한국해안 · 해양공학회
Korean Society of Coastal and Ocean Engineers

ISSN 1976-8885(Print)
ISSN 2779-3876(Online)



■ 기획특집
국내 연안해역 신재생에너지 도입·적용

해안과 해양

Coastal and Ocean

2020. 12
Vol.10 | No.2

한국해안·해양공학회지
Magazine of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers



Contents

05 **학회장 인사말** ····· 강범구

07 **기획특집(국내 연안해역 신재생에너지 도입·적용)**

· 해상풍력 동향과 산업화의 성공 열쇠 ····· 오정배
· 파력발전기술 상용화를 위한 파력발전 실해역 시험장의 활용 ····· 이정기
· 조류발전 도입을 위한 기술개발 동향 및 향후 과제 ····· 박진순
· 부유식 해상 태양광발전의 현황과 앞으로 나아갈 길 ····· 정현, 이병준

30 **기술기사**

· IoT 기반 파랑 예측기술의 해상공사 현장 시범적용 ····· 김민균
· 머신러닝을 이용한 태풍 시 실시간 유의파고 예측 ····· 오지희, 서경덕

43 **학술기사**

· 하구 부유사 농도에 대한 밀도류 효과의 데이터 기반 분석 ····· 서희정
· 심층신경망 및 신경망을 이용한 항내 파고 예측 사례 ····· 이진학
· 인공지능모델 해양기초정보 생산 ····· 안치옥, 최은영

62 **최신기술동향**

· 항만시설물 통합관리를 위한 BIM기반 통합 플랫폼 개발과 활용 ····· 문현석
· 비구조적 연안재해대책 동향과 시사점 ····· 윤성순

75 **해외건설현장**

· 홍콩 Tung Chung New Town Expansion 건설공사 시공 사례 ····· 박홍신

■ **한국해안·해양공학회지**

■ **발행인** : 강 범 구
■ **발행처** : 사단법인 한국해안·해양공학회
서울특별시 서초구 반포대로 14길 71 LG서초에클라트 1132호
· 전화 : 02-3474-1934 · FAX : 02-3473-1934
· E-mail : cocean@kscoe.or.kr · home : http://www.kscoe.or.kr
■ **제작인** : 이팩토리

■ **발행** : 2020년 12월 30일
■ **편집인** : 학회지 편집위원회

81 **분과위원회 및 소규모연구회**

· 해양에너지 분과위원회 (2020년 해양에너지분과 활동) ..... 이진학
· 설계시공 분과위원회
(단기간의 연안 및 횡단 표사 이동 변화 분석을 통한 최소 양빈 설계 전략) ..... 김일섭
· 연안환경 분과위원회 (연안재해취약성 평가의 현황과 향후계획) ..... 강태순
· 소규모연구회 (해양공학 인공지능 모델 연구회) ..... 김현동
· 소규모연구회 (선양빈 설계기법에 관한 고찰) ..... 김진혁

99 **국제학회 현황**

· 항만 관련 국제컨퍼런스 및 국제협회 최근 소식 ..... 김규한

107 **자유기고**

· 바다와 음악에 대한 小考 ..... 편종근
· 해양공학자의 바다를 지배하는 수(數)와 식(式) ..... 조홍연

119 **신간소개**

· 방재실무자와 공학자를 위한 연안재난 핸드북 ..... 신범식

121 **학회 및 회원소식** ..... 학회사무국

127 **공지사항** ..... 학회사무국

129 **편집후기** ..... 편집위원회

■ 임원명단

■ **회　장** : 강범구
■ **부회장** : 김규한, 김도삼, 김영복, 박홍남, 유병화, 이철조, 조원철
■ **이　사** : 고광오, 고성훈, 곽기수, 곽문수, 구성욱, 권소현, 권오순, 김건우, 김규섭, 김기범, 김동현, 김명진, 김순주, 김영택, 김일섭, 김정현, 김종규, 김진호, 김태림, 맹준호, 박영현, 박원경, 박일흠, 손상영, 신범식, 신용범, 안익장, 오상호, 윤성순, 윤성진, 윤현덕, 이광호, 이상호, 이윤수, 이인철, 이정근, 이종인, 이주용, 이진석, 임성순, 임효선, 장래욱, 장창환, 정윤태, 정태화, 조홍빈, 최혁진, 한재명, 홍상규, 홍원식
■ **감　사** : 안성모, 최상철
■ **논문집편집위원장** : 이창훈

■ 학회지 편집위원 명단

■ **위원장** : 안익성
■ **위　원** : 고광오, 구성욱, 김건의 김순주, 김영택, 박원경 신범식, 안성모, 안승현 안익장, 오상호, 윤성순 윤현덕, 홍상규

학회장 인사말



강 범 구
(사)한국해안·해양공학회 회장

존경하는 한국해안·해양공학회 회원 여러분!
희망차게 시작한 경자년도 이제 막바지를 향해 달려가고 있습니다.

유라시아 대륙 동쪽에 위치한 우리나라는 태평양을 사이에 두고 미국과 호주, 일본을 비롯한 수많은 연안 국가들과 연결되어 있는 해양 국가이면서, 국토의 3면이 바다로 둘러싸인 반도국으로서 대륙의 길이 다시 바다의 길로 이어지는 천혜의 지정학적 장점을 갖추고 있습니다. 역사적으로 보면 해양은 인류 문명과 국가 흥망과 밀접한 관계가 있어왔고, 해양력이 강한 나라, 바다를 지배하는 민족은 세계의 주역으로 부상하였습니다.

우리나라 경제가 연간 무역 1조 달러의 세계 10위권 규모로 성장할 수 있었던 배경에는 수출입 산업을 지원해 온 항만이 있었습니다. 우리 항만건설 역사는 비록 60년의 짧은 기간이지만, 경제개발에 맞춘 1960년대 공업항 건설을 시작으로 대형 컨테이너선 수용을 위한 신항만 건설, 유휴 항만 재개발, 항만배후단지와 친수 공간 조성 등 다양한 패러다임 변화를 겪어왔습니다.

한국해안·해양공학회는 항만 건설 외에도 인공섬 건설, 해상공항 건설, 연안역 개발, 방재 및 오염 대책, 심해 자원 개발 연구는 물론, 해상 풍력, 조력, 파력 등 해양에너지 연구 사업에도 적극 참여 중에 있습니다.

우리 학회는 지난 해 10월 10~11일 양일간 있었던 창립 30주년 기념행사에서 적극적인 산·학·민·관 협력으로 더욱 미래지향적으로 발전해나가는 학회를 만들기로 굳게 다짐한 바 있습니다.

그러나 올해 지구촌을 뒤덮은 코로나19 팬데믹은 전 세계의 산업, 경제, 사회, 문화, 정치 등 모든 분야를 마비시켜버렸습니다. 10월 21일 현재 전 세계 코로나19 확진자는 4,100만 명, 사망자는 110만 여명에 이르

렀고, 프랑스 정부는 확산세가 심각한 지역 야간 통행을 금지하는 등 유럽, 미주, 동남아 등 지구촌이 몸살을 앓고 있습니다. 우리나라도 10월 12일부터, 2개월간 전국적으로 지속되던 사회적 거리 두기 2단계를 1단계로 완화하였지만, 확진자수가 다시 세 자릿수를 넘나드는 불안한 상황이 지속되고 있습니다.

KMI는 금년 세계 컨테이너 물동량이 2.4% 증가할 것으로 전망하였으나, 해양수산부는 지난 3분기 전국 무역항 처리 물동량이 총 3억 5,952만 톤으로 전년 동기 대비 12.8% 감소했고, 수출입 물동량은 14.6% 감소한 총 3억 879만 톤으로, 항만별로는 부산항, 광양항, 울산항, 인천항이 전년 동기 대비 각각 19.3%, 9.2%, 11.0%, 3.4% 감소한 것으로 나타났습니다. 세계 주요 컨테이너항만은 상하이항이 2,780만 TEU를 처리해 세계 1위, 싱가포르항은 2,403만 TEU로 2위, 3, 4, 5위에는 닝보·저우산항, 선전항, 광저우항이, 부산항은 1,434만 TEU로 6위를 기록했다고 밝혔습니다.

해안·항만 분야의 가장 권위 있는 2년 주기 국제 행사인 37차 ICCE(International Conference on Coastal Engineering, 국제해안공학회의)가 호주 시드니에서 개최 예정이었으나 COVID-19로 인해 2022년으로 연기되었고, 아시아와 태평양 연안의 국가들을 대상으로 한 2년 주기의 해안 및 항만 관련 국제학술 회의인 APAC(International Conference on Asian and Pacific Coasts)도 2021년 일본 교토 개최 계획에서 2023년으로 순연되었습니다. 또한, 금년 3월 벨기에 Antwerp에서 예정되었던 국제항만협회(IAPH) 총회와, 5월 영국 Bristol에서 개최 계획이었던 국제수상교통시설협회(PIANC) Council Meeting과 AGA도 내년으로 연기되었습니다.

프랑스의 문화학자인 기 소르망(Guy Sorman)은 코로나로 인한 세계 변화 진단에서 “우리가 맞서게 될 거대한 변화가 무엇인가?” 라는 질문에 대하여 “이번 코로나로 인해서 우리의 운명이 상호 의존적이며, 우리의 이웃에게 달려있다는 점을 인식한 것이라고 생각합니다. 모든 국가가 서로 의존하고 있으며, 인류전체가 동질성을 느끼게 되었다고 생각합니다.”라고 이야기하였습니다.

한국해안·해양공학회 회원 여러분!

물류, 유통, 제조 등 모든 산업에서, 겪어보지 못한 새로운 혁신이 빠르게 진행되어, 산업의 패러다임이 ‘Game Changer’에 의해 새로 짜이고 있습니다. 초연결과 초지능, 혁신적 기술 융합의 4차 산업혁명 시대에, 급변하는 세계 해안공학 발전 추세에 부응하기 위해서는, 획기적이고 끊임없는 변화와 혁신 노력이 필요합니다. 학회의 경쟁력 확보와 내실 있는 성장을 위해 미래 인재 양성, 신재생 에너지와 ICT 융복합 기술, 스마트 건설 연구 등으로 기존 학회의 패러다임을 혁신해야 할 때입니다.

또한, 마리나, 해양 플랜트, 부유식 해상 구조물 등 다양하고 새로운 미래 수요와 기후변화로 인한 각종 기상이변, 해수면 상승, 지진·해일·폭풍 등 재해·재난에도 능동적으로 대처해나가야 합니다. 해양에 내재된 높은 불확실성 때문에, 해안·해양 전문가들이 과학적이고 공학적인 토대를 마련해주셔야 합니다.

코로나19로 어려움이 많겠지만, 서로를 배려하고 관심의 시간을 가짐으로써 새로운 삶으로의 도약도 가능해질 수 있다고 생각됩니다. 우리 모두 협력하면서 지혜를 모아 슬기롭게 이 시기를 극복해 나가도록 합시다.

이번 '해안과 해양'에서는 해상풍력, 파력발전, 조류발전 등 국내 연안 해역 신재생에너지 도입 및 적용 현황을 기획 특집으로 다루었고, IOT 기반 파랑 예측기술, 신경망 모델 및 인공지능기반 학술 연구 등 지능화 & 스마트화 연구 현황, 국제학회 현황과 학회 내 연구회도 소개하였습니다.

반년간지 학회 e-book의 완성도 제고를 위해 수고해 주신 편집위원장님과 집필진께 감사의 말씀을 드리며, 우리 학회지를 사랑하는 해안·해양·항만산업계 종사자 여러분의 건승을 기원합니다.



기획특집

(국내 연안해역 신재생에너지 도입·적용)

· 해상풍력 동향과 산업화의 성공 열쇠

· 파력발전기술 상용화를 위한 파력발전 실해역 시험장의 활용

· 조류발전 도입을 위한 기술개발 동향 및 향후 과제

· 부유식 해상 태양광발전의 현황과 앞으로 나아갈 길

해상풍력 동향과 산업화의 성공 열쇠



오 정 배
블루윈드엔지니어링㈜ 대표
(jone.oh@bluewind-eng.com)

1. 서론

해상풍력은 대규모 사업비가 투자되고 비교적 리스크가 높은 산업이다. 그러나 국가 측면에서 보면, 강재 소모량이 매우 높고, 설치선 제작, 해상 운송 설치 등 조선 철강 산업과의 시너지 효과가 크게 기대되는 산업이다. 또한 일자리 창출 효과가 매우 높은 산업이다.

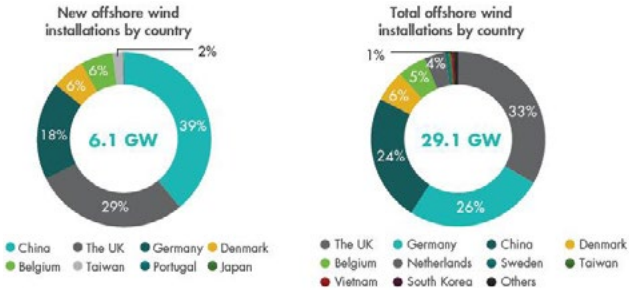
본 기고문에서는 해상풍력의 시장동향과 기술동향을 소개하고, 새롭게 떠오르는 부유식 해상풍력에 대해 기술한다.

2. 해상풍력 시장동향

해상풍력은 2006년 전세계 풍력발전 설치량의 1%인 100MW 규모였으나, 2019년 10%인 6.1GW로 높은 성장률을 보였다. 해상풍력 누적설치량은 29.1GW로, 전세계 해상풍력 설치규모 1위인 영국을 비롯한 유럽 주요국의 비중이 74%로 전세계 시장을 장악하고 있다. 한편 중국은 2017년 연간 신규 설치량 1GW를 돌파하면서 해상풍력 강자로 급부상하여 수년 이내 중국의 해상풍력 설치규모가 영국의 설치규모를 추월할 것으로 전망된다.



▲ <그림 1> 전세계 해상풍력 시장규모



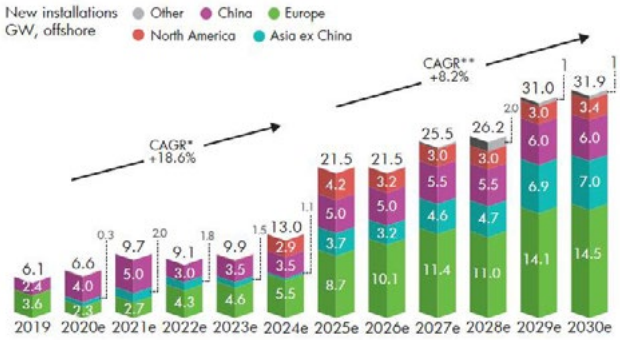
▲ <그림 2> 해상풍력 2019년 신규 설치 및 누적 설치 규모

불과 3-4년전에는 2030년 전세계 해상풍력 누적설치규모가 100GW로 전망되던 것이 최근 해상풍력 기술이 보편화되고 단지규모가 대형화되면서, 최근 시장전망은 2030년 230GW 규모로 대폭 증가하였다. 건설 리스크가 크다고 간주되었던 해상풍력이 성숙 단계로 접어 들었다고 판단되면서 Oil & Gas의 대형 기업이 참여하기 시작했고, 일자리 창출 효과가 높다고 판단한 정부가 드라이브를 걸기 때문이다. 중국, 아시아, 미국의 시장이 크게 성장하여 2030년에는 유럽과 비유럽의 해상풍력 연간 설치규모가 동등한 규모가 될 것으로 전망된다.

안타깝게도 우리나라의 해상풍력단지 건설은 서남해 해상풍력단지 60MW 건설이후 2020년, 2021년 건설에 착수할 단지가 없을 것으로 전망된다. 우리나라보다 해상풍력을 더 후발로 시작한 타이완보다 해상풍력 시장에서 뒤쳐지고 있다.

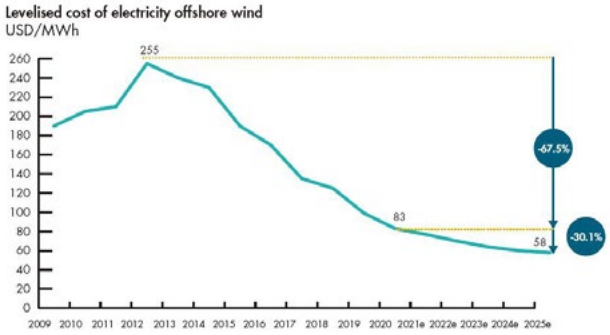
3. 해상풍력 기술동향

초기 해상풍력산업의 가장 큰 문제점 중의 하나는 경제성이었다. 설치 장소가 해상이므로 해상풍력 단지 설계 및 설치 기술들은 모두 Oil & Gas 산업에서 차용해 왔다. 그러나 설치 장비



및 공급망이 해상풍력에 적합하도록 최적화 되어 있지 않아, LCOE(Levelized Cost of Energy)가 타 발전산업 대비 높은 편이었다.

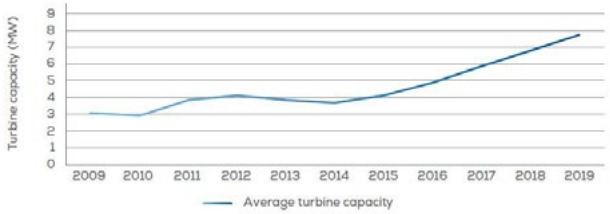
유럽에서는 해상풍력 경제성 확보를 위해 2020년까지 LCOE를 2011년 대비 30-40% 줄여야 한다는 의견에 따라 개선을 위한 많은 노력을 해 왔다. LCOE 저감의 핵심은 풍력발전단지의 대형화, 풍력터빈의 경제적 타당성 제고, 합리적 경쟁구도의 도입, 계약구조의 선진화 등이다. 놀랍게도 2011년 대비 LCOE 30-40% 저감계획은 2020년보다 4년 앞당겨 2016년에 달성되었다. 해상풍력발전의 경제성이 개선됨에 따라 유럽은 2022년 이후 건설될 상당수 해상풍력단지는 정부의 보조금 없이 건설할 예정이다.



▲ <그림 3> 해상풍력 LCOE 저감 전망

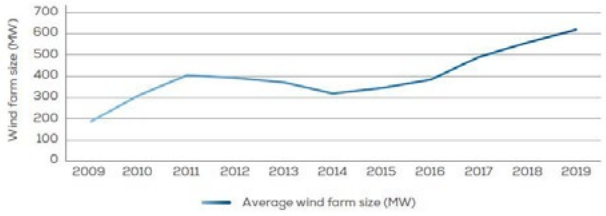
풍력터빈의 용량은 풍력단지 건설의 경제성에 큰 영향을 미친다. 동일 용량의 단지에서 풍력터빈의 용량이 커질수록 하부구조물의 수량, 내부망의 길이가 단축되므로 LCOE가 크게 개선이 된다.

<그림 4>는 유럽 해상풍력터빈의 연도별 평균 용량이다. 2019년의 신규풍력단지의 평균 용량은 7.8MW인 반면에 2020년 현재 국내 해상풍력단지의 최대 용량이 3MW이므로 유럽 시장대비 풍력터빈 용량 수준은 큰 차이가 있다.



▲ <그림 4> 유럽 해상풍력터빈 평균 용량

해상풍력단지의 용량이 커질수록 규모의 경제에 의해 LCOE 저감에 유리하다. 그림 5는 유럽 해상풍력단지 연도별 평균 용량이다. 2019년의 경우, 유럽의 평균 해상풍력단지 용량은 600MW를 초과하였고, 1GW 이상의 단지도 다수 계획 중이다. 반면에 우리나라 최대 해상풍력단지는 60MW로 유럽 시장과 큰 차이가 있다.



▲ <그림 5> 유럽 해상풍력단지 평균 용량

<그림 6>은 국내 해상풍력 단지 운영 및 발전사업허가를 획득한 단지 현황이다. 2020년 기준, 3.7GW의 발전사업이 허가를 획득하였다.



▲ <그림 6> 국내 해상풍력단지 운영 및 발전사업허가 획득 단지

4.부유식 해상풍력
– 해상풍력 새로운 경쟁의 시대 도래

현재 고정식 해상풍력은 Jackup 선박의 설치 한계로 약 50m 내외의 수심에만 설치할 수 있는 단점이 있다. 이를 극복하기

위해 설치수심 50m 이상의 깊은 곳에 하부구조물을 설치하는 것이 부유식 해상풍력이다. 부유식 해상풍력은 고정식 해상풍력대비 아래와 같은 많은 장점이 있다.

· 수심이 깊은 곳에 설치가 가능
· 부유체 형식에 따라 임대료가 고가인 Jackup 선박이 불필요
· 고정식 해상풍력은 하부구조물이 수심에 따라 단지내 설계를 달리해야 하나, 부유체는 설계 표준화가 가능
· 해안 이격거리가 먼 지역에 부유식 해상풍력단지 개발이 가능하므로, 일반적으로 풍황이 우수
· 해안 이격거리가 먼 지역은 상대적으로 수용성 해결이 고정식 해상풍력 대비 상대적으로 유리

고정식 해상풍력에서 후발적 위치에 있는 국가들이 기술 및 시장을 선점하기 위해 부유식 해상풍력 개발을 위해 노력 중이다. 그림 8 및 그림 9에서 보는 바와 같이 미국, 프랑스, 일본, 한국 등 해상풍력 5위권에 들지 못하는 국가들이 열띤 경쟁 중이다. 우리나라도 국책과제를 통해 약10년 전부터 기술개발을 지원해 왔다. 특히, 울산지역은 국내외 해상풍력 전문회사들이 컨소시움 형태로 대규모 단지를 개발하고 있다. 2020년 한 해 동안, 울산 앞 바다 풍황 측정을 위한 FLS(Floating LiDAR System)이 6개 설치되었다. 울산지역이 대규모 부유식 해상풍력단지개발에 성공한다면, 부유식 해상풍력 분야에서 전세계를 선도할 수 있다.

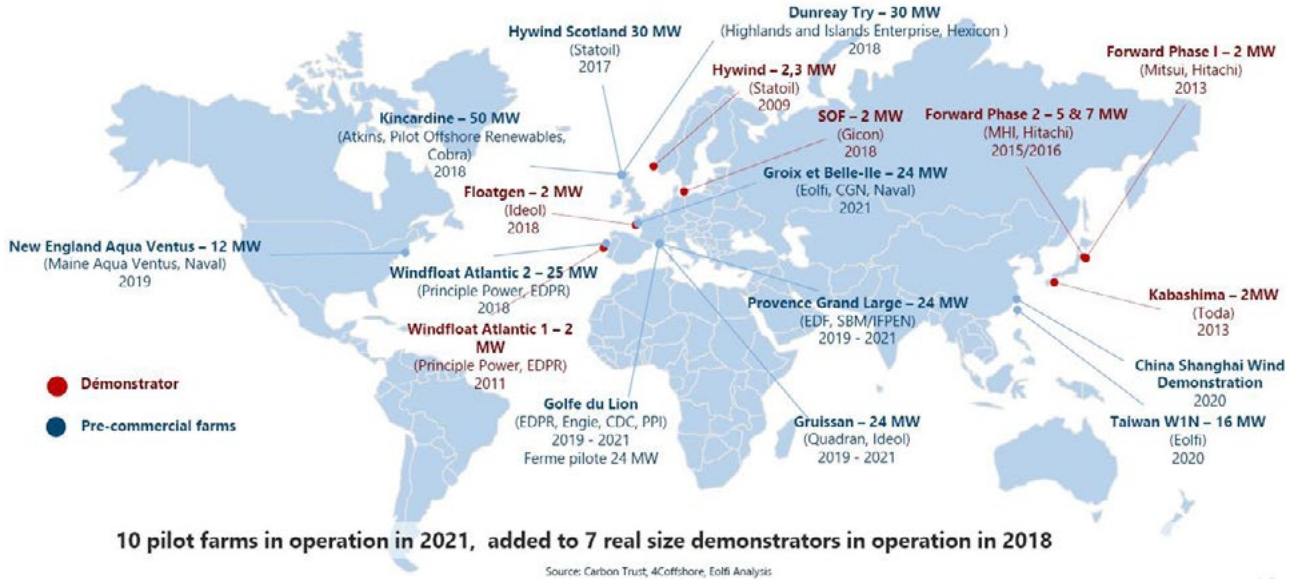


▲ <그림 7> 부유식 해상풍력의 3가지 개념

5. 해상풍력 산업화 성공의 축

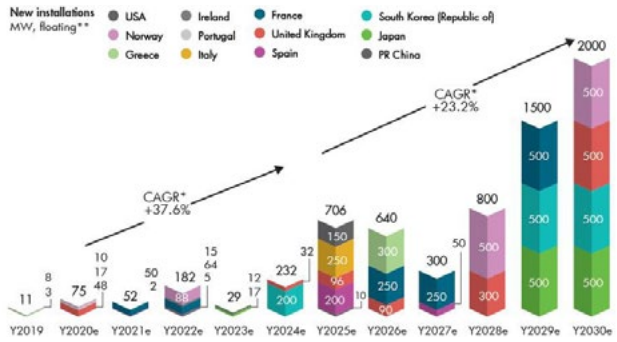
해상풍력 산업의 특징 중 하나는 이해당사자가 매우 많다는 것이다. 또한 단지가 건설될 지역이 바다이므로, 바다와 관련된 정부 부처, 지자체가 많아 인허가 기간이 많이 걸린다. 해상풍력터빈 및 하부구조물은 그 중량이 1,000톤 내외의 대형 고중량물이다. 따라서 운송 설치 능력이 매우 중요하다. 해상운송 설치 능력 측면에서, 우리나라는 전세계 1위의 조선강국으로 잠재적 능력은 매우 높다. 또한 해상풍력과 조선해양산업은 시너지 효과가 매우 높은 산업이다. 그러나 해상풍력산업에 초기에 진입하였음에도 해외시장에서 뒤쳐져지는 것은 왜일까?

IEA(International Energy Agency)는 해상풍력 발전을 위해서 6가지 측면에서 접근해야 한다고 발표했다. 특히 시장의 불확실성을 줄이기 위해서는 정부의 역할이 중요하다. 보조금지원제도는 시장 초기에 시장 확대를 위해 매우 중요하다. 우리나라의 RPS(Renewable Portfolio Standard) 제도와 유사한 RO(Renewable Obligation)제도를 운영하던 영국은 CfD(Contract for Difference)를 도입한 이후 투자자의 미래 리스크를 대폭 줄여 영국이 해상풍력산업분야 1위를 유

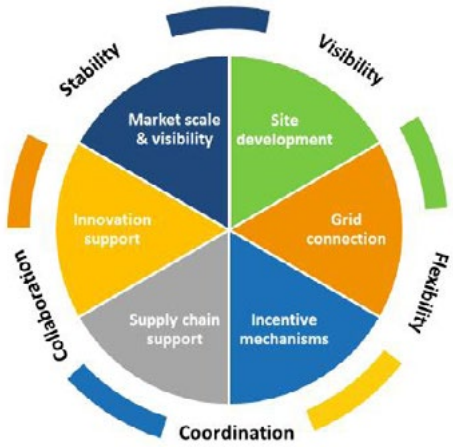


▲ <그림 8> 부유식 해상풍력 실증 및 준상업화 단지

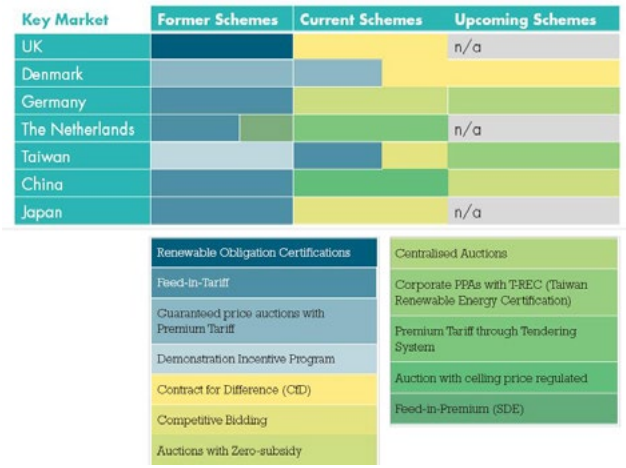
지하는데 결정적인 역할을 하였다. 현재 유럽의 여러 나라가 CfD제도를 도입할 예정이다. 우리나라의 현행 RPS 제도는 REC(Renewable Energy Certificate) 가중치를 사업 초기에 알 수 없다. 이러한 불확실성은 대규모 투자가 수반되는 해상풍력에 적합하지 않다.



▲ <그림 9> 부유식 해상풍력 시장 전망



▲ <그림 10> 해상풍력 발전 성공 6대 축



▲ <그림 11> 재생에너지 지원제도 개선 방향



▲ <그림 12> 영국 CfD 제도에 의한 발전단가 저감 추이

그림 6에서 보는 바와 같이 전남, 전북 및 울산지역에 개발중인 해상풍력 발전단지가 많다. 특히 전남, 전북 지역은 대규모 전원 소비량이 적은 지역이기 때문에 계통 접속을 위한 인프라가 부족하다. 향후 대규모 해상풍력 발전단지 개발시, 기존 계통 인프라의 큰 개선 없이는 발전과 전력 소비의 불균형이 발생한다. 따라서 계통 인프라의 부족은 향후 해상풍력 발전에 큰 걸림돌로 될 가능성이 높으며, 획기적이고 장기적인 시각으로 해상 풍력 발전단지 용량을 수용할 수 있는 계통 인프라의 보강이 필요하다.

해상풍력은 공급망이 LCOE 경쟁력 확보에 중요하지만 아직 우리나라는 해상풍력 공급망에 대한 체계적인 조사가 미흡하다.

해상풍력은 일자리 창출 효과가 매우 높은 산업이다. 강재 소모량이 높고, 다수의 대형 설치 전문선이 필요하고, 운영단계에서 장기간의 유지보수 인력이 소요된다. 이처럼 연관산업의 파급효과가 크고 일자리 창출효과가 높은 해상풍력발전산업을 촉진하여 관련산업 전체의 활성화에 기여하기 위해서는 슬기로운 지혜를 모으고 현명한 판단으로 지원을 아끼지 말아야 한다.

참고문헌

IEA-RETD, Comparative analysis of international offshore wind energy development (2017)

GWEC, Global offshore wind report 2020

Wind Europe, Offshore wind in Europe, key trends and statistics 2019

오정배, 한국 해상풍력 발전방안 제언, 풍력에너지저널, 2017

[감수 : 윤성순(ssyoon@kmi.re.kr)]

파력발전기술 상용화를 위한 파력발전 실해역 시험장의 활용



이 정 기
한국해양과학기술원 부설
선박해양플랜트연구소
연수연구원
(jklee04@kriso.re.kr)



홍 기 용
한국해양과학기술원 부설
선박해양플랜트연구소
책임연구원
(khong@kriso.re.kr)



최 종 수
한국해양과학기술원 부설
선박해양플랜트연구소
책임연구원
(jschoi@kriso.re.kr)

1. 배경 및 개요

국내에서는 1990년대 초반부터 다양한 형태의 파력발전 기술이 개발되어 왔고, 2001년 60kW급 주전A호가 최초로 실해역 실증을 수행한 바 있다(<표 1>). 아직 국내외적으로 파력발전기술의 상용화 사례는 없으나, 해외에서는 다수의 실해역 실증사례가 있으며, MW급 파력발전 장치의 실증도 준비하고 있다(<표 2> 참조). 기술개발수준을 나타내는 지표중의 하나인 기술성숙도(Technology Readiness Level; TRL)로 국내외 파력발전기술을 비교해보면 해외는 TRL 6 또는 8인 반면, 국내는 TRL 6이상인 기술이 많지 않다.

▼ <표 1> 국내 파력발전기술개발 현황('93~'21)

프로젝트명	설치형태	용량[kW]	연구기간	TRL-2020	비 고
60kW급 부유식 진동수주형 파력발전장치 /주전A호 (KRISO, 전력연구원)	부유식	60	1993-2001	5	2001년 실증시험
월파형 파력발전 기반기술 연구 (KRISO, 전력연구원)	케이슨	250	2003-2005	3	기초연구
진동수주형 파력발전 실용화 기술개발 (KRISO, 해수부)	케이슨	500	2003-2016	7	2015년 준공
나선암초형 월류파력발전 기술개발 (KRISO, 산자부)	모노파일/자켓	250	2007-2010	4	최적설계 완료
가동물체형 고효율 파력발전 시스템 기술 실증연구 (한국전력공사, 산업부)	부유식	50	2009-2012	4	실증 실패
4측식 선형 발전기 기반 AWS형 파력발전 시스템 개발 (연세대, 산업부)	부이	200	2010-2013	3	PTO개발
양방향 수력터빈을 이용한 부유식 파력터빈 원천기술 개발 (해양대, 산업부)	부유식	1	2011-2014	5	후속연구진행중
부유식 진자형 파력발전 기술개발 및 실증 (KRISO, KRISO)	부유식	300	2011-2016	6	2017년 실증
요요 진동시스템을 이용한 가변 공진형 파력발전장치의 개발 (KRE, 산업부)			2013-2016	3	
승강식 해상플랫폼을 가진 수직 진자운동형 30kW급 파력발전기 개발 (화진, 산업부)	자켓	30	2013-2016	5	
10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발 (KRISO, 해수부)	부유식	10 (MW)	2013-2016	3	파력-풍력 복합
해양부유식 구조물용 파랑발전시스템 개발 (한국플랜트관리, 산업부)	부유식	0.05	2014-2015	3	항로표지 적용
도서(섬)지역 전력 공급을 위한 분산발전용 50kW급 파력발전 시스템 시제품 개발 및 상용화 (인진, 산업부)	부유식	50	2014-2016	5	
파력발전의 발전효율 향상을 위한 연근해용 수평축 회전의 3kW급 원통형 파력발전 시스템 개발 (한국건설기술연구원, 산업부)	자중식	3	2015-2018	3	
방파제 연계형 파력발전 융복합 기술개발 (KRISO, 해양부)	자중식	30	2016-2021	4	2021년 실증
파랑변화에 대응 가능한 1MW급 운동 부체 배열식 파력발전시스템 원천기술 개발 (제주대, 산업부)	부유식	30	2017-2021	5	2020년 실증중

▼ <표 2> 국외 파력발전 기술개발 현황

장치명 (수행 기관/기업, 국적)	설치 형태	용량 [kW]	TRL (2016년 기준)	비 고
PowerBuoy (Ocean Power Technologies, 미국)	부유식	15	8 (New Jersey, 미국, 2015)	PB40
Oyster (Aquamarine Power, 영국 스코틀랜드)	고정식	800	8 (EMEC, 2012)	Oyster 800
CETO (Carnegie, 호주)	고정식	240	6 (Perth, 호주, 2014)	CETO5, ※CETO6는 1000kW계획
Wavestar (Wavestar, 덴마크)	고정식	600	8 (Hanstholm, 덴마크, 2009)	1/2 scale 모델
Oceanus (Seatricity, 영국)	부유식	162	6 (WaveHub, 2015)	Oceanus 2 비계통
WaveRoller (WaveRoller, 핀란드)	고정식	300	6 (Portugal, 2013)	3×100kW
Pelamis (Pelamis Wave Power/ EON, 영국스코틀랜드/ 영국스코틀랜드)	부유식	750	8 (EMEC, 2014)	
Penguin (Wello Oy, 핀란드)	부유식	500	8 (EMEC, 2015)	장기 실증중
		1,000	8 (EMEC, 2020)	설치 준비중
PICO (Wave energy center, 포르투갈)	고정식	400	8 (PICO, 2005)	
Limpet (Voith Hydro, 스코틀랜드)	고정식	500	8 (Islay, 2001)	
Wavegen (Voith Hydro, 스코틀랜드)	고정식	300	8 (Islay, 2001)	16×18.5kW

최근 들어 국내에서도 개발된 기술의 실해역 실증이 많이 시도되고 있다. 제주 서부해안에 설치된 500kW급 진동수주형 용수시험파력발전소와 부체배열식 파력발전장치의 실증(<그림 1> 참조)이 진행중이며, 2021년에는 방파제 연계형 파력발전장치의 실증(<그림 2>)이 예정되어 있다. 오랜 기간에 걸쳐 체계적으로 개발된 기술에 대해 실해역에서 성능을 검증함



▲ <그림 1> 부체배열식 파력발전 실증



▲ <그림 2> 방파제 연계형 파력발전

으로서, 상용화 단계로 진입하기 위한 노력이 계속되고 있다. 하지만, 실해역에서 실험을 수행하는 것은 쉬운 일만은 아니다. 육상에서처럼 어느 정도 통제가능한 조건에서 시험하는 것과 같지 않다는 것을 의미한다. 해상에 설치된 발전장치는 극한 해상환경을 견뎌야 하고, 설치나 운용시 장치의 안전과 더불어 해양오염이나 안전사고에 각별히 유의해야 하므로, 신중히 접근해야 할 필요가 있다. 뿐만 아니라, 계통연계를 위해 필요한 인프라 및 각종 계측장비의 구축, 해역 주변 어민 및 주민 수용성, 인허가 취득 등으로 인해 연구개발자는 많은 어려움에 직면할 수 있다.

국내 파력발전기술이 상용화에 근접하려면 발전장치를 장기간 실해역 운용하면서 시행착오를 통해 얻은 경험을 토대로 그 장치가 가질 수 있는 기술적인 문제를 해결하는 과정이 필요하며, 이에 필요한 기반이 구축된 공간과 시설이 반드시 필요하다.

한편, IEA-OES 연례 보고서에 따르면 유럽과 미국을 중심으로 파력발전을 비롯한 조류발전 시험장이

구축되었고, 구축 계획중이다. 대표적인 파력발전 실해역 시험장(<표 3 참조>)으로는 영국 EMEC (the European Marine Energy Centre), 스페인 Bimep, 프랑스 SEM-REV, 아일랜드 AMET, 미국 WETS 등이 있다. 또한, Bimep, Wavehub는 부유식 해상풍력발전의 실증까지 가능한 20MW 규모로 구축된 바 있다. 이러한 실해역 시험장을 활용하여 현재 많은 파력발전장치들의 장기 실증시험을 통해 다양하게 연구되고 있다.

▼ <표 3> 해외 파력발전 실해역 시험장

명칭	위치	시험장 규모 (정박지수 / 수심)	용량
EMEC	영국, 스코틀랜드, Orkney, Billia Croo	6 / 20, 50, 70m	7MW
WaveHub	영국, Cornwall 북쪽해안	4 / 48~58m	20MW
BiMEP	스페인, Basque Coast	4 / 50~90m	20MW
SEM-REV	프랑스, he Pays de la Loire region의 west coast 근해	4 / 35~40m	8MW
CMEC	중국, 산동성, 위해시, 성산두	파력발전용 4, 조류발전용 4	-
PLOCAN	스페인, 카나리섬	수심 0~30m	5MW
미국 WETS	미국, 하와이	3 / 30~80m	-

본 연구에서는 최근 국내 최초로 구축된 파력발전 실해역 시험장을 소개하고, 파력발전기술의 상용화를 위한 활용방안에 대해 기술하고자 하였다.

2. 본론

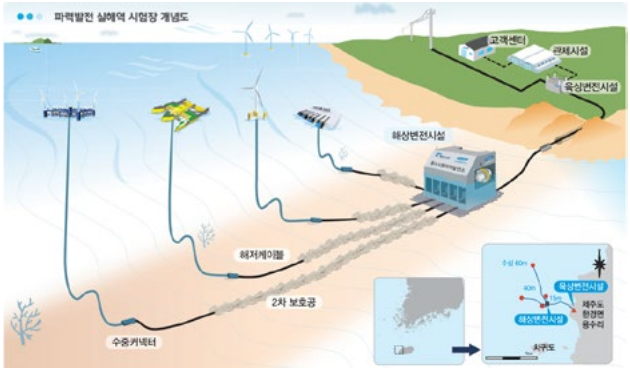
◆ 2.1 파력발전 실해역 시험장 구축 배경

파력발전 실해역 시험장(이하 파력시험장)은 파력발전을 비롯한 해양재생에너지기술을 개발하는 국내 연구자 및 관련기술 개발기업이 실해역에서 시험하기 위해 경험해야 하는 여러 어려움을 해소하기 위해 구축되었으며, 개발된 장치의 계통/비계통형 시험을 통한 발전성능, 설치 및 회수기술, 운용 및 유지관리기술 등을 검증할 수 있는 국내 최초이자 아시아 최초로 구축된 국가대형연구시설이다.

통상 연구실에서 수치해석 및 모형실험을 통해 성능이 검증된 다양한 기술들은 상용화 단계로 진입하기 위해 반드시 실해역에서의 성능검증이 요구된다. 이때, 개발자는 <그림 3>과 <그림 4>에 보인 바와 같이 막대한 인프라(전력전송설비, 해양환경계측장비 등) 구축 비용, 각종 인허가(해역공간 사용, 발전사업 등) 취득, 주민 수용성(주변 어민 및 주민 동의 등) 확보 등과 같이 연구 외적으로 많은 시간과 비용을 부담해야 하는 실정이다.



▲ <그림 3> 파력시험장의 필요성

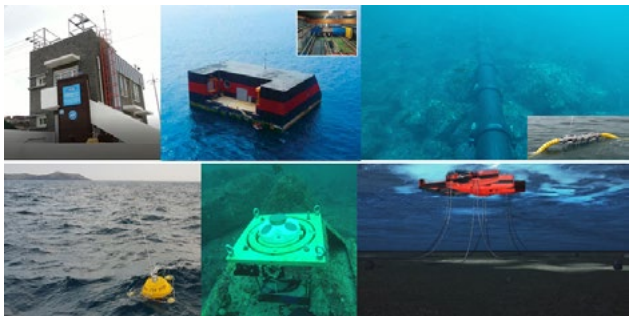


▲ <그림 4> 파력시험장 개념도

파력발전 실해역 시험장(이하 파력시험장)은 해양수산부 해양청정에너지기술개발사업의 일환으로 추진된 "파력발전 실해역 시험장 구축"과제를 통해2016년부터 2020년까지 약 4년 8개월간 시험장 설계, 시험장 구축에 필요한 인허가 취득, 실증시험에 필요한 각종 시설 및 장비를 갖추었으며, 2020년 9월 24일 구축이 완료되었다.

◆ 2.2 시설 및 장비 구성

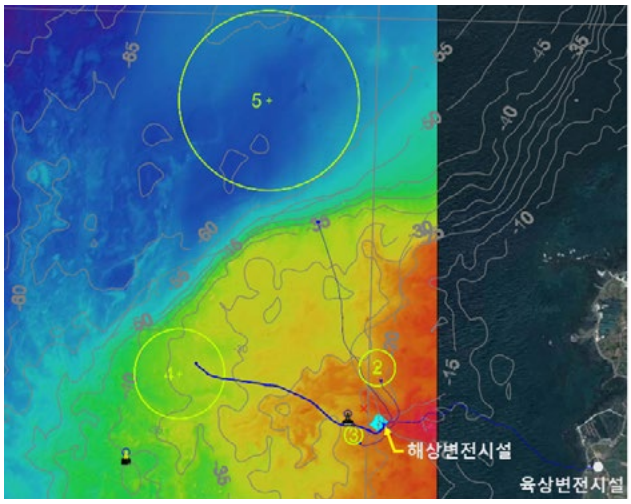
파력시험장은 제주특별자치도 제주시 한경면 용수리에 위치하고 있다. 실증 개발사가 수행하고자 하는 계통 및 비계통 시험이 가능하도록 해역 공간 제공, 인허가 대행, 시험장의 시설과 장비(<그림 5>참조) 및 각종 환경데이터를 제공해야 함에 따라 시험구역(정박지), 해상전력전송설비, 원격감시제어시스템(Supervisory Control and Data Acquisition system; SCADA), 육상부대시설, 해양환경계측시스템로 구성된다. 여기서 계통시험이라 함은 파력발전장치가 에너지변환장치를 통해 파랑에너지를 전기에너지로 변환하여 생산된 전력을 한국전력망(이하 한전망)으로 송전하는 것을 의미한다.



▲ <그림 5> 파력시험장 시설 및 장비

시험구역은 장치가 설치되어 시험하는 공간(<그림 6>참조)으로, 총 5개로 구분되어 있으며, 1, 2, 3번 시험구역은 수심 15~20m, 4번 시험구역은 40m, 5번 시험구역은 60m에 위치한다. 1번 시험구역은 진동수주형 파력발전용 공기터빈-발전기-전력변환장치 통합시험이 가능하고, 2, 3번 시험구역은 소형 파력발전 또는 착저식 파력발전 성능시험이 가능하다. 4번 시험구역은 부유식 파력발전 또는 부유식 풍력발전 성능시험이 가능하며, 장치 계류비용 저감을 위해 8개의 파일식 앵

커가 설치되어 있다. 5번 시험구역은 부유식 파력, 부유식 풍력, 파력-풍력 복합발전 성능시험이 가능하며, 1~4번 시험구역은 해저지질이 암반으로 형성되어 있는데 반해, 사질 퇴적층이 형성되어 있다.



▲ <그림 6> 파력시험장 해역

해상전력전송설비는 해저케이블 및 수중커넥터, 육·해상변전시설로 구성되며, 총 5MW의 접속계통용량을 확보하고 있다. 해저케이블 및 수중커넥터는 시험 구역에서 계통시험을 수행하는 파력발전장치를 운용하여 생산된 전력을 육상 한전계통으로 수송하는 설비를 의미하며, 수중 커넥터는 장치와 해상변전시설간 전원접속를 위해 암 · 수로 구분된 장비를 의미한다. 육 · 해상변전시설은 장치로부터 생산된 전력을 송전하고, 변전시설 및 발전장치에 요구되는 전력을 수전하며, 전력계통의 이상여부를 감지하여 차단하는 시설을 의미한다. 해저케이블은 22.9kV, 50m2 삼상으로, 장치의 원격제어신호 송수신을 위한 24 싱글모드 광케이블이 포함되어 있다.

시험장 해역은 각종 소형 선박의 항행과 어업활동이 있는 관계로 투묘, 어로 작업 등에 따른 해저케이블의 손상을 방지하기 위해 <그림 7>와 같이 해저케이블 포설 후 주강관, 스톤백, 콘크리트매트로 보호되고 있다.

육상부대시설은 관제실과 고객센터로 구성된다. 시험장 시설 안전관리와 해역 내 항행 안전을 확보하기 위해 원격감시제어시스템을 비롯한 AIS(Auto Identification System), V-PASS, Radar, CCTV, VHF를 운용하고 있다. 원격감시제어시스템은 계전보호감시 및 해상변전시설 내 공조모니터링 기능을 탑재하고 있다. 또한, 고객센터에는 개발자가 실증시험중 장치 제어모니터링을 위해 상주할 수 있는 공간이 마련되어 있다.

해양환경계측시스템은 풍향·풍속, 기압을 측정하기 위한 소형 기상대와 파랑, 조류 등을 계측하기 위한 파고계로 구성되어 있으며, 고정식 파고계와 부이식 파고계를 운용하고 있다.



▲ <그림 7> 해저케이블 1, 2차 보호공

◆ 2.3 인허가 취득

파력발전장치가 시험장 해역에서 계통시험을 수행하기 위해서는 <그림 8>에 나타낸 바와 같이 시험장 해역공간의 사용, 생산 전력 송전을 위해 담당기관으로부터 필요한 공유수면점사용허가, 발전사업허가를 득하였고, 이를 바탕으로 개발사업시행승인을 득하였다. 공유수면점사용허가 취득을 위해 시험장 해역에 대한 해상교통안전진단, 일반해역이용협의를 진행하였다. 특히 어업권을 소유한 권리자의 동의를 득하는 것이 인허가 취득에 가장 핵심이자 어려운 부분이었다. 또한, 발전사업허가의 경우 시험장 발전용량기준으로 전기위원회와 한국전력과의 협의를 통해 육상계통연계공사가 진행되었으며, 3년여에 걸쳐 시험장 구축에 필요한 인허가를 최종 완료하였다.

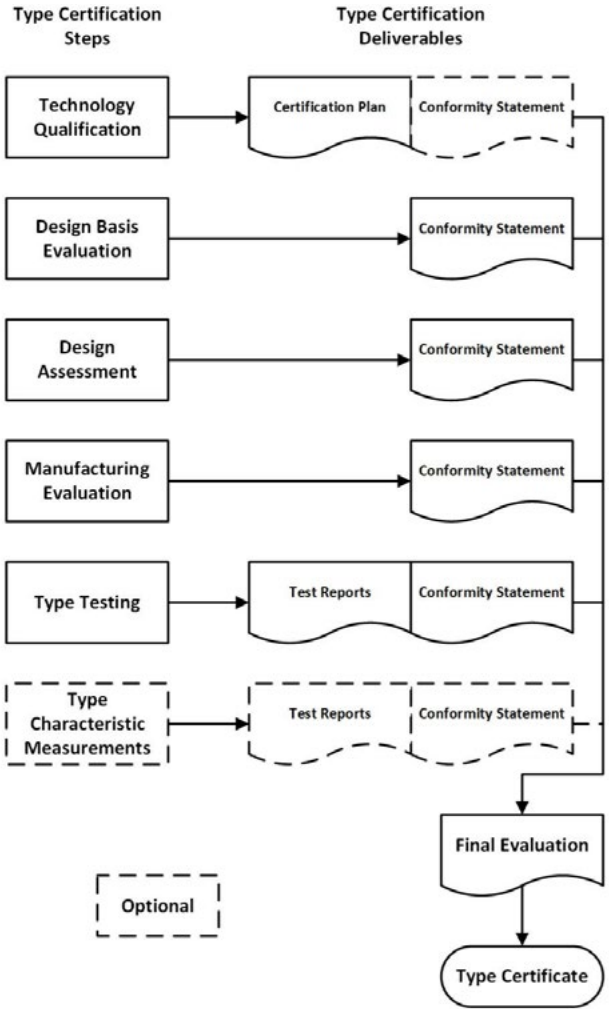


▲ <그림 8> 파력시험장 인허가 취득 절차

◆ 2.4 운영

파력시험장에서의 시험절차는 크게 시험이전단계와 시험단계로 구분된다. 시험이전단계에서는 파력발전장치 개발자가 실증시험을 의뢰하면 시험장이 시험계획(장치 세부사양, 구조 및 계류안전성, 설치·운용·회수 계획 등)을 확인하여 시험가능여부 판단 및 필요한 인허가를 계획한다. 또한, 장치 설치 및 회수시 해상공사가 진행됨에 따라 해당 기간 동안 안전이 최우선으로 보장되어야 하므로, 공사전 보험가입, 안전관리계획 등에 대해 면밀히 검토한다. 시험단계에서는 인허가 추진과 더불어 장치의 설치, 운용, 회수 단계에서 실증 장치와 시험장 시설의 안전을 확보하기 위해 시험장 및 개발자간 긴밀한 협력체계(SCADA를 활용한 경고 알람 공유, 수중 커넥터 접속, 사고시 긴급대응 등)를 구성하여 운영된다.

파력시험장은 국가연구시설장비진흥센터(National Research Facilities & Equipment Center; NFEC)에 등록된 국가대형연구시설로서, 국내 파력발전기술을 연구하는 개발자라면 누구나 접근하여 활용할 수 있도록 항시 철저한 관리가 필요함에 따라 주기적인 점검 및 유지보수를 수행하고 있다. 또한, 국가연구시설장비의 장기 운용과 더불어 시험장 시설 이상으로 인해 실증시험에 지장이 발생되지 않도록 항시 관리되고 있다.



▲ <그림 9> 해양에너지기술 형식인증절차(수립중)

◆ 2.5 파력발전기술 인증을 위한 시험장의 활용방안

해양에너지분야의 인증체계는 국제전기기술위원회의 적합성평가이사회에 속한 IECRE에 의해 현재 수립중으로, 해양에너지기술에 대한 형식인증절차(<그림 9>참조)는 한국에너지공단의 중대형 풍력터빈 인증절차(중대형 풍력터빈 인증업무 규정)와 비교해보면 거의 동일함을 알 수 있다. 다만, 해양에너지기술은 상용화된 풍력발전과 같이 그 방식이 정형화되어 있지 않아 보다 체계적인 인증을 위해 그 절차의 첫 단계로서 Technology qualification plan (TQP)을 작성하도록 되어 있으며, 그 기준으로 TC 114에서는 TQP에 대한 국제표준(IEC Technical Specification 62600-4)이 2020년 9월 발간된 바 있다. 또한, 해양에너지분야 국제표준도 인증체계와 함께 제정되고 있는 상태이다. 현재 TC114에서 출간되고 있는 문서들은 TS(Technical Specification) 버전으로, 풍력발전분야 표준에 비해 형식인증을 위한 세부적인 기준이 마련되어야 하는 상태이다.

한편, 풍력발전분야의 형식인증은 설계근거평가, 설계평가, 형식시험, 제조평가를 거쳐 모든 절차가 완료되면 한국에너지공단으로부터 해당 발전장치에 대한 KS인증을 부여하며, 인증 후에는 REC 가중치를 받을 수 있는 조건이 충족된다. 형식인증 절차중 형식시험은 출력성능 및 기계하중측정(필수), 전력품질, 소음측정(선택), 블레이드 강도 등이 있으며, 이러한 형식시험이 해양에너지기술 인증에 동일하게 적용될 경우 필수 시험항목인 출력성능 및 기계하중측정은 실해역에서 운용하고 있는 장치로부터 장기간 측정된 전력 및 하중 데이터와 풍향·풍속, 기압, 공기밀도 등과 같은 환경 데이터가 요구된다. 이러한 측면에서 파력시험장이 확보하고 있는 해역공간과 시설을 활용하여 파력발전장치가 실해역 실증을 수행한다면 출력성능 및 기계하중측정 등의 형식시험이 가능하다. 특히, 파력시험장의 해양환경계측시스템을 활용하여 취득 및 분석되는 해양환경데이터(파랑, 조류, 수온, 염분, 수심, 해수밀도 등)는 형식시험에 필요한 데이터로 이용할 수 있다.

발전방식이 다양한 파력발전장치의 특성상 각 방식별로 전체 형식시험 항목에 대한 국제표준이 온전히 제정되는 데에는 시간이 다소 필요하지만, 파력발전장치로부터 생산된 전력 데이터를 바탕으로 국제표준에 근거한 출력성능시험은 충분히 가능하다. 즉, 파랑에너지를 전기에너지로 변환하는 방식이 다양하더라도 파력발전장치의 발전성능평가는 가능하기 때문에 형식시험중 출력성능시험이 가능함을 의미한다. 또한, 파력시험장에서 장치의 실해역 실증 활성화를 통해 국제표준에 기반한 발전성능평가가 수행되고, 그 데이터가 축적되면 현재 제정중인 국제표준의 개정에 기여할 수 있다. 그 사례로서 파력시험장에서는 1번 시험구역에서 실증중인 500kW급 진동수주형 용수시험파력발전소를 대상으로 국제표준(IEC TS 62600- 100)에 근거한 출력 및 해양환경계측시스템과 성능평가방법을 적용하여 발전성능평가를 수행중에 있다. 향후 진동수주형 파력발전장치의 출력성능시험 절차를 수립하기 위한 중요한 자료로서 이용하기 위해 데이터를 축적중이며, 파력시험장이 출력성능평가기관으로서의 역할도 가능함을 의미한다. 참고로 국내에는 한국인정기구에서 인정한 해양에너지분야 공인시험기관은 없다.

3. 요약 및 결언

파력발전기술개발에 있어 그동안 겪어온 많은 어려움을 해소하고, 국내 기술의 상용화 촉진을 위하여 제주시 한경면 용수리에 파력발전 실해역 시험장이 구축되었다. 연구실에서 수치모형이나 이론적으로 검증된 기술을 설계부터 설치·운용·회수단계에 이르기까지 다양한 성능 검증과 더불어 안전한 실해역 실증이 수행될 수 있도록 시험장을 운영하고 있다.

현재까지 국내에서 개발된 파력발전기술이 상용화 단계에 도달하기 위해서는 장치의 각종 성능 및 안전성에 대한 체계적인 평가를 거쳐야 하지만, 해양에너지분야 인증체계와 관련 국제표준이 수립되고 있는 단계여서 평가가 어려운 실정이다. 이러한 현 단계에서 국내 파력발전 기술수준이 한 걸음 더 나아가기 위해서는 구축된 파력시험장에서의 실해역 실증을 수행하면서 적용가능한 출력성능 및 기계하중측정과 같은 형식시험을 시도해보는 것이 반드시 필요하다. 다만, 국내 해양에너지분야 인증체계와 국내표준이 전무하고, 한국인정기구에서 인정한 공인시험기관이 없어 형식시험에 대한 세부절차도 마련되어 있지 않지만, 장기간 실해역 실증을 통해 취득된 데이터를 분석함으로써, 그 절차와 평가방법을 정립하는데 기여할 것으로 판단된다. 이와 더불어 인증절차가 실해역에서 장치 운용시 성능과 안전을 평가하는 중요한 기준임을 인식하고, 인증과 관련된 국가기술표준원, 한국에너지공단과의 협력을 통해 국내 해양에너지 인증체계가 수립될 수 있도록 파력시험장을 적극 활용해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

신승호 (2013). 해양에너지 기술개발의 필수 관문, 실해역 시험 - 파력발전 실증 시험장의 현황과 문제, 개발방향, 한국해안·해양공학회지, 6(1), 20-35

한국에너지공단, 중대형 풍력터빈 KS인증업무규정

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소(2020). 파력발전 실해역 시험장 구축 최종 보고서

IEA-OES(2020). Annual report 2019.

International Electrotechnical Commission(201 2). IEC TS 62600-100 : Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 100: Electricity producing wave energy converters - Power performance assessment

International Electrotechnical Commission(201 8). IEC TS 62600-103 : Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 103: Guidelines for the early stage development of wave energy converters - Best practices and recommended procedures for the testing of pre-prototype devices, 13

International Electrotechnical Commission(202 0). IEC TS 62600-100 : Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 4: Specification for establishing qualification of new technology

IECRE(2020). ME Certification Scheme : Conformity Statement Requirements

[감수 : 윤성순(ssyoon@kmi.re.kr)]

조류발전 도입을 위한 기술개발 동향 및 향후 과제



박 진 순
한국해양과학기술원
연안개발·에너지연구센터
책임연구원
(jpark@kiost.ac.kr)



고 동 휘
한국해양과학기술원
연안개발·에너지연구센터
선임연구원
(kodh02@kiost.ac.kr)



이 진 학
한국해양과학기술원
연안개발·에너지연구센터
책임연구원
(yijh@kiost.ac.kr)

1. 조류발전 개요

바다에서 얻을 수 있는 에너지, 즉 해양에너지에는 조력, 조류, 파력, 해수온도차 에너지 등 다양한 형태의 에너지가 있고, 이러한 해양에너지를 이용하여 전기 또는 수소를 생산하거나 해수담수화 또는 양식장 운영 등에 활용할 수 있다. 이중 조류발전은 지구, 달, 태양 등 천체 운동에 의한 인력으로 발생하는 조석(潮汐, tide)에 의한 바닷물의 흐름을 직접 이용하여 전기를 생산하는 것으로 정의할 수 있다.

이와 같이 조류발전은 바닷물의 흐름이 가지고 있는 운동에너지를 전기에너지로 전환하는 발전방식으로, 기본원리는 풍력발전과 매우 유사하다. 조류발전의 장점은 해양에 대규모 댐을 건설할 필요가 없어 조력발전에 비하여 상대적으로 비용이 적게 들고, 해양환경에 미치는 영향이 적다. 또한 조석현상에 의하여 발생하는 흐름을 이용하기 때문에 날씨 변화나 계절에 관계없이 전기를 생산할 수 있고, 또한 장기적으로 정확한 발전량 예측이 가능하다. 한편, 조류발전의 단점으로는 흐름이 빠른 지역에 발전장치를 설치해야 하므로 해상풍력에 비하여 적지가 제한적이며, 조력발전과 같은 대규모 개발이 어려운 점 등을 들 수 있다.

조류발전은 에너지를 취득하는 터빈의 형태에 따라 수평축, 수직축, 진동식 터빈으로 구분할 수 있고, 터빈을 지지하는 형식에 따라 부유식, 파일식, 중력식 등으로 구분할 수 있다(<그림1> 참조). 일반적으로 조류발전은 유속이 1m/s 내외인 곳에서도 가능하나, 경제성 있는 발전을 위해서는 최소한 2m/s 이상인 곳을 후보지로 선정하고 있다.



(a) 수평축 (b) 수직축 (c) 진동식

(d) 조류발전시스템 설치 모식도

▲ <그림 1> 다양한 종류의 조류발전(이광수, 박진순 2013)

한편, 조류발전을 포함한 해양에너지 개발에 대한 주요 이슈로 해양환경에 대한 영향과 함께 현재까지의 발전단가가 풍력이나 태양광에 비해 높아 경제성 확보가 어려운 점이 있다. 이는 풍력이나 태양광에 비해 기술개발 기간이 짧고, 아직 완전한 상용화가 이루어지고 있지 않아 규모의 경제성을 확보하고 있지 못한데 주요한 원인이 있다고 할 수 있다. 향후 경제성 및 친환경성을 향상시킬 수 있도록 연구개발을 추진하고, 또한 정책적 지원 등이 활발해질 경우 조류발전의 발전단가도 상당히 낮아지고 또한 해양환경에 미치는 영향도 최소화할 수 있을 것으로 예상하고 있다.

2. 국내 연안의 조류에너지 부존량

우리나라는 예로부터 울돌목을 비롯하여 여러 해역에 빠른 조류가 있어 조류발전이 유망한 것으로 알려져 있다. 국

내 연안에서 조류발전이 가능한 후보지를 평가하기 위하여 한국해양과학기술원에서는 ① 조류, 수심, 공간정보 데이터를 수집하고, ② GIS 정보를 작성한 후, ③ 수심, 유속 등 자료를 토대로 조류발전 입지를 평가하여, 최종적으로 ④ 조류발전 적지를 선정하였다. GIS 통합분석을 위해 MOHID(Modelo HIDro dinamico) 수치모델을 이용한 해수유동 수치모의를 수행하였으며, 이러한 절차를 거쳐 <그림 2>에서 제시한 바와 같이 ① 백령도, ② 경기만의 동·서수도, ③ 천수만(입구), ④ 울돌목(명량수도), ⑤ 장죽수도 및 ⑥ 맹골·거차수도의 6개 지역을 조류발전 개발 후보지로 제안한 바 있다.

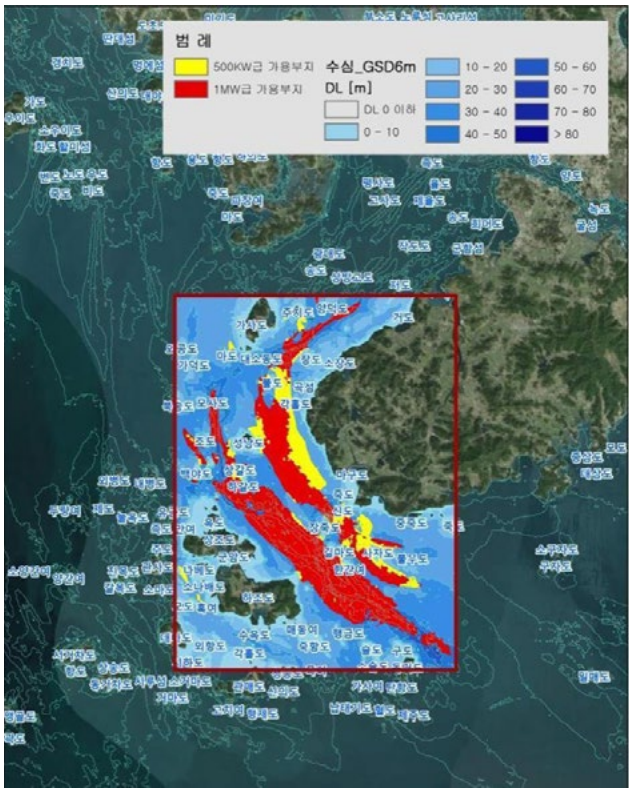
이들 해역은 최대 유속이 2m/s 이상이며, 수심은 20m 이상으로 조류터빈을 설치할 수 있는 최소한의 조건을 갖추고 있다. 이들 해역 중 특히 장죽수도는 설치 가능한 용량이 약 5.5 GW로 평가되어, 여러 후보지 중 입지조건이 가장 유리한 지역으로 평가되었으며, 향후 조류발전 기술이 상용화 된다면 대규모 조류발전단지 개발이 가능할 것으로 평가되었다(Park et al. 2019)(<그림 3> 참조). 아래 그림은 국내 연안에서 조류발전이 가능한 6개 해역의 위치이며, 각 후보지에서 설치 가능한 조류발전 터빈의 용량 및 개수, 그리고 이를 바탕으로 한 설비용량을 아래 <표 1>에서 제시하였다.



▲ <그림 2> 조류발전 가능 후보지 위치도

▼ <표 1> 조류발전 가능 후보지 시설용량

항목 / 가능 후보지	유속 (m/s) 최대	면적 (㎢)	설치가능 발전기 수 500 kW	설치가능 발전기 수 1 MW	시설가능 용량 (MW)
① 백령도	2.2	19.86	152	1,018	1,094
② 경기만 동·서수도	2.6	19.51	266	935	1,067
③ 천수만	2.7	4.53	422	14	225
④ 울돌목	4.7	0.94	209	-	104
⑤ 장죽수도	3.7	101.91	2,059	4,503	5,533
⑥ 맹골·거차수도	2.9	72.39	410	3,791	3,996



▲ <그림 3> 장죽수도 조류발전 가용 해역

3. 국내 조류발전 기술개발 연구동향

이미 상용화된 조력발전 기술을 제외한 해양에너지 기술의 경우 본격적인 시장 창출 이전의 기술개발 단계로, 현재 해양수산부 등 관련부처를 중심으로 여러 연구개발 및 실증(R&D&D, Research & Development & Demonstration) 과제를 추진하고 있으며, 이러한 연구개발을 통하여 해양에너지 시장 환경을 조성하고 궁극적으로는 이러한 분야에서의 신산업을 육성하고자 하고 있다. 조류발전 기술과 관련된 최근 국내 연구동향을 다음과 같이 간략하게 정리하였다.

국내에서는 2000년 이후 해양수산부에서 본격적으로 조류발전 등 해양에너지 관련 연구개발사업을 추진하였으며, 2005년부터 추진된 "조류에너지 실용화 기술개발(2005~2011)" 과제를 통하여 2009년 수직축 조류터빈을 적용한 1MW급 울돌목 시험조류발전소(<그림 4> 참조)를 건설하였다. 이 과제를 통하여 지지구조물, 발전기, 전력변환장치 및 통합감시시스템 등을 개발하였으며, 현재 울돌목 시험조류발전소는 다양한 중소형 조류발전 기술을 실해역에서 실증할 수 있는 해상기지로 활용되고 있으며, 동시에 기존 1MW급 발전설비를 150kW급으로 축소하여 운영하고 있다(<그림 5> 참조).

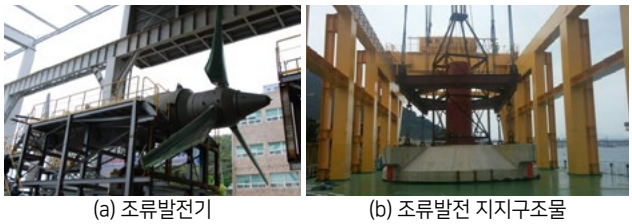


▲ <그림 4> 울돌목 시험조류발전소 전경



▲ <그림 5> 150kW급 터빈 및 발전기

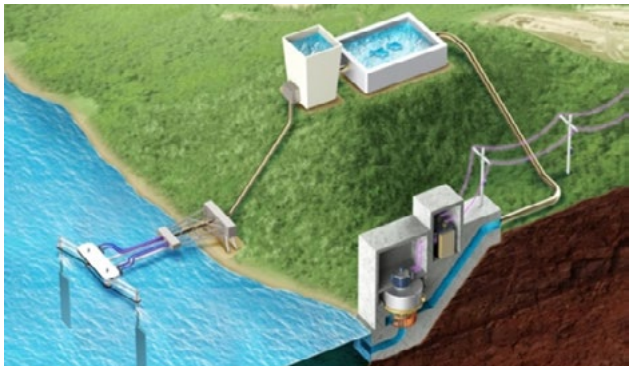
한편 수직축 터빈을 적용한 1MW급 울돌목 시험조류발전소 건설 이후, "능동제어형 조류발전 기술개발(2011~2020)"을 통하여 발전효율향상과 단지 개발에 적합한 수평축 200kW급 능동제어형 조류발전시스템(<그림 6> 참조)을 개발하여 현재 실증을 앞두고 있으며, 이 과제를 통하여 수평축 터빈뿐만 아니라, 듀얼 수직축 터빈, 진동형 터빈 등에 대한 원천기술을 확보한 바 있다. 그러나 200kW급 조류발전시스템은 조류발전단지를 구축하기에는 용량이 작아, 향후 10MW급 조류발전단지 구축 시 적용을 고려하여 200kW급 수평축 조류발전시스템을 확대한 "1MW급 조류발전 상용화 시스템 개발(2019~2022)"과제를 수행하고 있으며, 이 과제를 통하여 1MW급 조류발전시스템을 개발하고, 또한 10MW급 조류발전단지 구축에 대한 기본계획을 진행할 예정이다.



(a) 조류발전기 (b) 조류발전 지지구조물

▲ <그림 6> 200kW급 조류발전시스템 및 지지구조물

한편 수평축 조류발전시스템에 비하여 상대적으로 기술적 성숙도가 높고 유지관리가 유리한 수직축 터빈을 적용한 "도서지역 적용 조류발전-ESS 연계형 융복합시스템 개발" 과제를 2019년부터 2021년까지 진행하고 있다. 이와 유사하게 도서지역에 대한 적용을 고려한 "조류-양수 융합발전시스템 개발 및 실증" 과제를 산업통상자원부 과제로 수행한 바 있다(<그림 7> 참조). 국내 서남해안 도서지역의 경우 현재 디젤발전기를 이용하여 전기를 생산하고 이용하고 있어 육지에 비하여 전력단가가 높은 상황이며 따라서 발전단가가 높은 조류발전의 적용 가능성이 상대적으로 높기 때문에 해양수산부에서도 조류발전 보급을 위하여 적극적으로 지원하고 있는 상황이다. 또한 국가전력망에 연계되어 있지 않은 도서지역에 대한 조류발전 적용은 우리나라뿐만 아니라 해외에서도 적극적으로 추진하고 있어, 국내 기술을 적용하여 기술검증이 이루어진다면 동남아시아의 여러 도서국가에도 진출할 수 있을 것으로 기대되고 있다.



(a) 조류발전-양수 복합시스템 개념도



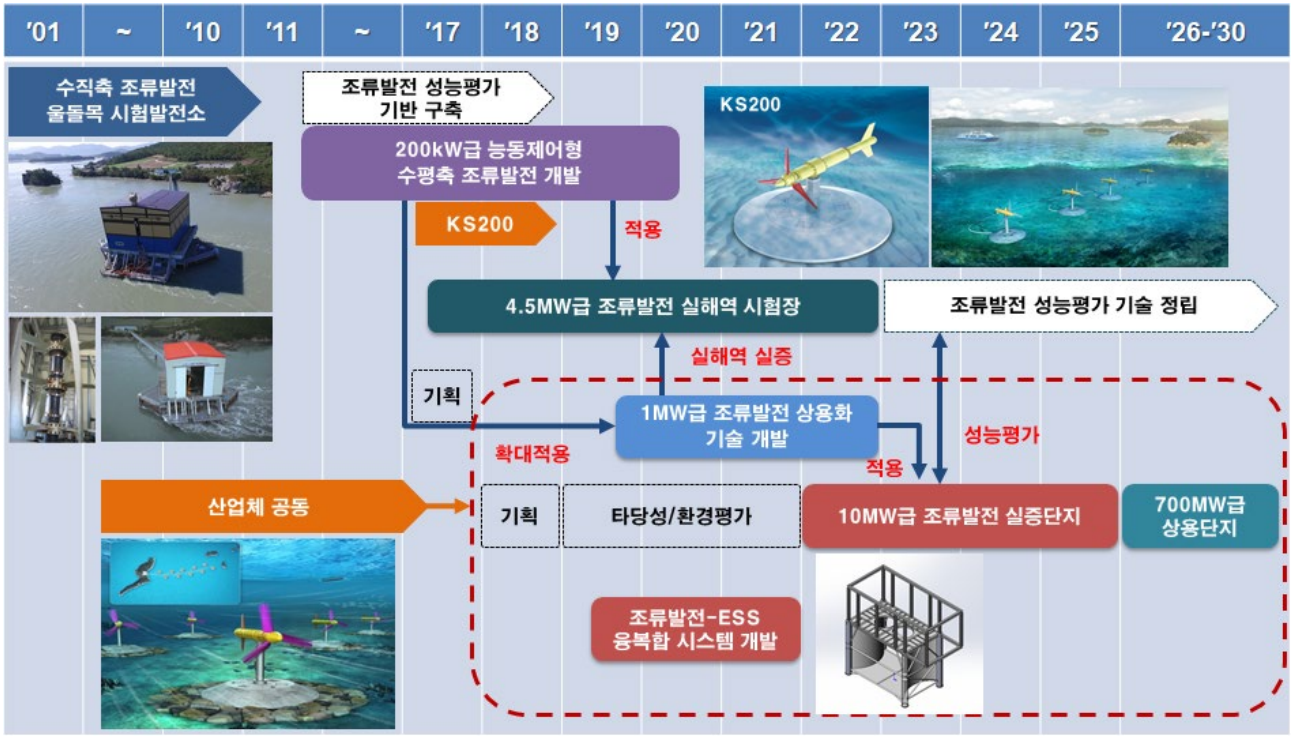
(b) 진동식 조류발전 터빈 및 양수 장치

▲ <그림 7> 조류발전-양수 복합시스템 개념도 및 실증 장면



▲ <그림 8> 조류발전 실해역 시험장 개념도

한편 이와 같은 조류발전 기술의 상용화를 위하여 반드시 거쳐야 하는 실해역 실증의 경우 각종 인허가를 취득하여야 하면 또한 고가의 해저케이블 등을 설치하여야 하므로 연구개발 단계에서 가장 어려운 단계라 할 수 있다. 따라서 조류발전 실해역 시험을 지원하기 위하여 해양수산부에서는 "조류발전 실해역 시험장 구축"과제를 추진하고 있으며, 이 과제를 통하여 육상부품 시험장과 실해역 시험장을 구축하고 있다. 현재 조류발전 로터 블레이드에 대한 시험을 지원하기 위한 육상부품 시험장은 한국해양과학기술원 부산 본원에 구축 중이며, 해상 시험장은 장죽수도에 파랑과 수심 특성에 따른 1MW급 4개 시험소와 울돌목 시험조류발전소를 이용한 0.5MW급 1개 시험소를 구축하고 있다. 육상부품 시험장의 경우 부안에 있는 풍력핵심연구센터와 영국 ORE(Ocean Renewable Energy) Catapult와 같이 블레이드 강도와 비파괴 시험 분야를 지원하고, 실해역 시험장의 경우 영국 EMEC(European Marine Energy Center)과 같이 여러 조류발전시스템에 대한 성능평가를 지원할 수 있도록 육상변전시설, 해저케이블과 수중 커넥터 등을 지원할 수 있도록 하고 있다. 또한 육상부품 시험장에서는 블레이드 강도와 비파괴 시험 분야에서, 해상시험장에서는 출력과 하중분야에서 KOLAS 공인시험기관으로 지정받기 위한 관련 절차를 진행하고 있다.



▲ <그림 9> 국내 조류발전 기술개발 현황

한편 해양수산부는 지난 2017년, 해양에너지 발전 인프라를 시화조력발전소 254MW를 포함하여 1.5GW까지 구축하여 청정에너지를 상시공급하고, 해양에너지 전문기업 육성 및 장비 기술 공급체계를 구축하기 위한 해양에너지 개발 목표 및 추진전략을 구체적으로 정리한 "2030 해양에너지 개발 계획(2017)"을 발표한 바 있다. 이 계획에 따르면 조류발전의 경우 R&D 및 인증체계를 구축하고, 서남해 10MW급 실증단지 및 이후 700MW급 조류발전단지 구축 등을 2030년까지 추진하는 것으로 되어 있고, 아래 <그림 9>는 이러한 계획을 포함하여 2000년 초반부터 조류발전 분야의 관련 과제 등을 정리한 것이다.

4. 조류발전 보급을 위한 향후 과제

해양에너지는 자원량이 풍부하고, 밀도도 높은 편이며, 특히 조류발전은 날씨와 계절에 상관없이 전기를 생산할 수 있고, 지속적인 이용도 가능한, 많은 장점이 있는 차세대 에너지원으로 주목받고 있다. 해양에너지 개발을 위한 본격적인 투자는 다른 신 재생에너지 자원에 비해 늦게 시작되었지만, 해양에너지가 갖는 이러한 여러 가지 장점으로 인해 최근 유럽 국가와 미국, 캐나다 등을 중심으로 실해역 성능시험이 급속히 확대되고 있다. 하지만 기술적인 측면에서는 해양의 높은 부식성과 가혹한 물리적 환경에 견디는 발전시스템의 개발과 이러한 시스템의 설치 운영 유지 보수 등을 위한 공법의 확보 등 극복해야 할 과제가 여전히 많이 남아 있다. 또한, 신 재생에너지 분야는 단기에 성과가 나타나는 것이 아니므로 장기적이고 일관된 정책 하에서의 지속적인 지원이 필요하다. 특히 해양에너지 분야는 신 재생에너지 중에서도 상대적으로 후발주자에 속한 분야로 시장 형성이 미흡한 단계이다. 시장경제 체제하에서 해양에너지와 같은 경쟁력이 낮은 기술은 시장을 통해서는 자발적으로 상용화가 이루어지지 않기 때문에 초기 단계에서는 정부 또는 공기업의 개입과 지원이 필요하다. 선진국에서는 과다한 초기투자의 필요성에도 불구하고, 화석에너지의 고갈문제와 환경문제에 대한 핵심 해결방안이라는 점에서 일찍부터 과감한 연구개발과 보급정책을 추진해오고 있다. 이러한 선진국의 사례를 참고하여 우리나라도 해양에너지에 대한 연구개발지원을 확대하는 한편 공적인 지원이 충분한 성과를 맺을 수 있도록 구체적인 방안 마련도 필요하다.

정부 차원의 지원은 정책적으로 조류발전 등 해양에너지 개발을 위해 필요한 인허가 제도를 완화하여 비기술적 어려움을 경감시켜 주는 것이 필요하다. 영국, 일본 등에서 추진 중인 해양공간계획 시 일정 지역을 해양에너지 개발 구역으로 지정하고, 이러한 해역에서는 인허가 절차를 간소화해 주는 등의 지원이 이루어진다면 조류발전 등 해양에너지 개발이 좀 더 탄력을 받을 수 있을 것으로 기대된다.

또한 조류발전 사업에 대한 기업투자를 늘이기 위하여 REC 가중치를 일정 기간 동안 높여 단지개발 및 규모의 경제성 확보가 가능하도록 하는 정책적 지원 역시 매우 필요한 부분이라 할 수 있다. 이와 관련하여 조류발전의 경우 외국에서 인정해 주고 있는 단가를 보면, ROC(Renewable Obligation Certificate) 제도를 채택하고 있는 영국의 경우, 조류발전사업에 대한 경매 가격이 2021-22, 22-23, 23-24, 24-25년도에 대하여 각각 300, 295, 225, 217(/MWh)로 제시하였으며, 원화로 환산하면 320-442원/kWh 수준이다(IEA-OES, 2018, 2019, 2020). 또한 FIT(Feed-in-Tariff) 제도를 운영하고 있는 중국의 경우, 현재 조우산 인근 해역에서 3.4MW급 시스템을 운영 중인 LHD 조류발전시스템에 대하여 정산단가를 ¥2.58/kWh(약 442원/kWh)로 지원해 주고 있다(IEA-OES, 2019, http://zhoushan.chinadaily.com.cn/2019-08/26/c_399144.htm). 현재 우리나라의 조류발전에 대한 REC 가중치 2와 SMP 단가(현재 약 50원/kWh), REC 단가(현재 약 45원/kWh)를 고려하면 우리나라에서 조류발전사업을 할 경우 전력생산에 대한 정산단가는 140원/kWh로 이들 국가보다 매우 낮은 수준임을 알 수 있다. 따라서 우선적으로는 도서지역과 같이 생산단가가 높은 지역에 조류발전을 보급하고, 기술수준 및 경제성 향상과 함께 REC 가중치를 높여 대규모 조류발전단지를 국내 연안에 구축할 수 있도록 해야 할 것으로 사료된다.

유엔 기후변화협약에 의거하여 우리나라는 국가온실가스감축목표(INDC: Intended Nationally Determined Contribution)를 2030년 배출전망(BAU)인 8억 5,060만톤 CO2 대비 37%를 감축하여야 한다. 이에 정부에서는 신 재생에너지 비중을 2030년까지 20%로 확대하는 신 재생에너지 3020 이행계획을 2018년에 발표한 있다. 또한 최근 발표한 제9차 전력수급기본계획에서는 2034년까지 재생에너지 비중을 40%까지 증가시키는 내용을 발표한 바 있으며, 이러한 계획의 달성을 위하여 그린뉴딜 정책을 적극 추진하고 있다. 해양수산부에서는 해양에너지 2030 개발계획(해양수산부, 2018)에서 2030년까지 해양에너지 설비로 재생에너지 전체 보급목표의 2.3%에 해당하는 1.5GW 개발을 목표로 제시한 바 있고, 또한 현재 그린뉴딜 정책에는 해양에너지 부문은 포

함되어 있지 않지만 해양수산부에서도 해양에너지 기술이 향상되어 상용화 단계에 진입하게 되면 그린뉴딜의 한 축을 담당할 수 있도록 육성하는 의지를 가지고 있다. 그러나 이러한 정부의 지원을 지속적으로 이끌어 내기 위해서는, 동시에 연구개발을 수행하는 관련 연구소, 대학, 기업에서 가시적인 성과를 제시해야 할 시점이라 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 기사는 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 재원을 받아 수행된 연구의 일환임(1MW급 조류발전 상용화 시스템 개발(과제번호 20190499), 조류발전 실해역 시험장 구축(과제번호 20170333)).

참고문헌

이광수, 박진순 (2013) 바다가 만든 자연에너지.

Jun-Seok Park, Chol-Young Lee, Jin-Soon Park, Hyun-Woo Choi, Dong-Hui Ko, and Jung-Lyul Lee (2019) Assessment of Tidal Stream Energy Resources Using a Numerical Model in Southwestern Sea of Korea. Ocean Science Journal, Vol. 54, No. 4. pp.529-541.

IEA-OES (2018) Annual Report – An Overview of Ocean Energy Activities in 2017.

IEA-OES (2019) Annual Report – An Overview of Ocean Energy Activities in 2018.

[감수 : 안성모(smahn1@naver.com)]



부유식 해상 태양광발전의 현황과 앞으로 나아갈 길



정 현
㈜오션스페이스 사장
(hchung@oceanspace.com)



이 병 준
㈜오션스페이스 부장
(bjlee@oceanspace.com)

1. 배경 및 개요

우리나라는 2030년까지 신재생에너지의 발전 비중을 20%까지 늘릴 예정이며 이 중 태양광발전이 절반 정도를 담당한다면 54GW의 설비가 필요한 상황이다. 그러나 육상태양광 발전만으로 이를 충당한다면 넓은 설치 대지 면적이 필요하므로 우리나라와 같이 가용한 땅이 좁고 산지가 많은 지형에서는 한계가 있을 수밖에 없다. 육상태양광 발전 부지 확보를 위해 임야 훼손 등 환경 문제가 발생하는데 이 때문에 집중 강우 시에는 산사태의 원인으로 지목되기도 한다.



▲ <그림 1> 산사태로 무너진 태양광 발전 시설

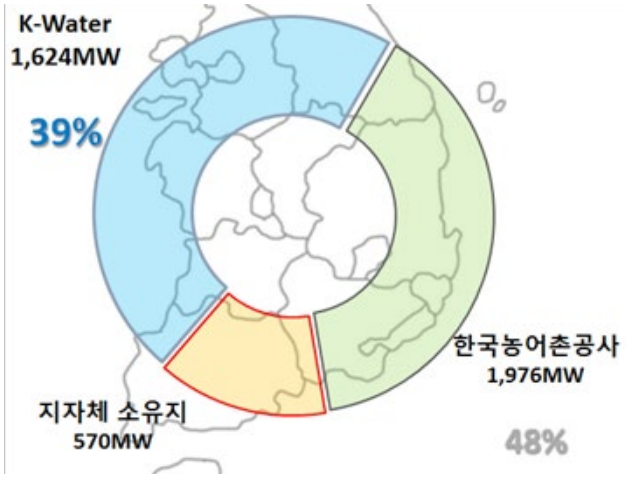
또한 육상태양광은 태양광이 강하게 내리쬐는 시간에 대지가 함께 가열됨으로써 대지 상부에 설치된 태양광 발전의 효율이 감소하는 현상이 발생한다는 문제점도 있다.

이의 대안으로 우리나라에서는 수상태양광의 가능성을 적극 검토해 왔다. 수상태양광은 주로 댐과 저수지 등의 유휴 수면에 설치되는데 육상에 비해 주변 여건 등의 제약이 적고 수면의 냉각 효과로 발전 효율이 향상되는 등의 장점이 있다.



▲ <그림 2> 경북 상주 지평 저수지 3MW 수상태양광

전국의 저수지 만수 면적은 560km2에 달하지만 갈수기 및 다른 용도로도 저수지를 활용해야 하므로 수상태양광 설치 가능 면적도 많다고 볼 수는 없다. 국내 수상태양광이 설치될 수 있는 댐과 저수지 등은 한국수자원공사(K-water)와 한국농어촌공사, 지자체 등이 보유하고 있으며 개발 가능 잠재량은 총 저수면적의 12% 정도인 69km2로 평가되고 있다. 그러나 이마저도 여러 민원 및 환경 요인으로 개발이 점점 어려워지고 있는 실정이다.



▲ <그림 3> 전국 수상태양광 개발 가능 잠재량

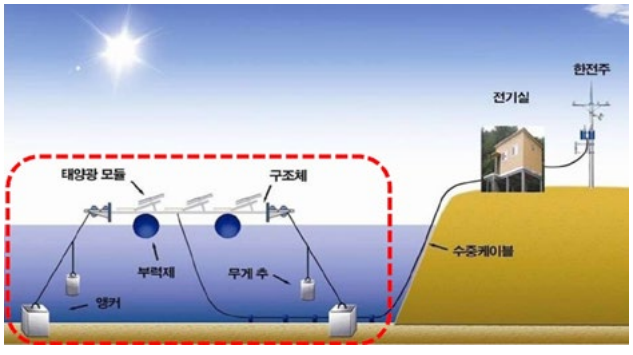
따라서 수상태양광의 대안으로 해상태양광이 떠오르고 있다. 우리나라 서해안이나 남해안은 수심이 낮고 다도해이기 때문에 섬 사이나 반쯤 폐쇄된 해역은 파고가 낮은 특성이 있다. 이를 고려하면 전국토의 8%에 달하는 8,000km2 정도를 해상태양광 부지로 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 해상태양광을 개발한다면 해양의 특성 상 육상이나 수상에 비해 부지 확보가 용이하고 경관 피해가 적으며 대규모화가 가능해 발전 단가 면에서 유리하다는 장점이 있다.

2. 부유식 수상태양광

◆ 2.1 기존 수상태양광 기술

육상태양광의 부지 확보와 환경 훼손 등의 문제를 해결하기 위해 제시된 수상태양광의 경우 수면 위에 태양광 패널이 설치되어 냉각 효과가 우수하고 이로 인해 발전 효율이 지열의 영향을 받는 육상태양광에 비해 10% 이상 상승하는 부수적인 이익이 있다.

수상태양광의 구성은 아래에서 보는 바와 같이 태양광 모듈과 이를 지지하는 구조체 및 부력재, 계류 및 앵커시스템, 수중케이블과 육상 전기실 등으로 이루어진다.



▲ <그림 4> 수상태양광 구성요소

수상태양광의 구조체 형식에는 프레임형, 부력일체형, 매트형 등이 있는데 프레임형이 가장 많이 쓰이고 있다. 이는 부력재 위에 별도의 구조체인 프레임(Frame)을 설치하는 방식으로, 프레임을 조립하고 이를 부력재에 연결 설치하며 시공비가 다른 형식에 비해 다소 높지만 구조적인 안전성이 상대적으로 우수하다는 장점이 있다.

프레임형 수상태양광의 구조체 재료로는 강재나 알루미늄, FRP, PE재 등을 사용하며 재료단가와 내구성, 구조 강성과 시공 편의성 등을 고려하여 선택한다.



▲ <그림 5> 프레임형 수상태양광

부력일체형은 저렴한 폴리에틸렌(PE) 등의 재질로 부력재와 태양광 패널을 지지하는 구조물을 일체화하여 만든 형식이다. 매트형은 매트(Mat) 형태로 부유시켜 태양광 패널을 설치한 것으로 부력일체형과 마찬가지로 시공비가 다소 저렴하지만 구조적으로 취약하고 태양광 발전의 효율도 저하된다는 단점이 있다.

한편 수상태양광은 패널의 설치 각도에 따라 고정식과 추적식, 회전식 등으로 분류된다. 고정식은 발전량 최적화를 위해 태양광 패널의 설치 각도를 미리 정하고 그 각도로 일정하게 고정한 방식으로 가장 많이 사용되고 있다. 추적식은 태양광 이동 경로를 따라 태양광 패널의 상하각도를 조절하는 방식이며, 회전식은 상하각도뿐 아니라 동서 이동 방향까지 조절하는 방식으로 태양광 발전 효율이 고정식에 비해 20~30%까지 증대되는 효과가 있다. 다만 설치비와 유지관리비가 높아진다는 단점이 있다.

수상태양광 부력재는 상부 하중을 지탱하고 전체 구조물의 안정성과 내구성을 확보하기 위해 중요한 역할을 하는 구성품이다. 부력재의 재료로는 HDPE(고밀도 폴리에틸렌)나 FRP(Fiber Reinforced Plastics) 계열을 사용한다.

수상태양광의 하부구조 설계조건에는 풍하중 외에 사하중, 활하중, 적설하중, 유수하중, 소규모 파랑하중 등이 있으며, 그 중에서도 최대 외압조건은 풍하중이라고 할 수 있다. 또한 수상태양광은 저수지의 수위 변화에도 적응할 수 있는 구조여야 한다.

따라서 부유체로 이루어진 수상태양광은 바람과 유속, 파랑 등에

의해 동요하며 움직이는데 이러한 동요와 움직임을 최대한 방지하기 위해 필요한 것이 계류 및 앵커시스템이다.

적정한 계류방식과 배치, 계류삭의 선정 및 앵커 설계를 위해서는 계류장력의 평가, 피로수명, 내구성, 생물부착 등의 문제를 정밀하게 검토해야 한다.

계류삭의 종류에는 체인, 와이어, PE 로프, 나일론 로프, 탄성계류로프, 복합 계류시스템 등이 있으며 경제성과 내구성, 강성, 운용성, 안전성과 현장 여건 등을 고려하여 선택한다.

계류 형식에는 이완 계류(Catenary Mooring), 인장 계류(Taut Mooring), 돌핀 계류(Dolphin Mooring) 등이 있으며 역시 경제성과 운용성, 현장 여건 등을 고려하여 선택한다.

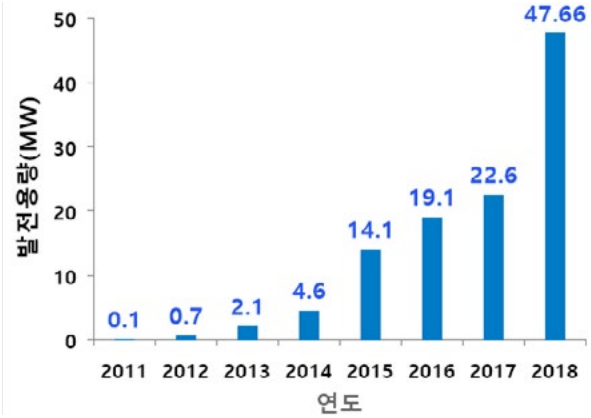
수위 변화를 고려하여 계류삭의 길이를 평상시에 길게 늘여 뜨려 놓는 이완 계류 방식을 선택할 경우 평상시 바람에 의해 수상 태양광의 동요가 심해질 수 있으므로, 이를 방지하기 위해 계류삭에 무게추를 달거나 처음부터 인장 계류 방식인 탄성계류로프를 적용하기도 한다. 계류삭의 장력을 증대시켜 팽팽하게 하면 상부 태양광 모듈의 동요가 줄어들지만 대신 앵커의 장력이 늘어나 더 큰 앵커가 필요하므로 경제성이 감소하는 요인이 되기도 한다.

수상태양광 설비의 건설비용에서 부유체 및 계류 시스템이 차지하는 비율은 43% 정도로 알려져 있다.

◆ 2.2 국내 수상태양광 설치 현황

현재 전국에 약 45개의 수상태양광 발전시설이 설치, 운영 중에 있으며 총 설비 용량은 47.66MW에 달한다.

한국수자원공사가 2011년 합천댐에 100kW급 수상태양광 실증 플랜트를 설치해 기술적으로 검증하고 이듬해인 2012년 500kW급 사업용 플랜트를 설치한 것이 첫 걸음이라고 볼 수 있다. 그러나 처음에는 기술 및 금융 관련 문제로 중소규모 수상태양광 위주로 개발되었다.



▲ <그림 6> 국내 수상태양광 설비 용량

농어촌공사는 2012년 청호저수지에 30kW를 시작으로 2014년 금광저수지 465kW 등 총 20개 지구에 18MW를 설치하였다.

대규모 수상태양광은 2014년 중부발전이 충북 영동 추풍령저수지에 2MW를 설치하였고, 2015년 10월에는 농어촌공사가 경북 상주 오태 및 지평저수지에 총 6MW급 시설을 설치하였다. 수자원공사는 2015년 12월에 충남 보령댐에 2MW 수상태양광이 설치하였고, 2017년에는 충주댐에 3MW를 추가로 설치하여 총 5.5MW의 수상태양광을 운영중에 있다.



▲ <그림 7> 충남 보령댐 2MW 수상태양광

2018년에는 민간기업에서 전북 군산시 제2국가산업단지 내 유수지에 국내최대규모 수상태양광인 18.7MW를 설치하여 현재 상업 운전 중에 있다.



▲ <그림 8> 전북 군산 유수지내 18.7MW 수상태양광

◆ 2.3 해외 수상태양광 설치 현황

세계은행에서 발표한 보고서에 따르면 2018년 9월 기준 전 세계 수상태양광 누적 설치 용량은 1.1GW 규모로 2000년 육상태양광 누적 설치 용량과 같은 규모라고 한다.

스페인에서는 2008년부터 호수나 저수지에 설치를 목적으로 수상태양광 발전 기술에 대한 연구개발을 시작하였고,

이탈리아의 경우는 Scienza Industria Tecnologia사에서 Colignola 호수에 30kW 수상태양광을 설치하였다.
일본은 수상태양광 분야에서 상당히 앞서 나가고 있으며 가와사키 제철이 NEDO(신에너지산업기술 종합개발기구)의 산업용 태양광발전 현지시험사업의 일환으로 카가와현 호넨저수지에 수상태양광 30kW를 2002년 3월 최초로 설치하였다.
이어서 2008년 카메야마시 200kW와 아이치현 80kW, 2013년 오케가와시 1.18MW, 사이타마현 가와고에시 710kW, 2014년 가와지마마치 7.5MW, 시마네현 야스기시 1.098MW, 2015년 사이타마현 7.5MW, 2016년 지바현 이치하라시(야마쿠라댐) 저수지 13.4MW 등을 설치하였다.
이 중 야마쿠라댐 저수지의 수상태양광은 일본에서 최대 규모, 세계에서 세 번째 규모로 태양광 패널 면적이 축구장 25개 크기인 18만m2에 달하며 저수지 전체 면적의 약 30%에 해당한다고 한다.



▲ <그림 9> 일본 야마쿠라댐 13.4MW 수상태양광

중국도 수상태양광 부문에서 괄목할만한 설치 규모를 갖고 있다. 친환경에너지기업 양광전원이 2017년 6월 안휘성 차오호수 수면에 40MW, 장강 삼협 집단공사가 역시 안휘성 호수 수면에 2019년 총 150MW 규모에 달하는 세계 최대 수상태양광 발전소를 건설하였다.



▲ <그림 10> 중국 안휘성 150MW 수상태양광

3. 부유식 해상태양광

◆ 3.1 해상태양광의 특성 및 현황

수상태양광을 댐과 저수지 등 담수 상에 들어가는 부유식 태양광시설로 정의한다면 해수 상에 설치되는 수상태양광은 해상태양광이라고 부를 수 있을 것이다. 아래의 물이 담수냐 해수냐 하는 점은 상부 태양광 시설과 계류장치의 내구성에 영향을 끼쳐 방식설계 등이 크게 달라질 수 있다.
이처럼 해상태양광은 모듈, 부력재, 상하부 구조물 등에 해상환경조건에 의한 열화와 부식이 발생할 수 있으므로 시스템의 안전성, 내구성, 친환경성 등에 문제가 발생할 수 있는 소지가 수상태양광에 비해 크다고 볼 수 있다.
따라서 고내구성 부력재의 개발이 필요하고 부력재에 발생하는 수중부착생물(따개비 등)의 방지 및 제거 기술과 해상전기시스템의 경량화, 방수, 방진, 방염, 내구성 등 안전성의 확보도 중요하다.
수위 변화도 수상태양광의 경우 홍수위로 인해 드물게 발생하는 경우라면 해상태양광은 조위차로 인해 발생하기 때문에 수상태양광보다 훨씬 자주 발생한다. 또한 해상 면적은 일반적으로 댐이나 저수지보다 크기 때문에 발생할 수 있는 파랑이 더 높아지고 조류의 영향도 설치 장소에 따라 무시할 수 없는 경우가 많다. 따라서 해상 외력에 대응하는 계류시스템 개발이 필요하며, 이처럼 해상태양광은 담수에 들어가는 수상태양광에 비해 안전 확보를 위한 설계 고려사항이 더 많아지게 된다.
그러나 안전성만 확보할 수 있다면 해상태양광은 육상태양광이나 수상태양광에 비해 상대적으로 부지 확보가 용이하고, 대규모로 태양광 발전 시설을 설치할 수 있다는 점에서 발전단가를 내리고 경제성을 높일 수 있다는 장점이 있다.
국내 서해안과 남해안은 수심이 낮고 섬과 해안으로 둘러싸인 해역이 많아 파고가 낮으며 따라서 해상태양광을 설치하여 운영할 수 있는 가용 해역이 많을 것으로 판단된다.
2016년 5월 한국서부발전은 태안화력발전소 내 취수로 유휴수면을 활용하여 1.8MW의 수상태양광을 설치하였다. 이 수상태양광은 아래의 물이 해수로 사실상 해상태양광의 일종으로 볼 수 있지만 육지 내의 제한된 수역에 설치하여 파랑과 유속이 거의 없어 일반적인 해상태양광이라고 하기는 어려울 것 같다.
한국서부발전은 장차 시화호 1.12km2의 수면에 102.5MW의 대규모 해상태양광을 설치하려고 계획하고 있다.
국내에서 최초로 시도되는 본격적인 해상태양광은 새만금 방조제 내부에 설치되는 새만금 수상태양광으로 총 1.4GW 규모이다. 2020년 하반기에 사업자를 공모할 계획이며 대상 해



▲ <그림 11> 새만금 수상태양광발전 구역 위치도

역은 산업연구용지 남측 A구역 6.6km2와 국제협력용지 동측 B구역 11.8km2 로 각각 500MW와 900MW의 해상태양광 시설이 추진되고 있다.

◆ 3.2 부유식 해상태양광 기술

해상태양광의 경우 파랑, 조류력, 풍하중, 조위차 등 다양한 해상조건을 고려하여 설계하여야 한다. 저수지 등에 설치되어 파도가 거의 없는 수상태양광과 달리 해상태양광은 파도로 인해 상하좌우로 태양광발전 시스템이 움직일 수 있고 파랑에 의한 호깅(Hogging)과 새깅(Sagging) 현상으로 수직방향 변동 하중도 발생할 수 있으므로 동요를 저감하고 파도에 능동적으로 대응할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

해상태양광 설계시 또 하나의 중요한 포인트는 해양부착생물에 의한 추가 하중이다. 따개비 등 해양부착생물은 수면 하 구조물과 계류로프 등에 달라붙어 사하중과 부력하중을 발생시키며 파랑과 조류의 투영면적을 크게 하여 외력의 증가도 일으키기 때문이다.

해상태양광의 부유체(Floating Platform)는 바람과 파도 등 외부 해상환경으로부터 상부 태양광발전 시스템을 지지해 주어야 하며, 계류 장치(Mooring System)는 이 부유체를 잡아주는 역할과 조위변화에 따른 계류선의 여유장력을 조정하여 부유체의 방향을 일정하게 유지시켜 주는 역할도 하여야 한다.

부유체의 방향 유지는 해상태양광 발전의 효율을 위해 중요하며, 부유체는 하루 중 태양광이 내리쬐는 비율이 가장 높은 방향을 향하도록 일정하게 유지되어야 한다.

또한 해상태양광 발전소에서 생산된 전기를 육상 전력 케이블에 연결하기 위한 육상 또는 해상변전소와 해저케이블 등의 설치도 필요하다.

해상태양광 설비의 건설비용에서 부유체 및 계류시스템이 차지하는 비율은 수상태양광보다 크게 높아질 것으로 예상된다.

4. 해상태양광의 향후 기술개발 방향

◆ 4.1 향후 기술개발의 주안점

앞으로 부유식 해상태양광의 기술 개발시 주목해야 할 분야는 다음과 같다고 볼 수 있다.

① 태양광 판넬에 파력이 작용하지 않도록 적정한 건현을 확보하는 기술

② 수선 면적을 최소화하여 파도에 의한 동요를 줄일 수 있는 기술

③ 수면 하 구조물의 투영면적을 최소화하여 계류력을 줄이고 계류장치의 경제성을 확보할 수 있는 기술

④ 구조물의 평면상 유연성을 확보하여 파도에 의한 과도한 하중을 방지할 수 있는 기술

⑤ 구조물 재질의 내부식성을 확보하여 유지관리의 경제성을 향상시킬 수 있는 기술

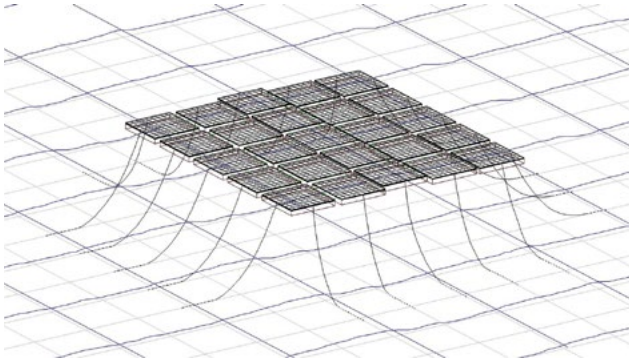
이 중에서도 ④번 항목의 기술이 가장 어려운 기술로 판단이 된다. 해상태양광은 해상에 넓게 퍼져있는 판(Plane)형태의 시설물로 이러한 시설은 파도가 칠 때 어떻게 하면 파도의 영향에 유연하게 대응하여 구조물에 작용하는 힘과 변형을 최소화할 수 있느냐가 중요하기 때문이다.

이처럼 해상태양광은 파도의 영향을 고려하여 파도의 상하운동에 능동적으로 대응할 수 있는 구조체를 만드는 것이 중요하다. 즉 상부 구조물을 수면의 움직임에 따라 수면과 유사하게 거동할 수 있도록 적절한 크기의 단위 플랫폼으로 설계하고 구조물 사이는 휨모멘트의 전달이 최소화되도록 효율적인 연결지지체를 설계하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

◆ 4.2 해상태양광 기술개발 현황

해양수산과학기술진흥원은 연구개발과제 중 하나로 MW급 해상태양광 발전을 위한 단위 플랫폼 개발을 시행하고 있으며 이를 통해 유의파고 2.5m의 해상상태에서 횡동요 5도 이하, 수직가속도 0.3g 이하의 해상태양광 구조물을 개발 중에 있다. 이 연구과제에는 해상에서의 동요 저감형 구조물과 단위 플랫폼 연결지지체 기술을 개발하고 나아가 단위 플랫폼 표준화 및 MW급 해상태양광 시스템을 설계하는 내용이 포함되어 있다.

여기서 개발된 해상태양광용 구조물과 연결지지체 기술이 수치해석 및 수조실험과 현장실증시험을 통해 적정성이 검증된다면 대상 유의파고를 점차 상향시켜가며 기술개발의 단계를 높여나갈 예정이라고 한다.



▲ <그림 12> 해상태양광 계류 수치해석

5. 결론

전력원을 기존의 화석연료나 원자력에서 신재생에너지로 전환하는 추세는 이미 세계적으로 일반화된 현상이라고 할 수 있으며 이 중 풍력과 태양광이 에너지 전환에 주도적 역할을 하고 있다고 볼 수 있다.

우리나라가 에너지 기술에서 다른 나라에 뒤처지지 않고 이를 선도하기 위해서는 해상태양광 등 새로운 신재생에너지 분야에 더욱 과감한 투자와 관심이 필요할 것으로 생각된다.

[감수 : 안성모(smahn1@naver.com)]

기술기사

· IoT 기반 파랑 예측기술의 해상공사 현장 시범적용

· 머신러닝을 이용한 태풍 시 실시간 유의파고 예측

IoT 기반 파랑 예측기술의 해상공사 현장 시범적용



김 민 균
GS건설㈜ 기술연구소
책임연구원
(mkkim03@gsenc.com)



김 권 수
㈜세일종합기술공사 기술연구소
이사
(kimknsu@hanmail.net)



유하상
㈜세일종합기술공사 기술연구소
전무
(coolman70@hanmail.net)

박 종 헌
GS건설㈜ 기술연구소 책임연구원(parkjh1@gsenc.com)

김 상 훈
㈜세일종합기술공사 기술연구소 이사(ksh9507@gmail.com)

1. 머리말

국내 건설사는 국내뿐 아닌 해외 건설시장에서도 각종 방파제, 호안, Oil & Gas Platform, 에너지 터미널 및 해상교량 프로젝트를 수주하여 시공 중에 있다. 해상공사는 파랑, 조위, 조류, 바람, 기압 등 해양외력의 영향을 적접적으로 받으므로, 공사 일정을 수립하거나 시공을 수행하는 동안 해양외력에 대한 검토가 필수적이다. 바지선의 전복, 해상작업 선단 파손 및 침수 등은 귀중한 생명 및 재산 피해가 동반되는 해양사고이므로(<그림 1>), 이러한 사고를 미연에 예방하고 안전한 공사를 수행하기 위해서는 신속하고, 정확한 현지 공사해역의 해황예보정보가 반드시 반영되어야 한다. 하지만, 동남아, 아프리카, 중동 및 중남미의 일부 국가들은 자체 해황예보 기술이 부족하여 해상공사 중 안전사고 발생확률이 선진국보다 높으므로, 전술된 해역에서 해상공사를 수행하기 위해서는 해당 프로젝트 해역의 지형 및 수심 등의 상세정보가 반영된 신뢰도 높은 해황예측서비스의 활용이 요구된다.



(a) 바지선 전복



b) 해상작업선 파손 및 침수

▲ <그림 1> 해상공사 사고사례

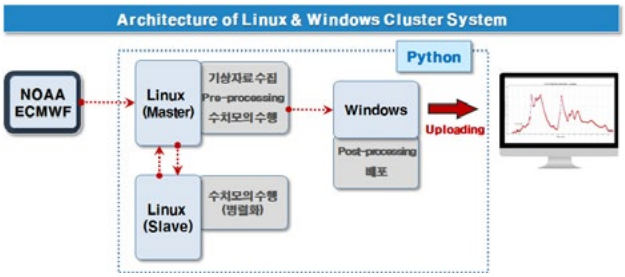
과거 해황예측기술은 슈퍼컴퓨터 보유 및 기상 계측망을 구축하여 운영이 가능한 국가기관의 전유물이었으나, 최근 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 전지구 해역을 대상으로 해양예보 Data를 무료공개하고 있고, 각종 IoT(Internet of Things) 기술이 보편화 된 후, 민간기관과 개인도 일정 품질 수준 이상의 해황예보시스템 구축이 가능하게 되었다. 이러한 IoT기술, 무료예보 Data, 전산서버 구축 및 해양물리에 대한 전문지식을 결합하여 건설사 자체적으로 해황예보시스템을 구축하고 운영한다면, 치명적인 해양외력에 대비하여 신속한 예보를 제공함으로써 보다 안전한 해상공사를 수행할 수 있고, 공사 Risk를 사전에 예방할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구팀에서는 중동의 페르시아 만에 위치한 Bahrain 해역에서 수행한 Bahrain LNG Import Terminal 해상공사 프로젝트 시공해역을 대상으로 파랑예측시스템을 자체 구축하여, 시범적으로 운영하였다. 구축된 시스템은 공

사당일을 기준으로 매일 NOAA 해양예보자료를 활용하여 향후 7일간의 파랑추이를 하루 2회씩 SWAN모델을 활용하여 수치계산하고, 자동으로 파랑예측보고서를 작성하여 시공현장 관리자에게 E-mail 전송이 가능하도록 하였다. 또한, Beta Version의 파랑예측시스템을 구축하여, Global 선진사의 유료 파랑예보서비스 결과와 상호 비교하여 그 적용성을 확인하였다.

2. 파랑예측시스템 구축

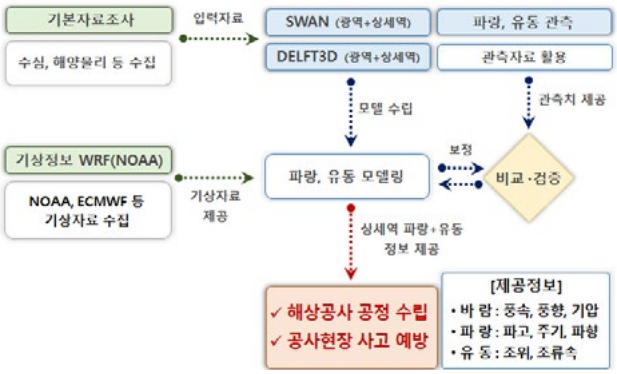
파랑예측시스템 구성체계는 <그림 2>에 도시된 바와 같이 기상자료 수집, 전처리 및 수치계산을 중심적으로 도맡아 실행하는 Linux 운영체계 파트와 계산된 결과를 수집·분석 및 사용자에게 배포하는 등의 역할을 수행하기 위한 Windows 운영체계 파트로 구성하였다. Linux는 1개의 Master node와 1개 이상의 Slave node로 구성된다. 이는 Hurb를 통해서 병렬로 연결되어 수치작업에 필요한 정보를 주고받을 수 있게 설계되고, 각 컴퓨터의 사양에 따라 수치계산에 필요한 실질적인 계산시간이 결정되므로 CPU 및 RAM 등이 높은 사양의 컴퓨터로 구축할 것을 추천한다. 그러나 Windows의 경우 본 과업에서 수행되는 역할은 계산된 결과를 수집하여 Post-processing을 수행하고, 이를 사용자에게 배포하는 목적에 중점을 두므로 비교적 저사양의 컴퓨터를 사용한다 하더라도 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.



▲ <그림 2> 파랑예측시스템 구성체계

<그림 2>에 도시된 구성체계의 내용을 보다 상세히 설명하면 다음과 같다. 우선 Linux에서는 Master node에서 기상자료를 Download 한다. 수집되는 자료의 용량에 따라 Slave Node에서 분담할 수 있도록 설정가능하며, 이때는 기상자료 데이터 용량 및 파일개수를 효율적으로 배분하여 Download를 진행한 다음, 각각의 Node로 저장된 자료를 다시 Master node에 통합하여 저장한다. 전술된 방법으로 수집된 기상자료는 Master node에서 Pre-processing 과정을 통해 수치모델의 입력자료로 활용이 가능하도록 재구성되고, 각각의 Node에 전달되어 해양물리수치해석 연산프로그램을 실행한다. Linux에서 수행된 해양물리 수치해석 실험결과는 최종적으로 Windows에서 수집하여 Post-processing 과정을 거쳐 예측결과를 분석하고, 간단한 보고서 형태로 자동으로 작성되고 배포된다. 앞에 기술한 일련의 모든 과정들은 Python 프로그램을 활용하여 일괄 자동으로 수행된다.

파랑예측시스템 구동 개념도를 <그림 3>에 정리하여 도시하였고, 다음과 같은 6개의 단계로 구성된다. 먼저 1)기상자료를 수집하는 단계, 2)그 기상자료를 수치모델의 입력형식으로 변환하는 Pre-processing 단계, 3)수치모델을 구축하고 실행하여 연산하는 단계, 4)수치결과를 수집하고 분석하여 결과를 도출하는 Post-processing 단계, 5)마지막으로 최종결과를 사용자에게 배포하는 단계, 6)전술된 모든 과정의 자동화 구축 단계로 분류된다. 전술된 각 단계에서의 내용을 아래에 보다 상세히 설명하였다.



▲ <그림 3> 파랑예측시스템 구동 개념도

◆ 2.1 기상자료 수집

파랑예보를 수행할 목표해역의 수치해석에 기초적인 입력자료로 NOAA에서 제공하는 해양기상 예측자료가 활용되며, 전술된 자료는 NOAA의 GFS(Global Forecast System)로부터 Download한다. NOAA에서는 매일 00시, 06시, 12시, 18시에 하루 4번 6시간 간격으로 자료를 배포하고 있으며, 최대 384시간(16일)까지 grib 형태의 예측자료를 제공하고 약 2주간 데이터를 보존하고 있다.

또한 배포되는 기상자료 해상도에 따라 격자의 크기가 각각 0.25도, 0.5도, 1.0도의 간격으로 구성되어 있으며, 모든 예측자료들은 5일까지 1시간 간격, 그 후로 10일까지는 3시간 간격, 마지막인 16일까지는 12시간 간격으로 자료가 구성되어 있다.

◆ 2.2 Pre-processing

수집된 기상자료를 수치모델의 입력자료로 변환하기 위하여 FORTRAN 프로그램을 활용하였으며, 변환된 입력자료는 관심해역에 해당하는 영역의 x 방향 풍속과 y 방향 풍속 및 기압장으로 구성되어진다. 각각의 파일들은 별도로 구축된 바람장 전용 격자망도와 상호 연동되어 수치모델에 입력된다.

◆ 2.3 모델 수립 및 실행

예측에 활용된 수치모델로써 해수유동 해석은 Delft3D 모형을 사용하였고 파랑해석 은 SWAN으로 구축하였으며, 전술한 두 가지 수치모델은 10분의 시간간격(dt)으로 Coupling되어 계산이 수행된다.

전술된 시간간격의 적절성을 판단하기 위하여 Case Study를 수행한 결과, 10분보다 적은 시간간격으로 수치모의를 수행하면 연산시간이 더 많이 소요됨에도 불구하고 수치해석 계산결과의 정확도가 탁월하게 높아지는 양상이 나타나지 않았다. 따라서, 수치해석에 활용한 시간간격으로 10분이 합리적이라 판단하였고, 이를 기반으로 수치모델을 수립하였다.

◆ 2.4 Post-processing

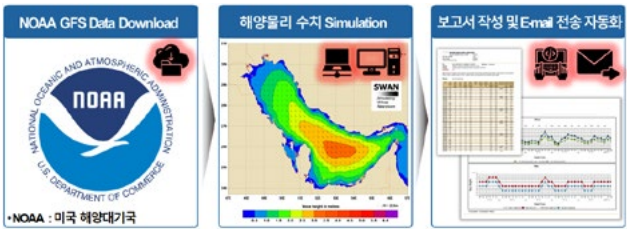
계산된 수치해석결과는 Windows에서 FTP(File Transfer Protocol)를 통해 Linux로부터 수집되도록 구성하였다. 수집된 결과는 Python 및 기존 Delft3D에서 제공되는 도구를 이용하여 시계열, 표, 벡터장, 장미도 등의 다양한 형태로 도시할 수 있으며, 예측결과보고서도 자동으로 작성이 가능하다.

◆ 2.5 배포 및 활용

Post-processing을 통해 도출된 결과는 사용자의 필요에 따라 웹상에 예측결과를 upload 하거나, 메일이나 문자 등을 활용하여 전송되도록 구축하였다.

◆ 2.6 파랑예측시스템 자동화

앞서 설명한 파랑예측시스템의 단계별 수행내용들은 <그림 4>에 도시된 바와 같이 NOAA 기상예측자료의 Download 부터 예측보고서 작성 및 메일발송 과정까지 파랑예보의 모든 단계들을 Python, Matlab 등의 프로그램을 효율적으로 Coding하여 자동으로 운영되도록 구축하였다.



▲ <그림 4> 파랑예보시스템 자동화 프로시저

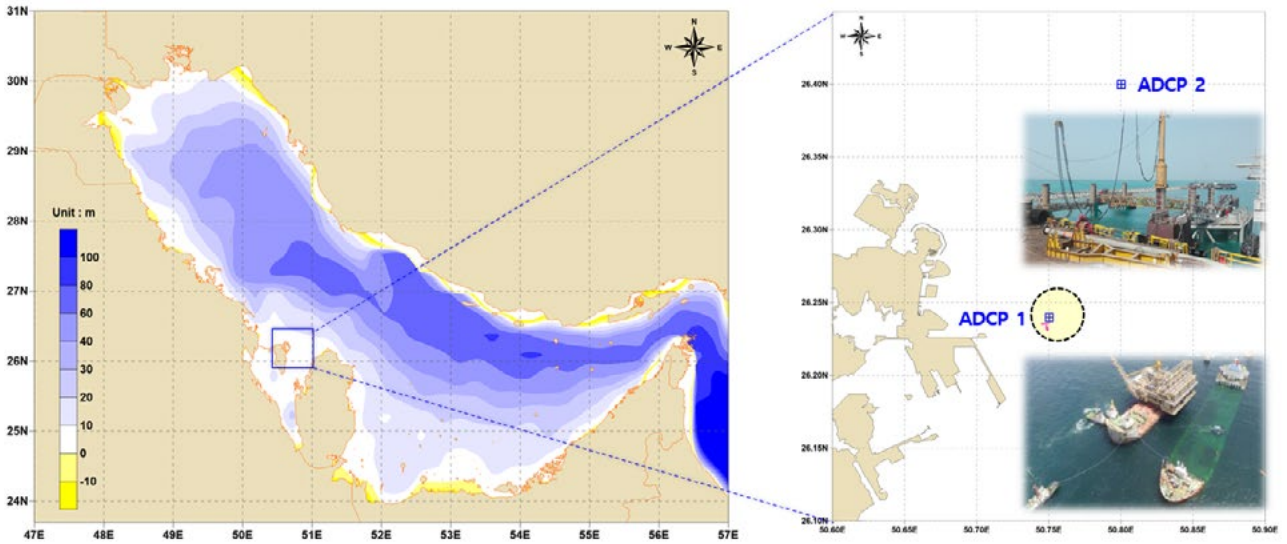
3. 수치모델 수립

◆ 3.1 수치모델 수립

중동에 위치한 Bahrain의 해상 LNG Terminal 프로젝트 현장이 개설되어 있었던(2017~2019년) 페르시아 만을 대상으로, 해상공정 수립 및 공사에 필요한 해양외력(파랑, 조석, 조류 등)을 시범적으로 예측하기 위하여 아래의 <표 1>과 같이 수치모델을 수립하였다. 이를 위하여 네덜란드에서 개발한 Delft3D 모델을 활용하여 유동현상을 재현하였고, 실시간 조위가 반영된 파랑변형 수치실험은 SWAN 모델을 활용하였다. <그림 5>에 수치모델을 구축한 페르시아 만의 전체 수심도와 Bahrain 프로젝트 대상 해역을 도시하였고, 더불어 수치모델 검증용으로 활용한 파랑관측 위치도 표시하였다.

▼ <표 1> 수치모델 개요

구 분		내 용
실험 목적		Bahrain 인근해역 해황재현 및 해양외력(조위, 조류 및 파랑) 예측
사용 모델		Delft3D & SWAN
실험 기간		1) 검증: 2016년 3~6월 - ADCP1(3/17~4/18, 5/04~6/03) 계측자료 활용 파랑검증 - ADCP2(3/17~4/09, 5/04~6/03) 계측자료 활용 파랑검증 2) 예측 : 2018년 3~8월 - NOAA GFS 활용하여 파랑 예측
실험 조건	해수 유동	14개 분조 외해 경계 조건
		(A0 + M2+ S2+ N2 + K2 + K1+ O1 + P1 + Q1 + MF + MM + M4 + MS4 + MN4)
	파랑 변형	1) NOAA NECP (파랑검증 활용) 2) NOAA GFS (파랑예측 활용)
격자 체계	계산 영역	9.3° × 6.4°
	격자 간격	0.0005°~ 0.05°
	격자세 분화	1) 해수유동 실험 : 1개 격자 2) 파랑 실험 : 4개 격자 Nesting



▲ <그림 5> Bahrain 프로젝트 해역 및 파랑관측 위치

수치실험 시 모델의 영역은 동서방향 9.3°, 남북방향 6.4°의 해역으로 설정하였고, 격자간격은 Bahrain 해역을 중심으로 최소 0.0005°, 최대 0.05°로 대상영역의 해상도를 최대한 반영하였으며, 이때 계산 격자망은 해수유동 1개, 파랑 4개의 Nested 격자로 구성하였다. 해수유동 및 파랑변형 수치실험은 Bahrain 해상공사 인근해역에서 구조물 설계를 위해 계측한 자료가 존재하는 기간인 2016년 3월부터 6월까지 수행하고, 모델의 검보정을 완료하였다. 또한, 2018년 3월부터 8월까지는 동일 해역을 대상으로 해상공사 현장 활용가능성을 판단하기 위하여 시범적으로 파랑예측용 수치모의를 수행하였다.

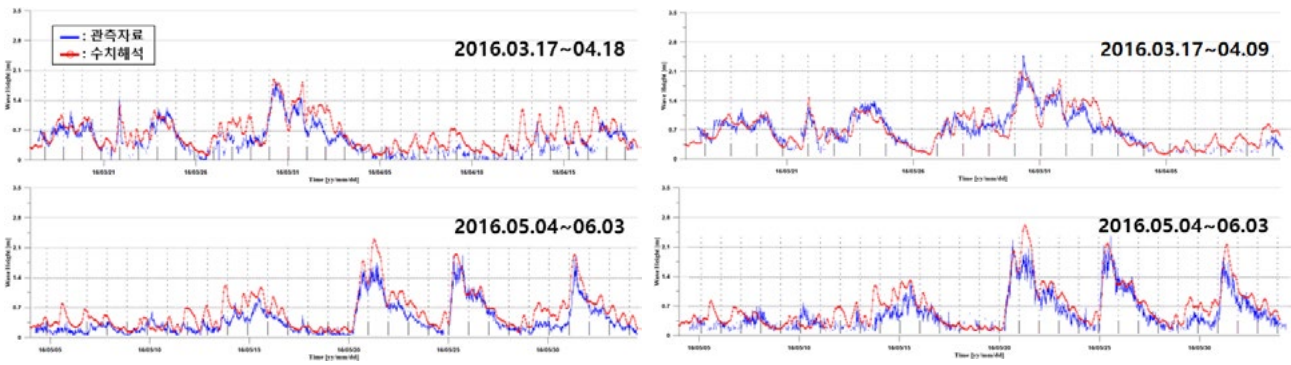
◆ 3.2 Bahrain 해역 수치모델 검증

Bahrain LNG Import Terminal 프로젝트의 설계를 수행하기 위하여 <그림 5>에서 도시된 바와 같이 프로젝트 인근해역 및 원해역에서 각각 약 2개월 동안 ADCP로 조위, 조류 및 파랑을 관측하였다. 계측된 파랑자료를 활용하여 수치해석결과와 비교하였고, 검증결과를 <그림 6>에 정리하여 도시하였다. 분석 결과, 일부 구간에서 관측자료와 수치해석결과가 차이를 조금 보였으며, 특히 6월 21일 경에는 수치결과가 다소 높게 나타나긴 했으나, 전체적인 양상과 파고의 크기는 유사한 것으로 판단된다.

4. Bahrain LNG Terminal 해상공사 시범3적용

◆ 4.1 프로젝트 개요

Bahrain LNG Import Terminal 프로젝트는 Bahrain 국영 석유가스 투자청인 Naga-holding이 Bahrain 내부의 에너지수요 증가에 맞춰 안정적인 LNG 가스 공급을 목적으로 추진한 Bahrain 정부의 국가전략사업이다. LNG 수입터미널은 하루 최대 약 226억 5,000만 ℓ 의 LNG 공급이 가능하며, 이



(a) 해상현장 인근역(PC1, ADCP 1)　　(b) 해상현장 외해역(PC2, ADCP 2)

▲ <그림 6> 파랑관측자료 및 수치해석 결과 비교

는 LNG 발전소 가동으로 인한 전력 공급 향상에 충분히 이바지할 것으로 예상된다. 전술한 수입터미널의 공사는 수도 Manama의 동쪽 Hidd 산업지역으로부터 5.4km 떨어진 해역에 방파제, LNG선 및 FSU (Floating Storage Unit, 부유식 저장선박)의 접안시설과 LNG 기화설비를 설치하고, 기화된 가스 이송용 해저 파이프라인 설치하고, 육상에서 상업가스로 변환시키기 위한 N2 생산 및 혼합설비 공사 등을 포함하여 32개월 동안에 설계하고 시공하는 과업이다.



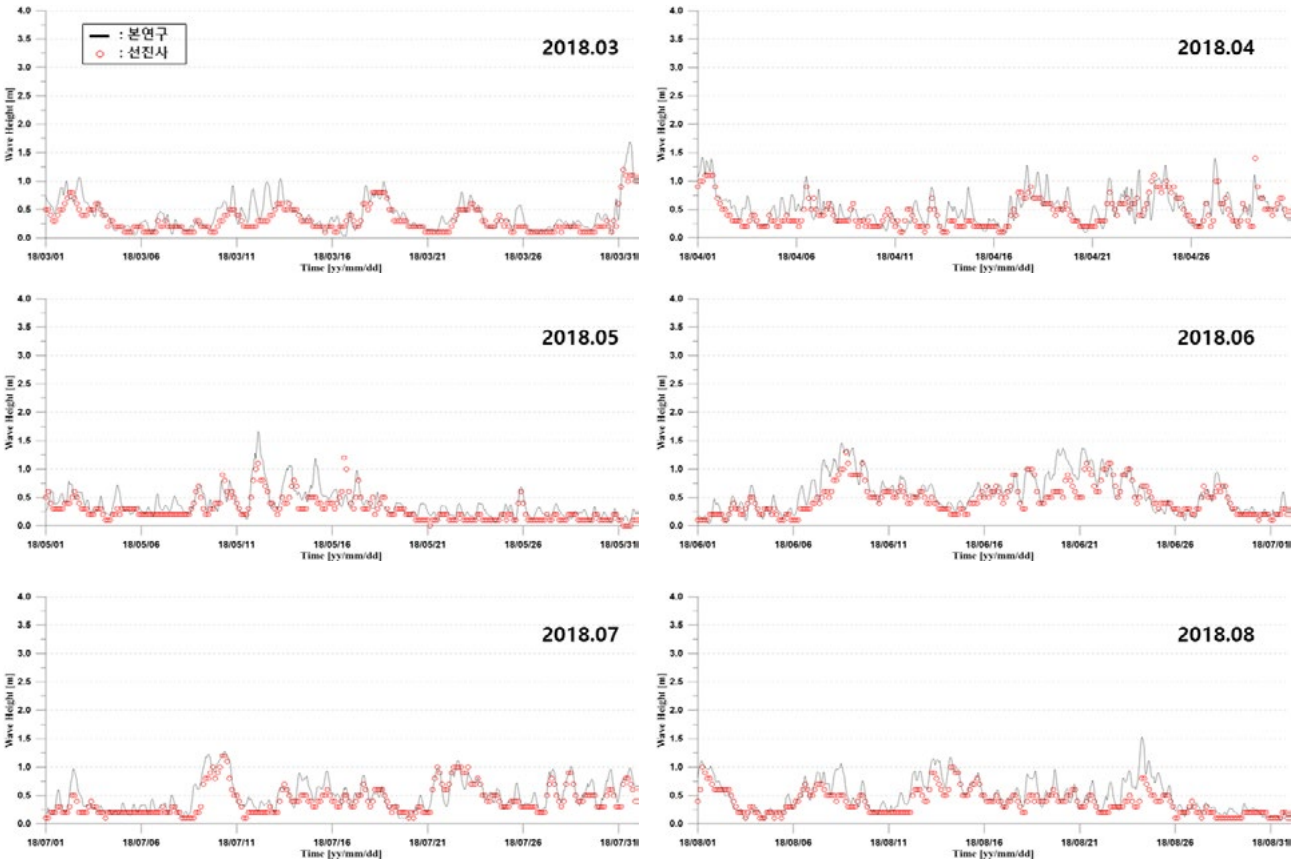
(a: 해상구조물, b: LNG 육상 인수설비, c: LNG 하역 시운전)

▲ <그림 7> Bahrain LNG Import Terminal 프로젝트 모습

<그림 7>에 (a)해상터미널을 구성하고 있는 각종 해상구조물들과 (b)육상의 LNG 인수설비 및 (c)LNG 터미널의 시운전 모습을 각각 도시하였다. 도시된 바와 같이 LNG 하역 시 정온도를 확보하기 위하여 500m 길이의 방파제를 설치되었고, 액화 LNG를 기화시키기 위한 7,200 ton 중량의 Re-gasification Platform을 육상에서 제작하여, Float-over 공법을 활용하여 기설치된 3,200 ton의 Jacket 위에 안착시켰다. 또한, 해상터미널로부터 해안까지 5.4km 구간에 걸쳐 기화된 LNG를 이송하기 위한 해저 파이프라인을 설치하였고, 해안부터 육상의 LNG 인수설비 공사부지까지 기존의 항만시설 및 산업도로를 개착하지 않도록 HDD(Horizontal Directional Drilling) 공법을 적용하여 파이프라인을 매설하는 공사를 완료하고, 전체 LNG 공급시스템의 시운전도 안전하게 완료하였다.

◆ 4.2 파랑예측시스템 시범적용 결과

LNG 터미널 해상공사를 수행하기 위하여 현장에서는 현지 기상 예보자료와 글로벌 선진사가 제공하는 유료 해황예보서비스들을 종합적으로 판단하여 해상공정 수립에 면밀히 활용하



▲ <그림 8> 파랑예측결과(유의파고) 비교 (Global 선진사 vs. 본 연구팀)

였다. 전술한 글로벌 선진사는 전세계 해역에 해황정보예측서비스를 제공하고 있으며, 전통과 역사가 오래되고 관련 업무에 충분한 경험 및 전문기술을 확보한 업체이다.

본 연구팀은 전술한 선진사의 예보서비스 결과를 Benchmarking하여 자체적으로 파랑예보시스템을 구축하고, 2018년 3월부터 8월까지 6개월간 시범적으로 운영하였다. 운영기간 동안 자체 예보결과와 선진사의 유의파 결과를 서로 비교하여 <그림 8>에 도시하였고, 오차분석한 결과로서 Bias가 0.03, RMSE가 0.18로 산출되어 진폭 및 위상 예측결과가 유사한 것으로 판단되었다. 현지 기상계측 자료 및 기상청 예보자료 없이 NOAA의 GFS 자료만을 입력자료로 활용하여 도출한 예측결과이므로 <그림 8>에 나타난 바와 같이 두 예보의 차이가 일부 발생하긴 하였다. 하지만, 전반적인 파랑예보추이 양상이 유사하게 나타났으므로, 해상시공현장에서 타사의 해황예측서비스 결과를 중복 검토할 수 있는 판단용 참고자료로 충분히 활용할 수 있으리라 판단된다.

5. 맺음말

본 연구에서는 해안/해양 구조물이 포함된 건설 프로젝트의 해상공사 일정을 보다 효율적이고 안전하게 수립할 수 있도록, 당사가 수행한 Bahrain LNG Import Terminal 프로젝트 현장이 위치하였던 페르시아 만의 Bahrain 해상을 대상으로 자체 파랑예보시스템을 시범적으로 구축하고 운영하였다. 예보시스템의 파랑수치모델 결과는 현장 해역에서 계측된 파고자료와 상호 비교하였고, 검보정 작업을 수행하여 예보의 신뢰성을 확보하였다. 또한, 자체 구축한 예보시스템을 2018년도 현장공사 기간 중 약 6개월 간 시범운영하고 글로벌 선진사의 유료 예보서비스 결과와 상호 비교하여 두 결과의 유사성을 확인함으로써, 구축한 파랑예보시스템의 현장 활용 가능성을 확인하였다.

향후, 페르시아 만 외의 동남아 및 아프리카와 같은 해외 해상공사 현장의 수요를 파악하여 예보가능한 해역을 확대 구축한다면, 해상공사의 안전사고 발생 가능성을 사전에 예방하고 기술적용 영역을 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

Deltares, 2018a. Delft3D-FLOW User Manual.

Deltares, 2018b. Delft3D-WAVE User Manual.

Matlibplot, https://matplotlib.org/

NOAA/National Weather Service,(2020). NOAA Operational Model Archive and Distribution System. [Online] Available at: <https://nomads.ncep.noaa. gov/pub/data/ nccf/com/gfs> [Accessed October 2020].

Python, https://www.python.org/

[감수 : 고광오(zeus@hdec.co.kr)]

머신러닝을 이용한 태풍 시 실시간 유의파고 예측



오 지 희
서울대학교 건설환경종합연구소
선임연구원
(wld12@snu.ac.kr)



서 경 덕
서울대학교 건설환경공학부
명예교수
(kdsuh@snu.ac.kr)

1. 머리말

우리나라는 해마다 태풍으로 인한 인명 및 재산 피해를 겪고 있다. 태풍은 폭풍 해일 및 고파랑을 일으키며, 해안 저지대 침수에도 영향을 미치는 등 해안 지역에서의 피해가 크다. 최근 들어 태풍의 빈도와 강도가 증가하고 있어서 그 피해가 커지는 추세이며 (오 등, 2011), 이로 인한 피해를 예방하기 위해 다각적인 연구가 이루어지고 있다. 특히, 인공신경망과 같은 머신러닝 기반의 파랑 예측 기술에 대한 관심이 높아지면서 국내외에서 다양한 연구가 진행되고 있다 (Deo et al., 2001; Londhe and Panchang, 2006; Zamani et al., 2008; Oh and Suh, 2018).

인공신경망은 물리적으로 정확한 이해가 없이도 유용하게 활용할 수 있어서 다양한 분야에서 활용되고 있으나, 입력 자료 및 결과에 전처리 과정이 없이는 비정상성을 갖는 자료를 다루는 것에 한계가 있다 (Cannas et al., 2006). 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위하여 인공신경망과 다른 기술들을 결합한 연구들이 수행되고 있다 (Deka and Prahlada, 2012; Prahlada and Deka, 2015; Dixit and Londhe, 2016; Oh and Suh, 2018a; Oh and Suh, 2018b). 웨이블릿 분석과 인공신경망을 결합한 모델 (WNN 모델)은 이러한 한계를 극복하기 위해 개발된 모델로 기존의 인공신경망 모델보다 높은 정확도를 보여주고 있다. 그러나 WNN 모델은 그 지점의 파고를 입력 자료로 이용하여 각 선행기간에 대한 파고를 예측하는데 단기 예측에서는 비교적 정확도가 높은 편이었으나 12시간 이상의 장기 예측에서는 그 정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다 (Deka and Prahlada, 2012; Prahlada and Deka, 2015). Dixit and Londhe (2016)은 WNN 모델을 사용하여 5 개의 주요 허리케인에 대하여 36시간 선행기간까지 극한 파랑을 예측하였고 매우 높은 정확도를 보여주었으나 2년 이상의 방대한 자료를 학습시켜야 하는 단점이 있다. 파랑 예측 모델에서는 파랑과 기상의 상관관계를 반영하는 것이 매우 중요하고 선행기간이 증가할수록 더욱 그러하다. 그러나 기존의 인공신경망 모델 또는 WNN 모델은 기상장과 파랑장 간의 상관 관계를 해석하는 데 어려움이 있고, 또한 하나의 모델로 여러 지점의 파고를 동시에 예측함에 어려움이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 Oh and Suh (2018b)는 인공신경망과 경험직교함수분석 (EOF analysis)과 웨이블릿 분석을 결합한 EOFWNN 모델을 개발하였고 동해에서의 8 개 지점에서의 상시 유의 파고를 예측하였다. 하나의 모델을 이용하여 여러 지점의 파고를 동시에 예측하였고, 공간적으로 분포하는 기상 자료와 파랑 간의 상관 관계를 반영하여 기존의 WNN 모델보다 높은 정확도를 보여 주었다.

본 연구에서는 선행 연구를 바탕으로 기상 변수와 파랑의 공간적 상관성을 반영하고, 비정상성을 갖는 자료를 다루기 위하여 EOFWNN 모델을 이용하여 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링 (2019) 기간 동안 12개 지점에서의 24시간, 48시간 선행 기간에 대하여 유의파고를 예측하였다.

2. 자료

본 연구에서 사용한 기상 자료는 미국 국립해양대기국 기후데이터센터 (NOAA/CDC)에서 제공하는 the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and National Center for Atmospheric Research (NCAR) 재분석 자료를 사용하였다. 2.5 ° × 2.5 °의 해면기압과 T62 가우시안 격자의 10 m 상공에서의 풍속자료를 사용하였다. 공간 영역은 태풍경로를 반영하는124 °~ 132 ° E, 30 °~ 40 ° N에 해당하고 시간 영역은 6시간 간격의 자료를 파고 자료와 같은 1시간 간격으로 내삽하여 사용하였다. 태풍 차바 (2016)는 기상청 기준 최저 기압 905 hPa, 최대 풍속 (10분 평균) 50 m/s의 중형의 매우 강한 태풍이다. 발생일은 2016년 9월 29일이고 소멸일은 2016년 10월 6일 이다. 태풍 링링 (2019)은 기상청 기준 최저 기압 940 hPa, 최대 풍속 (10분 평균) 47 m/s의 중형의 매우 강한 태풍이다. 발생일은 2019년 9월 2일이고 소멸일은 2019년 9월 8일이다. 본 연구에서의 예측 기간은 태풍 차바 (2016)의 경우 한반도 직접 영향 기간인 2016년 10월 3일부터 2016년 10월 6일에 해당하며, 태풍 링링 (2019)의 경우 2019년 9월 5일부터 2019년 9월 8일에 해당한다.

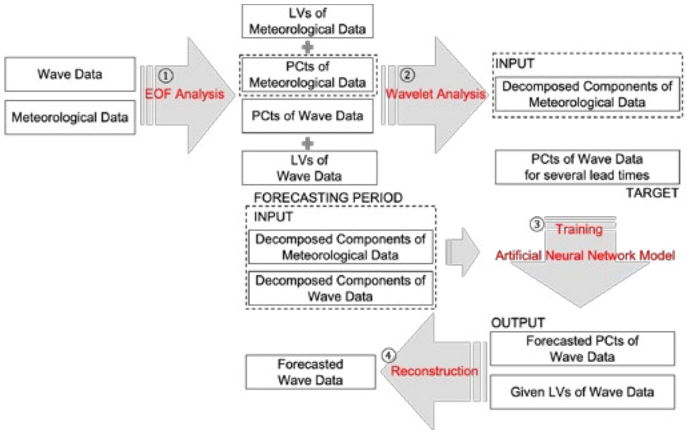
파랑 자료는 기상청에서 제공하는 7 지점 (거문도, 거제도, 마라도, 서귀포, 울산, 칠발도, 통영)과 국립해양조사원에서 제공하는 4 지점 (남해동부, 대한해협, 제주남부, 제주해협), 해양수산부에서 제공하는 1 지점 (경주수념말) 에서의 1 시간 간격 관측 자료를 사용하였다.

3. 모델의 구성

◆ 3.1 EOFWNN 모델

EOFWNN 모델은 인공신경망과 경험직교함수 분석과 웨이블릿 분석을 결합한 모형이다. 경험직교함수 분석은 시공간 자료를 공간과 시간의 패턴으로 분해하는 데 활용되고 물리적 과정을 해석하는 데 유용하다. 본 연구에서는 경험직교함수를 파랑과 기상 자료 사이의 상관 관계를 해석하는 데 사용하였다. 또한 경험직교함수 분석은 여러 지점에서의 파고를 동시에 예측할 수 있게 한다. 그런데 경험직교함수 분석은 자료의 정상성을 가정하고 있으나, 지구물리학적 변수나 기상 변수 등은 주기적으로 시간에 의존적인 공분산을 갖거나 비정상성을 갖는다. 따라서 이러한 변수들은 주기성을 제거한다 할지라도 정상성을 가정하는 것이 적절하지 않다 (Kim et al., 2015). 경험직교함수 분석의 정상성을 해결하기 위하여 비정상성을 갖는 자료 분석에 유용한 웨이블릿 분석을 모델에 적용하였다.

<그림 1>은 EOFWNN 모델의 개요도로 모델링 과정을 보여준다. 자료를 공간과 시간으로 우선 분해를 시킨 뒤 정상성 문제를 해결하는 과정으로 진행하기 때문에 자료에 경험직교함수 분석을 우선적으로 수행한 뒤 웨이블릿 분석을 수행하고 이로부터 생성되는 성분들을 인공신경망의 입력 자료로 이용하게 된다. 기상 자료만 인공신경망의 입력 자료로 사용하여 유의 파고를 결과로 얻는 과정으로 우선 기상 자료와 파고 자료에 대하여 각각 경험직교함수 분석을 수행한다. 경험직교함수 분석을 통해 생성된 기상 자료의 시간 성분 (PCts)들에 대하여 웨이블릿 분석을 수행한다. 이 때, 웨이블릿 함수는 Coiflet을 사용하였고 7 단계로 분해하였으며 MATLAB toolbox를 사용하였다. 기상 자료의 분해된 웨이블릿 성분인 근사 (approximation)와 세부 성분 (detail) 중 근사값 만을 인공신경망의 입력 자료로 사용하고 파고 자료의 PCts를 타겟으로 하여 학습을 수행한다. 인공신경망의 알고리즘은 Conjugate gradient Powell-Beale (CGB)를 사용하였고 MATLAB toolbox를 이용하였다. 이렇게 학습시킨 모델의 가중치 (weight)와 편차(bias)를 이용하여 테스트 시점의 기상 자료의 분해된 웨이블릿 성분을 모델의 입력 자료로 넣어 주고 24 시간 선행 기간의 파고 PCts를 예측한다. 예측된 파고의 PCts와 기존에 경험직교함수를 통해 계산된 파고의 공간 성분 (LVs)을 재결합하여 유의 파고를 생성한다.



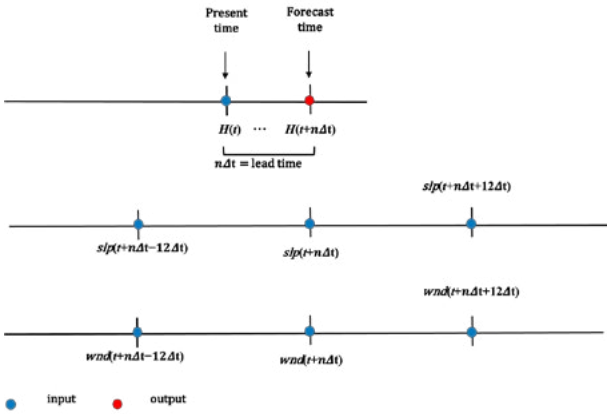
▲ <그림 1> EOFWNN 모형의 개요도

◆ 3.2 모델의 시나리오

본 연구에서는 기상 자료의 시간 지연 효과를 고려하기 위하여 파고를 예측하고자 하는 시점 (24시간 또는 48시간 선행 기간)의 기상 자료와 그 시간으로부터 전후 12시간의 시점을 예측 변수로 사용하였다. <그림 2>는 이를 설명하는 그림으로 요약하면, H(t+nΔt)를 예측하기 위하여 wnd(t+nΔt-12Δt), wnd(t+nΔt), wnd(t+nΔt+12Δt), slp(t+nΔt-12Δt), slp(t+nΔt), slp(t+nΔt+12Δt)를 예측 변수로 사용하였고, 이 때 H(t)는 현재 파고의 PCt, H(t+nΔt)는 예측하고자 하는 시점의 파고

PCt, wnd(t+nΔt), slp(t+nΔt)는 예측하고자 하는 시점의 풍속 및 해면 기압의 웨이블릿 성분들, wnd(t+nΔt-12Δt), slp(t+nΔt-12Δt)는 예측하고자 하는 시점으로부터 12시간 이전의 풍속 및 해면 기압의 웨이블릿 성분들, wnd(t+nΔt+12Δt), slp(t+nΔt+12Δt)는 예측하고자 하는 시점으로부터 12시간 이후의 풍속 및 해면 기압의 웨이블릿 성분들이다. nΔt는 선행 시간이며 본 연구에서는 24시간과 48시간이고 Δt는 한 시간이다.

실험은 태풍 차바 (2016) 및 태풍 링링 (2019)의 직접 영향 기간에 수행되었다. 학습은 현재 시점 바로 이전 90 일에 대하여 수행되었다. 보통은 학습이 전체 자료의 70 %, 테스트가 30 %로 이루어지지만 본 연구의 경우, 매번 테스트마다 학습을 수행하여 학습 기간의 계절적 영향 및 웨이블릿 분석의 단말 효과 (end effect)를 감소 시켰다.



▲ <그림 2> EOFWNN 모델의 공식화

4. 모델 결과 및 해석

모델의 예측 정확도를 평가하기 위하여 상관 계수 (R), index of agreement (IOA), 정규화된 평균제곱근오차 (NRMSE) 세 가지 인덱스를 사용하였다.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_i (x_i - y_i)^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (1)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_i (x_i - y_i)^2}{\sum_i (|y_i - \bar{y}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i (x_i - y_i)^2}{n}}}{\bar{x}} \quad (3)$$

여기서 $x_i, y_i, \bar{x}, \bar{y}$ 그리고 n은 관측된 파고, 예측된 파고, 관측된 파고의 평균, 예측된 파고의 평균, 그리고 관측값의 개수를 의미한다.

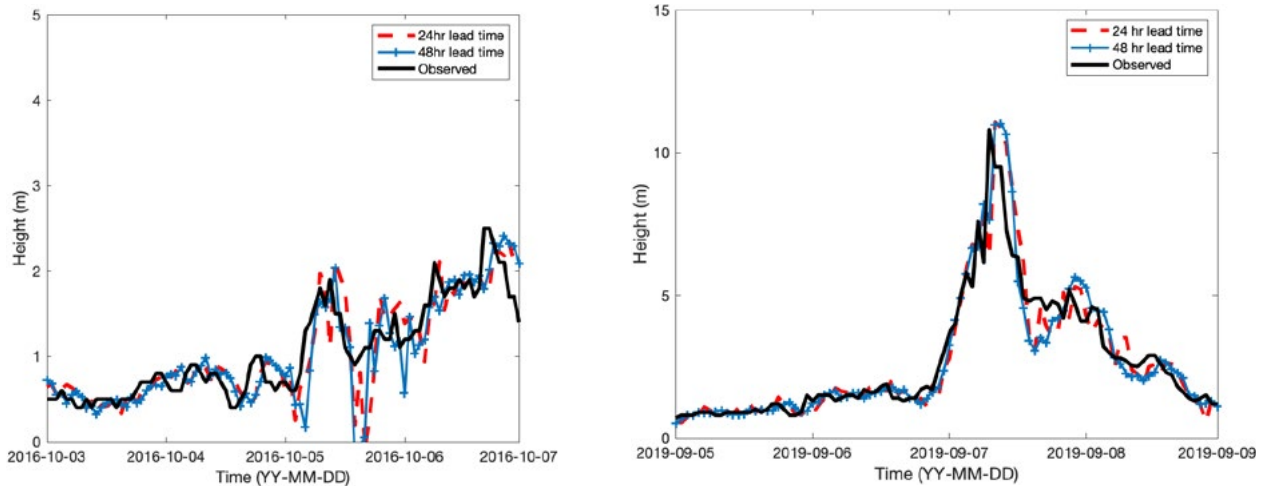
<표 1>은 EOFWNN 모델을 이용하여 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링 (2019) 기간 동안 각 선행 기간에 대하여 예측된 유의 파고의 예측 정확도를 보여준다. 이 때 학습 기간은 90

▼ <표 1> 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링 (2019)의 각 선행 기간에 대한 EOFWNN 모델 예측 성능 비교

태풍	선행시간 (hr)	Index	칠발도	마라도	제주 해협	제주 남부	서귀포	거문도	통영	남해 동부	거제도	대한 해협	경주 수념말	울산
차바 (2016)	24	IOA	0.914	0.937	0.935	0.947	0.945	0.934	0.917	0.917	0.914	0.922	0.918	0.978
		R	0.842	0.889	0.890	0.908	0.909	0.882	0.853	0.855	0.848	0.861	0.870	0.959
		NRMSE	0.306	0.421	0.489	0.401	0.518	0.557	0.657	0.637	0.635	0.575	0.536	0.253
	48	IOA	0.907	0.950	0.935	0.961	0.959	0.940	0.920	0.914	0.936	0.943	0.925	0.967
		R	0.834	0.910	0.886	0.932	0.931	0.891	0.857	0.848	0.884	0.894	0.866	0.938
		NRMSE	0.322	0.375	0.485	0.341	0.442	0.532	0.638	0.640	0.544	0.483	0.488	0.297
링링 (2019)	24	IOA	0.963	0.976	0.982	0.974	0.984	0.987	0.982	0.988	0.990	0.986	-	0.942
		R	0.931	0.957	0.970	0.950	0.971	0.974	0.967	0.979	0.981	0.972	-	0.894
		NRMSE	0.313	0.237	0.221	0.242	0.206	0.169	0.216	0.190	0.165	0.183	-	0.250
	48	IOA	0.968	0.975	0.983	0.981	0.984	0.984	0.985	0.990	0.991	0.992	-	0.970
		R	0.941	0.955	0.967	0.966	0.970	0.969	0.971	0.983	0.982	0.985	-	0.943
		NRMSE	0.292	0.239	0.209	0.208	0.200	0.188	0.197	0.165	0.156	0.136	-	0.178

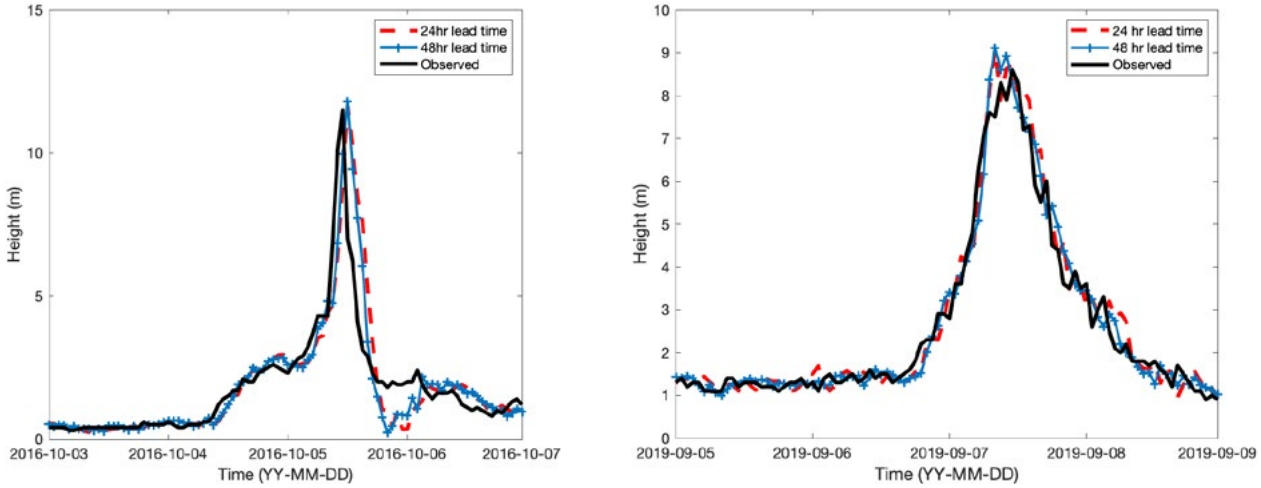
일에 해당한다. 태풍 차바 (2016)는 12지점에서의 파고 예측이 수행되었고, 태풍 링링 (2019)은 경주 수념말을 제외한 11 지점에서의 파고 예측이 수행되었다. 24시간 선행 기간의 예측 정확도를 보면 태풍 차바 (2016)는 IOA가 칠발도와 거제도에서 0.914로 가장 낮고 울산에서 0.978로 가장 높다. 태풍 링링 (2019)의 경우는 IOA가 울산에서 0.942로 가장 낮고 거제도에서 0.990으로 가장 높다. 48시간 선행 기간의 예측 정확도를 확인하면, 태풍 차바 (2016)의 경우, IOA가 칠발도에서 0.907로 가장 낮고 울산에서 0.967로 가장 높다. 태풍 링링 (2019)에서는 칠발도에서 IOA가 0.968로 가장 낮고 대한해협에서 0.992로 가장 높다. 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링 (2019) 모두 높은 예측 정확도를 보여주고 있다.

<그림 3>부터 <그림 6>까지는 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링 (2019)의 칠발도, 거제도, 대한해협, 울산에서의 각 선행기간에 대한 유의파고 예측 결과를 보여준다. 그림을 보면 경향 뿐만이 아니라 최댓값에서 높은 정확도를 갖는 것을 볼 수 있다. 그런데 태풍 차바 (2016)의 경우에는 파고의 최댓값 이후에 예측 값의 안정성이 떨어지는 양상이 보이나 태풍 링링 (2019)에서는 심한 진동이 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 태풍 차바 (2016)와 달리 태풍 링링 (2019)의 위치가 한반도 서쪽에 지속적으로 위치하면서 태풍 통과 이전과 이후의 급격한 기상 변화가 없기 때문으로 보인다.



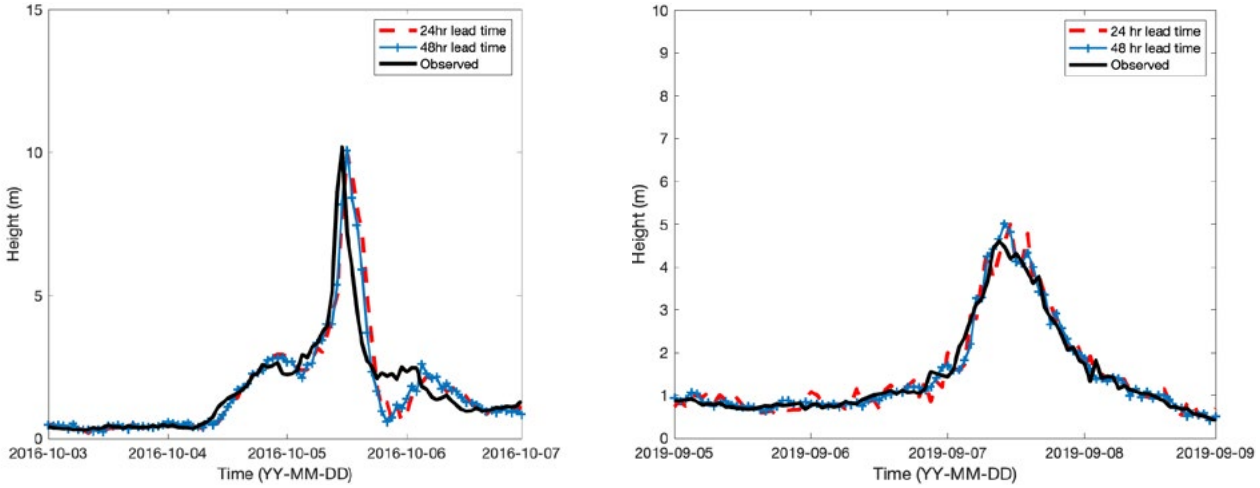
(a) 태풍 차바 (2016)　　(b) 태풍 링링 (2019)

▲ <그림 3> 칠발도에서의 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링(2019)의 각 선행 기간에 대한 유의파고 예측 결과



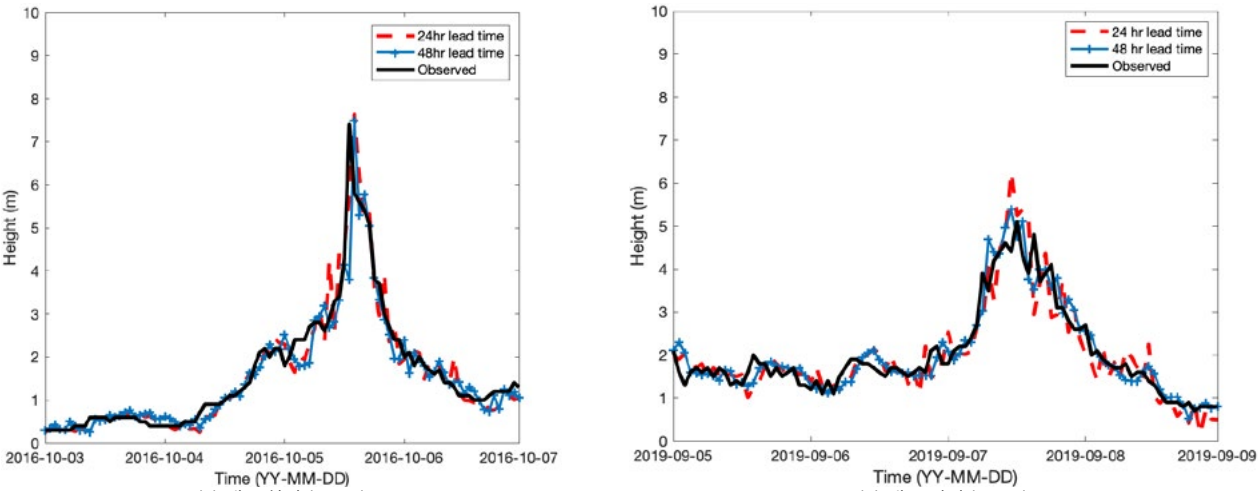
(a) 태풍 차바 (2016)　　(b) 태풍 링링 (2019)

▲ <그림 4> 거제도에서의 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링 (2019)의 각 선행 기간에 대한 유의파고 예측 결과



(a) 태풍 차바 (2016) (b) 태풍 링링 (2019)

▲ <그림 5> 대한해협에서의 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링 (2019)의 각 선행 기간에 대한 유의파고 예측 결과



(a) 태풍 차바 (2016) (b) 태풍 링링 (2019)

▲ <그림 6> 울산에서의 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링 (2019)의 각 선행 기간에 대한 유의파고 예측 결과

5. 맺음말

태풍 기간 동안의 실시간 유의 파고를 예측하기 위하여 인공신경망과 경험직교함수 분석, 웨이블릿 분석을 결합한 EOFWNN 모델을 이용하여 본 연구를 수행하였다. 태풍 차바 (2016)와 태풍 링링 (2019) 기간 동안 12지점에서의 24시간 및 48시간 선행 기간에 따른 유의 파고를 예측하였다. 기존의 머신 러닝 기법을 기반으로 한 파고 예측에서는 기상 변수와 파랑 간의 물리적 상관성을 반영하는데 어려움이 있고 특히, 태풍은 기상 변화가 급격하게 일어나기 때문에 파고 자료만을 이용하여 정확한 파고를 예측하는 데는 한계가 있을 수밖에 없다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 EOFWNN 모델을 이용하여 공간적으로 분포한 기상 변수로부터 여러 지점에서의 파고를 예측하였다. 또한 방대한 자료의 학습을 통해 예측을 수행하는 것이 아닌 90 일 정도의 파고 자료의 학습을 수행함으로써 학습에 대한 부담을 줄였고 실시간 학습을 통해 불확실성을 감소시켰다. 물론 실시간 학습을 위하여 관측하고자 하는 지점에서의 관측값이 실시간으로 반영이 되어야 하는 점과 예측 시점의 기상 예측 정보의 정확도 역시 중요하다는 한계는 있다. 그럼에도 수치모델링과 비교하여 적은 시간이 소요되며 기존의 머신 러닝 모델과 비교하여 상당히 높은 정확도를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

이러한 방재 기술 개발로 태풍 발생 시 신속하고 정확한 대비가 가능하고 국가 재해 인프라를 강화시킬 수 있다. 기상 예보 등 다양한 분야에 적용하여 독자적인 머신 러닝 예측 기술을 확보하고 더 나아가 세계적으로 기상 예보 및 재난 방재 시스템 분야에서 선도 그룹으로 도약할 수 있을 것으로 기대 된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 해양산업수요기반 기술개발사업의 일환인 "인공지능 기반 파랑예측시스템 개발 (No.20190245)"의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

오지희, 서경덕, 김영오, 2011. 과거 60년 간 한반도에 영향을 미친 태풍의 강도 및 지속기간의 경향 분석. 대한토목학회지. 31 (2), 121-128.

Cannas, B., Fanni, A., See, L., Sias, G., 2006. Data preprocessing for river flow forecasting using neural networks: wavelet transforms and data partitioning. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C 31 (18), 1164–1171.

Deka, P.C., Prahlada, R., 2012. Discrete wavelet neural network approach in significant wave height forecasting for multistep lead time. Ocean Eng. 43, 32–42.

Deo, M.C., Jha, A., Chaphekar, A., Ravikant, K., 2001. Neural networks for wave forecasting. Ocean Eng. 28 (7), 889–898.

Dixit, P., Londhe, S., 2016. Prediction of extreme wave heights using neuro wavelet technique. Appl. Ocean Res. 58, 241–252.

Kim, K.-Y., Hamlington, B., Na, H., 2015. Theoretical foundation of cyclostationary EOF analysis for geophysical and climatic variables: concepts and examples. Earth Sci. Rev. 150, 201–218.

Londhe, S., Panchang, V., 2006. One-day wave forecasts based on artificial neural networks. J. Atmos. Ocean. Technol. 23 (11), 1593–1603.

Oh, J., Suh, K.-D., 2018a. Examining the effect of time lags of meteorological variables on a wave forecasting model. J. Coastal Res. 85, 1186-1190.

Oh, J., Suh, K.-D., 2018b. Real-time forecasting of wave heights using EOF – wavelet – neural network hybrid model. Ocean Eng. 150, 48-59.

Prahlada, R., Deka, P.C., 2015. Forecasting of time series significant wave height using wavelet decomposed neural network. Aquatic Procedia 4, 540–547.

Zamani, A., Solomatine, D., Azimian, A., Heemink, A., 2008. Learning from data for wind–wave forecasting. Ocean Eng. 35 (10), 953–962.

[감수 : 김순주(civilsj@poscoenc.com)]



학술기사

· 하구 부유사 농도에 대한 밀도류 효과의 데이터 기반 분석
· 심층신경망 및 신경망을 이용한 항내 파고 예측 사례
· 인공지능모델 해양기초정보 생산

하구 부유사 농도에 대한 밀도류 효과의 데이터 기반 분석



서 희 정
㈜혜인이엔씨 기술연구소 부장
(hibako@naver.com)



윤 현 덕
명지대학교 토목환경공학과 교수
(hdyoon@mju.ac.kr)



조 민 상
명지대학교 토목환경공학과 박사과정
(choms218@gmail.com)

1. 서론

하구는 강의 담수와 바다의 바닷물이 혼합되는 반폐쇄성 수역으로 담수와 조류, 파랑 또는 밀도차에 의한 복잡한 순환 패턴이 형성된다. 하구에서는 유입되는 담수와 해수의 밀도차이로 인한 염분 경사에 의해 성층이 형성되어 혼합효과가 저하되고 각 유체가 밀도차에 따른 이층류를 형성한다.

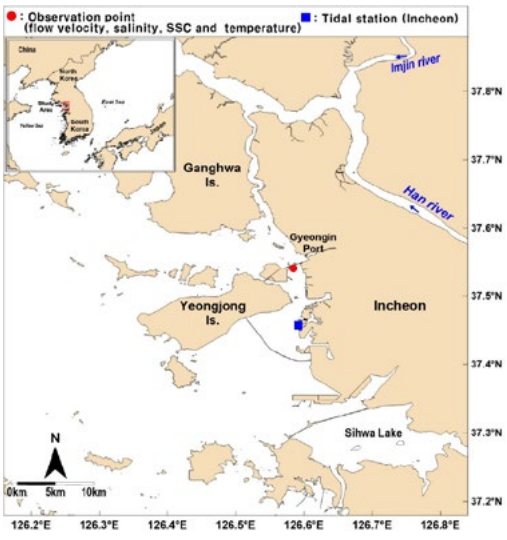
연구 대상지역인 경인항 일대는 한강 하구에 위치한 곳으로 하계시 다량의 담수 유입과 높은 조차로 인해 담수와 해수의 복잡한 흐름특성이 나타나며, 이는 조류, 염분 및 부유사 농도(Suspended Sediment Concentration, SSC)의 시공간적 분포에 영향을 미친다. SSC는 연간 1m가 넘는 퇴적으로 인해 문제가 발생하는 경인항의 퇴적 메커니즘을 이해하는 데 중요한 매개 변수로서, 하구의 특성과 SSC간의 상관관계에 대한 검토는 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 SSC와 관련한 다양한 수리학적 매개변수(조위, 조류, 수온·염분 등)를 조사하였으며, 데이터 기반 모델 중 하나인 인공신경망(Artificial neural network, ANN)에 현장조사 결과를 적용하여 하구의 SSC를 예측하는 데 중요한 수리학적 매개변수를 확인하였다. 데이터 기반 모델링은 하구의 복잡한 메커니즘을 귀납적으로 이해하기 위한 적절한 접근방법으로, ANN의 경우 인간 두뇌와 유사한 학습 프로세스 통해 입·출력 데이터 간의 관계를 식별할 수 있다. 특히 최근에는 원인과 결과가 명확하게 이해되지 않는 어렵고 복잡한 해안 퇴적 분야에 조사자료를 기반으로 빈번하게 활용되고 있다.(Singh, 2008; Van Maanen, 2010; Oehler, 2012; Yoon, 2013).

본 연구는 퇴적물 농도의 일반적인 예측 변수 뿐만아니라 ANN 모델링 결과로부터 퇴적물 이동 메커니즘을 파악하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 다양한 입력변수 조합을 통해 예측능력을 검토하고 밀도류 조건에서 퇴적물 농도에 대한 각 변수의 기여도를 분석하였다.

2. 현장 조사

현장조사는 인천지방해양수산청에서 발주한 "인천항·경인항 해양수리현상조사"의 <그림 1>의 경인항 인근의 1개 정점에 대해 2012~2015년까지 하계시 조류, 부유사, 수온·염분 및 파랑을 조사하였다. 동 기간의 자료중 본 연구에서는 담수의 하구특성을 검토하기 위해 비교적 강수량이 많고 누락된 데이터가 거의 없는 2012

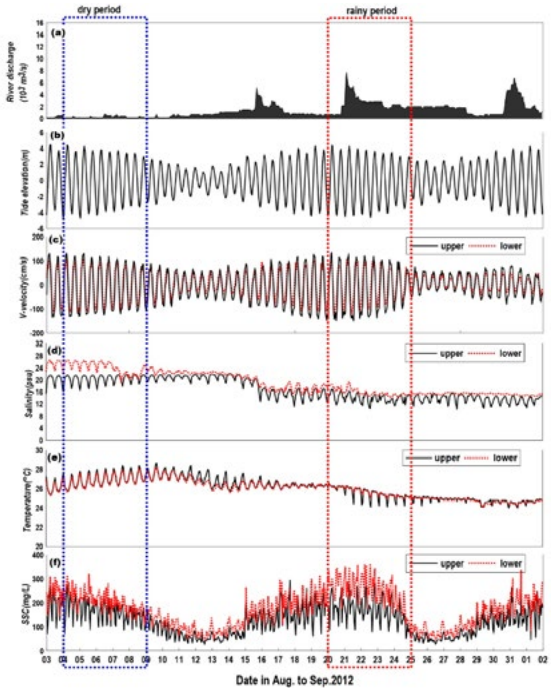


▲ <그림 1> 현장 조사지점

년(2012년 8월 3일~2012년 9월 2일)의 관측결과를 분석하였다. 타 기간에 비해 이 시기에는 태풍 볼라벤으로 인해 많은 강수가 발생하여 담수에 의한 하구의 수리학적 특성 분석의 적기이다.

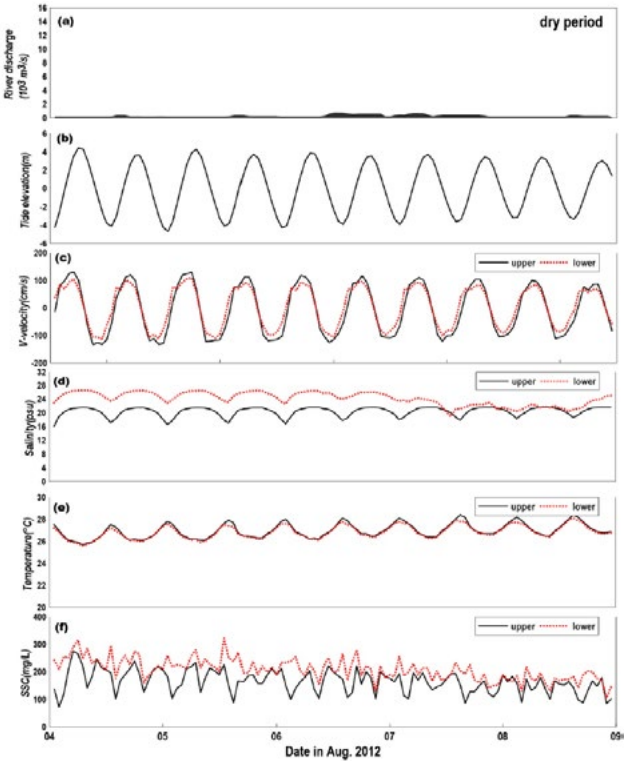
층별 조류, 부유사 농도 및 파랑은 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)를 사용하고, 수온 염분은 CTD-Diver를 사용하여 10분 간격으로 수층(표층 : 수면하 20%, 저층: 수면하 80% 설정)별로 관측하였다. 조위는 국립해양조사원의 인천 검조소 자료, 담수량은 한강홍수통제소의 팔당댐 방류량 자료를 활용하여 각 시계열 자료를 상호 분석하였다.

<그림 2>에 2012 년 하계에 관측한 성과를 각 조사 항목별로 비교하여 나타냈다. 이 기간 동안 평균 담수량은 1395.5㎥/s 였으나, 강수량이 적은 8월 4~9 일(건기)과 강수량이 많은 8월 20~25일(우기)의 방류량은 각각 248.9㎥/s 및 2577.7㎥/s로 많은 차이를 보였다.

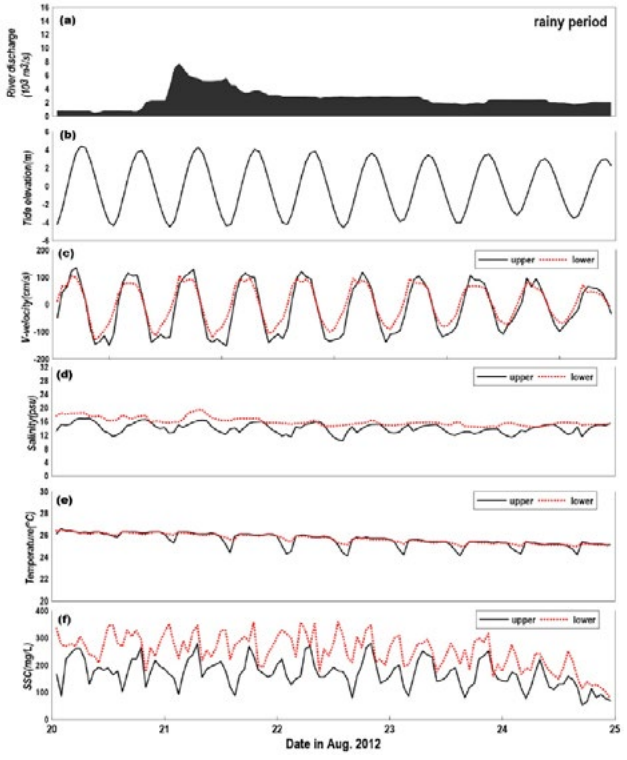


▲ <그림 2> 2012년 하계 관측 결과

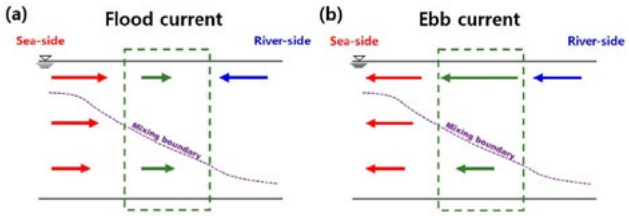
<그림 3, 4>는 <그림 2>의 건기와 우기 결과를 상세화한 결과이다. 건기와 우기에 대해 대조~소조시 9조석 주기를 설정하고 조사결과를 상호 비교하였다. 창·낙조 사이의 유속차는 건기에는 10cm/s 미만으로 나타났으며 표·저층간의 차이 또한 크지 않았다. 그러나 우기에는 창낙조 유속의 차이가 20cm/s으로 증가하고, 낙조시 표·저층 간 유속차이가 더 증가하였다. 이는 조류와 담수의 흐름 방향이 일치하는 낙조시 흐름이 강해지고, 하천 담수량이 증가함에 밀도가 낮은 담수의 표층 흐름이 강해짐에 따라 나타난 결과로 생각된다. 이러한 특성을 <그림5>에 설명하였다.



▲ <그림 3> 건기시 조사결과 시계열



▲ <그림 4> 우기시 조사결과 시계열



▲ <그림 5> 우기시 창·낙조시 연직 흐름특성

<표 1>은 표층/저층, 건기/우기 및 창조/낙조의 평균유속을 상호 비교하여 제시하였다. 낙조시 유속은 창조시 유속보다 빠르며, 표/저층의 유속비는 건기에 창조시 1.16, 낙조시 1.26이었다. 그러나 우기에는 표/저층 유속비가 창조시 1.19, 낙조시 1.48로 우기에는 낙조시 표/저층간의 유속비가 증가하였다. 이러한 결과로부터 한강의 담수 배출량이 증가함에 따라 낙조시 표층의 유속은 증가하는 반면, 저층에는 큰 차이가 없이 비교적 일정함을 유추할 수 있다. 이는 우기에 급증

▼ <표 1> 건기와 우기의 유속비교 결과

기간	조석주기	창조시			낙조시		
		저층	표층	표/저층비	저층	표층	표/저층비
건기	1	70.5	78.2	1.11	76.9	105.3	1.37
	2	85.2	91.1	1.07	76.4	103	1.35
	3	70	90	1.29	77	86	1.12
	4	59.9	82.7	1.38	70	84.3	1.2
	5	71.2	74.2	1.04	69.8	94.2	1.35
	6	73.5	77.2	1.05	66	85.7	1.3
	7	57.3	70.3	1.23	64.1	75.2	1.17
	8	53.1	68.3	1.29	68	77	1.13
	9	58.5	61.6	1.05	56.8	80.6	1.42
	평균	66.1	76.8	1.16	69.5	87.6	1.26
우기	1	73	92.8	1.27	67.8	95.9	1.41
	2	69.7	78.6	1.13	66.4	112.2	1.69
	3	71.8	74.6	1.04	64.5	109.2	1.69
	4	69	80.6	1.17	66.1	97.2	1.47
	5	67.8	75	1.11	56.7	86.3	1.52
	6	52.5	72.2	1.38	53.9	76	1.41
	7	47.6	58.3	1.22	49.8	65.1	1.31
	8	39.7	48.1	1.21	44.2	56.2	1.27
	평균	60.5	71.8	1.19	59	87.2	1.48

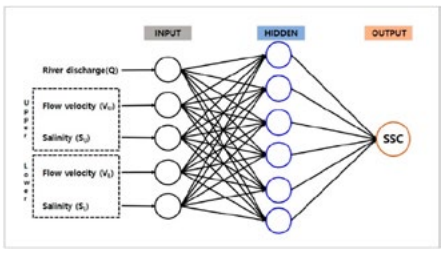
한 한강의 담수가 낙조시 밀도가 높은 해수 위의 표층에서 밀도차에 따라 흐름을 의미한다.

<그림 3(d), 4(d)>는 각각 건기와 우기의 표·저층의 염분도를 나타낸다. 평균 염분도는 건기에 20.4~24.2psu, 우기에 14.0~15.7psu이었다. 우기의 낮은 염분도는 하천에서 유입된 담수의 영향을 나타낸다. 건기에는 조석 주기에 따른 염분도 변화의 주기성의 나타난 반면, 우기시 저층의 염도변화는 조석주기에 의존하지 않고 비교적 일정하게 나타나 성층화로 인한 수직 혼합이 매우 제한적임을 확인할 수 있었다. 이는 수온(<그림 3(e), 4(e)>)에서도 유사한 경향을 보여주고 있다.

<그림 3(f), 4(f)>는 SSC의 변화를 보여준다. 건기에는 저층의 SSC(204.1~208.7mg/L)가 표층(155.6 ~173.3mg/L)보다 30% 더 큰 것으로 나타났으나, 우기에는 저층의 SSC(246.7~247.2mg/L)가 표층(164.8~169.1mg/L)보다 50% 더 커서, 표·저층간 SSC 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 건기와 우기 모두 표층의 SSC는 유사했으나, 우기에는 저층에서 SSC가 20% 증가하여, 담수에 의한 성층화가 수직 혼합을 감소시키고 저층의 부유사가 위로 이동할 수 없는 것으로 추정할 수 있으며, 이러한 현상은 국부적으로 퇴적가중을 야기할 수 있을 것으로 예상된다.

3. 인공 신경망 모델링

<그림 6>은 본 연구에서 적용된 ANN 모델의 구조를 나타내며, 이는 Yoon 등(2013)이 개발한 ANN 모델의 프레임 워크를 기반으로 하였다. ANN은 은닉층과 출력층이 있는 2개층의 feed-forward 구조로 구성하였고, 모델은 역전파 알고리즘(Levenberg -Marquardt)으로 계산된다. 입력층은 하천담수량, 조류속, 염분도 등을 포함한 수리학적 매개변수를 다양한 조합으로 구성하였다. 출력층은 저층의 부유사의 농도로 구성하였으며, 각각의 입력 및 출력 데이터 세트는 1시간 간격의 30일 데이터로 720개의 자료로 구성되었다.



▲ <그림 6> 인공신경망의 구조

입력 데이터와 은닉층의 뉴런은 가중치(weight)와 편향(bias)으로 상호 연결되며, 은닉층의 정보는 전달 함수를 사용하여 출력 레이어로 전송된다. 은닉층에 사용되는 net input(n1)은 다음과 같이 표현할 수 있다(Hagan 등, 1996).

$$n^1 = W^1 p + b^1 \quad (1)$$

여기서, W는 가중치 행렬, p는 입력 값, b는 편향이다. 위첨자 1은 은닉층을, 위첨자 2는 출력층을 나타낸다. 가중치 행렬(W)에서 첫 번째 인덱스는 해당 가중치에 대한 뉴런 목적지를 나타내고 두 번째 인덱스는 뉴런에 공급되는 신호의 소스를 나타냅니다. 순 입력 n1은 tan-sigmoid 전달 함수를 사용하여 은닉층으로 공급된다.

$$a^1 = f^1(n^1) = \frac{e^{n^1} - e^{-n^1}}{e^{n^1} + e^{-n^1}} \quad (2)$$

여기서 a^1은 은닉층의 뉴런 출력이며, 은닉층(a^1)에서 출력된 뉴런은 선형 전달함수가 있는 출력층에 사용된다.

$$a^2 = f^2(W^2 a^1 + b^2) = W^2 a^1 + b^2 \quad (3)$$

여기서 a^2는 출력층의 뉴런 출력이다.

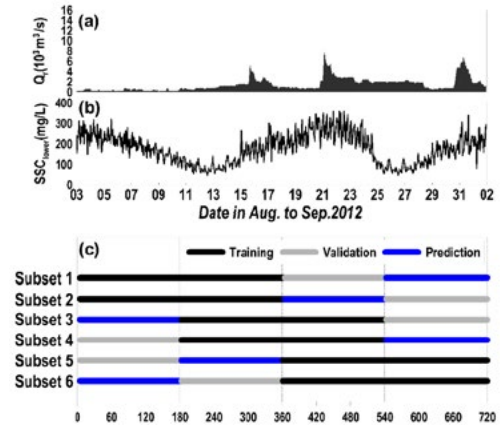
<표 2>는 입력 조합의 실험안은 네 그룹으로 분류하여 나열하였다. 저층 유속만으로 구성된 그룹 1, 하천 담수량과 저층의 염분도를 각각 구성한 그룹 2, 저층의 유속, 염분도, 하천 담수량을 모두 구성한 그룹 3으로 구분하였다. 그룹 4는 그룹 1~3에 적용된 저층의 수리학적 매개변수 외에 표층의 매개변수(유속, 염분도)도 포함하여 구성하였다.

하천 배출량은 Q, 유속은 V, 염분도는 S로 표시하였으며, 각각의 수층은 저층은 L로 표층은 U로 나타내었다. 예를 들어, $QV_LS_LV_U$는 하

▼ <표 2> 입력자료에 따른 실험안 구성

그룹	실험안	담수 방류량	저층 유속	저층 염분도	표층 유속	표층 염분도
1	V_L	○	●	○	○	○
2	QV_L	●	●	○	○	○
	V_LS_L	○	●	●	○	○
3	QV_LS_L	●	●	●	○	○
4	$QV_LS_LV_U$	●	●	●	●	○
	$QV_LS_LS_U$	●	●	●	○	●
	$QV_LV_US_U$	●	●	○	●	●

● : 적용, ○ : 미적용

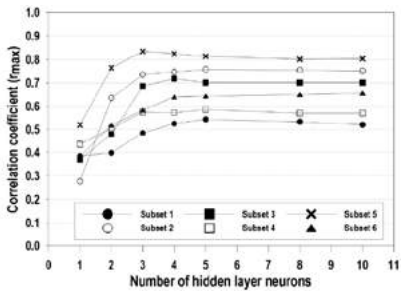


▲ <그림 7> 훈련, 검증 및 예측을 위한 subset 구성

천 담수량, 저층 유속과 염분도, 표층 유속을 적용한 실험조건을 나타낸다.

<그림 7>은 ANN 모델링을 위한 훈련(training), 검증(validation) 및 예측(prediction)을 위해 구성된 subset을 나타낸다. 30일 동안 1시간 간격으로 관찰된 720개 데이터 중 360 개 데이터가 (전체 데이터의 50%)가 훈련에 사용되고 180개 데이터(25%)는 검증, 180개 데이터(25%)는 예측에 사용되었다.

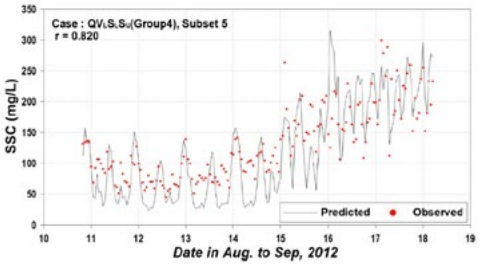
은닉층의 뉴런수와 subset을 최적화하기 위해 은닉층의 뉴런수(1, 2, 3, 4, 5, 8, 10)와 각 subset에 대한 민감도를 테스트하여 <그림 8>에 제시하였다. 그래프에 나타난 바와 같이 뉴런의 수와 subset에 따라 ANN의 성능에 차이를 보였다. 뉴런의 수를 3개에서 4개로 적용할 경우, 우수한 결과를 나타냈으며, 계산의 효율성을 위해 본 연구에서는 은닉층에 세 개의 뉴런을 적용하였다.



▲ <그림 8> ANN 성능 테스트 결과

ANN의 성능은 부유사 농도의 관측치와 예측치의 상관계수(r)로 검토하였다. 상관계수 r은 subset 5가 0.834로 가장 높고 subset 1이 0.484로 가장 낮은 결과를 나타냈다. subset 5의 경우, 훈련 구간에 담수량이 증가하고, 대조와 소조기에 해당되어 담수량의 변동과 조석주기에 따른 조류속의 증감 등의 다양한 경향성을 포함한 자료가 학습되어 부유사 농도가 잘 예측된 것으로 판단된다. 이에

반해 타 subset에는 훈련 구간에 담수량이 적어 담수변화에 따른 영향을 충분히 학습하지 못하였기 때문에 상대적으로 낮은 정도의 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 ANN의 성능에 있어 다양한 조건의 학습데이터가 중요함을 보여주고 있다. 결과를 토대로 본 연구에서는 ANN 모델링에 Subset 5를 사용하였다.



▲ <그림 9> 부유사 농도의 관측치와 예측치의 비교 (3개 뉴런, subset 5, $QV_LS_LV_{II}$적용)

<그림 9>는 부유사농도의 관측치와 예측시의 시계열을 나타냈으며, 비교적 잘 재현된 것으로 판단된다. 그러나 기존의 연구(Yoon, 2013)에서 언급한 바와 ANN은 일부 극한값에 대해서는 훈련과 예측이 어려운 것으로 나타났다(예 9월 15일 및 17일). 그럼에도 불구하고 본 연구에서 검토된 ANN모델은 우수한 예측 성능(r=0.82)을 보여주고 있다.

4. 결과 및 고찰

모델 성능은 부유사농도의 관측치와 예측치에 대해 불일치 비율(R), 평균제곱근 오차(RMSE), 평균 절대백분율 오차(MAPE) 및 상관계수 (r)의 네 가지 방법을 적용하여 적합도를 평가하였다.
불일치 비율(R)은 다음의 방법으로 정의된다.

$$R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{x_i}{y_i} \qquad (4)$$

여기서 x_i는 관측치이고, y_i은 예측치로 불일치 비율이 0에 가까울수록 관측치와 예측치가 일치함을 나타내며, 0보다 크면 과대평가, 작으면 과소평가로 정의된다.
평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error,)는 개별 관측치에 대해 오차의 정도를 파악할 수 있는 방법으로 일반적으로 낮은 RMSE는 높은 것보다 더 양호한 예측 가능성을 나타낸다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \qquad (5)$$

평균 절대 오차 백분율(Mean Absolute Percent Error, MAPE)은 예측값과 관측값에 대해 부호에 관계없이 모든 절대오차의 백분율을 확인할 수 있다. 이는 예측 결과와 관측 결과를 직접적으로 비교하는 방법 중 하나로 정량적인 오차 정도를 나타내는 평균 제곱근 오차와는 다르게 관측값에 대한 오차율을 검토할 수 있다.

$$MAPE(\%) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|x_i - y_i|}{x_i} \times 100 \qquad (6)$$

상관 계수 (r)는 예측값과 관측값 간에 존재하는 선형관계의 방향과 강도를 측정할 수 있다. -1.0의 상관관계는 완벽한 음의 상관 관계를, 1.0은 완벽한 양의 상관관계를 나타내며 0.0은 두 변수 사이에 선형 관계가 없음을 나타낸다.

$$r = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x}\right)\left(\frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y}\right), \quad -1 \le r \le 1 \qquad (7)$$

여기서 $\bar{x}, \bar{y}$는 x, y의 평균을 의미하고, σ_x, σ_y는 각각 x, y의 표준편차(standard deviation)이다.
<표 3>에 부유사 농도의 관측치와 ANN의 예측치 사이의 적합도 검토 결과를 제시하였다. 계산된 R, RMSE, MAPE 및 r에 대해 높은 적합도 순으로 각각 점수를 부여하고 이를 합산하여 적합도를 평가하였다. 일반적으로 저층의 수리학적 매개변수는 저층의 부유사 농도와 밀접한 관련성이 나타났다(예 : QVL, $QVLSL$). 흥미롭게도, $QVLSLSII$와 같이 표층의 염분도를 고려 시 모델의 부유사 농도가 잘 예측된 것으로 나타났다. 이는 표층 염분도를 포함함으로써 밀도 성층화 특성이 부유사농도 예측에 반영된 것으로 판단되며, 이것은 해수와 담수의 밀도(또는 염도) 차이로 인한 성층효과가 하구의 부유사 농도를 예측에 중요함을 귀납적으로 보여준다.

▼ <표 3> 적합도 평가 결과

그룹	실험안	R	RMSE	MAPE	r	SUM	적합도
1	V_L	7(1.26)	7(54.2)	7(36.3)	7(0.738)	28	7
2	QV_L	6(1.19)	4(47.1)	6(29.3)	3(0.796)	19	5
	V_LS_L	4(1.15)	2(25.4)	3(27.3)	4(0.793)	13	2
3	QV_LS_L	3(1.14)	3(45.9)	2(27.0)	5(0.788)	13	2
4	$QV_LS_LV_{II}$	5(1.15)	5(47.2)	5(28.8)	6(0.771)	21	6
	$QV_LS_LS_{II}$	**1(1.02)**	**1(44.6)**	**1(25.6)**	**1(0.820)**	**4**	**1**
	$QV_LV_{II}S_{II}$	2(0.91)	6(48.6)	4(27.5)	1(0.820)	14	4

ANN을 이용한 부유사농도 예측모델을 개발하기 위해서는 몇 가지 개선 사항과 추가연구가 필요하다. 본 연구에서는 수립한 ANN모델은 경인항에 국한된 데이터를 기반으로 구성되어 다른 지역에 적용하기는 어렵다. 그러나 다른 하구지역의 수리학적 매개변수와 부유사 농도 자료를 수집하여 모델에 적용할 경우 ANN모델의 예측성능을 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

또한, 관측기간(2012년~2015년) 동안 강수량이 지속적 감소하여 담수량에 의한 하구특성이 나타나는 자료가 적어 본 연구에서는 1개월의 시계열 자료만을 분석하였다. 따라서 다양한 이벤트를 포함하는 장기간의 자료를 반영시 모델을 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로, 기존의 연구에서 바람 또는 파랑과 같은 기상요인과 지형학적 요인도 부유사 농도 변화에 영향을 미치는 것으로 제시됨에 따라 이러한 요인에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 우리나라를 대표하는 하구인 경인항에서 관측된 조위, 조류, 하천 담수량, 염분도, 부유사 농도를 층별로 측정한 자료를 이용하여 하구의 밀도 성층류와 부유사 농도의 특성을 분석하였다. 또한 데이터 기반 모델링 기법 중 하나인 인공신경망을 사용하여 부유사농도에 대한 성층 흐름의 효과를 귀납적으로 분석하였다. 이 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 한강하구에 위치한 경인항 주변해역의 표층과 저층사이의 유속, 염도, 온도 등의 밀도에 의한 성층화 특성을 확인할 수 있었다. 하계 우기시 증가한 담수는 밀도가 높은 해수의 위로 흐르는 이층류 흐름특성을 보이며, 표층에서는 조석주기에 따른 주기성 변화가 뚜렷한데 반해, 저층의 변화는 적은 것을 확인할 수 있었다.

2. 하구의 부유사 농도는 담수량, 저층의 유속, 염분도와 높은 상관관계를 보인다. 담수 흐름 방향과 조수 흐름 방향이 동일한 경우, 표·저층 모두 부유사 농도와 수리학적 매개변수 간의 높은 상관성을 보인다. 반대로 홍수시 담수와 조수의 흐름 방향이 반대 인 경우, 저층의 SSC는 밀도 성층 효과로 인해 유체역학적 매개 변수와 낮은 상관성을 갖는다.

3. 데이터 기반 모델링 기법 중 하나인 ANN을 사용하여 부유사 농도와 유체역학적 요인간의 상관관계를 분석했다. 은닉층 뉴런의 수가 3~4 개일 경우, 최고의 성능을 보였으며, 담수유량의 증감 경향이 뚜렷한 시기의 학습자료를 기반으로 모델링할 경우, ANN 모델의 부유사농도 예측 성능이 향상되는 것으로 나타났다. 이는 자료기반 모델링을 이용한 하구 SSC 예측시 하천 담수량에 의한 성층화 효과가 중요함을 의미한다.

4. 모델 성능은 불일치 비율(R), 평균제곱근 오차(RMSE), 평균 절대백분율 오차(MAPE) 및 상관계수(r)의 네 가지 평가 방법으로 면밀하게 평가되었다. 하천 방류량, 저층 및 표층의 유속, 저층의 염분을 예측에 포함한 경우 부유사 농도의 관측치와 예측치가 가장 잘 맞는 것으로 나타났다. 특히 성층 효과를 나타내는 표층과 저층의 염분도를 고려한 결과 가장 높은 적합성을 얻은 것으로 나타났다. 이는 해수와 담수의 밀도 차이로 인한 성층화 효과가 하구의 부유사 농도를 예측하는데 중요하다는 것을 귀납적으로 보여준다.

참고문헌

윤병일, 우승범 (2012). 한강하구 염하수로 주변의 조석변화에 따른 염분분포와 담수와의 상관관계. 한국 해안·해양공학회 논문집, 제24권 제4호, 269-276.

인천지방해양수산청(2012~2015). 인천항 경인항 해양수리현상조사 용역 보고서

Hagan, M.T., Demuth, H.B. and Beale, M. (1996). Neural Network Design. PWS Publishing, Boston, MA, USA, 1-736.

Kerh, T., Lu, H. and Saunders, R. (2014). Investigating Nonlinear Shoreline Multiperiod Change from Orthophoto Map Information by Using a Neural Network Model. Math. Probl. Eng. 3, 1-9.

Oehler, F., Coco, G., Green, M.O. and Bryan, K.R. (2012). A data-driven approach to predict suspended-sediment reference concentration under non-breaking waves. Cont. Shelf Res., 46, 96-106.

Singh, A.K., Deo, M.C., Sanil Kumar, V. (2008). Prediction of littoral drift with artificial neural networks, Hydrology and Earth Systems Sciences. Eur. Geophys. Union, 12, 267-275.

Van Gent, M.R.A., Van Den Boogaard, H.F.P., Pozueta, B. and Medina, J.R. (2007). Neural network modeling of wave overtopping at coastal structures. Coast. Eng., 54, 586-593.

Van Maanen, B., Coco, G., Bryan, K.R. and Ruessink, B.G. (2010). The use of artificial neural networks to analyze and predict alongshore sediment transport. Nonlinear Process. Geophys., 17, 395-404.

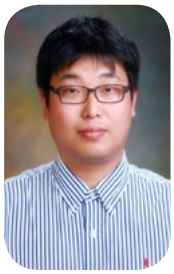
Yoon, H.D., Cox, D.T., and Kim, M.K. (2013). Prediction of time-dependent sediment suspension in the surf zone using artificial neural network. Coast. Eng., 71, 78-86.

[감수 : 안승현(shan@kmi.re.kr)]

심층신경망 및 신경망을 이용한 항내 파고 예측 사례



이 진 학
한국해양과학기술원
연안개발·에너지연구센터
책임연구원
(yijh@kiost.ac.k)



류 경 호
한국해양과학기술원
해양ICT융합연구센터
무기계약직 기술원
(ryukh75@kiost.ac.kr)



정 원 무
한국해양과학기술원
해양ICT융합연구센터
책임연구원
(wmjeong@kiost.ac.kr)

1. 들어가며

본 기사에서는 최근 가장 "핫(hot)"한 기술의 하나인 심층신경망(deep neural networks) 또는 딥러닝(deep learning), 그리고 인공지능(artificial intelligence, AI)에 대한 간단한 소개와 함께 신경망을 이용하여 항내 파고 및 하역중단시점 등을 예측한 사례를 소개하고자 한다. 심층신경망 혹은 딥러닝은 기계학습(machine learning)의 한 방법으로 최근 가장 많은 관심을 받고 있는 AI 기술이며 이러한 딥러닝의 놀라운 성능으로 AI 기술 또한 새로운 각광을 받고 있다.

우리가 생활하면서 주변에서 가장 쉽게 접할 수 있는 AI 기술은 아이폰의 "시리(siri)" 또는 갤럭시 "빅스비(bixby)"와 같은 스마트폰 속의 개인비서 앱이 아닐까 싶다. 최근에는 KT 기가 지니, 카카오 스피커 등 다양한 AI 스피커가 생활 속에서 사용되고 있지만, 몇 년 전까지만 하더라도 음성인식률이 낮거나 사용자의 의도를 제대로 파악하지 못하는 경우가 있어, 처음에는 재미삼아 써보기도 하지만 계속해서 이런 서비스를 많이 쓰는 경우는 보지 못하였다. 개인적으로 운전 중에는 빅스비를 이용하여 노래를 듣거나 내비게이션 목적지를 설정하는 경우가 종종 있다. 그래서인지 불과 몇 년 전만하더라도 AI라고 하면 사람 비슷한 흉내를 내는 기계 정도로 치부하곤 했었는데, 의외로 꽤 오래 전부터 이런 AI가 사람을 이긴 사례가 많이 있다.

AI와 인간의 대결에 있어 대표적인 사례로 체스, 바둑과 같은 보드게임, 그리고 제퍼디쇼(Jeopardy show)와 같은 퀴즈 등을 들 수 있다. 1990년대 중반, 당시 체스 세계챔피언으로 겨룰 상대가 없었던 러시아의 Garry Kasparov는 IBM이 개발한 Deep Blue에게 1승 3무 2패로 패하게 되고, 이후 사람이 아닌 AI가 체스 최강자의 자리를 차지하게 된다. 최근에는 슈퍼컴이나 고성능 PC가 아닌 스마트폰에서 돌아가는 AI 체스를 이길 수 있는 사람은 없다고 하니 그 발전 속도가 놀라울 따름이다. 그리고 모두가 기억하는 2015년 이후 알파고(AlphaGo)의 활약이 있다. 구글 딥마인드(DeepMind)사가 딥러닝, 몬테카를로 트리 탐색(Mont-Carlo tree search), 강화학습(reinforcement learning) 등 새로운 알고리즘을 적용하여 개발한 AlphaGo는 2015년 10월 유럽바둑챔피언십에서 3차례 우승한 바 있는 프랑스의 판후이(Fan Hui, 樊麾) 2단과의 5번기 대국에서 모두 이김으로써 바둑계에 이름을 드러내게 된다. 이듬해인 2016년 3월에는 여러 국제기전에서 18차례 우승한 바 있는 우리나라의 이세돌 9단과의 5번기 대국에서도 4대 1로 승리하고, 2017년 5월에는 당시 세계랭킹 1위였던 중국의 커제(柯洁) 9단과의 3번기 대국도 모두 승리함으로써 큰 충격을 주었다. 이후 AI에 대한 관심이 크게 증가한 것을 보면 AlphaGo는 AI 재부흥을 이끌어낸 일등공신이라 해도 과언이 아닐 것이다. 한편 최근 국내 종합병원에서 의료용으로 도입하여 관심을 받고 있는 IBM사의 왓슨(Watson)은 자연어 처리 분야에 적용하기 위하여 개발된 AI이다. IBM에서 지난 2006년 개발에 착수한 후, Watson은 2011년 Jeopardy Show에 참가하여 당시 역대 최대 상금을 받은 바 있는 Brad Rutter와 74번 연속 승리를 기록한 Ken Jennings를 상대로 퀴즈를 풀어, 이들을 가볍게 이김으로써 체스와 같은 룰 기반 보드게임 외에 자연어 처리 기능으로 문장을 이해하고 DB를 이용해야 하는 부분에서도 인간을 이긴 대표적인 사례로 남아있으며, 현재 Watson은 교육, 증권, 의료용으로 다양하게 적용되고 있다(wikipedia).

이와 같은 바둑, 체스 외에도 벽돌깨기, 스페이스 인베이더 같은 아



(a) Garry Kasparov와 체스 대결 중인 Deep Blue (dongascience.donga.com)



(b) Jeopardy Show에서 우승한 Watson(thedailybeast.com)



(c) 이세돌 9단과 바둑 대결 중인 AlphaGo(www.pri.org)



(d) 커제 9단과 바둑 대결 중인 AlphaGo(www.yna.co.kr)

▲ <그림 1> 대표적인 인간과 인공지능 간의 대결

케이드 게임에서도 AI가 어떻게 스스로 학습하여 게임에 적응하는지 아래의 사례를 통하여 재미있게 알아 볼 수 있다.

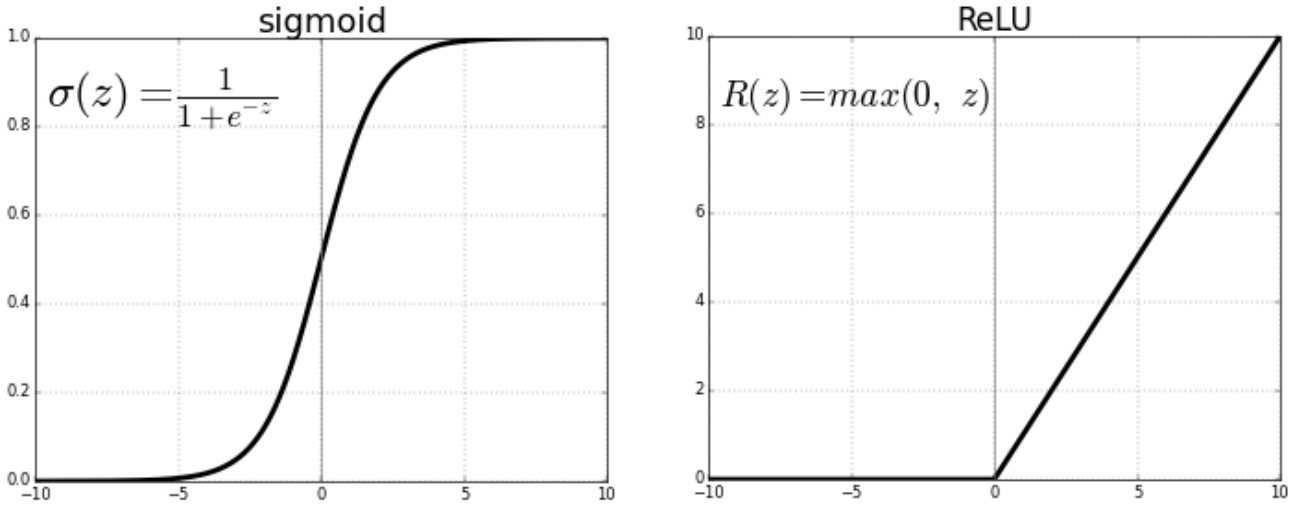
- 벽돌깨기: https://youtu.be/Q70ulPJW3Gk
- Space Invaders: https://youtu.be/SuooulLpjDo
- Star craft I: https://youtu.be/GgkmJDjeJtw
- Star craft II: (1) https://youtu.be/St5lxlxYGkI (2) https://arxiv.org/abs/1708.04782
- Super Mario World: (1) https://youtu.be/L4KBBAwF_bE (2) https://youtu.be/qv6UVOQ0F44
- Cookie Run: https://youtu.be/exXD6wJLJ6s

2. 파고예측 등 공학문제에 대한 적용

1956년 Dartmouth Conference에서 John McCarthy 등이 제안함으로써 최초 등장한 용어인 AI는 1980년대 기계학습으로 적용성을 확장시킨 후 어느 정도 정체기를 겪다 2010년 이후 딥러닝이 새롭게 적용되면서 새로운 제2의 AI 붐을 가져오게 된다. AI는 "기계가 가지고 있는 지능" 정도로 이해할 수 있으며, 따라서 인간보다 우수한 계산능력을 바탕으로 최근 합성곱신경망, 강화학습 등 새로운 알고리즘이 적용되면서 비약적으로 발전하고 있다.

신경망은 인간의 신경체계를 모사한 수치모형으로, 한 뉴런(neuron)에서 다음 뉴런으로 정보가 전달되는 과정을 모사하였으며, 여러 뉴런에서 모은 정보를 활성화할지 여부를 가리는 활성함수(activation function)를 도입하였다. 그러나 이와 같은 뉴런과 활성함수를 가진 단순 퍼셉트론(simple perceptron) 모형은 단순한 선형관계식은 모사할 수 있었지만 가장 단순한 XOR 문제도 해결할 수 없는 수준이었으며, 이와 같은 문제를 은닉층(hidden layer)을 도입함으로 해결할 수 있었다. 1개 층 이상의 은닉층을 갖는 다층퍼셉트론즈 신경망(multi-layered perceptron neural networks, MLPNN)은 한동안 여러 공학문제에서 활발히 적용되었으며, MLPNN을 이용함으로써 상당히 만족스런 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 3개 이상의 은닉층을 사용하면 성능이 더욱 개선될 것이라는 기대와는 달리 기존 시그모이드 함수(sigmoid function)를 활성함수로 사용하는 경우 오차역전파(error back-propagation) 시 미분값이 점점 작아져 오히려 신경망의 성능을 악화시키는 문제(vanishing gradient problem)가 있어 일반적으로 당시 신경망은 은닉층을 두 개 정도 사용하는 경우가 많았다.

이와 같은 일반적인 다층신경망의 성능을 획기적으로 개선시킨 것이 이른바 ReLU(Rectified Linear Unit) 활성함수이다. ReLU 함수를 사용함으로써 은닉층의 수가 증가하더라도 오차역전파 시 미분값이 0에 가까워지는 문제를 해결할 수 있었다. 또한 ReLU 함수의 사용과 함께 사용되기 시작한 합성곱신경망(CNN, convolution neural networks)은 최적의 특성(feature)을 신경망이 직접 추출해 낼 수 있다는 장점이 있어 영상자료를 이용한 분석에 널리 이용되기 시작하였고, 이러한 CNN과 일반 신경망(Fully Connected NN)을 이용하여 구성한 AlexNet, GoogleNet, ResNet, DenseNet 등 여러 딥러닝 신경망 모델이 제안되어 현재에 이르고 있다. 이러한 딥러닝 신경망 모델에 대해서는 보다 많은 참고문헌을 참조할 수 있다.



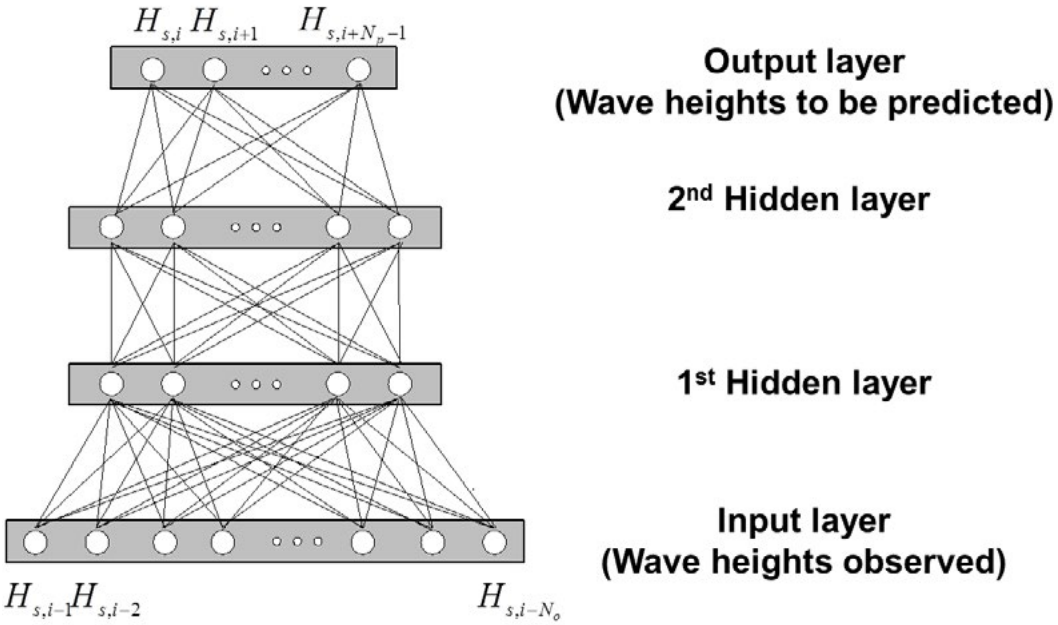
▲ <그림 2> 시그모이드 함수(좌)와 ReLU 함수(우)의 비교

최근까지 딥러닝은 주로 물체를 인식하거나, 영역을 구분하는 등의 영상 분야와 자율주행차량에 매우 활발하게 이용되고 있으며, 공학 분야에서는 균열과 같은 결함을 검출하는 등의 연구에 많이 이용되고 있다. 특히 토목, 건축 분야에서 딥러닝이 가장 활발하게 적용되고 있는 균열 탐색의 경우, 국내에서도 최근 2년 동안 여러 편의 논문이 발표된 바 있다(Hassan 등 2018, 김병현 등 2019, 김수민 등 2020, 김아람 등 2018, 김정민 등 2019, 김종우 등 2017, 김진언 등 2019, 김치성 등 2020, 설동현 등 2020, 손병직 등 2018, 손정모 등 2020, 심승보 등 2020, 이민혜 등 2019, 이상익 등 2019, 이예인 등 2018, 정서영 등 2019, 최승현 2018, 최윤수 등 2019, 한결 등 2019, 현석환 등 2019). 균열 탐색과 같이 영상을 이용하는 분야가 아닌 경우, 예를 들어 시계열 정보를 이용하는 경우에는 시계열 정보를 영상과 같은 2D 정보로 변환하여 딥러닝을 적용할 수 있다. 즉, 시계열 자료 자체를 SFT(short time Fourier transform) 또는 웨이블렛 변환 등을 통하여 2D 정보로 변환한 후 AlexNet 등 딥러닝의 입력정보로 이용하는 것이 가능하다. 그러나 이러한 경우 시간-주파수 해상도 등이 충분하지 않아 영상자료를 이용하는 분야에서와 같이 우수한 성능을 기대하기 어렵다. 또한 CNN 대신 회귀신경망(recurrent neural networks, RNN)을 이용하거나 LSTM(Long Short-Term Memory) 등 시간영역자료를 처리할 수 있는 신경망을 이용할 수 있지만 이 역시 기계나 전자 분야에 비해 해안해양 분야에서는 많은 적용이 이루어지고 있지 않은 것으로 생각된다.

최근 파고 예측 등 해안해양 분야에서 적용된 바 있는 신경망 및 딥러닝 관련 기술로는 이진학 등(2017), 이광호 등(2020), 김태윤(2020)의 연구를 예로 들 수 있는데, 이들은 CNN이나 RNN 등이 아닌, 예전부터 이용되어 온 일반적인 MLPNN을 적용하여 파고를 예측하여 하역중단시점을 예측하거나, 심해파형경사와 사면경사를 이용하여 쇄파를 예측하거나 혹은 파랑과 풍속을 예측하는 연구를 수행하였다. 해외에서도 신경망을 이용하여 하역중단 시점을 예측하는 연구를 수행한 바 있는데, 이들의 연구에서도 일반적인 MLPNN을 적용한 바 있다(Lopez and Iglesias 2013, Lopez et al. 2015). 한편 파고 예측 분야는 아니지만 영상자료를 이용하여 파고를 계산하기 위하여 합성곱 신경망을 적용한 사례도 최근 발표된 바 있다(손규빈 등 2020).

3. 포항신항 하역중단 예측을 위한 신경망 기반 파고 예측 사례

본 기사에서는 포항신항의 하역중단시점을 사전에 예보할 수 있도록 광역 계산결과와 포항신항 내에서 관측한 파고 자료를 이용하여 인공신경망 기반 파고 예측 모델을 구성한 기존 연구결과(이진학 등 2017)를 간략하게 소개하고자 한다. 이들의 연구에서는 (1) 바람 예보자료를 이용하여 항외 주요 지점에서의 파랑자료를 추산하고, (2) 복잡한 지형을 가진 항내 주요 지점에 대해서는 장기 관측을 실시하여 파랑자료를 수집한 후, (3) 광역 계산지점에서의 파고와 항내 관측지점에서의 파고 사이의 관계를 신경망(neural networks, NN) 모델을 이용하여 구성하고, (4) 실제 운영 시에는 바람예보자료를 이용한 수치실험 결과만으로 항내 파고를 예측함으로써 하역중단시점을 예보할 수 있는 방법



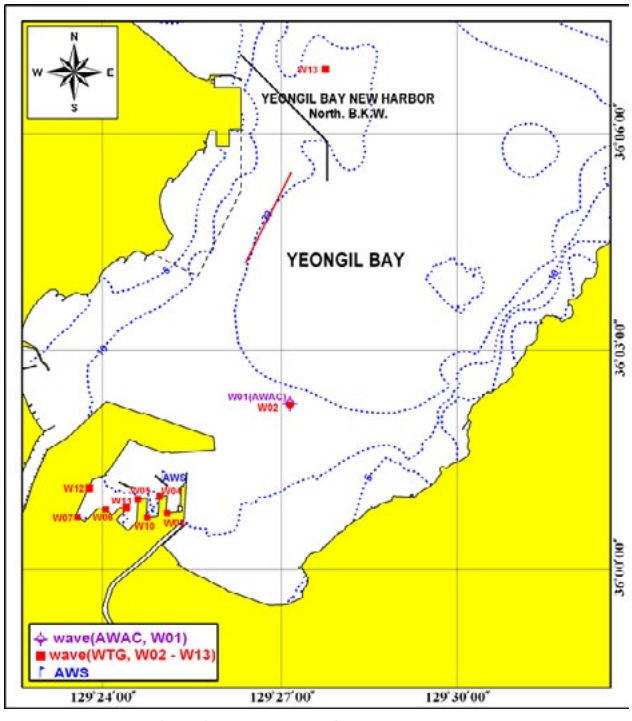
▲ <그림 3> 파고 예측에 사용된 심층신경망 구조(이진학 등 2017)

을 제안하였다.

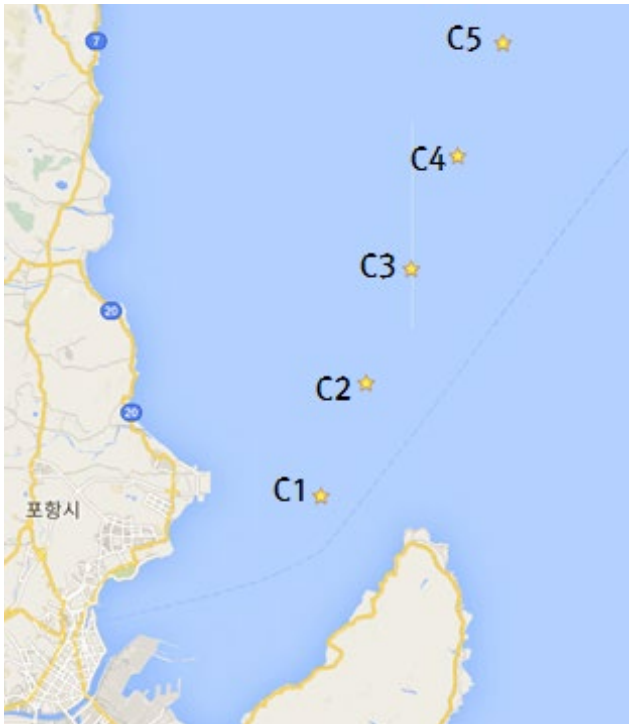
포항신항이 위치하고 있는 영일만을 포함하여 SWAN(Simulating WAves Nearshore) 모델을 이용하여 광역에 대한 파랑수치실험을 수행하고, 그 결과를 항내에서 장기 관측한 파랑자료와 신경망 모델을 이용하여 연계하였다. 2013년 10월부터 2014년 3월까지의 6개월 자료를 이용하여 NN 모델을 학습(training)시키고, 2014년 4월부터 12월까지의 9개월 자료를 이용하여 각각 모델의 결과를 검증(validation)하였다. 이 연구에서 사용된 신경망은 다음 그림과 같이 은닉층이 2개인 다층신경망으로, 넓은 범주에서 본다면 심층신경망의 한 종류라고도 할 수 있을 것이다. 그러나 딥러닝에서 많이 사용되는 ReLU 활성함수 대신 기존의 시그모이드 함수를 활성함수로 적용하였다.

이들은 일본기상청(JMA, Japan Meteorological Agency)의 바람 예보자료와 SWAN 모형을 사용하여 외해역에서의 후측 파랑자료를 산정하고, 후측 파랑자료 결과 중 계산 정확성을 확보할 수 있으면서 영일만 내의 파고와 연관성이 높은 C_1지점에서부터 C_5지점<그림 5 참조>까지의 파고, 파주기 및 파향자료를 신경망의 입력자료로 사용하였다. 또한 어느 시점에서의 항내 파고를 예측하기 위하여 후측 파랑자료를 해당 시점 이전 10개 자료까지 사용함으로써 시간 지연을 고려할 수 있도록 하였다.

또한 신경망의 출력자료로는 포항신항 내 파고를 사용하였는데, 포항신항의 경우 포켓 형상으로 지형이 매우 복잡하고 또한 정온도 확보를 위하여 북방파제를 비롯하여 항내에도 제1, 제2파제제가 설치되어 있어 수치실험을 통하여 파랑을 분석하기 매우 어려워, 장기관측을 통하여 파랑자료를 확보하고 이를 파랑예측 모델에 적용하였다. 2013년 10월부터 2014년 12월까지 15개월의 연속 관측자료가 확보되어 있는 W03, W04, W05, W10, W11<그림 4 참조> 등 총 5개 파고계 자료를 이용하여 파고예측 모델을 구성하였다.

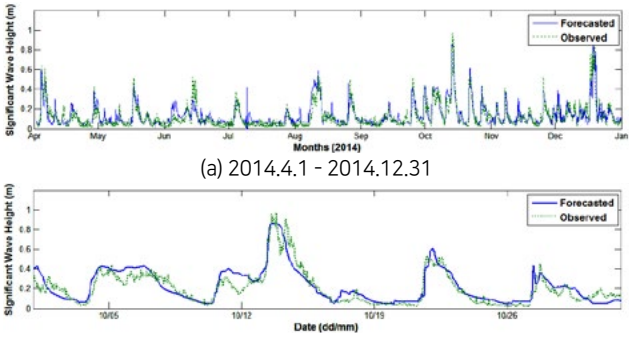


▲ <그림 4> 포항신항 위치 및 관측지점



▲ <그림 5> 광역 후측 파고 계산지점

아래의 그림은 C1, C2, C3 지점에서 구한 후측 파랑자료를 이용하여 예측된 W03 파고계 위치에서의 파고 결과로, 훈련 패턴에 대한 상관계수와 RMS 오차는 각각 0.9169, 0.0622 m이며, 시험 패턴에 대한 상관계수와 RMS 오차는 각각 0.8493, 0.0644 m이다.

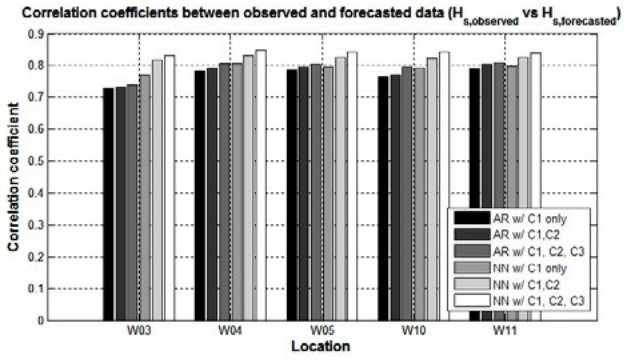


(a) 2014.4.1 - 2014.12.31

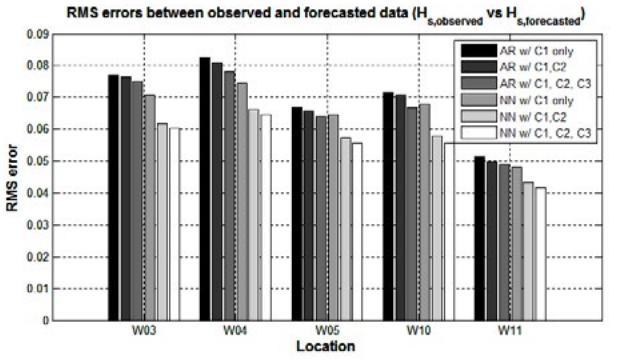
(b) Zoomed data (2014.10.1 – 2014.10.31)

▲ <그림 6> NN 모델로 예측한 파고와 관측 파고의 비교(W03) (이진학 등 2017)

아래의 그림은 AR 모델과 NN 모델을 사용하여 예측한 결과와 실제 항내 관측결과 사이의 상관계수 및 RMS 오차로, C1에서의 자료만 사용한 결과보다는 C1, C2, C3 계산지점에서의 결과를 모두 이용하는 것이 결과의 정확성을 향상시키는데 도움이 됨을 알 수 있다. 또한 AR 모델보다는 NN 모델의 상관계수가 높고, RMS 오차가 작아 NN 모델이 AR 모델보다 높은 수준의 예측성능을 가지고 있음을 알 수 있다. AR 모델과 NN 모델을 비교할 때, AR 모델은 선형예측 모델(linear estimation model)로 입력정보로 사용된 계산지점에서의 파고와 실제 관측한 지점에서의 파고 사이의 관계를 선형관계로 고려한 것인데 비하여, NN 모델은 비선형 시그모이드 함수(nonlinear sigmoid function)를 활성함수로 사용함으로써 이 두 정보 사이의 관계를 비선형 모델로 고려할 수 있다는 차이가 있다. 결국 NN 모델이 AR 모델보다 예측성능이 우수한 것은 항내에서의 복잡한 지형 및 파제제 등에 의한 비선형 파랑변형 효과를 NN 모델이 더 잘 모사할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.



(a) Correlation coefficients



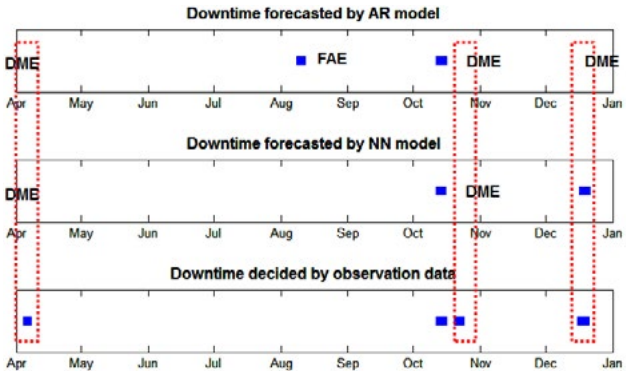
(a) RMS errors

▲ <그림 7> AR 모델과 NN 모델로 예측한 파고와 관측 파고 사이의 상관계수 및 RMS 오차 비교(이진학 등 2017)

이들의 연구에서는 하역한계파고(operational limit wave height)로 컨테이너선 및 RO-RO 선박 등에 대하여 적용하고 있는 하역한계파고 기준인 0.5 m를 고려하여 하역중단시점을 분석하였다. 아래 그림 8은 항내 설치된 W05 파고계 위치에서 관측된 파고자료로부터 안벽에서의 하역중단시점을 결정한 결과와 AR 모델 및 NN 모델을 이용하여 하역중단시점을 예측한 결

과를 비교한 것이다. 결과를 보면 2014년 10월 발생한 2번의 하역중단시점 중 첫 번째 하역중단시점의 경우 AR 모델 및 NN 모델이 모두 정확하게 예측하였지만, 두 번째 하역중단시점은 두 모델 모두 경보하지 못하는 오류, 즉 경보누락오류(downtime event missing error, DME)가 발생하였음을 알 수 있다. 한편, 2014년 8월의 경우 하역중단이 발생하는 파고가 없었음에도 불구하고 AR 모델의 경우 오경보하는 오류(false alarming error, FAE)가 발생하였다. W05 파고계 위치에서의 경우 AR 모델은 총 3회의 경보누락 오류가 발생하고, 1회의 오경보 오류가 발생하였으며, NN 모델의 경우 총 2회의 경보누락 오류가 발생하였음을 알 수 있다. 한편, <표 1>은 연구에서 사용된 5개 파고계에서의 관측 파고와 AR 및 NN 모델을 이용하여 예측한 파고로부터 하역중단시점을 예측한 결과로, 파고가 0.5 m를 초과한 총 23개 시점에 대하여, AR 모델의 경우 13개 하역중단시점을 누락하는 오류가 발생하였고, NN 모델의 경우 5개 하역중단시점을 누락하는 오류가 발생하였음을 알 수 있다. 한편 오경보 오류는 두 모델 모두 3개 시점으로 분석되었다. 이와 같이 오경보 및 경보누락과 같은 오류은 AR 모델, NN 모델에 모두 발생하고 있으나, 전체적으로 볼 때 AR 모델보다는 NN 모델이 비교적 하역중단 시점을 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

NN 모델과 AR 모델 모두 하역중단 시점을 정확하게 예측하는 데에는 어느 정도 한계가 있는 데 이러한 원인으로 (1) 후측 파랑자료를 구할 때 사용한 일본기상청의 바람예보자료의 정확도, (2) 수치실험모델인 SWAN에 포함되어 있는 지형정보 및 수심정보 등의 정확도, (3) SWAN 모델이 고려하지 못하는 실제 물리현상 등을 고려할 수 있으며, 따라서 보다 정확한 하역중단 시점 예측을 위해서는 높은 정확도와 정밀도를 갖는 바람예보자료, 지형 및 수심정보가 필요하고, 또한 수치해석 방법을 고도화하기 위한 추가 연구가 필요하리라 판단된다.



▲ <그림 8> AR 모델과 NN 모델로 예측한 하역중단시점 비교 (이진학 등 2017)

▼ <표 1> AR 모델과 NN 모델의 DME 및 FAE 비교(이진학 등 2017)

		관측지점					합계
		W03	W04	W05	W10	W11	
관측자료로 결정된 하역중단시점		3	9	4	5	2	23
AR 모델	DM1)	2	4	3	3	1	13
	FA2)	1	1	1	0	0	3
NN 모델	DM	1	1	2	1	0	5
	FA	1	0	0	2	0	3

1) DM: downtime event missing(하역중단시점 경보누락 오류)
2) FA: false alarming(하역중단시점 오경보 오류)

4. 맺음말

딥러닝 등 AI에 대한 연구가 대학이나 연구소에서 활발하게 진행되고 있지만, 산업체에서는 실제 비용을 줄이거나 생산량을 늘리기 위해 AI를 도입하려는 노력을 많이 기울이고 있다. 포스코의 경우 현재 많은 연구개발이 이루어지고 있는 딥러닝 등의 인공지능이 가지고 있는 현실적인 문제점, 즉 데이터 부족 문제와 인공지능의 성능에 대한 설명이 어려운 문제 등을 극복하기 위하여 지식 기반의 물리모델을 활용하고, 데이터 확보가 가능한 환경에서는 딥러닝 학습 방식을 취하여, 현재 상황에서 더 적절한 방법을 취사선택하거나 결합하는 방식인 앙상블(ensemble) AI를 지속적으로 개발하고 있다. 즉, 포스코가 수립해 놓은 물리, 야금학적 모델과 AI 모델을 결합하여 제조업 기반의 AI를 개발하고 있다. 이들이 개발하고 있는 앙상블 AI는 모든 것을 AI로 구현하지 않고 물리적인 현상을 이해할 수 있는 부분, 즉 해석적 분석이 가능한 부분에 대해서는 이론적인 해를 이용하고, 해석이 어렵거나 불가능한 경우, 또는 불확실성이 높은 부분은 AI를 적용함으로써 서로의 단점을 보완한 기법이라고 할 수 있다.

예전에 신경망을 이용하여 구조물 손상예측, 비선형 거동 추정 등을 연구할 때, 신경망은 해석이 어려운 곳에 적용하고 이론적인 해를 구할 수 있는 영역은 이론해를 사용하여 이를 융합할 수 있도록 하면 어떨까라는 생각을 한 적이 있다. 해양 분야의 여러 예측 문제에 AI를 적용하는 경우에도 마찬가지일 것이라고 생각된다. 이론적으로 혹은 수치적으로 분석할 수 있는 부분은 이를 이용하여 진행하고 비선형성이 크거나 불확실성이 높은 부분 등은 AI를 적용하는 방식으로 연구를 진행하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 예측의 경우에도 신경망 모델만 이용하는 것이 아니라 칼만 필터(Kalman filter)를 연동하거나

혹은 훈련 패턴을 생성할 때는 수치자료를 이용하는 것도 한 가지 방법이 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 "해양에너지 및 항만해양구조물 실용화 기술 개발(PE99831)"의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

http://ko.wikipedia.org
http://m.dongascience.donga.com/news.php?idx=10919
https://arxiv.org/abs/1708.04782
https://www.pri.org/stories/2018-01-05/garry-kasparov-and-game-artificial-intelligence
https://www.thedailybeast.com/watson-wins-on-jeopardy
https://www.yna.co.kr/view/AKR20170523147900007
https://youtu.be/exXD6wJLJ6s
https://youtu.be/GgkmJDjeJtw
https://youtu.be/L4KBBAwF_bE
https://youtu.be/Q70ulPJW3Gk
https://youtu.be/qv6UVOQ0F44
https://youtu.be/St5lxlxYGkI
https://youtu.be/SuooulLpjDo
Lopez, I., Lopez, M., and Iglesias, G. (2015) Artificial neural networks applied to port operability assessment. Ocean Engineering, 109, 298-308.
Lopez, M., and Iglesias, G. (2013) Artificial intelligence for estimating infra gravity energy in a harbour. Ocean Engineering, 57, 56-63.
Syed Ibrahim Hassan, Dang Lien Minh, 임수현, 민경복, 남준영, 문현준 (2018) CNN을 이용한 딥러닝 기반 하수관 손상 탐지 분류 시스템. 한국정보통신학회논문지, 22(3) 451~457.
김동현, 김영진, 허동수, 전호성, 이창훈 (2010) 파고계산 인공신경망을 이용한 방파제 기대피해도 산정. 한국해안·해양공학회논문집, 22(2) 126~132.
김병현, 김건순, 진수민, 조수진 (2019) 영상기반 콘크리트 균열 탐지 딥러닝 모델의 유형별 성능 비교. 한국안전학회지, 34(6) 50~57.
김수민, 손정모, 김도수 (2020) U-Net에 기반한 이미지 복원 기법을 이용한 콘크리트 균열 탐지 방안. 한국컴퓨터정보학회논문지, 25(10) 35~42.
김승우, 김소연, 서경덕 (2012) 직립방파제의 케이슨 활동에 미치는 기후변화 영향에 대한 수심의 효과. 한국해안·해양공학회논문집, 24(3) 179~188.
김아람, 김동현, 변요셉, 이성원 (2018) 딥러닝과 영상처리기법을 이용한 콘크리트 지반 구조물 균열 탐지. 한국지반공학회논문집, 34(12) 145-154.
김정민, 현세권, 채정환, 도명식 (2019) 드론영상을 이용한 물체탐지알고리즘 기반 도로균열탐지. 한국ITS학회 논문지, 18(6) 155~163.
김종우, 정영우, 임홍철 (2017) 드론과 이미지 분석기법을 활용한 구조물 외관점검 기술 연구. 한국건축시공학회지, 17(6) 545~557.
김진언, 송재준 (2019) 자동 균열 조사기법의 정확도 평가를 위한 조사선 기반의 지표 제안. 터널과 지하공간, 29(4), 230~242.
김치성, 황순규, 정준연, 손훈 (2020) 레이저 열화상 기법과 CNN 딥러닝을 이용한 용접부 표면의 자동 균열 검출 기술 개발. 비파괴검사학회지, 40(3) 163~173.
김태윤(2020) 딥러닝을 이용한 파랑 풍속 상호자료의 예측 기법. 한국해양환경 에너지학회지, 23(3) 142-147.
설동현, 오지훈, 김홍진 (2020) 콘크리트 균열 탐지를 위한 딥러닝 기반 CNN 모델 비교. 대한건축학회논문집 구조계, 36(3) 113~120.
손규빈, 최희정, 이정호, 노영빈, 강필성 (2020). 해상 이미지를 활용한 3D 합성곱 신경망과 합성곱 장단기 메모리 신경망 기반의 유의 파고 추정. 한국경영과학회지 45(1) 11-24.
손병직, 이규환 (2018) CNN 기법에 의한 손글씨 인식 파라미터 연구. 한국복합신소재구조학회 논문집, 9(4) 95~100.
손정모, 김도수, 황혜빈 (2020) 가중치 오차함수를 통한 콘크리트 균열 감지 모델 학습 개선. 한국컴퓨터정보학회논문지, 25(10) 15~22.
심승보 최상일, 공석민, 이성원 (2020) 지하구조물 콘크리트 균열 탐지를 위한 semi-supervised 의미론적 분할 기반의 적대적 학습 기법 연구. 한국터널지하공간학회 논문집, 22(5) 515~528.
이광호, 김탁겸, 김도삼 (2020) 머신러닝 오픈소스 플랫폼을 활용한 쇄파 예측. 한국해안 해양공학회, 32(4) 262-272.
이민혜, 남광우, 이창우 (2019) Mask R-CNN을 이용한 항공 영상에서의 도로 균열 검출. 한국산업정보학회논문지, 24(3) 23~29.
이상익, 양경모, 이제명, 이종혁, 정영준, 이준구, 최원 (2019) 딥러닝과 전이학습을 이용한 콘크리트 균열 인식 및 시각화. 한국농공학회논문집, 61(3) 55~65.
이예인, 김병현, 조수진 (2018) 딥러닝을 이용한 영상 기반의 콘크리트 구조물 박락 탐지. 콘크리트학회 논문집, 30(1) 91~99.
이진학, 류경호, 백원대, 정원무 (2017) 자기회귀 모델과 신경망 모델을 이용한 복잡한 지형 내 항만에서의 파고 및 하역중단 예측. 한국해안·해양공학회논문집, 29(4), 1~9.
정서영, 이슬기, 박찬일, 조수영, 유정호 (2019) 딥러닝 및 영상처리 기술을 활용한 콘크리트 균열 검출 방법. 대한건축학회논문집, 35(11) 163-170.
최승현, 도명식, 유상희, 조창석 (2018) 딥러닝을 이용한 영상기반 아스팔트 도로 균열상태 판정. 한국도로학회논문집, 20(5) 75~83.
최윤수, 김종호, 조현철, 이창준 (2019) 합성곱 신경망을 이용한 아스팔트 콘크리트 도로포장 표면균열 검출. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 23(6) 38~44.
한결, 오태민, 김현우, 송기일, 김영철, 권태혁 (2019) 스마트 구조물 균열 감지를 위한 1차원 합성곱신경망(1D CNN) 딥러닝을 이용한 파괴 신호 특정 기법. 한국방재학회논문집, 19(4) 1~7.
현석환, 이준성, 전성환, 김예진, 김광염, 윤태섭 (2019) 딥러닝을 이용한 화강암 X-ray CT 영상에서의 균열 검출에 관한 연구. 터널과 지하공간, 29(3) 184~196.

[감수 : 오상호(ohsangho@kiost.ac.kr)]

인공지능모델 해양기초정보 생산



안 치 옥
㈜미래해양 과장
(chioke@naver.com)

최 은 영
해양수산부 해양공간 정책과 주무관

1. 머리말

근 4차산업혁명의 핵심인 빅데이터와 인공지능기술 등의 신기술이 기존 산업의 혁신과 재편을 촉진하는 촉매제로 자리 잡았고 그 영향력이 확대되는 양상입니다. OECD의 "Artificial Intelligence in Society" 보고서에 따르면 인공지능 기술이 빠르게 도입되고 있는 10가지 분야, 즉 운송, 농업, 금융, 마케팅 및 광고, 과학, 건강, 형사 사법, 보안, 공공, 증강/가상현실 등이 있으며 인공지능을 사용하면 의사결정의 효율성 향상, 비용 절감 및 더 효율적인 자원 배분 등의 이점을 누릴 수 있다고 전망했습니다. 따라서 해양수산부에서 현재 진행하고 있는 인공지능형 연속자료 및 예측자료 생산의 배경 및 인공지능모델선정 및 개발 과정을 기술해 보려고 합니다.

2. 본론

◆ 2.1 배경

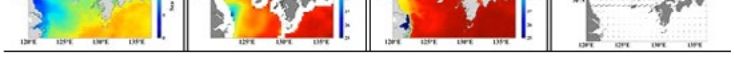
해양공간 정보는 미래의 해양공간관리를 위해 필수적인 요소이며 정책을 결정하는데 중요한 의사결정 자료로 사용됩니다. 하지만 현재의 국내의 해양공간정보는 해양의 특성상 연안 위주의 정점관측자료이며 이 정보들은 해양공간계획의 MSP격자 기준으로 격자 개수의 17%, 격자면적의 38%만 제공되고 있습니다. 그리고 해양 위성자료는 특성상 공간 측면에서는 관측자료보다 많은 영역의 정보를 가지지만 정점관측자료의 정확도 보다 신뢰성이 떨어집니다. 따라서 현재의 해양공간정보로는 의사 결정자료로 사용하기에는 부족함이 있습니다.
이번 과업은 국내 해양공간정보를 대표할 수 있는 신뢰도 높은 위성자료와 해양 수치 모델 자료를 사용하여 시간 공간적으로 연속성을 개선하고 관측정보를 토대로 하여 신뢰성이 향상된 해양 기본정보를 생산하고자 하는 것이 목표입니다.
과업에 선정된 해양기본요소에는 수온, 염분, 해상풍, 파랑, 수온 예측 등 5개의 요소가 선정되었으며 모델의 종류는 해양연속정보모델, 수온예측모델로 구분하였습니다. 2개의 모델 중 우리가 이번에 살펴볼 것은 해양연속정보 모델의 선정 및 개발 과정을 다루도록 하겠습니다.

◆ 2.2 자료수집

인공지능 학습자료는 `19년도에 조사된 학습자료 목록을 토대로 하여 <그림 2.1>의 위성자료와 <그림 2.2> 관측 수집하였으며 `20년도에 새롭게 추가된 파랑 연속자료를 생산하기 위하여 기상청에서 제공하는 지역파랑모델 자료를 추가 수집했습니다.

〈연계 위성자료 목록〉

OSTIA		SMAP		HYCOM		ERA5	
자료구분	위성정보(L4)	자료구분	위성정보(L3)	자료구분	자료구분	자료구분	재분석정
생산기관	UK Met (영국)	생산기관	NASA(미국)	생산기관	HYCOM(미국)	생산기관	ECMWF(유럽)
사료특성	수온	사료특성	염분	사료특성	염분	사료특성	바람
생산주기	1일	생산주기	1일	생산주기	3시간	생산주기	1시간
공간격자	6km	공간격자	25km	공간격자	0.3km	공간격자	6km



▲ <그림 2.1> 연계 위성정보 목록

자료명	관측정점 수	비고
해양환경측정망	417	시간해상도(4회/1년)
해양수질 자동관측망	21	시간해상도(5분)
해양수질자동관측망(하구역)	5	시간해상도(매월)
기상청(부이)	11	시간해상도(30분)
기상청(등표)	9	시간해상도(1시간)
실시간어장정보	64	시간해상도(30분)
연안정지관측자료	45	시간해상도(1일)
정선해양관측자료	351	외해, 시간해상도(격월)
어장환경모니터링(해수)	759	시간해상도(격월)
수출패류생산해역	11	시간해상도(임의)
조위관측소	61	시간해상도(월통계)
해양관측소	25	시간해상도(월통계)
해양관측부이	44	시간해상도(월통계)
해양과학기지	3	시간해상도(월통계)
근해생태조사	15	자료량 극소(1회관측성과만 수집)
합계	1,841	

▲ <그림 2.2> 연계 관측정보 목록

◆ 2.3 모델 조사 및 선정

1) 모델 조사

최근 몇 년간 다양한 분야에서 사용되고 있으며 기술개발이 가장 빨리 진행되고 있는 인공지능 학습기법 중 하나인 GAN[1] 기법을 선정하고 조사를 수행했습니다. GAN 기법은 생성자, 판별자로 불리는 두 개의 적대적 대립신경망이 서로 학습하여 진짜 자료와 같은 가짜 자료를 생산하는 모델입니다. GAN을 이용한 기법의 종류는 아래 <표 2.1>과 같습니다.

▼ <표 2.1> GAN 인공지능 모델 종류

	DCGAN	Pix2Pix	CycleGAN	cGAN	daGAN	SRGAN
특성	기존의 정보들을 조합하여 새로운 정보를 생산하는 기술	지도학습에 의한 이미지 변환 기술	비지도 학습에 의한 이미지 변환 기술	스케치 이미지를 사진 이미지로 변환 기술	특징 지점에 대하여 사용자의 지정한 색을 토대로 주변을 변화시키는 기술	저해상도 이미지를 고해상도 이미지로 변환 시키는 기술
예시	안경을 쓴 사람과 쓰지 않는 사람 정보를 활용하여 새로운 사람에게 안경을 씌우기	유채 사진을 컬러 사진으로 변환	말을 얼룩말로 변환	도시 풍경 그림을 도시 사진으로 변환	피부톤, 머리카락, 성별 등을 변환	훼손된 공간이나 빈 공간을 채워넣는 기술

2) 모델 선정

아래 <표 2.2>는 `19년도 인공지능 기법과 `20년도 인공지능 기법입니다.

▼ <표 2.2> `19년과 `20년 인공지능 기법

	`19년	`20년
연속모델	OI(최적보간)	daGAN(data assimil, GAN)
예측모델	ConvLSTM	pix2pixGAN

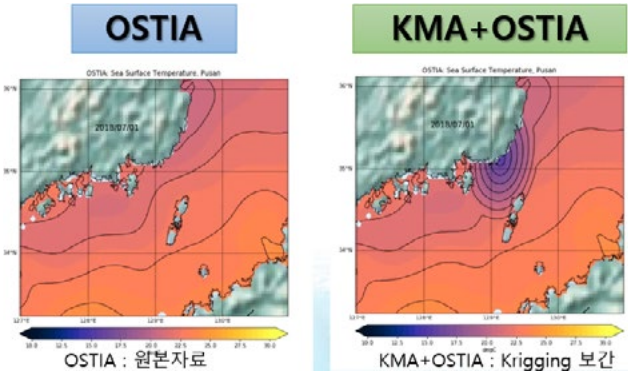
1) * GAN(Generative Adversarial Networks, 생성적 적대 신경망)

`19년 선정된 모델은 해양정점자료의 한계를 극복하였으며 시계열 자료의 한계를 극복했으나 성능이 자료의 다양성에 의존되었으며 만족스러운 결과가 나오지 않았습니다. 하여 `20년에 선정된 모델은 최근 기술이 다양한 분야에 적용되고 있으며 개발 속도가 가장 빠른 GAN 기법을 선정하였습니다.

인공지능 연속자료 생성 모델의 경우 국내 해양공간정보의 특성상 연안 위주의 정점자료이기 때문에 조사된 기법 중 SRGAN과 daGAN기법이 가장 적합하다고 판단되었으나 SRGAN의 경우 관측정점자료가 이미지 전체에 고르게 분포되어야 좋은 결과를 얻을 수 있는 기법이기 때문에 최종적으로 daGAN 기법이 선정되었습니다.

인공지능 수온예측자료의 모델의 경우 학습자료로 사용되는 해양공간정보가 대부분 쌍으로 이루어져 있어 GAN기법중 쌍으로 되어있는 이미지 간 변환 기술인 Pix2PixGAN 기법을 선정하였습니다. 예측모델로 선정된 Pix2PixGAN은 AutoEncoder의 위치정보손실을 개선한 U-Net을 생성자로 사용하며 PixelGAN과 ImageGAN의 단점을 중화시킨 PatchGAN을 판별자로 사용하는 인공지능 기법입니다.

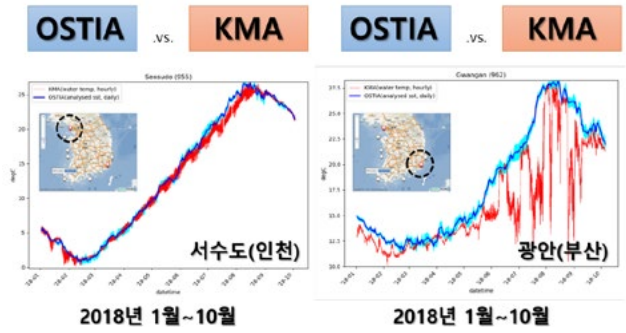
연속자료 생성 모델의 경우 `19년도에서 사용되었던 OI(최적보간) 기법은 선형보간 기법으로 거리에 따른 가중치 값으로 보간을 수행하며 아래의 <그림 2.3> 과같이 특정 관측지점의 영향이 크다는 것을 알 수 있습니다. 이는 관측정점이 다수 확보가 되지 않는다면 신뢰성 높은 자료를 생산하는 것에 한계가 있음을 보여줍니다. 따라서 인공지능 자료동화 기법인 daGAN의 경우 기존의 선형 보간 기법에서 나타난 한계를 개선할 수 있을 것으로 기대됩니다.



▲ <그림 2.3> 왼쪽: OSTIA위성자료,
오른쪽: OSTIA+KMA Krigging 보간자료

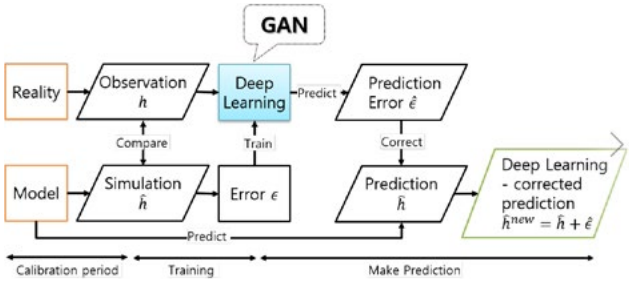
◆ 2.3 모델 학습

학습자료로 사용되는 위성자료의 경우 관측자료가 없는 지역의 해양공간정보를 갖고 있으나 아래의 <그림 2.4>처럼 연안지역의 관측자료와 비교했을 경우 위성자료와 관측자료가 일치하는 지역이 있는 반면에 차이가 크게 나는 지역이 있으며 크게 나는 지역의 경우 주로 여름철에 차이가 큰 것을 알 수 있었습니다. 따라서 인공지능 학습을 통하여 위성자료와 관측자료의 보간을 통해 자료의 신뢰도를 높이는 것이 모델 학습의 핵심입니다.



▲ <그림 2.4> OSTIA자료와 관측정점 자료 비교

인공지능 학습 모델 구조는 아래의 <그림 2.5>와 같이 자료보정단계, 학습단계, 예측단계 3단계로 이루어져 있습니다.



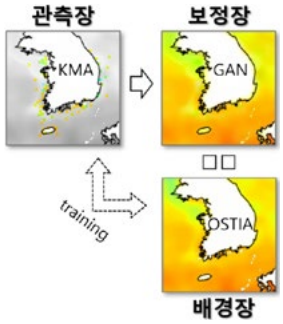
▲ <그림 2.5> 인공지능 학습 모델 구조도

◆ 2.4. 시범자료 생산

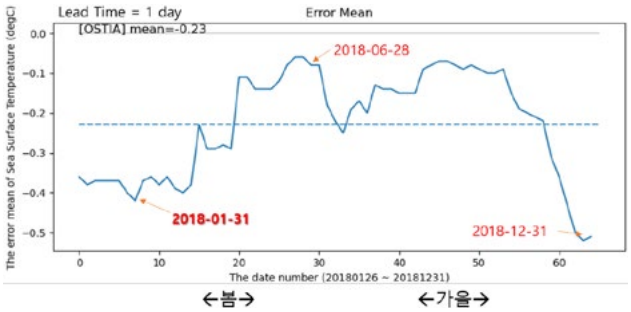
연속자료의 경우 <그림 2.6> 과 같이 위성자료와 관측자료로 보정 하였으며 학습은 매달 1일~25일, 검증은 26~말일로 하였고 총 학습기간은 2018년 1월 1일~12월 31일 까지 총 1년간의 자료를 학습하였습니다. <그림 2.7>을 보면 배경장으로 사용된 OSTIA자료와 daGAN 보정장의 차이를 시계열로 그렸을 경우 항상 OSTIA 자료보다 낮게 모의 하는 것을 알 수 있었습니다. 시계열 자료에서 Error Mean 값이 가장 작은 날과 큰 날을 분석해보았습니다.

보정 : OSTIA + KMA
학습 : 매달 1일 ~ 25일
검증 : 매달 26일 ~ 말일

기간 : 2018년 1월 1일
~ 2018년 12월 31일
(1년간)



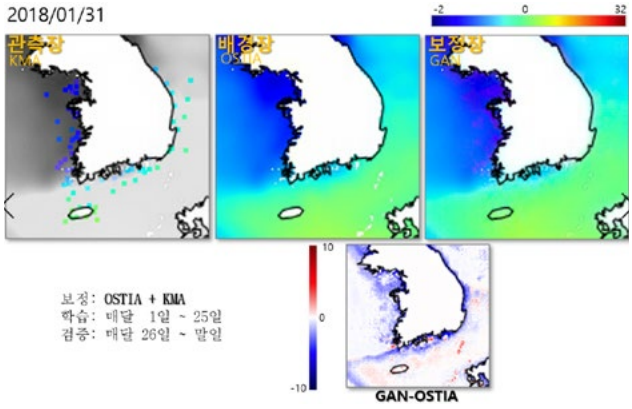
▲ <그림 2.6> daGAN 학습 방법



▲ <그림 2.7> 배경장(OSTIA)과 정장(daGAN)의 차이 시계열

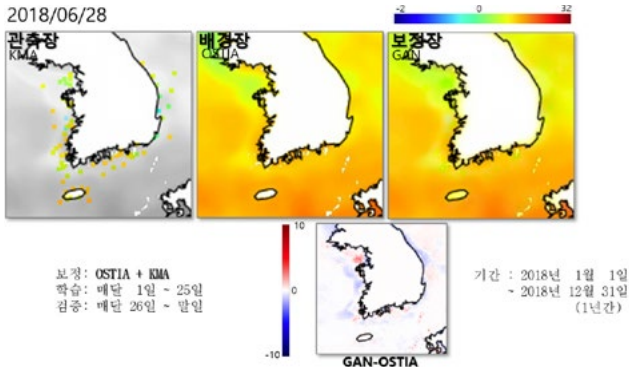
아래의 <그림 2.8>을 보면 첫 번째 이미지는 관측장, 가운데 이미지는 배경장(OSTIA), 세 번째 이미지는 보정장(daGAN) 자료이며 하단의 이미지는 보정장(daGAN)과 배경장(OSTIA)의 차이의 공간 분포도입니다.

공간분포를 보면 daGAN자료가 OSTIA자료에 비하여 연안지역이 다소 낮게 모의 되고 있음을 알 수 있습니다. 또한, 제주도 왼쪽지역은 관측정점 자료가 없음에도 불구하고 긴 띠처럼 낮게 모의 되고 있어 해류패턴과 유사하게 나타난 것으로 보입니다.



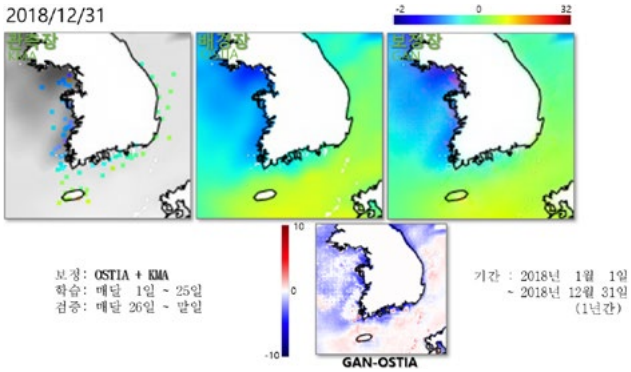
▲ <그림 2.8> 2018년 1월 31일

아래의 <그림 2.9>에서 하단의 GAN-OSTIA 를 보면 차이가 가장 작은 날로 공간분포가 전체적으로 잘 맞는 것을 볼 수 있었습니다.



▲ <그림 2.9> 2018년 6월 28일

아래의 <그림 2.10>을 보면 daGAN자료와 OSTIA자료의 차가 공간분포 전반적으로 OSTIA자료 보다 낮게 형성된 것을 볼 수 있었습니다. 이는 관측자료에 의한 자료동화가 잘 이루어진 것으로 보입니다.



▲ <그림 2.10> 2018년 12월 31일

3. 맺음말

인공지능형 연속자료생산 및 예측자료생산 과업의 중간단계에서 얻은 시범자료에서 선형 보간 기법과는 다른 차별된 결과가 나왔지만 실제로 자료의 결과가 맞는지는 추가적인 분석 과정이 진행되어야 할 것으로 보입니다.

그리고 인공지능 기법을 통해 산출된 결과를 수치 모델과 비교하여 인공지능 기법이 수치 모델의 어느 정도 수준에 도달하였는지 비교하는 것도 좋을 것 같습니다.

4. 참고문헌

Antipov, G., M. Baccouche, J.-L. Dugelay (2017) Face aging with conditional generative adversarial networks, DOI:10.1109/ICIP.2017.8296650.

Bin, H., C. Weihai, W. Xingming, L. Chun-Liang (2017) High-Quality Face Image SR Using Conditional Generative Adversarial Networks, arXiv:1707.00737.

Brock, A., J. Donahue, K. Simonyan (2018) Large Scale GAN Training for High Fidelity Natural Image Synthesis, arXiv:1809.11096

Brock, A., T. Lim, J.M. Ritchie, N. Weston (2016) Neural Photo Editing with Introspective Adversarial Networks, arXiv:1609.07093.

Brownlee, J. (2019). 18 Impressive Applications of Generative Adversarial Networks (GANs), Medium

Brundage, M., S. Avin, J. Clark, H. Toner, P. Eckersley, B. Garfinkel, A. Dafoe, P. Scharre, T. Zeitzoff, B. Filar, H. Anderson, H. Roff, G. C. Allen, J. Steinhardt, C. Flynn, S. O. hEigeartaigh, S. Beard, H. Belfield, S. Farquhar, C. Lyle, R. Crootof, O. Evans, M. Page, J. Bryson, R. Yampolksiy, D. Amodei (2018) The Malicious Use of Artificial Intelligence: Forecasting, Prevention, and Mitigation, arXiv:1802.07228.

Dash, A., J. C. B. Gamboa, S. Ahmed, M. Liwicki, M. Z. Afzal (2017) TAC-GAN – Text Conditioned Auxiliary Classifier Generative Adversarial Network, arXiv:1703.06412.

Gadelha, M., S. Maji, R. Wang (2016) 3D Shape Induction from 2D Views of Multiple Objects, arXiv:1612.05872.

Goodfellow, I. J., J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, Y. Bengio (2014). Generative Adversarial Nets, arXiv:1406.2661.

Huang, R., S. Zhang, T. Li, R. He (2017) Beyond Face Rotation: Global and Local Perception GAN for Photorealistic and Identity Preserving Frontal View Synthesis, arXiv:1704.04086.

Hui, J. (2018) GAN – Some cool applications of GAN, Medium.

Isola, P., J.-Y. Zhu, T. Zhou, A. A. Efros (2016) Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, arXiv:1611.07004.

Jin, Y., J. Zhang, M. Li, Y. Tian, H. Zhu, Z. Fang (2017) Towards the Automatic Anime Characters Creation with Generative Adversarial Networks, arXiv:1708.05509.

Karras, T., T. Aila, S. Laine, J. Lehtinen (2017). Progressive Growing of GANs for Improved Quality, Stability, and Variation, arXiv:1710.10196.

Ledig, C., L. Theis, F. Huszar, J. Caballero, A. Cunningham, A. Acosta, A. Aitken, A. Tejani, J. Totz, Z. Wang, W. Shi (2016) Photo-Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network, arXiv:1609.04802.

Li, Y., S. Liu, J. Yang, M.-H. Yang (2017) Generative Face Completion, arXiv:1704.05838.

Liu, M.-Y., O. Tuzel (2016) Coupled Generative Adversarial Networks, arXiv:1606.07536.

Ma, L., X. Jia, Q. Sun, B. Schiele, T. Tuytelaars, L. V. Gool (2017) Pose

Guided Person Image Generation, arXiv:1705.09368.
Pathak, D., P. Krahenbuhl, J. Donahue, T. Darrell, A. A. Efros (2017) Context Encoders: Feature Learning by Inpainting, arXiv:1604.07379.
Perarnau, G., J. van de Weijer, B. Raducanu, J. M. Alvarez (2016) Invertible Conditional GANs for image editing, arXiv:1611.06355.
Radford, A., L. Metz, S. Chintala (2015). Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks, arXiv:1511.06434.
Reed, S., Z. Akata, X. Yan, L. Logeswaran, B. Schiele, H. Lee (2016a) Generative Adversarial Text to Image Synthesis, arXiv:1605.05396.
Reed, S., Z. Akata, S. Mohan, S. Tenka, B. Schiele, H. Lee (2016b) Learning What and Where to Draw, arXiv:1610.02454.
Taigman, Y., A. Polyak, L. Wolf (2016) Unsupervised Cross-Domain Image Generation, arXiv:1611.02200.
Vasu, S., N. T. Madam, R. A.N (2018) Analyzing Perception-Distortion Tradeoff using Enhanced Perceptual Super-resolution Network, arXiv:1811.00344.
Vondrick, C., H. Pirsiavash, A. Torralba (2016) Generating Videos with Scene Dynamics, arXiv:1609.02612.
Wang, T.-C., M.-Y. Liu, J.-Y. Zhu, A. Tao, J. Kautz, B. Catanzaro (2017) High-Resolution Image Synthesis and Semantic Manipulation with Conditional GANs, arXiv:1711.11585.
Wu, H., S. Zheng, J. Zhang, K. Huang (2017) GP-GAN: Towards Realistic High-Resolution Image Blending, arXiv:1703.07195.
Wu, J., C. Zhang, T. Xue, W. T. Freeman, J. B. Tenenbaum (2016) Learning a Probabilistic Latent Space of Object Shapes via 3D Generative-Adversarial Modeling, arXiv:1610.07584.
Yeh, R. A., C. Chen, T. Y. Lim, A. G. Schwing, M. Hasegawa-Johnson, M. N. Do (2016) Semantic Image Inpainting with Deep Generative Models, arXiv:1607.07539.
Yoo, D., N. Kim, S. Park, A. S. Paek, I. S. Kweon (2016) Pixel-Level Domain Transfer, arXiv:1603.07442.
Zhang, H., T. Xu, H. Li, S. Zhang, X. Wang, X. Huang, D. Metaxas (2016) StackGAN: Text to Photo-realistic Image Synthesis with Stacked Generative Adversarial Networks, arXiv:1612.03242.
Zhang, H., V. Sindagi, V. M. Patel (2017) Image De-raining Using a Conditional Generative Adversarial Network, arXiv:1701.05957.
Zhang, R., J.-Y. Zhu, P. Isola, X. Geng, A. S. Lin, T. Yu, A. A. Efros (2017) Real-Time User-Guided Image Colorization with Learned Deep Priors, arXiv:1705.02999.
Zhang, Z., Y. Song, H. Qi (2017) Age Progression/Regression by Conditional Adversarial Autoencoder, arXiv:1702.08423.
Zhu, J.-Y., T. Park, P. Isola, A. A. Efros (2017) Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks, arXiv:1703.10593.
해양수산정보 (2019) 인공지능 기반 지식정보 생산·활용 결과 보고서. VII-9.

[감수 : 윤현덕(hdyoon@mju.ac.kr)]



최신기술동향

· 항만시설물 통합관리를 위한 BIM기반 통합 플랫폼 개발과 활용

· 비구조적 연안재해대책 동향과 시사점

항만시설물 통합관리를 위한 BIM기반 통합 플랫폼 개발과 활용



문 현 석
한국건설기술연구원 수석연구원
(hsmoon@kict.re.kr)

1. 머리말

최근 전세계적으로 4차 산업혁명이 대두되면서 BIM(Building Information Modeling)이 건설 산업의 혁신적 도구로 활용되고 있다. 이미 BIM은 건설 산업의 디지털 트랜스포메이션 (Digital Transformation)을 위한 핵심역할을 하고 있는 것이다. BIM은 이미 건축에서 많은 부분 일반화된 기술로 적용되고 있고, 기존의 전통한 건설 프로세스를 BIM기반으로 변화시키고 있다. 이러한 변화에 따라 토목분야에서도 건설생산성을 확보하기 위한 핵심도구로 적용이 확대되고 있다. 도로 및 철도 등은 공공발주기관 등이 BIM 관련 시범사업 등의 확대를 통해 BIM사업 발주와 설계 및 시공단계 적용을 적극 추진하고 있는 실정이다.

이러한 변화에 따라 항만분야에서도 BIM 도입을 통한 디지털화된 항만을 도입하기 위한 노력의 일환으로 다양한 정책을 마련하고 있다. 최근에는 정부는 디지털 뉴딜의 일환으로 SOC 디지털화를 추진하고 있다. 여기에는 항만 등에 대해 안전한 국토 시설 관리를 위해 디지털 트윈을 구축하는 등 10대 대표과제로 선정한 바 있다. 이러한 전략에 따라 항만의 디지털화가 가속화될 것으로 전망된다. 그러나 이러한 디지털 트윈체계의 변화에 대응하기 위해서는 BIM기반의 플랫폼 개발 환경 구축이 무엇보다 필요하다.

항만시설은 국가가 관리하는 보안시설이며, 시설의 유형이 항만, 부두, 도로, 철도, 건축 및 부대시설 등이 포함된 복합시설이다. 기존의 항만시설물은 2D기반으로 관리되고 있고 매뉴얼 방식의 정보입력과 관리체계를 가지고 있어 항만시설물 관리의 효율성을 저하시키고 있다. 또한 항만관련 시설물관리를 위한 표준체계가 구성되어 있지 않아 항만 정보의 관리방식도 매우 낙후되어 있어 업무 단계간 시스템간 정보를 공유 및 활용이 제약되는 것이 현실이다. 또한 항만 CALS, POMS 등 항만관련 시스템은 독립적인 자체 DB를 구축하고 있어 상호 시스템간의 데이터 교환 및 공유체계가 미흡하고 데이터의 구성을 위한 표준화가 이루어지지 않고 있다. BIM기반의 항만시설물 관리체계로 전환하기 위해서는 무엇보다 표준체계의 개발이 선행되어야 한다.

최근 인프라 시설의 설계방식이 기존 2D기반의 평면적 설계방식에서 3D기반의 입체적 설계방식으로 변화되고 있다. 그러나 항만시설은 여전히 2D방식의 설계를 수행하고 있고, 기술변화에 맞게 BIM 방식의 설계 체계가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 이로 인해 기존 2D방식이 가지는 설계오류, 정보의 비 투명성, 낮은 설계 생산성이 발생되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 높은 설계 생산성을 확보할 수 있도록 BIM 설계 방식으로 전환할 필요가 있다.

또한 이미 20년 이상의 노후화된 항만시설물이 증가하고 있고 이를 관리하기 위해 정기점검 또는 정밀안전진단 등을 수행하고 있다. 이미 POMS(항만유지관리시스템)나 FMS(시설물유지관리시스템)에 항만의 1, 2종 시설물에 대한 유지관리 이력이 관리되고 있다. 그러나 유지관리 점검데이터의 기록과 관리에만 그칠 뿐 이를 분석하여 성능예측 등의 수행은 어려운 실정이다. 이를 위해 기존의 항만 유지관리 이력을 빅데이터화 하고 항만의 열화변화를 예측함으로써 항만시설의 성능을 높일 수 있는 방안이 강구되어야 한다.

상기의 표준, BIM기반 설계지원, BIM기반 유지관리 이력체계를 단일의 환경에서 서비스를 제공하기 위해서는 클라우드 기반의 항만 BIM 통합 플랫폼이 개발될 필요가 잇다. 항만 BIM 플랫폼은 항만 BIM 성과품을 관리하고, 신속한 BIM설계 지원을 위한 라이브러리를 제공하며, 다양한 BIM기반의 업무지원 서비스를 클라우드 환경

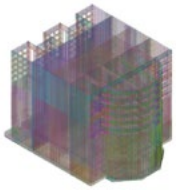
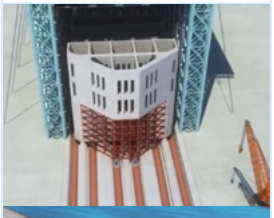
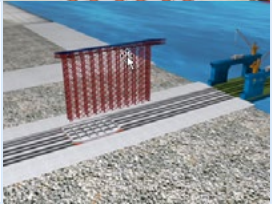
에서 제공할 것이다. 이와 함께 BIM환경에서 항만시설이 유지이력 관리 및 성능예측 정보의 시각화를 위한 서비스 환경도 제공된다. 이를 위해 해양수산부(이하 해수부)는 항만시설물의 디지털 생애주기 관리에 BIM 도입을 위해 2016년부터 기획과제를 수행하였다. 이에 따라 2018년부터 해수부의 지원을 통해 안전한 항만 구축 및 관리기술개발 사업의 일환으로 "생애주기별 항만시설 통합운영관리를 위한 BIM 기반기술 개발" 연구를 수행하고 있다. 본 기사에서는 현재 개발 중인 항만 BIM 플랫폼을 포함한 항만 BIM 표준, 항만 BIM 라이브러리 기반 설계자동화, 항만 BIM 유지이력 관리 및 성능예측 체계에 대해 설명하고 향후 디지털 항만 구축을 위해 어떻게 활용 될 수 있는지 알아보고자 한다.

2. 국내외 항만 BIM 적용 사례 및 분석

◆ 2.1 국내 항만 BIM 적용 사례

국내에서는 항만 BIM 적용 사례가 다수 있으나 발주처 요구에 의해 BIM을 도입한 사례는 부산국제여객터미널 사례가 유일하다. 기타 토목분야 사례는 항만 턴키사업 수행시 시공사가 자체적으로 기술검토를 수행한 사례가 대부분이다. 아래는 국내에서 수행된 BIM 적용사례이다.

▼ <표 1> 국내 항만분야 BIM수행사례

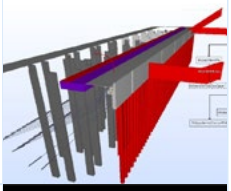
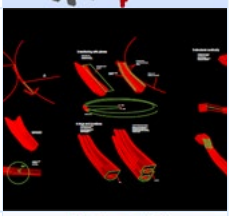
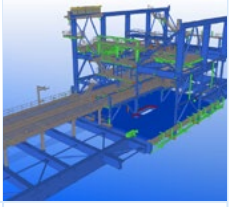
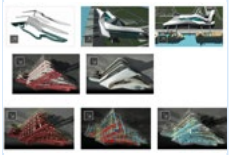
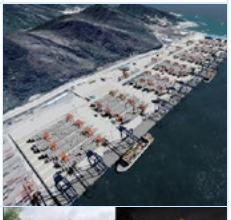
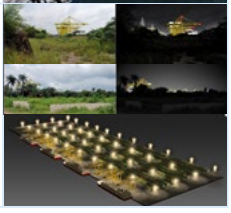
프로젝트명	BIM 활용분야	그림
부산항 국제여객 터미널	· 비정형 설계 · 동선검토 · 시공성검토 · 수량산출 · 공정시뮬레이션	
삼척 방파제	· 3차원 철근배근 간섭 검토 · 수량검토	
제주 해군기지	· 케이슨 설치 4D 시뮬레이션 · 케이슨 제작 공정 VR 검토 · 수량검토 · 3차원 공정관리 시스템 구축	
포항 영일만항	· 케이슨 설치 4D 시뮬레이션 · 케이슨 제작 시뮬레이션 · 3차원 공정관리 시스템 구축	

기존의 국내 사례들은 정보관점의 BIM을 다루는 것이 아닌 시각적 효과를 통한 의사결정 효율화에 중점을 두고 있다. 일부 사업에서는 부재간의 간섭을 검토하거나, 공법 및 시공과정에 대한 가상 시뮬레이션 적용 위주로 수행되었다.

◆ 2.2 해외 항만 BIM 적용 사례

해외에서는 주로 항만 일부 정박시설 구간에 대한 BIM 표준이나 GIS를 통합하여 설계 및 시공단계에서의 효율적인 항만관리를 수행하는 연구가 진행된 바 있다. 또한 설계-시공-운영 및 물류단계의 전반적 항만 프로세스 전 주기를 BIM기반으로 운영하는 사례(중국의 Gaolan)도 있다. 아래는 해외의 대표적인 BIM 수행사례이다.

▼ <표 2> 해외 항만분야 BIM수행사례

프로젝트명	BIM 활용분야	그림
The Port of Roatterdam (네덜란드)	· BIM/GIS 연계 · 표준정보모델 적용(IFC, CityGML) · Asset Management · 시각적 검토	
The Yokohama Port Terminal (일본)	· 시각적 검토 · 비정형 설계 · 의사결정 지원	
Rio Tinto Cape Lambert Port B Marine Works (호주)	· 안전성 검토 · 구조물 설치 검토 · 운영 및 보수문제 검토	
Tianjin Cruise Terminal (중국)	· 의사결정 지원 · 협업지원 · 간섭검토 · 동선분석 · 물량산출	
Gaolan Port Container Terminal (중국)	· 이미지기반 항만3D모델 구축 · 인프라 시설 통합 모델 · 설계 디자인 타당성 분석 · 가상시공 시뮬레이션 · 간섭검토 · Logistrics 시뮬레이션	
Lekki Harbour (나이지리아)	· 가상 및 실제 현장 비교 검토 · 항만전체 구간 BIM 설계	

상기 표에서 중국의 Gaolan 컨테이너 터미널 사례는 모든 인프라 시설을 BIM기반 통합 모델로 구축하고 물류 등의 시뮬레이션까지 연계하여 BIM을 수행한 대표적인 사례로 볼 수 있다. 일본의 Yokoham Port Terminal은 터미널의 비정형 철골 구조물에 대하여 3차원 설계를 수행하고 부재 제조에 활용한 바 있다. 이 외에도 코스타리카에서 수행된 Container Terminal in Mo n –Costa Rica는 항만 BIM 기반 시공 시뮬레이션, 모바일기반 현장 적용 및 협업관리 등을 수행한 바 있다. 이외에도 일부 유지관리에 BIM을 적용한 Barcelona Port 사례도 있다.

◆ 2.3 분석결과

상기의 국내외 사례들에서는 다양한 방식으로 BIM을 적용하였다. 일부 표준개발이나 협업체계를 구축한 사례도 있으나 대부분 단일 프로젝트 중심의 BIM적용에 그칠 뿐 관련 BIM데이터를 통합하고 이를 항만의 각 프로세스에 적용 관리 운용하는 측면의 시스템 등의 개발을 같이 이루어지지 못하였다. BIM은 무엇보다는 건설 전 주기의 정보를 어떻게 다루는지가 핵심이 된다. 이러한 관점에서 항만의 프로세스 동안 발생되는 정보를 통합하고 관리할 수 있는 표준, 라이브러리, 플랫폼 등의 체계가 단일 환경에 구축되는 것이 필요하다. 특히 BIM은 단일의 파일로 시작해서 단일의 파일로 끝나야 하므로CDE(Common Data Environment)기반의 협업체계를 마련하는 것이 요구된다.

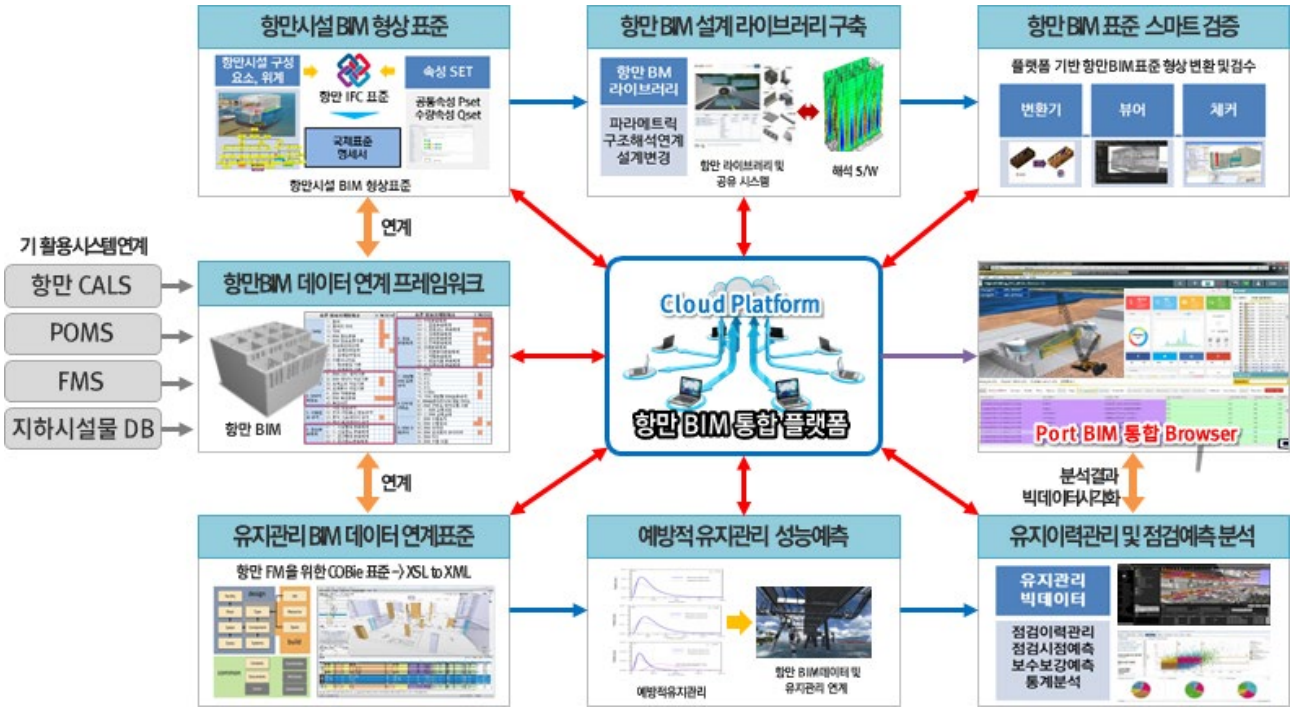
3. 항만 BIM 플랫폼 개발 연구 프레임워크

본 연구는 항만시설의 BIM 형상표준 및 정보유통 프레임워크를 개발하여 항만시설 정보의 지능화된 통합연계 및 설계활용 기반을 구축하고 항만 BIM 표준 형식에 따라 정의한 항만 유지관리 이력정보를 활용하여 항만시설의 사전 성능 예측에 대해 빅데이터 분석이 가능하도록 스마트 항만 BIM기술 도입 기반을 구축하는 것이다. 다음의 그림은 본 연구의 전체 개발 프레임워크를 구성한 것이다.

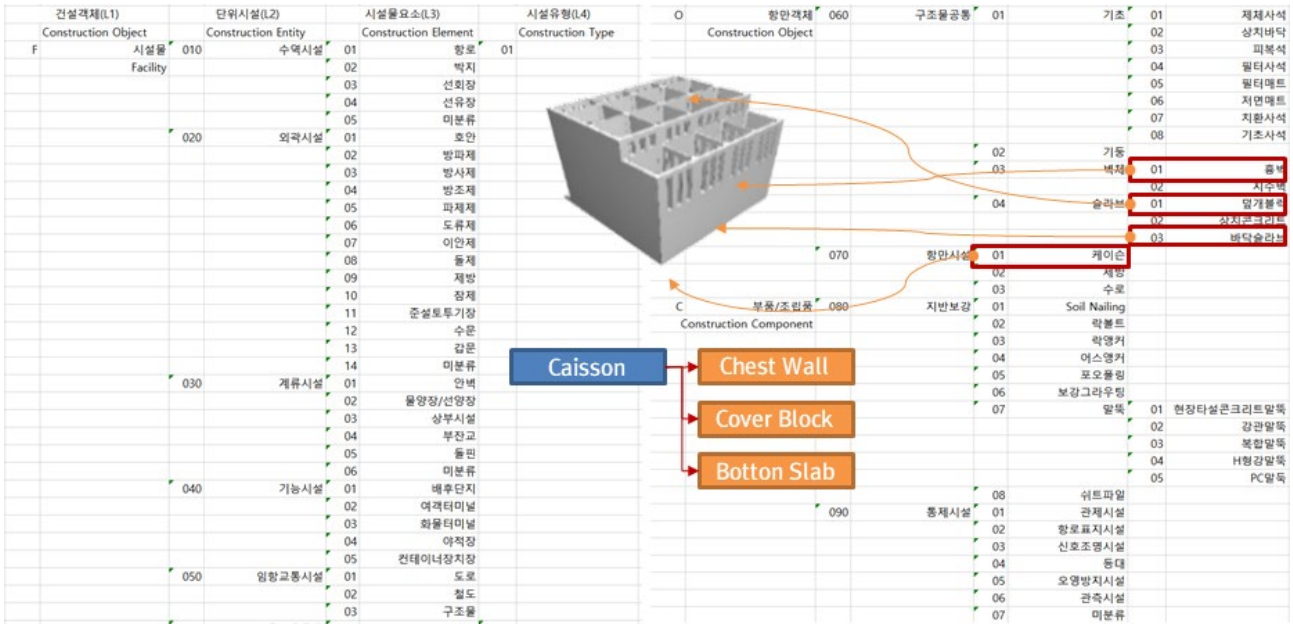
◆ 3.1 항만 BIM 표준

1) 항만 BIM 표준분류체계 개발

국내에서는 건설관련 정보를 다루기 위해 건설정보분류체계와 이를 기반으로 확장된 작업단위의 위계구조를 표준화한 작업분류체계(WBS)가 존재한다. 그러나 이는 2D기반의 환경에서 적용되는 것이어서 3차원 객체를 다루는 BIM관점에서는 다소 적용하기 어렵다. 즉 도면은 3D모델 자체가 되고 이를 기반으로 수량을 산출하는 등 객체를 통해 관리되고 처리되어야 한다. 이를 위해서는 객체관점의 새로운 분류체계가 필요하고 이와 연동되는 객체에 할당되는 속성분류체계 등이 개발되어야 한다. 이를 위해 연구에서는 객체 및 속성분류체계를 포함하는 항만 BIM 표준분류체계를 개발하였다. 아래의 그림은 항만 BIM객체분류체계의 일부를 나타낸 것이다.



▲ <그림 1> 항만 BIM 통합 플랫폼 개발 체계도



▲ <그림 2> 항만 BIM객체분류체계 구성(일부)

OBS hierarchy	OBS code
O(Object)-070(Common Facility)-01(Caisson)	
03(Wall)-01(Chest Wall)	O-070-01-03-01
04(Slab)-01(Cover Block)	O-070-01-04-01
04(Slab)-02(Bottom Slab)	O-070-01-04-02

▲ <그림 3> 케이슨에 대한 객체분류체계 구성 결과

이는 ISO12006-3인 "Framework for object-oriented information"을 기반으로 개발하였다. 항만 BIM객체분류체계는 단순히 파셋(Facet)의 조합이 아닌 고유의 시설결과물(Result)과 이를 구성하기 위해 하위시설 및 시설요소와 부재/부품 등을 조합하는 형태를 포함하고 모든 시설요소에 공통적으로 사용되는 공유 객체를 조합할 수 있도록 구성하였다. 다음은 항만시설 BIM 표준분류체계 중에서 케이슨에 대해 객체분류체계를 활용하여 코드체계를 예시로 구성한 것이다.

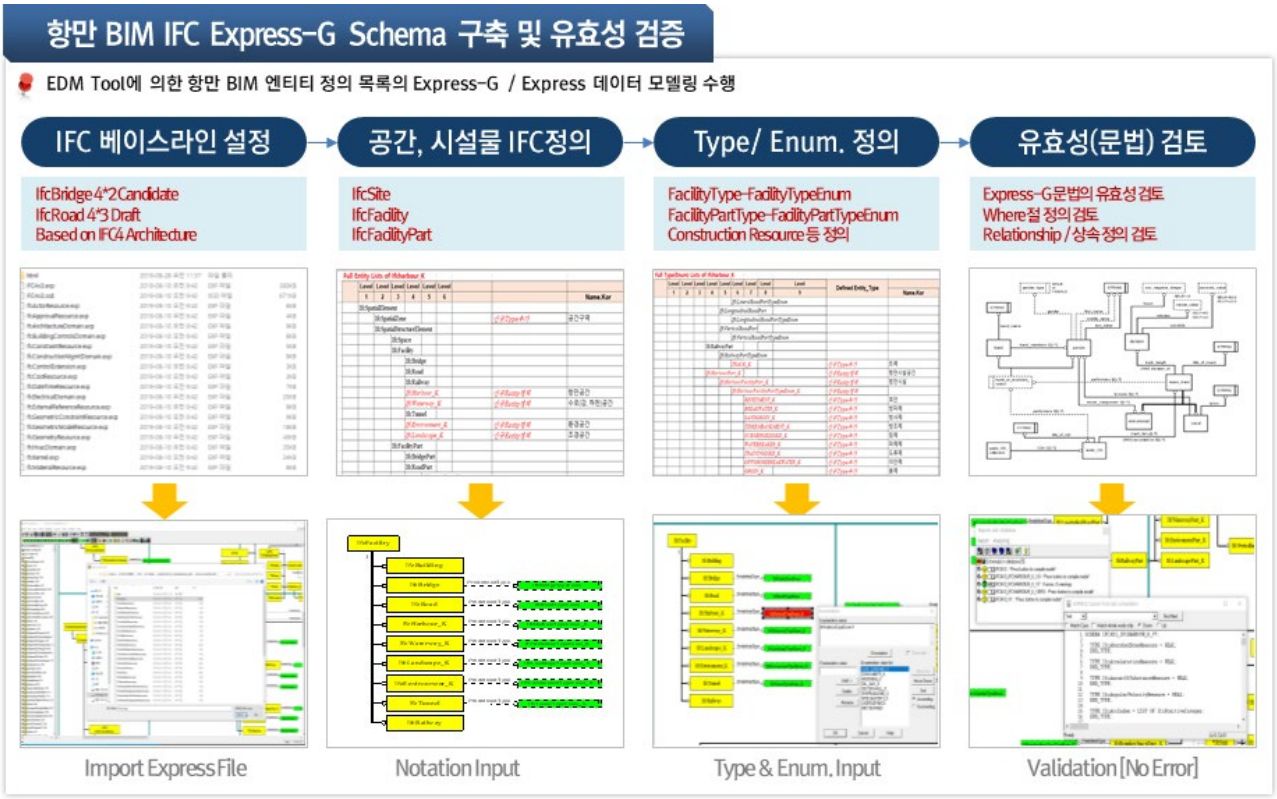
2) 항만 BIM 형상표준(IFC) 개발

BIM을 다루기 위해서는 이를 표현하는 3D모델과 속성에 대한 공통표준체계의 구성이 필요하다. 국제적으로 BIM데이터의 상호운용성을 확보할 목적으로 IFC(Industry Foundation Classes) 포맷을 개발하여 건설산업에 적용하고 있다. 이미 IFC표준은 ISO16739로서 국제표준으로 등록되어 있으며, 다수의 BIM S/W에서 이를 탑재하고 있다.

항만분야의 BIM 표준인 IFC개발 목적은 향후 항만산업에 BIM이 전면 적용될 경우 국가는 공통된 표준 기반의 BIM성과품을 제출받아 관리해야 한다. 현재에는 그러한 공통의 형상 표준이 없고 BIM S/W를 통한 자체 포맷을 제출할 경우에는 이를 뷰잉하거나 공통 데이터 체계로 관리하기 어렵게 된다. 또한 기존 건축에서 사용되는 IFC만으로는 항만의 형상을 표현하기 어렵고, 이를 컴퓨터가 이해할 수 없으므로 항만에 특화된 IFC를 개발하여 미래의 항만BIM 표준 환경에 대응해야 한다.

이를 위해 연구에서는 ISO16739인 IFC4를 기반으로 항만분야에 특화된 BIM형상표준인 IfcHarbour_K를 개발하였다.

이는 기존 IFC4의 스키마 구조에서 항만분야 특화 형상을 정의하여 확장한 것이며, 기존 형상을 표현하는 엔티티와 공유가 가능한 것들은 별도로 확장없이 재사용할 수 있도록 하였다. 또한 기존 형상엔티티 들 중에서 구조물이나 부재 타입의 추가만으로 형상을 정의할 수 있는 것은 타입 엔티티로 추가하였으며, 항만시설에 특화된 구조물과 부재인 경우에는 별도의 엔티티를 정의하여 항만법 제2조에 정의하고 있는 항만시설에 대한 BIM형상표현이 가능하도록 개발하였다. 다음은 항만 BIM표준인 IFC의 개발 구조를 나타낸 것이다.



▲ <그림 4> 항만 BIM IFC 표준 스키마 구축 절차

이러한 항만 BIM표준은 향후 항만시설의 납품되는 BIM성과품의 대표 포맷으로 공통 적용될 수 있다. 또한 항만의 생애주기 단계 동안 IFC 포맷으로 작성 저장된 파일을 지속가능하게 활용할 수 있는 장점이 있다. 특히 본 항만 IFC 포맷에는 IFC파일 작성시 입력된 모든 속성을 포함하게 되므로, 별도의 DB 구축없이도 IFC파일만으로 해당 구조물에 대한 세부 속성을 뷰어를 통해 일괄적으로 확인하는 것이 가능해진다. 이는 라이브러리의 공통 포맷으로도 활용될 수 있으며, 유지관리 성능 등급에 대한 이력 데이터를 입력하며, IFC파일을 기반으로 한 시계열 기반의 등급에 대한 시각화 이력관리를 가능하게 한다.

◆ 3.2 항만 BIM 표준 변환 및 검증 체계

상기의 항만 IFC 표준을 작성하기 위해서는 상용화된 BIM S/W에서 작동되는 IFC 변환기를 개발하고 변환하는 과정에서의 변환 오류를 사전 검토할 수 있는 체계의 개발이 필수적이다.

일반적으로 BIM S/W는 자체적인 파일포맷을 지원하고 있으나 연구에서 개발하는 항만 IFC로 변환하여 저장할 수 있는 기능이 없다. 우선 항만 구조물의 BIM설계 과정에서는 상용 S/W를 그대로 활용하여 자체포맷을 생성할 수 있다. 또한 해당 구조물에 대한 BIM 성과품을 납품할 경우에는 국가가 요구하는 BIM 성과품 포맷에 맞도록 변환하여 작성 납품 할 수 있어야 한다. 이러한 변환을 위해 상용 BIM S/W기반의 변환 Add-in 도구가 개발된다. 이는 BIM설계 후 설계된 각 구조물 부재가 기 정의된 IFC엔티티로 매핑하게 되고 각 엔티티에 해당하는 세부 속성을 입력한 후 변환을 수행하면 해당 부재의 IFC파일이 생성된다. 이 과정에 IFC로의 변환시 발생되는 매핑, 구조관계, 인스턴스 등의 오류를 체킹함으로써 최종 IFC파일을 작성하게 된다. 사용자(발주처, 민간) 등이 활용할 수 있도록 작성된 IFC 파일을 볼 수 있는 뷰어 등도 개발이 필요하다. 이러한 뷰어는 현재 개발 중이며, 4차년도인 2022년에는 온라인 BIM Viewer를 통해 항만 BIM 표준으로 작성된 IFC를 뷰잉할 수 있도록 플랫폼에 통합하여 운영할 것이다.

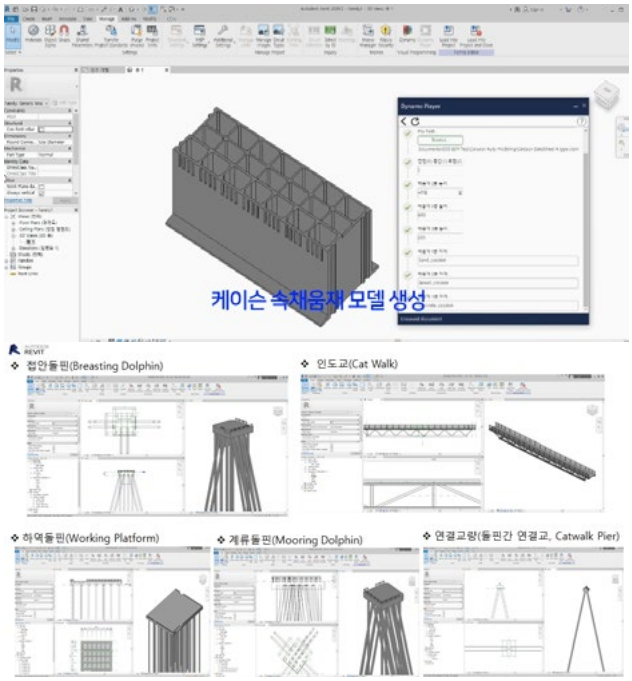
◆ 3.3 항만 BIM 라이브러리 기반 자동 설계 지원

라이브러리는 반복적으로 활용되는 모델을 미리 구축하여 저장해 놓은 모델 집합으로 정의된다. BIM의 중요한 목표중 하나는 설계 생산성을 높이는 것이다. 기존 2D환경에서 신속한 3D기반의 설계환경으로 전환하기 위해서는 항만 시설에 대한 다수의 라이브러리를 개발하고 이를 조합하여 구조물을 완성할 수 있도록 하는 설계 지원 환경을 구축해야 한다.

연구에서는 이러한 항만 BIM 라이브러리를 개발하기 위해 수역, 외곽, 계류 및 임항 교통시설에 대하여 약 600개 정도의 라이브러리를 개발하였다. 해당 BIM 라이브러리들은 모두 제원에 의해 신속한 변경이 가능하고 설계 제원을 변경함으로써 유사한 형태의 구조물 BIM 라이브러리를 신속하게 생성함과 동시에 방파제, 안벽 등의 항만 구조물에 대한 BIM 모델 구축이 가능하도록 하였다.

본 라이브러리는 기존 BIM 설계 S/W에 탑재된 비주얼 프로그래밍

기법을 적용할 기술을 활용하였다. 이를 위해 Revit의 Dynamo와 Allplan의 SmartParts를 활용하였으며, 해당 S/W에서 라이브러리의 직접변경과 조합에 의한 구조물 설계가 가능하도록 인터페이스도 구성하였다. 다음의 그림은 개발된 항만 BIM 라이브러리의 일부를 나타낸 것이다.



▲ <그림 5> 항만 BIM 라이브러리 구축 사례(일부)

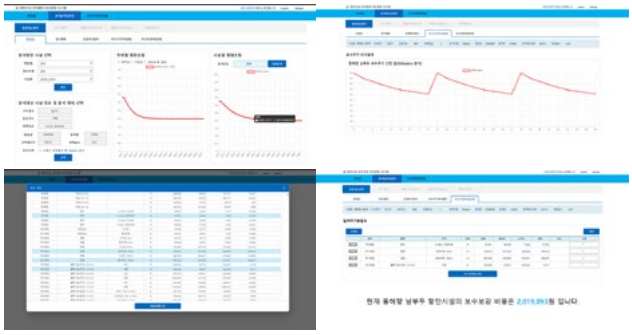
본 라이브러리는 엔지니어링사의 항만 설계 팀과의 협업을 통해 개발되었으며, 실제 항만 BIM 설계시 직접 활용 가능하도록 설계기준을 반영한 엔지니어링 관점에서 개발하였다. 이러한 라이브러리는 온라인을 통해 배포함으로써 다수의 설계자들이 직접활용 할 수 있도록 하는 온라인 공유시스템도 개발 중이다. 특히 라이브러리 설계 기준에 따라 인증된 라이브러리만을 업로드하여 배포할 수 있도록 라이브러리 품질 검증 시스템도 플랫폼에 탑재할 것이다.

이러한 항만 BIM 라이브러리는 항만 BIM 구조물의 신속한 설계시 활용할 수 있으며, 시공단계의 설계변경이나 유지관리단계에서의 보수보강시 교체 등에 직접 활용할 수 있다.

◆ 3.4 항만 BIM기반 빅데이터 유지이력관리 및 성능예측 기술

본 연구에서는 항만 BIM 적용을 위한 주요한 유스케이스로 항만 유지관리 분야를 채택하였다. 항만은 신규 항만 구축보다는 기 구축 항만시설에 대한 유지관리가 매우 중요하며, 이는 항만의 운영 및 물류와 높은 연동성을 갖는다. 항만 유지관리를 위해 1, 2종 시설의 유지관리 정기점검 및 정밀안전진단 보고서 등이 한국시설안전공단의 FMS로 제출되나, 제대로 관리되고 있지 않으며, 관련 유지관리 데이터도 디지털화 되어 있지 않아 항만시설의 열화 및 성능을 평가하는데 제약이 많다. 또한 시설 및 부재별로 유지관리 되지 않아 단위부재 등에 대한 열화를 확인하고 이에 따른 성능을 평가하는 것이 어렵다.

이를 위해 다음 그림에서 온라인 환경에서 운영 가능한 항만 유지관리 이력데이터 기반의 열화모델 산정 및 성능평가 화면을 구현하였다.



▲ <그림 6> BIM기반 항만 유지이력관리 시스템 프로토타입(일부)

본 시스템에서는 기존 제출된 각 해역별 항만에 대한 유지관리 이력데이터 중 정기점검 및 정밀안전진단 보고서의 부록 등에 포함된 유지관리 데이터20년치를 빅데이터화 하였다. 이를 기반으로 각 항만 시설별로 유사 패턴을 찾아 열화모델을 통계적 및 Markov Chain 기법으로 구축하였다. 또한 기존 한국시설안전공단의 종합성능평가 기법을 개선하여 추가되는 평가방안을 제시하였다. 이에 따라 선택적으로 종합성능평가가 가능하도록 하였다.

이는 현재 개발 중이며, 4차년도('21) 상반기에 플랫폼에 통합하여 온라인 서비스가 가능하도록 할 것이다. 그리고 각 항만시설에 대한 열화등급 및 성능평가 등급이 필터링 되고 이들 데이터가 항만 BIM 모델에 속성으로 입력되면, 각 부위의 열화 및 성능정보가 항만 모델을 통해 시계열 기반으로 시각화가 가능하며, 예측분석을 통해 열화변화 및 성능변화 예측이 가능할 것이다. 또한 이는 보수보강 주기에 대한 의사결정이 가능해지며, 보수보강 비용 등도 산정이 가능하도록 할 것이다. 다만 현재의 정기점검 및 정밀안전진단 데이터 들이 보고서의 형태로 존재하고 있어 연구에서 제시하는 시스템을 바로 사용할 수 는 없지만 추후 유지관리 데이터의 입력방식을 연구에서 제시하는 방식으로 전환한다면 손쉽게 구조물의 열화 및 성능평가를 수행하며, BIM기반으로 관리할 수 있을 것이다.

4. 클라우드 기반 항만 BIM 통합 플랫폼

연구에서는 상기의 항만 BIM표준분류체계, IFC 형상표준, BIM 라이브러리 및 공유 포털, BIM기반 항만 유지관리 시스템을 단일의 환경으로 통합하고 다양한 항만시설에 유연하게 대응할 수 있도록 하는 클라우드 기반의 항만 BIM 통합 플랫폼을 개발하였다. 현재 개발 중이며, 3차년까지 개발된 개별 시스템을 단일의 클라우드 환경에서 운영되도록 소스코드 및 DB 체계 등 개발환경을 일원화 하였다.

항만시설은 국가가 관리하는 보안시설이므로 아마존의 AWS, 마이크로소프트의 Azure 등의 클라우드 사설망을 활용할 수 없으므로 해역별 항만에 특화된 Private 방식의 클라우드 환경을 구축할 필요가 있다. 이는 각 항만공사, 항만청 및 운영사들이 최소의 비용으로 BIM기반의 항만 통합 플랫폼을 구축할 수 있도록 하는 H/W 및 S/W 인프라 환경을 제공해준다.

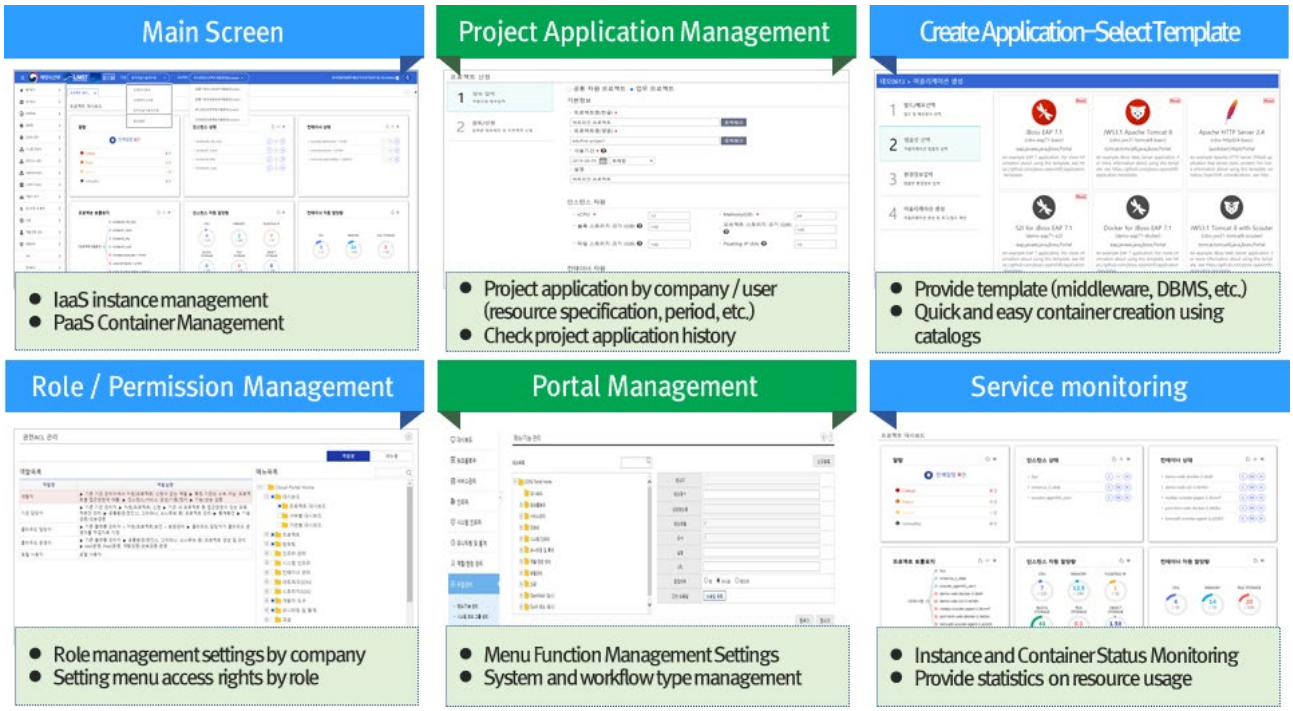
항만 BIM 플랫폼은 공사, 지방청 등이 자체 클라우드 H/W환경을 구축할 수 있도록 IaaS(Infastructure as a Service)를 구축하였고 이를 기반으로 관련 S/W개발 및 배포가 가능하도록 PaaS(Platform as a Service)를 IaaS와 함께 통합 개발하였다. 항만 BIM 모델은 대용량 모델과 데이터를 다루므로 파일서버 시스템 구축이 매우 중요하다. 이를 위해 별도의 BIM서버를 클라우드 환경에서 구축하였고 대용량 BIM 데이터의 실시간 로딩 구현을 위해 PaaS에 vGPU를 할당하였다.



▲ <그림 8> 항만 BIM 플랫폼의 BIM데이터 로딩 성능

이를 통해 vGPU를 할당하기 전과 후를 비교하였을 경우 약 60%이상의 모델로 로드 성능 개선을 확인하였으며, 렌더링 시간은 약 85% 수준으로 개선되었음이 확인되었다. 이를 통해 클라우드 환경에서 vGPU설치에 따라 BIM모델에 대한 로딩 성능이 개선될 수 있음을 증명하였다.

또한 PaaS환경 위에서 연구에서 개발하는 시스템들이 단일의



▲ <그림 7> 항만 BIM 플랫폼의 IaaS+PaaS 통합 플랫폼 주요 기능(일부)

환경으로 통합되어 서비스되는 BIM Browser를 개발하였다. 그리고 단위 프로그램이 클라우드 환경을 통해 배포될 수 있도록 하는 SaaS(Software as a Servie)를 개발 중에 있다. 특히 플랫폼에 저장된 BIM 모델로부터 추출된 데이터를 활용하여 항만의 BIM모델 현황, 항만시설 현황, 유지관리 데이터 현황 등을 통계적으로 확인할 수 있도록 항만 BIM Dashboard도 구축할 예정이다.

특히 본 항만 BIM 플랫폼은 단일 BIM 데이터로 사용주체간의 검토 승인 관리 등을 수행할 수 있도록 CDE(Common Data Environment)기반의 협업환경도 개발 중이다. 이렇게 되면, 항만 BIM데이터를 통한 관리자 및 사용자 간의 검토-승인-관리 등의 프로세스 수행뿐만 아니라 모델의 이력 및 버전관리 등을 처리할 수 있을 것이다.

현재 IaaS+PaaS환경을 개발이 완료되었고 4차년도('21) 상반기까지 개별 시스템을 단일의 플랫폼 환경으로 통합하여 서비스할 예정이다. 이러한 항만 BIM 플랫폼의 성능을 검증받을 수 있도록 TTA를 통해 인증을 추진 중에 있으며, SaaS에 대해서는 '21년도에 인증을 추진할 계획이다.

이렇게 되면 본 플랫폼은 항만 BIM 플랫폼으로서의 실무적 적용성능을 확보할 것으로 기대하며, 기존의 시스템과의 연계를 통해 모든 항만시설 데이터들이 BIM기반으로 디지털화 되어 통합 및 관리가 가능할 것이다.

5. 항만 BIM 통합 플랫폼 운영 시범사업

본 연구에서 개발한 항만 BIM 통합 플랫폼의 성능검증을 위해 '19년도에 한국건설기술연구원-부산항만공사-KIMST간에 부산신항에 대해 시범적용 추진이 가능하도록 MOU를 맺었다. 시범적용 대상은 부산신항 2-1단계 3부두에 해당된다. 올해 연말부터 내년도 상반기까지 해당 부두에 대해 BIM모델을 구축하고 이 과정에 연구에서 개발하는 BIM라이브러리의 적용을 수행할 것이다. 또한 부산신항 2-1단계 3부두의 유지관리 데이터를 바탕으로 BIM기반의 열화 및 성능평가에 대해 프로세스를 수행할 것이다. 특히 부산항만공사 관점에서 개발되는 항만 BIM통합 플랫폼이 적용될 수 있는지의 타당성을 검토하고 그 효과를 도출할 것이다.

6. 맺음말

최근 정부에서는 항만뿐만 아니라 타 SOC분야에서도 디지털화를 추진을 위해 SOC디지털화를 추진하고 있다. 그러한 과정에서 본 플랫폼은 기존의 항만 데이터를 디지털화하고 시설물을 BIM기반으로 관리할 수 있는 핵심 체계로 활용될 수 있다.

현재 개발 중이지만, 4차년도('21) 상반기에는 항만 BIM 통합 플랫폼을 가 오픈하여 다양한 항만시설에 대해 적용 가능하도록 검증할 계획이다. 또한 본 플랫폼을 활용한 2단계 R&D 사업도 추진 중이다.

연구에서 개발된 항만 BIM 분류체계 및 형상표준은 앞으로 항만시설물의 디지털화 및 통합관리의 기반 코드체계로 활용될 수 있을 것이다. 특히 항만시설의 디지털 트윈체계를 구축하기 위해서는 항만 BIM설계의 생산성을 확보하는 것이 중요하므로 연구에서 구축하는 항만 BIM라이브러리를 활용한 자동화 설계체계가 매우 도움이 될 것이다. 또한 항만 시설의 유지관리 점검 데이터의 입력 방식을 개선하고 이를 기반으로 시설 및 부재별로 열화 및 성능평가가 가능해진다면 좀 더 정확하고 신뢰성있는 유지관리 체계로 변화될 것으로 기대한다. 특히 이러한 빅데이터를 지속적으로 축적하면, 보수보강 주기 및 비용 등을 투명하게 산출할 수 있는 기반도 확보되어 관련 공무원 들의 편의성이 높아질 것이다.

마지막으로 이러한 시스템을 통합하는 단일 데이터 환경의 항만 BIM 통합 플랫폼은 머지 않아 항만시설의 디지털 트윈 플랫폼으로 연계되거나 변화될 것이며, 항만 시설물 관리의 디지털화를 가속화할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

과학기술정보통신부(2017). 혁신성장을 위한 사람 중심의 4차 산업혁명 대응 계획 I-Korea 4.0

기획재정부(2020). 한국판뉴딜, https://www.moef.go.kr/mp/nd/newDeal.do

한국건설기술연구원 (2016). 항만분야 BIM도입 및 활성화 기반 마련 기획 연구 보고서

한국건설기술연구원 (2018), 생애주기별 항만시설 통합 운영관리를 위한 BIM 기반기술 개발, 1차년도 연구보고서

한국건설기술연구원 (2019), 생애주기별 항만시설 통합 운영관리를 위한 BIM 기반기술 개발, 2차년도 연구보고서

문현석, 원지선, 신재영 (2018), 항만시설의 생애주기 업무지원을 위한 BIM 표준 프레임워크 구축, 한국BIM학회, 제8권 제4호, pp. 49-59

문현석, 현근주, 김원식 (2019), 항만 BIM 플랫폼의 클라우드 서비스를 위한 IaaS+PaaS 통합 환경 개발, 한국BIM학회, 제9권 제4호, pp. 62-74

[감수 : 홍상규(hsk2121@kecc.co.kr)]

비구조적 연안재해대책 동향과 시사점



윤 성 순
한국해양수산개발원 연구위원
(ssyoon@kmi.re.kr)

1. 서론

최근 10년 간 우리나라에서 발생한 자연재해 피해는 연평균 3,628억 원에 달하고 있고, 이를 복구하기 위해 매년 7,709억 원의 비용이 들었다. 자연재해의 위험은 상존하고 있으며, 기후변화와 해수면 상승으로 그 위험성은 더욱 커져가고 있어 자연재해의 피해 또한 커질 우려가 있다. 지금까지는 이러한 재해 위험에 대해 방파제, 이안제, 호안과 같은 시설물을 해안에 설치하여 방어하는 방식이 주로 적용되었다. 연안의 재해대응에 가장 대표적인 연안정비사업 역시 최근까지 재해대응을 위해 3천억 원 이상의 사업비를 투입하여 많은 시설물들을 설치하였다. 하지만 이러한 시설물 설치에 의한 구조적 대책은 해안을 인공화하거나 또 다른 피해의 원인이 되기도 하였으며, 재해위험에 대한 완전한 대책이 되지 못했다.

커져가는 재해의 위험성에 맞서 현재의 공간을 고집스럽게 방어하고자 할 때는 더 많은 비용이 소요되고 있고, 유지·관리에도 더 많은 비용이 필요하다. 이 경우에는 상습적인 위험지역을 피하는 것을 고려해야 한다. 재해대응의 주요 전략 가운데 '회피(해안 후퇴)' 전략이 있다는 것을 모르지 않음에도 불구하고 연안의 개발·이용의 밀도가 높은 우리나라에서는 제대로 적용해보지 못했다.

하지만 지금까지의 재해대응의 거의 대부분을 차지했던 구조적 대책의 문제와 한계를 충분히 경험한 우리는 보다 장기적이고 근본적인 대책을 위해 과거보다 더 나은 대책을 위해 새로운 방식으로서의 비구조적 대책에 대해 적극적으로 검토하고 시행할 필요가 있다. 궁극적으로는 우리의 연안을 지속가능한 공간으로 만들고 안전하게 이용할 수 있도록 기반을 다져나가야 할 것이다.

따라서 본 기고에서는 비구조적 대책의 필요성과 대표적인 비구조적 대책을 소개하고 우리나라에 적용 가능성을 제시함으로써 비구조적 대책에 대한 공감대를 확대하고 향후 연안의 자연재해대책을 개선하는데 도움이 되고자 한다.

2. 비구조적 대책의 필요성

연안의 자연재해는 대부분 해양으로부터의 외력 즉 파랑, 바람, 해수의 흐름과 같은 외력에 의해 발생된다. 이러한 해양으로부터의 외력을 제어하기 위해 콘크리트 재질의 구조물, 즉 방파제, 호안, 돌제, 잠제 등 설치하는 구조적 대책이 주로 이용되었다. 이러한 경향은 연안정비기본계획에 반영된 연안보전사업 대부분이 아직도 구조적 대책을 활용하고 있다는 것에서도 분명하다. 이러한 구조적 대책은 시급한 복구가 필요하거나 단기간의 효과를 만들기에 유리하지만 해안을 인공화하고 경관을 훼손하거나 2차 피해의 원인이 되기도 하는 부작용을 일이키기도 한다.

▼ <표 1> 제3차 연안정비기본계획의 구조적 대책 현황

구분	전체 사업지구	연안보전 사업지구	구조적 대책지구	비구조적 대책지구
사업지구 수(개)	370	296	272	24

자료 ; 윤성순 외(2019), p.40

한편 비구조적 대책이란 구조물 설치가 아닌 방식의 대책이란 뜻인데, 구조물을 설치하지 않으면서 해양으로부터의 외력에 대응한다는 것은 불가능해 보일 수 있지만 공간의 통합적관리를 통해 재해에 대응할 수도 있다. 재해 위험지역을 또 다른 시설물을 설치하여 적극적으로 방어하기보다 안전지역으로 후퇴하거나 피해대상물을 저감, 분산하는 방식이 대표적인 비구조적 대책이다. 도시계획을 통하여 상습 피해지역의 개발 밀도를 낮추거나 추가적인 개발을 억제하거나 안전한 지역으로 시설물을 이전하는 것도 가능한 방식이다. 이러한 대책들은 실질적으로 위험지역의 기존 이용자들이 동의할 수 있는 여건 조성이 무엇보다 중요한데, 소유한 토지를 매수하거나 이주를 위한 다양한 경제적 유인책을 제공할 필요가 있다.

구조적 대책에 비해 비구조적 대책은 시행에 많은 시간이 소요되고 효과는 더디게 나타난다. 하지만 그 효과는 재해대책으로서 보다 안정적이고 장기적이며 피해 재발의 가능성을 원천적으로 낮출 수 있다. 게다가 연안의 자연환경을 유지하고 지역 활성화 및 공간 재창출과 같은 부수의 효과까지 얻을 수 있다.

따라서 구조적 대책 일변도의 연안재해 대응의 한계와 문제에 대한 인식이 공감대를 얻기 시작한 지금부터는 개선된 대안을 검토해야 하고, 다양한 비구조적 대책의 개발과 적극적인 도입 노력이 필요하다. 물론 모든 연안에서 적용하기보다 유리한 조건에 따라 선별적으로 적용하기에 충분한 이유가 있다고 판단된다.

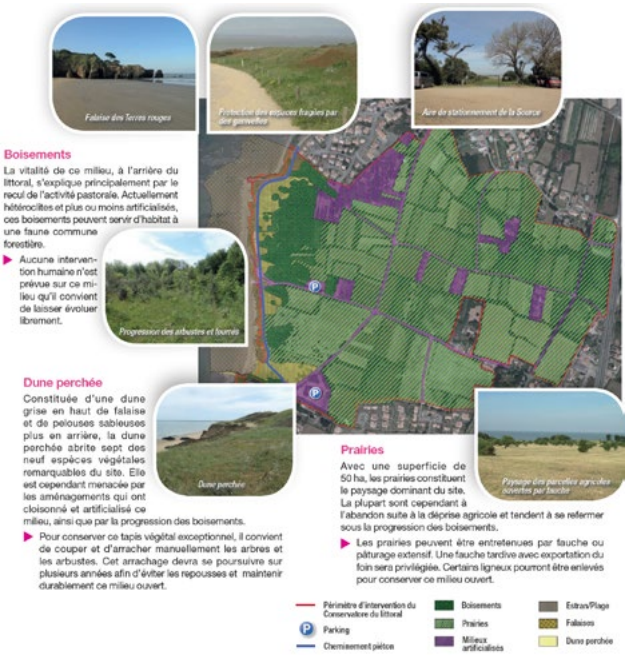
3. 국내외 사례

◆ 3.1 해외사례

프랑스는 지중해를 따라 약 5,800km에 이르는 해안선을 가지고 있으며, 해안 주변으로 인구밀도와 이용밀도가 높고, 연안침식과 같은 재해가 빈번하게 발생한다. 지중해 연안, 노르망디 및 북부연안에서는 심각한 연안침식 현상이 나타나고 있으며, 특히 북부연안의 Wissant Bay는 최근 약 50년간 250m 이상의 해안선 후퇴가 일어난 것으로 알려져 있다.[1)]

이러한 연안재해에 대응하기 위해 프랑스 정부는 1970년대부터 연안지역의 토지를 국가가 매수하는 정책을 시행하고 있다. 1975년에 「연안지역 및 호숫가 보존협회 설립에 관한 법률(Loin°75-602 du 10 juillet 1975 portant cr ation du conservatoire del'espace littoral et des rivages lacustres)」을 제정하고, 정부기관인 연안보전협회(Conservatoire du littoral)를 설립하여 연안의 토지를 계획적으로 계속 매수하고 있다. 특히 1986년에 제정한 「해안법(loi littoral)」은 이러한 정책의 법적 근거를 더욱 공고히 하면서 추진기반을 강화시켰다.

환경부 산하의 정부조직인 연안보전협회는 연안 및 호숫가에 위치한 자연적인 또는 경관적인 가치가 있는 토지를 확보 및 보호하는 것을 목적으로 운영되고 있다. 이 협회에서는 연안토지를 협의매수(Amicable acquisition), 선매권 행사(Preemption), 수용(Expropriation)의 방식을 통해 매수하고 있으며, 약 80%를 협의매수 방식으로 매수한다. 2019년 기준으로 750개 지역의 213,500ha를 매수하였는데, 이는 연안의 14%에 해당하는 규모이다. 연안보전협회는 이러한 매수 토지를 그대로 보존하거나, 훼손된 지역을 복원하거나 또는 기존의 이용형태를 유지하도록 한다. 사례로 프랑스 동부해안에 위치한 매수지역(Les Terres rouges)에 대한 관리계획에서는 침식 대응을 위한 나무울타리(des barrieres ganivelles) 설치, 경관 개선을 위한 인공시설물 제거, 특이한 식생 보호를 위한 나무나 관목 제거 등을 위한 사업 내용이 포함되어 있다.



자료 : Loire-Atlantique(2016), Plans de gestion du Conservatoire du littoral-Site des Terres rouges, p.2

▲ <그림 1> 프랑스의 매수한 토지에 대한 관리계획 사례>

재해방지의 목적이라면 연안에 완충공간을 확보하거나 피해대상물의 입지를 원천적으로 제한 또는 저감하는 효과를 얻을 수 있는 것이다. 프랑스는 '2015~2050 실행전략'에 따라 1,000개의 지역 320,000ha를 매수할 목표로 사업을 추진하고 있다.

연안재해의 대응전략으로 해안후퇴를 위해서는 기존 토지소유자 또는 이용자들의 설득이 필수인데, 국가가 상습적인 위험지역의 토지를 매수함으로써 해안후퇴 전략의 이행 조건을 만들 수 있는 것이다.

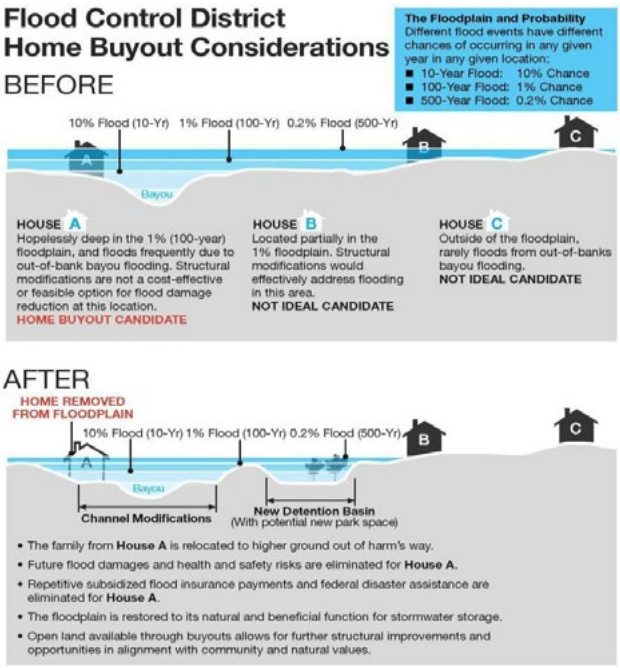
1) 윤성순·정지호·김대경(2018),「연안토지매입 동향과 도입가능성 검토」, p. 49.



자료 : 윤성순 외(2017), p.145

▲ <그림 2> 토지매수의 개념

미국의 경우 재해대응 주관 기관인 연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency, FEMA)의 예산지원을 중심으로 지방정부가 재해 취약지역의 토지와 건물 등을 매수하고 있다. FEMA의 위해저감 교부금사업(Hazard Mitigation Grant Program, HMGP)을 통해 연안지역에서 매수된 토지와 건물은 총 140건이며, 4억 3,161만 달러가 소요되었다. 이 밖에도 각 지방정부 차원에서도 토지 매수가 이뤄지는데, 텍사스주 Harris County의 경우 1985년부터 2017년까지 약 4.3㎢의 토지를 매수하였는데, 여기에는 총 2,105개의 건축물이 포함되어 있다.



자료: Harris County Flood Control District 홈페이지

▲ <그림 2> Harris County 홍수통제구역 주택매수의 고려사항

◆ 3.2 국내사례

연안 자연재해에 대한 비구조적 대책의 대표적인 사례를 거제 와현해안에서 찾을 수 있다. 와현해안은 2003년에 내습한 태풍 매미로 인해 해안가 주택의 파손을 비롯한 마을 전체에 큰 피해를 입었다. 이에 대한 대책으로 파손된 주택을 복구하고 재발 방지를 위해 해상에 방파제를 설치하는 것이 통상적인 방식이지만, 해안으로부터 일정거리를 후퇴한 안전한 지역에 택지를 조성하여 이주하는 방식을 택했다. 「국토계획법」에 따른 용도지역 변경, 「건축법」에 따른 건축허가 방식을 적용하였다. 피해를 입은 약 47,000㎡의 면적과 배후지역을 매수하고 기존 해안가 마을보다 내륙으로 약 45m 후퇴한 지역에 토지이용계획(용도지역 변경, 도로 개설 등) 변경을 통해 택지를 조성하였다. 태풍에 의해 피해를 입었던 지역은 자연재해를 완충하고 지역주민과 관광객이 이용할 수 있는 해안공원 및 주차장으로 조성하였다. 이로써 와현해안은 방파제와 같은 강성 구조물을 설치하지 않고도 매미와 같은 태풍이 재내습한다해도 피해가 반복될 위험이 없어졌다.

한편 와현해안의 재해대책으로 구조물을 설치할 경우, 해안 300m 지점에 100m의 저천단 이안제 2기의 설치가 필요하다고 판단되며, 비용은 약 137억 원이 예상된다. 이 비용에는 설치비용만 계상한 것이며, 유지 및 보수비용은 반영하지 않은 것이다. 반면에 해안후퇴사업에 소요된 비용은 총 139억 원이며, 이 가운데 33억 원은 이전한 택지의 분양으로 회수하여 최종적으로는 106억 원 수준이었다. 이밖에도 연안후퇴사업은 거주민 생활환경편익과 친수공간 제공편익이 발생되기 때문에 이를 감안하면 경제적으로 더욱 효율적이다.



▲ <그림 3> 거제 와현해안 해안후퇴사업 사례

거제 와현해안의 재해복구사업은 전통적인 구조물 설치방식이 아니라 도시계획이라는 공간관리방식을 활용한 해안후퇴 전략의 실행사례이다. 이처럼 재해대응을 위해 구조물을 설치하지 않아도 장기적으로 훨씬 안전한 환경을 조성하면서 경제적으로도 유리한 방안들을 만들 수 있다.

4. 맺음말

자연재해는 피해액보다 복구비가 2배 이상이 필요하고, 단순 복구는 피해 재발의 위험에서 벗어나지 못한다. 그리고 피해 예방을 위해 여러 구조물을 설치하여 방어하는 구조적 대책은 불완전한 대책이고 또 다른 피해를 발생하는 원인이 된다는 것을 지금까지의 많은 경험을 통해 체득하였다. 안전을 위협하는 자연재해에 방어하기 위한 구조물 설치는 필요하다. 하지만 단기간의 효과를 얻기 위해 부작용이 예상되는 구조적 대응방식을 고집하는 것은 바람직하지 않다. 대도시의 주거지와 같은 고밀도 이용지역이 아닌 농어촌과 같은 저밀도 이용지역에서는 비구조적 대책의 적용을 적극적으로 검토할 필요가 있다.

다행히 해양수산부에서는 제4차 연안정비기본계획을 수립하면서 토지매수를 통한 해안후퇴를 대안으로 제시한 지구를 포함시켰다. 이것은 구조적 대책 일변도의 대응방식에서 해안후퇴를 가능하게 하는 토지매수를 통해 비구조적 대책이 시행되는 첫 걸음이 되는 유의미한 변화이다.

본 기고에서는 비구조적 대책의 필요성을 토지매수를 중심으로 언급했지만, 연안의 지속가능성을 높이고 궁극적으로 보다 안전한 연안을 만들기 위해 더 다양한 비구조적 대책들이 개발되고 적극적으로 시행되기를 기대한다.

참고문헌

윤성순·정지호·김대경,「연안토지매입 동향과 도입 가능성 검토」, 한국해양수산개발원, 2018

윤성순·정지호·최석문·박희망,「연안침식 대응정책의 개선방안 연구」, 한국해양수산개발원, 2017

윤성순·정지호·최석문·좌미라,「재해대응 및 환경보전을 위한 연안토지 매수 이행방안 연구」, 한국해양수산개발원, 2019

해양수산부, 제3차 연안정비기본계획 지구별 조서, 2020

Harris County Flood Control District 홈페이지, https://www.hcfcd.org/Hurricane-Harvey/Home-Buyout-Program/Funding-Sources-for-Home-Buyouts

Loire-Atlantique, Plans de gestion du Conservatoire du littoral-Site des Terres rouges, 2016

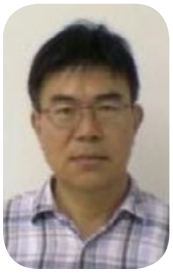
[감수 : 안익장(ikejangan@hanmail.net)]



해외건설현장

· 홍콩 Tung Chung New Town Expansion 건설공사 시공 사례

홍콩 Tung Chung New Town Expansion 건설공사 시공 사례



박 홍 신
삼성물산 수석
(tomashs@samsung.com)



박 재 영
삼성물산 책임
(jy2011.park@samsung.com)



홍 윤 기
삼성물산 선임
(yoonki1.hong@samsung.com)

1. 프로젝트 개요

Tung Chung New Town Expansion 건설공사는 홍콩 정부의 최우선 사업인 서민 주거 부족 해결을 위한 부지 공급 Program의 일환으로 계획되었다.

90년대말 개항한 첵랍콕 공항 지원도시 설립을 위해 인구 120,000명 수준의 정부 주도형 신도시 개발 사업('03년 Ph.3A 종료)으로 추가 개발을 통해 현 Tung Chung을 주거, 교육, 쇼핑, 사업이 동시에 가능한 인구 270,000명의 도시로 개발 추진하는 것을 목표로 홍콩 CEDD(Civil Engineering & Development Dept. 토목기술청)가 발주한 공사이다.

홍콩 란터우섬 북동부 Tung Chung 지역에 위치하고 있는 프로젝트 현장은 지반개량 후 134ha 규모(여의도 면적의 50% 정도)의 매립공사 및 호안공사를 수행하여 신규 부지를 공급하는 부지조성 프로젝트이며, 삼성물산, 홍콩 BK(Build King) JV(Joint Venture)로 2017년 12월 29일 착공하여 공사기간 79개월의 프로젝트를 현재 진행 중이며, 주요 공사 개요 및 규모는 <그림 1>, <그림 2> 및 <표 1>, <표 2>와 같다.

본문에서는 Tung Chung 매립 프로젝트의 진행된 주요 공정에 대해 소개하도록 하겠다.

▼ <표 1> 프로젝트 공사 개요

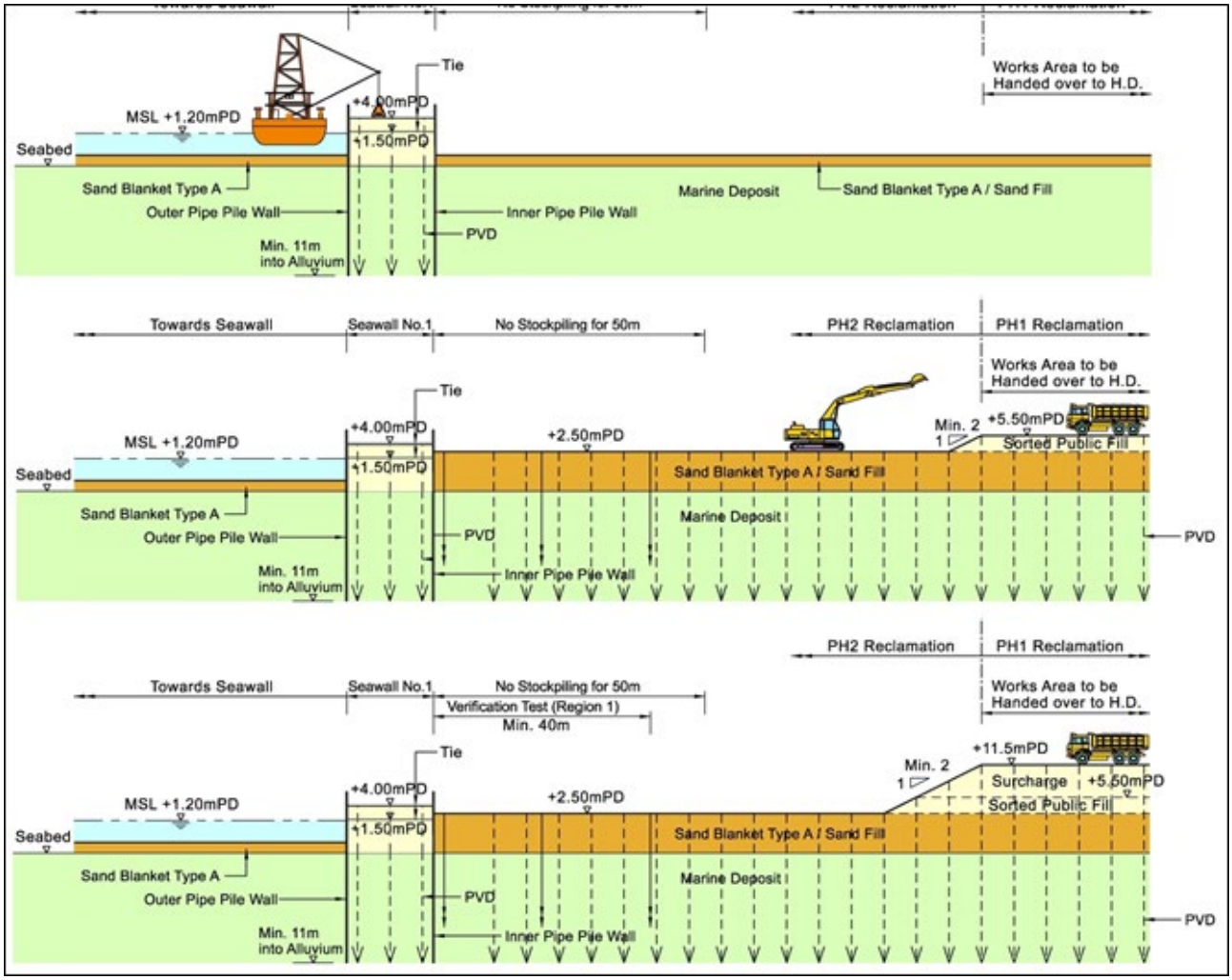
구 분	내 용
공 사 명	Tung Chung New Town Extension – Reclamation and Advanced Works
위 치	홍콩 란터우섬 북동부 Tung Chung 지역 (홍콩국제공항의 남쪽)
발 주 처	CEDD (Civil Engineering & Development Dept.)
공동도급	Build King, 삼성물산
공사 금액	약 980백만불
계약 공기	79개월 (2017.12 ~ 2024.07)
공사 내용	신규 매립지 조성(지반 개량 및 매립) Seawall 및 방파제 설치 공사



▲ <그림 1> 프로젝트 위치도



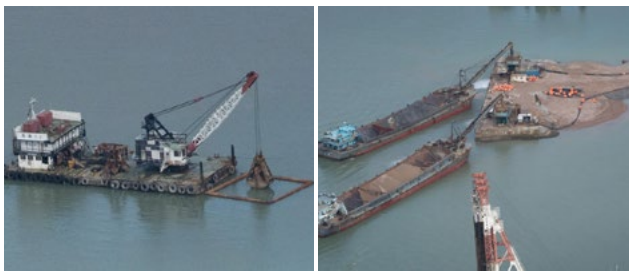
▲ <그림 2> 프로젝트 조감도



▲ <그림 3> 매립 계획

▼ <표 2> 프로젝트 인프라 부분 주요 규모

구 분	내 용
Reclamation	• 134ha *여의도 면적의 45%
Soil Improvement (PVD)	• 약 50 mil. m
Seawall	• 약 5 km (Slope/Vertical/Echo-shoreline)
DCM (Seawall foundation)	• 약 4 mil. m^3
Multi-cell drainage box culvert	• 약 500 m
Breakwater	• 약 150 m



▲ <그림 4> Grab Dredger와 Sand Pump

2. 프로젝트 주요 공정

◆ 2.1 매립 공사

부지 매립은 Seawall(호안) 내부 약 134ha 부지에 Geotextile, 모래매립, PVD(Plastic Vertical Drain)시공, Public Fill 매립의 순서로 진행이 된다.

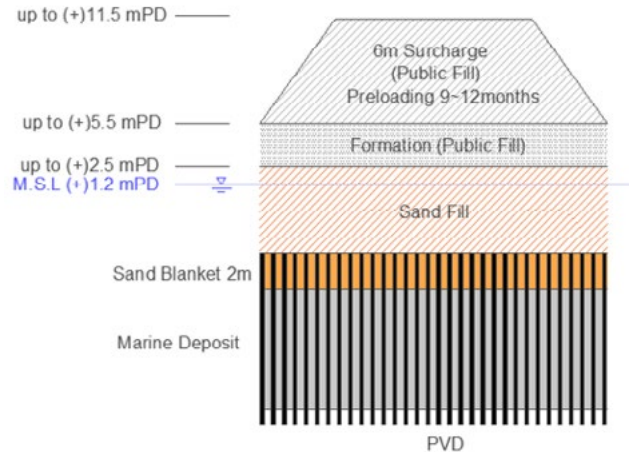
모래매립은 Grab 준설선 및 Sand Pump를 이용하여 1.0m~2.0m 두께로 Sand Blanket(약 296만m3)을 포설한 이후, +2.5mPD(Principal Datum)까지 모래 매립(약 388만m3)을 수행한다(그림 3, 그림 4 참조).

연약층(Marine Deposit) 개량을 위해 시공되는 PVD(Plastic Vertical Drain)는 Land PVD와 Marine PVD로 구분 되며(그림 5 참조), Land PVD는 Sand Blanket 상부(Seabed 상단 2m)에서 Alluvial층 하부 2m까지, Marine DCM은 Sand Fill 상단(2.5mPD)에서 Alluvial층 하부 2m까지 시공을 한다.



▲ <그림 5> PVD 시공 위치도

Public Fill 매립은 Sand Fill 상부, 해수면 위의 조건에서 +5.5mPD(Formation Level)까지 매립을 하고 6m 높이의 Surcharge를 시공하게 된다(그림 6 참조).



▲ <그림 6> 매립 단면

Public Fill은 발주처가 제공하는 매립재로 분세한 모래질과 점토가 섞여있는 재료이며, 해상 운반을 통해 공급이 된다. Public Fill 매립에 투입 되는 장비는 Flat Barge(2400ton), Derrick Light Barge, Unloading Platform 등이 있다(그림 7 참조).



▲ <그림 7> Public Fill 매립 투입장비

매립지 시공은 홍콩의 까다로운 환경기준을 만족시키고, 후속 공정의 조기착수를 위해 우선 시공되는 일부 구역에 가호안을 먼저 축조한 뒤 매립을 수행하는 방법을 적용함으로써, 환경에 대한 리스크를 최소화하는 효과를 얻을 수 있었다(그림 8 참조).



▲ <그림 8> 매립공사 진행 과정

◆ 2.2 DCM(Deep Cement Mixing) 공사

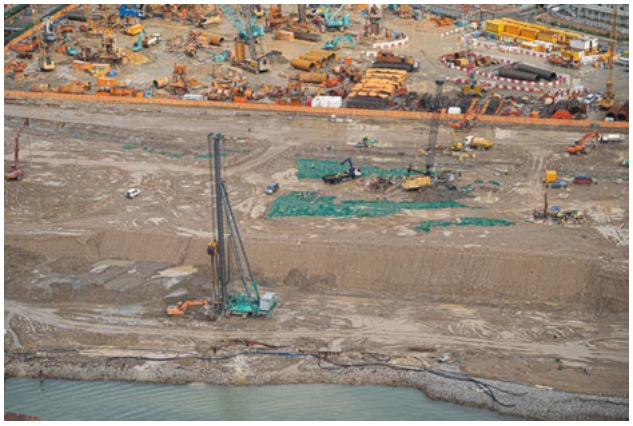
DCM(Deep Cement Mixing) 공사는 호안 하부 기초 및 일부 육상구간에 적용되었으며, 설계기준강도(UCS) 1MPa을 만족해야 한다.

DCM 공사는 해상 DCM과 육상 DCM으로 구분되고, 이 중 해상 DCM은 호안(Seawall) 기초로 설계 되었으며, 해상 DCM 전용선(3연 4축)을 동원하여 시공이 진행 된다(그림 9참조). 육상 DCM은 매립지 내 PVD 개량구간을 설계변경을 통해 DCM공법을 적용한 구역으로 육상 DCM 장비(1연 4축)를 동원하여 공사를 진행 중이다(그림 10 참조).

일부 구역은 기존 구조물(해상교량과 연결되는 램프교) 하부에 위치하여, 해상 DCM 전용선 투입에 제약이 있어서 특수 장비(Low Head Room DCM 전용선)를 투입하여 시공 한다. 해당 장비는 기존 해상DCM 장비 대비, 낮은 높이로 설계되어 고도가 제한되는 구간에서도 원활한 시공이 가능하며, 지반개량 심도를 만족하기 위하여 신축식 Rod



▲ <그림 9> 해상 DCM 시공 전경



▲ <그림 10> 육상 DCM 시공 전경

등, 최신 기술이 적용 되었다(그림 11 참조).
지반개량 공사 후에는 후속 공정을 위해 개량된 지반의 설계조건 만족여부를 검증하며, 시공된 DCM 개량체의 강도 확인을 위하여 Coring 작업 및 일축압축강도 시험을 실시하여 품질 관리를 수행 한다. 해당 시험의 결과는 지반개량 공사의 성공여부와 후속 공정의 귀중한 설계 자료로 사용된다.

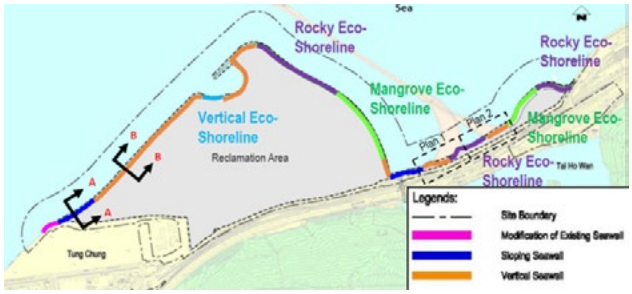
◆ 2.3 호안(Seawall) 공사

호안(Seawall)은 Sloping Seawall과 Vertical Seawall로 구분 되며, 이 중 Sloping Seawall은 경사제가 피복석으로 이루어진 일반 Sloping Seawall과 경사제가 Mangrove 식생으로 이루어진 Eco- Shoreline Seawall로 나뉜다. Vertical Seawall은 블록식 안벽 형태로 설계 되어 있다. 호안공사는 해상 DCM 시공이 완료된 이후, Heaved material 제거하고 시공이 진행 될 예정이다(그림 12~15 참조)

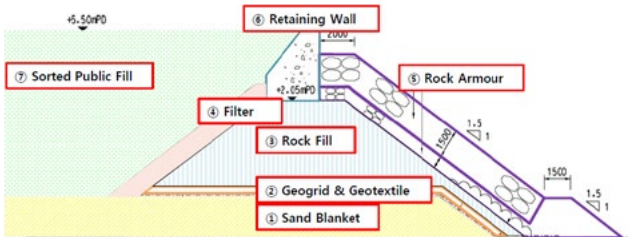




▲ <그림 11> LHR DCM 시공 전경



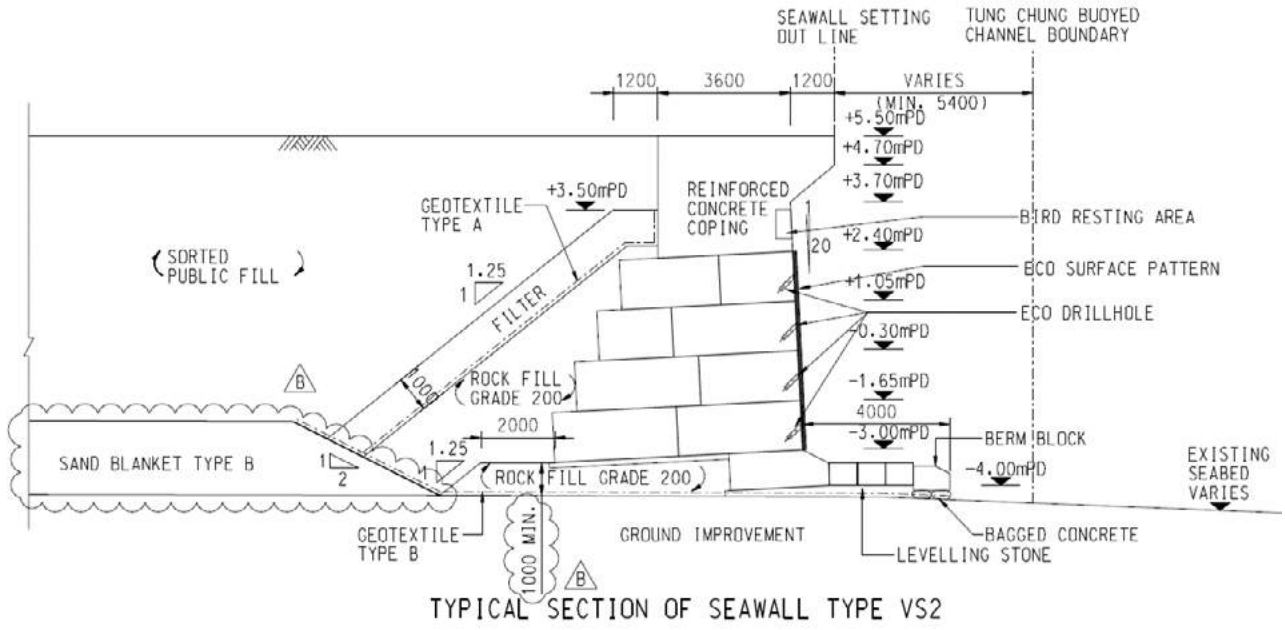
▲ <그림 12> 호안(Seawall) 계획 평면



▲ <그림 13> Sloping Seawall 단면



▲ <그림 14> Eco Shoreline Seawall 단면

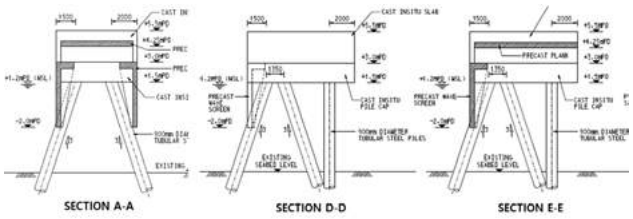


▲ <그림 15> Vertical Seawall 단면

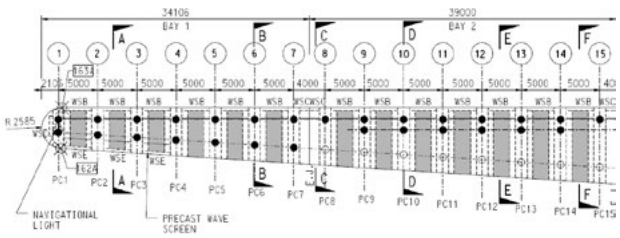
◆ 2.4 방파제 공사

본 프로젝트에 적용된 방파제는 추후 수상계류 시설, 클럽 하우스 등의 상업시설, 편의시설 설치를 위한 마리나로 사용되는 구간의 항내 정온도 확보를 위해 파랑을 막기 위한 구조물로 설계되었다.

또한, 환경을 고려하여 해수유동을 가능하게 하기 위하여 방파제 하부는 개방형인 강관 Pile로 설계 하였고, 그 위로 Precast Plank, Wave Screen 그리고 상부 Conc. Slab로 구성이 된다 (그림 16, 17 참고).



▲ <그림 16> 방파제 계획 단면



▲ <그림 17> 방파제 계획 평면

3. 맺음말

2017년 12월 착공한 본 프로젝트는 현재 매립과 지반개량 공사를 진행 중이며, 매립 완료 후 호안 및 방파제 공사 등을 진행 할 예정으로, COVID-19로 인한 불리한 여건 속에서도 원활한 공사 진행을 위해 노력을 기울이고 있다. 발주처에서는 홍콩 역내 부족한 택지의 공급을 서두르고 있으며, 이에 맞추어 단계별 마일스톤을 계속적으로 달성해 나갈 예정이다.

프로젝트 진행에 있어, 당사가 시공한 홍콩 첵랍콕 국제공항 3번째 활주로 확장공사인 3RS 프로젝트를 바탕으로 구축한 현지 협력사와 네트워크, 신뢰 관계 등 삼성물산 건설부문이 축적한 Know-how를 통하여 우수한 프로젝트 수행 경험이 되도록 노력함과 동시에, 홍콩 시장에서 한국 건설업체의 기술력을 널리 알리고 있다.

본 프로젝트의 성공적인 마무리를 통하여, 향후 발주가 예상되는 다양한 유사 홍콩 부지조성 프로젝트에 참여하여 당사의 기술력을 지속적으로 인정받을 수 있을 것으로 기대한다.

[감수 : 박원경(ocean21c@hanmail.net)]

분과위원회 및 소규모연구회

· 해양에너지 분과위원회(2020년 해양에너지분과 활동)
· 설계시공 분과위원회(단기간의 연안 및 횡단 표사 이동 변화 분석을 통한 최소 양빈 설계 전략)
· 연안환경 분과위원회(연안재해취약성 평가의 현황과 향후계획)
· 소규모연구회(해양공학 인공지능 모델 연구회)
· 소규모연구회(선양빈 설계기법에 관한 고찰)

2020년 해양에너지분과 활동

- 해양에너지 분과위원회

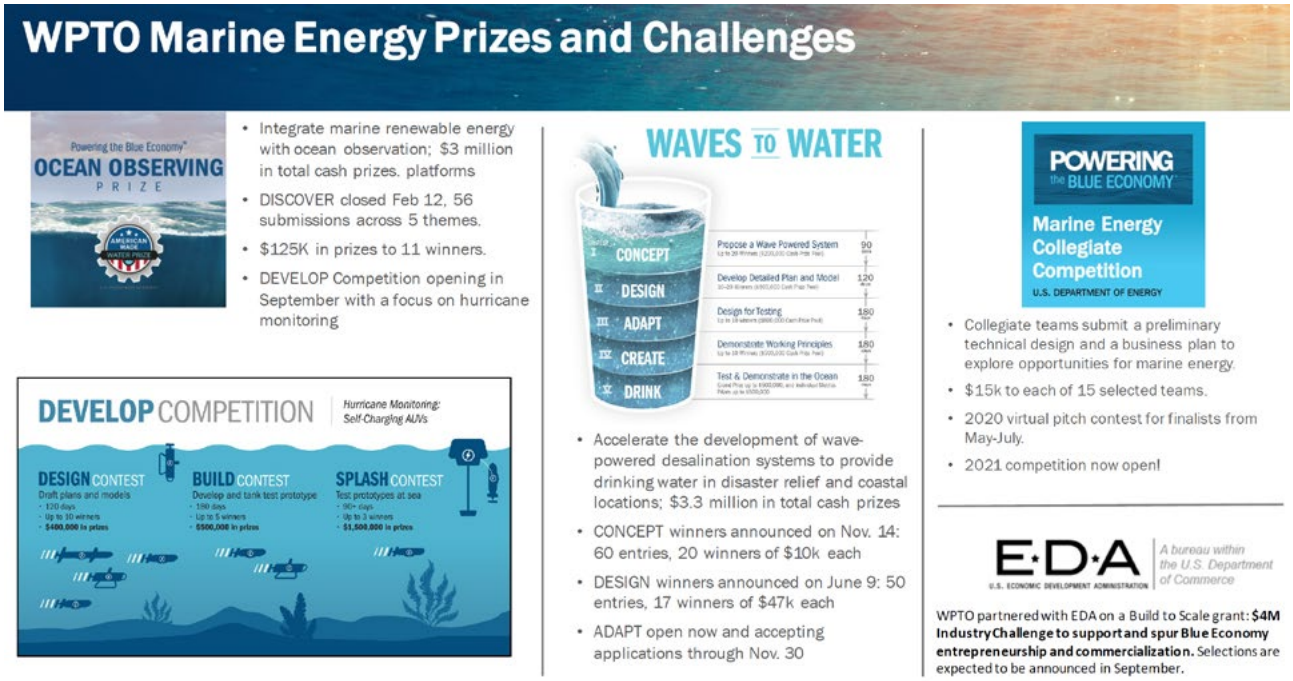


이 진 학
해양에너지 분과위원회 위원장
(한국해양과학기술원 책임연구원)
(yijh@kiost.ac.kr)

우리 학회의 해양에너지 분과위원회에서는 조류발전, 파력발전, 온도차발전 등 해양에너지 분야의 국제협력기구인 IEA-OES(International Energy Agency-Ocean Energy Systems), IRENA(International Renewable Energy Agency), International WaTERS(Wave and Tidal Energy Research Sites), IEC/TC114(International Electrotechnical Committee/Marine Energy Technical Committee) 등에서 발행한 여러 학술자료, 기술 자료를 공유하고, 검토하여, 궁극적으로 국내 연구 활동 증진 및 국내 관련 연구자 간의 협력을 강화하고자 올해 신설된 학회 산하 여러 위원회 중 하나이다. EU, 미국 등 해양에너지 기술을 선도하고 있는 국가들의 경우, 국제협력기구 활동을 지원하기 위한 국가위원회(National Committee)를 구성하여, 능동적으로 대응하고 국제협력을 선도하는 반면, 아직 국내에서는 이러한 활동을 위한 국가위원회가 없다. 따라서 우리 학회의 해양에너지 분과위원회가 국제협력을 위한 국가위원회의 초석이 될 수 있기를 바라며 지난 해 위원회를 구성하였다.

2020년 신년회에서 해양에너지 분과위원회에 대하여 소개를 한 바 있는데, 벌써 한해를 마감하는 시간이 되고 있다. 올 한 해는 코로나19로 인하여 국가 간 이동이 제한되고, 올해 초만 하더라도 회의 및 출장이 금지되어 학회 활동도 많이 위축되었을 뿐만 아니라, 분과위원회 활동 역시 크게 위축될 수밖에 없는 상황이라고 할 수 있다. 당초에는 학술대회 기간 중에 분과위원회를 개최할 계획이었으나, 상반기 중 한국해양과학기술협의회 공동학술대회가 상당 기간 동안 연기되었고, 또한 회사 내의 상황 등으로 출장이 어려워 분과위원회 조차 개최하지 못하였다. 또한 추계학술대회 기간 중에도 코로나19가 여전히 종식되지 않아 회원들의 적극적인 참여를 독려하기 어려운 상황이었다. 이런저런 이유로 올해는 별다른 활동을 하지 못하고 지나간 것 같아 매우 아쉬운 한해가 되고 만 것 같다. 이러한 상황은 사실 우리나라뿐만 아니라 국제협력기구 행사도 마찬가지로, 싱가포르에서 개최 예정이었던 IEC/TC114 총회가 취소되었고, IEA-OES 집행위원회는 단축하여 온라인으로 개최되었으며, InternationalWATERS와 AWTEC(Asian Wave and Tidal Energy Conference) 학술대회도 취소되었다.

다행히 IEA-OES는 온라인으로 두 차례의 집행위원회를 개최하였고, 두 번째 집행위원회에서는 각국의 해양에너지 개발 동향을 발표하였는데, 이 자리를 빌려 주요 내용을 소개할까 한다. 현재 대부분의 해양에너지시스템의 경우 해상풍력이나 태양광에 비하여 상용화 수준이 낮은 초기 상용화 단계로 여전히 에너지단가가 높아 기존 재생에너지와의 경쟁이 어려운 상황이다. 따라서 각국은 새로운 기술 혁신을 통하여 에너지단가를 낮출 수 있도록 하는 연구를 많이 수행하고 있는데, 이 자리에서는 지면 관계상 미국, 중국, EU의 사례를 소개한다.



▲ <그림 1> 미국에서 진행 중인 해양에너지 관련 프로그램 소개

- 미국

미국은 해양에너지 기술개발을 위하여 상당히 다양한 R&D 프로그램을 운영하고 있고, 한편 재미있는 사업도 많이 추진하고 있다. 올해 해양에너지 분야 R&D 예산은 총 2천만 달러 수준으로, 한화로 약 220억원 수준이다. 미국에서는 새로운 개념의 해양에너지 기술에 대한 지원을 위하여 Powering the Blue Economy라는 슬로건 아래 Ocean Observing Prize와 Waves to Water, Marine Energy Collegiate Competition 세 가지 프로그램을 운영하고 있고, 각각 처음 단계에는 10~20개 팀을 선정하여 지원한 후, 단계가 올라가면서 좋은 성과를 거둔 팀을 뽑아 좀 더 많은 지원을 해주는 방식을 취하고 있다. 우리나라의 경우에도 현재 에너지기술평가원에서 부유식 해상풍력 1단계 사업에 여러 팀을 선정하여 지원하고, 가장 우수한 팀을 2단계 주관기관으로 선정한다고 하니 이와 비슷하다고 할 수 있다. 연구개발 시스템에 미스트롯같은 경쟁 방식을 취한 것으로 좀 더 확대하면 좋을 것 같다는 생각을 한다. 그리고 이러한 프로그램과 함께 TEAMER(Testing & Expertise for Marine Energy)라는 3년 프로그램이 있는데, 이 프로그램을 통하여 180억원 규모의 연구비를 100개 이상의 과제에 지원하고 있다. TEAMER 프로그램의 장점으로 연구비뿐만 아니라 20여개 기관에 분산되어 있는 실험시설 및 전문가의 기술지원을 받을 수 있다는 점이다. 유럽에서 몇 년 동안 진행해 온 MaRINET(Marine Renewable Energy Testing)과 유사한 방식이며, 우리나라에도 이런 프로그램을 운영한다면 해양에너지 관련 개인 혹은 중소기업에서 개발한 기술을 전문가와의 협업을 통하여 검토하고 개선함으로써 더 좋은 혁신을 기회를 찾을 수 있을 것 같다.

- 중국

한편 중국은 "재생에너지와 수소에너지 기술 개발 프로그램"을 운영하고 있고, 현재 파력발전 및 온도차발전, 조류발전 기술 등에 대한 연구개발을 진행하고 있다. 중국은 2010년 이후 총 13억 위안, 한화로 2,190억원을 연구개발에 투자하여 총 116개 과제를 지원하였다고 한다. 연간 220억원 규모의 연구비로 한국, 미국과 비슷한 규모이며, 이중 R&D에 10%, 실증사업에 50% 정도 투자하였다. 이와 같은 연구비 투자로 500kW급 파력발전장치를 포함하여 총 40개 이상의 파력발전장치를 실해역에서 성능시험을 완료하였고, 현재 MW급 파력발전장치에 대한 기술을 개발하고 있으며, 한편 조류발전의 경우 650kW급 조류발전장치를 비롯하여 20기 이상의 조류발전장치에 대한 실해역 시험을 완료하였고, 역시 1MW급 조류발전장치를 개발하고 있다고 한다.

중국의 경우 LHD 조류발전시스템이 저장성 시우산섬 인근 해

역에서 현재까지 40개월 이상 정상적으로 운영을 마쳤으며, 현재까지 누적발전량은 1.9GWh로 현재 설비용량을 증설하기 위하여 두 번째 플랫폼을 건설 중에 있다. 그리고 이 시스템은 지방정부와의 협의를 통하여 ¥2.58/kWh(한화 약 442원/kWh)로 전력을 공급하기로 계약하여 실제 상용화 단계에 접어들었다고 볼 수 있다. kWh당 정산단가 442원은 현재 우리나라의 계통한계가격(SMP) 약 60원/kWh, REC 가격 약 45원/kWh를 고려할 때 REC 가중치를 약 7~8까지 고려할 때 가능한 수준으로 현재 조류발전에 대한 REC 가중치인 2는 현실적으로 매우 낮은 수준임을 알 수 있다.



▲ <그림 2> LHD 조류발전시스템



▲ <그림 3> 1MW(2x500kW) 파력발전장치

- EC (European Commission)

IEA-OES 정회원으로 일반적인 국가와 함께 EC(European Commission)도 있다. EC는 유럽연합 회원국에 대한 많은 연구개발비를 지원하고 있고, 해양에너지도 그 한 분야이다. Horizon 2020 프로그램 subtopic2에서 해양에너지 대규모 보급을 위한 기술 개발을 지원하고 있는데 올해 지원 가능한 분야로는 (1) 해양에너지시스템 개발-부유식 해상풍력, 파력, 조류발전 등, (2) 계통연계 인프라-DC, DC/AC 등, (3) 해양에너지 개발 보급을 위해 필요한 에너지저장기술 등의 분야이며 총 예산은 6800만 유로, 한화로 약 892억원 수준이라고 한다. 한편 Horizon 2020 외에 Innovative Fund를 통하여 총 10억 유로, 한화로 1조3000억원 규모의 연구비를 지원하는데 여기에는 아주 혁신적이거나 7.5백만 유로(약 98억원) 이상의 대형 플래그쉽 프로젝트를 지원하는데 일부 소형 과제도 지원한다. 영국이나 독일, 프랑스에서도 EC의 연구비 지원을 통하여 기술을 개발하는 사례가 많다. 유럽의 대표적인 해양에너지 관련 프로그램인 MaRINET2, DTOceanPlus(Design Tools for Ocean Energy Systems) 등도 모두 EU의 Horizon 2020 프로그램의 지원을 받아 진행되고 있다.



▲ <그림 4> Horizon 2020 프로그램의 지원으로 EMEC에서 실증 중인 Orbital O2 부유식 조류발전장치

코로나19 치료제와 백신이 개발되고 있지만 내년에도 한 동안은 외부활동에 많은 제약이 있을 것으로 생각된다. 당초 계획하였던 각국의 최신 기술 자료를 공유하고, 함께 검토함으로써, 궁극적으로 우리나라의 해양에너지 기술 발전을 위한 길을 함께 모색해 보고자 내년에는 가능하면 학술대회 기간 전후에 분과위원회를 개최하거나 SNS 등을 적극 활용하여 분과위원회 활동을 하고자 한다. 아직 시장이 형성되지 않은 해양에너지 분야인 만큼, 서로 간의 경쟁보다는, 협력을 통하여 시장을 먼저 만들고 키울 수 있도록 하였으면 하는 바람이다.

[감수 : 구성욱(ksw2002@dohwa.co.kr)]

단기간의 연안 및 횡단 표사 이동 변화 분석을 통한 최소 양빈 설계 전략

- 설계시공 분과위원회



김 일 섭
설계시공 분과위원회 위원장
(㈜세광종합기술단 상무)
(wavesing@hanmail.net)

권 혁 민 성균관대학교, ㈜세광종합기술단 연구소장
서 진 성 ㈜세광종합기술단 차장
김 진 혁 ㈜세광종합기술단 차장
장 병 진 ㈜세광종합기술단 대리
유 영 진 ㈜세광종합기술단 기사

1. 머리말

일반적으로 해안침식이 발생하면 양빈을 생각하게 되고 양빈 중에서도 가장 경제적인 샌드바이패싱을 우선적으로 고려하고 이것이 여의치 않으면 구조물을 생각하게 된다. 최근 들어 우리나라의 경우는 침식해빈에 대하여 구조물로 파랑에너지의 일부를 차폐하고 양빈하는 복합공법이 많이 채택되고 있다. 하지만, 곧 개장해야 하는 해수욕장이 인근 구조물에 의한 파랑장 변화로 인하여 침식의 영향을 받았다면 지역주민들은 모래가 다시 돌아오기를 기대하거나 관련자들에게 양빈을 요구하게 된다. 하지만, 연차예산 시스템에서는 침식량에 따라 다르지만 응급복구 방안으로 대처하기가 곤란한 경우가 대부분일 것이다.

필자 등은 우리나라 동해안에 위치한 추암·증산해수욕장의 개장을 약 20일 앞두고 심각한 해안 침식이 발생하여 민원이 발생한 현장에 대하여 기술적 자문을 수행하는 과정에서 발견한 침·퇴적 과정에 대하여 보고하고자 한다.

2. 본론

추암·증산해수욕장은 우리나라 동해안에 위치한 동해항 3단계 공사현장의 남측에 위치하며 동해안 전체 연안표사 흐름의 관점에서 하류부에 해당한다. 또한 <그림 1>을 보면 알 수 있듯이 해빈은 NE방향으로 열려 있으며 하류부측에 자연 돌제가 형성되어 있다.



▲ <그림 1> 동해항 3단계 시공 현황도

삼척시 추암·증산 해수욕장에 갑자기 침식이 발생했다는 현지 연락을 받은 이후 2020년 06월 25일에 촬영한 사진이 <그림 2(a)>이며 남측 자연돌제가 시작되는 지점에서 북측으로 바라본 모래장이다. 주목할 점은 <그림 2(a)>에 보인 바와 같이 작은 모래계단이 보이며 이는 연안표사가 발생하여 하류부로 이동하였으나, 상류부로부터 새롭게 모래가 공급되지 않아 발생하는 전형적인 단차이다. 자세히 보면 북측은 계단형이 별로 없으며 비교적 남측에서부터 자연돌제 지점까지 단차가 형성되어 있음을 알 수 있다. 이는 연안표사의 기인력인 내습파의 파향이 주로 북측계열임을 추정할 수 있는 증거이다. 자연돌제 인근은 모래장이 아니고 암석으로 형성되어 있으며 연안표사방향이 아니고 이안표사가 발생할 수 있는 방향으로 지형적 여건이 형성되어 있다.

하지만, 07월 07일에 촬영한 <그림 2(b)>를 보면 해빈 폭이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 지역민들은 2020년 07월 10일 해수욕장의 개장을 앞두고 <그림 2(a)>와 같이 해빈 폭이 침식에 의해 크게 줄어들어서 이에 대하여 긴급 대책을 요구하게 되었다.

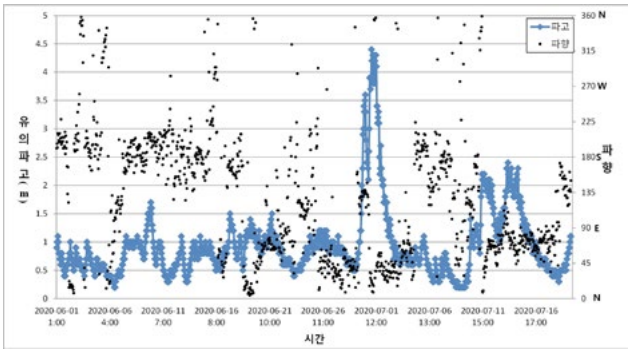


(a) (b)

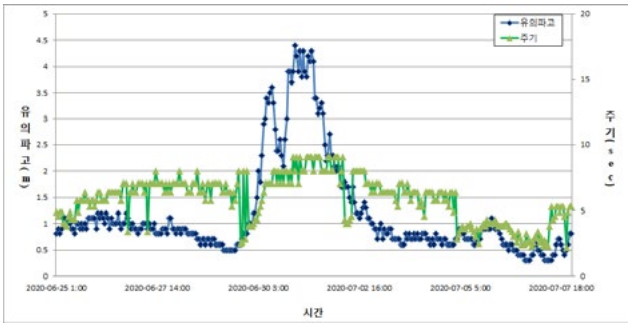
▲ <그림 2> 삼척시 추암·증산해수욕장
((a) 2020년 06월 25일, (b) 2020년 07월 07일)

하지만, 해빈은 적당한 수준의 양빈량으로는 복원·해결하기 어려운 상황이므로 해당 당국은 난처할 수밖에 없는 실정이었다. 이에 주민, 당국 및 전문가(필자들 포함) 등이 참석한 관련 자문회의를 개최하게 되었다.

본 자문회의에서 전문가들은 양빈시기를 최대한 늦추어서 실시할 것을 권유하였다. 이러한 근거는 <그림 3>에 보이는 바와 같이 계절적으로 남쪽에서 내습하는 파향이 우세할 시기에 북쪽에서 내습하는 파랑이 2020년 06월 16일 부근에서 내습하고 있음을 알 수 있다. 즉, 해수욕장 개장이 07월 10일 이므로 약 20일전에 해당한다. 따라서 이 시점에서 대책은 당연히 모래를 충전(양빈)해야 하는데 어떻게 할 것인가가 문제인 것이다. 응급복구 형태로 양빈을 하되 최소량으로 하는 방안을 모색하는 것이 현명한 방향이다. 따라서 전문가 그룹은 북쪽 계열의 파향이면서 파고가 크기 때문에 일시적일 가능성이 높으므로 해수욕장 개장 일시 직전까지 기다리다가 마지막에 양빈하는 것이 좋을 것으로 제안하게 된다. 즉, 일시적이라고 판단한 북쪽 계열의 파향이 여름철 주파향인 남쪽 계열의 파향으로 바뀌게 되면 횡단표사로 모래가 다시 돌아올 가능성이 높기 때문이다. 본 전문가 그룹에서 예상한 대로 <그림 3>에 보인 바와 같이 2020년 07월 03일경 남쪽 계열이 파향이 다시 내습하였으며, 2020년 07월06일까지 1m 전후의 그다지 크지 않은 파고가 발생했는데도 불구하고 많은 양의 모래가 횡단표사 형태로 돌아왔다. 북쪽 계열의 파향이 일시적이라는 판단은 계절적으로 가능성은 낮지만 너울성 파랑일 가능성 때문이었다. 이러한 3가지 관점은 현장에서 목측으로도 확인이 가능하며 지역민들의 의견 수렴 조사 등을 통하여 확인할 수 있다. 특히 <그림 4>를 보면 파고가 4m이상으로 크면서 주기가 약 9.0sec에 이르는 등 장주기성 고파랑에 해당한다. 따라서 북쪽에서의 높은 장주기성 파랑이 우리나라 동해안의 추암·증산 해수욕장을 내습하여 해안침식이 발생하게 된 것임을 알 수 있다.



▲ <그림 3> 짧은 기간 동안 침·퇴적을 반복하는 해빈의 파고 및 파향의 변화



▲ <그림 4> 고파랑 전·후의 파고-주기 변화

우리나라 동해안에 내습하는 장주기성 고파랑은 주로 겨울철에 일본 홋카이도 인근에 일시적으로 저기압이 형성되면서 발달한 파랑이 풍역대를 벗어나 자유파 형태로 내습하거나 또는 국부적으로 우리나라 동해안에 저기압이 형성되는 경우도 있다. 단, 장주기성 고파랑이 너울인지 아니면 동해안에 형성되는 일시적 저기압에 의한 것인지 여부는 일기도를 통하여 좀 더 자세한 판단을 할 수 있을 것이다.

3. 맺음말

여름철 해수욕장 개장 직전에 북쪽 계열의 내습 파향이면서 비교적 장주기성이고 고파랑이 내습하면 동해안 일대에 큰 규모의 표사이동이 발생할 수 있다. 하지만, 이러한 장주기성 고파랑은 일시적으로 발생하므로 계절적으로 주파향인 남쪽 계열의 평상 파랑이 다시 내습하면 이안표사가 다시 횡단표사 형태로 해빈으로 돌아올 수 있다.

본 기사는 단기간 내에 연안표사가 횡단표사로 바뀌어 해빈이 회복되는 과정을 관측하였다. 경제적인 양빈을 수행하기 위해서는 모래가 다시 돌아올 수도 있다는 가능성도 계획에 포함하는 것이 타당할 것으로 판단된다.



[감수 : 구성욱(ksw2002@dohwa.co.kr)]

연안재해취약성 평가의 현황과 향후계획

- 연안환경 분과위원회



강 태 순
연안환경 분과위원회 위원장
(㈜지오시스템리서치 수석)
(kangts@geosr.com)

강 분 순
국립해양조사원 연구사

연안재해취약성평가 과제는 국립해양조사원이 2010년부터 저탄소녹색성장기본법('10.4) 제48조와 동법시행령 제38조 기후변화 영향평가 및 적응대책 추진과 녹색성장5개년계획('09.7)에 의거 추진하고 있다. 문재인 정부에서는 5대 국정목표 중 "안전과 통합의 사회 – 재난, 재해예방 및 체계적 관리"의 중점과제로 추진되고 있다.

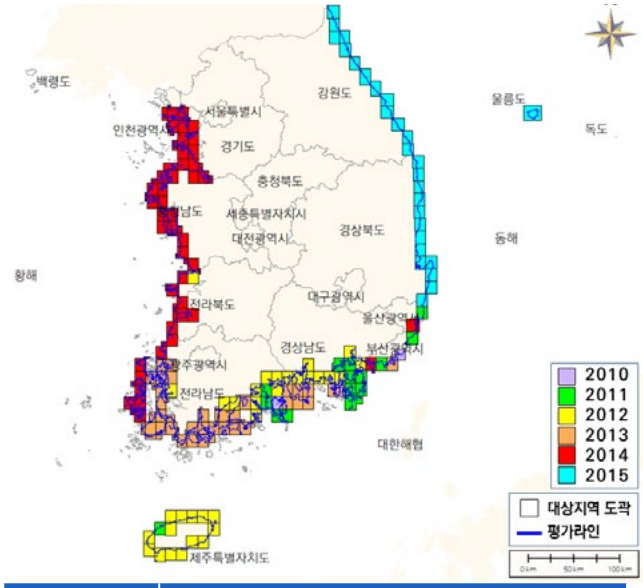
본 과제는 무분별한 연안개발과 기후변화에 따른 연안재해의 위험도가 증가하는 추세임에도 불구하고 해수면상승, 해일, 이상파랑, 침식 등 해양기인 재해취약정도의 과학적 평가지표가 전무하고, 연안정비기본계획, 연안통합관리계획 등 연안관리법 개정에 따른 취약정보의 필요성이 증가하고 있으며, 지자체 및 행정안전부의 자연재해저감종합계획 및 풍수해보험 등에서의 근거자료 필요성이 제기됨에 따라 시작되었다. 특히, 연안재해를 사후관리에서 선제적 예방관리로 취약지역 위험전이의 차단과 실용적인 국가 연안역 기후변화 적응정책 수립의 고도화에도 지원되고 있다.

이를 위하여 연안재해취약성 평가는 분산 관리되고 있는 연안정보를 통합하여 객관적, 정량적인 재해원인별 연안재해취약성 평가지수를 개발하고, GIS기반 취약성평가 시스템을 구축하는데 목적을 두고 있으며, 국가 기후변화 적응대책 수립에 필요한 근거자료의 총괄 생산과 연안재해정보를 한 곳에서 파악할 수 있는 사용자 기반의 시스템을 구축하는 내용을 담고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 2010년 "연안재해취약성 평가체계 시범구축 및 기본계획수립"을 시작으로 국립해양조사원에서 병행 추진되고 있는 해안침수예상도 사업과 연계하여 추진되고 있으며, 2015년에는 전국단위의 1단계 취약성 평가가 완료된 바 있다. 그리고 2016년부터 2020년까지 "연안재해취약성 평가체계 유지관리" 사업을 통해 환경부의 지자체 기후변화 적응대책 수립계획과 연계하여 연안부분 정보를 제공할 수 있도록 추진한 바 있다<그림 1>.

연안재해취약성 평가는 구축 초기 IPCC(2001)의 기후변화 취약성 평가 프레임을 준용하여 재해노출(Exposure) - 민감도(Sensitivity) - 적응능력(Adaptive Capacity) 지수를 이용하여 최종적으로 취약지수(Vulnerability)를 평가하였다. 이러한 개념은 기존의 단순 1차원적으로 재해를 바라보던 재해노출 즉, 외력이 얼마나 크냐에 따라 위험성을 판단한 시각에서, 민감도 즉, 그 지역이 그러한 외력이 왔을 때 얼마나 피해를 입는가, 그리고 적응능력 즉, 그 지역에서 재해가 발생했을 때 얼마나 빨리 복구/대응이 가능한가? 등의 3차원적인 시각으로 재해의 취약정도를 평가하는 것이다. 하지만 적응능력이 재해노출과 민감도에 따른 잠재적 취약성을 상쇄시키는 지표로 이용되기 때문에 재해노출 및 민감도에 따른 재해예방 정책이나 대책 을 수립하고자 할 때에는 재해영향을 왜곡시킬 우려가 있음을 지적한 바 있다(국토교통부, 2013). 이에 기존의 재해노출 – 민감도 – 적응능력의 프레임에서 적응능력을 배제하고 재해노출 – 민감도의 프레임으로 취약성을 평가하는 것으로 변경하였다<그림 2>.

연안재해노출지수(CODI, COastal Disaster exposure Index)는 연안의 인간 활동에 직접적, 간접적, 잠재적으로 재해를 유발할 수 있는 해양기인 외력현상의 정도를 나타내며,



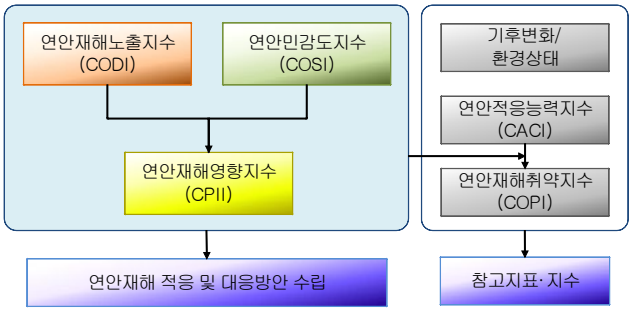
연도	대상 도엽수		
	과업지시	자체추가	소계
'10	2	-	2
'11	15	5	20
'12	30	3	33
'13	32(갱신1)	19	51
'14	38	36	74
'15	24	14	38
합계	141	77	218

연도	시군수	시군
'17	4	안산, 포항, 고창, 태안
'18	7	시흥, 평택, 여수, 아산, 서천, 강릉, 통영
'19	32	고성(강원), 동해, 삼척, 양양, 화성, 거제, 남해, 하동, 경주, 영덕, 울릉, 목포, 보성, 순천, 완도, 진도, 속초, 김포, 고성(경남), 사천, 광양, 무안, 영광, 영암, 장흥, 해남, 군산, 부안, 당진, 보령, 서산, 창원
'20	11	부산, 울산, 고흥, 신안, 함평, 울진, 인천, 강진, 홍성, 제주시, 서귀포시
합계		54개 시군

▲ <그림 1> 연안재해취약성평가 구축 현황

연안민감도지수(COSI, COastal Sensitivity Index)는 연안의 인간 활동이 노출에 의하여 부정적 영향을 받는 정도를, 연안재해영향지수(CPII, Coastal Potential Impact Index)는 노출과 민감도에 반응하는 재해의 영향정도를 최종적으로 평가한 것이다. 즉, 연안재해영향지수가 높게 평가된 지역은 실제로 재해피해가 발생할 가능성이 높은 곳을 의미한다.

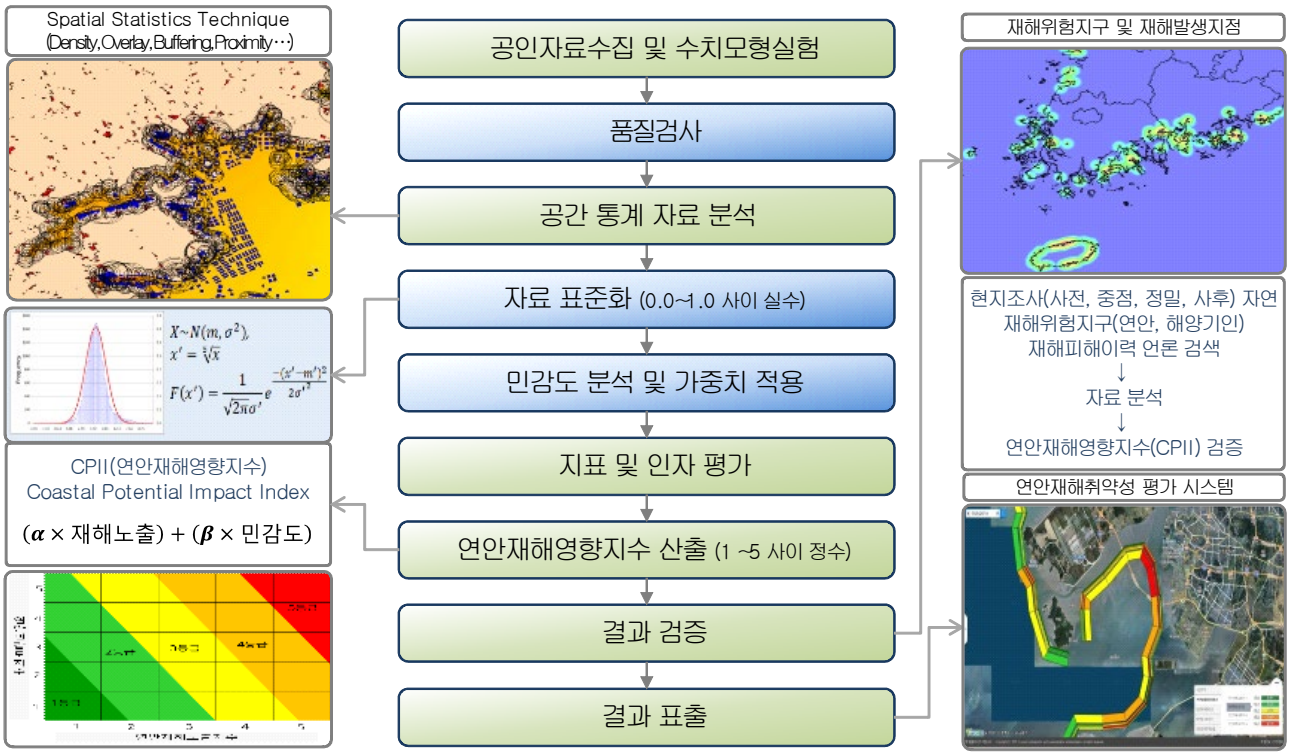
각각의 지수를 평가하기 위한 재해노출과 민감도를 구성하는 세부지표와 인자들은 국내외 연구사례와 전문가 자문을 통해 선정하였다<표 1>. 수집된 DB는 대부분 과거 30년부터 현재까지의 자료를 기반으로 평가하였으며, DB의 해상도는 250×250m 격자 단위로 연안육역 공간범위에 대하여 구축하였다. 여기서 연안육역은 연안관리법에서 정의한 해안선으로부터 500m(항만, 산업단지는 1km)까지의 범위를 말한다.



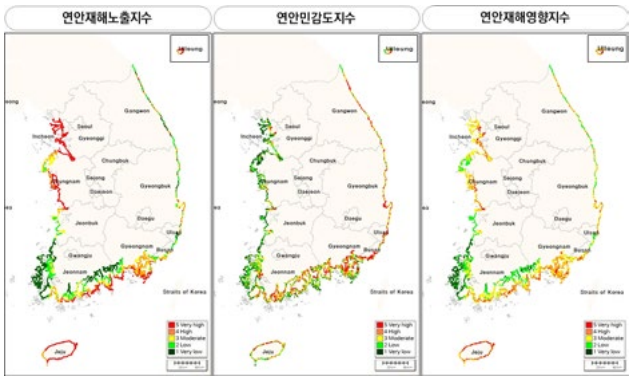
▲ <그림 2> 연안재해취약성 평가 프레임 및 평가지수

▼ <표 1> 지수별 지표·인자 세부내역

지수		지표	인자
연안재해영향지수	연안재해노출지수	태풍	내습빈도, 해면기압, 최대풍속, 사간강우량
		해일	태풍해일고
		파랑	유의파고
		조석	약최고고조위
		해수면상승	해수면상승률
		침식	침식
	연안민감도지수	인적민감도	인구, 고령인구, 장애인구
		물적민감도	연안건물, 항만·산업단지, 도로, 양식장,
		지형적민감도	침수지역, 대조차



▲ <그림 3> 연안재해취약성 평가 순서도



▲ <그림 4> 연안재해취약성평가 결과



<웹GIS 평가시스템>



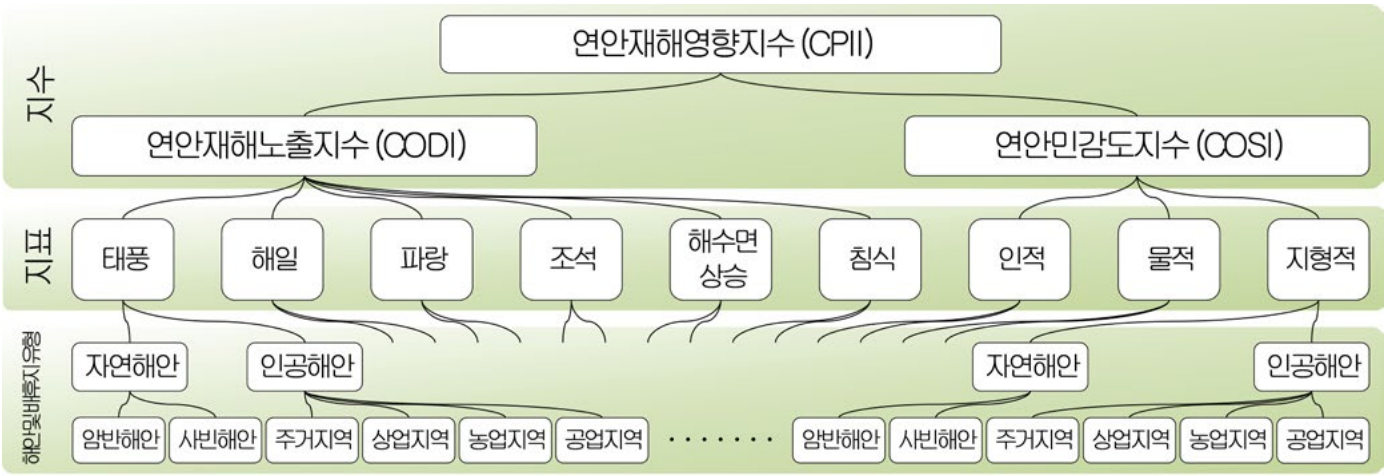
<평가 결과 표출>

▲ <그림 5> GIS 기반의 연안재해취약성 평가시스템

연안재해취약성 평가는 국가·지자체 제공 자료와 자체 생산된 고해상도 수치모델링 자료를 이용하여 구축되며, 품질검사, 공간통계자료분석, 자료표준화, 민감도분석 및 가중치 적용(계층분석방법, AHP) 등의 과정을 거쳐 평가된다<그림 3>. 해당과정을 거쳐 평가된 연안재해영향지수는 현지조사(사전, 중점, 정밀 및 사후조사) 자료와 재해위험지구, 재해피해이력 등의 자료를 분석하여 타당성을 검증하였다. 그리고 최종적인 결과는 연안재해노출지수, 연안민감도지수, 연안재해영향지수로 다섯 단계의 등급으로 분류하여 제시된다<그림 4>. 뿐만 아니라 각 지수별 지표 및 인자 단위까지 평가결과를 확인할 수 있다.

마지막으로 최종결과는 GIS 분석기능과 연계하여 가시화 활용 시스템에서 표출되고, 각 등급정보에 대한 DB표출, 통계, 가시화 및 출력기능 등을 GIS 기반의 연안재해취약성 평가시스템을 통해 제공하고 있다<그림 5>.

한편, 연안재해취약성 평가결과는 연안재해취약지역에 대한 대응 및 적응방안을 수립하는데 활용할 수 있다. 본 평가에서는 평가등급에 따른 정의와 재해발생확률, 대책의 시급성, 소모비용 및 정비사업과의 연계성을 고려하여, 연안재해영향지수를



▲ <그림 6> 적응 및 대응방안 트리구조

▼ <표 2> 활용방안

국가계획	내용
연안관리법(해양수산부)	· 연안관리법 제34조6에 의거 연안재해 위험평가 실시 ('20.2 개정) · 매년 연안재해 위험평가 시행 및 재해저감대책 수립
연안정비기본계획 (해양수산부)	· 연안침식, 침수 등 연안재해를 저감하기 위한 연안정비사업 시행 · 제3차 연안정비기본계획수립시 지역선정, 우선순위 등에 평가 활용
해양공간기본계획 (해양수산부)	· 해양공간계획 및 관리에 관한 법률에 의거 해양공간기본계획 내 용도구역 중 안전관리구역 설정
자연재해저감 종합대책 (행정안전부)	· 자연재해대책법 제25조의3에 의거 '자연재해저감 종합계획'을 통해 '해일위험지구'지정 · 행정안전부 해일위험지구지정 가이드라인에서 피해예측지구에 대해연안재해 취약성평가 활용 명시
국가기후변화 적응대책 (환경부)	· 기후변화적응대책 국토/연안부문 수립 시 평가결과 활용 · 제2차 국가기후변화적응대책, 지자체 적응대책 세부시행계획

시작으로 최하위 단계인 지표별 적응 및 대응방안 [자연해안(암반, 사빈), 인공해안(주거, 상업, 농업, 공업)]을 읍면동 별로 1등급부터 5등급까지 세부적으로 수립 가능하도록 가이드라인 체계를 제시하고 있다.

현재 연안재해취약성평가의 활용을 살펴보면, 기존 해양수산부의 연안관리지역계획수립, 연안정비기본계획 수립, 해양공간기본계획 수립, 행정안전부의 자연재해저감종합대책 수립, 환경부의 지자체 기후변화적응대책 세부시행계획 수립 시 활용되고 있으며, 2020년 2월 연안관리법 개정에 따른 연안재해위험평가 및 그에 따른 재해저감대책의 명문화로 그 활용도가 높아질 것으로 사료된다<표 2>.

※ 본 3편의 연구는 코로나19로 인한 어려운 상황임에도 불구하고 분과위원회 연구 활동으로 진행되었으며, 앞으로 더욱 활발한 활동을 기대해 봅니다.

[감수 : 구성욱(ksw2002@dohwa.co.kr)]

해양공학 인공지능 모델 연구회 (COAEM)

- 소규모연구회



책임 연구자:
김 현 동
(사)한국수상교통시설협회
사무국장
(hdkim311@gmail.com)

참여 연구자:
심 규 태 가톨릭관동대학교
정 진 우 가톨릭관동대학교
오 휴 민 ㈜미래해양
안 치 옥 ㈜미래해양
손 준 혁 가톨릭관동대학교 첨단해양공간개발연구센터
조 병 선 가톨릭관동대학교 첨단해양공간개발연구센터

해안•해양공학 분야에서 생성되는 데이터의 양은 최근에 들어 비약적으로 증가하고 있다. 예를 들어 컴퓨터의 고도화로 수치 모델링을 통해 고해상도의 방대한 데이터가 빠르게 생성되며, 해양 조사 장비는 과거에는 생각지도 못했던 광범위한 시공간의 고해상도 데이터의 습득과 처리가 쉬워지고 있는 등의 이유로 방대한 양의 데이터가 축적되고 있다. 바다의 특성, 해양 생태계, 관측 정보 등 고해상도의 공간적, 시간적 방대한 빅데이터(Big Data)는 기존에 변동성이 크고 다양한 원인에 따라 경향이 바뀌는 부정확한 예측 방법을 보완할 수 있도록 인공지능(AI)을 활용한 분석방법들이 대안으로 대두되고 있다.

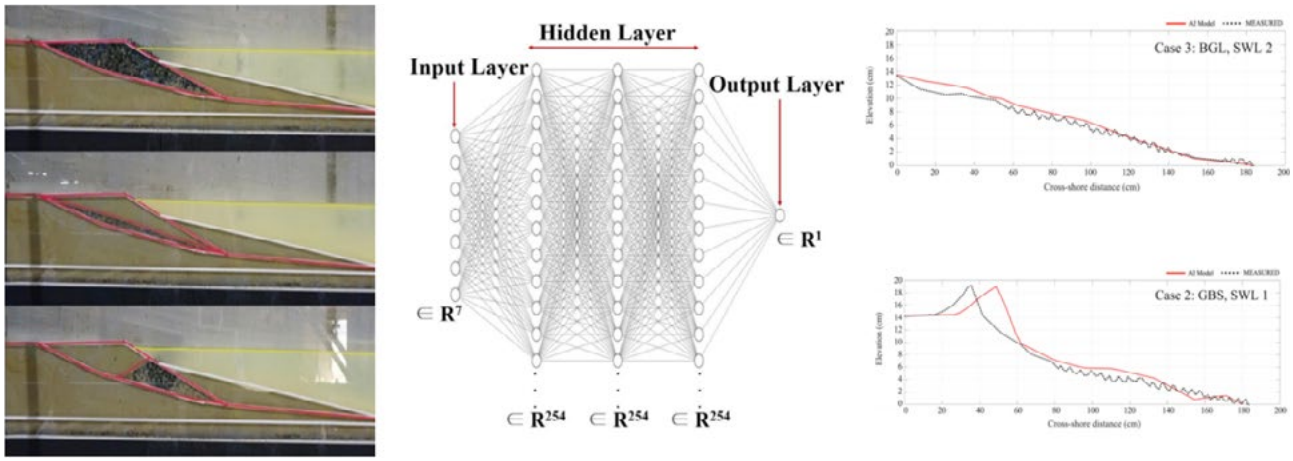
이러한 빅데이터와 인공지능을 포함한 사물인터넷, 클라우드 컴퓨팅, 모바일 및 정보통신기술 기반의 혁신 기술들은 4차 산업혁명과 미래사회의 변화를 주도하는 주요 변화 동인으로, 사물인터넷 센서가 수집한 데이터를 클라우드에 저장하고, 저장된 빅데이터를 인공지능을 통해 분석하여 최상의 서비스를 모바일 기기 와 같은 플랫폼 형태로 제공하는 한계 없는 다양한 형태의 사업과 신시장이 창출되어오고 있다.

컴퓨팅 기술의 발전과 함께 바다의 특성을 시뮬레이션하고 예측하기 위해 수치 모델링이 사용되지만, 이러한 예측은 필연적으로 특정 가정과 제한을 포함하며 고도로 전문화되어 있어, 기본 이론을 철저히 이해하는 숙련된 엔지니어만이 조작할 수 있다. 이로 인해 모델의 개발자와 실무자 간의 이해와 기대에 큰 차이가 있기도 하며, 조작에 상당한 제약이 따르기도 한다. 하지만, 해외에서는 인공지능 기술의 발전으로, 기계 학습 기능과 수치모델링 시스템을 통합하여 이러한 격차를 최소화하고 전문가의 요구도 줄이고 있는 추세이다.

또한, 수리모형실험도 예외는 아니다. 실제로 수치예측모형 실험에서 해석하기 어려운 많은 부분들을 수리모형 실험을 통해 해석하고 있으며, 이를 통해 얻어진 결과들은 항상 경험적 관계(Empirical relationships)를 고안하거나 정량적 모델을 테스트하는 기반이 되었기 때문에, 인공지능과 접목하여 사용한다면 수리모형실험으로도 해석하기 힘들었던 현상을 인공지능을 활용해서 보완하여 분석하고, 상관관계를 해석할 수 있다.

4차 산업혁명의 핵심기술인 인공지능 기술을 해안 해양공학에 접목하여 기존에 우수하게 평가받아온 수치모델과 수리모형실험을 비교 검증하고, 이를 인공지능 모델과 결합함으로써 보다 신뢰도 높고 신속한 결과를 도출할 수 있도록 인공지능과 해안 해양공학과의 융합모델을 구축하기 위해 출범한 해양공학 인공지능 모델 연구회 (COAEM)는 젊은 차세대 전문가들이 모여 결성한 소규모 연구회로, 작년부터 해안 해양공학 분야에서의 인공지능의 활용을 위한 다양한 연구들을 진행하고 있다.

최근 해양과학기술협의회 공동 학술대회에서 발표한 연구로서, 수리모형 실험을 통해 다양한 조건으로 자갈 양빈 실험을 수행하고, 이를 비선형 인공신경망인 Artificial Neural Networks (ANN)을 이용하여 모래와 자갈이 혼합된 상태에서 발생하는 표사이동의 특성과 상관관계를 분석하고 예측할 수 있도록 모델을 구축하고 그 성능을 소개한 바 있다. 수



▲ <그림 1> 자갈 양빈 수리모형실험과 인공지능 ANN 활용 결과 비교

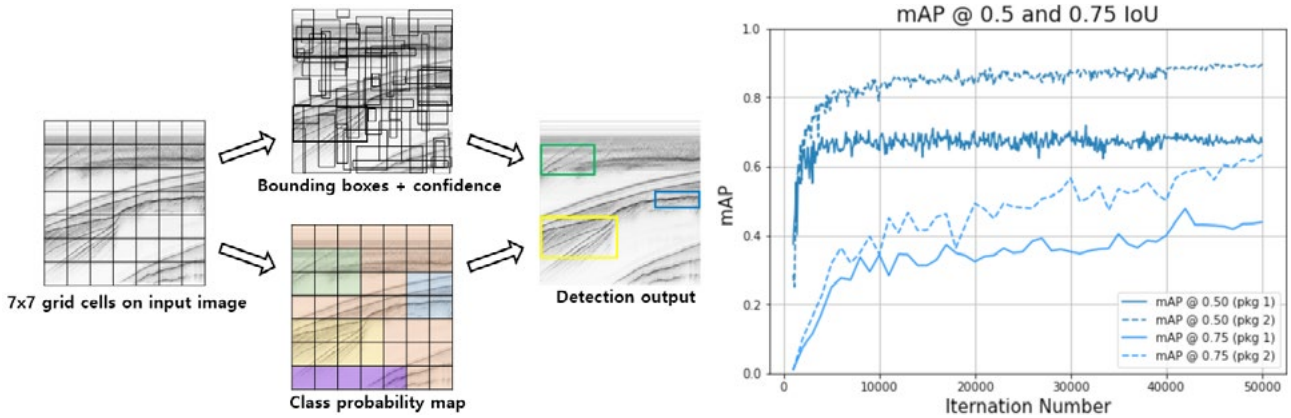
리모형실험을 통해 얻어진 다양한 조건의 데이터들을 학습하고, 초기 양빈 위치에 따라 외력과 시간의 흐름에 의해 변화하는 경향을 예측하는 것이 연구의 핵심이었고, 예측된 인공지능 모델 결과를 실제 수리모형 실험 결과와 비교하고, 수많은 수리모형 실험 결과와 현장 관측 데이터를 학습시키면 시킬 수록, 결과의 정확도가 향상되는 것을 확인하였다. 이는 추후 상용화 되어 현장에서도 사용이 가능할 것으로 사료되며, 인공지능과 해안공학의 공존 가능성을 확인할 수 있었다.

인공지능은 해양 환경 생태계에서도 접목이 가능했다. 2019년 등록된 특허 '딥러닝을 이용한 해양 탐사 시스템'과 '딥러닝을 이용한 청소유닛' 기술들을 토대로 인공지능을 이용한 스마트 해양 쓰레기 청소봇 (Deep Learning Ocean Cleaningbot, DLOC) 아이디어를 제안하였고, 아이디어가 실현 가능하도록 다양한 국내외 연구팀과 협업을 통해 아이디어의 실용화에 대해 검토하고 있다. 본 아이디어는 21세기 첨단 시대에 맞게 현실성 있는 수중드론과 인공지능 기술을 접목하여 쓰레기 수거를 스마트한 작업패턴으로 처리하여 세계적으로 문제가 되고 있는 항 내에서의 생태문제 대응 스마트 솔루션으로 제안하였으며, 해양수산 창업 콘테스트 아이디어 부문 결선 진출한 바 있다. DLOC는 항만, 연안, 강/호수에서 쓰레기를 인식하고 자동적으로 수거하며, 장애물 인식 및 우회, 분포도 탐색 및 학습, 최적 경로 탐색 및 학습 등의 기술이 융합되어있는 아이디어로, 4차산업혁명시대의 핵심 아이디어인 빅데이터, 사물인터넷, 인공지능 기술들을 활용하였다.

우리 연구회는 천부 지층 탐사를 통한 해저 지층 퇴적물 구조 분류에도 인공지능을 활용해보았다. 저주파 음향 펄스로 해저 지층 퇴적물의 구조와 모양을 40개의 분류표에 따라 구분하고 있다. 이때, 사람이 일일이 확인하고 분류표에 따라 구분하여 보관하는 작업을 수행해야 하는데, 이러한 분류 작업



▲ <그림 2> 연안재해취약성 평가 프레임 및 평가지수



▲ <그림 3> YOLO Regression Detection 모델과 Mean average precision (mAP) 그래프

을 사람이 하다 보니, 시간적 요구 및 분류하는 엔지니어에 따라 오류가 발생하고, 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 따라서, 인공 신경망을 구축한 딥러닝 기반 객체 인식 YOLOv3 (You Only Look Once)라는 모델로 수천개의 천부 지층 음향상 이미지들을 학습시키고 인식하여 자동으로 분류하여 보관하도록 하였고, Darknet-53 네트워크를 사용하여 53개의 합성 신경망과 3가지 (13x13, 26x26, 52x52) 크기의 특징 맵으로 FPN (Feature Pyramid Network)를 이뤄 다양한 사이즈의 객체를 정확하게 인식할 수 있도록 모델을 구축 활용해 학습 및 분류를 수행하였다. 약 17가지의 코드로 분류된 2487장의 천부 지층 음향상 이미지들을 학습시키고 검증한 결과, 89.36% mAP의 정확도와 F-1 score 84% 로 높은 정확도를 보였으며 향후 더 많은 천부 지층 음향상 이미지를 학습 시키고 보완한다면, 충분히 상용화가 가능할 것으로 예상되었다.

2019년 부터 COAEM 연구진들은 미국 California Baptist University 토목공학 연구실과 함께 퍼지이론(Fuzzy Logic)을 활용한 표사이동 모델을 개발하고 있으며, 단순한 표사이동 모델이 아닌 누구나 사용하기 쉽고 혁신적인 모델을 구축하기 위해 심열을 기울이고 있다. 퍼지이론은 모호한 상태를 참 혹은 거짓의 이진 논리에서 벗어난 다치성으로 표현하는 논리 개념으로 근사치나 주관적 값을 사용 하는 규칙들을 생성하며, 최근 인간의 사고 능력에 가까운 기능을 구현하는 연구가 활발하게 진행 되고 있다. 하지만 인공지능이 수학적 수식에 의존하지 않고 수많은 데이터의 경험식에 의존하는 방식으로 현장에서 바로 활용이 어려울 것으로 사료되는 바, 개발 후 GUI 포맷으로 구축하여 공학자들에게 무료로 배포하고, 피드백을 통해 모두가 쉽게 사용 하여 경향을 확인하고



▲ <그림 4> COAEM x California Baptist University 교수님들과 공동연구

참고 할 수 있는 모델로 활용이 가능하도록 만드는 것이 연구진들의 최종 목표이다.

우리 연구회는 해안공학에서부터 해양환경까지 다양한 분야에서 인공지능의 접목이 가능한 것을 다양한 연구들을 통해 경험하였으며 이를 토대로 인공지능을 설명할 수 있는 기술(Explainable AI)로 개발하여 실제 현장에 적용할 수 있도록 상용화 시킬 수 있도록 계속 노력할 것이다. 전 세계가 4차 산업혁명의 새로운 패러다임 속에서 정치, 경제, 사회, 문화,

과학 등 모든 분야에서 대변화를 맞이하고 있으며, 초연결, 초지능, 대융합의 시대가 도래하고 있다. 우리 해안 해양공학 분야도 변화하는 패러다임에 발맞춰 신기술을 받아들이고, 도전과 기술개발을 통해 해외 기술 한국화가 아닌 한국기술을 세계화할 해양분야의 K-Engineering을 전세계에 알릴 때가 아닌가 생각해본다.

본 연구회는 우리나라 해안 해양공학의 발전을 위해 차세대 전문가들의 재능 기부로 운영되는 연구회로서, 후원 및 공동 연구를 희망하는 기업 및 관계자께서는 hdkim311@gmail.com 로 연락 부탁 드립니다. 기재된 연구회의 연구들은 순수 연구 목적으로 한국해안해양공학회, 한국수상교통시설협회, ㈜미래해양, 첨단해양공간개발연구센터의 지원을 받아 함께 수행중인 연구들 입니다. 자세한 사항은 www.coaem.com을 통해 확인이 가능합니다.



[감수 : 구성욱(ksw2002@dohwa.co.kr)]

선양빈(先養浜) 예측 및 설계기법에 관한 고찰

- 소규모연구회



책임 연구자:
김 진 혁
㈜세광종합기술단 차장
(kjh6086@sekwangeng.co.kr)

참여 연구자:
장 병 진 ㈜세광종합기술단 대리
권 혁 민 성균관대학교, ㈜세광종합기술단 연구소장
김 일 섭 ㈜세광종합기술단 상무
서 진 성 ㈜세광종합기술단 차장
양 현 수 ㈜세광종합기술단 대리

1. 머리말

해안선을 보호하는 공법은 연성공법과 경성공법으로 대별된다. 최근 들어 우리나라는 연성과 경성공법을 혼합하는 형식의 복합공법이 많이 적용되는 경향이 있다. 즉, 해안침식이 발생하면 우선 내습하는 파랑에너지의 일부를 차폐 또는 쇄파시키고 침식된 해빈에 모래를 충전(양빈)하는 방식으로 진행한다. 하지만, 사후가 아닌 사전에 미리 모래를 충전하는 방법은 적용된 바 없다.

본 기사는 사전에 모래를 충전하여 해안선을 보호하는 방법은 어떠한 경우가 있을 수 있으며, 이러한 공법의 의의는 무엇인지에 대하여 고찰하고자 한다.

양빈은 시공 전·후 모래 유실량이 최소화 되도록 노력하는 것이 요망된다. 즉, 양빈 공사비 절감을 위해서는 모래 이동량이 적은편이 좋으나 공사기간 중 날씨, 풍향, 파랑, 파랑장 변화 등 많은 불확정 요소들이 방해요소로서 존재한다. 이러한 요소들을 극복할 수 있는 하나의 방법으로 선제적으로 예측되는 퇴적 위치에 양빈을 수행하여 다양한 외력조건에 대하여 기존 해안선의 횡단변위가 작게 발생하도록 하는 방법을 생각할 수 있다. 이는 해안선이 주파향을 포함하는 파랑장 등 외력조건에 대하여 해안선의 모래가 평형상태가 될 때까지 변화한다는 점에 착안한 것이다.

이와 같이 현재 해빈조건으로부터 예측된 평형해안선의 퇴적부분을 선제적으로 모래로 충전(充塡)하는 방법을 양빈이라고 한다. 선양빈은 예측되는 계절적 주파향에 대하여 인위적으로 안정해빈의 활선을 미리 확보함으로써 주어진 해빈에서 모래 이동량을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 기사는 이러한 선양빈을 위한 설계 과정을 보이고자 한다.

2. 본론

선양빈 공법의 효용성을 검증하기 위해서는 대상 해빈에서 계절별 주파향 결정방법이 선결되어야 한다. 우선 기존의 표사모형을 활용하여 현재의 해안선 변화를 계산하고 이를 미파솔(MeePaSol)의 결과와 비교해 볼 수 있다.

본 연구는 선양빈 공법을 국부적으로 해안선 변화가 큰 지역에 적용하고 모니터링을 통하여 이의 효용성을 확인하고자 한다. 금번 연구에서는 실해역을 대상으로 선양빈 설계 방법에 대해서만 논하고자 한다. 대상지역은 <그림 1>에 보이는 바와 같이 강원도의 삼척해수욕장이다. 남측에 계획된 돌제가 축조되면 연안표사가 돌제 북측 전면에 역활형 형태로 쌓일 것으로 예측되므로 상류부에 해당되는 북측 해빈을 포함하여 해안선 변화를 예측하고 선양빈을 하고자 한다. 미파솔(MeePaSol)을 적용하여 <그림 2>와 같이 해안선 관측자료를 이용하여 대상 해안 기준선으로 목표해안선을 설정하였다. 선양빈량은 관측한 해빈단면과 수심자료를 이용하여 해빈단면에서 해저경사 1/20으로 양빈량을 구하였고, 돌제 전면에서의 수심자료를 이용하여 평균수심에 목표해안선까지의 면적을 곱하여 양빈량을 산출하였다.

선양빈을 위한 소요 양빈량은 동계시 12,500m^3, 하계시

27,000m³로 각각 추산되나, 양빈사 채취량이 충분하지 않아 동계시 소요 양빈량을 목표로 하였다. 여기서, 소요 양빈량이란 돌제가 설치되어 새로운 평형해빈에 도달하기 위해 필요한 모래량을 의미한다.

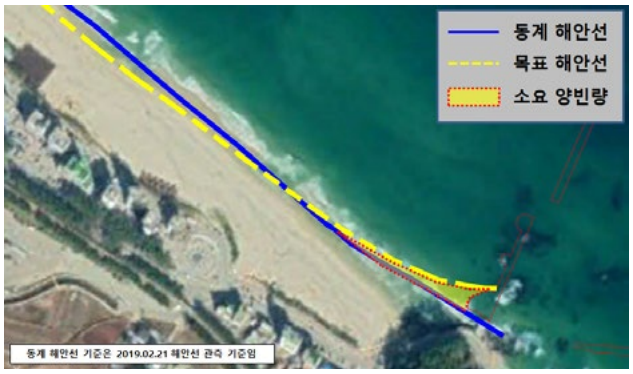
<그림 3>과 같이 동계시 양빈을 할 경우 12,500m³의 양빈량이 필요하지만, 양빈사 채취량은 6,000m³으로 충분하지 않으며 약 6,500m³ 만큼의 모래량은 북측의 상류부로부터 연안표사형태로 충전될 것으로 예측된다. 따라서 유실율을 고려하여 '(소요 양빈량)≤(양빈사 채취량)+(예측되는 연안표사량)'의 관계가 성립한다.

양빈사 채취량으로 충분하지 않은 자연적인 연안표사이동에 의한 소요 양빈량을 예측하기 위하여 <표 1>에 보인 바와 같이 가정한 각각의 단면적에 구역별 횡단측량선간 간격을 곱하여 산정하였다. 단, ① 단면적은 북쪽일수록 크도록 가정하였고 ② 전구간 침식 예상 단면 하부경사가 1/20이 되도록 하였으며 ③ <표 1>과 같이 돌제전면에 연안표사로 추가될 모래량(6,500m³)에 근접하도록 수회 반복하여 단면적을 조정하였다.

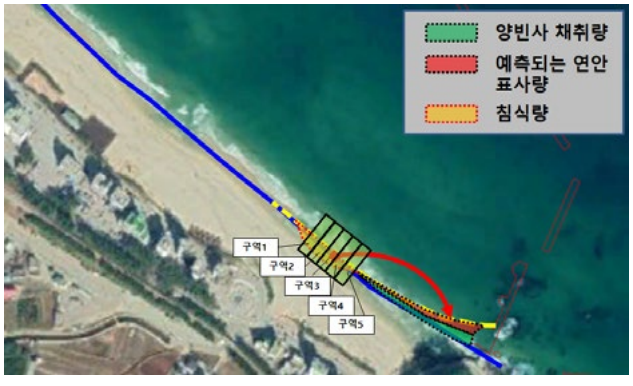
하계시의 양빈량이 더 크게 추산된 것은 관측에 의한 기준선이 육역방향으로 더 많이 후퇴해 있기 때문이다. 하지만, 목표 해안선은 동계와 하계가 거의 유사하다. 따라서 미파솔



▲ <그림 1> 선양빈 설계 대상지인 삼척해수욕장 일대

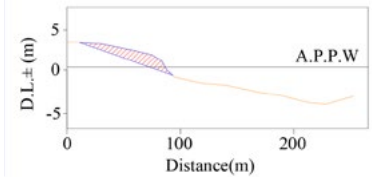
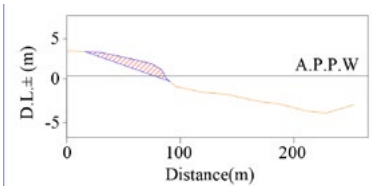
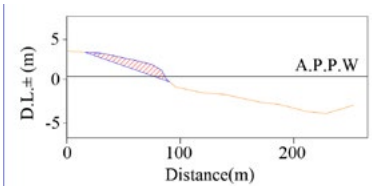
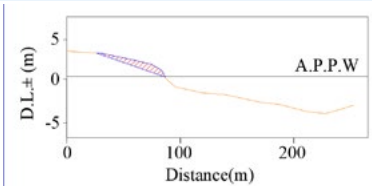
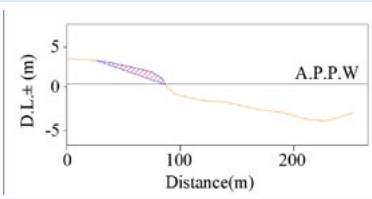


▲ <그림 2> 목표 해안선 설정



▲ <그림 3> 연안표사에 의한 침·퇴적량 산정

▼ <표 1> 연안표사이동에 의해 돌제전면 추가 충전을 위한 북측 상류부의 예상 침식단면

구분	단면도	체적(m³)
1구역		2,000
2구역		1,500
3구역		1,200
4구역		900
5구역		900
예측되는 연안 표사량		6,500

(MeePaSol)을 적용시 상류부측의 해안 기준선을 지정할 때 국부적으로 연속구간을 임의적으로 후퇴시켜 지정하면서 동계시와 하계시의 차이인 14,500m^3 만큼 모래 총량이 되도록 평형해안선을 추정하였다. 돌제로 인해 연안류가 차단되면 새로운 해안선 활선이 형성되게 된다. 단, 본 기사에서 보인 기존의 해안선 이미지는 좌표를 일치시킨 경우가 아님을 밝힌다. 하지만, <표 1>에 보인 구간별 체적량 계산은 동계시 현지 횡단측량성과 및 해안선 결정을 위하여 약최고고조위(A.P.P.W) 수위를 적용한 해안선의 육상부 단면을 대상으로 추정하였다. 양빈량 추정은 약최저저조위를 기준(DL ±0.0)으로 하였으며, 해안선은 <표 1>에 보인 바와 같이 약최고고조위를 기준으로 보았을 때 육역으로 약간 후퇴한 결과를 보인다.

이때, 평형해안선을 찾아가는데 기존의 기준선을 그대로 유지하면서 선양빈 활선에 따른 모래량을 추산하고 포설하면 최소한의 양빈으로 기존의 해안선을 안정화시킬 수 있을 것으로 기대된다. 선양빈 실해역 실험 결과는 이후 논문에 보고하고자 한다.

3. 맺음말

본 기사는 우리나라 최초로 선양빈 적용을 위한 양빈 설계과정을 보이고자 하였다. 선양빈은 현재의 해안선에 대하여 가능하면 연안표사 등의 이동을 억제하고 미리 퇴적되는 지역을 예측하여 모래를 충전하는 방법을 말한다. 추후 모니터링을 통하여 선양빈의 효용성에 대하여 실해역 자료를 바탕으로 논의하고자 한다.

※ 본 2편의 연구는 소규모 연구회 연구과제로 진행되었으며, 상세한 내용은 학술대회 발표 논문집을 참고하시기 바랍니다.

[감수 : 구성욱(ksw2002@dohwa.co.kr)]



국제학회 현황

· 항만 관련 국제컨퍼런스 및 국제협회 최근 소식

항만 관련 국제컨퍼런스 및 국제협회 최근 소식

- COVID-19에 따른 컨퍼런스 및 회의 연기 상황 -



김 규 한
가톨릭관동대학교 교수
(knkim@cku.ac.kr)

1. 소개에 앞서

어느 순간 갑작스럽게 우리 앞에 다가온 COVID-19 (Corona Virus Disease 19)는 우리에게서 2020년을 송두리째 뺏어가고 있다. 우리나라뿐만 아니라 전 세계가 팬데믹(Pandemic)상황에서 COVID-19 종식을 가늠할 수 없는 장기화 추세에 학회 및 협회와 연관된 다양한 학술 및 기술 행사도 오랜 역사 속에서 처음 있는 어려움에 직면하고 있다. 교육 학술행사 뿐 아니라 많은 사업들이 차질을 빚고 있는 무거운 상황 속에서 국내 학술관련 행사 및 학술대회는 비대면 무관중 온라인으로 개최되고 있지만 국제학술행사는 소수의 행사 이외에는 올해 행사를 취소하고 무조건 연기하는 추세에 있다. 코로나의 상황이 나아지지 않는다면 앞으로는 세계적인 국제행사도 무관중 비대면의 형식으로 이어질 가능성이 매우 크며 이러한 경향은 최신의 뉴노멀(New Normal) 로 자리잡아가게 될 것으로 예상된다.

본 고에서는 항만과 관련한 국제학술대회 및 국제회의를 소개하고 팬데믹 상황 속에서 행사개최여부, 비대면 환경 속에서의 새로운 개최방식과 연기 상황은 물론 새롭게 자리 잡은 랜선 Virtual 화상회의(컴퓨터를 이용한 화상회의) 소식을 정리하여 전하고자 한다.

2. 국제학술대회

◆ International Conference on Coastal Engineering (국제해안공학회의, ICCE)

- 해안·항만분야에 있어서 가장 권위 있는 학술회의로서 2년에 한번 씩 늦여름부터 가을 사이에 열리는 ICCE는 해안





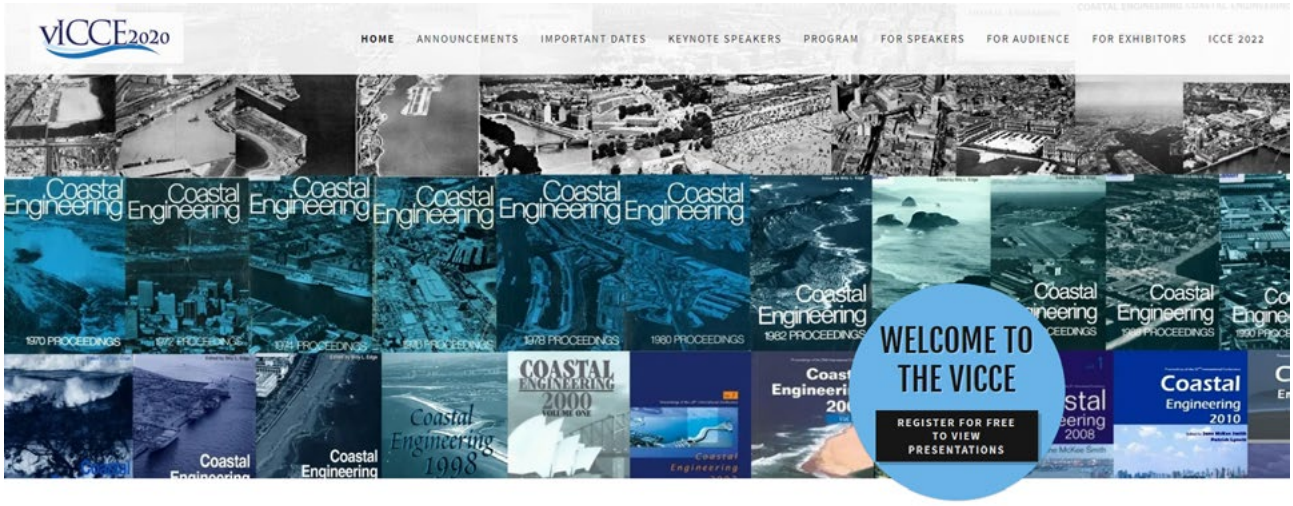
▲ ICCE 2014 Technical Session



▲ ICCE 2014 Closing Banquet

분야의 기술개발을 활성화하고 학술연구 및 정보교류의 목적으로 1950년 Long Beach(California, USA)에서 첫 회의가 시작되어, 2014년에는 35회 ICCE를 우리 학회 주관으로 서울에서 개최한 바 있다.

금년 호주 시드니에서 37회째 컨퍼런스가 개최될 예정이었으나 COVID-19로 인해 2022년으로 2년 연기되었다. 2016년에는 터키 이스탄불에서 개최가 예정되어 있었으나 개최 바로 전에 이스탄불에 구테타가 발생하여 연기되었고 그 해 11월에 터키의 다른 지역에서 개최된 바 있었다. 올해 2020년 컨퍼런스를 동일한 장소에서 2년을 순연시키게 된 것은 ICCE 역사상 처음 있는 일이다. 엄격한 심사를 통해 컨퍼런스에 발표될 논문을 이미 1월초에 결정한 상태에서 무조건 2년을 기다려야 하는 것은 연구자들에게 너무 답답한 일이기도 하다. 따라서 컨퍼런스를 주관하는 ICCE집행부 CERC (Coastal Engineering Research Council)는 2020년 발표로 승인된 발표논문을 기반으로 진행되는 온라인 컨퍼런스를 계획하였고, 이미 승인된 저자들에게 진행방식, 발표자의 등록비, 청중의 참가비에 대한 설문조사를 실시하고, 2020년 10월 6일부터 10월 9일까지 가상회의 사이트(https://vicce.live/)를 통해 학술대회를 개최하기로 결정하였다. 단, 2022년 ICCE와는 별개로 진행되며, 추후 2022년 ICCE의 초록은 내년에 다시 접수할 계획이다.



▲ Virtual ICCE 2020 Website

◆ International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC)

-아시아와 태평양 연안의 국가들을 대상으로 한 해안 및 항만 관련 국제학술회의 APAC는 아시아 태평양 지역의 해안공학 및 해안 환경 문제를 포함 연안 관련 연구에 학술 및 기술 교류를 촉진하는 국제컨퍼런스이다. 이 학술회의는 한국 해안·해양공학회(KSCOE), 중국해양학회(COES), 일본토목학회 해안분과위원회(JSCE)에 의해 설립되었으며, 2년마다 개최되고 있다. 2001년 대련에서 첫 번째 학술대회가 열린 이후 지난 2005년 8월에는 제주도에서 개최한바 있으며, 2009년에는 싱가폴, 2013년에는 인도네시아 발리에서 개최되었고, 2015년은 인도 첸나이, 2017년은 필리핀 마닐라,2019년은 베트남 하노이에서 개최된바 있다. 2021년 컨퍼런스는 일본 교토에서 열릴 계획이었으나, 역시 팬데믹의 영향으로 2023년으로 2년 순연되어 2023년에 동일한 일본 교토에서 개최될 예정이다. 차기 컨퍼런스는 2020년 올해에 개최되는 것도 아니고 내년에 예정되어 있는 행사임에도 불구하고 2023년으로 연기한 것은 그만큼 심각한 개최지의 상황을 반영한 것으로 이해된다.



▲ APAC 2019

3. 국제협회

◆ World Association for Waterborne Transport Infrastructure(수상교통시설협회, PIANC)

- PIANC는 하천이나 운하를 이용한 내륙수운이 발달한 유럽에서, 원활하고도 효율적인 교통·교역을 하기 위한 국제간 협의를 목적으로 개최된 국제항로회의(International Navigation Congress)를 계기로 1885년에 설립된 비정치, 비영리 단체이다.

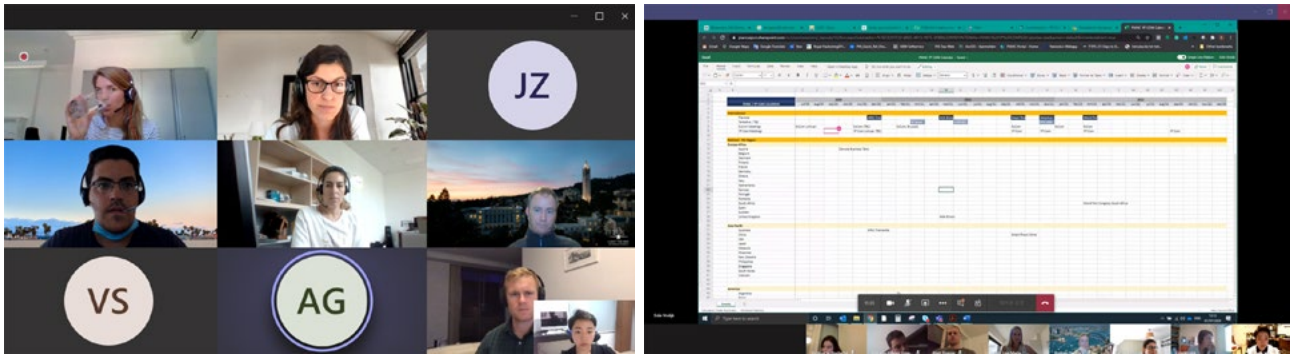
- 당초 국제항로협회(Permanent International Association of Navigation Congresses)에서 1998년 9월 국제수상교통시설협회(The World Association for Waterborne Transport Infrastructure)로 세부명칭이 변경되었으나 PIANC라는 영문이름은 유지하기로 결정하여 지금껏 사용되고 있다. 또한, UN의 자문기관으로도 지정되어 있으며 협회소재지는 벨기에의 브뤼셀에 있다.

- PIANC는 매년 개최되는 총회(Annual General Assembly: AGA)이외에 4년마다 개최되는 국제수상교통시설회의(Congress)는 각국의 유치경쟁이 치열하다. 2020년 PIANC 총회(AGA)는 영국 Bristol에서 개최될 예정이었으나 코로나로 인해 2021년으로 연기되었다. 한편 중요한 사안들을 결정하기 위한 PIANC 임시총회가 Virtual로 올해 10월 28일 열릴 예정이다.

- 아울러 매년 개최되는 AGA와 4년마다 열리는 Congress 이외에 개발도상국의 기술적 애로사항 등을 중심으로 논의가 이루어지는 PIANC COPEDEC (Coastal and Port Engineering in Development Countries) 컨퍼런스와 내륙 수운 관련 정책 및 기술 개발에 대한 논의가 주를 이루는 PIANC Smart River 컨퍼런스도 각국의 관심이 주목되는 행사들이다. 올해 처음으로 주최되는 아시아 권역 PIANC APAC회의는 예정대로 2020년 12월에 개최될 예정이지만, 코로나 펜데믹으로 Virtual 과 동시에 진행 할 예정이다. 이 밖에 각 분과회의, 컨퍼런스와 국제회의에서는 항만·항로 등의 기술적 과제에 관한 조사연구 결과, 이 분야의 젊은 기술자육성은 물론 개발도상국에 대한 기술원조 방안 등 다양한 주제의 논의가 이루어진다. 한편 코로나의 영향으로 많은 행사들이 연기되고 있으나 비대면 Virtual회의의 편리성을 확인하는 계기가 되어 PIANC 본부와 한국을 포함한 각국 PIANC 임원들의 랜선 화상회의는 오히려 월1회 이상으로 늘어나 보다 활발한 논의가 진행되고 있다.



▲ Annual General Assembly 2019(Kobe, Japan)



▲ PIANC 비대면 화상회의

▼ PIANC 행사 일정

	Event	일정	변경
1	PIANC World Congress	2022.03. / Cape Town, South Africa	미정
2	PIANC-COPEDEC Conference	2020.11.16.~20 / Manila, Philippines	1년 연기
3	PIANC-SMART Rivers Conference	2021.10.19.~22 / Nanjing, China.	미정
4	PIANC-Asia Pacific Conference	2020.12.01.~03 / Fremantle, Australia.	미변경 (Virtual 동시)
5	PIANC-Annual General Assembly	2020.5.25.~27 / Bristol, UK.	1년 연기

◆ **International Association of Ports and Harbors (세계항만협회, IAPH)**

- 국제항만협회는 세계항만의 발전과 항만 관계자의 교류를 목표로 1955년 미국 LA에서 설립된 세계의 항만 관계자가 모이는 유일한 국제 NGO단체이다. 현재 PIANC와 마찬가지로 UN자문기구로 등록되어있으며 UN 산하 6개 기관(IMO, ECOSOC, UNCTAD, UNEP, ILO, WCO)의 비정부 자문기구로 공식 인정받아 항만과 관련한 문제에 있어서 대표적인 역할을 하고 있다.

- 현재 세계의 주요 항만 관리자 등이 정회원으로 약 230개항, 또 항만 관련 정부 기관, 공공단체, 각종 협회, 기업, 대학, 개인 등 준회원이 약 140개소가 가입되어 있으며 전 세계 약 90개국에 걸쳐 있다. 우리나라의 경우는 정회원으로는 해양수산부, 인천지방해양수산청, 부산지방해양수산청, 지방항만공사(부산, 인천, 울산, 여수 광양)등 7곳이 가입되어 있다. 준회원으로는 한국해안해양공학회(KSCOE)를 비롯하여 한국해양수산개발원, 한국항만협회, 케이엘넷, Total Soft Bank 등이 가입되어 활동 중에 있다.

- 국제항만협회 총회는 매년 개최되며, 홀수 해에는 세계항만회의(World Ports Conference), 짝수 해에는 Mid-term Conference를 개최하여 왔으나, 2020년부터는 세계항만회의를 매년 개최하는 것으로 변경되었다. 새롭게 바뀐 규정에 의해 올해 6월 벨기에에서 세계항만회의가 열릴 예정이었으나 아쉽게도 COVID-19로 인해 2021년 6월로 연기되었다.
- 오프라인으로 열리는 세계항만회의(World Ports Conference)는 연기되었으나, 2021년 세계항만 회의를 앞두고 코로나 바이러스가 항만 및 물류 공급망에 미치는 영향을 조사하는 새로운 웹 세미나 시리즈를 시작하였다. IAPH World Ports Conference 팀이 준비한 무료 웨비나(Webinar) 시리즈는 비즈니스 모델 조정, 선박-해안 관계 개선 및 데이터 공유 추진이라는 상호 연결된 주제에 대해 다루고 있다. 여름 시리즈는 Kitack Lim (IMO 사무 총장), Gene Seroka (로스 앤젤레스 항만 전무), Jens Meier (CEO Hamburg Port Authority), Ley Hoon Quah (CEO Maritime and Port Authority Singapore), Noura Al Dhaheri (CEO MAQTA Gateway / Abu Dhabi Ports), Theo Notteboom (상하이 해양 대학), Jan Hoffmann (Chief Logistics Branch UNCTAD) 및 Guy Platten (국제 선박 사무총장)등 다양한 분야의 전문가들이 참여하는 Webinar를 추진하였다.

▼ IAPH Webinar 일정

	Event	일정	변경
1	Sustainable Port Development	2020.09.29.	WPSP
2	Sustainable Partnership between cargo interests and ports	2020.10.21.	Cargo and Port
3	Globalisation vs rationalization : impact on cargo and passenger ports	2020.11.10.	

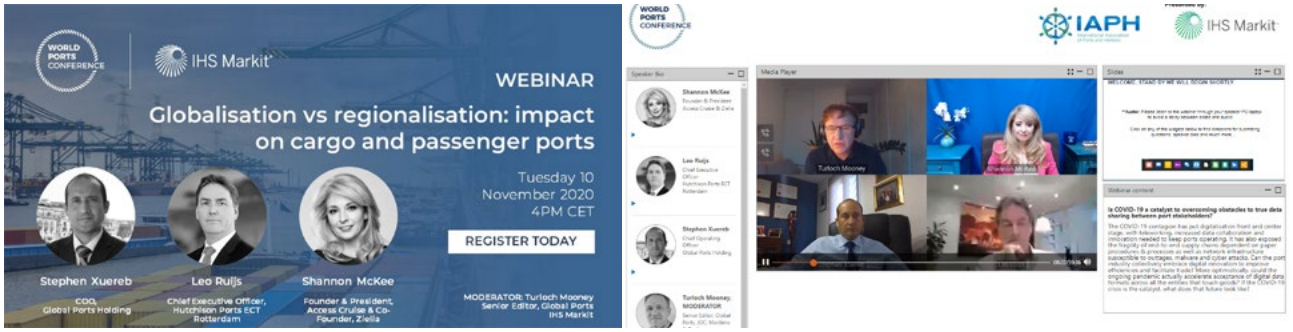
여름 시리즈는 Kitack Lim (IMO 사무 총장), Gene Seroka (로스 앤젤레스 항만 전무), Jens Meier (CEO Hamburg Port Authority), Ley Hoon Quah (CEO Maritime and Port Authority Singapore), Noura Al Dhaheri (CEO MAQTA Gateway / Abu Dhabi Ports), Theo Notteboom (상하이 해양 대학), Jan Hoffmann (Chief Logistics Branch UNCTAD) 및 Guy Platten (국제 선박 사무총장)등 다양한 분야의 전문가들이 참여하는 Webinar를 추진하였으며, 가을부터 진행된 Webinar에서는 2020년 9월 진행된 최근 IAPH의 주요 프로그램인 WPSP(World Port Sustainability Program)의 동아시아 및 오세아니아 지경에 대한 소개 및 계획을 시작으로 항만정책과 개발에 대한 다양한 세미나가 진행될 예정이다. 10월에는 국제항만협회 총재인 Santiago Garcia Mila(Port of Barcelona), Griff Lynch(Georgia Ports Authority), Andrew Gillespie(Ansell Limited), Jordi Espin Vallbona(Spanish Shippers' Council)이 참가하여 :"Sustainable partnerships between cargo interests and ports"에 대해 선주, 항만 및 터미널 운영자 간의 의미 있고 비즈니스를 향상시키는 관계 및 파트너십을 구축하는 모범 사례를 발표하였다. 11월에 열린 Webinar에서는 "Globalisation vs rationalization : impact on cargo and passenger ports" 주제로 Stephen Xuereb(Global Ports Holding), Leo Ruijs(Hutchison Ports), Shannon McKee(Zielia)가 원격 근무, 향상된 데이터 협업 및 항만 운영을 유지하는 데 필요한 혁신에 대해 토의하였다. 다음 회의는 2021년 2월부터 다시 WPSP(World Port Sustainability Program)과 COVID-19이후의 항만정책 변화에 대한 Webinar가 계속될 예정이다.
(https://www.worldportsconference.com/ webinars 참조)



▲ Sustainable Port Development(2020.09)



▲ Sustainable Partnership between cargo interests and ports(2020.10)



▲ Globalisation vs rationalization : impact on cargo and passenger ports(2020.11)

4. 맺는말

- 이번에는 지면 관계상 소개하기 어려웠지만 소개한 국제행사 이외에도 다양한 국제행사들이 코로나의 영향으로 개최가 연기되고 있다. 코로나의 영향이 오랜 기간 계속되면서 국제학회 및 협회 본부 측은 국제행사는 개최하지 못하지만 불가피하게 비대면 화상회의를 통해 중요한 국제미팅을 이어가고 있다. 이번 국제교류협력의 내용의 대부분은 이미 항만협회지에도 소개한 바 있으나 학회지에도 소개하는 것이 좋겠다는 편집위원회의 요청을 받아들여 추가로 IAPH등의 소식을 업데이트하여 다시 소개하게 되었다.

- 한편 이러한 비대면 화상회의를 통해 그동안 익숙하지 않았던 랜선 Virtual회의의 편리성을 새롭게 확인하는 계기가 되어 국제기구에 따라서는 오히려 랜선 화상회의의 빈도가 늘어나 보다 다양한 논의가 진행되고 있으며 이러한 상황은 코로나 이후에도 많은 부분 뉴노멀로 자리 잡아 갈 것으로 보인다.

[감수 : 신범식(sbs114@cku.ac.kr)]



자유기고

· 바다와 음악에 대한 小考

· 해양공학자의 바다를 지배하는 수(數)와 식(式)

바다와 음악에 대한 小考



편 종 근
명지대학교 명예교수
(ckpyun@mju.ac.kr)

평소 음악을 좋아했지만 현역 시절에는 괜히 마음만 급해서 집중적으로 시간을 할애할 심적인 여유가 없었으나, 정년퇴임을 한 2013년 이후에는 벼르고 벼렸던 대로 음악 감상만으로 그치지 않고 배운 게 도둑질이라고 어쭙잖게 장르별, 작곡가별 분류를 하고, 작품에 대한 이해를 높이려고 나름 해설서를 참고하면서 요약정리를 해보았다. 그러다보니 동호인 그룹이 자연스레 형성이 되었고, 또 어쭙잖게 그룹의 리더가 되어 아침마다 선곡된 곡의 해설과 함께 音源을 회원들에게 보내고 있었다. 그러던 중 세계적으로 명지휘자이자 碩學인 미국의 번스타인이 1958년부터 1970년까지 CBS에서 25회에 걸쳐 방송한 청소년을 위한 음악회의 DVD를 우연히 접하게 되어, 가뭄에 단비를 맞듯 아마추어가 갖는 궁금증을 해소할 수 있었다. 그리하여 한국 해안·해양공학회지(2016년 E-book, **<클래식의 세상>**, 71-78)에 번스타인의 제5회 청소년음악회의 **<고전음악이란 무엇인가?>**의 DVD 자막을 소개한 바 있었고, 돌아가신 최병호 교수로부터 어쭙잖은 일을 한다고 핀잔도 들었다. 벌써 4년 전 일이고, 그 후로도 취미생활을 계속하던 중, 우리 학회가 바다를 연구하는 학회라, 바다를 매개로 하여 음악과 관련을 지을 수 없을까 하는 생각이 들어, 아마추어 입장에서나마 **<바다>**를 주제 또는 대상으로 하는 음악을 모아 보았다.

제일 먼저 영국의 작곡가 **본 윌리암스**(Ralph Vaughan Williams 1872-1958)의 교향곡 1번 **<바다>**를 들 수 있는데, 소프라노, 바리톤 독창, 합창과 관현악을 위한 교향곡이다. 바다를 상징하며, 죽음을 극복하고 승리하는 인간 정신과 영적인 경험을 주제로 한 大敍事詩이다. 미국 시인 **휘트먼**(Walt Whitman)의 詩 **<풀잎**(Leaves of Grass)**>**에서 발췌한 가사에 합창곡을 붙인 형태이다. 6년이나 걸린 이 곡은 더할 나위 없이 뛰어난 것이었고, 거대한 힘을 발산하는 바다를 그려 놓은 한 폭의 그림 같았다.

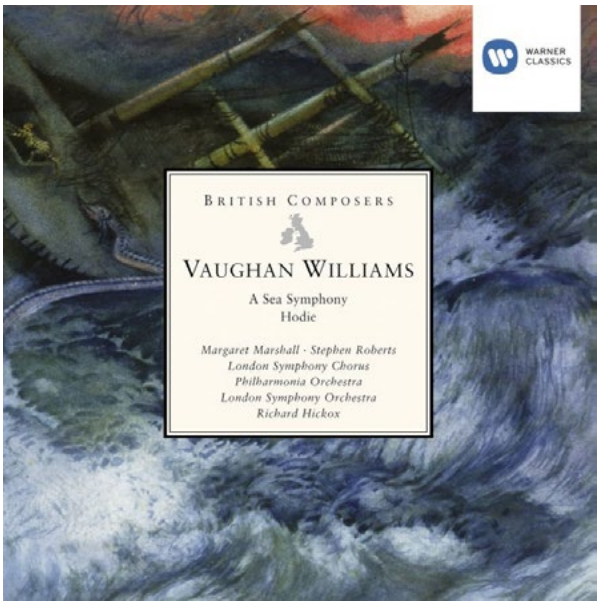
도입부(모든 바다와 배의 노래)는 출범을 의미하듯 밝은 팡파르로 시작되고, **느린 악장**(밤에 혼자 바닷가에서)은 밤에 바닷가에서 파도 소리를 들으며 은하계와 많은 공통점을 가진 바다의 신비에 대해 생각하는 야상곡적 표현이며, 3악장(파도)의 활기찬 **스케르초**는 제목 그대로 바다에서 파도치는 모습을 마치 그림을 그리듯이 생생하게 묘사한 회화적인 악장으로서 관현악단과 합창단에게 고도의 기교를 요구하고 있다. **피날레**(탐험하는 사람들)에서는 점점 음악이 고요해지며 배와 함께 영혼의 항해를 떠나라는, '깊은 곳만을 향해 나아가라'는 작곡가의 메시지가 전달된다.

약 1시간 4분여의 바다 교향곡은 당시 독일 교향곡의 전통을 따라 빠른 도입부(18분), 느린 2악장(11분), 스케르초 3악장(7분여), 피날레 4악장(27분)으로 되어있는 고전적 교향곡이다.

바다 교향곡의 모태가 된 것은 Whitman의 시집 Leaves of Grass인데 이 시를 읽고, **본 윌리암스**는 인간의 삶과 영혼, 자유와 평등, 개척 정신을 바다와 항해, 배에 비유한 詩에 깊은 인상을 받았다. 망망대해를 헤쳐 나가는 뱃사람의 모습에서 자기 자신을 보았으며, 우주에 던지는 거대한 메시지에서 새 시대의 미래를 읽었다. 그래서 바다 그 자체와 영원성과 인류에 바치는 거대한 합창 교향곡을 작곡하게 되었다.

이 작품은 성악적인 부분이 많아 교향곡이라기보다는 오라토리오나 칸타타와 같은 느낌이 들기도 한다. 바다와 파도를 그림처럼 묘사했으며, 바다를 통해 전체적으로 '죽음을 극복한 인간의 승리'와 마지막 악장에서는 '미지의 영적인 세계로의 출범'을 노래하고 있다. 힘 있게 미지의 바다를 누비던 영국인의 기상이 서려 있는 音**을 이용한** 詩**(Tone Poem)**라고 할 수 있다.

이 작곡가는 81세 때 **<남극 교향곡>(교향곡 7번)**을 초연하였다.



▲ Vaughan Williams: A Sea Symphony, Hodie

다음으로 꼽을 수 있는 곡으로는 프랑스의 대 작곡가 **드뷔시(Claude Debussy 1862-1918)**의 **바다-관현악을 위한 3개의 교향적 소묘**가 있다. 드뷔시는 모든 감정과 열정을 쏟아내는 독일 낭만주의의 장황함에 대해 신비롭고 감각적인 충격을 던져준 작곡가이다. 흔히 프랑스 인상주의 화법에 비유되는 그의 음악들은 낭만주의 음악의 새로운 대안이었으며, 현대 음악의 지평을 여는데 크게 기여하였다. 그는 인상주의 화가나 상징주의 시인들처럼 스쳐 지나가는 듯한 느낌과 안개처럼 영롱한 분위기를 연출하는데 능했다. 그의 음악은 자유분방하고 자발적이어서 마치 즉흥 연주되는 듯한 느낌이다. 그는 "음악을 전통적으로 고정된 형식에 끼어 맞추어서는 안 되며, 음악은 색채와 리듬으로 이루어진 것이다"라고 말했다. 그는 최초로 음색에 지대한 관심을 기울인 작곡가로서 새로운 음향의 색채를 위해 혁신적인 화성과 리듬을 구사하였다. 특히 그의 화성 처리는 인상주의 음악의 가장 혁신적인 특징이라 할 수 있다.

번스타인이 **제9회 청소년음악회(1961.12.1. 카네기홀)**에서 **<인상주의 음악이란 무엇인가?>**라는 주제로 강연을 할 때, 인상주의 음악의 대표적인 예로 드뷔시의 **'La Mer'**라는 大曲을 들었는데, 이 곡은 조용하다가도 갑자기 파도치고 요동하는 무수한 변화를 보여주는 **바다**를 주제로 써진 곡 중 가장 유명한 곡이다. 드뷔시의 이 작품 '바다'는 인상주의 음악으로서 사실에 대한 직접적인 묘사를 하지 않고, 대신 색채감, 움직임, **연상(suggestion)** 등으로 이루어져 있어, 바다를 전혀 보지 못한 사람들일지라도 바다에 대한 인상을 느낄 수 있다고 한다.

프랑스의 예술에서는 사실적 묘사보다 상상력이 주는 영향이 더 커서, 뭔가 불분명하고 흐릿한 느낌을 받는 **인상주의**는 잘 알고 있다시피 마네, 모네 같은 프랑스 화가에게서 시작되었다. 예를 들어 훌륭한 인상주의 화가 **모네**의 **루앙 대성당**의 그림을 보면 성당을 사실적으로 그렸다기보다는 성당에서 반사되는 빛과 색채를 그려서 성당의 꿈같은 것을 연상하게 한다.

음악은 미술과 달리 사실적 묘사를 할 수는 없지만 나름대로의 묘사를 분명하고 확실한 코드로 할 수 있으나, 확실하지 않은 코드도 있을 수 있어 이런 2가지 요소가 포함되어 있는 화음이 바로 인상주의 화음이다. 베토벤의 곡은 분명한 곡이라 볼 수 있고, 드뷔시의 몽롱한 멜로디는 무언가를 암시할 수 있다.

바다의 1악장의 제목은 **'바다의 새벽부터 낮까지'**인데, 해뜨기 직전의 바다의 정적과 신비한 첫 번째 햇살 그리고 바닷새들의 첫 울음을 연상할 수 있고, 바람이 불어 바다가 굽이치기 시작하고 **첼로와 호른**의 밝은 음향으로 떠오르는 해를 느끼게 하고 있다. **금관 악기**의 화음만으로 공중에 떠있는 강렬한 태양을 느끼게 한다. 멜로디로 그린 그림으로 눈이 아닌 귀를 위한 그림이라고 번스타인은 설명하고 있다.

바다의 2번째 악장의 제목은 **'파도의 장난'**이고, 모든 음계, 화음, 기법을 동원한 활기차며 역동적인 인상을 주는 음악이다. 울려 퍼지며 물보라를 뿜어내는 듯한 파도치는 모습을 **고대 교회 선법**으로, 파도가 부서져 거품이 되는 모습은 **온음계**로 나타내고 있다. 이 부분은 주고받으며 계속되고 해체되어 사라지는가 하면 다시 돌아오고 있다. 대립적인 요소를 최고조로 양립시킨다. 색채와 어둠의 희롱을 펼치고, 환상이 뒤쫓아 가는 연속

적으로 변화하는 발자취이다.

마지막 악장은 **'바람과 바다의 대화'**로 거친 바다를 묘사하고 있는데, 어두운 부분이 밝은 부분을 돋보이게 하는 이 악장의 진행은 대조 위에서 만들어진다. 그 하나의 힘은 끊임없이 바뀌는 혼돈의 **운동**이고, 다른 하나의 힘은 **선율적 바탕**이다. 혼돈은 **소놀리테(sonorite** 共鳴, 反響**)**와 음색에 강한 악센트를 줌으로써 음 하나하나에 독자성을 부여하고, 선율적 바탕은 노래함으로써 단일 형태를 지향한다. 이들은 그 특성을 간직하든지, 흩어 버리든지, 확대 증폭되고 있다. **트럼펫**에 의한 주제는 순환주제인데, **파곳**이 이어받고 때때로 변용하면서 <대화>의 드라마에 참여하고 마지막 부분에서도 활약한다. 1악장 코다에서 금관으로 **한낮의 빛의 반짝임**을 나타내는 부분과 호응하여 **<바다, 대자연의 어머니이다>**라고 말하고 있다.

드뷔시 **'바다'**는 가장 어렵고 복잡한 연주곡이다.



▲ Debussy: La Mer

3번째로 소개할 작곡가는 **멘델스존(Felix Mendelssohn 1809-1947)**으로 '천재는 요절 한다'는 말대로 **모차르트(1756-1791)**처럼 38세에 세상을 떠났지만, 교향곡 <이탈리아>와 바이올린 협주곡 등 주옥같은 작품들을 작곡하였고, 우리의 관심사인 바다에 대한 작품으로도 **서곡 고요한 바다와 즐거운 항해**와 **헤브리디스 서곡(핑갈의 동굴)** 등이 있다.

첫 번째 곡은 그가 시칠리아 여행 중에 **괴테**의 2개의 短詩에서 악상을 얻은 연주회용 서곡으로, 조용하게 움직임이 없는 **깊고 어두운 바다**와, 바람이 울부짖는 항구를 서둘러 떠나 **재빠르게 항해를 하고 귀환하는 것**을 대조적으로 다루었다.

두 번째 곡도 유럽 대 여행에서 유래한다. **핑갈의 동굴**로도 알려져 있는 이 곡은 1829년 친구인 카를 클린게만과 함께 갔던 스코틀랜드 도보 여행길에서 시작되었다. 이 작품은 1835년에 <한여름 밤의 꿈> 및 **<고요한 바다와 즐거운 항해>**와 함께 출판되었는데 최종 출판 버전에 이르기까지 길고 복잡한 과정을 거쳤다. 이 동굴의 내부는 크고 작은 육각형의 현무암 기둥들로 둘러싸인 거대한 홀의 형태를 이루고 있으며, 거기에 파도가 들이치며 만들어 내는 소리는 흡사 대성당에 메아리치는 파이프 오르간의 울림을 방불케 한다고 한다. 詩人 **키츠**는 "바다가 끊임없이 그곳에서 부서지고 있다. ... 장엄함과 웅대함, 그리고 광활함... 그것은 가장 훌륭한 대성당을 능가한다."라고 표현하였다.

이 곡은 '音의 풍경화가'로 일컬어지는 멘델스존의 절묘한 작곡기법이 가장 잘 발휘되어 있는 작품이다. 변화무쌍한 바다의 모습을 담은 한 폭의 풍경화를 보고 있는 듯한 착각에 빠진다. 넘실거리는 파도, 불어오는 바람, 외로이 떠 있는 섬과 바위들, 푸른 바다를 향해 입을 벌리고 있는 시커먼 동굴, 그 위를 날아다니는 갈매기 떼 등등... 이 모든 광경이 마치 손에 잡힐 듯 생생하게 눈앞에 펼쳐지는 것이다.

이 곡은 지극히 단순하고 감정을 유발하는 양식으로, 점점 더 높아지는 음정으로 **신비스러운 중심 주제**를 3차례 반복하면서 시작한다. 과장된 2번째 주제는 **첼로**로 소개되어 **바이올린**이 이어받으며, **금관의 팡파레**로 예고되는 발전부에서는 약간은 불길한 새 음형이 **목관**으로 등장한다. 재현부는 주제를 계속 더 발전시키고, 그곳에서 음악이 잦아들기 전에 폭풍 같은 코다가 나왔다가 **도입부 모티프**를 멀리서 메아리처럼 울리면서 사라진다.

부연 설명으로 Naver **지식백과**를 참조하면 아래와 같다.

"음악은 은근한 일렁임으로 시작된다. 처음에는 파곳, 비올라, 첼로로 제시되는 중심주제는 파도를 연상시키는데, 이 주제는 이후에도 다양한 형태로 나타나며 곡 전체를 지배한다. 이 파도가 점차 진폭을 확장해 가는 동안 목관에서 흘러나오는 또 하나의 선율은 그 위에 떠 있는 바위를 연상케 한다. 바람이 더 세차게 불어오고 파도가 바위에 부딪혀 부서지고 있다. 잠시 가라앉으면 파곳과 첼로가 칸타빌레 주제를 꺼내 놓는다. 느긋한 이 선율은 잔잔해진 바다를 미끄러지듯 나아가는 배의 모습, 또는 항해하는 나그네의 객수와 기대감을 드러내고 있다. 이내 다시 바다는 거칠어지고 코데타의 새로운 주제는 마치 배를 뒤엎어 버릴 듯이 격렬한 기세로 휘몰아치는 폭풍우와도 같다.

전개부에서는 갖가지 擬聲音들이 들려오며 배가 섬에 가까이 다가감을 암시한다. 바닷새의 울음소리, 바다표범의 포효 등. 아울러 부서지는 파도와 물보라 소리, 귓가를 스치는 한 줄기 바람의 감촉, 계속해서 긴장과 이완을 반복하는 변화무쌍한 바다의 모습, 긴박한 순간과 운치, 그리고 동굴의 감흥을 고스란히 전해주고 있다."



▲ Mendelssohn Overtures

다음으로 소개할 곡은 이른바 '**러시아 5인조**(Balakirev, Borodin, Cui, Mussorgsky and Rimsky-Korsakov)' 작곡가 가운데 한사람인 **림스키-코르샤코프(Nikolai Rimsky-Korsakov 1844-1908)**의 세헤라자데 중 1곡 **바다와 신드바드의 항해**와 4곡 **바그다드의 축제. 바다-난파**인데, 이 곡이 많은 사람들의 사랑을 받는 것은 전곡에 걸쳐 배어있는 이국적이고도 관능적인 오리엔트 정취와 단순하고도 호소력 있는 선율 때문이다. 물론 이 곡이 누구나 아는 **천일야화**라는 친숙한 이야기를 바탕으로 하고 있다는 사실도 무시할 수 없는 요인일 것이다.

피겨 스케이팅의 **김연아** 선수가 배경 곡으로 이 작품을 사용했는데, 45분여에 이르는 세헤라자데의 여러 주제를 4분 남짓하게 편집한 것이다.

1곡 : 느리고 장중하게 지시된 서주에서 위압적인 **금관 주제**는 샤리아르 왕을, **바이올린**이 연주하는 처연하고 애소하는 듯한 **선율**은 세헤라자데를 나타낸다. 이 2주제는 전곡에 걸쳐 등장한다. 주부를 여는 **파도가 넘실거리는 듯한 선율**은 왕의 주제를 변형한 것이다. 곧 신드바드의 주제가 플루트로 제시되고, 독주 바이올린이 세헤라자데의 주제를 화려하게 장식한다. 3주제가 얽히면서 자유롭게 전개되어 나간다.

4곡 : 이전 곡들의 여러 주제가 번갈아 가며 나타나 일대 축제를 벌이는 곡이다. 먼저 왕의 주제가 성급하고 퉁명스럽게 나타난 뒤, 이를 무마하듯 세헤라자데의 주제가 나타난다. 2주제가 변형된 형태로 한 번씩 더 나타난 다음, 악상이 일변해 급박하게 전개되는 리듬을 타고 바그다드의 축제가 펼쳐진다(도중에 왕자의 주제도 나온다). 이어 1곡에서의 **바다 선율이 더 큰 스케일로 펼쳐진 뒤 배가 난파**하고 나면, 2곡의 중간부 주제와 3곡의 첫 주제(목관으로 연주)가 나타난다. 흥분이 가라앉으면 독주 바이올린이 세헤라자데의 주제를 약음으로 가녀리게 연주하고, 이어 저음현이 왕의 주제를 연주한 뒤 양쪽이 어우러지면서 두 남녀의 진정한 결합을 알린다.

연주자들은 이 곡의 연주를 꺼린다고 하는데, 몇 개의 단순한 주제를 음색만 바꿔 끝없이 되풀이 하는 것이 고역이라는 것이나, 바로 그렇기에 이 곡이 위대한 것이라 말할 수도 있다. 천일야화 만큼이나 면면히 흐르는 아름다운 선율은 아무리 들어도 질리지 않는 매력을 지니고 있다. 이렇듯 세계 문학사상 불멸의 걸작과 함께 세월을 뛰어넘어 사랑받았고, 앞으로도 사랑받을 음악이 탄생한 것이다.

이 곡은 고전 음악을 **정확한 음악**이라 정의한다면 이러한 분류에 속하나, 특정 기간인 고전주의 시대의 음악에는 속하지 않는다는 예로서 번스타인의 제5회 청소년음악회의 **<고전음악이란 무엇인가?>**에서(한국 해안.해양공학회지 2016년 E-book, **<클래식의 세상>** 중 73pp.) 소개되었다.



▲ Rimsky-Korsakov Scheherazade

5번째로 소개할 곡은 **비발디(Antonio Vivaldi 1678-1741)의 플루트 협주곡 op.10(전6곡) 중 제1번, 일명 <바다의 폭풍우>**이다. 비발디 작품 대부분이 바이올린 곡이나, 비올라 다모레, 첼로, 만돌린, **플루트**, 피콜로, 오보에 파곳, 호른, 트럼펫 등을 위한 곡도 적지 않다. 이 작품 10에는 6곡의 협주곡이 수록되어 있는데, 첫 3곡은 표제음악이다. 1번은 **바이올린 협주곡 5번 Eb 장조, op.8-5**와 마찬가지로 **<바다의 폭풍우>**라는 제목을 붙였다.

1악장 : **바이올린 협주곡 op.8-5**와 마찬가지로 폭풍우의 정경을 16분음표의 음계와 펼침 화음으로 묘사되며, 전곡에서 계속 나타난다. 4개의 투티와 3개의 솔로로 이루어져 있다.

2악장 : 플루트가 계속 아리오소풍의 선율을 연주하고, 투티는 거의 의의를 갖지 않는다. 베네치아 오페라의 아리아에서의 파토스를 느낄 수 있다.

3악장 : op.8-5와 마찬가지 박자와 빠르기이며, 주요 주제 역시 음계적 동기와 옥타브의 도약으로 이루어져 있다. 5개의 투티와 4개의 솔로가 있다.



▲ Antonio Vivaldi

6번째 곡은 **쇼팽(Frederic Chopin 1810-1849)의 연습곡 12(24)번**, 일명 **<넓은 바다>**로 양손의 아르페지오(펼침 화음) 연습곡인데, 음의 큰 파도가 넓은 바다 한 가운데에서 큰 물결을 이루어 넘실거리며 동요하는 듯한 느낌 때문에 **<넓은 바다>**라는 별명을 갖게 되었다. 그 물결 속에서 특정한 음에 악센트를 줌으로써 선율을 떠오르게 하는 점도 이 연습곡의 포인트이다.



▲ Frederic Chopin

마지막으로 바다와 관련이 있는 곡 중 필자가 아는 범위 내에서 곡목만 소개하면 아래와 같다.

우선 오페라로는 바다의 폭풍우를 잘 묘사하고 있는 바그너(1813-1883)의 <방황하는 네델란드인>과 제목에서 알 수 있는 베르디(1813-1901)의 <해적>, 그리고 푸치니의 <나비부인>의 제2막 1장의 마지막에 나오는 어부들의 합창, 일명 허밍 코러스를 들 수 있겠다.

서곡으로는 베를리오즈(1803-1869)의 <해적>이 있고, 피아노곡은 무소르그스키(1839-1881)의 <크리미아의 남쪽 해안에서>가 있으며, 가곡으로는 보로딘(1833-1887)의 <바다>와, 림스키-코르샤코프의 <해변에서, 5개의 로망스>와 <깊은 바다는 조용하고>, 그리고 푸치니의 <육지와 바다>가 있다.

앞서 나름 자세히 소개한 7곡의 CD와, 악장별 설명과 연주 시간을 전재하였으니 참고하기 바란다.

본 윌리암스 교향곡 1번 D(라) 장조, <바다> (가사 : Walt Whitman) 1909년, 1923년 수정

소프라노 / Margaret Marshall

바리톤 / Stephen Roberts

London Symphony Chorus

Philharmonia Orchestra / Richard Hickox

EMI **2009년**

1악장 모든 바다와 배의 노래. Moderato maestoso

Behold, the sea itself (합창)	3:00
Today a rude brief recitative (바리톤, 합창)	4:26

Flaunt out, O sea, your separate flags of nations! (소프라노, 합창) 2:24
Token of all brave captains (합창) 4:44
A pennant universal (바리톤, 합창) 3:36 / **18:10**
2악장 밤에 혼자 바닷가에서. Largo sostenuto
On the beach at night, alone (바리톤, 합창) 3:44
A vast similitude interlocks all (바리톤, 합창) 7:21 / **11:05**
3악장 Scherzo 파도. Allegro brillante
After the sea-ship **7:26**
4악장 탐험하는 사람들. Grave e molto adagio - Andante con moto
O vast Rondure, swimming in Space (합창) 4:19
Down from the gardens of Asia descending (합창) 6:28
O we can wait no longer (바리톤, 소프라노) 5:03
O thou transcedent (소프라노, 바리톤, 합창) 3:17
Greater than stars or suns (합창, 소프라노, 바리톤) 1:26
Sail forth (합창, 소프라노, 바리톤) 2:06
O my brave Soul! (소프라노, 바리톤, 합창) 4:24 / **27:03 / 63:45**

드뷔시 바다-관현악을 위한 3개의 교향적 소묘 1905년
La Mer-Trois esquisses symphoniques pour orhestre
Boston Symphony Orchestra / Charles Munch
Sony Music Entertainment **2010년**
I De l'aube a midi sur la mer. Tres lent 8:37
II Jeux de vagues. Allegro 6:15
III Dialogue du vent et de la mer. Anime et tumultueux 7:58 / **22:50 / 1956년**

멘델스존 서곡 고요한 바다와 즐거운 항해 op.27 1828년
London Symphony Orchestra / Claudio Abbado
Deutsche Grammophon **1988년 (1986년 13:05)**
멘델스존 헤브리디스 서곡 (핑갈의 동굴) op.26 1830년
London Symphony Orchestra / Claudio Abbado
Deutsche Grammophon **1988년 (1985년 10:23)**

림스키코르샤코프(Nikolai Rimsky-Korsakov 1844-1908) 세헤라자데 op.35
Sheherazade-Symphonic suite for Orchestra
St.Petersburg Philharmonic Orchestra / Yuri Temirkanov
Euroarts **2014년**
1곡 바다와 신드바드의 항해 9:49
2곡 Kalender 왕자의 이야기 12:55
3곡 젊은 왕자와 공주 10:12
4곡 바그다드의 축제. 바다-난파 12:48 / **45:44 / 2013년**

비발디 플루트 협주곡 op.10(전6곡) 1730년경
플루트 / Lisa Beznosiuk
Deutsche Grammophon **2012년**
제1번 F 장조, op.10-1, RV433 <바다의 폭풍우>
1악장 Allegro 2:54
2악장 Largo 1:49
3악장 Presto 2:06 / **6:49 / 1987년**

쇼팽 연습곡 12(24)번 C 단조, op.25-12 <넓은 바다>
피아노 / Maurizio Pollini
Deutsche Grammophon **2014년**
Allegro molto con fuoco. **(2:32) / 1972년**

[감수 : 고광오(zeus@hdec.co.kr)]

해안공학자의 바다를 지배하는 수(數)와 식(式).



조 홍 연
한국해양과학기술원 해양빅데이터센터
책임연구원
(hycho@kiost.ac.kr)

바다를 공부하는 사람, 해안공학자 또는 해양과학자와 기술자에게 수학은 어느 정도의 비중을 차지하고 있을 까? 기하와 대수(algebra, 代數)로 시작되는 수학의 세계에서 살고 있는 또는 살아야만 하는 해안 분야의 전문가는 수학 수준이 어느 정도 일까? 광범위한 수학의 영역에서 어떤 방법으로 자신의 수학 수준을 파악할 수 있을까? 이 원고는 편안한 마음으로 나도 모르게 이런 저런 '수'와 '식'으로 표현되는 수학의 세계에서 살고 있으면서, 그 존재를 공기와 같이 당연한 것으로 여기는 독자에게 새로운 시각으로 수학의 가치와 역할을 상기시키고자하는 생각으로 시작하였다. 편안한 마음으로, 진짜 편안한 마음으로 학창시절을 떠 올려보기를 바란다.

이런저런 발표를 하다보면 복잡한 '수식'보다는 가능하면 말로, "쉬운 말"로 설명을 해달라는 요청을 자주 받는다. 일반 강연이 아니라 이 분야에 종사하는 사람이 대부분을 이루는 발표에서도 마찬가지이다. '수식'이 강연에서 부담스러운 부분으로 자리를 잡고 있음을 실감한다. 수학은 초중고 및 대학과정에서 필수적인 중요 과목으로 굳건하게 자리를 잡고 있는 데, 그 이후에는 다수의 사람에게 수학적인 표현이 왜 이리도 부담스러운 부분으로 자리를 잡게 되었을까? 수학은 그리도 어려운가? 수학적인 표현은, 수식은 우리가 이해할 수 없는 부분인가?

필자는 수학이 수학 사용자에게는 가장 쉬운, 그리고 가장 명확한 분야라고 주장하고 있다. 미결의 난제가 아니라면 이미 풀려있는 문제를 또는 이미 증명되어 있는 수식을 이해하고, 적절하게 활용하기만 하면 되는 수학보다 더 쉬운 것이 있을까? 수학적인 증명은 논쟁 대상이 아니기 때문에 매우 명확한 부분이기도 하다. 수학적인 부분은 오류 유무만으로 판단되고, 논쟁 영역은 수학적인 부분보다는 수학적인 표현이 불가능하거나 아직 정립되지 않은 부분에서 발생하고 있음을 우선 인지할 필요가 있다. 해안공학 및 과학 분야에서 제기되는 어떤 논쟁이 되는 주제는 수학적인 부분이 아니다.

누구에게는 부담이 되지만, 바다를 공부하고, 바다로 생계(?)를 이어가는 우리에게는 필수적인 수학의 세계를 아주 간단한, 기본적인 수준에서 '추억'이라는 단어로 연상하며 이 글을 시작한다. 수학 수준을 논하는 것은 아니지만, 바다를 공부하는 우리에게는 평균 이상의 수학 수준이 요구되고 있다. 그 평균 이상의 최소를 기억해 보자. 바다를 공부하는 우리에게 친근한? 또는 무서운? 평균 이상의 수와 식은 무엇인가? 또 무엇이었던가? 중·고등학교 학생 수준을 평균으로 하고, 그 수준에서 시작을 하자.

수학은 "수"에서 시작한다. 그리고 기호가 뒤따른다. 기하(geometry)를 포함하는 대수(代數, algebra)의 시작이다. "수"의 세계는 초등학교의 자연수를 시작으로, 분수, 정수, 유리

수, 무리수, 실수, 허수로 이어지고 대학에서는 여전히 실수의 세계가 주를 이루지만 한 단계 수준이 높은 실수와 허수로 표현되는 '복소수(complex numbers)'를 기본 수준의 '수'의 영역으로 간주한다. 이러한 수와 더불어 '수"를 포함하는 용어도 등장한다. 예로 수(number), 상수(constants), 변수(variables), 함수(functions, equations), 계수(coefficients, 점성계수, 분자확산계수, 난류확산계수 등등), 벡터와 행렬(vectro and matrix), 텐서(tensor) 등을 들 수 있다.

$1,2,3,\ \ldots,\ \sqrt{2},\ \sqrt{3},\ \pi,\ e,\ \gamma,\ i,\ \phi,\ \ln 2,\ \ln 3,\ \log 2,\ \log 3$

$a,b,c,\ x,y,z,\ l,m,n,\ \vec{a},\vec{b},\ \vec{a}\cdot\vec{b},\ \vec{a}\times\vec{b},$

$\|x\|,\ |x|,\ \lim_{n\to\infty} a_n,\ \sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{a\,k^{p}},\ \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix},\ \delta_{ij},\ \epsilon_{ijk}$

함수(function, 기능?)는 어떠한가? 생각나는 함수가 있는가? 전 국민이 알고 있는 함수는 무엇일까? 다항함수이다. 생활에서 사용하지는 않더라도 아주 유명한 함수이다. 일차함수(직선), 이차함수(포물선), 지수-로그 함수, 삼각함수 정도는 기억하고 있을 것이다.

$y=ax+b,\ y=ax^2+bx+c,$

$\ln(x),\ \log(x),\ \log_2(x),\ e^x,\ \exp(x)$

$\sin(x),\ \cos(x),\tan(x),\ asin(x)=\sin^{-1}(x),\ acos(x),\ atan(x)$

$\sin^2 x+\cos^2 x\ =\ 1,\ (\sin x)'=\cos x,\ (\cos x)'\ =\ -\sin x$

이 함수를 알려면 반드시 알아야 하는 상수가 있다. 전 국민이 알고 기억하는 원주율 π=3.14(1592654···), 그리고 극한으로 정의되는 e=2.718281828···. 여기에 Eluer-Mascheroni 상수 r=0.5772157···을 기억한다면 고급수준이다. 황금률(golden ratio, Φ=1.618···)도 정의에 입각하여 이차방정식에서 유도되는 대표적이고 유명한 상수이다. 또 거의 상수가 있다. 약간의 변동이 있으나 거의 상수같이 암기하여 사용하는 수이다. 수학적인 상수와는 달리 단위가 추가된다.

중력가속도, g=9.806(m^2/s),
공기의 밀도, ρ_a= 1.225 kg/m^3,
담수의 밀도, ρ_{fw} = 1,000 kg/m^3,
해수의 밀도, ρ_{sw}=1,024-1,025 kg/m^3,
표사의 밀도 ρ_s=2,600 kg/m^3,

그러나 바다에서 파랑(파도)을 공부한 사람이라면, 적어도 선형 파랑이론(linear wave theory, 추억의 기본 과목)을 공부한 사람이라면 알아야 하는 보다 높은 수준의 함수가 있다. 아래에 제시되는 hyperbolic 함수이다.

cosh(x), sinh(x), tanh(x).

$\sinh(x)=\frac{e^x-e^{-x}}{2},\ \cosh(x)=\frac{e^x+e^{-x}}{2},\ \tanh(x)=\frac{\sinh(x)}{\cosh(x)}.$

$\cosh^2 x-\sinh^2 x\ =\ 1,\ (\sinh x)'=\cosh x,\ (\cosh x)'=\sinh x$

삼각함수의 핵심 상수가 'π'라면, hyperbolic 함수의 핵심상수는 'e' 이다. 순전히 혹시나 가질 수 있는 호기심 해소를 위하여 설명하면, 지수 e(자연로그의 밑, base - 자연지수?)도 원주율 'π'와 같이 의미(원의 직경에 대한 둘레의 비율)를 가지는 무한소수 상수이다. 다음과 같은 지수함수(a^x, 변수는 x)를 미분하는 경우, 그 미분이 자신이 되는 지수(a=e)로 정의된다. $da^x/dx=a^x$ 조건을 만족하는 a, 그 'a'가 바로 'e'이다. 그리고 그 유명한 지수함수가 소개된다. e^x. 아. 그렇구나. 증명을 보고 싶은 독자가 있을 수도 있겠지만, 그 증명의 시작만을 제시한다. 극한으로 정의되는 'e'. 참고로 일반 지수함수의 미분은 $da^x/dx=a^x\cdot\ln a$이다.

$$\lim_{\Delta x\to 0}\frac{a^{x+\Delta x}-a^x}{\Delta x}\ =\ \lim_{\Delta x\to 0}\frac{a^x(a^{\Delta x}-1)}{\Delta x}\ =\ a^x,$$

이 조건을 만족하는 $a\ =\ e$.

실험을 하는 사람에게는 익숙한 수, 무차원 수가 있다. Reynolds number, Froude number, 수리실험(hydraulic experiment)의 '상사법칙'에서 사용되는 유명한 수이다.

수의 세계에서 확장되는 수학적인 '식(equation)'의 세계는 어떠한가?
'식'이라면 공식(formulae), 방정식(equation)이 떠오른다. 해안공학분야에서 수치해석 및 이론을 공부한 사람이라면 지배방정식(governing equation)이 떠오를 것이다.
전 국민이 알고 있는 공식이 무엇인지 아시는가? "근의 공식"이다. 정확하게는 이차방정식의 근의 공식이다. 당연히 알고 있겠지만 아래에 제시한다. 근과 계수와의 관계는 생략한다.

$$f(x)\ =\ ax^2+bx+c=0$$

$$x_{1,2}\ =\ \frac{-b\pm\sqrt{b^2-4ac}}{2a},$$

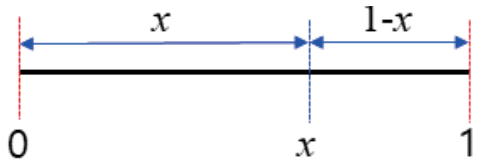
조금 더 공부한 학생이라면 변형공식도 기억할 것이다.

$$x_{1,2} = \frac{-b' \pm \sqrt{(b')^2 - ac}}{a} \quad (b' = b/2,\ b \text{ = 짝수인 경우})$$

여기서 a,b,c는 이차방정식의 계수(coefficients)이다.

저자만의 즐거움일 수 도 있겠지만, 이차방정식의 활용 영역을 소개한다. 이차방정식을 이용한 황금률(golden ratio) 계산과정이다. 해안공학과는 무관하지만 잠시 '쉬어가는 코너' 정도로 생각하자.

"단위길이(1)를 가진 선분의 분할 비율로 분할 지점의 길이에 대한 전체 길이의 비율이 두 개로 분할된 구간에서 작은 구간에 대한 큰 구간의 비율과 같게 분할하는 경우, 황금 분할이라고 하고, 작은 구간에 대한 큰 구간의 비율을 황금률이라고 한다."



$$\frac{1}{x} = \frac{x}{1-x} \text{ --> } x^2 + x - 1 = 0 \text{ --> } x = \frac{-1+\sqrt{5}}{2} = 0.618 (0 \leq x \leq 1)$$

황금률, $\phi = \frac{1}{x} = \frac{2}{-1+\sqrt{5}} = \frac{2(1+\sqrt{5})}{4} = 1 + \frac{\sqrt{5}}{2} = 1.618.$

'근의 공식'은 삼차, 사차함수에서도 있지만 진짜로 너무 복잡하다. 이 공식 정도면 감당할 만하다. 삼차 방정식의 해를 이 공식을 이용하는 경우는 별로 없을 것이다. 삼차 방정식의 일반해를 구하는 근의 공식을 소개한다. 오차방정식 이상의 일반해(근의 공식)는 없다는 것을 증명한 수학자가 있다. 근의 공식은 4차 함수에서 끝난다. 저자는 3차 함수의 '근의 공식'을 보여주는 것으로 공식의 세계를 마무리 하고자 한다.

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$$

$$x_1 = -\frac{b}{3a} - \frac{1}{3a}\sqrt[3]{\frac{1}{2}\left[2b^3 - 9abc + 27a^2d + \sqrt{(2b^3 - 9abc + 27a^2d)^2 - 4(b^2 - 3ac)^3}\right]} - \frac{1}{3a}\sqrt[3]{\frac{1}{2}\left[2b^3 - 9abc + 27a^2d - \sqrt{(2b^3 - 9abc + 27a^2d)^2 - 4(b^2 - 3ac)^3}\right]}$$

$$x_2 = -\frac{b}{3a} + \frac{1+\sqrt{3}\,i}{6a}\sqrt[3]{\frac{1}{2}\left[2b^3 - 9abc + 27a^2d + \sqrt{(2b^3 - 9abc + 27a^2d)^2 - 4(b^2 - 3ac)^3}\right]} + \frac{1-\sqrt{3}\,i}{6a}\sqrt[3]{\frac{1}{2}\left[2b^3 - 9abc + 27a^2d - \sqrt{(2b^3 - 9abc + 27a^2d)^2 - 4(b^2 - 3ac)^3}\right]}$$

$$x_3 = -\frac{b}{3a} + \frac{1-\sqrt{3}\,i}{6a}\sqrt[3]{\frac{1}{2}\left[2b^3 - 9abc + 27a^2d + \sqrt{(2b^3 - 9abc + 27a^2d)^2 - 4(b^2 - 3ac)^3}\right]} + \frac{1+\sqrt{3}\,i}{6a}\sqrt[3]{\frac{1}{2}\left[2b^3 - 9abc + 27a^2d - \sqrt{(2b^3 - 9abc + 27a^2d)^2 - 4(b^2 - 3ac)^3}\right]}$$

바다를 공부하고 있는 사람 누구나가 기억하고 있을 공식에는 어떤 공식이 있을까? 파속 공식, $c=\sqrt{gh}$(쓰나미-쯔나미, tsunami, 津波 이동속도). 아래의 공식은 어떠한가? 사용하는 기호나 형태의 차이가 있을 수는 있다.

심해조건의 파장(wave-length, m) 계산 공식, $L_0 = \frac{g T^2}{2\pi}$

Goda 파압 공식, $p = \left(\frac{1}{2} + \cos\beta\right)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha \lambda \cos^3\beta) \cdot \rho g H$

방파제 안정을 분석해 본 사람이라면 허드슨 공식? 허드슨 방정식이라고도 한다.

$$W = \frac{\gamma_R H^3}{K_D \Delta^3 \cot(\theta)}$$

파압과 수면변위 관계공식 – 선형 파랑이론(linear wave theory)

$\eta(x,t) = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t)$, $2a = H$, a = wave amplitude

$\phi(x,z,t) = \frac{\omega}{k} a \frac{\cosh(k(h+z))}{\sinh kh}\sin(kx - \omega t)$, velocity potential,

$p(x,z,t) = \rho g a \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh kh} \cdot \cos(kx - \omega t)$

Euler 공식, $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$

조화분석(Harmonic analysis)을 위한 조위 표현 공식

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^{m} f(t) \cdot H_k \cos(\omega_k t - \phi_k + u_n(t) + V_0(t))$$

공식에 사용된 변수를 명확하게 설명하는 것은 독자의 심기를 건드리는 일이라 생각한다. 그냥 이런 유명한 공식이 있다는 정도로 마무리한다. 실험공식, 경험공식을 제외하고는 모두 유도된다. 그리고 그것을 해안공학자나 과학자는 기본적으로 다 배운다.

또 다른 공식으로는 표사(sediment)를 공부하는 사람이라면 다양한 표사이동(transport rate) 추정 공식을 떠올릴 것이다. 침강속도 공식(van Rijn 공식, $w_s = f(d_{50})$)

항력계수 – wave generation 바람의 응력 전달,

$u_*^2 = f(W_s) = c_D U_{10}^2$, $\tau = \rho u_*^2$

월파(overtopping) 공식, EurOtop.

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = \frac{0.023}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \xi_{m-1,0} \cdot \exp\left[-2.7\left(\frac{R_c}{H_{m0}\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta\gamma_v}\right)^{1.3}\right]$$

태풍 매개변수 모형 공식. 중심기압 분포 공식(Holland model)

$$p = p_c + (p_n - p_c) \cdot \exp\left(-\frac{A}{r^B}\right)$$

'식'의 또 한 분야는 관계식이다. 근과 계수와의 관계(α+β =-*b*/2*a*, αβ=*c*/*a*,)로 부터 시작되는 이 관계식은 역시 파랑이론을 배운 사람이라면 분산 관계식(dispersion relation)이 떠오를 것이다. 주기와 수심이 주어지면, 파장을 계산할 수 있는 비선형(non-linear) 함수로 표현되는 공식이다. 보통 Newton-Raphson 방법으로 푼다.

$$\sigma^2 = gk\tanh(kh),\ \sigma = \frac{2\pi}{T},\ k = \frac{2\pi}{L}.$$

저자의 견해에 의하면, '수식'의 '꽃'은 방정식이다. 간단하게는 'equation' 정도로 표현하지만, 다양한 모형을 실무에서 활발하게 사용하는 사람에게는 '지배방정식(governing equation)'이라는 단어가 친숙할 것이다. 어떤 현상을 지배(통치?)하는 방정식이라... 참으로 거창하고 강력한 단어이다. 바다에서 발생하는 어떤 현상을 지배하는 방정식이 있고, 그 방정식을 이용하여 어떤 현상을 다양한 조건에서 계산하는 것이다. 대단하다. 그 방정식은 어떤 것인가?

Mild-slope equation(Berkhoff, 1972)[1]: 완만한 경사조건에서의 [완경사] 파랑전파를 지배하는 방정식

$$\nabla \cdot (cc_g \nabla \eta) + k^2 cc_g \eta = 0$$

$$\eta(x,y,t) = Re\left[\eta(x,y)\, e^{-i\omega t}\right]$$

Laplace equation. $\nabla^2 \phi = 0$

바다 연구 분야의 세부분야로는 보다 특화된 용어 등이 사용되기도 하지만, 해수와 같은 유체를 다루는 역학(fluid mechanics) 분야의 뿌리를 이루는 지배방정식이 있다. 컴퓨터로 해수의 유동을 계산하는 사람이라면 피할 수 없는 방정식이다. 그리고 매우 활발하게 활용되고 있는 방정식이기도 하다. 바다의 흐름을 지배하는 방정식이다.

질량보존 방정식(budget).

Navier-Stokes equation.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

$$\vec{F} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u}$$

이 정도면 복잡한 식이라고 할 수 있으나, 그 의미는 간단하다. Newton 제2법칙, F=ma 공식으로부터 유도되는 방정식이다. 다만 하나 기억할 것은 미분방정식이라는 점이다. 우리는 미분기호보다는 위치(*x*(*t*)), 속도(*v*(*t*)), 가속도(*a*(*t*))를 구분된 기호로 사용하지만, 실제로는 다음과 같은 관계가 존재한다. 이 관계식은 파랑부이에서 가속도를 측정하여 수면 변위로 환산하는 이론적인 배경이 된다.

$$a(t) = dv(t)/dt = d^2x(t)/dt^2,\ v(t) = dx(t)/dt,$$

그리고 이상적인 수학의 세계에서 현실적인 (물리) 역학의 세계로 오면서 수학적인 표현을 벗어나는 경험공식이 추가된다. 그 경험공식이 처리하는 부분은 매체의 경계부분, 마찰부분이 된다. 이론적인 수식도 당연히 현실 세계에서는 한계가 있고, 그 한계는 기술적인 처리가 요구된다. 수식으로 표현되기도 하지만, 여전히 수식 표현의 한계를 느끼게 하는 분야도 있다.

turbulence ⇒ micro-scale (sub-grid, 미시의 시계)
friction (stress) ⇒ non-linear (empirical, 경험의 세계)
breaking ⇒ discontinuity (수학적인 처리 곤란?)

수식보다는 모델의 영역으로 간주되지만, No equation, No model. 수치모형을 위한 수식은 실제 현장 해역에서 적용하는 문제이기 때문에, 모든 수식을 동원하여 계산 가능한 형식으로 제공된다. 그래서 매우 복잡한 형태를 보인다. 차분(difference) 방정식으로 표현되는 이 수식은 여기에서는 생략하지만, 이상적인 수학 세계의 도움으로 물리적인 현실세계를 표현하는 가장 현실적인 방정식이다. 차분 지배방정식이 된다. 모델의 기본은 수식보다는 다음과 같은 표현이 적절하다.
"초기정보와 경계정보를 이용하여 이후 시간의 모든 내부 지점의 정보를 계산하는 도구".

몇몇 유명한 모델의 이름을 제시한다.

SWAN model, Boussinesque model
Flow model – MOHID, EFDC, Delft-3D model, ROMS 등등

1) Berkhoff J.C.W.(1972). Computation of combined refraction-diffraction. Proceedings of the 13th International Coastal Engineering Conference, Vancouver, Canada, Vol. 1, ASCE, New York (1972), pp. 471-490

마지막으로 또 하나 수학적인 기법을 추가하면 변환(transformation)이라는 것이 있고, 누구나 중요한 부분이라고 주장하고 수용하는 통계학 분야의 '분포함수'라는 것이 있다.

파랑 분석을 한번이라도 해 보았거나, time-series 자료 분석을 배운 적이 있다면 FFT(Fast Fourier Transform), 푸리에 변환은 알고 있을 것이다. 최근 파랑 관측은 1초 이하 정도 간격으로 측정하며, 이 측정에 해당하는 연속적인 수면변위(water surface elevation) 자료를 Fourier 변환 과정을 거쳐 유의파고와 첨두 주기를 산출하는 스펙트럼 방법에 크게 의존하고 있으며, 그 방법의 핵심에 푸리에 변환이 있다(JONSWAP, BM, PM, TMA 스펙트럼 등).

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}, \quad T_p, f_p$$

$$F[\eta(t)] = S(f), \text{ Fourier transformation.}$$

바다 연구에서 통계가 부각된 시기는 "확률론적인 설계기법"의 중요한 사안으로 부각되는 시기와 일치한다고 할 수 있다. 결국은 어떤 해양 물리변수의 분포함수를 추정하는 연구이다. 더불어 전통적인 분야는 "극치해석(extreme value analysis)" 분야이다.

극치해석은 Gumbel 함수, Weibull 함수, Generalized Pareto Distribution 등을 필두로 다양한 확률분포함수 등이 거론된다.

통계는 바다를 연구하는 사람에게는 어느 정도 중요한가? 최근 기계학습 분야가 새로운 예측도구로 대두되면서 통계분석 분야가 부각되고 있다. 통계적인 분석 도구는 과학 분야에서 현미경과 망원경의 역할에 해당된다. 기존에는 볼 수 없었던 미시-거시의 세계를 보여주는 도구가 주도했던 과학이 지금은 통계적인 도구를 통하여 기존에 볼 수 없었던 어떤 결과를 보는 작업이 주도하고 있다. 그 연구 방향은 본 원고의 범위를 벗어난다.

통계도 분야가 방대하기 때문에 기억을 되살리고자 하면 범위를 제한해야 한다. 그 제한된 범위는 무엇인가? 난수와 분포함수이다. 통계 기초를 공부한 사람이라면 정규분포함수는 알 것이다. 그 함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

수학, 통계, 역학은 해안·해양공학을 공부하는사람 누구에게나 도움을 주고 있는 고마운 친구이고, 도구이다. 그 도구를 멀리한다면, 우리는 불편함을 감수하여야 하고, 친구를 멀리하는 '배은망덕'한 사람(?)이 된다. 도움을 받은 친구를 멀리하지 말고 기억하기를 바란다.

[감수 : 김영택(ytkim@kict.re.kr)]

신간소개

· 방재실무자와 공학자를 위한 연안재난 핸드북

신간소개

방재실무자와 공학자를 위한 연안재난 핸드북



이 책은 Handbook of Coastal Disaster Mitigation for Engineers and Planners(2015년)(저자: Miguel Esteban, Hiroshi Takagi, Tomoya Shibayama)를 번역한 책으로 2000년 이후 발생한 대규모 연안재난(2004년 인도양 지진해일, 미국의 허리케인 카트리나(2005년)와 샌디(2012년), 2011년 동일본 대지진해일, 2013년 필리핀의 태풍 하이옌 등)에 의한 피해에 관한 원인분석 및 대책을 제시한다. 이 핸드북은 세계적으로 권위 있는 해안공학 및 방재공학 전문가들이 최근 발생한 지진해일과 폭풍해일로 유발된 사건들에 대한 분석으로 시작하여, 이후 해수면 상승으로 유발된 장래 위협을 분석하고 취약성을 평가하는 방법을 다루는 장들이 이어진다. 아울러, 연안재난에 대한 대응을 통해 복원성(復原性, Resilience) 있는 사회를 건설하기 위한 구조적·비구조적 대책과 재난 후 재건의 잠재력을 감안한 공학적인 경감대책을 소개한다. 마지막으로 향후 연안재난과 해안·항만 방재구조물에 미칠 기후변화에 따른 해수면 상승에 대해서도 다양한 연안기반시설 관련 적응선택과 함께 언급한다.

[감수 : 신범식(sbs114@cku.ac.kr)]

학회 및 회원소식

학회소식

◆ 한국해안·해양공학회 제7~8대 회장 최병호 교수 別世

우리 학회의 제7,8대(2002~2005년) 회장을 역임하시고 학회 발전을 위해 많은 공헌을 하신 최병호 교수(성균관대학교 건축토목공학부 명예교수)께서 2020년 7월 3일 타계하셨습니다. 삼가 고인의 명복을 빕니다.

故 崔秉昊 교수 追慕辭

오늘, 潮汐과 地震海溢의 세계적인 碩學인 성균관대학교 건축토목공학부의 최병호 명예교수가 향년 75세로 운명을 달리하였다.

최교수는 종로구 삼청동에서 4남 4녀 중 막내로 태어나서 혜화국민학교를 졸업하고, 유수한 경기중, 고를 거쳐 1969년에 서울대학교 공과대학 토목공학과를 졸업하였다. 해군 시설장교로 군복무를 마친 후, 일찍이 도미유학을 하여 1975년 오레곤 주립대학에서 '오레곤 하구의 오염과 조석 플러싱 예측/Pollution and Tidal Flushing Predictions for Oregon's Estuaries' 이란 논문으로 석사학위(M.Oc.E.)를 취득하고, 이어 1979년까지 영국 해양연구소에서 Heaps 교수의 지도로 조석학과 조석모델 연구를 하였다. 1980년 유종의 미를 거두어 영국 Salford 대학교에서 '황해와 동지나해의 조석의 수치모델 연구/A Numerical Model Investigation of Tides in the Yellow Sea and the Eastern China Sea' 논문으로 해양공학 박사학위를 받았다. 귀국하여 한국 과학기술연구원 해양연구소 선임연구원으로 있다가, 이듬해 성균관대학교 교수로 부임하여 해안공학을 가르치며 2011년 8월에 정년퇴임을 할 때까지 30여년을 후학을 위해 헌신하였다. 그동안 영국토목기술사와 미국 해안공학 전문가 자격증도 취득하였다.

1976년에 박정수 여사와 결혼한 최교수는 슬하에 2남 1녀를 두었고, 이어 손자 2에 손녀 1를 맞이하여 다복한 가정을 꾸리고 있었다.

최교수의 연구업적을 나열하자면 날밤을 셀 정도로 많아서 무려 195편의 潮汐과 津波(thunami)에 관한 논문과 43권의 저서, 그리고 14권의 연구보고서가 있는데, 이렇게 한 우물만 파고들었던 연구자도 드물 것이다. 그리고 Data를 중요시하는 최교수는 전구해양의 해파 특성을 비롯한 무려 47장의 해안정보 CD/DVD를 제작하여 배포하였다. 자료(data)만큼 현지조사를 중요시하던 최교수는 일본의 都司(Thuji)교수와 함께 1992년에는 인도네시아의 Flores섬의 쓰나미를, 2011년에는 東일본대지진의 津波를 조사한바 있다. 都司교수의 회고담에 의하면 2011년의 조사 시에는 하도 더워서 팬츠 1장만 입고 쫓아다녔다고 하니, 그의 열정을 가히 짐작할 수 있다. 2004년 12월에 인도네시아 수마트라 섬에서 일어난 津波는 이듬해 조사단을 꾸릴 정도로 열성적으로 접근하여 기록을 남겼다.

학회 및 학술 활동도 활발하여, 국제 수리학회, 영국 토목학회, 미국 토목학회 정회원이면서 국내의 토목학회, 수문학회, 측지학회, 해양학회에서 여러 직책을 맡았었다. 1989년에 한국해안·해양공학회를 창립하는데 일익을 담당하였고, 한국해안·해양공학회장은 7대, 8대에 걸쳐 2002년에서 2005년까지 역임하였으며, 한국공학한림원(1996년~)의 창립위원이기도 하였다.

이러한 왕성한 연구와 다양한 학술적 공적의 결과로 2011년 대한토목학회에서 수여하는 한국토목문화대상(학술부문)을 받았다.

국제학술회의에도 남다른 열의를 보여 수없이 많은 회의에 참가하는 등, 세계를 주름잡았고, 2001년 APAC(아시아 태평양 해안학회)를 창립하여 2009년에서 2011년까지 평의회 의장(council chair)을 맡은 바 있으며, 2014년 서울에서 개최된 34차 ICCE(국제해안공학 학술회의)에서는 미국토목학회로부터 영예의 국제 해안공학상(International Coastal Engineering Award)을 받았다. 이번 訃告에도 미국을 비롯해 APAC회원국인 일본, 중국, 인도, 인도네시아, 베트남으로부터 애도의 글이 답지하였다.

2011년 은퇴 후, 마음의 여유를 가져서인지, 본인의 전공을 살려 과거 유명한 해전 시의 해황을, 즉 임진왜란시의 한산도대첩과 노량해전, 그리고 노르만디 상륙작전시의 해황을 추정(hindcast)한 논문을 각종 학술발표회에서 구두발표 또는 포스터세션 발표를 하여 우리들의 호기심을 만족시켜 주었다.

마지막으로 그가 쓰러지기 직전에 열렸던 작년 10월 토목학회의 정기학술발표회에 모습을 드러낼 만큼 그의 열정은 식을 줄을 몰라서, 그때를 기억하는 모든 이들의 가슴을 먹먹하게 만들고 있다.

대학교수로서 후진양성도 게을리 하지 않아서 18명(외국박사 6명 포함)의 박사와 33명의 석사를 배출하였다.

평소에 빵과 치킨을 좋아하였고, 영화 관람과 포커 게임을 즐겨하는 인간적인 면도 있었다. 최교수의 또 다른 인간적인 면은 2017년 11월에 이북 多劑耐性結核 환자 살리기에 누구도 엄두를 못 낼 거금 1억을 희사한 데에서도 엿볼 수 있다.

누구나 살다가는 한 세상이지만 하도 여러 분야에서 심도 깊은 족적을 남겨서 그의 뒤를 쫓아가기가 버거울 정도이다. 최교수와 이래저래 인연이 닿았던 모든 이들은 그의 자신만만한 高聲과 특유의 몸짓을 잊지 못할 것이며 그 뒤에 숨어 있는 잔정을 느낄 것이다. 다시 한 번 그에 대한 아쉬움을 달래며 영원한 안식을 기원하는 바이다.

2020.7.5. 故 최병호교수를 기리며...

명지대학교 명예교수 편종근

◆ 서경덕 교수 2020년 International Coastal Engineering Award 수상

우리 학회 회원인 서경덕 교수(서울대학교 건설환경공학부 명예교수)께서 2020년 International Coastal Engineering Award를 수상하게 됨을 기쁜 마음으로 알려드립니다.

잘 아시다시피 올해 호주 시드니에서 개최 예정이었던 ICCE가 COVID19로 인해 2년 순연되어 2022년에 같은 장소에서 개최 예정입니다. 따라서 시상식은 2022년 ICCE(International Conference on Coastal Engineering)에서 있을 예정입니다.

아울러 2014년 서울에서 개최되었던 ICCE에서 고 최병호 교수가 동일한 상을 받아서, 한국인으로서는 두 번째이고 두 분 모두 우리 학회 회원으로서 이름을 四海에 알린 셈입니다.

다시 한번 수상을 축하드립니다.

◆ 2020년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회

- 일정 및 장소 : 2020년 7월 22일(수) ~ 23일(목), 부산 BEXCO
- 주최 : 한국해양과학기술협의회
- 주관 : 한국해안·해양공학회, 대한조선학회, 한국해양공학회, 한국해양학회, 한국해양환경·에너지학회, 한국항해항만학회
- 주요 프로그램 : 공동심포지엄, 공동워크샵 및 각 학회 프로그램







◆ 2020년도 제28차 추계학술대회

- 일정 및 장소 : 2020년 11월 5일(목) ~ 6일(금), 제주신화월드 랜딩컨벤션센터

- 참석 인원 : 170명

- 논문 발표 : 64편







◆ 이사회

▶ 2020년도 제2차 이사회

- 일시 : 2020년 8월 19일(수) 11:30
- 장소 : 대려도(역삼동)
- 참석 : 34인(위임 22인 포함)
- 주요 안건
  · 2020년도 제28차 추계학술대회 계획
  · 선거관리위원회 구성



▶ 2020년도 제3차 이사회

- 일시 : 2020년 11월 6일(금) 07:30
- 장소 : 제주신화월드 랜딩다이닝
- 참석 : 37인(위임 13인 포함)
- 주요 안건
  · 논문집 심사료 조정
  · 학술대회 준비위원회 운영 등



◆ 원로회의

▶ 2020년도 원로 회의

- 일시 : 2020년 10월 20일(화) 11:30
- 장소 : 파크루안(역삼동)
- 참석 : 11인
- 보고 내용
  · 논문집 및 학회지 발간
  · 2020년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 결과 보고
  · 2020년도 제28차 추계학술대회 준비 현황



회원소식

◆ 회원 현황

- 총 1,272명(종신회원 : 448명, 일반회원 : 628명, 학생회원 : 196명)
- 기업 특별회원 36개사

◆ 신규 가입

No.	성명	소속	No.	성명	소속
1	김경엽	한동대학교	12	이명은	현대건설㈜
2	김정인	서울대학교	13	이민재	서울대학교
3	김종덕	㈜해안해양기술	14	이주연	한국해양과학기술원
4	김희연	한동대학교	15	이황기	㈜해안해양기술
5	노민	국립기상과학원	16	임민영	마린테크
6	노효섭	서울대학교	17	정승명	전남대학교
7	라나리	국립기상과학원	18	조명환	한양대학교
8	배현우	한국해양대학교	19	조창우	㈜지오시스템리서치
9	백승준	서울대학교	20	황동욱	서울대학교
10	송상준	㈜연안항만엔지니어링	21	지형석	㈜해안해양기술
11	신홍렬	공주대학교	22	황예진	한국해양대학교

공지사항

회원 가입 안내

▶ 회원 가입

온라인논문투고시스템(http://kscoe.reviewnet.co.kr) 접속하여 메뉴 중 규정 및 안내
- **회원 가입** - 가입 신청서 작성

▶ 회비 안내

개인회원	정회원	학생회원	종신회원
입회비	10,000원	5,000원	-
연회비	30,000원/년	10,000원/년	종신회비 300,000원

▶ 회비납부 방법

은행명	계좌번호	예금주
SC은행	435-10-011808	(사)한국해안·해양공학

학회지 투고요령

1 워드프로세서를 사용하시고, 이메일(cocean@kscoe.or.kr)로 원고를 보내주시기 바랍니다.
2 원고는 A4용지에 신명조 10, 줄간격 200, 1단 편집으로 작성하여 주시기 바랍니다.
3 원고 분류와 내용 안내

원고 분류		내용
권두언		
특별 기사		최근 해안, 해양관련 정책
학술 기사		기술의 실용화 및 현장적용, 응용결과 등
일반 기사		최근 해안, 항만 관련 시사
현장소식	국내	국내 설계 및 시공현장 소개
	해외	국내기업 진출 설계 및 시공현장 소개, 해외탐방 기사
해외학술동향		최신 해외학술정보 소개
최신기술동향		최신 국내외 신기술 소개
자유기고		회원 자유 형식 원고
현장탐방기, 학술대회 참가기		국내외 현장탐방, 학술대회 참가
신간소개		신간소개

4 원고를 투고하실 때 별지에 성명, 직장 및 직위, 주민등록번호, 자택주소 및 전화번호, 은행 계좌번호(원고료 송금용)를 명기하여 보내주시기 바랍니다. 원고를 투고하실 때에는 다음의 <저작권 및 책임>에 대한 일반 원칙에 동의하시는 것으로 간주됩니다.
5 「학회지에 이미 게재되었거나 향후 게재되는 원고의 저작권은 학회에 귀속되며, 원고의 투고로서 원고의 저작권을 학회에 이양하는 것으로 본다. 또한, 종전에 발행된 학회지에 게재된 원고에 대해 학회가 이미 관리한 사항에 대해서는 이의를 제기하지 않는다. 다만 게재 된 원고내용으로 인한 모든 책임은 투고자에게 귀속 된다」.

편집후기

김 영 택 편집위원

우리학회 학회지 “해안과 해양”이 2008년도부터 반년간지로 출간을 시작한 이래 금번이 10년차(Vol. 10)가 되는 것 같습니다. 이와 같은 의미 있는 회차의 마무리에 편집후기를 작성할 수 있어 영광입니다.

학회지를 이용한 해안·해양 분야 최신의 국내외 연구 및 기술 동향, 건설시장 동향 및 인적 네트워크 현황 등에 대한 자유로운 원고 투고 등을 통하여 회원들이 소통할 수 있는 공간이 지속되기를 바랍니다.

최근 뉴스 등을 보면, 이제 위드 코로나(With Corona)의 시기라고 합니다. 이제 어느 회의를 가던지 마스크를 착용하는 것이 너무 당연한 상황이 된 것 같습니다. 내년 여름호가 나올 때까지 모두 건강하시고, 그 때는 마스크 없이 편하게 회의할 수 있는 시절이 왔으면 좋겠습니다.

안 성 모 편집위원

학회지를 준비하면서 항상 많은 어려움과 직면하지만 많은 전문가들이 힘을 합쳐 또 하나의 작품을 만든다는 마음으로 준비하면서 허들을 넘어가는 즐거움을 맛볼 수 있었던 것은 기쁨이었고, 정리의 과정에서 귀중한 자료를 만든다는 성취감을 느낄 수 있었던 점이 좋았고, 개인적으로도 더 소중한 기억들을 남기게 됨을 감사할 수 있는 것 같습니다.

또한, 학회지는 4차 산업혁명시대에 발 맞추어 e-book으로 발간되는 부분은 참고무적이라고 생각이 들고, 해안, 해양 및 항만분야의 저변 확대를 위해 보다 많은 사람들이 볼 수 있는 자료가 되기를 기원하며, 앞으로도 암묵지를 형식지로 수평 전개하여 해안, 해양 및 항만분야의 발전에 기여할 수 있는 학회지가 될 수 있도록 노력하겠습니다.

안 익 성 편집위원장

모두가 미증유의 감염병인 코로나-19와 함께한 한 해였습니다. 이동, 미팅, 대화 등이 자유롭지 않고, 여유 있는 여행도 '이 상황 지나고 나면' 버킷리스트 목록의 희망사항으로만 남게 되어 마음이 답답합니다. 또한, 올해는 우리의 주 관심사인, 긴 장마와 큰 태풍의 잦은 내습으로 기후변화의 영향을 크게 체감했던 해로 기억됩니다.

이 모두가 지구환경과 생태보전 이라는 큰 화두와 연관되어 있어, 지속가능한 개발과 보전을 위해 해안·해양을 다루는 우리 산학관연 종사자들의 역할이 더욱 더 중요해 졌음을 깨닫게 하기도 합니다.

금회 학회지는, 그린뉴딜의 일환으로 향후 국내 연안해역에 확대가 예상되는 해상풍력, 파력과 조류발전, 부유식 태양광과 같은 신재생에너지의 도입과 적용에 관한 내용을 기획특집으로 꾸며 봤습니다.

또한, 최신의 4차 산업혁명 기조에 걸맞는 정책방향과 다양한 기술 및 학술기사를 최대한 발굴하여 수록하고져 노력했습니다. 함께 수고해주신 저자분들과 편집위원님들께 심심한 감사를 드립니다.

'이 상황 지나고 나면' 할 일이 참 많을 것 같습니다.

독자분들과 함께 소확행을 누리는 '신축년' 새해를 기원합니다.



KUKDONG
극동건설주식회사

세계에서 가장 높은 트윈타워인 페트로나스

사우디아라비아의 바닷길을 새로여는 신항만

대한민국 경제의 상징인 한국종합무역센터...

이미 국내외에서 인정받은 극동건설의 기술력이

도로로, 댐으로, 항만으로 더 넓고 새로운 세상을 만들어갑니다.

70년의 기술노하우로 더 큰 세상을 만드는 극동건설

극동건설이 지을 다음 세계는 어떤 곳이 될지 기대됩니다.

지켜봐 주십시오. 극동건설이 지을 더 큰 세상

극동건설이 지을 다음 세계가 궁금합니다





한국해안 · 해양공학회

Korean Society of Coastal and Ocean Engineers