

2022

통일·평화기반구축사업 결과보고서

기후변화 대비 남북협력 관점에서 본 북한 서해안 해양신재생에너지

RENEWABLE OCEAN ENERGY
ON THE WEST COAST OF DPRK FROM THE
INTER-KOREAN COOPERATION PERSPECTIVE
FOR RESPONDING TO CLIMATE CHANGE



제 출 문

서울대학교 통일평화연구원장 귀하

본 보고서를 “2022 통일·평화기반구축사업”의 결과
보고서로 제출합니다.

2023년 1월

참여 연구진

서울대학교 건설환경공학부	연구책임자	박 용 성
창원대학교 스마트그린공학부	공동연구자	오 상 호
서울대학교 건설환경공학부	연구원	김 정 인
서울대학교 건설환경공학부	연구원	백 승 준
서울대학교 건설환경공학부	연구원	정 원

<제목 차례>

1. 서론	1
가. 연구 배경 및 필요성	1
1) 기후변화 대비 환경협력을 통한 남북관계 정상화	1
나. 연구 목표	2
1) 기후변화 대비라는 목표로서의 남북 해양신재생에너지 협력 중요성 규명	2
2) 북한 해주만 조력발전에 대한 공학적 검토 수행	2
3) 북한 해양신재생에너지 공급에 관한 후속연구를 위한 기반 제공	2
2. 기후변화를 고려한 남북 환경협력의 중요성	3
가. 전세계적 기후변화 대응 노력	3
1) 기후변화 대비 환경협력을 통한 남북관계 정상화	3
3. 북한 해주만 조력발전에 대한 공학적 검토	5
가. 해주만 조력 자원 평가를 위한 기초 자료 수집	5
1) 해주만 근처 조위 데이터 수집	5
2) 해주만 근처 조위 데이터 조화분석	7
3) 지형 및 해저지형 자료 수집	10
나. 해주만 조력발전 이론적 잠재량 추산	12
1) 수치 모델링을 활용한 해주만 내 조위 변화 예측	12
2) 예측 조위를 이용한 해주만 이론적 조력자원 부존량 산정	14
4. 결론	20
가. 결론 및 요약	20
나. 향후 연구 발전 가능성	20
5. 주요 사업 성과	22
가. 학회 참여 및 행사 개최	21
1) 한국수자원학회 해안공학분과 X 해안공학연구실 해양신재생에너지 세미나 개최	21
2) KSCE 2022 CONVENTION (대한토목학회 학술발표대회) 구두발표	22
3) 한국해안·해양공학회 제30차 추계학술대회 구두발표	23
4) 2022 통일평화기반구축사업 연합학술대회 구두발표	23
[참고문헌]	42

<표 차례>

[표 3-1] 비실시간 조위 관측점 정보	6
[표 3-2] 각 관측점별 4대분조 조화상수 요약	7
[표 3-3] Open API를 활용한 비실시간 장단기 조위 데이터 다운로드 코드(python)	7
[표 3-4] t_tide 조화분석 코드 (MATLAB)	8
[표 3-5] GEBCO 해저지형 자료 netCDF 파일을 xyz 파일로 변환하는 코드 (python)	9

<그림 차례>

[그림 1-1] 남북 ‘그린데탕트’ 개념 (나용우, 2022)	1
[그림 3-2] 해양수산부 바다누리 해양정보서비스 비실시간 장단기 조위 Open API 정보 (해양수산부, n.d.)	5
[그림 3-3] 해주만 근처 비실시간 조위 관측점	6
[그림 3-4] 관측점별 조위 데이터	7
[그림 3-5] 연평도 남측 조위 데이터 조화분석 결과	8
[그림 3-6] 인천-백령항로 조위 데이터 조화분석 결과	8
[그림 3-7] 어류정향 조위 데이터 조화분석 결과	9
[그림 3-8] 강화 하리 조위 데이터 조화분석 결과	9
[그림 3-9] 국토지리정보원 90m 해상도 수치표고모델	1
[그림 3-10] 해안경계선 추출을 위한 벡터 레이어 생성	1
[그림 3-11] GEBCO 2022 해저지형 자료 취득 과정 (GEBCO Compilation Group, 2022)	1
[그림 3-12] Delft3D 격자 생성 틀에 불러온 지형자료 및 해안선	1
[그림 3-13] 격자 생성 및 GEBCO 해저지형 자료 내삽	1
[그림 3-14] 해주만 내 조위 예측 데이터 수집 지점	1
[그림 3-15] 해주만 내 유속장 예측 데이터 예시	1
[그림 3-16] 해주만 내 조위 예측 데이터	1
[그림 3-17] 해주만 조지 면적 설계안 1 (한국해양연구원, 2006)	1
[그림 3-18] 해주만 조지 면적 설계안 2 (한국해양연구원, 2006)	1
[그림 3-19] 해주만 조지 면적 설계안 (대우건설, 2021)	1
[그림 5-1] 세미나 포스터	2
[그림 5-2] 세미나 사진	2
[그림 5-3] KSCE 2022 CONVENTION 발표 초록	2
[그림 5-4] KSCE 2022 CONVENTION 발표 사진	2
[그림 5-5] 한국해양·해양공학회 제30차 추계학술대회 발표 초록	2
[그림 5-6] 연합학술대회 발표자료	2

연구 배경 및 필요성

기후변화 대비 환경협력을 통한 남북관계 정상화

1989년 이래 대한민국 정부는 「민족공동체 통일방안」의 기본정신을 따라 통일 정책을 상황에 맞게 변화해가며 남북한이 단계적·점진적 방식의 통일을 이루어낼 수 있도록 지속적인 노력을 하고 있다. 이번 정부에서는 ‘남북공동경제 발전계획’을 수립하여 산업 기술과 관련된 경제발전 계획을 마련하고, 남북 ‘그린데탕트’를 구현하기 위해 수자원 분야 협력 강화 및 접경지역 ‘그린평화지대화’구축을 남북관계 국정목표로 제시하였다(제20대 대통령직인수위원회, 2022).



[그림 1-1] 남북 ‘그린데탕트’ 개념 (나용우, 2022)

‘그린데탕트’는 그린(Green)과 긴장완화(Detente)가 결합된 용어로, 전 지구적 문제인 기후변화로 인한 환경 및 생태 문제를 공동으로 대응하기 위한 협력이 정치군사적 신뢰로 이어져 국가 간 대립·갈등관계를 완화할 수 있다는 뜻을 담은 정책지향적 개념이다(나용우, 2022). 즉, 기후변화 대응을 위한 남북 환경협력을 통해 다른 분야에서도 점차 상호이해 및 교류 활성화를 이끌어내고, 한반도 긴장완화 및 평화구축을 실현해 남북관계 정상화로 연계할 수 있다는 것이다. 이는 단순히 인도주의적으로 일회성에 그치는 원조를 제공하는 것보다 더 근본적인 남북협력을 가능케 하며, 환경문제라는 더 큰 문제를 해결할 수 있다는 점에서 남북 모두에게 상호 이익이 될 수 있다.

본 연구진은 『2021 통일·평화기반구축사업』에서 「북한 해양 신재생 에너지의 개발전략 제안」이라는 주제로 연구를 진행하였고, 북한 서해안의 해주시에 해양신재생에너지를 공급하여 남북의 거점도시로 발전시키는 방안을 제시한 바 있다(박용성 외, 2022). 따라서 이전 연도 연구에 이어, 본 연구진은 현 정부의 남북관계 국정목표에 맞는 남북 환경협력 방안으로써 북한 서해안의 풍부한 조력 자원을 기반으로 한 해양신재생에너지 기술협력을 하는 것을 제안하고자 본 연구를 추진하였다.

연구 목표

◎ 기후변화 대비라는 목표로서의 남북 해양신재생에너지 협력 중요성 규명

북한에 일방적인 에너지 원조를 하기 위함이 아닌, 인류의 당면 과제인 기후변화 대비에 기여하기 위한 남북 해양신재생에너지 협력사업의 의의를 제시한다.

◎ 북한 해주만 조력발전에 대한 공학적 검토 수행

정책적·경제적 관점이 아닌 공학적 관점에서 북한 해주만의 조력 자원을 평가하고, 적용 가능한 조력발전 기술을 검토하여 북한 해주만 조력발전 유의성을 구체적으로 판단한다.

◎ 북한 해양신재생에너지 공급에 관한 후속연구를 위한 기반 제공

본 연구 외에 추후 타 연구자가 북한 해양신재생에너지 기술협력사업에 관해 후속 연구를 수행할 시 연구 기반으로서 본 연구가 활용되게끔 자료집 및 단행본을 출간 및 외부에 공유한다.

전세계적 기후변화 대응 노력

기후변화 대비 환경협력을 통한 남북관계 정상화

□ 글래스고 기후합의 북한 인프라 관련 협력사업 계획 시 기후환경변화 고려의 중요성

북한에의 전력공급 사업을 계획하기 전, 어떠한 에너지를 공급할 것인지를 먼저 고려하여야 한다. 화석에너지를 활용한 인프라 관련 사업을 계획할 경우 전 세계적인 탄소 중립 기조와 맞지 않아 추후 계획을 수정해야 하거나 극단적으로는 이미 설치된 인프라를 다시 건설해야 할 수 있기 때문이다.

최근 2021년 10월 유엔기후변화협약 당사국총회 (COP26)에서 채택된 ‘글래스고 기후합의 (Glasgow Climate Pact)’에서는 전 지구적인 기후변화 대응의 노력을 이전보다 더욱 강조하였다(문진영 & 이성희, 2021). 일례로 이전 파리 기후협약에서는 석탄발전의 축소를 직접 명시하지는 않았으나, 이번 글래스고 기후합의에서는 석탄발전의 점진적 폐지 및 신규 석탄발전 투자를 중단하는 문구가 담겨있다(문진영 & 이성희, 2021). 특히 개도국의 기후변화 적응 필요성을 강조하여 선진국의 재원, 기술이전, 역량배양 등 지원 확대를 촉구하는 내용이 전개되었다(문진영 & 이성희, 2021). 이러한 전 세계적 탄소중립 노력을 따라가기 위해서 우리나라 또한 강점을 가진 조력발전 등 해양신재생에너지 분야를 중심으로 개도국 적응 부문 사업에 참여할 필요가 있다.

아울러 국제 탄소 시장 관련 지침이 합의되었기 때문에 우리나라 또한 구체적인 SDM(Sustainable Development Mechanism, 지속가능개발체제) 관리 체계가 필요하다. 우리나라 정부의 대응을 보면, 국외감축사업 협력국으로 베트남(2021.5 협정 체결), 페루(문안 협상), 스리랑카(문안 협상) 등과 양자 기후변화협력 협정 체결을 추진 중이며, 칠레 등 협정대상 국가를 추가 발굴할 예정이라고 밝힌 바 있다(관계부처 합동, 2021). 따라서 탄소중립 개도국 적응 부문 사업 참여 및 SDM 관리를 위해 북한과의 기후변화협력 체결도 고려 가능하고, 탄소 감축 여력이 높은 북한과 협력하여 국내 탄소 시장을 확대하는 방안도 생각해볼 수 있다.

□ 해양신재생에너지 개발 적지로서의 서해안

여러 종류의 신재생에너지 중, 본 연구진에서는 조력에너지를 북한에 적용하는 안을 제안한다. 이전 연차 『2021 통일·평화기반구축사업』에서, 본 연구진은 「북한 해양 신재생 에너지의 개발전략 제안」이라는 주제로 연구를 진행하였고, 북한의 서해안, 특히 해주만을 해양신재생에너지 개발 적지로 선정한 바 있다. 1차년도 연구에서는 해주시가 평양과 서울의 중간지대이며, 항만과 철도를 갖추고 있어 교통 인프라가 우수하며, 평양·남포 등 북한의 주요 산업단지와 근 거리에 위치해 산업 입지와 숙련 노동 활용 가능성 측면에서도 유리하여 북한의 해주시가 도시 발전가능성 측면에서 매우 우수하다는 것을 밝혔으며, 서해안의 도시 중 해주시를 선제적으로

경제협력의 중심지로 발전시켜야 함을 강조하였다.

그러나 해주시는 발전잠재력에 비해 대규모 수력발전소, 화력발전소 등이 부재해 전력 에너지 여건이 다른 중규모 도시에 비해 좋지 않다는 약점이 있다. 그러나 추가로 수력발전소를 건설하기에는 근처 하천 유량이 부족한 실정이고 해주시는 해주만이라는 큰 만을 품고 있어 조력발전소를 건설하기 적절하며, 해주만은 우리나라 서해안의 다른 만처럼 조차가 커 조력발전 잠재용량이 풍부하다. 또한, 우리나라는 세계 조력발전소 중 최대 발전용량 규모인 시화호 조력발전소를 성공적으로 건설 및 활용한 사례가 있는 만큼 강점을 지닌 해양신재생에너지를 중심으로 개도국 적응 부문 사업에 참여할 필요가 있다.

이러한 이유로, 본 연구진은 해주만에 조력발전에너지를 공급하기 전 해주만이 가진 조력발전 잠재용량을 정성적, 정량적으로 평가해야 하는 필요성을 느껴 전년도의 후속연구를 진행하였다.

해주만 조력 자원 평가를 위한 기초 자료 수집

해주만 근처 조위 데이터 수집

해주만의 조력발전 이론적 잠재량을 계산하기 위해서는 해주만의 조위를 알아야 한다. 그러나 북한의 폐쇄성으로 인해 북한 해안에서의 조위 실측 데이터를 구득하는 것이 불가능하였다. 따라서 본 연구에서는 해주만 근처에 있는 국내 인천만의 조위 실측 데이터를 수집하고, 이를 바탕으로 수치모델을 구축해 해주만의 조위를 예측하고자 하였다.

현재 국내 해안 대부분 지역에는 조위 관측소가 설치되어 있어 해양수산부 바다누리 해양정보서비스 사이트에서 실시간 조위 실측데이터를 손쉽게 조회할 수 있으나, 본 연구에서 목표로 하는 해주만 근처 인천만 지역의 경우 북한과의 경계 인근에 있기에 고정 조위 관측소가 설치되어 있지 않아 24시간 실시간 조위 실측데이터를 얻을 수 없었다. 그렇지만 국립해양조사원에서 고정 조위 관측소가 설치되지 않은 지역의 조위 실측데이터를 보완하기 위해서 실시간 조위 실측데이터 미계측 지역에서 일정 기간 조위를 실측하고, 이를 [그림 3-2]와 같이 제공하고 있기 때문에 본 연구에서는 이 비실시간 장단기 조위 실측데이터를 조화상수 분석에 활용하였다. 특히 인천만 내 접경지역의 경우 국립해양조사원에서 2020년부터 2021년까지 약 6개월~1년간의 비실시간 장단기 조위 실측데이터를 수집한 바 있어 이 자료를 취득하였다.

비실시간 장단기 조위
 OPEN API로 새로운 해양정보를 만들어 보세요.
 국립해양조사원에서 제공하는 다양한 해양정보를 위도(위도, 기압, 계면 등)에서 활용할 수 있도록 XML 또는 JSON 형식으로 데이터를 제공하는 API 서비스입니다.

요청변수 (Request Parameter)

항목명(영문)	항목명(국문)	생성데이터	비고
DataType	데이터 종류	tideShortLong	
ServiceKey	인증키	wldhxng34hkddbsgm81wldhxng34hkddbsgm81=	
ObsCode	관측소 번호	SO_0411	
Page	페이지선택	1	
ResultType	결과타입	json, xml	

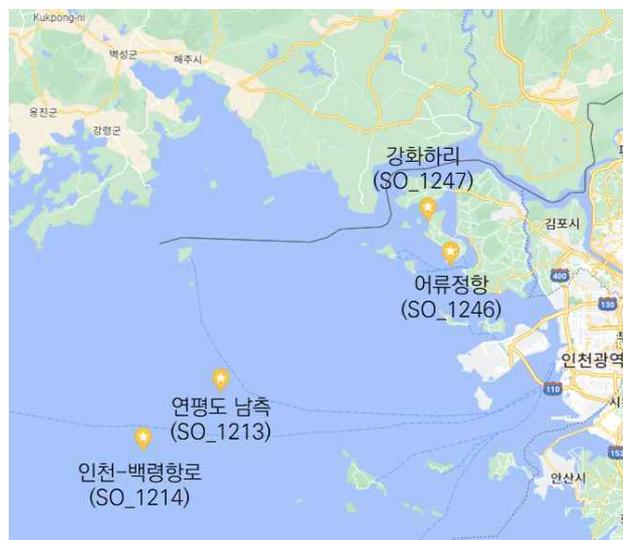
출력결과 (Response Element)

항목명(영문)	항목명(국문)	생성데이터	비고
obs_post_id	장단기 관측일 ID	SO_0411	
obs_post_name	장단기 관측일 명	2013년 신노항항	
obs_lat	관측소 위도	34.94805555555556	
obs_lon	관측소 경도	127.86111111111111	
obs_current_page	현재페이지	1	
obs_last_page	마지막페이지	100	
record_time	관측시간	2013-06-26 00:00	년-월-일 시:분
tide_level	조위	359	cm

[그림 3-2] 해양수산부 바다누리 해양정보서비스 비실시간 장단기 조위 Open API 정보 (해양수산부, n.d.)

본 연구에서 수집한 조위 데이터 관측 지점은 연평도 남측, 인천-백령항로, 어류정항, 강화하리, 이렇게 총 4곳으로 해당 관측점의 위치는 [그림 3-3]과 같으며, 관측점 ID 및 위도, 경도, 관측 기간 등 관측점 정보는 아래 [표 3-1]과 같다. 관측점 ID를 활용해 Open API로 각 관측점의 조위 데이터를 취득하였으며, 이때 사용한 코드는 [표 3-3]에 첨부하였다.

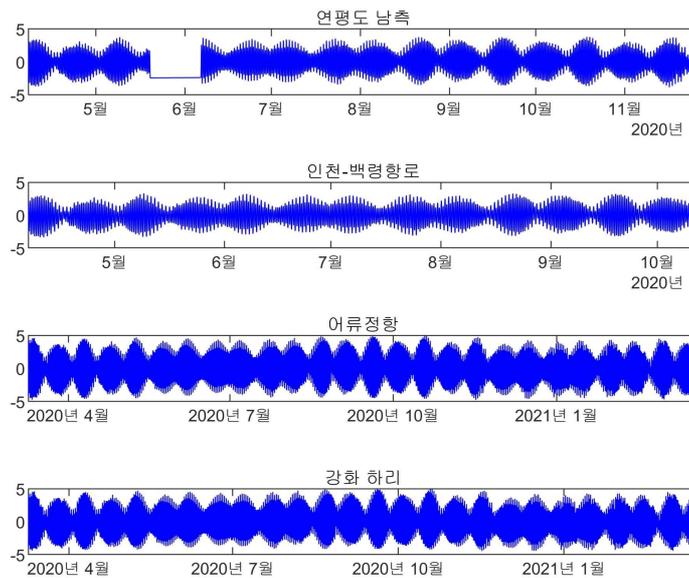
취득한 관측점별 조위 시계열 자료를 [그림 3-4]와 같이 도시하였다. 이때, 연평도 남측에서 측정된 조위 데이터 중 2020년 5월 19일 22시 06분부터 6월 6일 12시 00분까지의 조위 데이터가 미계측 혹은 누락 되어 해당 기간의 조위 데이터가 존재하지 않았다. 따라서 연평도 남측 조위 분석에는 2020년 6월 6일 12시 00분 이후의 자료만을 활용하였다.



[그림 3-3] 해주만 근처 비실시간 조위 관측점

[표 3-1] 비실시간 조위 관측점 정보

관측점 명	연평도 남측	인천-백령항로	어류정항	강화 하리
관측점 ID	SO_1213	SO_1214	SO_1246	SO_1247
관측점 위도	37.39811	37.28431	37.64333	37.72806
관측점 경도	125.7877	125.6000	126.3428	126.2867
관측 시작일시	2020-04-07 11:30	2020-04-06 17:00	2020-03-09 10:30	2020-03-09 11:40
관측 종료일시	2020-11-26 10:18	2020-10-12 11:10	2021-03-21 15:50	2021-03-16 12:10
관측 시간 간격	1분	1분	10분	10분
데이터 개수	3100070	271792	54321	53572



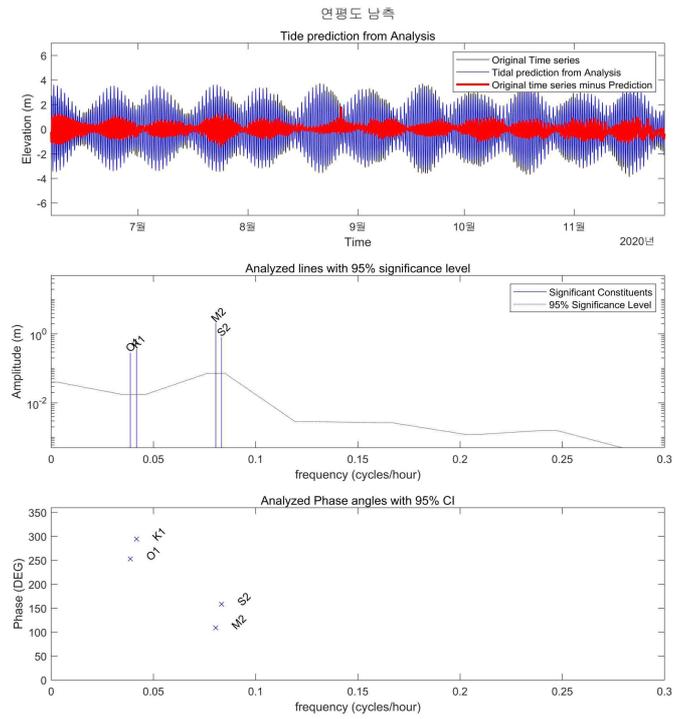
[그림 3-4] 관측점별 조위 데이터

◎ 해주만 근처 조위 데이터 조화분석

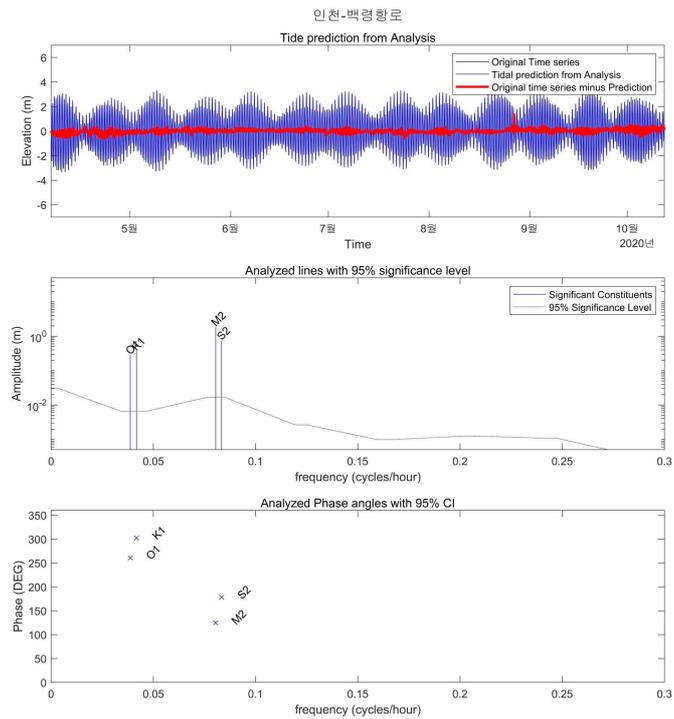
수집한 자료를 바탕으로, MATLAB t_tide toolbox를 이용해 조위 관측 데이터에 대한 조화 분석을 수행하였다. t_tide toolbox는 Mike Foreman이 FORTRAN을 이용해 개발한 IOS Tidal Package를 MATLAB package로 변환한 것으로, R. Pawlowicz, B. Beardsley, 그리고 S. Lentz가 2002년에 제작한 패키지이다(Pawlowicz, 2021). t_tide 함수에 조위 시계열 자료와 관측 시간 간격, 관측점의 위도를 입력하면 각 분조에 해당하는 조화상수(진폭과 위상)를 얻을 수 있다. 우리나라는 특히 4대 분조(M2, S2, K1, O1)의 영향을 주로 받기 때문에 본 연구에서는 아래 [표 3-2]와 같이 해당 4개 분조에 해당하는 조화상수만을 추출하였다. 조화분석 시 사용한 코드 및 결과는 [표 3-4]와 [그림 3-5 ~ 8]에 제시하였다.

[표 3-2] 각 관측점별 4대분조 조화상수 요약

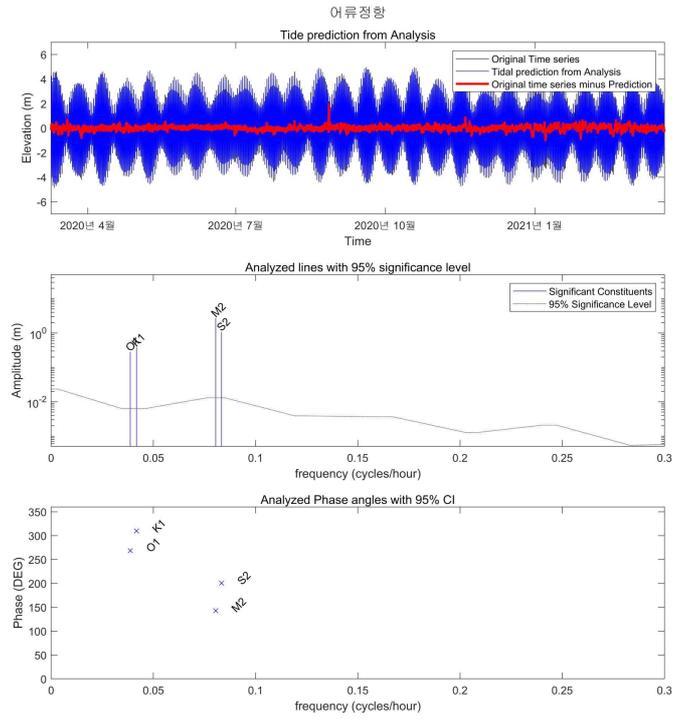
관측점 \ 분조	연평도 남측		인천-백령항로		어류정항		강화 하리	
	진폭 (cm)	위상 (°)						
M2	211.6	109.2	186.5	124.5	274.1	142.8	269.0	150.5
S2	81.21	158.6	73.54	177.8	108.5	200.6	103.9	209.8
K1	36.56	294.4	36.58	302.2	38.46	309.8	37.29	312.7
O1	28.56	253.0	27.96	260.7	27.96	268.7	26.88	270.9



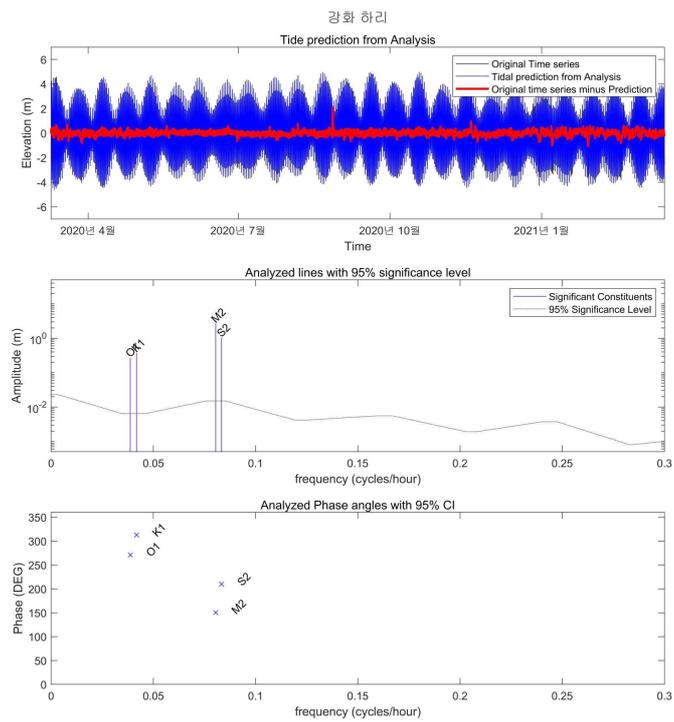
[그림 3-5] 연평도 남측 조위 데이터 조화분석 결과



[그림 3-6] 인천-백령항로 조위 데이터 조화분석 결과



[그림 3-7] 어류정항 조위 데이터 조화분석 결과



[그림 3-8] 강화 하리 조위 데이터 조화분석 결과

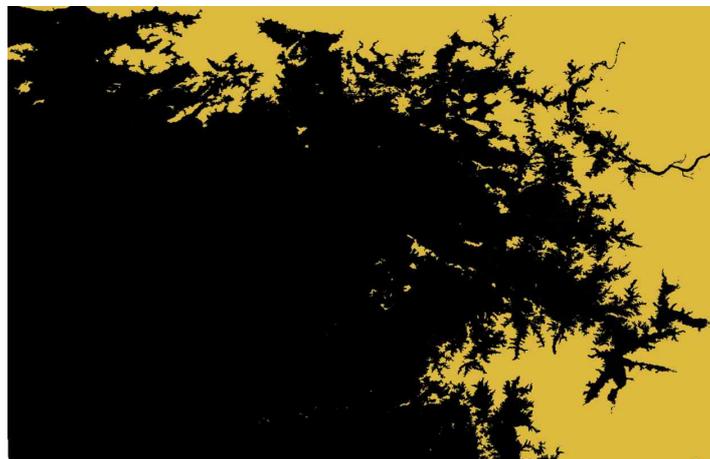
◎ 지형 및 해저지형 자료 수집

□ 해주만 근처 지형자료 수집

해주만 내 조위 예측 전, 육지와 해양의 경계를 설정하여 수치모델링 수행 영역을 결정하기 위하여 해주만 근처의 지형자료를 수집하였다. 지형자료는 국가정보포털 오픈마켓에서 제공하는 국토지리정보원의 90m 해상도 수치표고모델(DEM)을 활용하였다(국토지리정보원, 2015). 이때 해당 DEM의 경우 한반도 전체의 수치지형도를 제공하고 있으므로, 효율적인 모델링을 위해 지리 정보 체계 응용 프로그램인 QGIS를 활용하여 해당 DEM에서 해주만 근처에 해당하는 영역만 선택하여 사용하였다. 그 후, 해안경계선을 추출하기 위해 평균해수면과 표고가 일치하는 지점을 이은 벡터 레이어를 따로 생성하여 Delft3D에서 해안경계선으로 변환할 수 있도록 WGS84 좌표계로 변환 후 shp 파일을 저장하였다.



[그림 3-9] 국토지리정보원 90m 해상도 수치표고모델



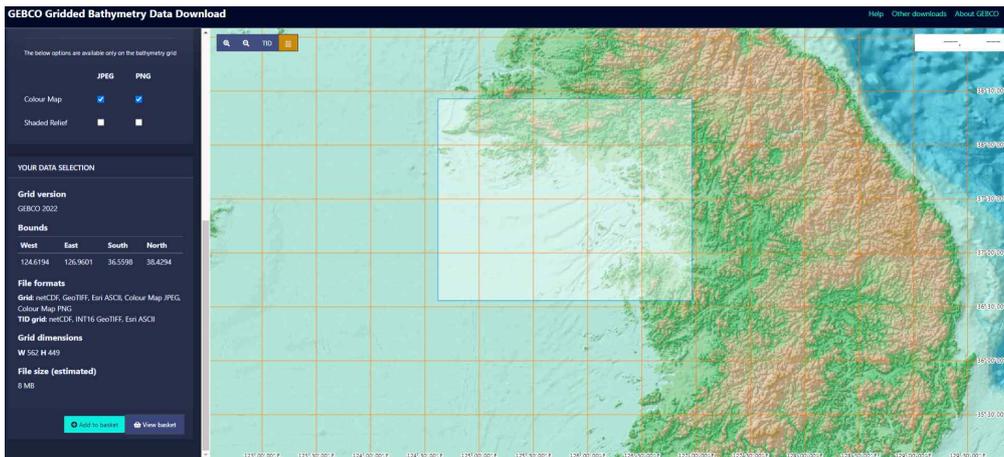
[그림 3-10] 해안경계선 추출을 위한 벡터 레이어 생성

□ 해주만 해저지형 자료 수집

아울러 해주만 내 조위 예측을 위해 수치모델링을 수행하는 데 필요한 해주만 해저지형 자료를 수집하였다. 항공사진, 위성사진 등 다양한 방법으로 정밀한 지형정보를 취득할 수 있는 수치표고모델과는 다르게 정밀한 해저지형도는 직접 측량해야만 얻을 수 있으므로, 북한과 같이 국가 간 분쟁의 소지가 있어 접근이 어려운 지역의 해저지형도는 취득이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 해양 수직 탐사와 위성 중력데이터를 이용해 산출해낸 글로벌 수심 데이터인 GEBCO (GEneral Bathymetric Charts of the Oceans) 해저지형 자료를 사용하였다.

GEBCO 글로벌 해저지형 자료는 Seabed 2030 프로젝트에서 제작되었는데, 이 프로젝트는 전 세계의 해저지형 자료를 모두 수집하여 지구 해저지형도를 제작하고 이를 일반인에게 공개하고자 하는 목적으로 시작되어 International Hydrographic Organization(IHO)과 유네스코의 Intergovernmental Oceanographic Commission(IOC)의 지원을 받고 있다 (GEBCO Compilation Group., 2022).

본 연구에서 사용한 GEBCO_2022 해저지형 자료는 2022년 6월에 공개된 최신 자료로, 15 arc-second(약 450m) 공간 해상도를 가지고 있다 (GEBCO Compilation Group, 2022). 실제로 해당 해양지역에 가서 ADCP 등으로 수심을 측량하는 것에 비해서는 정확도가 떨어지지만, 최진무(2011)에 의하면 GEBCO 데이터를 비교적 수심이 얇은 서해와 남해 지역에서 충분히 활용할 수 있고, 내삽을 통해 실측 데이터를 대체하여 사용할 수 있다. 특히 선행연구의 경우 GEBCO 자료 해상도가 현재보다 더 낮은 30 arc-second(약 900m)일 때 수행된 연구이므로 GEBCO 해저지형 자료로 실측 해저지형 자료를 대체하여 사용하여도 그 정확도가 크게 떨어지지 않을 것으로 판단된다.



[그림 3-11] GEBCO 2022 해저지형 자료 취득 과정 (GEBCO Compilation Group, 2022)

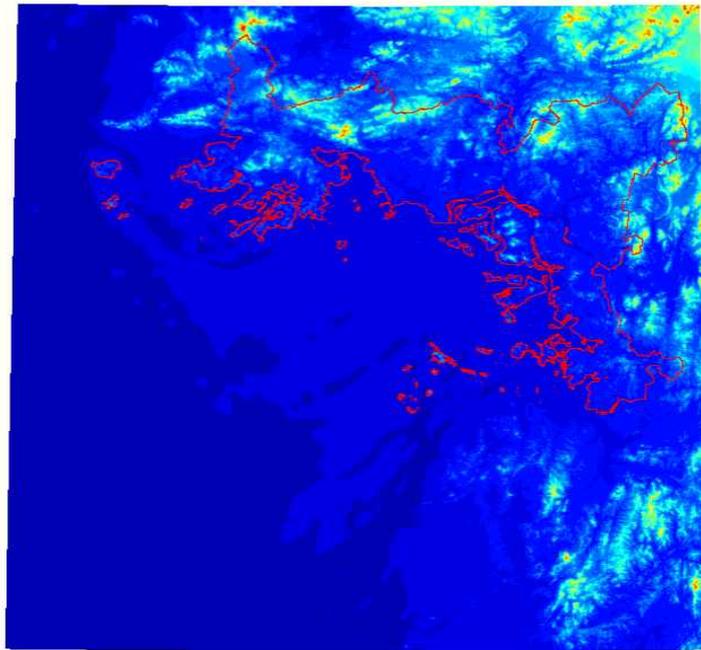
위 [그림 3-11]은 GEBCO 웹사이트에서 해주만 및 근처 해역의 해저지형 자료를 취득하는 과정을 캡처한 사진이다. 위와 같이 해저지형 자료를 netCDF 파일로 다운받은 후, 추후 수치 모델링을 수행하기 위해 Delft3D에서 활용 가능하도록 xyz 파일로 변환하였다. xyz 파일로 변

환하는 데 사용한 코드는 [표 3-5]에 첨부하였다. GEBCO 해저지형 자료는 WGS84 좌표계를 따르고 있기 때문에 지형자료와 다르게 별도의 좌표 변환은 수행하지 않았다.

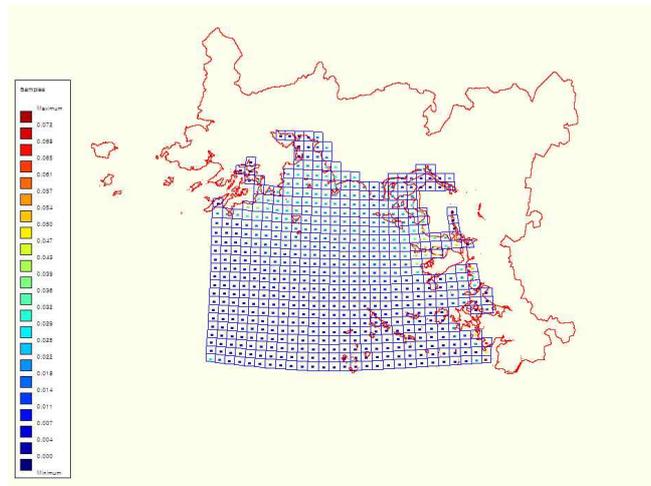
④ 해주만 조력발전 이론적 잠재량 추산

◎ 수치 모델링을 활용한 해주만 내 조위 변화 예측

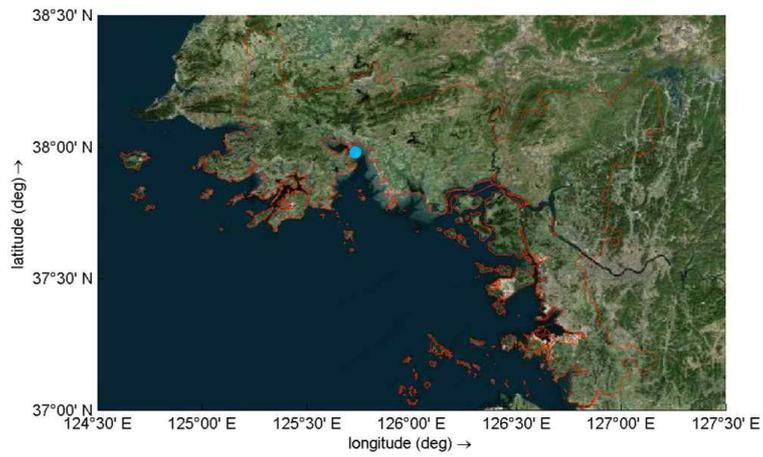
앞서 취득한 해주만 근처 조위 분석 자료와 지형/해저지형 자료를 바탕으로 Delft3D 수치 모델링 툴을 활용해 해주만 내 조위 변화를 예측하였다. 지형자료 및 해안선을 Delft3D 격자 생성 툴에 [그림 3-12]와 같이 불러온 후, [그림 3-13]에 제시된 것처럼 해안선 및 수치해석 영역을 따라 격자를 생성하여 GEBCO 해저지형 자료를 격자에 맞게 내삽하였다. 다음으로, 해주만 내 조위 예측데이터 수집 지점을 [그림 3-14]과 같이 설정하여 해당 지점에서의 조위 예측데이터를 수집하였다. 수치 모델링 수행 시 경계조건에는 다른 외력을 제외하고 앞선 절에서 분석한 해주만 근처 조위데이터를 입력하였다. 그 결과, [그림 3-15, 16]과 같이 해주만 근처 유속장과 해주만 내 조위 변화를 예측할 수 있었다. 수치 모델링 수행 결과, 해주만 내 조위 예측 데이터 대조차는 5.78m로 산정되었다.



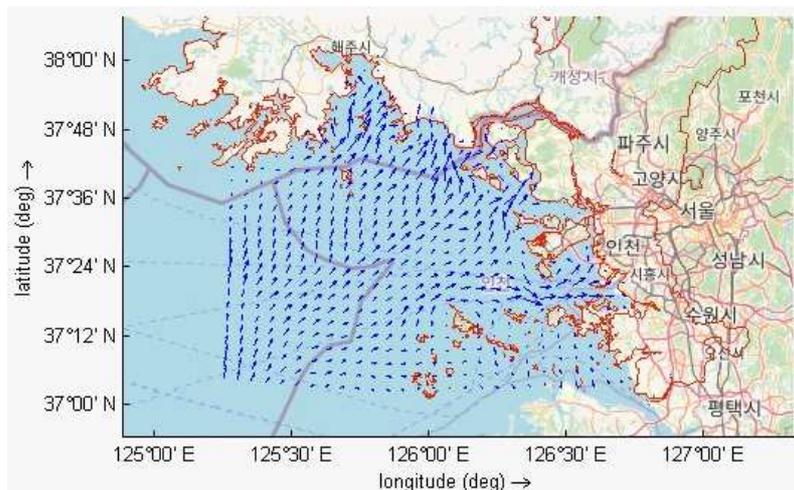
[그림 3-12] Delft3D 격자 생성 툴에 불러온 지형자료 및 해안선



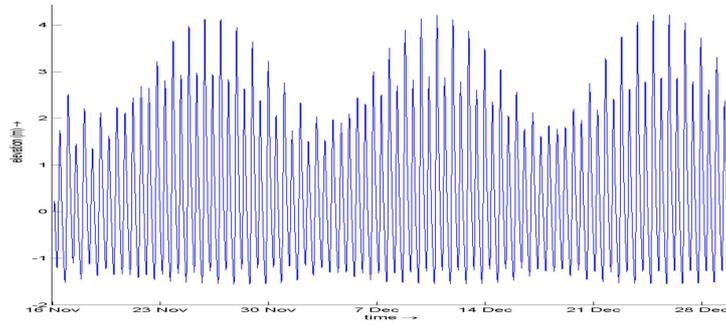
[그림 3-13] 격자 생성 및 GEBCO 해저지형 자료 내삽



[그림 3-14] 해주만 내 조위 예측 데이터 수집 지점



[그림 3-15] 해주만 내 유속장 예측 데이터 예시



[그림 3-16] 해주만 내 조위 예측 데이터

◎ 예측 조위를 이용한 해주만 이론적 조력자원 부존량 산정

수치모델 결과를 이용해 해주만 내 존재하는 조력 자원의 이론적인 잠재 부존량을 산정하였다. 먼저 대조차를 대푯값으로 사용하여 조석현상으로 발생하는 해수의 최대 위치에너지를 계산하였다. 해수의 밀도를 ρ , 중력가속도를 g , 조지의 면적을 A , 대조차를 H 라 하면, 해수 위치에너지 E_p 는 아래와 같은 식으로 산정 가능하다.

$$E_p = \frac{1}{2} \rho g A H^2$$

그 후, 우리나라에서 가장 두드러지게 나타나는 반일주조 주기(T_{semi} , 12시간 25분)와 면적의 곱으로 위치에너지를 나눠주면 조력에너지 일률밀도 P 를 계산 가능하다(황수진 & 조철희, 2019). 이는 목표 지역에 부존하고 있는 조지 면적 당 조력에너지 잠재량을 뜻한다.

$$P = \frac{E_p}{T_{semi} A} = \frac{\frac{1}{2} \rho g H^2}{44700 \text{ sec}}$$

일률밀도를 이용해 연간 에너지 총량을 조지 면적 당 연간발전환산량(AEP, Annual Energy Production)으로 나타낼 수 있다.

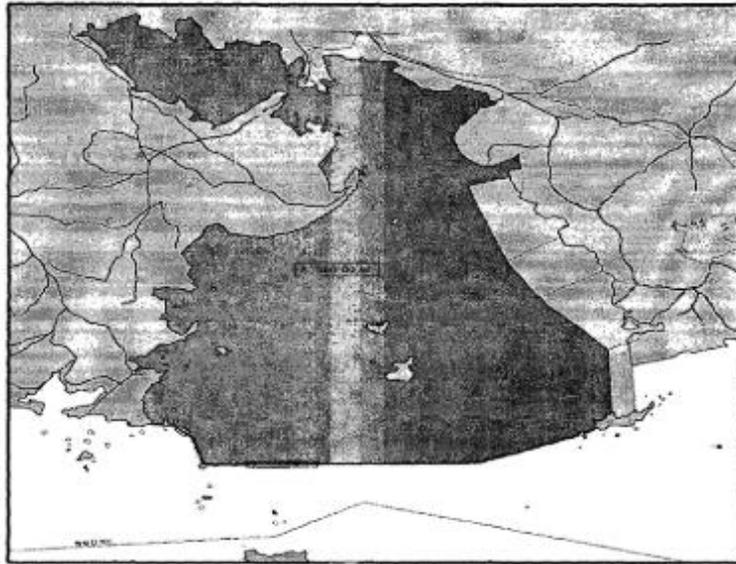
$$AEP/area = P \times (365 \text{ days}) \times (24 \text{ hrs})$$

위에서 구한 대조차 5.78m를 위 식에 대입하면, 해주만의 조지 면적 당 연간발전환산량은 0.0375 Twh/y/km²으로 계산된다. 이 조지 면적 당 연간발전환산량에 해주만의 조지 수면적을 곱하면 해주만의 개략적인 이론적 조력 에너지 부존량을 추산할 수 있다.

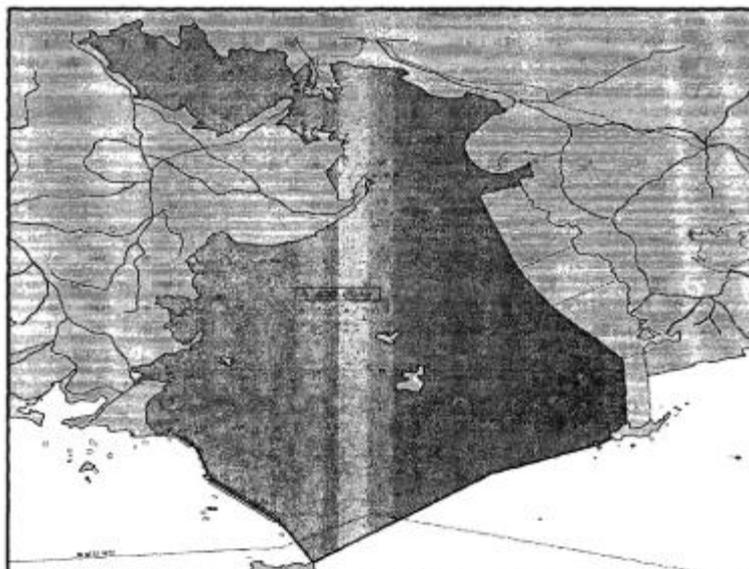
해주만 조력발전에 관해서는 이전 연구들에서 다양한 설계안을 제시한 바 있는데, 2006년 한국해양연구원 보고서에서는 각각 582km², 631km²에 해당하는 해주만 조력발전소 설계안을 제시하였고([그림 3-17, 18]), 대우건설에서는 조력발전소 공사 규모를 축소하기 위해 더 좁은 113.79km²에 해당하는 조지 면적을 제시하였다([그림 3-19]). 해주시 발전 수요량에 따라 적절한 규모의 조지 면적을 선택하면 될 것으로 생각된다.

위에서 구한 조지 면적 당 연간발전환산량을 시화조력발전소와 비교해 보면, 시화조력발전소의 이론적 조력발전 잠재량이 1.262Twh/y이고, 조지 면적이 42.35km²이므로, 시화조력발전소의 조지 면적 당 연간발전환산량이 약 0.0298 Twh/y/km²로 계산된다. 따라서 해주만에 조

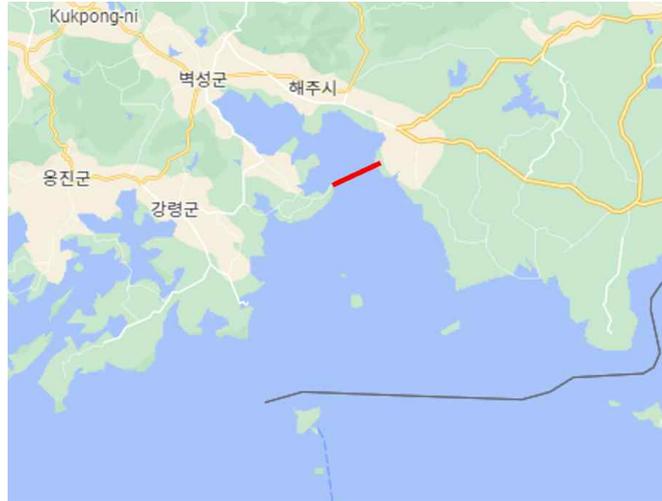
력발전소를 건설할 경우 현재 시화조력발전소와 비슷한 수준 혹은 그 이상의 전력을 생산할 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라, 시화조력발전소의 경우 오염된 시화호를 바다 쪽으로 담수를 배출하여 시화호 생태를 발전시키기 위한 목적을 겸하여 지어졌기 때문에 단방향 발전 방식을 택한 반면, 해주만의 경우 양방향 발전 방식을 택하는 방안도 고려해볼 수 있기 때문에 시화조력발전소보다 더 좋은 발전효율을 보일 수 있다.



[그림 3-17] 해주만 조지 면적 설계안 1 (한국해양연구원, 2006)



[그림 3-18] 해주만 조지 면적 설계안 2 (한국해양연구원, 2006)



[그림 3-19] 해주만 조지 면적 설계안 (대우건설, 2021)

[표 3-3] Open API를 활용한 비실시간 장단기 조위 데이터 다운로드 코드(python)

```

# %% import library
import requests
import json
import pandas as pd

from pandas import json_normalize

# %% Open API url
DataType = "tideShortLong"
key = "A12vUZ71eo9ojEgPSyHw=="
ObsCode = "SO_1213"
#ObsCode(2020년도): SO_1213(연평도 남측), SO_1214(인천 백령항로), SO_1247(강화
#하리), SO_1246(어류정향)
Page = "1"

url_first = ("http://www.khoa.go.kr/api/oceangrid/"+DataType
             +"/search.do?ServiceKey="+key
             + "&ObsCode="+ObsCode
             + "&Page="+Page
             + "&ResultType=json")

# %% request meta data of the observation point anc save as a csv file
response_first = requests.get(url_first)
contents_first = response_first.text
json_ob_first = json.loads(contents_first)

meta_data = json_ob_first['result']['meta']
meta_df = json_normalize(meta_data)
meta_filename = "H:\tideShortLong\\"+ObsCode + "_meta.csv"
meta_df.to_csv(meta_filename, sep=',', na_rep='NaN', encoding='utf-8-sig')

# %% find the last page number and generate page list
meta_df = meta_df.astype({'obs_last_page': 'int'})
lp = meta_df.iloc[0]['obs_last_page']
page_list = [str(x) for x in range(1, lp+1)]

# %% make url list of the certain observation point
url_list = [("http://www.khoa.go.kr/api/oceangrid/"+DataType
            +"/search.do?ServiceKey="+key
            + "&ObsCode="+ObsCode
            + "&Page="+page_x
            + "&ResultType=json") for page_x in page_list
]

# %% download tide level observation data
df_list = []
for url in url_list:
    print(url)
    response = requests.get(url)
    contents = response.text
    json_ob = json.loads(contents)
    data = json_ob['result']['data']
    df2 = json_normalize(data)
    df_list.append(df2)

df = pd.concat(df_list, ignore_index=True)

# %% save csv file
filename = "H:\tideShortLong\\"+ObsCode + ".csv"
df.to_csv(filename, sep=',', na_rep='NaN')

```

[표 3-4] t_tide 조화분석 코드 (MATLAB)

```

data1 =readtable("SO_1213.csv"); % 2020년 연평도 남측 Lat 37.39811 Lon 125.7877
data2 =readtable("SO_1214.csv"); % 2020년 인천-백령항로 Lat 37.28431 Lon 125.6000
data3 =readtable("SO_1246.csv"); % 2020-21년 어류정항 Lat 37.64333 Lon 126.3428
data4 =readtable("SO_1247.csv"); % 2020-21년 강화하리 Lat 37.72806 Lon 126.2867

d ={data1,data2,data3,data4};
lat =[37.39811,37.28431,37.64333,37.72806];
plottitle ={"연평도 남측","인천-백령항로","어류정항","강화 하리"};

for i =1:4
    figure();
    t =tiledlayout(3,1);

    data =d{i};
    tm =table2array(data(:,3));
    level =(table2array(data(:,2))-mean(table2array(data(:,2))))/100;% cm to m

    tt =minutes(tm(2)-tm(1))/60; % minute to hour
    [tidedstruc,pout]=t_tide(level,...
        'interval',tt,... % hourly data
        'start',datetime(tm(1)),... % start time is datestr(tuk_time(1))
        'latitude',lat(i),... % Latitude of obs % Add a shallow-water
constituent
        'error','linear',... % coloured bootstrap CI
        'synthesis',1)

    nexttile
    plot(tm,level,'Color','k');
    line(tm,pout,'color','b');
    line(tm,level-pout,'linewi',2,'color','r');
    xlim([tm(1),tm(end)]);
    ylim([-7,7]);
    xlabel('Time');
    ylabel('Elevation (m)');
    title('Tide prediction from Analysis');
    legend({'Original Time series','Tidal prediction from Analysis','Original time series minus
Prediction'},'location','northeast');

    nexttile
    name =string(tidedstruc.name);
    idM2 =find(strcmp(name,'M2 '));
    idS2 =find(strcmp(name,'S2 '));
    idK1 =find(strcmp(name,'K1 '));
    idO1 =find(strcmp(name,'O1 '));
    idfour =[idM2,idS2,idK1,idO1];
    tideconfour =tidedstruc.tidecon(idfour,:);
    freqfour =tidedstruc.freq(idfour);
    fsig=tideconfour(:,1)>tideconfour(:,2);% Significant peaks
    semilogy([freqfour(fsig),freqfour(fsig)],[.0005*ones(sum(fsig),1),tideconfour(fsig,1)],'
linestyle','-','color','b');
    hold on
    semilogy(tidedstruc.freq,tidedstruc.tidecon(:,2),':k');
    xlim([0,0.3]);
    ylim([0.0005,50]);
    xlabel('frequency (cycles/hour)');
    text(freqfour,tideconfour(:,1),tidedstruc.name(idfour,:),'rotation',45,'vertical','base');
    ylabel('Amplitude (m)');
    legend({'Significant Constituents',' ','95% Significance Level'},'location','northeast');
    title('Analyzed lines with 95% significance level');
    hold off

```

```

nexttile
plot(freqfour(fsig),tideconfour(fsig,3),'bx');
hold on
xlim([0 0.3]);
ylim([0 360]);
xlabel('frequency (cycles/hour)');
text(freqfour+0.01,tideconfour(:,3)-5,tidestruc.name(idfour,:),'rotation',45,'vertical','base');
ylabel('Phase (DEG)');
title('Analyzed Phase angles with 95% CI');
hold off

title(t,plottitle{i});
end

```

[표 3-5] GEBCO 해저지형 자료 netCDF 파일을 xyz 파일로 변환하는 코드 (python)

```

#import numpy as np
import netCDF4 as nc
#import csv

###
filename ='H:/GEBCO_27_Sep_2022_7b13c43ef4d0/gebco_2022_n38.5849_s36.1021_w124.2764_e127.2597.nc'
f =nc.Dataset(filename)
#print(f)
print(f.variables.keys())

###
lat =f.variables['lat'][:]
lon =f.variables['lon'][:]
elev =f.variables['elevation'][:]

###
print(lat)
print(lon)
print(elev)

###
with open('H:/GEBCO_27_Sep_2022_7b13c43ef4d0/GEBCO2.xyz','w')as xyzfile:
    for i in range(len(lon)):
        for j in range(len(lat)):
            xyzfile.write("{} , {} , {} \n".format(lon[i],lat[j],-elev[j,i]))

```



결론 및 요약

- 북한의 에너지 수급 상황은 심각한 수준으로, 장기적인 경제 안정성 확보 및 추후 남북교류 협력사업의 기초 마련을 위해 다양한 에너지 공급원 구축이 필요
- 우리나라 정부 차원에서 국제적 탄소 저감 기조에 맞추어 해양신재생에너지 기술을 성장 및 적용시켜야 할 필요 있음.
- 해안 근처의 발전 가능성이 높고 향후 에너지가 많이 필요할 것으로 보이는 지역으로 개주-해주 공업지구가 있고, 이를 해양신재생에너지 우선 개발지역으로 생각 가능.
- 해주만에 부존되어 있는 이론적으로 이용 가능한 조지면적 당 연간 에너지 발전량은 0.0375 TWh/y/km²로, 해주만의 조력자원을 충분히 풍부하나 기술적·경제적 요인을 고려한 더 구체적인 분석이 필요.

향후 연구 발전 가능성

- 조력발전소 건설 후 조위가 변화할 수 있으므로 이를 고려한 상황에서 조위 변화 예측 및 조력발전소 건설 후 해수 흐름 변화 연구 필요.
- 북한의 에너지 수요량 분석, 해양신재생에너지원의 밀도 분석, 적절한 조력발전소 형태 등 더 구체적인 연구가 가능.

5 2022년도 통일평화기반구축사업 결과보고서
주요 사업 성과

학회 참여 및 행사 개최

◎ 한국수자원학회 해안공학분과 X 해안공학연구실 해양신재생에너지 세미나 개최

- 발표자: 박용성(서울대학교 부교수), 손상영(고려대학교 부교수)
- 일시 / 장소: 2022년 09월 30일 / 서울대학교 35동 223호



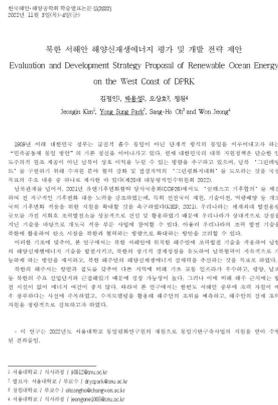
[그림 5-1] 세미나 포스터



[그림 5-2] 세미나 사진

◎ 한국해양·해양공학회 제30차 추계학술대회 구두발표

- 발표 제목: 북한 서해안 해양신재생에너지 평가 및 개발 전략 제안
- 저자: 김정인, 박용성, 오상호, 정원
- 일시 / 장소: 2022년 11월 03-04일 / 경주 화백컨벤션센터



[그림 5-5] 한국해양·해양공학회 제30차 추계학술대회 발표 초록

◎ 2022 통일평화기반구축사업 연합학술대회 구두발표

- 발표 제목: 기후변화 대비 남북협력 관점에서 본 북한 서해안 해양신재생에너지
- 참석자: 박용성, 오상호, 김정인, 문대웅(대우건설), 이성훈(K-water)
- 일시 / 장소: 2022년 11월 17-18일 / 서울대 호암교수회관



[그림 5-6] 연합학술대회 발표자료

[참고문헌]

- 이광수, & 박진순. (2012). 우리나라 조력발전 현황과 전망. *해안과 해양 : 한국해안·해양공학 회지*, 5(2), 29-47.
- 이명환, 정군오, 임응순. (2012). 중국의 전력소비와 경제성장의 인과관계 분석. *한국산학기술학 회논문지*. 제13권. 제10호.
- 통일부. (2019). *문재인 정부의 한반도 정책 - 평화와 번영의 한반도*. 통일부.
- 함지하. (2020, October 13). 북한 석탄 항구 움직임 둔화... 광산 침수 가능성. *VOA*. Retrieved January 10, 2022, from https://www.voakorea.com/a/korea_korea-politics_coal-mine-flooded/6044011.html
- 관계부처 합동. (2021, October 18). *2050 탄소중립 시나리오안*. Retrieved January 7, 2022, from <http://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>.
- 조정환, 강만옥. (2012). 한국의 전력소비와 경제성장의 인과관계 분석. *자원·환경경제연구*. 제21권. 제3호.
- 장석환. (2021, October). *공유하천을 통한 남북 상생* [Slides]. 서울대학교 통일평화연구원. <https://ipus.snu.ac.kr/blog/archives/conference/5477>
- 문진영, & 이성희. (2021, November 30). 2021년 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26) 논의 및 시사점. *KIEP 오늘의 세계경제*, 21(21), 1-17. <http://www.kiep.go.kr/skin.jsp?bid=Pub0301&grp=publication2>
- 제20대 대통령직인수위원회. (2022). *겸손하게 국민의 뜻을 받들겠습니다 - 제20대 대통령직 인수위원회 백서*. 제20대 대통령직인수위원회.
- 나용우. (2022, May). 남북 그린데탕트를 위한 정부 정책 제안. *남북교류협력지원협회 이음*. Retrieved January 2, 2023, from <http://webzine.sonosa.or.kr/202205/2>
- 박용성, 오상호, 김정인. (2022, January). 북한 해양 신재생 에너지의 개발전략 제안. *2021 통일·평화기반구축사업 결과보고서*. 통일평화연구원.
- 해양수산부. (n.d.). 비실시간 장단기 조위. *바다누리 해양정보 서비스*. Retrieved July 6, 2022, from <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/khoa/takepart/openapi/openApiObsTideSoDataInfo.do#>
- Pawlowicz, R. (2011). T_Tide Harmonic Analysis Toolbox. *Rich Pawlowicz's Matlab Staff*. Retrieved September 11, 2022, from https://www.eoas.ubc.ca/~rich/#T_Tide
- 국토지리정보원. (2015). 수치표고모델(DEM)_90M. *국가정보포털 오픈마켓*. Retrieved July 14, 2022, from <http://data.nsd.gov.kr/dataset>
- GEBCO Compilation Group. (2022). GEBCO 2022 Grid. doi:10.5285/e0f0bb80-ab44-2739-e053-6c86abc0289c
- 황수진, & 조철희. (2019). 국내 해양에너지 이론적 잠재량 산정 연구. *한국수소 및 신에너지 학회 논문집*, 30, 465-472.
- 한국해양연구원. (2006). *한반도 조력자원 개발 타당성 검토*.
- 대우건설. (2021). *북한 해주권역 전력공급 사업(안)*.