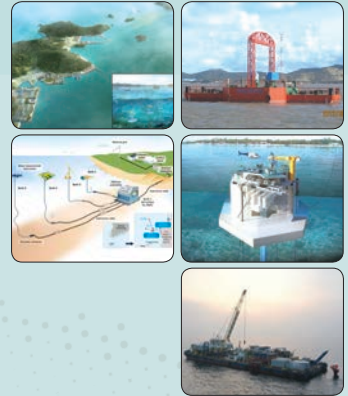


04호

해설이 있는

국민기술제안 인사이트

INSIGHT



해양에너지를 활용한
지속가능 에너지 생산



미세먼지 문제 해결을 위한
국가기후환경회의

대통령 직속 자문기구인 국가기후환경회의는 미세먼지 문제해결에 필요한 국민의 아이디어 및 보유기술에 대한 창구 역할을 수행하는 「국민기술제안 자문 플랫폼」을 운영하고 있습니다.

이를 통해 국민의 미세먼지 해결 기술 제안을 적극 청취하고, 전문기관(연구개발, 특허, 인증, 사업화 등)을 통한 기술자문 및 대국민 서비스를 지원해 오고 있습니다.

본 ‘국민기술제안 INSIGHT’는 국민들이 제안한 미세먼지 문제 해결을 위한 기술아이디어 가운데 정책 반영 및 사업화 등이 필요한 아이템을 선별하여 심층적으로 분석하기 위해서 추진된 사업입니다.

앞으로, 다양한 국민들의 아이디어가 기술개발이 이루어지고 현장 적용이 확대되어 미세먼지 없는 푸른 하늘에서 숨쉴 수 있도록 적극 지원하도록 하겠습니다.

요약문

- ☑ 미세먼지 저감을 위하여 환경부하 물질을 발생시키지 않는 청정재생에너지의 중요성 및 이용이 더욱 강조되고 있으며, 해양에너지 역시 해양이 가지고 있는 재생에너지로 이 글에서는 해양에너지의 국내외 개발 동향과 상용화를 위한 향후 과제를 소개함
- ☑ 대표적인 해양에너지 자원으로 조력, 조류, 파력, 해수온도차에너지 등이 있으며 조력을 제외한 해양에너지는 현재 상용화 단계에 이르지 못하고 있음
- ☑ 해양에너지는 전력을 생산하는 발전, 해수를 담수로 바꾸는 해수담수화, 그리고 양식 등에 활용할 수 있으며, 이중 가장 널리 개발되고 있고, 중요한 부분이 발전임
- ☑ 조위차를 이용하여 전력을 생산하는 조력발전에는 여러 방식이 있으나 현재 가장 일반적인 방법은 단조지식 단류식, 단조지식 복류식이며, 프랑스의 240MW급 랑스 조력발전소와 우리나라의 254MW급 시화호 조력발전소가 가장 대표적인 조력발전소임
- ☑ 조력발전은 기술수준이 높고 대규모 개발 및 복합활용이 가능한 해양에너지이지만 해수유통을 어느 정도 차단하게 됨에 따라 갯벌 면적 감소 등의 환경영향이 있어 현재 추가적인 개발이 지연되고 있음
- ☑ 빠른 흐름을 이용하는 조류발전은 풍력발전과 매우 유사한 형태 및 기본원리를 가지고 있어 기존 풍력발전 기술을 기반으로 기술개발이 비교적 빨리 이루어지고 있으며, 현재 준상용화 단계에 있는 것으로 평가됨
- ☑ 풍력발전과 같이 블레이드 3개를 적용한 수평축 조류발전기술이 거의 상용화 단계에 이르고 있으나 발전단가가 상대적으로 높아 경제성을 확보하는 것이 당면 과제임
- ☑ 파도가 가지고 있는 위치에너지와 운동에너지를 이용하여 전력을 생산하는 파력발전은 다양한 개념의 기술이 개발되고 있으며 실험을 완료한 장치들이 많이 있음
- ☑ 파력발전의 경우 경제성 향상을 위하여 해상풍력과 연계한 복합발전, 해수담수화와 연계한 복합활용 등의 기술을 개발하고 있음
- ☑ 고온의 표층수와 저온의 심층수 사이의 온도차를 이용하는 해수온도차발전의 경우 최근 해수담수화 등과 연계하여 많은 관심을 받고 있음
- ☑ 해양에너지의 상용화를 위해서는 환경영향을 저감할 수 있고 또한, 경제성을 향상시킬 수 있는 기술 개발이 필요하며, 또한 관련 산업을 지원하기 위해서는 기술표준이 마련되어야 함



CONTENTS

1. 해양에너지 종류 및 특성	1
2. 조력에너지 개발 동향	3
3. 조류에너지 개발 동향	5
4. 파력발전 개발 동향	11
5. 해수온도차에너지 개발 동향	15
6. 해양에너지 상용화를 위한 향후 과제	20



표목차

그림목차

[표 1] 해외 조류발전시스템 목록	10	<그림 1> 장샤(江夏) 조력발전소 및 터빈 6기	4
[표 2] 주요 파력발전 기술 개요	12	<그림 2> 조류발전 실해역 시험장 조감도 (IEA-OES, 2019)	6
[표 3] 파력발전 기술개발 주요 연구개발과제	13	<그림 3> 60kW급 수평축 조류 발전 장치 실증시험 및 야경	8
		<그림 4> 해능(海能) III 실증시험	9
		<그림 5> 파력발전 실해역 시험장 조감도 (IEA-OES, 2019)	12
		<그림 6> 응식(鷹式) 1호 실증시험	14
		<그림 7> 1MW급 OTEC 해상형 플랜트 조감도	16
		<그림 8> 1MW급 OTEC 플랜트 실해역 성능시험(IEA-OES, 2019)	16
		<그림 9> OTEC 자원지도 및 개발/운영 중인 OTEC 플랜트(IEA-OES, 2019)	19



해양에너지를 활용한 지속가능 에너지 생산

이진학 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 책임연구원/센터장

해양에너지는 조력, 조류, 파력, 해수온도차에너지 등과 같이 해양이 가지고 있는 청정재생에너지를 의미하며, 조력을 제외한 해양에너지 기술은 본격적인 상용화가 이루어지지 않은 상황임. 본 기사에서는 국내외 해양에너지 개발 동향을 살펴보고, 또한 해양에너지 기술의 상용화를 위한 향후 과제를 제시하고자 함

1. 해양에너지 종류 및 특성

☑ 해양에너지는 재생에너지의 한 분야임

- 미세먼지 저감을 위하여 환경부하 물질을 발생시키지 않는 청정재생에너지의 중요성 및 이용이 더욱 강조되고 있음. 해양에너지는 해양이 가지고 있는 청정재생에너지로 이 기사에서는 해양에너지의 국내외 개발 동향과 상용화를 위한 향후 과제를 살펴보고자 함

☑ 대표적인 해양에너지로 조력, 조류, 파력, 온도차에너지 등이 있음

- 해양에너지는 바다 자체가 가지고 있는 다양한 역학적, 화학적 에너지를 의미하며, 조력, 조류, 파력, 염분차, 해수온도차에너지 등이 있음. 해양에너지의 범위를 해양이라는 공간에서 이용 가능한 에너지로 확대하여 해상풍력(offshore wind)과 해양바이오(marine bio)까지 포함하는 경우도 있음
- IEA-OES¹⁾의 경우 바다 자체가 가지고 있는 에너지를 직접 이용하는 경우로 정의하여 해상풍력과 해양바이오를 제외함(출처: <https://www.ocean-energy-systems.org/>)
- IEC/TC114²⁾의 경우 조류, 파력, 온도차, 하천류(river current) 등을 해양에너지 범위로 포함시키고 있음. 조력발전은 기존 수력터빈 기술분과(IEC/TC4)의 국제표준을 적용할 수 있어 제외하였고, 하천류의 경우 비록 해양에너지는 아니지만 기본적인 원리가 조류발전과 유사하고, 또한 캐나다와 유럽 일부 국가에서 하천류 발전 산업이 있어 이를 포함하고 있음 (출처: <https://www.iec.ch/>)

1) 국제에너지기구(IEA, International Energy Agency) 산하 해양에너지시스템(Ocean Energy Systems) 기술협력프로그램으로 2001년 설립되었으며, 2020년 현재 한국을 비롯하여 총 25개 국가가 회원국으로 참여하고 있음

2) 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Committee) 산하 해양에너지 기술분과(Technical Committee 113)로 2007년 설립되었으며, 2009년 2차 총회가 한국에서 개최된 바 있음. 2020년 현재 한국을 비롯하여 총 28국가가 회원국으로 참여하고 있음

- 국내외에서 기술개발과 상용화가 활발하게 이루어지고 있는 조력, 조류, 파력, 해수온도차 에너지에 대하여 소개하고자 함
- 또한 해양에너지는 전력 생산을 위한 발전 및 해수담수화 등에 직·간접적으로 이용되고 있으며, 가장 큰 부분을 차지하고 있는 발전을 중심으로 개발 동향 및 상용화를 위한 향후 과제에 대하여 소개하고자 함
- 조력발전은 해수가 가지고 있는 위치에너지를 변환하여 전기를 생산하는 것으로, 기본적으로 만조와 간조 시 조위 차가 큰 지역에서 적용할 수 있음
 - 우리나라를 비롯하여 프랑스, 캐나다, 중국, 영국 등에서 조력발전에 많은 관심을 가지고 있음
 - 조력발전은 조지(潮池)의 수에 따라 단조지식(單-, single-basin scheme), **복조지식(複-, multiple-basin scheme)³⁾**으로 구분할 수 있고, 발전 시 흐름에 따라 단류식(單流-), **복류식(複流-)⁴⁾**으로 구분할 수 있음. 단류식의 경우 창조식(漲潮-)과 낙조식(落潮-)⁵⁾으로 세분함(KORDI, 1996)
 - 조력발전은 상용화 단계로 기술수준이 높고, 대규모 개발이 가능할 뿐만 아니라 해상풍력 등과 연계한 복합활용이 가능함
 - 조력발전은 방조제를 필요로 하며, 해수유통을 어느 정도 차단하게 됨에 따라 환경문제를 유발할 수 있고, 이로 인하여 대규모 조력발전소 건설 계획이 지연되거나 취소되고 있음
- 조류발전은 우리나라 울돌목과 같이 조류의 흐름이 빠른 해역에서 조류가 가지고 있는 운동 에너지를 이용하여 전기를 생산하는 방식임
 - 조력발전과 달리 방조제를 필요로 하지 않아 환경영향이 상대적으로 적음
 - 기본적으로 조력발전과 조류발전은 태양과 지구, 달 사이의 인력관계에 의하여 발생하는 **조석현상⁶⁾**을 이용하는 것으로 정확한 장기예측이 가능
 - 국내의 경우 발전가능한 해역이 현재 항로 및 양식장으로 많이 이용되고 있어 다양한 이해 관계자 간의 사회적 합의가 매우 중요한 상황임
- 파력발전은 파도가 가지고 있는 운동에너지와 위치에너지를 활용하여 전기를 생산하는 방식임
 - 바람이 꾸준하게 불어오는 북해 지역이 파력발전에 가장 유망한 해역이라 할 수 있음
 - 파력발전은 다양한 방식이 제안되고 있음
 - 파력을 크게 받기 때문에 구조적 안전성을 확보하는 것이 매우 중요하고, 풍력발전과 같이

3) 단조지식은 하나의 조지(潮池, basin)를 형성한 조력발전 방식이며, 복조지식은 두 개 이상의 조지를 이용하여 발전하는 방식임

4) 단류식은 창조 또는 낙조 시 어느 한 방향에서만 발전하는 방식이며, 복류식은 창조와 낙조 시 모두 발전하는 방식임

5) 창조식은 창조 시 발전하고 낙조 시 충수(充水)하는 방식이며, 낙조식은 이와 반대로 창조 시 충수하고, 낙조 시 발전하는 방식

6) 조석(潮汐)현상은 지구의 바다가 태양과 달이 지구에 미치는 기조력(起潮力, tidal force)에 의해 해수면이 오르내리는 현상

정확한 발전량 예측이 어려움

- 해수온도차발전은 따뜻한 표층수와 차가운 심층수 사이의 온도차를 이용하여 전기를 생산하는 발전방식임
 - 고온의 표층수로 진공펌프로 감압시켜 얻은 증기로 터빈을 돌려 발전하고 증기를 차가운 심층수로 냉각시켜 담수로 회수하는 방식임
 - 표층수의 온도가 높을수록 발전출력이 높으므로 주로 적도 부근의 열대지역에서 유망한 발전방식임
 - 효율과 경제성이 낮아 한동안 연구개발이 지연되었으나, 최근 고효율 터빈기술이 개발되고, 또한 지속적으로 발전할 수 있는 장점과 열대도서지역의 경우 담수화와 연계할 수 있다는 장점이 부각되면서 다시 관심을 받고 있는 분야임

2. 조력에너지 개발 동향

- ☑ 조력발전은 가장 먼저 상용화된 해양에너지 분야로 현재 프랑스, 한국, 캐나다, 중국 등에서 상용발전소를 운전하고 있으나, 환경 문제 등으로 인하여 추가 건설이 지연되고 있음
 - 현재 운전 중인 100MW급 이상의 대형 조력발전소로는 프랑스의 랑스 **조력발전소**⁷⁾와 우리나라의 시화호 **조력발전소**⁸⁾가 있음
 - 랑스 조력발전소(Rance Tidal Power Plant)는 시설용량 240MW급 조력발전소로 복류식 발전방식을 적용하고 있음
 - 시화호 조력발전소(Sihwa Lake Tidal Power Plant)는 시설용량 254MW급 조력발전소로 세계 최대 규모의 조력발전소임
 - 반월국가산업단지와 농지 확장을 위한 시화방조제 건설('94) 이후 시화호의 수질이 급격하게 악화되었으며, 이러한 수질악화 문제를 해소하기 위한 일환으로 시화방조제 내에 시화호조력발전소를 건설하였으며, 인근 매립지의 관리수위를 초과하지 않도록 단류식 창조식 발전을 채택하고 있음
 - 1MW~100MW급 중형 조력발전소로는 캐나다의 아나폴리스 조력발전소와 중국의 장샤 조

7) 프랑스 브리타니주의 랑스강 하구에 위치하고 있으며 1966년 11월부터 운영. 현재 프랑스 발전기업인 EDF가 운영하고 있으며, 시설용량 240MW(10MW급 터빈 24기), 연간발전량 약 600GWh으로 프랑스 전력수요의 0.012%를 공급하고 있음. 설비비용은 약 40% 수준임(출처: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/la-rance-tidal-barrage>)

8) 경기 안산시 시화방조제에 위치하고 있으며 2011년 8월부터 운영. K-Water가 운영하고 있으며, 시설용량 245MW(24.5MW급 터빈 10기), 연간발전량 약 550GWh이며, 건설비용은 약 3570억원 (출처: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/sihwa-tidal-power-plant>)

력발전소가 있음

- 아나폴리스 조력발전소(Annapolis Tidal Power Station)는 캐나다 펀디 만과 아나폴리스 강 사이에 위치한 세계에서 세 번째 규모인 20MW급 조력발전소로 1984년부터 2019년까지 운영하였으며 2019년 장비 파손으로 운영을 중단함
(출처: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/annapolis-tidal-station>)
- 중국의 장샤(江厦) 조력발전소(JiangXia Tidal Power Plant)는 1980년 상용발전을 시작하였으며, 터빈 6기(600kW급 1기, 700kW급 5기)를 사용하여 총 시설용량 4.1MW임. 장샤 조력발전소는 단조지 복류식 방식을 적용하고 있음
(출처: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/jiangxia-pilot-tidal-power-plant>)



〈그림 1〉 장샤(江厦) 조력발전소 및 터빈 6기

- 2009년~2015년에 중국 잔타오강(健跳港), 우산커(乳山口) 등 10MW급 발전소에 대한 타당성 연구에 따르면 평균 발전단가는 해외 조력발전소 발전단가와 비슷한 $\text{¥}1.386\sim 2.6/\text{kWh}$ (약 237~445원/kWh)이며, 이는 풍력발전 등 다른 재생에너지 발전단가보다는 높은 수준임
 - 조력발전의 경우 환경 문제 등으로 인하여 추가적인 건설이 이루어지고 있지 않으며, 국내의 경우 환경영향을 저감할 수 있는 조력발전기술에 대한 연구가 진행되고 있음
- ☑ 차세대 조력발전 기술은 친환경성과 경제성을 확보할 수 있는 기술임
- 국내에서는 환경친화적 조력발전을 위하여 다양한 개발안을 제시한 바 있음
 - “조력에너지 실용화 기술개발(06~10)”과제를 통하여 해양생태계에 미치는 영향을 최소화 하면서 청정 해양에너지를 개발하기 위한 친환경 조력발전 모델을 연구함 (출처: 한국해양연구원, 2011)

- 갯벌 복원, 해수소통 수문 설치, 수질 모니터링 관리체계 구축, 대체 조류(鳥類) 서식지 및 인공습지 조성 등을 통해 환경에 영향을 최소화하는 방안을 제안함(출처: 조력에너지 실용화 기술개발 최종보고서, 2010)
- 환경친화적이고, 주민참여형 조력발전사업 개발이 필요함
- 영국에서는 양수-조력발전(tidal power with pumped hydro), AI 등을 이용한 조력발전 운영 최적화 등의 연구를 지속적으로 수행하고 있음 (출처: HM Government, 2009)
- Bristol Channel 內 West Somerset Lagoon을 대상으로 조력발전 출력 향상을 위하여 양수 개념을 도입하는 것에 관한 연구를 수행한 바 있음
- Swansea Bay Tidal Lagoon 사업의 경제성 확보를 위하여 유전자알고리즘 등을 이용한 운영 최적화에 대한 연구를 수행한 바 있음(출처: Xue et al, 2020)

3. 조류에너지 개발 동향

- ☑ 조류발전은 조류의 운동에너지를 이용하는 것으로 형태나 기본 원리가 풍력발전과 매우 유사함
 - 조류발전은 풍력발전과 유사하게 수평축⁹⁾ 또는 수직축¹⁰⁾ 터빈을 중심으로 개발되고 있으며, 일부 플랩 방식, 스크류 방식 등도 개발되고 있음
 - 실제 상용화에 가장 근접한 기술은 풍력발전과 유사하게 블레이드 3개를 적용한 수평축 조류발전 기술임
 - 국내 조류발전은 초기 준상용화 단계(TRL 6~7)로 평가되고 있으며, 영국 등 선진국 대비 80~90% 수준을 보유하고 있음. 세부적으로는 조류발전 지지구조물 설계 및 시공 분야는 선진국 수준이지만, 조류에너지 변환 및 적용기술은 상대적으로 선진국 수준에 도달하지 못하고 있음
 - 영국을 중심으로 미국, 캐나다, 노르웨이, 네덜란드, 호주 등에서 조류발전 상용화를 위한 연구가 활발하게 수행되고 있음
 - 조류발전기 개발 외에도 국제 기술표준화, 실험역 시험장 구축, 발전단지 조성 등 조류발전 상용화에 필요한 다양한 프로젝트가 수행되고 있음

- ☑ 국내 조류발전 관련 본격적인 연구는 2000년대 초반부터 이루어지고 있으며, 해양수산부와

9) 회전축이 흐름방향에 대하여 수평인 방식으로 상류식(up-stream)과 하류식(down-stream)으로 구분

10) 회전축이 흐름방향에 대하여 수직인 방식으로 흐름의 방향에 관계없이 발전이 가능하여 요잉(yawing)이 필요하지 않음

산업통상자원부의 지원으로 한국해양과학기술원, 인하대학교, (주)오션스페이스 등이 관련 기술을 개발하고 있음

- 한국해양과학기술원에서는 1986년 우수영 조류발전 가능성 조사 연구 이후, 2001년부터 수행된 조류에너지 실용화 기술개발을 통하여 **울돌목시험조류발전소¹¹⁾**를 건설하여 운영하고 있음
 - 울돌목시험조류발전소는 500kW급 수직축 터빈 2기를 적용하여 1MW급 시스템으로 개발됨. 실증시험 이후 상용발전을 위하여 현재 150kW급으로 규모를 줄여 운영하고 있음
 - 한국해양과학기술원에서는 2014년에는 20kW급 축소모형에 대한 실증 이후, 현재 200kW급 수평축 조류발전시스템 실증 단계에 있음
- (주)오션스페이스는 인하대 등과 공동으로 조류발전시스템을 개발한 바 있음
 - 25kW급 조류터빈을 개발하여 삼천포 화력발전소 방수로 구간에서 성능시험을 수행하고('08.06), 100kW급 부유식 조류발전시스템에 대한 성능시험을 수행함('10)
- 최근 조류발전 상용화를 지원하기 위하여 인프라 구축 사업을 진행하고 있음
 - 2017년부터 해양수산부 R&D 사업으로 조류발전시스템과 부품에 대한 성능시험 및 평가가 가능한 4.5MW급 **“조류발전 실해역 시험장¹²⁾”** 구축 사업을 진행하고 있음



〈그림 2〉 조류발전 실해역 시험장 조감도(IEA-OES, 2019)

11) 국토해양부의 R&D사업의 일환으로 '05년 착공, '09년 완공. 총 건설비용은 약125억 원이며, 500kW급 수직축 터빈 2기가 설치되어 있으며, 수면 위 발전시설을 포함하여 가로 16m, 세로 36m, 높이 48m, 총 무게 1천 ton에 달하는 규모임

12) 해양에너지시스템 상용화에 있어 가장 중요한 단계인 실제 해역에서의 성능시험을 지원하기 위한 시험장. 실제 해역에서의 성능시험 시 해저케이블 등 관련 인프라 구축비용, 주민동의 등 인허가 관련 사항 등의 문제를 해결하기 위한 시설

- ☑ 영국은 조류발전 분야에서 가장 앞선 기술과 사업화 실적을 보유하고 있음

 - 영국 스코틀랜드 북쪽 해안과 Stroma 섬 사이에 위치한 Pentland Firth(펜틀랜드 해협)에 총 398MW급의 조류발전단지를 조성하는 MeyGen 프로젝트를 추진 중임
 - MeyGen 프로젝트는 세계 최대 규모의 상용 조류발전사업으로 86MW급 Phase 1과 321MW급 Phase 2로 계획되어 있으며, 현재 6MW(1.5MW급 터빈 4기) Phase 1a단계를 완료하고 상용 발전 중에 있음
 - MeyGen 프로젝트 Phase 1a에서는 1.5MW급 Atlantis AR1500 터빈 1기와 1.5MW급 Andritz Hydro Hammerfest HS1000 Mk1 터빈 3기를 적용함
 - 2019년 연간발전량은 13.8GWh에 이르고 있으며, 현재까지 총 24.7GWh이상의 전력을 생산한 바 있음(출처: <https://simecatlantis.com/projects/meygen/>)
 - 유럽해양에너지센터(EMEC)¹³⁾와 ORE Catapult¹⁴⁾ 등의 기관에서 조류발전 연구인프라 시설을 운영하고 있음
 - 스코틀랜드 오크니 제도(Orkney Islands)에 위치한 EMEC(European Marine Energy Center)은 2002년 이후 현재까지 OpenHydro를 비롯하여 총 14개 개발사의 조류발전시스템에 대한 실증을 완료 또는 진행 중임
 - 또한 EMEC은 최근 조류발전과 연계한 수소생산 시험설비를 구축하여 운영하고 있음(출처: <http://www.emec.org.uk/>)
 - 한편 블라이쓰(Blyth)에 위치한 ORE Catapult에서는 조류발전 로터 블레이드 및 동력전달계 등에 대한 시험시설을 보유하고 있음(출처: <https://ore.catapult.org.uk/>)
- ☑ 중국은 1980년대부터 조류에너지 이용 및 개발을 위한 연구를 시작하였으며, 현재까지 다양한 정부 지원을 통하여 지속적으로 관련 기술을 개발하고 있음

 - 중국은 동쪽 해안에 긴 해안선을 이루고 있어 해양에너지 개발에 유리한 지리적 요건을 갖고 있음

13) 영국 스코틀랜드 오크니 제도에 위치한 파력발전 및 조류발전 관련 연구센터이자 UKAS 공인시험기관. 2001년 설립되었으며, 본부는 Stromness에 소재. 실규모 계통연계 시험이 가능한 시험장을 포함하여 총 4개소의 실험력 시험장을 운영하고 있음

- Billia Croo 파력발전 시험장
- Fall of Warness 조류발전 시험장
- Scapa Flow 소형 파력발전 시험장
- Shapinsay Sound 소형 조류발전 시험장

14) 영국 Catapult 네트워크의 하나로 해양에너지/해상풍력 등의 연구를 수행. Blyth의 NaREC(National Renewable Energy Center)을 포함하여 Levenmouth의 FRIC(Fife Renewables Innovation Center), Hull의 O&M Center 등이 있음. 삼성중공업이 개발한 Levenmouth의 7MW급 해상풍력터빈을 실험용 터빈으로 운영 중임

- 이론적 해양에너지 부존량은 1,669.39GW에 달하며 이 중 조류발전은 8.32GW로 추정됨
- 주요 프로젝트로 다이산(Daishan) 조류발전 실증 사업(1.7MW급), 자이루오산(Zhairuoshan) 조류발전 실증 사업(470kW급) 등이 있음
- 자이루오산(摘箬山, Zhairuoshan) 실증 사업
 - 절강대학교에서 개발한 60kW 반직접구동식 (semi-direct drive) 수평축 조류발전장치에 대한 실증시험을 수행하여('14.05-), '15.04까지 누적발전량 2만 kWh 달성함
 - 현재 이 시스템을 기반으로 600kW 조류발전시스템을 개발 중임



〈그림 3〉 60kW급 수평축 조류 발전 장치 실증시험 및 야경

- 다이산(岱山, Daishan) 실증 사업
 - 15~300kW급 규모의 수직축 조류발전시스템을 개발하여 성능을 시험하고 있음
 - 하얼빈공대에서 개발한 수직축 조류발전시스템인 “해능(海能) III”는 조우산(舟山)시 다이산(岱山, Daishan) 인근 해역에서 지난 2013년 12월부터 1년 간 실증시험을 수행하였으며, 이후 수리 보수 및 재운영함
 - 세계 최대 규모의 수직축 조류발전 장치인 1.7MW급 LHD 조류발전시스템이 2016년 7월 동일 해역에 설치되었으며, 2017년 5월 연속 발전을 개시한 후 2019년 9월까지 총 1.5GWh의 누적발전량을 달성함
 - 현재 지방정부와 합의된 LHD 조류발전 정산단가는 ¥2.58/kWh(약 442원/kWh)임 (출처: IEA-OES, 2019, http://zhoushan.chinadaily.com.cn/2019-08/26/c_399144.htm)



〈그림 4〉 해능(海能) III 실증시험

- ☑ 일본과 캐나다 등에서도 조류발전 관련 연구를 추진하고 있음
 - 일본은 다양한 조류발전 연구를 추진하였으나 최근에는 해류발전 분야의 연구가 중점적으로 추진되고 있음
 - 일본 나가사키 해양산업 클러스터 추진협의회(NaMICPA, Nagasaki Marine Industry Cluster Promotion Association)와 나가사키 지방정부에서는 EMEC과 유사한 AMEC(Asia Marine Energy Center)을 설립할 계획을 수립하였으나 장기간 보류되고 있음
 - 현재 부유식 해상풍력 실증사업 등을 추진하고 있으며, 조류발전의 경우 나가사키 주변 해역에서의 해류발전 실험을 제외하고는 많은 사업이 취소 또는 보류되고 있음
 - 캐나다의 **FORCE¹⁵**(The Fundy Ocean Research Center for Energy) 실험장 시험장은 다양한 종류의 조류발전 시스템과 계통연계 실험을 수행하며, 기기성능 평가 및 기술 개발을 지원하고 조류발전 상용화 컨설팅을 수행하고 있음

- ☑ 주요 조류발전시스템 개발사로 Andritz, Alstom, Atlantis 등이 있으며, 여러 차례의 인수합병이 이루어진 바 있고, 또한 상용화를 견인하기 위하여 실증단지 개발 사업을 추진하고 있음
 - 현재 전 세계적으로 조류발전시스템 상용화 기술은 대형 발전사 혹은 중공업사가 보유하고 있음
 - 스위스 Andritz Hydro는 노르웨이 Hammerfest Strom을 합병하며, 조류발전사업에 진출

15) 캐나다 노바스코티아주 펀디만(Bay of Fundy)에 위치한 조류발전 관련 해양연구센터로 최강유속이 5m/s에 이르는 조류를 이용한 실험 시험장을 운영하고 있음 <https://fundyforce.ca>

- 독일 Siemens는 영국의 **Marine Current Turbine¹⁶⁾**을 합병하며 조류발전사업에 진출하였으나 현재는 SIMEC Atlantis Energy에서 MCT 기술을 인수하였음
- 프랑스 Alstom사는 영국 Tidal Generation을 합병하며 조류사업에 진출하였고, 이후 미국 GE가 Alstom을 합병함
- 이들 3개 회사의 시스템은 모두 실험실 실증을 통하여 1GWh 이상의 누적발전량을 생산하여 준상용화 단계(기술성숙도 8)를 달성함

☑ 상용화를 위한 조류발전 실증단지 개발 사업이 가속화되고 있음

- MeyGen 프로젝트의 1a단계 사업으로 1.5MW Andritz Hydro 시스템 3기와 1.5MW Atlantis 시스템 1기를 적용한 6MW급 실증단지 건설이 2015년에 시작되어 2017년부터 운영 중에 있으며 현재까지 24.7GWh의 누적발전량을 기록
- 현재 스코틀랜드 Sound of Islay(10MW), 스코틀랜드 Kyle Rhea(10MW), 프랑스 자르 블라카드(5.6MW) 등의 실증 단지 개발 사업이 계획

☑ 현재까지 개발되었거나 개발 중인 조류발전시스템은 다음 표와 같음(출처: Seo et al, 2019)

[표 1] 해외 조류발전시스템 목록

사업명(회사)	위치	터빈(개발사)	형태	설비용량
MeyGen Phase 1a (SAE)	퍼트랜드 퍼스 (Pentland Firth) (영국 스코틀랜드)	AHH1000 MK1 (Andritz Hydro Hammerfest)	3엽	4.5 MW
		AR1500 (Atlantis Resources)		1.5 MW
SRI-2000 (Orbital Marine Power (前 Scotrenewables))	오크니(Orkney) (영국 스코틀랜드)	Orbital O2 (Orbital Marine Power)	2엽 (부유식)	2MW
Ocean Current Project (IHI Corporation & NEDO)	쿠지노시마 (Kuchino-shima)(일본)	Kairyu (1/3.5 규모 100kW, IHI, Toshiba)	2엽 (부유식)	2MW

16) 세계 최초로 계통연계 실험실 시험에 성공한 수평축 조류발전시스템인 SeaGen-S의 개발사로 현재는 SIMEC Atlantis Energy로 합병됨

사업명(회사)	위치	터빈(개발사)	형태	설비용량
OCEAN_2G (SAGRES)	이데이섬(Eday island) (영국) & 비고만(Vigo bay) (스페인)	ATIR (Magallanes Renovables)	3엽 (부유식)	2MW
ICE (브리타니 혁신개발부, (BDI, Brittany Innovation Development Agency))	우산트섬 (Ushant island) (프랑스)	SABELLA D10 (SABELLA, AKUO Energy)	6엽 대칭형 블레이드	1MW
딥그린(Deep Green) (Minesto)	영국 웨일즈	DG500 Kite (Minesto)	5엽 (부유식)	500kW
SFPMRE (Guodian United Power Technology Co.)	자이로우산 섬 (Zhairuoshan Island) (중국)	New ZJU (United Power)	2엽	600kW

4. 파력발전 개발 동향

- ☑ 파력발전은 진동수주형, 가동물체형, 월파형 등 매우 다양한 기술이 개발되고 있으며, 기술개발 단계 역시 기초원천에서 실증 단계까지 매우 다양함
 - 파도로 인하여 구조물 내부에 발생하는 물기둥의 진동을 이용하여 공기 터빈을 작동시키는 **진동수주형**¹⁷⁾(振動水柱-, Oscillating Water Column), 펠라미스(Pelamis)와 같은 **가동물체형**¹⁸⁾, 웨이브 드래곤(wave dragon)과 같은 **월파형**¹⁹⁾(越波-, wave overtopping), 오이스터(Oyster)와 같은 **플랩형**²⁰⁾(flap -), 웨이브 스타(Wave Star)와 같은 **점 흡수형**²¹⁾(point absorber-) 등 여러 방식이 있음
 - 진동수주형, 가동물체형 및 월파형 파력발전 기술의 개념과 장점 및 단점은 아래 표와 같음

17) 파력에너지를 공기의 흐름으로 변환하여 이를 전기에너지로 변환하는 방식으로 안전성이 높음. 대표적인 진동수주형 파력발전시스템으로 포르투갈의 PICO 파력발전소와 국내 용수시험파력발전소가 있음

18) 수면의 움직임에 따라 민감하게 반응하는 물체의 움직임을 전기에너지로 변환. 대표적인 가동물체형 파력발전시스템으로 펠라미스(Pelamis)가 있음

19) 파 진행방향 전면에 사면을 두어 월파를 유도함으로써 파도의 운동에너지를 위치에너지로 변환하여 전기에너지를 생산하는 방식임. 대표적인 월파형 파력발전시스템으로 웨이브 드래곤(Wave Dragon)이 있음

20) 주로 연안에 적용하는 방식으로 플랩을 저면에 설치하여 파도에 의하여 진동하도록 하여 전기에너지를 생산하는 방식임. 대표적인 월파형 파력발전시스템으로 오이스터(Oyster)가 있음

21) 부체의 움직임으로부터 해저면 또는 다른 구조물 고정단의 선형발전기 등을 작동시켜 전기를 생산하는 방식임. 대표적인 점 흡수형으로 덴마크의 웨이브 스타(WaveStar)가 있음

[표 2] 주요 파력발전 기술 개요

종류	구분	내 용
가동 물체형	개념	수면의 움직임에 따라 민감하게 반응하는 물체의 움직임을 전기에너지로 변환
	장점	파력에너지를 직접 이용하므로 에너지 효율이 높음
	단점	파력에 직접 부딪치므로 구조물이 취약
진동 수주형	개념	파력에너지를 공기의 흐름으로 변환하여 이를 전기에너지로 변환
	장점	효율성이 월파형보다 높고, 파랑의 형태와 무관하게 발전
	단점	파랑의 변동성을 제어하기 어려움
월파형	개념	파 진행방향 전면에 사면을 두어 운동에너지를 위치에너지로 변환하여 전기에너지를 생산하는 방식
	단점	일정 수위 이상만 전기 생산 가능

☑ 국내 파력발전 기술개발은 해양수산부, 산업통상자원부 등의 지원으로 이루어지고 있음

- 국내 파력발전의 경우 현재까지 REC 가중치가 결정되지 않았지만 향후 용수시험파력발전소 등 관련 시스템 실증자료가 확보되면 REC 가중치 결정 및 산업화 견인이 가능할 것으로 기대되고 있음
- 2016년에 제주도 한경면 용수리 해안에 국내 최초 500kW급 **용수 시험파력발전소²²⁾**를 준공함
- 또한 2016년 5월부터 해양수산부 해양청정에너지기술개발 사업의 일환으로 기존 용수시험 파력발전소를 이용하는 한편 해저케이블을 추가 설치하여 5MW급 규모의 파력발전 실해역 시험장을 구축하여 2020년 9월 준공함



<그림 5> 파력발전 실해역 시험장 조감도(IEA-OES, 2019)

- 국내에서 수행된 파력발전 기술개발 주요 연구개발과제는 다음과 같음

22) 500kW급 발전소로 제주 한경면 용수리 인근해역에 케이슨식으로 시공된 국내 최초 계통연계형 파력발전시스템

[표 3] 파력발전 기술개발 주요 연구개발과제

프로젝트명	변환형식	설치형태	용량	연구기간	비고
60kW급 부유식 진동수주형 파력발전장치/주전A호 (KRISO, 전력연구원)	진동수주형	부유식	60kW	1993-2001	실증시험('01)
월파형 파력발전 기반기술 연구(KRISO, 전력연구원)	월파형	케이슨	250kW	2003-2005	기초연구
진동수주형 파력발전 실용화 기술개발 (KRISO, 해수부)	진동수주형	케이슨	500kW	2003-2016	시험파력 발전소 준공('16)
나선암초형 월류파력발전 기술개발(KRISO, 산자부)	월파형	Monopile or Jacket	250kW	2007-2010	최적설계 완료
가동물체형 고효율 파력발전 시스템 기술 실증연구(한국전력공사, 산업부)	가동물체형	부유식	50kW	2009-2012	-
부유식 진자형 파력발전 기술개발 및 실증(KRISO)	플랩형	부유식	300kW	2011-2016	
승강식 해상플랫폼을 가진 수직 진자운동형 30kW급 파력발전기 개발(화진, 산업부)	점 흡수형	파일식	30kW	2013-2016	-
10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발(KRISO, 해수부)	점 흡수형	부유식	10MW	2013-2016	파력-해상풍력 복합발전
도서(섬)지역 전력공급을 위한 분산발전용 50kW급 파력발전 시스템 시제품 개발 및 상용화(인진, 산업부)	점 흡수형	부유식	50kW	2014-2016	-
방파제 연계형 파력발전 융복합 기술개발 (KRISO, 해수부)	진동수주형	-	-	2016-2020	-

- 세계 각국에서 개발된 주요 파력발전기 모델 및 특징

- 실해역에서 운영 중인 진동수주형 파력발전시스템으로 영국의 **Islay LIMPET²³⁾**(500kW), 포르투갈의 **Pico²⁴⁾**(400kW), 호주 Energetech(2MW) 등이 있음
- 실해역에서 운영 중인 가동물체형 파력발전시스템으로 **Pelamis²⁵⁾**(750kW), 영국의 **Oyster²⁶⁾** 등이 있음

23) 세계 최초로 계통에 연계된 500kW급 파력발전소로 Wavegen이 개발 운영 중. 1991년 75kW 시제품에 대한 시험 후, 2000년 500kW급으로 건설되었으며, 현재는 250kW급으로 운영되고 있음

24) 포르투갈 Pico 섬 연안에 설치된 400kW급 파력발전소로 1999년 1월부터 2018년 4월까지 운영(출처: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/pico-power-plant>)

25) ScottishPower Renewables와 E.ON에 개발한 가동물체형 750kW급 파력발전장치로 EMEC에서 2010년 10월부터 2014년 11월까지 실해역 시험 완료(출처: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/pelamis-wave-power-p2-demonstration-emec>)

26) Aquamarine사에서 개발한 파력발전장치로 힌지로 고정된 플랩을 이용

- 스코틀랜드의 AquaMarine Power에서 개발한 정격출력 315kW의 Oyster 1은 2009년 Billia Croo 해역의 EMEC (European Maritime Energy Center) 실증장에 설치되어, 6,000시간 이상의 실증시험을 수행하였음. 이후 개발된 800kW급 Oyster 800은 2015년 11월부터 1년간 EMEC 시험장에서 실증을 수행함
- 미국 OPT사에서 개발한 PowerBuoy는 모듈형을 적용하여 구성 및 확장성이 뛰어나며 2004년 이래 지속적으로 실험실 실증을 수행하여 상용화 단계에 근접하고 있음
- 호주의 Carnegie는 10년간의 개발, 모형 시험, 실증 시험 등의 과정을 거쳐 상용화 단계의 파력발전기 CETO를 개발. 1999년 개념 개발 이후, CETO1(2003년), 1kW급 CETO2(2006년), 직경 7m 80kW급 CETO3(2011년), 직경 11m 240kW급 전력생산 및 담수화 목적의 CETO5(2014년), 1MW급 CETO6(2016년) 등을 개발하고 있음

☑ 중국은 정부의 해양에너지 개발 정책에 따라 다양한 형태의 파력발전 기술을 개발하고 있으며, 실증시험을 수행 중임

- 2010년 해양에너지 개발계획에 따라 중국과학원(CAS, Chinese Academy of Science) 산하 광저우에너지연구소(GIEC, Guangzhou Institute of Energy Conversion), 국가해양기술센터(NOTC, National Ocean Technology Center), 중국해양대학교 등 여러 연구소와 대학에서 관련 기술을 개발하고 있음
 - 중국은 진동수주형, 진자형 등과 같은 파력발전시스템 개발연구를 진행하였음
 - 독자적인 혁신 기술 과정에서 안정성, 실용성, 고효율 등 핵심 현안에 대해 주력하고 있음
- 현재 중국에서는 10~300kW급 파력발전시스템을 개발함
 - 중국과학원 광저우 에너지연구소에서 개발한 10kW급 응식(鷹式) 파력발전시스템은 2012년 12월부터 1년 6개월간의 실증시험을 진행하였으며, 연속 6개월 이상 운영에 성공함



〈그림 6〉 응식(鷹式) 1호 실증시험

- 2014년에 100kW 파력발전 장치 개발이 시작되었으며 2015년 12월에 완산호(万山湖) 100kW 파력발전시스템이 설치되었고, 1MW 장치가 남중국해역에서 실증시험에 성공한 바 있음
- 중국 연근해의 파력에너지밀도가 상대적으로 낮은 수준이어서 향후 고효율, 고안정성 장치를 개발하는데 초점을 맞추고 있음

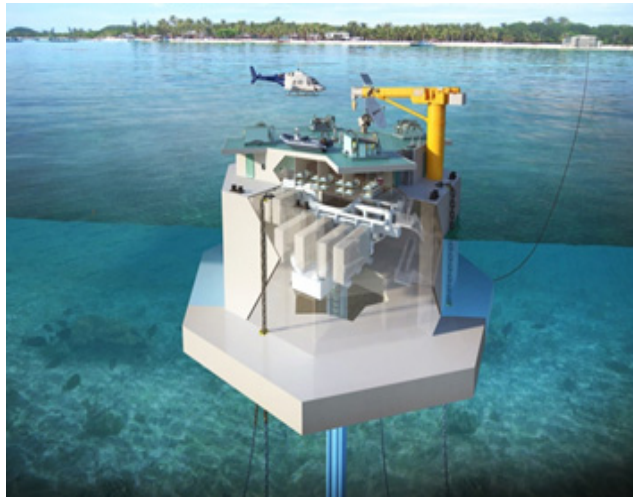
5. 해수온도차에너지 개발 동향

- ☑ 해수온도차발전 상용화를 위하여 미국, 프랑스, 일본, 한국 등에서 연구개발 및 실증을 추진하고 있음
- 한국의 경우 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소를 중심으로 관련 기술을 개발하고 있음
 - 2001년에 OTEC 플랜트 구조물(바지선 형식) 개발을 위한 기초연구와 한-인도 공동연구를 실시함
 - 2010년부터 14개 산학연 협력연구로 해수냉난방용 탠덤식 터보 히트펌프를 개발한 바 있고, 해수온도차발전 플랜트 관련기술을 연구 개발 중에 있음
 - R22²⁷⁾를 이용한 100W급 해수온도차발전 초소형 파일럿 플랜트를 설계, 제작 및 운전한 바 있음
 - 2013년에 R32²⁸⁾를 이용한 해수온도차 파일럿 플랜트를 설계 및 제작하여, 성공적으로 운전함으로써 세계 4번째로 해수온도차발전에 성공함
 - 2014년에 R245fa²⁹⁾를 이용한 미활용열 및 해양심층수를 이용한 200kW 온도차 플랜트의 설계 및 제작을 완료하고, 시운전 및 성능평가 장기운전을 준비 중에 있음
 - 2015년에 R32를 이용한 1MW급 해수온도차발전 실증플랜트는 육상형 및 해상형에 적용 가능하도록 상세설계를 실시하고, 프랑스 선급 BV로부터 기본승인(AIP, Approval In Principal)을 획득하였음

27) 클로로디플루오로메탄 냉매로써 분자식은 CHClF₂임

28) 메틸렌클로라이드 냉매로써 분자식은 CH₂F₂

29) 펜타플로로프로펜 냉매로 분자식은 CF₃CH₂CHF₂임. 기존 프레온가스와 성질이 유사하여 가전제품 등에 냉매로 쓰이지만 오존층을 파괴하지 않을 뿐 아니라 15도에서 기체로 바뀌는 특징이 있음



〈그림 7〉 1MW급 OTEC 해상형 플랜트 조감도

- 한편 국내 기업이 외국에서 직접 재생에너지를 보급하여 확보한 온실가스 감축실적에 대해서도 국내 거래가 인정됨에 따라 관련 세부기준에 대한 기준을 마련 중임
- '21년 적도 키리바시에 완공을 목표로 1MW급 해수온도차발전 실증플랜트 연구개발 및 핵심부품 제작에 착수함
- '19년 울산 인근 해역에서 실증실험을 성공적으로 수행한 바 있음



〈그림 8〉 1MW급 OTEC 플랜트 실험해역 성능시험(IEA-OES, 2019)

- ☑ 미국, 일본은 해수온도차발전 분야의 연구개발을 비교적 빨리 시작하였음
- 미국은 하와이를 중심으로 해수온도차발전 연구를 조기에 수행한 바 있음
- Makai Ocean Eng.는 하와이 NELHA³⁰에 105kW OTEC 파일럿 플랜트를 설치 및 가동 실험 중임

- Lockheed Martin은 미국 에너지국(DOE, Department of Energy)과 OTEC 플랫폼 위에서 제작 가능한 경제적인 10MW용 OTEC 라이저(직경10m, 길이 1,000m)를 개발
- Lockheed Martin은 반잠수식 100MW 해수온도차발전 플랜트 개념설계를 완료함
- 일본은 오키나와 쿠메지마(Kumejima)에 부존해 있는 해수온도차에너지를 활용하기 위한 연구를 수행하고 있음
 - 사가대학을 중심으로 기초연구를 추진하면서 코베제강 등을 통하여 오키나와 쿠메지마에 100kW 육상형 파일럿 플랜트를 설치하여 장기운전 실험 중임
 - 1MW OTEC 파일럿 플랜트 실험을 목표로 신에너지개발기구(NEDO)³¹⁾ 지원 하에 2013년 3월 50kW급 플랜트를 구축함
 - 2015년에 100kW급 플랜트를 구축하고, 2019년부터 해양심층수 10만톤/일 이상을 취수할 수 있는 취수관을 건설하기로 함에 따라 가까운 미래에 1MW급 OTEC 플랜트를 개발할 수 있을 것으로 기대
 - NEDO는 2020년에 10MW급, 2030년에 50MW급 해수온도차발전 플랜트 개발 로드맵을 작성함
- EU는 태평양과 대서양의 여러 자치령 도서지역에 해수온도차발전 플랜트를 보급하기 위하여 다양한 연구개발을 추진하고 있음
 - 2014년, 아쿠아에너지, DCNS 등에 1,000억원을 지원하여, 대서양 마르티네크섬에 10MW급 OTEC 플랜트 설치를 지원하고 있음
 - 프랑스 해양기업, Bardot 그룹은 인도양 몰디브에 300인용 eco-resort를 건설하기 위하여, 해수온도차발전, 해수냉난방 및 해수담수화 이용을 계획하고 있으며, 이를 통해 상용화를 추진하기로 확정 발표함
- 중국은 하이난 등 남중국해 해역에 해수온도차에너지 잠재량이 많으나 기술개발이 상대적으로 늦게 시작됨
 - 1980년대 초, 중국과학원 GIEC, NOTC, 중국해양대학교 등 여러 기관에서 해수온도차발전 기술개발을 착수함
 - 2005년에 천진대학교에서 혼합 온도차 에너지 이용을 위한 200W급 NH₃ 터빈을 개발하였고, 2012년에 FIO에서 공장 폐수를 이용하여 발전하는 15kW급 온도차발전장치를 개발하

30) NELHA는 1974년 지열발전, 해수온도차발전 등의 연구를 수행하기 위하여 설립된 연구소

31) 70년대 두 차례의 오일쇼크 이후 일본의 대체에너지 기술을 개발하고 증진하기 위하여 1980년 설립된 기구로, 2003년 독립행정법인으로 개편됨. 2011년 동일본지진 이후 원자력발전을 대체하기 위한 해상풍력, 해양에너지 분야의 대형 R&D 사업을 발굴하여, 지원하고 있음

였으며, 2017년에 고효율 NH₃ 터빈, 열변환기 등 핵심기술을 개발함

- 2004년에 천진대학교와 NOTC가 온도차발전을 이용한 수증글라이더를 개발하였으며 2011년 NOTC에서 소형 해양관측 플랫폼에 전력을 공급하기 위한 200W급 온도차발전 기술을 개발함
- 해수온도차발전의 핵심 기술인 열순환 방식은 open형, close형, 혼합형 순환 방식이 있으며 FIO에서는 세계 최고 수준인 close형 열순환 시스템이 15kW 발전 장치와 10kW 실험실 모의 시스템을 개발하고, 시험 및 운영에 성공함

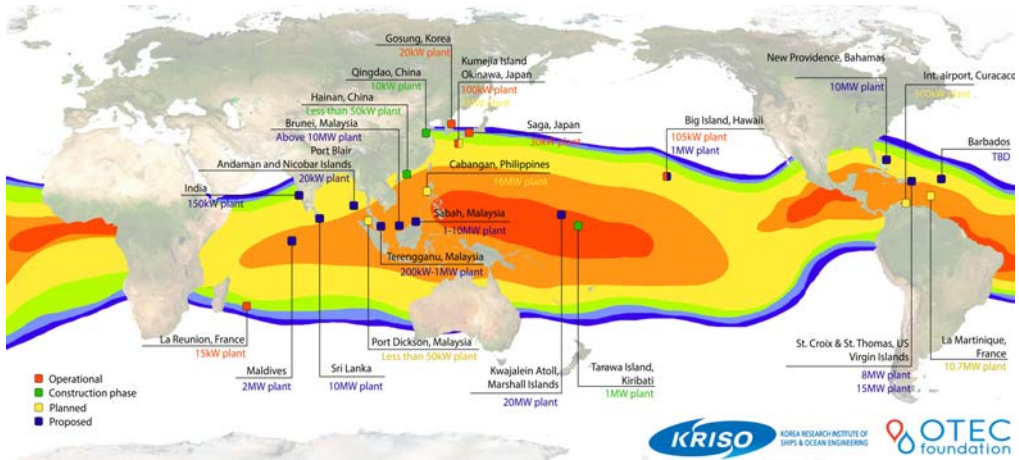
☑ 해수온도차발전의 경우, 태평양 및 대서양 도서국가에 대한 보급을 위하여 국제적으로 공동연구 및 대응을 매우 활발하게 이루어지고 있음

- 태평양 도서국가의 해수온도차발전 요구가 높음

- 키리바시, 투발루(16), 통가(17), 마셜아일랜드(18) 등은 한국에 1MW급 OTEC 플랜트의 실험역 실증 후 해수온도차발전에 대한 ODA 공여를 요청하고 있으며, 특히, 투발루 총리는 2016년 10월 한국을 방문하여, 해수온도차발전 기획 및 지원을 해양수산부 등에 요청한 바 있음

- 기술선진국은 해수온도차발전 플랜트를 이들 도서국가에 보급하기 위하여 협력을 강화하고 있음

- 미국 Lockheed Martin은 핵심장치(열교환기, 라이저 등)를 Makai Ocean Eng. 등을 통하여 지속적으로 연구개발 중이며, 중국과 협력하여 하이난섬 그린리조트 조성을 위한 10MW급 OTEC 플랜트 개발을 추진 중임
- 미국 OTEC International사, OTECo사 등이 도서국가에 대한 전력공급을 위하여 해수온도차발전 플랜트를 계획함
- 미해군은 인도양 도서국가에 전력과 담수를 공급할 수 있는 8MW급 OTEC 플랜트를 계획 중임
- OTECo.는 바하마에 10MW OTEC 플랜트 2기를 건설하고, 이를 해수냉난방 및 농수산물 등에 복합이용할 수 있는 사업을 추진하기로 MOU를 맺고, 자본유치를 진행하고 있음
- 프랑스는 DCNS가 핵심장치 개발과 함께 육상형 및 해상형 모델을 제안하면서, EU의 지원을 받아 16MW급 OTEC 플랜트를 대서양 마르티니크섬에 설치하기 위한 프로젝트 추진 중임



〈그림 9〉 OTEC 자원지도 및 개발/운영 중인 OTEC 플랜트(IEA-OES, 2019)

• 그림 영문 설명

Operational -> 운영 중, Construction Phase -> 건설 중, Planned -> 계획 중, Proposed -> 제안, plant -> 플랜트

India -> 인도(India)

La Reunion, France -> 프랑스령 레위니옹(La Reunion, France)

Maldives -> 몰디브(Maldives)

Sri Lanka -> 스리랑가(Sri Lanka)

Andaman and Nicobar Islands -> 안다만 & 니코바르 제도(Andaman and Nicobar Islands)

Brunei, Malaysia -> 브루나이, 말레이시아(Brunei, Malaysia)

Hainan, China -> 중국 하이난(Hainan, China)

Qingdao, China -> 중국 칭타오(Qingdao, China)

Gosung, Korea -> 한국 고성(Gosung, Korea)

Kumejima Island, Okinawa, Japan -> 일본 오키나와 쿠메지마(Kumejima, Okinawa, Japan)

Saga, Japan -> 일본 사가(Saga, Japan)

Cabangan, Philippines -> 필리핀 카방간(Cabangan, Philippines)

Sabah, Malaysia -> 말레이시아 사바(Sabah, Malaysia)

Terengganu, Malaysia -> 말레이시아 테렝가누주(Terengganu, Malaysia)

Port Dickson, Malaysia -> 말레이시아 포트딕슨(Port Dickson, Malaysia)

Kwajalein Atoll, Marshall Islands -> 마셜제도 콰절린환초(Kwajalein Atoll, Marshall Islands)

Tarawa Island, Kiribati -> 키리바시 타라와섬(Tarawa Island, Kiribati)

Big Island, Hawaii -> 하와이 빅아일랜드(Big Island, Hawaii)

New Providence, Bahamas -> 뉴프로비던스, 바하마(New Providence, Bahamas)

Int. Airport, Curacao -> 퀴라소 국제공항(Curacao)

Barbados -> 바베이도스(Barbados)

St. Croix & St. Thomas, US Virgin Islands -> 세인트 크로이, 세인트 토마스, 미국령 버진 제도(St. Croix & St. Thomas, US Virgin Islands)

La Martinique, France -> 프랑스령 마르티니크(La Martinique, France)

6. 해양에너지 상용화를 위한 향후 과제

- ☑ 해양에너지 개발 및 상용화를 위하여 해상풍력 및 태양광 발전과 유사한 수준의 경제성 확보가 필요함
 - 해양에너지는 既상용화된 해상풍력 및 태양광과 달리 초기개발단계(early development stage)에 있는 기술분야로 정책지원이 필요함
 - 다양한 종류의 해양에너지는 각각 기술수준과 경제성이 다르며 현재 조력발전을 제외하면 상용화된 기술이 없음
 - 따라서 실증단지 개발 사업을 통하여 기술성 및 경제성, 친환경성 등을 검증하면서 상용화 수준을 높이고 있음
 - 현재 재생에너지 중 육상풍력발전과 태양광발전의 경우 **그리드 패리티(grid parity)³²⁾**를 달성하여 화석연료를 사용하는 발전과 유사한 수준의 발전단가를 가지고 있으나 조류, 파력 등은 발전단가가 이보다 높음
 - 해양에너지 기술수준이 가장 높은 영국에서도 해양에너지의 목표단가가 해상풍력 목표단가보다 높게 고려되고 있음
 - 영국의 경우 우리나라의 RPS 제도와 유사한 **ROC(Renewable Obligation Certificate)³³⁾** 제도를 운영하고 있으며, 재생에너지 사업자의 경우 CfD(Contract for Difference)를 통하여 발전차액을 보상받도록 하고 있음
 - 영국의 CfD 목표단가(strike price)는 해상풍력의 경우 2021년 이후 105, 100, 56, 53 (£/MWh)로 비용이 낮아지고 있으나, 파력발전의 경우 310, 300, 281, 268 (£/MWh), 조류발전의 경우 300, 295, 225, 217 (£/MWh)로 해상풍력에 비하여 목표단가가 높고, 현재까지 실제 낙찰된 사례가 없음(출처: IEA-OES, 2018, 2019, 2020)
 - 해상풍력단지에 비하여 해양에너지 발전단가는 초기개발단계의 기술로 규모가 작고 따라서 비용이 높은 상황임. 따라서 해양에너지 기술 상용화를 위해서는 정부의 정책적 지원(REC 판매, 세제 혜택 등) 및 대기업의 **전력구매계약(PPA³⁴⁾** 등으로 실증사업 등을 먼저 추진하

32) 재생에너지의 단가가 일반 전력회사(화석연료 등)에서 전력을 구입하는 가격보다 작거나 동등한 수준의 비용으로 공급받을 수 있는 상황을 의미. 이는 곧 해당 재생에너지의 경제성이 기존 화석연료와 동등 이상의 수준에 도달하였음을 의미하며, 상용화에 있어 중요한 척도가 되고 있음

33) 영국의 재생에너지 정책의 일환이며, ROC는 재생에너지 발전사업자가 생산한 전력을 전력공급자에 팔 수 있는 자격을 의미함. 영국 에너지시장규제기관 오프젬(Ofgem)은 전력공급자에게 연간 전력판매량의 일정비율을 재생에너지로 생산된 전력으로 공급하도록 강제하고 있어 우리나라의 ROC와 매우 유사함

34) 발전사업자가 생산한 전력을 전력시장을 통하지 아니하고 대기업 등과 직접 장기계약하여 공급하는 방식. 미국의 경우 마이크로소프트, 델 등의 기업이 풍력사업자와 PPA를 체결하고 있음

고, 이후 단지규모를 확장시켜 가면서 경제성을 확보할 필요가 있음

☑ 해양에너지 상용화를 위해서는 경제성과 함께 친환경성에 대한 문제 해결이 필요함

- 재생에너지의 친환경성에 대한 인식 개선이 필요함
 - 미세먼지, 탄소배출 등을 저감하기 위해서는 전력사용량을 줄이는 동시에 재생에너지로 전력을 생산하고자 하는 노력이 필요함
 - 조력발전의 경우에도 갯벌 면적 감소 등의 환경적인 영향이 있지만 동시에 미세먼지나 이산화탄소 등의 환경부하물질을 배출하지 않는 친환경성을 가지고 있음
 - 따라서 해양에너지 개발 시 환경측면에서의 장단점을 비교하여 친환경성에 대한 인식이 확장되고 주민참여가 가능한 사업을 통하여 해양에너지 상용화를 앞당길 수 있도록 하여야 함
- 해양에너지에 대한 환경영향평가 기준 개발 필요
 - EMEC의 경우 파력발전 개발이 해양환경에 미치는 영향을 연구하기 위해 EMFF(European Maritime and Fisheries Fund)의 지원을 받아 SEA Wave(Strategic Environmental Assessment of Wave energy technologies) 과제를 수행 중에 있으며, 현재 영국, 포르투갈, 핀란드, 벨기에, 스웨덴, 아일랜드 각국의 연구자, 개발자 등이 참여하고 있음
 - IEA-OES에서도 OES-Environmental 과제를 지원하고 있으며, 이 과제를 통하여 해양에너지 개발에 따른 소음, 진동, 전자기적 영향 등이 조류(鳥類), 해양동식물 등에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고 있음
 - 해양에너지 설치와 운영에 따른 해양환경영향을 이해하고, 향후 산업화 시 발생할 수 있는 리스크를 최소화하기 위하여 그 필요성이 높음
 - 조류발전 개발이 해양환경에 미치는 영향을 규명하기 위하여 해양환경 모니터링 및 데이터베이스 구축, 해양환경영향에 대한 과학적 분석이 필요함
 - 조류발전에 대한 주민수용성 제고 및 이해도 향상을 위해서는 조류발전으로 인한 해양환경영향을 분석하고 객관적인 자료를 제시하는 것이 필요
- 해양에너지에 대한 국제기술표준 제정 필요
 - 풍력발전, 태양광발전의 경우 IEC 국제표준이 제정되어 있으며, 국내표준(KS) 역시 국제표준을 국내 부합화하여 적용하고 있음
 - 그러나 해양에너지의 경우 여러 기술이 개발되고 있는 상용화 이전 단계로 현재 국제표준(IS, International Standards)이 아닌 기술지침서(TS, Technical Specification) 단계임
 - 현재는 이러한 기술지침을 따라 설계 및 성능평가가 이루어지고 있으며, 향후 상용화 단계

에 접어들게 되면 기술지침을 국제표준으로 강화할 예정임

- 현재까지 재정되어 사용되고 있는 기술지침은 다음과 같이 15편이 있으며, 현재 국내 부합화를 계획 중임(출처: IEC)
 - IEC TS 62600-1:2020 Part 1: Vocabulary
 - IEC TS 62600-2:2019 Part 2: Marine energy systems - Design requirements\
 - IEC TS 62600-3:2020 Part 3: Measurement of mechanical loads
 - IEC TS 62600-4:2020 Part 4: Specification for establishing qualification of new technology
 - IEC TS 62600-10:2015 Part 10: Assessment of mooring system for marine energy converters (MECs)
 - IEC TS 62600-20:2019 Part 20: Design and analysis of an Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) plant - General guidance
 - IEC TS 62600-30:2018 Part 30: Electrical power quality requirements
 - IEC TS 62600-40:2019 Part 40: Acoustic characterization of marine energy converters
 - IEC TS 62600-100:2012 Part 100: Electricity producing wave energy converters - Power performance assessment
 - IEC TS 62600-101:2015 Part 101: Wave energy resource assessment and characterization
 - IEC TS 62600-102:2016 Part 102: Wave energy converter power performance assessment at a second location using measured assessment data
 - IEC TS 62600-103:2018 Part 103: Guidelines for the early stage development of wave energy converters - Best practices and recommended procedures for the testing of pre-prototype devices
 - IEC TS 62600-200:2013 Part 200: Electricity producing tidal energy converters - Power performance assessment
 - IEC TS 62600-201:2015 Part 201: Tidal energy resource assessment and characterization
 - IEC TS 62600-300:2019 Part 300: Electricity producing river energy converters - Power performance assessment
 - IEC TS 62600-301:2019 Part 301: River energy resource assessment

국민기술제안 제언

◆ 국민기술제안 주요 내용

- 본 해양에너지를 활용한 지속가능 에너지 생산과 관련하여 국민들은 ① 조류발전선을 활용한 전력생산 기술, ② 미세먼지 해결을 위한 신재생에너지 발전장치, ③ 재생에너지 발전방식(수력양수발전타워 발전소) 등의 내용을 제안함
- 미세먼지 저감에 있어 재생에너지의 사용은 매우 필수적인 것이며, 국민들 또한 이를 잘 인식하고 있는 것으로 생각됨. 현재 해양에너지의 다양한 방식 중 조력발전과 조류발전 형태의 기술이 제안되고 있는데, 이는 조력발전의 경우 시화호 조력발전소와 기존 수력발전소로부터 아이디어를 얻고, 그리고 조류발전의 경우 기존 풍력발전으로부터 새로운 아이디어를 구상하기 비교적 용이하였기 때문으로 생각됨. 국가기후환경회의의 국민기술제안을 통하여 파력발전이나 온도차발전에 대한 국민들의 많은 아이디어가 제안되고, 실제 활용으로도 이어질 수 있기를 바랍.

◆ 총평 / 전문가 의견

- 현재 제안된 국민기술제안을 현실화하기 위해서는 우선 제안기술에 대한 합리적 절차에 따른 성능검증이 필요함. 이를 위해서는 관련 연구를 수행하고 있는 대학, 연구소와의 공동연구를 추천하고자 함. 실제 많은 중소기업에서 재생에너지 관련 기술을 제안하고 있는데, 그중 많은 기술이 합리적 절차에 따른 검증 없이 진행되고 있음.
- 따라서 실내실험 또는 수치해석을 통하여 성능을 검증한 후, 조금 더 큰 규모의 실험을 수행할 수 있으며, 이 단계에서는 정부의 다양한 국가연구개발사업으로부터 지원을 받는 것이 필요함. 중소기업의 경우 중소벤처기업부에서 지원하는 많은 사업(www.smtech.go.kr 참조)이 있으며, 해양분야의 경우 해양수산부에도 기술개발 및 창업지원 과제(www.kimst.re.kr 참조)가 많이 있음. 한편, 산업통상자원부에서도 에너지 관련 R&D를 많이 지원하고 있음(www.ketep.re.kr 참조).
- 이러한 연구개발사업 참여를 통하여 제안기술을 구체화하고 고도화할 수 있을 것으로 생각하며, 특히 최종단계에서는 비용을 줄이고, 안전성을 높이는 연구개발이 필요함.

참·고·문·헌·

1. 국립환경과학원 (2019) : 「2016 국가 대기오염물질 배출량」
2. 해양수산부 (2019) : 「2030 친환경 관공선 전환계획」
3. 해양수산부 (2019) : 「환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률(약칭 : 친환경선박법)」, '20년 1월 1일 시행
4. Bloomberg new energy finance (2019) : 'Electric Vehicle Outlook 2019'
5. HSTariffStat (2017) : 국내 내연기관 선외기 수입 규모
6. 한국과학기술기획평가원 (2019) : 2018년 기술수준평가(기계·제조)
7. E-Ferry Project (2015) : Horizon 2020
8. 중소조선연구원 (2019) : 「전기추진 중소형 선박 실시간 모니터링 및 통합에너지 관리 시스템 개발」 공동기획 연구 최종 보고서
9. 한국과학기술기획평가원 (2019) : 2018년 기술수준평가(기계·제조)
10. IBK 경제연구소 (2019) : Weekly IBK 경제브리프, 레저용 선박의 부상과 기회요인 분석
11. IDTheEx (2017) : Electric Boats and Ships 2017-2027
12. 중국 해사안전청 (2018) : Fishing Boat Renovation Project
13. 해양수산부 (2020) : 통계시스템
14. Government Printing Office (2017) : Code of Federal Regulations
15. City of Amsterdam (2019) : Clean Air Action Plan
16. Interferry (2015) : BB GREEN - the world's first 30knots fast battery powered Air Supported commuter ferry
17. 人民代表大会常务委员会 (2012) : 北京市河湖保护管理条例
18. 해양수산부 (2019) : 2019년 해양수산사업 시행지침서
19. 환경부 (2016) : 상수원관리규칙
20. 환경부 (2016) : 팔당·대청호 상수원 수질보전 특별대책지역 지정 및 특별종합대책
21. 해양수산부 (2020) : 2020년도 전기추진 차도선 및 이동식 전원공급 시스템 개발사업
22. 한국산업기술진흥원 (2017) : 2025년 미래 유망 신산업의 인력수요 전망
23. SE BOAT 회사 홈페이지
24. WIRED (2014) : Stockholm's New Electric Ferry Takes Just 10 Minutes to Charge, 2014.04.29
25. Ship Technology (2015) : Ampere Electric-Powered Ferry, 2015.06.01
26. Torqeedo (2016) : Torqeedo powers public transportation on the water, 2016.08.09
27. electrive.com (2019) : Torqeedo to have delivered 100,000 electric drives, 2019.11.19
28. 한겨레 (2017) : 중국 세계 첫 전기화물선 띄웠다, 2017.12.14
29. plugboats.com (2020) : Yamaha electric motor unveiled - good for e-boats?, 2020.02.11

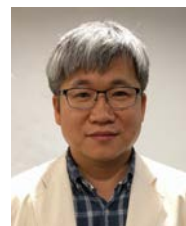
30. American Machinist (2018) : General Dynamics Draws USN Submarine R&D, Design Work, 2018.12.13
31. Bioenergy (2017) : BB Green electric commuter ferry fetches award at global Marine Conference, 2017.06.19.

저자소개

이진학

한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터
책임연구원/센터장

T. 051-664-3527 Email: yijh@kiost.ac.kr



기획편집

국가기후환경회의

이동규 국장(국제과학기술국)

윤영기 과장(과학기술협력과)

담당 **오상열** 선임(과학기술협력과) / **김종익** 민간4급(과학기술협력과)

T. 02-6744-0513, kji804@korea.kr

※ 본 자료는 국가기후환경회의(www.ncca.go.kr)에서 다운로드 가능합니다.

2021-04

미세먼지 기술분야 이슈페이퍼

해양에너지를 활용한 지속가능 에너지 생산

발행일 | 2021년 2월

발행처 | 국가기후환경회의
서울 종로구 새문안로 7 콘코디언빌딩 13층
T. 02-6744-0500

문 의 | 국가기후환경회의 과학기술협력과

본 보고서의 내용은 연구자 등의 견해이며, 국가기후환경회의의 공식입장과 다를 수 있습니다



미세먼지 문제 해결을 위한
국가기후환경회의



본 인쇄물은 친환경용지와 공기름 잉크를 사용하여 만들어졌습니다.