BSPE9956G-11634-7

KIOST 한국해양과학기술원

부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 개발 기획 보고서

2018. 4.

한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 「부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 개발 기술 기획 보고서」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018년 4월

연구책임자 : 한 택 희

참여연구원 박 진 순

이 진 학

오 상 호

김 민 욱

김 원 술

고 동 휘

박 준 석

김 성 원

홍 혜 민

이 주 연

요 약 문

<table>
<tr><td>과제목표</td><td colspan="3">○ 해양 에너지 발전 효율 증대를 위한 신개념 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 제시 및 이의 구현을 위한 플랫폼 핵심 원천 기술 도출 및 연구과제 기획.</td></tr>
<tr><td>과제내용</td><td colspan="3">○ 부유식 조류-풍력 복합발전 구성 및 적지 도출
- 해양에너지 기술 및 시장 현황 조사/분석
- 해상풍력-조류 복합발전 구성 방안 도출
- 해상풍력-조류 복합발전 적지 분석 및 선정

○ 해양에너지 부유식 플랫폼 기술 조사 및 분석
- 부유식 플랫폼 기술 현황 분석
- 부유식 플랫폼 해석/시공 기술 분석
- 부유식 플랫폼 건설 핵심기술 분석
- 부유식 조류-풍력 복합발전 플랫폼 개발 필요 기술 도출</td></tr>
<tr><td rowspan="3">중심어</td><td>해양에너지</td><td>해상풍력</td><td>부유식</td></tr>
<tr><td>플랫폼</td><td>조류발전</td><td>복합발전</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

목 차

1. 연구개발 목표 및 필요성 1

1.1. 연구 추진 배경 1

1.2. 연구 목표 3

1.3. 부유식 복합발전의 필요성 4

2. 국내외 기술동향 11

2.1. 해양에너지 기술동향 11

2.1.1. 조력발전 13

2.1.2. 파력발전 15

2.1.3. 조류발전 19

2.1.4. 해상풍력발전 25

2.2. 해양에너지 복합발전 기술 동향 30

2.2.1. 파력-풍력 복합발전 31

2.2.2. 조류-풍력 복합발전 33

2.2.3. 기타 복합발전 35

3. 국내외 산업동향 39

3.1. 해양에너지 산업/시장 동향 39

3.1.1. 조력발전 40

3.1.2. 파력발전 42

3.1.3. 해상풍력발전 43

3.2. 부유식 조류-풍력 복합발전 시장 동향 51

4. 연구개발과제 도출 ····· 55

4.1. 연구필요 기술 ····· 55

4.1.1. 해양에너지 적지 분석 기술 ····· 56

4.1.2. 부유식 구조체 거동 안정화 기술 ····· 60

4.1.3. 부유식 플랫폼 기술 ····· 62

4.1.4. 부유식 구조물 운영 및 유지관리기술 ····· 74

4.2. 기술개발 목표 및 내용 ····· 78

4.2.1. 조류-해상풍력발전 적지 선정 기술개발 ····· 78

4.2.2. 부유식 구조체 거동 안정화 기술 ····· 80

4.2.3. 부유식 조류-해상풍력발전 플랫폼 개발 ····· 83

4.2.4. 부유식 조류-해상풍력 발전시스템 운영/유지관리 기술 개발 ···· 84

4.3. 로드맵 및 추진계획 ····· 87

5. 경제성 분석 ····· 89

5.1. R&D과제 경제성분석 방법론 개요 ····· 89

5.1.1. R&D과제 경제성 분석 개념 및 방법론 ····· 89

5.1.2. 국가 R&D사업 예비타당성조사 경제적 타당성 분석 방법론 ····· 91

5.2. 경제성 분석 방법론 설정 ····· 97

5.2.1. 비용항목 도출 ····· 97

5.2.2. 편익항목 도출 ····· 99

5.2.3. 편익항목별 분석 모델 ····· 99

5.2.4. B/C Ratio 산출 방법론 ····· 104

5.3. 연구과제 경제성 분석 ····· 105

5.3.1. 비용 분석 ····· 105

5.3.2. 편익 분석 ····· 106
5.3.3. B/C분석 ····· 108

6. 참고문헌 ····· 111

표 목차

<표 1> 제 4차 신재생에너지 기본계획 (’ 14.9, 산업부) 에너지 보급목표(%) ·····9
<표 2> 해양에너지 종류 ·····12
<표 3> World ocean energy reserves ·····12
<표 4> 국내 신재생에너지 수요 전망 및 개발 목표 ·····40
<표 5> 국내 조력발전 시장 현황 및 전망 ·····40
<표 6> 에너지원별 발전단가 ·····42
<표 7> 주요 국가 해상풍력 시장 전망(MW) ·····44
<표 8> 다양한 분야의 부유식 구조물 적용 사례 ·····61
<표 9> 프로젝트 별 부유식 해상풍력 플랫폼의 특징 (한국건설기술연구원, 2014) ·····72
<표 10> 조류-해상풍력발전 적지 선정 기술개발 목표 및 내용 ·····79
<표 11> 조류-해상풍력발전 적지 선정 기술개발 추진일정 및 소요예산 ·····80
<표 12> 부유식 구조체 거동 안정화 기술 연구목표 및 연구개발 내용 ·····81
<표 13> 부유식 구조체 거동 안정화 기술 연구개발 추진일정 및 소요예산 ·····82
<표 14> 부유식 조류-해상풍력발전 플랫폼 개발 연구목표 및 연구개발 내용 ·····83
<표 15> 부유식 조류-해상풍력발전 플랫폼 개발 연구 추진일정 및 소요예산 ·····84
<표 16> 부유식 조류-해상풍력 발전시스템 운영/유지관리 기술 개발 연구목표 및 연구개발 내용 85
<표 17> 부유식 조류-해상풍력 발전시스템 운영/유지관리 기술 개발 연구 추진일정 및 소요예산 86
<표 18> 무형자산 경제적 가치 분석 방법론 ·····90
<표 19> 수익접근법 기반 경제성분석 방법 ·····91
<표 20> 연구개발부문 예비타당성조사의 편익 반영여부 구분 ·····92
<표 21> 연구개발부문 예비타당성조사의 편익항목 구분 ·····93
<표 22> 국가연구개발사업의 총비용 분석을 위한 분류체계 ·····97
<표 23> 총 사업비와 총 비용의 구분 ·····98
<표 24> 동 사업 관련 IPC 분야 특허인용수명(TCT) 지수 ·····101
<표 25> 부유식 복합발전 관련분야 유사과제 목록(2011-2016) ·····103
<표 26> 유사 분야 상용화 기술개발사업을 위한 연구비 및 기간 조사 ·····106
<표 27> 총 비용 산출 ·····106
<표 28> 동 사업 복합발전 연간 설치량(MW) 추정 ·····107
<표 29> 동 사업 복합발전 시장규모(억원) 추정 ·····108
<표 30> 동 사업 복합발전 편익 추정 ·····108

그림 목차

[그림 1] 전세계 발전량 중 신재생 에너지 비율 ·····1
[그림 2] 2017년도 국내의 전원설비 현황 ·····2
[그림 3] 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 구상안 ·····3
[그림 4] 파력-해상풍력 복합발전 사례(덴마크 포세이돈 및 영국 Green Ocean Energy) ·····6
[그림 5] 부유식 풍력발전 시스템 개념도 및 명칭 ·····7
[그림 6] 수심에 따른 해상풍력 foundation의 건설비 ·····7
[그림 7] TLP의 발전단가 변동 전망 (NREL, 2004) ·····7
[그림 8] 해상풍력발전 단가 전망 ·····8
[그림 9] 우리나라의 심해풍력 자원량 분포 ·····8
[그림 10] 에너지원과 지지구조물에 따른 복합발전의 분류 ·····8
[그림 11] 국내 조력발전 시장 현황 및 전망 ·····14
[그림 12] 조력발전소 주요 개발 현황 ·····14
[그림 13] 파력에너지 관련기술의 선진국 대비 기술수준 ·····17
[그림 14] P2 파력발전기 ·····17
[그림 15] Oyster 파력발전기 ·····18
[그림 16] AWS 파력발전기 ·····19
[그림 17] 국가별 주요 파력발전 시설 및 개발계획 ·····19
[그림 18] HAT 방식과 VAT 방식의 특성 비교 ·····20
[그림 19] Seaflow 조류발전 장치 ·····21
[그림 20] SeaGen 조류발전 장치 ·····21
[그림 21] 계류식 조류발전 ·····22
[그림 22] AK-1000 조류발전 터빈 ·····22
[그림 23] 원형 조류발전 터빈 ·····23
[그림 24] Nautiricity사 조류발전 장치 ·····23
[그림 25] Verdant사 조류발전 장치 ·····24
[그림 26] Open Hydro 조류발전 장치(좌) MCT 조류발전 장치(우) ·····24
[그림 27] 해상풍력단지 구축 추진 계획 ·····25
[그림 28] 일본 풍력발전 도입량과 증가율 ·····27
[그림 29] 일본 풍력발전 도입 로드맵 ·····28
[그림 30] 후쿠시마 부유식 해상 풍력발전 설비 및 유체부분 ·····29

[그림 31] 후쿠시마 앞바다의 설치 해역 및 설비 ·····29
[그림 32] 후쿠시마 부유식 해상 풍력발전 실증 프로젝트 계획 ·····30
[그림 33] 후쿠시마 부유식 풍력발전 유압드라이브 구조 ·····30
[그림 34] 불규칙적인 풍력발전 사례(독일) ·····31
[그림 35] KRISO에서 연구 중인 10MW 복합발전(풍력-파력에너지) 플랫폼 ·····32
[그림 36] Wave Treader 개념도 ·····33
[그림 37] 하이브리드 해상풍력-조류 복합발전 지지구조 ·····34
[그림 38] 조류-풍력 복합발전기 디자인 ·····35
[그림 39] Ocean Energy Island Module의 구조 ·····36
[그림 40] Ocean Energy Island Complex ·····36
[그림 41] Energy Island 개념도 ·····37
[그림 42] 일본의 해양 복합발전장치 설치장소와 장비 및 향후 해양발전팜 조감도 ·····38
[그림 43] 전 세계 해상풍력 시장 규모 ·····43
[그림 44] 해상풍력 시장동향 및 전망(MW) ·····43
[그림 45] 해상풍력 주요 업체의 시장 개발 현황(GW) ·····44
[그림 46] 세계 풍력업체 시장 점유율 현황 ·····45
[그림 47] 미국의 풍력발전 개발 현황 ·····47
[그림 48] 일본 풍력발전 시장 규모 확대 전망치 ·····48
[그림 49] 영국의 해상풍력 발전계획 (자료 : 주영대사관, 2011) ·····49
[그림 50] 세계 최초의 부유식 해상 풍력 발전소인 하이윈드 ·····54
[그림 51] 제안 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 ·····55
[그림 52] 제안 시스템의 확장 ·····55
[그림 53] 개발 조건 및 연구 필요 기술 ·····56
[그림 54] Global offshore annual wave power level distribution (출처: Cornett(2008)) ·····57
[그림 55] Global semidiurnal tidal amplitude (출처: NASA) ·····57
[그림 56] 스코틀랜드 주변해역의 해양에너지 자원 분포도(출처: HMSO) ·····58
[그림 57] 한반도 남부해역의 조류에너지 자원분포도(한국해양과학기술원) ·····59
[그림 58] 우리나라 연간에너지밀도 분포도(국립해양조사원) ·····59
[그림 59] 한반도 해상 풍력에너지 자원분포도(에너지기술연구원) ·····59
[그림 60] 우리나라 서남해의 조류-해상풍력에너지 자원분포도 ·····60
[그림 61] 해양 구조물의 종류 (Pedro Gomes, 2014) ·····62
[그림 62] TLP (www.rigzone.com) ·····63
[그림 63] 원통부이형 (Pedro Gomes, 2014) ·····63

[그림 64] 반잠수식 구조물 (www.offshore-mag.com) ·····64
[그림 65] LNG-FPSO의 주요장비 (www.gasnews.com) ·····64
[그림 66] 부유식 플랫폼의 종류 및 특성 ·····65
[그림 67] 부유식 구조체의 설계시 고려사항 ·····65
[그림 68] 부유식 구조체의 설계과정 ·····66
[그림 69] Blue H의 부유식 해상풍력발전기 ·····68
[그림 70] Blue H의 부유식 해상풍력 발전기 프로토타입 ·····68
[그림 71] HYWIND 프로젝트의 SPAR타입 풍력발전 ·····69
[그림 72] SWAY 프로젝트의 풍력발전기 ·····69
[그림 73] Wind Sea 프로젝트의 풍력발전기 ·····69
[그림 74] Wind Float 프로젝트의 반잠수식 해상풍력단지 ·····70
[그림 75] Alstom사의 TLB타입의 풍력발전 ·····70
[그림 76] PelaStar 부유식 풍력발전기 ·····70
[그림 77] 부유식 해상 풍력발전기 Fukushima Mirai ·····71
[그림 78] 부유식 해상 변전소 Fukushima Kizuna ·····71
[그림 79] 플로팅 구조물에 대한 계측, 평가 및 모니터링 기술 관련 논문 편수 ·····74
[그림 80] 모듈형 부유식 구조물에 대한 응답모니터링을 위한 센서 네트워크 개요도 ·····75
[그림 81] 인공지능 기반 방재기술 관련 논문 편수 ·····76
[그림 82] 웨이블렛, 신경망, 힐버트 변환 등을 딥러닝과 연계한 알고리즘 개요도 ·····77
[그림 83] 개발필요 핵심기술 및 연구내용 ·····78
[그림 84] 로드맵 ·····87
[그림 85] 연구추진 계획 ·····87
[그림 86] 연차별 소요 예산 ·····88
[그림 87] R&D과제 경제성분석의 범위 ·····89
[그림 88] 국가해상풍력단지(Round1-3) 계획 ·····101
[그림 89] 비용편익분석 산식 ·····105

1. 연구개발 목표 및 필요성

1.1. 연구 추진 배경

□ 전 세계적으로 풍력, 조력, 태양광 등과 같은 신재생 에너지에 대한 관심이 증대되고 있으며, 이중 발전효율이 높은 풍력발전에 대한 산업이 유럽과 미국, 중국 등지에서 활발히 진행 중

○ 특히, 2011년 일본 도호쿠 지방에서 발생한 311 대지진에 의한 후쿠시마 원자력 발전소의 파손 및 제어불능에 따라 원자력 발전소의 안전성에 대한 불안감이 상승

○ 이후 독일과 일본에서는 기존의 원자력 발전소를 폐쇄하고 신재생에너지로 대체하는 방안을 모색하고 있으며, 이중 풍력발전이 가장 중요한 부분을 차지

○ 원자력 발전소 수출국인 프랑스를 제외하면 영국, 독일, 덴마크 등의 대다수 유럽 국가들은 육상 및 해상풍력 발전에 매우 적극적

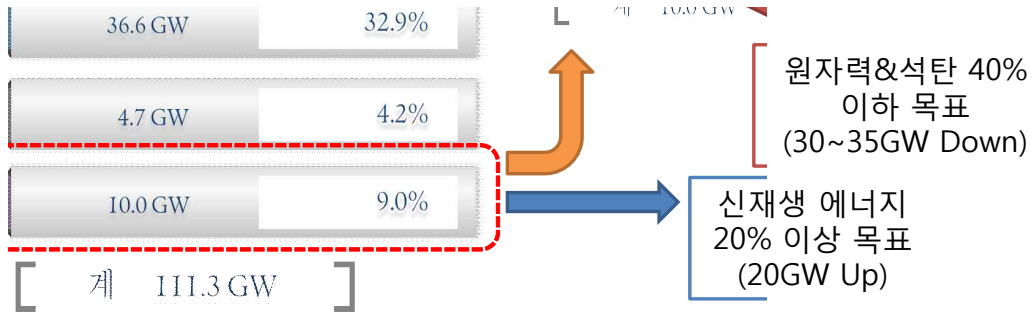
- 글로벌데이터 연구소가 최근 발표한 보고서에 따르면, 영국 해상 풍력 시장은 정부의 적극적인 정책적 지원에 힘입어 현재까지 설치된 해상풍력 용량의 절반 이상을 차지하고 있으며, 2006~2013년 사이 영국의 해상 풍력 발전은 연평균 42.9% 수준으로 크게 성장
- 글로벌데이터 연구소는 2020년까지 연평균 16.9% 성장이 이어질 것으로 전망
- 영국이 예측 기간 동안 세계 누적 설치용량의 36.4%를 점유해 세계 시장을 선도할 것으로 예상

[그림 1] 전세계 발전량 중 신재생 에너지 비율

○ 국내에서도 해상풍력발전단지 건설 사업이 지연되고 있기는 하나, 서남해의 2.5GW, 전남의 4GW의 해상풍력단지 개발계획 등을 추진

○ 육상풍력 발전 시 소음에 의한 민원, 발전 설비 대형화 문제 등으로 인하여 양질의 바람을 얻어 발전효율을 증대시킬 수 있는 해상풍력발전 단지 건설이 활발해지고 있으나, 천해에 건설되고 있는 해상풍력단지의 경우 각종 민원에 의해 사업이 지연

○ 따라서 이의 해소 방안으로서 심해에 해상풍력단지를 건설하고자 하는 움직임이 있음



[그림 2] 2017년도 국내의 전원설비 현황

□ 해양수산부에서는 2025년부터 2030년에 1GW 규모의 해양에너지 인프라 조성 및 본격적인 상업 발전을 위한 대규모 인프라 개발에 대한 해양에너지 개발 목표를 설정함

○ 조류: 인천·서남해지역을 중심으로 약 500MW 조류발전단지 조성 - 인천(덕적도), 진도(장죽수도, 맹골수도 등)

○ 파력: 남해 해역을 중심으로 100MW 규모의 부유식 파력발전단지 개발하고, 항만·도서지역 방파제와 연계한 20MW급 소형파력발전시스템 구축

○ 복합: 해상풍력, 파력 등을 활용한 200MW 규모의 복합 발전단지 구축

○ 200MW의 복합발전 단지 구축을 위해서는 부유식 조류-풍력 복합발전 필요

□ 이에 본 연구에서는 심해 해상풍력 단지 건설을 위한 핵심 사항은 해상풍력발전기를 설치할 수 있는 부유식 플랫폼이라 판단하며, 해양에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 조류 발전 기술을 접목한 부유식 플랫폼의 개발하고자 함

○ 정부의 해양에너지 인프라 개발 및 조성계획 달성을 위한 부유식 조류-풍력 복합발전 플랫폼 및 시스템 핵심 기술 확보 필요

1.2. 연구 목표

□ 해양 에너지 발전 효율 증대를 위한 신개념 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 제시

□ 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 구현을 위한 플랫폼 핵심 원천 기술 도출 및 연구과제 기획

Extension

[그림 3] 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 구상안

○ 부유식 조류-풍력 복합발전 구성 및 적지 도출

- 해양에너지 기술 및 시장 현황 조사/분석
- 해상풍력-조류 복합발전 구성 방안 도출
- 해상풍력-조류 복합발전 적지 분석 및 선정

○ 해양에너지 부유식 플랫폼 기술 조사 및 분석

- 부유식 플랫폼 기술 현황 분석
- 부유식 플랫폼 해석/시공 기술 분석
- 부유식 플랫폼 건설 핵심기술 분석
- 부유식 조류-풍력 복합발전 플랫폼 개발 필요 기술 도출

○ 부유식 조류-해상풍력발전 시스템 계측 기반 운영 및 유지관리 기술 개발 분석

- 부유식 구조물에 대한 계측, 평가 및 모니터링 기술 조사
- 인공지능 기반 유지관리기술 조사

1.3. 부유식 복합발전의 필요성

□ 해양에너지 기술개발은 현재까지 조력 및 조류에너지 중심으로 파력, 해양온도차 발전 등 개별 에너지원별 실용화 기술개발로 추진 중이나 다수의 문제점이 존재

○ 우리나라는 해역별로 발전 가능한 해양 에너지의 특성이 다르고, 해저 지반도 해역별로 다름

○ 해양에너지 개발에 있어서 해결해야 할 많은 문제점 존재

- 울돌목 시험조류발전소 건설 시 구조물 제작 및 시공비용이 전체 건설비의 72%를 차지하는 등 높은 구조물 시공비는 해양에너지 개발에 있어 경제성을 감소시키는 주요 원인임
- 해상풍력도 육지에서 멀리 떨어진 해상에서 발전하게 되면서 케이블 설치 등 송전비용이 과다하게 증가하여 경제성 감소의 우려가 있음
- 또한 풍력과 파력의 경우 불규칙적인 발전으로 인하여 전력품질이 기존 화력발전 및 원자력발전에 비하여 매우 낮은 단점
- 덴마크의 경우 이와 같은 불규칙적인 발전으로 인하여 70% 이상의 전력을 원가 이하로 주변국에 수출하는 실정

○ 또한 조력의 경우 상용화 단계에, 조력 및 파력은 현장실증단계에 도달하였으므로 이러한 에너지원별 요소기술들을 융·복합하여 복합발전 및 다양한 형태의 복합발전 단지구축을 위한 연구개발이 필요

□ 이러한 문제를 해결할 수 있는 대안으로 복합발전이 대두

○ 조류-해상풍력 복합발전의 경우 발전량이 규칙적인 조류발전의 특성이 반영되어, 풍력의 불규칙성을 일정 부분 해소할 수 있는 장점 보유

- 해상풍력에 비하여 경제성이 낮은 파력발전 또는 조류발전을 복합 개발하는 경우, 경제성을 향상시킬 수 있기 때문

○ 우리나라는 해역별로 발전 가능한 해양 에너지의 특성이 다르고, 해저 지반도 해역별로 다르므로 해역별로 다양한 해양에너지 복합 발전의 개발안이 존재

- 해역별 특성에 따라 서해안은 해상풍력-조류 및 해상풍력-조류 복합발전 개발안, 남서해안은 해상풍력-조류-파력 복합발전 개발안, 남동해안은 기존의 슬릿케이슨 방파제에 파력발전과 해상풍력을 동시에 수행하는 개발안, 동해안은 초대형 부유식 에너지 아일랜드에 해상풍력, 파력, 해수온도차, 바이오, 태양광을 동시에 할 수 있는 초대형 부유식 해양에너지 복합발전 개발안을 제안

○ 해상풍력 발전과 파력발전은 개발 대상 적지가 일치하는 경우가 많으므로 하나의 구조물 및 제어 시스템을 통하여 풍력과 해양에너지원을 동시에 활용할 수 있는 복합발전시스템 개발이 가능하며, 이를 통하여 발전효율 및 경제성 향상이 가능할 것으로 기대

□ 복합발전시스템 개발을 통하여 생성된 전력을 효율적으로 사용지까지 전송하기 위해서는 다양한 에너지 변환에 관한 연구 필요

○ 발전된 전력을 직접 해수담수화에 의해 물을 생성하며, 다시 물을 전기분해에 의해 수소 생산, 저장하는 방안들이 고안되고 있음

- 해상풍력발전의 경우 개별 터빈과 터빈 사이의 간격이 500~1000m에 이르는 등 단지화를 할 경우 매우 넓은 해역을 필요로 하며, 이러한 해역을 효율적으로 활용하는 것이 단지의 경제성 확보에 있어 중요함

- 예를 들어 해상풍력발전 시스템의 기초구조물을 활용하여 외해가두리, 해양관측시스템, 해양관광용 수상 및 수중전망대, 그리고 수중활동을 위한 잠수챔버의 기능을 지원하는 융합기술개발을 통해 수익창출이 가능

□ 복합발전단지 조성기술은 실용화 사례가 거의 없지만 최근 들어 매우 활발한 연구 진행

○ 해상풍력-파력 복합발전의 경우 다양한 구조물에 대한 연구가 진행 중

- 덴마크의 부유식 해상풍력0파력발전장치인 포세이돈이 실증시험 중에 있고, Green Ocean Energy(영국)이 500kW급 부유식 “Wave Treader“ 시제품을 개발하여 2011년 실해역 시험을 할 예정임

- 그밖에도 Grays Harbor Ocean Energy(미국), Virginia Tech(미국), Pelagic Power(노르웨이)등이 다양한 모델을 연구 중임

○ 영국과 네덜란드에서는 조류/조력 발전, 해상풍력발전, 해수온도차발전, 해상 태양광발전 등이 결합된 초대형 복합해양에너지플랜트에 대한 기획이 수행되어 해상풍력과 수소저장/연료전지 융합시스템 제안

○ 특히 네덜란드는 풍력발전이 균일한 전력 생산이 어려운 점을 감안하여 해상풍력단지에서 생산된 전력을 저장하는 에너지섬 개념의 에너지 저장시스템 제안

- 이는 양수발전의 일종으로서 풍력에너지가 과도할 때 초과 전력으로 지하 호수에 바닷물을 끌어 들이고, 풍력에너지가 적을 때 지하 호수의 물을 배출하면서 전력을 생산하여 안정화를 꾀하는 개념으로 최대 1.5GW 용량을 계획

○ 복합 에너지 이용을 위한 에너지섬 조성 기술은 개념 구상 또는 기획 단계로서 여러 개념들이 소개됨

- 예를 들어, 에너지 섬은 상부에는 풍력발전과 태양광 발전, 하부에는 조류발전, OTEC 시설들이 설치된 부유식 인공섬 조성 계획으로 모듈화되어 조립후 하나의 조립식 인공섬을 형성하는 개념임

[그림 4] 파력-해상풍력 복합발전 사례(덴마크 포세이돈 및 영국 Green Ocean Energy)

□ 기술적 측면

○ 고정식 해상풍력은 해저지반 상태 및 수심에 대한 제약이 크고, 수심 증가에 따라 건설비용이 기하급수적으로 증가하므로, 차세대 해상풍력 시장으로 심해 풍력자원을 경제적으로 활용할 수 있는 부유식 해상풍력발전이 주목 받음.

○ 부유식 해상풍력발전시스템은 해상에 떠있는 부유체 위에 타워를 고정시키고 부유체의 운동은 계류장치(Mooring System)에 의해 제어하는 구조로 이루어져 있으므로, 수심이 깊어져도 특별히 구조물의 크기가 커질 필요가 없는 장점을 가짐.

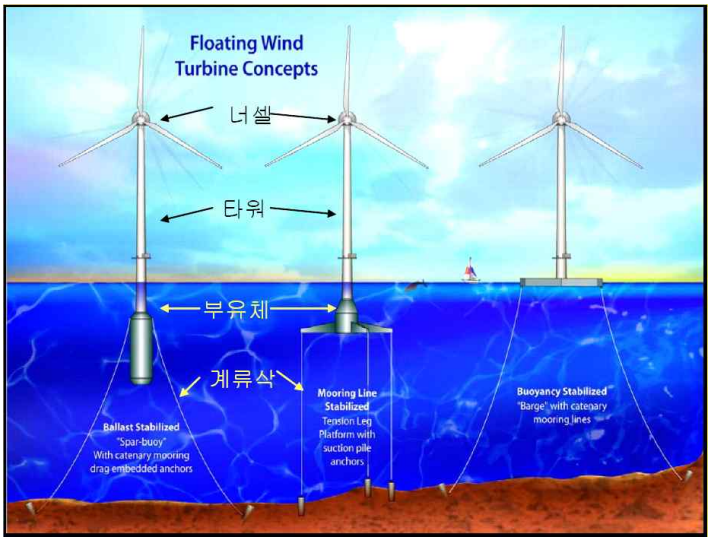
○ 현재 해상풍력은 고정식에서 부유식으로 기술이 발전하고 있는 추세이며, 부유구조 자체의 건설비는 큰 차이가 없으므로 대형 해상풍력발전시스템(5MW 이상)이 유리한 것으로 보고됨.

○ 현재의 개별적인 에너지원에 대한 발전시스템 건설의 경우, 해상공사에 따른 많은 비용 발생

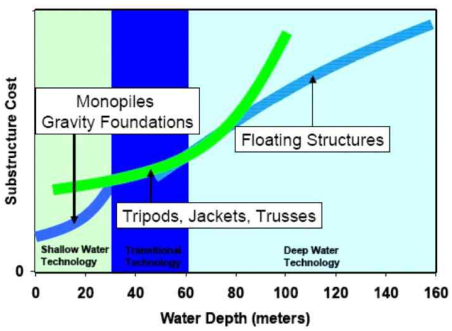
등으로 인하여 경제성 확보가 어려우며, 또한 연안이나 에너지 소비 지역과의 거리가 먼 경우 송전선로 구축 등에 많은 비용이 소모.

○ 단일 에너지원의 경우 전력생산이 불규칙적인 단점이 있으며, 전력생산을 계획할 수 없음. 따라서 고품질의 전력생산이 어려움.

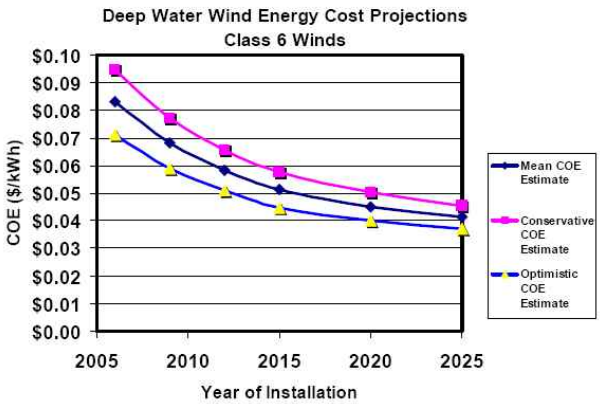
○ 이러한 개별 에너지원 발전시스템의 낮은 경제성 및 전력품질 문제를 극복하기 위하여 복합발전 중심의 단지 조성 기술 개발이 필요



[그림 5] 부유식 풍력발전 시스템 개념도 및 명칭



[그림 6] 수심에 따른 해상풍력 foundation의 건설비



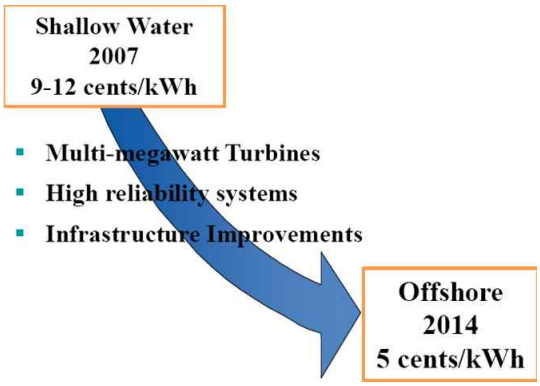
[그림 7] TLP의 발전단가 변동 전망 (NREL, 2004)

○ 하나의 구조물 및 제어 시스템을 통하여 복수의 에너지원을 동시에 활용할 수 있는 복합발전 시스템 개발이 가능하며, 이를 통하여 발전효율 및 경제성 향상이 가능할 것으로 기대됨.

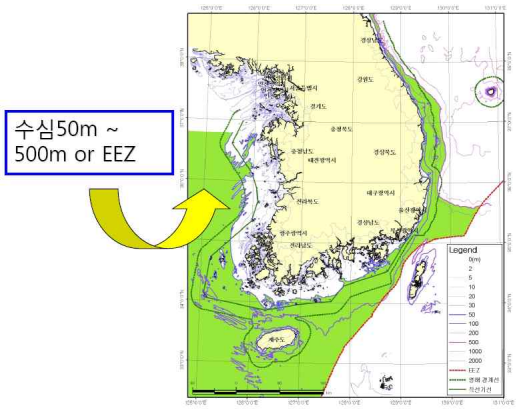
○ 특히, 풍력 발전의 경우, 해양에너지 발전을 위한 개발 대상 적지가 일치하는 경우가 많아 복합발전 단지 구성에 적합함.

○ 해양에너지 복합발전은 에너지원의 조합(Energy Combination)과 지지구조물(Platform)의 종류에 따라 분류할 수 있음.

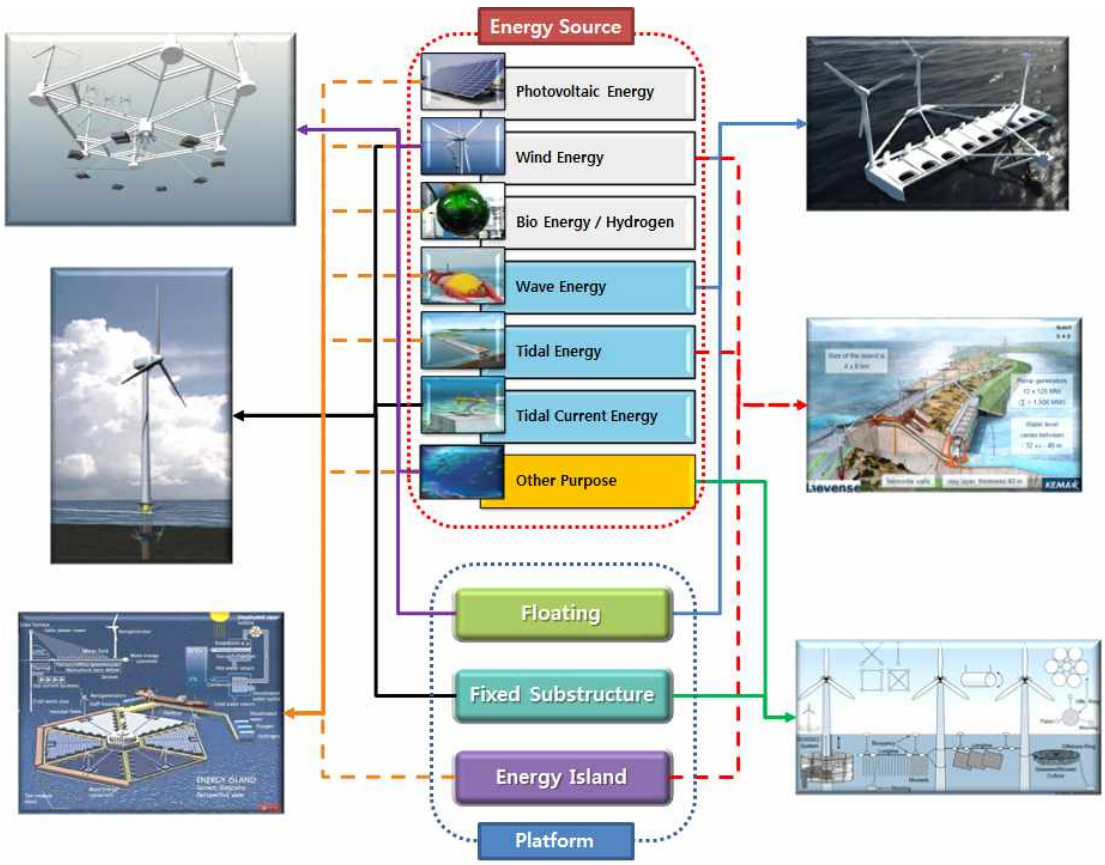
○ 발전의 목적 이외에도 바다목장, 해수담수화, 수소생산의 개념과 함께 구성될 수 있으며, 이를 위한 플랫폼 개발이 필요함.



[그림 8] 해상풍력발전 단가 전망



[그림 9] 우리나라의 심해풍력 자원량 분포



[그림 10] 에너지원과 지지구조물에 따른 복합발전의 분류

□ 경제·산업적 측면

○ 세계 각국은 에너지 환경, 안보 및 경제에 능동적으로 대처하기 위해 신재생에너지 개발에 국가적 역량을 경쟁적으로 집중함.

○ 우리나라 연안에는 개발 가능한 해양에너지가 약 25,000MW(해상풍력 11,000MW 포함)의 부존되어 있는 것으로 평가되며, 이를 개발할 경우 신산업 창출과 더불어 우리나라 에너지 자급도 제고 가능.

○ 신재생에너지에 대한 제적 추세, 기술 완성도와 경제성을 감안하면 상당기간 동안 풍력발전이 최적 대안의 위치를 고수할 것으로 판단됨.

<표 1> 제 4차 신재생에너지 기본계획 ('14.9, 산업부) 에너지 보급목표(%)

년도	태양광	태양열	풍력	지열	폐기물	바이오	수력	해양
2014	4.9	0.5	2.6	0.9	67.0	13.3	9.7	1.1
2025	12.9	3.7	15.6	4.4	38.8	19.0	4.1	1.6
2035	14.1	7.9	18.2	8.5	29.2	18.0	2.9	1.3

○ GWEC(Global Wind Energy Council) 2010년 보고서에 따르면, 2010년 기준 전세계 전기에너지 소비량 중 풍력에너지가 2.4%를 공급, 2020년에 8.9%와 2030년에는 15.1%의 비율로 확대될 것으로 전망됨.

○ 국내외 육상풍력은 양호한 입지의 고갈과 민원의 증가로 인한 입지확보에 많은 제약이 있어 이에 대한 대안으로 최근 해상풍력 개발이 급신장. (※ 제주도 한림해상 풍력단지는 지난 10년간 환경영향평가의 반복된 재심의로 사업추진 지연.)

○ 현재 해상풍력은 육상에 비해 설치 및 유지보수 비용이 많이 들어 경제성이 뒤떨어지나 대형터빈 설치와 함께 대단위 풍력단지를 조성하기가 용이하기 때문에 예상되는 설치기술 및 유지보수 기술이 발전에 힘입어 향후 해상풍력발전이 주축이 될 것으로 전망됨. (※ 현재 풍력발전 MW당 국내 건설비는 육상 25억원, 해상 60억원으로 추산.)

○ LCOE(Levelized Cost of Energy)를 분석하면 나셀(발전장치)가 20%, 로터 15%, 지지구조물(타워 5%, 기초 11%) 16%이며, 해상풍력은 육상에 비해 토목의 비중이 크고 설치수심과 외력조건에 따라 토목공사 비중이 급격히 상승하며 해상풍력의 중심축이 기계에서 토목으로 이동.

○ 유가하락과 글로벌 경제침체의 여파로 풍력발전에 대한 정부 연구개발비와 기업의 자본투자가 축소 지연되고 있으나 외부여건 변화에 대비하여 해상풍력의 경제성 확보를 위한 기술역량의 강화가 필요한 시점임.

○ 우리나라의 연안 풍력자원은 적지가 한정되어 있으나, 심해풍력 자원은 넓게 분포해 있어 적지 확보가 용이함.

□ 사회·문화적 측면

○ 정부의 탈원전 선언 및 신재생 에너지에 대한 관심 증대

○ 폐쇄 원전 발전량을 보완하기 위한 태양광 및 육상풍력 조성을 위한 필요 부지 부족

○ 해양에너지는 부지의 제한에 상대적으로 자유로움.

○ 육지에서 큰 이격 거리를 가짐에 따라 민원 발생 최소화 기대 가능.

○ 민원 문제 해결 및 양질의 바람자원 확보를 위해 해상풍력 발전단지는 연안에서 외해로 이동하는 추세이며, 수심증가에 따라 부유식 구조물이 경제적이며, 향후 발전단가도 하락할 것으로 예상됨.

2. 국내외 기술동향

2.1. 해양에너지 기술동향

□ 해양에너지는 화석연료의 사용에 따르는 환경오염과 자원고갈 문제를 극복할 수 있는 유망한 청정재생에너지 자원

○ 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라 연안 해역은 다양한 가용 에너지 자원이 풍부하게 분포하며, 설치 가능한 해역 또한 광범위하여 해양에너지 자원은 우리나라 연안역에서도 대규모로 활용이 가능한 에너지 자원임

- 특히, 활용 가능한 육상공간이 매우 제한되어 있는 우리나라에서, 해양에너지 자원의 활용은 에너지의 수입의존도를 낮출 뿐 아니라 기후변화 협약에 의한 국제적인 환경보호 노력과 이에 따른 각종 규제에 적극적으로 대응할 수 있는 중요한 방안임

- 해양에너지는 에너지 변환효율이 높고 에너지 밀도가 높아서 개발시 경제성 확보가 유리한 무고갈성 청정에너지로 대규모로 개발이 가능한 무한한 재생에너지 자원으로서 오염문제가 없는 무공해 자원이며 미래의 유망에너지 자원으로 평가받고 있음

○ 광의로 본 해양에너지는 조력, 조류, 파력, 해수온도차, 염도차, 해양바이오 에너지 및 해상풍력을 들 수 있으나, 통상적으로 해상풍력은 해양에너지보다는 풍력에너지 분야로, 해양바이오는 바이오에너지 분야로 분류

- 광의의 해양에너지 정의에서 해상의 바람에너지를 이용하여 전기를 생산하는 해상풍력발전도 해양에너지에 포함되고 있음

- 육상풍력발전장치 설치에 필요한 적지 부족과 대용량 풍력단지 조성의 한계로 인하여 해상에 설치하기 시작한 해상풍력은 대형구조물 산업이라는 측면에서 조선해양산업과 매우 밀접

- 해상풍력에서 고정식 혹은 부유식 하부구조물의 설계를 위하여 해양환경과 해양플랜트 산업에 대한 중요성 증대

○ 협의의 해양에너지는 조력, 조류, 파력, 온도차 및 염도차 만을 포함함

- 해양에너지는 해양의 조수・파도・해류・온도차 등을 변환시켜 전기 또는 열을 생산하는 기술로써 전기를 생산하는 방식은 조력・파력・조류・온도차 발전 등이 있음

<표 2> 해양에너지 종류

구분	개요
조력(Tidal Barrage)발전	▪ 조차가 큰 하구나 만에 방조제를 설치한 후, 외해와 조지 내의 수위차를 이용하여 전력을 생산
파력(Wave Energy)발전	▪ 입사하는 파랑에너지를 터빈 등의 원동기 구동력으로 변환하여 전력을 생산하며 설치방식에 따라 크게 부유식과 고정식으로 구분
조류(Tidal Current)발전	▪ 조수간만차에 의해 발생하는 해수의 높은 유속을 이용하여 에너지를 생산하는 발전으로 수평 유체흐름을 회전운동 또는 왕복운동으로 변환시켜 전력을 생산
해양온도차발전 (OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion)	▪ 해양 표면층의 온수(예 : 25~30℃)와 심해 500~1000m정도의 냉수(예 : 5~7℃)와의 온도차를 이용하여 열에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 발전
해상풍력(Offshore wind power)	▪ 풍력터빈을 호수, 연안과 같은 수역에 설치하여 그 곳에서 부는 바람의 운동에너지를 회전날개에 의한 기계에너지로 변환하여 전기를 얻는 발전방식

○ 에너지 부존량의 평가로는 파력 및 온도차 발전이 많지만 에너지원별 입지조건이나, 경제성, 기술성, 환경요소 등을 고려할 때 실제로 가장 활발한 개발이 진행되고 있는 분야는 조류발전임

<표 3> World ocean energy reserves

해양에너지	Energy reserves (TWh/year)
조력(Tidal Barrage)발전	300
파력(Wave Energy)발전	80,000
조류(Tidal Current)발전	800
해양온도차발전(OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion)	10,000

자료: 양창조, 황태규, 조류에너지의 이용기술, 2016(원자료:IEA-OES, Policy Report, International Energy Agency, (2006))

□ 우리나라 연안은 세계적인 해양에너지 개발 유망지역으로 조력, 조류, 파력 등 총 14,000MW 이상의 해양에너지가 부존하는 것으로 파악

○ 이를 활용할 경우 상당한 에너지 대체효과가 있을 것으로 기대

○ 특히 우리나라의 서, 남해안에는 지형적인 영향으로 조력발전과 조류발전 적지가 산재

2.1.1. 조력발전

□ 조력발전의 정의

○ 조력발전은 조석을 동력으로 해수면의 상승과 하강 작용을 이용하여 전기를 생산하는 발전방식으로 방조제를 축조하여 해수저수지를 조성한 후 발전하는 방법이 일반적으로 사용되며 상세 구분은 다음과 같음

- 일정중량의 부체가 받는 부력을 이용하는 부체식
- 조위의 상승하강에 따라 밀실에 공기를 압축시키는 압축공기식
- 방조제를 축조하여 해수저수지 즉, 조지를 조성하여 발전하는 조지식

○ 조력발전은 무한정 사용 가능한 발전방식으로 대규모 발전이 가능하나 발전단가가 높음

□ 국내 동향

○ 실용화된 조력발전방식은 조지식으로 강한 조석이 발생하는 큰 하구나 만에 방조제를 설치하여 조지를 만들고 외해수위와 조지내의 수위차를 이용하여 발전

- 조지식 조력발전은 일반적으로 조지의 수에 따라 단조지식과 복조지식으로 구분되며, 조석의 이용 횟수에 따라 단류식과 복류식으로 나뉨
- 단류식은 조지 내의 수위가 외해 수위보다 높을 때 해수를 내보내면서 발전하는 낙조식 단류발전과 외해 수위가 조지내의 수위보다 높을 때 해수를 채우면서 발전하는 창조식 발전으로 구분
- 복류식은 낙조와 창조를 함께 이용하는 방식

○ 방조제 건설로 인한 해양환경 변화 문제 등으로 다소 논란의 여지가 있지만 경제성 측면에서 만큼은 어느 청정에너지보다도 우수하다는 평가를 받고 있는 에너지원임

○ 1980년대에 걸쳐 가로림만을 중심으로 서해안에서 조력발전에 대한 개략적인 타당성조사 실시하였고, 1993년 가로림만 조력발전 타당성조사 결과 발전 단일목적으로 개발시에는 경제성이 충분하지 못한 것으로 평가되어 개발을 보류

※ 2015년 사업자의 요청에 따라 준비기간을 2020년으로 연장

○ 시화호 조력발전소는 2004년에 공사에 착수해 2011년 완공한 조력발전소로 경기도 안산시 대부동 시화호방조제에 지어져, 수차발전기 10기에서 25만 4,000kW의 발전시설용량을 갖춘 세계 최대 규모의 조력발전소임

※ 연간발전량은 5억 5,200만kWh로 인구 50만 명이 사용할 수 있는 전력량을 생산함

구분	시설용량(MW)	발전용량(GWh)	공사비(원)	준공(예정)
시화조력발전	254	553	4,959억	2011.8
가로림조력발전	520	950	1조 22억	기본설계 완료(2015)
강화조력발전	840	1,556	2조 3,000억	예비타당성조사 완료(2016)
인천조력발전	2,414	2,414	3조 9,000억	예비타당성조사 완료(2017)
총계	4,028	5,473	7조 6,981억	-

자료 : 지식경제부, 2008, "수용성 향상을 위한 조력발전의 환경친화적 건설방안", 한국환경정책평가연구원, 2010, "해양에너지 산업화 지원방안 연구", 한국해양수산개발원, 2010 참조, KISTI 재작성.

[그림 11] 국내 조력발전 시장 현황 및 전망

□ 해외 동향

○ 최근까지 주요 선진국은 조력발전 건설에 따른 환경훼손 가능성을 우려해 조력발전을 건설하지 않았으나 대규모 발전이 가능하고 기술이 안정화됨에 따라 신규 건설을 적극 추진중

국가	발전소	준공년도	최대조차(m)	시설용량(MW)	연간발전량(GWh)	발전방식
프랑스	Rance	1966	13.5	240	544	복류식
러시아	Kislaya Guba	1968	3.9	0.4	1.2	복류식
중국	Jiangxia	1985	8.39	3.2	6.0	복류식
캐나다	Annapolis	1984	8.7	20	50	단류식
한국	시화조력발전	2011	7.8	254	552	단류식

자료 : "해양에너지 산업화 지원방안 연구", 한국해양수산개발원, 2010, "신재생에너지백서", 2010 참조, KISTI 재작성.

[그림 12] 조력발전소 주요 개발 현황

○ 프랑스

- 프랑스는 북서부 연안 랑스 하구에 1966년 시설용량 24만kW급 상업용 조력발전소를 설치하고 현재까지 운영중
- 1971~1982년 대규모 유지보수기간중의 가동율이 71~94%였으나 이후 평균가동율은 97%임
- 프랑스 조력발전의 조위는 최대조차 13.5m, 평균조차 8.5m이고, 시설용량 240MW로 연간발전량은 544Gwh임

○ 캐나다

- 1919년 아나폴리스 지방의 Fundy만에 조력개발이 제안되어 대규모 개발이전의 연구 개발시설로 개획됨
- 이후 1980년 개발을 계획이 발표되었으며 이듬해 1981년 착공하여 1984년 준공되어 현재까지 운영되고 있음

- 아나폴리스 발전소의 조위는 평균조차 7.0m이고, 시설용량 20MW, 연간 발전량 50GWh이며 발전소에 운영은 약 100km 떨어진 Milton Contral Center에서 원격 조정되고있음

○ 중국

- 중국의 조력발전계획은 1950년대 조석 에너지 부존량 기초조사를 실시하였으며, 1958년 조력지점 500개소에 대한 조사통계에 의하면 이론상 110 106KW 연간 총 발전량은 87 109KW로 연구됨
- 지앙시아 조력발전소는 간척용 제방 준공시 건설계획이 수립되었으며 다양한 용량의 수차를 적용하였고 수차 5대중 2대에 증속기를 설치하여 운영중임
- 중국은 전국 연안에 대하여 자체적인 조력발전 계획을 가지고 있으며 1958년부터 10년간을 1단계, 1970년대를 2단계, 1980년대 이후를 3단계로 볼 수 있음
- 역사적으로 중국의 발전은 단계별 발전과정을 거치면서 실패와 경험을 가지고 있으며, 중국내 운영중인 조력발전소는 총 9개소가 있음

○ 러시아

- 1935~1940년 사이 실시된 전 국토 전력화 사업의 일환으로 검토되었으며, 극한지에서의 발전소 건설 및 가동에 따른 여러 가지 문제점에 대하여 연구하기 위하여 실험용으로 설치됨
- 특징적으로 케이슨을 이용하여 부유공법에 의한 공사를 하여, 인근 드라이독(Dry Dock)에서 제작된 수차구조물을 이동하여 조력댐과 연결하는 방식으로 시공
- 러시아 키스라야 구바 지방에 1938년 건설 검토를 시작하여 1962년 건설이 확정되고, 1968년 가동을 시작
- 당초 2기의 벌브형 수차 발전기를 설치할 계획이였으나 사업검토과정에서 계획이 변경되어 발전기수 1기만 설치하여 운영 연구중

2.1.2. 파력발전

□ 파력발전의 정의

○ 파랑의 운동 및 위치에너지를 이용하여 터빈을 구동하거나, 기계장치의 운동으로 변환하여 전기를 생산하는 기술

- 파고가 높고 파주기가 긴 해역이 적지로 평가

□ 국내 동향

○ 에너지 변환원리에 따라 가동물체형, 진동수주형, 월파형 방식이 적용되고 있으며, 설치 형태에 따라서 착저식(또는 고정식)과 부유식으로 구분

- 가동물체형은 수면의 움직임에 따라 민감하게 반응하도록 고안된 여러 형태의 기구를 사용하여 파랑에너지를 물체에 직접 전달하고, 이 때 발생하는 물체의 움직임을 전기에너지로 변환하는 방식으로 파력발전의 가장 오래된 형태임
- 전동수주형 파력발전은 파랑에너지를 공기의 흐름으로 변환하고, 발생된 공기의 흐름 중에 터빈을 위치시켜 전기를 얻는 파력발전 방식으로 입사파가 장치의 전면에서 반사되어 중복파가 형성되고, 이 때 발생하는 수면의 상하 움직임이 장치 전면의 개구부를 통해 공기실 내로 전달되어 공기실 안의 공기가 압축/팽창을 반복하게 되면, 이에 의해 공기실 상부 노즐분에 공기의 흐름 발생
- 월파형 파력발전은 파랑의 진행방향 전면에 사면을 두어 파랑에너지를 위치에너지로 변환하여 저수한 후 형성된 수두차를 이용하여 저수지의 하부에 설치한 수차터빈을 돌려 발전하는 방식

○ 2006년까지 세계적으로 실해역 실증이 이루어진 총 52개 파력발전장치의 변환 원리별 분포를 살펴보면, 진동수주형 12개, 월파형 3개, 가동물체형에 속하는 장치 32개 및 기타 5개로 아직까지는 가동물체형이 다수를 차지

- 1993년에서 2001년에 60KW 부유식 진동수주형 파력발전 장치를 개발
- 2003년~2012년에 500KW 고정식 진동수주형 파력발전 시스템을 개발
- 2006년 150W 등부표용 부유식 소형파력 발전기를 제주 차귀도 해역에 설치하여 실증시험
- 2007년~2010년 250KW 나선 암초형 월류파력발전 기술 개발 등 파력발전에 대한 기술개발이 추진
- 2012년 포항 호미곶면 대보리 앞바다에 소형 파력발전소를 건설해 시험 가동하였으나 시험단계에서 적정 부력을 유지하지 못해 설비가 가라앉아 시험에 실패
- 현재 제주 한경면 앞 500m 해상에 500KW급 시험용 파력발전소를 건설하여 현재 기술 검증 및 시운전중

○ 파력발전의 핵심기술은 해양에너지 구조물 설계 및 시공기술, 단지, 발전시스템 운용

○ 에너지관리공단에서 발표한 “신·재생 에너지 D&D전략 2030”에 의하면 2020년에 파력발전의 경제성 제고를 제외한 다른 기술에서 선진국 대비 90% 이상의 기술 수준에 도달할 것으로 전망

(단위: 선진국 = 100)

구분	소분류	2007년	2012년	2020년
파력에너지 변환기술	적지 평가	80	90	100
	파력에너지 집적 및 흡수	75	85	95
	터빈 기술	75	85	95
파력발전구조물 설계 및 시공기술	해양환경 평가	65	80	95
	고정식 파력발전 구조물 설계 및 시공	80	90	100
	부체식 파력발전 구조물 설계 및 시공	75	85	95
파력발전 발전시스템 기술	파력발전용 발전기 및 전력 제어	70	80	90
	파력발전 시스템 운용 및 보수 유지	65	75	90
	파력발전의 경제성 제고	60	75	85

자료: 에너지관리공단, "신 · 재생 에너지 R&D전략 2030", 2009

[그림 13] 파력에너지 관련기술의 선진국 대비 기술수준

□ 해외 동향

○ 영국

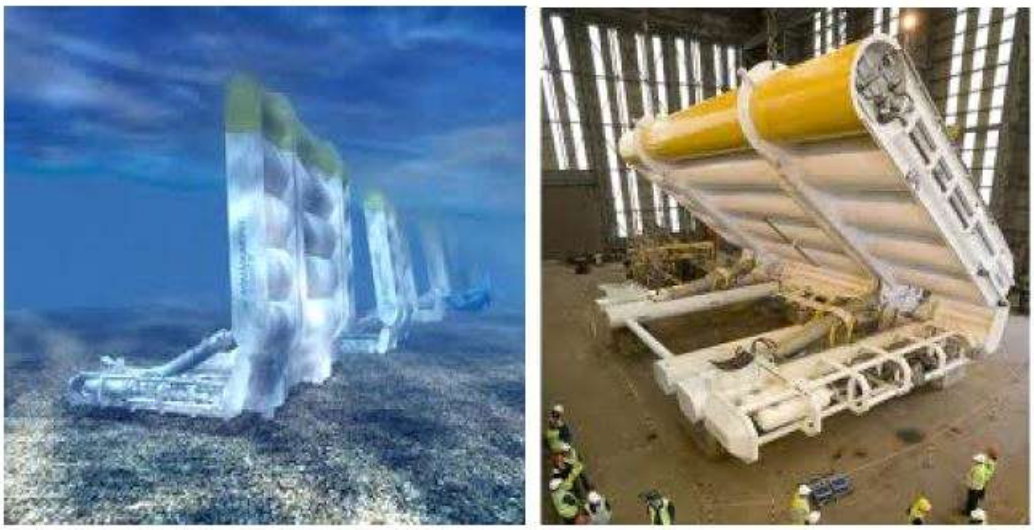
- 2000년 영국 Wavegen사가 스코틀랜드 서부 해안 Islay 섬에 500MW급 고정식 진동수주형파력발전기인 Limpet을 설치

※ 연안고정식 파력발전과 풍력발전 장치를 조합하여 3.5MW급(WSOP3500) 발전장치를 제안

자료 : "Vattenfall snaps up final Emec berth in Orkney for Pelamis' P2", Rechargenews, 2012.03.15.

[그림 14] P2 파력발전기

- 세계 최초의 상업용 파력발전 장치는 스코틀랜드 에너지 전문회사인 Pelamis사가 2008년에 개발한 부유식 파력발전 P2(750KW)로 파도가 칠 때 연결된 원통의 이음새에 위치한 유압장치를 이용하여 파력에너지를 흡수하는 방법을 사용하여 포르투갈 북부 해상에 설치
- 2012년에서 2015년까지 스코틀랜드는 총 10MW의 전력을 생산할 수 있는 프로젝트를 추진 중에 있으며, 파력발전기당 1MW의 파력발전용 Array 10기를 Pulse Tidal사에서 설치할 예정
- 스코틀랜드는 2020년까지 6개의 파력발전 계획을 가지고 있으며, 세계 최대 파력발전 프로젝트는 Islay 섬 연안 협곡과 펜랜드 해협에서 1,600MW 규모로 진행 중
- 스코틀랜드 해양에너지 개발업체인 Aquamarine Power사가 2011년에 출시한 800kw급 오이스터(Oyster) 800은 해저면에 위치한 바닥구조물과 힌지로 연결된 연직구조물이 파도에 따라 진자운동을 하고, 이 때 유압장치를 이용하여 기계에너지로 변환하여 발전하는 방식



자료 : "Wave Power Gets Creative", Cleantech Investing, 2009.05.22.

[그림 15] Oyster 파력발전기

- 부유식과 고정식의 혼합형인 Archimedes Wace Swing (AWS)는 고정되어 있는 내부 실린더와 파도의 상하 운동에너지를 흡수하여 움직이는 외부 실린더의 상대운동을 이용하여 발전하는 방식
- 현재 실해역에서 운용중인 진동수주형 파력발전장치로 영국의 Limpet(500㎾), 포르투갈의 Pico(400㎾), 호주 Energetech(2㎿)가 있으며, 월파형 파력발전장치로 덴마크의 Wave Dragon(4MW)이 축소 실증플랜트를 제작하여 실해역 시험을 추진

[그림 16] AWS 파력발전기

국 명	설치 장소	발전 형식	발전 용도	발전 출력	운전 기간
노르웨이	Toftestallen	고정진동수주	발전	500kW	1985-1988
	Toftestallen	협수로월류	발전	350kW	1985-1991
덴마크	북서부해안	선회식부이	실증시험	45kW	1988-1990 1994-1996
	NissumBredning	연안 부체식 월류	상업용발전	4MW	2005-예정
미국		연안직접역침투법	해수담수화		1988
중국	Dawanshan island	고정진동수주	발전	3kW	1990
	Shanwei	고정진동수주		100kW	계획중
인도	Madras	고정진동수주	발전	150kW 75kW	1990-1995 1996-
스웨덴	서부해안	부체식 파력용기	해상시험	110kW	1991
아일랜드	Shannon River 하구	McCabe 파랑펌프	음료수 발전	-	1996
영국	Islay island	고정진동수주	상업용발전	500kW	2000
	Islay island	세미서브식 원통이중매유압	발전	350kW×2	2002
	Shetland island	부체식 파력용기	발전	400kW	2002
포르투갈	Pico island	고정진동수주	발전	500kW	1999-
	Pico island	파고차진등부이	실증시험	2MW	2002-시험
호주	Port Kembla	고정진동수주	상업용발전	500kW	건설중
일본	오키나와현	부체식 (카이요)	실증시험		1984-1985
	홋가이도현	진자식	실증시험		1983-
	아마가타현 사카타항	진등수주형	실증시험	60kW/kW	1987-1994
	미에현 고카쇼만	진등수주형 (마이티휘일)	실증시험	110kW	1998-2002

자료 : 최영도·이영호, "파력발전의 개요 및 연구개발 현황", 「태양에너지」, 제6권 제1호, p. 19

[그림 17] 국가별 주요 파력발전 시설 및 개발계획

2.1.3. 조류발전

□ 조류발전의 정의

○ 조류발전은 조류의 흐름이 빠른 곳을 선정하여 그 지점에 수차발전기를 설치하고, 자연적인 조류의 흐름을 이용하여 설치된 수차발전기를 가동시켜 발전하는 기술임

- 해수의 유동에 의한 운동에너지를 이용하여 수차를 구동하거나 기계장치의 운동

으로 변환하여 전기를 생산하는 기술임

- 해양에 대규모 댐을 건설할 필요 없이 발전에 필요한 수차와 발전장치를 설치하기 때문에 적지 대상 해역이 제한적이며 조력발전과 같은 대규모의 적용이 어려움

○ 조류발전의 큰 장점은 날씨 변화나 계절에 관계없이 발전량 예측이 가능하여 신뢰성 있는 에너지원으로 활용이 가능

- 또한 해수유통이 자유롭고 해양환경에 미치는 영향이 거의 없어 조력발전보다 더 환경 친화적인 것으로 간주됨

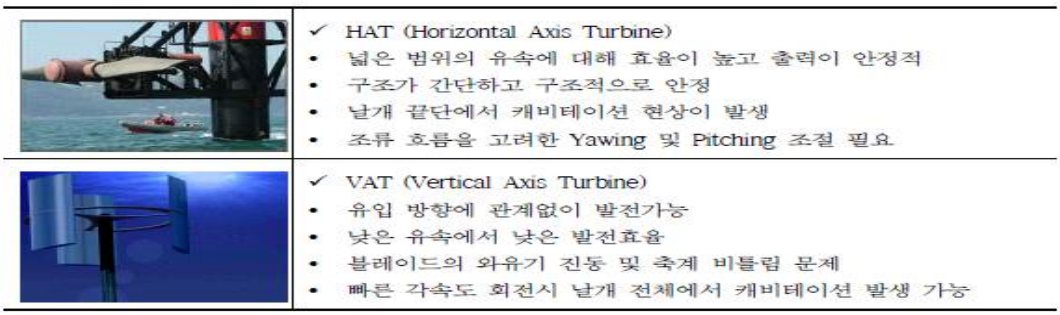
○ 해수의 유속과 발전기의 효율에 큰 영향을 받으며 조류발전은 계절적 요인이나 날씨에 관계없이 발전할 수 있는 친환경적인 발전 방법이나 설치하기 어려운 단점이 있음

□ 국내 동향

○ 조류발전 터빈은 터빈의 회전방향에 따라서 수평축터빈과 수직축터빈으로 분류

- 수평축인 경우 일방향 흐름, 하천과 같이 일정한 흐름을 유지하는 경우에 유리

- 수직축인 경우 조류와 같이 흐름의 방향이 변하는 경우에 유리



자료 : 한국과학기술한림원, 해양에너지의 미래 전망과 국가적 발전 전략 연구, 2012

[그림 18] HAT 방식과 VAT 방식의 특성 비교

○ 일반적으로 조류발전은 유속이 1m/s내외인 곳에서도 가능하나, 경제성 있는 발전을 위해서는 최소한 2m/s이상인 곳을 후보지로 선정

○ 국내 최초의 조류발전소는 울돌목 시험 조류발전소로 2003년 미국 Gorlov의 기술을 제공받아 100KW 시험 VAT 헬리컬 조류발전 장치를 설치하였으며, 2009년 1MW급 수직축 헬리컬 조류발전 장치를 설치

○ 2008년 6월 오션스페이스와 인하대가 개발하고 남동발전이 참여한 25kW 조류발전 장치를 삼천포 방수로에 시험 설치하였으며, 조류발전 기술 최초로 방수로에서 시험하여 발전장치의 실용화 가능성을 확인

○ 2011년 100KW 수평축 부유식 조류발전 장치의 해양에서 성능시험함

□ 해외 동향

○ 영국

- 영국의 Marine Current Turbine(MCT)사는 1998년부터 2003년까지 영국 남서부의 Lynmouth 지역의 Foreland Point 해양에 Seaflow라 불리는 300kW급의 파이로트 발전 시스템을 설치
- Seaflow는 수평축 형식으로 두 개의 블레이드를 장착하였으며, 모노파일에 가이드를 설치하여 상하 이동이 가능하도록 한 조류발전 장치

[그림 19] Seaflow 조류발전 장치

- 2008년 SeaGen 프로젝트는 세계 최초의 상용규모의 계통연계형 조류발전시스템으로 북아이랜드의 Strangford Narrows지역에 SeaGen을 설치하여 1.2MW 조류발전시스템을 운전

[그림 20] SeaGen 조류발전 장치

- Lunar Energy사는 독자적으로 1MW급 덕트형 조류발전 장치를 개발하였으며, cartridgepod 방식의 특수한 유지보수 방법을 적용

- SMD Hydrovision사는 2개의 피치고정 장치를 사용한 터빈장착을 하여 15m 로터를 사용하여 최대출력 1MW 계류식 조류발전을 개발

  ※ 이 조류발전 장치는 자체 부력으로 물위에 뜨며 해저에 계류체인으로 고정시켜 조류의 입사 방향 변화에 자체적으로 방향을 조절할 수가 있어 발전 효율을 높일 수 있음

[그림 21] 계류식 조류발전

- 아틀란티스사는 1MW급 조류발전 장치(AK-1000)를 개발하여 2011년 유럽해양에너지센터(EMEC)에 시험 설치

  ※ AK-1000의 터빈 직경은 18m로 양방향 구동 형태로 설계됨

[그림 22] AK-1000 조류발전 터빈

- 영국의 Openhydro사에서 개발한 원형터빈은 제트엔진형태로 2개의 수직파일이

구조물을 지지하며 6m 원형 발전장치가 유지·보수를 위해 파일의 상하로 이동하도록 설계하여 실해역 성능검증중

[그림 23] 원형 조류발전 터빈

- 영국의 Nautiricity사에서 개발한 조류발전 장치는 두 개의 로터가 반대로 돌아가는 구조로 발전장치 후류를 억제하고 발전효율을 높일 수 있으며, 현재 300kW급이 개발되어 런던 탭스강에서 실험중

[그림 24] Nautiricity사 조류발전 장치

- 스코틀랜드의 EMEC(European Marine Energy Center)는 Orkney Island에 실해역 시험을 하였으며, 고효율 조류발전 터빈 개발을 추진

○ 미국

- 미국의 Verdant Power사는 뉴욕의 동쪽 강변에 200kW급 조류발전 시스템을 개발하여 6기를 설치해 일부지역에 전력 공급

[그림 25] Verdant사 조류발전 장치

○ 독일

- 독일 Voith - Siemens사는 영구자석 동기발전기(PMSG)를 사용하여 변화하는 유속에 따른 출력을 효과적으로 대처할 수 있도록 조류발전 장치를 개발
- Hammerfest사는 2003년 노르웨이의 Kvalsund, Finnmark에 300kW급 조류발전 장치를 설치하여 2008년까지 4년 동안 실해역 시험을 수행

○ 캐나다

- 노바스코티아 주정부는 FORCE(Fundy Ocean Research Centre for Energy)를 설립하여 조류발전 기술개발을 주도하고 있으며, 정부 지원하에 1MW급 대형 조류발전을 설치중
- 500KW급 조류발전 장치를 개발하고 있으며, Brier Island에 조류발전 단지개발을 추진중

[그림 26] Open Hydro 조류발전 장치(좌) MCT 조류발전 장치(우)

2.1.4. 해상풍력발전

□ 해상풍력발전의 정의

○ 풍력발전은 바람의 운동에너지를 전기 에너지로 변환하는 에너지 변환기술임

○ 공기가 익형 위를 지날 때 양력과 항력이 발생되는 공기역학적 특성을 통해 회전자가 회전하게 되는데 이때 발생되는 기계적 회전 에너지가 발전기를 통해 전기 에너지로 변환됨

□ 국내 동향

○ 2013년 현재 5MW가 설치되었으며. 서남해 2.5GW 단지 외에 새만금 20MW, 제주 264MW, 전남 4GW의 해상풍력단지를 구축 예정

단지명	개발주체	용량	현황 및 향후일정
새만금 (전북)	전라북도	20MW (터빈 미정)	• 기본설계 완료('13.6.) • 턴키 설계('13.7.~'13.12.) • EPC 입찰('14.1.) • 단지구축('14.3.~'15.12.)
탐라 (제주)	포스코에너지 (64%) 두산중 (36%)	30MW (두산 3MW)	• EPC 계약('12.5.) • 단지구축('13.3.~'14.12.)
한림 (제주)	한국전력기술 대림산업 (SPC 추진중)	150MW (터빈 미정)	• 기상탑 설치('12.5.) • 타당성조사 완료('13.9.) • EPC 입찰('13.말) • 단지구축('13.12~'15.12.)
대정 (제주)	남부발전 (49.9%) 삼성중 (50.1%)	총 203MW (삼성 7MW) ※ 1단계 84MW 2단계 119MW	• EPC 계약('12.9.) • 단지구축 1단계 : '13.5.~'14.12. 2단계 : '15.1.~'16.12.
전남 4GW (전남)	전라남도 포스코에너지 SK E&S 지역난방공사 한양	4GW (터빈 미정) ※ 전남 5GW 사업 중 해상 4GW, 육상 1GW	• 기상탑 설치('13.3.) • 타당성조사 완료('14.5.)

주: 서남해 2.5GW 단지 제외

[그림 27] 해상풍력단지 구축 추진 계획

○ 2014년 6월 제주 해역에 2GW 규모의 부유식 해상풍력 발전단지 건설을 계획중에 있으며, 2단계에 걸쳐 설치할 계획임

- 1단계 사업에서 2015년까지 미국 PPI사의 반잠수식 부유체를 제주 해상에 적용할 수 있도록 설계를 변경하고 부유체와 풍력터빈을 복합적으로 조정할 수 있는 제어기술 개발을 추진

- 2단계 사업에서 해상풍력시스템을 부유체와 결합해 제주 해상에 띄우는 실증사업으로 5.5MW 해상풍력시스템 2기를 설치할 계획임

○ 제주 해상 여건을 고려하여 깊은 수심에 적용가능한 부유식 해상풍력터빈을 개발하여 수심 35m 이내에는 고정식, 35m 이상 수심에는 부유식 풍력터빈을 적용해 종방향의 대규모 해상풍력단지 조성이 가능할 전망

□ 해외 동향

○ 미국

- 케이프 윈드(Cape Wind) 프로젝트 관련 협회는 130개의 풍력터빈으로 구성된 풍력단지 조성을 위해 독일 풍력터빈 제조업체인 지멘스(Siemens)에서 3.5MW급의 터빈을 제공받아 프로젝트를 추진할 계획

  ※ 케이프 윈드 프로젝트는 총 420MW 규모의 전기를 생산할 계획이며, 매사추세츠 주 낸탁만(Nantucket Sound)의 Horseshoe Shoal에 풍력단지를 설치할 계획이다. 미국 에너지부에 따르면 동부 해안선의 천해 지대는 530,000MW 규모의 풍력에너지를 공급할 수 있는 잠재력을 가진 것으로 나타났으며, 이는 미국 에너지 수요의 40% 이상을 충족하는 양이다.

- 메릴랜드(Maryland)에서 10~30마일 떨어진 해양면적 80,000에이커(acres)에 해상풍력발전설비를 설치할 예정으로 메릴랜드 풍력에너지 지역은 두 개의 지역으로 북쪽과 남쪽 지역에 있음

  ※ 메릴랜드는 약 850MW에서 1,450MW 규모의 풍력발전 잠재력을 가지고 있음

○ 영국

- 영국은 2020년 풍력발전 용량을 현재보다 3배 정도 늘리려고 계획 중에 있다. 현재 영국의 총 풍력발전 용량은 10.4GW이며, 2020년에 전체 18GW 규모의 해상풍력발전단지와 16GW의 육상풍력 발전설비를 설치할 계획이다.

- 스코틀랜드의 풍력발전 개발사들은 해상풍력발전의 비용이 너무 높아 해상풍력발전의 전략적 도입을 줄여가고 있으며, 이러한 고비용 문제를 해결하기 위한 방안으로 부유식 풍력터빈이 대두되고 있음

- 스코틀랜드에서는 Buchan Deep이라 명명된 부유식 풍력단지 프로젝트를 계획중이며, 부유식 풍력단지는 기존 고정식 해상 풍려단지 대비 비용 면에서 훨씬 경제적일 것으로 추정됨

○ 독일

- 독일은 2020년까지 10GW 해상풍력 설치를 목표로 하고있음

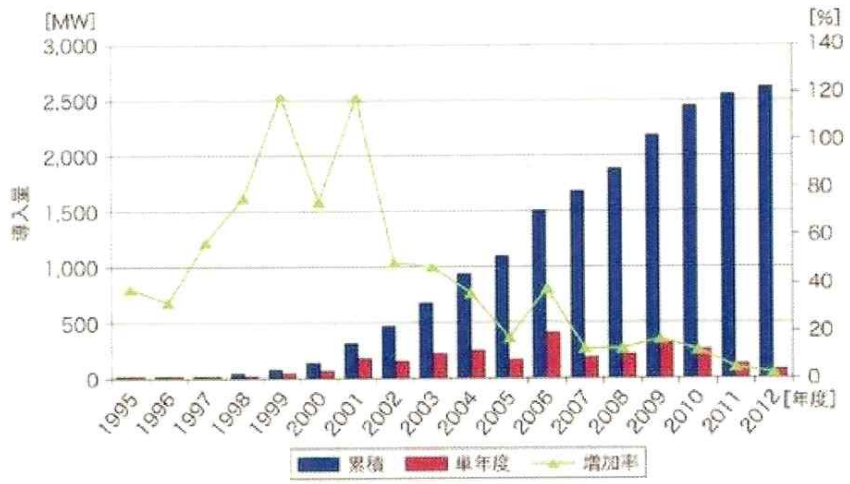
- 북해 및 발트해 연안을 중심으로 한 독일 해상풍력단지는 대부분 연안에서

30~60Km 이상 떨어진 해상에 설치되지 않으면 자연경관 및 생태계 훼손 등의 이유로 독일 당국의 인허가가 어려워 연안으로부터 30~80Km, 200Km 이상 떨어진 곳에 해상풍력단지가 설치가 이루어지고 있으나 깊은 수심으로 인한 위험성과 설치선 이동거리로 인한 높은 비용의 부담을 가지고 있음

- 풍력기업과 송전망기업간의 불화로 인해 노디시오스트 풍력단지의 완공년도가 2년 지연되는 등의 독일 해상풍력발전 활성화에 걸림돌이 되고 있음
- 독일 지멘스가 북해에 해상풍력 플랫폼 설치에 성공. HelWin 1이라 불리는 이 플랫폼은 노드시오스트와 미어윈드의 해상풍력발전단지에서 생산된 전력을 손실이 낮은 직류로 전환해 함부르크의 서북 지역에 위치한 지상 발전소로 전달함

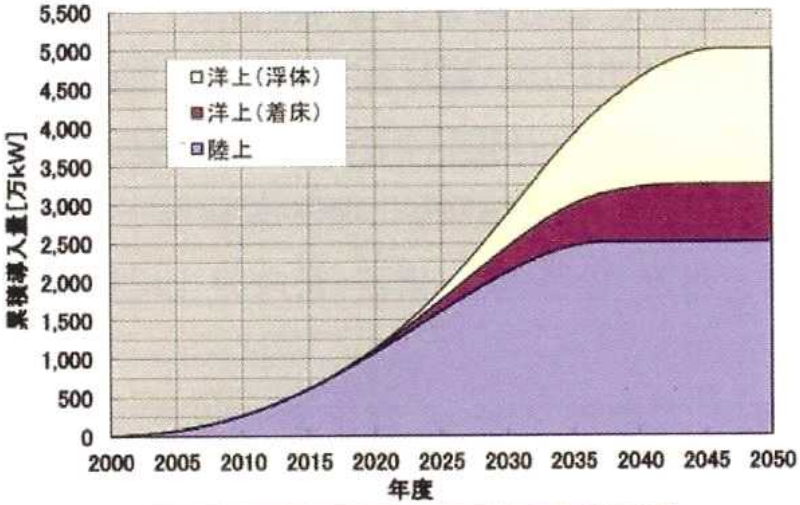
○ 일본

- 일본 풍력발전협회의 예측에 의하면 2010년도에 244만 KW였던 풍력발전 규모는 2020년도까지 5배 가까운 1,130만KW로 확대될 것으로 전망하고 있으며, 해상 풍력발전이 급속하게 증가하여 2050년도에는 육상과 해상을 합해 5,000만KW에 도달하는 로드맵이 작성
- 일본 근해는 수심 50m를 넘는 해역이 존재하기에 해상에 설비를 부유시키는 부체식 풍력타워 개발에 주력하고 있고, 일본 근해에서의 평균풍속이 6m/s 넘어 어느 지역에서도 풍력발전을 실시할 수 있음



자료: NEDO

[그림 28] 일본 풍력발전 도입량과 증가율



	風力導入目標値[万kW]			
年度	陸上	着床	浮体	合計
2010	242	3	0	244
2020	1,080	40	10	1,130
2030	2,120	330	430	2,880
2040	2,500	720	1,400	4,620
2050	2,500	750	1,750	5,000

자료: 日本風力発電協会

[그림 29] 일본 풍력발전 도입 로드맵

- 풍력발전 도입량이 일본에서 가장 큰 아오모리현에서 시모키타반도의 롯카쇼촌으로 태평양 연안의 육상에 19기, 해상에 32기의 풍력타워를 설치하는 계획이 진행 중이며, 시모키타반도의 태평양 측에도 2개의 풍력발전 프로젝트가 추진되고 있음
- 후쿠시마현 연안에 부체식에 의한 2MW의 대형 발전설비가 가동 중으로 해양생물 및 어업에 대한 영향의 평가를 포함하여 실증시험이 추진중

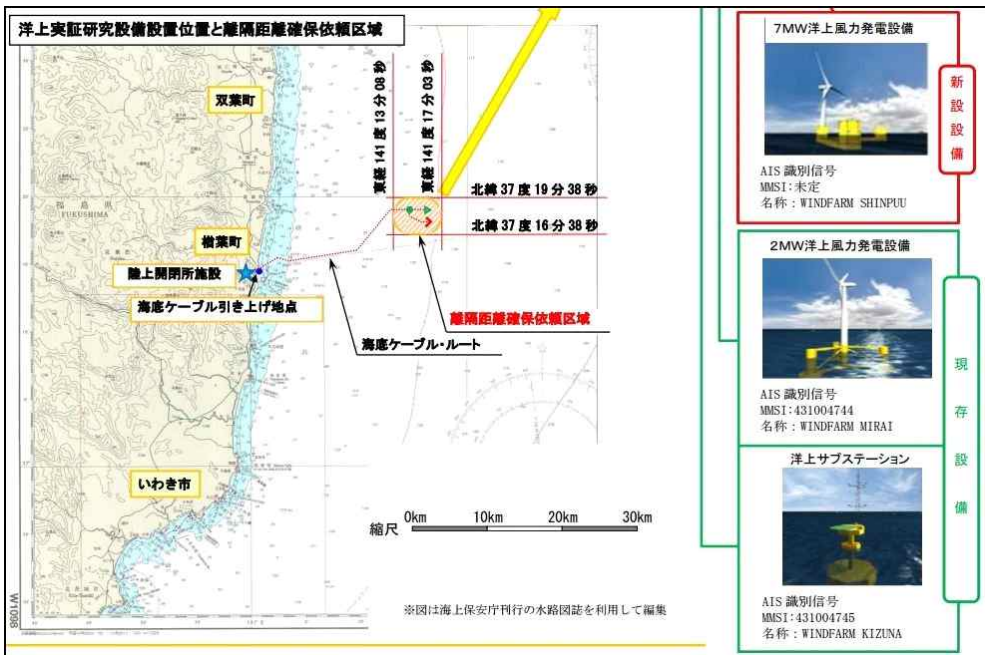
  ※ 이 프로젝트는 2011년 핵 사태가 일어난 지역 근처에 2013년에 시작하여 운전중에 있으며, 제 2기에서 발전능력 7MW의 발전설비를 2개소에 설치

  ※ 부유식 풍력타워는 3개의 수직 기둥과 2개의 수평기둥을 직각으로 결합한 구조로 아래 절반 정도를 수중에 잠수시켜 안정화 시켰으며, 타워 직경 167m, 중심을 해수면에서 105m 높이에 설치

  ※ 풍력타워의 회전을 발전기에 효율적으로 전달하기 위해 유악 드라이브 방식을 사용하였고, 해상의 변전설비에 송전 케이블을 연결하여 육상으로 전력을 보내는 방법을 사용하여 발전중

출처 : 후쿠시마 해상 풍력 컨소시엄

[그림 30] 후쿠시마 부유식 해상 풍력발전 설비 및 유체부분

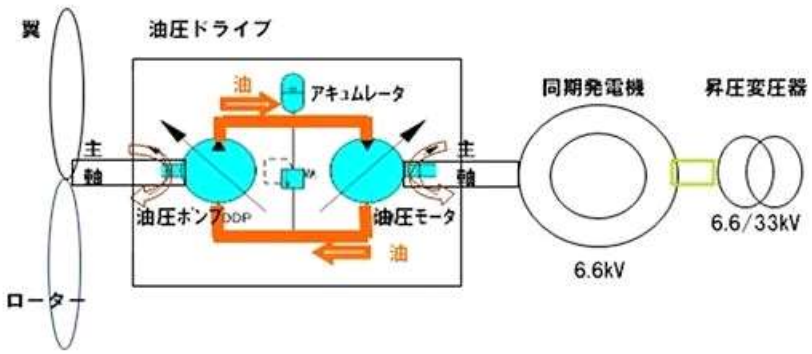


출처 : 후쿠시마 해상 풍력 컨소시엄

[그림 31] 후쿠시마 앞바다의 설치 해역 및 설비

출처 : 후쿠시마 해상 풍력 컨소시엄

[그림 32] 후쿠시마 부유식 해상 풍력발전 실증 프로젝트 계획



출처 : NEDO

[그림 33] 후쿠시마 부유식 풍력발전 유압드라이브 구조

- 일본의 Toshiba와 IHI는 하늘에 띄우는 연처럼 바닷속에서 떠다니는 터빈을 전력적으로 적용한 해양에너지 프로젝트를 수행중

  ※ 이 발전장치는 부유상자 내에 위치한 두 개의 회전식 터빈으로 구성되어 있으며, 부유식 상자는 주요 전략적 지점의 해저 표면에 연결하여 2017년 완공을 목표

2.2. 해양에너지 복합발전 기술 동향

□ 복합발전의 필요성

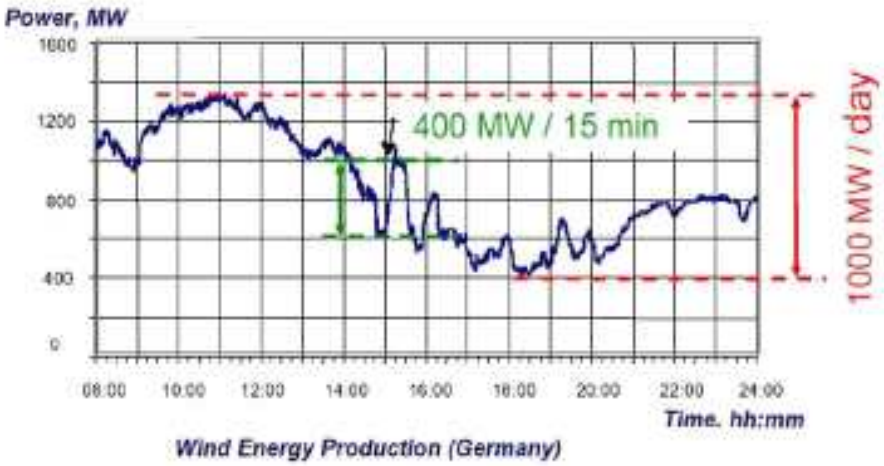
○ 풍력발전의 간헐성이라는 단점을 극복하기 위하여 풍력발전과 타 에너지원과의 융복합 또는 저장수단과의 융복합 기술개발이 적극적으로 진행

- 미국 Lazard 사에서 발표한 2013년판 균등화 발전원가(LCOE; levelized cost of energy)[1] 분석결과에 따르면, 풍력발전은 재생에너지원 중 가장 경제성이 우수할 뿐 아니라 단위용량 당 차지하는 면적이 적기 때문에 기존 발전소 규모로의 확대가 용이

- 그러나 바람의 변동성에 의해 간헐적으로 발전하는 단점이 있음

○ 풍력과 파력발전의 경우 불규칙적인 발전으로 인하여 전력품질이 화력발전과 원자력발전에 비해 낮아 이러한 문제를 해결할 수 있는 대안으로 복합발전이 대두됨

- 독일의 풍력발전의 경우 최대 1400MW까지 발전이 가능하나 동일한 날짜에 약 1000KW가 감소하기도하며, 15분의 짧은 시간 내에 400MW의 전력 변동이 발생하고 있음



자료 : 한국과학기술한림원, 해양에너지의 미래 전망과 국가적 발전 전략 연구, 2012

[그림 34] 불규칙적인 풍력발전 사례(독일)

○ 해상풍력발전의 경우 각각의 터빈과 터빈 사이의 간격이 500~1000m에 이르기 때문에 단지화를 할 경우 넓은 해역을 필요로 함

- 이러한 해역을 효율적으로 활용하는 것이 해상풍력단지의 경제성 확보에 있어 중요

2.2.1. 파력-풍력 복합발전

□ 국내 동향

○ 국내의 선박해양플랜트연구소에서는 10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물에 대한 연구가 진행 중에 있음. 반잠수식 형태의 구조물을 선택하여 4개의 풍력타워를 구조물의 네

1) Lazard Ltd., "Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis Version 7.0", 2013.

모서리에 배치하였으며, 파력발전과 함께 통합적으로 10MW 이상의 전력을 생산하는 것을 목표로 연구가 진행 중임.

○ KRISO에서 VLFS에 대한 연구가 진행 중임. 폰툰형식의 부유체구조를 타깃으로 구조 및 계류 시스템관련 설계기술을 개발 중이며, 제주공항의 확장을 위한 계획에 VLFS가 제시되기도 하였음.

[그림 35] KRISO에서 연구 중인 10MW 복합발전(풍력-파력에너지) 플랫폼

□ 해외 동향

○ 덴마크의 부유식 해상풍력-파력발전 장치인 포세이돈(Poseidon)이 실증시험 중

- 덴마크 역시 고정식 해상 풍력터빈에 파력발전을 추가한 포세이돈 복합발전시스템을 제안함

○ 영국 Green Ocean Energy사의 500kW급 부유식 “Wave Treader“ 시제품을 개발

- 영국의 Green Ocean Energy사가 개발한 Wave Treader는 해상 풍력발전과 파력발전을 결합시킨 복합발전시스템임
- Wave Treader는 500kW 발전용량을 가지며, 유리강화 플라스틱으로 제작된 20m 길이의 부유체 2개로 구성
- 이 부유체들은 50m 길이의 움직이는 빔(pivoting beams)에 의해 풍력터빈의 몸체에 연결되며 부유체들이 파도에 의해 상하운동을 하면 부유체에 붙은 팔(arm)이 빔에 붙어 있는 유압 실린더를 구동시키고 이는 다시 발전기에 붙어 있는 유압모터를 회전시켜 전기를 발생하게 됨

자료 : 녹색기술정보포털, 풍력 융복합발전 기술동향,
(원자료 : http://www.power-technology.com/projects/greenoceanenergywav)

[그림 36] Wave Treader 개념도

- Wave Treader는 발전효율을 극대화하기 위하여 파도의 방향에 맞춰 회전하고 조석(潮汐)에 따른 수위변화에 따라 높이가 조절되도록 설계됨
- 외해(外海)에는 연안에 비해 파도가 더 강하므로 파력발전기의 발전용량을 키울 수 있으며 또한 전력망과 발전시스템의 계류 장치를 풍력터빈과 공유하여 발전용량 당 투자비를 크게 낮출 수 있음
- Wave Treader 시제품의 실 해역 시험이 조만간 진행될 계획임

○ 영국 Wavegen사는 연안 고정식 파력발전과 풍력발전 장치를 조합하여 3.5MW급(WSOP3500) 발전장치를 제안

2.2.2. 조류-풍력 복합발전

□ 조류-풍력 복합발전의 정의

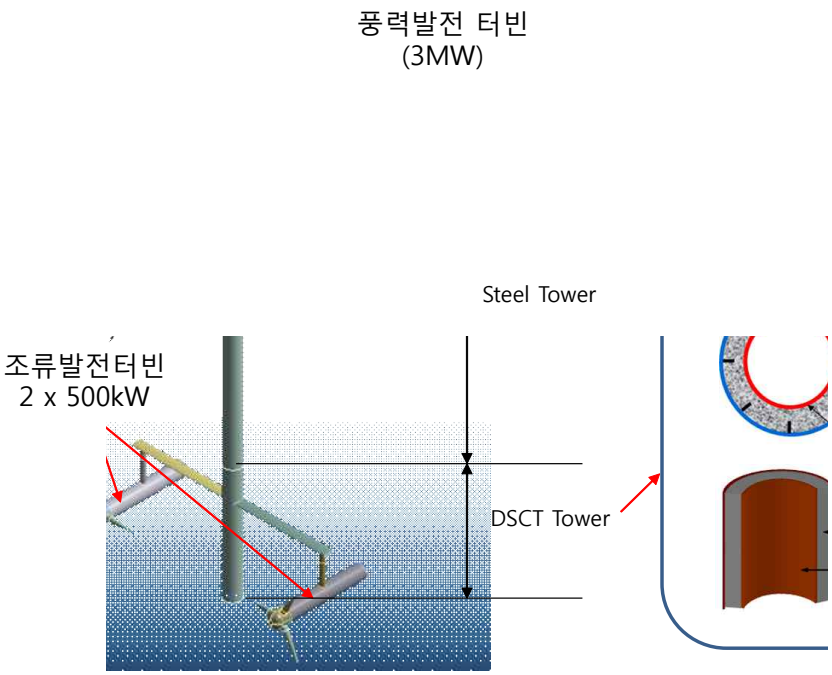
○ 조류-풍력발전의 경우 규칙적인 발전량을 가지는 조류발전의 특성과 풍력의 불규칙적인 발전이 결합되어 풍력발전의 불규칙적인 발전을 일정 부분 해소가능

- 해상풍력에 비하여 경제성이 낮은 파력발전과 조류발전을 풍력과 복합 개발하는 경우는 경제성을 향상시킬 수 있음
- 해상풍력 발전과 파력발전은 개발 적지가 일치하는 경우가 많아 하나의 구조물 및 제어 시스템을 통하여 풍력과 해양에너지원을 동시에 활용할 수 있으며, 발전효율 및 경제성 향상이 가능할 것으로 기대되고 있음

□ 국내 동향

○ 2017년 한국해양과학기술원에서 4MW급의 고정식 조류-풍력발전 시스템을 개발하고 설계함.

- 3MW급 풍력발전기 1기와 500kW급 조류발전기 2기를 동시에 지지하기 위한 하이브리드 지지구조물의 개발과 설계 수행.
- 풍력발전기와 조류터빈을 동시에 지지해야 함에 따라 큰 모멘트와 축력에 저항해야 하는 TP(Transition Piece) 하부의 구조물은 성능이 우수한 DSCT(Double-Skinned Composite Tubular, 콘크리트 충진 이중강관) 구조 적용.
- TP 상부는 기존의 풍력타워와 같이 강관 타워 적용



[그림 37] 하이브리드 해상풍력-조류 복합발전 지지구조

□ 해외 동향

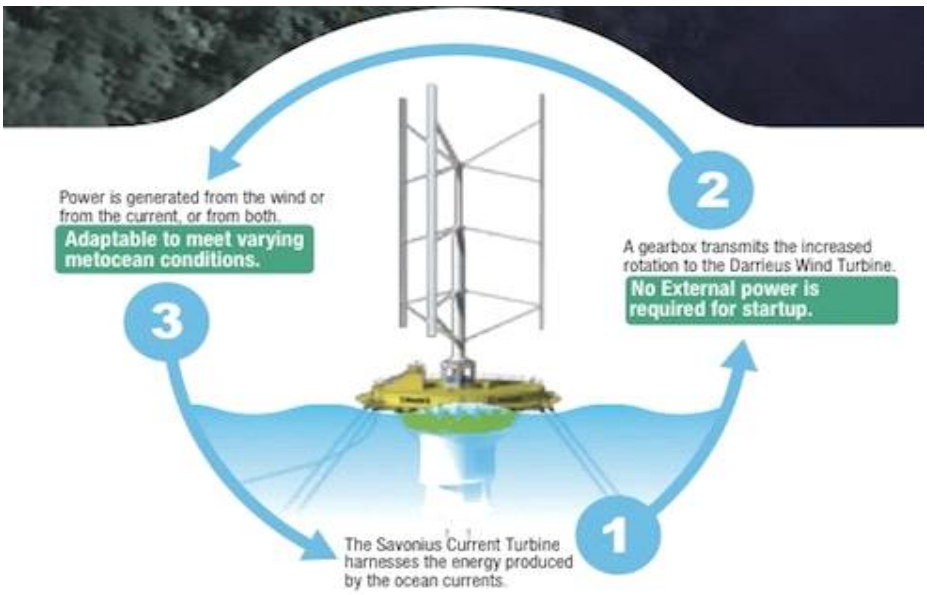
○ 일본 Mitsui Ocean Development & Engineering Company에서는 해상에 설치하여 풍력과 조류(current)를 동시에 에너지원으로 사용할 수 있는 SKWID (Savonius Keel and Wind turbine Darrieus) 시스템을 개발 중[2)]

- 이 시스템은 고정된 부유식 플랫폼에서 수면 위쪽으로는 바람에 의해 회전하는

2) http://www.treehugger.com/wind-technology/worlds-first-floating-windcurrent-hybrid-generator.html

수직축 풍력터빈이 있으며, 수면 아래쪽에는 조류의 흐름을 이용하는 조류터빈이 설치됨

- 이 두 개의 터빈은 기어박스를 통해 발전기로 연결되어 있어서 둘 중 하나라도 작동하게 되면 발전이 가능
- 해상 풍력터빈은 사보니우스 수직축 풍력터빈을 사용하여 어떠한 방향에서 바람이 불어오더라도 발전이 가능한 구조임
- 해수면 아래에 위치한 조류터빈은 직경이 15m이며, 한 방향으로 회전하지만 불규칙적인 조류의 흐름도 모두 잡아낼 수 있도록 설계되어 있음
- 조만간 시제품을 일본 근해에 설치하여 실 해역 테스트를 진행할 예정



자료 : 녹색기술정보포털, 풍력 융복합발전 기술동향,
(원자료 : http://www.power-technology.com/projects/greenoceanenergywav)

[그림 38] 조류·풍력 복합발전기 디자인

2.2.3. 기타 복합발전

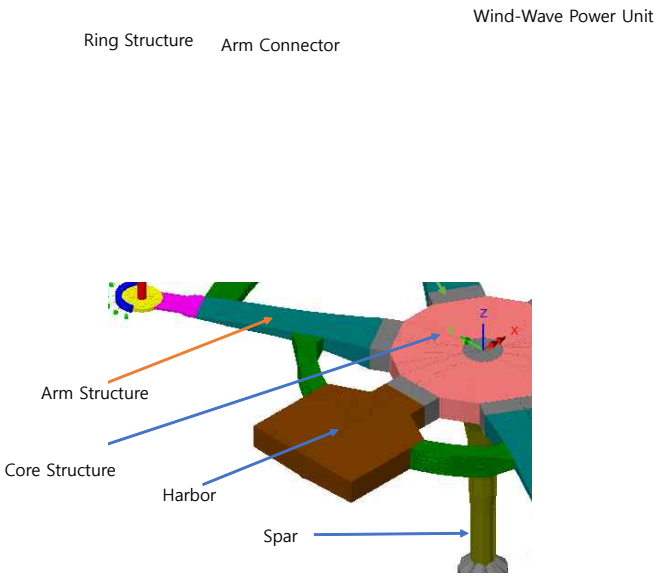
□ 국내 동향

○ 한국해양과학기술원에서(2016)는 모듈로 구성되는 Ocean Energy Complex를 제안함.

- 풍력과 파력으로 구성되는 Unit이 결합하여, Ocean Energy Module을 구성하며, Module이 결합하여 초대형 부유식 플랫폼인 Ocean Energy Complex를 구성하는 개념임.
- 해상풍력과 파력발전을 복합으로 발전하는 부유체 구조물 유닛(unit)과 그 유닛으로 구성되는 해양복합발전 부유식 구조물 모듈(에너지 아일랜드 모듈), 그리고

다시 그 부유식 구조물 모듈을 연결하여 대형 해양복합발전 에너지 섬(에너지 아일랜드 콤플렉스)을 구성하는 개념. (Unit → Module → Complex)

- 해상풍력-파력 부유체 구조물 유닛은 부유식 구조물과 접안시설, 파력 발전기로 구성되며, 부유식 구조물 위에 풍력 발전기가 설치됨.
- 부유식 구조물 유닛의 한쪽 방향에는 파력발전기가 설치되며, 녹색 원통부의 부유체가 파에 의해 상하운동을 하게됨에 따라 청색부의 내부에 설치된 발전기가 작동함.
- 다른 방향에는 시설의 유지관리를 위한 접안시설이 배치됨.



[그림 39] Ocean Energy Island Module의 구조

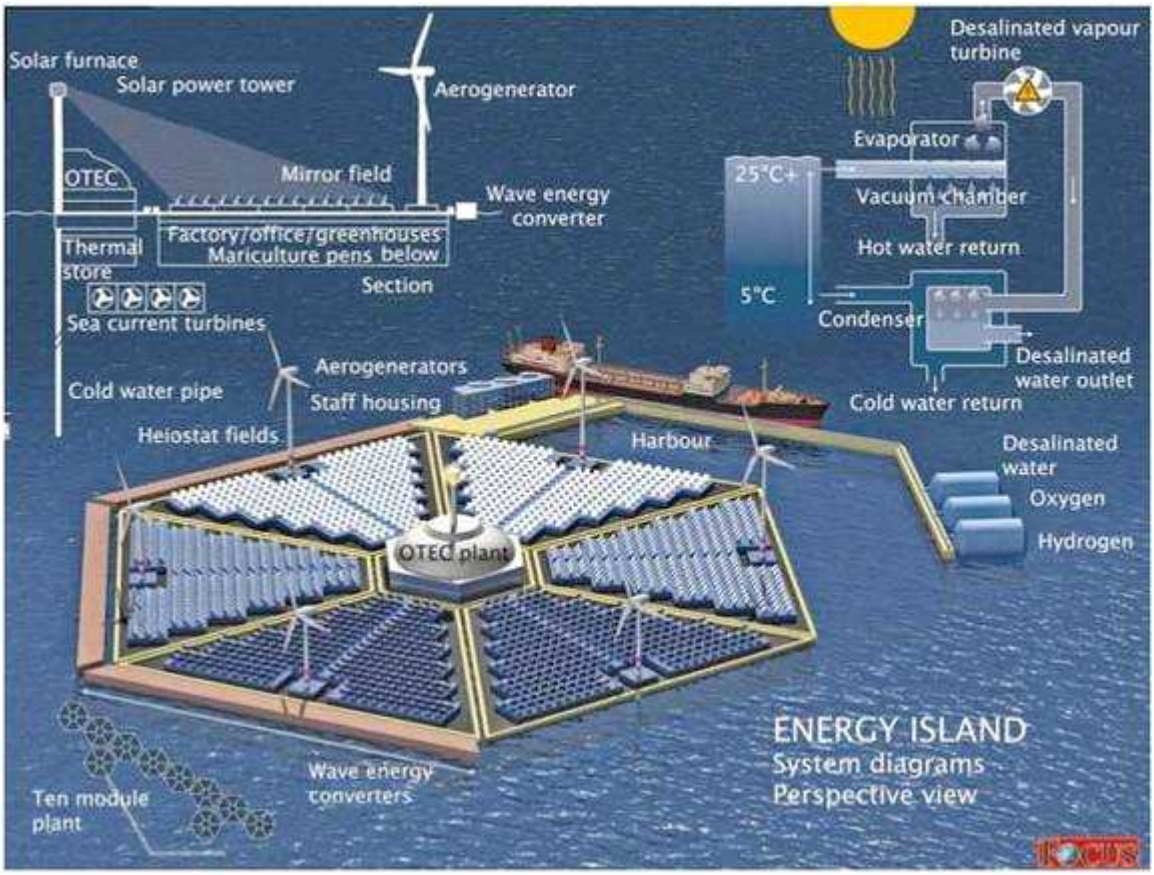
Energy Island Complex

[그림 40] Ocean Energy Island Complex

□ 해외 동향

○ 일본은 초대형 해양구조물 상부에 태양광 및 풍력발전, 수면에서는 파력발전, 수면 아래에서는 조류발전을 수행하는 복합발전 방식을 제안함

○ 영국의 Energyisland사는 해상 풍력발전과 파력발전 외에도 해수 온도차 발전, 태양광 발전 등 해양에서 이용 가능한 신재생에너지를 결합시켜 상호 보완함으로써 에너지 전환효율을 극대화시킨 개념의 대규모 부유식 플랫폼 Energy Island를 제안



자료 : 녹색기술정보포털, 풍력 융복합발전 기술동향,
(원자료 : http://www.power-technology.com/projects/greenoceanenergywav)

[그림 41] Energy Island 개념도

○ 미국의 Grays Harbor Ocean Energy사와 Virginia Tech사, 노르웨이 Pelagic Power사 등이 다양한 모델을 연구중

○ 영국과 네덜란드에서는 조류·조력 발전, 해상풍력발전, 해수온도차발전, 해상 태양광발전 등이 결합된 초대형 복합해양에너지플랜트에 대한 기획이 수행되어 해상풍력과 수소저장/연료전지 융합시스템을 제안함

○ 일본

- 2011년 12월 일본 후쿠오카 하카다만 해상에 세계 최초로 부유식 복합 해양발전 장비가 설치되어 실증 실험중
- 직경 약 18m의 육각형 부체에 출력 3KW의 윈드렌즈 풍차(직경 3.4m) 2기와 출력 1.5KW의 태양전지 패널을 설치한 것으로 윈드렌즈 풍차는 날개 주위에 링 모양의 덮개가 설치되어있어 흩어진 바람을 모아 가속시켜 보다 강한 바람을 풍차 날개에 제공하여 2~3배의 발전효율을 가지는 신형식의 집풍식 소형 풍차임
- 실증실험은 일본 환경성의 지원으로 규슈대 응용역학 연구소에서 수행중이며, 하카다항에서 650m 떨어진 해상에서 1년간 계류하며 내구성과 부체의 흔들림, 해양 생태계의 변화 등의 데이터를 수집할 예정
- 규수대 응용역학 연구소는 향후 복합 해양발전장비를 지속적으로 개선하여 신재생 에너지를 입체적으로 이용하는 복합발전시스템의 반잠수식 복합 해양발전팜을 개발할 계획임

일본의 해양 복합발전장치 설치장소와 장비 및 향후 해양발전팜 조감도

자료 : 아사히 신문

자료 : 아사히 신문

[그림 42] 일본의 해양 복합발전장치 설치장소와 장비 및 향후 해양발전팜 조감도

3. 국내외 산업동향

3.1. 해양에너지 산업/시장 동향

□ 우리나라 연안은 세계적인 해양에너지 개발 유망지역으로 조력, 조류, 파력 등 총 14,000MW 이상의 해양에너지가 부존하는 것으로 파악되고 있어 이를 활용할 경우 상당한 에너지 대체효과가 있을 것으로 기대

○ 우리나라의 서, 남해안에는 지형적인 영향으로 조력발전과 조류발전 적지가 산재하고 있어 해상풍력과 파력발전은 해양에너지를 이용하는 대표적인 신재생에너지이며 각각 독자적인 단일 발전시스템으로의 연구개발이 활발히 진행

○ 이들 해양 신재생에너지의 경우 사업 측면에서는 아직까지 고정식이 대세를 이루어 있지만, 고정식의 경우는 연안에 가까운 수심 20m 내외가 경제적인 한계이고 이들 연안지역은 어업권 보상, 환경문제, 각종 인허가, 레이더 간섭 등의 군사적 문제로 해상부지 확보에 어려움이 많아 많은 사업들이 난관에 부딪혀 있는 실정임

- 국내의 경우 새만금 풍력사업이 국방부 레이더 간섭, 어장파괴에 대한 어민들의 반발로 사업이 좌초되었으며,
- 정부에서 국책사업으로 추진중인 서남해안 해상풍력 사업도 레이더 간섭 문제 및 각종 인허가 문제로 수년 동안 지체되고 있는 상황임

○ 따라서, 해상 부지를 손쉽게 활용하고 발전량의 효율성을 얻기 위해 에너지 잠재량이 풍부한 외해, 심해로 나아가고 있는 실정임

○ 국내의 단일발전 분야에서는, 한국건설기술연구원, 한국선급, 포스코 등에서 수심 30m 이내에 적용 가능한 고정식 해상풍력 지지구조물 기술을 개발

○ 파력발전 분야에서는 선박해양연구소, 삼성중공업, 학계 등에서 파력발전 플랫폼을 개발중에 있지만, 파력발전만으로는 발전 효율성이 낮아 사업화가 어려운 문제점 발생

□ 국내 민간의 투자촉진을 유도하는 RPS 제도를 전격 도입함에 따라 2022년까지 약 54조원 규모의 신재생에너지시장이 창출될 것으로 예상

<표 4> 국내 신재생에너지 수요 전망 및 개발 목표

(단위: 천 TOE)

구분	2008년	2010년	2015년	2020년	2030년	연평균 증가율(%)
태양열	33	40	63	342	1,882	20.2
태양광	59	138	313	552	1,364	15.3
풍력	106	220	1,084	2,035	4,155	18.1
바이오	518	987	2,210	4,211	10,357	14.6
수력	946	972	1,071	1,165	1,447	1.9
지열	9	43	280	544	1,261	25.5
해양	0	70	393	907	1,540	49.6
폐기물	4,688	5,097	6,316	7,764	11,021	4.0
합계	**6,360**	**7,566**	**11,731**	**17,520**	**33,027**	**7.8**
1차 에너지 (백만 TOE)	247	253	270	287	300	0.9
비중(%)	2.58	2.98	4.33	6.08	11.0	-

자료 : 舊 지식경제부, 2008

3.1.1. 조력발전

□ 조력발전은 무한정으로 대규모 발전이 가능하나 발전 단가가 높음

○ 조석을 동력으로 해수면의 상승과 하강 작용을 이용하여 전기를 생산하는 발전 방식으로 방조제를 축조하여 해수저수지를 조성한 후 발전하는 방법이 일반적으로 사용

<표 5> 국내 조력발전 시장 현황 및 전망

구분	시설용량(MW)	발전용량(GWh)	공사비(원)	준공(예정)
시화조력발전	254	553	4,959억	2011.8
가로림조력발전	520	950	1조 22억	기본설계 완료(2015)
강화조력발전	840	1,556	2조 3,000억	예비타당성 조사 완료(2016)
인천조력발전	2,414	2,414	3조 9,000억	예비타당성 조사 완료(2017)
총계	**4,028**	**5,473**	**7조 6,981억**	-

자료 : 舊 지식경제부, 2008, '수용성 향상을 위한 조력발전의 환경친화적 건설방안', 한국환경정책평가연구원, 2010, '해양에너지 산업화 지원방안 연구', 한국해양수산개발원, 2010 참조 KISTI 재작성

□ 최근까지 주요 선진국은 조력발전 기술이 안정화됨에 따라 신규 건설 추진

○ 조력발전 건설에 따른 환경훼손 가능성을 우려해 조력발전을 건설하지 않았으나 대규모 발전이 가능하고 기술이 안정화됨에 따라 신규 건설을 적극 추진 중

○ 프랑스는 북서부 연안 랑스 하구에 1966년 시설용량 24만kW급 상업용 조력발전소를 설치하고 현재까지 운영중이며, 1971~1982년 대규모 유지보수기간중의 가동율이 71~94%였으나 이후 평균가동율은 97%

- 프랑스 조력발전의 조위는 최대조차 13.5m, 평균조차 8.5m이고, 시설용량 240MW로 연간발전량은 544Gwh

○ 캐나다는 1919년 아나폴리스 지방의 Fundy만에 조력개발이 제안되어 대규모 개발이전의 연구 개발시설로 계획

- 이후 1980년 개발을 계획이 발표되었으며 이듬해 1981년 착공하여 1984년 준공되어 현재까지 운영

- 아나폴리스 발전소의 조위는 평균조차 7.0m이고, 시설용량 20MW, 연간 발전량 50GWh이다. 발전소에 운영은 약 100km 떨어진 Milton Contral Center에서 원격조정

○ 중국의 조력발전계획은 1950년대 조석 에너지 부존량 기초조사를 실시하였으며, 1958년 조력지점 500개소에 대한 조사통계에 의하면 이론상 110 106KW 연간 총 발전량은 87 109KW로 연구

- 지앙시아 조력발전소는 간척용 제방 준공시 건설계획이 수립되었으며 다양한 용량의 수차를 적용하였고 수차 5대중 2대에 증속기를 설치하여 운영중

- 중국은 전국 연안에 대하여 자체적인 조력발전 계획을 세웠으며, 1958년부터 10년간을 1단계, 1970년대를 2단계, 1980년대 이후를 3단계로 구분하여 추진

- 역사적으로 중국의 발전은 단계별 발전과정을 거치면서 실패와 경험을 가지고 있으며, 중국내 운영중인 조력발전소는 총 9개소 존재

○ 러시아는 1935~1940년 사이 실시된 전 국토 전력화 사업의 일환으로 검토되었으며, 극한지에서의 발전소 건설 및 가동에 따른 여러 가지 문제점에 대하여 연구하기 위하여 실험용으로 설치

- 특징적으로 케이슨을 이용하여 부유공법에 의한 공사를 하여, 인근 드라이독(Dry Dock)에서 제작된 수차구조물을 이동하여 조력댐과 연결하는 방식으로 시공

- 러시아 키스라야 구바 지방에 1938년 건설 검토를 시작하여 1962년 건설이 확정되고, 1968년 가동을 시작

- 당초 2기의 벌브형 수차 발전기를 설치할 계획이였으나 사업검토과정에서 계획

이 변경되어 발전기수 1기만 설치하여 운영 연구 중

3.1.2. 파력발전

□ 파력발전은 소규모 발전이 가능한 친환경 발전이나, 초기 제작비 많이 투입

○ 파력발전은 발전기를 방파제로 이용, 한번 설치시 거의 영구적으로 사용 가능한 친환경 발전임

○ 그러나, 전기 발생 출력변동이 심해 대규모 발전에 제약이 있으며, 초기 제작비가 많이 들어가는 단점이 있음

- 파력발전의 입지조건은 육지에서 30km 미만, 수심 300m 미만의 해상으로 편서풍이 강한 지역이 파력발전의 적지
- 국내에서는 동해안, 제주도 지역이 적합하며, 국외에서는 서유럽해안, 북미, 호주, 뉴질랜드 해안이 적합

<표 6> 에너지원별 발전단가

(단위:¢/kWh)

구분	석유	조력·조류	파력	풍력	태양	지열	바이오
최저	3.0	7.0	3.0	2.5	20.0	7.0	2.9
최고	5.0	10.0	12.0	10.0	40.0	9.0	8.0
평균	4.0	8.0	9.0	5.0	26.0	8.0	6.0

자료 : 신재생에너지센터, "2008 신재생에너지의 이해", 2008

□ 국내 파력발전은 1993년 이후 파력발전 시스템 개발하여 포항, 제주도 등에 설치하여 실증시험 추진

○ 1993년에서 2001년에 60KW 부유식 진동수주형 파력발전 장치를 개발하였으며, 2003년~2012년에 500KW 고정식 진동수주형 파력발전 시스템을 개발

○ 2006년 150W 등부표용 부유식 소형파력 발전기를 제주 차귀도 해역에 설치하여 실증시험, 2007년~2010년 250KW 나선 암초형 월류파력발전 기술개발 등 파력발전에 대한 기술개발이 이루어짐

- 제주 한경면 앞 500m 해상에 500KW급 시험용 파력발전소를 건설하여 기술 검증 및 시운전

○ 2012년 포항 호미곶면 대보리 앞바다에 소형 파력발전소를 건설해 시험 가동하였으나 시험단계에서 적정 부력을 유지하지 못해 설비가 가라앉아 시험에 실패

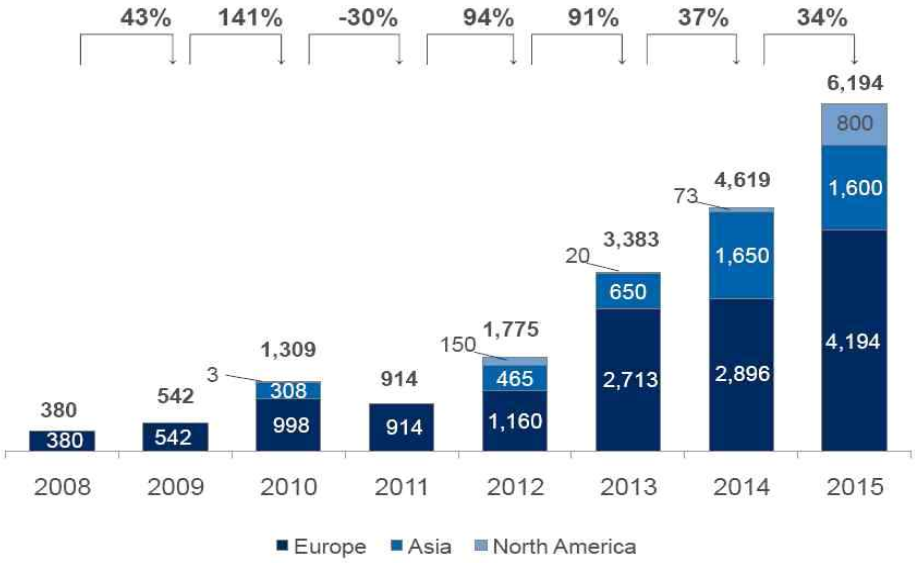
3.1.3. 해상풍력발전

□ 해상풍력 플랫폼 시장은 현재까지 주로 유럽을 중심으로 형성되어 있으며, 최근 화석연료 대체에너지 개발 필요성 증가에 따라 전 세계적으로 급속한 시장 확대

○ 2015년까지 세계 해상풍력 시장은 유럽을 중심으로 성장할 전망이나, 유럽의 경제적 침체 및 높은 생산단가로 인해 풍력터빈 생산기지가 점차 아·태지역으로 이동하는 추세

- 특히 중국의 경우 2010년 해상풍력 발전 생산 용량은 7.7GW로 확대되었으며, 2011년에는 8.0GW 규모가 추가 설치되는 등 세계 풍력터빈 생산 기지로써의 위치 형성

[그림 43] 전 세계 해상풍력 시장 규모



[그림 44] 해상풍력 시장동향 및 전망(MW)
(자료 : New Energy Finance, 2010)

<표 7> 주요 국가 해상풍력 시장 전망(MW)

(단위:)

시장	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
영국	284	652	484	500	1, 341	1, 304	750	5, 315
독일	-	138	266	288	972	1, 040	1, 892	4, 596
덴마크	245	208	-	-	400	-	-	853
중국	13	308	-	405	650	1, 600	1, 500	3, 826
미국	-	3	-	150	20	73	300	546
캐나다	-	-	-	-	-	-	500	500

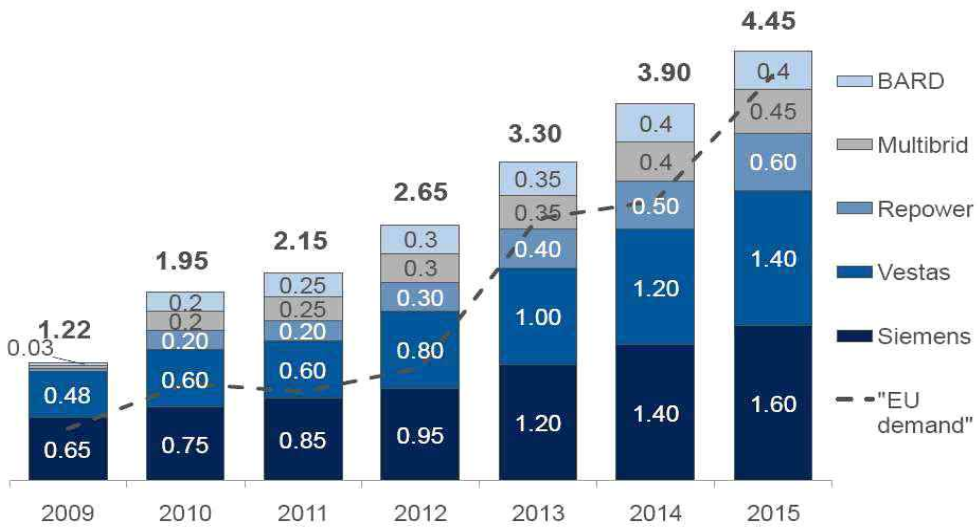
자료 : New Energy Finance, 2010

□ 해상풍력 시장은 현재 높은 기술력과 축적된 경험을 갖고 있는 유럽 메이저업체들이 독점하고 있으며, 높은 진입장벽으로 현재의 과점 현상이 2015년까지 지속될 전망임

○ 중국의 Sinovel, Goldwind와 같은 후발 풍력업체들도 5MW급 터빈을 개발하여 국제시장 진입을 시도하고 있으나 제품의 신뢰성을 검증받는 데에 어느 정도 시간이 필요할 것으로 예상됨

○ Vestas, Enercon 등 유럽 풍력 업체들의 경우 내부조달 비중이 높은 반면 Sinovel, Goldwind, Repower사의 경우 기술력이 완전히 확보되지 않아 주요 부품에 대한 외부조달이 이루어지고 있음

- Vestas, Siemens 등 메이저 풍력 업체들은 6MW급 해상풍력터빈을 개발하여시험가동 중에 있으며 중국업체인 Goldwind 역시 2010년 5.0MW급 풍력터빈을 개발하여 2.5~5.0MW에 걸친 제품 포트폴리오를 구축함

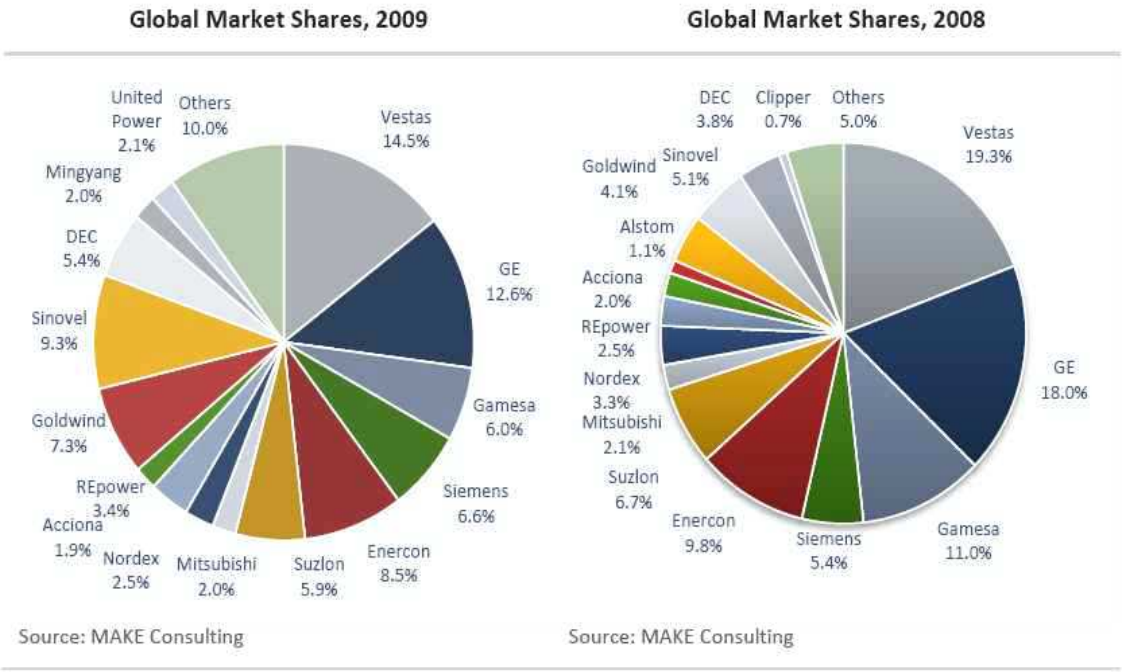


[그림 45] 해상풍력 주요 업체의 시장 개발 현황(GW)
(자료 : New Energy Finance, 2010)

□ 전반적인 세계 풍력업체 시장 동향으로써 아직까지는 시장 점유율 상위 15개 업체 중 유럽 업체들의 강세가 유지되고 있으나 내수시장을 바탕으로 한 중국 업체들의 성장세가 두드러지고 있음

○ Vestas, GE, Gamesa 등 기존 시장 상위 업체들의 시장 점유율이 점차 하락하고 있는 반면, Sinovel, Goldwind 등 내수시장 확보에 따른 중국 업체들의 약진이 계속되고 있음. 중국 시장의 확대 추세로 볼 때, 이와 같은 현상은 당분간 지속될 것으로 전망됨

○ 이에 따라 유럽의 시장 상위 업체들은 경제성 및 안전성이 우수한 신형식 플랫폼과 심해 적용이 가능한 부유식 해상풍력 플랫폼 개발 등 새로운 해상풍력 분야 시장 개척에 많은 노력을 쏟고 있으며, 추후 이러한 분야에 우수한 기술력을 가진 업체들의 시장 점유율이 증가할 것으로 예상됨



[그림 46] 세계 풍력업체 시장 점유율 현황
(자료 : Make Consulting, 2010)

(1) 국내

□ 국내에서는 1990년대 초부터 정부지원 하에 풍력설비 관련 연구가 이루어져왔으며 2002년부터 실질적인 시장이 형성되었으나, 아직 해외에 비해 규모가 작은 편임

○ 풍력산업 수출액은 2004년 5,800만 달러에서 2009년 7억 2,400억 달러로 약 12배 가까이 증가

- 정부는 현재 2조 정도의 내수시장 규모가 2030년 12조 5천억 규모로 확대될 것

으로 전망함

○ 정부는 2011년 10개의 ‘생태계 발전형 신 성장 동력 프로젝트’를 발표하고 해당 분야에 2천억원의 예산을 집중 지원

- 본 프로젝트의 한 축으로써 ‘해상풍력 수출산업화 기반 구축’ 부문이 포함되어 있으며 이에 따라 해상풍력 플랫폼 개발에 대한 국가 차원의 전폭적인 지원
- 서해안과 남해안 일부에 해상풍력 플랫폼이 설치되어 있으며, 본격적인 해상풍력 발전단지 구축을 위한 프로젝트는 2012년부터 추진
- 국내는 2013년 부안, 영광지역 해상에 5MW급 해상풍력 플랫폼 20기(100MW)로 구성된 실증단지를 조성, 서남해 2.5GW 단지 외에 새만금 20MW, 제주 264MW, 전남 4GW의 해상풍력단지를 구축
- 본 사업에서는 2016년까지 5MW급 해상풍력 플랫폼 200기(1,000MW)를 설치한 시범단지를 구축하고 2019년까지 300기(1,500MW)를 추가로 설치해 대규모 해상풍력 발전단지를 구축하고자 함

○ 국내 풍력발전의 경우 2014년에 약 2조원 규모의 시장이 창출 될 것으로 분석되고 있음

- RPS 제도 적용에 따른 2022년의 의무이행 발전량을 현재 가장 경제성 있고 실효성 있는 신재생에너지로써 가시적인 투자가 활발히 진행되고 있는 풍력발전으로 모두 활용할 경우, 2022년에 국내 약 21GW의 풍력발전 설비가 요구될 것으로 분석됨

○ 특히 정부가 해상풍력 로드맵을 발표하고(2010년), 국내 각 지역 해상에 대한 풍력발전 단지 구축 계획이 가시화됨에 따라 주요 민간 기업을 중심으로 국내·외 시장 확보를 위한 움직임이 활발히 이루어지고 있음

- 정부에서는 2030년까지 풍력발전을 통한 공급량을 연평균 18.1%로 증가시킬 계획을 밝혔으며, 국내 풍력시장은 지속적으로 활성화/확대 될 것으로 전망됨

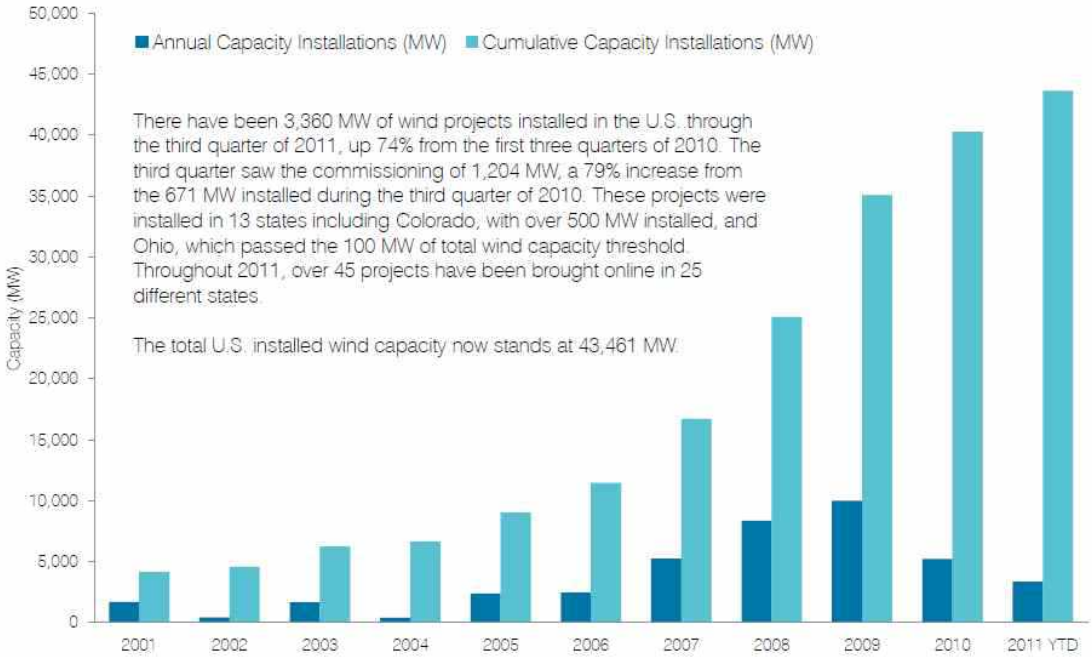
(2) 해외

(가) 미국

□ 미국의 풍력발전에 의한 전력 공급량은 지속적으로 증가하고 있음. 2011년 3분기에 신규 설치된 풍력발전 용량은 3,360MW로 전년대비 74% 증가되었으며, 2011년 9월 말 기준, 미국 내 풍력발전 용량은 총 4만 3,461MW로써 육상풍력의 경우 이미 세계 최대의 풍력 시장이 형성되어 있음

○ Cape Cod Offshore Wind Farm 프로젝트는 미국 최초의 해상풍력 발전단지 조성을 위한 프로젝트로써 총 17억 달러가 투자되어 2014년까지 1단계 프로젝트(330MW)가 완료될 예정임

○ 현재 프로젝트 원천 업체(Cape Wind)와 현지 전력회사(National Grid) 간 전력공급계약(공급기간 15년)과 지멘스와의 터빈 공급 계약 체결이 완료됨



[그림 47] 미국의 풍력발전 개발 현황
(자료 : 미국 풍력발전협회, 2011)

(나) 일본

□ 일본 정부는 에너지 정책의 무게중심을 '탈 원전' 쪽으로 옮기고 있으며, 이에 따라 해상풍력발전 시장에 대한 기대치가 높아지고 있음.

○ 일본 풍력발전협회의 예측에 의하면 2010년도에 244만 KW였던 풍력발전 규모는 2020년도까지 5배 가까운 1,130만KW로 확대될 것으로 전망

- 2010년부터 해상풍력 부문에 매년 20억엔의 예산을 지원하고 있으며, 특히 후쿠시마 원전사태 이후 약 2억 5천달러 규모의 후쿠시마 해상풍력발전단지 구축 계획을 발표하고 Mitsubishi, Fuji, Shimazu 등의 대형 민간기업과 연계하여 사업을 진행 중에 있음
- 후쿠시마현 연안에 부체식에 의한 2MW의 대형 발전설비가 가동 중으로 해양생물 및 어업에 대한 영향의 평가를 포함하여 실증시험이 추진중
- 이 프로젝트는 2011년 핵 사태가 일어난 지역 근처에 2013년에 시작하여 운전중에 있으며, 제2기에서 발전능력 7MW의 발전설비를 2개소에 설치

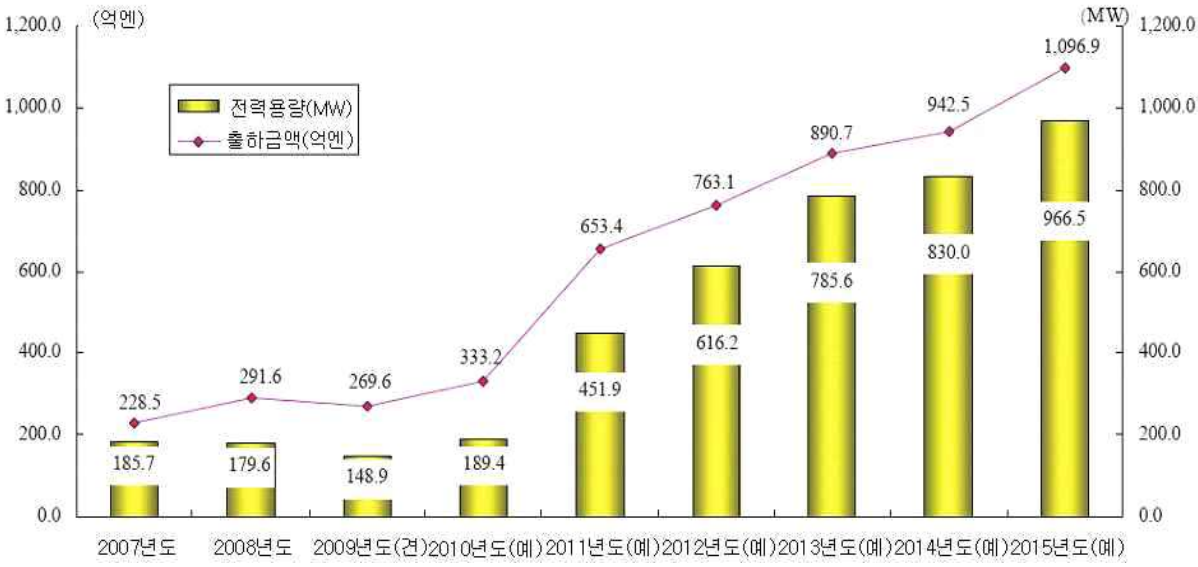
○ 일본에서는 2009년 이바라키현 해상에 후지 중공업 히타치의 2MW급 해상풍력 발전기 7기가

설치된 바 있으며 신에너지 산업 기술 종합개발 기구(NEDO)프로젝트의 일환으로 치바현 조시시 앞바다에 본격적인 해상풍력 플랫폼 실증시험이 이루어질 예정임

- 일본 근해는 수심 50m를 넘는 해역이 존재하기에 해상에 설비를 부유시키는 부체식 풍력타워 개발에 주력하고 있고, 일본 근해에서의 평균풍속이 6m/s 넘어 어느 지역에서도 풍력발전을 실시 가능함
- 풍력발전 도입량이 일본에서 가장 큰 아오모리현에서 시모키타반도의 롯카쇼촌으로 태평양 연안의 육상에 19기, 해상에 32기의 풍력타워를 설치하는 계획이 진행 중이며, 시모키타반도의 태평양 측에도 2개의 풍력발전 프로젝트가 추진 중임
- 부유식 풍력타워는 3개의 수직 기둥과 2개의 수평 기둥을 직각으로 결합한 구조로 아래 절반 정도를 수중에 잠수시켜 안정화 시켰으며, 타워 직경 167m, 중심을 해수면에서 105m 높이에 설치
- 풍력타워의 회전을 발전기에 효율적으로 전달하기 위해 유악 드라이브 방식을 사용하였고, 해상의 변전설비에 송전 케이블을 연결하여 육상으로 전력을 보내는 방법을 사용하여 발전중에 있음

○ 일본 정부는 2012년 7월부터 자연 에너지 전량 매입제도를 도입하여 풍력발전을 통해 전력회사로 공급되는 전력을 1kW당 23.1엔에 구매할 계획을 밝히는 등 시장 활성화에 적극 참여하고 있음

○ 해상 풍력발전이 급속하게 증가하여 2050년도에는 육상과 해상을 합해 5,000만KW에 도달하는 로드맵 작성



[그림 48] 일본 풍력발전 시장 규모 확대 전망치
(자료 : 야노경제연구소)

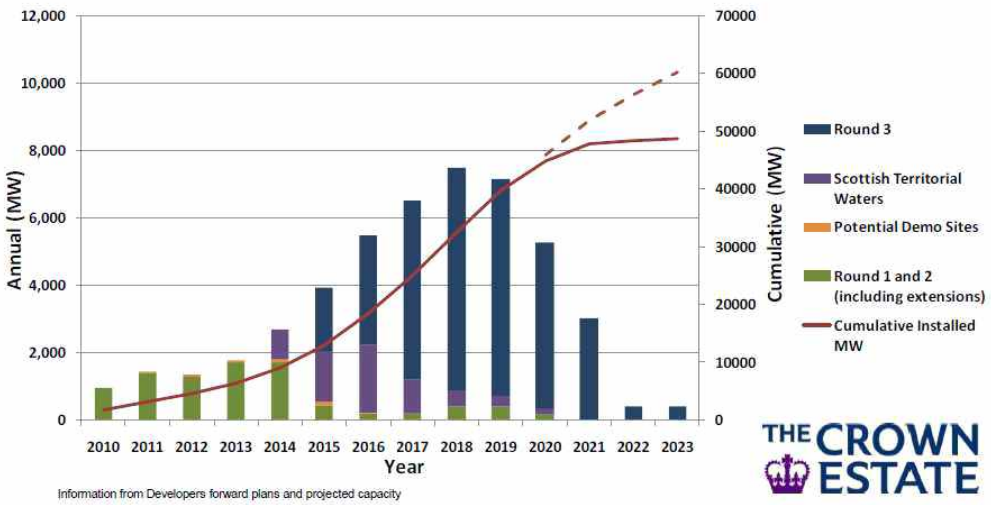
(라) 중국

□ 중국 시장은 현재 아·태지역 내에서 매우 빠른 속도로 증대되고 있으며, 앞으로도 중국 정부의 강력한 지원 아래 지속적인 개발이 예상되고 있어 세계적 잠재 시장으로 부각되고 있음

- 육상풍력발전을 지속적으로 개발하고 있는 중국은 최근 긴 해안과 우수한 풍황 조건을 갖춰 잠재 부존량이 풍부한 자국의 해상풍력발전 시장을 적극 확대해나가고 있음
- 중국의 해상풍력 관련 최초의 상업화 프로젝트인 상하이 둥하이(东海) 대교 해상풍력 발전 사업이 현재 진행 중에 있음. 본 사업은 3MW급 해상풍력 플랫폼 34기를 설치해 총 102MW 규모의 발전량을 확보하는 것을 목표로 하고 있으며, 사업 완료시 발전단지의 연간 발전량은 267GW에 이를 것으로 추정됨
- 상해 푸둥(浦东), 산둥 창다오(长刀) 등에 해상풍력 플랫폼이 지속적으로 설치되고 있으며, 장쑤성의 경우 2020년까지 7GW 규모의 해상풍력 발전단지를 구축하고자 2010년 11월부 개발사업이 진행 중에 있음.
- 중국의 해상풍력 발전 용량은 2015년에 15GW, 2020년에는 30GW를 넘어설 것으로 예상되고 있음.

(마) 영국

□ 영국은 3단계의 라운드 프로젝트를 통해 2023년까지 총 47GW 규모의 해상풍력 발전단지를 조성할 계획임



[그림 49] 영국의 해상풍력 발전계획 (자료 : 주영대사관, 2011)

○ 3라운드 프로젝트는 2012년 하반기부터 turbine 등의 부품 발주를 개시하고 2015년 해상 설치를 시작하여 2023년 목표 발전용량인 32,000MW에 해당하는 발전단지를 추가 구축하며, 이를 통해 약 50,000MW의 전력을 해상풍력발전을 통해 공급하도록 함

(바) 독일

□ 독일은 2020년까지 10GW 해상풍력 설치를 목표 함

○ 북해 및 발트해 연안을 중심으로 한 독일 해상풍력단지는 대부분 연안에서 30~60Km 이상 떨어진 해상에 설치되지 않으면 자연경관 및 생태계 훼손 등의 이유로 독일 당국의 인허가가 어려워 연안으로부터 30~80Km, 200Km 이상 떨어진 곳에 해상풍력단지가 설치가 이루어짐

- 그러나 깊은 수심으로 인한 위험성과 설치선 이동거리로 인한 높은 비용의 부담을 가지고 있음
- 또한, 풍력기업과 송전망기업간의 불화로 인해 노디시오스트 풍력단지의 완공년도가 2년 지연되는 등의 독일 해상풍력발전 활성화에 걸림돌이 되고 있음

○ 독일 지멘스가 북해에 해상풍력 HelWin 1 플랫폼 설치에 성공하였으며, 이 플랫폼은 노드시오스트와 미어윈드의 해상풍력발전단지에서 생산된 전력을 손실이 낮은 직류로 전환해 함부르크의 서북 지역에 위치한 지상 발전소로 전달

□ 독일의 Vestas, GE, Gamesa 등 기존 시장 상위 업체들의 시장 점유율이 점차 하락

○ 반면, Sinovel, Goldwind 등 내수시장 확보에 따라 중국 업체들의 약진이 계속되고 있음.

- 중국 시장의 확대 추세로 볼 때, 이와 같은 현상은 당분간 지속될 것으로 전망됨

○ 이에 따라 유럽의 시장 상위 업체들은 경제성 및 안전성이 우수한 신형식 플랫폼과 심해 적용이 가능한 부유식 해상풍력 플랫폼 개발 등 새로운 해상풍력 분야 시장 개척에 많은 노력을 쏟고 있으며, 추후 이러한 분야에 우수한 기술력을 가진 업체들의 시장 점유율이 증가할 것으로 예상됨

(사) 덴마크

□ 오일쇼크에 의해 정부 주도 하 대규모 풍력발전 단지 구축

○ 거의 대부분의 에너지를 수입에 의존했던 덴마크는 오일쇼크를 통해 막대한 타격을 입었으며, 그 후 정부 주도 하 대규모 풍력발전 단지 구축

- 이에 따라 다른 국가들보다 먼저 육상 풍력단지 건설의 공간적 한계를 깨달을 수 있었으며, 1991년 세계 첫 해상풍력 플랫폼을 설치한 이래 2008년까지 214기

의 해상풍력 플랫폼(423MW)을 설치함

○ 덴마크 정부는 2003년, 해상풍력발전 장기개발계획을 수립하고 2025년까지 북해의 해상전력 생산량을 5,200MW까지 증대시킴

○ 특히 최근에는 심해 단지조성이 가능한 부유식 해상풍력 플랫폼 기술개발에 관심을 갖고 관련 기술에 대한 투자를 늘리고 있음

(아) 싱가포르

□ 아직까지 싱가포르의 풍력에너지 시장은 협소한 편이나, Gamesa 등 세계적인 풍력에너지 기술 기업들이 동남아시아 시장 진출을 위한 교두보로써 최근 관심을 갖고 진출하고 있음

○ 싱가포르는 뛰어난 R&D 인프라스트럭처와 물류 기반, 고급인력, 대량생산 노하우 및 산업 역량, 유망한 아시아 시장과의 뛰어난 접근성 등을 갖추고 있어 최적의 해상풍력발전 시장 입지를 갖춘 것으로 분석되고 있음

- 이에 세계 최대 풍력기술업체인 덴마크의 Vestas는 2007년 싱가포르에 지역본부를 개소하였으며 향후 10년간 싱가포르에 약 5억 싱가포르 달러를 투자해 자국 외 최대 규모의 R&D센터를 구축할 계획을 밝힘

○ 또한 스페인의 Gamesa 역시 2012년 4월 싱가포르에 신규 R&D센터와 상용화 사무소를 개소하고 NTU, NUS, A-Star 등의 연구진들과 협력하여 향후 18~24개월 내로 연구 상용화를 이루고자 함

○ 이와 같은 시장 확대 추세는 풍력에너지를 포함한 청정에너지 R&D 중심지로서 거듭나고자 하는 싱가포르 정부의 노력과 기업 R&D 및 동남아 시장진출확대를 노리는 해외 유수 풍력업체들의 전략이 통합 반영된 효과로써 향후 지속적인 시장 확대가 이루어질 전망임

3.2. 부유식 조류-풍력 복합발전 시장 동향

□ (해상풍력-파력) 풍력과 파력발전의 경우 불규칙적인 발전으로 인하여 전력품질이 화력발전과 원자력발전에 비해 낮아 이에 대한 대안으로 복합발전 대두

○ 복합발전의 하나인 풍력-조류발전의 경우 규칙적인 발전량을 가지는 조류발전의 특성과 풍력의 불규칙적인 발전이 결합되어 풍력발전의 불규칙적인 발전을 일정 부분 해소

○ 또한 해상풍력에 비하여 경제성이 낮은 파력발전과 조류발전을 풍력과 복합 개발하는 경우는 경제성을 향상시킬 수 있음

- 해상풍력 발전과 파력발전은 개발 적지가 일치하는 경우가 많아 하나의 구조물

및 제어 시스템을 통하여 풍력과 해양에너지원을 동시에 활용할 수 있으며, 발전효율 및 경제성 향상이 가능할 것으로 기대됨

- 해상풍력발전의 경우 각각의 터빈과 터빈 사이의 간격이 500~1000m에 이르기 때문에 단지화를 할 경우 넓은 해역이 필요
- 이러한 해역을 효율적으로 활용하는 것이 해상풍력단지의 경제성 확보에 있어 중요한 요소임
- 덴마크의 부유식 해상풍력-파력발전 장치인 포세이돈(Poseidon)이 실증시험 중에 있고, 영국 Green Ocean Energy사의 500kW급 부유식 "Wave Treader" 시제품을 개발
- 미국의 Grays Harbor Ocean Energy사와 Virginia Tech사, 노르웨이 Pelagic Power사 등이 다양한 모델을 연구
- 영국과 네덜란드에서는 조류·조력 발전, 해상풍력발전, 해수온도차발전, 해상태양광발전 시스템 연구

□ (부유식-해상풍력) 국내는 2014년 6월 제주 해역에 2GW 규모의 부유식 해상풍력 발전단지 건설중에 있으며, 2단계에 걸쳐 설치할 계획

○ 1단계 사업에서 2015년까지 미국 PPI사의 반잠수식 부유체를 제주 해상에 적용할 수 있도록 설계를 변경하고 부유체와 풍력터빈을 복합적으로 조정할 수 있는 제어기술 개발을 추진

○ 2단계 사업에서 해상풍력시스템을 부유체와 결합해 제주 해상에 띄우는 실증사업으로 5.5MW 해상풍력시스템 2기를 설치할 계획

○ 제주 해상 여건을 고려하여 깊은 수심에 적용가능한 부유식 해상풍력터빈을 개발하여 수심 35m 이내에는 고정식, 35m 이상 수심에는 부유식 풍력터빈을 적용해 종방향의 대규모 해상풍력단지 조성이 가능할 전망임

□ (부유식 플랫폼) 부유식 해상 풍력 발전기의 잠재량은 영국 130 GW(TLP형), 아일랜드 40 GW(TLP형), 노르웨이(140GW, Spar 또는 TLP형), 핀란드 (7 GW, TLP), 한국 25GW (TLP또는 Spar형)으로 추산

○ 영국에서는 2010년에 세계 최대의 설비용량을 자랑하는 Thanet 해상풍력발전소가 가동되어, 해상풍력발전의 설비용량이 134만kW에 도달하였음

- 2007년에 영국정부는 2020년까지 3,300만kW의 해상풍력을 개발한다는 목표를 발표했으며, 사업규모는 무려 130조원이상으로 이 계획에서는 2020년까지 7,000기 이상의 해상발전소를 설치하고, 영국의 전 소비전력의 1/3을 제공

○ 영국의 해상풍력개발은 Round 1, Round 2, Round 3의 3단계로 나누어서 진행되고 있으며,

Round 1의 개발해역은 해안선에서 비교적 가까운 즉, 수심이 얕은 장소이지만, Round 3는 해안선에서 벗어나, 수심이 깊은 장소로 이동하고 있음. Round 3의 가장 먼 구역은 해안선으로부터 195km, 가장 깊은 구역은 평균수심 50m임.

- 현재까지의 해상풍력발전 프로젝트와 비교했을 때, Round 3은 아주 큰 도전과제라고 말할 수 있으며, 이미 2010년 1월에 Round 3의 개발사업자가 입찰로 결정되어, 9개 구역의 총 설비용량은 3,200만kW로 결정

○ 일본의 신재생에너지 개발을 주도하고 있는 NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization)에서는 2004년 수립한 '풍력발전로드맵'에서 2030년 해상 풍력발전 설치 목표량을 해상기초식으로 300만kW, 부유식으로 1,000만kW를 계획

○ 풍력발전은 발전단지가 대형화될수록 경제성 역시 향상되나 육지에는 수백MW 규모의 대형 단지를 건설할 수 있는 부지가 매우 제한적

○ 또한 단지 건설에 따른 민원 문제 역시 큰 장애로 작용하므로 풍력발전의 보급 확산이 제한적

○ 해상은 육상보다 풍황자원이 우수하고 대형 발전단지 건설이 용이하며, 단지건설에 따른 민원도 육상보다 적음

○ 특히 육지에서 멀어질수록 풍황자원이 좋아지고 민원은 줄어드나 수심이 깊어지므로 건설비용이 증가

○ 현재 유럽 선진 제작사들은 5MW급 이상의 대형 풍력발전기를 경쟁적으로 개발하고 있으며 이는 해상풍력발전단지의 대형화에 유리한 요소로 작용

□ 스코틀랜드 해안에서 25km 정도 떨어진 먼 바다에 떠있는 부유식 해상 풍력 발전소의 명칭은 '하이윈드 풍력 발전소(Hywind farm)' [3)]

○ 노르웨이의 에너지 전문 업체인 스타토일(Statoil)社가 아랍에미리트의 신재생에너지 벤처기업인 마스다(Masdar)社와 손을 잡고 공동으로 건설

○ 스타토일社의 발표에 따르면 이 풍력 발전소는 총 5기의 6메가와트(MW)급 발전기로 구성되어 있어서, 스코틀랜드 해안가에 거주하는 약 2만 가구의 가정에 전력을 공급할 수 있는 수준

○ 하이윈드 발전소를 건설하는데 있어 소요된 자금은 약 2억 파운드로서 우리 돈으로 약 3000억 원 정도가 투자된 것으로 알려졌는데, 신재생 에너지 생산을 위한 투자규모치고는 상당히 큰 비용이 들어갔다는 것이 업계의 시각

○ 최근 몇 년간 해상 풍력 발전소의 건설 비용이 현격하게 감소하고 있음

3) http://www.sciencetimes.co.kr/?news=%ED%92%8D%EB%A0%A5-%EB%B0%9C%EC%A0%84-%ED%95%B4%EC%83%81-%EB%B6%80%EC%9C%A0%EC%8B%9D-%EB%8C%80%EC%84%B8#:none

- 비용 산출의 대상이 해저 바닥에 고정하는 풍력 발전소이기 때문에 부유식 발전소와는 다르지만, 부유식이 고정식 보다 더 저렴하게 설치할 수 있기 때문에 건설 비용을 대폭 줄일 수 있음

○ 부유식이 고정식보다 설치 비용이 저렴할 수 있는 이유는 해저 바닥에 고정하는 지지대를 설치할 필요가 없기 때문이다. 물론 부유식도 발전기가 뒤집어지거나 파도에 휩쓸려 가지 않도록 고정해주는 케이블을 설치해야 하지만, 케이블 설치와 지지대 설치는 비용면에서 상당한 차이가 있다.

○ 풍력 발전기는 높이가 거의 250m에 달하는 만큼 고정식 발전 방식이라면 지지대 설치에 상당한 비용이 소요된다. 반면에 부유식은 해저 바닥에 설치한 고리에 케이블을 4면에서 연결만 해주면 되기 때문에 상대적으로 설치 비용이 저렴할 수밖에 없는 것이다.

○ 발전기의 고정 작업과 관련한 부유식 풍력 발전의 또 다른 장점으로는 확장성을 들 수 있다. 고정식 발전기는 비용도 비용이지만, 조금만 수심이 깊어져도 작업이 불가능해진다. 그러나 부유식은 수심이 아무리 깊어도 발전기를 설치하는데 있어 별 다른 어려움이 없다.

○ 하이윈드 풍력 발전소의 경우 현재 수심이 100m가 되는 수역의 해상에 설치되어 있는데, 스타토일社가 공개한 자료에 따르면 육지에서 멀리 떨어진 수심이 800m가 되는 바다 위에도 발전기 설치가 가능한 것으로 파악됐다.

○ 한편 스타토일社는 에너지 분야에서 확보한 기술과 경험을 바탕으로 해상용 풍력 발전 분야에서 두각을 보이고 있다. 스코틀랜드 외에도 프랑스와 영국, 그리고 아일랜드 및 포르투갈에도 오는 2021년까지 9개의 부유식 풍력발전소를 설치할 계획인 것으로 알려졌다

[그림 50] 세계 최초의 부유식 해상 풍력 발전소인 하이윈드
자료: 사이언스타임즈, 탈원전 시대, '해상 부유식' 풍력 발전 주목, 2017.11.02

4. 연구개발과제 도출

4.1. 연구필요 기술

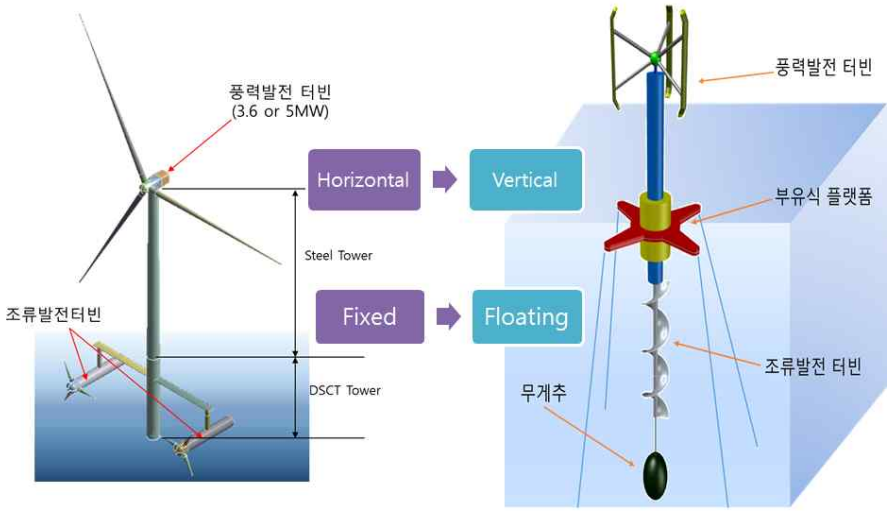
□ 제안 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템

○ 본 기획에서는 아래와 같은 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템을 제안함.

○ 1단계 추진 과제의 개발 목표는 4MW(풍력 3MW, 조류 1W)급 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 핵심기술 개발 및 기본설계이며, 2단계는 7MW(풍력 5MW, 조류 2MW)임.

○ 대상 후보지는 수심 30m 이상, 평균풍속 7m/s 이상, 평균유속 1.m/s 이상으로 설정함.

○ 제안 시스템은 파력을 추가하여 확장될 수 있음.



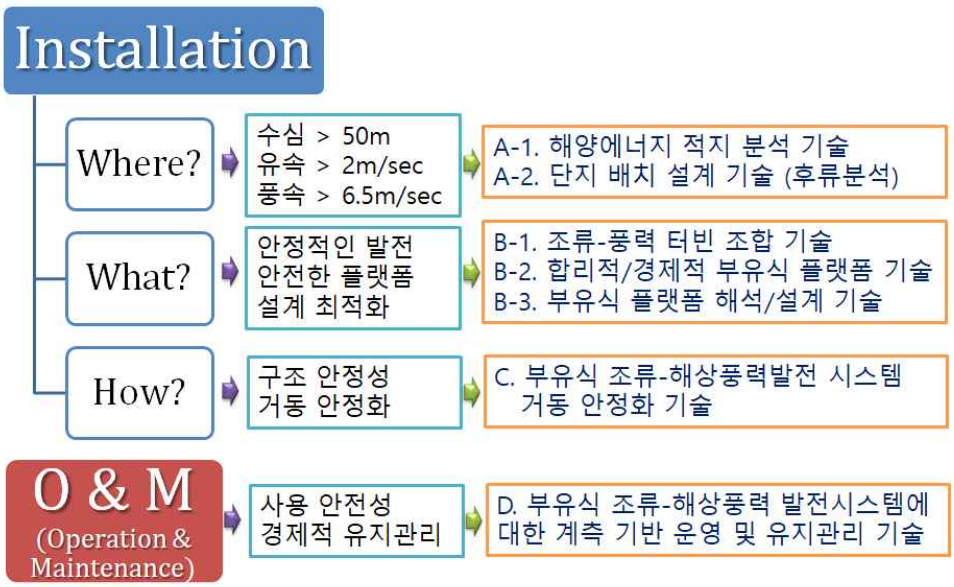
[그림 51] 제안 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템

Extension

[그림 52] 제안 시스템의 확장

□ 제안 시스템의 개발을 위해서는 아래의 조건을 만족하는 설치와 운영/유지관리 기술의 개발이 필요함.

- 적지선정 기술 : 해양에너지 부존량 산정, 단지 배치
- 부유체 구조(Platform) : 풍력, 조류 터빈지지 부유체, 형상 및 재료, 풍력-조류 터빈 조합에 따른 안전성, 구조체 설계
- 부유체 운동 안정화 : 연성거동해석, 터빈 조합에 따른 거동 분석, 안정화, 계류선
- 유지관리 : Deep Learning



[그림 53] 개발 조건 및 연구 필요 기술

4.1.1. 해양에너지 적지 분석 기술

○ 선진 각국은 일찍부터 해양에너지 자원에 관심을 가져 자국 해역에 대한 잠재적 개발적지 파악 및 개발에 노력을 기울이고 있음.(국립해양조사원, 2010).

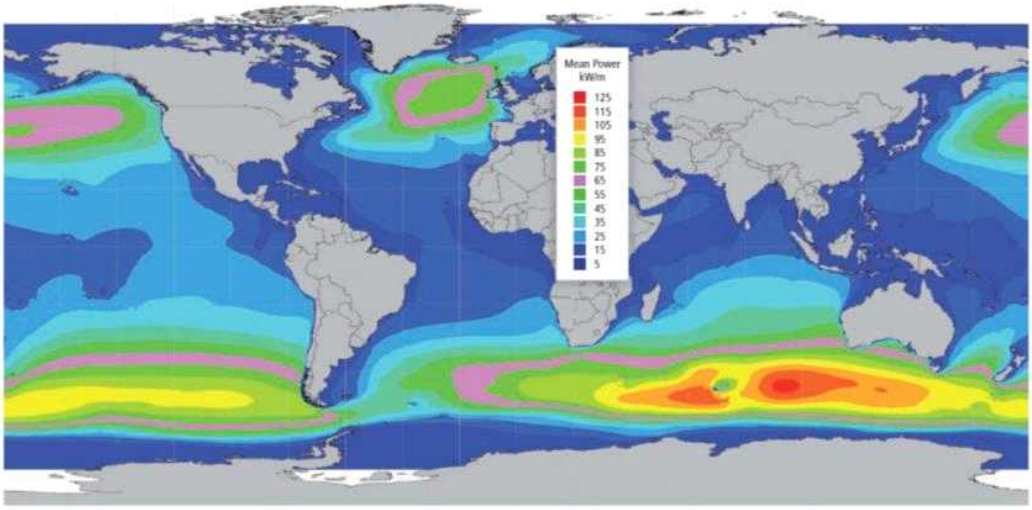
○ 전 세계의 해양에너지 개발 연구를 선도하고 있는 영국의 경우 영국 에너지 기술지원단(Energy Technology Support Unit, ETSU(1993))에서 해도의 최강유속을 분석하여 영국의 조류에너지 자원량을 추정하여 적지 33개소를 확인

○ European Commission(1996)은 유럽연합의 지원으로 ETSU가 사용한 방법을 통해 유럽 주변해역의 조류에너지 자원량을 추정(12,500MW)하여 이에 대한 전자 BD를 구축하였으며, 캐나다

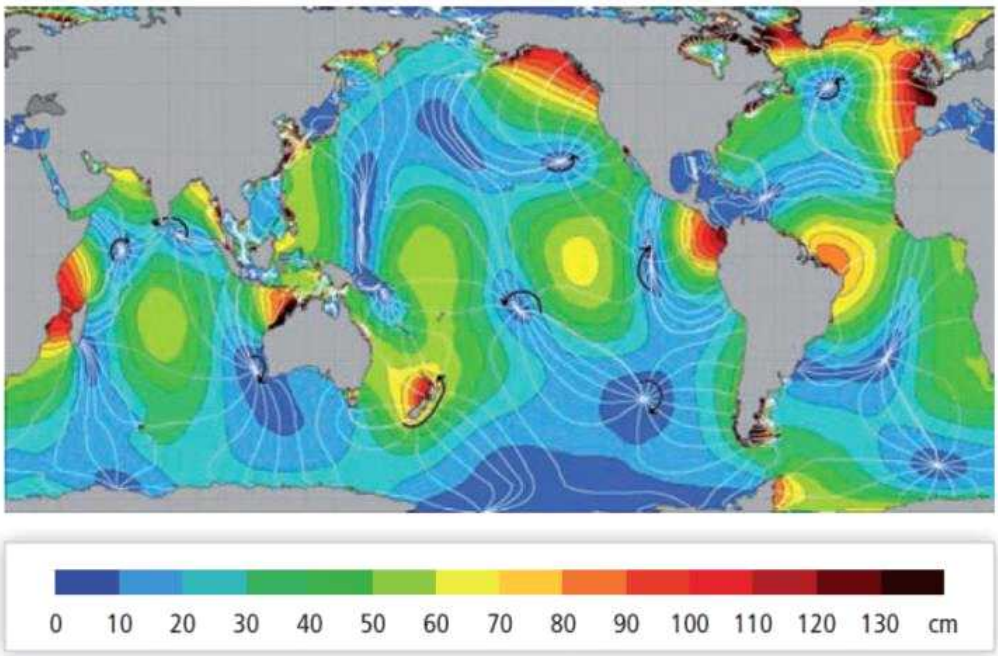
의 British Columbia Hydro 전력회사는 조류에너지 자원량을 나타내는 주요 물리적 요소를 DB화하여 개발 유망지를 파악(BC Hydro, 2002).

○ 스코틀랜드 정부에서는 스코들랜드 주변해역의 해양에너지 자원 분포도를 작성하여 공개

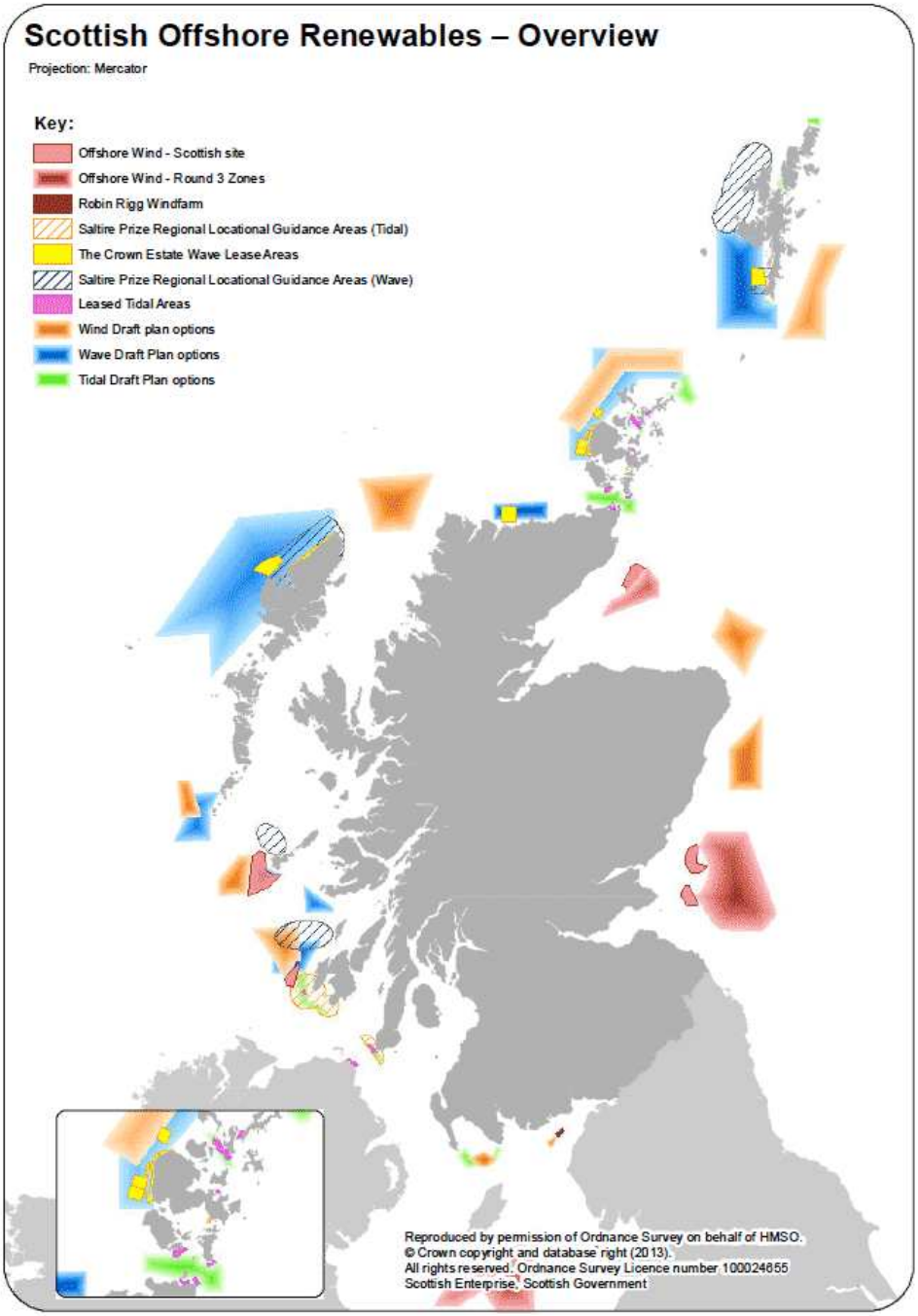
○ 국제 에너지 협의체인 Word Energy Council에서는 주기적으로 World Energy Resources: Marine Energy를 발간하여 전 세계에 분포되어 있는 해양에너지 자원량을 추정하여 공개 (WEC, 2016).



[그림 54] Global offshore annual wave power level distribution (출처: Cornett(2008))



[그림 55] Global semidiurnal tidal amplitude (출처: NASA)



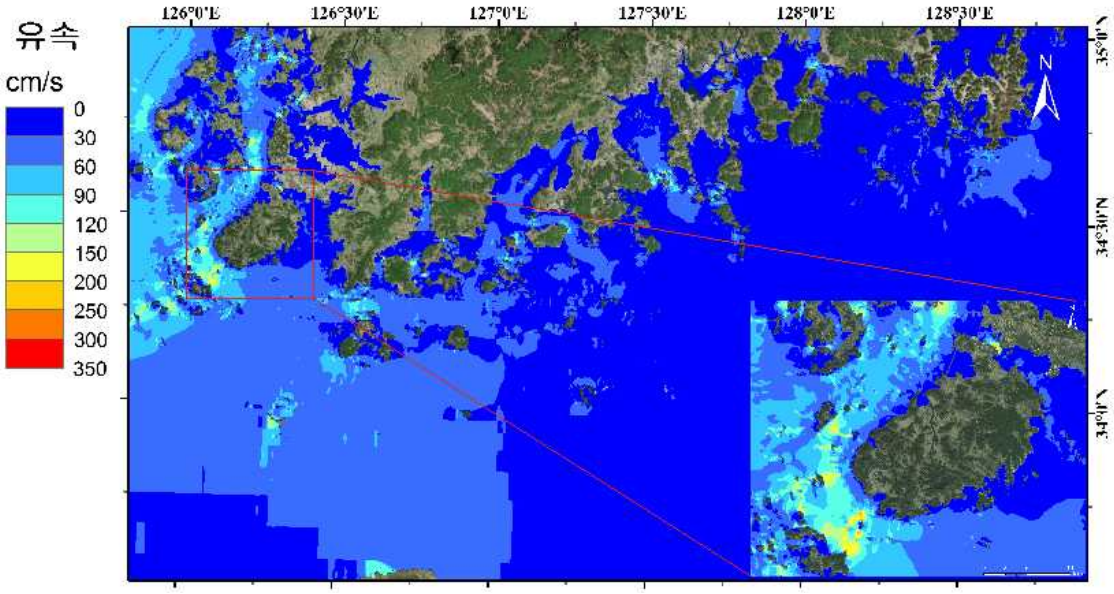
[그림 56] 스코틀랜드 주변해역의 해양에너지 자원 분포도(출처: HMSO)

○ 우리나라의 경우 한국해양과학기술원에서 한국 남부해역의 해양에너지 자원 분포 및 가용발전량 조사연구(2010) 조력·조류에너지 실용화 기술개발 연구(2011) 등을 통해 한반도의 해양에너지의 분포를 파악

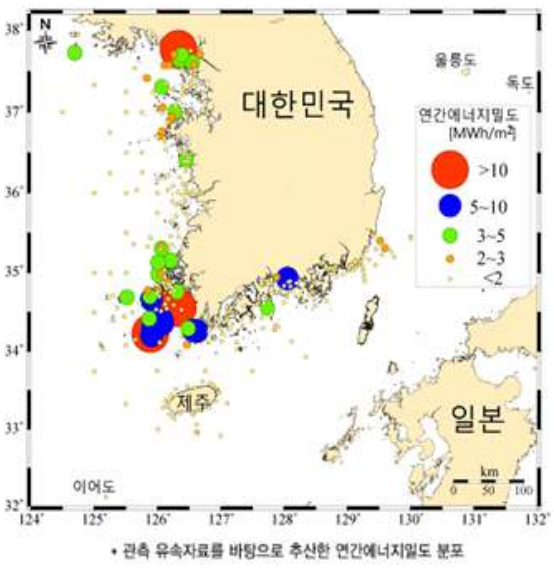
○ 국립해양조사원의 경우 남한의 서·남해 연안에서 관측된 유속자료를 바탕으로 잠재적인 조류에너지 자원량을 정량적으로 추정(국립해양조사원, 2010)

○ 국립기상연구소와 한국에너지기술연구원에서는 관측자료 및 수치모의 결과를 바탕으로 우리나라의 풍력기상자원도를 제작하였으며, 현재 지속적으로 보완하고 있는 상태

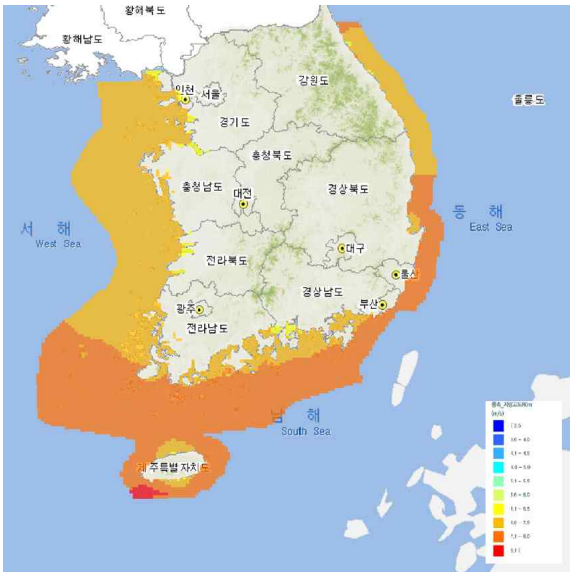
○ 이외에도 대학을 포함한 다양한 기관에서 우리나라 주변의 해양에너지 부존량 연구를 지속적으로 진행



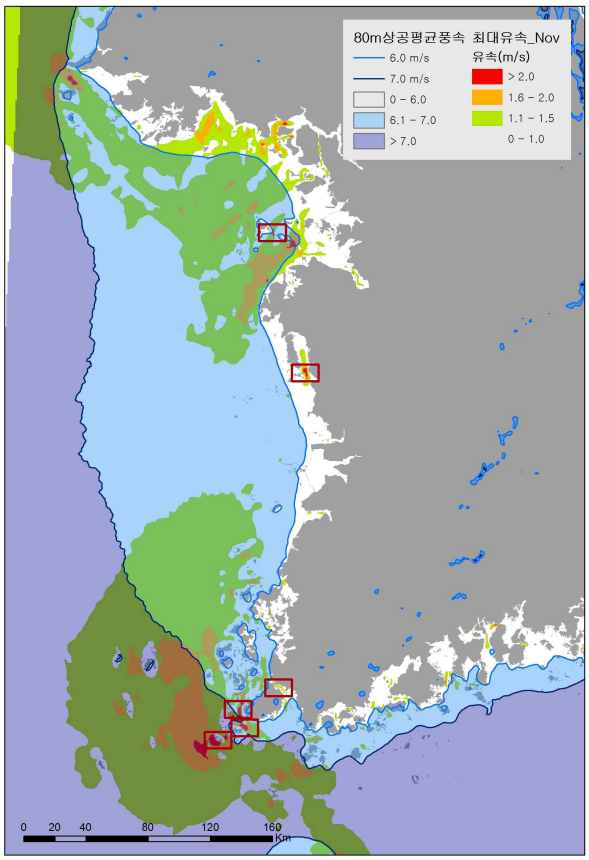
[그림 57] 한반도 남부해역의 조류에너지 자원분포도(한국해양과학기술원)



[그림 58] 우리나라 연간에너지밀도 분포도(국립해양조사원)



[그림 59] 한반도 해상 풍력에너지 자원분포도(에너지기술연구원)



[그림 60] 우리나라 서남해의 조류-해상풍력에너지
자원분포도

4.1.2. 부유식 구조체 거동 안정화 기술

- 해외에서는 부유식 해상풍력 시스템 개발 및 실증사업이 진행됨에 따라 블레이드-타워-하부체-계류계 시스템에 관한 연성해석 및 제어에 관한 연구가 활발하게 추진되고 있음
- 조류-해상풍력 복합발전의 경우에도 대형 부유체 시스템에 관한 연성해석 및 제어 연구가 필수적으로 필요함
- 부유식 해상풍력 동적 거동 모델링은 공력-유체력-계류력과 제어 및 구조동력학적 연성 해석을 수행하는 형태로 진행 중이며, 대표적인 S/W는 FAST(NREL), Simo(Sintef), WindHydro(KIMM) 등이 있음
- 조류-해상풍력 복합발전 연성 해석은 부유식 풍력발전 시스템 특성에 더하여 조류발전 시스템과의 연성 및 상호 간섭효과를 포함하여 통합하는 모델링 형태로 개발이 필요함
- 특히 설계하중 조건에서 부유체의 동적 안정성을 평가하고 거동을 안정화시키는 기술 및 안

정성 평가 기준에 관한 연구가 이루어져야 함

<표 8> 다양한 분야의 부유식 구조물 적용 사례

<table>
<tr><td>
[반잠수식 해상플랜트]</td><td>
[부유식 석유생산시스템]</td></tr>
<tr><td>
[원해 양식장]</td><td>
[초대형 부유식 구조물 공항]</td></tr>
<tr><td>
[파력-해상풍력 복합발전]</td><td>
[부유식 인공섬]</td></tr>
</table>

○ 부유체 거동 및 계류에 관한 모델링 및 실험 연구는 해양플랜트 산업 분야에서 이미 응용되고 있는 기술이며, 이와 관련하여 국내·외 대학 및 연구소 등에서 관련 연구개발이 활발하게 이루어지고 있음

○ 부유체 거동에 관한 기술은 해양플랜트 산업 뿐 아니라 초대형 부유구조물(VLFS: Very Large Floating Structures) 관련 기술, 양식장(Offshore Aquaculture), 외해 인공섬 등 다양한 분야에 적용되고 있음

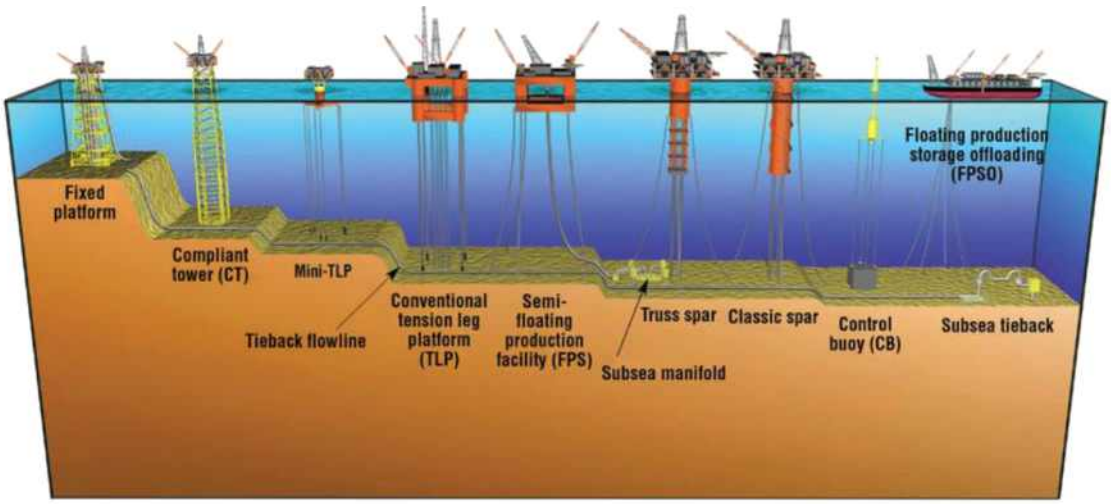
4.1.3. 부유식 플랫폼 기술

(1) 부유식 해양구조물 종류

○ 고정식 해상 구조물은 해저면에 고정되어 유리한 조업조건을 제공하지만, 수심이 점차 깊어지면 구조물의 크기가 너무 비대해지면서 경제성을 잃어버리고, 또한 피로에 의한 파괴의 위험성을 피하기가 어려워짐.

○ 이에 대한 대안으로 수심의 영향을 직접적으로 받지 않는 부유식 구조물을 생각 할 수 있으나, 부유식 구조물은 바람, 조류, 파도에 의해 발생되는 6자유도 운동과 특히 비선형 표류운동을 하므로 별도의 장치를 이용하여 이러한 운동에 대하여 억제 혹은 보상하여 안전성을 확보해야 함. (대한조선공학회, 2002).

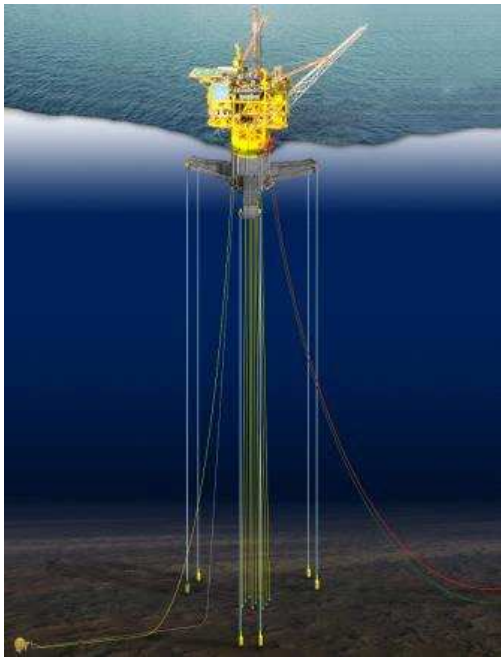
○ 부유식 플랫폼의 위치 형태를 유지하는 안정성 측면에서 부유식 해상 구조물의 종류는 하부구조물인 부력체가 외력을 받을 경우에 이에 대항하여 위치 형태를 유지하는 복원성의 발생에 따라 분류됨.



[그림 61] 해양 구조물의 종류 (Pedro Gomes, 2014)

□ 인장각 플랫폼 (Tension Leg Platform: TLP)

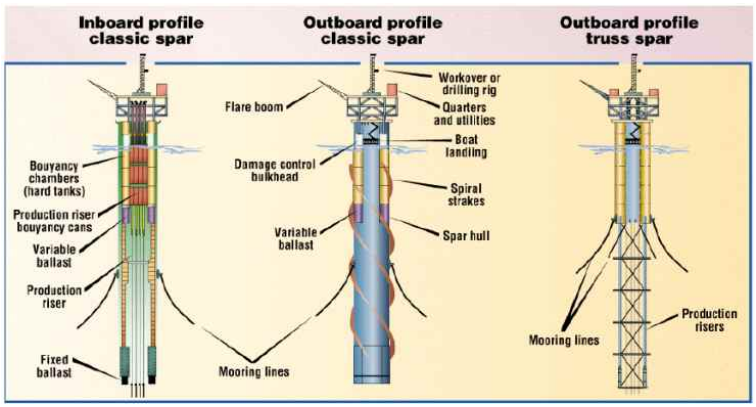
○ TLP는 아래에서 소개할 반잠수식과 유사하나, 텐던(tendon)이라는 특수 계류선의 인장력과 구조물의 부력을 이용하여 해저면에 연결시켜 일정위치에서 벗어나지 못하게 만든 구조임.



[그림 62] TLP (www.riqzone.com)

□ 원통부이형 (SPAR)

○ SPAR는 반잠수식과 유사하며, 원통형의 긴 실린더 모양의 하부구조로 되어있는 구조물의 상부에 플랫폼을 건설하고, 하부에 방사형으로 계류선을 배치한 형식의 부유식 구조물



[그림 63] 원통부이형 (Pedro Gomes, 2014)

□ 반잠수식 (semi-submersible)

○ 부유체로는 초기에 선박이 주로 이용되었으나, 운동성능이 우수한 반잠수식(semi-submersible)이 출현하면서 이를 대체함.

○ 선박에 비해 수선면적이 작아 파랑과의 공진을 피하기에 유리하며, 큰 배수량의 하부구조가

물속에 잠겨 있어서 수직운동이 줄어드는 장점이 있음.

○ 하지만 적재중량이 크게 제한되어있으며 가격이 비싼 것이 단점임.

[그림 64] 반잠수식 구조물
(www.offshore-mag.com)

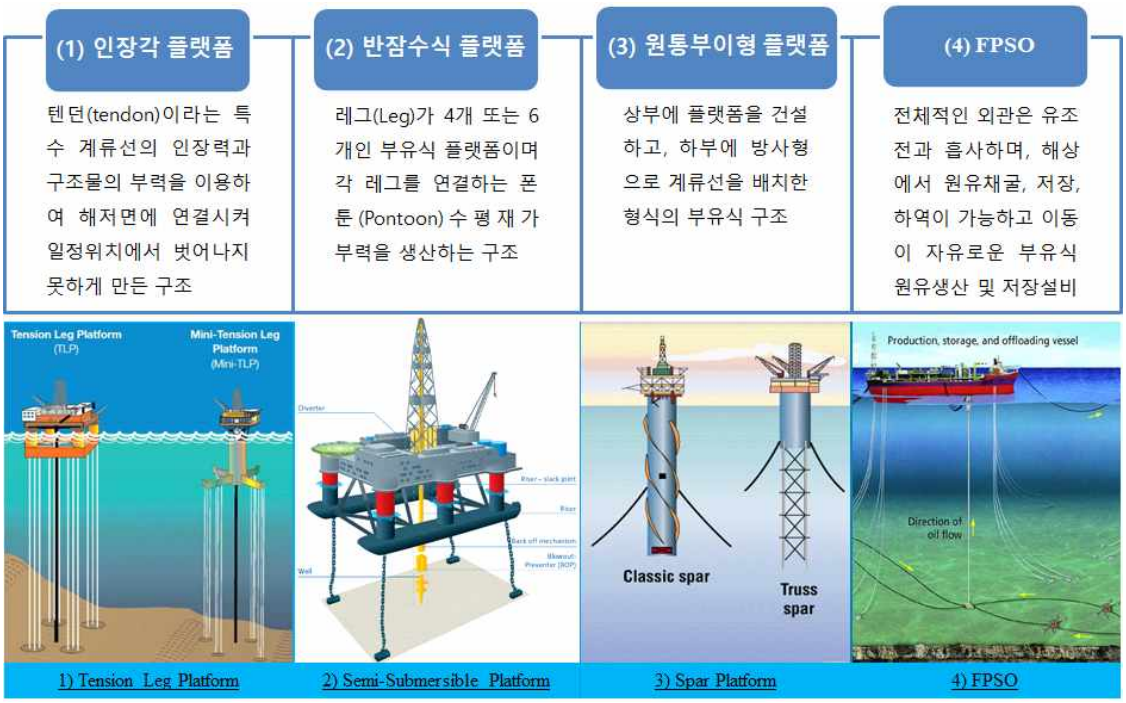
□ Floating Production Storage and Off-loading (FPSO)

○ FPSO는 선박으로 생산하면서 저장과 하역을 겸하는 부유식 복합생산 시스템임.

○ 저항을 작게 받아 예인선의 도움 없이 자체의 추진기를 이용하여 목적지에 도달이 가능하며, 배수량이 커서 시자재와 생산되는 기름 또는 액화LNG와 같은 자원을 저장할 수 있는 장점이 있음.

[그림 65] LNG-FPSO의 주요장비 (www.gasnews.com)

□ 부유식 해양 구조물에 대한 특징은 다음과 같이 정리할 수 있음.



[그림 66] 부유식 플랫폼의 종류 및 특성

(2) 해상 부유식 구조물의 설계 및 해석

1. 상판의 squeeze/pry 하중
2. 텐던 (또는 계류라인) 연결부
3. 중량의 민감도

1. 고체의 ballasting, VIM(vortex induced motion), VIV(vortex induced vibration)
2. 계류시스템, 설치 및 전도

1. 구조체의 연성도
2. 구조체의 목적
3. 계류 시스템의 선정
4. 파랑(Slamming) 의 영향
5. 부유식 구조체와 연결부분의 상세설계

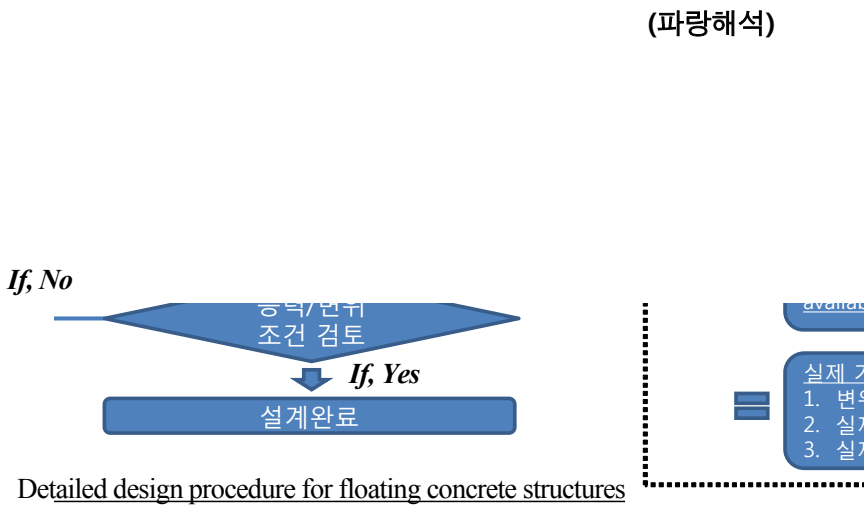
[그림 67] 부유식 구조체의 설계시 고려사항

○ 부유식 해양 구조물의 전체적인 설계과정은 다른 구조물의 경우와 같이 구조설계 하중의 계산, 경험에 근거한 부재의 초기치수 선정, 계산된 하중에 대한 구조해석, 그리고 해석 결과를 근거로 한 구조부재 치수의 적합여부 판정과정으로 구성됨.

○ 마지막의 판정과정에서 부적합한 결론이 나오면, 부재의 치수를 수정하고 계속적인 반복 과정을 통해 최종 설계가 이루어짐.

○ 이 과정에서 이전의 유사한 케이스의 설계 자료나 선급이 제시하는 설계식을 이용하게 됨. 하지만 선박의 경우와는 달리 해양 구조물의 경우는 적합한 설계식이 많지 않아 충분한 설계 경험이 없는 경우는 많은 시행착오를 겪을 수밖에 없음 (대한조선공학회, 2002).

○ 아래의 그림에 해양구조물 설계과정을 간략하게 나타냄.



[그림 68] 부유식 구조체의 설계과정

○ 육상에서의 하중조건과는 달리 해양 구조물은 파랑에 의한 하중을 고려해야 하며, 매우 복잡한 양상을 보여서 파랑하중을 명확하게 규명하지는 못하고 있는 실정임.

○ 해양 구조물 설계에서 일반적으로 고려되는 파랑은 크게 규칙파와 불규칙파로 나눌 수 있으며, 구조물의 종류에 따라 그 특성이 달라지므로 일반적인 기술이 어려움.

○ 해양에서의 바람은 그 속도의 변화가 너무 빠르고, 조류의 경우는 반대로 너무 느리게 변화하여, 이 둘은 보통 정적하중으로 간주하며, Morison 방정식을 이용하여 산정할 수 있음 (대한조선공학회, 2002).

○ 해양 구조물의 구조해석은 해양 구조물이 가동상태에서 안전한가를 검토하는 정치해석(inplace analysis), 해상오퍼레이션 관련한 선적해석(load out analysis), 운송해석(transportation analysis), 리프팅 해석(lifting analysis), 도역학적 구조해석, 피로해석 등이 있음.

○ 해양 구조물의 종류에 따라 필요한 해석의 차이가 있을 수 있으며, 해양 구조물 특성상 최종적으로 설치되는 장소와 건조 장소가 상당히 거리를 사이에 두고 있기 때문에 운용 장소에서 제 기능을 충분이 발휘하기 위한 해상 오퍼레이션을 위한 설계와 해석이 반드시 이루어져야 함 (대한조선공학회, 2002).

○ 또한 해상풍력, 해상 태양광발전, 조류에너지 융복합에너지 발전 등의 새로운 형태의 부유식 해양에너지 구조물의 경우 풍력타워, 터빈, 태양광판 등과 같은 구조물로 인하여 기존의 구조물과는 다른 하중조건이 추가적으로 발생되기 때문에 이러한 구조물과 해양 구조물간의 하중결합에 있어서의 해석이 매우 중요함.

□ 국외의 부유식 구조체 관련 설계기준목록은 다음과 같음

○ 미국

- ABS Rules for Building and Classing Offshore Installation
- ABS Guide for Building and Classing Offshore Liquefied Natural Gas Terminals
- ABS Part 1 Rules for Conditioning and Classification Offshore Unit and Structures
- ABS Part 2 Rules for Material Selection and Welding
- ABS Part 3 Rules for Survey after construction
- ACI 357.2R-88 : State-of-the-Art Report on Barge-Like Concrete Structures

○ 유럽

- Norwegian-3473, Concrete Structure Design Rule
- DNV(Det Norske Veritas)-OS-C502 Offshore Concrete Structures
- DNV-OS-C503 Concrete Liquefied Natural Gas Terminal Structures and Containment Systems

○ 일본

- 日本土木學會 浮体橋設計指針
- 日本土木學會 超大型浮体構造物の構造設計

(3) 해외 부유식 해상풍력 현황

- 영국에서는 2010년에 세계 최대의 설비용량을 자랑하는 Thanet 해상풍력발전소가 가동되어, 해상풍력발전의 설비용량이 134만kW에 도달하였음.
- 2007년에 영국정부는 2020년까지 3,300만kW의 해상풍력을 개발한다는 목표를 발표했으며, 사업규모는 130조원이상으로 이 계획에서는 2020년까지 7,000기 이상의 해상발전소를 설치하고, 영국의 전 소비전력의 1/3을 제공하고자 함.
- 영국의 해상풍력개발은 Round 1, Round 2, Round 3의 3단계로 나누어서 진행되고 있음.
- Round 1의 개발해역은 해안선에서 비교적 가까운 즉, 수심이 얕은 장소이지만, Round 3는 해안선에서 벗어나, 수심이 깊은 장소로 이동하고 있음.
- Round 3의 가장 먼 구역은 해안선으로부터 195km, 가장 깊은 구역은 평균 수심 50m임. 2010년 1월에 Round 3의 개발사업자가 입찰로 결정되어, 9개 구역의 총 설비용량은 3,200만kW로 결정되었음.
- BlueH 프로젝트에서는 이탈리아 남서해안으로부터 2km 떨어져 있으며 수심 113m인 지역에 80kW 용량의 부유식 풍력발전기 프로토타입을 설치하여 데이터를 수집하고 각종 시험을 수행하여 90MW 규모의 풍력발전 단지의 건설을 계획하였음.

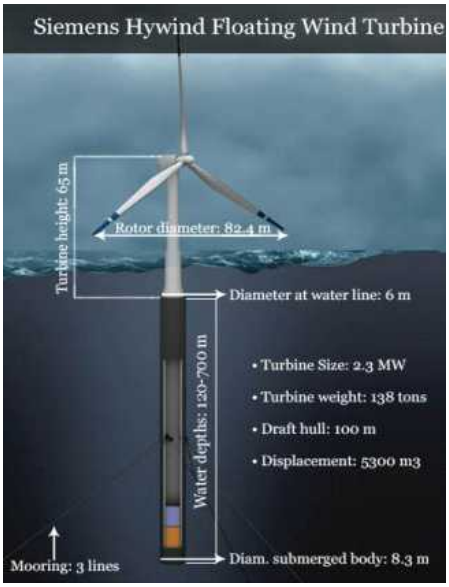
[그림 69] Blue H의 부유식 해상풍력발전기

[그림 70] Blue H의 부유식 해상풍력 발전기 프로토타입

- 노르웨이의 StatoilHydro사는 2009년 6월 spar타입의 2.3MW급 부유식 풍력발전기 'Hywind'를 남부 해안 10km 바다에 직경 82m의 로터를 3개의 wire로 구성된catenary계류시스템을 적용하여 220m 수심에 설치한 HYWIND 프로젝트가 계통에 연결된 최초의 부유식 풍력발전기로 기록됨.

○ 2009년 9월에는 미국 메인 주(Maine, USA)와 주의 심해개발에 HYWIND기술의 적용 타당성을 공동으로 연구하기로 합의함에 따라 25MW 규모의 부유식 풍력발전 파일럿 프로젝트 제안서를 HYWIND에 요청함.

○ SWAY 사는 Karmoy프로젝트를 통해 부유식 풍력발전시스템을 개발하였으며, 하나의 인장각(Tension Leg)만을 사용하는 대신 와이어(Wire)로써 타워 하중을 제한할 수 있도록 고안됨. 다운윈드, 공기역학적 타워단면형상, 중력앵커 등의 독특한 구조형식을 적용하였으며, 2013년 노르웨이 해역에 5MW급 발전기 설치를 위하여 1/6 축소실증모델이 건설됨.



[그림 71] HYWIND 프로젝트의 SPAR타입 풍력발전

[그림 72] SWAY 프로젝트의 풍력발전기

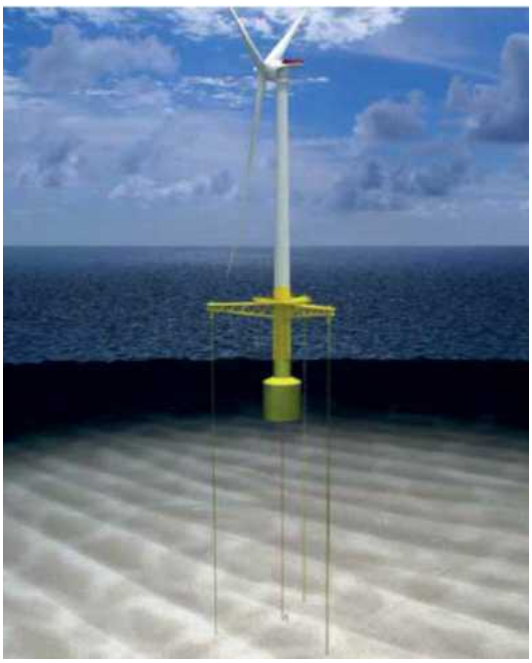
[그림 73] Wind Sea 프로젝트의 풍력발전기

○ Force Technology사와 NLI사에서 개발 중인 Wind Sea 해양풍력발전기는 3개의 풍력발전기를 지지하는 하나의 부유체로 구성되어있음. 부유체는 반잠수식 형태이며, 3개의 Column으로 이

루어져있고, 각 Column마다 하나의 풍력발전기를 지탱함. 부유체는 Mooring line과 중앙에 위치한 turret으로 연결되어있기 때문에 구조물이 풍향에 따라 회전이 가능함. 현재 3.0MW급 해상풍력 프로토타입이 Rogaland에 설치되어있음.

○ Principle Power사에서 진행 중인 Wind Float 프로젝트는 Vestas에서 제작한 Semi-Submersible 플랫폼으로, 해상 풍력발전기를 위한 단순하면서도 경제적인 장비이며, 파도로 부터의 충격이나 풍력발전기 자체의 움직임으로 인한 영향을 제한할 수 있음.

[그림 74] Wind Float 프로젝트의 반잠수식 해상풍력단지



[그림 75] Alstom사의 TLB타입의 풍력발전

[그림 76] PelaStar 부유식 풍력발전기

○ Wind Float 프로젝트는 포르투갈 해변에 2.0MW 해상 풍력발전기의 Prototype 설치와 시운전을 포함하고 있으며, 2011년에 설치되었고, 2017년에 5-7MW 급의 해상 풍력발전기를 상업화

가 이루어질 것으로 예상하고 있음.

○ Alstom사에서 TLB(Tension Leg Buoy)와 TLP(Tension Leg Platform) 두 가지의 타입인 Floating haliade 부유식 해상풍력발전기의 개발을 진행 중에 있으며, TLB는 50m에서 80m 사이의 수심 그리고 TLP는 80m에서 300m까지의 수심에서 설치가 가능함. 현재 개발 중에 있는 터빈의 용량은 6MW임.

○ 미국의 Glosten Associates에서는 PelaStar TLP가 1:50의 모델 테스트가 2011년 완료되었음. 터빈에서의 움직임을 최소화하여 효율을 증대시켰으며, 자본비의 감소에 초점을 맞추어 개발함. 수심 50~200m 조건에서 5~10MW급 터빈을 지지할 수 있도록 설계됨. 2017년까지 프로젝트가 진행됨.

○ 2014년 일본의 대학과 기업의 산학연 컨소시엄은 후쿠시마 연안에서 동쪽으로 10km떨어진 곳에서 부유식 해상 풍력발전기의 시운전을 실시했음. 2MW급 다운윈드형 부유식 해상풍력발전기 1기로 발전한 전력을 부유식 해상 변전소를 이용하여 66kV로 변환시킨 뒤에 해저케이블을 통해 18km떨어진 육지까지 보냄. 정보수집을 통해 발전소의 안전성 및 발전효율과 환경에 미치는 영향을 평가하여 2016년 실용화 한다는 계획임.

○ 일본의 신재생에너지 개발을 주도하고 있는 NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization)에서는 2004년 수립한 ‘풍력발전로드맵’에서 2030년 해상 풍력발전 설치 목표량을 해상기초식으로 300만kW, 부유식으로1,000만kW를 계획하고 있음.

○ 동경대 Suzuki 교수팀은 5MW 스파형 해상풍력발전기를 설계 및 해석을 수행하여 현재 실험 가동 중에 있음. 또한, Ryukyu 대학에서는 한 변이 10m인 육면체 콘크리트 구조물의 Hexa-Float를 제안하여 현재 10kW의작은 규모로 시험 운행 중에 있음.

[그림 77] 부유식 해상 풍력발전기 Fukushima Mirai

[그림 78] 부유식 해상 변전소 Fukushima Kizuna

○ 구조물이 자세를 유지하는 안정성 측면에서 부유식 해상풍력발전시스템은 다양한 방식들을 취하고 있으며 최근 연구되고 있는 형식들을 살펴보면 Classic TLP, Spar Type, Semi-sub의 세 종류가 주를 이루고 있음.

○ Classic TLP와 Semi-sub의 경우 운동성능이 우수하나 가격적으로는 불리함.

○ Spar의 경우는 전반적으로 운동성능은 보통이나 가격적인 측면이 매우 유리함. 또한 TLP와 Spar의 가장 큰 차이점은 계류라인의 종류가 다르다는 것임. 일반적으로 TLP는 Tendon을 사용하는 반면 Spar의 경우 Catenary Mooring을 채택하고 있음.

<표 9> 프로젝트 별 부유식 해상풍력 플랫폼의 특징 (한국건설기술연구원, 2014)

	Blue H	Hy-wind	Karmoy	Wind Sea	Wind Float	Tri-Floater
개발자	Blue H (NL)	Statoil Hydro (NO)	SWAY (NO)	Force Tech. (NO)	Principle power (PO)	Gusto (NL)
형식 (계류)	TLP (tendon)	SPAR (catenary)	Hybrid SPAR (single TLP)	Semi-sub (turret)	Semi-sub (catenary)	Semi-sub (catenary)
전력용량	TBD	2.3MW	2.3MW	1.0MW*3	2.0MW	TBD
장점	-	간편한 구조 검증된 hull기술	우아한 미관 낮은 강재중량	발전용량 향상	우수한 모션 간편한 설치	우수한 모션 간편한 설치
단점	계류비용	대수심, 모선 설치시 문제	설치/유지 관리	터빈간섭 대형 구조물	강재 부식	타워연결부 구조적문제

○ - 부유식 해상풍력발전시스템은 바람과 함께 파도, 조류 등 다양한 외부환경에 노출되고, 비교적 큰 운동을 동반하는 특성을 가짐. 이러한 복잡한 시스템의 설계를 위해서는 하중, 운동, 발전 성능 등을 예측할 수 있는 해석기술의 개발이 필요함.

○ - 부유식 해상풍력발전시스템은 전력 발전부, 지지구조물, 플랫폼, 계류, 앵커 등의 여러 구조물이 함께 이루어져 있어, 각각에 대한 해석이 이루어져야함. 또한 각 구조물이 결합되는 경우에 대한 글로벌 퍼포먼스 해석이 이루어져야함.

○ - 조선, 토목, 기계, 항공 등 여러 분야에서 터빈과 지지구조물, 부유식 구조물, 계류시스템 등 각각에 대하여 기존의 해석기법을 응용한 해석기법들이 있으며, 서로 연계하여 복합해석기법을 연구 중에 있음.

○ - 미국의 NASA에서는 전 세계 Wind map을 작성중이며, 1972년 연방정부의 주도로 풍력발전에 대한 연구가 이루어졌으며, National Renewable Energy Laboratory(NREL)에서는 풍력발전

의 신뢰성, 대체 서비스, 대용량 유/무효전력발전, 순간 전압변동에 주안점을 두고 풍력발전에 대한 연구를 진행하고 있음. 또한 풍력발전 시스템의 동적 응답해석 프로그램 FAST를 개발하여 해상풍력발전의 동적 특성에 대한 연구를 하고 있음 (한국건설기술연구원, 2014).

○ - Texas A&M 대학의 한 연구진은 위에서 언급한 NREL의 풍력발전 시스템의 동적응답 해석 프로그램 FAST를 응용하여 자체 개발한 hydrodynamic해석 프로그램과 연동하여 부유식 풍력발전 구조물의 전체적인 운동 해석에 대한 연구를 진행하고 있음.

(4) 국내 부유식 해상풍력 현황

○ 2016년 기준, 해상풍력발전 설비는 총 35MW 설치되어있으며, 한반도 해상풍력자원의 잠재량은 최소경제성 기준 약 33.2GW 이상을 보유하고 있음.

○ 서남해 2.5GW급 해상풍력단지 조성 사업이 진행 중에 있으며, 2017년 4월 1단계 60MW(3MW 20기) 공사가 착공되었음.

○ 현재 국내에서 운영 중이거나 착공이 진행 및 예정되어있는 해상풍력발전의 경우 모두 고정식 플랫폼을 이용한 풍력발전이며, 부유식 해상풍력의 경우 R&D 사업으로 선박해양플랜트연구소의 10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물에 대한 연구가 진행 중에 있음.

○ 반잠수식 형태의 구조물을 선택하여 4개의 풍력타워를 구조물의 네 모서리에 배치하였으며, 파력발전과 함께 통합적으로 10MW 이상의 전력을 생산하는 것을 목표로 연구가 진행 중임.

○ 해상풍력 플랫폼 기술은 현재 일부 연구 추진 중에 있으나 요소기술 확보 단계 수준이며, 실증경험이 없어 기술력 확보에 어려움을 겪고 있으며 선진기술과의 격차 역시 비교적 큰 차이로 발생하고 있음.

○ 부유식 플랫폼 요소기술 확보를 위한 연구개발 현황은 다음과 같음.

- 대한전기협회(2011~2014)에서는 부유식 해상풍력시스템 기준의 국제 표준개발을 통한 국내 기술기준의 국제 기술기준 선점 및 국내 기업들의 이익을 극대화 하고자 IEC/TC88 표준화 동향, EWEC, WWEC 등 유관기관의 기술 기준 개발 동향을 검토.

- 목포대학교(2010~2013)에서는 해상풍력 발전용 플랫폼에 작용하는 파랑하중, 조류하중 및 풍하중 등 유체하중 해석기술을 개발하고자 플랫폼에 작용하는 유체하중을 산정하고 유체하중에 의한 구조변형 해석기술을 개발하고자 연구하였음.

- 한국기계연구원(2009~2012)에서는 부유식 해상풍력발전 시스템의 최적화 설계 및 경제성을 분석하기 위하여 동력학 해석프로그램을 개발하고 개념설계를 수행함.

- 또한, 검증시험을 위한 시험설계 및 모델제작 및 실험과 최적화설계 및 경제성 분석을 실시하여 추후 개발되는 부유식 해상풍력발전 시스템의 설계 검증, 안전성 및 신뢰성 평가 기술을 확보하고자 수행된 바 있음

4.1.4. 부유식 구조물 운영 및 유지관리기술

□ 부유식 구조물의 운영 및 유지관리와 관련하여 최근 많은 관심을 받고 있는 인공지능 기반의 유지관리에 관한 관심이 높아지고 있음

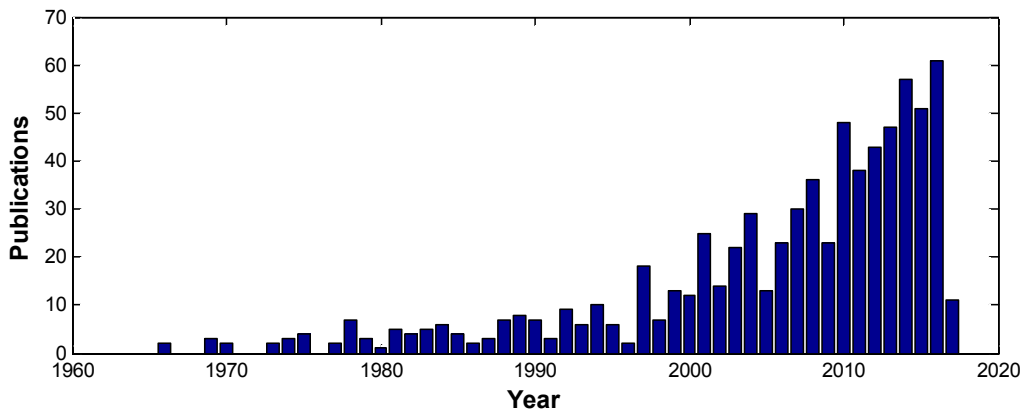
□ 여러 기술 중 (1) 부유식 구조물에 대한 계측, 평가 및 모니터링 기술 및 (2) 인공지능 기반 유지관리기술에 대한 연구개발 현황을 조사 분석함

(1) 부유식 구조물에 대한 계측, 평가 및 모니터링 기술

□ 플로팅 구조물에 대한 계측, 평가 및 모니터링 관련 논문 분석을 위한 검색식과 검색 결과는 다음과 같음

(({floating structures} OR {floating bodies} OR {floating platforms} OR {mooring lines} OR {mooring dolphins}) AND (monitoring OR measurement OR assessment OR evaluation OR {damage detection})) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI"))

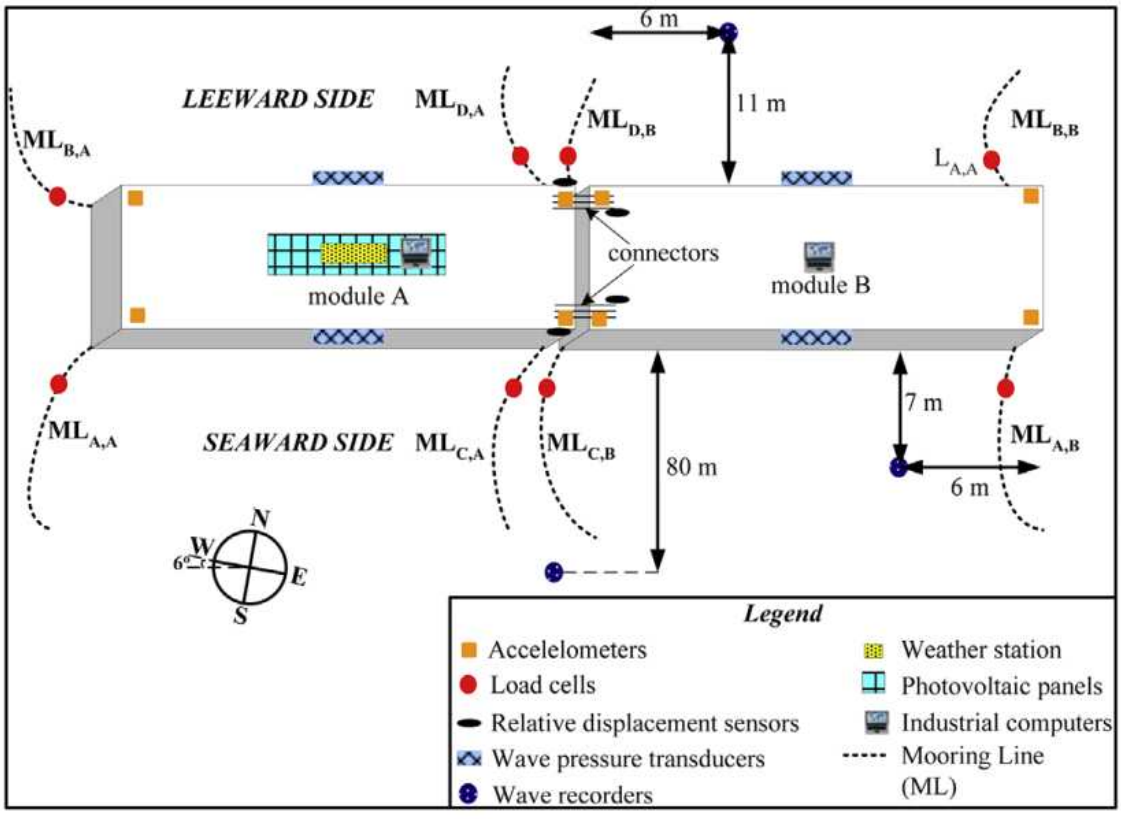
- 총 737편의 논문이 검색되었으며, 주요 키워드로는 Mooring (199), Floating Structures (137), Offshore Structures (132), Arctic Engineering (87), Hydrodynamics (77), Computer Simulation (76), Floating Bodies (75), Floating Platforms (69), Mooring Line (68), Ocean Currents (62), Mathematical Models (61) 등이 분석되었음
- 특히 Mooring에 관련된 논문의 비중이 높음을 알 수 있음
- 한편, 연도별 논문게재 수는 매년 다소간의 증감이 있기는 하나 전체적으로 보면 지속적으로 증가하고 있음.



[그림 79] 플로팅 구조물에 대한 계측, 평가 및 모니터링 기술 관련 논문 편수

○ 2016년도에 발표된 Tseranidis 등의 “Investigation of the condition and the behavior of a modular floating structures by harnessing monitoring data” 논문에서는 모듈형 부유식 구조물에 대한 상태와 거동특성을 분석

○ 다음 그림은 이 연구에서 제시한 모듈형 부유식 구조물의 응답을 모니터링 하기 위한 센서 네트워크(SNMR, Sensor Networks for Monitoring Responses) 개요도를 나타낸 것임



[그림 80] 모듈형 부유식 구조물에 대한 응답모니터링을 위한 센서 네트워크 개요도(Tseranidis 등 2016)

○ 한편 전체적으로 볼 때 계류라인(mooring line)에 대한 피로손상 등을 평가하는 논문이 많이 발표되고 있음.

○ 최근에는 부유식 해상풍력, 부유식 파력발전 등 부유식 구조물의 활용이 증가하고 있는 해양에너지 분야에서의 모니터링 및 제어 관련 논문 게재가 활발함.

○ 부유식 구조물 자체의 손상평가와 관련된 논문은 현재까지 발표된 바가 거의 없고, 주로 계류라인(mooring line), 라이저(riser) 등에 대한 피로손상 평가 등의 논문이 다수를 차지함.

○ 이는 계류라인이나 라이저의 실제 사고사례가 빈번하기 때문에 연구필요성이 높았던 것으로 이해할 수 있음.

○ 기존 부유식 구조물은 주로 석유시추 등에 활용되어 왔으나, 이 연구에서 개발하고자 하는 부유식 조류-해상풍력 복합발전시스템의 경우 해수면에서 상당히 높은 위치에서 큰 하중을

받기 때문에 기존 석유시추용 부유식 구조물보다 안정성 확보가 어려울 가능성이 높음.

○ 따라서 기존 부유식 구조물에 대한 계측 평가 및 유지관리보다 한 단계 높은 수준의 기술개발이 요구됨.

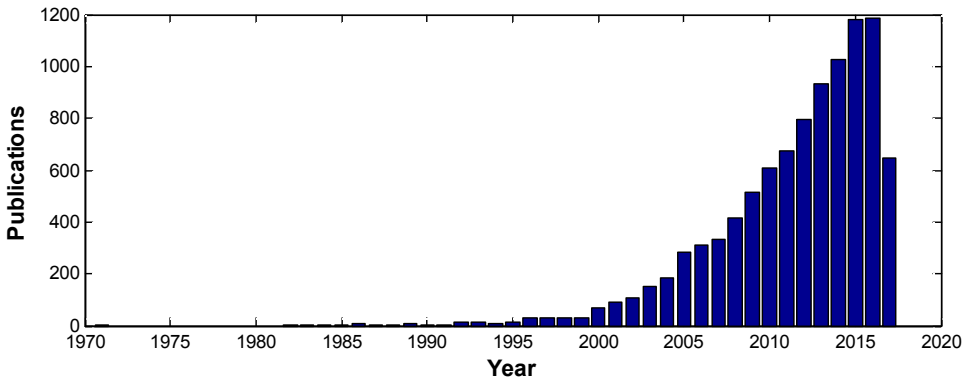
□ 인공지능 기반 방재기술 세 가지 주제에 대한 논문 게재 현황을 분석함

○ 한편 최근 많은 관심을 받고 있는 Deep Learning 등 인공지능 기반 방재기술, 즉 시설물 건전성 평가, 손상추정 등과 관련하여 아래의 검색식을 이용하여 검색하였으며, 검색결과는 다음과 같음

({deep learning} OR {machine learning} OR {artificial intelligence} OR {neural networks}) AND ({structural damage detection} OR {structural health monitoring} OR {structural integrity assessment} OR {structural diagnosis} OR {structural prognosis} OR {performance assessment} OR {structural damage assessment}) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI"))

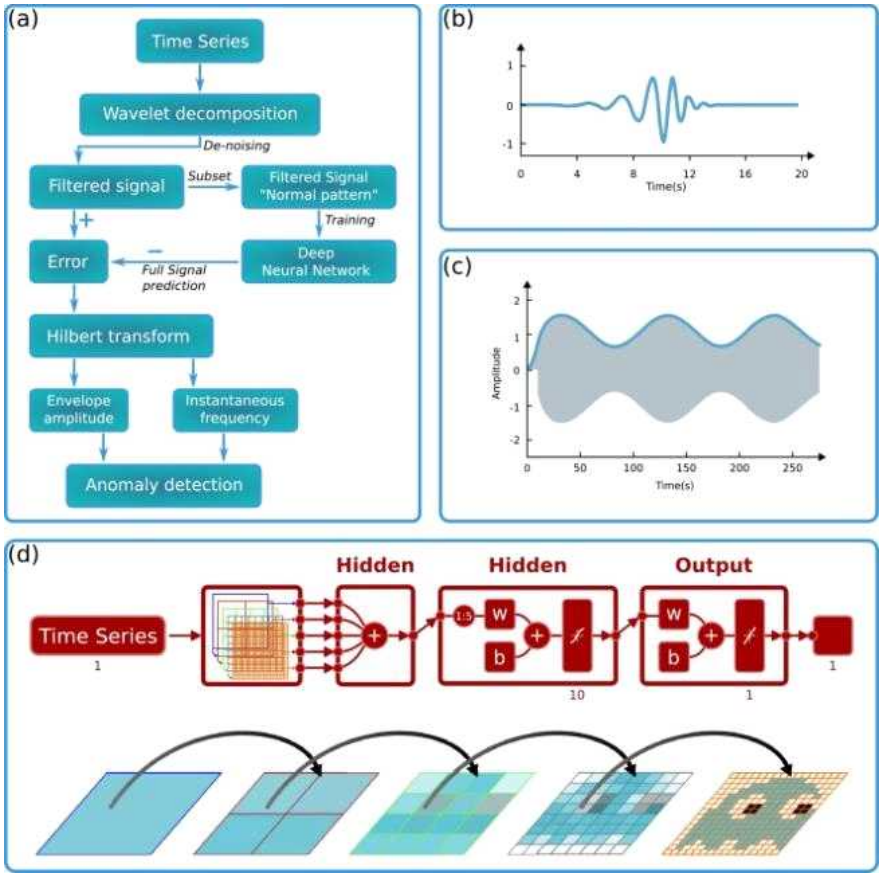
○ 총 9170건의 결과가 공학분야에서 검색되었으며, 가장 많이 중복되고 있는 주제어로는 Damage Detection (1,674), Structural Health Monitoring (1,624), Neural Networks (1,509), Algorithms (1,108), Optimization (1,000), Performance Assessment (966), Structural Analysis (761), Artificial Intelligence (594) 등이 있음

○ 최근 기계학습, 딥러닝 등 인공지능 기법에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 이를 반영하듯 논문게재가 지속적으로 많이 이루어지고 있음



[그림 81] 인공지능 기반 방재기술 관련 논문 편수

○ 2017년 최근 Detecting anomalies in time series via a deep learning algorithm combining wavelets, neural networks and Hilbert transform 등을 비롯하여 여러 논문에서 평가, 모니터링 등을 위하여 pattern recognition, support vector machine, kernel classification, deep learning 등을 적용하고 있음



[그림 82] 웨이블렛, 신경망, 힐버트 변환 등을 딥러닝과 연계한 알고리즘 개요도 (Kanarachos 등 2017)

(2) 부유식 해상풍력발전 O&M 기술

□ 부유식 해상풍력발전시스템의 O&M과 관련하여 많은 연구가 진행되고 있음

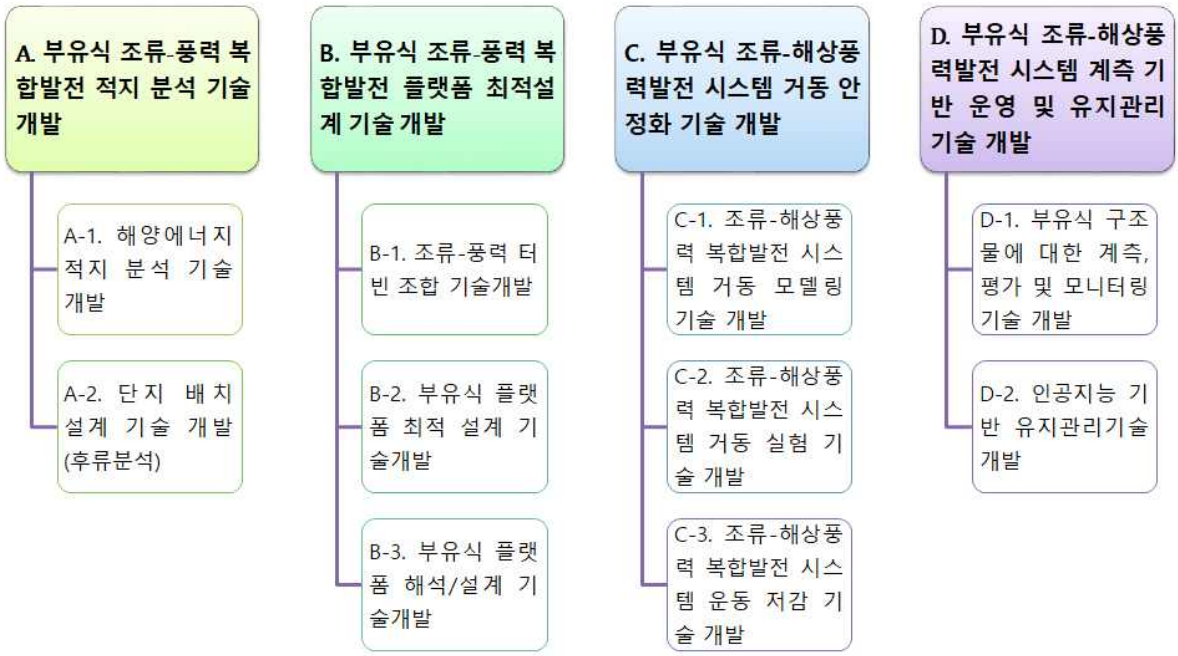
□ Carbon Trust(2015)는 부유식 해상풍력발전시스템의 O&M과 관련하여 O&M 전략, 자산 건전성, 상태 감시, 파괴 유형 등에 대한 자료를 발표한 바 있음(Carbon Trust 2015).

○ O&M 전략의 경우 중대한 수리의 경우, 시스템을 예인하여 육상에서 수리하는 경우와 대형 장비를 동원하여 설치 해역에서 수리하는 경우에 대한 논의가 중요하며, 이때 설치위치와 육지와의 거리, 가용 장비 등이 중요한 요소가 되며, 현재 더 많은 논의가 필요한 것으로 제시된 바 있음

○ 대부분 설계수명은 최소 20년을 기준으로 하고 있으며, 실제 가용 수명은 기존 부유식 해상 플랫폼에서와 같이 그 이상이 될 것으로 예상됨.

4.2. 기술개발 목표 및 내용

○ 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 핵심 기술개발을 위한 연구 필요 기술은 다음과 같이 도출할 수 있음.



[그림 83] 개발필요 핵심기술 및 연구내용

4.2.1. 조류-해상풍력발전 적지 선정 기술개발

(1) 연구목표

□ 부유식 조류-해상풍력 복합발전 적지 선정

(2) 연구개발 내용

<표 10> 조류-해상풍력발전 적지 선정 기술개발 목표 및 내용

구분	연차별연구목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비/ 백만원)
1차년도	부유식 조류-해상풍력 후보지 조사	○ 부유식 조류-해상풍력 부존량 검토 - 해수유동 수치모형 수립 및 적용 - 우리나라 주요 해역의 조류 및 해상풍력 부존량 검토 - 부유식 조류-해상풍력 유망 해역 1차 선정 ○ 부유식 조류-해상풍력 복합발전 시스템 배치 기준 정립 연구(1) - 자료 조사 및 분석	○ 준비 단계 - 조류/해상풍 관련 자료 조사 - 광역 해수유동 수치모의 - 자료 조사 및 분석	50
2차년도	부유식 조류-해상풍력 적지선정(1)	○ 부유식 조류-해상풍력 복합발전 적지선정(1) - 1차 후보지의 조류/해상풍 조사 및 분석 - 상세 해수유동 수치모형 실험 - 부유식 조류-해상풍력 유망 해역 2차 선정 ○ 부유식 조류-해상풍력 복합발전 시스템 배치 기준 정립 연구(2) - 부유식 복합발전시스템 적정 배치 연구(1)	○ 기술개발 - 상세 해수유동 수치모의 - GIS 기반 유망 해역 선정	50
3차년도	부유식 조류-해상풍력 적지선정(2)	○ 부유식 조류-해상풍력 복합발전 적지선정(2) - 2차 후보지의 육상/해상 여건 조사 및 분석 - 2차 후보지의 조류/해상풍 정밀 조사 및 분석 - 부유식 조류-해상풍력 적지 선정 및 발전량 산출 ○ 부유식 조류-해상풍력 복합발전 시스템 배치 기준 정립 연구(3) - 부유식 복합발전시스템 적정 배치 연구(2) - 부유식 복합발전시스템 배치 기준 수립	○ 기술개발 - 육상/해상 여건 정밀 조사 및 분석 - GIS 기반 적지 선정 및 발전량 산출	50

(3) 연구개발 추진일정 및 소요예산

<표 11> 조류-해상풍력발전 적지 선정 기술개발 추진일정 및 소요예산

추진 일정													
해당 연차	연구내용	월별 추진 일정											소요예산 (천원)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	부유식 조류-해상풍력 부존량 검토	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	50,000
	부유식 조류-해상풍력 복합발전 시스템 배치 기준 정립 연구(1)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
2	부유식 조류-해상풍력 복합발전 적지선정(1)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	50,000
	부유식 조류-해상풍력 복합발전 시스템 배치 기준 정립 연구(2)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
3	부유식 조류-해상풍력 복합발전 적지선정(2)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	50,000
	부유식 조류-해상풍력 복합발전 시스템 배치 기준 정립 연구(3)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			

4.2.2. 부유식 구조체 거동 안정화 기술

(1) 연구목표

□ 조류와 해상풍력 두 에너지원을 결합한 복합 부유식 구조물의 복잡한 동적 거동을 수치/수리 모델링 기법을 기반으로 해석하고, 전체 시스템의 연성 거동을 안정화시키는 기술을 개발함

(2) 연구개발 내용

□ 조류-해상풍력 복합발전 시스템 거동 모델링 기술 개발

□ 조류-해상풍력 복합발전 시스템 거동 실험 기술 개발

□ 조류-해상풍력 복합발전 시스템 운동 저감 기술 개발

<표 12> 부유식 구조체 거동 안정화 기술 연구목표 및 연구개발 내용

구분	연차별연구목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비/ 백만원)
1차년도	조류-해상풍력 복합발전 시스템 해석 기술 개발(I)	○ 복합발전 시스템 구조 특성 검토 - 기존 관련 자료 수집 및 기술 분석	○ 준비 단계 - 문헌 조사	150
		○ 복합발전 시스템 거동 모델링 기술 개발 - 조류 터빈 연성해석 기술 개발 (I) - 풍력 터빈 연성해석 기술 개발 (I)	○ 모델링 연구 - 개별 해석 기술 개발	
		○ 복합발전 시스템 거동 실험 기술 개발 - 풍력 터빈 수리실험을 위한 인프라 구축 - 조류 터빈 수리실험을 위한 인프라 구축	○ 준비 단계 - 실험기반 구축	
2차년도	조류-해상풍력 복합발전 시스템 해석 기술 개발(II)	○ 복합발전 시스템 운동저감 기술개발 - 수치/수리모델링 결과 검토 및 분석(I) - 시스템 거동 안정화 개념모형 도출	○ 해석 연구 - 개념기술 도출	150
		○ 복합발전 시스템 거동 모델링 기술 개발 - 조류 터빈 연성해석 기술 개발 (II) - 풍력 터빈 연성해석 기술 개발 (II) - 통합 시스템 모델링 기술 개발 (I)	○ 모델링 연구 - 통합 해석 기술 개발	
		○ 복합발전 시스템 거동 실험 기술 개발 - 복합발전 시스템 실험모형 제작 - 복합발전 시스템 모형시험 및 성능분석(I)	○ 실험 연구 - 수리실험 수행	
3차년도	조류-해상풍력 복합발전 시스템 운동 저감 기술 개발	○ 복합발전 시스템 운동저감 기술개발 - 수치/수리모델링 결과 검토 및 분석(II) - 시스템 거동 안정화 표준모형 개발/검증	○ 해석 연구 - 도출된 기술 검증	150
		○ 복합발전 시스템 거동 모델링 기술 개발 - 통합 시스템 모델링 기술 개발 (II)	○ 모델링 연구 - 통합 해석 기술 개발	
		○ 복합발전 시스템 거동 실험 기술 개발 - 복합발전 시스템 모형시험 및 성능분석 (II)	○ 실험 연구 - 수리실험 수행	

(3) 연구개발 추진일정 및 소요예산

<표 13> 부유식 구조체 거동 안정화 기술 연구개발 추진일정 및 소요예산

추진 일정														
해당 연차	연구내용	월별 추진 일정												소요예산 (천원)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	복합발전 시스템 구조 특성 검토	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			20,000
	풍력/조류 터빈 연성해석 기술 개발	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	65,000
	풍력/조류 터빈 수리실험 기반구축						■	■	■	■	■	■	■	65,000
2	복합발전 시스템 운동저감 기술개발	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	40,000
	조류/풍력 터빈 연성해석 및 통합시스템 모델링 기술 개발				■	■	■	■	■	■	■	■	■	55,000
	복합발전 시스템 거동 실험 기술 개발				■	■	■	■	■	■				55,000
3	시스템 거동 안정화 표준모형 개발/검증	■	■	■	■	■				■	■	■	■	50,000
	복합발전 시스템 거동 모델링 기술 개발	■	■	■	■	■	■	■	■	■				50,000
	복합발전 시스템 모형실험 및 성능분석	■	■	■	■	■	■	■	■					50,000

4.2.3. 부유식 조류-해상풍력발전 플랫폼 개발

(1) 연구목표

□ 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 개발을 통한 Ocean Energy Complex 구현

□ 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 구현을 위한 핵심 요소 기술 개발

(2) 연구개발 내용

□ 플랫폼의 운동을 최소화 시킬 수 있는 플랫폼의 형상을 개발

□ 신형식 부유식 구조 부재 및 모듈화 기술 개발

□ 부유식 구조체의 특성을 고려한 실용화 기술 개발

<표 14> 부유식 조류-해상풍력발전 플랫폼 개발 연구목표 및 연구개발 내용

구분	연차별연구목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비/ 백만원)
1차년도	부유식 구조체 해석 및 설계를 위한 기초연구	-부유식 구조체 자료수집 및 시공사례 벤치마킹	○ 준비 단계 -자료수집 및 분석	60
		-대상구조물 설정 및 핵심요소기술 분류 -효율적 공간창출 방안	○ 해석적 연구 --하중별 거동 해석	
		-부유식 구조체 해석, 설계, 핵심기술 개발 -부유식 구조체 거동 평가기술 개발	○ 이론 및 해석적 연구	
2차년도	부유식 구조체 시스템 및 성능검증	-신형식 부유식 구조 부재 및 모듈화 기술 개발	○ 실험 및 해석	80
		-부식 방지 고강도 지지구조 개발	○ 실험 및 해석	
		-Pilot Project의 기본설계 및 축소 수리 모형실험, 유지관리기술 개발	○ 실험 및 해석	
3차년도	목적 맞춤형 활용기술 개발, 현장 조사 및 실증	적지 선정 및 활용 방안 확립	○ 조사 및 검증단계 - 설계, 실험, 검증	70
		-Pilot Project 구현 및 지침서 작성 -각종 지침서 작성	○ 구현단계 - 설계, 실험, 검증	
		-Pilot Project 운영 및 실용화 방안 -부유식 구조체 실용화 방안 마련	○ 운영단계	

(3) 연구개발 추진일정 및 소요예산

<표 15> 부유식 조류-해상풍력발전 플랫폼 개발 연구 추진일정 및 소요예산

추진 일정													
해당 연차	연구내용	월별 추진 일정											소요예산 (천원)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	관련자료 수집 및 시공사례 벤치마킹	■	■	■	■	■								10,000
	-대상구조물 설정 및 핵심 요소기술 분류 -효율적 공간창출 방안					■	■	■						20,000
	-부유식 구조체 해석, 설계, 핵심기술 개발 -부유식 구조체 거동 평가 기술 개발								■	■	■	■	■	30,000
2	신형식 부유식 구조 부재 및 모듈화 기술개발	■	■	■	■	■								40,000
	부식 방지 고강도 지지구조 개발					■	■	■						20,000
	Pilot Project의 기본설계 및 축소 수리 모형실험, 유지관리기술 개발								■	■	■	■	■	20,000
3	적지 선정 및 활용 방안 확립	■	■	■	■	■								20,000
	Pilot Project 구현 및 지침서 작성				■	■	■	■	■					10,000
	-Pilot Project 운영 및 실용화 방안 -부유식 구조체 실용화 방안 마련				■	■	■	■	■	■	■	■		40,000

4.2.4. 부유식 조류-해상풍력 발전시스템 운영/유지관리 기술 개발

(1) 연구목표

□ 부유식 조류-해상풍력 발전시스템에 대한 계측 기반의 운영 및 유지관리 기술 개발

(2) 연구개발 내용

<표 16> 부유식 조류-해상풍력 발전시스템 운영/유지관리 기술 개발 연구목표 및 연구개발 내용

구분	연차별연구목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비/ 백만원)
1차년도	O&M 개념설계	○ O&M 개념설계 - 부유식 플랫폼에 대한 O&M 개념 정립	○ 준비 단계 - 자료조사 및 분석	50
		○ O&M H/W 구축 - 부유식 플랫폼에 적합한 계측시스템 선정 - 센서 및 계측시스템 등 구매	○ 준비 단계 - 자료조사 및 분석 - 센서 구매	
		○ O&M S/W 설계 - 머신러닝, 딥러닝 등 인공지능 기반의 모니터링 모듈 개발	○ 준비 단계 - 자료조사 및 분석 - S/W 모듈 개발	
2차년도	모형실험을 통한 O&M 적용	○ 모형제작 - 실내실험을 위한 부유식 조류-해상풍력 모형 설계 및 제작	○ 준비 단계 - 구조물 설계 - 구조물 제작	50
		○ O&M H/W 구축 - 센서 및 계측시스템 기본 성능 검증 • 부유식 플랫폼 거동 계측 • 계류선 장력 계측 • 조류터빈 및 해상풍력 응답 계측	○ 이론적 연구 - 계측위치 및 계측항목 설정 - 센서 성능 검토	
		○ O&M S/W 검증 - 수치해석을 통한 모니터링 모듈 성능 검증 • 부유식 플랫폼 응답 분석 및 손상 추정 • 계류선 손상 추정 • 조류터빈 및 해상풍력 연결부 손상 추정	○ 수치실험 단계 - 수치해석에 의한 응답 특성 검토 - 모니터링 S/W 모듈 성능 검토	
3차년도	모형실험을 통한 O&M 적용	○ 모형설치 및 실험 - 부유식 조류-해상풍력 모형 설치 및 실험	○ 실험 단계 - 모형설치 및 실험	50
		○ O&M H/W 구축 - 센서 및 계측시스템 설치 및 다양한 조건에서의 응답 모니터링	○ 실험적 연구 - 계측위치 및 계측항목 설정 - 센서 성능 검토	
		○ O&M S/W 검증 - 실내실험을 통한 모니터링 모듈 성능 검증 • 부유식 플랫폼 응답 분석 및 손상 추정 • 계류선 손상 추정 • 조류터빈 및 해상풍력 연결부 손상 추정	○ 실내실험 단계 - 실험에 의한 응답 특성 검토 - 모니터링 S/W 모듈 성능 검토	

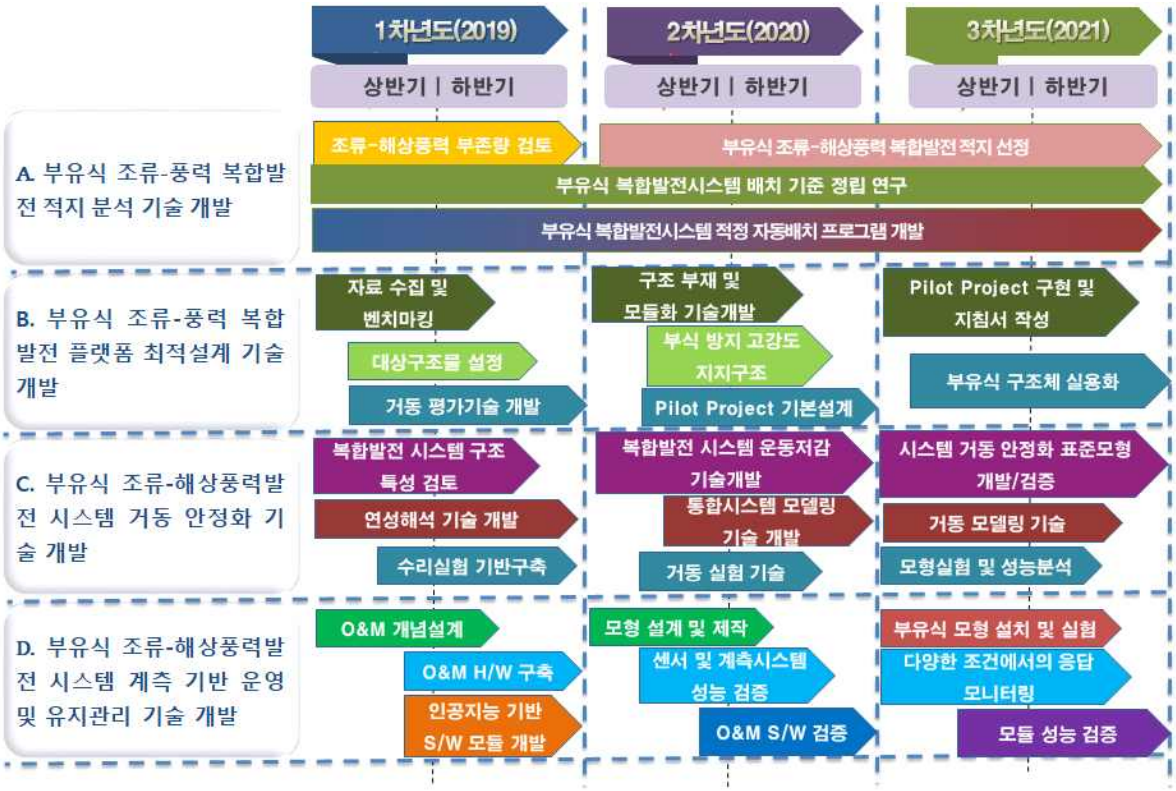
(3) 연구개발 추진일정 및 소요예산

<표 17> 부유식 조류-해상풍력 발전시스템 운영/유지관리 기술 개발 연구 추진일정 및 소요예산

추진 일정													
해당 연차	연구내용	월별 추진 일정											소요예산 (천원)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2018	- (O&M 개념설계) 부유식 플랫폼 O&M 개념 정립	■	■	■	■	■								10,000
	- (O&M H/W 구축) 계측시스템 선정						■	■	■					20,000
	- (O&M H/W 구축) 센서 및 계측시스템 등 구매									■	■	■		
	- (O&M S/W 설계)인공지능 기반의 S/W 모듈 개발						■	■	■	■	■	■	■	20,000
2019	(모형제작) 실내실험을 위한 모형 설계 및 제작	■	■	■	■	■	■							20,000
	(O&M H/W 구축) 센서 및 계측시스템 성능 검증				■	■	■	■	■	■				20,000
	(O&M S/W 검증) 수치적 모니터링 모듈 성능 검증							■	■	■	■	■	■	10,000
2018	(모형설치 및 실험) 부유식 모형 설치 및 실험	■	■	■	■	■	■	■	■					20,000
	(O&M H/W 구축) 다양한 조건에서의 응답 모니터링	■	■	■	■	■	■	■	■					20,000
	(O&M S/W 검증)실내실험을 통한 모듈 성능 검증					■	■	■	■	■	■	■	■	10,000

4.3. 로드맵 및 추진계획

[그림 84] 로드맵



[그림 85] 연구추진 계획

□ 1단계 연구를 위한 소요예산은 직접비 기준 3년간 960,000천원이며, 연차별 소요 예산은 다음과 같음.

[그림 86] 연차별 소요 예산

5. 경제성 분석

5.1. R&D과제 경제성분석 방법론 개요

5.1.1. R&D과제 경제성 분석 개념 및 방법론[4)]

□ R&D과제 경제성분석이란 R&D 자원의 투입에 대한 R&D 활동의 직접적 결과인 산출(Output)이 기업의 사업 활동을 통해 얼마나 많은 경제적 이익이나 성과(Outcome)를 가져오느냐를 정량 또는 정성적으로 분석하는 활동임

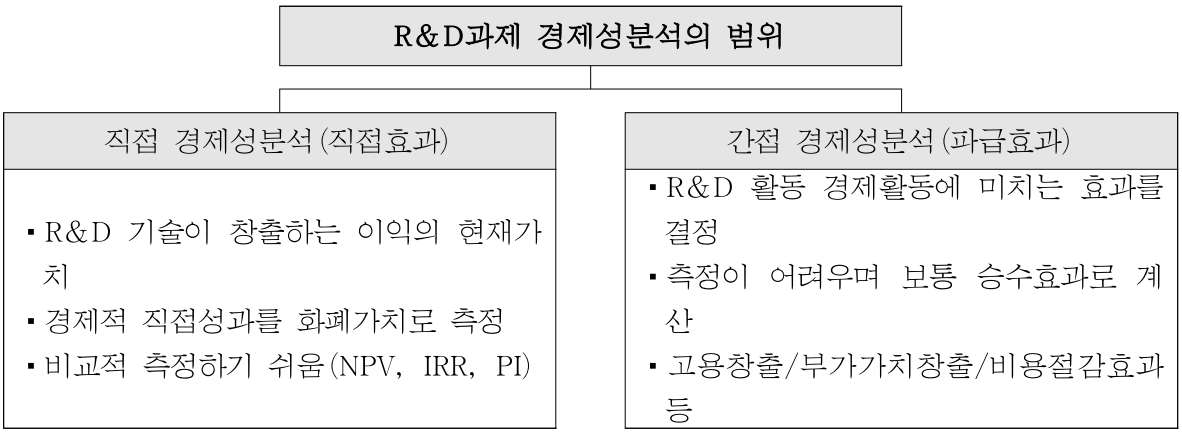
○ (개념) R&D자원의 투입에 대해 R&D 활동의 직접적 결과인 산출물(Outputs)이 기업의 사업활동을 통해 얼마나 많은 경제적 이익이나 성과(Outcomes)를 가져오느냐를 정량적 또는 정성적으로 측정하고 관계를 밝히는 R&D 경영관리 활동

○ (활용) 복수의 R&D과제가 존재할 경우 개별 R&D 과제의 경제적 가치 규모를 측정비교하여 투자우선순위 결정을 위한 기초자료로 활용

- 정부의 R&D예산 효율성 및 효과 관리의 필요성 증대와 함께 경제성분석의 중요성은 높아지고 있음

○ (범위) R&D과제 경제성분석은 직접분석(직접효과)와 간접분석(파급효과)의 총합

- (직접효과) R&D 기술의 사업화를 통해 창출될 수 있는 이익의 현재가치
- (파급효과) 해당 R&D분야 연구개발비를 투자함에 따른 경제적 파급효과와 해당 분야 외 타 산업분야에 미치는 경제적 파급효과의 합



[그림 87] R&D과제 경제성분석의 범위

자료: KEIT, 기획단계 R&D과제 경제성분석 방법론 및 사례, 2013.04

4) KEIT, 기획단계 R&D과제 경제성분석 방법론 및 사례, 2013.04

- 과제기획 단계에서는 R&D과제가 가지는 특성으로 인해 파급효과 분석보다 직접효과 분석을 통해 R&D과제의 경제성을 평가

기획단계 R&D과제의 특성
▪ 과제 수행주체의 불명확성(대기업, 중소기업, 연구소, 대학교, 협회 등) ▪ 개발된 개술의 적용시장 및 제품의 다양성(원천기술 경우) ▪ 미래(기술개발 후)의 산업 및 시장에 대한 추정의 모호성 ▪ 환경변화에 따른 기술개발목표 변경 가능성(타겟시장, 적용제품 변경 가능) ▪ 개발될 기술에 대한 지적재산권 확보 불확실성 ▪ 계획된 연구개발비 투입의 불확실성

○ 과제 기획단계 경제성분석은 기획중인 R&D과제가 기술개발을 통해 얼마나 큰 경제적 성과를 창출할 수 있을지를 분석하는 것임

- 개발 기술 및 적용될 제품이 명확하고 사업화 할 대상기업이 확실하지 않은 상황에서 미래의 산업, 타겟 시장 및 적용 가능한 제품을 다양한 방법을 통해 분석하고 시장 진출 시 경쟁정도 및 사업화 가능성 등을 사전적으로 조사·분석
- 분석 결과는 우수 R&D과제 선정 및 사업비 산정 등에 활용

□ 무형자산의 경제적 가치 분석 방법론에는 비용접근법(Cost Approach), 시장접근법(Market Approach), 수익접근법(Income Approach) 등이 있으며, 보통 수익접근법을 기본으로 하고 기타 방법을 보완적으로 활용

<표 18> 무형자산 경제적 가치 분석 방법론

방법론 구분	주요 내용
비용접근법 (Cost Approach)	▪ 비용접근법은 회피비용(avoided cost) 개념으로 기술을 직접 개발하지 않고 구매할 때 회피할 수 있는 비용을 의미 ▪ 실제R&D비용과 기술가치가 다르기 때문에 특수한 경우를 제외하고는 적용되지 않음
시장접근법 (Market Approach)	▪ 해당기술과 유사한 기술이 시장에서 거래된 가격 또는 사례를 조사하여 기술가치를 산정하는 방법 ▪ 신기술의 경우 유사사례가 없어 적용이 어려움
수익접근법 (Income Approach)	▪ 해당기술을 이용하여 사업을 수행하였을 때, 미래에 발생할 사업가치에서 해당 기술로 인해 발생하는 가치를 산정 ▪ 가장 보편적으로 많이 사용하는 방법으로 DCF개념이 근간을 이루고 있고, 다양한 variation이 있음

자료: KEIT, 기획단계 R&D과제 경제성분석 방법론 및 사례, 2013.04

○ 수입접근법을 활용한 R&D과제 경제성분석 방법에는 순현재가치법(NPV), 내부수익률법(IRR), 회수기간법(PBP), 수익성지수법(PI) 및 비용편익분석(BCR) 등이 있음

- R&D과제 경제성분석 시 2~3개의 분석법을 동시에 사용하여 경제성 평가

<표 19> 수익접근법 기반 경제성분석 방법

방법론 구분	주요 내용
순현재가치법 (Net Present Value)	▪ R&D투자로부터 발생하는 현금유입의 현재가치에서 현금유출의 현재가치를 차감하여 분석하는 방법 → NPV가 0이상일 경우 경제성이 있음
내부수익율법 (Internal Rate of Return)	▪ 현금유입의 현재가치와 현금유출의 현재가치를 일치시켜주는 할인율을 구하여 판단하는 방법(NPV가 0이 되는 할인율) → 내부수익율이 자본비용보다 클 경우 경제성이 있음
회수기간법 (Payback Period)	▪ 투자안의 현금유입으로 추자원금을 회수하는데 소용되는 시간 → PBA가 적을수록 경제성이 높음
수익성지수법 (Profitability Index)	▪ NPV(순현재가치)를 투입비용(R&D 투자금, 양산투입비용)의 현재가치 합으로 나눈 백분율값 → PI(수익성지수)가 높을수록 경제성이 높음
비용편익비율법 (Benefit-Cost Ratio)	▪ BCR은 비용 대비 편익(즉, 투자금액 대비 수익)의 비육 지표 → 1보다 큰 값을 가질수록 사업타당성(수익성)이 있다고 볼 수 있음 → BCR = (미래현금흐름의 현재가치 + 자본적지출의 현재가치 + 총 사업비) / (자본적지출의 현재가치 + 총사업비)

자료: KEIT, 기획단계 R&D과제 경제성분석 방법론 및 사례, 2013.04

5.1.2. 국가 R&D사업 예비타당성조사 경제적 타당성 분석 방법론[5)]

□ 연구개발사업을 통해 발생할 수 있는 경제적 편익은 직접적 경제적 편익, 간접적 경제적 편익, 산업연관 유발효과로 구분 가능

○ 직접적 경제적 편익은 연구개발의 산출물이 시장에서 거래되어 발생하는 경제적 편익만을 지칭

○ 간접적 경제적 편익은 시장의 거래에서 발생하는 것이 아닌 산출물의 보유 또는 적용으로 인한 경제적 편익을 의미

5) KISTEP, 연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침(제2-1판), 2016.11

- 이러한 관점에서는 사업의 직접적 목표와 연관성이 낮은 부차적인 비용저감 효과나 수입대체 효과는 간접적 경제적 편익으로 간주됨

○ 산업연관 유발효과는 연구개발사업의 진행, 연구개발사업의 산출물의 생산 및 거래 등을 통해 국가 경제적 관점에서 간접적으로 유발되는 파급효과이며, 생산유발효과, 고용 및 취업 유발효과, 부가가치 유발효과 등이 있음

○ 연구개발부문 예비타당성조사에서는 직접적 경제적 편익만을 해당 사업의 편익항목으로 반영하며, 간접적 경제적 편익과 산업연관 유발효과는 편익항목으로 포함하지 않음

<표 20> 연구개발부문 예비타당성조사의 편익 반영여부 구분

구분	예비타당성조사 비용편익 분석 시 편익 반영	예비타당성조사 비용편익 분석 시 편익 미반영
가치증가	▪ 가치창출·증대 -신기술 적용을 통한 생산량 증가 -신기술 개발로 인한 가치창출 ▪ 기술거래 -기술이전에 의한 로열티 수입	▪ 과학기술지식 (논문, 특허 등)† ▪ 과학기술자의 교육훈련 ▪ 지역개발효과 ▪ 지역산업구조 개편 ▪ 생산 유발효과 ▪ 부가가치 유발효과 ▪ 고용 유발효과 ▪ 수입 유발효과 ▪ 수출 유발효과 ▪ 소득 분배효과 ▪ 취업 유발효과
비용감소	▪ 생산비용저감 -생산투입 자원 및 시간의 저감 -연구기간, 출장횟수 등의 연구수행 비용저감 -물류비용저감 ▪ 피해비용저감 -재난·재해·사고로 인한 피해 감소 ▪ 질병비용저감‡ ▪ 환경비용저감‡	

주) † 논문이나 특허는 비용효과 분석으로 반영할 수 있음
‡ 질병비용저감과 환경비용저감은 사업이 기여한 부분만의 산출과 이중계산 배제에 제약이 있을 경우에는 비용편익 분석이 아닌 비용효과 분석으로 수행 가능

□ 연구개발부문 예비타당성조사에서는 편익의 항목과 범위를 세분화하여 추정한 뒤 이를 모두 합산하는 상향식 접근법을 우선적으로 적용

○ 상향식 접근법과 하향식 접근법을 모두 적용하여 각각 편익을 추정한 후 비교에 의한 조정을 거치는 것이 이상적이나,

※ 편익 추정의 방법으로는 편익의 항목과 범위를 세분화해서 추정한 뒤 이를 모두 합산하는 상향식(bottom-up) 접근법과 세분화하지 않고 전체의 관점에서 분석하는 하향식(top-down) 접근법이 있음

○ 연구개발부문 예비타당성조사에서는 우선적으로 상향식 접근법을 적용하고 이러한 세분화에 제약이 클 경우에 하향식 접근법을 적용

○ 어떠한 경우에도 편익 추정과정에 적용되는 가정, 즉 편익 회임기간으로 인한 투입과 편익 발생시점의 차이, 편익기간, 편익항목의 범위, 편익 수혜집단의 범위 등 불확실한 사항의 적절한 처리를 위한 모형 및 가정의 적용이 필요함

□ 연구개발부문 예비타당성조사에서 연구개발사업의 편익은 정(positive)의 편익인 가치창출 편익과 부(negative)의 편익인 비용저감 편익으로 구분

○ 가치창출 편익은 연구개발사업의 결과로 소비자의 후생을 향상시키거나 사업의 산출물이 시장을 통해 거래됨으로서 새롭게 부가가치를 창출하는 것을 사업의 목적으로 할 때 반영 할 수 있는 편익항목임

○ 비용저감 편익은 연구개발사업을 통해 개발된 기술을 적용함으로써 특정 분야에서 기존에 소요되던 비용이 감소하는 것과 관련됨

<표 21> 연구개발부문 예비타당성조사의 편익항목 구분

구분	세부 편익항목	설명
가치창출 편익	소비자 중심 편익	연구개발사업의 효과가 소비자에게 영향을 주는 경우, 후생경제학에 근거
	생산자 중심 편익	연구개발사업의 효과가 생산자에게 영향을 주는 경우, 시장수요접근법이 대표적
비용저감 편익	생산비용저감 편익	자원비용, 공정비용, 연구장비 사용비용, 출장비용 등 각종 생산비용의 저감
	피해비용저감 편익	재난·재해, 사고, 질병 등으로 인해 발생하는 피해비용의 저감

□ (소비자 중심 편익) 일반적으로 수요곡선 접근법을 이용하여 추정

○ 연구개발사업의 효과가 소비자에게 직접적인 영향을 주는 경우에는 소비자 잉여의 창출분이나 증가분을 구해 이를 편익으로 추정 가능

○ 잠재적 소비자들은 연구개발사업의 산출물을 이용하여 만족감을 얻게 되는데, 이를 화폐단위로 표현한 것을 소비자 편익 또는 소비자 후생이라고 하고, 일반적으로 수요곡선 접근법을 이용하여 추정

□ (생산자 중심 편익) 시장수요접근법을 이용하여 추정

○ 공공투자사업의 편익 추정을 위해서는 사업의 결과물과 관련이 있는 재화나 서비스에 대한

시장 수요의 추정이 필수적

○ 연구개발부문 예비타당성조사에서는 이러한 시장 수요의 추정에 의한 편익을 추정하고 있으며, 시장수요접근법(market demand approach)이라는 방법론으로 생산자 중심의 편익을 계산

- 시장수요접근법은 시장가치 창출을 목적으로 하는 많은 연구개발사업의 경제성 분석에 대표적으로 활용
- 시장수요접근법에서는 해당 연구개발사업의 시행에 의한 미래 시장규모의 증가분에, 해당 연구개발사업의 기여로 창출된 직접적 편익을 한정시키기 위한 다양한 변수를 고려하여 편익을 산정

> ***편익 = 미래 시장규모 × 사업기여율 × R&D기여율 × R&D사업화성공률 × 부가가치율***

○ 각 변수별 주요 내용

- **(미래시장규모)** 해당 연구개발사업의 결과와 직접적으로 관련된 국내 산업/제품의 미래 총생산액(또는 매출액)을 의미하며, 일반적으로 미래 국내 수요 중 국산품이 차지하는 규모와 해외에 수출되는 규모를 모두 포함
  ※ 단, 편익 추정식에서의 미래 시장규모는 특정 산업 또는 제품의 전체 시장이 아니라, 기준선 분석과 시장점유율(또는 시장대체율)의 적용을 통해 도출된 조사 대상사업과 직접적으로 관련된 시장규모만을 의미

- **(사업기여율)** 전체 시장 규모 중에서 어느 부분까지를 해당 사업에 의한 기여분으로 고려해야 하는지가 중요한 고려사항
  ※ 조사 대상 연구개발사업에 의해 창출되는 편익만을 계산하기 위해서는 대상 시장 또는 기술분야의 전체 연구개발투자 규모 중에서 해당 사업이 차지하는 비중을 고려해야 함
  ※ 연구개발사업의 경제성 분석을 수행하는 과정에서 해당 산업분야의 미래 편익 발생시점의 전체 연구개발투자 규모에 대한 예측자료를 구할 수 있는 경우에는 이를 활용
  ※ 해당 산업에서 유사한 성격의 정부 투자나 민간 투자 규모에 대한 자료가 이용 가능한 경우에도 이를 최대한 활용하는 것이 바람직

- **(R&D 기여율)** 연구개발성과의 상업화를 통해 부가가치가 창출되었을 때, 전체 부가가치 가운데 연구개발에 의한 기여분이 어느 정도인지를 나타내는 지표이며, 해당 사업의 경제적 가치를 합리적으로 추정하기 위해 적용
  ※ R&D기여율을 정량적인 근거를 토대로 세부 기술분야별로 산정하는 것이 어렵기 때문에, 거시적 관점의 R&D기여율이 일반적으로 활용
  ※ 「제3차 과학기술기본계획」에서 최근 데이터를 적용하여 새롭게 구한 수치(35.4%)를 제시하였으므로 이를 활용하는 것을 권고

- **(R&D 사업화 성공률)** 기술개발 결과가 시장에서의 경제적 효과 창출로 이어지기 위해서는 기술의 실증 및 상용화의 과정을 거치며, 이러한 과정에서 존재하는 불확실성을 반영하기 위해 R&D사업화성공률이라는 변수를 고려

  ※ 연구개발성과의 활용에 대한 조사·분석보고서를 우선 활용하고, 필요에 따라 기타 자료를 활용

- **(부가가치율)** 편익은 사업 수행으로 창출된 매출액 전체가 아닌 부가가치를 기준으로 추정되기 때문에 부가가치율을 적용해야 하며 매출액 중에서 실제 새롭게 창출된 경제적 효과가 차지하는 비율을 의미

  ※ 일반적으로 업종 또는 기업의 일정 기간 부가가치액을 동일기간의 매출액으로 나눈 비율로 정의

  ※ 최신 한국은행 산업연관표의 투입산출표 중 기본부문 기초가격거래표를 적용해야 하며 부문분류의 적용 기준은 해당 기술을 가장 적합하게 나타낼 수 있는 기본부문을 원칙으로 하되 필요에 따라 통합소분류로 확대 가능

□ (생산비용저감 편익) 신기술의 적용을 통해 단위 생산에서 비용이 어느 정도 저감되는지를 먼저 추정하고 여기에 미래의 국내 생산 규모를 곱하여 전체 비용저감액을 산출

○ 기존 공정을 대체할 새로운 공정기술의 개발이나 기존의 생산 공정이나 활동의 일부를 개선·개량하는 기술 개발을 목적으로 하는 연구개발사업에 대한 직접적 경제적 편익은 새로운 기술의 적용으로 인한 생산비용저감액으로부터 계산됨

○ 새로 개발되는 기술이 기존기술을 완전히 대체하는 경우와 기존 기술의 일부를 효율화하는 경우가 있으며, 두 경우 모두 국내 생산액이 아닌 국내 생산 규모의 예측이 필요

> ***비용저감액 = (기존 기술에 의한 현재의 단위당 생산비용 - 신기술에 의한 미래의 단위당 생산비용 추정치) × 국내 생산 규모***
> ***비용저감액 = (기존 기술에 의한 현재의 단위당 생산비용 × 신기술에 의한 미래의 비용저감율) × 국내 생산 규모***

○ 비용저감액이 실현되기 위해 요구되는 조건들과 요인들에 대한 고려도 필요

- 비용저감 효과를 발현하기 위해 연구개발투자 이외의 상용화를 위한 다양한 비용이 추가되어야 하는 경우* 정확한 후속비용의 도출이 가능한 경우에는 이를 구해 총비용에 포함하며, 그렇지 않을 경우에는 비용저감액 산출식에 R&D기여율을 적용

  ※ 생산체계 구축이나 적용비용, 또는 학습비용과 같은 비용이 대표적

- 비용저감을 위해 개발된 기술이 상용화를 위한 과정을 거쳐야 하는 경우에는 R&D사업화성공률을 적용하여 상용화 성공에 대한 확률적인 개념을 추가해야 함

○ 연구장비 구축의 경우, 해당 연구장비가 국내에 처음으로 구축되는 것이고 국내 업체들이 활용함으로써 해외 기관에 위탁하는 것보다 비용을 저감할 수 있는 경우에 그 저감액을 비용저감 편익으로 간주할 수 있음

> *연구장비 사용비용저감 편익 = (기존 해외 연구장비 사용비용 - 해당 사업의 연구장비 사용비용) × 연구장비의 사용수요*

- 국내 구축되는 연구장비의 활용에 따른 추가적인 편익도 고려가능
- 연구수행비용저감과 관련되어, 연구장비의 구축에 따라 출장횟수 또는 출장시간을 줄일 수 있는 경우*와 연구장비의 국내 구축을 통해 연구개발활동과 관련된 소요시간을 단축시킬 수 있는 경우**가 해당

  * 신규 개발된 제품의 시험·평가를 위해 해외 출장을 가지 않고 국내의 연구장비를 활용함으로써 출장비용을 저감할 수 있는 경우에는 출장비용의 저감액을 편익으로 인정

  ** 노동시장을 대리시장으로 정하여 단축된 시간을 업무에 사용하여 생산성을 증가시킬 수 있는 것으로 보아 한계생산성인 시간당 임금률을 사용 가능

○ 그외 물류비용저감 편익, 생산투입자원저감 편익(원재료비용저감 편익, 설치비용저감 편익, 운영비용저감 편익 등이 해당) 등이 있음

□ (피해비용저감 편익) 피해함수접근법, 대체비용접근법, 손실비용접근법 등 적용 가능

○ 국가연구개발사업을 통해 개발된 환경 또는 보건분야 기술을 적용하여 기존의 재난·재해·사고·질병 등으로 인해 발생하는 피해비용을 저감하는 경우에 고려할 수 있는 편익항목

- 물리적 변화가 건강이나 생산량의 변화에 미치는 영향을 금전적 가치로 환산하는 피해함수접근법(damage function approach)의 일종
- 환경오염으로 인한 피해를 사후적으로 원상회복하기 위한 비용을 측정하고 이 비용을 환경개선 편익으로 간주하는 대체비용접근법의 적용도 가능
- 사고나 재해로 인한 손실규모를 추정하여 편익으로 적용하는 손실비용접근법을 적용할 수 있음

○ 피해비용저감 편익의 개념은 연구개발사업의 목표와 특성에 따라 반영되는 편익항목의 설정도 달라지므로 이에 적합한 추정방법을 적용해야함

5.2. 경제성 분석 방법론 설정

5.2.1. 비용항목 도출

□ 연구개발부문 예비타당성조사 표준지침에서는 경제적 타당성 분석 시 사업기간내 포함되는 모든 비용인 총사업비와 목표가 달성하기 위해 필요하나 사업비에 반영되지 않은 사후비용 등을 합산한 모든 비용을 총 비용으로 고려함

○ 연구개발부문 예비타당성조사에서는「예비타당성조사 운용지침」제6조에서 규정된 총사업비의 정의를 따르며, 총사업비를 제안된 사업기간 내에 포함되는 모든 비용으로 정의함

○ 경제적 타당성 분석을 위해서는 목표가 달성되기 위하여 소요되는 수명주기비용에 대한 추정이 필수적이며, 이를 총비용이라 정의함

○ 사업목표 달성을 위해 반드시 필요하나, 사업기간 내에 소요되지 않아 총사업비에 반영되지 않는 숨은 비용(hidden cost)을 사후비용으로 정의함

- 숨은 비용은 추정 가능한 범위에서 최대한 반영하는 것을 원칙으로 하는데, 대표적인 것으로는 사업기간 이후에 사업과 관련된 인건비 또는 도입된 시설·장비의 운용 및 처분과 관련된 비용이 고려될 수 있음

○ 총비용을 산출하는 기간은 30년을 최대기간으로 하며, 기술의 진부화를 고려하여 목표가 달성되는 기간까지 소요되는 비용을 합산

○ 경제성 분석을 위해서 사업의 효과(또는 편익)가 최종적으로 발생하는 해의 말까지 소요되는 모든 비용을 총비용으로 고려함

<표 22> 국가연구개발사업의 총비용 분석을 위한 분류체계

과제 성격	분류 기준
연구개발	- 연구시설, 장비 구입 및 유지비, 연구관리비를 제외한 모든 연구개발비
연구시설·장비 구입 및 유지비	- 연구시설 구축 및 유지비, 연구장비 구입 및 유지비, 시설·장비의 차입금 상환 등
연구관리	- 연구과제 평가 및 관리비, 국공립연구소와 출연연구소의 인건비, 경상비, 연구개발 관련 사무국 운영비 등

자료: KISTEP, 연구개발부문의 예비타당성조사 표준지침, 2016.11

<표 23> 총 사업비와 총 비용의 구분

구분	사업기간 내 소요(1)	사업기간 이후 소요(2)
연구개발(A)	○ (A1)	△ (A2)
연구시설·장비 구입 및 유지비(B)	○ (B1)	○ (B2)
연구관리(C)	○ (C1)	△ (C2)
합계 (D=A+B+C)	**○ (D1)**	**△ (D2)**

※ 총사업비 = D1, 사후 비용 = D2, 총비용 = D1 + D2

1) A2가 존재하는 경우 : 후속 연구개발(실증연구 등)이 필요
2) B2가 존재하는 경우 : 시설·장비를 구축하는 경우, 편익기간 동안 소요
3) C2가 존재하는 경우 : 사업 종료 후에도 유지되는 사업단, 기관 등의 인건비, 경상운영비 등 사후비용으로서 편익기간 동안 소요

자료: KISTEP, 연구개발부문의 예비타당성조사 표준지침, 2016.11

□ 이에 따라 본 과제의 경제성분석에서는 과제의 예산 총합인 총사업비와 사후비용인 실용화연구개발사업비, 연구시설장비 구입·유지비를 포함하여 총 비용으로 적용함

○ 본 과제의 사업기간인 3년동안의 과제예산과 이후 실용화연구개발을 위한 후속연구사업의 연구개발비, 시스템 구축·운영비를 고려함

$$Cost = aRC + (bRC + bSC)$$

a = 본 과제 사업,
b = 후속사업(실용화연구개발)
RC = 연구개발 과제 예산, Research Cost
SC = 발전시스템 구축·운영비, System(Equipment) Cost

5.2.2. 편익항목 도출

(1) 예상 연구개발 성과물 및 경제적 효과

□ 동 연구개발 사업으로 도출 예상 되는 연구개발 성과물은 ‘부유식 조류-해상풍력발전 시스템’, ‘해상풍력기반 부유식 플랫폼’과 ‘운영 및 유지관리 기술’로 분석

○ 부유식 조류-해상풍력 발전 시스템

○ 해상풍력기반 부유식 플랫폼

○ 부유식 조류-해상풍력 시스템 운영 및 유지관리 기술

(2) 예상 경제적 효과에 따른 편익 도출

□ 동 연구개발 사업 수행을 통해 발생하는 편익은 크게 3가지 구분됨

○ 시장수요접근법을 활용하여 국내 부유식 조류-풍력 발전 시스템 적용을 통한 매출 편익

- 국내 부유식 해상풍력 발전단지 구축예정 지역 중 조류와 풍력발전 모두 발전이 가능한 부유식 조류-해상풍력 발전 시스템으로 일부 대체

○ 기존 조류, 해상풍력의 단일발전방식 대비 건설비 및 설비비 절감 편익

- 기존 부유식 구조체(플랫폼)에 비해 단위용량당 건설비 및 설비비 절감 가능

○ 인공지능 기반 유지관리 기술 적용에 따른 상시 운영비용 절감 편익

※ 일반적인 풍력발전은 무인 원격 운전되어 유지보수 비용이 적은 장점이 있음

5.2.3. 편익항목별 분석 모델

(1) 국내 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 매출 편익

□ 국내 해양에너지 복합발전 단지 구축 예정 지역에 개발된 성과물의 적용으로 인한 매출 중 개발기술이 편익 발생에 기여한 부분을 현재가치로 평가하여 분석

편익 = 미래 시장규모 × 사업기여율 × R&D기여율 × R&D사업화성공률 × 부가가치율

□ (편익 회임기간) 연구개발 투자 이후 편익이 발생되기까지는 일정 시간을 필요로 함에 따라 편익 회임기간을 5년으로 설정

○ 연구개발사업에 대한 투자가 이루어진 후, 경제적인 편익 또는 효과가 발생하기 전까지의 시간적 지연을 편익 회임기간이라고 정의

- 일반적으로 연구개발활동으로 인한 경제적 효과가 발생하기 위해서는 기술개발의 사업화 등의 과정을 거쳐야 하기 때문에 편익 회임기간을 지난 시점을 최초 편익 발생시점으로 정의 가능

○ 양희승(2010)에 따르면 기존에 관련 연구가 없었던 기초 연구의 경우 평균 7년, 기존 연구가 존재하는 응용기술 개발의 경우 평균 6.4년이 걸리는 것으로 나타남[6)]

○ 한국개발연구원(KDI)에서는 편익회임기간이 별도로 제시하지 않은 경우 기초연구는 5년, 개발·응용 연구는 3년을 기본으로 사업 특성을 반영하고 있음

○ 동 경제성 분석 대상 사업은 핵심원천기술개발을 목적으로 하고 있으며, 후속연구사업으로 상용화 연구가 추진되어야 함에 따라 KDI에서 제시하는 기초연구 5년 기준을 따름

- NTIS[7)]를 통해 유사과제를 검색한 결과, 부유식 해상풍력시스템 상용화를 목적으로 하는 기술개발사업은 대략 3년간의 연구기간을 보유한 것으로 조사

※ 12MW급 부유식 해상풍력발전시스템 상용화를 위한 핵심기술개발(2014.12.~2017.11.)
경쟁력을 갖춘 부유식 해양 풍력 시스템 개발(2015.1. ~ 2016.12)
보급형 3kW급 풍력발전기 상용화 기술개발(2011.12.~2013.11)

□ (편익기간) 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템의 기술수명주기를 편익기간인 9년으로 설정

○ 편익기간은 최초 편익 발생시점이 결정된 이후에는 해당 사업의 편익이 얼마동안 지속될지를 고려해야하는 기간임

- 노화준(2004)는 사업을 수행함으로써 편익이 나오게 될 것으로 기대할 수 있는 시간을 사업의 수명으로 정의하였음

○ IPC(국제특허분류)별로 특허인용수명(TCT, Technology cycle Time) 지수를 활용하여 기술수명주기 산출

※ 특허인용수명 : 특정의 특허가 등록 이후 다른 특허에 의해 인용되는 기간을 의미함. 특허인용수명 지수는 후방인용(Backward Citation)에 기반한 특허인용수명의 평균, Q1, Q2(중앙값), Q3에 대한 통계값을 제시함. 특히 이와 같이 산출된 Q2는 TCT(Technology Cycle Time, 기술순환주기 또는 기술수명주기)라고 부름

6) KISTEP, 연구개발부문의 예비타당성조사 표준지침, 2016.11
7) NTIS, 국가과학기술지식정보서비스, http://www.ntis.go.kr/ThMain.do

○ 동 사업관련 특허인용수명지수는 관련 분야의 중앙값의 평균인 9년으로 설정

<표 24> 동 사업 관련 IPC 분야 특허인용수명(TCT) 지수

IPC	내용	평균값	Q1	Q2 (중앙값)	Q3
E02D	기초, 굴착; 축제; 지하 또는 수중 구조물	12.72	5	10	18
H02K	발전-전기 기계	11.68	5	8	16
H02G	전기케이블 또는 전선, 또는 광 및 전기케이블 또는 전선의 결합체의 설치	12.30	4	9	18

출처: 산업통상자원부, 기술가치평가 실무가이드, 2014.12

□ (미래시장규모) 국내 부유식 해상풍력단지의 일부 시장을 부유식 조류-풍력발전 시스템으로 개발완료 후 대체되고 점차 대체비중이 증가할 것으로 가정

○ 동 연구개발사업 종료후 5년 뒤인 2026년부터 매출편익이 발생한다고 가정하고 편익기간 9년을 반영하여 2026년부터 2034년까지 미래 시장규모 예측이 필요

○ 동 기술개발을 통해 개발된 성과물은 기존 부유식 해상풍력 단지의 일부 시장을 대체하여 편익을 달성할 수 있음에 따라 향후 국가 계획에 따른 시장규모 산정

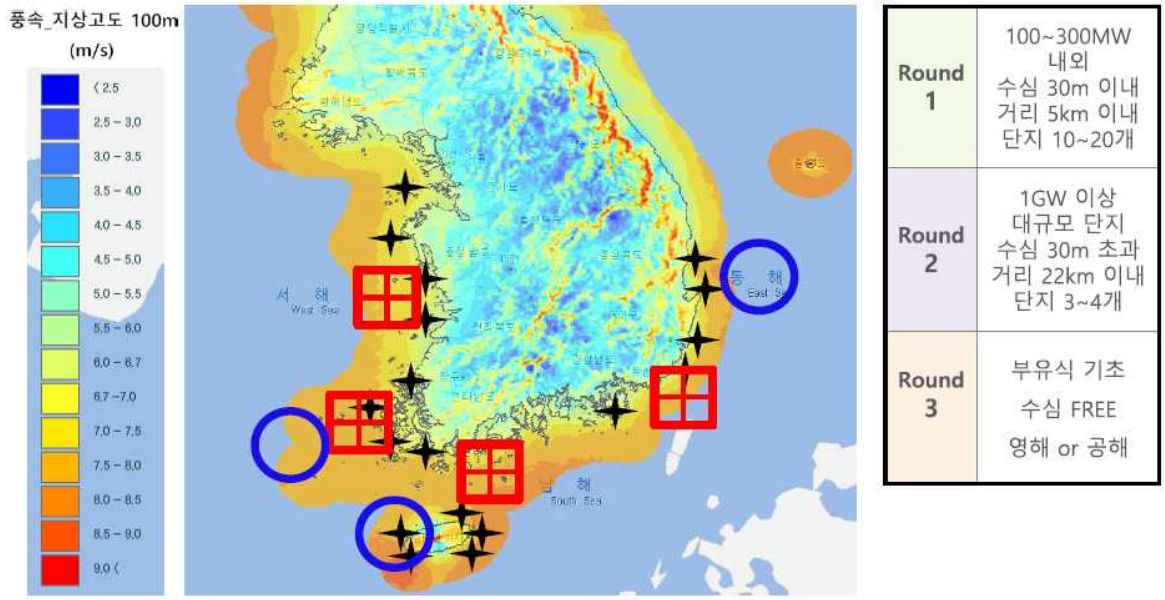
- 2016년 기준 국내 해상풍력발전은 35MW가 설치 되어있으며 국가해상풍력단지를 구축을 통해 2030년까지 13GW 생산을 목표로 하고 있음
- 해당 국가계획을 기준으로 2030년까지 13GW 규모로 추산하면 연간 50% 이상의 성장률로 시장이 확대되며 이후 15%* 수준으로 성장하는 것으로 가정

  ※ 최근 5년간 세계 시장의 연평균 성장률은 15%임(KETEP, 2017.9.28. 발표자료)

- 국가 해상풍력단지 중 Round3에 해당하는 부유식 해상풍력 규모를 전체 30%로 가정하고 부유식 해상풍력단지를 복합발전으로 전체 대체된다고 가정

  ※ 복합발전의 유형은 부유식 파력-풍력과 부유식 조류-풍력의 2가지로 분류함

- 부유식 해상풍력단지 중 부유식 조류-풍력발전의 시장규모는 이 중 50%를 차지한다고 가정하고, 현재의 생산금액이 1MW당 현재 해상풍력 40억원에서 점차 감소할 것으로 가정
- 이 중 부유식 조류-풍력발전 시스템이 2026년 20%에서 점차 매년 10%씩 시장점유율이 증가 된다고 가정



[그림 88] 국가해상풍력단지(Round1-3) 계획

자료: KETEP, 해상풍력개발 현황 및 미래, 2017.9.28

□ (사업기여율) 62.7%로 산정

○ 사업기여율은 미래 시점 기준의 연구개발활동 중 조사 대상사업이 차지하는 비중만을 적용한다는 개념임

- 자료 조사를 통해 해당 분야의 연간 총 R&D 투자 규모가 데이터가 있을 경우 이를 반영하여 사업 기여율을 도출

○ 사업기여율은 기존 KISTEP 예타보고서에 활용된 유사분야 사업기여율을 참고하여 62.7%로 설정

- 사업기여율 산정을 위하여 NTIS를 통해 유사과제를 도출 하였으나 기존 유사과제는 부유식 파력-풍력발전 시스템의 주된 내용으로 동 사업의 유사과제로 보기 어려움

※ 사업기여율 = 동 사업 투자규모/(국내 부유식 복합발전분야 R&D 전체 투자규모(정부+민간) + 동사업 투자규모)

- KISTEP 예비타당성조사 보고서 중 유사 분야 기술인 발전시스템 기술개발사업에서 설정한 사업기여율을 참조

※ 초임계 CO2 발전시스템 기술개발사업 예비타당성조사 보고서

<표 25> 부유식 복합발전 관련분야 유사과제 목록(2011-2016)

부처명	과제명	정부출연금	민간부담금	총연구비	연간총연구비*
산업통상자원부	심해용부유식풍력발전substructure/platform 기반기술개발	2,507	240	2,747	916
	12MW급부유식해상풍력발전시스템상용화를 위한핵심기술개발	1,000	82	1,082	541
	중수심용부유식해상풍력발전파일럿플랜트(750kW급) 개발	2,500	1,541	4,041	4,041
해양수산부	1,000톤급계류앵커개발	200	-	200	200
	1,000톤급계류앵커개발및설계해양환경조건 산정	357	-	357	357
	고강도신소재기반적용기술및피로/방식향상 기술개발	100	-	100	100
	고강도강적용구조연결부수명향상기술개발	102	-	102	51
	복합발전전력계통시뮬레이션모델및상위전력 제어기술개발	100	-	100	100
	복합발전전력변환및제어기술개발	90	-	90	90
	복합발전전력변환기시뮬레이션모델개선및검 증연구	65	-	65	65
	복합발전출력제어및전력변환기제어기술개발	173	-	173	173
	복합발전풍력터빈제어시스템기술개발	200	-	200	200
	부유식파력-해상풍력연계형발전	1,525	-	1,525	1,525
	부유체대형복합구조물의구조강도및안전성해 석기술개발	922	-	922	461
	부유체복합구조물핵심요소기술개발	9,124	-	9,124	4,562
	장지간부유구조물과표준모델기본설계구조최 적화및풍력터빈블레이드난류유동장해석	157	-	157	157
	통합제어시뮬레이션및모니터링기술개발	90	-	90	90
	파력발전전력변환기및통합감시제어시스템최 적화기술개발	620	-	620	620
	파력-해상풍력연계형발전통합제어기술개발	629	-	629	629
	풍력터빈동적모델및제어시스템연구	519	-	519	173
총합계		20,980	1,863	22,843	15,051

□ (R&D 기여율) 35.4%를 적용

○ 제3차 과학기술기본계획(미래창조과학부, 2013.8)에서 제시된 R&D 경제성장 기여율 35.4%를 적용

□ (R&D 사업화 성공률) 기존사례 성공률을 적용하여 19.1%로 설정

○ 동 사업은 다수의 과제로 구성되어 있으며, 기술개발 결과가 시장에서의 편익창출로 이어지기 위해 기술의 실증 및 상용화의 과정에서 불확실성 보유

○ KISTEP 예비타당성조사 보고서 중 유사 분야 기술인 발전시스템 기술개발사업에서 설정한 R&D 사업화 성공율을 참조

※ 초임계 CO2 발전시스템 기술개발사업 예비타당성조사 보고서

□ (부가가치율) 36.0%로 설정

○ 동 사업 수행 시 창출되는 편익은 새롭게 창출된 경제적 편익만을 고려하므로 시장 전체가 아닌 부가가치를 기준으로 설정

○ 부가가치율은 KISTEP 예비타당성조사 지침의 제안에 따라 부가가치율은 총투입액 중 부가가치액을 차지하는 비율로 산출

- 한국은행 산업연관표(2014년 연장표)의 투입산출표 중 기초가격 통합소분류 기준 161개 상품부문 중 동 사업에 가장 적절한 상품부문 즉, '101. 전력 및 신재생에너지' 부문을 계산

- 부가가치율 = (부가가치액/총투입액) x 100 = (21,131,712)/(58,689,846) x 100
= 36.0%

5.2.4. B/C Ratio 산출 방법론

□ (산출방법) 동 사업의 진행으로 인한 총 편익과 총비용을 현재가치로 환산하여 총편익의 현재가치를 총비용로 나누어 사업의 경제성을 최종 분석

○ 비용편익분석에 의한 결과 지표는 비용편익 비율(benefit-cost ratio), 순현재가치(NPV: net present value), 내부수익률(IRR: internal rate of return) 등이 있음

○ 동 경제성 분석에서는 비용편익 비율로 산출된 ROI의 B/C Ratio 분석으로 사업의 경제성을 판단

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

B_t : t시점의 편익, C_t : t시점의 비용, r : 할인율, n : 분석기간

[그림 89] 비용편익분석 산식

자료: KISTEP 예비타당성조사 표준지침, 2016.11

□ (결과의 해석) 비용 대비 편익의 비율이 높은 사업일수록 경제성이 높은 것으로 평가

○ B/C≥1인 경우 각 과제 또는 분야별 발생 편익이 투입 R&D 예산 대비 높은 것으로서 경제적 관점에서 추진하기에 타당한 것으로 분석

○ B/C≤1인 경우 해당 기술은 투입 예산 대비 높은 편익을 확보하지 못하여 경제적 관점에서는

○ 타당성을 확보하기 힘든 기술로 해석

5.3. 연구과제 경제성 분석

5.3.1. 비용 분석

□ ‘부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 연구개발사업’의 총 사업비와 사업비에는 반영되지 않았으나 이후 필요한 사후 비용을 고려하여 총 비용은 45.7억원이며, 현재가치를 고려하면 39.5억원으로 분석

○ ‘부유식 조류-풍력 복합발전 시스템 연구개발사업’의 총 사업비는 3년간 9.7억원임

○ 동 연구개발사업을 통해 개발된 기술은 필수적으로 실용화단계의 연구가 필요함에 따라 실용화연구개발비 및 해당 시스템 구축운영비를 산정 및 고려해야함

- 기 추진된 과제를 검토를 통해 부유식 해상풍력에 대한 상용화 연구개발은 약 3년간 연간 12억원 규모의 투자가 요구되는 것으로 조사

<표 26> 유사 분야 상용화 기술개발사업을 위한 연구비 및 기간 조사

유사과제	연구기간	총 연구비 (정부출연금) (백만원)	연간 정부출연금 (백만원)	비고
12MW급 부유식 해상풍력발전시스템 상용화를 위한 핵심기술개발	2014-12-01 ~ 2017-11-30	1,100	550	연구기간은 3년으로 설정되어 있으나 연구비 집행이 2년치로 됨
보급형 3kW급 풍력발전기 상용화 기술개발	2011-12-01 ~ 2013-11-30	770	385	
중수심용 부유식 해상 풍력발전 파일럿 플랜트 (750kW급) 개발	2016-05-01 ~ 2020-04-30	2,500	2,500	진행중 과제로 1차년도 예산만 조사
평균	**3년**		**1,145**	

○ 총 비용은 45.7억원 규모이며, 이에 대한 현재가치는 39.5억원으로 분석

<표 27> 총 비용 산출

	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	합계 (백만원)	현재가치 (2018년 기준)
사업비	310	340	320				970	
상용화사업비				1,200	1,200	1,200	3,600	
총비용	310	340	320	1,200	1,200	1,200	4,570	3,949

5.3.2. 편익 분석

□ 부유식 조류-풍력 발전시스템 시장규모 도출

○ 해상풍력발전 시장 규모는 국가 계획에 따라 2030년 누적발전량 규모 1.3GW를 목표로 동일한 CAGR로 시장규모를 산정 및 이후 연간 15%로 증가 가정

※ 연간 15%는 현재 전세계 풍력발전 최근 5년간 성장률

○ 국내 해상풍력발전 단지 중 부유식 해상풍력발전단지 비중을 30%로 가정

○ 부유식 해상풍력발전단지 중 동 사업을 통해 개발된 부유식 조류-풍력 발전시스템의 시장점

유율을 2033년 20%를 달성한다고 가정

- 2026년 처음 시작연도에는 부유식 조류-풍력 발전시스템 1개의 예상 성능기준인 10MW로 시작한다고 가정하면 시장점유율 4%로 시작
- 2016년 풍력발전 전반 기준으로 외산설비 비율이 51.8% 수준으로, 다양한 복합발전 유형(부유식 파력-풍력, 부유식 태양광-풍력 등)을 고려하여 20%까지 해당 기술의 적용이 가능할 것으로 추정

○ 2026년 연간 10MW규모에서 2033년 연간 133MW규모까지 설치규모가 증가할 것으로 전망

<표 28> 동 사업 복합발전 연간 설치량(MW) 추정

구분	2016년 (기준)	2026년	2027년	2028년	2029년	2030년	2031년	2032년	2033년
해상풍력 (MW) (누적)	35	2,397	3,658	5,582	8,519	13,000	14,950	17,193	19,771
해상풍력 신규 설치량(MW)		826	1,261	1,924	2,936	4,481	1,950	2,243	2,579
부유식 해상풍력 설치량(MW)		248	378	577	881	1,344	585	673	774
동 사업 복합발전 점유율(%)		4.0%	5.0%	6.3%	8.0%	10.0%	12.6%	15.9%	20%
복합발전 설치량(신규)		10	19	37	70	135	74	107	155

○ 최근 국내외 해상풍력, 부유식 해상풍력단지 설치 비용을 참조하여 복합발전 설치단가를 1MW당 50억원 규모로 산정하여 시장규모 산출

- 부유식 해상풍력발전기의 국내 제작·설치비용 정보가 부재함에 따라 가장 최근 발표된 서남해상풍력발전단지 3MW급 해상풍력발전기의 하부구조물 제작-설치 비용이 46억원 규모를 참조
- 영국의 부유식 해상풍력단지(30MW, 6MW규모 5기 풍력터빈 구성)의 사업비는 2억 파운드, 약 3000억원 규모로 발표되어 6MW 1개별 600억원 규모로 추정[8)]

8) 보도자료, http://www.koenergy.co.kr/news/articleView.html?idxno=93279

<표 29> 동 사업 복합발전 시장규모(억원) 추정

구분	2016년 (기준)	2026년	2027년	2028년	2029년	2030년	2031년	2032년	2033년
복합발전 설치량(신규)	-	10	19	37	70	135	74	107	155
복합발전 시장규모(억원)	-	397	762	1,463	2,809	5,396	2,955	4,277	6,189

□ 편익 분석

○ 앞서 방법론 설정에서 제시한 편익항목은 다음과 같음

- 사업기여율 : 35.4%
- R&D기여율 : 62.7%
- R&D 사업화 성공율 : 19.1%
- 부가가치율 : 36.0%

○ 편익기간 8년간 발생하는 총 편익은 370억원으로 현재가치(2018년기준)는 287억원으로 분석

<표 30> 동 사업 복합발전 편익 추정

구분	2026년	2027년	2028년	2029년	2030년	2031년	2032년	2033년
복합발전 시장규모(억원)	397	762	1,463	2,809	5,396	2,955	4,277	6,189
사업기여율	35.40%	35.40%	35.40%	35.40%	35.40%	35.40%	35.40%	35.40%
R&D기여율	62.70%	62.70%	62.70%	62.70%	62.70%	62.70%	62.70%	62.70%
R&D사업화 성공율	19.10%	19.10%	19.10%	19.10%	19.10%	19.10%	19.10%	19.10%
부가가치율	36.00%	36.00%	36.00%	36.00%	36.00%	36.00%	36.00%	36.00%
편익(억원)	**6.05**	**11.63**	**22.33**	**42.88**	**82.35**	**45.10**	**65.27**	**94.46**

5.3.3. B/C분석

□ ‘부유식 조류-풍력 복합발전시스템 연구개발사업’ 편익의 현재가치와 총 비용의 현재가치를 고려한 B/C Raito는 7.3으로 동 연구개발사업은 경제성이 있는 것으로 분석

○ 편익 항목인 부유식 조류-풍력 복합발전 시스템의 매출편익 현재가치는 287억원이며, 비용 항목(총사업비 및 후속사업비)의 현재가치는 39.5억원임

○ 이에 따라 B/C Raito는 (287억원/39.5억원 = 7.3) 7.3으로 도출됨

6. 참고문헌

1. 고동휘, 박진순, 이광수, 박준석(2017). 울돌목 조류발전 부존량 평가. 2017년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회.

2. 국립해양조사원(2010). 조류에너지 자원도 개발 연구(1): 관측유속 기반.

3. 국토해양부(2011). 조력에너지 실용화 기술개발 최종보고서.

4. 국토해양부(2011). 조류에너지 실용화 기술개발 최종보고서.

5. 국회신재생에너지포럼/한국에너지기술평가원 (2017) 해상풍력 산업화 전망과 과제 자료집

6. 김경환, 이강수, 손정민, 박세완, 홍기용 (2014) 10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전구조물의 개념설계, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp.2382-2387.

7. 미래창조과학부, 과학기술&ICT 정책·기술 동향, 2014.04.25.

8. 지식경제부(2010). 한국 남부해역의 해양에너지 자원 분포 및 가용발전량 조사연구.

9. 한국건설기술연구원 (2014) 부유식 해상풍력.파력 복합발전 플랫폼 및 복합이용 기술 개발 (기획보고서), 2014년도 주요사업 기획보고서(연구기획사업), 한국건설기술연구원

10. BC Hydro(2002). Green energy study for British Columbia Phase 2: Mainland, Tidal current energy., BC Hydro, Engineering.

11. Carbon Trust (2015) Floating Offshore Wind: Market and Technology Review, The Scottish Government

12. Cornett AM(2008). A Global Wave Energy Resource Assessment. Procedings of ISOPE, 8(March).

13. EMEC(2009). Assessment of tidal energy resource. EMEC.

14. ETSU(1993). Tidal stream energy review. Technical report ETSU-T-05/00155/REP, Harewll Laboratory, Energy Technology Support Unit. DTI.

15. European Commission(1996). The exploitation of tidal and marine currents. Non Nuclear Energy-JOULE II, wave energy project results. Technical report EUR

16683 EN, Commission of the European Communities. Directorate-General for Science, Research and Devlopment.

16. KISTEP, S&T GPS 웹사이트 해외정책동향, 2015.04.03

17. NASA(2006). TOPEX/Poseidon: Revealing Hidden Tidal Energy, Greenbelt, Maryland. Available at: svs.gsfc.nasa.gov/stories/topecx/.

18. World Eenrgy Council(2016). World Energy Resources: Marine Energy 2016.

주 의

1. 본 보고서는 한국해양과학기술원의 내부 연구사업으로 수행된 결과물입니다.

2. 본 보고서의 내용을 인용할 경우, 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.