

해상풍력발전단지 조성 시의 해상 운송 및 설치 방법

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 이홍원
(hongwlee@reseat.re.kr)

1. 머리말

세계 각국은 지구온난화 대응을 위해 신재생에너지(renewable energy)의 개발과 이용에 힘을 쏟고 있다. 유망 신재생에너지의 하나인 풍력에너지(wind energy) 분야도 이러한 추세에 맞춰 풍력단지(wind farm) 건설을 대규모로 진행하고 있다. 하지만 현재 주류를 이루고 있는 육상풍력은 부지 확보의 어려움과 소음, 경관훼손 등의 환경 이슈 문제가 점차 커지고 있어 최근에는 해안에 인접한 해상풍력단지(offshore wind farm) 건설 비율이 점차 높아지고 있다. 대단위 풍력단지 조성에 유리한 해상풍력발전은 바람자원이 풍부하고 난류(turbulence) 강도가 약한 특성을 갖고 있으며, 조력(tidal power), 파력(wave power), 온도차 발전과 같은 해양에너지 이용 발전시스템과의 결합을 통해 발전효율을 향상시킬 수 있는 잠재적인 장점도 있다.

최초의 해상풍력발전은 1991년 스웨덴 Nogersund 해상에 설치된 정격출력 220kW의 풍력터빈으로 알려져 있다. 해상풍력단지 규모로는 1992년 덴마크 Vindeby 해상에 450kW×11기 규모의 해상풍력발전소가 처음 건설됐고, 뒤이어 영국, 독일, 벨기에 등 유럽 각국과 아시아, 미국으로 건설이 확대되고 있다. 세계풍력에너지협회(GWEC)의 2016년 보고서에 의하면 전 세계 풍력발전 설치용량은 2016년 말 기준으로 486GW를 넘어섰으며 2021년에는 800GW에 이를 것으로 예측되고 있다. 해상풍력발전은 설치용량이 2016년 한해에 2.2GW가 신설되어 누적으로 14.4GW를 기록했으며, 이 중 약 88%가 유럽의 10개 지역에 설치되고 나머지는 중국, 일본, 한국, 미국에 설치됐다.

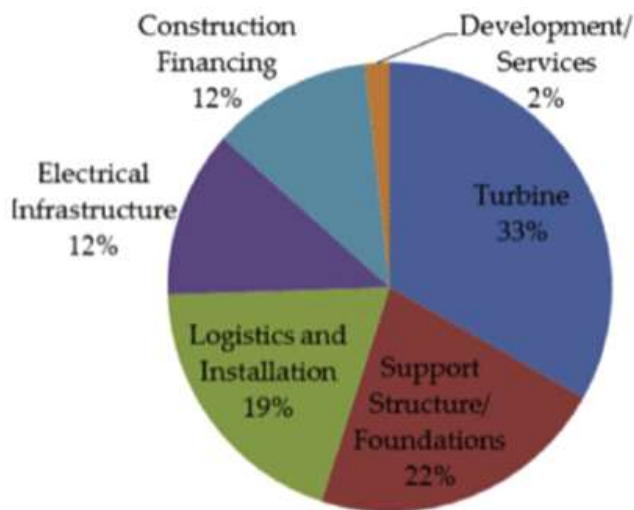
국내의 해상풍력발전은 1998년에 상업운전에 들어간 제주도의 소규모 풍력 발전을 시초로 현재 대규모급 해상풍력단지 건설이 서남해 해역에서 진행되고 있다. 이 사업에서 시설용량 60MW(3MW×20기) 규모의 1차 실증단계(2015~2018년)는 2017년 4월에 착수 했지만 400MW 규모의 2차 시범단지 계획(2018~2020년)과 2GW의 3차 확산단계 계획(2020년~)과 함께 완료 시기 지연은 불가피할 것으로 보인다.

한편 해상풍력단지는 육상에 비해 날씨에 따른 작업 차질 등으로 건설비가 높고 접근성이 떨어져 유지보수 비용도 높으므로 전체 비용을 줄여야 하는 과제를 안고 있다. 이 보고서는 해상풍력발전의 개요 소개와 함께 건설비용 절감 측면에서 해상풍력발전단지 건설에서의 해상 운송 및 설치 방법에 대해 서남해 풍력단지를 중심으로 분석한다.

2. 해상풍력발전의 개요

2-1. 특징

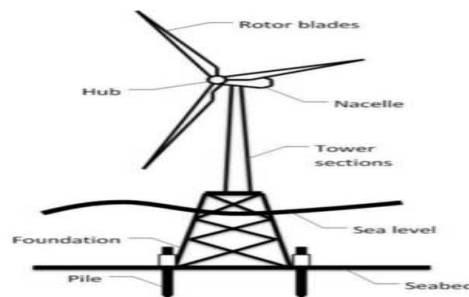
해상풍력은 육상풍력에 비해 발전기의 해상 운송 및 설치와 함께 하부구조물, 변전소 공사, 송전망 연결 등 건설비용이 증가한다. <그림 2-1>과 같이 전체 건설비용의 19%를 차지하는 물류(logistics) 및 설치 작업은 날씨, 바람, 파도 등의 해상 조건에 크게 영향을 받기 때문에 설치 해상의 기상 악화는 큰 폭으로 건설비용을 증가시킨다. 여기에 최근 단지 사이트의 연안 해역에서 근해로의 확장, 수심의 증가와 함께 풍력터빈의 대형화 추세가 진행되고 있어 종래의 해상풍력 건설 방법을 새롭게 개선하는 것이 필요하다.



<그림 2-1> 일반적인 풍력단지의 건설비용 구성⁽¹⁾

2-2. 해상풍력발전기의 구성

해상풍력발전기는 일반적으로 <그림2-2>과 같이 하부구조물(foundation), 파일(pile), 타워(tower), 나셀(nacelle), 허브(hub)와 로터 블레이드(rotor blade)로 구성된다.

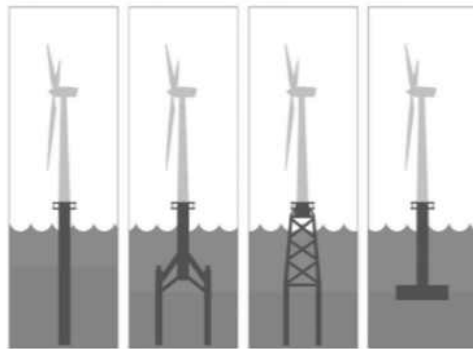


<그림 2-2> 해상풍력발전기의 구성 요소⁽²⁾

2-2-1. 하부구조물의 종류

하부구조물은 <그림 2-3>에서와 같이 여러 종류가 있고 선택한 종류에 따라 필요한 장비가 정해진다. 예를 들면 모노파일(mono pile)은 4~6m 직경의 강관을 해저바닥 20m 까지 매설하기 위해 대형 유압해머가 사용된다.

- (1) 모노파일 방식: 콘크리트나 고강도 PC(Prestressed Concrete) 모두 가능하고 수심이 20m보다 낮은 해상에 적용된다. 운전 중 낮은 소음과 함께 유지보수가 쉽고 대규모로 조달이 쉬운 장점이 있다.
- (2) 트라이포드(tripod foundation) 방식: 정유·가스 산업의 기술을 응용할 수 있다. 수심이 깊은 해상에 적용되고 각 끝단에 구성된 파일을 해저바닥에 매설한다. 지금까지 적용 사례는 많지 않다.
- (3) 재킷(jacket foundation) 방식: 파일, 하부구조물과 철타프레임으로 구성되고 수심이 깊은 해상(20~80m)에서 사용되고 가볍고 강도가 높은 장점이 있다.
- (4) 중력식(gravity foundation): 철타 파일로 만들고 주로 낮은 수심에 사용되며 단순하고 비용이 낮은 장점이 있다. 무거운 구조물에 견디는 해저 지반에서 사용된다.



<그림 2-3> 해상풍력발전기의 하부구조물⁽²⁾
(왼쪽부터 모노파일, 트라이포드, 재킷, 중력식)

2-2-2. 파일 및 타워

파일은 해저바닥에 하부구조물을 고정하는데 사용한다. 해머나 진동으로 파일을 매설할 때 주로 형판(template)을 사용하고, 재킷의 다리 끝부분에 고정된 스파이크(spike)를 파일에 맞춰 해저바닥에 고정한다. 타워는 상부의 부하를 하부구조물에 전달하는 기능을 하며 해수의 강한 부식에 견디는 철타판과 보강재로 만든다.

2-2-3. 나셀, 허브 및 로터 블레이드

나셀은 철타 격자와 유리섬유의 복합재로 만든다. 내부에 기어박스(gear box), 변압기(transformer), 냉각시스템(cooling system) 등의 유압·전기·기계 부품이 순차 조립된다. 무거운 중량(4MW의 경우 125톤)을 고려해야 한다. 허브는 나셀에 3개의 블레이드를 결합하는 기능을 한다. 블레이드는 주로 강화유리섬유 등 복합재로 구성되며 경량화를 위해

탄소섬유도 사용된다. 3MW 터빈의 블레이드는 무게가 100톤이고 직경은 100m에 달한다.

2-3. 해상풍력단지의 건설

국내의 해상풍력 이용은 제주도 내 테스트베드(test bed) 수준의 소규모 발전터빈 설치 경험을 보유하고 있다. 따라서 대규모 서남해 해상풍력단지 건설 시는 사전에 서남해 환경과 해상풍력 선진국인 유럽의 사례를 충분히 검토하여 적재 및 설치 방법을 결정할 필요가 있다.

해상풍력단지의 설치비용에 대한 절감 방법에는 ①발전기의 선적 부품수의 축소, ②해상운송 시간의 단축, ③저비용 설치선의 이용 등이 있다. ①항은 출입 항구에서 선박에 적재하기 전 단계에서 발전기의 전체 또는 일부를 조립함으로써 해상에서의 기중기(crane) 작업 횟수를 줄여 설치시간을 단축하는 것으로 대형 기중기가 설치된 선박이 필요하다. ②항은 1회 선적 당 발전기 적재 대수를 늘려 항구와 설치 해역 간의 운항회수를 줄이고 고속선박 이용으로 전체 운항시간을 줄이는 방법이다. ③항은 저비용 선박으로 비용을 줄이는 방법이지만 저비용은 저효율로 이어질 수 있어 작업시간의 증가로 설치비가 크게 늘어날 수 있어 전체 비용 측면을 고려해야 한다.

2-4. 해상풍력의 설치비용과 설치기간에 대한 시뮬레이션

Herman⁽³⁾은 풍력단지 건설에서의 운송 및 설치비용 산출을 위한 컴퓨터 모델을 개발하고 이 모델을 OWECOP(Offshore Wind Energy Cost and Potential) II 모델에 적용했다. 이들은 알려져 있는 해양기술(marine technology) 정보와 풍력발전기의 조립 방법에 따라 운송 및 설치비용을 산출했다. 또한 해상풍력 장비들의 비용과 함께 기상 악화에 따르는 일정 지연에 대한 예측과 선박의 복수 운용도 포함했다.

Muhabie⁽²⁾ 등은 해상풍력에서의 운송 및 설치 방법을 최적화하기 위해 DES(Discrete Event Simulation, 이산 사건 시뮬레이션)를 활용했다. DES는 날씨 제한(weather restriction), 거리 행렬(distance matrix), 선박 특성, 조립 시나리오 등을 고려한다. 풍력단지의 계획 단계에서 실제 기상 데이터(풍속, 파도 높이)와 확률적 접근법을 사용하고 DES를 통해 분석을 실시했다. 모델에는 항구로부터 설치 해상까지 풍력발전기 부품, 파일, 하부구조물의 운송에서부터 풍력발전기의 설치까지 모든 작업 과정이 포함된다. 실제 해상풍력단지 구성에 적용하여 분석을 통해 두 가지의 제안(실제 데이터와 확률적 접근법) 모델에서 거의 일치된 결과가 나타났다.

Sarker⁽⁵⁾ 등은 해상풍력단지 건설비용에 크게 영향을 끼치는 설치시간의 최소화를 위해 육상에서 이뤄지는 풍력발전기의 사전조립(pre-assembly) 방법과 발전기의 정격용량 등 운송 및 설치에서의 변수에 대한 최적화를 연구했다. 또한 인양(lifting) 작업과 조립 작업의 학습률(learning rate), 항구와 설치 해상 간의 거리, 선박의 갑판면적, 선박의 기중기 인양속도가 전체 비용에 크게 영향을 끼치므로 이를 기반으로 해상풍력단지에서의 풍력발전기 설치와 운송에 대한 모델을 개발했다. 모델 해석과 시스템 파라미터의 영향을 파악하기 위해 수치해석을 실시했다. 분석 결과, 발전기 용량과 사전조립 방법이 전체 비용에 크게 영향을 미쳤다. 또한 계획된 유지보수가 계획되지 않는 경우보다 비용

을 크게 절감되는 것을 알 수 있었다.

2-5. 해상풍력발전기의 운송 및 설치 선박

유럽 내에서 해상풍력단지 건설에 주로 이용하는 선박은 WTIV(Wind Turbine Installation Vessel), 잭업바지선(jack-up barge), 크레인바지선(crane barge), 화물바지선(cargo barge) 등이 있다. 이들 중 WTIV와 잭업바지선은 대부분 풍력터빈 설치에 사용되고 크레인바지선은 하부구조물 설치 용도로 많이 이용되며 화물바지선은 부대 화물의 운송용으로 사용된다. 예인선(tug boat)은 WTIV 이외의 자체추진 기관이 없는 선박을 이동시키는 용도로 쓰인다. 해상풍력발전기 설치용 선박의 규격과 특징은 <표 2-1>에서와 같고, 설치 선단의 중심 역할은 <그림 2-4>와 같은 형태를 갖는 WTIV와 잭업바지선이 수행한다.

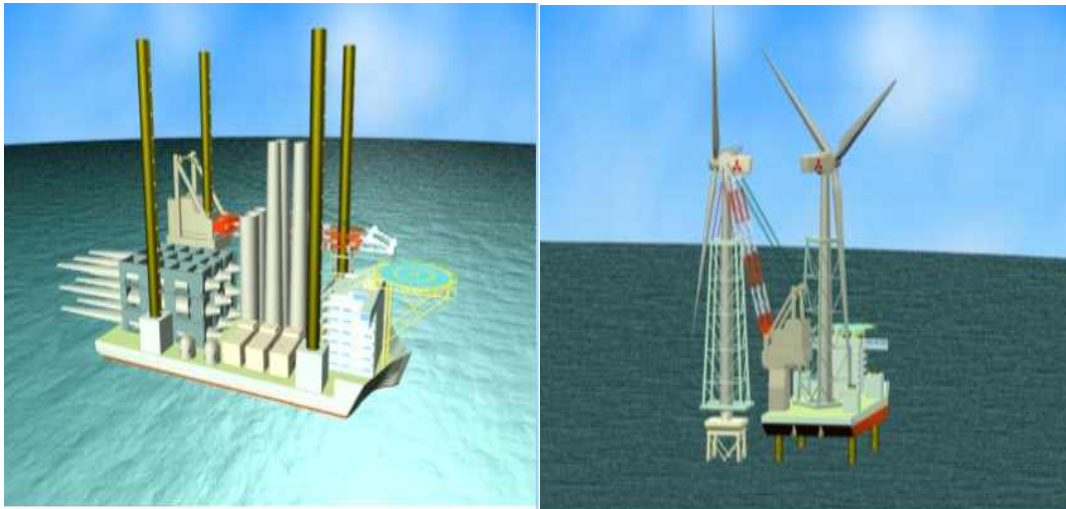
한편 새로운 개념의 설치선박들이 제안되고 있다. 일본 Mitsubishi 중공업은 <그림 2-5>와 같은 풍력발전기와 하부구조물의 겸용설치가 가능한 신개념 설치 선박을 개발하고 있다. 이 선박은 7MW급 발전기를 대상으로 분할설치의 경우는 3기, 일체설치일 때는 2기를 적재, 설치할 수 있으며, 하부구조물의 경우에는 2기분을 동시 처리할 수 있다. 또한 중국 DDHI(Dao Da 중공업)는 복합재 버킷(composite bucket) 형태의 하부구조물과 발전터빈을 육상에서 완전한 형태로 결합시킨 후 현장 해역까지 운송하여 해저에 설치하는 새로운 설치방법과 선박을 개발하고 있다⁽⁷⁾⁽⁸⁾. 다른 방식으로서 Mitsubishi 중공업은 적재 항구에서 부유체(floater) 형태의 하부구조물에 발전터빈을 결합시켜 완성된 풍력발전기를 하부 부유체의 자체 부력과 예인선으로 설치 해상까지 이동시켜 해저에 설치하는 신개념의 V자형 반잠수식 해상풍력발전기 부유체(offshore wind turbine floater)를 개발하고 있다⁽⁹⁾. 국내의 경우는 삼성중공업과 대우중공업 등에서 WTIV를 건조한 경험을 갖고 있다. 예로서 삼성중공업⁽¹⁰⁾은 2012년 7월과 12월에 북해해역(수심 60m)에서 사용되는 세계최대 설치 선박 1, 2호기를 각각 인도한 실적을 갖고 있다.

<표 2-1> 유럽 내 해상풍력단지 건설에 사용된 선박의 규격 및 특징⁽¹⁾

종류	규격 및 특징	비고
WTIV	재킹(jacking) 시스템 & DP(Dynamic Positioning) 시스템 대형 기중기(800~1,500톤), 적재용량, 500~8,000톤, 대형 갑판	1일 용선비: 150,000~250,000\$ 갑판 하중부하: 2톤/m ²
잭업바지선	자체추진기관 없음, 잭업시스템(유압), 중대형 기중기(200~1,000톤), DP 시스템 또는 계류(mooring) 장치	1일 용선비: 100,000~180,000\$ 예인선, 화물바지선과 선단구성
크레인바지선	기중기가 설치된 대형바지선, 일체(all in one)설치방식, 하부 지지구조물/변전소 공사용, 파고/풍속에 제약 받음	1일 용선비: 80,000~100,000\$
화물바지선	화물운송 전용	1일 용선비: 30,000~50,000\$
예인선	잭업/크레인바지선의 예인, 파고에 가장 크게 제약 받음	1일 용선비: 1,000~5,000\$



<그림 2-4> WTIV(왼쪽)과 잭업바지선(오른쪽)⁽⁴⁾

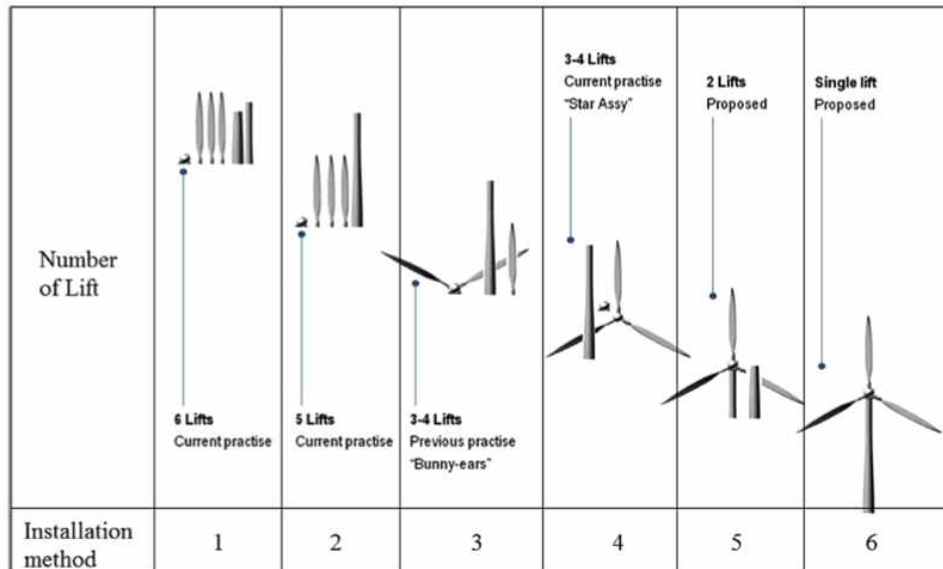


<그림 2-5> Mitsubishi의 신개념 설치선(왼쪽: 분할설치방식, 오른쪽: 일체설치방식)⁽⁶⁾

3. 서남해 해상풍력발전의 설치 방법에 대한 검토⁽¹⁾

3-1. 해상풍력발전기의 설치 방법

해상풍력단지 건설에서 건설비용과 건설기간이 크게 영향을 주는 풍력발전기의 설치 방법은 일반적으로 <그림 3-1>에서와 같이 6가지의 설치 방법이 제시된다. 지금까지 해상풍력발전기는 정격용량이 비교적 작은 소형이므로 설치 선박 등에 적재하기 전에 육상에서 사전조립(pre-onshore assembly)하는 방법을 쉽게 적용할 수 있었다. 유럽에서는 지금까지 6가지의 설치방법 중 3(bunny-ears)이나 4(star assy)의 방법을 많이 적용했는데 풍력터빈의 대형화로 사전조립 방법은 적용하기 어려워졌다. 즉 사전조립을 위해서는 부두에 넓은 작업 공간이 필요하고 대형 갑판과 대형 기중기가 설치된 선박이 필요하기 때문이다. 이에 따라 최근에는 육상에서 이뤄지는 사전조립의 범위를 축소시키고 현장 해상에서 조립하는 부품수를 늘리는 추세로 바뀌고 있다.



<그림 3-1> 해상풍력발전기의 설치 방법⁽¹⁾

해상풍력발전기의 설치 방법은 설치 해상의 환경, 발전기 정격용량, 운송설치선 등 관련 정보와 목표로 하는 건설비용과 건설기간을 고려하여 정하는 것이 필요하다. 특히 건설비용 절감에는 현장에서의 설치시간 단축을 위해 적재하는 부품수를 줄이는 것이 효과적이다. 하지만 유럽 풍력단지들의 자료에 따르면 실제로는 발전기의 설치 방법과 설치 소요일과의 상관관계는 완전분할(one by one) 방법인 1과 이에 가까운 2의 설치 방법은 2일 이내에 설치가 이뤄졌다. 이에 비해 사전조립 범위가 큰 3, 4, 5 설치 방법에서는 평균 5일(1.6~25일) 이상이 소요되었다(표 3-1).

<표 3-1> 유럽 해상풍력단지들의 발전기 설치 사례⁽¹⁾

프로젝트명	선박 대수	소요 기간(월)	발전기 수량	설치소요일/발전기	설치 방법
Lillgrund	1	2.5	48	1.6	3
OWEZ	1	3.5	36	2.9	5
Kentish Flats	1	4.0	30	4.0	4
Scroby Sands	1	3.0	24	3.8	4
Nysted	1	3.0	72	1.3	3
Horns Rev	2	4.0	80	1.5(3.0)	4
Burbo Bank	1	1.5	25	1.8	2
P. Amalia	2	11.0	60	5.5(9.5)	5
Middelgrunden	2	1.25	20	1.9(3.8)	3
North Hoyle	2	3.0	30	3.0(6.0)	4
Alpha Ventus	1	1.5	6	7.5	3
Thornton Bank	2	2.5	6	12.5(25)	3
Robin Rigg	2	9.0	60	4.5(9.0)	4
Horns Rev 2	1	6.0	91	2.0	3
L/I Dowsing	1	3.5	54	1.9	1
Barrow	1	5.0	30	5.0	4
Arklow	1	2.0	7	8.6	3

3-2. 해상풍력발전기 설치 작업에서의 지연 요소

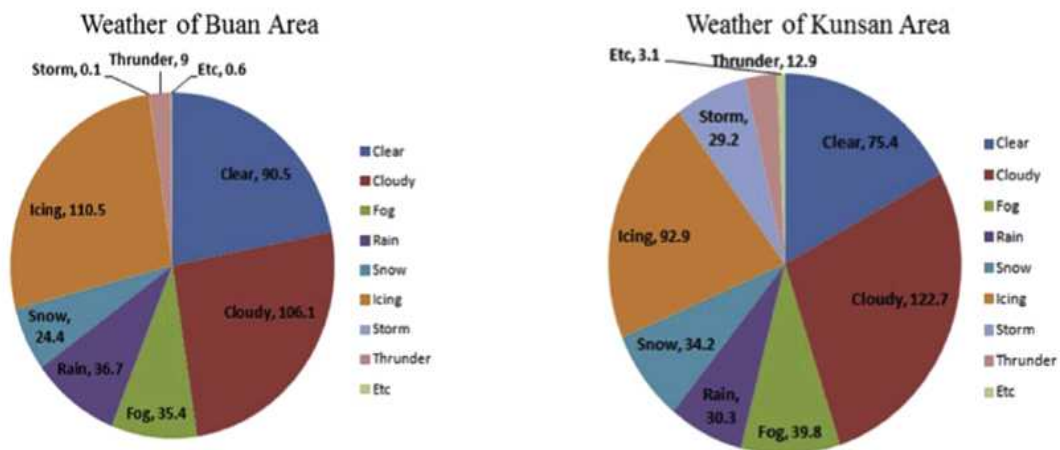
해상풍력발전기의 운송, 설치에서의 지연은 <표 3-2>와 같은 요소 때문으로 볼 수 있다. 특히 터빈 설치와 같이 높이를 정확히 맞춰야하는 작업에서 설치 선박의 작업 시 제약 조건은 매우 중요하다. 대부분의 선박은 파도 높이에 크게 제약을 받는다. 또한 풍속도 기중기 작업 가능여부에 중요한 요소가 된다. 일반적으로 해수면 20m 높이에서 10%를 넘거나 허브 높이에서 12%를 초과하면 안전을 위해 기중기 작업을 제한한다.

<표 3-2> 해상풍력발전기 설치 작업에서의 지연 요소⁽¹⁾

항목	요소	내용
지연 요소	강우	10mm/일 또는 1mm/h 초과
	결빙	기온 -10℃이하
	가시거리	비, 안개, 눈에 의한 가시거리 90m 이내
	야간작업	조명이 불충분하면 안전 위험
선박 작업 제한	파고 제한	운항과 작업 시 파고 1.5m
	풍속 제한	해수면 위 10m에서 10m/s 이상 또는 터빈 허브 높이에서 12m/s 이상
	해류속도 제한	DP시스템 작동 중이나 적재작업 중 기준치 이상(일반적으로 1.2m/s)
	조수(tidal)의 범위	설계치 이상의 조수 크기

3-3. 서남해의 해상 환경

서남해 해상풍력단지과 인접한 군산기상관측소와 부안기상대의 군산·부안지역의 일반적인 기후는 <그림 3-2>과 같으며, 설치작업이 가능한 작업일수는 연간 232~237일에 지나지 않는다.



*) Rain (more than 10mm), Storm (higher than wind speed 13.9m/sec), Temperature (-10℃ below)

<그림 3-2> 부안·군산 지역의 일반적인 기후⁽¹⁾

또한 부안·군산 해역의 해상 환경은 <표 3-3>과 같으며, 특히 조수의 차가 크고 해류가 빠르다. 설치 작업 시 해류 방향이 바뀌면 수심이 변화하고 수심이 변하면 닻에 의한 계류로는 정위치를 유지하기 어렵다. 이 해역은 해안에 근접된 해역의 수심은 10m 정도이다. 설치 선박의 작업 가능한 파고(2.5~3.0m)를 감안하면 9.0m 이상의 수심에서 작업이 가능하므로 수심에 대한 여유가 1.0m에 지나지 않는다.

<표 3-3> 부안/군산 해상 환경 조건⁽¹⁾

해상 환경조건	데이터 값
최대 파고(50년 빈도)	13.76m
유의 파고(50년 빈도)	7.4m
파도 주기(50년 빈도)	9.64~12.4s
최대 풍속(50년 빈도)	41.0m/s
최대 해류속도(해수면)	1.025m/s
최대 해류속도(해저)	0.85m/s
조수 차	6.63m
폭풍 해일(군산항)	1.9m

4. 서남해 해상풍력발전의 운송 및 설치 방법에 대한 평가⁽¹⁾

4-1. 설치 선단의 구성

설치 선단의 구성에는 설치 해역의 환경을 충분히 반영하는 것이 필요하다. 우선 각 선박의 운송과 설치 작업 조건은 <표 4-1>에서와 같이 800~1,500톤의 기중기를 장착한 WTIV의 경우는 12노트보다 느린 속도와 3m보다 낮은 파고에서 운항이 가능하고, 해상의 설치 작업은 파고가 2.5m보다 낮고 풍속이 16m/s보다 낮으면 가능하다. 800톤 기중기를 장착한 잭업바지선은 운송 시 4노트의 예인속도와 2.5m의 파고가 상한이고, 설치 작업은 파고 1.65m 미만과 풍속 16m/s미만에서 가능하다. 이러한 각 선박들의 작업 조건과 인근해역의 해상 환경을 고려하여 <표 4-2>와 같이 다양한 선택으로 설치 선단을 구성했다.

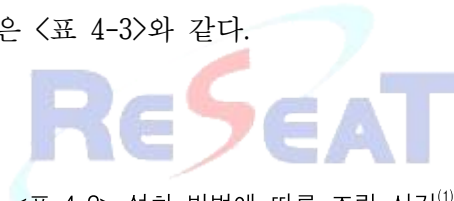
<표 4-1> 해상풍력발전기 설치 선박의 운송 및 작업 조건⁽¹⁾

선박 종류	작업 장비	용량	운항 조건(한계)		작업 조건	
			속도(노트)	파고(m)	파고(m)	풍속(m/s)
WTIV	Jack up/down + crane	crane: 800~1500 톤	12	3.0	2.5	16
잭업바지선	jack up/down + crane	crane: 800톤	4	2.5	1.65	16
크레인바지선	Shear crane	crane: 3000 톤	4	1.5	1.0	10
화물바지선	Stacking	2,000~5000p	4	1.5	1.5	14
예인선	Towing	750 hp, 1000p	13	2.5	1.0~1.65	14

<표 4-2> 해상풍력발전기 설치 선단의 구성 방법⁽¹⁾

	선택-1			선택-2			선택-3			선택-4		
	종류	용량	척	종류	용량	척	종류	용량	척	종류	용량	척
설치 선박	WTIV	800톤 crane	1	잭업 바지선	800톤 crane	1	잭업 바지선	800톤 crane	1	크레인 바지선	3000톤	1
				예인선	1500hp	1	화물 바지선	5000p	1	화물 바지선	5000P	2
							예인선	1500hp	2	예인선	1500hp	3
							예인선	750hp	2	예인선	750hp	2
							해양예인 지원선	1500hp	1	해양예 인지원 선	1500hp	1

이상과 같이 여러 방식으로 구성한 설치 선단에 대해 운용에 따른 경제성과 설치시간을 평가했다. 설치용 풍력발전기는 15MW 단위로 수송하는 것으로 가정하고 설치 방법에 따른 유닛 당 조립시간은 <표 4-3>와 같다.



<표 4-3> 설치 방법에 따른 조립 시간⁽¹⁾

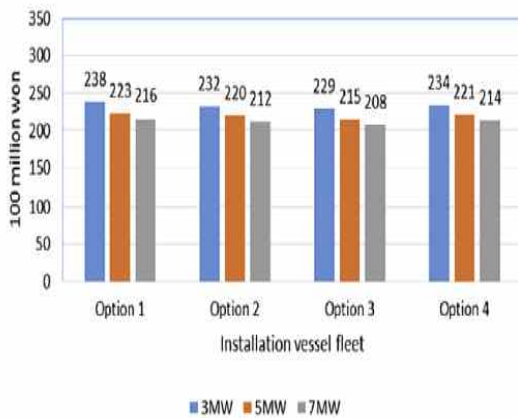
조립 부품	개별(One by One) 방법				날개조립(Star-assy)	
	3MW		7MW		5MW	
	최소	최대	최소	최대	최소	최대
타워베이스 & 타워 1	2	4	6	10	6	10
타워 2 & 나셀+ 로터	3	5	8	10		
타워 2 & 나셀 볼트 100% 토크	5	10	8	14		
날개 1	2	5	4	8		
날개 2	2	5	4	8		
날개 3	2	5	4	8		
타워 2 & 나셀					8	10
타워 2 & 나셀 볼트 100% 토크					8	14
로터 + 날개 1 + 날개 2 + 날개 3					4	10
시간 합계(시간)	16	34	34	58	26	44
합계(일)	0.67	1.42	1.42	2.42	1.08	1.83

해상풍력발전기의 선적 1세트 당 설치시간은 ①항구에서의 적재시간, ②항구에서 현장까지 선박 이동시간, ③현장에서의 발전기 당 설치시간×발전기수량, ④발전기에서 다른 발전기까지 이동시간×(발전기수량-1)의 합으로 나타낼 수 있다. 해상풍력단지 건설에서의 전체 설치시간은 선적 당 설치시간에 선적회수(설치 발전용량/선적 당 발전용량)를

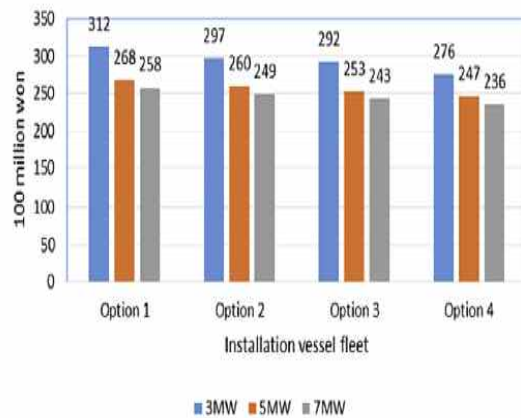
좁은 시간이 된다. 설치비용 계산에 있어서 설치선박의 1일 용선비로는 200,000\$(WTIV), 150,000\$(책임바지선), 90,000\$(크레인바지선), 50,000\$(화물바지선)과 3,000\$(예인선) 수치를 각각 적용했다.

4-2. 경제성의 평가^㉔

100MW 실증단지에 대한 설치비용은 <그림 4-1>과 같이 선박 구성에 따라 큰 차이는 없지만 선택-4에서 비용이 약간 낮고 풍력발전기의 발전용량이 클수록 비용이 낮아지는 경향을 보인다. 400MW 시범단지는 <그림 4-2>에서와 같이 선택-4에서 비용이 크게 떨어졌다. 이것은 선택-4의 구성에서 1일 용선비가 가장 낮기 때문이다.

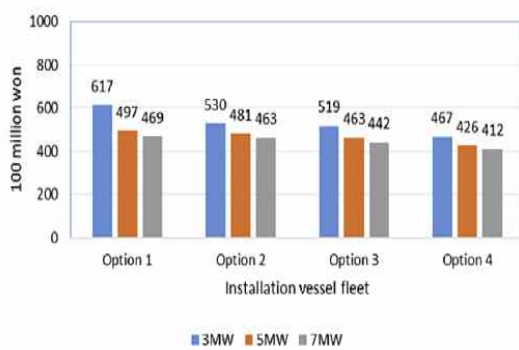


(a) Minimum installation period per unit

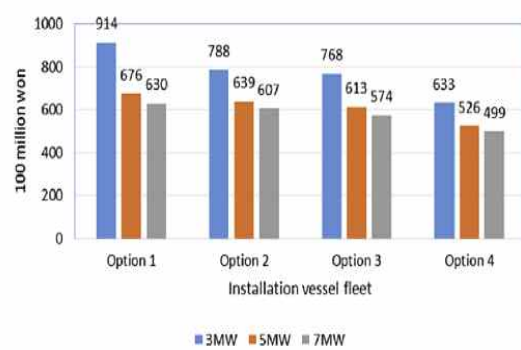


(b) Maximum installation period per unit

<그림 4-1> 100MW 실증단지에 대한 설치비용⁽¹⁾



(a) Minimum installation period per unit



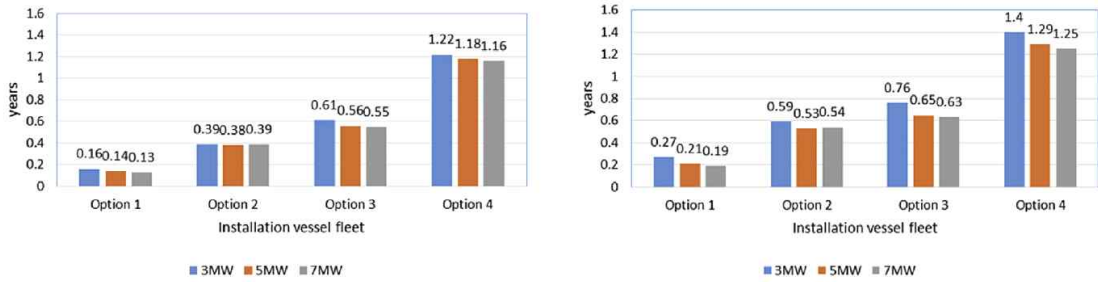
(b) Maximum installation period per unit

<그림 4-2> 400MW 시범단지에 대한 설치비용⁽¹⁾

4-3. 설치기간의 평가

선택-4의 구성 방법을 적용한 경우는 설치 선박의 작업효율이 다른 방법에 비해 떨어

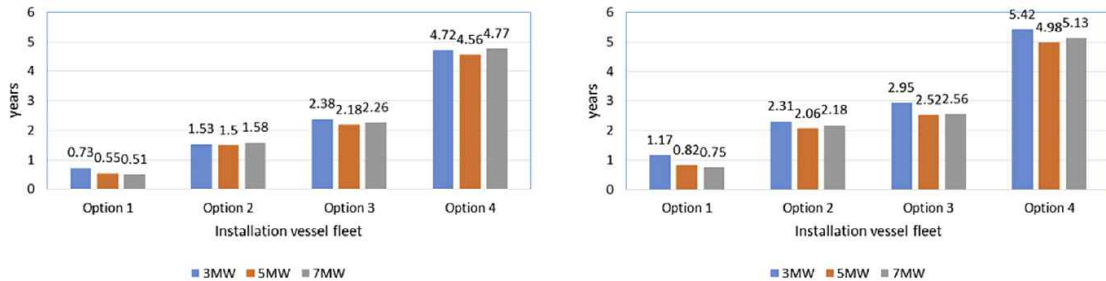
지고 파고와 풍속 등 해상 환경도 더 크게 영향을 받기 때문에 작업소요일이 가장 길게 나타났다. 이 결과, 100MW 단지에서의 작업일수는 선택-1 적용 시 37~46일이 소요되는데 비해 선택-4의 구성에서는 254~267일이 소요됐으며, 400MW 단지의 경우도 선택-1에서 작업일수가 145~208일인데 비해 선택-4에서는 999~1044일로 계산됐다. 이에 따라 설치기간에서는 <그림 4-3>과 <그림 4-4>에서와 같이 선택-4의 방법 적용 시 100MW 단지 건설은 1~2년이 소요되고 400MW 단지 건설에는 4~5년이 걸리는 것으로 나타났다.



(a) Minimum installation period per unit

(b) Maximum installation period per unit

<그림 4-3> 100MW 실증단지에 대한 소요 설치기간⁽¹⁾



(a) Minimum installation period per unit

(b) Maximum installation period per unit

<그림 4-4> 400MW 실증단지에 대한 소요 설치기간⁽¹⁾

5. 맺음말

해상풍력발전에 대해 개요를 기술하고 서남해 해상풍력단지 건설 시의 해상 운송 및 설치 방법에 대해 분석 검토했다. 검토 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. ① 서남해 풍력단지에 있어 설치 선박 이용 시 9m 이상의 수심이 필요하고, 해당 해역은 조수간만의 차가 크므로 선박 계류(mooring) 방식은 적절하지 않다. ②WTIV 또는 잭업바지선를 사용하면 용선비용은 올라가지만 설치시간은 단축되어 전체 건설비용은 절감할 수 있다. ③풍력터빈의 용량은 증가할수록 설치비용이 절감되고 설치시간도 단축된다. ④WTIV나 잭업바지선 사용에 따르는 설치시간의 단축은 경험 있는 기술자 확보와 명확한 계획에 의해 실현 가능하고, 불명확한 계획이나 부품 제조회사로부터의 발전기 공급이 지연되면 설치비는 급속하게 상승된다.

독일의 경우 2016년에 이미 전력의 11.9%가 풍력으로 공급되는 등 전 세계의 풍

력발전 산업은 빠른 성장을 보이고 있다. 우리나라도 지난해까지 풍력발전 누적설치용량은 1GW 정도로 미미한 수준이지만 최근 정부는 2030년까지 전력의 20%를 신재생에너지로 공급할 계획을 발표했고, 이 계획에 의하면 풍력발전은 2030년까지 16GW까지 늘어나야 한다. 이를 기회로 국내 풍력시장이 활성화되면 국내 풍력산업은 경쟁력이 향상되며 수출산업으로의 도약도 가능하게 될 것으로 기대된다.

<참고문헌>

1. D. Ahn, S. Shin, S.Y. Kim, H. Kharoufi, H.C. Kim, “Comparative evaluation of different offshore wind turbine installation vessels for Korean west-south wind farm”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9, 2017, pp.45~54
2. Y. T. Muhabie, J. D Caprace, C. Petcu, P. Rigo, “Improving the Installation of Offshore Wind Farms by the use of Discrete Event Simulation”, *5th World Maritime Technology Conference*, 2015, <http://hdl.handle.net/2268/188269>
3. Herman, S.A, “Offshore Wind Farms: Analysis of Transport and Installation Costs”, ECN-I-02 - 002, 2002
4. K. Lindvig, “The installation and servicing of offshore wind farms”, *European Forum for Renewable Energy Sources*, A2SEA, 16 Sep 2016
5. B.R. Sarker, T.I. Faiz, “Minimizing transportation and installation costs for turbine in offshore wind farms”, *Renewable Energy*, 101, 2017, pp.667~679
6. M. Komatsu, T. Sawai, H. Ito, H. Kumamoto, “Economic Study and Concept of Next Generation Wind Turbine Installation Vessel”, *三菱重工技報*, 50(1), 2013, pp.32~36
7. P. Zhang, H. Ding, C. Le, X Huang, “Motion analysis on integrated transportation technique for offshore wind turbines”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5, 053117, 2013, pp.1~15
8. P. Zhang, Y. Han, H. Ding, S. Zhang, “Field experiments on wet tows of an integrated transportation and installation vessel with two bucket foundations for offshore wind turbines”, *Ocean Engineering*, 108, 2015, pp.769~777
9. M. Komatsu, H. Kumamoto, M. Ohta, H. Tanaka, H. Mori, S. Miyazaki, “Development of Offshore Wind Turbine Floater that Blends into Japanese Waters - Evaluation of the Validity for Design and Construction method of V-shaped Semi-submersible Floating Structure -”, *三菱重工技報*, 53(1), 2016, pp.28~36
10. 삼성중공업, “국내 해양환경에 적합한 해상풍력발전 설비 전문설치선 도입방안 연구”, 기술혁신사업 기술개발보고서, 지식경제부, 2013

<관련기술목록>

1. GWEC(Global Wind Energy Council), <http://www.gwec.net>

2. K. Lange, A. Rinne, H. D. Haasis, “Planning maritime logistics concepts for offshore wind farms: A newly developed decision support system”, in: H. Hu, X. Shi, R. Stahlbock, S. VoB (Eds.), Berlin, Springer, 2012, pp.142~158
3. M. Skiba, “Offshore wind energy - the installation challenge”, RWE Innogy GmbH, Nomura Wind Seminar London, 22 Jan 2010, pp.1~30



이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.