

서남해안 2.5GW 해상풍력단지 조성을 위한 설치 일정계획

고현정*

Installation Scheduling for the Development of Southwest Coast 2.5GW Offshore Wind Farm

Ko, Hyun-Jeung

Abstract

As a way to address global warming, among the renewable energy sources, there have been heavy investments worldwide for the development of offshore wind farms. However, such development has a drawback: investment costs are higher than those for onshore wind farms due to required operations such as offshore transportation and installation. In particular, delays in installation due to adverse maritime weather conditions are factors that affect the economics of offshore wind farms' operation. Therefore, in this study, we analyze the optimal schedule of the construction of an offshore wind farm from a macro perspective by considering the weather conditions in Korea. For this purpose, we develop a mathematical model and apply it to a 2.5 GW offshore wind farm project on the southwestern coast of the country. We use data from the Korea Meteorological Agency for maritime weather conditions and attempt to reflect the actual input data based on precedent cases overseas. The results show that it takes 6 months to install 35 offshore wind turbines. More specifically, it is pointed out that it is possible to minimize costs by not working in winter.

Key words: Installation schedule, Maritime logistics, Mixed integer programming(MIP), Offshore wind farm

▷ 논문접수: 2017. 05. 10. ▷ 심사완료: 2017. 06. 01. ▷ 게재확정: 2017. 06. 23.

* 군산대학교 물류학과 교수, hjko@kunsan.ac.kr

I. 서론

세계 각국은 지구온난화에 대처하는 일환으로 신재생에너지 개발에 집중하고 있으며, 특히 신재생에너지 가운데 해상풍력 개발은 영국, 덴마크, 벨기에 등의 유럽을 중심으로 적극적으로 이루어지고 있다. 이는 해상풍력발전이 해상을 이용한 대규모 설치 공간 확보가 용이하고 소음, 진동 등의 민원 발생을 최소화 할 수 있기 때문이다. 그러나 해상풍력 발전단지 조성은 해상에서의 하부구조물 시공, 풍력터빈 설치, 유지보수 등을 감안할 때, 투자비용이 육상풍력에 비해 45~50% 정도 더 높은 것이 단점으로 지적되고 있다.

해상풍력 발전기를 해상에 설치하기 위해서는 먼저 해저 지질 및 지형 조사를 실시하여 적합한 하부구조물의 형태(Monopile, Tripod, Jacket 등)를 선정해야 한다. 다음으로 선정된 형태의 하부구조물을 제작하고 선박을 이용하여 해상 발전단지로 이동시켜 파일기초 해상시공 작업이 이루어진다. 그리고 시공된 하부구조물에 케이블 및 타워를 설치한 후 타워에 풍력터빈을 연결하는 작업을 한다. 마지막으로 해상변압기를 시공하여 해저케이블로 전기 계통을 연계하여 육상의 송전소와 연결한다.

최근 해상에 설치되는 풍력터빈 용량은 5MW급으로 블레이드 직경 126~146m, 중량 650~860톤, 타워(tower) 높이 100m에 달하는 대형 중량화물이기 때문에 해상작업이 어렵고 숙련된 설치 기술이 요구된다. 예로서 블레이드 작업은 바람의 속도가 약 8m/s 이상이면 작업을 할 수 없다고 알려져 있는데, 이는 선박 크레인(crane) 후크에서 바람의 속도에 의해 블레이드 중량에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 해상풍력 단지조성은 해상작업이 필수적으로 요구되며, 이에 따른 선박 임대와 숙련

된 인력활용으로 설치비용이 높은 단점이 있다. 특히 기상 및 해상 여건에 따라 완공 시기가 지연되면 추가적인 비용이 요구됨에 따라 체계적인 일정계획 수립에 대한 연구가 필요하다.

해상풍력터빈 설치를 위한 물류 관련 선행연구는 많지 않으며, 특히 유럽의 해상풍력단지 조성 사례들이 보고서 형태로 주로 발표되었다(NREL, 2013; RAVE, 2010; Bishop et al. 2010; Gerdes et al., 2010). 학술적 연구를 살펴보면, 국내의 경우, 고현정(2012)은 해상풍력 발전단지의 효율적 조성 및 운영을 지원하는 해상풍력 전용항만의 최적입지를 선택하는 연구를 수행하였다. 동 연구에는 우리나라 서남해안 2.5GW 해상풍력단지 조성을 위한 최적의 전용항만 입지를 선택하는 사례를 다루고 있다.

해외의 경우도 아직 연구의 초기 단계라고 할 수 있다. Scholz-Reiter et al.(2011)은 해상풍력 단지조성을 위한 최적의 일정을 분석하고자 MILP모델을 제시하였다. 저자는 독일의 최초 해상풍력단지인 Alpha Ventus를 조성할 때, 해상풍력단지 조성기간이 해상 기상의 변화에 민감하다는 경험을 통해 해상풍력터빈 설치 일정계획의 중요성을 인식하고 동 연구를 수행하였다. 그러나 제시한 모델은 1대의 선박을 이용하여 설치 일정을 분석하는 한계점을 지니고 있다. Lange et al.(2012)는 시물레이션 모델을 이용하여 해상풍력터빈 공급사슬을 정의하고, 다양한 물류전략에 따른 비용 및 시간을 분석하였다. 특히 블레이드, 허브, 타워로 구성된 해상풍력터빈의 상부구조물에 대한 운송전략을 고려하였다. 또한 해상풍력터빈의 구성품을 생산 공장에서 전용항만으로 직접시켜 해상의 풍력단지로 운송하는 방식과 개별적으로 구성품을 풍력단지 현장으로 운송하는 방식

을 비교하였다. Muhabie et al. (2015)는 시뮬레이션 모델을 이용하여 해상풍력터빈의 운송 및 설치를 비용 및 시간적 측면에서 또한 분석하였다. 특히 저자는 해상기상 여건을 반영함에 있어 실제 데이터뿐만 아니라 최적 설치 전략을 파악하고자 확률분포를 적용하여 분석하였다.

이와 같이 선행연구를 살펴보면, 해상풍력 발전단지 조성은 발전단지의 수심 및 해저 지질구조, 육지와와의 인접성, 해상의 기상변화 등에 따라 지역마다 상이한 물류전략이 적용되었다. 특히 본 연구에서는 실제 해상기상 데이터를 이용하여 우리나라 서남해안 2.5GW 해상풍력단지 조성을 위한 거시적 측면에서 최적 일정계획을 분석하고자 하였다.

II. 해상풍력단지 조성

1. 해상기상 여건

해상풍력터빈의 설치는 선박을 이용하여 해상에서 작업이 이루어지는 바, 해상의 기상여건에 민감하다. 해저에서 작업이 이루어지는 하부구조물 설치의 경우 어느 정도의 해상 기류 및 바람에도 작업이 가능하다. 그러나 상부구조물(블레이드, 너트셀, 타워 등) 설치하는 바람의 세기 여부에 달려있다. 특히 블레이드 조립 작업은 바람이 거의 없는 상태에서 이루어져야 하는 조건이 필요하다. 또한 상부구조물은 하부구조물이 설치되어야만 작업이 가능한 의존성이 존재한다. 따라서 해상풍력 발전단지 조성은 해상기상 변동에 따라 전체 일정이 좌우된다고 할 수 있다.

Lange et al.(2012)는 해상의 기상여건 악화가 해상풍력단지 조성을 위한 물류비용에 미치

는 영향을 분석하였다. <표 1>에서와 같이 해상풍력단지를 조성하기 위해서는 토목작업과 설치 및 운송비의 비중이 전체의 50%로 높게 차지하는 것으로 분석되었다(Green et al. 2011; Davey et al. 2012; IRENA 2012). 즉, 해상기상 변화에 따라 해상작업이 지체될 경우 설치 선박의 임대비용이 증가하여 발전단지 경제성에도 영향을 주는 것으로 나타났다.

한편, 해상여건을 고려하여 경제적으로 해상풍력단지를 조성하기 위한 하나의 대안으로 해상 풍력단지 조성 시 하부구조물은 해상기상 여건이 열악한 가을부터 다음 해 봄까지 설치를 하고, 상대적으로 해상기상 여건이 좋은 여름에는 상부 작업을 수행한다. 그러나 이는 설치선박의 활용도를 높이는 장점이 있으나 설치기간이 길어지는 단점이 있다.

표 1. 풍력단지 조성비용 구조 비교

구분	육상	해상
풍력터빈	65~75%	30~50%
진력망	10%	15~30%
토목작업	5%	15~25%
설치 및 운송	2%	5~30%
기타	5%	8%

단기적으로 신뢰성 있는 해상기상 예측은 일반적으로 14일 정도로 이루어지고 있다. 이러한 단기적 예측과 계절별 과거 데이터를 이용하면 좀 더 정확한 설치계획을 수립할 수 있다. 과거 데이터는 특정기간에 대한 평균적 측면에서 풍속, 기온, 비율 가능성 등에 대한 정보를 활용할 수 있다. 따라서 단기 및 장기적 예측치를 이용하여 해상풍력 단지 조성 일정계획을 수립하는 것이 선박 및 제한된 자원의 활용도를 높일 수 있는 방안이다.

2. 설치 방식

해상풍력터빈 및 하부구조물을 설치하는 방식은 2가지로 형태로 나눌 수 있다. 첫째, 피더(feeder) 선박과 설치 플랫폼을 동시에 활용하는 방식으로, 피더선박을 이용하여 항만에서 설치 플랫폼 까지 부품을 운송하고, 플랫폼에서 조립하여 구조물을 설치하는 형태이다(〈그림 1〉 참조). 이 방식의 장점은 설치 플랫폼이 현장에 정지하고 있어 설치선박의 활용도를 높일 수 있다. 그러나 피더선이 충분히 투입되어야 하므로 비용이 증가 할 수 있다.

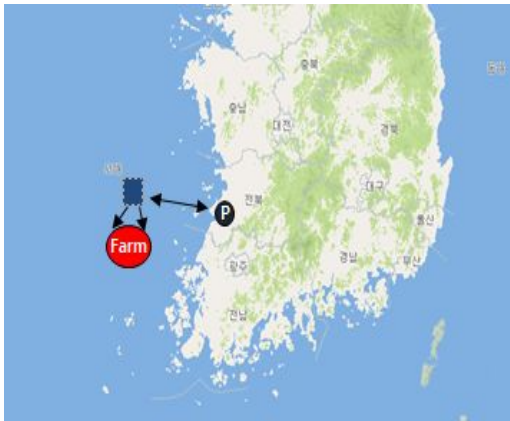


그림 1. 피딩(feeding) 설치방식

둘째, 설치 전용선박을 이용하여 항만에서 해상터빈, 하부구조물 등을 선적하여 직접 해상풍력단지로 이동하여 현장에서 조립하여 설치하는 방식이다(〈그림 2〉 참조). 이는 피더선박을 투입하지 않고 설치 전용선만 이용함에 따라 설치를 마칠 때까지 이동할 수 없으므로 전용선박의 활용도가 낮아지는 단점이 있다. 하지만 피더선을 이용하는 비용은 발생하지 않는다.

3. 설치 선박

해상풍력 설치선박은 MPVs(Multipurpose Vessels)과 WIVs(Wind Farm Installation Vessels)로 나눌 수 있다. 세부적으로 MPVs는 Jack-up barges, Jack-up vessels, Crane ships 등이 있다. Crane ship은 중량물의 선적 및 하역이 가능하도록 크레인이 장착되어 있는 선박으로 주로 중량물 운송에 사용된다.

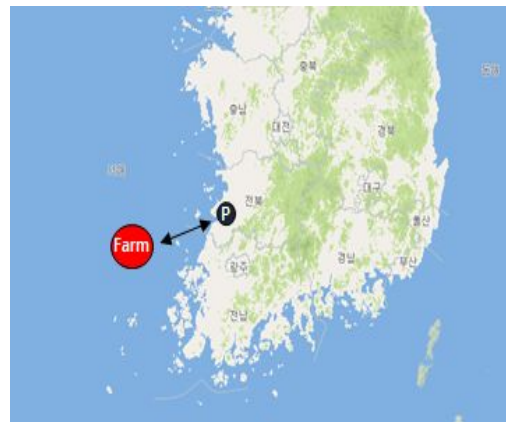


그림 2. 트랜지팅(transiting) 설치방식

Jack-up barge와 Jack-up vessel은 자체 동력 사용 유무에 따라 구분되며, 일반적 구조는 다리 3개가 바닥에 박힌 상태에서 상판이 아래와 위로 움직이는 Jack-up 형태의 부선 또는 선박이다. 이들 장비는 주로 해상다리 건설, 해상유전 개발, 시추작업 등에 사용된다. 예로서 2007년 네덜란드 OWEZ¹⁾ 사업에서 해상풍력터빈을 설치하는데 Jack-up vessel인 Sea Energy호가 사용되었다. 제원은 무게 3,332톤, 최대 작업수심 24m, 최대 인양능력 450톤, 길이 92m, 폭 22m, 흘수(Draught)

1) Offshore Wind farm Egmond aan Zee(OWEZ)사업은 네덜란드 최초의 해상풍력단지 조성사업으로 Egmond ann Zee 해변 서쪽 약 10km에 위치하고 있으며 베스트라스 v90-3.0 발전기 36기가 설치되어 있다. 단지 수심은 15-18m이고 Monopil기초로 시공되어 있다.

3.8m로 알려져 있다(NoorzeeWind²⁾, 2008).

WIPs는 해상풍력 터빈, 타워, 블레이드 등을 최적으로 설치하기 위해 제작된 선박으로 Jack-up vessel과 구조적으로 유사하지만 상부공간 활용도와 인양능력이 향상된 것이 특징이다. 2003년 처음으로 사용된 WIP는 다리가 여섯 개가 달린 MPI Resolution으로 알려져 있다. 최근 해상풍력발전 용량이 세계적으로 증가함에 따라 WIP의 수요가 증가될 것으로 예상하고 있으며, 특히 싱가포르 SPO사가 발주한 길이 161m, 폭 49, 높이 10.4m의 세계 최대 WIP가 우리나라에서 제작되기도 하였다. 동 WIP는 해수면 위로 최고 17m까지 부양될 수 있고, 선체에 장착된 1,200톤급 크레인으로 해상터빈, 타워, 블레이드를 설치할 수 할 수 있다. 향후 설치선박의 공급은 상대적으로 부족하여 해상풍력 터빈 설치 지연현상은 심화될 것으로 예상하고 있다(EWEA, 2009).



그림 3. Sea Energy 선박의 작업 전경



그림 4. MPI Resolution 선박 작업 전경

III. 연구 모형

본 연구에서 해상풍력터빈의 설치방식은 문제의 단순화를 위해 트랜지팅(Transiting) 방식으로 설정하였다(〈그림 2〉 참조). 즉, 설치선박을 이용하여 항만에서 상부구조물(해상터빈, 타워, 블레이드 등), 파일, 하부구조물, 케이블을 선적하여 직접 해상풍력단지로 이동하여 현장에서 설치하는 형태이다. 실제 작업의 프로세스를 고려하여 본 연구에서 가정하고 있는 사항은 구체적으로 다음과 같다.

- 항만에서 선박을 이용하여 해상풍력 단지로 이동한 후 하부구조물, 파일, 케이블, 상부구조물의 설치 순으로 작업을 하는 것으로 정의한다. 특히 하부구조물은 Jacket을 의미하고, 상부구조물은 타워와 풍력터빈으로 구성되는 것으로 하였다.

- 해상풍력터빈을 설치하는 소요되는 시간은 항만에서의 선적시간, 항만-풍력단지의 왕복 운송시간, 해상에서의 설치시간으로 구분하였다.

- 선박은 3가지 형태(전용선, 바지선,

2) NoordizeeWind는 전력회사인 Nuon과 석유회사인 Shell의 합작회사(joint venture)이다.

케이블선)으로 정의하고, 전용선은 케이블 설치를 제외하고 모든 작업에 사용되며, 바지선은 파일 설치만 가능하도록 하여 선박의 기능을 구별하였다. 또한 케이블선은 케이블 설치에만 이용되는 것으로 가정하였다.

- 해상여건은 좋음, 중간, 나쁨으로 3가지로 설정하였다.
 - 좋음(good)수준 : 모든 구조물에 대해 해상 작업이 가능한 해상 조건
 - 중간(medium)수준 : 상부구조물을 제외한 구조물을 설치 가능한 해상 조건
 - 나쁨(bad)수준 : 모든 작업 불가능

수학적 모형에서 사용될 입력 데이터 및 결정변수는 다음과 같다.

(입력 데이터)

- N : 설치될 해상풍력터빈 n 의 집합
- V : 가용한 선박 v 의 집합(전용선, 케이블선)
- K : 해상풍력터빈 구성품 k 의 집합(하부구조물(S), 파일(P), 케이블(C), 상부구조물(T))
- W : 해상상태를 나타내는 w 의 집합(좋은(G), 중간(M), 나쁨(B))
- T : 설치 기간 t 의 집합
- $vsCap_v^k$ = 선박 v 의 구조물 k 선적 용량
- $oprCost_{vt}$ = 기간 t 의 선박 v 운영비용
- $fixedCost_t$ = 기간 t 의 고정비용
- $loadT_v^k$ = 선박 v 의 구조물 k 선적시간
- $instT_v^k$ = 선박 v 의 구조물 k 설치시간
- $trmsT_v$ = 선박 v 의 항만에서 풍력단지 이동시간
- $weaCon_t^w$ = 설치기간 t 의 기상 상태 w (G, M, B)별 발생 빈도

$unitT$ = 기상상태 측정 단위시간

(결정 변수)

- $varSub_{vt}$: 기간 t 의 선박 v 에 의한 하부구조물 설치 개수
- $varPile_{vt}$: 기간 t 의 선박 v 에 의한 파일 설치 개수
- $varCable_{vt}$: 기간 t 의 선박 v 에 의한 케이블 설치 개수
- $varTop_{vt}$: 기간 t 의 선박 v 에 의한 상부구조물 설치 개수
- $binY_t$: 기간 t 에 프로젝트가 진행 중이면 1, 아니면 0인 이진 결정변수
- $tourX_{vt}^k$: 기간 t 의 해상터빈시스템 설치를 위한 선박 v 의 운항 횟수

Objective function :

$$\begin{aligned} \text{Minimize :} \\ \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} fixedCost_t \cdot Y_t + oprCost_{vt} \cdot tourX_{vt}^{S, P, C, T} \end{aligned} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{t=1}^{t'} \sum_{v \in V} varPile_{vt} \leq varSub_{vt}, t' \in T \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^{t'} \sum_{v \in V} varCable_{vt} \leq varPile_{vt}, t' \in T \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^{t'} \sum_{v \in V} varTop_{vt} \leq varCable_{vt}, t' \in T \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{v \in V} varTop_{vt} = N, t' \in T, v \in V \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{v \in V} varCalbe_{vt} = N, t' \in T, v \in V \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{v \in V} varPile_{vt} = N, t' \in T, v \in V \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{v \in V} varSub_{vt} = N, t \in T, v \in V \quad (8)$$

$$\sum_{v \in V} (varSub_{vt} + varPile_{vt} + varCable_{vt} + varTop_{vt}) \leq 4 \cdot N \cdot bin Y_t, t \in T \quad (9)$$

$$\frac{varSub_{vt}}{vslCap_{vt}^S} + \frac{varPile_{vt}}{vslCap_{vt}^P} + \frac{varCable_{vt}}{vslCap_{vt}^C} + \frac{varTop_{vt}}{vslCap_{vt}^T} \leq tourX_{vt}^{S,P,C,T}, t \in T, v \in V \quad (10)$$

$$varTop_{vt} \cdot (loadT_v^T + instT_v^T) + tourX_{vt}^T \cdot 2 \cdot trnsT_v \leq unitT \cdot weaCon_t^G, v \in V, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{v \in V} [varSub_{vt} \cdot (loadT_v^S + instT_v^S) + varPile_{vt} \cdot (loadT_v^P + instT_v^P) + varTop_{vt} \cdot (loadT_v^T + instT_v^T) + varCable_{vt} \cdot (loadT_v^C + instT_v^C)] + \sum_{v \in V} 2 \cdot trnsT_v (tourX_{vt}^S + tourX_{vt}^P + tourX_{vt}^C + tourX_{vt}^T) \leq unitT \cdot (weaCon_t^G + weaCon_t^M), t \in T \quad (12)$$

$$varSub_{vt}, varPile_{vt}, varCable_{vt}, varTop_{vt}: \text{positive integers} \quad (13)$$

$$TourX_{vt}^{S,P,C,T}: \text{positive integers} \quad (14)$$

$$Y_t \in \{0, 1\} \quad (15)$$

목적함수(1)은 고정비와 운영비를 최소화하는 식으로 표현된다. 특히 고정비는 매 기간마다 기본적으로 필요한 장비 임대비를 의미하며, 또한 운영비는 선박을 운항하는데 소요되는 비용으로 정의하였다. 제약조건식(2), (3), (4)는 해상터빈시스템의 설치하부구조물,

파일, 케이블, 상부구조물의 순서로 진행되는 조건식이다. 제약조건식(5), (6), (7), (8)은 프로젝트 기간 동안 설치되어야 할 해상터빈시스템의 총 개수를 보장하는 조건식이다. 제약조건식(9)는 특정 기간에서 프로젝트의 진행의 유무를 제약하는 조건식이다. 제약조건식(10)은 선박의 운항수를 결정하는 식이다. 제약조건식(11)은 해상 여건이 좋은 경우에만 상부구조물을 설치할 수 있다는 제약식이다. 제약조건식(12)는 해상 작업이 불가능한 경우 선박이 운항 할 수 없다는 제약식이다.

IV. 실증 분석

4.1 서남해안 해상풍력단지

국내의 서남해안 해상풍력단지(Southwest Offshore Wind Farm, SW-OWF)는 부안·영광 지역 해상에 위치하고 있으며, 해상의 바람 등급 3(6.9~7.5m/s)과 수심 9.2~12m라는 입지적 특징을 가지고 있다. 2010년 11월 SW-OWF는 국책 사업으로 추진되면서 개발 로드맵이 발표되었으나 국내외 여건 변화로 개발계획이 변경되어 왔다. 초기 로드맵을 보면, 1단계로는 2013년까지 100MW(5MW급 20기) 실증단지를 건설하여 Test Bed 구축에 중점을 두면서 민관 합동으로 추진하고자 하였다. 그리고 2단계는 2016년까지 900MW(5MW급 180기) 시범단지를 건설하고 Track Record 확보에 중점을 두고자 하였다. 마지막 3단계는 2019년까지 1,500MW(5MW급 300기)를 건설하는 것으로 민간자본으로 조성될 계획이었다. 그러나 개발 일정이 지연 되면서 2017~2018년까지 실증단지 60MW, 2018~2010년까지 시범단지 400MW, 그리고 2020년 이후에 확산단지 2,000MW를 건설하는 것으로 변경되었

다. 개발 계획은 일정만 지연되는 것이며 전체적으로 SW-OWF에 설치될 총 풍력터빈 수는 5M급 기준으로 500기가 되는 대규모 사업이다. SW-OWF는 부안·영광지역 해상에 위치함에 따라, 특히 해상기상 여건은 해상풍력단지 조성에 가장 영향을 주는 요소인바, 본 연구에

하고는 매월 작업 일수가 60%가 넘는 것으로 나타났다. 특히 가장 여건이 좋은 시기는 4, 5월이며 작업일수는 90%가 넘는 것으로 나타났으나, 나쁜 시기는 1월로 39%로 나타났다 (<그림 5> 참조).

표 2. 해상기상 데이터

지점	일시	풍속 (m/s)	풍향 (deg)	GUST풍속 (m/s)	최대파고 (m)	유의파고 (m)	평균파고 (m)
22186	2016-01-01 1:00	3.4	325	5.8	1.8	0.9	0.6
22186	2016-01-01 2:00	3.1	315	5.2	1.4	0.8	0.5
22186	2016-01-01 3:00	2.9	303	5.9	1.4	0.8	0.6
22186	2016-01-01 4:00	3.0	314	4.9	1.2	0.8	0.6
22186	2016-01-01 5:00	2.1	334	4.4	1.3	0.8	0.5
22186	2016-01-01 6:00	4.1	286	6.4	1	0.7	0.5
22186	2016-01-01 7:00	2.9	324	5.5	1.2	0.7	0.5
22186	2016-01-01 8:00	2.5	297	4.2	1.1	0.7	0.5
...

자료 : 기상청(www.kma.go.kr)

서는 기상청의 기상자료 개방포털에서 제공하는 해상 데이터를 활용하였다. 국내의 해상상황은 해양기상부이를 이용하여 1시간 간격으로 측정되고 있는데, 지리적으로 SW-OWF에 인접한 부안의 해상부이 자료를 활용하였다. <표 2>는 기상청의 원자료를 나타낸 것이며, 매 시간마다 풍속(평균풍속과 GUST풍속)과 파고(최대파고, 유의파고, 평균파고) 데이터를 5가지로 구분하여 제공하고 있다.

본 연구에서 사용된 자료는 2016년 기상자료이며 하루 24시간을 오전(1~12시)과 오후(13~24시)로 나누고 이에 대한 평균풍속과 유의파고를 각 구간에서 최대의 값으로 설정하였다. 그 결과 해상풍력단지가 위치한 서남해안의 해상 작업여건은 1, 2, 11, 12월을 제외

4.2 모형 분석

1) 입력 데이터

SW-OWF의 풍력터빈 설치전략을 분석하기 위해서는 입력 데이터에 대한 정의가 요구되며, 본 연구에서는 설치될 해상풍력터빈의 용량은 5M급으로 설정하였다. 그리고 정부는 대규모 SW-OWF를 효율적으로 조성하고자 군산항에 해상풍력 전용터미널³⁾을 건설하고 있는바, 해상풍력단지 조성을 위한 물류거점은 군산항으로 설정하였다. 따라서 SW-OWF 조성을 위한 물류 활동은 군산항에서의 풍력시스

3) 환황해권의 중심에 위치하여 중국의 동해와 인접해 있으며, 군산항 75번 선석은 적치장 면적 126,000㎡, 부두길이 210m, 수심 15m로 해상풍력 전용항만 운영에 요건을 갖추고 있다.

템을 선적작업, 그리고 풍력단지로 이동하는 운송작업, 다음으로 해상에서 구조물을 설치하는 해상작업으로 본 연구에서는 설정하였다. 해상운송 시간을 계산하기 위해, 먼저 군산항과 해상풍력단지의 중심까지의 이격거리를 80km로 설정하고, 선박의 속도는 13.5knots(25km/h)인 WIP⁴⁾를 활용하는 것으로 하였다. 이에 따라 편도 해상운송 시간은 약 3시간으로 설정되었다.

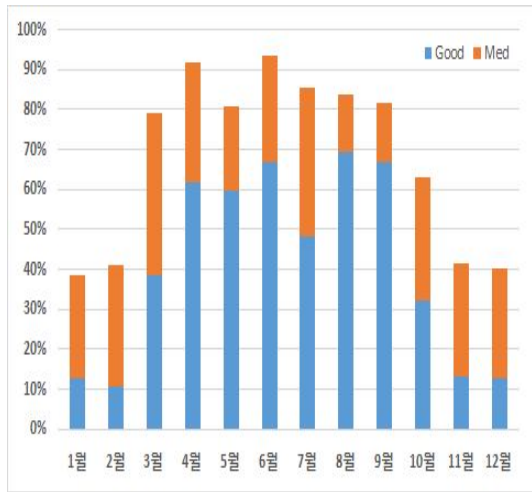


그림 5. 2016년 월별 작업 가능한 기상 여건 분포(풍속 11m/s 이하, 파고 1.25m 이하)

해상풍력터빈 시스템의 선적 및 설치 시간은 하부구조물의 구조, 풍력터빈의 용량, 선박의 형태, 작업자의 숙련도 등에 따라 매우 다양하다. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 해상풍력터빈 1기당 설치시간을 약 4.58일 소요되는 것으로 하여 세부작업 시간을 <표 3>으로 설정하였다. 특히 <표 3>의 값은 NoordzeeWind(2008)의 근해 해상발전단지 조성사업인 OWEZ 경우를 감안하여 설정하였다.

표 3. 세부 작업 소요 시간

작업	소요시간(hour)	
하부구조물	선적	2
	설치	24
파일	선적	1
	설치	15
케이블	선적	1
	설치	17
상부구조물	선적	2
	설치	24

OWEZ의 경우 Monopile 형식의 하부구조물 및 타워 설치시간은 공사초기에는 2일을 초과한 것으로 소개되어 있다. 36개의 하부구조물과 타워 시공에 소요된 기간은 총 116일로 1기당 3.2일이 소요되었고, 상부구조물 설치에 총 79일로 1기당 2.2일이 소요되었다. 따라서 하부구조물, 타워, 상부구조물, 케이블 설치를 포함한 전체 공사기간은 총 150일이 소요되며, 1기당 4.17일이 소요되었다.

해상풍력 단지조성을 위한 선박의 형태는 해상풍력 전용선과 해양플랜트 건설에 사용된 바지선을 고려하였다. <표 4>은 유럽의 해상풍력단지 조성에 사용된 선박의 상부구조물 선적 방식 및 용량을 요약한 것이다. 선박의 종류, 톤수, 속도, 크레인(crane)에 따라 설치 기간은 상이한 바, 본 연구에서는 전용선, 바지선, 케이블선이 사용되는 것으로 가정하고, 선박별 가능한 작업과 용량을 <표 5>와 같이 정의하였다. 전용선은 케이블 작업을 제외하고 모두 가능하며, 바지선은 파일작업, 케이블선은 케이블 연결만 가능하도록 선박기능을 차별화 하였다.

해상기상 여건은 3가지 좋음, 중간, 나쁨으로 구분하였고, 이에 상응하는 기준은 풍속과 파

4) Pacific Osprey은 2013년 건조된 전용선으로 선적 공간 4,300m³, 능력 8,400톤, 속도 13.5knots이다.

표 4. 해상풍력단지 별 풍력터빈의 해상운송 방식 사례

구분	Ormonde	Thornton Bank	Lynn & Inner Dowsing	Greater Gabbard
터빈용량	5M	5M	3.6M	3.6M
선적방식	R2T	SP6	SP6	SP6
선박형태	SeaJack (바지선)	Vagant (바지선)	Resolution (전용선)	Levithan (전용선)
터빈수	2	1	6	2
소요면적/개	1,250m ² /개	400m ² /개	533m ² /개	450m ² /개
소요중량	52.5%	65.6%	28.2%	64.6%

자료: 해상풍력단지 프로젝트(Ormonde, Thornton Bank, Lynn & Inner Dowsing, Greater Gabbard)를 참고하여 재구성(R2T: 허브와 블레이드를 항만에서 조립하여 운송하는 방식; SP6: 허브와 너셀은 항만에서 조립하고 블레이드는 날개로 운송하는 방식)

표 5. 선박별 1항차 작업량

작업	전용선	바지선	케이블선
하부구조물	3기	N/A	N/A
파일	5기	5기	N/A
케이블	N/A	N/A	5기
상부구조물	5기	N/A	N/A

표 6. 해상기상 여건 조건

구분	조건	
	풍속	파고
좋은(Good)	≤8m/s	≤0.75m
중간(Medium)	≤11m/s	≤1.25m

고에 따라 <표 6>와 같이 정의하였다. 좋은(good) 수준은 모든 조물에 대해 해상 작업이 가능한 해상 조건이며, 중간(medium) 수준은 상부구조물을 제외한 구조물을 설치 가능한 해상 조건이다. 마지막으로 나쁜(bad) 수준은 모든 작업이 불가능한 해상여건으로 정의하였다.

해상풍력단지에 설치될 총 해상풍력터빈의 수는 35기로 하였고, 목적함수는 고정비와 변동비로 구성하여 비용을 최소화함으로써 풍력단지의 경제적 부담을 고려하였다. 이를 위해 월별 고정비는 10,000로 가정하고 공사 기간이 길어질수록 페널티를 매월 10%로 증가하도록 하였다. 또한 변동비는 전용선 100, 바지선 70, 케이블선 50으로 설정하였다.

2) 설치 일정계획 분석

가) 최적 일정

해상풍력터빈 35기를 설치하는데 6개월이 소요되며 최적의 해상풍력단지 조성비용은 87,611로 분석되었다. 특히 작업의 시작 시점을 2, 3, 4, 5월로 설정할 경우 <그림 6>와 같이 조성비용이 동일하게 나타났다. 이는 국내의 해상 기상여건이 <그림 5>와 같이 계절적으로 상이함에 따라 작업 시작 시점에 따라 해상풍력단지 조성비용이 다른 것으로 해석된다. 즉 1월에 상부 및 하부 구조물을 설치할 수 있는 작업일수가 40% 미만으로 제한적이기

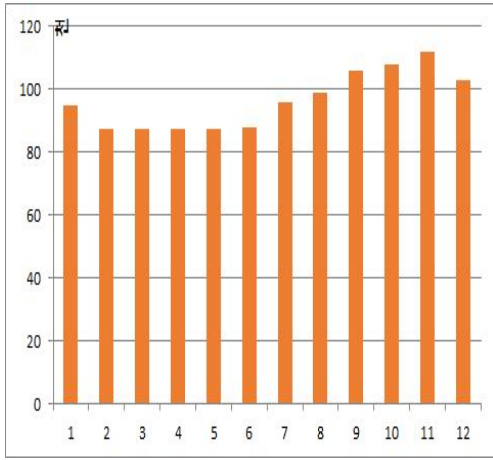


그림 6. 작업 시점별 해상풍력단지 조성비용 추이

때문이다. 또한 6월부터 12월까지 다시 비용이 증가하는 추세를 보이고 있는데, 이는 11, 12월에 작업 가능일수가 60%로 떨어지기 때문이다. 따라서 국내의 경우 겨울을 피하여 집중적으로 장비를 투입하여 작업을 마무리하는 전략이 요구된다.

국내 해상풍력터빈의 설치는 셋째 달 10기, 넷째 달 10기, 그리고 여섯째 달에 15를 설치하여 총 35기가 완성되는 일정이다. 세부적으로 구조물의 설치 계획은 다음과 같다(〈그림 7〉 참조). 첫째 달에는 하부구조물 8개를 설치하고 이 가운데 5개의 하부구조물에 파일과 케이블을 연결한다. 두 번째 달에도 하부구조물 9개를 설치하면서 첫째 달에 설치한 하부구조물을 포함하여 10개의 하부구조물에 파일과 케이블을 연결한다. 셋째 달부터 하부구조물에 상부구조물 10개를 연결하면서, 동시에 하부구조물 9개를 설치한다. 넷째 달에도 상부구조물 10개를 연결하면서 파일 10개, 케이블 5개를 연결한다. 다섯째 달에는 하부구조물 9개를 설치하면서 파일 10개과 케이블 10개를 연결하여 마지막 상부구조물 10기를 설치할 준비를 마무

리한 한다. 그리고 마지막 달에는 상부구조물 15개를 연결한다.

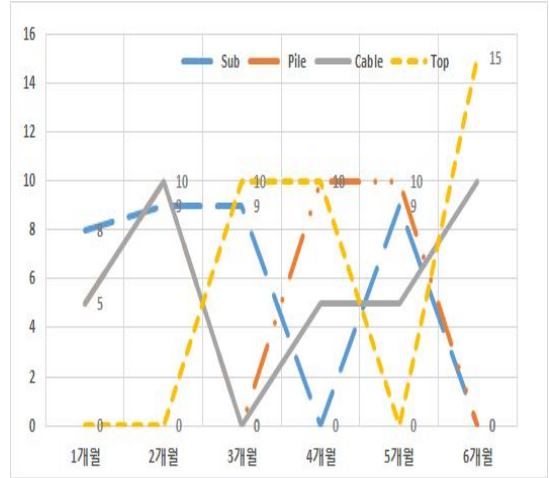


그림 7. 구조물의 최적 설치일정

나) 해상기상 변화

현재의 국내 해상기상 여건을 감안하여 기상 변화에 대한 민감도 분석을 하였다. 특히 작업할 수 없는 날(Bad 상태)의 일수를 매달 증감시켰다. 본 연구에서는 〈표 7〉와 같이 4일 증가한 경우 총 비용에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 본 연구에서는 하루를 12시간으로 단위로 나누어 기상변화를 분석한 바, 8번(4일×2번)의 해상여건이 변하면 총 비용에 영향을 끼친다는 의미이다. 그러나 해상 기상변화를 반영하는 시간단위를 작게 할 경우 작업 지연에 미치는 영향은 더욱 민감할 것으로 판단된다.

표 7. 나쁜 기상여건 증감

증감 일수	비용
1	87,612
2	87,612
3	87,612
4	107,099
5	107,099
6	107,099

V. 결론

전 세계적으로 지구온난화에 대처하는 방안으로 신재생에너지를 개발하고 있고, 특히 해상풍력단지 조성사업을 지속적으로 확대되고 있다. 우리나라도 이에 부응하기 위하여 국가적으로 서남해안 2.5GW 해상풍력단지를 조성하는 사업을 추진하고 있다. 그러나 해상풍력단지는 육상과 달리 해상에서의 운송 및 작업이 이루어지는 바, 투자비용이 많이 발생되는 단점을 가지고 있다. 특히 해상의 기상 여건 변화는 해상풍력단지 조성 작업에서 시간적 지연(delay)을 야기하는 요소로 작용하고 있다.

이러한 지연은 선박임대, 항만시설사용 등의 비용을 증가시켜 사업의 경제성에 부정적인 영향을 끼치는 바, 국내 해상여건을 반영한 체계적인 예측자료를 바탕으로 일정계획을 수립해야 한다. 따라서 본 연구에서는 국내 해상의 기상여건을 고려하여 해상풍력단지 조성의 최적 설치 일정계획을 분석하고자 하였다. 이를 위해 수리적 모델을 개발하였고, 이를 이용하여 국내 서남해안 2.5GW 해상풍력단지 조성사업에 적용하였다.

해상 기상여건은 기상청이 제공하는 2016년 자료를 이용하였다. 또한 모델에 사용된 입력

자료는 해외의 선행사례를 바탕으로 현실성을 최대한 반영하고자 하였다. 그 결과 해상풍력 터빈 35기를 설치하는데 6개월이 소요되는 것으로 분석되었다. 특히 겨울 동안 작업을 피하여 작업의 시작 시점을 2, 3, 4, 5월로 설정할 경우 비용을 최소화할 수 있는 것으로 분석되었다.

그리고 국내의 기상여건, 즉 겨울을 제외한 계절에 집중적으로 해상작업이 필요한 점을 감안할 때 국내에 특화된 해상풍력 전용선박(WIVs)의 제작 필요성이 강조된다. 이는 일반 다목적 선박을 이용하는 것보다 설치시간 단축 및 해상기상 변화에 유연성 있게 대처할 수 있기 때문이다. 또한 현재 건조된 전용선박의 수가 많지 않고, 전 세계적으로 해상풍력단지 조성 투자가 지속적으로 확대되고 있는 바, 향후 전용선박의 수요가 공급을 초과할 것으로 예상되기 때문에 임대 가능성도 불확실하다.

한편, 본 연구에서는 하루를 오전과 오후의 2가지로 시간단위로 나누고, 설치할 해상풍력 터빈의 대수를 35기로 설정하였다. 이렇게 문제의 크기를 제한한 이유는 문제의 크기가 커질수록 문제를 푸는 시간이 기하급수적으로 늘어났기 때문이다. 따라서 본 연구는 현실의 해상 기상여건을 민감하게 반영하지 못했다는 것이 연구의 한계점이라 사료된다. 그러나 국내의 해상여건을 반영한 설치 일정계획을 거시적 측면에서 분석하고, 설치시간 단축을 위한 전략이 필요하다는 시사점을 제시한 것이 본 연구의 의의라고 할 수 있다. 향후 시간 단위의 크기를 작게 하여 현실성 있는 해상의 기상변화를 반영하여 설치 일정계획을 분석할 수 있는 모델의 개발이 요구된다.

참고문헌

- 고현정(2014), 국내 해상 풍력발전 전용항만 입지선정에 관한 연구, 한국항만경제학회지, 제29집 제4호, 53-80.
- Bis, I. and C. Stock(2010), Using collaborative virtual environments to plan wind energy installation”, *Renewable Energy*, 35(10), 2348-2355.
- Davey, E. and A. Nimmo(2012), *Offshore wind cost reduction: Pathways study*, Tech. Rep, The crow state, 16 New Burlington Place, London.
- EWEA(200), *Oceans of opportunity - EWEA Offshore Report 2009*, European Wind Energy Association.
- Gerdes, G., A. Tiedemann, and S. Zeelenberg(2010), *Case study: European Offshore Wind Farms*.
- Green R., and N. Vasilakos(2011), The economics of offshore wind, *Energy Policy*, 39(2), 496-502
- IRENA(2012), *Renewable Energy Technologies: Cost analysis series wind power*, Tech. Rep., International Renewable Energy Agency.
- Lange, K., A. Rinne, and H.D. Haasis(2012), *Planning maritime logistics concepts for offshore wind farms: A newly developed decision support system*, In Lecture Notes in Computer Science, 7555 LNCS, 142-158.
- Muhabie, Y.K., J.D. Caprace, C. Petcu, and P. Rigo(2015), Improving the installation of offshore wind farms by the use of Discrete Event Simulation, *The Proceedings of 5th World Maritime Technology Conference*, USA.
- NoordzeeWind(2008), *Offshore Windfarm Egmond aan Zee Gerneal Report*.
- NREL(2013), *Installation, Operation, and Maintenance Strategies to Reduce the Cost of Offshore Wind Energy*, National Renewable Energy Laboratory.
- Schweizer(2011), A MILP for installation scheduling of offshore wind farm, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 5(2), 371-378.
- AVIO Research at Alpha Ventus(2010), *Interaktive Offshore-Windenergie Karte von Europa*(<http://rave.iset.uni-kassel.de>).

서남해안 2.5GW 해상풍력단지 조성을 위한 설치 일정계획

고현정

국문요약

지구 온난화에 대처하는 일환으로 신재생에너지 가운데 세계 각국은 해상풍력단지 개발에 투자를 집중하고 있다. 그러나 해상풍력단지 개발은 해상에서의 구조물 운송, 설치 등의 해상작업이 요구됨에 따라 투자비용이 육상풍력단지 보다 높은 단점이 있다. 특히 해상기상 여건으로 인한 설치기간 지연은 해상풍력단지 운영의 경제성에도 영향을 끼치는 요소이다. 따라서 본 연구에서는 국내 해상의 기상여건을 고려하여 해상풍력단지 조성의 최적 일정계획을 거시적 측면에서 분석하고자 하였다. 이를 위해 수리적 모델을 개발하였고, 이를 이용하여 국내 서남해안 2.5GW 해상풍력단지 조성사업에 적용하였다. 해상 기상여건은 기상청의 자료를 활용하였고, 모델에 사용된 입력 자료는 해외의 선행 사례를 바탕으로 현실성을 최대한 반영하고자 하였다. 그 결과 해상풍력터빈 35기를 설치하는데 6개월이 소요되는 것으로 분석되었다. 특히 겨울을 피하여 작업하는 것이 비용을 최소화할 수 있는 것으로 분석되었다.

주제어: 일정계획, 해상물류, 수리모델, 해상풍력단지