

국내 해상풍력 발전단지 입지 분석 연구

Study of the Spatial Location Analysis for Domestic Offshore Wind Farm

김동휘¹⁾, Dong-Hwi Kim, 이용준²⁾, Yong-Jun Lee, 류인호³⁾, In-Ho Ryu, 서대림⁴⁾, Dae-Rim Seo

¹⁾ 포스코건설 R&D센터 대리, Assistant Engineer, R&D Center, POSCO E&C

²⁾ 포스코건설 R&D센터 부장, Professional Engineer, R&D Center, POSCO E&C

³⁾ 포스코건설 에너지사업본부 부장, General Manager, Energy E&C Div., POSCO E&C

⁴⁾ 포스코건설 에너지사업본부 차장, Deputy General Manager, Energy E&C Div., POSCO E&C.

SYNOPSIS : After facing the fact such as fossil-fuel depletion, global warming, the Kyoto Protocol coming into force of mandatory reductions of carbon dioxide, the world is actively promoting the spread of the solar, wind, tidal, geothermal and other clean renewable energy technology development. Among them, wind power is the only alternative energy to secure a comparable price competition with fossil fuels because cheaper price power generation than other renewable energy when creating large-scale wind farm, thus wind power is the fastest growing industries in the world in the renewable energy field. Especially the offshore wind power is showing rapid growth as most of the wind power sector because of less changes of wind speed, no restrictions of land use, and large-scale development of offshore wind power. In this paper, the field of site selection and spatial location analysis techniques for development of large-scale offshore wind farm are discussed primarily. This paper shows overview of offshore wind power and establishment procedure for development of offshore wind farm.

Keywords : wind power, spatial location analysis, offshore wind farm, site selection, wind turbine

1. 서론

지속적인 인류문명의 발전과 생활수준의 향상으로 지구상 인류의 에너지 소비는 점점 증가하게 되었고, 이러한 소비 수준을 만족시킬 수 있는 충분한 에너지공급을 위해 주로 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료가 대량으로 사용되게 되었다. 그러나 화석연료 부존자원의 유한성으로 인한 에너지 파동, 화석연료 사용에 따른 이산화탄소 배출 및 이로 인한 온실효과로 대기온도상승을 초래하여 여러가지 심각한 문제가 야기됨에 따라, 국가별로 차별화된 온실가스배출량의 감량을 규정하는 “교토의정서(KYOTO PROTOCOL)”에 합의하기에 이르렀다.

교토의정서 발효에 의한 이산화탄소 의무감축이 현실로 다가오면서 각국 정부는 풍력과 태양광을 주축으로 한 신재생에너지의 개발과 확산을 위하여 적극적인 지원에 나서게 되었다. 우리정부도 『제2차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2003.12)』을 발표하는 등 에너지 패러다임을 풍력, 태양광, 수소·연료전지 등 신·재생에너지로 맞춰 보급을 촉진하고 있으며, 그 중에서도 풍력발전은 국내 부존자원이 풍부하고 환경오염이 없으며 저가의 청정에너지 확보가 가능한 가장 유망한 대안으로 부상하고 있다.

지금까지는 주로 육상에 풍력단지를 조성하여 풍력에너지를 얻었으나 육상에서의 풍력발전은 설치장소가 한정되어 있고, 소음, 시계, 전파 등의 거주환경 및 민원문제가 지속적으로 제기되고 있으며, 더구나 우리나라와 같이 국토가 협소하고 풍력발전단지 부지선정에 제한이 있는 경우 그 보급량이 한계에 봉착하게 될 수 밖에 없다. 따라서 육상에 비해 바람의 난류와 높이, 방향에 따른 풍속변화가 적어 양질의 풍부한 풍력에너지원을 확보할 수 있고, 부지사용에 대한 제약이 없어 대단위개발이 가능하며, 거주환경 및 민원발생 우려가 적은 해상풍력이 90%이상의 에너지를 수입 화석연료에 의존하는 우리나라의 수입 대체와 온실가스 저감에 지대한 기여를 할 수 있는 대안이 될 수 있다고 판단된다.

본 연구에서는 앞서 언급한 해상풍력발전 단지의 대규모 개발시 가장 우선적으로 수행되는 입지 선정 분야에 대하여 풍황 및 각종 기초자료의 분석을 통한 최적 입지분석 기법 및 해상풍력발전기 기초 형식 도출 사례에 대해 논할 예정이다.

2. 해상풍력 발전단지 개요

해상풍력 발전기는 일반적으로 다음과 같이 크게 3가지로 구성되어진다. 전력을 생산하는 터빈 구조물, 터빈을 해상위에 고정시키는 기초 구조물, 생산된 전력을 송전하는 송전 시설(해상변전소와 해저케이블)이 주 요소시설이다. 부수적으로는 해류의 영향으로 인한 기초의 침식방지를 위한 세굴방지시스템, 해상에서 송전된 전기를 육상으로 분배하는 육상계통연결 시스템 등도 필수 요소 중 하나이다.

2.1 터빈 구조물

해상풍력 발전기에서 가장 중요한 부분인 터빈 구조물의 경우, 일반적으로 로터-너셀 어셈블리와 지지구조물로 구성되어 있다. 통칭 터빈 또는 발전기라고 부러우는 로터-너셀 어셈블리는 블레이드와 허브로 구성된 로터와, 로터를 제외한 타워 상단부의 모든 구성요소를 포함하는 너셀의 조합으로 풍력을 통해 전력을 발생시키는 핵심부품의 조합이라고 할 수 있다. 해상풍력 발전기는 주요 업체간 기술개발 경쟁이 가속화되어 현재 유럽을 포함한 선진국의 경우 5MW급 초대형 해상풍력발전기가 이미 개발 완료되어 6MW~7MW급 개발에 주력하고 있으며, 국내에서도 3MW~5MW급의 개발을 진행중이다.

한편 터빈 아래쪽 지지구조물의 경우 타워와 하부구조물로 구성되어 있으며, 이 중 타워의 경우, 발전량 증가에 따른 로터 블레이드 크기의 대형화로 인해 그 높이 역시 증가 추세이다. 따라서 해저지반-구조물 상호작용을 고려한 진동특성 검토가 필요하며, 이는 타워 뿐 아니라 기초와 타워를 연결하는 하부구조물의 설계에도 고려되어야 한다.

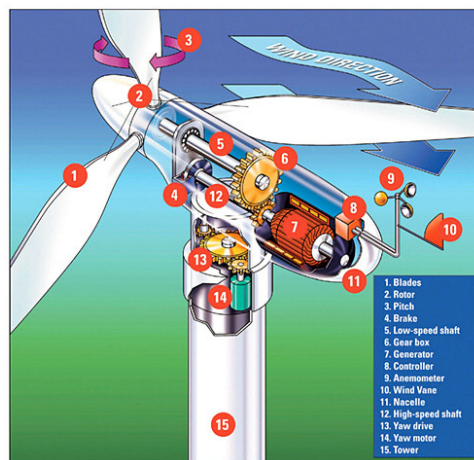


그림 1. 터빈의 세부 구성요소

2.2 기초 구조물

육상풍력발전과 달리 해상풍력발전의 경우, 해저에 풍력타워를 안정적으로 고정시켜 줄 수 있는 해상 기초 구조물이 반드시 필요하며, 해당 기초구조물은 극심한 해양환경에 노출되기 때문에 구조적인 신뢰성이 매우 중요하다 할 수 있다. 또한, 기초설치에 소요되는 비용이 막대하기 때문에 경제성을 가지도록 설계되어야 하며 현장 설치공사가 수반되므로 시공성이 좋아야 한다. 해상풍력발전장치의 기초는 일반적으로 수심에 따라 적용형식이 달라지는데, 30m 이하는 중력식 및 모노파일식, 30~80m까지는 트라이포트, 자켓기초식 등으로 분류된다. 또한 이보다 수심이 더 깊을 경우에는 별도로 부유식 구조물을 이용하는 개념이 도출되고는 있으나 현재 모형 시험 수준에 있으며 아직까지 시공된 사례는 없다.

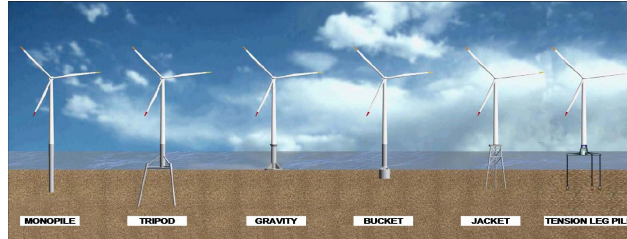


그림 2. 해상풍력발전기 기초형식

2.3 송전시설

앞서 언급하였다시피 송전시설은 일반적으로 해상변전소와 해저케이블로 구성되게 되며, 이 중 해상변전소의 경우 육상계통을 위한 전압이 22.9kV 이상일 때 필요하게 된다. 육상변전 시설은 주로 절연을 위해 옥외에 설치되나, 해상에서는 염분의 영향을 피하기 위해 옥내에 설치되는 것이 일반적이다. 해상계통연결에서 터빈 간의 케이블은 전기 수전반과 송변전 시설이 있는 해상변전소로 연결되며 해저케이블을 통해 육상계통으로 다시 연결된다. 유럽 등의 사례로 보아 통상 40MW 이하의 풍력발전단지에서는 별도로 해상에 변전소를 건립하지 않는 것이 일반적이다.

한 편, 해상풍력 발전 단지에서 생산된 전력을 육상으로 송전하기 위한 계통 연계방법은 아직 연구가 진행중이나, 연결방식에 따라 나누게 되면 크게 개별연계(Individual), 그물연계(Mesh), 방사연계(Redical)의 3가지 방식으로 나눌 수 있다. 유럽의 해상풍력단지를 살펴보면, Individual 방식보다는 해상변전소를 둔 Mesh 방식으로 송전선로 설치가 주로 이루어진 것으로 나타났다.



그림 3. 해상 변전소 사례(Siemens AG)

3. 해상풍력 발전단지 입지 분석

3.1 기상자료 조사 및 분석

3.1.1 풍력-기상자원지도 분석

국립기상연구소에서 제공하는 기상자원지도는 1km 해상도로 공간적인 변동성이 큰 바람 정보를 다양한 통계적인 정보와 함께 상세하게 제공하여, 풍력발전에 적합한 지역 정보를 제시한다.

아래의 그림에서 연 평균 풍속의 경우, 7.5 m/s 이상의 풍속은 강원도 태백산맥, 경남·북 동해안, 남해안, 제주도 및 주변 해상에서 나타나며, 해상풍의 경우, 강원도 동해안과 서해안은 풍속이 6.5~7.0 m/s를 보이고 남해안은 7.5 m/s 이상의 강한 풍속이 나타난다. 한편 주풍향 분포의 경우, 한국의 전형적 풍향 특성인 북서풍이 지배적인 것으로 나타났으며, 이는 시베리아 반도의 오호츠크해 기단의 영향이라 할 수 있다. 풍속과 주풍향 비율의 영향을 많이 받는 에너지밀도 역시 제주도 지역이 550~600W/m²로 가장 높으며, 서남해안 지역의 에너지밀도는 380~410W/m² 정도로 나타났다.

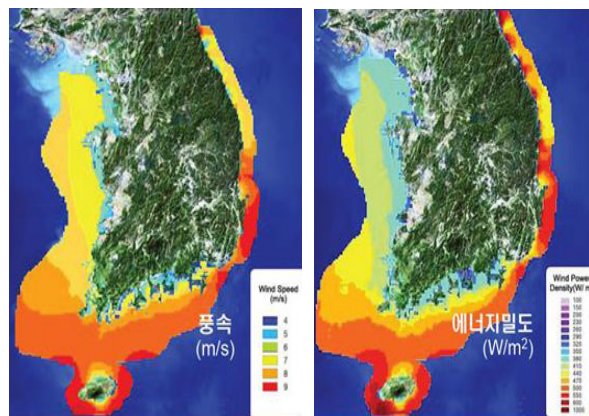


그림 4. 남한지역 해상 풍속 및 에너지밀도 분포

3.1.2 후보지 풍향데이터 분석

상기의 풍력-기상자원지도를 근거하여 국내의 많은 기업들이 지자체 또는 기관과 연계하여 제주도 및 내륙 인근 해역에 풍력발전단지 조성 사업을 추진하고 있다. 하지만 본격적인 사업 추진시 각 사업 후보지역 내에서 계측된 풍향자료를 사용하여 해상 풍향자원을 추가적으로 분석하는 것이 필요하다.

첫 번째로, 사업후보지 내에 위치한 자동기상관측소(AWS)들의 풍향 계측자료의 분석하는 방법이 있다. 기상청에서 설치한 자동기상관측소는 기상관련 13개 항목을 자동 측정하는 시설로, 여기서 측정된 풍속, 풍향 등의 자료를 이용하여 풍향자원 분석이 가능하다. 이 때 관측소의 위치와 실제 해상풍력발전기 위치와의 차이 등을 고려하여 보정을 실시한다.

또 한 가지는, 풍질 측정 장비인 Met Mast를 설치하여 사업지역 내 풍향을 실측하고 그 결과를 분석하는 방법이다. 가장 정확한 풍향데이터 획득 방법은 풍력발전단지 건설 위치에 해상 Mast를 직접 설치하여 발전기 허브 설치 높이에서 계측된 결과를 분석하는 것이나, 일반적으로 해상 Mast의 설치 여건이 좋지 않고 해상 설치비용 역시 상당히 고가이므로, 인근의 섬에 육상 설치된 Met Mast의 측정 자료를 분석하는 것이 경제적이다. Met Mast로 풍질 측정을 실시할 경우 풍속 및 풍향은 최소 1년간 10분 단위로 측정을 실시하며 측정 결과는 높이 보정 등의 Calibration 과정을 반드시 거쳐야 한다.



그림 5. 해상 및 육상 Met Mast

3.1.3 태풍 영향 분석

International Electrotechnical Commission(IEC)에서 제안한 풍력발전 국제기준인 IEC61400에서는 풍력터빈 설계시 형식등급에 따라 설계에 고려되는 풍속이 명기되어 있다. 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 기후 특성상 여름철에 빈번히 발생하는 태풍의 경우, 최대순간풍속이 17~44 m/s 정도로 매우 빨라, 이에 대한 고려가 설계시 반드시 이루어져야 한다. 따라서 풍력발전기 선정 시 국내에서 발생된 태풍의 재현빈도를 고려한 극한풍속 산정 및 발전기 등급 선정을 실시하여 그 결과를 반영해야 한다.

3.2 지질자료 조사 및 분석

3.2.1 지형 및 지정학적 입지 분석

풍력발전사업의 특성상 여러 후보지역 중 풍력자원이 많을 것으로 예측되는 지점을 우선적으로 선정하는 것은 당연하다. 하지만 해상풍력발전의 경우 추가로 고려되어야 할 사항이 있는데 바로 지형 및 지정학적 입지이다. 첫 번째로 지형 분석은 수심, 주변 섬 분포, 육지로부터의 거리 조사 등을 수행하는 것으로 전력계통(Grid) 연계방식 선정 및 공사비 산출과 직결되어 있다. 두 번째로 지정학적 입지 분석은 입지후보지 주변 연관 인프라 조사(기존 시설물, 향후 개발계획)를 수행하는 것으로 해상풍력발전단지 시공과 관련이 있는 항목이라 할 수 있다. 따라서 해상풍력발전단지 설치후보지 선정 시에는 풍력자원 뿐 아니라 상기의 조건들 역시 면밀히 검토하여 선정하는 것이 타당하다.

3.2.2 현장조사 및 시험

해상풍력발전의 특징 중 하나가 육상풍력발전과는 달리 별도의 해상 기초구조물을 적용해야 한다는 점이다. 특히 해상 기초구조물의 시공에 소요되는 비용은 전체 건설비용의 약 21%를 차지할 정도로 높으므로, 기초구조물의 규모를 줄이는 것이 전체 공사비를 절감할 수 있는 방안이라 할 수 있다. 기초구조물의 규모 및 형식은 그 특성상 수심, 지층분포 및 역학적 특성, 기반암 심도 등의 조건들에 큰 영향을 받는다. 따라서 사업후보지의 경제적 선정 및 건설에 필요한 제반 지반공학적 기초자료를 제공하기 위하여 해양탐사, 시추조사 등이 수행되게 된다. 일반적으로 해상풍력발전 후보지의 경우 조사 범위가 넓으므로 시간과 비용의 효율성을 고려하여 물리탐사(수심측량, 수중지층탐사, 해저면영상탐사 등)를 우선적으로 시행하며, 이 결과를 토대로 보다 세밀한 지층구조 파악 및 현장시험 실시를 위해 시추조사를 수행하게 된다.

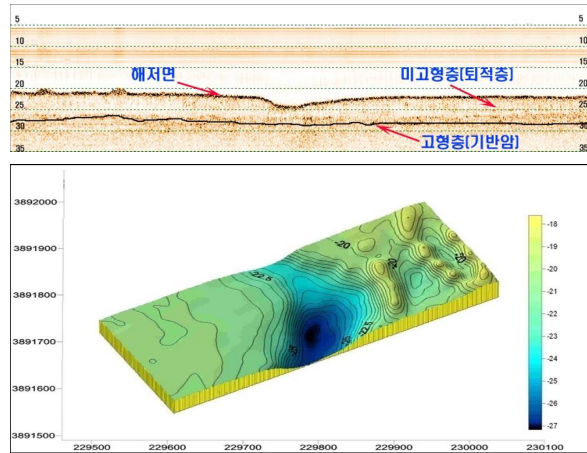


그림 6. 지층 및 수심 분석

3.3 해상풍력 발전단지 배치 계획 수립

3.3.1 건설 후보지 및 우선 설치지점 선정

해상풍력 발전단지 조성사업은 일반적으로 투자비의 효율적 집행을 고려하여 단계적으로 10년 이상을 바라보고 개발을 추진하게 되는 장기 사업이며, 한 편 해상풍력 발전단지의 건설비는 관련 기술의 발달에 따라 점진적으로 감소할 것으로 예상된다. 따라서 건설 후보지는 현재 시점에서의 경제성, 기술력 등을 고려하여 발굴하는 것 보다는 사업지구 내에 설치할 수 있는 최대한의 해상풍력 발전단지 후보지 선정을 목표로 하여 추진하는 것이 합리적이다.

이렇게 발굴된 건설 후보지 내에, 단계적인 개발계획 수립을 위해 세분화된 우선 설치지점을 선정하는 과정을 거치게 된다. 이 때 경제성 및 주변 여건이 우수할 것으로 판단되어지는 지역에 대해 풍력발전 단지의 크기, 주변 인프라 또는 해안까지의 거리, 기반암 심도, 수심, 주변 도서 및 특이 지형 등을 고려하여 몇 개의 Zone으로 나누어 우선 설치지점으로 제안을 하는 것이 일반적이다.

3.3.2 건설 후보지 내 풍력자원 시뮬레이션

해상풍력발전 시설 및 배치계획 수립시 적용되는 풍력데이터는 해상에 설치된 Met Mast의 실측 자료의 분석을 기본으로 한다. 하지만 해상 Mast 설치 및 측정이 수행되지 않은 경우, 육상(도서) 실측 데이터, 기상자료 분석 데이터, 해상에서의 풍속변화 현상을 반영한 데이터 등 각각에 대하여 Case 별로 풍황분석 및 시뮬레이션을 수행하고 이를 비교분석하는 것이 일반적인 방법이다.

상기의 Case 별 풍황자료의 시뮬레이션 분석을 통해 얻어지는 에너지밀도 관련 파라미터, 난류강도, 극한풍속 등의 결과치들은 발전량 산정 및 발전기 설계의 기초 자료가 된다.

3.3.3 해상풍력발전기 후보 선정

해상풍력발전기의 선정은 전 세계 각지에서 건설 및 운영되고 있는 해상풍력발전단지에 적용된 발전기 시스템에 대해 면밀히 분석한 후 그 중 제작사가 우수하고 적용실적이 많은 기종을 선정하는 방식이 가장 합리적이라 할 수 있다. 아래의 그림은 2009년 기준 풍력발전기 공급사별 시장점유율을 표시한 것이다.

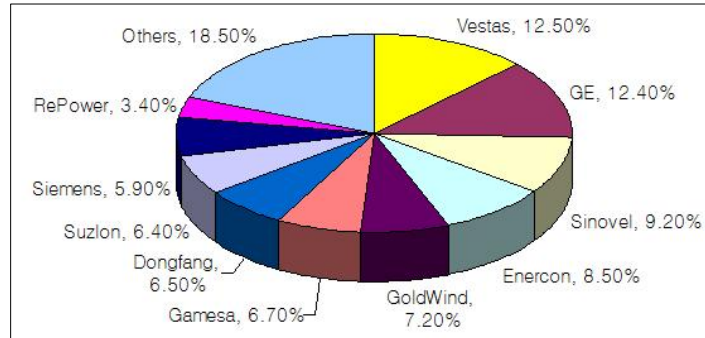


그림 7. 풍력발전기 공급사별 시장 점유율(2009년)

한편 풍력발전기의 용량별 설치 추세를 보면 2005년까지는 3MW 이하의 모델이 약 89.4%를 차지하고 3MW 이상의 모델은 10.6%만을 차지하는 등 3MW 이하 모델이 주로 적용된 반면에, 2006년 이후부터는 3MW급 이상 모델들의 수요가 급증하기 시작하여 그 점유율이 전체 설치량의 57.2%를 차지하기에 이른 것으로 조사결과 나타났다. 또한 5MW 이상급 모델들 역시 일부 적용되는 등 해상풍력발전기의 대형화 추세를 반영하고 있다. 따라서 향후 추진될 해상풍력 발전단지 조성 사업에서는 5MW 이상급의 초대형 풍력발전기가 주력 모델이 될 수 있음을 반드시 염두해 두고 사업을 계획하여야 할 것이다.

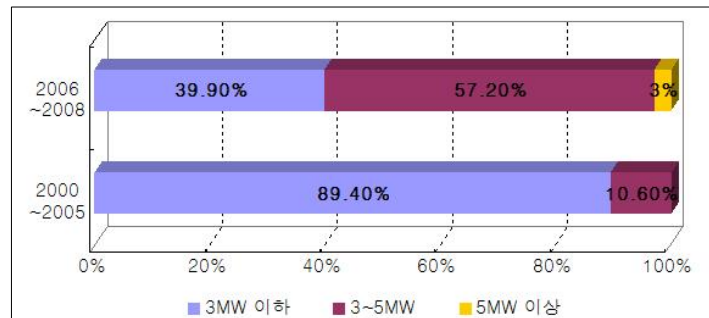


그림 8. 풍력발전기 용량별 설치 추세

3.3.4 해상풍력 발전단지 기본 배치

상기의 시뮬레이션 수행 및 발전기 후보 선정이 완료되면, 우선 설치지점 Zone들을 고려하여 건설 후보지 내에 여러 개의 해상풍력 발전단지의 기본 배치계획을 수립하게 되며, 발전단지 배치기준은 아래와 같다.

- 1) 풍력 시뮬레이션 결과 발전량이 가장 높은 지점을 우선적으로 배치
- 2) 한전전기 공급에 대한 규정을 고려한 배치규모 산정
- 3) 수자원 보호구역 및 여객선 항로를 고려한 풍력발전소 배치
- 4) 추정 풍화암선 선단 깊이를 고려한 풍력발전소 배치
- 5) 섬 또는 육지, 기존변전소 등과의 거리를 고려한 배치 결정

배치기준을 고려하여 해상풍력 발전단지의 기본배치가 완료되면, Case별 풍황 시뮬레이션 결과와 발전기 모델을 고려하여 각 발전단지 별 연간발전량 및 운전성능 예측을 실시하게 된다.

3.3.5 해상풍력발전기 기초형식 선정

건설 후보지 내 수심 및 지반 조사가 완료되었다면 해상풍력 발전기 기초 구조물의 형식 선정이 가능하다. 상기에서 언급하였듯이 기초 구조물은 수심과 지층의 구성에 따라 구조형식과 시공방법이 달라지게 되며 이는 건설비용과 직결되어 있다. 또한 동일 기초형식에서도 상부 터빈의 발전용량과 해상조건에서 발생하는 외부하중들의 크기에 따라 그 규모가 달라지며 이는 현재의 국내 기술수준을 고려하였을 때 시공 가능성과도 연계를 되게 된다. 따라서 기초 구조물의 형식 및 규모의 결정은 설치지역 조건, 하중 규모, 장비 조합 등의 다양한 요소들을 검토하여 신중하게 결정하여야 한다.

3.3.5 전력계통 연계방안 수립

해상풍력 발전단지 조성에서 발전만큼 중요한 것이 발생한 전기를 송전하여 육상계통과 연결하는 것이라 할 수 있다. 이러한 전력계통 연계를 위해 필요한 시설물은 앞서 언급한 바와 같이 크게 해상변전소와 해저케이블이 있으며, 이들을 설치하기 위해서 각각에 대하여 고려되어야 할 기술적 사항들은 아래와 같다.

- 1) 해상 변전소 신설 여부 및 계통 연계방식 결정을 위한 인근 변전소 현황 검토
- 2) 해상 변전소 구조물 설치를 위한 해상 지반조사 및 설계과 실험 수행
- 3) 해저 케이블 등급 결정을 위한 계통 연계 전기방식 및 인근 선로망 검토
- 4) 해저 케이블 설치를 위한 조류 특성 및 해안 선박출입 영향 검토

일반적으로 해상풍력에서의 계통연계는 프로젝트 전체 비용의 20% 정도를 차지할 정도로 경제성에 많은 영향을 끼치는 부분이므로, 계통 연계방안 수립 시에는 위의 고려사항들 외에도 해저케이블 설치 비용, 국가 송전망 확충 계획, 육해상 중개선로의 부하율 등을 면밀히 검토하여 경제적인 방향으로 결정되어야 한다.

4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 해상풍력 발전 시설물의 설치를 위한 입지 분석 방향 및 항목별 검토사항에 대하여 논의되었다. 앞서 언급하였듯이 하나의 해상풍력 발전단지 조성사업을 추진하기 위해서는 기상, 기계, 해양, 토목, 전력분야 등 다양한 분야에 대한 종합적인 검토가 이루어져야 하는 것으로 나타났다. 다시 말하면, 기상과 기계분야는 생산성, 해양과 토목분야는 시공성, 전력분야는 활용성 측면에 대하여 중점적으로 검토되고 이들의 결과를 종합하여 해당 사업의 경제성과 사업성이 평가되는 방식을 거치는 것이 일반적이다. 물론 이외에도 사업 후보지 내 어업권, 문화재, 해당 지자체의 조례 등 각종 인허가 및 민원사항 등에 대한 검토 역시 함께 진행되어야 할 사항이다.

참고문헌

- (1) 한국에너지기술연구원, 풍력자원 데이터베이스-국가바람지도, <http://www.kier-wind.org/>
- (2) 김현구 외, 2009, 국가바람지도 및 지리정보시스템 기반의 해상풍력단지 입지전략 연구, 한국환경과학회지 제18권 제8호.
- (3) 김정근 외, 2009, 해상풍력단지 개발을 위한 입지요인 분석(풍자원을 중심으로), 한국도시행정학회 도시행정학보 제22집 제1호.
- (4) 강금석, 2009, 해상풍력 개발 동향 및 토목기술의 역할, 물과 미래 제42권 제5호
- (5) 채인태, 2006, 풍력발전 기술과 국내외 시장 및 기술동향. 대우엔지니어링기술보 제22권 제1호.
- (6) 에너지관리공단 신재생에너지센터, 신재생에너지 백서 2008 pp. 294~305, 2008.