

## 해상풍력발전 기술의 현황 및 전망

정 석 용 | 두산중공업(주) 풍력기술팀, 책임연구원 | e-mail : seokyong.jeong@doosan.com  
 박 종 포 | 두산중공업(주) 풍력기술팀장, 수석연구원 | e-mail : jongpo.park@doosan.com  
 이 익 형 | 두산중공업(주) 미래에너지담당, 상무 | e-mail : ikhyung.lee@doosan.com  
 정 진 도 | 호서대학교 환경공학과, 교수 | e-mail : jddhung@hoseo.edu

이 글에서는 녹색성장의 핵심인 풍력발전 기술 개발 현황과 시장 동향을 살펴보고, 급격히 성장하고 있는 해상풍력시장 선점을 위한 해상풍력발전시스템 설계에 대한 고려사항을 살펴보고, 해상풍력 활성화를 위한 제안을 하고자 한다.

### 풍력발전의 개발 동향

풍력발전은 다양한 신재생에너지원 가운데 가장 강력한 기술 및 시장경쟁력을 갖추고 있어 녹색성장기술의 핵심으로 자리잡고 있어 세계풍력발전 시장은 급속히 성장하고 있다. 최근 출시되는 풍력발전시스템은 대형화와 해상화되는 경향을 볼 수 있다. 대형화는 시스템의 COE(Cost of electricity)를 낮추기 위해서 도입되고 있으며, 유럽의 개발사들은 이미 로터 직경 126m 이상 풍력발전시스템을 개발완료 하였고 현재 실증 중이다(Repower 5MW, Bard 5MW, Enercon 6MW 등). 또한 유용한 육상단지의 고갈과 소음, 그림자 등과 같은 환경 문제로부터 탈피를 위해서 해상 풍력발전시스템이 점차 확대되고 있는 추세이다.

이러한 추세 속에서 주요 풍력터빈 개발사들은 6~7MW급의 대형 풍력발전시스템을 경쟁적으로 개발하고 있으며, 더불어 많은 해상풍력발전단지가 계획되고 있다. 또한 시스템 가격, 신뢰성, 운용경험 및 출력성능이 풍력발전시스템 개발자 및 구매자에게 중요하게 여겨지고 있다.<sup>(1)</sup>

### 해상풍력발전의 시장 현황

현재까지 해상풍력단지 대부분은 북유럽 전반에 걸쳐 조성되었다. 2008년 말 기준으로 운전 중인 해상풍력발전단지의 설비용량은 총 1,421MW이며, 이중 영국이 588MW로 약 41.4%를 점유하고 있다.(표 1)

삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라와 지형 여건이 유사한 영국은 최근 몇 년 사이에 해상풍력에 대한 전폭적인 투자를 하고 있어, 2008년 한 해 동안 194MW를 설치함으로써 덴마크를 제치고 세계 최고의 해상풍력단지 설비 점유율을 확보하고 있다. 네덜란드도 2008년에 120MW를 설치함으로써 해상풍력의 강국으로 대두하였다. 네덜란드, 스웨덴, 아일랜드, 영국 등은 자국 내 주기기 제조업이 취약함에도 적극적으로 해상풍력발전단지를 개발하여 운영하고 있다.

해상풍황 자원이 풍부해 1981년부터 해상풍력발전을 도입한 덴마크의 경우, 해상 풍력발전의 도입으로 전력공급체계의 전환점을 마련하였으며, 2030년까지 4,000MW 이상의 해상 풍력단지를 해안에 건설 계획을 수립하고 추

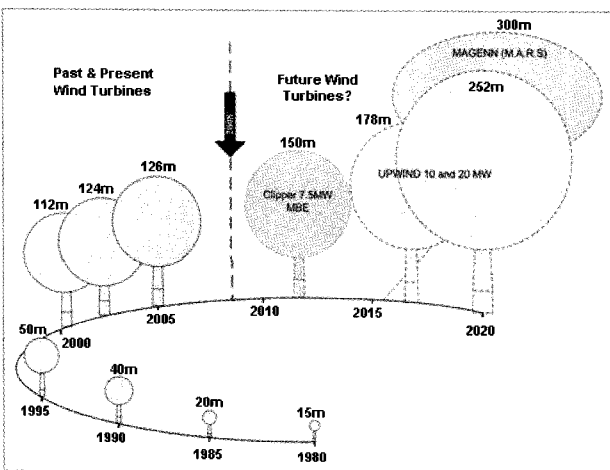


그림 1 풍력발전시스템 개발 추이 (출처 : Garrad Hassan)

표 1 2008년 말 세계 해상풍력 설치 용량 (출처 : BTM Consult ApS-March 2009)

| Country                       | Installed MW 2007 | Accu. MW 2007 | Installed MW 2008 | Accu. MW 2008 |
|-------------------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| Belgium                       | 0                 | 0             | 30                | 30            |
| Denmark                       | 0                 | 397.9         | 0                 | 397.9         |
| Ireland                       | 0                 | 25            | 0                 | 25            |
| The Netherlands               | 0                 | 126.8         | 120               | 246.8         |
| Sweden                        | 110               | 133.3         | 0                 | 133.3         |
| UK                            | 90                | 394           | 194               | 588           |
| <b>Total capacity - World</b> | <b>200</b>        | <b>1,077</b>  | <b>344</b>        | <b>1,421</b>  |

Source: BTM Consult ApS - March 2009

진하고 있다.

이렇게 북유럽의 해상풍력단지가 확대되는 이유를 간략히 요약하면 아래와 같다.

- 육상풍력단지의 포화상태로 건설제한
- 제한된 가용 풍력단지 입지여건 및 정부 승인 획득의 어려움
- 해상은 풍력단지의 대규모화가 용이
- 전력수요지와 근접한 입지 선정 가능
- 고품질 및 풍부한 풍력자원



그림 2 세계 최초 덴마크 Vindeby 해상풍력단지(1991)

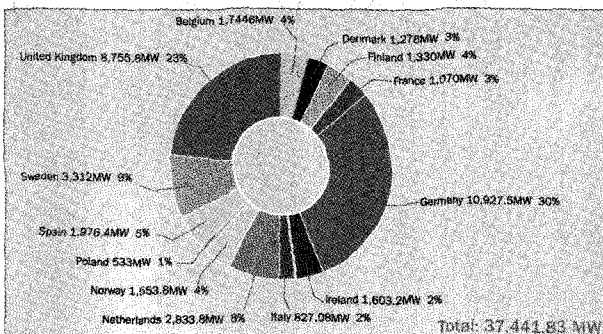


그림 3 2008년 말 유럽해상풍력단지 운영 및 조성 계획 (출처 : EWEA)

- 지역별 높은 Power Rate
- 재생에너지에 대한 소비자의 욕구
- 정부의 녹색 시장 촉진책

유럽풍력협회(EWEA: European Wind Energy Association)는 2010년 전 세계 총 풍력설비용량 60GW 가운데 5GW는 해상풍력이 담당할 것으로 예측하고 있으며, 그림 3에서와 같이 2008년 말 유럽에서 운영 중 이거나 단지조성 계획이 확정된 용량이 37,441MW로서 향후 해상풍력시장은 급속히 성장될 것으로 예측된다.

이렇게 급격히 성장하는 풍력발전 시장에 대응하고자 국내에서 MW급 이상 대형풍력발전시스템을 (주)유니슨과 (주)효성에서 750kW, 2MW급을 국책과제로 개발을 완료 하여 상용화를 추진 중이며, 최근 정부의 녹색성장 정책에 힘을 얻어서 삼성중공업, 현대중공업, STX엔진 등 대형 조선사들이 해외에서 풍력모터를 도입하여 생산계획을 수립하거나 해외 풍력기업을 인수하는 등 풍력발전사업에 대거 참여하고 있다.

### 해상풍력 설계적용 기술

해상 풍력발전시스템의 기본적인 구조는 전체적으로 큰 차이가 없으나 해상풍력의 경우 육상보다 가혹한 조건에서 작동하므로 신뢰성에 더욱 중점을 둔 설계를 하는 동시에 시스템의 안전 유지를 위한 보조설비를 설치할 필요가

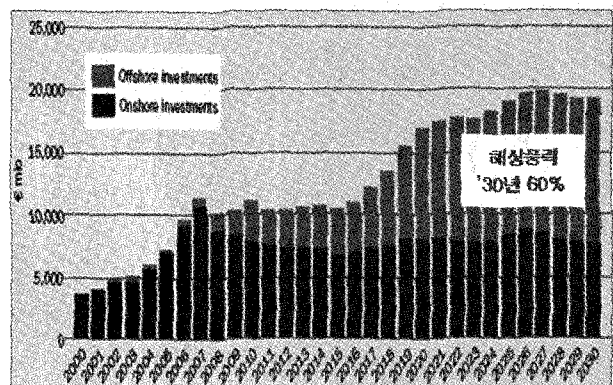


그림 4 2030년 유럽풍력발전 시장 전망 (출처 : EWEA, 2007)

있다. 해상용 풍력발전시스템의 구조는 로터-너셀 조립부, 지지구조부 및 기초부로 구분되며 육상용 풍력발전시스템과 달리 해상에 설치하기 위한 별도의 기초 구조물(모노파일, 중력기초 콘크리트, Tripod, Jacket, Tripile 등)이 요구되고, 이를 타워부와 연결하기 위한 연결 기술이 필요로 한다.

해상화를 통해 공력소음 문제로 증가시키지 못했던 회전속도를 증가시켜 풍력발전기의 하중을 줄일 수 있다는 점과 상대적으로 적은 난류량으로 인해 시스템이 받는 피로하중이 감소하기 때문에 설계상의 제약변수들을 줄일 수 있는 장점이 있다.

또한 구조 계산 시 바람에 의한 진동뿐 아니라 파도, 해류, 조류 등에 의한 해석이 동시에 수행되어야 하므로 design load case(DLC) 계산 시에 육상용 시스템에 비해 추가로 검토사항이 요구된다.

해상용 풍력터빈은 나셀 본체 가압, 냉각용 공기 염분제거, 부식방지 코팅, 윤활유, 내부크레인 구조 등 많은 요소가 달라지므로 시스템의 설계나 제작에 많은 변화가 필요하며, 각 구성품에 대해 염분의 영향을 고려한 설계 및 소재 선택이 요구된다.

해상용의 경우 O&M 시 육상용에 비해 접근이 용이하지 않으므로 높은 신뢰성이 필요하며 이를 위한 부식방지 기술, 시스템 감시, 고장 시 진단기술, 고장 예방기술 등이 중요한 설계요인이다.

두산중공업에서 국내 최초로 개발 성공한 3MW급 해상용 풍력발전시스템인 WinDS3000™ 모델은 2009년 9월 제주도 김녕 육상실증단지에 설치하여 시운전을 수행할 계획이다.

해상용으로 개발된 WinDS3000™ 모델은 상기 언급된 해상설계기술 사항들이 반영된 모델이다. 주요 내용을 간략히 소개하면, 고장 최소화를 위한 신뢰성, 파워 생산량 최대화를 위한 가용성, 쉬운 유지보수를 위한 보수성 그리고 즉각적인 서비스를 위한 편의성을 의미하는 high RAMS(reliability, availability, maintainability and serviceability) 기술을 근간으로 설계 되었다. 이러한 RAMS는 현재 풍력발전시스템의 개발기준이 되고 있

며, 그림 5에서와 같이 시스템 강건 설계, 결합요인의 조기 탐지, 쉬운 접근성을 통해서 확보할 수 있다. High RAMS 기술 적용으로 풍력발전 주기기 시장에서 해외선진사와 경쟁력 측면에서 기술우위를 확보할 수 있게 되었다.

또한 WinDS3000™ 모델은 고 신뢰성을 만족시키기 위해서, 신뢰성이 확보된 부품사용과 함께, 육상 및 해상 조건에서 각 구성품의 설계 및 높은 안전계수를 다양한 해석방법을 통하여 검증하였다.

가용성을 증대시키기 위해서 3-블레이드 로터와 함께 영구 자석 동기형 발전기가 적용되었으며, 출력제어에서는 정격풍속 이하에서는 토크제어를 사용하고, 정격 풍속 이상에서는 피치제어를 사용하였다. 이를 통해,

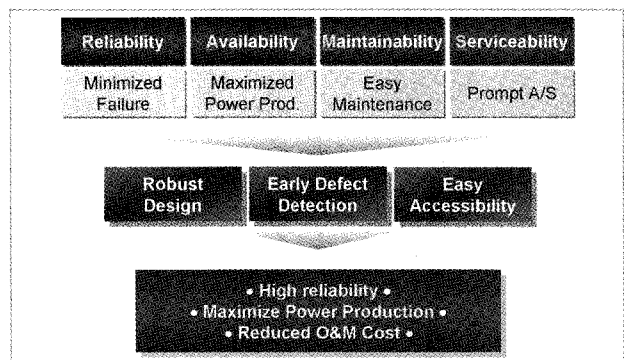


그림 5 WinDS3000™ 모델에 적용된 High RAMS 개념

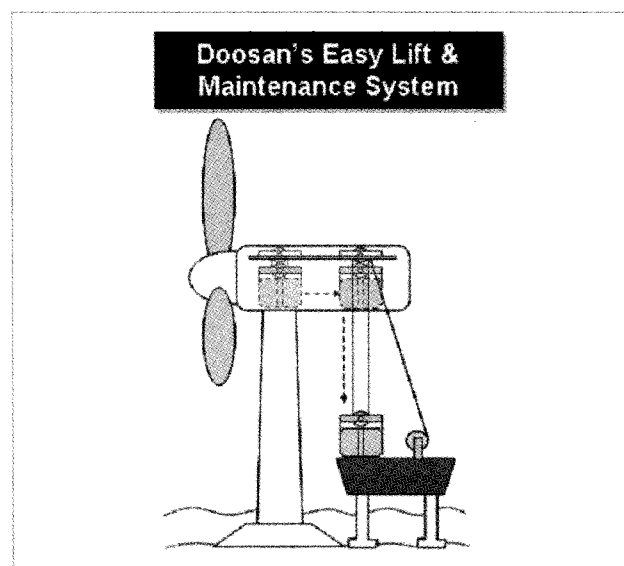


그림 6 WinDS3000™에 적용된 유지보수 크레인 개념도

WinDS3000™은 최적의 출력 곡선과 부분부하에서도 높은 효율을 갖도록 설계되어 에너지 생산량 증대를 위한 가용성을 확대하였다. 더불어, 50Hz 및 60Hz 전력망에 쉽게 적용할 수 있도록 영구자석형 발전기와 풀 파워 컨버터를 사용하여 그리드 친화적인 시스템을 구축하였다.

특히 WinDS3000™ 모델은 해상용 풍력발전시스템임을 고려하여 유지보수 비용 저감과 유지보수 편의성 증대를 위해서 그림 6에 나타낸 것과 같이 혁신적인 나셀 내부 크레인을 개발하여 탑재되었다. 나셀 내부 유지보수 크레인인 윈치-폴리 시스템과 결합하여 나셀내부의 모든 구성품을 취급할 수 있도록 하였다. 따라서 유지보수를 위한 대형 크레인이 필요 없으며, 더불어 대형 크레인을 위한 대형 jack-berge ship도 필요 없기 때문에 유지보수 비용을 감소시킬 수 있다.

본 유지보수 시스템 적용으로 O&M 시나리오 분석한 결과, 20년 설계 수명동안 10%의 연간 고장률을 가진다는 조건하에서, 통상적인 대형 크레인 시스템과 비교하였을 때, 유지보수 비용 및 보수기간이 각각 72%와 20%로 획기적으로 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

또한 두산중공업은 수년 동안 발전플랜트 사업수행으로 축적된 노하우를 충분히 활용하여 풍력발전 시스템의 운전 및 유지보수 시에 신속한 서비스를 제공할 예정이다.

낮은 COE(발전단가)는 풍력 발전 시스템 개발 시 가장 중요한 인자 중의 하나라고 할 수 있다. 발전단가는 풍력 발전시스템의 비용, 출력 및 풍력터빈의 효율과 관계되어 있다. 낮은 발전단가를 획득하기 위해서 높은 출력 성능,

경량화, 드라이브 트레인 최적화 그리고 유지보수 비용의 감소가 필수적이다. WinDS3000™모델 설계 시 이러한 내용이 충분히 반영되었다.

그림 7은 BLADED S/W를 이용하여 WinDS3000™의 출력곡선을 예측하고 있다. 13m/s에서 정격출력을 가지며, 정격 풍속 이상에서는 피치제어를 이용하여 출력을 정규화 하였다.

### 해상풍력 기초구조물

해상풍력단지 건설에 투자되는 비용 중에서 그림 8에서와 같이 해상기초구조물 제작 및 시공비가 25%로 상대적으로 높은 비중을 차지한다. 따라서 해상풍력 기초구조물의 건설 공기단축, 시공 위험도 등과 관련한 비용효과성(Cost-effectiveness)을 갖도록 하는 시공기술의 확보가 중요하며, 상세 환경영향평가, 발전단지 상세설계, 육상 예비조립, 육상 관련 설비설치, 운송, 해상구조물설치(해상기상탑, 해저케이블), 해저기초공사, 해상풍력발전시스템 설치, 시운전(commissioning) 등의 기술 확보가 매우 중요하다.

해저기초공사는 육상과 구별되는 가장 큰 특징으로 조류와 파도로 인해 발생하는 추가적인 하중을 견딜 수 있도록 설계되어야 하며, 파도로 인해 발생 할 수 있는 최대 하중은 바람에 의해 발생할 수 있는 최대 하중의 약 20% 정도로 이에 대한 대비가 필요하다.<sup>(2)</sup>

추가적인 하중을 견뎌내기 위한 해저기초구조물의 형식

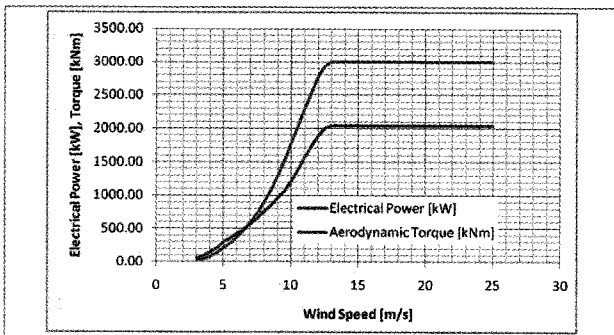


그림 7 WinDS3000™ 모델의 출력곡선

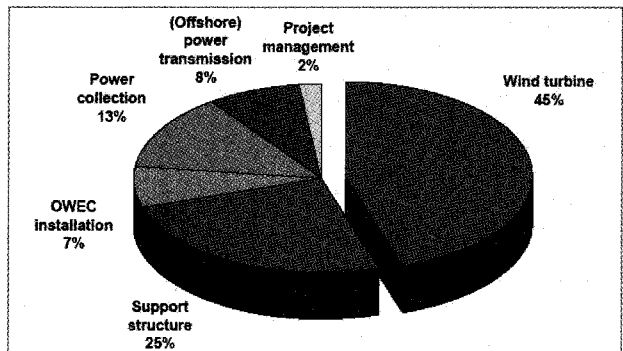


그림 8 해상풍력발전단지 초기투자 비용의 구성

으로는 크게 중력케이슨식, 모노파일식, 자켓식 등을 들 수 있으며 이와는 별도로 부유식 구조물을 이용하는 개념이 도출되고 있으나 아직까지 연구 단계이다.

그림 9는 수심에 따른 해상기초구조물 시공 방법을 표현한 그림이다.

해상풍력단지 건설시 유럽에서 가장 많이 적용하는 기초구조물 시공 방법은 중력식과 모노파일 방식이다. 그림 10에서와 같이 중력식은 비교적 수심이 낮은 20m 이내 지역에 설치되며, 구조물 자체의 하중을 기반으로 구조물의 안정성을 높이는 방식이다.

대체로 수심 30m 이하 지점에 설치되는 모노 파일방식은 유럽에서 가장 많이 적용하고 있으며, 시공은 해저면에 대구경의 파일을 향타 또는 드릴링으로 굴착하여 고정시

키고 중앙부에는 철근콘크리트로 그라우팅하여 해저면과 고정하는 개념이다. 해저면이 경암인 경우에는 유리하고, 수심 30m까지는 경제성이 있으며 대단위 단지 건설 시 경제성이 좋은 방법이다. 그러나 3MW 급 이상 대형 해상풍력발전시스템을 시공하기 위해서는 직경 4m 이상의 파일의 굴착하여야 하므로 신규 굴착 장비가 도입되어야 하는 단점이 있다.

자켓식 구조물은 풍력타워를 지지하는 자켓을 말뚝 또는 파일에 의하여 해저에 고정하는 개념으로 파일의 경우에는 중앙부를 철근콘크리트로 채워서 시공한다. 대수심의 해양에 설치되는 해양구조물로서 실적이 많아 신뢰성이 있다. 또한 사전제작 자켓과 말뚝 또는 파일을 이용하므로 해상공사기간 단축이 가능한 장점이 있다. 수심 30m까지는 대규모 해상풍력단지의 시공의 경우는 경제성을 갖춘 구조물이다. 자켓식 구조물은 국내 관련업체에서 해상구조물 시공에 많은 경험을 보유하고 있으며, 국내여건상 해상풍력발전시스템 기초구조물로서 적용 가능성이 가장 높다.

두산중공업이 총괄 주관기관으로 추진하는 해상풍력 실증단지조성 국책과제는 국내 최초로 제주도 월정리 해상에 2MW 1기, 3MW 1기 총 5MW 용량 시공계획이며, 이곳에 시공되는 기초 구조물은 자켓 구조물로 시공될 예정이다.

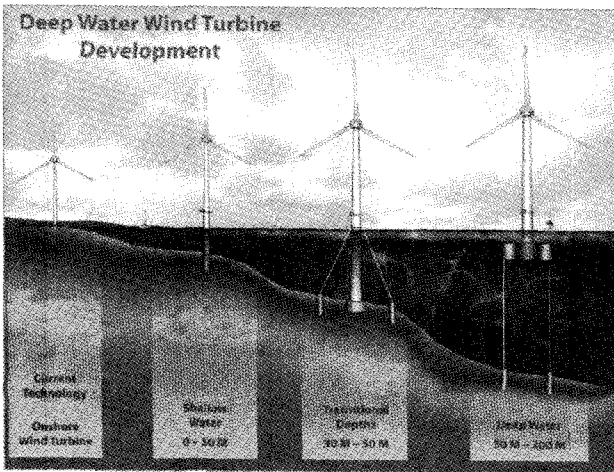


그림 9 해상풍력발전시스템용 기초 구조물 (출처 : NREL)

### 해상풍력 활성화를 위한 제안

해상풍력단지 설계 시 기본적으로 확보되어야 하는 설계 자료는 자연조건으로 강우일수, 기온, 풍향, 태풍, 해무, 파고, 파주기, 조위, 조류 등 자료가 필요하며, 지형 및 지질조건으로 해저면 지반형상, 해저면 지질특성을 조사하여야 한다. 기타 현장 상황으로 기존구조물 유무 및 크기, 인근 항만시설의 상황, 장애물 현황, 자재반입을 위한 루트가 확보되어야 한다.

현재까지 국내에 확보된 해상기상 관련자료 및 해상지질 특성 자료가 체계적으로 구축되어 있지 않아 사업수행에 많은 어려움이 있다. 해상풍력 활성화를 위하여 국책연

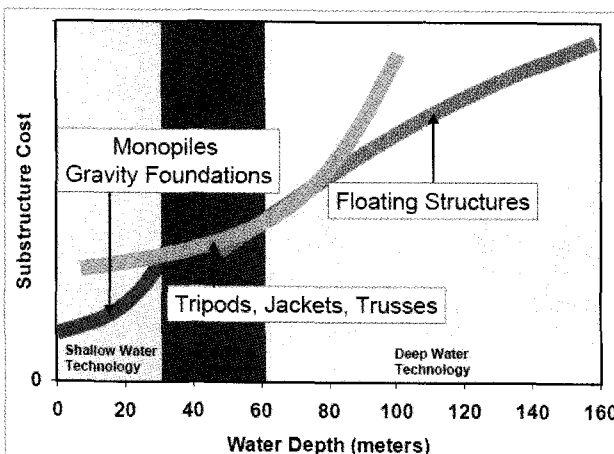


그림 10 수심에 따른 해저기초구조물 적용 방안

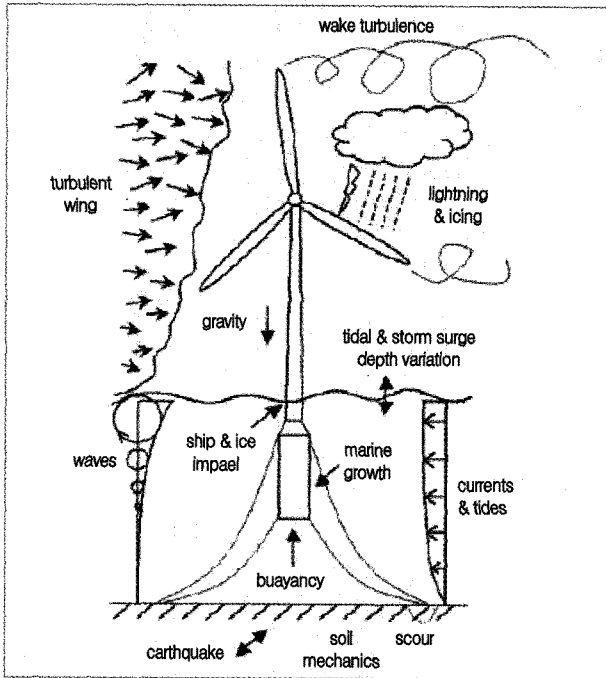


그림 11 해상풍력발전시스템 설계 시 고려사항 (출처 : NREL)

구기관을 중심으로 해상풍력단지 설계를 위한 체계적인 해양자료 구축이 요구된다.

우리나라에서 해상풍력단지 시공은 육지에서 가까운 연근해에는 어장 등으로 시공 시 민원으로 현실적으로 어려움이 많고, 풍황자원이 풍부한 동해에는 수심이 깊어 현재 기술로써 시공이 불가능하다. 원 해상의 양질의 풍황자원 이용을 위하여 100m 이상 수심에 적용 가능한 부유식 기초구조물은 개발착수가 요구된다. 그림 12에 부유식 해상 기초구조물 개념을 소개하였다.

부유식 기초구조물은 로프의 힘으로 주로 유지되며, 풍력발전기의 형태와 모양에 따라 앵커링 방식이 결정된다.

급격한 시장성장이 예상되는 해상풍력발전분야 세계적인 기술선점을 위하여 성장잠재력이 높으나, 기술개발이 시작 단계인 부유식 해상기초구조물 연구를 위해 체계적인 조직 구성이 요구된다.

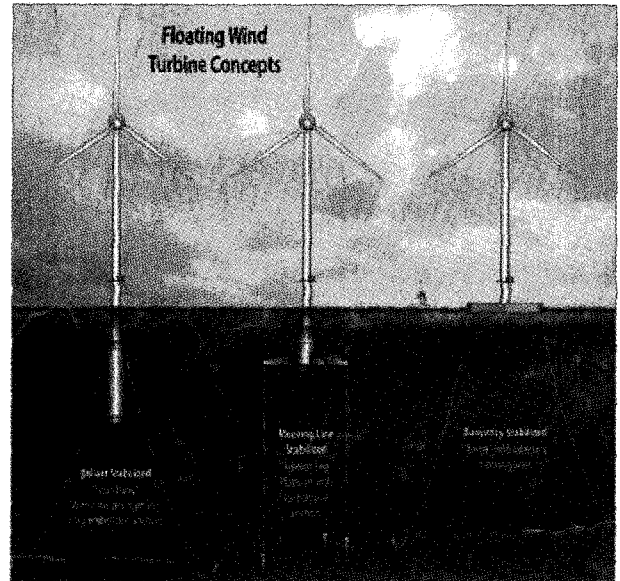


그림 12 부유식 해상기초구조물 개념 (출처 : NREL)

#### 참고문헌

- (1) Bywaters, G.; John, V.; Lynch, J.; Mattila, P.; Norton, G.; Stowell, J.; Salata, M.; Labath, O.; Chertok, A.; Hablanian, D., 2004, "Northern Power Systems WindPACT Drive Train Alternative Design Study Report," NREL Report, SR-500-35524.
- (2) Design Methods for Offshore Wind Turbines at Exposed Sites," Final Report of OWTES Project, 2004.
- (3) W.D. Joo, J.H. Lee, J.I. Kim, J.H. Park, J.H. Choi and J. P. Park, 2007, "Conceptual Design of a 3 MW Class Wind Turbine for Offshore Application," PowerGen International.