특집 1 | 한국지반공학회지 | Vol.27, No.2 | pp.8~17

해상풍력발전(Offshore Wind Turbine)과 지반공학

윤 길 림
한국해양연구원
책임연구원
(glyoon@kordi.re.kr)

이 근 하
(주)대우엔지니어링
부사장

함 태 규
(주)대우엔지니어링 기술연구소
선임연구원

이 규 환
건양대학교
건설시스템공학과 교수

1. 개요

화석연료 고갈 및 지구 온난화 방지를 위해 세계적으로 신 · 재생에너지 산업의 급속한 성장세가 지속되고 있으며, 국내에서도 온실가스 저감에 대한 의무부담이 강화됨에 따라 에너지이용 패러다임 변화에 대응하는 신 · 재생에너지 설치사업 참여가 절실히 필요한 상황이라고 할 수 있다. 청정에너지 사업유형인 신 · 재생에너지 설치사업 중에서도 가장 먼저 Grid Parity를 달성한 해상풍력발전 사업은 매년 25% 이상의 급성장을 보이고 있으며, 현 정부에서 "5대 핵심녹색사업"으로 선정, 본격적인 수출사업으로 육성하는 것으로 결정되어 있다.

해상 풍력발전은 크게 바람으로부터 바람에너지를 만드는 회전자(Rotor), 회전자의 회전에너지를 발전기로 전달하는 구동장치, 이러한 주요장치를 해면에서 일정높이 이상 위치시키기 위한 타워, 그리고 지반에 고정하기 위한 하부지지구조로 구성된다. 또한 해상부분에는 유지관리 등을 위한 접근을 위해 Access Door, Boat landing, Ladder 등이 타워에 설치되며, 케이블설치를 위한 J-tube, 기초에는 세굴보호공이 설치된다.

해상 풍력발전은 육상에 비해 대형 해상장비를 필요로 하고 공사비 및 설치비가 고가로, 각 부품의 염분에 대한 방식처리, 전력수송을 위한 해저전력선 등 추가적인 기술을 필요로 한다.

따라서 현 정부의 지원사업과 연계한 "해상풍력발전산

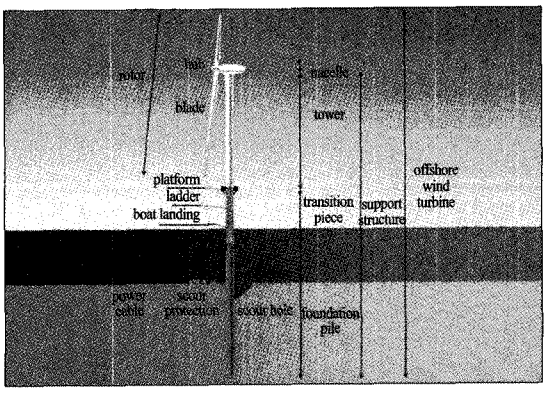

그림 1. 해상풍력발전 시스템 구성

업"의 독자적인 핵심기술 및 Know-how를 확보하여 해상풍력발전 설계 및 시공기술의 자립화를 달성하기 위한 연구가 긴요하다고 할 수 있다.

2010년 현재 전 세계 연안풍력발전 현황은 약 2,9GW이며 대부분 유럽국가가 차지하고 있다. 유럽의 경우, 1991년 덴마크가 최초로 연안풍력발전을 시작한 이래 약 830개 이상의 연안풍력발전 터빈을 설치하여 운영하고 있다. 국토가 좁은 유럽의 경우, 일찍부터 연안풍력에 적극적이었으나 미국은 넓은 국토 등으로 인해 지상 풍력에 관심을 가져왔다. 다만, 현재 설치된 연안풍력발전 설비는 모두 수심 30m이내의 얕은 바다에 설치된 것이며, 그 이상의 수심에 대해서는 여전히 기술적인 한계가 존재한다.

수심이 깊을수록 육지에서 멀어질수록 바람의 세기가 증가하는 것은 일반적이며 대규모의 풍력발전을 위해서는 30m이상의 심도에서 풍력발전을 설치하여야 한다는 문제가 앞으로 풀어야할 과제라고 할 수 있다.

해상풍력발전단지 계획에 있어 수심측량, 지층탐사, 파랑조사, 기초 지반조사 등의 현지조사가 필요하며, 풍력발전의 기초구조물을 축조하기 위한 지반조사는 구조물의 안정성을 결정짓는 매우 중요한 정보를 제공한다. 해상풍력발전 단지의 구조물 축조를 위한 기초지반의 경우 해양 미고결지반인 경우가 많으며, 해양 미고결지반은 지층, 침전물, 해수의 유동에 따른 침전상태 및 입자의 크기 등이 일반적인 미고결지반과는 크게 다른 특징을 가지고 있다.

현재 해상풍력발전 하부기초 설계시 필요한 지반정수를 구하기 위하여 SPT, CPT 등이 수행되고 있으나, 해상조사는 육상조사보다 난이도가 높고 정밀한 기술이 필요하나 아직은 국내 기술력이 부족한 실정이다. 따라서 해상풍력발전용 하부기초 설계에 활용되는 지반정수를 구하기 위한 해저 지반조사 기술이 확보되어야 한다.

본고에서는 해상풍력발전기 건설을 위한 국내외 기술개발 현황을 조사하고 해저지구물리 탐사기술과 보링공을 이용한 지반조사 기술을 소개한다. 마지막으로 해상풍력발전 및 해상구조물의 기초설계에 필요한 지반정수 선정 방법 및 해상풍력 기초시스템의 현황과 문제점에 대하여 기술하였다.

2. 해상풍력 국내 · 외 동향

2010년 현재, 전 세계 해상풍력 발전용량은 유럽을 중심으로 2.9GW이며 2.6GW가 건설 중이다. 또한, 현재 승인된 계획은 23.6GW이며, 세계 각국에서 준비하고 있는 규모는 총 153.9GW나 된다. 최근 들어 유럽 외에 중국, 미국 등이 해상풍력단지 개발을 추진 중이다. 유럽의 경우, 영국, 덴마크 등을 중심으로 2020년까지 40GW, 2030년까지 150GW 건설 계획이다.

중국은 2010년 아시아 최초 해상풍력단지(상해, 3MW×34기)를 완공하였으며 2030년까지 35GW로 확대할 계획이고, 미국은 2010년 동부해안에 해상풍력발전단지(3.6MW×130기) 건설을 승인하였고, 2030년까지 54GW를 설치할 예정이다.

해상풍력산업은 조선, 철강, 전기, 토목, 정밀 기계 등 다양한 산업기술이 분포된 융·복합기술로 다양한 supply chain을 갖는 미래 융합산업, 신성장 동력 및 수출 산업화에 대한 가능성이 제기되고 있다. 우리나라의 경우, 해상풍력단지 개발은 초기 단계로 초기 시장창출에 어려움이 예상되나 국제적인 경쟁력을 갖고 있는 조선, 중공업, 해양플랜트, 건설, 전기, IT 등의 관련 산업과 접목시 짧은 기간 내에 세계시장 진출이 가능한 분야로 기대되고 있다.

또한, 국토여건상 육상풍력보다는 환경파괴와 민원발생이 적고, 대규모 단지 개발이 가능한 해상풍력이 유망하다.

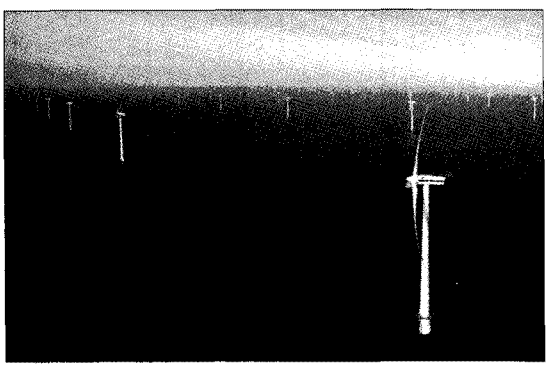

그림 2. 덴마크 Horns Rev 해상 풍력 단지

3. 국내 해상풍력단지 추진계획

지식경제부에서는 2008.10월부터 2년 동안 우리나라 해상을 대상으로 풍향, 수심, 계통연계조건, 해안과의 이격거리, 변전소 이격거리, 확장성 등을 조사한 결과 부안-영광지역 해상을 최적지로 선정하였다.

부안-영광지역 해상은 바람 등급 Class 3(6.9~7.5m/s), 수심 20m이내, 변전소 이격거리 15km, 300MW이상의 대규모 단지 개발이 가능한 것으로 보인다. 특히, 부안-영광지역 해상에 실증단지 조성을 시작으로 2019년까지 3단계로 나누어 총 2,500MW 규모의 대규모 해상풍력발전단지를 건설할 예정이다.

- 1단계: 2013년까지 100MW(5MW급 20기) 실증단지를 건설하여 Track Record 확보에 중점(민·관 합동으로 6,036억 투자)
- 2단계: 2016년까지 900MW(5MW급 180기) 시범단지 건설(민·관 합동으로 3조 254억 투자)
- 3단계: 2019년까지 1,500MW(5MW급 300기) 해상풍력발전단지 추가 건설(민간에서 5조 6,300억 투자)

4. 해저지반 조사기술 현황

해상풍력발전 기초구조물의 규모 및 형식은 그 특성상 수심, 지층분포 및 역학적 특성, 기반암 심도 등의 조건들에 큰 영향을 받게 된다. 따라서 사업후보지의 경제적 선정 및 건설에 필요한 지반공학적 기초자료를 제공하기 위하여 해양탐사, 시추조사 등이 수행된다. 일반적으로 해상풍력발전 후보지의 경우 조사 범위가 넓은 이유로 효율성을 고려하여 물리탐사(수심측량, 수중지층탐사, 해저면 영상탐사 등)를 우선적으로 시행하고, 이 결과를 토대로 보다 세밀한 지층구조 및 현장시험 실시를 위해 시추조사를 수행하게 된다.

해양에서는 해수라는 독특한 매질로 인한 정보전달과 탐사의 어려움, 그리고 10m에 1기압씩 증가하는 수압으로 인해 해저지반조사는 많은 장벽에 가로막혀 왔다. 그러나 최근 과학의 발달로 각종 탐사·관측 장비가 비약적인 발전을 이루었으며 인공위성에 의한 원격탐사기술 등과 같은 첨단 탐사기술이 활용되고 있다. 해양조사기법에는 해류나 조류, 파랑 등 복잡한 해양물리환경을 조사 관측하는데 사용되는 해양관측기술, 해저의 지질학적 구조를 파악하는데 사용되는 해저지구물리 탐사기술, 해양지반의 지층구조 파악을 위한 보링기법, 해저지반의 시료채취를 위한 샘플링 기술, 그리고 해저지반의 공학적 물성 파악을 위한 원위치 시험기법 등이 있다.

4.1 해저물리탐사기술

4.1.1 해상탄성파 탐사

단일채널 해상탄성파 탐사는 해상, 하천, 호수와 늪 등의 수상에서 실시하는 천부 반사법 탐사이다. 다중채널 해상탄성파 탐사에 비해 장비가 간단하여 기동성이 있는 측정이 가능하고 비교적 적은 비용으로 해저면 하부의 지질 상황을 파악할 수 있다. 수면 밑의 지형을 측정하는 데는 음향측심기가 사용된다. 음향측심기는 해수면 부근에서 일정한 간격으로 수백 kHz의 음파를 해저로 향하여 보내고 해저면으로부터 반사된 파의 왕복시간을 측정하여 수심을 측정하는 방법이다. 해상 탄성파 탐사는 해상에서 사용되는 반사법 탄성파 탐사의 일종으로 음파 탐사라고도 하며 주로 천부의 해저 지질조사에 사용되고 있다. 탐사선이 항해하면서 반사파 기록을 실시간으로 얻기 때문에 효율적인 측정이 가능하고 개략 탐사로부터 정밀탐사에 이르기까지 폭 넓게 사용되고 있다. 해수면 부근에서 P파를 발생시키고 해저면 하부로부터 반사된 미약한 신호를 한 그룹의 수신기로 수신하여 왕복시간과 그 강약을 기록 장치로 연속적으로 표시하는 방법이다. 탐사선을 일정한 속도로 이동시킴으로써 해저면 하부의 지질구조나 퇴적구조를 연속으로 단기간에 탐사할 수 있다.

그러나 단일 채널 탄성파 탐사는 간접적인 방법이기 때문에 지층의 역학적 특성을 직접적으로 파악할 수는 없다. 또한 음파가 투과하지 않는 단단한 지층 내의 정보는 얻어지지 않는다. 다중 채널 탄성파 탐사는 하나의 음원에서 발파한 음파를 여러 개의 수진기로 수신하여 디지털

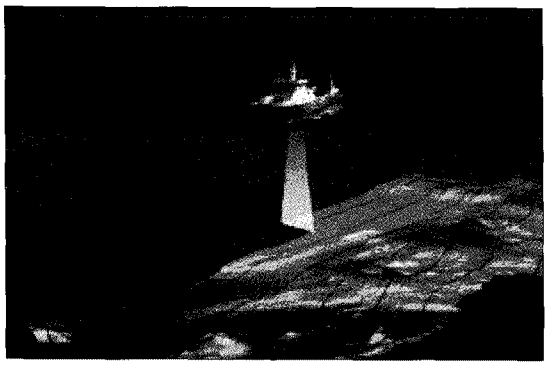

그림 3. 해상에서 탄성파 탐사 모식도

로 수록한 후 자료처리에 의하여 심부까지의 반사기록을 얻는다. 단일 채널 탄성파 탐사는 한 그룹의 수진기로 수신하여 그 신호를 디지털로 기록한다. 다중 채널 탄성파 탐사에 비해 장비가 소규모이고 소형의 탐사선에 탑재할 수 있어 적은 비용으로 조사가 가능한 장점이 있다.

4.1.2 MBES (Multi-Beam Echo Sound)

최근 소나(sonar)기술과 위치정보에 대한 기술, 그리고 컴퓨터 프로세싱 기술의 급격한 발전으로 인해 해저 지형 조사방법에 있어서 획기적인 진전이 있었다. 이러한 발전으로 인해 정밀 해저 지형 조사를 위한 방법으로 일반적인 단채널 음향 측심기(echo sounder)에서 다중채널 음향 측심기(multi-beam echo sound)로 점차 옮겨가고 있다. 다중 채널 음향 측심기의 특징은 한번의 ping(송신)으로 수심의 2~7배 정도 되는 지역에 대한 정보를 얻을 수 있다는 점과 초음파 대역의 고주파를 사용하므로 정밀한 해저 지형자료를 획득할 수가 있다는 것이다. 일반적인 원리는 단순하지만 다중 채널 음향 측심기는 해수의 심도별 음파 속도 및 navigation시에 배의 움직임(roll, pitch, heave) 및 조석의 정밀한 관측이 필요하고 해저에서 반사된 빔의 forming에 복잡한 수학 연산 과정이 필요하여 배의 특성으로 인한 기계적 잡음을 제거하기 위하여 patch test를 반드시 수행하여야 한다는 단점이 있다.

단채널 음향 측심기에 비해 다중채널 음향 측심기는 수십~수백 배에 달하는 자료를 획득하게 되며, 이를 처리하는 과정과 3차원으로 영상화하는 기법들이 많이 연구되고 있다. 이러한 3차원 영상 처리 기법은 Lidar 자료나 육상 지형 자료까지도 처리를 할 수 있으며, 전자 해도 및 인공위성 영상을 포함하여 항공사진 등까지 layer 개념을 도입하여 VR(Virtual Reality) 기법을 이용하는 연구가 많이 수행되고 있다. 다중채널 음향측심기(MBES)는 GPS의 오차를 1cm 이내로 유지하면서 10 노트 이상의 운항속도로 조사를 할 수 있는 방법에 대해 연구가 진행되고 있다.

4.2 해상시추 보링공의 지반조사기술

해상에서 이루어지고 있는 보링공을 이용한 지반조사는 일반적인 보링 및 샘플링을 비롯하여 표준관입시험, 콘관입시험, 공내재하시험, 현장베인시험 등 육상에서 활용 중인 시험기법들이 대부분 적용될 수 있다. 하지만, 육상의 경우에 비해서 능률이나 정도가 자연조건에 의해 크게 좌우된다. 이는 조류나 파랑, 항적파 등 육상에서는 생각할 필요가 없는 장애를 가지고 있기 때문이며, 시험위치의 수심에 따라서 작업 방법에 큰 차이가 있다. 수심이 비교적 얕을 경우 주로 작업 공간을 위한 가설작업장(self elevating Platform, SEP)을 활용하는 반면, 수심이 깊은 위치에서는 가설작업장의 적용이 힘들기 때문에 굴착된 보어홀의 바닥으로부터 장비를 관입시키는 방식인 다운홀 방식이나 해저 바닥 면에서 직접 관입시키는 방식인 착저형(seabed) 방식 등이 활용된다.

4.2.1 천해에서의 지반조사

천해의 지반조사는 일반적으로 가설작업장을 이용하여 이루어지는데, 육상에서 사용되는 모든 지반조사 기법이 활용될 수 있다. 여기서, 가설작업장은 안전, 능률, 조사성과의 품질확보에 적절하게 기능하는 것이 중요하다. 가설작업장에는 여러 가지 형식이 있고 조사목적, 수심, 해상조건, 교통 선박의 운행빈도, 조사현장에서 수배가 가능한 크레인선의 규모, 게다가 경제성이 가미되어 선정되는 것이 보통이다.

해상 가설작업장은, 크게 부체작업장과 고정 작업장으로 구분할 수 있다. 부체작업장은 고정 작업장의 설치가 곤란한 대수심이나 정온인 해역에서 이용되는 것으로, 선

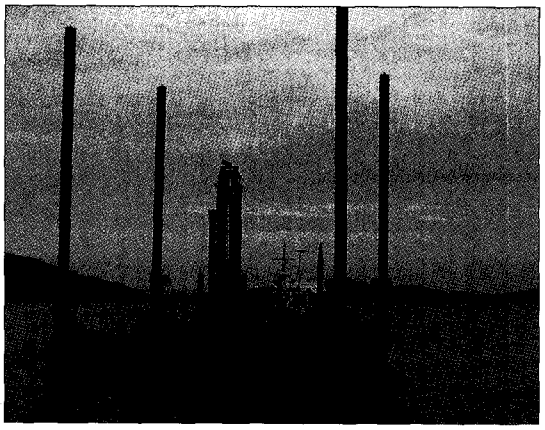

그림 4. SEP 바지에서 해상콘관입시험 모습

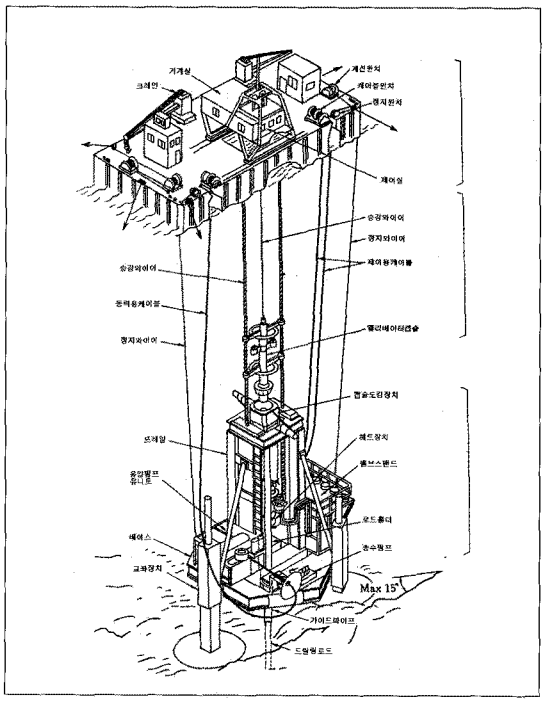

그림 5. 해저착저형 지반조사장치

박식 및 반잠수식이 있다. 선박식은 상하(pitching)나 좌우(rolling)로의 흔들림이 있어 보링이나 샘플링에 악영향을 줄 가능성이 높고, 특히 교란되지 않은 샘플링이 수반되는 조사에는 부적절하다고 할 수 있다. 고정작업장은 해상에서의 토질조사에는 필수적으로 항만공사 시방서에 의하면 해상작업에서의 작업장은 작업의 안전 및 조사정도를 확보할 수 있는 구조의 보링작업용 작업장을 이용하는 것으로 명기되어 있다. 고정작업장에는 대표적인 강제 작업장과 그림 4와 같은 작업장(소형 SEP 바지선)이 대표적이다.

4.2.2 심해에서의 해저지반 조사기술

가. 다운홀 방식(downhole type)

다운홀 방식의 해양 지반조사 시험기는 드릴에 의해 굴착된 굴착면에서부터 관입이 이루어진다. 즉, 원하는 깊이까지 선상의 동력장치나 시험기 자체의 동력원에 의해 드릴링 작업이 이루어진 후, 관입이 이루어지는 방식이다. 해저지반 조사에 일반적으로 사용되는 콘은 선단면적이 1㎠(표준콘의 경우 10㎠)인 소형으로서, 현재는 통상적인 조사가 가능한 깊이가 10m 이내에 머무르고 있다. 현재 최신의 다운홀 방식의 콘관입시험 장비는 이탈리아의 SPG사와 스웨덴의 ENVI사에 의해 공동으로 개발되고 있다. 이 시스템은 드릴링의 위한 비트 앞에 관입을 위한 콘이 부착되어 드릴링과 동시에 콘의 관입이 이루어지는 방식이다.

나. 착저형 방식(seabed type)

가설작업장을 이용한 해양조사시 수심, 조류, 파랑 등의 영향 및 해상 가설 작업장의 위험성과 비능률성을 줄이고자 하는 목적으로 조사기기를 해저면에 가라앉혀 모선에서 원격조정에 의한 방법이 고안되었다.

해저착저형 보링장치는 해저의 암반 코어링에 원비트 런방식(코어링이 종료하면 1회마다 장치 전체를 들어 올려 코어를 회수함)이 이용된 것이 최초이고, 그 후 대수심 해역의 연약지반에서 교란되지 않은 시료의 샘플링을 목적으로 그림 5와 같은 해저착저형 장치의 연구개발이 이루어지고 있다.

착저형 콘관입시험기의 경우, 콘의 단면적이 10㎠인 표준형 착저형 시험기 이외에도 해저의 파이프라인이나 케이블 매설의 증가로 인하여 소형의 시험장비들의 사용이 더욱 증가하는 추세로 1~5㎠의 소형콘을 장착한 콘관입시험기가 많이 사용되고 있다. 그림 6은 미국 SAGE사에서 사용하고 있는 코일형태의 롯드에 소형콘을 연결시킨 해양콘관입시험기를 나타내고 있다.

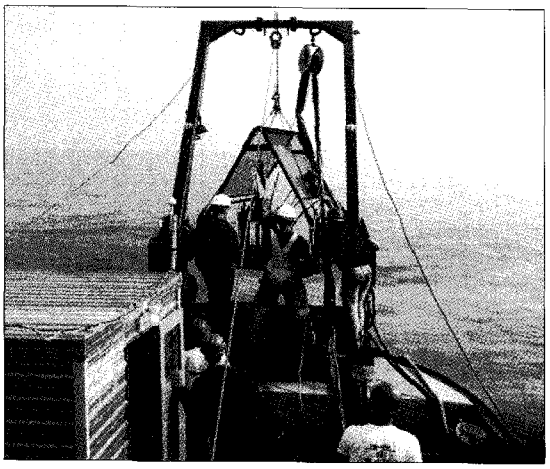

그림 6. 소형콘을 이용한 콘관입시험기

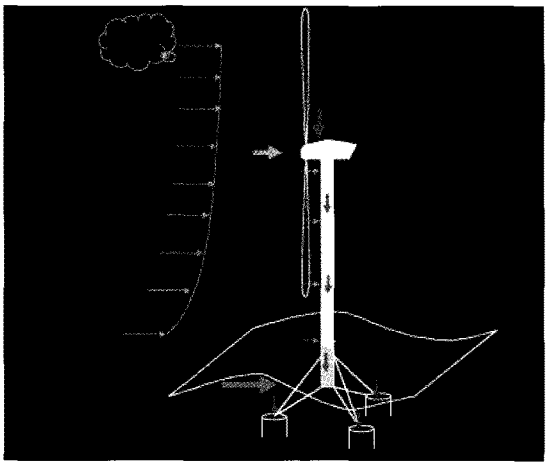

그림 7. 해상풍력발전의 하중 개념도

5. 해상풍력발전 하부기초 형식

해상에서는 시공시 필요한 중장비의 이동 및 작동이 매우 어렵기 때문에 육상과 달리 해상에 대형구조물을 설치하는 것은 쉽지 않다. 따라서 해상에 풍력발전기를 설치하는 것은 지반조사 및 기초구조물에 상당한 비용을 투자해야 한다.

해상풍력발전기는 보통 3~30m의 해저지반에 설치되며 설계 및 시공기술은 보통 육상의 기술에 근본을 두고 있다. 해상기초시스템은 일반적으로 모노타입, 중력식기초, 석션/버켓기초로 구분된다. 해상의 풍력발전기는 해상 특유의 외부하중에 견뎌야 한다. 즉, 혹독한 바람, 파도, 조류 및 지진 및 빙하중 등의 수평하중에 견디도록 설계되어야 한다. 해상풍력발전기는 수평하중으로 인한 풍력발전기의 하부기초 및 기둥에 상당한 모멘트 하중이 작용하게 되며 그림 7은 이러한 수평력이 해상풍력기에 미치는 하중전달개념을 보여주고 있다.

하부기초에 미치는 수평하중에 대한 정밀한 수치모델링기법과 과거에 경험하지 못한 5m 이상의 대규모의 해상풍력발전기의 기둥과 하부기초에 대한 설계기법이 개발되어야 한다. 해상풍력 발전 공사에서 전체 공사비 중 기초 공사비가 가장 큰 부분을 차지하고 있으며 해상 풍력 발전을 망설이게 하는 것 가운데 하나가 터빈을 설치하고 유지하는 비용이라고 할 수 있다.

EWEA(2009)의 보고에 따르면 풍력단지 설치에 있어 기초구조물 설치가 차지하는 비용은 육상의 경우 16%, 해상의 경우 32%(Support structure+Installation)인 것으로 조사되었다. 따라서 설계 단계에서 시공이 간단하고 신뢰성 높은 터빈을 설치하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 현재 대부분의 해상풍력 발전기의 기초 형식은 모노 파일이고 중력식도 적용되고 있다. 이 외에도 트라이포드, 재킷, 석션 파일 형식들이 적용이 가능하다. 각 기초의 특성에 대해서 정리를 하면 다음과 같다.

① 모노 파일

모노파일 기초는 해상풍력의 표준 형식으로 자리를 잡고 있다.

모노파일은 수심 25m까지 유용하게 쓸 수 있으며 기초 설치를 위해서 해저 지반을 정리하지 않아도 되고, 제작이 상대적으로 간단하며, 중력식과는 달리 세굴에 민감하지 않은 것으로 알려져 있다. 그러나 설치를 하기 위해서는 특수한 장비가 필요하고 지반에 호박돌 층이 있으면 항타를 해서 설치하기 어렵다. 수심이 깊은 경우 기초의 강성이 저하된다.

② 중력식 기초

자중으로 터빈이 위치를 유지할 수 있도록 한 형식으로, 콘크리트와 강재로 제작이 가능하고 케이슨으로도 설계할 수 있다. 콘크리트 중력식은 거대한 중량을 옮기는데 비용이 많이 든다. 강재로 만든 중력식 기초는 현장으

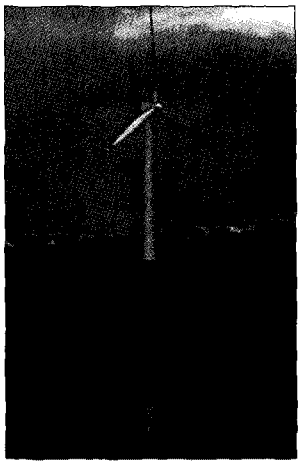

그림 8. 모노파일식 기초형식

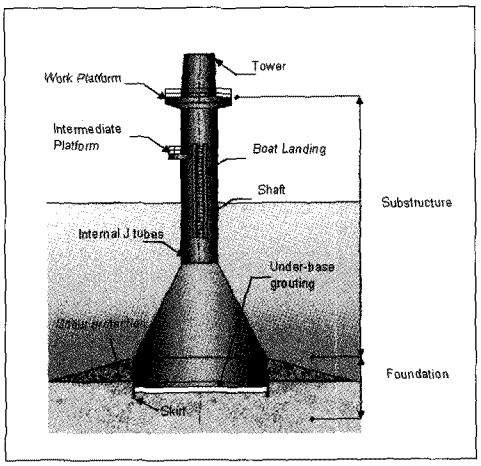

그림 9. 중력식 기초형식

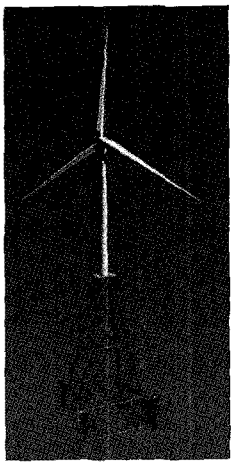

그림 10. 재킷식 기초형식

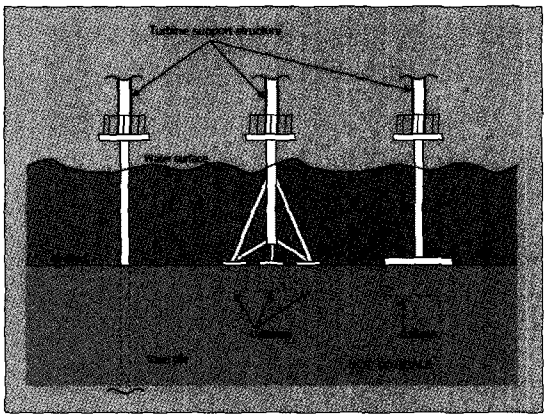

그림 11. 석션/버켓 기초형식

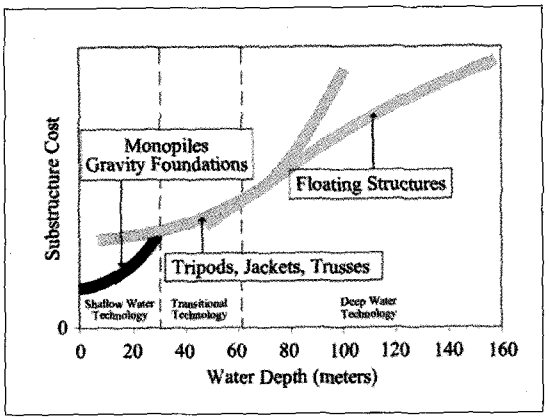

그림 12. 수심-구조물 공사비에 따른 기초형식 검토

로 옮긴 후 내부 속채움을 시행하므로 설치와 운반이 용이하며 주로 수심이 얕고, 바닥이 단단하고 강도가 좋은 지반에 적용한다. 기초의 윗부분을 기울어진 원뿔형으로 만들어서 부유체의 충격력을 감소시키기도 한다. 일반적으로, 수심 10m까지 유용하게 적용할 수 있고, 20m가 넘는 지역에는 알맞지 않다. 기초를 거치할 수 있도록 해저 지반을 정리해야 하며 세굴보호공을 반드시 적용해야 하므로 토사의 이동이 많은 경우 적용하는데 어려움이 많다.

③ 트라이포드/재킷 구조

트라이포드 또는 재킷 구조의 기초는 해상 원유 개발에서 사용하던 것을 적용한 것이다. 이 형식은 수심 7m에도 적용이 가능하고 30m 이상의 수심에도 적용할 수 있으며 해저 지반 처리를 거의 하지 않아도 기초를 설치할 수 있다. 모서리에 있는 튜브(Corner tube)를 통해 파일을 항타하고 콘크리트로 충진을 한다. 그러나 호박돌 층이 있는 경우 설치하기가 어렵고 브레이스 부재들로 인해 선박의 접근이 어렵다.

④ 석션/버켓 기초

석션 파일은 현재 부유 구조물의 앵커로 널리 사용되고 있고, 적은 수의 고정식 구조물기초로도 사용되어 왔다. 해상 풍력 발전에서는 모노 석션 파일과 트라이포드 석션 파일 형태로 사용이 가능하다. 석션 압력을 사용해서 설치가 이루어지므로 중장비가 필요하지 않다. 그러나 설계와 시공 경험이 많지 않은 약점이 있다. 이 밖에도 부유식 형태가 있다. 50~100 m 수심에 적용할 수 있도록 설계가 되지만 안정성 문제로 파고가 낮은 지역에 국한된다. 계

류 시설로 인해 설치비용이 증가하고, 인근 지역의 어업 및 항해가 어렵게 된다.

그림 12는 수심에 따른 공사비증가 및 이에 따른 기초형식의 경제성 관계를 나타내고 있다. 20m까지의 낮은 수심구간에서는 중력식기초나 모노파일 기초가 가장 경제적인 기초형식이며, 20~60m까지는 트라이포드, 재킷, Truss 형식의 기초가, 60m 이상의 대심도 구간에서는 부유식 형태의 기초가 가장 경제적인 형식으로 나타나고 있다. 물론 이는 보편적인 경향에 대한 분석으로 해상풍력단지의 최적의 기초형식은 수심, 조류, 파고, 지형 등 해상조건과 운송을 위한 바지선 용량, 크레인 용량, 항타장비 등 해상장비의 여건에 따라 달라질 수 있으므로 종합적인 분석 및 경제성검토가 필요하다.

6. 말뚝기초의 지반설계정수

6.1 마찰말뚝의 지지력 산정

대심도 연약지반에 시공된 말뚝은 연약지반의 심도가 매우 깊어 말뚝선단에 지지층의 없는 부상말뚝(Floating pile)과 연약층을 통과하여 말뚝 선단이 지지층에 도달한 경우가 있다. 이 두 가지 모두 말뚝 극한지지력의 대부분이 말뚝과 지반과의 마찰력에 의해 발생한다. 마찰말뚝의 연직지지력과 주면마찰력을 구하기 위하여 여러 가지 방법이 사용되고 있으나 각각의 방법에는 장 · 단점을 가지고 있다. 또한 말뚝의 시공법이나 재질에 따라 지지력을 평가하기 위한 방법도 달라진다. 특히, 말뚝의 지지력 산정을 위해 사용되는 설계정수들은 시험방법, 해석방법에 따라 그 편차가 심하다. 그러므로 대심도 말뚝설계 및 시공에 대한 경험이 부족한 경우에는 설계정수를 어떻게 선정할 것인지 어떤 해석법을 적용할지 판단하기가 매우 어렵다. 따라서 현장 기술자도 쉽게 적용할 수 있는 표준화된 설계정수 산정기술 개발이 필요하며 이를 통해 설계정수나 말뚝의 지지력 산정시 발생할 수 있는 불확실성을 최소화해야 된다. 대심도 연약지반에 시공된 말뚝의 지지력을 산정하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 방법은 다음과 같다.

- α법 (Tomlinson, 1987)
- β법 (Esrig & Kirby, 1979)
- λ법 (Vijayvergiya & Focht, 1972)
- Nordlund법(Nordlund, 1963)
- Nottingham&Schmertmann법(CPT, 1975)
- Schmertmann법 (SPT, Sharp, 1987)

6.2 마찰말뚝의 설계 변수

대심도 연약지반에 관입된 마찰말뚝을 설계하는 경우, 전응력 해석법과 유효응력해석법을 적용할 수 있다. 이들 방법도 각각 장점과 단점을 가지고 있으며, 정확한 지지력을 구하기 위해서는 지지력 산정에 필요한 신뢰성 있는 설계정수의 산정이 매우 중요한 요소이다. 말뚝의 지지력 산정에 사용되는 대표적인 파라메타는 다음과 같다.

- N_c 파라메타
- 선단 지반 점착력, c_b
- 주면 점착력, c_s
- 점착력 계수, α
- 토압계수
- 연직유효응력 등

특히, 대심도 연약지반에 시공된 마찰말뚝의 경우, 지반과 말뚝과의 상대변위로 인하여 부주면마찰력이 발생할 수 있다. 이러한 부주면마찰력은 말뚝에 하중을 가하는 것과 같은 작용을 하게 되어 말뚝의 지지력을 감소시키는 원인이 된다. 또한, 부주면마찰력의 크기는 말뚝자체의 재질강도를 초과할 수 있으므로 정확한 부주면마찰력을 구하기 위한 설계정수 산정기술은 마찰말뚝 설계시 고려해야할 중요한 요소이다.

6.3 지반설계정수 선정절차 수립

대부분의 대심도 연약지반은 다른 퇴적환경에서 형성되었다. 그러므로 흙의 물리적 특성이 위치마다 달라지는데 이러한 특성은 비교적 균질한 흙에서도 존재한다. 이

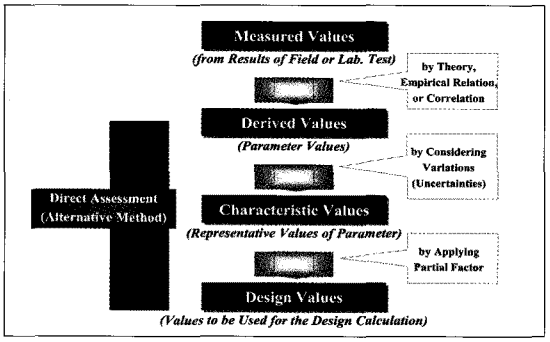

그림 13. 신뢰성 지반설계정수 결정과정

러한 흙 특성의 변동성은 지반구조물 해석시 불확실성을 발생시키는 주요한 원인이 되며 지반특성을 대표하는 정확한 설계정수를 선정하는 것을 어렵게 한다. 지반구조물의 설계시 사용되는 설계정수는 설계자에 의해 선정된다고 할 수 있다. 그러나 어떻게 설계정수가 선정되는지, 측정된 설계정수를 얼마나 보수적으로 적용해야 하는지는 설계기준이나 규정에 거의 논의되지 않고 있다. 그림 13은 유로코드 7에서 제시된 설계치를 얻기 위한 과정으로 지반설계정수를 구하기 위하여 측정치(Measured value), 추론치(Derived value), 특성값(Characteristic value) 및 설계치(Design value)의 4가지 단계의 값을 언급하고 있다.

대심도 연약지반에 시공된 마찰말뚝의 지지력, 침하, 수평변위 등을 구하기 위한 설계정수 산정식에도 지반의 불확실성이 고려된 최적의 설계정수 산정기법의 개발이 요구된다고 할 수 있다.

국내의 연약지반 조사 역사도 30여년 이상이 되었으나 대심도 연약지반 특히 대수심 연약지반에 대한 기술 인력이나 장비 등은 매우 취약한 형편이다. 특히, 대심도 기초구조물의 최적설계 및 시공을 위해서는 신뢰성 있는 지반정수를 얻는 것이 매우 중요하므로 첨단 지반조사기술의 신속한 개발 및 보급이 필요하다고 할 수 있다.

7. 해상풍력발전의 하부기초의 설계 및 시공의 해결과제

해상풍력발전은 육상풍력발전기와 마찬가지로 바람을 이용해 터빈을 움직임으로써 발전하게 된다. 따라서 육상발전기와 동일한 기술을 적용해 20년 정도의 수명을 보장하고 육상보다는 대용량의 발전기가 적용될 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 해상풍력 발전의 경우, 해저에서 이루어지므로 기초공사가 매우 중요하다. 일반적으로 수심 30m이하에서는 콘크리트 고정타입과 모노폴리타입이, 수심이 깊은 20~80m까지는 자켓타입과 삼각대(Tripod) 고정 방식이 사용된다. 그 이상의 수심일 경우에는 고정이 어렵기 때문에 보통 부유식 타입이 고려될 수 있으나 기술적 어려움이 상존한다.

해상에서 설치과정은 일반적으로 연근해는 비교적 수심이 얕고 연약한 지반으로 구상되어 단일지주형 모노파일(monopile)을 설치예정 위치로 가져와서 바다 밑바닥(seabed)에 앉히고 수면 바로 위까지 올린다. 이 단일지주는 직경이 4~5m에 달하는 강관말뚝(steel tube)으로써 터빈과 타워를 지지한다. 터빈과 타워를 연결할 중간재(transition piece, TP))를 강관 위에 끼우고 강관내부는 그라우팅으로 채우는 공법을 사용한다. 중간재(TP)의 높이는 약 20m이며 터빈과 타워의 플랫폼을 형성한다.

잘 알려진 데로 해상풍력발전의 하부기초로 많이 활용되는 모노말뚝은 여러 가지 단점을 가지고 있으며, 그 단점의 핵심은 바로 중간재(TP)와 단일지주말뚝간의 접촉면에 있다. 단일지주 말뚝내부는 그라우팅 되어 있으며 중간재와 단일지주간의 접촉면에서 발생하는 전단력은 밑바닥에 전달되지만, 타워의 미끄러짐을 지주내부의 브래킷만이 저항하고 있기 때문에 최근에 상당한 숫자의 그라우팅부분의 실제 파괴사례가 보고되었다. 이러한 기술적 문제를 해결하기 위하여 지주를 원뿔형으로 디자인하는 것이 선호되고 있으나, 실제 제작자들은 각각 다른 방식의 임시방편적인 기술로 대신하고 있는 것으로 알려져 있다.

그리고 깊은 수심에서의 자켓타입은 해상풍력단지 보유국인 유럽 및 미국 등지에서 가장 많은 관심을 보이고 있는 기초이다. 이 방식은 자켓식 구조물로 지지하고 말뚝 또는 파일로 해저에 고정하는 방식이다. 부유식 타입은 바다 표면에 발전기를 띄우는 기술로 미래 심해상 풍력발전에 필수적이지만 앞으로 10~15년 후에 상용화 될 것으로 보인다.

표 1. 해상풍력 설계기준(신윤섭, 2009)

구분	국내 항만 및 어항 설계기준 (2005)	일본 해상 풍력 발전의 기술 매뉴얼 (2001)	API RP2A (1993, 2000)	DNV-OS-J101 (2007)	GL (2005)	IEC 61400-3 (2008)
목적	항만시설 설계서	해상풍력발전기 전용설계서	해상구조물 범용설계서	해상풍력발전 전용설계서	해상풍력발전 전용설계서	해상풍력발전 전용설계서
극한하중	불명확	파랑: 30-50년 풍속: 50년	100년 주기	50년주기	50년주기	50년주기
하중사례수	불명확	2개	불명확	31개	44개	33개
한계상태*	미포함	미포함	ULS SLS	ULS SLS	ULS SLS	ULS SLS
해석방법	허용응력설계	허용응력설계	한계상태설계 허용응력설계	한계상태설계	한계상태설계	한계상태설계
지지력 계산	항만 및 어항설계서의 지지력 산정식	일본 항만시설기준의 지지력 산정식	API 방법	API 방법: 다른 공인된 표준	API 방법: 다른 공인된 표준	ISO 19902

* 해상 풍력발전기 전용 설계서에서는 피로한계상태(FLS)를 조사하도록 되어 있으나 지반과 관련된 해상 기초구조물에서 반복하중에 대한 영향은 극한상태(ULS)에 포함하여 설계한다.

8. 결론

최근 정부의 신재생에너지 의무할당제 도입방침으로 가장 먼저 영향을 받는 발전사업자의 움직임이 해상풍력 발전으로 향하고 있으며 해상풍력은 육사풍력에 비해 민원이나 발전 용량, 대규모 단지조성 가능 등의 많은 이점이 있으나 환경문제와 육지와의 연결 계통문제점 등 여러 가지 문제점들도 안고 있으며 지반공학적인 측면에서 특히 대심도 기초지반조사 및 시공적인 측면에서도 해결해야할 많은 과제들을 안고 있다. 따라서 향후 추진할 연구과제는 해외기술의 모방에서 벗어나 독자적으로 국내 풍력발전 설치를 위한 해상타워 플랫폼 설치를 위한 하부기초구조물 설계시 문제 해결과 해상에서의 시공 기술개발, 그리고 국내 해저지반 상세조사 기술 확보가 될 것으로 판단된다.

중장기적으로는 국내 해상풍력발전기의 신뢰성 설계기준의 개발이다. 현재, 국제적으로 모든 구조물의 설계기준이 한계상태설계법을 근간으로 한 신뢰성이론의 접목은 필수적인 사항이므로 우리나라 현실에 적합한 신뢰성 설계기준 개발은 시급히 추진할 과제이다.

참고문헌

1. 한국해양연구원(1999), "지구환경 변화사와 해저자원", 해양과학총서 5.p. 120~145.
2. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M.(1996), Cone penetration testing in geotechnical practice, Blackie Academic & Professional, 312p.
3. Monahan, I. L. and Monahan, D., 2001,The quality control cycle in the age of electronic chart production, contracted work and ISO certification :United States Hydrographic Conference Preceeding, CDROM. 18P.
4. 日本土質工學會 (1994), "海の構造物と基礎", 土質工學ライブラリー 39, 320p.
5. 신윤섭(2009), 해상풍력발전 전망과 기초기술동향 방향, GS건설 연지회 학술포럼, 발표자료, 2009.12.11.