



해상풍력 파일지지 콘크리트 기초구조물(MCF)

Multi-Piled Concrete Foundation for Offshore Wind Turbines

김현기 Hyun-Gi Kim
(주)에이스이엔씨 기술연구소
소장

전혜관 Hye-Kwan Jeon
(주)에이스이엔씨
대표이사

김기두 Ki-Du Kim
건국대학교 사회환경시스템공학과
교수

1. 머리말

풍력 발전 분야는 녹색성장, 친환경, CO₂저감과 같은 키워드와 접목되어 전세계 신재생에너지 투자의 약 45%를 차지하고 있으며, 연평균 20% 이상의 고성장 산업으로 주목받고 있다. GWEC의 대륙별 시장예측¹⁾에 따르면 향후 아시아 시장의 성장이 대폭 진행될 것으로 예측되며, 국내에서도 신재생에너지 의무할당제(RPS, Renewable Portfolio Standard)가 시행되면서 2020년까지 42.5조원의 투자로 신재생에너지 11.2GW 개발계획이 발표²⁾되었고, 그 중 58.2%인 6.7GW를 풍력에너지로 개발할 계획이다. 특히, 서남해 해상풍력 2.5GW 개발과 함께 남해안 해역의 1GW급 해상풍력단지 추가발굴을 진행하여 국가전략 사업으로써 글로벌 3대 해상풍력 강국으로의 도약을 목표로 하고 있다.

해상풍력은 터빈보다 해상기초 구조물, 타워, 케이블시공 등의 사업비 비중이 상대적으로 높다. 지지구조물 및 기초의 제작과 설치비용이 전체 비용의 최소 30%를 차지하며, 수심이 깊어지면 50%에 이를 정도로 높아 지게 된다. 따라서 기술개발을 통해 경제성이 높고 경쟁력 있는 지지구조를 개발할 경우 파급효과가 육상풍력에 비해 상대적으로 크다.

단지의 규모가 커지고 수심이 깊어지면 경제성을 확보하기 어려워 구조적 안정성을 보장하면서도 경제적인 재료인 콘크리트를 이용한 지지구조물이 필요하다. 또한, 강재와 콘크리트를 이용한 부재의 최적배치는 자중을 줄이고 시공성을 확보할 수 있는 최적의 대안이 될 수 있다³⁾.

본 기사에서는 모노파일 및 중력식과 같은 기존 지지구조물이 갖는 단점을 보완하여 수심과 지반조건의 제약 없이 광범위한 적용이 가능하도록 강재 샤프트와 원추형 콘크리트로 이루어진 파일지지 콘크리트 기초구조물(Multi-Piled Concrete Foundation, MCF)에 대해 소개하고자 한다.

2. MCF 기초구조물 개요

2.1 콘크리트 지지구조 개발 동향

최근의 해상 풍력 발전 동향을 보면, 대용량 터빈의 개발과 함께 경제성 확보를 위한 대규모 단지조성 및 대



그림 1. 중력식 콘크리트 지지구조 개발 사례

수심 지역으로의 이동이다. 따라서, 강재를 이용한 지지구조물은 경제성을 확보하기 어려워짐에 따라 구조적 안정성을 보장하면서도 경제적인 콘크리트를 이용한 지지구조물이 주목받고 있다. <그림 1>은 시공되거나 제안된 중력식 기반의 콘크리트 지지구조 형식을 나타내는데, 유럽을 중심으로 콘크리트와 강재를 조합한 여러 가지 형식의 지지구조 연구개발이 진행되고 있다.

자켓 구조는 다수의 강재가 용접으로 연결되어 피로하중에 취약하고 대수심에 적용할 모노파일의 경우 직경이 커져 시공이 쉽지 않다. 중력식의 경우에도 지반조건의 영향이 크게 작용하고 과도한 자중으로 인해 비경제적인 요소들이 발생하게 된다. 이러한 단점들을 보완하여 경제성과 안정성을 확보한 지지구조 형식이 파일지지 콘크리트 기초구조물(MCF)이다.

2.2 MCF의 구성

MCF의 기본단면을 설정하기 위해 5 MW 터빈용량을 기준으로 최근 적용된 서남해 해상풍력 기초구

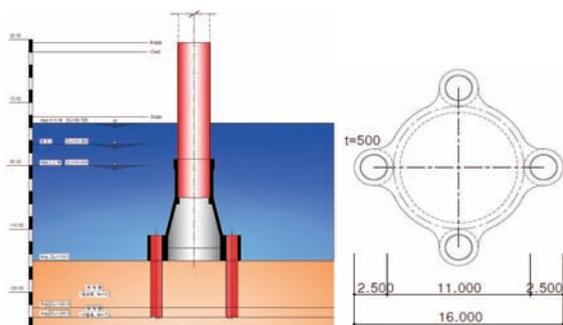


그림 2. 해양 조건을 적용한 기본 단면

조물 기본설계 보고서(2013)⁴⁾에 따라 1단계 실증단지에 해당되는 전북 부안 위도~전남 영광 안마도 해상 조건(수심 15 m)을 적용하였다.

MCF 지지구조는 해저 지반으로부터 최하단의 기초부까지 콘크리트재료를 이용하였고, 타워기초 혹은 플랫폼까지는 모노파일과 유사한 강재 샤프트(shaft)를 채용하였다.

<그림 2>는 기본단면을 나타낸다. 샤프트의 직경은 상부하중의 전달을 위해 타워 기초부 직경 5.6 m와 동일하고 원추형 콘크리트부와 합성되어 연결되는 부분은 텐던의 정착을 고려하여 7.0 m로 결정 되었다. 샤프트와 콘크리트 연결부는 직경과 같은 수준의 길이 6.0 m로 설정하여 콘크리트부를 강체로 보았을 때 충분한 지지력이 확보되도록 하였다.

원추형 콘크리트의 기본두께는 0.5 m이며, 원형에서 원추형으로 단면이 커지는 부분에 응력이 집중되므로 테두리보(ring beam)가 형성되어 있고, 강재 샤프트와 콘크리트 연결부 및 파일과의 연결부는 전단연결재를 이용하여 합성시켰다.

2.3 MCF의 특징

서남해 해상풍력 기초구조물 기본설계⁴⁾에 따르면, 시범단지에 적용되는 공사비는 터빈의 가격이 5 MW기준으로 약 80억원으로 예상되며, 지지구조로 자켓 기초를 적용할 경우 1기당 약 88억원이 소요되는 것으로 알려져 있다. 해상설치 공사방식이나 파일기초의 시공비를 자켓식과 동일하게 가정하였을 때 <그림 3>과 같이 MCF 기초구조물의 개략

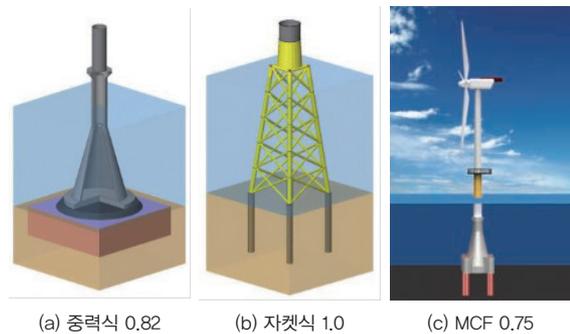


그림 3. 소요되는 공사비의 상대비교

공사비는 총공사비 기준으로 자켓식의 75% 정도로 산정되었다.

한편, 해상풍력 지지구조는 터빈의 작용으로 인한 동적거동 평가가 구조물의 적정성 검토나 설계를 결정짓는 중요한 요소가 된다. 일반적으로 강재구조물 설계시 로터의 회전주파수나 블레이드의 통과주파수 영역을 회피하기 위한 노력이 필요하나 중력식이나 MCF와 같이 콘크리트를 이용한 지지구조는 재료특성이나 질량에서 기인한 고유진동수의 범위가 터빈의 고유진동수 범위를 훨씬 넘어서는 강성영역에 존재하게 되어 우수한 진동특성을 보인다.

MCF 지지구조는 <표 1>과 같이 공사비 절감과 시공성의 향상을 가져올 뿐 아니라 구조적으로도 안정성이 우수한 형식이며, 암반의 심도가 깊은 지역에도 폭넓게 적용할 수 있다. 또한, 해상변전소를 비롯하여 다양한 해양구조물에도 활용할 수 있다.

3. MCF 구조해석 및 설계

3.1 3차원 해석 모델링

MCF와 같이 하단에 원추형의 두꺼운 콘크리트 지지구조를 갖는 형태는 등가의 빔요소를 이용한 해석방법이 적절하지 않다. 본 구조물의 해석에는 파랑하중에 의한 3차원 해석이 가능한 입체요소를 정식화하여 개발된 프로그램 XSEA를 사용하였다. 해양구조물 전용해석 프로그램 XSEA⁵⁾는 범용 구조물 해석 프로그램인 XFINAS로 부터 파력, 풍력 등 해양환경하중의 적용이 가능도록 최근 건국대학교에서 개발되었다. MCF 설계단면력을 구하기 위한 해석에는 XSEA에 탑재된 뼈대요소와 3차원 솔리드 요소가 이용되었다. <그림 4>는 3차원요소를 이용

표 1. MCF 지지구조의 특징

특징	내용
저진동, 피로수명 증대	발전기 손상방지 및 내구성향상
중공의 원추형 형상	자중저감/부유식 운송(경제성향상)
콘크리트 재료 이용	제작비 절감
파일기초	연약지반 시공 가능
부식, 해조류 침식	강재 대비 우수
친환경 구조물	해양생물 서식지 제공

한 모델링을 나타낸다.

터빈하중은 NREL모델 5MW를 기준으로 UPWIND 프로젝트(Final Report WP4,2)⁶⁾에서 GH Bladed로 해석된 데이터를 사용하였다. 극한한 계상태(ULS)와 사용한계상태(SLS)에 대해 하중계수를 적용하였고, 하중작용각도는 0°와 45°를 고려하였다.

3.2 준정적(Quasi-Static) 해석

공력해석에 따른 터빈하중(타워상단)과 해양환경 하중에 대한 사용한계상태(SLS) 해석결과 타워상단의 변위는 하중조합 3번에서 최대 변위가 발생하였으며, 0°의 경우 0.939m, 45°일 경우 0.934로 DNV-J101 규정에 따른 허용 처짐 L/100 = 1.02m 이하로 나타났다. 두 방향의 발생 변위는 비슷한 경향을 보였고, 작용각도 0°일 때 약간 더 크게 나타났다.

극한한계상태(USL) 해석결과 <그림 5>와 같이 콘크리트부에서의 최대 압축응력은 13.548 MPa, 인장응력은 11.380 MPa로 원추형 상단부에서 나타났으며, 텐던을 이용한 프리스트레스(prestress) 도입이 필요한 것으로 나타났다. 강연선(15.2mm-22)을 30개 적용시 허용응력 이내로 제어되어 해양환

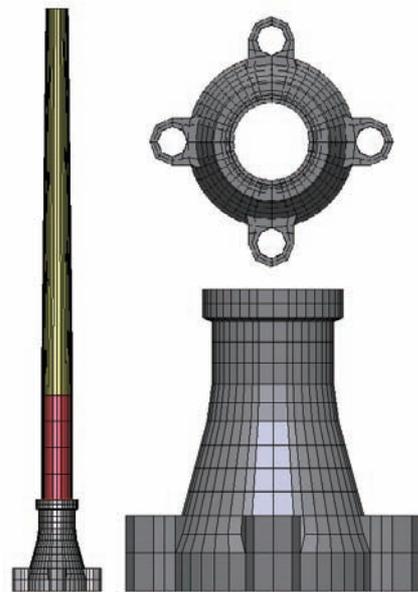


그림 4. 3차원 요소를 이용한 모델링

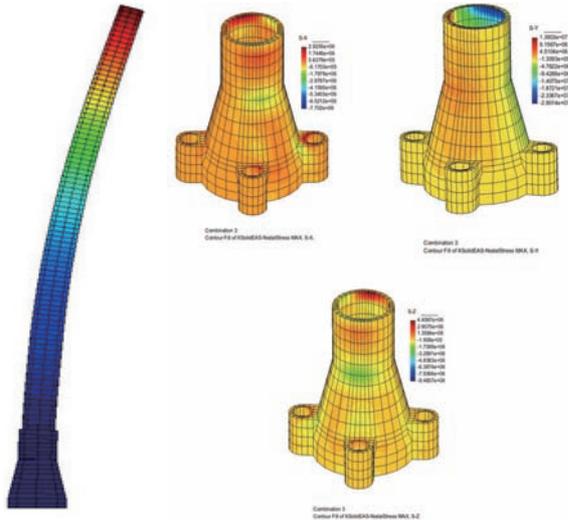


그림 5. XSEA를 이용한 3차원해석 결과

경 하에서 가해지는 하중에 대해 충분히 안전측으로 설계 되었다.

3.3 고유진동수 해석

해상풍력발전 지지구조물의 고유진동수 해석에서 일반적으로 2차, 3차 모드는 실제 구조물에서 일어나기 힘들기 때문에 1차 모드의 평가가 가장 중요하다.

〈그림 6〉은 모드별 형상을 나타낸다. 1차 모드의 고유진동수는 0.970 Hz로 나타나 로터의 회전진동수(1P)와 블레이드 통과주파수(3P)영역을 충분히 벗어난 강성영역(stiff-stiff)에 위치하여 충분히 안전한 강성과 진동특성을 갖는 것으로 평가되었다. 일반적으로 강재를 이용한 자켓이나 트라이포드의 경우에는 고유진동수가 연강성(soft-stiff) 영역에 위치하도록 설계하게 된다.



그림 6. 모드별 형상

4. 해상운송 및 설치

MCF 지지구조의 콘크리트부 자중이 1천톤 이하로 계획되어 해상설치 방안으로 해상크레인과 바지선을 이용한 방법을 우선 검토할 수 있다. 〈그림 7〉과 같이 프리 파일링(pre-piling) 시공 후 바지선에 의한 운송이 이루어지고, 기 시공된 파일 상단에 안착시키게 된다. 파일과 강재슬리브 사이에는 전단력 확보를 위한 그라우팅 작업이 실시되고 수직도 조절을 병행 할 수 있다. 국내의 경우 자켓구조물과 같은 강재 해양구조물의 시공 후 파일시공 경험이 많아 강재슬리브 내부 유격이나 그라우팅 방법에 따라 포스트 파일링(post-piling)도 고려할 수 있다.

한편, 원추형 콘크리트 형상 내부가 비어 있는 점을 이용해 바닥면 하단에 목재 혹은 적절한 재료를 이용한 임시용 부재를 이용하여 폐단면을 형성하거나 부유체를 이용하면 플로팅 운송도 가능하다.

5. 맺음말

매년 터빈숫자의 증가에도 불구하고 해상풍력발전 산업은 경제성이 문제가 되어왔다. 동역학적 거동이 지배하는 해상풍력 구조물에 있어서 안정성이 탁월하고 충분한 경제성을 확보할 수 있는 지지구조 형식에 대한 연구개발이 필수적인 이유이다. MCF 지지구조는 기존의 중력식이나 강재 자켓식의 단점을 보완한 경제적인 형식으로, 서남해안과 같은 연



그림 7. 단계별 해상 설치 과정

약지반과 수심이 깊은 지역에도 폭넓게 적용할 수 있는 대안이 될 수 있다. 본 기사에서는 타당성 설계를 수행한 내용과 제작 및 시공법에 관한 내용을 중심으로 소개하였다. 향후 취약부로 판단되는 연결부에 대한 상세해석과 실험적 연구가 추가적으로 수행되어야 하며, 다양한 해상설치 방법에 대한 축소모형 실험과 시뮬레이션이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 점차 커지고 있는 아시아 시장과 빠르게 변하는 시장의 트렌드를 볼 때 실증을 통한 Track Record를 확보한다면, 세계시장 진출과 기술 선점에 어려움이 없을 것으로 전망된다. 

담당 편집위원 : 문도영(경성대학교) dymoon@ks.ac.kr

참고문헌

1. GWEC, 『Global Wind 2011 Report』, 19-21, 2012.
2. 한국전력, 『한전 및 발전 6개 2020년까지 42,5조원 투자로 신재생에너지 11.5 GW 개발』, 보도자료, 2014.
3. 김현기, 『해상풍력발전 하이브리드 지지구조의 정동적 거동특성 연구』, 건국대학교대학원 박사학위논문, 2013.
4. 한국해상풍력(주), 『서남해 해상풍력 기초구조물 기본설계 보고서』, 2013.
5. 건국대학교, Nonlinear dynamic analysis, www.xfinas.com, 2012.
6. W.De Vries, 『Support Structure Concepts for Deep Water Sites, Final Report WP4.2』, TU-Delft, 2011.



김현기 소장은 건국대학교 사회환경시스템공학과에서 해상풍력발전 지지구조에 관한 연구로 박사학위를 취득하였다. (주)신성엔지니어링과 (주)동호에서 13년간 근무하면서 해상 교량설계와 R&D를 담당하였고, 2014년부터 (주)에이시엔씨의 기술연구소장으로 재직 중이다. 주 관심 연구 분야는 저비용 해양구조물 설계 및 시공기술 등이다.
khk2696@nate.com



전혜관 대표이사는 삼성물산 건설부문, 남원건설엔지니어링, (주)인터컨스텍에서 교량 및 토목구조물관련 설계 및 시공, R&D 등을 담당하였고, 현재는 PSC거더 신기술인 '변단면 PSC-빔' 개발 및 시공을 전문으로 하고 있는 (주)에이시엔씨의 대표이사로 지속적인 구조물관련 기술개발을 진행하고 있다.
hkj444@daum.net



김기두 교수는 영국 Imperial College, London의 토목공학과에서 구조공학 박사학위를 취득한 후 삼성중공업 해양사업본부, 한국시설안전공단 등의 근무경력을 거쳐 건국대학교의 사회환경시스템공학과 교수로 재직하고 있다. 현재 한국강구조학회 부회장 및 대한토목학회 해상풍력 및 해양 플랜트 구조 위원장을 맡고 있으며, 해양 실무 경험을 바탕으로 저비용 해상풍력 지지구조물의 개념 설계 및 관련 소프트웨어의 연구개발에 집중하고 있다.
kimkd@konkuk.ac.kr