



03

해상풍력 콘크리트 하부구조 연결부

Tower-Support Connection on Offshore Concrete Wind Energy Substructures

김지환 Jihwan Kim
고려대학교
건축사회환경공학부 연구교수

최국권 Gukgwon Choi
고려대학교
건축사회환경공학부 석사과정

지광승 Goangseup Ji
고려대학교
건축사회환경공학부 교수

1. 머리말

1.1 해상풍력 산업

아시아와 유럽 국가들의 주도로 에너지 수요 급증과 온실가스 저감을 위한 신재생 에너지 산업이 집중적으로 육성되고 있다. 그 중 해상풍력산업은 발전을 위한 부지확보가 양호하고 대규모 발전단지조성이 가능하며, 풍부한 에너지원으로 인해 경제성 및 친환경성이 우수한 신재생 에너지 산업으로 평가받고 있다.

세계 최대의 해상풍력 국가인 영국은 2020년까지 전체 전력의 25%를 해상풍력으로 공급할 계획이며, 덴마크는 '2050년 화석 연료 제로화' 선언과 국가 전력수요의 24%를 해상풍력으로 공급하기 위한 로드맵을 마련하였다. 아시아에서는 중국이 2020년까지 전체 발전설비 용량의 4%대로 확대될 계획으로, 총발전설비 용량이 150GW에 이를 전망이다. 우리나라도 세계적인 흐름에 발맞추어 2010년 11월 '해상풍력 발전 산업 추진 로드맵'을 발표하고, 현재 2.5GW 규모의 서남해 해상풍력사업을 추진하고 있다(그림 1). 국내의 침체된 조선 산업의 관련기술을 활용하여 해상풍력을 제2의 조선 산업으로 육성하고 글로벌 3대 해상풍력 강국으로 도약하기 위해 해상풍력사업이 진행 중에 있다.

1.2 해상풍력 지지구조물 연결부

해상풍력발전기는 크게 RNA(Rotor-Nacelle Assembly)



(a) 서남해 해상풍력단지 조감도



(b) 서남해 해상풍력단지 배치도

그림 1. 서남해 해상풍력 2.5GW 개발

라 불리는 발전기 구성물과 지지구조물(supporting structure)로 구분되며, 지지구조물은 타워(tower),

하부구조(substructure)와 기초(foundation)로 구성된다. 일반적으로 해상풍력발전기의 타워와 하부구조물 사이에는 타워에 작용하는 수평, 수직, 모멘트하중을 하부구조물에 전달하여 이를 분산시키는 연결부가 존재한다. 연결부는 타워와 하부구조물의 하중전달체계의 중요한 역할을 담당하는 비정형 구조물 형태로 설계시 <그림 2>와 같이 지지구조 형식과 연결방법 그리고 해양환경에 의한 요소(파도, 해류, 선박과의 충돌, 해조류의 영향, 염분 등)로 결정된다. 해상풍력발전기의 거대한 구조와 날개에서 받는 풍하중 등을 하부구조와 기초로 효과적으로 전달하고, 파도 및 해류 등 해양환경의 영향에서 해상풍력발전기를 안전하게 지지하기 위해서는 견고한 연결부 설계가 필요하다.

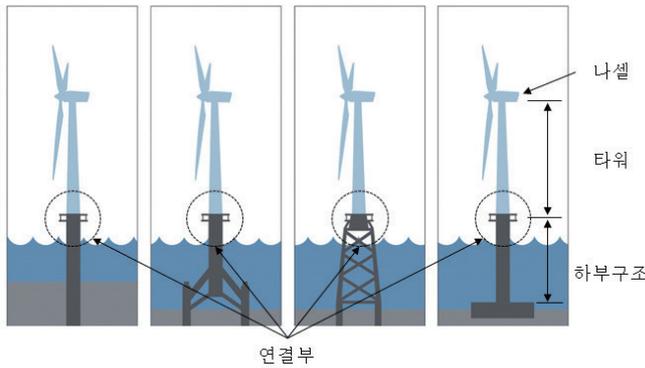


그림 2. 해상풍력 하부구조 연결부의 정의

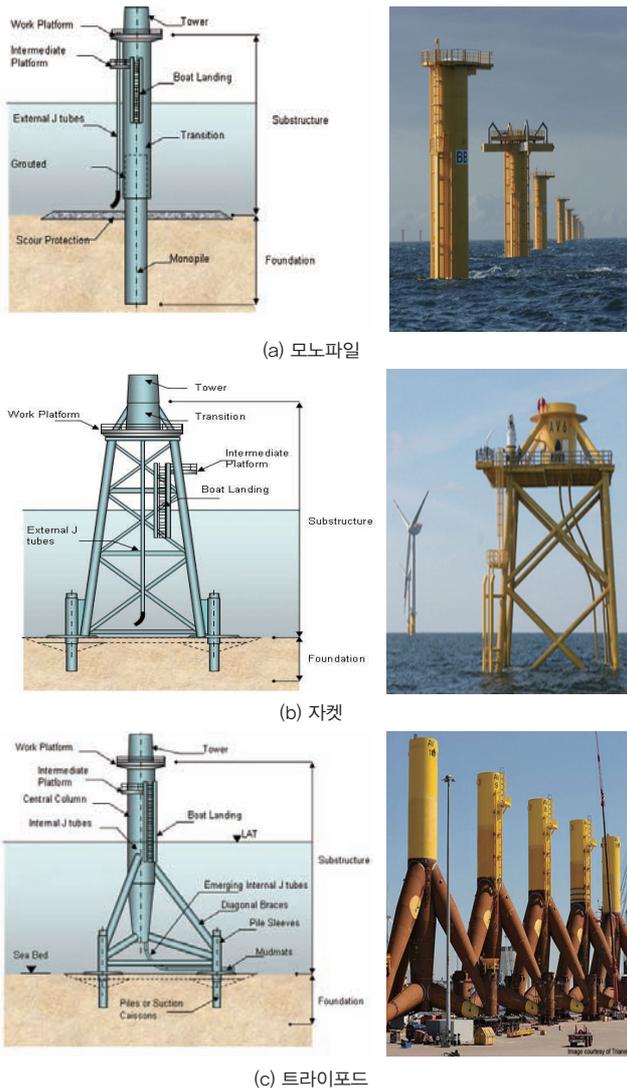


그림 3. 강재 하부구조와 트랜지션피스

현재 해상풍력발전을 위한 하부구조물은 모노파일(monopile), 중력식(gravity), 자켓(jacket), 트라이포드(tripods), 트라이파일(tripile), 석션파일(suction pile), 부유식(floating) 구조 형태가 주로 사용되고 있다. 국내에서 진행 중인 해상풍력용 지지구조의 연구·개발은 자켓과 모노파일 형식의 하부구조물로 모두 연결부가 강재(steel)의 트랜지션피스(Transition Piece; TP)로 제작되어 용접, 볼트, 그리고 모르타르 그라우팅을 이용하여 하부구조와 연결된다. 강재로 제작된 연결부는 인성이 크고 재료의 성질이 균일하고 경량인 장점이 있으나 혹독한 해양환경 내에서 염해에 의한 부식의 위험성이 있으며, 고가의 비용으로 인하여 경제성 확보가 어렵다. 이러한 강재의 재료적 단점을 해결할 수 있는 대안의 하나로 해상풍력 하부구조물과 연결부를 콘크리트로 제작하는 것이 제안되고 있다. 하부구조물과 연결부에 콘크리트 사용 시 높은 구조물 강성을 갖기 때문에 강재 사용에 비해 변형과 진동저감, 부식 저항성 증진, 피로강도 및 내구성이 우수하여 반영구적 수명을 가질 수 있다. 또한, 연근해 적용 시에는 강재에 비해 상당량

의 재료비 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 현재 국내에는 콘크리트 하부구조물 연결부에 대한 설계 및 시공 방법이 구축되어 있지 않다. 따라서 보다 경제적, 구조적으로 우수한 콘크리트 하부구조 연결부 개발을 위해서는 국내 해양환경 실정에 맞는 연결부 설계기술 개발이 우선되어야 한다.

본 고에서는 해상풍력 지지구조물의 연결부에 대해 살펴보고, 해상풍력발전 타워에 작용하는 하중을 콘크리트 하부구조물에 효과적으로 전달 및 분배할 수 있는 해상풍력 콘크리트 하부구조 연결부 설계개념을 소개하고자 한다.

2. 해상풍력 타워-하부구조 연결부 개요

2.1 연결부 형식

해상풍력발전기에 있어서 연결부란 나셀과 블레이드를 지지하는 타워로부터 하중을 하부구조물에 전하는 접합부이며, 일반적으로는 <그림 2>에서처럼 하부구조물의 상부가 그 범위이다. 이러한 연결부는 발전을 위한 하부구조의 형식과 재료에 따라 결정되며, 강재로 제작된 해상풍력 하부구조의 경우 일반적으로 연결부에 트랜지션피스를 설치하여 타워에 작용하는 하중을 지지구조에 전달하고, 콘크리트로 제작된 하부구조는 앵커볼트/앵커링과 강관이 구조 부재간의 하중 전달에 사용된다.

2.1.1 강재 지지구조에 적용되는 연결부 형식

해상풍력 발전을 위한 강재 하부구조 형식은 모노파일, 자켓, 트라이포드가 대표적이며, 이들 구조물들은 타워와 하부지지구조 사이에 <그림 3>과 같이 트랜지션피스를 설치하여 작용하중을 하부지지구조로 전달한다. 모노파일은 현재 가장 널리 쓰이는 하부구조 형식으로, 모노파일의 트랜지션피스는 상부 타워와 하부파일기초를 연결하고, 파일과 타워의 수직도를 조정/일치시키는 역할을 한다. 연결을 위해 기초파일과 트랜지션피스 사이에는 그라우트를 주입하여 일체화시키며(Princess Amalia, NL), 모노파일의 트랜지션피스 관련 기준은 DNV-

OS-J101에 제시되어 있다. 수심 30m 이상에 주로 적용되는 자켓 하부구조의 트랜지션피스 연결에는 현장시공에서의 신속성과 간편성으로 강구조물의 일반적 연결방식인 용접 연결이 적용되고 있다(Alpha Ventus, Germany). 트라이포드는 하부구조와 트랜지션피스가 일체형인 하부구조이다(Alpha Ventus, Germany).

2.1.2 콘크리트 지지구조에 적용되는 연결부 형식

해상풍력 콘크리트 지지구조는 해저면에 고정시키는 고정식과 바다에 띄우는 부유식 지지구조가 있으며, 현재 고정식 해상풍력 지지구조의 대표적 형식은 중력식 지지구조이다(<그림 4>). 풍력 타워에 작용하는 하중을 콘크리트 하부구조에 전달하기 위한 연결 방식은 <그림 5>와 같이 크게 앵커 문힘 방식과 강관 문힘 방식으로 나뉜다. 앵커 문힘 방식은 타워에서 기초로 작용하는 압축력이 베이스플레이트에 작용하고, 앵커의 인발력은 앵커링에 작용한다(<그림 5-(a)>). 앵커 문힘 방식의 경우, 특히 앵커링의 인발력에 의한 콘크리트의 콘 파괴가 설계

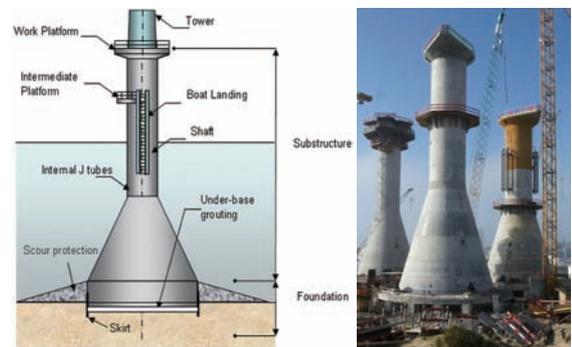
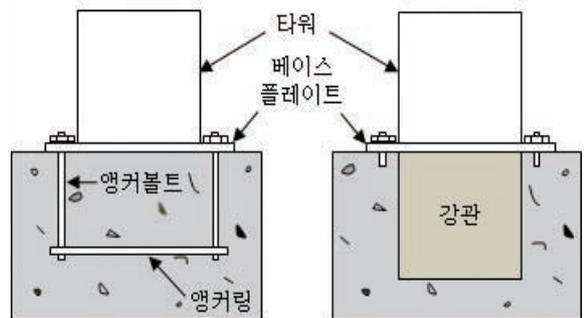


그림 4. 중력식 콘크리트 하부구조



(a) 앵커 문힘 형식 (b) 강관 문힘 형식

그림 5. 콘크리트 지지구조 연결부 형식

시 고려되어야 한다. 육상풍력 콘크리트 지지구조의 앵커볼트·앵커링 연결부에 관한 구조설계법은 일본 토목학회의 풍력발전설비 지지구조물 설계지침에서 규정하고 있으나 해상풍력 콘크리트 하부구조의 연결부 설계 방법에 대해서는 현재 적절한 설계기준이 제시되어 있지 않고 있다. <그림 5-(b)>의 강관 문힘 형식은 콘크리트 하부구조 상단 내부에 강관을 매입하여 타워에 작용하는 최대 모멘트에 <그림 6>과 같이 강관 매입부의 상단과 하단부에 작용하는 두 접촉력(contact pressure)과 수평·수직 방향의 마찰력에 저항하도록 하는 설계방법으로 이는 모노파일의 트랜지션피스 하중저항 메커니즘과 동일하며<그림 7>, 콘크리트 충전강관을 이용한 코벨과 파일캡 설계에 적용되고 있다(PCI). 일반적인 앵커볼트 연결에서는 콘크리트 파괴면 확보를 위해 지지면적이 충분히 확보되어야 하지만, 본 연결방식은 앵커연결에 비해 지지면적이 적게 소요된다. 그러나 타워에 작용한 하중을 하부구조로 안전하게 전달하고 경제적인 설계를 위해서는 강관의 두께, 매입깊이 그리고 강관 매입부의 상·하단부에 작용하는 두 접촉력의 응력 분포와 마찰력 결정이 중요하며, 접촉력 즉, 전단에 의해 연결부가 파괴될 경우 매우 취약적으로 구조물의 강도와 연성이 저하됨으로 강관 상·하단의 콘크리트 접촉부는 전단력에 대해 충분한 저항성능을 확보할 수 있도록 구조설계가 이루어져야 한다. 이러한 형식은 VICI Ventus사의 해상풍력 콘크리트 하부구조가 대표적이다<그림 8>.

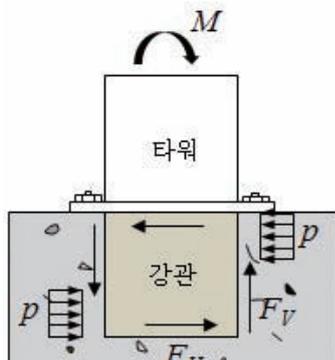
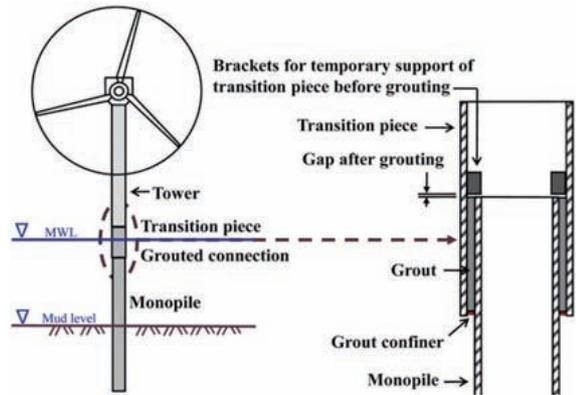
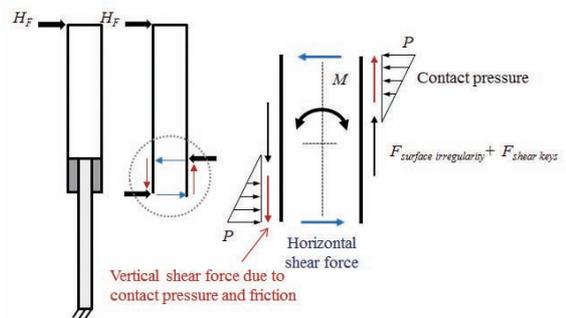


그림 6. 강관 문힘 형식의 하중저항 메커니즘



(a) Transition Piece 개념도



(b) Transition Piece 하중 전달

그림 7. 모노파일의 Transition Piece, DNV

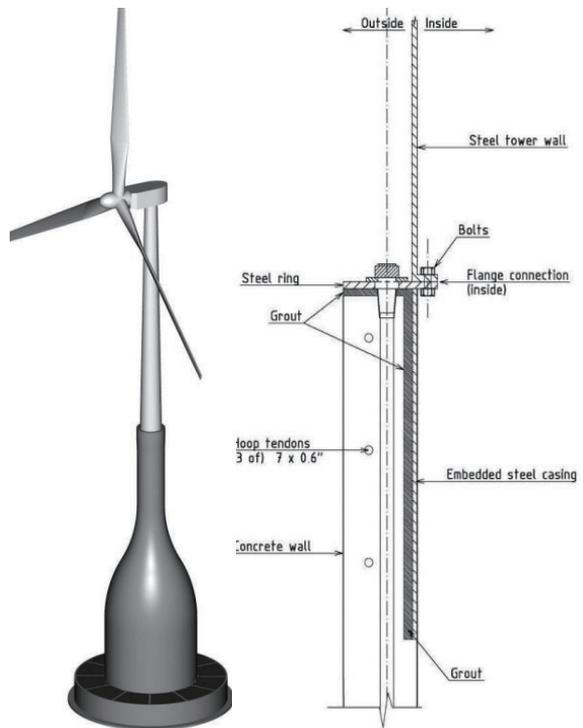


그림 8. 강관 문힘 형식(Vici Ventus)

2.2 해상풍력 하부구조물 연결부 관련 설계기준

최근 세계적으로 해상 풍력발전 기술에 대한 수요가 증가함에 따라 국내외에서 해상 풍력발전 하부구조 설계를 위한 기준이 제시되고 있지만, 콘크리트 하부구조물의 연결부 설계 관련 기준은 현재 마련되어 있지 않다. <표 1>에는 국내외 연결부 설계기준 조사 결과를 나타내었다. 해상풍력 하부구조물의 연결부 관련 설계기준 및 지침은 국내 설계 기준으로는 한국선급(KR)에서 발간한 『해상 풍력발전 시스템의 기술 기준(2011)』이 있으며, 해외 기준으로는 노르웨이선급(DNV)의 『DNV-OS-J101』가 사용되고 있다. 또한, 해상풍력 하부구조물 설계에 참고할 수 있는 관련 기준으로는 해양 플랫폼 설계를 위한 ISO(International Organization for Standardization)에서 발간한 『ISO 19902』와 『ISO 19903』, 그리고 API(American Petroleum Institute)의 『API 2A-WSD』이 있다. 그러나 이러한 설계 기준들은 모두 강재로 제작된 연결부를 대상으로 하고 있다. 일본토목학회(JSCE)의 『풍력발전설비 지지구조물 설계지침·동해설』은 육상풍력발전설비에 대한 설계기준으로, 타워와 콘크리트 지지구조연결을 위한 앵커볼트/앵커링 설계지침을 제시하고 있다.

3. 해상풍력 콘크리트 하부구조 연결부의 설계개념

3.1 개요

해상풍력 하부구조 연결부 설계에 앞서 구조물에 작용하는 하중특성과 해양환경 그리고 시공성과 경제성을 고려하여 사용재료와 연결부형식이 선정되어야 한다. 5 MW급 해상풍력발전 하부구조에 작용

하는 나셀, 블레이드 및 타워에 의한 수직하중은 수평하중의 약 10배 이상이고, 68 m 높이의 타워 상단에 나셀이 위치하기 때문에 하부구조 상부로부터 먼 거리에 수평하중의 중심축이 존재하여 큰 모멘트가 하부구조 상부의 연결부에 발생한다. 연결부에 앵커 문힘 형식을 적용하여 작용되는 모멘트에 저항하기 위해서는 넓고 안정된 연결부 지지면 확보가 필요하다. 특히, 설계 시 앵커링의 인발에 의한 콘크리트부의 콘 파괴 고려로 인해 단면적 증가는 필연적이다. 그러나 육상풍력발전과 달리 해상풍력발전에서 콘크리트 하부구조는 일반적으로 중공형이며, 단면적 증가는 구조물의 무게를 증가시킴으로써 시공비용 증가를 야기시키기 때문에 연결부의 단면적 최소화가 요구된다. 그러므로 최소화된 연결부 단면적을 고려하기 위해서는 강관 문힘 형식과 같은 설계 메커니즘을 적용해야 한다. 이를 위해 연결부를 비부착 앵커가 매입된 콘크리트 내부 튜브와 콘크리트 하부구조의 외부 튜브로 구성한다. 내·외부 튜브는 각각 앵커와 텐던의 인장력 도입으로 인해 프리스트레싱이 작용하는 독립된 구조로 고려하여, 작용 모멘트를 튜브의 상하부에 작용하는 접촉력과 마찰력으로 하부구조에 전달하도록 한 구조이다.

3.2 연결부 설계개념 및 적용

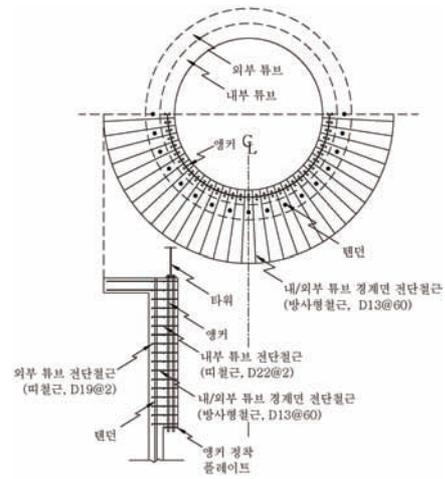
5 MW급 해상풍력 중력식 콘크리트 하부구조 연결부를 대상으로 본 개념을 적용하였다. 이때, 타워 하단부 외경은 5.6 m, 타워 두께는 32 mm, 내·외부 튜브의 외경은 각각 6, 7 m로 하였다. 텐던은 32 개소에 배치되었고, 앵커는 시공성을 고려하여 128 개의 앵커를 64개씩 2열 배치된다. 이때, 콘크리트의 압축강도는 45 MPa, 텐던과 앵커의 항복강도는 각각 1,200 MPa와 835 MPa이다. 콘크리트 타워 하

표 1. 국내외 하부구조물 연결부 설계기준

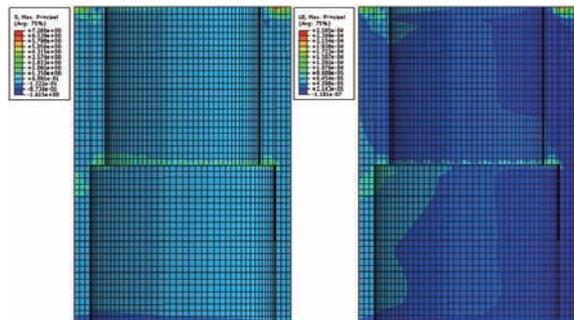
설계기준	KR	DNV	API	ISO 19902	ISO 19903	JSCE
설계법	한계상태설계법	한계상태설계법	허용응력설계법	한계상태설계법	한계상태설계법	허용응력설계법
사용 재료	강재	강재	강재	강재	콘크리트	콘크리트
연결 방법	볼트, 용접, 그라우팅	볼트, 그라우팅	볼트, 용접	볼트, 용접, 그라우팅	명시하지 않음	앵커볼트, 앵커링
대상	강구조	강구조	강구조	해상 플랫폼(강구조)	해상 플랫폼(콘크리트)	육상풍력(콘크리트)

단부에 작용하는 하중은 수직력 8,440 kN, 수평력 998 kN, 모멘트 89,788 kN·m를 고려하였고, 작용 모멘트로 인한 타워플렌지의 들뜸은 외부 염분 및 수분 침투로 인한 내구성 저하를 야기시키기 때문에 이를 막기 위해 앵커에 체결력을 도입하는 것으로 한다. 타워에 작용하는 수평력(V)로 인하여 연결부에 작용되는 모멘트(M)에 저항하는 접촉력(ΔV) 산정 시 내·외부 두 튜브 사이의 수평·수직 방향의 마찰력은 고려하지 않았으며, 외부 튜브에 작용하는 접촉력은 한 곳에 집중되는 것으로 가정하였다(그림 9). 그러나 하부구조가 원형이기 때문에 외부 튜브의 표면에 작용하는 접촉력은 비선형으로 분포할 것으로 판단되며, 접촉력의 정확한 분포 결정을 위해서는 유한요소해석을 통한 검토가 필요하다.

〈그림 10〉에는 설계 결과와 검증에 위한 유한요소 해석 결과를 나타내고 있다. 해석 결과, 내부 튜브 하단의 경계부에서 최대 인장응력과 압축응력이 발생하는 것을 확인하였고, 구조적으로 안전한 것으로 판단된다. 그러나 보다 경제적이고 안전한 설계방안 마련을 위해서는 내부 튜브의 매입깊이(I)과 같은 중요 설계 변수에 대한 검토와 앵커의 콘크리트 단부 파괴에 대한 추가적인 해석이 필요하다. DNV에서는 〈그림 7〉과 같이 강재 기초파일과 그라우트재 사이의 수평·수직 방향의 마찰력 또한 모멘트에 저항하며, 마찰계수는 최대 0.4로 제한하고 있다. 본 적용에서는 내·외부 두 튜브 사이의 마찰력을 고려하지 않았으나 내·외부 콘크리트 튜브가 일체 타설될 경우의 마찰계수는 1.4로 수평·수직 방향의 마찰력 고려 시 접촉력은 더 감소할 것으로 판단된다. 또한, 내부 튜브의 앵커단부에서 콘크리트 외부 부트



(a) 연결부 설계 결과



(b) 유한요소해석 결과

그림 10. 연결부 설계 결과와 유한요소해석

로 직접 전달되는 축력을 반영한다면(그림 9), 접촉력은 더욱 감소하여 경제적인 설계결과를 얻을 수 있다.

4. 맺음말

해상풍력발전 지지구조물의 연결부는 타워에 작용하는 수평하중, 수직하중, 모멘트를 하부구조물에 전달하여 이를 분산시키는 하중전달체계의 중요한 역할을 담당하고 있고, 연결부에서의 파괴는 해상풍력발전 지지구조물의 수명을 결정짓는 핵심적인 요소로 정확한 해석 및 안전한 설계를 필요로 한다. 본 연결부 설계 개념은 콘크리트 하부구조 상단 내부에 앵커가 매입된 콘크리트 튜브를 설치하여 타워에 작용하는 최대 모멘트가 외부 튜브의 상단과 하단부에 작용하는 두 접촉력과 두 튜브 사이의 수평·수직 방향의 마찰력을 고려하는 설계 개념으로, 타워와 콘크리트 하부구조물 간에 효과적으로 하중을 분배 할 수 있고, 하부구조의

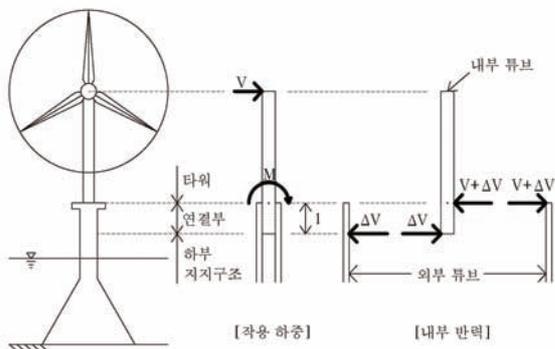


그림 9. 접촉력(contact pressure) 산정

단면을 최소화할 수 있어 경제적인 연결부 설계가 가능하며, 고정식뿐만 아니라 부유식 콘크리트 하부구조의 연결부에도 적용이 가능하다. 해상풍력 콘크리트 하부구조 연결부 설계 시스템의 정립/체계화/실용화를 본고에서 소개한 연결부 설계개념을 기반으로 진행할 수 있을 것으로 판단된다. 

담당 편집위원 : 문도영(경성대학교) dymoon@ks.ac.kr

참고문헌

1. Det Norske Veritas(DNV) AS, DNV-OS-J101: Design of offshore wind turbine structures, DNV, 2013.
2. T. Fischer, W. de Vries, B. Schmidt, Upwind Design Basis(WP4: Offshore Foundations and Support Structures), Endowed Chair of Wind Energy(SWE) at the Institute of Aircraft Design, University of Stuttgart, Stuttgart, 2010.
3. Precast/Prestressed Concrete Institute(PCI), PCI Design Manual, PCI, 2010.
4. American Concrete Institute(ACI), Building Code Requirements for Structural concrete(ACI 318-11), ACI, 2011.
5. 지광습, 임재영, 최국권, 김지환, '해상풍력 타워-지지구조 연결부 설계기준 현황', 한국콘크리트학회 2013년도 봄 학술대회 논문집, Vol. 25, No. 1, 2013, pp. 749 ~ 750.
6. Inge Lotsberg, "Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures", Marine Structures, Vol. 32, 2013, pp. 113 ~ 135.



김지환 연구교수는 고려대학교 건축사회환경공학부에서 이방향 인장응력 상태에서의 콘크리트와 섬유보강 시멘트 복합재료 평가 연구로 박사학위를 취득하였으며, 연구교수로 재직 중에 있다. 주요 연구 분야는 콘크리트 및 섬유보강 시멘트 복합재료 구조물의 거동 특성 분야이며, 현재 해상풍력 콘크리트 하부구조 연결부 개발에 관한 연구를 수행하고 있다.

jihwan@korea.ac.kr



최국권 학생은 고려대학교 건축사회환경공학부에서 학사학위를 취득하였으며, 2013년 2월에 동 대학원 구조공학 분야 석사과정에 진학하였다. 현재 '해상풍력 지지구조 설계기준 및 콘크리트 지지구조물 기술개발' 연구과제에 참여하여 해상풍력발전 구조물 관련 연구를 수행하고 있다.

fullframe@korea.ac.kr



지광습 교수는 미국 NorthWestern University의 토목공학과에서 구조공학 분야로 박사학위를 취득한 후 고려대학교 건축사회환경공학부 교수로 재직하고 있다. 대한토목학회, 한국콘크리트학회, 한국구조물진단유지관리공학회, 한국전산구조공학회, 한국강구조학회, 한국철도학회, 유럽 RILEM 정회원이며, 해양구조물, 응용역학, 구조물의 손상 및 파괴에 관련된 연구를 주로 수행하고 있다.

g-zi@korea.ac.kr