

해상풍력발전기 모노파일 기초공사용 설치시스템 구조 안전성

차태형*, 정원지**,#, 이현준**

*삼보CMC(주), **창원대학교

Structural Safety in Installation System for Monopile Basic Construction of Offshore Wind Power Generators

Tae-Hyeong Cha*, Won-Jee Chung**,#, Hyun-Jun Lee**

*Sambocmc Corporation Ltd., **Changwon National University

(Received 13 October 2021; received in revised form 29 October 2021; accepted 02 November 2021)

ABSTRACT

Recently, the development of offshore wind farms based on past technical experiences from onshore wind turbine installations has become a worldwide issue. This study investigated the technical issues related to offshore wind farms and large-diameter monopiles from an economic perspective. In particular, the monopile foundation system (MFS), which is the most important part of the proposed fast construction system, is applied for the first time in Korea, and structural verification is essential because it supports large-diameter monopiles and is in charge of excavation. Therefore, in this study, a rapid construction system for large offshore wind power generators was introduced, and stability verification was performed through the structural analysis of the MFS.

Keywords : Offshore Wind Power Generator(해상 풍력 발전기), Monopile(모노파일), Reverse Circulation Drilling (역순환 드릴링), Monopile Foundation System(모노파일 기초설치 시스템), Rapid Construction(신속한 건설)

1. 서 론

풍력발전산업은 신재생에너지 가운데 가장 경제성이 높아 이미 오래전부터 산업화가 진행되어 왔으며 해상풍력 역시 약 20년 전부터 발전단지 형태로 실용되고 있다. 현재까지 국내의 해상풍력단지는 자켓 기초를 적용하여 주로 시공되고 있지만 Post Piling 방법, 자켓과 TP(Transition Piece) 2분리 시공 등과 같은 비효율적인 시공요소로 인해 비경제적인 시공이 이루어지

고 있다. 이 시공 방법은 자켓 지지구조물을 상부 및 하부 2단으로 나누어 제작하여 운송한 후 하부 및 상부 자켓을 순차적으로 설치한다. 이로 인해, 자켓 설치 공정이 하나의 구조물이 아닌 두 개의 구조물을 설치하는 공정으로 해상공사 기간이 증가하고, 상부 자켓 설치과정에서 현장용접을 통하여 조립하게 되어 공사기간이 늘어날 뿐 아니라, 현장용접으로 용접품질 확보에도 어려움이 있다^[1]. 이러한 이유로 유럽의 경우 모노파일 방식의 해상풍력기초가 활발히 적용되고 있고 일반적으로 약 30m 수심 정도에서 해상풍력발전 기초는 모노파일 방식이 경제성이 높은 것으로 알려져 있다. 하지만 이와 관련된 국내 기술수준은 매우 미흡하다고 할

Corresponding Author : wjchung@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-267-1138 Fax: +82-55-263-5221

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수 있으며 기존 국내 시공방법으로는 대형해상풍력발전기의 모노파일 기초시공 시 효율이 떨어지며 공기연장, 장비수급 등의 많은 문제를 야기한다²⁴⁾. 해상풍력발전이 경제성을 확보하기 위해서는 대규모단지로 조성되어야 하며, 또한 기초의 시공비용을 절감할 수 있는 경제적인 기초시스템이 적용되어야 한다⁵⁾.

이에 본 논문에서는 해상풍력발전기 모노파일 기초공사용 설치시스템의 기존 시공 공법의 문제점을 파악하고 경제성 확보를 위해 새로운 설치시스템을 제안하고 주요장비의 안정성을 연구하였다.

2. 연구 배경

2.1 모노파일 기초 시공 공법

해상풍력발전기 기초공사인 모노파일 시공에는 Piling Hammer를 이용하여 해저면을 타격하며 설치하거나, R.C.D(Reverse Circulation Drilling)를 이용하여 해저면을 굴착한 후 모노파일을 시공하는 공법들이 있다. 그 중 가장 경제성이 높은 공법은 ‘Vibratory Driven’으로 진동구조물을 이용, 모노파일에 직접 진동 및 충격력을 전달하여 밀도가 낮은(모래 or 연점토) 해저 지면에 모노파일을 설치하는 공법이다. 이 공법은 모노파일의 수직도 유지만 보증되면 빠른 속도로 시공이 가능하므로 공기단축으로 인해 굉장히 경제적이고 주로 유럽이나 미국 등의 해저지반조건이 대부분 모래나 점토로 이루어진 Vibratory Driven 공법에 적합할 경우 적용이 된다. 하지만 국내의 경우 해저의 낮은 깊이에서 암반이 넓게 분포되어 있어 Vibratory Driven 공법을 사용할 수 없는 실정이다.

국내 모노파일 시공은 타 공법을 적용할 수밖에 없으며 여러 공법 중 단 한 가지 공법만이 적용될 수 있는데, 그 공법이 R.C.D(Reverse Circulation Drilling)공법이다. R.C.D 공법은 역순환 굴착공법이라 하며 전 회전식 굴착기(Top Pile Drill Rig)로 해저 지면은 천공 하는 굴착 공법이다.

이 공법은 이미 대구경 해저 천공에 널리 사용되고 있지만 모노파일 설치 시공에 사용되지 않는 이유는 Casing(or Temporary Casing) 설치기간이 길며 해저지반 조건에 따라 크게 차이가 나 경제성이 낮기 때문이다. Casing은 굴착장비가 해상에서 제 위치를 벗어나지 않도록 지지해주며, 첫 굴착 시 굴착 수직도에 관련하여

안전성과 작업성에 큰 영향을 미친다. Casing 설치의 주요점은 설치 후 굴착 반력 및 침식에 의해 Casing이 기울어지지 않게 하는 것이며, 이를 위해 적게는 1개월 많게는 수개월의 설치기간과 많은 비용이 소모되고 있어 급속 시공 기술 개발이 필요하다고 할 수 있다.

2.2 급속 시공 공법

Casing 설치를 위한 해저지반 조건은 크게 2가지로 나뉜다. 하나는 모래(점토)층 이후 암반층이 나타나는 조건이며 다른 하나는 모래(점토)층 또는 암반층이 바로 나타나는 조건이다. 첫 번째 조건에서의 Casing 설치 는 Hammer(Vibratory, Impact, Etc.) 등을 이용하여 Casing을 암반층까지 삽입 및 고정하는 방법이고, 두 번째 조건에서의 Casing 설치 는 시공 위치의 평탄화 작업과 Casing을 고정시키기 위한 사석 채움과 그리고 콘크리트 타설 작업이 필요하다.

위의 두 가지 설치방법은 모두 문제점을 내포하고 있다. 첫 번째의 경우는 굴착 시공 중 침식에 의한 Casing의 기울어짐이다. 이 증상은 암반층이 고르지 않아 나타나는 현상으로 안전성과 작업성 모두에 영향을 끼친다. 두 번째 경우는 설치기간에서 매우 많은 시간이 소요된다. 평탄화를 위한 잠수부와 장비 투입, 사석의 운반 및 채움, 콘크리트의 타설 및 양생 작업에서 최소한 2개월 이상이 소모된다.

본 논문에서 제안하는 급속 시공 공법은 R.C.D.공법 중 가장 많은 설치기간을 차지하는 Casing을 급속으로 시공하는 공법으로 해저지반조건에 상관없이 수개월이 소요되는 기간을 1개월 이내로 설치할 수 있는 공법이다. 기존의 Casing 시공 방식은 고르지 못한 해저 지면으로 인하여 잠수부를 투입하여 평탄

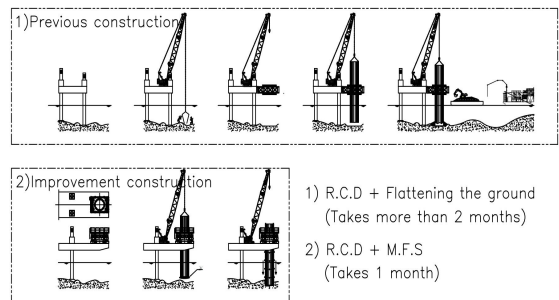


Fig. 1 Comparison of conventional and proposed construction method

화 작업을 진행, Guide Frame을 설치한 후 Guide frame 내 Casing을 삽입해야 한다. 그런 다음 Casing 내외에 사석 채움과 콘크리트 타설하므로 해상공사기간이 증가하여 경제성이 낮다. 제안 방식은 Casing을 직접적으로 암반에 굴착 삽입하므로, 평탄화 및 사석 채움과 콘크리트 타설 작업이 제외되어 Casing의 설치기간 단축과 동시에 침식에 의한 Casing이 기울어지는 문제점 등이 해소될 것으로 판단된다. 기존방식과 제안되는 개선방식을 Fig. 1에 비교하여 나타내었다.

3. 급속 시공 구성 요소

3.1 주요 요소

급속 시공 공법을 위한 시공 개발 장비의 주요 요소로는 M.F.S(Monopile Foundation System), Casing & Shoe Bit가 있다. Fig. 2에서는 M.F.S가 Casing을 삽입 및 회전시키는 방법을 개략적으로 나타낸 그림이다. Fig. 2(a)(b)와 같이 Casing을 외곽에서 감싸 얹으며 고정시켜 Casing에 회전력과 삽입력을 제공하여 해저면에 고정시키는 작용을 한다.

일정깊이까지 내려간 이후에는 Fig. 2(c)와 같이 Casing 고정장치가 상승하여 다시 회전 및 삽입작업을 반복한다. Casing & Shoe Bit는 중공형 원기둥 아랫면에 굴착에 유리한 형상의 초경 재질의 Shoe Bit를 나열 조립한 구조물로 예시 사진을 Fig. 3에 표기하였다. 이 두 장치를 이용한 급속시공공법은 M.F.S를 이용, Casing & Shoe Bit에 회전력과 삽입력을 공급하여 해저 암반에 직접 굴착 및 삽입 고정하는 공법으로 해저지형조건에 영향을 받지 않으며, 기존 Casing 설치 대비, 공사기간을 획기적 단축이 가능하다.

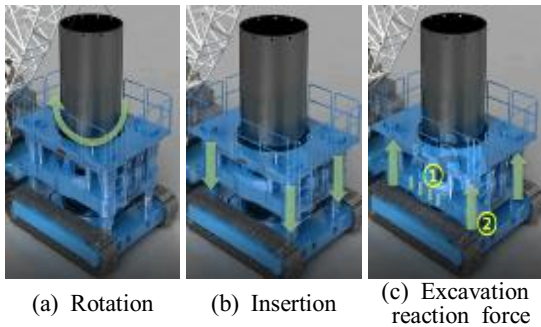


Fig. 2 Schematic of M.F.S operation



Fig. 3 Example of casing and shoe bit

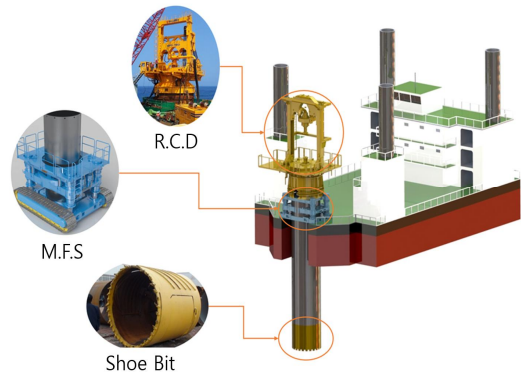


Fig. 4 Configuration of the rapidly construction system

3.2 급속 시공 구성

급속 시공 장비는 Jack-up Barge, M.F.S, Casing & Shoe Bit 그리고 R.C.D로 구성된다. Jack-up Barge는 M.F.S에 지지력을 제공하고, M.F.S는 Casing & Shoe Bit에 굴착(회전&삽입)력을 제공하며, 마지막으로 Casing은 R.C.D 장비에 지지력을 제공한다. Fig. 4에 급속시공시스템의 구성을 그림으로 표현하였다.

4. M.F.S 구조검증

4.1 개요

대용량 고중량의 Casing을 안정적으로 지지하면서 굴착하기 위해서는 M.F.S 장비의 구조검증이 필수적이다. 본 논문에서는 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 아래 항목들을 점검하였고, 최종적으로 M.F.S의 구조 안정성을 확인하였다. M.F.S의 주요구성품인 Chuck Frame, Casing Drive Frame, Base Frame, Chuck Part, Casing Drive Part, Base Frame Part에서의 응력 및 변형(처짐) 양상 분석 및 점검을 통하

여 안정성을 검증하였다.

해석에 사용한 M.F.S의 개략도를 Fig. 5에 표기하였고, 이 도면을 활용하여 해석용 3D 모델링 수행 및 유한요소 해석을 진행 하였다.

4.2 설계 자료

4.2.1 허용 응력

M.F.S 응력 평가는 KDS 14 30 10 ‘구조 부재 설계기준(허용응력설계법)’을 적용하였다⁶⁾.

등가응력(Von-mises Equivalent Stress)에 대한 안전을

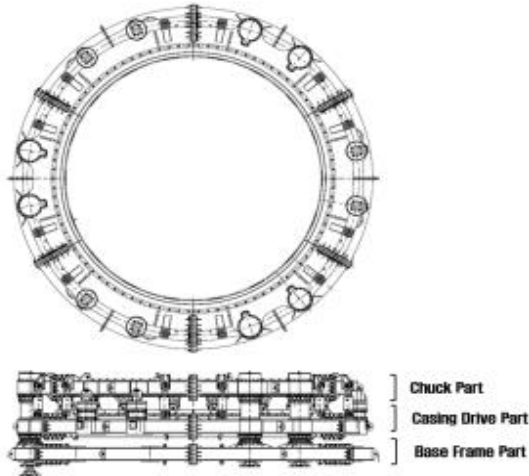


Fig. 5 Monopile Foundation System schematic

Table 1 Allowable stress

Part	Material	Yield strength	Allowable stress
Wedge	SCW480	275 MPa	165 MPa
Pin	SCM440	834 MPa	500 MPa
Etc.	SM490A	315 MPa	189 MPa

Table 2 Material properties

Material	Modulus of elasticity	Density	Poisson's ratio
General steel	210,000 MPa	7750 kg/m ³	0.3

1.67 (인장재에 대해 항복강도의 60% 사용)을 적용하였고, 허용응력과 재료 물성치를 Table 1, Table 2에 각각 표기 하였다.

4.2.2 하중 조합

Push-Down Condition에서는 케이싱 중량에 의한 Force 192.2 ton, 장비중량에 의한 Load 150 ton과 암반 굴착을 위한 Torque 1572.9 ton*m (350 bar)의 합산으로 하중을 계산 하였고, Lifting Condition 일때는 고정된 암반에서 케이싱을 인발하려면 최초 약 10초가량 순간적으로 강력한 힘이 필요하다. 순간적으로 작용되는 Force 1051.2ton(350 bar), 장비중량 Load 150ton과 인발을 위한 Torque 1572.9 ton*m(350 bar)의 합산으로 하중을 계산하였다. M.F.S의 세부 하중조건을 Table 3에 표기하였다.

4.3 유한요소해석

작용하중에 의한 응력 및 변형 양상을 분석하고 구조물의 안정성을 평가하기 위하여 유한요소 해석(Finite Element Analysis, FEA)을 사용하였고, 유한요소 모델링 수를 Table 4에, 유한요소모델 형상을 Fig. 6에 각각 나타내었다.

Table 3 Load condition

Model name		RD750	
Max. casing dia.	mm	7500	
Max. dia.	mm	7552	
Lifting stroke	mm	750	
Lifting force	kN ton	5890.5 (200bar)	10308.4 (350bar)
		600.7	1051.2
Push down force	kN ton	1885.0+1430.9(Deadweight)	3315.9
		192.2+145.9(Deadweight)	338.1
Rotation speed	rpm	Low	High
		0.29	0.87
Torque (300bar)	kNm ton*m	13221.1	4415.3
		1348.2	450.2
Clamping force (200bar)	kN ton	19627	
		2001	
Leveling force (200bar)	kN ton	8482	
		865	
Weight	ton	150	

Table 4 FE Model Statistics

Item	Value
Type of elements	Solid elements
Number of elements	390,778
Number of nodes	873,150



Fig. 6 Finite element model

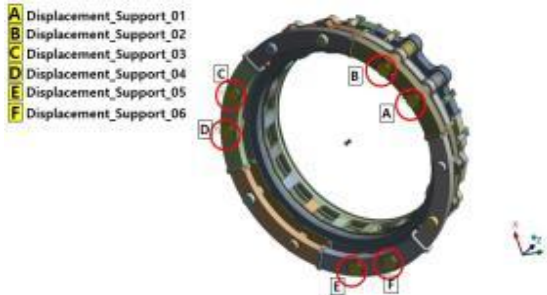


Fig. 7 Leveling cylinder constraint boundary condition

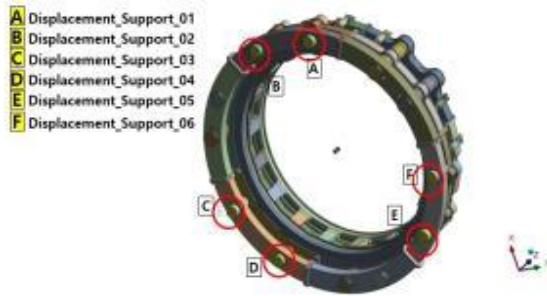


Fig. 8 Stopper constraint boundary conditions

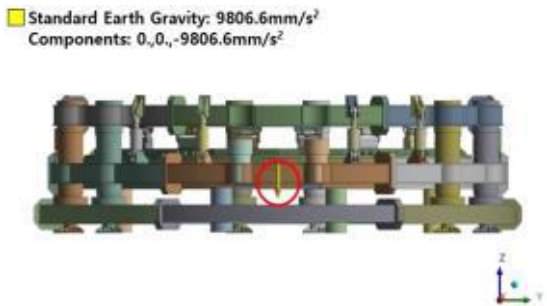


Fig. 9 Self-weight : Push-Down Condition

4.3.1 구속 경계조건

레벨링 실린더(Leveling Cylinder)의 지면 접촉 부위에 수직 방향의 운동은 제한되는 것으로 가정하여, Z 방향 운동을 구속하였고 Fig. 7에 나타내었다. 스톱퍼(Stopper)의 지면 접촉 부위에 수평 방향의 운동은 제한되는 것으로 가정하여 X, Y 방향 운동을 구속하였고 Fig. 8에 나타내었다.

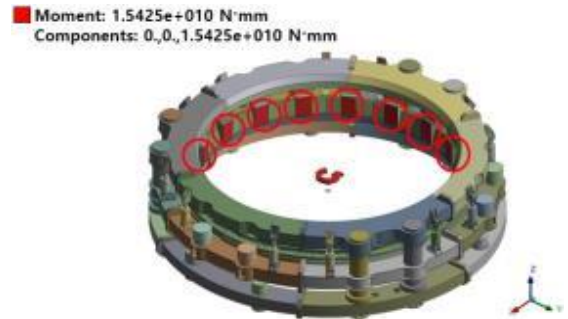


Fig. 10 Torque : Push-Down Condition

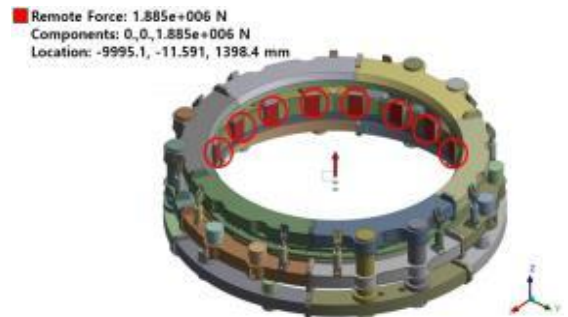


Fig. 11 Push-Down Force

4.3.2 하중 조건

Push-Down Condition인 경우 구조물 전체 자중(Self-weight 또는 Dead Load) 150ton을 적용하고 Fig. 9에 나타내었다. 1572.9 ton·m(350bar)의 크기를 가지는 Torque를 18개의 Wedge에 균일하게 작용시키고, Fig. 10에 나타내었다. 192.2ton의 크기를 가지는 Push-Down Force를 18개의 Wedge에 균일하게 작용시키고 Fig. 11에 나타내었다. Lifting Condition인 경우에도 Push-Down Condition과 같은 조건으로 구조물 전체 자중(Self-weight 또는 Dead Load) 150ton을 적용하였다. 1572.9 ton·m(350bar)의 크기를 가지는 Torque를 18개

의 Wedge에 균일하게 작용시키고 Fig. 12에 나타내었다.

1051.2 ton의 크기를 가지는 Lifting Force를 레벨링 실린더(Leveling Cylinder)와 접촉하고 있는 Casing Drive Frame 부위에 균일하게 작용시키고 Fig. 13에 나타내었다.

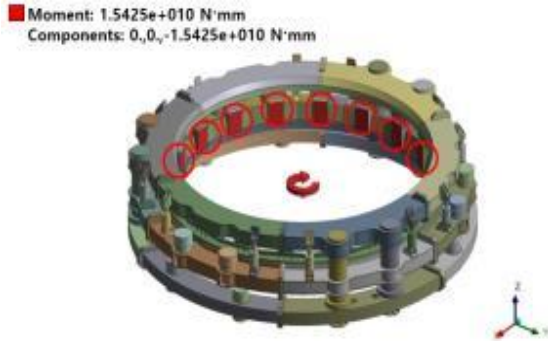


Fig. 12 Torque : Lifting Condition

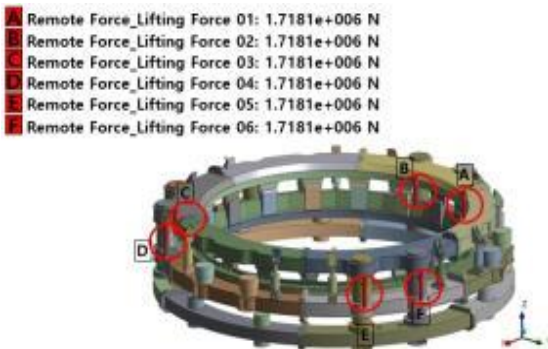


Fig. 13 Lifting Force

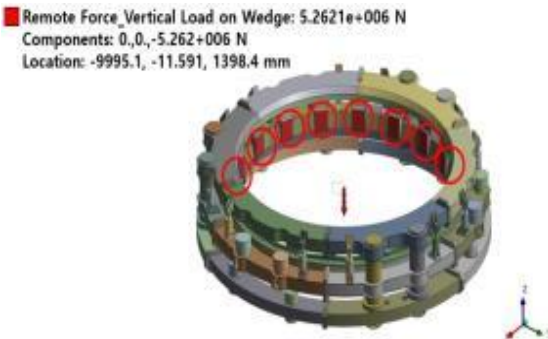


Fig. 14 Vertical pressing load acting on wedge



Fig. 15 Horizontal pressing load acting on wedge

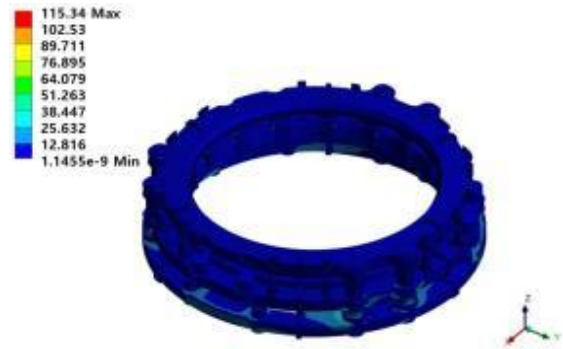


Fig. 16 Von-mises equivalent stress-the entire structure (Push-Down Condition)

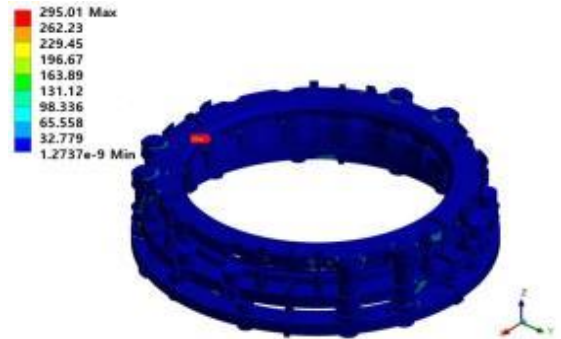


Fig. 17 Von-mises equivalent stress - the entire structure(Lifting Condition)

200bar 사용조건에 Leveling Force는 865ton이다. 여기에 Casing을 인발하기 위한 Extraction Force 505.34ton에 Casing Weight 176.81ton을 제외한 328.53ton을 적용하면 536.4 ton이 발생 된다. 12개의

Chuck Cylinder에 각각 44.7ton의 하중(전체 하중 536.4ton)이 작용한 결과, 18개의 Wedge 각각에 29.8 ton의 수직 누름 하중이 발생하고, Casing을 누르는 수평 하중 100ton이 발생한다. 이들 수직 누름 하중(536.4ton = 18 x 29.8ton)과 수평 누름 하중(100ton)을 18개의 Wedge에 균일하게 작용시키고 Fig. 14, Fig. 15에 나타내었다.

Table 5 Von-mises equivalent stress table

Part name	Unit	Equivalent stress		Allowable value (Safety factor 1.67)		Evaluation Result
		Push down	Lifting			
Base frame	Mpa	60.0	61.3	<	189.0	OK
Drive frame	Mpa	49.5	159.2	<	189.0	OK
Chuck frame	Mpa	35.3	116.7	<	189.0	OK
Casing drive frame	Mpa	31.4	159.2	<	189.0	OK
Bearing part	Mpa	21.6	78.7	<	189.0	OK
Casing drive frame bearing	Mpa	35.3	116.7	<	189.0	OK
Chuck frame bearing part	Mpa	2.6	7.8	<	189.0	OK
Chuck frame bearing	Mpa	28.9	89.7	<	189.0	OK
Chuck cylinder	Mpa	41.5	54.8	<	189.0	OK
Leveling cylinder	Mpa	25.7	26.7	<	189.0	OK
Stopper	Mpa	115.3	295.0	<	500.4	OK
Wedge pin	Mpa	45.9	121.3	<	165.0	OK

4.4 해석 결과

M.F.S의 주요 부위별 동작별 Von-mises 등가응력 결과를 Table 5에 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 부재별 항복강도의 1.67의 안전율을 적용하여 허용응력을 설정하였고, Push-down과 Lifting 상태에서의 응력 수치를 표기 하였다. Base frame의 경우 허용응력 189Mpa 대비 Push-down 60Mpa, Lifting 61.3Mpa으로 확인되었다. Base frame 외 9종의 주요 부위의 응력 수치도 표기하였다. Stopper는 허용응력 500.4Mpa 대비 Push-down 115.3Mpa, Lifting 295Mpa으로 확인되었다. Wedge pin의 경우는 허용응력 165Mpa 대비 Push-down 45.9Mpa, Lifting 121.3Mpa으로 확인되었다. 즉, 해석에서 산출된 각 부위의 최대등가응력이 각 해당 허용응력보다 적은 값들을 보이고 있으며, 이로부터 구조물은 안전한 것으로 판단된다. 특히 대형 Casing을 압착한 상태에서 강한 회전력으로 동작하는 Drive frame을 상승시키는 Lifting condition에서의 구조물전체의 Von-mises 등가응력 해석결과를 Fig. 16 과 Fig. 17에 첨부 하였다.

5. 결론

본 논문은 해상풍력발전기 모노파일 기초공사와 관련한 일반적인 시공방식을 소개하고, 국내 시공현장에 적용 가능한 한국형 모노파일 기초공사의 급속 시공 기술에 대하여 제안하고 핵심기술의 구조안전성 검토에 대하여 기술하였다.

제안되는 M.F.S(Monopile foundation system)의 구조검증을 위하여 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 구조해석을 수행하였고, 장비 주요 부위의 응력 및 변형을 확인하였으며 정상동작을 점검하였다. M.F.S의 Von-mises 응력평가를 통하여 KDS 14 30 10 ‘구조 부재 설계기준(허용응력설계법)을 만족함을 확인하였다. Base Frame은 189Mpa 대비 61.3Mpa, Drive Frame은 189Mpa 대비 159.2Mpa, Chuck frame은 189Mpa 대비 116.7Mpa 등 Table 5와 같이 M.F.S의 주요 구동부위의 구조해석을 통하여 최적화된 값을 확인하였고, Push Down과 Lifting 구동시에 구조적으로 안전함을 검증하였다.

기술한 바와 같이 수개월의 공사 기간이 소요되어

결정적 영향을 미치는 Casing 설치작업을 검증된 전용 M.F.S 장비와 Shoe Bit를 통해 1개월 이내로 공사 기간을 크게 절감할 수 있을 것으로 보이며, 전용 RCD 장비를 이용하여 대형 수직구 굴착에 대한 신뢰성도 확보할 것으로 기대한다.

REFERENCES

1. Lee, D. H., Choi, H. S., Ha, S. Y., Choi, B. R., Kim, J. K. and Zi, G. S., "Integrated Construction of Jacket Substructures to Reduce Construction Cost for Offshore Wind Turbines," *Journal of Wind Energy*, Vol. 10, No. 2, pp. 47-55, 2019.
2. Nah, D., Shin, H., and Nah, D., "Offshore Wind Power Review", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 20, No .2, pp. 143-153, 2011.
3. Scharff, R., and Siems, M., "Monopile foundations for offshore wind turbines," *Steel construction : Design and research*, Vol. 6, No.1, pp. 47-53, 2013.
4. Arshad, M., and O'kelly, B., "Analysis and Design of Monopile Foundations for Offshore Wind-Turbine Structures," *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol. 34, No.6, pp. 503-525, 2016.
5. Wind energy, Annual performance results and target, Report published 18, Jan., 2009.
6. "KDS 14 30 10 : 2019 Steel structural member design criteria," Enacted 30, Jun., 2016, from <http://www.kcsc.re.kr>