

5MW급 해상풍력 하부구조물 설계 및 해석에 관한 연구

선민영¹ · 이성범² · 이기열³ · 문병영[†]

(Received July 1, 2014 ; Revised September 4, 2014 ; Accepted November 18, 2014)

The study on substructure design and analysis for 5MW offshore wind turbine

Min-Young Sun¹ · Sung-Bum Lee² · Ki-Yeol Lee³ · Byung-Young Moon[†]

요약: 본 연구는 5MW급 해상풍력 하부구조물개발에 있어 설계에 필요한 다양한 해양환경 조건에 대하여 높은 안정성 확보가 요구되는 해상용 풍력발전 하부구조물과 관련, 구조물의 설계방법을 제시하고 그 안정성을 고찰하여 관련 기술 분야에 기여함을 목표로 한다. 특히, 5MW급 해상풍력발전 시스템에 대해 시험영역에서 큰 바람의 방향이 지속되고 있는 동안에 동시에 발달된 파도의 계산에 대한 정보를 제공한다. 그러므로 바람의 영역과 접근하는 파동 행렬간의 관련성을 검토하여 강도, 방향 그리고 시간의 이동성을 계산할 수 있음을 확인하였다. 쇄파에서의 국부적인 압력분포를 물리적인 모델링과 수치적 모델링을 통해 조사하는 것이 가능하다. 해상 풍력 에너지 변환장치의 지지구조물들에 대해 최근 적용된 구조 및 피로에 대한 평가는 일반 설계규칙에 근거했다. 5MW 해상풍력 하부구조물은 제약조건이 많아 단일구조로 취급하는데 이는 생산에서 높은 안전계수를 고려해야함을 의미한다.

주제어: 하부구조물, 풍력발전터빈, CFD 해석, 안전계수, 해상풍력, 안정성 설계

Abstract: This study aims at dedicating to relevant technology fields by suggesting design methods of structures and estimating their safety in relation to substructure for offshore wind power requiring high safety to various environment conditions. Especially, with respect to 5MW Offshore Wind Power System, this study will provide information about major wind directions and duration in combination with the developing wave climate at the test field. Therefore, connections between wind fields and approaching wave trains will be estimated and their intensity, direction and time shift will be pointed out. Furthermore, the local pressure distribution of breaking waves will be investigated by physical and numerical modeling. The currently applied structural and fatigue assessment of support structures for offshore wind energy converters is based on common design rules. Normally, constructions in structural engineering are treated as limited, single structures. This means that varying aspects of manufacturing are considered by high safety factors.

Keywords: Substructure, Wind Turbine, CFD Analysis, Safety Factor, Offshore Wind Power, Stability Design

1. 서론

지속 가능한 신재생 에너지 분야에서 주목을 받아왔던 풍력발전이 해상풍력을 중심으로 급격하게 변모하고 있다. 유럽에서 뿐만 아니라 일본, 미국에서도 해상풍력을 적극 육성하는 방향으로 전환하여 대규모 단지 개발에 나서고 있으며, 우리나라 또한 [서남해 2.5GW 해상 풍력 종합 추진 계획]을 발표하면서 국내 기업의 경쟁력 강화와 국내 기술의 수출 산업화를 위한 지원이 본격적으로 이루어지고 있다. 현재 세계 해상풍력 설치 용량은 유럽을 중심으로 3.55 GW 수준이지만 4.0 GW가 건설 중이고 승인된 계획도 15.9

GW에 이르고 있으며, 2030년까지 건설규모는 총 239 GW에 달할 것으로 전망된다고 한다[1][2].

이처럼 각국이 해상풍력에 적극적인 이유는 육상풍력에 비하여 대규모 단지 구성이 용이하고 바람의 질이 우수하며, 대형 풍력 발전기 부품 운송에 제약이 없는 등의 이점이 있기 때문이다.

특히 육상용 풍력발전 기초구조물에 비해 다양한 하중을 받는 해상용 풍력발전 하부구조물은 해양플랜트, 파력발전, 조력발전, 조류발전용 지지구조물과 마찬가지로 다양한 해양환경 조건에 대하여 전반적으로 높은 안정성의 확보가 요구되어 진다[3].

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3935-504X>): Department of Naval Architecture, Kunsan National University, 558 Daehak-ro, Gunsan 573-701, Korea, E-mail: moonby20@gmail.com, Tel: 063-489-1854

1 Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: smy5438@komeri.re.kr, Tel: 063-465-8423

2 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: space489@naver.com, Tel: 063-469-1854

3 Shipbuilding & Marine Technical Manpower Agency, Kunsan National University, E-mail: kimhynhe1@naver.com, Tel: 063-469-1858

이에 본 연구에서는, 설치 지역의 해양환경 특성을 고려하여, 5MW 급 해상풍력발전 하부구조물의 설계방법을 제시하고 그 안전성을 고찰하여 관련기술 분야에 기여하고자 한다. 해상풍력발전 하부구조물은 수심과 지반 여건에 따라 일반적으로 Figure 1과 같이 Gravity type, Monopile type, Jacket type, Tripod type 등으로 나눌 수 있다[4].

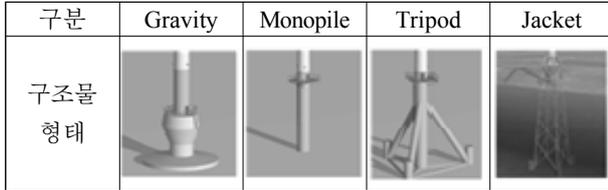


Figure. 1: Type of Substructure

Gravity type은 말뚝이 불필요하고 강성이 우수한 장점이 있으나 바닥정리가 필요하고 설치 장비가 대형인 단점이 있다. Monopile type은 제작과 설치가 용이하고 기초 하부구조물 형태 중 가장 경제적이지만 대구경 말뚝으로 인한 환경문제(해양 지반을 굴착시 소음, 진동 문제)가 발생한다.

Tripod Type은 Monopile의 확장형으로 소구경 말뚝을 사용하지만 제조비용이 증가하고 Anchor Pile이 필요한 단점이 있다.

Jacket Type은 자켓을 콘크리트 말뚝이나 쇠말뚝으로 해저에 고정하고 자켓구조물 위에 Pole, Turbine 등을 설치하는 형태로 설치수심은 20미터에서 80미터까지이며 우리나라 해상 풍력단지에 적합한 형태라 할 수 있다. 그러나 형상이 복잡하고 하부구조물 특성상반복하중에 의한 피로 파괴 위험이 있어, 복합하중에 대한 검증이 철저하게 요구된다.

본 연구에서는 우리나라 해상 풍력단지에 적합한 형태인 Jacket type substructure의 설계 조건과 해양 환경 하중에 대한 하부구조물의 모델링과 구조해석을 진행하였다. 해양 데이터 조사 및 분석을 통하여 해상환경을 고려한 통합 하중해석 결과를 ANSYS tool을 사용하여 해석하였으며, 최대 하중에 대한 구조물의 안전성 평가를 실시하였다.

2. 해상풍력 지지구조물 설계 조건

2.1. 해양데이터 조사 및 분석

지지구조물이 설치되는 해양지반 환경, 설치된 발전기 하중, 운전시 동하중, 해양환경 하중의 정확한 평가는 Substructure의 안전성 설계의 필수 항목이다.

본 연구에서 적용한 해상 풍력 지지구조물의 설치 해역은 서남해안 2.5GW 단지 중 실증단지 No.7과 No.8 지점 중심이다. 이는 격포항에서 35 km 떨어져 있으며, 해모수(해상기상탑)의 관측 자료를 중심으로 인근의 수치모의에 의

한 추산 자료, 시추조사 자료 등을 이용하여 본 연구수행을 위한 외부 환경조건을 분석하였다. 해상 풍력 발전의 해양 환경 하중 계산을 위해서는 설치 지점에서 수위 변동을 고려해야하며, Table 1은 국립해양조사원, 영광 검조소, 해모수의 계측데이터 분석에 따른 수위(water level)를 나타낸다 [5].

연구 대상 해역의 지반 조건으로는 기존 타당성 조사 연구[지식경제부 2011]에서 시행된 8개의 시추공중 No.7의 현장원위치시험 자료 및 실내 시험 자료를 적용하였다.

Table 1: The harmonic constant and inharmonic constant of tide

| Topic | | Latitude | | Yeong Kwang | | Offshore Mast | |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
| Observed position | | 35° 37' 5" N 126° 18' 7" E | | 35° 25' 34" N 126° 25' 14" E | | 35° 27' 55" N 126° 07' 45" E | |
| Observed time | | 2011.02.01.~07.31 | | 2011.01.01.~01.31 | | 2011.04.12.~06.17 | |
| Harmonic constant | Component tide topic | Semi range (cm) | Crust (°) | Semi range (cm) | Crust (°) | Semi range (cm) | Crust (°) |
| | M2 | 195.1 | 75.14 | 200.9 | 70.55 | 187.7 | 50.09 |
| | S2 | 74.72 | 127.4 | 76.88 | 122.5 | 71.29 | 103.1 |
| | K1 | 32.91 | 275.1 | 33.18 | 271.8 | 31.24 | 252.1 |
| | O1 | 24.85 | 238.1 | 25.25 | 235.6 | 25.86 | 213.5 |
| Inharmonic constant | Mean high water interval | 2h 35min | | 2h 26min | | 1h 44min | |
| | Mean low water interval | 8h 47min | | 8h 38min | | 7h 56min | |
| | Highest high water | 655.16m | | 672.58m | | 632.18cm | |
| | Mean sea level | 327.585m | | 336.29m | | 316.09cm | |
| | Lowest low water | 0.00m | | 0.00m | | 0.00cm | |
| Tide form number | | 0.21 | | 0.21 | | 0.22 | |

시추공중 No.7의 물깊이(water depth)는 8.8 m이며, 해저면을 '0'이라 두었을 때, 지층 구조도를 보면 모래층이 0~27 m, 점토층이 27~46 m, 풍화토가 46~57 m, 풍화암이 57~59 m, 연암이 59~64 m 사이에 존재할 것으로 추정된다.

100년 빈도를 고려한 풍속, 해양지반, 수심, 파랑, 조류 등의 해양 데이터 자료 수집을 위해 해양연구원 조사 자료를 적용하였으며, 단지 전체의 해양환경에 영향을 받는 지지구조물의 해석은 전력연구원 분석 보고서의 데이터를 참조하였다. 한국 해양연구원 분석결과, 연구대상지역 수심은 10 m 내외로 극한유의파고 7 m의 1.28배를 상회하므로 쇄파대로 보기 어렵고, 바람에 의한 해류보다 조석에 의한 조류가 지배적이므로, 평균 해수면 327.6 cm에서 추정된 조류속은 0.88 m/s임을 알 수 있었다[5]. IEC61400-3 에서 제시

한 바람과 해수면 유속의 관계식은 다음과 같다[6][7].

$$U_w(0) = 0.01 \cdot V_{1-hour}(z = 10m) \quad (1)$$

위 식에서 $V_{1-hour}(z = 10m)$ 는 해수면 10 m 고도에서의 한 시간 평균 풍속을 나타낸다. 방향별로 연 최대풍속을 구하고, Weibull 분포로 가정하여 극치분석을 수행하였으며, 재현주기 50년 빈도의 풍속을 결정하였다. 재현주기 1년 빈도 풍속은 24년간의 과량역추산 자료-한국 해양연구원 (2005), 1979.01~2003.12.로부터 모든 방향별로 연 최대풍속을 구하고, 이를 방향별로 평균한 값을 재현주기 1년 풍속으로 결정하였다. 산출결과는 Table 2와 같다[5].

Table 2: The velocity (cm/s) of a moving fluid according to re-turn period and wind directions

| period (year) | N | NNE | NE | E | E | ESE | SE | SSE |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1yr | 12.77 | 11.06 | 10.4 | 9.565 | 9.723 | 10.72 | 10.72 | 11.17 |
| 50yr | 16.85 | 16.31 | 15.81 | 14.26 | 14.10 | 15.08 | 14.51 | 14.65 |
| period (year) | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW |
| 1yr | 11.6 | 11.46 | 10.74 | 10.2 | 10.87 | 12.19 | 13.87 | 14.41 |
| 50yr | 15.01 | 14.91 | 13.68 | 14.18 | 13.94 | 14.83 | 16.22 | 17.61 |

불규칙파를 분석하기 위한 방법으로는 과량 스펙트럼 법을 이용하였으며, 한국 해양연구원에서 제시한 50년 빈도의 유의파고 $H_{1/3} = 7.0m$ 와 유의파주기 $T_{1/3} = 11.8s$ 에 대한 스펙트럼 모델을 Table 3과 같이 분석하였다[5].

Table 3: The peaks spectral period according to spectral models

| No | HS | TS | spectrum | Peak spectral Period, T_p |
|----|----|-------|----------|-----------------------------|
| 1 | 7m | 11.8s | B-M | 12.3457s |
| 2 | | | JONSWAP | 12.6582s |

2.2. 지지구조물 하중 해석

과량에 의한 하중을 산정하기 위해서는 Morison Formular를 이용한다. 단위 길이 당 과하중은 아래와 같다.

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A u^2 + \rho C_m V \frac{du}{dt} \quad (2)$$

여기에서, C_m 은 Inertia 계수, C_D 는 Drag 계수, A는 단위면적, u는 물 입자 속도이다.

조력하중은 임의 지점에서 여러 가지 형태의 조류의 합으로 이루어져 있으므로, 설계변수를 결정하기 위해서는

실제로 측정을 하거나 기록된 자료를 사용해야 한다고 한다. 따라서 조류의 속도는 소유주의 설계 시방서에서 현장 데이터의 수심에 따라 결정되어지지만, 이러한 데이터가 없을 경우 식 (3)을 이용하여 계산한다[8][9].

$$V(z) = V_{tide}(z) + V_{wind}(z) \quad (3)$$

$V(z)$ 는 Sea Floor에서 거리 z인 지점의 Total Current Velocity, V_{tide} 는 해수면에서 Tide Current Velocity, V_{wind} 는 해수면에서 Wind Generated Current Velocity 이다.

타워에 작용하는 풍하중은 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$F_{wind-t} = \frac{1}{2} A C_D \rho_a V_w^2 \quad (4)$$

여기에서, A는 바람에 영향을 받는 타워 면적, C_D 는 추력계수, ρ_a 는 공기밀도, V_w 는 바람의 속도이다. 기타 하중으로는 빙하중과 지진, 충격하중 등이 있다.[10][11].

3. 해상풍력 지지구조물 설계/해석

해상풍력발전기 지지구조물은 해상의 다양한 환경하중 조건 하에서 발전기의 수명이 지속되는 기간 동안 충분한 구조강도를 유지하여야 한다. 하중평가과정을 거쳐 산정된 하중케이스를 지지구조물에 적용한 뒤, 유한요소법을 응용한 상용프로그램(ANSYS)을 이용하여 지지구조물 중요 부위의 변위, 응력, 변형률, 피로수명 등의 평가를 수행하였다.

3.1. 해상 풍력 지지구조물 설계

대상 지지구조물 형식(Jacket Type)과 설계에서 5MW 급 Substructure의 Transition Piece 설계 초기값은 상온가공을 고려하여 t=80mm 기준으로 설계하였으나, 1차 해석결과 변형

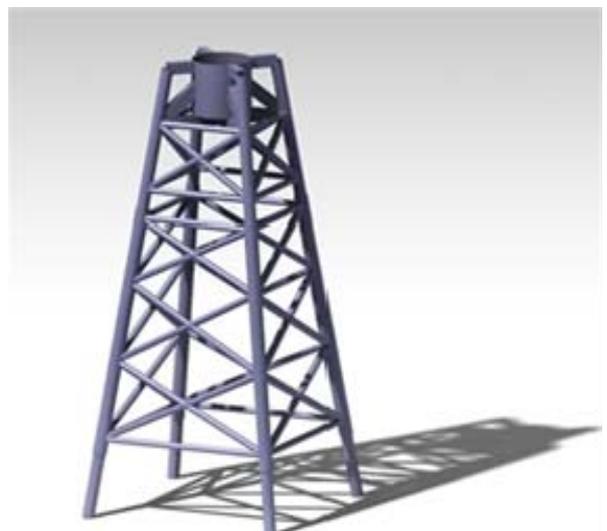


Figure 2: Jacket Type Substructure

량이 크게 발생하여 100mm 로 재설계를 하였다.

공간은 수심을 고려하여 2단으로 설계하였으며, 각단의 높이는 25 m를 기준으로 대수심에서 소켓방식으로 조립이 가능토록 하였으며, 2단 조립시 전체 높이는 50 m의 대수심 까지 설치 할 수 있도록 설계 하였다.

3.2. 해상 풍력 지지구조물 해석

3.2.1. 해석 절차

해상풍력 지지구조물 해석을 위해서 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용한다. ANSYS Design Modeler를 이용하여 3D Beam 구조 모델링을 한 뒤, 하중에 대한 구조 해석을 ANSYS Design Simulation으로 수행한다. ANSYS workbench의 BEAMCHECK 기능을 이용하여 “AISC WSD” Edition 9에 따른 unity check를 수행한다[12].

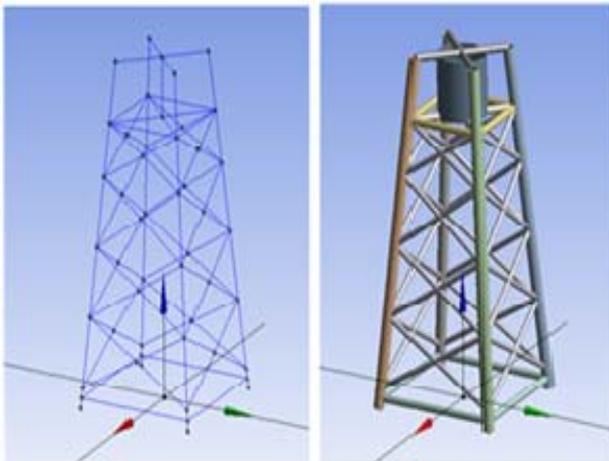


Figure 3: 3D BEAM model

3.2.2. 경계 조건 및 방향별 하중 부과

해석을 진행시키기 위한 경계조건으로는 해저면에 닿는 4개 부분을 완전 고정하여 자유도를 구속시켰으며, 하중해석은 GH-BLADE에서 계산된 여러 하중 조합 중 가장 큰 하중을 x,y,z 방향별로 부가시켜 해석을 진행하였다. 하부 구조물에 걸리는 방향별 하중부과 값과 하중 적용 방향은 Table 4, Figure 4와 같다.

본 연구에서 적용한 해상 풍력 발전기 하부구조물의 중량 및 물성치는 Table 5에 나타내었다. 상부 구조물의 설계 적용하중은 total weight에 안전율 10%를 곱한 값으로 770 톤을 적용시켰으며, 마찬가지로 Jacket type의 하부구조물 중량은 수치계산 후 660톤의 설계 하중을 적용시켰다[13].

Table 4: Load of each direction

| 구분 | Fx | Fy | Fz |
|-----------|---------|--------|--------|
| Load (kN) | -6760.4 | 1796.7 | 1741.6 |

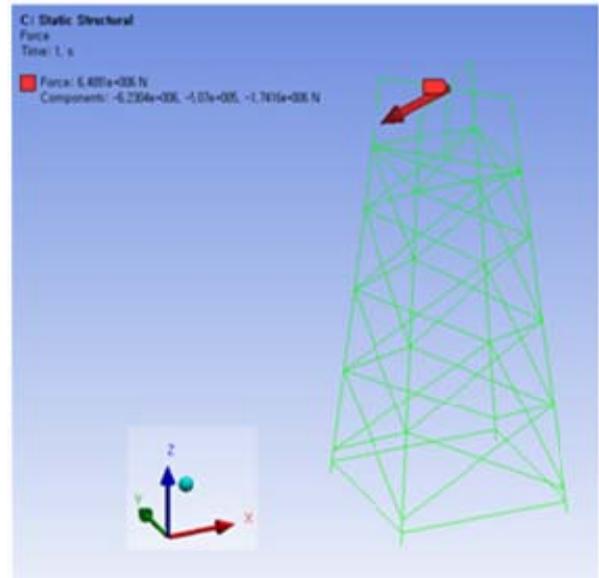


Figure 4: Direction of total load

Table 5: Weight and Properties of Structure

| Wind Turbine | | |
|--|-----------------------------|-----------|
| Item | Specification | Weight |
| Nacelle+Hub | 20.0 × 6.0 × 6.0m | 334.4 ton |
| | (L × B × H) | |
| Blade | (67.0+1.0m/H) × 3Pcs | 92.4 ton |
| Tower | 71.8m (3Pcs) | 340.2 ton |
| Total Weight | - | 770.0 ton |
| Hub Ht. | 100.0m above M.W.L | |
| Rotor Dia | 140.0 m | |
| Substructure | | |
| Item | Specification | Weight |
| Transition Piece | 6.0 × 9.9m | 231.0 ton |
| Jacket | 10.0 × 28.0m | 429.0 ton |
| Jacket materials property of matter that applied to interpretation | | |
| Modulus of elasticity | 200000 Mpa | |
| Poisson's ratio | 0.3 | |
| Density | 7.80E-06 kg/mm ³ | |

3.3. 해석 결과

3.3.1. 설계한 구조물 변위 해석

해석결과 적용 하중을 부분 별로 부가하여, Axial-Fx, SHEAR-Fy, SHEAR-Fz, TORQUE-Mx, MOMENT-My, MOMENT-Mz에 대하여 반복 수행한 결과 구조적으로 크게 변화가 없음을 보였다. 그리고 Combined Case(AXIAL-x, SHEAR-y, SHEAR-z, TORSION, BENDING, MAX SHEAR)에서도 허용응력에 대한 변위량이 1이내로써 안정성(stability)을 보였다.

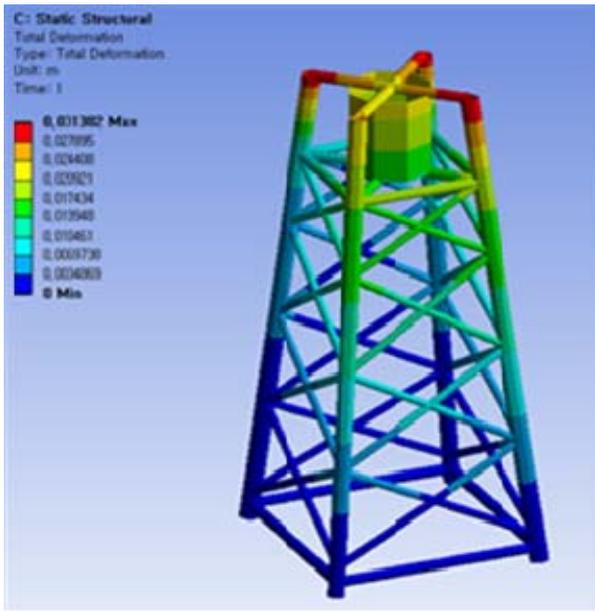


Figure 5: Total Displacement (m)

3.3.2. 응력분포 해석결과

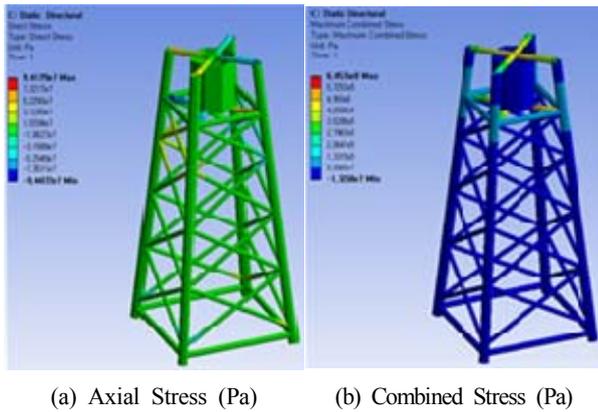


Figure 6: Stress distribution

설계 지지구조물에 작용하는 최대하중에 대한 구조물의 안전성 분석을 수행한 결과(ASAS EXECUTION CONTROL OPTIONS) 구조물의 변위발생은 설계조건에서 허용응력 355MPa이내로써 안정적인임을 알 수 있다.

3.3.3. Code Check 해석결과

다음은 AISC WSD Edition 9에 따른 Member unity check의 수행 결과를 Figure 7에 나타내었다.

이는 Table 6의 Ocean Environment를 적용시켜 Axial stress, Y-Bending stress, Z-Bending stress, Yield stress에 따른 check를 나타낸 것이다.

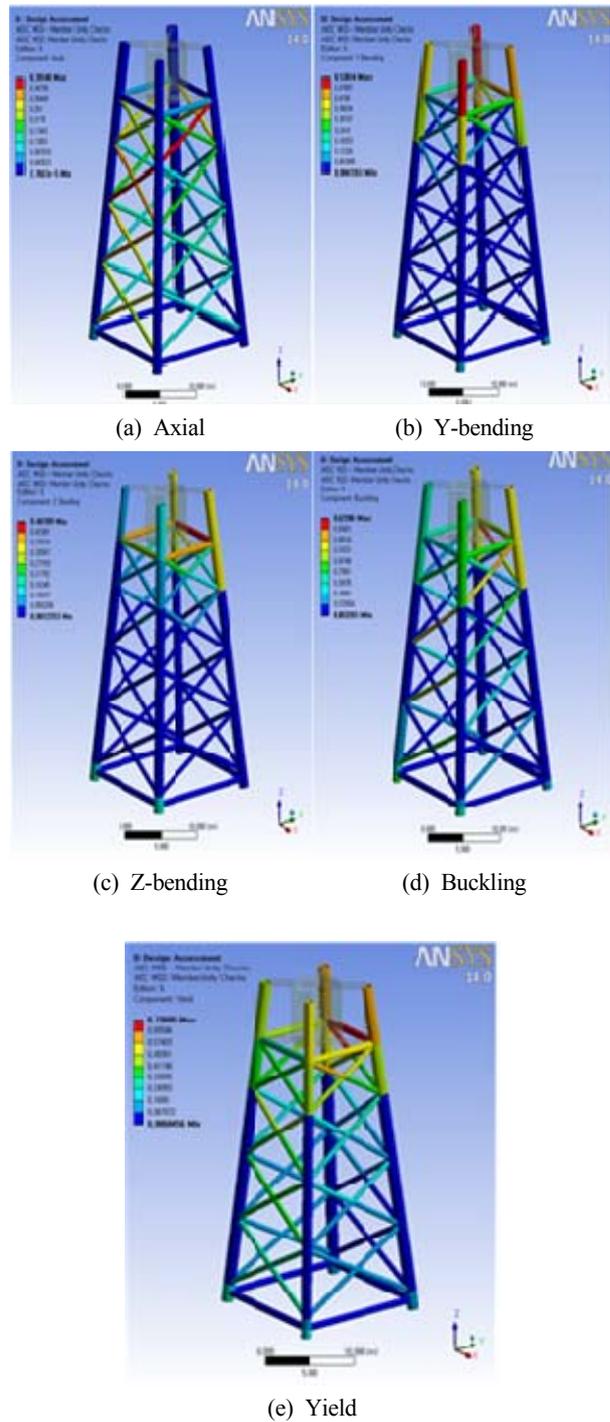


Figure 7: Unit check results

부가하중을 나타내는 Figure 7과 Table 6의 Ocean Environment를 구조해석에 적용시켜, 설계 지지구조물에 대하여 (a) Axial stress, (b) Y-Bending stress, (c) Z-Bending stress, (d) Buckling, (e) Yield stress에 따른 check를 수행한 결과, 지지구조물에 작용하는 굽힘 응력 모두 1이하의 값을 보임으로 구조적 안정성을 확보하였다고 볼 수 있겠으나,

(b)에서와 같이 일부부재(해양환경 파력의 작용방향)에 대하여는 추가적인 보강이 필요함을 확인할 수 있었다.

Table 6: Ocean Environment

| | |
|------------------|-----------------------|
| Mean Water Level | 6.73 m |
| Water Density | 1025kg/m ³ |
| Tide Height | 3.36 m |
| Surge Height | 4.42 m |
| Wave Height | 13.76 m |
| Wave Period | 13.15 s |

4. 결론

- ANSYS Workbench를 이용하여 본 연구의 5MW급 해상풍력발전 시스템을 탑재하는 자켓 타입형 하부구조물의 최적 설계에 대한 해석 결과, 극한하중 경우에 대한 구조물은 변형량이 1이하로 나타났다. 이는 허용 응력 설계법으로 분석 수행한 결과 안전성을 확보한 것으로 확인 되었다.
- API WSD Edition21에 따른 Member unity check 수행하였으며 해석 결과 모두 1이하의 값을 보여 구조물은 하중조건에 대해 안전할 것으로 판단된다.
- 본 연구 해석과정에서 지지구조물 구조적 고유진동수 범위에 있는 파랑 에너지가 구조물에 중요 동적반응을 야기하기에 충분한 크기로 나타나, 동적해석(Dynamic Analysis)을 고려하여야 함을 확인 하였다.
- 하중의 변화가 큰 Gust case(DLC1.5, 1.6)에 대해 하중의 위상을 변화시켜 해석 수행 후, 각부재의 Member Unity check 결과 지지구조물의 구조적 안전성을 확인 하였다.
- 본 연구에서 수행한 설계 또는 해석은 국내 연안에 적합한 해상풍력 하부구조물에 대한 동적해석기술의 근간이 되어 국내 기술의 신뢰성 확보의 계기가 될 수 있겠다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구결과 (No. 2013H1B8A2023237)과 2013년도 호남광역경제권 선도산업 산업생태계 지원 사업(그린, 레저 선박 기자재 개발을 위한 기술 인력 지원)의 지원으로 연구되었습니다.

References

[1] M. Hartnett, T. Mullarkey, and G. Keane, "Modal analysis of an existing oshore platform," *Engineering Structures*, vol. 19, pp. 487-498, 1997.

[2] A. S. Elliott, "Analyzing rotor dynamics with a gen-

eral-purpose code," *Mechanical Engineering*, vol. 112, no. 12, pp. 21-25, 1990.

[3] IEC 61400-1 Ed. 3, *Wind Turbines - Part 1: Design Requirements*, International Electrotechnical Commission (IEC), 2005.

[4] A. I. Korotkin, *Added Masses of Ship Structures*. Springer Science and Business Media B:V, 2009.

[5] M. Seidel, "Jacket substructures for the repower 5MW wind turbine," *Proceedings European Offshore Wind Conference*, p. 32, 2007.

[6] W. Musial, S. Butterfield, and B. Ram, "Energy from offshore wind," *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, pp. 1-4, 2006.

[7] G. Watson, *A Framework for Offshore Wind Energy Development in the United States*, Massachusetts Technology Collaborative, USA, 2005.

[8] M. L. Buhl, "CombEEv user's guide," NREL/EL-500-31664, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, October 2003.

[9] D. T. Greenwood, *Principles of Dynamics*, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA, 1998.

[10] J. N. Newman, *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1997.

[11] B. J. Jonkman and M. L. Buhl, "TurbSim user's guide," NREL/EL-500-41136, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, March 2007.

[12] P. J. Moriarty, and A. C. Hansen, "AeroDyn theory manual," NREL/EL-500-36881, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, December 2005.

[13] O. M. Faltinsen, *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.