



[2019-12-WD-002]

부유식 풍력 발전기의 자유도 운동에 따른 공력 및 구조 해석

한원석¹⁾ · 전민우²⁾ · 이수갑³⁾*

Aerodynamics and Structural Dynamics of Floating Offshore Wind Turbine under Different Degrees of Freedom

Wonsuk Han¹⁾ · Minu Jeon²⁾ · Soogab Lee³⁾*

Received 23 July 2019 Revised 10 September 2019 Accepted 4 October 2019

ABSTRACT A floating offshore wind turbine (FOWT) has six degrees of freedom (DOF) motion caused from stochastic wind and wave loads. As each type of FOWT support platform has different characteristics of the 6-DOFs motion, it is important to understand the effect of 6-DOFs motion on the aerodynamic performance and structural loads of FOWTs. In this study, two different types of support platform, Spar-type OC3-Hywind and tension-leg platform (TLP)-type MIT/TLP, were investigated for a NREL 5-MW wind turbine. The aerodynamic performance and structural loads were calculated from NREL's FAST code where aerodynamics module is replaced with an unsteady vortex lattice method (UVLM). Aerodynamic power performance and fatigue loads of the two different support platforms were compared. The aerodynamic characteristics, power performance and root flapwise bending moment, showed comparable results for both Spar and TLP. In the structural dynamics aspect, however, TLP showed 22% less damage equivalent load (DEL) than Spar, according to the axial force. Furthermore, the TLP's DEL of fore-aft bending moment showed 16% less than Spar. In addition, the damage rate showed similar results to the DEL.

Key words Floating offshore wind turbine(부유식 풍력 발전기), Platform(플랫폼), Vortex lattice method(와류 격자법), Fatigue(피로)

Nomenclature

A : cross-sectional area

I_x : sectional moments of area to X axis

I_y : sectional moments of area to Y axis

M_x : side-to-side bending moment

M_y : fore-aft bending moment

m : Wohler exponent

N : number of cycles until failure

N_z : axial force

r : local radius

Γ : strength of circulation

ϕ : velocity potential

ϕ^* : total velocity potential

1) M.S. Candidate, Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

2) Ph. D, Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

3) Professor, Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

*Corresponding author: solee@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-7384

Fax: +82-2-876-4360

- ϕ_{∞} : free-stream potential
 σ : axial stress
 σ^{ult} : ultimate design stress
 σ^{MF} : fixed mean stress
 σ^{RF} : cycle's stress range

Subscript

- DEL : damage-equivalent load
 DOF : degree of freedom
 FAST : fatigue, aerodynamics, structures, and turbulence
 FOWT : floating offshore wind turbine
 JONSWAP : joint north sea wave project
 NVCM : nonlinear vortex correction method
 TLP : tension-leg platform
 UVLM : unsteady vortex lattice method

1. 서론

풍력 발전기는 육상 풍력 발전기 뿐만 아니라, 바다에 설치 될 수 있는 해상 풍력 발전기가 있다. 그 중에서도, 바다의 수심이 낮은 곳에 설치되는 고정식 해상 풍력 발전기가 있고, 수심이 깊은 곳에 설치되는 부유식 풍력 발전기가 있다. 해상 풍력 발전기는 로터에서 발생하는 소음과 시각적 유해성을 해소 할 수 있기 때문에 빠르게 증가하고 있다. 또한 풍력 발전기의 공력에 상당한 영향을 주는 바람의 세기와 일관성 또한 해안에서 멀수록 좋아지는 경향이 있다. Musial W는 고정식 풍력 발전기는 깊은 바다에서는 경제 적이지 않으며, 깊은 바다에서는 부유식 풍력 발전기가 더 경쟁력이 있다는 연구 결과를 내었다^[1]. 또한 오랜 기간 동안 기름 및 가스 사업에서의 부유식 시스템 사용은 부유식 시스템의 용이성을 증명하였다.

부유식 풍력 발전기는 타워를 받치는 플랫폼이 고정되어 있지 않아서 복잡한 유동 상태에서 작동한다. 주로 바람뿐만 아니라 파도에 의해 비정상 상태를 나타내고 이에 따라 6-자유도 운동을 한다. 6-자유도 운동은 6개의 자유도 운동을 의미하며, 병진 운동인 surge, sway, heave와 회전

운동인 roll, pitch, yaw를 나타낸다(Fig. 1). 이 6-자유도 운동은 부유식 풍력 발전기의 플랫폼 종류에 따라 달라질 수 있다. 부유식 풍력 발전기에 사용되는 대표적인 플랫폼 중 Spar와 Tension-leg platform(TLP)를 본 연구에서 사용하였다.

Fig. 2는 Spar와 TLP의 모델링이다. 두 플랫폼은 각각 다른 안정성 방식을 가지고 있기 때문에 6-자유도 운동의 크기 및 변동성 또한 다르다. Spar의 경우 바닥짐(Ballast)으로 안정성을 가지며, TLP의 경우 계류선의 장력으로 안정성을 가진다.

본 논문에서는 두 종류의 다른 플랫폼의 자유도 운동에 따른 공력 및 구조 특성을 연구하였다. 먼저 두 종류 플랫폼의 6-자유도 운동을 모사하기 위해 NREL에서 개발한 FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence)

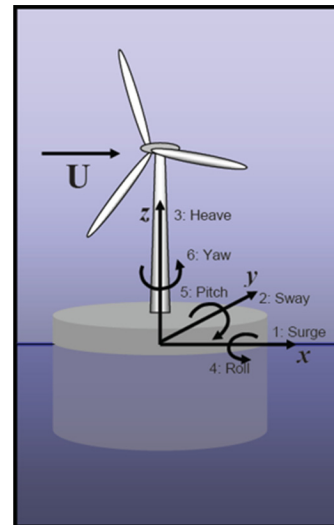


Fig. 1. 6-DOFs of FOWT

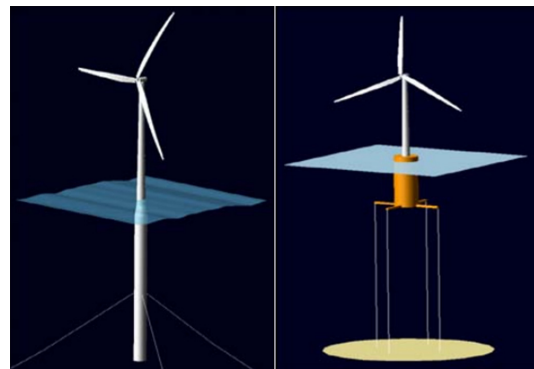


Fig. 2. Spar and TLP configuration

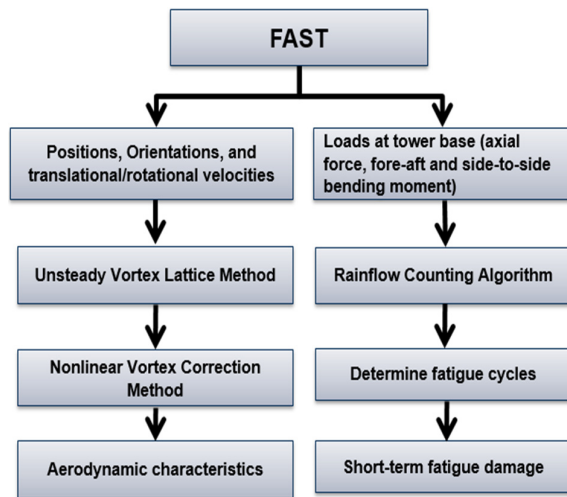


Fig. 3. Flowchart of analysis

를 사용하였다^[2]. 두 종류 플랫폼의 자유도 운동을 고려하여 로터 면에서의 공력 특성인 출력량(Rated power)과 블레이드 Root부의 flapwise bending moment(RFBM) 해석을 수행하였다. 또한 타워 하부의 Bending moment 해석을 수행하여 이에 따른 단 시간의 Damage rate 및 DEL (Damage-equivalent load)를 구하여 비교하였다. Figure 3은 공력 및 구조 해석의 전체 순서도를 나타낸 것이다. 먼저 두 종류의 플랫폼을 동일한 단일 바람 및 해랑 조건에서 FAST를 통하여 해석을 한다. 해석 후 결과를 비정상 와류 격자(UVLM)와 비선형 와류 보정 기법(NVCM)을 이용하여 공력 특성을 분석하였다. 다음으로 FAST를 통해 나온 하중 데이터로 레인플로 집계법(Rainflow counting algorithm)을 통해 무작위한 하중 및 응력의 주기를 계산하였다. 이에 따른 피로 주기를 결정하고, 각 시간 영역의 단기간의 손상 증가 하중 및 손상비를 구하여 플랫폼 간의 비교를 수행하였다.

2. 수치 해석 모델

2.1 5-MW 풍력발전기

본 연구에서 사용된 부유식 풍력 발전기의 타워는 NREL에서 개발한 NREL 5-MW 풍력 발전기를 사용하였다. Table 1은 NREL 5-MW 풍력 발전기의 타워 물성치이다. 블레이

Table 1. Gross properties of the NREL 5-MW wind turbine

Rating	5 MW
Rotor orientation, configuration	Upwind, 3 blades
Control	Variable speed, collective pitch
Rotor, hub diameter	126 m, 3 m
Hub height	90 m
Cut-in, Rated, Cut-out wind speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-in, Rated rotor speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rated tip speed	80 m/s
Overhang, shaft tilt, precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor mass	110,000 kg
Nacelle mass	240,000 kg
Tower mass	347,460 kg
Coordinate location of overall center of mass	(-0.2 m, 0.0 m, 64.0 m)

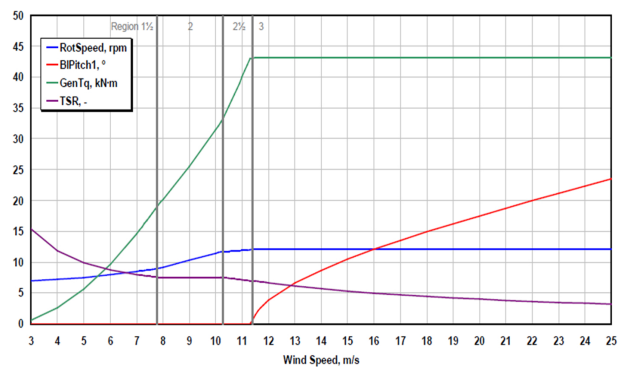


Fig. 4. Wind speed and blade pitch angle

드의 pitch 각도는 Fig. 4에서 나오는 각 풍속에 맞는 table 값을 사용하였다^[3].

2.2 플랫폼 조건

부유식 풍력 발전기의 주요 플랫폼 중 Spar와 TLP는 다른 방식의 안정성 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 OC3-Hywind의 spar 타입과 MIT/NREL의 TLP 타입 플랫폼을 선정하였다. Table 2는 두 플랫폼의 주요 물성치이다^[4].

2.3 바람 및 파도 조건

먼저 두 플랫폼의 6-자유도 운동을 분석하기 위해 풍속은 4 m/s에서 20 m/s 까지 2 m/s의 증가량을 두고 총 9개

Table 2. Summary of properties for Spar and TLP

	OC3-Hywind Spar	MIT/NREL TLP
Water depth	200 m	320 m
Diameter	18 m	6.5 to 9.4 m (tapered)
Water displacement	12,180 m ³	8,029 m ³
Mass, including ballast	8,600,000 kg	7,466,000 kg
CM location of the platform below SWL	40.61 m	89.92 m
Roll inertia about CM	571,600,600 kg·m ²	4,229,000,000 kg·m ²
Pitch inertia about CM	571,600,600 kg·m ²	4,229,000,000 kg·m ²
Yaw inertia about CM	361,400,000 kg·m ²	164,200,000 kg·m ²
Number of mooring lines	8 (4 pairs)	3
Depth to fairleads, anchors	47.89, 200	70, 320
Radius to fairleads, anchors	27, 27	5.2, 853.9
Unstretched line length	151.7 m	902.2 m
Line diameter	0.127 m	0.09 m
Line mass density	116 kg/m	77.71 kg/m
Line extensional stiffness	1,500,000,000 N	384,200,000 N

의 균일한 풍속 데이터를 사용하였고 풍향은 모든 풍속에 대해 0°로 가정하였다. 또한 불규칙적인 파도 상태를 모델링하기 위해 IEC 61400-3 규정에 따른 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였고, 이에 부합하기 위하여 파고를 6 m, 피크 파주기(peak spectral period)를 10초로 가정하였다^[5].

3. 수치해석법

3.1 공력 특성 모델

3.1.1 비정상 와류 격자 기법

비정상 와류 격자 기법은 공기 역학적 양력과 항력을 예측하기 위해 사용된다. 지배 방정식은 라플라스 방정식이며, 본체의 경계 및 후류를 제외한 전체 유동장의 유체가 비회전성 및 비압축성을 가정한다. 그러므로 속도 포텐셜

이 관성의 틀에서 가정되며, 연속 방정식은 식 (1)이다.

$$\nabla^2 \phi^* = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 ϕ^* 는 전체 속도 포텐셜이다. Green 항등식을 이용하여 라플라스식의 일반적 해는 소스(source)와 더블렛(doublet) 분포의 합으로 계산될 수 있다. 식 (1)의 일반적 해는 더블렛 분포를 와류 분포로 치환하면 식 (2)으로 얻을 수 있다.

$$\phi^* = \frac{1}{4\pi} \int_{body+wake} \Gamma n \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS + \phi_\infty \quad (2)$$

식 (2)의 ϕ_∞ 는 자유류의 속도이다. 블레이드의 경계 순환 (bound circulation) 과 와류의 후류는 와류 링 요소에 의해 만들어지며, 두 개의 경계 조건이 필요하다. 첫 번째 경계 조건은 Neumann 경계 조건으로, 물체의 경계면을 통과하는 법선 속도가 0 이어야한다.

$$(\nabla \phi + \phi_\infty) \cdot n = 0 \quad (3)$$

두 번째 경계 조건은 유체에서 물체의 움직임으로 인해 발생하는 유동 교란 인자(flow disturbance)가 물체에서 떨어져야 한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \nabla \phi = 0 \quad (4)$$

경계 조건들을 만족시킨 후, 소용돌이 발(Vortex sheet)에 의해 생성되는 공기력은 Kutta-Joukowski 이론에 의해 계산된다^[6].

3.1.2 비선형 와류 보정 기법

비정상 와류 격자 기법은 두께에 의한 효과와 점성으로 인한 실속을 고려하지 못하기 때문에, 비선형 와류 보정 기법이 사용되었다. 비선형 와류 보정 기법은 비정상 와류 격자 기법에서 나온 단면의 양력을 2차원 look-up table의 양력 및 항력 계수와 맞추는 기법이다^[7]. 로터 블레이드의

3차원 효과를 보정하기 위해서 Du와 Selig의 실속 지연(stall delay) 모델을 추가하였다^[8]. 본 연구에서는 블레이드를 총 28개의 패널로 나누었다.

3.1.3 FAST

FAST는 부유식 풍력 발전기를 포함한 수평축 풍력 발전기의 동적 특성을 모사하기 위해 NREL에서 개발한 오픈소스 도구이다. FAST는 시간 영역에서 비선형적 공력, 수력, 전기, 구조적 모사를 수행하기 위해 여러 개의 구성요소(module)로 이루어져 있다. 본 연구에서는 Minu Jeon이 개발한 FAST-UVLM 코드를 사용하였는데, FAST의 모듈 중 Aerodyn을 UVLM으로 대체한 것으로 Fig. 5는 그 모식도이다.

FAST의 공력 해석 모듈인 AeroDyn은 풍속에 따라 두 가지 모델인 BEM(Blade element momentum)과 GDW(Generalized dynamic wake)를 사용한다^[9]. BEM 모델은 평형 상태의 후류를 가정하기 때문에 동적 유입류 현상을 고려하지 못한다. 반면 GDW와 UVLM은 블레이드의 받음각의 변화 혹은 로터에서의 풍속 변화에 의한 동적 유입류 현상을 고려한다. 하지만 GDW의 경우 로터의 선단 주속비(Tip-speed ratio)가 높은 저속의 경우에서 불안정하였다^[10]. 이에 따라 본 연구에서는 모든 풍속에 대해 UVLM을 사용하여 공력 하중을 구하였다.

구조 특성의 경우 FAST의 HydroDyn을 이용하여 파도에 의한 반복되는 하중 및 굽힘 모멘트를 구하였다. HydroDyn의 경우 포텐셜 이론과 Morison 방정식을 기초에 두고 있으며, 점성 저항력은 Morison 방정식에서 항력 항에 의해 구할 수 있다. 플랫폼 계류선의 장력은 표준 준정적 모델로 계산되었다.

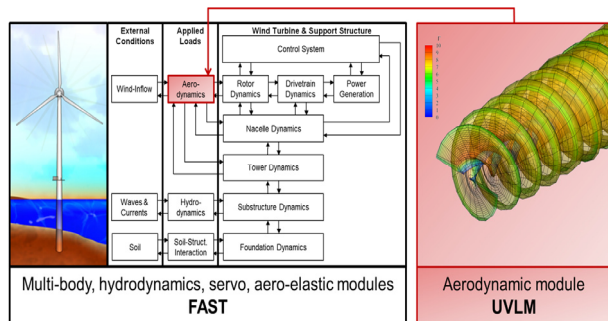


Fig. 5. FAST-UVLM coupling method

3.2 구조 특성 모델

FAST로 구한 타워 하부의 반복적 하중 및 굽힘 모멘트를 이용하여 피로 해석을 수행하였다. 단기간의 피로 해석을 수행하기 위해, IEC 61400-3에 의거하여 단일 풍속에 대해 10분 동안의 데이터를 사용하였다^[5]. 피로 손상은 축 방향 응력 및 전단 응력에 의해 계산되어야 하는데, 전단 응력에 의한 피로 손상은 축 방향 응력에 비해 매우 작다^[11]. 따라서 축 방향 응력만 피로 손상 계산에 고려되었다. 하중에 의한 단면의 변형을 제외하면, 축 방향 응력은 공칭 응력과 같게 되는데 그 식은 아래와 같다^[12].

$$\sigma = \frac{N_z}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot r \cdot \cos\theta - \frac{M_x}{I_x} \cdot r \cdot \sin\theta \quad (5)$$

위 식의 N_z 는 타워의 위쪽을 향하는 축 방향의 힘이고, M_y 와 M_x 는 각 전-후부 및 양측면의 굽힘 모멘트이다. A 는 공칭 단면적, r 은 단면의 반지름, 그리고 I_x 와 I_y 는 각 x 축 및 y 축의 관성 모멘트이다. 본 연구에서의 바람 및 파도의 방향은 0° 이기 때문에 식 (5)의 측면 굽힘 모멘트 항은 0이 되므로 무시한다. 이에 따른 새로운 식은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{N_z}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot r \quad (6)$$

이에 따라 본 연구에서는 축 방향 힘과 전-후부의 굽힘 모멘트에 의한 피로 손상을 구하였다. 피로 손상은 레인플로 집계법을 사용하여 피로의 주기를 계산하고 S-N 곡선을 구하였다.

$$N = \left(\frac{\sigma^{ult} - |\sigma^{MF}|}{\frac{1}{2} \sigma^{RF}} \right)^m \quad (7)$$

N 은 구조적 파손(failure)까지의 주기의 갯수, σ^{ult} 는 응력의 극값, σ^{MF} 는 단면 평균 응력, σ^{RF} 는 주기의 응력 범위 값, 그리고 m 은 Wohler 지수이다. σ^{ult} 는 응력의 최댓값과 계수인자의 곱으로 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 계수인자를 20으로 선정하였다. 응력의 최댓값은 MEXtreme

프로그램을 사용하여 구하였다^[13]. 본 연구에 사용된 타워 하부의 구조를 고려하여, S-N 곡선 선정을 위한 m 값을 지정하기 위해 DNV-GL의 'air' 범주를 참고하였다^[14]. 또한 타워 하부의 피로 해석을 수행한 여러 연구를 참고하여 m 값을 4로 선정하였다^[12,15]. 마지막으로, 손상 평가 하중은 NREL에서 개발한 후처리 프로그램인 MLife를 사용하였다^[16].

4. 결 과

4.1 자유도 운동 비교

두 플랫폼 Spar와 TLP의 6-자유도 운동을 구하기 위해 FAST를 사용하였다. 모사 시간은 각 풍속마다 다르게 설

정 되었으며, 총 20 바퀴 회전을 기준으로 선정되었다. 풍력 발전기의 경우 후류의 vortex 강도가 낮기 때문에 대형 풍력 발전기의 경우 약 6 바퀴 이상 빠져나가면 수렴이 된다. Fig. 6과 7은 각 Spar와 TLP의 6-자유도 운동을 각 풍속 별로 나타낸 것이다.

그래프의 좌측 y 축은 병진운동인 surge, sway, heave 움직임에 대한 것이고, 우측 y 축은 회전 운동인 roll, pitch, yaw 움직임을 나타낸 것이다. 두 플랫폼의 6-자유도 운동은 공통적으로 병진운동인 surge, 그리고 회전운동인 pitch 움직임을 주요하게 나타냈다. TLP의 경우 yaw 움직임 또한 주요하게 나타났으나, spar의 yaw 움직임과 비교하였을 때 surge 및 pitch 움직임에 비해 그 차이가 크지 않았다. 이에 따라 Fig. 8과 Fig. 9에서 두 플랫폼의 surge와 pitch 움직임을 비교하였다.

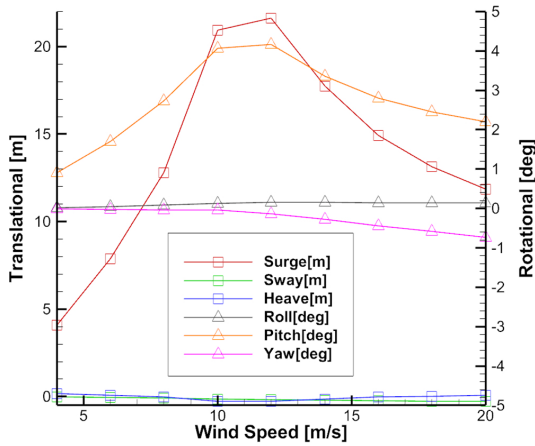


Fig. 6. 6-DOF of Spar

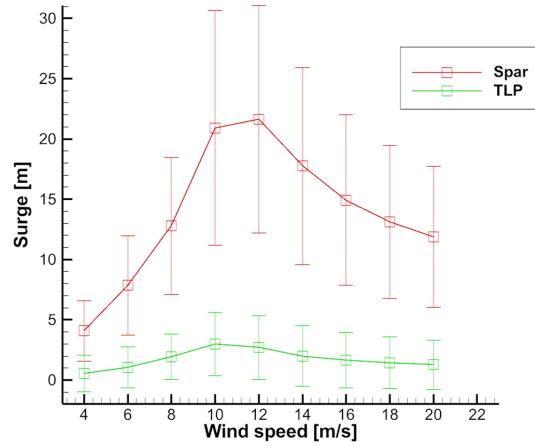


Fig. 8. Surge motion comparison

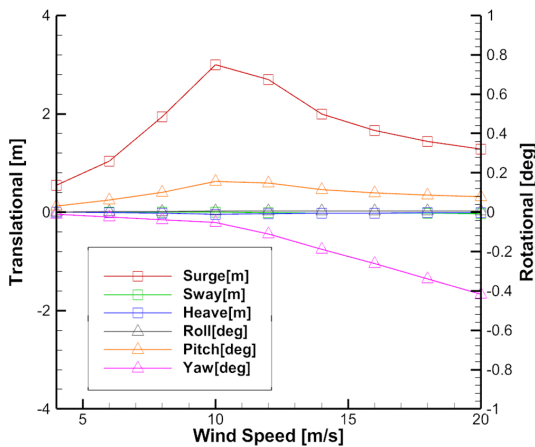


Fig. 7. 6-DOF of TLP

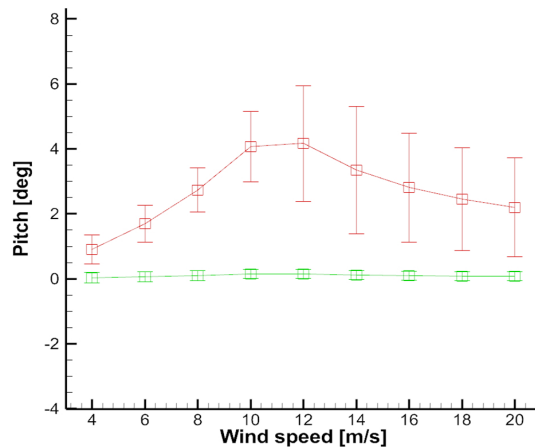


Fig. 9. Pitch motion comparison

비교 그림에서의 에러 바는 각 움직임의 표준 편차를 나타낸 것이다. Spar의 경우 각 풍속마다 surge와 pitch 움직임이 발산하여 0° 로 회복하지 못하였다. 하지만 TLP의 surge와 pitch 움직임은 각 풍속마다 0° 로 회복하는 경향을 보였다. 특히 TLP의 surge와 pitch 움직임의 변화율은 Spar에 비교하여 매우 작았다.

4.2 공력 특성 결과

로터 면에서의 공력 특성인 출력량과 블레이드의 RFBM을 각 플랫폼에 따라 산출 한 뒤 비교를 수행하였다. Fig. 10은 각 풍속에 대한 출력량의 비교 그래프이다.

정격 풍속 이후 두 플랫폼에 대해 출력량과 RFBM 모두 비슷한 결과를 보여주었다. 그래프에서 타워의 정격 풍속

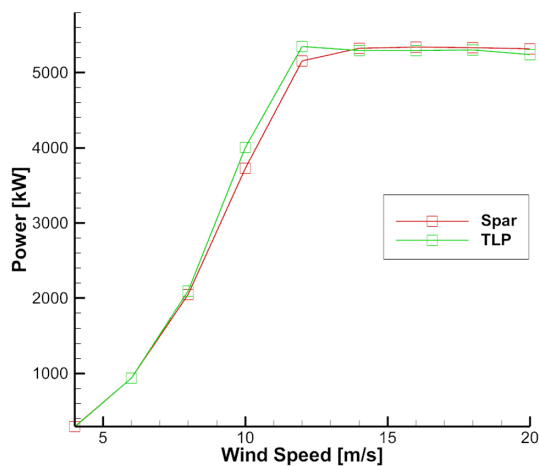


Fig. 10. Power production comparison

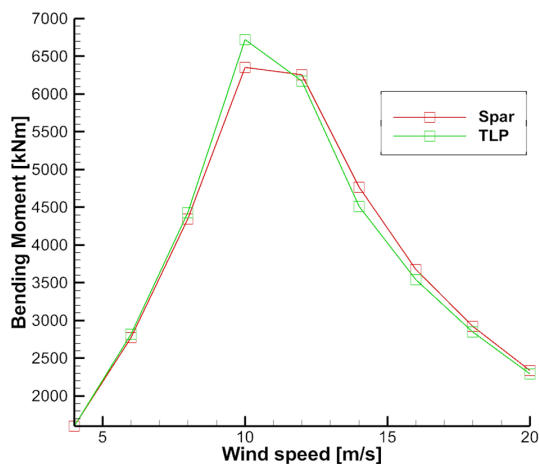


Fig. 11. Wind speed vs. RFBM

인 11.4 m/s 이후로는 정격 출력량인 5 MW로 수렴하는 모습을 보이고 있다. 이는 초기 조건에서 블레이드의 pitch 각도를 풍속에 따른 정격 각도로 설정했기 때문에 나오는 결과로 보여진다. Fig. 11은 각 풍속 당 블레이드 root부의 flapwise 굽힘 모멘트이다. 이 결과 또한 두 플랫폼에 대해 비슷한 값과 경향성을 보여주었다. Sant와 Cuschieri의 연구에 따르면, surge와 pitch 운동은 로터의 추력과 출력량에 상당한 영향을 준다고 한다^[17]. 하지만 본 연구의 초기 조건처럼 블레이드의 pitch 각도를 풍속 및 로터의 속도에 해당하는 데이터에 맞추면 정격 출력량으로 수렴하는 것으로 보아, 로터 면에서의 공력 특성은 플랫폼의 6-자유도 운동에 크게 영향을 받지 않고, 블레이드의 pitch 각도에 따라 달라짐을 알 수 있다.

4.3 구조 특성 결과

타워 면에서의 구조 특성 중 FAST를 이용하여 각 풍속 당 타워 하부의 굽힘 모멘트 값을 구하여 결과를 비교하였다. 굽힘 모멘트의 결과에 따라 특정 풍속에서의 피로도를 분석하였다.

4.3.1 굽힘 모멘트

Fig. 12와 Fig. 13은 각 플랫폼마다 타워 하부의 전-후부 및 양면의 굽힘 모멘트를 각 풍속에 따라 비교한 것이다.

타워 전-후부 굽힘 모멘트의 경우 10 m/s 이후부터 두 플랫폼의 차이가 매우 커짐을 알 수 있다. 특히 14 m/s에

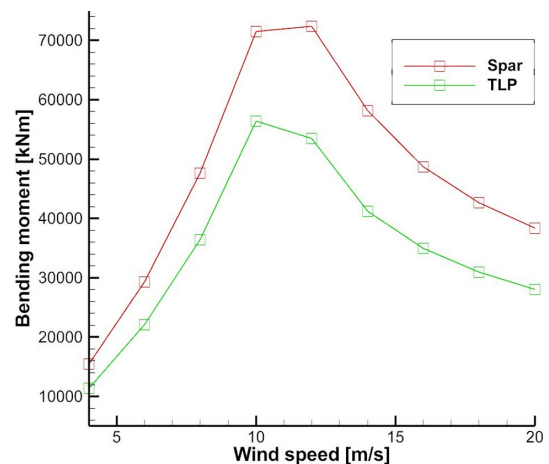


Fig. 12. Fore-aft bending moment comparison

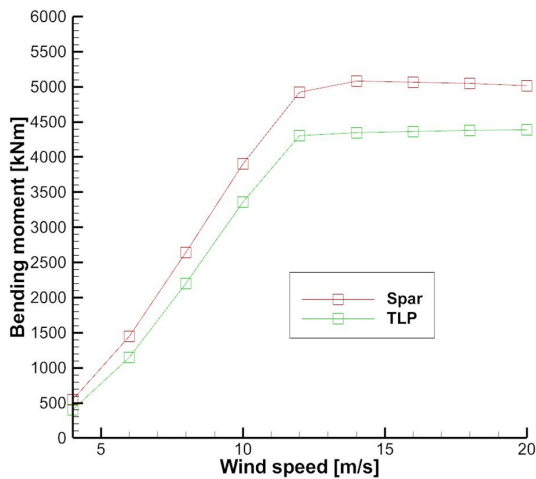


Fig. 13. Side-to-side bending moment comparison

서 그 차이가 34%로 가장 컸다. 반면 양면의 굽힘 모멘트는 차이가 존재 하였으나, 전-후부 굽힘 모멘트에 비해 그 차이가 작았다. 타워 하부의 굽힘 모멘트의 차이는 서로 다른 플랫폼에 의한 타워 움직임의 차이에 기반 할 수 있는데, 위의 surge와 pitch 움직임의 차이가 이를 뒷받침한다. 이 x축에 따른 모션은 전-후부 굽힘 모멘트에 영향을 미치는 하중을 더 크게 유도한다. 이 결과를 토대로, 본 연구에서는 하부 구조물의 차이에 따른 피로 해석을 수행하였다.

4.3.2 피로 분석

피로 분석을 위해 굽힘 모멘트의 차이가 가장 컸던 풍속 14 m/s의 조건을 사용하여 600초간의 모의실험을 수행하였다. 이는 IEC-61400-3에 의거하여 10분의 충분한 시간으로 수렴하는 데이터를 얻기 위함이다^[5]. 피로 하중의 대부분이 정상 가동 상태 (Normal operation)에서 비롯되기 때문에, 시뮬레이션 조건은 IEC 표준의 설계 조건인 design load case(DLC) 1.2에 따라 설정되었다^[18,19]. DLC 1.2는 NTM(Normal turbulence model) 바람 모델을 사용하며, 파도의 모델은 NSS(Normal Sea State)로 설정하였다. 손상 증가 하중은 파도의 영향을 제외한 육상 풍력 발전기에 대한 비율로 비교를 하였다. Table 3은 손상 증가 하중

Table 3. Damage Equivalent Load

DEL	Spar/Land	TLP/Land
Axial Force	2.10	1.69
Fore-aft Bending Moment	4.55	3.86

의 비율 결과이다. 축 방향 힘의 경우 Spar의 결과 값이 TLP의 값보다 약 22% 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 타워 하부 전-후부 굽힘 모멘트의 경우 Spar의 결과 값이 TLP의 값보다 약 16% 더 크게 나타났다. 두 플랫폼 모두 축 방향 힘과 전-후부 굽힘 모멘트의 손상 증가 하중이 육상 풍력 발전기보다 일정 배수 이상으로 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 부유식 풍력 발전기의 6-자유도 운동에 의한 하중의 변화량이 풍하중에만 의존되는 육상 풍력 발전기의 하중 변화량보다 크기 때문이다. 또한 TLP의 경우 주요 자유도 운동인 surge 및 pitch의 평균 값 및 변화량이 Spar에 비해 작기 때문에 이에 따른 손상 증가 하중 또한 Spar의 값보다 작은 것을 확인 할 수 있다.

Table 4는 손상비의 결과이다. 마찬가지로 Spar의 손상비 값이 TLP의 값보다 컸는데, 두 플랫폼 모두 축 방향 힘의 손상비보다 전-후부 굽힘 모멘트의 손상비가 더 컸다.

Table 4. Damage rate

Damage Rate	OC3-Hywind	MIT/TLP
Axial Force	2.07E-016	8.85E-017
Fore-aft Bending Moment	6.98E-005	2.63E-008

5. 결론

본 연구에서는 부유식 풍력 발전기의 6-자유도 운동이 두 개의 플랫폼을 비교하여 공력 및 구조적으로 미치는 영향을 분석하였다.

6-자유도 운동 중 surge와 pitch가 주요하다는 것을 FAST를 이용하여 각 풍속에 따른 평균 및 표준 분포를 통해 알 수 있었다. Spar의 경우 surge와 pitch 운동의 크기가 TLP와 비교하여 더 큰 것을 확인하였으며, 특히 pitch 운동의 경우 TLP는 거의 변화가 없음을 확인하였다.

로터 면에서의 공력 특성인 출력량과 블레이드의 RFBM을 비정상 와류 격자 기법과 비선형 와류 보정 기법을 이용하여 구하였다. 출력량의 경우 두 플랫폼 모두 정격 속도 이상에서 정격 출력량인 5-MW로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한 블레이드의 RFBM 또한 두 플랫폼이 비슷한 값을 산출해냈다. 이는 초기 조건에서 풍속에 따른 블레이드의

정격 pitch 각도를 맞추었기 때문에 나타난 결과이다. 따라서 공력 특성은 플랫폼의 6-자유도 운동이 아니라 블레이드의 pitch 각도에 영향을 받았다.

타워 면에서의 구조 특성인 타워 하부의 굽힘 모멘트와 피로는 차이가 크게 나타났다. 정격 풍속인 11.4 m/s를 전후로 두 플랫폼의 전-후부 굽힘 모멘트 및 양면의 굽힘 모멘트의 차이가 더 커졌다. 특히 14 m/s에서 그 차이가 가장 컸으며, 전-후부 굽힘 모멘트의 차이가 양 측면의 굽힘 모멘트의 차이보다 더 컸다. 14 m/s에서의 축 방향 힘의 손상 증가 하중은 Spar의 값이 TLP의 값보다 약 22% 더 컸고, 전-후부 굽힘 모멘트의 손상 증가 하중은 약 16% 더 컸다. 손상비 또한 Spar의 값이 TLP보다 더 크게 나타났는데, 특히 전-후부 굽힘 모멘트의 손상비가 축 방향 힘의 손상비보다 매우 컸다. 따라서 축 방향 힘보다 전-후부 굽힘 모멘트에 의한 손상의 영향이 더 큼을 알 수 있다. 결과적으로 6-자유도 운동에 대해 공력적인 영향은 크게 작용하지 않았으나, surge와 pitch의 크기가 더 작은 TLP가 구조적인 면에서 Spar 보다 더 구조적으로 안정적인 것으로 보인다. 하지만 두 플랫폼의 설치 및 관리 비용이나 바다의 깊이 면과 같은 요소들을 고려하여 해안의 상태에 따라 적합한 플랫폼을 사용하는 것이 중요하다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20194030202300). 그리고 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(NO. 20183010025280).

References

- [1] Musial, W., Butterfield, S., and Boone, A., 2004, "Feasibility of floating platform systems for wind turbines", 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, <https://doi.org/10.2514/6.2004-1007>.
- [2] Jonkman, J.M., and Buhl Jr. M.L., 2005, "FAST User's Guide", Technical Report NREL/EL-500-38230, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, USA.
- [3] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., 2005, "Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development", Technical Report NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, USA.
- [4] Robertson, A.N. and Jonkman, J.M., 2011, "Loads analysis of several offshore floating wind turbine concepts", International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [5] TC88-MT IEC, 2005, "IEC 61400-3: Wind turbines part 1: Design requirements", International Electro-technical Commission, Geneva.
- [6] Katz, J. and Plotkin, A., 2001, "Low-speed aerodynamics", 2nd ed., Cambridge University Press.
- [7] Kim H., Lee S., Son E., Lee S., and Lee S., 2012, "Aerodynamic noise analysis of large horizontal axis wind turbines considering fluid-structure interaction", *Renewable Energy*, **42**, 46-53.
- [8] Du, Z. and Selig, M.S., 1998, "A 3-D stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction", AIAA/ASME Wind Energy Symposium, Reno, United States, pp. 9-19.
- [9] Moriarty, P.J., and Hansen, A.C., 2005, "AeroDyn Theory Manual" doi:10.2172/15014831.
- [10] Jeon, M., Lee, S., Kim, T., and Lee, S., 2016, "Wake influence on dynamic load characteristics of offshore floating wind turbines", *AIAA Journal*, 3535-3545.
- [11] Kvitem, M.I. and Moan, T., 2015, "Time domain analysis procedures for fatigue assessment of a semi-submersible wind turbine" *Mar. Struct.*, **40**, 38-59.
- [12] Li, H., Hu, Z., Wang, J., and Meng, X., 2018, "Short-term fatigue analysis for tower base of a spar-type wind turbine under stochastic wind-wave loads", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, **10**(1), 9-20.
- [13] Hayman, G.J., 2015, "MExtemes Manual Version 1.00", Technical Report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, USA.
- [14] DNV GL AS, 2016, "RP-C203: Fatigue design of offshore steel structures", Standard: DNVGL-RP-0005, 22-23.
- [15] Slot, R.M.M., Schwarte, J., Svenningsen, L., Sørensen, J.

- J.D., and Thøgersen, M.L., 2018, “Directional fatigue accumulation in wind turbine steel towers”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, **1102**, 012017. Journal of Physics: Conference Series, vol. 1102, 2018, p. 012017., doi:10.1088/1742-6596/1102/1/012017.
- [16] Hayman, G., 2012, “MLife Theory Manual for Version 1.00”, Technical Report., NREL, Golden, Colorado, USA.
- [17] Sant, T., and Cuschieri, K., 2016, “Comparing three aerodynamic models for predicting the thrust and power characteristics of a yawed floating wind turbine rotor”, J. Sol. Energy Eng., **138**(3), 031004.
- [18] International Electrotechnical Commission, 2005, “IEC 61400-1: Wind turbines-part 1: design requirements”, Third Edition.
- [19] Bergami, L., Gaunaa, M., and Heinz, J., 2013, “Wind Energy”, **16**, 681-693, ISSN 1099-1824.