



극한 해상상황에서 파 에너지 성분 별 2차 유체력 하중이 계류선 응답과 손상 증가 피로 성능에 미치는 영향 분석

강태원^a, 양현익^{b*}

Analysis of Second Hydrodynamic Loads Effect on the Mooring Line Response and Damage Equivalent Fatigue by Wave Energy Components Under Extreme Sea Conditions

Tae-Won Kang^a, Hyun-Ik Yang^{b*}^a Department of mechanical design engineering, Hanyang university, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea^b Department of mechanical engineering, Hanyang university, 55, Hanyangdahak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do, 15588, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 October 2019
Revised 11 November 2019
Accepted 14 November 2019

Keywords:

Swell and wind sea energy
Hurricane
Second order hydrodynamic load
Extreme sea condition
Damage equivalent fatigue load
Semi-submersible platform

ABSTRACT

In this study, we analyzed the effect of the second hydrodynamic loads on the mooring line response and damage equivalent fatigue by wave energy components under the extreme sea conditions. To examine this effect, the dynamic responses of offshore wind turbine structures were evaluated by separating each component and coupling it with a HydroDyn module of the NREL FAST software. It was found that the wave energy affecting the mooring tension is larger in the swell than in the wind sea and thus creates larger mean position changes in the structure. In conclusion, the second hydrodynamic load influenced the behavior of the structure, which significantly affects the damage equivalent fatigue of the mooring line.

1. 서론

최근 지구온난화 대책으로 탄소 배출권 제한 정책에 맞춰 화석 연료를 대체할 수 있는 신재생에너지 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 친환경적인 측면에서 해상 풍력발전은 고갈되어 가는 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지 장치로 각광받고 있다^[1]. 그러나 현재 개발되고 있는 부유식 해상풍력의 경우, 운용되거나 설치가 계획되고 있는 해역 해양환경으로 인해 구조물의 동적 안정성 확립이 어려운 실정이다^[2]. 이 때문에 해양환경을 고려한 부

유식 해상풍력 구조물의 동적성능을 확보하는 것이 매우 중요하다^[3-4]. 현재 해상 구조물이 설치되어 있는 대표적 지역으로는 미국 대서양 및 태평양 해역일대로 열대성 저기압과 같은 허리케인이 지속적 발생하기 때문에 시설파괴 등의 많은 사례가 보고되고 있다^[5]. 그렇기 때문에 극한 해상상태에서의 부유식 해상구조물의 운동성능분석을 통해 시설파괴 등의 피해를 방지하기 위한 연구가 필요하다^[6].

기존에는 극한 해상환경에서 각 성분의 파 에너지가 부유식 구조물의 응답에 미치는 영향을 분석하는 연구들이 진행되었다.

* Corresponding author. Tel.: +82-31-400-5285

Fax: +82-31-400-5959

E-mail address: skynet@hanyang.ac.kr (Hyun-Ik Yang).

Kang et al.^[7]의 경우 허리케인 Ike의 해상상태를 고려한 수치태풍 모델 결과로부터 wind sea와 swell을 분리하여, 반잠수식 해상풍력 구조물의 유체력 하중으로 적용하였다. 그러나 swell 과 에너지를 1차 유체력 하중으로 적용하였기 때문에, 계류력이 과소평가되고 2차 유체력을 고려할 때 나타나는 부유체의 거동 특성을 파악하기 힘든 한계점을 시사하였다. 그래서 2차 유체력 하중으로 적용하여 부유식 해상풍력구조물에 적용한 연구사례들이 있다. Roald et al.^[8]의 연구에서는 2차 유체력 하중을 고려하여 TLP type의 해상풍력구조물의 운동특성을 분석하였다. 그 결과 2차 하중의 합-주파수 하중(Sum-frequency load)으로 인해 pitch와 타워 주기의 영향을 미치면서 스프링잉(Springing) 혹은 링잉(Ringing)의 거동 변화가 나타났으며, 2차 하중의 중요성을 다시 한 번 부각시켰다. Durate et al.^[9]의 연구에서는 평균 드리프트 하중(Mean drift load), 뉴만 근사모델, 합- 및 차-주파수 하중 등의 2차 유체력 하중을 Spar 형태의 해상풍력 구조물의 적용하였다. 그 결과 평균 드리프트 하중이나 뉴만 근사모델의 경우, 부유체 거동을 과소평가할 수 있지만 합- 및 차-주파수 하중이 고려된 2차 하중을 고려하다면 응답을 더 잘 예측할 수 있다고 분석하였다. 하지만 극한 해상상황을 설계하중으로 가정하여 부유식 해상풍력 구조물의 거동 및 계류선 응답을 검토하였지만 계류선의 피로성능 영향에 대해서는 분석하지 못한 한계점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존 설계 하중에서 계산된 파 스펙트럼을 활용하지 않고, 허리케인 Ike (2008)를 수치 시뮬레이션으로 계산된 파와 바람 에너지 데이터를 활용하였다^[10-11]. 파 에너지 데이터에서 komen et al.^[12]이 제시한 wave-age criteria method 방법을 통해서 wind sea와 swell 성분으로 분류하였고, 각각을 1차와 2차 유체력 하중으로 계산하여 구조물의 응답 및 계류력을 분석하였다. 또한 계산된 계류력을 바탕으로 손상 등 피로성능 분석하였다.

2. 극한 해상상태 및 2차 유체력 하중

2.1 특정 극한 해상상황 선정

Kim et al.^[14]의 연구에서는 미국 대서양 지역에서 발생된 열대성 저기압의 허리케인 Ike (2008) 상황을 고려하여 수치 시뮬레이션한 결과를 제공한다. Fig. 1과 Fig. 2^[13]는 100 h 해상상태일 때의 허리케인 위치 및 파 스펙트럼을 보여준다. 100 h 해상상태일 때의 허리케인은 계측(Site)지점에 근접한 상황이기 때문에, 이전 해상상태보다(Fig. 1: 80h-90h) 파 에너지가 더욱 발달한다. 큰 특징으로는 swell 에너지와 wind sea 에너지가 뚜렷하게 분리된 bi-modal 형태를 가진다. 이때 wind sea는 지역풍의 영향을 받아 생성된 파 에너지이며, swell은 먼 바다에서부터 생성되어 이루어

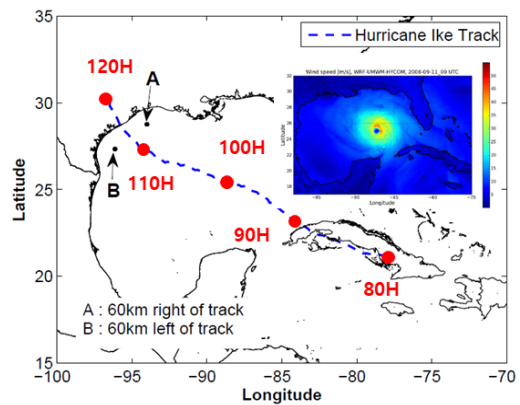


Fig. 1 Numerical simulation hurricane ike (2008) result

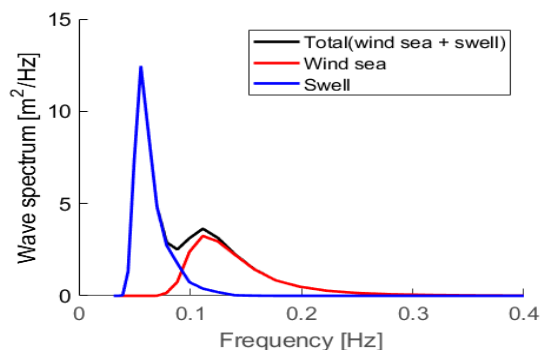


Fig. 2 Wave spectrum: hurricane ike progress 100 h

진 저주기 너울성 파도의 형태를 가지는 파 에너지이다. 또한 저주기 성분의 swell 파에너지는 kang et al.^[15]의 연구에서 부유식 해상풍력 구조물의 고유주기의 포함되어 있기 때문에 거동의 큰 영향을 미친다고 분석 바가 있다.

2.2 2차 유체력 하중

부유식 해상풍력 구조물이 주파수 영역에서 계산되는 운동방정식은 Eq. 1과 같다. M 은 구조물의 질량, $A(\omega)$ 는 부가질량(Added-mass), $B(\omega)$ 는 감쇠(Radiation damping), C_{hydro} 는 부유식 구조물의 복원행렬, q 는 부유식 구조물의 변위, \dot{q} 는 부유식 구조물의 속도, \ddot{q} 는 부유식 구조물의 가속도, 그리고 $F_{ext}(\omega)^{(1)}$, $F_{ext}(\omega)^{(2)}$ 는 1차와 2차 유체력 하중을 의미한다.

$$(M + A(\omega))\ddot{q} + B(\omega)\dot{q} + (C_{hydro})q = F_{ext}(\omega)^{(1)} + F_{ext}(\omega)^{(2)} \quad (1)$$

1차와 2차 하중은(Eq. 2-3), Fig. 2의 극한 해상상태의 파고가 고려되어 계산되는 유체력 하중을 의미하며, 부유식 해상풍력 구조물의 운동, 속도 및 가속도와 무관한 파랑 기진력이라고도 한다 (wave-excitation force).

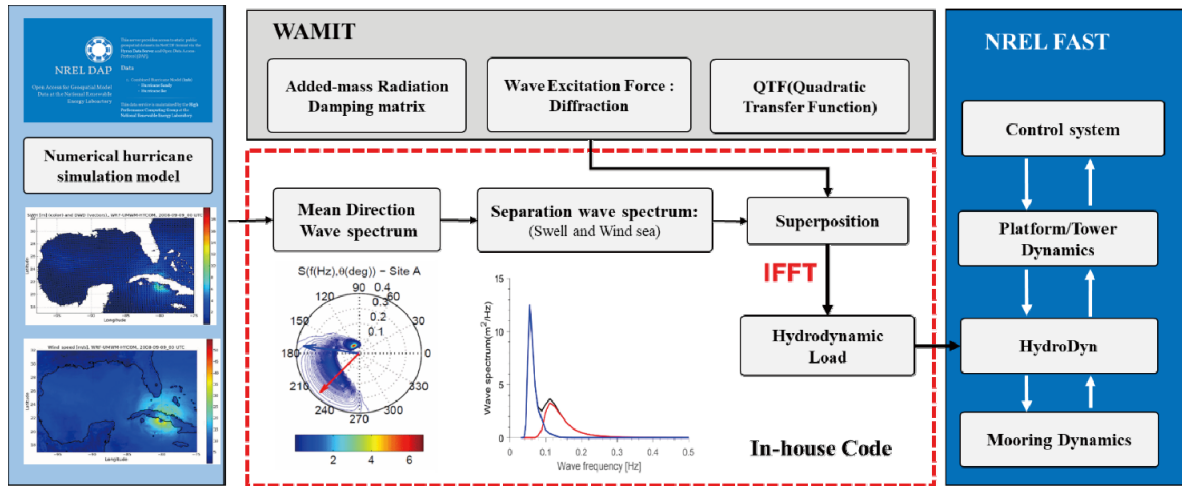


Fig. 3 Hydrodynamic load calculation flow chart

1차 하중에서 $X_i(\omega_k)$ 는 부유식 해상풍력 구조물의 6자유도 운동방향의 RAO (Response amplitude operation)이고, 2차에서 $X_i^+(\omega_k, \omega_l)$ 와 $X_i^-(\omega_k, \omega_l)$ 는 합-주파수 및 차-주파수 파랑 기진력 QTF (Quadratic transfer function)를 의미한다. 또한 파 진폭과 파 주파수는 k 와 m 방향으로 표현된다. 1차와 2차 하중에서 RAO와 QTF는 WAMIT [21]에서 계산된 DeepCwind 반잠수식 해상풍력 구조물의 수치해석 결과 데이터를 활용하였다. 그리고 파고 ($A_k = \sqrt{2S(\omega)d\omega}$)에서 $S(\omega)$ 는 파 스펙트럼이며, total (wind sea + swell), wind sea, swell 파 에너지 성분으로 분리하여 하중을 계산하였다. 1차와 2차 유체력 하중이 계산된 결과는 Eq. 4의 식을 통해서 step size 별로 합해진다.

$$F_{ext_i}(t)^{(1)} = Re \left(\sum_{k=1}^N A_k X_i(\omega_k) e^{j\omega_k t} \right) \quad (2)$$

$$F_{ext_i}(t)^{(2)} = Re \left(\sum_{(k=1)(l=1)}^N \sum_{(k=1)(l=1)}^N [A_k A_l X_i^+(\omega_k, \omega_l) e^{j(\omega_k + \omega_l)t} + A_k A_l^* X_i^-(\omega_k, \omega_l) e^{j(\omega_k - \omega_l)t}] \right) \quad (3)$$

$$F_{ext_i}(t)^{(total)} = F_{ext_i}(t)^{(1)} + F_{ext_i}(t)^{(2)} \quad (4)$$

2.1절에서 활용된 수치 허리케인 시뮬레이션 데이터를 가지고 유체력 하중 수식이 적용되어 FAST의 HydroDyn 모듈과 연결되는 과정을 나타낸다(Fig. 3). 이 절차를 통해서 계산된 각 성분 파 에너지의 1차 및 2차 유체력 하중이 부유식 해상풍력 구조물에 적용된다. 그래서 극한 해상상태의 파고가 고려된 유체력 하중에 의한 구조물 응답과 계류선의 손상 등 피로성능을 분석하였다.

3. 반잠수식 해상풍력 구조물

3.1 DeepCwind 반잠수식 해상풍력 구조물

DeepCwind OC4 반잠수식 해상풍력 구조물은 NREL^[16]에서 연구로 활용되며 제공하고 있는 모델이다. 패어리더(Fairlead)는 부유체 중심 기둥으로부터 40.87 m의 거리로 3개의 외각기둥에 연결되어 있고, 비신장(unstretched) 길이는 835.5m, 등가 계류선의 질량 밀도(Equivalent mooring line mass density)는 113.35 kg/m를 가진다. 활용된 반잠수식 해상풍력 모델의 자세한 형상정보와(Fig. 4), 부유체(Platform) 구조 및 계류선의 물성치 정보는 Table 1과 Table 2^[16]과 같다.

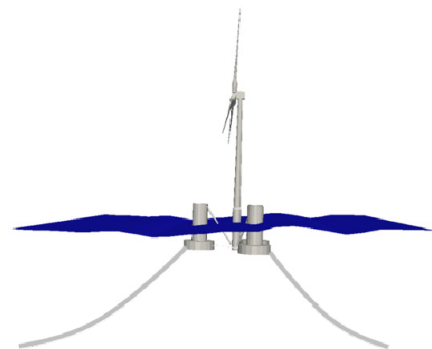


Fig. 4 5 MW DeepCwind semi-submersible wind turbine structures

Table 1 Floating platform's structural property

Dimensions	Value
Platform mass (including ballast)	13,473,000 kg
Center of gravity	13.46 m
Platform roll inertia about COG	6.827e+9 kg·m ²
Platform pitch inertia about COG	6.827e+9 kg·m ²
Platform yaw inertia about COG	1.226e+10 kg·m ²

Table 2 Mooring line property

Dimensions	Value
Number of mooring lines	3 EA
Angle between adjacent lines	120°
Depth to anchors below SWL	200 m
Depth to firleads below SWL	14 m
Radius to anchors from platform centerline	837.6 m
Radius to fairleads from platform centerline	40.868 m
Unstretched mooring line length	835.5 m
Mooring line diameter	0.0766 m
Equivalent mooring line mass density	113.35 kg/m
Equivalent mooring line mass in water	108.63 kg/m
Equivalent mooring line extensional stiffness	7.536 MN

3.2 유체 정역학

부유체 구조물이 해수면 위 일정한 위치에서 정적평형을 이루기 위해서는 정역학적 안전성의 기여하는 부력, 중력, 복원력 등의 정

역학적 요소가 구조물 주변에 작용한다(Eq. 5).

$$F_{static,i} = (\rho V_0 - m)g\delta_{i3} - (my_G - \rho V_0 y_B)g\delta_{i4} + (mx_G - \rho V_0 x_B)g\delta_{i5} - \sum_{j=1}^6 c_{ij}\xi_j \tag{5}$$

구조물이 해수면 위에 고정된 위치로 유지하는데 필요한 중력과 부력 성분은 Eq. 5에서 세 번째 항까지이다. 그리고 수식에서 (x_G, y_G, z_G) 는 중력(Center of gravity: CoG)을 나타내고, (x_B, y_B, z_B) 는 구조물의 부력중심(Center of buoyance: CoB) 위치를 나타낸다. 또한 V_0 는 구조물 부피를 의미하며 $\rho V_0 = m$ 으로 적용된다. c_{ij} 는 부유체 구조물의 외부에서 작용하는 유체력 하중에 의해서 힘 또는 모멘트를 유도하는 유체 정역학 행렬이며, Eq. 6의 명시되었다^[16]. 또한 유체 정역학 행렬에서는 선수동요(yaw), 종동요(pitch), 횡동요(roll)의 커플링(coupling) 없이 대칭으로 계산되어 적용된다.

$$C_{ij}^{Hydrostatic} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_0 & 0 & -\rho g \iint_{A_0} x dA & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho g \iint_{A_0} y^2 dA + \rho g V_0 z_{COB} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho g \iint_{A_0} x dA & 0 & \rho g \iint_{A_0} x^2 dA + \rho g V_0 z_{COB} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

4. 손상 증가 피로 하중

극한 하중으로 인해 부유식 해상풍력 구조물이 일반 운용상태에서보다 더욱 큰 거동 변화를 발생하기 때문에, 계류선의 피로성능 평가가 중요하다. 계류선의 피로문제에 영향을 미치는 두 가지 주된 요인은 재료의 피로 강도와 사이클(cycle) 하중이 있다. 일반적으로 피로 강도는 재료 및 기계적 특성으로 분류될 수 있다. 재료의 피로 신뢰성을 평가하기 위해서는 동적 하중 하에서 피로성능 파악하는 것이 중요하다. 그래서 S-N 선도를 통해서 누적 피로 손상을 고려하여, 하중 사이클 N번 후 파손이 발생되는지를 파악할 수 있다. 또한 불규칙한 하중의 경우, Palmgren-Miner 선형 손상 축적 이론을 통해서 S-N 곡선과 카운팅 사이클 방법을 결합하여 피로 수명을 예측할 수 있다. 주기 계산 절차는 수명 예측에 사용되는 등가 사이클(Equivalent cycle)을 사용하며, 불규칙한 하중의 n번째 사이클의 진폭이 있는 경우 손상이 발생한다고 가정한다. 그래서 가변적인 유체력 하중의 변화가 계류선의 주는 피로성능을 정량적으로 비교 가능하기 때문에, 손상 증가 피로 하중(Damage equivalent fatigue load: DEFL)^[17]을 통해 계류선의 단기 피로성능을 검토하였다.

DEFL은(Eq. 7) 모든 가변 진폭 하중 범위 L만큼 동일한 피로 손상을 유발하는 하중 범위로 정의할 수 있다. 이때, EFL (Equivalent fatigue load)^[18]을 통하여 해석 시뮬레이션 시간 동안의 사이클에 대하여 변곡점의 변화를 레인 플로우 카운팅 방법을 사용하여 계산하였다.

$$EFL = \sqrt[m]{\frac{\sum n_i L_i^m}{N}}, \quad DFL = \frac{EFL}{K} \tag{7}$$

L_i 는 하중 사이클 범위를 나타내며, n_i 는 L_i 의 사이클 카운터 수를 N 은 개수, m 은 S-N 선도의 역 기울기를 나타낸다. K 의 경우 스티드 체인일 때(Stud chain)^[19], 1.2E+11을 사용한다. 피로성능은 Palmgren-Miners rule을 사용하여 S-N 곡선을 기반으로 계산되며, 누적 손상 DEFL은 전체 수명 동안 1보다 작아야 파괴가 일어나지 않는다.

5. 계류력 응답 및 단기 손상 피로 성능평가

5.1 극한 해상상태에서의 계류력 특성 분석

Fig. 5는 반잠수식 해상풍력 구조물의 3개의 계류력 응답 PSD

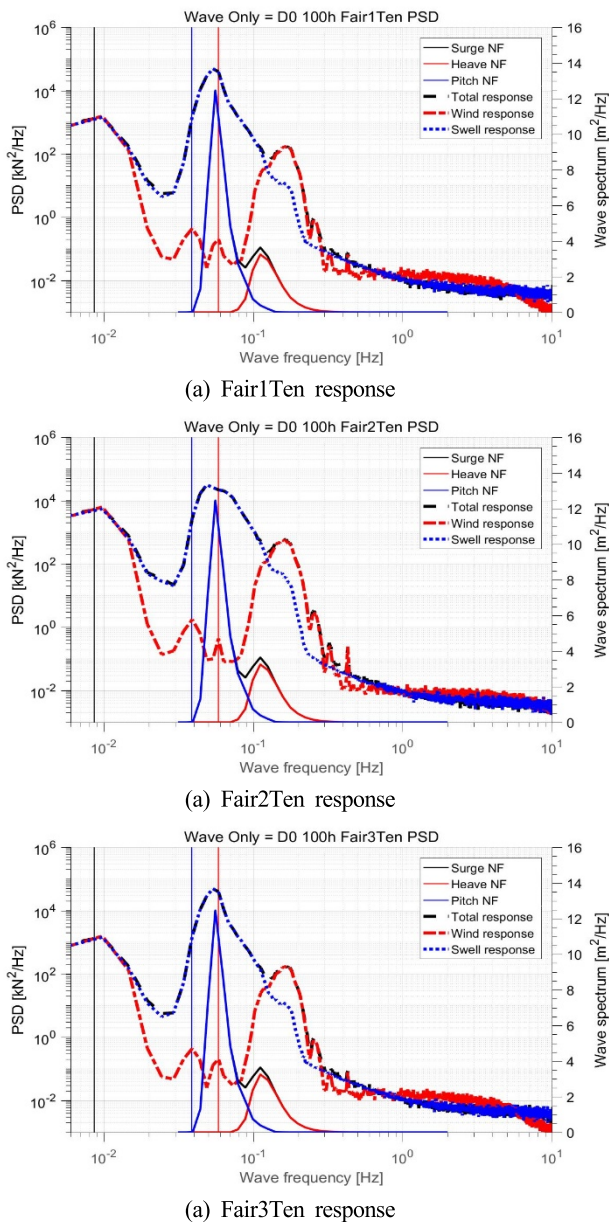


Fig. 5 Mooring line tension PSD response result

(Power spectral density) 결과를 나타내며, 계류력 응답의 단위는 kN^2/Hz 이다. 계류력 응답에서 표시된 Fair1Ten은 Fairlead to tension: No.1의 의미로, 부유체에 연결된 페어리더 1번의 계류력 결과를 의미한다. 그리고 검정색, 파란색, 빨간색 수직선은 구조물의 surge, pitch, heave 고유 주기이다(Natural frequency: NF)^[20]. 계류력 응답은 surge NF, heave NF, 그리고 파 에너지 범위에서 응답이 관찰되었다. 그 중 swell 에너지 계류력 응답은 wind sea 에너지 계류력 응답보다 유도된 파 에너지 범위에서 더 큰 계류력 응답이 관찰되었다. 이런 결과가 나타난 이유는 swell 에너지는 부유체 구조물의 평균 움직임(Mean position) 변화를 크게 발생시키기 때문에 초기 장력이 wind sea일 때 보다 더 크게 발생하

Table 3 Mooring line tension result (Fair2Ten): Maximum, mean and standard deviation

Load case	First	Second
	Max/Mean/Std [kN]	Max/Mean/Std [kN]
Total (wind sea+swell) energy	1211/1101/31	1408/1159/62
Wind sea energy	1128/1100/6	1300/1152/43
Swell energy	1204/1101/30	1215/1105/36

였다. 그리고 파 에너지 범위에서도 wind sea 파 에너지 유체력이 작용할 때 보다 swell의 계류력 응답에서 더 컸다.

Wind sea 파 에너지가 작용할 때를 관찰해 보면, surge NF, pitch NF, 그리고 wind sea 파 에너지 범위, 타워의 FA/SS (Fore-aft/Side-to-side)에서 응답을 보였다. wind sea는 고주기 영역의(Hight frequency: HF) 파 에너지이기 때문에, 구조물이 각운동의 영향을 미치고 이는 터빈으로 운동이 전달되면서 굽힘 운동이 발생되었기 때문이다.

5.2 계류선 피로성능 평가

반잠수식 해상풍력 구조물의 피로성능을 평가하기 위해서 1시간 동안 시뮬레이션 된 계류력 응답결과를 토대로 분석이 수행되었다. 분석의 활용된 결과는 부유체 전면의 연결된 계류선 2번 페어리더의 계류력 결과이며(Fair2Ten), 최대 계류력(Maximum tension), 평균 계류력(Mean tension), 표준편차(Standard deviation), 그리고 DEFL를 계산하였다(Table 3과 Table 4).

최대 계류력은 total (wind sea+swell) 파 에너지의 2차 유체력 하중일 때 최대장력을 보였다. 그러나 각 성분의 파 에너지 응답을 비교해보면, 최대 계류력은 wind sea 에너지의 2차 유체력 하중일 때 최대로 발생되었으며, Standard deviation (Std) 역시 가장 큰 변화폭을 가졌다. 그리고 2차 유체력은 모든 응답결과에서 더 큰 값을 보였는데, 이는 합-주파수 하중과 차-주파수 하중에 의한 고주기 및 저주기 영역의 유체력 하중 증가가 부유식 해상풍력 구조물 거동의 영향을 미쳤다. 그러면서 부유체와 연결된 계류선이 증가된 거동변화로 인해 초기 계류력의 상승을 가져왔기 때문이다. 특히 1차와 2차 유체력의 최대 계류력 증가폭은 wind sea 에너지 일 경우 컸는데, 고주기 영역의 파 에너지와 2차 유체력의 합-주파수 하중이 같이 작용되면서 부유체의 각운동이 더욱 크게 발생되었다. 이런 결과는 Std의 값으로 유추해 볼 수 있는데, 평균 계류력을(Mean tension) 기준으로 Std 값이 크다는 점은 부유식 해상풍력 구조물의 움직임 변동폭이 크다는 것과 같다(Table 3).

운동해석 결과를 토대로 DEFL 결과를 관찰해보면(Table 4), swell 파 에너지의 1차와 2차 유체력 하중일 때가 wind sea 파 에너지 인 경우보다 초기 계류력 응답의 영향을 미쳐 계류선이 받는 손상이 더 컸다. 그러나 파 에너지 기준으로 결과를 살펴볼 때,

Table 4 Mooring line tension DEFL result: Fair2Ten

Load case	First DEFL [-]	Second DEFL [-]
Total (wind sea+swell) energy	1.85E-3	5.60E-3
Wind sea energy	3.22E-5	8.93E-4
Swell energy	1.37E-3	1.74E-3

wind sea 에너지 2차 유체력 하중이 가장 큰 손상 상승폭을 보였다. 이는 곧 초기 계류력이 상승된 상태에서 반복적인 움직임이 자주 발생하였기 때문에, 단기 시간일지라도 계류선에 작용하는 피로의 큰 문제로 다가올 수 있다는 점으로 분석된다.

6. 결론

본 연구에서는 파 에너지 성분별 2차 유체력 하중이 부유식 해상 풍력 구조물 계류선 응답과 손상 피로성능을 분석한다. 이를 위해서 허리케인이 site 지점에 근접하여 파 에너지가 크게 발달한 특정 극한 해상상황을 고려하였다. 그리고 2차 유체력 하중이 구조물 거동의 미치는 효과와 파 에너지 성분이 거동변화의 미치는 영향을 검토하기 위해서 각 성분으로 분리하여 1차와 2차 유체력 하중을 계산하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

파 에너지가 발달된 극한 해상상황에서는 swell과 wind sea 에너지가 bi-modal 형태를 지니며, 이때 swell은 반잠수식 해상풍력 구조물의 고유주기 영역의 분포되어 있다. 이때 각 성분의 파 에너지의 2차 유체력 하중은 차-주파수 하중과 합-주파수 하중이 추가되면서 작지만 구조물 거동의 공진현상을 발생시키기 충분하다.

파 에너지 범위에서는 swell 에너지에 의한 계류력 응답이 지배적이었으며, wind sea 에너지만 작용할 때에는 작지만 타워의 응답이 관찰되었다. 그리고 손상 피로성능 평가 결과에서 2차 유체력 하중은 1차 유체력 하중보다 부유체 구조물의 평균 움직임의 변화를 상승시켰다. 또한 초기 계류력 상승을 가져온 상태에서 wind sea 파 에너지와 2차 유체력의 합-주파수 하중에 의해 각운동이 더욱 크게 발생하여 반복적인 움직임이 크게 발생되었다.

손상 피로성능 분석결과에서는 swell 파 에너지의 2차 유체력 하중이 1차 유체력 하중보다 더 큰 계류선의 피로문제를 발생시켰다. 그러나 2차 유체력이 고려된 wind sea에너지 결과에서는 swell일 때보다 계류선 손상이 작게 나타났지만, 1차 유체력 하중일 때보다 손상이 더욱 크게 발생하였다. 이는 단기 피로 성능에서 영향을 미치는 인자는 초기 계류력과, 평균 계류력, 그리고 Std이며, 이중에서도 Std값이 큰 상승을 가져올 때 피로성능의 큰 문제가 발생할 수 있다.

References

- [1] Ellabban, O., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F., 2014, Renewable Energy Resources: Current Status, Future prospects and their enabling technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39:748-64, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>.
- [2] Ostachowicz, W., McGugan, M., Schröder-Hinrichs, J.-U., Luczak, M., 2016, MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology, Cham: Springer.
- [3] Lee, K.-H., 2016, Numerical Methods for Hydro-static and-dynamic Analysis of 3D Elastic Floating Structures, Doctoral Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea.
- [4] Dong, W., Moan, T., Gao, Z., 2012, Fatigue Reliability Analysis of the Jacket Support Structure for Offshore Wind Turbine Considering the Effect of Corrosion and Inspection, Reliab. Eng. Syst. Safe, 106 11-27, <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.06.011>.
- [5] Rose, S., Jaramillo, P., Small, M. J., Grossman, I., Apt, J., 2012, Quantifying the Hurricane Risk to Offshore Wind Turbines, Proceedings of the National Academy of Sciences., 109:9 3247-3252, <https://10.1073/pnas.1111769109>.
- [6] Amirinia, G., Jung, S., 2017, Along-wind Buffeting Responses of Wind Turbines Subjected to Hurricanes Considering Unsteady Aerodynamics of the Tower, Engineering Structures, 138 337-350, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.023>.
- [7] Kang, T.-W., Yang, H.-I., Kim, E., 2018, Evaluation of the Effect of Hurricane Induced Swell on the Global Response of Floating Offshore Wind Turbine, Structures 18: Int. Conf. of ocean sys. Eng., 1-6.
- [8] Roald, L., Jonkman, J., Robertson, A., Chokani, N., 2013, The Effect of Second-Order Hydrodynamics on Floating Offshore Wind Turbines, J. Energy Procedia., 35 253-264, <https://10.1016/j.egypro.2013.07.178>.
- [9] Duarte, T., Sarmento, A., Jonkman, J., 2014, Effects of Second-Order Hydrodynamic Forces on Floating Offshore Wind Turbines, NREL/CP-5000-60966, Colorado.
- [10] Chen, S. S., Price, J. F., Zhao, W., Donelan, M. A., Walsh, E. J., 2007, The CBLAST-Hurricane Program and the NextGeneration Fully Coupled Atmosphere-Wave-Ocean Models for Hurricane Research and Prediction, Bulletin of the American Meteorological Society, 88:3 311-318, <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-3-311>.
- [11] Chen, S. S., Zhao, W., Donelan, M. A., Tolman, H. L., 2013,

- Directional Wind-wave Coupling in Fully Coupled Atmosphere-wave-ocean Models: Results from CBLAST-Hurricane, *J. the Atmospheric Sciences*, 70:10 3198-3215, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0157.1>.
- [12] Komen, G., Hasselmann, K., 1984, On the Existence of a Fully Developed Wind-sea Spectrum, *J. physical oceanography*, 14:8 1271-1285, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2).
- [13] Kang, T.-W., Yang, H.-I., Lee, J.-I., Noh, M.-H., Kim, E., 2017, Dynamic Response Analysis of Offshore Wind Turbine Structure by Typhoon generated-Swell, *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf.*, 61.
- [14] Kim, E., Manuel, L., Curcic, M., Chen S. S., Phillips, C., Veers, P., 2016, On the Use of Coupled Wind, Wave, and Current Fields in the Simulation of Loads on Bottom-Supported Offshore Wind Turbines during Hurricanes: March 2012 - September 2015, NREL/TP-5000-65283, Colorado.
- [15] Kang, T.-W., Noh, H.-J., Kim, E., Noh, M.-H., Yang, H.-I., 2019, Effects of Hurricane-induced Swell Wave Components on the Motion Characteristics of Semi-submersible Offshore Wind Structures, *Proc. Korean Association of Ocean Sci. and Technol. societies. Spring Conf.*, 301-304.
- [16] Robertson, A., Jonkman, J., Masciola, M., Song, H., Goupee, A., Coulling, A., Luan, C., 2014, Definition of Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4, NREL/TP-5000-60601, Colorado.
- [17] Ragan, P., Manuel, L., 2007, Comparing Estimates of Wind Turbine Fatigue Loads Using Time-Domain and Spectral Methods, *Wind Engineering*, 31:2 83-99, <https://doi.org/10.1260/030952407781494494>.
- [18] Cosack, N., 2010, Fatigue Load Monitoring with Standard Wind Turbine Signals, Doctoral Dissertation, Stuttgart University, Germany.
- [19] DNV, 2006, Fatigue Design of Offshore Steel Structures, DNV-RP-C203, Norway.
- [20] Coulling, A. J., Goupee, A. J., Robertson, A. N., Jonkman, J. M., Dagher, H. J., 2013, Validation of a FAST semi-submersible floating wind turbine numerical model with DeepCwind test data, *J. Renew. and sustain. Energy*, 5:2 023116, <https://doi.org/10.1063/1.4796197>.
- [21] WAMIT, 2008, WAMIT USER MANUAL Version 7.0, WAMIT, Inc.