Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 28:6 (2019) 375~382

https://doi.org/10.7735/ksmte.2019.28.6.375

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

극한 해양환경에서 생성된 파 에너지 성분이 부유식 해상풍력 구조물 거동에 미치는 영향

강태원[a], 양현익[b*]

Influence on Floating Offshore Wind Turbine Structure by Wave Energy Generated under Extreme Metocean 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
Extreme metocean condition
Hurricane
Semi-submersible platform
Dynamic response analysis

ABSTRACT

We analyzed the dynamic response characteristics of a floating offshore windturbine structure influenced by the wave energy under extreme metocean conditions. Wave energy consists of swell and wind sea components, and the wave age criteria method was used to separate each component of wave energy. We then applied a hydrodynamic load to the platform to analyze load changes according to a hurricane's progress time. Generally, in case of a semi-subemulsible structure, as the resonance period is distributed in the low-frequency region, the swell has a large motion. Therefore, we analyzed surge, heave, and pitch motion and evaluated the motion characteristics when the load acts in various directions of wave energy components. Finally, we found that swell energy greatly influences on and contributes to the motion of a floating structure in consideration of the directionality.

1. 서 론

근해부터 심해해역까지 부유식 해양구조물 운용 및 개발이 확대되면서 다양한 해상환경에 의한 구조물 거동특성을 분석하는 연구가 필요한 실정이다. 또한, 부유식 해상 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 해양환경에 의해 발생한 구조물의 거동특성을 파악하는 것이 중요하다[1]. 따라서 구조물의 거동특성의 큰 영향을 미치는 극한 해수면 변화를 고려하여 구조물의 거동해석을 수행하여야 한다[2].

현재 국제기관에서는 극한 해상환경을 고려하여 부유식 해상풍력 구조물 거동특성 평가방법에 대해서 가이드라인을 제시하고 있다. 먼저 IEC[3]에서는 중국, 일본, 한국, 대만, 미국 등 열대성 저기압이 발생하는 지역에 T grade라는 극한 설계하중 조건을 제시하여 부유식 해상풍력 구조물 거동특성을 분석하기 위한 설계방법을 제공하고 있다. API[4]에서도 멕시코 연안에서 불어오는 허리케인 하중을 설계적으로 적용할 수 있도록 가이드라인을 명시해주고 있다. 하지만 가이드라인에서는 파 에너지를 성분별로 분리하지 않기 때문에, 각각의 파 에너지가 부유체 거동에 미치는 하중 기여 영향을 분석하기 힘들다.

이와 반면에 부유식 해상구조물의 거동에 영향을 미치는 파 에너지를 성분별로 적용한 연구사례들이 있다. 먼저 Zhang et al.[5]은 부유식 해상구조물인 FPSO (Floating production storage

* Corresponding author. Tel.: +82-31-400-5285
Fax: +82-31-400-5959
E-mail address: skynet@hanyang.ac.kr (Hyun-Ik Yang).

offloading)를 통해서 저주기 드리프트 하중(Low-frequency drift force)이 구조물 거동특성에 미치는 영향을 분석하였다. 연구에서 사용된 파 스펙트럼은 서아프리카 지역에서 계측된 데이터를 사용하였으며, wind sea와 swell 파 에너지를 분리시켜 swell 에너지가 부유식 해상 구조물 거동특성에 큰 영향을 미친다고 분석하였다. Gang et at.[6]는 앞서 연구된 하중과 동일하게 서아프리카에서 측정된 파 스펙트럼을 wind sea와 swell 파 에너지 성분으로 분리하여 각 성분을 FPSO의 유체력 하중(Hydrodynamic load)으로 적용하였다. 그 결과 부유식 구조물의 계류력(Mooring line tension)에는 swell 에너지가 wind sea 에너지보다 더 큰 응답을 도출한다고 분석하였다. 그러나 앞선 연구들에서 분석된 해상상태는 극한 해상조건이 아니며, 부유식 해상풍력 구조물과는 다른 부유식 해상구조물 형태를 가지기 때문에, 구조물의 고유 특성이 달라 분석된 결과를 활용하는데 제약을 가지고 있다.

본 연구에서는 극한 해상상태인 허리케인이 진행하면서 변화되는 파 에너지를 각 성분으로 분리하고, 유체력 하중으로 계산하여 반잠수식 해상풍력 구조물에(semi-submersible offshore wind turbine structures) 적용하였다. 먼저 파 에너지가 bi-modal 형태로 분리되면서 파 에너지가 발달된 극한 해상환경 조건을 선정하여 운동 특성을 분석하였다. 다음으로는 허리케인이 진행하면서 변화된 해상환경에 따른 파 에너지 변화를 통해서 구조물의 거동 변화를 관찰하였다. 마지막으로 다양한 방향에서 유체력 하중이 구조물에 작용될 때, 파 에너지 성분별 운동특성의 미치는 하중기여 영향도 관찰하였다.

2. 극한 해상환경 조건 및 유체력 하중

극한 해상환경 조건에서 부유식 해상풍력 구조물의 위험성을 평가하기 위해서 수치 허리케인 시뮬레이션 모델(Numerical hurricane simulation model)을 통해 계산된 바람과 파 에너지 결과를 활용하였다. 이 수치화 된 허리케인 시뮬레이션 모델은 미국 중남부지역에서 발생한 허리케인 Ike (2008)의 대기, 해양 표면파 및 해양의 요소들을 결합하여 설계된 통합 대기-해양 인터페이스 모델이다[7-8].

2.1 Swell과 wind sea 파 에너지 분리

Kim[9]과 Kim et al.[15]의 연구에서는 수치 허리케인 모델에 의해 계산된 파 에너지를 wave-age criteria 방법[10]을 이용하여 wind sea와 swell 성분으로 분리하였으며, 방향성을 가지는 파 스펙트럼(Directional wave spectrum)을 해상 시간별로 에너지를 평균화하여 1차원 파 스펙트럼으로 적용하였다(Fig. 1). 그림에서 붉은선은 wind sea, 파란선은 swell, 검은선은 total (wind sea + swell) 에너지(m^2/Hz)를 나타낸다.

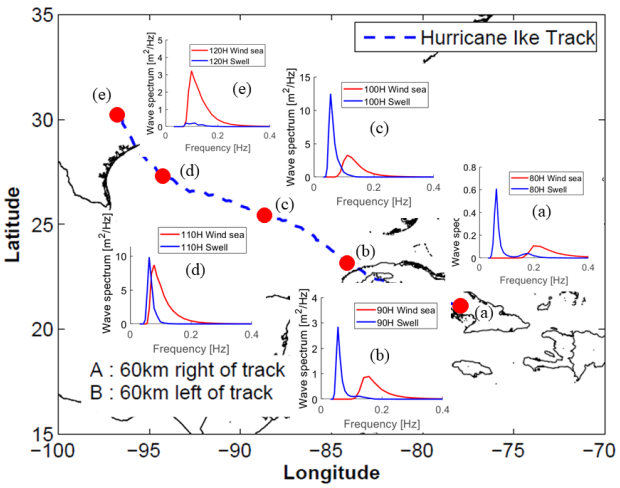


Fig. 1 Wave spectrum change with hurricane progress time: 80 h ~120 h

허리케인이 진행됨에 따라서 wind sea와 swell 에너지의 peak 주기가 변화되는 것을 볼 수 있으며(Fig. 1)[12], 측정지점에 도달한 110 h 해상상태에서는 wind sea와 swell 에너지가 비슷한 주파수 영역에서 파 에너지를 형성하고 있다. 허리케인이 진행되면서 육지에 도달 한 시간인 120 h 해상상태에서는 swell 에너지가 감소되고, wind sea 에너지가 주를 이루는 스펙트럼 형태를 보였다. 특히 80 h~100 h 해상상태의 경우(Fig. 1: 80 h~100 h), 파 스펙트럼이 bi-modal (2-peak) 형태를 가지고 있는 것을 볼 수 있는데, 이때 생성된 swell 파 에너지는 반잠수식 해상풍력 구조물의 고유주기 영역에 분포되어 있다. 그리고 허리케인이 진행하면서 swell 파 에너지의 주기 변화가 wind sea 에너지 보다 작은 것을 볼 수 있다. 이러한 파 에너지 변화에 따른 구조물의 운동특성도 분석하였다.

2.2 운동 방정식 및 유체력

부유식 해상풍력 구조물의 거동특성을 평가하기 위해서는 시간에 따라 변화되는 구조물의 운동특성을 분석해야 한다. 구조물이 강체라고 가정될 때, 운동방정식은 다음과 같이 정의된다(Eq. 1). 여기서 M은 부유식 해상풍력 구조물의 질량, $A(\omega)$는 부가질량(Added-mass), $B(\omega)$는 감쇠(Radiation damping), C_{hydro}는 복원행렬, q는 변위, $\dot{q}$는 속도, $\ddot{q}$는 가속도를 의미한다.

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

구조물의 작용하는 외부 유체력 하중(wave excitation force: 파랑 기진력)을 계산하기 위해서는 반잠수식 해상풍력 구조물 RAO (Response amplitude operation: $\zeta(\omega_k)$)에 입사파 복소 진폭

Fig. 2 5 MW DeepCwind semi-submersible wind turbine structures geometry

(Complex amplitude: $A_k e^{i\omega_k t}$)을 곱하여, 각 시간에서 모든 힘을 중첩하여 계산해야 한다. 입사파의 복소 진폭의 경우 극한 해상상태 변화별 파고가 고려되었으며(Fig. 1), 계산된 외력은 주파수 영역 변수이므로 시간 영역의 하중으로 변환하기 위해 역푸리에 변환(Inverse fast fourier transform)을 하고, 이를 통해 유체력을 계산하였다(Eq. 2).

$$F_{ext}(t) = Re\{\sum_{(k=1)}^{N} A_k \zeta(\omega_k) e^{i\omega_k t} = \mathrm{IFFT}(F_{ext}) \quad (2)$$

파고는 $A_k = \sqrt{2S(\omega)d\omega}$ 이며, $S(\omega)$[12]는 수치 허리케인 모델에서 계산된 파 스펙트럼이다. 여기서 파의 갯수는 N개이고, 무작위 위상의 경우 0~2π 사이에서 등간격으로 분포된다. 그리고 total (wind sea + swell), wind sea, swell 파 에너지 성분으로 유체력을 계산하였다.

3. 부유식 해상풍력 구조물

NREL[11]에서 개발된 DeepCwind 반잠수식 해상풍력 구조물은 5 MW의 출력을 가지는 Upwind 형태의 해상풍력 터빈이 장착되어 있다. 부유체 구조물의 홀수는 20 m, 기둥과 기둥사이 거리는 50 m, 터빈이 설치된 중앙기둥의 반지름은 6.5 m이다. 그리고 주기둥과 외부 기둥(3개)이 각각 브레이스(brace)로 연결되어 있고, 외각부 기둥의 하부 지름은 24 m, 상부 지름은 12 m의 형상을 가진다(Fig. 2)[14]. 반잠수식 해상풍력 구조물이 해수면과 평형을 이루기 위해 ballast 역할을 하는 콘크리트를 포함한 플랫폼 구조물과 로터-나셀 조립체(RNA, Rotor nacelle assembly), 타워 그리고 계류선이 균형을 이루도록 설계되었다. 계류선은 수심 아래 14.0 m의 위치하여 있으며, 구조물 중심선에서 40.87 m 반경의 하부기둥 상단부에 연결되어 있다. 그리고 120°의 간격으로 3개의 계류선이 균일하게 연결된 형태를 가진다. 이때 적용된 계류선과 구조물의 물성치 정보는 Table 1에 명시하였다[13].

Table 1 Floating platform's structural and mooring 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 pitchiInertia about COG	6.827e+9 kg·m^2
Platform yaw inertia about COG	1.226e+10 kg·m^2
Number of mooring lines	3 EA
Angle between adjacent lines	120°
Radius to anchors from platform centerline	837.6 m
Radius to fairleads from platform centerline	40.868 m
Equivalent mooring line mass density	113.35 kg/m

4. 극한해상환경 하중에서의 부유식 해상풍력 구조물 응답결과 및 고찰

극한 해상 상태에서 변화되는 파 에너지에 따라 부유식 해상풍력 구조물의 거동특성을 분석하기 위해서 surge, heave, pitch 방향 응답과 부유체 전면에서 후면까지 30° 각도별로 유체력이 작용될 때 구조물의 거동특성 변화를 검토하였다.

4.1 특정 극한 해상상태에서의 부유식 해상풍력 구조물의 응답 특성 분석

먼저, 파 에너지가 크게 발달한 해상환경 조건에서 부유식 해상풍력 구조물의 거동변화를 통해서 각 에너지 성분의 하중 기여도를 관찰하였다. Fig. 3은 허리케인이 진행된 100 h 해상상태에서 부유식 해상풍력 터빈에 작용한 유체력 하중과 구조물 응답 PSD (Power spectral density) 결과를 나타낸다. 그림에서 왼편에 놓인 도표들의 파란색 선과 점선은 swell 파 에너지 성분과 유체력 하중을, 빨간색 선과 점선은 wind sea 파 에너지 성분과 유체력 하중을, 검은색 선과 점선은 total (wind sea+swell) 파 에너지와 유체력 하중을 나타낸다. 그리고 오른편의 도표들은 부유식 구조물의 응답 PSD로 하중 결과와 동일한 응답을 표시한다. 각 파 에너지 성분별 하중에서 surge와 heave 하중은 N^2/Hz, 응답은 m^2/Hz, pitch의 경우, 하중은 Nm^2/Hz, 응답은 deg^2/Hz의 단위로 표시되었다. 또한 검정색, 파란색, 빨간색 수직선은 반잠수식 해상풍력 구조물의 surge, pitch, heave의 고유주기(Natural frequency: NF)에 해당한다[18].

100 h 해상상태는 측정지점에(Site) 근접한 상황이기 때문에, 파 에너지 성분이 이전 해상상태보다(80 h~90 h) 더 발달된다. 이때 허리케인에 의해서 생성된 파 에너지는 swell과 wind sea 성분이 뚜렷하게 분리된 형태를 보이고 있는데, 100 h 해상상태는 80 h~90 h 해상상태보다 wind sea peak 주기가 swell peak 주기로 가까워진 것을 볼 수 있다(Fig. 1: 80 h and 90 h). 여기서 swell은 peak 주기 변화가 적고, wind sea는 지역풍의(Local wind) 영향

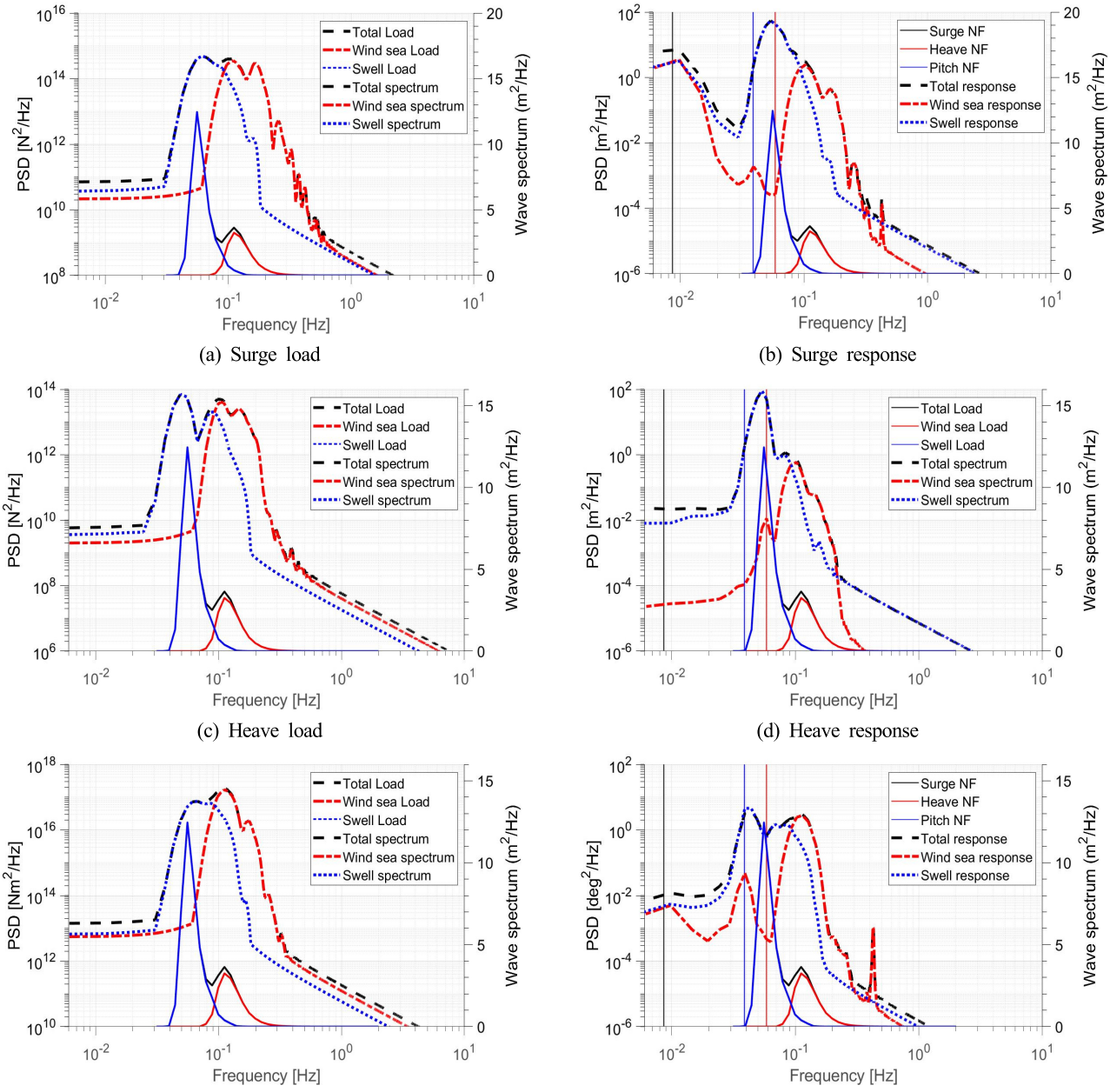
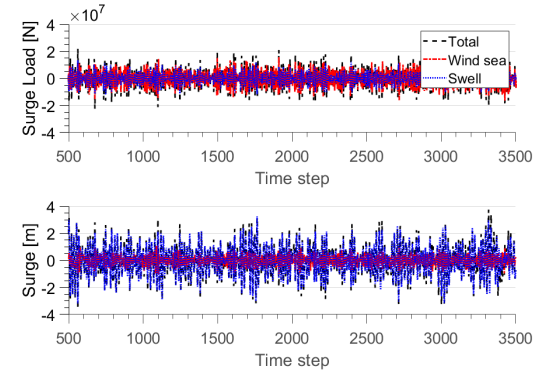


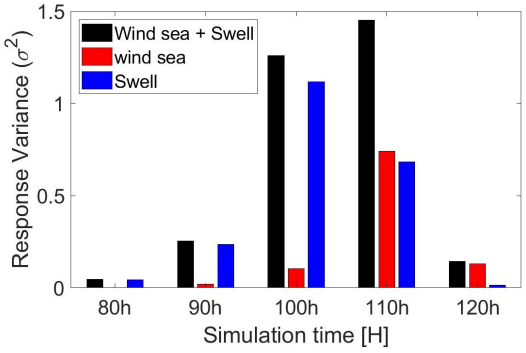
Fig. 3 Total (wind sea + swell), wind sea, swell energy hydrodynamic load and surge, heave and pitch response PSD result: hurricane progress 100 h

을 받아 파 에너지 주기 변화가 심하다. 그래서 파 peak 주기가 영향을 받아 swell peak로 가까워졌다(Fig. 1).

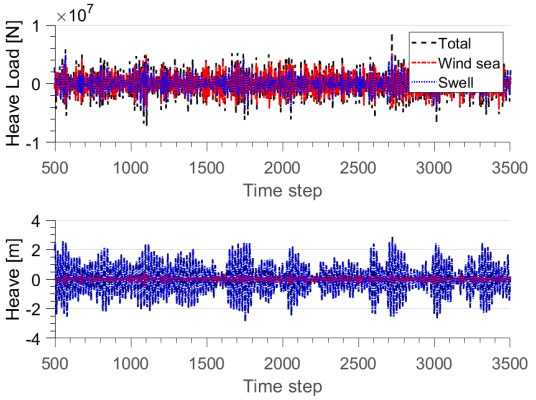
Surge 응답 결과에서는(Fig. 3(b)), surge와 heave NF에서 구조물의 응답이 뚜렷하게 나타났다. Surge NF 부근에서의 swell과 wind sea 하중에 의한 응답 에너지는 비슷하지만(Fig. 3(a)), 파 에너지가 발생하는 주파수 범위에서 swell에 더 큰 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. heave 응답 결과에서는(Fig. 3(d)), swell에 의한 응답 에너지가 wind sea 보다 더 컸는데, heave NF와 swell peak 에너지가 유사한 주파수 범위에 분포되어 있기 때문에, 이에 의거한 공진현상으로 swell 에너지 하중에(Fig. 3(a)) 더 큰 거동이 발생하여 응답에너지가 상승되었다. 이러한 결과로 비추어 볼 때, heave 거동은 swell에 응답기여가 큰 것으로 판단된다. 그리고 pitch 응답 결과에서(Fig. 3(f)) 알 수 있듯이 swell 에너지의 유체력 하중 기여 보다는 wind sea 에너지 하중의(Fig. 3(e)) 영향이 다른 방향의 응답 결과보다 기여하는 바가 컸다. 결과적으로 pitch 거동의 경우 swell에 의한 응답 영향이 크지만, wind sea 유체력 하중에 의해 구조물의 응답도 크게 증가되는 결과를 알 수 있어서 고주기 영역의 하중이 거동 변화에 큰 영향을 미치고 있다는 것을



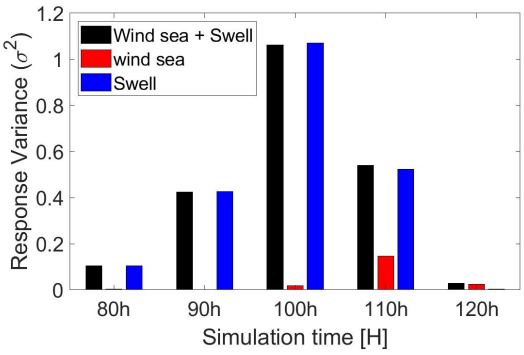
(a) Surge load and response



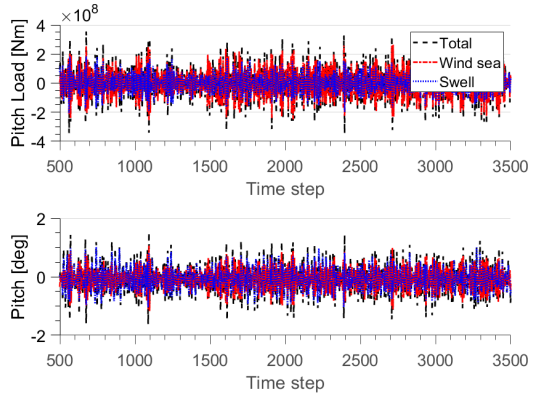
(b) Surge variance



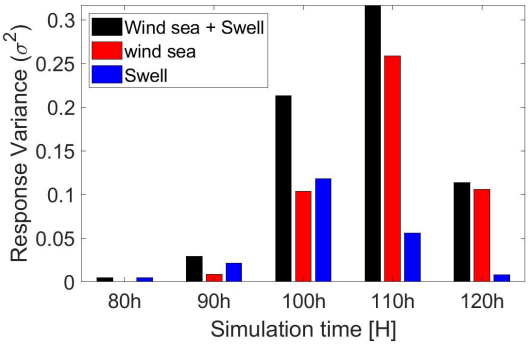
(c) Heave load and response



(d) Heave variance



(e) Pitch load and response



(f) Pitch variance

Fig. 4 Time history and variation in the platform response variance with time indicating contributions from wind sea and swell: surge, heave, pitch motion result

확인할 수 있다. 이러한 극한 해상상태의 파 에너지성분 별 응답특성은, Kang et al. [16,17]의 연구에서도 파 에너지가 구조물 거동의 미치는 하중기여 응답과 같은 경향성을 보였다.

4.2 극한 해상상태 변화의 따른 부유식 해상풍력 구조물의 응답 특성 분석

허리케인이 진행되면서 변화된 해상상태의 각 파 에너지 성분을 surge, heave, pitch의 응답 분산결과와 시간 영역에서의 total (wind sea+swell), wind sea, swell 하중과 응답 결과를 나타내었다(Fig. 4).

Wind sea 에너지 유체력 하중이 surge, heave, pitch 응답에서 모두 swell 에너지 하중보다 부유체에 더 큰 유체력이 작용하고 있지만(Fig. 4(a), (c) and (e)), 거동해석 결과를 살펴보면, swell 유체력 하중이 구조물 응답에 더 큰 기여를 하는 것을 볼 수 있다(Fig. 4(b), (d) and (f)). 또한 surge와 heave 거동에서는 swell 에너지에 의한 응답 기여가 큰 것으로 판단되지만(Fig. 4(b), (d)), pitch 거동 결과에서는(Fig. 4(f)) 110 h 해상상태에서 wind sea의 응답이 swell에서보다 더 크게 작용한 것으로 관찰되었다.

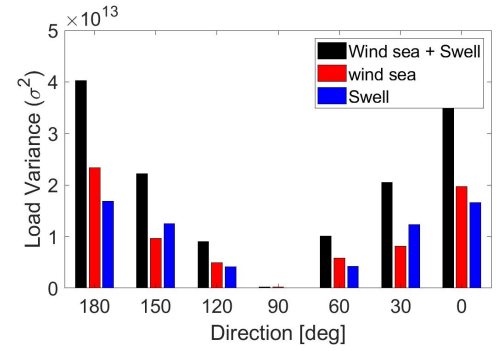
정리하면, 상대적으로 작은 swell 에너지 유체력 하중이 부유체에 작용함에도 불구하고 surge와 heave 거동의 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었지만, pitch 거동은 극한 해상조건으로 도달할수록 swell 에너지 하중에 의한 거동변화보다 wind sea가 기여하는 바가 컸다. 이는 pitch 거동의 경우 타워의 주기와 맞물리는 고주기 성분의 wind sea 파 에너지가 공진현상으로 구조물 응답에 더 큰 기여를 한 것으로 판단되었다. 그러나 heave 거동은 허리케인이 접근하면서 wind sea 에너지가 상승함에도 불구하고, swell 유체력 하중에 영향이 가장 큰 것으로 판단되었다. 이는 저주기 유체력 하중에 영향을 미치기 때문이다. 또한 극한 해상조건에서 swell 에너지가 heave 거동의 변화를 크게 발생시킴으로써 기둥과 기둥사이 연결 브레이스 혹은 계류선의 피로 문제로 확장될 수 있다.

Surge 방향의 거동 응답에서는 Fig. 1에서처럼 각 에너지의 상승변화의 맞춰 응답특성들이 관찰되었지만, 평균 구조물의 움직임의(mean position) 영향을 미치는 swell 파 에너지 성분 유체력에 더 큰 응답을 나타났다.

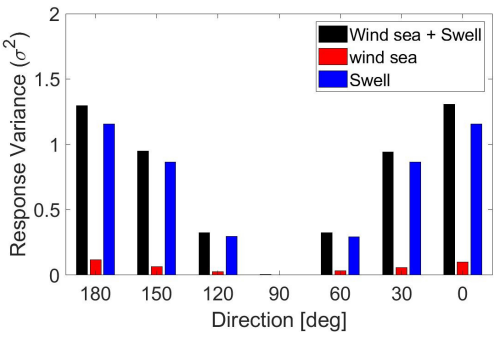
4.3 방향별 유체력 하중에 의한 부유식 해상풍력 구조물의 응답 특성 분석

여러 방향별로 각 성분의 파 에너지 유체력 하중이 부유체 구조물의 작용할 때, 하중과 구조물의 응답 분산결과를 보여주고 있다(Fig. 5).

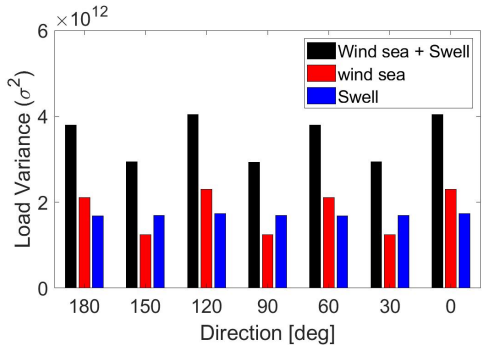
Heave 거동을 제외하고는(Fig. 5(c)) wind sea 하중이 swell 하중보다 모든 방향에서 크게 작용하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5(a), (c) and (e)). 반면에 거동해석 결과에서는 다른 경향성을 보였다.



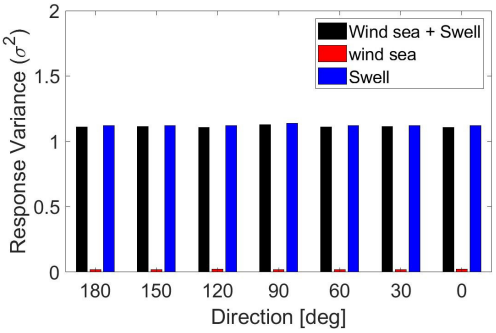
(a) Surge load directional variance



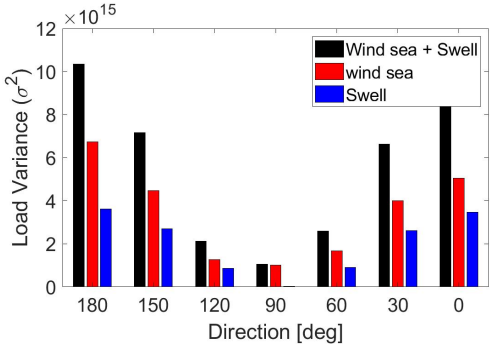
(b) Surge response directional variance



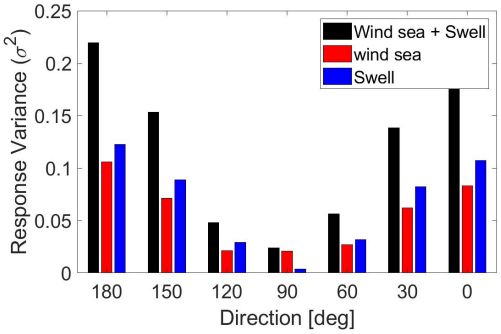
(c) Heave load directional variance



(d) Heave response directional variance



(e) Pitch load directional variance



(f) Pitch response directional variance

Fig. 5 Total (wind sea + swell), wind sea, swell load and response variance result: All directions of surge, heave, pitch

특히 heave 거동은(Fig. 5(d)), wind sea 유체력 하중이 부유체에 크게 작용함에도 불구하고 모든 방향에서 swell 유체력 하중에 의한 구조물 거동 변화가 더 큰 것으로 관찰되었다. 또한 모든 방향에서 wind sea 하중이 swell 보다 큰 유체력이 작용하고 있음에도 불구하고(Fig. 5(a), (c) and (e)), swell에 의한 구조물의 거동이 더 크게 발생하여 응답에너지가 상승된 결과를 보이고 있다(Fig. 5(b), (d) and (f)). 즉 heave 거동은 방향성을 고려한 거동특성분석에서도 swell에 의한 유체력이 더 큰 기여를 하였다. 나머지 surge와 pitch 거동 변화의 특성은 4.2절에서 관찰된 응답특성과 동일한 결과가 나타났으며(Fig. 4), 한 가지 다른 점은 heave의 응답은 모든 방향에서 고르게 응답크기를 보였지만, 두 방향의 거동에서는 달랐다. 이는 반잠수식 해상풍력 구조물의 RAO와 연관이 있다. 전면과 후면에서의 RAO는 크지만 90° 방향에서는 RAO가 작기 때문에 이러한 응답 결과가 도출되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 극한 해상상태에서 생성된 파 에너지 성분별 유체력이 부유식 해상풍력 구조물 거동특성에 어떤 영향을 미치는지 분석하였으며, 파 에너지를 total (wind sea+swell), wind sea, swell 성분으로 분리하여 이에 의거한 유체력을 계산하였다. 부유식 해상풍력구조물의 거동특성 평가를 수행하기 위해서 NREL에서 개발한 FAST (Fatigue aerodynamics structures and turbulence) 프로그램을 사용하였고, 파 에너지는 수치 허리케인 시뮬레이션 모델결과를 활용하였다. 다음은 본 연구의 결과를 개략적으로 요약하였다.

Surge 응답 결과를 관찰해보면, 고유주기 부근에서 swell과 wind sea에너지 유체력 하중에 의한 구조물의 응답 에너지는 큰 차이를 보이지 않았지만, 파 에너지 범위에서 swell유체력 하중에 큰 거동변화를 보였다. 이는 구조물의 평균 움직임의 변화를 미치는 저주기 swell 파 에너지 성분의 유체력 하중이 구조물 거동변화에 지배적인 요소로 작용하기 때문이다. 그리고 heave 거동에서는 wind sea 하중이 크게 작용하더라도, swell 하중에 더 큰 영향을 미쳤다. 이는 구조물의 상하운동에서는 저주기 성분이 지배적인 역할을 한다고 볼 수 있다. Pitch 거동 결과의 경우, surge와 heave 거동특성과는 다른 응답특성이 관찰되었는데, wind sea유체력 하중에 의한 응답 기여도가 상승된 결과가 분석되었다. 이는 pitch 거동으로 타워가 영향을 받으면서 굽힘 거동이 발생되었기 때문이다.

또한 허리케인이 진행되면서 시간에 따라 극한 바람에 의해서 wind sea 파 에너지가 상승함에도 불구하고, swell 파 에너지의 유체력 하중에 구조물 거동변화가 더 컸다. 그 중에서도 heave거동은 swell에너지에 지배적이었다. 만약 이 운동이 지속적으로 큰 폭의 움직임이 유지될 경우, 해상풍력 구조물은 단기 피로문제가 발생될 수 있다. 그러나 pitch 응답결과는 허리케인이 측정지점에 근접한 해상상태에서(110 h) wind sea 성분의 유체력 하중이 swell보다 거동변화에 더 큰 기여를 한 것으로 분석되었다. 또한 wind sea 파 에너지가 지배적인 120 h에서는 모든 방향에서 wind sea 유체력 하중에 응답이 지배적이었다.

방향별 응답에서도 앞서 분석된 결과들과 동일한 거동변화 특성이 관찰되었다. 한가지 다른 점은 surge와 pitch의 90° 방향에서는 응답이 180° 방향보다 감소된 하중과 응답 결과가 나타났다. 이는 극한 해상상태에서 작용하는 파고는 동일하지만 구조물의 운동, 속도 및 가속도의 영향을 받지 않는 유체력 하중(wave excitation force)은 RAO와 파고의 곱으로 계산되기 때문에 감소된 결과가 나타났다.

그리고 부유식 해상풍력 구조물의 경우, 공진 회피 설계를 위해 대부분 저주기 영역의 고유주기를 가지기 때문에, swell 에너지 유체력 하중이 작게 작용하더라도 구조물이 공진현상으로 인해 큰 응답이 나타났다. 만약 저주기 파 에너지 성분과 고차항의 유체력 성분이 같이 작용한다면 더 큰 응답이 분석될 것으로 판단된다.

References

[1] Lee, M.-K., Jung, K.-H., Park, S.-B., Yu, B.-S., Chung, Y.-S., 2016, Extreme Mooring Analysis of Turret Moored LNG-FSRU, J. Society of Naval Arch. of Korea, 53:5 435-446, https://doi.org/10.3744/SNAK.2016.53.5.435.

[2] 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, Republic of Korea.

[3] IEC, 2005, IEC 61400-1 Wind Turbines - Part 1: Design Requirements, IEC 61400-1:2004, Geneva.

[4] API, 2007, Interim Guidance on Hurricane Conditions in the Gulf of Mexico, API-BULL2INT-MET, Washington, DC.

[5] Zhang, L., Lu, H., Yang, J., Peng, T., Xiao, L., 2013, Low-frequency Drift Forces and Horizontal Motions of a Moored FPSO in Bi-directional Swell and Wind-sea Offshore West Africa, Ships and Offshore Structures, 8:5 425-440, https://doi.org/10.1080/17445302.2012.700564.

[6] Gang, C., Hongtao, Y., Peilin, D., Ji, Z., Jian, Z., Yuhan, W., 2014, The Effect on Hydrodynamic Performance of Multi-point Moored FPSO in Swell Condition of West Africa, ASME 2014

33rd Int.Conf on Ocean, Offshore and Arct. Eng. 1A: Offshore Tech: V01AT01A008, https://doi.org/10.1115/OMAE2014-23144.

[7] 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-88-3-3II.

[8] 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.

[9] Kim, E., 2015, Offshore Wind Turbine Loads under the Coupled Influences of Wind, Waves, and Currents During Gurricanes, Doctoral Dissertation, Texas at Austin University, USA.

[10] Komen, G., Hasselmann, K., 1984, On the Existence of a Fully Developed Wind-sea Spectru, J. physical oceanography, 14:8 1271-1285, https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2.

[11] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G., 2009, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, NREL/TP-500-38060, Colorado.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Kang, T.-W., Noh, H.-J., Yang, H.-I., Noh, M.-H., Kim, E., 2019, Analysis of Mooring Tension Characteristics of Floating Offshore Wind Turbine Structure by First and Second Hydrodynamic Load of Swell Wave Component, Proc. Korean Association of Ocean Sci. and Technol. societies. Spring Conf., 308-311.

[18] Coulling, A. J., Goupee, A. J., Robertson, A. N., Jonkman, J. M., and 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.