

부유식 파력-해상풍력 복합 발전시스템의 등가설계파 기법 적용에 관한 연구

손정민 · 신승호 · 홍기용[†]
선박해양플랜트연구소

A Study on Equivalent Design Wave Approach for a Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation System

Jung Min Sohn, Seung Ho Shin and Keyyong Hong[†]

Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 32, 1312 beon-gil, Yuseong-daero,
Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

요 약

부유식 해양구조물은 설계수명 동안 조우할 수 있는 가장 극심한 환경하중을 고려하여 설계되어야 한다. 본 연구의 해석 대상인 부유식 파력-해상풍력 복합 발전시스템에 가장 큰 영향을 미치는 환경하중은 파랑하중이다. 파랑하중의 주요 매개변수는 파장, 파고, 파향이며, 이들의 조합에 따라 구조물의 거동특성에 미치는 영향은 판이하다. 이에 따라, 대상 해역이 가지는 파랑의 특성과 구조물이 가지는 응답 특성을 기반으로 극한 응답을 주는 파랑인자를 탐색하는 과정이 필요하다. 즉, 환경조건 범위에서 발생할 수 있는 모든 파랑조건을 탐색하여 최대 응답을 발생시키는 등가설계파를 추출해야 한다. 이는 특정 하중의 최대 설계 응답과 동일한 응답 수준을 주는 규칙파를 탐색하는 일련의 과정을 통해 계산 가능하다. 본 연구에서는 부유식 파력-해상풍력 복합 발전시스템에 작용하는 특정 하중 인자에 대해 등가설계파를 산정하였으며, 전체구조해석에 활용하였다.

Abstract – Floating offshore structures should be designed by considering the most extreme environmental loadings which may be encountered in their design life. The most severe loading on a wave-offshore wind hybrid power generation system is wave loads. The principal parameters of wave loads are wave length, wave height and wave direction. The wave loads have different effects on the structural behavior characteristic depending on the combination of wave parameters. Therefore, the process of investigation for critical loads based on the individual wave loading parameter is need. Namely, the equivalent design wave should be derived by finding the wave condition which generates the maximum stress in entire wave conditions. Through a series of analysis, an equivalent regular wave height can be obtained which generates the same amount of the hydrodynamic loads as calculated in the response analysis. The aim of this study is the determination of equivalent design wave regarding to characteristic global hydrodynamic responses for wave-offshore wind hybrid power generation system. It will be utilized in the global structural response analysis subjected to selected design waves and this study also includes an application of global structural analysis.

Keywords: wave-offshore wind hybrid power generation system(부유식 파력-해상풍력 복합 발전시스템), equivalent design wave approach(등가설계파 기법), stress RAO(응력 전달함수), response spectrum(응답 스펙트럼), global structural analysis(전체구조해석)


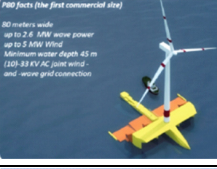
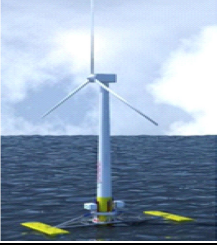

1. 서 론

지구 온난화 문제와 화석 연료 부족의 해결책으로 대체에너지 개발이 활발히 진행되는 가운데 풍력발전은 신재생에너지 중 가장 높은

효율을 가지고 안정적이며 경제성이 높은 에너지원으로 꼽히며, 파력발전은 모든 해역에 폭넓게 분포되어 있어 삼면이 바다인 우리나라에 적합한 에너지원이다. 특히, 개발 대상 적지가 일치하는 파력과 해상풍력 발전을 결합하여, 복합 구조물 및 제어시스템을 통해 두 에너지원을 동시에 활용함으로써 경제성을 향상시키고 공간

[†]Corresponding author: khong@kriso.re.kr

Table 1. Summary of hybrid wave-offshore wind power plant project

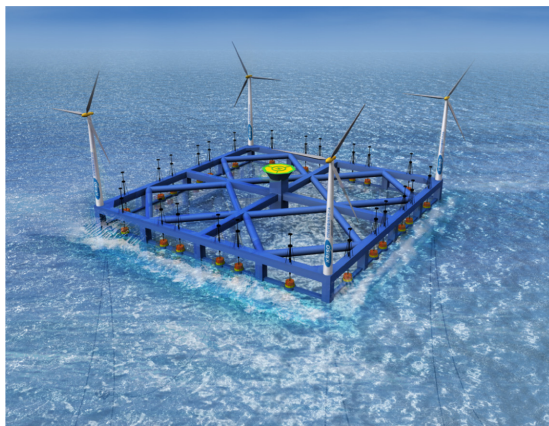
프로젝트	개발 국가	특징
 <p>P37 (Floating Power Plant A/S, 2015)</p>	덴마크	11 kW 풍력 3기와 파력발전기를 포함한 터렛 계류방식의 반잠수식 구조물로 2008년 해상설치 후 4번의 실패역시험과 20개월의 계통연계시험을 완료함
 <p>P80 (Floating Power Plant A/S, 2015)</p>	덴마크	p37기를 바탕으로 2.6 MW 파력과 최대 5 MW 단일 풍력으로 구성된 상용 복합 발전시스템 개발 중임
 <p>Wave Treader (Green Ocean Energy, 2015)</p>	영국	50 m 길이의 부유체 2개는 20 m 길이의 빔에 의해 풍력터빈에 연결되며 파도의 방향에 따른 회전과 조석에 따른 수위 변화가 가능하도록 설계되었으며, 2010년 실증모델 개발, 2011년 시제품 건설함
 <p>W2-Power (Pelagic Power, 2015)</p>	노르웨이	175 kW 파력 18기와 3.6 MW 해상풍력 2기로 구성, 파력발전의 경우 2006년 1:3 scale 실증 시험완료

의 효율성을 높일 수 있다. 최근 유럽 국가를 중심으로 해상 복합 발전 실용화를 위한 기술개발 경쟁이 심화되고 있으며, 개발 프로젝트 별 특징을 Table 1에 정리하였다.

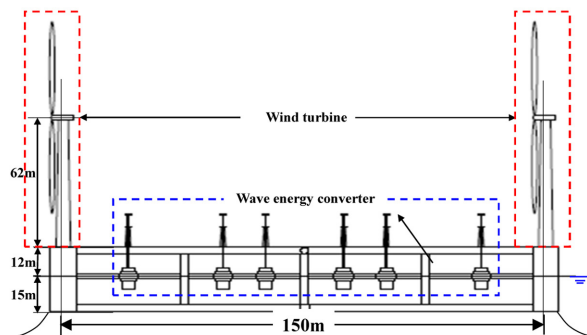
이에 발맞추어 파력-해상풍력 분야의 기술 선도 및 시장 선점을 위한 원천기술 확보를 위해 선박해양플랜트연구소에서는 2013년 6월부터 부유식 파력-해상풍력 복합 발전시스템 설계기술개발을 연구 중이다. 천해역 공간의 제한성과 환경적 민감성에 기인하여 해상풍력의 대상해역이 심해로 확장되는 추세이며, 수심이 깊어질수록 부유식이 건설비 측면에 유리하다. 이에 따라, 본 시스템은 Fig. 1과

같이 운동성능이 양호한 반잠수식 구조물로 선정하였으며, 수선면에 24개의 점흡수식 100 kW 파력발전기와 구조물의 모서리에 4기의 3 MW 풍력발전기가 설치되며, 발전량 10 MW와 설계수명 20년을 목표로 한다. 또한 설치 해역과 구조물의 특성을 고려하여 방사형 계류시스템을 사용하여 파랑 또는 조류에 기인하는 표류력을 받을 때 위치를 유지하도록 하였다.

개념설계 단계에서는 수요 조사 분석, 대상 적지, 구조물의 목적 및 기능 설정, 구조물의 기본 구조 형식, 계류시스템 형태, 계통연계 등이 수행된다. 이후, 기본설계 단계에서 전체적인 GA(General



(a) concept design



(b) layout

Fig. 1. Wave-offshore wind hybrid power generation system.

Arrangement) 작성, 설계환경 및 설계하중 결정, 설계기준의 설정, 사용 재료 선정, 구조물의 안전성/안정성의 검토가 된 후 각종 하중조건 및 운용조건에 관한 건전성 평가가 수행되면서 상세설계가 진행된다. 구조설계는 설계조건 설정, 설계, 전체구조해석, 국부구조해석, 피로해석 등으로 나뉠 수 있다. 구조물이 심해자원 개발과 함께 대형화되고, 육지로부터 멀리 설치됨에 따라 구조물의 안전성은 더욱 강조되고 있으며, 관련 연구도 활발하게 진행되고 있다(Park and Chung, 2001; Lee et al., 2004; Lee et al., 2014; Sohn et al., 2014).

본 논문에서는 작성된 GA 및 중량보고서를 바탕으로 해석 모델을 만들고 운동해석을 수행한 후 대상 적지의 파 스펙트럼을 이용하여 통계 해석을 수행하고 설계하중 조건을 산정하였다. 또한, 전체유한요소 모델을 작성하고 산정된 등가설계과 하중을 가하여 구조 응답을 살펴보았다.

2. 해석 모델

2.1 운동해석 모델

복합 발전시스템은 길이 및 폭 방향에 대해 대칭을 이루는 구조물로, 해석 시간 단축을 위해 1/4모델로 구성하였다. Fig. 2를 바탕으로 파장과 파고에 대한 부재 특성 길이별로 지배적인 유체하중 영역을 분류하고, Fig. 3과 같이 회절과 관성력이 지배적인 영역의 부재는 패널로 점성 영향이 큰 부재는 보요소로 모델링하였다. 생성된 모델은 선형포텐셜이론 기반인 DNV-GL Sesam Hydro D(2015)을 사용하여 운동해석을 수행하였다.

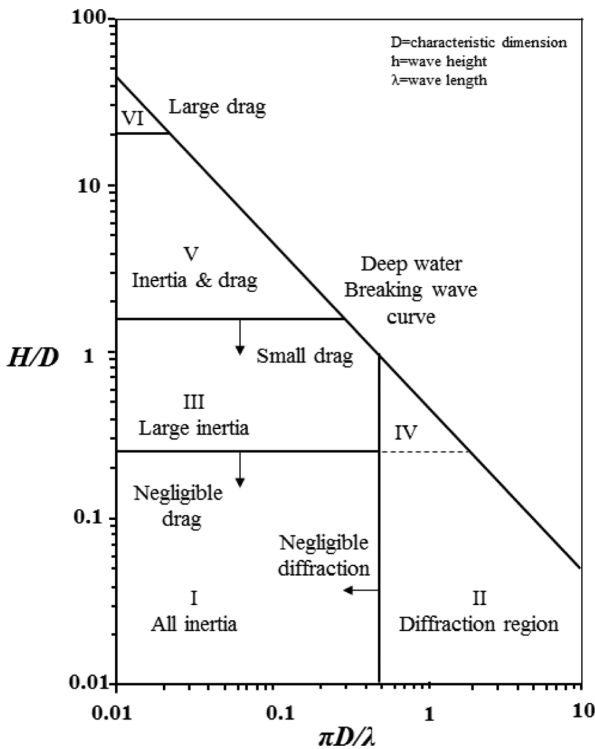
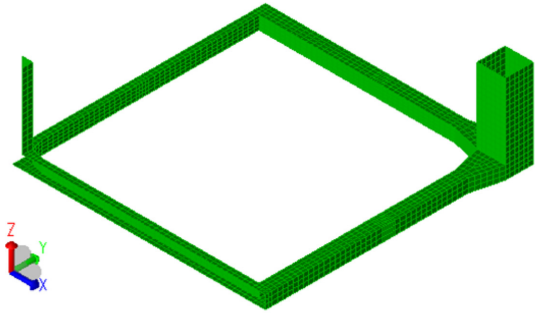
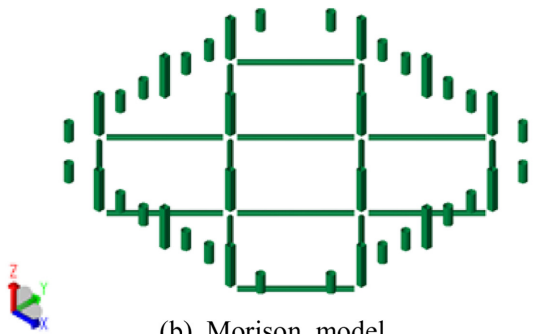


Fig. 2. Different wave force regime (Chakrabarti, 1987).



(a) Panel model



(b) Morison model

Fig. 3. Hydrodynamic model for wave-offshore wind hybrid power generation system.

2.2 구조해석 모델

설계과를 산정하기 위해서는 운동해석 결과를 바탕으로 응력 RAO를 작성하여야 한다. 이는 특정 구조 응답의 최대치를 제시하는 파주기를 탐색하는 과정의 일환으로 이는 유체동역학적 하중과 관성력의 하중특성을 포함한다. 본 연구에서는 설계과를 이용한 전체구조해석을 용이하게 하기 위하여 DNV-GL Sesam Genie(2015)를 이용하여 구조해석 모델을 Fig. 4와 같이 구성하였다. 개념설계안과 중량보고서를 바탕으로 주요 부재와 2차 부재의 형상은 셀요소와

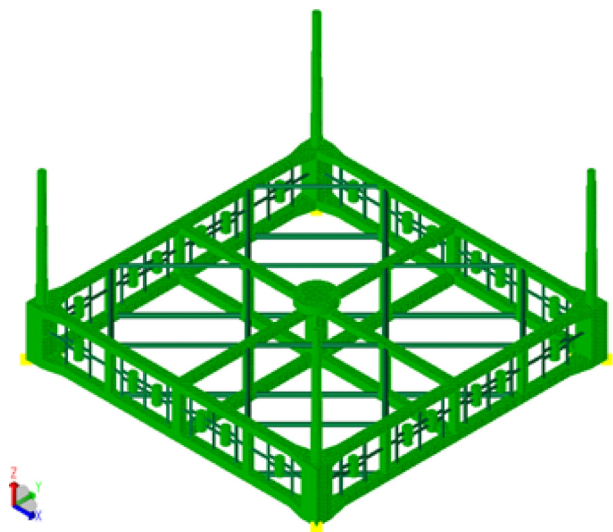


Fig. 4. Finite element model for structural analysis.

Table 2. Weights of component parts of wave-offshore wind hybrid power generation system

	Dimension (m×m)	Mass (×10 ³ kg)
Hull (Column, pontoon)	8.5×8.5, 4×4	4,998
Deck, brace	4×3, 2.5φ	8,798
Wind turbine tower	-	1,051
Rotor Nacelle Assembly	-	749
Wave energy converter (WEC)	4.5φ	1,777
WEC guide frame	1.1×0.8+0.015×0.02	567
Electrical equipment	-	628
Damping plate	-	654
Marine system	-	1,017
Mooring load	-	500
Water ballast	-	6,108
Total		26,847

보요소로 구현하였으며, 밸러스트 수, 기장, 전장, 풍력터빈 타워, RNA 등은 질량요소로 구성하였다(Table 2). 밀도를 조정하여 설계안의 중량을 충족시켰으며, 관성 반경과 무게 중심을 오차 3% 이내로 모델링하였다.

3. 설계파 결정 방법

3.1 파랑 스펙트럼

구조물은 설계수명 기간 동안 다양한 단기 해상 상태를 겪게 되며 이는 파랑빈도자료(Wave scatter diagram)로부터 특정 지역에서의 해상상태를 확인할 수 있다. 본 논문에서는 전해역 심해설계파 추정보고서(Lee, 2005)를 바탕으로 재현주기별 설계파를 산정하였으며, 극한 조건은 100년 재현주기파로 유의파고(Hs) 11.32 m와 정점주기는(Tp) 15.1 s이다.

응답 스펙트럼은 파랑 스펙트럼의 에너지 밀도에 따라 최대 응답치가 달라지기에 파고주기 구간별 출현율을 바탕으로 추정된 Hs-Tp선도(Fig. 5)를 사용하여 100년 재현주기의 극치 주변 ±3개 값을

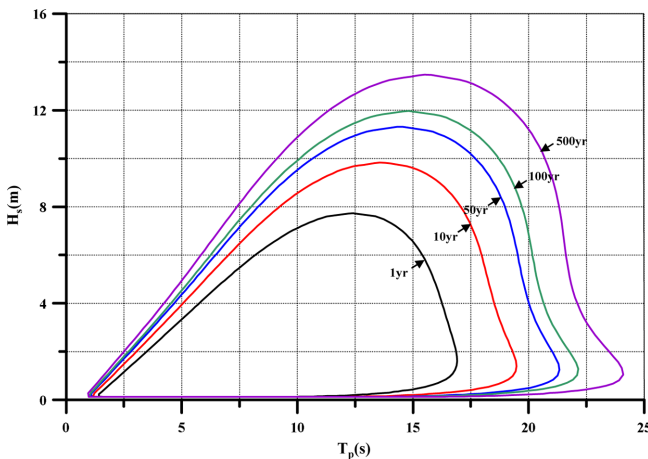


Fig. 5. Relationship between significant height and peak period depending on return period (Choi and Kwon, 2015).

사용하여 6개의 파랑 스펙트럼을 구성하였다. JONSWAP 스펙트럼을 통해 모델링되었으며, 스펙트럼 첨두증대계수 (γ)는 3.3을 사용하였다.

3.2 운동 RAO

복합 발전시스템이 설치될 해역의 극한 환경 조건은 정점 주기는 약 15.1 s로서, 이는 약 0.4 rad/s에 상응하는 값이다. 주파수는 0.025-1.5 rad/s 범위에서 0.025 rad/s 간격으로 각 주파수에 대해 운동 해석을 수행하였으며, 수심은 80 m로 설정하였다. 선수각이 0° 이상 90° 이하인 범위에 대해서 해석을 수행하였으며, 전단력과 비틀림 모멘트는 선수과가 아닌 횡과에서 최대 하중이 발생함으로 15° 간격으로 운동 특성을 비교하였다.

Fig. 6은 0°와 45°에 대한 운동 해석 결과를 도시화하였다. 운동 해석 결과 중 상하동요는 약 0.45 rad/s 부근에서 정점을 보이며, 종동요는 최대 0.025 deg/m정도까지의 응답을 보였다. 또한 해석 모델의 차이에 의한 RAO 비교결과도 포함하였다. 횡과가 가해질 때 선수동요를 제외한 나머지는 유사한 결과를 보였으며, 선수동요에서는 0.05 m/m 차이를 보였다. 이는 구조물이 가지는 관성력의 차이로 인해 운동 RAO가 달라질 수 있음을 보여주는 결과이며, 최대 차이는 12%정도이다. 해석 소요시간 측면에서 운동해석 모델 사용이 유리하나, 설계파를 이용한 구조해석을 염두 해둔다면 구조 해석 모델을 사용하여 진행하기를 추천한다.

3.3 응력 RAO

응력 RAO를 작성하기에 앞서, 본 구조물이 가질 수 있는 특정 하중이 정의되어야 한다. ABS(2015)와 DNV(2012) 선급 룰은 분리력, 비틀림모멘트, 전단력, 굽힘모멘트, 갑판 가속도에 대해 검토를 요구한다. 복합 발전시스템의 갑판 중량은 상대적으로 적기에 갑판 가속도로 인한 하중은 제외하였지만, 풍력발전기가 부유체 끝단에 설치됨에 따라 부유체의 횡동요 및 종동요 등에 대한 허브 높이에서의 가속도의 특성은 검토하였다.

우선적으로 구조물의 끝단에서 특정 단면까지 작용하는 동적 하중과 운동으로 인한 관성력을 적분하여 계산된 단면의 위치에 따른 응답값을 조사하였다. 이를 위해 Fig. 7과 같이 구조물의 길이 방향에 대해 25개의 y-z단면(101-125, 우측에서부터 좌측)으로 구성하였다. 양의 x축부터 구조물의 중앙 지점을 기준으로 등 간격으로 배치하되, 양 끝 수직 컬럼은 보다 조밀하게 배치하였다. 파랑 주파수별로 최대가 발생하는 단면은 차이가 있었으며, 최대 또는 그에 준하는 값을 제시하는 단면을 선정하여 응력 RAO를 작성하였다.

Table 3은 특정 하중 별로 응력 RAO가 최대 응답이 되는 파주기, 최대 위치와 파향을 정리하고 DNV(2012)에서 제시하는 값과 비교하였다. 분리력과 굽힘모멘트는 DNV에서 제시한 값과 유사하였으나, 전단력과 비틀림모멘트는 차이를 보였다. 이는 반잠수식 구조물의 경우 중앙부에 구성부재가 없어 데크와 폰툰 혹은 수평 브레이싱 조인트 부위에 최대치가 발생하며, 복합 발전시스템은 중앙부에 컬럼이 위치하여 중앙부에서 정점이 발생한다.

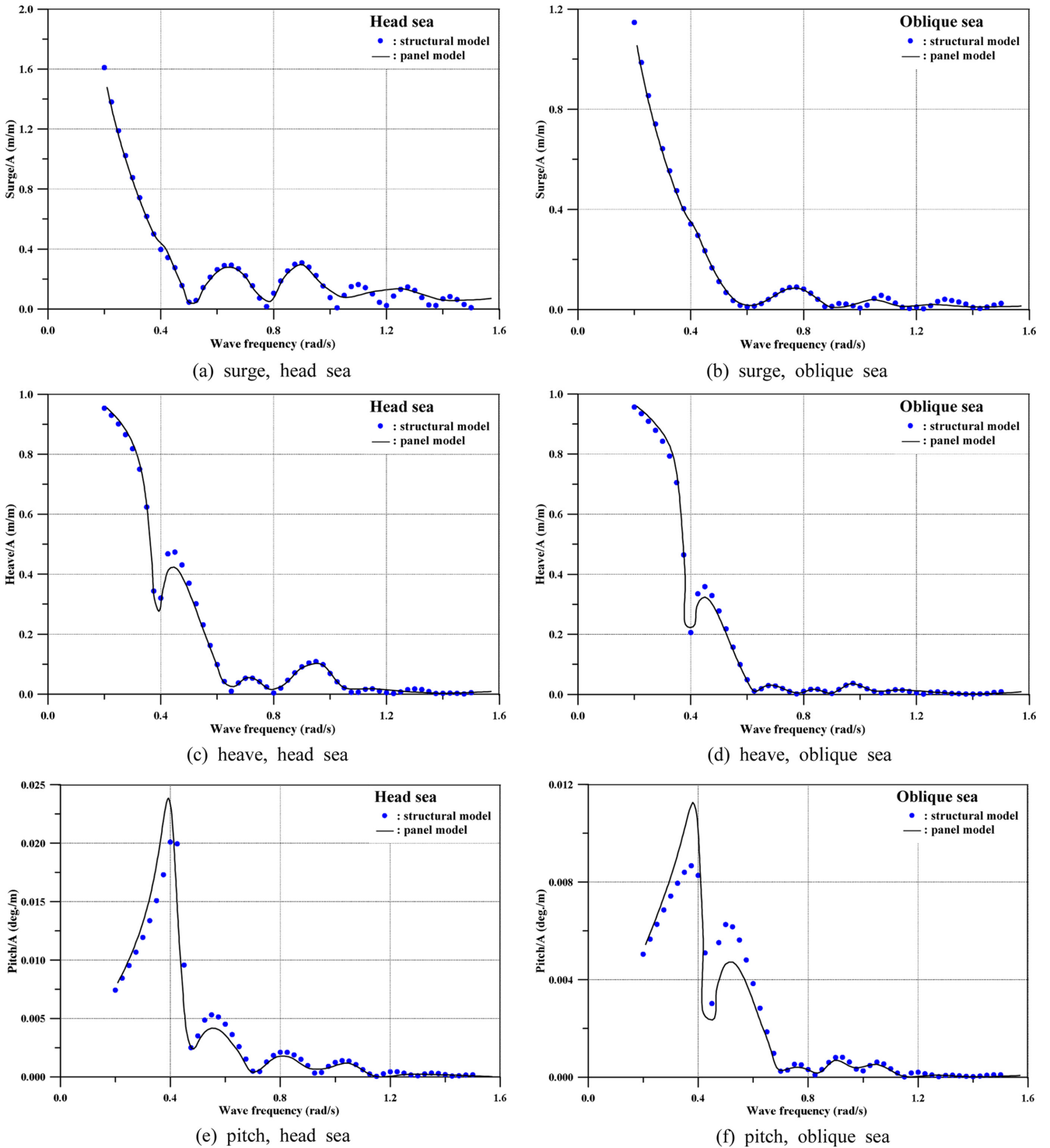


Fig. 6. Comparison of the motion responses of platform in regular waves between panel and structural (mass) model.

하중별로 살펴보면 분리력은 파랑을 가장 먼저 만나게 되는 단면과 중앙부에서 정점이 발생하였다. 선측 컬럼 중앙에서 최대 하중이 발생한 파랑의 주파수는 0.425 rad/s 부근으로, 파장으로 환산하면 약 340m로 선급 물에 제시된 바와 같이 폰툰간 거리의 약 2 배에 해당하는 값이다. 전단력의 경우 파랑이 부유체에 사파로 작

용할 때 최대 하중이 발생하며, 파랑 주파수에 따라 조금씩의 차이는 있으나 양쪽 부이 가이드프레임 부근과 부유체의 중앙부에서도 정점이 발생하였다. 비틀림 모멘트의 경우 파랑이 부유체에 사파로 작용할 때 최대 하중이 발생하며, 선측의 컬럼과 수평 브레이싱, 후측의 컬럼 부근에서도 정점이 발생하였다. 일반 반잠수식 구조물과

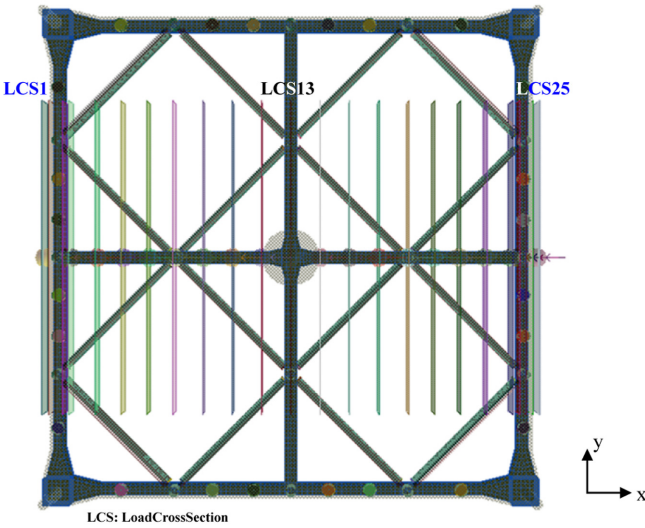


Fig. 7. Position of section considered in x direction.

달리 본 구조물은 수평 및 대각브레이싱으로 폰툰부가 구성되어 있어 최대 응답을 야기하는 파장이 짧아진 것으로 사료된다. 수직 굽힘하중은 파랑이 부유체에 선수파로 작용할 때 최대 하중이 발생하며, 굽힘하중의 경우 컬럼 중심부와 부유체 중심에서 최대하중을 보였다.

3.4 등가설계파

등가설계파는 극한하중을 줄 수 있는 하나의 정현파로 Fig. 8과 같이 설계수명 동안 조우할 수 있는 불규칙 해상 상태를 정현파의 합성으로 나타낼 수 있다는 가정 하에 규칙파에 대한 응력 RAO를 구한다. 설계해역의 파랑 스펙트럼이 정의되면 응력 RAO와 파랑 스펙트럼으로부터 응답 스펙트럼을 도출한다. 응답 스펙트럼이 레일리 (Rayleigh) 분포를 따른다고 가정하면 초과확률은 식 (1)과 같이 특정 응답(A)과 표준편차(σ)의 관계식으로 정의된다.

$$Q(A) = e^{-\frac{A^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

단기 해상 상태 기간(D_s)동안의 영교차 (zero-up crossing) 수(N_s)는 식 (2)와 같이 평균 영교차 응답 주기(T_x)로부터 결정된다. 여기서, D_s 는 3시간이며, m 은 응답 스펙트럼($m_n = \int_0^\infty \omega^n S_R(\omega) d\omega$)으로 m_0 는 응답 스펙트럼의 면적, m_2 는 응답 스펙트럼의 2차 모멘트이다.

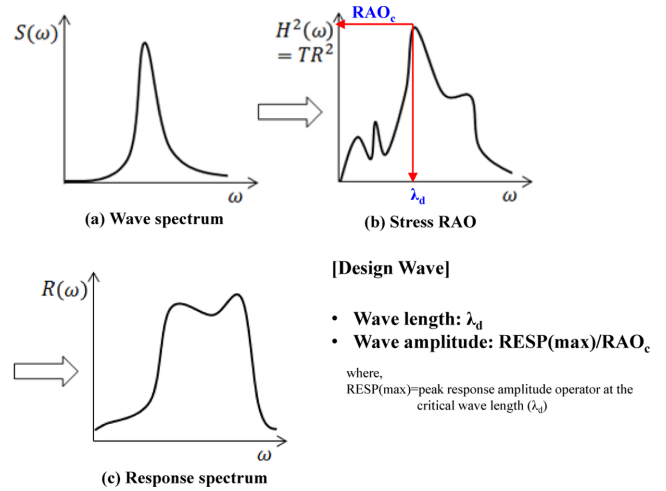


Fig. 8. A process of equivalent design wave approach (DNV, 2012).

$$N_s = \frac{D_s}{T_x} \quad (T_x = 2\pi\sqrt{m_0/m_2}) \quad (2)$$

따라서, 최대 응답(RESP(max))은 $\frac{1}{N_s}$ 의 확률로 존재하므로 식 (3)과 같이 도출된다.

$$RESP(max) = \sqrt{2}\sigma_s\sqrt{\ln N_s} \left(\because Q(RESP(max)) = e^{-\frac{RESP(max)^2}{2\sigma_s^2}} = \frac{1}{N_s} \right) \quad (3)$$

본 논문에서는 DNV-GL Sesam Postrep(2015)를 사용하여 구조물의 특정 하중과 이에 대응하는 파향을 통계학적 해석을 통해 최대 응답을 결정하였다. Table 4는 계산된 복합 발전시스템의 등가설계파이며, 특정 하중에서의 응력 RAO가 가장 클 때의 파랑조건으로부터 파장과 파향이 결정되며, 최대의 응답값과 응답 스펙트럼의 비로 파고가 결정된다.

예를 들어, 14.78s을 주기로 가지는 파가 구조물의 선수부에서 가해질 때, 103번 섹션에서 15.6 MN/m 응력 RAO가 관찰되며, 이를 특정 파랑 스펙트럼($H_s=11.32$ m, $T_p=15.1$ s)과 결합할 때 가장 큰 응답(101.0 MN)이 제시된다. Table 4는 파주기, 파향 및 파랑 스펙트럼을 변화시켜가며 탐색함으로써 하중별로 최대 응답을 제시하는 파랑조건이다. 이를 통해 복합 발전시스템에 가장 큰 영향을 미치는 하중은 분리력과 굽힘모멘트 임을 확인할 수 있다. 또한, 가장 큰 파고의 조건의 스펙트럼보다 주변의 다른 파랑 스펙트럼에

Table 3. Summary of critical wave and direction

	Wave-offshore wind structure			Semi-submersible (DNV, 2012)		
	Wave direction (deg.)	Wave length (m)	Location of max. response	Wave direction (deg.)	Wave length (m)	Location of max. response
Split force	90	340	pontoon (end), mid-section	90	317	pontoon (end), mid-section
Longitudinal Shear force	45	55	WEC guide frame, mid-section	45-60	336	pontoon/node/column intersections
	60	72	mid-section, inner column	45-60	336	
Torsion moment	30	135	mid-section, cross-bracing	45-60	225	column to deck connections
	60	340	inner column, mid-section	45-60	225	
Vertical bending moment	0	160	column, mid-section	0	160	column

Table 4. Design waves derived from short-term analysis

	Wave heading (deg.)	Wave spectrum		Section	Wave frequency (rad/s)	Wave period (s)	Max. response (N or Nm)	Stress RAO (N/m or Nm/m)	Wave amplitude (m)	Wave height (m)
		Hs (m)	Tp (s)							
Split force (N)	0	11.32	15.10	103	0.425	14.78	1.01E+08	1.56E+07	6.43	12.86
		10.53	11.75	113	0.775	8.11	2.44E+07	6.41E+06	3.81	7.63
		11.12	13.28	123	0.45	13.96	6.95E+07	8.32E+06	8.35	16.70
Shear force (N)	45	11.12	13.28	106	1.075	5.85	6.43E+06	1.69E+06	3.81	7.62
		11.32	15.10	114	1.25	5.03	9.02E+06	1.28E+06	7.07	14.14
		11.12	13.28	120	1.05	5.98	6.73E+06	1.65E+06	4.07	8.14
	60	11.12	13.28	105	1.2	5.24	5.41E+06	1.45E+06	3.73	7.47
		11.32	15.10	112	0.925	6.79	8.36E+06	1.64E+06	5.10	10.20
		11.12	13.28	121	0.975	6.44	5.66E+06	1.40E+06	4.04	8.08
Torsional moment (Nm)	30	11.12	13.28	110	0.65	9.67	3.33E+08	6.35E+07	5.24	10.48
		10.53	11.75	114	0.675	9.31	3.90E+08	7.36E+07	5.30	9.53
		11.12	13.28	121	0.45	13.96	4.35E+08	5.83E+07	7.46	14.90
	60	11.32	15.10	105	0.425	14.78	5.05E+08	7.89E+07	6.40	12.79
		11.12	13.28	114	0.85	7.39	3.02E+08	5.89E+07	5.13	10.30
		11.12	13.28	121	0.45	13.96	3.38E+08	4.69E+07	7.20	14.40
Bending moment (Nm)	0	11.32	15.10	103	0.425	14.78	1.35E+09	2.00E+08	6.73	13.45
		11.12	13.28	112	0.625	10.05	4.52E+08	7.42E+07	6.10	12.20
		11.32	15.10	123	0.425	14.78	7.97E+08	9.72E+07	8.19	16.39
Acceleration (at hub height) (m/s ²)	0	11.12	16.25	Horizontal	0.875	7.18	1.60E+00	2.00E-01	7.99	16.00
	90	11.32	15.10	Transverse	0.875	7.18	1.84E+00	3.13E-01	5.88	11.75
	0	11.32	15.10	Vertical	0.425	14.78	2.30E+00	3.56E-01	6.45	12.90
		11.32	15.10		0.425	14.78	2.29E+00	3.53E-01	6.48	12.95

서 응력 RAO의 조합에 따라 보다 큰 응답이 나타날 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 등가설계파를 이용한 전체구조해석 예

전체구조해석에는 설계환경 및 설계하중 결정, 설계기준의 설정, 사용 재료 선정, 구조물의 안전성 검토가 포함된다. 본 절에서는 선

정된 등가설계파를 이용한 직접구조해석 예로 최대 굽힘 모멘트를 야기하는 파랑조건(Hs=16.39 m, Tp=8.19 sec, θ=0 deg.)에서의 전체구조해석을 수행하였다. 본 구조물은 고장력강(E=205.8 GPa, σ_y=355 MPa, ν=0.3)으로 초기설계 되었으며, 허용응력법을 설계기준으로 안전성을 검토하였다. 전체구조모델은 다수의 스티프너를 동일한 강성을 가지는 하나의 빔으로 모델링하여, 요소 크기가 너무 작게 생성되는 것을 방지하였다.

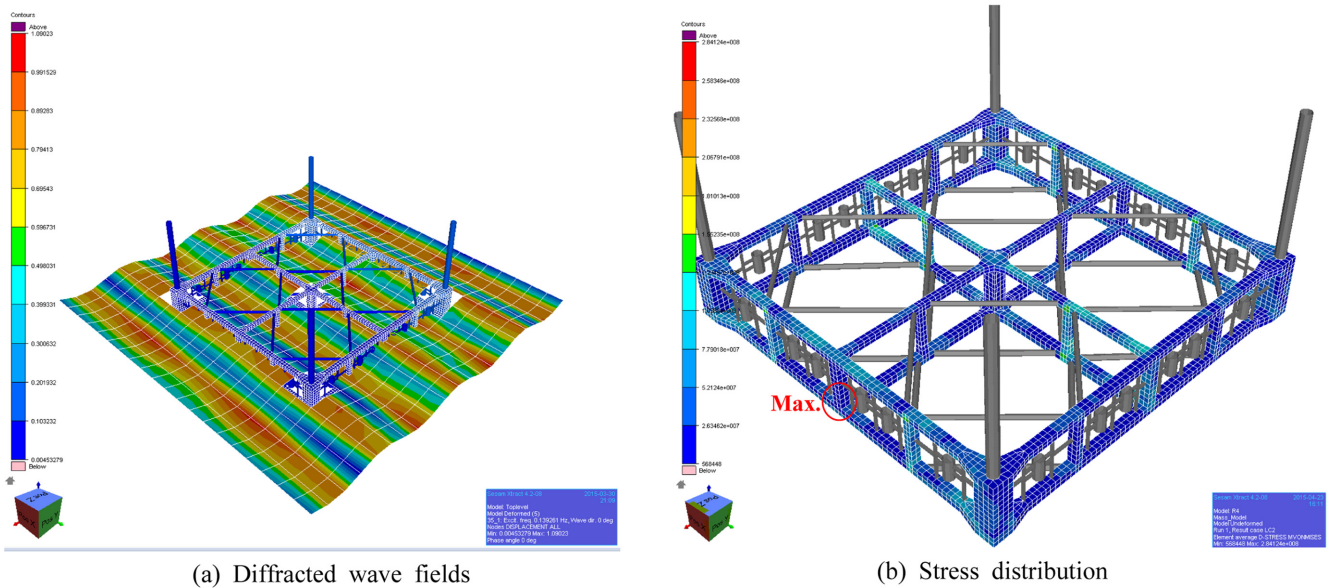


Fig. 9. An example of global structural response for vertical bending moment.

전체 바닥면에 수선면의 복원력에 해당되는 강성을 가지는 다수의 스프링을 부착하는 경계조건을 사용하여 강체운동을 방지하고 부유 조건을 구현하였다(DNV, 2012). DNV-GL Sesam Sestra(2015)를 이용하여 운동해석으로 인한 작용 하중을 구조해석 모델에 부과하였으며, 최대 구조 응답을 나타내는 위상에서의 등가설계과와 그때의 구조물의 구조 응답을 Fig. 9에 도시하였다. 최댓값은 284.1 MPa로 외부 폰톤과 내부 폰톤, 수직부재가 연결되는 지점의 보강재에서 나타났다. 재료의 허용응력인 301.75 MPa(재료안전계수 15% 가정)임을 감안하면, 전체 구조강도는 안전성을 확보함을 알 수 있다. 그러나 응력이 크게 발생하는 부위는 상세 분할 요소를 가지고 상세 응력 평가가 요구된다. 전체구조해석은 전체 규칙과를 탐색하는 방식이 아닌 등가설계과를 정의함으로써 구조 해석에 소모되는 시간과 노력을 절감할 수 있는 장점을 가지며, 고응력 부위를 탐색하기에 용이하다.

5. 결론 및 고찰

본 논문에서는 수치계산을 통해 부유식 파력-해상풍력 복합 발전시스템의 설치 대상 적지 환경을 고려하여 극한값을 줄 수 있는 등가설계과가 산정되었으며, 이를 바탕으로 다음과 같은 결론들이 얻어졌다.

1) 등가설계과 탐색을 통해 분리력과 굽힘모멘트는 DNV 가이드에서 제시한 값과 유사한 파랑조건을 보였으나, 전단력과 비틀림모멘트는 본 구조물이 가지는 구조적인 특성으로 인해 정점주기와 발생위치가 다소 달랐다.

2) 응력 RAO를 비교함으로써 본 구조물에 가장 큰 응답을 야기하는 하중은 굽힘하중과 분리력임을 확인하였으며, 파랑 스펙트럼 별로 상이한 응답 스펙트럼이 제시됨으로 극치값 뿐 아니라 주변값의 탐색이 필요함을 확인하였다.

3) 전체구조해석은 굽힘하중이 지배적인 파랑조건에서의 구조 응답 특성을 살펴보았으며, 등가설계과를 이용한 전체구조해석은 소모되는 시간과 노력을 절감할 수 있는 장점이 있음을 확인하였다.

본 구조물은 파랑-해상풍력 복합 발전시스템으로서 파랑에 대한 하중이 가장 지배적일 것으로 판단되지만, 구조물이 설계수명 동안 안전성을 확보하기 위해서는 바람하중 또는 파랑-풍력 조합하중에 대한 설계조건이 정립되어야 하며, 이에 따른 구조안전성 평가가 요구된다. 이에 따라, 파랑-풍력 복합하중 설계조건 산정 및 구조해석을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 해양수산부 과제 “10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술개발”와 선박해양플랜트연구소에서 주요 사업으로 수행중인 “부유식 진자형 파력발전 기술개발 및 실증”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] ABS, 2015, Rules for building and classing: floating production installations, American Bureau of Shipping, Houston, TX, USA.
- [2] Chakrabarti, S.K., 1987, Hydrodynamics of offshore structures. WIT Press. UK.
- [3] Choi, Y.H. and Kwon, C.S., 2015, “Longterm analysis of wave database by IFORM”, Proceeding of the Korean Association of Oceans Science and Technology Societies, Korea, May 21-22.
- [4] DNV, 2012, Column-stabilised units. Oslo (Norway): Det Norske Veritas.
- [5] DNV-GL Sesam Genie, 2015, Sesam Genie v6.9-05, Det Norske Veritas Software, Oslo, Norway.
- [6] DNV-GL Sesam HydroD, 2015, Sesam HydroD v4.6-03, Det Norske Veritas Software, Oslo, Norway.
- [7] DNV-GL Sesam Postresp, 2015, Sesam Postresp v6.4-02, Det Norske Veritas Software, Oslo, Norway.
- [8] DNV-GL Sesam Sestra, 2015, Sesam Sestra v8.6, Det Norske Veritas Software, Oslo, Norway.
- [9] Floating Power Plant, 2015, Available from <http://www.floatingpowerplant.com>.
- [10] Green Ocean Energy, 2015, Available from <http://www.power-technology.com>.
- [11] Lee, D.Y., 2005, Report for estimation of deep-sea design wave in Korea, Ministry of Oceans and Fisheries, Korea.
- [12] Lee, J.H., Kim, S.Y., Kim, M.H., Shin, S.C. and Lee, Y.S., 2014, “Design optimization and reliability analysis of jacket support structure for 5-MW offshore wind turbine”, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol.28, No.3, 218-226.
- [13] Lee, T.K., Park, S.W. and Hong, S.Y., 2004, “Structural analysis of hull structure for VLFS using equivalent plate model”, Proceeding of the Annual Spring Meeting, Chungmu, Korea, April 22-23.
- [14] Park, S.W. and Chung, T.Y., 2001, “A study for the structural design of floating airports on sea”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.38, No.2, 19-25.
- [15] Pelagic Power, 2015, Available from <http://www.pelagicpower.no>.
- [16] Sohn, J.M., Cheon, H.J., Shin, S.H. and Hong, K.Y., 2014, “Ultimate strength analysis of connections of floating pendulum wave energy converter”, Journal or the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol.17, No.1, 36-41.

Received 2 April 2015

1st Revised 21 April 2015, 2nd Revised 4 May 2015,

3rd Revised 27 May 2015

Accepted 28 May 2015