특집

부유식 해상풍력 플랫폼 형상 최적화 연구

홍사영, 김진하 (선박해양플랜트연구소)
김현조 (삼성중공업㈜)

1. 서 론

육상풍력과 비교하여 양질의 풍력에너지를 얻을 수 있는 해상풍력구조물은 현재 해저 지반 고정형 풍력단지가 주류를 이루고 있으나 대수심에 따른 경제적인 설치비용과 보다 양질의 풍력에너지를 이용하기 위해 부유식 형태인 스파형(Spar), TLP형(TLP type), 반잠수식형(Semi-submersible type) 등이 개발되고 있는 추세이다. 부유식 해상풍력플랫폼의 대표적 구조물로 스파형 2.3Mw급 "Hywind"는 2009년 실해역 설치를 통해 현재까지 운용되고 있으며, Hywind에 기초하여, 5MW급 Hywind-OC3를 통한 비교연구가 진행되고 있다. 또한, 반잠수식 구조물 형태를 지닌 "Wind-Float"에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Jonkman, et al. 2010; Roddier, et al., 2010).

최근에는 부유식 해상풍력발전장치에 대해 해상풍에 의한 블레이드의 공기역학적 연성효과를 고려한 시간영역의 통합거동 수치계산과 다양한 모형실험, 해상풍력단지 조성 등과 관련한 국내외의 활발한 연구가 진행되고 있다 (Jonkman, 2010; Robertson, et al., 2011; Myhr, et al., 2011; Shin, 2011; Koo, et al., 2012; Martin, et al., 2012).

스파형 구조물은 깊은 흘수와 작은 수선면적을 가지므로, 우수한 상하운동 특성을 가지고 있으나, 100m 이상의 깊은 흘수로 인해 운용수심의 제한이 있다. TLP 형 구조물은 우수한 운동응답특성을 가지고 있으나, 텐던 선장력 변화와 터어빈과 연계된 구조진동, 텐던 계류장치의 복잡성과 높은 설치비용 등의 단점이 있다. 반잠수식 시추선형은 구조물의 복잡성으로 인한 건조비의 증가, 구조하중 최적배치 및 피로파괴 등이 문제점으로 지적되고 있다.

본 연구에서는 부유식 해상풍력 플랫폼 최적형상 연구를 통해 경제성과 안전성을 갖춘 형상개발 과정을 소개한다. 본 연구의 이전연구로써 5MW급 부유식 해상풍력플랫폼에 대해 형상설계를 통해 단순형상 구조물로 경제적인 건조 및 설치비용과 수심 100m 이하의 천해역에서 운용가능하며, 비교적 양호한 운동성능을 가지는 다양한 부유식 해상풍력플랫폼에 대한 형상설계를 수행한 바 있다 (Hong, et al., 2012a, 2012b; 김진하 등 2012a, 2012b).

본 연구에서는 Hong et al.(2012a, b), 김진하 등(2012a, b)의 연구결과에서 얻어진 해상풍력플랫폼의 운동 및 가속도 응답성능 개선과정을 소개한다. 부유식 해상풍력 구조물 개발을 위해 해 9절점 고차경계요소법(9-node HOBEM)을 적용하여 복잡한 형상변화에 따른 운동성능에 대한 파라메트릭 연구를 효율적으로 수행하였다. 다양한 형상설계를 통해 보다 우수한 운동 및 가속도 응답성능을 가진 해상풍력플랫폼을 선정하였다. 또한, 수치계산결과의 검증을 위해 3가지 해상풍력플랫폼에 대한 일련의 운동시험을 한국해양과학기술원 해양공학수조에서 수행하였다.

최종적으로, 형상설계를 통해 선정한 부유식 해상풍력플랫폼의 운동성능에 대한 수치계산 및 시험결과를 상호비교 · 분석함으로써 천해에서의 적용성을 검토하였다.

2. 부유식 해상풍력 플랫폼 형상 설계

2.1 형상설계안

부유식 해상풍력플랫폼의 형상설계에는 복원안정성, 건조비용, 운동 및 가속도 응답특성 등을 고려하였다. 이를 위해 5MW 급 기준으로 현존하는 구조물 대비 경량화 및 천수심 적용을 위한 흘수제한을 설계 목표로 하였다.

먼저, 특정 해상풍력 터어빈 하중과 풍속과의 상관관계 (Roddier, et al., 2010)를 이용하면, 풍속 12m/sec일 때 최대 터어빈 하중은 약 760kN 이므로, 이러한 정적 풍하중에 의한 해상풍력플랫폼의 초기경사각(static heeling angle)을 10도 이내의 복원안정성을 만족하는 범위로 가정하였다.

그리고, 5MW급 Hywind-OC3와 비교하여 1/2이하인 60m 이하의 흘수로 제한하여 100m 이하의 설치수심에서의 운용성을 넓히고, 건조 및 설치비용을 경감하도록 형상설계를 수행하였다.

또한, 해상풍력 발전장치의 운용한계를 해상상태 6(Hs=5.0m, Tp=12.4s)으로 가정하여 파 주파수 운동을 최소화 하도록 상하 및 횡/종동요의 고유주파수를 최소 0.4 rad/s 이내가 되도록 형상설계안을 검토하였다.

Fig. 1은 이상과 같은 해상풍력발전장치 형상설계 운용안을 검토하기 위한 파주기에 따른 해상상태별 파도 스펙트럼을 보여주고 있다.

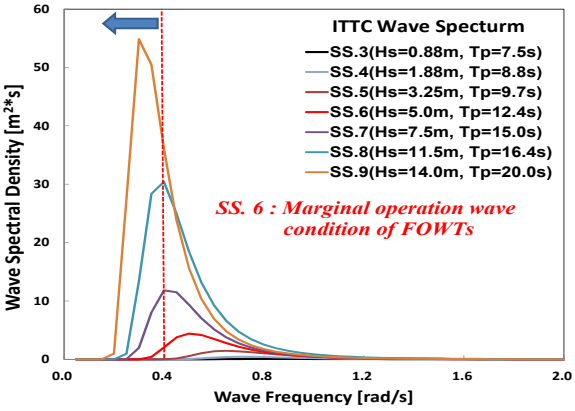

Fig. 1 ITTC wave spectra for varying sea state

2.2 형상 파라메터 연구

Fig. 2는 해상풍력플랫폼의 형상설계안을 고려한 형상이며, Table 1에 주요제원을 나타내었다.

Type-0 구조물은 본 연구의 형상설계의 비교대상으로 선정한 5MW급 Hywind-OC3 스파형 구조물이다. Type-I은 상하 및 종동요 감쇠평판을 갖춘 사각형 단면으로 배수량 5,100m3의 설계초안 구조물이다. Type-II와 Type-III 구조물은 Type-I 구조물과 비교하여 1)스파형 5Mw급 Hywind-OC3과 반잠수형 WindFloat과 유사하게 배수량을 7000m^3 으로 증가시키고, 2) 파향에 따른 운동응답을 고려하여 원형단면의 수선면과 3) 파랑기진력 감소를 위해 수선면적을 줄이고, 테이퍼가 있는 트러스 스파형태(Truss spar type)로 설계하였다. 특히, Type-III 구조물은 Type-II 구조물보다 수선면적이 작고 수선아래 부체(Fig.2 의 #1) 흘수가 크며 하부구조물을 원형으로 설계하여 보다 좋은 운동성능을 가지도록 설계한 형상이다.

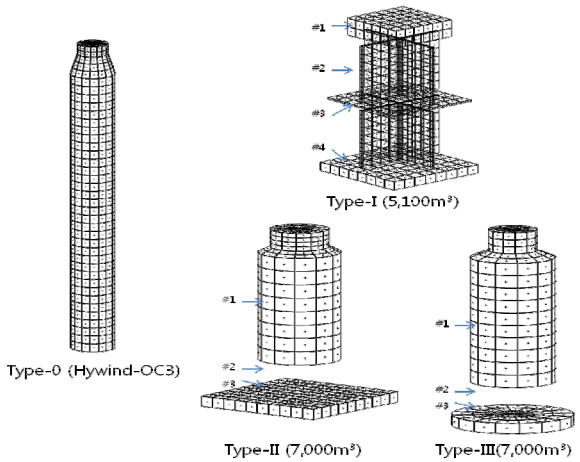

Fig. 2 Design concepts of FOWTs

Table 1 Main particulars of floating wind turbine platforms

Type	Disp.[m^3]	Body	Dia./Length [m]	Height [m]	GMt [m]
0	8,074	#1	9.4	120.0	21.0
I	5,100	#1	16.0	6.0	6.3
		#2	22.0	41.0	
		#3	24.2	3.0	
		#4	22.0	0.5	
II	7,000	#1	10.0/14.0	37.0	5.5
		#2	–	10.0	
		#3	21.8	3.0	
III	7,000	#1	8.0/14.0	44.0	6.0
		#2	–	9.6	
		#3	20.0	3.0	

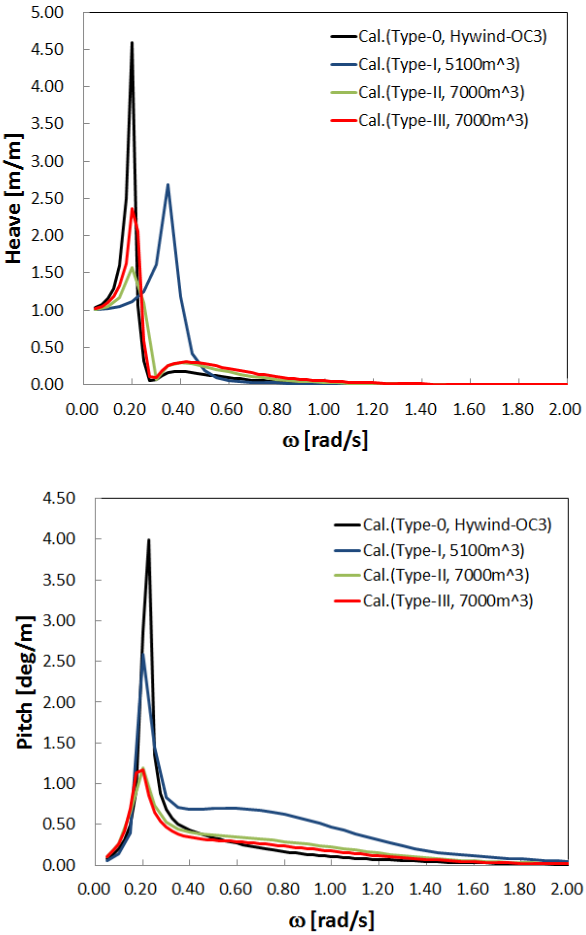

Fig. 3 Heave & pitch RAO responses

Fig. 3은 규칙 선수파중 상하 및 종동요 응답을 나타내고 있다. 이때 설계수심은 시험수심을 고려한 144m 이다. 상하동

요의 공진주파수는 Type-I 구조물의 0.35rad/s를 제외한 나머지 형상들은 약 0.2rad/s로 유사하게 나타났다. 이는, Type-I 구조물과 비교하여 작은 수선면적과 배수량 증가 및 테이퍼형상에 따른 영향으로 공진주파수가 저주파수 영역으로 이동한 결과로 생각된다. 종동요 공진주파수는 모두 0.2rad/s 로 유사하며, 설계초안인 Type-I 구조물이 전 주파수 영역에서 응답이 가장 크게 나타나며, Type-III 가 Type-0 구조물과 유사한 응답특성을 보이고 있다.

Fig. 4는 규칙 선수파중 나셀(Nacelle)의 수평 및 수직가속도 응답을 나타내고 있다. Type-III 구조물은 수평가속도에서는 전 주파수 구간, 수직가속도는 0.3rad/s 이전의 장주기 영역에서 Type-0 구조물를 제외하고 응답이 가장 작게 나타나며 특히, Type-I 설계초안 구조물과 비교하면 응답저감 효과가 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

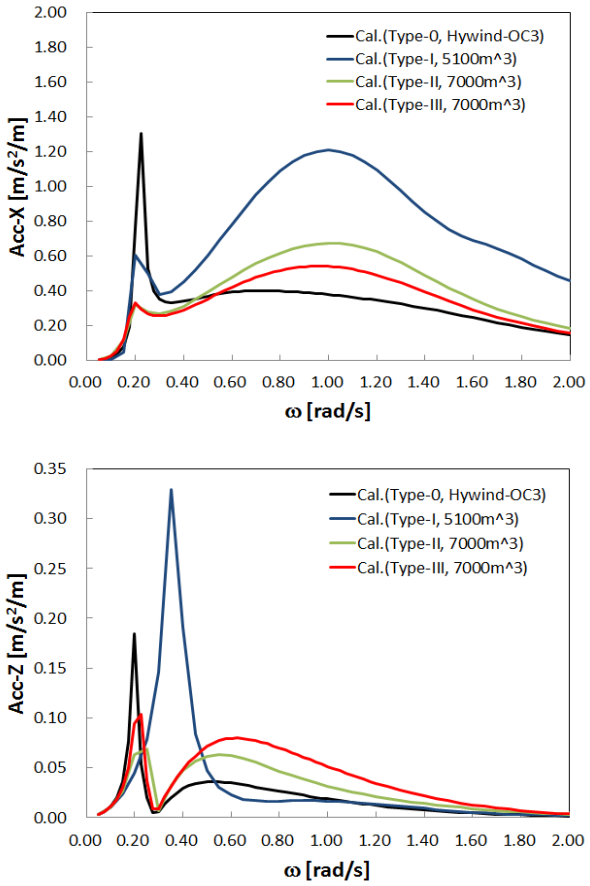

Fig. 4 Acceleration responses at nacelle

Fig. 5는 해상상태변화에 따른 불규칙파중의 운동과 가속도 응답을 나타내고 있다.

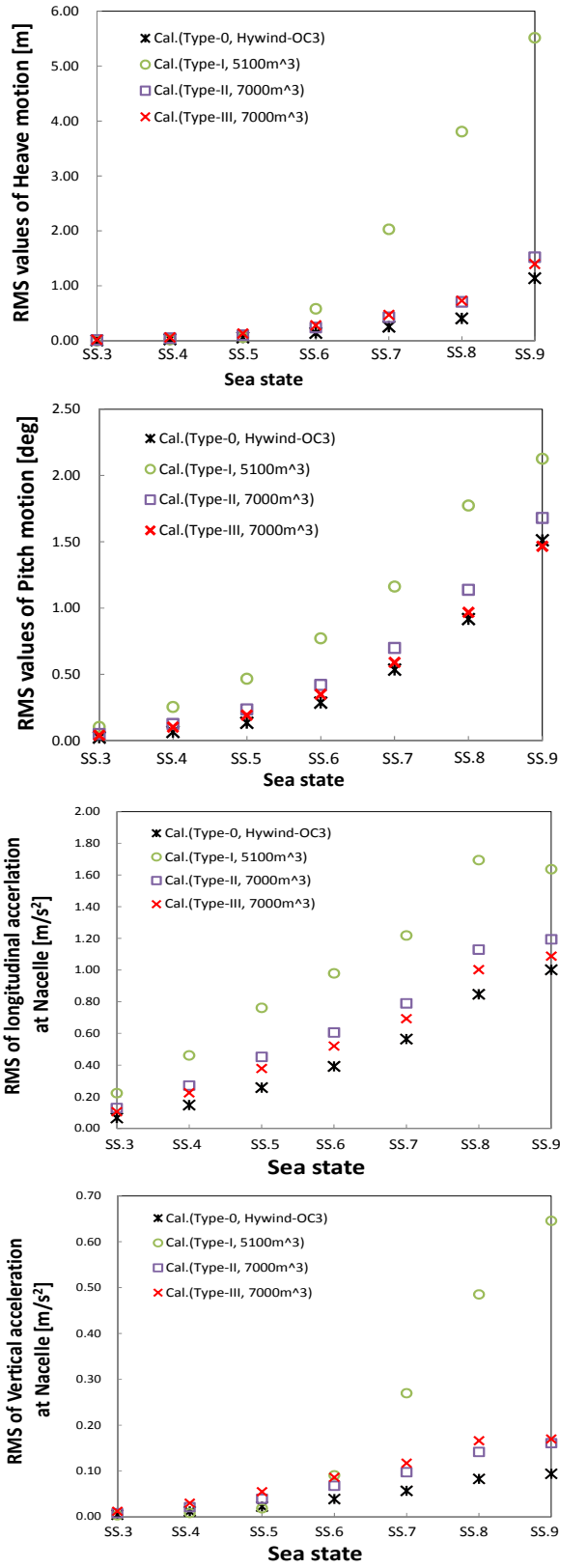

Fig. 5 Comparison of motion acceleration responses in irregular waves

종동요 응답은 Type-I의 설계초안 구조물과 비교하여 해상상태가 커질수록 저감효과를 보이며 특히, 해상상태 6에서는 약 50% 의 작은 응답을 보인다. 나셀의 수평가속도 응답도 종동요 응답과 유사하게 배수량 증가에 따른 응답저감 경향을 뚜렷이 보이고 있다. 특히, 종동요와 수평가속도응답은 형상설계안에서 Type-III 구조물이 가장 응답이 작게 나타났다.

2.3 모형시험 검증

해상풍력플랫폼의 형상설계에 대한 파라메트릭연구를 통해 수치계산결과의 검증을 위해 선박해양플랜트연구소 해양공학수조에서 운동모형시험을 수행하였다. 운동모형시험은 Fig. 2의 형상설계안에서 3가지 모형에 대해 수행하였다. Type-0와 Type-I 구조물은 선행연구를 통해 흘수 및 시험수조 수심을 고려하여 1/45 축척비로 수행하였다. 형상설계 개선안은 수치계산을 통해 Type-II 보다 운동성능이 우수한 Type-III 구조물에 대해 1/30 축척비로 운동시험을 수행하였다.

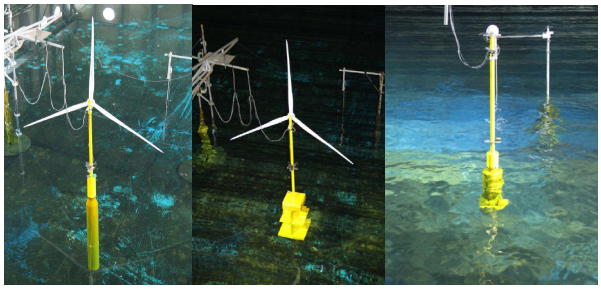

Fig. 6 Wind turbine platform model tests

Fig. 7은 규칙파 및 백색잡음파(white noise spectrum)에 의한 3가지 형상(Fig. 6)에 대한 운동 및 가속도 RAO 응답을 나타내고 있다. 여기서, 실선은 계류강성을 고려한 수치계산결과이며, 점선과 심볼은 각각 백색잡음파와 규칙파에 의한 RAO 응답의 실험결과이다. 규칙파 및 white noise test를 통한 모형실험 결과가 전반적으로 수치계산결과가 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있으며 이로부터 형상설계를 위한 수치해법의 정확성이 검증된 것으로 판단된다.

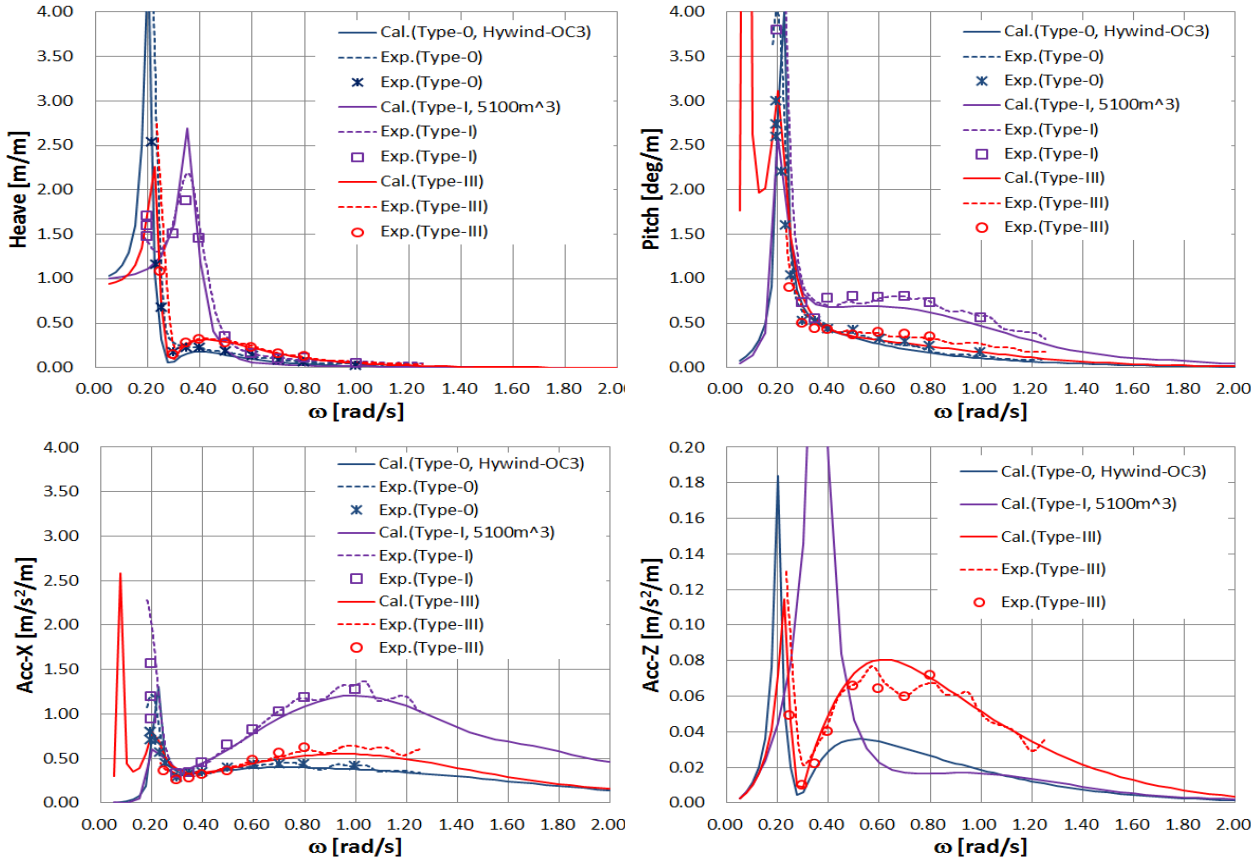

Fig. 7 Motion & Acceleration RAO responses

3. 결 론

이상과 같이 본 연구의 부유식 해상풍력플랫폼의 형상설계 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 다양한 5MW급 해상풍력플랫폼에 대한 수치계산을 통한 운동성능의 파라메트릭 연구를 통해 100m 이하 수심에 운용 가능한 단순형상을 가지는 경제성 높은 트러스 스파형태의 형상설계안을 제시하였다.

- 수치계산 및 운동시험을 통해 해상풍력플랫폼 형상설계안은 스파형 Hywind-OC3와 종동요 및 수평가속도 응답은 거의 유사한 응답이 나타났다. 상하운동 응답은 약 2배 정도로 크지만, 운용한계조건(SP2)조건에서 rms 값이 0.3m로 실제 응답크기는 크지 않았다. 또한, 수치계산과 실험의 운동응답 결과가 매우 잘 일치하였다.

- 본 연구에서 고려하지 않은 블레이드의 공기역학적 특성을 고려한 통합연계해석은 최적형상 설계 목적에는 큰 영향을 주지 않을 것이나 최적 운용조건 도출을 위해서는 이에 대한 세심한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

- 다양한 형상의 해상구조물 형상의 파랑 중 성능해석이 가능한 신뢰성 높은 수치해석기법이 검증되었으며 이를 통한 적정수심에 대한 단순형상을 가지는 경제성 높은 해상풍력플랫폼의 개발이 기대된다.

후 기

본 논문은 “SHI-KORDI 협력사업을 위한 해양공학수조를 공동활용연구” 및 “Spar 기반 연계형 지지구조물 기술개발” 과제와 관련한 결과의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

Choi, Y.R. and Hong, S.Y. (2002). "An analysis of hydrodynamic interaction of floating multi-body using higher-order boundary element method", Proc. 12st ISOPE, Kita-Kyushu Vol1, pp 303-308.

Hong, S.Y., Kim, J.H., Kim, H.J., Choi, Y.R. (2002). "Experimental study on behavior of tandem and side-by-side moored vessels", Proc. 12st ISOPE, Kita-Kyushu Vol3, pp 841-847.

Hong, S.Y., Kim, J.H., Cho, S.K., Choi, Y.R., Kim, Y.S.(2005). "Numerical and experimental study on hydrodynamic interaction of side-by-side moored multiple vessels", Ocean Engineering 32, pp 783-801.

Hong, S.Y., Kim, J.H., Hong, S.W. & Kim, H.J. (2012a). "Design and analysis of a Box floater with damping Plates for Floating Wind Turbine Platform", Proceedings 12st ISOPE, Rhodes, Greece, Vol1, pp 411-416.

Hong, S.Y., Kim, J.H., & Kim, H.J. (2012b). "Design and analysis of a Box-type Floating Wind Turbine Structure with Large Motion Damping Plates", Proc. 12st ISOPE-PACOMS, Vladivostock, Russia, pp 11-15.

Jonkman, J. (2010). "Definition of the floating system for Phase IV of OC3", Technical Report NREL/TP-500-47535.

Koo, BJ, Goupee, A.J., Lambrakos K., Kimall, R.W. (2012). "Model test for a floating wind turbine of three different floaters", 83642, Proc 21st OMAE, Rio de Janeiro, Brazil.

Martin, H.R, Kimall, R.W., Viselli, A.M., Goupee, A.J. (2012). "Methodology for wind/wave basin testing of floating wind turbines", 83627, Proc 21st OMAE, 83627, Rio de Janeiro, Brazil.

Myhr, A, Maus, K.J. and Nygaard, T.A. (2011). "Experimental and Computaional Comparison of the OC3-HYWIND and Tension-Leg-Buoy(TLB) Floating Wind Turbine Conceptual design", Proceedings 21st ISOPE, Maui, Hawaii Vol 1, pp 353-360.

Roddier, D., Cemelli, C., Aubault, A., and Weinstein, A. (2010). "WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines", Journal of Renewable and Sustainable Energy2, 0033104.

Robertson, A.N. and Jonkman, M. (2011). "Loads analysis of several offshore floating wind turbine concepts", Proc 21st ISOPE, Maui, Hawaii Vol 1, pp 443-450.

Shin, H.K. (2010). "Model test of the OC-3-Hywind Floating Offshore Wind turbine", Proc 21st ISOPE, Maui, Hawaii Vol 1, pp 361-366.

김진하, 홍사영, 김현조, 김세은 (2012a). "부유식 해상풍력 플랫폼의 형상설계 연구", 한국풍력에너지학회 춘계학술대회
김진하, 홍사영, 김현조 (2012b). "천흘수형 해상풍력플랫폼의 형상설계에 대한 운동성능연구", 한국해양공학회 추계학술대회

홍 사 영

■ 1960년생
■ 1994년 서울대학교 조선해양공학과 박사
■ 현 재: 선박해양플랜트연구소 책임연구원
■ 관심분야: 부유체동역학, 해양플랜트, 계류시스템
■ 연 락 처 : ***-****-****
■ E – mail : sayhong@kriso.re.kr

김 진 하

■ 1967년생
■ 2006년 충남대학교 선박해양공학과 박사
■ 현 재 : 선박해양플랜트연구소 책임연구원
■ 관심분야 : 내항성능해석, 모형시험, 해양에너지
■ 연 락 처 : ***-****-****
■ E – mail : jhakim@kriso.re.kr

김 현 조

■ 1970년생
■ 2009년 MIT 해양공학 박사
■ 현 재 : 삼성중공업 수석연구원
■ 관심분야 : 해양구조물, 계류시스템, DP시스템
■ 연 락 처 : ***-****-****
■ E – mail : hyunjoe.kim@samsung.com

2014년도 원로회원 간담회

일 자: 2014년 3월 17일(월) 오전 11시 30분
장 소: 학회 회의실
참 석: 신종계 회장 외 9명