

# 부유식 해상 풍력 발전기의 최적 형상 설계에 관한 연구

박정훈·신현경<sup>†</sup>  
울산대학교 조선해양공학부

## A Study on the Optimal Shape Design of a Floating Offshore Wind Turbine

Jeong-Hoon Park·Hyunkyung Shin<sup>†</sup>  
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Usually, in case of wind turbines on land, there are a lot of constraints for installation such as the insufficient installation space and noise pollution. On March 11, 2011, a nuclear leakage accident occurred due to the tsunami caused by the earthquake in Japan and then there have been a rapidly growing interest in floating offshore wind turbines. In this study, an optimization of the substructure of a semi-submersible type floating offshore wind turbine was made. Design variables were set and design alternatives were fixed. UOU-FAST was used for motion analysis in combined environmental conditions of waves and wind. Response Amplitude Operators(RAOs) were compared between the design alternatives.

**Keywords** : Floating offshore wind turbine(부유식 해상풍력발전기), Optimal shape design(최적형상설계), UOU-FAST, RAO(운동 응답)

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경 및 필요성

최근 환경에 대한 관심이 세계적으로 증가하고 있으며, 석유를 포함한 각종 연료비의 상승으로 에너지 문제 또한 해결해야 할 중요한 과제로 대두되고 있다. 이러한 상황에서 재생 에너지의 개발이 전 세계적으로 화두가 되고 있던 중 2011년 3월 11일 대지진에 의해 발생한 쓰나미로 인해 일본 후쿠시마에 위치한 원자력발전소가 침수되어 다량의 방사성 물질이 누출되는 사고가 발생하였다. 이로 인해, 바람을 이용하여 전기를 생산하는 풍력 발전기에 대한 관심이 더욱 커지게 되었다.

풍력발전기를 육상에 설치하게 되면 입지 조건이 까다로우며 엄청난 소음으로 인해 민원이 발생하는 단점이 있다. 하지만, 해상풍력발전기의 경우 입지 확보가 용이하고 대형화가 가능하며 소음으로부터 자유롭다.

최근 건조 개발되고 있는 풍력발전기는 대형화, 대수심화 되어가고 있다. 이로 인해 연근해에만 설치하는 해상 풍력 발전기가 아닌 부유식 해상 풍력발전기의 필요성이 대두되고 있다

Fig. 1은 NREL(National Renewable Energy Laboratory) 에서 정의하고 있는 해상풍력발전의 종류에 대해 보여주고 있다. 해상 풍력발전은 고정식(fixed type)과 부유식(floating type) 발전으로 나누고 있으며 고정식의 경우 주로 수심 50 m이내 연근해에 해저기초를 설치하며, 부유식은 수심 50 m이상 보다 깊은 바다에 선박처럼 바다 위에 띄우는 발전 방법이다 (Jonkman, 2007).

최근에 건조 개발되고 있는 해상 풍력발전기는 대형화 대수심화 되어가고 있기 때문에 고정식에서 부유식으로 바뀌어 가고 있다.

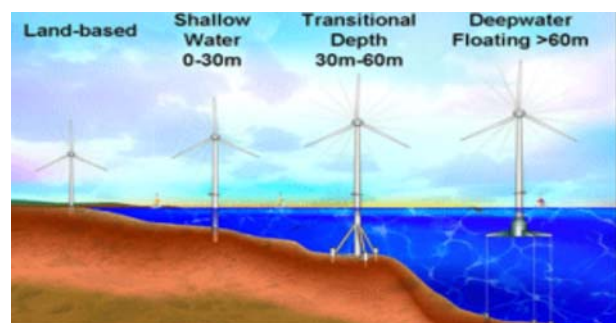


Fig. 1 Offshore wind turbine type (NREL)

이에 본 연구에서는 2011년 International Energy Agency(IEA)에서 채택한 5 MW Semi-submersible Floating Offshore Wind Turbine(FOWT)를 표준 모델로 선택하였으며, FOWT의 수면 하 부피, 배수량, 이차 질량모멘트는 일정하게 두고, 파랑 중 운동응답(RAO)을 가장 작게 하는 변수로서 Upper Column과 Base Column(footing)의 직경을 선정하였다 (Robertson, et al., 2012). Table 1에 보여지는 Upper Column 직경 12m를 기준으로, 파랑강제력에 의한 RAO를 고려하면서 수선면적(waterplane area)이 작은 Column 직경 8 m (Type 8)로부터 시작하여 최대 13.8m (Type 14)까지 증가시키면서 RAO의 변화를 살펴보았다.

### 1.2 관련 연구 현황

해상 풍력 발전기의 관련 연구를 간략히 소개하면 다음과 같다.

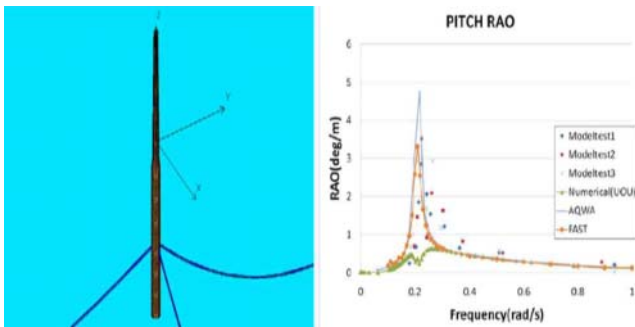


Fig. 2 Simplified model using AQWA (ANSYS, 2015) and pitch RAO (KR)

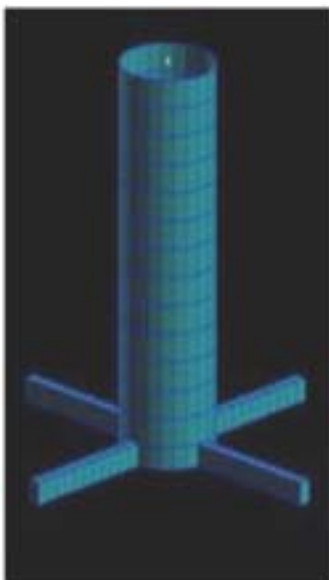


Fig. 3 Substructure model and framework (KR)

Kim, et al. (2011)은 5 MW Spar 형식 부유식 해상 풍력발전기의 운동성능을 파악하였다. 이를 위해 수치해석 모델은 NREL에서 공개한 OC3Hywind Spar (Jonkman, 2010)를 사용하였고

Figs. 2와 3 같이 AQWA를 사용한 simplified model의 운동해석 결과를 모형실험 결과와 FAST수치해석 결과에 대해 비교하였다 (Jonkman, et al., 2005). 그리고 그 결과가 상당부분 일치하는 것을 확인하였다.

Han, et al. (2011)은 TLP형식의 부유식 해상풍력 발전기의 하부구조물 설계에 있어 최적 설계 Framework를 구축하였다. 설계 변수로서 흘수, 반경을 두고 10여가지의 case를 만들어 각 case들에 대한 운동해석을 실시하고 이를 나셀 가속도, 배수량, 계류력으로 성능평가를 실시, 최적 설계안을 도출하였다.

또한 심해에서 설치 가능한 부유식 해상풍력발전기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이는 대형화에 따른 효율의 증가가 가능하다는 장점을 가진다 (BQDOHA, 2013).

## 2. Semi-submersible FOWT 형상

### 2.1 Semi-submersible FOWT 제원

본 연구에서는 5MW semi-submersible FOWT 모델을 사용하였다. 주요 제원은 NREL에서 제공한 자료를 참고하였고 그 주요 제원을 Table 1, Table 2에 나타내었으며, 형상은 Fig. 4와 같다 (Robertson, et al., 2012).

Table 1 Semi-submersible FOWT properties

Item	Prototype
Water Depth	200 m
Turbine Power	5 MW
Rotor Mass	110,000 kg
Rotor Diameter	126 m
Hub Mass	56,780 kg
Blade Mass(1EA)	17,740 kg
Nacelle Mass	240,000 kg
Tower Height	77.6 m
Tower Mass	249,718 kg
Tower Top Diameter	3.87 m
Tower Base Diameter	6.5 m
Platform Height	32 m
Platform Mass	13,473,000 kg
Upper Column Diameter	12 m
Upper Column Height	26 m
Base Column Diameter	24 m
Base Column Height	6 m
Pontoons Diameter	1.6 m
Main Column Diameter	6.5 m
Columns Offset	50 m
Total Structure Mass	14,147,238 kg
Draft	20 m

Table 2 Mooring system properties

Item	Prototype
Number of Mooring Lines	3
Angle Between Adjacent Lines	120°
Depth to Anchors Below SWL	200 m
Depth to Fairleads Below SWL	14 m
Radius to Anchors from Platform Centerline	837.6 m
Radius to Fairleads from Platform Centerline	40.868 m
Unscratched Mooring Line Length	835.5 m
Mooring Line Diameter	0.0766 m
Equivalent Mooring Line Mass Density	113.35 kg/m
Equivalent Mooring Line Weight in Water	108.63 kg/m
Equivalent Mooring Line Extensional Stiffness	753,600,000 N
Mooring Line Pretension	1,839,000 N
Fairlead Tension	1,099,000 N
Degree of Mooring at Fairlead	34.93°

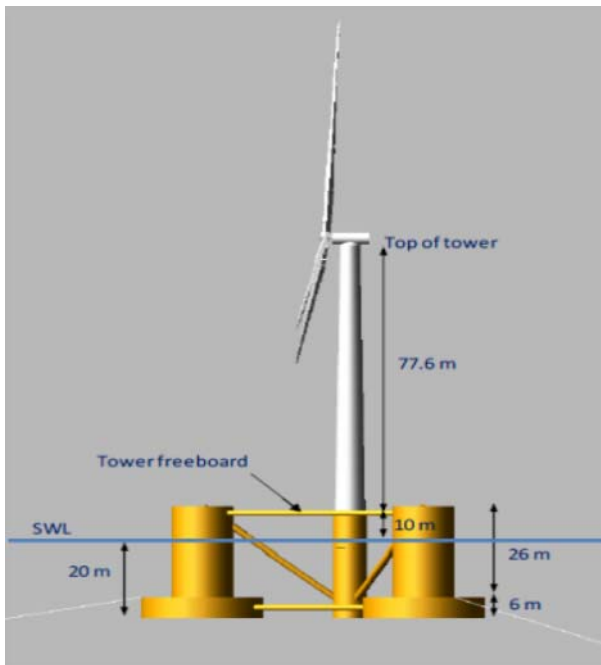


Fig. 4 5MW semi-submersible FOWT by IEA Wind TASK 30

## 2.2 모델링, 설계 변수 및 설계 대안

본 연구에서는 Semi-submersible FOWT의 수면 하부 형상 최

적화를 위해 platform의 기본적인 특성을 유지하면서 형상 변화에 의한 운동 변화를 확인하기 위해 배수량, 중량, Inertia를 제약 조건으로 두었다. 그리고 upper column의 높이와 base column의 높이 및 draft는 mooring system의 특성을 유지시키기 위해 고정하였다. 따라서, 설계 변수는 Fig. 5에서 보이는 것과 같이 upper column의 반경(R1)과 base column의 반경(R2)으로 선정하게 되었다.

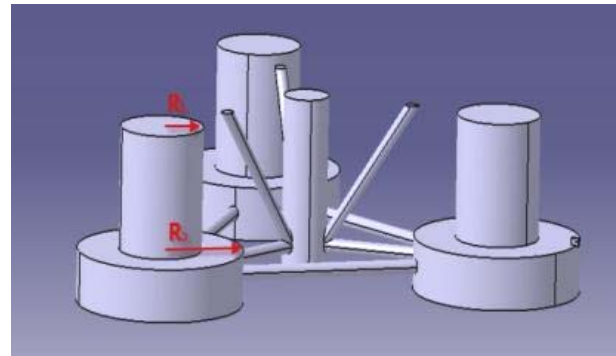


Fig. 5 Design variables (upper column radius R1 & base column radius R2)

Fig. 6은 Table 1에 있는 Semi-submersible FOWT의 제원대로 중량을 일정하게 유지하며 X, Y, Z축에 대한 이차 질량모멘트를 맞추기 위해 base column안에 동그란 원판을 추가적으로 가한 그림이다. 이 때, 모든 type에 대해 100% 일치하는 이차 질량모멘트를 맞추기가 불가능하여 최대 오차 2%까지 수용하였다.

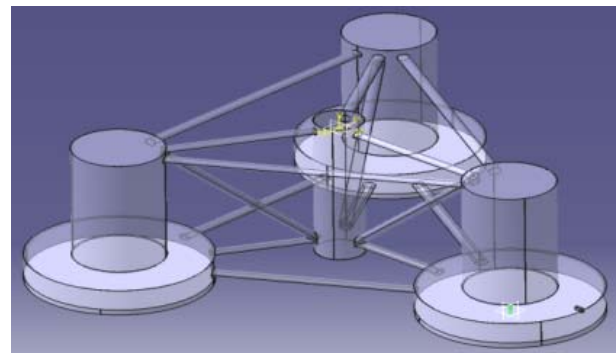


Fig. 6 Platform design using CATIA

UOU(University of Ulsan) in house code에서 요구되는 형상 데이터를 MSC. Patran을 활용하여 얻었으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다.

Upper column의 반경이 4 m보다 작은 설계 대안에서는 free surface에서 무게중심까지의 거리(COG)가 부력중심까지의 거리(COB)보다 짧았다.

표준 모델의 upper column 반경인 6 m부터 5.7 m까지는 1.25%, 5.7 m부터 4 m까지는 2.5%씩 감소하여 설계 대안을 설정하였다. 이렇게 감소량의 차이를 둔 이유는 6 m로부터 최초 2.5%씩 감소시켰을 경우 표준 모델보다 RAO 변화를 살펴 볼 때

더 좋은 운동 성능을 가진 설계 대안이 보이지 않아 그 이후 감 소량을 더욱 세분화 하였기 때문이다.

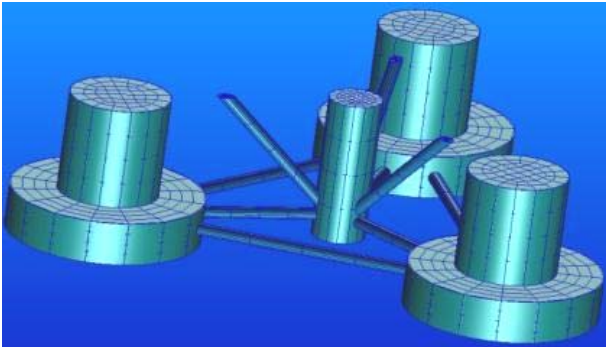


Fig. 7 Surface mesh generated by MSC. Patran

Table 3 Design alternatives and properties

Type	R1(m)	R2(m)	Ratio of displacement	COG(m)	COB(m)
1	4	13.829	1	14.874	13.258
2	5.1	12.946	1	14.23	14.12
3	5.4	12.655	1	14.34	13.822
4	5.55	12.5	1	14.2	13.666
5	5.7	12.34	1	14.29	13.506
6	5.85	12.174	1	14.064	13.342
7	5.925	12.087	1	14.029	13.258
9	6.075	11.910	1	13.96	13.087
10	6.15	11.818	1	14.006	13
11	6.3	11.626	1	13.854	12.822
12	6.45	11.436	1	13.786	12.642
13	6.6	11.226	1	13.798	12.455
14	6.9	10.79	1	13.576	12.071

Upper column의 반경이 줄어들수록 platform이 받는 파랑강 제력은 줄어들며 이에 따라 전체적인 운동 또한 줄어든다. 하지만, 높이가 높고 최상부에 무게가 집중된 Wind turbine의 특성 상, Wind와 rotating rotor에 의한 Thrust force가 매우 중요하다. 이 Thrust force는 큰 Pitch 방향 모멘트를 발생시키기 때문에 platform은 이를 보상할 수 있는 복원 모멘트를 가져야 한다. 하지만, 이 복원 모멘트는 Platform의 upper column 반경에 의존 하기 때문에 운동성능을 위해서 과도하게 줄이는 것은 안정성에 부정적인 결과를 가져온다.

### 3. UOU-FAST Simulation

#### 3.1 개요

본 연구에서의 모든 type에 대해 UOU in-house code를 사용 해 added mass, damping ratio 및 wave exciting force를 얻을 수 있었으며 그 결과를 다시 UOU-FAST의 input으로 사용해 RAO를 구하였다.

Table 4 Quadratic additional damping in 6-freedom motion

	Quadratic additional damping
Surge(Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	3.95E+5
Sway(Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	3.95E+5
Heave(Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	3.88E+6
Roll(Ns <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> )	3.70E+10
Pitch(Ns <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> )	3.70E+10
Yaw(Ns <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> )	4.08E+9

Viscous damping을 고려하기 위해서 Quadratic additional damping을 적용하였으며 이는 모든 설계 대안들에 대해 동일하다. 이를 상세히 Table 4에 나타내었다 (Robertson, et al., 2012).

#### 3.2 Load case (LC)

Load case는 크게 Load case 1부터 Load case 4로 나뉘어지 며 이것은 Table 5에 나타내었다. 각 Load case(이하, LC)의 정 의는 Table 5와 같으며, 그 상세내용은 Table 6, Table 7과 같다.

Table 5 Load case categories

Load case	Wave	Wind	Rotor
1	Regular	X	Fixed
2	Regular	O	Rotating
3	Irregular	X	Fixed
4	Irregular	O	Rotating

Table 6 Detailed contents of Load case 1, 2

Period (sec)	Frequency (rad/s)	Wave height(m)	Wind speed (m/s)	Rotor speed (rpm)
5	1.256637	6	11.4	12.1
6	1.047198	6	11.4	12.1
7	0.897598	6	11.4	12.1
8	0.785398	6	11.4	12.1
9	0.698132	6	11.4	12.1
9.7	0.647751	6	11.4	12.1
11	0.571199	6	11.4	12.1
14	0.448799	6	11.4	12.1
16	0.392699	6	11.4	12.1
17	0.369599	6	11.4	12.1
18	0.349066	6	11.4	12.1
19	0.330694	6	11.4	12.1
20	0.314159	6	11.4	12.1
21	0.299199	6	11.4	12.1
23	0.273182	6	11.4	12.1
24	0.261799	6	11.4	12.1
25	0.251327	6	11.4	12.1
27	0.232711	6	11.4	12.1
30	0.20944	6	11.4	12.1
40	0.15708	6	11.4	12.1
50	0.125664	6	11.4	12.1

Table 7 Detailed contents of Load case 3, 4

Sea state	Tp(s)	Hs(m)	Wind speed(m/s)	Rotor speed(m/s)
4	8.1	2.44	11.4	12.1
5	9.7	3.66	11.4	12.1
6	11.3	5.49	11.4	12.1
7	13.6	9.14	11.4	12.1

LC 1과 2는 Regular wave에서의 simulation이며, 차이점은 Wind와 Rotor의 고려 유무이다. 즉, LC 1은 wave만을 고려한 것이고 LC 2는 Wind speed와 Rotor의 회전속도가 포함된다. LC 3과 4는 Irregular wave에서의 simulation이며, 차이점은 LC 1, 2와 동일하다.

### 3.3 Type 8(표준 모델) 시뮬레이션

NREL (2012) 에서 제공한 데이터(이하, MARIN)를 활용하여 UOU-FAST를 적용한 시뮬레이션 결과와 Table 1에 있는 제원대로 모델링 한 Type 8 (표준 모델)을 UOU-FAST 시뮬레이션 한 결과를 비교하였다 (Fig. 8~ Fig. 19, Table 7~ Table 10).

(1) Load case 1

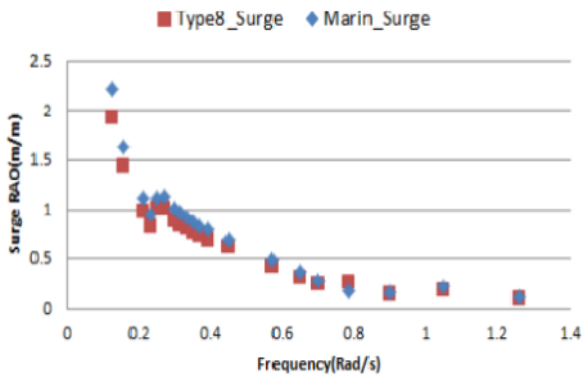


Fig. 8 Surge RAO

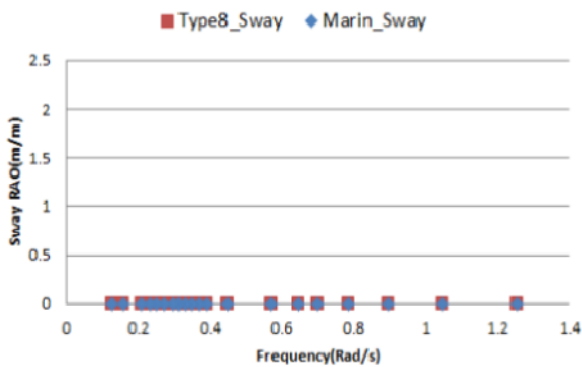


Fig. 9 Sway RAO

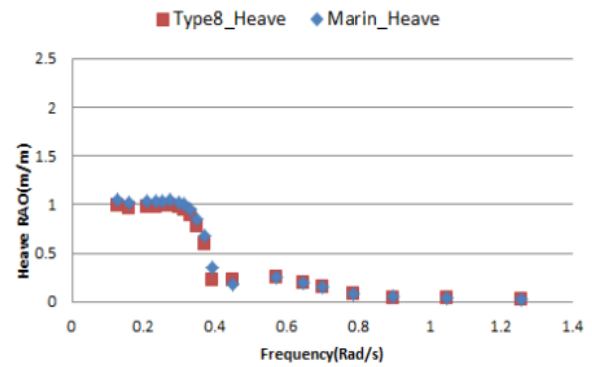


Fig. 10 Heave RAO

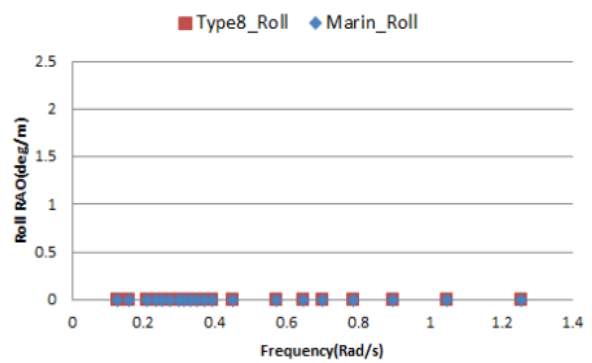


Fig. 11 Roll RAO

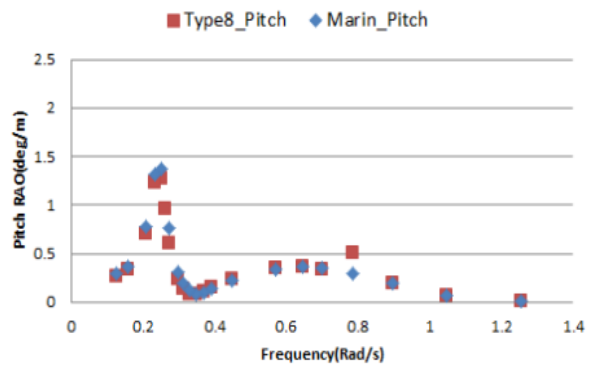


Fig. 12 Pitch RAO

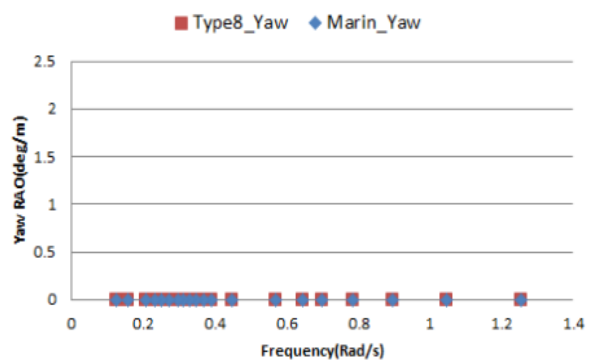


Fig. 13 Yaw RAO

(2) Load case 1~case 2 results

MARIN 데이터와 비교했을 경우 Type 8 (표준 모델)의 결과가 전체적으로 일치함을 보였다. Table 7은 Surge, Heave 그리고 Pitch에서의 최대값이다. Surge RAO의 경우 최대 0.279m/m, Pitch RAO의 경우에는 0.1 deg/m의 차이가 있었으나, 이는 수용할 수 있는 범위 내에 있다.

Table 7 RAO comparison between Type 8 and MARIN in LC 1

	Type 8	MARIN
Surge(m/m)	1.927	2.206
Heave(m/m)	0.9853	1.0405
Pitch(deg/m)	1.2725	1.3751

Table 8 RAO comparison between Type 8 and MARIN in LC 2

	Type 8	MARIN
Surge(m/m)	1.9218	2.1981
Heave(m/m)	0.9853	1.0405
Roll(deg/m)	0.0885	0.1245
Pitch(deg/m)	0.7685	0.8968

Table 8은 Surge, Heave, Roll, 그리고 Pitch에서의 최대값이다. Surge RAO의 경우 최대 0.27 m/m, Pitch RAO의 경우 0.13 deg/m의 차이가 발생하였다.

(3) Load case 3

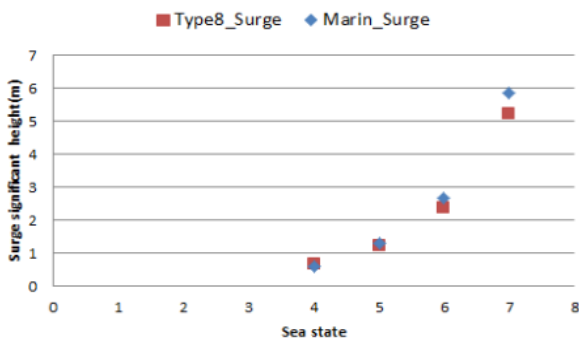


Fig. 14 Surge Significant height

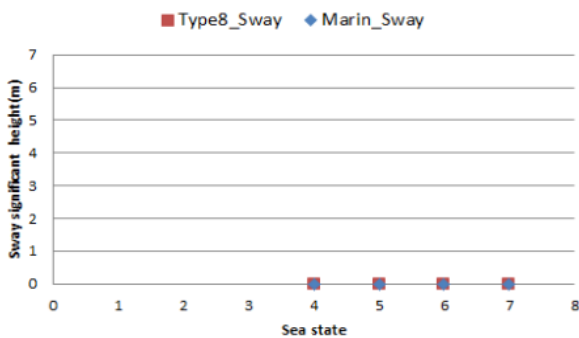


Fig. 15 Sway Significant height

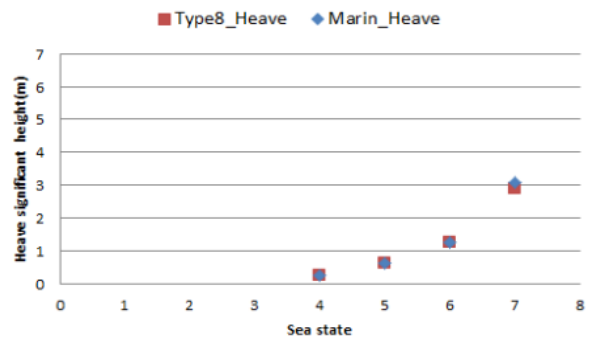


Fig. 16 Heave Significant height

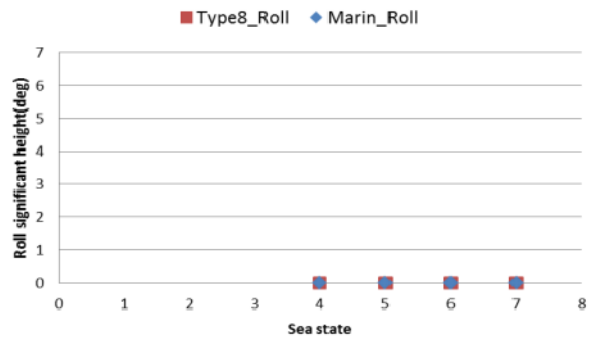


Fig. 17 Roll Significant height

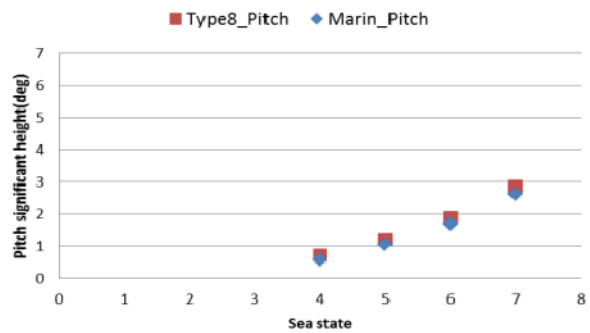


Fig. 18 Pitch Significant height

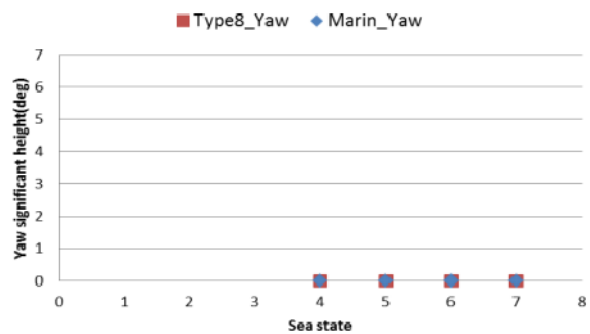


Fig. 19 Yaw Significant height

(4) Load case 3~case 4 results

Table 9는 Surge, Heave 그리고 Pitch에서의 최대값을 보여



주고 있다. Surge Significant height의 경우 최대 0.65 m의 차이가 발생하였으며, Pitch Significant height의 경우에는 0.22 deg의 차이가 발생하였다. 하지만, 그 차이는 크지 않다.

Table 9 Significant height comparison between Type 8 and MARIN in LC 3

	Type 8	MARIN
Surge(m)	5.2065	5.8528
Heave(m)	2.9018	3.0829
Pitch(deg)	2.8453	2.6239

Table 10 Significant height comparison between Type 8 and MARIN in LC 4

	Type 8	MARIN
Surge(m)	5.2066	5.8528
Heave(m)	2.9018	3.0829
Pitch(deg)	2.8436	2.6225

Table 10은 Surge, Heave 그리고 Pitch에서의 최대값을 나타낸다. LC 4에서의 Surge significant height의 경우 Sea state 7에서 최대 0.65 m, Pitch significant height의 경우 0.22 deg의 차이가 발생하였다.

모든 LC별로 Marin 데이터와 Type 8(표준 모델)에 대한 수치 해석을 실시하였다. 전체적으로 모든 운동에 대해 일치함을 보였다. 하지만, surge와 pitch에서는 약간의 차이가 보였으나 그 차이가 크지 않았다. 따라서, Type 8(표준 모델)을 기준으로 모든 설계 대안을 비교·분석하였다.

### 3.4 각 Type별 RAO 및 Significant height 비교

#### (1) Load case 1

Table 11은 LC 1에서의 설계 대안에 따른 각 운동 별 최대값을 정리한 것이다.

설계 대안에 따른 각 운동 별 최대값을 비교하였을 때, Type 8(표준 모델)과 설계 대안들은 모든 운동에 대하여 유사한 값을 보인다. Surge RAO의 경우 전체적으로 비슷한 거동을 보였다. Type 8~1은 점점 커지는 경향을 확인할 수 있었으며 1, 2, 3번은 최대 0.17 m/m, 0.19 m/m, 0.16 m/m의 차이를 보였다. Type 8~14는 Type 8 보다는 작아지는 경향이 있으며 Type 14의 경우 최대 0.07 m 작아졌다. Sway RAO의 경우 Type 2, 3, 11을 제외하고는 거동이 없었다. Heave RAO의 경우는 최대 진동수인 0.125 Rad/s에서는 Type 1이 0.4725 m/m로 나타내며 이는 Type 8(표준 모델)보다 약 0.6 m/m만큼 줄어든 값이다. 하지만, 최대값을 비교했을 시 전체 설계 대안들이 1 m/m의 근사한 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

Roll RAO의 경우는 Type 2, 3, 11의 경우를 제외하고는 거동이 없는 것을 확인 할 수 있었다. Pitch RAO의 경우 Type 8~1은 거동이 줄어드는 경향을 보이고 Type 8~14는 커지는 경향을 보인다. Type 2번이 최대 0.6 m/m의 차이를 보였으며, Type 13은 0.73 deg/m의 차이를 보인다. Yaw RAO의 경우 Type 2, 3을 제외하고는 거동이 없었다.

Table 11 RAO comparison for all design alternatives in LC 1

	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (deg/m)	Pitch (deg/m)	Yaw (deg/m)
Type1	2.105	0	1.0222	0	1.423	0
Type2	2.1195	0.7435	1.0203	1.0833	0.6811	0.3427
Type3	2.0878	0.7381	1.0315	1.08216	0.7188	0.3616
Type4	2.0356	0	0.9135	0	0.946	0
Type5	1.953	0	0.989	0	1.151	0
Type6	1.9415	0	0.9933	0	1.2608	0
Type7	1.9375	0	1.0035	0	1.3265	0
Type8	1.9276	0	0.9853	0	1.2725	0
Type9	1.9238	0	1.0091	0	1.4625	0
Type10	1.9156	0	1.0121	0	1.5245	0
Type11	1.935	0.6828	1.083	0.7601	1.6766	0
Type12	1.8915	0	0.9995	0	1.7133	0
Type13	1.883	0	0.9898	0	1.8261	0
Type14	1.8583	0	0.9806	0	1.9845	0

#### (2) Load case 2

Table 12는 LC 2에서의 설계 대안에 따른 각 운동 별 최대값을 정리한 것이다. Surge RAO의 경우 Type 8(표준 모델)과 전체적으로 비슷한 거동을 보였다. Type 8~1은 점점 커지는 경향을 보이며 1, 2, 3번은 최대 0.17 m/m, 0.18 m/m, 0.15 m/m의 차이를 보였다. Type 8~14는 Type 8(표준 모델)보다는 작아지는 경향이 있으며 Type 14의 경우 최대 0.068 m/m 작아짐을 확인할 수 있었다. Sway RAO의 경우 Type 2, 3, 11을 제외하고는 거동이 없었으며, Heave RAO의 경우는 모든 설계 대안들이 1의 근사한 값을 가졌다. Type 4의 경우 가장 큰 차이를 나타냈는데 이 차이는 0.09로 큰 차이를 보이지 않았다. Roll RAO는 표준 모델(type8)과 마찬가지로 전체 설계 대안에 대해 0.25 rad/s에서 공진이 발생함을 알 수 있었다. Pitch RAO의 경우 Type 8~1은 거동이 줄어드는 경향을 보이고 Type 8~14는 커지는 경향을 보인다. Type 4번이 최대 0.16 deg/m의 차이를 보였으며, Type 14는 0.59 deg/m의 차이를 보인다. Yaw RAO의 경우 Type 1, 2, 3을 제외하고는 거동이 없었다.

Table 12 RAO comparison for all design alternatives in LC 2

	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (deg/m)	Pitch (deg/m)	Yaw (deg/m)
Type1	2.0936	0	0.9626	0.2698	1.087	0.2399
Type2	2.1091	0.7391	1.0203	1.1065	0.7255	0.2934
Type3	2.0776	0.7345	1.0313	0.9981	0.628	0.2939
Type4	2.028	0	0.914	0.08625	0.6053	0
Type5	1.9456	0	0.989	0.1768	0.6628	0
Type6	1.909	0	1.0121	0.21715	0.925	0
Type7	1.931	0	0.9925	0.2038	0.7751	0
Type8	1.9218	0	0.9853	0.0885	0.7685	0
Type9	1.9175	0	1.0091	0.2399	0.8716	0
Type10	1.9093	0	1.0121	0.2355	0.9255	0
Type11	1.93	0.678	1.07	0.648	1.06	0
Type12	1.8858	0	0.9995	0.2163	1.1028	0
Type13	1.8773	0	0.99	0.2735	1.2108	0
Type14	1.8535	0	0.9808	0.3145	1.365	0

(3) Load case 3

Table 13은 LC 3에서의 설계 대안에 따른 각 운동 별 유의값을 정리한 것이다. Type 8과 전체적으로 일치함을 보였으나, Surge significant height의 경우 Type 8~1은 점점 감소하는 경향을 보였으며, Type 8~14의 경우는 증가하는 경향을 보였다. Heave와 Pitch significant height의 경우는 증가하는 경향을 보였으며, Type 8~14는 점점 감소하는 경향을 보였다.

Table 13 Significant motion height comparison for all design alternatives in LC 3

	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (deg)	Pitch (deg)	Yaw (deg)
Type1	4.366	0	4.756	0	6.314	0
Type2	4.750	0	3.484	0.325	4.666	0.2074
Type3	4.868	0.2105	3.1127	0.3676	4.0876	0.3692
Type4	4.905	0	3.525	0	3.813	0
Type5	5.103	0	2.874	0	3.5815	0
Type6	5.132	0	2.861	0	3.1024	0
Type7	5.1796	0	2.8597	0	2.9145	0
Type8	5.2065	0	2.9018	0	2.8453	0
Type9	5.256	0	3.1035	0	2.589	0
Type10	5.2934	0	3.2759	0	2.4168	0
Type11	5.9312	0.2247	4.1378	0.2399	2.0379	0
Type12	5.486	0	4.1295	0	1.898	0
Type13	5.538	0	4.629	0	1.556	0
Type14	5.781	0	5.585	0	2.240	0

(4) Load case 4

Table 14는 LC 4에서의 설계 대안에 따른 각 운동 별 유의값을 정리한 것이다. Type 8(표준 모델)과 전체적으로 일치함을

보였으나, Type 8~1의 경우 Heave와 Pitch significant height는 점점 증가하는 경향을 보인다. Type 8~14의 경우는 Heave significant height는 점점 증가하는 경향을 보이는 반면, Pitch significant height는 감소하는 경향을 보인다.

Table 14 Significant motion height comparison for all design alternatives in LC 4

	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (deg)	Pitch (deg)	Yaw (deg)
Type1	4.3070	0	4.7566	0	6.2456	0
Type2	5.206	0	2.9018	0	2.8436	0
Type3	4.750	0.2172	3.484	0.3283	4.663	0.2125
Type4	4.905	0	3.252	0	3.810	0
Type5	5.1032	0	2.8748	0	3.579	0
Type6	5.1321	0	2.8617	0	3.100	0
Type7	5.1796	0	2.8597	0	2.9126	0
Type8	5.206	0	2.9018	0	2.4836	0
Type9	5.2586	0	3.1035	0	2.5877	0
Type10	5.293	0	3.275	0	2.415	0
Type11	5.367	0.225	4.1378	0.2387	2.065	0.1695
Type12	5.4861	0	4.1295	0	1.8965	0
Type13	5.538	0	4.629	0	1.554	0
Type14	5.780	0	5.585	0	2.237	0

### 4. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 2011년 IEA에서 채택한 5MW semi-submersible FOWT를 표준 모델로 선택하여 platform의 수면 하 부의 최적 설계 연구를 수행하였다. 이를 위해 upper column과 base column의 높이 및 draft는 mooring system의 특성을 일정하게 유지하기 위해 제약 조건으로 두었으며 upper 및 base column의 반경을 설계 변수로 가정한 뒤 총 14가지 설계 대안들에 대해 파랑 중 운동 응답(RAO)의 변화를 살펴보았다.

platform의 기본적인 특성을 유지하기 위해 수면 하 부피(부력), 배수량(총 질량), 이차 질량모멘트는 일정하게 두었다.

그 결과 upper column의 반경이 작아질수록 LC 1, 2에서는 기존 모델보다 더 좋은 거동을 보이지만 LC 3, 4에서는 더 큰 거동을 보였다. 반면에, upper column의 반경이 커질수록 LC 1, 2에서는 더 큰 거동을 보였으나 LC 3, 4에서는 더 좋은 거동을 확인할 수 있었다.

표준 모델과 전 설계 대안들의 최대 응답은 모든 운동에서 유사하였다. 표준 모델과 설계 대안들의 유사한 형상에 의해서 전 모델은 added mass와 damping, wave exciting force에서 큰 차이를 가지지 않는다. 때문에, 수치해석에서의 최대 응답은 additional damping에 크게 의존한다. 하지만, 본 연구에서는 형상변화에 따른 additional damping를 수치해석적으로 구할 수 없었기 때문에 동일한 값을 적용하였으며, 그 결과 모든 Load case에 대해서 표준 모델보다 더 좋은 운동성능을 보이는 설계 대안을 찾을 수 없었다. 향후, 형상에 따라 변화하는 additional damping



의 수치적 적용 방법에 대한 연구를 수행할 예정이며, 수치해석을 통해 Wave의 방향에 따른 운동성능을 비교 및 평가할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No. 20124030200110 and No. 20128520020010) 입니다.

## References

ANSYS, 2015. [Online] <http://www.ansys.kr/Products/Other+Products/ANSYS+AQWA/> [Accessed 20 March 2015].

BQDOHA, 2013. [Online] <http://www.bqdoha.com/2013/08/future-of-europes-energy-production-in-offshore-floating-wind-turbines> [Accessed 20 March 2015].

Han, K.M. Kang, S.H. Lee. J.C. Lee. J.H. Kang. D.H. Shin. S.C. & Kim. S.Y., 2011. Floating offshore wind turbine substructure optimal design. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting*, SNAK, Mokpo, 3-4 November 2011, pp.541-546.

Jonkman, J., Marshall, L., and Buhl.Jr., 2005. *FAST User's Guide, Technical Report NREL/EL-500-38230*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy.

Jonkman, J., 2010. *Definition of the Floating System for Phase IV of OC3. Technical Report NREL/TP-500-47535*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy.

Jonkman, J., 2007. *Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wing Turbine, Technical Report NREL/TP-500-41958*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy.

Kim, M.S. Lee, K.S. Kim, M.E. & Shin, H.K., 2011. Motion analysis of 5MW Spar type Floating offshore wind turbine. *Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Pusan, 2-3 June 2011, pp.804-808.

NREL, 2012. [Online] <https://oc4.collaborationhost.net> [Accessed 20 March 2013].

Robertson, A. Jonkman, J. Masciola, M. Song, H. Goupee, A. Coulling, A. & Luan, C., 2012. *Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy.

