

OC3 Hywind 부유식 풍력발전기 플랫폼의 유체력 계산 및 운동해석

김민수¹ · 이강수[†]

(원고접수일 : 2012년 11월 28일, 원고수정일 : 2013년 2월 23일, 심사완료일 : 2013년 9월 17일)

Hydrodynamic force calculation and motion analysis of OC3 Hywind floating offshore wind turbine platform

Min-Su Kim¹ · Kang-Su Lee[†]

요약: 이 연구에서는 부유식 풍력발전기 컨셉트모델중의 하나인 5MW급 OC3-Hywind를 해석하였다. 이 모델은 스파형 플랫폼을 가지고 있으며 3개의 현수식 계류삭으로 해저면과 연결되어있다. 수치해석프로그램으로는 NREL에서 개발한 FAST와 AQWA가 사용되었다. FAST에 입력되는 유체력은 AQWA를 통해서 계산되었으며, 운동특성으로는 전달응답함수와 평균운동, 상위1/3운동, 상위1/10운동을 평가하였다. 다른기관의 해석, 실험결과와 비교하였으며, 이 결과는 부유식풍력발전기 컨셉모델의 기초설계를 재해석하는데 있어 도움이 될것이다.

주제어: 운동해석, 부유식풍력발전기, 유체력, 전달응답함수, 운동스펙트럼

Abstract: In this study, the analyzed turbine is a 5MW upwind-type wind turbine. This conceptual model was made to compare the results of the numerical analysis program in the IEA Annex23 Subtask2 OC3 project. The numerical analysis program used in this study is FAST developed by NREL and AQWA of ANSYS. Motion characteristics, such as RAO, average motion, significant motion and average amplitude of 1/10 highest motion were obtained through the numerical analysis. The results of the numerical analysis were compared with the results of other numerical analyses and the experimental results, and all the results agreed with one another. The results will help resolve the fundamental design trade-offs between basic floating system concepts.

Keywords: Motion analysis, Floating offshore wind turbine, Hydrodynamic force, RAO, Motion spectrum

1. 서론

전 세계적으로 환경문제가 이슈화 되면서 녹색기술이 주목받고 있으며, 특히 바람을 에너지로 하는 풍력발전은 육·해상에서 빠른 성장 중이다. 해상풍력발전은 현재 얕은 수심에서 고정식 타입의 해상풍력발전기가 설치되고 있다. 이는 주로 개발되는 해상풍력발전단지 수심이 50m이하로 낮아 고정식 하부구조물이 적합하기 때문이다. 해상풍력발전

이 대형화와 양질의 바람을 찾아 원해로 나간다면 수심이 깊어져 지금의 고정식 보다는 부유식 하부구조물이 적합하게 된다. 이에 부유식 하부구조물의 풍력발전기에 대한 연구가 필요하다. 일반적으로 고정식 하부구조물로 설치되어 있는 풍력발전기의 성능을 평가하는 것은 출력성능, 하중, 소음, 전력품질 등이 있으며, 이들 4가지는 국제전기표준회의의 규격을 따른다. 그러나 풍력발전기가 부유식 하부구조

[†] Corresponding Author: Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KIOST, 1312-12 Yuseong-Daero, 305-343, Korea, E-mail: klee@kiost.ac, Tel: 042-860-3351

¹ Korean Register, Haewoon-Bd. 6th Floor, Kukheodaero 68-gil Yeongdeungpo-gu, 150-871

물을 가진다면 성능을 평가하는데 있어 파랑 및 바람중의 운동성능이 추가되어야 한다. 운동성능은 풍력발전기의 출력에 영향을 미치는 중요한 인자이기 때문이다[8]. 이에 본 연구에서는 IEA Annex23 Subtask2 OC3 Project에서 수치해석결과 비교모델로 제안한 콘셉트모델인 5MW 스파타입의 부유식 풍력발전기의 운동해석을 수행하였다. 타 논문의 모형 시험결과 및 수치해석 결과와의 비교를 통해 운동해석에 대한 결과를 확인하였고, 불규칙파 운동해석을 통해 얻을 수 있는 운동스펙트럼을 계산 하였으며 평균, 유의, 상위 1/10 평균과고 운동진폭을 확인하였다. 이 논문에서는 나셀과 블레이드의 영향은 무계조건으로만 고려하였다.

2. 해석 모델 및 조건

2.1 해석 모델

이번 연구의 해석모델은 NREL에서 개발한 5MW 급 스파타입의 부유식 풍력발전기이다. 부유식 풍력발전기의 제원은 Table 1, Table 2 그리고 Figure 1과 같다[4]-[6].

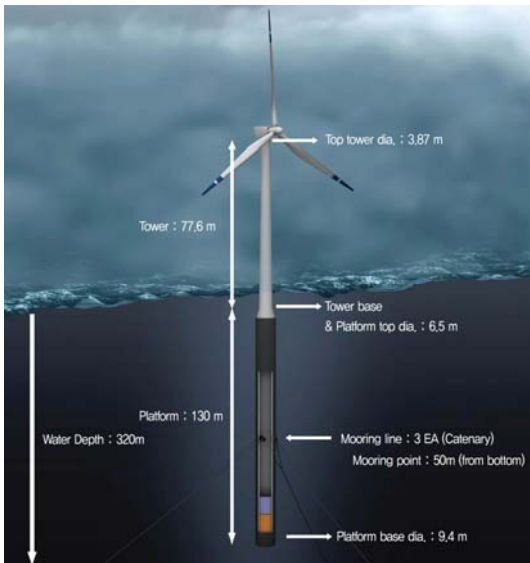


Figure 1: 5MW spar type floating offshore wind turbine

Table 1: Floating offshore wind turbine properties

Item	Prototype	Model
Scale ratio	128	
Draft [m]	120	0.9375
Total structure mass [kg]	8066048	3.846
Location of center of mass (from free surface) [m]	-78.0013	-0.6094
Roll & pitch inertia (about still water level) [kg·m ²]	6.8026 e+10	1.9802
Yaw inertia (about still water level) [kg·m ²]	1.9157 e+10	5.58e-3
Water depth [m]	320	2.5

Table 2: Mooring system properties

Item	Prototype	Model
Number of mooring lines	3	3
Length [m]	902.2	7.05
Mooring line diameter [m]	0.09	0.001
Equivalent mooring line mass density [kg/m]	77.7066	0.00468
Fairleader location (from bottom) [m]	50	0.3906

2.2 해석 조건

파의 방향은 0°도인 정면파(Head sea)이고 불규칙파는 IEC61400-3 Annex B의 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였고 식 (1)과 같다.

$$S_{JS}(f) = \beta \exp\left(-1.25\left(\frac{f}{f_P}\right)^{-4}\right) \alpha \exp\left(-0.5\left(\frac{f/f_P - 1}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1)$$

$$\alpha = (1 - 0.287 \ln \gamma) \gamma$$

$$\beta = 0.3125 H_S^2 T_P \left(\frac{f}{f_P}\right)^{-5}$$

$$\sigma = 0.07 \text{ for } f \leq f_P$$

$$\sigma = 0.09 \text{ for } f > f_P$$

$$S_{JS}(f): \text{JONSWAP}$$

(Joint North Sea Wave Project) Spectrum

H_S : Significant wave height

T_P : Peak period

f : Wave frequency

f_P : Peak frequency

γ : Peak-shape parameter

해상상태에 따른 JONSWAP 스펙트럼에서의 조건은 **Table 3**과 같다.

Table 3: Condition of irregular wave

Sea state	5	6	7	8	
H _s (Significant wave height) [m]	3.66	5.49	9.14	15.24	
Peak frequency [rad/s]	0.6478	0.5560	0.4620	0.3696	
Frequency range	from	0.389	0.334	0.277	0.222
	to	1.643	1.411	1.172	0.938
Gamma	3.3	3.3	3.3	3.3	

3. 해석 과정

수치해석은 ANSYS의 AQWA프로그램에서 LINE, LIBRIUM, FER, NAUT와 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 개발한 오픈소스코드인 FAST(Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence)를 이용하여 수행하였다.

3.1 AQWA의 해석과정

AQWA는 구조물을 여러 개의 패널로 표현하여 해석하며 Source distribution 방법을 사용한다. 이 방법은 각 Source가 패널의 중심에 있고, 프로그램은 경계조건에 대해 Source의 강도를 계산하는 방법이다. AQWA프로그램의 수치해석 가정으로는 이상유체, 비회전성, 비압축성 그리고 비점성이다. 표면장력은 고려하지 않으며 운동의 크기와 속도는 작다고 가정한다. AQWA프로그램의 지배방정식은 식(2)과 같다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{2}$$

부유체 모델의 포텐셜은 포텐셜 중첩법으로 식(3)과 같다.

$$\phi(X, Y, Z)e^{-i\omega t} = \left[(\phi_I + \phi_d) + \sum_{j=1}^6 \phi_j x_j \right] e^{-i\omega t} \tag{3}$$

ϕ_I : incident wave potential

ϕ_d : diffracted wave potential

ϕ_j : potential due to j th motion

x_j : th-motion(per unit wave amplitude)

ω : frequency of incident wave

여기서 j 값 1~6은 6 자유도를 나타낸다.

AQWA의 해석과정은 다음과 같다.

- (1) 해석모델 모델링
- (2) 모델의 질량정보 입력
- (3) 회절(Diffraction), 방사(Radiation)해석 조건입력
- (4) 회절 및 방사해석
- (5) 6자유도에 대한 유체력결과 및 진동응답함수 결과 확인

3.2 FAST의 해석과정

FAST는 2~3개의 블레이드를 가진 수평축 풍력발전기 해석프로그램으로 AQWA와는 달리 블레이드의 회전 및 바람조건에 대한 결과를 얻을 수 있다. FAST는 IEA annex23 subtask2 OC3프로젝트에서 이미 타 프로그램과의 결과 비교를 통하여 결과에 대한 신뢰도를 가지고 있다.

FAST의 해석과정은 다음과 같다.

- (1) 해석모델 모델링 (블레이드, 타워, 플랫폼 등 관련자료 FAST입력 자료로 변환)
- (2) 유체력데이터 입력 (AQWA 또는 유체력계산 프로그램에서 나온 유체력데이터)
- (3) 해석조건 설정 (규칙파, 불규칙파, 바람 등)
- (4) 시간영역해석
- (5) 시간영역해석결과 (변위, 가속도)
- (6) 시간영역해석결과를 통한 진동응답함수확인

4. 해석 결과

4.1 유체력

운동해석을 하기 전에 FAST와 AQWA의 RAO를 비교하기 위해서 FAST에 입력되는 유체력을 AQWA를 통해 계산하였으며, NREL에서 공개한 WAMIT으로 계산된 유체력과 비교하였다. **Figure 2**와 **3**에서 X1은 Surge방향을 X2는 Sway방향을 X3는

Heave방향을 X4는 Roll방향을 X5는 Pitch방향을 X6는 Yaw방향을 나타낸다. Figure 4에서 Figure 9까지 그림에서의 1~6의 숫자는 6자유도를 숫자로 표현한 것이다. 파장제력, 부가질량 그리고 감쇠까지 비교 해본 결과 WAMIT으로 계산한 결과와 AQWA의 결과가 큰 차이는 나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 Heave방향 감쇠력이 작아 스파타입에서 나타날 수 있는 Mathieu형 불안정성이 나타날 것으로 예상된다[1]. AQWA로 계산된 유체력은 FAST의 입력 자료로 사용하였다.

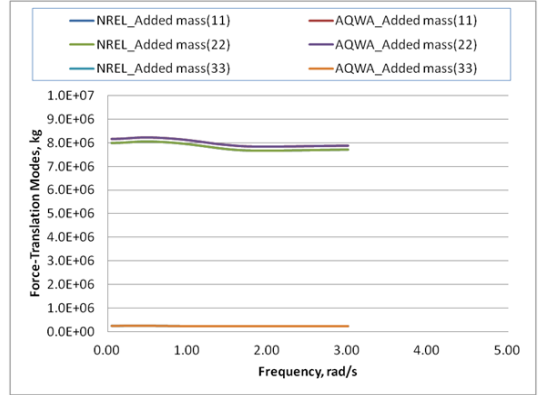


Figure 4: Force-Translation mode added mass

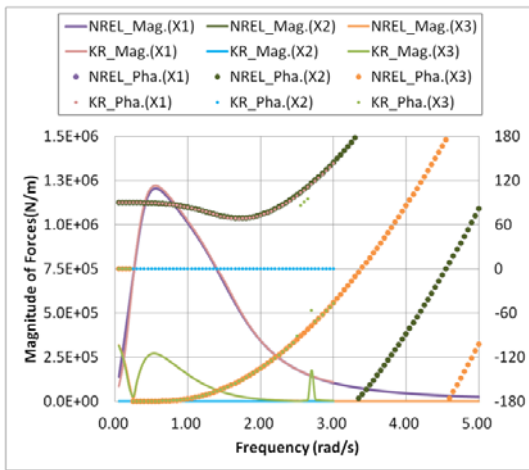


Figure 2: Translation mode wave exciting force

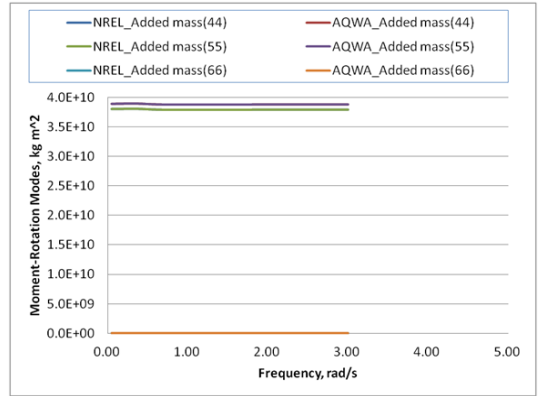


Figure 5: Moment-Rotation mode added mass

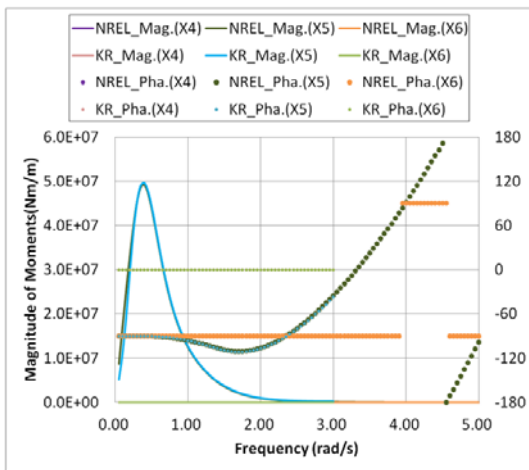


Figure 3: Rotation mode wave exciting force

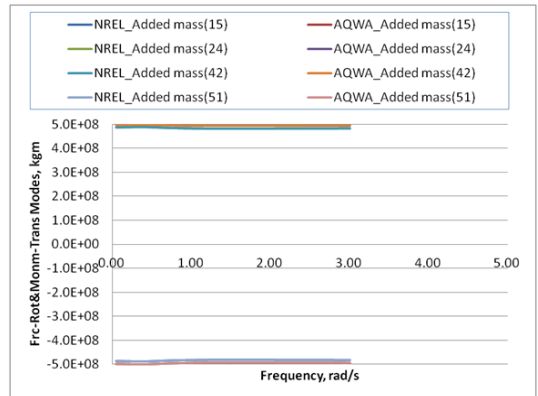


Figure 6: Force-Rotation & Moment-Translation mode added mass

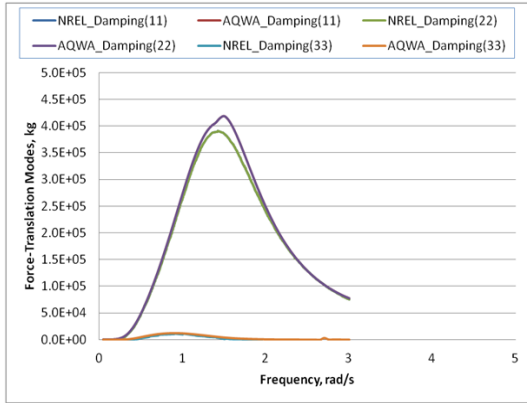


Figure 7: Force-Translation mode damping

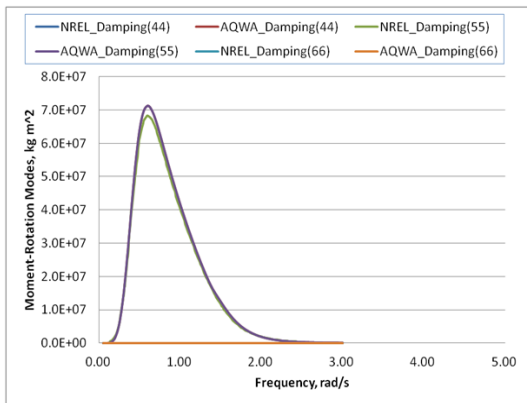


Figure 8: Moment-Rotation mode damping

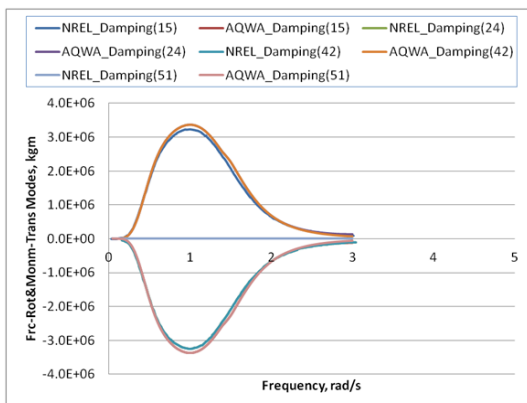


Figure 9: Force-Rotation & Moment-Translation mode damping

4.2 진동응답함수

부유식 구조물의 운동특성을 알아보기 위해 선박이나 해양구조물과 같은 부유체의 운동을 해석하는데 가장 기본이 되는 RAO를 계산하였다. RAO는 입사파에 따른 구조물의 운동을 진동수 영역에 나타낸다. 입사파는 모형시험결과와 수치해석결과 모두 정면파이므로 Sway와 Roll은 고려하지 않았다. RAO는 식 (4)와 같고 해석결과는 Figure 10 ~ 13과 같다.

$$RAO = \frac{Output}{Input} \rightarrow \left| \frac{\eta(f)}{A(f)} \right| = \sqrt{\frac{S_j(f)}{S_w(f)}} \quad (4)$$

$\eta(f)$: Motion response amplitude

$A(f)$: Wave amplitude

$S_j(f)$: Motion response spectrum

$S_w(f)$: Wave spectrum

단, 회전운동의 RAO는 Φ/kA 로 정의된다[3].

Φ : Rotational motion response amplitude

k : Wave number

A : Wave amplitude

Surge, Heave, Pitch방향에서 모형실험결과(Model test1,2,3)와 수치해석의 결과가 같은 경향을 보이고 대체로 비슷한 결과를 나타내는 것을 확인 할 수 있다[2]. 정면파에서 풍력발전기에 영향을 미칠 수 있는 운동으로는 Heave와 Pitch방향이 블레이드와 바람이 만나는 각도와 속도를 변화시킬 수 있으며 이 두 방향의 운동의 크기를 확인해 보면 0.2rad/s 부근이 공진 영역이라는 것을 확인 할 수 있으며, Table 3에서 파랑의 공진점과 비교했을때 공진점이 다른 것을 확인할 수 있다.

Figure 10 ~ 13의 각 Case의 조건의 차이는 공통적인 Wave조건을 제외하고 Table 4와 같다.

Table 4: Analysis condition

Case	Wind	Hydro data
Model test(1, 2, 3)	-	-
AQWA	0	-
FAST(KR)	0	WAMIT
FASTwithAQWA(KR)	0	AQWA
FASTwithAQWA(wind8, 11.4 m/s)	8,11.4	AQWA

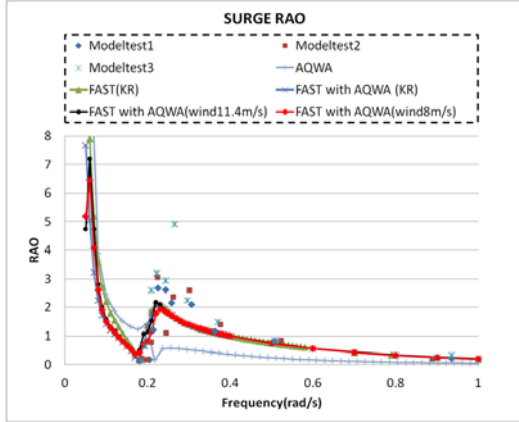


Figure 10: Surge RAO

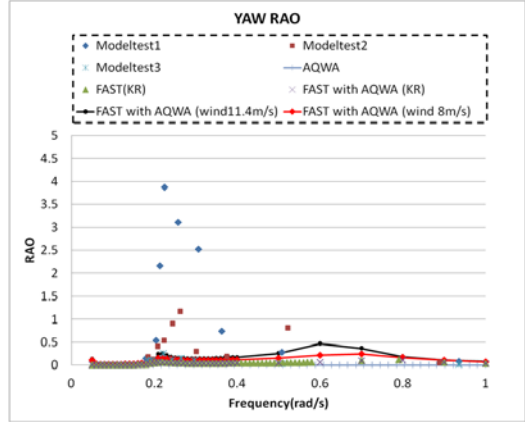


Figure 13: Yaw RAO

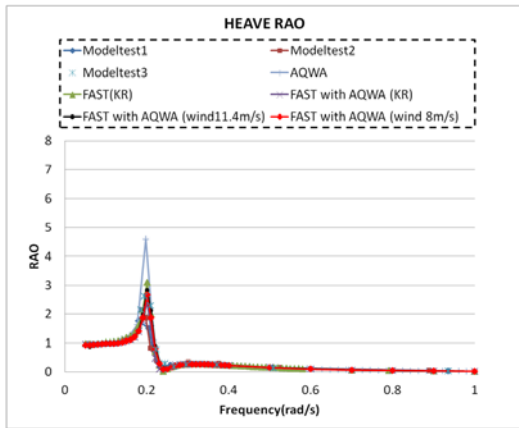


Figure 11: Heave RAO

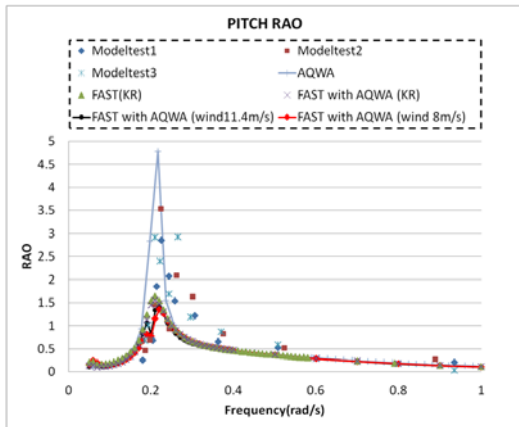


Figure 12: Pitch RAO

4.3 Motion Spectrum

운동 스펙트럼은 실제 부유식 구조물이 설치될 해역의 파 스펙트럼을 기준으로 구조물의 진동응답함수를 이용해 식 (5)와 같이 계산할 수 있다. 이 논문에서는 북해를 기준으로 하여 JONSWAP 스펙트럼을 사용해 운동스펙트럼을 계산하였다. 계산결과는 풍력발전기 발전에 영향을 주는 Heave와 Pitch운동만 계산하였다. Figure 14 ~ 21은 그 결과를 나타낸다.

$$S(f) = S_{JS}(f) |RAO|^2 \quad (5)$$

운동 스펙트럼에서 해상상태 7까지의 Y축은 모두 같은 크기이고, Figure 20 ~ 21은 10배 확대한 것이다.

운동스펙트럼을 보면 해상상태가 악화될수록 그 에너지의 크기가 확연히 커지는 것을 알 수 있는데 이는 JONSWAP 스펙트럼을 확인해보면 알 수 있다.

해상상태가 나빠질수록 Spectral Density의 정점이 커지고 진동수 대역이 조금씩 저주파 대역으로 이동하며 진동응답함수의 정점값에 점점 가까워지기 때문에 위와 같은 결과가 나타나는 것이다. Table 5는 운동스펙트럼결과를 이용해 식 (6), (7), (8)에 따라 운동의 진폭을 계산한 것이다[7].

$$H_{avg} = 1.25 \sqrt{m_0} \quad (6)$$

$$H_{1/3} = 2.00 \sqrt{m_0} \quad (7)$$

$$H_{1/10} = 2.55 \sqrt{m_0} \quad (8)$$

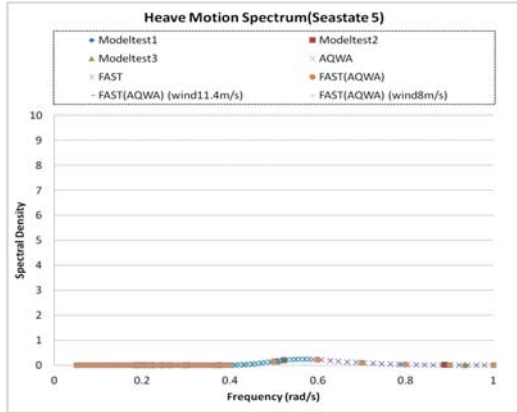


Figure 14: Heave motion spectrum (Sea state 5)

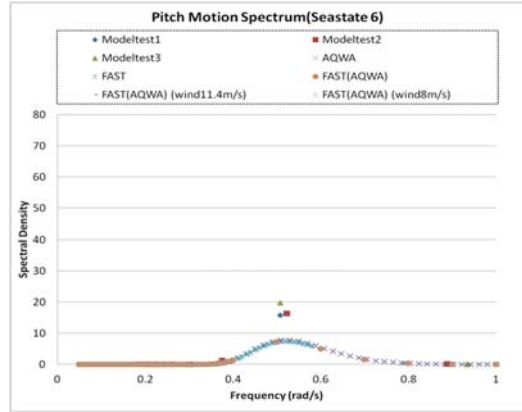


Figure 17: Pitch motion spectrum (Sea state 6)

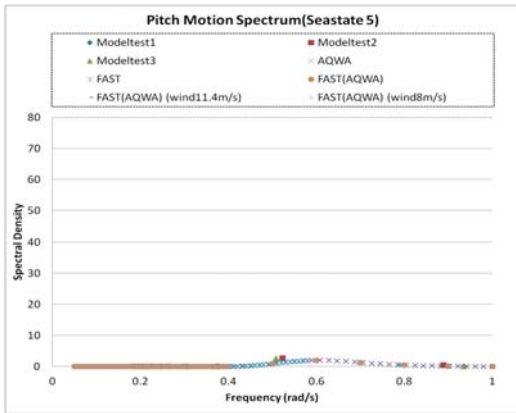


Figure 15: Pitch motion spectrum (Sea state 5)

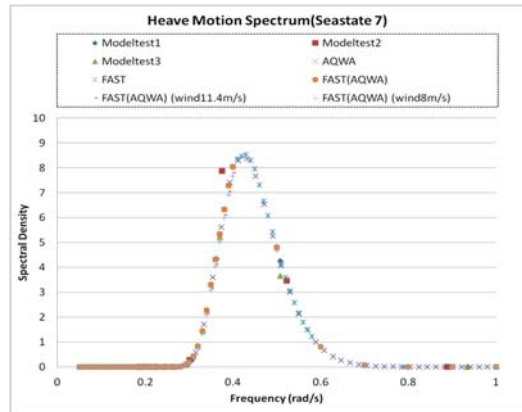


Figure 18: Heave motion spectrum (Sea state 7)

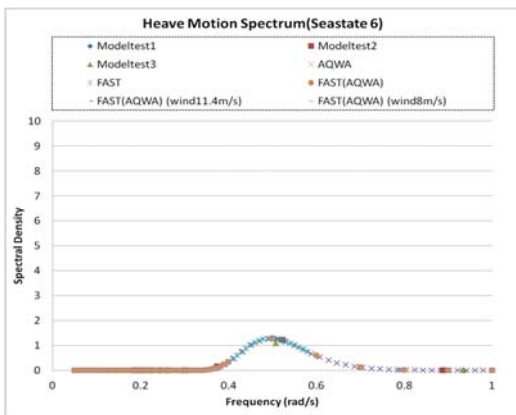


Figure 16: Heave motion spectrum (Sea state 6)

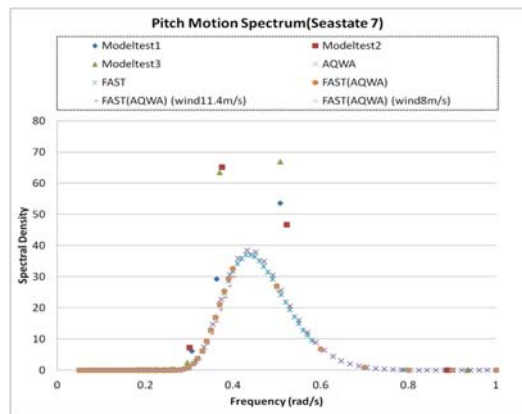


Figure 19: Pitch motion spectrum (Sea state 7)

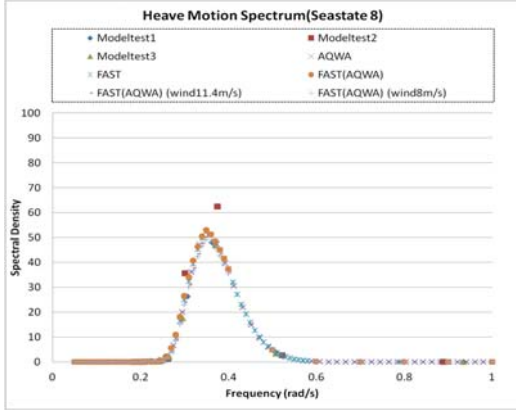


Figure 20: Heave motion spectrum (Sea state 8)

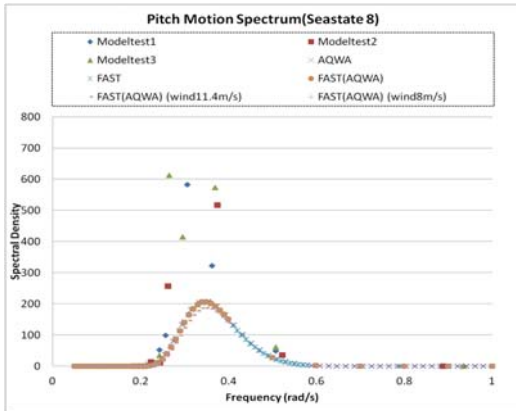


Figure 21: Pitch motion spectrum (Sea state 8)

Table 5 Motion according to Sea State using motion spectrum

Sea state	Average amplitude		Significant amplitude		Average amplitude of 1/10 highest	
	Heave (m)	Pitch (deg)	Heave (m)	Pitch (deg)	Heave (m)	Pitch (deg)
5	0.281	0.839	0.449	1.342	0.573	1.171
6	0.602	1.554	0.962	2.486	1.227	3.169
7	1.440	3.218	2.304	5.148	2.938	6.563
8	3.282	7.082	5.251	11.332	6.695	14.447

부유식해상풍력발전기의 종동요 최대각은 약 10deg를 넘어서면 효율이 떨어지는 것으로 알려져 있다. Table5의 결과를 확인하면 부유식해상풍력발

전기의 종동요 최대각을 10deg 이하로 볼 때 이 모델은 해상상태 7까지는 발전이 가능한 상태임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 부유식 풍력발전기의 운동해석을 수행하였으며, 수행에 필요한 유체력 또한 계산하였다. 모형시험결과와 검증된 수치해석 프로그램을 통해 5MW급 스파타입의 부유식풍력발전기의 운동성능을 파악하여 이로부터 다음과 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 5MW급 스파형 부유식 풍력발전기의 진동응답 함수의 경향을 확인하였다.
- (2) 부유식해상풍력발전기의 종동요 최대각을 10deg로 할 경우 이 모델의 경우 해상상태7정도까지 발전이 가능한 것을 확인하였다.
- (3) 진폭응답함수에서 Heave와 Pitch의 공진주파수는 0.2rad/s 부근으로 공진영역이 같은 것을 알 수 있다.
- (4) 이 모델과 같은 원통형 스파형 하부구조물은 Heave와 Pitch의 공진주파수가 비슷하고 Heave 방향 감쇠력이 작아 공진주파수 영역의 입사파에 의해서 상하운동이 증폭되면 종동요에 영향을 주는 Mathieu형 불안정성을 가질 수도 있다.
- (5) 해상상태에 따른 운동 스펙트럼을 확인하였다.
- (6) 운동스펙트럼을 통해 불규칙파에서의 평균, 유의, 상위 1/10 평균과고 진폭을 확인하였다.

후기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 "10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발 및 인프라 구축"의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. B. Roh and H. S. Choi, "Effects of damping plate on Mathieu type unstability of spar platform", Korean journal of ship and ocean

- technology, vol 42, no. 2, pp. 124-128, 2005
(in Korean).
- [2] H. K. Shin and K. M. Kim, "Motion analysis of a 5MW floating offshore wind turbine", Korean Journal of ocean engineering, vol. 25, no. 5, pp. 64-68, 2011 (in Korean).
- [3] H. K. Shin, M. S. Kim, C. M. Roh, S. H. Yang, J. W. Jo, J. W. Kim, S. R. Kim, Y. C. Yang, and B. M. Kim, "Motion performance test of floating dock-gate through the model test", Korean journal of ship and ocean technology, vol. 45, no. 6, pp. 611-619, 2008
- [4] J. Jonkman, Definition of the Floating System for Phase IV of OC3, Technical Report NREL/TP-500-47535, 2010.
- [5] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060, 2009.
- [6] H. J. T. Kooijman, C. Lindenburg, D. Winkelaar, and E. L. Hoof, DOWEC 6 MW PRE-DESIGN Aero-elastic Modeling of the DOWEC 6MW Pre-design in PHATAS, DOWEC-F1W2-HJK-01-046/9 Public Version, 2003.
- [7] K. J. Rawson, and E. C. Tupper, Basic Ship Theory 2, fifth edition, Oxford, England, Butterworth-Heinemann, 2001
- [8] P. D. Sclavounos, T. Christopher, and S. H. Lee, "Floating offshore wind turbines: response in a sea-state pareto optimal designs and economic assessment", Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology, pp. 611-619, 2008. [Online]. Available: http://web.mit.edu/flowlab/pdf/Floating_Offshore_Wind_Turbines.pdf