

5MW 부유식 풍력발전기의 운동 해석

신현경* · 김경만*

*울산대학교 조선해양공학부

Motion Analysis of 5-MW Floating Offshore Wind Turbine

Hyun-Kyoung Shin* and Kyoung-Man Kim*

*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Korea

KEY WORDS: 5MW floating offshore wind turbine 5MW 부유식 풍력발전기, Response amplitude operators 진폭응답함수, Significant motion 유의운동, Numerical simulation 수치 시뮬레이션

ABSTRACT: The motion responses of a 5-MW floating offshore wind turbine were simulated in regular and irregular waves and its RAOs and significant motion responses were calculated, respectively. The floating offshore wind turbine employed in this simulation was the OC3-Hywind designed by the National Renewable Research Laboratory, USA. The numerical simulation was carried out using MOSES (Multi-Operational Structural Engineering Simulator), which is widely used to analyze and design floating offshore structures in the gas and oil industry.

1. 서 론

세계적인 환경규제 강화와 유가급등으로 인해 화석연료에 대한 대체에너지 개발이 본격화되고 있다. 이에 정부는 새로운 비전의 축, 신 국가발전 패러다임으로 '저탄소 녹색성장'을 제시하였다. 에너지 해외의존도가 97%에 달하는 우리나라에서 풍력에너지의 활용은 원유 수입 절감을 통한 단순한 외화 절약뿐만 아니라 화석연료의 고갈에 대비하는 재생 가능한 에너지원 확보, 비산유국으로서 에너지 자립 등을 위해 반드시 필요하다. 신재생 에너지 산업은 전 지구적 환경산업으로, 경제협약으로 발전되고 있는 기후변화 협약에 대응하고 있는 가장 확실한 해결책의 하나이다. 특히 부유식 풍력발전에 대한 전략기술 개발에 박차를 가하여, 산업화에 가속도가 붙을 전망이다.

일반적으로 해상에서는 육상에 비하여 바람의 질이 좋아 높은 발전효율을 기대할 수 있고, 소음 등으로 인한 님비 현상을 해소시킬 수 있다. 현재의 해상 풍력발전기 기술은 비교적 수심이 얇은 곳에 고정식으로 설치할 수 있는 수준이지만, 더 먼 바다로 나간다면 바람의 질이 좋아지고, 구조물을 고정시키면서 생기는 환경문제를 해결할 수 있다.

이에 부유식 구조물을 이용한 해상풍력발전기에 대한 연구의 필요성은 더욱 부각되었다. 미국의 NREL(신재생에너지연구소)에서는 FAST라는 풍력발전기의 동적응답해석 프로그램을 이용하여 부유식 해상 풍력발전기의 파랑 및 바람 중의 운동을 해석하였다. 덴마크 Rixø 연구소는 부유식 해상풍력발전시스템의 설계를 위한 동특성 해석코드(HAWCS)를 개발하여 SIMO/RIFLEX

부유식 거동해석 프로그램과 결합하여 구조물의 해석에 사용하고 있다. 노르웨이의 Statoil hydro사에서는 자사의 부유식 해상풍력발전기의 설계검증을 위하여 동적응답을 해석하는 전산프로그램을 개발하여 설계에 적용하였다. 풍력발전기가 육상에 고정되어 있는 경우의 거동을 수행할 수 있는 공탄성 해석 프로그램(HAWC2)과 해양구조물의 동적응답 해석을 수행하기 위한 프로그램(SIMO/RIFLEX)으로 구성되어 있고 해양공학수조에서의 모형실험 결과와 비교하여 좋은 결과를 얻었다.

일반적으로 육상에 설치되어 있는 풍력발전기의 성능을 평가하는 것은 출력성능, 하중, 소음, 전력품질 등이 있다. 이들 4가지는 국제 전기 표준회의(International electrotechnical commission, IEC)의 표준을 따른다. 그러나 풍력발전기가 부유식으로 해상에 설치된다면 풍력발전기의 성능을 평가하는데 구조물의 파랑 중 운동성능이 추가되어야 한다. 부유식 해양구조물의 운동성능은 구조물의 목적인 작업에 영향을 미치는 중요한 인자이기 때문이다.

이에 본 연구에서는 부유식 풍력발전기의 개념설계와 상용 프로그램인 MOSES 를 이용한 운동 해석의 결과를 소개하고자 한다.

2. 부유식 풍력발전기

2.1 부유식 해상 풍력발전기 제원

부유식 해상 풍력발전기의 제원은 Table 1에서 보이며, 계류시스템의 경우 3개의 계류선(Mooring line)을 120° 간격으로 배치하였고, 계류선은 Table 2의 제원대로 모델링되었다(Jonk

man, 2009; Jonkman et al., 2009; Kooijman et al., 2003).

Table 1. Floating wind turbine properties

| | |
|---|------------------------------------|
| Water depth | 320m |
| Turbine power | 5MW |
| Rotor mass | 110,000kg |
| Rotor diameter | 126m |
| Hub mass | 56,780kg |
| Hub diameter | 3m |
| Blade mass | 17,740kg |
| Nacelle mass | 240,000kg |
| Tower height | 77.6m |
| Tower mass | 249,718kg |
| Tower top dia | 3.87m |
| Tower base dia | 6.5m |
| Platform height | 130m |
| Platform top diameter | 6.5m |
| Platform base diameter | 9.4m |
| Platform mass including ballast | 7,466,330kg |
| Total structure mass (without mooring lines) | 8,066,048kg |
| Draft (from bottom, including mooring lines) | 120m |
| Location of center of mass (from bottom) | 41.9987m |
| Roll inertia (about water level) | 6.8025977471E+10 kg*m ² |
| Pitch inertia (about water level) | 6.8025977471E+10 kg*m ² |
| Yaw inertia (about platform center) | 1.9157300092E+10 kg*m ² |

Table 2. Mooring system properties

| | |
|---|-------------|
| Number of mooring lines | 3 |
| Angle between adjacent lines | 120 ° |
| Mooring force on the platform | 163,900N |
| Mooring line length | 902.20m |
| Mooring line pretension | 911,000N |
| Mooring line diameter | 0.09m |
| Equivalent mooring line Mass density | 77.7066kg/m |
| Equivalent mooring line weight in water | 698.094N/m |
| Mooring point (from bottom) | 50m |

3. 수치 해석

3.1 MOSES

수치해석은 부유식 해양구조물을 설계하고 분석하는데 널리 사용되고 있는 범용 해석시스템인 MOSES (Multi-operational structural engineering simulator; ultramarine)를 이용하였다.

MOSES에 적용되는 운동방정식은 다음과 같다(Ultramarine, 2008).

$$I\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = s \quad (1)$$

I = Inertia tensor of the body

C = Tangent damping matrices

K = Stiffness matrices

q = Displacement

s = Generalized force

운동방정식 식(1)에 의해 구조물에 작용하는 힘이나 운동을 각각 시간 영역과 진동수 영역에서 나타낼 수 있다. 우측항의 Generalized force는 파력, 풍력, 조류력, 계류력 등이 있다.

3.2 진폭응답함수

진폭응답함수(Response amplitude operators: RAO)는 진동수 영역에서의 복합된 운동방정식들의 행렬을 기본적인 방법으로 해석함으로써 얻어진다.

$$RAO = \frac{OUTPUT}{INPUT} \Rightarrow \left| \frac{\eta(w)}{A(w)} \right| = \sqrt{\frac{S_{\eta}(w)}{S_w(w)}} \quad (2)$$

$\eta(w)$: motion response amplitude

$A(w)$: wave amplitude

$S_{\eta}(w)$: motion response spectrum

$S_w(w)$: wave spectrum

단, 회전운동의 RAO는 Φ/kA 로 정의된다(신현경 외, 2008).

Φ : Rotational motion response amplitude

k : Wave number

A : Wave amplitude

부유식 해상 풍력발전기의 운동 성능을 평가하는데 가장 중요하게 여겨지는 것은 나셀의 거동이다. 나셀의 큰 거동은 구조물의 효율을 떨어뜨리고, 극한 해상상태에서 구조물의 장치에 손상을 야기시킨다(Sclavounos et al., 2007). 그러므로 부유식 해상 풍력발전기의 나셀의 운동을 이해하고, 그것의 가속도를 최소화 하는 것은 매우 중요하다.

3.3 운동 응답의 분산

RAO를 구하면 다양한 해상상태에서 구조물에 대한 운동의 분산과 표준편차를 얻을 수 있다. 선형이론의 가정에 의해 Gaussian 입력 신호가 주어지면 선형 시스템의 출력 신호 또한 분산을 통해 Gaussian으로 표현된다. 그것은 다음 병진모드와 회전모드로 나타내진다.

$$\sigma_{\zeta_i}^2 = \int S_{\zeta}(w) |RAO_i|^2 dw \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\sigma_{\zeta_i}^2 = \int S_{\zeta}(w) \frac{|RAO_i|^2}{R^2} dw \quad i = 4, 5, 6 \quad (4)$$

$\sigma_{\zeta_i}^2$ = the variance of system motion in mode i

$S_{\zeta}(w)$ = the spectral density of the ambient waves
in the given sea state

w = wave frequency

$R = \text{the radius}$ (RAO를 무차원화하기 위해 사용)

ISSC (International ship structures committee)와 ITTC (International towing tank conference)는 발달된 해상에서의 Spectral density를 다음과 같이 제시하였다(Wayman et al., 2006).

$$S_{\zeta}(w) = (H_s^2 T_m) \left(\frac{.11}{2\pi}\right) \left(\frac{w T_m}{2\pi}\right)^{-5} \exp(.44 \left(\frac{w T_m}{2\pi}\right)^{-4})$$

$H_s = \text{significant wave height}$
 $T_m = \text{mean period in given sea state}$
(5)

3.4 수치 시뮬레이션

MOSES를 실행시키는데 있어서는 .DAT파일과 .CIF파일 2가지의 파일이 필요하다. DAT파일에서는 초기값 설정과 계류선을 제외한 구조물의 모델링을 수행한다. CIF 파일에서는 계류선의 모델링, 환경조건 부여, 원하는 결과값을 구하는데 필요한 계산 명령을 한다.

Fig. 1은 모델링이 끝난 후 시뮬레이션 되는 상황을 캡처한 것이다. 모델링과 시뮬레이션을 완료한 후 최종적으로 구조물의 운동을 알아보기 위해서 여러 환경상태(i.e 규칙파, 불규칙파, 바람의 유무, 입사 각도)에서 구조물의 운동을 수치해석하였다.

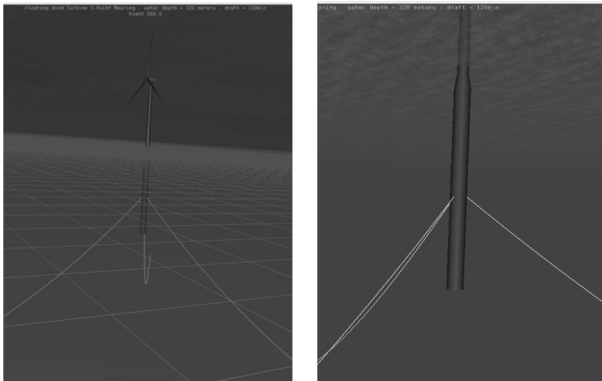


Fig. 1 Floating wind turbine in MOSES

진폭응답함수 RAO를 구함에 있어 해상조건은 바람이 없는 1m 진폭의 규칙파로, 유의운동값(Significant motion response)을 해상상태(Sea states) 1~8까지 시뮬레이션을 수행하였다.

4. 결 과

4.1 진폭응답함수

일반적인 선박의 움직임을 알아보기 위해 진폭응답함수를 구하는 경우에는 무게 중심에서 계산하는 것이 일반적이다. 그러나 부유식 해상 풍력발전기의 경우에는 무게 중심의 운동과 더불어 나셀의 운동 또한 중요하므로 두 지점 즉, 무게 중심과 나셀 중심에서의 RAO를 계산하였다.

(무게 중심 : 42.00m, 나셀 중심 : 209.54m)

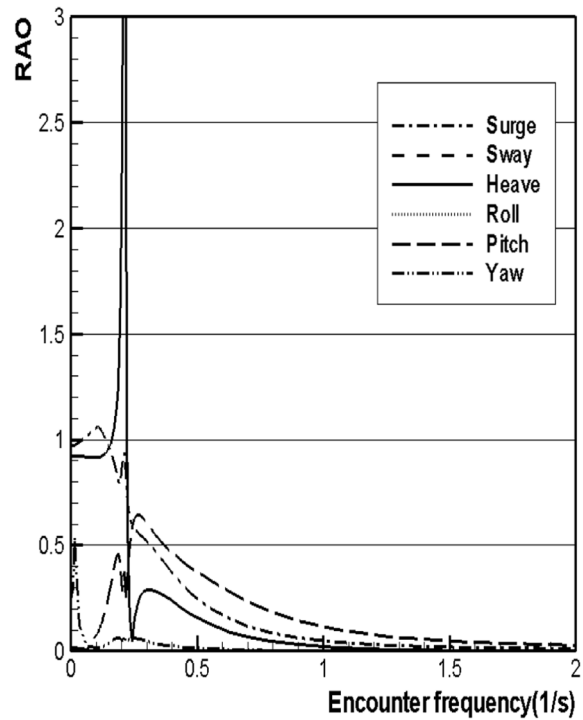


Fig. 2 RAO at center of mass (Regular wave, $H=1\text{m}$, No wind, Heading 0°)

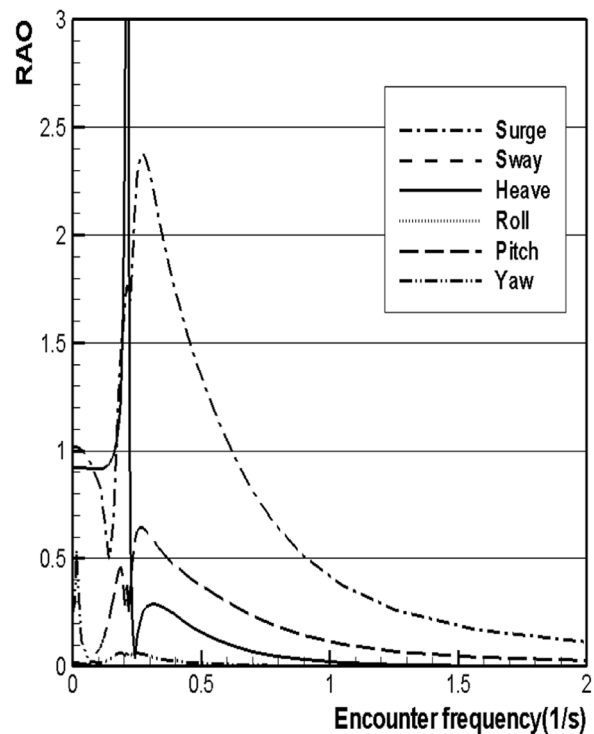


Fig. 3 RAO at nacelle (Regular wave, $H=1\text{m}$, No wind, Heading 0°)

Figs. 2, 3의 전후동요(Surge)를 보면 확실히 나셀에서의 운동이 큰 것을 알 수 있다. 파도의 입사각을 0° 이외에 30° 로 하여 RAO를 구하였다. 30° 일 때는 구조물의 6자유도 운동 모두를 볼 수

있다. 좌우동요(Yaw)는 그 값이 워낙 작아서 그래프에 표현이 되지 않았다.

Figs. 4, 5의 Heading 30°일 때 계측 위치에 따른 RAO를 비교해 보면 전후동요, 좌우동요에서 큰 차이를 보인다. 이러한 결과는 세로방향으로 길이가 긴 부유식 해상 풍력발전기의 형상에 따르는 것이다.

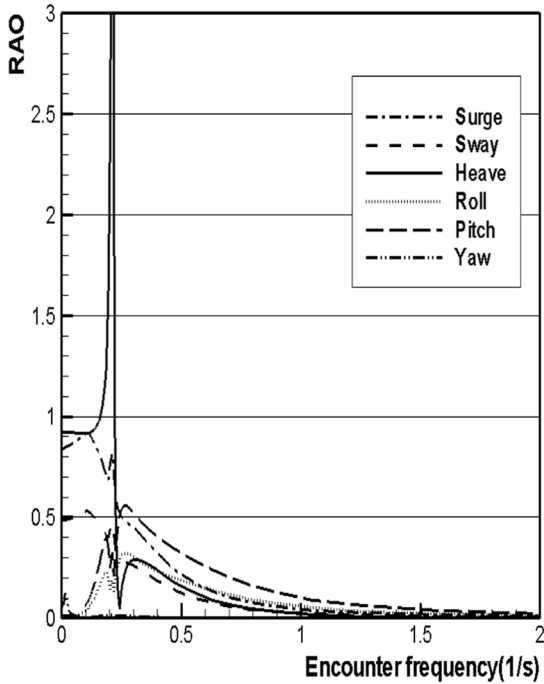


Fig. 4 RAO at center of mass (Regular wave, $H=1m$, No wind, Heading 30)

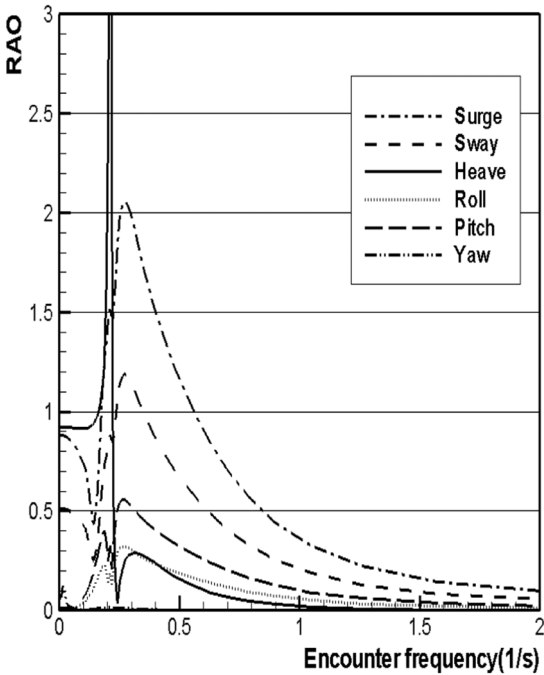


Fig. 5 RAO at nacelle (Regular wave, $H=1m$, No wind, Heading 30)

4.2 유의운동

불규칙파에서의 부유식 해상 풍력발전기의 각 해상상태에서의 움직임 알아보기 위해서는 RAO를 이용하는 방법과, 특정 해상상태에서의 운동을 대표값인 유의운동응답(Significant motion response)로 나타내는 방법이 있다.

Table 4. Sea states (Heading angle 0°)

| state | $T(s)$ | $H_s(m)$ | Wind speed (m/s) |
|-------|--------|----------|------------------|
| 1 | 2.0 | 0.09 | 2.5 |
| 2 | 4.8 | 0.67 | 6.0 |
| 3 | 6.5 | 1.40 | 8.125 |
| 4 | 8.1 | 2.43 | 10 |
| 5 | 9.7 | 3.66 | 12.125 |
| 6 | 11.3 | 5.49 | 14 |
| 7 | 13.6 | 9.14 | 17 |
| 8 | 17.0 | 15.24 | 21.25 |

H_s (m) = Significant wave height

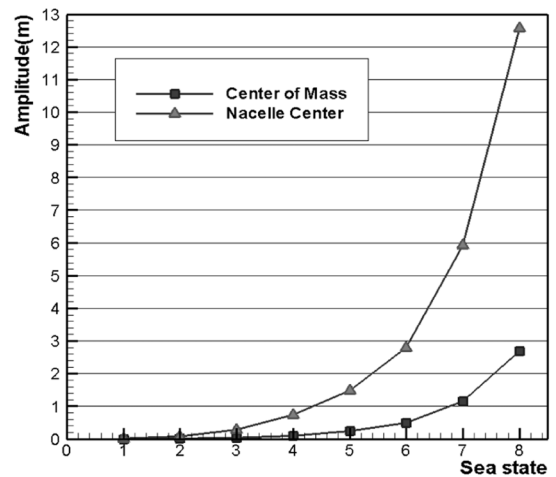


Fig. 6 Significant surge amplitude (Heading = 0°)

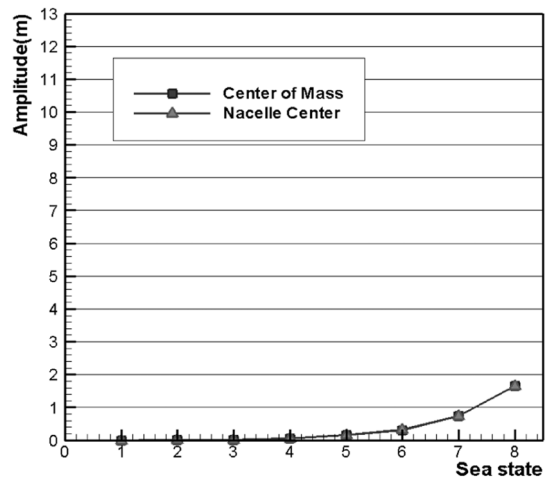


Fig. 7 Significant heave amplitude (Heading = 0°)

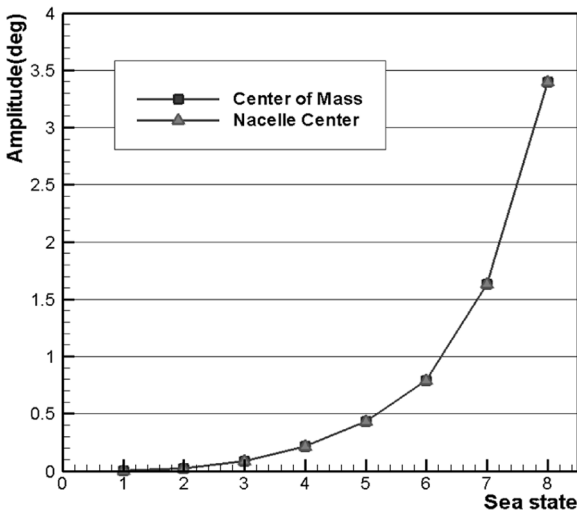


Fig. 8 Significant pitch amplitude (Heading = 0°)

Figs. 6-8 은 Sea States 1-8 에서 시뮬레이션을 통하여 구한 유의운동을 나타낸 것이다. 유의운동이란 구조물의 운동을 큰 순서로 전체 운동의 1/3까지의 운동을 평균한 값을 나타낸다. Sea state의 숫자가 커질수록 해상상태가 악화되는 것을 Table 4의 파도의 유의파고 H_s , 최대 주기 T (Peak period), 풍속(Wind speed)의 변화를 통해서 알 수 있다. Fig. 6은 무게 중심과 나셀 중심에서 전후동요의 차이가 해상상태가 악화될수록 커짐을 알 수 있다.

그 외 Figs. 7,8을 통해서 상하동요(Heave)와 종동요(Pitch)에서는 무게 중심과 나셀 중심에서의 운동이 일치함을 확인할 수 있다. 이는 강체의 회전운동이 위치에 따라 달라질 수 없음을 나타내며, 상하동요의 경우에는 높이 방향으로 매우 긴 세장체이고 종동요의 경우 운동의 각이 제한적인 대상구조물의 특성이 반영된 것이다. 결과 그래프를 보면 전체적으로 해상상태가 악화될수록 계류된 구조물의 모든 운동이 커짐을 확인할 수 있다.

결 론

본 논문에서는 부유식 해양구조물을 설계하고 분석하는데 널리 사용되고 있는 범용 해석 시스템인 MOSES를 이용하여 5MW 급 부유식 해상 풍력발전기의 운동 성능을 수치해석하였다. 수치해석 결과를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) OC3-Hywind 해상풍력발전기의 상하동요 고유진동수는 0.2094(rad/s) 이다. 구조물의 큰 운동을 야기시키는 특정 주파수를 갖는 파도상에 구조물이 노출되면 설계된 하중 이상의 하중을 받아 자칫하면 구조물이 손상될 수 있으므로 주의하여 설계되어야 한다.

(2) 구조물의 무게 중심과 나셀 중심에서의 운동진폭응답함수 RAO와 유의운동을 비교하여 전후동요의 경우 나셀 중심에서의 운동이 무게 중심에서의 운동보다 큰 것을 확인하였다. 이는 구조물의 세로방향으로 긴 형상에 기인한 것으로 무게 중심에서의 작은 움직임이 나셀에는 상당한 부담을 줄 수 있다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KEITEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20093020020020).

참 고 문 헌

신현경, 김민성, 노철민, 양승호, 조진욱, 김종욱, 김삼룡, 양영철, 김봉민 (2008). “모형시험을 통한 플로팅 도크게이트 운동 성능 평가”, 대한 조선학회 논문집 제45권 제 6호.

Jonkman, J. (2009). Definition of the Floating System for Phase IV of OC3, National Wind Technology Center (NWTC), National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G. (2009). Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060.

Kooijman, H.J.T., Lindenburg, C., Winkelaar, D. and Hooft, E.L. (2003). DOWEC 6 MW PRE-DESIGN Aero-elastic modeling of the DOWEC 6MW pre-design in PHATAS, DOWEC-F1W2-HJK -01-046/9 public version.

Sclavounos, P.D., Christopher, T. and Lee, S.H. (2007). “Floating Offshore Wind Turbines : Responses in a Sea-state Pareto Optimal Designs and Economic Assessment“, Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology.

Sclavounos, P.D. (2009). 2.24 Ocean Waves and Their Interaction with Ships and Offshore Energy System, Lecture Notes, Open Course Ware, MIT.

Ultramarine, Inc. (2008), REFERENCE MANUAL FOR MOSES.

Wayman, E.N., Sclavounos, P.D., Butterfield, S., Jonkman J. and Musial W. (2006). Coupled Dynamic Modeling of Floating Wind Turbine Systems. Massachusetts Institute of Technology and National Renewable Energy Laboratory.

2010년 4월 2일 원고 접수

2011년 10월 11일 심사 완료

2011년 10월 17일 게재 확정