

고 내항성 해상풍력 발전기 해석

안규중¹, 구본국^{2*}

¹창원대학교 스마트환경에너지공학과

²창원대학교 조선해양공학과

Analysis of High Sea-worthiness Offshore Wind Turbine

Gyu-Jung Ahn¹, Bon-Guk Koo^{2*}

¹Department of Smart Environmental Energy Engineering, Changwon National University

²Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Changwon National University

요약 해상 풍력발전기의 운동 성능 분석 및 개선을 위한 연구가 수행되었다. 본 연구에 사용된 형상은 과거 연구를 참고하여 가져온 것이며 이를 바탕으로 수선면적의 크기를 80% 60% 40% 20%로 각각 설계하여 이에 따른 운동성능을 확인해 보았다. 해상상태는 Sea State 4, 5, 6에서 계산을 수행하였다. 계산과정에서는 상업용 전산 유체역학(ANSYS)과 AQUA를 사용하여 계산을 수행하였다. 전반적인 운동성능의 경우 이론과 동일하게 수선면적의 크기가 줄어들수록 HEAVE, ROLL, PITCH와 같은 운동이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 수선면적의 크기가 급격히 줄어든 형상의 경우 복원성 계산을 진행하였을 때 복원성능에서 만족하지 못하는 경우가 발생할 수도 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 해상상태에 따른 적정의 수선면적이 있을 수도 있다는 것을 확인할 수 있었다.

• **주제어** : CFD, 해상 풍력발전기, 수선면적, 응답진폭함수, 제곱평균 실효값

Abstract Research was conducted to analyze and improve the kinetic performance of offshore wind power generators. The shape used in this study was taken with reference to the previous paper, and the size of the repair area was designed at 80%, 60%, 40%, and 20%, respectively, and the exercise performance was confirmed accordingly. The sea state was calculated in Sea State 4, 5, and 6. In the calculation process, the calculation was performed using commercial computational hydrodynamics (ANSYS) and AQUA. In the case of overall exercise performance, it was confirmed that the smaller the size of the repair area, the smaller the exercise such as heave, roll, and pitch. However, it was confirmed that in the case of a shape in which the size of the repair area was rapidly reduced, there may be cases in which the restoration performance was not satisfied when the restoration calculation was performed. In addition, it was confirmed that there may be an appropriate repair surface depending on the sea condition.

• **Key Words** : CFD, Wind Turbine, Wet Surface, RAO, RMS

Received 20 December 2021, Revised 28 December 2021, Accepted 30 December 2021

* **Corresponding Author** Bon-Guk Koo, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea. E-mail: bonguk9@changwon.ac.kr

I. 서론

최근 환경에 관한 관심이 세계적으로 증가하고 있으며 2017년 기준으로, 국내에서 사용 중인 에너지원은 대부분 화석연료와 원자력 에너지에 편중되어 있고 이중, 재생 에너지는 약 5%를 차지한다. 여기서 재생 에너지의 92%는 태양열, 지열, 바이오 등 및 8%의 풍력 에너지로 되어 있다. 풍력발전기를 육상에 설치하게 되면 입지 조건에 제과 소음으로 인해 민원이 발생하는 단점이 있다.

하지만 해상풍력발전기의 경우 입지 확보가 쉽고 대형화가 가능하다는 장점이 존재한다. 반면 부유식 풍력발전 장치는 설치 지역의 해상환경 특성에 영향을 많이 받는다. 부유체의 동요가 심한 경우, 소음 및 안전 문제, 풍력발전기의 성능에도 영향을 미친다. 따라서 발전기 설치 전, 해당 해역의 특성을 고려한 운동 성능 계산이 필수적이다.

해상풍력 부유체의 동요를 줄이는 방안으로 사용하는 부유체의 하부 감쇠판(Damping plate) 형상을 변경하거나, 감쇠판의 면적을 감소 및 추가 평판 구조물(Heave plate)을 설치하여 내항 성능을 개선하는 방법을 구현하였다[1-3]. 본 논문에서는 부유체 원기둥(Upper Column, UC)의 수선 면적을 변화 시켜 여러 모델을 제작하고, 각 모델의 운동 응답을 확인하여 주어진 해상환경에 맞는 최적의 부유체 설계를 목표로 연구를 진행하였다.

II. 계산 데이터

2.1 모델형상

본 연구에서 사용할 기준모델은 이전 연구를 참고하여 모델을 선정 하였다[4]. 선정된 기준모델(Model A)의 원기둥(Upper Column, UC) 수선 면적을 기준(100%)으로 20%씩 줄여 보다 작은 수선면적을 갖는 모델, Model B(80%), Model C(60%), Model D(40%)와 Model E(20%)를 설계하였다. 이렇게 설계한 5개 모델의 형상과 제원, 기준모델(Model A)의 개략도는 Fig. 1과 Fig. 2에 나타나 있다.



Fig. 1. Model shape according to the area.

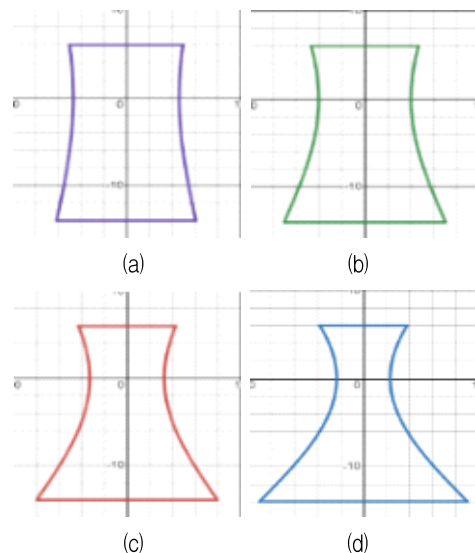


Fig. 2. Detailed shape of each case: (a)=CASE_B; (b)=CASE_C; (c)=CASE_D; (d)=CASE_E;

2.2 상부 구조물

상부 구조물의 경우 참고한 논문을 바탕으로 NREL-5-MW 풍력 발전기를 사용하였으며 NREL-5-MW Definition은 Table 1에 나타나 있다. 부유체의 운동성능을 비교하기 위해 모든 케이스에 동일한 제원의 타워, 나셀, 블레이드, 컨트롤 시스템이 사용되었다.

2.3 해상 환경

본 연구에서는 ITTC(International Towing Tank Conference)에서 정의한 스펙트럼을 사용하였다. 스펙트럼에 사용되는 매개변수는 다음과 같다.

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{-B/\omega^4}$$

$$A = 173(\zeta\omega)_{1/3}^2 / T_1^4$$

$$B = 691 / T_1^4$$

$$T_1 = 0.834 T_P$$

Table 1. The main specifications of the upper structure

Description	Value
Rated power, P	4[MW]
Rotor Orientation Configuration	Upwind, 3 Blades
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Rotor, Hub Diameter	126.3 [m]
Hub Height	90 [m]
Rotor Mass	110,000 [kg]
Nacelle Mass	240,000 [kg]
Tower Mass	347,460 [kg]
Cut In, Rated, Cut Out	3.11[m/s]
Wind Speed	4.25[m/s]
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9, 12.1[rpm]
Overall Center of Mass	(-0.2, 0.0, 64.0) [m]

Table 2. Sea State

Sea State	H_s (m)	T_P (sec)
4	1.88	8.8
5	3.25	9.7
6	5	12.4

본 논문에서 사용하는 해상환경을 나타낸 Table 1, 2에서 HS(유의 파고, significant wave height)는 임의 관측 시간 동안 관측된 파고 중에서 파고가 가장 높은 순서로 전체 1/3에 해당하는 파고들의 평균이며, 이와 유사하게 Tp(유의 파주기, Peak period)는 큰 순서로 정의한 1/3까지에 해당하는 파랑들의 파주기를 평균한 값이다. Fig. 3은 Table 2를 이용하여 생성한 파 에너지 스펙트럼이다.

III. 계산과정

3.1 복원성 계산

3.1.1 비손상 복원성

국제해사기구(IMO)는 선박의 안전한 운항을 보장하고 운항의 위험을 최소화하기 위해 복원성에 대한 강제기준과 권고기준으로 '2008 IS CODE' 를 제정하였다.

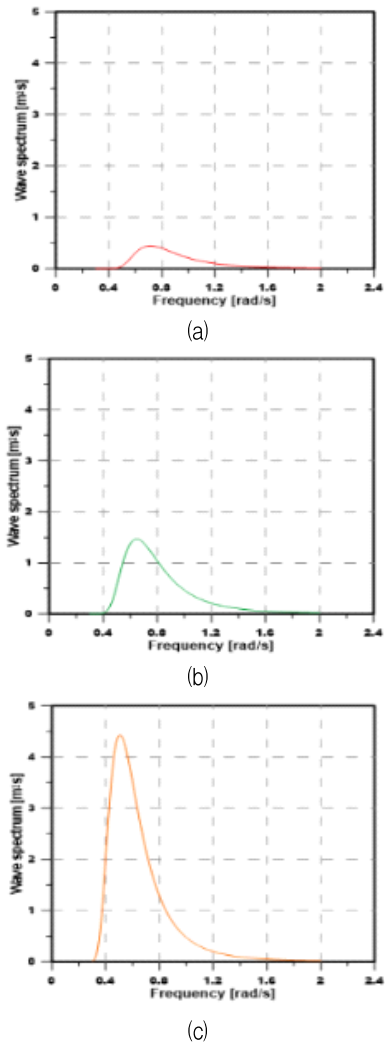


Fig. 3. ITTC Wave Spectrums (a)=Sea State4 ; (b)=Sea State5; (c)=Sea State6

IMO에서 정의한 이동식 해양굴착 구조물에는 반잠수형 구조물, 수상형 구조물, 갑판상승형구조물 등이

있다. 수상형 구조물은 부양상태에서 작업이 가능하도록 단일 또는 복합 선체 구조로 된 선박형 또는 부선형 배수량 선체를 갖는 구조물로 정의하였다. 본 논문의 구조물은 이동식 해양굴착 구조물 중 수상형 구조물로 정의한다. 따라서 '009 MODU Code 3장'의 규정을 적용하여야 한다. 수상형 구조물의 갑판침수각까지의 복원모멘트 곡선이 동일한 각까지의 풍력 모멘트 곡선 면적의 40%보다 커야 하며, 복원모멘트는 풍력 모멘트 곡선과 교차하는 두 번째 각까지 모두 양의 값을 가져야 한다.

3.1.2 풍력 모멘트

본 논문의 구조물의 경우 상부 갑판에 풍력터빈 구조물이 설치되기에 풍력 모멘트 또한 고려해야 하는 대상이 된다. IMO는 다음 식을 통해 풍력을 계산하도록 권고하였다.

$$F = \frac{1}{2} C_s C_H \rho V^2 A$$

C_s = 수면 위로 노출된 구조물의 형상 계수

C_H = 수면 위로 노출된 구조물의 높이 계수

A = 경사시 투영면적

위 식에서 횡 경사각에 의한 변수는 C_H 와 A 가 존재한다. 상부 구조물은 5MW 풍력터빈으로 날개(Blade) 3개, 나셀(Nacelle), 타워(Tower) 5가지로 구성된다. 높이 계수는 각 구조물의 무게중심을 기준으로 계산을 진행하였고 각 구조물의 횡 경사 변화에 따른 무게중심 변화를 고려하여 풍압의 중심점을 계산한다. 그 후 풍압의 중심점으로부터 부심까지의 거리를 풍력 모멘트 암(Wind moment arm)으로 설정한다. 풍속은 일반 조건의 최솟값으로 설정하였다.

3.2 복원 모멘트

구조물의 횡 경사에 대한 복원 모멘트는 Orca3D 유체정역학 및 복원성 해석을 통해 계산을 진행하였다 [5]. 각 구조물의 갑판침수각은 형상을 통해 구할 수

있다. 복원성 계산의 기준인 갑판 침수각까지 풍력 모멘트와 복원 모멘트 곡선 면적은 수치 적분(Simpson's 2nd Rule)을 통해 계산을 진행하였다.

$$\int_a^b y dx \approx \frac{3h}{8} (y_0 + 3y_1 + 3y_2 + 2y_3 + \dots + 3y_{n-2} + 3y_{n-1} + y_n)$$

계산해보았을 때 각 구조물의 복원성은 모두 만족을 하였다. 하지만 CASE_E의 경우 수선면적이 더 작아진다면 복원성을 만족 못 한다는 것을 확인하였다.

3.3 응답 진폭 함수

응답 진폭 함수(RAO)에서 병진운동은 $\frac{x_{1,2,3}}{C_A}$, 회전 운동은 $\frac{x_{4,5,6}}{kC_A}$ 으로 표기한다. 본 논문에서 사용할 6자유도 운동에 대한 Motion RAOs 계산은 내항성 해석프로그램 Ansys Aqua를 사용하여 진행하였다. 3가지 운동 Heave, Roll, Pitch에 대한 RAO값이 Fig. 4에 나타나 있다.

3.3.1 운동 응답 스펙트럼(Motion response spectrum)

불규칙 파 중 운동 응답은 응답진폭함수(RAO)와 파 에너지 스펙트럼을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$S_{\xi}(\omega) = S_{\zeta}(\omega_e) RAO_{x_i}^2 (i = 1, 2, 3)$$

$$S_{\xi}(\omega) = k^2 S_{\zeta}(\omega_e) RAO_{x_i}^2 (i = 4, 5, 6)$$

$$S_{\xi}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega) \frac{g}{g - 2\omega U \cos \mu}$$

선박의 경우 운동 응답 스펙트럼의 계산에 있어서 조우 주파수(Encounter frequency)를 사용하여 계산이 진행되어야 한다. 본 논문에서는 정지한 부유체(U=0)에 대한 계산을 진행하므로, 운동 응답 스펙트럼의 계산에서 파의 절대 주파수에 대하여 계산을 수행하였다.

Fig. 4를 확인해 보면 구조물의 형상이 좌우 대칭이므로 Roll의 경우 $\mu = 0^\circ, 45^\circ$ 에서는 발생하지 않고,

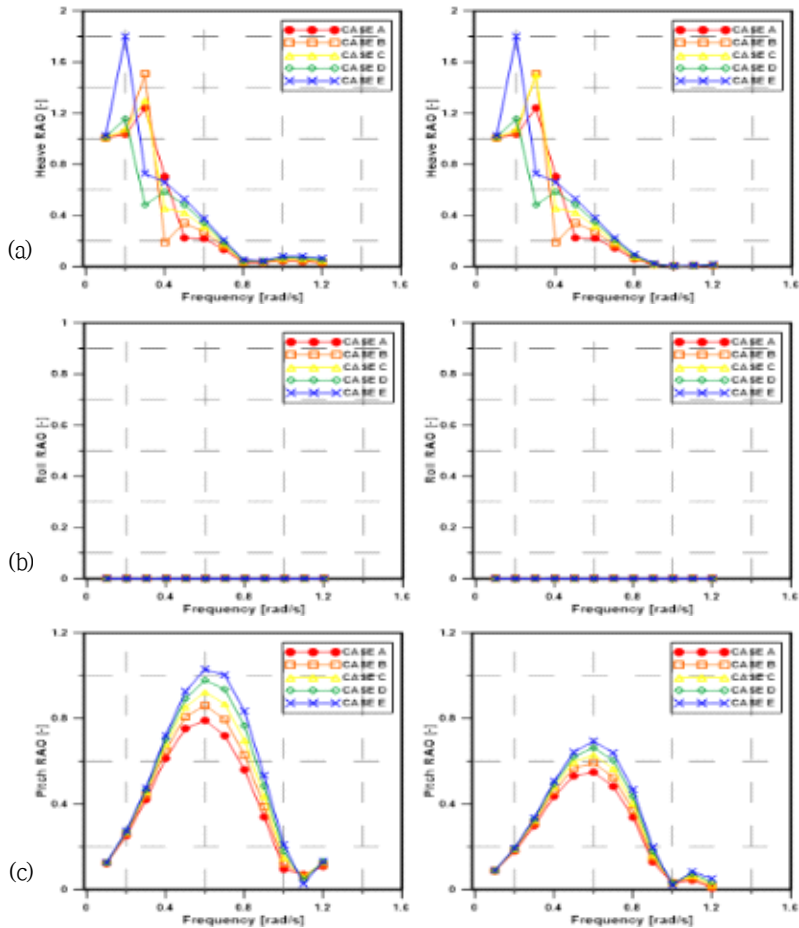


Fig. 4. RAO at $\mu = 0^\circ, 45^\circ$, (a) Heave; (b) Roll; (c) Pitch

Heave의 경우 파향에 관계없이 거의 일정하게 발생을 하였다. 반면 Pitch의 경우는 선수파에서 가장 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 제곱평균 실효 값(Root Mean Square)

불규칙파 중 운동응답 상하동요 스펙트럼 모멘트는 다음과 같다.

$$m_n = \omega_c^n S_{x3}(\omega_c) d\omega_c$$

본 논문에서는 운동응답의 통계수치를 이용한 여러 스펙트럼 모멘트 값 중에서 제곱평균 실효 값(Root Mean Square, RMS)을 통한 모델의 내항성능 비교가 진행되었다.

본 연구에서는 모델 간의 내항성능 평가는 Motion amplitude 값을 비교하는 것으로 진행했다. RMS ($\sigma_0 = \sqrt{m_0}$) 값을 이용하면 SSA(Single Significant Amplitude, $2\sqrt{m_0}$)와 같은 유의미한 값을 도출할 수 있기에 모델 간 성능 비교에 적절하다고 판단했다. 내항성 해석프로그램 Ansys Aqwa를 통해 구한 모델들의 Motion RAO와 ITTC파 에너지 스펙트럼을 Simpson's 2nd rule을 이용하여 운동 응답 스펙트럼을 계산하였다. RMS를 통한 성능을 비교한 그래프는 Fig. 5와 같다.

계산을 진행하고 확인해 보았을 때 Surge(전후 동요), Sway(좌우 동요)에 대한 값의 차이는 크게 나타나지 않는 반면 Fig. 5와 같이 상하동요(Heave), 횡동요(Rolling), 종동요(Pitching)의 경우 수선면적이 작아지면서 운동성능에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

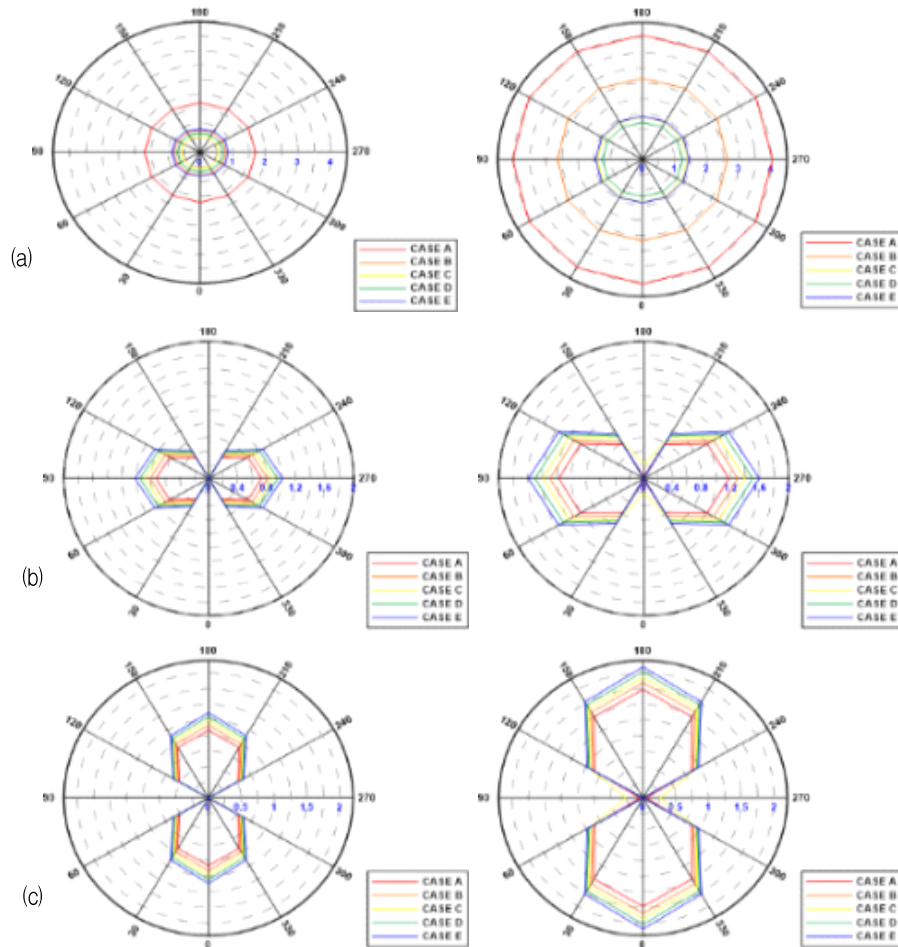


Fig. 5 RMS, (a) Heave; (b) Roll; (c) Pitch

IV. 결론

수선면적에 따른 해상 부유체의 운동성능을 확인하기 시뮬레이션을 진행하였다. 전후 동요(Surge)와 좌우 동요(Sway)에 대한 운동에서 모델 간의 성능 차이는 보이지 않는다. 하지만 상하동요(Heave), 횡동요(Rolling), 종동요(Pitching)에는 영향을 주는 것으로 확인하였다. 수선면적이 작아지면 운동성능에 대한 장점이 존재하였다. 하지만 수선면적이 CASE_D보다 작아진다면 복원성능에 대한 부분에서 만족하지 못할 것으로 생각된다. 또한, 해상상태가 좋을수록 수선면적에 대한 운동성능이 크게 차이가 나지는 않았다. 따라서

해상상태에 따른 적정의 수선면적이 있을 거라 예상이 된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역 혁신 사업의 결과입니다.(2021RIS-003) 그리고 이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술포진원의 지원을 받아 수행된 연구임.(P0017006, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)

REFERENCES

- [1] Sung-Jae Kim, Weoncheol Koo and Min-Jae Shin, "An Experimental Study on Heave Reduction of a Floating body with Various Submerged-Body Areas," J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol. 22, No. 3, 133-141, August 2019.
- [2] L. Pavon and S. Iglesias, "Hydrodynamic coefficients and pressure loads on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines: a comparative analysis using large scale models," Renew Energy, 81:864-81. 2015.
- [3] A. Subbulakshmi and R. Sundaravadivelu, "Heave Damping of Spar Platform for offshore Wind Turbine with Heave plate," Ocean Eng, 121, 24-36, 2016.
- [4] Liu, Zhenqing, Yicheng Fan, Wei Wang, and Guowei Qian, "Numerical Study of a Proposed Semi-Submersible Floating Platform with Different Numbers of Offset Columns Based on the DeepCwind Prototype for Improving the Wave-Resistance Ability" Applied Sciences, 9, no. 6: 1255. 2019.
- [5] Minji Kim and Hyunkyung Shin, "A Study on Environmental Conditions for the Estimation of Stability of Floating Offshore Wind Turbine Systems," Journal of Wind Energy, Vol. 11, no 4, pp. 5-11. 2020.

저자소개

안 규 중 (Gyu-Jung Ahn)



2021년 2월 : 창원대학교
조선해양공학과(공학사)
2021년 3월~현재 : 창원대학교
스마트환경에너지공학과과정
(공학석사)

구 본 국 (Bon-Guk Koo)



2002년 2월 : 부산대학교
조선해양공학과(공학사)
2004년 2월 : 부산대학교
조선해양공학과(공학석사)
2006년 5월 : UCLA
기계공학과(공학석사)
2011년 12월 : Univ. of Iowa
기계공학과(공학박사)

2014년 3월~현재 : 창원대학교 조선해양공학과 교수
관심분야 : 유동해석/전산유체역학