

# 부유식 해상풍력발전기 하부구조물의 종경사각에 따른 주파수 영역 운동응답 분석

남인혁\* · 최영명\*\* · 한익승\*\*\* · 임채옥\*\*\*\* · 김진옥\*\*\*\*\* · † 신성철

\*,\*\*\*\*\*부산대학교 대학원, \*\*부산대학교 조선해양공학과 조교수, \*\*\*한화오션 책임연구원, \*\*\*\*부산대학교 연수연구원, † 부산대학교 조선해양공학과 교수

## A Frequency Domain Motion Response Analysis of Substructure of Floating Offshore Wind Turbine with Varying Trim

In-hyuk Nam\* · Young-Myung Choi\*\* · Ikseung Han\*\*\* · Chaeg Lim\*\*\*\* · Jinuk Kim\*\*\*\*\* · † Sung-chul Shin

\*,\*\*\*\*\*Student, Graduate School of Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*Assistant Professor, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*\*Principal Researcher, Hanwha Ocean, Seoul 100-800, Korea

\*\*\*\*Postdoctoral Researcher, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

† Professor, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**요 약** : 최근 탄소 저감에 대한 요구가 증가함에 따라 전 세계적으로 화석연료의 사용을 줄이고, 신재생 에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 신재생 에너지를 활용한 발전 방식 중, 부유식 해상풍력발전기는 설치제약이 적으며, 대규모 단지 구성이 수월한 장점이 있다. 부유식 해상풍력발전기의 파랑 중 운동응답 해석은 초기 설계 단계에서 필수적으로 수행되어야 한다. 본 연구는 부유식 해상풍력발전기 중 반잠수식 해상풍력발전기에 대하여 종경사각에 따른 주파수 영역에서의 운동 해석을 수행하고, 종경사각에 따른 운동 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 운동응답 분석은 6자유도 운동 중 Heave, Roll, Pitch에 대하여 수행하였다. 고유 주기 분석을 수행하여, 종경사각의 변화가 Heave, Pitch 운동은 유의미한 변화를 나타내진 않았지만, Roll 운동은 규칙적으로 변화함을 확인하였다.

**핵심용어** : 부유식 해상풍력발전기, 운동응답 분석, 고유 주기 분석, 운동응답 진폭 연산자, 종경사각

**Abstract** : As the demand for reducing carbon emissions increases, efforts to reduce the usage of fossil fuels and research on renewable energy are also increasing. Among the various renewable energy harvesting techniques, the floating offshore wind turbine has several advantages. Compared to other technologies, it has fewer installation limitations due to interference with human activity. Additionally, a large wind turbine farm can be constructed in the open ocean. Therefore, it is important to conduct motion analysis of floating offshore wind turbines in waves during the initial stage of conceptual design. In this study, a frequency motion analysis was conducted on a semi-submersible type floating offshore wind turbine. The analysis focused on the effects of varying trim on the motion characteristics. Specifically, motion response analysis was performed on heave, roll, and pitch. Natural period analysis confirmed that changing the trim angle did not significantly affect the heave and pitch motions, but it did have a regular impact on the roll motion.

**Key words** : floating offshore wind turbine, motion response analysis, natural period, motion RAOs, trim

### 1. 서 론

최근, 지구온난화로 인한 이상기후 현상이 나타나면서 탄소 배출에 관한 관심과 우려가 증가하였다. 이에 따라, 여러 국가에서 탄소 중립을 선언하였으며, 이를 이루기 위해 화석연료의 사용을 줄이고, 신재생에너지의 사용을 위한 연구개발에

노력하고 있다(Hannah, 2019; Lee, 2011). 다양한 신재생에너지 중 바람을 에너지원으로 하는 풍력발전은 육상풍력발전시스템과 해상풍력발전시스템이 있다. 육상풍력발전시스템의 경우 소음, 지리적 요인 등의 이유로 설치 위치에 따른 제한이 있다. 반면, 해상풍력발전시스템의 경우, 설치 위치에 따른 제한이 육상시스템보다 상대적으로 적으며, 해상이 육상보다 풍

† Corresponding author : 정희원, scshin@pusan.ac.kr 051)510-2525

\* 정희원, inhyuk0123@pusan.ac.kr 051)510-2754

\*\* 정희원, youngmyung.choi@pusan.ac.kr 051)510-2346

\*\*\* 정희원, ihan@hanwha.com 02)2129-7265

\*\*\*\* 정희원, orc@pusan.ac.kr 051)510-2754

\*\*\*\*\* 정희원, jinwok97@pusan.ac.kr 051)510-3277

량, 풍속 및 바람의 지속성이 우수하여 풍력 발전 시스템의 해상 설치가 주로 고려되고 있다.

해상풍력발전시스템에는 고정식시스템과 부유식시스템이 있다. 깊은 바다에서 경쟁력이 있는 부유식시스템은 오랜 기간 석유·가스 플랜트 등 타 분야에서 안정성을 증명하였다. 다만, 부유식시스템은 해상에 부유하고 있으며, 파랑, 바람, 조류로 대표되는 해상 환경에 민감한 특성을 가진다. 따라서, 복원성, 운동성능, 계류 성능 및 구조물의 피로 수명이 공학적으로 타당하게 설계되어야만 한다. 해상 환경에 따른 구조물의 안정성을 평가하기 위해, 파랑 중 운동성능 평가가 매우 중요하며, 운동성능 평가가 구조물의 형상 및 주요 제원을 결정하게 된다.

부유식 해상풍력발전기의 관심이 증가함에 따라 지속적으로 운동성능 분석에 관한 연구가 진행되고 있다. Han, I. S.의 연구에서는 반잠수식 해상풍력발전기의 운동 및 구조해석, 피로해석을 수행하여 피로성능을 검증하였다(Han et al., 2023). Han, W.S.의 연구에서는 5MW급 Spar, TLP 형식의 부유식 해상풍력발전기를 대상으로 6자유도 운동이 구조적으로 미치는 영향을 분석하였다(Han et al., 2019).

본 연구에서는 부유식시스템 중 반잠수식 해상풍력발전기를 연구 모델로 선정하였다. 모델의 허용 종경사각은  $-1.5^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$ 로 설정되어 있다. 종경사각 변화가 반잠수식 해상풍력발전기의 운동성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 주파수 영역 운동 해석과 운동 응답 분석을 실시하였다. 운동응답 분석을 위해, 먼저 허용 종경사각을 모두 포함하도록 약간 넓은 범위인  $-2.0^{\circ} \sim 2.0^{\circ}$ 에서 종경사각 조건을 변경하여 각각에 대한 주파수 영역 운동해석을 수행하였다. 이후, 운동특성을 나타내는 운동응답연산자(Motion Response Amplitude Operators; Motion RAOs)를 도출하고, 고유 주파수를 분석하여 각각의 종경사각 조건에 따른 결과를 분석하였다. 반잠수식 해상풍력발전기의 운동성능 해석에는 DNV Sesam(DNV GL AS, 2018)을 이용하였다.

## 2. 반잠수식 해상풍력발전기 제원 및 해석조건

### 2.1 형상 및 주요 제원

연구에 사용된 반잠수식 해상풍력발전기는 블레이드의 직경이 120m인 15MW으로 Kriso에서 설계한 모델이다. 형태는 Fig. 1과 같으며, Table 1에는 주요 제원을 표기하였다. 모델은 Tower, Top brace, Column, Pontoon으로 구성되어 있다. 하부구조물은 Top brace, Column과 Pontoon이 포함되며, 정삼각형 형상이다. 상부구조물로부터 오는 하중을 효과적으로 지지하기 위해 Column 상부는 세 개의 Top brace로 연결된 구조를 갖는다. Pontoon과 Column의 연결부에는 Heave plate가 설치되어 있어, Heave 운동을 저감하는 데 목적이 있다.

반잠수식 해상풍력발전기의 흘수는 15m이며, 경하중량은

$7.294 \times 10^6 \text{kg}$ 이다. Turbine, Blade 등 Tower 상부 구조물의 질량은 무게 중심과 관성 반경에 고려하였다. Fig. 2는 계류선 배치, Table 2는 계류선에 작용하는 x, y, z축방향 장력을 정리한 표이다(Han et al., 2023)

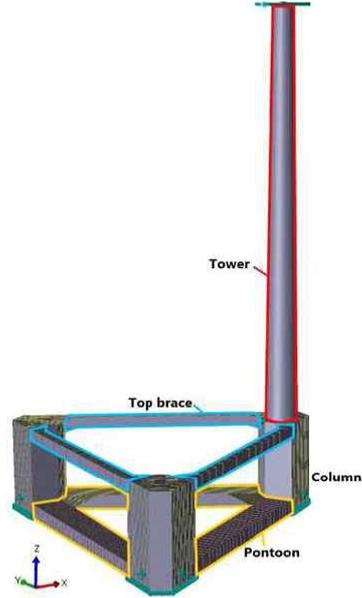


Fig. 1 Schematic view on the semi-submersible type floating offshore wind turbine

Table 1 Principal dimensions of floating offshore wind turbines

Item	Value [m]
Tower height	130.00
Top brace length	60.00
Top brace width	4.50
Top brace height	3.50
Column length	12.75
Column corner length	5.84
Column height	29.00
Pontoon length	60.00
Pontoon width	9.00
Pontoon height	4.50

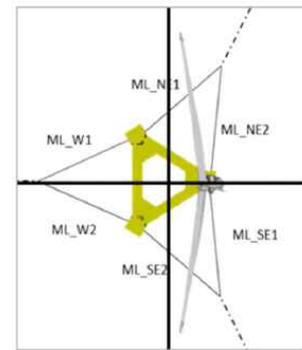


Fig. 2 Mooring line

Table 2 Mooring stiffness at neutral position

Line	$k_x$ (kN/m)	$k_y$ (kN/m)	$k_z$ (kN/m)
ML_NE1	43	92	18
ML_NE2	4	173	18
ML_SE1	4	174	18
ML_SE2	42	92	18
ML_W1	236	4	18
ML_W2	236	4	18

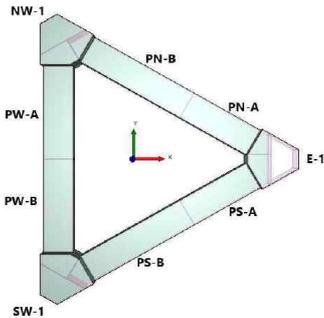


Fig. 3 Configuration of ballast tanks

### 2.2 밸러스트 탱크

밸러스트 탱크는 Pontoon과 Column 하부에 설치되어 있다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯, Pontoon 하나에는 두 개의 밸러스트 탱크가 설치되어 있다. E-1 탱크 상부에는 타워가 설치되어 있으므로, NW-1, PW-A, PW-B, SW-1 탱크에는 평형수가 가득 차 있도록 설정하였으며, 나머지 탱크는 종경사각에 맞추어 흡수와 무게중심을 고려해 자동으로 채워지도록 설정하였다. 평형수는 해수로, 밀도는  $1,025\text{kg/m}^3$ 이다.

### 2.3 복원성

반잠수식 해상풍력발전기를 비롯한 부유식 구조물에 대한 정적 안정성 평가가 필요하다. 정적 안정성은 부유체가 횡동요 및 종동요를 가질 때, 정적 평형 상태로 돌아갈려는 성질을 일컫는다. 복원성 평가를 통해 정적 안정성을 점검할 수 있다. 이러한 이유로, 초기설계 단계에서는 운동성능보다 복원성 평가에 중점을 둔다. 따라서, 운동응답 분석에 앞서 부유체의 비손상 복원성을 평가하였다.

복원성 평가 기준은 국제해사기구 IMO의 2008 IS Code, General Criteria(IMO, 2008)를 적용해 평가하였다. 반잠수식 해상풍력발전기는 x축 종방향 길이와 y축 횡방향 길이가 비슷하므로 횡경사각에 따른 복원성뿐만 아니라 종경사각에 따른 복원성 또한 평가하였다. Fig. 4는 횡경사각과 종경사각에 따른 GZ-Curve이며, General Criteria에 따른 복원성 평가 기준을 모두 만족하였음을 확인하였다.

### 2.4 대상 해역

반잠수식 해상풍력발전기는 울산 앞바다 60km 해상(35.469N, 130.026E 부근)에 설치하는 것으로 가정하였다.

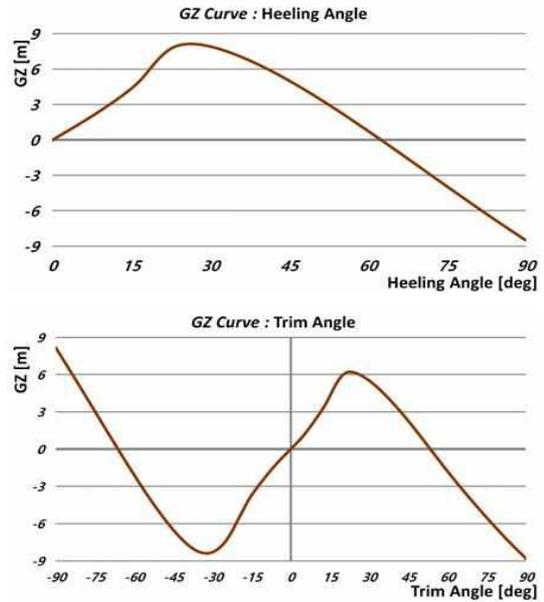


Fig. 4 GZ Curves

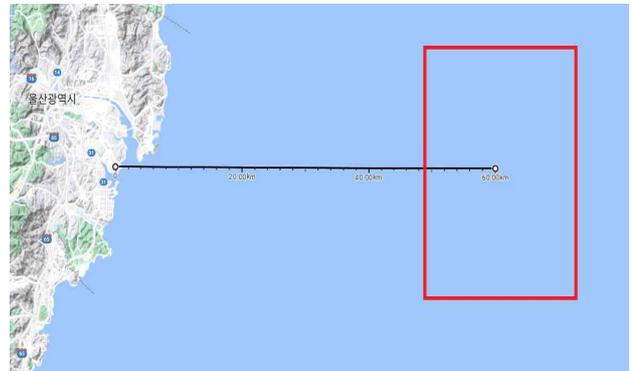


Fig. 5 Location of floating offshore wind turbine farm

해역의 평균 수심은 약 137m이다. 본 연구에서는 주파수 영역 규칙과 해석을 수행하였으므로, 수심 이외의 해상 조건은 적용하지 않았다. Fig. 5은 대규모 반잠수식 해상풍력발전기 단지가 설치되는 해역의 위치를 표시한 그림이다. 울산 앞바다로 선정한 이유로는 먼 바다에 설치되므로 소음 및 진동으로 인한 민원 발생 가능성이 낮으며, 발전소 밀집 지역과 근접하여 대용량 전력 연계가 용이하다(Choi, 2021).

### 2.5 주파수 영역 운동해석 조건

반잠수식 해상풍력발전기 하부구조물 형상은 x축을 기준으로 대칭이다. 따라서 입사파 파향(Wave direction)은  $0^\circ$ 에서  $180^\circ$  사이를  $30^\circ$  간격으로 나누어 총 7개의 파향을 선정하였다. 타워가 설치된 방향을 선수, 반대 방향을 선미로 가정하면,  $0^\circ$ 는 선미에서 선수 방향으로,  $180^\circ$ 는 선수에서 선미 방향으로 진행되는 파향을 나타낸다. 주파수 영역 운동해석을 수

행하기 위해 주파수는 0.01rad/s에서 2.00rad/s까지 0.01rad/s 간격으로 총 200개의 주파수를 설정하였다. 2.00rad/s 이상의 주파수에서는 운동응답 값이 0으로 수렴한 것을 확인한 후, 최종 주파수 범위를 설정하였다. 종경사각은 밸러스트 탱크의 평형수를 조절하여 무게중심을 옮김으로써 조절하였다. 종경사각은 2.0°에서 -2.0°까지 0.5°간격으로 총 9개를 설정하였다. 2.0°는 선수방향으로 기울어짐을 의미하며, -2.0°는 선미방향으로 기울어짐을 의미한다.

### 3. 주파수 영역 운동해석

#### 3.1 부유체 6자유도 운동

유체정역학적 복원력, 부가질량력, 파랑 감쇠력 및 파랑 기진력을 이용해 나타난 부유체의 6자유도 운동방정식은 식 (1) 과 같다(Yeom, 2012).

$$\sum_{k=1}^6 \left[ -\omega^2 (\Delta_{jk} + A_{jk}) + i\omega B_{jk} + C_{jk} \right] \bar{\eta}_j = F_{L,j} + F_{D,j} \quad (1)$$

여기서  $j$ 는 1부터 6까지이며, 6자유도 운동모드를 나타낸다. 1은 Surge(전후동요), 2는 Sway(좌우동요), 3은 Heave(상하동요), 4는 Roll(횡동요), 5는 Pitch(종동요), 6은 Yaw(선수동요)를 나타낸다.  $\omega$ 는 각 주파수,  $A$ 는 부가질량계수,  $B$ 는 감쇠계수,  $C$ 는 복원력계수,  $\bar{\eta}_j$ 는 주파수 영역에서의 운동 진폭 크기를 의미한다.  $F_{L,j} + F_{D,j}$ 는 파랑 기진력을 나타낸다.

파랑 중에 운동하는 모든 부유체는 표면에 유체력이 작용한다. 유체력은 잠수 표면적에 대한 압력 적분으로 얻을 수 있고, 유체 압력은 식 (2)와 같이 선형화된 베르누이 방정식 (Linearized Bernoulli's equation)으로부터 구할 수 있다.

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \rho g z \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\Phi$ 는 속도 포텐셜을 의미한다.  $-\rho g z$ 는 정수압을, 나머지 항은 유체동역학적 압력을 나타낸다. 식 (2)를 기반으로, 선형화된 유체력은 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, 식 (4)와 같이 정수압 항과 유체동역학 항으로 나눌 수 있다.

$$F_{H,j} = - \iint_s P n_j ds \quad (3)$$

$$F_{H,j} = F_{HS,j} + F_{HD,j} \quad (4)$$

여기서  $F_{HS,j}$ 는 정수압 항,  $F_{HD,j}$ 는 유체동역학 항으로, 각

각을 식 (5)와 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$F_{HS,j} = \rho g \iint_s z n_j ds \quad (5)$$

$$F_{HD,j} = \rho \iint_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} n_j ds \quad (6)$$

#### 3.2 복원력계수

부유체에 작용하는 복원력은 부력과 중력이 변화하여 발생한다. 평균 정수압의 적분은 부유체의 무게와 상쇄되며, 부유체의 운동에 따른 정수압과 중력의 동적 변화에 따라 복원력이 발생한다. 이를 복원력계수와 부유체 운동을 이용해 식 (7) 과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{HS,k} + F_{g,k} &= F_{HS,k}^{(0)} + F_{g,k}^{(0)} + \Delta F_{HS,k} + \Delta F_{g,k} \\ &= \Delta F_{HS,k} + \Delta F_{g,k} \\ &= - \sum_{j=1}^6 C_{jk} \bar{\eta}_k e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $C_{jk}$ 는 복원력계수로,  $k$ 축 방향의 단위 변위에 대한  $j$ 축 방향으로의 부유체에 작용하는 힘을 나타낸다.  $\bar{\eta}_k$ 는  $k$ 축 방향에 대한 부유체 운동을 나타낸다. 복원력은 식 (8)와 같이 6자유도 운동에 대한 행렬로 표현할 수 있다. Heave, Roll, Pitch 운동에 대한 복원력계수  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{55}$ 는 식 (9), (12)와 같이 나타낼 수 있다. Roll축 단위 변위에 대한 Heave 운동 방향으로의 부유체에 작용하는 복원력계수는 식 (10)와 같이, Pitch축 단위 변위에 대한 Heave 운동 방향으로의 부유체에 작용하는 복원력계수는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. Pitch축 단위 변위에 대한 Roll 운동 방향으로의 부유체에 작용하는 복원력계수는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & C_{35} & 0 \\ 0 & 0 & C_{43} & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & C_{53} & C_{54} & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

with

$$C_{33} = \rho g A_{wp} \quad (9)$$

$$C_{34} = C_{43} = \rho g A_{wp} y_F \quad (10)$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho g A_{wp} x_F \quad (11)$$

$$C_{44} = \rho g \nabla \overline{GM}_T, \quad C_{55} = \rho g \nabla \overline{GM}_L \quad (12)$$

$$C_{45} = C_{54} = - \int_{A_{wp}} xy dA \quad (13)$$

$\overline{GM}_T$ 와  $\overline{GM}_L$ 은 각각 횡방향 메타센터 높이와 종방향 메타

센터 높이를 나타낸다.

### 3.3 유체동역학적 힘

유체동역학적 힘을 계산하기 앞서, 유동장 내의 전체 속도 포텐셜을 구할 필요가 있다. 전체 속도 포텐셜은 정상 성분 포텐셜과 비정상 성분 포텐셜의 합으로 나타낸다. 식 (14)은 전체 속도 포텐셜을 나타낸 식이다.

$$\Phi(x,y,z,t) = \left[ (\phi_I + \phi_D) - \sum_{j=1}^6 \phi_j \bar{\eta}_j \right] e^{-i\omega t} \quad (14)$$

$\Phi$ 는 전체 유동 속도 포텐셜,  $\phi_I$ ,  $\phi_D$ ,  $\phi_j$ 는 입사파, 산란,  $j$  운동 모드에 대한 단위 속도 포텐셜을 의미한다. 식 (6)에 식 (14)을 대입함으로써, 유체동역학 힘을 식 (15)과 같이 구할 수 있다.

$$F_{HDj} = \sum_{k=1}^6 \left[ -i\omega\rho \int_S \phi_k n_j ds \right] \bar{\eta}_k e^{-i\omega t} = F_{Lj} + F_{Dj} + F_{Rj} \quad (15)$$

식 (15)에서  $F_{Rj}$ 는 방사력(Radiation force)이며, 부유체가 정수 중 각각의 모드로 운동할 때, 부유체에 작용하는 힘을 나타내며, 부가질량력과 파랑 감쇠력으로 나눌 수 있다. 식 (16)는 방사력에 대한 식이다.

$$F_{Rj} = \sum_{k=1}^6 (\omega^2 A_{jk} - i\omega B_{jk}) \bar{\eta}_k e^{-i\omega t} \quad (16)$$

여기서  $A_{jk}$ 는  $k$ 방향 단위진폭 운동으로 인한  $j$ 방향 부가질량,  $B_{jk}$ 는  $k$ 방향 단위진폭으로 인한  $j$ 방향 파랑 감쇠를 나타낸다. 선박 및 해양구조물로 대표되는 좌우 대칭 구조물에 대해, 종방향 운동(Surge-Heave-Pitch) 및 횡방향 운동(Sway-Roll-Yaw)이 연성(Coupling)되어 각각 부가질량 및 파랑 감쇠 항이 나타난다.

## 4. 운동해석 결과

### 4.1 유체역학적 특성값

3장에서 도출한 식을 바탕으로 운동해석을 수행하여, 부유체 운동방정식의 유체역학적 특성값인 부가질량력, 파랑 감쇠력, 파랑 기진력을 도출하고, 이를 이용하여 Heave, Roll, Pitch 운동에 대한 Motion RAOs를 도출하였다. 운동해석은 DNV Sesam의 HydroD(DNV GL AS, 2017a)를 이용하였으

며, 주파수 영역 운동해석을 위해 Wadam(DNV GL AS, 2017b)을 사용하였다. 이후, 유체역학적 특성값을 이용하여 고유 주파수를 도출하고, 비교하여 종경사각에 따른 운동특성 변화를 분석하였다. 종방향, 횡방향 운동에 대한 부가 질량 계수 그래프를 Fig. 6, 7에 나타내었고, 파랑 감쇠계수는 Fig. 8, 9 및 파랑기진력은 Fig. 10, 11에 나타내었다.

### 4.2 운동 고유 주파수 분석

부유식 해상 구조물은 질량-감쇠-스프링 시스템으로 이해될 수 있으며, 고유 주파수를 가진다. 이 때, 입사파의 가진 주파수가 부유체 운동의 고유 주파수와 일치할 경우, 공진이 발생하여, 구조물의 운동이 크게 증가할 수 있다. 파랑 감쇠항을 제외하고, 부유식 해상 구조물의 운동 고유 주파수는 복원력과 부가질량력을 이용하여 아래와 같은 식으로부터 추정할 수 있다(Thor, 2011).

$$\omega_i = \sqrt{\frac{C_{ii}}{M + A_{ii}(\omega_i)}} \quad (17)$$

여기서  $\omega_i$ 는  $i$ 모드에서의 고유 주파수를 의미한다.  $i$ 가 3, 4, 5가 아닐 때에는 Freely Floating Body에서 수평면 운동에 대한 복원력이 없으므로 모두 0에 수렴한다. 따라서, 고유 주파수는 Heave, Roll, Pitch 운동을 제외하면 무한대에 수렴한다. 위 식을 이용하여 도출한 Heave, Roll, Pitch 운동의 고유 주기 및 고유주파수는 종경사각에 따라 분류하여 Table 3에 정리하였다. 실제 고유 주파수 산정을 위해 파랑 감쇠를 고려한 고유 주파수는 DNV Sesam의 Postresp에서 해석 결과 후처리를 통해 도출하였다. 파랑 감쇠를 고려한 고유 주기 및 고유 주파수는 Table 4에 정리하였다. 감쇠계수가 적용되면 주기 및 주파수가 일부 수정될 수 있지만, 경향성에는 크게 영향을 미치지 않는다. 따라서, Roll의 고유 주파수와 부가질량 사이의 관계를 분석하였다.

결과를 분석하면 Heave, Pitch 운동의 경우 종경사각에 따른 고유 주파수 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 반면, Roll 운동은 고유 주파수의 변화를 뚜렷이 찾아볼 수 있다. 종경사각이 2.0°인 경우, 고유 주파수는 가장 작게 나타나며, -2.0°인 경우 가장 크게 나타나고, 종경사각이 -2.0°에 가까워질수록 고유 주파수는 커진다. 부가질량은 부유체와 접해있는 유체력의 동적인 효과를 질량으로 환산하여 부유체에 가산되는 가상의 질량을 의미한다. Trim이 감소함에 따라, 선미부의 접수면적이 줄어들고, 선수부의 접수면적이 증가함을 Fig. 12에서 확인할 수 있다. 부유체가 동일한 횡동요 운동을 수행한다고 가정했을 때, 선미부 접수면적의 회전반경이 크기 때문에, 유체력에 의한 부가질량이 증가함을 예측할 수 있고, Fig. 7의  $A_{44}$ 의 경향에서 Trim 변화에 따른 질량 증가가 확인된다. 따라서, Trim의 변화가 부가 질량 변화 및 횡동요의 고유 주파

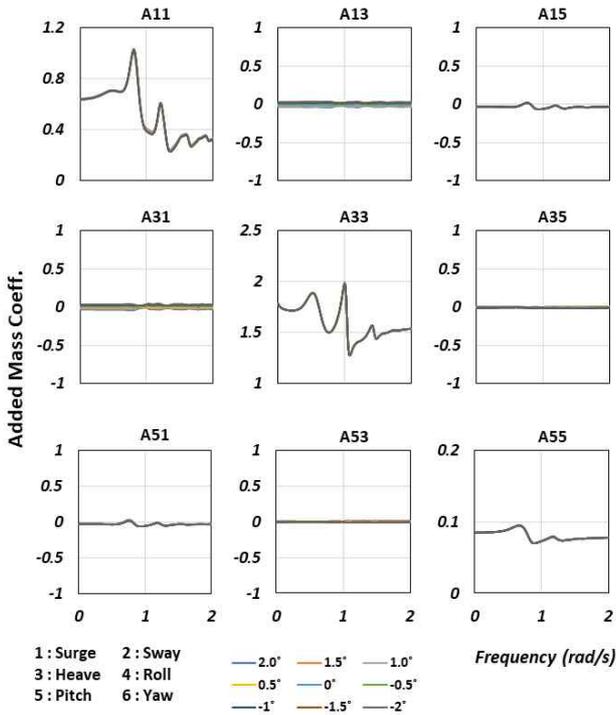


Fig. 6 Added mass coefficient of surge, heave, pitch motion

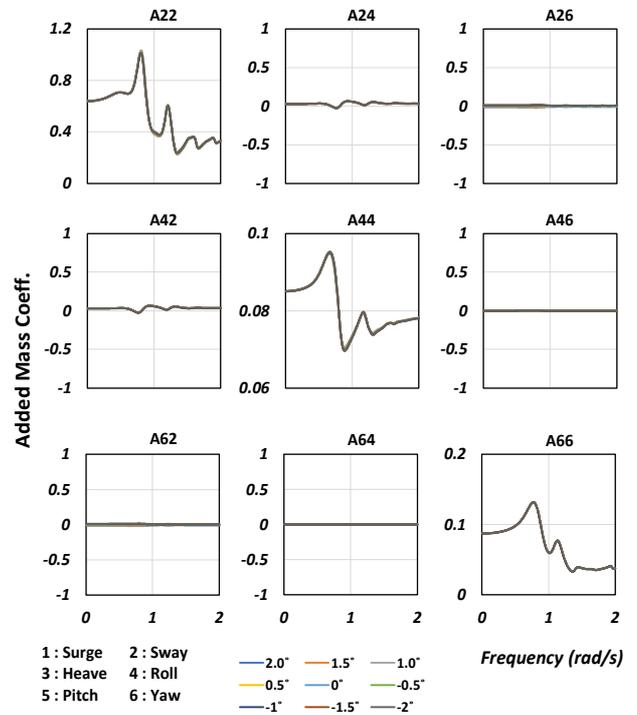


Fig. 7 Added mass coefficient of sway, roll, yaw motion

수 변화를 가져옴을 확인할 수 있다. 일반적인 해양파의 주기가 6초에서 18초 사이의 주기를 가지므로, 부유식 구조물의 고유 주파수가 해당 주기 영역과 멀어질 때, 해당 운동이 저감되는 효과를 가진다.

따라서, 종경사각이 2.0°일 때의 물의 동적인 효과가 -2.0°일 때보다 고유 주파수가 크므로, 횡동요 운동성능이 향상될 것을 기대할 수 있다.

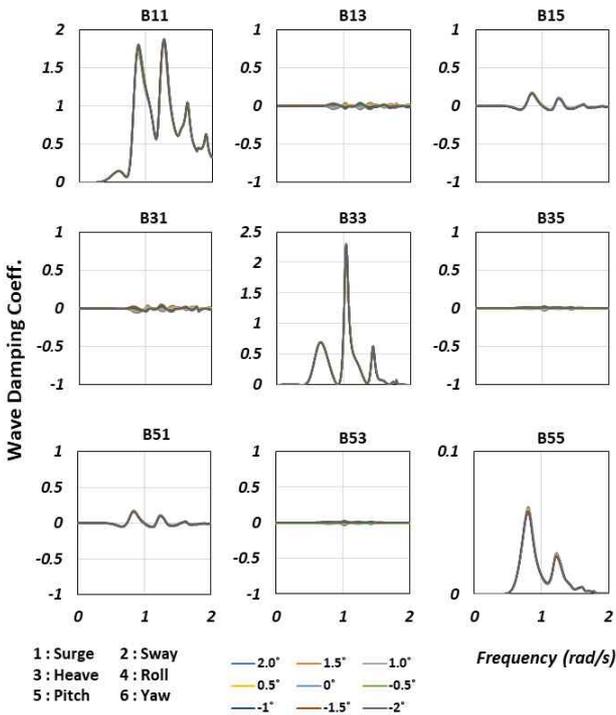


Fig. 8 Wave damping coefficient of surge, heave, pitch motion

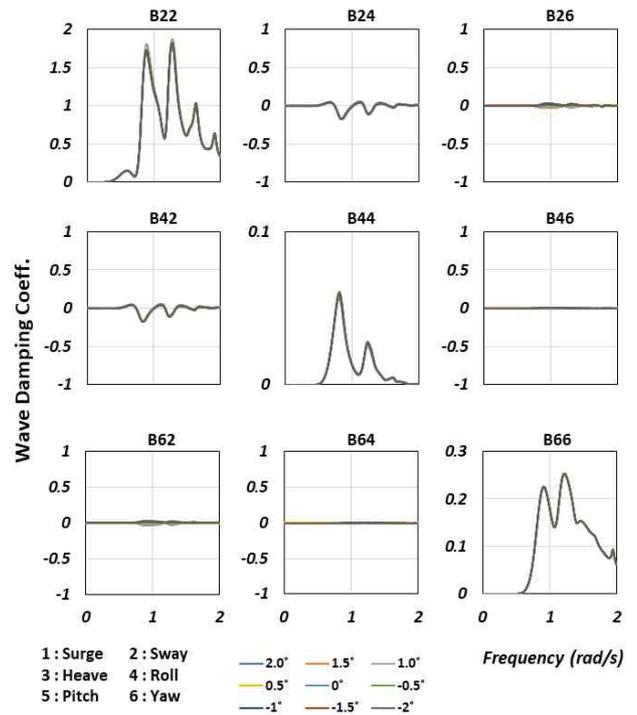


Fig. 9 Wave damping coefficient of sway, roll, yaw motion

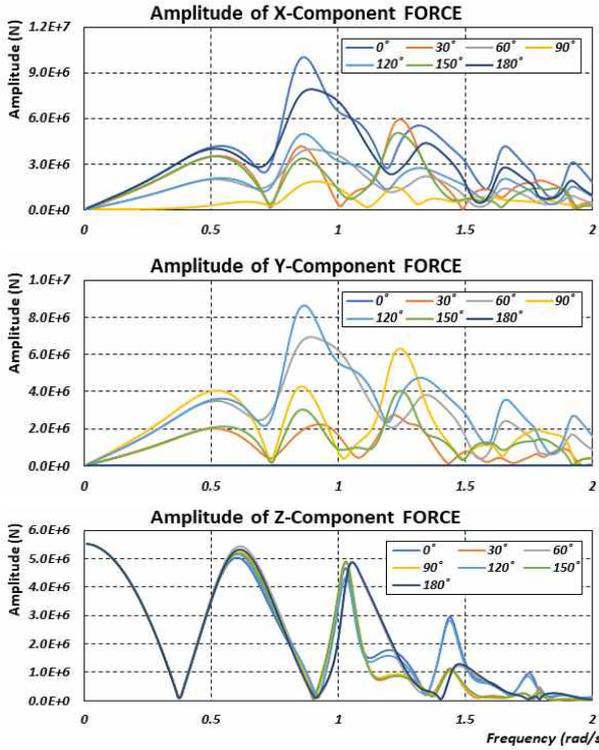


Fig. 10 Wave exciting force in surge, sway and heave motions

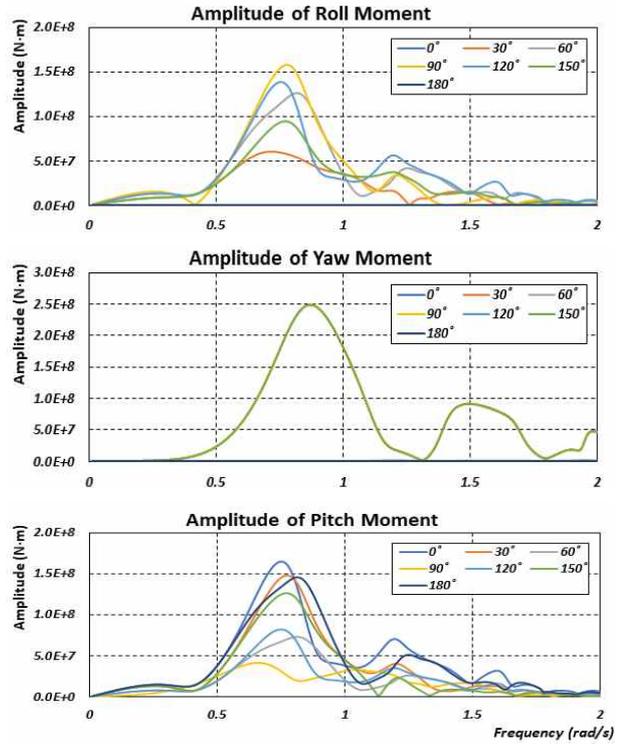


Fig. 11 Wave exciting moment in roll, pitch and yaw motions

Table 3 Natural period and frequency, exclude damping

Trim (deg)	Period(s)			Frequency(rad/s)		
	Heave	Roll	Pitch	Heave	Roll	Pitch
2.0	17.714	27.893	28.007	0.355	0.225	0.224
1.5	17.715	27.853	28.056	0.355	0.226	0.224
1.0	17.718	27.813	28.097	0.355	0.226	0.224
0.5	17.716	27.767	28.138	0.355	0.226	0.223
0	17.717	27.721	28.168	0.355	0.227	0.223
-0.5	17.717	27.670	28.187	0.355	0.227	0.223
-1.0	17.717	27.494	27.979	0.355	0.229	0.225
-1.5	17.716	27.435	27.981	0.355	0.229	0.225
-2.0	17.714	27.353	27.962	0.355	0.23	0.225

Table 4 Natural period and frequency, include damping

Trim (deg)	Period(s)			Frequency(rad/s)		
	Heave	Roll	Pitch	Heave	Roll	Pitch
2.0	18.34	28.254	32.242	0.343	0.222	0.195
1.5	18.345	28.19	32.317	0.343	0.223	0.194
1.0	18.348	28.122	32.381	0.342	0.223	0.194
0.5	18.35	28.051	32.436	0.342	0.224	0.194
0	18.35	27.977	32.479	0.342	0.225	0.193
-0.5	18.35	27.9	32.512	0.342	0.225	0.193
-1.0	18.348	27.615	32.199	0.342	0.228	0.195
-1.5	18.345	27.529	32.205	0.343	0.228	0.195
-2.0	18.341	27.435	32.177	0.343	0.229	0.195

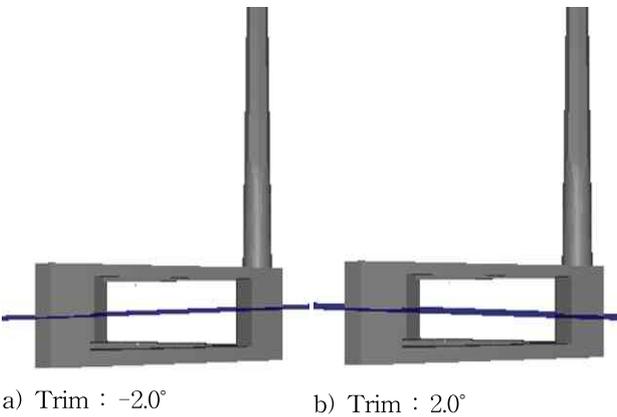


Fig. 12 Comparison of inundation area by trim angle

### 4.3 Motion RAOs

주파수 영역 운동해석으로부터 구한 유체역학적 특성값을 바탕으로, 운동응답연산자 Motion RAOs를 도출하였다. 부유식 구조물의 Motion RAOs는 식 (18)으로 정의된다.

$$\bar{\eta}(\omega) = \frac{F_I(\omega) + F_D(\omega)}{-\omega^2[M + A(\omega)] - i\omega B(\omega) + C} \quad (18)$$

여기서  $M$ 은 부유체 질량,  $A, B, C$ 는 각각 앞서 구한 부가질량계수, 감쇠계수, 복원력계수의 행렬을 의미한다.  $\bar{\eta}$ 는 부유체 운동진폭을 나타내며, 병진운동의 경우 단위는 m, 회전운동의

경우 단위는 rad(라디안)이다.  $\eta_0$ 는 입사파 파고(Incident wave amplitude)를 나타낸다. Wadam 운동해석 결과로부터 종경사각과 파향에 따른 Heave, Roll, Pitch의 Motion RAOs를 도출하였다. Fig. 13, 14, 15는 각각 Heave RAO, Roll RAO, Pitch RAO를 나타낸 그래프이다. Fig. 13, 14, 15에서 나타내는 Heave, Roll, Pitch 운동의 피크 주파수는 파랑 감쇠를 적용한 고유 주파수인 Table 4와 일치함을 확인하였다. Heave RAO에서는 파향과 종경사각에 따른 운동응답 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았음을 확인하였다. Roll RAO에서는 파향에 따른 분석 결과, 종경사각이 0°일 때 기준으로 파향 90°인 경우 피크 응답이 0.0474rad/s로 응답이 가장 컸으며, 0° 및 180°인 경우 응답이 가장 작게 나타났다. 반대로 Pitch RAO에서는 파향에 따른 분석 결과, 종경사각이 0°일 때 기준으로 파향이 180°인 경우 피크 응답이 0.0551rad/s로 가장 크게 나타났으며, 90°인 경우 가장 작게 나타났다. 이러한 결

과가 나타난 주요 원인으로는 운동 방향과 파향이 일치하여, 파랑 하중이 큰 운동을 유발한 것으로 볼 수 있다. 종경사각에 따른 비교 결과, Heave RAO 및 Roll RAO의 평균 응답은 종경사각에 따른 큰 변화를 나타내지 않았다. Roll 운동의 경우, 종경사각에 따른 변화를 명확하게 보기 위하여 파향 90°를 기준으로 분석하였다. Roll 운동응답 평균은 종경사각이 -2.0°일 때 0.00345rad/m, 2.0°일 때 0.00321rad/m로, -2.0°에 가까워질수록 커졌다. 고유 주파수 분석을 통해 종경사각이 -2.0°에 가까워질수록 고유 주파수가 커졌음을 확인하였다. 주파수 영역 규칙과 해석에 적용되는 파랑은 단위 파랑으로, 주파수는 1rad/s이다. 종경사각이 -2.0°일 때 단위 파랑의 주파수에 가까워진다. 파랑의 주파수와 가까워질수록 구조물과 파랑의 공진 주파수에 가까워지므로, 더 큰 운동응답을 보인다. 따라서 단위 파랑에서는 종경사각이 -2.0°일 때의 운동응답이 2.0°일 때보다 더 큼을 설명할 수 있다.

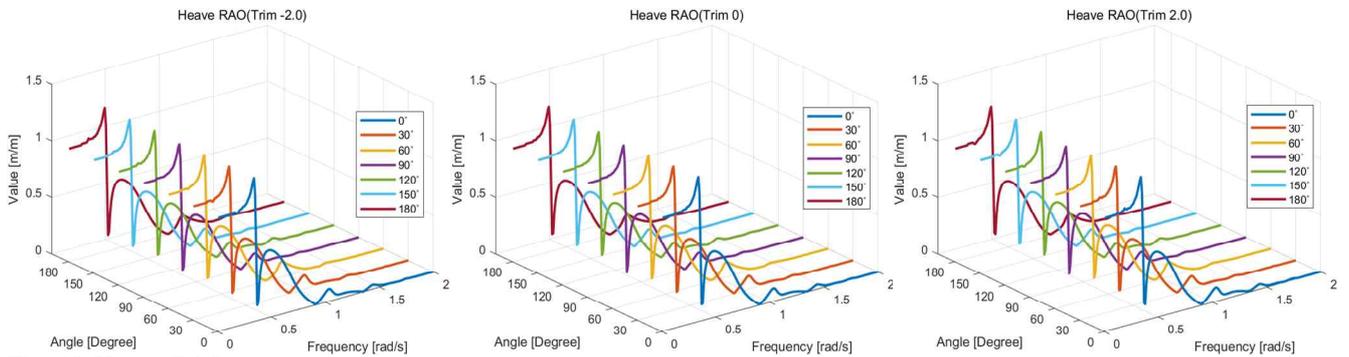


Fig. 13 Heave RAO

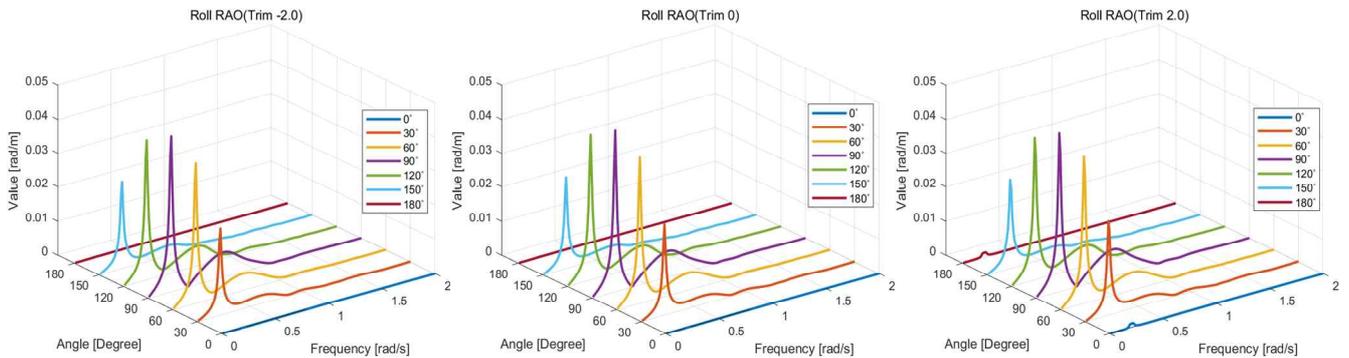


Fig. 14 Roll RAO

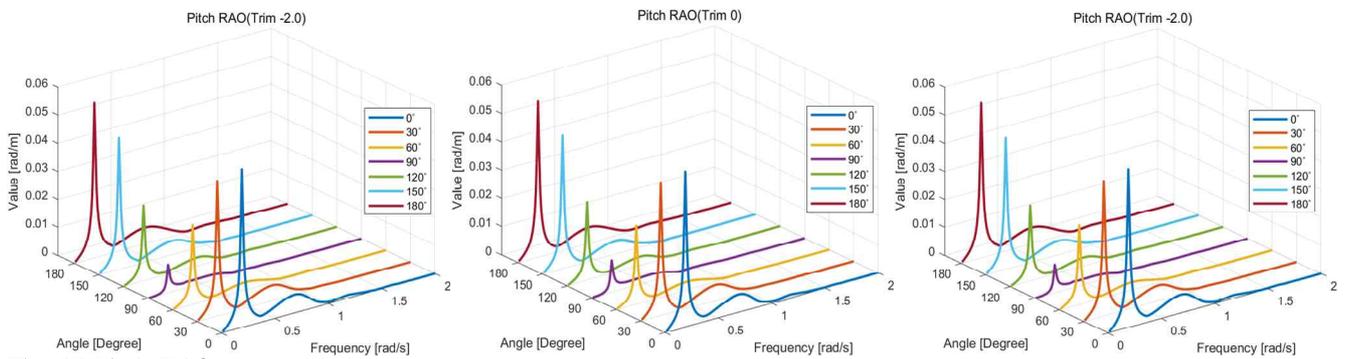


Fig. 15 Pitch RAO

## 5. 결 론

본 연구는 반잠수식 해상풍력발전기에 대하여 주파수 영역에서의 운동성능 분석을 수행하였다. 유체역학적 특성값인 부가질량력, 파랑 감쇠력, 파랑 기진력을 도출하였다. 이를 바탕으로 Motion RAOs 및 고유 주파수, 고유 주파수를 도출하였다. 고유 주파수는 파랑 감쇠를 고려한 고유 주파수와 파랑 감쇠를 고려하지 않은 고유 주파수를 도출하였으며, 파랑 감쇠를 고려한 고유 주파수와 Motion RAOs의 피크 주파수를 비교하여 검증하였다. 고유 주파수 분석을 통해 종경사각이 2.0° 에서 -2.0°로 갈수록 Roll 운동의 고유 주파수는 28.254초에서 27.435로 짧아짐을 확인하였다. 이는 종경사각이 작아짐에 따른 하부 형상 변화가 부가질량력 감소에 영향을 준 것으로 판단된다. 반면, Heave, Pitch 운동은 Roll 운동에 비하여 종경사각의 변화에 따른 운동응답 변화가 상대적으로 작게 나타났다. x축을 기준으로 회전하는 Roll 운동은 침수표면적의 변화와 이로 인한 부가질량의 변화가 크게 나타난다. y축을 기준으로 회전하는 Pitch 운동 및 상하운동을 하는 Heave 운동은 침수표면적의 변화가 부가질량에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 상대적으로 종경사각의 변화에 따른 Heave, Roll 운동응답의 변화가 작게 나타난 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시한 종경사각에 따른 고유 주파수는 불규칙파 시간영역 운동응답에서의 Zero crossing Period와 비교하여, 실제 해상상태에서 공진의 위험이 발생하는지 확인할 필요가 있다. 또한, Motion RAOs, 파랑 스펙트럼으로부터 응답스펙트럼을 도출하여 해당 Zero crossing에서의 에너지 밀도를 확인할 필요가 있다. 추후 연구로 반잠수식 해상풍력발전기에 대하여, 종경사각에 따른 불규칙파 시간영역 운동응답 분석을 수행하여 Zero crossing, RMS 등 주요 설계 인자를 도출하고, 분석하는 연구를 수행하고자 한다.

## 후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0023684, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)

## References

- [1] Choi S. Y., Moon B. S. and Kim T. G.(2021), "The Maritime Environment Impact Assessment of Offshore Floating Wind Power in Ulsan - A Focus on Habitat Equivalence Analysis" Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 45, No. 3, pp. 130-137.
- [2] DNV GL AS.(2017a), Sesam User Manual - HydroD Wave load & stability analysis of fixed and floating structures.
- [3] DNV GL AS.(2017b), Sesam User Manual - Wadam Wave Analysis by Diffraction and Morison theory.
- [4] DNV GL AS.(2018), Sesam User Manual - Sesam Manager Managing Sesam Workflow.
- [5] Han, I. S., Lim, C. O. and Kim, K. H.(2023), "Fatigue Performance Analysis for FOWT in the Basic Design Stage", Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, Vol.26, No.1, pp. 1-9.
- [6] Han, W. S., Heon, M. N. and Lee, S. G.(2019), "Aerodynamics and Structural Dynamics of Floating Offshore Wind Turbine under Different Degrees of Freedom", Journal of New & Renewable Energy, Vol.15, No.4, pp. 11-20.
- [7] Hannah, E. M.(2019), "Renewables 2019 Global Status Report". Renewables 2019 Global Status Report.
- [8] IMO(2008), Adoption of the International Code on Intact Stability, MSC.267(85).
- [9] Lee, S. B.(2011), "A Study on the Environment Assessment of Wind Farm".
- [10] Thor, I. F.(2011), Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control.
- [11] Yeom, D. J.(2012), Ship Motion and Manoeuvrability.

Received 25 January 2024

Revised 02 February 2024

Accepted 05 June 2024