한국해양환경·에너지학회지
J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy
Vol. 28, No. 3, 150-155, August 2025

https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2025.28.3.150
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

Original Article

계측 기준점 변환에 따른 해상풍력 하부 구조물 운동응답비교: 상용 프로그램 적용 사례

박종서[1] · 허상환[2] · 구원철[3,†]
[1]인하대학교 조선해양공학과 대학생
[2]인하대학교 조선해양공학과 전임연구원
[3]인하대학교 조선해양공학과 교수

Comparative Analysis of Offshore Wind Substructure Motions Based on Reference Point Transformations: Case Study with Commercial Software

Jongseo Park[1], Sanghwan Heo[2], and Weoncheol Koo[3,†]
[1]Undergraduate student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea
[2]Research Associate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea
[3]Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

요 약

다양한 해상 풍력 발전 플랫폼(5MW 급 Spar 플랫폼, 15MW 급 반잠수식 플랫폼 등)의 파랑 중 운동 성능을 계산하기 위해서는 검증된 해양 유체동역학 상용 프로그램인 AQWA 나 WAMIT을 이용할 수 있다. 이러한 선형 포텐셜 유동 기반의 주파수 영역 프로그램들은 경계요소법(Boundary Element Method)을 사용하여 대상 구조물의 침수된 표면을 격자 모델링하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 AQWA 프로그램으로 계산된 OC3 Spar 형 구조물의 해양동역학 계수들과 운동 응답이 WAMIT의 계산 결과와 상이한 점을 확인하고 그 이유를 변환 수식과 해석 결과를 통해 분석하였다. 동일한 모델과 환경 조건을 적용하여 플랫폼의 부가질량(Added mass), 방사감쇠계수(Radiation damping coefficient), 파랑하중 및 운동응답(RAO) 결과를 비교하였다. 플랫폼의 병진 운동으로 인한 부가질량과 방사감쇠계수는 차이가 없었으나, 회전운동으로 인한 계수들은 차이가 발생하였다. 또한, 병진 운동 RAO는 계측 기준점에 따라 두 프로그램 간에 차이가 발생하지만, 회전운동 RAO 결과는 계측 기준점이 상이함에도 불구하고 두 프로그램의 결과가 동일하였다. 이는 AQWA 계산 결과는 구조물의 무게중심을 기준점으로 계산하여 결과를 도출하지만, WAMIT는 무게중심을 기준으로 계산하지만, SWL(Still Water Level)을 기준으로 결과를 변환하여 보여주기 때문이었다. 이를 검증하기 위해, AQWA 계산 결과를 SWL로 변환하여 WAMIT 결과와 일치함을 확인하였다.

Abstract – Various hydrodynamic analysis tools, such as AQWA and WAMIT, are validated frequency-domain programs based on linear potential flow theory and are widely used to evaluate the motion performance of offshore wind turbine platforms, including 5 MW-class spar-type and 15 MW-class semi-submersible platforms. These tools employ the Boundary Element Method (BEM) to discretize the wetted surface of the structure and are generally expected to yield consistent results. In this study, discrepancies between the hydrodynamic coefficients and motion responses for an OC3 Spar-type platform computed using AQWA and those obtained from WAMIT were identified and analyzed using transformation formulas and comparative results. Using an identical structural model and environmental conditions, added mass, radiation damping coefficients, wave loads, and response amplitude operators (RAOs) were compared between the two programs. The added mass and radiation damping coeffi-

†Corresponding author: wckoo@inha.ac.kr

cients for translational motions were in good agreement between the two programs. However, notable differences were observed in the coefficients associated with rotational motions. Furthermore, RAOs for translational motions differed depending on the response reference point, whereas RAOs for rotational motions were consistent despite differences in reference locations. This discrepancy is attributed to the fact that AQWA outputs responses relative to the center of gravity of the platform, whereas WAMIT, though computing motions at the center of gravity, presents results referenced to the mean water surface. When the AQWA results were transformed to the water surface reference point, close agreement with WAMIT outputs was observed.

Keywords: Hydrodynamic Coefficients(유체동역학 계수), Response Amplitude Operator(응답 진폭 연산자), Frequency-domain Boundary Element Method(주파수영역 경계요소법), Reference Point(계측 기준점), Floating Offshore Wind Turbine(부유식 해상풍력 발전기)

1. 서 론

부유식 해상풍력 발전은 수심이 깊은 해역에서 양질의 풍력 에너지를 활용할 수 있고, 설치에 따른 환경 문제도 상대적으로 적기 때문에, 차세대 해상풍력 기술로 주목받고 있다(Musial & Butterfield[2004]). 특히 외해 지역은 상대적으로 큰 파랑하중으로 부유체의 동적 안정성과 발전 효율에 상당한 영향을 미치게 된다(Bashetty & Ozcelik[2021]). 따라서, 부유체의 정밀한 운동응답 특성을 파악하고 이를 설계에 반영하는 것이 필요하다. 일반적으로 부유체의 파랑 중 운동응답 해석은 오랫동안 활용되고 검증된 경계요소법(Boundary Element Method; BEM) 기반의 수치해석 기법이 널리 사용되었으며 대표적인 수치해석 프로그램으로는 WAMIT(Lee[1995]; Newman[2005]; WAMIT[2023])과 AQWA(ANSYS [2020])가 있다. 이 프로그램들은 선형 포텐셜 유동 이론을 바탕으로 부유체 주변의 유동장을 해석하고, 이를 통해 부유체의 부가질량, 방사감쇠계수, 파랑하중, 운동응답 함수(Response Amplitude Operator; RAO) 등을 산출할 수 있다.

그러나 각 프로그램은 유체동역학 계수와 운동응답을 계산하기 위한 계측 기준점(Reference Point)의 설정 방식이 상이하며, 이로 인해 동일한 부유체 모델이라 하더라도 해석 결과에 차이가 발생할 수 있다. 또한, 계측 기준점에 따른 부유체의 상이한 해석 결과는 다른 응용 프로그램의 결과에도 영향을 미치게 된다. 특히, 부유체의 각 방향에 대한 운동응답과 유체동역학 계수들은 계류선의 동적 해석을 위한 OrcaFlex(Orcina[2021])나 풍력발전기 해석 프로그램인 OpenFAST(NREL[2023])의 입력값으로 활용될 수 있기 때문에 입력값 산정에 주의가 필요하다. 따라서, 대표적인 해양유체동역학 프로그램들의 계측 기준점에 따른 유체동역학 계수들과 운동응답 결과에 대해 보다 체계적인 분석이 필요하지만, 아직까지 국내에서는 이에 대한 상세한 비교 연구가 충분히 수행되지 않았다.

본 연구에서는 Zabala *et al.*[2024]의 유체동역학 계수 변환 연구를 활용하여, 미국 에너지부 산하 국립재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory; NREL)에서 개발한 부유식 해상풍력 기초 구조물인 OC3 Spar 플랫폼(Jonkman[2010])을 대상으로 계측 기준점 위치 변화가 유체동역학 계수들과 운동응답에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 각 상용 프로그램의 계측 기준점 변경에 따른 병진운동과 회전운동의 유체동역학 계수들과 운동 응답의 변화와 특징을 비교하였다. 이를 통해 상용 프로그램의 수치해석 결과의 신뢰도 확보와 도출된 결과값의 정확한 해석 및 응용 프로그램에 활용하기 위해 고려해야 할 요소를 도출하고자 하였다.

2. 수학적 정식화

2.1 유체동역학 계수 및 운동 응답

본 연구에서 부유체의 유체동역학 계수(부가질량, 방사감쇠계수, 파랑하중)들과 운동 응답(RAO)은 유체동역학 상용 프로그램인 WAMIT과 AQWA를 사용하여 계산하였다(WAMIT[2023]; ANSYS [2020]). 두 프로그램은 선형 포텐셜 유동 이론을 바탕으로 한 주파수 영역 경계요소법(BEM)을 기반으로 개발되었다. 계산 영역의 유체장이 비점성, 비압축성, 비회전성이라고 가정하면 유동은 속도 포텐셜을 이용하여 묘사할 수 있다. 이 때, 시간 영역 속도 포텐셜은 식 (1)과 같이 표현되며, 계산 영역의 지배방정식은 식 (2)와 같이 라플라스 방정식으로 표현된다.

$$\Phi(\vec{X},t) = a_w \varphi(\vec{X}) e^{-i\omega t} \tag{1}$$

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial Z^2} = 0 \tag{2}$$

여기서 $\vec{X}(X,Y,Z)$는 부유체 표면 요소의 좌표 벡터, t는 시간, a_w는 입사파의 파고, φ는 복소 속도 포텐셜, ω는 입사파 주파수를 나타낸다. 복소 속도 포텐셜은 식 (3)과 같이 선형 중첩 정리를 이용하여 입사파, 산란파, 방사파 속도 포텐셜의 합으로 구성된다.

$$\varphi(\vec{X}) = [(\varphi_I + \varphi_d) + \textstyle\sum_{j=1}^{6} \varphi_{rj} x_j] \tag{3}$$

여기서 φ_I과 φ_d는 각각 1차 입사파와 산란파 속도 포텐셜을 나타낸다. φ_{rj}는 물체의 j 방향의 단위 진폭 움직임에 의한 방사파 속도 포텐셜을 나타낸다. φ_I는 이론식을 통해 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\varphi_I = -\frac{iga_w}{\omega}\frac{\cosh[k(Z+h)]}{\cosh(kh)} e^{i[k(X\cos\alpha + Y\sin\alpha)]} \tag{4}$$

여기서 g는 중력가속도, k는 파수, h는 수심, α는 입사파의 입사

각도를 나타낸다. φ_d와 φ_r을 구하기 위해 Green의 정리와 Green함수를 식 (2)에 적용하면 식 (5)와 같이 경계 적분 방정식을 구할 수 있다.

$$2\pi\varphi + \iint_S \varphi \frac{\partial G}{\partial \vec{n}} dS = \iint_S G \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} dS \tag{5}$$

여기서 S는 부유체의 침수 표면을 나타낸다. $\vec{n}$은 부유체 표면 요소의 법선 벡터를 나타내며, 이 벡터는 3개의 병진 방향 성분과 각 요소에서 기준점에 대한 거리 벡터($\vec{r}$)를 이용해 표현되는 3개의 회전 방향에 대한 성분으로 구성된다.

$$\vec{n} = [\vec{n}_{1:3} (\vec{r} \times \vec{n}_{1:3})]^T \tag{6}$$

G는 Green함수이며, 두 프로그램에서 사용한 Green함수는 다음과 같이 표현된다.

$$G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega) = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \int_0^\infty \frac{2(k+\nu)e^{-kh}\cosh[k(Z+h)]\cosh[k(\zeta+h)]}{k\sinh(kh) - \nu\cosh(kh)} J_0(kR1)dk + i2\pi \frac{(k_0+\nu)e^{-k_0 h}\cosh[k_0(Z+h)\cosh(\zeta+h)]}{\sinh(k_0 h) + k_0 h\ \cosh(k_0 h) - \nu\sinh(k_0 h)} J_0(k_0 R1) \tag{7}$$

여기서 $\vec{\xi}(\xi, \eta, \zeta)$는 소스(source) 분포법에서 소스점의 위치를 나타내며, J_0는 제 1종 Bessel함수를 나타낸다. 그리고,

$$R1 = \sqrt{(X-\xi)^2 + (Y-\eta)^2}, \quad r_1 = \sqrt{R1^2 + (Z-\zeta)^2},$$
$$r_2 = \sqrt{R1^2 + (Z+\zeta+2h)^2}, \ \nu = \frac{\omega^2}{g} = k_0 \tanh(k_0 h)$$

φ_d와 φ_r은 식 (8)과 식 (9)의 부유체 경계조건들을 식 (5)에 대입하여 각각 산란문제와 방사 문제를 풀어서 구할 수 있다.

$$\frac{\partial(\varphi_I + \varphi_d)}{\partial \vec{n}} = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial \varphi_r}{\partial \vec{n}} = \vec{v} \cdot \vec{n} \tag{9}$$

여기서 $\vec{v}$는 부유체의 속도 벡터를 나타낸다. 입사파에 의해 부유체에 작용하는 파랑하중은 Froude-Krylov 힘(F_I)과 산란력(F_d)의 합으로 구성되며, 각각 φ_I과 φ_d를 이용하여 계산된다. 또한, φ_r을 이용하여 물체의 움직임에 의한 방사력이 계산되며, 방사력의 실수부와 허수부는 각각 부가질량(A)과 방사감쇠계수(B)로 표현된다.

$$F_j = F_{I,j} + F_{d,j} = -i\rho\omega \int_S (\varphi_I + \varphi_d) n_j dS \tag{10}$$

$$F_{r,j} = -i\rho\omega \int_S \varphi_{r,jl} n_j dS = -i\omega A_{jl} - B_{jl} \tag{11}$$

여기서 아래첨자 j와 l은 운동 모드를 나타낸다. 질량-감쇠-강성 기반의 2차 상미분 방정식으로 표현되는 운동방정식을 통해 부유체의 운동 응답(RAO)을 구할 수 있으며, 단위 입사파에 대한 부유체의 RAO는 식 (12)와 같이 표현된다.

$$RAO = \left[\frac{\{F_i + F_d\}}{[-\omega^2(M+A) - i\omega B + K]} \right] \tag{12}$$

여기서 M은 부유체의 질량 행렬, K는 부유체의 강성행렬을 나타낸다. 수학적 정식화에 대한 상세한 내용은 각 프로그램의 매뉴얼에서 확인할 수 있다(WAMIT[2023]; ANSYS[2020]).

2.2 계측 기준점 변환

식 (10)-(12)를 이용하여 계산되는 유체동역학 계수들과 RAO는 계측 기준점의 위치에 따라 달라질 수 있다. 계측 기준점 변경은 물체 표면의 법선 벡터(식 (6))에 반영되며, 이에 따라 부유체 기준점에서의 외력의 크기와 위상각이 변하게 된다(Zabala *et al.*[2024]). Fig. 1은 3차원 공간에서 강체의 무게중심(G)과 임의의 계측 기준점(P)를 묘사한 것이다. 강체의 무게중심으로부터 계측 기준점까지의 변위 벡터($\vec{u}$)는 계측 기준점의 좌표($\vec{r^P}$)와 강체의 무게중심까지의 변위 벡터($\vec{r^G}$)를 이용하여 표현할 수 있다.

$$\vec{u} = \vec{r^P} - \vec{r^G} = [X_P - X_G \quad Y_P - Y_G \quad Z_P - Z_G]^T \tag{13}$$

식 (10)에서 나타낸 부유체에 작용하는 파랑하중은 계측 기준점 변환에 따라 다음과 같이 변경된다(Zabala *et al.*[2024]).

$$F^P_{1:3} = F^G_{1:3} e^{ik\vec{x}} \tag{14}$$

$$M^P_{4:6} = (M^G_{4:6} - \vec{u} \times F^G_{1:3}) e^{ik\vec{x}} \tag{15}$$

여기서 위첨자 P와 G는 각각 계측 기준점과 무게중심에 작용하는 하중을 의미한다. $\vec{x}$는 계측 기준점으로부터 각 요소까지의 수평 거리벡터를 나타내며, $e^{ik\vec{x}}$는 두 점 사이의 파랑하중의 위상각 차이를 의미한다. 식 (11)에서 나타낸 방사력은 6×6행렬이며, 병진 및 회전 방향 성분에 따라 3×3 크기의 4개의 부행렬(Q)로 표현할 수

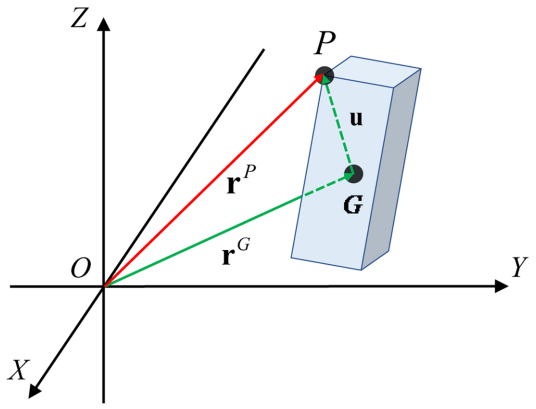

Fig. 1. Description of a rigid body in three-dimensional coordinate system.

있다. 각 부행렬에 대해 계측 기준점 변환을 수행하면 변경된 방사력은 다음과 같이 표현된다(Zabala *et al.*[2024]).

$$F_R^P = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12}+Q_{11}\tilde{u} \\ Q_{21}-\tilde{u}Q_{11} & Q_{22}-\tilde{u}Q_{12}+Q_{12}\tilde{u}+\tilde{u}Q_{11}\tilde{u} \end{bmatrix} \tag{16}$$

여기서, $\tilde{u}$ 은 $\vec{u}$ 의 반대칭행렬(skew-symmetric matrix)이다.

$$\tilde{u} = \begin{bmatrix} 0 & -(Z_P-Z_G) & (Y_P-Y_G) \\ (Z_P-Z_G) & 0 & -(X_P-X_G) \\ -(Y_P-Y_G) & (X_P-X_G) & 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

계측 기준점에서의 부가질량과 방사감쇠계수는 변경된 방사력을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$A^P = -\mathrm{Imag}(F_R^P)/\omega \tag{18}$$

$$B^P = -\mathrm{Real}(F_R^P) \tag{19}$$

또한, RAO는 계측 기준점 변환에 따라 다음과 같이 변경된다.

$$RAO^P = \begin{bmatrix} I_{3\times3} & \tilde{u}^T \\ 0_{3\times3} & I_{3\times3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} RAO_T \\ RAO_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} RAO_T + RAO_R \times \vec{u} \\ RAO_R \end{Bmatrix} \tag{20}$$

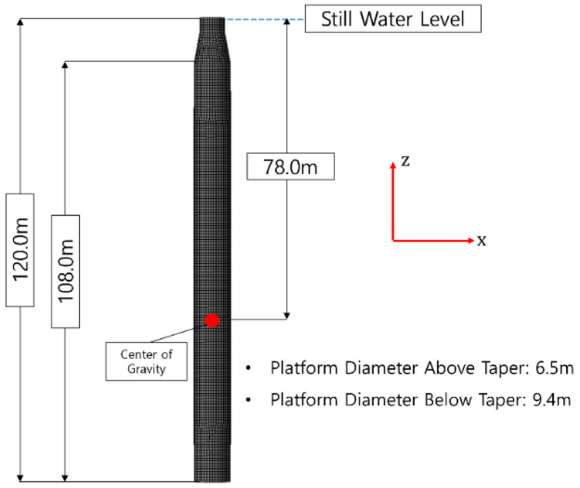

Fig. 2. Submerged part of the OC3 Spar Platform Model (Jonkman [2010]).

Table 1. Properties of the OC3 Spar Platform (Jonkman[2010])

Description	Value
Mass [kg]	8.066E+06
Center of gravity [m]	(0, 0, –78.0)
Roll & Pitch moment of inertia [kg·m^2]	1.893E+10
Yaw moment of inertia [kg·m^2]	1.9157E+8
Draft [m]	120

여기서, $I_{3\times3}$은 크기가 3인 단위행렬을 의미하며, 아래첨자 T와 R은 각각 병진 및 회전 방향을 나타낸다.

3. 수치해석 결과

본 연구에서는 계측 기준점에 따른 유체동역학 계수들과 RAO를 비교하기 위해 상용 프로그램인 WAMIT과 AQWA를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 각 프로그램의 계측 기준점의 초기값은 각각 SWL(Still Water Level)과 무게중심(Center of Gravity; CoG)으로 설정되어 있다(WAMIT[2023]; ANSYS[2020]). Fig. 2는 수치해석을 위한 OC3 Spar 플랫폼의 수면 아래 부분의 수치모델을 나타낸 것이며, Table 1은 구조물의 제원을 나타낸 것이다(Jonkman[2010]). 구조물은 약 7,600개의 사각형 요소로 모델링하였으며, 두 프로그램에서 동일한 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 수심은 320 m이며, 유체의 밀도는 1,025 kg/m^{3}이다. 입사파는 x축 방향으로 입사한다. 구조물은 6자유도 운동을 하지만, 본 연구에서는 입사파의 방향을 고려하여 x축 방향에 대한 3자유도 운동(Surge, Heave, Pitch)에 대한 결과만 분석하였다.

본 연구에서 계측 기준점 변환은 AQWA로부터 계산된 무게중심 계측 기준점 결과들(AQWA (CoG))을 SWL 계측 기준점 결과로 변환(AQWA (CoG to SWL))하여 WAMIT으로 계산된 SWL 계측 기준점 결과들(WAMIT (SWL))과 비교하였다. 이 때, 구조물의 무게중심으로부터 SWL로 계측 기준점을 변환하기 위해 벡터($\vec{u} \equiv (0, 0, 78)$)를 사용하여 계측 기준점 변환을 수행하였다. Fig. 3은 계측 기준점에 따른 OC3 Spar 플랫폼에 작용하는 파랑하중의 절대값을 비교한 것이다. 본 연구에서 계측 기준점 변환벡터($\vec{u}$)는 z축에 대해서만 값을 가지며, 수평방향에 대해서는 동일한 값을 가

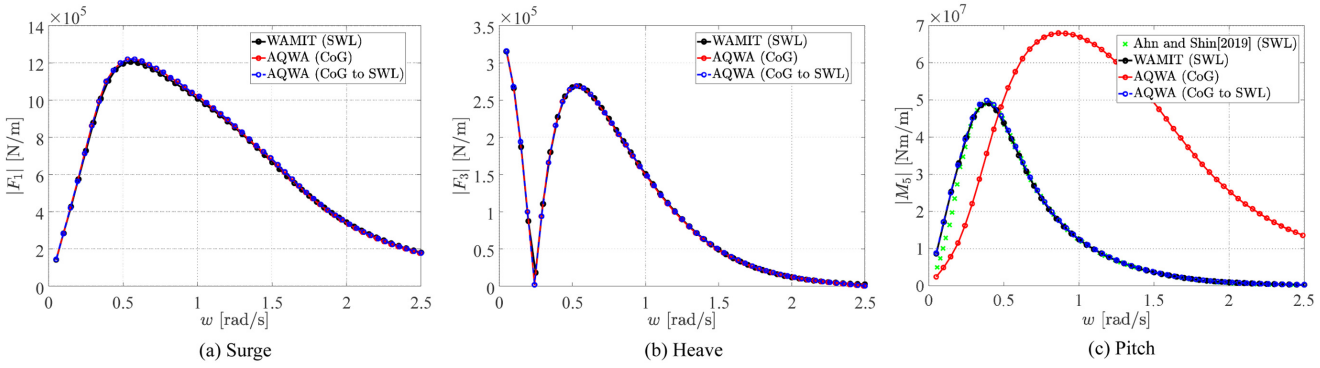

Fig. 3. Comparison of wave loads according to the reference point.

진다. 따라서, 식 (14)에 의해 파랑하중의 병진 방향 성분은 위상각이 동일하며, 그 크기 또한 동일한 값을 가진다 (Fig. 3(a)-(b)). 한편, 파랑 하중의 회전 방향 성분(Fig. 3(c))은 계측 기준점의 차이에 따라 WAMIT(SWL)과 AQWA(CoG)에서 서로 다른 결과가 출력되었다. 이는 식 (15)에 의해 파랑하중의 회전 방향 성분의 크기와 위상각이 $\vec{u}$ 에 의해 변환되기 때문이다. 무게중심에서 계측된 AQWA의 결과를 SWL을 기준으로 변환한 결과(AQWA (CoG to SWL))는 WAMIT과 Ahn and Shin[2019]의 수치해석 결과와 경향 및 크기가 잘 일치하였으며, 이는 본 연구에서 수행된 계측 기준점 변환이 잘 수행되었음을 보여준다.

주파수 영역 해석에서 부유체의 움직임에 의한 방사력은 식 (11)과 같이 부가질량과 방사감쇠계수로 표현된다. 먼저, Fig. 4는 계측 기준점에 따른 OC3 Spar 플랫폼의 부가질량을 비교한 결과이다. Surge와 Heave의 부가질량은 모든 경우에서 경향 및 크기가 유사하게 나타났으나, Pitch의 경우 계측 기준점 위치에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 방사력 변환에 대한 식 (16)을 통해 확인할 수 있는데, 병진 성분은 계측 기준점에 관계없이 동일하지만 회전 성분은 $\vec{u}$ 의 값에 따라 달라지기 때문이다. 또한, Pitch 부가질량은 SWL을 기준으로 변환한 AQWA 결과(CoG to SWL)와 WAMIT 결과(SWL)가 잘 일치하였다.

앞서 언급한 것과 같이 방사감쇠계수 또한 방사력 계산을 통해 산정되므로, Fig. 4의 부가질량과 마찬가지로 Surge와 Heave 방사감쇠계수는 모든 결과가 유사하게 나타났다(Fig. 5(a)-(b)). 반면, Pitch 방사감쇠계수는 계측 기준점 위치에 따라 뚜렷한 차이가 발생하였으며, 이는 앞서 설명한 회전 성분 변환 특성에 기인한다. 또한, SWL을 기준으로 변환한 AQWA 결과(CoG to SWL)는 WAMIT 결과(SWL)와 잘 일치하였으며, Figs. 4-5를 통해 본 연구에서 수행한 계측 기준점 변환이 방사력에 대해서도 타당하게 적용되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 계측 기준점에 따른 OC3 Spar 플랫폼의 운동응답(RAO)을 비교한 결과로, 본 연구에서는 계류선 등이 고려되지 않은 부유체의 자유 운동응답을 구하였다. 유체동역학 계수 비교와 달리, Surge RAO는 식 (20)에 따라 계측 기준점에 의존하여 값이 달라진다. 다만, 앞서 언급한 것과 같이 $\vec{u}$ 의 수평 성분이 없기 때문에 Heave RAO는 기준점 변화와 관계없이 동일하게 나타났다. 회전운동 RAO(Pitch)는 계측 기준점에 무관하게 동일함을 확인할 수 있다.

이상의 결과들은 동일한 구조물에 동일한 환경 하중을 적용했을 때, 계측 기준점 위치에 따른 차이를 비교한 것이다. 물리적으로는 동일한 운동을 의미하지만, 표현되는 유체동역학 계수와 운동응답은 계측 기준점에 따라 달라질 수 있다. 구체적으로, $\vec{u}$ 의 수평 방향 성분이 없는 경우 병진운동에 대한 유체동역학 계수들(Surge, Heave)은 계측 기준점 변화에 영향을 받지 않지만, 회전운동에 대한 계수들(Pitch)은 영향을 받는다. 하지만, 운동응답의 경우 Surge RAO는 계측 기준점에 의존하고, Heave RAO도 $\vec{u}$ 에 수평 방향 성분이 있을 경우 영향을 받을 수 있지만, Pitch RAO는 기준점 변화와 무관하게 동일하게 나타난다. 따라서, 동일한 부유체 구조물에

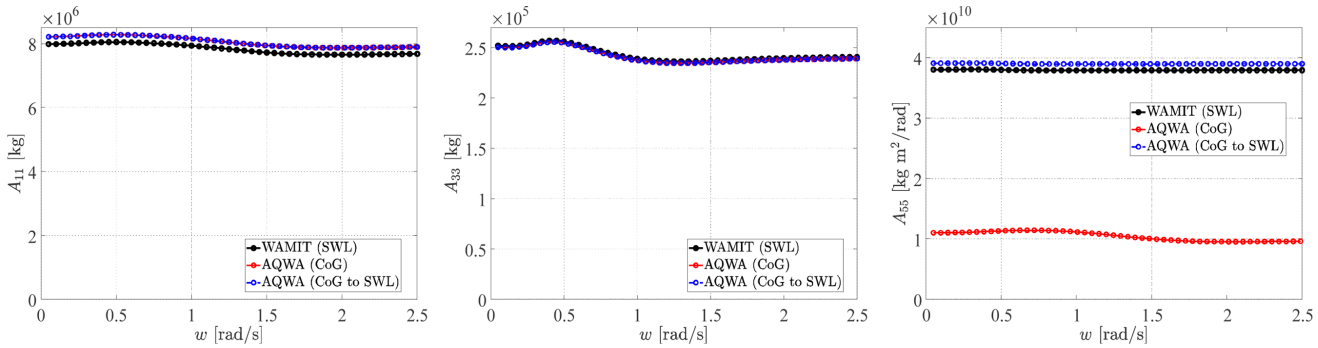

Fig. 4. Comparison of added mass according to the reference point.

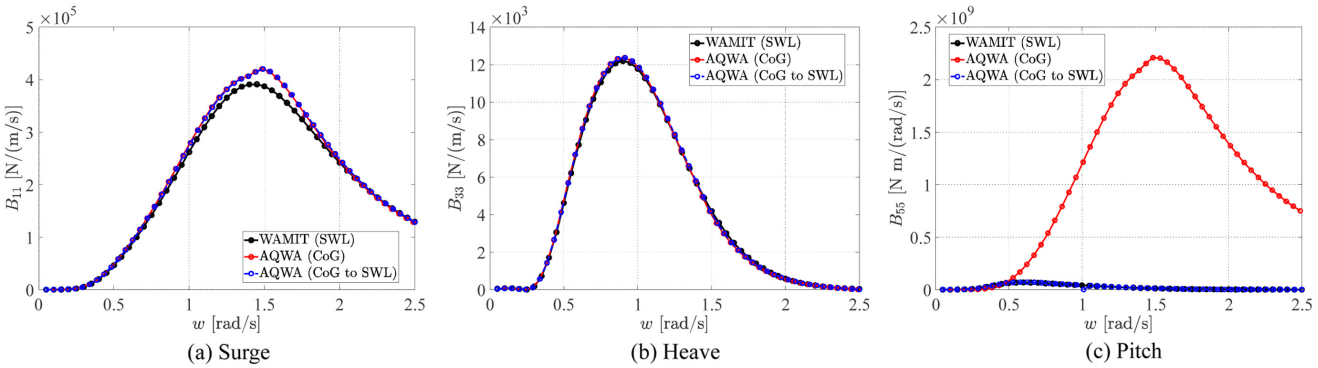

Fig. 5. Comparison of radiation damping coefficients according to the reference point.

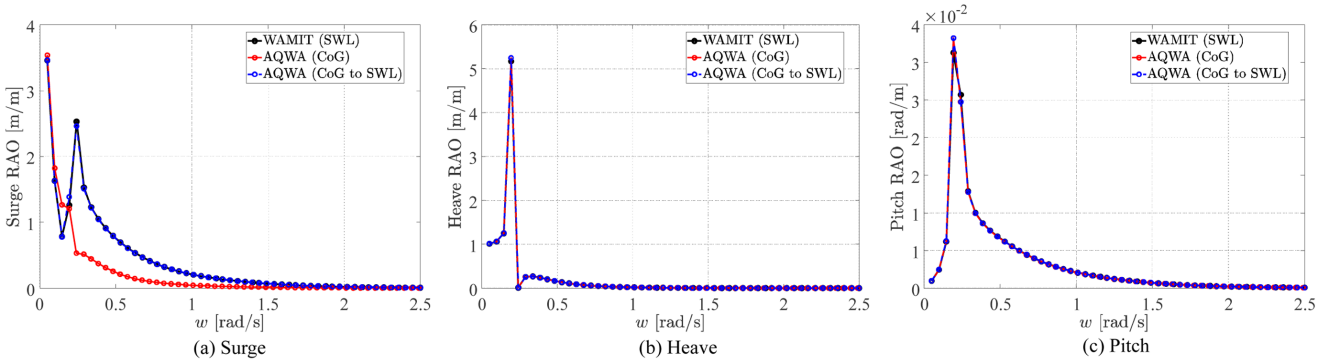

Fig. 6. Comparison of RAOs according to the reference point.

대한 운동 해석이라 하더라도 계측 기준점에 따라 유체동역학 계수와 운동응답 결과값이 다르게 출력될 수 있으며, 해석 프로그램에 따라 계측 기준점 정의가 다르기 때문에 정확한 계수를 활용하기 위해서는 계측 기준점의 위치를 명확히 파악하는 것이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 유체동역학 계수 변환 원리를 활용하여, OC3 Spar 플랫폼을 대상으로 계측 기준점 위치 변화가 유체동역학 계수들과 운동응답에 미치는 영향을 분석하였다. 검증된 상용 프로그램인 WAMIT과 AQWA의 계산 결과의 상이점을 파악하여, 계측 기준점 변경에 따른 병진운동과 회전운동의 유체동역학 계수들과 운동 응답의 변화와 특징을 비교하였다.

병진 운동에 대해서는 부가질량, 방사감쇠계수, 파랑 하중이 계측 기준점 변환에 영향을 받지 않는 것으로 나타난 반면, RAO는 계측 기준점의 위치에 따라 민감한 변화를 보이는 것으로 나타났다. 한편, 부유체의 회전 운동의 경우, 부가모멘트, 방사감쇠계수, 파랑 하중은 계측 기준점 변환에 따라 달라졌으며, 회전 운동에 대한 RAO는 계측 기준점 변화와 무관한 특성을 나타내었다. 이는 계측 기준점 변화에 따른 물체의 법선 벡터가 변경되기 때문이다.

이러한 결과를 통해, 동일한 부유체에 동일한 환경 하중을 적용하여 물리적으로 동일한 유체동역학 수치해석을 수행하더라도, 계측 기준점의 위치에 따라 해석 결과가 다르게 출력된다. 따라서, 각 프로그램의 계측 기준점 설정이 해석 결과에 미치는 영향을 고려해야 하며, 계산 결과를 분석하고 활용하기 위해서는 계측 기준점을 통일하는 과정이 필요함을 확인하였다. 본 연구에서는 계측 기준점의 위치를 무게중심에서 SWL로 변환하였으나, 임의의 계측 기준점에 대해서도 동일한 방법을 사용하여 유체동역학 결과들을 변환할 수 있다. 다만, 운동응답 분석 시 계류선 등의 영향을 고려하지 않았기 때문에 부유체의 운동응답에 대한 계측 기준점 변환에 대해서는 추가적인 분석이 필요하다. 또한, 본 연구에서는 가장 많이 활용되는 검증된 두 상용 프로그램에 대해 분석을 수행하였지만, 차후 다른 유사 프로그램에 대해서도 각 계측 기준점 설정과 이에 따른 결과 도출 형식을 비교 분석할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00278157).

References

[1] Ahn, H.J. and Shin, H., 2019, Model test and numerical simulation of OC3 spar type floating offshore wind turbine, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng., 11(1), 1–10.
[2] ANSYS Inc., 2020, Aqwa Reference Manual, Release 2020 R1, ANSYS Inc., Canonsburg, PA.
[3] Bashetty, S. and Ozcelik, S., 2021, Review on dynamics of offshore floating wind turbine platforms, Energies, 14(19), 6026.
[4] Jonkman, J., 2010, Definition of the floating system for phase IV of OC3, National Renewable Energy Laboratory (NREL), NREL/TP-500-47535.
[5] Lee, C.H., 1995, WAMIT User Manual, WAMIT Inc.
[6] Musial, W. and Butterfield, S., 2004, Future for Offshore Wind Energy in the United States, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
[7] National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2023, OpenFAST Documentation, Version 3.x, NREL, Golden, CO.
[8] Newman, J.N., 2005, WAMIT User Manual (Version X.X) [Software manual], WAMIT Inc.
[9] Orcina Ltd., 2024, OrcaFlex® Software Manual, Version 11.5, Orcina Ltd., Hampshire, UK.
[10] WAMIT Inc., 2023, WAMIT User Manual, Version 7.x, WAMIT Inc., Chestnut Hill, MA.
[11] Zabala, I., Henriques, J.C.C., Kelly, T.E., Ricci, P.P. and Blanco, J.M., 2024, Post-processing techniques to improve the results of hydrodynamic Boundary Element Method solvers, Ocean Eng., 295, 116913.

Received 7 August 2025
Revised 15 August 2025
Accepted 18 August 2025