

다목적 어군 모니터링 부이 유체동역학적 성능 평가

김성재^{1,†} · 이동길² · 정성재² · 구원철³¹국립수산과학원 수산공학과 해양수산연구소²국립수산과학원 수산공학과 해양수산연구소³인하대학교 조선해양공학과 교수

Assessment of Hydrodynamic Performance of a Multi-Purpose Fish School Monitoring Buoy

Sung-Jae Kim^{1,†}, Donggil Lee², Seongjae Jeong², and Weoncheol Koo³¹Researcher, Fisheries Engineering Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083 Korea²Senior researcher, Fisheries Engineering Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083 Korea³Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

요 약

본 연구는 ICT 융합 스마트 어업 기술 활성화를 위한 다목적 어군 모니터링 부이의 유체동역학적 성능을 평가하고 최적 형상을 산정하는 것을 목적으로 한다. 다목적 어군 모니터링 부이는 실시간 데이터 수집 및 장기간 독립 운용을 위해 태양광 모듈을 탑재하고 있으며, 태양광 발전 효율은 부이 운동 응답에 많은 영향을 받는다. 부이 운동 응답을 분석하기 위해, 어군 모니터링 부이에 대한 선형 포텐셜 유동 이론 기반 유체동역학적 해석을 수행하였고, 부이 감쇠판의 점성 감쇠 효과는 모리슨(Morison) 항력 항 형태로 고려하였다. 다목적 어군 모니터링 부이에 감쇠판을 적용한 결과, 상하운동은 감쇠판의 큰 점성 감쇠 효과로 인해 공진 현상이 없는 과도 감쇠 상태가 되었고, 종동요는 감쇠판으로 인해 공진 주파수 부근에서 운동응답이 최대 75%까지 감소하였다. 또한, 부력재 크기 변화보다는 감쇠판 크기 변화가 종동요에 미치는 영향이 더 컸다. 실제 설치 예상 지역(거제, 여수)의 파랑 조건을 분석한 후, 해당 지역에서의 다목적 어군 모니터링 부이의 운동 응답 특성과 태양광 발전 상대효율 변화를 확인하였다. 고정된 태양광 발전에 비해, 감쇠판을 적용한 다목적 어군 모니터링 부이의 연간 태양광 발전 상대 효율이 96% 이상으로 안정적으로 유지할 수 있음이 입증되었다. 본 연구 결과는 향후 해양수산분야 소형 부이 개발에 필요한 기초 자료 및 설계 지침을 제공할 것으로 기대한다.

Abstract – This study aims to assess the hydrodynamic performance and determine the optimal hull shape of a multi-purpose fish school monitoring buoy, which is crucial for ICT-integrated smart fishery systems. The buoy, equipped with a solar module on the top for long-term independent operation, requires minimal motion response to ensure measuring system stability and maximize solar power efficiency. The motion response was analyzed in frequency domain, based on linear potential flow theory. Additionally, the viscous damping effect of the bottom damping plate was incorporated into the equation of motion using equivalent linearization of the Morison drag term. Analysis results showed that the application of a damping plate led to an overdamped state in heave motion, eliminating resonance. Furthermore, the damping plate significantly reduced the pitch motion response by up to 75% near the pitch natural frequency. Based on wave scatter diagrams from two target installation sites (Geoje and Yeosu), the damping plate ensured an annual relative solar panel efficiency of 96% or higher. This study highlights the critical role of the damping plate in ensuring stable system operation and provides fundamental data for future buoy development in the ocean and fisheries sectors.

Keywords: multi-purpose fish school monitoring buoy(다목적 어군 모니터링 부이), hydrodynamic performance assessment(유체동역학적 성능 평가), damping plate(감쇠판), solar panel efficiency(태양광 효율), motion response(운동응답)

[†]Corresponding author: sjkim8@korea.kr

1. 서 론

최근 어가인구 고령화와 어업종사자 인건비 상승으로 인해 전세계적으로 ICT 융합 기술을 활용한 스마트 어업 및 양식 시스템 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 정치망 어업과 해상 가두리 양식업은 상시 현장 관리가 요구되지만, 시설이 해상에 위치하고 있어 주기적인 관리를 위해서는 인력과 비용 측면에서 큰 부담이 따른다. 이를 해결하기 위한 방안으로 ICT 기술을 접목한 모니터링 시스템 기술 개발에 대한 현장 요구가 증가하고 있다. 다목적 어군 모니터링 시스템은 소형 부이에 수중 카메라 및 각종 센서들을 탑재하여 육상에서 실시간으로 어장 정보를 파악할 수 있는 시스템이다. 특히, 정치망에서는 유입되는 어류 입망량을 확인할 수 있고, 가두리 양식장에서 양식어류 상태 뿐만 아니라 수온, 용존산소량 등을 수집할 수 있다. 이로써 어업인은 굳이 출항하지 않고도 모니터링 시스템을 통해 조업 여부 및 작업 필요성을 판단할 수 있다. 나아가 이러한 부이는 향후 해양 및 수산자원 조사용 부이로까지 확장할 수 있어, 해양 자원 관리와 친환경 어업 기술 개발 측면에서도 중요한 역할을 할 것으로 기대한다.

다목적 어군 모니터링 부이의 현장 활용성을 높이기 위해서는, 실제 해상 환경에서의 부이 안정성과 장기간 독립 운영을 위한 자가발전 시스템을 반드시 확보해야 한다. 특히, 부이 운동성능은 모니터링 시스템의 계측 정확도에도 많은 영향을 미치기 때문에, 부이의 최적 형상을 산정하는 것은 매우 중요한 작업 중 하나이다. 이와 관련하여, Kim *et al.*[2015a]는 방사/산란 문제 기반의 수치해석을 통해 반구형 부이의 형상 조건 변화에 따른 운동성능을 확인하였다. 또한, 다양한 파랑 조건에서 유의진폭을 비교하며 파력발전장치의 최대 에너지 추출을 위한 부이의 최적 형상을 산정하였다. 또한, Kim *et al.*[2021]은 원통형, 원뿔대형, 반구형 부이의 운동 성능을 부분 비선형 해석을 통해 분석하였다. 여기서, 부분 비선형 해석은 매순간 부이 거동과 자유표면 높낮이를 바탕으로 부이의 침수면적을 계산하고, 이를 통해 비선형 Froude-krylov 힘과 복원력을 고려한 부이의 움직임 분석하는 것이다. 이런 비선형 해석 방법을 토대로, 부이 형상이 부이 운동 성능에 미치는 영향을 확인한 바 있다.

또한, 다목적 어군 모니터링 부이의 전력 공급 장치로는 태양광 발전 시스템을 사용한다. 하지만, 부이 회전운동이 상부에 설치된 태양광 패널의 입사각을 변화시켜 발전 효율에 영향을 미치게 된다. 이와 관련하여, Wang *et al.*[2023]은 태양광을 설치한 부이의 회전운동이 상부에 설치된 태양광 패널 효율에 미치는 영향을 확인하였다. 설치한 태양광 패널 각도가 0~30도인 경우, 부이 회전운동이 태양광 발전 효율에 미치는 영향은 가장 작았다. 하지만, 패널 각도가 90°까지 기울어지면 발전 출력이 약 70% 감소하였다. 또한, Yang *et al.*[2024]은 조파수조 실험을 통해 파랑에 의한 부이 회전운동이 출력 저하로 이어짐을 확인하였다. 또한, 하부 구조물의 형태에 따라 운동 응답 및 전력 손실이 달라짐을 보여주었다.

태양광 발전 효율 증대 뿐만 아니라, 어군 모니터링 시스템의 안

정적인 계측 데이터 획득을 위해서는 부이 운동 응답을 최소화해야 한다. 부이 운동 응답을 줄이기 위해서 감쇠판을 활용한 많은 연구들이 수행되어 왔다. Kim *et al.*[2015b]은 이중 구조 부이에 링 형태의 감쇠판을 부착하여 상하운동 에너지의 75% 이상을 억제하는 효과를 실험적으로 입증하였다. 또한, Park *et al.*[2018]은 반잠수식 복합발전 플랫폼의 운동 저감을 위해 감쇠판을 부착하는 실험적 및 수치적 연구를 수행하였고, Wang *et al.*[2024]도 부유식 해상 풍력 구조물에 타공판 형태의 감쇠판을 적용하고 이로 인한 동적 응답 변화를 확인하였다. Turner *et al.*[2023]은 선행 연구들을 비교 분석하여 KC (Keulegan-Carpenter) 수, 판 두께, 공극률 등 다양한 조건에 따른 감쇠판의 부가질량 및 항력계수 변화를 정리하였다.

본 연구의 목적은 상부에 태양광 모듈을 탑재한 다목적 어군 모니터링 부이의 최적 형상을 산정하는 것이다. 이를 위해, 부이의 감쇠판 및 부력재 크기에 따른 유체동역학적 성능을 3차원 방사/산란 문제를 해결함으로써 분석하였다. 또한, 감쇠판으로 인한 운동 감쇠 효과를 추정하기 위해, 모리슨 (Morison) 방정식의 항력 항을 활용해 추가 점성 감쇠 효과를 고려하여 부이의 운동 응답 RAO(response amplitude operator)를 산출하였다. 또한, 설치 예상 지역 2곳(거제, 여수)에서의 부이 운동 응답과 연간 태양광 발전 상대 효율을 추정하였고, 이를 토대로 다목적 어군 모니터링 부이의 최적 형상을 도출하였다. 본 연구 결과는 향후 스마트 수산업 및 자원 조사용 부이 개발에 필요한 기초자료와 설계 지침을 제공할 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1 다목적 어군 모니터링 부이

다목적 어군 모니터링 시스템은 정치망 어업 및 해상 가두리 양식업의 효율적인 시설 관리를 위해 고안된 ICT 융합 기술이다. 이 시스템은 수중 센서를 포함하여 어군 상태, 수온, 용존산소량 등 핵심 데이터를 실시간으로 수집하고 LTE 통신을 통해 육상으로 전송하여 어업인이 어장 관련 정보를 손쉽게 취급할 수 있도록 하는 것이 목적이다. 장기간 독립 운영을 위해 12V 기반의 독립형 태양광 발전 시스템이 주 전원으로 사용되며, 태양광 모듈은 설치 편의성과 풍하중에 의한 안전 확보를 위해 부유체 상단에 수평으로 설치하였다. 시스템 컨트롤러는 저전력, 저가화 및 경량화에 초점을 맞춰 수중 센서, GPS, 마이크로컨트롤러 및 통신 모듈을 하나로 통합하여 구성하였다(Lee *et al.*[2023]). 또한 어업인들이 다양한 현장 상황과 용도에 맞게 사용할 수 있도록 부이 크기를 최소화하였고, 복원성 강화하기 위해 부이 중간에 부력재를 적용하였다(Fig. 1). 이러한 다목적 어군 모니터링 시스템의 안정적인 운영을 위해서는 설치 지역 해양 환경을 고려한 부이의 최적 형상 설계가 필수적이다.

2.2 문제의 정식화

다목적 어군 모니터링 부이의 파랑 중 운동 응답 특성 분석을 위해 선형 포텐셜 유동 이론 기반의 상용 프로그램(ANSYS AQWA)을

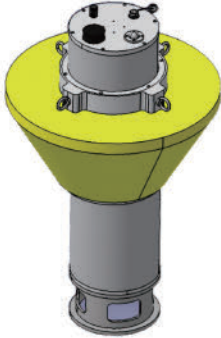


Fig. 1. Multi-purpose fish school monitoring buoy.

활용하였다. 해당 프로그램은 파랑 그린 함수법을 기반으로 주파수 영역에서 부이의 방사/산란 문제를 해결하고, 부이의 운동방정식을 수립한다. 여기서, 방사 문제는 잔잔한 바다에서 부이가 움직일 때 발생하는 유체동역학적 힘을 분석하고, 산란 문제는 고정된 부이에 파도가 입사할 때 산란되는 유동으로 인한 효과를 확인한다. 방사 문제로 부이의 부가 질량/관성모멘트와 방사 감쇠 계수를 구할 수 있으며, 산란 문제를 해결함으로써 부이에 작용하는 파랑 하중을 산정할 수 있다. 또한, 부이 복원성은 부이의 형상, 무게 및 무게중심에 따라 결정된다. 이때, 부이의 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M+M_a]\{\ddot{\xi}\}+[C]\{\dot{\xi}\}+[K]\{\xi\}=\{F_{ex}\}+\{F_D\} \quad (1)$$

여기서 $[M]$ = 질량 행렬(Mass matrix)

$[M_a]$ = 부가 질량/관성모멘트 행렬(Added mass/moment of inertia matrix)

$[C]$ = 방사 감쇠 계수 행렬(Radiation damping coefficient matrix)

$[K]$ = 복원성 계수 행렬(Restoring coefficient matrix)

$\{F_{ex}\}$ = 파랑 하중 벡터(Wave excitation force vector)

$\{F_D\}$ = 항력 벡터(Drag force vector)

$\{\xi\}$ = 변위 벡터(Motion displacement vector)

변위 벡터는 3개의 병진운동(surge, sway, heave)와 3개의 회전운동(roll, pitch, yaw)로 구성된다. 본 연구에서는 다목적 어군 모니터링 부이의 과도한 운동을 저감하고자 감쇠판을 추가 고려하였는데, 앞서 언급한 방사/산란 문제는 포텐셜 유동 기반으로 감쇠판의 점성 감쇠 효과를 고려할 수 없다. 따라서, 기존 선행 연구 결과를 기반으로 감쇠판 점성 감쇠 효과를 추정하였다. Turner *et al.*[2023]는 기존 선행 연구들을 바탕으로 감쇠판이 부착된 원통형 부유체의 항력 계수를 감쇠판 크기 및 KC 수 따라 비교·정리하였다. 상하 방향(heave) 항력은 모리슨(Morison) 항력 모델을 바탕으로 식 (2)와 (3)과 같이 나타냈다.

$$F_{hD} = -\frac{1}{2}\rho C_{hd}A_p\xi_3|\dot{\xi}_3| = -B_{eq3}\dot{\xi}_3 \quad (2)$$

$$B_{eq3} = \frac{4}{3\pi}\rho C_{hd}A_p\omega|\xi_3| \quad (3)$$

여기서 F_{hD} = 상하 방향 항력(Heave drag force)

ρ = 해수 밀도(Sea water density)

C_{hd} = 상하 방향 항력 계수(Heave drag coefficient)

A_p = 감쇠판 단면적(Sectional area of the damping plate)

B_{eq3} = 상하 방향 선형화된 항력 계수(Equivalent heave drag coefficient)

등가 선형 항력계수는 에너지 등가 선형화 기법을 적용하여 식 (3)과 같이 정리하였다. 사실 감쇠판 상하 방향 항력은 감쇠판 수직 속도 제곱에 비례한다. 여기서 감쇠판 수직속도란, 부유체의 상하 운동 뿐만 아니라 횡동요(roll) 및 종동요(pitch) 같은 회전운동 성분을 포함하게 된다. 따라서 감쇠판이 회전운동에 미치는 감쇠 모멘트를 수학적으로 표현할 수 있다. 이와 관련하여 Cozjin *et al.*[2005]는 동일한 형태의 감쇠판을 가진 원통형 부유체에 대한 항력계수를 실험적 방법으로 추정하였는데, 해당 논문에서는 감쇠판이 회전운동에 미치는 영향을 식 (4), (5)와 같이 정리하였고, 본 연구에서 정리된 식을 사용하였다.

$$M_{xD} = -B_{eq4}\dot{\xi}_4, M_{yD} = -B_{eq5}\dot{\xi}_5 \quad (4)$$

$$B_{eq4} = \frac{16}{9\pi^2}\rho C_{hd}A_pR^3\omega|\xi_4|, B_{eq5} = \frac{16}{9\pi^2}\rho C_{hd}A_pR^3\omega|\xi_5| \quad (5)$$

여기서 M_{xD} = 횡동요 감쇠 모멘트(Roll damping moment)

M_{yD} = 종동요 감쇠 모멘트(Pitch damping moment)

B_{eq4} = 선형화된 횡동요 항력모멘트 계수(Equivalent roll drag coefficient)

B_{eq5} = 선형화된 종동요 항력모멘트 계수(Equivalent pitch drag coefficient)

R_p = 감쇠판 반지름(Radius of the damping plate)

등가 선형 모델은 부이 운동의 진폭을 포함하고 있기 때문에, 반복법을 통해 감쇠판 저항 효과를 고려한 부이의 운동 응답 해를 도출하였다. 이때, 초기 부이 운동 진폭 값은 0으로 가정하고, 수렴 오차 기준은 0.001로 정하였다. 이러한 반복 해석은 각 주파수 별로 수행하였고, 반복 횟수는 50을 초과하지 않았다. 이렇게 다양한 부이 형상 조건에서의 감쇠판 항력까지 고려한 부이 운동 응답 특성을 비교하였다.

본 연구에서는 다양한 조건에서의 부이 운동 응답 특성 비교 뿐만 아니라, 실제 설치 예상 지역에서의 부이의 연간 운동 응답 특성을 분석하였다. 대상 해역에서 발생하는 파도의 특성을 나타내는 파랑 빈도 분포도(wave scatter diagram)를 기반으로 다양한 유의 파고와 침투 주기(또는 침투 주파수) 조합을 추출하였고, 식 (6)과 같은 JONSWAP 스펙트럼을 도입하여 설치 예상 지역의 파도 정보를 수치화하였다.

$$S_w(\omega) = \frac{5}{16}(1 - 0.278 \ln(\gamma)) H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp\left\{ \frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right\} \exp\left[\frac{(\omega/\omega_p - 1)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (6)$$

여기서 $S_w(\omega)$ = 파랑 스펙트럼(Wave spectrum)
 H_s = 유의 파고(Significant wave height)
 ω_p = 파도 침두 주파수(Wave peak frequency)
 γ = 무차원 형상 계수(Non-dimensional peak shape parameter)
 σ = 스펙트럼 폭 계수(Spectral width parameter)
 $\sigma = \sigma_a$ for $\omega \leq \omega_p$
 $\sigma = \sigma_b$ for $\omega > \omega_p$

무차원 형상계수는 DNV 지침(DNV[2010])에 따라 식 (7)과 같이 유의 파고와 침두 주기의 관계를 통해 추정하였고, 스펙트럼 폭은 각각 $\sigma_s = 0.07$, $\sigma_b = 0.09$ 를 사용하였다.

$$\gamma = 5 \text{ for } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6$$

$$\gamma = \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) \text{ for } \left(3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) < 5$$

$$\gamma = 1 \text{ for } 5 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (7)$$

이렇게 구축한 파랑 스펙트럼과 부이 운동 응답 RAO의 제곱을 곱하여 응답 스펙트럼(response spectrum)을 계산할 수 있다. 응답 스펙트럼에서 부이 운동 모드별 분산(variance), 표준편차(standard deviation), 유의 진폭(significant amplitude) 등을 계산·비교함으로써 형상에 따른 부이 운동 응답 차이를 통계적으로 비교할 수 있다. 본 연구에서는 부이 운동 모드별로 유의 진폭을 비교함으로써 부이 형상에 따른 차이를 비교하였다.

부이 상부에 수평으로 설치된 태양광 패널의 경우, 부이의 횡동요 및 종동요가 태양광 패널면을 태양에 대해 기울어지도록 하기 때문에 일사량이 감소하는 코사인 손실(cosine effect)이 발생한다. 태양광 패널이 태양 광선에 직각으로 향할 때 최대 출력을 내지만, 경사각이 발생하면 유효 투사 면적과 출력이 cosine 함수에 따라 감소하는데, 이런 효과를 고려한 태양광 패널 출력 식을 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_s(t) = \eta_s A_s I_{s0} \cos \theta(t) \quad (8)$$

여기서 P_s = 태양광 패널 출력(Solar panel output)
 η_s = 태양광 모듈 효율(Photovoltaic module efficiency)
 A_s = 태양광 모듈 유효 면적(Effective area of the solar module)
 I_{s0} = 수평 태양광 패널 기준 일사량(Irradiance on a horizontal solar panel)
 θ = 부이의 태양광 패널 경사각(Tilt angle of the buoy's solar panel)

부이의 태양광 패널 경사각은 부이의 횡동요 및 종동요 운동 응답을 이용해 나타낼 수 있다($\theta \approx \sqrt{\xi_4^2 + \xi_5^2}$). 부이 상부 태양광의 시간 평균 출력을 동일한 일사량의 고정식 태양광 패널 출력과 비교하여 부이 움직임으로 인한 상대 효율을 식 (9)과 같이 계산할 수 있다.

$$\eta_{re} = \frac{\frac{1}{T_r} \int_0^{T_r} P_s(t) dt}{\eta_s A_s I_{s0}} = \frac{\int_0^{T_r} \cos \theta(t) dt}{\int_0^{T_r} 1 dt} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \sigma_\theta^2}} \quad (9)$$

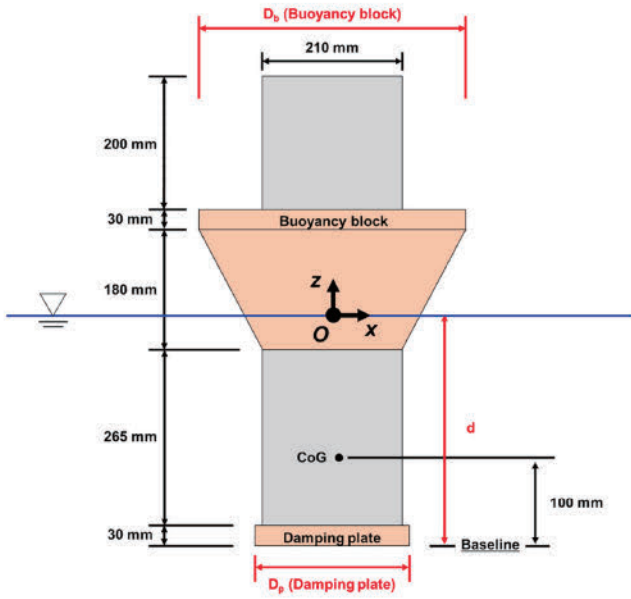
여기서 η_{re} = 부이 회전운동으로 인한 태양광 패널의 상대 효율
 σ_θ^2 = 부이 태양광 패널 경사각 변화의 분산

일반적으로 부이의 회전운동 응답은 정규분포를 따르기 때문에, 지수형 근사를 통해 부이 태양광 패널 상대 효율을 식 (9)의 하반부와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 각 파랑 조건에서의 횡동요 및 종동요 분산 값을 활용하여 태양광 발전 상대 효율을 산출하였다. 계산된 태양광 발전 상대 효율을 파랑 빈도 분포도의 파랑 출현 확률과 결합하여 고정식 태양광 발전 대비 본 다목적 어군 모니터링 부이의 연간 평균 태양광 발전 효율을 평가하였다. 이때, 문제의 단순화를 위해 계절 및 일사 시간대와 파랑 출현 간의 상관성은 고려하지 않았다.

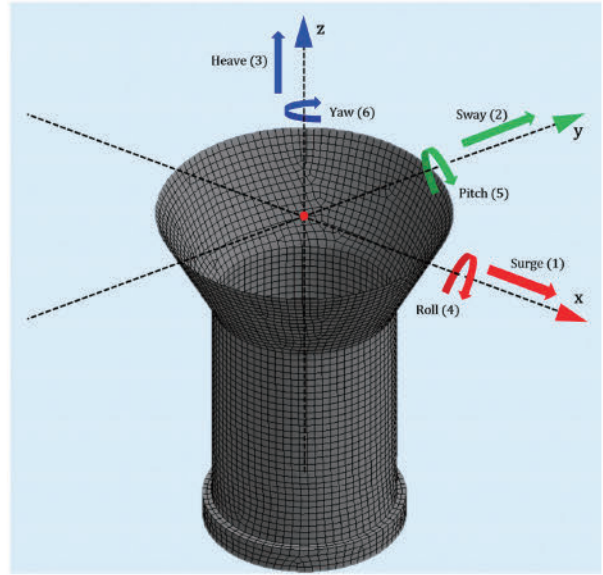
3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 모델

다목적 어군 모니터링 부이는 정치망 또는 양식장 상태점검 및 해양환경 조사를 위한 다양한 센서들을 포함하고 있고, 이를 구동하기 위한 자가발전용 태양광 패널을 가지고 있다. 본 부이를 어업 인이 이송, 설치 및 해체 등 취급하기 좋도록 부이 직경을 센서 및 배터리 사이즈에 맞춰 최소화하였고, 부력 확보 및 회전운동 복원성 향상을 위해 원뿔대형 부력재를 부이 중간에 추가 설치하였다. Fig. 2는 다목적 어군 모니터링 부이의 계략도와 수치해석 모델을 보여주고, Table 1은 부이의 주요 제원을 나타낸다. 동일한 무게 및 관성반경 조건에서 부력재와 감쇠판의 크기가 부이의 운동 성능에 미치는 영향을 확인하였다. 무게와 관성반경은 실제 모든 센서와 배터리의 설치 위치 및 무게를 고려하여 계산하였다. 부력재는 원뿔대 형태로, 밀면 직경은 부이 본체의 직경과 동일하고 윗면 직경은 0.4, 0.5, 0.6 m로 다르게 하였다. 부력재 크기에 따라 전체적인 부피가 달라지며 이때의 흘수는 각각 0.455, 0.435, 0.415 m이다. 감쇠판 직경은 부이 본체 직경의 1.1, 1.2, 1.3배가 되도록 하였다. 감쇠판 적용에 따른 부피 변화는 전체 몰수면적 대비 3% 미만이기 때문에 문제의 간소화를 위해 감쇠판 적용에 따른 흘수 변화는 무시했다. Turner *et al.*[2023]의 연구 결과에 따르면, KC 수가 1을 초과하면 원판형 감쇠판 항력계수가 일정 값($C_{hd} = 5$)으로 수렴한다. 본 다목적 어군 모니터링 부이 감쇠판은 파장에 비해 크기가 매우 작아서 KC 수($KC = 2\pi \xi / D_p > 5$)가 높다. 따라서 항력계수는 Turner *et al.*[2023]에 따라 '5'로 정했고, 감쇠판이 없는 경우 선행연구



(a) Schematic diagram



(b) Numerical model

Fig. 2. Schematic diagram of the fish school monitoring buoy and its numerical model.

Table 1. Specifications of the fish school monitoring buoy

Item	Unit	Dimensions
Mass, m	kg	22.0
Roll radius of Gyration, r_x	m	1.314
Pitch radius of Gyration, r_y	m	1.314
Yaw radius of Gyration, r_z	m	0.288
Center of gravity(from baseline), G_z	m	0.10
Inner buoy diameter, D	m	0.21
Inner buoy height, H_b	m	0.678
Damping plate diameter, D_p	m	0.21~0.273
Damping plate height, H_p	m	0.03
Buoyancy block diameter, D_b	m	0.4~0.6

(Gudmestad and Meo[1996])를 바탕으로 원통의 항력계수($C_{nd} = 1.0$)를 사용하였다. Table 2는 본 연구에서 고려한 해석 조건과 각 조건에서의 주요 복원성 계수를 보여준다. 수치해석 모델링을 위해 ANSYS AQWA 2021 R1를 활용하였고, 프로그램 지침에 따라 해석 주파수 조건($\omega = 0.02 \sim 20 \text{ rad/s}$)에서 해석이 가능하도록 요소 크기를 충분히 작게 설계하였다. 이때, 모니터링 부이의 요소 수는 약 5,000~5,900개로, 부력재와 감쇠판 크기에 따라 요소 수는 달라진다. Fig. 3은 요소 수에 대한 민감도 평가를 위한 수렴도 평가를 수행하였다. 민감도 평가를 위해, 상하운동 부가질량과 중동요 부가관성모멘트를 다양한 요소 수 조건에서 비교하였다. 요소 수가 2880을 넘어감에 따라 부가 질량 및 관성모멘트가 수렴한 것으로 보아 본 수치해석 연구의 요소 수가 적합함을 확인하였다. 수심은 20 m, 물의 밀도는 $1,025 \text{ kg/m}^3$ 이다.

Table 2. Numerical analysis cases

Item	Draft [m]	Buoyancy block diameter [m]	Damping plate diameter [m]	Heave restoring coefficient [N/m]	Pitch restoring coefficient [Nm/rad]
Case 1-0	0.455	0.4	0.21	1,133.1	42.56
Case 1-1	0.455	0.4	0.231	1,133.1	42.38
Case 1-2	0.455	0.4	0.252	1,133.1	42.17
Case 1-3	0.455	0.4	0.273	1,133.1	41.95
Case 2-0	0.435	0.5	0.21	1,497.5	47.38
Case 2-1	0.435	0.5	0.231	1,497.5	47.19
Case 2-2	0.435	0.5	0.252	1,497.5	46.98
Case 2-3	0.435	0.5	0.273	1,497.5	46.76
Case 3-0	0.415	0.6	0.21	1,743.5	47.86
Case 3-1	0.415	0.6	0.231	1,743.5	47.68
Case 3-2	0.415	0.6	0.252	1,743.5	47.47
Case 3-3	0.415	0.6	0.273	1,743.5	47.25

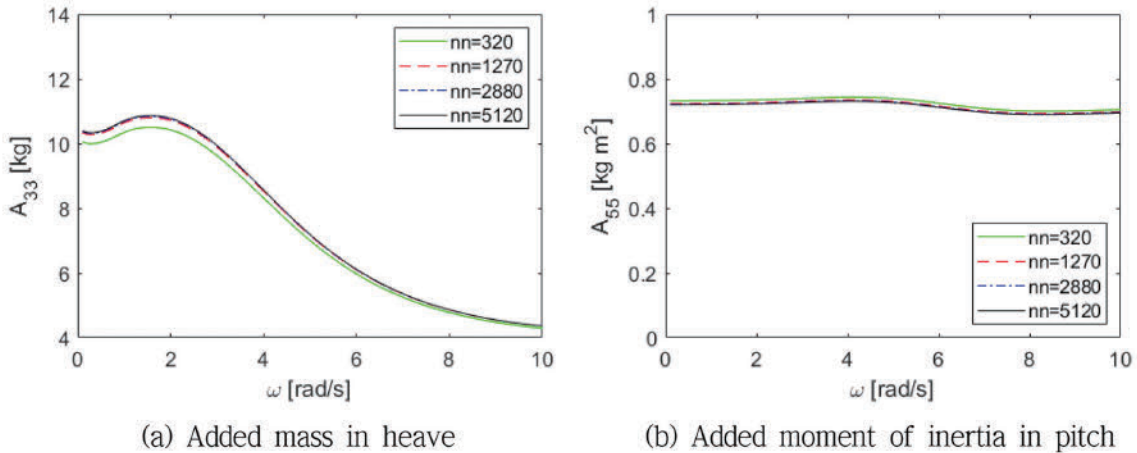


Fig. 3. Convergence Study on the Number of Elements (nm = the number of nodes).

3.2 다목적 어군 모니터링 부이 운동 응답

부이 상부에 위치한 태양광 패널의 효율은 부이 운동에 많은 영향을 받기 때문에, 본 절에서는 다목적 어군 모니터링 부이의 유체동역학적 특성을 분석하고, 감쇠판 크기가 부이 운동 성능에 미치는 영향을 확인하였다. 먼저, 부력재 크기가 가장 작을 경우($D_b=0.4\text{m}$)에 다양한 감쇠판 크기 조건에 따른 부이의 유체동역학적 계수, 파랑하중, 부유체 운동 응답을 확인하였다. Fig. 4은 감쇠판 크기에 따른 부이의 부가 질량/관성모멘트, 방사 감쇠 계수, 파랑하중을 보여준다. 다목적 어군 모니터링 부이는 원점 대칭이고 계류 시스템을 고려하지 않았기 때문에, 상하운동(heave)과 종동요(pitch)에 대한 유체동역학적 계수만 비교하였다. 또한, 부이가 원점 대칭이기 때문에, 파도가 항상 부이의 x 축 방향으로 발생한다고 가정하여 계산하였다. Fig. 4에 따르면, 추가 적용함에 따라 전체적인 부이의 부가 질량 및 관성모멘트가 증가하였다. 이는 수면 아래에 위치한 부가물(감쇠판)로 인해, 부이가 움직이기 위해서는 더 많은 힘을 필요하기 때문이다. 이것이 감쇠판이 부이 운동 응답을 저감시키는 주요 원인 중 하나다. 방사 감쇠 계수는 감쇠판 유무와 관계없이 대체로 비슷한 값을 가졌다. 하지만, 일부 주파수 영역에서는 상하운동 방사 감쇠 계수가 감쇠판 적용으로 인해 다소 작아졌다. 해당 주파수 영역대에서 감쇠판이 방사파의 생성을 방해하였음을 알 수 있는데, 이는 감쇠판이 설치된 위치, 특히 자유표면과의 거리 등과 연관이 될 것으로 추정된다. 파랑하중의 경우, 수직력은 감쇠판의 유무와 관계없이 거의 유사한 값을 가지는데, 이는 감쇠판이 부이 최하단부에 설치되어 파도에 대한 영향이 작기 때문이다. 종동요 모멘트는 특정 주파수 영역(5 rad/s 부근)에서 감쇠판을 적용할 경우 그렇지 않은 경우에 비해 큰 값을 가졌다. 물론 종동요 모멘트는 수직력에 비해 그 크기가 상당히 작지만, 이러한 변화는 감쇠판 윗면과 밑면의 압력 분포 차이로 인함으로 추정된다. 또한 감쇠판이 부이 하단부에 위치하고 있기 때문에 종동요 모멘트 변화를 다소 유발한 것으로 보인다. 하지만, 풍랑 및 너울 주파수 영역대는 $0\sim 2\text{ rad/s}$ 로, 해당 주파수 영역대에서는 방사감쇠계수 및 파랑하중에 대한 감쇠판 크기의 영향은 크지 않았다.

Fig. 5는 상하운동응답(heave motion RAO)과 종동요 운동응답(pitch motion RAO)를 보여준다. 부력재 윗면 지름이 0.4m 일 때, 4 가지 감쇠판 조건에서의 부이 운동 응답을 비교하였다. 부이 종동요 운동응답은 주로 공진주파수 인근에 집중되어 있으므로 공진주파수 부근인 $0\sim 2\text{ rad/s}$ 만을 관찰하였다. 본 해석에는 Fig. 4에서 비교한 부가 질량/관성모멘트, 방사 감쇠 계수, 파랑하중 뿐만 아니라, 항력 효과를 추가적으로 고려하여 운동 응답을 산출하였다. 감쇠판을 적용한 부이는 비교적 작은 상하운동응답과 종동요 운동응답이 발생하였다. 특히, 상하운동응답의 경우 감쇠판에 의한 감쇠효과가 매우 커서 공진현상이 발생하지 않는 과도 감쇠(overdamped) 상태에 해당하였다. 이러한 감쇠 효과에도 불구하고, 부이 직경이 일반적인 해양파 파장에 비해 매우 작아 풍랑 및 너울의 주파수 대역인 $\omega=0\sim 2\text{ rad/s}$ 에서 상하운동응답에 감쇠판이 미치는 영향은 크지 않았다. 하지만, 종동요는 고유주기가 약 6초로, 해당 고유주기에서 운동 응답이 감쇠판으로 인해 최대 75%까지 감소하였다. 일반적으로 감쇠판은 부유식 구조물의 상하운동을 줄이기 위해 사용되지만, 이러한 소형 부이는 풍랑 및 너울 주파수 대역에서 상하운동에 미치는 영향보다는 종동요에 미치는 영향이 컸다.

3.3 부력재 효과

부력재의 크기는 부이의 흡수와 복원성에 많은 영향을 주는 중요한 요소이기 때문에, 본 절에서는 부력재의 크기가 다목적 어군 모니터링 부이 운동 성능에 미치는 영향을 확인하였다. Table 2와 같이 부력재의 상판 지름이 변하면, 전체 부피가 달라져서 흡수 또한 변한다. Fig. 6와 7은 각각 부력재 상판 지름이 0.5m 일 경우와 0.6m 인 경우 부이의 상하운동 및 종동요 운동 응답을 보여준다. 상하운동은 Fig. 5처럼 부력재의 크기와 관계없이 감쇠판으로 인한 큰 감쇠효과로 인해 공진현상이 발생하지 않는 과도 감쇠 시스템이 된다. 감쇠판이 없는 경우에도 항력을 고려하기 때문에 상하운동 공진현상이 크진 않지만 $\omega \approx 0.4\text{ rad/s}$ 부근에서 발생하였다. 감쇠판을 적용한 경우에는 그렇지 않을 경우에 비해 고주파수 영역($\omega \approx 5\text{ rad/s}$)에서 최대 50%까지 작은 상하운동응답이 발생한다.

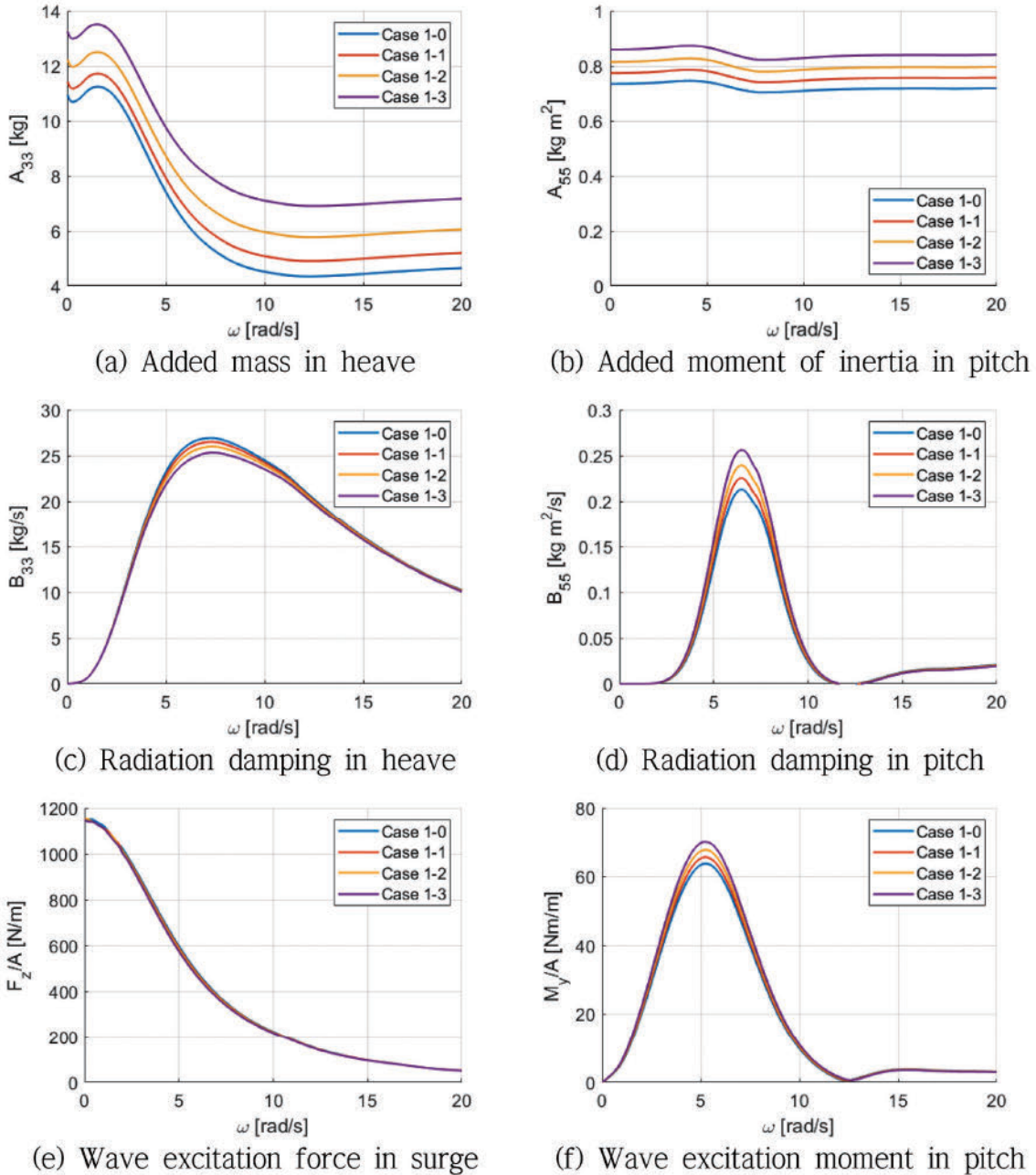


Fig. 4. Hydrodynamic coefficients and excitation forces/moments of the fish school monitoring buoy with various damping-plate sizes ($D_b = 0.4$ m).

하지만, 부력재 및 감쇠판 크기와 관계없이 풍랑 및 너울 주파수 대역(0~2 rad/s)에서는 상하운동응답 감쇠효과는 크지 않았다. 중동요 운동응답은 감쇠판을 통해 공진주파수에서의 운동응답이 효과적으로 저감되었다. 또한, 부력재 크기와 관계 없이 어군모니터링 부이의 중동요 고유주파수는 중동요 고유주파수가 1.0~1.1 rad/s로 유사하였다. 일반적인 풍랑(wind wave) 및 너울(swell)의 주파수 대역이 $\omega = 0 \sim 2$ rad/s 이기 때문에, 부이의 중동요 공진현상으로 인한 태양광 발전 효율 변화에 대한 주의 깊은 검토가 필요하다. 또한, 부력재 크기에 따라 중동요 고유주파수가 크게 변하지 않은 것으로 보

아, 부력재 크기보다는 감쇠판 크기가 부이의 중동요 저감에 더 효과적임을 확인하였다.

3.4 실효역 부이 운동 특성 분석

본 절에서는 앞서 수행한 부이 형상에 따른 유체동역학적 분석 결과를 바탕으로 실제 많은 정치망과 해상가두리 양식장이 설치되어 있는 남해안에서의 다목적 어군 모니터링 부이의 운동 응답을 분석하였다. 남해안 2곳(거제, 여수)에 대한 실제 해양 관측 자료를 해양수산부 전국 파랑 관측 자료 제공 시스템(MOF[2025])으로부

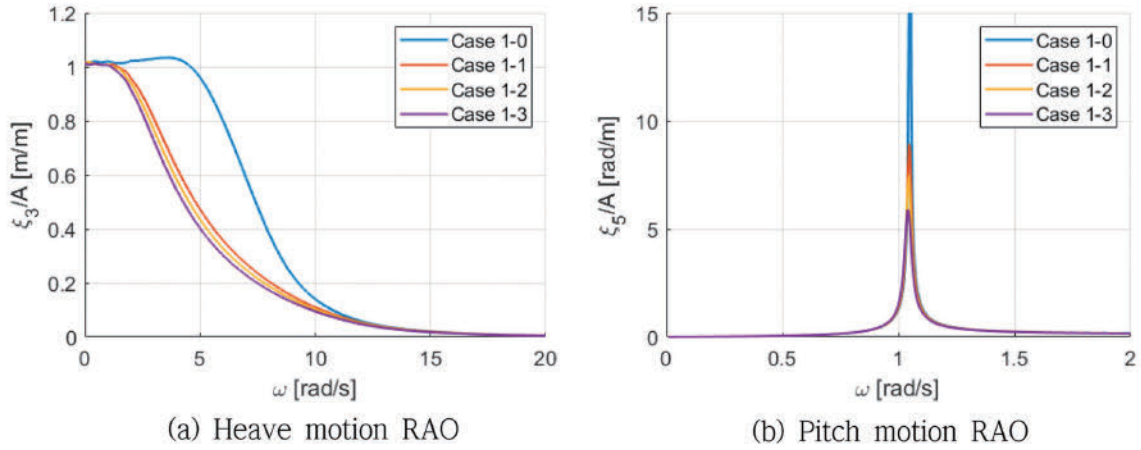


Fig. 5. Heave and pitch motion RAOs of the fish school monitoring buoy with various damping-plate sizes ($D_b = 0.4$ m).

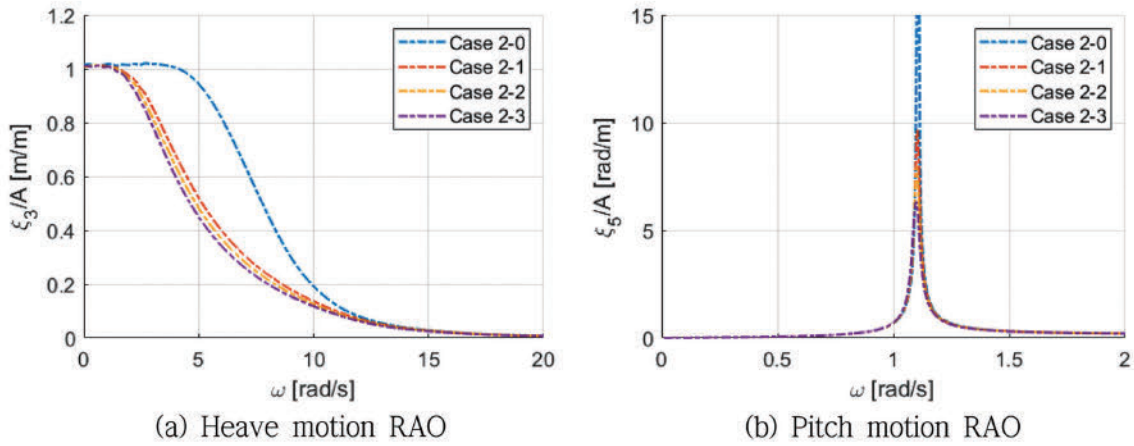


Fig. 6. Heave and pitch motion RAOs of the fish school monitoring buoy with various damping-plate sizes ($D_b = 0.5$ m).

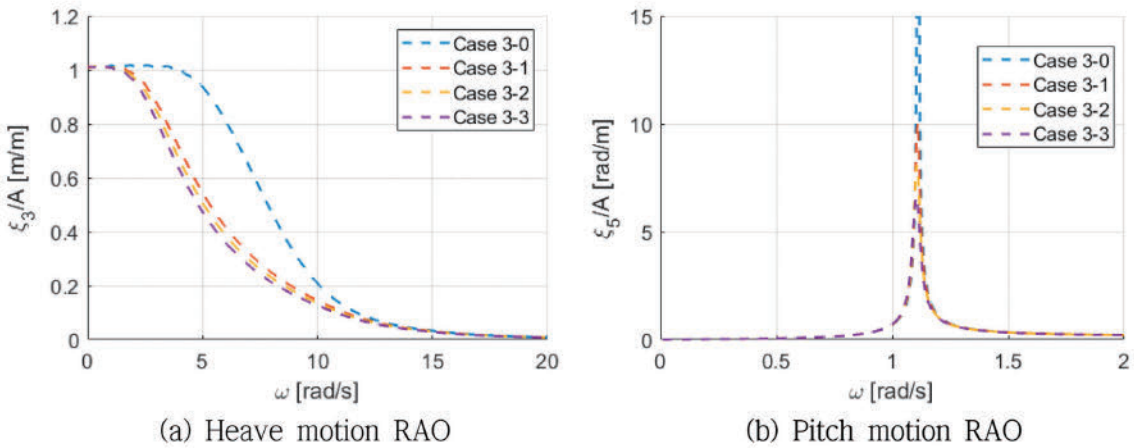


Fig. 7. Heave and pitch motion RAOs of the fish school monitoring buoy with various damping-plate sizes ($D_b = 0.6$ m).

터 제공받아 연간 부이 운동 성능 및 태양광 발전 효율 분석에 활용하였다. Fig. 8은 남해안 2곳의 파랑 빈도 분포도(wave scatter diagram)를 나타낸다. 이 중 거제시 인근 파랑 자료는 해양수산부에서 해양 관측 시스템을 이용해 2023년 11월부터 2025년 2월까지 계

측한 자료를 분석하여 만들었으며, 해당 시스템의 위치는 위도 34.76도, 경도 128.69도인 지점이다. 또한, 여수시 인근 파랑 자료도 해양수산부의 초음파식 파향·파고계를 통해 2018년 12월부터 2025년 4월까지의 기간 동안 위도 및 경도가 34.53도, 127.96도인 지점

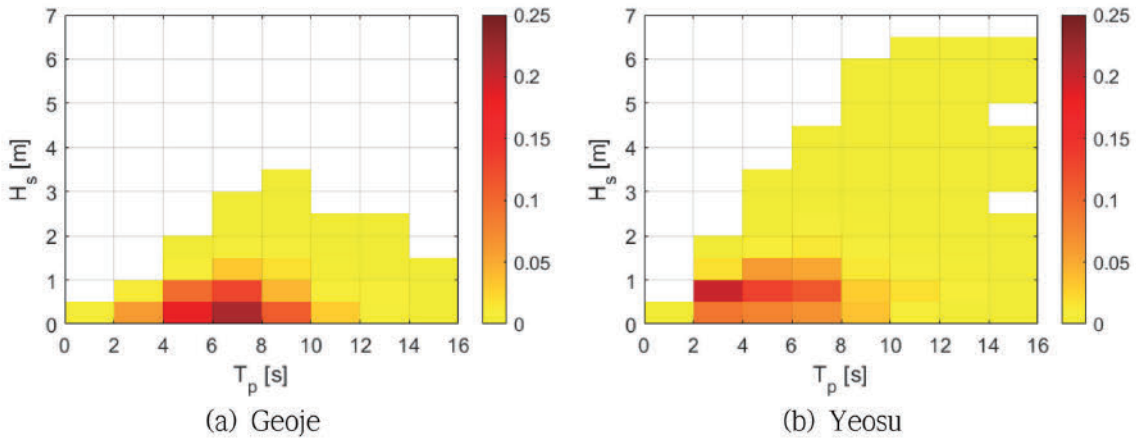


Fig. 8. Wave scatter diagrams at the two target sites (Gejoe and Yeosu).

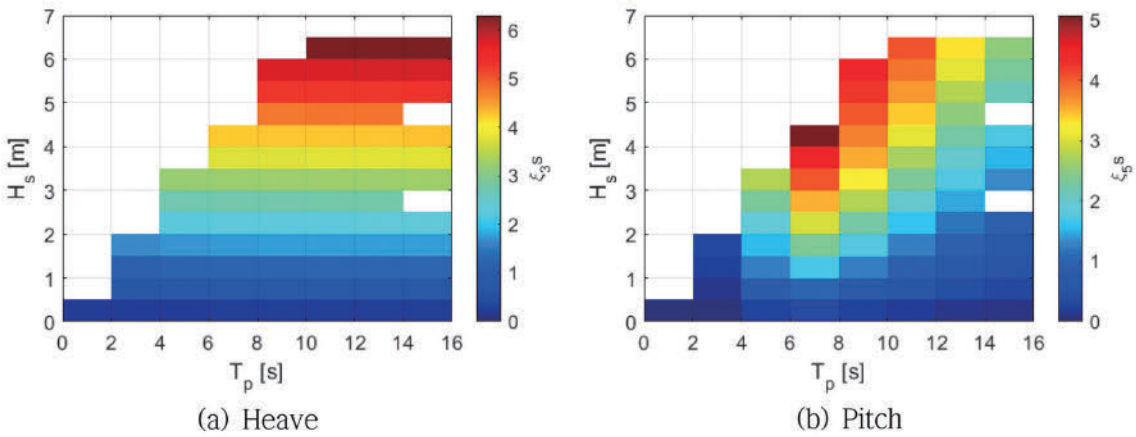


Fig. 9. Significant motion amplitudes of the fish school monitoring buoy (Cases 1–3).

에서 풍랑을 계측·분석한 자료이다. 비교적 내만 위치한 거제 지역 해양 관측 결과를 확인하면, 유의파고 1 m 이하, 첨두 주기 6~8초인 파도가 가장 많이 발생하였고, 유의파고가 1.5 m 이상의 파도는 비교적 드물게 발생하였다. 하지만, 비교적 외해에 위치한 여수시 파랑 자료는 유의파고 1 m, 첨두 주기 2~4초인 파도가 가장 빈번하게 발생하였고, 거제시 파랑 데이터에서는 잘 발생하지 않던 비교적 긴 주기와 높은 파고를 가진 파도도 종종 관측되었다.

Fig. 9은 다양한 유의파고 및 첨두 주기 조합의 파랑 조건에서 다목적 어군 모니터링 부이의 상하운동 및 종동요 유의진폭을 나타냈다. 이를 계산하기 위해, 식 (1)에서 계산한 부이의 주파수 영역 운동 응답 RAO와 식 (6)에서 계산한 파랑 스펙트럼을 조합해서 운동 응답 스펙트럼을 산출한 후, 해당 운동 응답 스펙트럼의 분산 및 유의진폭을 계산하였다. 먼저, 부력재가 가장 작은 경우를 대상으로 부이 운동의 유의진폭 값을 비교하였다(Fig. 9). 상하운동의 경우, 운동 응답 RAO가 파랑 주파수 0~2 rad/s 조건에서 거의 1에 해당하기 때문에, 첨두 주기가 6초 이상의 장주기(long wave period) 조건에서 유의파고와 유사한 유의진폭을 가졌다. 하지만, 종동요의 경우, 첨두 주기가 6~10초인 파랑 조건에서 높은 종동요 유의진폭이 관측되었다. 이는 종동요 공진주파수가 1.0~1.1 rad/s이기 때문

이다. 또한, 높은 파고 조건일수록 더 높은 상하운동 및 종동요 유의진폭을 가졌다. 6~10초의 첨두 주기와 높은 유의파고 조건에서 파도한 종동요로 인해 태양광 발전 효율이 다소 저하될 것으로 예상된다.

Fig. 10는 부력재 크기에 따른 어군 모니터링 부이의 태양광 발전 상대 효율을 보여준다. 연간 태양광 발전 상대 효율을 추정하기 위해, 파랑 빈도 분포도에서 모든 파도 조건(유의파고 및 첨두 주기 조합)에 대한 태양광 발전 상대 효율을 식 (9)을 활용해 산정하였다. 여기서, 상대 효율이 1에 가까울수록 부이 움직임으로 인한 태양광 발전 효율 저감이 적은 것을 뜻한다. Fig. 9(b)의 종동요 유의진폭 값처럼, 부력재 크기와 관계없이 첨두 주기 6~10초일 때, 태양광 발전 상대 효율이 비교적 낮게 추정되었다. 또한 이런 효과는 높은 파고 조건에서 더욱 두드러지게 나타난다. Figs. 5-7의 부력재 크기에 따른 종동요 비교한 결과처럼, 부력재의 크기는 태양광 발전 상대 효율 변화에 큰 영향을 주진 못했다.

Table 3은 설치 예상 지역 2곳(거제, 여수)에서의 연간 태양광 발전 상대 효율을 비교하였다. 부력재의 크기와 감쇠판의 유무에 따른 연간 상대 효율을 나타낸다. 연간 상대 효율은 앞서 계산한 파랑 조건별 태양광 발전 상대 효율과 파랑 빈도 분포도를 조합하여 연간

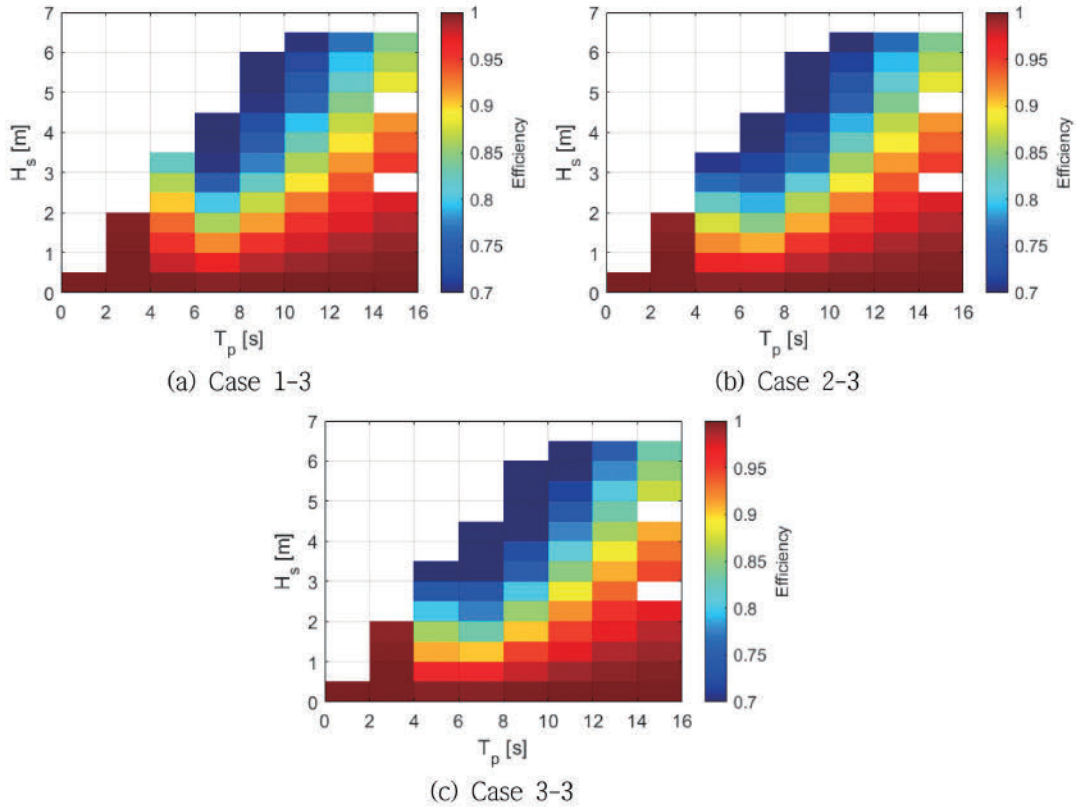


Fig. 10. Relative efficiency heatmap of the solar panel installed on the fish school monitoring buoy.

Table 3. Annual relative efficiency for the solar panel on the fish school monitoring buoy

	Case 1-0	Case 1-3	Case 2-0	Case 2-3	Case 3-0	Case 3-3
Geoje	95.06%	98.53%	94.03%	98.21%	93.58%	98.03%
Yeosu	93.05%	97.78%	91.34%	97.18%	90.71%	96.89%

태양광 발전 상대 효율을 계산하였다. 설치 예상 지역은 비교적 내만에 위치하고 있어, 대체로 파도 주기가 비교적 짧고 유의파고도 높지 않았다. 높은 파고의 파도 조건에서는 태양광 발전 효율을 상당히 떨어졌지만, 유의파고 2 m 이상의 파도가 설치 예상 지역 파도 전체의 3% 미만으로 상당히 적었다(거제, 0.44%; 여수, 2.15%). 반면에, 중동요에 가장 큰 영향을 주는 침두주기가 4~10초인 파도는 약 60~85%로 상당한 부분을 차지하고 있다(거제, 85.81%; 여수, 62.70%). 감쇠판을 적용하지 않은 부이의 연간 태양광 발전 상대 효율이 최소 90%이었고, 감쇠판을 적용하면 적용하지 않은 경우에 비해 약 3~5% 더 높은 연간 상대 효율을 가졌다. 이렇게 전반적으로 상대 효율이 높은 이유는 설치 예상 지역에서 주로 발생하는 파도가 짧은 주기와 낮은 파고를 가지고 있는데, 이때의 상대 효율이 매우 높기 때문이다. 또한, 감쇠판은 전반적인 운동 응답을 저감시켜 어군 모니터링 시스템의 안정적인 운용에 도움을 주기 때문에 감쇠판 설치가 어군 모니터링 운용에 중요한 역할을 할 것으로 보인다. 하지만, 먼 바다나 동해안 같이 비교적 긴 파장과 높은 파고를 가진 해역에 본 다목적 어군 모니터링 부이를 적용하면 파도중 동요로 인해 안정적인 에너지 생산과 양식장 상태 및 해양환경 관측에 큰

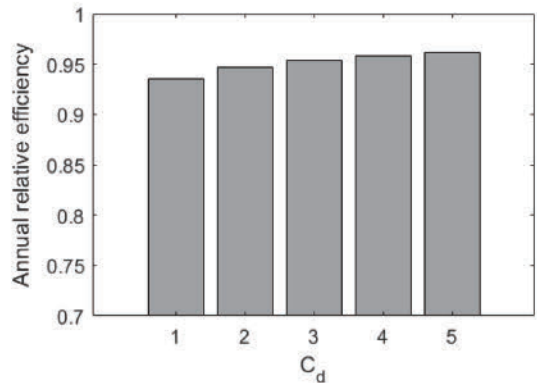


Fig. 11. Annual relative efficiency of the solar panel with various drag coefficients (Cases 1–3, Yeosu).

어려움이 발생할 가능성도 있다.

마지막으로, 다목적 어군 모니터링 부이의 안정성 및 태양광 발전 효율에 영향을 미치는 항력 계수에 대한 민감도를 평가하였다(Fig. 11). 본 연구는 포텐셜 유동 기반 3차원 방사/산란 문제를 해결하여 유체동역학적 계수를 계산하고, 선행 연구의 감쇠판 항력계수를 차

용하여 다목적 어군 모니터링 부이의 태양광 발전 효율을 분석하였다. 어군 모니터링 부이 감쇠판이 부이의 종동요 및 태양광 발전 효율에 미치는 영향을 확인하였기 때문에, 다양한 항력 계수를 적용한 후 여수지역에서의 연간 태양광 발전 상대 효율을 상호 비교함으로써 감쇠판 항력 계수의 민감성을 비교하였다. 항력 계수를 1에서 5까지 1씩 증가시키면서 연간 태양광 발전 상대 효율을 비교하였는데, 항력 계수가 작을수록 상대 효율이 비교적 낮았다. 하지만, 항력 계수가 가장 작은 '1'이라고 하더라도, 태양광 발전 상대 효율이 93% 이상에 해당하기 때문에 항력 계수의 민감도가 비교적 적음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 정치망 및 양식장의 효율적인 관리와 해양 조사를 위한 다목적 어군 모니터링 부이의 유체동역학적 성능을 평가하였다. 다목적 어군 모니터링 부이는 장시간 해상 환경에서의 사용을 위한 자가발전용 태양광 패널을 탑재하고 있는데, 부이 운동이 태양광 발전 효율에 미치는 영향을 본 연구를 통해 확인하였다. 다목적 어군 모니터링 부이의 최적 형상을 산정하기 위해, 부이의 유체동역학적 운동 응답은 3차원 방사산란 문제를 기반으로 한 부이의 운동방정식을 통해 계산하였고, 감쇠판으로 인한 점성 감쇠 효과는 모리스 항력 모델을 활용하여 고려하였다. 또한, 부력계 및 감쇠판 크기에 따른 운동 응답 특성 및 연간 태양광 발전 상대 효율을 분석하였고, 마지막으로 감쇠판 항력 계수의 민감성을 평가하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 감쇠판을 적용하면 어군 모니터링 부이의 부가 질량 및 관성 모멘트가 증가하고, 감쇠판의 점성 감쇠 효과로 인해 상하운동은 과도 감쇠 상태가 되어 공진현상이 발생하지 않았다.

2. 감쇠판은 어군 모니터링 부이의 종동요를 공진 주파수 부근에서 최대 75%까지 크게 감소시켰다. 이러한 종동요 저감 효과는 부력계 크기 변화보다 감쇠판 크기 변화에서 더 두드러지게 나타났다.

3. 부이의 종동요 및 횡동요는 태양광 패널의 출력 저하(코사인 손실)를 유발하는데, 감쇠판을 적용함으로써 설치 예상 지역(거제, 여수)에서 연간 태양광 발전 상대 효율을 최소 96% 이상으로 안정적으로 유지할 수 있음이 확인됐다. 이는 감쇠판 설치가 어군 모니터링 시스템의 안정적인 운용에 중요한 역할을 함을 시사한다.

4. 감쇠판 항력 계수의 민감도를 비교한 결과, 항력 계수가 가장 작은 경우(기존 대비 20%)에도 태양광 발전 상대 효율이 93% 이상으로 나타나, 항력계수 변화에 대한 민감도가 비교적 적음을 확인하였다.

결론적으로, 본 연구 결과는 향후 스마트 어업용 및 수산자원 조사용 부이 개발에 필요한 기초자료와 설계 지침을 제공할 것으로 기대된다. 다만, 외해나 긴 파장을 가진 해역에 적용할 경우 과도한 종동요로 인한 문제가 발생할 가능성이 있고, 실제 파도는 방향 분포를 가지고 있기 때문에, 보다 실제와 유사한 환경 특성을 고려한 맞춤형 설계가 필요하다. 또한 부이 정위(station keeping)를 위

해서 부이의 계류시스템이 추가로 고려되어야 한다. 특히, 계류시스템 조건(종류, 연결위치, 길이, 앵커종류 등)에 따라 부이 회전운동이 크게 변할 수 있고, 이에 따른 태양광 효율 및 모니터링 시스템 계측 안정성 변화가 야기될 수 있어 이를 고려한 계류시스템 설계가 필요하다.

후 기

본 연구는 2025년 국립수산물과학원 수산시험연구사업(R2025050)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- [1] Cozijn, H., Uittenbogaard, R. and Brake, E.T., 2005, Heave, Roll and Pitch Damping of a Deepwater CALM Buoy with a Skirt, in proc. of ISOPE Conference, Seoul, Korea, 388-395.
- [2] DNV, 2010, Recommended practice DNV-RP-C205: environmental conditions and environmental loads, DNV, Norway.
- [3] Gudmestad, O.T. and Meo, G., 1996, Hydrodynamic coefficients for calculation of hydrodynamic loads on offshore truss structures, *Mar. Struct.*, 9, 745-758.
- [4] Kim, S.J., Koo, W., Heo, K.U. and Heo, S., 2015a, Numerical Study on Shape Optimization of a Heaving Hemisphere Wave Energy Converter. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 18(4), 254-262.
- [5] Kim, J.R., Hyeon, J.W., Koh, H.J., Kweon, H.M. and Cho, I.H., 2015b, Model Test of Dual-Buoy Wave Energy Converter using Multi-resonance, *J. Ocean Eng. Technol.*, 29(2), 191-198.
- [6] Kim, S.J., Koo, W. and Kim, M.H., 2021, The effects of geometrical buoy shape with nonlinear Froude-Krylov force on a heaving buoy point absorber, *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 13(4), 86-101.
- [7] Lee, D., Koo, M., Heo, G., Cheong, J., Im, H. and Bae, J., 2023, Development of a low-power remote monitoring module for set-net fish school based on WCDMA, *J Korean Soc Fish Ocean Technol*, 59(3), 206-214.
- [8] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), Wave Information Network of Korea, <http://wink.go.kr/>, 2025 (accessed 2025.10.12)
- [9] Park, S., Kim, K.H. and Hong, K., 2018, Conceptual Design of Motion Reduction Device for Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation Platform, *J. Ocean Eng. Technol.*, 32(1), 9-20.
- [10] Tumer, M., Wang, L., Thiagarajan, K. and Robertson, A., 2023, Heave Plate Hydrodynamic Coefficients for Floating Offshore Wind Turbines – A Compilation of Data, in proc. of ASME 2023 5th Int. Offshore Wind Tech. Conf., Exeter, United Kingdom.
- [11] Wang, C., Song, X., Fu, Q., Cui, L. and Chen, P., 2023, Design and Optimization of PV Power Supply System for Marine Buoys,

J. Mar. Sci. Eng., 11(9), 1808.

- [12] Wang, H., Yang, Y., Guo, Y. and Lian, J., 2024, Influence of Heave Plate on the Dynamic Response of a 10 MW Semisubmersible Floating Platform, J. Mar. Sci. Eng., 12, 2156.
- [13] Yang, Y., Mi, C., Ou, B., Wong, A., Duffy, J.G, Wood, T., Utama, I.K.A.P., Chen, W. and Huang, L., 2024, A comparative experimental study on the hydrodynamic performance of two floating

solar structures with a breakwater in waves, Sol. Energy, 284, 113029.

Received 13 October 2025

1st Revised 23 October 2025, 2nd Revised 9 November 2025

Accepted 10 November 2025