

# A Study on the Improvement of the Motion Performance of Floating Marina Structures Considering Korea Coastal Environment

Dong-Min Kim<sup>1</sup>\*, Sanghwan Heo<sup>1</sup> and Weoncheol Koo<sup>1</sup>\*

<sup>1</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

## 한국해양환경을 고려한 부유식 마리나 구조물의 운동성능 향상에 관한 연구

김동민<sup>1</sup>\* · 허상환<sup>1</sup>\* · 구원철<sup>1</sup>\*

<sup>1</sup>인하대학교 조선해양공학과

**KEY WORDS:** Heave response amplitude operator(RAO) 상하운동응답, Connection line 연결체, Floating body 부유체, Submerged body 몰수체, Wave scatter diagram 파랑빈도분포표

**ABSTRACT:** The aim of this study was to improve the vertical motion performance of floating marina structures and to optimize the shapes of the structures for the Korea coastal environment. The floating body is connected to a plate-shaped submerged body through a connecting line under the water that has a stiff spring that serves to reduce the heave response. This system, which has two degrees of freedom, was modelled to analyze the interaction between the floating body and the submerged body. The vertical motion of the two-body system was compared with the motion of a single body to verify that the system could perform as an optimized model.

### 1. 서 론

최근 세계적으로 해양스포츠에 대한 관심이 확산되어 모터보트, 요트 등 레저선박(Pleasure boat)을 이용한 레저 활동이 증가하였고, 이에 따라 이를 수용할 마리나에 대한 수요도 증가하고 있다. 해양레저산업에 발을 내딛은 도입 초기 국가에서는 마리나를 그저 마리나선박의 계류시설에 한정하였지만 해양레저산업의 선진국이라 할 수 있는 호주에서는 마리나를 레저·관광·숙박 등 각종 서비스 시설을 갖춘 워터프론트 형태로서 고용 창출효과와 지역 내 상당한 경제효과를 이끌어내고 있다(MOF, 2015). 이러한 견해를 종합해보면 마리나는 해양관광사업의 필수불가결한 핵심시설이며, 현 시대를 살아가는 사람들을 위한 삶의 질 향상과 함께 미래 레저사업을 이끌어 나갈 공간이라고 해도 과언이 아니다.

마리나 항만 근처에 지어지는 구조물은 대부분 레저를 위한 편의시설이기 때문에, 시설 사용자들의 편의와 안정성을 고려하여 설계되어야 한다. 일반적으로 마리나 항만은 방파제에 의존

한 인공항이라 할 수 있으므로, 외해에서부터 들어오는 입사파의 영향이 그리 크지 않은 편이다(Ryu, 2007). 그러나 마리나 입구에서 들어올 수 있는 미약한 입사파도 결코 간과할 수 없으며, 항만 내에서 이동하는 선박의 항주파 또한 고려해야 한다. 이는 마리나 계류 선박 등에서 거주하고 활동하는 사람들에게 거주 편의성과 작업 안정성 등에 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 마리나 항만에 설치되는 부유식 구조물은 Fig. 1과 같이 수직 파일에 의해 고정되어 계류를 위한 목적으로 사용되는 부잔교와 같은 형태이다. 이와 관련하여 Shin et al.(2018)은 얇은 직사각형 형태의 평판 몰수체를 스프링 강성을 지닌 양방향 스프링 강성을 지닌 연결체로 부유체에 연결하여, 두 물체 사이의 면적비와 스프링 강성비에 따른 부유체의 상하운동응답의 변화에 대한 수치적 연구를 수행한 바 있다. 또한, 수치적 연구결과에 실제 해상에서 존재할 수 있는 유체점성 등의 영향을 고려한 부유체의 상하운동저감 수치 해석 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 부유식 구조물에 상하운동을 제어하기 위한 몰수체를 양방향 스프링 강성을 지닌 연결체로 연결한 이중 부

Received 24 September 2018, revised 18 December 2018, accepted 22 February 2019

Corresponding author Weoncheol Koo: +82-32-860-7348, wckoo@inha.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4384-0996>

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2018 in Jeju.

© 2019, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1 Floating structures located at Gyeongin Ara Marina (Monthly Maritime Korea, 2015)

유체(Two-body)를 대상으로 하였다. 그리고 실제 해상상태를 가정한 입사파 조건에 따라 연결체의 스프링 강성과 물수체의 면적에 따른 상부 부유체의 상하운동 감소에 대해 수치적으로 비교분석 하였고, 이를 바탕으로 부유체의 상하운동을 최소화할 수 있는 물수체의 형상을 최적화하였다. 또한, 물수체가 연결되지 않은 단일 부유체 모델(Single-body)을 수치 모델링하고, 실제 계측된 파 조건에 따른 30년 반복주기 파 조건의 산정과 적용을 통해 두 모델의 유의응답을 비교함으로써 물수체 설치 유무에 따른 부유체의 상하운동저감 효과를 추정하였고 이에 따른 항만 내 실제 적용 가능성을 추정하였다.

## 2. 기초 이론 및 배경

### 2.1 이자유도계 운동 방정식(Two degree of freedom(DOF) equation of motion)

본 연구에서는 부유체가 수직 파일로 인해 상하운동 이외의 운동은 구속되어 매우 작다고 가정하였다. 따라서, 단일 부유체는 하나의 자유도를 가지며, 물수체가 연결된 경우에는 두 물체의 상호작용에 의해 두개의 자유도를 가진다. 또한 Shin et al.(2017)의 실험적 연구 결과를 통해 부유체와 물수체간의 연결체와의 연성운동을 이상적인 스프링강성으로 고려하였으며, 이에 따른 부유체 동요에 따른 이자유도계 운동 방정식을 적용하였다.

$$\begin{aligned} (M_{33} + A_{33})\ddot{x}_3 + C_{33}\dot{x}_3 + K_{33}x_3 + K_{added}x_3 + A_{39}x_9 \\ + C_{39}\dot{x}_9 - K_{added}x_9 = F_3 e^{i\omega t} \\ (M_{99} + A_{99})\ddot{x}_9 + C_{99}\dot{x}_9 + K_{99}x_9 + K_{added}x_9 + A_{93}x_3 \\ + C_{93}\dot{x}_3 - K_{added}x_3 = F_9 e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\ddot{x}_i, \dot{x}_i, x_i$ 는 각각 부유체 운동방향의 가속도, 속도, 변위이며,  $M_{ij}, A_{ij}, K_{ij}$ 는 각각 부유체와 물수체의 질량, 부가질량, 복원력 계수를 의미하며,  $K_{added}$ 는 연결체의 스프링 강성계수,  $F_i$ 는 파랑에 의한 외력을 나타낸다. 또한, 아래첨자 3과 9는 각각 부유체와 물수체의 상하운동을 나타낸다. 식 (1)에서  $K_{99}$ 는 물수체의 스프링강성으로 거의 존재하지 않다고 볼 수 있다.

식 (1)로부터 부유체의 응답이 최소가 되는 주파수를 예측할 수 있는데, 먼저 두 물체의 운동응답이 선형적이라고 가정하면 식 (2)와 같은 조화 함수로 나타낼 수 있다.

$$x_{3 \text{ or } 9} = X_{3 \text{ or } 9} e^{i\omega t} \quad (2)$$

$X_{3 \text{ or } 9}$ 는 부유체 또는 물수체의 운동 변위이며, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)과 같이 부유체와 물수체의 속도와 가속도를 입사파 주파수와 운동 변위를 이용해서 나타낼 수 있다. 이때, 물수체의 자체 상하 운동 강성과 방사 감쇠가 거의 없고, 물수체에 작용하는 힘이 매우 작다고 가정하였다.

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M_{33} + K_{33} + K_{added} & -K_{added} \\ -K_{added} & -\omega^2 M_{99} + K_{added} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_3 \\ X_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 부유체와 물수체 각각의 질량과 부가질량의 합을  $M_i$ 로 나타내었으며, 식 (3)을 부유체의 상하운동변위  $X_3$ 에 대해 정리하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_3 = \frac{F_3 (K_{added} - \omega^2 (M_{99}))}{(-\omega^2 M_{33} + K_{33} + K_{added})(-\omega^2 M_{99} + K_{added}) - K_{added}^2} \quad (4)$$

식 (4)의 분자가 0이 되면 상하운동변위가 0이 되는데, 이 때의 주파수  $\omega$ 를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega = \sqrt{\frac{K_{added}}{M_{99}}} \quad (5)$$

식 (5)를 통해 특정 입사파 주파수에 대한 물수체의 부가질량이나 연결체의 스프링 강성을 변화시키기에 따라 부유체의 상하운동 변위를 최소화 시킬 수 있음을 알 수 있다(Shin et al., 2017).

### 2.2 규칙파 해석

본 연구에서는 부유체 운동 해석을 위해 비점성, 비압축성, 비회전성의 포텐셜 유동을 기반으로 한 유체동역학적 상용 프로그램인 ANSYS AQWA를 활용 하였다. 또한 프로그램의 운용

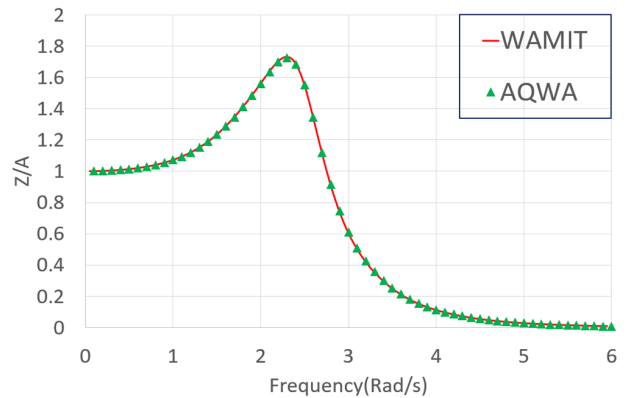


Fig. 2 Comparison of heave Response amplitude operator(RAO) of a single rectangular body with two commercial programs (Length×Breadth×Thickness = 10 m × 2 m × 1 m)

신뢰성을 검증하기 위해 또 다른 유체동역학적 상용 프로그램인 WAMIT을 이용한 이전 연구의 단일 부유체 모델에 대한 규칙과 해석 결과를 Fig. 2와 같이 비교 분석하였다.

Fig. 2를 통해 ANSYS AQWA와 WAMIT을 통한 규칙과 해석이 같은 결과 값을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구에서는 ANSYS AQWA를 이용한 연구 결과에 충분한 신뢰성이 있다고 판단하여 수치해석을 수행하였다.

## 2.3 해양파 산정 배경

해양구조물의 설계에 필요한 설계파고를 산출하는 방법은 풍속의 연중 최대치를 사용하여 추정하는 방법(Hindcasting), 계측된 파고의 연중 최대치를 이용하는 방법 그리고 계측된 파랑자료를 이용하여 추정하는 방법 등이 있다. 일반적으로 관측된 파랑자료를 통한 설계파고의 추정과정에는 구조물을 설치하는 지역의 최소 2-3년간의 파랑관측 자료를 사용하는 것이 권장된다.

본 연구에서는 해수면이 잔잔하여 초보자도 쉽게 해양레저에 관심을 가질 수 있고, 수도권에 위치하여 국제적인 관광 명소로서 발전이 기대되는 경인항을 해당 마리아 지역으로 선정하였고, 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, 2012)의 실시간해양관측정보시스템을 통해 경인항의 파랑자료를 수집하였다. 또한, 경인항의 설계파고를 계산하기 위해 파랑빈도분포표(Wave scatter diagram)에서 유의파고와 영점상향통과주기를 이용하여 30년 반복주기를 가지는 파고를 산출하였다.

## 2.4 선형 회귀 분석

설계파고를 추정하는 방법은 먼저  $n$ 년 반복주기를 가지는 한계유의파고( $H_{sn}$ )을 결정하고, 이 한계유의파고를 이용하여 극한파고를 추정하는 과정으로 나누어진다. 여기서 한계유의파고를 계산하기 위해서는 적절한 확률분포함수를 선정해야 한다. 본 연구에서는 일반적으로 해양파에 적용되어 신뢰성 있는 결과를 산출할 수 있는 Weibull 분포함수를 이용하였다.

$$P(H) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H-\epsilon}{\theta}\right)^\alpha\right] \quad (6)$$

여기서,  $P(H)$ 는 Weibull 분포함수의 누적확률분포함수이며,  $H$ 는 파고,  $\alpha$ 와  $\theta$ 는 형상 파라미터(Shape parameter),  $\epsilon$ 는 위치 파라미터(Location parameter)이다. 식 (6)을 정리하면 다음과 같이  $Y = mX + b$  형태의 선형관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\ln[\ln(1 - P(H))] = -\alpha \ln(H - \epsilon) + \alpha \ln(\theta) \quad (7)$$

식 (7)과 같은 선형관계식에서  $X$ 축과  $Y$ 축은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = \ln(H - \epsilon), Y = \ln(\ln(1 - P)) \quad (8)$$

$$m = -\alpha, b = \alpha \ln \theta$$

## 2.5 설계파고 계산 방법

본 연구에서는 구조물 설치지역인 경인항의 4년치 파랑관측 자료를 사용하여 설계파고를 추정하였다.

$n$ 년 반복주기를 가지는 한계유의파고  $H_{sn}$ 를 구하는 과정으로는 해당지역의 관측된 파랑자료의 파랑빈도분포표를 작성하여 누적확률분포로 정리하고, 확률분포함수를 사용하여 선형회귀 분석을 실시하여 얻을 수 있는 값을 통해 설계파고 및 파주기를 구할 수 있다(Tucker, 1991).

## 2.6 파랑 스펙트럼(Wave spectrum)

본 연구에서는 충분히 발달한 풍파에 대한 파랑 스펙트럼 모델 중 하나인 Pierson-Moskowitz(PM) 스펙트럼을 적용하여, 불규칙 파를 고려하였다. 유의파고와 최대파주기에 따른 에너지 스펙트럼은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다(Heo et al., 2016).

$$S_\zeta(\omega) = \frac{173 \cdot H_s^2}{T^4} \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left\{\frac{-692}{T^4} \cdot \omega^{-4}\right\} \quad (9)$$

여기서,  $H_s$ 와  $T$ 는 각각 유의파고와 파주기,  $\omega$ 는 측정할 주파수 범위이다.

## 2.7 응답 스펙트럼(Response spectrum)

응답 스펙트럼은 상하운동응답과 파랑 스펙트럼의 연산으로 구할 수 있으며, 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 응답 스펙트럼을 이용하면, 불규칙파 중 운동의 통계적 특성을 구할 수 있다. 응답이 Rayleigh 분포를 따를 때, 제곱평균제곱근(Root mean square, RMS)을 산정하고, 이를 이용하여 유의응답(RMS의 2배)과 최대응답(유의응답의 1.86배)을 계산할 수 있다(Mansouri and Hadidi, 2009).

$$S_z(\omega) = RAO(\omega)^2 \cdot S_\zeta(\omega) \quad (10)$$

# 3. 수치 결과 및 해석

## 3.1 수치모델

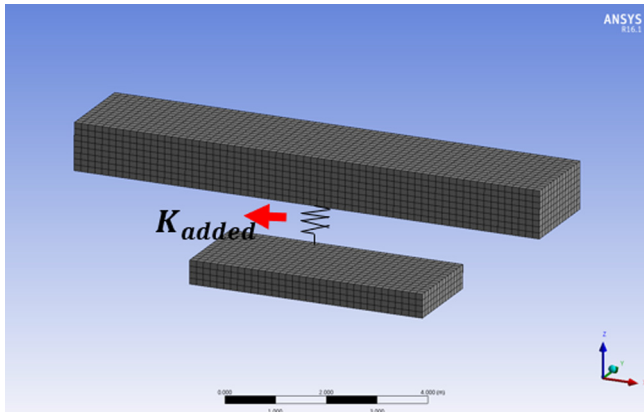
본 연구에서 사용된 수치 모델은 조위변동에 관계없이 상시 선박이 계류할 수 있는 부잔교를 수치적으로 모델링 한 것으로써, 직사각형 마지형태의 부유체와 몰수체가 스프링 강성을 지닌 연결체로 연결된 구조이다. Shin et al.(2017)에 의하면 부유체와 몰수체의 면적비와 스프링강성비의 변화의 따라 몰수체와의 상호작용으로 부유체의 상하운동응답이 변화하는 것을 확인한 바 있다. 본 연구에서는 Shin et al.(2018)의 수치적 연구를 기반으로 부유체 상하운동의 최소화를 위해 몰수체의 면적비, 스프링 강성비와 같은 매개변수를 통해 경인항에 적용될 수 있는 가장 적합한 몰수체의 형상을 모델링하였다.

Table 1은 부유체와 몰수체의 제원을 나타낸 것이다. 여기서  $A_F$ 는 부유체의 수선면적이며,  $A_S$ 는 몰수체의 투영면적이다. Fig. 3은 ANSYS Workbench를 이용하여 모델링한 구조물의 형상을 나타낸 것이다. 몰수체의 형상은 Fig. 3과 같이 부유체와 몰수체의 폭은 동일하되, 몰수체의 길이방향 길이를 줄여 그에 따른 면적의 비율을 통해 몰수체의 투영면적을 선정하였다.

MOF(2013)에 따르면 20m 미만의 마리아 선박용 잔교 및 부잔교의 건현은 300~500mm로 권장된다. 따라서 이를 반영한 부

**Table 1** Structural properties of numerical model

| Item            |  | Dimension                            |
|-----------------|--|--------------------------------------|
| Floating body   | Length ( $L_F$ )                               | 15 m                                 |
|                 | Breadth ( $B_F$ )                              | 2 m                                  |
|                 | Thickness ( $T_F$ )                            | 1 m                                  |
|                 | Water-plane area $A_F (=L_F \times B_F)$       | 30 m <sup>2</sup>                    |
|                 | Mass ( $m_{33}$ )                              | 30,750 kg                            |
|                 | Vertical restoring coefficient $K_{33} (K_F)$  | $3.0 \times 10^5$ N/m                |
| Submerged body  | Thickness ( $T_S$ )                            | 0.5 m                                |
|                 |  | $0.2A_F$<br>(mass = 3,075 kg)        |
|                 |  | $0.5A_F$<br>(mass = 7,687.5 kg)      |
|                 | Projected area at vertical direction ( $A_S$ ) | $0.8A_F$<br>(mass = 12,300 kg)       |
| Connection line |  | $1.0A_F$<br>(mass = 15,375 kg)       |
|                 |  | $0.5K_F$<br>( $1.5 \times 10^5$ N/m) |
|                 | Added stiffness $K_a (=K_{added})$             | $1.0K_F$<br>( $3.0 \times 10^5$ N/m) |
|                 |  | $1.5K_F$<br>( $4.5 \times 10^5$ N/m) |

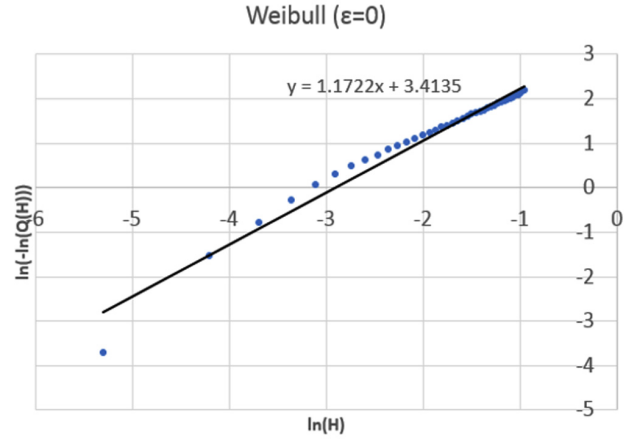


**Fig. 3** Numerical model of two DOF structure

유체의 두께를 1m로 선정하였으며, 물수체는 부유체의 두께의 절반으로 가정하였다. 또한, 부유체와 물수체를 연결하는 연결체의 길이는 항만 수심 및 조위차를 고려하여 1m로 결정하였으며, 입사파 주파수의 범위는 0.1rad/s부터 6.0rad/s까지, 0.1rad/s 간격으로 총 60개의 주파수에 대해 해석을 수행하였다.

**3.2 경인항의 해양파 산정**

국립해양조사원의 실시간 해양관측정보시스템으로부터, 해당 항만에서 측정된 다년간(2012~2015)의 파랑정보(유의파고, 유의파주기)를 얻을 수 있다. 계측된 파랑 정보와 파랑빈도분포표를 이용하여 선형 회귀 분석을 수행하면, Fig. 4와 같은 추세선을



**Fig. 4** Fitting of Weibull distribution

**Table 2** Calculation of ocean wave at Gyeongin Port

| $H_{S30}$<br>[m] | $H_{30}$<br>[m] | $T_2$<br>[sec] | $T_1$<br>[sec] | $1.3T_2$<br>[sec] |
|------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|
| 0.5              | 1.2             | 1.97           | 2.14           | 2.56              |

$H_{S30}$  : 30-year return period significant wave height  
 $H_{30}$  : 30-year return period marginal significant wave height  
 $T_2$  : Average zero up-crossing wave period  
 $T_1$  :  $1.086 T_2$   
 $T_{max}$  :  $1.3 \sim 1.4 T_2$

얻을 수 있다. 또한 이 추세선의 기울기와 y절편을 이용하여 30년 반복주기 유의파고와 최대파주기를 예측할 수 있다(SNAK, 2014).

통상적으로 마리나 항만 내의 유의파고는 0.3m를 넘지 않아야 하며, 최대 파주기는 2초를 기준으로 한다. 또한, 50년 반복주기를 고려할 경우에도 유의파고는 0.5m, 최대파주기는 2.5초를 넘지 않아야 한다(MOF, 2013). Table 2는 경인항에 대한 2012년부터 2015년까지 관측된 파랑정보를 이용하여, 30년 반복주기에 대한 유의/한계파고 및 최대파주기를 Weibull분포를 이용하여 예측하고 정리한 것이다. 유의파고는 0.5m로 50년 반복주기에 대한 기준을 만족하지만, 최대파주기는 2.76초로 50년 반복주기에 대한 기준보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 일반적인 마리나의 50년 반복주기에 대한 최대파주기는 한 지역이 아닌 여러 지역의 최대파주기의 값에 대한 평균이므로 기준치보다 작거나 클 것이라고 판단하였다. 계산 수행 시 최대파주기는  $1.3 T_2$ 의 값을 사용하였다.

Fig. 5는 경인항의 파랑 정보로 예측한 30년 반복주기 유의파고와 최대파주기를 이용하여 구한 파랑 스펙트럼을 나타낸 것이다. 파랑 스펙트럼의 최대값은 주파수가 2.28rad/s일 때 발생하였으며, 파랑 스펙트럼이 큰 값을 가지는 파 주파수 범위와 부유체 상하운동응답의 고유주파수 범위가 비슷한 경우 부유체의 실제 상하운동이 커지게 된다. 본 연구에서는 위와 같은 파랑 스펙트럼이 큰 값을 가지는 범위에서 물수체의 영향에 의한 부유체의 상하운동 저감을 확인하기 위해 단일 부유체와 이중 부유체의 수치해석을 수행하였다.



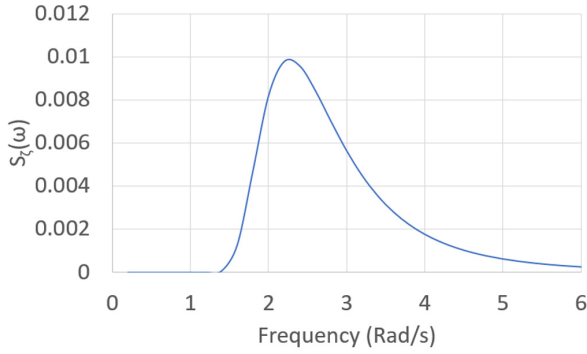


Fig. 5 Incident wave spectrum at Gyeongin Port ( $T_1 = 2.14$  s,  $H_s = 0.5$  m)

3.3 매개변수에 따른 부유체의 상하운동응답 계산

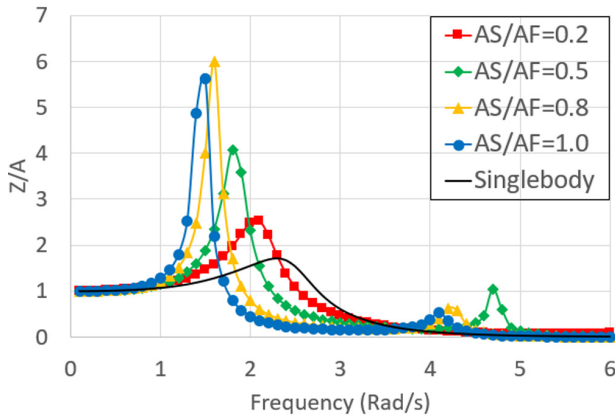
본 연구에서는 부유체 면적과 수직 복원력 계수에 대한 물수체의 스프링 강성비 및 면적에 따른 상하운동응답을 비교 분석하였다.

Fig. 6은 부유체와 물수체 사이의 면적비와 스프링 강성비에 따른 부유체의 상하운동응답을 환경 외력의 주파수에 대해 비교한 것이며, Table 3은 공진주파수와 그 주파수에서의 상하운동

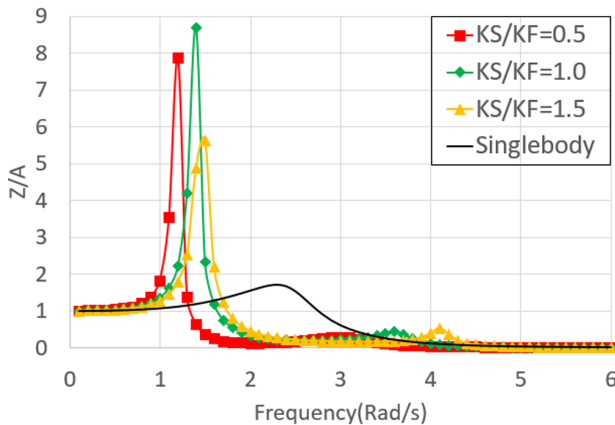
Table 3 Natural frequencies and RAOs of the surface floating body

| Single body                          | Ratio           | $\omega_n$ [rad/s] | RAO    |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------|--------|
|                                      | -               | 2.3                | 1.7206 |
| Two-body at various area ratios      | $A_s/A_F = 0.2$ | 2.1                | 2.2151 |
|                                      |                 | 6.2                | 0.4538 |
|                                      | $A_s/A_F = 0.5$ | 1.8                | 3.1852 |
|                                      |                 | 4.7                | 0.7855 |
|                                      | $A_s/A_F = 0.8$ | 1.6                | 4.2348 |
|                                      |                 | 4.2                | 0.9188 |
| $A_s/A_F = 1.0$                      | 1.5             | 3.7023             |        |
|                                      | 4.1             | 1.0722             |        |
| Two-body at various stiffness ratios | $K_s/K_F = 0.5$ | 1.2                | 7.8630 |
|                                      |                 | 3.0                | 0.2830 |
|                                      | $K_s/K_F = 1.0$ | 1.4                | 8.6842 |
|                                      |                 | 3.6                | 0.4339 |
|                                      | $K_s/K_F = 1.5$ | 1.5                | 5.6283 |
|                                      |                 | 4.1                | 0.5277 |

동응답을 정리한 것이다. 먼저 Fig. 6에서, 앞서 언급한 바와 같이 단일 부유체는 일자유도 운동을 하므로 그에 따라 하나의 공진주파수를 가지는 것에 반해, 이중 부유체는 물수체와의 상호작용으로 인해 이 자유도 운동을 하므로 그에 따라 두 개의 공진주파수가 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 물수체와의 상호작용에 의해 부유체의 상하운동 공진주파수가 변화하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(a)는 부유체와 물수체의 면적비 변화에 따른 부유체의 상하운동응답을 나타낸 것이다. 앞서 경인항의 30년 반복주기 파랑조건에 따른 파랑 스펙트럼과 비교하여, 단일 부유체의 상하운동응답에 따른 공진주파수는 2.3rad/s로서 최대 파랑 스펙트럼 주파수(2.28 rad/s)와 거의 일치하므로 단일 부유체의 상하운동은 주어진 파랑조건에서 매우 크게 발생할 것임을 예측할 수 있다. 한편, 이중 부유체의 경우, 각각의 공진주파수 범위들은 파랑 스펙트럼이 최대인 주파수 범위를 벗어나게 되어 단일 부유체와 비교하였을 때, 이중 부유체의 상하운동은 단일 부유체의 상하운동에 비해 크게 감소할 것임을 예측할 수 있다. 또한, Fig. 6(b)는 물수체의 스프링 강성비에 따른 부유체의 상하운동응답을 나타낸 것이다. 연결체의 강성이 증가할수록 부유체의 공진주파수가 증가(공진주기가 짧아짐)하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 강성이 큰 연결체일수록 부유체가 보다 짧은 입사파에 반응함을 의미한다.



(a) Comparison of heave RAO for various area ratios with  $K_s/K_F = 1.5$



(b) Comparison of heave RAO for various stiffness ratios with  $A_s/A_F = 1.0$

Fig. 6 Heave RAOs of the surface floating body

본 연구에서는 Fig. 6의 부유체의 상하운동응답에 대한 수치 해석 결과를 바탕으로, 경인항의 파랑조건에 가장 적합한 물수체의 조건을 선정하였다. 파랑 스펙트럼의 값이 큰 주파수 범위를 회피함과 동시에 작은 RAO값을 가지는 면적비( $A_s/A_F = 1.0$ )와 스프링 강성비( $K_s/K_F = 1.5$ )를 이용하여 본 연구의 수치해석에 사용하였다. Fig. 7은 위의 조건들을 적용하여 계산한 이중 부유체의 상하운동응답을 단일 부유체의 경우와 비교한 것이다. 이중 부유체 모델의 첫 번째 공진주파수 범위가 단일 부유체의 공진주파수 범위보다 더 낮은 주파수(저주파수)에 존재하고, 계산된 RAO 값이 상대적으로 더 크음을 확인할 수 있다. 그러나,

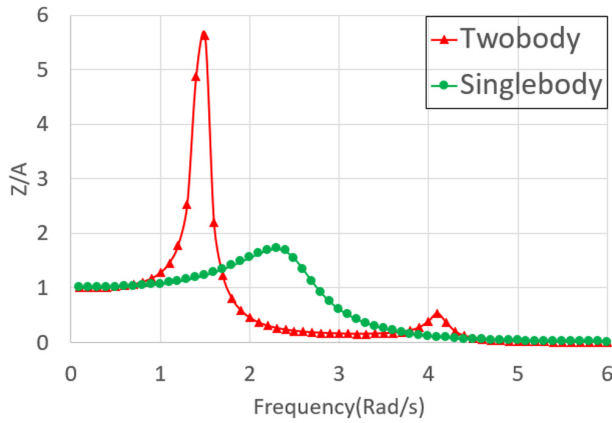


Fig. 7 Heave RAO of the numerical models at  $A_s/A_F=1.0$ ,  $K_s/K_F=1.5$

이는 실제 해상에서 발생할 수 있는 추가적인 점성 영향을 고려한 부유체 상하운동저감에 관한 수치적 연구(Shin et al, 2018)에 의하면 부유체의 상하운동응답 크기가 더욱 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 실제 해상에서의 부유체는 점성의 영향으로 상하운동이 이보다 더 저감될 것으로 판단된다.

### 3.4 경인항 해상조건을 적용한 부유체 응답 스펙트럼

본 연구에서는 식 (10)을 이용하여 부유체의 상하운동에 대한 응답 스펙트럼을 계산하였으며, 몰수체의 유무에 따른 결과를 비교하였다.

Fig. 8은 경인항의 파랑조건에 따른 단일 부유체와 이중 부유체의 응답 스펙트럼을 나타낸 것이다. 단일 부유체의 응답 스펙트럼의 최대값은 2.3rad/s에서 발생하였으며, 이중 부유체의 응답 스펙트럼의 최대값은 대략 1.5rad/s에서 발생하였다. 앞서 예측한 것처럼, 이중 부유체의 응답 스펙트럼의 최대값은 단일 부유체의 최대값에 비해 상당히 작은 값을 확인할 수 있다. 이는 단일 부유체의 경우, 경인항의 파랑조건에 따른 공진주기와 단일 부유체의 공진주기가 일치되어 응답 스펙트럼의 값이 커지게 된 것이다. 또한, 이중 부유체는 몰수체의 영향에 의해 공진주기가 변화하여, 경인항의 파랑조건에 따른 공진주기를 회

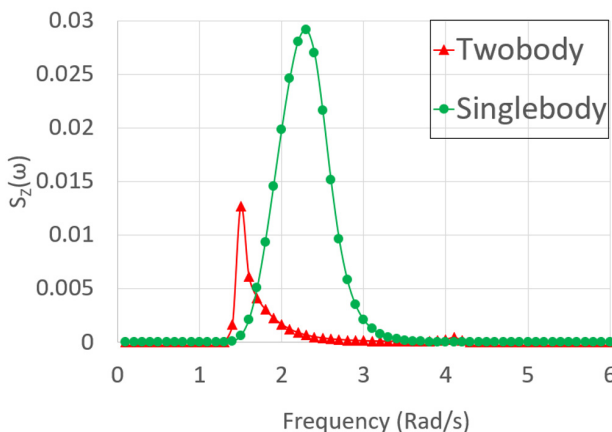


Fig. 8 Comparison of response spectrum of two different models at Gyeongin Port

피했음을 알 수 있다. 또한, 응답 스펙트럼의 제곱 평균값을 이용하여 계산한 유의응답은, 단일 부유체와 이중 부유체에 대해 각각 0.30m와 0.12m이며, 이중 부유체 모델이 약 60%의 상하운동저감 효과가 있음을 확인하였다. 또한 Fig. 7에 대한 결과에서 언급한 바와 같이, 실제 해상에서 점성영향 등을 고려한다면, 이중 부유체의 상하운동 저감효과는 더 증가할 것으로 판단된다. 이상의 결과를 통해, 본 연구에서 고려한 이중부유체는 경인항의 해상조건에서 상당한 상하운동저감 효과를 기대할 수 있으며, 향후 유사한 해역에서 본 연구에서 제시한 규모의 몰수체를 연결한다면 부유체의 상하운동 저감에 큰 효과를 발휘할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 연안레저 구조물 설치가 필요한 연안환경(특히 경인항)에 적합한 부유식 마리나 구조물의 상하운동을 저감하기 위해, 몰수체와 부유체가 스프링 강성을 가지는 연결체로 이루어진 이중 구조물의 상하운동응답을 수치 모델링하여, 단일 구조물의 운동성능과 비교 분석하였다.

부잔교 형태의 구조물인 단일 부유체 모델과 부유체에 연결된 몰수체로 구성된 이자유도 모델의 상하운동응답을 유체동역학 프로그램(ANSYS AQWA)을 이용하여 계산하였다. 또한, 경인항을 목적 항만으로 선정하고, 30년 반복주기 파랑 조건을 예측하여 이를 해상조건으로 대입하여, 두 구조물의 응답 스펙트럼을 계산하였고, 이를 통해 이중 부유체의 상하운동저감 효과를 확인하였다.

본 연구를 통해 제시된 이중 부유체는 단일 부유체에 비해 약 60%의 상하운동 저감의 효과가 있음을 확인하였고, 실제 해상에서 점성 효과 등을 고려한다면 더 큰 저감 효과가 예상된다.

경인항을 비롯한 국내 연안에 부유식 구조물을 설치하게 될 경우, 해당 지역에서의 환경 조건과 본 연구에서 제시한 방법을 이용하면 부유체의 상하운동을 저감할 수 있는 부유체 설계에 도움이 될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “한·영 해양플랜트 글로벌 전문인력양성사업”의 지원을 받아 수행된 연구결과임. 또한, 이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력 양성).

## References

- Heo, S.H., Koo, W.C., Park, M.S., 2016. Dynamic Response Analysis of a Jack-up Leg with Pile-Soil Interaction. *New & Renewable Energy*, 12(1), 10-18. <https://doi.org/10.7849/ksnre.2016.03.12.1.10>
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency 2012. Korea Ocean Observing And Forecasting System. [Online] Available at:

- <[http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/oldobservation/obs\\_past\\_search\\_statistic.do](http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/oldobservation/obs_past_search_statistic.do)> [Accessed 5 Mar. 2018].
- Mansouri, R., Hadidi, H., 2009. Comprehensive Study on the Linear Hydrodynamic Analysis of a Truss Spar in Random Waves. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 29, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering, 3(5), 349-361.
- Ministry of Oceans and Fisheries(MOF), 2013. Manual on Marina Operational Services.
- Ministry of Oceans and Fisheries(MOF), 2015. Marina Business Start Guide Book.
- Monthly Maritime Korea 2015. Floating Structures Located at Gyeongin Ara Marina. [Online] Available at: <<http://www.monthlymaritimekorea.com/news/articleView.html?idxno16318>> [Accessed 26 Mar. 2018].
- Ryu, H.J., 2007. A Study on the World Leisure Boat and Marina Industry for Korean Local Governments. Korea Local Authorities Foundation for International Relations, Seoul.
- Shin, M.J., Koo, W.C., Kim, S.J., Heo, S.H., Min, E.H., 2017. Experimental Study on the Reduction of Vertical Motion of Floating Body using Floating-Submerged Bodies Interaction. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 54(6), 485-491. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2017.54.6.485>
- Shin, M.J., Koo, W.C., Kim, S.J., 2018. Numerical Analysis of Vertical Motion Control of a Floating Structure with a Two-Body Interaction. International Journal of Applied Engineering Research, 13(1), 511-519.
- Tucker, M.J., 1991. Waves in Ocean Engineering. Ellis Horwood Ltd., Chichester.