

# 관제탑 형상을 고려한 부유식 해상공항의 유탄성 운동

이호영 · 곽영기 · 박종환  
목포대학교 선박해양공학과

## Hydroelastic Responses of the Floating Airport Considering the Shape for Control Tower

HO-YOUNG LEE, YOUNG-KI KWAK AND JONG-HWAN PARK

Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Mokpo National University, Mokpo 534-729, Korea

**Keywords :** Hydroelastic Response 유탄성 응답, Control Tower 관제탑, Source and Dipole Method, 소오스 다이폴법, Finite Element Method 유한요소법

**Abstract :** *Very Large Floating Structures have been planned for effective utilization of ocean space in recent years. The VLFS usually has a control tower to guide airplane securely. This paper present an effective method for calculating the wave induced hydroelastic responses of VLFS considering the effect of control tower-shapes. The source and dipole distribution method is used to calculate the hydrodynamic loads and equation of motion is derived by considering the static and dynamic coupling effects from different segments of the plate. The rigidity matrix for VLFS is formulated by finite element method using a plate theory. The calculated results for VLFS with a control tower are compared with those for VLFS without a control tower.*

### 1. 서 언

인간 활동을 위해 사용되는 육지가 매우 제한되어 있기 때문에 길이와 폭이 수천 킬로미터가 되는 초대형 부유식 해양 구조물은 일본을 비롯하여 여러 국가에서 육지공항의 대안으로서 적극적으로 검토되고 있다. 심지어 충분한 국토 면적을 가지고 있는 국가도 미래에는 소음 및 환경 오염을 회피하기 위해 바다가 인접한 대도시 근처에서는 부유식 해상공항이 육지 공항보다 선호될지 모른다.

이런 추세에 맞추어 일본의 메가플로트(Mega-float) 연구 조합은 해상공항에 대한 개념 설계를 완성하여 길이가 1km나 되는 구조물을 성공적으로 건조하고 실 해상에서 실증 실험을 수행하였다. 대부분 해상에 설치되는 해상공항은 직사각형 모양이 아니라 관제탑을 설치하기 위해 중간부분이 약간 튀어나와 있다. 이전의 연구에서 이를 고려하여 파랑중의 해상공항에 대한 유탄성 해석을 수행한 예는 흔하지 않다.

지금까지 폰툰(pontoon)식 초대형 부유식 해상공항의 유탄성 응답을 해석하기 위하여 여러 가지 방법이 개발되었다. 기 개발된 방법을 요약하면 해상공항의 유체력을 해석하기 위해 압력분포법(Kashiwagi, 1998; Yago and Endo, 1996; 이등, 2000), 특이점 분포법(구등, 1998; 심등, 1999; 이와신, 2000; Murai et al., 1999) 및 속도 포텐셜 접속법(Nagata et al., 1997; Ohmatsu, 1998)을 주로 사용하였고, 구조물의 변위를 계산하기 위해 보(구등, 1998) 및 판 요소(심등, 1999; 신등, 2000; 이와 신, 2000; Yago and Endo, 1996)를 사용한 유한요소법, 유한차분법(Murai

et al., 1999) 및 자유-자유보를 중첩한 모드(Mode) 해석법(신등, 2000; 이등, 2000; Kashiwagi, 1998; Nagata et al., 1997; Ohmatsu, 1998) 이 주로 사용되었다. 유체력 해석을 위한 압력분포법은 홀수가 변하는 구조물에 적용하기 어려우나 특이점 분포법과 속도포텐셜 접속법은 홀수가 변하는 다양한 형상에 적용할 수 있다. 모드 해석법은 형상이 간단한 직사각형 구조물에 적용할 수 있지만 다양한 형상의 구조물에 대해 적용하기 힘든 반면에, 유한요소법은 다양한 형상의 구조물과 불균일 구조물에 대해 적용하기가 쉽고 또한 이용 용도가 다양하게 사용된다.

본 논문은 파랑에 의한 유체력을 계산하기 위해 소오스-다이폴 분포법이 사용되었다(이와 신, 2000). 구조물의 응답은 임의의 형상에 대해서도 쉽게 적용하기 위해 판 요소를 사용한 유한요소법을 이용하여 강성 행렬을 구성한 운동방정식을 통하여 계산된다.

본 연구에서 계산 모델(Model)로 길이가 300m, 1000m 인 직사각형 모양의 부유식 해상공항을 도입하고 관제탑은 길이 방향의 중앙 및 윗부분에 위치시켜 관제탑이 있는 경우와 없는 경우에 대한 비교 계산을 수행하였다.

### 2. 문제의 정식화

초대형 해양공항의 유탄성 응답 운동을 기술하기 위해 우수 직각 좌표계를 사용하였고,  $z=0$ 는 정수면에 위치하며 원점은 구조물의 중심에 놓이며 구체적인 모습은 Fig.1에 도시하였다.

유체의 유동은 비점성, 비압축성 및 비회전적 흐름을 가정하면 속도 포텐셜이 도입되고 구조물의 운동이 작다고 가정하면 모든 경계조건이 선형화된다. 또한 속도 포텐셜이 시간에 대한 조화함수라 가정하면 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = i\omega [\zeta_0(\varphi_I + \varphi_d) + \sum_{m=1}^N \sum_{j=1}^3 X_{m,j}^m \varphi_{m,j}^m] e^{i\omega t} \quad (1)$$

여기서  $\omega$ 는 입사파의 원진동수를 나타내며,  $\varphi_I$ 는 입사파 포텐셜이며,  $\varphi_d$ 는 산란 포텐셜이며,  $\zeta_0$ 는 입사 파랑의 진폭이며,  $N$ 은 구조물의 총 부체의 수를 나타내며,  $\varphi_{m,j}^m$ 는  $m$  부체 요소의  $j$  번째 모드의 운동에 의한 속도 포텐셜이며,  $X_{m,j}^m$ 는  $m$  부체 요소의  $j$  번째 모드의 운동에 의한 운동 진폭을 나타내며,  $j=1, 2, 3$ 은 상하동요, 횡동요, 종동요 운동 모드를 나타낸다.

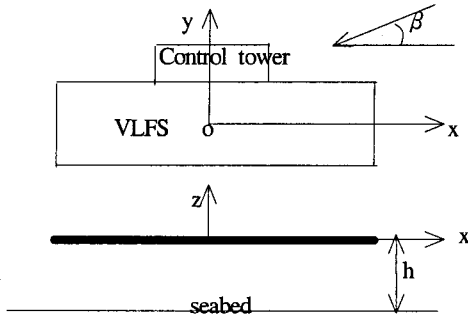


Fig.1 Definition of Coordinate system

유한수심에서 입사 파랑의 속도 포텐셜은 선형이론으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\varphi_I = \frac{g}{\omega^2} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (2)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도이며,  $k$ 는 입사파의 파수이며,  $\beta$ 는 입사파의 입사각도를 나타내며 양의  $x$ 축으로부터 반시계 방향이 양의 각도이다. 방사문제와 산란문제에서 선형화된 물체표면 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \varphi_{m,j}^m}{\partial n} = n_{m,j}^m, \quad \text{on } S^m \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi_{m,j}^m}{\partial n} = 0, \quad \text{on } S^i \quad (i \neq m)$$

$$\frac{\partial \varphi_d}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_I}{\partial n} \quad \text{on } S^i \quad \text{and } i=1,2,\dots,N \quad (4)$$

여기서  $S^m$ 와  $S^i$ 는 각각  $n$ 번째와  $i$  번째 부체 요소에서 물체 표면을 나타내며,  $n_{m,j}^m$ 는  $m$  부체표면의  $j$  번째 운동 모드에 대한 방향 코사인 이다. 방사 및 산란 속도 포텐셜은 그린

(Green) 제 2정리에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$2\pi \varphi_{m,j}^m(P) + \sum_{n=1}^N \int_{S^n} \varphi_{m,j}^m(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} ds = \sum_{n=1}^N \int_{S^n} G(P,Q) \frac{\partial \varphi_{m,j}^m}{\partial n_Q} ds \quad (5)$$

$$2\pi \varphi_d(P) + \sum_{n=1}^N \int_{S^n} \varphi_d(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} ds = - \sum_{n=1}^N \int_{S^n} G(P,Q) \frac{\partial \varphi_I}{\partial n_Q} ds \quad (6)$$

여기서  $P$ 는 관측(Field)점이며,  $Q$ 는 소오스(Source) 점을 표시한다.  $G(P,Q)$ 는 방사조건, 해저면 조건, 선형화된 자유표면조건 및 연속방정식을 만족하는 유한수심에서 동요하는 그린함수이다. 그린함수에 대해 급수전개한 형태와 적분형태는 이와 신(2000)에 자세하게 주어진다. 식 (5) 및 (6)에서 방사 속도포텐셜과 산란포텐셜을 계산하면 부가질량, 파랑 감쇠계수 및 파랑 제력은 다음과 같이 표현된다.

$$a_{kj}^{mn} = -\rho \text{Re} \left[ \int_{S^n} \varphi_{m,j}^m; n_{m,k}^m ds \right] \quad (7)$$

$$b_{kj}^{mn} = \rho \omega \text{Im} \left[ \int_{S^n} \varphi_{m,j}^m; n_{m,k}^m ds \right] \quad (8)$$

$$F_{m,j}^m = -\rho \zeta_0 \omega^2 \int_{S^n} (\varphi_I + \varphi_d) n_{m,j}^m ds \quad (9)$$

$$(k, j = 1,2,3 : m, n = 1,2,\dots,N)$$

초대형 해상공항은 길이와 폭의 차원에 비해 깊이가 아주 작으므로 판으로 치환될 수 있고, 운동방정식은 식 (7)~(9)에서 계산된 유체력, 정적 복원력 및 판 요소로 표현된 유한요소법을 사용하여 계산된 강성행렬에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$-\omega^2 M_{j,j}^m; X_{j,j}^m + \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^3 (-\omega^2 a_{kj}^{mn} + i\omega b_{kj}^{mn} + C_{kj}^{mn}) X_{m,k}^m = F_{m,j}^m \quad (10)$$

$$(j=1,2,3 : n=1,2,3,\dots,N)$$

여기서  $M_{j,j}^m$ 는  $j$  방향의 운동에 대한  $n$ 번째에 있는 부체의 질량 또는 관성모멘트를 나타내며,  $C_{kj}^{mn}$ 는 복원력과 구조적 반력을 나타내는 강성행렬을 포함한다. 강성행렬은 판요소로 이산화하여 유한요소법을 사용하여 표현하였다(신등, 2000).

### 3. 계산결과 및 고찰

본 계산에 사용된 해상공항은 일본에서 실증실험을 수행한 길이가 300m인 구조물 및 1000m 구조물(Nagata et al., 1997)을 택하여 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 구조물의 기본 제원은 Table 1에 나타내었다.

Fig.2는 Model 1에서 관제탑이 있는 경우에 대하여 구조물의 수직운동을 x-y 평면에 도시하였다. 그림에서 입사파각이 0 deg 인 경우에도 관제탑이 놓이는 형상의 영향으로 운동 응답

이 폭 방향으로 비대칭인 것을 알 수 있다.

Fig.3은 Model 2에서 관제탑이 있는 경우에 대하여 구조물의 수직운동을 x-y 평면에 도시하였다. Model 1 보다 구조물이 길고 유연하므로 응답의 동요 주파수가 짧게 나타나고 응답의 크기도 작다.

Fig.4는 Model 1인 경우에 대해 중심선, 좌현 및 우현에서 구조물의 수직 운동값을 도시하였다. 관제탑이 없는 경우에 이전의 연구에서 계산된 응답 값을 실험치 및 다른 계산치와 비교하여 일치하는 결과를 도출하였고 본 논문에는 비교 결과를 도시하지 않았다(이와 신, 2000 ; 신등, 2000). 그림으로부터 관제탑 형상을 고려한 경우가 운동 응답값이 약간 크고 관제탑의 형상 영향이 관제탑이 놓이는 좌현보다 우현에서 뚜렷하게 나타난다.

Fig.5는 Model 2인 경우에 대해 중심선, 좌현 및 우현에서 구조물의 수직운동값을 도시하였다. 관제탑 형상을 고려한 경우와 관제탑이 없는 경우에 대한 운동값을 비교하면, 관제탑 형상을 고려한 경우의 운동 값이 동요폭이 약간 크다.

Table 1 Numerical data for computation

Model 1
L×B×D×draft(Main structure) ; 300m×60m×2m×0.5m
l×b×d×draft(Control tower) ; 100m×20m×2m×0.5m
h ; 58.5m
EI/B ; $8.1167 \times 10^8$ kgm
T ; 9.80 sec
Model 2
L×B×D×draft(Main structure) ; 1000m×200m×4.5m×1.5m
l×b×d×draft(Control tower) ; 200m×40m×4.5m×1.5m
h ; 60m
EI/B ; $7.5 \times 10^9$ kgm
T ; 10 sec

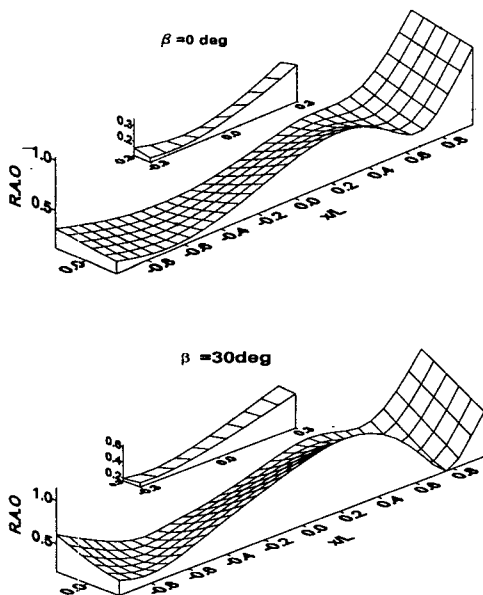


Fig.2 Distribution of vertical displacement amplitude(Model 1)

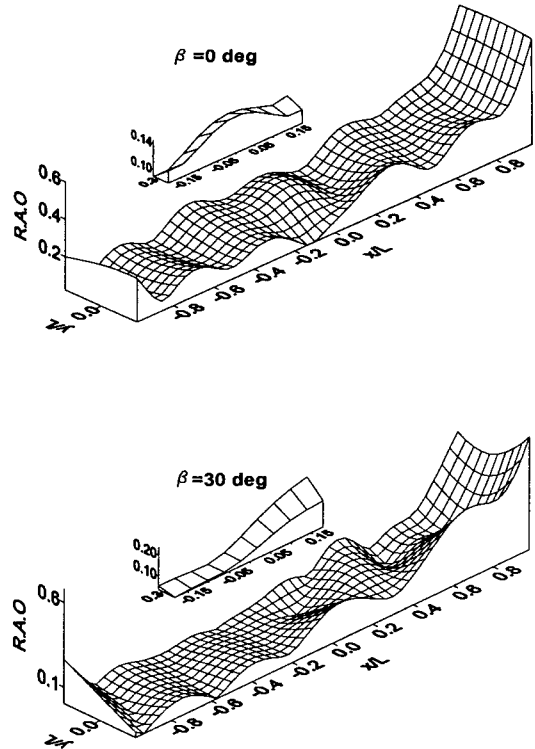
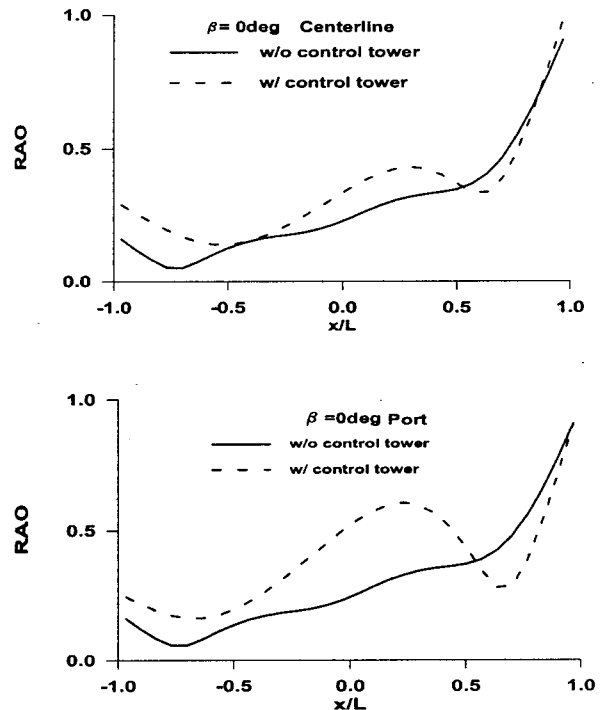


Fig.3 Distribution of vertical displacement amplitude(Model 2)



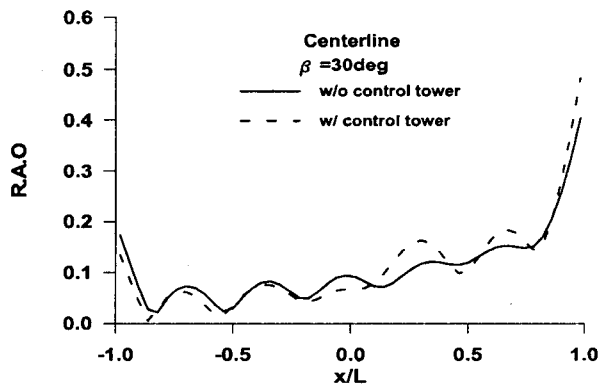
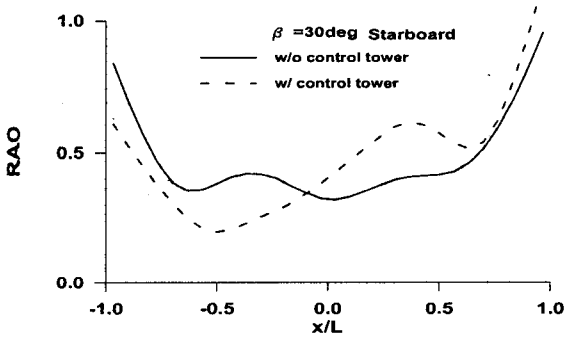
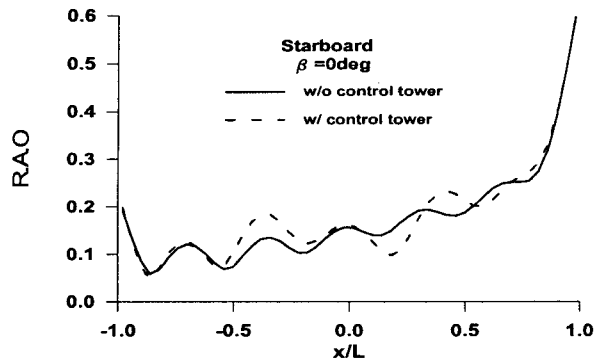
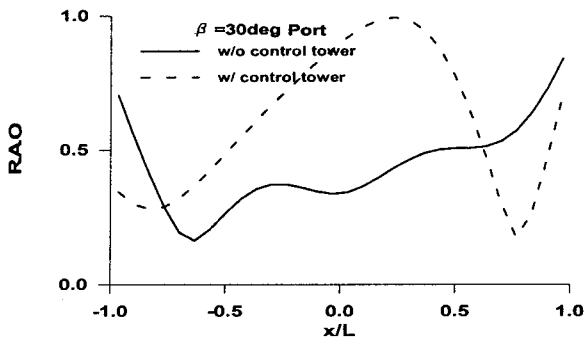
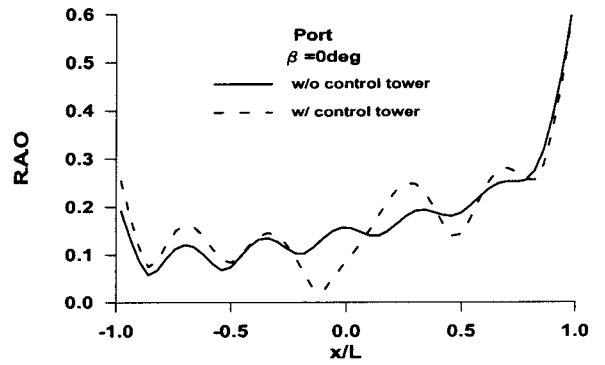
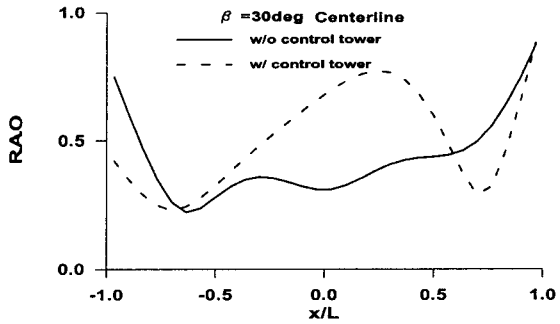
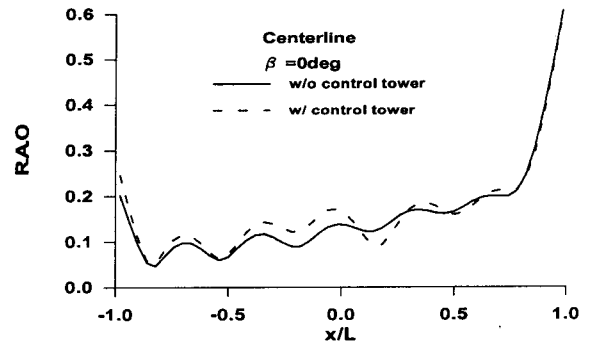
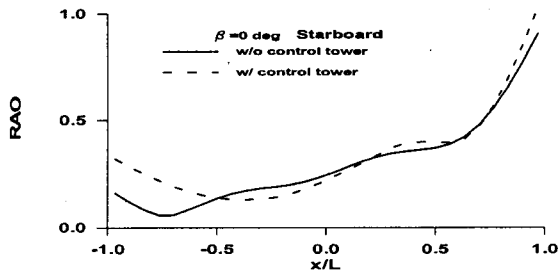


Fig.4 Longitudinal distribution of vertical displacement amplitude (Model 1)

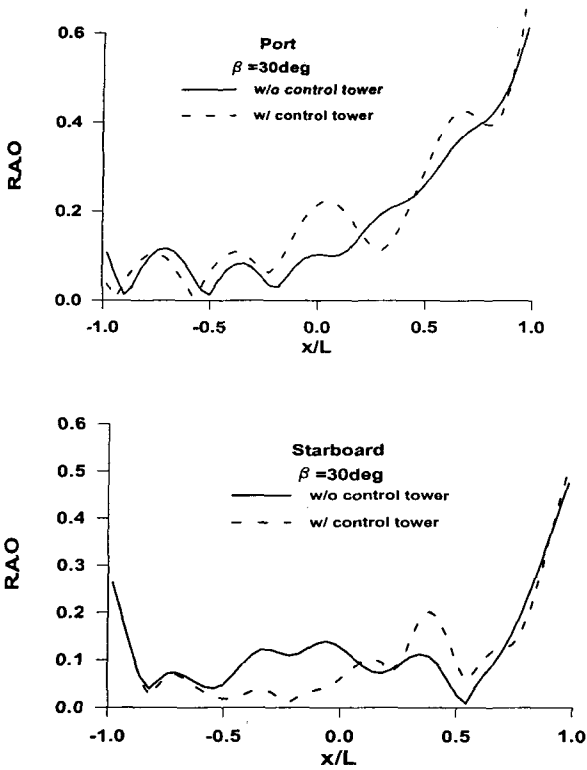


Fig.5 Longitudinal distribution of vertical displacement amplitude (Model 2)

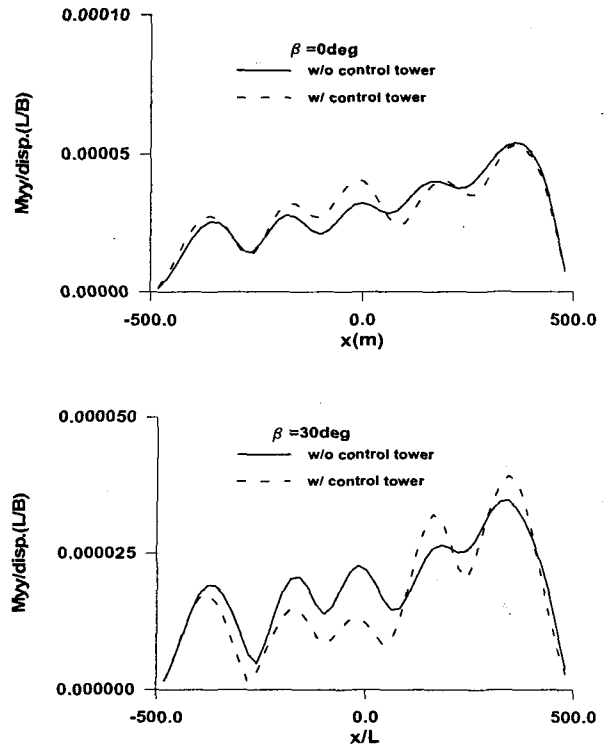


Fig.7 Longitudinal distribution of bending moment amplitude on centerline(Model 2)

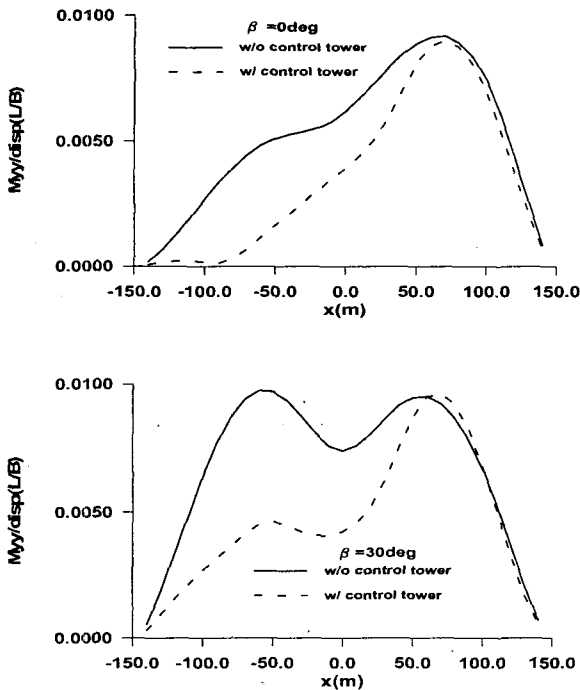


Fig.6 Longitudinal distribution of bending moment amplitude on centerline(Model 1)

Fig.6, 7은 각각 모델 1, 2인 경우에 중심선( $y=0$ )에서 구조물의 굽힘 모멘트( $M_{yy}$ )를 도시하였다. 굽힘 모멘트의 값은 관제탑 형상을 고려한 경우에 약간 크다. 왜냐하면 Fig.6, 7은 배수량에 의해 무차원화되었는데 배수량이 관제탑이 있는 경우에 약간 크기 때문이다. 또한 구조물이 길고 유연해지면 굽힘 모멘트가 길이방향으로 값의 차이가 커진다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 소오스-다이폴 분포법과 판이론에 의한 유한요소법을 사용하여 관제탑 형상을 고려하여 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 응답을 해석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 관제탑 형상을 유체력을 계산할 때와 유한요소법에서 고려하여 유탄성 해석을 수행하였다.
- (2) 관제탑 형상을 고려한 경우에 운동응답은 약간 커지고 굽힘 모멘트도 커지는 것을 확인하였다. 결과적으로 관제탑 형상을 고려하면 관제탑이 없는 경우보다 운동학적 및 구조적으로 약간 불리하다는 것을 알 수 있다.
- (3) 앞으로 불균일 구조물과 운동을 저감할 목적의 방파제 형태를 도입한 구조물의 계산에 본방법을 적용하여 유탄성 해석을 수행할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- 구자삼, 조효제, 김병현, 이창호(1998). “바이지식 초대형 부유식 구조물의 유탄성 응답 해석”, 한국해양공학회지, 제12권 제2호.
- 신현경, 이호영, 신현수, 박인규(2000). “초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답에 대한 해석 방법”, 한국해양공학회지, 제14권 제2호, pp 19~27.
- 신현경, 이호영, 신현수, 박인규(2000). “천홀수 부유식 해양구조물의 유탄성연구(II)-수치해석 기법 개발”, 현대중공업(주)-울산대학교 산학 협동연구과제 2차년도 최종보고서.
- 심인환, 윤재돈, 최항순(1999). “사파중에 놓인 거대 부유체의 응답에 대한 유탄성 해석”, 대한조선학회논문집, 제36권 제3호, pp 83~92.
- 이호영, 신현경(2000). “천홀수 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답해석”, 한국해양공학회지, 제14권 제2호, pp 53~59.
- 이호영, 신현경, 신현수, 박인규(2000). “압력분포법에 의한 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 해석”, 대한조선학회논문집, 제37권 제4호, pp 66~74.
- Kashiwagi, M.(1998). “A B-spline Galerkin Scheme for Calculating the Hydroelastic Response of a Very Large Floating Structure in Waves”, J. Mar. Sci. Technol. 3, pp 37~49.
- Murai, M., Kagemoto, H. and Fujino, M.(1999). “On the Hydroelastic Responses of a Very Large Floating Structure in Waves”, J. Mar. Sci. Technol. 3, pp 123~153.
- Nagata, S. et al.(1997). “The Analysis of the Wave-Induced Responses of an Elastic Floating Plate”, Proc. 16th OMAE Vol.VI, Ocean Space Utilization, Vol.4, pp 163~169.
- Ohmatsu, S.(1998). “Numerical Calculation of Hydroelastic Behaviour of Pontoon Type VLFS in Waves”, Proc. 17th OMAE, No.4333.
- Yago, K. and Endo, H.(1996). “On the Hydroelastic Responses of Box-Shaped Flating Structure with Shallow Draft(Tank Test with Large Scale Model)”, J. of Soc. of Naval Arch. of Japan. Vol.180, pp 341~352.