

불균일 강성을 갖는 폰툰형 구조물의 유탄성 응답 특성에 관한 실험 연구

조석규^{†*}, 홍사영^{*}, 김진하^{*}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*}

Experimental Study on the Hydroelastic Response of a Pontoon Type Structure with Nonuniform Mass and Stiffness

Seok-Kyu Cho^{†*}, Sa-Young Hong^{*} and Jin-Ha Kim^{*}

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering(KRISO), KORDI^{*}

Abstract

Very Large Floating Structure(VLFS) is regarded as one of promising candidates for the future utilization of ocean space. VLFS has the merits of small environmental effect, short construction term, easiness for extension and removal. It is well known that hydroelastic response is one of major design concerns of such a huge structure. Most of studies on the hydroelastic analysis of VLFS assumed uniform mass and bending stiffness. In case of a floating hotel where noticeable change of mass and stiffness at the hotel part is expected, it is necessary to investigate the effect of nonuniform mass and bending stiffness on the hydroelastic response. A model test of a pontoon type VLFS with nonuniform bending stiffness carried out for performance evaluation of a floating marina-hotel-convention center is described in this paper. Through investigation of model test results and comparison with numerical analysis using eigenfunction method, effect of the variation of bending stiffness is discussed.

※Keywords : VLFS(초대형 부유식 구조물), hydroelasticity analysis(유탄성 해석), model test(모형 시험), eigenfuncton expansion method(고유함수전개법)

1. 서언

연안 공간 확보의 주요 수단이었던 매립 대상지

의 급격한 감소와 매립으로 인한 환경비용의 증가로 인해, 차세대 해양 구조물로 주목을 받고 있는 초대형 부유식 구조물(VLFS: Very Large Floating Structures)을 이용한 해양공간의 활용 연구가 활발히 진행되어 왔다. 초대형 부유식 구조물은 설치되는 장소의 수심, 해저지형, 지진에 영향을 적게 받고, 건설기간이 짧으며, 구조물의 확장과 제

접수일: 2004년 5월 24일, 승인일: 2004년 8월 17일

† 주저자, E-mail: skcho@kriso.re.kr

Tel: 042-868-7501

거가 용이한 장점을 가지고 있다. 일본에서는 메가플로트 프로젝트(1995-2000)에서 길이 1000 m의 구조물의 설계, 건조, 설치 및 실증실험을 통해 실용화 기술의 검증이 완료된 상태이며, 최근 길이 4 km, 폭 1 km 규모의 하네다 공항 확장 계획에 VLFS를 이용하는 방안이 적극 검토되고 있다(Mega Float 技術研究組合 2000, Miyajima et al. 2003).

초대형 부유식 구조물은 길이, 폭에 비해 두께가 매우 얇아 구조물의 변형을 고려한 유탄성 응답이 설계에 있어 주된 고려사항이다. 기존의 유탄성 응답 해석은 대부분 균일 강성을 가진 구조물을 대상으로 하였다(이호영 등 2000(a), 2000(b), 홍사영 2003). 이는 초기 초대형 구조물의 용도로 검토된 대상이 구조물의 강성이 일정한 활주부가 대부분을 차지하는 해상비행장이었고 초대형 구조물의 규모가 기존의 해양구조물에 비해 매우 커서 초기 개념설계 과정에서 균일강성과 균일질량 분포가정이 해석의 효율 면에서 타당한 것으로 판단되었기 때문이었다. 그러나 최근 검토가 이루어지고 있는 부유식 컨테이너 항만이나 해상호텔과 같은 구조물에서는 컨테이너 야적장이나 호텔부와 같이 구조물의 상당 부분에 무게가 집중되고 이로 인한 구조적 강성의 증가가 일어난다. 이러한 구조물에서는 부분적인 질량의 집중과 강성의 증가효과가 유탄성 응답 검토에서 고려되어야 할 것으로 판단된다(Tsubogo/Okada 2003).

본 연구에서는 구조물의 상당 부분에 질량과 강성이 증가한 형태를 갖는 부유식 마리나 리조트/컨벤션센터에 대한 기본설계성능 검토를 위한 폰톤형 VLFS의 유탄성 응답 모형시험을 수행하였다. 모형시험의 대상인 부유식 마리나 리조트는 상부에 대칭으로 호텔이 배치되어 구조물의 질량분포와 강성이 위치에 따라 다르다. 본 연구에서는 부유식 마리나 리조트/컨벤션센터의 VLFS 모형을 불균일 강성을 가지도록 제작하여 유탄성 응답 모형시험을 수행하였으며, 균일강성 구조물에 대해 정확도와 효율이 입증된 Kim/Ertekin(1998), 홍사영 등(2003)의 고유항수전개법을 사용하여 유탄성 응답을 계산하여 실험결과와 비교함으로써 불균일 질량 및 강성 분포의 효과를 검토하였다.

2. 모형 시험

모형 시험은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 해양공학수조(L×B×D : 56×30×4.5 m)에서 수행하였다. 모형의 축척비는 강성, 두께, 수심, 계측범위 등을 종합적으로 고려하여 1/125로 정하였다. 실제 구조물이 설치되는 수심은 20m이나 앞에서 정한 모형비에서는 파도생성에 어려움이 있어 수심을 40m로 수정하였다. 규칙파 및 불규칙파에 대해 실험이 수행되었으며 실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Test conditions

Water Depth	40 m
Regular Wave	
Wave Period	5 ~ 25 sec
Wave Height	2.0 m
Irregular Wave	
Sig. Wave Height	1.0 m
Modal Period	13 sec.
Wave Direction	180°, 135°, 90°

2.1 모형과 계측시스템

2.1.1 모형 제작

VLFS 모형시험은 모형비가 크고 계류시스템의 제작, 조파, 수심과 강성의 상사, 정밀한 운동계측의 어려운 점이 있다(신현경 등 1998, Yago/Endo 1996). 부유식 마리나 리조트/컨벤션센터와 모형의 주요목을 Table 2에 비교하였다. 실제 구조물의 중앙 좌우측에 호텔이 위치하여(part b) 다른 부분(part a)과 강성과 두께가 다르다. 이 부분(part b)을 고려하여 Fig. 1과 같이 모형을 제작하여 기하학적, 동역학적으로 실제 구조물에 상사하도록 제작하였다. 신현경 등(1999)의 방법을 따라 알루미늄판과 폴리우레탄을 접합하여 구조물의 강성을 상사하였으며 part a와 part b에 대해 서로 다른 두께의 알루미늄판과 폴리우레탄판을 사용하였다. Fig. 2에는 각 부분별로 시편을 제작하여 계측한 구조물의 강성을 나타내었다. 그림에서 보듯이 모형에서 설계 강성이 잘 상사된 것을 알 수

있다. 돌핀-펜더 계류 시스템은 모형의 양측에 3 지점, 총 6개를 설치하였다. 펜더는 고무튜브를 사용하여 제작하였다.

- 불균일 VLFS : 알루미늄 + 폴리우레탄
기하학적 상사 : 길이, 폭, 두께
동역학적 상사 : 굽힘 강성
- 돌핀-펜더 계류시스템 : 고무튜브
기하학적 상사 : 펜더 높이
동역학적 상사 : 변위-반력 관계

Table 2 Principal particulars

	Prototype	Model
Scale Ratio	125	
Length [m]	500	4.0
Breadth [m]	300	2.4
Draft [m]	part a : 2.0 part b : 3.0	part a : 0.016 part b : 0.024
I(average)	80 m ⁴	-
I (part a)	10.5 m ⁴	-
I (part b)	19 m ⁴	-
t(Al)(a/b)	-	2.5/3.3 mm
t(PE)(a/b)	-	53/61 mm

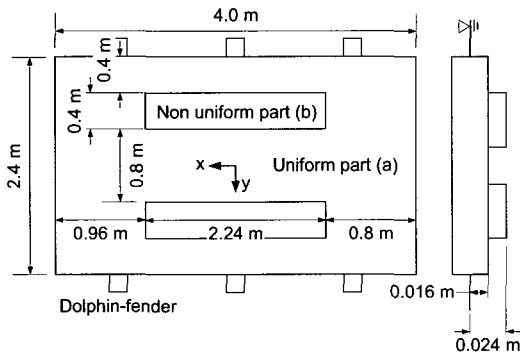


Fig. 1 Model

2.1.2 계측 시스템

VLFS의 주요 계측 항목은 변위, 변형률, 펜더 하중이다. VLFS의 모형시험 시 큰 모형비로 인해

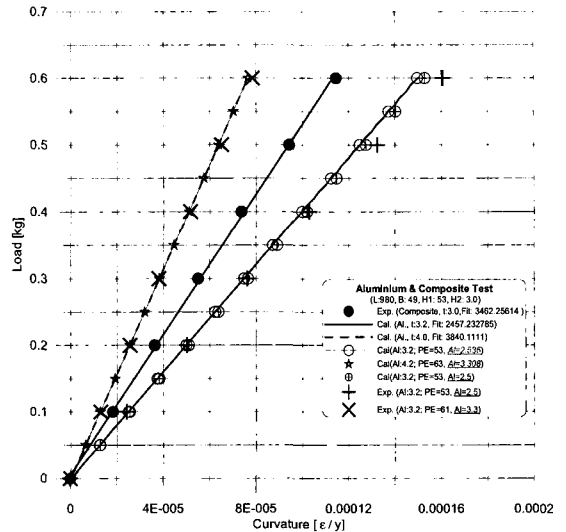


Fig. 2 Load-curvature curve of test specimens

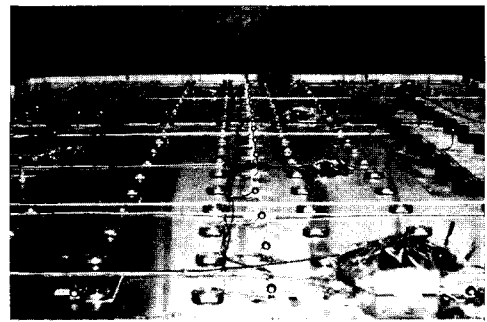


Fig. 3 RODYM 6D Precision Test

변위의 크기가 매우 작아져 계측에 큰 어려움이 있다. 본 연구에서는 KRYPTON사의 광학식 운동 계측 시스템인 RODYM 6D를 사용하여 47 지점에서 변위를 계측하였다. 계측의 정확도는 계측범위인 3 ~ 7 m 사이에서 0.01 ~ 0.1 mm의 오차를 가지는 것으로 나타났다. Fig. 3에 LED target의 배치사진을 나타내었다. 변형률은 x 방향으로 29개, y 방향으로 21개 위치에 Strain gauge를 설치하여 측정하였으며, 펜더 하중은 x, y 2개씩 총 12개의 Loadcell로 측정하였다.

3. 수치 해석

본 연구에서는 수치 해석 결과의 정확도와 효율

이 검증된 Kim/Ertekin(1998), 홍사영 등(2003)의 고유함수전개법을 사용하여 구조물의 평균 균일 강성($I=80m^4$)에 대한 유탄성 응답을 계산하였다.

Kirchhoff Plate 이론에 따라 VLFS의 운동방정식은 다음과 같다.

$$-mw^2w + D\Delta^2w = p_f \quad (1)$$

여기서 m 은 단위 면적 당 질량, D 는 단위 폭 당 강성계수, Δ 는 2차원 라플라스 연산자, p_f 는 판 밑면에 작용하는 압력의 공간함수이다.

구조물의 모서리를 따라 전단력과 모멘트가 0인 조건이 부과되었으며 해석을 통해 구해진 유탄성 변위로부터 구조물에 작용하는 응력은 다음과 같이 구하였다.

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu\epsilon_y) \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu\epsilon_x) \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \epsilon_{xy} \quad (4)$$

$$\epsilon_x = z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \epsilon_y = z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \epsilon_{xy} = 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (5)$$

4. 결과 및 고찰

강성변화와 질량집중의 효과를 살펴보기 위해 모형시험 결과를 균일 강성 유탄성 이론해석 결과를 비교하였다. Fig. 5 ~ Fig. 8까지 본 구조물의 설계파에 해당하는 파주기 13초, 선수각 180°, 135°, 90°에서 VLFS의 길이방향과 폭 방향으로 Heave RAO에 대해 모형시험과 유탄성 이론해석 결과를 비교하였다. Fig. 4에서 C는 길이방향과 폭방향으로 VLFS의 중앙, L은 y 가 75m, R은 y 가 -75m, 그리고 F는 x 가 240m, A는 x 가 -240m인 지점이다. 실험치와 계산치의 경향은, 강성이 증가한 중앙부에서는 실험치가 계산치에 비해 작은 값을 나타내지만 그밖에 부분에서는 대체로 실험치와 유사한 경향을 나타내고 있다. 사파(135도)의

경우에는 우측(R)에서의 응답의 차이가 더 크게 나타났으며 횡파(90도)의 경우에는 선수파 및 사파에 비해 그 일치도가 높은 것으로 나타났는데 이는 횡파의 경우 강성이 증가된 부분이 선수파에 비해 상대적으로 작기 때문인 것으로 보인다. 전체적으로 평균강성으로 예측한 계산치가 실험치보다 크게 나타나 초기 설계시의 균일강성을 가정한 계산치가 보수적인 예측을 함을 알 수 있다.

Fig. 9 ~ Fig. 14에는 파주기 13초, 선수각 180°, 135°, 90°에서 VLFS의 길이방향과 폭 방향으로 x , y 방향의 응력에 대해 모형시험과 유탄성 이론해석 결과를 비교하였다. 종방향 응력의 경우 계산치가 실험치에 비해 호털부에서 그 값이 작게 나타났는데 이는 응력 추정에 있어 균일강성을 사용함으로써 실제 값의 약 70%정도로 추정된 것에 기인한 것으로 보인다. 반면에 횡방향 응력의 경우는 종방향 응력보다는 일치도가 좋게 나타났는데 이는 앞서 유탄성 응답에서 살펴본 바와 같이 횡방향에서의 강성집중 효과가 종방향보다는 뚜렷하지 않은 이유로 생각된다. 이 밖의 파주기에 대해서도 유사한 경향이 관찰되었다.

마지막으로 Fig. 15, 16에는 불규칙파 조건 ($H1/3=1.0m$, $Tp=13$ sec)에서의 최대 응력을 나타내었으며 예측된 최대 응력이 설계치(236 MPa)를 넘지 않음을 확인하였다.

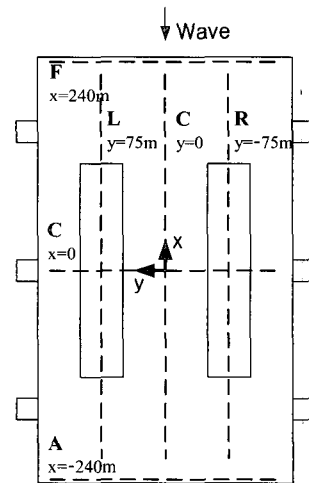


Fig. 4 Extraction points

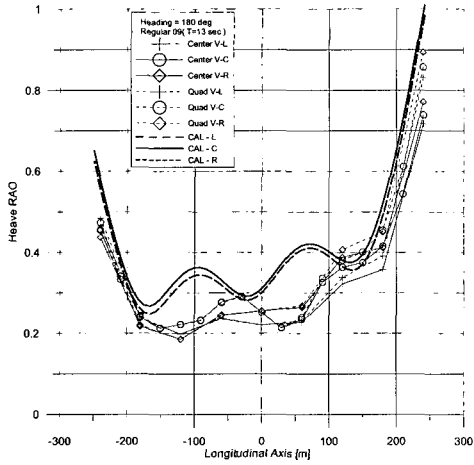


Fig. 5 Hydroelastic response(180°, T=13 sec)

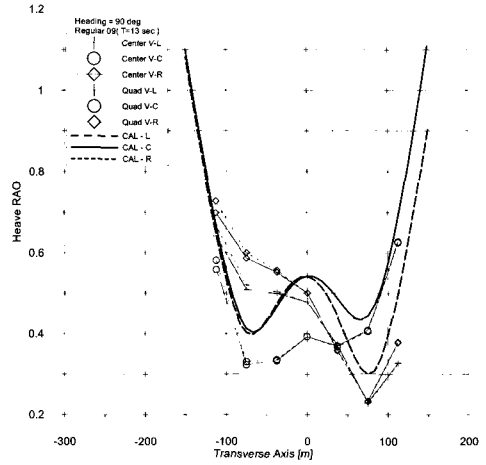


Fig. 6 Hydroelastic response(90°, T=13 sec)

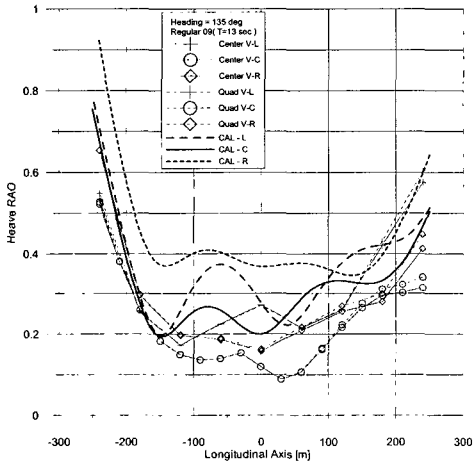


Fig. 7 Hydroelastic response(135°, T=13 sec)

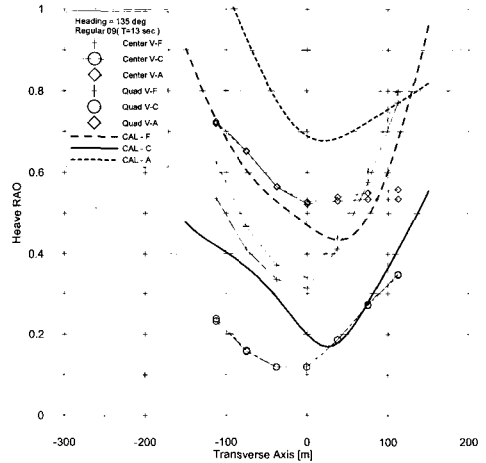


Fig. 8 Hydroelastic response(135°, T=13 sec)

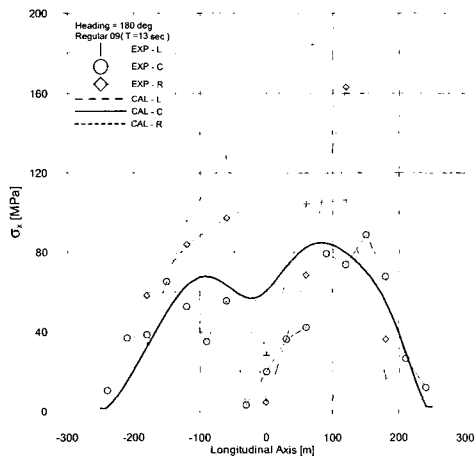


Fig. 9 σ_x (180°, T=13 sec)

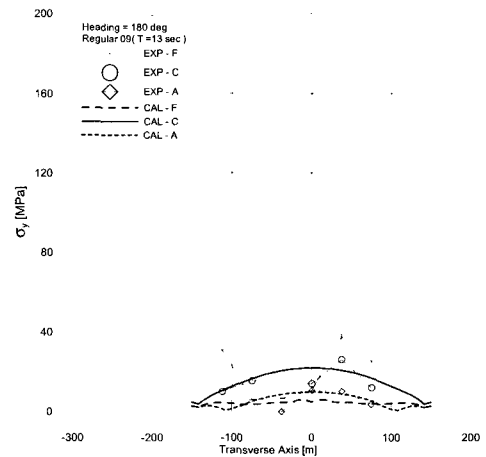


Fig. 10 σ_y (180°, T=13 sec)

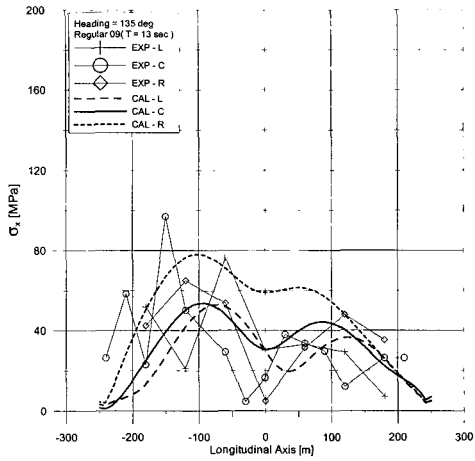


Fig. 11 $\sigma_x(135^\circ, T=13 \text{ sec})$

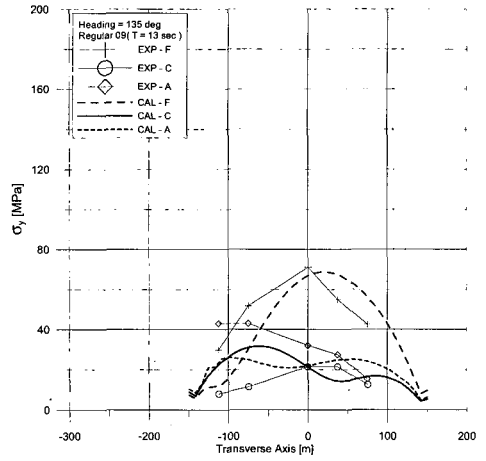


Fig. 12 $\sigma_y(135^\circ, T=13 \text{ sec})$

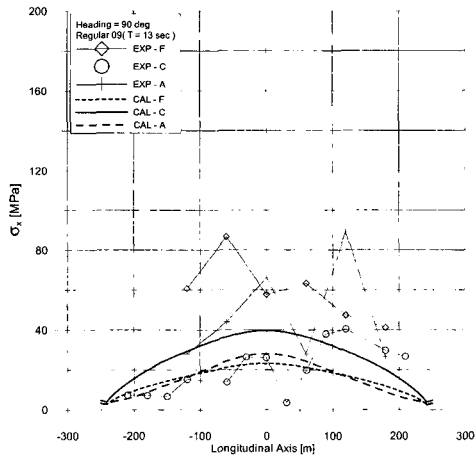


Fig. 13 $\sigma_x(90^\circ, T=13 \text{ sec})$

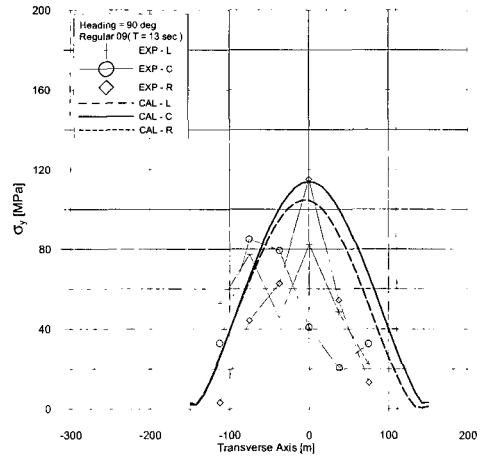


Fig. 14 $\sigma_y(90^\circ, T=13 \text{ sec})$

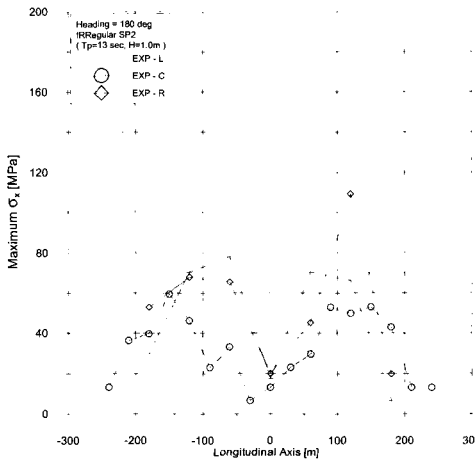


Fig. 15 Max $\sigma_x(180^\circ, H1/3=1.0m, T_p=13 \text{ sec})$

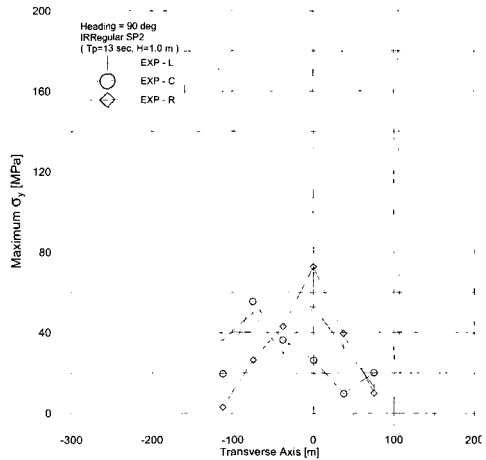


Fig. 16 Max $\sigma_y(90^\circ, H1/3=1.0m, T_p=13 \text{ sec})$

5. 결 론

부유식 마리나 리조트/컨벤션센터 용도의 VLFS를 대상으로 모형시험과 유탄성 이론해석을 수행하였다. 이로부터 다음의 결과를 확인하였다.

1. 불균일 강성 모형을 제작, 모형시험을 수행하였으며 고정도 비접촉 운동계측시스템을 사용하여 기존의 실험이 가지고 있던 계측 문제를 개선하였다.

2. 강성이 균일한 경우에 대해 유탄성 이론해석을 수행하여 불균일 강성 실험결과와 비교하였으며 강성이 다른 부분에서 이론해석이 수직운동변위를 크게 평가하고 응력을 작게 계산함을 알 수 있었으며, 이러한 경향은 VLFS의 길이 방향으로 나타났으며 폭 방향으로 미미하였다.

3. 초기 설계 시 균일 강성을 가정한 유탄성 응답해석은 운동변위에서는 보수적인 예측을 하고 응력은 실제보다 작게 평가하는 결과를 주었다. 응력 평가 시 부분적으로 변하는 실제 강성을 고려하면 실용적인 예측값을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

4. VLFS의 질량과 강성의 불균일 효과를 엄밀하게 고려하기 위해서는 질량과 강성의 부분적인 변화를 고려할 수 있는 BEM-FEM 직접해석이 필요하다.

후 기

본 논문은 해양수산부가 지원하는 해양수산 연구개발과제인 '초대형 부유식 해양구조물 기술개발' 과 공공기술연구회가 지원하는 기본연구사업 '해양개발을 위한 설계 엔지니어링 기술 고도화'의 일부로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 신현경, 김성경, 양영수, 박인규, 신현수, 1998, "천출수 부유식 해양구조물의 유탄성 모형시험 기법 개발에 관한 연구," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 290-293.
- 신현경, 이호영, 신현수, 박인규, 1999, "초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답 해석-압력

분포 방법," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 400-404.

- 이호영, 신현경, 신현수, 박인규, 2000(a), "압력분포법에 의한 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 해석," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 4호, pp. 66-74.
- 홍사영, 김장환, 최윤락, 2003, "고유함수 전개법을 이용한 방파제와 초대형 폰툰 구조물의 유탄성 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 243-250.
- Kim, J.W. and Ertekin, R.C., 1998, "An eigenfunction-expansion method for predicting hydroelastic behavior of a shallow-draft VLFS." Proc. 2nd Int. Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology (Hydroelasticity '98), December, Kyushu, pp. 47-59.
- Miyajima, S., Seto, H. and Ohta, M., 2003, "Hydroelastic Responses of the Mega-Float Phase-II Model in Waves," Proc. 13th ISOPE Conference, Hawaii, pp. 254-259.
- Tsubogo, T. and Okada, H., 2003, "A Floating Beam of Variable Stiffness on Shallow Water Subject to Wave Forcing," Proc. 13th ISOPE Conference, Hawaii, pp. 129-136.
- Yago, K. and Endo, H., 1996, "On the Hydroelastic Response of Box-Shaped Floating Structure with Shallow Draft," J Soc Nav Archit Japan, Vol 180, pp. 341-352.
- 메가프로트技術研究組合, 2000, 메가프로트의空港利用に関する実証的研究 平成11年研究成果報告書



< 조 석 규 >



< 홍 사 영 >



< 김 진 하 >