

# 파랑하중을 받는 부유체의 강성에 따른 응답 고찰

## Response Analysis of Floating Structure under Wave Loads Considering Stiffness

김 병 완\* · 김 영 식\* · 홍 사 영\* · 경 조 현\* · 조 석 규\*

Kim, Byoung-Wan · Kim, Young-Shik · Hong, Sa-Young · Kyoung, Jo-Yun · Cho, Seok-Kyu

### ABSTRACT

In this paper, the effect of stiffness on hydroelastic responses of plate-like floating structure under wave loads are studied. Direct method is used for the numerical analysis. In the numerical analysis, structural equation is formulated by finite element method(FEM) and higher order boundary element method(HOBEM) is employed for the analysis of fluid flow. A 1000m-long VLFS(Very Large Floating Structure) is considered in numerical analyses. By analyzing VLFS for various cases of stiffness, the characteristics of hydroelastic responses with the variation of stiffness are investigated.

*Keywords:* floating structure, VLFS, wave load, hydroelastic response, stiffness.

### 1. 서 론

부유식 해상구조물은 계류 장치와 함께 바다 위에 떠있는 구조물로서 고정식 해상구조물에 비해 시공 및 환경 측면에서 유리하다. 최근에는 초대형 부유식 구조물(Very Large Floating Structure: VLFS)을 이용하여 컨테이너터미널, 마리나리조트, 항만, 해상기지 등을 설립하는 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. VLFS의 주된 환경하중은 파도에 의한 파랑하중이므로 설계에 있어서 파랑하중에 대한 응답해석이 필수적으로 수행되어야 한다. 부유구조물의 파랑응답 해석에 있어서 구조물이 소규모일 경우 탄성변형이 미미하므로 강체 운동으로 고려하여 해석해도 무방한 반면 VLFS와 같이 대규모일 경우 유연성에 의한 탄성변형을 무시할 수 없으므로 구조물의 변형과 유체유동의 상호작용을 고려한 유탄성응답 해석이 수행되어야 한다. 즉, VLFS의 설계에 있어서 강성은 주요 설계인자 중 하나로 볼 수 있다. 본 연구의 목적은 다양한 강성을 갖는 VLFS의 유탄성응답을 수치적으로 고찰함으로써 강성변화에 따른 VLFS의 응답 변동 특성을 규명하는데 있다.

VLFS의 유탄성응답 해석을 위한 수치해법에는 모드법(Maeda et al., 1995; Takaki and Gu, 1996; Ohmatsu, 1997; Nagata et al., 1997; Kashiwagi and Furukawa, 1997; Hong et al., 2001; Hamamoto and

- \* 한국해양연구원 선임연구원 E-mail: kimbw@moeri.re.kr
- \* 한국해양연구원 연구원 E-mail: youngshikkim@moeri.re.kr
- \* 한국해양연구원 책임연구원 E-mail: sayhong@moeri.re.kr
- \* 한국해양연구원 선임연구원 E-mail: johyun@moeri.re.kr
- \* 한국해양연구원 연구원 E-mail: skcho@moeri.re.kr

Fujita, 2002; Kyoung et al., 2005), 고유함수법(Ohkusu and Namba, 1996; Kim and Ertekin, 1998; Hong et al., 2003), 직접법(Yago and Endo, 1996; Yasuzawa et al., 1997; Kim et al., 2005) 등이 있다. 모드법과 고유함수법은 구조물의 거동을 잘 묘사할 수 있는 소수의 모드 내지 고유함수를 사용하므로 수치적으로 매우 효율적인 반면 형상 내지 강성분포가 복잡하여 모드와 고유함수를 수학적으로 구하기가 까다로운 구조물에 적용하는데 제약이 있다. 직접법은 운동방정식을 모드 내지 고유함수로 축약하지 않고 구조물의 모든 자유도의 운동을 모두 풀어내므로 계산용량이 많고 해석시간 면에서 비효율적이지만 개념적으로 모든 모드가 고려되므로 정확도가 우수하고 임의의 형상이나 강성분포를 갖는 구조물을 해석할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 보다 정확한 응답해석을 목적으로 직접법을 적용하였다. VLFS는 두께에 비해 길이나 폭이 크므로 구조해석에 있어서 평판모델링이 가능하며 본 연구에서는 대체변형률기법이 적용된 유한요소법(Donea and Lamain, 1987)으로부터 평판 운동방정식을 수립하였다. VLFS 주위의 유동에 대한 해석은 선형포텐셜이론에 근거한 고차경계요소법(Hong et al., 2001)을 적용하였다.

수치해석은 길이가 1000m이고 폭이 500m인 VLFS를 대상으로 수행하였으며 VLFS의 횡강성과 입사파도의 주기 등을 변화시키면서 수직변위, 굽힘응력 등의 유탄성응답에 대한 변동특성을 고찰하였다.

## 2. 운동방정식의 정식화

VLFS는 평판해석이 가능하며 본 연구에서는 평판 정식화 방법으로서 유한요소법을 도입하였다. 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$(-\omega^2[M] + [K])\{w\} = \sum_e \int \{N\} p ds \tag{1}$$

$[M]$ 과  $[K]$ 는 각각 질량행렬 및 강성행렬을 나타내며  $\{w\}$ 는 수직변위와 회전변위가 포함된 변위 벡터를 나타낸다.  $\omega$ 는 운동의 진동수를 나타낸다.  $\{N\}$ 은 형상함수이며  $p$ 는 유체 압력이다. 첨자  $e$ 는 요소 수준에서의 계산을 의미한다.

유체유동은 Laplace 방정식을 만족하는 속도포텐셜을 통해 묘사할 수 있으며 속도포텐셜의 수치해법으로서 본 연구에서는 고차경계요소법을 도입하였다. 속도포텐셜은 입사포텐셜  $\{\phi_I\}$ , 산란포텐셜  $\{\phi_S\}$ , 방사포텐셜  $\{\phi_R\}$ 로 구분되며 구조물이 접하는 경계면에서 산란 및 방사포텐셜은 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \{\phi_S\}}{\partial z} = -\frac{\partial \{\phi_I\}}{\partial z} \tag{2}$$

$$\frac{\partial \{\phi_R\}}{\partial z} = -i\omega \{w_z\} \tag{3}$$

여기에서  $\{w_z\}$ 는 구조물의 수직변위벡터이다. 직접법에서는 방사포텐셜을 식 (4)와 같이 구조물의 수직변위로 표현하며 이를 식 (3)에 대입함으로써 식 (5)와 같은 수정된 경계조건을 얻는다.

$$\{\phi_R\} = [\Phi_R]\{w_z\} \tag{4}$$

$$\frac{\partial[\Phi_R]}{\partial z} = -i\omega[I] \quad (5)$$

평판요소 내부에 작용하는 유체압력은 다음 식과 같이 네 절점의 압력  $\{p\}_e$ 를 내삽함으로써 구현할 수 있다.

$$p = \{N\}^T \{p\}_e \quad (6)$$

한편, 네 절점의 압력은 선형화된 베르누이 방정식으로부터 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\{p\}_e = i\omega\rho(\{\phi_I\}_e + \{\phi_S\}_e + \{\phi_R\}_e) - \rho g\{w_z\}_e \quad (7)$$

여기에서  $\rho$ 는 유체의 밀도이다. 식 (1), (4), (6) 및 (7)을 조합하면 유체-구조 상호작용에 대한 최종 운동방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$(-\omega^2[M] - \omega^2[M_w] - i\omega[C_w] + [K] + [K_w])\{w\} = \{f\} \quad (8)$$

여기에서  $[M_w]$ ,  $[C_w]$ ,  $[K_w]$ ,  $\{f\}$ 는 각각 부가질량행렬, 유체역학적 감쇠행렬, 유체역학적 강성행렬 및 파랑기진력벡터로서 식 (9)~(12)와 같이 정리된다.

$$[M_w] = -\sum_e \int \frac{\rho}{\omega} \{N\} \{N\}^T \text{Im}[\Phi_R]_e ds \quad (9)$$

$$[C_w] = \sum_e \int \rho \{N\} \{N\}^T \text{Re}[\Phi_R]_e ds \quad (10)$$

$$[K_w] = \sum_e \int \rho g \{N\} \{N\}^T ds \quad (11)$$

$$\{f\} = \sum_e \int i\omega\rho \{N\} \{N\}^T ds (\{\phi_I\} + \{\phi_S\}) \quad (12)$$

고차경계요소법으로부터 구한 포텐셜을 식 (9)~(12)에 대입한 후 식 (8)을 풀어서 변위를 산출한다. 한편, 구조물에 발생하는 응력은 다음과 같이 산출한다.

$$\{\sigma\}_e = [E][B]\{w\}_e \quad (13)$$

$\{\sigma\}_e$ 는 요소 내에서의 응력벡터이고  $[E]$ 는 탄성계수 행렬,  $[B]$ 는 변형율과 변위의 관계를 나타내는 행렬이다.  $\{w\}_e$ 는 요소의 네 절점에서의 변위로서 식 (8)의 해로부터 결정된다.

### 3. 수치해석

수치해석에 고려된 구조물은 길이가 1000m이고 폭이 500m인 VLFS로서 흘수는 2 m이고 바다의 수심은 30 m이다. 예제 VLFS의 형상이 그림 1에 제시되어 있다. 예제 VLFS의 재료적 특성 및 해석조건은 표 1에 정리하였다. 제시한 VLFS는 단위폭 당 단면 2차 모멘트( $I/B$ )가 0.667인 VLFS로서 강성의 변화가 유탄성응답에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 강성을 원래 구조물보다 1배에서 20배까지 단계적으로 증가시키면서 해석을 수행하였다.

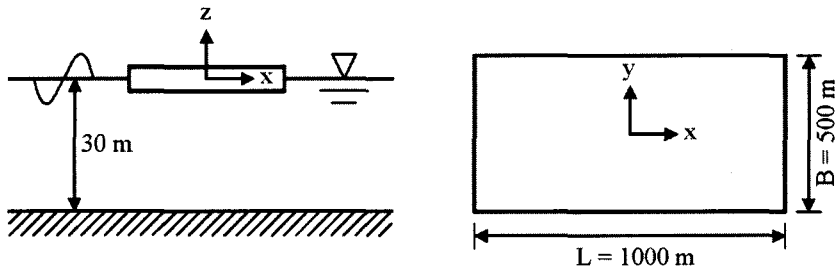


그림 1 예제 VLFS의 형상

표 1 예제 VLFS의 재료적 특성 및 해석조건

General particulars of VLFS	Length (m)	1000
	Width (m)	500
	Height (m)	6
	Youngs modulus (Pa)	$2.06 \times 10^{11}$
	Poisson ratio	0.3
	$I/B$ ( $m^3$ )	0.667
Analysis conditions	Water depth (m)	30
	Draft (m)	2
	Water density ( $kg/m^3$ )	1025
	Heading angle (degree)	0
	Wave period (sec)	8~20

수치해석 결과가 그림 2~4에 제시되어 있다. 그림에서 A는 파도의 진폭을 나타내며  $\sigma_x$ 는 종방향 굽힘응력을 나타낸다. 또한, 그림에 제시된 곡선은 구조물 중심선 상에서의 응력분포를 나타낸다. 그림 2는 입사파도가 비교적 단주기인 주기 8초에서의 응력분포를 제시하고 있다. 강성이 2배인 경우 응력이 큰 폭으로 감소함을 알 수 있다. 강성이 2배에서 3배로 증가한 경우 운동모드의 특성이 변하여 정점이 6개인 응력곡선이 정점이 5개인 곡선으로 변함을 알 수 있다. 한편 동적효과로 인하여 강성이 증가하여도 응력이 거의 줄지 않음을 알 수 있다. 강성이 4배에서 7배까지 증가하는 단계에 있어서는 모드특성이 동일하여 응력곡선의 분포 형상이 거의 바뀌지 않으며 응력의 크기는 강성에 따라 비례적으로 감소함을 알 수 있다. 그러나 강성이 8배에

서 11배까지 증가하는 경우 다시 모드특성의 변화가 발생하여 정점이 5개인 응력곡선이 정점이 4개인 곡선으로 바뀌고 동적효과가 크게 반영되어 강성이 증가하면서 응력의 크기가 오히려 증가하는 현상이 발생한다. 강성이 12배 이상일 경우엔 강성이 증가함에 따라 응력도 차례로 감소하며 곡선의 분포형상도 유사하다. 그림 3은 입사파도가 다소 장주기인 주기 14초의 응력분포를 제시하고 있다. 강성이 4배에서 7배로 증가하는 경우 모드특성에 변화가 있어서 응력곡선의 분포형상이 바뀌며 특정 위치에서 응력이 미미하게 커지는 현상이 관찰되나 주기가 8초인 경우에 비해서는 동적효과가 작음을 알 수 있다. 그림 4는 주기가 20초로서 가장 장주기에 속하는 파도에 대한 응력분포를 나타낸다. 주기가 20초일 경우 강성이 증가함에 따라 거의 비례적으로 응답이 감소하고 모드 변화에 따라 곡선 형상이 바뀌어도 응력이 증가하는 현상이 발생하지 않는다. 즉 동적효과가 거의 없어 유사정적 응답을 보임을 알 수 있다.

그림 5는 VLFS의 수직변위 분포의 예를 제시하고 있다. 수직변위에 있어서 강성에 따른 변동 특성은 응력과 동일한 양상을 보인다. 강성변화에 따른 변위 변동 곡선은 지면 관계상 생략하였다.

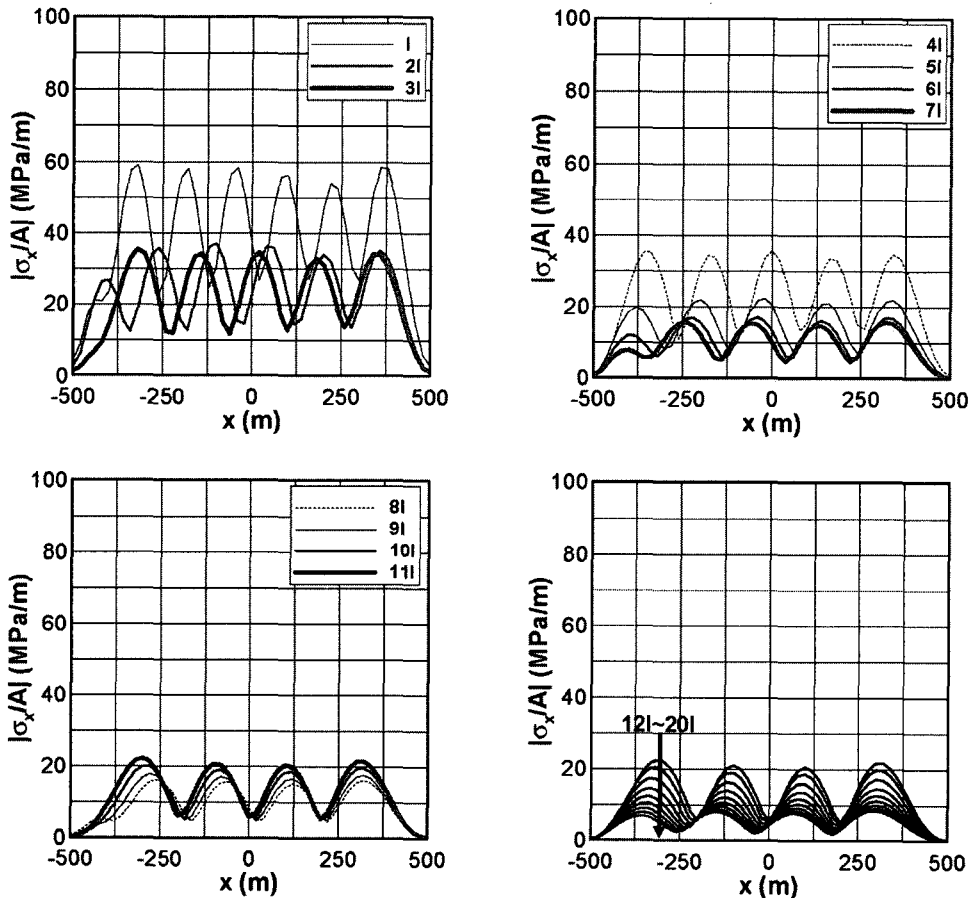


그림 2 예제 VLFS의 굽힘응력 (파도주기=8초)

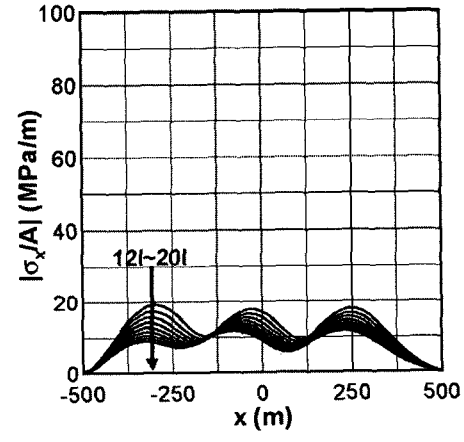
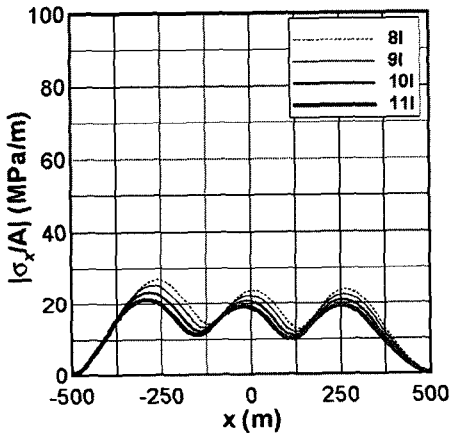
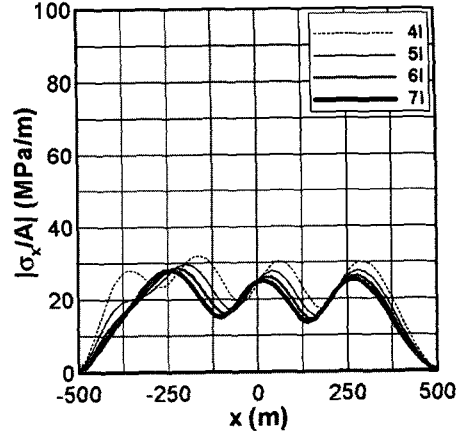
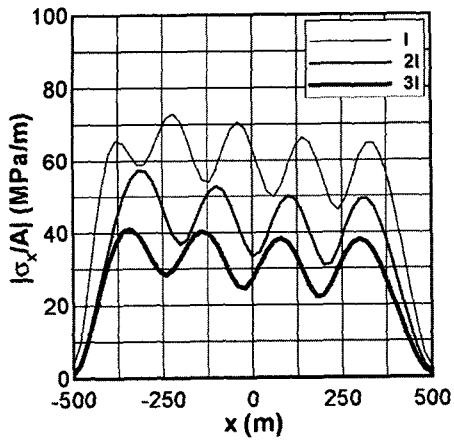


그림 3 예제 VLFS의 굽힘응력 (파도주기=14초)

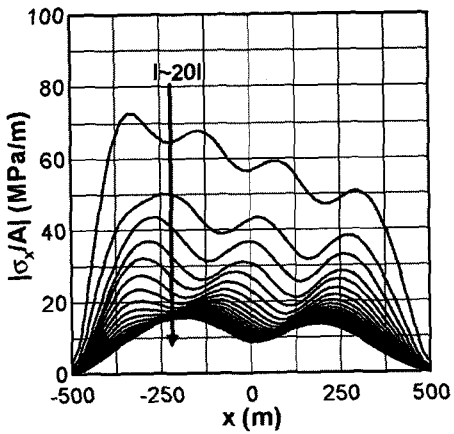


그림 4 예제 VLFS의 굽힘응력 (파도주기=20초)

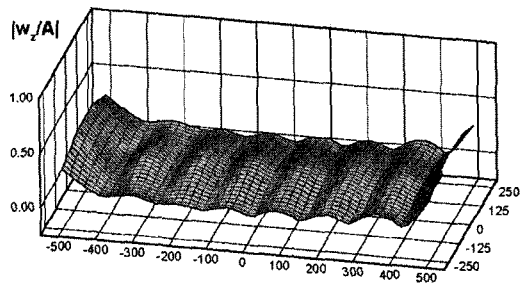


그림 5 VLFS의 수직변위 형상 (파도주기=8초)

#### 4. 결론

본 연구에서는 파랑하중을 받는 부유구조물에 대하여 유한요소법과 고차경계요소법이 도입된 직접법을 이용하여 유탄성응답을 수치적으로 해석하고 강성변화에 따른 응답의 변동특성을 논의하였다. 수치해석은 길이가 1000m이고 폭이 500m인 VLFS를 대상으로 수행하였으며 해석 결과로부터 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

주기가 8초로서 주기가 비교적 짧은 파도 즉 단파에 대해서 구조물의 운동모드가 변하지 않을 경우 강성이 클수록 응답은 작고 강성이 작으면 응답이 크지만 강성의 변화에 따라 운동모드가 변할 경우 동적효과에 의해 강성이 증가하여도 응답이 감소하지 않거나 오히려 응답이 증가하는 현상이 존재한다. 반면 파도의 주기가 길수록 즉 장파일수록 동적효과가 감소되어 운동모드 변화와 무관하게 강성이 크면 응답이 작고 강성이 작으면 응답이 크다.

연안에서의 일반적인 파도는 주기가 12초 이하로서 비교적 단파이며 단파의 경우 부유구조물의 응답은 강성 변화에 따라 불규칙한 특성을 보이므로 연안에 설치되는 부유구조물의 강성 결정 시 보다 주의깊은 해석이 필요할 것으로 보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 해양수산부가 지원하는 해양수산 연구개발과제인 ‘초대형 부유식 해상구조물 기술개발’ 사업의 일부로 수행된 것으로 연구를 지원한 해양수산부에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Donea, J. and Lamain, L.G. (1987) A Modified Representation of Transverse Shear in  $C^0$  Quadrilateral Plate Elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 63, pp.183~207.
- Hamamoto, T. and Fujita, K. (2002) Wet-Mode Superposition for Evaluating the Hydroelastic Response of Floating Structures with Arbitrary Shape, *Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.290~297.
- Hong, S.Y., Choi, Y.R. and Hong, S.W. (2001) Investigation of Draft Effects on Analysis of Hydroelastic Responses of Pontoon-Type VLFS, *Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.222~228.
- Hong, S.Y., Kim, J.W., Ertekin, R.C. and Shin, Y.S. (2003) An Eigenfunction-Expansion Method for Hydroelastic Analysis of a Floating Runaway, *Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.121~128.
- Kashiwagi, M. and Furukawa, C. (1997) A Mode-Expansion Method for Predicting Hydroelastic Behavior of a Shallow-Draft VLFS, *Proceedings of 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 6, pp.179~186.
- Kim, B.W., Kyoung J.H., Hong, S.Y. and Cho, S.K. (2005) Investigation of the Effect of Stiffness Distribution and Structure Shape on Hydroelastic Responses of Very Large Floating Structures, *Proceedings of 15th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.210~217.
- Kim, J.W. and Ertekin, R.C. (1998) An Eigenfunction-Expansion Method for Predicting Hydroelastic Behavior of a Shallow-Draft VLFS, *Proceedings of the 2nd International Conference on*

*Hydroelasticity in Marine Technology*, pp.47~59.

- Kyoungh, J.H., Hong, S.Y., Kim, B.W. and Cho., S.K.** (2005) Hydroelastic Response of a Very Large Floating Structure over a Variable Bottom Topography, *Ocean Engineering*, 32(17/18), pp.2040~2052.
- Maeda, H., Masuda, K., Miyajima, S. and Ikoma, T.** (1995) Hydroelastic Responses of Pontoon Type Very Large Floating Offshore Structures, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 178, pp.203~212.
- Nagata, S., Yoshida, H., Fujita, T. and Isshiki, H.** (1997) The Analysis of the Wave-Induced Responses of an Elastic Floating Plate, *Proceedings of 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 6, pp.163~169.
- Ohkusu, M. and Namba, Y.** (1996) Analysis of Hydroelastic Behavior of a Large Floating Platform of Thin Plate Configuration in Waves, *Proceedings of International Workshop on Very Large Floating Structures*, pp.143~148.
- Ohmatsu, S.** (1997) Numerical Calculation of Hydroelastic Responses of Pontoon Type VLFS, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 182, pp.329~340.
- Takaki, M. and Gu, X.** (1996) Motions of a Floating Elastic Plate in Waves, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 180, pp.331~339.
- Yago, K. and Endo, H.** (1996) On the Hydroelastic Response of Box-Shaped Floating Structure with Shallow Draft, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 180, pp.341~352.
- Yasuzawa, Y., Kagawa, K., Kawano, D. and Kitabayashi, K.** (1997) Dynamic Response of a Large Flexible Floating Structure in Regular Waves, *Proceedings of 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 6, pp.187~194.