

## 보 변환 기법을 이용한 3차원 부유체의 응답해석

### Response Analysis of 3-dimensional Floating Structure Using Beam Transformation

김병완\* · 홍사영\* · 경조현\* · 조석규\*

Byoung Wan Kim, Sa Young Hong, Jo Hyun Kyoung and Seok Kyu Cho

Key Words : floating structures(부유구조물), hydroelastic responses(유탄성응답), direct method(직접법), beam transformation(보 변환)

#### ABSTRACT

In this paper, the modified direct method employing beam transformation technique is proposed in order to efficiently calculate hydroelastic responses of floating structure. Since the proposed method expresses the displacements of three-dimensional structure with those of transformed beam which leads to small number of equations of motion, the method is numerically efficient compared to the conventional direct method. To verify the efficiency of the proposed method, a 500 m-long floating structure under wave loads is considered in numerical example. Displacements, bending moments, torsion moments and shear forces are calculated and computing time is examined. The results are also compared with those of the conventional direct method.

#### 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 항만, 해상 기지, 마리나리조트 등을 설립하는 가능성에 대해 활발히 논의되고 있다.

VLFS는 일반적으로 대규모 구조물로서 유연성을 무시할 수 없는 구조물이므로 해석 및 설계에 있어서 유체와 구조의 상호작용을 고려한 유탄성 해석이 요구된다. 유탄성응답 해석 방법에는 모드법<sup>(1~6)</sup>, 고유함수법<sup>(7,8)</sup>, 직접법<sup>(9~11)</sup> 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 정확도가 우수하고 임의의 형상이나 강성분포를 갖는 구조물을 해석할 수 있는 장점이 있다. 반면, 모든 자유도가 고려되므로 대규모 구조물과 같이 수치 격자점이 많을 경우 요구되는 계산용량이 크고 해석시간 면에서 비효율적이다.

본 연구에서는 기존의 직접법에 보 변환 기법을 도입하여 수치적 효율성이 향상된 수정된 직접법을 제안하였다. 제안방법은 3차원 구조물의 변위를 보 변위로 표현하므로 운동방정식의 개수가 축소되어 수치적으로 효율적이다. 제안방법의 효율성을 검증하기 위해 길이가 500m이고 폭이 50m인 VLFS를 대상으로 수치해석을 수행하였다. 입사 파도의 파장을 달리하면서 구조물의 변위, 휨모멘트, 비틀림 모멘트, 전단력 등을 고찰하였으며 해석시간을 검토하였다. 아울러 기존의 직접법을 통한 해석 결과도 함께 제시하여 제안방법과 기존의 직접법의 효율성을 비교하였다.

#### 2. 운동방정식 정식화

##### 2.1 직접법

서론에서도 언급하였듯이 기존의 직접법은 모드 내지 고유함수를 사용하지 않고 구조물의 모든 자유도의 운동을 직접 풀어내므로 구조물의 운동방정식은 유한요소법(Finite Element Method : FEM)을 통해 정식화할 수 있다. 유체

† 한국해양연구원 해양시스템안전연구소  
E-mail : kimbw@moeri.re.kr  
Tel : (042) 888-7524, Fax : (042) 888-7519

\* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

영역은 경계요소법 등을 통해 정식화하며 구조와 유체의 접합면에서 속도가 동일하다는 적합조건으로부터 구조와 유체의 거동이 통합된 운동방정식을 수립한다. 본 연구에서 고려된 VLFS의 경우 폭이 50m이고 높이가 6m로서 폭에 비해 높이가 작으므로 기존의 직접법으로 해석할 경우 구조물은 평판요소를 이용한 모델링이 가능하다. 평판요소를 이용하여 직접법을 정식화하는 과정은 참고문헌 11에 정리되어 있다.

### 2.2 제안방법

본 연구에서 제안하는 수정된 직접법은 3차원 구조물을 등가의 보로 변환하여 3차원 변위를 보 변위로 표현한다. 이때 등가의 보는 유한요소법을 이용하여 보요소로부터 모델링한다. 제안방법은 보 변환 기법을 사용하므로 보로 치환하더라도 수치해석 정확도가 감소되지 않는 구조물 예를 들면 폭에 비해 길이가 큰 구조물에만 적용할 수 있는 제약이 있다. 폭이 상대적으로 큰 구조물에 대한 적용은 추후 과제로서 현재 연구 중에 있다.

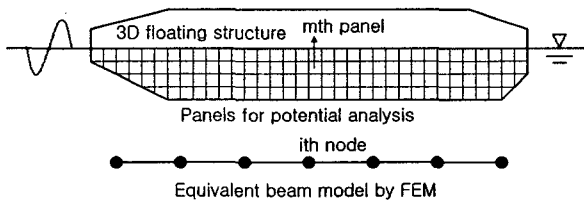


Fig. 1 Numerical model of floating structure

Fig. 1은 제안방법의 개념을 도시하고 있다. 3차원 구조물의 m번째 패널과 등가보 구조물의 i번째 절점이 상응할 경우 m번째 패널의 변위  $\vec{u}_m = (u_{x,m}, u_{y,m}, u_{z,m})$ 은 i번째 보 절점의 직선변위  $\vec{a}_i$ 와 회전변위  $\vec{\theta}_i$ 를 이용하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{u}_m = \vec{a}_i + \vec{\theta}_i \times \vec{L} \quad (1)$$

여기에서

$$\vec{L} = \vec{r}_m - \vec{r}_i \quad (2)$$

$$\vec{a}_i = (u_{x,i}, u_{y,i}, u_{z,i}) \quad (3)$$

$$\vec{\theta}_i = (\theta_{x,i}, \theta_{y,i}, \theta_{z,i}) \quad (4)$$

식 (2)에서  $\vec{r}_m$ 과  $\vec{r}_i$ 는 각각 m번째 패널과 i번째 보 절점의 위치벡터를 나타낸다. 식 (3)에서  $u_{x,i}, u_{y,i}, u_{z,i}$ 는 i번째 보 절점의 x, y, z축에 대한 선변위를 각각 나타내고 식 (4)에서  $\theta_{x,i}, \theta_{y,i}, \theta_{z,i}$ 는 i번째 보 절점의 x, y, z축에 대한 회전변위를 각각 나타낸다. 구조물의 형상이 복잡하더라도 식 (1)을 이용한 변환이 가능하므로 제안방법은 임의의 형상을 고려할 수 있다. 또한, 보요소를 도입한 유한요소법으

로부터 수치모델을 구성하므로 불규칙한 강성분포를 반영할 수 있다. 즉 제안한 수정된 직접법은 임의의 형상과 강성분포를 갖는 구조물을 해석할 수 있는 기존 직접법의 특성을 그대로 유지한다. 한편, 제안방법은 본래의 3차원 구조물의 변위를 보 변위로 표현하므로 수치모델 격자 수가 감소하여 풀어야 할 운동방정식의 수도 감소한다. 즉, 수치적인 효율성이 향상된다.

보 구조물의 운동방정식은 유한요소법으로부터 식 (5)와 같이 구성할 수 있다.

$$(-\omega^2[M] + [K])\{u\} = \{f(\phi_R, \phi_S, \phi_R)\} \quad (5)$$

$[M]$ 과  $[K]$ 는 각각 질량행렬 및 강성행렬을 나타내며  $\{u\}$ 는 보 절점의 변위벡터를 나타낸다.  $\omega$ 는 파도의 진동수를 나타낸다. 하중벡터  $\{f\}$ 는 유체력의 함수이며 유체의 거동은 식 (6)을 만족하는 속도포텐셜로 묘사할 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (6)$$

속도포텐셜은 입사포텐셜  $\phi_I$ , 산란포텐셜  $\phi_S$ , 방사포텐셜  $\phi_R$  등으로 구분되며 구조와 유체의 접합면에서 산란포텐셜은 식 (7)의 경계조건을 만족하며 방사포텐셜은 식 (8)의 속도 적합조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \phi_S}{\partial z} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial z} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = -i\omega \vec{n} \cdot \vec{u}_m \quad (8)$$

속도포텐셜 중 입사포텐셜은 수학적으로 해를 구할 수 있다. 산란포텐셜과 방사포텐셜은 수치적인 방법으로 계산하며 본 연구에서는 수치해법으로서 경계요소법을 도입하였다. 식 (8)에서 우변의  $\vec{u}_m$ 은 미지수이므로 우변을 수치해석이 가능한 기지수 형태로 바꾸어야 한다. 식 (8)의 우변 중  $\vec{n} \cdot \vec{u}_m$ 을 식 (1)을 이용하여 식 (9)와 같이 보 절점 변위로 표현하고 방사포텐셜 또한 식 (10)과 같이 보 절점 변위로 치환한다.

$$\vec{n} \cdot \vec{u}_m = [T]\{u\} \quad (9)$$

$$\{\phi_R\} = [\Phi]\{u\} \quad (10)$$

식 (9) 및 (10)을 식 (8)에 대입하면 식 (11)과 같이 수치적인 해석이 가능한 새로운 경계조건을 도출할 수 있다.

$$\frac{\partial [\Phi]}{\partial n} = -i\omega [T] \quad (11)$$

보 구조물의 i번째 절점에 작용하는 힘과 모멘트는 식 (12) 및 (13)과 같이 i번째 절점에 상응하는 3차원 구조물 패널들의 압력  $p_m$ 을 적분함으로써 구성할 수 있다.

$$\vec{f}_i = -\sum_{panel} (p_m \vec{n} - \rho g z \vec{\theta}_i \times \vec{n}) A \quad (12)$$

$$\vec{M}_i = -\sum_{panel} [p_m \vec{L} \times \vec{n} - \rho g z \{(\vec{n} \cdot \vec{\theta}_i) \vec{L} - (\vec{L} \cdot \vec{\theta}_i) \vec{n}\}] A \quad (13)$$

A는 패널의 면적을 나타낸다. 한편, 패널에 작용하는 압력

은 베르누이 정리로부터 식 (14)와 같은 형태를 띤다.

$$p_m = i\omega\rho(\phi_f + \phi_s + \phi_R) - \rho g u_m \cdot \nabla z \quad (14)$$

식 (10)을 식 (14)에 대입하고 이를 다시 식 (12)와 (13)에 대입하면 식 (5)의 우변 즉 하중벡터는 식 (15)와 같이 구성된다.

$$\{f(\phi_f, \phi_s)\} + \omega^2 [M_w]\{u\} + i\omega [C_w]\{u\} - [K_w]\{u\} \quad (15)$$

여기에서  $[M_w]$ ,  $[C_w]$ ,  $[K_w]$  각각 부가질량행렬, 유체역학적 감쇠행렬, 유체역학적 강성행렬에 해당한다. 식 (15)를 식 (5)의 우변에 대입하고 정리하면 식 (16)과 같이 최종적인 운동방정식을 구성할 수 있다.

$$(-\omega^2 [M + M_w] - i\omega [C_w] + [K + K_w])\{u\} = \{f(\phi_f, \phi_s)\} \quad (16)$$

식 (16)을 풀어 보 절점 변위  $\{u\}$ 를 구하고 이를 식 (1)과 (10)에 대입하여 3차원 구조물의 변위와 방사포텐셜을 각각 구한다. 3차원 구조물의 변위와 방사포텐셜을 다시 식 (14)에 대입하여 3차원 구조물에 작용하는 압력을 구한다. 구조물 단면에서의 휨모멘트, 비틀림모멘트, 전단력 등은 식 (14)로부터 구한 압력을 직접 적분하여 산출할 수 있다.

### 3. 수치예제

제안방법의 효율성을 검증하기 위해 예제 구조물에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 길이 500m, 폭 50m, 높이 6m, 흘수 2m인 VLFS를 대상으로 수행하였다. 구조물 재료는 강재로 가정하였으며 단위폭 당 강도(I/B)는 0.667로 하였다. I는 구조물의 단면 2차모멘트이고 B는 구조물의 폭을 나타낸다. 고려된 파도의 입사각은 45도로서 사파를 고려하였으며 파장비( $\lambda/L$ )는 0.1, 0.5, 1.0 등 세 경우를 고려하였다.  $\lambda$ 는 파도의 파장을 나타내며 L은 구조물의 길이를 나타낸다. 예제 구조물의 형상, 특성 및 해석조건을 Fig. 2 및 Table 1에 정리하였다. 기존의 직접법 및 제안방법으로부터 변위와 휨모멘트, 비틀림모멘트, 전단력 등의 단면하중을 계산하고 두 결과를 서로 비교하였다. 기존의 직접법을 통한 해석에 있어서 구조물은 평판으로 간주하여 평판요소를 도입하여 해석하였다.

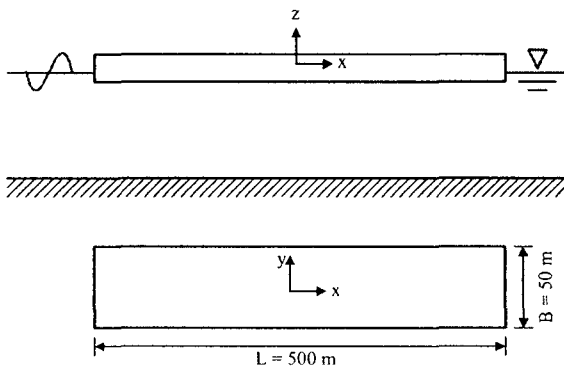


Fig. 2 Sketch of example structure

Table 1 Particulars and analysis condition of example structure

Length (m)	500
Width (m)	50
Height (m)	6
Young modulus (Pa)	$2.06 \times 10^{11}$
Poisson ratio	0.3
I/B ( $m^3$ )	0.667
Draft (m)	2
Water density ( $kg/m^3$ )	1025
Heading angle (degree)	45
Wave length ration ( $\lambda/L$ )	0.1, 0.5, 1.0

해석 결과가 Figs. 3~14에 제시되어 있다. Figs. 3~8은 구조물의 수직변위 분포 형상으로서 그림에서 A는 입사파도의 진폭을 나타낸다. Figs. 3과 4는 파장비 0.1에 대한 VLFS의 수직변위로서 Fig. 3은 기존의 직접법의 결과이고 Fig. 4는 제안방법의 결과이다. 그림에서도 알 수 있듯이 두 방법의 결과는 거의 동일하다. Fig. 5는 파장비가 0.5일 경우의 변위로서 기존의 직접법으로부터 구한 결과이며 Fig. 6은 제안방법으로부터 구한 변위이다. 마찬가지로 두 방법의 결과가 거의 같다. Fig. 7 및 8은 파장비 1.0에 대한 수직변위로서 각각 기존의 직접법 및 제안방법으로부터 해석한 결과이다. 두 방법의 결과가 거의 동일함을 알 수 있다. Figs. 9~15는 구조물 단면하중의 분포를 제시하고 있다. 그림에서  $M_v$ 는 단면에 작용하는 휨모멘트를 나타내며 T는 비틀림모멘트를 나타낸다.  $S_v$ 는 단면에 작용하는 전단력을 나타낸다. 실선은 기존 직접법으로부터 계산한 결과이며 점선은 제안방법으로부터 계산한 결과이다. 그림에서도 알 수 있듯이 두 방법의 결과는 거의 동일하다. 요약하자면 유탄성 응답에 있어서 제안방법과 기존의 직접법의 결과가 거의 동일하므로 제안방법에 있어서 해석의 정확도가 거의 유지됨을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of computing time (Calculator : Pentium 3.40 GHz)

Method	Number of nodes	Matrix size	CPU time (sec)
Direct	1313	3939×3939	632.344
Proposed	100	600×600	13.015

Table 2는 기존 직접법과 제안방법의 계산시간을 비교하고 있다. 기존 직접법의 경우 사용된 총 절점 수는 1313이고 평판해석이 도입되어 절점 당 자유도가 3이므로 운동방

정식을 구성하는 시스템 행렬의 크기는  $3939 \times 3939$ 이다. 제안방법에 있어서 사용된 보 결점 수는 100이고 보의 절점당 자유도가 6이므로 시스템 행렬의 크기는  $600 \times 600$ 이다. 즉 제안방법의 시스템 행렬의 크기가 기존 직접법에 비해 작으며 계산시간 또한 감소됨을 알 수 있다.

제안방법의 경우 3차원 구조물의 변위를 보의 변위로 표현하므로 수치해석 절점수를 현격히 줄일 수 있다. 따라서, 운동방정식의 개수 즉 시스템 행렬의 크기가 감소되어 계산에 소요되는 시간도 작아 기존 직접법에 비해 더 효율적이다.

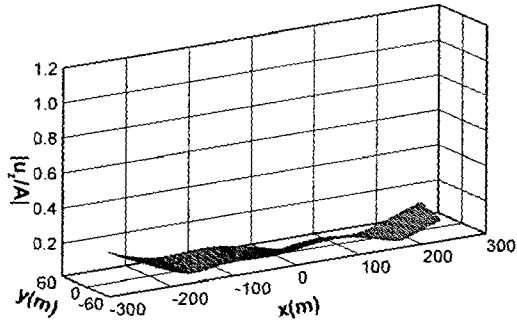


Fig. 3 Displacement of direct method ( $\lambda/L=0.1$ )

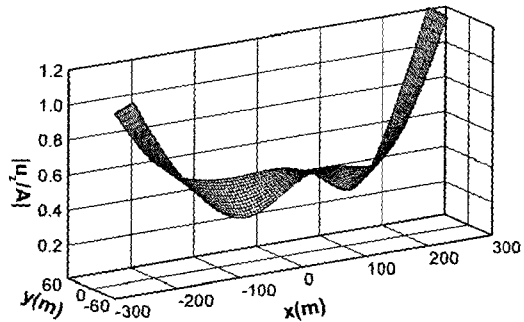


Fig. 6 Displacement of proposed method ( $\lambda/L=0.5$ )

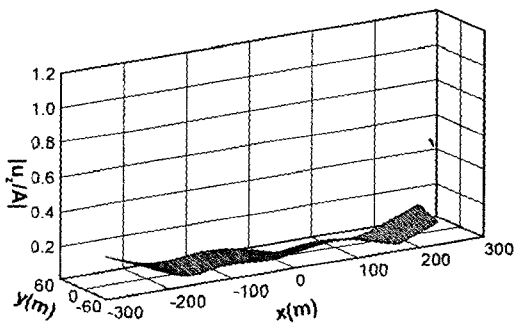


Fig. 4 Displacement of proposed method ( $\lambda/L=0.1$ )

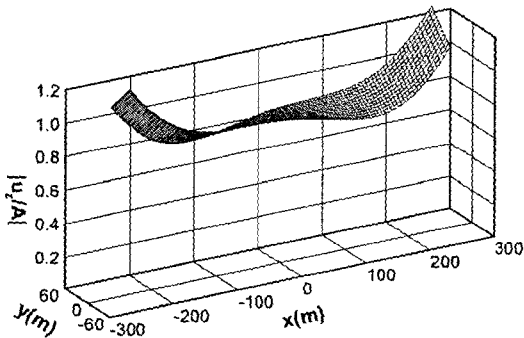


Fig. 7 Displacement of direct method ( $\lambda/L=1.0$ )

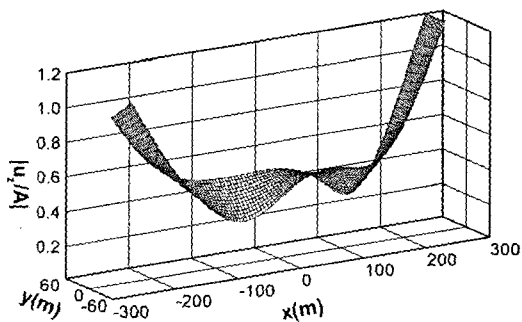


Fig. 5 Displacement of direct method ( $\lambda/L=0.5$ )

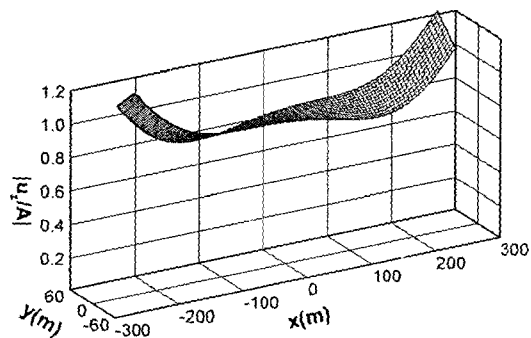


Fig. 8 Displacement of proposed method ( $\lambda/L=1.0$ )

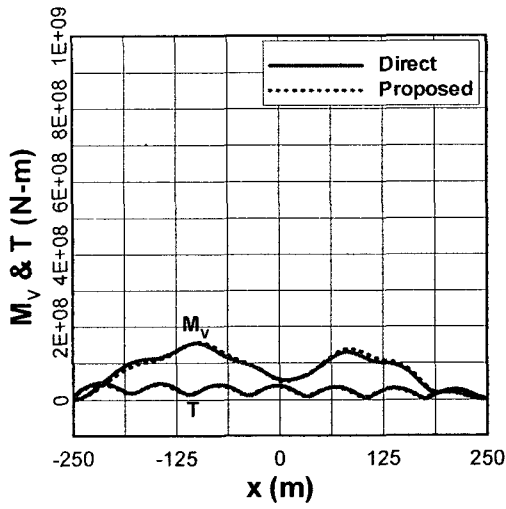


Fig. 9 Bending and torsion moments ( $\lambda/L=0.1$ )

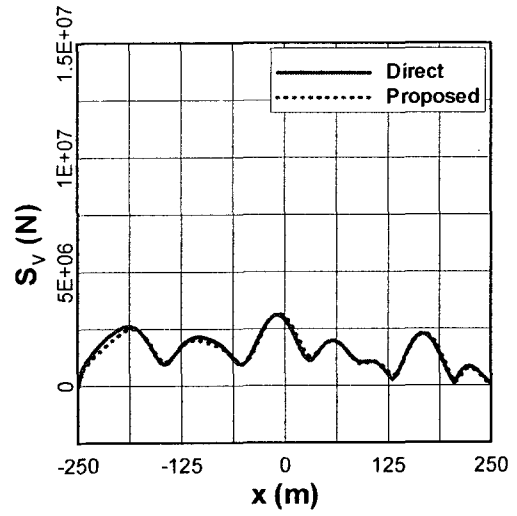


Fig. 12 Shear forces ( $\lambda/L=0.1$ )

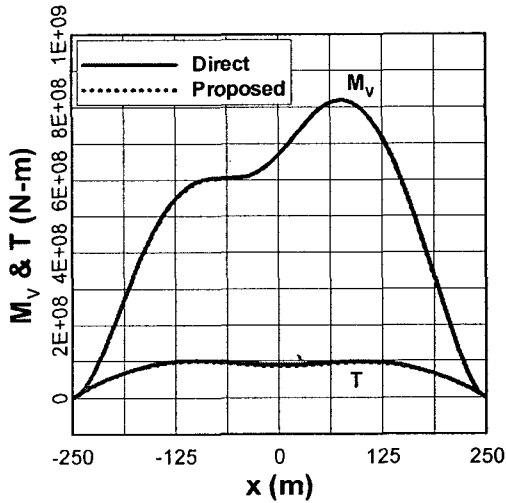


Fig. 10 Bending and torsion moments ( $\lambda/L=0.5$ )

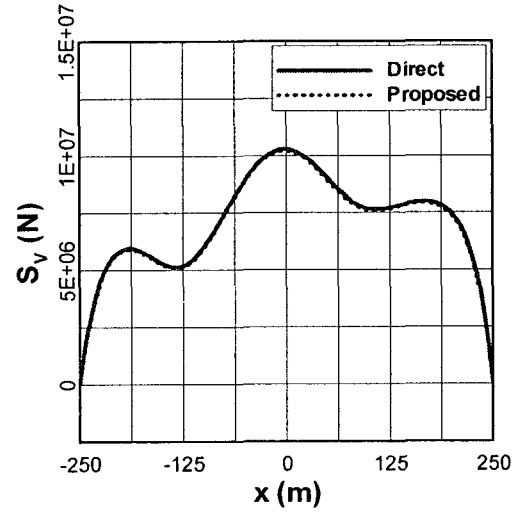


Fig. 13 Shear forces ( $\lambda/L=0.5$ )

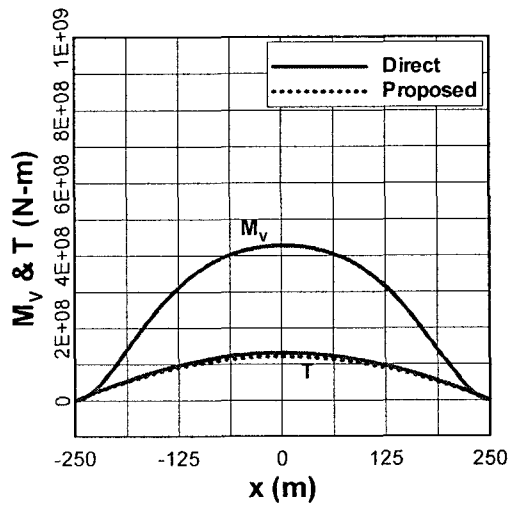


Fig. 11 Bending and torsion moments ( $\lambda/L=1.0$ )

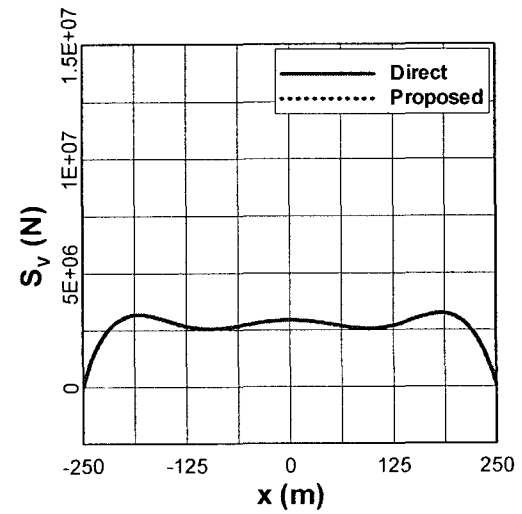


Fig. 14 Shear forces ( $\lambda/L=1.0$ )

#### 4. 결 론

본 연구에서는 부유구조물의 유탄성응답 해석에 있어서 기존의 직접법에 보 변환기법을 도입하여 수치적 효율성을 향상시킨 수정된 직접법을 제안하였다. 길이가 500m이고 폭 50m인 VLFS를 대상으로 수치해석을 수행하여 제안방법의 효율성을 검증하였으며 수치해석 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

제안방법은 구조물의 형상이 복잡하더라도 보 변환 기법의 적용이 가능하므로 임의의 형상을 고려할 수 있으며 보 요소를 도입한 유한요소법으로부터 수치모델을 구성하므로 불규칙한 강성분포를 반영할 수 있다. 즉 제안방법은 임의의 형상과 강성분포를 갖는 구조물을 해석할 수 있는 기존 직접법의 특성을 그대로 유지한다.

유탄성 응답에 있어서 제안방법과 기존 직접법의 결과가 거의 동일하다. 즉, 제안방법에 있어서 해석의 정확도가 거의 유지된다.

제안방법은 3차원 변위를 보 변위로 표현하므로 운동방정식의 개수가 비교적 작아 기존의 직접법에 비해 계산에 있어서 더 효율적이다.

#### 후 기

본 논문은 해양수산부가 지원하는 해양수산 연구개발과제인 '초대형 부유식 해상구조물 기술개발' 사업의 일부로 수행되었음을 밝혀 둔다.

#### 참 고 문 헌

(1) 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*, Vol.178, pp.203~212.  
 (2) Takaki, M. and Gu, X., 1996, "Motions of a Floating Elastic Plate in Waves," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.180, pp.331~339.  
 (3) Ohmatsu, S., 1997, "Numerical Calculation of

Hydroelastic Responses of Pontoon Type VLFS," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.182, pp.329~340.

(4) 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*, Vol.6, pp.163~169.

(5) 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*, Vol.6, pp.179~186.

(6) 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.

(7) 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.

(8) 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.

(9) 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*, Vol.180, pp.341~352.

(10) 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*, Vol.6, pp.187~194.

(11) 김병완, 홍사영, 경조현, 조석규, 2006, "부유식 구조물의 집합부 형태에 따른 동적응답 특성 연구," 한국소음진동공학회논문집, 16권 2호, pp.132~140.