

# 부유식 구조물의 접합부 형태에 따른 응답 특성 연구

## Dynamic Responses of Floating Structures with Connections

김병완\* · 홍사영\* · 경조현\* · 조석규\*

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

**Key Words** : Floating Structures(부유식 구조물), Dynamic Responses(동적응답), Hinge Connection(힌지 접합), Spring Connection(스프링 접합)

### ABSTRACT

This paper investigates the characteristics of dynamic responses of floating structures with connections under sea wave loads. Direct method using higher order boundary element method and finite element method is adopted for numerical analysis. 500 m-long VLFS with four units are considered in numerical analysis. Hinge connection and spring connection with various strength are considered as connection types. Displacements and stresses of VLFS according to the connection types are compared considering wave period and heading angle.

### 1. 서 론

부유식 해상구조물은 계류 장치와 함께 바다 위에 떠있는 구조물로서 고정식 해상구조물에 비해 시공 및 환경 측면에서 유리하다. 최근에는 초대형 부유식 구조물(VLFS)을 이용하여 항만, 해상기지, 마리나리조트 등을 설립하는 가능성에 대해 활발히 논의되고 있다. VLFS는 대형 구조물이므로 육상에서의 일체형 시공은 실제적으로 어려우며 다수의 유닛이 결합된 형태로 해상에서 시공된다. 일본 메가플로트 프로젝트 수행 중 실증 실험을 목적으로 실험역에 실제로 설치되었던 제1기 실증구조물도 길이가 100m이고 폭이 20m인 유닛 9개를 결합하여 구성된 바 있다<sup>(1)</sup>. 유닛과 유닛은 용접, 볼트 체결 등의 방법으로 결합되며 해상작업을 위해서는 유닛을 일시적으로 고정하기 위한 접합부 장치가 필요하다. 해상 접합 시 부유구조물의 거동은 접합부의 형태 및 형상에 따라 민감하게 변화하므로 접합부에 따른 정확한 사전 해석이 접합부 고정장치의 설계에 필수적이다. 접합부가 스프링 형태로 구성된 부유구조물에 있어서 파랑하중에 따른 접합부 하중의 변동 특성에 대해 이미

논의된 바 있다<sup>(2)</sup>. 본 논문의 목적은 그 연구내용을 더욱 확장하여 스프링 접합부로 구성된 부유구조물과 더불어 힌지 접합부로 구성된 부유구조물의 파랑응답을 수치적인 방법으로 고찰하고 파랑의 주기, 입사각 등에 따른 구조물의 전체 거동 및 응력의 변동 양상을 파악하는 데 있다.

VLFS는 유연성을 무시할 수 없는 구조물이므로 해석 및 설계에 있어서 유체와 구조의 상호작용을 고려한 유탄성 해석이 요구된다. 유탄성응답 해석 방법에는 모드법<sup>(3-8)</sup>, 직접법<sup>(1,9)</sup> 및 고유함수전개법<sup>(10,11)</sup> 등이 있다. 본 연구에서 고려된 구조물은 접합부가 존재하는 VLFS로서 접합부에서의 강성이 본체와 다르게 분포하므로 응답해석에 있어서 불규칙한 강성 분포를 잘 반영할 수 있는 직접법을 이용하였다. 유체유동 해석은 고차경계요소법(HOBEM)을 적용하였으며 구조해석은 유한요소법(FEM)을 적용하였다.

수치해석은 길이가 250m이고 폭이 125m인 유닛 네 개가 결합된 VLFS(500 m × 250 m)를 대상으로 수행하였다. 유닛의 접합부가 힌지로 연결된 경우와 스프링으로 연결된 경우를 고려하였으며 접합부의 형태 및 강도에 따른 응답의 차이를 비교하였으며 입사파도의 주기, 입사각 등에 따른 응답 특성을 더불어 고찰하였다.

### 2. 운동방정식

#### 2.1 유체-구조물의 상호작용 방정식

구조물의 운동방정식은 Mindlin 평판요소를 도입한 유한요소법으로부터 수립한다. Mindlin 요소의 정식화는 대체변

† 한국해양연구원 해양시스템안전연구소  
E-mail : kimbw@kriso.re.kr  
Tel : (042) 868-7524, Fax : (042) 868-7519

\* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

형률 기법<sup>(12)</sup>을 적용하였다. 운동방정식은 다음과 같다.

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

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

유체유동은 속도포텐셜을 통해 묘사할 수 있으며 속도포텐셜에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

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

속도포텐셜은 세 부분으로 구분할 수 있으며 수치적으로 격자점에서 계산되므로 다음과 같이 벡터 형태로 표현할 수 있다.

$$\{\phi\} = \{\phi_j\} + \{\phi_s\} + \{\phi_r\} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\{\phi_j\}$ 는 입사포텐셜,  $\{\phi_s\}$ 는 산란포텐셜 그리고  $\{\phi_r\}$ 은 방사포텐셜을 각각 나타낸다. 입사포텐셜은 수학적으로 해를 구할 수 있다. 산란포텐셜과 방사포텐셜은 수치적인 방법으로 계산하며 본 연구에서는 수치해법으로서 고차경계요소법을 도입하였다. 유체와 구조물이 접하는 경계면에서 산란 및 방사포텐셜은 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \{\phi_s\}}{\partial z} = -\frac{\partial \{\phi_j\}}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \{\phi_r\}}{\partial z} = -i\alpha \{w_z\} \quad (5)$$

여기에서  $\{w_z\}$ 는 구조물의 수직변위벡터이다.

직접법에서는 방사포텐셜을 다음 식과 같이 구조물의 수직변위의 합으로 표현한다.

$$\{\phi_r\} = [\Phi_R] \{w_z\} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하면 식 (7)과 같이 수정된 경계조건을 얻는다.

$$\frac{\partial [\Phi_R]}{\partial z} = -i\alpha [I] \quad (7)$$

식 (7)에서  $[I]$ 는 단위행렬이며 물리적으로는 각 절점에 재하된 단위진폭 변위를 의미한다. 따라서  $\Phi_R(i, j)$ 는  $j$ 번째 절점에 단위진폭 변위가 발생하였을 때  $i$ 번째 절점에서 발생하는 방사포텐셜의 값을 나타낸다. 평판요소 내부에 작용하는 유체압력은 네 절점의 압력 값을 내삽함으로써 구할 수 있다. 네 절점의 압력을  $\{p\}_e$ 라 하면 내부 압력은 다음과 같다.

$$p = \{N\}^T \{p\}_e \quad (8)$$

한편, 네 절점의 압력은 선형화된 베르누이 방정식으로부터 식 (9)와 같이 정리할 수 있다.

$$\{p\}_e = i\omega \rho (\{\phi_j\}_e + \{\phi_s\}_e + \{\phi_r\}_e) - \rho g \{w_z\}_e \quad (9)$$

여기에서  $\rho$ 는 유체의 밀도이다. 식 (1), (6), (8) 및 (9)를

조합하면 유체-구조 상호작용에 대한 최종 운동방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$(-\omega^2[M + M_w] - i\alpha[C_w] + [K + K_w])\{w\} = \{f\} \quad (10)$$

여기에서  $[M_w]$ ,  $[C_w]$ ,  $[K_w]$ ,  $\{f\}$ 는 각각 부가질량행렬, 유체역학적 감쇠행렬, 유체역학적 강성행렬 및 과량기진력 벡터로서 식 (11)~(14)와 같이 정리된다.

$$[M_w] = -\sum_e \int \frac{\rho}{\omega} \{N\} \{N\}^T \text{Im}[\Phi_R]_e ds \quad (11)$$

$$[C_w] = \sum_e \int \rho \{N\} \{N\}^T \text{Re}[\Phi_R]_e ds \quad (12)$$

$$[K_w] = \sum_e \int \rho g \{N\} \{N\}^T ds \quad (13)$$

$$\{f\} = \sum_e \int i\omega \rho \{N\} \{N\}^T ds (\{\phi_j\}_e + \{\phi_s\}_e) \quad (14)$$

고차경계요소법으로부터 구한 속도포텐셜을 식 (11)~(14)에 대입한 후 식 (10)을 풀어 유탄성응답을 산출한다.

한편, 구조물에 발생하는 응력은 식 (10)의 해를 이용하여 다음과 같이 산출한다.

$$\{\sigma\}_e = [E][B]\{w\}_e \quad (15)$$

$\{\sigma\}_e$ 는 요소 내에서의 응력을 나타내는 응력벡터이고  $[B]$ 는 탄성계수 행렬,  $[B]$ 는 변형률과 변위의 관계를 나타내는 행렬이다.  $\{w\}_e$ 는 요소의 네 절점에서의 변위값을 나타내는 변위벡터로서 식 (10)의 해로부터 결정된다.

## 2.2 접합부를 고려한 운동방정식

본 연구에서는 유닛 접합부의 형태로서 스프링 접합부와 힌지 접합부를 고려하고 있다. 접합부의 특성이 응답해석에 반영되기 위해서는 식 (10)의 수정이 요구된다. 유닛과 유닛이 스프링 강성으로 연결될 경우 3자유도 스프링요소를 도입하여 접합부를 묘사할 수 있다.  $i$ 번째 절점과  $j$ 번째 절점이 스프링으로 연결되고  $i$ 번째 절점과  $j$ 번째 절점의 수직변위에 상응하는 자유도의 번호를  $i_1$  및  $j_1$ 이라 하면 식 (10)의 강성행렬에서 해당 항은 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} K(i_1, i_1)_{new} &= K(i_1, i_1) + K_z \\ K(i_1, j_1)_{new} &= K(i_1, j_1) - K_z \\ K(j_1, i_1)_{new} &= K(j_1, i_1) - K_z \\ K(j_1, j_1)_{new} &= K(j_1, j_1) + K_z \end{aligned} \quad (16)$$

식에서  $K_z$ 는 수직방향 스프링상수이다. x축 중심 회전스프링상수( $K_\alpha$ )와 y축 중심 회전스프링상수( $K_\beta$ )도 마찬가지로 추가된다.

유닛과 유닛이 힌지형태로 연결될 경우 본 연구에서는 페널티 방법을 적용하여 운동방정식을 수정하였다. 만일  $i$ 번째 절점과  $j$ 번째 절점이 힌지로 연결된다면 두 절점의 수직변위는 동일하므로 다음과 같은 구속방정식이 성립된다.

$$w_{i1} - w_{j1} = 0 \quad (17)$$

페널티 방법에서는 매우 큰 페널티 수를 도입하여 구속방

정식에 해당하는 dummy 에너지를 총에너지에 추가한다. 식 (17)을 고려한 총에너지는 다음과 같다.

$$\pi = \frac{1}{2} \{w\}^T [A] \{w\} - \{w\}^T \{f\} + \frac{\lambda_p}{2} (w_a - w_b)^2 \quad (18)$$

여기에서  $[A]$ 는 식 (10) 좌변의 계수행렬이고  $\lambda_p$ 는 페널티 수로서 본 연구에서는  $10^{10}$ 을 사용하였다. 식 (18)을 최소화( $\delta\pi=0$ )하면  $[A]$ 의  $i$ 번째 절점과  $j$ 번째 절점의 수직 변위에 해당하는 항은 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} A(i_1, i_1)_{new} &= A(i_1, i_1) + \lambda_p \\ A(i_1, j_1)_{new} &= A(i_1, j_1) - \lambda_p \\ A(j_1, i_1)_{new} &= A(j_1, i_1) - \lambda_p \\ A(j_1, j_1)_{new} &= A(j_1, j_1) + \lambda_p \end{aligned} \quad (19)$$

### 3. 수치해석

수치해석은 4개의 유닛이 결합된 부유식 구조물을 대상으로 수행하였다. 고려 대상이 된 접합부의 형태는 두 가지로서 첫 번째는 유닛이 힌지로 연결된 형태이고 또 하나는 유닛이 스프링으로 연결된 형태이다. 예제 구조물의 형상, 특성 및 해석조건을 Fig. 1, 2 및 Table 1에 정리하였다. 파도의 주기는 일반적인 해상파의 주기 영역에 해당하는 8~15 초로 하였다. 유닛의 접합부가 스프링 형태인 경우 스프링 강도를 변화시키면서 구조물의 응답을 파악하였다. Table 2에 해석 시 사용된 스프링의 강도를 제시하였다.

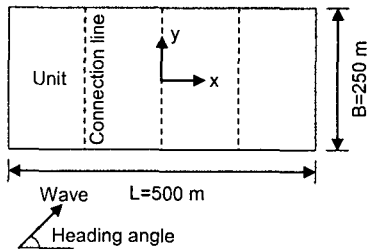


Fig. 1 Plan view of example structure

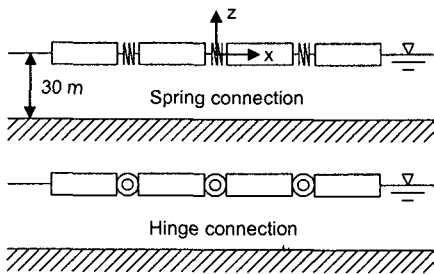


Fig. 2 Side view of example structure

해석 결과가 Figs. 3~32에 제시되어 있다. y축 방향 최대 응답의 종방향 분포를 나타내고 있으며 그림에서 'One

body'는 접합부가 없는 일체형 구조물의 응답을 나타낸다.  $w_z$ 는 구조물의 수직변위,  $\sigma_x$ 는 종방향 응력,  $\sigma_y$ 는 횡방향 응력을 각각 나타낸다.

Table 1 Basic properties of example structure

Draft (m)	2
Structure depth (m)	6
I/B (m <sup>3</sup> )	0.667
Young's modulus (Pa)	$2.06 \times 10^{11}$
Poisson ratio	0.3
Water density (kg/m <sup>3</sup> )	1025
Heading angle ( $\beta$ ) (degree)	0~90
Wave period (T) (sec)	8~15

Table 2 Spring constants of spring connection

Springs	$K_z$ (MN/m)	$K_{Bx}$ (GNm/rad)	$K_{By}$ (GNm/rad)
Spring1	15	15	15
Spring2	75	75	75
Spring3	150	150	150
Spring4	1500	1500	1500

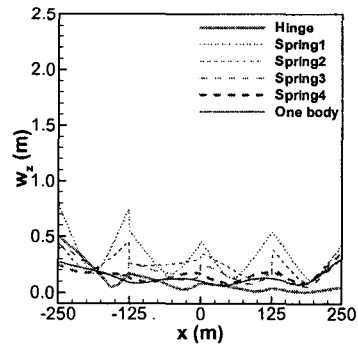


Fig. 3  $w_z$  of VLFS (T=8 sec,  $\beta=0$  deg)

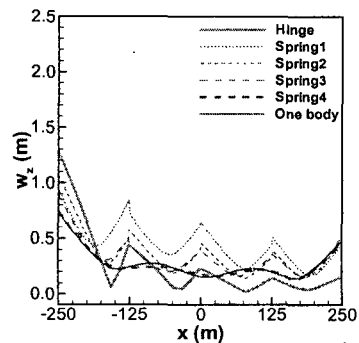


Fig. 4  $w_z$  of VLFS (T=11 sec,  $\beta=0$  deg)

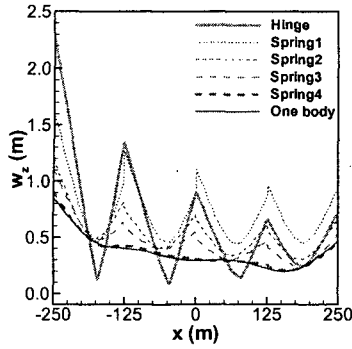


Fig. 5  $w_z$  of VLFS ( $T=15$  sec,  $\beta=0$  deg)

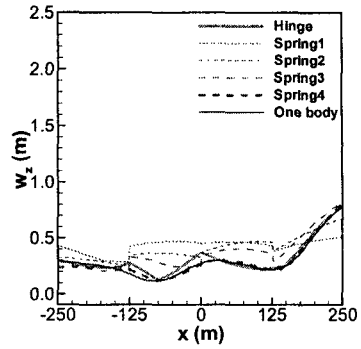


Fig. 9  $w_z$  of VLFS ( $T=8$  sec,  $\beta=75$  deg)

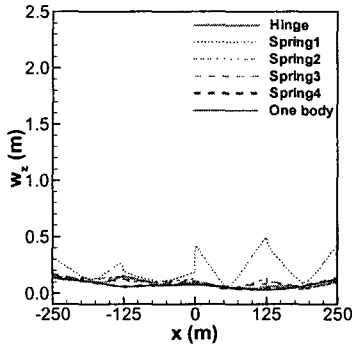


Fig. 6  $w_z$  of VLFS ( $T=8$  sec,  $\beta=45$  deg)

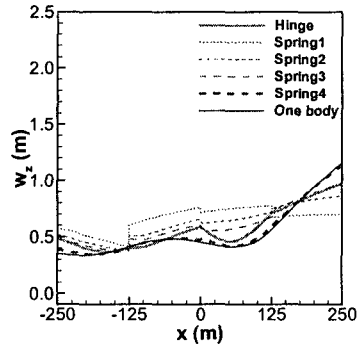


Fig. 10  $w_z$  of VLFS ( $T=11$  sec,  $\beta=75$  deg)

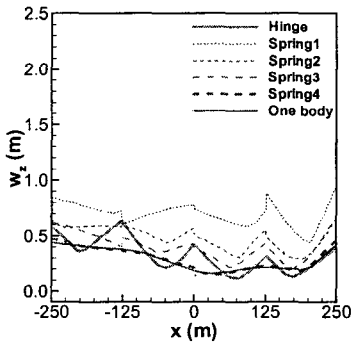


Fig. 7  $w_z$  of VLFS ( $T=11$  sec,  $\beta=45$  deg)

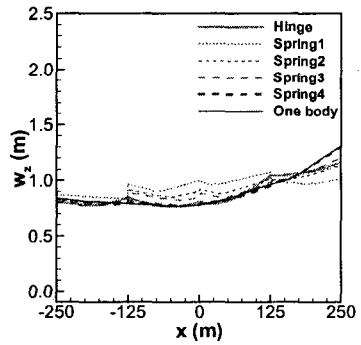


Fig. 11  $w_z$  of VLFS ( $T=15$  sec,  $\beta=75$  deg)

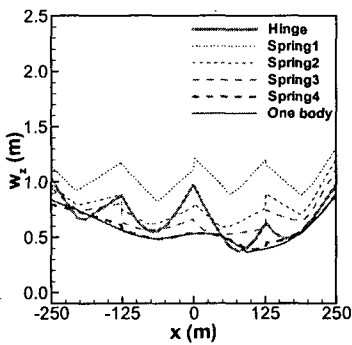


Fig. 8  $w_z$  of VLFS ( $T=15$  sec,  $\beta=45$  deg)

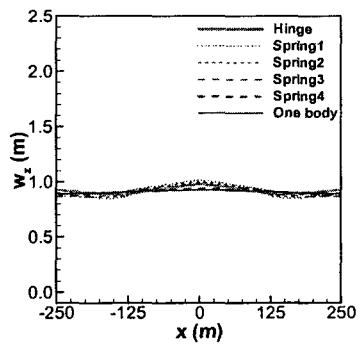


Fig. 12  $w_z$  of VLFS ( $T=15$  sec,  $\beta=90$  deg)

Figs. 3~12는 VLFS의 수직변위 분포를 제시하고 있다. 스프링 구조물의 경우 스프링강도가 작을수록 접합부에서 구조물의 굴절 정도가 커서 변위도 크다. 반면, 스프링강도가 클수록 변위가 작아지며 강도가 증가하면서 점차 일체형 구조물의 거동에 수렴한다. 힌지구조물의 경우 접합부의 전단방향이 구속되어 있으므로 입사각 0도인 경우 단주기 파에서 변위가 작으나 휨강성은 없으므로 장주기파에서는 변위가 크다. 한편, 접합부에서 횡방향 및 비틀림방향이 구속되어 있으므로 입사각이 큰 파도 즉 사파에서 변위가 대체로 작아진다. 입사각이 90도인 경우 접합부가 변위형상에 미치는 영향이 작아서 구조물의 변위는 거의 동일하다.

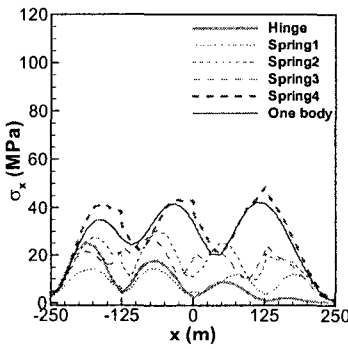


Fig. 13  $\sigma_x$  of VLFS (T=8 sec,  $\beta=0$  deg)

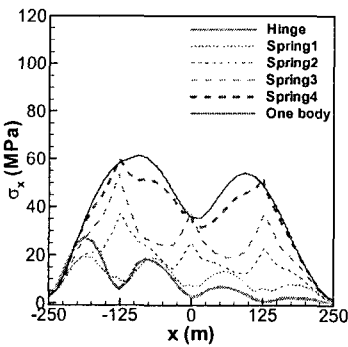


Fig. 14  $\sigma_x$  of VLFS (T=11 sec,  $\beta=0$  deg)

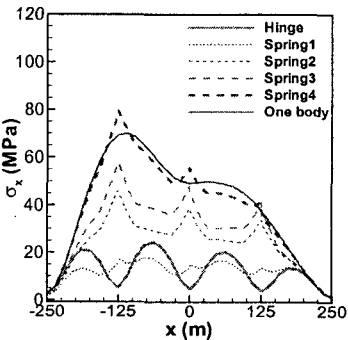


Fig. 15  $\sigma_x$  of VLFS (T=15 sec,  $\beta=0$  deg)

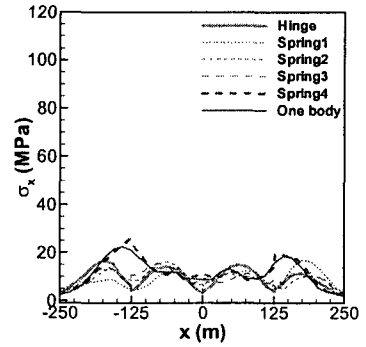


Fig. 16  $\sigma_x$  of VLFS (T=8 sec,  $\beta=45$  deg)

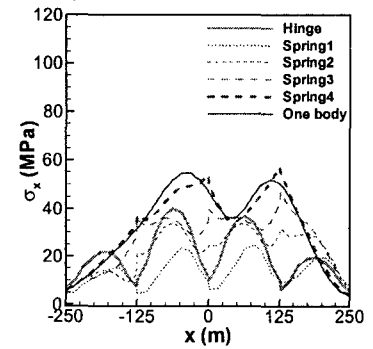


Fig. 17  $\sigma_x$  of VLFS (T=11 sec,  $\beta=45$  deg)

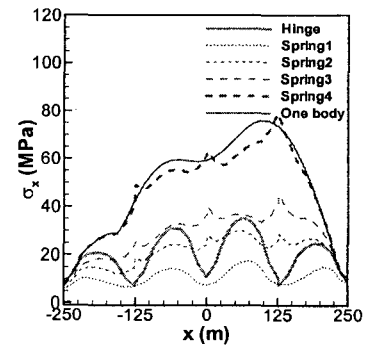


Fig. 18  $\sigma_x$  of VLFS (T=15 sec,  $\beta=45$  deg)

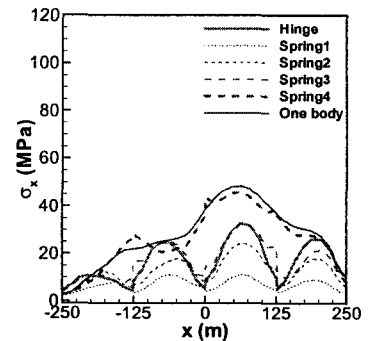


Fig. 19  $\sigma_x$  of VLFS (T=8 sec,  $\beta=75$  deg)

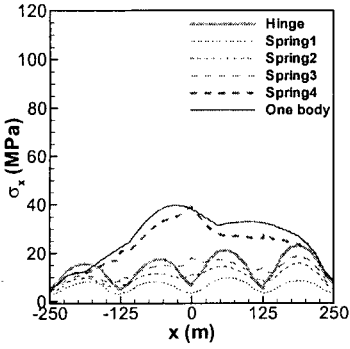


Fig. 20  $\sigma_x$  of VLFS ( $T=11$  sec,  $\beta=75$  deg)

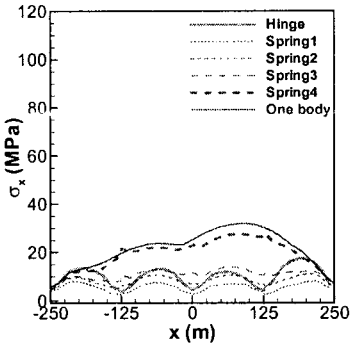


Fig. 21  $\sigma_x$  of VLFS ( $T=15$  sec,  $\beta=75$  deg)

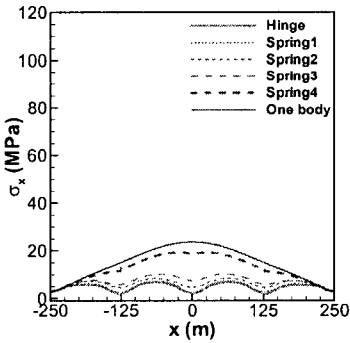


Fig. 22  $\sigma_x$  of VLFS ( $T=15$  sec,  $\beta=90$  deg)

Figs. 13~22는 VLFS의 종방향응력 분포를 나타내고 있다. 스프링구조물의 경우 스프링강도가 작을수록 접합부에서 횡방향의 회전이 더욱 자유로우므로 유닛의 곡률이 작아서 응력도 작다. 반면, 스프링강도가 증가하면서 응력이 커지며 점차 일체형 구조물의 거동에 수렴한다. 힌지구조물의 경우 접합부에서 모멘트가 풀려있으므로 입사각 0도에서 응력이 작다. 한편, 사파에서 접합부에서의 횡방향 및 비틀림방향 구속의 영향으로 응력이 다소 크지만 스프링강도가 큰 구조물에 비해서는 응력이 매우 작다. 입사각이 90도인 경우 사파의 영향이 없으므로 접합부에서 모멘트가 풀려있는 힌지구조물에서의 응력이 가장 작다.

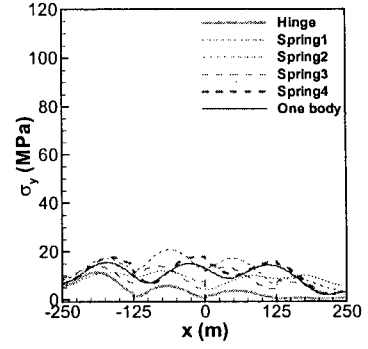


Fig. 23  $\sigma_y$  of VLFS ( $T=8$  sec,  $\beta=0$  deg)

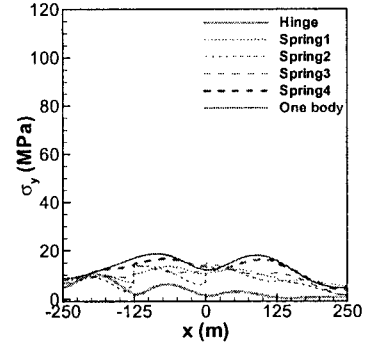


Fig. 24  $\sigma_y$  of VLFS ( $T=11$  sec,  $\beta=0$  deg)

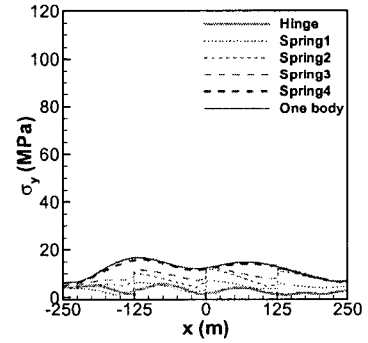


Fig. 25  $\sigma_y$  of VLFS ( $T=15$  sec,  $\beta=0$  deg)

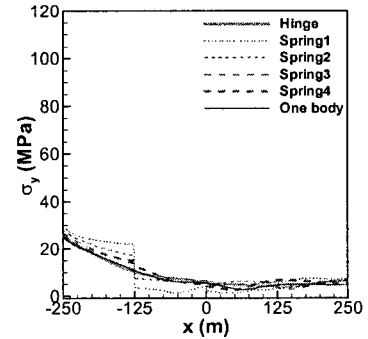


Fig. 26  $\sigma_y$  of VLFS ( $T=8$  sec,  $\beta=45$  deg)

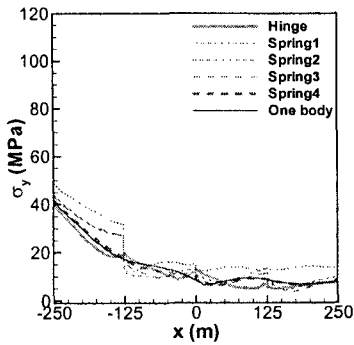


Fig. 27  $\sigma_y$  of VLFS (T=11 sec,  $\beta=45$  deg)

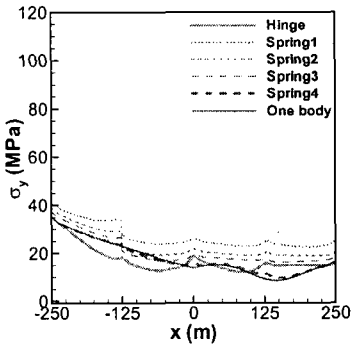


Fig. 28  $\sigma_y$  of VLFS (T=15 sec,  $\beta=45$  deg)

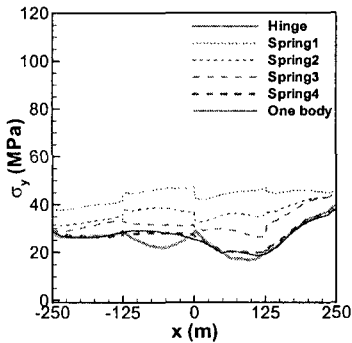


Fig. 29  $\sigma_y$  of VLFS (T=8 sec,  $\beta=75$  deg)

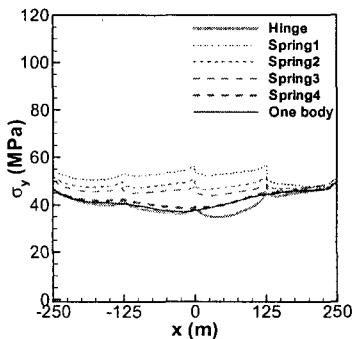


Fig. 30  $\sigma_y$  of VLFS (T=11 sec,  $\beta=75$  deg)

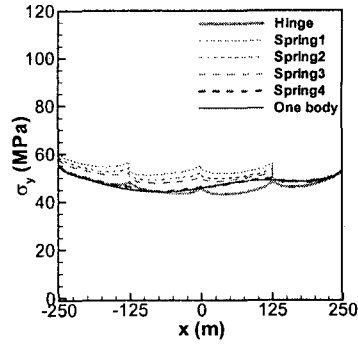


Fig. 31  $\sigma_y$  of VLFS (T=15 sec,  $\beta=75$  deg)

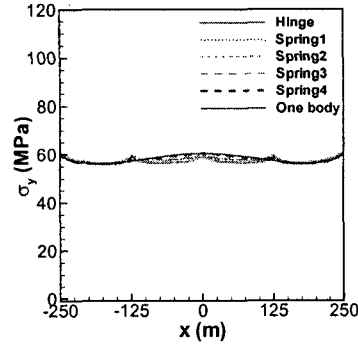


Fig. 32  $\sigma_y$  of VLFS (T=15 sec,  $\beta=90$  deg)

Figs. 23~32는 VLFS의 횡방향응력 분포를 제시하고 있다. 입사각이 0도인 경우 스프링강도가 작은 구조물과 힌지 구조물의 횡방향응력이 작다. 사파의 경우 스프링강도가 작은 구조물일수록 응력이 커지는데 그것은 스프링강도가 작을수록 접합부의 전단강도와 비틀림강도가 작아서 횡방향 곡률이 쉽게 커지기 때문이다. 반면, 스프링강도가 큰 구조물 내지 힌지구조물은 접합부의 전단강도와 비틀림강도가 크므로 횡방향 휨이 상대적으로 억제되어 횡방향응력이 작다. 입사각이 90도일 경우 접합부가 횡방향응력에 미치는 영향이 작아서 구조물의 횡방향응력은 거의 동일하다.

#### 4. 결 론

본 연구는 접합부가 스프링 내지 힌지로 구성된 부유구조물에 대해 고차경계요소법과 유한요소법을 적용한 직접법을 이용하여 유탄성응답을 수치적으로 해석하고 파도의 주기, 입사각 등에 따른 구조물의 변위 및 응력의 변동 양상을 고찰하였다. 유닛 네 개가 결합된 길이 500m 폭 250m의 VLFS를 대상으로 해석을 수행하였으며 해석 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

스프링 구조물의 경우 스프링강도가 작을수록 접합부에서 구조물의 굴절 정도가 크므로 수직변위가 큰 반면 스프

링강도가 커질수록 변위가 작아지다가 점차 일체형 구조물의 거동에 수렴한다. 힌지구조물의 경우 접합부의 전단방향이 구속되어 있으므로 입사각 0도인 경우 단주기파에서 변위가 작으나 횡강성은 없으므로 장주기파에서는 변위가 크다. 한편, 접합부에서 횡방향 및 비틀림방향이 구속되어 있으므로 사파에서 변위가 대체로 작다. 입사각이 90도일 경우 접합부의 영향이 작아서 구조물의 변위는 거의 동일하다.

스프링구조물의 경우 스프링강도가 작을수록 접합부에서 힘이 자유로워 종방향응력이 작은 반면 스프링강도가 커질수록 종방향응력이 증가하다가 점차 일체형 구조물의 거동에 수렴한다. 접합부의 모멘트가 풀려있는 힌지구조물의 경우 입사각 0도에서 종방향응력이 작다. 한편, 사파에서는 접합부에서의 횡방향 및 비틀림방향 구속의 영향으로 종방향응력이 다소 크지만 스프링강도가 큰 구조물에 비해서는 매우 작다. 입사각이 90도일 경우 사파의 영향이 없으므로 힌지구조물의 종방향응력이 가장 작다.

입사각이 0도인 경우 스프링강도가 작은 구조물과 힌지구조물의 횡방향응력이 작다. 사파의 경우 스프링강도가 작은 구조물일수록 접합부의 전단강도와 비틀림강도가 작아서 횡방향 힘이 쉽게 발생하여 횡방향응력이 크다. 반면, 스프링강도가 큰 구조물 내지 힌지구조물은 접합부의 전단강도와 비틀림강도가 크므로 횡방향 힘이 억제되어 횡방향응력이 작다. 입사각이 90도일 경우 접합부의 영향이 작아서 구조물의 횡방향응력은 거의 동일하다.

해석결과를 요약해볼 때 변위 내지 응력이 비교적 작은 힌지 접합 구조가 스프링 접합 구조에 비해 해상 접합 시 다소 유리하다고 할 수 있다. 그러나, 힌지 접합부의 비틀림 저항 설계와 실제 시공법 등에 대해서는 더욱 많은 연구가 필요하다고 본다.

## 후 기

본 논문은 한국해양연구원이 지원하는 연구정책 및 지원사업과제인 '부유식 구조물의 접합부 형태에 따른 응답 특성 연구'의 일부로 수행되었음을 밝혀 둔다.

## 참 고 문 헌

(1) 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.  
 (2) 김병완, 경조현, 홍사영, 조석규, 이인원, 2005, "접합부의 강도를 고려한 부유식 구조물의 고유모드 및 응답 해석," 한국소음진동공학회 2005년도 춘계학술대회논문집,

pp.698~702.

(3) 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.  
 (4) 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.  
 (5) 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.  
 (6) 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.  
 (7) 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.  
 (8) 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.  
 (9) 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.  
 (10) 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.  
 (11) 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.  
 (12) 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*, Vol. 63, pp.183~207.