

# 불규칙파 중 초대형 부유식 해양 구조물에 대한 운동 해석

신현경\* · 이호영\* · 임춘규\* · 신현수\*\* · 박인규\*\*

\*울산대학교 수송시스템공학부

\*\*현대중공업(주) 선박해양연구소

## Motion Analysis of a Very Large Floating Structure in Irregular Waves

HYUNKYOUNG SHIN\*, HO YOUNG LEE\*, CHOON GYU LIM\*, HYUN SOO SHIN\*\* AND IN GYU PARK\*\*

\*School of Transportation System Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

\*\*Hyundai Heavy Industry Co. Ltd, Ulsan, 682-792, Korea

**KEY WORDS:** Very large floating structure 초대형 부유식 해양 구조물, Long-crested irregular wave 장파정 불규칙파, Source-dipole distribution method 소오스-다이폴 분포법, Deck wetness 갑판침수, Irregular motion 불규칙 운동

**ABSTRACT:** A very large floating structure has rather small motion characteristics as to the whole body, while the motion at end part of such structure becomes largest due to the elastic motion of the structure. This paper presents on the theoretical result on the relative motion characteristics and green water phenomena of VLFS in waves. This phenomena affect not only to strength of the structure but also to determination of depth of structure. To predict motion responses of structure in regular waves, the source-dipole distribution method and F.E.M. is used. By irregular wave results, the probability of occurrence of green water and response of the structure were calculated.

### 1. 서 론

지금까지 초대형 부유식 해양 구조물의 운동을 계산하기 위해 유탄성 변형을 고려하여 파도에 의한 구조물의 응답에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다(Yago and Endo, 1996; Kashiwagi and Furukawa, 1997; 신과 이, 1999). 초대형 부유식 해양 구조물의 기본 설계에서 가장 중요한 요소는 길이, 폭 및 깊이를 결정하는데 있다. 길이와 폭은 이착륙할 항공기의 종류와 부대 시설과 관련되기 때문에 유체역학적인 관점에서 고려할 사항이 아니다. 그러나 깊이를 결정하는 것은 기본 설계자가 가장 관심을 갖고 있으며, 구조물의 비용을 줄이기 위해 깊이를 최대한 줄여야 한다. 깊이를 결정할 가장 중요한 요소 중의 하나가 파도와 구조물의 상대 운동에 의해 어떤 해상상태에서 갑판이 침수가 일어나지 않도록 하여야만 한다. 갑판에 많은 녹수(Green Water)가 발생할 경우에 깊이를 증가시켜서 갑판 위의 중요한 의장품에 물이 들어가지 않도록 보호해야 한다. 이와 같이 구조물 깊이를 줄이고 파도에 대한 하중을 줄이기 위해 구조물의 바깥에다 고정식 방파제를 설치한다.

본 연구에서는 규칙파 중에서 유체력을 계산하기 위해 유한 수심 그린함수를 이용한 소오스-다이폴 분포법이 사용되었고 구조물의 운동은 판 방정식에 의해 만족되며, 구조물의 응답은 판 요소의 중앙 점을 절점으로 하여 이들의 절점을 탄성 요소로 연결하여 유한 요소법에 의해 정식화하여 수직운동을 계산하였다(신과 이, 1999). 그리고 장파정 불규칙 파중의 ITTC 스펙트럼을 사용하고, 초기 설계 단계에서 가장 중요 시 되는 구조물의 깊이 결정을 위해 여러 해상 상태에 대한 구조물의 갑판 침수 확률과 시간당 횡수를 계산하였고 불규칙 파중에서 운동 해석을 실시하였다.

### 2. 수식의 정식화

좌표계는 우수좌표계를 사용하였고, Fig.1과 같이 정의된다. 기본가정은 구조물의 형상은 길이 L, 폭 B인 사각형 형태이고, 흘수 d는 폭과 길이에 비해서 아주 작다.

선형이론을 도입하기 위해 구조물의 운동은 미소진폭의 시간 조화운동이라 가정하여 물체 및 자유표면 경계조건은 선형화 시킨다.

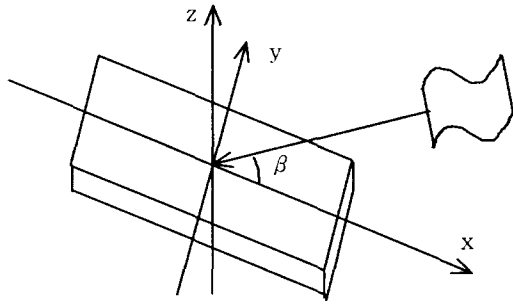


Fig. 1 Coordinate systems

속도 포텐셜  $\Phi$ , 구조물의 수직변위  $w$  는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = i\omega [a(\Phi_I + \Phi_S) + \sum_{i=1}^{NX \times NY/4} w_i \Phi_i] \quad (1)$$

여기서,

- $a$  : 입사파의 진폭
- $w_i$  :  $i$  번째 운동의 복소진폭
- $NX$  :  $x$  축 방향의 요소 수
- $NY$  :  $y$  축 방향의 요소 수

유한 수심에서 입사파의 포텐셜  $\Phi_I$  는 선형파 이론을 사용함으로써 주어진다.

$$\Phi_I = \frac{g}{\omega^2} \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} \exp[-ik_0(x \cos \beta + y \sin \beta)] \quad (2)$$

- $\omega$  : 입사파의 주파수
- $\beta$  : 입사파의 진행방향과  $x$  축과 이루는 각
- $k_0$  : 분산관계를 만족하는 파수

유탄성 운동을 나타내기 위한 일반화된 방사 문제는 4개의 유체 요소가 같이 단위 운동을 할 때 각 절점에 유효하는 포텐셜을 계산하는 문제로 구성되었고,  $\Phi_i$  ( $i=1, \dots, NX \times NY/4$ ) 는 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

$$\nabla^2 \Phi_i = 0 \quad \text{in the fluid domain} \quad (3)$$

$$\Phi_{iz} - \frac{\omega^2}{g} \Phi_i = 0 \quad \text{at } z=0 \quad (4)$$

$$\Phi_{iz} = 0 \quad \text{at } z=-h \quad (5)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} (\Phi_{iR} - i \frac{\omega^2}{g} \Phi_i) = 0 \quad (6)$$

속도 포텐셜은 그린(Green) 제 2정리에 의해 다음과 같이 소오스와 법선 다이플에 의해서 각 요소의 절점에서 계산된다.

$$2\pi \Phi_i(x) + \int \int_{S_H} \Phi_i(\xi) \frac{\partial G(\xi, x)}{\partial n_\xi} dS(\xi)$$

$$= \int \int_{S_H} \frac{\partial \Phi_i(\xi)}{\partial n_\xi} G(\xi, x) dS(\xi) \quad (7)$$

$i=1, 2, \dots, NX \times NY/4$

- $G(\xi, x)$  : 유한수심에 대한 그린 함수
- $n$  : 단위 법선벡터
- $x$  와  $\xi$  : 관측점과 용출점

(7)에서 사용된 유한수심 그린함수는 Wehausen & Laitone를 참고하였다(Wehausen and Laitone, 1960). 유탄성 문제를 해석하기 위해 일반화된 방사문제와 산란 문제에 대한 물체 표면조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial n} = n_i \quad i=1, 2, \dots, NX \times NY/4 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi_s}{\partial n} = - \frac{\partial \Phi_I}{\partial n} \quad (9)$$

### 3. 판의 유탄성 운동

판의 두께가 길이와 폭의 차원에 비하여 아주 작다는 가정에 따라 유체력과 관련된 압력에 의해 판의 운동은 다음식에 의해 표현된다.

$$-M \omega^2 w(x, y) + D \nabla^4 w(x, y) = -\rho i \omega \Phi w - \rho g w \quad (10)$$

- $D = (Et^3/12(1-\nu^2))$  : flexural rigidity
- $E$  : Young's modulus
- $\nu$  : Poisson's ratio
- $t$  : 구조물 깊이
- $w(x, y)$  : 판의 수직 변위

구조물의 운동은 다음과 같이 표현된다(Yago and Endo, 1996).

$$(-\omega^2 ([M] + [m]) + i\omega [N] + [K_r] + [K_s])[w] = [F] \quad (11)$$

- $[M]$  : 구조물의 질량 행렬
- $[m]$  : 부가 질량 행렬
- $[N]$  : 감쇠계수 행렬
- $[K_r]$  : 복원력 행렬
- $[K_s]$  : 강성 행렬
- $[F]$  : 과 강제력 행렬

탄성변위의 응답은 방사계산, 산란계산에서 구한 유체력의 결과를 (10)식에 대입하여 계산할 수 있다. 본 계산에서는 유체력을 받는 패널과 탄성 평판 패널로 나눠 모델화하고 유체 패널에 작용하는 힘이 탄성 평판의 패널의 절점에서 작용하는 것으로 하여 탄성 평판은 등방성 강방형 요소로 하고 비적합이론에 기초한 강성 행렬을 적용한다. 유체력은 패널 중앙을 절점으로 하고 요소내에서는 압력이 일정하다고 가정한다. 유체력은 탄성평판 4개

의 패널에 집중적으로 작용한다.

(11)식은 간략화하여 각 질점에 대해 상하방향만으로 표현했으나 판의 휨에 대해서는 3자유도의 형태를 취해서 나타내었다(Yago and Endo, 1996; 신과 이, 1999).

#### 4. 감판 침수

장파장 불규칙파 스펙트럼은 ITTC(1978) 스펙트럼을 이용하고 모양은 Fig.2와 같다.

$$S_{\zeta}(\omega) = A/\omega^5 \exp(-B/\omega^4) \quad (16)$$

$$A = 172.5(H_{1/3}^2/T^4)$$

$$B = 691/T^4$$

$H_{1/3}$  : 유의 파고 (meter)

$T$  : 평균주기 (sec)

구조물 임의 위치 (x,y,z)에서의 수직 상대 변위는 다음과 같다.

$$Z_r = Z_i - \zeta_w \quad (17)$$

여기에서,

$$i = 1, 2, \dots, NX \times NY/4$$

$Z_i$  : 구조물의 운동에 의한 정수면 부터의 변위

$$\zeta_w = a \exp[-ik(x \cos \beta + y \sin \beta)] \quad (18)$$

초대형 부유식 해상구조물의 경우 판의 수직 변위만을 고려하므로 식(17)에서 Roll, Pitch값은 배제되어있다. 따라서  $m_0$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_0 = \int_0^{\infty} \left( \frac{Z_i - \zeta_w}{a} \right)^2 S_{\zeta}(\omega) d\omega \quad (19)$$

상대 변위  $Z_r$ 의 확률분포를 Rayleigh 분포라고 가정하면 감판 침수의 확률은 다음 식으로 표시된다.

$$P_{dw} = \exp[-(t-d)^2/2m_0] \quad (20)$$

여기서,  $t$  : 감판 상부까지 깊이

$d$  : 흘수

그리고 1시간당 발생횟수는 다음과 같다.

$$N_{dw} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\dot{m}_0}{m_0} \right)^{1/2} P_{dw} \cdot 3600 \quad (21)$$

Table 1 Sea states

Beaufort No.	$H_{1/3}$ (m)	T(sec.)
5	2.0	5.46
8	5.0	9.05

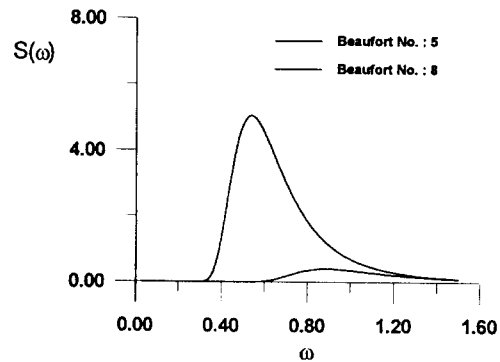


Fig. 2 ITTC Spectrum

본 연구에서 해상 상태는 Beaufort Number에 따라 결정하였고 그 내용은 Table 1과 같다.

계산으로 일본에서 실증시험을 행한 Phase I 구조물을 택하였고 기본제원은 길이 300m, 폭 60m, 깊이 2m, 4m, 흘수 0.5m, 수심58.5m로 설정하여 계산하였다.

Table 2는 Table.1의 해상 상태에 따라 구조물의 깊이를 4m, 2m인 경우에 구조물의 강성(EI)은 같게하고, 흘수는 0.5m로 결정하고 입사파의 각도가 0°, 30°, 45°, 90° 인 경우 감판침수확률과 1시간 당 발생횟수 중 가장 큰 값을 나타내었다.

Fig.3은  $\omega=0.5, 1.0$  에서 파중에서 운동에 기인하는 상대 변위를 나타낸 것이고, Fig.4는 감판침수확률을 나타내었다. Fig.5는 시간당 감판침수횟수를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 파 입사각이 0°, 30°, 45° 인 경우는 파상측의 Port부분에서 침수확률과 횡수가 크게 나타나고 파 입사각이 90° 인 경우는 중앙 부근에서 침수확률과 횡수가 크게 나타난다. Table 2와 그림에서 해상 상태 5에서 깊이가 2m인 경우에는 구조물이 파중에 어느 정도 유지가 가능하나, 해상상태 8인 경우는 침수확률이 너무 커서 구조물을 유지하기가 어렵다고 생각된다. 구조물의 깊이를 4m로 증가시킨 경우에 해상상태 5에서는 해수가 감판위로 거의 올라오지 않으나, 해상상태 8인 경우에는 깊이를 증가 시켜도 침수 확률이 크게 줄어들지 않는다. 따라서 위의 계산 결과로 볼 때 해상상태가 아주 큰 경우에 깊이를 증가시키는 것보다 고정식 방파제를 설치하는 것이 유리하다고 생각된다.

**Table 2 Probability and numbers for deck wetness**

Angle (deg.)	Beaufort No.	Depth (m)	Probability (%)	Numbers (times/hour)
0	5	2	5.58	31.97
		4	0	0
	8	2	83.2	477.13
		4	36.77	210.69
30	5	2	1.37	7.88
		4	0	0
	8	2	74.50	427.14
		4	19.65	112.59
45	5	2	5.35	30.65
		4	0	0
	8	2	85.4	498.3
		4	42.25	242.10
90	5	2	7.34	42.08
		4	0	0
	8	2	87.4	501.23
		4	46.49	266.40

**5. 불규칙파중의 운동해석**

일반적으로 불규칙파의 스펙트럼으로부터 성분파의 진폭, 파수 및 위상각을 산출하여 선형 중첩을 이용하여 입사파를 생성하고 이를 이용하여 운동을 해석할 수 있다. 파면의 변화는 다음 식으로 표현된다(Faltinsen, 1990).

$$Z1(t) = \sum_{j=1}^N A_j \sin(\omega_j t - k_j x + \epsilon_j) \quad (22)$$

여기서,

$$A_j = \sqrt{S(\omega) 2 \Delta \omega} \quad (23)$$

$$\Delta \omega = 2 \pi / T \quad (24)$$

$$N = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\Delta \omega} \quad (25)$$

위의 (22)식에 구조물의 운동 응답을 취하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Z2(t) = \sum_{j=1}^N A_j |H(\omega)| \sin(\omega_j t + \delta(\omega_j) + \epsilon_j) \quad (26)$$

여기서,

$|H(\omega)|$  : 단위 파진폭에 대한 상대 변위

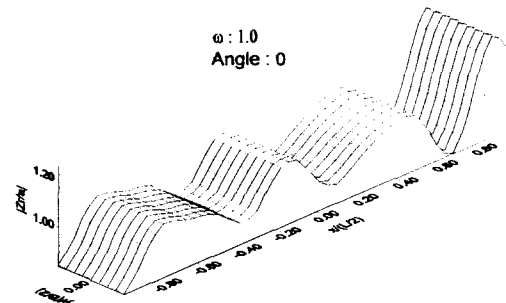
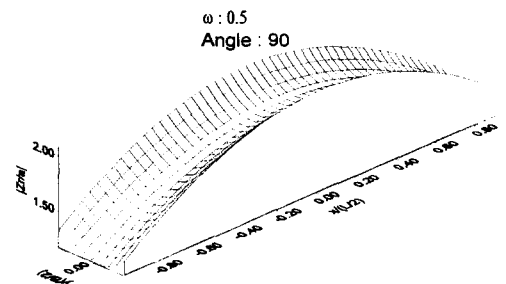
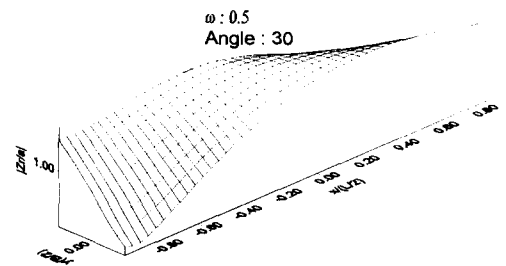
$\delta(\omega_j)$  : 응답과 결합된 위상각

본 논문에서 성분파는 (25)식에 의해 개수가 정해졌으며

응답 스펙트럼에서의 성분은 23개로 분할 하여 계산을 하였다.

Fig.6은 ITTC 스펙트럼을 이용하여 Beaufort No.4(유의 파고 1.0m, 평균파주기 3.86초), 입사각이 0° 이고 수심이 58.5m인 경우와 Beaufort No.8(유의파고 5.5m, 평균파주기 9.05초), 입사각 45° 일 때 Beaufort No.4일 경우는 선미와 중앙부 Beaufort No.8일 경우는 선수와 선미부분에 대해 시간에 따른 수직 상대 운동을 나타낸 것이다. 선수와 선미의 운동이 중앙부의 운동에 비해 약간 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig.7은 장파정 불규칙파에서 Beaufort No.8이고 입사파각이 0° 일 때 시간별(1초, 6초, 11초, 16초)로 구조물의 운동을 나타낸 것이다.



**Fig. 3 Relative vertical displacement**

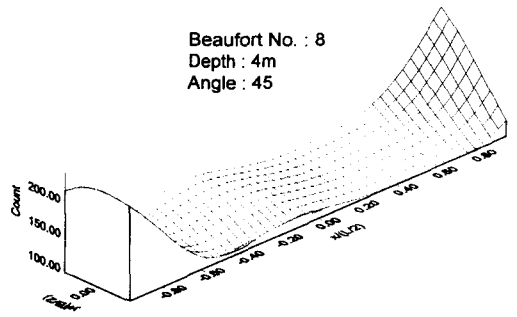
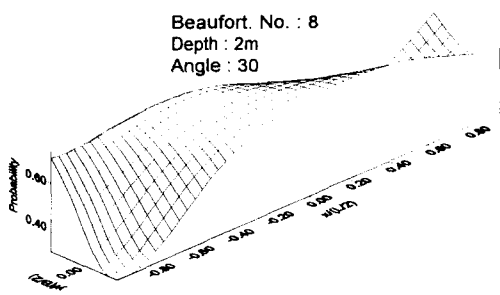
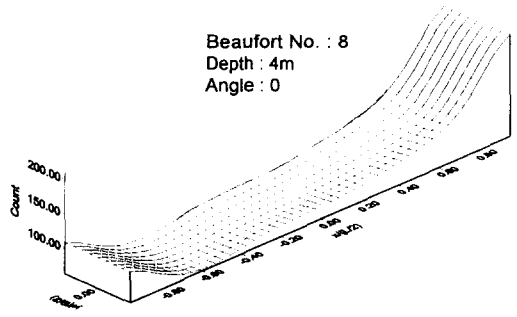
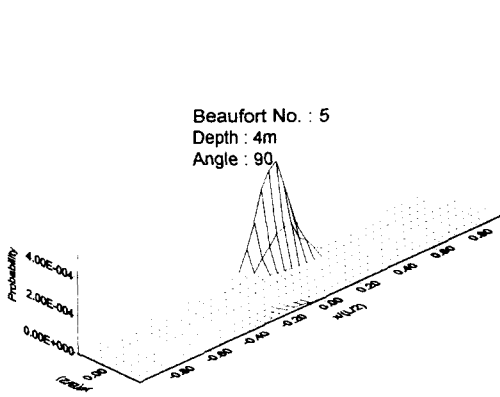


Fig. 5 Numbers of deck wetness

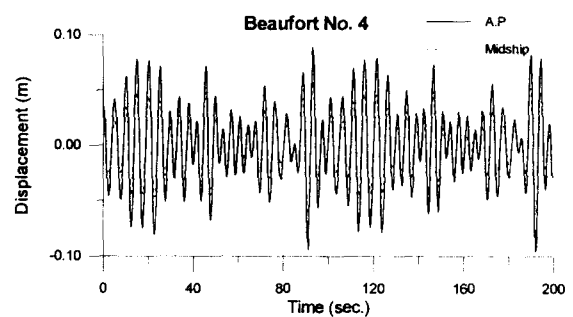
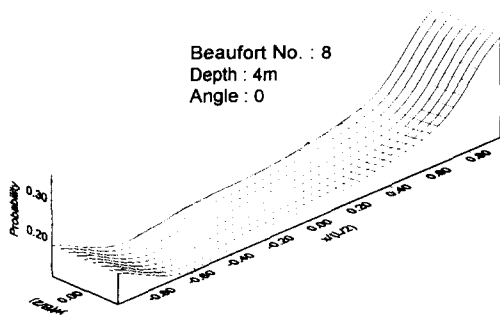


Fig. 4 Probability of deck wetness

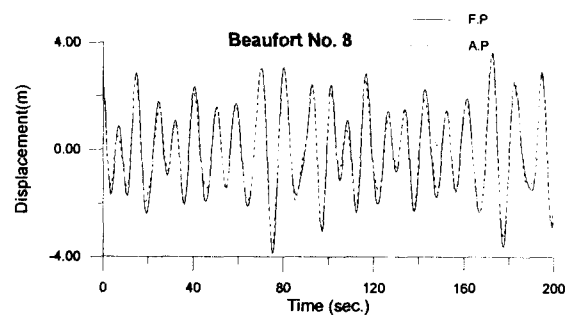
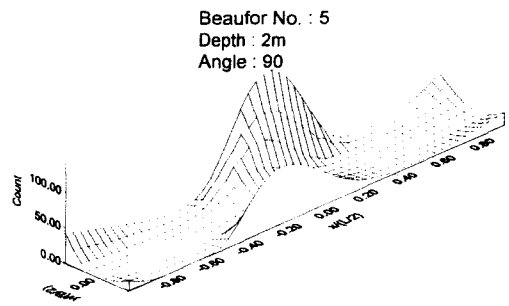


Fig. 6 Time series of vertical displacement at A.P., Midship and F.P.

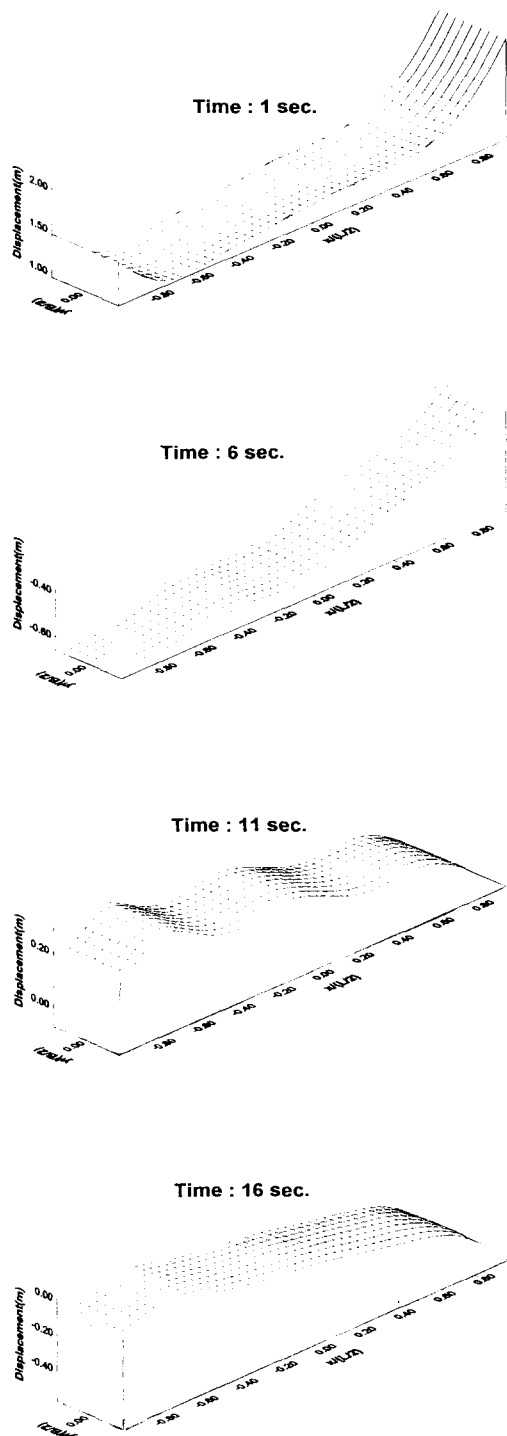


Fig. 7 Distribution of vertical displacement

## 6. 결 론

본 논문은 소오스-다이폴 분포법과 유한 요소법을 사용하여 초대형 부유식 해양구조물에 대한 불규칙파 중에서 유탄성 응답을 해석하였고 해상상태와 입사파각의 변화

에 따라 갑판의 침수 확률과 시간 당 월파 횟수를 계산하여 초기 설계단계에서 중요한 요소인 구조물의 깊이를 결정하는데 응용될 수 있다고 생각된다.

추후의 연구에서 모형 시험과의 비교가 필요하며, 현실적으로 고정식 방파제가 놓여 있는 상황에서 여러 해상상태에 대한 운동과 갑판 침수에 대한 연구가 필요하다.

## 7. 참고 문헌

- 신현경, 이호영, "천홀수 초대형 부유식 해양 구조물의 유탄성 응답 해석", 한국해양공학회 추계연구발표회, 1999.
- Faltinsen, O. M., "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", Cambridge University Press, pp.23~39, 1990.
- Kashiwagi, M. and Furukawa, C., "A Mode-Expansion Method for Predicting Hydroelastic Behavior of a Shallow Draft VLFS", OMAE Vol.VI, Ocean Space Utilization, 1997.
- Yago, K and Endo, H., "On the Hydroelastic Response of Box-Shaped Floating Structure with Shallow Draft (Tank Test with Large Scale Model)", Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol.180, pp.341~352, 1996.
- Wehausen, J. V. and Laitone, E. V., "Handbuch der Physik", Vol.9, Springer-Verlag, Berlin, 1960.