

불규칙파 중 초대형 부유식 해양 구조물에 대한 운동

신현경*, 이호영**, 임춘규***, 신현수****, 박인규*****

Motion of a Very Large Floating Structure in Irregular waves

H. Shin*, H. Y. Lee**, C. G. Lim***, H. S. Shin**** and I. G. Park*****

요 약

대형 부유식 해양 구조물은 끝부분을 제외하고 작은 운동 특성을 보여주지만, 구조물 각 끝부분의 운동은 유탄성운동에 기인하여 더욱 크게 된다. 본 논문에서는 불규칙파 중에서 초대형 부유식 해양 구조물 운동 특성에 관한 수치적 추정을 제시한다. 불규칙파 중 구조물의 운동을 추정하기 위하여 소오스-다이폴 분포법과 유한요소법이 사용된다.

Abstract

Very large floating structures have rather small motion characteristics except their ends, where the motions become much larger due to the elastic motion of the structure. This paper presents the numerical predictions of hydroelastic behaviors of VLFS in irregular waves. To predict motion responses of structure in irregular waves, the source-dipole distribution method and finite element method is used.

1. 서론

지금까지 초대형 부유식 해양 구조물의 운동을 계산하기 위해 파도에 의한 유탄성 변형을 고려한 구조물의 응답에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다 (심인환 등 1999, 2000, 이호영/신현경 2000, Yago/Endo 1996).

초대형 부유식 해양구조물은 악천후가 사전에 예상되어도 이를 맞아 견디어 내어야 하기 때문에 해양 환경이 선박보다 더욱 중요하다. 따라서 지금까지 많은 연구가 이루어진 규칙파 중의 구조물의 운동을 바탕으로 불규칙파 중의 구조물의 운동 해석을 실시하였다.

본 연구에서는 규칙파 중에서 유체력을 계산하

접수일자: 2000년 4월 25일, 승인일자: 2000년 10월 9일

*정회원, 울산대학교 수송시스템공학부 교수(E-mail: hsshin@uou.ulsan.co.kr)

**정회원, 울산대학교 수송시스템공학부 연구교수(E-mail: hy19930@yahoo.co.kr)

***학생회원, 울산대학교 수송시스템공학부 대학원

****정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소 책임연구원

기 위해 유한 수심 그린함수를 이용한 소오스-다이폴 분포법이 사용되었고 구조물의 운동은 판 방정식에 의해 만족되며, 구조물의 응답은 판요소의 중앙 점을 절점으로 하여 이들의 절점을 탄성 요소로 연결하여 유한 요소법에 의해 정식화하여 수직운동을 계산하였다(이호영/신현경 2000). 그리고 장파정 불규칙파 중의 ITTC 스펙트럼으로부터 성분파의 진폭, 파수 및 위상각을 산출하여 선형 중첩을 이용하여 입사파를 생성하고 이를 이용하여 불규칙파 중의 여러 해상 상태에 대한 구조물의 운동해석을 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.

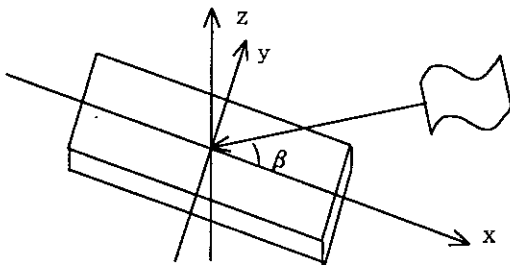


Fig.1 Coordinate systems

속도 포텐셜 ϕ , 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 ϕ_I 는 선형파 이론을 사용함으로써 주어진다.

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

ω : 입사파의 주파수

β : 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 유기하는 포텐셜을 계산하는 문제로 구성되었고, ϕ_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 다이폴에 의해서 각 요소의 절점에서 계산된다.

$$2\pi \phi_i(\vec{x}) + \int \int_{S_H} \phi_i(\vec{\xi}) \frac{\partial G(\vec{\xi}, \vec{x})}{\partial n_{\xi}} dS(\vec{\xi}) = \int \int_{S_H} \frac{\partial \phi_i(\vec{\xi})}{\partial n_{\xi}} G(\vec{\xi}, \vec{x}) dS(\vec{\xi}) \quad (7)$$

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

$G(\vec{\xi}, \vec{x})$: 유한수심에 대한 그린 함수

n : 단위 법선벡터

\vec{x} 와 $\vec{\xi}$: 관측점과 용출점

(7)에서 사용된 유한 수심 그린 함수는 Wehausen/Laitone(1960)을 참고하였다.

유탄성 문제를 해석하기 위해 일반화된 방사문제와 산란문제에 대한 물체 표면조건은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_l}{\partial n} \quad (9)$$

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

ν : Poisson's ratio

t : 구조물 깊이

$w(x,y)$: 판의 수직 변위

구조물의 운동은 다음과 같이 표현된다(Yago/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

$[F]$: 파 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 탄성평판의 패널의 절점에서 작용하는 것으로 하여 탄성 평판은 등방성 장방형 요소로 하고 비적합이론에 기초한 강성 행렬을 적용한다. 유체력은 패널 중앙을 절점으로 하고 요소내에서는 압력이 일정하다고 가정한다. 유체력은 탄성평판 4개의 패널에 집중적으로 작용한다.

(11)식은 간략화하여 각 절점에 대해 상하방향만으로 표현했으나 판의 휨에 대해서는 3자유도의 형태를 취해서 나타내었다(이호영/신현경 2000, Yago/Endo 1996).

4. 불규칙과 중의 운동

장파장 불규칙과 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.

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

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

Z_i : 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 상대수직변위에 대한 m_0 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

Table 1 Sea states

Beaufort No.	$H_{1/3}$ (m)	T(sec.)
4	1.0	3.86
5	2.0	5.46
6	3.0	6.69
8	5.5	9.05

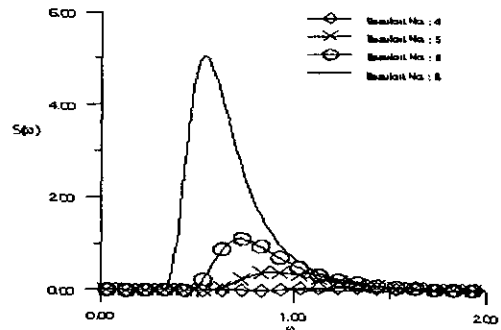


Fig.2 ITTC spectrum

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

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

Fig. 3은 0.5, 1.0 rad/s일 경우 규칙파 중에서 운동에 기인하는 상대 변위를 나타낸 것이다. 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).

$$Z_1(t) = \sum_{j=1}^N A_j \sin(\omega_j t - k_j x + \epsilon_j) \quad (20)$$

$$A_j = \sqrt{S_{\zeta}(\omega) 2 \Delta \omega} \quad (21)$$

$$\Delta \omega = 2\pi/T \quad (22)$$

$$N = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\Delta \omega} \quad (23)$$

위의 (20)식에 구조물의 운동 응답을 취하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$ZZ(t) = \sum_{j=1}^N A_j |H(\omega_j)| \sin(\omega_j t + \delta(\omega_j) + \epsilon_j) \quad (24)$$

$|H(\omega_j)|$: 단위 파진폭에 대한 상대변위

$\delta(\omega_j)$: 응답파 결합된 위상각

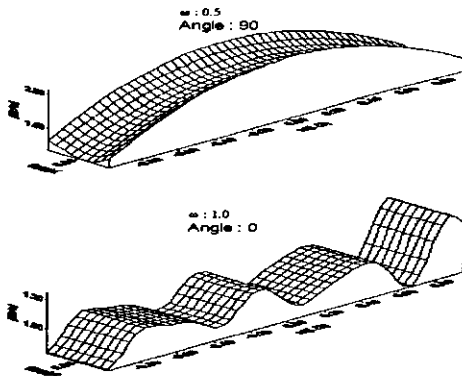


Fig.3 Relative vertical displacement

선형 중첩법에 의해 파도를 생성할 경우 $\Delta \omega$ 가 일정하면 $2\pi/\Delta \omega$ 에 대응되는 주기로 변조가 나타나게 되므로 파도신호가 반복되지 않도록 (23) 식으로 성분파의 개수를 결정하였고 응답스펙트럼에서의 성분은 23개로 분할하여 계산하였다.

Fig.4는 ITTC 스펙트럼을 이용하여 Beaufort No.4(유의파고 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 수직 상대 운동이 중앙부의 수직 상대 운동에 비해 크게 나타남을 알 수 있다.

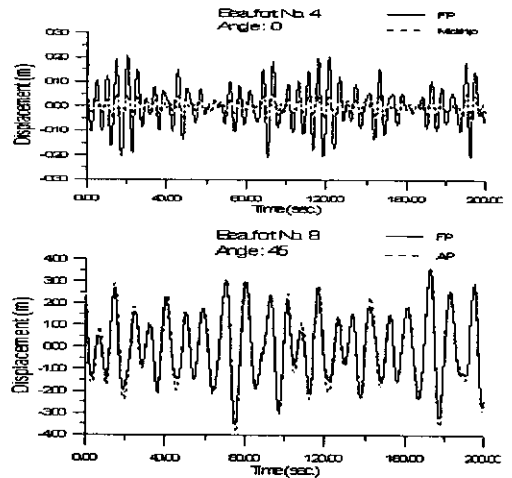


Fig.4 Time series of vertical displacement at F.P., Midship, A.P.

Fig. 5는 Beaufort No.8에서 수직 상대운동에 대한 제곱평균치(Mean square value) m_0 값을 나타낸 것이다.

Fig. 6은 Beaufort No.4, 5, 6, 8이고, 입사각이 $0^\circ, 90^\circ$ 일 때 선수, 선미, 중앙부의 수직 상대 운동을 응답스펙트럼으로 나타내었다.

파도에 대한 구조물의 운동을 잘 보이고 있는데 입사각이 0° 일 경우에는 선수부의 상대운동이 가장 크게 나타나고 선미부와 중앙부의 상대운동은

비슷하게 나타나고 있다.

그러나 입사각이 90° 일 경우에는 중앙부의 상대 운동이 선수와 선미부의 상대운동보다 크게 나타난다.

이는 파상측과 파하측의 수직운동과 입사파 사이의 위상차에 의해 상대운동은 서로 취소되고, 중앙부는 수직운동은 작으나 입사파의 진폭이 상대적으로 크기 때문에 나타나는 현상이다.

그리고, 입사각 90° 인 경우의 선수 및 선미부의 수직 상대운동 응답 스펙트럼 값에 peak가 2개 생기는 것을 볼 수 있다. 이는 일반적인 해상상태에서 파도 스펙트럼의 값은 고주파수에서 작으므로, 고주파수의 수직 상대 운동 값이 저주파수 값보다 크다는 것을 의미한다.

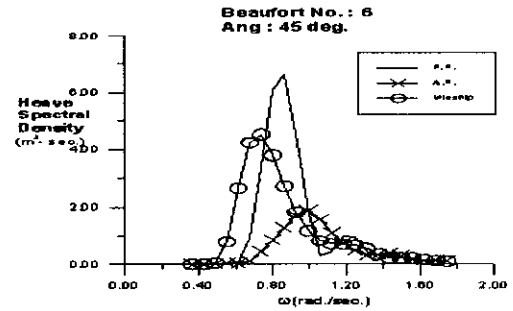
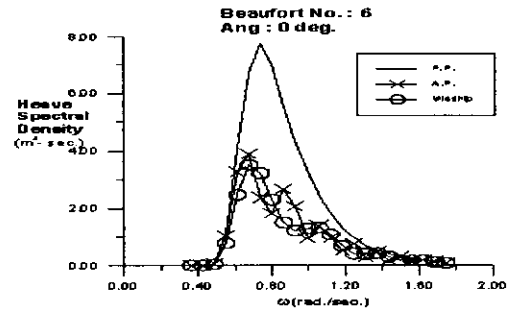
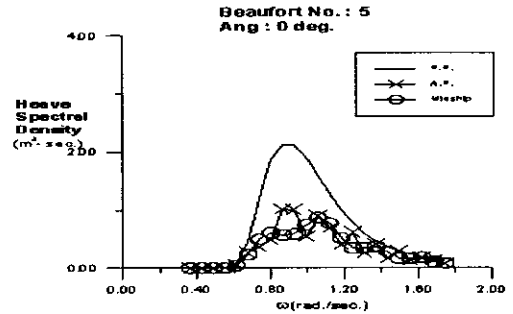
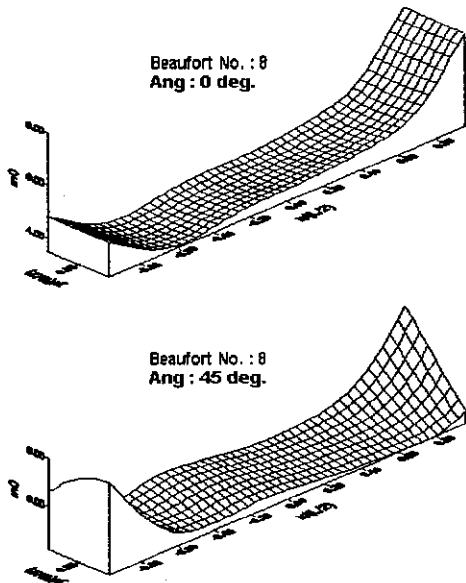
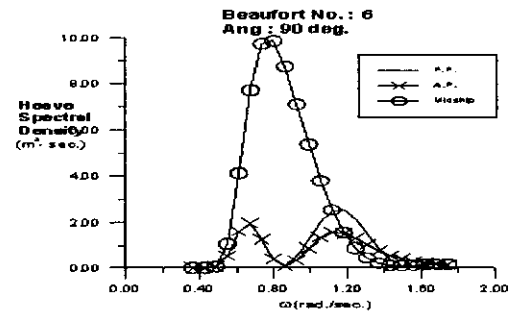
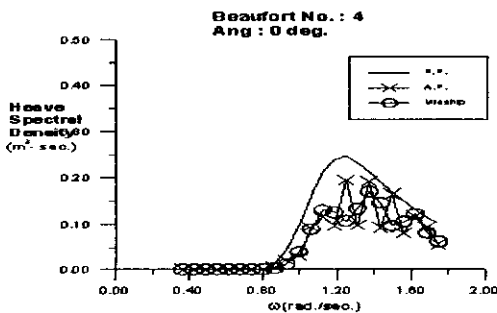


Fig.5 Distribution of mean square value



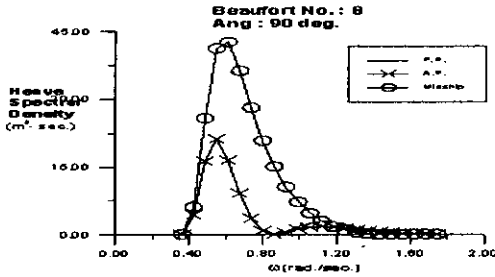


Fig.6 Distribution of heave spectral density

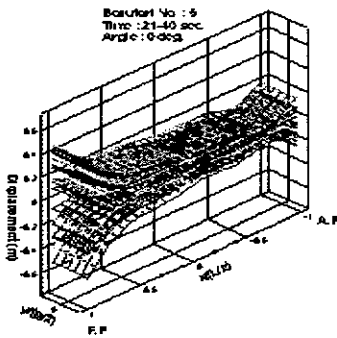
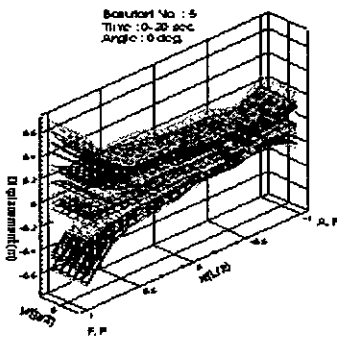


Fig.7 Distribution of vertical displacement

Fig. 7은 장파장 불규칙파에서 Beaufort No.5 이고 입사파각이 0° 일 때 시간변화에 따른 구조물의 운동을 나타낸 것이다. 선수부의 상대운동이 중앙부와 선미부의 운동보다 크며 시간에 따른 상대운동이 잘 표현되고 있음을 알 수 있다. 또한

본 계산에서 구조물의 깊이와 흘수가 각각 2m, 0.5m 이므로 그림으로부터 알 수 있듯이 해상상태 5에서 갑판 침수는 일어나지 않으나 선저 노출은 부분적으로 발생하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 소오스-다이폴 분포법과 유한 요소법을 사용하여 초대형 부유식 해양구조물에 대한 불규칙파 중에서 해상상태와 입사파 각의 변화에 따라 유탄성 응답을 해석하였다.

입사파각이 0° 일 경우에는 선수부분의 수직 상대운동이 크게 나타나고, 90° 일 경우에는 구조물 중앙부의 수직 상대운동이 크게 나타나고 있으며 그 운동 변위 또한 0° 일 경우보다 상대적으로 크게 나타난다.

추후의 연구에서 이호영/신현경(2000)의 시간영역에서의 운동해석방법 및 모형 시험과의 비교가 필요하며, 현실적으로 고정식 방파제가 놓여 있는 상황에서 여러 해상상태에 대한 운동에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 심인환, 윤재돈, 최형순, "사파중에 놓인 거대 부유체의 응답에 대한 유탄성 해석", 대한조선학회 논문집, 제 36권 제 3호, 1999
- 이호영, 신현경, "천흘수 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답 해석", 한국해양공학회지, 제 14권 제 2호, 2000
- 이호영, 신현경, "시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 운동 해석", 한국해양공학회지, 제 14권 제 3호, 2000
- Wehausen, J. V. and Laitone, E. V., "Handbuch der physik", Vol.9, Springer-Verlag, Berlin, 1960.
- Faltinsen, O. M., "Sea loads on ships and offshore structures", Cambridge University Press, pp.23~39, 1990.
- 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.



이호영



신현수



박인규