

## 손상침수로 자세변화된 바지형 선박의 파랑하중해석

홍도천<sup>†\*</sup>, 홍사영<sup>\*\*</sup>

충남대 첨단수송체연구소\*, 해양시스템안전연구소 한국해양연구원\*\*

### Waveload Analysis for Heeled Barges with Flooded Compartments

Do-Chun Hong<sup>†\*</sup> and Sa-Young Hong<sup>\*\*</sup>

Center for Advanced Transportation Vehicles, Chungnam National University\*  
Offshore Plant Research Division, KRISO, KORDI\*\*

#### Abstract

A ship may suffer sinkage and heel due to flood in a compartment caused by damage on a deck. The motion and waveloads of the heeled ship floating in waves have been analyzed by making use of a three dimensional potential theory taking account of the hydrodynamic pressure in the flooded compartments. The shear forces and bending moments due to radiation-diffraction waves have been calculated by the direct integration of the 3-d hydrodynamic pressure on the outer and inner hulls of floating barges. The motion responses and the relative flow rate across the mean free surface of the water in the flooded compartments are also presented

※Keywords: Waveload (파랑하중), Flow in flooded compartment (침수부 유동), Damaged ship motion (손상선박운동)

#### 1. 서론

선체의 손상은 느리게 진행되는 수선면 및 접수면의 변화를 가져오며 동시에 해양파에 의한 선체 응답운동이 보다 빠르게 진행된다. 따라서 입사파, 선박의 자세변화에 따른 산란파, 방사파에 더하여

선체내부의 침수로 인한 내부유동이 발생 하는 등 매우 복잡한 유동에 기인한 하중을 받게 된다. 한편 손상선박은 동적 안정성이 보장되지 않아 전복 또는 침몰하는 경우가 있고 손상 안정성이 보장되는 경우에도 복잡한 파 하중에 의하여 선체의 파손이 진행되어 침몰할 가능성이 높다. 따라서 선박의 다양한 손상부위를 가정하여 6 자유도 선체 운동 및 3 차원 파랑하중 해석을 수행하여 구조설계에 반영시켜야 한다 (홍도천 등 1998). 본 논문에서는 바-지형 부유체가 갑판 손상에 의하여 내

접수일: 2005 년 6 월 7 일, 승인일: 2005 년 8 월 12 일

† 주저자, E-mail: dchong@cnu.ac.kr

Tel: 042-868-7588

부 수밀구역이 침수되었을 경우, 선형 포텐셜 이론에 근거하여 선체에 작용하는 파랑하중의 해석 기법을 보이고 수치모형에 대한 계산을 수행하였다.

2. 포텐셜 유동 및 선체 운동응답 해석

선체는 강체이고 유체는 비점성, 비압축성이며 유체영역은 자유표면  $F$  및 선체의 접수면 아래의 공간이고 여기에 중력이 작용하고 있다. 직각좌표계  $(x, y, z)$ 의 원점  $O$ 가 평균위치에 있는 물체의 수선면상에 있고  $z$  축은 수직 상방을 가리킨다. 평균위치의 접수면을  $S$ , 거기서 유체영역을 향한 법선 벡터를  $n$  이라한다. 주파수  $\omega$ 와 미소진폭  $a_0$ 를 가진 입사파가 무한원방에서 오며, 물체는 입사파 주파수로 미소진폭 단순조화운동을 한다. 선체의 6 자유도 운동에 의한  $S$  상의 1 점  $M$ 의 변위  $D(M)$ 은 다음과 같다.

$$\text{Re}\{D(M)e^{-i\omega t}\} = \text{Re}\{ \mathbf{a} + \boldsymbol{\theta} \times (\mathbf{r}_M - \mathbf{r}_O) \} e^{-i\omega t} \quad (1)$$

$$\mathbf{a} = \sum_{q=1}^3 a_q \mathbf{e}_q, \boldsymbol{\theta} = \sum_{q=4}^6 a_q \mathbf{e}_{q-3} \quad (2)$$

여기서  $(a_q, q=1,2,3)$ 는 각각 선박의 전후, 좌우 및 상하 동요를 나타내고  $(a_q, q=4,5,6)$ 는 중심  $O$ 에 대한 선박의 회전성분인 횡, 종 및 선 수 요이다.

유동을 비회전이라 하면 Laplace 방정식을 만족시키는 속도포텐셜  $\Phi = \text{Re}\{\Psi e^{-i\omega t}\}$ 가 존재하며 이는 다시 입사파  $\psi_o$ , 산란파  $\psi_7$  및 방사파 포텐셜  $\psi_R$ 로 나눌 수 있다.

$$\Psi = \psi_o + \psi_R + \psi_7 \quad (3)$$

$$\psi_o = -\frac{a_0 g}{\omega} e^{k_0[z+i(x \cos \beta + y \sin \beta)]} \quad (4)$$

(4)에서  $k_0$ 는 파수이고  $\beta$ 는  $x$  축으로부터 전 파랑의 입사각이다.

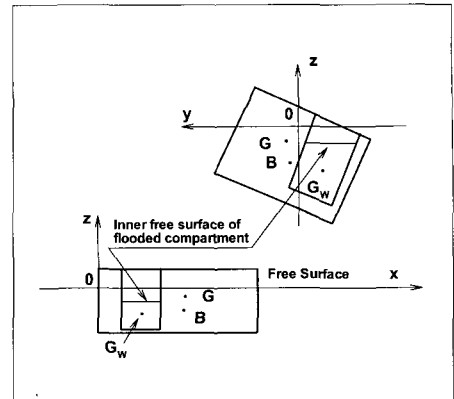


Fig. 1 Coordinate system and transverse and longitudinal sections

선체내부가 침수되어 Fig.1에 보인 바와 같이 수밀 격벽에 둘러싸인 구역에 물이 찬 상태에서 평형을 유지할 경우 선체운동에 의하여 내부유동이 발생되며 이를 내부 유동 포텐셜  $\psi_r$ 로 표시할 수 있다.  $\psi_R$  및  $\psi_r$ 는 각각 선체운동과 단위운동포텐셜의 곱으로 표시된다.

$$\psi_R = -i\omega \sum_{q=1}^6 a_q \psi_q \quad (5)$$

$$\psi_r = -i\omega \sum_{q=1}^6 a_q \phi_q^I \quad (6)$$

$\psi_q (q=1,2,,6)$  및  $\psi_7$ 은 무한수심에서 자유표면 경계조건을 만족시키는 Kelvin 형 Green 함수를 사용한 Green 적분방정식의 해로 구하여진다 (Hong 1987). 이들 포텐셜은 자유표면 경계조건

$$-k_0 \psi_q + \frac{\partial \psi_q}{\partial z} = 0, q=1,2,,7 \text{ on } F \quad (7)$$

접수면 경계조건 및 무한원방 경계조건을 만족시킨다.

한편  $\phi_q^I (q=1,2,,6)$ 는 선체내부유체영역에서 Rankine 형 Green 함수를 사용한 Green 적분방정식의 해로 구하여진다. 침수구역의 내부자유표면을  $F_I$ 라 하면 내부유동 포텐셜의 자유표면 경계조

건은 다음과 같다.

$$-k_0 \phi_q^I + \frac{\partial \phi_q^I}{\partial z} = 0, q = 1, 2, 6 \text{ on } F_i \quad (8)$$

내부유동이 외부유동과 격리되어있는 경우이므로 무한원방 경계조건은 필요치 않고 (8)에 더하여 내부 접수면 경계조건만 적용된다.

선체의 복소운동진폭 ( $a_q, q = 1, 2, 6$ ) 는 주파수 영역에서의 내부유동 포텐셜  $\psi_r$  에 기인한 유체력을 고려한 주파수 영역 부유체 운동방정식의 해로 구하여진다.

$$\begin{aligned} & \rho a_0 \omega^2 L^3 \sum_{q=1}^6 \left[ \frac{\Delta}{L^3} I_{pq} + M_{pq} + iB_{pq} \right. \\ & \left. + M_{pq}^I - \frac{1}{k_0 L} (R_{pq} + R_{pq}^I) a_q \right] \quad (9) \\ & = -\rho a_0 \omega^2 L^3 F_p, \\ & p = 1, 2, 6 \end{aligned}$$

위식에서  $\rho$  는 유체밀도,  $\Delta, I_{pq}$  는 각각 선체의 배수용적 및 관성계수이고  $F_p$  는 파 기진력,  $M_{pq}, B_{pq}$  및  $R_{pq}$  는 각각 선체의 외부유동에 기인한 부가질량, 조파감쇠 및 복원력 계수이다.  $M_{pq}^I$  및  $R_{pq}^I$  는 내부 유동에 기인한 부가질량 및 복원력 계수이다.

한편 침수구역의 내부자유표면 유동에 의하여 내부수평면을 통과하는 상대유량  $Q$  를 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$Q = -i\omega \sum_{q=1}^6 a_q q_q \quad (10)$$

$$q_q = \iint_{F_i} \left( \frac{\partial \phi_q^I}{\partial n_i} - \kappa_q \right) ds, q = 1, 2, 6 \quad (11)$$

$$\kappa_q = 0 \text{ for } q = 1, 2, 6 \quad (12)$$

$$\kappa_q = 1 \text{ for } q = 3 \quad (13)$$

$$\kappa_q = (y - y_0) \text{ for } q = 4 \quad (14)$$

$$\kappa_q = -(x - x_0) \text{ for } q = 5 \quad (15)$$

위에서  $q_q$  는 단위진폭 6 자유도 선체운동에 기인한 상대유량이고  $\kappa_q$  는 각 운동에 대한 내부수평면의 수직변위이다.

### 3. 파랑하중

전체 포텐셜을 알면 외부선체 접수면의 한점에 작용하는 복소수로 표시된 변동 유체압력을 Bernoulli 공식을 사용하여 구할 수 있다.

$$p(M) = i\rho\omega\Psi(M) \quad (16)$$

전체 유압은

$$P_T = P_0 + P_1 + P_R + P_S \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_S(M) &= -\rho g \mathbf{D}(M) \cdot \nabla z \\ &= -\rho g [a_3 + a_4 (y_M - y_0) - a_5 (x_M - x_0)] \quad (18) \end{aligned}$$

이산화된 선체표면의 평면요소  $E_j$  에 작용하는 힘 및 모멘트는

$$d\mathbf{F}_j = -\iint_{E_j} [p_T \mathbf{n} - \rho g z \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{n}] ds \quad (19)$$

$$\begin{aligned} d\mathbf{M}_j &= -\iint_{E_j} \{ p_T \overrightarrow{O_S M} \times \mathbf{n} - \rho g z [(\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\theta}) \overrightarrow{O_S M} \\ &\quad - \overrightarrow{O_S M} \cdot \boldsymbol{\theta}] \mathbf{n} \} ds \quad (20) \end{aligned}$$

위에서  $O_S$  는 임의의 모멘트 계산 기준점이다. 한편 선체내부의 접수면에 작용하는 변동압력은

$$p^I = p_r^I + p_s^I \quad (21)$$

위에서

$$p^I(M) = i \omega \psi_r(M) \quad (22)$$

이고  $p_s^I$  는  $p_s$  와 유사하게 선체내부 침수구역의 유체정압에 기인한 1st-order 압력이다.

이산화된 내부 접수면 요소  $E_j^I$  에 작용하는 힘  $d\mathbf{F}_j^I$  및 모멘트  $d\mathbf{M}_j^I$  는 각각 식 (19),(20)식과 유사하게 계산된다.

여기서 선체의 어떤 수직단면을  $C_k$  라 하고 선미에서 여기까지의 선체질량을  $m_k$  라 하면, 이에 작용하는 수직 전단력은  $m_k$  의 관성력과 외부 및 내부 접수면에 작용하는 변동 유압에 기인한 힘의 차의 수직 성분으로 표시된다.

$$S_Y = \mathbf{e}_3 \cdot (\mathbf{I}_k - \mathbf{F}_k) \quad (23)$$

$$\mathbf{I}_k = -\omega^2 \iiint_{m_k} \mathbf{D}(M) dm \quad (24)$$

$$\mathbf{F}_k = \sum_{j=1}^{N_k} d\mathbf{F}_j + \sum_{j=1}^{N_k^I} d\mathbf{F}_j^I \quad (25)$$

여기서  $N_k$  및  $N_k^I$  는  $C_k$  까지의 평면요소  $E_j$  및  $E_j^I$  의 개수를 나타낸다.

한편  $m_k$  에 작용하는 급힘 모멘트는  $m_k$  의 관성모멘트에서 외부 및 내부 유동에 기인한 모멘트와  $m_k$  에 작용하는 중력에 의한 변동 모멘트의 합을 뺀 값의 수평성분으로 표시된다.

$$M_Y = \mathbf{e}_2 \cdot (\mathbf{J}_k - (\mathbf{M}_k + \mathbf{M}_k^G)) \quad (26)$$

$$\mathbf{J}_k = -\omega^2 \iiint_{m_k} [\overline{O_S M} \times \mathbf{D}(M)] dm \quad (27)$$

$$\mathbf{M}_k = \sum_{j=1}^{N_k} d\mathbf{M}_j + \sum_{j=1}^{N_k^I} d\mathbf{M}_j^I \quad (28)$$

$$\mathbf{M}_k^G = -g \iiint_{m_k} [(\boldsymbol{\theta} \times \overline{O_S M}) \times \mathbf{e}_3] dm \quad (29)$$

한편 횡 전단력 및 급힘모멘트는

$$S_L = \mathbf{e}_2 \cdot (\mathbf{I}_k - \mathbf{F}_k) \quad (30)$$

$$M_L = \mathbf{e}_3 \cdot (\mathbf{J}_k - (\mathbf{M}_k + \mathbf{M}_k^G)) \quad (31)$$

비틀 모멘트는

$$M_T = \mathbf{e}_1 \cdot (\mathbf{J}_k - (\mathbf{M}_k + \mathbf{M}_k^G)) \quad (32)$$

#### 4. 수치시험 및 토의

수치모형은 Fig. 2 및 Fig. 3 에 보인 바와 같이 길이 L=200 미터이고 너비, 깊이가 각각 30 미터인 Barge-1 및 Barge-2 이다.

구조 부재의 밀도는 균일하며 전자가 2.4 후자가 2.3 ton/m<sup>3</sup> 이다. 물의 밀도는=1 ton/m<sup>3</sup> 로 가정하여 정상 상태의 출수를 각각 10 미터로 정했다. 갑판부 손상으로 인하여 그림에 보인 바와 같이 빗금 친 부위가 침수되었을 때 평균 내부수위를 각각 18 m 및 12 m 로 가정하면 양자의 출수 증가 및 경사각은 Table 1 과 같다. 선수파이고 무차원 파장 0.25 <math>\lambda/L </math> <math>10 </math> 구간에서 0.25 간격으로 수치시험이 수행되었다.  $\lambda/L < 0.25$  인 구간도 내부유동 및 국부강도 해석을 위하여 고려되어야 하나 본 수치시험에서는 선체의 중강도 해석을

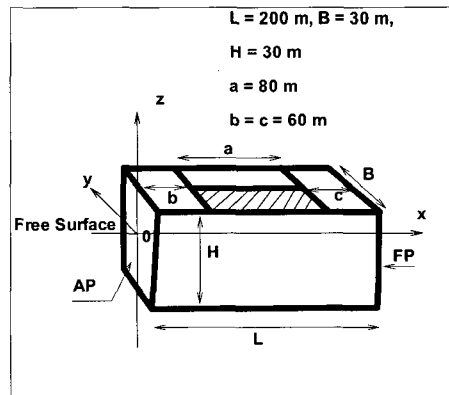


Fig. 2 Sketch of Barge-1

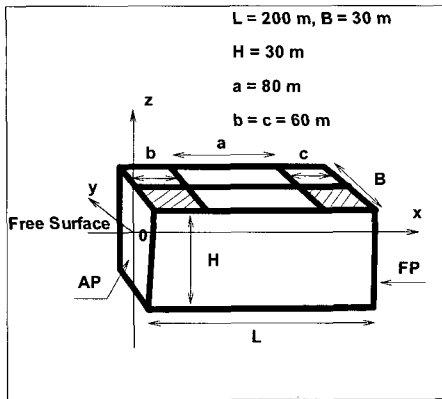


Fig. 3 Sketch of Barge-2

Table 1 Sinkage and heel

	좌현흘수	우현흘수	경사각
Barge-2	8.25 m	18.6 m	19 도
Barge-1	8 m	19 m	20.2 도

위한 파 하중을 구하는 것에 주안점을 두어 비교적 짧은 파는 제외되었다. Fig.4-5, Fig.6-7 및 Fig. 8-9 에 정상상태 및 침수상태의 Barge-1 의 무차원 수직 굽힘 모멘트, 전단력 및 운동응답을 각각 비교하였다. 침수에 의하여 굽힘 모멘트와 전단력이 전반적으로 증가되었는데 이는 대체로 흘수증가에 기인된 것으로 사료된다.

$\lambda/L = 1.25$  에서는 모멘트와 전단력이 대폭 증가된 것을 알 수 있다. 이를 규명하기 위하여 내부유동을 고찰하였다. 내부유동의 공진주기를 간략한 방법으로 알아내기 위하여 단위진폭 기진에 의한 내부자유수면 상대속도의 평균절대값을 다음과 같이 계산하였다.

$$Q_q = \iint_{A_F} \left| \frac{\partial \phi_q^I}{\partial n_i} - \kappa_q \right| ds / A_F, \quad q = 1, 2, 6 \quad (33)$$

위에서  $A_F$  는 내부자유수면의 면적이다. 상기 식은 상대유속의 절대값을 적분함으로써 자유수면의 비대칭 모드의 상쇄가 일어나지 않으므로  $Q_q$  ( $q = 1, 2, 6$ )가 대칭 모드 공진주기 뿐 아니라 비대칭 모드 공진주기에서도 극대값을 보이므로

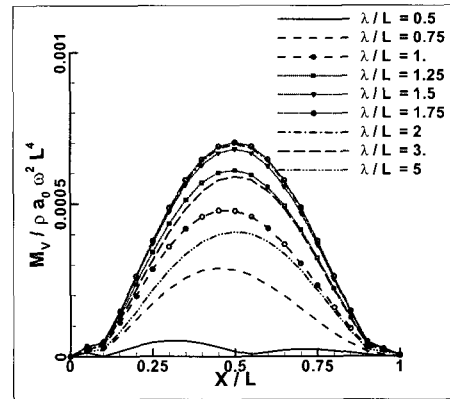


Fig. 4 Vertical bending moments of intact Barge-1

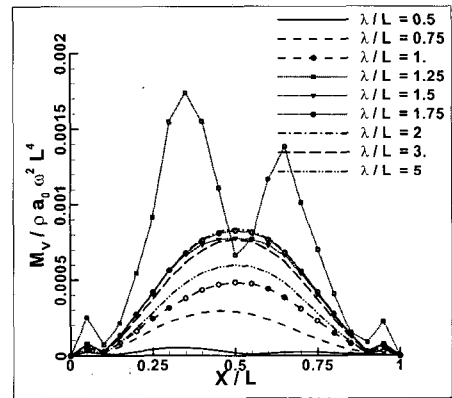


Fig. 5 Vertical bending moments of flooded Barge-1

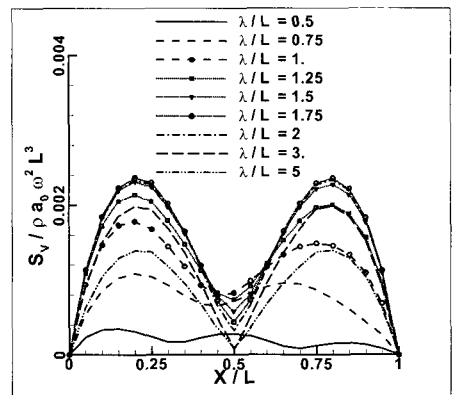


Fig. 6 Vertical shear forces of intact Barge-1

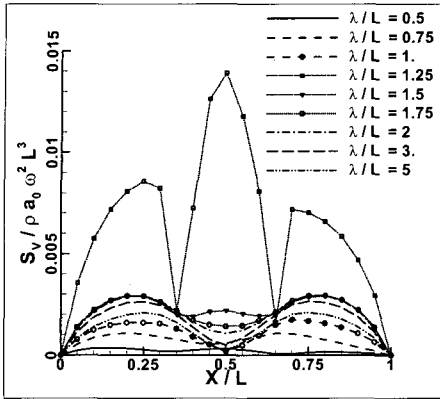


Fig. 7 Vertical shear forces of flooded Barge-1

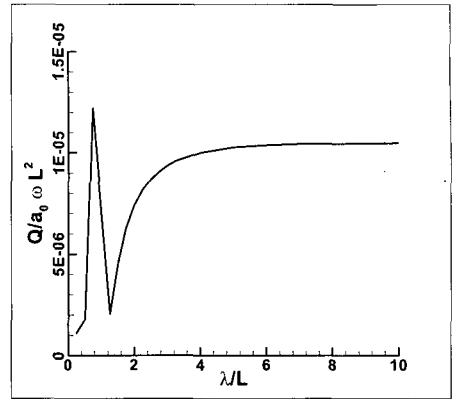


Fig. 10 Total flow rate in the flooded compartment of Barge-1

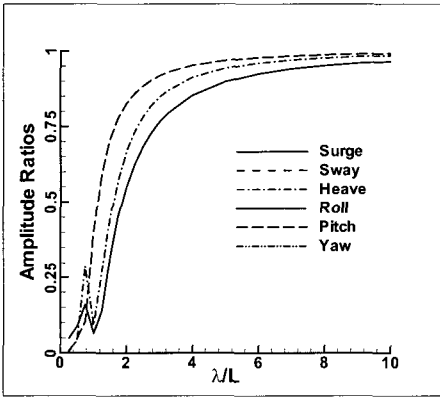


Fig. 8 Motion responses of intact Barge-1

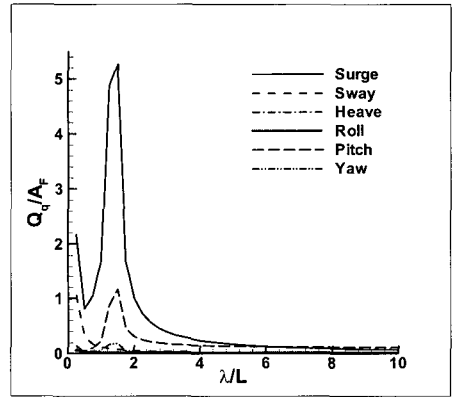


Fig. 11 Absolute flow rate for unit-amplitude excitation in the flooded compartment of Barge-1

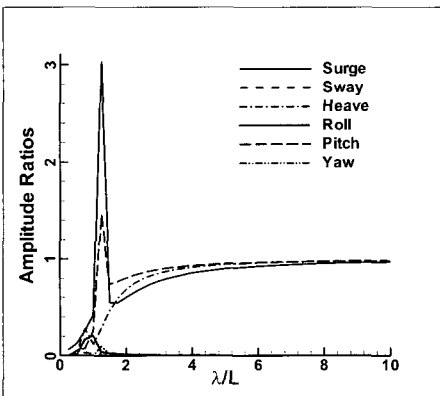


Fig. 9 Motion responses of flooded Barge-1

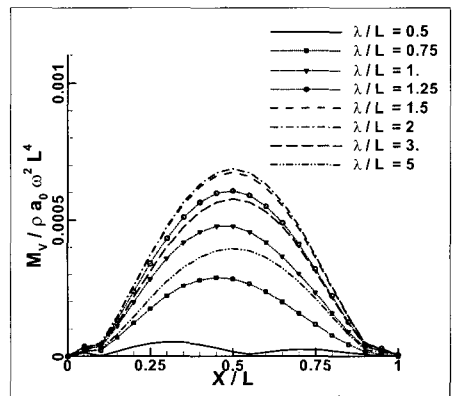


Fig. 12 Vertical bending moments of intact Barge-2

내부유동의 공진주기를 판정할 수 있다. Fig. 10에 내부자유수면의 무차원 상대유량의 절대값을 보였다.  $\lambda/L = 1$  부근에서 극대값이 발생함을 알 수 있다. 이에 대한 운동의 성분별 기여도를 보기 위하여 Fig. 11에 단위진폭 기진에 의한 내부자유수면의 상대속도의 평균절대값을 보였다. 전후동요, 종요, 선수요에 의한 내부유동의 공진이  $\lambda/L = 1.25$  부근에서 발생함을 알 수 있다. 이 영향으로 Fig. 8-9에 보인 바와 같이 전후동요의 공진주기가 약간 커져서  $\lambda/L = 1.25$ 인 내부유동의 공진주기와 일치하면서 진폭이 대폭 증가되었다. 동시에 전후동요-종요 연성효과에 의하여 종요의 공진도 발생한 것을 알 수 있다. 상하동요는 침수전후 모두  $\lambda/L = 0.8$  부근에서 작은 극대값을 보이고 있다. 좌우동요, 횡요 및 선수요는 침수전에 극대값을 보이지 않다가 침수후  $\lambda/L$ 의 값이 각각 0.8, 0.8, 1에서 작은 극대값을 보이고 있다.

Fig. 12-13, Fig. 14-15 및 Fig. 16-17에 정상상태 및 침수상태의 Barge-2의 무차원 수직 굽힘 모멘트, 전단력 및 운동응답을 각각 비교하였다. 굽힘 모멘트와 전단력이  $\lambda/L = 1$  이외의 영역에서는 침수에 의하여 큰 변화를 보이지 않고 있다. 이는 2개 침수구역의 형상이 동일하며 선미부에 위치한 침수구역 1과 선수부에 위치한 침수구역 2가 종방향으로 대칭적으로 존재하기 때문으로 사료된다.  $\lambda/L = 1$ 에서 모멘트와 전단력이 대폭 증가된 것은 Barge-1의 경우와 마찬가지로 운동 및 내부유동의 공진에 기인한 것이다.

Fig. 18 침수구역별로 내부자유수면의 무차원 상대유량의 절대값을 보였다. 2개 침수구역이 동일하기 때문에 양자 모두  $\lambda/L = 1$  부근에서 극대값을 보이고 있다. 침수구역 1에서의 단위진폭 기진에 의한 내부자유수면 상대속도의 평균절대값을 Fig.19에 보였다. 2개 침수구역의 형상이 동일하고 배치가 전후 대칭적이므로 침수구역 2에서의 단위진폭 기진에 의한 내부자유수면 상대속

도의 평균절대값이 침수구역 1에서의 값과 유사하게 계산되었다. 전후동요, 종요, 선수요에 의한 내부유동의 공진이  $\lambda/L = 1$  부근에서 발생함을 알 수 있다. 이 영향으로 Fig.16-17에 보인 바와 같이 전후동요의 공진주기가 침수전  $\lambda/L = 0.8$ 에서 침수후  $\lambda/L = 1$ 인 내부유동의 공진주기와 일치하면서 진폭이 대폭 증가되었다. 동시에 전후동요-종요 연성효과에 의하여 종요의 공진도 발생한 것을 알 수 있다. 상하동요는 침수전후 모두  $\lambda/L = 0.8$  부근에서 작은 극대값을 보이고 있다. 좌우동요, 횡요 및 선수요는 침수전에 극대값을 보이지 않다가 침수후  $\lambda/L$ 의 값이 각각 0.8, 0.8, 1에서 작은 극대값을 보이고 있다.

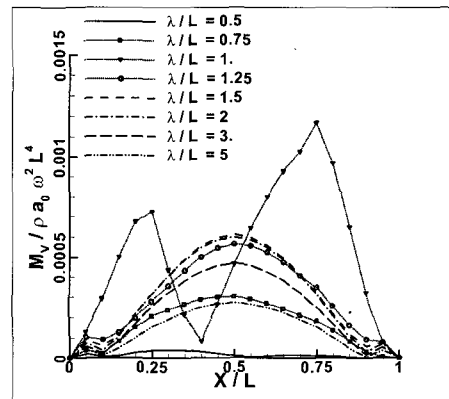


Fig. 13 Vertical bending moments of flooded Barge-2

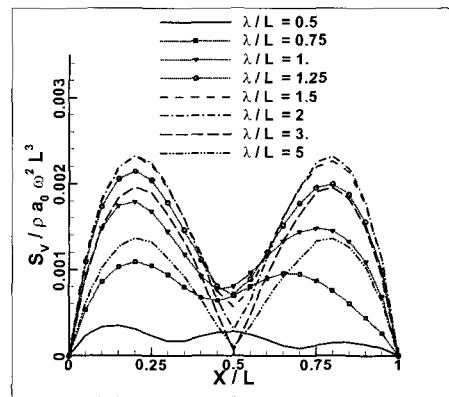


Fig. 14 Vertical shear forces of intact Barge-2

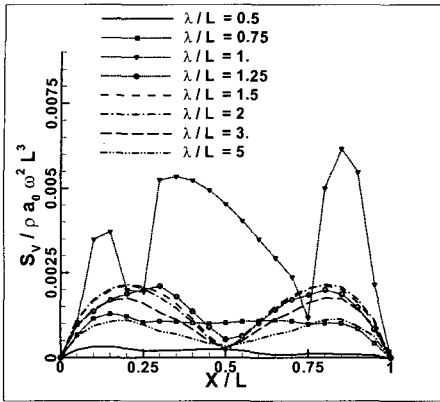


Fig. 15 Vertical shear forces of flooded Barge-2

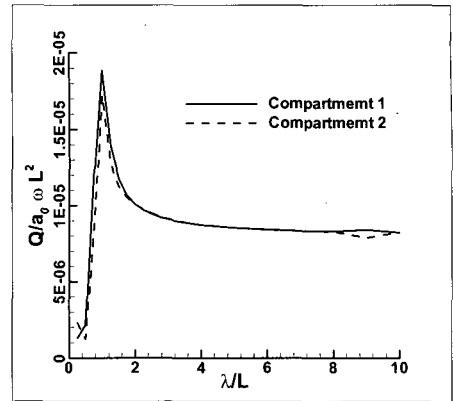


Fig. 18 Flow rate in the flooded compartments of Barge-2

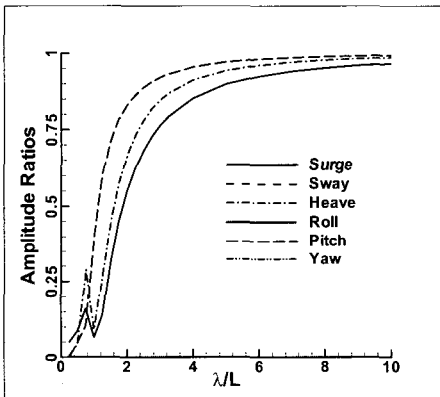


Fig. 16 Motion responses of intact Barge-2

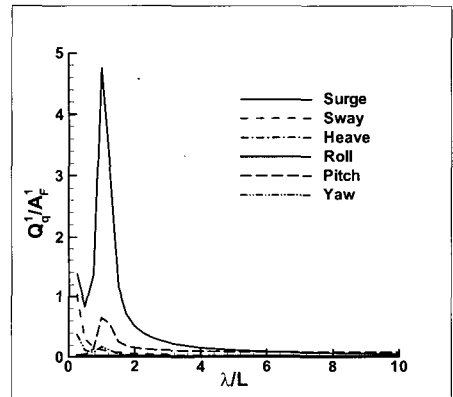


Fig. 19 Absolute flow rate for unit-amplitude excitation in the flooded compartment 1 of Barge-2

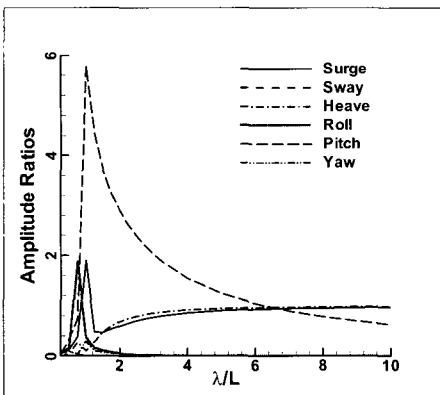


Fig. 17 Motion responses of flooded Barge-2

침수에 의하여 급힘 모멘트와 전단력이  $\lambda/L = 1$  에서 급격히 증가한 것은 위에서 설명한 바와 같이 전후동요-종요의 연성 공진 및 내부유동 공진에 의한 유압의 증가에 기인한 것임을 알 수 있다.

### 5. 결론

선박의 손상 침수부위를 가정하여 6 자유도 선체운동 및 3 차원 파랑하중 해석을 수행하였다. 이를 위하여 수밀구역 침수에 의한 흘수증가, 경사



및 내부유동을 고려한 3 차원 파랑하중 계산기법을 개발하고 2 개 수치모형에 대한 수치실험을 통하여 해석기법의 타당성을 보였다.

선체 침수구역 내부유동의 공진에 의하여 선체 운동의 공진이 유발될 수 있음을 보였다. 특히 선체운동의 특정모드의 공진주기가 내부유동의 동일모드의 공진주기와 비슷한 경우 양자의 상승작용으로 선체운동 및 내부유동의 진폭이 동반하여 급격히 증가하며 이에 의하여 수직 전단력 및 굽힘모멘트도 대폭 증가됨을 알 수 있었다.

침수구역의 발생으로 선체운동특성이 매우 달라 지므로 이를 고려하여 파중 동적 안정성 및 구조 안전성 해석을 수행하여야 할 것이다. 또한 내부 유동의 공진주기 및 대진폭 선체운동 발생시 선형 포텐셜 이론에 의한 수치해가 실제보다 과대하게 나오는 것으로 알려져 있으므로 이를 감안하여야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 선박 의 동적 안정성 시뮬레이션 기술 개발중 선박 자세를 고려한 파랑하중 해석결과의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 홍도천, 1991, "진동수주의 증폭에 관한 연구," 선박해양기술, 제 6 호.
- 홍도천, 장래대, 김종현, 송재영, 1998, " 규칙파 중의 선체에 작용하는수직 전단력 및 수평 굽힘우력의 3 차원 계산기법 및 비교 수치계산," 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 276-279.
- 홍도천, 홍사영, 2005, "손상침수로 자세변화된 바-지형 선박의 파랑하중해석," 한국 해양과학기술협의회 공동 학술대회 초록집, p. 409.
- Hong, D.C., 1987, "On the improved Green radiation-diffraction problem," 대한조선학회지 제 24 권 제 1 호, pp. 1-8.



< 홍 도 천 > < 홍 사 영 >