한국해양공학회지 제20권 제3호, pp 24~36, 2006년 6월 (ISSN 1225-0767)

침수 선박의 손상부 크기에 따른 파랑하중 고찰

김병완* · 홍도천** · 홍사영*
*한국해양연구원 해양시스템기술연구본부
**충남대학교 첨단수송체연구소

Wave Load Analysis of Flooded Ship Considering Size of Damage Opening

BYOUNG-WAN KIM*, DO-CHUN HONG** AND SA-YOUNG HONG*
*Maritime and Ocean Engineering Research Institute, MOERI/KORDI, Daejeon, Korea
**Center for Advanced Transportation Vehicles, Chungnam University, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Wave load 파랑하중, Flooded ship 침수선박, Damage opening size 손상부 크기, Flow in flooded compartment 침수 구획 내 유동

ABSTRACT: *This paper investigates wave loads of ships that suffer sinkage due to flood in a compartment caused by damage on the side of the hull. By analyzing ships with various sizesof damage opening, the influence of opening size on ship response is investigated. The motion of the damaged ship is analyzed by using the boundary element method, based on three-dimensional potential theory, considering hydrodynamic pressure in the flooded compartments. The shear forces, bending moments and torsional moments are calculated by the direct integration of the three dimensional hydrodynamic pressure on the outer and inner hulls. A RORO passenger ship with length of 174.8 m is considered in the numerical example, and results for wave loads are discussed.*

1. 서 론

내부 구획이 침수된 손상 선박의 경우 입사파, 산란파, 방사파와 더불어 구획 내의 내부 유동에도 영향을 받으므로 선박에 작용하는 휨모멘트, 전단력, 비틀림모멘트 등의 파랑하중은 매우 복잡한 특성을 띠며 동적 안정성의 손실에 의해 전복의 가능성도 커진다. 또한 동적 안정성이 보장되더라도 복잡한 파랑하중에 의하여 손상이 진전되어 결국 전복될 가능성이 크다. 따라서 보다 신뢰적인 안전성 평가를 위해서는 손상을 고려한 해석이 필요할 것으로 판단된다. 한편, 최근에는 국제해사기구(IMO)를 중심으로 성능기반 기준(Goal based standards)의 개념을 도입하여 선박의 운항 중 다양한 조건의 황천 및 손상 시나리오에 대한 시뮬레이션을 통해 안정성의 평가를 요구하는 방향으로 기준의 개정이 추진되고 있으며 유럽의 선박 연구협의회인 SAFER EURORO에서도 위험도 기반 설계(Risk based design)의 개념을 제시하여(Vassalos, 2004) 선박 설계기준에 적용하려고 시도하는 등 선박의 손상 안정성 해석의 중요성이 첨차 증대되고 있는 실정이다. 따라서 선박의 설계에 있어서 다양한 손상 조건에 대한 파랑하중의 해석 및 시뮬레이션이 향후 더욱 필요할 것으로 보인다.

교신저자 김병완: 대전광역시 유성구 장동 373-1
042-868-7524 kimbw@moeri.re.kr

파랑하중의 수치해석에 있어서 Strip 방법이 전통적으로 널리 사용되어 왔으며 최근에 이르러 3차원 포텐셜이론에 근거한 경계요소법을 도입하여 구조물에 작용하는 파랑하중을 3차원으로 엄밀하게 해석하려는 시도가 이루어지고 있다. 홍도천 등(1998)은 3차원 포텐셜이론이 이용된 경계요소법을 통해 바지형 구조물에 작용하는 파랑하중을 계산하여 그 결과를 Strip 방법의 결과와 비교하였다. 또한, 홍도천 등(2005)은 3차원 포텐셜 경계요소법으로부터 침수 구획이 존재하는 바지형 구조물의 파랑하중을 해석하여 비손상 바지 구조의 파랑하중과 비교함으로써 파랑하중에 있어서 손상부가 미치는 효과에 대해 고찰하였다. Kim et al. (2006)은 그 방법을 내부 구획이 침수된 손상 선박의 파랑하중 해석에 적용하여 손상 선박과 비손상 선박의 거동을 비교하였다.

본 연구는 홍도천 등(2005)과 Kim et al. (2006)의 연구를 확장한 것으로서 손상 선박과 비손상 선박의 파랑하중 고찰과 더불어 손상부의 크기를 다양하게 변화시켜 침수 선박의 파랑하중을 해석함으로써 손상부의 크기가 선박의 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 수치해석에 사용된 선박의 제원은 ITTC 벤치마크 연구에 사용되었던 침수 구획이 존재하는 RORO 여객선(Papanikolau and Spanos, 2004; 조석규 등, 2005)을 참고로 하였으며 손상부의 크기를 달리하면서 선체의 운동, 선박의 단면에 작용하는 휨모멘트, 전단력, 비틀림모멘트 등의 변동 양상을 고찰하였다.

2. 운동방정식의 정식화

2.1 유동 및 선박운동 해석

선박에 작용하는 파랑하중의 산출을 위해서는 접수면의 변위의 계산이 선행되어야 한다. 접수면 S 상의 한 점 M의 변위는 선체의 6자유도 운동으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\mathrm{Re}\{\mathrm{D}(M)e^{-i\omega t}\}=\mathrm{Re}[\{\mathbf{a}+\boldsymbol{\theta}\times(\mathbf{r}_{M}-\mathbf{r}_0)\}e^{-i\omega t}] \tag{1}$$

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

여기에서 ω는 파도의 각진동수이고 $a_q(q=1,2,...,6)$는 선박의 전후동요, 좌우동요, 상하동요 및 회전 중심 0에 대한 횡동요, 종동요, 선수동요를 나타낸다. Fig. 1은 해석을 위한 좌표계를 나타낸다. 선박의 운동은 선박과 유체의 상호작용에 따라 결정되므로 선체 운동을 계산하기 위해서는 유체유동에 대한 해석이 필요하다.

유체유동은 Laplace 방정식을 만족하는 속도포텐셜 $\Phi=\mathrm{Re}(\psi e^{-i\omega t})$로 묘사할 수 있으며 ψ는 다시 식 (3)과 같이 입사파 포텐셜 ψ_0, 산란파 포텐셜 ψ_7, 방사파 포텐셜 ψ_R등 세 부분으로 나눌 수 있다.

$$\psi=\psi_0+\psi_R+\psi_7 \tag{3}$$

입사파는 식 (4)와 같으며 식에서 a_0는 파도의 진폭, k_0는 파수, β는 입사각을 나타낸다.

$$\psi_0=-\frac{a_0 g}{\omega}e^{k_0\{z+i(x\cos\beta+y\sin\beta)\}} \tag{4}$$

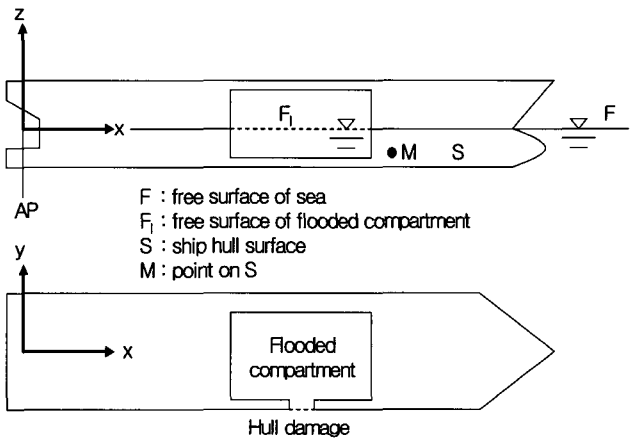

Fig. 1 Coordinate system of flooded ship

방사파는 식 (5)와 같이 선체의 운동과 단위운동포텐셜 ψ_q의 곱으로 표현할 수 있다.

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

산란파 포텐셜과 단위운동포텐셜은 식 (6)과 같은 자유표면 경계조건과 선체표면 경계조건, 무한원방 경계조건을 만족하며 Kelvin형 Green함수를 이용한 적분방정식으로부터 계산할 수 있다. 적분방정식 해의 산출은 홍도천(1987)의 절차를 따랐다.

$$-k_0\psi_q+\frac{\partial\psi_q}{\partial z}=0,\ q=1,2,...,7\ \ on\,F \tag{6}$$

선박의 운동은 침수 구획 내 유체의 유동을 유발하며 유동은 방사파 성분만 존재한다. 구획 내 방사포텐셜은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\psi_r=-i\omega\sum_{q=1}^{6}a_q\phi_q^I \tag{7}$$

식 (7)에서 단위운동포텐셜 ϕ_q^I는 Rankine형 Green함수를 이용한 적분방정식의 해로부터 산출되며 구획 내 자유표면 F^I에서 식 (8)과 같은 경계조건을 만족한다. 구획 내 유동의 경우 무한원방 경계조건은 필요없다.

$$-k_0\phi_q^I+\frac{\partial\phi_q^I}{\partial z}=0,\ q=1,2,...,6\ \ on\,F_I \tag{8}$$

한편, 선체 외부 흐름과 구획 내 흐름이 손상부에서 동일한 영역을 공유하므로 다음과 같은 접합조건이 손상부에서 성립한다.

$$\psi=\psi_R,\ \frac{\partial\psi}{\partial n}=\frac{\partial\psi_r}{\partial n} \tag{9}$$

최종적인 선체 운동방정식은 식 (10)과 같이 구성되며 식에서 ρ는 유체의 밀도, Δ는 배수량, I_{pq}는 질량행렬, F_p는 파랑기진력 벡터이다. M_{pq}, B_{pq}, R_{pq}는 각각 부가질량행렬, 부가감쇠행렬, 부력스프링행렬이며 M_{pq}^I, R_{pq}^I는 침수 구획 내 유동에 기인한 부가질량행렬, 부력스프링행렬을 나타낸다.

$$\rho a_0\omega^2L^3\sum_{q=1}^{6}\left\{\frac{\Delta}{L^3}I_{pq}+M_{pq}+iB_{pq}+M_{pq}^I-\frac{1}{k_0L}(R_{pq}+R_{pq}^I)\right\}a_q \tag{10}$$
$$=-\rho a_0\omega^2L^3F_p,\ p=1,2,...,6$$

침수선박의 응답은 침수 구획 내 유동과 공조되어 증폭될 가능성이 크며 그러한 공진주기는 구획 내 자유표면을 통과하는 유량의 변화율을 주기 별로 고찰함으로써 평가할 수 있다. 유량 변화율은 식 (11)과 같이 산출할 수 있다.

$$Q=-i\omega\sum_{q=1}^{6}a_q q_q \tag{11}$$

위에서 q_q는 단위운동에 따른 유량변화율로서 식 (12)와 같이 계산하며 식 (12)에서 수평면의 수직변위를 나타내는 항인 κ_q는 식 (13)으로부터 산출한다.

$$q_q=\int_{F_i}\left(\frac{\partial\phi_q^I}{\partial n_i}-\kappa_q\right)ds,\quad q=1,2,...,6 \tag{12}$$

$$\kappa_q\begin{cases}=0 & for\,q=1,2,6\\ =1 & for\,q=3\\ =y-y_0 & for\,q=4\\ =-(x-x_0) & for\,q=5\end{cases} \tag{13}$$

식 (12)는 상대적인 유량변화율로서 절대량의 변화율은 식 (14)와 같이 산출할 수 있다.

$$Q_q=\int_{F_i}\left|\frac{\partial\phi_q^I}{\partial n_i}-\kappa_q\right|ds,\quad q=1,2,...,6 \tag{14}$$

식 (12)와 달리 식 (14)는 유량 절대값의 변화율로서 계산 과정에서 비대칭모드가 상쇄될 염려가 없으므로 대칭모드 뿐만 아니라 비대칭모드에 해당하는 공진주기의 파악에도 유용하다. 따라서, 본 연구에서는 침수 구획 내 유동의 공진 평가 척도로서 식 (14)를 사용하였다.

2.2 파랑하중의 산출

접수면의 한 점 M의 압력은 식 (15)와 같이 네 부분으로 구분할 수 있다.

$$p_T=p_0+p_7+p_R+p_S \tag{15}$$

p_0는 입사파 압력, p_7는 산란파 압력, p_R은 방사파 압력으로서 각각의 경우에 해당하는 속도포텐셜을 이용하여 식 (16)과 같은 Bernoulli 방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$p(M)=i\rho\omega\psi(M) \tag{16}$$

p_S는 정수압으로서 식 (17)로부터 산출한다.

$$\begin{aligned}p_S(M)&=-\rho g\mathbf{D}(M)\cdot\nabla z\\&=-\rho g\{a_3+a_4(y_M-y_0)-a_5(x_M-x_0)\}\end{aligned} \tag{17}$$

접수면의 해석 격자계 상의 j번째 패널 E_j에 작용하는 힘과 모멘트는 해석 결과로부터 산출된 선체의 운동과 압력으로부터 식 (18), (19)와 같이 계산한다.

$$d\mathbf{F}_j=-\int_{E_j}(p_T\mathbf{n}-\rho gz\boldsymbol{\theta}\times\mathbf{n})ds \tag{18}$$

$$d\mathbf{M}_j=-\int_{E_j}[p_T\overrightarrow{OM}\times\mathbf{n}-\rho gz\{(\mathbf{n}\cdot\boldsymbol{\theta})\overrightarrow{OM}-(\overrightarrow{OM}\cdot\boldsymbol{\theta})\mathbf{n}\}]ds \tag{19}$$

위에서 O는 모멘트 계산 중심점이며 $\mathbf{n}$은 패널의 법선벡터를 나타낸다. 한편, 침수 구획 내에서는 방사파만 존재하므로 접수면의 압력은 식 (20)과 같이 방사파 압력 p_r^I와 정압 p_S^I만 존재한다.

$$p^I=p_r^I+p_S^I \tag{20}$$

방사파 압력은 식 (21)과 같은 Bernoulli 방정식으로부터 구하며 정수압은 식 (17)과 동일한 방법으로 구할 수 있다.

$$p_r^I(M)=i\omega\psi_r(M) \tag{21}$$

패널에 작용하는 힘과 모멘트도 식 (18), (19)와 동일한 절차로 산출한다.

선박의 Station에 작용하는 전단력과 휨모멘트는 패널의 힘과 모멘트를 적분함으로써 산출할 수 있다. 식 (22)~(24)는 k번째 Station에 작용하는 수직방향 전단력의 계산과정을 나타낸다.

$$S_V=\mathbf{e}_3\cdot(\mathbf{I}_k-\mathbf{F}_k) \tag{22}$$

$$\mathbf{I}_k=-\omega^2\int_{m_k}\mathbf{D}(M)dm \tag{23}$$

$$\mathbf{F}_k=\sum_{j=1}^{N_k}d\mathbf{F}_j+\sum_{j=1}^{N_k'}d\mathbf{F}_j^I \tag{24}$$

k번째 Station에 작용하는 수직방향 휨모멘트는 식 (25)~(28)로부터 산출할 수 있다.

$$M_V=\mathbf{e}_2\cdot\{\mathbf{J}_k-(\mathbf{M}_k+\mathbf{M}_k^G)\} \tag{25}$$

$$\mathbf{J}_k=-\omega^2\int_{m_k}\overrightarrow{OM}\times\mathbf{D}(M)dm \tag{26}$$

$$\mathbf{M}_k=\sum_{j=1}^{N_k}d\mathbf{M}_j+\sum_{j=1}^{N_k'}d\mathbf{M}_j^I \tag{27}$$

$$M_k^G = -g\int_{m_k} (\theta \times \overrightarrow{OM}) \times e_3 dm \tag{28}$$

수평방향 전단력, 수평방향 휨모멘트, 비틀림모멘트는 식 (29), (30), (31)로부터 각각 구할 수 있다.

$$S_H = e_2 \cdot (I_k - F_k) \tag{29}$$

$$M_H = e_3 \cdot \{J_k - (M_k + M_k^G)\} \tag{30}$$

$$M_T = e_1 \cdot \{J_k - (M_k + M_k^G)\} \tag{31}$$

3. 수치해석 및 토의

수치해석은 침수 구획이 존재하는 선박을 대상으로 수행하였다. 예제 선박의 제원은 ITTC 벤치마크에 사용되었던 RORO 여객선을 참고하였으며 선박의 길이는 174.8m, 폭은 25m이며 흘수는 6.4m이다. ITTC 벤치마크 연구에 사용된 선박의 경우 질량 및 관성모멘트 분포에 대한 정보가 따로 제시된 바가 없어서 본 연구에서는 일반적인 선박의 경우를 참고로 하여 질량과 관성모멘트의 분포를 적절히 가정하였다. 예제선박의 기하학적 형상과 특성을 Fig. 2, Table 1, Table 2에 정리하였다. 입사파는 종파로 가정하였으며 파장비(λ/L)을 0.1에서 10까지 변화시키면서 해석을 수행하였다. 선체 손상에 의해 길이 26.714m, 폭 25m의 내부 구획이 침수된 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 침수가 진행되어 정상상태에 이른 후의 거동을 고려하였으며 정상상태에 이르기까지의 천이구간의 거동은 무시하였다. 정상상태는 침수에 의한 선박의 추가 배수량과 구획 내에 침수된 물의 질량이 동일한 시점에서 결정하였으며 그 때의 추가 흘수는 0.9649m이다. 침수 구획의 특성이 Table 3에 제시되어있다. 본 연구의 주된 목적이 선체 손상부의 크기에 따른 파랑하중의 변동을 고찰하는데 있으므로 Fig. 3과 같이 선체의 손상부의 크기를 4단계로 구분하여 각 경우에 대한 수치해석을 수행함으로써 손상부 크기의 영향을 고찰하였다.

Fig. 4는 속도포텐셜 해석을 위한 경계요소법 격자계의 형상을 나타낸다. 바깥 곡면은 흘수선 이하의 선체 접수면의 격자계를 나타내며 내부의 육면체는 침수 구획의 접수면 및 자유표면의 격자계를 나타낸다.

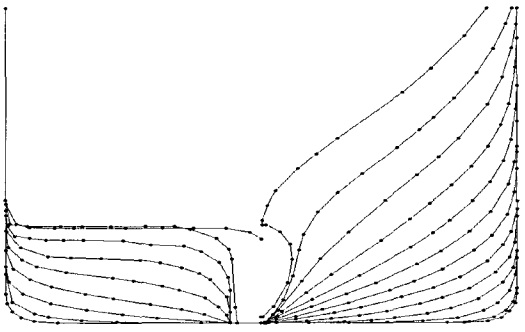

Fig. 2 Body plan of example ship

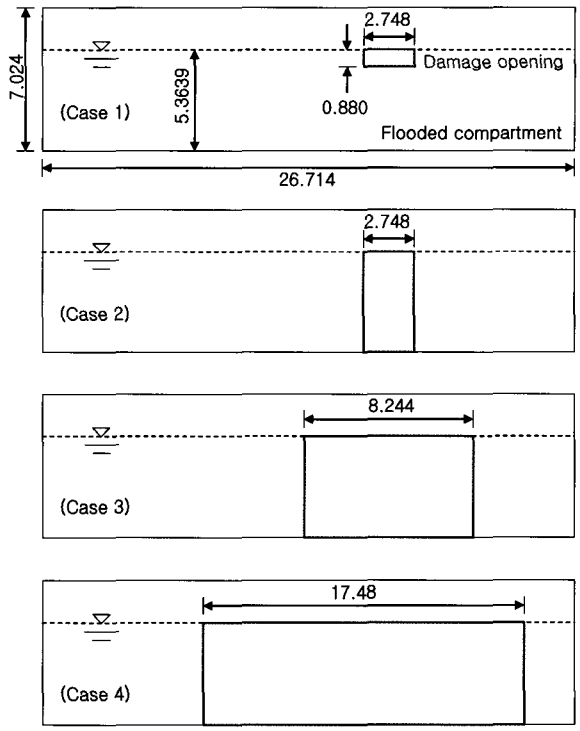

Fig. 3 Side view of flooded compartment

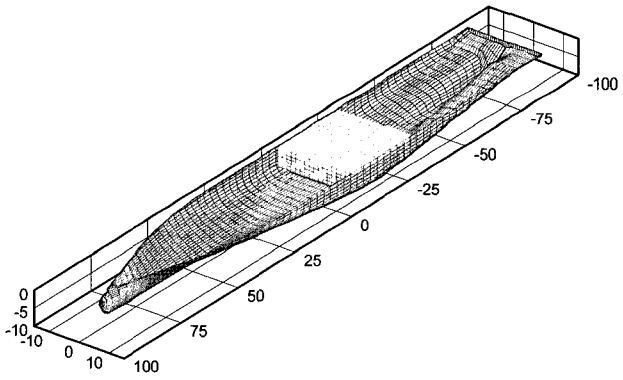

Fig. 4 Mesh for potential flow analysis

수치해석 결과가 Figs. 5~45에 제시되어있다. 그림에서 'Intact'는 내부 구획이 침수되지 않은 비손상 선박에 대한 해석 결과를 나타내며 'No opening'은 내부 구획이 침수되었으나 손상부는 없는 선박의 해석 결과를 나타낸다. Figs. 5~9는 주기변화에 따른 침수 구획 내의 유동특성 변화에 대한 결과를, Figs. 10~15는 주기변화에 따른 선체의 운동응답 변화를 나타내고 있다. 비손상 선박, 내부 구획만 침수되고 손상부는 없는 선박, 손상부가 매우 작은 선박(Case 1)의 경우 파장비 0.5 부근에서 구획 내 유동의 공진이 발생함을 알 수 있다. 선체 운동에 있어서도 파장비 0.5에서 공진현상이 있으나 그 값은 매우 작음을 알 수 있다. 손상부가 상대적으로 큰 Case 2의 경우 손상부를 통한 유체 유동의 영향에 의해 구획 내 유동과 선체운동의 공진현상이 파장비 0.5와 더불어 9 부근에서도 추

가적으로 발생함을 관찰할 수 있다. 손상부가 보다 큰 Case 3에서는 파장비 5에서 공진이 추가 발생하고 손상부가 가장 큰 Case 4에서는 파장비 3 부근에서 추가적인 공진이 발생한다. 한편, 입사파가 종파이므로 비손상 선박 및 손상부가 없는 선박의 경우 선박의 대칭성에 의해 좌우동요, 횡동요, 선수동요 등이 발생하지 않음을 알 수 있으며 Case 1의 경우 좌우동요, 선수동이 등이 발생하나 손상부의 크기가 미미하므로 그 값은 매우 작다. 반면, Case 2~4에서는 손상부에 의한 비대칭성 때문에 종파에도 불구하고 좌우동요, 횡동요, 선수동요 등이 발생한다. 한편, 횡동요는 손상부에 민감하여 손상부가 큰 경우뿐만 아니라 손상부가 미미한 Case 1에서도 파장비 1 부근에서 공진이 일어나 급격히 커진다.

Figs. 16~21은 선체의 단면에 작용하는 수직방향 휨모멘트의 분포를 나타내며, Figs. 22~27은 수직방향 전단력의 분포를 나타내고 있다. 비손상의 경우 및 내부 구획만 침수되고 손상부는 없는 경우 내부 유동의 공진현상이 파장비 0.5 부근에서 발생함에도 불구하고 수직 방향 휨모멘트와 전단력이 특별히 증폭되는 현상이 관찰되지 않는데 그 이유는 비교적 단주기에 속하는 파장비 0.5의 파도에 대해서 선체운동의 값이 매우 작아 선체에 작용하는 힘 또한 작기 때문이다. 손상부가 매우 작은 Case 1의 경우에도 마찬가지 이유로 수직방향 휨모멘트와 전단력의 증폭현상이 없으며 손상부의 크기가 미미하므로 그 값의 크기 및 분포 또한 손상부가 없는 경우와 거의 유사하다. 반면, 손상부가 다소 큰 Case 2의 경우 장파 영역인 파장비 9에서 유동의 공진이 발생하고 그 영역에서의 선체 운동이 크므로 유동과 선박응답이 공조되면서 구획 내의 압력이 급격히 증가하여 수직방향 휨모멘트와 전단력 또한 파장비 9에서 급격히 커짐을 알 수 있다.

Table 1 Main particulars of example ship

L(Length) (m)	174.8		
B(Breadth) (m)	25.0		
D(Initial draft) (m)	6.40		
*S*inkage (m)	0.9649		
*D*eck height	9.10		
*D*isplacement (ton)	16358.91		
Center of gravity	(x_G, y_G, z_G)=(83.151, 0.0, 1.665)		
GM (m)	2.155		
KG (m)	8.065		
Radius of gyration (m)	Roll	Pitch	Yaw
	9.5	40.685	40.68

손상부의 크기가 Case 2보다 큰 Case 3의 경우 Case 2와 마찬가지로 공진현상이 발생하여 파장비 5 부근에서 수직방향 휨모멘트와 전단력이 급격히 커진다. 단, 공진주기에 해당하는 파장비가 5로써 Case 2의 공진주기에 비해 단주기이다. 손상부의 크기가 가장 큰 Case 4의 경우 유량변화율이 급격히 커진 파장비 3부근에서 수직방향 휨모멘트와 전단력도 크게 발생한다. 한편, 공진주기의 파장비가 약 3으로서 Case 3에 비해 단파영역에서 공진이 발생한다. 수치결과로부터 알 수 있듯이 손상부의 크기가 클수록 공진응답을 보이는 주기가 작음을 알 수 있는데 그것은 손상부가 큰 선박의 경우 단파에 대해서도 응답이 매우 커질 수 있으므로 손상부가 작은 선박의 경우에 비해 선체 파손의 가능성이 상대적으로 큼을 의미한다.

Figs. 28~33은 선체에 작용하는 횡방향 휨모멘트의 분포를 나타내며, Figs. 34~39는 횡방향 전단력의 분포를, Figs. 40~45는 비틀림모멘트의 분포를 제시하고 있다. 비손상의 경우 및 내부 구획이 침수만 되고 손상부가 없는 경우 좌우동요, 횡동요, 선수동요 등과 마찬가지로 선박의 대칭성 때문에 수평방향 휨모멘트, 수평방향 전단력, 비틀림모멘트 등이 발생하지 않는다.

손상부가 가장 작은 Case 1의 경우에도 비틀림모멘틀 제외하고 수평방향 휨모멘트와 전단력이 거의 발생하지 않는데 극것은 손상부가 미미하여 그 영향이 작기 때문이다. 반면 손상부가 다소 큰 Case 2~4의 경우 손상에 의한 구획의 좌우 비대

Table 2 Distribution of mass and gyration radius of example ship

Station no	Mass (ton)	Radius of gyration (m)		
		Roll	Pitch	Yaw
1	917.039	10.5400	73.0290	73.0200
2	1706.962	10.1550	67.7850	67.7800
3	2496.886	9.7700	62.5410	62.5400
4	3422.456	9.6650	58.1925	58.1900
5	4348.026	9.5600	53.8440	53.8400
6	5187.496	9.5400	50.6760	50.6700
7	6026.966	9.5200	47.5080	47.5000
8	7146.260	9.5100	44.2295	44.2250
9	8265.554	9.5000	40.9510	40.9500
10	9346.103	9.5000	38.9575	38.9550
11	10426.652	9.5000	36.9640	36.9600
12	11455.545	9.5000	36.2650	36.2600
13	12484.431	9.5000	35.5660	35.5600
14	13539.140	9.5000	36.1830	36.1800
15	14593.869	9.5000	36.8000	36.8000
16	15218.330	9.5000	37.9500	37.9500
17	15842.311	9.5000	39.1000	39.1000
18	16085.855	9.5000	39.8500	39.8500
19	16324.490	9.5000	40.6000	40.6000
20	16335.440	9.5000	40.6425	40.6400
21	16358.910	9.5000	40.6850	40.6800

칭성에 의해 수평방향 휨모멘트, 수평방향 전단력, 비틀림모멘트 등이 발생하며 수직방향 휨모멘트 및 전단력과 마찬가지로 수평방향 휨모멘트, 수평방향 전단력, 비틀림모멘트에 있어서도 침수 구획의 유동 공진에 따른 증폭 현상이 발생함을 고찰할 수 있다. 한편, 비틀림모멘트에 있어서 파장비 1에서도 다소 증폭되는 현상이 관찰되는데 그것은 선체의 횡동요 운동이 파장비 1에서 공진하는 것과 관련이 있는 것으로 보인다.

Table 3 Particulars of flooded compartment

Length (m)	26.714
Breadth (m)	25.0
Height (m)	7.024
Position of center from AP (m)	70.828
Damaged side	Starboard

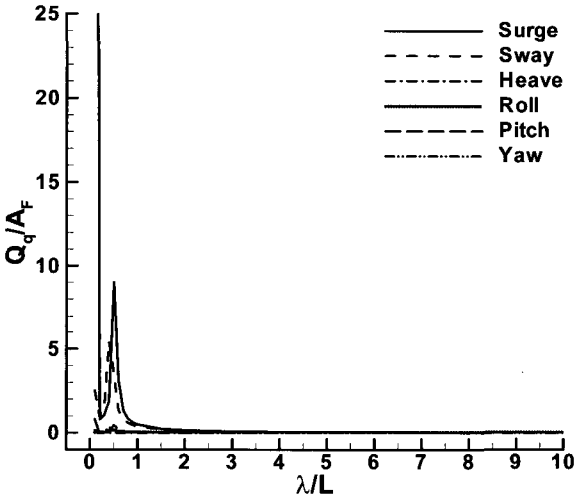

Fig. 5 Flow rate in flooded compartment (no opening)

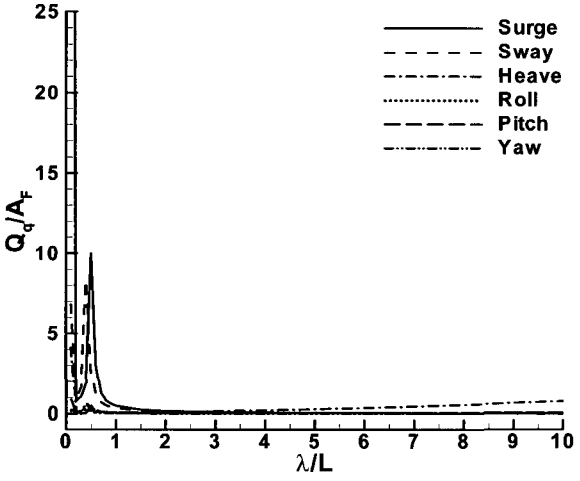

Fig. 6 Flow rate in flooded compartment (case 1)

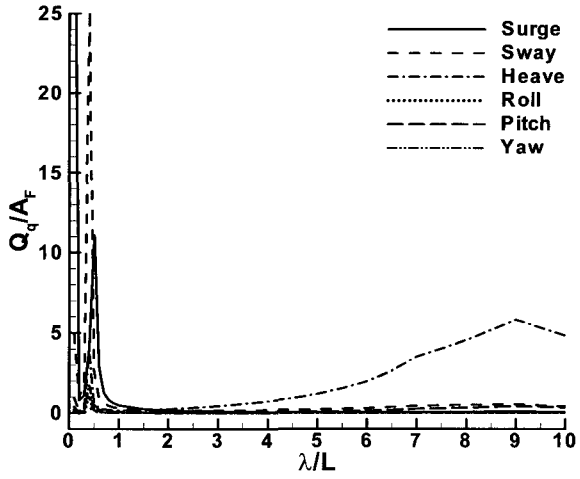

Fig. 7 Flow rate in flooded compartment (case 2)

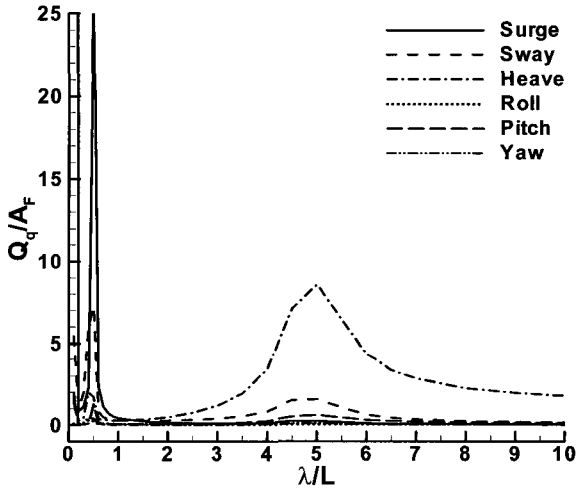

Fig. 8 Flow rate in flooded compartment (case 3)

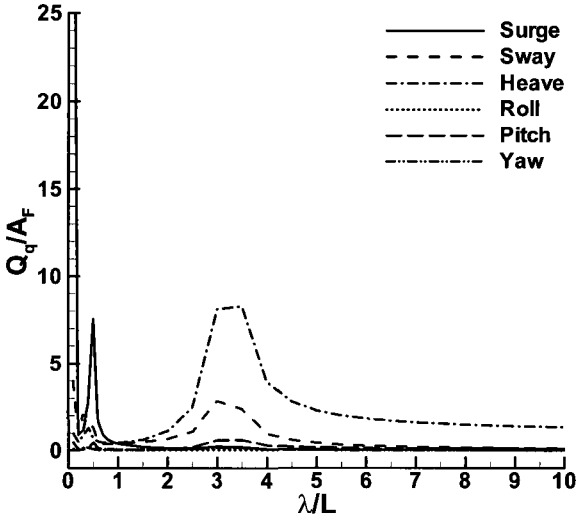

Fig. 9 Flow rate in flooded compartment (case 4)

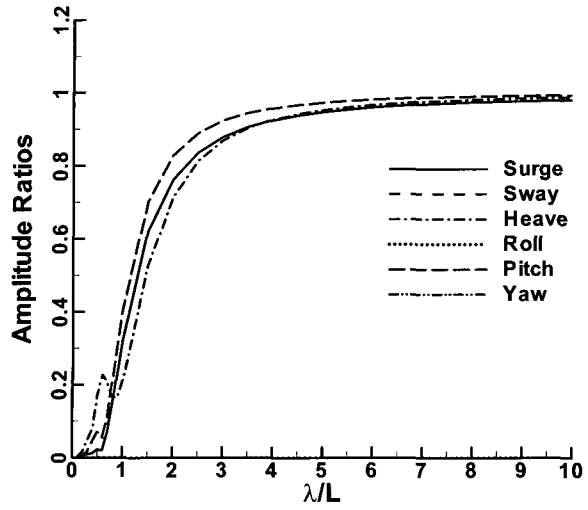

Fig. 10 Motion responses of ship (intact)

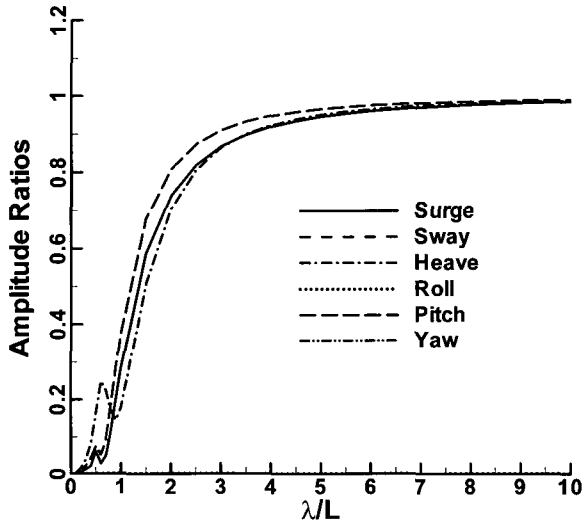

Fig. 11 Motion responses of ship (no opening)

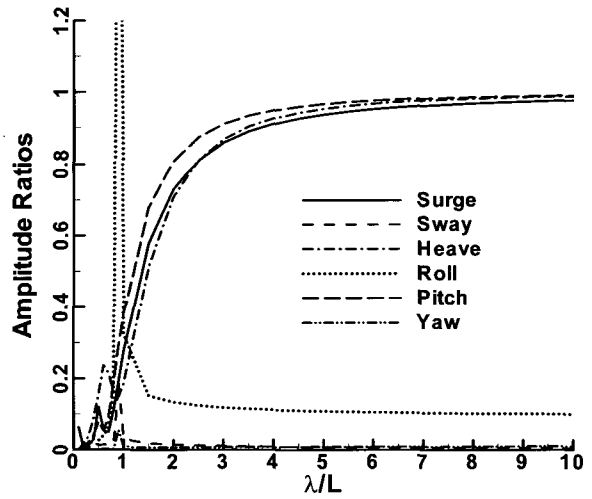

Fig. 12 Motion responses of ship (case 1)

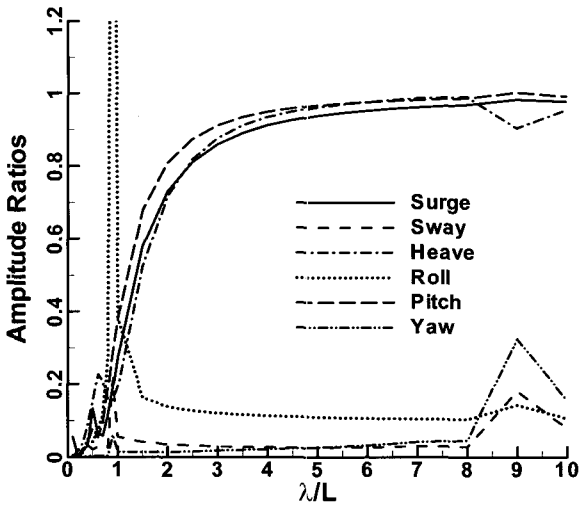

Fig. 13 Motion responses of ship (case 2)

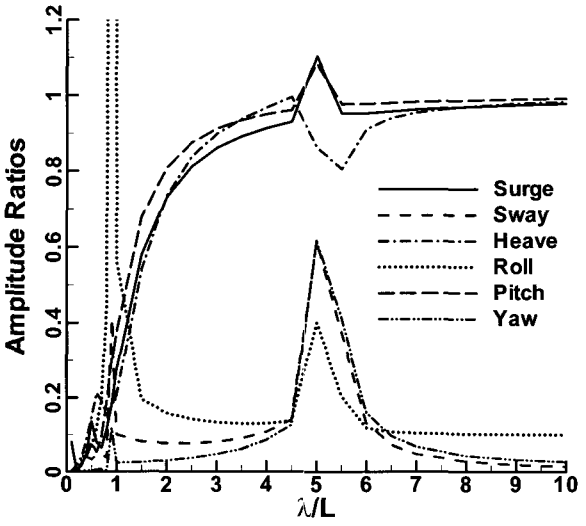

Fig. 14 Motion responses of ship (case 3)

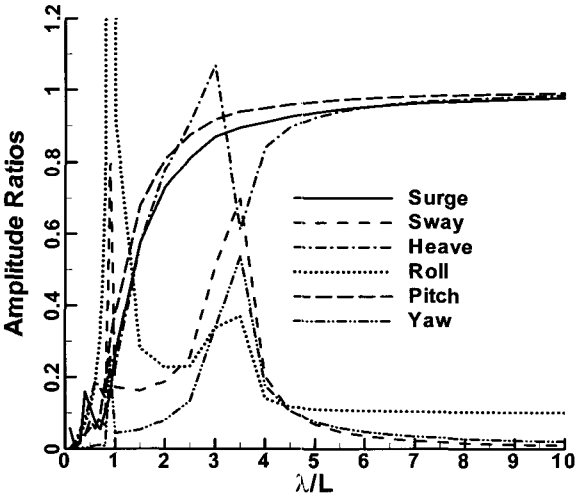

Fig. 15 Motion responses of ship (case 4)

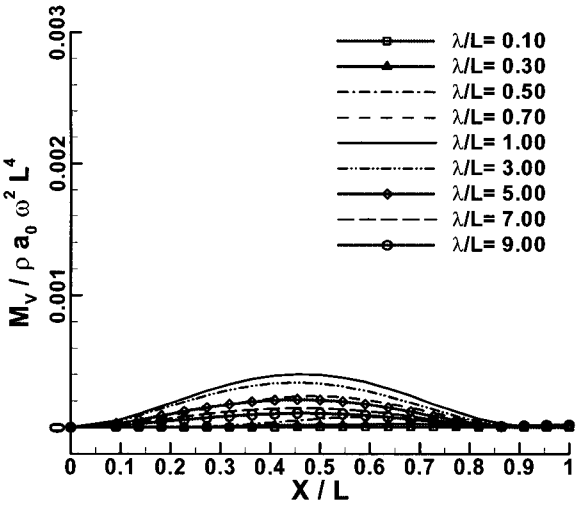

Fig. 16 Vertical bending moments of ship (intact)

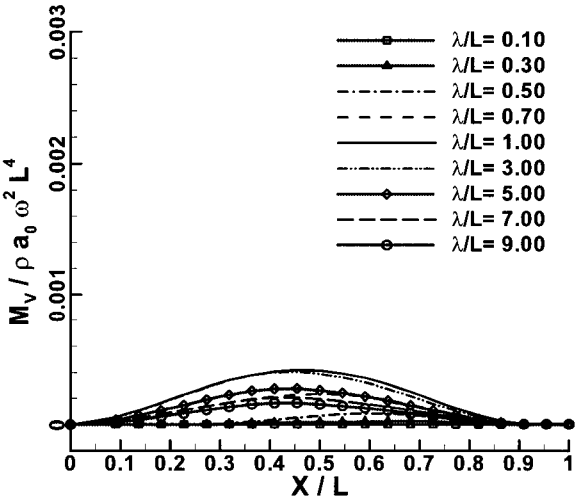

Fig. 17 Vertical bending moments of ship (no opening)

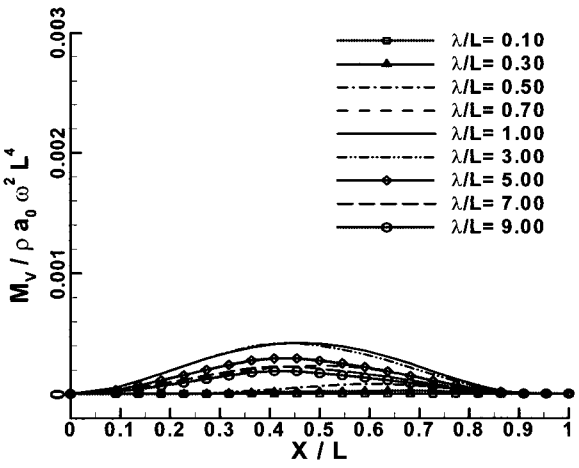

Fig. 18 Vertical bending moments of ship (case 1)

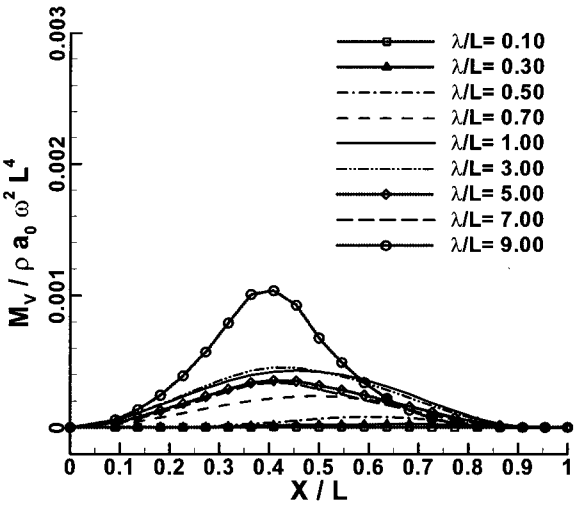

Fig. 19 Vertical bending moments of ship (case 2)

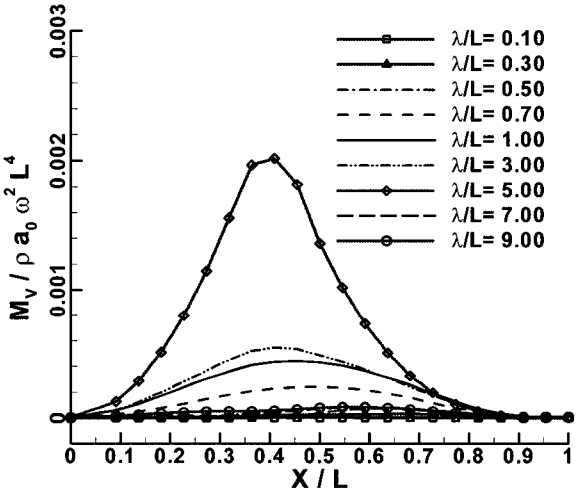

Fig. 20 Vertical bending moments of ship (case 3)

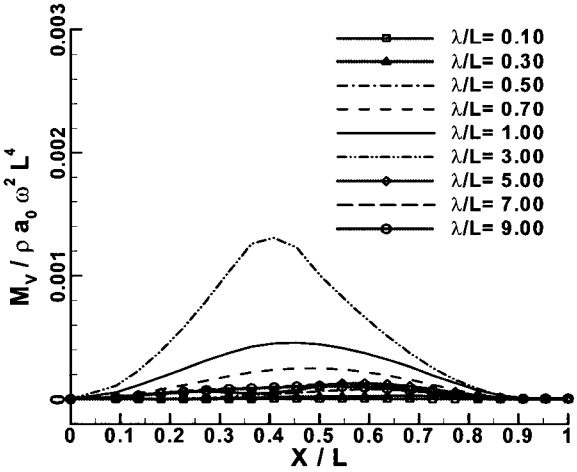

Fig. 21 Vertical bending moments of ship (case 4)

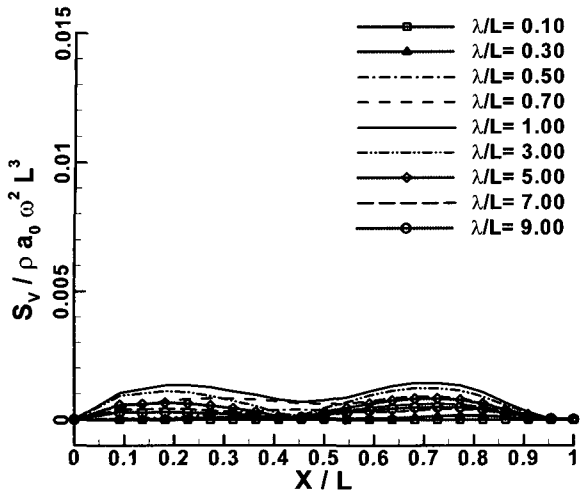

Fig. 22 Vertical shear forces of ship (intact)

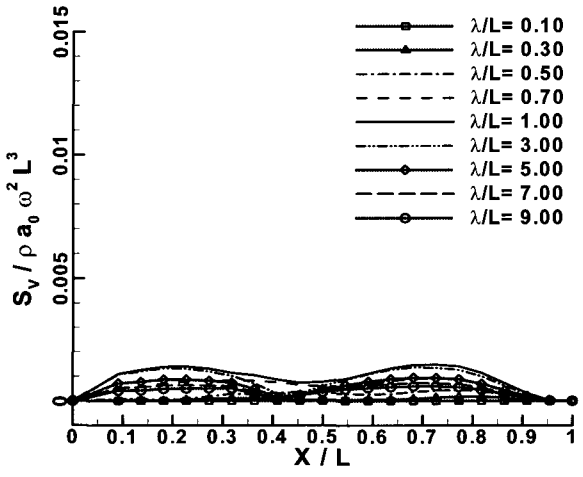

Fig. 23 Vertical shear forces of ship (no opening)

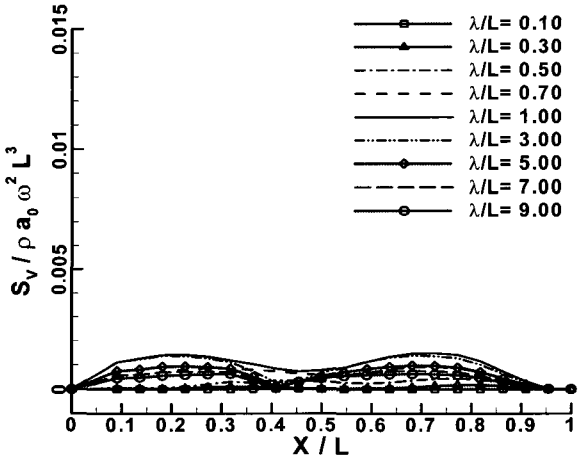

Fig. 24 Vertical shear forces of ship (case 1)

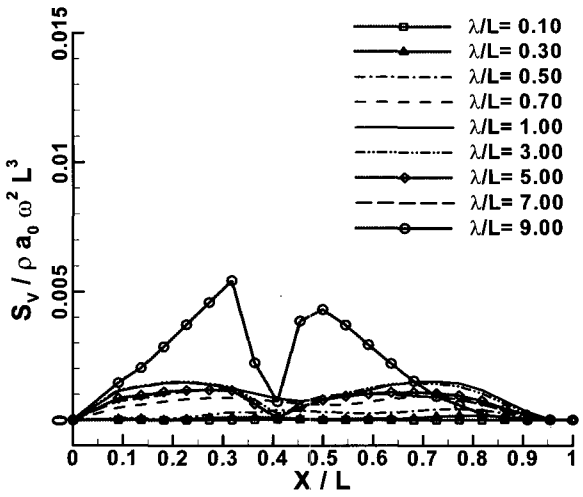

Fig. 25 Vertical shear forces of ship (case 2)

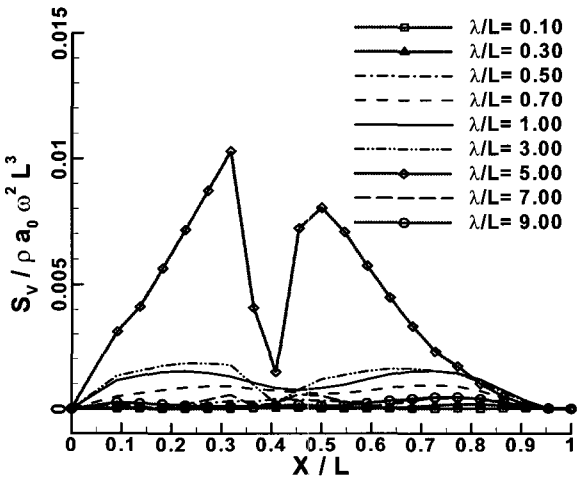

Fig. 26 Vertical shear forces of ship (case 3)

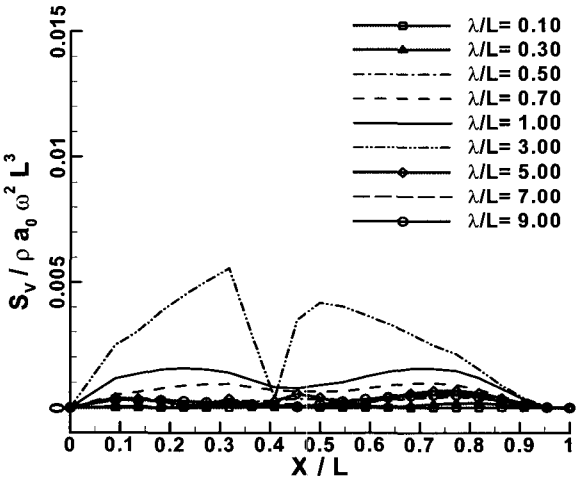

Fig. 27 Vertical shear forces of ship (case 4)

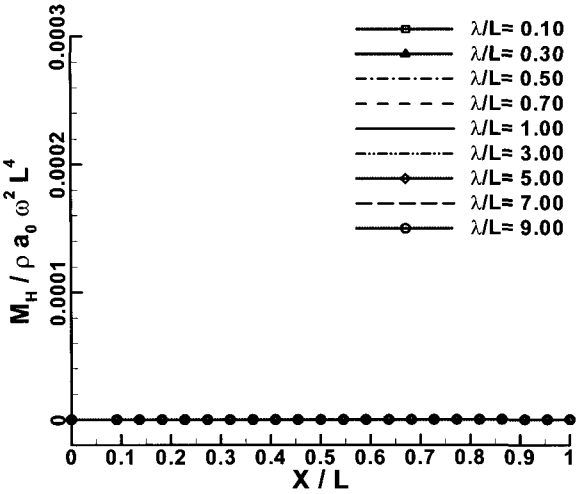

Fig. 28 Lateral bending moments of ship (intact)

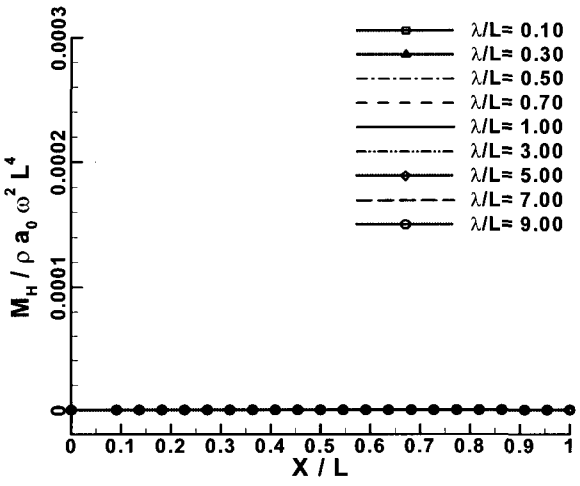

Fig. 29 Lateral bending moments of ship (no opening)

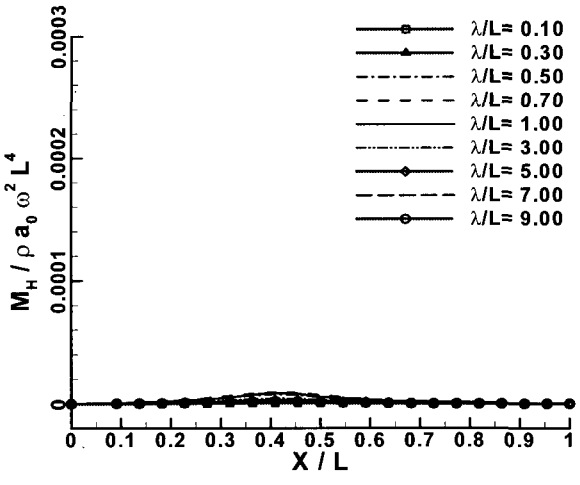

Fig. 30 Lateral bending moments of ship (case 1)

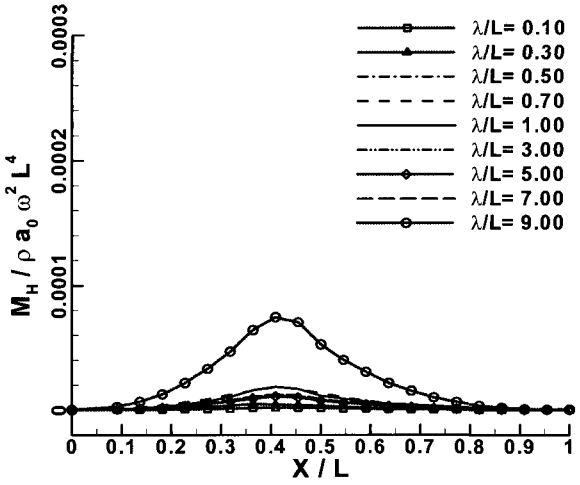

Fig. 31 Lateral bending moments of ship (case 2)

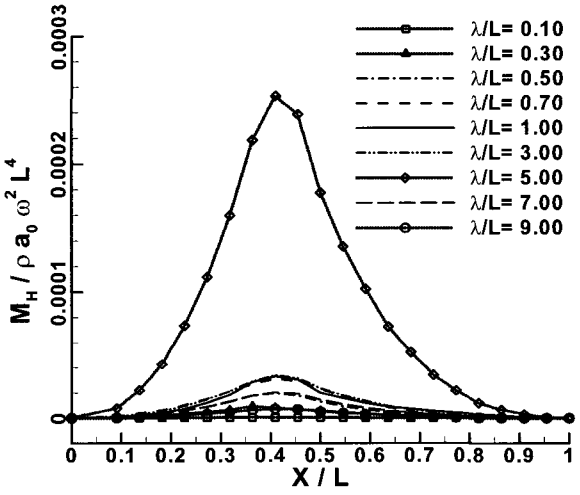

Fig. 32 Lateral bending moments of ship (case 3)

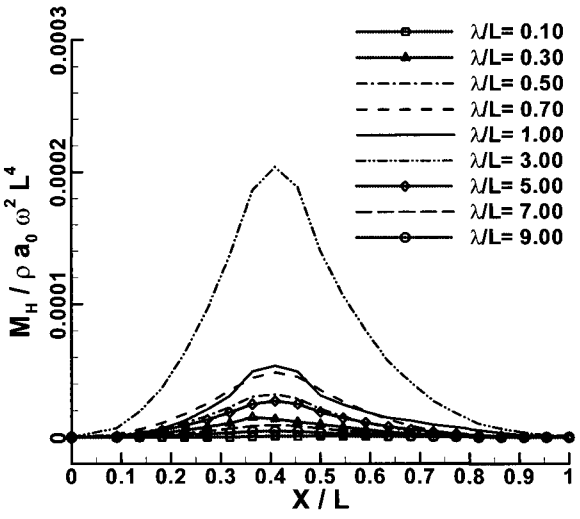

Fig. 33 Lateral bending moments of ship (case 4)

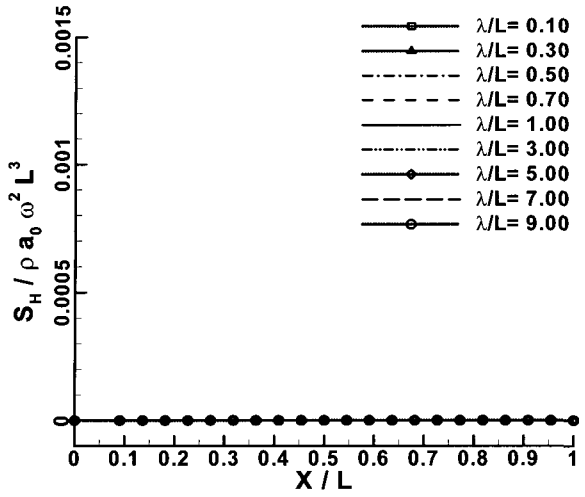

Fig. 34 Lateral shear forces of ship (intact)

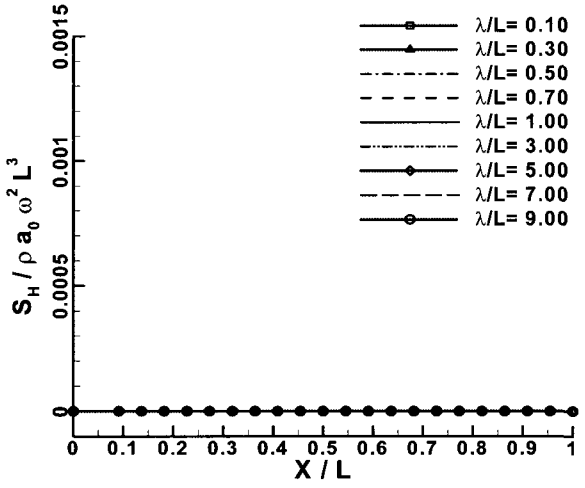

Fig. 35 Lateral shear forces of ship (no opening)

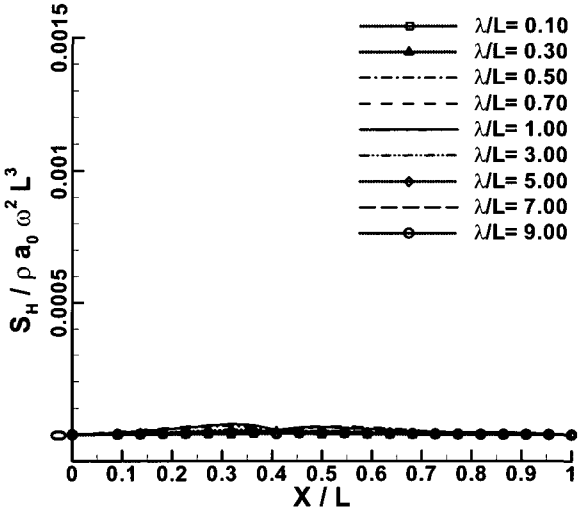

Fig. 36 Lateral shear forces of ship (case 1)

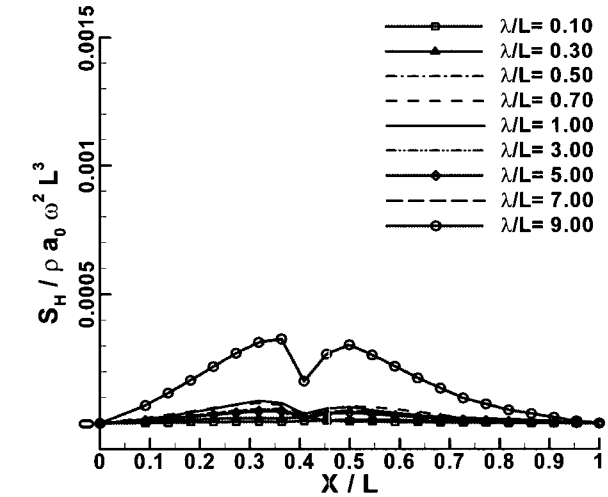

Fig. 37 Lateral shear forces of ship (case 2)

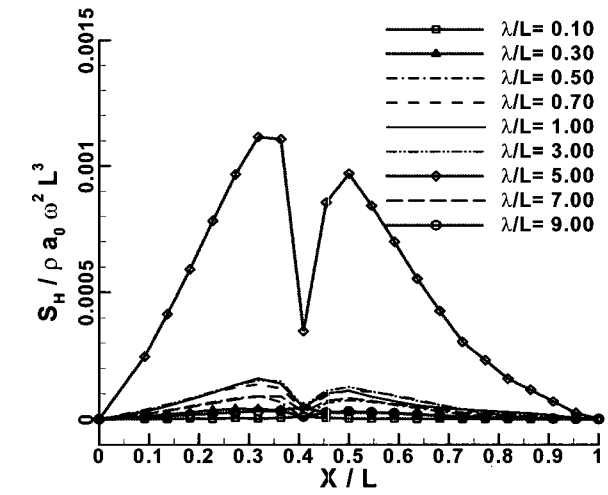

Fig. 38 Lateral shear forces of ship (case 3)

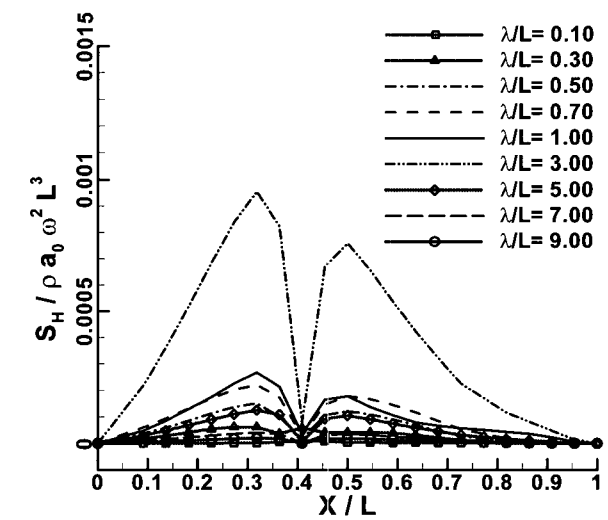

Fig. 39 Lateral shear forces of ship (case 4)

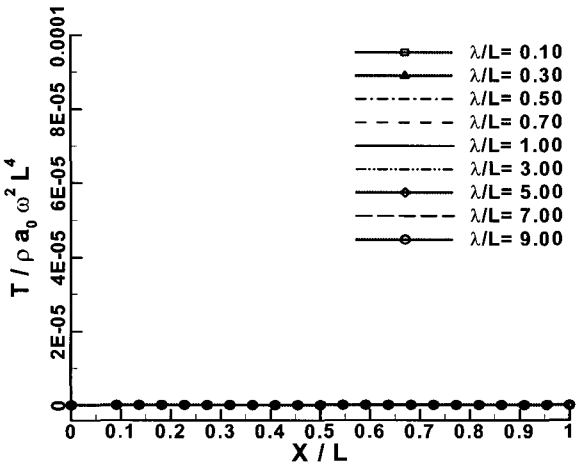

Fig. 40 Torsional moments of ship (intact)

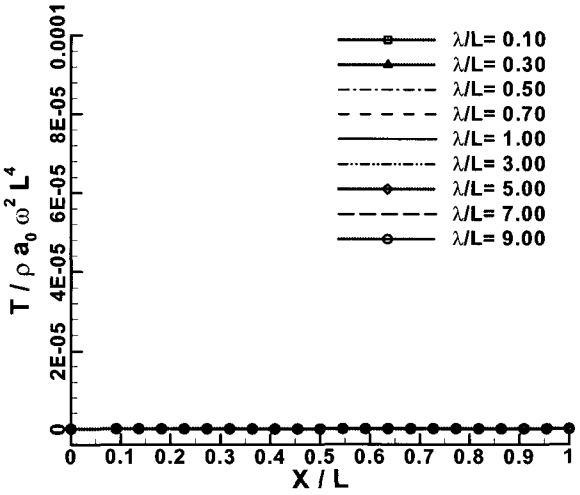

Fig. 41 Torsional moments of ship (no opening)

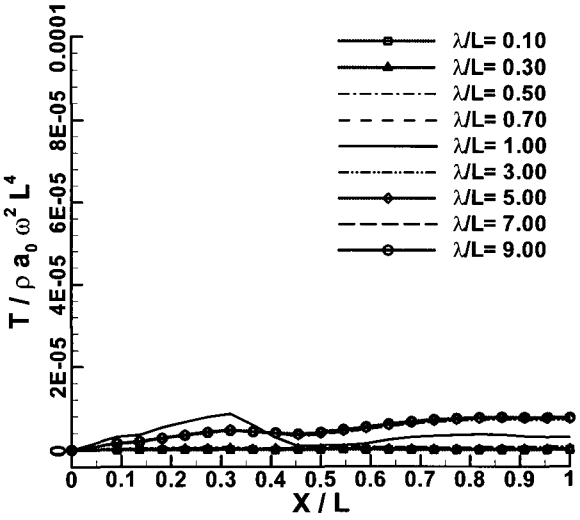

Fig. 42 Torsional moments of ship (case 1)

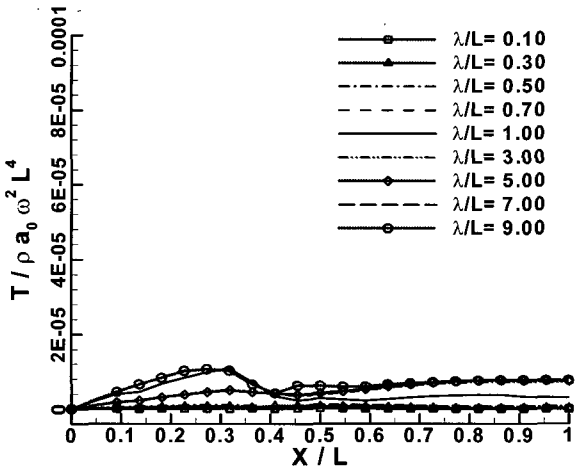

Fig. 43 Torsional moments of ship (case 2)

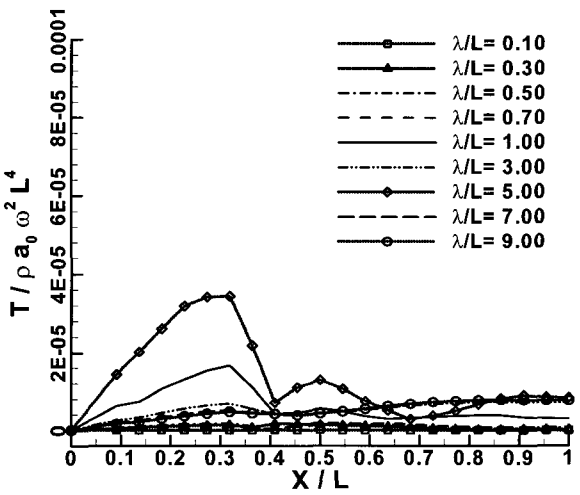

Fig. 44 Torsional moments of ship (case 3)

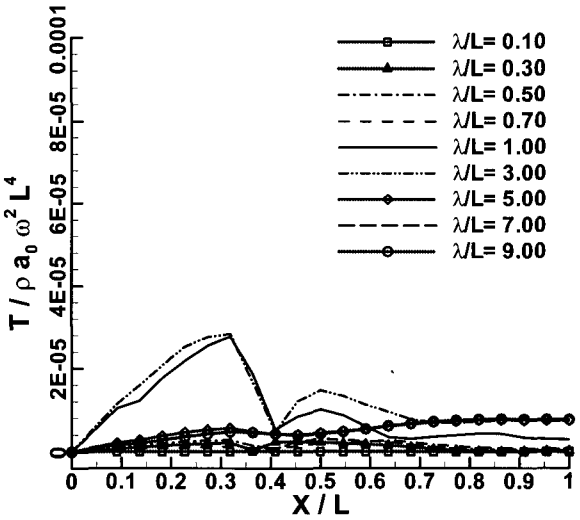

Fig. 45 Torsional moments of ship (case 4)

4. 결 론

본 논문에서는 내부 구획이 침수된 손상 선박에 작용하는 파랑응답을 해석하고 선체 손상부의 크기에 따른 파랑하중의 변동 특성을 고찰하였다. 선박의 응답은 3차원 포텐셜이론에 근거한 경계요소법으로부터 산출하였고 휨모멘트, 전단력, 비틀림모멘트 등은 압력의 직접 적분을 통하여 산출하였다. 수치해석은 RORO 여객선을 대상으로 수행하였다. 수치해석 결과로부터 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 손상부가 존재하는 경우 침수 구획의 비대칭성과 구획 내부 유동의 효과로 인하여 종파에서도 수평방향 휨모멘트, 수평방향 전단력, 비틀림모멘트, 좌우동요, 횡동요, 선수동요 등이 발생한다.

(2) 손상부를 통한 유체 유동의 효과에 의해 장파 영역의 특정 주기에서 유량과 응답의 공진현상이 발생하면서 구획 내의 압력이 급격히 증가하여 해당 주기에서 휨모멘트, 전단력, 비틀림모멘트 등도 급격히 커진다.

(3) 손상부의 크기가 클수록 내부유동 공진 영역의 파장은 짧아진다. 따라서, 손상부가 큰 선박의 경우 파장이 짧은 파도에 대해서도 파손의 가능성이 크므로 손상부가 작은 선박의 경우에 비해 상대적으로 파랑하중에 취약하다고 볼 수 있다.

후 기

본 논문은 산업자원부가 지원하는 '선박의 동적 안정성 시뮬레이션 기술 개발' 사업의 일부로 수행되었음을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

조석규, 홍사영, 이경중, 경조현, 김영식 (2005). "24th ITTC 손상선박 안정성 수치해석 연구", 대한조선학회논문집, 제42권, 제5호, pp 435-447.

홍도천 (1987). "On the Improved Green Integral Equation applied to the Water-wave Radiation-Diffraction Problem", 대한조선학회논문집, 제24권, 제1호, pp 1-8.

홍도천, 장래대, 김종현, 송재영 (1998). "규칙파중의 선체에 작용하는 수직 전단력 및 수평 굽힘우력의 3차원 계산기법 및 수치계산", 대한조선학회 1998년도 춘계학술대회 논문집, pp 276-279.

홍도천, 홍사영 (2005). "손상침수로 자세변화된 바지형 선박의 파랑하중해석", 대한조선학회논문집, 제42권, 제4호, pp 379-387.

Kim, B.W., Hong, D.C. and Hong, S.Y. (2006). "Wave Load Analysis for Damaged Ships with Flooded Compartments", Proc. of 16th International Offshore and Polar Engineering Conf., San Francisco, pp 298-303.

Papanikolau, A. and Spanos, D. (2004). "24th ITTC Benchmark Study on Numerical Prediction of Damage Ship Stability in Waves: Preliminary Analysis of Results", Proc. of 7th International Ship Stability Workshop, pp 1-9.

Vassalos, D. (2004). "Risk-Based Design: From Philosophy to Implementation", Proc. of 2nd International Maritime Conference on Design for Safety, pp 1-10.

2006년 3월 22일 원고 접수
2006년 5월 2일 최종 수정본 채택