

# 선수부 선저 슬래밍 충격에 대비한 설계압력의 산출

김용직<sup>1,†</sup> · 이승철<sup>1</sup> · 하영록<sup>2</sup> · 홍사영<sup>3</sup>  
부경대학교 조선해양시스템공학과<sup>1</sup>  
거제대학교 조선해양공학과<sup>2</sup>  
선박해양플랜트연구소<sup>3</sup>

## Computation of Design Pressure against the Bow Bottom Slamming Impact

Yong Jig Kim<sup>1,†</sup> · Seung-Chul Lee<sup>1</sup> · Youngrok Ha<sup>2</sup> · Sa Young Hong<sup>3</sup>  
Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kojje College<sup>2</sup>  
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering<sup>3</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ship's bottom slamming has been studied by many researchers for a very long time. But still some ships suffer structure damages caused by the bottom slamming impacts. This paper presents a practical computation method of the design impact pressure due to ship's bow bottom slamming. Large heave and pitch motions of a rigid hull ship are simulated by the nonlinear strip method in time domain and the relative colliding velocity between the bow bottom and the water surface is calculated using the simulated ship motions. The bottom slamming impact pressure is calculated as a product of the relative colliding velocity squared and the bottom slamming pressure coefficient that is obtained by modification of the SNAME pressure coefficients based on Ochi's slamming experiments. Not only the bottom slamming pressures but also the required bottom plate thicknesses are calculated and compared with those of the classification society rules. The comparisons show good agreements and it is confirmed that the present method is practically very useful for the bottom structure design against ship's bow bottom slamming impacts.

**Keywords** : Bow bottom slamming(선수부 선저 슬래밍), Design impact pressure(설계 충격압력), Nonlinear strip method(비선형 스트립법), Slamming pressure coefficient(슬래밍 압력계수), Plate thickness(외판 두께), Classification society rules(선급협회 규칙)

## 1. 서론

선저 슬래밍은 선수부 선저의 비교적 평탄한 선체 부분이 수면 밖으로 노출되었다가 수면에 재돌입하는 과정에서 발생하며, 선수부 선저에 국부적으로 큰 충격압력과 충격력을 발생시키는 대표적인 충격현상이다. 이 선저 슬래밍은 풍력을 이용하는 범선 시대를 지나 기관이 선박에 장착되고 배가 거친 해상에서 바람과 파도를 거스르며 항해가 가능해지면서부터 발생하였다고 할 수 있고, 현재까지 비교적 오랫동안 연구되어 왔다 (Wagner, 1932; Ochi & Motter, 1971; 1973; Stavovy & Chuang, 1976; Hwang et al., 1985; SNAME, 1993; Shin et al., 2010; Hwang et al., 2012; Kwon et al., 2013). 그러나 오랜 연구에도 불구하고 선저

슬래밍 등의 충격현상은 본질적으로 매우 격렬하고 복잡한 현상이기 때문에 관련 충격현상에 대한 유체역학적 해석이나 공학적 대처가 아직 충분하다고 할 수 없으며, 이에 의한 선체손상 사고들도 발생하고 있어 충격크기의 적절한 산출과 이를 반영한 구조 설계의 개선이 계속 요구되고 있다.

실선의 슬래밍 충격시 유동현상을 실제 설계에 적용할 수 있는 수준으로 적절하게 직접 시뮬레이션 하여 충격압력 등을 산출하는 것은 현재로서는 어려운 실정이고 앞으로도 상당기간 실현되기 어려울 것이다. 따라서 슬래밍 충격에 따른 실선 문제들을 해결하기 위해서는 관련 유동의 엄밀한 해석보다는 선체운동의 수치 계산과 슬래밍 실험계수 등을 융합하여 필요한 설계압력 등을 산출하는 계산법이 적절하다고 할 수 있다. 또한 실제 충격압

력의 복잡한 변화를 자세하게 고려하기 보다는 국부강도 검토에 편리하게 이용할 수 있는 등가정수압(충격압력을 같은 크기의 구 조변형을 유발 할 수 있는 등가의 정수압으로 대체한 압력)의 추정과 이를 이용한 설계법의 개발이 실용적이라고 할 수 있다. 그 동안의 파랑충격에 대한 실용적 연구들도 주로 이 등가정수압 개념의 충격압력 산출에 중점을 두고 수행되어 왔고 선급규칙들의 설계압력도 이 압력을 반영하고 있다고 할 수 있다.

등가정수압 개념의 선저 슬래밍 충격압력은 그 계산법을 단순화하면 선체와 수면과의 상대속도와 선저형상에 따른 압력계수로 부터 계산될 수 있다. 선체와 수면과의 상대속도는 선형 및 비선형 계산법들이 다양하게 사용될 수 있으며, 압력계수의 산출에는 이론해석이 한계가 있으므로 주로 실험자료에 근거를 둔 계수들이 사용되어 왔다. 참고문헌 SNAME (1993)에는 실험에서의 여러 압력계수들이 수록되어 있는데, 압력계수가 2차원 실험보다는 3차원 실험에서 작고 정수면에 낙하하는 실험보다는 파면과의 충돌실험에서 작게 산출되는 등 실험방법이나 실험조건에 따라 큰 차이를 보이므로 압력계수의 적절한 선정 및 이용에 유의할 필요가 있다.

본 논문에서는 큰 파도 중에서의 과대 선체운동을 Hwang et al. (1985)의 비선형 스트립법을 사용하여 시간영역에서 비선형 시뮬레이션 하며, 이 운동 계산결과를 이용하여 선체와 파면과의 상대속도를 산출한다. 선저 슬래밍 압력계수는 Ochi and Motter (1971, 1973)의 실험에 바탕을 둔 미국조선학회 압력계수 (SNAME, 1993)의 크기를 보정하여 사용한다. 기존의 슬래밍 연구들 (SNAWJ, 1974; 1987; Kim et al., 2003)을 참고하여 설계 압력 산출을 위한 선박 운항조건과 설계파 조건을 정하며, 정립된 설계압력 계산법을 이용하여 다양한 여러 실선들의 선저 슬래밍 충격압력을 산출한다. 선저 슬래밍 설계압력뿐 아니라 선저외판의 요구두께도 산출하여 선급규칙들의 설계압력 및 요구두께와 비교하며, 실선적용의 타당성을 검토한다.

## 2. 계산법의 개요

### 2.1 과대 종운동의 계산

입사파는 선형 규칙파로 가정하였으며 선체는 강체로 가정하였다. 큰 파고의 파에 의해 발생하는 선박의 과대 종운동들(longitudinal motions)을 적절히 계산하기 위해서는 선체 운동방정식의 유체 정역학 및 동역학 계수들이 과대 운동에 의해 대폭적으로 변화하는 비선형 효과를 적절히 고려하는 시간영역 해법을 이용할 필요가 있다. 본 논문에서는 과대 종운동의 계산에 Hwang et al. (1985)의 비선형 스트립법을 사용하였다.

선체에 작용하는 여러 힘들(유체 운동량 변화에 기인하는 힘과 조파 감쇠력, 부력, 자중, 관성력)로부터 다음과 같은 힘과 모멘트의 평형 방정식들을 얻는다.

$$\int_{-L/2}^{L/2} \left[ \frac{d}{dt}(M_H V_r) + N_H V_r + \rho g A - w - \frac{w}{g} a \right] dx = 0 \quad (1)$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} (x - x_G) \left[ \frac{d}{dt}(M_H V_r) + N_H V_r + \rho g A - w - \frac{w}{g} a \right] dx = 0 \quad (2)$$

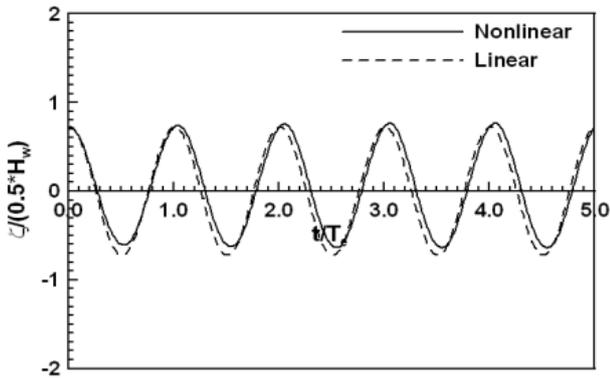
여기에서  $L$ 은 선체길이이며,  $x$  좌표는 선수방향인 양이고 원점은 선체중양에 둔다.  $x_G$ 는 선체 무게중심의  $x$ 좌표이다.  $M_H$ 와  $N_H$ ,  $A$ 는 각각 선체단면의 변화하는 순간 흘수에 대한 이차원 부가질량과 감쇠계수, 수면하 단면적이다.  $w$ 는 선체의 단위길이당 중량이며  $\rho$ 는 유체밀도이고,  $g$ 는 중력가속도이며  $a$ 는 선체 단면의 상하방향 가속도이다.  $V_r$ 은 선체와 유체와의 상하방향 상대속도(relative velocity)이며 다음과 같이 계산한다.

$$V_r = -\dot{\zeta} + (x - x_G)\dot{\theta} - U\theta + V_z \quad (3)$$

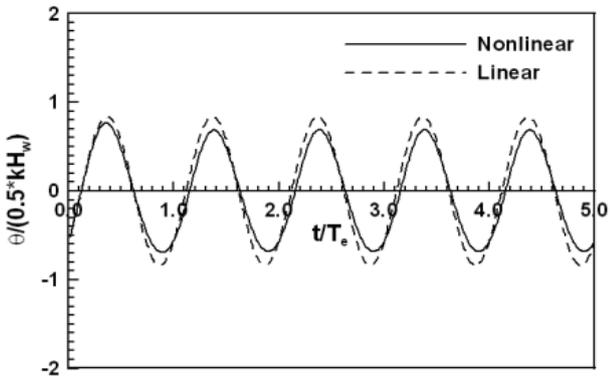
여기에서  $\zeta$ 는 상하동요(heave) 변위,  $\theta$ 는 종동요(pitch) 각,  $U$ 는 선속,  $V_z$ 는 입사파에 의한 상하방향 유속이다.  $\zeta$ 는 상방향 변위를 양으로 하고,  $\theta$ 는 선수가 내려 갈 때를 양으로 한다.

식 (3)을 식 (1)과 (2)에 대입하여 정리하면 상하동요  $\zeta$ 와 종동요  $\theta$ 에 대한 연성 운동방정식들이 얻어진다. 이 운동방정식들의 시간영역에서의 해는 초기조건(효율적인 계산을 위해 선형해의 한 순간 상태를 초기상태로 함)으로부터 시작하여 시간의 진행에 따라 운동들을 시간적분 하여 구해 가는데, 시간적분 방법으로는 선형해에서 무조건 안정성이 증명되어 있는 Newmark- $\beta$ 법을 이용한다 (Hwang et al., 1985). 시간영역 계산과정을 반복하여 운동응답이 주기적인 준 정상상태에 이르게 한 후 한 주기 동안의 운동응답을 비선형 해로 한다. 이 계산법에서는  $M_H$ 와  $N_H$  그리고  $A$ 를 각 순간의 변화하는 수면하 단면에 대한 값들을 사용하므로 과대운동에 따른 이들의 비선형적 변화가 고려되며, 부가질량  $M_H$ 의 시간미분항 등에 의한 충격력들도 고려된다.

S175 콘테이너선 (ITTC, 1983)을 대상으로 과대 종운동 계산 예를 Fig.1에 보인다. 이 선박의 길이  $L$ 은 175m이며, 균일흘수 5.5m의 경항상태(배수량 12,760 ton)로 가정하였다. Fig.1의 (1)과 (2)는 각각 상하동요와 종동요의 시간  $t$ 에 따른 계산결과이다( $T_c$ 는 조우주기,  $k$ 는 파수). 계산조건은 Froude 수  $F_n (= U/\sqrt{gL})$ 이 0.1925, 선수각  $\mu$ 가 선수파인  $180^\circ$ , 파장-선체 길이 비  $L_w/L$ 이 1.0, 파고  $H_w$ 가 8.179m이다. 선형해의 한 상태를 초기조건으로 하여 시작된 계산이 비교적 빠르게 과도효과가 소멸되고 준 정상상태(주기적인 반복상태)인 비선형 해에 도달하는 것을 볼 수 있다. 함께 표시한 선형해와 비교하여 본 비선형 계산의 운동들이 다소 작음을 확인할 수 있고, 특히 종동요에서 감소효과가 비교적 큼을 알 수 있다. 본 연구의 운동계산 전산코드에 대한 신뢰성 검증 등은 선형연구들 (Hwang et al., 1985; Kim & Shin, 2005)에서 수행되었다. 계산된 비선형 상하동요와 종동요를 이용하여 식 (3)으로 상대속도  $V_r$ 이 산출된다.



(1) Heave displacement



(2) Pitch displacement

Fig. 1 Heave and pitch displacements of S175 container ship(ballast condition,  $F_n=0.1925$ ,  $\mu=180^\circ$ ,  $L_w/L=1.0$ ,  $H_w=8.179$  m)

## 2.2 선저 슬래밍 설계압력의 계산

선저 슬래밍 설계압력은 선저형상에 따른 압력계수와 상대속도로부터 계산될 수 있다. 압력계수의 산출에는 이론해석이 한계가 있으므로 주로 실험자료에 근거를 둔 계수들이 사용되어 왔다. 선저 슬래밍에 적용할 수 있는 압력계수로 Ochi and Motter (1971, 1973)의 실험에 근거한 압력계수를 들 수 있는데, 이 압력계수는 만재율수의 1/10에 해당하는 선저부의 형상에 의해 압력계수를 구하도록 되어 있다. 본래 이 방법은 선저형상을 원으로 등각사상해서 얻어지는 3 파라메타들로부터 압력계수를 구하도록 되어 있어, 이 파라메타들의 계산을 위한 별도의 프로그램을 필요로 한다. SNAME(미국조선학회)의 HS-2 패널은 이 Ochi의 실험자료를 재분석하여 선저형상으로부터 간단히 얻을 수 있는 2 파라메타들(1/10홀수에서의 폭-홀수비, 바닥 평탄부의 폭-홀수비)을 이용하여 압력계수를 얻을 수 있는 도표를 발표하였다(SNAME, 1993). 이 SNAME 도표의 압력계수를 이용하여 선저 슬래밍 압력을 계산하면 사용하기에 편리하면서도 선저형상의 중요한 2가지 파라메타를 통해 선저형상이 슬래밍 압력에 미치는 영향을 정성적인 관점에서 잘 반영할 수 있다고 생각된다. 그러나 이 압력계수를 실제 실선에 적용하여 선저 슬래밍 압력을 산출해 보면 구조설계를 위한 설계압력으로 사용하기에는 압력 크기가 다소 작다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 다른 낙하

실험 압력계수들 (Stavovy & Chuang, 1976)을 감안하고 충격이 클 때의 입수충격과 선저충격과의 상관관계 등을 고려하여 SNAME의 압력계수를 약 2.4배하여 크기를 보정한 압력계수  $K_S$ 를 사용하였다. 이는 입수충격 압력계수 최대값  $250.6 \times$  등가정수압 변환계수  $0.25 \div$  SNAME 압력계수 최대값  $26.4 \approx 2.4$  임을 고려한 것이지만, 현실적으로 설계압력 값을 적절한 수준으로 높여주기 위한 방안이다. Fig. 2에 본 논문의 선저 슬래밍 압력계수  $K_S$ 를 보인다. 이 압력계수  $K_S$ 를 사용하여 계산된 4장의 선저 슬래밍 설계압력과 선저 외판 계산결과에서 이 압력계수의 유용성을 확인할 수 있다.

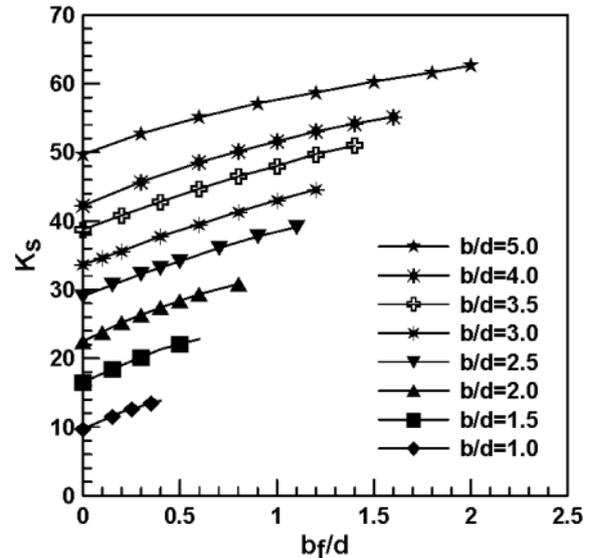


Fig. 2 Bottom slamming pressure coefficient  $K_S$

Fig. 2에서  $d$ 는 만재율수의 1/10을 나타내며,  $b$ 는 만재율수의 1/10에 해당하는 선저부의 반폭이고  $b_f$ 는 선저 평탄부의 반폭이다. 각 선체단면의  $b/d$ 와  $b_f/d$ 를 이용하여 Fig. 2로부터 내삽법 혹은 외삽법에 의해 압력계수  $K_S$ 를 산출한다. 선저 슬래밍 충격압력  $P_{imp}$ 는 압력계수  $K_S$ 와 상대속도  $V_r$ 을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$P_{imp} = \frac{1}{2} \rho K_S V_r^2 \quad (4)$$

S175 컨테이너선 (ITTC, 1983)의 경하상태를 대상으로 선저 슬래밍 충격압력  $P_{imp}$ 의 계산예를 Fig. 3에 보인다. 계산조건은 Fig. 1에서와 같고,  $x/L=0.5$ 가 FP이고  $x/L=0.0$ 이 선체중앙이다. 본 연구에서의 선저 슬래밍 충격압력은 운동응답의 시뮬레이션 과정 중 각 선체단면의 선저가 수면으로 들어가는 시점에 그 스테이션에서 계산된다. Fig. 3의 선저 슬래밍 충격압력  $P_{imp}$ 는 각 스테이션에서 이렇게 계산된 압력이며, 이 압력은 각 위치에서 예상되는 선저 슬래밍 충격압력을 나타내지만 어느 한 순간의 동시 압력분포는 아니다.

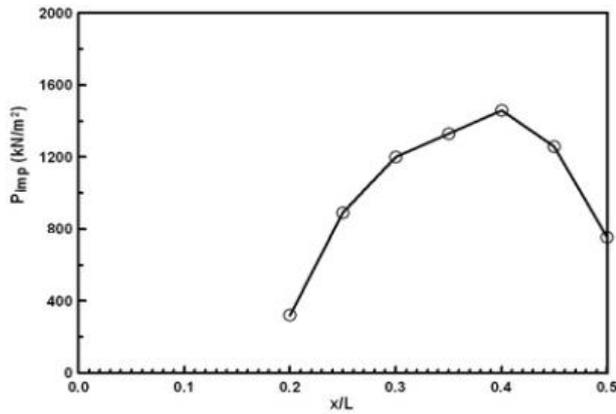


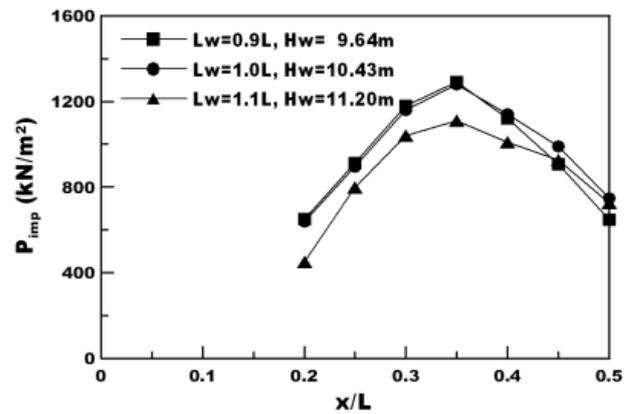
Fig. 3 Bottom slamming impact pressure of S175 container ship(ballast condition,  $F_n=0.1925$ ,  $\mu=180^\circ$ ,  $L_w/L=1.0$ ,  $H_w=8.179$  m)

구조설계 등에 사용할 선저 슬래밍 설계압력의 계산시 계산조건은 슬래밍에 대한 다른 연구들 (SNAWJ, 1974; 1987; Kim et al., 2003)을 참고하여 선속( $U$ )은 설계속도의 70%, 파 방향은 선수파, 파고( $H_w$ )는 파장( $L_w$ )에 따라 식 (5)의 Zimmerman의 파고식에 의한 값으로 주었다. Fig. 4의 파장에 따른 선저 슬래밍 압력 계산결과 등을 참고하여 파장은 선저 슬래밍 압력이 대체로 최대가 되도록 선체길이와 같게 단순화하여 주었다.

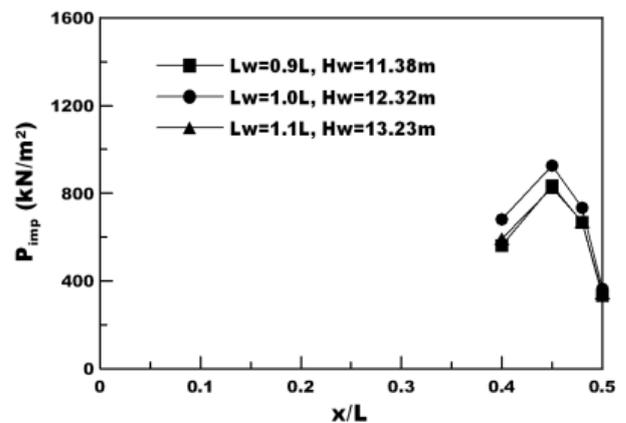
$$H_w = (L_w/10.62)^{0.75} \quad (\text{in meter}) \quad (5)$$

### 3. 계산 대상 선박들의 주요목

선저 슬래밍 계산을 위한 대상선박으로 비교적 다양하게 4척의 컨테이너선과 1척의 탱커, 2척의 산적화물선을 택하였다. 컨테이너선은 선속이 빠르고 방형계수가 작은 비척선(fine ship)에 속하며, 탱커와 산적화물선은 상대적으로 선속이 느리고 방형계수가 큰 비대선(full ship)에 속한다.



(1) 242 m container ship



(2) 302 m tanker

Fig. 4 Effect of wave length on bottom slamming pressure(70% of design speed, head sea, Zimmerman's wave height)

Table 1에 각 선박들의 주요제원을 보이고 선수 선저부의 선도를 Fig.5에 보인다. 선박의 일련번호는 비척선의 길이 순번 뒤에 비대선의 순번이 부여되었다. Fig.5에서 각 스테이션별 숫자는 FP를 20으로 선체중양을 10으로 했을 때의 길이방향 위치를 나타낸다.

Table 1 Principal particulars of the selected ships for bottom slamming calculation

Ship no.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
Ship type	Container	Container	Container	Container	Oil tanker	Bulk carrier	Bulk carrier	
Length, $L(m)$	242	226.7	224	189.7	302.15	275	155	
Breadth, $B(m)$	32.2	32.2	32.2	23.8	44.20	45.9	23.8	
Depth, $D(m)$	18.6	19.0	19.0	14.325	24.5	24.7	13.5	
Full load mean draft, $T(m)$	11.7	11.6	11.7	7.9	19.1	17.4	9.9	
Design Froude number, $F_n$	0.245	0.2553	0.2404	0.2218	0.1465	0.1436	0.2087	
Block coefficient, $C_b$	0.6413	0.6549	0.6547	0.7442	0.8343	0.8528	0.7998	
Ballast condition	Displacement(ton)	23961.0	24997.2	26381.6	14549.8	92858.0	79622.3	13020.0
	FP draft(m)	3.907	3.912	4.418	3.702	7.08	7.057	4.6
	AP draft(m)	7.159	8.021	8.176	5.232	10.15	8.221	4.61
	LCG(aft-, m)	-10.147	-10.114	-9.431	-2.326	4.75	8.486	4.83
	Pitch gyradius/ $L$	0.25*	0.25*	0.25*	0.25*	0.25*	0.25*	0.25*

\* Assumed value

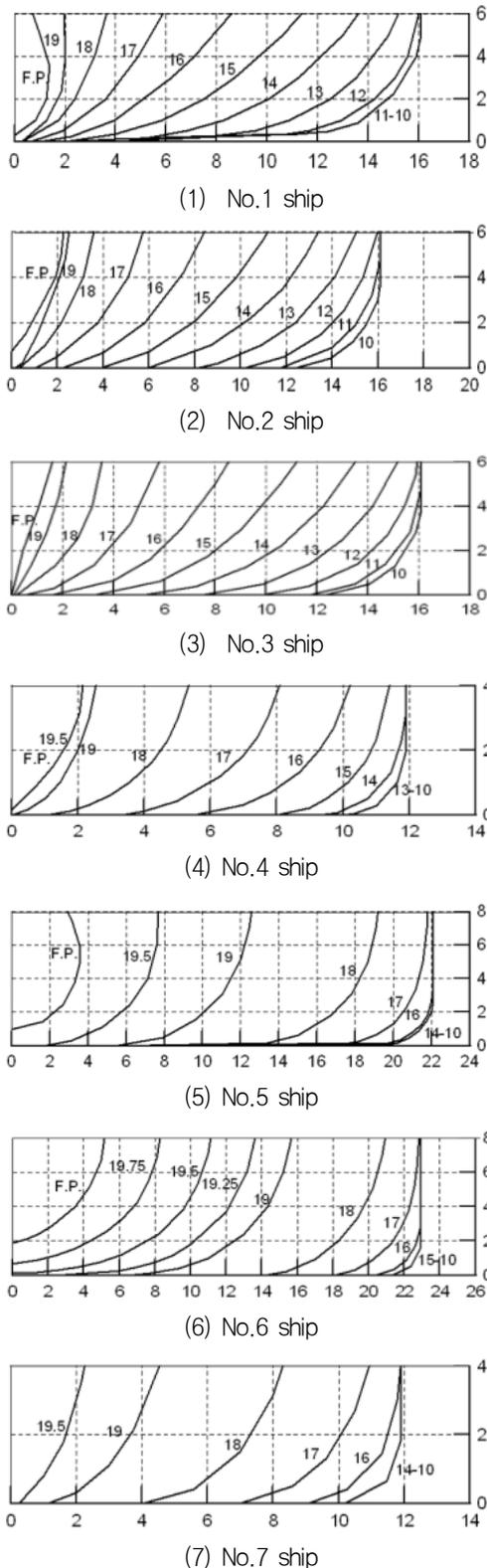
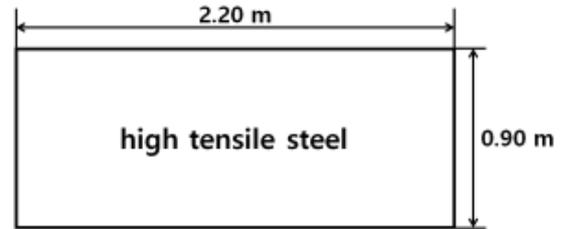


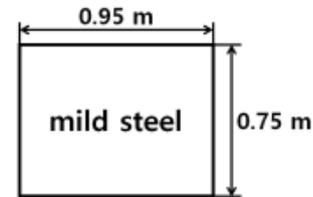
Fig. 5 Bow bottom area of the selected ships for bottom slamming calculation (unit: meter)

슬래밍 충격에 대비하여 요구되는 선저 외판의 두께는 슬래밍 압력 외에 외판패널의 형상과 크기, 재질에 따라 서로 달라진다. 본 연구에서는 유사선박들의 선저외판 구조를 참고하여 Fig. 6의

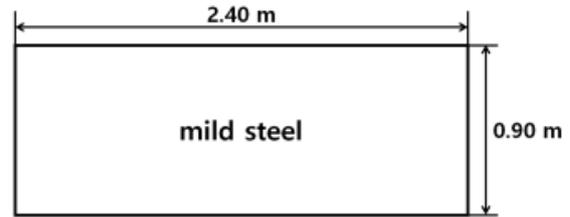
4가지 패널 형태를 정하고, 각 선박에 적절하다고 생각되는 1가지 형태로 각 선박의 선저외판을 가정하였다. (1)번~(3)번 선박은 P1 패널로 가정되었고, (4)번 선박은 P2 패널, (5)번과 (6)번 선박은 P3 패널, (7)번 선박은 P4 패널로 가정되었다. P1 패널의 재질은 고장력강이며 나머지 패널들은 연강이다.



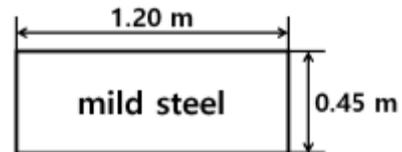
(1) P1 panel(No.1, 2 & 3 ships)



(2) P2 panel(No.4 ship)



(3) P3 panel(No.5 & 6 ships)



(4) P4 panel(No.7 ship)

Fig. 6 Dimension and materials of the selected bottom plate panels

#### 4. 계산결과 및 고찰

선저 슬래밍 충격은 오랫동안 연구되어 왔고 각국 선급협회들은 슬래밍 충격에 대비한 보강규정들을 가지고 있다. 이 선급협회 규정들은 그동안의 오랜 연구결과와 경험을 반영하고 있으므로 본 논문에서는 선저 슬래밍 충격압력과 이를 반영한 선저외판 요구두께를 산출하여 선급규정들(DNV, 2005; GL, 2002; LR, 2000; KR, 2008; IACS, 2006a; 2006b)에 의한 값들과 비교함으로써 본 계산방법의 실선적용 타당성을 검증하고자 한다.

본 논문의 방법에 의한 외판두께는 식 (6)을 이용하여 계산하였다.

$$P_{imp} = \frac{\sigma_Y}{\Phi_s} \left( \frac{t_p}{b_s} \right)^2 \times 10^{-3} \quad (kN/m^2) \quad (6)$$

여기서,

$$\Phi_s = \frac{(\sqrt{1+3\beta_s^2} - 1)^2}{12\beta_s^2}$$

$t_p$  : 외판 두께 (mm)

$\beta_s = \frac{a_s}{b_s}$  : 가로세로비 (aspect ratio)

$a_s$  : 외판 긴 변의 길이 (m)

$b_s$  : 외판 짧은 변의 길이 (m)

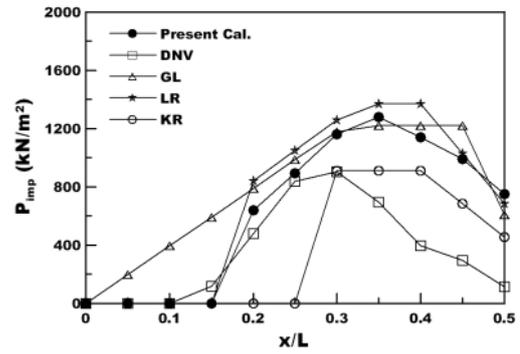
$\sigma_Y$  : 재료의 항복응력 ( $N/mm^2$ )

이 식은 외판을 균일 분포하중을 받는 4변 고정 직사각형 평판으로 가정하고 소성봉괴 이론을 따른 상계정리(upper bound theorem)를 이용하여 외판 내력으로서의 압력  $P_{imp}$  를 구한 것이다 (Kim et al., 2001). 계산시 연강의 항복응력은  $235 N/mm^2$  로 주었고, 고장력강의 항복응력은  $315 N/mm^2$  로 주었다.

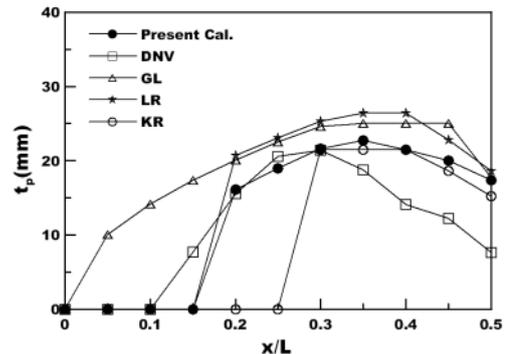
본 연구의 방법과 각 선급규칙에 의한 설계압력과 외판두께의 계산결과를 7척의 대상선박에 대해 각각 Fig. 7~Fig. 13에 보인다(선급규칙에 의한 외판두께에서 부식여유는 제외하였음). 대체로 선속이 빠른 (1)번~(4)번의 컨테이너선들에서 상대적으로 선저 슬래밍 설계압력이 높아  $900 kN/m^2 \sim 1400 kN/m^2$  정도의 최대압력이 나타나고, 선속이 느린 (5)번~(7)번의 비대선들에서는 이보다 낮은  $700 kN/m^2 \sim 1100 kN/m^2$  정도의 최대압력이 나타남을 볼 수 있다. 또한 상대적으로 고속인 컨테이너선들에서는 선저 쪽이 비교적 후방에서 넓어지므로 최대압력 지점이 상대적으로 후방에서 나타나고 저속인 비대선들에서는 선수쪽에서의 선저 폭이 큰 관계로 최대압력 지점이 더 앞쪽에서 나타남도 볼 수 있다. 외판 요구두께에서의 선급간 차이는 설계압력 최대값에서의 각 선급간 차이보다 더 작음도 볼 수 있다.

각 선급규정들은 선박의 전체강도 확보와 화물적재 등을 위해 판의 기본적인 두께에 대한 규정을 두고 있고, Fig. 7~Fig.13에서의 외판 요구두께는 선저 슬래밍 충격에 대비하여 국부적으로 특별히 요구되는 두께이다. 실제 선저 슬래밍에 대비한 보강은 후자의 두께가 기본적인 판 두께 보다 큰 부분에서만 외판 두께를 후자의 두께 이상이 되도록 함으로써 이루어진다. 또한, 선급 규정들에서 비교적 후방까지, 특히 일부 선급규정에서 선체중앙 ( $x/L=0$ ) 부근까지 선저 슬래밍 설계압력과 보강두께를 주는 것은 그곳까지 선저충격이 발생하기 때문이 아니라 전방의 최대 충격압력을 후방으로 가면서 점진적으로 줄여 줌으로써 이로 인한 외판두께가 후방의 기본 두께와 점진적인 연속성을 갖도록 하여 구조강도상 안전을 도모하기 위함이라고 할 수 있다.

본 계산법에서는 선저가 수면위로 노출되었다가 재돌입하는 순간에 충격압력을 계산하므로 선속이 낮은 비대선의 경우 Fig. 11~Fig. 13에서 보듯이  $x/L \geq 0.3$ 인 선수쪽 일부만 선저가 수면위로 노출되고 이 부분에서만 충격압력이 발생하고 있다. 이 경우에도 실제 구조설계에 적용할 때는 본 계산의 선저 슬래밍

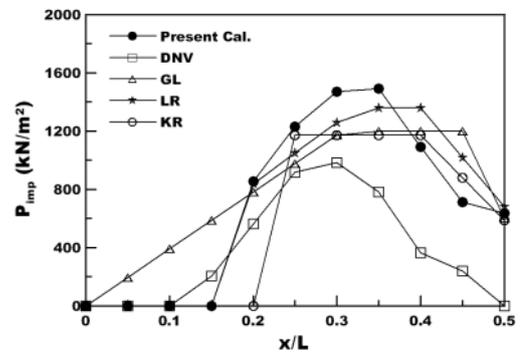


(1) Bottom slamming pressure

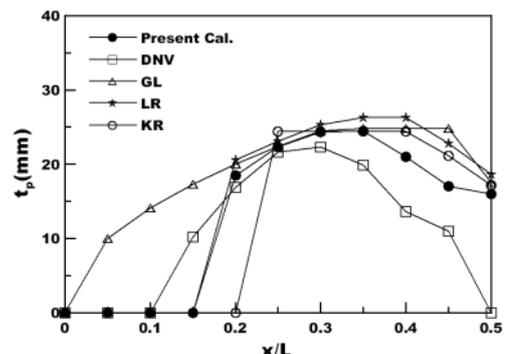


(2) Bottom plate thickness(P1 panel)

Fig. 7 Comparison of design pressure and plate thickness for bottom slamming (No.1 ship)

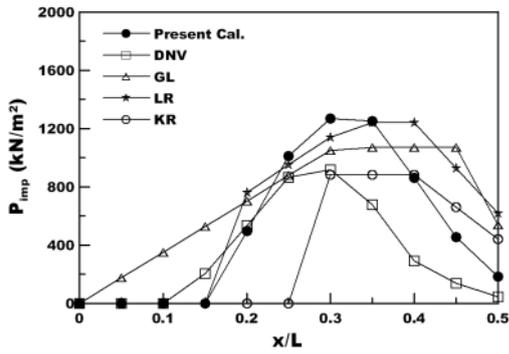


(1) Bottom slamming pressure

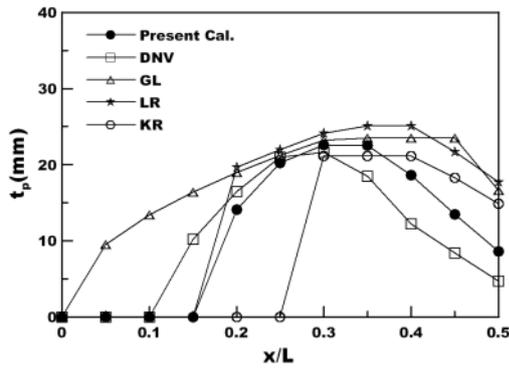


(2) Bottom plate thickness(P1 panel)

Fig. 8 Comparison of design pressure and plate thickness for bottom slamming (No.2 ship)

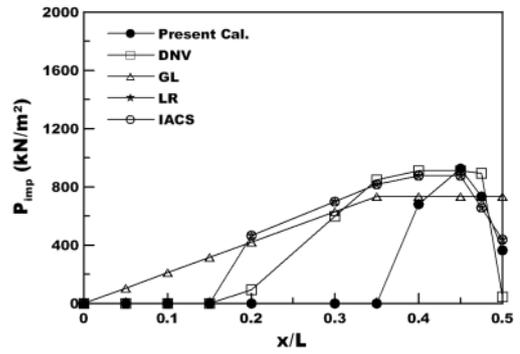


(1) Bottom slamming pressure

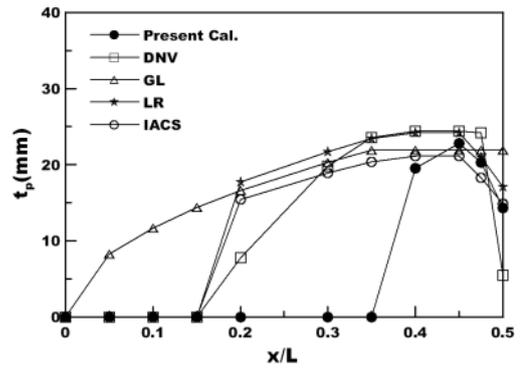


(2) Bottom plate thickness(P1 panel)

Fig. 9 Comparison of design pressure and plate thickness for bottom slamming (No.3 ship)

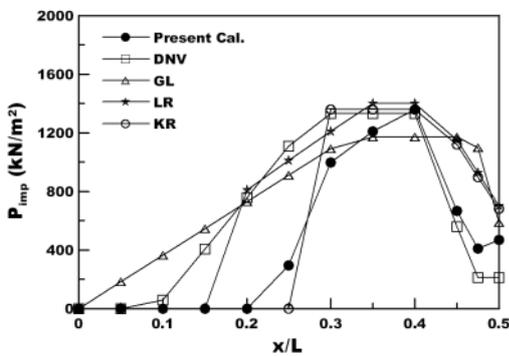


(1) Bottom slamming pressure

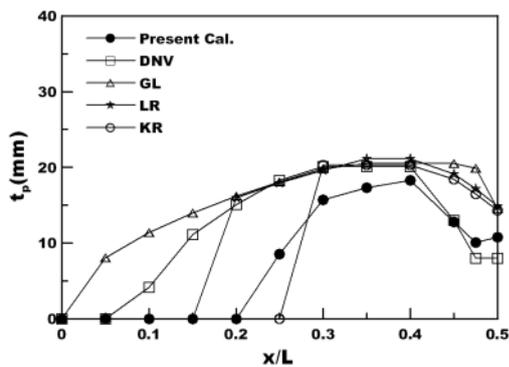


(2) Bottom plate thickness(P3 panel)

Fig.11 Comparison of design pressure and plate thickness for bottom slamming (No.5 ship)

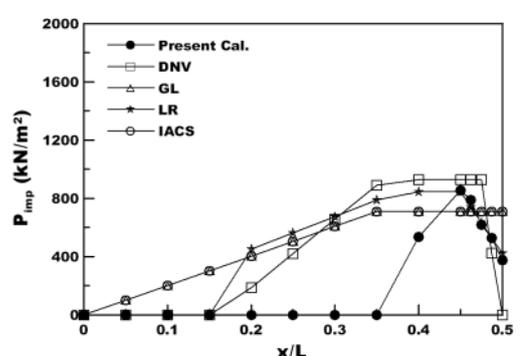


(1) Bottom slamming pressure

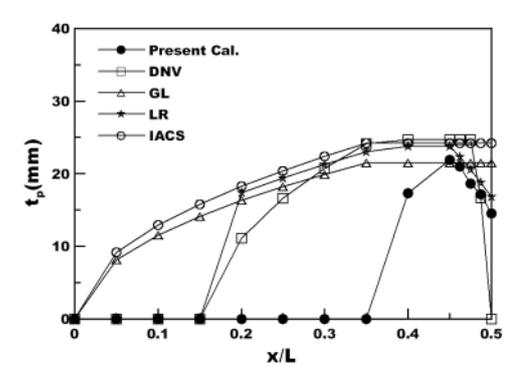


(2) Bottom plate thickness(P2 panel)

Fig. 10 Comparison of design pressure and plate thickness for bottom slamming (No.4 ship)

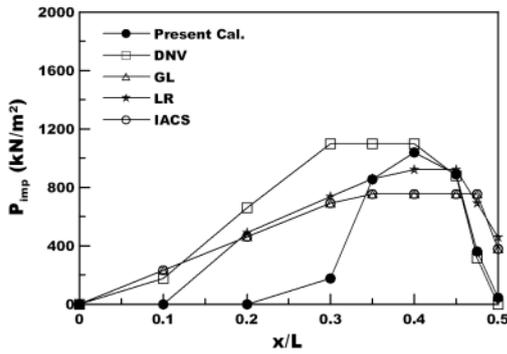


(1) Bottom slamming pressure

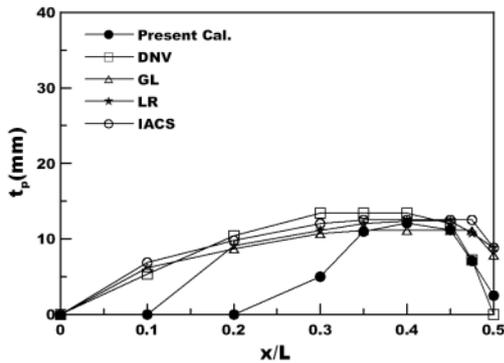


(2) Bottom plate thickness(P3 panel)

Fig. 12 Comparison of design pressure and plate thickness for bottom slamming (No.6 ship)



(1) Bottom slamming pressure



(2) Bottom plate thickness(P4 panel)

Fig. 13 Comparison of design pressure and plate thickness for bottom slamming (No.7 ship)

최대 압력과 최대 두께를 다소 후방까지 확장하여 적용하고 그 후방에서는 다시 점진적으로 감소시킴으로써 구조강도의 점진적 연속성을 고려하는 안전한 설계가 바람직하다고 생각된다.

Fig. 7~Fig. 13에 보인 비교를 통하여 대체로 본 연구의 방법이 각 선급규칙의 선저 슬래밍 설계압력과 유사한 크기의 압력을 주며, 요구하는 외판두께도 선급규칙들의 요구두께와 유사하다고 할 수 있다. 각 선급의 선저 슬래밍 규칙은 오랜 연구결과와 실선적용의 경험을 반영하고 있고 본 연구의 방법이 이 규칙들과 유사한 결과를 주므로, 본 연구의 방법은 선저 슬래밍에 대비한 실선의 구조 강도설계에 무난히 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 선체와 파면과의 상대운동은 시간영역에서의 비선형 시뮬레이션에 의해 계산하고, 산출된 상대속도와 SNAME 압력계수 (SNAME, 1993)의 크기를 보정한 압력계수를 이용하여 선저 슬래밍 설계압력을 산출하는 방법을 새로 정립하였다.

총 7척의 선박(콘테이너선 4척과 탱커 1척, 산적화물선 2척)에 대해 선저 슬래밍 계산이 수행되었다. 본 연구에서 정립된 방법에 의한 선저 슬래밍 충격압력은 각 선급규칙의 선저 슬래밍 설계압력과 유사한 크기의 압력을 주며, 본 연구의 방법으로 계산된 외판두께도 선급규칙들의 요구두께와 유사함을 보였다.

각 선급규칙의 선저 슬래밍 규칙들은 오랫동안 축적된 많은 실선자료에 기초하여 제정 및 개정되어 왔고 본 연구의 계산법이 이 규칙들과 유사한 결과를 주므로, 본 논문의 계산법은 선저 슬래밍에 대비한 실선의 강도설계에 무난히 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 게재되었습니다.

## References

- Det Norske Veritas(DNV), 2005. *DNV rules. Part 3, Chapter 1..* DNV: Norway.
- Germanischer Lloyds(GL), 2002. *GL rules. Part 1, Chapter 1..* GL: Germany.
- Hwang, J.H., Kim, Y.J., Kim, J.Y. & Oh I.G., 1985. Nonlinear effects on ship motion and wave load. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 22(3), pp.1-8.
- Hwang, J.H., Park, I.K. & Koo, W.C., 2012. Numerical analysis of ship motion and wave loads including momentum slamming. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(2), pp.109-115.
- International Association of Classification Societies (IACS), 2006a. *IACS common structure rules for oil tankers. Section 7..* IACS: UK.
- International Association of Classification Societies (IACS), 2006b. *IACS common structure rules for bulk carriers. Chapter 4.,* IACS: UK.
- International Towing Tank Conference(ITTC), 1983. Summary of results obtained with computer programs to predict ship motions in six degree of freedom and related responses. *Report of 15th and 16th ITTC Seakeeping Committee.*
- Kim, Y.J. & Shin, K.S., 2005. Numerical calculation and experiment of green water on the bow deck in regular waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(4), pp. 350-356.
- Kim, Y.J., Shin, K.S., Shin, C.H., Kang, J.M., Kim, M.S., Kim, S.C., Oh, S.G., Rim, C.W., Kim, D.H., Kim, D.H., Park, I.H., Song, K.J., Lee, C.K. & Jang, Y.H., 2001. *Development of the strength evaluation method of bow flare structures.* Report of the Joint Project of Pukyong National Univ., Korean

- Register of Shipping, Hyundai Heavy Industries CO. LTD, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering CO. LTD, Samsung Heavy Industries CO. LTD, Hanjin Heavy Industries & Construction CO. LTD & Korea Institute of Machinery & Materials.
- Kim, Y.J., Shin, K.S., Shin, C.H., Kang, J.M., Kim, M.S., Kim, S.C., Oh, S.G., Rim, C.W., Kim, D.H., Kim, D.H., Park, I.H., Song, K.J., Lee, C.K. & Jang, Y.H., 2003. Prediction of bow flare impact pressure and its application to ship structure design – container ship and PCC. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(3), pp.29–36.
- Korean Register of Shipping(KR), 2008. *KR rules. Part 3, Chapter 7.*. KR: Korea.
- Kwon, S.H., Yang, Y.J. & Lee, H.S., 2013. Experimental and numerical study on slamming impact. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(1), pp.1–8.
- Lloyd’s Register of Shipping(LR), 2000. *LR rules. Part 3, Chapter 5.*. LR: UK.
- Ochi, M.K. & Motter, L.E., 1971. A method to estimate slamming characteristics for ship design. *Marine Technology*, 8(2), pp.219–232.
- Ochi, M.K. & Motter, L.E., 1973. Prediction of slamming characteristics and hull responses for ship design. *SNAME Transaction*, 81, pp.144–176.
- Shin, H.K., Kim, S.C. & Cho, S.R., 2010. Experimental investigations on slamming impact by drop tests. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(3), pp.410–420.
- Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1993. *Notes on ship slamming*. Panel HS-2 of SNAME, Technical and Research Bullentin 2–30.
- Society of Naval Architects of West Japan(SNAWJ), 1974. *Investigation on ship structural damage(4)*. Technical Committee of SNAWJ Report No.16.
- Society of Naval Architects of West Japan(SNAWJ), 1987. *Investigation on ship structural damage(5)*. Technical Committee of SNAWJ Report No.18.
- Stavovy, A.B. & Chuang, S.L., 1976. Analytical determination of slamming pressures for high-speed vehicles in waves. *Journal of Ship Research*, 20(4), pp.190–198.
- Wagner, H., 1932. *Landing of seaplanes, National Advisory Committee for Aeronautics(NACA) TN 622*.

