

# 자유낙하에 의한 각도 변화에 따른 썰기형 구조물 주위의 유동특성에 관한 실험적 연구

오승진<sup>1</sup> · 조대환<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2013년 3월 26일, 원고수정일 : 2013년 5월 22일, 심사완료일 : 2013년 7월 11일)

## An experimental study on the flow characteristics around to changes in the angle of the wedge type structure by free fall

Seung-Jin Oh<sup>1</sup> · Dae-Hwan, Cho<sup>†</sup>

**요약:** 본 연구에서는 자유낙하 하는 썰기형 구조물의 각도 변화에 따른 충격압력 및 유동특성을 알아보고자 실험을 수행하였다. 유동장의 계측은 2-프레임 그레이레벨 상호상관 PIV기법을 이용하였으며, 충격압력의 계측은 압력계측장비인 Dewetron System을 이용하였다. 모델과 자유수면이 이루는 각도는 15°, 25°, 35° 및 45°를 적용하여 다양성을 주어 실험하였으며, 속도장은 접수보다 이수에서 빠른 유동특성을 나타냈으며, 접수에서 보다 이수에서 시간이 더 소요됨을 보였다. 모델 하부에서의 충격압력은 썰기의 각도 45° 보다, 입수각이 작은 15°와 P1 지점에서 높게 나타났다.

**주제어:** 자유낙하, 충격압력, 유동장, 접수, 이수

**Abstract:** This paper presents are experimental investigation to figure out impact pressure and flow characteristics of a wedge type structure in free fall. The flow field has been obtained by 2-frame grey level cross correlation PIV(Particle Image Velocimetry) method, the impact pressure of free fall structure by a pressure acquisition system apply to Dewetron system. The angles between a model and the free surface are adapted 15°, 25°, 35° and 45° respectively. Velocity field of water exit has higher better than water entry. The impact pressure under the bottom of the model has been appeared higher values at 15° than 45°, and also at P1.

**Keywords:** Free Fall, Impact Pressure, Flow Field, Water Entry, Water Exit

### 1. 서 론

항행 중에 있는 선박이나 해양구조물의 하부가 파도에 의해 수면과의 충격으로 발생하는 슬래밍(Slamming) 현상은 충격력 및 압력변화로 인해 구조물의 변형을 야기함으로써 인해 중요한 연구 대상이 된다[1]. 이처럼 자유낙하로 발생하는 충격압력은 중력식 라이프보트의 구조기준, 요트 및 레저보

트 활주 시 수면과 충격압력에 대한 안전기준 등과 관련해서 지속적인 연구가 이루어지고 있다[2].

슬래밍 현상의 실험적 연구로는 [3][4]에서 언급한 것과 같이 해상 비행기의 낙하 시 작용하는 압력의 변화에 대한 선구적인 연구가 수행되었다. 또한, [5]는 실선을 대상으로 북태평양과 인도양을 항해하는 대형컨테이너선의 선수 플레어 슬래밍

<sup>†</sup>Corresponding Author: Faculty of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaechal-ro 91, Mokpo, Jeollanam-do, 530-729, Korea, E-mail: dhcho@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7217

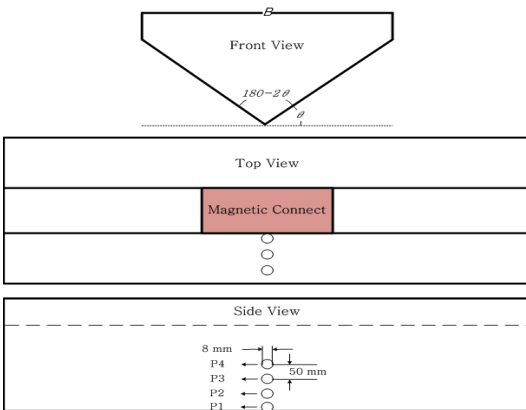
<sup>1</sup> Division of Marine Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University, E-mail: plus1850@mmu.ac.kr,

압력 계측자료를 토대로 선수 슬래밍 압력의 최대 압력 도달시간에 대한 분석결과를 제시하였다.

본 연구에서는 수면과 접하는 췌기형 모델의 입수각도별 자유낙하실험을 기반으로 충격압력 및 순간속도분포 특성을 고찰하였고 선저경사각에 따른 추가 연구의 기초자료를 확보하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 조건

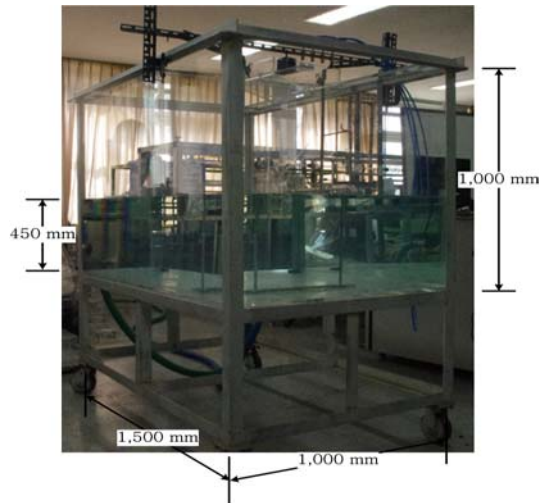
실험에 사용한 모델의 형상을 도시한 그림은 **Figure 1**과 같다. 투명아크릴로 제작된 모델은 충격압력의 획득을 위해 모형의 길이방향 끝단 모서리로부터 50mm 간격으로 중앙으로부터 P1, P2, P3 및 P4의 센서를 설치하여 자유낙하 시 충격압력을 계측할 수 있도록 하였으며, **Figure 2**의 그림과 같은 수조에서 각도별로 제작한 모형으로 자유낙하 실험을 실시하여 충격압력 및 유동장을 획득하였다.



**Figure 1:** Schematic configuration of the model

**Table 1**은 실험조건을 나타냈다. 췌기형 구조물의 입수각도  $\theta$ 는 15°, 25°, 35° 및 45°를 채택하였으며, 각도별로 모델을 제작하였다. 실험에서 실시한 모델의 자유낙하 높이는 300mm에서 수행하였고 이때 모델의 중량은 2.0kg이다. 실험에서 자유낙하 시 모델이 흔들리지 않고 정확한 입수각도로 수면에 낙하하도록 레일을 설치하는 방법을 사용

하지 않고 평균 10회 이상의 자유낙하 실험을 하면서 고속카메라로 촬영한 후 영상을 확인하여 정확히 수직으로 낙하한 실험결과 데이터의 결과값으로 분석하였다. **Table 2**는 압력 계측 장치의 제원으로서 초당 10,000개의 샘플링이 가능하며 압력은 5bar 까지 계측이 가능하고 압력센서에서 획득한 값은 변환기를 통하여 출력 시 전압차를 시계열로 획득할 수 있다.



**Figure 2:** Schematic diagram of water tank

**Table 1:** Experimental conditions

Model Wedge Angle (°)	15, 25, 35, 45
Free Fall Height (mm)	300
Model Weight (kg)	2.0

**Table 2:** Pressure acquisition system specification

Items	Unit	Value
Sampling Freq.	kHz	10
Output	Volt	$\pm 5$
Max. Deviation	mmV	$\pm 2 (\pm 0.00015 \text{kgf/cm}^2)$
Resolution	$\mu\text{V}$	40 (0.000003kgf/cm <sup>2</sup> )

**Figure 3**은 자유낙하 하는 췌기형 모델의 유동정보 계측을 위해 적용한 PIV시스템의 개략적인 구

성도이다. PIV시스템에 관해서는 [6]에 의해 자세히 설명되어있다. 실험에서 사용한 광원은 직진성과 반사성이 우수한 500mW의 광다이오드를 집적화한 2차원 광원을 계측영역에 조사하여 수행하였으며, 해상도는 초당 125프레임으로 촬영하여 유동정보를 계측하였으며, 유동장 계측을 위한 실험조건은 Table 3과 같다.

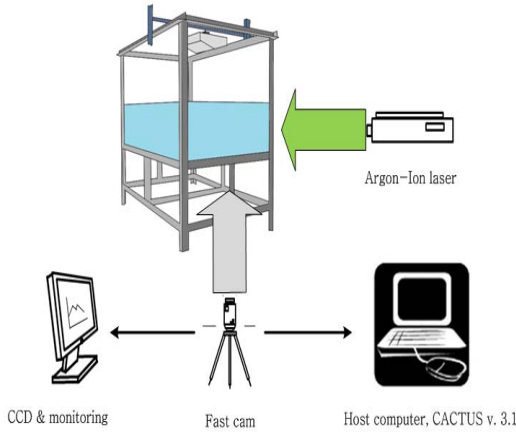


Figure 3: Schematic arrangement of PIV system

Table 3: Experimental condition for PIV System

Item	Specification
Light source	SLOC Lasers (GL532H-500mW)
Sheet light	Cylindrical lens (Width ≈ 2mm)
Working fluid	Fresh water (17±1 °C)
Time resolution	125 FPS
Particle	PVC ( $\rho$ : 1.02, $\phi$ : 150 $\mu$ m)
Image resolution	1,280×1,024

### 3. 실험결과 및 고찰

슬래밍 현상의 재현 실험을 통해 획득한 충격압력은 Figure 4 ~ Figure 7까지 시간변화에 따른 압력변화를 도시하였고 압력결과는 Table 4와 같다.

입수각 15°, 25°, 35° 및 45°에서 자유낙하 시 발생한 충격압력을 살펴보면 P1에서는 췌기의 입수각도가 증가할수록 충격압력은 감소하는 경향을

나타내고 P2에서는 대체적으로 입수각의 증가에 따라 충격압력은 감소하지만 25°에서는 증가하는 결과를 보였다. P3에서는 입수각의 변화에 대해 압력변화의 폭이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 모델의 센서 위치가 가장 높은 곳에 위치한 P4의 값은 전체적으로 가장 낮은 압력결과를 나타내고 있으며, 각도의 증가에 따라 충격압력은 대체적으로 변화폭이 작지만 특이하게 25°에서는 15°보다 급격한 압력 증가를 보이다가 35°에서는 압력감소의 결과를 나타내고 있다. 최고압력분포의 경향은 입수각도가 10°씩 증가할수록 약 7.3%의 압력감소율을 나타내고 있다. 특히, 15°에서 25°의 각도 변화를 줄 때 압력감소율이 약 11.5%로 가장 크게 나타났다. 이와 같이 췌기형 구조물이 자유낙하로 인해 발생하는 충격압력은 입수각도가 증가할수록 압력은 감소하는 결과로 나타났지만 구조물의 위치에 따라 오히려 증가하는 경우도 나타나고 있다. 이러한 이유는 모형과 수면이 접하는 각도에 따라 에어포켓의 형성이 결정되기 때문이며, Figure 8은 고속카메라로 촬영한 충격압력이 발생한 같은 시간대에서 15°와 45°의 모형의 췌기바닥에 형성된 에어포켓의 크기와 분포를 볼 수 있다.

췌기형 구조물의 자유낙하로 발생되는 충격압력에서 중요한 요인은 충격압력의 크기와 더불어 충격압력의 지속시간이다. 이러한 충격압력의 지속시간을 살펴보기 위해 Table 5와 Figure 9를 비교, 분석하여 Figure 10과 같은 결과를 나타냈다. Table 5는 15°모형의 상태에 따른 충격압력과 시간의 상관관계를 나타냈으며, 최고압력지속시간은 이러한 데이터와 고속카메라로 촬영한 영상을 분석하여 Figure 9에 나타냈고 이러한 표와 사진을 분석하여 Figure 10과 같이 정리하였다. 실험에서 고속카메라의 시간 해상도는 1/125초로 촬영하였으며, 이는 영상 1프레임당 요구되는 시간이 0.008초이며 이러한 근거로 영상과 압력데이터를 비교했다. Figure 9의 (a)는 수면과 접촉한 영상이며 프레임 수는 15였고, 이때의 시간은 0.614초였으며 0.616초로 지나면서 압력이 급격히 올라갔다. 이때의 영상과 압력 데이터를 비교하면 15프레임과 압력값 0.616초는 같은 시기임을 알 수 있다. 그리고 입수의 마지막은

Figure 9의 (b)와 같이 모형이 물속에서 정지한 상태인 40프레임에서 종료됨을 알 수 있으며 37프레임은 수면과 충돌 후 0.176초 후가 되면서 0.792초에서 입수는 종료되고 이수로 진행된다.

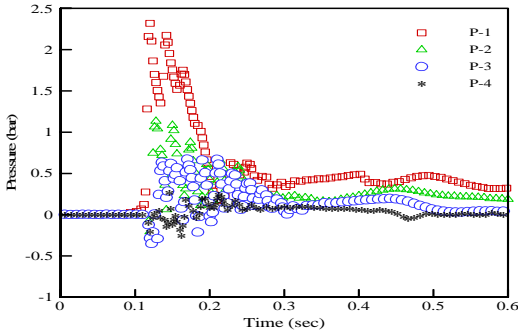


Figure 4: Time histories of pressure at 15°

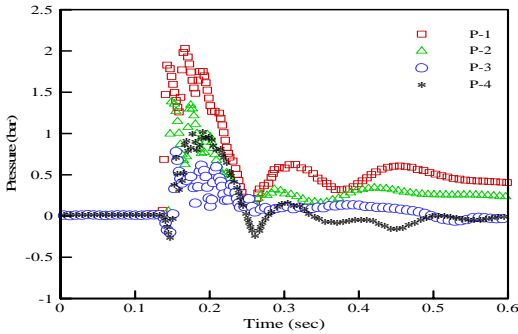


Figure 5: Time histories of pressure at 25°

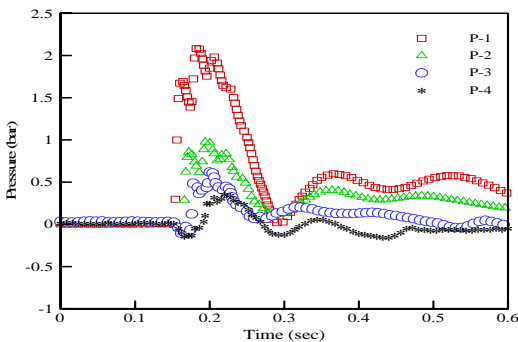


Figure 6: Time histories of pressure at 35°

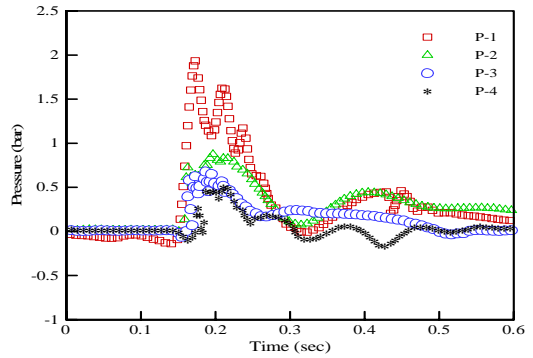


Figure 7: Time histories of pressure at 45°

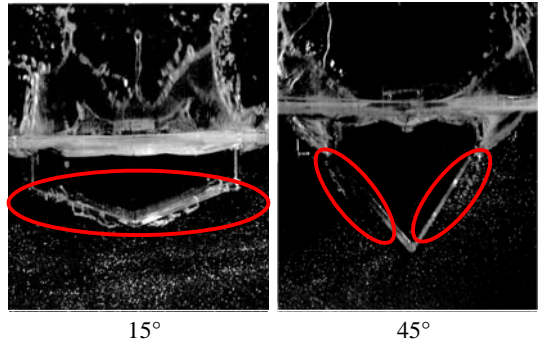


Figure 8: Image of air-pocket at 15° and 45° model

Table 4: Distribution of maximum pressure

	P1 (bar)	P2 (bar)	P3 (bar)	P4 (bar)
15°	2.32	1.13	0.67	0.27
25°	2.03	1.42	0.78	1.03
35°	2.11	1.01	0.64	0.36
45°	1.93	0.87	0.68	0.52

Table 5: List of pressure-time history at water entry

Status	Time (sec)	Pres. (bar)
Before impact with water	0.614	0.03
Impact with water surface	0.616	1.28
At the maximum pressure	0.62	2.32
Stop in the water	0.792	0.38

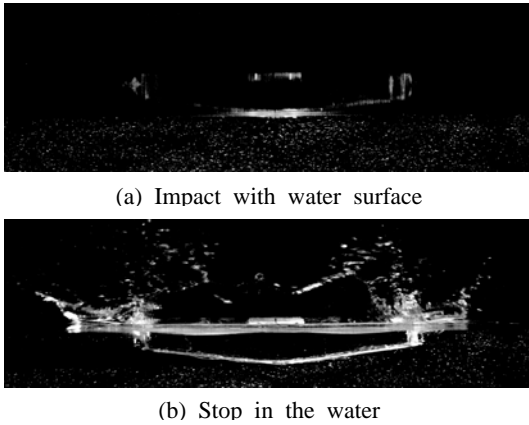


Figure 9: Image of impact at water entry

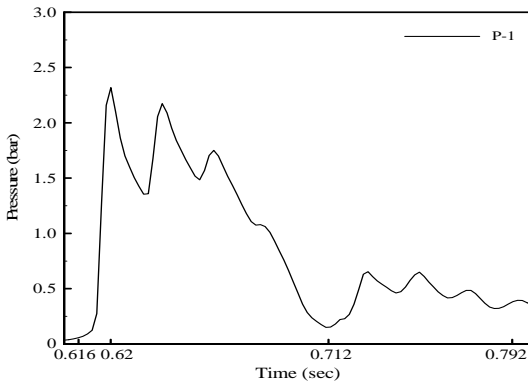


Figure 10: Image of impact at water entry

이와 같은 방법으로 최고압력의 결과를 나타낸 15°와 45°의 충격압력지속시간을 살펴보면 15°에서는 0.092초가 되고 45°에서는 0.172초가 된다. 따라서 썰기형 구조물의 충격압력이 클수록 충격압력의 지속시간은 짧아지며, 충격압력이 작을수록 지속시간은 길어지는 결과를 보였다.

Figure 11과 Figure 12는 접수에서 최고압력 결과를 나타낸 15°와 최저압력의 결과를 나타낸 45°를 대상으로 실험을 통해 획득한 영상을 PIV 해석 프로그램을 통해 속도성분을 벡터성분으로 나타낸 그림이다. 모형 바닥의 경사면부근에서는 수직방향으로 하강하는 유동이 형성되고, 썰기의 기울기에 비례하여 충격압력을 받으면서 X = 40mm영역에서부터 수평으로 이동하는 경향이 나타나고 X = 50mm의 수면에서는 상승하는 유동분포를 보이고

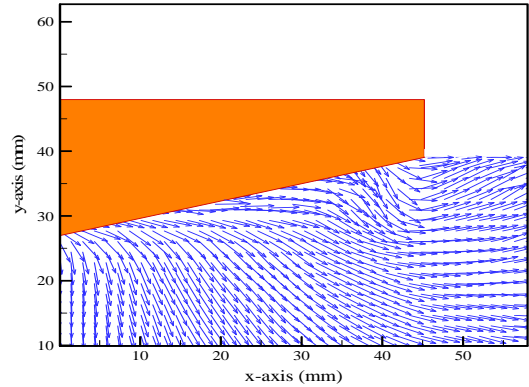


Figure 11: Instantaneous velocity fields during water entry at 15°

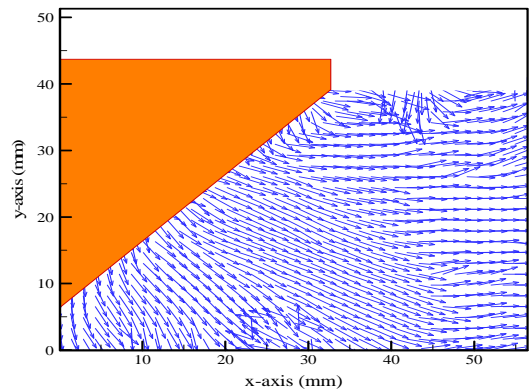


Figure 12: Instantaneous velocity fields during water entry at 45°

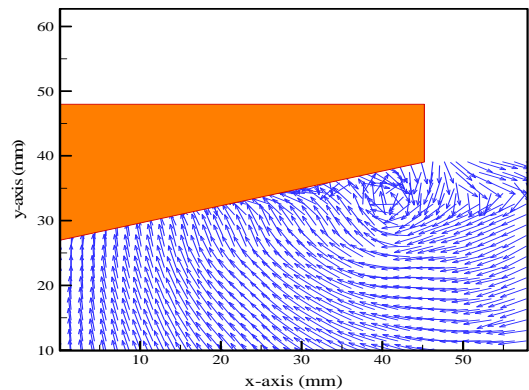
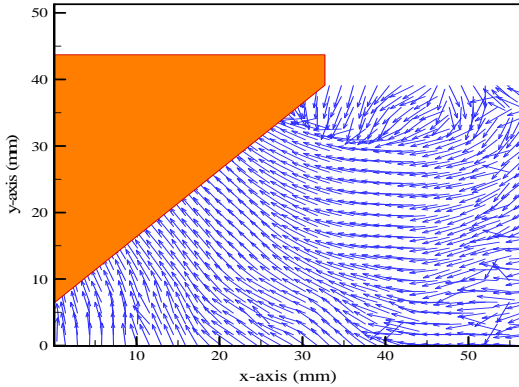


Figure 13: Instantaneous velocity fields during water exit at 15°



**Figure 14:** Instantaneous velocity fields during water exit at 45°

있다. 15°에서는 모형의 바닥면에서 경사면을 따라 수면으로 이동하는 성분을 확인할 수 있으며, 이는 입수하면서 모형의 바닥과 함께 공기가 물속으로 들어와서 에어포켓을 형성하고 다시 빠져나가려는 유동의 변화로 보이며, 이러한 유동은 각도가 증가할수록 바닥의 경사면에서 멀어지며 45°에서는 나타나지 않는다. 이는 에어포켓의 영향으로 입수 시 각도가 커질수록 에어포켓의 영향을 작게 받음으로 인해 충격압력의 감소로 나타나는 것을 의미한다. 또한, 유동장에서 수평속도성분이 작고 분포범위가 넓을수록 충격압력은 감소하며, 모형의 영역에서 벗어난 곳에서는 수직상승하는 속도성분이 작을수록 충격압력은 증가하는 관계를 나타냈다.

Figure 13과 Figure 14는 이수에서 발생하는 속도성분의 벡터분포를 도시한 결과이다. 입수와는 반대로 수직 상승하는 유동을 나타내고 있으며, 모형의 끝단 X = 40mm영역에서 난류가 형성됨을 알 수 있다. 이러한 난류는 입수각이 클수록 작게 나타나면서 줄어드는 경향으로 나타났다. 이수에서 형성되는 유동장은 입수에서 발생한 수직 하강하는 유동과 이수에서 발생한 수직 상승하는 유동이 만나 난류를 형성하며 난류는 모형의 영역에서 벗어난 수면부근에서 발생한다. 또한, 모형의 각도가 증가할수록 수직 상승하는 속도성분이 증가하였고, 양의 성분을 갖는 영역이 넓어졌다.

## 4. 결 론

선저경사각의 각도 변화에 따른 기초연구로 자유낙하실험에 의한 자유수면과 썰기형 모델이 이루는 경사각을 15°, 25°, 35° 및 45°에서 충격압력과 유동특성을 계측하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

자유낙하로 인해 발생하는 충격압력은 입수각도가 증가할수록 압력은 감소하는 결과로 나타났지만 오히려 증가하는 경우도 나타나고 있다. 이러한 이유는 모형과 수면이 접하는 각도에 따라 에어포켓의 형성이 결정되기 때문이다.

충격압력이 클수록 충격압력의 지속시간은 짧아지며, 충격압력이 작을수록 지속시간은 길어지는 결과를 보였다.

각도가 증가할수록 수직 상승하는 속도성분이 증가하였고, 양의 성분을 갖는 영역이 넓어졌다.

본 실험은 모형의 중량과 자유낙하높이가 같을 때 선저경사각의 변화에 따른 충격압력과 유동특성을 알아보려고 하였다. 선저경사각에 따른 모형을 제작하면서 높이와 길이는 같게 제작하였으나, 중량 및 자유낙하방법의 문제로 모형의 폭에 대한 동일성을 갖추지 못하였다. 추후 이러한 기술적 문제를 해결하여 모형의 형상에 따른 충격압력의 영향에 관한 연구가 요구된다.

## 참고문헌

- [1] Park and Chun, “Analysis of flow around a rigid body on water-entry & exit problems”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 36, no. 4, pp. 37-47, 1999.
- [2] Lee, J. and Philip A. W., “Experimental study of the hydro-impact of slamming in a modern racing sailboat”, Journal of Sailboat Technology, article 2010-01, pp. 1-29, 2010.
- [3] Baker, G. S. and Keary, E. M.. Experiments with Full-Sized Machines, British A.R.C.

Reports and Memoranda No 683, pp. 1-10, 1920.

- [4] Von Karman, T., The Impact of Seaplane Floats during Landing, N.A.C.A. TN321 Washington, pp. 1-8, 1929.
- [5] Lee, Rim, Kim, Hea and Kim, "A study on measurement of flare slamming of large container vessel(II) Characteristic analysis of measured slamming pressure", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 44, no. 3, pp. 279-284, 2007.
- [6] Lee and Cho, "A study on PIV measurement of unsteady flow around disk caused by slide type valve quick closing", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety vol. 15, no. 3, pp. 251-256, 2009.
- [7] Park, Lee and Rim, "Whipping analysis of hull girders considering slamming impact loads", Journal of the Society of Naval Architects of Korea vol. 37, no. 3, pp. 99-109, 2000.