

슬래밍에 의한 썰기형 구조물 주위의 유동특성에 관한 실험적 연구

오승진* · 조대환**†

* 목포해양대학교 대학원, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

An Experimental Study on the Flow Characteristics around Wedge Type Structure by Slamming

Seung-Jin Oh* · Dae-Hwan Cho**†

* Graduate school, Faculty of Marine Engineering, Mokpo National Maritime Uni. Mokpo, 530-729, Korea

** Faculty of Marine Engineering, Mokpo National Maritime Uni. Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 본 연구에서는 자유낙하 하는 썰기형 구조물의 슬래밍 충격압력 및 유동특성을 알아보고자 실험을 수행하였다. 유동장의 계측은 2-프레임 그레이레벨 상호상관 PIV 기법을 이용하였으며, 자유낙하 하는 구조물의 충격압력은 압력 계측장비인 Dewetron System 을 이용하였다. 모델과 자유수면간 이루는 각도는 15°, 25°, 35° 및 45°를 적용하였으며 종렬과 자유낙하의 높이에 대해서 다양성을 주어 실험하였다. 속도장은 접수보다 이수에서 빠른 유동특성을 나타냈으며, 접수에서 보다 이수에서 시간이 더 소요됨을 보였으며, 모델 하부에서의 충격압력은 모델의 45도에서 보다, 입수각이 작은 15도와 P1 지점에서 높게 나타났다.

핵심용어 : 슬래밍, 피칭, 자유낙하, 충격압력, 유동장, 접수, 이수

Abstract : This paper presents are experimental investigation to figure out slamming 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 ha been appeared higher values at 15 degrees than 45 degrees, and also at P1.

Key Words : Slamming, Panting, Free fall, Impact pressure, Flow field, Water entry, Water exit

1. 서 론

선체나 해양구조물의 하부가 파도에 의해 수면과의 충격으로 발생하는 슬래밍(Slamming) 현상은 충격력으로 압력변화 및 구조물의 변형을 야기함으로 인해 중요한 연구의 대상이 된다(Park et al., 1999). 이러한 슬래밍 현상은 중역식 라이프보트의 구조기준, 요트 및 레저보트 활주 시 수면과 충격압력에 대한 안전기준 등 지속적인 관련연구가 이루어지고 있다(Lee et al., 2010). 슬래밍 현상은 실험적 연구로 Baker and Keary(1920), von karman(1929)에 의해서 해상비행기가 낙하 시 작용하는 압력의 변화에 대한 선구적인 연구가 수행

되었다. 또한, 천수에서 박스형 구조물이 접수할 경우 나타나는 유동현상을 확인하였고 접수충격에 의해 모델의 바닥에서 접선방향의 흐름이 발생하며 정지상태의 유체에 모델이 접수 시 위쪽으로 상승하는 천수파의 메커니즘을 파악하였다(Kang et al., 2009). 북태평양과 인도양을 항해하는 실선을 대상으로 선수 플레어 슬래밍 압력 계측자료를 토대로 선수 슬래밍 압력의 최대압력 도달시간에 대한 분석결과를 제시하였다(Lee et al., 2007). 본 연구에서는 수면과 접하는 썰기형 모델의 입수각도별 자유낙하실험을 기반으로 충격압력 및 순간속도분포 특성을 고찰하였으며, 선저경사각에 따른 추가 연구의 기초자료를 확보함으로 인해 선박의 대형화 및 고속화로 인해 발생하는 슬래밍에 의한 충격압력을 분석하여 선박의 안전 및 구조물의 설계에서 요구되는 강판의 두께와 형상 결정을 위해 연구하고자 한다.

* First Author : plus1850@mmu.ac.kr, 010-6619-0726

† Corresponding Author : dhcho@mmu.ac.kr, 061-240-7217

2. 실험장치 및 조건

Fig. 1은 자유낙하 하는 썰기형 모델의 유동정보계측을 위해 적용한 PIV 시스템의 개략적인 구성도이며 PIV 시스템에 대해서는 기존의 연구로 자세히 설명되어있다(Lee et al., 2009). 실험에 사용한 광원은 직진성과 반사성이 우수한 500 mW의 광다이오드를 집적화한 2차원 광원을 계측영역에 조사하여 Fig. 2와 같이 실험하였다.

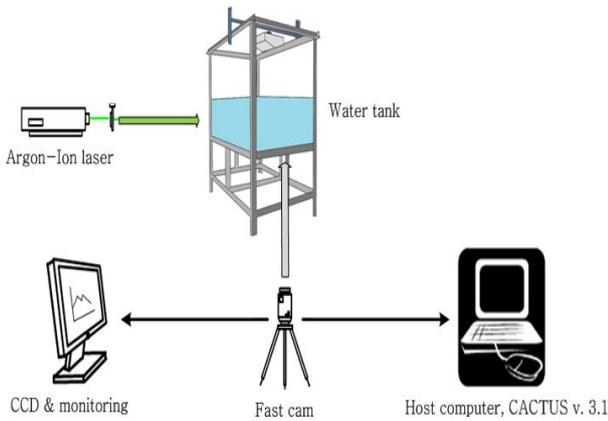


Fig. 1. Schematic arrangement of PIV system.

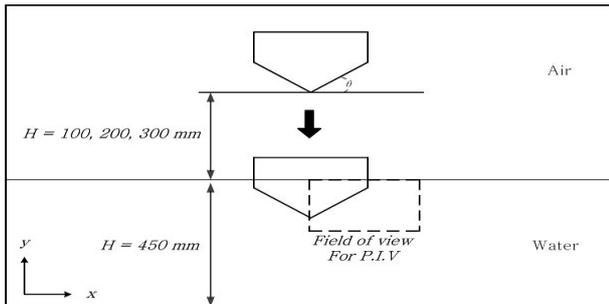


Fig. 2. Schematic view of the trimming model and interpretation area.

실험의 수행을 위해 제작된 모형의 입수각도 θ 는 모형이 자유낙하 후 수면과 처음으로 접하는 각도이다. 제작된 모형의 각도(θ)는 자유수면을 기준으로 15°, 25°, 35° 및 45°를 적용하였으며 모형의 자유낙하높이는 100, 200 및 300 mm에서 수행하였다. 또한, 투명 아크릴로 제작된 모형의 중량은 1.5, 1.8 및 2.0 kg이다. 자유낙하 시 모형이 흔들리지 않고 수면에 낙하 하도록 평균 10회 이상의 자유낙하 실험을 하면서 고속카메라로 촬영한 후 영상을 확인하여 정확히 수직으로 낙하한 실험결과와 데이터로 분석하였다. 슬래밍 현상의 재현을 위해 실시한 실험 Case는 모형의 입수각도, 중량 및

자유낙하높이의 다양성에 따라 총 36가지의 Case로 분리하여 충격압력실험을 하였으며, 충격압력의 결과를 바탕으로 가시화 실험을 하였고 Case는 중량과 자유낙하높이의 최소와 최대를 선택해서 총 18가지로 실험하여 속도장을 계측하였다. 유동장 계측을 위한 실험조건은 Table 1과 같으며 자유낙하 하는 모형을 점수(Water entry)와 이수(Water exit)로 구분하였으며, 유동추적에 사용된 고속카메라의 해상도는 초당 125프레임으로 촬영하여 유동정보를 계측하였다.

Table 1. Experimental condition

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

Fig. 3은 모형의 형상과 압력센서의 부착위치 및 전자석을 이용한 자유낙하를 위해 모형의 길이방향 중앙에 연결부위(Magnetic connect)를 설치한 것을 도시한 것이다. 압력획득을 위해 모형의 길이방향 끝단 모서리로부터 50 mm 간격으로 모형의 좌측면 중앙으로 부터 P1, P2, P3 및 P4의 센서를 설치하여 충격압력을 계측하였으며 발생하는 충격압력은 모형의 대칭형상으로 인해 한쪽면의 압력만을 획득하였으며 실험에서 요구하는 충격압력과 유동장의 해석조건에 충분하다.

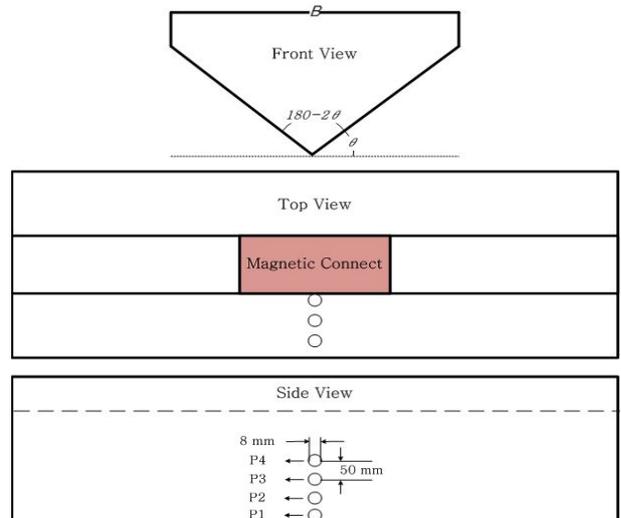


Fig. 3. Schematic configuration and location of pressure sensors on the model.

Table 2는 압력계측장치의 제원으로 초당 10,000개의 샘플링이 가능하며 압력은 5 bar까지 계측이 가능하고 압력센서에서 획득한 값은 변환기를 통하여 출력 시 전압차를 시계열로 획득된다.

Table 2. Pressure acquisition system specification

Items	Unit	Value
Sampling Freq.	kHz	10
Output	Volt	± 5
Max. Deviation	mmV	± 2 (± 0.00015 kgf/cm ²)
Resolution	μV	40 (0.000003 kgf/cm ²)

3. 실험결과 및 고찰

슬래밍 현상의 재현실험을 통해 획득한 충격압력은 전체의 실험 경우 중에서 Fig. 4와 같이 15°의 입수각을 갖는 2.0 kg의 썰기형 구조물을 300 mm에서 자유낙하 했을 때 최고 압력분포를 나타냈으며, 최저압력분포를 나타낸 경우는 Fig. 5와 같이 35°의 입수각을 갖는 1.5 kg 중량의 모형을 100 mm에서 자유낙하 시켰을 때이다.

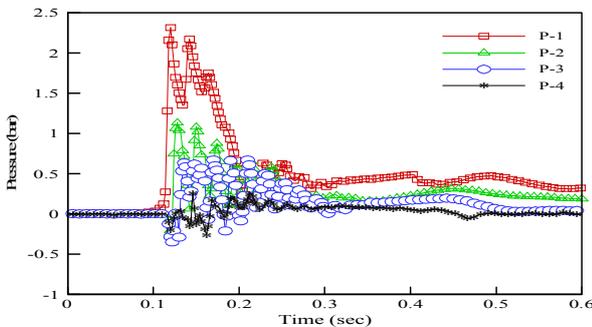


Fig. 4. Time histories of pressure at 15°-300 mm-2.0 kg.

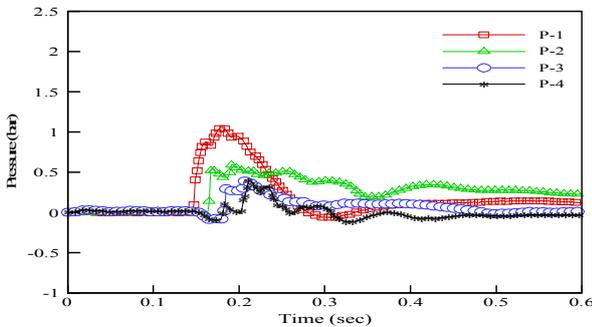


Fig. 5. Time histories of pressure at 35°-100 mm-1.5 kg.

각 실험에서 나타난 충격압력의 결과를 통해 입수각에 따른 최고압력분포를 분석했을 때 나타난 그림은 Fig. 6~ Fig. 9와 같다. Fig. 6은 입수각이 가장 작은 15°의 모형을 대상으로

로 최고압력을 비교해서 나타낸 것이다. P1의 압력값은 300 mm-2.0 kg에서 2.32 bar의 압력으로 전체 Case에서 가장 높은 압력분포로 나타났고 가장 낮은 압력분포를 보인 경우는 100 mm-1.8 kg에서 1.43 bar로 나타냈다. P2에서도 300 mm-2.0 kg에서 1.13 bar의 계측결과로 가장 높은 압력을 분포하였으며, 100 mm-1.5 kg에서 0.77 bar의 압력으로 제일 낮은 압력결과를 나타냈다. P3에서는 200 mm-1.8 kg에서 0.70 bar의 계측결과로 가장 높게 나타났으며, 100 mm-2.0 kg에서 0.43 bar로 가장 낮게 나타났다. 그리고 수면과 접촉하는 위치가 가장 먼 곳에 위치한 P4의 압력계측결과로는 200 mm-1.5 kg에서 0.60 bar로 가장 높게 나타났으며, 100 mm-1.5 kg에서 0.10 bar로 가장 낮은 압력의 결과를 나타냈다.

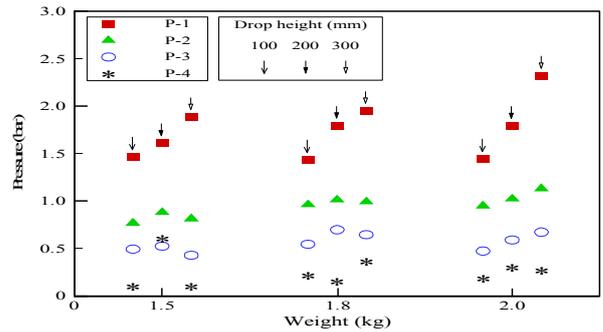


Fig. 6. Peak pressure distribution at 15°.

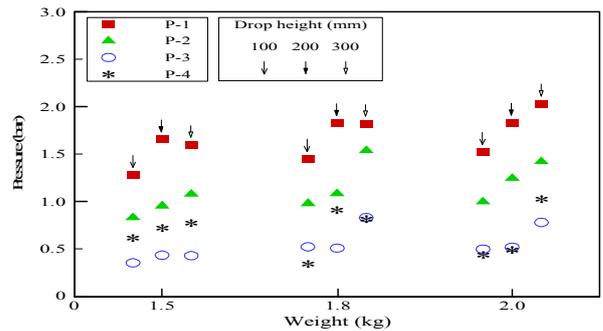


Fig. 7. Peak pressure distribution at 25°.

Fig. 7은 25°에서 나타난 최고압력분포이다. 충격압력이 가장 높게 나타난 위치인 P1을 기준으로 300 mm-2.0 kg에서 가장 높은 압력분포를 보이며, 100 mm-1.5 kg에서 가장 낮은 압력결과를 나타냈다. 각도가 15°에서 25°로 10° 증가했을 때 최대압력은 약 13% 감소하고 최소압력은 약 10% 감소하는 결과를 나타냈다.

Fig. 8은 35°의 썰기형 모델을 대상으로 실험한 최고압력분포를 나타낸 그림이다. P1위치는 300 mm-2.0 kg에서 2.11 bar로 가장 높은 압력결과로 나타났으며 100 mm-1.5 kg에서 1.06 bar로 가장 낮은 압력결과로 나타났으며 이는 전체 Case

중 가장 낮은 압력결과를 나타냈다. 또한, 25°와 비교했을 때 최대압력은 약 4% 감소했고 최소압력은 약 18% 감소했다.

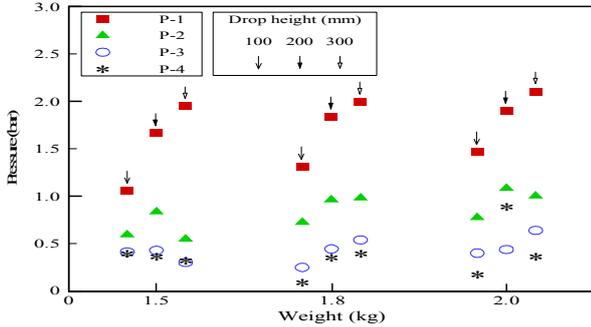


Fig. 8. Peak pressure distribution at 35°.

Fig. 9는 45°의 입수각을 갖는 모형에서 나타난 최고압력 데이터를 나타낸 그림이다. 실험의 압력분포에서 전체적인 충격압력이 현저히 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 입수각의 증가로 인해 물속으로 유입되는 공기의 양이 감소하며 유입된 공기는 경사면을 따라 빠르게 공기 중으로 떠오르기 때문이다.

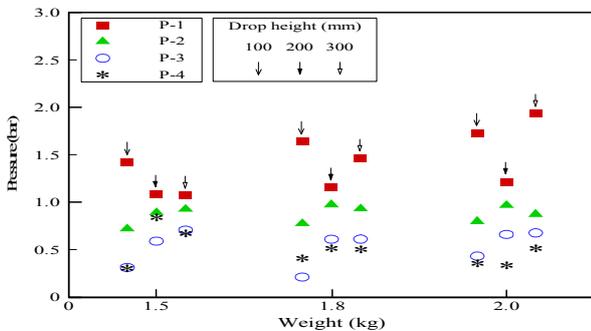


Fig. 9. Peak pressure distribution at 45°.

최고압력분포의 경향은 입수각도가 10°씩 증가할수록 충격압력은 약 7.3%의 압력감소율을 보이고 있다. 특히, 15°에서 25°로 각도 변화를 줄 때 압력감소율이 약 11.5%로 가장 크게 나타났다. 이처럼 슬래밍 현상의 충격압력은 입수각도가 증가할수록 압력은 감소하는 결과로 나타났지만 오히려 증가하는 경우도 나타나고 있다. 이러한 이유는 모형과 수면이 접하는 시간과 중량 및 형성되는 에어포켓의 크기와 두께에 따라 결정되기 때문이다.

충격압력실험으로 나타난 결과를 바탕으로 충격압력이 가장 높게 나타난 Case(15°-300 mm-2.0 kg)와 가장 낮게 나타난 Case(35°-100 mm-1.5 kg)를 비교하여 속도분포를 나타냈다.

Fig. 10은 충격압력이 가장 높게 나타난 15°의 입수각도를 갖는 2.0 kg 중량의 썰기형 모형을 300 mm 높이에서 자유 낙하시켜 슬래밍 현상을 재현한 실험을 고속카메라로 촬영하

여 연속 사진으로 나타냈고 모형의 충격으로 발생하는 유동을 가시화 하였다. 그리고 충격압력획득 시 이처럼 영상을 확인하면서 자유수면과 이루는 모형의 입수각이 정확하도록 반복실험을 하였다.

Fig. 11은 최소충격압력결과를 나타낸 35°의 입수각을 갖는 1.5 kg 중량의 모형을 100 mm 높이에서 자유낙하 시킨 실험의 연속사진이다.

Fig. 10에서 나타난 유동 가시화의 사진을 보면 공기 중에서 수면으로 자유낙하 하는 실험체가 수면과 접촉하여 수면 아래 방향으로 계속 진행하다가 물속에서 정지한 순간까지의 접수상태를 나타냈다. (a)는 공기 중에서 낙하하고 있는 모형의 상태를 보여주며 (b)는 자유표면과 모형이 충돌하는 순간을 나타냈고 (c)~(g)까지는 모형이 물속에서 아래쪽으로 진행하고 있는 순간을 보여준다. 마지막 사진인 (h)는 모형이 물속으로 더 이상 진행하지 못하고 정지한 순간이다.

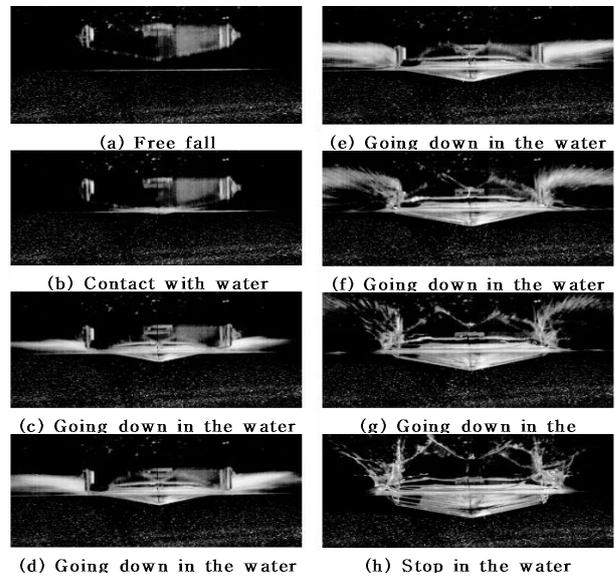


Fig. 10. Visualization by high speed camera (Water entry at maximum pressure).

Fig. 11은 충격압력이 제일 낮게 나타난 Case의 자유낙하 실험을 고속카메라로 촬영한 영상의 연속사진이다. Fig. 11도 자유낙하 하여 물속에서 정지하기까지의 상태를 나타내고 있으며, Fig. 10과 비교해 보면 충격압력으로 인한 수면과의 충돌로 비산하는 물보라의 크기와 발생 시간이 낮게 나타나고 있다. 또한, 수면과 최초로 충돌한 35°의 경우 15°에 비해 에어포켓의 두께와 크기가 작게 형성되며 이러한 현상으로 인해 충격압력의 크기가 변화되는 것으로 추정한다. 15°의 경우에는 에어포켓의 형성이 빨리되고 35°에 비해 물보라의 크기가 훨씬 크게 나타나며 이러한 현상은 기존의 제시한 연구결과와 일치한다(Park et al., 2009)

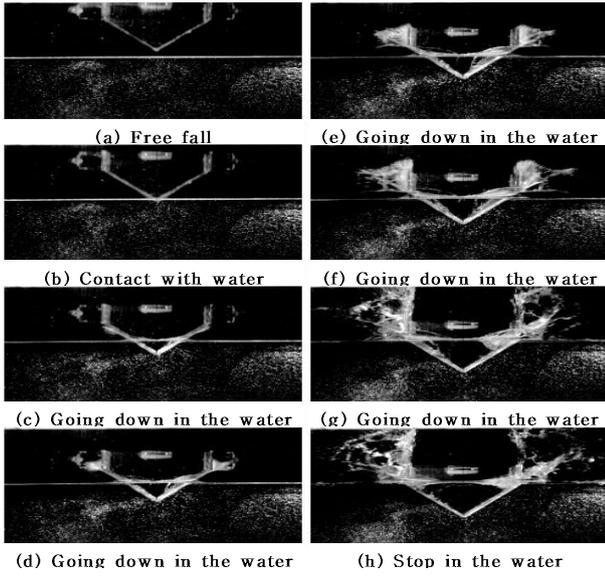


Fig. 11. Visualization by high speed camera(Water entry at minimum pressure).

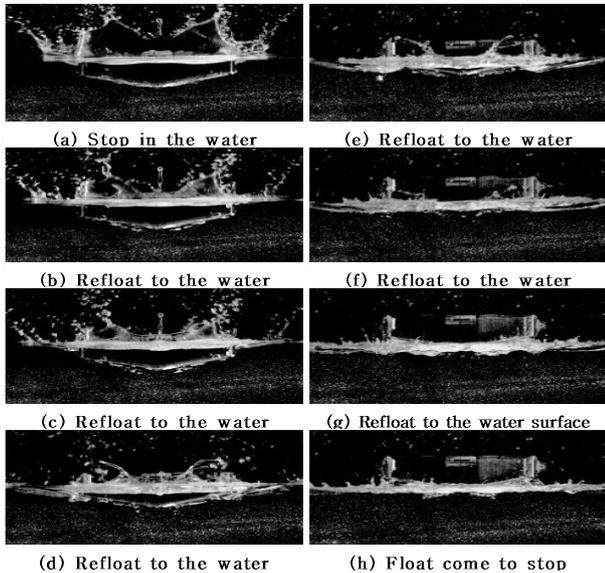


Fig. 12. Visualization by high speed camera(Water exit at maximum pressure).

Fig. 12는 최대압력을 나타낸 Case에서 접수를 완료하고 다시 떠오르는 이수과정을 촬영한 영상을 연속사진으로 나타낸 것이다. Fig. 12의 (a)과정은 접수의 한계점으로 모형이 정지한 영상이며 부력에 의해 다시 위로 떠오르기 위해 준비하는 단계이다. 이 단계를 지나 부력 및 복원력에 의해 격리되었던 물이 다시 모형과 부딪히며 물속에 갇혔던 공기가 압축되어 마지막으로 갇힌 공기는 수면으로 상승하게 되고 이와 함께 모형도 수면으로 떠오르게 되는 과정을 (b)~(g)의 사진에서 볼 수 있으며, 떠오르는 과정을 마치고 다시

물속으로 들어가기 전의 사진을 (h)에서 볼 수 있다.

박 등(Park et al., 1999)은 강체주위에서 접수와 이수문제에 이루어지는 유동해석에서 수치해석을 통해 강체에 작용하는 유체충격력을 계산하였다. 또한, 접수와 이수에서 발생하는 강체의 상승속도를 비교했을 때 이수에 대해 자세한 자료를 얻지 못해 자유수면 밖으로 나가는 속도를 제한하였지만, 본 실험에서는 이러한 문제점을 해결 하였으며 접수보다 이수의 시간이 더 지체되는 결과를 얻었다.

Fig. 13과 Fig. 14는 접수에서 나타난 최고압력과 최저압력의 결과를 PIV 해석 프로그램을 통해 수직방향성분의 등분포도로 나타낸 그림이다. 낙하로 발생하는 수직 하강하는 힘에 의해 모형의 영역에서 음의 방향성분이 분포하고 있으며, Fig. 13이 Fig. 14보다 음의 방향속도성분 분포 범위가 넓게 나타나있다. Fig. 13에서는 X=45영역에서 음의 성분이 나타나 있으나, Fig. 14에서는 X=30영역에서 나타나있음을 볼 수 있다. 모형의 경사면이 15°인 Fig. 13에서 모형의 경사면 주위 X=17~27영역에서 나타난 양의 성분이 분한 구간은 접수 중 발생한 에어포켓이 경사면을 따라 수면으로 상승하는 유동이 형성됨을 나타내며, 이는 Fig. 14에서는 나타나지 않고 있다.

수면과 접촉하는 경사면이 클수록 에어포켓 형성에 영향을 미치며 이러한 에어포켓은 충격압력의 크기와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

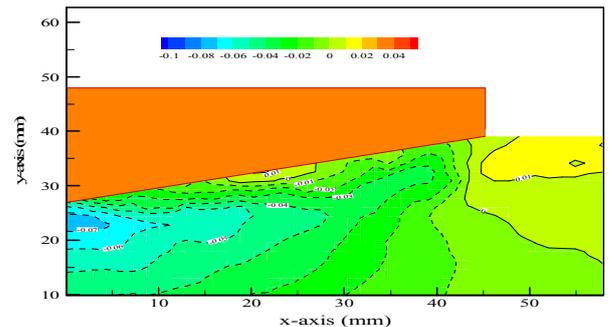


Fig. 13. Results of v-velocity fields during water entry at max' pressure.

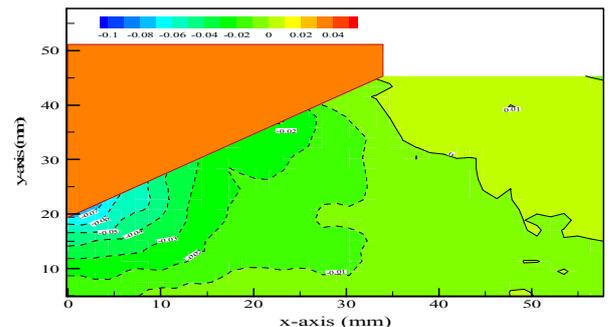


Fig. 14. Results of v-velocity fields during water entry at mini' pressure.

Fig. 15와 16은 이수 시에 발생하는 수직방향 성분에 대한 등분포도를 나타낸 것이다. 양의 방향과 음의 방향 분포가 접수와는 반대로 분포하고 있다. 충격압력이 강한 Fig. 13과 15에서는 충격압력이 낮은 Fig. 14와 16보다 모형과 근접한 부근에서 등분포도의 밀도가 높게 나타나 있으며, 전체적으로 접수보다 이수에서 높은 속도분포를 보였다.

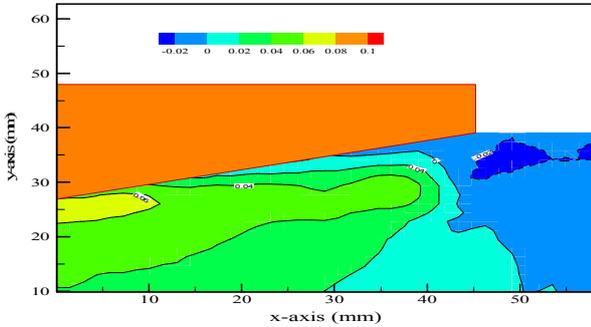


Fig. 15. Results of v-velocity fields during water exit at max' pressure.

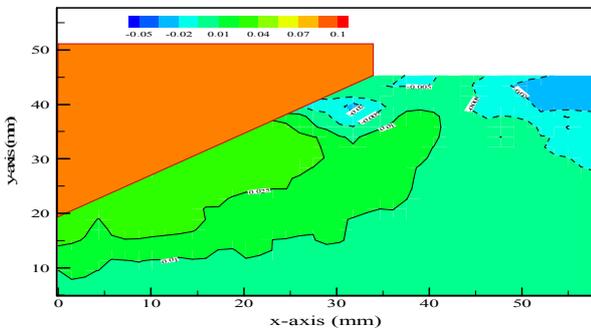


Fig. 16. Results of v-velocity fields during water exit at mini' pressure.

4. 결론

선저경사각에 따른 기초연구로 슬래밍 충격압력과 유동 특성을 계측하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

췌기형 모형에서 충격압력이 클수록 에어포켓의 형성 또한 비례해서 커지며, 이는 모형과 수면이 접하는 경사각의 각도가 커질수록 충격압력이 작아지며, 에어포켓의 영향을 받는다.

동일입자추적을 통한 유동특성은 접수보다 이수에서 모델의 경사각에 관계없이 높은 속도분포를 보였다.

고속카메라를 이용한 시간-영상 분석을 통해 접수보다 이수에서 시간이 더 소요되는 결과를 나타냈다.

본 연구에서는 다양한 해양파의 유입에 따른 유체동역학적 충격하중에 대해 확대 해석하는 데는 한계를 가지고 있

어 이에 대한 단계적인 추가 연구가 필요하며 선저경사각에 따른 자유 또는 강제낙하에 대한 점진적 연구가 요구된다.

참고 문헌

- [1] Baker, G. S. and E. M. Keary(1920). Experiments with Full-Sized Machines, British A.R.C. Reports and Memoranda No 683, pp. 1-10.
- [2] Kang, H. D, S. H. Oh and S. H. Kwon(2009), An Experimental study on shallow water effect in slamming, Journal of the Society of Naval Architects of Korea , Vol. 23, No. 1, pp. 60-66.
- [3] Lee, C. J. and D. H. Cho(2009), 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.
- [4] Lee, J and A. W. Philip(2010), Experimental study of the hydro-impact of slamming in a modern racing sailboat, Journal of Sailboat Technology, article 2010-01, pp. 1-29
- [5] Lee, T. K, C. W. Rim, Y. N. Kim, J. H. Heo and B. H. Kim(2007), 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.
- [6] Park, I. R. and H. H. Chun(1999), 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.
- [7] Park, J. S., S. H. Oh, S. H. Kown and J. Y. Chung(2009), A study on slamming impact pressure, Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 23, No. 1, pp. 67-73.
- [8] von Karman, T.(1929), The Impact of Seaplane Floats during Landing, N.A.C.A. TN321 Washington, pp. 1-8.

원고접수일 : 2013년 03월 04일

원고수정일 : 2013년 03월 22일

게재확정일 : 2013년 04월 25일