

직사각형 해양구조물의 자유낙하 슬래밍 충격압력 및 유동특성에 관한 실험적 연구

오승진* · 김옥석**† · 이경우*** · 조대환****

* 목포해양대학교 기관시스템공학과 박사과정, ** 서해지방해양경찰청
*** 목포해양대학교 조선해양공학과, **** 목포해양대학교 기관시스템공학부

An Experimental Study on Slamming Impact Pressure and Flow Characteristics by Free Fall of Rectangular Marine Structure

Seung-Jin Oh* · Ok-Sok Gim**† · Gyoung-Woo Lee*** · Dae-Wan Cho****

* Graduate school, Faculty of Marine Engineering, Mokpo National Maritime Uni, Mokpo, 530-729, Korea
** Dept. of Guard and Safety, West Regional Headquarters, Korea Coast Guard, Mokpo, 530-420, Korea
*** Dept. of Naval Architecture & Ocean 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 자유낙하하는 직사각형 해양구조물(800×250×50 mm)의 슬래밍 충격압력 및 유동특성을 알아보고자 실험을 수행하였다. 유동장의 계측은 2-프레임 그레이레벨 상호상관 PIV기법을 이용하였으며, 자유낙하하는 모델의 충격압력은 압력계측장비(Dewatron)를 이용하였다. 모델과 자유수면간 이루는 각은 10°와 20°를 적용하였다. 속도장은 접수보다 이수에서 빠른 유동특성을 나타냈다. 모델 하부에서 충격압력이 가장 높은 지점인 P2 지점에서 10°보다 경사각이 큰 20°에서 약 6% 상승하였다.

핵심용어 : 슬래밍, 자유낙하, 충격압력, 유동장, 접수, 이수

Abstract : This paper presents an experimental investigation to figure out slamming impact pressure and flow characteristics of a rectangular Marine structure(800×250×50mm) 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 the free fall model by a pressure acquisition system(Dewatron). The angles between a model and the free surface are adapted 10° and 20° respectively. Velocity field of water exit has higher better than water entry. The highest point, P2 of impact pressure under the bottom of the model has been appeared about 6% higher values at 20 degrees than 10 degrees.

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

1. 서 론

선체나 해양구조물의 하부가 파도에 의해 수면과 충격으로 발생하는 슬래밍(Slamming) 현상은 충격력, 압력변화 및 구조물 변형을 야기하여 중요한 연구의 대상이다(박과 전, 1999). 중력식 라이프보트의 구조기준, 요트 및 레저보트 활주수 수면과 충격압력에 대한 안전기준 등 지속적인 관련연구가 이루어지고 있다(Lee and Philip, 2010; Manganeli et al., 2003).

충격압력은 대형 선박의 경우 선수에서 선체길이의 1/8 ~ 1/5 정도 후방 선저의 평평한 부분에서 크게 받고 발라스트 항해시 선미기관에 심하게 작용한다. 활주형 고속선의 경우에는 선수에 파를 받으며 항주하는 경우 선수 선저부에 격심한 충격을 받아서 선체는 짧은 주기로 급격한 진동을 하게 된다. 특히 발라스트 항해시 흘수가 낮아서 슬래밍이 심하면 선수 선저부가 과도한 응력을 받아서 손상을 입는 경우가 있다. 이러한 손상을 예방하기 위해서는 선속을 낮추거나 파를 받는 각도에 변화를 주어 상하동요와 종동요 주기의 변화를 통해 감소시킨다(박과 전, 1999).

* 대표저자 : 정희원, plus1850@mmu.ac.kr, 010-6619-0726
† 교신저자 : 정희원, domingo@mmu.ac.kr, 010-2614-3001

슬래밍현상은 실험적 연구로 Baker and Keary(1920), Thompson(1928), Von Karman(1929)에 의해서 해상비행기의 낙하시 작용하는 압력의 변화에 대한 선구적인 연구가 수행되었다. 강 등(2009)은 천수에서 박스형 구조물이 접수할 경우 나타나는 유동현상을 확인하였다. 접수충격에 의해 모델의 바닥에 접선방향의 흐름이 발생하며 정지상태의 유체에 모델이 접수(Water entry)시 위쪽으로 상승하는 천수과의 메커니즘을 파악하였다. 실선에서의 슬래밍 압력에 대한 연구로는 이 등(2007)이 북태평양과 인도양을 항해하는 대형 컨테이너선의 선수 플레이어 슬래밍 압력 계측자료를 토대로 선수 슬래밍 압력의 최대압력 도달시간에 대한 분석결과를 제시하였다. 수치해석에 의한 연구로는 박 등(2000)이 대파고 파랑 중에서 슬래밍 충격에 대한 동적 탄성응답 해석법을 개발하여 검증을 위해 V형 단면 선박과 S-175 선형 모델을 대상으로 수치해석을 수행하여 비교분석 결과를 제시하였다. 염과 윤(2008)은 선저경사각을 가진 쇄기형 구조물의 접수시 발생하는 슬래밍 현상에 대해서 수치해석을 수행해 경계요소법 결과와 비교하였다.

국내의 연구동향을 살펴본 결과, 자유낙하 또는 강제낙하시 모델의 곡률과 높이에 대한 연구가 주로 수행되었다. 실제해상에서 슬래밍현상은 선체하부에 큰 충격압력으로 작용하여 선체구조, 진동 및 조종성과 침로안정성 등에 영향을 주어 다양한 측면의 연구의 필요성을 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 자유낙하에 의한 충격압력을 받는 직사각형 모델하부의 국부압력을 계측하고 이로 인한 접수 및 이수시 모델주변의 유동특성에 대해 이해를 높이고자 한다. 또한, 선저경사각에 따른 추가 연구의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 조건

Fig. 1은 자유낙하하는 직사각형 모델의 유동정보 계측을 위해 적용한 PIV시스템의 개략적인 구성도이다. PIV시스템에 대해서는 이와 조(2009)에 자세히 설명되어있다. 광원은 직진성과 반사성이 우수한 500 mW의 광다이오드를 집적화한 2차원 광원을 계측영역에 조사하여 Fig. 2와 같이 $1.5^L \times 1.0^B \times 1.0^D$ m³의 수조에서 실험을 수행하였다. 고속카메라(FASTCAM-X 128PCI, Nikon)는 1280×1024 픽셀의 해상도를 지원하며 컴퓨터의 이미지 획득장치와 연결하여 초당 125프레임의 유동정보를 획득하였다. 동일입자추적을 위한 상용프로그램(CACTUS v3.1)은 두 프레임의 음영 레벨의 상호상관계수로 동일입자를 판별하여 입자의 변위를 구하여 벡터, 와도 및 응력을 구하는 알고리즘을 이용하여 유동정보를 획득하였다. Fig. 2와 같이 모델의 크기는 $800^L \times 250^B \times 50^H$

mm로 아크릴계 소재를 사용하여 직사각형으로 설계 제작하였으며 모델의 무게는 2.5 kg이다. 수면과 접하는 모델의 한쪽 끝단 하부에 회전축을 설치하여 자유낙하시 측면으로 흔들리지 않고 회전축을 따라 수면에 낙하하도록 고정시켰다. 모델의 낙하각도는 회전축에서 자유수면과 모델바닥이 이루는 각을 기준으로 10°와 20°를 적용하였다. 신 등(2010)에 따르면 물체가 수면에 자유낙하시 최대 압력값은 근사적으로 충격속도의 제곱으로 증가하고, 모델의 곡률반경에 의한 것보다는 입수각에 보다 영향을 많이 받는다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 모델의 자유낙하 높이의 변화에 대한 유동특성과 압력값의 차를 알아보고자 10°와 배각인 20°를 실험조건으로 선정하였다. 속도장을 위한 계측 영역으로는 자유수면과 모델의 끝단 P1 지점을 중심으로 유동변화를 계측하였다. 자유수면과 수조바닥과의 높이는 강 등(2009)에서 제시한 천수역($h/L < 1$)의 영향을 벗어난 $h=250$ mm($h/L=1.25$)를 적용하였다.

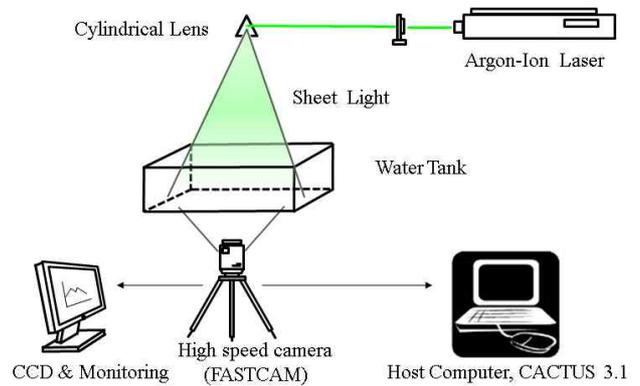


Fig. 1. Schematic arrangement of PIV system.

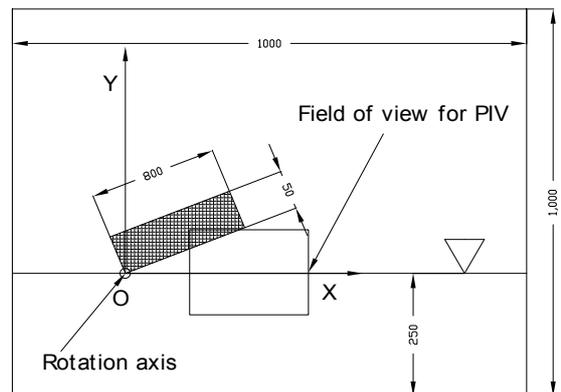


Fig. 2. Coordinate system and model setup in the water tank(Unit : mm).

실험조건으로 수조 내 유체의 온도는 Table 1과 같이 17 °C 전후의 청수를 사용하였다. 유동의 추적을 위한 PVC입자는 비중이 1.02로 균일한 크기를 선별하여 유체에 삽입하였다. 자유낙하하는 모델이 자유수면에 접수(Water entry) 및 이수(Water exit)시 유동추적은 고속카메라를 이용하였으며 해상도는 초당 125프레임으로 촬영하여 유동정보를 계측하였다. Fig. 3은 압력 센서의 부착위치를 도시한 것이다. 길이방향의 끝단부터 200 mm 간격으로 중앙에 설치하여 자유낙하시 충격압력을 계측하였다. Table 2는 압력 계측 장치의 제원으로 초당 10,000개의 샘플링이 가능하며 압력은 0.15 kgf/cm² 까지 계측이 가능하다. 압력센서에서 받은 값은 변환기를 통하여 출력시 전압차를 시계열로 획득된다.

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	1280×1024

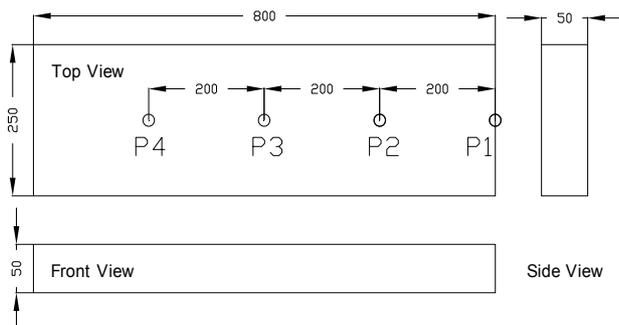


Fig. 3. Schematic configuration and location of pressure sensors on the model.

Table 2. Pressure acquisition system specification

Items	Unit	Value
Sampling Freq.	kHz	10
Range	mmH ₂ O	± 1500 (0.15 kgf/cm ²)
Output	Volt	± 5
Max. Deviation	mmV	± 2 (± 0.00015 kgf/cm ²)
Resolution	μ V	40 (0.000003 kgf/cm ²)

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 모델이 자유수면과 이루는 경사각 10°에서 자유낙하시킨 경우로 접수(Water entry)시 유동분포를 도시한 것이다. 모델 하부에서는 수직 하강하는 유동이 형성되고 있으며, 자유수면에서는 모델과 근접한 X=40-80 mm 영역에서는 수평축으로 이동하다가 X=80 mm를 지나면서 상승하는 유동분포를 보이고 있다. Fig. 5는 모델이 자유수면과 이루는 경사각 10°에서 자유낙하시킨 경우로 이수(Water exit)시 유동분포를 도시한 것이다. 자유낙하된 모델이 부력에 의해 상승시간 약 0.08초 동안 시간 평균한 결과이다. 모델의 수직하부에서는 Fig. 4와 상반된 수직상승하는 벡터분포를 보

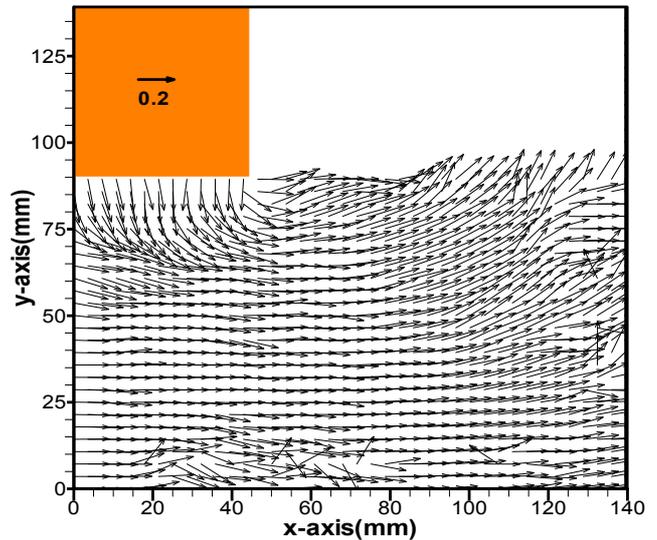


Fig. 4. Velocity field during water entry at 10-deg.

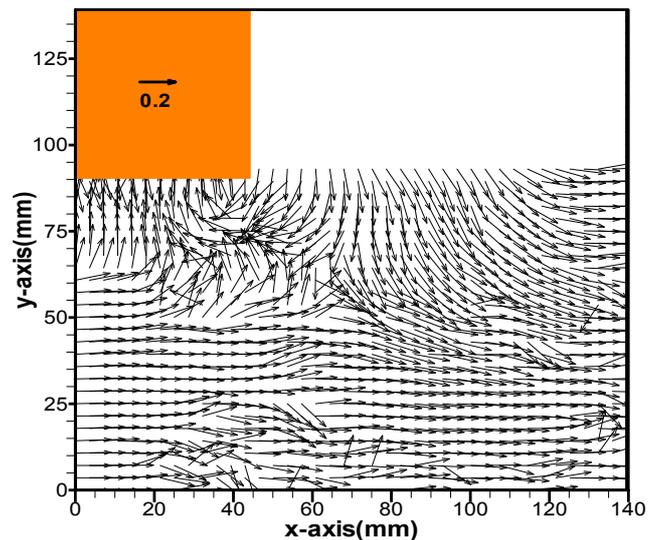


Fig. 5. Velocity field during water exit at 10-deg.

이고 있다. 이와 더불어 모델을 벗어난 자유수면에서는 $X=40-80$ mm까지는 수직하방으로 벡터분포를 보이고, $X=80$ mm 이후에서는 수평축으로 에너지의 이동에 의해 일정한 기울기를 가지는 속도분포가 나타났다.

Fig. 6은 모델이 자유수면과 이루는 경사각 20° 에서 자유낙하시킨 경우로 접수시 유동분포를 도시한 것이다. 유동의 변화양상은 Fig. 4와 유사한 경향을 보이고 있다. 모델의 하부에서는 수직 하강하는 벡터분포를 보이고 있다. 자유수면에서 유동의 변화도 Fig. 4에서 보다 동적인 분포가 강하게 나타나고 있다. 상승하는 벡터분포가 모델 끝지점에서부터 형성되어 하류로 발달하고 있다. 마찬가지로 Fig. 7도 모델이 자유수면과 이루는 경사각 20° 에서 자유낙하시킨 경우로

이수시 벡터분포를 도시한 것이다. 유동이 복잡한 양상을 보이며 모델의 수직 하부에서는 역시 수직 상승하는 벡터분포가 나타났다. 자유수면에서도 일정 기울기를 가진 수직 하강하는 벡터분포를 보이고 있다. 벡터장의 가운데에서 수평축 반대방향으로 모델하부로 이동하는 성분이 넓게 분포하는 특성을 보이고 있다.

Fig. 8은 경사각 10° 에서 자유낙하로 접수시 수직방향 성분의 대한 등분포도이다. 실선과 점선은 양의 방향과 음의 방향을 의미한다. 모델의 수직하부에서 음의 방향으로 조밀(稠密)한 등분포도가 나타났다. 이에 반해 모델을 벗어난 $X=40$ mm 우측에는 양의 방향에 대한 등분포가 나타났다. 이와는 반대로 Fig. 9는 경사각 10° 에서 자유낙하 후 이수

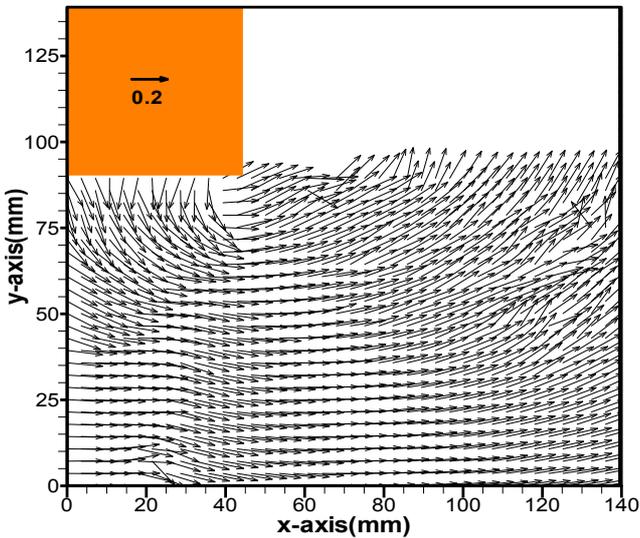


Fig. 6. Velocity field during water entry at 20-deg.

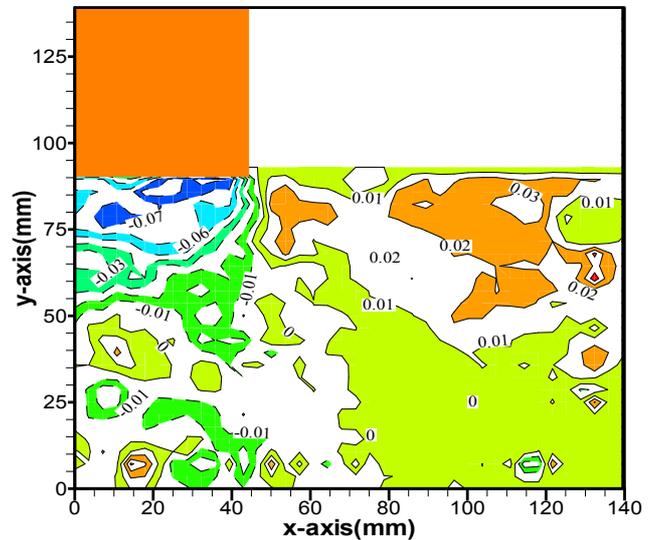


Fig. 8. V-component during water entry at 10-deg.

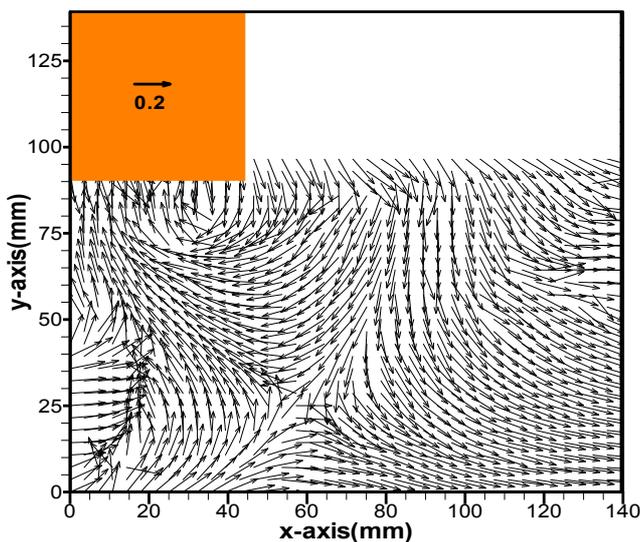


Fig. 7. Velocity field during water exit at 20-deg.

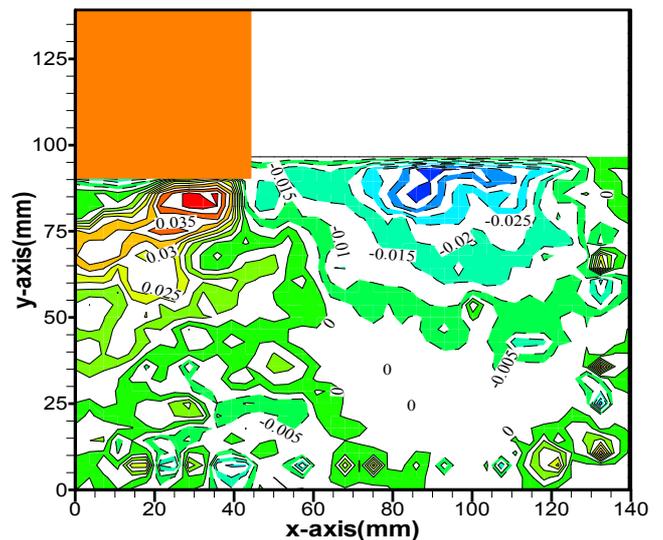


Fig. 9. V-component during water exit at 10-deg.

될 때의 수직방향 성분에 대한 등분포도를 나타낸 것이다. 양의 방향과 음의 방향의 분포가 Fig. 8과 반대로 분포하고 있다. 모델과 근접한 부근에서 등분포도의 밀도가 높게 나타나며 강도는 모델의 끝지점(40, 75)에서 강한 양의 성분을 보이고 있다. 또한 자유수면 부근(85, 77)에서 음의 성분이 강한 분포를 나타냈다.

Fig. 10은 경사각 20°에서 자유낙하로 인한 접수시 수직방향의 성분에 대한 등분포도를 나타낸 것이다. 수직 낙하속도가 10°에 비해 증가한 경우로 모델의 수직 하방에 분포하는 수직방향의 음의 수직성분 분포가 Fig. 8에 비해 보다 넓게 분포하며 강도도 강한 분포를 나타냈다. 양의 등분포를 형성하는 X=40 mm 우측에서도 강도가 10°의 경우에 비해 큰 분포를 나타냈다. Fig. 11은 경사각 20°에서 자유낙하로

인한 이수시 수직방향 성분에 대한 등분포도를 도시한 결과이다. 자유수면 부근에서는 유선형의 음의 성분분포를 나타내는 등분포의 밀도가 높게 나타났다. 모델 하부에서 강한 양의 분포는 유체 점성과 부력에 의한 강한 양의 유동구조가 형성되고 있다.

Table 3은 모델의 경사각 10°와 20°에서 수직방향과 수평방향 속도성분의 최대값을 추출한 결과이다. 수평방향의 속도성분의 최대값은 10°에서는 0.3521 m/s와 20°에서 0.3488 m/s로 이수시 모두 높게 나타났다. 또한 수직방향 속도성분에서도 10°에서는 0.0529 m/s와 20°에서 0.109 m/s로 이수시 높은 분포를 보였다. 여기서 속도분포와 압력과의 관계를 생각해 보면, 수평방향의 속도성분이 수직방향에 비해 높게 나타나는 이유는 자유낙하하는 모델의 이동방향이 수직으로 작용하지만 자유수면에서 압력이 낮은 수평방향으로 이동이 자유롭기 때문으로 판단된다. 또한 20°에서 보다 높은 속도분포를 보이는 이유는 충격압력은 모델의 낙하속도의 제곱에 비례하는 식(1)의 관계에 의한다고 판단된다.

Table 3. Comparison of Max. values

Class.	10 deg.		20 deg.	
	Entry	Exit	Entry	Exit
U-component	0.3488	0.3521	0.3108	0.3488
V-component	0.0469	0.0529	0.0832	0.1094
Impact pressure	P2 (0.0140 kgf/cm ²)		P2 (0.0158 kgf/cm ²)	

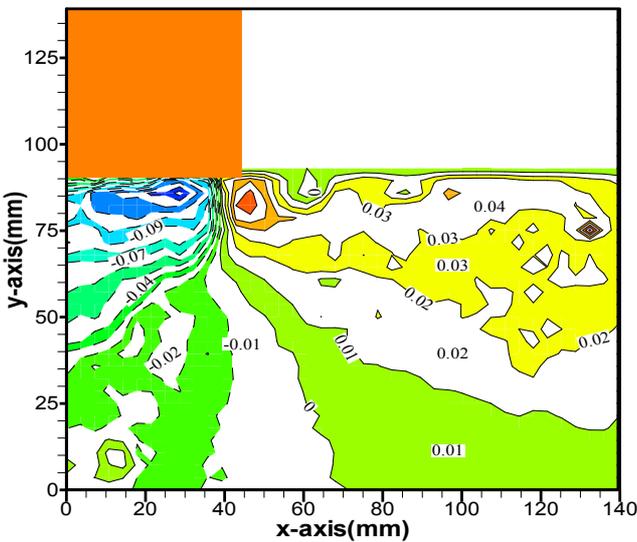


Fig. 10. V-component during water entry at 20-deg.

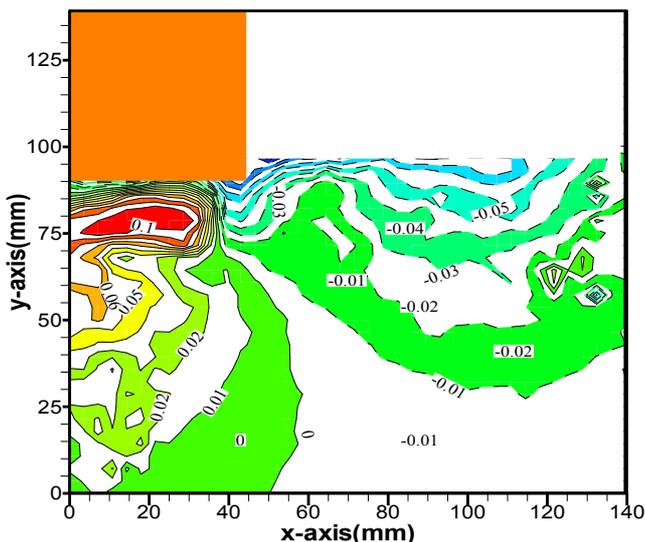


Fig. 11. V-component during water exit at 20-deg.

입수시에 비해 이수시 높은 속도분포를 나타내는 이유로는 모델과 유체가 갖는 점성과 압력차가 가장 큰 원인으로 판단된다. 즉, 모델이 접수시 모델하부에서 수면과 접하기 전까지 빠르게 빠져나가는 공기유동으로 인해 낮은 압력분포를 나타내게 되는데 이는 전체에너지는 항상 보존된다는 베르누이원리에 따른다. 자유수면과 접하는 순간 큰 충격압력이 가해지게 되는데 자유낙하시 모델 직하의 공기층은 일부는 외부로 빠져나가고 나머지 일부는 빠져나가지 못한 상태에서 정수중인 수면과 모델사이에서 충격을 완화시키는 댐핑작용을 하게 된다. 외부에서 힘이 가해지지 않는 한 유체 상태를 그대로 유지하려는 뉴턴의 제1법칙에 따라 정지해 있으려고 하나 모델에 의한 외력에 의해 유동흐름이 형성된다. 이에 반하여, 이수시에는 모델에 작용하는 수직상승하는 부력과 유체 점성력과 이수시 모델에 의해 밀려난 유체가 평형을 유지하기 위해 다시 회복되는 과정에서 빠른 속도분포를 보인다고 판단된다. 따라서 실험결과와 같이 수직 및 수평방향의 유속분포는 접수시보다 이수시에 보다 강하게 나타났다. 슬래밍 충격압력은 식(1)과 같이 충격순간 선수와 파 사이의 상대속도의 제곱에 비례한다(Ochi, 1964).

$$P = K\dot{r}^2 = 0.5\rho K_1\dot{r}^2 \quad (1)$$

여기서 K는 단면형상계수, K_1 는 무차원 단면형상계수, \dot{r} 는 충격시 선수와 파면 사이의 상대속도를 의미한다. 따라서 Table 3에서 최대 압력값을 비교한 결과를 살펴보면 10°보다 20°에서 압력값이 크게 예측되어 신 등(2010) 연구결과에서 보여준 압력의 시계열 분포에서 최외각 지점에서 안쪽으로 높은 압력값을 보이는 결과와 일치하였다.

Fig. 12는 경사각 10°에서 자유낙하시 충격압력에 대한 시계열을 도시한 결과이다. 모델의 회전축에서 제일 먼 지점인 P1(800 mm)에서 가장 낮은 압력이 나타났으며 가장 높은 값은 P2(600 mm)에서 0.0140 kgf/cm²가 나타났다. 두 번째로 높은 압력은 P3(400 mm)지점에서 나타났다. Fig. 13은 경사각 20°에서 자유낙하시 충격압력에 대한 시계열을 도시한 결과

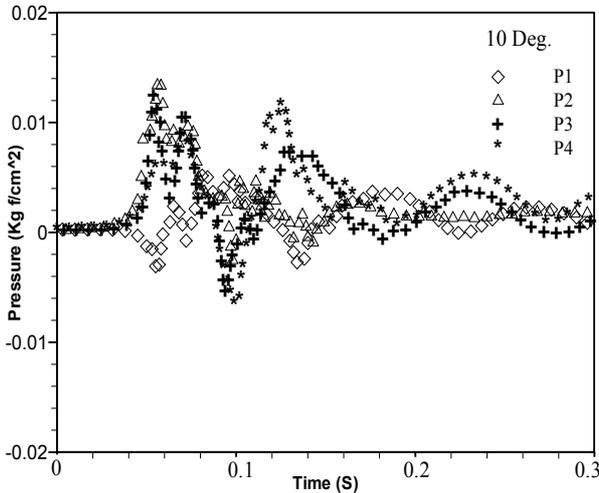


Fig. 12. Time histories of pressure at 10°.

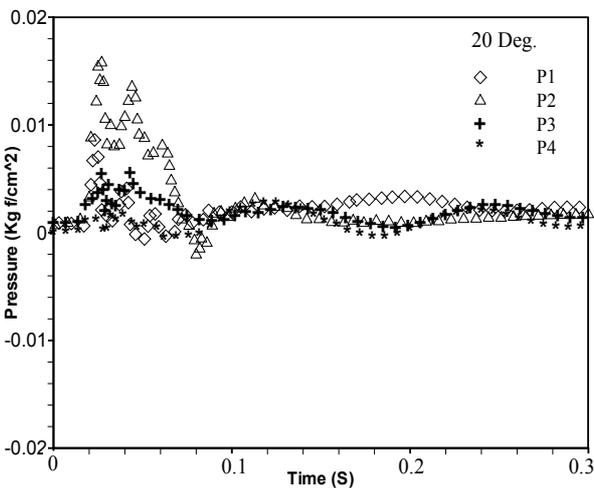


Fig. 13. Time histories of pressure at 20°.

이다. 가장 높은 압력 값을 보이는 지점은 P2 (600 mm)지점에서 0.0158 kgf/cm²로 나타났으며 두 번째로 높은 압력 값은 P1(800 mm)에서 나타났다. 압력분포는 10°보다 20°에서 보다 큰 값을 보였다.

Table 4는 경사각 10°와 20°에서 충격압력을 지점별로 예측한 결과이다. 수직방향으로 자유낙하 속도가 낮은 10°의 경우 자유낙하속도가 높은 20°에 비해 낮은 압력이 나타났다. 가장 높은 자유낙하 속도를 가질 것으로 예상되는 P1 지점에서 압력이 낮게 나타나는 이유는 충격압력을 받을 시점에 모델 전방으로 유체가 밀려나게 되어 압력이 낮은 것으로 판단된다. 또한 20°의 경우 10°에서의 결과와 다르게 P3 및 P4 지점에서 낮은 압력 값이 예측되었다. 모델의 내측에서의 이러한 낮은 압력 값은 경사각 크기가 증가함에 따라 압력 값이 증가하지는 않았다. 이러한 현상에 대해서는 본 연구에서 논의하기에는 한계를 가지고 있어 추가적인 연구의 필요성을 제시하고 있다.

Table 4. Summary of impact pressure acting on points

Classification		10 deg.	20 deg.
Impact pressure (unit: kgf/cm ²)	P1	0.0055	0.0086
	P2	0.0140	0.0158
	P3	0.0130	0.0056
	P4	0.0117	0.0026

4. 결 론

선저경사각에 따른 기초연구로 자유낙하실험에 의한 자유수면과 직사각형 모델이 이루는 경사각을 10°와 20°에서 충격압력 및 유동특성을 예측하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

동일입자추적을 통한 유동특성에서는 점수시보다 이수시에 모델의 경사각에 관계없이 높은 속도분포를 보였으며 경사각이 큰 20°인 경우에 수평방향으로 이동하는 속도성분이 크게 나타났다.

충격압력은 모델 끝단인 P1(800 mm) 지점에서 가장 낮게 나타났으며, 경사각이 큰 20°의 P2 지점에서 10°도에서 보다 약 6% 증가하여 가장 높게 나타났다. 따라서 슬래밍 충격압력은 P2 지점 부근에서 선체에 크게 영향을 미치므로 선저경사각에 따른 영향, 구조강도의 보강 등에 대한 집중적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 다양한 해양파의 유입에 따른 유체동역학적 충격압력에 대해 확대 해석하는 데는 한계가 있어 이에 대한 단계적인 추가 연구가 필요하다. 또한 선저경사각에 따른 자유 또는 강제낙하에 대한 점진적 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] 강효동, 오승훈, 권순홍(2009), 천수에서의 슬래밍 현상에 대한 실험적 연구, 한국해양공학회지, 제23권, 제1호, pp. 60-66.
- [2] 박성환, 이근배, 임채환(2000), 슬래밍 충격하중을 고려한 선체 휘핑 해석, 대한조선학회논문집, 제37권, 제3호, pp. 99-109.
- [3] 박일룡, 전호환(1999), 접수와 이수 문제에서 강제주위 유동해석, 대한조선학회논문집, 제36권, 제4호, pp. 37-47.
- [4] 신현경, 김성철, 조상래(2010), 낙하실험에 의한 슬래밍 충격의 실험적 연구, 대한조선학회논문집, 제47권, 제3호, pp. 410-420.
- [5] 엄덕준, 윤범상(2008), 2차원 쇄기형 구조물의 슬래밍 현상에 대한 수치 유동해석, 대한조선학회논문집, 제45권, 제4호, pp. 477-484.
- [6] 이철재, 조대환(2009), 슬라이드 밸브 급폐쇄에 따른 디스크 주위 비정상유동의 PIV계측에 관한 연구, 해양환경안전학회, 제15권, 제3호, pp. 251-256.
- [7] 이탁기, 임채환, 김영남, 허주호, 김병현(2007), 대형 컨테이너선의 플레어 슬래밍 계측 연구(II) 슬래밍 압력 특성 분석, 대한조선학회논문집, 제44권, 제3호, pp. 279-284.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Manganelli, P., B. Wagemakers and P. Wilson (2003), Investigation of slamming loads using slam patches on a scaled model of an Open 60' class yacht, International Journal of Small Craft Technology, 145, pp. 47-62.
- [11] Ochi, M. K.(1964), Extreme behavior of a ship in rough seas slamming and shipping of green water, Trans, SNAME, 69, pp. 143-148.
- [12] Thompson, F. L.(1928), Water Pressure Distribution on a Seaplane Float. N. A. C. A. Technical Report No. 290, pp. 1-12.
- [13] Von Karman, T.(1929), The Impact of Seaplane Floats during Landing, N. A. C. A. TN321 Washington, pp. 1-8.

원고접수일 : 2012년 07월 25일

원고수정일 : 2012년 08월 14일 (1차)

2012년 08월 21일 (2차)

게재확정일 : 2012년 08월 24일