

## 박스형 모델에 의한 슬로싱 하중에 관한 실험적 연구

정동우\* · 전수성\* · 박준수\* · 권순홍\* · 장택수\*

\*부산대학교 조선해양공학과

### An Experimental Study on Rectangular Box Sloshing

DONG-WOO JUNG\*, SOO-SUNG CHUN\*, JUN-SOO PARK\*, SUN-HONG KWON\*, TAEK-SOO JANG\*

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National Univ.\**

KEY WORDS: LNGC(액화 천연가스 운반선), Sloshing, Bubble 생성 과정, Hydraulic jump, Standing wave, 공진 주파수, 압력, Rectangular box, 고속 카메라, Low filling

ABSTRACT: This study presents experimental results of sloshing phenomenon done on rectangular box. A simple harmonic excitation was done on the box. Two kinds of filling ratio, 20% and 30% of height, were tested. A total of 15 pressure sensors were installed to monitor the impact pressure. Each test was repeated for 20 times to ensure the repeatability. The high speed camera captured the flow field and the corresponding pressure were synchronize with video signal so that the video image can help the interpretation of the impact pressure. The two filling ratio made difference in the flow characteristic and impact pressure. The use of high speed camera made it possible to understand the bubble generation mechanism. The pressure time histories were presented.

#### 1. 서 론

천연가스는 청정 에너지원으로서 전 세계적으로 그 수요량은 계속 증가추세를 보이고 있고 이에 따라 LNG 운반선에 대한 수요 역시 증가하고 있다. 또한 천연가스 수요의 증가는 LNG 운반선의 크기를 증가시키고 있다. 이러한 선박의 크기 증가는 홀수 제한, 추진 효율 및 조종성능 증가 등과 같은 기술적 진보를 필요로 한다. 선박이 해상에서 운항중일 때 탱크 내벽과 선체구조에 충격하중을 가하게되는 슬로싱 현상 역시 중요하게 고려되어진다. 슬로싱 현상은 여러 가지 과학 및 공학분야에서 오랜 시간동안 관심의 대상이 되어 왔으며, 슬로싱 현상 자체에 대한 많은 연구가 진행되어왔다. 또한 슬로싱 현상 자체뿐만 아니라 Scale effect (Bass 1974; Bass 1985), 압축성 효과 (Bass, 1972; Florschuetz, 1965), 유탄성(Kapsenberg, 2003; Lee, 1997), 점성영향(Bass 1974), parametric study(Lee, D.H, 2005) 등과 같은 주제에 대한 연구들 역시 슬로싱 현상에 대한 더 나은 이해를 돕기 위해 연구가 지속적으로 수행되어져 왔다. 국내 연구자들의 연구로는 LNG-tank에 작용하는 슬로싱 하중에 대해 (Sim, I.H, 2004; Lee, Y.B, 2005; Lee, Y.B, 2006; 황성현 2005) 연구되어 왔다.

본 논문에서는 사각탱크 모형에 대해 단일모드 실험을 실시하여 유동장에 의해 유기된 탱크 벽면에 작용하는 압력을 측정하였고 고속 카메라를 이용하여 탱크 내부의 유체 파형과 유동장 내에서 공기방울이 생기는 과정을 관찰하였다. 실험은

병진 운동 즉 Surge 모션에 대해 실시하였으며 낮은 적재율에서 공진 주파수에 의한 유동장 변화를 살펴보았다.

#### 2. 실험 장비

본 연구를 수행하기 위해 Fig.1의 6자유도 모션 플랫폼을 사용하였다. 사용한 모델은 Fig.2에서 보는바와 같이  $L \times B \times D$ 가  $0.79 \times 0.48 \times 0.48$  (m)인 직육면체 탱크이다. 유동을 관찰하기 위하여 고속 카메라를 사용하였고 550W 할로겐 전등 3개를 탱크 뒤쪽에 배치시키고 빛을 고루 퍼지게 하기 위하여 흰색 아크릴 판을 사용하였다. 실험은 Surge motion으로 변위는 50mm로 수행하였다.

압력계측에 사용된 압력계는 Kistler에서 제조한 701A모델을 사용하여 Fig. 3에서 보는바와 같이 15개의 압력계를 설치하여 압력을 계측하였다. 이 압력계는 크기가 직경 9.5mm이며 최대 250bar 까지 계측이 가능하고 고유진동수는 70kHz이다. 압력데이터의 sampling rate는 20kHz로 실험을 수행하였다. 데이터 저장을 위해서 National Instrument의 PXI-4472B data acquisition module을 사용하였다. PXI-4472B 모델은 최대 102.4kS/sec로 8개 채널에서 동시에 신호를 획득할 수 있는 장비이다. 데이터 저장을 위해 사용된 소프트웨어는 LabView를 이용하였다. 모션 시작과 동시에 압력을 계측하고 또한 동영상 촬영하기 위하여 모션 플랫폼의 전기적 신호를 이용하여 전체 시스템을 동기화 시켰다.

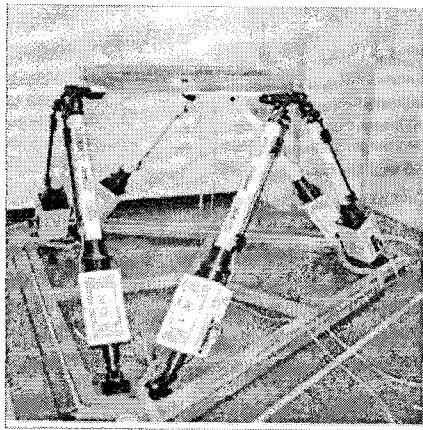


Fig. 1 6DOF Motion platform

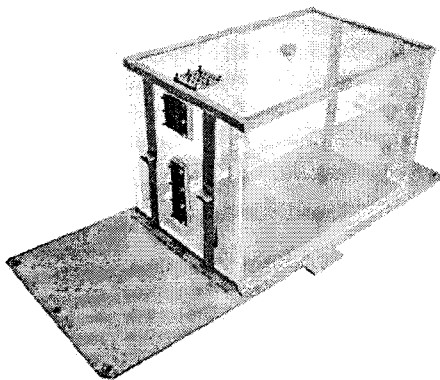


Fig. 2 Rectangular model tank  
 $L \times B \times D = 0.79 \times 0.48 \times 0.48(m)$

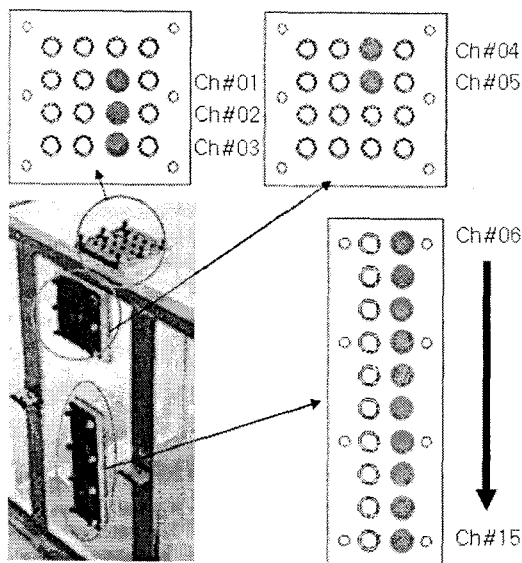


Fig. 3 Sensor location

### 3. 실험 개요

낮은 적재율에서 생성되는 파의 종류는 Traveling wave(또는 Progressive wave), Hydraulic jump, 그리고 Standing wave 3가지로 구분할 수 있다. Traveling wave의 경우 적재율 10%H가량에서, Hydraulic jump의 경우 20%H, 그리고 Standing wave의 경우 30%H이상에서 발생 가능하다. Traveling wave의 경우 tank 벽면에 의한 반사파의 영향이 심하여 만들기가 힘들어 본 연구에서는 배제시켰다. Hydraulic jump와 Standing wave의 경우 공진 주파수로 가진 하였을 때 만들 수 있으며 30%H의 경우 공진 주파수의 70~80%에서 Hydraulic jump가 만들어지나 20%H에서 만들어지는 파의 형태가 더 좋기 때문에 본 연구에서는 20%H에서 Hydraulic jump, 30%H에서 Standing wave를 만들어 그 현상을 보고자 한다.

공진 주파수는 식 (1)과 같이 선형 분산 관계식으로부터 구한다.

$$fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{L} g \tanh\left(\frac{\pi T}{L}\right)} \quad (1)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $L$ 은 탱크 길이,  $T$ 는 적재 수심이다.

고속카메라의 촬영시간의 제약으로 인하여 실험 시작부터 파의 형태가 완전하게 발달한 후 2번의 주기까지를 두 개의 간격으로 나누어 실험을 수행하였고 압력은 20초간 측정하여 동영상으로 실제 현상을 관찰하고 그것과 압력 데이터를 비교해 가면서 해석하였다. 동영상 데이터와 압력 데이터의 비교를 가능하게 한 것은 전체 시스템의 동기화로 인함이다. 모션 시작과 동시에 모션 제어 컴퓨터로부터 나오는 전기적 신호를 이용하여 압력과 동영상 데이터의 획득을 시작한다.

### 4. 실험결과 및 해석

#### 4.1 적재율 20%H (Hydraulic jump)

##### ① 파의 형태

적재율 20%H에서 공진 주파수로 가진 하였을 때 생성되는 파의 형태는 Fig. 4와 같다. 파가 Hydraulic jump의 형태로 서서히 발달하다가 완전하게 모습을 갖추었을 때의 모습을 순서대로 배열하였다. Fig. 4에서 우측 상단에 위치한 2번 그림에서 Hydraulic jump 형태를 잘 보여주고 있다.

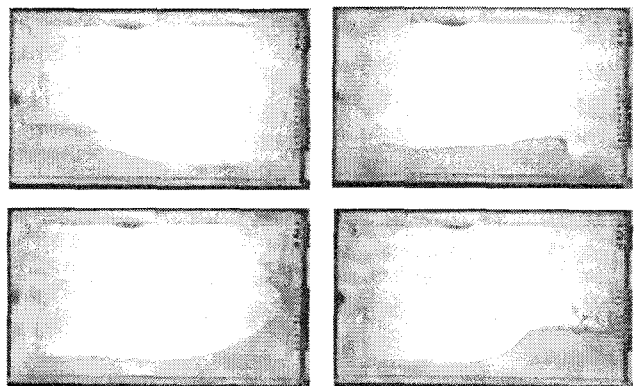


Fig. 4 Generation of hydraulic jump

② 압력의 time history

20%H의 경우 충격하중이 직접적으로 가해지는 14, 15번 채널에서의 값이 상대적으로 큰 값을 가졌다. Upper side bulkhead에서는 파형이 완전하게 발달되었을 때는 유체가 거의 닿지 못하고 그 다음 충격에서 유체 하중이 가해지며 그때가 큰 값을 가지게 된다. Front bulkhead와 가장 가까운 3번 채널에서 가장 큰 값을 가지며 이 값을 14, 15번 채널의 값과 비교할 때 상대적으로 작은 값을 가지게 된다. 파형이 완전하게 발달되었을 때의 첫 번째 피크 압력은 실험 시작 후 2.8초, 두 번째 피크 압력은 4.3초가량 경과하였을 때이다. 채널 3번과 14, 15번의 압력 time history는 Fig. 5~7 과 같다. 20번의 반복실험을 통한 peak 압력의 평균값은 Table 1. 과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 첫 번째 충격에서 가장 큰 값을 가진다.

일반적으로 압력에 영향을 받은 것에 따라 신호에 차이가 난다. Fig. 7에서 그 중 두 가지를 볼 수 있다. 하나는 bubble의 영향에 의해 oscillation하는 첫 번째 peak에서 볼 수 있고 다른 하나는 순수한 hydrodynamic impact에 의한 두, 세 번째 peak에서 볼 수 있다. 첫 번째 peak를 주파수에 대한 함수로 바꾸어 보면 Fig. 8과 같이 1180Hz에서 peak 값을 가지고 bubble의 작용에 의한 것이라 할 수 있다. Fig. 9에서는 hydrodynamic에 의한 신호를 시간과 주파수 영역에서 표현하였다. Pure hydrodynamic에 의한 것은 특별히 큰 피크를 보이는 주파수 영역에서의 특징이 나타나지 않는다.

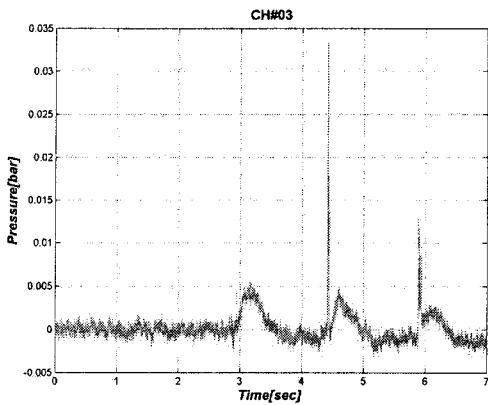


Fig. 5 Pressure time history (Channel #03)

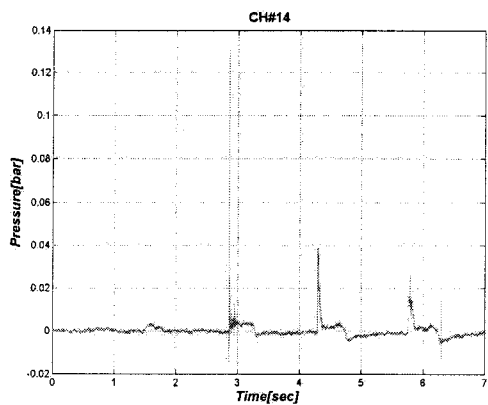


Fig. 6 Pressure time history (Channel #14)

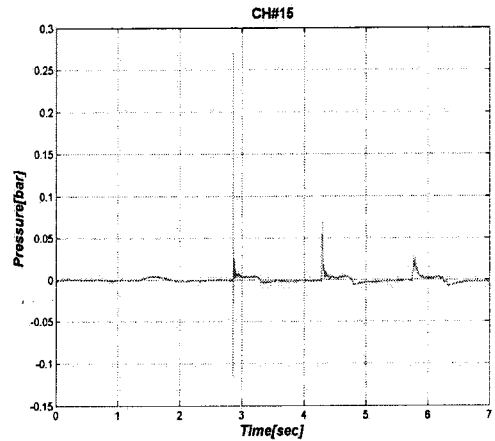


Fig. 7 Pressure time history (Channel #15)

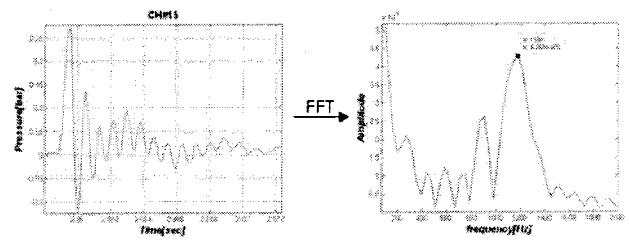


Fig. 8 Time & frequency domain of air impact pressure

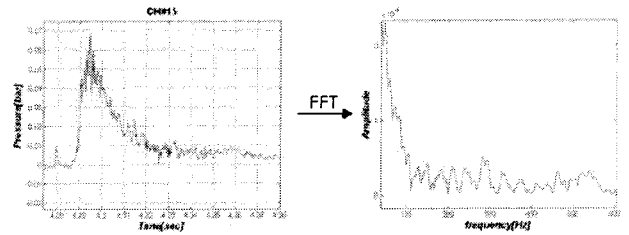


Fig. 9 Time & frequency domain of pure hydrodynamic impact

Table 1 Mean peak pressure of each excitation

Excitation	Ch. #03	Ch. #14	Ch. #15
1st		0.094847	0.344872
2nd	0.02348	0.052328	0.074626
3rd	0.025473	0.045287	0.050817

③ Bubble 생성 과정

Bubble의 주된 생성 원인은 파가 벽면에 충격하중을 가한 후 깨진 유체 입자들이 자유수면으로 떨어지면서 생성된다. 20%H의 경우에 처음으로 파형이 완전한 모습을 갖추었을 때 breaking되면서 파의 선두부분에 공기가 포함된다. 공기가 포함된 파가 벽면에 부딪히면서 다량의 bubble을 생성시킨다. 이러한 현상을 Fig. 10에서 충격 전에 공기가 포함된 선두부분이 벽면과 부딪히면서 bubble을 생성시키는 것을 보여준다.

충격 후 벽면에 부딪힌 유체는 벽면을 따라 수직 상승하게 되고 다시 자유수면으로 떨어지면서 bubble을 생성시킨다. 또한, 충격 후 벽면에서 부서진 spray들이 자유수면으로 떨어지면서

bubble을 생성시킨다. 이 현상을 Fig. 11에서 볼 수 있다. Bubble이 생기게 되는 3가지 이유 중에서 20%H에서 가장 dominant한 원인은 첫 번째인 공기가 포함된 파가 벽면에 부딪히는 것이다.

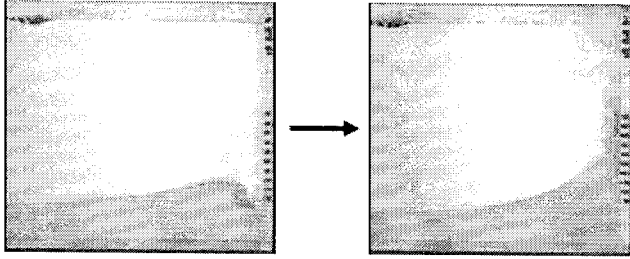


Fig. 10 Bubble generation mechanism(#1)

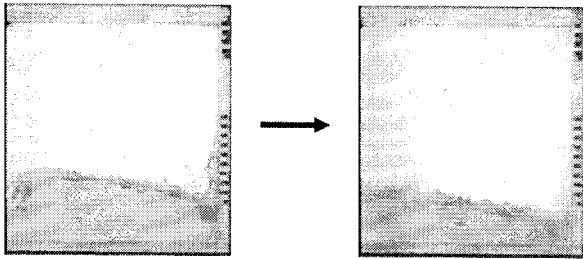


Fig. 11 Bubble generation mechanism(#2)

#### 4.1 적재율 30%H (Standing wave)

##### ① 파의 형태

적재율 30%H에서 공진 주파수로 가진 하였을 때 생성되는 파의 형태는 Fig. 12과 같다. 파가 Standing wave의 형태로 서서히 발달하다가 완전하게 모습을 갖추었을 때의 모습을 순서대로 배열하였다. Fig. 12 중 좌측 성단에 위치한 2번 그림과 좌측 하단에 위치한 4번 그림에서 Standing wave의 형태를 잘 갖추고 있다.

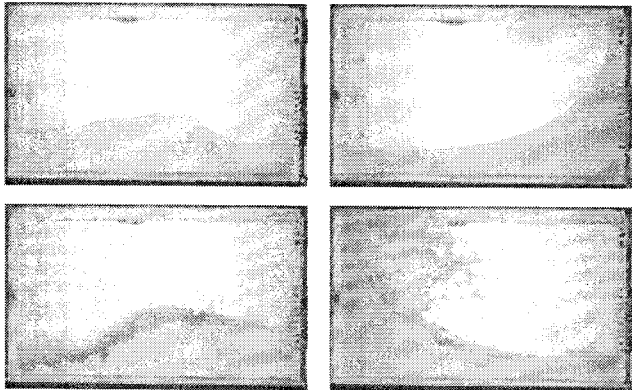


Fig. 12 Generation of standing wave

##### ② 압력의 time history

30%H의 경우 충격하중이 직접적으로 가해지는 3, 12, 13번 채널에서의 값이 상대적으로 큰 값을 가졌다. 파가 완전하게 발달되면 Upper-side bulkhead 까지 충격하중이 가해지며 바로 다음의 충격에서 압력이 가장 큰 값을 가진다. Side bulkhead와

Upper-side bulkhead의 압력은 3, 12, 13번 채널 모두 비슷한 결과를 얻었다. 파형이 완전하게 발달되었을 때의 첫 번째 peak impact는 실험 시작 후 2.6초, 두 번째 peak impact는 4초가량 경과하였을 때이다. 채널 3, 12, 13 번의 압력 time history는 Fig. 13~15과 같고, 20번의 반복실험을 통한 peak 압력의 평균 값은 Table 2. 와 같다. 이 경우의 피크 압력의 주된 형태는 pure hydrodynamic impact이다.

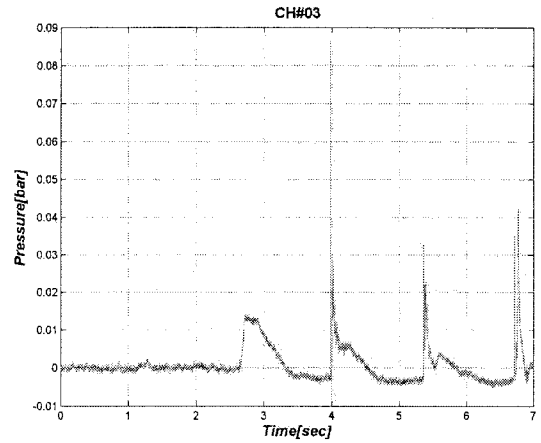


Fig. 13 Pressure time history (Channel #03)

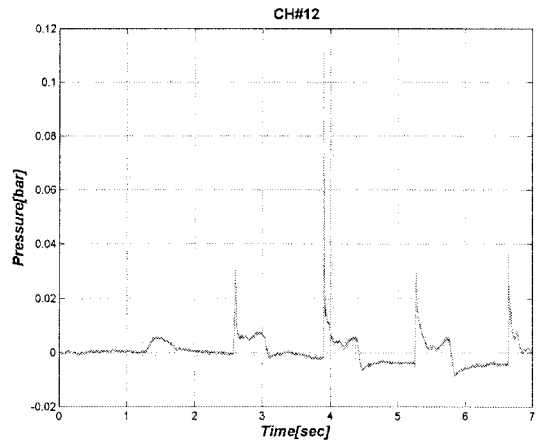


Fig. 14 Pressure time history (Channel #12)

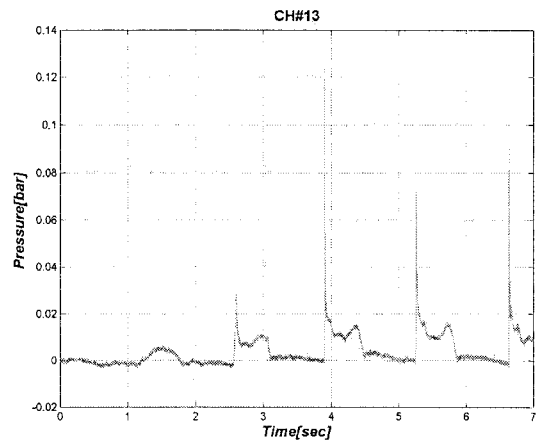


Fig. 15 Pressure time history (Channel #13)

Table 2 Mean peak pressure of each excitation

Excitation	Ch. #03	Ch. #12	Ch. #13
1st	0.02152	0.030018	0.027388
2nd	0.060375	0.087329	0.121097
3rd	0.161678	0.031903	0.063329

③ Bubble 생성 과정

30%H의 경우 첫 번째 충격에서 파가 공기를 포함하지 않기 때문에 Fig. 14의 첫 번째 사진에서 보는바와 같이 bubble이 거의 발생하지 않는다. 첫 번째 충격 후 벽을 타고 수직상승한 유체가 다시 수직강하 하면서 bubble을 생성시킨다. 다시 떨어지는 이 유체의 양은 20%H보다 많기 때문에 자유수면의 간섭이 더 심하여 더 많은 bubble이 생성되며 특히, 자유수면의 빈 공간이 생기고 이 공간을 인접한 유체가 채워주는 과정에서 또다시 좌측 벽면에 작은 충격하중이 가해진다. 이것은 Fig. 16의 두 번째 사진에서 알 수 있다. 20%H와 마찬가지로 첫 번째 충격 후 부서진 spray가 자유수면 위로 떨어지면서 다량의 bubble을 생성시키는데 30%H에서 bubble의 생성은 이러한 물방울로 인한 원인이 dominant하다. Fig. 17는 두 번째 충격 후와 세 번째 충격의 사진인데 첫 번째와 비교했을 때 bubble이 점차 증가한다는 것을 알 수 있다.

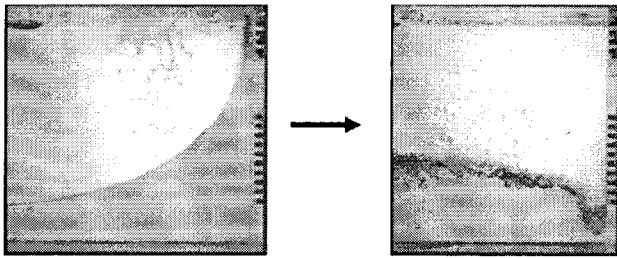


Fig. 16 Bubble generation mechanism(#1)

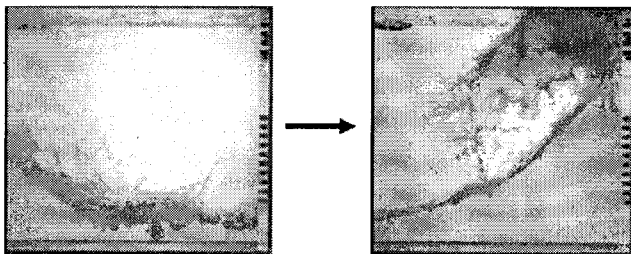


Fig. 17 Bubble generation mechanism(#2)

5. 결 론

본 연구는 낮은 적재율에서의 나타나는 파의 형태에 따른 압력의 특성과 bubble의 생성 원리를 알아보기 위함이다. 고속카메라를 사용한 유동 계측으로 단순한 직사각형 박스에서 일어나는 현상을 자세히 관찰할 수 있었으며 특히 시스템의 동기화로 인하여 동영상과 압력을 자세히 비교할 수 있었다. 이로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 20%H와 30%H의 적재율에서 공진 주파수에 의해 만들어지는 파는 Hydraulic jump와 Standing wave이다. 20%H에서 가장 큰 압력이 작용하는 지점은 채널 15번이며 파의 형태가 완전한 모습을 갖추었을 때 가장 큰 압력이 작용한다. 30%H의 경우 파의 형태가 완전한 모습을 갖춘 후 그 다음의 충격에서 가장 큰 압력이 작용한다. 20%H와 30%H를 비교하면 20%H의 채널 15번에서의 작용한 압력이 가장 크다. 이것은 유체의 진행 방향이 압력 센서와 수직에 가깝기 때문이며, 30%H에서는 충격하중이 가해지기 전에 위로 향하는 성분이 많기 때문으로 해석할 수 있다.

(2) 탱크 내의 유체 유동으로 인해 bubble이 많이 생기게 된다. Bubble은 주로 파가 벽면에 부딪혀 깨지면서 발생하는 spray가 자유수면으로 떨어지면서 생기게 되는데 이것은 Standing wave 일 때 bubble 발생의 주요 원인이다. Hydraulic jump의 경우는 물방울이 자유수면에 떨어지면서 생기는 원인도 있지만 충격 직전에 파의 front 부분에 다량의 유입된 공기가 spray로 되어 자유 표면과 상호 작용하여 발생한다.

후 기

본 연구는 대우조선해양(주)의 지원으로 만들어진 실험 장비를 사용하여 수행된 것이며, 연구비 지원 및 협조에 대해 감사드립니다.

참 고 문 헌

황성현, 정준형, 권순홍, 이영범, 이정무 (2005). "직사각형 박스에 작용하는 슬로싱에 관한 연구", 추계대한조선학회, pp 1085-1087.

Lee, Y.B., Lee, J.M., Kim, Y.S., Jung, J.H., Jung, D.W., and Kwon, S.H (2006). "An Experimental Study of Impulsive Sloshing Load Acting on LNGC Tank", Proc. of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conf., pp 193-198.

Lee, D.H., Kim, M.H., Kwon, S.H., Kim, J.W., and Lee, J.M (2005). "A Parametric and Numerical Study on LNG-tank Sloshing Loads", Proc. of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conf., pp 228-232.

Lee, D.Y. (1997). "A study on the sloshing of cargo tanks including hydroelastic effects", Ph.D. dissertation, Seoul National University.

Sim, I.H., Lee, Y.B., Kim, Y.S., Jang, T.S., Park, J.S., Paek, S.W., Jung, J.H. and Kwon, S.H (2004) "Experimental and Numerical Study on Sloshing Phenomenon", Proc. of 2nd Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, pp 307-310.

Lee, Y.B., Sim, I.H., Kim, Y.S., Jung, J.H., Park, J.S., Kwon, S.H., and Jang, T.S. (2005). "Experimental Study on Sloshing for Large LNGC Design", Fifteenth International

- Offshore and Polar Engineering Conf., pp 233-240.
- Bass, RL. (1972). "Liquid Impact loads in LNG Carriers", Technical Report No.1 for Methane Tanker Service Co., Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, Aug.
- Bass, RL., Bowles, EB., Trudell, RW., Peck, JC., Yoshimura, N., Endo, S., B.F.M. Pots (1985). "Modeling Criteria for Scaled LNG Sloshing Experiments", Journal of Fluids Engineering, Vol 107, pp 272-280.
- Florschuetz, LW and Chao, BT (1965). "On the mechanism of vapor bubble collapse", Journal of heat transfer, Transactions of ASME, pp 209-220.
- Bass, RL and Ransleben, G E, Jr (1974). "Scaling Criteria for Large Amplitude Sloshing in LNG Ship Cargo tank", Technical Report No. 2 for Methane Tanker Service Co., Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, Oct.