

얼리지 압력이 2차원 슬로싱 실험에 미치는 영향에 관한 연구

최후인* · 권순홍* · 이상범* · 이기현** · 박정호*

*부산대학교 조선해양공학과

**부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터

A Study on Ullage Effect in 2-D Sloshing Experiment

Hu-In Choi*, Sun-Hong Kwon*, Sang-Beom Lee*, Ki-Hyun Lee** and Jung-Ho Park*

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

**Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Sloshing phenomenon 슬로싱 현상, Ullage effect 얼리지 영향, Scale effect 스케일 영향, Impact pressure 충격압력, Jet spray 제트 스프레이

ABSTRACT: This study presents investigation on ullage effect in sloshing experiment. The experiment was done with two dimensional tank. Sloshing experiments were carried out in the tank with 6 different ullage pressures. The tested filling ratio was 30% of the tank height. The flow field was recorded with high speed camera. The sloshing impact pressure were measured at 18 locations. It was shown that the variation of ullage pressures influences the magnitude of pressure and flow field. This study demonstrated the importance of ullage pressure in sloshing test.

1. 서 론

환경 보전에 대한 관심이 증대됨에 따라 청정 에너지원인 천연가스의 수요는 쉽게 줄어들지 않고 있다. 이에 따라 액화천연가스의 해상 생산 및 저장, 효과적인 운송을 가능하게 하는 기술들의 필요성이 대두되고 있다. 또한 FLNG(Floating liquefied natural gas, 부유식 액화천연가스)선, LNG FPSO(Liquefied natural gas floating production storage and offloading, 부유식 액화천연가스 생산·저장·하역설비)선, LNG FSRU(Liquefied natural gas floating storage and regasification unit, 부유식 액화천연가스 저장 및 재기화설비)선과 같이 선박이 대형화됨에 따라 추진 효율 및 조종 성능 증가와 함께, 선체 내벽 충격하중에 따른 슬로싱 현상의 규명에 대한 연구가 더욱 중요하게 인식되고 있다.

슬로싱 실험에 영향을 미치는 주요 요소로는 모델 화물창의 가진 진폭, 가진 주파수, 적재율(최후인 등, 2010)과 압력계(최영명 등, 2009)를 들 수 있고 이에 대한 연구들이 행해지고 있다. 뿐만 아니라, 슬로싱 현상을 규명하기 위해서는 스케일 영향(Bass et al., 1985; Jeon et al., 2008), 얼리지 영향, 유탄성 영향(이동연, 1997), 압축성 영향(Bass, 1972; Florschuetz and Chao, 1965; 박준수 등, 2009), 점성 영향(Bass and Ransleben, 1974)에 대한 연구가 선행되었다. 본 연구에서는 화물창 내부 기체 영역(얼리지)의 압력 변화에 따른 슬로싱 충격압력 차이를 분석하였다. 슬로싱 실험은 모델 화물창 내부 압력을 1기압으로 실시하고

있다. 이 값은 실선의 화물창 내부 압력과 일치하는 셈이 된다. 그러나 스케일 법칙에 의하면 크기가 다른 두 화물창 내부의 압력은 차이가 나야하고, 본 연구에서는 얼리지 압력의 차이가 예측된 충격 압력에 영향을 미치는지에 대한 연구를 수행하고자 한다. 실험에 사용 한 모델 화물창은 138,000m³ 급 액화천연가스운반선 두 번째 화물창에 대하여 1/100 축소 모델을 적용하였다. 진공 펌프를 이용해 주어진 압력까지 감압하여 실험을 수행하였으며, 감압 조건은 대기압 상태와 같은 1bar에서부터, 1/100 축소 모델에 적용 가능한 0.025bar까지 실험을 수행하였다. 모델 화물창의 안정성 확보를 위해 더 낮은 압력에서의 실험은 수행하지 못 하였다. 압력계는 모델 화물창 상부에 7개, 측면 벽에 11개를 설치하였고, 모델 화물창 내부 기체 영역의 유체동역학적 거동을 파악하기 위해 초고속카메라로 촬영하였다. 얼리지 압력이 낮아짐에 따라 모델 화물창 내부 유동의 변화 및 압력값에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1 스케일 법칙

충격하중에 대한 압력 산정 시에는 압축성 고려 유무에 따라 유체 내에서의 음속을 고려해주어야 하는데, 본 연구에서는 유체를 비압축성으로 가정하였다. 모델 화물창에 작용하는 압력에 관하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P \propto \rho \nu^2 \quad (1)$$

P 는 슬로싱 현상에 의한 충격 압력, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 유체의 속도이다. 여기서 ν 는 모델 화물창의 길이 L 과 가진 주기 T 로 나타낼 수 있는데 식 (2)와 같다.

$$P \propto \rho \left(\frac{L}{T}\right)^2 \quad (2)$$

T 는 공진 주파수의 역수로 구하였다. 실선으로의 압력값 확장은 Froude 스케일을 통해 식 (2)로부터 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$P_p = P_m \left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right) \left(\frac{1}{\lambda}\right) \quad (3)$$

P_m 과 P_p 는 각각 모델과 실제 화물창에서의 열리지 압력을 나타내고, P_m 과 P_p 는 모델과 실제 내부 액체의 밀도를 나타낸다. 본 실험에서 사용된 1/100 축척 화물창 열리지 압력은 실선의 열리지 압력을 1bar로 가정하였을 때, 약 0.025bar임을 알 수 있다 (Bass et al., 1985). 식 (3)은 열리지 압력 또한 정압, 동압과 같이 스케일 변화에 따른 영향을 고려해주어야 한다는 것을 의미한다.

2.2 슬로싱 가진 장치

선박이 운용되는 실제 해상 상태를 재현하기 위하여 본 실험에서는 6자유도 모션 플랫폼을 사용하였다. 사용된 슬로싱 가진 장치(Sloshing motion platform)는 적재 동하중 4ton으로 설계되었다. 실험 장치를 제어하기 위한 시스템은 크게 시스템 콘솔부, 운동 제어부 및 제어 소프트웨어로 나눌 수 있다. 시스템 콘솔부는 원하는 입력값을 전달하고 제어할 수 있게 해주는 역할을 한다. Digital signal processor(DSP)와 Signal board를 내장한 호스트 컴퓨터와 Interface control unit(ICU)로 구성되어 있다. 운동 제어부는 실제 운동을 가능하게 해주는 장치로서 전원 공급 장치, 서보 모터/드라이브 그리고 액추에이터로 구성되어 있다. 운동 제어 소프트웨어는 보다 쉽게 운동 명령을 입력하기 위해 Embedded motion control program(EMCP), 운동판 설계/튜닝/운용 소프트웨어와 Application program interface(API) Library로 구성되어 있다. 전체 시스템의 예상치 못한 오작동으로

인한 장비의 손상을 미연에 방지하여 안전성을 확보하기 위해 각 액추에이터에는 운동 제한 스위치(Limit switch)를 설치하였고, 15kW 서보 모터와 40mm의 볼 스크류 리드를 갖추고 있다. 슬로싱 가진 장치 및 시스템의 운용에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

2.3 실험 모델

실험에 사용된 화물창 모델은 138,000m³ 급 액화천연가스운반선 두 번째 화물창의 길이 방향을 기준으로 하여 1/100 축척 2차원 형상의 직육면체(화물창 내부 길이×폭×높이= 0.4372m×0.0350m×0.2676m)이다. 그리고 화물창 벽은 두께 15mm의 아크릴로 제작되었으며, 본 연구에 사용된 화물창 모델의 사진은 Fig. 2와 같다. 슬로싱 가진 장치에 기인하여 생성된 파의 유체충격압력을 계측하기 위하여, 화물창의 한 쪽 면에 총 18개의 압력계를 설치하였다. 화물창은 대칭적 구조이므로 한 쪽 면에만 압력계를 설치하여 실험을 실시하였다. 세부적 위치로는 화물창 상부에 7개를 설치하였고, 옆쪽 벽면에 11개의 압력계를 설치하였다. 압력계의 위치 및 평균 수면의 높이는 Fig. 3에 나타내었다.

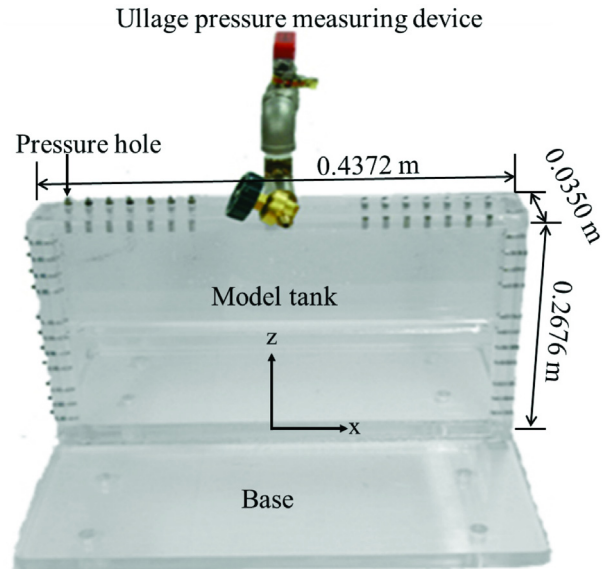


Fig. 2 Model tank

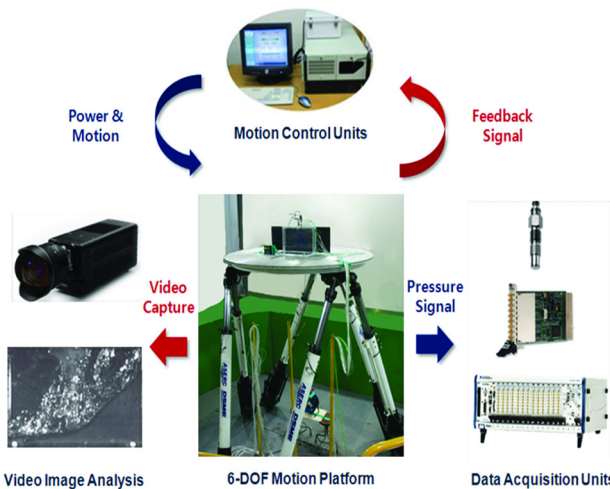


Fig. 1 Schematic view of the measurement system for experiments

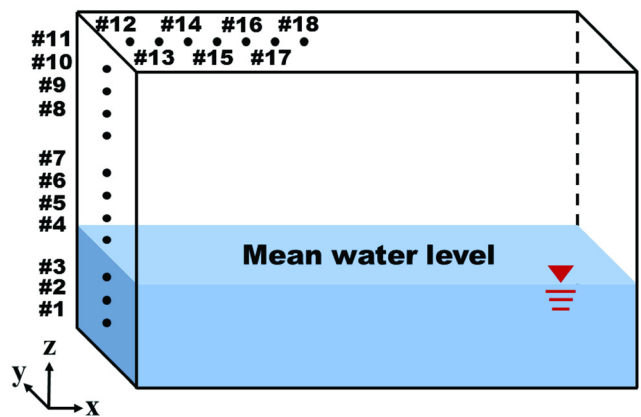


Fig. 3 Locations of pressure sensors

2.4 실험 장치

압력 계측에는 키슬러(Kistler)사에서 제조한 Integrated circuit piezoelectric(ICP) 형태의 211B5 모델 압력계를 사용하였다. 이 압력계의 지름은 5.5mm이며 고유 진동수는 300kHz이다. 그리고 압력 데이터 획득을 위해서 내쇼날인스트루먼트(National Instrument)사의 PXI-4472B 데이터 획득 모듈을 사용하였다. 이 모델은 최대 102.4kHz 샘플링 주파수로 8개 채널에서 동시에 신호를 획득할 수 있는 장비로, 압력계 총 18개에서 데이터를 획득하기 위하여 3개의 모듈을 사용하였다. 본 연구에서는 데이터 획득 시 20kHz의 샘플링 주파수로 실험을 수행하였고, 랩뷰(Lab VIEW)를 활용하여 압력 데이터를 저장하였다. 모델 화물창 내부 유동장의 형태를 파악하기 위하여 레드레이크(Redlake)사의 Motion Pro Y5 초고속카메라를 사용하였으며, 촬영은 초당 500프레임으로 수행하였다. 가진하는 동안 얼리지 압력의 변화를 측정하기 위하여 1.33bar에서 1.0×10^{-6} bar까지 측정이 가능한 Vaccum 게이지를 사용하였다.

2.5 실험 조건

가진 진폭은 모델 화물창 길이의 10%인 43.72mm로 주었으며, 적재율은 화물창 높이의 30%인 80mm로 하였다. 화물창 길이 방향에 대한 내부유동의 첫 번째 모드는 생성된 파장이 화

물창 길이의 두 배가 될 때이며, 이에 해당하는 주파수는 식 (4)로 표시된다(Dean and Dalrymple, 1984).

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{L} g \tanh\left(\frac{\pi H}{L}\right)} \tag{4}$$

g 는 중력가속도이고 L 은 모델 화물창의 길이, H 는 액체 화물의 적재 수심을 나타낸다. 가진 운동의 조건은 길이 방향의 2차원 모델 화물창 형상을 고려하여 Surge 방향의 병진운동으로 실험을 실시하였다. 총 6가지의 얼리지 압력에 대한 실험 조건은 Table 1에 나타내었다. 실험 조건마다 가진 주기를 고려하여, 실험 시간은 300초로 하였다.

Table 1 Test matrix

Filling ratio [% of the tank height]	Frequency [Hz]	Ullage Pressure [bar]
30 (80mm)	0.96	1
		0.2
		0.1
		0.08
		0.05
		0.025

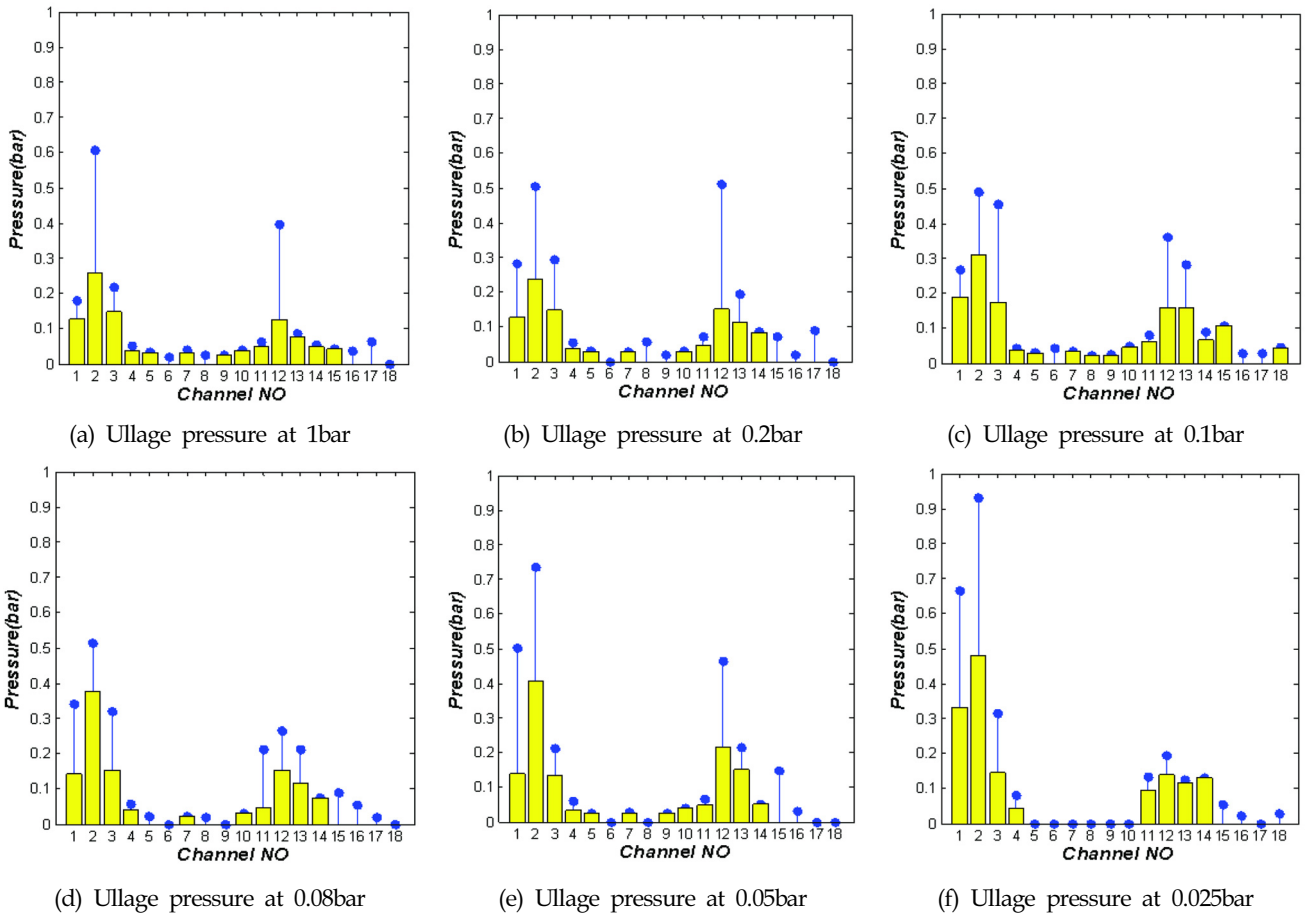


Fig. 4 Statistical analysis of pressures

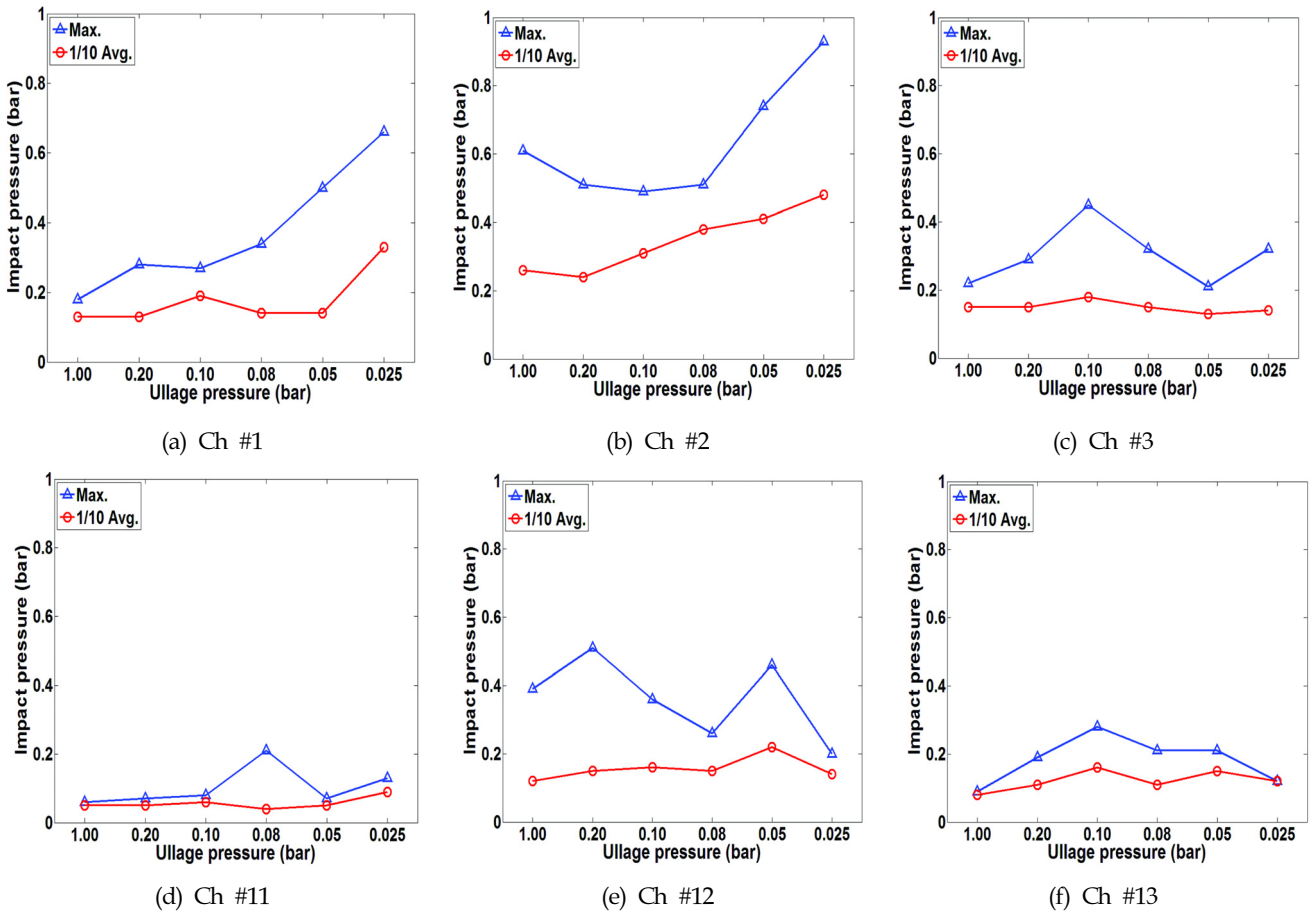


Fig. 5 Comparison of peak pressures

3. 실험 결과 및 해석

3.1 얼리지 압력에 따른 위치별 충격압력의 분포

적재율 30%에서 얼리지 압력을 기준으로 각 압력계별 충격압력 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 가는 선으로 된 기둥은 최대 압력값을 나타내고, 막대 기둥은 피크(Peak) 압력값 상위 1/10의 평균을 나타낸다. 얼리지 압력과 관계없이 평균 수면 부근과 모델 화물창 상부 모서리 부근의 압력값이 일괄적으로 크게 나타남을 Fig. 4를 통해 알 수 있다. 평균 수면 부근에서 큰 압력이 나타나는 이유는 가진으로 생성된 파가 수직 벽면의 평균 수면 부근에 부딪치면서 높은 압력을 생성하기 때문이다. 또한 내부 유체가 수직 벽면과의 충돌 후 발생시키는 제트로 인해 상부 모서리 부근에도 높은 압력이 나타나고 있다. 최대 압력값과 상위 1/10 피크 압력값의 평균이 가장 큰 압력계는 모든 실험 케이스에서 압력계 2번에서 나타났다. 즉, 수직 벽면에 화물창 내부 유체는 적재 높이보다 조금 낮은 압력계 2번과 3번 부근에서 큰 충격 압력을 발생시킴을 확인할 수 있다. 최대 압력값은 각 얼리지 압력에 대하여 불규칙적으로 나타나고 있지만, 내부 기체 압력이 1bar에서 0.025bar까지 줄어들면서 큰 충격 압력을 보이는 압력계 1번과 2번에서는 상위 1/10 피크 압력값의 평균은 증가하는 경향을 고찰할 수 있다. 이것은 얼리지 압력의 감소가 유

체 유동을 보다 자유롭게 허용하기 때문이다.

3.2 주요 압력계에서의 얼리지 압력별 충격압력 분포

통계적 해석에 따라 모델 화물창 상부 모서리 부근과 평균 수면 부근의 압력계에서 높은 압력값을 가진다는 것을 Fig. 4를 통하여 고찰할 수 있었다. Fig. 5에서는 그 두 부근의 압력계에 대하여 얼리지 압력별 최고 압력값과 피크 압력값 상위 1/10의 평균을 나타내었다. Fig. 5 (a), (b)에서 알 수 있듯이 동일 가진 주파수일 경우에도, 실제 유체 충격이 발생하는 수직 벽면에서는 얼리지 압력이 줄어들면서 충격압력이 커지는 경향을 유지한다. 가장 큰 압력이 발생하는 압력계 2번에 대하여 피크 압력 상위 1/10 평균을 각 얼리지 압력에 대하여 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. 모델 화물창 내부 기체 영역 압력이 1bar에서 0.025bar로 줄어들면서 유체충격 압력은 0.222bar의 차이가 발생함을 알 수 있다.

3.3 얼리지 압력에 따른 내부 유동장 비교

얼리지 압력 1bar, 0.05bar 그리고 0.025bar에 대하여 초고속 카메라를 이용하여 모델 화물창 내부의 유체 운동에 관한 영상을 획득하였다. 영상을 획득한 시간은 약 15초 정도이고, 모델 화물창 내부의 슬로싱 현상은 2~3 사이클 이후에는 완전 발달한 형상을 보인다. 따라서 초고속카메라로 획득한 초기의 15초는

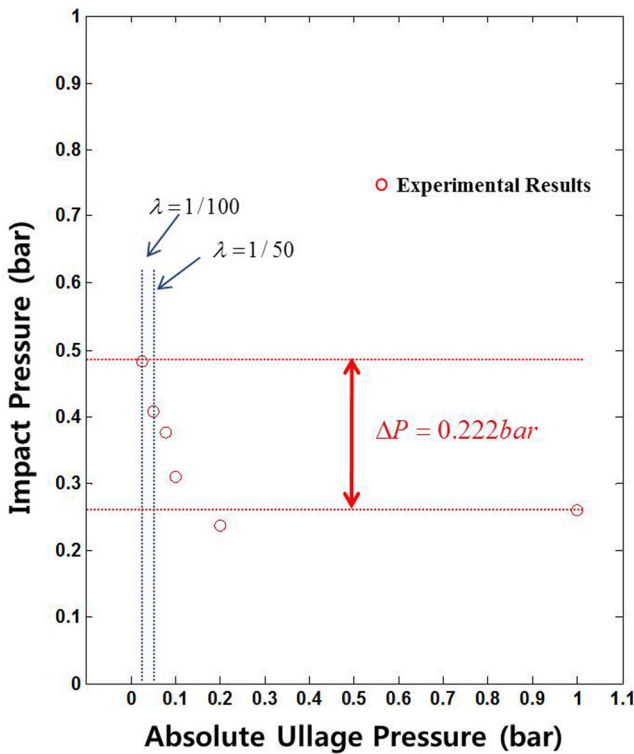


Fig. 6 Impact pressures (1/10 avg.) at Ch #2

완전히 발달한 모델 화물창 내부 유체 운동에 관한 영상을 포함하고 있다. Fig. 7은 이러한 유체 운동 중 특징적인 일부분을 나타낸 것이다. 얼리지 압력이 클수록 제트 스프레이가 덜 발생한다는 것을 알 수 있다. 1bar일 때는 모델 화물창 길이 대비 60%까지 제트 스프레이가 발생하지만, 0.05bar의 경우 70%까지 발생하였고, 0.025bar의 경우 95%까지 발생한다. 제트 스프레이의 발생 길이는 비디오 판독을 통하여 측정하였다. 얼리지 압력이 낮을수록 자유롭게 자유 표면이 움직이게 된다는 것을 확인할 수 있다. 또한 압력이 낮아질수록 유체 충격 시 더욱 더 많은 공기 방울(Bubble)이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 액화천연가스 화물창 길이 방향의 2차원 1/100 축척 모델을 사용하여 얼리지 영향에 대하여 알아보았고,

다음과 같은 결론을 고찰할 수 있었다.

- (1) 슬로싱 실험의 영상 분석을 통하여 얼리지 압력이 낮아짐에 따라 내부 유체 유동이 활발해짐을 확인할 수 있었다.
- (2) 슬로싱 현상은 내부 유체 유동의 활발한 정도에 따라 압력값의 크기가 결정된다. 화물창 내부 유체가 충격을 가하는 수직 벽면 부근과 제트가 충격을 가하는 화물창 상부 모서리 부근에서 얼리지 압력에 관계없이 큰 압력값이 발생하였다.
- (3) 가장 큰 압력값이 발생한 압력계 2번에서는 얼리지 압력이 1bar에서 0.025bar로 줄어들면서 0.2bar 정도의 압력값 차이가 나타났다. 따라서 슬로싱 실험 시 Froude 스케일에 따라 얼리지 압력을 변화시켜 실험을 실시하여야 한다는 결론에 도달하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부 가스플랜트 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

박준수, 김현이, 이기현, 권순홍, 전수성, 정병훈 (2009). "압축성이 슬로싱 현상에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 한국해양공학학회지, 제23권, 제4호, pp 12-18.

이동연 (1997). "유탄성을 고려한 탱크내 슬로싱에 대한 연구", 서울대학교 박사학위논문.

최영명, 김현이, 박준수, 권순홍, 김동진 (2009). "유체 충격 압력에 관한 압전 압력 센서 특징", 한국해양공학학회지, 제23권, 제6호, pp 17-22.

최후인, 권순홍, 박정호, 최영명 (2010). "적재율이 슬로싱 충격압력에 미치는 영향에 관한 연구", 한국해양공학학회지, 제24권, 제6호, pp 30-33.

Bass, R.L. (1972). Liquid Impact Loads in LNG Carriers, Technical Report No 1 for El Paso Natural Gas Co., Houston, Texas.

Bass, R.L. and Ransleben, G.E. Jr. (1974). Scaling Criteria for Large Amplitude Sloshing in LNG Ship Cargo Tanks, Technical Report No 2 for Methane Tanker Service Co., Southwest Research Institute, San Antonio, Texas.

Bass, R.L., Bowles, E.B., Trudell, R.W., Navickas, J., Peck, J.C.,

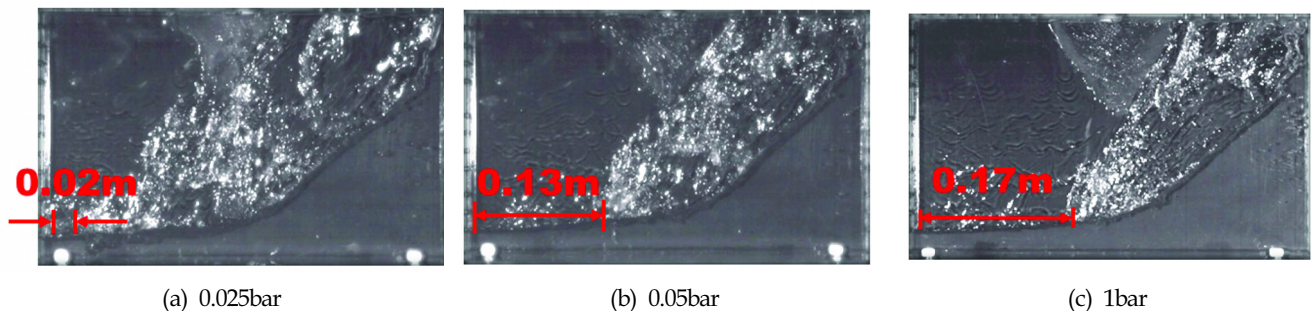


Fig. 7 View of fluids field

- Yochimura, N., Endo, S. and Pots, B.F.M. (1985). "Modeling Criteria for Scaeld LNG Sloshing Experiments", *Journal of Fluids Engineering*, Vol 107, pp 272-280.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific.
- Florschuetz. L.W. and Chao, B.T. (1965). "On the Mechanism of Vapor Bubble Collapse", *Journal of Heat Transfer, Transactions of ASME*, pp 209-220.
- Jeon, S.S., Kim, H.Y., Kang, H.D., Oh, S.H., Park, J.S., Lee, K.H. and Kwon, S.H. (2008). "A Study of Scale Dependency of model Test on Fluid Sloshing Load", *Proc. OC2008, Osaka*.
-
- 2012년 1월 20일 원고 접수
 2012년 2월 21일 심사 완료
 2012년 2월 21일 게재 확정