

적재율이 슬로싱 충격압력에 미치는 영향에 관한 연구

최후인* · 권순홍* · 박정호* · 최영명*

*부산대학교 조선해양공학과

A Study on the Effect of Filling Ratio on Sloshing Impact Pressure

Hu-In Choi*, Sun-Hong Kwon*, Jung-Ho Park* and Young-Myung Choi*

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

KEY WORDS: Impact pressure pattern 충격압력패턴, Regular excitation 단일주기가진, Sloshing experiment 슬로싱 실험, Histogram of impact pressure 충격압력 히스토그램, Filling ratio 적재율

ABSTRACT: This study presents the effect of filling ratio on sloshing impact pressure. The experiment was done with three filling ratios of 20%, 70%, and 95% of the tank height. The input of the motion was regular excitation. The total number of sensors in use were 53. They were installed on tank top and tank wall. The maximum pressures and the average of one third highest impact pressures for the whole pressure sensors were investigated. The result shows clearly the location of sensors which are exposed to the high impact pressures for different filling ratios. The characteristics of the impact patterns for three filling ratios were also examined.

1. 서 론

석유와 더불어 천연가스는 실생활의 중요한 에너지 자원으로 널리 이용되고 있다. 2008년 금융위기 이후 전 세계적으로 신조선박 발주가 줄었고, 액화천연가스운반선(LNG Carrier) 또한 그 수주잔량이 줄어든 상태이다. 하지만 액화천연가스운반선에서 더 나아가 LNG FPSO, FSRU와 같은 선박의 개발로 새로운 수요를 창출하고 있다. 이제는 운항 중인 선박에 발생하는 슬로싱 현상뿐만 아니라, 정지한 상태에서의 슬로싱 현상을 해석하고 연구하는 활동이 활발히 이루어지고 있는 실정이다(Pastoor et al., 2005; Lee et al., 2006; Jeon et al., 2008). 그리고 화물창의 안정적 설계를 위해 액화천연가스운반선의 화물창 내부 유체충격하중을 산정하는 연구가 지속되고 있다. 슬로싱 현상은 대단히 복잡한 현상으로 이론적이나 수치해석적인 접근이 아직 어려운 실정이기 때문에 실험적 연구가 대단히 중요하다. 본 연구는 규칙 가진에 따라 발생하는 충격 압력의 분포를 모델 화물창에 설치된 53개의 압력계를 통해 분석하였다. 모델 화물창 높이의 20%, 70%, 95% 세 가지 적재율을 고려하였고, 가장 압력이 큰 순서로 5개의 압력시계열 데이터를 분석해보았다. 분석 결과 충격 압력 신호의 대표적인 형태인 와그너 형태(Wagner type)의 충격 압력(Wagner, 1932)과 바그놀드 형태(Bagnold type)의 충격 압력(Bagnold, 1939), 그리고 제트 스프레이(Jet spray) 형태의 충격 압력을 볼 수 있었다.

2. 실 험

2.1 슬로싱 가진 장치

해상 상태를 연출하기 위하여 6자유도 운동 구현이 가능한 실험 장치로, 부산대학교 조선해양공학과 해양공학실험실 보유의 슬로싱 가진 장치(Sloshing motion platform)를 사용하였다. 적재 동하중 4000kgf로 설계되었고, 실험 장치를 제어하기 위한 시스템은 크게 시스템 콘솔부, 운동 제어부 및 제어 소프트웨어로 나눌 수 있으며, 운동 제어부 및 제어 소프트웨어는 다음과 같이 다시 세분화 시켜볼 수 있다. 운동 제어부는 실제 운동을 가능하게 해주는 장치로서 전원 공급 장치, 서보 모터, 드라이브 그리고 액추에이터(Actuator)로 구성되어 있다. 운동 제어 소프트웨어는 보다 쉽게 운동 명령을 입력하기 위해 DSP(Digital signal processor), ROM(Read only memory), EMCP(Enterprise manager configuration plug-in), 운동판 설계, 튜닝, 운용 소프트웨어와 API(Application program interface) Library의 부분으로 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 서보모터와 40mm의 볼 스크류 리드를 갖추고 있는 액추에이터를 운용하고 있다. 슬로싱 가진 장치 및 시스템의 운용에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

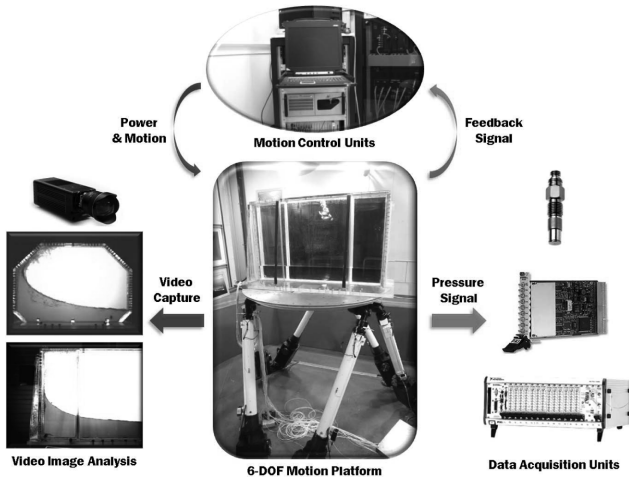


Fig. 1 Schematic view of the measurement system for experiments

2.2 실험 모델

실험에 사용된 화물창 모델은 138,000m³ 액화천연가스운반선의 No. 2 탱크의 길이 방향을 기준으로 하여 1/25 축척 2차원 형상의 직육면체(화물창 내부 L×B×H=1.75m×0.14m×1.07m)이다. 그리고 화물창 벽의 두께는 40mm 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 53개의 압력계를 설치하



Fig. 2 Model tank

Table 1 Sensor locations

| Locations | Channel# | Distance from ① (mm) |
|-----------|----------|------------------------------|
| #10 #1 | 1~10 | 10 + (40 * (10 - channel#)) |
| #11 ① | 11~28 | 10 + (18 * (channel# - 11)) |
| | 29~41 | 28 + (18 * (channel# - 11)) |
| #54 | 42~53 | 568 + (37 * (channel# - 41)) |

였다. 화물창은 대칭적 구조이므로 한 쪽 면에만 압력계를 설치하여도 충분할 것으로 생각된다. 세부적 위치로는 화물창 상부에 10개를 설치하였고, 옆쪽 벽면에 43개의 압력계를 설치하였다. 압력계의 정확한 위치는 Table 1과 같다.

2.3 실험 장치

압력 계측에는 키슬러(Kistler)사에서 제조한 ICP(Integrated circuit piezoelectric) 형태의 211B5 모델 압력계를 사용하였다. 이 압력계의 직경은 5.5mm이며 고유 진동수는 300kHz이다. 그리고 압력 데이터 획득을 위해서 내쇼날인스트루먼트(National Instrument)사의 PXI-4472B 데이터 획득 모듈을 사용하였으며, 이 모델은 최대 102.4kHz 샘플링 주파수로 8개 채널에서 동시에 신호를 획득할 수 있는 장비이다.

본 연구에서는 데이터 획득 시 20kHz의 샘플링 주파수로 실험을 수행하였고, 랩뷰(LabVIEW)를 활용하여 압력 데이터를 저장하였다.

2.4 실험 조건

20%H(Height of tank), 70%H, 95%H 적재율에서 실험을 실시하였으며, 가장 큰 압력값을 갖기 위하여 공진주파수로 가진 하였다. 공진주파수는 식 (1)과 같이 선형 관계 분산식으로부터 구하였다.

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

가진 운동의 조건은 길이 방향의 2차원 모델 화물창 형상을 고려하여 서어지(Surge) 방향의 병진운동에서 실험을 하였다. 각각의 적재율에 따른 공진주파수는 Table 2와 같으며, 가진 주기를 고려하여 120초 동안 실험을 수행하였다. 운동의 진폭은 모델 화물창 길이 방향의 10%(175mm)로 설정 하였다.

Table 2 Experimental condition

| Filling ratio [%H] | Frequency [Hz] |
|--------------------|----------------|
| 20 (214.1 mm) | 0.4046 |
| 70 (749.2 mm) | 0.6243 |
| 95 (1016.8 mm) | 0.6510 |

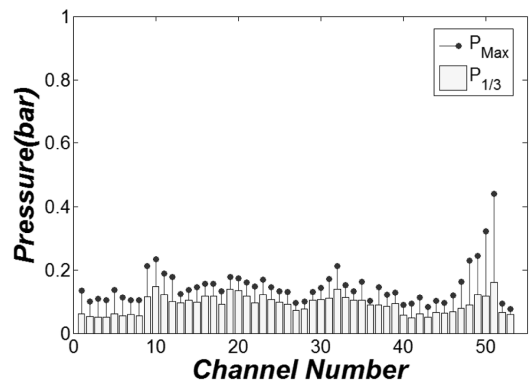


Fig. 3 Impact pressure distribution(20%H)

3. 실험 결과 및 해석

3.1 센서별 충격압력의 분포

본 실험에 사용된 53개의 센서별로 측정된 최대 압력값 (Maximum peak)과 상위 1/3 압력의 평균값들을 Figs. 3~5에 나타내었다. 두 압력값을 쉽게 구분 할 수 있도록 최대 압력값은 원으로 그리고 상위 1/3 압력값의 평균은 막대그래프로 나타내었다. 압력값의 선별적 적용을 위해 0.01bar 이하의 데이터는 고려하지 않았다. 먼저 20%H 적재율의 경우인 Fig. 3에 따르면 수위 부근에 위치한 51번 압력계에서 가장 큰 압력값 0.44bar를 보였다. 이것은 반대편 화물창에서 이동하는 유체가 측면 화물창에 부딪히면서 나타나는 것이다. 뿐만 아니라, 상위 1/3 평균 압력값 또한 0.16bar로 동일한 위치에서 가장 크게 발생하였다. 그 외에 모델 화물창 상부 모서리 부근의 10번 압력계에서도 상위 1/3 평균 압력값이 0.15bar로 크게 나타나는 것으로 보아, 수위 부근과 상부 모서리 부근에서 상대적으로 큰 압력값이 집중된다는 것을 쉽게 알 수 있다. 다음으로 Fig. 4에 나타낸 70%H 적재율의 경우, 최대 압력값은 33번 압력계에서 나타났으며, 그 크기는 0.96bar이다. 이 크기는 다른 적재율에서의 최대 압력값에 비해 두 배 정도 큰 압력값으로 이 압력계가 위치한 지점은 제트 스프레이가 벽에 충격을 가하는 지점이다. 또한 수위 부근의 23번 압력계에서도 0.95bar의 아주 큰 압력값을 보인다. 압력값 상위 1/3 평균에서는 모델 화물창 상부 모서

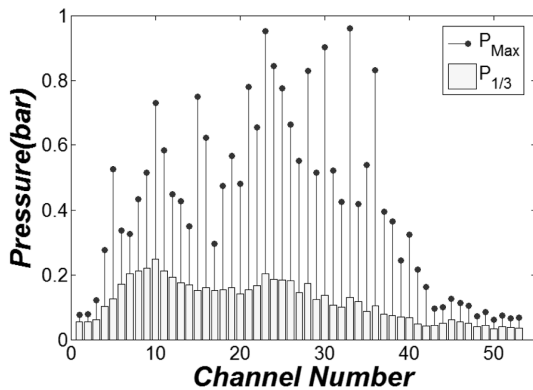


Fig. 4 Impact pressure distribution (70%H)

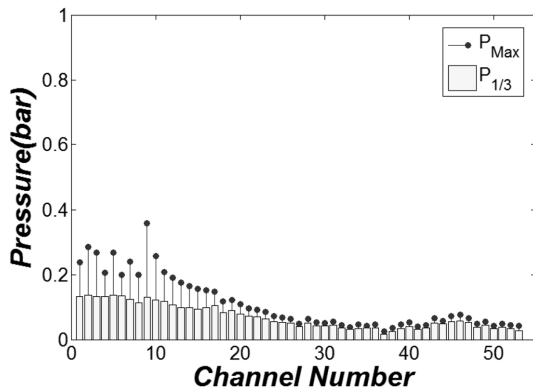


Fig. 5 Impact pressure distribution (95%H)

리에 위치한 10번 압력계에서 가장 큰 0.25bar의 압력 평균값을 가진다. 이것은 모델 화물창에서 가진 운동 중 지속적으로 큰 충격 압력이 가해지는 곳은 상부 모서리 부근이라는 것을 알 수 있다. 95%H 적재율에서 각 채널별 충격압력 분포를 조사해 본 결과, 상부 모서리 부근에 위치한 9번 압력계에서 가장 큰 압력값 0.36bar가 나타났다. 하지만, 다른 적재율에 비해 상대적으로 크지 않은 압력값을 나타내었고, 적재율이 높은 만큼 수위가 깊어질수록 압력값이 낮아지는 경향을 보인다. 각 채널별 압력 데이터 분포는 Fig. 5에 나타내었다.

3.2 센서별 충격압력의 패턴

각 적재율 별로 가장 압력이 큰 순서로 5개의 압력시계열 데이터를 정리해서 중요한 충격 압력의 패턴을 조사해 보고자 하였다. 압력이 작용한 위치를 Figs. 6~8에 나타내었고, 번호는 압력 크기의 순서를 나타낸다. 압력계의 위치가 대단히 밀집되어 있는 경우, 부득이 번호의 크기가 상대적으로 크게 표시되어있다. 20% 적재율의 경우를 나타내는 Fig. 6에 따르면 5개의 압력시계열이 모두 와그너 형태의 충격 압력을 나타내는 것을 알 수 있고 이것은 이 적재율에서 공기 주머니(Air pocket)의 영향이, 큰 충격 압력에 기여하는 바가 없다고 할 수 있다. Fig. 7에는 적재율 70%의 경우를 나타내는데 수면 부근에 큰 압력이 작용함을 우선 알 수 있고 다양한 충격 형태가 나타나는 것이 그 특징이다. 와그너 형태의 충격 압력은 23번 압력계에서 나타났

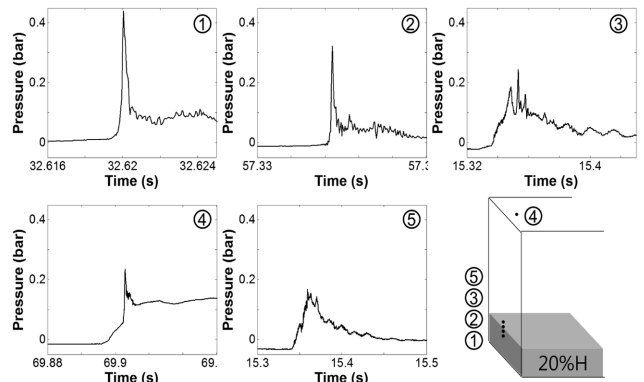


Fig. 6 Patterns of top 5 pressures (20%H)

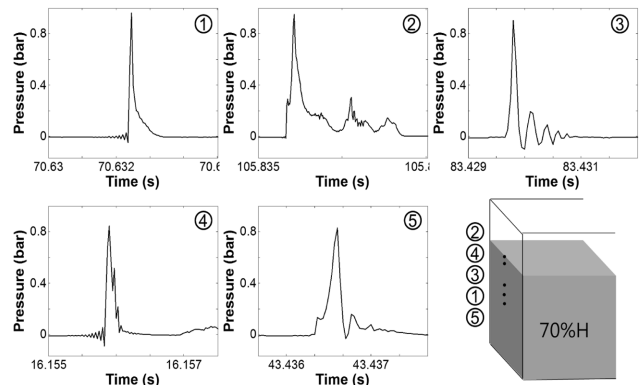


Fig. 7 Patterns of top 5 pressures (70%H)

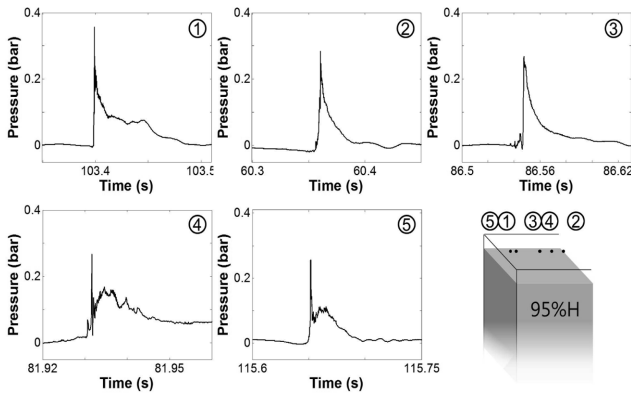


Fig. 8 Patterns of top 5 pressures (95%H)

고 바그놀드 형태의 충격 압력은 24번과 30번 압력계에서 나타났다. 그리고 수면 아래에 위치한 33번과 36번 압력계에는 유체가 반대쪽으로 이동하면서 이들 압력계가 공기 중에 노출이 되고 반대쪽에서 발생한 제트 스프레이에 의한 충격 압력이 가해졌음을 알 수 있다. 마지막으로 Fig. 8에는 적재율 95%의 결과를 도시하였다. 이 경우는 시계열이 모두 와그너 형태의 충격 압력을 보여 주었고, 바그놀드 형태와 중첩되는 형태도 나타남을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 적재율의 변화가 슬로싱 충격 압력에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 적재율의 변화가 각 센서에 작용하는 최대 압력과 상위 압력값 1/3의 평균에 미치는 영향에 대해서 알아보았고, 각 적재율 별로 가장 압력이 큰 순서로 5개의 압력시계열 데이터를 정리해서 중요한 충격 압력의 패턴을 알아보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 20% 적재율의 경우, 수위 부근에서 큰 압력값이 발생하였고, 상위 5개의 압력값의 시계열은 모두 와그너 형태의 충격 압력이 발생하였다.

(2) 70% 적재율의 경우, 제트 스프레이가 충격을 가하는 모델 화물창 측면에서 가장 큰 압력값이 나타났다. 압력의 형태는 와

그너·바그놀드 형태의 충격 압력으로 다양하게 나타났다.

(3) 95% 적재율의 경우, 상부 모서리 부근에 위치한 압력계에서 가장 큰 압력값이 나타났다. 하지만, 다른 적재율에 비해서 상대적으로 낮은 압력값을 보였다. 상위 5개의 압력값의 시계열은 모두 와그너 형태의 충격 압력이었고, 바그놀드 형태와 중첩되는 형태도 보여주었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

Bagnold, R.A. (1939). Interim Report on Wave Pressure Research, Englewood Cliffs, Prentice Hall.

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.

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", The Proc. of The Sixteenth ISOPE Conference, Vol III, pp 193-198.

Pastoor, W., Ostvold, T.K., Byklum, E. and Valsgard, S. (2005). Sloshing in LNG Carriers for New Designs, New Trades and New Operations, GasTech, Bilbao, Spain.

Wagner, H. (1932). "Über Stoss - und Gleitvorgänge and der Oberfläche von Flüssigkeiten", ZAMM, Vol 12, pp 193-235.

2010년 12월 6일 원고 접수

2010년 12월 9일 심사 완료

2010년 12월 17일 게재 확정