

## 동일 형상의 서로 다른 크기를 가지는 2 차원 4 각 탱크의 슬로싱 충격 압력에 관한 실험적 연구

황윤식<sup>†</sup>\*, 정준형\*, 김대웅\*, 류민철\*

대우조선해양(주) 선박해양기술연구소\*

### An Experimental Study on Sloshing Impact Pressures with Two Identically Shaped Rectangular 2-Dimensional Model Tanks with Different Sizes

Yoon-sik Hwang<sup>†</sup>\*, Jun-hyung Jung\*, Dae-woong Kim\* and Min-cheol Ryu\*

Ship & Ocean R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Eng. Co., Ltd.\*

#### Abstract

Recent growth in LNG market has led dramatic increase in new buildings of LNG carriers and several large LNG carriers are now being constructed by shipbuilders in Korea. Large size LNG carriers has brought keen concerns on the issue regarding safety of cargo containment systems and sloshing impact load which is the critical source of loads on the membrane type containment systems. Up to the present, the best way to properly assess sloshing impact pressures on surrounding walls is a model testing for wide-ranged excitation conditions. These impact pressures obtained from model tests sometimes need to be interpreted to full-scale values and in the near future this necessity will be strengthened for more rigorous and direct safety assessment of LNG cargo containment system. In this paper, a basic experimental study is carried out with two different sized, 2-D identically shaped model tanks excited in simple translational motions. Relationships between pressures of different sized model tanks are investigated. Model tanks are filled with fresh water and equipped with same sized pressure sensors.

※Keywords: Sloshing impact pressure, 2-D rectangular tank, Experiment

#### 1. 서론

액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas) 시장의 성장으로 인해 LNG 운반선 건조량의 증가와

더불어 크기도 증가하여, 현재 화물적재용적이 210,000m<sup>3</sup>에 달하는 선박의 시작선이 건조 완료되어 시운전과 선주에게 인도되는 단계에 와 있고, 260,000m<sup>3</sup>를 넘는 대형 LNG 운반선이 건조 단계에 있다. 이들 대형 LNG 운반선은 조선업체들과 관련 기관 및 정부의 노력으로 모두 국내에서

<sup>†</sup>교신저자: yshwang1@dsme.co.kr, 010-9974-5847

건조되고 있는 상황으로 자부심을 느낄 수 있는 부분이다.

대형 LNG 운반선의 건조와 더불어 중간 크기의 LNG 선에 대한 수요와 LNG terminal 개념의 부유식 생산 및 저장 설비에 대한 요구가 늘어가고 있으며, 시장에서의 이러한 요구는 설계와 건조를 담당하는 조선해양업체에서의 적극적인 기술 향상과 관련 기관과 정부의 지속적인 지원이 수반되어야 만족시킬 수 있을 것이다.

LNG 운반 및 저장에 관련한 선박 또는 설비들에 있어서 극저온의 LNG 를 저장하는 화물창의 안전성 확보는 중요한 설계 요소의 하나이며, 안전성 확보 여부에 따라서 특정 화물창의 적용을 통한 프로젝트의 성사 여부가 결정될 수도 있고, 다른 개념의 화물창을 고려해야 하는 등의 기술적으로 중요한 결정 인자로 작용하고 있다. LNG 화물창의 안전성을 평가 및 보증하는데 있어서 하중 측면에서 고려되는 슬로싱 현상과 이에 기인하는 화물창 벽면에서의 충격 하중의 정도 높은 추정치는 필수 불가결한 요소이다. 멤브레인(membrane) 타입의 화물창에 관한 안전성 평가에 있어서는 프랑스의 GTT 라는 회사의 독점 기술에 의존하는 경향이 지속되고 있고, 선급에서의 해당 LNG 운반선의 승인을 위한 과정에서 슬로싱 현상 및 화물창 안전성 평가 절차가 통일성 있게 정립되어 있지 못하다. 현재 GTT 와 여러 선급들이 각자의 개념에 의거한 평가 절차를 정립해 적용하고 있으며, 이러한 과정에서 여러 기술적인 항목에 대한 검토도 개별적으로 이루어지고 있다.

슬로싱 현상에 의한 충격 압력의 예측은 현상의 복잡성으로 인해 현재 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있는 유일한 방법은 실험에 의존하는 것이다. 초기 설계 단계에서 활용할 수 있는 비교적 효율적인 수치해석 프로그램도 존재하고, 좀더 엄밀한 해석을 위한 전용 프로그래밍 및 범용 CFD 프로그램들도 쉽게 확보할 수 있으나, 아직은 화물창의 설계와 안전성 평가를 위한 도구로서 실제 프로젝트 단계에서 활용되기에는 무리가 있으며, 엄밀한 수준의 해석을 위한 시간적 비용이 모형 실험에 비해 저렴한 수준이라고 볼 수도 없다. 물론 획기

적인 화물창의 개발이나 기 개발되어 있는 다른 개념의 화물창을 적용함으로써 슬로싱 현상 자체를 염려하지 않아도 되는 경우는 더 이상 슬로싱 현상을 중요한 부분으로 논할 필요가 없을 것이므로, 기술자 입장에서는 두 가지 방향 모두를 염두에 두고 기술을 쌓고 아이디어를 만들어 내는 것이 필요할 것이다.

현재 가장 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 실험적 방법에서도 여러 가지 어려운 점들이 존재하나, 본 논문에서는 그 중 하나인 모형 탱크에 대한 실험에서 얻은 충격압력을 어떻게 실선으로 확장할 것인가에 대한 실험적 검토 결과를 다루고 있다. 충격 압력의 실선 확장 법칙에 관계하는 모든 변수들을 대상으로 하는 일반론을 다루는 것은 아니며, 기하학적 상사와 Froude 상사를 고려하고 물과 공기로 채워진 서로 다른 크기의 두 모형 탱크에서 얻어지는 충격 압력의 연관성을 검토하였다.

Abramson 등(1974)은 슬로싱 실험에서의 충격 압력항을 무차원화 된 몇 개 항들의 함수로 고려하여 각 항의 의미와 중요성을 언급한 바 있으며, Pastoor(2005) 등은 모형 탱크의 실험 결과를 실선으로 확장함에 있어 고려해야 할 내용들과 기존의 연구 내용들을 정리한 바 있는데, 실험에서 획득한 압력을 어떻게 실선으로 확장할 것인가에 대해서는 특히, 액체내에 포함될 수 있는 기체로 인한 압축성의 고려 여부에 따라 서로 다른 확장 방법의 고려 가능성을 언급하고 있다. Gavory(2005)도 슬로싱 충격 압력의 실선확장 법칙에 대한 명확한 정의가 쉽지 않음을 언급하고 이에 대한 연구를 GTT 내에서도 중요한 부분으로 고려하고 있음을 살펴 볼 수 있다.

본 논문에서 다루고 있는 모형 실험은 부산대학교에 설치되어 있는 6 자유도 모션 플랫폼을 활용하여 수행되었고, 기초 실험의 목적을 고려하여 2차원 4 각 탱크 형상을 대상으로 하였다. 탱크의 길이-높이 비는  $140,000\text{m}^3$  급의 LNG 운반선 화물창이 가지는 길이-높이 비를 기준으로 정하였고 모형 탱크 간의 축척비는 2 배가 되도록 하였다. Froude 상사를 만족하도록 가진 조건을 설정하고

계측된 압력을 위치별로 비교하였다. 적재 높이와 운동의 진폭 및 계측 위치에 따라 서로 다른 경향을 보이면서, 대체로 흔히 거론되는 액체의 압축성 고려 여부에 따른 두 가지 확장 방법에 준하는 결과를 확인 할 수 있었다. 이러한 차이를 보이는 결과들에 대해서는 압력 신호의 시계열에 대한 상세한 추가 검토가 필요한 것으로 판단하며, 아울러 실제 화물창의 횡단면 형상을 고려한 8 각 모형 탱크에 대해서도 유사한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 더 나아가서는 3 차원 모형 탱크에 대한 검토도 필요할 것이며, 궁극적으로 실선 확장 방법을 깊이 있게 논하고 정립하기 위해서는 다른 분야에서와 마찬가지로 슬로싱 충격 압력에 대한 실선 계측이 필요하며, 현재 이러한 시도를 위한 움직임이 몇몇 그룹에서 시작된 상황이다. 향후 이들 결과에 주목할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 2. 모형 탱크, 압력 센서 및 6 자유도 모션 플랫폼

모형 탱크는  $140,000\text{m}^3$  급의 LNG 운반선 화물창의 치수를 근거로 하여, 종단면 형상을 기준으로 삼아 2 차원 유동여 형성될 수 있도록 구성하였다. 축척비는 각각 1/50, 1/25 로 취하여 두 모형 탱크 간의 길이 비가 2 배가 되도록 하였다. Table 1 에 실험에 사용된 모형 탱크들의 치수를 나타내었고, Fig. 2 에서는 두 탱크의 크기를 직접 비교해 볼 수 있도록 비교 사진을 담았다.

모형 탱크의 가진을 위해 부산대학교에 설치되어 있는 6 자유도 모션 플랫폼을 이용하였으며, Fig. 1 에서 모션 플랫폼 전체 형상을 살펴 볼 수 있다.

Table 1 Dimensions of Tank Models

Tank	1/50 Model	1/25 Model
Dimension	Tank	Tank
L(mm)	874.4	1748.8
B(mm)	70.0	140.0
H(mm)	535.2	1070.3

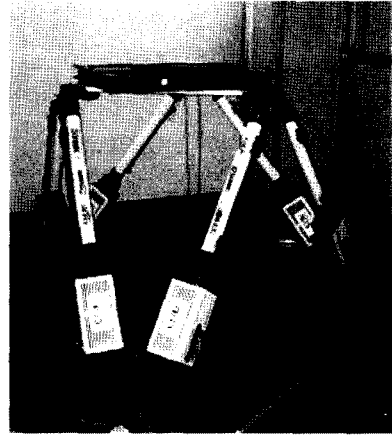


Fig. 1 Sloshing Motion Platform at Pusan National University

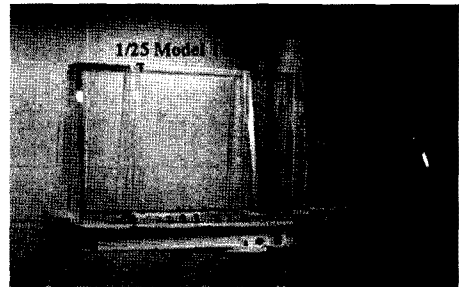


Fig. 2 Comparison of Two Model Tanks

슬로싱에 의한 충격 압력 계측을 위해서 서로 다른 크기의 두 탱크에 기하학적으로 동일한 위치에 압력 센서를 설치하였고, 실험에서 고려된 액체(fresh water)의 적재 높이에 따라 두 가지의 센서 위치 조항을 고려하였다.

Fig. 3 과 Fig. 4 는 액체의 적재 높이가 탱크 높이의 40%인 경우에 대한 센서 설치 위치를 나타낸 것이고, Fig. 5 와 Fig. 6 은 적재 높이가 탱크 높이의 70% 및 90%인 경우에 대한 센서 설치 위치를 보인 것이다.

본 실험에서 고려되지 못한 사항으로, 두 모형 탱크의 크기가 서로 다르기 때문에 엄밀한 기하학적 상사를 고려하자면, 압력 계측을 위한 센서의 계측부 면적도 이에 부합하게 고려되어야 하나, 본 실험에서는 불가피하게 두 탱크 모두에 동일한

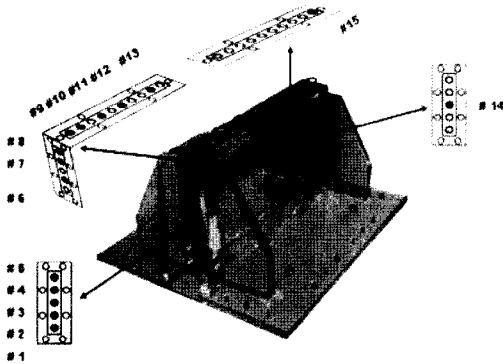


Fig. 3 Pressure Sensor Locations of 1/50 Model(40%H Filling Case)

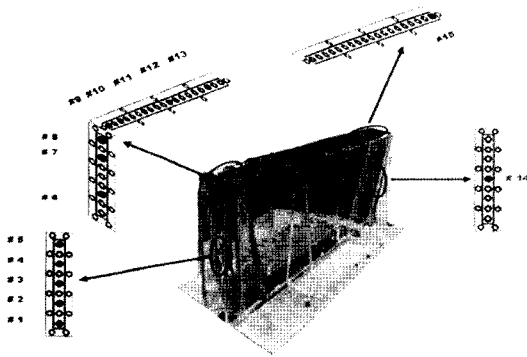


Fig. 4 Pressure Sensor Locations of 1/25 Model(40%H Filling Case)

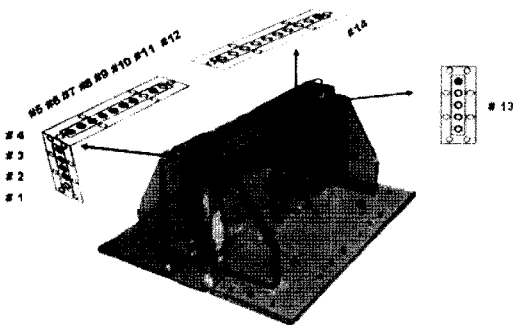


Fig. 5 Pressure Sensor Locations of 1/50 Model(70%H, 90H Filling Cases)

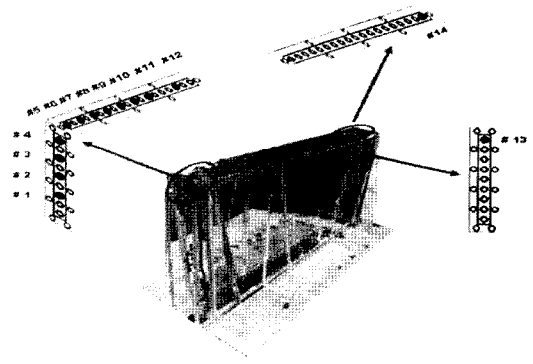


Fig. 6 Pressure Sensor Locations of 1/25 Model(70%H, 90H Filling Cases)

센서를 적용하였다. 이러한 센서 계측 면적의 기하학적 상사 측면에서의 불일치에 대해서는 실험 결과를 분석하는 과정에서 다시 한번 언급될 것이나, 실험 구상 단계에서는 이러한 불일치로 인한 영향이 큰 모형 탱크에서의 '상대적'으로 큰 충격 압력으로 나타날 것으로 예상한 바 있다. 이는 충격 압력이 국부적인 특성으로 나타날 수 있음을 고려한 예상이었으며, 본 실험 결과에서 이러한 가능성이 완전히 배제되었다고 볼 수는 없다. 압력 계측에 이용된 센서의 압력 계측부는 직경이 6mm 인 원형으로 구성되어 있다.

### 3. 실험 조건 및 결과

#### 3.1 실험 조건

모형 탱크의 가진은 탱크 길이 방향으로의 병진 운동만을 고려하였다.

실험 조건은 3 개의 적재 높이를 고려하고, 각각의 적재 높이에 해당하는 내부 유동의 이론적인 고유 주기에 대해 2 개의 진폭을 선정하였다. 진폭은 모형 탱크의 길이를 기준으로 각각 5%와 10%로 취하였다. Table 2 와 에 1/50 및 1/25 모형 탱크에 대한 가진 조건을 정리하였다.

진폭은 탱크의 길이에 비례하고, 동일한 적재율에 대한 두 탱크의 가진 주기는 탱크 길이의 제곱근에 비례하게 정하였으므로 두 탱크는 Froude 상사를 만족시키도록 실험 조건이 설정된 것이다.

Table 2 Test Cases (1/50 Model Tank)

Filling Height	Excitation Amplitude	Excitation Frequency
214.1mm (40%H)	43.72mm 87.44mm	0.7597Hz
374.6mm (70%H)	43.72mm 87.44mm	0.8829Hz
481.6mm (90%H)	43.72mm 87.44mm	0.9157Hz

Table 3 Test Cases (1/25 Model Tank)

Filling Height	Excitation Amplitude	Excitation Frequency
428.1mm (40%H)	87.44mm 174.88mm	0.5372Hz
749.2mm (70%H)	87.44mm 174.88mm	0.6243Hz
963.3mm (90%H)	87.44mm 174.88mm	0.6475Hz

3.2 결과 분석

각 센서에서의 압력 신호는 sampling rate 을 20kHz로 취해 받았고, 축척에 관계없이 동일한 sampling rate를 적용하였다. 계측된 압력신호에서 유의한 peak 값을 취하기 위해서 peak over threshold method 를 적용하고 threshold 값은 모형 탱크의 크기에 따라 달리 적용하였으며, 1/50 탱크에 대해서는 5mbar, 1/25 탱크에 대해서는 10mbar를 적용하였다. 각 조건의 1회 실험은 5분 동안 수행되었으며, 충분한 압력 신호 확보를 위해, 1/50 탱크에 대해서는 2회씩, 1/25 탱크에 대해서는 3회씩 반복 실험을 수행하였다.

Fig. 7 에서 Fig. 12 까지는 각 실험 조건에 대한 일부 센서에서의 1 회 분 실험의 전체 압력 신호 시계열을 보여주고 있다.

규칙 운동에 대한 실험이지만, 압력 신호는 불규칙한 특성을 보인다. 물론 불규칙 운동으로 야기될 충격 압력 신호는 이보다 더 불규칙적인 특성을 보이게 될 것이나, 일반적으로 규칙 운동

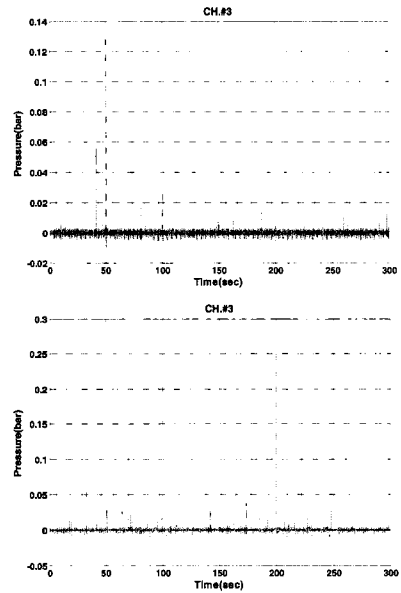


Fig. 7 Examples of time histories of pressure signals at ch. #3 (upper : 1/50-tank, lower : 1/25-tank, FL40%H, AMP5%L)

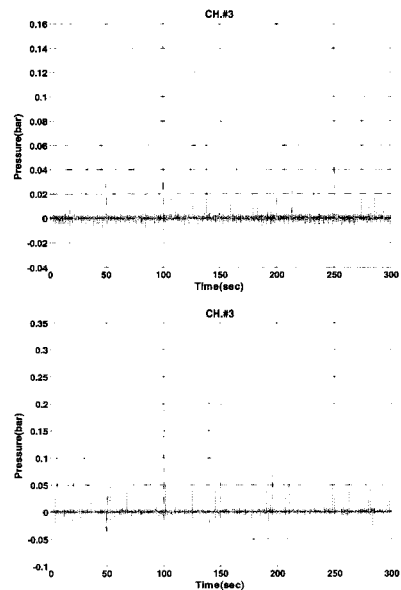


Fig. 8 Examples of time histories of pressure signals at ch. #3 (upper : 1/50-tank, lower : 1/25-tank, FL40%H, AMP10%L)

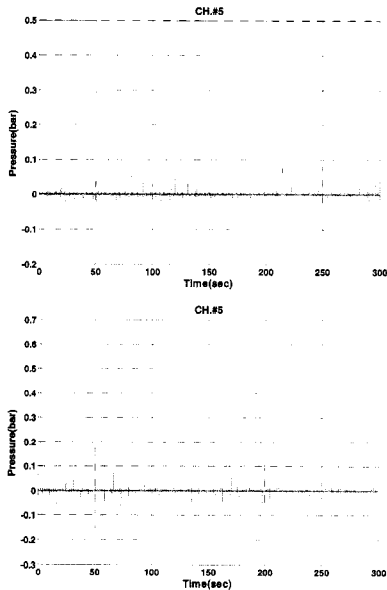


Fig. 9 Examples of time histories of pressure signals at ch. #5 (upper : 1/50-tank, lower : 1/25-tank, FL70%H, AMP5%L)

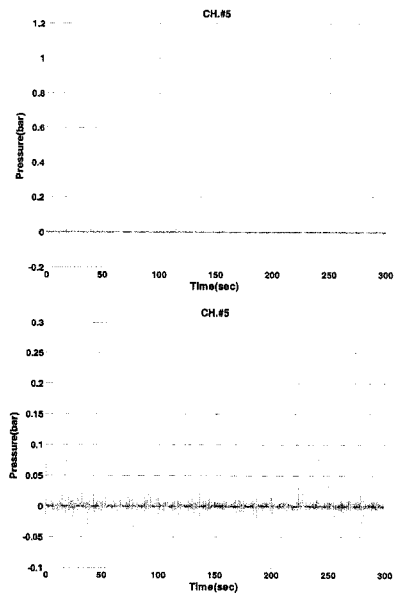


Fig. 11 Examples of time histories of pressure signals at ch. #5 (upper : 1/50-tank, lower : 1/25-tank, FL90%H, AMP5%L)

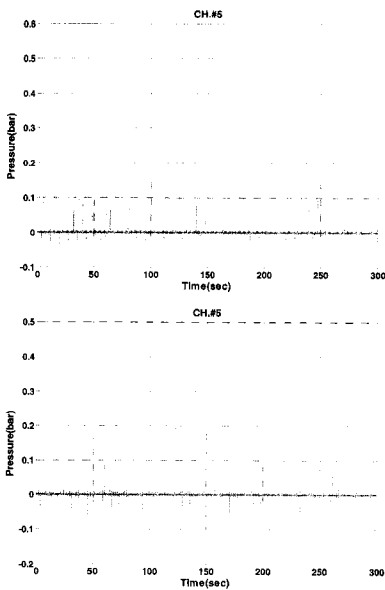


Fig. 10 Examples of time histories of pressure signals at ch. #5 (upper : 1/50-tank, lower : 1/25-tank, FL70%H, AMP10%L)

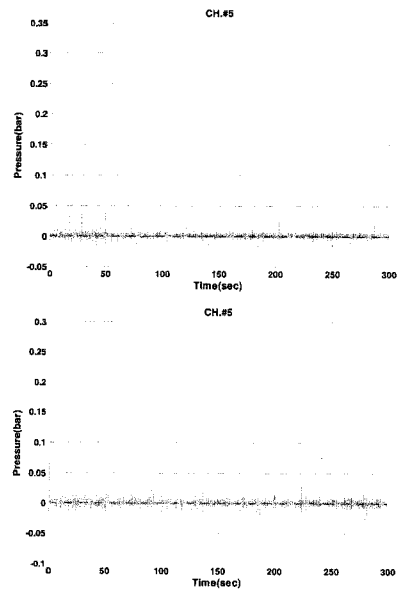


Fig. 12 Examples of time histories of pressure signals at ch. #5 (upper : 1/50-tank, lower : 1/25-tank, FL90%H, AMP10%L)

(input)에서 기대해 볼 수 있는 결과의 규칙성은 슬로싱 충격 압력(output) 신호에서는 기대할 수 없는 것이 실제 현상이다. 이러한 신호 특성을 근거로 하여 수치해석 결과를 검증함에 있어서도 단순한 압력 신호의 시계열 만의 비교보다는 통계적인 수치를 확보하여 검토하는 등의 다양한 고려가 필요할 것임을 예상할 수 있다.

본 논문에서 살펴 보고자 하는 모형 탱크의 축척비에 따른 압력 특성의 비교 역시 통계적인 처리 결과를 기준으로 하였다.

Peak over threshold method 를 이용해 추출한 압력 peak 값의 개수는 실험 조건과 계측 위치에 따라 조금씩 차이가 있으나, 대략 400 개 전후로 얻어졌으며, 통계적인 처리에 충분한 수의 peak 값이 얻어진 것으로 판단하였다. 추출된 각 조건 및 각 센서 위치에서의 peak 값을 전체 평균, 1/3-평균, 1/10-평균 값 등으로 구분하여 대표값을 얻고, 본 논문에서는 전체 peak 의 평균값을 기준으로 검토하였다. 나머지 1/3-평균 및 1/10-평균 값에서도 경향은 대체로 유사하게 나타났다.

두 모형 탱크에서 얻어진 충격 압력을 비교하기 위해 압력에 대한 다음의 두 가지 무차원화 방법을 고려하였다.

- 1)  $P/(\rho(L/T)^2)$  : Incompressible
- 2)  $P/(\rho C(L/T))$  : Compressible

여기서  $P$  는 슬로싱 충격 압력,  $\rho$  는 액체의 밀도,  $L$  은 특성 길이로 모형 탱크의 길이,  $T$  는 탱크의 가진 주기로 보았다.  $C$  는 매질에서의 음속이며, 본 검토에서는 변화되지 않는 값으로 보았다. 실험 조건은 Froude 상사에 의거하여 정해졌으므로, 1) 에 의한 무차원화의 경우 압력이 길이 비(또는 속도의 제곱)에 비례하는 것으로 보는 것이며, 2) 에 의한 무차원화의 경우 길이 비의 제곱근(또는 속도)에 비례하는 것으로 보는 셈이다.

먼저 실험이 수행된 모든 조건, 모든 센서에서의 계측된 압력 결과 평균치를 Fig. 13, Fig. 14 그리고 Fig. 15 에 보였다.

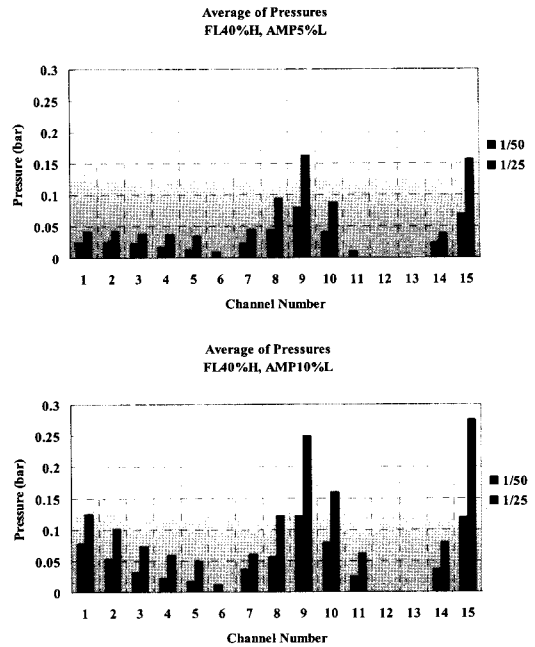


Fig. 13 Pressure comparison (40%H Filling Case)

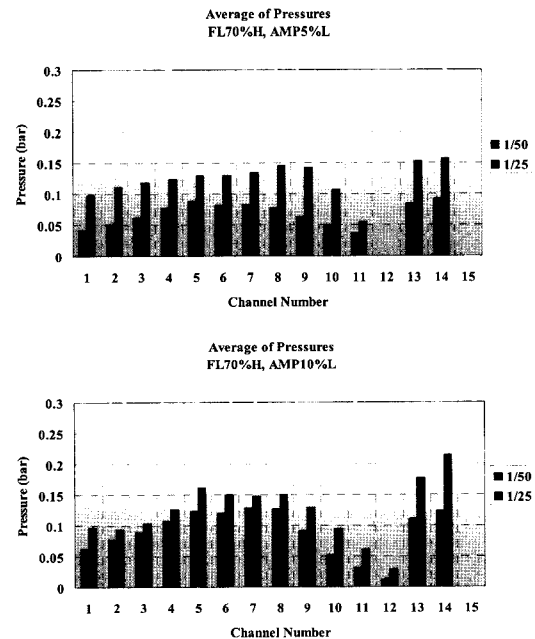


Fig. 14 Pressure comparison (70%H Filling Case)

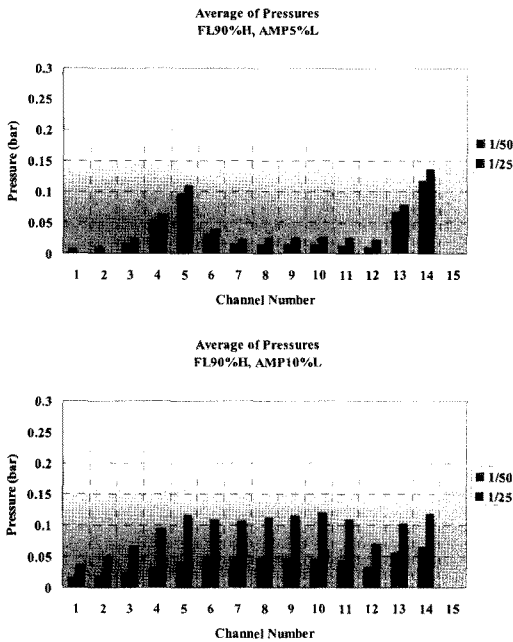


Fig. 15 Pressure comparison (90%H Filling Case)

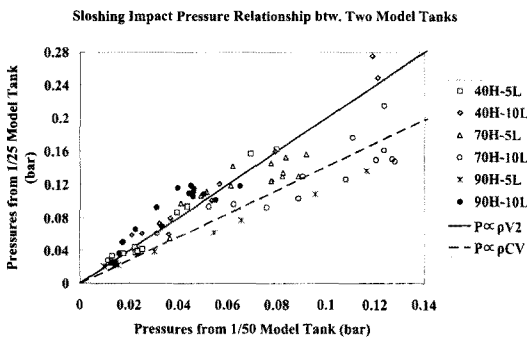


Fig. 16 Relationship between pressures from two model tanks (all cases, all sensors)

두 모형 탱크에서 얻어진 충격 압력의 크기를 각각 가로, 세로 축에 나타내어 상관관계를 파악해 보면 Fig. 16 과 같은 분포를 살펴볼 수 있는데, 앞서 언급한 바에 의거하여 충격압력이 길이 비 (또는 속도의 제곱)에 비례하는 경우의 기준선을 실선으로 나타내고, 길이 비의 제곱근(또는 속도)에 비례하는 경우의 기준선을 파선으로 나타내어

함께 도시하였다.

두 탱크의 길이 비가 2 이므로 실선으로 표시된 기준선의 기울기는 2 이고, 파선으로 표시된 기준선의 기울기는  $\sqrt{2}$  이다. 두 탱크에서 얻어진 충격 압력이 두 기준선을 따라 분포하고 있음을 알 수 있는데, 액체의 적재율과 진폭 및 압력의 크기(계측 위치)에 따라 차이들을 보이고 있음을 알 수 있다.

적재 높이에 따라 별도의 관계분포로 살펴보면, Fig. 17 의 40% 적재 높이에 해당하는 경우는 대체로 압력의 특성이 길이 비(또는 속도의 제곱)에 비례하는 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

이와는 달리 Fig. 18 에 도시한 70% 및 90% 적재 높이의 경우에는 길이 비의 제곱근(또는 속도)에 비례하는 관계를 보여주며, 특히 압력이 클수록 그러한 관계가 강한 것으로 보인다.

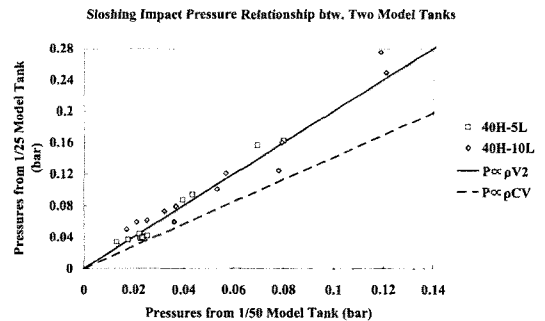


Fig. 17 Relationship between pressures from two model tanks ( $P \propto v^2$ )

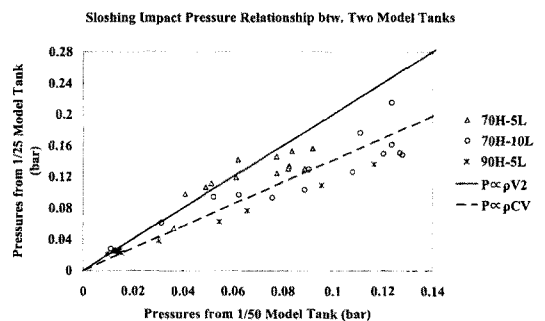


Fig. 18 Relationship between pressures from two model tanks ( $P \propto vCV$ )



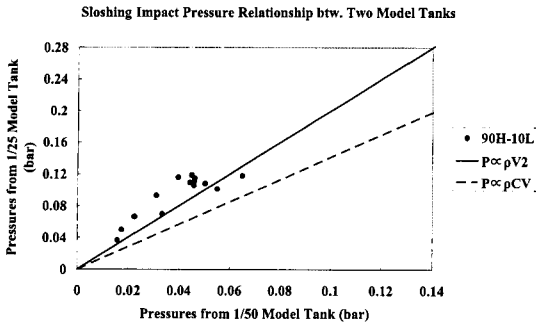


Fig. 19 Relationship between pressures from two model tanks (special case)

기준선에서 많이 벗어나는 관계를 보이는 조건으로 Fig. 19 에 보인 90% 적재 높이, 10%L 진폭을 고려한 경우를 볼 수 있다. 본 연구를 위한 실험에서 압력 계측 센서의 계측부 면적에 있어서의 기하학적 상사를 충족시키지 못한 문제점이 있음을 언급한 바 있다. 또한 이러한 문제는 국부적으로 높은 압력이 집중되는 특성이 나타나는 경우, 큰 탱크에서 계측 될 압력이 작은 탱크에서의 것보다 '상대적'으로 클 가능성을 우려한 바 있다. 그리고, Fig. 19 에 보인 결과가 이러한 센서 계측부 면적의 상대적인 차이로 인해 기인한 것일 수도 있으나, 본 연구에서는 이에 대한 검토가 충분히 이루어지지 못하였다.

본 연구에서는 슬로싱에 의한 자유표면의 거동과 벽면 충격시의 형상 등에 대해서는 상세하게 다루지 못하였는데, 각 실험 조건에 대해 서로 다른 두 탱크의 왼쪽 상부 모서리에 충격이 발생하기 전과 후의 자유표면 형상을 Fig. 20 에서 Fig. 25 까지 나타내었다. 일반 캠코더로 촬영된 자료로 시간 스케일이 정확하지 않고 화질이 다소 떨어지는 문제는 있으나, 탱크의 크기에 관계없이 자유표면의 형상은 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나, 진폭이 큰 경우에 있어서는 벽면과 천정을 충돌한 물이 반대편 벽으로 날아가 부딪히는 양상이 작은 탱크와 큰 탱크 사이에 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었고, 이러한 차이는 기존의 상사 법칙에서 고려되지 않은 부분으로 보인다. 이러한

유동 특성에서의 차이는 충격 압력의 크기에 영향을 미칠 것으로 예상되므로 향후 검토되어야 할 특성 중의 하나로 생각된다.

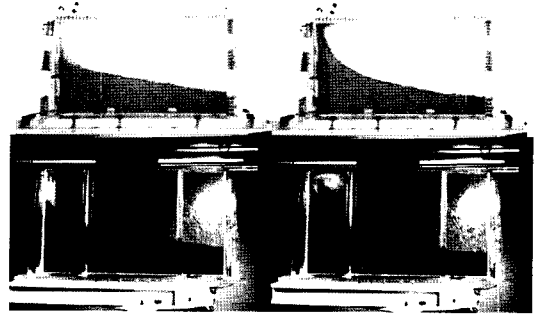


Fig. 20 Before & after impact on ceiling : FL40%H, AMP5%L (upper: 1/50, lower : 1/25)

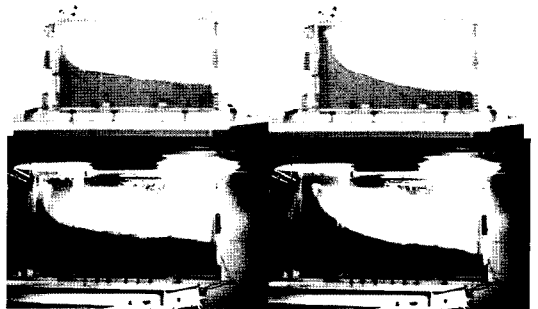


Fig. 21 Before & after impact on ceiling : FL40%H, AMP10%L (upper: 1/50, lower : 1/25)

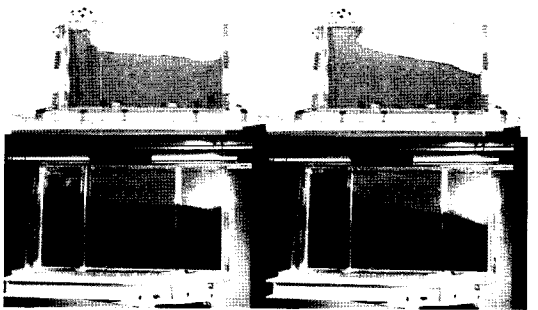


Fig. 22 Before & after impact on ceiling : FL70%H, AMP5%L (upper: 1/50, lower : 1/25)

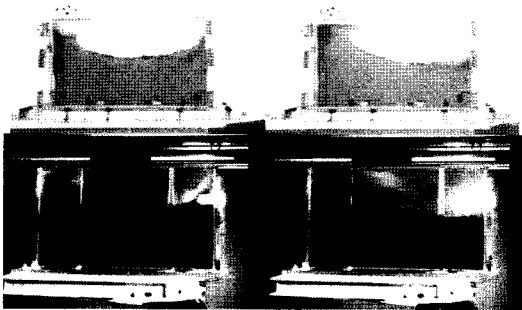


Fig. 23 Before & after impact on ceiling : FL70%H, AMP10%L (upper: 1/50, lower : 1/25)

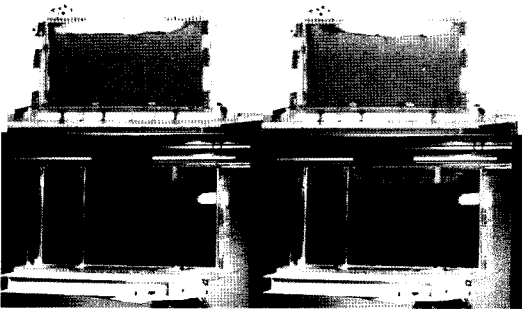


Fig. 24 Before & after impact on ceiling : FL90%H, AMP5%L (upper: 1/50, lower : 1/25)



Fig. 25 Before & after impact on ceiling : FL90%H, AMP5%L (upper: 1/50, lower : 1/25)

한쪽 벽면과 천정을 충돌한 물이 반대편 벽면으로 날아가 부딪히는 현상은 압력 신호에서 명확하게 확인할 수 있는데, Fig. 26 과 Fig. 27 의 압력 센

서 CH#1~CH#5 결과를 살펴보면, 1/50 모형 탱크에서는 주기적인 압력 신호 사이에 유의한 수준의 압력 신호가 거의 나타나지 않는 반면, 1/25 모형 탱크에서는 주기적인 압력 신호보다 훨씬 큰 압력 값을 보여주는 신호가 존재함을 알 수 있다. 이는 반대편 천정으로부터 빠른 속도로 날아드는 물 덩어리가 센서에 충돌하면서 발생하는 신호이며 흥미로운 결과로 보인다.

참고로 Fig. 26 에서 Fig. 31 까지 보인 압력 신호는 각 조건의 가진 주기를 기준으로 한 무차원

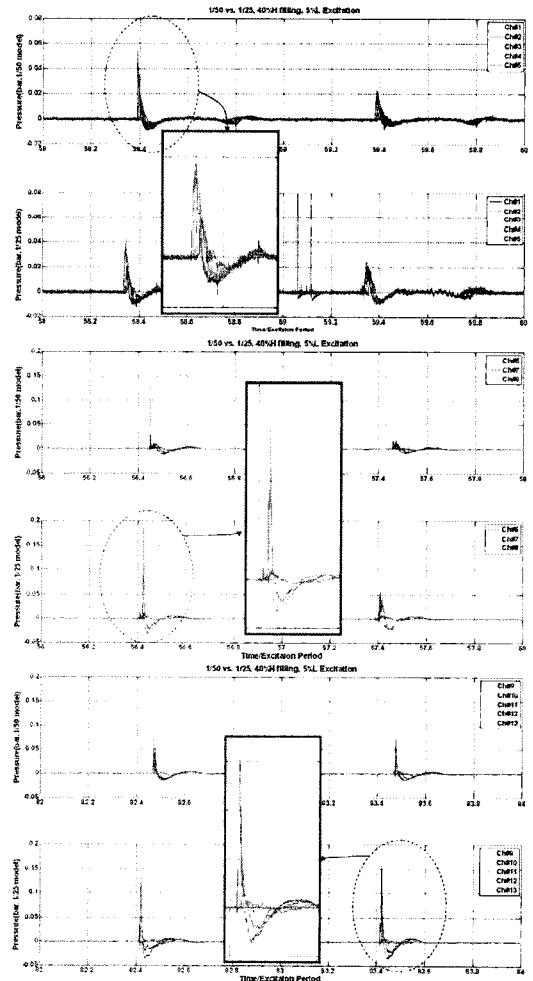


Fig. 26 Pressure signals for 2 periods : FL40%H, AMP5%L

참고로 Fig. 26 에서 Fig. 31 까지 보인 압력 신호는 각 조건의 가진 주기를 기준으로 한 무차원화된 시간을 가로축으로 두고, 두 주기 동안의 신호를 도시한 것이다.

한 가지 더 주의해서 볼 만한 신호 특성으로, Fig. 28 에서 볼 수 있는 압력신호의 특성이다. 다른 조건의 압력 센서들에서도 간혹 볼 수 있는 특성이기는 하나, 70% 적재 높이의 5%L 진폭인 경우 예측된 주요 위치에서의 압력 신호 거의 대부분이 진동하는 특성을 보여주고 있다. 이러한 특성을 Fig. 22 에서 볼 수 있는 충격 직전의 자유표면의

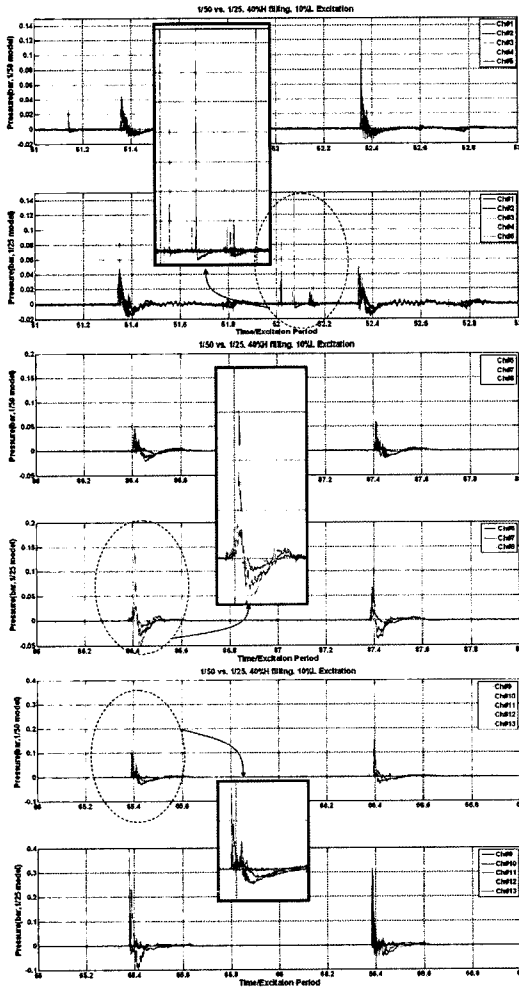


Fig. 27 Pressure signals for 2 periods : FL40%H, AMP10%L

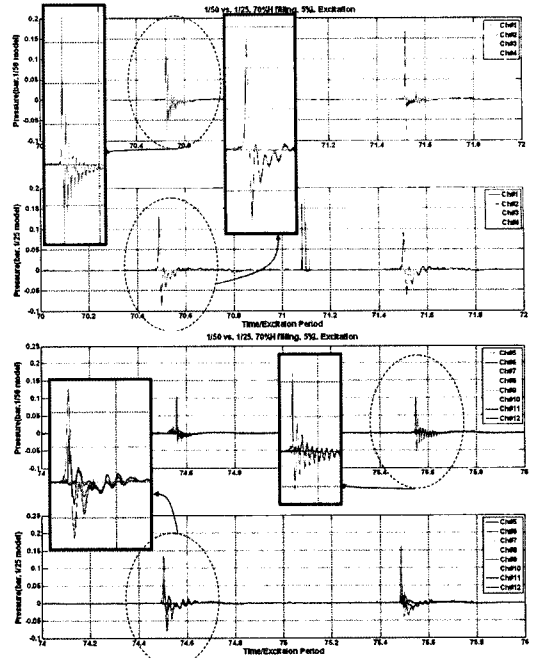


Fig. 28 Pressure signals for 2 periods : FL70%H, AMP5%L

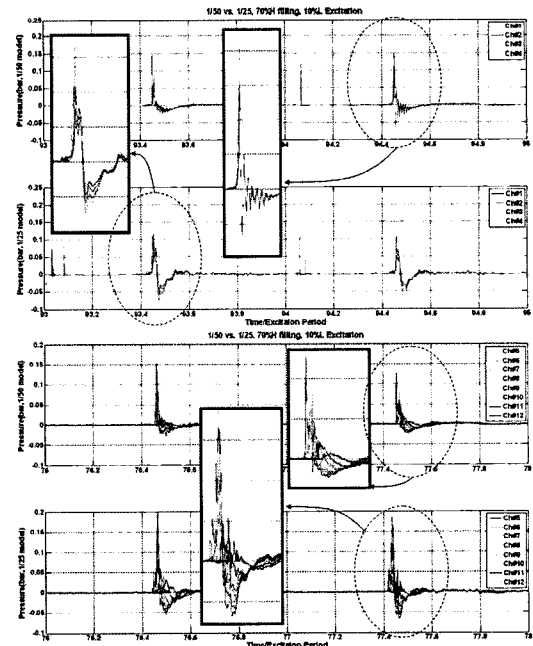


Fig. 29 Pressure signals for 2 periods : FL70%H, AMP10%L

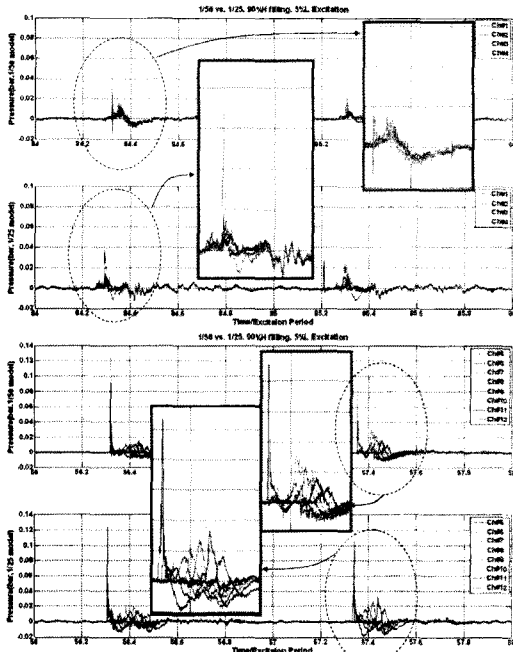


Fig. 30 Pressure signals for 2 periods : FL90%H, AMP5%L

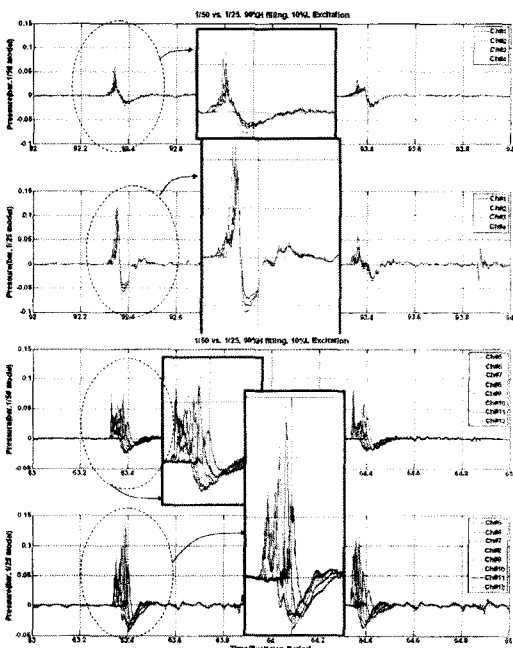


Fig. 31 Pressure signals for 2 periods : FL90%H, AMP10%L

형상과 함께 고려해 보면 충격시의 벽면과 액체(물) 사이에 공기영역이 형성되었을 것으로 예상해 볼 수 있으며, 동영상 자료에서도 확연하게 드러남을 확인한 바 있다.

짧은 시간 동안의 자유표면 변화와 거동 등에 대해 좀더 상세한 현상을 파악하기 위해서는 고속 카메라를 활용한 촬영이 반드시 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

2 차원 4 각 모형 탱크의 슬로싱 실험을 통해 축척비에 따른 슬로싱 압력 특성을 검토하였다. 서로 다른 크기의 동일 형상을 가지는 2 차원 4 각 탱크를 제작하고 이를 Froude 상사에 의거하여 가진하고 탱크 내 여러 위치에서의 슬로싱 충격 압력을 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 모형 탱크 크기에 따른 슬로싱 충격 압력의 상관관계는 대체로 축척비에 비례하는 관계와 축척비의 제곱근에 비례하는 관계를 모두 보여 주었으며, 액체(물)의 적재 높이와 가진 조건에 따라 다른 양상을 보여 주는 것으로 나타났다.

2) 액체의 적재 높이가 낮은 경우(탱크 높이의 40%)에는 탱크 크기에 따른 충격 압력의 관계가 축척비에 비례하는(Froude scaling) 관계를 강하게 보여주는 것으로 나타났다. 또한 벽면에 설치된 센서에서 확인된 현상의 하나로, 반대편 벽면과 천정을 치고 빠른 속도로 날아드는 물 덩이에 의한 추가적인 압력 신호가 유의한 수준으로 나타남을 확인하였고, 이러한 현상이 탱크의 크기에 따라 차이가 나고 작은 탱크의 경우 이러한 압력 신호가 상대적으로 적게 나타났다.

3) 액체의 적재 높이가 높은 경우(탱크 높이의 70% 및 90%)에는 충격 압력이 축척비의 제곱근에 비례하는 특성을 더 따르는 것으로 나타났으며, 이는 액체 내에 포함된 적지 않은 양의 기포들의 영향으로 압축성을 고려할 필요성이 있음을 의미하는 것으로 판단된다.

4) 탱크 높이의 90%로 적재하고 진폭을 탱크 길이의 10%로 취한 경우는 Froude scaling 에 의한 보정을 할 경우에도 큰 탱크에서의 결과가 작은 탱크에서의 결과보다 더 큰 경향을 보이고 있는데, 이에 대해서는 명확한 설명이 이루어지지 못했고, 실험에서 적용된 센서의 계측부 면적이 기하학적 상사를 만족시키지 못한 점과 관련이 있을 가능성을 추측해 볼 수 있다. 즉, 계측된 압력 특성이 국부적으로 집중되는 경우에는 상대적으로 넓은 영역에 대한 압력을 계측하게 되는 작은 탱크에서의 결과가 큰 탱크에서의 결과보다는 상대적으로 작아질 수 있는 것이다. 그러나, 이에 대해서는 향후 추가 실험 등의 검토가 필요하다.

5) 탱크 높이의 70%로 적재하고 진폭을 탱크 길이의 5%로 취한 경우의 충격 압력 신호는 명확하게 진동하는 양상을 보여주는 것으로 나타났는데, 이러한 특성은 작은 탱크에서 더 명확하게 확인할 수 있다. 이러한 신호 특성은 액체와 벽면 사이에 갇히는 공기층의 영향으로 알려져 있으며, 본 실험에서도 이러한 현상이 발생하였고 가시적으로 확인할 수 있었다.

모형실험을 통해 얻은 슬로싱 충격 압력을 실선으로 확장하는 기법은 향후 매우 중요한 기술로 요구될 것으로 예상되며, 본 연구가 향후 국내에서의 관련 기술에 대한 적극적인 개발 노력의 일부분으로 활용되기를 기대한다.

아울러 더 깊이 있고 체계적인 연구를 수행하고 그 결과를 통해 더 안전한 LNG 운반 및 저장 관련 설비를 지속적으로 건조해 나갈 수 있는 기술을 확보하려면, 고속카메라를 활용한 슬로싱 현상 촬영과 압력의 동시 계측을 통한 슬로싱 충격 압력 메커니즘 이해, 대형 모형 탱크를 이용한 실험이 가능한 모션 플랫폼의 확보 등, 실험 기법 및 장비상의 기술 확보를 통해 기초 연구를 강화할 필요가 있으며, 실선 슬로싱 압력 계측을 통해 자료를 확보하는 것도 앞으로 다루어야 할 중요한 도전 과제로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 성장동력/중기거점/차세대신기술개발사업의 하나로 대우조선해양(주)이 세부주관기관으로 수행한 바 있는, “LNG 유체 동하중 평가 및 Pump Tower 설계기술 개발”에 관한 연구의 일부로 수행된 내용을 포함하며, 이후 DSME 자체적으로 수행한 연구 내용을 추가하여 작성되었음을 밝힙니다.

## 참 고 문 헌

- 권순홍, “Ullage Pressure 및 Gas, Liquid Density Ratio 가 슬로싱 하중에 미치는 하중에 미치는 영향”, 대우조선해양/첨단조선공학연구센터, 2004년 12월.
- Abramson, H.N., Bass, R.L., Faltinsen, O., Olsen, H.A., 1974, “Liquid Slosh in LNG Carriers, 10<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Boston.
- Gavory, T., 2005, “Innovative Tools Open Up New Prospects for Liquid Motion Model Tests, GasTech 2005, Bilbao.
- Pastoor, W., Østvoid, T.K., Byklum, E., Valsgård, S., 2005, “Sloshing load and response in LNG carriers for new designs, new operations and new trades”, GasTech 2005, Bilbao.
- Rognebakke, O. F., Faltinsen, O.M., “Sloshing induced impact with air cavity in rectangular tank with a high filling ratio”, 20<sup>th</sup> International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Longyearbyen, Spitsbergen.



< 황 윤 식 > < 정 준 형 > < 김 대 웅 > < 류 민 철 >