creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

기체-액체 밀도차에 대한 슬로싱 충격압력의 실험적 고찰

Study on the Effect of Density Ratio of Gas and Liquid in Sloshing Experiment

2013년 2월

서울대학교 대학원

산업·조선공학부

안 양 준

초 록

기체-액체 밀도차에 대한 슬로싱 충격압력의 실험적 고찰

안양준

서울대학교 산업·조선공학부

본 논문은 슬로싱 모형 실험을 수행할 때 모형 탱크 내부의 기체-액체 밀도비 차이가 슬로싱 현상에 미치는 영향에 대해 다루고 있다. 최근 높아진 LNG 수요에 따라 LNG 선박이 점차 대형화되고, 화물창의 크기도 커졌다. 화물창의 크기가 커짐에 따라 화물창에서 발생하는 슬로싱 현상의 공진 주기가 선박 운동 주기에 가까워졌고, 선박 설계 단계에서 슬로싱 하중 해석이 중요한 문제로 부각되었다. 그리고 이러한 슬로싱 문제에 대해 여러 국제 선급에서는 모형 실험을 통한 해결을 권고하고 있다.

모형 실험을 수행할 경우 그 결과를 실선 설계에 적용하기 위해서는 적절한 스케일링 법칙을 사용해야 한다. 실험에 필요한 조건과 변수들을 무차원화하는 방식을 일반적으로 사용하지만, 슬로싱 문제에 대해서 어떤 스케일링 법칙이 가장 적합한지는 아직까지 밝혀지지 않았다. 일반적으로 프루드 수가 슬로싱 충격 압력을 스케일링하기에 적절하다고 여겨지고 있으나, 최근에는 프루드 수가

가진 한계점을 지적하며 다른 무차원화변수들이 제안되었다.

새로 제안된 여러 무차원변수 중 본 연구에서는 기체-액체 밀도비에 초점을 맞추어 슬로싱 현상이 기체-액체 밀도비에 따라 변하는 결과를 실험을 통해 확인하였다. 크게 세 실험을 수행하였고, 첫번째 실험은 2차원 사각 수조를 이용한 규칙 운동 조건에서 밀도비의 변화에 따라 충격 압력의 변화를 확인하는 것이다. 두번째 실험은 3차원 팔각 수조를 이용하여 불규칙 운동 조건에서 밀도비가 슬로싱 충격 압력에 미치는 영향을 확인하는 것이다. 마지막 실험은 입자 영상 유속계 실험을 이용하여 슬로싱 현상이 발생할 때 유동의 기구학적 현상과 동역학적 현상에 밀도비가 미치는 영향을 살펴보는 것이다. 특히 입자 영상 유속계 실험을 슬로싱 실험에 적용하기 위해서는 기포 생성, 레이저의 굴절 등 여러가지 기술적인 문제점들이 있었고, 본 연구에서는 우선 이 문제점들을 해결하였다. 그리고 압력 센서를 통해 측정한 신호와 고속 카메라를 이용해 촬영한 이미지를 시간을 기준으로 동기화 하여 비교하였다.

첫번째 실험과 두번째 실험을 통해 기체-액체 밀도비가 슬로싱 충격 압력 극값의 크기에 영향을 미치는 것을 확인했으며, 세번째 실험을 통해 충격 압력의 극값 뿐만 아니라 유동의 기구학적인 현상과 동역학적인 현상이 함께 변하는 것을 확인하였다.

주요어 : 모형실험, 밀도비, 스케일링 법칙, 슬로싱, 혼합 기체,

학번 : 2011-21178

목차

1. 서론 1

2. 모형실험 5

2.1 모형실험 소개 5

2.2. 실험 장비 5

2.2.2. 압력 센서 7

2.2.3. 혼합기체의 구성 9

2.2.4. 혼합 기체의 주입 11

2.4. 입자 영상 유속계(PIV) 시스템 20

2.4.1. 입자 영상 유속계 시스템의 구성 20

2.4.2. 시스템 구성 장비 21

2.4.3. 압력신호와 촬영이미지의 동기화 22

2.4.4. PIV 시스템 적용을 위한 문제점과 해결 방안 24

2.5. 결과 해석 방법 27

2.5.1. 충격압력신호의 추출 27

2.5.2. 상승 시간의 정의 28

2.5.3. 통계해석기법 29

2.5.4. 입자 영상 유속계 시스템 실험 결과 해석 32

3. 실험 조건 33

3.1. 규칙운동 실험 조건 33

3.2. 불규칙운동 실험 조건 34

3.3. PIV 실험 조건 35

4. 4. 실험 결과 36
4.1. 규칙운동 실험 결과 36
4.1.1. 적재수심 95%H 조건 36
4.1.2. 적재수심 70%H 조건 38
4.2. 불규칙운동 실험 결과 43
4.2.1. 적재수심 95%H & 70%H 조건 43
4.2.2. 적재수심 10%H 조건 47
4.3. PIV 실험 결과 49
4.3.1. 충격압력의 비교 49
4.3.2. 비교 대상의 선정 50
4.3.3. 압력신호와 유체속도의 동기화 결과 52
4.3.4. 압력신호와 유체가속도의 동기화 결과 55
5. 결론 57
참고문헌 60

표 목차

Table 2-1 Technical data of 211B5 sensor..... 8
Table 2-2 Components of the mixture 10
Table 2-3 The examples of saturation test..... 13
Table 2-4 Technical data of PXI-4495..... 16
Table 2-5 Technical data of coupler 16
Table 2-6 Model tanks..... 18
Table 2-7 Configuration of sensors..... 19
Table 3-1 Test condition of harmonic test 33
Table 3-2 Test condition of irregular test 34
Table 3-3 Test condition of harmonic test 35

그림 목차

Fig. 2-1 Experimental setup 6
Fig. 2-2 Overview of the experimental facility in Seoul National University (SNU) 6
Fig. 2-3 Pressure transducer 211B5 made by KISTLER CO..... 7
Fig. 2-4 Oxygen level check..... 13
Fig. 2-5 Six-degree-of-freedom motion platforms. 5 ton capacity (left), and 1.5 ton capacity (right)..... 14
Fig. 2-6 PXI-4495 (NATIONAL INSTRUMENTS CO.) 15
Fig. 2-7 Piezoelectric sensor power supply/coupler (KISTLER CO.)..... 15
Fig. 2-8 Mounted pressure sensor panels..... 19
Fig. 2-9 General view of the PIV experimental setup. 20
Fig. 2-10 (left) High-speed camera, and (right) CW laser. 21
Fig. 2-11 Timing diagram of the synchronization...... 23
Fig. 2-12 (left) typical sloshing impact, and (right) problems of application of PIV experiment to sloshing experiment. 25
Fig. 2-13 Extraction of sampling peak and time window of POT method. 27
Fig. 2-14 Definition of rise time..... 29
Fig. 3-1 schematic drawing of impact and locations of sensors. 35
Fig. 4-1 Measured sloshing pressure of 2D harmonic test with 95%H

filling level varying the frequency and the density ratio..... 37
Fig. 4-2 Measured sloshing pressure of 2D harmonic test with 70%H filling level varying the frequency and the density ratio..... 39
Fig. 4-3 Sloshing pressure of 2D harmonic test in particular frequency regions of 70%H filling level 40
Fig. 4-4 Measured sloshing pressure of 2D harmonic test with 25%H filling level varying the frequency and the density ratio..... 42
Fig. 4-5. Measured sloshing pressure of 2D harmonic test with 15%H filling level varying the frequency and the density ratio..... 42
Fig. 4-6 Influence of the density ratio on the statistical pressures of 95%H and 70%H filling levels under 3D irregular test..... 44
Fig. 4-7 The average of rise time of 95%H filling level under 3D irregular test 46
Fig. 4-8 Influence of the density ratio on the statistical pressures of 95%H and 70%H filling levels under 3D irregular test..... 48
Fig. 4-9 The average of rise time of 10%H filling level under 3D irregular test 48
Fig. 4-10 Influence of the density ratio on the sloshing pressure under the PIV test condition 49
Fig. 4-11 Transformed pressure signal into frequency domain of the ambient air condition..... 51
Fig. 4-12 Transformed pressure signal into frequency domain of the mixture condition. 51
Fig. 4-13 Time history of the pressure and the magnitude of velocities under the ambient air condition..... 54
Fig. 4-14 Time history of the pressure and the magnitude of velocities under the mixture condition..... 54
Fig. 4-15 Time history of the pressure and accelerations during the same impact of Fig. 7. 56
Fig. 4-16 Time history of the pressure and accelerations during the same impact of Fig. 7. 56

1. 서론

멤브레인(membrane) 형태의 화물창을 가진 액화천연가스(LNG) 선박에서 발생하는 슬로싱(sloshing) 현상은 화물창 내부에 큰 충격을 발생시켜 구조물에 손상을 입힐 가능성이 크다. 따라서 슬로싱 충격 압력에 대한 정확한 예측은 액화천연가스 운반선(LNGC)과 액화천연가스 화물창을 갖고 있는 LNG-Floating production storage and offloading (LNG-FPSO), floating storage and regasification unit (FSRU) 등과 같은 해양구조물의 화물창 설계 시 핵심 기술 분야에 속한다. 이러한 슬로싱 유동 해석에는 현재까지 복잡한 물리적 현상 때문에 충격 압력을 예측할 때 해석적, 또는 수치적인 접근 방법보다 실험을 이용한 접근 방법이 선호되었다. 또한 여러 선급에서도 실험을 통한 접근 방법을 요구하고 있다(ABS, 2006; DNV, 2006; LR, 2009).

실험을 통한 접근 방법을 사용할 때 실선과 동일한 조건에서 슬로싱 실험을 진행하는 것이 어렵기 때문에 스케일링 법칙(scaling law)을 사용해야 한다. 이를 위하여 실험에 필요한 조건과 변수들을 무차원화하여 슬로싱 현상에 적절한 스케일링 법칙을 구하기 위한 노력이 있었다. 아직까지 명확한 결과가 나오지 않은 상황이지만 모형 탱크 내부의 전반적인 유동은 Froude 스케일링 법칙을 따르기 때문에, 실험 결과 중 충격 압력의 크기는 이를 적용하는 것이 적절하다고 알려져 있다(Bass et al., 1980).

슬로싱 현상의 전반적인 유동과 함께 국부적인 유동에 관해서도

적용 가능한 스케일링 법칙을 찾기 위한 다양한 연구들이 있었다. 이들은 해석적 방법, 수치적 방법(Braeunig et al., 2009), 그리고 실험적 방법들을 사용하였으며, 연구 결과의 일부로 기체-액체 밀도비 항을 포함하는 음향 스케일링 법칙이 슬로싱 충격 압력에 중요한 역할을 한다는 것이 밝혀졌다(Dias et al., 2007). 그의 연구에서는 해석적인 접근 방법을 통해 기체-액체 밀도비는 충격 순간에 발생하는 유체의 운동량 변화의 크기에 영향을 미칠 것으로 예측하고 있으며, 수치적 접근 방법을 통해 기체-액체 밀도비가 슬로싱 충격 압력에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 실험적 접근 방법에서도 기체-액체 밀도비가 슬로싱 충격 압력에 영향을 주는 것을 보였다(Maillard and Brosset, 2009).

이렇게 기체-액체의 밀도비가 슬로싱 현상에 주요 인자로 작용하는 이유는 크게 두 가지가 있다. 첫째, 슬로싱 현상은 국부적으로 변화가 심한 유동 특성을 갖고 있다. Froude 수는 국부적 유동 변화를 명확하게 표현하기에 한계를 갖고 있어 기체-액체의 밀도비를 포함하는 무차원 수의 도입이 필요하다. 둘째, LNG 선박 화물창 내부의 유체와 모형 탱크 내부의 유체는 서로 성질이 다르다. LNG 선박 화물창 내부의 유체는 액화한 천연 가스와 기화한 천연 가스로 구성되어 있으나, 모형 실험의 경우 물과 대기를 사용한다. 실제 화물창의 경우 천연 가스의 비등점에 가까운 온도를 유지시키고, 작은 압력으로도 유체의 상변화가 일어나 구조물에 발생하는 충격 압력에 영향을 미치지만 Froude 수는 이 현상을 표현하지 못한다. 상변화를 고려한 연구에서는 기체-액체의 밀도비를 고려

해야 함을 밝히고 있으며(Maillard and Brosset, 2009; Yung et al., 2009; 2010), 실제 LNG 선박 화물창 내부의 기체-액체 밀도비를 고려한 실험이 실제 현상을 보다 잘 모사하고 있다고 볼 수 있다. 하지만 상기 연구에서는 제한된 조건에서 적은 수의 실험 결과만을 보여주고 있다. 2D 모형 탱크만을 이용하여 특정 주파수 조건에서만 실험을 진행하였기 때문에 아직까지 기체-액체 밀도의 정확한 영향을 파악하기 어렵다. 예를 들어 화물창의 슬로싱 현상에 대한 공진 주기와 같은 중요한 인자에 관한 기체-액체 밀도비의 영향이 확실하게 밝혀지지 않았고, 불규칙 운동에서의 결과도 알려지지 않았다.

본 연구는 기체-액체 밀도비의 변화에 따른 슬로싱 충격 압력 변화를 보다 상세히 밝히기 위해 진행되었다. 이를 위하여 크게 세 가지 실험을 수행하였다. 첫째, 2차원 모형 탱크를 이용하여 탱크의 공진 주기를 포함하는 다양한 강제 동요 주기에 대해 기체-액체 밀도비가 슬로싱 충격 압력에 미치는 영향을 확인하였다. 둘째, 3차원 모형 탱크를 이용하여 불규칙 운동 조건에서 어떻게 기체-액체 밀도비가 슬로싱 충격 압력에 영향을 미칠 수 있는지 살펴보았다. 2차원 모형 탱크와 3차원 모형 탱크는 모두 적재 수심을 달리하며 실험을 수행하였고, 2차원 모형 실험은 규칙 운동 조건에서, 3차원 모형 탱크를 이용한 실험은 해상 조건을 달리한 불규칙파 운동 조건에서 실험을 수행하였다. 셋째, 입자 영상 유속계 실험을 슬로싱 실험에 적용하여 유동의 기구학적 현상과 동역학적 현상에 미치는 기체-액체 밀도비의 영향을 파악하였다.

입자 영상 유속계 실험은 실험에 소요되는 높은 비용에 대한 대안으로 여겨지는 수치해석기법의 신뢰도를 높이기 위한 방안으로도 활용이 가능하다. 입자 영상 유속계 실험을 통해 압력과 유체 속도에 대한 상관관계에 대한 신빙성 높은 자료를 얻을 수 있기 때문이다. 이러한 연구 방안은 Gavory (2005) 등에 의해 제안되었으나, 기술적인 문제가 많아 뚜렷한 연구 결과가 많지 않다.

첫번째 문제로는 자유표면이 구조물과 부딛히며 발생하는 기포에 있다. 생성된 기포는 레이저의 투과를 막고, 기포 내부에 금속 입자를 주입할 수 없기 때문에 유동의 해석이 어렵다. 두번째 문제는 2D 사각 수조를 이용한 규칙 운동 조건에서의 실험에도 3차원 효과가 발생하여 레이저가 자유표면을 통과할 때 굴절되어 카메라의 초점을 벗어난다. 그 외 경제성 등의 여러가지 이유로 입자 영상 유속계 실험을 적용하기 어려웠다. 본 연구에서는 세번째 실험을 위하여 기술한 여러 기술적인 문제들을 해결하여 입자 영상 유속계 실험을 슬로싱 실험에 적용할 수 있었다. 기포 생성 문제의 경우 근본적인 해결책을 찾지는 못하였으나, 여러가지 슬로싱 현상의 유형 중 바그놀드 유형(Bagnold type)을 선택하여 기포가 적게 발생하는 조건을 구성하여 기체-액체 밀도비의 영향을 파악하는데 초점을 맞추었다.

2. 모형실험

2.1 모형실험 소개

슬로싱 현상은 그 복잡한 물리적 현상 때문에 해석적인 접근 방법이나 수치적인 접근 방법보다 실험을 이용한 접근 방법을 선호하고 있다. 여러 선급에서도 실험을 통한 접근 방법을 선호하고 있으며, 모형의 크기에 대해서는 대상 모선 화물창과 1/50 이상의 축척비를 갖는 모형을 요구한다(DNV, 2006). 따라서 본 연구에서 수행한 실험은 모두 1/50 이상의 축척비를 갖는 모형을 사용해 진행하였다.

2.2. 실험 장비

2.2.1. 슬로싱 실험 개관

모형실험은 서울대학교 슬로싱 실험동에서 수행하였다. 서울대학교에 구축한 슬로싱 실험 시설은 Fig. 2-1과 같은 구성을 갖고 있으며, 그 전경은 Fig. 2-2와 같다. 먼저 강제동요기 제어부에서 실험 조건에 대한 운동을 부여하고, 강제동요기의 움직임에 의해 위에 부착된 모형 탱크 내부에서 슬로싱 현상이 발생한다. 발생한 슬로싱 현상은 모형 탱크 내벽에 장착한 압력 센서를 통해 계측하고, 압력 신호는 커플러를 거쳐 2진 파일 형식으로 저장된다.

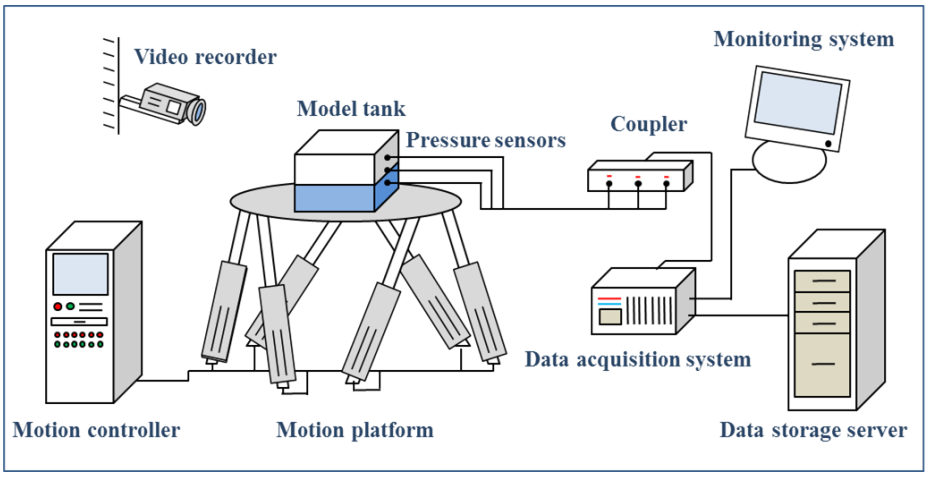


Fig. 2-1 Experimental setup

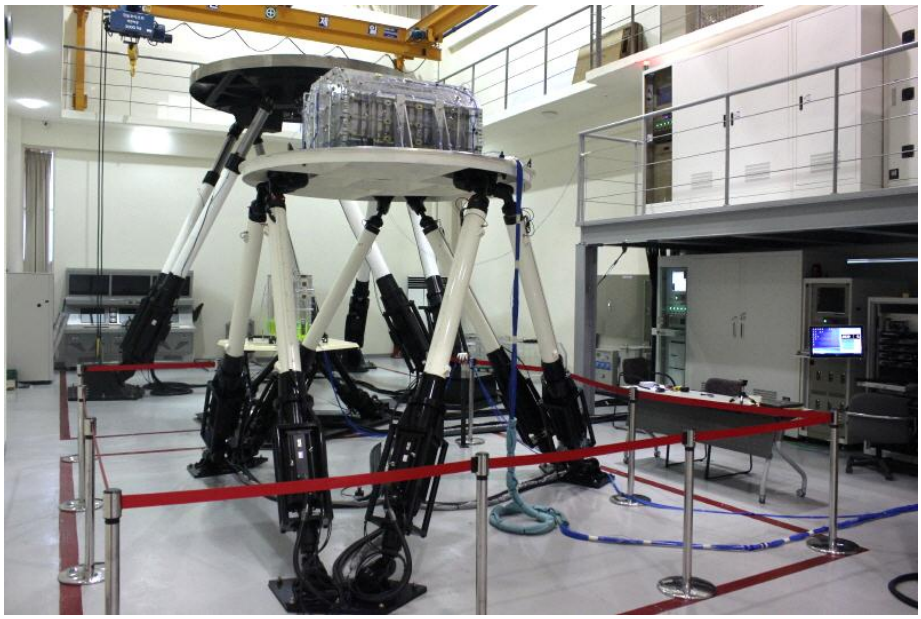


Fig. 2-2 Overview of the experimental facility in Seoul National University (SNU)

2.2.2. 압력 센서

압력 센서는 ICP(Integrated Circuit Piezoelectric) 타입의 센서인 KISTLER 社의 모델명 211B5 센서를 사용하였다. 슬로싱 실험을 수행할 때 충격 압력을 계측하기 위해서는 많은 수의 센서가 필요하며, 본 연구에서 사용한 압력 센서는 별도의 엠프가 필요 없어 센서의 설치가 용이하다는 장점이 있다. 다만 편의 전압(vias voltage)를 제거하기 위해 별도로 커플러를 설치해야 한다. 압력 센서의 직경은 5.54 mm이며 최대 계측 가능 압력은 6.89 bar다. Fig. 2-3에는 압력센서의 모습과 제원을 나타내었고, 그 기술적 특징은 Table 2-1에 정리하였다.

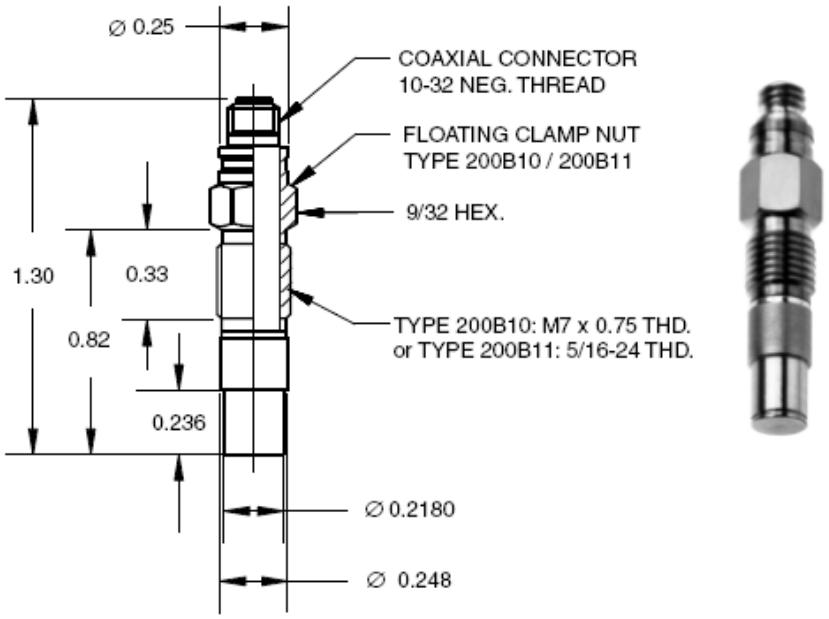


Fig. 2-3 Pressure transducer 211B5 made by KISTLER CO.

Table 2-1 Technical data of 211B5 sensor

Type	Value
Pressure Range (psi)	100
Maximum Pressure without damage (psi)	500
Sensitivity nom (mV/psi)	50
Threshold (psims)	0.001
Amplitude Non-linearity zero based BFSL (±%FSO)	1
Hysteresis (%)	1
Time Constant nom. (s)	20
Resonant Frequency nom (kHz)	300
Rise Time 10 ... 90% (us)	2
Low Frequency Response -5% Point (Hz)	0.025
High Frequency Response +5% Point (kHz)	50
Acceleration Sensitivity (gpk)	0.002
Shock Limit (1ms pulse) (gpk)	5000
Vibration max. (gpk)	50
Temperature Coefficient of Sensitivity (%/˚F)	-0.03
Temperature Range Operating (˚F) (4 mA supply current)	-65 ~ 200
Bias nom. (VDC)	11
Impedance max. (Ω)	100

2.2.3. 혼합기체의 구성

슬로싱 모형 실험을 수행한 기존의 연구들은 물과 대기 중의 공기를 사용한다. 물과 일반 대기는 실제 LNG 선박 화물창 내부 유체와 물리적인 성질과 다르다. 먼저 기체-액체 밀도비가 일반 대기와 물의 경우 약 0.0012, 그리고 LNG 선박 화물창의 경우 약 0.004로 알려져 있다. 또한 실제 화물창 내부의 천연가스가 비등점 근처의 온도에서 액체 상태를 유지하는 유체와 기화한 액체로 구성되어 있어 작은 압력 변화에도 유체의 상변화가 일어나 슬로싱 현상에 영향을 미친다. 하지만 물과 일반 대기의 경우 슬로싱 충격 압력으로 상변화 등이 발생하지 않는다. 그 밖에도 shock의 발생이나 기포의 형성 등 슬로싱 현상에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요소들이 다르다. 따라서 모형 실험에서 사용하는 유체로는 액화 천연 가스가 가장 적합하지만, 기술적인 측면과 안전상의 문제를 고려할 때 액화 천연 가스를 이용하는 것이 현실적으로 어렵다.

이에 대한 대안으로 기존 슬로싱 모형 실험에서 사용한 기체를 대신하여 육불화황(Sulphur hexafluoride, SF6)과 질소(Nitrogen, N2)의 혼합 기체(mixture)를 사용하여 실제 화물창과 유사한 기체-액체 밀도비를 조성하였다. 모형 탱크 내부에 슬로싱 충격 압력이 발생할 때 일어나는 상변화가 발생하는 유체의 성질 특성은 고려하지 않았다. 육불화황과 질소의 혼합 기체는 일반 공기와 마찬가지로 슬로싱 충격 압력에 의해 액화되지 않지만, 무독성의 기

체이기 때문에 안전을 고려할 때 기체-액체 밀도비를 변화시키는 실험 재료로 사용하기 용이하다. 이 혼합 기체를 일반 대기와 섞어 목표로 하는 기체의 밀도를 갖도록 탱크 내부의 기체 조성비를 변화시켰다. 그리고 조성비 변화에 따라 달라지는 기체의 밀도 변화에 따라 슬로싱 충격 압력의 변화를 확인하였다. 기체-액체 밀도비의 변화 범위는 일반 대기와 물을 사용한 실험의 밀도비에서 실제 화물창의 기체-액체 밀도비까지 설정하였고, 실험 조건과 여건에 따라 다양한 밀도비 조건에 대한 실험을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 혼합 기체의 구성은 Table 2-2와 같다. 혼합 기체를 전혀 사용하지 않을 경우 모형 실험은 일반 대기와 물의 밀도비 조건에서 실험을 진행하게 되며, 일반 대기를 혼합 기체가 완전히 대신할 경우 모형 탱크 내부는 실제 LNG 화물창의 기체-액체 밀도비와 유사한 밀도비를 갖게 된다.

Table 2-2 Components of the mixture

Products	Density (kg/m^3)	Component ratio (%)
Sulphur hexafluoride (SF_6)	6.162	56.9
Nitrogen (N_2)	1.146	43.1
Mixture ($SF_6 + N_2$)	3.999	100.0

2.2.4. 혼합 기체의 주입

모형 탱크 내부에 주입한 혼합 기체의 비율을 확인하기 위해 산소 계측기를 사용하였다. 혼합 기체는 불활성화 기체이며 불활성화 기체를 측정하기 위한 조건이 까다롭고, 측정기를 탱크에 부착하기 위한 기술적인 문제가 많다. 이러한 문제들 때문에 탱크 내부 기체의 밀도를 확인할 때 혼합 기체의 양을 직접 측정하지 않고 산소의 농도를 측정하는 방식을 선택하였다. 산소는 다른 불활성화 기체에 비해 측정이 비교적 쉽고, 혼합 기체에 사용한 질소 다음으로 대기를 구성하는 비율이 높은 기체다. 따라서 모형 탱크 내부의 산소 양을 측정하여 탱크 내부에 일반 대기가 들어 있는 양을 측정하고, 이를 통해 혼합 기체가 탱크 내부에 얼마나 포함되어 있는지를 추정하는 방식을 사용하였다.

실험 중 모형 탱크 내부의 공기와 외부 대기가 섞여 기체의 밀도가 달라지는 것을 방지하기 위하여 탱크는 기밀을 유지하였다. 모형 탱크 제작 마감 시 기밀 전용 실리콘을 사용하여 탱크를 밀폐하였고, 매 실험 전후에 거품시험을 통하여 기밀여부를 확인하였다. 또한 탱크에 기압계를 설치하여 가스 주입 전후로 탱크 내부 기압이 변하지 않도록 조절하여 기체의 밀도가 달라지는 것을 방지하였다.

혼합 기체를 조성하고 있는 육불화황과 질소는 모두 수용성 기체로 물과 접촉 시 용해될 수 있다. 이 성질은 실험 진행 도중 모형 탱크 내부의 기체−액체 밀도비에 영향을 줄 수 있다. 그러므로

실험을 진행하기 전 물속에 녹아 있는 기체 역시 자유 표면 위의 기체와 동일한 조성과 밀도를 갖도록 조절할 필요가 있다. 하지만 기술적인 부분에서 물 속에 녹아 있는 기체를 확인하기 어렵기 때문에 자유 표면 위의 기체를 실험에서 목표하는 수준으로 기체의 조성을 변화시키고, 모형 탱크를 강제 동요시켜 이 기체를 물 속에 용해시키는 방식을 선택하였다.

우선 모형 탱크 내부의 자유 표면 위 기체를 실험이 목표하는 밀도의 기체로 채운 후, 탱크를 강제 동요시켜 물 속의 기체와 섞었다. 그리고 강제 동요가 끝나면 기체의 조성비를 확인하였다. 확인한 조성비에 따라 혼합 기체를 추가로 주입하거나 빼내고 다시 강제 동요시켜 충분히 물 속의 기체와 자유 표면 위 기체의 조성이 유사하도록 만들었다. 기체의 주입과 강제 동요를 위한 포화 작업을 반복하여 실험에서 목표로 하고 있는 기체의 밀도를 얻었다. Table 2-3은 3차원 모형 탱크를 이용한 실험 중 목표한 기체-액체 밀도를 맞추기 위해 혼합 기체의 포화 작업을 진행한 예다. 모형 탱크 높이의 95% 적재 수심(95%H) 조건에서 목표한 기체의 밀도는 0.0019 kg/m^{3}로 기대하는 모형 탱크 내부의 산소 농도는 15.0%다. Table 2-3에서와 같이 일정 횟수의 반복 과정을 거친 후에는 모형 탱크를 강제 동요시켜 자유 표면 위의 기체와 물 속의 기체를 섞는 과정 뒤에도 기체 중 산소의 농도가 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 모든 실험은 Table 2-3과 같은 일련의 작업을 통해 기체를 액체에 충분히 포화시킨 후 실험을 진행하였다. Fig. 2-4는 이러한 포화 작업의 일부로 산소 측정기의 수치는 현

재 탱크 내부 자유표면 위 기체의 산소 함유 비율을 나타내고 있고, 압력계를 이용해 탱크 내부의 압력도 같이 확인하였다.

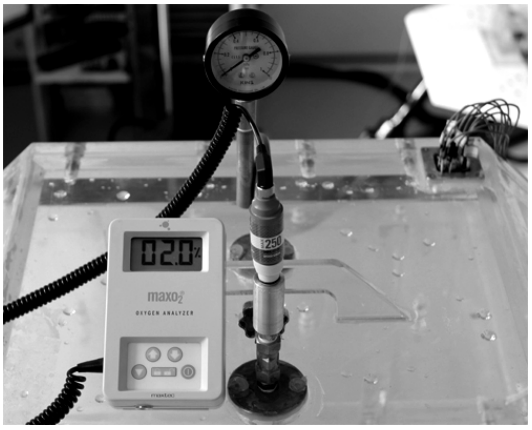


Fig. 2-4 Oxygen level check

Table 2-3 The examples of saturation test

Filling level (%H)	Target Oxygen Level (%)	Setting #.	Action	Measured oxygen level (%)
95	15	01	Gas Injection	14.6
		02	Forced Motion	16.0
		03	Gas Injection	14.6
		04	Forced Motion	14.8
		05	Forced Motion	15.1
		06	Gas Injection	15.0
		07	Forced Motion	15.0

2.2.5. 강제 동요기

서울대학교 슬로싱 실험동은 10톤, 5톤, 그리고 1.5톤 용량의 세 종류의 강제동요기를 보유하고있다. 본 연구에서는 첫번째 실험과 두번째 실험에서는 5톤 용량의 강제 동요기를 사용하였고, 세번째의 입자 영상 유속계 실험에서는 1.5톤 용량의 강제동요기를 사용하였다.

모든 강제동요기는 스튜어트 플랫폼(Stewart platform)으로, 6개의 다리를 갖고 있다. 그리고 운동 조작 패널에서 각각의 다리 길이를 변화시켜 강제동요기 상부 테크의 6자유도 운동을 모사할 수 있다 첫번째 충격 압력 측정을 위한 규칙 운동 조건 실험과 세번째 입자 영상 유속계 실험에서는 운동 조작 패널에서 규칙 운동을 부여하였고, 두번째 불규칙 운동 조건 실험의 경우 불규칙 조건을 따로 생성하여 강제 동요 움직임을 부여하였다. 두 강제동요기의 모습은 Fig. 2-5와 같다.

Fig. 2-5 Six-degree-of-freedom motion platforms. 5 ton capacity (left), and 1.5 ton capacity (right).

2.2.6. 데이터 수집 시스템 (Data Acquisition System, DAQ)

압력 센서로 계측한 슬로싱 충격압력은 KISTLER 社의 커플러를 거쳐 편의 전압(bias voltage)이 제거된 형태로 전달되며, NATIONAL INSTRUMENTS 社의 PXI-4495 장비를 이용해 이진 파일 형태로 저장된다. 커플러와 DAQ의 모습은 Fig. 2-6과 Fig. 2-7에 나타내었고, 상세한 기술 자료는 Table 2-4와 Table 2-5에 정리하였다.

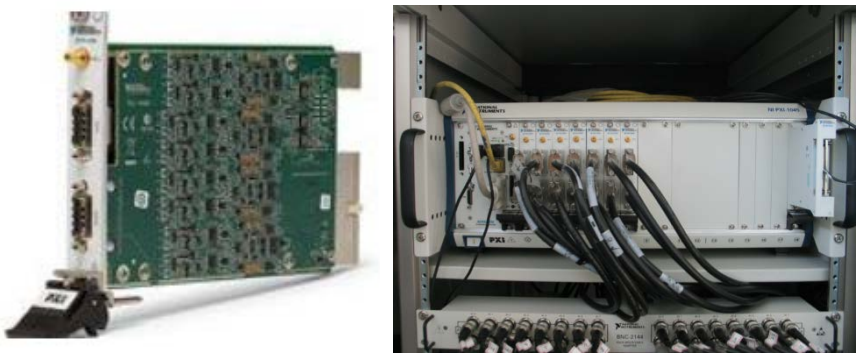


Fig. 2-6 PXI-4495 (NATIONAL INSTRUMENTS CO.)

Fig. 2-7 Piezoelectric sensor power supply/coupler (KISTLER CO.)

Table 2-4 Technical data of PXI-4495

Bus	PXI, PXI Express
Input Resolution (bits)	24
Dynamic Range (dB)	114
Sampling Rate per Channel	204.8 kS/s
Analog Inputs	16
Input Range	-10 - +10V
Gain Settings	0 and 20 dB
Coupling	DC
TEDS Supports	OK

Table 2-5 Technical data of coupler

Type		Value
Channel		16
Sensor Excitation	Voltage (VDC)	24
	Constant current (mA)	2
	Fixed again	1
	Accuracy (%)	-1 - +1
	Non-linearity (%)	-1 - +1
Frequency response (Hz)		0.05 – 50000
Time constant (sec)		10
Noise (uVrms)		<100
Channel Isomation, min (dB)		74
Output	Voltage (V)	-10 - +10
	Current (mA)	5
Environmental	Operating temperature range (℃)	0
	Relative humidity (%)	
Connector		BNC cable

2.3. 모형 탱크와 센서 위치

규칙운동 실험을 위한 2차원 모형 탱크는 1/40 크기로 제작하였으며, 제원은 GAZTRANSPORT & TECHNIGAZ S.A.S가 제공하였다. 불규칙운동 실험을 위한 3차원 모형 탱크는 160K LNG선 실선 화물창을 기준으로 제작하였고, 그 크기는 실선 화물창의 1/50이다. PIV 실험을 위한 2차원 모형 탱크는 기준이 되는 모델 없이 제작하였다. 규칙운동 실험의 모형 탱크는 폭과 길이 비 0.12, 높이와 길이 비 0.71로, 불규칙운동 실험의 모형 탱크는 폭과 길이 비 0.82, 높이와 길이 비가 0.61로, 그리고 PIV 실험의 모형 탱크는 폭과 길이 비 0.188, 높이와 길이 비가 0.75를 갖는다. 모형 탱크의 재료로는 내부유동 관측을 위하여 투명한 아크릴 판을 사용하였고, 특히 규칙운동 실험과 불규칙운동 실험의 경우 유탄성을 고려하여 35 mm 두께의 아크릴 판을 사용하였다. PIV 실험에 사용한 모형 탱크의 아크릴판 두께는 20 mm 이다. 모든 모형 탱크에서 내벽은 매끄럽게 처리하였으며 펌프타워 등의 내부재는 고려하지 않았다. 제작한 규칙운동 실험 모형과 불규칙운동 실험 모형, 그리고 PIV 실험 모형은 Table 2-6에 나타내었다.

압력 센서는 규칙운동 실험과 불규칙 운동 실험의 경우 충격 압력을 측정하여 기체-액체 밀도비의 영향을 확인하기 위한 실험이기 때문에 Fig. 2-8과 같은 다양한 종류의 패널 형식으로 제작하였다. 그리고 충격 압력이 발생하는 위치에 이 센서 패널들을 부착하였다. 특히 규칙운동 실험의 경우 슬로싱 유동의 비대칭성을 고려하여 6x6 패널을 탱크 지붕의 양쪽 끝에 배치 하였다. 하지만

낮은 적재 수심에서 발생하는 슬로싱 충격 압력을 측정할 때는 유동의 비대칭성을 고려하지 않고, 한쪽 측면에만 센서를 배치하였다. PIV 실험의 경우 측정한 압력 신호와 고속카메라로 촬영한 영상의 동기화를 통한 분석이 목적이기 때문에, 충격 압력이 발생하는 위치에 4개의 센서를 따로 부착을 하였다(Table 2-7).

Table 2-6 Model tanks

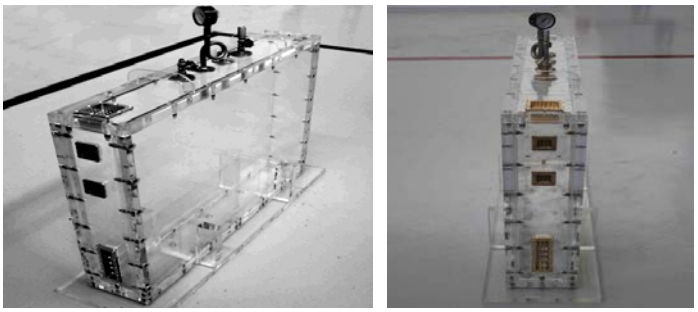
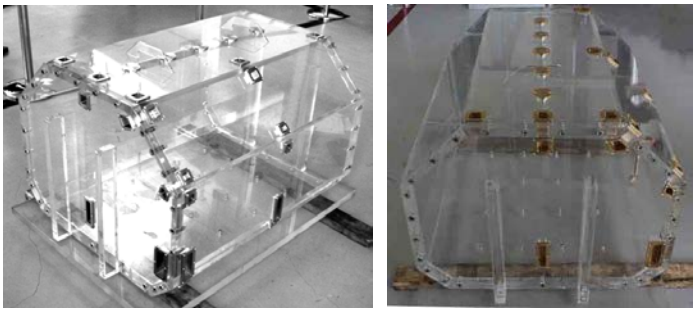
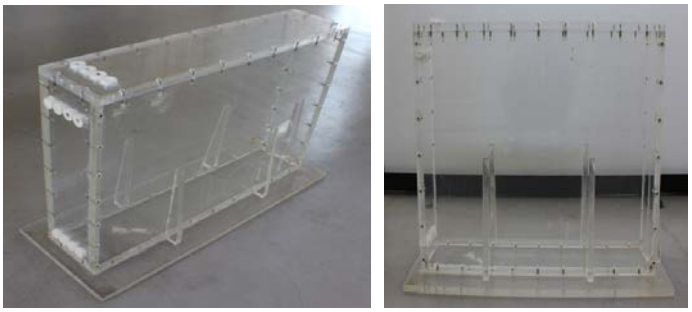
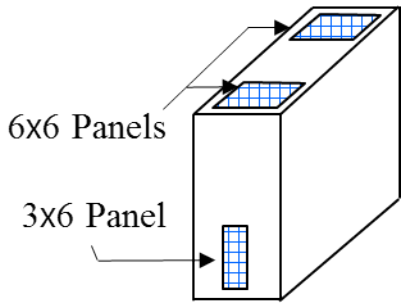
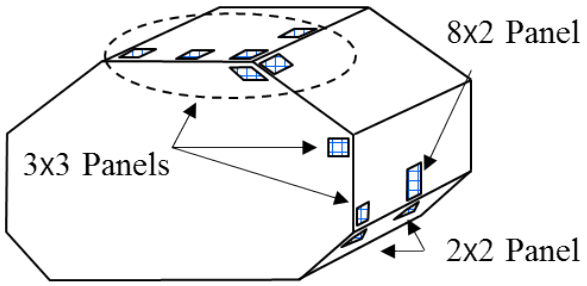
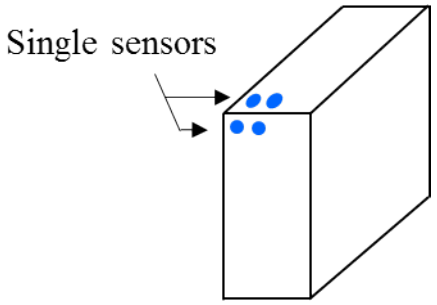
	Model tanks
2D model (1) (Harmonic test)	
3D model (Irregular test)	
2D model (2) (PIV test)	

Table 2-7 Configuration of sensors

	Configuration of sensors
2D model (1) (Harmonic test)	
3D model (Irregular test)	
2D model (2) (PIV test)	

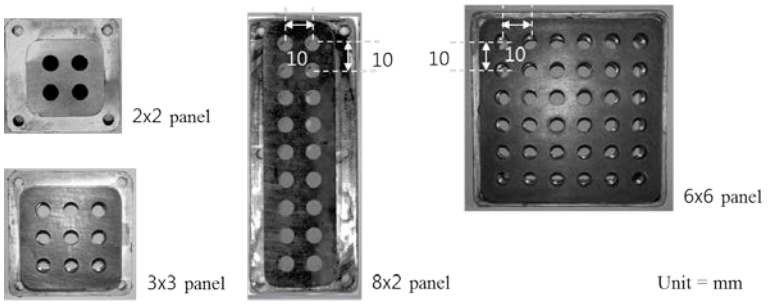


Fig. 2-8 Mounted pressure sensor panels

2.4. 입자 영상 유속계(PIV) 시스템

2.4.1. 입자 영상 유속계 시스템의 구성

입자 영상 유속계 시스템은 크게 다음과 같은 구성을 가진다. 액체의 속도를 측정하기 위해 액체와 동일한 밀도를 가진 미세한 크기의 금속 입자를 액체에 푼다. 레이저를 비추어 레이저 빛이 금속 입자 표면에서 반사하고, 카메라는 반사되는 빛을 이용하여 금속 입자를 촬영한다. 그리고 금속 입자의 크기가 미세하기 때문에 액체의 움직임을 그대로 구현할 수 있다고 가정하여 유동을 측정하는 방식이다. 본 연구에서 사용한 입자 영상 유속계 시스템의 전체적인 구성은 Fig. 2-9와 같다.

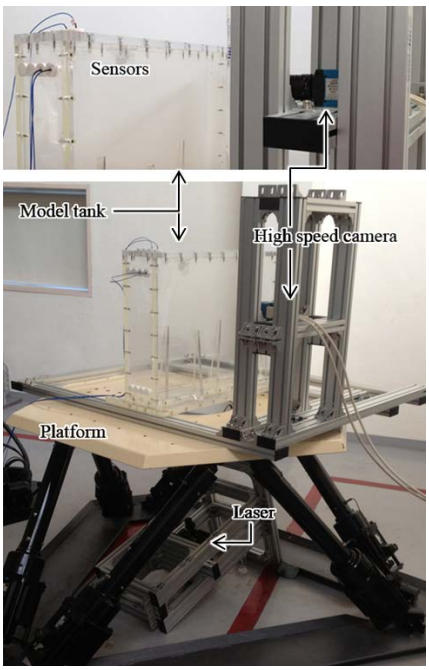


Fig. 2-9 General view of the PIV experimental setup.

2.4.2. 시스템 구성 장비

유체 입자의 속도를 촬영하기 위해서는 먼저 대상 유체의 속도를 측정이 가능한 기능을 지닌 고속 카메라를 사용해야 한다. 본 연구에서 사용한 고속 카메라는 EOSENSE 社의 고속 카메라를 사용하였다. 이 카메라는 1000×1000 화소 촬영 시 초당 816 프레임을 촬영할 수 있다. 촬영 이미지는 흑백이며 외부 저장 공간에 이미지를 저장하기 때문에 최대 8 테라 바이트까지 촬영이 가능하다. 본 연구는 608×1208 화소 크기로 초당 1000 프레임으로 촬영하였다.

레이저는 다이오드 펌프 고체 상태 레이저 (Diode-pumped solid state, DPSS)레이저를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 레이저는 이 중 파장의 종류가 연속 파장 형태(continuous wave, CW)인 레이저를 택하였으며, 파장의 길이는 532 *nm*, 그리고 출력은 5 *W*다. 은 코팅 입자(silver coated hallow-glass)를 액체에 적절한 양을 투입하였고, 단일 입자의 지름은 10 μm다. 사용한 고속 카메라와 레이저의 모습은 Fig. 2-10과 같다.

Fig. 2-10 (left) High-speed camera, and (right) CW laser.

2.4.3. 압력신호와 촬영이미지의 동기화

고속 카메라를 이용해 촬영한 슬로싱 유동 이미지와 압력 센서가 측정한 슬로싱 충격 압력은 다음과 같은 방식으로 동기화할 수 있다. 두 실험 결과를 동기화하는 목적은 슬로싱 현상에 대하여 같은 시간에 발생하는 기구학적 현상과 동력학적 현상을 함께 살펴보는 것이다. 이를 통해 기체-액체 밀도비를 변경함에 따라 충격 압력의 극값의 변화만을 비교하는 것이 아니라 유동의 기구학적 현상의 변화도 함께 살펴볼 수 있다.

먼저 슬로싱 충격 압력의 측정과 유동에 대한 이미지의 촬영을 동일하게 시작해야 한다. 다른 두 종류의 실험 결과를 저장하는 시작 시점을 동일하게 만드는 방법은 크게 하드웨어를 이용하는 방법과 소프트웨어를 이용하는 방법, 두 가지가 있다. 본 연구에서는 두 방법 중 소프트웨어를 이용하는 방법을 사용하였다. 압력을 측정하는 프로그램 내부에 카메라 촬영을 시작하는 신호를 보낼 수 있는 내부 방아쇠(internal trigger)프로그램을 추가하여 압력 측정을 시작할 때 이 내부 방아쇠를 이용하여 펄스 신호를 카메라에 보내 카메라 촬영이 시작될 수 있도록 시스템을 구성하였다. 또한 카메라가 유동을 촬영하여 저장할 때 매 촬영 이미지가 촬영된 각각의 시간 정보를 함께 저장하도록 구성하였다. 저장된 시간 정보를 바탕으로 측정한 압력 신호와 동일한 시간에서 촬영한 이미지를 비교할 수 있다.

카메라의 촬영은 앞서 설명한 것과 같이 초당 1000 프레임의

속도로 이루어지고, 슬로싱 압력 신호은 초당 20000번의 속도로 압력 신호를 저장한다. 사용한 레이저가 CW 타입이기 때문에 레이저의 펄스는 이 동기화 시스템에서 고려할 필요가 없다.

동기화 시스템의 전반적인 구성은 Fig. 2-11과 같다.

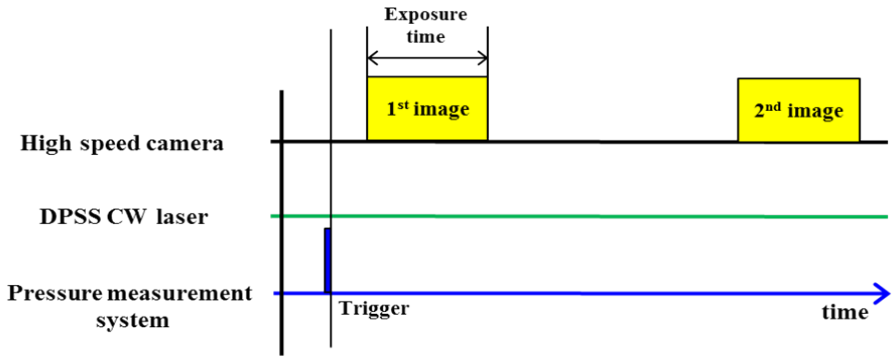


Fig. 2-11 Timing diagram of the synchronization.

2.4.4. PIV 시스템 적용을 위한 문제점과 해결 방안

입자 영상 유속계 실험을 슬로싱 실험에 적용하기 위해서는 몇 가지 문제점을 해결해야 한다. 첫번째 문제는 슬로싱 현상이 좁은 공간에서 격렬한 유동에 의해 발생하며, 그 충격 압력의 크기가 크기 때문에 액체 내부에 대량의 기포가 생성된다. 흑백으로 촬영한 이미지를 해석할 때 기포와 입자의 구별이 어려워 기포의 위치가 입자의 위치를 파악할 때 잘못된 정보를 제공한다. 특히 기포의 이동 속도는 일반적으로 액체의 속도와 크게 차이가 있기 때문에 기포가 존재할 경우 유동의 해석이 어렵다. 그리고 기포의 내부에 입자가 존재할 수 없기 때문에 기포가 대량으로 발생할 경우 해석에 필요한 정보를 제공하는 입자의 수가 너무 적어 해석이 불가능하다. 또한 기포 표면에서 레이저가 굴절 및 반사되어 근처의 입자를 레이저가 비추지 못하고 카메라의 초점을 벗어날 수 있다.

두번째 문제는 레이저가 자유표면을 지나며 발생하는 굴절 문제다. 2차원 사각 수조를 이용한 규칙 운동 조건의 실험도 3차원 효과가 발생하여 자유표면이 레이저와 수평 상태를 유지하지 못하며, 이로 인해 레이저가 굴절할 때 카메라의 초점을 벗어난다. 카메라의 초점을 벗어날 경우 입자의 위치를 선명하게 파악하지 못하여 해석할 때 잘못된 결과를 얻을 수 있는 가능성이 커진다.

세번째 문제는 탱크 내벽에서 발생하는 반사로 인해 카메라가 유동을 촬영할 때 잘못된 정보를 얻게 되는 문제다. 탱크는 내부 유동을 관찰하기 위해 일반적으로 투명한 아크릴 판으로 제작을

하지만, 센서는 빛을 쉽게 반사시키는 금속으로 제작되며 센서를 탱크에 부착하기 위한 구조물도 보통 금속을 사용한다. 따라서 슬로싱 충격 압력이 발생하는 위치를 레이저가 비출 때 레이저 빛이 센서와 금속 표면에서 반사되어 입자의 촬영을 방해한다.

상기한 세 문제점을 간략히 도식화하면 Fig. 2-12와 같다. 왼쪽 사진은 공진 주기에서 슬로싱 현상이 발생할 때 생성되는 기포의 모습이다. 촬영 범위 내부는 모두 기포로 가득차기 때문에 입자를 촬영는 것이 불가능한 것을 확인할 수 있다. 오른쪽은 전반적인 문제점을 나타낸 그림으로 센서에서 발생하는 난반사, 기포에 의해 발생하는 난반사, 그리고 자유표면에서 발생하는 굴절 문제를 나타내었다.

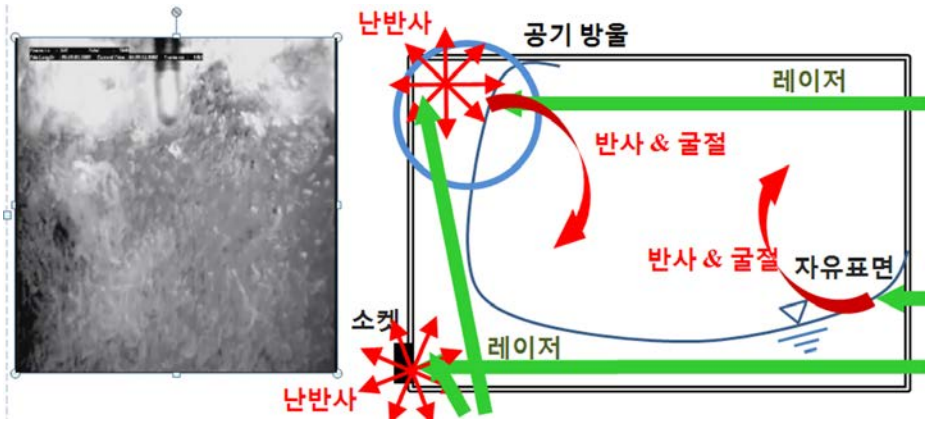


Fig. 2-12 (left) typical sloshing impact, and (right) problems of application of PIV experiment to sloshing experiment.

상기한 문제점들은 다음과 같은 방법으로 해결하였다. 첫번째, 소켓에서의난반사 문제다. 이 문제는 소켓을 흑색으로 칠하여 해결하였다. 저항 실험을 위한 입자 영상 유속계 실험의 경우에도 선체를 흑색으로 도색을 하며, 이와 같은 방식을 사용하였다. 실험 조건이 3차원 문제가 아니기 때문에 간단한 도색작업으로 난반사 문제를 해결할 수 있었다.

두번째, 자유표면에서의 레이저 굴절 문제는 레이저의 위치를 변경하여 해결하였다. 앞선 Fig. 2-9의 전반적인 실험 구성에서 볼 수 있듯이 레이저의 위치를 탱크 아래쪽에 위치하여 충격 압력이 발생할 때 레이저 빛이 자유표면을 지나지 않도록 조절하였다.

세번째, 기포에 의한 문제는 슬로싱 충격 압력의 유형을 선택하여 해결하였다. 전통적으로 슬로싱 충격 압력은 와그너 유형(Wagner type)과 바그놀드 유형(Bagnold type)으로 구별한다. 와그너 유형은 충격이 발생할 때 자유표면과 구조물 사이에 공기가 갇히지 않는 유형의 충격을 의미하고, 바그놀드 유형은 공기가 갇히는 유형의 충격을 의미한다. 와그너 유형의 경우 자유표면과 탱크 구조물 사이에 기체가 갇히지 않지만, 자유표면이 깨지며 기체가 액체 내부로 침두하여 액체 내부에는 다량의 기포가 생성되는 경우가 많다. 본 연구에서는 바그놀드 유형이 발생하는 조건을 선택하여 많은 양의 기체가 자유표면과 구조물 사이에 갇히지만, 액체 내부에는 기포가 적게 발생하여 액체 내부에 존재하는 입자의 위치를 카메라가 할 수 있었다.

2.5. 결과 해석 방법

2.5.1. 충격압력신호의 추출

슬로싱 충격 압력의 크기를 비교하기 위해서 먼저 저장된 압력신호 자료로부터 유효한 충격 압력 신호를 추출하였다. 충격 압력 신호 추출에는 Peak Over Threshold (POT) 방법을 사용하였다. POT 방법은 압력 신호 중 압력 역 값(threshold pressure) 이상의 값이 계측된 신호를 우선적으로 선별하고, 선별한 신호를 바탕으로 추출 시간 간격(time window) 내에서 가장 큰 충격 압력 신호를 최종적으로 추출하는 방법이다. 가장 큰 압력 신호의 최대값을 해당 충격의 압력값으로 산정하였다. Fig. 2-13에는 POT 방법을 통한 슬로싱 충격 압력 신호 추출의 예를 나타내었다. 본 연구에서 사용한 압력 역 값은 2.5 kPa이고, 추출 시간 간격은 0.2 sec다.

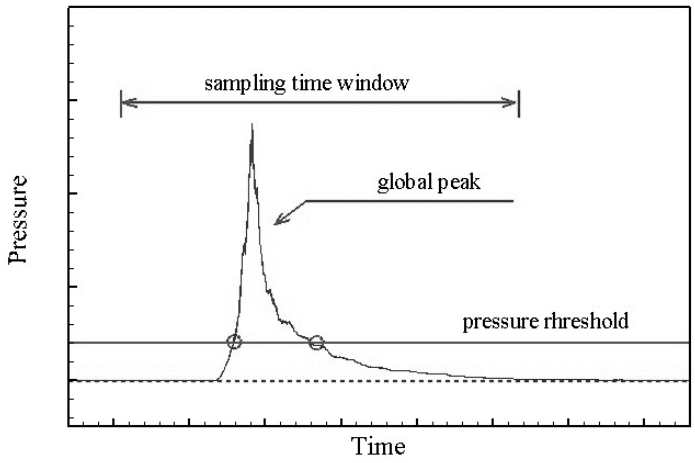


Fig. 2-13 Extraction of sampling peak and time window of POT method

2.5.2. 상승 시간의 정의

본 연구에서는 기체-액체 밀도비에 따른 충격 압력의 극값을 비교함과 동시에 상승 시간을 비교하였다. 상승시간은 충격 압력 신호를 이용해 충격 하중을 산정할 때의 자료가 된다. 상승시간을 정의하는 방법은 각 선급마다 다르다.

본 연구에서 사용한 방법은 여러 선급에서 제시하는 상승 시간에 대한 정의 방법 중 DNV 선급에서 사용하는 방식을 사용하였다. 이 방법은 앞서 규정한 슬로싱 충격 압력을 기준으로 그 크기의 절반에 해당하는 압력이 나타나는 순간의 압력을 지나도록 압력 역값(threshold pressure)까지 선형으로 연결하여 압력이 시작하는 순간으로 설정한다. 그리고 압력이 시작하는 순간과 압력 극값이 나타나는 시간 간격을 상승 시간으로 규정하는 방법이다. 방법을 그림으로 나타내면 Fig. 2-14와 같다. 그리고 이를 수식으로 표현하면 (1)와 같다. $t_{P_{\max}}$ 는 압력 극값이 나타날 때의 순간을 의미하며, $t_{(0.5P_{\max})\text{up-crossing}}$ 은 압력 극값이 나타나기에 앞서 압력 신호가 상승하는 동안 극값의 절반값이 나타나는 순간을, 그리고 T_{rise} 는 상승 시간을 의미한다.

$$T_{\text{rise}} = 2\left(t_{P_{\max}} - t_{(0.5P_{\max})\text{up-crossing}}\right) \quad (1)$$

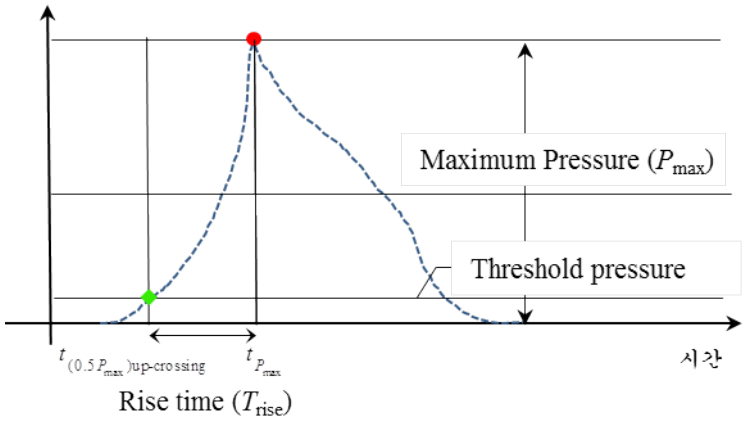


Fig. 2-14 Definition of rise time

2.5.3. 통계해석기법

실험 데이터로부터 통계해석 결과를 얻기 위해서는 우선 추출된 global peak들을 최대 충격압에 따라 내림차순 정렬할 필요가 있다. 정렬 후 global peak의 충격압은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$p_1 > p_2 > \ldots > p_{n-1} > p_n \qquad (2)$$

여기서 n은 통계해석에 사용되는 global peak의 개수이다. 압력의 크기들을 정렬한 후에 average of 1/k largest peaks, average of n largest peaks 등의 통계치들을 계산할 수 있다. Average of 1/k largest peaks는 상위 1/k 그룹에 속하는 peak들의 평균을 의미하고, average of k largest peaks는 k개의 가장 큰 peak들의 평균을 의미한다.

$$p_{\text{avg.1/k largest}} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} p_i \quad (14)$$

$$p_{\text{avg. k largest}} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} p_i \quad (15)$$

여기서 n은 global peak의 개수, m은 $1/k$ 그룹에 속하는 global peak의 개수로 $m = [n/k]$로 나타낼 수 있다.

해석에 사용한 통계치는 2차원 모형 규칙운동 조건의 경우 1/10 상위 충격 압력의 평균을 사용하였다. 이는 추출한 충격 압력 중 크기 순으로 배열하여 상위 10%의 충격 압력의 평균을 의미한다. 불규칙운동 실험의 해석에 있어 극치분포함수를 사용하였다. 근사에 사용한 극치 분포 함수는 3변수 Weibull 분포 함수와 Pareto 분포 함수다. 충격 압력 작용 시간을 나타내기 위하여 충격 압력 신호를 삼각형의 형태로 모델링을 한 후 상승 시간을 다음과 같은 방법으로 정의하여 해석에 사용하였다(Kim et al., 2010).

$$T_{rise} = 2\left(t_{P_{\max}} - t_{(0.5P_{\max})\text{up-crossing}}\right) \quad (3)$$

여기서는 압력신호가 최대값($P_{\max}$)을 나타낼 당시의 시점을 의미하며, $t_{P_{\max}}$ 는 압력신호가 최대값($P_{\max}$)의 0.5배 해당하는 크기의 압력을 지날 때의 시점을 의미한다.

3변수 Weibull 분포함수의 누적확률분포는 다음과 같이 나타난다.

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left[(x-\delta)/\beta\right]^{\gamma}\right) \quad (4)$$

변수 x의 범위는 $\delta \le x < \infty$이다. δ는 위치모수, β는 척도모수, γ는 형상모수이며, 각 모수는 모멘트법을 이용하여 구할 수 있다. 모멘트 법에서는 실험으로부터 얻은 충격압력신호 샘플의 압력값의 평균, 분산, 와도의 세가지 모멘트를 모델값들, 즉 분포함수의 평균, 분산, 와도와 일치시키는 방법으로 모수를 추정한다.

Generalized Pareto 분포함수의 확률밀도함수(Probability density function, PDF)와 누적확률밀도함수(Cubulitive density function, CDF)는 각각 다음과 같다.

$$g(x;c,\lambda) = \frac{1}{\lambda}\left(1+\frac{c}{\lambda}x\right)^{-1/c-1} \quad (5)$$

$$G(x;c,\lambda) = 1-\left(1+\frac{c}{\lambda}x\right)^{-1/c} \quad (6)$$

변수 x의 범위는 $c > 0$인 경우, $0 < x < \infty$이고, $c < 0$인 경우, $0 < x < -\lambda/c$ 이다. c는 shape parameter, λ는 scale parameter 이다.

2.5.4. 입자 영상 유속계 시스템 실험 결과 해석

입자 영상 유속계 시스템 실험에서 카메라로 촬영한 입자의 속도는 다음과 같은 방법을 사용하였다. 촬영 이미지의 크기는 608×1208 화소로 초당 1000 프레임을 촬영하였다. 먼저 검정 시험 결과 1화소는 약 52.175 μm의 거리와 같은 것으로 측정되었다. 촬영한 이미지로부터 입자의 속도를 해석할 때 시간 순서대로 이미지를 배열하여 첫번째와 두번째 이미지의 입자 사이의 거리와 시간을 이용하여 속도를 해석하고, 다음 속도는 두번째와 세번째 이미지를, 이어서 세번째와 네번째의 이미지를 해석하는 순서로 진행하였다.

각각 다른 이미지로부터 동일한 입자를 선택하는 것이 불가능하기 때문에 입자를 선택할 때는 일반적으로 특정한 크기의 구역(interrogation area)을 설정하여 통계적 해석 방법을 이용해 입자의 속도를 추정하기 위한 정보를 구한다. 본 연구에서는 해석을 위한 구역의 크기로는 정사각형 크기의 32×32 화소와 16×16 화소에서 해석을 진행하였고, 유동이 전반적으로 세로 방향으로 일어나기 때문에 세로 방향의 구역 크기를 작게 설정한 16×32 화소 크기에서 추가로 해석을 수행하였다. 구역의 크기를 설정한 후 해당 구역은 위치가 고정되어 있으며, 해당 구역을 지나는 입자의 속도에 대한 해석을 진행하였다. 입자의 속도를 해석할 때는 사용한 상용 소프트웨어의 확률적 상관관계를 사용하였다.

3. 실험 조건

3.1. 규칙운동 실험 조건

2차원 규칙 운동 실험의 경우 95%H, 70%H, 25%H, 15%H의 네 적재 수심 조건에 대해 실험을 수행하였다. 모형 탱크의 강제 운동 폭은 95%H와 70%H에 대하여 0.042l와 0.016l 두 가지 조건에 대한 실험을 수행하였고, 25%H와 15%H 조건에 대해서는 0.1l 조건에 대한 실험을 수행하였다. 운동 주파수(ω)는 모형 탱크에 대한 1차 공진주파수(ω_0)를 기준으로 다양하게 변화시켰으며, 각 조건 별로 200 주기의 시간동안 실험을 수행하였다. 기체-액체 밀도비 조건은 이를 일반 대기와 물의 밀도비에서 실제 LNG 선박 화물창의 밀도비까지 점진적으로 변경시켜가며 실험을 수행하였다.

Table 3-1 Test condition of harmonic test

	Harmonic Test
Excitation motion	Harmonic, regular
Model tank	2D model tank (1)
Filling level	95%H, 70%H, 25%H, 15%H
Excitation frequency	$0.7\omega_0$ - $1.4\omega_0$
Simulation time	200 periods

3.2. 불규칙운동 실험 조건

3차원 불규칙운동 실험의 경우 95%H, 70%H, 그리고 10%H 적재 수심에 대해 실험을 수행하였고, 각 적재 수심 별로 다른 선수각과 해상상태를 적용하였다. 95%H와 70%H 적재 수심 조건의 경우 선수각 150°의 북대서양 40년 주기 파를, 10%H 적재 수심 조건에서는 선수각 90°의 북대서양 1년 주기파를 선정하였다. 모든 조건은 실선 기준 5시간 동안 충격 압력을 계측하였다. 이 해상상태는 본 연구를 진행하기 앞서 각 적재 수심 별로 다양한 해상 상태와 선수각을 조건으로 하는 실험을 통해 가장 유의한 슬로싱 충격 압력이 나타나는 해상 상태와 선수각을 선정하였다.

Table 3-2 Test condition of irregular test

	Irreugular Test		
Excitation motion	Irregular		
Model tank	3D model (160K LNG carrier)		
Filling level	95%H	70%H	10%H
Sea-state	T_z = 9.5 s H_s = 8.3 m	T_z = 9.5 s H_s = 14.4 m	T_z = 9.5 s H_s = 14.4 m
Wave heading angle	90°	150°	150°
Simulation time	5 hours in real scale		

3.3. PIV 실험 조건

PIV 실험 조건은 적재 수심 70%H 조건에서 바그놀드 유형의 슬로싱 충격에 대해 실험을 수행하였다. PIV 실험을 적용하기 위해 액체 내부에 기포가 적게 생성되면서, 충격 압력이 큰 실험 조건을 선택하였다. 이 실험 조건은 모형 탱크 상부 모서리에 기체가 갇히는 현상이 발생한다. 모식도는 Fig. 3-1와 같고, 상세 조건은 Table 3-3에 나타내었다.

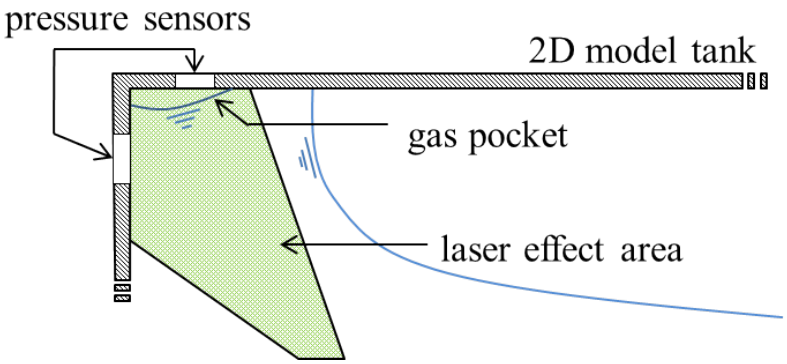


Fig. 3-1 schematic drawing of impact and locations of sensors.

Table 3-3 Test condition of harmonic test

	PIV Test
Excitation motion	Harmonic, regular
Model tank	2D model tank (2)
Filling level	70%H
Simulatino time	200 periods
Remarks	Gas pocket conditino

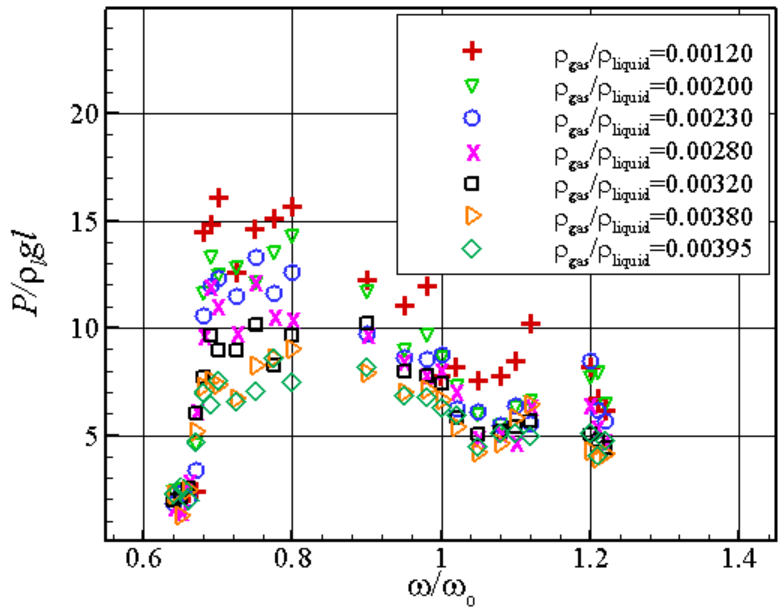
4. 4. 실험 결과

4.1. 규칙운동 실험 결과

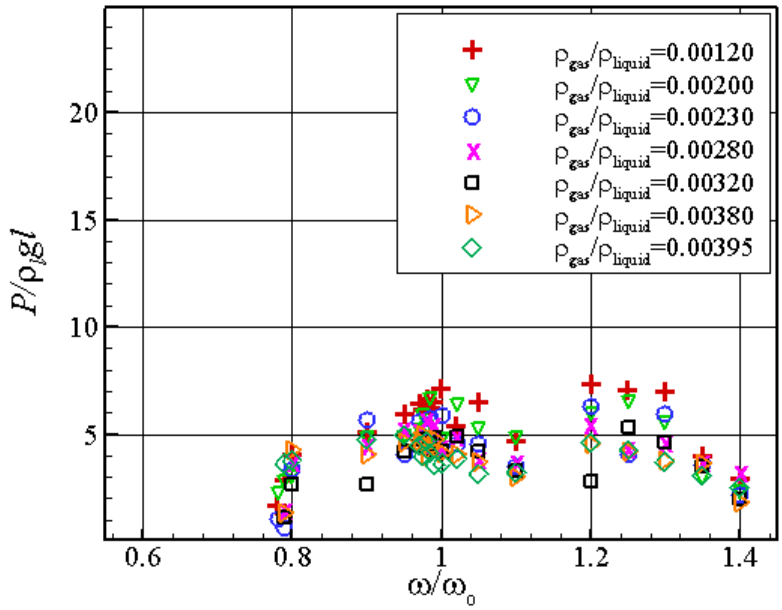
4.1.1. 적재수심 95%H 조건

적재수심 95%H의 규칙 운동 실험 결과는 Fig. 4-1에 나타난 바와 같다. 강제 동요 진폭에 따라 (a)와 (b) 그림으로 나누어 정리하였다. x축에는 실험의 강제 동요 주파수를 모형 탱크의 슬로싱 유동에 대한 1차 공진 주파수로 무차원화 한 값을 나타내었고, y축에는 계측한 충격 압력 상위 1/10의 평균값을 무차원화하여 나타내었다. 기체-액체의 밀도비를 변화하며 실험한 결과는 서로 다른 모양의 부호로 나타내었다.

결과를 보면 강제 동요 진폭이 $0.042l$ 일 때 이론적인 공진 주기 보다 긴 주기에서 큰 슬로싱 충격 압력이 나타났으나, 강제 동요 진폭이 $0.016l$ 일 경우는 이론적인 공진 주기보다 짧은 주기에서 큰 슬로싱 충격 압력이 나타났다. 기체-액체 밀도비 증가에 따른 충격 압력의 감소는 대부분의 강제 동요 주기에서 점진적으로 나타났으며, 슬로싱 충격 압력이 크게 나타나는 강제 동요 주기에서 보다 명확히 나타났다. 또한 슬로싱 충격 압력의 크기와 강제 동요 주기에 따른 경향은 기체-액체 밀도비 증가에 상관 없이 일정함을 확인할 수 있다.



(a) Excitation amplitude = 0.042*l*



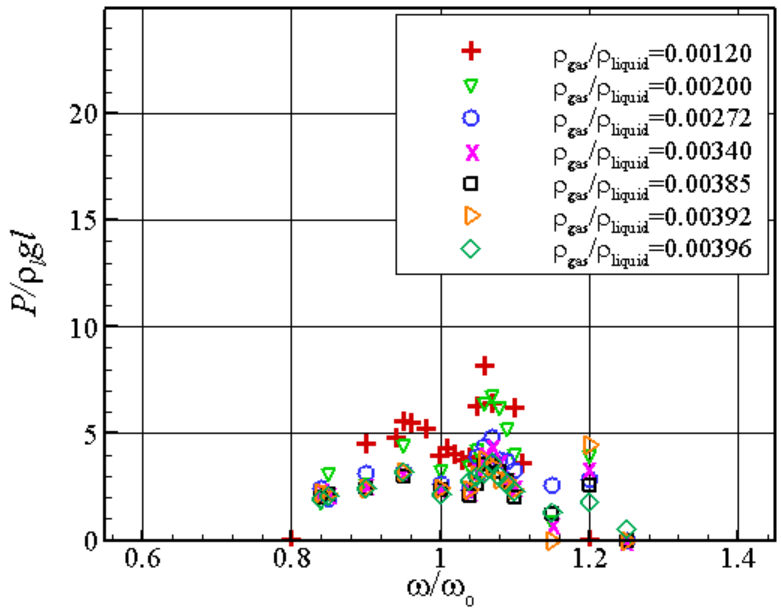
(b) Excitation amplitude = 0.016*l*

Fig. 4-1 Measured sloshing pressure of 2D harmonic test with 95%H filling level varying the frequency and the density ratio

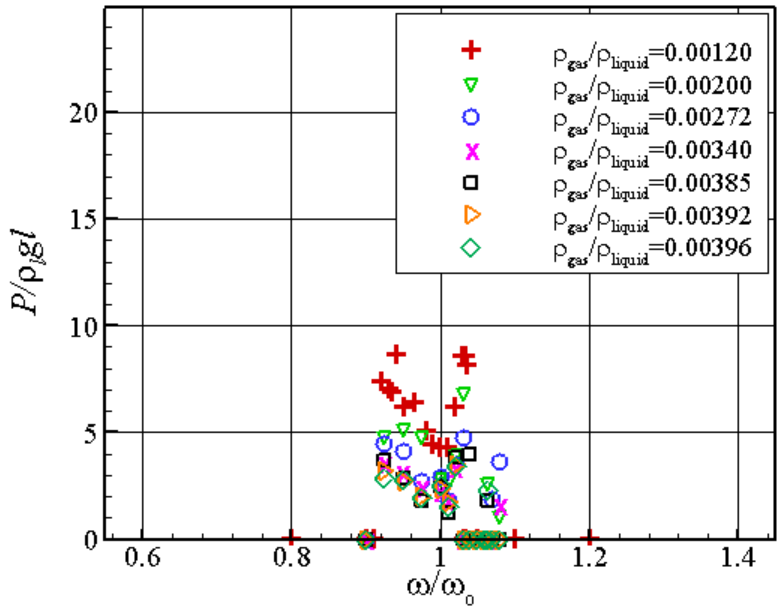
4.1.2. 적재수심 70%H 조건

Fig. 4-2은 적재수심 70%H 조건에서의 규칙 운동 실험 결과를 나타낸 그림이다. 적재수심 95%H 조건에서의 실험 결과와 유사하게 기체-액체 밀도비가 증가함에 따라 충격 압력이 감소하는 경향이 나타났다. 일반 대기를 이용한 실험의 기체-액체 밀도비 조건에서의 충격 압력과 비교할 때, 혼합기체를 사용하여 실제 화물창의 밀도비와 유사한 조건에서의 슬로싱 충격 압력은 약 40%에서 50% 정도 감소하였다. 하지만 일부 강제동요 진동수 구간에서는 기체-액체 밀도비에 의한 차이가 나타나지 않았다.

이렇게 밀도비에 따라 충격 압력이 감소하지 않는 특정 주기는 Fig. 4-3에 다시 나타내었다. Fig. 4-3의 x축은 기체-액체 밀도비를, y축은 무차원화한 슬로싱 충격 압력을 의미한다. Fig. 4-3에 나타난 실험 조건의 강제 동요 진동수에서는 강제 동요기가 규칙적으로 운동함에도 유체의 움직임이 매우 불규칙적이며, 충격 압력이 나타나는 주기와 그 크기도 일정하지 않았다. 이와 같은 불규칙한 현상이 나타난 강제 동요 주기 구간은 유동이 불안정하다고 알려진 도약 현상(jump phenomena)이 일어나는 구간으로 추정된다. 이 구간에서는 슬로싱 충격 압력에 대한 기체-액체 밀도비의 영향보다, 유동의 불규칙성에 의한 충격 압력의 변화가 더 크기 때문에 기체-액체 밀도비의 영향을 확인하기 어렵다.

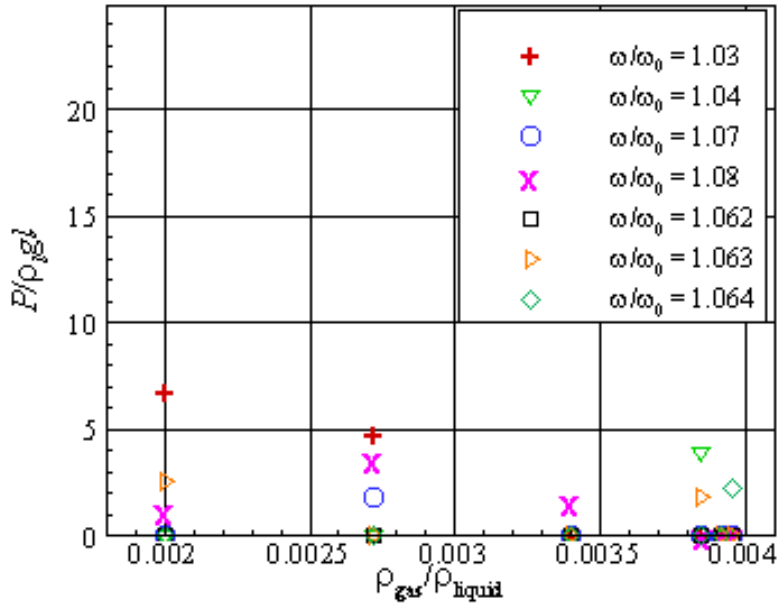


(a) Excitation amplitude = 0.043*l*

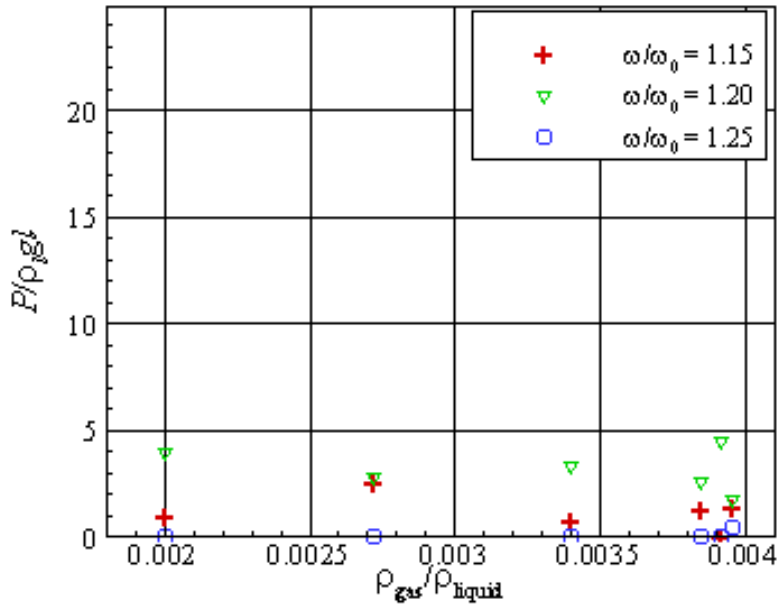


(b) Excitation amplitude = 15 mm

Fig. 4-2 Measured sloshing pressure of 2D harmonic test with 70%H filling level varying the frequency and the density ratio



(a) Excitation amplitude = 0.042*l*



(b) Excitation amplitude = 0.016*l*

Fig. 4-3 Sloshing pressure of 2D harmonic test in particular frequency regions of 70%H filling level

4.1.3. 적재수심 25%H & 15%H 조건

적재 수심 25%H 조건에서의 결과를 Fig. 4-4에, 적재 수심 15%H 조건에서의 결과를 Fig. 4-5에 나타내었다. 다른 적재 수심에서의 결과와 유사하게 대부분의 강제 동요 진동수에서는 기체-액체 밀도비를 증가시킴에 따라 슬로싱 충격 압력이 감소하였다. 하지만 강제 동요 진동수에 따라 감소폭이 서로 다르며, 특정 강제 동요 진동수 조건에서는 기체-액체 밀도비의 변화로 인한 영향이 나타나지 않았다.

몇몇 조건에서 기체-액체 밀도비의 영향이 나타나지 않는 이유는 적재 수심이 낮기 때문에 진행하는 파가 깨졌기 때문으로 보인다. 깨진 파가 탱크 벽에 도달할 때 기체가 갇히지 않고, 상대적으로 기체가 빠져나갈 공간이 많다. 따라서 압력 센서가 위치한 곳에서 깨진 파가 슬로싱 충격이 발생하면 기체-액체 밀도비의 영향을 확인하기 어렵다. 또 하나의 이유로는 탱크 측면에는 압력 센서가 탱크 지붕에 비해 성기게 분포하고 있어 충격 압력을 온전히 측정하지 못하였을 가능성도 있다.

반대로 슬로싱 충격 압력이 발생할 때 기체가 자유표면과 탱크 벽에 갇히는 조건, 하이드롤릭점프(hydraulic jump), 혹은 filp-through 조건 등에서는 기체-액체의 밀도비가 슬로싱 충격 압력에 크게 영향을 미친다. 이 조건들에서는 기체-액체의 밀도비를 증가시킴에 따라 슬로싱 충격압력이 뚜렷하게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

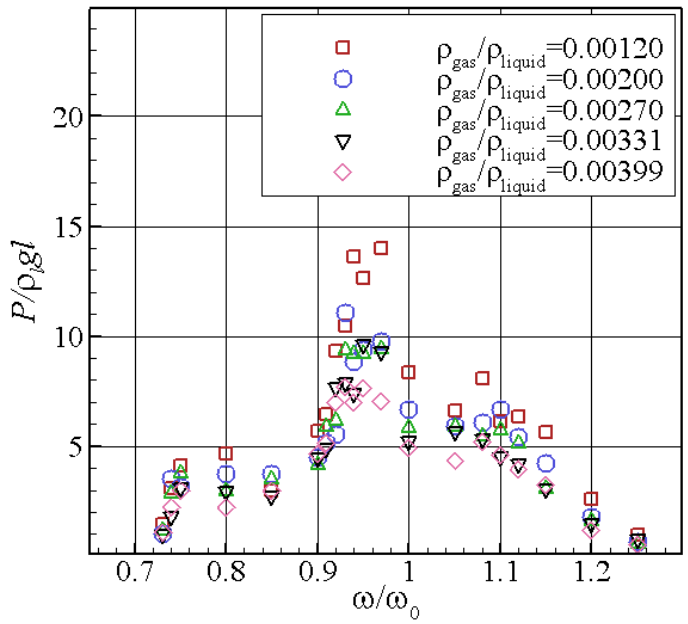


Fig. 4-4 Measured sloshing pressure of 2D harmonic test with 25%H filling level varying the frequency and the density ratio

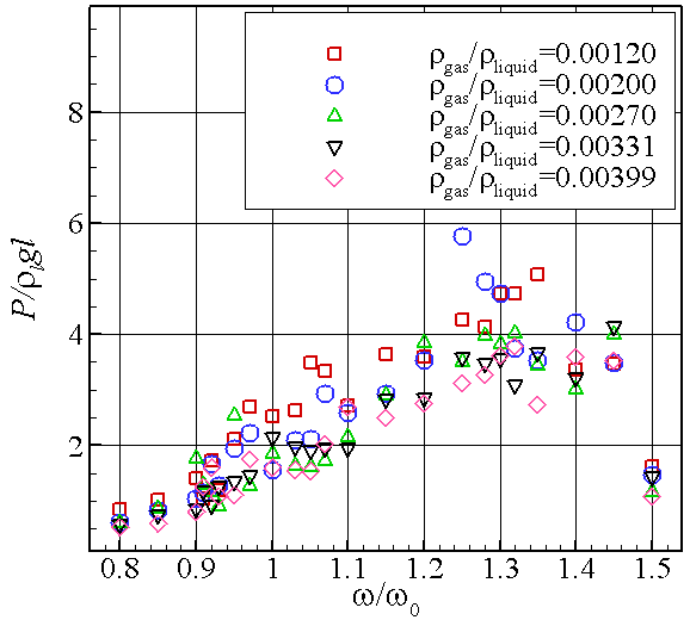


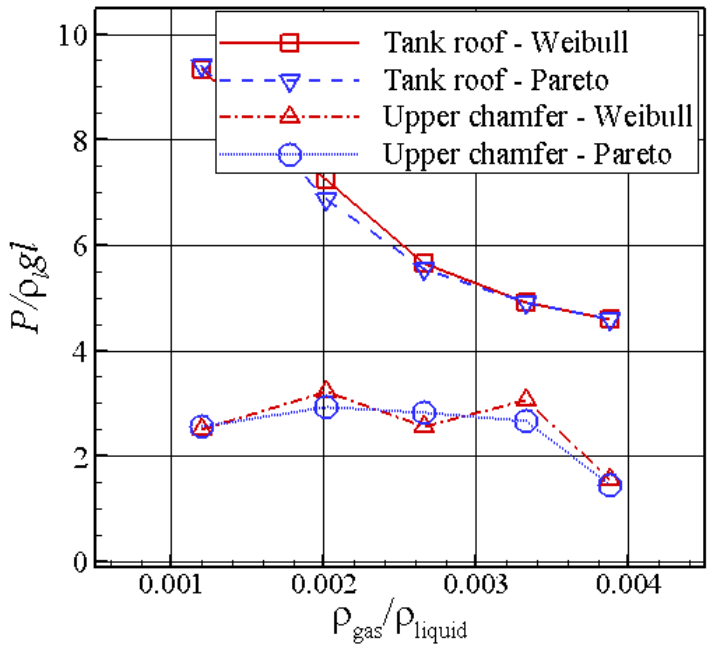
Fig. 4-5. Measured sloshing pressure of 2D harmonic test with 15%H filling level varying the frequency and the density ratio

4.2. 불규칙운동 실험 결과

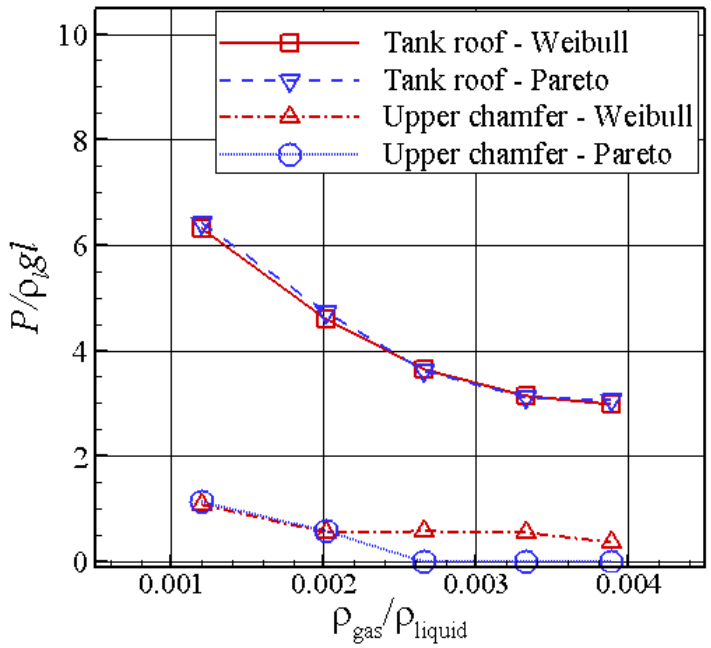
3차원 모형 탱크를 이용한 실험의 경우 불규칙 운동 조건의 계측 결과를 통계 해석하여 정리하였다. 극한 통계 해석의 방법은 3변수 Weibull 분포와 Pareto 분포를 사용하였고, 두 분포함수를 이용해 슬로싱 충격 압력의 변화를 관찰하였다. 95%H, 70%H 및 10%H의 적재 수심을 고려하였으며 각 적재 수심 별로 기체-액체 밀도비를 달리하여 실험을 수행하였다.

4.2.1. 적재수심 95%H & 70%H 조건

Fig. 4-6 은 각각 적재 수심 95%H와 70%H 조건 실험에서 모형 탱크 지붕(tank roof)과 상부 모서리(upper chamfer)에서 발생한 슬로싱 충격 압력 결과를 나타낸 그림이다. x축에는 기체-액체의 밀도비를, y축에는 세시간 Weibull 통계 해석과 Pareto 통계 해석의 결과 값을 무차원화하여 나타내었다. 모형 탱크 지붕에서는 기체-액체 밀도비가 0.0012에서 약 0.004로 증가할 때 슬로싱 충격 압력이 절반 수준으로 줄어들었다. 하지만 상부 모서리에서는 기체-액체 밀도비가 증가함에 따른 충격 압력의 감소를 뚜렷하게 확인하기 어려웠다. 그 이유는 상부 모서리에 나타난 충격 압력의 크기가 탱크 상부에 나타난 것에 비해 상대적으로 작고 슬로싱 충격이 발생한 횟수도 적기 때문에 기체-액체 밀도비의 영향이 상대적으로 크게 나타나지 않은 것으로 보인다.



(a) Tank roof



(b) Upper chamfer

Fig. 4-6 Influence of the density ratio on the statistical pressures of 95%H and 70%H filling levels under 3D irregular test

95%H와 70%H의 두 적재 수심 조건에 대해 충격 압력의 상승 시간을 Fig. 4-7과 Fig. 4-8에 각각 나타내었다. 충격 압력의 크기를 기준으로 상위 10%, 20%, 그리고 30%에 해당하는 압력 신호에 대한 상승 시간을 기체-액체 밀도비를 달리하는 조건에 대하여 각각 비교하였다.

상위 10% 충격 압력의 결과를 보면 기체-액체 밀도비의 변화에 따라 충격 압력의 상승시간이 변화하는 모습을 보여준다. 그러나 상위 20%, 30%의 경우처럼 보다 작은 충격 압력까지 고려할수록 충격 압력의 상승시간과 기체-액체 밀도비의 관계가 불규칙한 경향이 나타났다. 결론적으로 슬로싱 충격 압력의 크기와 상승시간에 밀도비가 영향을 미치는 것으로 볼 수 있으며, 상대적으로 높은 충격 압력에 대해 상승 시간이 밀도비에 영향을 받는 것으로 추정할 수 있다.

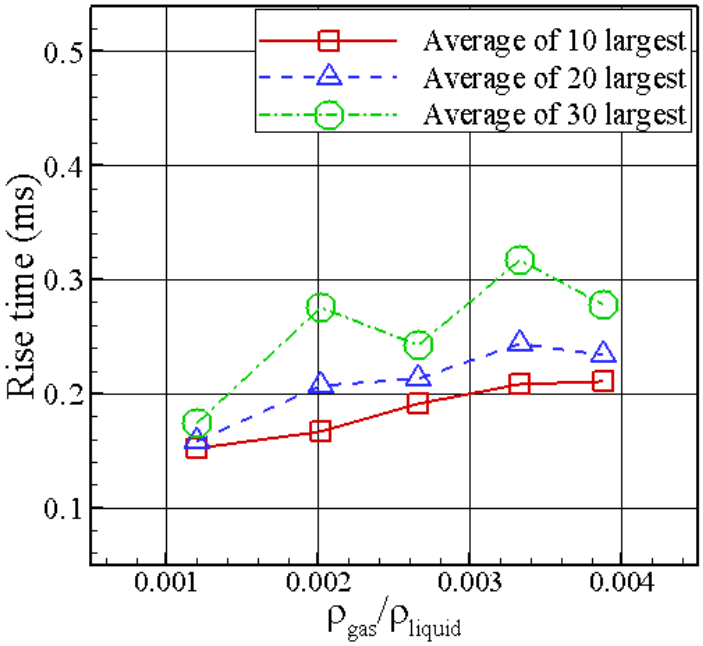


Fig. 4-7 The average of rise time of 95%H filling level under 3D irregular test

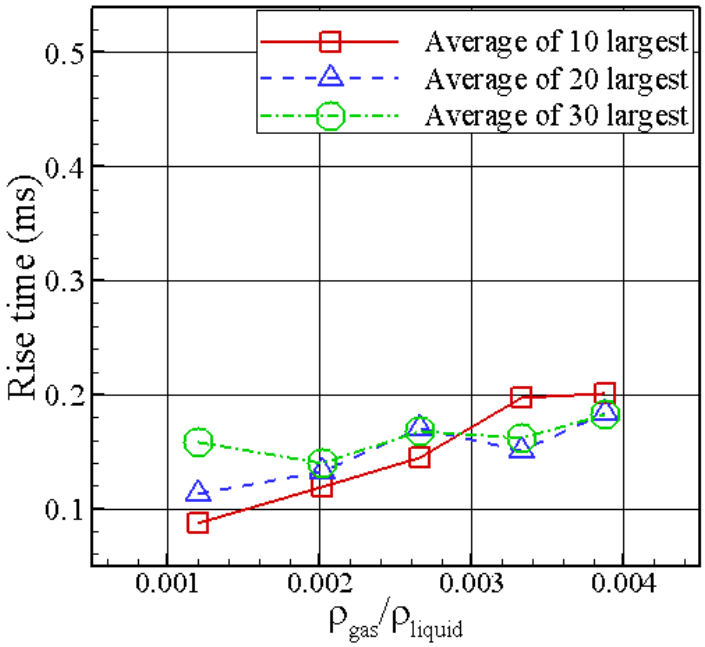


Fig. 4-8 The average of rise time of 70%H filling level under 3D irregular test

4.2.2. 적재수심 10%H 조건

10%H 적재 수심 조건에서 기체-액체 밀도비를 변경할 때 나타나는 슬로싱 충격 압력에 대한 결과는 Fig. 4-8에 나타내었다. 대부분의 슬로싱 충격 압력이 탱크 측면에 나타났고, 이와 함께 하부 모서리(lower chamfer)에도 나타났다. 실험 결과, 적재 수심 95%H와 70%H 조건과 달리 기체-액체 밀도비가 증가할 때 슬로싱 충격 압력이 감소하는 경향이 일정하지 않았다.

10%H 적재 수심에서의 상승 시간에 대한 기체-액체 밀도비의 영향은 Fig. 4-9 에 나타내었다. 95%H 조건과 70%H 조건에서 나타난 상승 시간의 변화와는 다른 결과를 얻을 수 있었다. 상위 10%, 20%, 그리고 30% 충격 압력 신호들의 상승 시간에 대해서는 모두 기체-액체 밀도비의 변화에 따른 영향이 나타나지 않았다.

이와 같이 적재 수심이 낮은 조건의 경우 슬로싱 충격 압력 극값의 크기와 압력 신호의 상승 시간에 대해 기체-액체 밀도비가 영향을 미치지 못하는 이유는 다음과 같다. 적재 수심이 낮을 경우 모형 탱크 바닥의 영향으로 인해 파가 진행하며 파 머리가 깨지고, 충격 발생 시 자유 표면과 모형 탱크 벽 사이에 기체가 갇히는 경우가 적기 때문으로 보인다. 또한 높은 적재 수심에 비해 기체가 빠져나갈 수 있는 공간이 많아 기체의 밀도가 충격 압력에 영향을 미칠 가능성이 줄어든다.

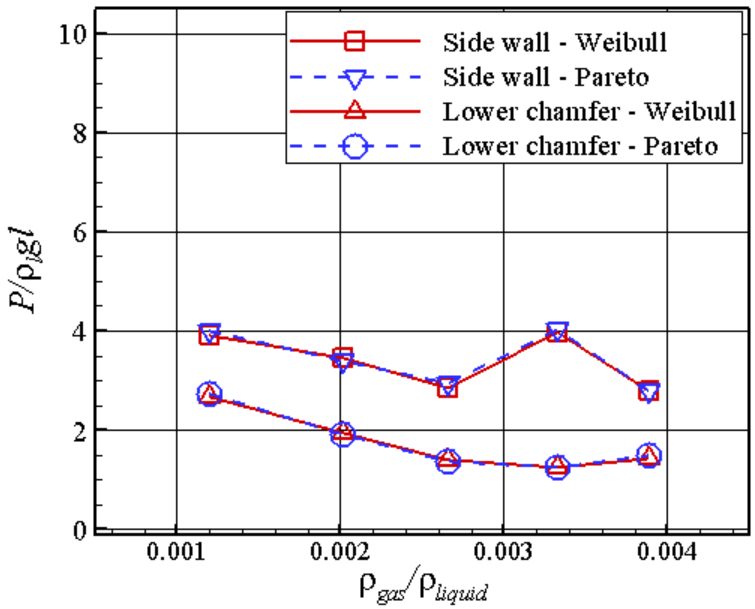


Fig. 4-9 Influence of the density ratio on the statistical pressures of 95%H and 70%H filling levels under 3D irregular test

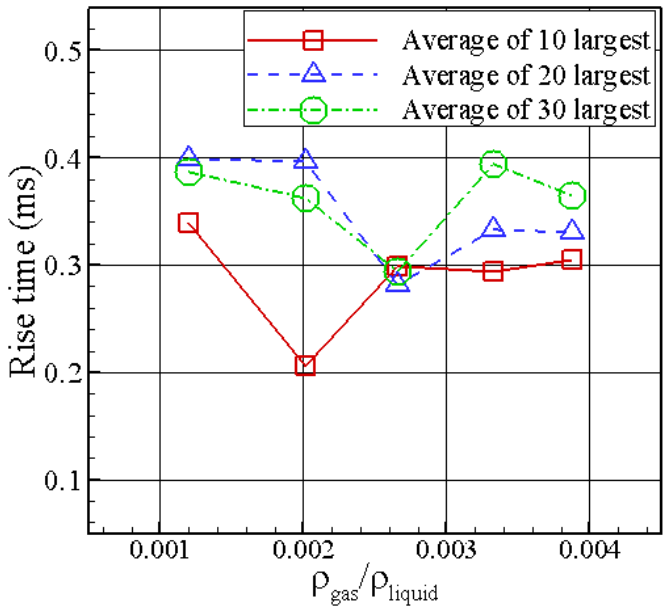


Fig. 4-10 The average of rise time of 10%H filling level under 3D irregular test

4.3. PIV 실험 결과

4.3.1. 충격압력의 비교

PIV 실험은 200주기 동안 4개의 센서를 이용해 슬로싱 충격 압력을 계측하였다. 일반공기와 물을 이용하여 기존 슬로싱 실험의 기체-액체 밀도비 조건의 실험과 혼합기체와 물을 이용하여 실제 LNG 화물창의 밀도비와 유사한 조건의 실험 결과를 비교하였다. 먼저 기체-액체의 밀도비가 슬로싱 충격 압력에 영향을 미치는지 여부와 영향의 정도를 확인할 필요가 있다. 각 센서에 나타난 상위 10% 충격 압력의 평균을 Fig. 4-10에 나타내었다. 모든 압력 센서에서 밀도비를 증가시킴에 따라 충격 압력이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 탱크 지붕에 부착한 세번째 압력 센서와 네번째 압력 센서에서 슬로싱 충격 압력의 감소 비율이 측면에 부착한 첫번째 압력 센서와 두번째 압력 센서에 비해 컸다. 이는 탱크 지붕에 부착한 센서가 공기 주머니가 생성되는 위치에 부착되어 있기 때문으로 보인다.

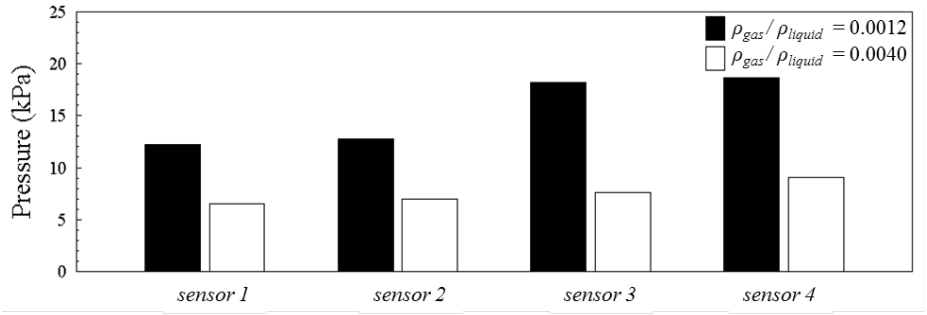


Fig. 4-11 Influence of the density ratio on the sloshing pressure under the PIV test condition

4.3.2. 비교 대상의 선정

기체-액체 밀도비 변화에 따른 슬로싱 충격이 발생할 때의 유동 변화를 PIV 실험을 통해 알아보기 위해서는 특정한 기준을 가지고 비교 대상을 선정해야 한다. 슬로싱 현상의 특성상 모든 조건이 같더라도 매 순간 자유표면의 형상과 충격 압력의 크기, 그리고 압력 신호의 형태가 다르기 때문이다. 본 연구에서는 일반공기와 물을 사용한 조건에서의 충격 압력들과 혼합 기체와 물을 사용한 조건에서의 충격 압력들 중 압력 신호의 진동하는 주기가 유사한 두 충격 압력을 선정하였고, 해당 압력 신호가 발생한 유동에 대해 PIV 실험을 수행하였다. 각각의 압력신호를 고속 푸리에 변환(fast Fourier Transform, FFT)를 사용하여 주파수 영역으로 확장한 결과는 Fig. 4-11과 같다.

먼저 일반공기를 사용한 실험의 경우 압력 신호를 저장하기 시작한 후 2200초 경에 발생한 충격 압력을 선정을 하였고, 혼합 기체를 사용한 실험의 경우 약 1700초 경에 발생한 충격 압력을 선정하였다. 각각의 슬로싱 충격압력이 발생할 때 측면에 부착한 첫 번째와 두번째의 압력 센서에서 계측한 압력 신호를 주파수 영역으로 변환한 결과는 압력신호의 아래에 나타내었다. 두 슬로싱 충격압력의 압력 신호는 모두 약 80Hz 진동수에서 가장 큰 진폭을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다.

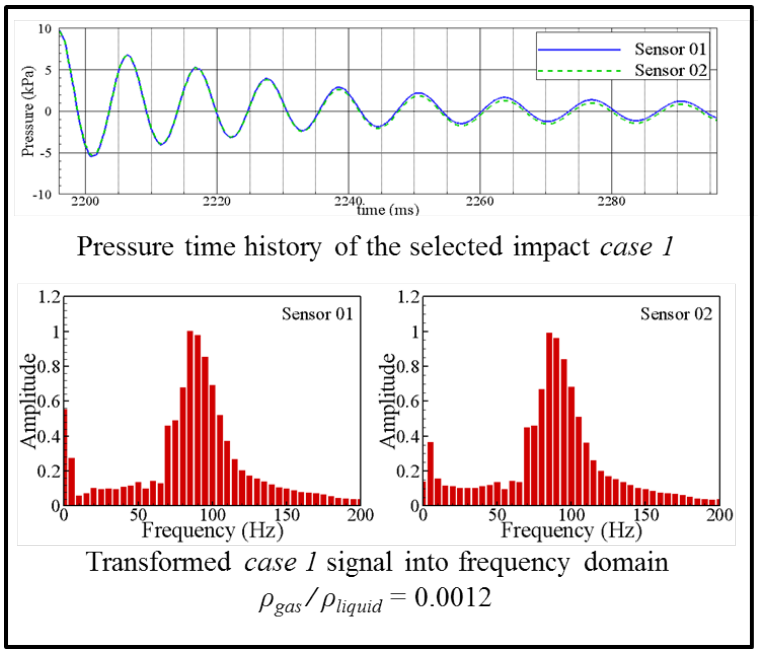


Fig. 4-12 Transformed pressure signal into frequency domain of the ambient air condition.

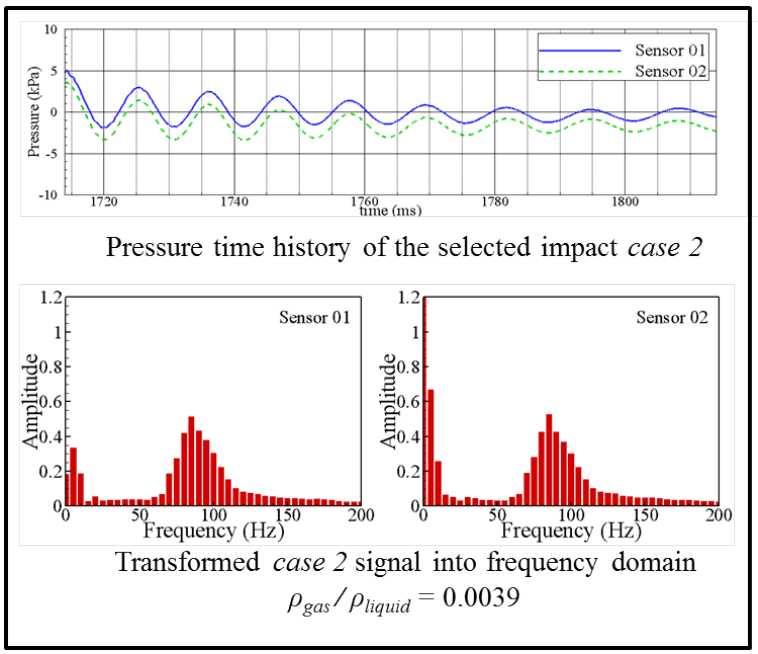


Fig. 4-13 Transformed pressure signal into frequency domain of the mixture condition.

4.3.3. 압력신호와 유체속도의 동기화 결과

압력 센서를 통해 계측한 압력 신호와 고속 카메라를 이용해 촬영한 이미지는 압력 신호를 저장하는 소프트웨어 내부에 장착한 내부 방아쇠(internal trigger)를 이용해 동시에 저장을 시작한다. 그리고 저장되는 두 데이터는 해석할 때 동일한 시간 소인(time stamp)을 사용하여 동기화가 가능하다. 촬영 이미지는 가로세로 각각 32 화소의 직사각형 크기를 갖는 구역을 지나가는 입자의 속도를 해석하였다.

Fig. 4-14와 Fig. 4-15는 압력신호와 입자 속도의 해석 결과를 동기화하여 같은 시간에 저장하여 해석한 결과를 비교한 그래프다. 파란색 실선은 압력 신호를 가리키고, 네개의 서로 다른 심볼(Area 01, Area 02, Area 03, and Area 04)로는 네개의 다른 위치에서의 입자의 속도를 해석하여 그 절대값을 나타내었다. 그래프에 나타낸 네 위치를 선정한 기준은 다음과 같다. 측면에 부착한 압력 센서(sensor 1, sensor2)와 갇힌 기체 주머니의 자유표면 사이에 위치하는 위치를 먼저 선택하였다. 그리고 그 위치 중 해석 시간 동안 기포가 해석 위치를 지나가지 않으면서 각종 미세물질들이 확인되지 않아 해석할 때 잘못된 결과를 가져올 수 있는 가능성이 가장 적다고 판단하는 위치를 선정하였다. Fig. 4-14와 Fig. 4-15에 나타낸 각 심볼들의 위치는 서로 동일하다.

결과를 살펴보면 두 그래프에서 동일하게 압력 최대값이 나타날 때 입자 속도의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 입자 속도

의 크기는 갇힌 기체 주머니의 표면이 진동하면서 약 80Hz의 주기로 진동하고 있다. 또한 압력 신호는 입자 속도의 크기가 진동하는 결과와 약 90도의 위상차이를 보이며 진동하고 있다. 압력 신호가 음수 최대값이 될 때 유체 입자 속도가 가장 빠르다.

이 결과를 통해서 압력 신호의 진동은 주머니 형태로 갇힌 기체가 압축되었다가 팽창하는 진동에 의해 주위 유체를 진동시키고, 이렇게 진동하는 유체에 의해 발생하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 이 실험과 같은 조건에서는 충격이 발생하는 근방의 모든 구조물에서 유사한 주기로 진동하는 충격 압력 신호가 계측될 것임을 추측할 수 있다.

혼합 기체 실험 결과 Fig. 4-14는 슬로싱 충격 압력이 발생하기 시작하는 구간에서 앞선 일반 공기 실험 결과 Fig. 4-13과 유사하게 압력 최대값이 나타날 때 입자 속도의 크기가 감소하였다. 그리고 압력 신호와 입자 속도 크기의 진동 주기가 약 90도의 위상차이를 보인다. 하지만 시간이 지남에 따라 그 위상차이가 줄어들었다. 해석한 입자 속도의 크기와 압력의 크기가 상대적으로 작아 기체의 압축성에 의해 나타나는 진동이 뚜렷하게 나타나지 않았던 것으로 보인다. 또한 속도 크기가 작아 PIV 해석이 어렵고, 확인하지 못한 여러 인자들이 해석에 영향을 미쳤기 때문으로 여겨진다.

기체-액체 밀도비에 따른 입자 속도의 크기 차이는 Fig. 4-13와 Fig. 4-14를 비교할 때 확인할 수 있다. 혼합 기체를 사용하여 기체-액체 밀도비를 증가시킬 경우 충격 압력의 크기가 줄어들면서 입자 속도의 크기도 줄어든다. 본 실험의 조건과 같이 많은 양

의 부피를 갖는 기체가 갇히는 조건에서 기체-액체의 밀도비를 증가시키면 압축된 기체에 의해 진동하는 크기도 함께 감소한다. 그리고 그 진동도 일반 공기를 사용한 조건에 비하여 상대적으로 명확하지 않다. PIV 실험 결과를 통해 기체-액체의 밀도비가 유동의 기구학적 결과에도 영향을 미치는 것을 확인하였다.

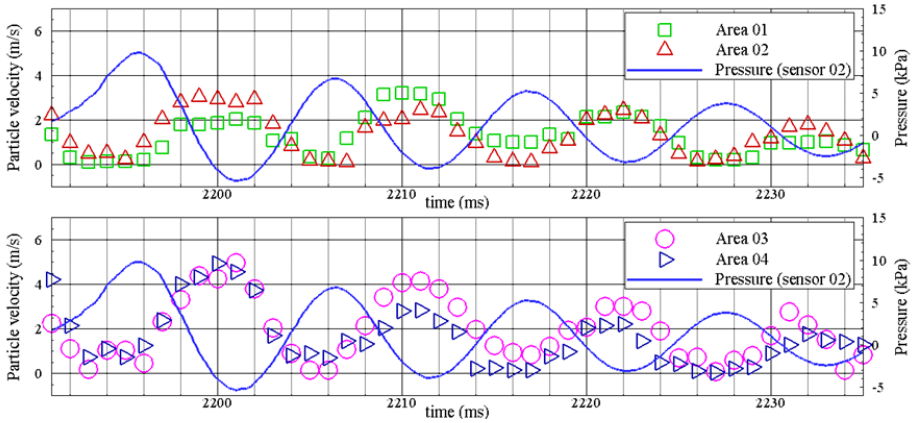


Fig. 4-14 Time history of the pressure and the magnitude of velocities under the ambient air condition.

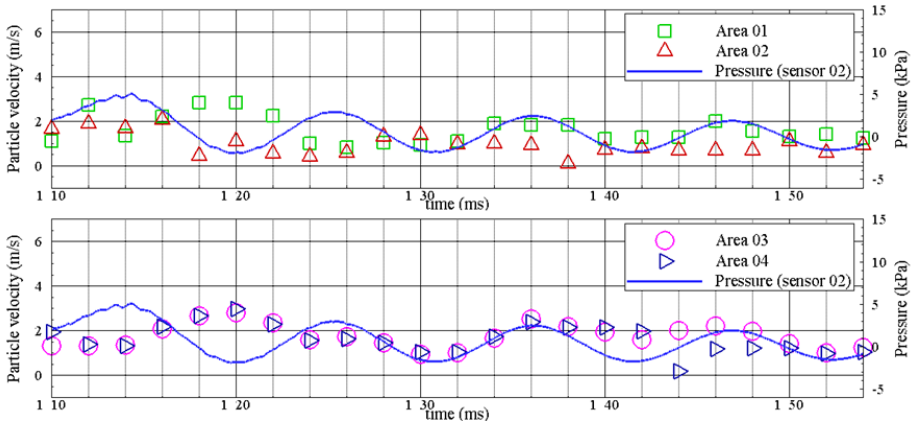


Fig. 4-15 Time history of the pressure and the magnitude of velocities under the mixture condition.

4.3.4. 압력신호와 유체가속도의 동기화 결과

입자의 가속도장 $\partial v / \partial t$은 입자에 대해 해석한 속도장 결과로부터 1차 후방차분(the first-order backward difference)을 이용해 구할 수 있다. 사용한 계산 방정식은 (7)와 같다.

$$a(t_n) = \frac{v(x,t_n) - v(x,t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} \tag{7}$$

방정식 (7)에서 a는 가속도, t는 해석 시간, x는 해석 위치, 그리고 첨자 n은 순서를 나타낸다. 계산한 가속도장 역시 압력신호와 동일한 시간 소인을 사용하기때문에 압력신호와 함께 나타낼 수 있다. 압력신호와 입자 가속도를 해석한 결과를 함께 나타내면 Fig. 4-16와 Fig. 4-17와 같다. 느리게 진동하는 심볼은 충격 후에 나타나는 유체 입자의 가속도를 의미하며 flip through 형태의 슬로싱 충격 압력이 나타날 때 발생하는 가속도에 비해 매우 낮다 (Lugni, Brocchini, and Faltinsen, 2006). 또한 가속도의 크기가 4 m/s^2 이하이기 때문에 중력 가속도에 의해 영향을 받을 가능성이 있는 영역에 속한다. 해석 결과 일반 공기를 사용한 조건과 혼합 기체를 사용한 조건에서 모두 압력 신호가 양의 극값과 음의 극값을 가질 때 유체 입자가 가속되지 않는 것을 확인할 수 있다.

일반 공기를 사용한 실험에서는 속도장 해석 결과와 마찬가지로 비교적 명확한 결과를 얻을 수 있었다.

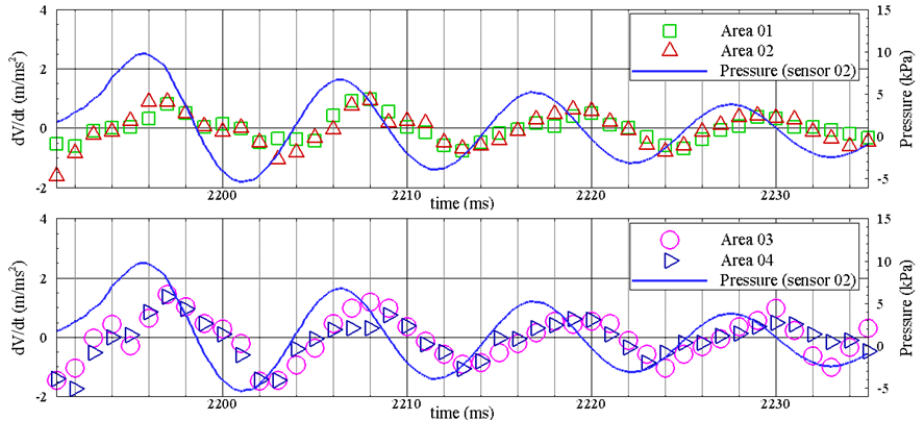


Fig. 4-16 Time history of the pressure and accelerations during the same impact of Fig. 4-14.

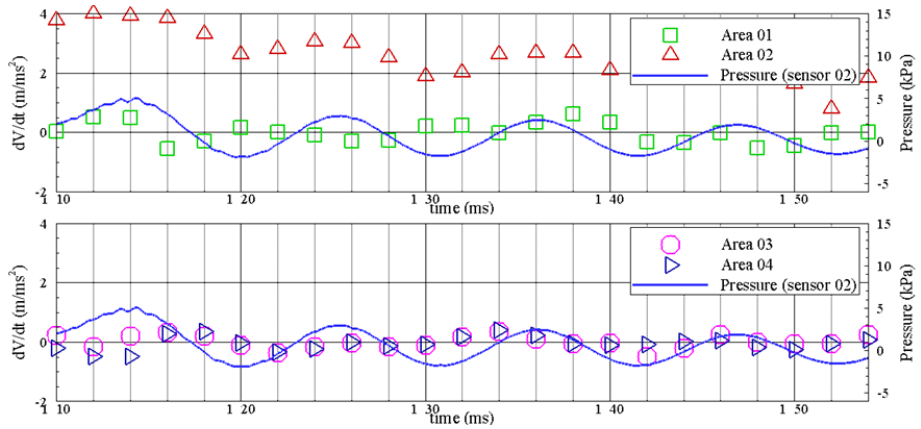


Fig. 4-17 Time history of the pressure and accelerations during the same impact of Fig.4-15.

5. 결론

슬로싱 실험 시 모형 탱크 내부의 기체-액체 밀도비는 슬로싱 실험 결과에 영향을 미친다. 기체-액체 밀도비가 증가함에 따라 충격 압력의 크기가 대체로 작아지며 감소 비율은 선형적이지 않다. 하지만 2차원 규칙 운동 실험의 특정 강제 동요 주기에서는 밀도비가 증가하여도 슬로싱 충격 압력의 크기가 감소하지 않았다. 이 강제 동요 주기는 점프 현상이 나타나는 구간으로 보이며 유동이 강제 동요의 주기에 매우 민감한 조건이다.

3차원 불규칙 운동 실험 결과 적재 수심과 해상 조건에 따라 기체-액체 밀도비가 미치는 영향이 달라졌다. 적재 수심 95%H 조건과 70%H 조건에서 그 영향이 뚜렷하게 나타났다. 밀도비를 증가시킴에 따라 충격 압력의 크기가 줄어들고, 상승 시간이 늘어났다. 적재 수심 10%H 조건에서는 상대적으로 영향이 작았다. 밀도비를 증가시킬 때 충격 압력의 크기가 일정하게 감소하지 않았고, 상승 시간의 경우도 규칙적인 변화 경향을 찾기는 어려웠다.

따라서 일반 공기를 이용하는 기존의 슬로싱 실험 결과는 실제 화물창의 슬로싱 현상에서 나타나는 충격 압력과 다를 수 있다. 기체-액체의 밀도비가 충격 압력의 크기와 함께 상승시간에도 영향을 미치기 때문이다. 실험 결과, 슬로싱 모형 실험 수행 시 실제 화물창의 천연 가스와 액화 천연 가스의 밀도비를 고려해야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

입자 영상 유속계 실험을 통해 기체-액체 밀도비 변화에 따른 슬

로싱 유동의 기구학적인 변화와 동역학적인 변화를 함께 살펴보았다. 입자 영상 유속계 실험을 슬로싱 실험에 적용하기 위해 크게 두가지 문제점을 해결하였다. 첫번째 문제는 레이저가 자유표면을 지나갈 때 굴절이 발생하여 카메라 초점을 벗어나는 문제다. 그리고 두번째 문제는 슬로싱 충격 압력이 발생할 때 액체가 구조물에 부딛히면서 많은 숫자의 기포가 발생한다. 기포 표면에서 발생하는 레이저의 굴절과 반사에 의해 카메라의 초점을 벗어나고, 잘못된 정보를 얻게 되는 문제가 발생한다다. 특히 두번째 문제의 경우 기포 내부에 입자가 존재하지 않아 기포가 많이 발생할 경우 해석을 위한 입자 위치 정보를 전혀 얻기 어렵다.

첫번째 문제는 레이저의 위치를 변경하여 해결하였다. 레이저의 위치를 탱크 아래에 위치하여 슬로싱 충격이 발생할 때 레이저가 자유표면을 통과하지 않도록 조절하였다. 레이저가 자유표면을 지나지 않기 때문에 자유표면에서 발생하는 굴절 및 반사에 의한 문제점이 나타나지 않았다. 두번째 문제는 슬로싱 충격 압력이 발생하는 조건을 조절하여 해결하였다. 슬로싱 충격 압력은 전통적으로 크게 두가지로 구별하고 있으며, 이 중 바그놀드 유형의 충격 압력을 선택하여 상대적으로 기포가 적게 발생하는 조건을 선택하였다. 이 조건에서는 입자 영상 유속계 실험을 수행하는 것이 가능하였다.

이렇게 문제점을 해결하여 적용한 입자 영상 유속계 실험을 통해 크게 두가지 결과를 얻을 수 있었다. 첫번째 결과로 기체-액체의 밀도비를 증가시킬 경우 슬로싱 충격 압력의 극값 크기가 줄어

들 뿐만 아니라 유동의 속도도 감소하였다. 특히 실험 조건은 느린 주기의 진동하는 압력 신호를 보이는데, 압력 신호가 진동하는 충격 압력에 대해 기체-액체 밀도비가 유동의 진동하는 속도에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 하지만 입자의 위치에 대한 해석을 통해 1차로 얻은 속도장에 대한 결과로부터 가속도장 결과를 얻을 때, 그 크기와 정확성이 상대적으로 떨어지기 때문에 가속도 결과에 대한 신뢰도가 낮고 그 변화를 비교하기 어렵다.

두번째 결과로는 입자 영상 유속계 실험을 슬로싱 실험에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다. 입자 영상 유속계 실험은 해석하고자 하는 문제의 물리 현상에 대한 이해를 높이고, 나아가 수치해석의 신뢰도를 높이기 위한 유용한 정보를 제공할 수 있다. 하지만 기포 발생과 비용 문제 등 여러 문제점들로 인해 연구가 거의 진행되지 않았다. 본 연구는 입자 영상 유속계 실험을 적용할 때 발생하는 몇가지 문제점들을 해결할 수 있는 방안을 제공하였으며, 앞으로 슬로싱 문제에 대해 입자 영상 유속계 실험을 적용할 수 있는 가능성을 함께 제시하였다.

참고문헌

[1] American Bureau of Shipping, 2006, *Guidance notes on strength assessment of membrane-type LNG carriers*, Guidance Note (updated in 2009), Houston, USA.

[2] Bass, R.L. Bowles, E.B. & Cox, P.A., 1980, *Liquid Dynamic Loads in LNG Cargo Tanks*, The Society of Naval Architects & Marine Engineers Transactions, 88, pp.103-126.

[3] Braeunig, J.–P. Brosset, L. Dias, F. & Ghidaglia, J.–M., 2009, *Phenomenological Study of Liquid Impacts through 2D Compressible Two-fluid Numerical Simulations*, The 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 21-26, June 2009.

[4] Det Norske Veritas, 2006, *Sloshing Analysis of LNG Membrane Tanks*, Classification Notes, Oslo, Norway.

[5] Dias, F. Ghidaglia, J.–M. & Le Coq, G., 2007, *On the Fluid Dynamics Models for Sloshing*, The 17th International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, 1-6, July 2007.

[6] Gavory, T, 2005, *Innovative Tools Open up New Prospects for Liquid Motion Model Tests*, GAZTRANSPORT & TECHNIGAS SAs Report, Gavory pp.11.

[7] Kim, Y., Kim, SY., Yoo, WJ., 2010, *Statistical Evaluation of Local Impact Pressures in Sloshing*, Proc 20th Int Offshore and Polar Eng Conference, ISOPE, Beijing, China.

[8] Maillard, S. & Brosset, L., 2009, *Influence of Density Ratio between Liquid and Gas on Sloshing Model Test Results*, The 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 21-26, June 2009.

[9] Lloyd's Register, 2009, *Sloshing Assessment Guidance Document for Membrane Tank LNG Operations*, London, UK.

[10] Lugni, C, Brocchini, M, and Faltinsen, OM, 2006, *Wave Impact Loads: The Role of the Fip-through*, Phys of Fluids, Vol. 18, 122101.

[11] Yung, T-W. Sandström, R.E. He, H. & Minta, M.K., 2010, *On the Physics of Vapor/Liquid Interaction during Impact on Solids*, Journal of Ship Research, 54(3), pp.174-183.

[12] Yung, T-W. Ding, J. He, H. & Sandström, R.E., 2009, *LNG Sloshing*: *Characteristics and Scaling Laws*, The 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 21-26, June 2009.

Abstract

Study on the Effect of Density Ratio of Gas and Liquid in Sloshing Experiment

Yangjun Ahn
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering
Seoul National University

The purpose of this study is to observe effects of the gas-liquid density ratio on the sloshing experiment. Due to the recent significant demands of LNG fuel, a size of LNG container vessel has been increased, and the volume of its cargo containers has been also increased. This increase leads the natural frequency of sloshing inside of the cargo to that of the vessel; problems caused by sloshing needs to be considered, and classification societies recommend experimental approach by using a model tank rather than computational approach or analytical approach.

Being carried out, sloshing experiments produce their results which need appropriate scaling for considering parent ship design. Identifying the nondimensional parameters has been generally conducted, and a few researches have concluded that Froude number may represent sloshing pressure. However, Froude number has many limitations such as ignoring the local phenomena or chances of thermodynamic effects. Therefore, several nondimensional parameters have been suggested, and one of the

numbers is the gas-liquid density ratio.

The presents study focuses on this density ratio, and observe its influence on the sloshing phenomena. Three tests have been set up. Conditions of the first test are harmonic and regular. Two-dimensional model tank has been mounted, and the density ratio varies for each condition. Its influence on the sloshing impact peak pressure is measured and compared. Next, the purpose of the second test is similar with the first one, but conditions are irregular, and 160K LNG cargo container has been selected as a model tank. For the last test, Particle Image Velocimetry (PIV) experiment has been applied for the sloshing experiment under the regular conditions. Several technical problems exist for this application, and solved in the present study. PIV experiments give the kinematic and dynamic results of flow, and they are compared with the experiments which have the different density ratio.

The first and the second test insist that the increase of the density ratio generally lead decrease of the sloshing peak pressure, and the third test, variation of the density ratio changes the kinematics and dynamics of flow.

Keywords : Model test, Density rratio, Scaling, Sloshing, Mixed gas

Student Number : 2011-21178