



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.

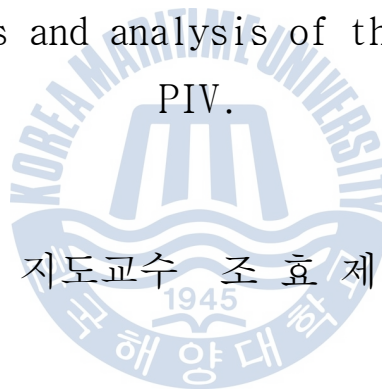
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

파랑중 슬로싱을 동반한 바아의
운동특성과 PIV를 이용한 압력장 해석에
관한 연구

Studies on the motion characteristics of a barge accompanied
by sloshing in waves and analysis of the pressure field by
PIV.



지도교수 조 효 제

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

이 언 주

본 논문을 이언주의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 손 경 호 (인)

위 원 박 주 용 (인)

위 원 이 승 재 (인)

위 원 구 자 삼 (인)

위 원 조 효 제 (인)

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	i
List of Figures	ii
Abstract	vi

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 국내 · 외 연구개발 현황	3
1.3 연구내용 및 방법	5

2. 슬로싱 탱크내 압력측정 방법

2.1 기존 압력측정을 위한 실험 방법	7
2.1.1 운동 플랫폼을 이용한 압력측정 실험	8
2.1.2 대형모형 실험	9
2.1.3 얼리지 압력이 2차원 슬로싱 실험에 미치는 영향	10
2.1.4 에어 포켓에 의한 압축성 영향	11
2.2 기존에 압력측정을 위해 사용되는 압력센서와 결과 분석 방법	12
2.2.1 실험에 이용된 압력센서의 특징	12
2.2.2 압력측정 실험결과의 분석 방법	14
2.3 비접촉식 압력장 해석기법	17
2.3.1 압력장 해석을 위한 수식의 전개	17
2.3.2 압력장 해석을 위한 실험 방법	22
2.3.3 압력장 해석의 실험 결과	26

3. 파랑중 슬로싱을 동반한 바이지 형상 모델의 운동특성	
3.1 실험 방법	39
3.1.1 상사조건	39
3.1.2 실험모형의 형태	45
3.1.3 실험 제원	46
3.1.4 실험 조건	50
3.2 실험모형의 횡동요와 상하동요	57
3.3 실험모형의 탱크내부와 주변유체의 PIV 분석결과	64
4. 결론	76
감사의 글	78
참고문헌	79
부록A 실험모형의 탱크내부 슬로싱 현상이 횡동요에 미치는 영향에 대한 실험영상	85



List of Tables

Table 1 Specifications of the 2-D wave tank (SI unit).	42
Table 2 Specifications of the barge shaped model (SI unit).	42
Table 3 Specifications of the Deepwater Pathfinder (Samsung Heavy Industries, 1998).	44
Table 4 Specifications used in the experiment.	46
Table 5 Experiment case of the barge shaped model in the 2-D wave tank.	56



List of Figures

Fig. 1 Sloshing experiment equipment in the Seoul National University (김용환 등, 2012).	8
Fig. 2 Appearance of the experiments carried out in the SLOSH project and layout of the experiment model (BV & MARIN, 2005).	9
Fig. 3 Experiments that the change of pressure inside the tank made in the Pusan National University (Choi, et al., 2012).	10
Fig. 4 Equipments performed on the air pocket at Pusan National University (Park, et al., 2009).	11
Fig. 5 Design of a standard pressure sensor (Choi, et al., 2009).	12
Fig. 6 Measurement results of the pressure sensor : (a) dynamic pressure sensor, (b) static pressure sensor (Choi, et al., 2009).	13
Fig. 7 The examples of the measurement results of the sloshing impact pressure signal (김용환 등, 2012).	14
Fig. 8 Different impact type for low filling situations : (a) steep wave, (b) breaking wave, (c) aerated wave (BV & MARIN, 2005).	15
Fig. 9 The time histories of the two typical pressure measurements : (a) steep wave, (b) breaking wave (BV & MARIN, 2005).	16
Fig. 10 Grid for the finite difference calculation (可視化情報學會, 2002).	21
Fig. 11 Sketch of the experimental method in the wave tank.	23
Fig. 12 (a) Appearance of the structure in the wave tank experiments and (b) pressure sensors installed appearance.	24
Fig. 13 PIV experiments in a wave tank shape of the structure : (a) X-Y view(zoom-out), (b) Y-Z view(zoom-in).	24

Fig. 14 A pressure sensor power supply and measuring device (Kistler type 5110).	25
Fig. 15 Pressure sensors (Kistler type 211B).	25
Fig. 16 Video of the PIV experiment.	27
Fig. 17 Position of the pressure sensor in an image taken with PIV : (a) the original image was taken by PIV, (b) close-up image of a window A.	29
Fig. 18 Experimental results of pressure sensor (wave period : 1.0sec, wave height : 0.07m) : (a) the original data of the measured pressure value, (b) the actual pressure value changes to filter the original data(a).	31
Fig. 19 Pressure sensor response characteristics test in the tank.	32
Fig. 20 Experimental results of pressure sensor (wave period : 1.0sec, wave height : 0.07m) : (a) the original data of the measured pressure value, (b) the actual pressure value changes to filter the original data(a).	34
Fig. 21 Idealized time history and actual time history of impact pressure (Noh, et al., 2010).	35
Fig. 22 Results of the measured pressure value with the pressure sensor (Kistler 211B).	36
Fig. 23 Distribution of the pressure values measured by using a PIV techniques.	38
Fig. 24 L,B,D representation of the relationship between the tank and the barge shaped model.	41

Fig. 25 Trends in the design dimensions of the FPSO (ABS, 2002) :	
(a) relationship of length and width, (b) relationship of length and depth.	
.....	43
Fig. 26 Appearance of the barge shaped model designed by CAD.	45
Fig. 27 The actual shape of the created model.	45
Fig. 28 Servo type wave height meter : (a) detector, (b) main body.	47
Fig. 29 Schematic of 2-D wave tank.	47
Fig. 30 Motion instrumentations of the structure in the wave tank :	
(a) 4-D motion measuring equipment, (b) coordinate system of the	
equipment.	48
Fig. 31 Setting state of the diode laser and laser sheet lens.	49
Fig. 32 Equipment used in the high speed shooting : (a) high speed	
camera (CCD camera), (b) Nikon AF60mm lenses.	49
Fig. 33 Samples of the incident wave measured using by wave detector	
in the 2-D wave tank.	50
Fig. 34 Sloshing phenomenon of the membrane-type tank (LR, 2009) :	
(a) definition of the fluid filling ratio of the inside tank, (b) sloshing	
pressure due to the fluid filling ratio.	52
Fig. 35 Photo by correcting the weight in experimental models.	53
Fig. 36 Rolling according to the fluid loading ratio in the sloshing tank.	
.....	55
Fig. 37 Roll characteristics of the barge shaped model in accordance with	
the fluid filing ratio inside the sloshing tank.	60

Fig. 38 Heave characteristics of the barge shaped model in accordance with the fluid filling ratio inside the sloshing tank.	62
Fig. 39 Transverse natural frequency of sloshing tank (Lee, 2008).	63
Fig. 40 PIV analysis position.	64
Fig. 41 PIV result in ①(wave crest) : (a) velocity, (b) pressure	67
Fig. 42 PIV result in ② : (a) velocity, (b) pressure	68
Fig. 43 PIV result in ③(wave descent) : (a) velocity, (b) pressure	69
Fig. 44 PIV result in ④ : (a) velocity, (b) pressure	70
Fig. 45 PIV result in ⑤(wave trough) : (a) velocity, (b) pressure	71
Fig. 46 PIV result in ⑥ : (a) velocity, (b) pressure	72
Fig. 47 PIV result in ⑦(wave ascent) : (a) velocity, (b) pressure	73
Fig. 48 PIV result in ⑧ : (a) velocity, (b) pressure	74
Fig. 49 PIV result in ⑨(wave crest) : (a) velocity, (b) pressure	75

Studies on the motion characteristics of a barge accompanied by sloshing in waves and analysis of the pressure field by PIV

Lee, Eon Ju

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime And Ocean University

Abstract

In many cases, the size of the vessel has been increased to improve the loading efficiency of the vessel in relation to the LNG handling and storage. Therefore, ensuring the stability of the cargo hold to store the LNG has been considered as an important matter. Especially, the sloshing, which is the fluid impact load on the hull structure, has become an emerging problem. However, the current GTT and many classes has been using different evaluation methods based on their own concepts and evaluation process as well as the technical examination methods. Thus, it is necessary to conduct an experimental study regarding the sloshing phenomenon and it is also important that the accumulation of the results.

KEY WORDS: PIV; Pressure field; Noncontact analysis technique; Sloshing;

Prediction of the pressure on the sloshing phenomenon is complicated phenomenon. Therefore, it is important to examine the exact movement of the fluid in the hydrodynamic viewpoint and to identify the physical phenomenon associated with the change of various conditions. Hence, the only way to derive a reliable result for now is to conduct an experimental study.

Many previous studies measured an impact pressure in the sloshing tank using a pressure sensor. This is a method for measuring only the pressure value at a certain point(point peak pressure) in the interior of the tank.

The primary purpose of the study is to provide a way to measure the pressure field in the total flow field in the noncontact method using the PIV technique. A beam structure was prepared for the development of noncontact pressure field analysis techniques for this purpose and a pressure sensor was attached on the side of the beam structure. When the incident waves hit the beam structure, the pressure value was measured using a pressure sensor in real time. At the same time the surrounding fluid in the beam structure was measured using a PIV technique. Through comparison of two different measurement methods were used to verify the validity of the noncontact pressure field analysis techniques using the PIV technique.

Based on the experiment results using the PIV technique, this study analyzed the pressure field including both the inside fluid flow of the sloshing tank and the surrounding fluid flow of the barge shaped model. This analysis is for the pressure of the total flow field.

The secondary purpose of this study was to figure out the movement characteristics of the FPSO accompanied by the sloshing in the waves using a 2-D wave tank. Also the researcher examined how the sloshing in the tank affects on the motion of the experimental model.

This experiment was performed with a simplified barge shaped model for FPSO. Tank sloshing phenomenon is mainly influenced by the greatest of the structure according to rolling in the beam sea. Therefore, the conditions of the incident waves were set in this papers as a beam sea. Model experiments were performed based on a change in the fluid height in the tank loading (0%, 10%, 30%, 50%, 80%) and a change of the incident wave period(0.7sec~1.8sec). Factors of the change mentioned above were examined how the factors affect the movement and sloshing phenomenon of the structure.

In this study, the results were compared the contact-type pressure value measured by the pressure sensor and the noncontact-type pressure value measured by the PIV technique.

In addition, this study measured the movement of the experimental model(roll, heave) and the PIV experiment was performed to measure the inside flow of the sloshing tank and the surrounding flow of the experimental model at the same time.

A diode laser, a high speed camera, a wave height meter, a 4-motion instrumentation, and a wave maker were synchronized and used for the study.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

2005년 통계에 의하면 전 세계 에너지소비량의 28.5%를 천연가스가 차지하고 있으며, 다른 에너지원들에 비교될 만큼 천연가스의 사용이 증가하고 있다. 따라서 액화천연가스의 효과적인 수송을 가능하게 할 기술들에 대한 필요성과 중요성이 날로 커지고 있다. 특히 적재 효율성을 높이기 위해 액화천연가스 운반선의 크기가 증가하고 있으며, 선박의 크기 증가는 홀수 제한, 추진 효율 및 조종성능 향상 등과 같은 기술적 진보를 필요로 하고 있다. 뿐만 아니라 선박이 해상에서 운항 중일 때 화물창 내벽, 단열재 시스템 및 선체구조에 작용하는 유체 충격 하중인 슬로싱 현상도 중요 항목으로 고려되어지고 있다.

따라서 선박의 운항에서 발생하는 슬로싱 현상에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 물리적 관점에서 구체적이고 명확한 슬로싱 현상에 대한 해석을 하기 위하여, 스케일 영향, 유탄성 영향, 점성영향, 액화가스 밀도 비, 화물창 내 공기의 압력 및 압축성 등과 같은 연구를 통하여, 슬로싱 현상에 대한 한층 더 명확한 이해를 할 수 있는 연구가 지속적으로 수행되어 왔으며 지금도 진행되고 있다.

LNG 운반 및 저장에 관련한 선박 등에 있어서 극저온의 LNG를 저장하는 화물창의 안전성 확보는 중요한 설계요소의 하나이다. 그러나 멤브레인 타입의 화물창에 관한 안전성 평가에 있어서는 프랑스의 GTT사의 독점 기술에 의존하는 경향이 지속되고 있고, 선급에서의 해당 LNG 운반선의 승인을 위한 과정에서도 슬로싱 현상 및 화물창 안전성 평가 절차가 통일성 있게 정립되어 있지 못하다. 현재 GTT와 여러 선급들이 각자 개념에 의거한 평가 절차를 정립해 적용하고 있으며, 이러한 과정에서 여러 기술적인 항목에 대한 검토도 개별적

으로 이루어지고 있다.

슬로싱 현상에 의한 충격 압력의 예측은 현상의 복잡성으로 인해 현재 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있는 유일한 방법은 실험에 의존하는 것이다. 초기 단계에서 활용할 수 있는 비교적 효율적인 수치해석 프로그램과 좀 더 엄밀한 해석을 위한 전용 프로그램 및 범용 CFD 프로그램들도 쉽게 확보할 수 있으나, 아직은 화물창의 설계와 안전성 평가를 위한 도구로써 실제 프로젝트 단계에서 활용되기에는 무리가 있다. 엄밀한 수준의 해석을 위한 시간적 비용이 모형실험에 비해 저렴한 수준이라고 볼 수도 없다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서는 여러 조건에 따른 슬로싱 현상을 물리적으로 규명해야 하며, 유체역학적으로 유체거동을 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 유체 거동을 파악하기 위해서는 시간에 따른 유동장의 속도 및 압력 분포를 정량적으로 계측 할 수 있어야 한다.

지금까지는 유체유동을 비점성 운동으로 보고 구조물에 미치는 힘을 산정하여 계산하는 방식으로 구조물의 운동을 실험적 및 해석적으로 예측해 왔으나 엄밀하게 해석하기 위해서는 유체의 비점성 운동에 따른 구조물 주위에 발생하는 와(vorticity)의 영향을 고려하여야 한다. 컴퓨터의 성능이 향상됨에 따라 수치적 해석방법에 의한 유체-구조물 연성문제를 다루는 연구가 점차 늘어나고 있는 추세이나 이들 결과들을 뒷받침 해주는 실험계측방법은 유체의 운동과 구조물의 운동을 각각 독립적으로 측정하는 것이어서 이들 측정결과들로부터 유체-고체의 연성운동을 도출해 내기란 용이하지 않다.

유체동하중분포는 펌프타워의 설계에 있어서 반드시 고려되어야 하지만 유체동하중분포를 측정할 수 있는 측정법은 아직 없다. 압력공에 의한 하중분포 측정은 점계측(point peak pressure)에 의한 것이기 때문에 전체에 걸친 하중분포 추정에는 한계를 지닐 뿐만 아니라, 실시간의 하중분포추정은 측정원리상 어려운 관계로 비정상유동(unsteady flows)에 의한 유체력의 비정상 하중분포 추정은 불가능하다. 또한, 슬로싱의 비정상 비선형성에 의하여 발생하는 불규칙 ejection 현상 등은 아직 그 발생 메커니즘이 규명되지 않은 관계로 이에 대한 연구가 필요하다.

모형실험을 통해 얻은 슬로싱 충격 압력을 실선으로 확장하는 기법은 향후 매우 중요한 기술로 요구될 것으로 예상되며, 또한 고속카메라를 활용한 슬로싱 현상의 촬영과 압력의 동시 계측을 통한 슬로싱 충격 압력 메커니즘 이해와 실험 기법에 대한 연구를 강화할 필요가 있다.

1.2 국내 · 외 연구개발 현황

슬로싱 유동은 외부 기진력에 의하여 움직이는 탱크 내부에 부분적으로 적재된 유체가 일으키는 유동 현상이다. 1950년대와 1960년대 우주 로켓과 관련하여 연료탱크 내부의 슬로싱 유동에 의한 궤도 변화를 예측하기 위한 연구들이 진행되었고, 1970년대와 1980년대에는 LNG운반선의 건조가 증가하면서 선박 내의 슬로싱 현상에 대한 연구가 활발하게 진행되었다.

최근 LNG에 대한 수요 증가로 LNG 운반선이 대형화 되고 있고 LNG RV(regasification vessel), LNG-FPSO, FSRU와 같은 새로운 개념의 선박 및 해양구조물들의 개발이 이루어지고 있어 슬로싱에 대한 해석이 그 어느 때 보다 중요한 시점이다. LNG운반선이나 VLCC와 같이 큰 액체 화물창을 갖는 선박의 경우 선박의 동요에 의하여 화물창 내부에서 격렬한 슬로싱 현상이 발생하게 된다. 이로 인하여 화물창 내부에 국부적인 충격압이 발생하여 구조부재에 손상을 줄 수 있다.

여러 가지 수치기법과 실험을 통하여 슬로싱 현상을 예측하기 위한 연구가 수행되어왔다. 해석적인 접근방법은 직사각형 또는 구형의 단순한 유동에 대하여만 적용이 되고 있다. 실험적 연구의 경우 선박의 6자유도 운동을 모두 고려한 모형을 통하여 충격하중을 측정할 수 있다. 그러나 모형실험을 통한 충격압력을 실선크기로 확장하는 데는 많은 어려움이 있다.

선박이 손상되었을 때 안전과 이와 관련된 규정 수정에 대한 연구와 활동이 최근 활발하게 이루어지고 있으며, 고부가 선박의 설계에 필수적인 설계요소이다. ITTC는 선박의 안정성에 관한 특별 위원회를 조직하여 현재까지 국제 공동 벤치마크 연구를 수행하고 있다. 지금까지의 손상 선박의 운동 수치해석 결과는 모형시험 결과를 정성적으로만 예측하고 있다. 현재까지의 연구는 내부 유동을 집중질량으로 가

정하여 준정적 상태에서 수리모형을 사용하고 있다. 준정적방법을 사용하면 다양한 조건에 대하여 모델링의 유연성과 해석의 용이함을 얻을 수 있으나, 내부 유동이 선박의 운동과 연성되면 부정확한 결과를 나타낸다. 오차의 주요한 원인은 준정적 방법이 자유 수면을 항상 수평하게 가정하여 내부 유동의 동역학 특성을 고려하지 못하기 때문이다. 내부 유동과 선박 운동의 연성효과를 고려할 수 있는 방법은 CFD를 사용하여 내부 자유 수면을 직접 해석하는 것이 있으나, 준정적 모델링보다 해석 시간이 길다는 단점이 있다. 최근 컴퓨터 하드웨어와 자유수면 해석법의 발전으로 해석시간이 단축되어, CFD를 사용한 내부 유동 해석과 선박 운동의 연성 문제 연구는 최근에 많이 이루어지고 있다.

지금까지의 탱크내 슬로싱 현상에 대한 수치해석 결과는 2차원 탱크내 슬로싱 현상에 대한 압력에 대한 연구(Yang & Kim, 2010; Park, et al., 2005; Hidemi Mutsuda, et al., 2008), 탱크 형태에 따른 슬로싱 현상에 대한 연구(Noh, 2005; Ha, et al., 2002; Cho, et al., 2006; Choi, 2008), 탱크내 부재를 이용한 슬로싱 저감방법에 대한 연구(Lee, et al., 2003b; Park & Yoon, 2003; Kim, et al., 2004a; Kim, et al., 2004b; Kim, et al., 2003), 파랑 중 FPSO의 운동에 대한 연구(Kwak, et al., 2004; Choi, et al., 2005; Lim, et al., 2006), 유체 적재율에 따른 탱크 슬로싱 현상에 대한 연구(Murray Rudman & Paul W.Cleary, 2009) 등이 주를 이루고 있다. 최근에는 CFD를 사용한 내부 유동 해석과 선박 운동의 연성 문제에 관하여 연구가 많이 이루어지고 있다(Li Yu-Long, et al., 2012).

기존의 슬로싱에 대한 모형실험들은 주로 사각형 액체 탱크내 부재 유무에 따른 슬로싱의 특성(Lee & Cho, 2005; Shin, et al., 2005), 병진 또는 횡동요 하는 사각형 탱크 내부의 슬로싱 특성(Lee, et al., 2003a; Kim, et al., 2013), 유체 저장탱크의 슬로싱 특성(Yoon, et al., 2002; Hong, et al., 2001), 2차원 사각탱크의 슬로싱 충격압력(Hwang, et al., 2008; Jung, et al., 2006; Fabrizio Pistani & Krish Thiagarajan, 2012; Mirosław Lench Kaminski & Hannes Bogaert, 2010; Tim Bunnik & René Huijsmans, 2009) 등에 관한 연구가 수행되었다. 최근에는 압축성이 슬로싱 현상에 미치는 영향(Park, et al., 2009), 슬로싱 고유주기 산정(Shin, et al., 1994; Yeun, et al., 2004), 기체-액체 밀도차에 대한 슬로싱

충격압력(Ahn, et al., 2013), 얼리지 압력이 슬로싱 실험에 미치는 영향(Choi, et al., 2012; S. Maillars & L. Brosset, 2009; T.-W.Young, et al., 2009), 에어 포켓(air pocket)에 관한 연구(NTNU, 2005), 슬로싱 하중 추정을 위한 모형탱크 실험과 압력신호의 통계해석(김용환 등, 2012) 등의 다양한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 또한 국외에서는 선급을 중심으로 다양한 실험과 연구가 진행되고 있다(Nicolas Moiroud, et al., 2009; Zoran Mravak, et al., 2009; ABS, 2002; Erwin Loots, et al., 2004).

기존에는 주로 강제동요를 발생 시킨 후 단일 탱크의 슬로싱의 압력측정을 위하여 압력센서를 이용한 점측식 점계측 방법이 이용되었으며, 파랑 중 유체력과 구조물운동을 함께 연동하여 실험한 예가 없다. 또한 PIV기법을 이용하여 슬로싱 탱크내 전체유동의 압력장을 비점측식으로 해석한 예 또한 없다.

1.3 연구내용 및 방법

본 논문에서는 압력센서를 이용해 측정된 점측식 압력값과 PIV기법을 이용해 계측된 비점측식 압력 값의 비교·검증을 수행하였다. 또한 입사파에 따른 실험모형의 운동측정, 실험모형의 슬로싱 탱크내부 유동변화와 실험모형 주변유체의 유동변화를 PIV기법을 이용하여 동시에 계측하였다. 이를 위해 레이저, 고속카메라, 파고계, 4자유 운동 계측장치, 조파기 등 실험에 사용된 모든 장비는 동기화시켜 작동되게 하였다.

우선 비점측식 압력장 해석기법 개발을 위하여, 별도로 빔구조물을 제작하였다. 제작된 빔구조물 측면에 압력센서를 부착한 후 입사파 발생 시 빔구조물에게해지는 압력 값을 실시간으로 계측하였으며, 이와 동시에 빔구조물 주변유체를 PIV기법으로 계측하였다. 이렇게 압력센서를 이용해 계측된 점측방식의 압력 값과 PIV기법을 이용해 계측된 비점측방식의 압력 값을 비교하여 PIV기법을 이용한 전체 유동장의 압력장 해석기법의 타당성을 검증하였다. 이러한 결과를 토대로 PIV기법을 이용한 비점측식 압력장 해석기법을 이용하여 바지형상 모델의 슬로싱탱크 내부유체와 모델의 주변유체를 전체 유동장에 대하여 압력장 해석을 수행하였다.

다음으로 2차원 조파수조를 이용하여 파랑중 슬로싱을 동반한 FPSO의 운동 특성을 파악하기 위하여, FPSO를 간략화한 바지형상 모델로 실험을 수행하였다. 탱크내 슬로싱 현상은 주로 횡파(*beam sea*) 상태에서 구조물의 횡동요에 따른 영향을 가장 크게 받는다. 따라서 본 논문에서는 입사파의 조건을 횡파상태로 설정하였다. 실험은 슬로싱 탱크내 유체적재높이의 변화(0%, 10%, 30%, 50%, 80%)와 입사파 주기의 변화(0.7sec~1.8sec)에 따른 실험모형의 탱크내 슬로싱 운동주기와 운동의 변화를 분석하였다.

각 장의 내용을 요약하면 아래와 같다.

제 1장에서는 연구배경 및 필요성, 국내외 관련분야에 대한 기술개발현황과 본 논문에서의 연구내용 및 방법을 기술하였다.

제 2장에서는 기존의 슬로싱 탱크내 압력측정을 위한 방법과 본 논문에서 새로이 시도한 기법에 대해 기술하였다.

제 3장에서는 실험모형의 슬로싱 탱크내 유체적재율 변화와 입사파 주기의 변화에 따른 실험모형의 운동결과와 PIV 분석결과를 기술하였다.

제 4장에서는 본 연구에서 얻은 주요한 결과를 총괄하여 결론을 맺는다.

제 2 장 슬로싱 탱크내 압력측정 방법

2.1 기존 압력측정을 위한 실험 방법

실험적 기법으로 슬로싱에 대한 압력을 측정하는 방법은 크게 아래와 같이 3가지로 나눌 수 있다.

① 좌·우로 강제동요를 발생시키는 장치를 이용한 탱크내 슬로싱에 대한 압력을 계측하는 방법

② Six-motion platform에서 강제동요를 발생시켜 단일 탱크내 슬로싱에 대한 압력을 계측하는 방법

③ 대형 수로에서 진행파를 생성하여 실제 크기의 CCS 방열구조에 부딪혀 압력을 계측하는 방법

이중 최근에는 주로 국·내외 적으로 six-motion platform을 이용한 실험과 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 2차원 단일탱크와 3차원 단일탱크의 모형실험에서 탱크내 슬로싱에 대한 압력측정은 모형 탱크내 압력센서를 부착하여 국부적인 압력측정을 주로 하고 있으며, 모형 탱크내 슬로싱 현상을 전체 유동장에 걸쳐서 압력장 해석한 예는 없다.

기존에 좌·우 강제동요 발생장치에서 단일탱크의 내부 슬로싱 현상에 대하여 전체 유동의 속도장을 가시화한 적은 있으나, 파랑 중 유체력과 구조물운동이 함께 연동되어 일어나는 탱크내 슬로싱 현상의 가시화와 주변유동장의 가시화를 동시에 연구한 적은 없다.

최근 슬로싱 현상에 대하여 연구가 진행되고 있는 실험적 방법들에 대하여 소개하고자 한다.

2.1.1 운동 플랫폼을 이용한 압력측정 실험

모형실험은 제작된 모형탱크 내에서 압력센서를 부착하고 운동 플랫폼(motion platform)을 이용하여 탱크를 가진함으로써 탱크 내벽에 발생하는 유체 충격압력을 계측하고 수집된 데이터에 대하여 통계해석을 하는 과정으로 수행된다. 선박의 운동을 자유자재로 모사하기 위하여 운동플랫폼은 대개 6자유도 운동이 가능한 타입이 요구되며, 현재 많은 실험기관에서 이러한 형태의 운동 플랫폼이 사용되고 있다. Fig. 1은 서울대 슬로싱 연구센터에서 보유한 장치를 나타낸 것이다.(김용환 등, 2012)

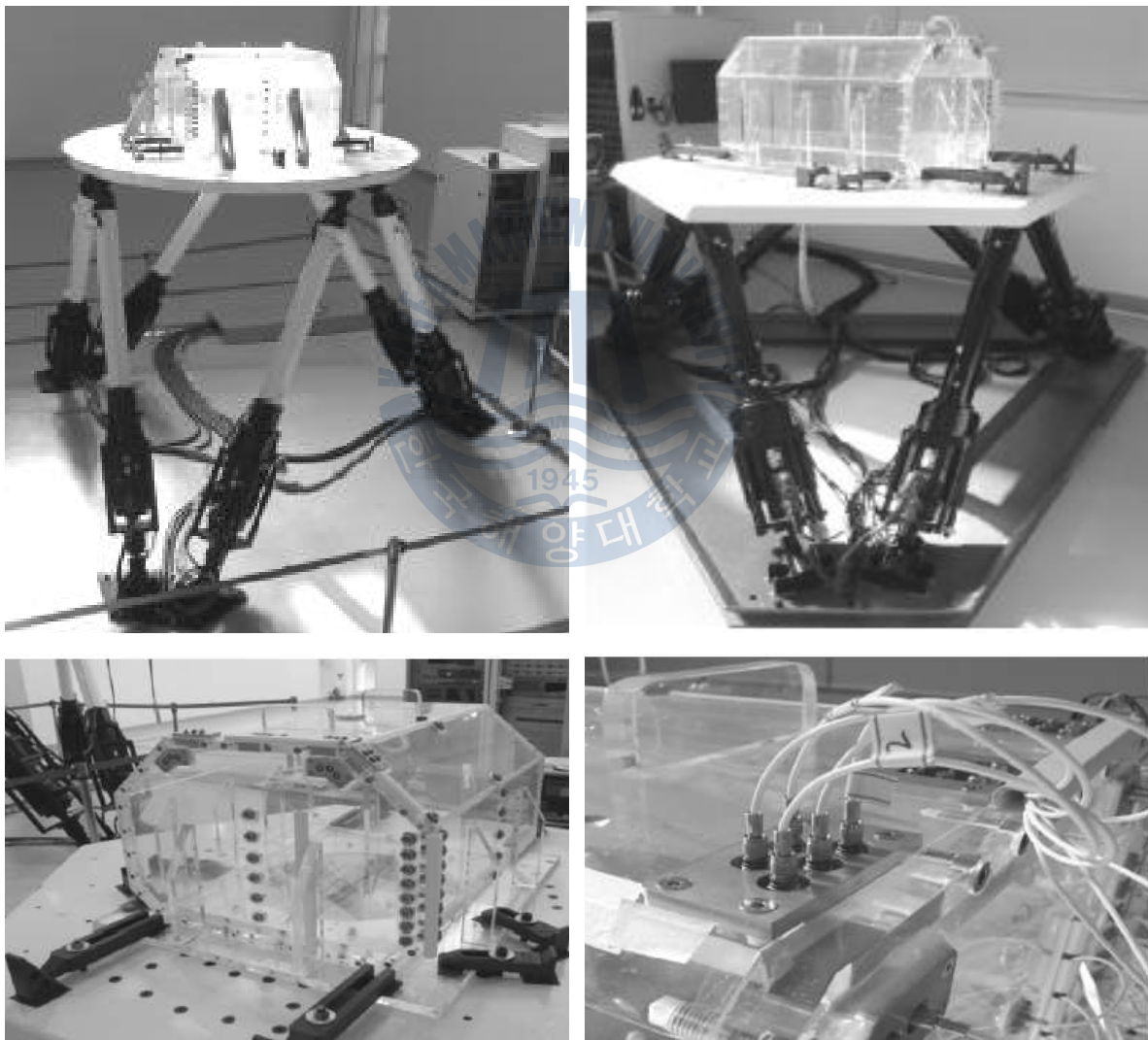


Fig. 1 Sloshing test equipment in the Seoul National University (김용환 등, 2012).

2.1.2 대형모형 실험

2005년부터 시작된 SLOSHEL 프로젝트(BV & MARIN, 2005)는 GTT, MARIN, Shell 등의 기업들과 ABS, DNV, NK, BV, Lloyd 등 선급이 공동으로 참여한 공동산업프로젝트(joint industry project)이다(Fig. 2). 이 공동연구에서는 축척 모형시험의 한계를 극복하기 위하여 실제 크기의 CCS 방열구조에 대한 실험을 통하여 여러 가지 다양한 측면에서 슬로싱 현상에 대한 물리적 이해의 폭을 넓히고자 하였다. SLOSHEL 프로젝트의 가장 큰 특징은 full scale CCS의 방열 패널을 직접 이용한다는 점이다. 길이 240m, 깊이 7m, 폭5m의 대형 수로에서 다양한 형태의 단방향 진행파를 생성하여 NO96 방식 방열 박스에 부딪히는 실험을 진행하고 그 결과를 계측하였다. 이를 통하여 유체 충격하중의 특성과 CCS 및 지지구조의 구조 응답을 분석하고, CFD 및 FEM 해석의 결과 검증 을 위하여 데이터베이스를 구축하였으며, 슬로싱 해석방법에 대한 합리적인 평가를 시도하고 있다.(노인식 과 김성찬, 2012)

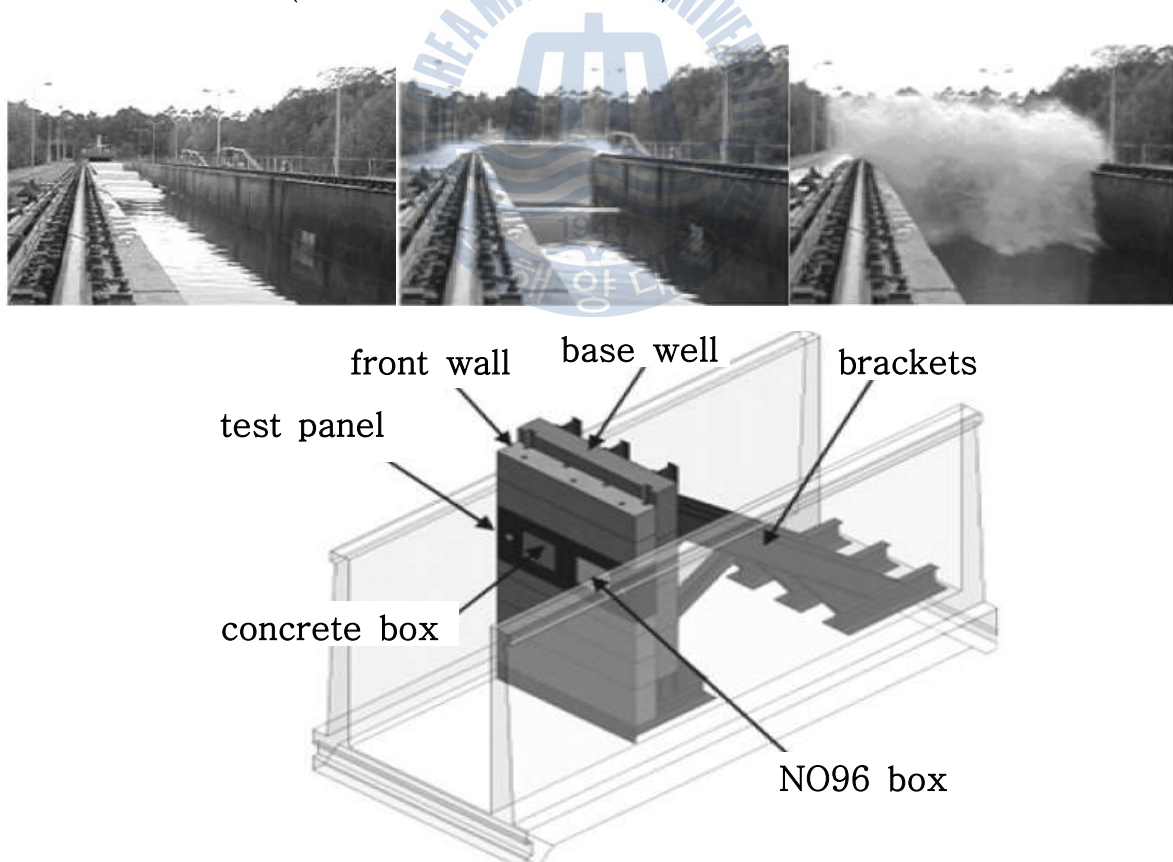


Fig. 2 Appearance of the experiments carried out in the SLOSHEL project and layout of experiment model (BV & MARIN, 2005).

2.1.3 얼리지 압력이 2차원 슬로싱 실험에 미치는 영향

화물창 내부 얼리지(ullage)의 압력변화에 따른 슬로싱 충격압력 차이를 분석하기 위하여, 실험모델 화물창 내부압력을 실선의 화물창 내부 압력과 일치시켜 실험을 수행하였다(Fig. 3). 그러나 스케일 법칙에 의하여 크기가 다른 두 화물창 내부의 압력은 차이가 나야하므로, 진공펌프를 이용하여 주어진 압력까지 감압하여 실험을 수행하였다. 감압조건은 대기압 상태와 같은 1 bar에서부터 1/100 축소 모델에 적용 가능한 0.025bar까지 실험을 수행하였다. 압력계를 모델 화물창 내부에 설치하고 초고속카메라를 이용하여 탱크내부를 촬영하였다. 얼리지 압력이 낮아짐에 따라 모델 화물창 내부유동의 변화 및 압력값에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.(Choi, et al., 2012)

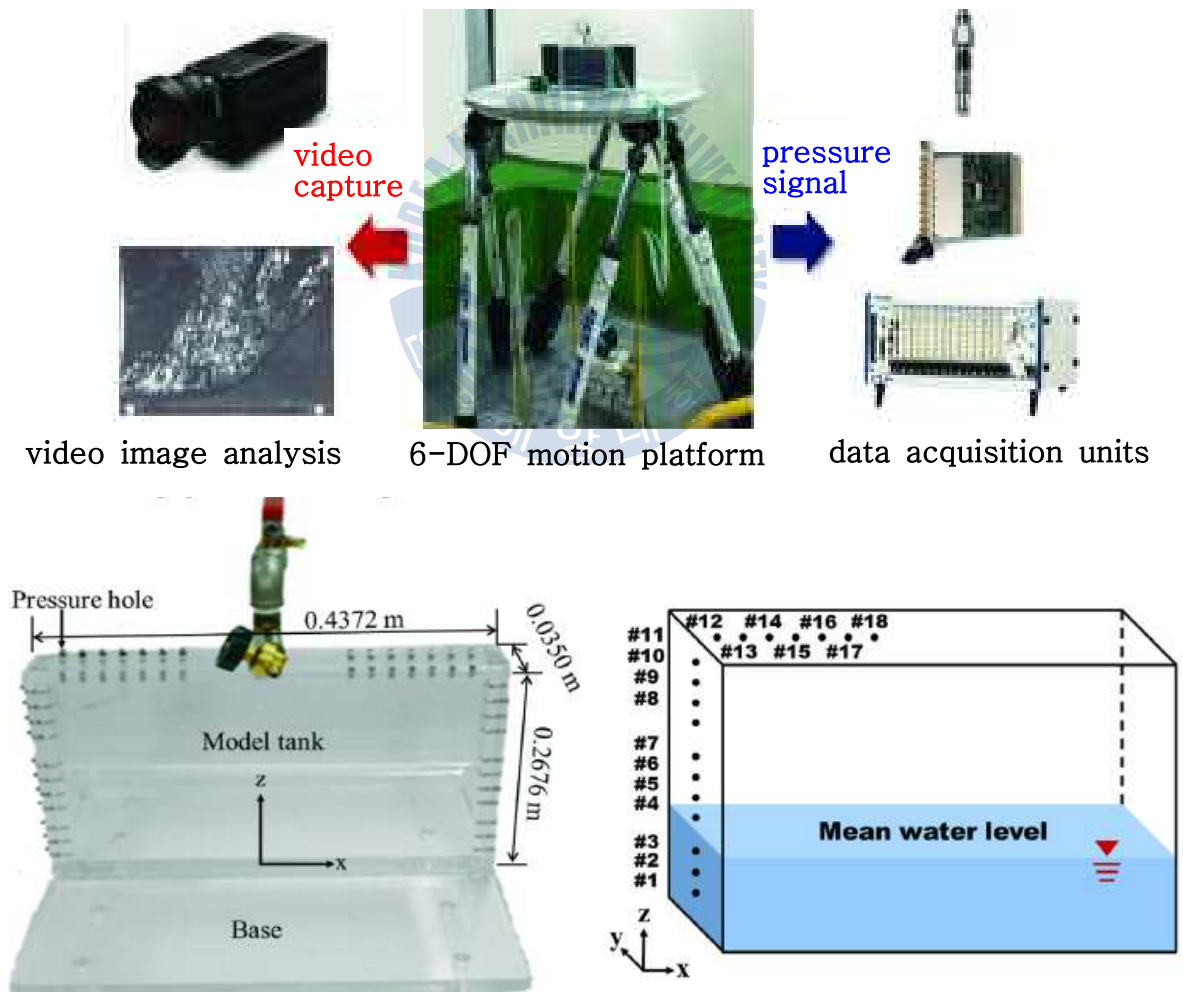


Fig. 3 Experiments that the change of pressure inside the tank made in the Pusan National University (Choi, et al., 2012).

2.1.4 에어 포켓에 의한 압축성 영향

액화천연가스 운반선 NO.2 화물창을 길이 방향으로 단순화하여 1/25 축척의 2차원 화물창 모델로 제작하여 실험을 수행하였다. 실험은 다양한 낮은 적재율에서 운동 조건을 변화하여 수행하였다(Fig. 4). 초고속 카메라를 이용하여 화물창 내부의 유체동역학적 현상을 파악하였으며, 각 실험 조건에서 대표적인 압력 시계열을 획득하여 분석하였다. 고속카메라, 압력계 및 슬로싱 운동플랫폼(sloshing motion platform)을 동기화하여 에어 포켓(air pocket)에 의한 압축성 영향을 영상과 압력 값을 동시에 획득하여 분석하였다. 에어 포켓의 직경과 그 위에 형성되는 물 층의 두께비가 에어 포켓의 거동과 압력 값에 어떠한 영향을 미치는지를 고찰하였다(Park, et al., 2009).

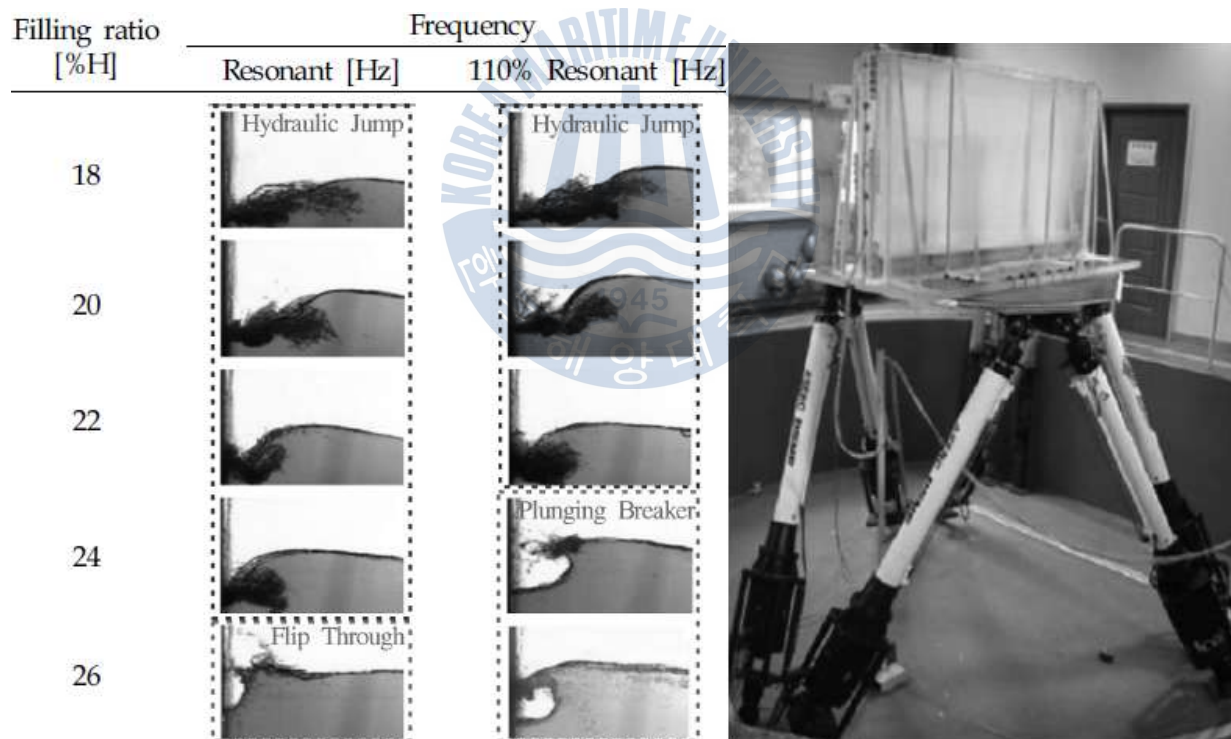


Fig. 4 Equipments performed on the air pocket at Pusan National University (Park, et al., 2009).

2.2 기존에 압력측정을 위해서 사용되는 압력센서와 결과 분석방법

2.2.1 실험에 이용된 압력센서의 특징

유체의 압력 측정을 위하여 사용되어지는 압력 센서는 크게 2가지의 종류가 있다. 압전방식(piezoelectric type)과 ICP(integrated circuit piezoelectric)방식의 압력센서이다. 주로 슬로싱 탱크내 압력측정과 방열판에 가해지는 유체충격 압력측정(SLOSHEL 프로젝트)에는 Kistler 사의 211B5센서가 사용된다. Kistler 사의 211B5 센서는 별도의 증폭 앰프가 필요하지 않으며, 센서에 앰프가 내장된 방식(ICP type)이다. Fig. 5는 압력센서의 기본적인 구조를 나타내고 있다. 다이어그램(diagram)에 작용하는 압력은 전하중관(preload sleeve)과 스페이서(spacer)에 비례하는 힘으로 전달된다(Choi, et al., 2009).

동압력센서를 슬로싱을 비롯한 충격압력 측정에 주로 사용하는 이유는 센서의 민감도와 내구성이 가장 큰 이유이다. Kistler 사는 압전방식의 5011B 모델과 ICP방식의 211B5 모델이 있다. 압전방식의 압력센서는 전하앰프(charge amplifier)가 반드시 필요하며, 센서의 민감도가 떨어진다. 따라서 순간적인 변동압력을 계측하기 위해서는 주로 ICP방식의 211B5 센서가 이용되고 있다.

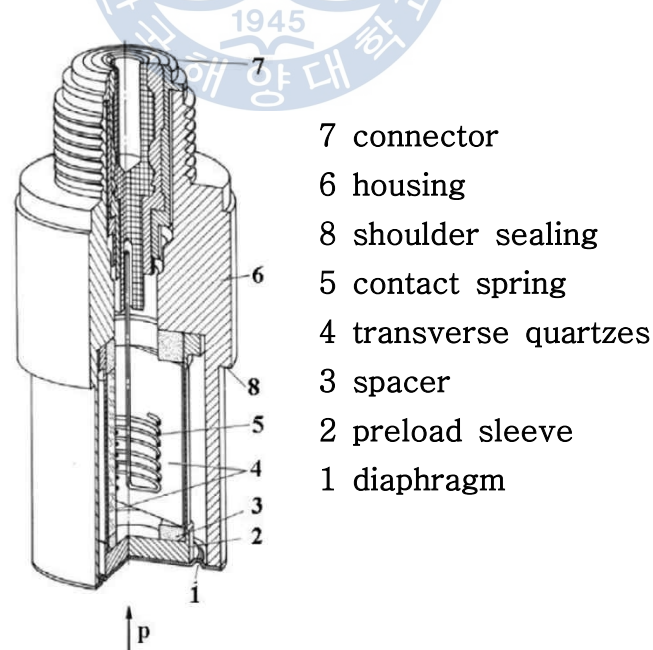


Fig. 5 Design of a standard pressure sensor (Choi, et al., 2009).

Kistler 사의 211B5 센서는 동압력(dynamic pressure)만을 계측하는 센서이다. 따라서 압력의 변화량만 계측할 수 있으며, 힘이 제거되는 순간 부압(negative pressure)이 작용한다. Fig. 6은 동압력센서와 정압력센서를 이용하여 계측된 압력 값을 비교한 그림이다(Choi, et al., 2009).

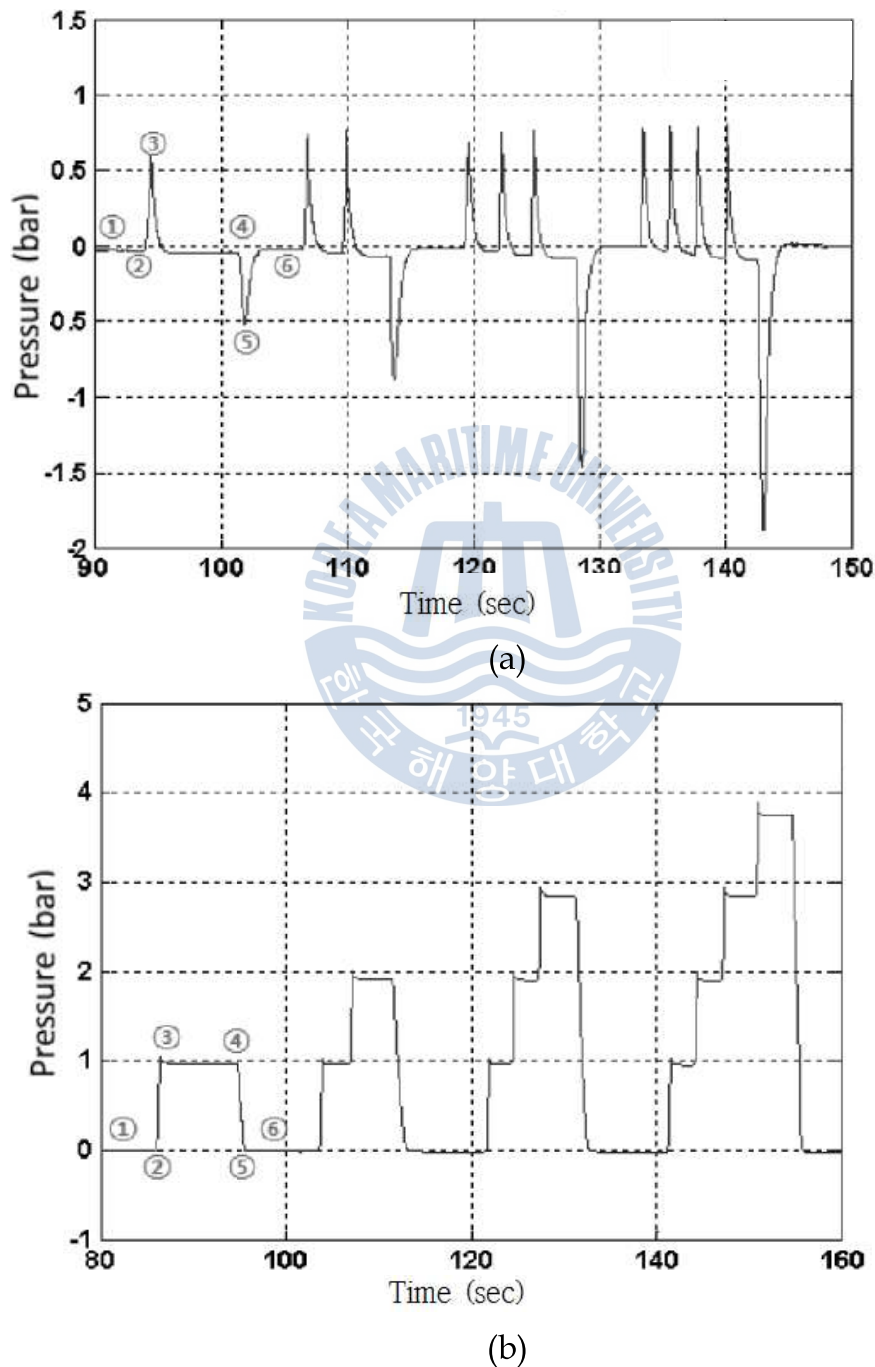


Fig. 6 Measurement results of the pressure sensor : (a) dynamic pressure sensor, (b) static pressure sensor (Choi, et al., 2009).

2.2.2 압력측정 실험 결과의 분석 방법

주로 six-motion platform에서 강제동요에 의해 생성되는 탱크내 슬로싱 현상의 충격압력은 Fig. 7과 같은 실험데이터를 생성한다. 일반적으로 슬로싱 현상의 충격압력신호는 크기가 상당히 불규칙하고, 큰 충격이 일어나는 간격 또한 일관성을 찾기가 힘들다(김용환 등, 2012). 이는 주로 Kistler 사의 ICP타입의 211B5 변동압력센서를 이용하여 충격압력을 계측하기 때문이다. Fig. 6에 나타내었듯이 변동압력센서는 압력이 순간적으로 변동하였을 때 그 값을 계측하며, 압력값이 변하지 않고 유지되는 경우에는 다시 원점으로 돌아가고 압력값이 완전히 제거되는 경우에는 부압이 생성된다. 따라서 동압력센서를 이용하여 계측된 슬로싱 탱크내 충격압력의 실험결과를 분석하기 위해서 최대충격압력신호 중 가장 큰 압력값을 충격압력으로 정의하고 분석한다. 이러한 최대충격압력신호를 분석하기 위해서 국제 선급 및 슬로싱 실험 기관에서는 여러 가지 방법으로 기준을 적용하여 최대충격압력을 분석하고 있다.

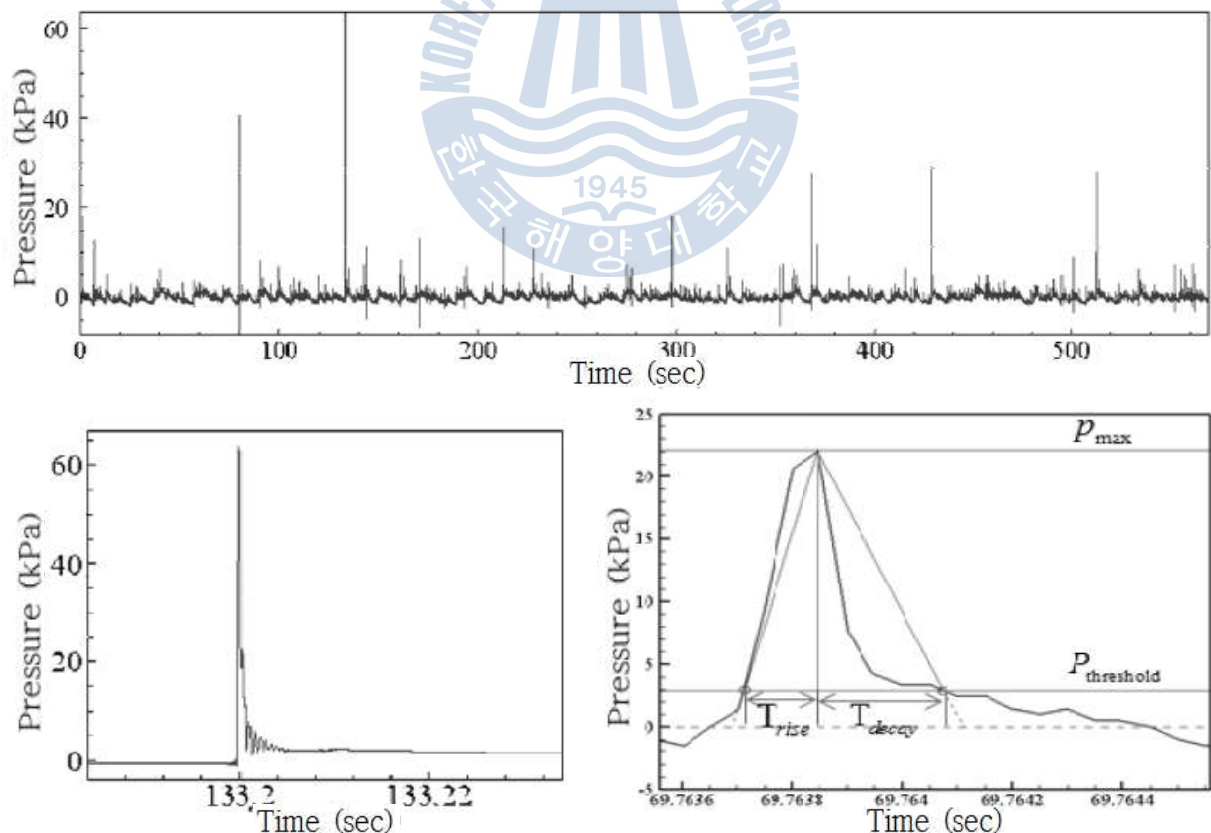


Fig. 7 The examples of the measurement results of the sloshing impact pressure signal (김용환 등, 2012).

또한 Fig. 2의 SLOSHEL 프로젝트는 CCS 방열패널에 수로에서 생성된 파를 직접적으로 충돌시켜 유체충격압력을 계측하였다. 이러한 방법은 본 논문에서 비접촉식 압력장 해석방법의 검증을 위하여 실시한 조파수조에 수직구조물을 설치한 후 조파수조에서 생성된 입사파를 구조물에 충돌시켜 압력센서를 통하여 유체충격압력을 계측한 실험과 유사성이 있다. 다만 SLOSHEL 프로젝트의 경우에는 단발성 입사파를 수직방열판에 충돌시킨 값이고, 본 논문에서는 조파수조에서 생성된 입사파가 수직구조물에 반복적으로 충격압력을 가했다는 차이점이 있다.

Fig. 8은 SLOSHEL 프로젝트에서 수행된 낮은 유체적재율에서 발생하는 슬로싱 탱크내 유체 충격형태에 대하여 설명하고 있다. Fig. 8(a)는 가파른 파(steeep wave)가 구조물에 부딪히는 경우이며, (b)는 쇄파(breaking wave)가 구조물에 부딪히는 경우, (c)는 발포성기체가 섞인 파(aerated wave)가 구조물에 부딪히는 경우를 나타낸다.

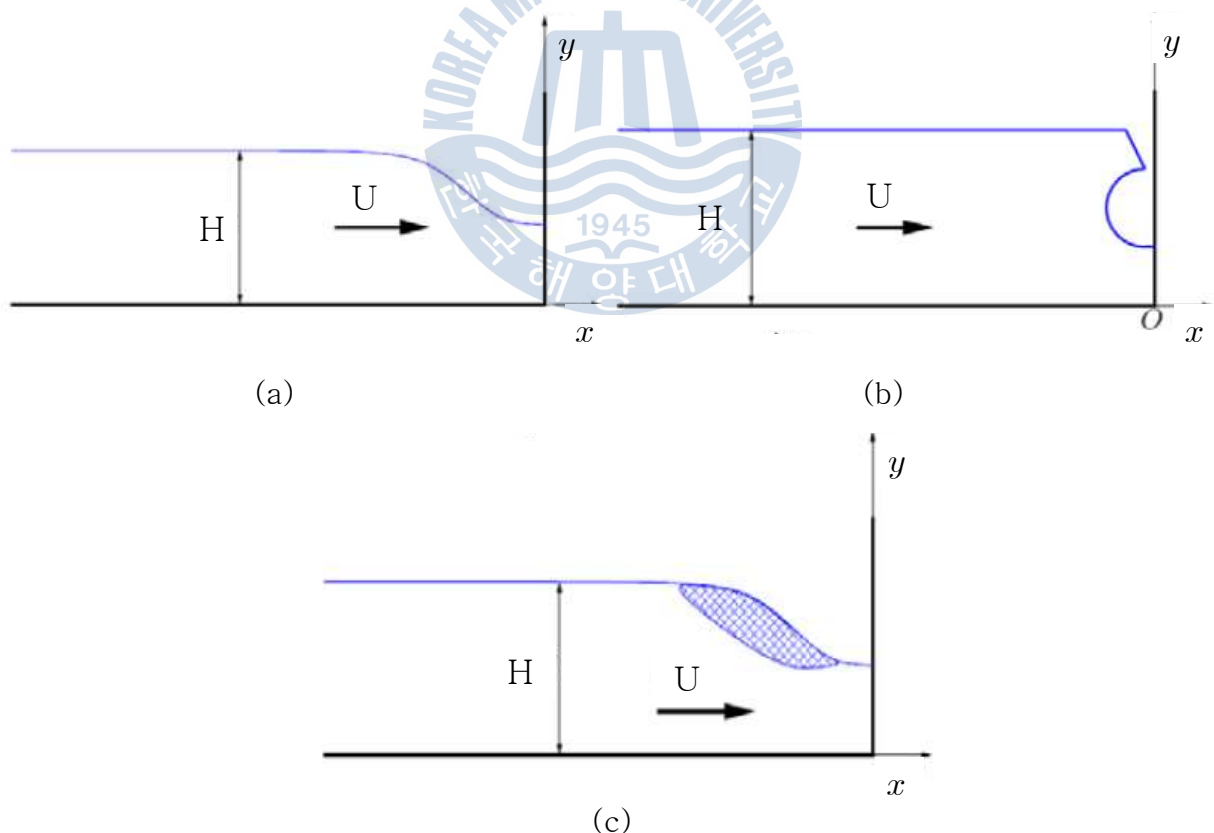


Fig. 8 Different impact type for low filling situations : (a) steep wave, (b) breaking wave, (c) aerated wave (BV & MARIN, 2005).

슬로싱 충격압력의 신호는 대표적으로 와그너 형태(wagner type)의 충격압력, 바그놀드 형태(bagnold type)의 충격압력, 제트 스프레이 형태(jet spray type)의 충격압력으로 나뉠 수 있다. 와그너 형태의 충격압력은 수괴의 직접적인 충돌에 따라 접촉면에서 단일 압력 첨두치를 보이는 반면에 바그놀드 형태의 충격압력은 에어포켓의 진동에 의해 비접촉면에서도 압력의 첨두치를 보인다.

Fig. 9는 SLOSHEL 프로젝트의 실험결과를 나타내고 있다. Fig. 9(a)는 수직구조물에 가파른 형태의 입사파(steeep wave)가 순간적 충격을 가했을 때, 직접적인 충돌에 따라 초기 접촉면에서 단일 첨두치를 나타내는 와그너형태의 유체충격압력이 계측되는 것을 나타낸다. Fig. 9(b)는 수직구조물에 쇄파(breaking wave)형태의 입사파가 순간적 충격을 가했을 때 직접적인 충돌에 따라 초기 접촉면에서 첫 번째 압력값이 계측되고, 이후에 에어포켓과 제트 스프레이 등과 같은 2차적인 요인에 의해 두 번째 압력값이 계측되는 바그놀드 형태의 유체충격압력이 계측되는 것을 나타낸다.

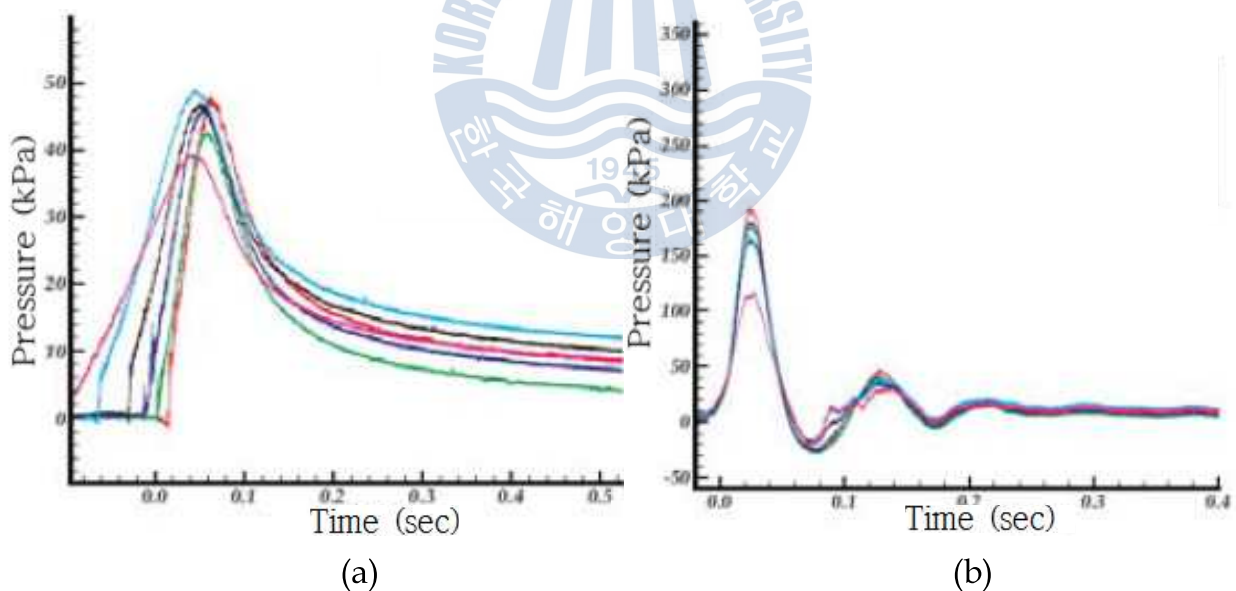


Fig. 9 The time histories of the two typical pressure measurements : (a) steep wave, (b) breaking wave (BV & MARIN, 2005).

2.3 비점축식 압력장 해석기법

2.3.1 압력장 해석을 위한 수식의 전개

PIV실험에서 촬영된 이미지는 2차원 평면, 직각좌표계 안에서 분석이 이루어진다. 따라서 Navier-stokes 방정식을 2축으로 표현하면, 식 (1a)와 식 (1b)으로 나타낼 수 있다.

$$V = (u, v)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g_x \quad (1a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g_y \quad (1b)$$

또한 본 논문에서는 PIV실험 유체입자(particle)를 비점성($\mu = 0$)으로 정의 한다. x 축을 수평방향, y 축을 연직하방향으로 취할 때, 일반적으로 지구 중력장내에서는 외력으로서 $x=0$, $y=g$ (단, g : 중력가속도)가 작용하고 있다. 따라서 식 (1a)와 식 (1b)는 식 (2a)와 식 (2b)이 된다.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (g_x = 0) \quad (2a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + g_y \quad (2b)$$

입자의 속도는 시간, 위치의 함수이며, 식 (3)으로 표현된다.

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) \quad (3)$$

이때, 식 (3)에서 $\frac{\partial V}{\partial t}$ 는 시간에 대한 속도의 편미분 항이며, 위치(x, y, z)를 고정시켰을 때의 시간에 대한 가속도를 의미한다. 이는 국부가속도(local acceleration)이다. 고정된 검사체적을 통과하는 정상 압축성 유동의 일반적인 경우에는 정상유동이기 때문에 $\rho = \rho(x, y, z)$ 이다. 정의에 의하면, 정상유동에서는 유체의 성질이 시간에 따라 변하지 않으므로, $\rho \frac{\partial V}{\partial t} = 0$ 이다. $V \cdot \nabla V$ 는 위치에 대한 속도의 편미분 항이며, 시간을 고정시켰을 때 각축방향에 대한 가속도를 의미한다. 직교좌표계에서 $V \cdot \nabla V$ 를 전개하면 각각 y, z, t 고정/ x, z, t 고정/ x, y, t 고정 했을 때의 가속도이다.

식 (2a), 식 (2b)을 $\frac{\partial P}{\partial x} = f, \frac{\partial P}{\partial y} = g$ 라는 형태로 변형하면, 우변의 f, g 는 속도벡터와 ρ 에 의해 부여되는 양이다. 만일 f, g 가 정확하게 계산된다면, 흐름함수 ($u = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$ 일때, $\Psi = \int u dy - \int v dx$)와 마찬가지로 압력 p 는 f, g 을 공간적분함으로써 구할 수 있다(可視化情報學會, 2002).

식 (2a)와 식 (2b)을 연속방정식으로 압력(P)에 관한 푸아송방정식으로 유도하면 식 (4)가 된다.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = -\rho \left(\frac{\partial Fu}{\partial x} + \frac{\partial Fv}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\text{여기서, } Fu = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}, Fv = u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}$$

식 (4)는 압력의 공간분포가 시간에 의존하지 않고, 순간의 속도 필드에서 결정하는 것을 나타내고 있다. 즉, 식의 우변의 속도장 정보가 PIV측정결과에서 주어지면 적절한 경계조건을 설정하여 압력 p 에 대한 미분방정식을 푸는 것으로 압력의 공간 분포가 얻어진다(可視化情報學會, 2002).

식 (4)은 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \nabla^2 P \\
&= \rho \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \\
&= \rho \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \\
&= \rho \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(2u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial x} + 2v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \\
&= \rho \left\{ -2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] - \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + v \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right] \right. \\
&\quad - \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right] - \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + u \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right] \\
&\quad \left. - \left[\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right] - 2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \right\} \tag{5}
\end{aligned}$$

식 (5)에서 식 (6)의 항이 연속방정식에 의해 아래와 같이 소거된다.

$$\begin{aligned}
& 2u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + u \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + u \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + v \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + 2v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\
&= 2u \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2v \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \tag{6}
\end{aligned}$$

식 (5)을 다시 정리하면, 식(7)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \nabla^2 P \\
&= \rho \left[-2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \\
&= -2\rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \\
&= -2\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] - 2\rho \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \\
&= -2\rho \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \tag{7}
\end{aligned}$$

식 (7)에서 $\frac{\partial v}{\partial y}$ 은 식 (8)과 같이 연속방정식에 의해 $-\frac{\partial u}{\partial x}$ 로 바꿀 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial u}{\partial x} \tag{8}$$

따라서 압력의 공간분포는 식 (9)와 같이 정의 될 수 있다.

$$\nabla^2 P = -2\rho \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \tag{9}$$

식 (9)의 우측에 표현된 식을 풀기 위해 필요한 정보는 속도의 2방향성분의 공간적 분포이며, 이는 2차원 PIV에 의해 쉽게 측정가능하다. 하지만 컴퓨터는 주어진 자료만을 처리하는 계산기이기 때문에 식 (9)과 같은 무한한 수를 계산할 수는 없고, 무수히 많은 수를 계산함으로써 근사치를 구하게 된다. 이를 위해 유한차분법에 의한 분리산화를 이용한다. PIV에 의해 속도 정보를 얻을 수 있는 평면에 Fig.10와 같이 격자를 설정한다. 이 때 격자점을 PIV 속도 데이터

가 정의된 위치와 일치시키고, x 방향과 y 방향의 격자폭($\Delta x, \Delta y$)을 서로 같게 해두면 처리가 간편해진다. 격자점의 지표 i 와 j 에서 각각 x 좌표, y 좌표를 나타낸다고 하면, 식 (10)의 공간의 2계미분은 식 (11)과 같이 유한차 형식으로 근사하는 것이 좋다(可視化情報學會, 2002).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{p_{i+1,j} - 2p_{i,j} + p_{i-1,j}}{(\Delta x)^2}, \quad \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{p_{i,j+1} - 2p_{i,j} + p_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입해 정리하면, 식 (11)가 얻어진다.

$$p_{i,j} = \frac{1}{4}(p_{i+1,j} + p_{i-1,j} + p_{i,j+1} + p_{i,j-1}) - \frac{1}{2}\rho(\Delta x)^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j} \quad (11)$$

식 (11)을 통해서 (i, j) 로 표시되는 점의 압력을 구할 수 있다.

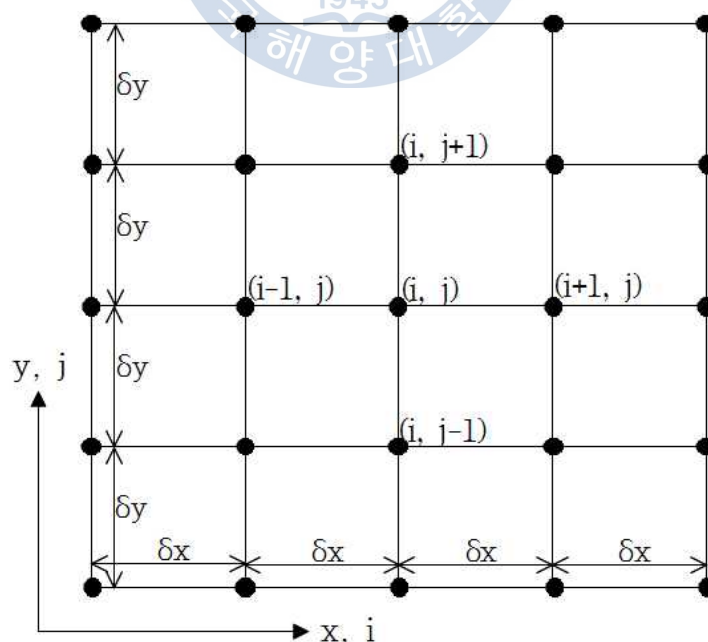


Fig. 10 Grid for the finite difference calculation (可視化情報學會, 2002).

2.3.2 압력장 해석을 위한 실험방법

본 논문에서는 비접촉식 압력장 해석기법 개발을 위하여, 빔구조물을 제작하여 측면에 압력센서를 부착한 후 입사파에 따른 빔구조물에 가해지는 압력값을 실시간으로 계측하였다. 이와 동시에 빔구조물의 주변유체를 PIV기법으로 촬영하고 분석하였다. 압력센서를 이용하여 계측된 접촉식 압력값과 PIV기법을 이용하여 분석한 비접촉식 압력값을 비교함으로써, PIV기법을 이용한 전체 유동장의 압력장 해석기법의 타당성을 검증하였다. 또한, 이러한 검증결과를 토대로 3장에서 바야지 형상 모델의 슬로싱 탱크내의 내부유체와 구조물의 주변유체를 PIV기법을 이용하여 전체 유동장에 대하여 압력장 해석을 수행하였다.

Fig. 11은 2차원 조파수조 내에서 빔구조물에 압력센서를 부착하여 실험하는 모습을 도시화한 것이다. 입사파의 방향은 X방향이며, 수심의 깊이방향은 Y방향이다. 압력센서는 수심의 깊이방향인 Y방향으로 빔구조물에 부착하였다. PIV 실험을 위해 다이오드레이저에서 생성된 레이저빔이 조파수조안에 위치시킨 거울에 반사되어, 수심의 깊이방향인 Y방향으로 레이저시트가 생성되게 하였다. 또한 레이저시트의 위치는 Fig. 13(b)와 같이 압력센서가 부착된 위치에 일치시켜 생성되게 하였다.

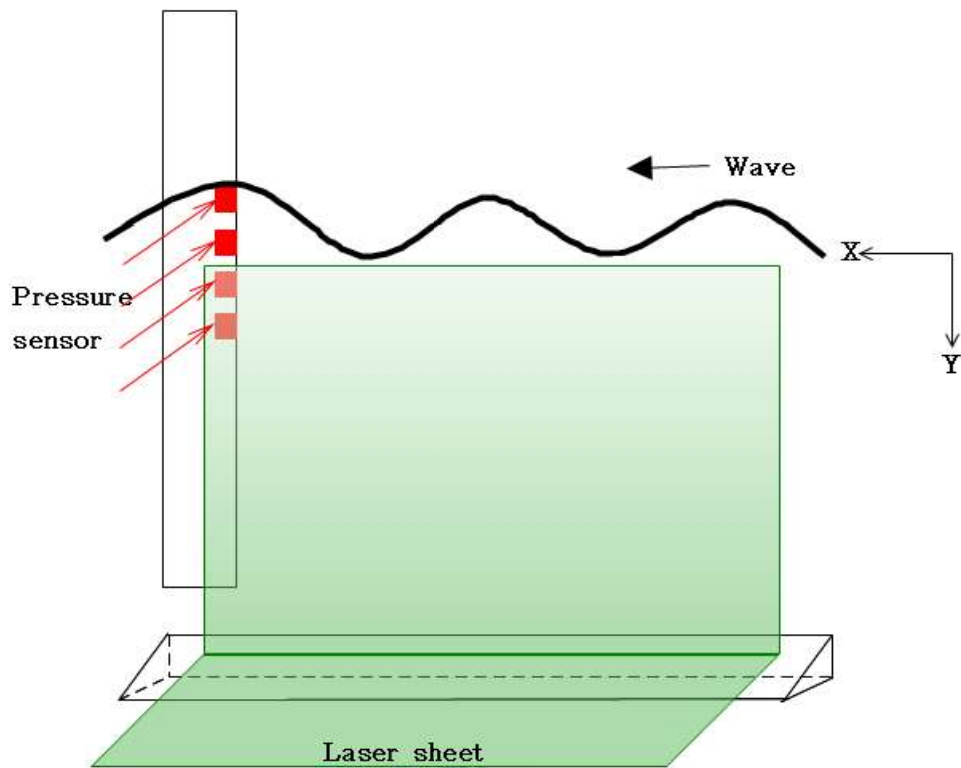
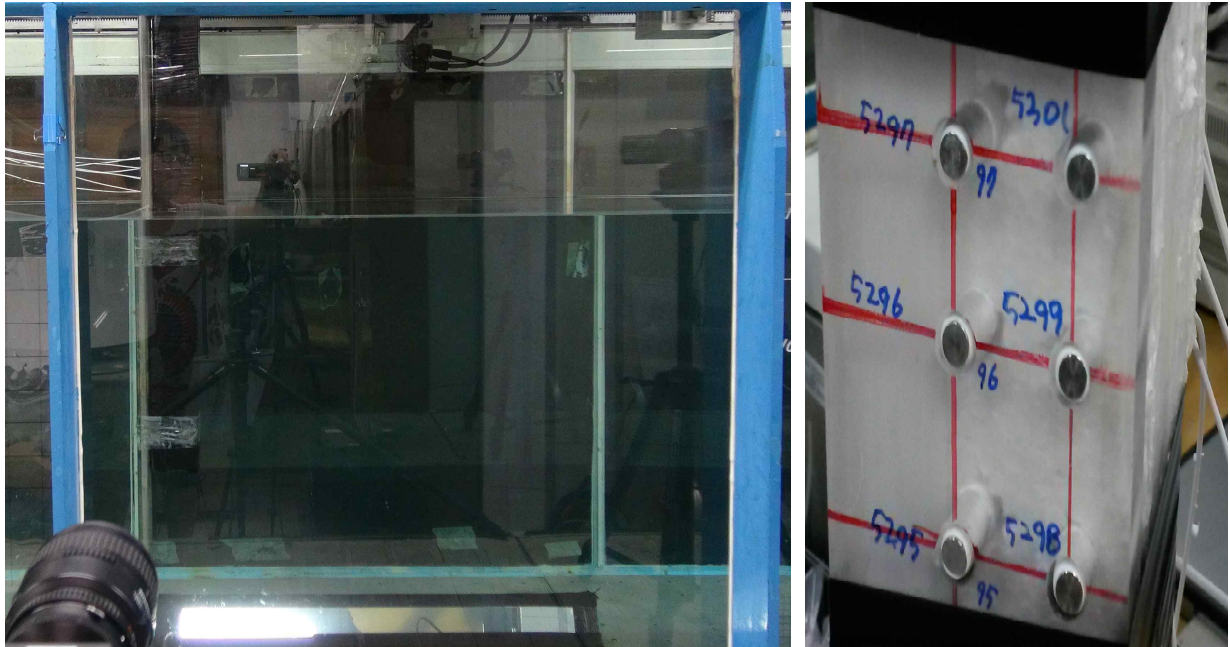


Fig. 11 Sketch of the experimental method in the wave tank.

Fig. 12(a)는 실제 실험모습이며, (b)는 빔구조물에 압력센서를 부착한 실제 모습이다. Fig. 13(a)는 2차원 조파수조에서 PIV실험을 위하여 particle를 살포 후 다이오드레이저를 이용하여 레이저시트를 형성한 모습이며, (b)는 레이저시트가 빔구조물 측면에 부착한 압력센서위치에 형성되는 것을 보여주고 있다. Fig. 14는 실험에 사용된 압력센서 전원공급 및 측정 장치(Kistler type 5110)이며, Fig. 15는 압력센서(Kistler type211B)이다. 압력센서의 측정가능범위는 0~100psi(0~6.895bar)이며, 직경은 6.3mm이다.

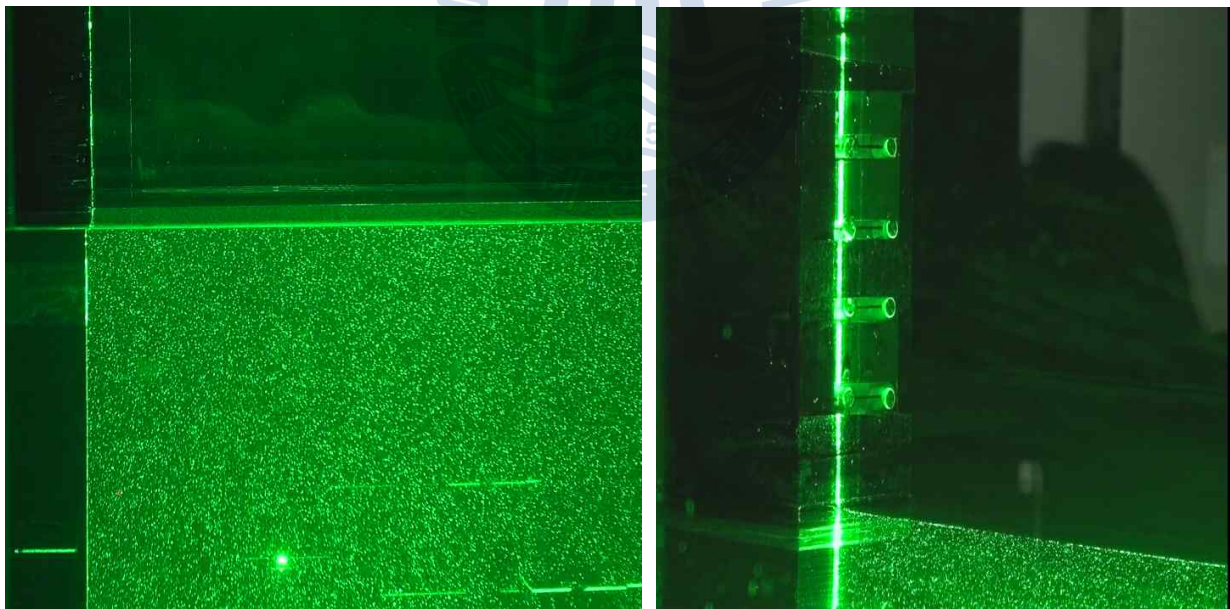
실험은 2차원조파수조에서 입사파주기 1.0sec, 파고 0.12m, 수심 0.8m 의 조건으로 수행하였다. 이때, PIV실험을 위하여 고속카메라는 100Hz로 촬영하였으며, 압력센서는 200Hz 계측하였다.



(a)

(b)

Fig. 12 (a) Appearance of the structure in the wave tank experiments and (b) pressure sensors installed appearance.



(a)

(b)

Fig. 13 PIV experiments in a wave tank shape of the structure : (a) X-Y view(zoom-out), (b) Y-Z view(zoom-in).



Fig. 14 A pressure sensor power supply and measuring device (Kistler type 5110).

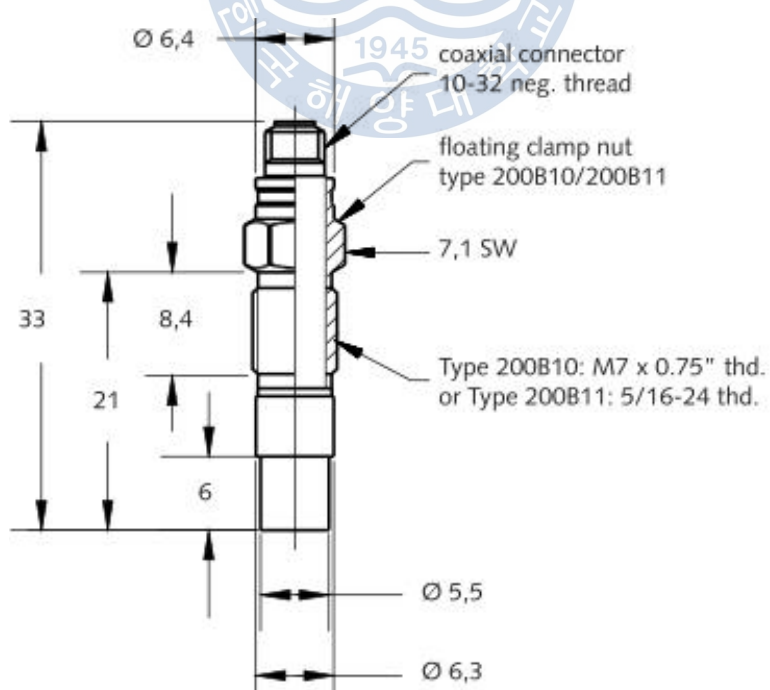


Fig. 15 Pressure sensors (Kistler type 211B).

2.3.3 압력장 해석의 실험 결과

심수역에서 2차원 규칙파의 파정 직하에서의 압력은 $P = \rho g y + \rho g \zeta_0 \cdot \exp(-ky)$ 이다(손경호, 1998). 이를 실험조건을 대입하여 계산하면, $P = 1000 \times 9.81 \times 0.8 + 1000 \times 9.81 \times 0.06 \cdot \exp(-4.02 \times 0.8) = 7.87 \text{ kPa}$ 이다.

이는 이번 논문에서 실험한 조건인 2차원 조파수조에 구조물을 삽입하여 실험한 조건과 다른 경우이다. 따라서 구조물과 입사파의 상호간섭에 의하여 일어나는 효과를 고려하지 않은 순수 sin파의 이론적 값이다. 따라서 Fig. 22의 압력센서로부터 측정되는 압력값 보다 크다.

Fig. 16은 빔구조물에 동압력센서를 장착한 후 조파수조에 수직방향으로 설치한 모습이다. PIV 실험을 위하여 입자(particle)를 조파수조에 살포한 후 다이오드레이저를 이용하여 레이저시트를 생성하고, 실제 실험을 수행하는 모습을 동영상으로 찍은 것이다. 레이저시트는 압력센서①~③의 위치에 생성되는 것을 알 수 있다.



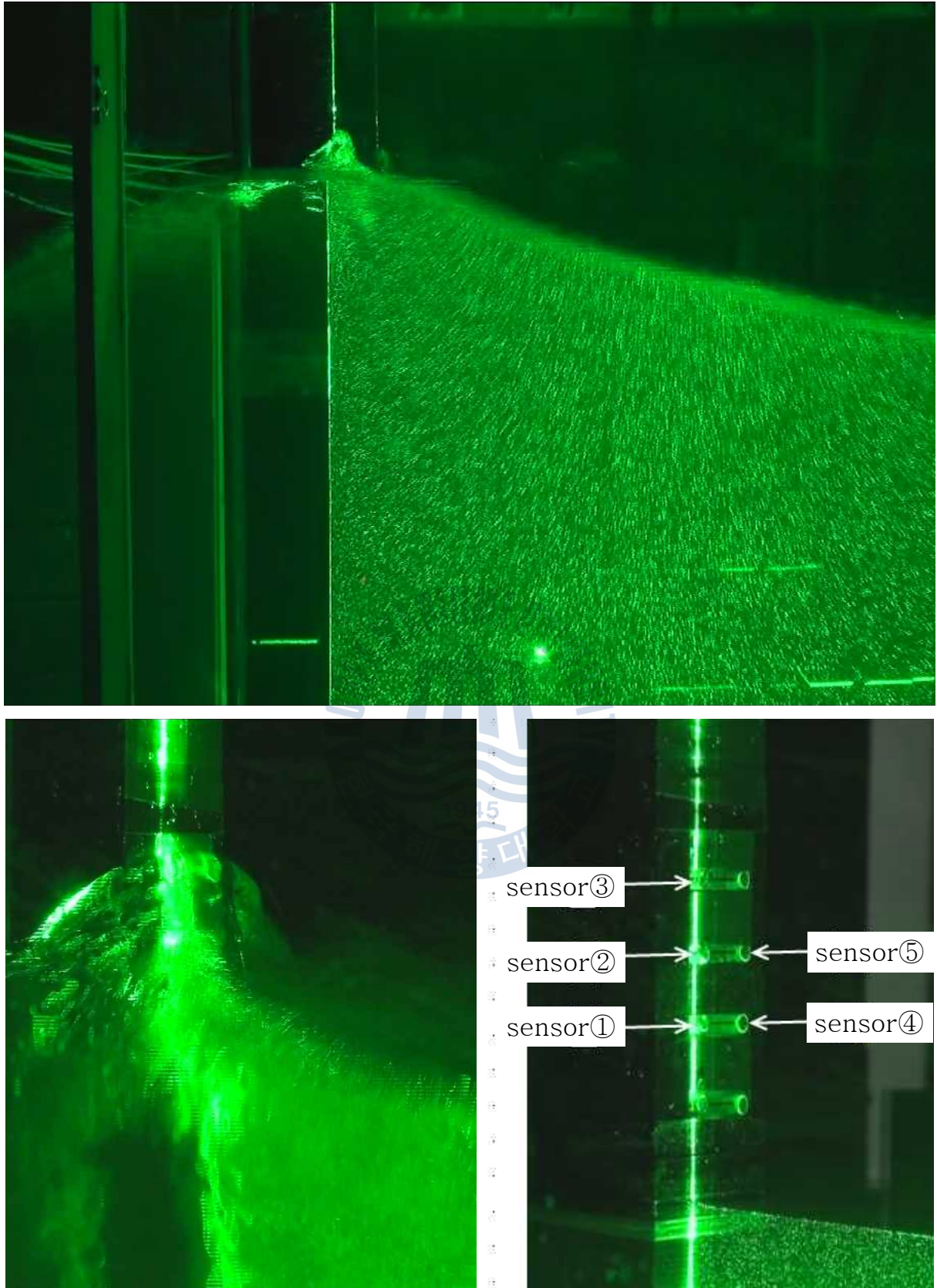


Fig. 16 Video of the PIV experiment.

PIV실험을 통하여 고속카메라로 획득한 원본 이미지는 입자가 흰색이며, 배경이 검은색이다. Fig. 17는 논문의 인쇄 시 이미지의 구분이 잘되게 하기위해서 흑백반전을 하였으며, 여기서 검은색 점으로 표현된 부분이 PIV실험을 위하여 조파수조에 살포한 입자이다. 또한 검은색 실선 3개로 표시된 부분은 실제 PIV이미지상의 압력센서①~③의 위치이다. 이중 PIV로 압력장을 분석한 부분과 비교할 부분은 압력센서①의 위치이다. 압력센서②와 ③의 위치는 입사파가 빔구조물에 부딪히면서 버블과 에어포켓 등이 발생되어 PIV 촬영을 위해 생성된 레이저시트의 빛이 충분히 도달하지 않거나, 도달하더라도 PIV분석에 필요한 입자의 이미지가 선명하게 찍히지 않아 많은 에러백터를 양산한다. 따라서 입사파가 빔구조물에 충격압력을 가했을 때, 버블 등의 생성이 일어나지 않는 압력센서①의 위치를 선택하였다. Fig. 17(a)는 PIV 촬영된 이미지의 실제모습이며, (b)는 (a)의 window A 부분을 확대한 모습이다.



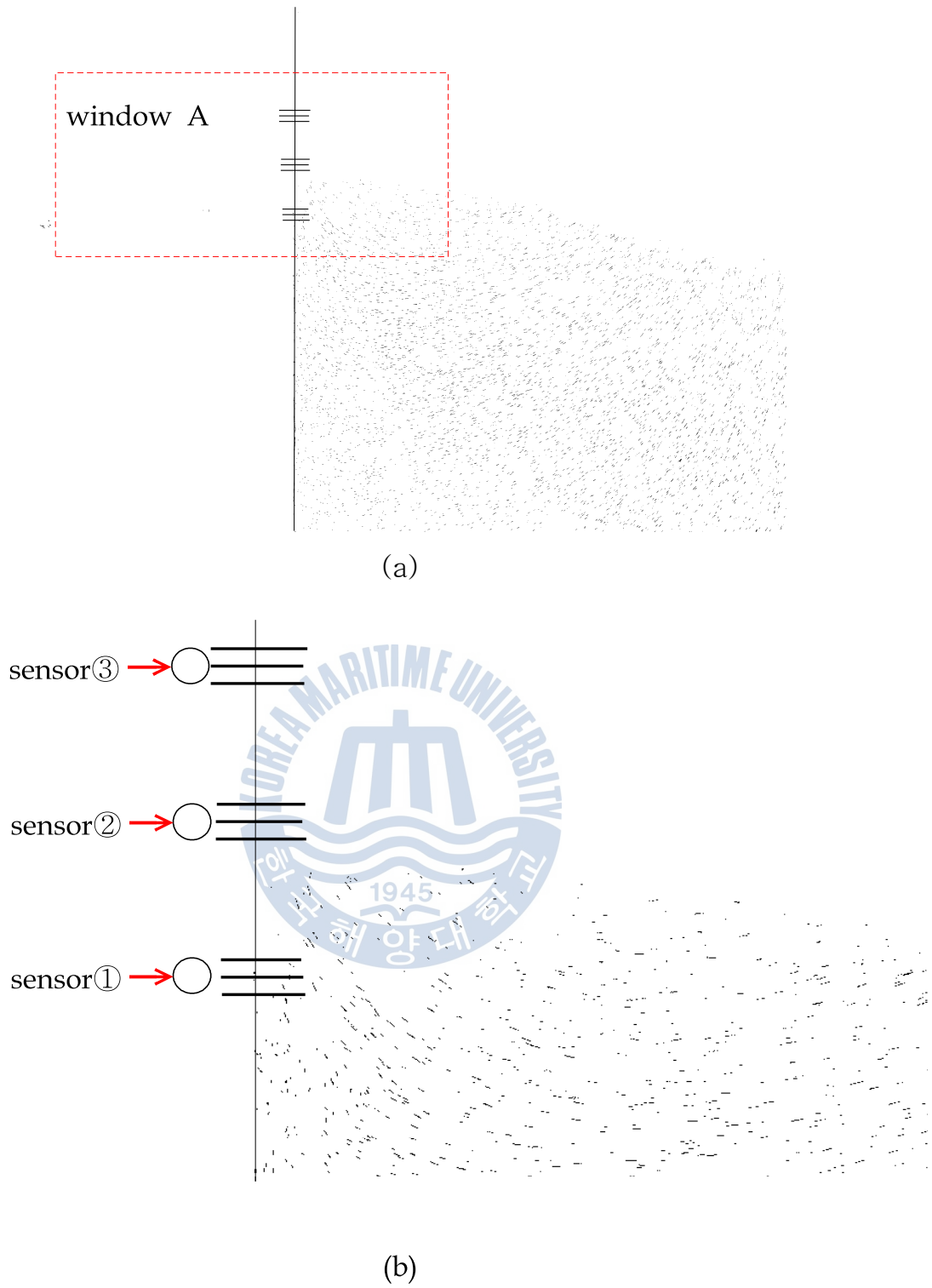


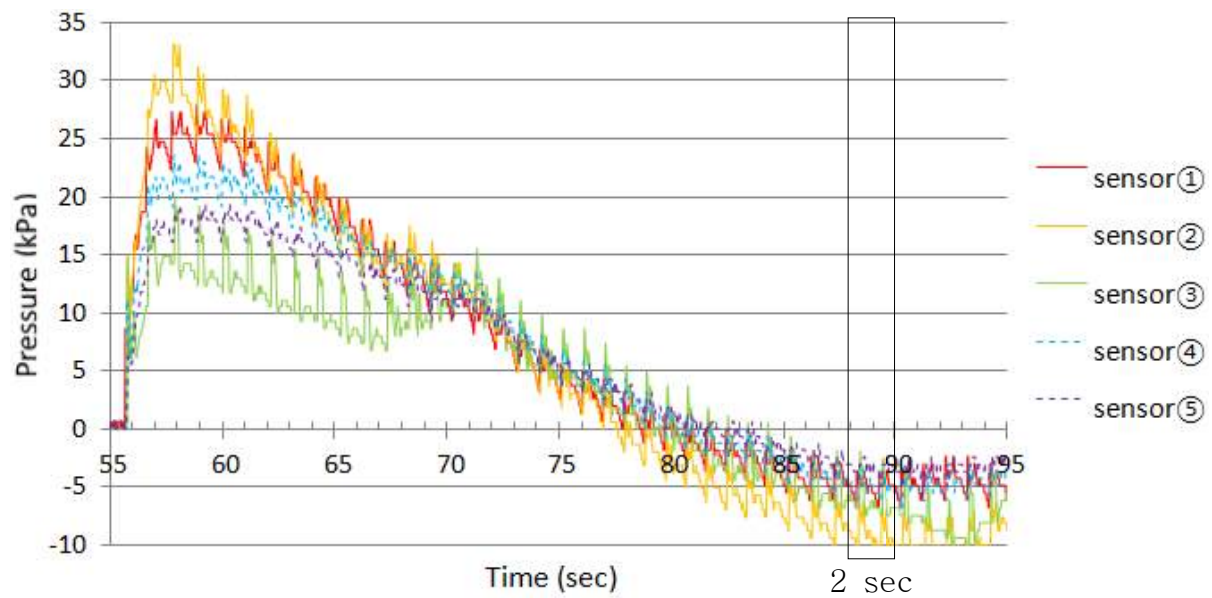
Fig. 17 Position of the pressure sensor in an image taken with PIV : (a) the original image was taken by PIV, (b) close-up image of a window A.

Fig. 18은 Kistler사의 211B 동압력센서가 장착된 빔구조물에 입사파가 충격압력을 가했을 때 압력센서에 계측된 압력값이다. 이때 조파수조에서 생성된 입사파주기는 1.0 sec이고, 입사파고는 0.12 m이다.

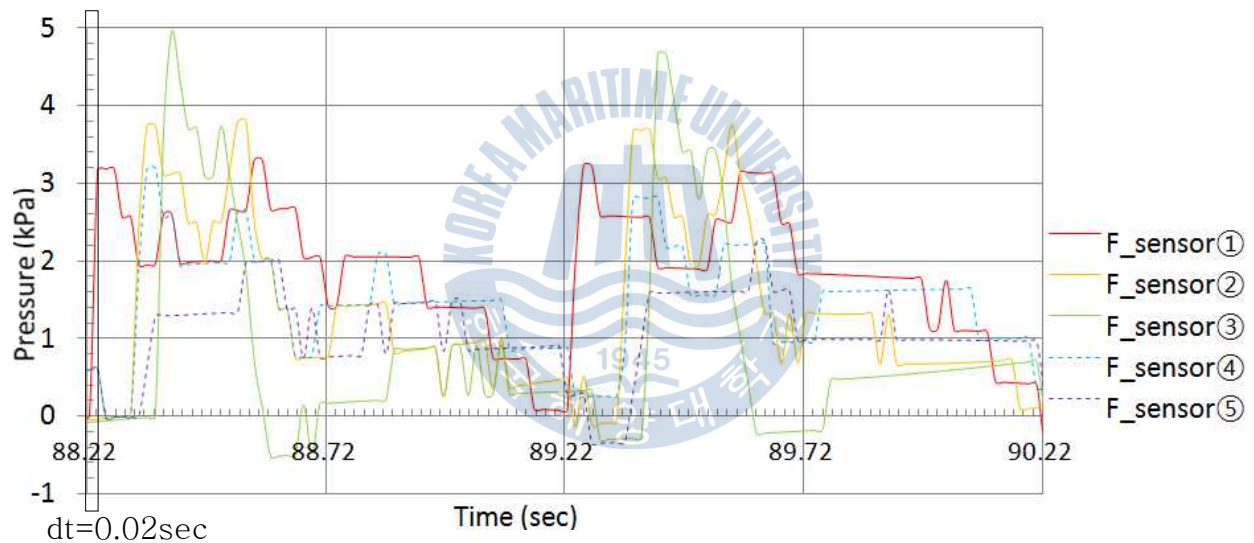
Fig. 18(a)는 압력센서①~⑤에서 실제로 계측된 압력값이며, 이중 검은색 박스로 표시된 영역인 88sec~90sec 구간에서 약2초가량 PIV 촬영을 수행하였다. 입사파 주기가 1.0sec이므로, 2개의 입사파가 촬영되었음을 의미한다.

Fig. 18(b)는 압력센서에서 계측된 원본 데이터 (a)를 FFT를 취해서 high pass filter한 결과 중에서 PIV촬영이 이루어진 88sec~90sec사이의 변동압력값을 확대하여 나타낸 것이다. (b)의 값은 실제로 압력센서가 입사파에 의해 변동하는 압력값이라 할 수 있다. (b)에서 동압력센서가 초기화(zero set)가 이루어지는 순간부터 입사파의 수면변화량에 따른 변동압력값이 계측되다가 다시 초기화가 되는 것이 입사파주기인 1.0sec의 간격으로 반복됨을 알 수 있다. 이중 초기 0sec~0.5sec 동안은 입사파의 수면이 압력센서에 압력을 가해서 압력값이 증가하다가, 0.5sec~1.0sec 동안은 압력센서가 수면위로 노출되면서 입사파에 대한 압력을 받지 않아 초기화가 이루어지는 구간으로 작용된다. 또한 동압력센서의 측정값은 앞서 Fig. 6에 나타내었듯이 압력의 변화량만을 계측할 수 있으며, 힘이 제거되는 순간 부압이 작용한다. 따라서 동압력센서의 초기화 단계에서 들어오는 최초의 순간 변동압력값이 신뢰할 수 있는 데이터이며, 순간적으로 변동압력값이 계측되어 최대치에 도달하는 시간은 0.02sec이다.

본 논문에서 PIV기법을 이용하여 고속카메라로 촬영된 이미지는 100Hz이며, $dt=0.01\text{sec}$ 이다. 따라서 분석에 이용된 두 장의 이미지사이의 시간간격은 0.01sec이며, 압력장 분포해석을 수행한 결과는 0.01sec의 시간의 변화 동안 일어난 입자(particle)의 변동압력의 값이다. 따라서 압력센서로 계측된 변동압력값과의 비교를 위해서는 PIV로 촬영된 이미지의 $dt=0.02\text{sec}$ 로 분석할 필요가 있다.



(a)



(b)

Fig. 18 Experimental results of pressure sensor (wave period : 1.0sec, wave height : 0.12m) : (a) the original data of the measured pressure value, (b) the actual pressure value changes to filter the original data(a).

Fig. 19는 수조에서 압력센서를 수면으로부터 5cm 입수시켰을 때, 압력센서의 반응특성을 테스트한 결과이다. 압력센서에 물이 닿자마자 급격하게 수치가 올라가며, 이후 Fig. 18(a)와 같은 형태를 띠게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 18(a)에서 Fig. 19의 값을 필터링한 후의 데이터인 Fig. 18(b)가 실제로 입사파에 따라 변동되는 압력값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

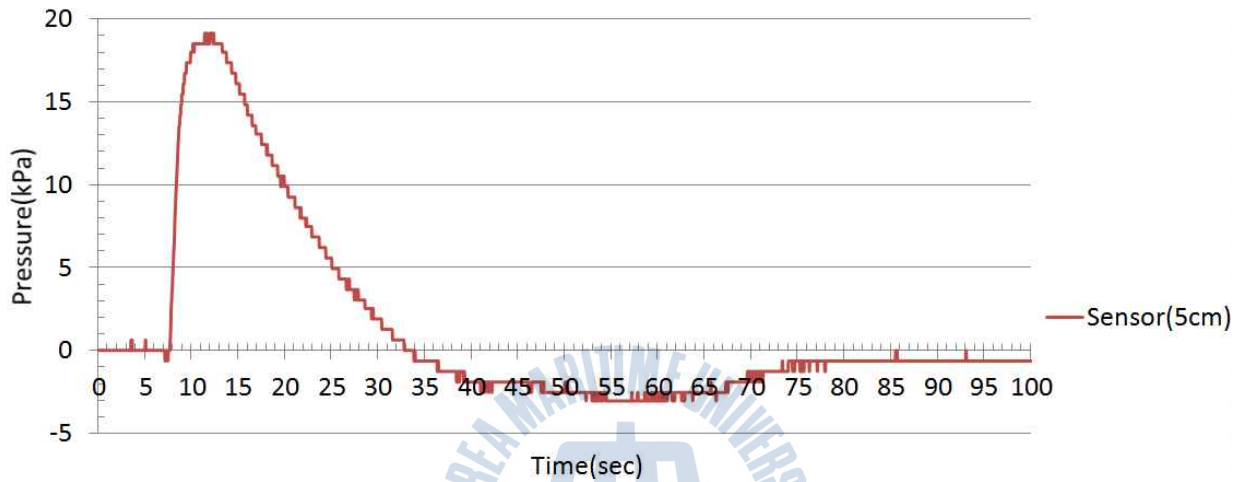


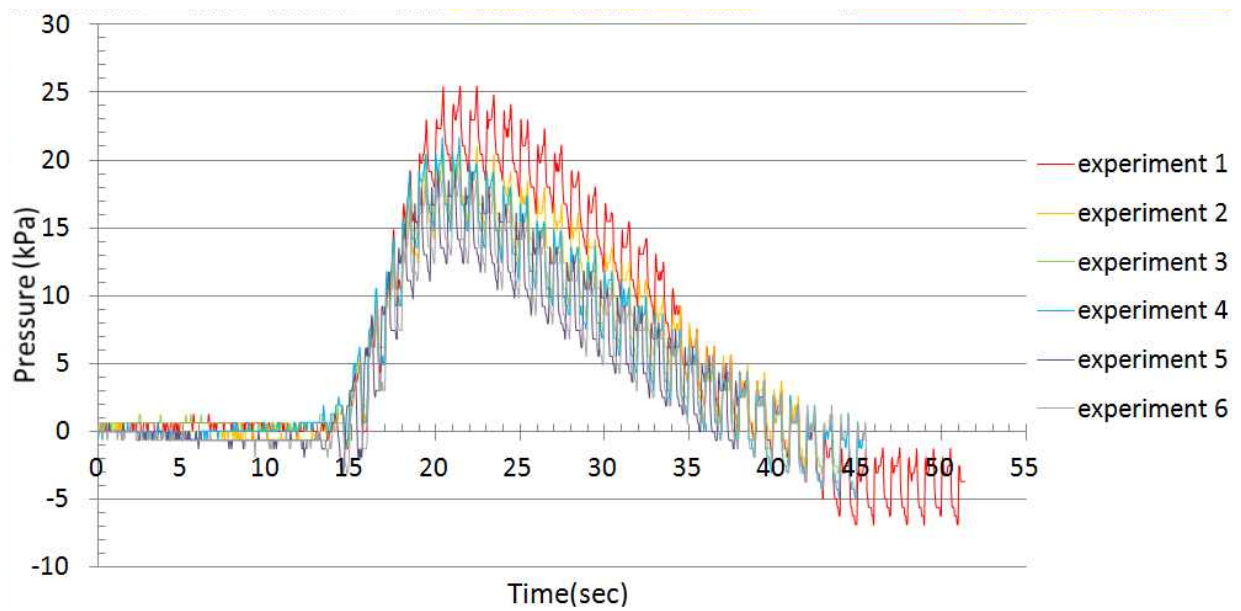
Fig. 19 Pressure sensor response characteristics test in the tank.

Fig. 20는 조파수조에서 주기 1.0sec, 파고 0.07m인 입사파를 조파시켰을 때 압력센서에 측정되는 압력값을 나타낸 결과이다. Fig. 20는 Fig. 18과의 비교를 위하여 sin파의 형태를 띠는 낮은 파고에서의 실험을 수행한 것이다.

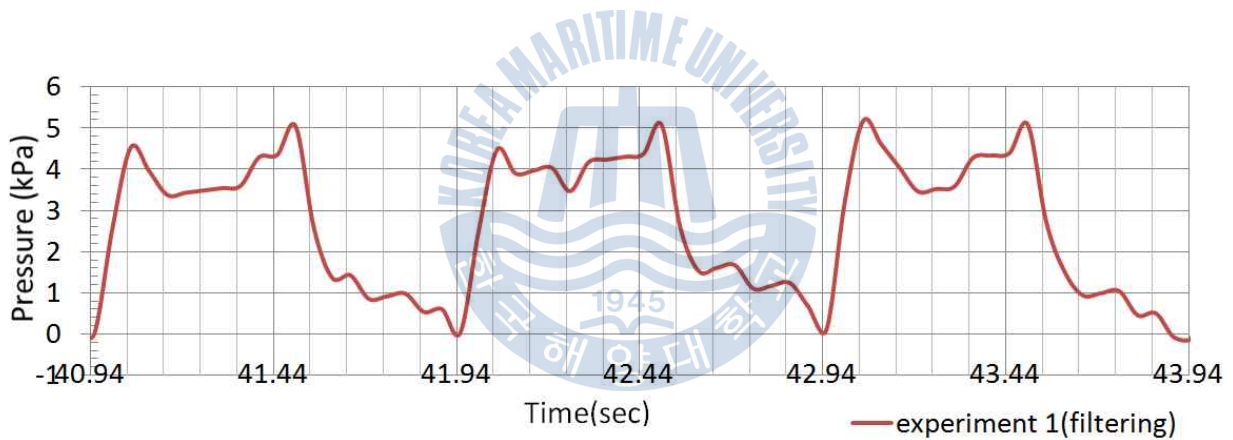
Fig. 20(a)는 압력센서에서 측정된 원본 데이터이며, 동일한 압력센서를 이용하여 실험을 총6번 반복수행하여 1회~6회까지의 실험결과를 나타내었다. Fig. 20(b)는 (a)의 6개의 실험결과 중 첫 번째 실험데이터를 필터링한 값이다. Fig. 20(a)에서도 Fig. 18(a)와 같은 형태를 띠며, Fig. 19의 특성을 내포하고 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 Fig. 18(a)의 원본데이터에서 필터링한 결과인 Fig. 18(b)를 조파수조에서 입사파가 빔구조물에 충돌했을 때, 변동압력센서가 측정하는 압력값이라 할 수 있다.





(a)



(b)

Fig. 20 Experimental results of pressure sensor (wave period : 1.0sec, wave height : 0.07m) : (a) the original data of the measured pressure value, (b) the actual pressure value changes to filter the original data(a).

Fig. 21에 나타나듯이 유체충격압력의 시간 이력은 대체로 다음과 같은 순서를 보인다는 것을 확인 할 수 있다.

1단계 : 수면이 닫는 순간부터 충격 압력은 급격히 최대치까지 상승한다.

2단계 : 압력이 최대치에 도달한 순간부터 다시 급격히 감소되나 그 감소 속도는 상승 시보다는 상대적으로 느리다.

3단계 : 충격압력이 어느 정도 수준까지 떨어지면 상당한 시간 동안 그 수압을 그대로 유지하다가 서서히 소멸된다.

결국 충격압력의 시간 축에 대한 프로파일은 최대압력까지 초기 상승시간, 최대압력의 크기, 하강시간, 유지시간, 소멸시간 등의 인자로 표현될 수 있다.(Noh, et al., 2010) 따라서 Fig. 18(b)와 같은 양상을 나타낸다. 이는 조파기에서 생성된 초기 입사파가 구조물에 부딪혀 생성되는 최대충격압력 계측 후 수렴단계에 이르고자하는 단계가 포함되었기 때문이다.

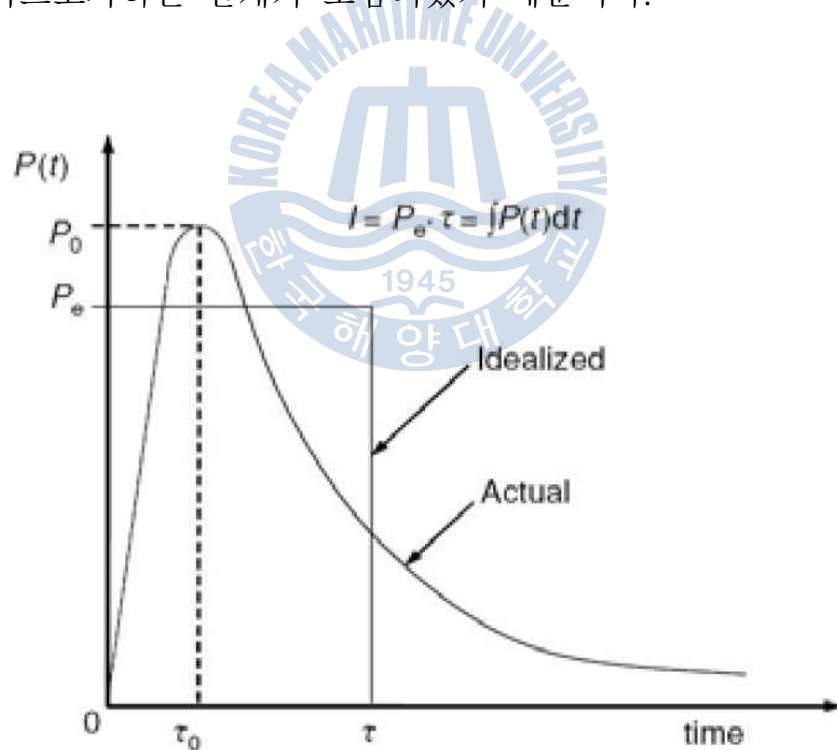


Fig. 21 Idealized time history and actual time history of impact pressure (Noh, et al., 2010).

Fig. 22은 압력센서(Kistler 211B)를 빔구조물에 설치하여 실험한 결과이다. 압력센서①~③은 빔구조물 폭방향(Z)의 가운데 부분에 설치하였으며, 압력센서④와 ⑤는 빔구조물 폭방향(Z)의 가운데로부터 우측에 설치하였다. 또한 빔구조물의 길이방향(Y)으로 설치한 압력센서①~③사이의 간격은 각 0.03m씩 떨어져 있으며, 압력센서④와 ⑤의 간격 또한 마찬가지이다. 압력센서①의 값은 약 3.2 kPa, 압력센서②의 값은 약 3.8 kPa, 압력센서③의 값은 약 5 kPa이며, 압력센서④와 ⑤의 값은 약 2.5 kPa로 거의 유사하게 측정되었다.

이는 Fig. 16의 PIV실험영상에서 나타나듯이 압력센서②와③은 입사파의 파정이 빔구조물에 부딪혔을 때 생성되는 충격압력 값이 더해져서 압력센서의 값이 상승되어 측정되었다. 그러나 압력센서④와⑤는 빔구조물의 한가운데에서 가장자리 쪽으로 좀 더 이동되어 설치하였으므로, 입사파가 빔구조물과 부딪히면서 일어나는 충격압력 보다 빔구조물 측면으로 흐르면서 감쇠되는 파력이 더 커서 과정에서 측정되는 압력센서①에서의 값보다 더 작게 측정되었다.

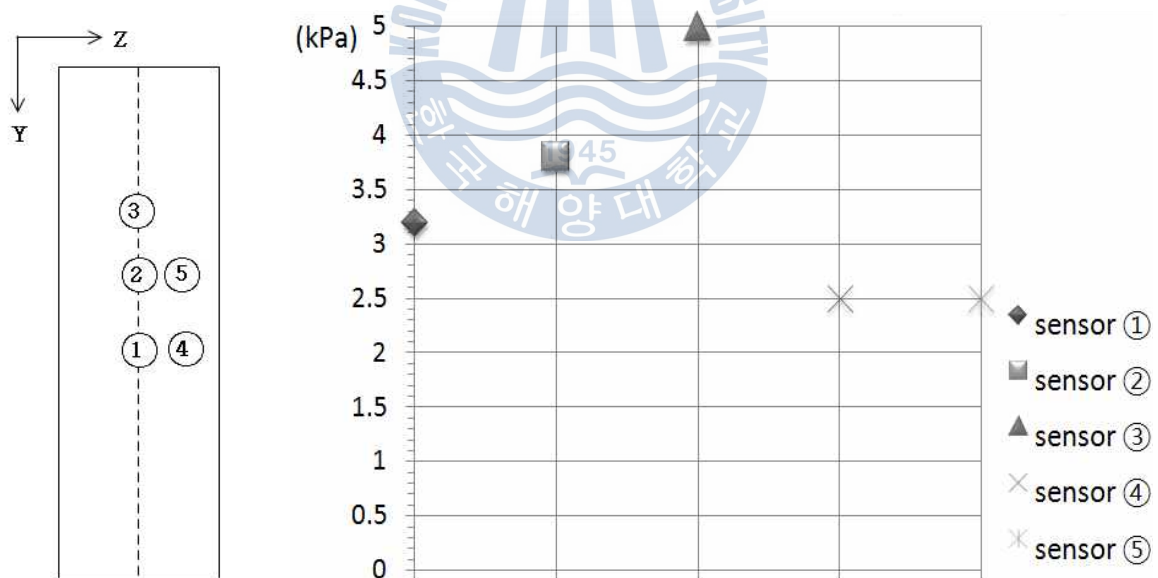


Fig. 22 Results of the measured pressure value with the pressure sensor (Kistler 211B).

Fig. 23은 2차원 조파수조에 설치된 빔구조물 주변유체를 PIV기법으로 실험한 결과를 압력분포로 나타낸 것이다. Fig. 17에 검은색 3줄로 PIV 이미지에 표시한 부분은 압력센서①~③의 위치이며, Fig. 23에서 Y축으로는 678 Pixel ~ 714 pixel(센서직경 65mm), X축으로는 850 Pixel에 해당되는 부분이 압력센서①의 위치이다. PIV기법을 이용한 실험의 분석 결과는 대략 4 kPa 정도로 나타났으며, 동일 지점에서의 압력센서를 통하여 측정되어진 압력값이 약 3.2 kPa인 것을 감안하면 좀 더 크게 압력값이 나온다는 것을 알 수 있다. 그러나 PIV기법을 이용한 압력장 해석은 주변 속도벡터를 고려하여 계산되어지는 것이다. 따라서 단순히 압력센서① 위치에서의 압력값 뿐만 아니라, 입사파의 과정과 빔구조물이 만나는 지점에서 급격히 증가하는 주변의 속도변화가 반영된 결과이다.

따라서 압력센서를 통하여 측정되어 지는 특정지점에서의 압력측정기법보다 그 정밀도 면에서는 떨어진다고 하겠으나, 유동장 전반에 걸친 압력장분포를 확인하는 것에서는 큰 의미를 지닌다고 할 수 있다. 특히 압력센서의 큰 단점인 실험구조물에 장착 시 일어나는 노이즈에 의한 데이터 간섭, 구조물의 협소한 지역이나 급격히 변화하는 단면에 장착할 수 없다는 점을 고려할 때, 전체 유동장의 압력장분포를 PIV기법을 이용하여 비접촉방식으로 측정할 수 있다는 점은 큰 장점이라 하겠다. 또한 오차면에서도 압력장 분포도로 확인할 경우 그 범위가 크지 않다.

본 논문에서 고속카메라를 이용하여 획득된 이미지는 PIV기법을 통하여 분석을 수행하였으며, 이때 촬영된 이미지의 캘리브레이션 값은 $10\text{mm}=60.21\text{ Pixel}$ ($1\text{mm}/1\text{pixel} = 0.166$)이다.

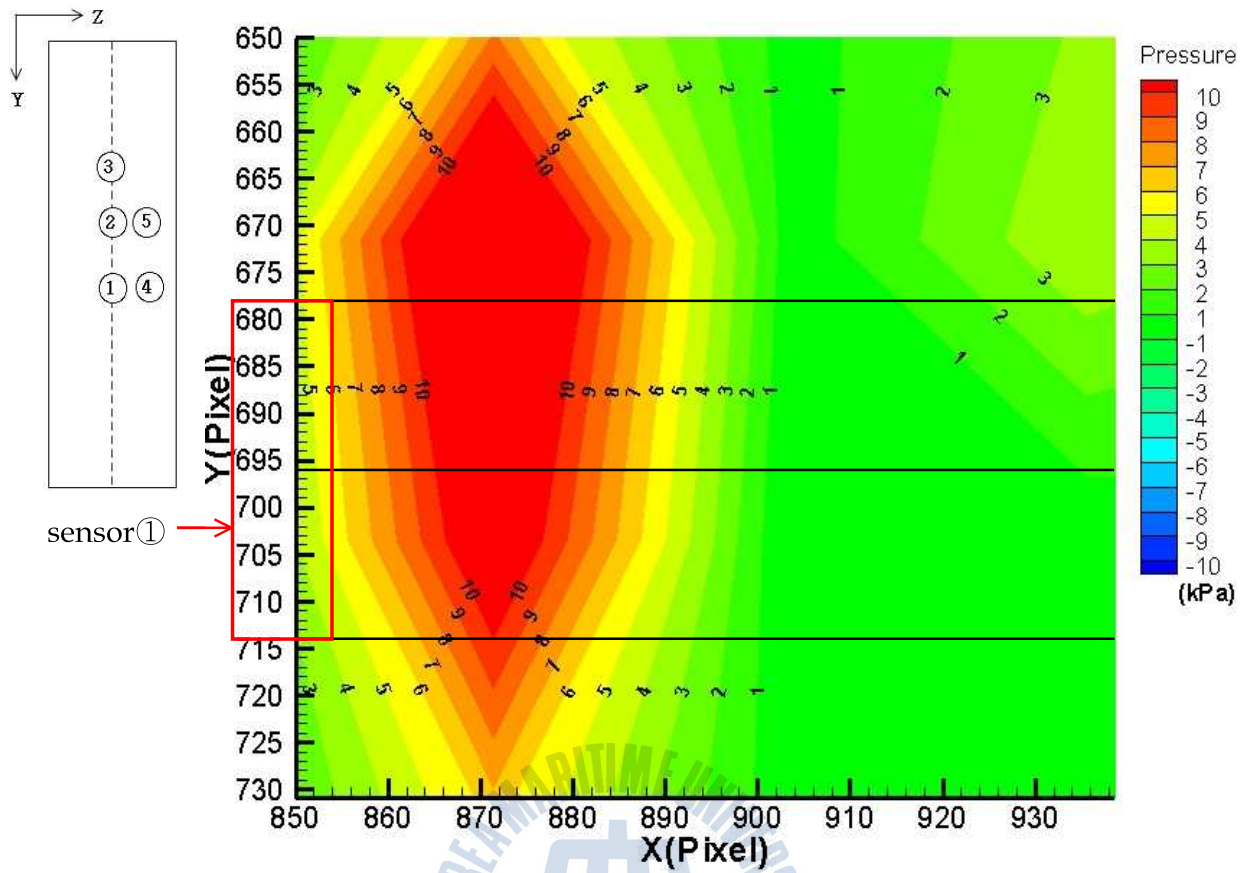


Fig. 23 Distribution of the pressure values measured by using a PIV techniques.

제 3 장 파랑중 슬로싱을 동반한 바아지 형상 모델의 운동특성

3.1 실험 방법

3.1.1 상사조건

모형시험결과를 실선으로 확장하기 위해서는 기하학적상사(Geometric similarity), 운동학적상사(Kinematic similarity), 역학적상사(Dynamics similarity)로 정의되는 3가지 상사법칙을 따라야 한다.

기하학적상사란 모형선-실선의 생긴 모습이 닮은꼴이면 상응되는 모든 점에서 접선의 기울기가 같다는 것이며, 표면의 조도(roughness)는 모형선에서 그대로 재현할 수 없으므로, 모형선의 표면은 매끈하게(smooth)하고, 나중에 필요한 수정을 한다. 축척비($\frac{L_S}{L_M}$)로써 나타낼 수 있으며, 여기서 L_S 는 실선의 길이, L_M 는 모형선의 길이이다.

운동학적상사란 모형선과 실선 주위의 유동의 모습이 닮은꼴이면 상응되는 모든 점에서의 속도 벡터의 방향이 같으며, 모형선과 실선의 상응되는 점에서 2점의 속도의 비가 동일하다는 것이다. 운동학적상사를 수식으로 표현하면 식 (12)과 같다.

$$\left(\frac{V_A}{V_B} \right)_M = \left(\frac{V_A}{V_B} \right)_S \quad (12)$$

역학적상사란 모형선과 실선에 작용하는 힘이 닮은꼴이면 상응되는 모든 점에서 힘 벡터의 방향이 같다는 것으로 기준 측에 대한 힘의 방향도 닮은꼴이란 것이다. 역학적상사를 수식으로 표현하면 식 (13)과 같다.

$$\left(\frac{F_t}{F_n} \right)_M = \left(\frac{F_t}{F_n} \right)_S \quad (13)$$

수조실험을 위하여 기하학적 상사법칙에 따라 길이로 축척하여 상사하였으며, 단위는 SI단위계(m, sec, kg)를 사용하였다. Fig. 24는 실제 조파수조에 설치된 바아지 형상 모델의 실험모형으로 조파수조와 모형의 L(길이), B(폭), D(높이) 관계를 보여주고 있다.



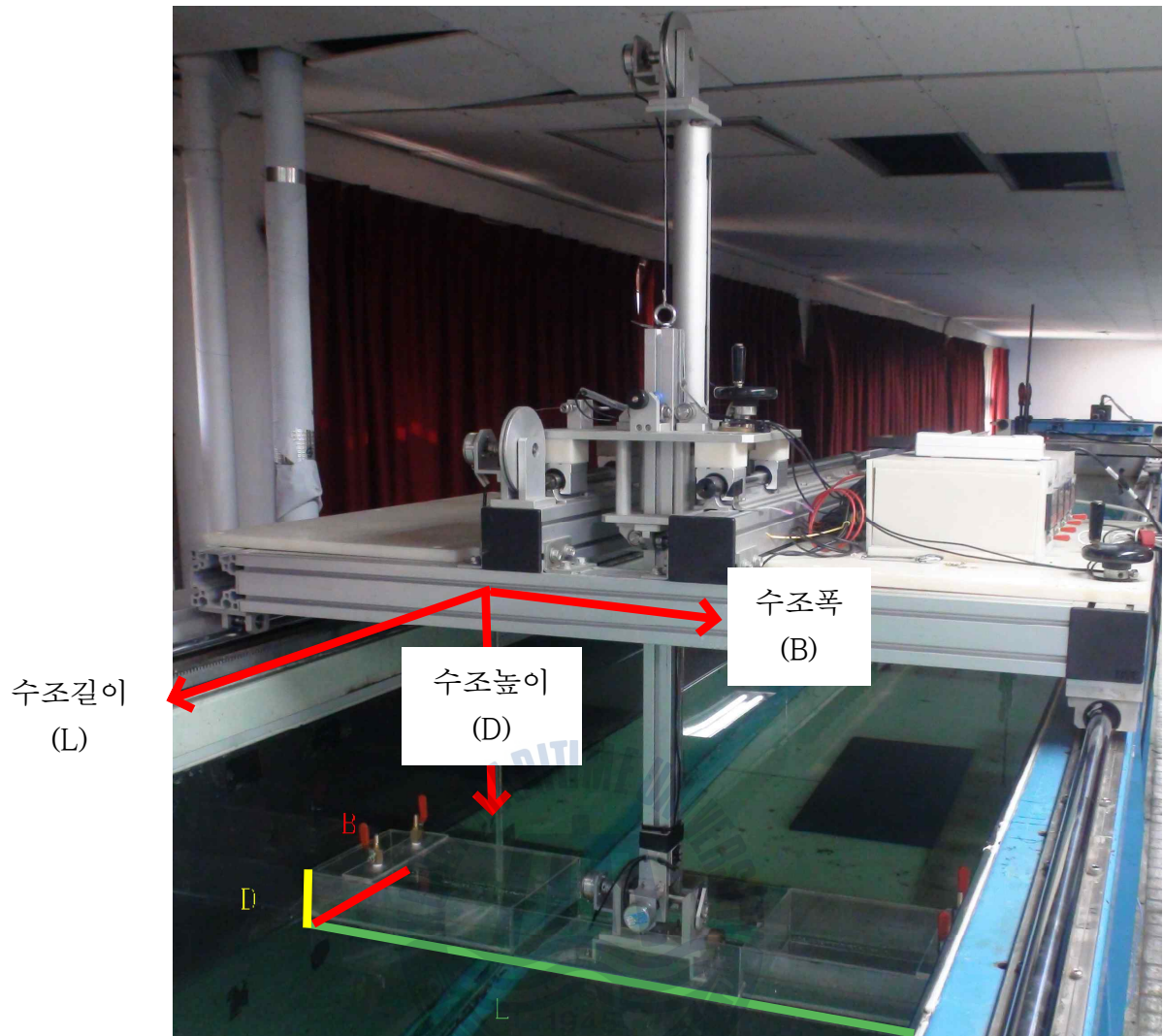


Fig. 24 L,B,D representation of the relationship between the tank and the barge shaped model.

Table 1은 2차원 조파수조의 제원이며, Table 2는 바아지 형상 모델의 실험모형에 대한 제원을 나타내고 있다. Fig. 24와 Table 1, Table 2에서 보여 지는 바와 같이 2차원실험을 위하여 조파수조의 폭(B)방향이 실험모형의 길이(L)가 되도록 하였으며, 조파기에서 생성된 파는 실험모형의 측면에서 조우하도록(beam sea) 설계하였다. 따라서 축척비는 $\frac{L_S}{L_M} = \frac{213}{1} = 213$ 이다.

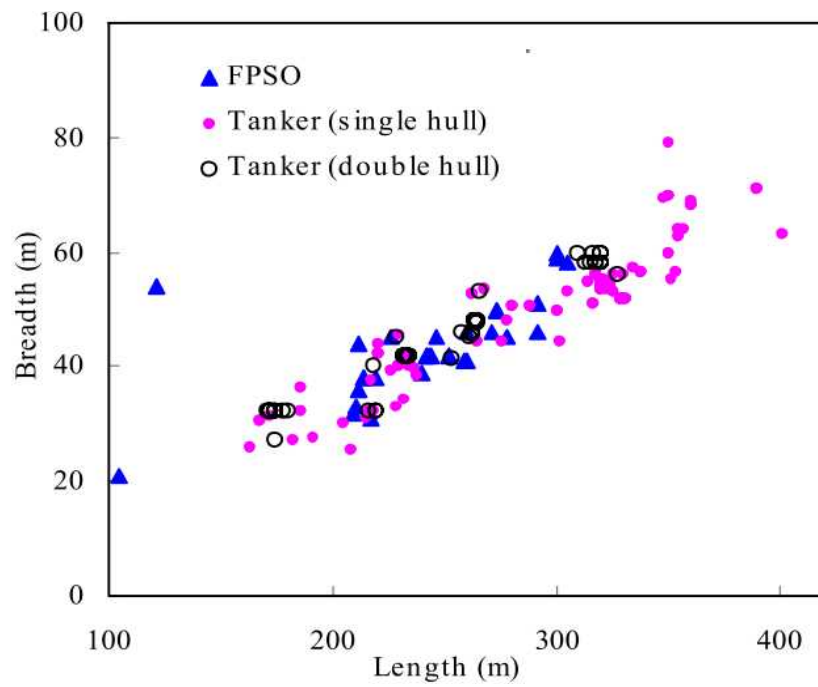
Table 1 Specifications of the 2-D wave tank (SI unit).

L(length)	B(breadth)	D(depth)	d(draft of water)
25m	1m	1.1m	0.8m

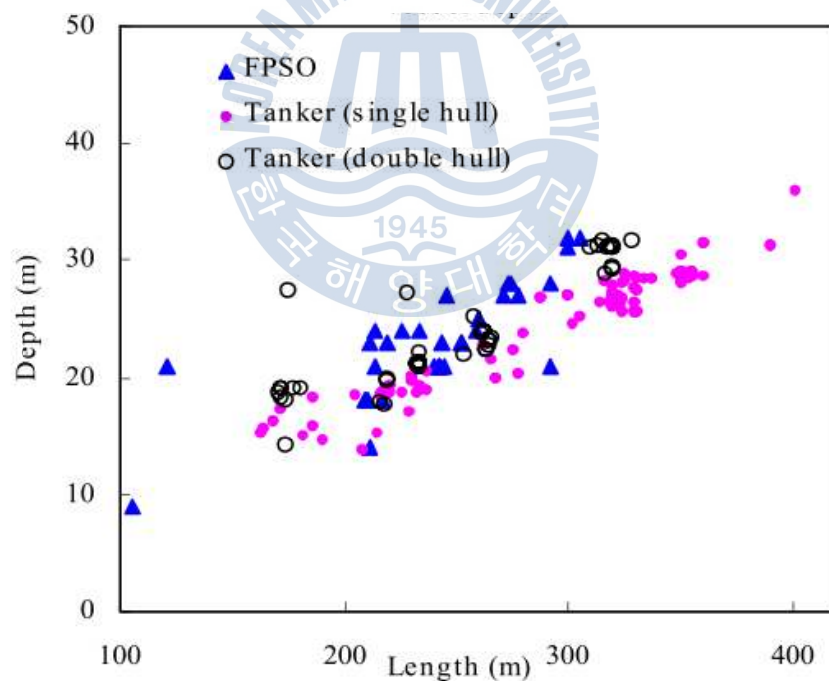
Table 2 Specifications of the barge shaped model (SI unit).

L(length)	B(breadth)	D(depth)
1m	0.22m	0.105m

Fig. 25는 2002년 ABS선급의 기술서에 실린 자료이며, FPSO의 길이(length)에 따른 폭(breadth)과 깊이(depth)의 비율을 나타내고 있다. FPSO의 폭에 대한 길이의 비율이 주로 4.5~5.5 사이에 많이 분포하고 있는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 25 Trends in the design dimensions of the FPSO (ABS, 2002) : (a) relationship of length and width, (b) relationship of length and depth.

Table 3은 이번 실험의 모델이 된 삼성중공업의 딥워터 패스타인더호이며, 앞선 Fig. 25에 나타낸 바와 같이 딥워터 패스파인더호 역시 구조물의 폭에 대한 길이의 비율이 5에 가까운 것을 알 수 있다. Table 2에서 알 수 있듯이, 상사법칙에 따라 설계된 실험모형의 폭에 대한 길이의 비율은 약 4.55이다. 이는 조파수조에서 2차원 실험을 하기위하여, 수조의 폭(1m)에 실험모형의 길이(1m)를 맞추어 설계하고, Fig. 27에서와 같이 실험모형의 가운데 부분에 4자유운동 계측장비를 설치하기 위하여 실험모형의 폭을 증가시킨 결과이다. 그러나 Fig. 25(a)을 보면 구조물의 길이에 대한 폭의 비율이 4.5~5.5사이에 분포된다는 점을 감안한다면, 약 4.55의 비율역시 이러한 범주에 속한다.

Table 3 Specifications of the Deepwater Pathfinder (Samsung Heavy Industries, 1998).

L _S (C _b =0.864054454)					
L(length)	B(breadth)	D(depth)	L.W.L.	D.W.T.	D.W.T.
213m	42m	20m	13m	103ton	103000m ³
L/B=5.071					

3.1.2 실험모형의 형태

Fig. 26은 설계된 실험모형과 2차원 조파수조 내에 4자유운동장치와 연결하여 설치된 모습을 나타내고 있으며, Fig. 27는 실제 제작된 실험모형이다. 유체적재 탱크 내 슬로싱 현상을 관측하기 위하여 아크릴로 제작되었으며, 선수, 선미부에 각각 탱크를 가지고 있다. 또한 탱크 상갑판에 4개의 에어밸브(air valve)를 설치하여 탱크 내부의 유체적재 및 조파 중 슬로싱 발생 시 자유로운 유체 움직임이 일어날 수 있도록 하였다.

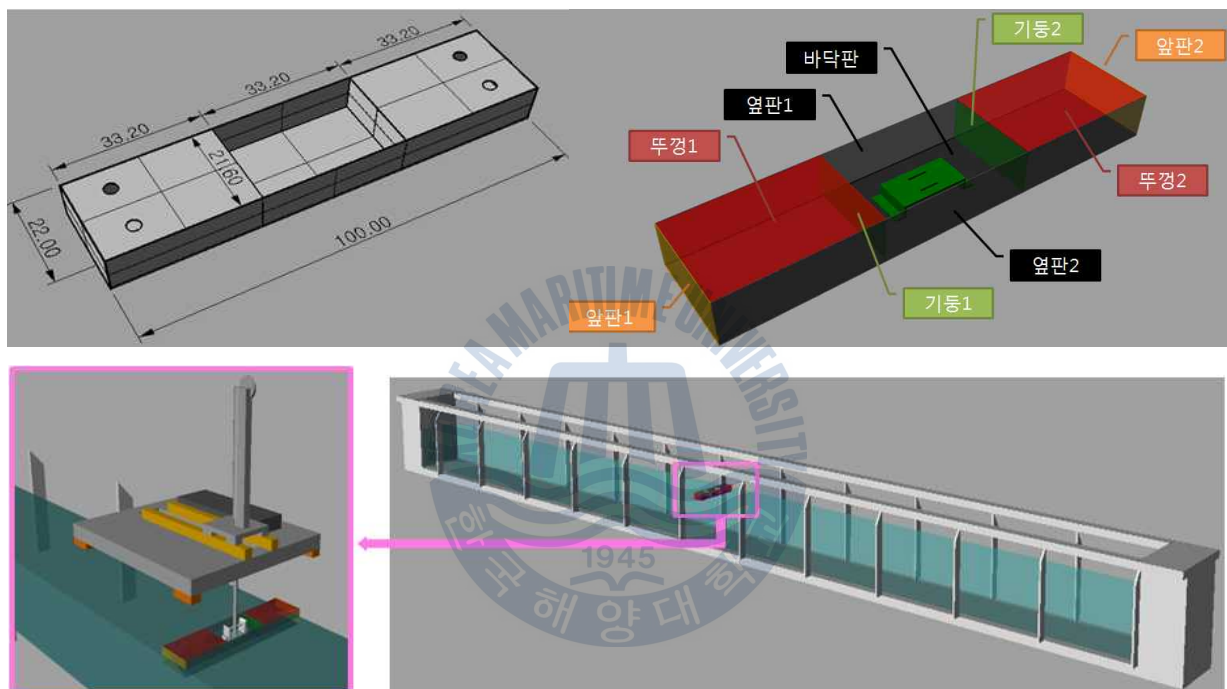


Fig. 26 Appearance of the barge shaped model designed by CAD.

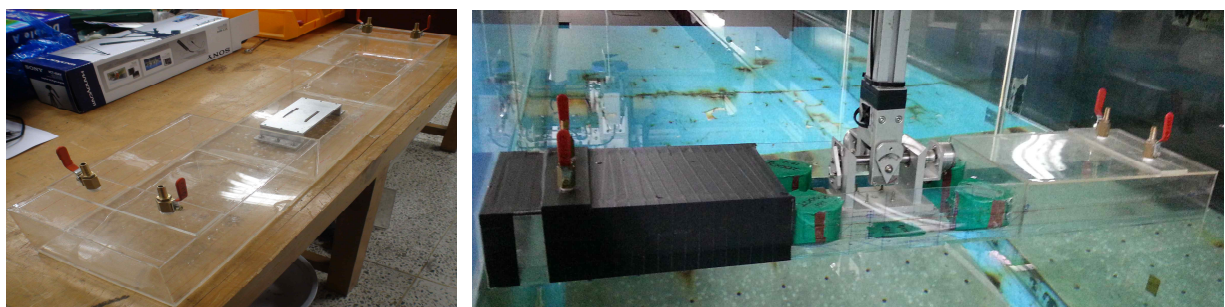


Fig. 27 The actual shape of the created model.

3.1.3 실험 제원

본 실험에 사용된 재원을 Table 4에 나타내었으며, 각각의 상세한 이미지들은 Fig. 28~Fig. 32에 나타내었다. 실험에 사용된 모든 장비는 동기화를 통하여 동시에 제어가 가능하도록 장치를 구현하고 실험을 수행하였으며, 이를 통해 실험의 재현성을 확보하였다.

Table 4 Specifications used in the experiment.

equipment	detailed conditions of the equipment
servo type wave height meter : main body (SH-301) (Fig.28(a))	-channel number : 1 channel -output voltage: $\pm 3(\pm 5V \text{ Max})$ -calibration voltage : 0.50%
servo type wave height meter : detector(SHT3-30) (Fig.28(b))	-maximum measuring wave height : 300mm($\pm 150\text{mm}$)
2-D wave tank(Fig.29)	-25m(L) $\times$ 1m(B) $\times$ 1.1(D), -water depth : 0.8m -range of wave make(0.07m~0.22m)
wave maker(Fig.29)	-piston type
motion instrumentations of structure motion in the wave tank(Fig.30)	-roll($\pm 45^\circ$) -pitch($\pm 45^\circ$) -heave($\pm 100\text{mm}$) -sway($\pm 100\text{mm}$)
diode-pumped thin-disk Laser (Fig.31)	-laser head layout : $\lambda=532\text{nm}$ (green) -output power : 8w -beam diameter < 2mm -air cooling
CCD-camera (motion analyzer motionXtra N-5) (Fig.32(a))	-sensor : CMOS sensor, gray -pixel size : $7.7\mu\text{m}$ (square format) -resolution : 2352*1728 pixels -bit Depth : 8bits -shooting speed : 100Hz
Nikon AF 60mm 1:2.8D (Fig.32(b))	f 2.8
vestosint 2157(polyamid 12)	$57\mu\text{m}$, $1.02\text{g}/\text{cm}^3$

Fig. 28는 본 실험의 파고를 측정 할 때 사용된 KENEK의 서보식 파고계이다. 서보모터(servo motor)에 의해 침 전극 끝부분이 수위 변화에 따라 상,하로 움직이게 되고, 침 전극의 위치는 서보모터와 기계적으로 연동된 포텐셜 메터(potential meter)에 의해 위치 출력(파고출력)으로서 나타난다.

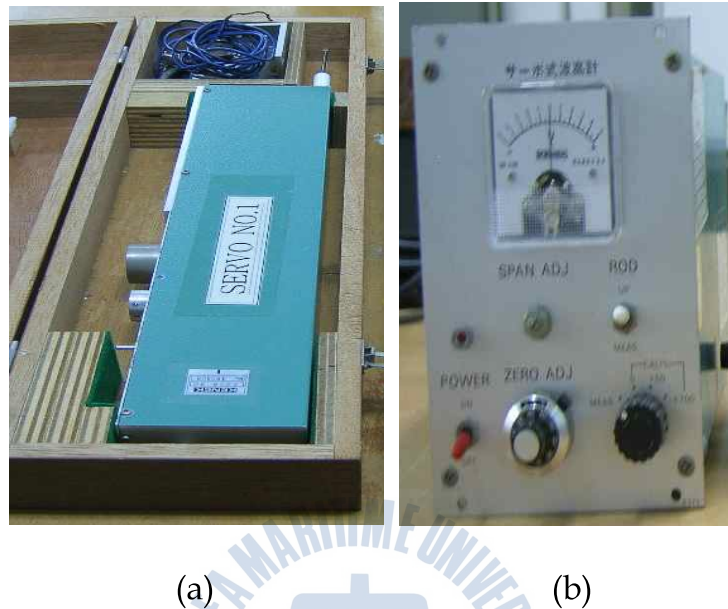


Fig. 28 Servo type wave height meter : (a) detector, (b) main body.

Fig. 29은 본 실험에서 사용된 25m×1.0m×1.1m(L×B×D)의 2차원 조파수조로 조파기(wave maker)는 피스톤형식이며, 파생성이 가능한 파고는 0.01m~0.24m이고, 주기는 0.5sec~2.0sec이다. 또한 다종의 선형파 및 ISSC, ITTC, JONSWAP 등을 적용한 불규칙파형 생성이 가능하다. 본 논문에서는 수심(water depth)을 0.8m로 두고 실험을 수행하였다.

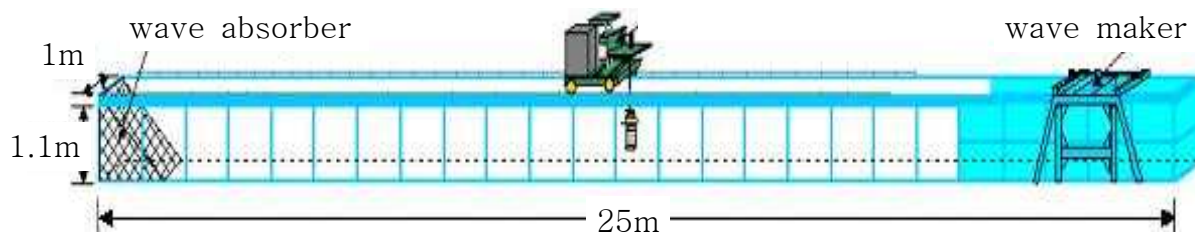


Fig. 29 Schematic of 2-D wave tank.

Fig. 30는 2차원조파수조에서 다양한 해양 구조물 모델시험의 파랑 중 거동측정실험용 운동 계측장비로 heave($\pm 100\text{mm}$), sway($\pm 100\text{mm}$), roll($\pm 45^\circ$), pitch($\pm 45^\circ$)에 대하여 측정이 가능하다. 본 논문에서는 바아지 형상 모델의 횡동요(roll)와 상하동요(heave)를 측정하는데 이용하였다.

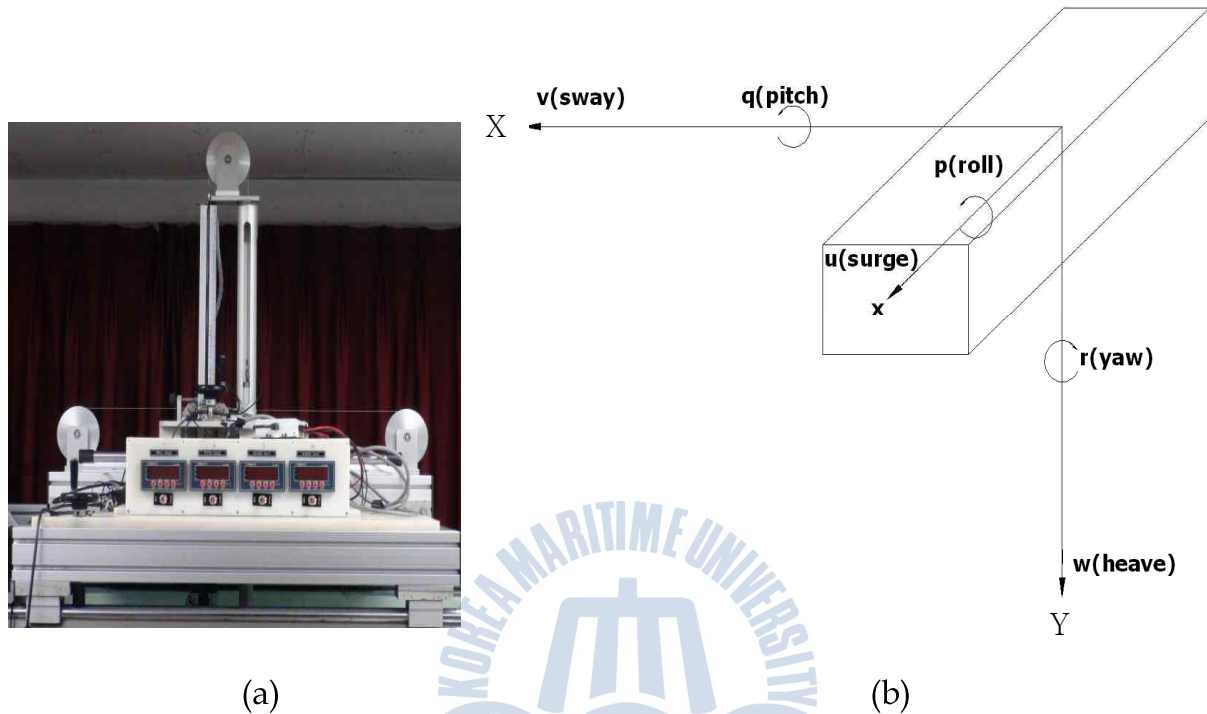


Fig. 30 Motion instrumentations of the structure in the wave tank : (a) 4-D motion measuring equipment, (b) coordinate system of the equipment.

Fig. 31은 PIV실험에서 광원으로 사용된 다이오드 레이저와 편광시트렌즈를 나타내고 있다. 광원으로 사용된 다이오드 레이저는 연속적으로 레이저빔을 생성하는 레이저이며, 파장(λ)은 532nm 으로 초록색의 레이저빔을 생성한다. 다이오드에서 집적하여 레이저를 생성하는 원리로 레이저빔의 밝기를 0~100% (8W) 까지 조절하여 사용할 수 있다. 다이오드레이저로부터 생성되는 레이저빔은 직진성과 원형을 이루고 있다. PIV실험을 하기위해서 편광시트로 생성이 되어야 함으로 이를 변환하기위해서 편광시트렌즈를 제작하여 실험을 수행하였다. 다이오드레이저와 편광시트렌즈의 셋팅을 위해서 옵티케이بل에 장착하여 레이저시트를 생성하여 실험하였다.

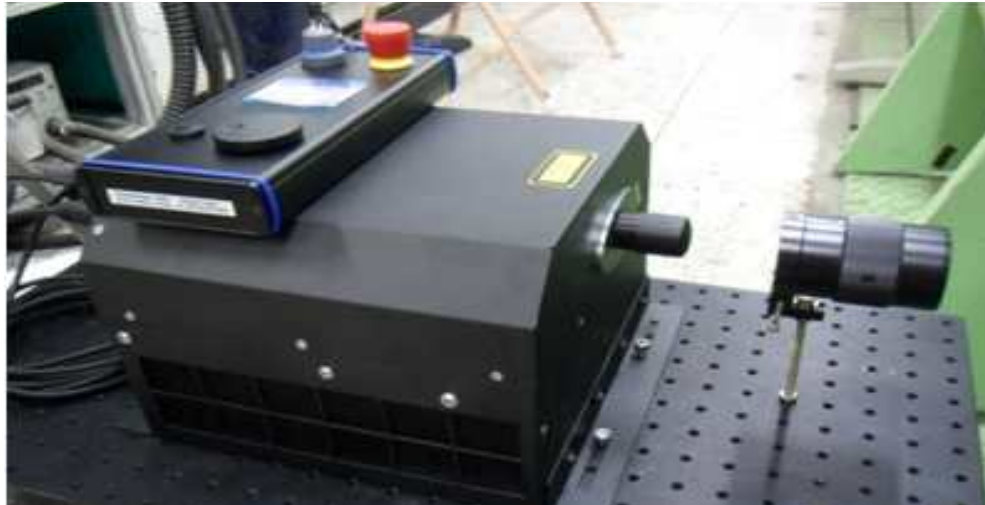


Fig. 31 Setting state of the diode laser and laser sheet lens.

Fig. 32는 PIV실험에서 사용된 고속카메라와 렌즈를 나타내고 있다. 고속카메라는 CMOS sensor(2351*1728)를 탑재하고 있으며, 흑백으로 촬영되고, 최대 초당 39000장 촬영이 가능하다. 또한 실험에 사용된 Nikon AF60mm 렌즈는 마이크로 촬영이 가능한 단렌즈로써, f2.8로 밝은 편에 속하는 렌즈이다. 본 논문에서는 고속카메라의 frame rate는 100Hz(dt=0.01sec)로 실험을 수행하였으며, 촬영된 이미지의 왜곡을 최소화하기 위하여 60mm 표준렌즈를 장착하여 촬영하였다.



(a)



(b)

Fig. 32 Equipment used in the hight speed shooting : (a) high speed camera (CCD camera), (b) Nikon AF60mm lenses.

3.1.4 실험 조건

Fig. 33은 2차원 조파수조에서 만들어진 파를 파고계로 측정한 값을 나타내고 있다. 조파기(wave maker)로 만들어진 파가 가속구간과 과도구간을 거쳐 회색으로 색칠된 준정상 상태에 이른 이후의 안정화된 파를 입사파로 측정하였으며, 상당히 안정화된 정도 높은 파가 생성되는 것을 확인 할 수 있다.

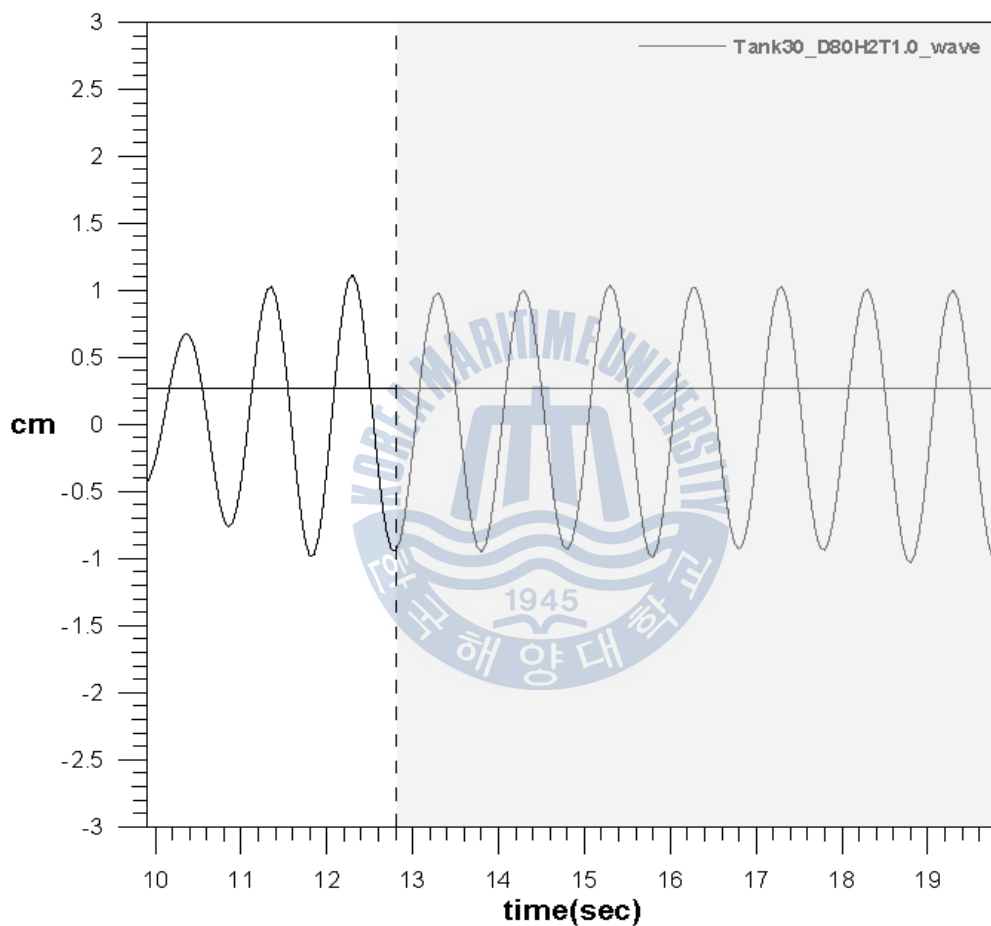


Fig. 33 Samples of the incident wave measured using by wave detector in the 2-D wave tank.

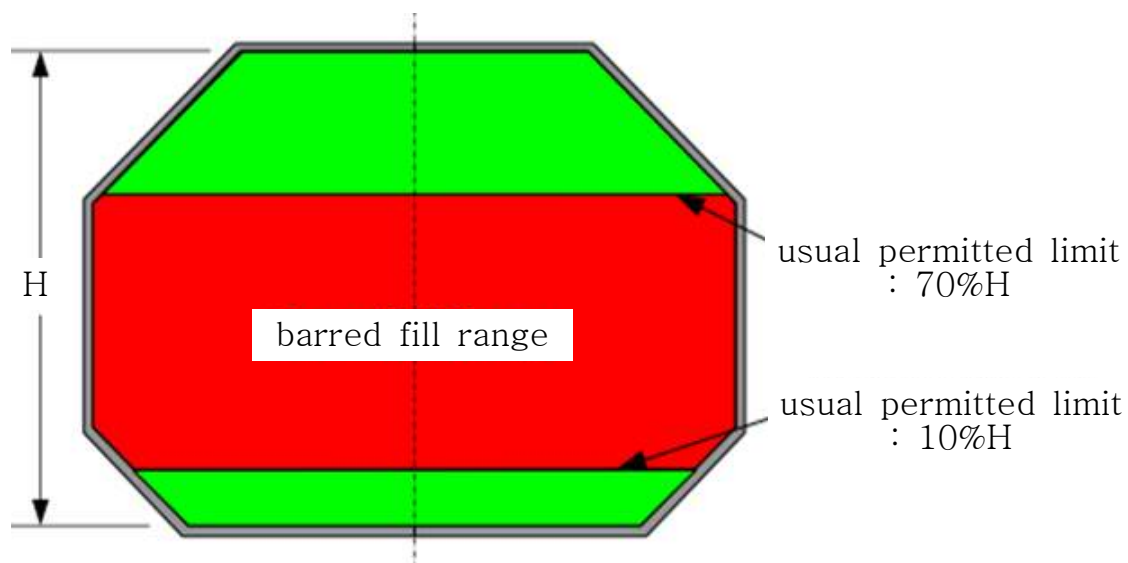
앞선 절에서 여러 선급들에서 슬로싱에 대한 연구를 많이 진행하고 있다는 것을 언급했었다. 주로 LNG 멤브레인 타입 탱크의 표준 유체적재 정도와 슬로싱에 대한 연구를 위한 부분 적재 정도에 대한 연구를 진행하고 있다.

우선 프랑스선급(BV)에서는 표준 유체적재 정도(standard filling levels)를 탱크 높이의 70%~98%, 0%~10%로 정의하고 있으며, 슬로싱에 대한 연구를 위한 부분 적재 정도를 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 60%로 나누어 연구하고 있다.(BV, 2011)

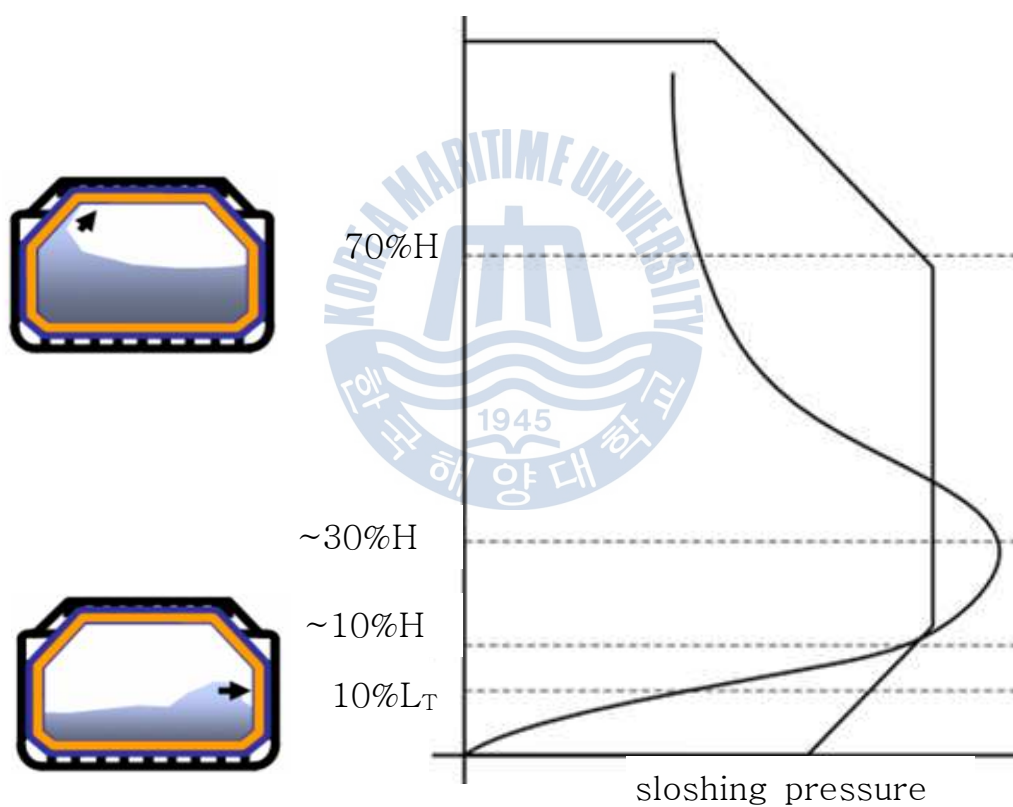
영국선급(LR)은 Fig. 34에 나타내었듯이 유체의 고적재정도(hight fill height)를 70%, 80%, 95%로 나누고, 저적재정도(low fill height)를 10%로 나누어 연구하고 있다. 또한 유체적재 정도에 따른 슬로싱 연구를 위해 15%, 20%, 30%, 50%의 적재율에 따른 연구도 진행하고 있다. 멤브레인 타입 탱크의 슬로싱은 주로 탱크내 유체적재율이 10%~30% 사이구간에서 많이 일어나며, 30% 일 때 가장 크게 일어난다.(LR, 2009)

ABS, DNV, GTT 등 다른 선급들에서도 비슷한 연구들이 진행되고 있으며, LNG 멤브레인 타입 탱크의 내부 유체적재 정도의 분류(%) 구간도 유사하다.

따라서 본 논문에서는 유체적재율이 10%, 30%인 경우를 실험 케이스에 포함시켰으며, 선급의 탱크내부 유체적재율의 분류를 반영하여 실험 케이스를 나누었다.



(a)



(b)

Fig. 34 Sloshing phenomenon of the membrane-type tank (LR, 2009) : (a) definition of the fluid filling ratio of the inside tank, (b) sloshing pressure due to the fluid filling ratio.

Table 5은 실험모형의 탱크내부 유체적재율을 나타내고 있다. 선급에서 표현하는 low fill heights(10%), high fill heights(80%), intermediate fill heights(30%, 50%)로 실험케이스를 나누었으며, 탱크내부에 유체가 없는 강체(0%)의 케이스를 추가하였다. 이는 탱크내부 유체의 적재 유·무에 따른 비교를 하기위해서이다. 또한 실험모형의 홀수는 고정시켰으며, 탱크내부 유체적재 후 고정홀수와 차이만큼 추(weight)를 추가하여 총무게를 보정하였다(Fig. 35).

Table 5 Dimensions of the sloshing tank and the fluid filling ratio.

sloshing tank(L _M)							
L (length)	B (breadth)	D (depth)	filling depth 0%	filling depth 10%	filling depth 30%	filling depth 50%	filling depth 80%
0.33m	0.216m	0.097m	0m	0.0097m	0.0291m	0.0485m	0.0776m
*draft of the experimental model : 0.066m							

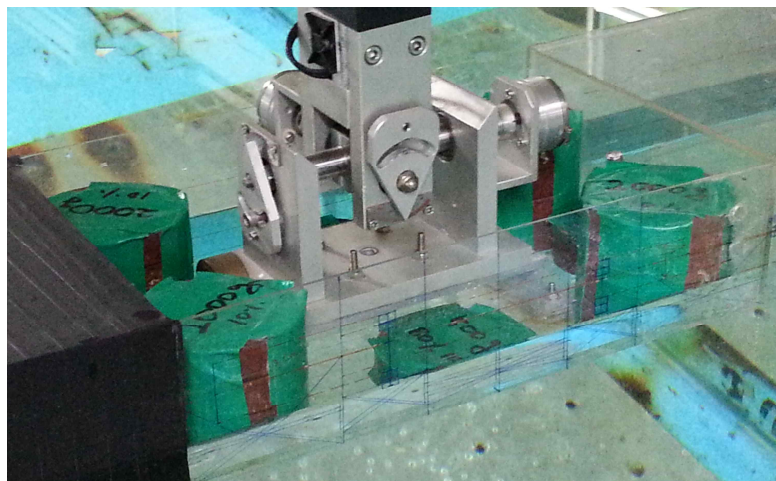


Fig. 35 Photo by correcting the weight in experimental models.

Fig. 36은 실험모형의 탱크내부 유체 적재율에 따른 횡동요의 고유주기를 측정한 결과이다. 탱크내부 유체 적재율이 0%인 강체의 경우에는 횡동요의 고유주기가 약 1.086sec이다. 그러나 강체를 제외한 다른 경우에는 구조물의 횡동요와 탱크내부 슬로싱 운동의 위상차로 인해 운동의 양상이 복잡해져서 고유주기의 명확한 판별이 어렵다. 단지, 각각의 유체 적재율 변화에 따른 횡동요의 양상만을 확인할 수 있다.



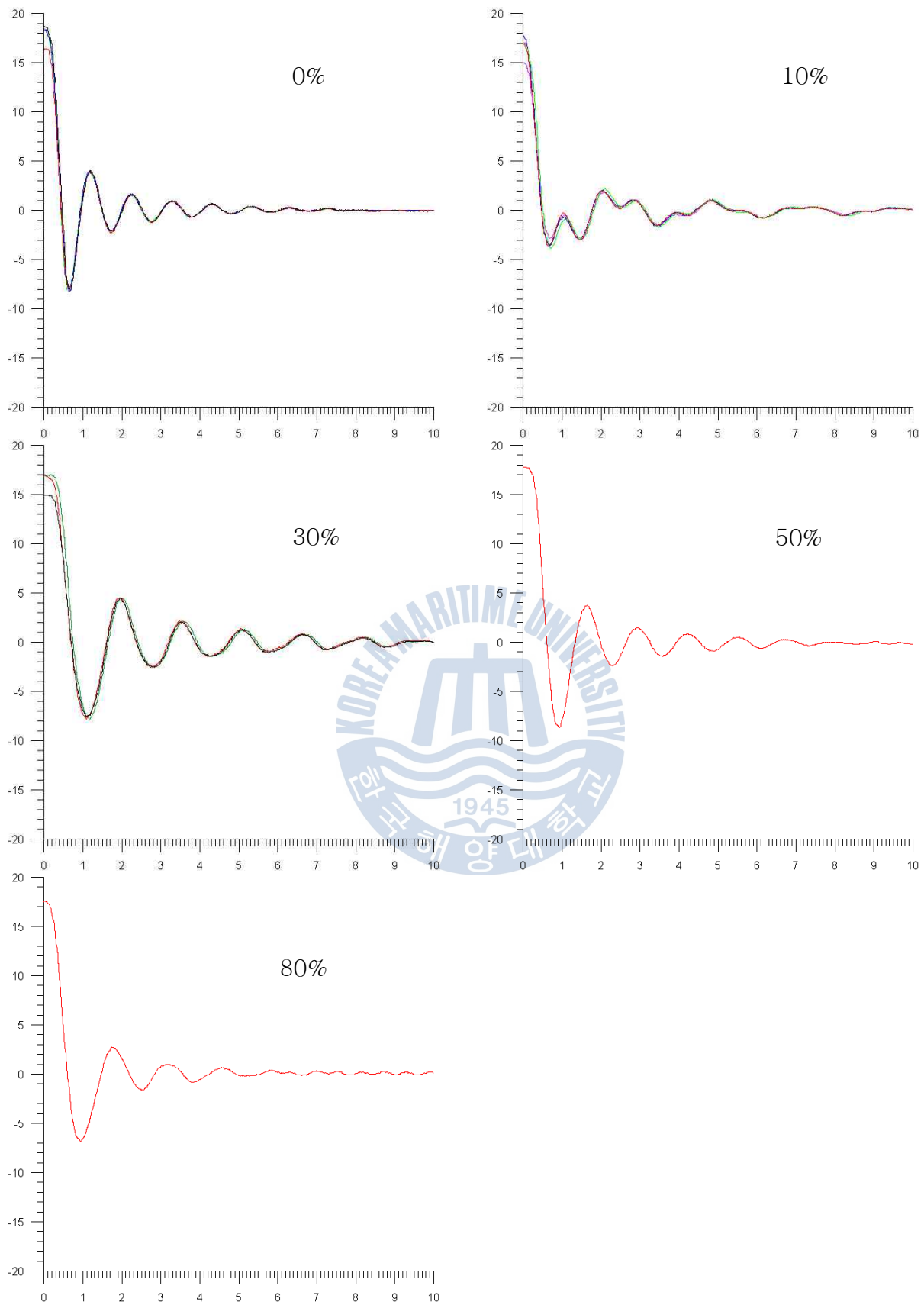


Fig. 36 Rolling according to the fluid loading ratio in the sloshing tank.

Table 5는 본 논문에서 수행된 바가지 형상 모델의 실험 케이스를 나타내고 있다. 2차원 조파수조에서 수심 0.8m, 입사파고 0.02m일 때 실험모형의 횡동요와 상하동요를 제외한 나머지 운동은 구속한 상태에서 실험을 수행하였다. 실험모형의 운동(roll, heave)은 탱크내부 유체적재율에 따라(0%~80%) 입사파 주기를 변화시키면서(0.7sec~1.8sec) 계측하였다. PIV 실험은 탱크내부 유체적재율이 50%일 때, 실험모형 탱크내부 유체와 실험모형의 주변유체를 촬영하였으며, 이때 입사파 주기는 0.7sec~1.2sec까지 변화를 주어 실험하였다. PIV로 실험한 모든 결과들을 실기에는 그 양이 너무 많아 그중에서 실험의 분석결과 탱크내부의 유동변화가 가장 크게 나타나는 입사파주기 0.8sec에서의 결과를 본 논문에서 실게 되었다.

Table 5 Experiment case of the barge shaped model in the 2-D wave tank.

*water depth : 0.8m, wave height : 0.02m						
①roll measurements ②heave measurements	tank filling depth (%)	0 %	10 %	30 %	50 %	80 %
	incident wave period (sec)	0.7, 1.1, 1.5	0.8, 1.2, 1.6	0.9, 1.3, 1.7	1.0, 1.4, 1.8	
PIV experiments ①fluids inside of the sloshing tank ②fluid surrounding of the model.	tank filling depth (%)	50%				
	incident wave period (sec)	0.7, 1.1	0.8, 1.2	0.9	1.0	

3.2 실험모형의 횡동요와 상하동요

Fig. 37는 탱크내부 유체적재율 변화에 따라(0%~80%) 실험모형의 횡동요의 변화가 어떻게 일어나는가를 나타내고 있다. Fig. 37(a)는 실험한 결과를 평균한 값이며, (b)는 실험한 결과를 평균한 값을 입사파의 최대 파경사각 값으로 무차원한 값이다. 가로축은 입사파 주기를 나타내고, 세로축은 횡동요를 각도(degree)로 나타낸 것이다. 또한 빨간색 선으로 슬로싱 탱크내 유체적재정도에 따른 슬로싱의 고유주기를 표시하였다.

강체(filling depth 0%)인 경우에는 실험모형의 횡동요 주기가 약 1.086sec이므로(Fig. 36), Fig. 37(a)에서 나타나듯이 1.1sec에서 횡동요 값이 최대이다. 그러나 입사파를 최대파경사각으로 무차원화 했을 때는 1.2sec에서 횡동요 값이 최대이다(Fig. 37(b)). 이는 입사파고의 크기가 같더라도, 최대파경사각($\alpha_0 = \frac{4\pi^2\zeta_0}{gT^2}$)으로 무차원화를 하게 되면 주기가 커질수록 값이 커지기 때문이다.

Fig. 34에서 나타나듯이 유체적재율이 10%~30%사이에서 탱크내부의 압력값이 최대로 변동하며, 특히 유체적재율이 30%에서 압력 값이 최대인 것을 알 수 있다. 이는 슬로싱탱크 내부에서의 유체의 요동이 크게 일어난다는 의미이다.

Fig. 37(b)의 결과에서는 유체적재율 10%에서는 횡동요 값이 강체일 때보다 전반적으로 적게 나타난다. 유체적재율 30% 일 때는 입사파주기 1.3sec 이하에서는 횡동요 값이 강체일 때보다 작으나, 입사파주기 1.4sec 이상에서는 강체보다 횡동요 값이 현저히 증가한다. 특히 입사파주기 0.8sec~1.0sec에서는 유체적재율 10%일 때 보다 횡동요 값이 훨씬 적다. 유체적재율 50% 일 때는 입사파주기 1.1sec 이하에서는 강체보다 횡동요 값이 작으나, 입사파주기 1.2sec 이상에서는 강체보다 횡동요 값이 증가한다.

Fig. 37(a)에서 유체적재율에 따라 계산된 탱크내 슬로싱의 고유주기를 살펴보면, 유체적재율 10%와 30%에서 탱크내 슬로싱의 고유주기에서 실험모형의 횡동요 값이 최소로 나타난다. 이는 슬로싱의 고유주기와 실험모형의 횡동요

운동주기의 위상차에 따른 결과라 할 수 있다. 이는 부록A.1-8와 부록A.2-2를 보면 알 수 있는데, 입사파에 의한 실험모형의 운동을 방해할 만큼 슬로싱탱크 내부에서 유체의 슬로싱 현상이 극렬하게 일어나고 있다.

부록A.1~부록A.4는 실험모형의 슬로싱탱크 내부의 유체 적재율을 변화시켰을 때(10%, 30%, 50%, 80%) 입사파 주기의 변화에 따른(0.7sec~1.8sec) 실험모형의 운동과 내부유체의 움직임을 촬영한 영상이다.

부록A.1는 실험모형의 슬로싱탱크 내부의 유체 적재율이 10%일 때의 영상이다. 부록A.1-4를 보면, 슬로싱탱크 내부의 유동이 갑자기 변화하기 시작해 실험모형의 횡동요 운동을 방해하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 입사파의 주기 1.0sec(부록A.1-4) 이상부터 계속 일어난다. 이는 Fig. 37에서 유체적재율 10% 일 때, 실험모형의 횡동요 운동의 양상을 자세히 설명할 수 있는 장면이라 하겠다.

부록A.2는 실험모형의 슬로싱탱크 내부의 유체적재율이 30% 일 때의 촬영영상으로 입사파주기가 0.8sec(부록A.2-2)~1.0sec(부록A.2-4)에서 특히 탱크내부의 유동의 움직임을 격렬하게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 Fig. 37에서 유체적재율 10% 일 때 보다 실험모형의 횡동요 값이 훨씬 작게 나타나는 원인이 된다. 입사파의 주기 1.1sec(부록A.2-5)~1.4sec(부록A.2-8)에서는 여전히 탱크 내부의 슬로싱이 발달해있는 상태이며, 입사파 주기 1.5sec(부록A.2-9) 이후부터 점차 슬로싱이 안정화되기 시작한다.

부록A.3은 실험모형의 슬로싱탱크 내부의 유체적재율이 50% 일 때의 촬영영상으로 입사파의 주기가 0.7sec(부록A.3-1)~0.9sec(부록A.3-3)에서 슬로싱탱크 내부유체의 슬로싱 운동으로 인해서 강체보다 횡동요 값을 줄이게 된다. 입사파의 주기 1.1sec(부록A.3-5)부터 탱크내 슬로싱이 실험모형의 횡동요에 동조하기 시작한다. 주기 1.4sec(부록A.3-8) 이상부터는 탱크내부의 유체가 무게 추와 같은 역할을 해서 실험모형의 횡동요를 증가시킨다.

부록A.4는 실험모형의 슬로싱탱크 내부의 유체적재율이 80% 일 때의 촬영영상으로 입사파의 주기 1.2sec(부록A.4-6)에서부터 슬로싱탱크 내부의 유체가 슬로싱을 하다가 탱크 천장에 overlapping 되는 것을 볼 수 있다. 이는 실험모형

의 횡동요에 탱크내부의 유체가 같은 방향으로 크게 동조하고 있음을 의미하며, Fig. 37에서 입사파주기 1.2sec 이상부터 강체보다 유체적재율 80%의 횡동요 값이 크게 나타나는 이유이다.



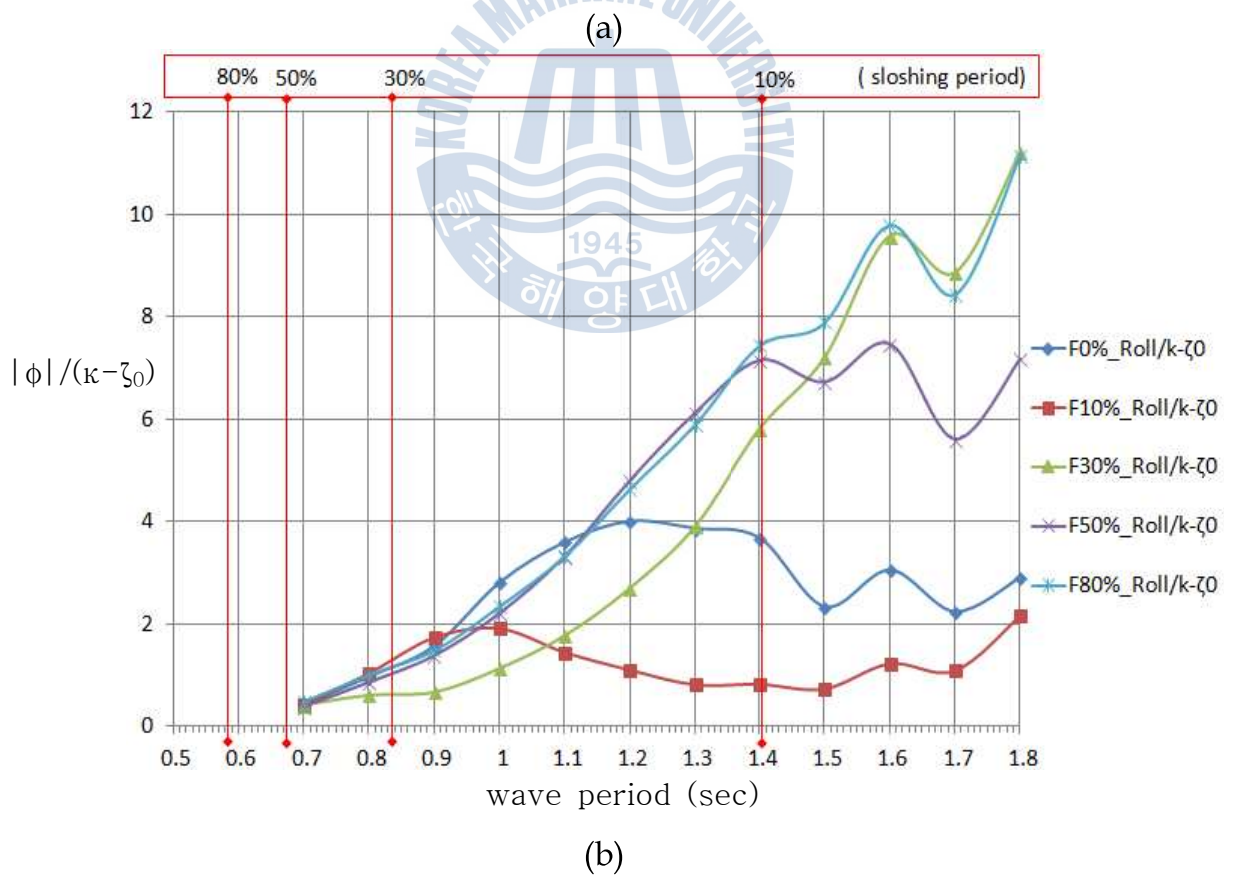
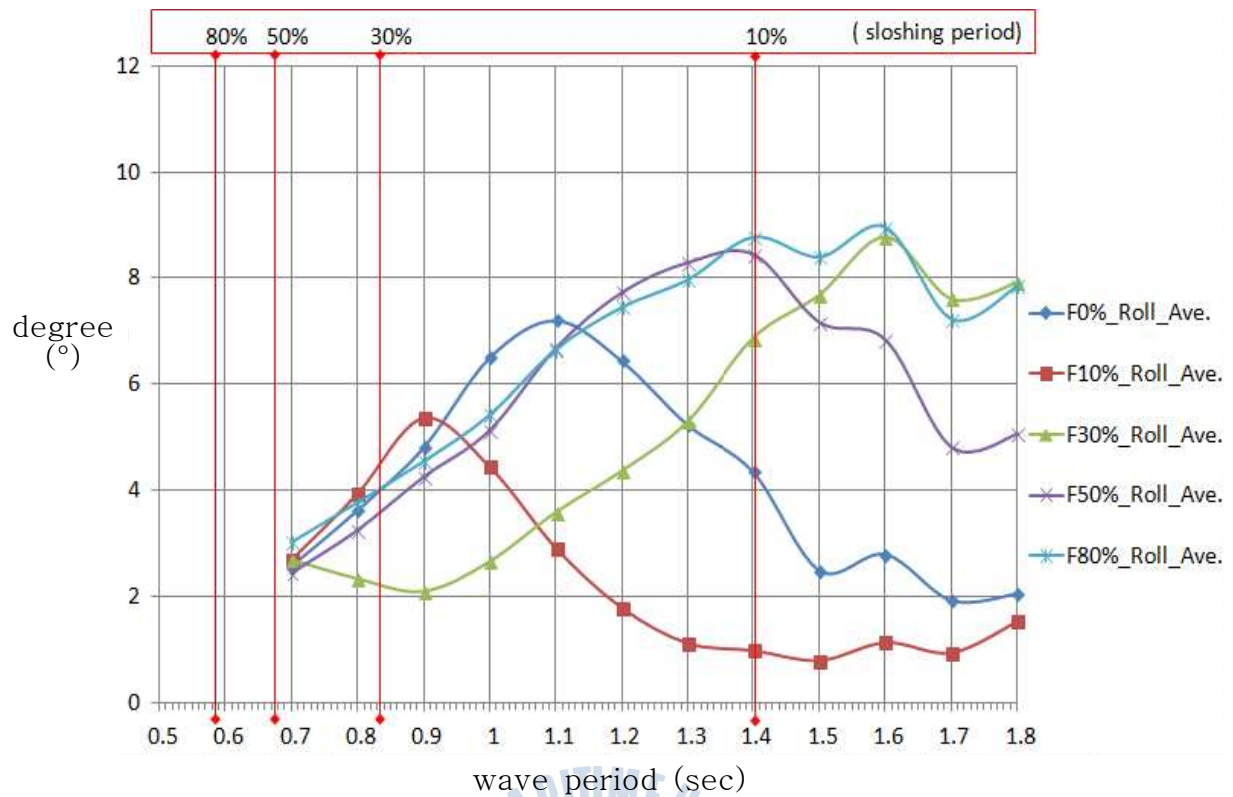


Fig. 37 Roll characteristics of the barge shaped model in accordance with the fluid filling ratio inside the sloshing tank.

Fig. 38는 탱크내부 유체적재율 변화에 따라(0%~80%) 실험모형의 상하동요 운동의 변화가 어떻게 일어나는가를 나타내고 있다. Fig. 38(a)는 실험한 결과를 평균한 값이며, (b)는 실험한 결과를 평균한 값을 입사파고 값으로 무차원한 값이다. 가로축은 입사파 주기를 나타내고, 세로축은 상하동요를 높이(m)로 나타낸 것이다. 강체와 유체적재율 변화에 따른 상하동요의 변동은 거의 없는 편이다. 이는 유체적재율 변화에 따라 현저하게 변화하는 횡동요와 큰 차이를 보인다. 따라서 슬로싱탱크 내부의 유체적재율에 따른 실험모형의 운동은 주로 횡동요에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.



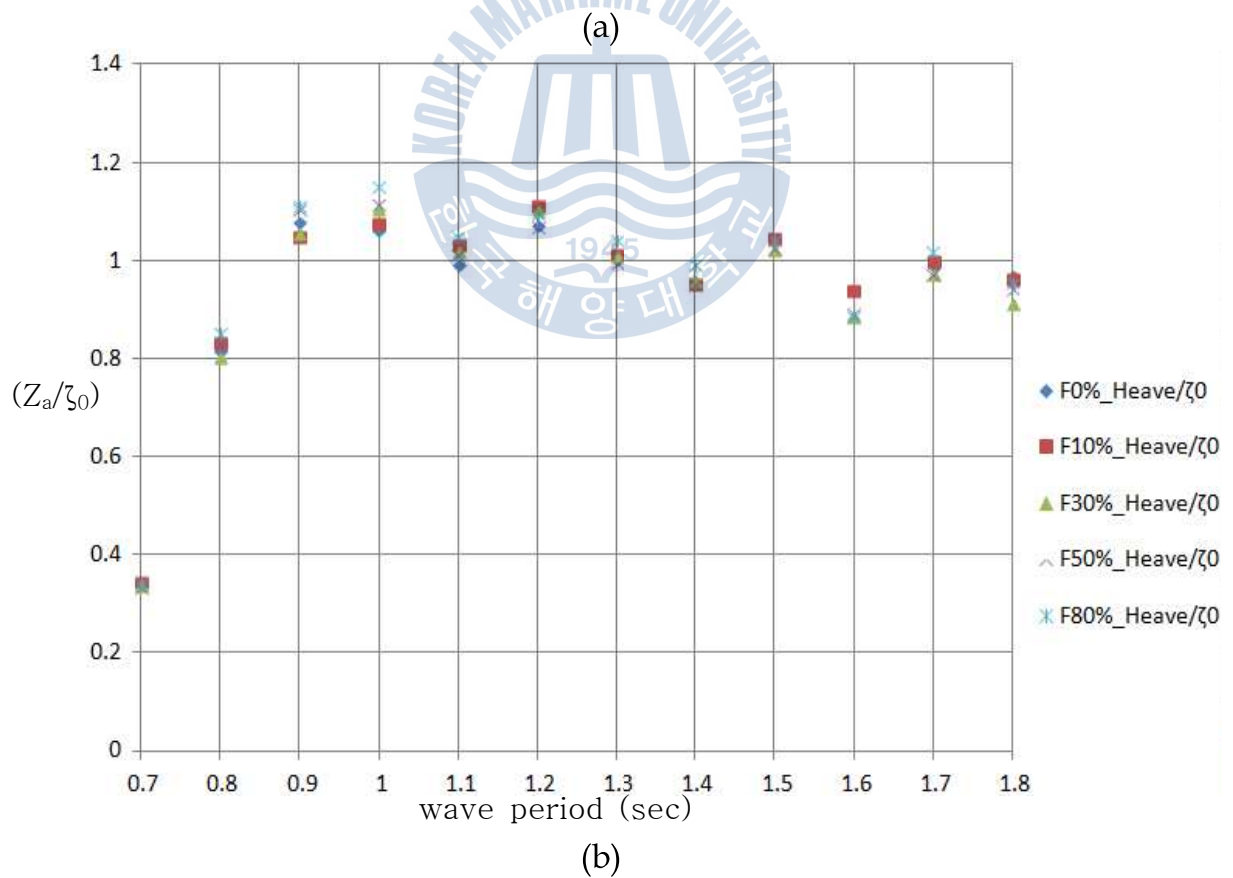
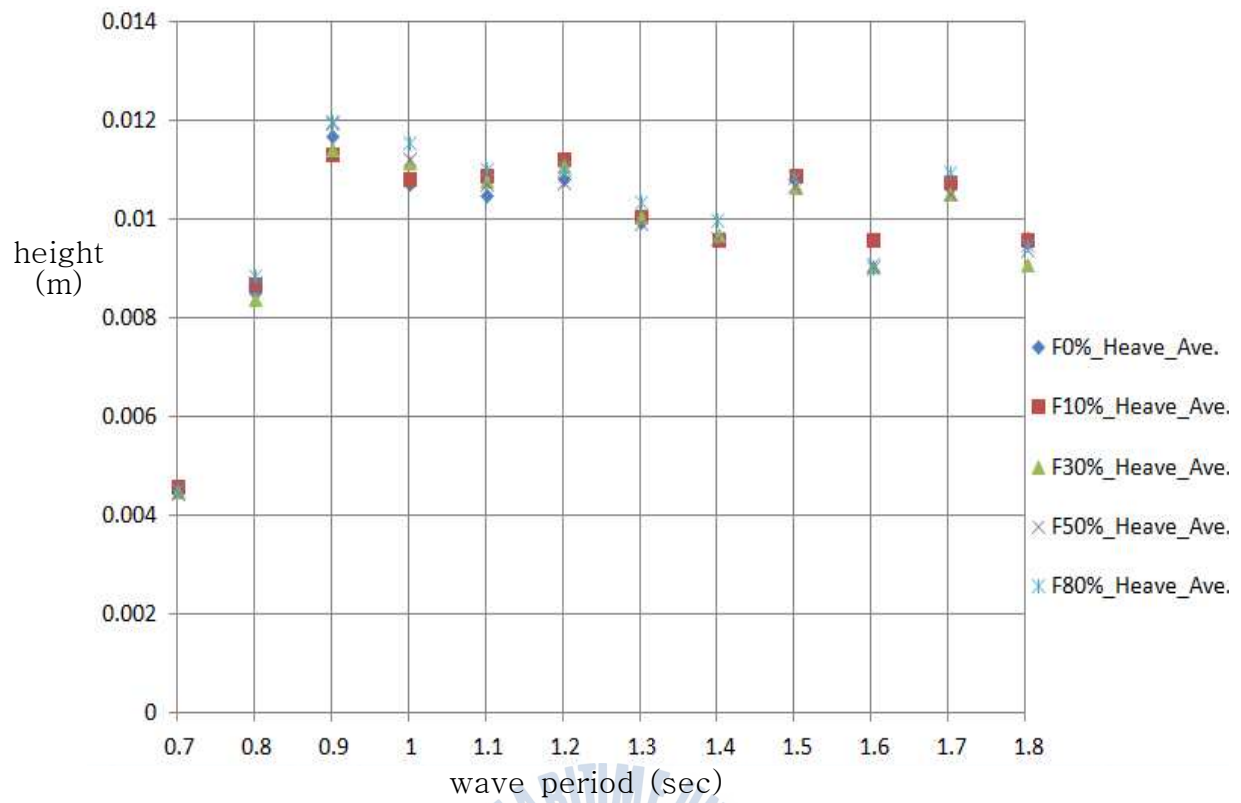


Fig. 38 Heave characteristics of the barge shaped model in accordance with the fluid filling ratio inside the sloshing tank.

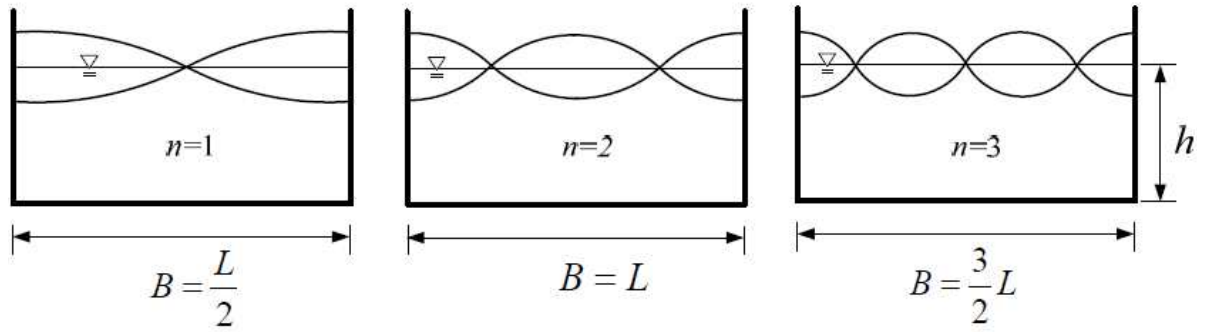


Fig. 39 Transverse natural frequency of sloshing tank (Lee, 2008).

슬로싱의 고유주기의 계산은 Fig. 39에 나타내었듯이 1차모드에 대해 계산하였으며, 식 (14)을 이용하여 계산하였다(Lee, 2008).

$$T_n = \frac{\sqrt{2\pi\left(\frac{2}{n}B\right)}}{\sqrt{g \tanh\left(\frac{2\pi}{\left(\frac{2}{n}B\right)}h\right)}} = \frac{\sqrt{\frac{4\pi B}{n}}}{\sqrt{g \tanh\left(\frac{n\pi h}{B}\right)}} = \frac{2\sqrt{\pi B}}{n\sqrt{g \tanh\left(\frac{n\pi h}{B}\right)}} \quad (14)$$

3.3 실험모형의 탱크내부와 주변유체의 PIV 분석 결과

Fig. 41~Fig. 49는 실험모형의 슬로싱탱크 내부 유체적재율이 50%이고, 입사파주기가 0.8sec일 때 실험모형의 주변유체와 슬로싱탱크 내부의 유체를 PIV기법으로 실험하여 분석한 결과이다. 고속카메라를 이용하여 100Hz로 촬영하였으며, 주기가 0.8sec이면 총 80장이 한주기이다. 분석결과 중 주요하다고 판단한 9장을 선별하여 본 논문에 실게 되었다.

Fig. 40은 Fig. 41~Fig. 49의 ①~⑨까지의 분석위치를 나타내고 있다. ①과⑨는 파정, ③은 내리막 파면, ⑤는 파저, ⑦은 오르막 파면이다. ②와⑥은 슬로싱탱크 내부에서 슬로싱이 좌·우로 가장 많이 움직이는 지점이며, ④와⑧은 슬로싱탱크 내부 유체의 수면의 가운데가 가장 많이 상승하는 지점이다.

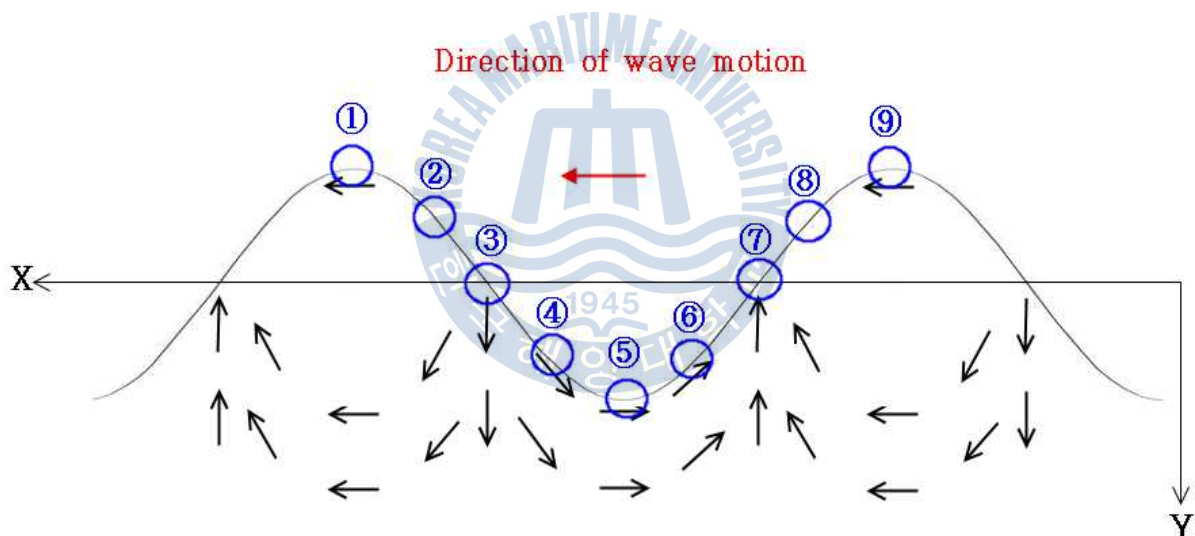


Fig. 40 PIV analysis position.

Fig. 41~Fig. 49에서 전반적으로 특이한 점은 겉보기에는 슬로싱탱크 내부의 유체가 고요해 보이나, 실제로 유체입자들은 내부에서 요동치며 수면에서의 압력값이 상승한다는 점이다. 반대로 슬로싱탱크 내부유체가 좌우로 슬로싱을 크게 할 때에는 유체입자의 속도변화가 크지 않으며, 수면에서의 압력값도 작게 나온다는 점이다.

Fig. 41과 Fig. 45의 순간을 자세히 살펴보면, 슬로싱탱크 내부유체는 겉보기에는 크게 변동성이 없어 보이나 실제 유체입자들의 양상은 정반대이다. Fig. 41은 파정으로 슬로싱탱크 내부에서 유체가 가운데를 중심으로 좌·우로 이동해 가운데는 속도가 작아지고, 슬로싱탱크 내부의 좌·우로 갈수록 속도가 증가한다. 또한 압력값은 속도의 변화가 가장 큰 수면부분에서 압력값이 가장 높게 나왔으며, 슬로싱탱크 내부의 좌·우부분에서의 압력값도 소폭 상승했다. 유체의 가운데 부분의 압력이 가장 작게 나왔다. Fig. 45는 파저로 유체입자의 속도는 슬로싱탱크 내부의 가운데부분의 수면에서 가장 크며, 가운데를 중심으로 좌·우로 유체입자가 이동하며 속도는 점점 감소하였다. 또한 슬로싱탱크 내부의 좌·우 부분의 벽면의 압력값은 소폭 상승하였으며, 바닥면에서의 압력값은 크게 상승하였다. 이는 큰 속도를 가지는 유체입자들이 바닥면과 부딪히면서 속도가 급감하게 되어 압력값이 증가되는 원인이 되었음을 알 수 있다.

반대로 Fig. 42과 Fig. 46에서는 슬로싱탱크 내부 유체가 좌·우 슬로싱을 가장 크게 일으키는 부분이지만, 유체입자의 속도변화를 살펴보면 Fig. 41, Fig. 45와는 정반대의 양상임을 알 수 있다. 슬로싱이 일어나면서 급격히 상승하는 수면부분에서의 유체입자 속도방향은 실제로는 모체가 되는 덩어리지어진 유체와 합쳐 지기위해 수면이 상승하는 우측상방향이 아닌 좌측하방향을 향하는 것을 알 수 있다. 압력값의 분포도 실제로 유체입자의 속도변화가 가장 크게 일어나는 모체가 되는 덩어리지어진 유체의 수면부분에서 가장 크게 나타난다.

이는 슬로싱탱크 내부에서 좌·우 방향으로 수면이 급격히 상승하는 슬로싱 현상이 일어날 때, 실제로는 이미 그 유체입자에서의 속도와 압력값은 뒤에서 뒤따르는 모체가 되는 유체덩어리의 속도와 압력값 보다 현저히 작다는 것을 나타내는 것이라 하겠다. 주로 압력센서를 이용한 탱크내부의 실험에서는 슬로싱 현상으로 내부벽면에 유체가 부딪치는 부분을 실험하는 것을 생각해본다면, 이는 실제로는 모체가 되는 유체덩어리 내부에서의 압력값을 측정하지 못하여 이를 간과하는 것이라 하겠다.

Fig. 43와 Fig. 47는 겉보기에는 유체의 양상이 차이가 없어 보이나 실제 유체입자의 양상은 정반대이다. Fig. 43은 내리막 파면으로 슬로싱탱크 내부 유체가 우측방향으로 기울어진 상태이나, 유체입자의 속도방향은 탱크내부의 한가

운데를 중심으로 유체입자들이 속도를 줄이면서 모이는 현상을 보인다. 그러나 다음 현상인 Fig. 44에서의 슬로싱탱크 가운데 부분에서의 수면의 급격한 상승 현상을 일으키기 위해 Fig. 43의 가운데 수면부분에서의 유체입자의 방향은 위쪽을 향한다. 우측방향으로 유체가 기울어짐으로 인해 슬로싱탱크 내부 우측면에서의 압력값이 상승하고, 좌측바닥면에서의 압력값도 상승하게 된다.

Fig. 47은 오르막 파면으로 슬로싱탱크 내부의 유체가 좌측방향으로 기울어진 상태이나 실제 유체입자의 이동방향은 슬로싱탱크 내부의 가운데를 중심으로 유체입자들이 속도를 증가시키며 모이는 현상이 일어난다. 또한 다음 현상인 Fig. 48의 슬로싱탱크 가운데 부분에서의 수면의 급격한 상승현상을 일으키기 위해 Fig. 47의 가운데 수면부분에서의 유체입자의 방향은 위쪽을 향하며 속도와 압력값이 가장 크게 나타난다.



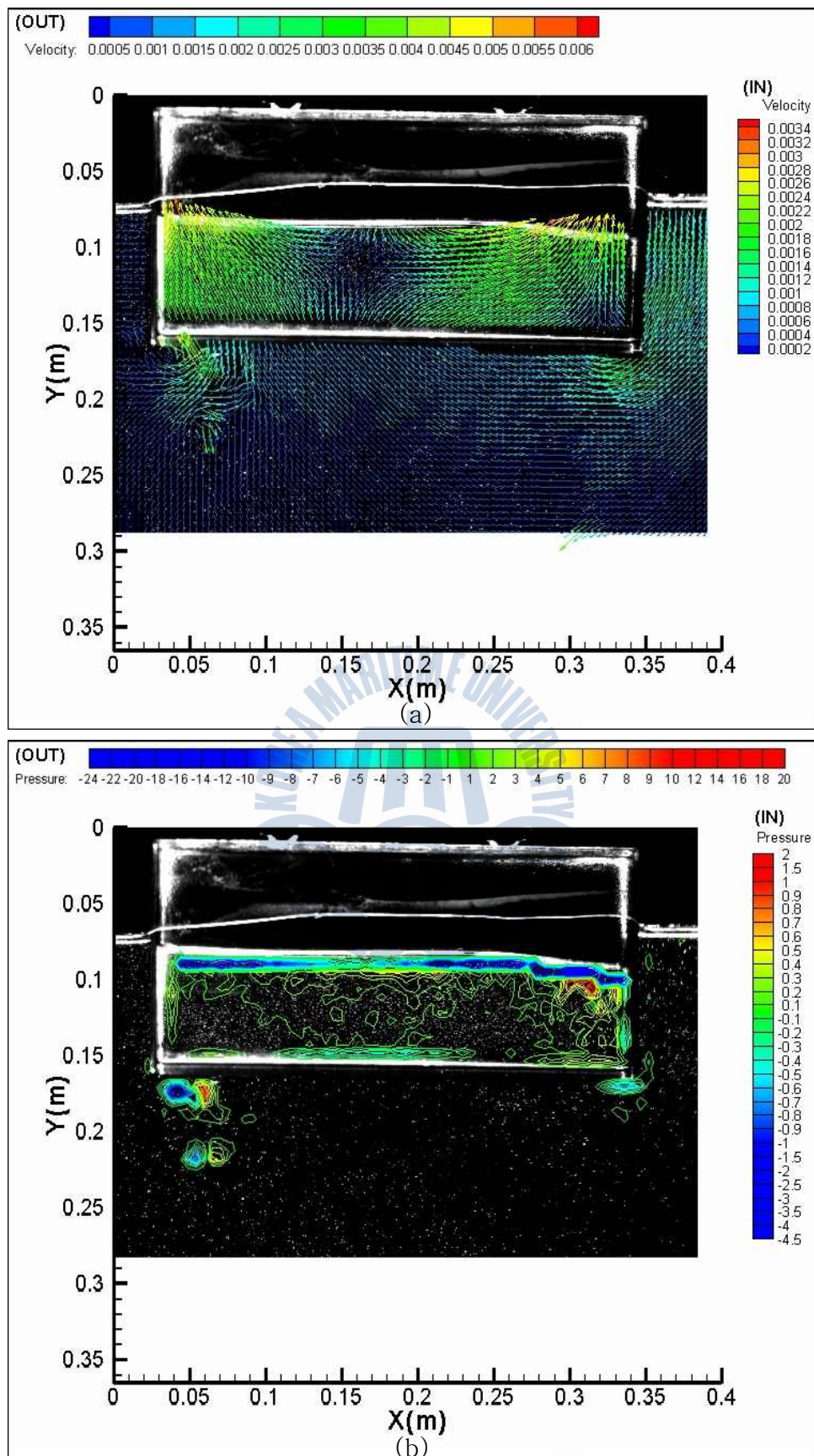


Fig. 41 PIV results in ①(wave crest) : (a) velocity, (b) pressure.

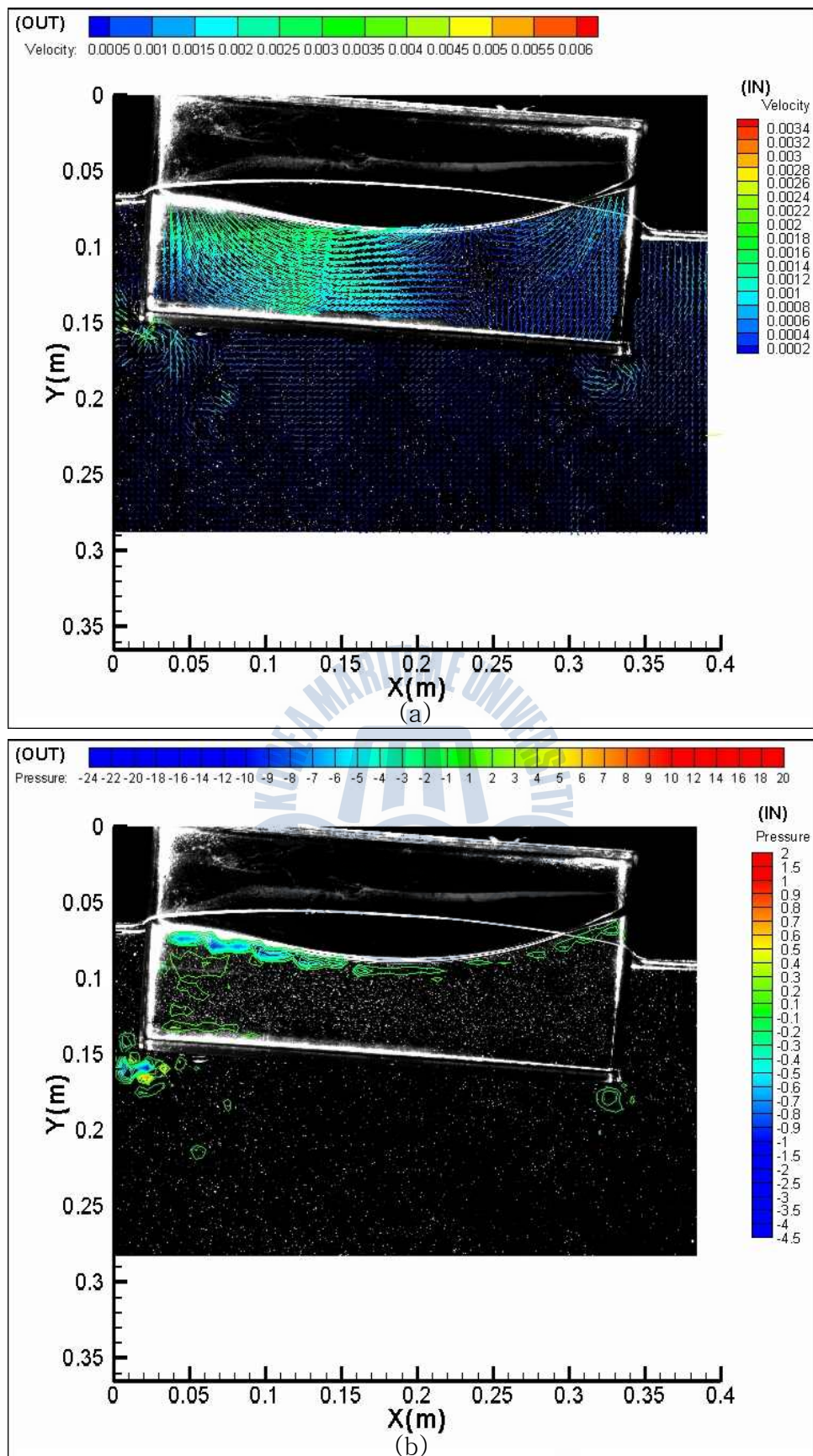


Fig. 42 PIV results in ② : (a) velocity, (b) pressure.

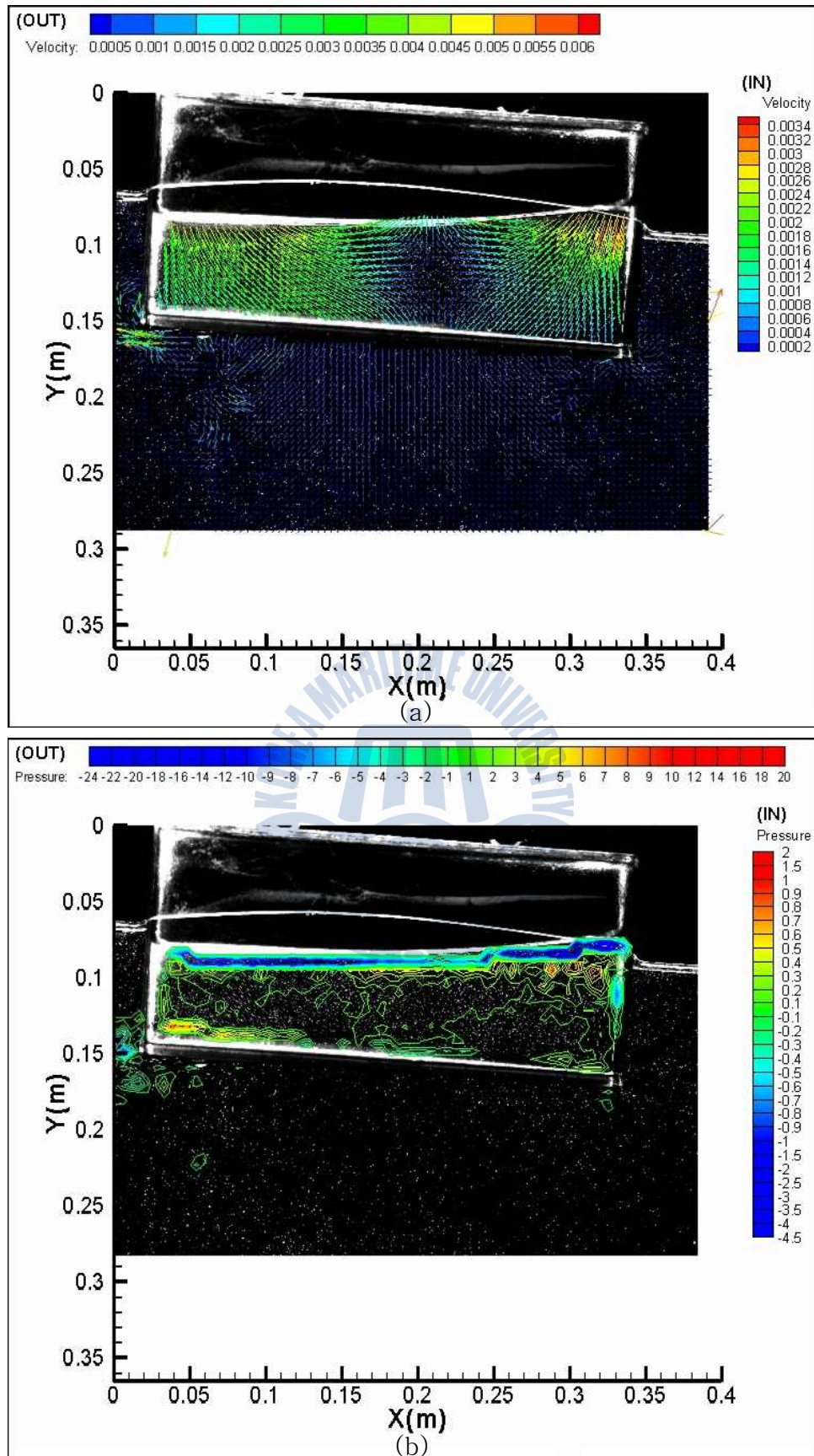


Fig. 43 PIV results in ③(wave descent) : (a) velocity, (b) pressure.

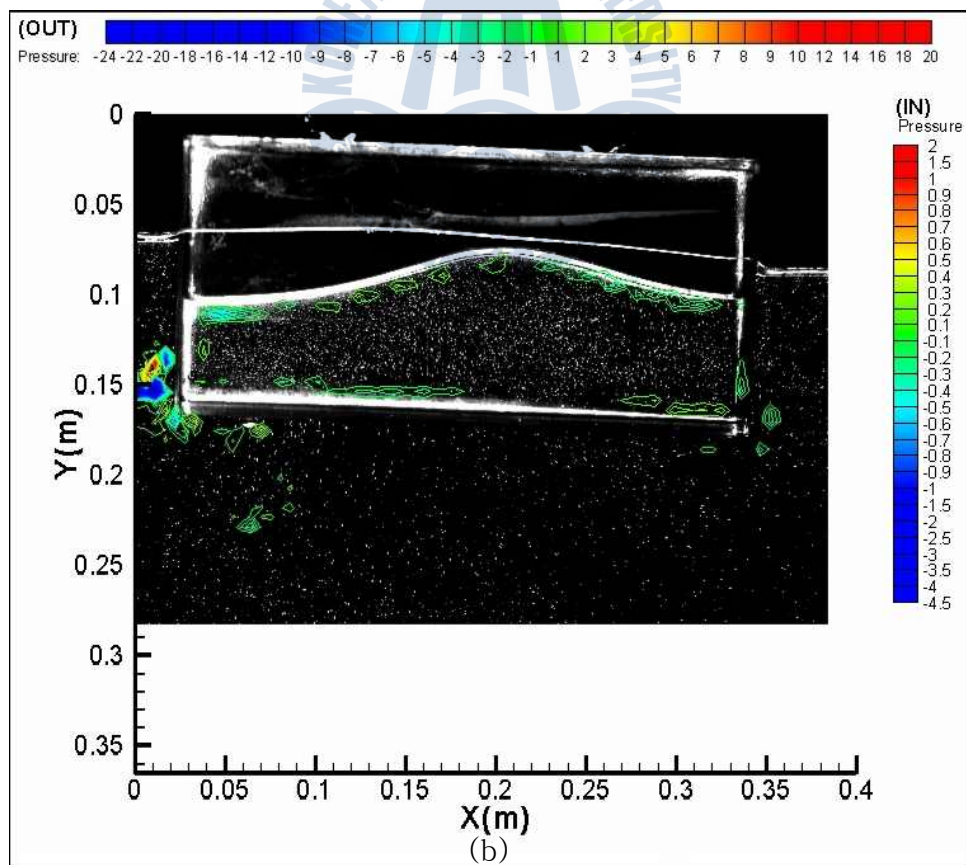
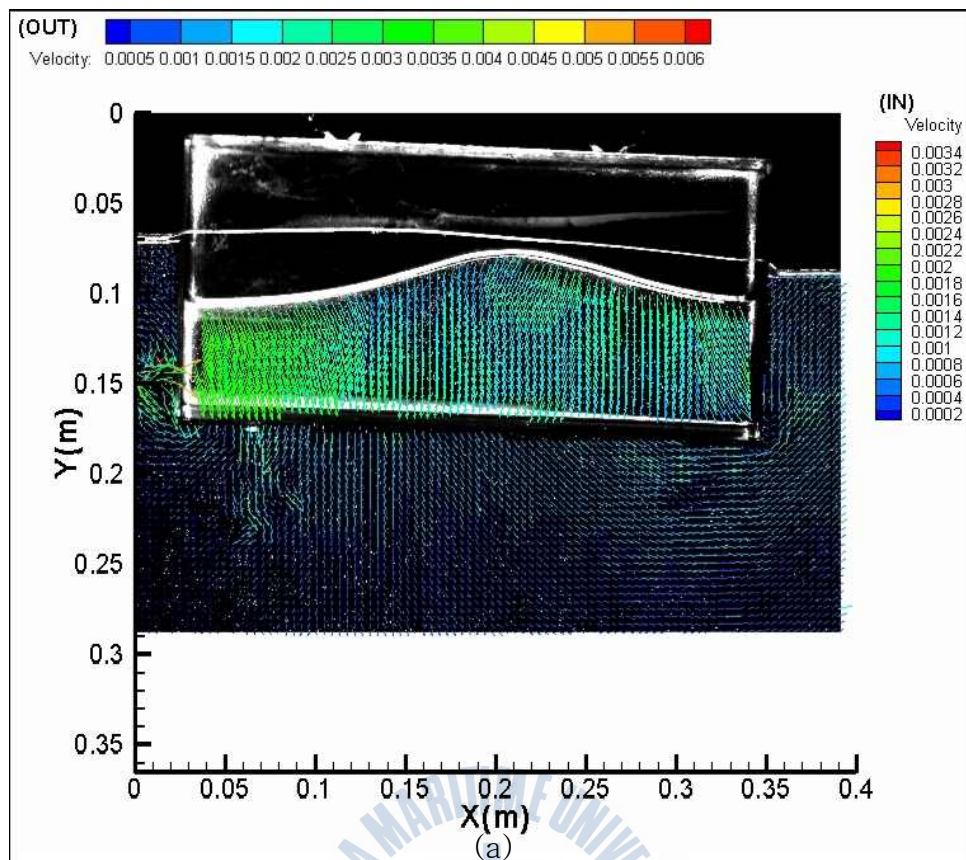


Fig. 44 PIV results in ④ : (a) velocity, (b) pressure.

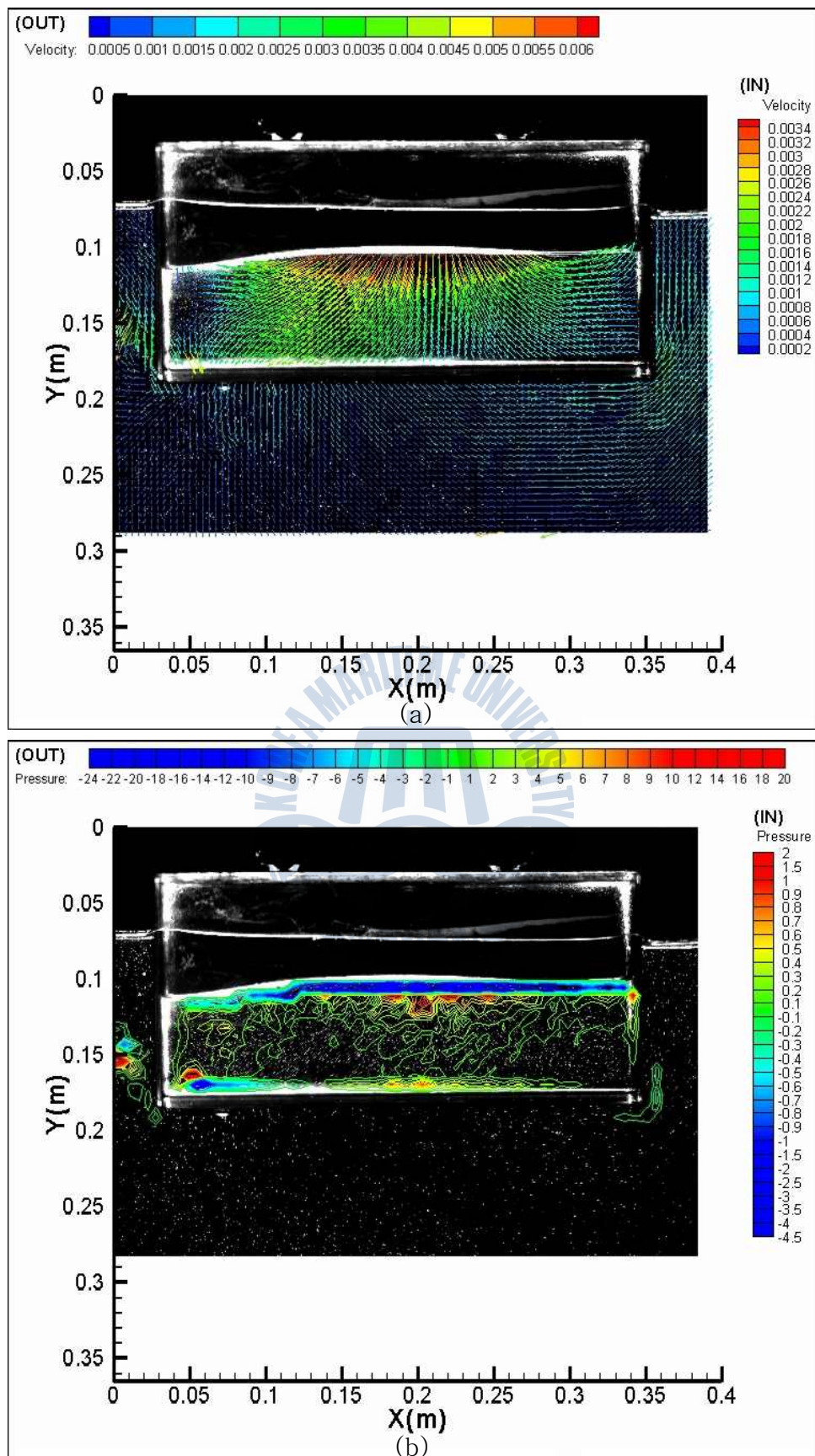


Fig. 45 PIV results in ⑤(wave trough) : (a) velocity, (b) pressure.

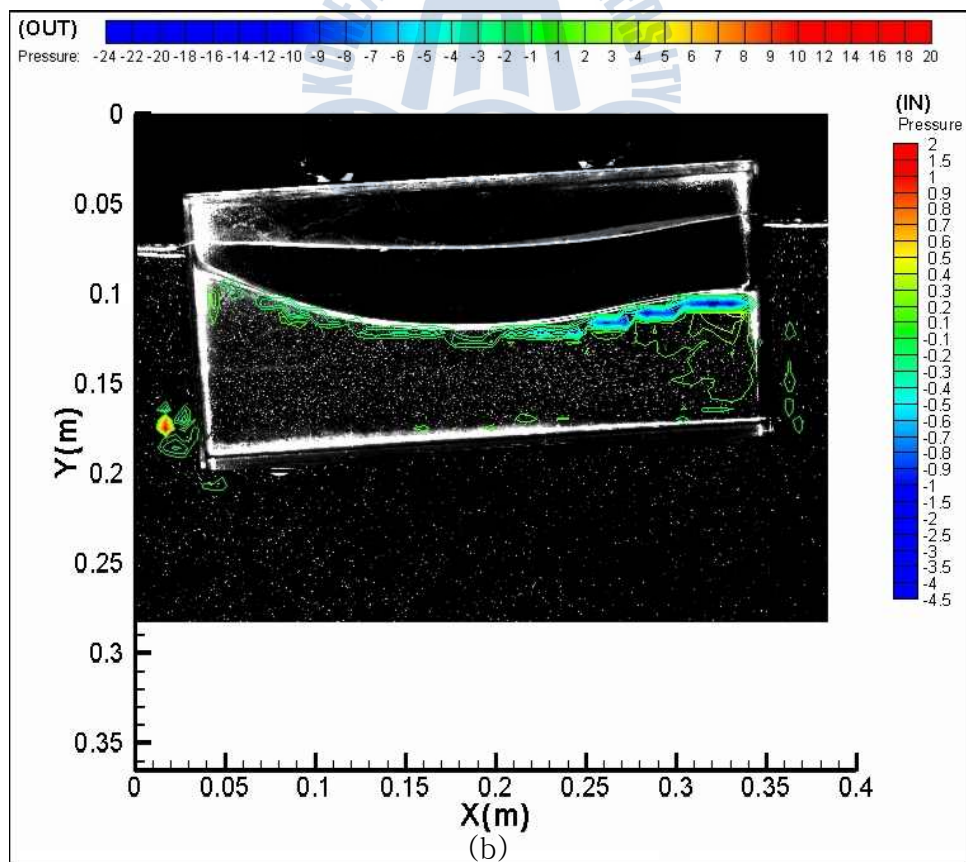
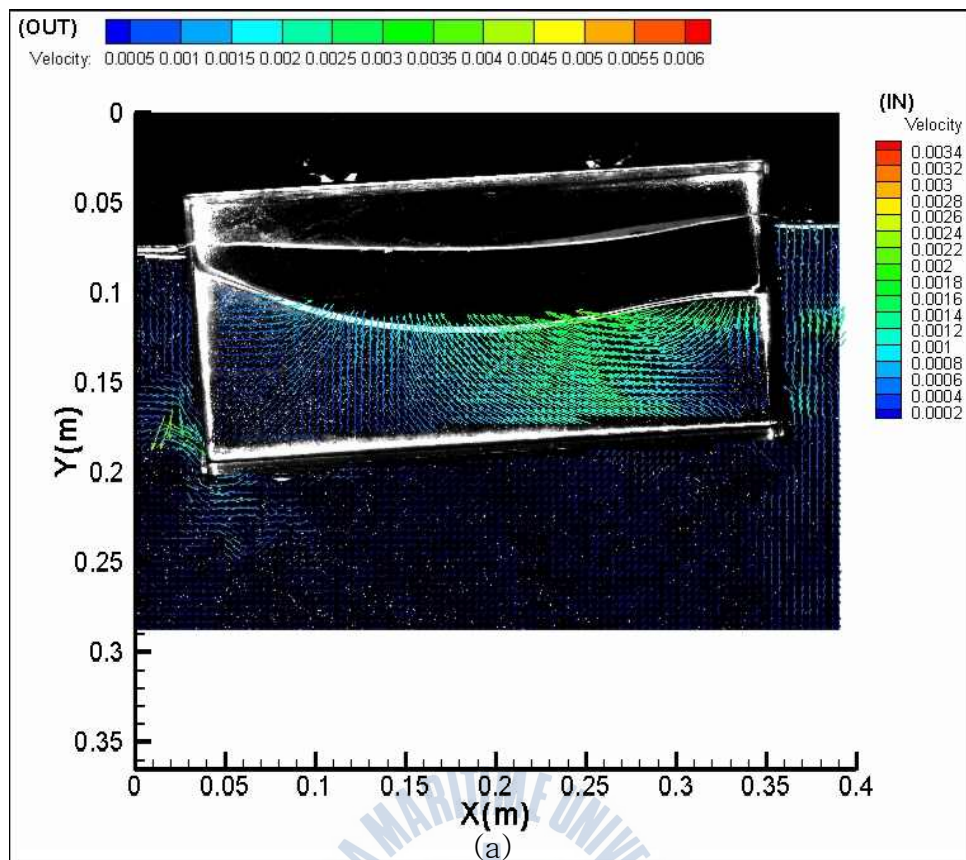


Fig. 46 PIV results in ⑥ : (a) velocity, (b) pressure.

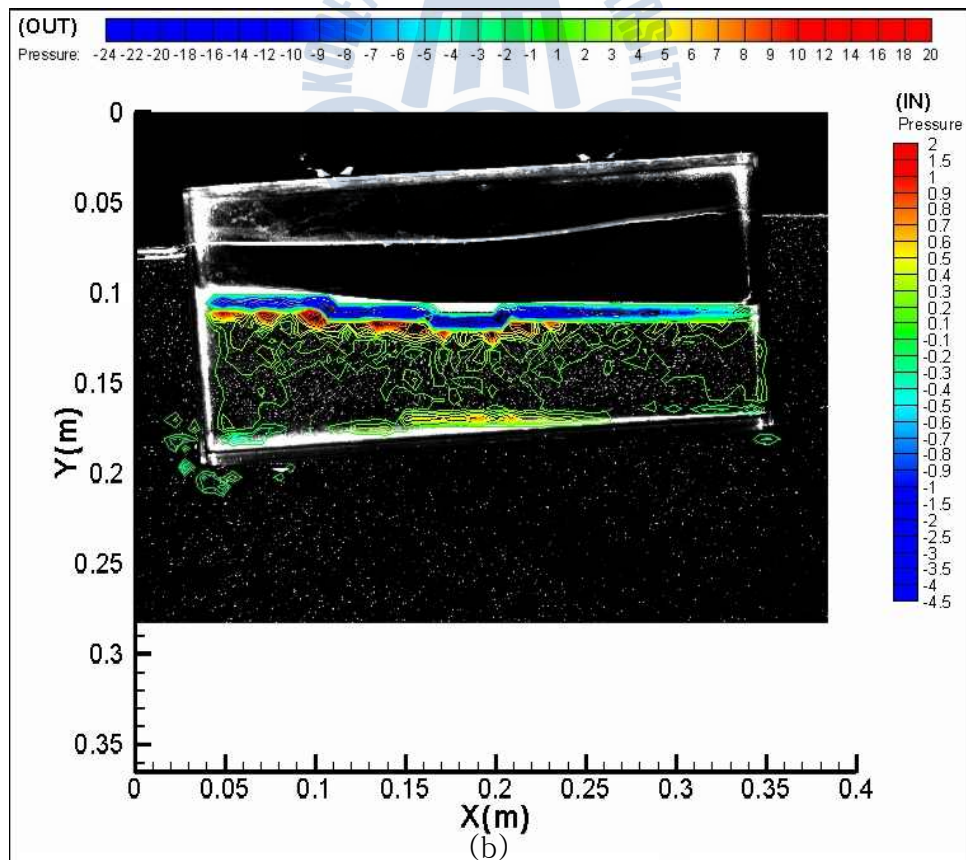
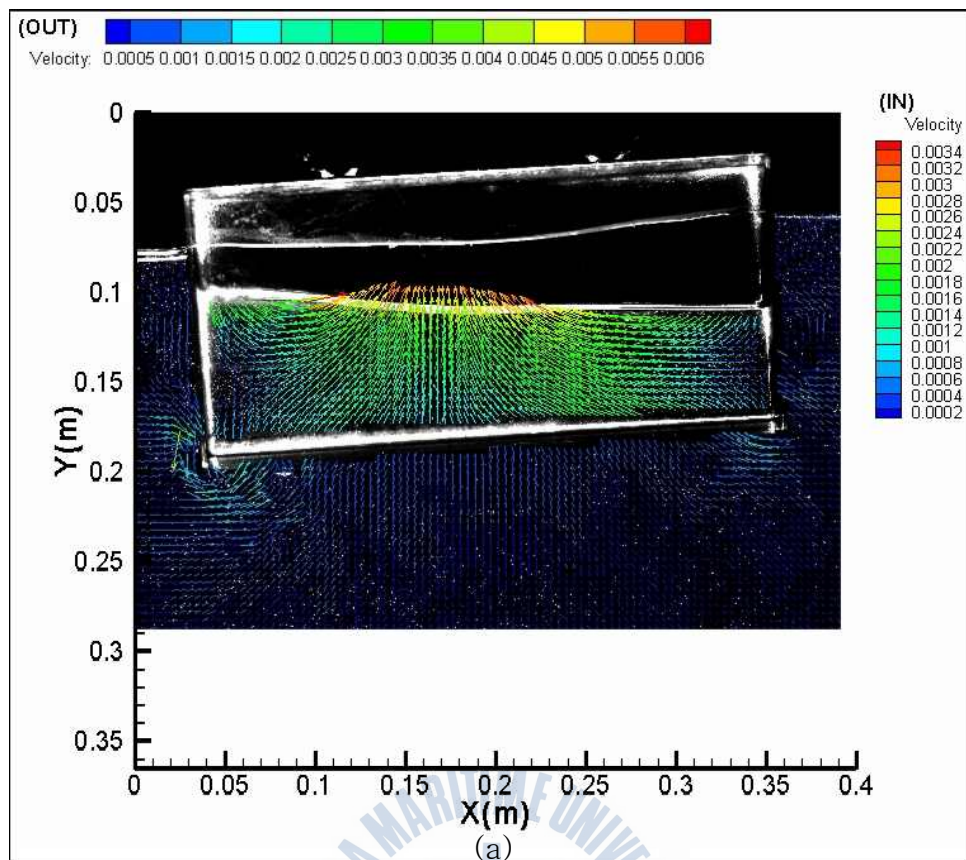


Fig. 47 PIV results in ⑦(wave ascent) : (a) velocity, (b) pressure.

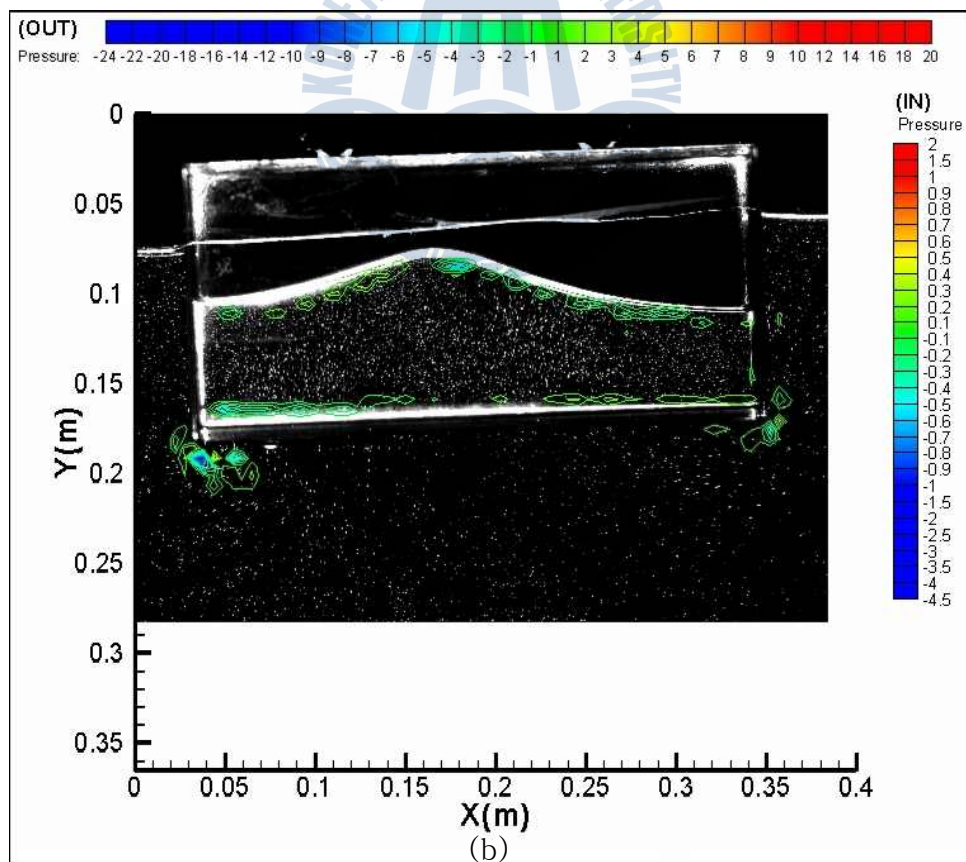
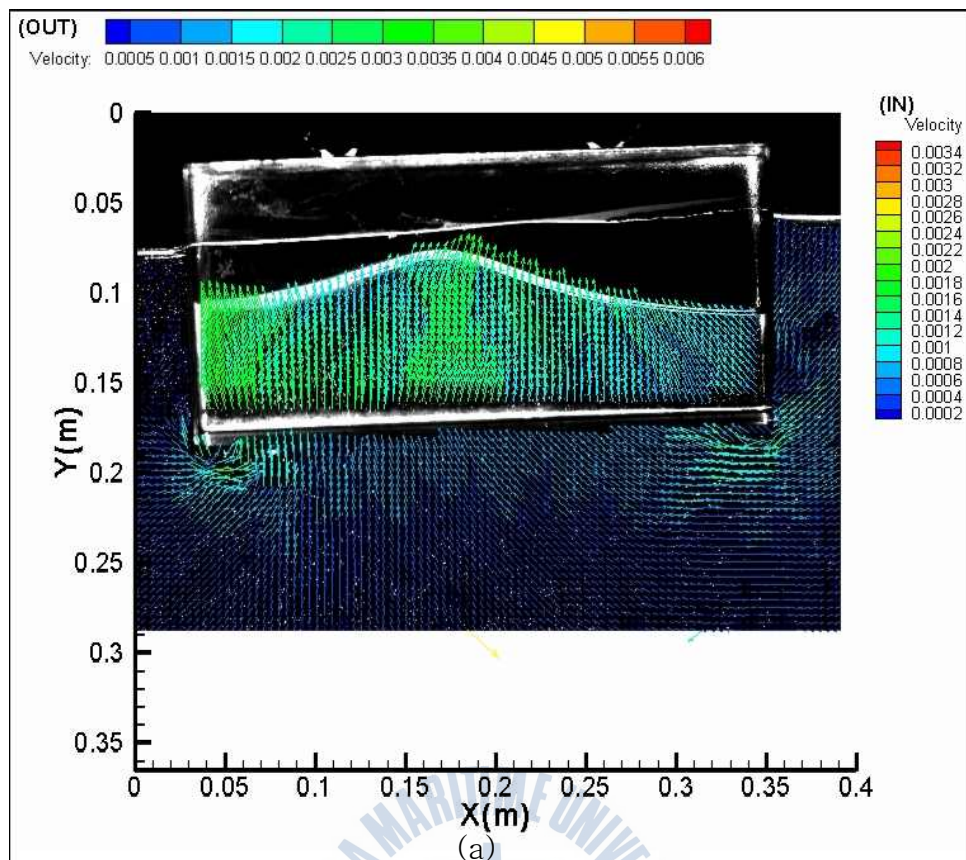


Fig. 48 PIV results in ⑧ : (a) velocity, (b) pressure.

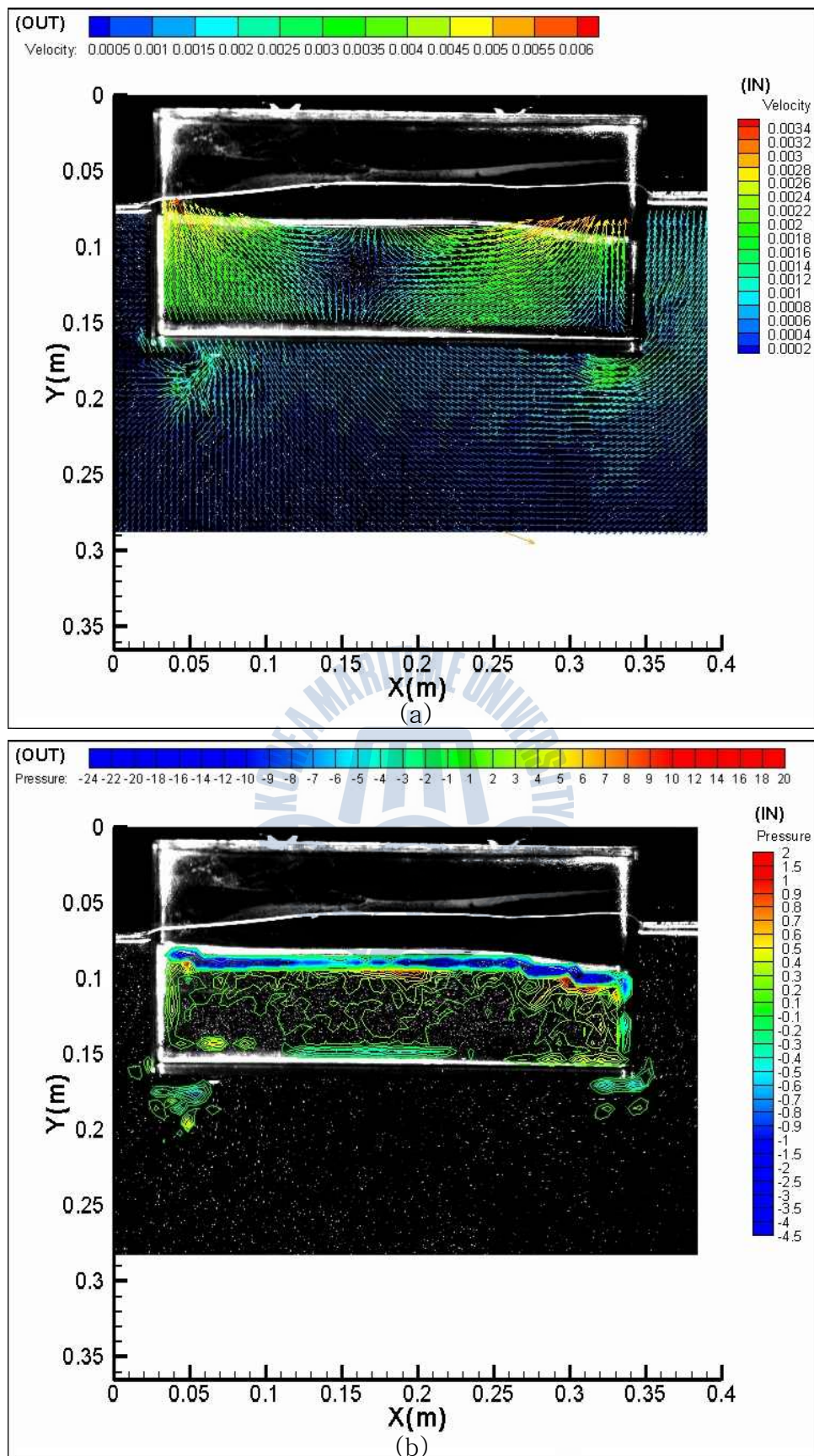


Fig. 49 PIV results in ⑨(wave crest) : (a) velocity, (b) pressure.

제 4 장 결론

본 논문은 선박의 대형화로 인하여 대두되고 있는 탱크내 슬로싱현상을 실험하고, 슬로싱 현상이 일어나는 탱크내부의 유체 변동압력을 분석할 수 있는 방법을 제안하고자한다. 이를 위해 슬로싱 탱크를 가지는 실험모형을 제작하고, 모형의 슬로싱탱크 내부에 적재되는 유체비율과 입사파주기의 변화에 따른 실험을 수행하였다. 그 결과 실험모형 자체의 운동과 슬로싱탱크 내부의 유체 운동이 연성된 복합적인 운동 값을 2차원조파수조 안에서 측정하였다. 선급들을 통해 기존에 제시된 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 분석결과와 유사한 결론이 도출되는 것을 알 수 있었다.

기존의 실험방법에서는 주로 압력센서를 이용한 특정 지점에서의 점계측 방법으로 슬로싱탱크 내부에서 슬로싱 현상으로 일어나는 유체충격압력을 측정하였다. 그러나 이번 연구를 통하여 새롭게 알게 된 사실은 슬로싱탱크 내부에서 수면이 급격히 상승하는 부분의 압력값 뿐만이 아니라, 모체로 일컬어지는 유체 덩어리 자체가 가지는 수면부분에서의 압력값과 속도방향의 중요성이다. 이는 기존의 압력센서 등을 이용한 점측식 압력측정 방법을 통해서서는 알아 낼 수가 없었던 현상들이다.

본 논문에서는 PIV기법을 이용한 비접촉식 압력장의 해석방법과 실험방법을 적용하였다. 또한 PIV기법의 압력장 해석결과의 검증과 타당성을 위하여 압력센서를 장착한 구조물의 실험을 별도로 수행하여, 두 가지 방법을 비교하였다. 비교결과 압력센서를 이용한 기계적인 센서값이 정밀도 면에서는 우수하나, 실험대상 구조물에 장착하여 실험을 수행하였을 경우에 센서 자체의 민감도와 노이즈차폐 기술에 따라 편차가 크게 발생됨을 알 수 있었다. 또한 실험모형이 운동을 할 경우 압력센서 자체의 데이터에 비정상적인 데이터 값이 입력되는 경우가 많았다. 이는 기존에 압력센서를 통해 실험을 수행하는 경우 대부분이

실험대상 구조물을 고정하여 실험을 수행하는 이유이기도 하다.

따라서 이번 실험을 통하여 알게 된 사실은 2차원조파수조에서 조파를 시킨 후 실험모형과 슬로싱탱크 내부의 유체, 그리고 입사파의 복합적인 연성운동에 의해서 발생하는 움직임이 일어날 경우에는 압력센서를 이용한 실험이 상당한 기술을 요한다는 점이다.

첫째는 압력센서 자체의 정밀한 수밀을 요구하고, 둘째로는 압력센서를 구조물에 설치 할 때 압력이 가해져서는 안 되고, 셋째로는 압력센서에 노이즈가 들어오지 않게 차폐를 해야 되고, 넷째는 급격히 변하는 곡면을 가지는 구조물에 장착 시에는 데이터케이블이 꺾이게 되어 압력센서 계측부에 압력이 가해진다는 점이다. 따라서 실험수행에 있어 압력센서를 이용한 데이터를 획득하는데 많은 어려움과 기술이 따른다.

따라서 압력센서를 이용한 점측식 점계측 압력측정 방법과 더불어 비점측식 압력장의 측정방법이 반드시 필요하다. 또한 기존에 점계측 압력측정 방법에서는 알아낼 수 없었던, 유동장 전체의 속도장과 압력분포를 획득할 수 있다는 점에서도 큰 장점이라 하겠다.

그러나 PIV기법을 이용한 압력장 분석시 가장 큰 단점은 정밀한 유체입자의 촬영을 위해서는 많은 시간이 소요되며, 정밀한 사진의 획득 뒤에도 후처리 과정에서 일어나는 수치적인 생략과 간략화로 인한 오차의 발생이 생긴다는 점이다. 또한 압력장의 계산시 유한차분법을 이용한 계산으로 인하여 주변 압력값이 고려되어 계산되어 짐으로 정밀한 압력점의 계측은 어렵다. 그러나 PIV기법을 이용한 전체 유동장의 비점측식 압력장의 해석으로 인하여 얻어지는 결과를 압력분포도로 살펴본다면, 세밀성 면에서는 기계적 센서를 이용한 점계측 기법 보다는 떨어지나 그 오차의 정도는 크지 않다는 것을 이번 논문을 통하여 알게 되었다. 또한 전체 유동장의 압력분포도의 분석적인 면에서는 본 논문에서 수행한 비점측식 압력장해석 방법이 더 우수함을 알 수 있었다.

감사의 글

먼저 석사에 이어 박사학위를 밟는 긴 시간 동안 부족한 제자에게 많은 도움을 주신 지도교수이신 조효제 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 부족한 논문 심사해주신 구자삼 교수님, 손경호 교수님, 박주용 교수님, 이승재 교수님께도 감사 말씀 전합니다.

실험에 보조를 해준 해양시스템연구실 후배들에게도 고맙다는 말을 전합니다. 항상 도움을 청할 때마다 도와주신 이승철 박사님께도 감사말씀 전합니다.

박사학위를 마치기까지 많은 시간이 걸렸지만, 끝까지 공부할 수 있게 옆에서 응원해준 평생의 반려자에게도 고맙다는 말을 전합니다. 부족한 며느리를 위해 희생하신 시어머니와 아들 성수와 딸 지영이 에게도 미안하고 감사하다는 말을 전합니다. 그리고 부족한 막내딸을 위해 항상 걱정과 기도를 해주시는 부모님과 가족들에게도 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

모교에서 학부부터 시작해 석사학위를 받고, 박사학위를 마치기까지 오랜 시간동안 생활하면서 많은 일들이 있었지만, 시간이 지나고 보니 다 인생에 있어 순간순간들일 뿐이었습니다. 같이 학교생활하면서 힘이 되어준 선배와 동기들에게도 고맙다는 말을 전합니다.

방과제를 건너던 20살 대학신입생 때가 엇그제만 같은데, 벌써 두 아이의 엄마가 되고 서른 중반의 나이가 되어 박사학위를 마치게 되니 많은 생각이 듭니다. 항상 자갈마당과 룡비치에서 과도치는 모습을 보고, 조도섬에 있어 사방이 바다에 둘러싸여 낭만적인 나의 모교가 많이 좋았습니다.

그동안 곁에서 많은 응원과 힘이 되어준 분들께 깊은 감사 말씀을 드립니다.

2015년 1월 박사학위 논문을 제출하며 이언주

참고문헌

- 김용환, 김상엽, 김경환, 안양준, 2012. (특집)슬로싱 하중 추정을 위한 모형탱크 실험과 압력신호의 통계해석. *대한조선학회지*, 49(1), pp.13-18.
- 노인식, 김성찬, 2012. (특집)슬로싱 충격압력에 대한 LNG CCS의 동적 구조응답 해석법. *대한조선학회지*, 49(1), pp.19-26.
- Ahn, Y.G., Kim, S.Y., Lim, K.H., Lee, S.W. & Kim, Y.H., 2013. Study on the effect of density ratio of gas and liquid in sloshing experiment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(2), pp.120-128.
- Cho, S.K., Hong, S.Y., Kim, J. & Park, I.R., 2006. A numerical study on the coupled dynamics of ship and flooding water. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(6), pp.631-637.
- Choi, H.G., 2008. Numerical analysis of three-dimensional sloshing flow using least-square and level-set method. *Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineers*, November, 2008, pp.2401-2405.
- Choi, H.I., Kwon, S.H., Lee, S.B., Lee, K.H. & Park, J.H., 2012. A study on ullage effect in 2-D sloshing experiment. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 26(1), pp.54-59.
- Choi, Y.M., Kim, H.Y., Park, J.S., Kwon, S.H. & Kim, D.J., 2009. Characteristics of piezoelectric sensor for fluid impact pressure. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 23(6), pp.17-22.
- Choi, Y.R., Kim, J.H. & Kim, Y.S., 2005. An analysis of rolling performance for a barge-type FPSO. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 19(3), pp.25-30.
- Erwin Loots, Wouter Paster, Bas Buchner & Trym Tveitnes, 2004. The numerical simulation of LNG sloshing with an improved volume of fluid method. *Proceeding*

of the 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, June 20-25, 2004, pp.1-9.

Fabrizio Pistani & Krish Thiagarajan, 2012. Experimental measurements and data analysis of the impact pressure in a sloshing experiment. *Journal of Ocean Engineering*, 2012(52), pp.60-74.

Ha, M.K., Kim, M.S., Paik, B.K. & Park, C.H., 2002. Motion and sloshing analysis for new concept of offshore storage unit. *International Journal of Ocean Engineering and Technology*, 5(1), pp.22-28.

Hidemi Mutsuda, Yoshiaki Shinkura & Yasuaki Doi, 2008. An Eulerian scheme with lagrangian particles for solving impact pressure caused by wave breaking. *Proceeding of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vancouver, BC, Canada, July 6-11, 2008, pp.162-169.

Hong, S.J., Lee, Y.S. & Choi, M.H., 2001. A study on the sloshing characteristics on the tank containing the fluid. *Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, April, 2001, pp.886-891.

Hwang, Y.S., Jung, J.H., Kim, D.W. & Ryu, M.C., 2008. An experimental study on sloshing impact pressures with two identically shaped rectangular 2-Dimensional model tanks with different sizes. *Special Issue of the Society of Naval Architect of Korea*, September, 2008, pp.16-28.

Jung, D.W., Chun, S.S., Park, J.S., Kwon, S.H. & Jang, T.S., 2006. An experimental study on rectangular box sloshing. *Proceeding of the Korean Society of Ocean Engineers*, November, 2006, pp.386-391.

Kim, H.S., Lee, Y.S., Kim, S.J. & Kim, Y.W., 2004a. Sloshing reduction optimization of storage tank using evolutionary method. *Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, April, 2004, pp.410-415.

Kim, J.W., Sim, I.H., Kim, Y.S. & Bai, K.J., 2003. A three-dimensional finite-element computation for the sloshing impact pressure in LNG tank. *Proceeding of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30, 2003, pp.501-508.

- Kim, Y.H., Sung, H.G., Cho, S.K. & Choi, H.S., 2013. The sloshing effect on the roll motion and 2-DOF motions of a 2D rectangular cylinder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(2), pp.69-78.
- Kim, Y.H., Shin, Y.S. & Lee, K.H., 2004b. Numerical study on slosh-induced impact pressure on three-dimensional prismatic tanks. *Applied Ocean Research*, March, 2004, 26, pp.213-226.
- Kwak, H.U., Choi, H.S. & Shin, H.S., 2004. Motion analysis of FPSO in irregular seas including swells. *Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK*, Chungmu, April 22-23, 2004, pp.535-540.
- Lee, H.W. & Cho, J.R., 2005. Characteristic analysis of nonlinear sloshing in baffled tank. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(11), pp.1455-1462.
- Lee, Y.S., Kim, H.S., Lee, J.H. & Ko, S.H., 2003a. A study on the sloshing of the rectangular tank partially filled with fluid under translational motion. *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 13(8), pp.591-597.
- Lee, Y.S., Kim, H.S., Lee, J.H., Kim, Y.W. & Ko, S.H., 2003b. A study on the reduction of the sloshing of storage tank using wing and diaphragm baffle. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(12), pp.2039-2046.
- Lim, C.G., Lee, H.Y. & Shin, H.G., 2006. Nonlinear motion analysis of FPSO and shuttle tanker in a tandem configuration. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(5), pp.560-567.
- Li Yu-long, ZHU Ren-chuan, MIAO Guo-ping & FAN Ju, 2012. Simulation of tank sloshing based on openfoam and coupling with ship motions in time domain. *Journal of Hydrodynamics*, 2012(5), pp.450-457.
- Mirosław Lench Kaminski & Hannes Bogaert, 2010. Full-scale sloshing impact test-part I. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, ISOPE, 20(1), pp.24-33.
- Murray Rudman & Paul W. Cleary, 2009. Modelling sloshing in LNG tanks. *7th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO, Melbourne, Australia, December 9-11, 2009, pp.1-6.

- Noh, B.J., 2005. Sloshing load analysis in spherical tank of LNG carrier. *Special Issue of the Society of Naval Architect of Korea*, June, 2005, pp.22-30.
- Nicolas Moirod, Eric Baudin, Jacqueline Henry, Louis Dielbold & Mirela Zalar, 2009. Application of the seakeeping & sloshing coupling for the LNG terminal. *Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE, Osaka, Japan, June 21-26, 2009, pp.46-53.
- Noh, I.S., Lee, J.M. & Yeom, C.W., 2010. A fundamental study for time history modeling of fluid impact pressure. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.242-247.
- Park, J.S., Kim, H.Y., Lee, K.H., Kwon, S.H., Jeon, S.S. & Jung, B.H., 2009. An experimental study on compressibility effect in sloshing phenomenon. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 23(4), pp.12-18.
- Park, J.J., Kim, M.S., Kim, Y.B. & Ha, M.K., 2005. Numerical sloshing analysis of LNG carriers in irregular waves. *Special Issue of the Society of Naval Architect of Korea*, June, 2005, pp.38-43.
- Park, K.J. & Yoon, S.H., 2003. Sloshing minimization technique in liquid fuel tank by the use of baffle. *Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, April, 2003, pp.917-920.
- Shin, J.R., Choi, K.S., Kang, S.Y. & Kim, H.S., 1994. Estimation of sloshing natural periods in liquid cargo tanks. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 8(2), pp.93-104.
- Shin, J.R., Choi, K.S. & Kang, S.Y., 2005. An analytic solution to sloshing natural periods for a prismatic liquid cargo tank with baffles. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 19(6), pp.16-21.
- S. Maillard & L. Brosset, 2009. Influence of DR between liquid and gas on sloshing model test results. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 19(4), pp.271-279.
- T.-W. Yung, Z. Ding, H. He & R.E. Sandstorm, 2009. LNG sloshing : characteristics and scaling laws. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 19(4), pp.264-270.

- Tim Bunnik & René Huijsmans, 2009. Large-Scale LNG sloshing model tests. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 19(1), pp.8-14.
- Yang, K.K. & Kim, Y.H., 2010. Numerical analysis of violent sloshing problems by CCUP method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(1), pp.1-10.
- Yeun, J.H., Heo, J.H., Paik, J.K. & Lee, J.H., 2004. 슬로싱 압력하의 LNG 운반선 방열 시스템 붕괴거동 특성에 관한 연구. *Proceeding of the annual spring meeting, SNAK*, Chungmu, April 22-23, 2004, pp.201-206.
- Yoon, S.H., Park, K.J. & Sim, K.S., 2002. Evaluation for sloshing behaviors of liquid storage tank. *Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering*, June, 2002, pp.314-317.
- Zoran Mravak, Jérôme de Lauzon, Yun-Suk Chung, Louis Dieblod & Eric Baudin, 2009. Strength assessment of membrane LNG tank structure based on direct calculation of structural response. *Proceeding of the ASME 2009 28th International Conference and Arctic Engineering*, OMAE, Honolulu, Hawaii, USA, May 31 - June 5, 2009, pp.1-8.
- Bureau Veritas(BV) Research Department & Maritime Research Institute Netherlands(MARIN) Hydro Structural Services, 2005. *Full-scale experiments and new methodology to assess the structural behaviour of a membrane LNGC containment system under breaking waves project "SLOSHEL"*. Bureau Veritas(BV) Research Department & Maritime Research Institute Netherlands(MARIN) Hydro Structural Services.
- Bureau Veritas(BV), 2011. *Design sloshing loads for LNG Membrane tanks(Guidance Note)*, Paris: Achevé d'imprimer sur les presses d'Activ'Company.
- Lloyd's Register(LR), 2009. *Sloshing assessment guidance document for Membrane tank LNG operations*, London: Lloyd's Register Registered office.
- NTNU, 2005. *Challenges in experimental and numerical modeling with emphasis on high-speed marine vehicles and sloshing*, Norway: NTNU.
- American Bureau of Shipping(ABS), 2002. *Parametric study on slosh-induced impact pressure: Experiment vs. numerical computation(Technical Papers)*, U.S.A: Research department of American Bureau of Shipping.

손경호, 1998. *해양파역학*. 효성출판사:부산.

可視化情報學會, 2002. *PIV 핸드ブック*. 森北出版株式會社.

Lee, S.J., 2008. *The effects of LNG-sloshing on the global responses of LNG-carriers*. Ph.D. Texas: Texas A&M University.



부록A 실험모형의 탱크내부 슬로싱 현상이 횡동요에 미치는 영향에 대한 실험영상

실험모형의 탱크내부에 유체 적재율을 변화시켰을 때(10%, 30%, 50%, 80%), 입사파 주기의 변화(0.7sec~1.8sec)에 따른 실험모형의 운동과 내부유체의 움직임을 촬영한 영상을 캡처한 사진이다. 특히 실험모형의 탱크내부에서 일어나는 슬로싱 현상이 실험모형의 횡동요에 어떠한 영향을 미치는지를 보여주고 있다.

조파수조의 수심은 $0.8m$, 입사파고는 $0.02m$ 이며, 입사파의 방향은 횡파(*beam sea*)이다. 실험모형의 운동은 횡동요(*roll*)와 상하동요(*heave*)를 제외한 운동은 고정된 상태이다.

A.1 탱크내부 유체 적재율이 10% 일 때

실험모형의 탱크내부 유체 적재율이 10%일 때, 입사파 주기를 0.7sec~1.8sec로 변화시키며 실험을 수행한 영상이다. 빨간색 실선으로 표시된 부분이 실험모형의 탱크내부 수면을 표시한 부분이며, 실험모형의 횡동요 발생 시 나타나는 모습이다.

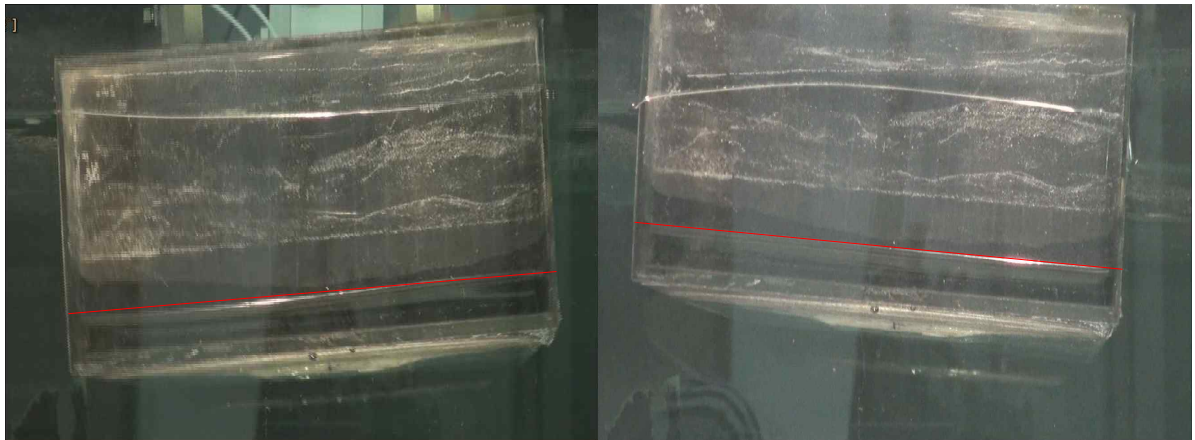


Fig. A.1-1 Incident wave period : 0.7 sec

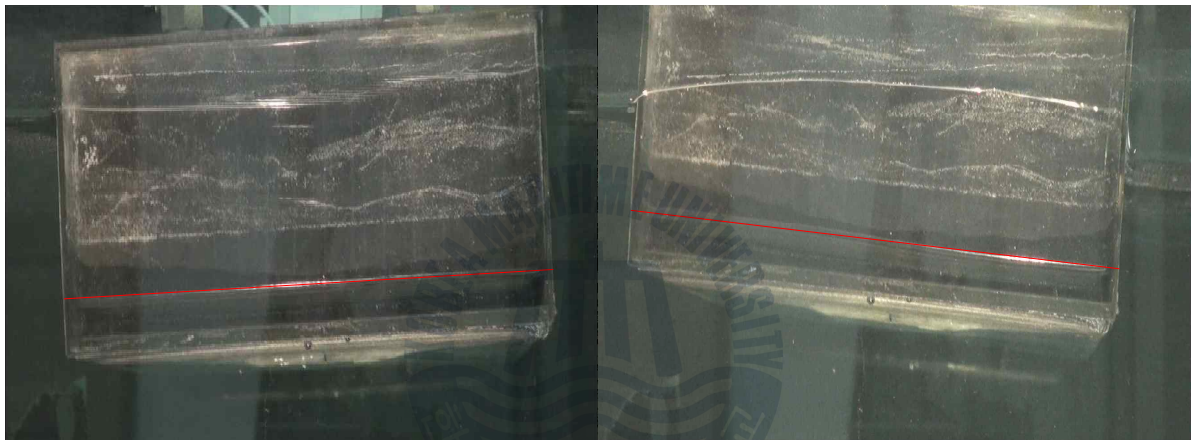


Fig. A.1-2 Incident wave period : 0.8 sec

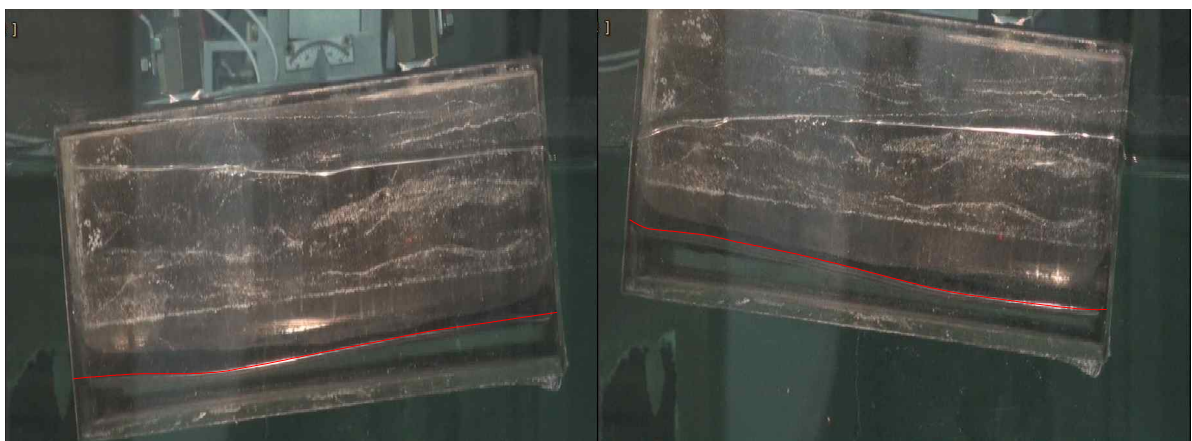


Fig. A.1-3 Incident wave period : 0.9 sec



Fig. A.1-4 Incident wave period : 1.0 sec

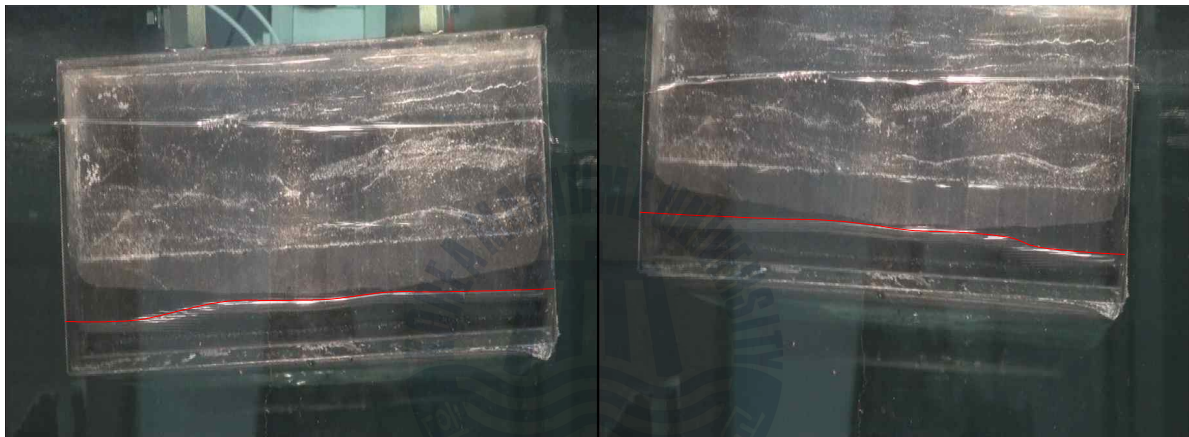


Fig. A.1-5 Incident wave period : 1.1 sec



Fig. A.1-6 Incident wave period : 1.2 sec

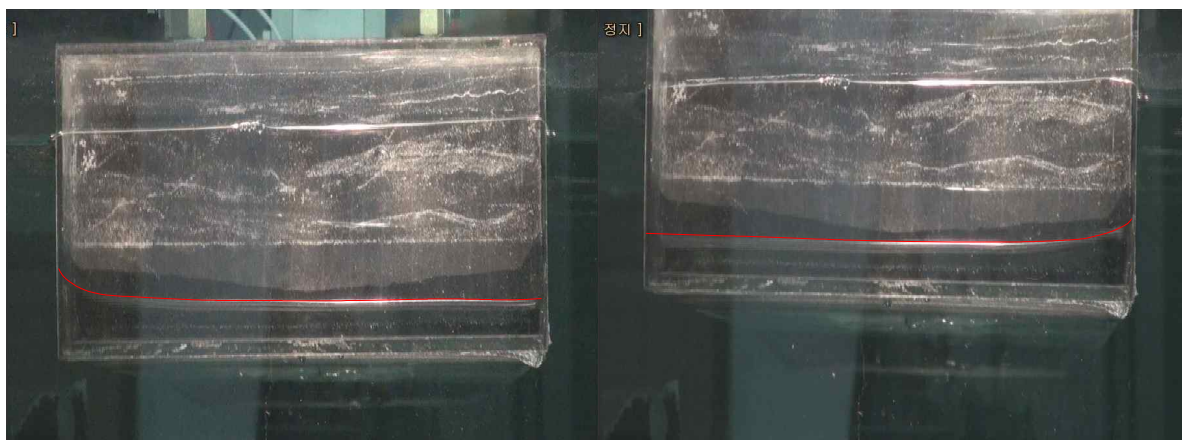


Fig. A.1-7 Incident wave period : 1.3 sec

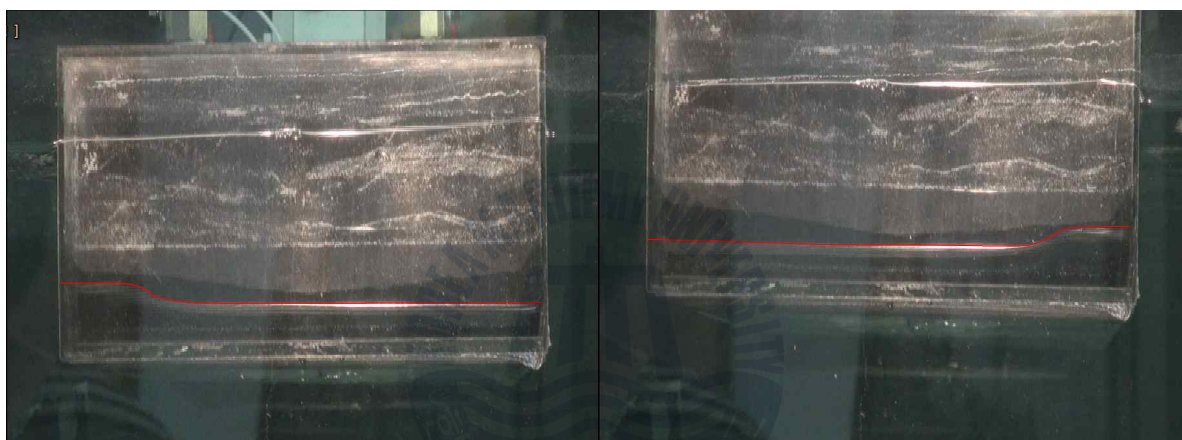


Fig. A.1-8 Incident wave period : 1.4 sec



Fig. A.1-9 Incident wave period : 1.5 sec

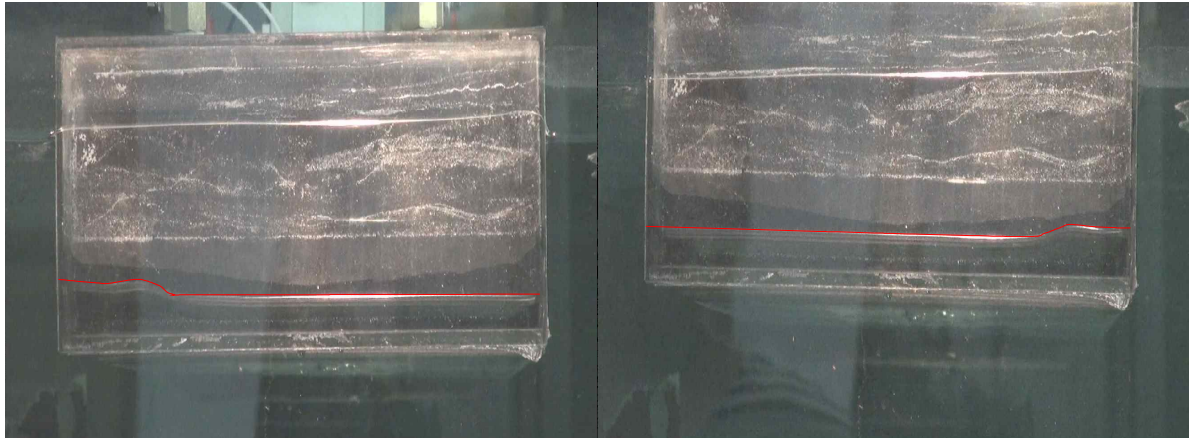


Fig. A.1-10 Incident wave period : 1.6 sec

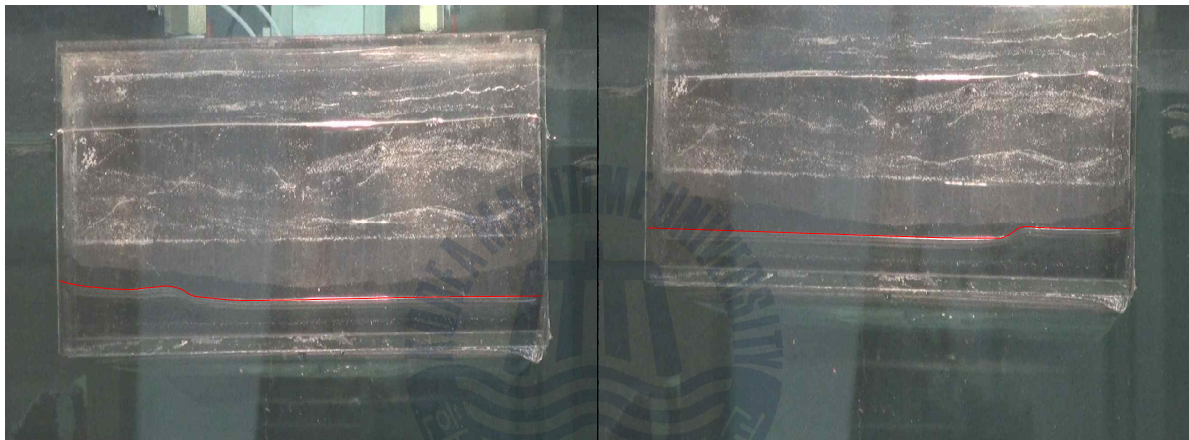


Fig. A.1-11 Incident wave period : 1.7 sec



Fig. A.1-12 Incident wave period : 1.8 sec

A.2 탱크내부 유체 적재율이 30% 일 때

실험모형의 탱크내부 유체 적재율이 30%일 때, 입사파 주기를 0.7sec~1.8sec로 변화시키며 실험을 수행한 영상이다. 빨간색 실선으로 표시된 부분이 실험모형의 탱크내부 수면을 표시한 부분이며, 실험모형의 횡동요 발생 시 나타나는 모습이다.



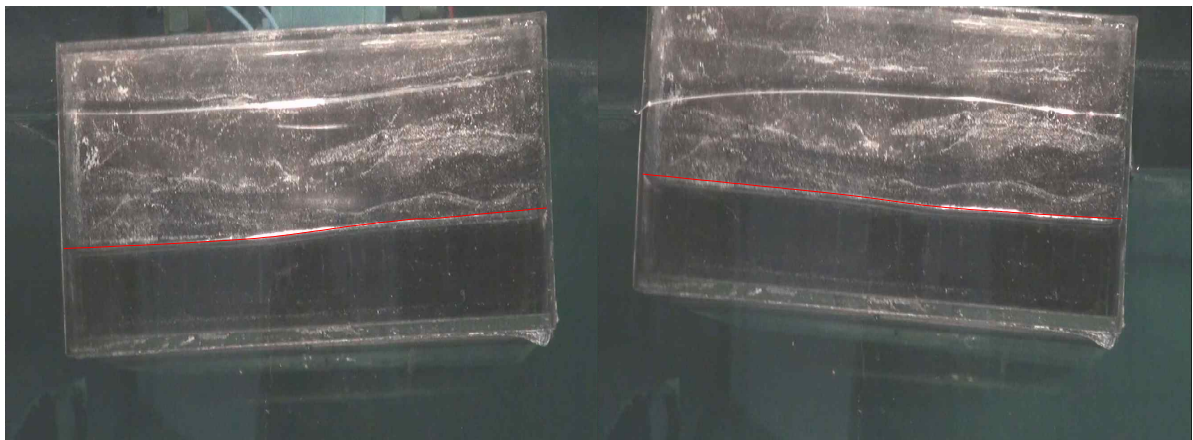


Fig. A.2-1 Incident wave period : 0.7 sec



Fig. A.2-2 Incident wave period : 0.8 sec



Fig. A.2-3 Incident wave period : 0.9 sec

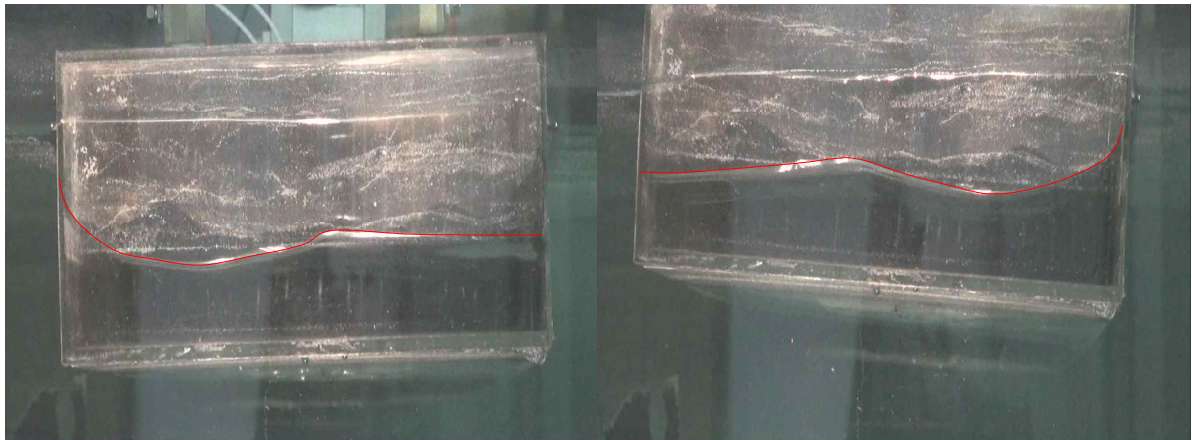


Fig. A.2-4 Incident wave period : 1.0 sec

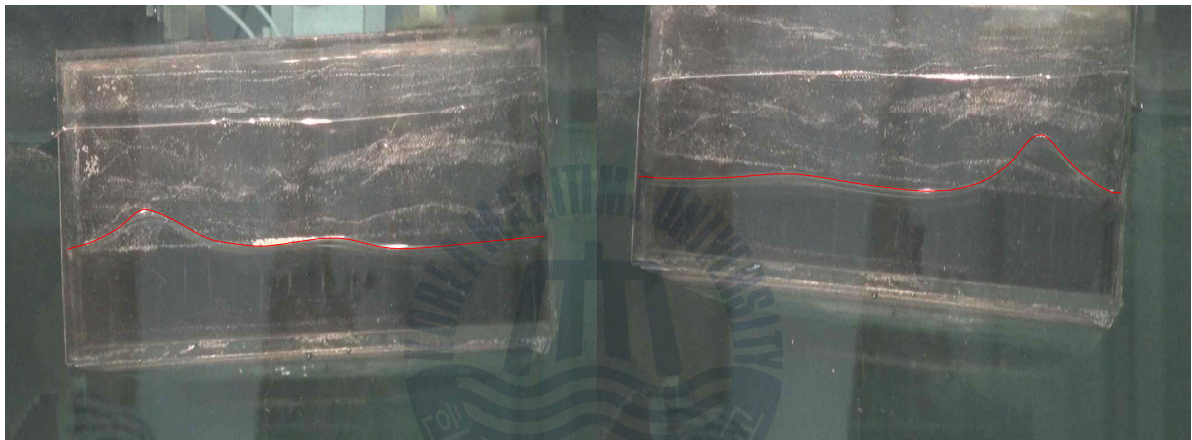


Fig. A.2-5 Incident wave period : 1.1 sec



Fig. A.2-6 Incident wave period : 1.2 sec

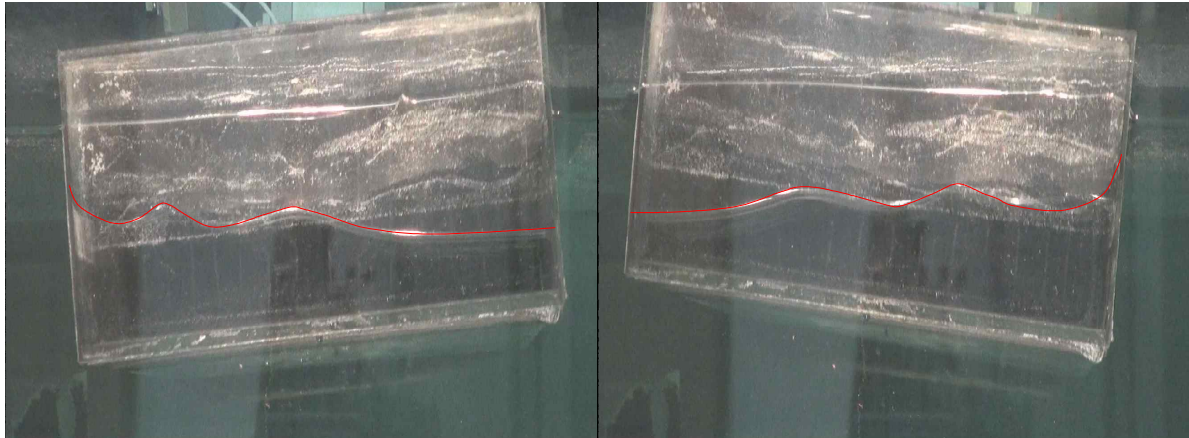


Fig. A.2-7 Incident wave period : 1.3 sec

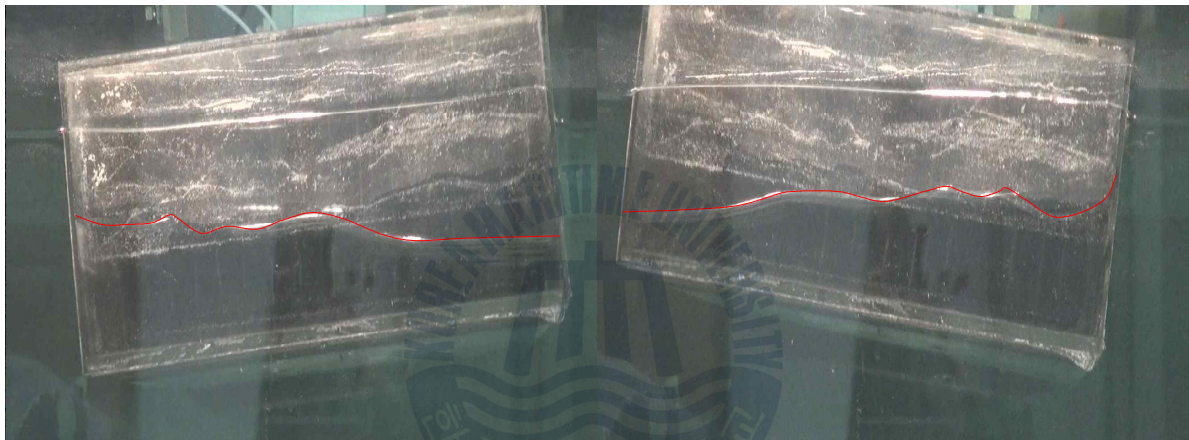


Fig. A.2-8 Incident wave period : 1.4 sec

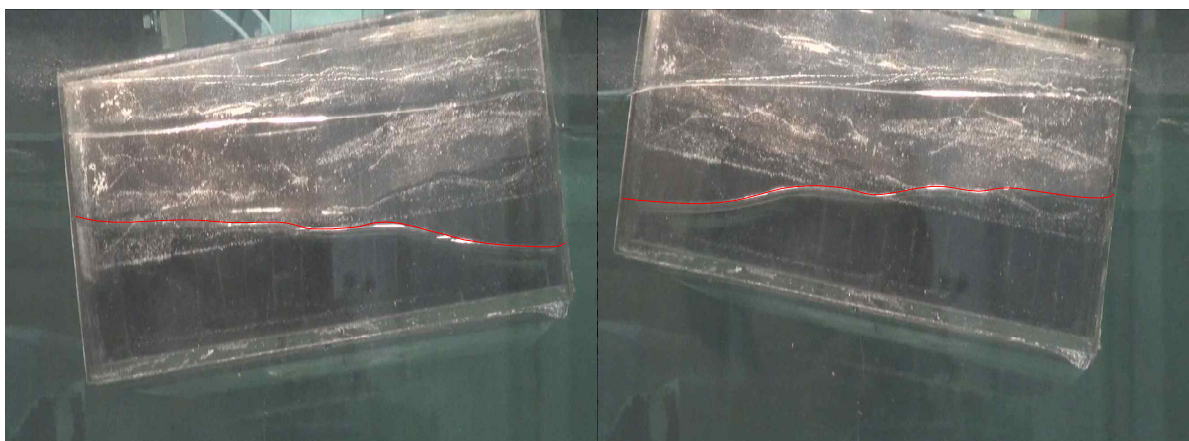


Fig. A.2-9 Incident wave period : 1.5 sec



Fig. A.2-10 Incident wave period : 1.6 sec



Fig. A.2-11 Incident wave period : 1.7 sec



Fig. A.2-12 Incident wave period : 1.8 sec

A.3 탱크내부 유체 적재율이 50% 일 때

실험모형의 탱크내부 유체 적재율이 50%일 때, 입사파 주기를 0.7sec~1.8sec로 변화시키며 실험을 수행한 영상이다. 빨간색 실선으로 표시된 부분이 실험모형의 탱크내부 수면을 표시한 부분이며, 실험모형의 횡동요 발생 시 나타나는 모습이다.



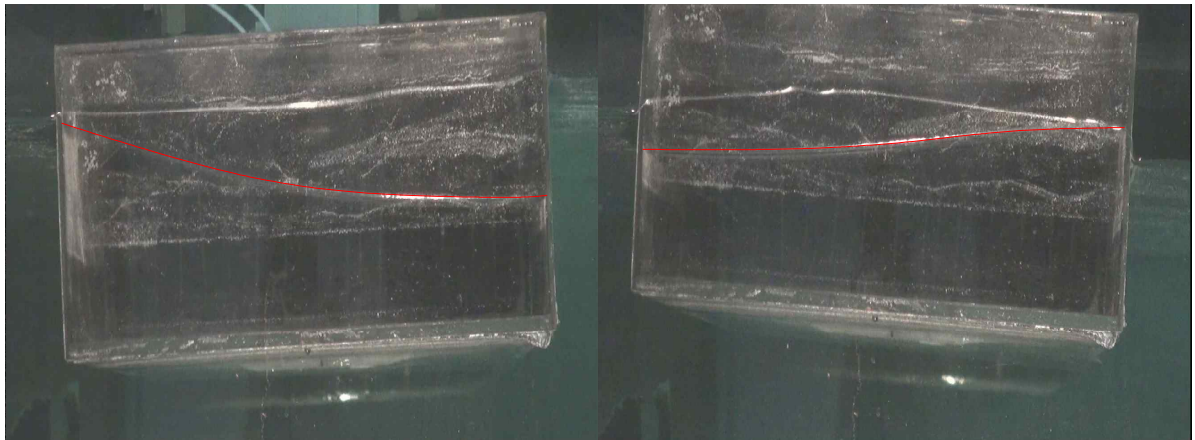


Fig. A.3-1 Incident wave period : 0.7 sec



Fig. A.3-2 Incident wave period : 0.8 sec

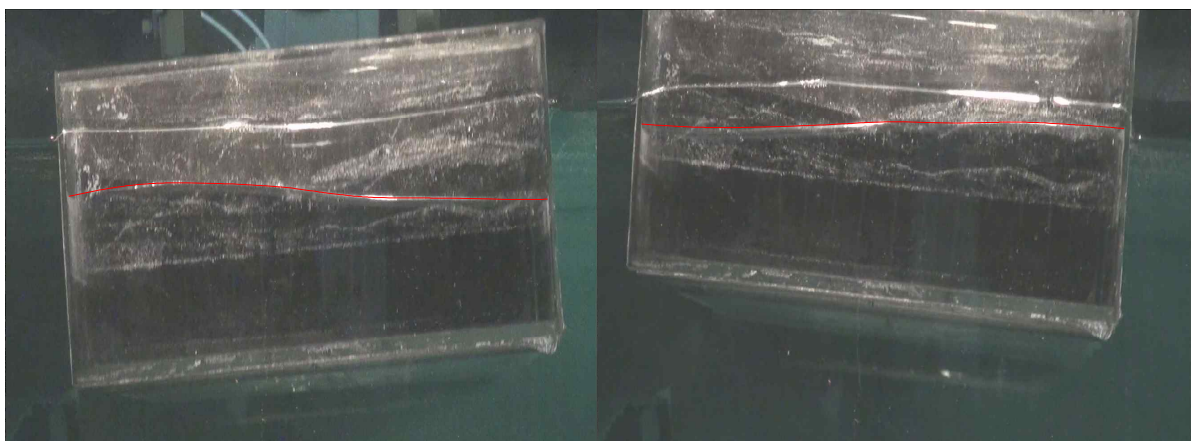


Fig. A.3-3 Incident wave period : 0.9 sec

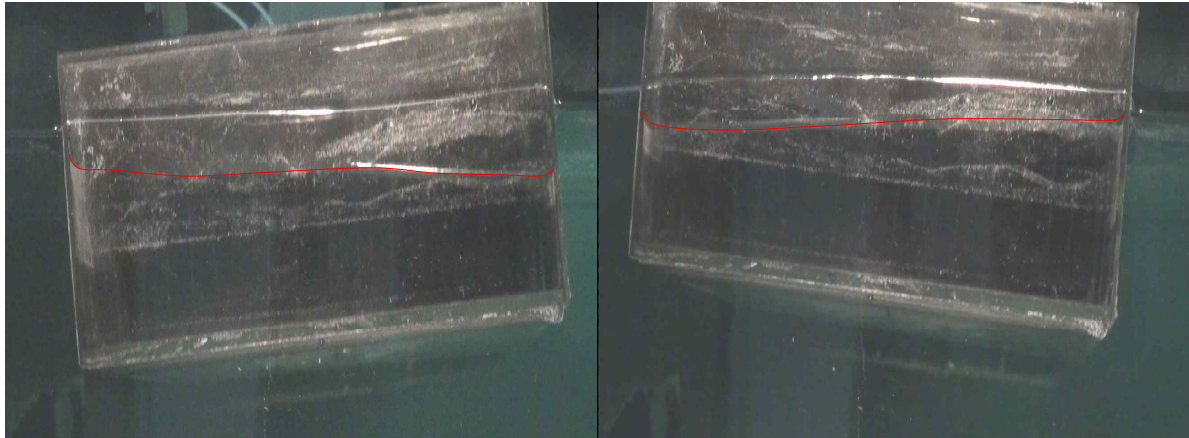


Fig. A.3-4 Incident wave period : 1.0 sec

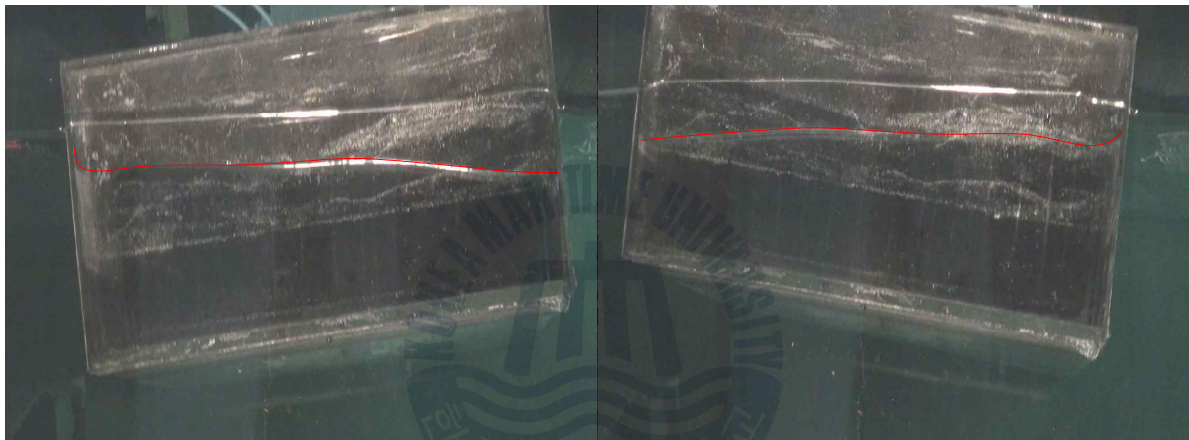


Fig. A.3-5 Incident wave period : 1.1 sec

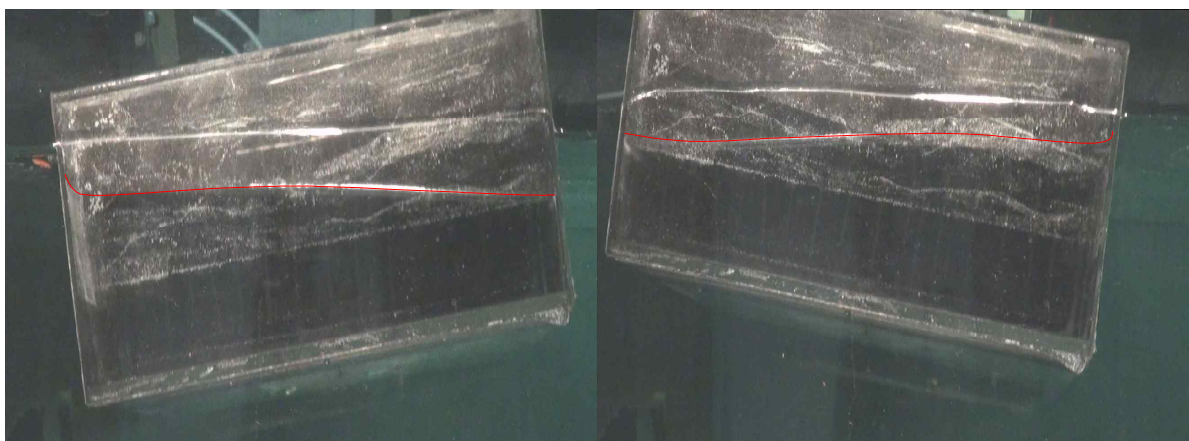


Fig. A.3-6 Incident wave period : 1.2 sec

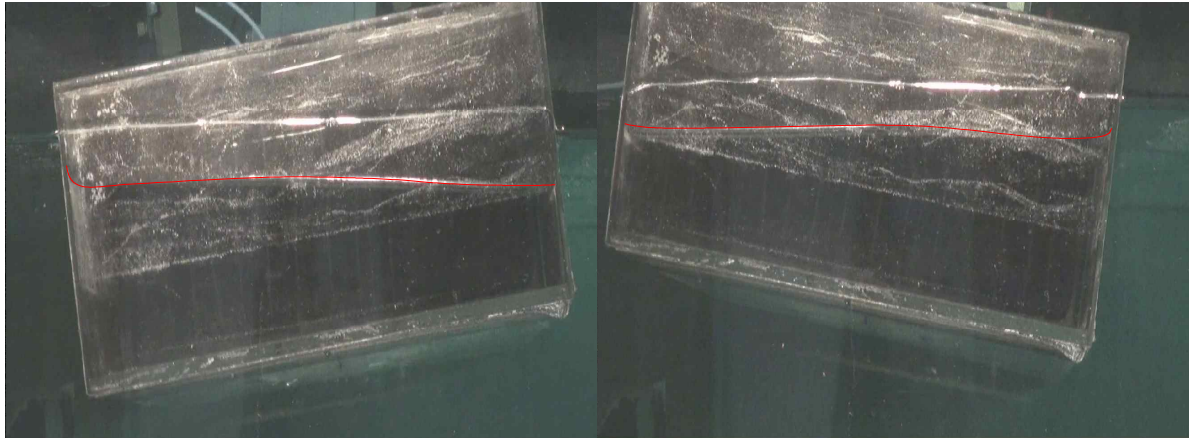


Fig. A.3-7 Incident wave period : 1.3 sec



Fig. A.3-8 Incident wave period : 1.4 sec

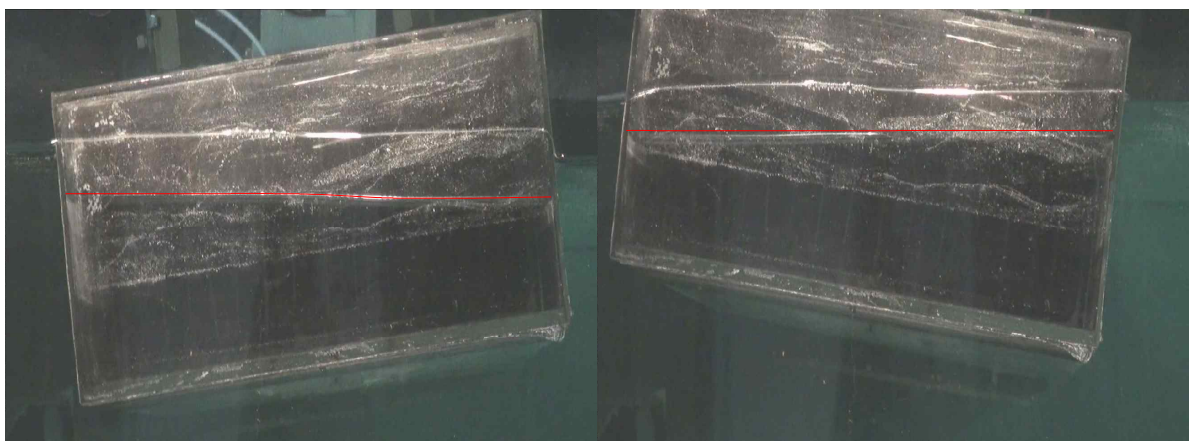


Fig. A.3-9 Incident wave period : 1.5 sec

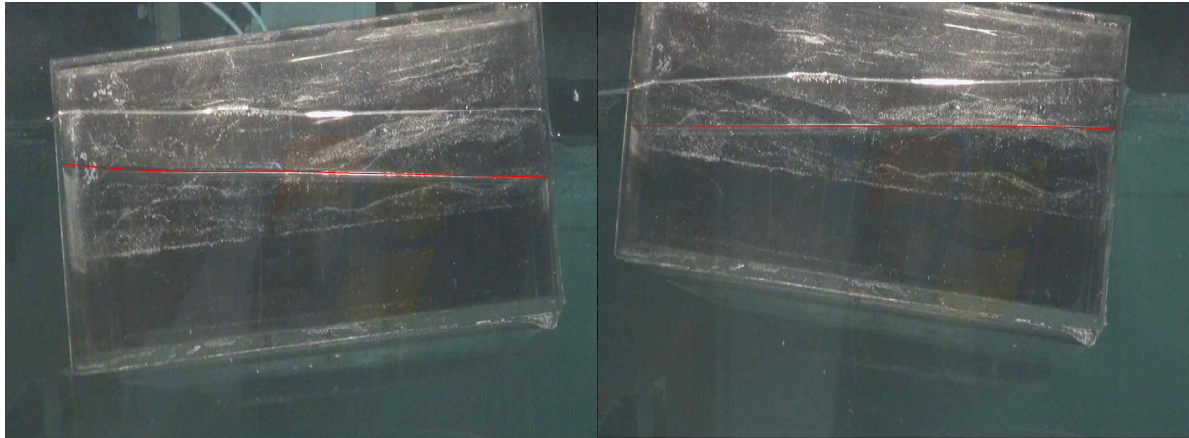


Fig. A.3-10 Incident wave period : 1.6 sec



Fig. A.3-11 Incident wave period : 1.7 sec

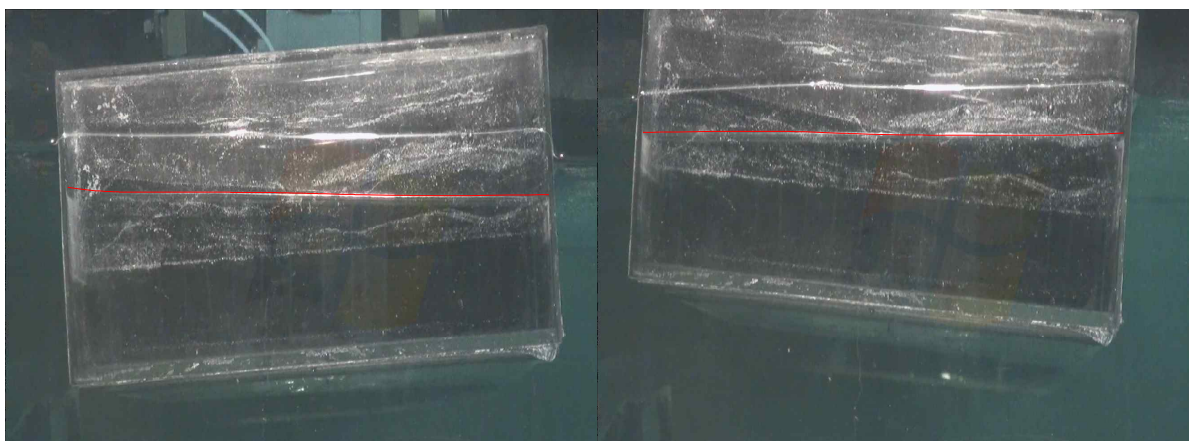


Fig. A.3-12 Incident wave period : 1.8 sec

A.3 탱크내부 유체 적재율이 80% 일 때

실험모형의 탱크내부 유체 적재율이 80%일 때, 입사파 주기를 0.7sec~1.8sec로 변화시키며 실험을 수행한 영상이다. 빨간색 실선으로 표시된 부분이 실험모형의 탱크내부 수면을 표시한 부분이며, 실험모형의 횡동요 발생 시 나타나는 모습이다.



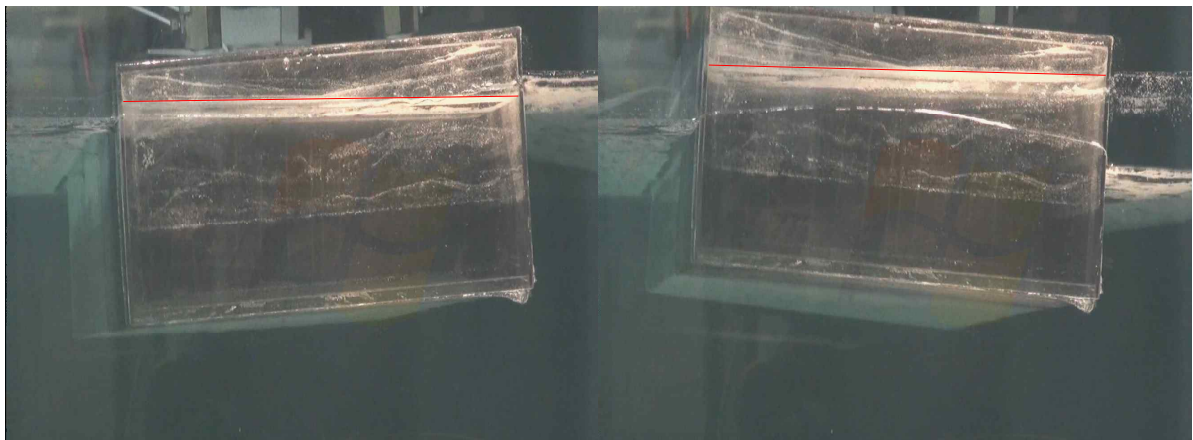


Fig. A.4-1 Incident wave period : 0.7 sec

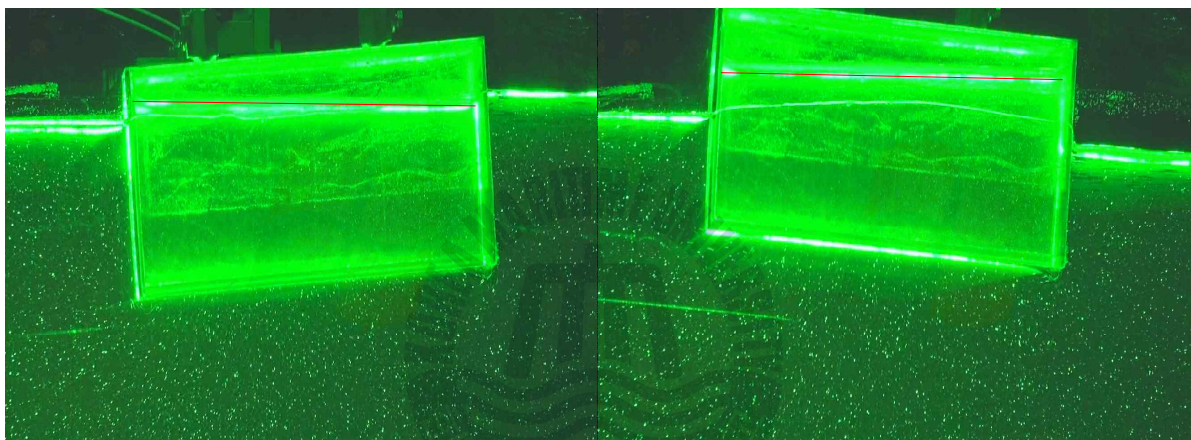


Fig. A.4-2 Incident wave period : 0.8 sec

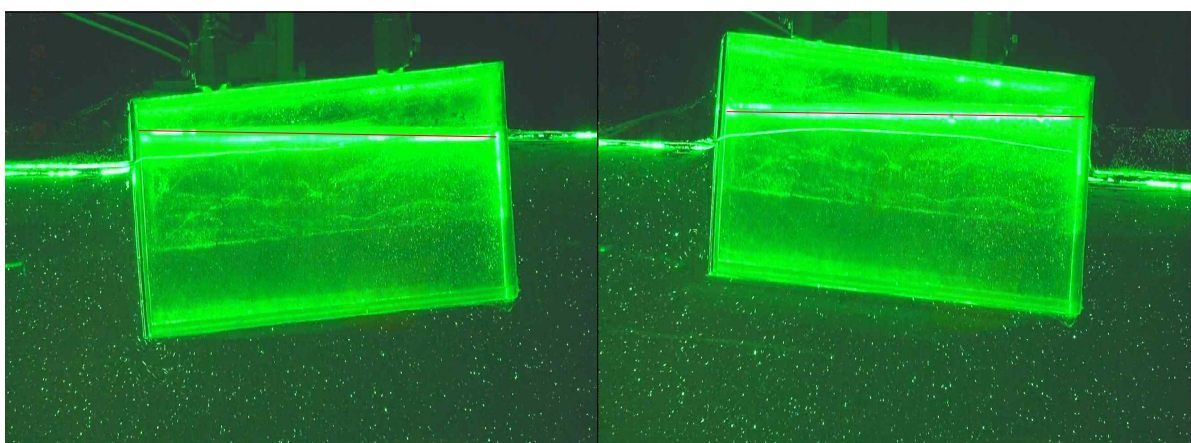


Fig. A.4-3 Incident wave period : 0.9 sec

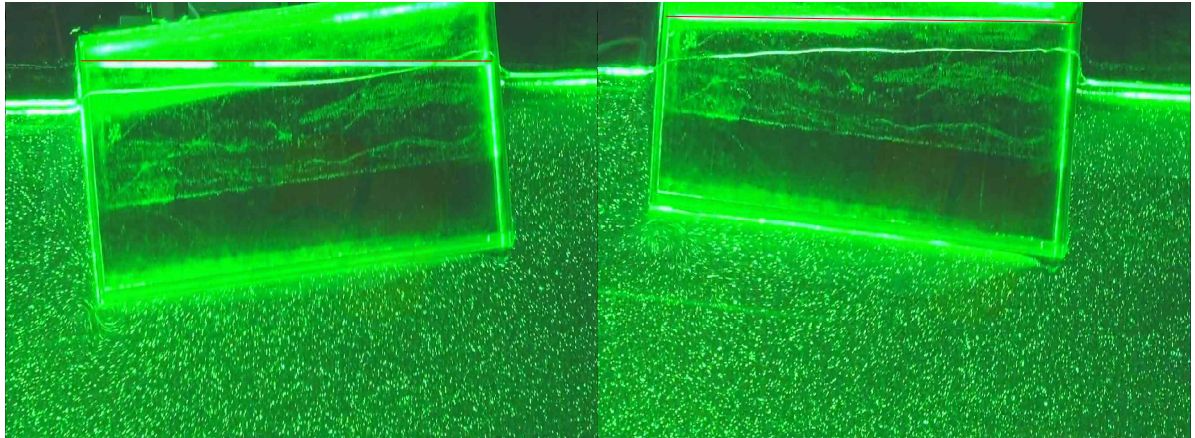


Fig. A.44 Incident wave period : 1.0 sec



Fig. A.45 Incident wave period : 1.1 sec

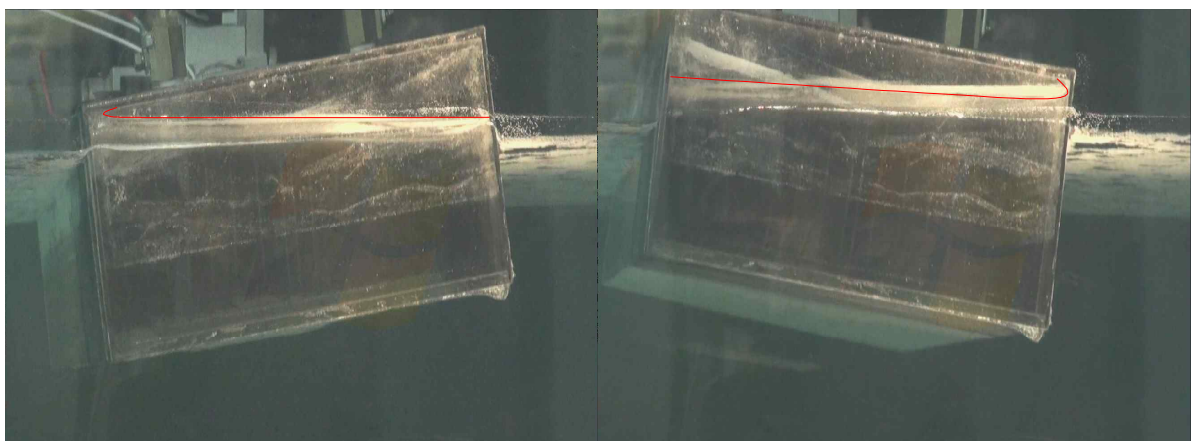


Fig. A.46 Incident wave period : 1.2 sec

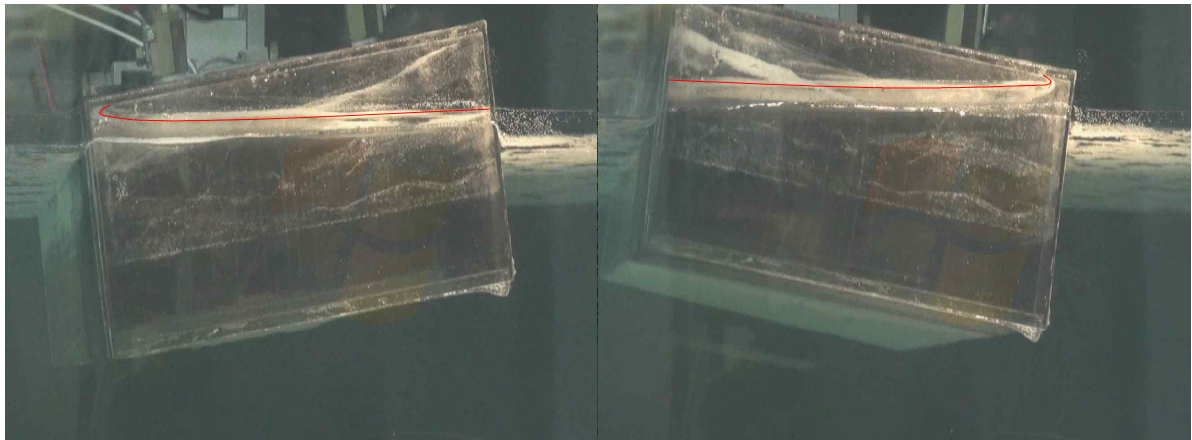


Fig. A.4-7 Incident wave period : 1.3 sec



Fig. A.4-8 Incident wave period : 1.4 sec

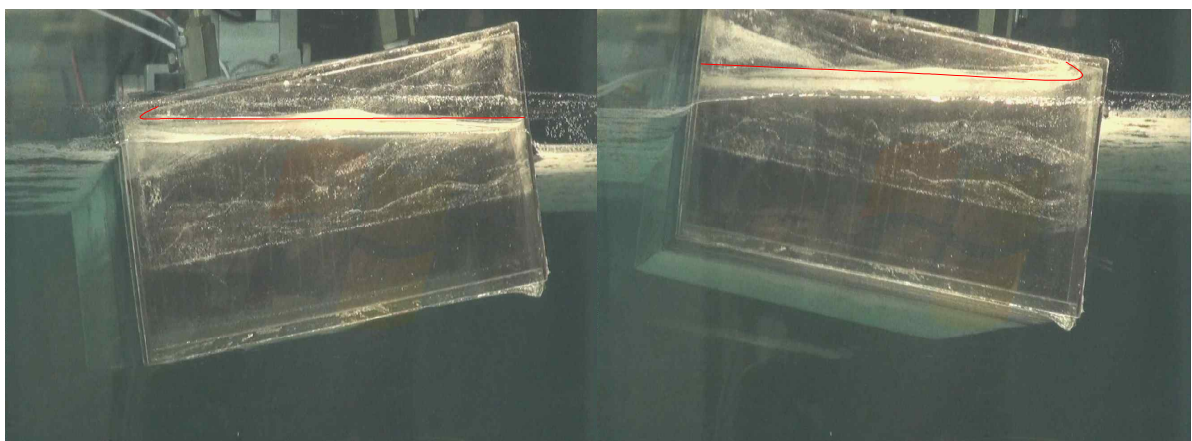


Fig. A.4-9 Incident wave period : 1.5 sec

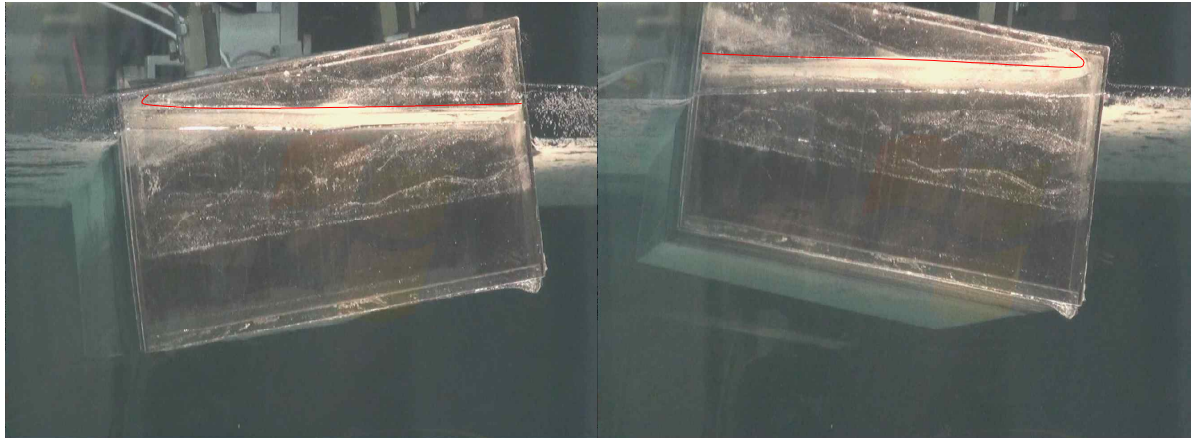


Fig. A.4-10 Incident wave period : 1.6 sec

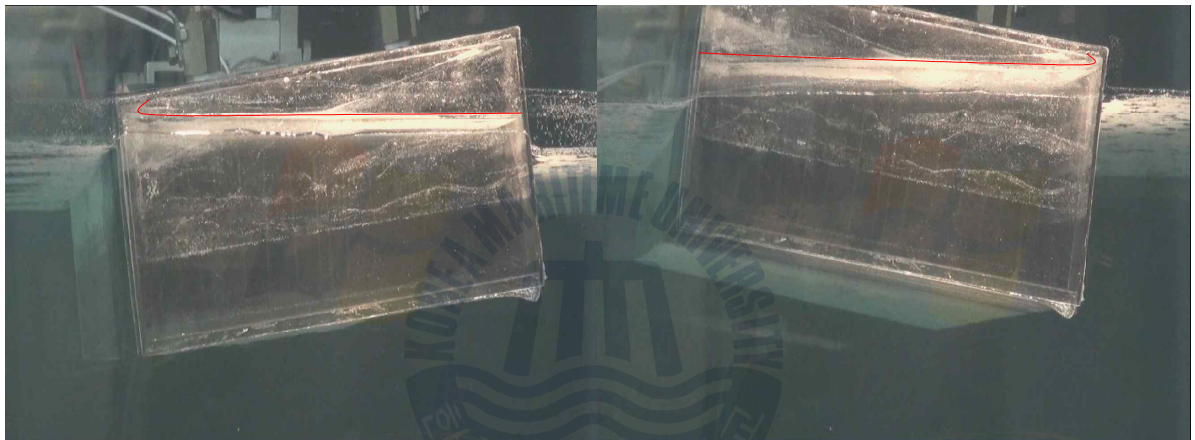


Fig. A.4-11 Incident wave period : 1.7 sec

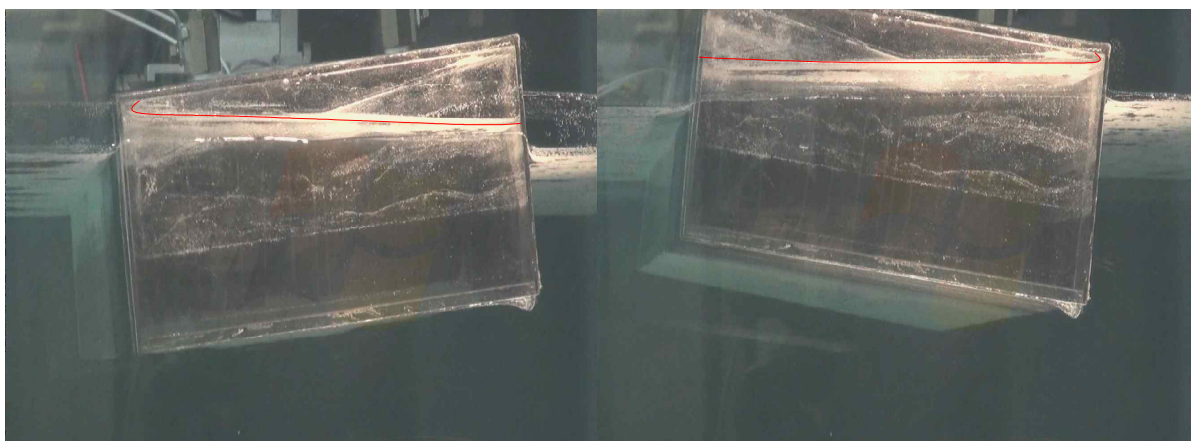


Fig. A.4-12 Incident wave period : 1.8 sec