



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

자유낙하실험을 통한 슬래밍 하중 특성이
구조물의 형상 및 두께 변화에
미치는 영향에 관한 연구

A study on the effect of slamming load
characteristics on changes in the shape and
thickness of elastic structures through
a free drop test

울산대학교대학원
조선및해양공학과
서 병 천

자유낙하실험을 통한 슬래밍 하중 특성이
구조물의 형상 및 두께 변화에
미치는 영향에 관한 연구

지도교수 서형석

이 논문을 공학박사 학위 논문으로 제출함

2022년 8월

울산대학교대학원
조선및해양공학과
서 병 천

서병천의 공학박사 학위 논문을 인준함

심사위원 최 윤 락 (인)

심사위원 서 형 석 (인)

심사위원 유 정 수 (인)

심사위원 정 효 석 (인)

심사위원 장 호 윤 (인)

울산대학교대학원

2022년 8월

자유낙하실험을 통한 슬래밍 하중 특성이 구조물의 형상 및 두께 변화에 미치는 영향에 관한 연구

서 병 천

울산대학교대학원 조선및해양공학과

국문 요약

극한의 환경에서 운용되는 해양 구조물에 발생하는 슬래밍 현상은 고려되어야 할 매우 중요한 요소이다. 슬래밍 현상은 고정식과 부유식 해양구조물 그리고 운항하는 선박 뿐만 아니라 해상의 파랑 조건에서 운용되는 모든 구조물에 영향을 미칠 수 있다. 슬래밍 현상에 대한 연구는 오랜 시간 지속되어 왔지만, 현재도 슬래밍 현상에 의한 구조의 손상이 꾸준히 보고되고 있다. 지금까지의 슬래밍 현상에 대한 실험은 구조물이 강체라는 가정 하에 수행 되었다. 따라서, 슬래밍 하중에 대한 구조물의 탄성 영향에 대한 연구가 필요하며 유체와 구조물이 충격 시 발생하는 하중에 대해 이해하고 설계 단계에서 충분히 고려되어야 한다. 그러기 위해서는 양질의 실험 결과가 제공 되어야 하며, 구조물의 탄성 영향과 단일 하중이 아닌 반복 하중이 구조물에 미치는 영향에 대한 실험적인 연구가 필요하다.

슬래밍 현상은 매우 짧은 시간에 발생하며, 구조물에 슬래밍 하중이 가해질 때 발행하는 영향에 대해 알기 위해서는 양질의 실험 결과가 요구된다. 이러한 양질의 실험 결과를 얻기 위해서는 반복 적인 실험을 통해 실험의 불확실성을 낮추어 신뢰성을 확보해야 한다. 실험의 불확실성을 낮추기 위해서는 실험의 세팅이 매우 중요한 요소이다. 슬래밍 현상은 매우 짧은 시간에 반복적으로 발행하기 때문에 실험의 세팅은 매우 중요한 변수이다. 구조물을 자유 수면과 수평하게 자유낙하를 시키기 위한 실험 장치와, 단 시간에 발생하는 슬래밍 하중을 계측하기 위한 적절한 센서의 선택 그리고 데이터의 저장 능력 등 수많은 실험의 변수들이 신중히 고려되어야 한다.

통상적으로 슬래밍 하중은 최대 압력(Peak pressure), 압력의 폭(Peak width) 그리고 압력의 지속시간(Duration)으로 표현이 가능하며, 최대 압력과 폭을 이상화한 압력 값(Impulse)등이 구조물에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 슬래밍 압력은 구조물의 Dead-rise angle 및 고유 주기에 영향을 받으며 자유 수면과 이루는

각인 Dead-rise angle이 3° ~ 10° 일 때 가장 큰 압력 값을 나타낸다.

본 논문에서는 실험적인 접근을 통하여 슬래밍 하중 특성을 이해하고 구조물의 재질을 나무와 철로 제작하여 강체와 탄성체에 대한 비교 실험을 수행하였다. 또한, Dead-rise angle과 두께를 변화함으로써 슬래밍 하중이 구조물에 미치는 영향을 연구하였다. 실험값을 활용하여 구조물에 미치는 상관관계를 분석함으로써 두께 추정식에 반영이 가능하다. 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 사용하여 실험에서 얻은 구조물의 거동특성과 비교함으로써 실험에 대한 신뢰성을 확보하고 누적 반복 손상에 대한 검증 및 예측이 가능하다.

실험은 울산대학교 해양공학수조 Trimming tank 및 특수 제작 된 슬래밍 실험 장비에서 수행됐으며, 자유 수면으로 구조물이 자유 낙하할 수 있도록 슬래밍 실험 장치를 구축하여 실험하였다. 구조물의 두께와 자유 수면과 이루는 각(Dead-rise angle), 낙하 높이를 다르게 하여 실험을 진행 하였으며, 구조물의 밑면에 압력센서를 설치하여 최대 압력, 압력의 폭 그리고 지속 시간을 계측 하였다. 스트레인 게이지를 부착하여 압력 센서에서 계측된 슬래밍 하중과 구조물의 거동 특성을 확인 하였다.

목차

국문요약	I
목차	III
그림 목차	VI
표 목차	IX
기호설명	XVII
제1장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구 목적 및 범위	5
제2장 자유 낙하 실험	7
2.1 자유 낙하 실험 장치	7
2.1.1 Trimming tank 실험장치	7
2.1.2 UOU 실험장치	8
2.2 자유 낙하 실험 방법	9
제3장 실험 모델	11
3.1 실험 모델 제원	11
3.1.1 Trimming tank slamming 실험 모델	11
3.1.2 UOU slamming 실험 모델	13
3.2 인장 실험	14
제4장 계측 센서 및 장비 설치	15
4.1 계측 센서	15
4.1.1 센서 위치	15
4.1.2 압력 센서	18
4.1.3 Strain 게이지	20
4.2 계측 장치 세팅	21
4.2.1 캘리브레이션	21
4.2.2 계측 정보 저장 및 수량	22

제5장 결과	23
5.1 Trimming tank slamming 실험 결과	23
5.1.1 Dead-rise angle 0°	24
5.1.2 Dead-rise angle 0°계측 결과 비교	25
5.1.3 Dead-rise angle 3°	29
5.1.4 Dead-rise angle 3°계측 결과 비교	30
5.1.5 Dead-rise angle 10°	34
5.1.6 Dead-rise angle 10°계측 결과 비교	35
5.1.7 Dead-rise angle 20°	39
5.1.8 Dead-rise angle 20°계측 결과 비교	40
5.2 UOU slamming 실험 결과	44
5.2.1 Dead-rise angle 0°	44
5.2.2 Dead-rise angle 10°	44
5.2.3 Cylindrical shape	47
5.3 UOU slamming 결과 비교	50
5.4 Second peak	51
5.5 Deflection	54
5.5.1 Dead-rise angle 0°	54
5.5.2 Dead-rise angle 10°	56
5.5.3 Cylindrical shape	57
제6장 실험식 추정	58
6.1 Dimensional analysis	58
6.2 Multiple regression analysis	62
6.3 Verification	63
6.4 실험식 추정 결과	64
제7장 시뮬레이션	66
7.1 서론	66
7.2 결과	69
제8장 결론 및 향후 연구	75
8.1 결론	75
8.2 향후연구	78

참고문헌	79
부록 A. Dead-rise angle 0°	83
부록 B. Dead-rise angle 3°	91
부록 C. Dead-rise angle 10°	99
부록 D. Dead-rise angle 20°	107
Abstract	115

그림 목차

그림 1.1 slamming 현상에 의한 선체 손상	1
그림 1.2 slamming 현상의 대표적인 네 가지 경우	2
그림 1.3 1:40 스케일 부유식 해상 풍력 발전기 운동 성능 모형 실험	2
그림 1.4 Horizontal slamming으로 인한 해양 구조물 인명 사고 사례	3
그림 2.1 울산대학교 해양공학수조 Trimming tank에 설치 된 slamming 실험 장치	7
그림 2.2 울산대학교 UOU slamming 실험 장치	8
그림 2.3 slamming 실험 루프	9
그림 2.4 UOU slamming 실험 장치 컨트롤 판넬	9
그림 2.5 UOU slamming 실험 방법 계략도	10
그림 3.1 Trimming tank slamming 실험 모델 사진 wood(좌), steel(우)	11
그림 3.2 Trimming tank slamming 모델의 제작 과정 및 설치 모습	12
그림 3.3 UOU slamming 실험 모델의 설치 모습 및 정면도	13
그림 3.4 slamming 실험 모델 시편의 인장 실험	14
그림 3.5 slamming 실험 모델 시편의 인장 실험 결과	14
그림 4.1 dead-rise angle이 0° 와 10°의 압력센서, strain 게이지의 위치 개략도	15
그림 4.2 dead-rise angle이 0° 와 10° 그리고 실린더 형상의 압력 센서, strain 게이지의 위치 개략도	15
그림 4.3 slamming 실험 모델에 설치 된 압력 센서와 strain 게이지	16
그림 4.4 설치 된 압력 센서 외관 모습	16
그림 4.5 slamming 하중 계측을 위한 압력 센서	18
그림 4.6 Piezoelectric type 센서와 strain type 센서의 비교	19
그림 4.7 NI 컴퓨터에 연결된 압력 센서와 strain 게이지 캘리브레이션	21
그림 4.8 데이터 샘플링 수에 따른 slamming 압력의 차이	22
그림 5.1 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력 비교	25
그림 5.2 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 strain 비교	25

그림 5.3 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭 비교	25
그림 5.4 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 Impulse 비교	26
그림 5.5 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 Coefficient of pressure 비교	27
그림 5.6 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력 비교	30
그림 5.7 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 strain 비교	30
그림 5.8 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭 비교	30
그림 5.9 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 Impulse 비교	32
그림 5.10 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 Coefficient of pressure 비교	32
그림 5.11 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력 비교	35
그림 5.12 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 strain 비교	35
그림 5.13 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭 비교	36
그림 5.14 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 Impulse 비교	37
그림 5.15 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 Coefficient of pressure 비교	38
그림 5.16 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력 비교	40
그림 5.17 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 strain 비교	40
그림 5.18 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭 비교	41
그림 5.19 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 Impulse 비교	42
그림 5.20 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 Coefficient of pressure 비교	43
그림 5.21 Dead-rise angle 10° 압력과 스트레인 그래프, 자유 낙하 속력: 4.43m/s (높이: 1.0m)	45
그림 5.22 Dead-rise angle 10° 압력과 스트레인 그래프, 자유 낙하 속력: 5.78m/s (높이: 1.7m)	46
그림 5.23 Cylindrical shape 압력과 스트레인 그래프, 자유 낙하 속력: 4.43m/s (높이: 1.0m)	47
그림 5.24 Cylindrical shape 압력과 스트레인 그래프, 자유 낙하 속력: 5.78m/s (높이: 1.7m)	48

그림 5.25 최대 압력 비교 낙하 속력(좌) 밑면 두께(우)	50
그림 5.26 dead-rise angle도가 0°와 10° Wood 모델의 압력 그래프	51
그림 5.27 dead-rise angle도가 10°와 실린더 형상 Steel 모델의 압력 그래프	51
그림 5.28 Hammer test for dead-rise angle 10° and cylindrical model	52
그림 5.29 Frequency analysis results	53
그림 5.30 dead-rise angle도가 0°의 변형 곡선	54
그림 5.31 dead-rise angle도가 10°의 변형 곡선	56
그림 5.32 cylindrical Shape의 변형 곡선	57
그림 6.1 실험식 추정을 위한 실험 항목 및 경우의 수 정리	58
그림 6.2 실험식 추정을 위한 종속 변수와 독립 변수의 분리	62
그림 6.3 생략 가능 독립 변수의 상쇄	62
그림 6.3 실험식 추정을 위한 상관 관계 분석	63
그림 6.4 실험 값과 추정식의 비교	63
그림 6.5 스트레인과 임펄스, 최대 압력 관계	64
그림 6.6 최대 압력과 임펄스 관계	64
그림 6.7 임펄스와 스트레인, 정압의 관계	65
그림 7.1 Dead-rise angle 10° 시뮬레이션 모델링	66
그림 7.2 시뮬레이션 모델에 적용된 응력-소성 변형 곡선	67
밑면 두께: 3mm, 자유 낙하 속력: 3.13m/s (높이: 1.0m)	67
밑면 두께: 8mm, 자유 낙하 속력: 3.13m/s (높이: 1.0m)	67
그림 7.3 시뮬레이션을 통한 영구 변형 예측 결과	69
그림 7.4 이상화 된 압력 형상	70
그림 7.5 dead-rise angle 10° 모델과 Cylindrical 모델 시뮬레이션 모델링	72
그림 7.6 시뮬레이션과 실험값에 대한 거동 특성 비교	73
그림 7.7 누적 하중에 따른 변형 예측	73
그림 7.8 첫 번째 자유 낙하 실험(좌)에서의 변형 및 다섯 번째 자유 낙하 실험(우)에서의 영구 변형	74
그림 8.1 실린더 형상 모델, 밑면 두께 5mm와 8mm의 air effect	75

표 목차

표 3.1 Trimming tank slamming 실험 모델 제원	11
표 3.2 UOU slamming 실험 모델 제원	13
표 3.3 인장 실험 결과	14
표 4.1 압력 센서 사양	18
표 4.2 Strain 게이지 사양	20
표 5.1 Bottom thickness 3mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	24
표 5.2 Bottom thickness 4mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	24
표 5.3 Bottom thickness 5mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	24
표 5.4 Bottom thickness 50mm(Wood), Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	24
표 5.5 Bottom thickness 3mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	29
표 5.6 Bottom thickness 4mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	29
표 5.7 Bottom thickness 5mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	29
표 5.8 Bottom thickness 50mm(Wood), Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	29
표 5.9 Bottom thickness 3mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	34
표 5.10 Bottom thickness 4mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	34
표 5.11 Bottom thickness 5mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	34

표 5.12 Bottom thickness 50mm(Wood), Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	34
표 5.13 Bottom thickness 3mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	39
표 5.14 Bottom thickness 4mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	39
표 5.15 Bottom thickness 5mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	39
표 5.16 Bottom thickness 50mm(Wood), Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value	39
표 5.17 dead-rise angle: 0° 실험 결과	44
(a) dead-rise angle: 0°, 자유 낙하 속력: 4.43m/s (높이: 1.0m)	44
(b) dead-rise angle: 0°, 자유 낙하 속력: 5.78m/s (높이: 1.7m)	44
표 5.18 dead-rise angle: 10° 실험 결과	44
(a) dead-rise angle: 10°, 자유 낙하 속력: 4.43m/s (높이: 1.0m)	44
(b) dead-rise angle: 10°, 자유 낙하 속력: 5.78m/s (높이: 1.7m)	45
표 5.19 dead-rise angle: Cylindrical 실험 결과	47
(a) dead-rise angle: Cylindrical, 자유 낙하 속력: 4.43m/s (높이: 1.0m)	47
(b) dead-rise angle: Cylindrical, 자유 낙하 속력: 5.78m/s (높이: 1.7m)	47
표 5.20 Comparison of natural frequency on the water	53
표 6.1 Selection of Variable	58
표 6.2 탄성에 영향을 미치는 매개 변수	59
표 7.1 실험 값과 시뮬레이션을 통한 변형 예측 값의 비교	69
(b)밀면 두께: 3mm, 자유 낙하 속력: 3.13m/s (높이: 1.0m)	69
(b)밀면 두께: 8mm, 자유 낙하 속력: 3.13m/s (높이: 1.0m)	69
표 7.2 반복 하중에 대한 최대 압력, 지속 시간 그리고 영구 변형 결과	71
표 7.3 시뮬레이션과 실험을 통한 최대 변형 결과	74

부록

- 표 A.1 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속력 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 80
- 표 A.2 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 80
- 표 A.3 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속력 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 80
- 표 A.4 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속력 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 ... 81
- 표 A.5 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속력 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 81
- 표 A.6 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속력 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 82
- 표 A.7 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 ... 82
- 표 A.8 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속력 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 ... 82
- 표 A.9 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속력 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 83
- 표 A.10 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속력 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 ... 83
- 표 A.11 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속력 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 84
- 표 A.12 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 84
- 표 A.13 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속력 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 ... 84
- 표 A.14 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속력 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 85
- 표 A.15 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속력 3.13m/s에서의 최대

	압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	85
표 A.16	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	86
표 A.17	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	86
표 A.18	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	86
표 A.19	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	87
표 A.20	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	87
표 B.1	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	88
표 B.2	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	88
표 B.3	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	88
표 B.4	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	89
표 B.5	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	89
표 B.6	밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	90
표 B.7	밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	90
표 B.8	밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	90
표 B.9	밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	91
표 B.10	밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	91

표 B.11	밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 92
표 B.12	밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 92
표 B.13	밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 92
표 B.14	밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 93
표 B.15	밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 93
표 B.16	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 94
표 B.17	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 94
표 B.18	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 94
표 B.19	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 95
표 B.20	밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 95
표 C.1	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 96
표 C.2	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 96
표 C.3	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 96
표 C.4	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 97
표 C.5	밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	· 97
표 C.6	밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대	

압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	98
표 C.7 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	98
표 C.8 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속력 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	98
표 C.9 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속력 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	99
표 C.10 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속력 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	99
표 C.11 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속력 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	100
표 C.12 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	100
표 C.13 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속력 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	100
표 C.14 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속력 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	101
표 C.15 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속력 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	101
표 C.16 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속력 1.40m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	102
표 C.17 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	102
표 C.18 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속력 2.43m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	102
표 C.19 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속력 2.80m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	103
표 C.20 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속력 3.13m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	103
표 D.1 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속력 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	104

- 표 D.2 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 ... 104
- 표 D.3 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속력 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 104
- 표 D.4 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속력 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 105
- 표 D.5 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속력 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 105
- 표 D.6 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속력 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 ... 106
- 표 D.7 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 106
- 표 D.8 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속력 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 106
- 표 D.9 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속력 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 ... 107
- 표 D.10 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속력 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 107
- 표 D.11 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속력 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 108
- 표 D.12 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 108
- 표 D.13 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속력 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 108
- 표 D.14 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속력 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 109
- 표 D.15 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속력 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 · 109
- 표 D.16 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속력 1.40m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값 110
- 표 D.17 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속력 1.98m/s에서의 최대

압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	110
표 D.18 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	110
표 D.19 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	111
표 D.20 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값	111

기호설명

P_p : Peak pressure

ρ : Density of the fluid (1000kg/m²)

C_p : Coefficient of pressure

V : Entry velocity

σ_{tr} and ε_{tr} : True stress and true strain, respectively

$\sigma_{Y,tr}$, $\sigma_{HS,tr}$ and $\sigma_{T,tr}$: True yield strength, hardening start stress and ultimate tensile strength, respectively

$\varepsilon_{Y,tr}$, $\varepsilon_{HS,tr}$ and $\varepsilon_{T,tr}$: True yield strain, hardening start strain and ultimate

σ_{YD} : Dynamic yield strength

a and b : The longer and shorter length of the plate, respectively.

τ : Duration of pressure

$T_{n,w}$: Natural frequency when one side is in contact with water and the other side is in air

ρ_l : density of liquid, and was assumed to be 1025kg/m³ for sea water.

ρ_p : density of the plate, in kg/m³

σ_Y and t : Yield strength and thickness of the wedge, respectively.

M/L^3 : Density (ρ)

L/T : Velocity(V)

L : Length(L)

B : Width(W)

t : Thickness(T)

M : Mass(M)

M/LT^2 : Elasticity(E)

M/LT^2 : Pressure(P)

$M^0L^0T^0$: Dead-rise angle(θ)

k_a : Correction factor for aspect ratio of plate

k_r : Correction factor for curved plate with stiffening direction

s : Stiffener spacing

t_k : Corrosion addition

f_1 : 1 material factor depending on material strength group

p_{sl} : design pressure

제1장 서론

1.1 연구배경

연료 및 원가 절감을 위해 가용 동력으로 더 빠른 속도와 기동성을 달성할 수 있는 선박을 설계 하기 위해 노력하고 있다. 선박이 대형화 되고 선속이 증가함에 따라 슬래밍 현상에 의한 피해 사례는 꾸준히 보고되고 있으며[12], 구조적인 손상과 더불어 인명의 피해까지 발생하고 있다[13]. 선박 및 해양 구조물에는 slamming, sloshing 그리고 green water와 같은 다양한 유형의 충격 압력 하중이 발생한다. 환경 하중과 관련한 대부분의 연구는 최대 압력을 추정하는데 중점을 두고 있다[14]. 슬래밍 하중은 이러한 최대 압력을 기준으로 정적인 압력으로 설계에 반영 된다[15]. 여러 연구 결과에 따르면 최대 압력뿐만 아니라 압력의 지속 시간도 구조물의 손상 정도를 예측하는데 중요한 역할을 한다[15]. 충격 하중에 대한 구조물의 국부변형의 크기나 파단의 발생 여부 및 발생한 파단의 크기에 대한 예측은 선박해양구조물의 안전성 평가에 매우 중요하다. 자항 능력이 있는 선박의 경우도 그렇지만 해상에서 오랫동안 한 자리에 머무는 해양구조물의 경우는 보수가 어렵고 비용이 많이 들기 때문에 사고로 인해 구조물에 발생하는 손상에 대해 초기 설계 단계에서부터 고려할 필요가 있다[25].

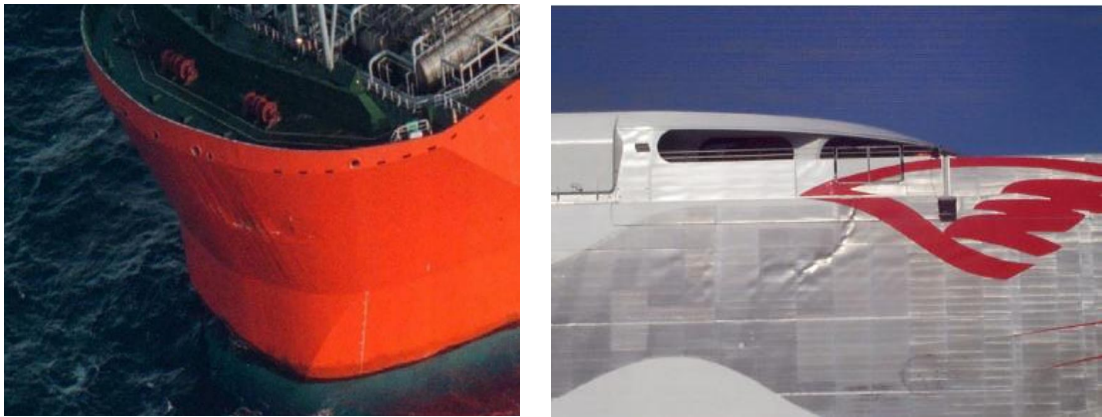


그림 1.1 slamming 현상에 의한 선체 손상

그림 1.1과 1.4는 극한의 환경에서 운용되는 선박이 슬래밍 하중으로 인한 구조의 손상을 보여준다. 슬래밍 충격 하중은 하중의 크기, 상승 시간 및 지속 시간으로 설명될 수 있다[39]. 예측되는 슬래밍 현상은 비선형 적이며 구조물의 움직임 및 형태의 영향을 받는다[2,7]. 해양에서 운용되는 모든 구조물은 슬래밍 현상에 의한 구조적인 손상에 염두를 두어야 하며, 최근 각광받는 부유식 해상 풍력 발전기의 경우도 예외는 아니다. 슬래밍 현상으로 인해 약 20년 이상의 설계 수명을 요구하는 해양 구조물과 부유식 해상 풍력 발전기의 구조 손상과 더불어 그 설계 수명을 현저히 단축시킬

수 있다.

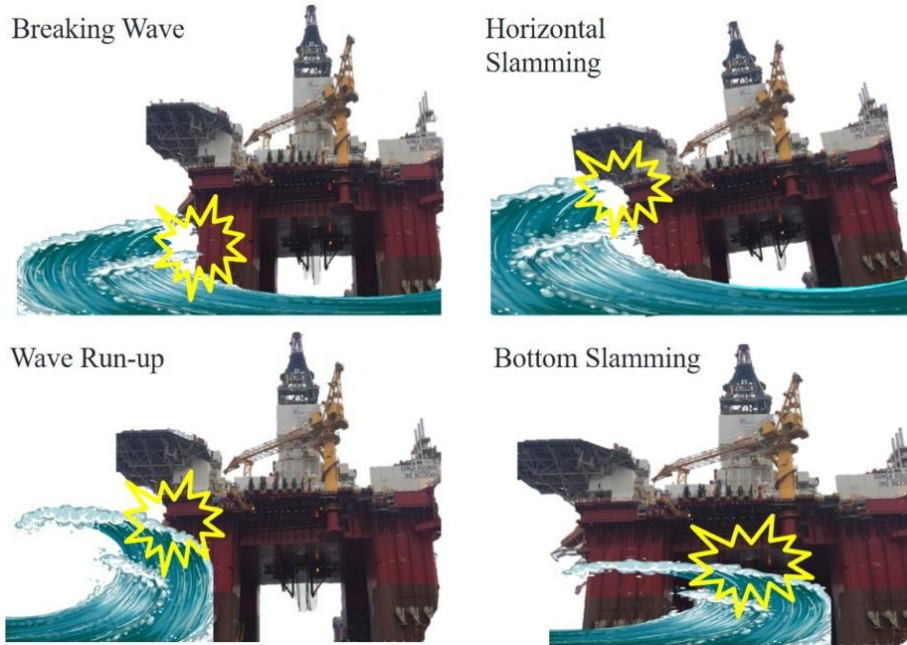


그림 1.2 slamming 현상의 대표적인 네 가지 경우

해양 구조물에서의 슬래밍 현상은 크게 네 가지로 분류할 수 있다[3,4,5]. 그림 1.2에 나타난 것과 같이 파고와 파장의 비가 1:7일 때 파도가 부서지면서 발생하는 breaking wave에 의한 slamming, 구조물의 heave운동과 pitch운동이 coupling되어 발생하는 horizontal slamming, 파도가 구조물의 외벽을 타고 오르며 발생하는 wave run-up slamming 마지막으로 파도가 구조물의 밑면을 강타하는 bottom slamming으로 명칭 할 수 있다.

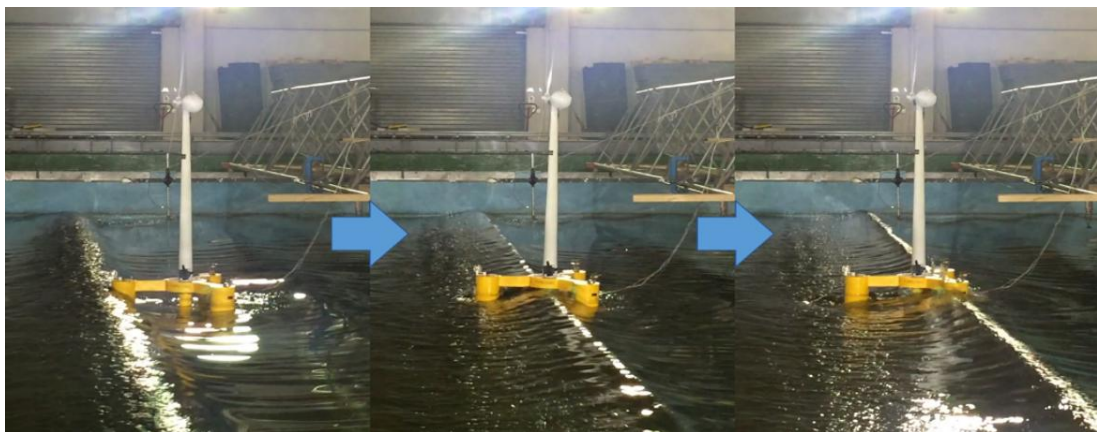


그림 1.3 1:40 스케일 부유식 해상 풍력 발전기 운동 성능 모형 실험

최근 재생 에너지에 대한 중요성과 관심이 높아짐에 따라 해상 풍력 발전기에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 한국도 이러한 추세에 맞추어 실증을 위한 연구가 활발히 진행 중이며, 이러한 이유 중 하나는 지리적 조건과 바람의 질이 우수하기 때문이다. 수심이 상대적으로 낮은 서해는 고정식 해상 풍력 발전기의 설치에 용이하며, 상대적으로 수심이 깊은 동해는 부유식 해상 풍력 발전기의 설치에 유리하며 대규모 단지의 생성이 가능하다. 이러한 해상 풍력 발전기의 경우 설계 단계에서부터 여러 기술적 측면을 고려해야 한다. 이 중 슬래밍 하중으로 인한 구조물의 손상을 미연에 방지하기 위한 연구 또한 필요하다. 그림 1.2는 불규칙 파랑에서 부유식 해상 풍력 발전기의 운동 성능을 평가하는 실험이다. 그림 1.2와 1.3에 묘사된 바와 같이 wave run-up slamming, bottom slamming, horizontal slamming 그리고 braking wave slamming 네 가지의 슬래밍 현상이 모형 실험에서 모두 발생하는 것을 확인할 수 있다[17,18].



그림 1.4 Horizontal slamming으로 인한 해양 구조물 인명 사고 사례

이러한 극한의 해상 환경에서 해양 구조물의 운동과 더불어 발생하는 슬래밍 현상은 더욱 위험할 수 있다. 그림 1.4는 Heave운동과 pitch운동이 복합적으로 발생한 상태에서 wave가 run-up하여 발생한 horizontal slamming으로 인해 실제 인명의 피해가 발생하는 안타까운 사고 사례도 있다. 이러한 슬래밍 현상을 설명하기 위해 동적 접근이 필요함을 나타낸다[6]. 슬래밍 하중의 동적 특성을 무시하고 정적으로 접근할 수 있는지에 대한 의문이 발생할 수 있다[18]. 슬래밍에 대한 분석 및 수치 해석[8]은 수 십년 동안 수행되어 왔으며, 이를 다양한 슬래밍 현상(썩기 및 원뿔[9,11,30] 및 평평한 모델[32]에 적용하기 위한 노력이 지속되었다.

본 연구에서는 trimming tank에서 수행된 dead-rise angle이 0°, 3°, 10°, 20° 그리고 슬래밍 전용 실험 장치에서 수행된 0°, 10°, 실린더 형상의 실험 모델의 두께와 자

유낙하 높이를 다르게 하여 실험을 수행하였다. 실험적인 접근을 통하여 슬래밍 하중 특성을 이해하고 구조물의 재질을 나무와 철로 제작하여 강체와 탄성체에 대한 비교 실험을 수행하였다. 또한, Dead-rise angle과 두께를 변화함으로써 슬래밍 하중이 구조물에 미치는 영향을 연구하였다. 실험값을 활용하여 구조물에 미치는 상관관계를 분석함으로써 두께 추정식에 반영이 가능하다. 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 사용하여 실험에서 얻은 구조물의 거동특성과 비교함으로써 실험에 대한 신뢰성을 확보하였다.

실험은 울산대학교 해양공학수조 Trimming tank 및 특수 제작 된 슬래밍 실험 장비에서 수행되었으며, 자유 수면으로 구조물이 자유 낙하할 수 있도록 슬래밍 실험 장치를 구축하여 실험하였다. 구조물의 두께와 자유 수면과 이루는 각(Dead-rise angle), 낙하 높이를 다르게 하여 실험을 진행 하였으며, 구조물의 밑면에 압력센서를 설치하여 최대 압력, 압력의 폭 그리고 지속 시간을 측정 하였다. 스트레인 게이지를 부착하여 압력 센서에서 측정된 슬래밍 하중과 구조물의 거동 특성을 확인 하였다.

1.2 연구 목적 및 범위

Seo, B.C et al. [30]의 저자는 dead-rise angle이 10° 를 이루는 모델을 사용하여 반복 낙하 실험을 수행하였다. 반복 되는 낙하 실험 후 각각의 변형을 측정하였으며, 대부분의 결과에서 슬래밍 충격 압력은 정적으로 가정되었으며, 동적 특성은 무시되었다. 이러한 가정의 바탕은 [21,22]의 저자에 의해 보고 된 바와 같이 충격 압력의 지속 시간이 영향을 받는 구조물의 고유 주기보다 더 크다는 것이었다. 슬래밍 압력에 대한 탄성 영향을 결정하기 위해 재질이 steel로 제작된 모델을 사용하여 자유 낙하 실험을 수행 하였다. 실험 모델이 자유 낙하 하며 수면과 충돌 할 때 압력을 계측 하였다.

일반적으로 압력의 지속 시간이 1 미만일 경우, 구조물의 거동 특성은 피크 압력 및 지속 시간에 관계없이 이상화 한 압력 값(Impulse) 값에 의해 결정된다. 반면 압력의 지속 시간이 1보다 큰 경우, 구조물의 거동 특성은 피크 압력에 의해 결정 된다[20]. 그러나 압력의 지속 시간이 구조물의 고유 주기와 유사하다면, 구조물의 거동 특성은 피크 압력과 지속 시간 모두의 영향을 받는다[19]. 압력은 매우 짧은 시간에 계측 되었으며, 몇 개의 피크 압력이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 계측 된 첫 번째 압력은 슬래밍으로 인한 충격 압력이고 두 번째 압력은 실험 모델의 고유 주기에 의한 상호 작용으로 인한 것이다. 두 번째 발생한 압력은 첫 번째 압력과 비교하여 무시할 수 없을 만큼 크게 계측 되었다. 파도는 주기적 혹은 불규칙 적으로 반복이 되며 구조의 손상을 일으킨다. [30,31]와 [32]은 슬래밍 하중에 의한 구조의 손상을 포함하고 있다. 본 논문에서는 압력 지속시간의 역수를 구조물의 고유 주기와 비교하였다.

본 연구에서는 탄성 영향이 구조물의 형상과 두께에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 실험 모델은 두 가지 종류로 제작 되었다. Wood를 사용하여 제작된 모델과 steel을 사용하여 제작된 모델이다. Wood를 사용한 실험 모델은 rigid한 성질에 대한 실험을 하고자 하였으며, steel로 제작된 실험 모델은 탄성 영향이 구조물의 거동 특성에 미치는 영향을 연구하고자 하였다. 또한, 울산대학교 해양공학 수조 trimming tank에서 수행된 실험의 경우 dead-rise angle이 0° , 3° , 10° 그리고 20° 인 모델을 사용하였으며, 각각의 두께는 3mm, 4mm 그리고 5mm이다. Rigid모델인 wood의 경우 밑면의 두께를 50mm로 제작 하였다. 다른 실험은 그 크기를 크게 하여 실제 구조물의 보강재가 설치되는 최소 크기로 제작 하였으며, 구조물의 거동 특성을 확실히 하고자 슬래밍 전용 실험 장치에서 수행된 실험이다. dead-rise angle(Dead-rise angle)이 0° , 10° 그리고 실린더 형태인 모델을 사용하였으며, 각각의 두께는 3mm, 5mm 그리고 8mm이다.

슬래밍 실험의 경우 매우 짧은 시간에 이루어지므로 압력 센서의 선택과 설치 그리고 계측된 정보를 받아들이고 저장하는 기법 또한 매우 중요한 변수 중 하나이다. 본 연구를 통하여 슬래밍 실험 기법에 대한 표준을 제시하고 계측된 압력 값인 최대 압력(Peak pressure), 압력의 폭(Peak width), 압력의 지속시간(Duration) 그리고 이를

이상화한 압력 값인 Impulse를 계측함으로써 양질의 실험 결과를 제공하고자 한다. 반복 시험을 통하여 시험 결과에 대한 신뢰성을 확보한 후 실험식을 추정하여 각각의 변수들의 상관관계를 분석하여 실험식 추정 및 검증함으로써 스트레인, 임펄스, 최대 압력과의 상관관계에 대해 변형률과 주기를 추정할 수 있으면 설계압력에 대한 설계가 가능하다는 결론이다. 이렇게 추정된 실험식의 관계는 최종 두께 추정 설계식에 반영할 수 있다.

마지막으로 슬래밍 하중에 따른 최종 변형량 예측이다. 슬래밍 현상은 단일 파랑에 대한 조건이 아니다. 또한, 탄성 영향에 대한 영향중 첫 번째 충격 후 여러 압력이 추가로 발생 하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션을 통해 탄성체의 거동 특성이 유사한 결과를 보이는 것을 확인 하였다. 이것은 시뮬레이션에 대한 검증 절차이며, 최종적으로 반복 누적 하중을 가해 실험에서 얻는 변형 값과 시뮬레이션을 통해 얻은 변형 값이 유사한 결과를 보이는 것을 확인 하였다.

충격력과 압력 분포에 대한 더 나은 이해를 통해 설계자는 이러한 힘을 견딜 수 있을 만큼 충분히 선체를 강화하고 극한의 조건에서 선체의 과도한 충격을 방지할 수 있는 선체 형태를 설계할 수 있다. 슬래밍 등과 같은 현상을 고려하여 해상에서 선박의 적절한 안전을 보장하기 위해 새로운 규정을 개발하는 데 도움이 될 것이다.

제2장 자유 낙하 실험

2.1 자유 낙하 실험 장치

2.1.1 Trimming tank slamming 실험 장치

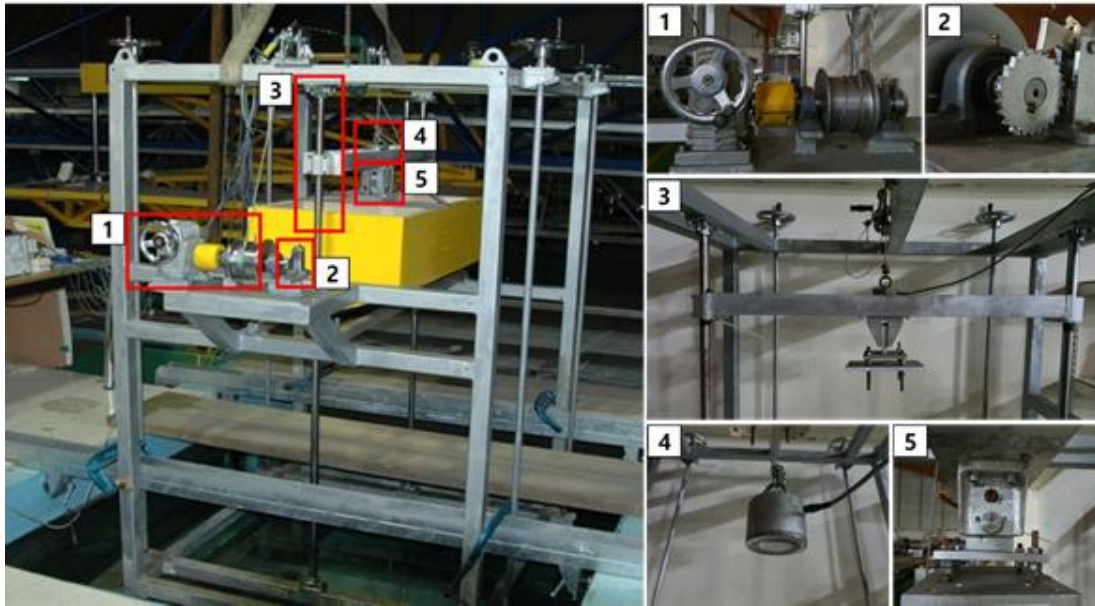


그림 2.1 울산대학교 해양공학수조 Trimming tank에 설치 된 slamming 실험 장치

그림 2.1은 울산대학교 해양공학수조 trimming tank에 설치 된 슬래밍 실험 장치이다. 그림 2.1에 표기된 1은 슬래밍 실험 모델을 들어 올릴 때 사용되는 장치로써 유압을 사용하도록 제작된 것으로 감축기어가 내장돼 있어 슬래밍 실험 모델을 들어 올리는데 더욱 용이하도록 설치되었다. 그림 2.1에 표기된 2번은 실험 장치 중 가장 중요한 것으로써 안전한 실험을 위한 제어 장치이다. 톱니를 사용한 아날로그 방식으로 의도하지 않은 전류의 차단이 발생 했을 때 구조물이 낙하하지 않도록 기계적으로 실험 모델을 지지하는 장치이다. 그림 2.1에 표기된 3번은 가이드 레일을 나타낸다. 실험 모델이 자유 수면과 수평 하게 낙하 하도록 지지하는 역할을 한다. 그림 2.1에 표기된 4번은 전자적으로써 실험 모델을 들어 올리고 자유낙하를 실행 할 때 사용된다. 전류를 차단함으로써 실험 모델은 자유낙하를 하게 된다. 그림 2.1에 표기된 5번은 수평을 맞추기 위한 미세 조절장치이다. 자체적으로 제작한 실험 모델이 정밀한 가공을 거쳐 제작이 되어도 자유 수면과 완벽한 수평을 이루기 힘들기 때문에 자유 수면과 완전한 수평을 이루기 위한 장치이다. 실험에 사용된 trimming tank의 제원은 가로와 세로의 길이는 2,000mm 수심은 1,000mm이다.

2.1.2 UOU slamming 실험 장치

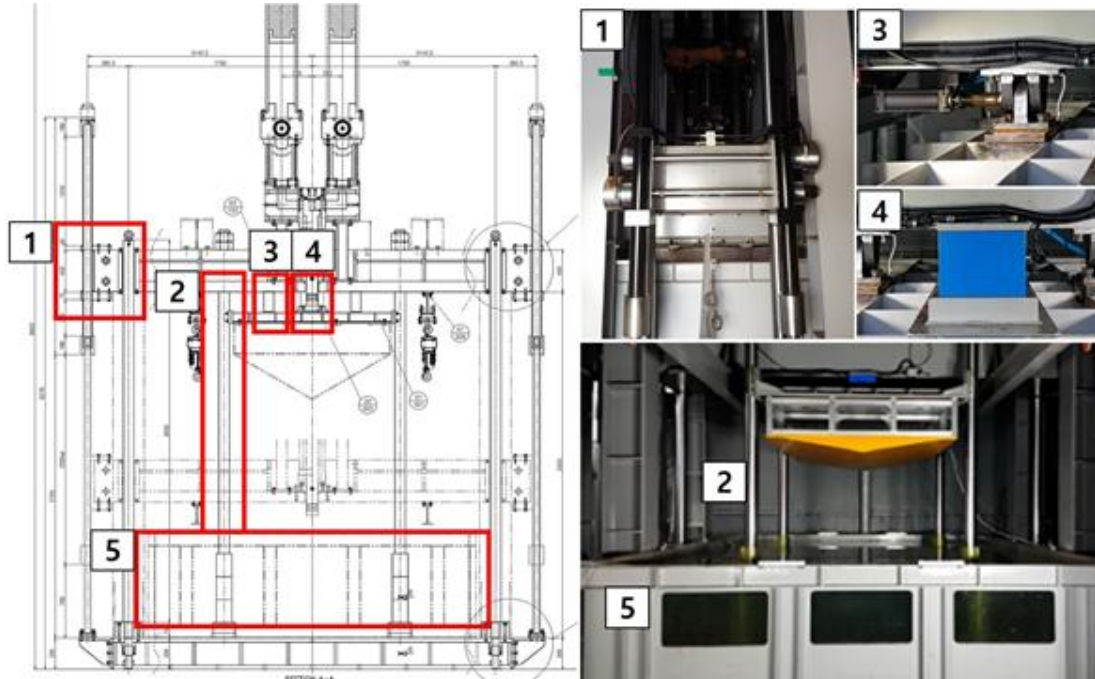


그림 2.2 울산대학교 UOU slamming 실험 장치

그림 2.2는 UOU(University of Ulsan) 슬래밍 실험 장치를 보여준다. 이하 UOU 슬래밍 장치로 표기한다. 슬래밍 실험 전용으로 자체 제작된 장치로써 trimming tank 보다 큰 모델의 슬래밍 실험이 가능하다. 그림 2.2의 1은 유압을 사용하여 실험 모델을 들어 올리는 장치로 가이드 레일을 따라 수면과 수평하게 시료를 실험 높이까지 들어 올리는 역할을 한다. 그림 2.2의 2는 슬래밍 실험 모델이 실험 장치에 설치된 전체의 모습을 보여준다. 노란색으로 보이는 것이 rigid로 가정한 나무로 제작된 모델이 설치되어있는 모습이며, 회색으로 보이는 기둥은 가이드 레일이다. 실험 모델이 자유 수면과 수평하게 낙하하도록 지지하는 역할을 한다. 그림 2.2에 표기된 3번은 실험 장치 중 가장 중요한 것으로써 안전한 실험을 위한 제어 장치이다. 전자석을 사용하는 장치로써 의도하지 않은 전류의 차단이 발생했을 때 구조물이 낙하하지 않도록 전력과 별개로 공기압을 사용하여 기계적으로 실험 모델을 지지하는 장치이다. 그림 2.2에 표기된 4번은 전자석으로써 실험 모델을 들어 올리고 자유낙하를 실행할 때 사용된다. 전류를 차단함으로써 실험 모델은 자유낙하를 하게 된다. 그림 2.2의 5번은 UOU 슬래밍 실험 장치의 tank이다. Tank의 제원은 가로 3,000mm 세로 4,000mm 그리고 수심은 1,000mm이다.

2.2 자유 낙하 실험 방법

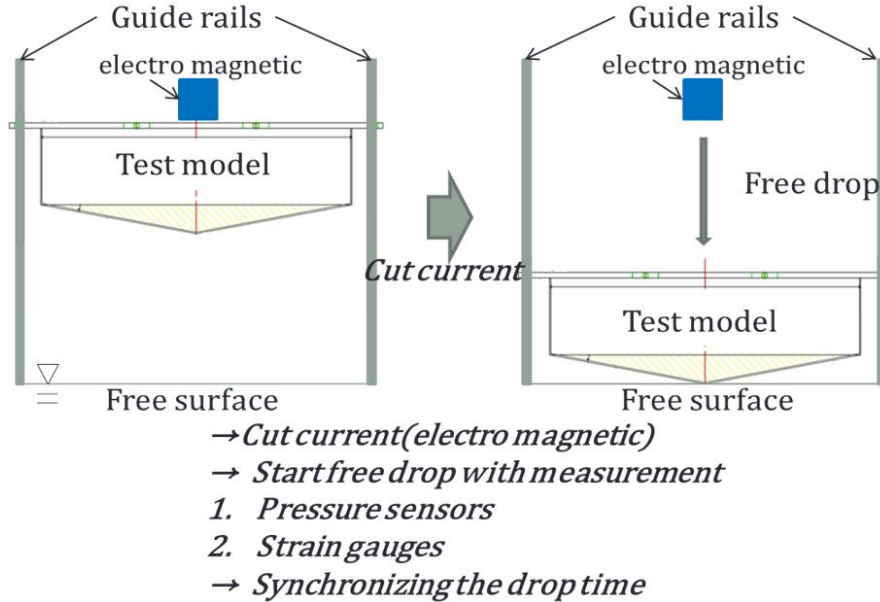


그림 2.3 slamming 실험 루프

그림 2.3은 슬래밍 실험 절차에 대한 전체적인 계략도를 나타낸다. 낙하 실험기에 실험 모델을 설치 한 후 전자석을 사용하여 실험 높이까지 실험 모델을 들어 올린다. 전류를 차단함과 동시에 실험 모델은 가이드 레일을 따라 자유 수면으로 중력에 의해 자유 낙하 하게 된다. 전류를 차단함과 동시에 압력 센서와 strain 게이지의 정보가 실시간으로 동기화 되어 컴퓨터에 저장된다.

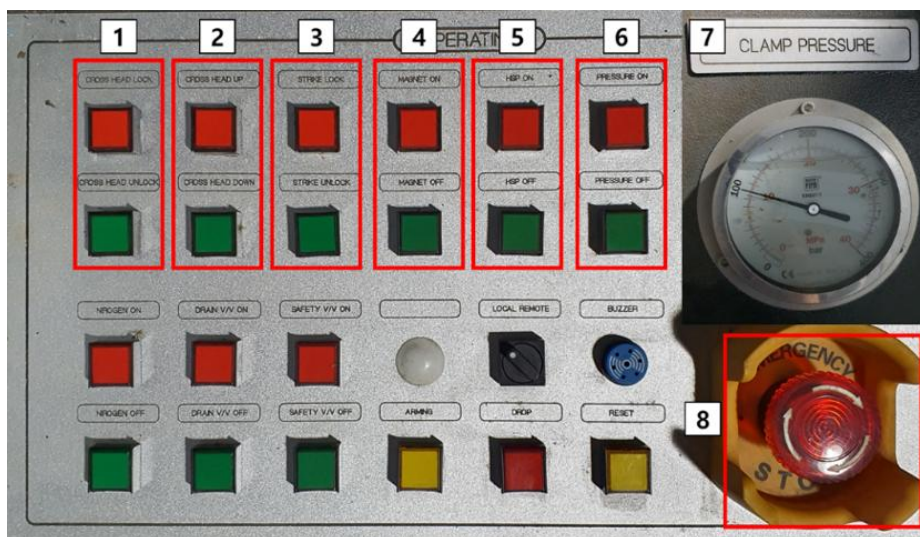


그림 2.4 UOU slamming 실험 장치 컨트롤 패널

그림 2.4은 UOU 슬래밍 실험 장치의 컨트롤 패널이다. 유압 및 전력을 사용하는 장비로써 절차와 방법에 대해 서술 하였다. 실험의 진행 순서대로 서술 하면 그림 속 5번 HSP 버튼을 ON으로 설정 한 후 Pressure ON으로 설정한다. 이때, 주의 사항으로는 7번 항목인 Clamp pressure게이지의 눈금이 100Bar에 향해 있는 것을 확인한다. UOU 슬래밍 실험 장치에는 실험 직전 까지도 두 가지의 안전장치가 설정 돼 있다. 하나는 앞서 설명한 전력의 차단이 갑자기 발생 하였을 경우를 대비한 공기 압력을 사용한 클램프이며, 다른 하나는 전력과 상관없이 유압을 사용한 클램프 장치이다. 공기 압력을 사용한 클램프가 작동 상태인 것을 유관으로 확인 한 후 Magnet ON버튼으로 전자석을 사용하여 실험 모델을 부착 한다. 그림 2.4의 1버튼인 Cross head unlock버튼을 눌러 유압 안전장치인 7번 게이지의 눈금이 0이 된 것을 확인한 후, 2번 버튼인 Cross head up-down버튼을 사용하여 실험 목표에 도달할 수 있도록 높이를 조절한다. 마지막으로 공기압을 사용한 안전장치인 Strike unlock버튼을 작동하여 공기압 클램프를 해제 하면 자유낙하 실험 전까지의 준비 단계는 마무리 된다. 슬래밍 실험은 중량물을 취급하며 중력에 의한 자유 낙하가 이루어지기 때문에 각별히 안전에 주의를 기울여야 한다. 안전에 기하여 모든 실험 준비가 완료 되면 4번의 Magnet off버튼을 눌러 실험 모델을 자유낙하 시킨다. 위에 나열된 일련의 과정 중 만일 문제가 발생한다면 8번에 표시된 긴급 정지 버튼을 사용하여 정지시킴으로써 실험을 중단 할 수 있다. 실험 방법의 계략도는 그림 2.5에 표현하였다.

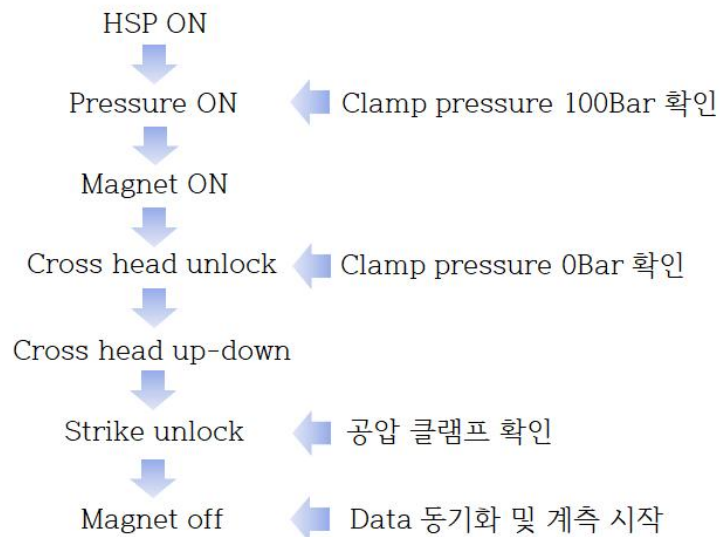


그림 2.5 UOU slamming 실험 방법 계략도

제3장 실험 모델

3.1 실험 모델 제원

3.1.1 Trimming tank 모델

표 3.1 Trimming tank slamming 실험 모델 제원

Material	Wood		Steel	
Length [mm]	1,000			
Width [mm]	600			
Height [mm]	400			
Mass [kg]	60			
Bottom plate thickness [mm]	50	3	4	5
Dead-rise angle [deg.]	0, 3, 10, 20			

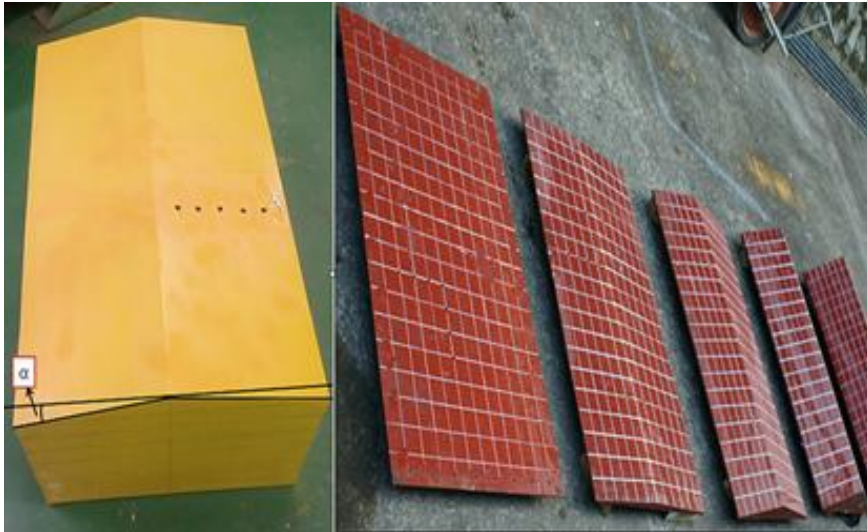


그림 3.1 Trimming tank slamming 실험 모델 사진 wood(좌), steel(우)

표 3.1과 그림 3.1은 trimming tank에서 수행된 슬래밍 실험 모델의 제원과 사진이다. 재질은 그림 3.1의 좌측의 노란색 모델은 rigid 실험을 위해 wood로 제작된 모델과 우측의 붉은 색의 모델은 탄성 영향에 대한 실험을 위한 steel로 제작된 모델을 보여준다. 표 3.1에 나타난 것과 같이 모델의 길이는 1,000mm, 너비 600mm, 높이 400mm이며, 질량은 모두 60kg으로 동일하게 하였다. 밑면면의 두께는 wood의 경우 50mm로 제작 되었으며, steel의 경우 탄성에 의한 영향을 알아보기 위해 3mm, 4mm 그리고 5mm로 제작 되었다. 두께의 차이만큼 발생한 질량은 무게 추를 사용

하여 증가 시키며 실험 모델의 질량이 모두 60Kg이 되도록 하였다. Dead-rise angle은 각각의 두께별로 0°, 3°, 10° 그리고 20° 이다.

그림 3.2는 trimming tank 슬래밍 실험 모델의 제작 과정과 설치 된 모습을 나타낸다. 울산대학교 해양공학 수조 목공실에서 재질이 wood인 모델의 제작되었으며, steel의 경우 CATIA를 통한 디자인 과정을 거쳐 제작 설치하였다.

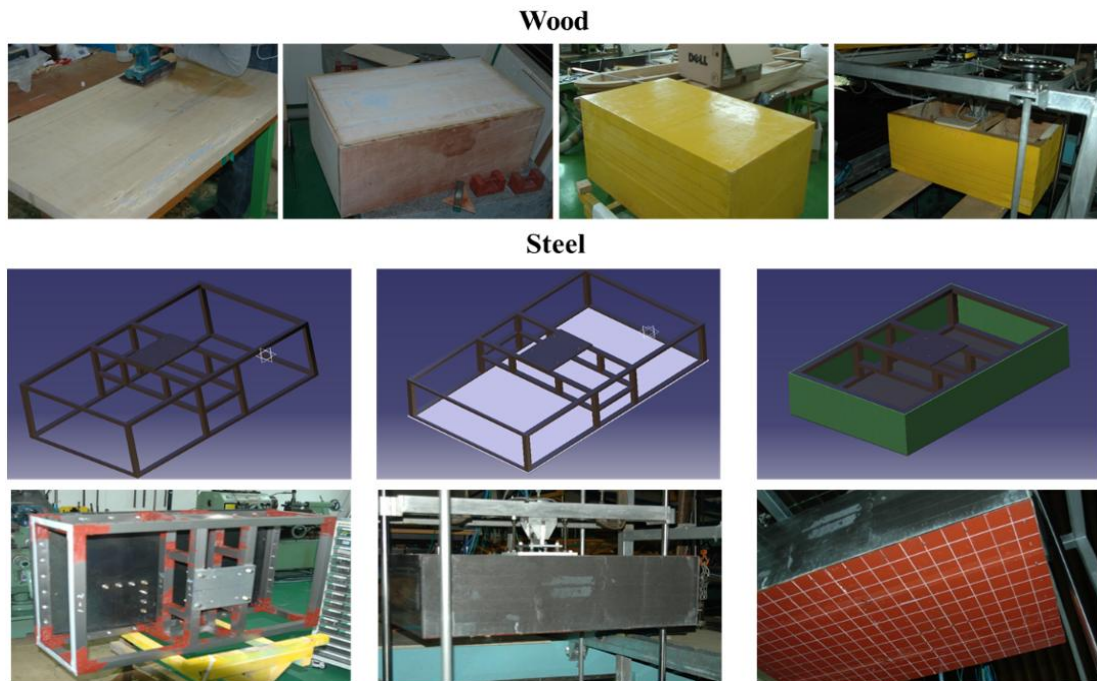


그림 3.2 Trimming tank slamming 모델의 제작 과정 및 설치 모습

3.1.2 UOU slamming 실험 모델

표 3.2 UOU slamming 실험 모델 제원

Material	Wood		Steel	
Length [mm]	2,000			
Width [mm]	1,200			
Height [mm]	300			
Mass [kg]	400			
Bottom plate thickness [mm]	100	3	5	8
Dead-rise angle [deg.]	0, 10		0, 10, Cyl.	

표 3.2와 그림 3.3은 UOU 슬래밍 실험 장치에서 수행된 실험 모델의 제원과 사진이다. 재질은 그림 3.3의 상단 노란색을 띠는 rigid 실험을 위해 wood로 제작된 모델과 탄성 영향에 대한 실험을 위한 하단에 보이는 steel로 제작 되었다. 표 3.2에 나타난 것과 같이 모델의 길이는 2,000mm, 너비 1,200mm, 높이 300mm이며, 질량은 모두 400kg으로 동일하게 하였다. 밑면면의 두께는 wood의 경우 100mm로 제작 되었으며, steel의 경우 탄성에 의한 영향을 알아보기 위해 3mm, 5mm 그리고 8mm로 제작 되었다. 두께의 차이만큼 발생한 질량은 무게 추를 사용하여 증가 시키며 실험 모델의 질량이 모두 400Kg이 되도록 하였다. Dead-rise angle은 wood의 경우 0°와 10°이며, steel의 경우 각각의 두께별로 0°, 10° 그리고 실린더 형상이다.

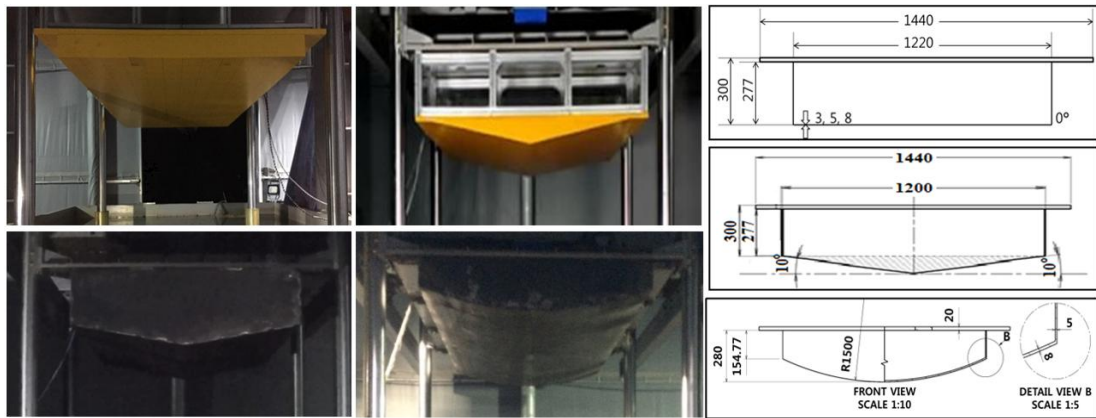


그림 3.3 UOU slamming 실험 모델의 설치 모습 및 정면도

3.2 인장 실험

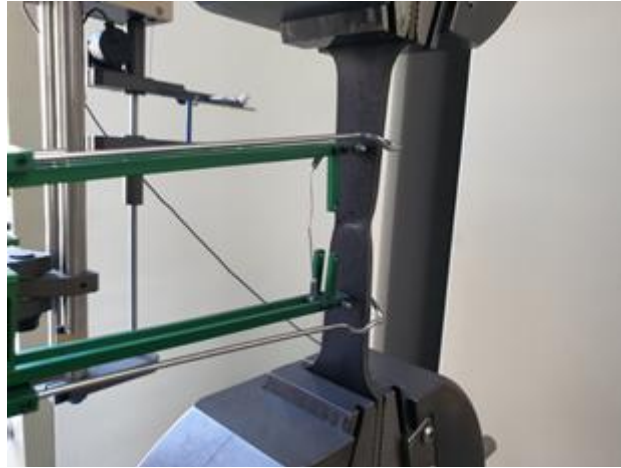


그림 3.4 slamming 실험 모델 시편의 인장 실험

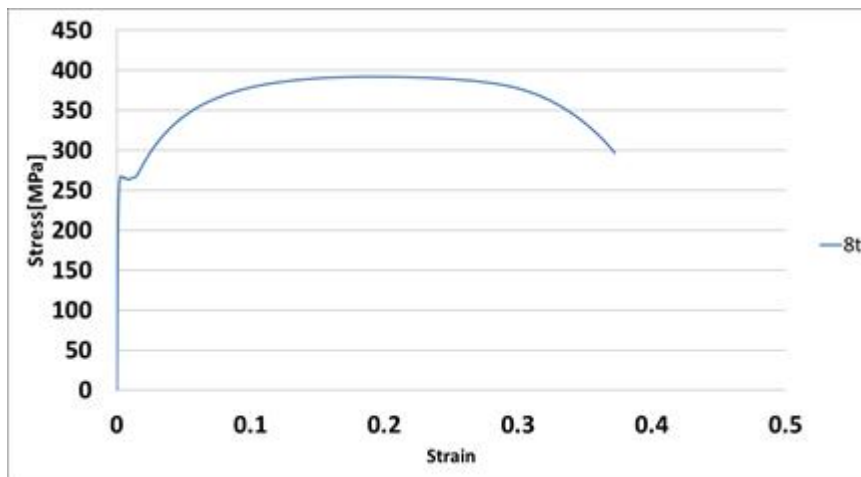


그림 3.5 slamming 실험 모델 시편의 인장 실험 결과

표 3.3 인장 실험 결과

Thickness		Yield Stress	Ultimate Strength
Nominal [mm]	Actual [mm]	[MPa]	[MPa]
8.0 mm	7.9	266.2	392.3

실험에 사용된 steel의 재질은 mild steel (SS41 grade)로, 해양 구조물의 제작에 일반적으로 널리 사용되는 재질이다. 인장 강도 실험은 [1]에 의해 제공된 절차에 따라 인증된 실험 시편과 실험기를 사용하여 수행되었다. 그림 3.5와 표 3.3에 명기된 것처럼 항복 응력은 266.2 Mpa이다.

제4장 계측 센서 및 장비 설치

4.1 계측 센서

4.1.1 센서 위치

본 실험에서 계측 된 물리적 값은 Pressure 와 strain이다. 그림 4.1, 4.2와 같이 총 8개의 압력 센서와 strain 게이지가 설치 됐으며 압력 센서는 모델의 중심으로부터 수평 수직으로 각각 100mm떨어진 위치에 설치되었다. Strain 게이지는 압력 센서와 대칭이 되는 위치에 설치하였다. 압력 센서의 위치는 그림의 붉은 점으로 표시 되었 으며 strain 게이지의 위치는 노란색으로 표시 하였다.

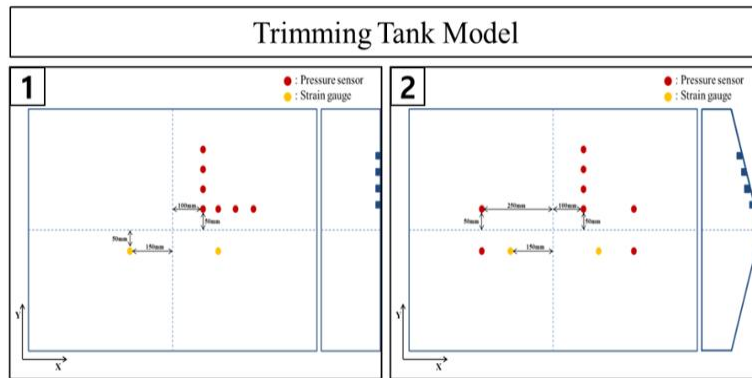


그림 4.1 dead-rise angle이 0° 와 10°의 압력센서, strain 게이지의 위치 개략도

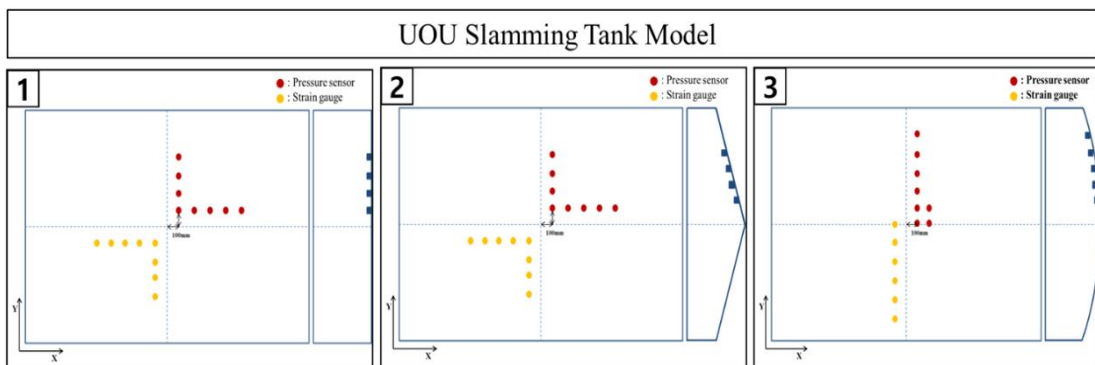


그림 4.2 dead-rise angle이 0° 와 10° 그리고 실린더 형상의 압력 센서, strain 게이지의 위치 개략도

Dead-rise angle이 0°인 모델의 경우 모든 압력 센서가 수면에 닿는 시간이 동일하게 된다. Dead-rise angle이 3°, 10° 또는 실린더의 경우 자유 수면과 접촉하는 시간의 차이가 발생하게 된다. 중앙에 가까운 곳에 설치 된 압력센서가 수면과 가장 먼저

접촉 하게 되고 입수 과정을 거치며 순차적으로 압력 센서가 반응 하게 된다. 또한 압력 센서의 위치를 동일한 라인에 설치함으로써 자유 낙하한 모델이 자유 수면과 수평 하게 낙하 하였는지 압력 센서의 그래프가 동시에 반응하는 것을 확인함으로써 실험의 신뢰성을 확보하였다.

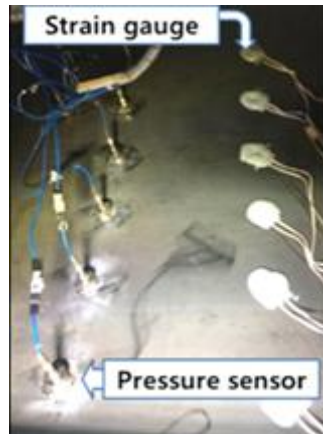


그림 4.3 Slamming 실험 모델에 설치 된 압력 센서와 strain 게이지

그림 4.3은 슬래밍 실험 모델에 설치 된 압력 센서와 strain 게이지를 나타낸다. 압력 센서는 별도의 소켓을 제작 하여 고정하였으며 strain 게이지는 전기적 신호가 왜곡되지 않도록 그림에 보이는 것과 같이 흰색 방수 실리콘을 사용하여 방수 처리 하였다. 압력 센서와 strain 게이지의 계측 정보는 자유 낙하가 시작됨과 동시에 동기화 되어 컴퓨터에 저장된다.



그림 4.4 설치 된 압력 센서 외관 모습

슬래밍 실험에 있어 압력 센서의 설치는 매우 중요한 요소이다. 압력 센서를 연결하는 소켓의 제작과 설치가 정밀해야 하며, 설치 된 압력 센서는 실험 모델의 표면과 1mm의 돌출이나 함몰이 되어서는 안 된다[16]. 센서가 돌출 되거나 함몰되어 설치

될 경우 압력 값이 실제보다 더 크거나 작게 나오는 현상이 발생할 수 있다[24]. 그림 4.4는 설치 된 압력 센서를 나타내며 사진과 같이 실험 모델의 표면과 정확히 일치하도록 설치 된 것을 확인할 수 있다.

4.1.2 압력 센서

표 4.1 압력 센서 사양

Sensor Number	Voltage Sensitivity	
1	4.967 mV/PSI	720.4 mV/Mpa
2	5.043 mV/PSI	731.5 mV/Mpa
3	5.044 mV/PSI	731.6 mV/Mpa
4	4.963 mV/PSI	719.8 mV/Mpa
5	5.047 mV/PSI	732.0 mV/Mpa
6	4.963 mV/PSI	719.8 mV/Mpa
7	5.067 mV/PSI	734.9 mV/Mpa
8	5.061 mV/PSI	727.5 mV/Mpa

슬래밍 실험에 있어 압력 센서의 선택은 매우 중요한 요소이다. 센서의 타입이나 사양 그리고 작동 방식에 따라 압력 그래프의 형태가 왜곡될 수 있다. 표 4.1은 압력 센서의 사양을 나타낸다[27]. 압력 센서는 슬래밍 압력을 측정하는데 필요한 반응 대역이 크며 반응의 속도가 매우 빠른 것을 사용하였다. 일반적으로 센서는 마이크로 초 단위의 응답 속도와 높은 주파수 응답 속도를 갖는다. 위에 언급한 것과 같이 압력 센서가 설치 되었으며, 본 연구에 사용된 센서의 공진 주파수는 500kHz보다 높은 것을 사용하였다. 실험에서 측정 한 impulse 압력 하중은 센서 유형, 크기 및 감도의 영향을 받는다[38]. 일반적인 압력 센서는 압전 타입 및 변형 타입의 센서이다. 본 연구에서는 두 가지 유형의 센서를 비교하여 슬래밍 실험에 적합한 센서를 선정하였다. 압전 타입 센서는 strain 게이지나 로드셀과 같이 부하에서 변형되지 않으며, 압 전형이기 때문에 센서는 더 단단하며 더 높은 주파수 영역에 대한 계측이 가능하다. 압 전 타입 센서는 동적인 소자가 없기 때문에 피로 또는 감도면에서 강점이 있다. 이는 센서의 수명을 늘리고 strain 게이지 타입 센서보다 교정 할 필요성을 줄인다. 압전 기술의 또 다른 이점은 하나의 센서를 여러 측정 범위에 사용할 수 있다는 것이다. $V=Q/C$ (V 는 전압 출력, Q 는 생성 된 전하, C 는 시스템 커패시턴스), 전하 증폭기는 C 의 값을 조정하여 여러 전기 출력 범위를 선택할 수 있다[34].

Strain 게이지타입의 압력 센서의 기술이 주파수 응답에 제한되는 이유는 strain 게이지 디자인에서 비롯된다. strain 게이지의 감도는 원하는 측정 범위에 맞게 크기를 조정해야 하는 구조의 강성에 의해 고정된다. 강성은 주파수 응답을 제어하며, 강성이 높을수록 달성 가능한 주파수가 높아진다. Strain 타입 센서는 몇 가지 단점이 있다. 따라서 압전 타입 센서는 strain 타입 센서보다 더 많은 응용 분야를 포괄 한다.

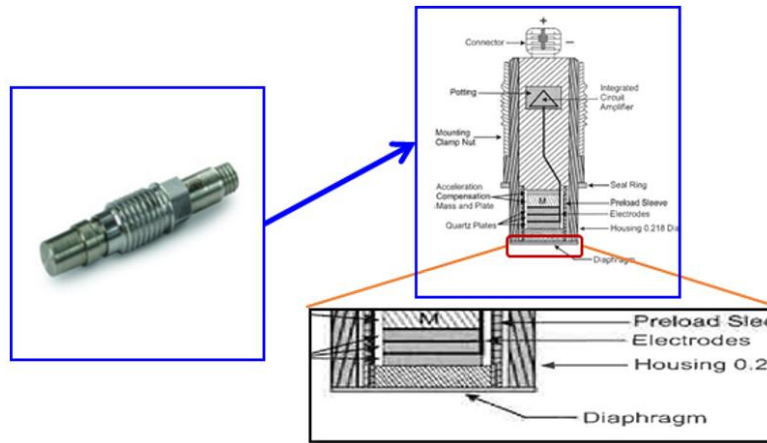


그림 4.5 Slamming 하중 계측을 위한 압력 센서

그림 4.5는 본 실험에 사용된 압력 센서를 나타낸다. Diaphragm의 재질이 온도의 영향에 민감하지 않은 Invar인 압력 센서를 사용하였으며, 압력 센서의 캘리브레이션은 표 4.1에 나열된 초기 값을 설정하고 보정하여 사용하였다.

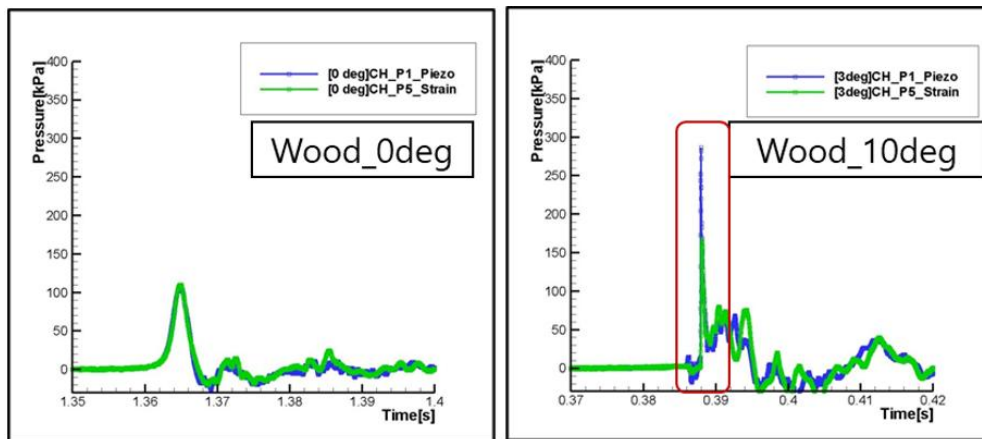


그림 4.6 Piezoelectric type 센서와 strain type 센서의 비교

그림 4.6은 strain 타입의 압력 센서와 Piezoelectric type 센서의 반응 차이를 나타낸다. 실험 조건은 wood로 제작된 모델을 사용했으며 센서 외의 모든 조건은 동일하게 하여 센서의 차이에 대해 알아보았다. dead-rise angle이 0° 인 경우에는 압력의 최대값의 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 dead-rise angle이 10° 인 경우 압력의 최대값이 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 슬래밍 현상이 매우 단 시간에 발생하는데 비해 strain 타입의 압력 센서는 압전 타입의 센서에 비해 그 반응 속도가 현저히 느리기 때문이다.

4.1.3 Strain 게이지

표 4.2 Strain 게이지 사양

Gauge Length	Gauge Factor	Gauge Resistance
6 mm	1 = 2.10, 2 = 2.10, $\pm 1\%$	120 \pm 0.5 Ω

구조물의 거동 특성과 변형을 계측하기 위해 strain 게이지를 설치하였다. Strain 게이지의 사양은 표 4.2에 서술하였다. Strain 게이지는 두 개의 채널이 사용되었으며, X-방향과 Y-방향의 변형을 측정 하였다. Strain값을 사용하여 시뮬레이션 데이터와 비교 하였으며 구조물의 거동 특성을 파악하는 결과로 사용하였다. 표 4.2에 작성된 strain 게이지 저항 값과 계수를 사용하여 초기 값을 설정하고 보정하여 캘리브레이션 하였다.

4.2 계측 장치 세팅

4.2.1 캘리브레이션

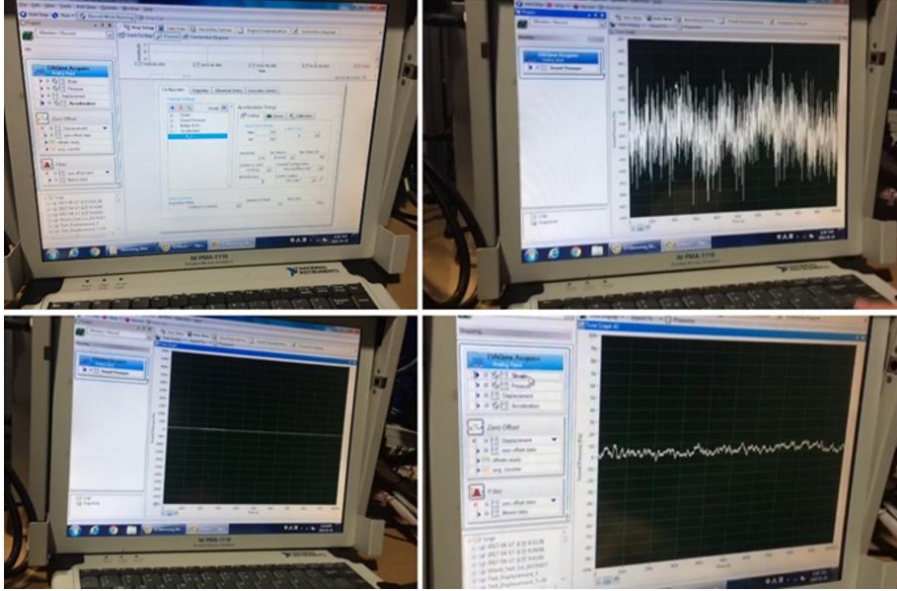


그림 4.7 NI 컴퓨터에 연결된 압력 센서와 strain 게이지 캘리브레이션

그림 4.7은 계측되는 데이터의 캘리브레이션을 나타낸다. 압력 센서와 strain 센서를 실험 모델에 설치하고 NI 컴퓨터에 연결한 후 Labview 프로그램을 통해 동기화를 진행한다. 다 채널 데이터 수집이 가능하며, 각 채널당 초당 최대 100만개의 데이터 수집과 저장이 동시에 가능하다. 본 실험에서는 각 채널당 초당 만 개의 데이터를 수집 저장하여 분석 하였다. 슬래밍 실험의 압력과 strain 정보는 매우 짧은 시간에 발생한다. 따라서 정보가 왜곡되지 않고 지연되지 않도록 적절한 샘플링 개수를 설정해야 한다. 샘플링의 개수가 부족할 경우 최대 압력이나 테일 부위의 압력 형상이 왜곡될 수 있다. 본 연구에서는 4.2.2의 계측 정보 저장 및 수량에 대한 실험을 수행하여 슬래밍 현상시 발생하는 압력 데이터가 왜곡 되지 않고 Strain 의 결과와 동기화 되어 저장 되도록 하였다.

4.2.2 계측 정보 저장 및 수량

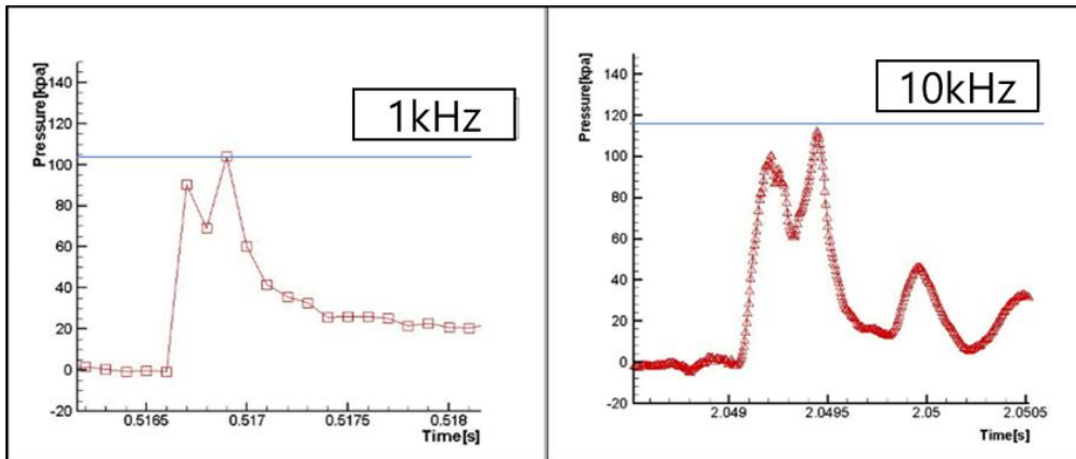


그림 4.8 데이터 샘플링 수에 따른 slamming 압력의 차이

그림 4.8은 계측되는 샘플링 개수의 차이에 따른 슬래밍 압력 형상의 차이를 보여준다. 최대 압력의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 더불어 압력의 테일 형상이 현저히 다른 것을 확인할 수 있다[32]. 최대 압력과 그 폭을 사용하여 값이 구해지는 impulse 값은 압력의 테일 형상이 왜곡됨에 따라 그 값의 차이가 크게 발생할 수 있기 때문에 적절한 샘플링 값을 적용하여 데이터를 계측하고 저장하는 것이 슬래밍 실험의 중요한 요소이다.

제5장 결과

5.1 Trimming tank 실험 결과

표 5.1 ~ 5.16은 Trimming tank에서 재질이 steel로 제작된 모델과 wood로 제작된 모델의 실험 결과를 나타낸 것이다. 밑면의 두께는 steel로 제작된 모델의 경우 3mm, 4mm 그리고 5mm이며, wood로 제작된 모델은 50mm이다. 각각의 표에 최대 압력(Peak pressure), 최대 strain 값(Peak strain), 압력의 폭(Peak width), 최대 압력과 지속시간의 면적(Impulse) 그리고 Coefficient of pressure 값을 계산하여 나열하였다. Wood의 경우 rigid 모델로 가정하여 제작하여 실험을 수행하여 strain 값을 측정 하지 않았다. 최대 압력의 단위는 kPa로 작성 하였으며, 슬래밍 실험의 특성상 압력의 발생 시간이 매우 짧은 점을 고려하여 압력의 지속시간은 초(sec)단위가 아닌 1/1000초(ms)단위로 표시하였다. 최대 압력 값과 압력의 지속시간을 이용하여 계산한 impulse 값의 단위는 pa*s로 표시 하였다. 모든 실험은 동일 조건에서 최소 3번 이상 반복하였으며 결과에는 반복 실험의 평균값을 작성 하였다. 부록 A의 표 No.1 ~ No.3까지의 각각의 계측된 실험 값을 작성하였으며, 평균값과 표준 편차를 통한 COV (%)값을 확인함으로써 실험의 신뢰성을 확보하였다. Dead-rise angle을 갖는 모델의 경우 압력 센서가 설치된 위치에 따라 압력 피크가 발생하는 시간이 차이가 나게 된다. 본 연구에서는 제일 먼저 슬래밍 압력이 발생하는 압력 센서의 값을 활용하였다. 또한, 실험 모델의 제원에 따른 모든 실험 값을 표로 나열함으로써 논문을 읽은 누구라도 결과 값의 활용이 용이하게 하였다. Coefficient of pressure는 다음과 같은 식(1)으로 정의 된다[29].

$$P_p = \frac{1}{2} C_p \rho V^2 \quad (1)$$

P_p : Peakpressure

ρ : Density of the fluid (1000kg/m²)

C_p : Coefficientofpressure

V : Entry velocity

5.1.1 Dead-rise angle 0°

⌘ 5.1 Bottom thickness 3mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	16.33	4.58.E-04	6.15	50.26	16.67
1.98	27.89	5.37.E-04	5.57	77.62	14.23
2.43	38.27	6.61.E-04	5.15	98.54	12.96
2.80	53.76	7.61.E-04	4.40	118.47	13.72
3.13	61.90	8.78.E-04	3.83	118.57	12.64

⌘ 5.2 Bottom thickness 4mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	17.53	3.38.E-04	5.45	47.73	17.89
1.98	31.76	4.82.E-04	4.53	71.97	16.20
2.43	49.83	5.93.E-04	4.03	100.52	16.88
2.80	68.00	7.03.E-04	3.57	121.49	17.35
3.13	79.00	7.66.E-04	3.48	137.32	16.13

⌘ 5.3 Bottom thickness 5mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	22.77	3.02.E-04	4.61	52.41	23.23
1.98	37.37	4.42.E-04	4.15	77.52	19.06
2.43	58.43	5.54.E-04	3.98	116.31	19.79
2.80	77.59	6.53.E-04	3.44	133.57	19.79
3.13	89.65	7.17.E-04	3.23	144.78	18.30

⌘ 5.4 Bottom thickness 50mm(Wood), Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	29.95	6.07	90.86	30.56
1.98	51.69	5.07	130.89	26.37
2.43	76.12	4.55	173.28	25.78
2.80	91.41	4.26	194.65	23.32
3.13	112.54	4.24	238.36	22.97

5.1.2 Dead-rise angle 0° 계측 결과 비교

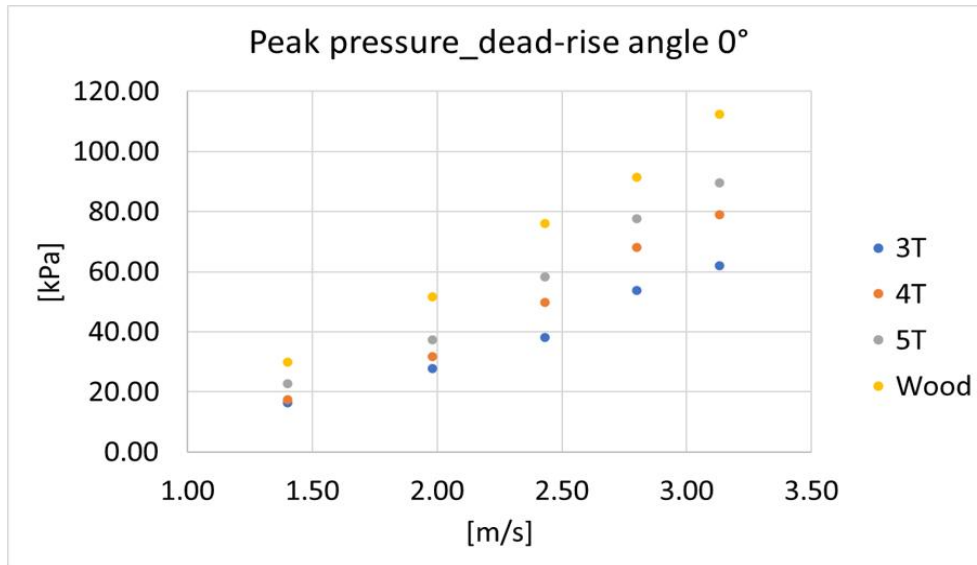


그림 5.1 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력 비교

그림 5.1은 dead-rise angle이 0°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 압력을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 낙하 높이가 증가하면서 자유 낙하 속력이 증가하고 그에 따른 최대 압력이 증가하는 것을 확인하였다. 특이점은 같은 질량으로 세팅하여 실험을 진행 하였음에도 밑면의 두께가 두꺼울수록 최대 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Rigid로 가정한 wood의 경우 최대 압력이 가장 높게 계측 되었으며, steel의 경우 탄성 영향에 의해 Air effect가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 한 개의 압력 피크에 공기 층으로 인한 여러 개의 압력이 동시에 발생하는 것을 의미하며, 이러한 공기층으로 인해 최대 압력이 dead-rise angle도가 3°~10°인 모델보다 낮게 계측 되는 것 확인하였다.

그림 5.2는 dead-rise angle이 0°인 밑면의 두께 3mm, 4mm 그리고 5mm로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 strain 값을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 낙하 높이가 증가함에 따라 strain 값이 증가 하였으며, 두께가 얇을수록 그 값이 더욱 크게 나오는 것을 확인할 수 있다.

그림 5.3은 dead-rise angle이 0°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. Rigid인 wood와 steel로 제작된 모델과의 탄성 영향에 대한 특성이 뚜렷이 보이지는 않는다. steel로 제작

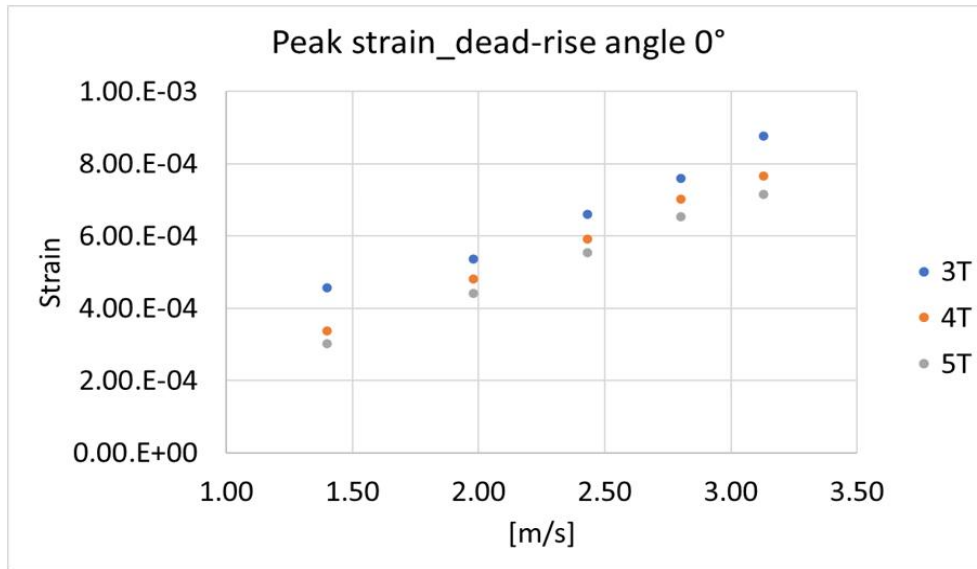


그림 5.2 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 strain 비교

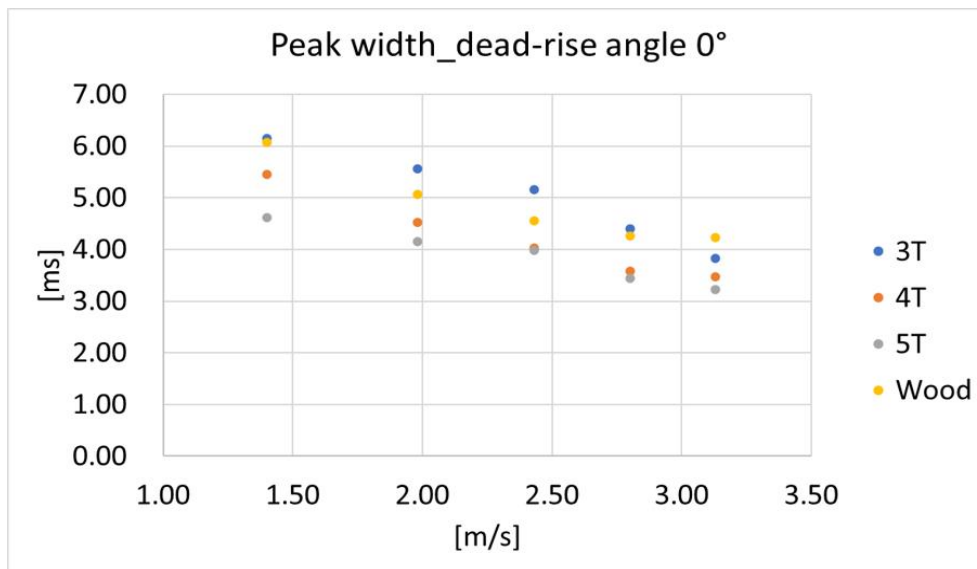


그림 5.3 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭 비교

된 모델의 예측된 최대 압력의 폭을 비교해 보면, 낙하 높이가 증가 할수록 최대 압력의 폭이 작아지며 두께가 두꺼울수록 최대 압력의 폭이 작아지는 경향을 보인다. 최대 압력과 최대 압력의 폭을 사용하여 슬래밍 압력을 이상화한 값인 impulse 값을 계산 하기 때문에 압력의 폭은 단 시간에 발생하여 매우 작은 값이지만 매우 중요한 계측 요소 중 하나이다.

그림 5.4는 dead-rise angle이 0°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood 로 제작 된 모델의 낙하 속력에 따른 Impulse 값을 나타낸다. 자유 낙하 높이는

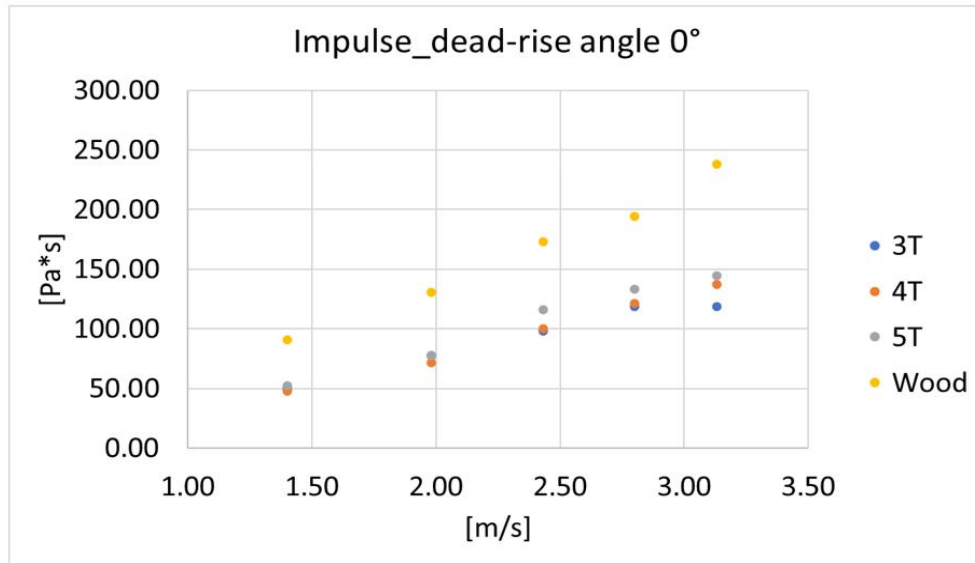


그림 5.4 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 Impulse 비교

100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 측정된 최대 압력과 최대 압력의 폭을 활용하여 압력의 면적을 구한 값으로 최대 압력과 그 압력이 지속된 시간이 구조물에 작용하는 하중을 의미한다. 최대 압력이 상대적으로 높더라도 그 지속시간이 짧거나 최대 압력이 상대적으로 작더라도 그 지속시간이 길면 Impulse값은 같을 수 있으며, 구조물에 영향을 미치는 요소 또한 달라지게 된다. 슬래밍의 연구에서는 최대 압력뿐 아니라 구조물에 작용한 하중의 지속시간을 포함한 Impulse값이 중요한 변수이다. 그림 5.4에서 나타난 것과 같이 자유 낙하 높이가 증가 함에 따라 Impulse값이 증가하는 경향을 확인 할 수 있으며, wood를 제외한 값들은 큰 차이를

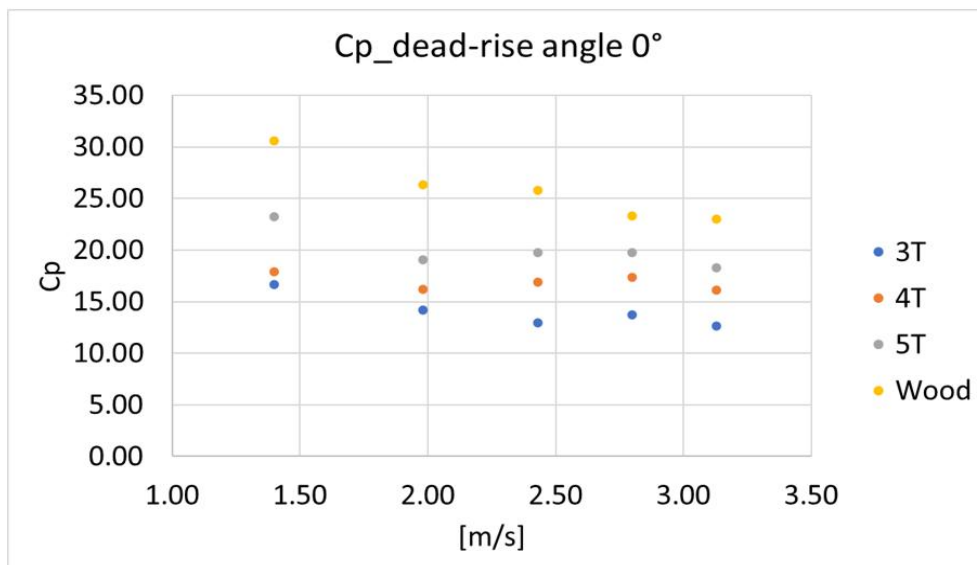


그림 5.5 Dead-rise angle 0°에 대한 낙하 속력에 따른 Coefficient of pressure 비교

보이지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 5.5는 위의 식 (1)을 사용하여 구한 Coefficient of pressure 값을 나타낸다. 계측된 최대 압력이나 strain 값은 낙하 속력이 증가함에 따라 증가 하였다. 최대 압력을 사용하여 무차원화 한 값으로 모델의 두께에 따른 차이는 보이지만 그 값의 차이가 크지 않고 비교적 일정한 것을 확인할 수 있다. 이러한 압력 계수는 실험의 방법이나 모델의 크기 등의 제약조건에 관계없이 최대 압력을 구하기 위한 계수로서 사용이 가능하다.

5.1.3 Dead-rise angle 3°

⌘ 5.5 Bottom thickness 3mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	122.95	3.81.E-04	0.45	27.45	125.46
1.98	165.09	6.09.E-04	0.29	24.15	84.22
2.43	182.29	8.09.E-04	0.21	19.04	61.74
2.80	228.84	9.17.E-04	0.18	20.45	58.38
3.13	289.34	1.04.E-03	0.17	24.11	59.07

⌘ 5.6 Bottom thickness 4mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	131.72	2.07.E-04	0.33	21.79	134.41
1.98	202.39	3.54.E-04	0.21	21.25	103.25
2.43	285.26	5.41.E-04	0.19	26.43	96.62
2.80	326.30	6.95.E-04	0.16	26.85	83.24
3.13	392.72	8.54.E-04	0.14	27.64	80.17

⌘ 5.7 Bottom thickness 5mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	195.28	1.99.E-04	0.23	22.89	199.27
1.98	414.24	3.05.E-04	0.16	33.34	211.33
2.43	543.16	4.09.E-04	0.12	33.28	183.97
2.80	810.83	5.66.E-04	0.07	29.05	206.84
3.13	985.76	7.19.E-04	0.06	29.84	201.24

⌘ 5.8 Bottom thickness 50mm(Wood), Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	207.62	0.54	56.35	211.86
1.98	449.45	0.41	92.25	229.29
2.43	607.08	0.33	100.18	205.62
2.80	876.19	0.30	132.61	223.52
3.13	1091.25	0.29	159.15	222.78

5.1.4 Dead-rise angle 3° 계측 결과 비교

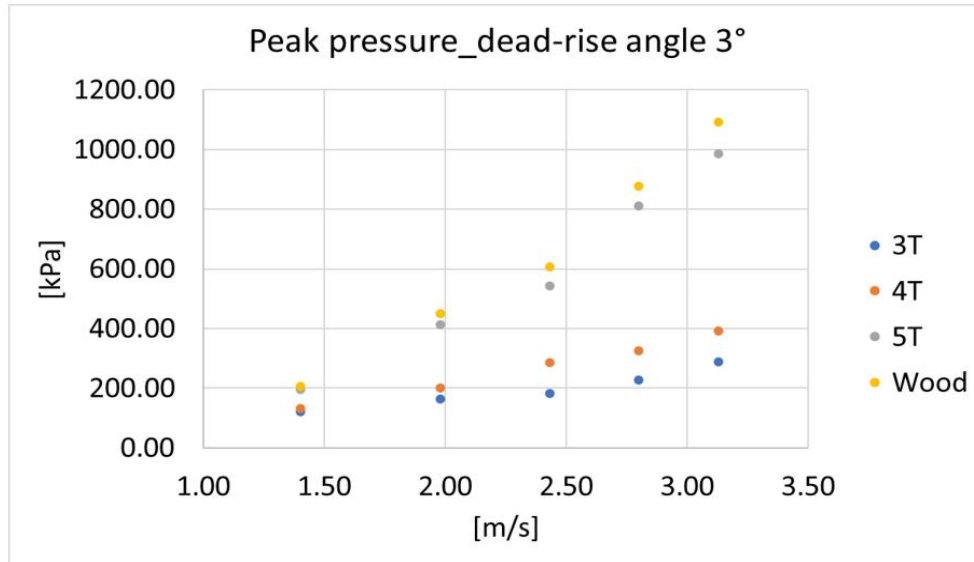


그림 5.6 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력 비교

그림 5.6은 dead-rise angle이 3°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 압력을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 낙하 높이가 증가하면서 자유 낙하 속력이 증가하고 그에 따른 최대 압력이 큰 폭으로 증가하는 것을 확인하였다. 특이점은 자유 수면의 각도와 이루는 각이 0°와 같이 같은 질량으로 세팅하여 실험을 진행 하였음에도 밑면의 두께가 두꺼울수록 최대 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Rigid로 가정한 wood의 경우 최대 압력이 가장 높게 계측되었으며, 자유 수면의 각도와 이루는 각이 0°에 비해 최대 압력이 상당히 높게 계측되었다. 자유 수면의 각도와 이루는 각이 0°의 경우 탄성 영향에 의한 air effect로 인해 압력 값이 상쇄되는데 비해 자유 수면의 각도와 이루는 각이 3°의 경우 탄성 영향은 작용을 하지만 공기층이 형성되지 않아 큰 압력 값을 보이는 것으로 확인되었다.

그림 5.7은 dead-rise angle이 3°인 밑면의 두께 3mm, 4mm 그리고 5mm로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 strain 값을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 낙하 높이가 증가함에 따라 strain 값이 증가 하였으며, 두께가 얇을수록 그 값이 더욱 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 최대 압력의 크기가 상대적으로 큰 경향을 나타냈으나 strain 값은 dead-rise angle이 0°의 실험값과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않는다.

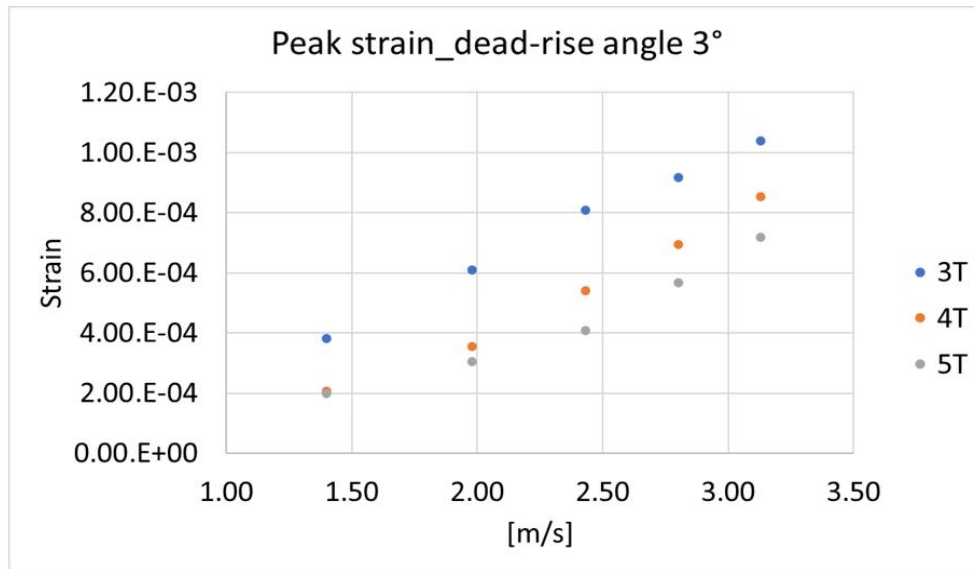


그림 5.7 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 strain 비교

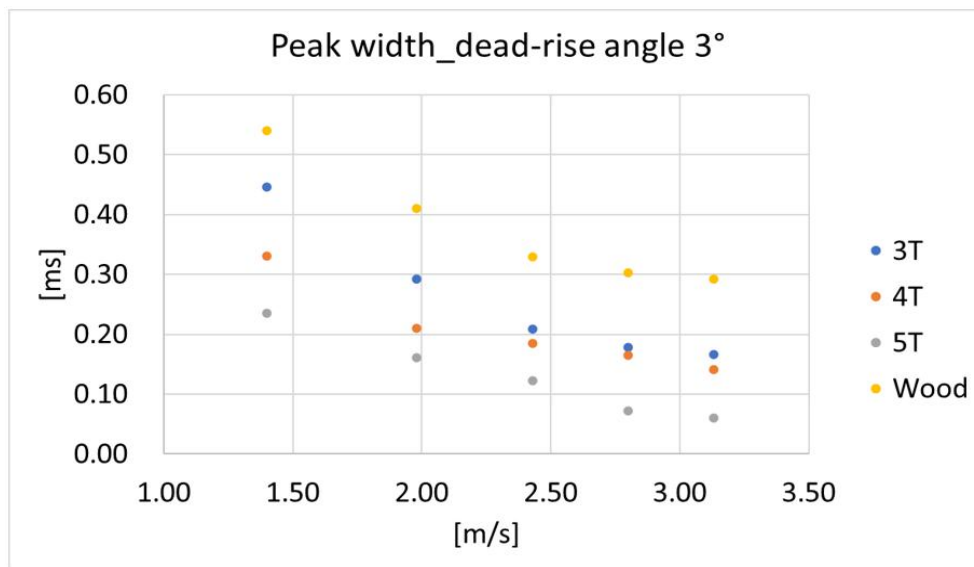


그림 5.8 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭 비교

그림 5.8은 dead-rise angle이 3°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. Rigid인 wood와 steel로 제작된 모델과의 압력의 폭이 상대적으로 높게 측정 되었으며, steel로 제작된 모델의 측정된 최대 압력의 폭을 비교해 보면, 낙하 높이가 증가 할수록 최대 압력의 폭이 작아지며 두께가 두꺼울수록 최대 압력의 폭이 작아지는 경향을 보인다. 최대 압력과 최대 압력의 폭을 사용하여 슬래밍 압력을 이상화한 값인 impulse 값을 계산하기 때문에 압력의 폭은 단 시간에 발생하여 매우 작은 값이지만 매우 중요한 측정

요소 중 하나이다.

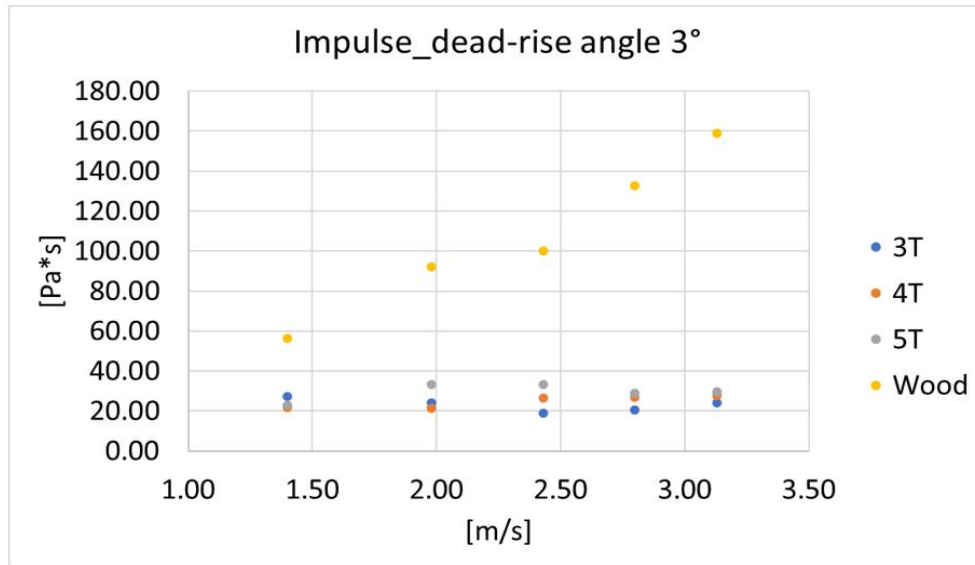


그림 5.9 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 Impulse 비교

그림 5.9는 dead-rise angle이 3°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 Impulse 값을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 계측된 최대 압력과 최대 압력의 폭을 활용하여 압력의 면적을 구한 값으로 최대 압력과 그 압력이 지속된 시간이 구조물에 작용하는 하중을 의미한다. 최대 압력이 상대적으로 높더라도 그 지속시간이 짧거나 최대 압력이 상대적으로 작더라도 그 지속시간이 길면 Impulse 값은 같을 수 있으며, 구조물에 영향을 미치는 요소 또한 달라지게 된다. 슬래밍의 연구에서는 최대 압력뿐 아니라 구조물에 작용한 하중의 지속시간을 포함한 Impulse 값이 중요한 변수이다. dead-rise angle이 0°의 경우 자유 낙하 높이가 증가함에 따라 Impulse값이 증가하는 경향을 보였으나, rigid 모델인 wood를 제외한 값들은 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 압력의 지속시간이 중요 변수로 작용되는 impulse의 경우 dead-rise angle이 0°에서는 폭의 측정에 있어 air effect로 인한 어려움이 있지만, dead-rise angle이 3°인 경우 압력의 상승이 매우 가파르며 압력의 하강이 명확히 나타내어 지기 때문에 압력의 폭을 더욱 정확히 계측 가능하며 따라서 압력의 면적 또한 비교적 구하기가 용이하다.

그림 5.10은 위의 식 (1)을 사용하여 구한 Coefficient of pressure 값을 나타낸다. 계측된 최대 압력이나 strain 값은 낙하 속력이 증가함에 따라 증가 하였다. 최대 압력을 사용하여 무차원화 한 값으로 모델의 두께에 따른 차이는 보인다. 최대 압력이 큰 만큼 압력 계수의 값이 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 두께에 따른 압력 계수의 차이는 있지만 낙하 속력이 1.4m/s일 경우를 제외하고는 낙하 속력에 상관없

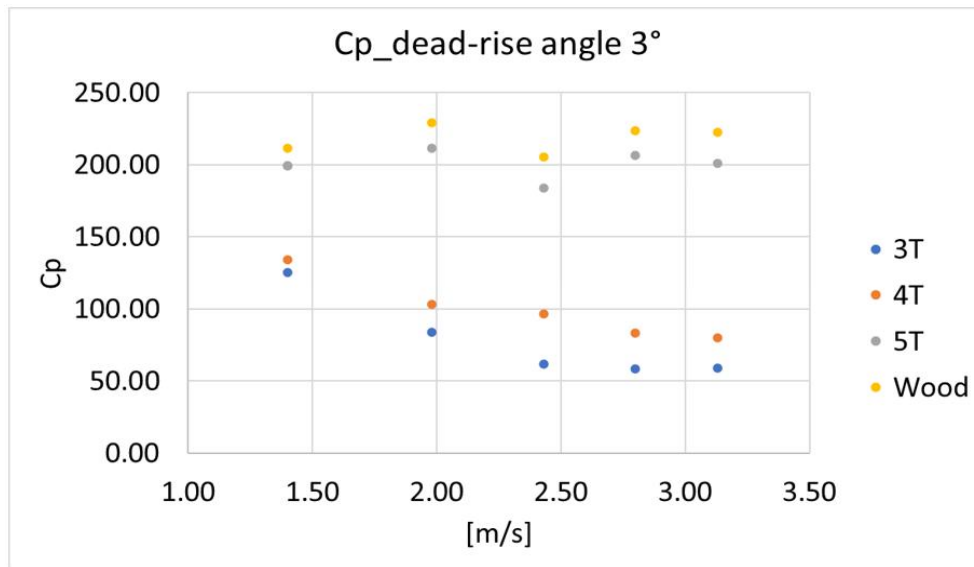


그림 5.10 Dead-rise angle 3°에 대한 낙하 속력에 따른 Coefficient of pressure 비교

이 비교적 일정한 값을 나타낸다. 이러한 압력 계수는 실험의 방법이나 모델의 크기 등의 제약조건에 관계없이 최대 압력을 구하기 위한 계수로서 사용이 가능하다.

5.1.5 Dead-rise angle 10°

⌘ 5.9 Bottom thickness 3mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	Mean	34.83	1.20.E-04	2.19	38.20
1.98	64.54	1.85.E-04	1.63	52.76	32.93
2.43	90.59	2.40.E-04	1.50	68.13	30.68
2.80	109.32	3.05.E-04	1.41	76.91	27.89
3.13	125.61	3.68.E-04	1.39	87.05	25.64

⌘ 5.10 Bottom thickness 4mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	37.66	8.90.E-05	2.05	38.65	38.43
1.98	69.25	1.37.E-04	1.52	52.76	35.33
2.43	99.61	1.78.E-04	1.33	66.16	33.74
2.80	128.90	2.32.E-04	1.18	75.92	32.88
3.13	156.11	2.83.E-04	1.07	83.79	31.87

⌘ 5.11 Bottom thickness 5mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	42.62	6.75.E-05	1.18	25.10	43.49
1.98	78.25	1.17.E-04	0.81	31.80	39.92
2.43	116.28	1.60.E-04	0.63	36.38	39.38
2.80	146.58	1.90.E-04	0.57	41.72	37.39
3.13	178.83	2.22.E-04	0.49	43.82	36.51

⌘ 5.12 Bottom thickness 50mm(Wood), Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	43.49	1.46	31.70	44.38
1.98	82.18	1.10	45.07	41.93
2.43	123.97	0.98	60.63	41.99
2.80	153.68	0.92	70.46	39.20
3.13	183.95	0.81	74.69	37.55

5.1.6 Dead-rise angle 10° 계측 결과 비교

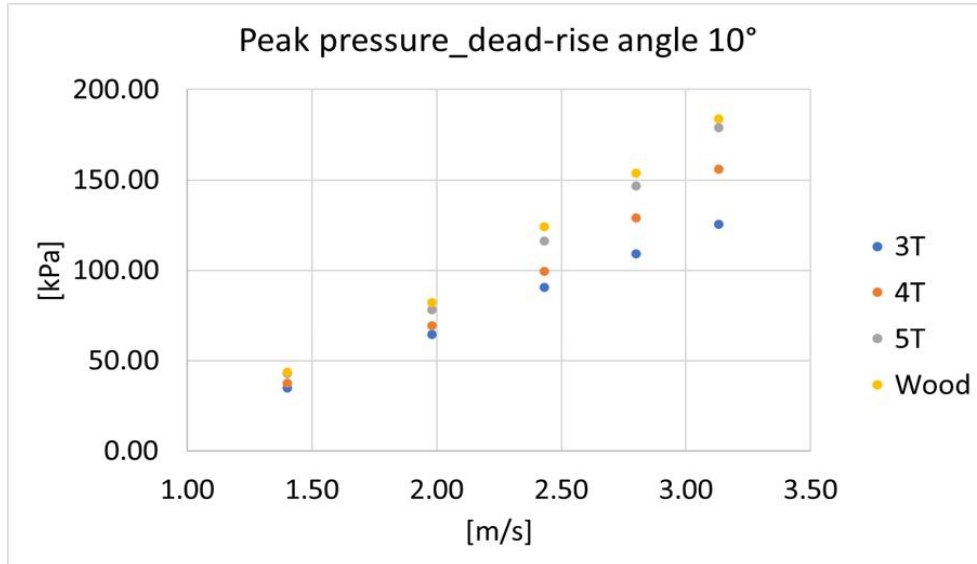


그림 5.11 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력 비교

그림 5.11은 dead-rise angle이 10°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작 된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 압력을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 낙하 높이가 증가 하면서 자유 낙하 속력이 증가하고 그에 따른 최대 압력이 증가 하는 것을 확인하였다. 특이점은 자유 수면의 각도와 이루는 각이 0°와 같이 같은 질량으로 세팅하여 실험을 진행 하였음에도 밑면의 두께가 두꺼울수록 최대 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Rigid로 가정한 wood의 경우 최대 압력이 가장 높게 계측 되었으며, 자유 수면의 각도와 이루는 각이 0°에 비해 최대 압력이 높게 계측 되었다. 자유 수면의 각도와 이루는 각이 0°의 경우 탄성 영향에 의한 air effect로 인해 압력 값이 상쇄되는데 비해 자유 수면의 각도와 이루는 각이 10°의 경우 3°와 동일하게 탄성 영향은 작용을 하지만 공기층이 형성되지 않아 큰 압력 값을 보이는 것으로 확인 되었다. 자유 수면의 각도와 이루는 각이 3°에 비해 큰 압력이 계측 되지는 않았지만 일반적으로 자유 수면의 각도와 이루는 각이 3°~10°의 경우가 가장 큰 압력 값을 나타내는 것으로 보고되고 있다.

그림 5.12은 dead-rise angle이 10°인 밑면의 두께 3mm, 4mm 그리고 5mm로 제작 된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 strain 값을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 낙하 높이가 증가함에 따라 strain 값이 증가 하였으며, 두께가 얇을수록 그 값이 더욱 크게 나오는 것을

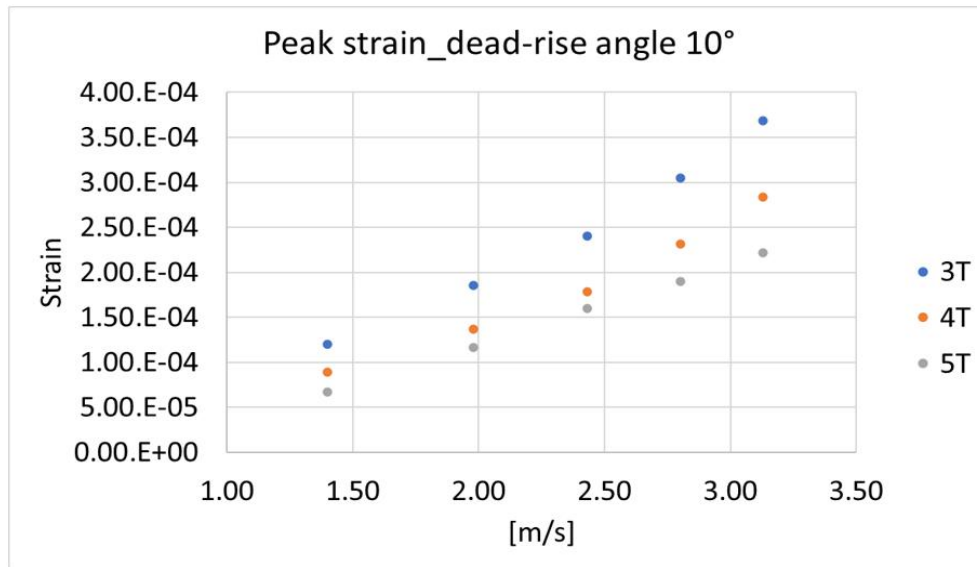


그림 5.12 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 strain 비교

확인할 수 있다. 최대 압력의 크기가 상대적으로 큰 경향을 나타냈으나 strain 값은 dead-rise angle이 0°의 실험 값과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않는다.

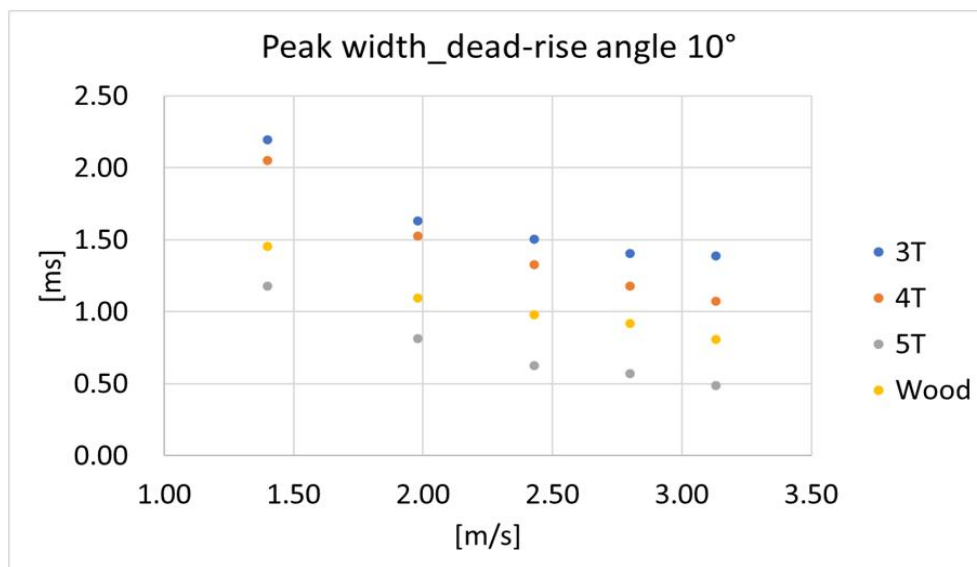


그림 5.13 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭 비교

그림 5.13은 dead-rise angle이 10°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 탄성 모델인 steel로 제작된 모델의 경우 두께에 따른 압력 폭이 상대적으로 낮게 예측 되었으며, 낙하 높이가 증가 할수록 최대 압력의 폭이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 최대 압력과

최대 압력의 폭을 사용하여 슬래밍 압력을 이상화한 값인 impulse 값을 계산 하기 때문에 압력의 폭은 단 시간에 발생하여 매우 작은 값이지만 매우 중요한 계측 요소 중 하나이다. Rigid 모델인 wood의 경우 두께 4mm와 5mm사이에 값이 걸쳐 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 impulse 값에 영향을 미치게 되는데 그림 5.14에 보는 것과 같이 impulse 값 또한 두께 4mm와 5mm의 사이에 그 값이 나타나 있는 것을 확인할 수 있다.

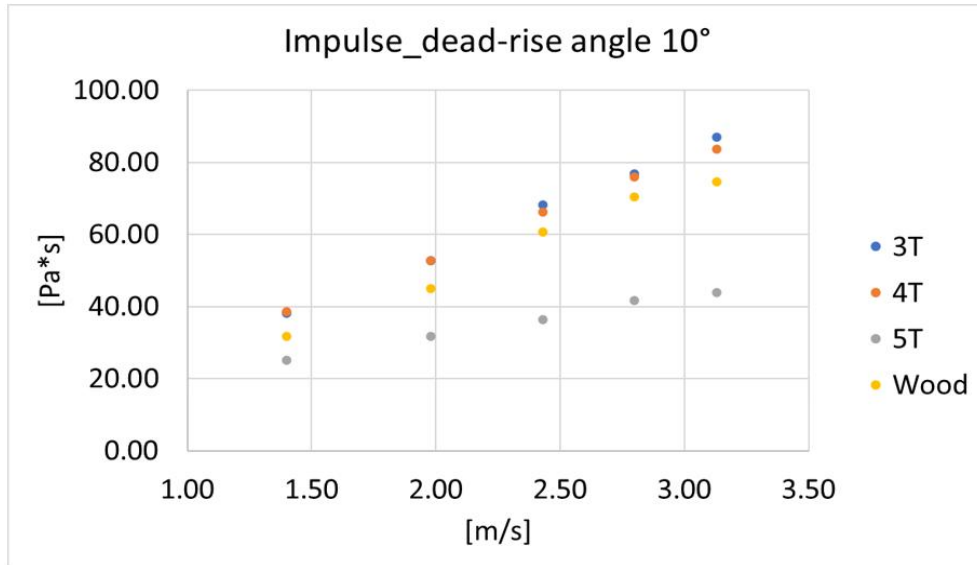


그림 5.14 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 Impulse 비교

그림 5.14는 dead-rise angle이 10°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작 된 모델의 낙하 속력에 따른 Impulse 값을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 계측된 최대 압력과 최대 압력의 폭을 활용하여 압력의 면적을 구한 값으로 최대 압력과 그 압력이 지속된 시간이 구조물에 작용하는 하중을 의미한다. 최대 압력이 상대적으로 높더라도 그 지속시간이 짧거나 최대 압력이 상대적으로 작더라도 그 지속시간이 길면 Impulse 값은 같을 수 있으며, 구조물에 영향을 미치는 요소 또한 달라지게 된다. 슬래밍 연구는 최대 압력 뿐 아니라 구조물에 작용한 하중의 지속시간을 포함한 Impulse 값이 중요한 변수이다. dead-rise angle이 0°의 경우 자유 낙하 높이가 증가 함에 따라 Impulse값이 증가하는 경향을 보였으며, rigid 모델인 wood를 제외한 값들은 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. dead-rise angle이 10°의 경우 압력의 상승과 하강이 명확히 나타내어 지기 때문에 압력의 폭을 더욱 정확히 계측 가능하며 따라서 압력의 면적 또한 비교적 구하기가 용이하다. dead-rise angle이 0°의 경우 rigid 모델인 wood와 두께가 두꺼울수록 impulse 값 또한 크게 나타났다. dead-rise angle이 3°의 경우 wood를 제외한 steel의 impulse값이 낙하 속력과 밑면의 두께와 상관없이 일정한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. dead-rise

angle이 10°의 경우 impulse 값이 역전 되는 경향을 보였다. 낙하 속력이 증가 함에 따라 impulse값 또한 증가 하였지만 밑면의 두께가 얇을 수록 값이 더욱 크게 나타나는 경향을 보였다.

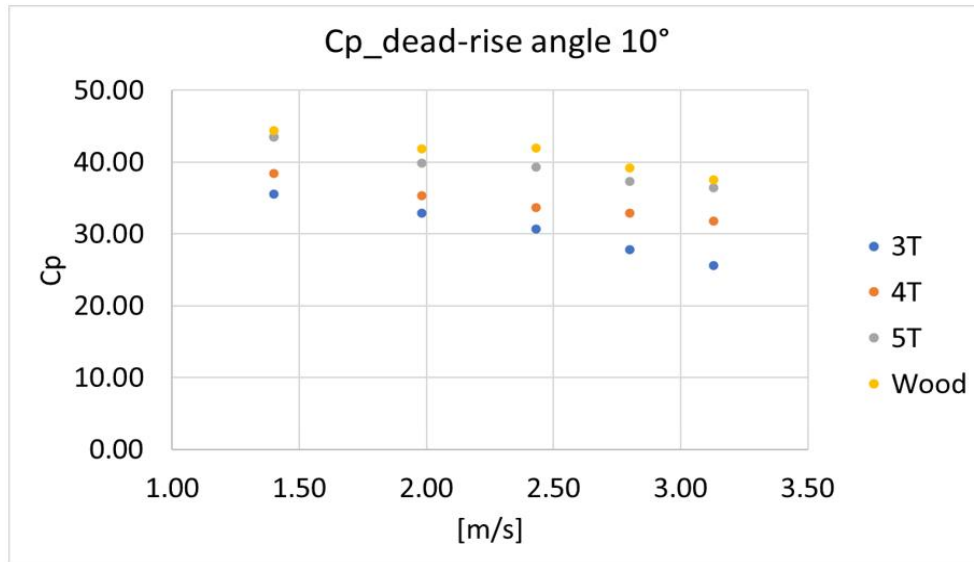


그림 5.15 Dead-rise angle 10°에 대한 낙하 속력에 따른 Coefficient of pressure 비교

그림 5.15은 위의 식 (1)을 사용하여 구한 Coefficient of pressure 값을 나타낸다. 계측된 최대 압력이나 strain 값은 낙하 속력이 증가함에 따라 증가 하였다. 최대 압력을 사용하여 무차원화 한 값으로 모델의 두께에 따른 차이는 보인다. 최대 압력이 큰 만큼 압력 계수의 값이 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 두께에 따른 압력 계수의 차이는 있지만 낙하 속력에 상관없이 비교적 일정한 값을 나타낸다. 이러한 압력 계수는 실험의 방법이나 모델의 크기 등의 제약조건에 관계없이 최대 압력을 구하기 위한 계수로서 사용이 가능하다.

5.1.7 Dead-rise angle 20°

⌘ 5.13 Bottom thickness 3mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	13.29	6.33.E-05	9.31	61.90	13.56
1.98	23.74	1.03.E-04	7.70	91.31	12.11
2.43	33.65	1.36.E-04	6.04	101.68	11.40
2.80	42.86	1.66.E-04	5.20	111.34	10.93
3.13	53.15	1.98.E-04	4.67	124.05	10.85

⌘ 5.14 Bottom thickness 4mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	14.11	4.55.E-05	7.70	54.35	14.40
1.98	25.51	7.59.E-05	6.54	83.47	13.01
2.43	37.29	1.05.E-04	5.53	103.17	12.63
2.80	48.57	1.31.E-04	4.66	113.25	12.39
3.13	59.89	1.56.E-04	3.94	118.07	12.23

⌘ 5.15 Bottom thickness 5mm, Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	19.26	3.27.E-05	2.90	27.89	19.66
1.98	35.41	5.28.E-05	2.16	38.24	18.07
2.43	52.57	7.15.E-05	1.78	46.68	17.81
2.80	68.12	9.12.E-05	1.62	55.03	17.38
3.13	84.97	1.08.E-04	1.27	53.76	17.35

⌘ 5.16 Bottom thickness 50mm(Wood), Peak Pressure, strain, Peak Width, Impulse Coefficient of pressure Value

m/s	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
1.40	27.65	3.07	42.50	28.21
1.98	41.66	2.38	49.62	21.25
2.43	55.57	2.20	61.17	18.82
2.80	69.93	2.17	75.72	17.84
3.13	85.99	1.94	83.23	17.55

5.1.8 Dead-rise angle 20° 계측 결과 비교

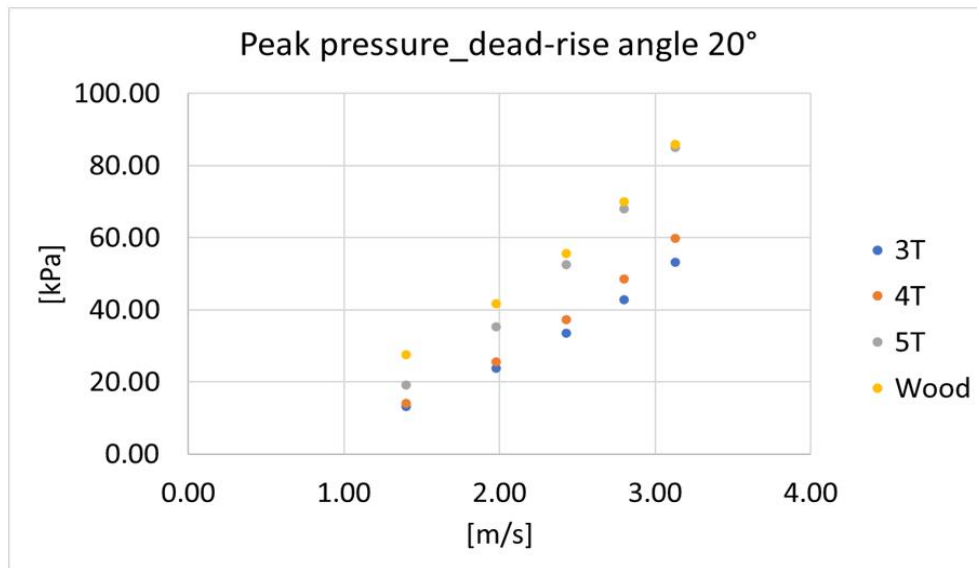


그림 5.16 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력 비교

그림 5.16은 dead-rise angle이 20°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 압력을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 낙하 높이가 증가 하면서 자유 낙하 속력이 증가하고 그에 따른 최대 압력이 증가 하는 것을 확인하였다. 특이점은 자유 수면의 각도와 이루는 각이 0°와 같이 같은 질량으로 세팅하여 실험을 진행 하였음에도 밑면의 두께가 두꺼울수록 최대 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Rigid로 가정한 wood의 경우 최대 압력이 가장 높게 계측 되었으며, 자유 수면의 각도와 이루는 각이 0°에 비해 최대 압력이 높게 계측 되었다. 자유 수면의 각도와 이루는 각이 0°의 경우 탄성 영향에 의한 air effect로 인해 압력 값이 상쇄되는데 비해 자유 수면의 각도와 이루는 각이 10°의 경우 3°와 동일하게 탄성 영향은 작용을 하지만 공기층이 형성되지 않아 큰 압력 값을 보이는 것으로 확인 되었다. 자유 수면의 각도와 이루는 각이 3°에 비해 큰 압력이 계측 되지는 않았지만 일반적으로 자유 수면의 각도와 이루는 각이 3°~10°의 경우가 가장 큰 압력 값을 나타내는 것으로 보고되고 있다.

그림 5.17은 dead-rise angle이 20°인 밑면의 두께 3mm, 4mm 그리고 5mm로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 strain 값을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 낙하 높이가 증가 함에 따라 strain 값이 증가 하였으며, 두께가 얇을수록 그 값이 더욱 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 최대 압력의 크기가 상대적으로 큰 경향을 나타냈으나 strain 값은

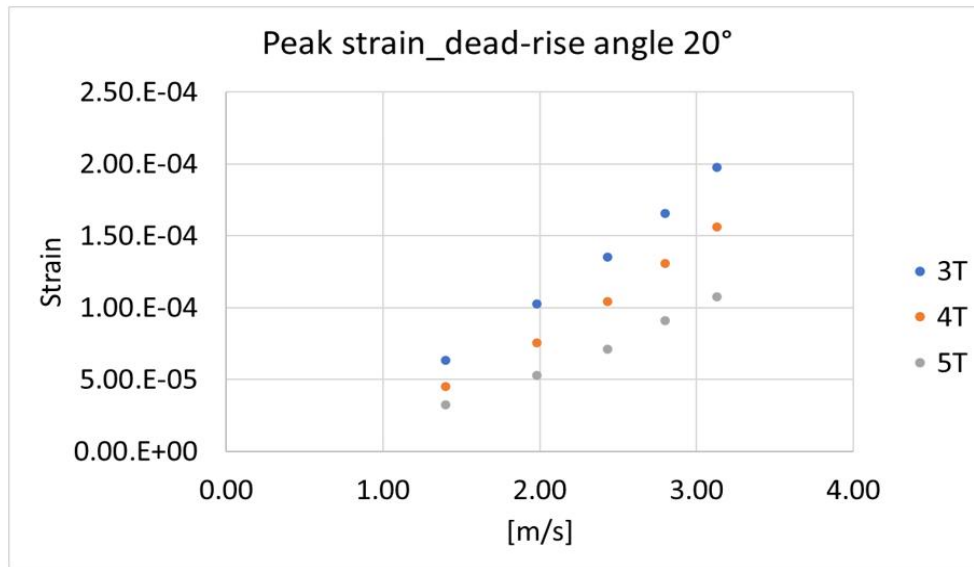


그림 5.17 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 strain 비교

dead-rise angle이 0°의 실험 값과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않는다.

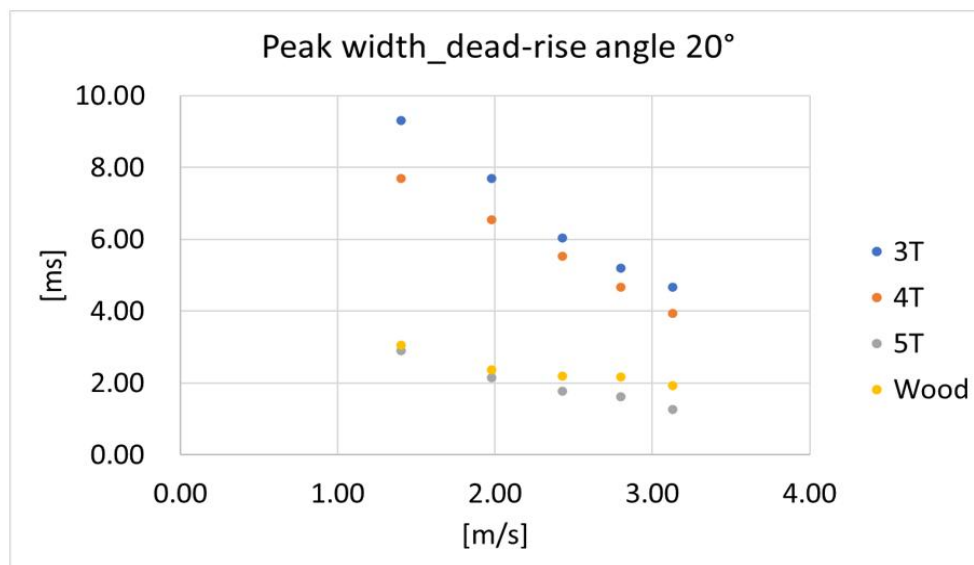


그림 5.18 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭 비교

그림 5.18은 dead-rise angle이 20°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작된 모델의 낙하 속력에 따른 최대 압력의 폭을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 탄성 모델인 steel로 제작된 모델의 경우 두께에 따른 압력 폭이 상대적으로 낮게 측정되었으며, 낙하 높이가 증가 할수록 최대 압력의 폭이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 최대 압력과 최대 압력의 폭을 사용하여 슬래밍 압력을 이상화한 값인 impulse 값을 계산하기 때문에 압력의 폭은 단 시간에 발생하여 매우 작은 값이지만 매우 중요한 계측 요소 중

하나이다. Rigid 모델인 wood의 경우 두께 4mm와 5mm사이 에 값이 걸쳐 있는 것 을 확인할 수 있다. 이는 impulse 값에 영향을 미치게 되는데 그림 5,14에 보는것과 같이 impulse 값 또한 두께 4mm와 5mm의 사이에 그 값이 나타나 있는 것을 확인 할 수 있다.

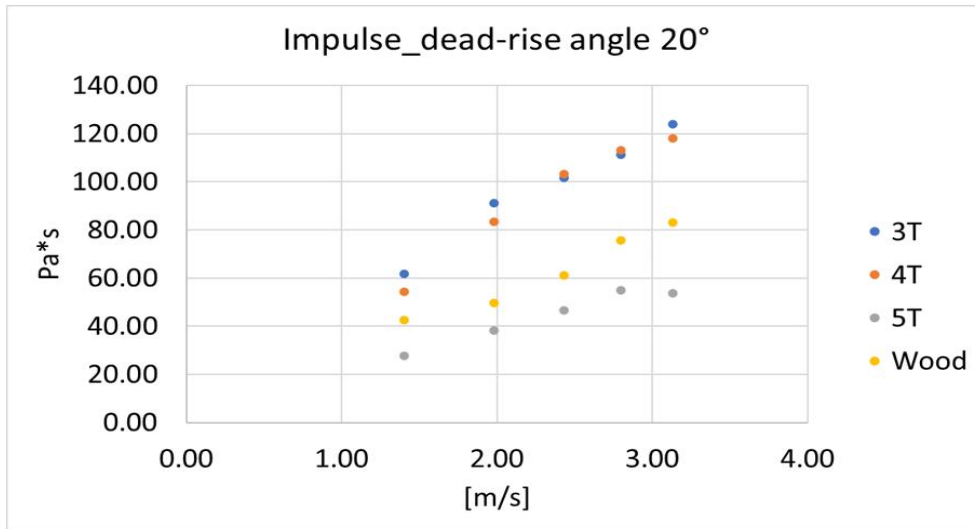


그림 5.19 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 Impulse 비교

그림 5.19는 dead-rise angle이 20°인 밑면의 두께 3mm, 4mm, 5mm 그리고 wood로 제작 된 모델의 낙하 속력에 따른 Impulse 값을 나타낸다. 자유 낙하 높이는 100mm~500mm까지 100mm의 간격을 두고 실험을 하였다. 계측된 최대 압력과 최대 압력의 폭을 활용하여 압력의 면적을 구한 값으로 최대 압력과 그 압력이 지속 된 시간이 구조물에 작용하는 하중을 의미한다. 최대 압력이 상대적으로 높더라도 그 지속시간이 짧거나 최대 압력이 상대적으로 작더라도 그 지속시간이 길면 Impulse 값은 같을 수 있으며, 구조물에 영향을 미치는 요소 또한 달라지게 된다. 슬래밍의 연구에서는 최대 압력뿐 아니라 구조물에 작용한 하중의 지속시간을 포함한 Impulse 값이 중요한 변수이다. dead-rise angle이 0°의 경우 자유 낙하 높이가 증가함에 따라 Impulse값이 증가하는 경향을 보였으며, rigid 모델인 wood를 제외한 값들은 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. dead-rise angle이 10°의 경우 압력의 상승과 하강이 명확히 나타내어지기 때문에 압력의 폭을 더욱 정확히 계측 가능하며 따라서 압력의 면적 또한 비교적 구하기가 용이하다. dead-rise angle이 0°의 경우 rigid 모델인 wood와 두께가 두꺼울수록 impulse 값 또한 크게 나타났다. dead-rise angle이 3°의 경우 wood를 제외한 steel의 impulse값이 낙하 속력과 밑면의 두께와 상관없이 일정한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. dead-rise angle이 10°의 경우 impulse 값이 역전 되는 경향을 보였다. 낙하 속력이 증가함에 따라 impulse값 또한 증가 하였지만 밑면의 두께가 얇을수록 값이 더욱 크게 나타나는 경향을 보였다.

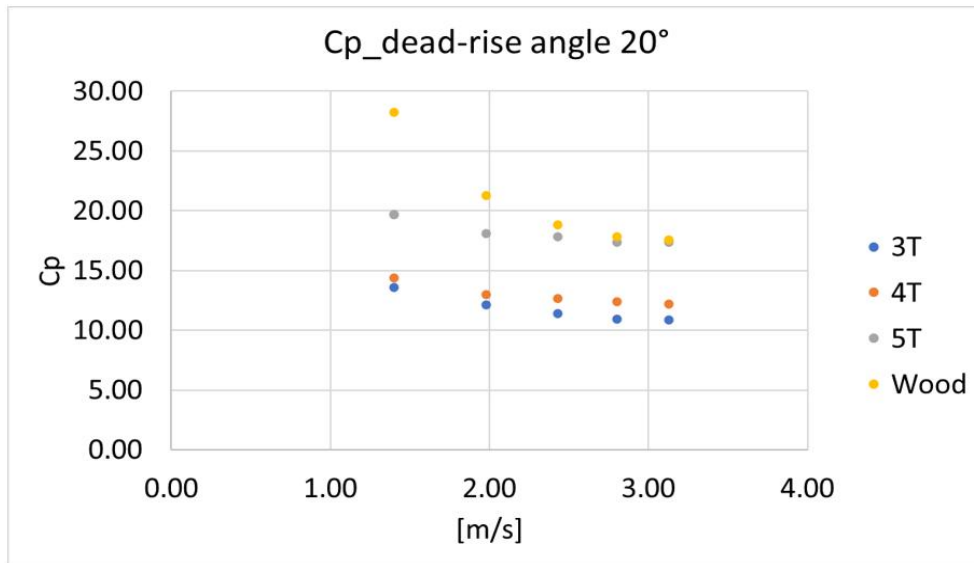


그림 5.20 Dead-rise angle 20°에 대한 낙하 속력에 따른 Coefficient of pressure 비교

그림 5.20은 위의 식 (1)을 사용하여 구한 Coefficient of pressure 값을 나타낸다. 계측된 최대 압력이나 strain 값은 낙하 속력이 증가함에 따라 증가 하였다. 최대 압력을 사용하여 무차원화 한 값으로 모델의 두께에 따른 차이는 보인다. 최대 압력이 큰 만큼 압력 계수의 값이 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 두께에 따른 압력 계수의 차이는 있지만 낙하 속력에 상관없이 비교적 일정한 값을 나타낸다. 이러한 압력 계수는 실험의 방법이나 모델의 크기 등의 제약조건에 관계없이 최대 압력을 구하기 위한 계수로서 사용이 가능하다.

5.2 UOU slamming 실험 결과

5.2.1 Dead-rise angle 0°

표 5.17은 실험 모델의 밑면이 dead-rise angle이 0°의 결과이다. 밑면의 두께는 3mm, 5mm 그리고 8mm이다. 자유 낙하 높이는 각각 1.0m와 1.7m이다. 자유 낙하를 시작하여 수면에 도달했을 때 실험 모델의 속력은 4.43m/s와 5.78m/s이다. 실험을 통해 계측된 최대 압력과 압력의 지속시간을 표5.82에 작성하였으며 최대 압력과 지속시간을 이상화한 압력의 면적 즉, impulse값을 계산하였다. dead-rise angle이 0°의 경우 air effect가 발생하게 된다. 압력 그래프를 확인하면 최대 압력 부분이 탄성에 의한 영향으로 여러 개로 갈라지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 air effect로 인해 dead-rise angle이 3°~10°에 비해 최대 압력 값이 작게 나오는 것을 확인할 수 있다.

표 5.17 dead-rise angle: 0° 실험 결과

(a) dead-rise angle: 0°, 자유 낙하 속력: 4.43m/s (높이: 1.0m)

Thickness (mm)	Peak Pressure (kPa)	Duration (msec)	Impulse (kPa - msec)
3	50	2.3	58
5	135	2.1	142
8	180	2.0	180

(b) dead-rise angle: 0°, 자유 낙하 속력: 5.78m/s (높이: 1.7m)

Thickness (mm)	Peak Pressure (kPa)	Duration (msec)	Impulse (kPa - msec)
3	90	2.3	104
5	160	2.1	168
8	315	2.0	315

5.2.2 Dead-rise angle 10°

표 5.18 dead-rise angle: 10° 실험 결과

(a) dead-rise angle: 10°, 자유 낙하 속력: 4.43m/s (높이: 1.0m)

Thickness (mm)	Peak Pressure (kPa)	Duration (msec)	Impulse (kPa - msec)
3	174	1.3	113
5	265	1.1	146
8	290	1.0	145

(b) dead-rise angle: 10°, 자유 낙하 속력: 5.78m/s (높이: 1.7m)

Thickness (mm)	Peak Pressure (kPa)	Duration (msec)	Impulse (kPa - msec)
3	209	1.3	136
5	284	1.1	156
8	449	1.0	225

표 5.18은 실험 모델의 밑면이 dead-rise angle이 10°의 결과이다. 밑면의 두께는 3mm, 5mm 그리고 8mm이다. 자유 낙하 높이는 각각 1.0m와 1.7m이다. 자유 낙하를 시작하여 수면에 도달했을 때 실험 모델의 속력은 4.43m/s와 5.78m/s이다. 실험을 통해 계측된 최대 압력과 압력의 지속시간을 표 5.83에 작성하였으며 최대 압력과 지속시간을 이상화한 압력의 면적 즉, impulse값을 계산하였다.

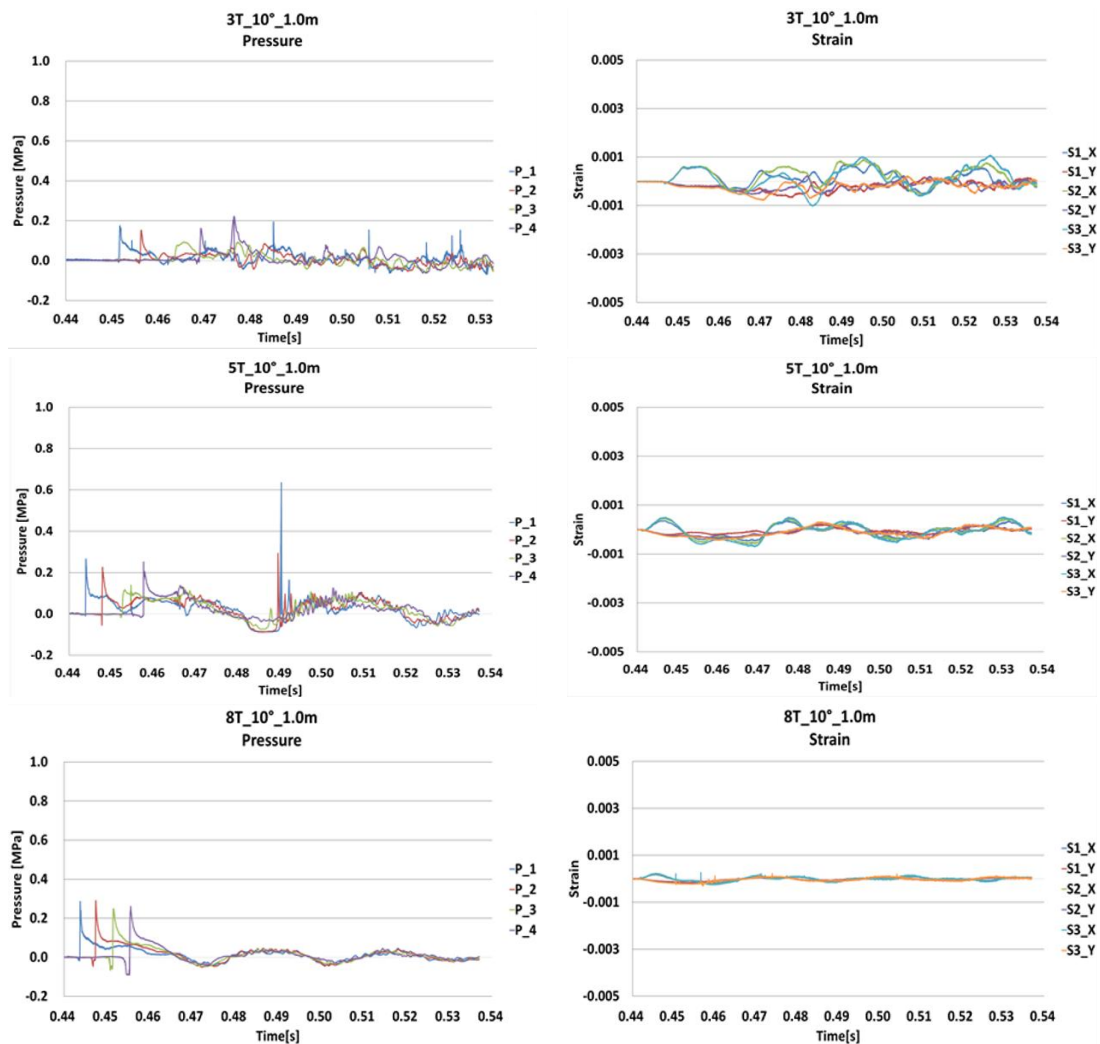


그림 5.21 Dead-rise angle 10° 압력과 스트레인 그래프, 자유 낙하 속력: 4.43m/s (높이: 1.0m)

Trimming tank에서 수행된 실험과 비교가 가능한 두께 5mm이며 dead-rise angle 도가 10° 인 실험 모델을 검토한 결과 최대 압력은 178.83kPa, 압력의 지속시간은 0.49msec 그리고 impulse 값은 43.82kPa*msec로 계측 되었다. 낙하 높이가 두 배로 증가한 만큼 최대 압력 값이 265kPa로 증가 하였으며 압력의 지속시간과 impulse값 또한 증가한 것을 확인 하였다. 보강을 하지 않은 구조물의 크기가 커지고 무게가 증가됨에 따라 구조물이 받는 하중이 커진다는 것을 의미한다. 실험에서 계측된 압력과 스트레인을 그림 5.21과 5.22에 나타냈다.

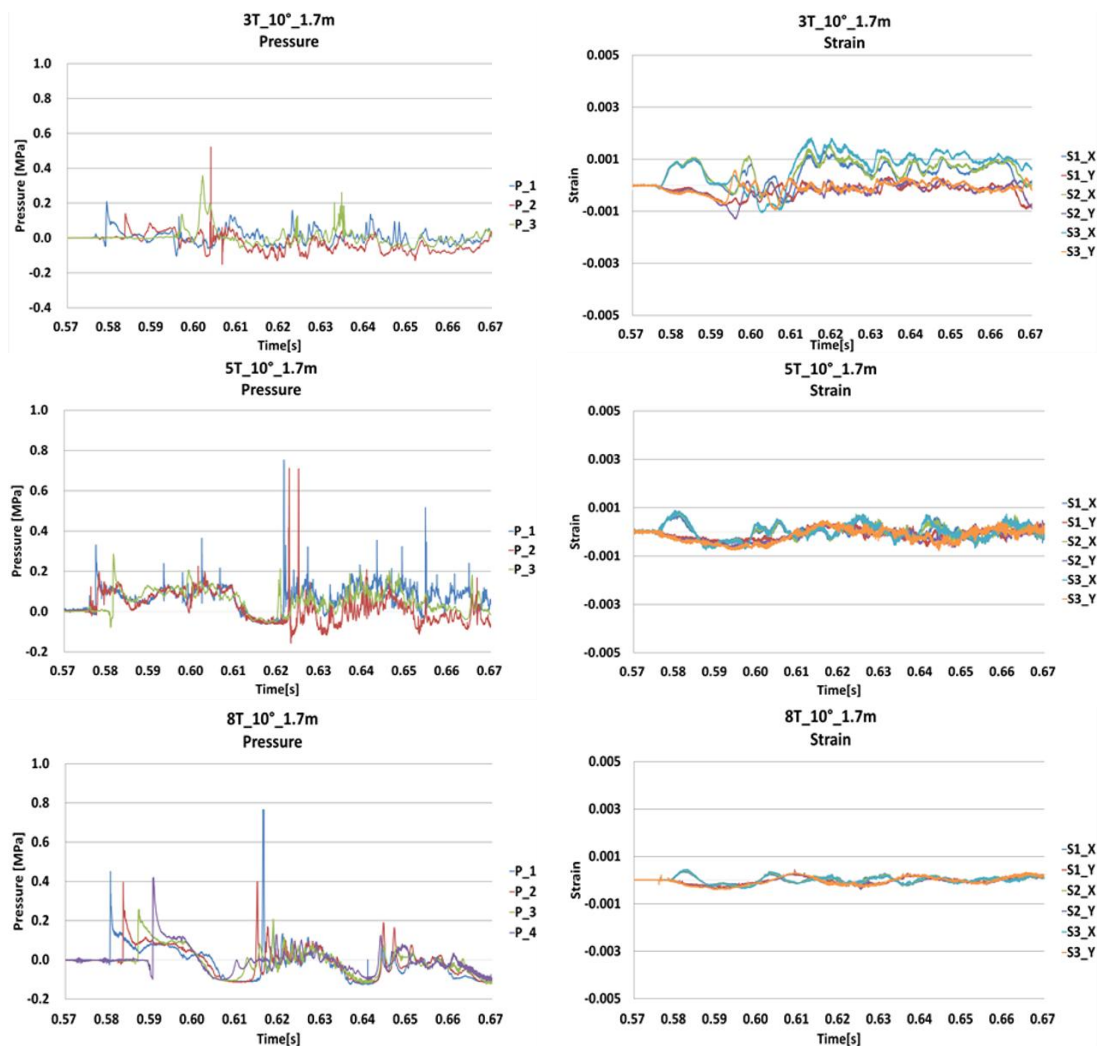


그림 5.22 Dead-rise angle 10° 압력과 스트레인 그래프, 자유 낙하 속도: 5.78m/s (높이: 1.7m)

그림 5.21과 5.22는 압력과 스트레인 계측 결과이다. dead-rise angle이 10° 로 수면에 닿는 시간이 압력 센서의 설치 위치마다 다르다. 따라서 압력이 계측되는 시간의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

5.2.3 Cylindrical shape

Air effect는 0° 모델뿐만 아니라 실린더 형상의 모델에서도 계측 되었다. Air effect는 압력의 증가를 억제하지만 해양 구조물에서 가장 널리 사용되는 형상인 실린더 형상에서 동일 조건과 비교하였을 때 최대 압력 값이 높게 계측되었다. 일반적으로 dead-rise angle이 3°~10°일 때 압력 값이 높게 나타난다고 알려져 있으나 실린더 형상의 모델에서 더욱 높은 압력 값이 계측 되었다.

표 5.19 dead-rise angle: Cylindrical 실험 결과

(a) dead-rise angle: Cylindrical, 자유 낙하 속도: 4.43m/s (높이: 1.0m)

Thickness (mm)	Peak Pressure (kPa)	Duration (msec)	Impulse (kPa - msec)
3	590	1.3	384
5	770	1.1	424
8	790	1.0	395

(b) dead-rise angle: Cylindrical, 자유 낙하 속도: 5.78m/s (높이: 1.7m)

Thickness (mm)	Peak Pressure (kPa)	Duration (msec)	Impulse (kPa - msec)
3	790	1.3	514
5	820	1.1	451
8	980	1.0	490

그림 5.23과 5.24는 실린더 형상의 압력과 스트레인 계측 결과를 나타낸다. 압력의 상승과 하강이 매우 가파른 것을 확인할 수 있으며, 최대 압력은 가장 높게 계측되는 반면 압력의 지속시간은 변함이 없었다.

그림 5.23의 두께 5mm 낙하 높이 1.0m 스트레인 결과를 확인하면 충격 하중이 발생함과 동시에 스트레인 값도 변화하는 것을 확인할 수 있다. 스트레인 값이 0.001까지 상승하였다가 다시 0으로 수렴하는 그래프를 볼 수 있는데 이는 변형이 일어나지 않았음을 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

반면 그림 5.24의 두께 5mm 낙하 높이 1.7m 스트레인 결과를 확인하면 충격 하중이 발생함과 동시에 스트레인 값도 변화하는 것을 확인할 수 있다. 스트레인 값이 0.001까지 상승하였다가 다시 0으로 수렴하지 않는 그래프를 볼 수 있는데 이는 영구 변형이 발생하여 복원되지 않았음을 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

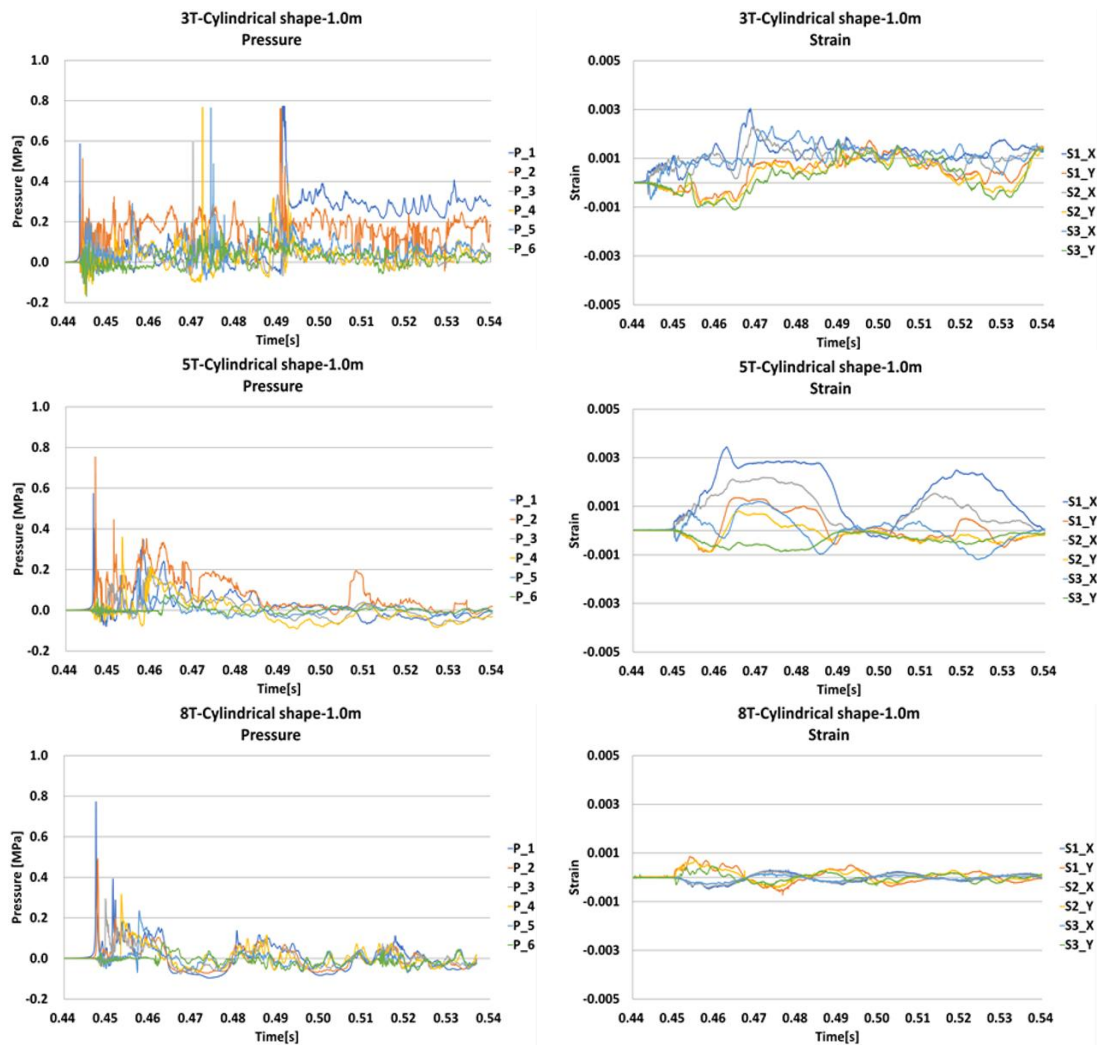


그림 5.23 Cylindrical shape 압력과 스트레인 그래프, 자유 낙하 속력: 4.43m/s (높이: 1.0m)

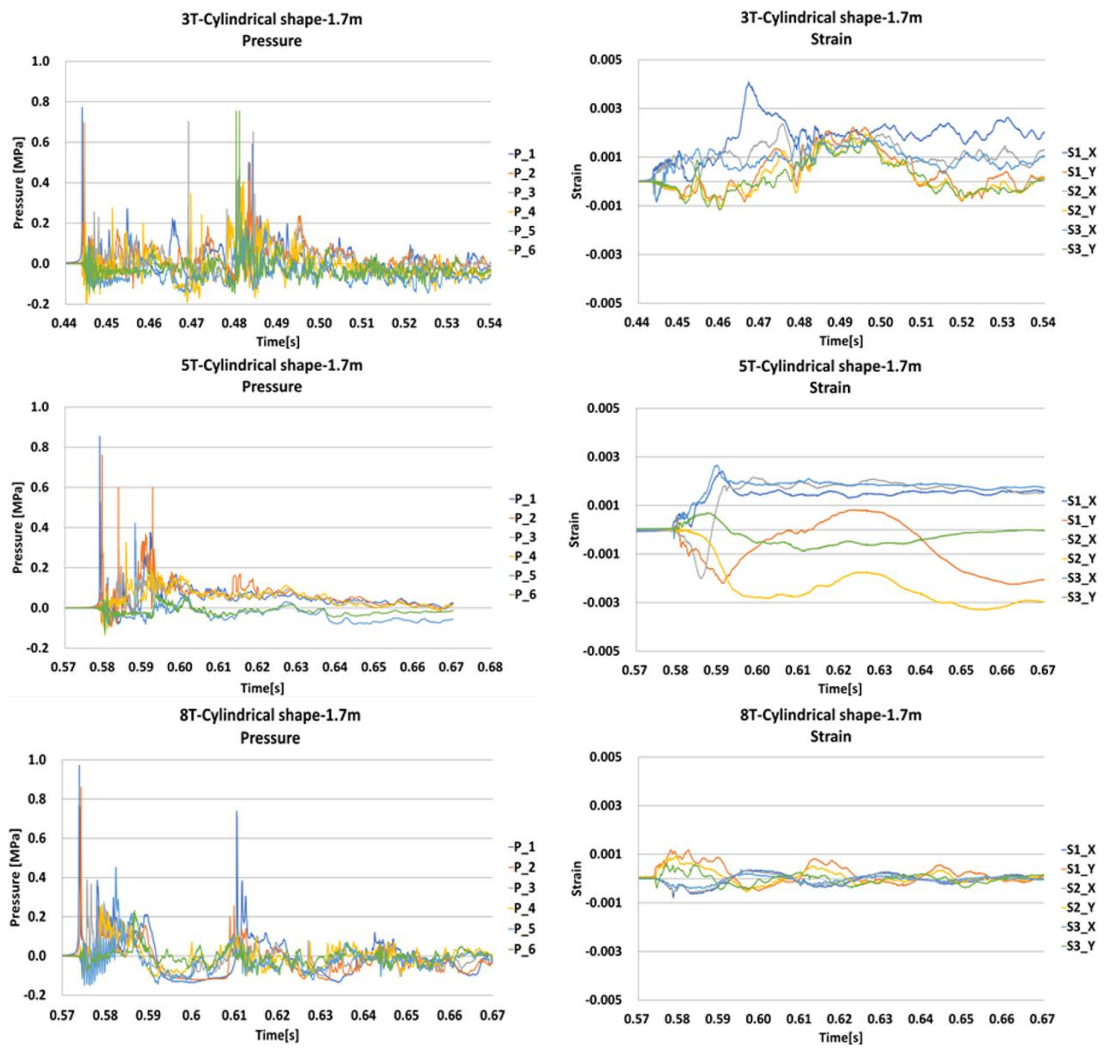


그림 5.24 Cylindrical shape 압력과 스트레인 그래프, 자유 낙하 속력: 5.78m/s (높이: 1.7m)

5.3 UOU slamming 결과 비교

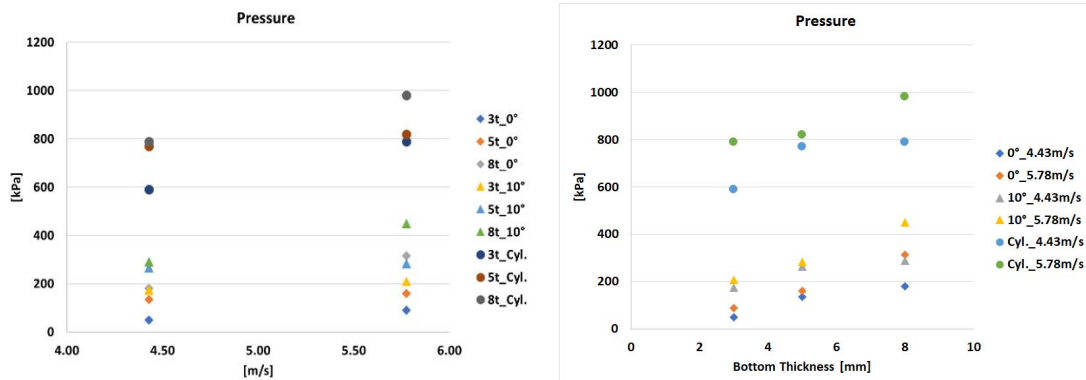


그림 5.25 최대 압력 비교 낙하 속도(좌) 밑면 두께(우)

그림 5.25는 평판과 Dead-rise angle 10° 그리고 실린더 형상의 최대 압력 값을 낙하 속도에 따른 결과와 밑면의 두께에 따른 결과로 나타냈다. 평판의 경우 낙하 속력이 4.43m/s일 때와 5.78m/s일 때 각각 180kPa와 315kPa로 계측 되었다. Dead-rise angle 10°인 경우 낙하 속력이 4.43m/s일 때와 5.78m/s일 때 각각 290kPa와 450kPa로 계측 되었다. 실린더 형상의 경우 낙하 속력이 4.43m/s일 때와 5.78m/s일 때 각각 780kPa와 980kPa로 가장 높은 압력 값을 보였다. 해양 구조물에서 가장 널리 사용되는 실린더 형상의 경우 슬래밍 하중에 의한 영향을 더 많이 받는 것을 의미하며, 낙하 높이가 증가하고 두께가 증가함에 따라 증가 된 압력과 지속시간을 이상화 하여 계산 된 impulse값 역시 다른 모델에 비해 약 4배 정도 높다. 밑면의 두께와 낙하 속력에 따른 압력을 비교하여도 실린더 형상의 압력이 가장 높게 계측 되었으며 해양 구조물의 설치에 가장 널리 이용되는 실린더 형상이 슬래밍 하중에 의한 영향을 가장 높게 받는 것을 의미한다.

5.4 Second peak

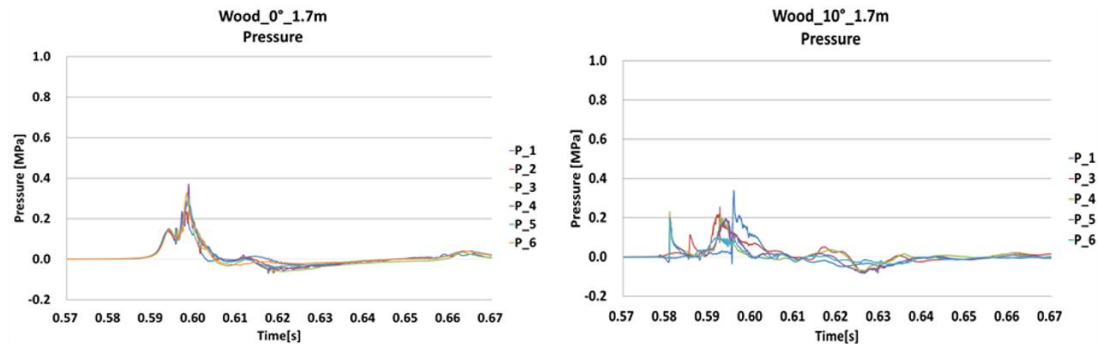


그림 5.26 dead-rise angle도가 0°와 10° Wood 모델의 압력 그래프

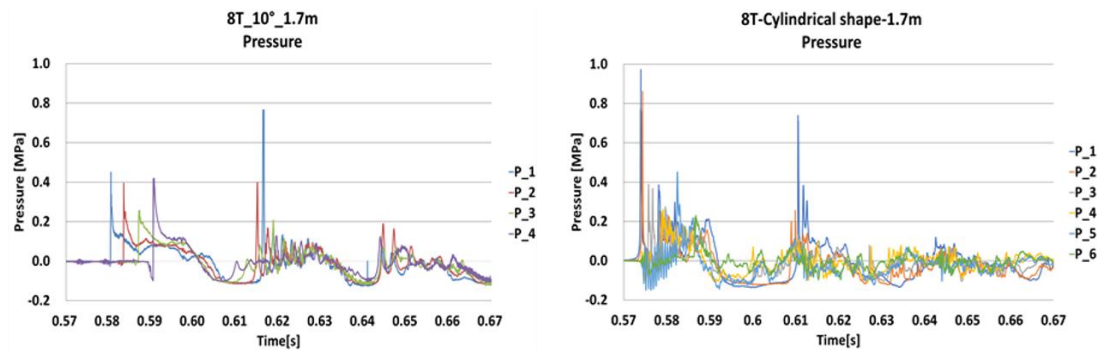


그림 5.27 dead-rise angle도가 10°와 실린더 형상 Steel 모델의 압력 그래프

그림 5.26는 dead-rise angle이 0°와 10°이며, 자유 낙하 속력 5.78m/s에서 rigid모델인 wood의 압력을 나타낸다. 계측 된 두 개의 그래프의 압력 흐름을 살펴보면 수면과 충격으로 생긴 압력이 발생한 후 압력의 변곡선 없이 0으로 흘러가는 것을 확인할 수 있다.

그림 5.27은 탄성 슬래밍 하중이 탄성체에 미치는 영향을 알아보기 위해 steel로 제작된 모델의 압력 그래프이다. Dead-rise angle이 10°와 실린더 형상이며, 자유 낙하 속력 5.78m/s이다. Steel로 제작된 모델의 경우 특이한 결과를 확인할 수 있다. 첫 번째 압력이 발생하고 약 0.03초 후 두 번째 압력이 발생한다는 것이다. 발생한 두 번째 압력은 첫 번째 압력보다 높았다. 실린더 형상의 모델, 낙하 높이 1.7m의 경우, 첫 번째 압력은 약 0.60 초에서 발생하고 두 번째 압력은 첫 번째 압력이 발생한 후 약 0.03 초 뒤인 약 0.63초에서 발생하는 것으로 계측되었다. 이론적으로 계산된 구조물의 고유 주기 34.85Hz와 실험에서 계측된 값 33.33Hz이 매우 근접한 것으로 확인되었다. 이는 단일 하중에서도 충격 압력은 구조물의 고유 주기에 따라 여러 번 발생 함을 확인 하는 중요한 결과이다. 단일 파동으로도 구조물이 영구적으로 손상 될 수 있으며 반복적인 슬래밍으로 인해 피로 손상이 발생할 수 있음을 의미한다. 그림 5.26의 0.59초에 음(Negative) 압이 발생한 것을 확인할 수 있다. 음(Negative) 압력

은 구조물의 탄성 효과로 인해 발생한다. 실린더 형상의 경우, 첫 번째 압력은 다른 구조물에 비해 더 높게 나타나지만 두 번째 압력은 첫 번째 압력에 비해 낮게 나오는 경향이 있다. 구조물의 탄성 효과는 슬래밍 연구에 있어 고려 해야 하는 중요한 요소로 밝혀졌다. 탄성 효과로 인한 음(Negative)압이 -0.1Mpa에 가까울 때 두 번째 압력이 발생하는 것으로 보인다.

식 (2)를 사용하여 한쪽 면이 물에 접촉한 상태의 고유 주기를 계산할 수 있다. 물의 질량이 추가되어 주기가 증가 혹은 감소할 수 있다. 해머테스트를 통한 고유 주기의 측정 결과는 그림 5.28과 표 5.19에 나타내었다. 이론적으로 계산한 주기와 해머 테스트, 그리고 실험에서 얻은 값이 유사한 것을 확인할 수 있다.

$$f_{water} = \frac{f_{air}}{\sqrt{a + \frac{A_p}{Mp}}} \quad (2)$$

$$A_p = \alpha_{ij} \beta ab^2$$

$$\alpha_{ij} = \frac{(\int \tilde{z}_{ij} dA)^2}{2ab(\int \tilde{z}_{ij} dA)}$$

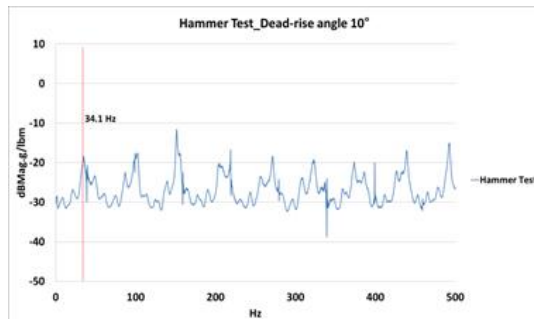
a : width of plate

b : length of plate

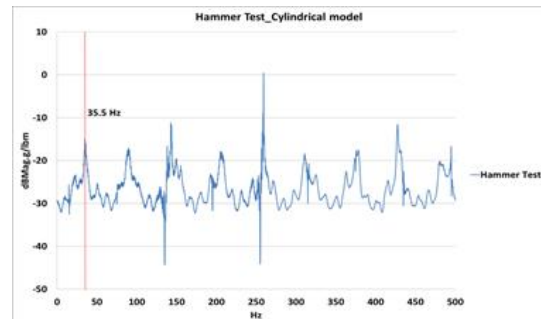
β : aspect ratio dependent factor

α_{ij} : a function of model indices and boundary condition on plate

\tilde{z}_{ij} : dimensionless mode shape of $i j$ mode



Hammering test result for dead-rise angle 10°



Hammering test result for cylindrical model

그림 5.28 Hammer test for dead-rise angle 10° and cylindrical model

표 5.20 Comparison of natural frequency on the water

	f_{water} [Eq. (2)] [Theoretical]	Experimental [Drop test]	Experimental [Hammer test]
Dead-rise angle 10°	34.8 [Hz]	33.3 [Hz]	34.1 [Hz]
Cylindrical	34.1 [Hz]	33.3 [Hz]	35.5 [Hz]

그림 5.29는 압력과 스트레인의 결과를 FFT(Fast Fourier Transform)에서 주파수 영역으로 변환한 것이다. 32.12Hz의 결과를 확인했으며, 실험값과 이론 그리고 해머 테스트의 결과와 유사한 것을 확인할 수 있다.

따라서 첫 번째 피크 압력 이후에 여러 피크가 발생할 수 있으며, 이러한 압력은 구조물의 고유 주기에 의해 발생한다. 고유 주기에 의해 발생하는 압력의 지속시간이 매우 짧지만 구조물에 미치는 영향에 대해서는 추후 연구가 필요하다.

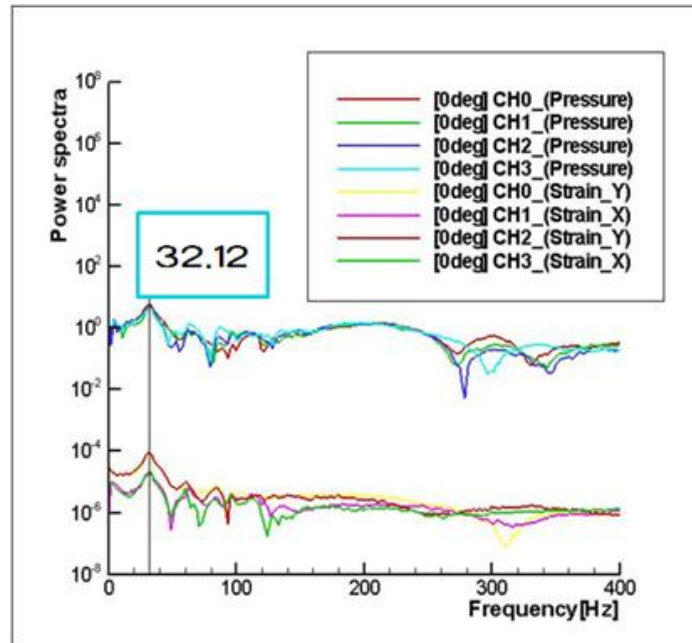


그림 5.29 Frequency analysis results

5.5 Deflection

5.5.1 Dead-rise angle 0°

그림 5.28은 평판에 대한 슬래밍 하중에 의한 변형을 계측한 것이다. 슬래밍 하중이 가해지기 전 초기 상태를 계측 하였으며, 구조물의 변형 정도에 따라 최소 두 번에서 다섯번 반복하여 자유낙하를 수행시켜 누적 하중을 가하였다. 그림 5.29는 Dead-rise angle이 10° 인 모델의 변형을 나타내며 그림 5.30은 실린더 형태 모델의 변형을 나타낸다. 변형은 모델의 중앙 단면을 측정하였다. 모델의 밑면 두께는 3mm, 5mm 그리고 8mm이며 낙하 높이는 각각 1.0m와 1.7m이다.

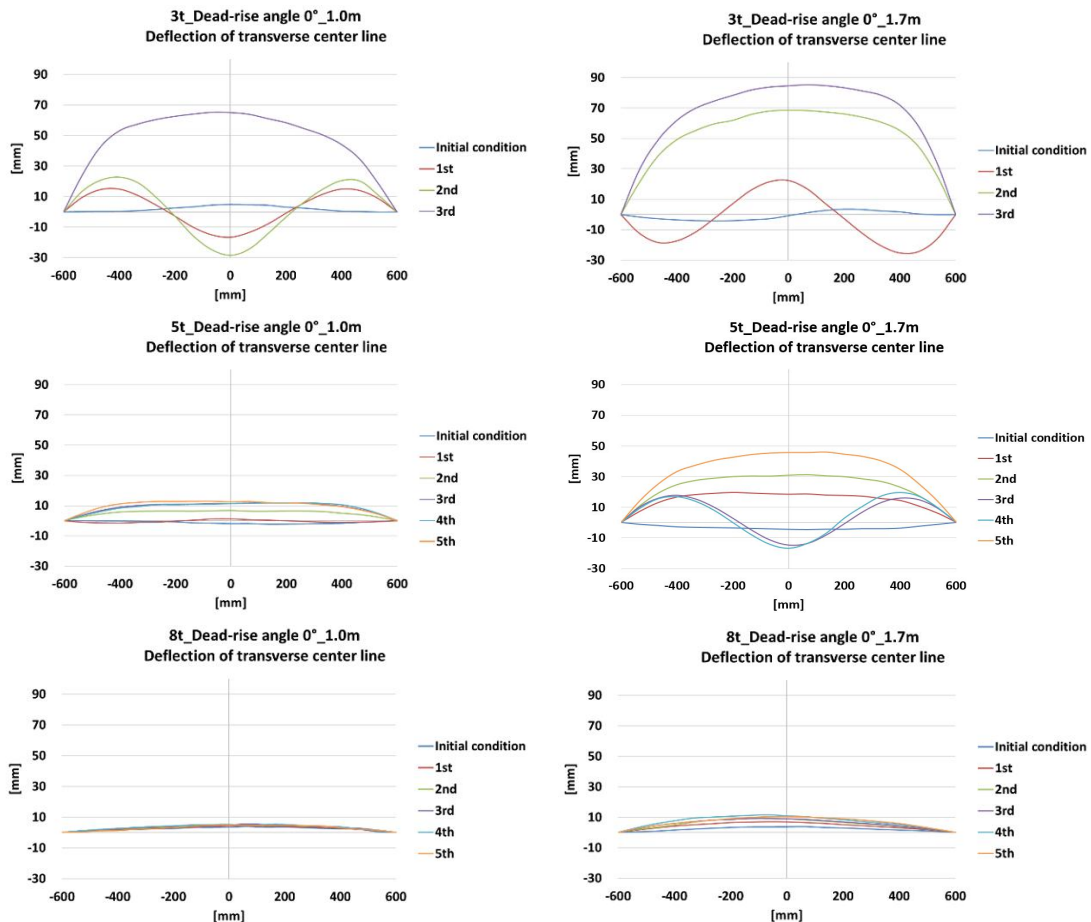


그림 5.28 dead-rise angle도가 0°의 변형 곡선

그림 5.28에 보이는 것과 같이 두께 3mm의 낙하 높이 1.0m에서의 자유 낙하 실험은 세 번이 수행되었다. 첫 번째와 두 번째 실험에서의 변형은 자유 판 진동의 3차

모드인 `M`의 형태와 유사한 경향을 보인다[38]. 높이 1.7m에서의 첫 번째 실험 결과 또한 자유 판 진동의 3차 모드인 `M`의 형태와 유사한 경향을 보인다. 실험이 세 번씩 수행된 이유는 실험 모델의 용접 부 파단으로 더 이상의 실험 진행이 어려우며 안전상 문제가 생길 수 있기 때문에 세 번씩 수행하였다. 중앙 단면에서의 최대 변형은 각각 63mm와 86mm이다. 두께 5mm의 낙하 높이 1.0m와 1.7m에서의 자유 낙하 실험은 각각 다섯 번 수행되었다. 낙하 높이 1.0m에서 수행된 자유 낙하 실험에서 예측된 최대 변형은 약 10mm이며 누적 반복 될수록 변형이 증가하는 것을 확인하였다. 높이 1.7m에서 첫 번째와 두 번째 낙하 실험에서는 두께 3mm와 동일하게 자유 판 진동의 3차 모드인 `M`의 형태와 유사한 경향을 보인다. 총 다섯 번의 자유 낙하 실험을 통해 충격 하중을 누적 하였고 최대 변형은 약 58mm로 예측되었다. 두께 8mm이며 낙하 높이 1.0m의 실험의 경우 모델의 두께 보다 작은 약 7mm의 변형이 예측되어 대 변형이 발생하지 않은 것으로 판단되며 낙하 높이 1.7m에서 누적 변형이 최대 10mm로 예측 되었다. 모재의 두께 이상의 변형이 발생하였을 때 대 변형이 발생한 것으로 간주 되는데 대 변형이 발생하기 전 자유 판 진동의 3차 모드인 `M` 형태의 변형이 발생하고 그 후 판의 대 변형이 발생하는 것으로 예측 되었다.

5.5.2 Dead-rise angle 10°

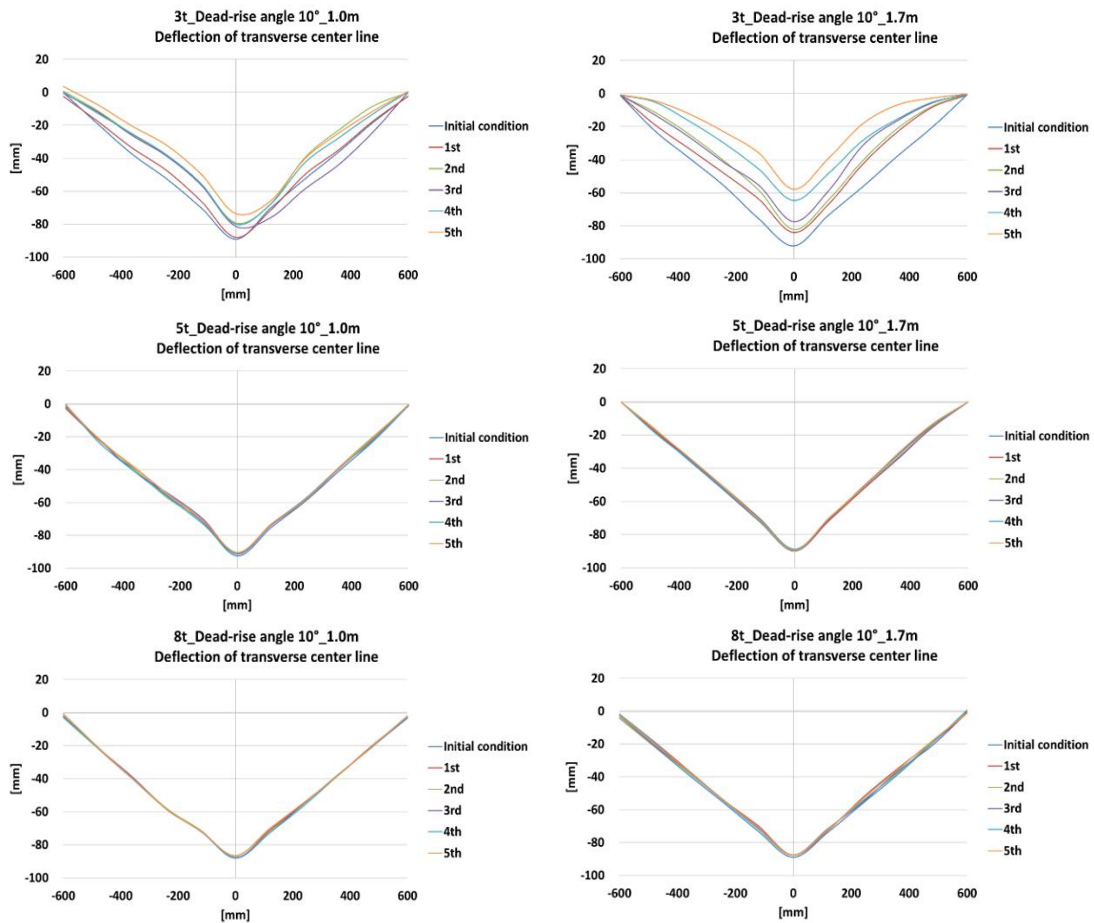


그림 5.29 dead-rise angle도가 10°의 변형 곡선

그림 5.29에 보이는 것과 같이 두께 3mm의 낙하 높이 1.0m와 1.7m에서의 자유 낙하 실험은 다섯 번이 수행되었다. 실험이 다섯 번씩 수행된 이유는 실험 모델의 용접 부 파단으로 더 이상의 실험 진행이 어려우며 안전상 문제가 생길 수 있기 때문에 각각 다섯 번씩 수행하였다. 중앙 단면에서의 최대 변형은 각각 20mm와 40mm가 계측되었다. 두께 5mm와 8mm의 낙하 높이 1.0m와 1.7m에서의 자유 낙하 실험은 각각 다섯 번 수행되었다. 평판에 비해 높은 압력이 계측된 것이 비해 두께 5mm와 8mm에서의 대 변형은 계측되지 않았다.

5.5.3 Cylindrical shape

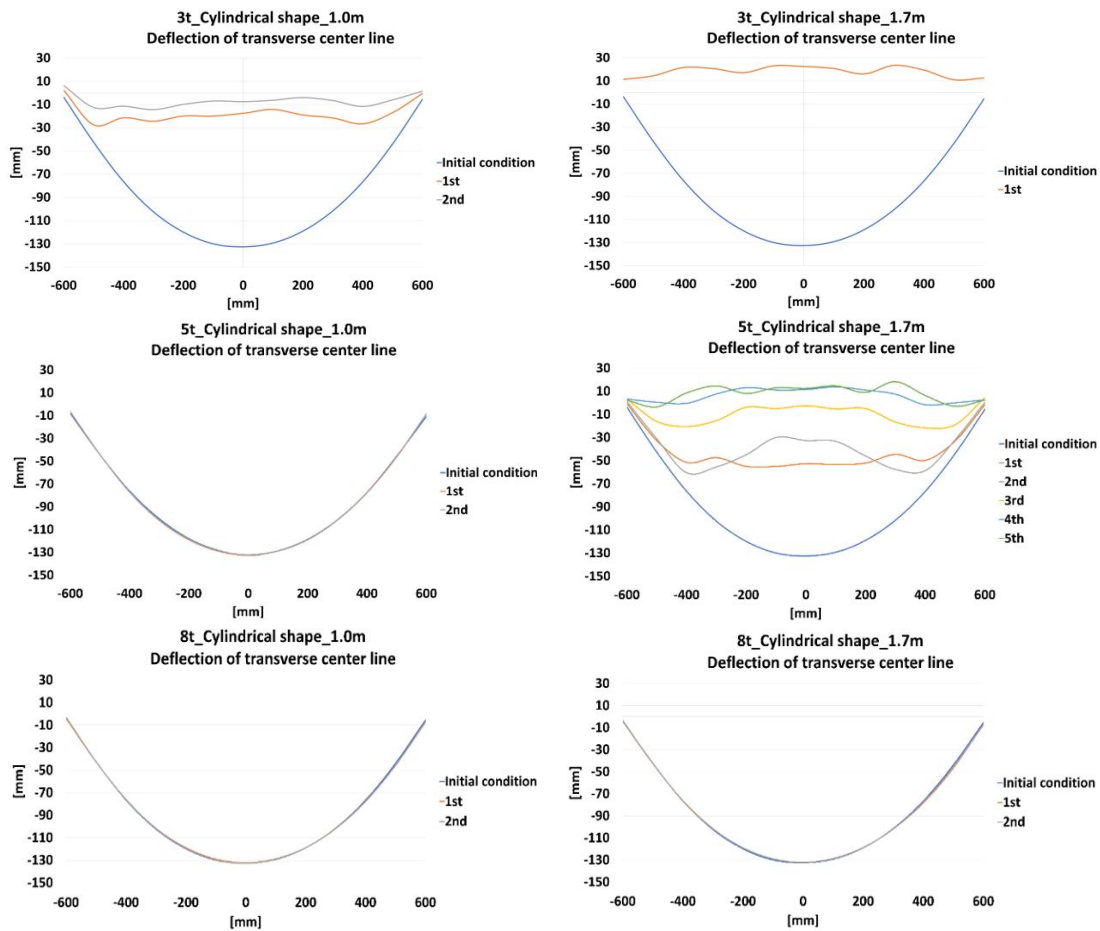


그림 5.30 cylindrical Shape의 변형 곡선

그림 5.30에 보이는 것과 같이 두께 3mm의 낙하 높이 1.0m에서의 자유 낙하 실험은 두 번이 수행되었다. 실험이 두 번만 수행된 이유는 실험 모델의 용접 부 파단으로 더 이상의 실험 진행이 어려우며 안전상 문제가 생길 수 있기 때문에 두 번 수행하였다. 중앙 단면에서의 최대 변형은 각각 130mm와 140mm이다. 가장 높은 압력을 보인 실린더 형상의 경우 압력의 크기와 변형의 크기가 모두 크게 계측 되었다. 두께 5mm의 낙하 높이 1.0m와 1.7m에서의 자유 낙하 실험은 각각 두 번과 다섯번 수행되었다. 낙하 높이 1.0m에서 수행된 자유 낙하 실험에서는 변형이 계측되지 않아 두 번의 실험을 수행하였고, 높이 1.7m에서 다섯번의 자유 낙하 실험을 수행하여 누적된 손상을 계측한 결과 최대 변형은 150mm까지 계측 되었다. 이러한 결과는 시뮬레이션을 통한 누적 손상을 예측한 결과와 일치하는 결과이다. 두께 8mm의 낙하 높이 1.0m와 1.7m에서의 자유 낙하 실험은 각각 두 번 수행되었다. 평판과 Dead-rise angle 10° 에 비해 높은 압력이 계측 됐지만 두께 5mm와 8mm만큼의 대 변형은 계측되지 않았다.

제6장 실험식 추정

6.1 Dimensional analysis

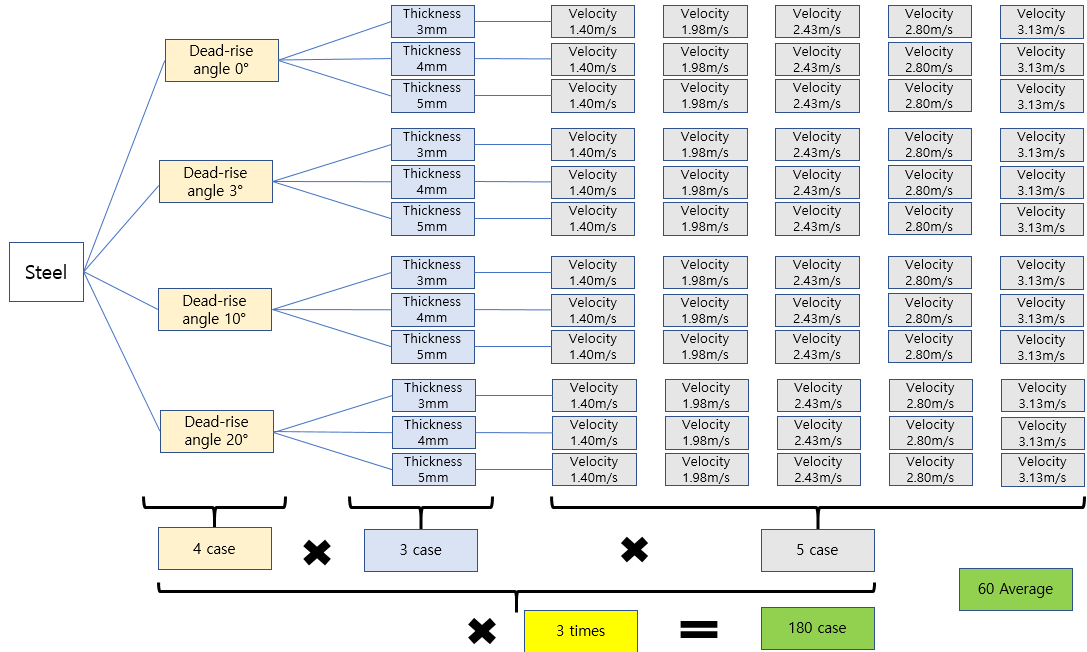


그림 6.1 실험식 추정을 위한 실험 항목 및 경우의 수 정리

그림 6.1은 실험식 추정을 위한 실험 항목 및 그에 따른 경우의 수를 나타낸다. Dead-rise angle 별 4개의 case와 각각 3case, 속력에 대한 경우의 수 5가지를 모두 조합하면 총 180개의 실험 데이터를 확보 할 수 있으며, 60개의 평균값을 얻을 수 있다.

표 6.1 Selection of Variable

Properties	Parameters	Form	비고
Geometry	Length of the model	L	
	Breadth of the model	B	생략 가능
	Plate thickness	t	
	Dead-rise angle	θ	
Environment	Drop height	h	
	Fluid density	ρ	
	Fluid pressure	P	
	Acceleration due to gravity	g	
Material	Water depth	d	생략 가능
	Fluid viscosity	μ	생략 가능
	Material density	D	
	Elasticity	E	

표 6.1은 각각의 변수들을 나열하고 표기하였다. 환경 변수인 물의 깊이 및 점성, 형상 변수인 모델의 너비는 실험식의 추정에 있어 공통되는 항목으로 상쇄가 가능하다. 실험을 통해 얻을 수 있는 최종 값인 탄성에 대한 값을 최종 도출 결과 값으로 가정한 후 종속 변수와 독립 변수를 나누어 상쇄가 가능한 항목을 상쇄한 후 각각의 물리적인 값으로 표현 후 재차 상쇄 가능한 항목을 상쇄하여 초기 실험식을 추정 하였다 [28].

표 6.2 탄성에 영향을 미치는 매개 변수

Sl. No.	Variables	Dimension
1	Length(L)	L
2	Thickness(t)	L
3	Angle(θ)	$M^0L^0T^0$
4	Velocity(V)	LT^{-1}
5	Density (ρ)	ML^{-3}
6	Pressure(P)	$ML^{-1}T^{-2}$
7	Gravity(g)	LT^{-2}
8	Mass(M)	M
9	Elasticity(E)	$ML^{-1}T^{-2}$

표 6.1에 나열된 항목 중 필수 변수는 표 6.2에 표기된 9가지이며, 이를 dimension 화하기 위해 각각이 가진 물리량으로 표기 하였다. 표 6.2를 토대로 변수와 각 항목 들을 정리하면 하기와 같이 무차원화 된 변수가 도출 된다.

Total number of variables (m) = 9+1 = 10

Total number of fundamental dimensions (n) = 3

Total number of non-dimensional quantities (m-n) = 10 - 3 = 7

실험식의 추정을 위해 물리 변수를 결정해야 한다. 변수는 다음과 같다. 차원이 없는 값인 Strain값을 토대로: Strain(ϵ), $M^0L^0T^0$

1. Density (ρ) = M/L^3
2. Velocity(V) = L/T
3. Length(L) = L
4. Width(W) = L
5. Thickness(T) = L
6. Mass(M) = M
7. Elasticity(E) = M/LT^2
8. Pressure(P) = M/LT^2

$$9. \text{ Dead-rise angle}(\theta) = M^0 L^0 T^0$$

Dimension Analysis:

$$M^0 L^0 T^0 = (M/L^3)^a (L/T)^b (L)^c (L)^d (L)^e (M)^f (M/LT^2)^g (M/LT^2)^h (M^0 L^0 T^0)^i$$

위의 변수를 토대로 다음과 같은 변수들을 무 차원화하기 위한 다음과 같은 식이 성립한다.

$$M^0 L^0 T^0 = (\rho)^a (V)^b (L)^c (W)^d (T)^e (M)^f (E)^g (P)^h (\theta)^i$$

$$M^0 L^0 T^0 = (ML^{-3})^a (LT^{-1})^b (L)^c (L)^d (L)^e (M)^f (ML^{-1}T^{-2})^g (ML^{-1}T^{-2})^h (M^0 L^0 T^0)^i$$

$$M^0 L^0 T^0 = (M/L^3)^a (L/T)^b (L)^c (L)^d (L)^e (M)^f (M/LT^2)^g (M/LT^2)^h (M^0 L^0 T^0)^i$$

$$M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{W}{L}\right)^d \left(\frac{T}{L}\right)^e \left(\frac{M}{\rho L^3}\right)^f \left(\frac{E}{\rho v^2}\right)^g \left(\frac{P}{\rho v^2}\right)^h (\theta)^i$$

$$M^0 = f \left\{ \left(\frac{M}{L^3}\right)^a (M)^f \left(\frac{M}{LT^2}\right)^g \left(\frac{M}{LT^2}\right)^h \right\}$$

$$L^0 = f \left\{ \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{T}\right)^b (M)^c (M)^d (M)^e \left(\frac{M}{LT^2}\right)^g \left(\frac{M}{LT^2}\right)^h \right\}$$

$$T^0 = f \left\{ \left(\frac{L}{T}\right)^b \left(\frac{M}{LT^2}\right)^g \left(\frac{M}{LT^2}\right)^h \right\}$$

$$\epsilon = \left(\frac{gL}{v^2}\right)^d \left(\frac{t}{L}\right)^e \left(\frac{M}{\rho L^3}\right)^f \left(\frac{E}{\rho v^2}\right)^g \left(\frac{P}{\rho v^2}\right)^h (\theta)^i$$

$$\epsilon = \left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right)^{-d/2} \left(\frac{t}{L}\right)^e \left(\frac{M}{\rho L^3}\right)^f \left(\frac{E}{\rho v^2}\right)^g \left(\frac{P}{\rho v^2}\right)^h (\theta)^i$$

위의 식을 토대로 상쇄가 가능한 항목을 묶어 상쇄시키면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$0 = a + f + g + h,$$

$$\therefore a = -f - g - h$$

$$0 = -3a + b + c + d + e - g - h$$

$$0 = -3(-f - g - h) - 2g - 2h + c + d + e - g - h$$

$$= 3f + 3g + 3h - 2g - 2h + c + d + e - g - h$$

$$\therefore c = 3f + c + d + e$$

$$0 = -b - 2g - 2h$$

$$\therefore b = -2g - 2h$$

$$M^0 L^0 T^0 = (\rho)^a (V)^b (L)^c (W)^d (T)^e (M)^f (E)^g (P)^h (\theta)^i$$

$$\therefore a = -f - g - h$$

$$\therefore b = -2g - 2h$$

$$\therefore c = 3f + c + d + e$$

$$\therefore M^0 L^0 T^0 = (\rho)^{-f-g-h} (V)^{2g-2h} (L)^{3f+c+d+e} (W)^d (T)^e (M)^f (E)^g (P)^h (\theta)^i$$

6.2 Multiple regression analysis

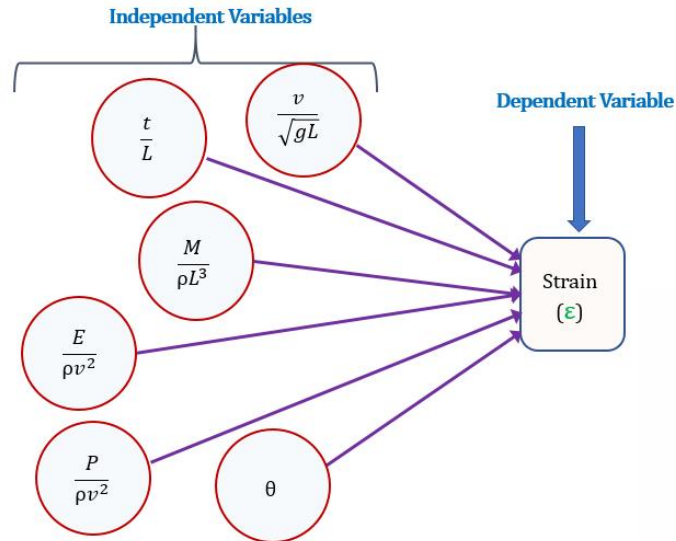


그림 6.2 실험식 추정을 위한 종속 변수와 독립 변수의 분리

그림 6.2는 실험식 추정을 위한 종속 변수와 독립 변수의 구분을 정의 한다. 앞서 언급한 여러 변수 중 독립 변수의 항목을 정하여 종속되는 변수에 대입 및 공통 항목으로 무시가 가능한 모델의 너비 물의 깊이, 점성 등을 생략 하는 과정을 진행 하였다.

$$\epsilon = f \left\{ \frac{v}{\sqrt{gL}}, \frac{t}{L}, \frac{M}{\rho L^3}, \frac{E}{\rho v^2}, \frac{P}{\rho v^2}, \theta \right\}$$

~~X1 = $\frac{v}{\sqrt{gL}}$~~ X2 = $\frac{t}{L}$ X3 = $\frac{M}{\rho L^3}$
 X4 = $\frac{E}{\rho v^2}$ X5 = $\frac{P}{\rho v^2}$ X6 = θ

그림 6.3 생략 가능 독립 변수의 상쇄

Correlation

	ϵ	X1	X2	X3	X4	X5
X1	0.44					
X2	-0.22	0.00				
X3	*	*	*			
X4	-0.40	-0.95	0.00	*		
X5	0.18	-0.09	0.27	*	0.09	
X6	-0.76	0.00	0.00	*	0.00	-0.35

그림 6.3 실험식 추정을 위한 상관 관계 분석

6.3 Verification

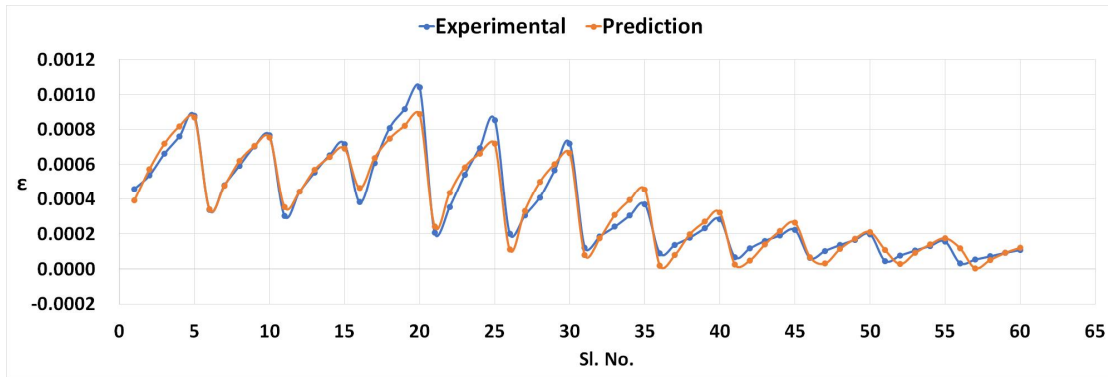


그림 6.4 실험 값과 추정식의 비교

그림 6.4는 위의 과정을 거쳐 얻은 실험 추정식과 실제 실험에서 얻은 strain값을 비교하기 위해 그래프로 나타낸 것이다. 실험과 약 92%이상의 일치하는 실험식을 도출하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \therefore & [(1.13 \times 10^{-3})] + [(-5.78 \times 10^{-2}) \cdot X1] + [(5.29 \times 10^{-11}) \cdot X2] + [(-1.76 \times 10^{-11}) \cdot X3] \\ & + [(6.83 \times 10^{-6}) \cdot X4] + [(7.41 \times 10^{-20}) \cdot X3^2] + [(8.98 \times 10^{-10}) \cdot X1 \cdot X3] \\ & + [(5.66 \times 10^{-3}) \cdot X1 \cdot X5] + [(2.65 \times 10^{-12}) \cdot X2 \cdot X4] + [(-3.41 \times 10^{-14}) \cdot X3 \cdot X4] \\ & + [(2.32 \times 10^{-13}) \cdot X3 \cdot X5] + [(-2.24 \times 10^{-6}) \cdot X4 \cdot X5] \end{aligned}$$

6.4 실험식 추정 결과

현재까지 선박의 두께는 슬래밍 최대 압력을 등가설계 압력으로 산정하고 있다. 그러나 설계 변수는 구조물의 고유 주기와 압력의 폭을 고려한 임펄스 값이 충격 압력이 될 수 있다. 구조물의 고유 주기가 압력의 폭보다 클 경우 설계변수는 피크 압력이 되며, 구조물의 고유 주기가 압력의 폭보다 작을 경우 임펄스 값이 설계 변수로 산정이 가능하다. 앞에 서술한 실험식 추정을 통해 임펄스 값을 산정하여 등가 정압 계수를 제안함으로써 선박이나 해양구조물의 손상을 방지하는데 유용하게 사용될 수 있다.

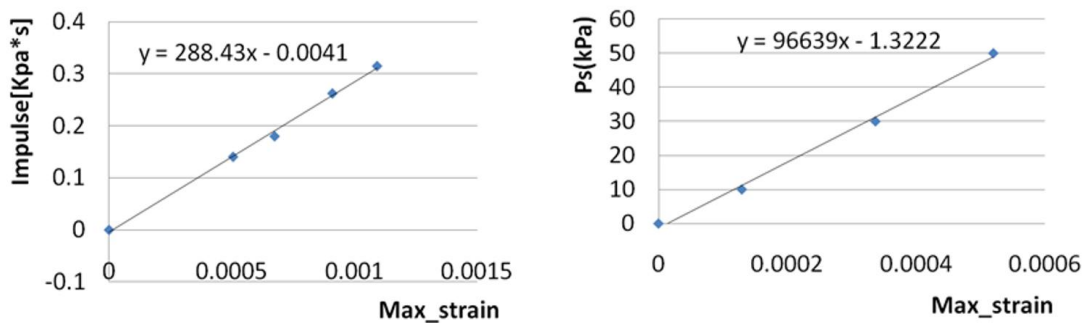


그림 6.5 스트레인과 임펄스, 최대 압력 관계

지금까지의 구조 계산식은 최대 압력에서 변환된 등가정압을 사용하여 제안하였다. 그러나 그림 6.5와 같이 구조물의 고유 주기보다 작은 압력 폭을 갖는 임펄스에 의한 등가 정압을 제시하지 않았다. 이 장에서는 평판에 대한 구조 설계식을 제안하며, 그림 6.6과 같이 최대 압력과 임펄스값의 관계로 정의 된다.

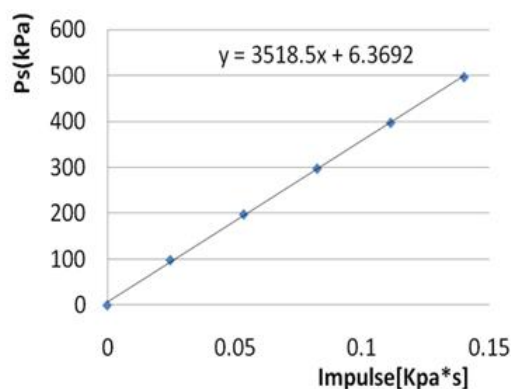


그림 6.6 최대 압력과 임펄스 관계



그림 6.7 임펄스와 스트레인, 정압의 관계

그림 6.7과 같은 최종 결과를 도출할 수 있으며, 압력의 지속 시간과 구조물의 고유 주기를 고려하여 공식에 활용될 수 있다. 이러한 결과는 슬래밍 충격 압력의 산정에 있어 부족한 정보에 대한 문제를 해결할 수 있다. 다음 식의 계수는 DNV GL 규정 [10]의 챕터 1과 챕터 6을 참고 하였다. 구조적 손상 방지를 위한 기본 설계 변수에 최대 압력과 압력의 지속시간을 고려하여 다음 두께 추정 구조식(3)를 만족하기 위한 설계 변수에 해당하는 피크 압력, 지속시간, 임펄스의 관계에서 압력의 지속시간이 주기보다 짧을 경우 임펄스 값을 사용함으로써 부족한 변수에 대한 정보를 해결할 수 있다. 변형률과 주기의 추정이 가능하다면 설계 압력에 대한 설계식의 추정이 가능하며, 임펄스 값과 변형률 그리고 정적 압력과의 관계는 실험과 앞장의 실험식 추정에서 검증 되었다.

$$t_{sl} = \frac{0.9k_a k_r s \sqrt{p_{sl}}}{\sqrt{f_1}} + t_k \quad (3)$$

k_a : Correction factor for aspect ratio of plate

k_r : Correction factor for curved plate with stiffening direction

s : Stiffener spacing

t_k : Corrosion addition

f_1 : 1 material factor depending on material strength group

p_{sl} : design pressure

제7장 시뮬레이션

7.1 서론

시뮬레이션은 비선형 FE package ABAQUS 소프트웨어를 사용하여 수행하였다. 자유 낙하에서 예측된 슬래밍 압력을 하중 값으로 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 모델은 그림 6.1에 나타났다. S4R(four-node shell element)요소를 사용하여 모델링하였으며, hourglass control 기법이 사용되었다. 다양한 격자 크기에 대한 수렴을 확인하였으며, 본 시뮬레이션에 적용된 격자의 크기는 테스트 모델 두께의 1/5~7 수준이다.

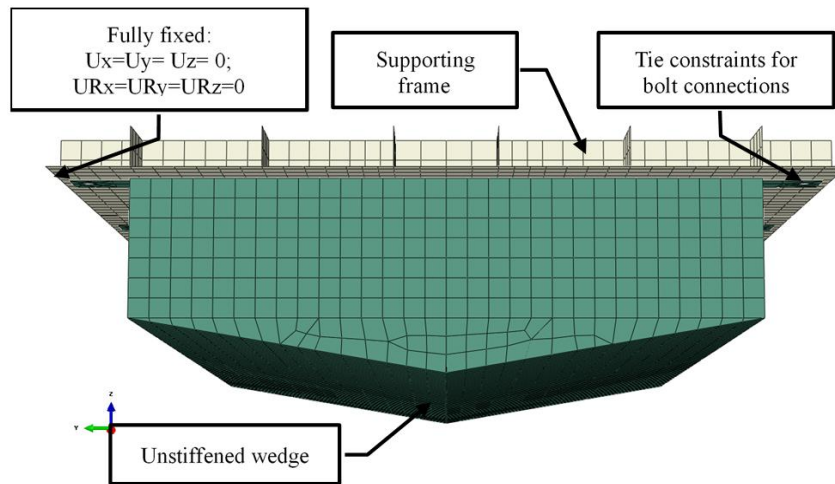


그림 7.1 Dead-rise angle 10° 시뮬레이션 모델링

실제 실험과 동일한 조건을 위해 실험 모델을 지지하는 프레임을 도모델링 하였으며, 실험 모델과 지지 프레임의 경계 조건은 surface-to-surface contact 조건이 적용되었다. 실험 모델과 지지 프레임 사이의 마찰 계수는 Villavicencio와 Guedes Soares [37]가 제안한대로 0.2로 설정되었다. 재료의 특성은 [33]가 제안한 방정식을 사용하여 정의되었다. 인장 실험으로 얻은 항복 강도, 인장 강도 그리고 변형률은 정적 해석을 위한 방정식의 추정에 사용되었다. 실제 응력 및 변형은 식(4)~(6)으로 표현된 관계를 사용하였다. 또한 실제 소성 변형은 식(5)를 사용하여 계산되었다. 3.2 절에서 실시된 인장실험의 결과가 본 시뮬레이션에 사용되었으며, 반복되는 충격 하중에 대한 평가가 이루어져야 한다는 Mei et al.[25] and Zhao et al. [40]의 논문을 기초로 시뮬레이션이 수행되었다.

$$\sigma_{te} = \sigma_e (\epsilon_e + 1) \quad (4)$$

$$\sigma_{tr} = \ln(\varepsilon_e + 1) \quad (5)$$

$$\sigma_{pl,tr} = \varepsilon_{tr} - \frac{\sigma_{tr}}{E} \quad (6)$$

그림 7.2는 시뮬레이션에 적용된 실제 응력 및 소성 변형 곡선을 나타낸다. 실험을 통해 계측된 응력 및 변형을 식(7)~(9)에 적용하여 yield plateau 및 strain hardening 구성 식을 얻을 수 있다.

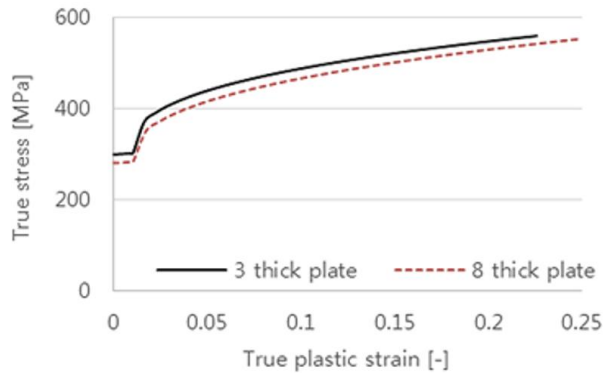


그림 7.2 시뮬레이션 모델에 적용된 응력-소성 변형 곡선

$$\sigma_{tr} = E\varepsilon_{tr} \quad \text{When, } 0 < \varepsilon_{tr} \leq \varepsilon_{Y,tr} \quad (7)$$

$$\sigma_{tr} = \sigma_{Y,tr} + (\sigma_{HS,tr} - \sigma_{Y,tr}) \frac{\varepsilon_{tr} - \varepsilon_{Y,tr}}{\varepsilon_{HS,tr} - \varepsilon_{Y,tr}} \quad (8)$$

$$\text{When, } \varepsilon_{Y,tr} < \varepsilon_{tr} \leq \varepsilon_{HS,tr}$$

$$\sigma_{tr} = \sigma_{HS,tr} + K(\varepsilon_{tr} - \varepsilon_{HS,tr})^n \quad (9)$$

$$\text{When, } \varepsilon_{HS,tr} < \varepsilon_{tr}$$

$$\text{When, } n = (\varepsilon_{T,tr} - \varepsilon_{HS,tr}) \frac{\sigma_{T,tr}}{\sigma_{T,tr} - \sigma_{HS,tr}}$$

$$K = \frac{\sigma_{T,tr} - \sigma_{HS,tr}}{(\varepsilon_{T,tr} - \varepsilon_{HS,tr})^n}$$

σ_{tr} and ε_{tr} : True stress and true strain, respectively

$\sigma_{Y,tr}$, $\sigma_{HS,tr}$ and $\sigma_{T,tr}$: True yield strength, hardening start stress and ultimate tensile strength, respectively

$\varepsilon_{Y,tr}$, $\varepsilon_{HS,tr}$ and $\varepsilon_{T,tr}$: True yield strain, hardening start strain and ultimate tensile strain, respectively

변형률 경화에 대한 효과를 고려하기 위해 Symonds 방정식[23]인 식(10)을 사용하였다. 실험에 사용된 모델은 연강으로 제작 되었으므로 재료의 D와 q에 해당하는 값은 각각 40.4/s 및 5를 적용하였다.

$$\frac{\sigma_{YD}}{\sigma_D} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (10)$$

σ_{YD} : Dynamic yield strength

반복적인 하중이 가해지는 시뮬레이션의 수행을 위해 압력이 누적되며 가해지도록 설정하였다. 각 하중이 가해지고 임의의 감쇠 계수를 적용하여 압력으로부터 전해지는 구조물의 진동을 완화하여 정적인 상태에 이르게 하였다. 시뮬레이션의 결과에 큰 영향을 미치는 감쇠 계수는 임계값의 1%로 설정하여 질량 비례 수(α) 값을 구하였다. 반복되는 시간의 간격은 0.15초로 하였다.

7.2 결과

시뮬레이션을 통해 예측된 영구 변형은 표7.1에 나열하였다. 표7.1의 영구 변형 예측 값은 자유 낙하 높이 1.0m이며 두께 3mm의 경우 실험값과의 비교 검증을 위해 2번의 자유낙하를 적용하였으며 두께 8mm의 경우 5번이 적용되었다. 시뮬레이션 결과 실험값과 상당히 일치 하는 것을 확인하였다.

표 7.1 실험 값과 시뮬레이션을 통한 변형 예측 값의 비교

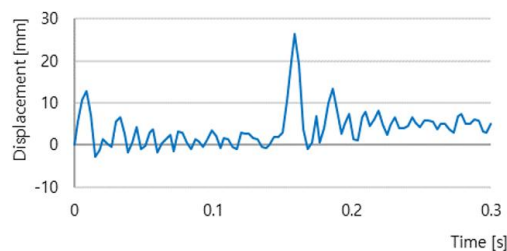
(a) 밀면 두께: 3mm, 자유 낙하 속도: 3.13m/s (높이: 1.0m)

No. of Repetition	Experiment (mm)	Prediction (mm)	Pred./Exp.
1 st	1.150	1.168	1.016
2 nd	7.043	5.715	0.811

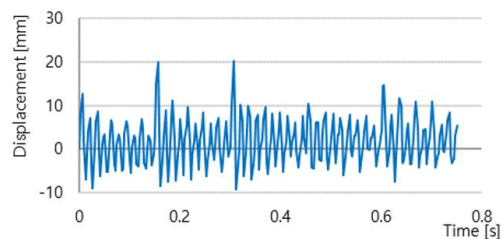
(b) 밀면 두께: 8mm, 자유 낙하 속도: 3.13m/s (높이: 1.0m)

No. of Repetition	Experiment (mm)	Prediction (mm)	Pred./Exp.
1 st	0.317	0.256	0.808
2 nd	0.104	0.377	3.629
3 rd	0.826	0.883	1.069
4 th	0.831	0.975	1.173
5 th	1.296	1.464	1.130

표 7.1은 실험 모델이 3.13m/s의 속력으로 수면과 반복적으로 충돌하여 슬래밍 하중이 가해 졌을 경우 영구 변형에 대한 실험값과 시뮬레이션을 통한 예측 값을 비교하여 나열하였다.



(a) 밀면 두께: 3mm, 자유 낙하 속도: 3.13m/s (높이: 1.0m)



(b) 밀면 두께: 8mm, 자유 낙하 속도: 3.13m/s (높이: 1.0m)
그림 7.3 시뮬레이션을 통한 영구 변형 예측 결과

그림 7.3은 시뮬레이션을 통한 영구 변형에 대한 예측 결과이다. 표7.1에 표기된 것과 같이 실험을 통해 계측된 값과 상당히 일치 하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 구조물이 압력 하중이 가해지고 발생하는 진동이 정확히 구현되었다. [23,28]는 그림 7.4에 표현된 것과 같이 슬래밍 하중을 삼각형 넓이의 면적으로 이상화 하여 사용하는 것을 권장하였다. 그림에서 시간과 압력은 각각의 고유 주기 $T_{n,w}$ 및 P_c 로 무차원화 하였다. 하지만 이렇게 이상화 된 압력의 형상 또한 실제 실험에서 계측 된 압력 값을 사용하여야 가능하다.

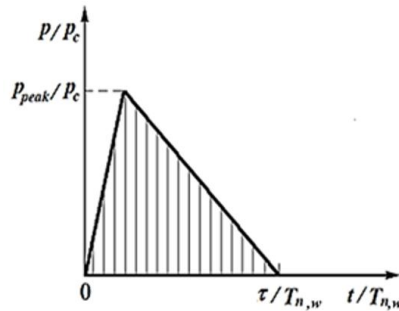


그림 7.4 이상화 된 압력 형상

그림 7.4에서 τ 는 압력이 지속되는 시간이며 P_{peak} 는 최대 압력이다. $T_{n,w}(=1/f_{water})$ 는 한쪽 면이 물에 닿아 있고 다른 면은 공기 중에 있을 때 고유 주기를 나타낸다.

보강되지 않은 강판의 고유 주기는 식(9)를 통하여 추정할 수 있다. 또한 Silla et al.[29,33]로부터 제안된 식(11)을 통해 고유 주기를 구할 수 있다.

$$T_n = \frac{1}{f_n} \quad (11)$$

$$\text{when, } f_n = 5.544 \times 10^6 \times \frac{t}{ab} \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + 0.6045}$$

a and b : The longer and shorter length of the plate, respectively.

모든 면이 공기 중에 노출되고 변의 고정 유무에 따른 고유 주기를 계산 하는 식은 명확히 제시가 되었다. 그러나 해양 구조물은 한쪽 면은 공기 중에 노출되어 있고 다른 면은 물과 접촉하고 있는 경우가 많다. [33,34] 에서 주변의 물은 감쇠 역할을 하여 고유 진동수를 감소시킨다. 식(12)은 한쪽 면은 공기 중에 노출되어 있고 다른 면은

물에 접수된 상태인 강판의 고유 주기를 추정한다. $\tau / T_{n,w}$ 의 값은 침수 효과를 고려한 값으로 표 9에 나타냈다.

$$f_{water} = f_{air} \sqrt{\frac{K_p}{K_p + \frac{\rho_1}{\rho_p}}} \quad (12)$$

$$where, K_p = \frac{\pi \times t}{a \times b} \sqrt{\frac{b^2}{10^6} + a^2}$$

ρ_1 : density of liquid, and was assumed to be 1025 kg/m^3 for sea water.

ρ_p : density of the plate, in kg/m^3

또한, Jones [36]의 제안에 따른 보강이 되지 않은 판의 정적 붕괴 압력은 식(13)를 통해 예측할 수 있다.

$$P_c = \frac{16m_Y}{b^2} \left[1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$where, m_Y = \frac{\sigma_Y t^2}{4}$$

σ_Y and t : Yield strength and thickness of the wedge, respectively.

표 7.2 반복 하중에 대한 최대 압력, 지속 시간 그리고 영구 변형 결과

No. of Repetition	P_{peak}/P_c	$\tau/T_{n,W}$	δ/t
1 st	1.269	0.061	0.040
2 nd	1.318	0.159	0.013
3 rd	1.299	0.128	0.105
4 th	1.377	0.189	0.106
5 th	1.663	0.134	0.165

실험과 시뮬레이션을 통해 반복되는 하중에 대한 연구를 진행하였다. 수행된 결과는 표 7.2이 나타냈다. Chuang [7] 과 Dac Dung Truong[8]에 따르면 반복되는 하중으로 인해 손상이 누적되고 결국 구조의 파괴로 이어질 수 있다. 슬래밍에 대한 연구에서는 이러한 반복되는 하중에 대해 간과할 수 없다. 실험을 통한 반복 하중을 재현하기에는 많은 어려움이 따른다. 첫 번째 하중이 구조물에 가해졌을 때 이미 영구 변형이나 구조물의 손상이 발생하게 되면 두 번째 하중은 같은 압력이 작용했다고 단정

짓기 어렵다. 따라서 시뮬레이션을 통해 반복되는 하중을 가하여 구조물의 변형에 대해 예측하고 검증하였다. 일반적으로 무 차원화 한 압력(T_P/T_N)의 지속 시간이 1미만 일 경우 구조물의 거동 특성은 압력 하중의 크기와 지속시간에 관계없이 impulse 값에 의해 결정된다. 반면, 무 차원화 한 압력 지속 시간의 크기가 1보다 큰 경우 구조물의 거동 특성은 최대 압력에 의해 결정된다[35]. 압력의 지속 시간이 구조물의 고유 주기와 유사하다면, 구조물의 거동 특성은 최대 압력의 크기 및 지속 시간의 영향을 받는다.

또한, 실험에서 계측 된 압력 값을 활용하여 시뮬레이션에 적용하여 구조물의 거동 특성을 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 상용 프로그램은 6.1장에 언급된 것과 같은 비선형 FE package ABAQUS 소프트웨어를 사용하여 수행하였다. 자유 낙하에서 계측된 슬래밍 압력을 하중 값으로 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 모델은 그림 6.5에 나타냈다. S4R(four-node shell element)요소를 사용하여 모델링 하였으며, hourglass control 기법이 사용되었다. 다양한 격자 크기에 대한 수렴을 확인하였으며, 본 시뮬레이션에 적용된 격자의 크기는 테스트 모델 두께의 1/5~7 수준으로 변형 예측에 사용된 것과 같은 격자 크기이다.

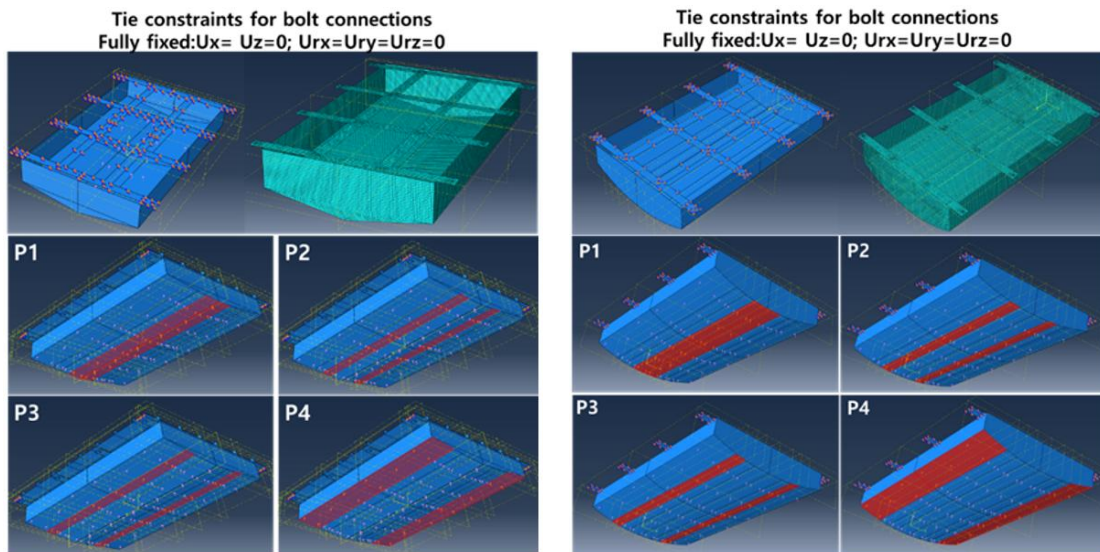


그림 7.5 dead-rise angle 10° 모델과 Cylindrical 모델 시뮬레이션 모델링

구조물의 거동 특성을 확인하기 위해 실험에서 계측 된 압력 값을 사용하였으며, 압력 값은 그림 7.5의 P1~P4에 붉은 색으로 나타난 순차적으로 작용하게 된다. P1이 충격 압력을 가장 먼저 받으며 P4가 가장 나중에 충격 압력을 받게 된다. 이에 따라 실험에서 계측된 압력의 간격 시간을 동일하게 시뮬레이션에 적용하였다. 모델링 된 상태는 실제 실험 조건과 동일하게 하기 위해 서포트 되는 지점을 완전 고정의 형태로 적용하였다.

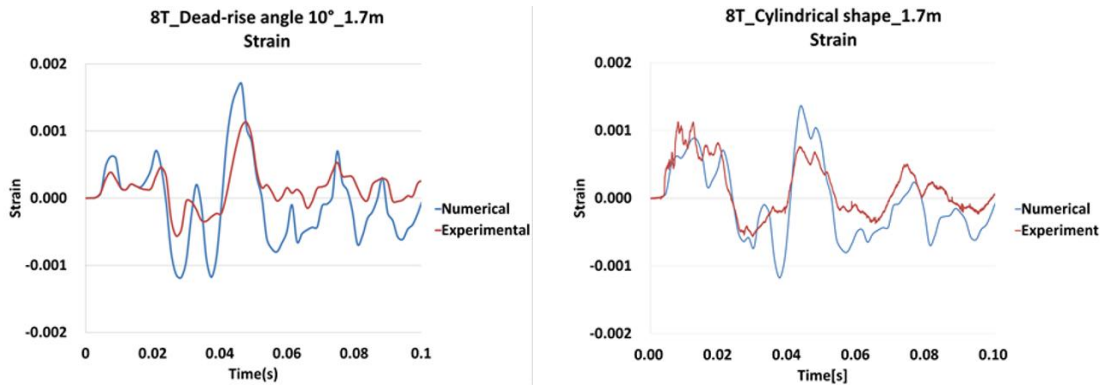


그림 7.6 시뮬레이션과 실험값에 대한 거동 특성 비교

그림 6.6은 시뮬레이션을 통한 구조물의 거동 특성과 실험에서 계측된 값을 비교한 것이다. 붉은 선은 실험값을 의미하고 파란 선은 시뮬레이션 값을 의미한다. 두 그래프가 완전히 일치하지는 않지만 시뮬레이션과 실험값의 거동 특성이 유사한 것을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확보하였고 누적되는 손상에 대해 시뮬레이션 하여 실험에서 계측된 변형 값과 비교하였다.

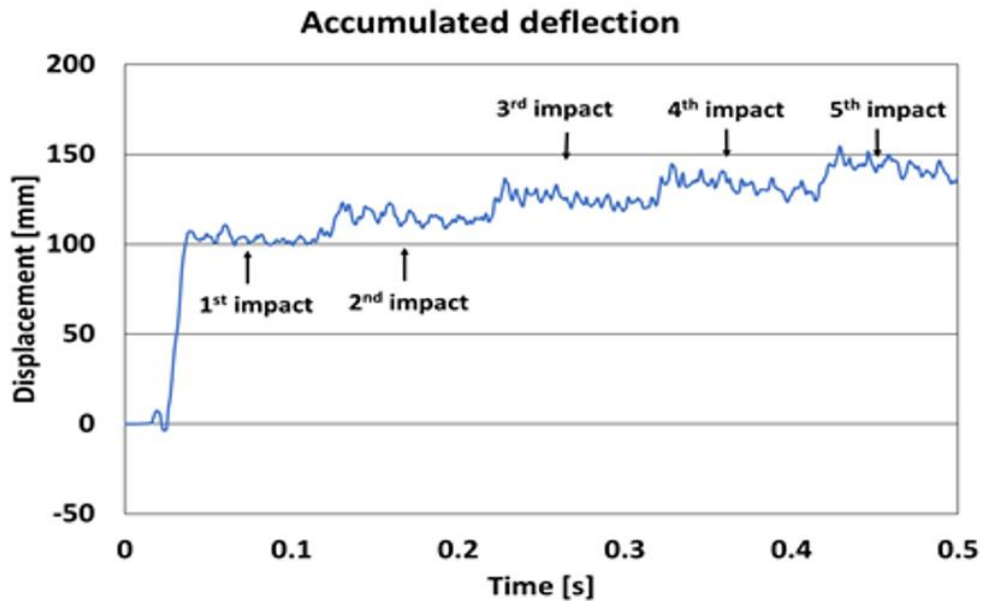


그림 7.7 누적 하중에 따른 변형 예측

그림 7.7은 누적된 하중에 따른 변형을 시뮬레이션 한 결과이다. 누적 손상에 대한 실험을 위해 변형이 발생하지만 한 번에 심각한 손상을 입지 않고 또한 변형이 적절히 발생하는 모델인 밀면 두께 5mm인 모델을 일정 시간 간격으로 자유 낙하하여 변형을 계측하였다. 시뮬레이션에는 5 번의 실험에서 얻은 압력 하중을 적용하여 실험값과 비교 하였다. 시뮬레이션과 실험에서 계측된 영구 변형 값의 결과는 표 7.3에 나열하였으며 그림 7.8은 첫 번째 자유 낙하 실험과 다섯 번째 자유 낙하 실험에서

계측된 변형의 모습이다.

표 7.3 시뮬레이션과 실험을 통한 최대 변형 결과

	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Measurement [mm]	80	100	120	130	140
Simulation [mm]	100	115	125	135	145



그림 7.8 첫 번째 자유 낙하 실험(좌)에서의 변형 및 다섯 번째 자유 낙하 실험(우)에서의 영구 변형

표 7.3과 그림 7.8에서 보는 것과 같이 첫 번째 자유 낙하로 인한 변형 값은 실험 값과 시뮬레이션 값이 각각 80mm와 100mm로 시뮬레이션의 결과가 약 20mm 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 마지막 다섯 번째 자유 낙하 결과를 비교 하면 그 값의 차이는 약 5mm로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 실험과 시뮬레이션이 반복 될수록 값이 수렴하는 것을 보이는데 이러한 오차의 원인으로는 실제 실험에서는 변형이 일어난 후 압력의 계측이 손상된 구조물로 인해 일정하다고 볼 수 없기 때문이다. 또한, dead-rise angle이 0°와 마찬가지로 실린더 형상에서도 air effect가 발생하는 것을 압력 그래프를 통해 확인하였다. 마지막으로 second pressure 가 발생하지만 구조물에 어떠한 영향을 미치는지 명확히 알 수 없다. 하지만 시뮬레이션과 실험값이 점차 수렴해 감으로써 누적 손상에 대한 구조물의 영구 변형 값이 일치하는 것을 확인 하였다.

제8장 결론 및 향후 연구

8.1 결론

본 연구에서는 낙하 높이와 dead-rise angle을 그리고 모델의 크기를 변화 하며 실험을 하였다. Rigid로 가정하여 wood로 제작된 모델과 탄성 영향에 대한 연구를 위해 steel로 제작된 모델을 실험에 사용하였다.

Air effect는 dead-rise angle 0° 와 실린더 형상에서 발생하였다. 이러한 air effect는 압력의 상승을 억제하는 효과가 있다. 일반적으로 dead-rise angle이 $3^\circ\sim 10^\circ$ 일 때 압력 값이 높게 나타난다고 알려져 있으나 실린더 형상의 모델에서 더욱 높은 압력 값이 계측 되었다. 그림 8.1과 같이 air effect는 실린더 형상의 모델에서도 발생하였으며, air effect로 인해 압력의 상승이 억제되었음에도 다른 형상의 모델과 비교하였을 때 가장 높은 압력 값을 보였다.

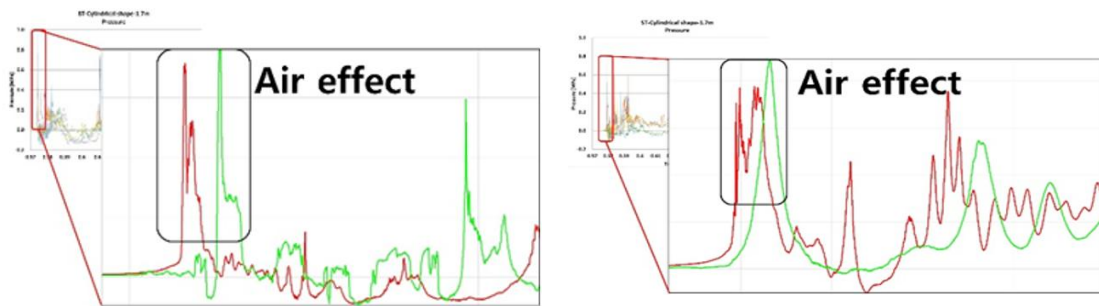


그림 8.1 실린더 형상 모델, 밑면 두께 5mm와 8mm의 air effect

Dead-rise angle 10° 와 실린더 형상의 경우 자유 수면과 이루는 각으로 인해 압력이 발생하는 시간이 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션에는 압력이 발생하는 시간차이를 고려하여 모델링 하여 적용하였다. 5.4절의 second peak가 발생하는 것을 확인하였으며 이는 구조물의 고유 주기와 일치하는 것을 확인하였다. 첫 번째 압력이 발생하고 약 0.03초 후 두 번째 압력이 발생하였다. 발생한 두 번째 압력은 첫 번째 압력과 비슷한 수준이거나 더 높았다. 낙하 높이 1.7m의 경우, 첫 번째 압력은 약 0.60 초에서 발생하고 두 번째 압력은 첫 번째 압력이 발생한 후 약 0.03 초 뒤인 약 0.63초에서 발생하는 것으로 확인되었다. 이론적으로 계산된 구조물의 고유 주기 34.85Hz와 실험에서 계측된 값 33.33Hz이 매우 근사한 값을 확인하였다. 식을 사용하여 추정된 구조물의 고유 주기와 실험을 통해 계측된 구조물의 고유 주기가 유사한 것을 확인 했으며, 이러한 결과는 구조물의 탄성 영향이라는 것을 확인했다. 실험에서 보인 약 0.03초의 간격으로 발생한 압력은 rigid 모델인 wood로 제작된 모델에서는 발생하지 않는 현상으로 슬래밍의 연구에서 구조물의 고유 주기가 반영되어야 한다는 주장을 뒷받침한다. 단일 하중에서도 충격 압력은 구조물의 고유 주기에 따라

여러 번 발생 함을 확인 하는 중요한 결과이다. 단일 파동으로도 구조물이 영구적으로 손상 될 수 있으며 반복적인 슬래밍으로 인해 피로 손상이 발생할 수 있음을 의미한다.

탄성 영향으로 음(Negative) 압력이 발생 한 것을 확인할 수 있다. 실린더 형상의 경우, 첫 번째 압력은 다른 구조물에 비해 더 높게 나타나지만 두 번째 압력은 첫 번째 압력에 비해 낮게 나오는 경향이 있다. 탄성 효과로 인한 음(Negative)압이 -0.1Mpa 에 가까울 때 두 번째 압력이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 구조물의 탄성 영향이 슬래밍 연구에 있어 고려해야 하는 또 하나의 중요한 요소임을 증명하는 중요한 실험 결과이다.

Dead-rise이 0° 이며 자유 낙하 높이가 1.0m에서의 최대 압력은 180kPa이고 impulse 값은 180kPa-msec이며, 자유 낙하 높이 1.7m에서의 최대 압력은 315kPa이고 impulse 값은 180kPa-msec이다. 압력의 지속시간이 긴 만큼 impulse 값이 최대 압력 값과 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다.

Dead-rise이 10° 이며 자유 낙하 높이가 1.0m에서의 최대 압력은 290kPa이고 impulse 값은 145kPa-msec이며, 자유 낙하 높이 1.7m에서의 최대 압력은 449kPa이고 impulse 값은 225kPa-msec이다. 평판에 비해 impulse 값이 감소하는 경향을 보였는데, dead-rise angle이 형성된 모델의 경우 자유 수면과 충격 시 air effect의 영향이 없으며, 압력의 상승이 가파르게 나타나게 되므로 형상이 더욱 날카롭게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 압력의 상승과 하강이 가파르게 되어 압력의 지속시간인 duration 값이 작아지고 그로 인해 impulse 값이 평판에 비해 작은 것을 확인할 수 있다.

실린더 형상이며 자유 낙하 높이가 1.0m에서의 최대 압력은 790kPa이고 impulse 값은 395kPa-msec이며, 자유 낙하 높이 1.7m에서의 최대 압력은 980kPa이고 impulse 값은 490kPa-msec이다. 각 실험의 결과는 부록의 표를 통해 나열하였으며, 실린더 형상에서 가장 높은 압력 값과 변형이 계측 되었다. impulse 값은 중간 정도의 값으로 확인 됐다. 실린더 형상의 경우 평판에서 나타난 air effect와 dead-rise angle을 갖는 모델의 성질 두 가지를 모두 갖고 있기 때문에 계측 된 압력에 비해 impulse값이 높지 않지만 평판에 비해 impulse 값은 큰 것을 확인할 수 있다. 자유 낙하 높이가 증가하는 것은 수면과의 충돌 속력이 증가 하는 것을 의미하며 압력과 변형은 낙하 높이와 두께에 따라 [26] 증가하는 것으로 나타났다. 또한 평판의 경우를 제외하고 dead-rise angle이 감소하면 압력이 증가하는 것을 확인했다. 또한, dead-rise angle이 6° 미만인 경우 탄성 효과를 고려해야한다 [29].

반복 누적 손상과 관련하여 밀면의 두께 5mm인 모델에 대해 5번의 자유 낙하 실험을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과와 비교 하였다. 실험에서의 초기 변형이 약 20mm 정도 더 크게 관측 되었으며, 누적 충격 하중에 의한 변형은 초기 변형 이후 구조물의 형상의 변형으로 그 변형이 점차 감소하는 경향을 확인 하였다. 시뮬레이션의 변형 증가 추이가 실제 실험에서 계측된 값과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인 하였

다.

또한, 실험에서 계측된 결과를 바탕으로 실험식을 추정하여 슬래밍 실험의 기본 자료로써 활용이 가능하다. 변형률과 주기의 추정이 가능하다면 설계 압력에 대한 설계식의 추정이 가능하며, 임펄스 값과 변형률 그리고 정적 압력과의 관계는 실험과 앞장의 실험식 추정에서 검증 되었다 슬래밍 실험은 많은 변수와 숙련도가 요구되는 실험으로 본 논문을 활용하여 실험 결과 및 데이터를 비교 검증함으로써 연구의 신뢰성을 향상 할 수 있으며 비교 검증이 가능하다.

8.2 향후 연구

본 연구에서는 비 보강 판으로 제작 된 구조물을 사용하여 탄성 영향에 대한 연구를 수행 하였다. 밑면의 두께 및 형상, 낙하 높이를 다르게 하여 슬래밍 하중을 계측하고 변형을 측정 하였다. 또한, 나무로 제작 된 강체의 경우와 비교함으로써 슬래밍 하중이 탄성체에 미치는 영향에 대해 연구 하였다. 실제 선박 및 해양 구조물의 경우 비보강판과 보강재로 이루어진 보강 판이다. 따라서 추후 진행 될 연구는 보강재가 포함 된 구조에 대한 슬래밍 하중이 미치는 영향에 대해 실험적인 접근이 필요하다.

슬래밍 현상의 실험적 접근에는 많은 변수와 어려움이 따른다. 이를 해결하고 실험의 신뢰성 향상을 위해서는 반복적인 실험을 통해 실험의 신뢰성을 향상하고 파라메트릭 연구를 통해 다양한 크기 및 형상에 대한 실험 결과가 요구 된다. 또한, 복합소재의 탄성 영향에 대한 유체-구조 연성의 실험 및 해석이 요구 된다.

첫 번째 피크 압력 이후에 여러 피크가 발생할 수 있으며, 이러한 압력은 구조물의 고유 주기에 의해 발생한다. 고유 주기에 의해 발생하는 압력이 구조물에 미치는 영향에 대해서는 추후 연구가 필요하다. 또한, 후판에 대한 연구가 추가로 이루어 져야 할 것으로 판단되며 후판의 설계식에 반영하기 위한 상사성에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] ASTM E8/E8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials; ASTM E8/E8M: West Conshohocken, PA, USA, 2011.
- [2] Buchner, B.; Voogt, A. Wave impacts due to steep fronted waves. In Proceedings of the Rogue Waves, Brest, France, 20-22 October 2004; p. 7.
- [3] Cho, S.R.; Choi, S.I.; Son, S.K. Dynamic material properties of marine steels under impact loadings. In Proceedings of the 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Incheon, Korea, 25-29 August 2015.
- [4] Choi, M.G.; Park, I, K.; Koo, W.C.; Numerical Prediction of Slamming Impact Loads and Response on a Ship in Waves Considering Relative Vertical Velocity. Journal of the Society of Naval Architects of Korea. pISSN:1225-1143, Vol. 51, No. 6, pp. 503-509, December 2014
- [5] Choi, S,J.; Joes, J.; Estimation of slamming coefficients on local members of offshore wind turbine foundation (jacket type) under plunging breaker, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 9 (2017) 624e640
- [6] Choi, T,S.; Islam MD,S.; Seo, D,W.; Kim, J,G.; Song, K,H.; Dynamic Response of Container Ship Subjected to Bow flare Slamming Loads. Journal of Advanced Research in Ocean Engineering 4(4) (2018) 195-203
- [7] Chuang, S.-L. Investigation of Impact of Rigid and Elastic Bodies with Water, DEPARTMENT OF THE NAVY NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER: 1970.
- [8] Dac Dung Truong.; Response of marine structures to repeated impact loadings, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan.
- [9] De Backer, G.; Vantorre, M.; Beels, C.; De Pré, J.; Victor, S.; De Rouck, J.; Van Paepegem, W. Experimental investigation of water impact on axisymmetric bodies. Appl. Ocean Res. 2009, 31, 143-156.
- [10] DNV Rules for Ships, July 2009 Pt.3 Ch.1 General principles and Ch.6 Hull local scantling

- [11] Dobrovolskaya, Z.N. On some problems of similarity flow of fluid with a free surface. *J. Fluid Mech.* 1969, 36, 805-829.
- [12] Engle, A.; Lewis, R. A comparison of hydrodynamic impacts prediction methods with two dimensional drop test data. *Mar. Struct.* 2003, 16, 175-182.
- [13] Engle, A.; Lewis, R. A comparison of hydrodynamic impacts prediction methods with two dimensional drop test data. *Mar. Struct.* 2003, 16, 175-182.
- [14] Faltinsen, O.; Kjaerland, O.; Nøttveit, A.; Vinje, T. Water Impact Loads And Dynamic Response Of Horizontal Circular Cylinders in Offshore Structures. In *Proceedings of the Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 2-5 May 2008.
- [15] Faltinsen, O.M. Water Entry of a Wedge with Finite Deadrise Angle. *J. Ship Res.* 2002, 46, 39-51.
- [16] Faltinsen, O.M.; Kvålsvold, J.; Aarsnes, J.V. Wave impact on a horizontal elastic plate. *J. Mar. Sci. Technol.* 1997, 2, 87-100.
- [17] Frieze, P.A.; Paik, J. Are classification society-based standards appropriate for designing ship structures. In *Proceedings of the RINA, Royal Institution of Naval Architects International Conference-Developments in Classification and International Regulations-Papers*, London, UK, 24-25 January 2007.
- [18] Frieze, P.A.; Paik, J. Are classification society-based standards appropriate for designing ship structures. In *Proceedings of the RINA, Royal Institution of Naval Architects International Conference-Developments in Classification and International Regulations-Papers*, London, UK, 24-25 January 2007.
- [19] Haugen, E.M. *Hydro Elastic Analysis of Slamming on Stiffened Plates with Application to Catamaran Wetdecks*; Norwegian University of Science and Technology: Trondheim, Norway, 1999.
- [20] Kim, Y.J.; Lee, S.C.; Ha, Y.; Hong, S.Y.; Computation of Design Pressure against the Bow Bottom Slamming Impact. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. pISSN:1225-1143, Vol. 55, No. 3, pp. 187-195, June 2018.
- [21] Kim, Y.J.; Shin, K.S.; Shin, C.H.; Kang, J.M.; Kim, M.S.; Kim, S.C.;

- Oh, S.G.; Rim, C.W.; Kim, D.H.; Kim, D.H.; et al. Prediction of Bow Flare Impact Pressure and Its Application to Ship Structure Design-Container Ship and PCC-. J. Soc. Nav. Archit. Korea 2003, 40, 29-36.
- [22] Kim, Y.J.; Shin, K.S.; Shin, C.H.; Kang, J.M.; Kim, M.S.; Kim, S.C.; Oh, S.G.; Rim, C.W.; Kim, D.H.; Kim, D.H.; et al. Prediction of Bow Flare Impact Pressure and Its Application to Ship Structure Design-Tanker and Bulk Carrier. J. Soc. Nav. Archit. Korea 2015, 52, 418-424.
- [23] Kleefsman, T. Water Impact Loading on Offshore Structures A Numerical Study. ISSC, International Ship and Offshore Structures Congress: 2005.
- [24] Lee, Tak-Kee.; Rim, C,W.; Kim, Y,N.; Heo, J,H.; Kim. B.H.; A Study on Measurement of Flare Slamming of Large Container Vessel (II) - Characteristic Analysis of Measured Slamming Pressure - Journal of the Society of naval Architects of Korea. Vol. 44, No. 3, pp. 297-284, June 2007.
- [25] Mei, X.; Liu, Y.; Yue, D.K.P. On the water impact of general two-dimensional sections. Appl. Ocean Res. 1999, 21, 1-15.
- [26] Park, S,H.; Residual strengths of marine structures with collision and corrosion damages, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan.
- [27] PCB Piezotronics. Technical Sheet of Pressure Transducer of Type 102B06. Available online:http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Pressure/products/Manuals/102B06.pdf (accessed on 2010).
- [28] Rupesh Kumar.; Marine applications of flapping foils/plates to the stationkeeping system, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan.
- [29] Seo, B.; Shin, H.; Experimental study of slamming effects on wedge and cylindrical surfaces. MDPI, Applied Sciences 10(4):1503, Feb. 2020.
- [30] Seo, B.; Truong, D.D.; Cho, S.; Kim, D.; Park, S.; Shin, H. A study on accumulated damage of steel wedges with dead-rise 10° due to slamming loads. Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. 2018, 10, 520-528.

- [31] Shin, H.; Kim, S.C.; Cho, S.R. Experimental Investigations on Slamming Impacts by Drop Tests. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. Vol. 47, No. 3, pp. 410-420, June 2010
- [32] Shin, H.; Seo, B.; Cho, S.R. Experimental investigation of slamming impact acted on flat bottom bodies and cumulative damage. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2018, 10, 294-306.
- [33] Sinha, S.; Kar, S.; Sarangdhar, D.G. Development of Simplified Structural Design Formulation for Slamming Loads. In *Proceedings of the ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Mumbai, India, 27 July 2009.
- [34] Sun, H.; Faltinsen, O.M. Water impact of horizontal circular cylinders and cylindrical shells. *Appl. Ocean Res.* 2006, 28, 299-311.
- [35] The United Kingdom Merchant Shipping. Marine Accident Investigation Branch, Southampton United Kingdom; Napoli Report No 9/2008; The United Kingdom Merchant Shipping; 2008.
- [36] Van Nuffel, D.; Vepa, K.S.; de Baere, I.; Degrieck, J.; de Rouck, J.; van Paepegem, W. Study on the Parameters Influencing the Accuracy and Reproducibility of Dynamic Pressure Measurements at the Surface of a Rigid Body During Water Impact. *Exp. Mech.* 2013, 53, 131-144.
- [37] Villavicencio, R.; Soares, C.G. Numerical modelling of the boundary conditions on beams struck transversely by a mass. *Int. J. Impact Eng.* 2011, 38, 384-396.
- [38] Wienke, J.; Oumeraci, H. Breaking wave impact force on a vertical and inclined slender pile-Theoretical and large-scale model investigations. *Coast. Eng.* 2005, 52, 435-462.
- [39] Yamamoto, Y.; Iida, K.; Fukasawa, T.; Murakami, T.; Arai, M.; Ando, A. Structural damage analysis of a fast ship due to bow flare slamming. *Int. Shipbuild. Prog.* 1985, 32, 124-136.
- [40] Zhao, R.; Faltinsen, O.; Aarsnes, J. Water Entry of Arbitrary Two-Dimensional Sections with and without Flow Separation. In *Proceedings of the 21st Symposium on Naval Hydrodynamics*, Trondheim, Norway, 19 August 1997.

부록 A. Dead-rise angle 0°

A.1 Bottom thickness 3mm (Steel)

표 A.1 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	17.60	4.68.E-04	6.16	54.24	17.96
No.2	15.02	4.53.E-04	6.14	46.11	15.33
No.3	16.37	4.54.E-04	6.16	50.43	16.71
Mean	16.33	4.58.E-04	6.15	50.26	16.67
Standard Deviation	1.29	8.18.E-06	0.01	4.07	1.32
COV (%)	7.90	1.79	0.22	8.09	7.90

표 A.2 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	27.83	5.21.E-04	5.73	79.69	14.20
No.2	28.07	5.34.E-04	5.51	77.31	14.32
No.3	27.77	5.56.E-04	5.47	75.87	14.16
Mean	27.89	5.37.E-04	5.57	77.62	14.23
Standard Deviation	0.16	1.78.E-05	0.14	1.93	0.08
COV (%)	0.56	3.31	2.51	2.48	0.56

표 A.3 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	38.44	6.67.E-04	4.96	95.32	13.02
No.2	38.05	6.55.E-04	5.27	100.35	12.89
No.3	38.31	6.62.E-04	5.22	99.97	12.98
Mean	38.27	6.61.E-04	5.15	98.54	12.96
Standard Deviation	0.20	5.79.E-06	0.17	2.80	0.07
COV (%)	0.53	0.88	3.27	2.84	0.53

표 A.4 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	50.78	7.61.E-04	4.32	109.57	12.95
No.2	56.21	7.59.E-04	4.58	128.68	14.34
No.3	54.30	7.62.E-04	4.32	117.18	13.85
Mean	53.76	7.61.E-04	4.40	118.47	13.72
Standard Deviation	2.76	1.55.E-06	0.15	9.62	0.70
COV (%)	5.13	0.20	3.45	8.12	5.13

표 A.5 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	61.02	8.95.E-04	3.76	114.72	12.46
No.2	61.72	8.53.E-04	3.85	118.72	12.60
No.3	62.95	8.87.E-04	3.88	122.27	12.85
Mean	61.90	8.78.E-04	3.83	118.57	12.64
Standard Deviation	0.97	2.24.E-05	0.06	3.78	0.20
COV (%)	1.57	2.55	1.67	3.19	1.57

A.2 Bottom thickness 4mm (Steel)

표 A.6 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	17.56	3.40.E-04	5.39	47.32	17.92
No.2	17.41	3.39.E-04	5.52	48.09	17.77
No.3	17.62	3.35.E-04	5.42	47.77	17.98
Mean	17.53	3.38.E-04	5.45	47.73	17.89
Standard Deviation	0.11	2.82.E-06	0.07	0.38	0.11
COV (%)	0.62	0.83	1.29	0.81	0.62

표 A.7 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	31.90	4.88.E-04	4.51	71.94	16.27
No.2	31.96	4.83.E-04	4.55	72.71	16.30
No.3	31.43	4.74.E-04	4.53	71.26	16.04
Mean	31.76	4.82.E-04	4.53	71.97	16.20
Standard Deviation	0.29	6.66.E-06	0.02	0.73	0.15
COV (%)	0.91	1.38	0.45	1.01	0.91

표 A.8 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	48.24	5.85.E-04	4.01	96.70	16.34
No.2	51.09	5.97.E-04	4.07	103.99	17.30
No.3	50.14	5.97.E-04	4.02	100.86	16.98
Mean	49.83	5.93.E-04	4.03	100.52	16.88
Standard Deviation	1.45	6.90.E-06	0.03	3.66	0.49
COV (%)	2.91	1.16	0.81	3.64	2.91

표 A.9 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	67.69	7.00.E-04	3.47	117.59	17.27
No.2	68.41	7.07.E-04	3.64	124.58	17.45
No.3	67.88	7.03.E-04	3.60	122.30	17.32
Mean	68.00	7.03.E-04	3.57	121.49	17.35
Standard Deviation	0.37	3.48.E-06	0.09	3.56	0.10
COV (%)	0.55	0.49	2.46	2.93	0.55

표 A.10 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	79.89	7.68.E-04	3.50	139.65	16.31
No.2	78.32	7.57.E-04	3.50	137.16	15.99
No.3	78.78	7.74.E-04	3.43	135.15	16.08
Mean	79.00	7.66.E-04	3.48	137.32	16.13
Standard Deviation	0.81	8.89.E-06	0.04	2.26	0.17
COV (%)	1.02	1.16	1.13	1.64	1.02

A.3 Bottom thickness 5mm (Steel)

표 A.11 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure[kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	25.27	3.03.E-04	4.43	55.98	25.79
No.2	21.79	3.00.E-04	4.77	51.96	22.23
No.3	21.24	3.01.E-04	4.64	49.28	21.67
Mean	22.77	3.02.E-04	4.61	52.41	23.23
Standard Deviation	2.19	1.36.E-06	0.17	3.37	2.23
COV (%)	9.60	0.45	3.72	6.43	9.60

표 A.12 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure[kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	36.68	4.42.E-04	4.13	75.75	18.71
No.2	38.34	4.41.E-04	4.37	83.77	19.56
No.3	37.07	4.42.E-04	3.94	73.04	18.91
Mean	37.37	4.42.E-04	4.15	77.52	19.06
Standard Deviation	0.87	6.82.E-07	0.22	5.58	0.44
COV (%)	2.32	0.15	5.20	7.20	2.32

표 A.13 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure[kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	59.64	5.55.E-04	3.83	114.20	20.20
No.2	59.86	5.52.E-04	4.17	124.80	20.27
No.3	55.80	5.54.E-04	3.94	109.93	18.90
Mean	58.43	5.54.E-04	3.98	116.31	19.79
Standard Deviation	2.28	1.15.E-06	0.17	7.66	0.77
COV (%)	3.90	0.21	4.36	6.58	3.90

표 A.14 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	79.94	6.51.E-04	3.29	131.50	20.39
No.2	74.56	6.57.E-04	3.24	120.79	19.02
No.3	78.27	6.52.E-04	3.79	148.43	19.97
Mean	77.59	6.53.E-04	3.44	133.57	19.79
Standard Deviation	2.75	3.00.E-06	0.31	13.94	0.70
COV (%)	3.55	0.46	8.89	10.43	3.55

표 A.15 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure[kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	89.62	7.18.E-04	3.22	144.29	18.30
No.2	88.83	7.16.E-04	3.26	144.79	18.13
No.3	90.50	7.16.E-04	3.21	145.25	18.48
Mean	89.65	7.17.E-04	3.23	144.78	18.30
Standard Deviation	0.84	1.15.E-06	0.03	0.48	0.17
COV (%)	0.93	0.16	0.82	0.33	0.93

A.4 Bottom thickness 50mm (Wood)

표 A.16 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	30.15	6.18	93.17	30.76
No.2	29.55	5.93	87.62	30.15
No.3	30.15	6.09	91.80	30.76
Mean	29.95	6.07	90.86	30.56
Standard Deviation	0.35	0.13	2.89	0.35
COV (%)	1.16	2.09	3.18	1.16

표 A.17 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	50.95	5.16	131.45	25.99
No.2	52.17	4.81	125.38	26.61
No.3	51.94	5.23	135.83	26.50
Mean	51.69	5.07	130.89	26.37
Standard Deviation	0.65	0.23	5.25	0.33
COV (%)	1.25	4.48	4.01	1.25

표 A.18 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	75.42	4.44	167.28	25.54
No.2	77.54	4.61	178.88	26.26
No.3	75.42	4.61	173.68	25.54
Mean	76.12	4.55	173.28	25.78
Standard Deviation	1.22	0.10	5.81	0.41
COV (%)	1.61	2.21	3.35	1.61

표 A.19 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	89.08	4.26	189.51	22.72
No.2	92.08	4.25	195.57	23.49
No.3	93.08	4.27	198.86	23.74
Mean	91.41	4.26	194.65	23.32
Standard Deviation	2.08	0.01	4.74	0.53
COV (%)	2.28	0.30	2.44	2.28

표 A.20 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	108.39	4.22	228.59	22.13
No.2	110.84	4.22	233.98	22.63
No.3	118.39	4.27	252.52	24.17
Mean	112.54	4.24	238.36	22.97
Standard Deviation	5.21	0.03	12.55	1.06
COV (%)	4.63	0.63	5.27	4.63

부록 B. Dead-rise angle 3°

B.1 Bottom thickness 3mm (Steel)

표 B.1 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	130.19	3.81.E-04	0.45	29.55	132.85
No.2	117.42	3.78.E-04	0.47	27.80	119.82
No.3	121.25	3.84.E-04	0.41	25.01	123.72
Mean	122.95	3.81.E-04	0.45	27.45	125.46
Standard Deviation	6.55	3.02.E-06	0.03	2.29	6.69
COV (%)	5.33	0.79	6.97	8.34	5.33

표 B.2 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	167.22	6.10.E-04	0.29	24.49	85.31
No.2	169.77	6.07.E-04	0.27	23.21	86.61
No.3	158.28	6.09.E-04	0.31	24.73	80.75
Mean	165.09	6.09.E-04	0.29	24.15	84.22
Standard Deviation	6.04	1.72.E-06	0.02	0.82	3.08
COV (%)	3.66	0.28	6.67	3.39	3.66

표 B.3 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	184.07	8.04.E-04	0.25	23.37	62.34
No.2	191.03	8.08.E-04	0.20	18.66	64.70
No.3	171.77	8.16.E-04	0.18	15.10	58.18
Mean	182.29	8.09.E-04	0.21	19.04	61.74
Standard Deviation	9.75	6.10.E-06	0.04	4.15	3.30
COV (%)	5.35	0.75	19.52	21.79	5.35

표 B.4 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	233.53	9.18.E-04	0.19	21.60	59.58
No.2	222.61	9.26.E-04	0.16	17.25	56.79
No.3	230.38	9.06.E-04	0.20	22.50	58.77
Mean	228.84	9.17.E-04	0.18	20.45	58.38
Standard Deviation	5.62	1.02.E-05	0.02	2.81	1.43
COV (%)	2.46	1.12	11.74	13.72	2.46

표 B.5 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	290.48	1.01.E-03	0.17	23.96	59.30
No.2	285.23	1.01.E-03	0.17	24.24	58.23
No.3	292.31	1.10.E-03	0.17	24.12	59.67
Mean	289.34	1.04.E-03	0.17	24.11	59.07
Standard Deviation	3.67	5.19.E-05	0.00	0.14	0.75
COV (%)	1.27	4.99	1.73	0.58	1.27

B.2 Bottom thickness 4mm (Steel)

표 B.6 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	140.00	2.07.E-04	0.34	23.86	142.85
No.2	124.73	2.06.E-04	0.32	19.93	127.27
No.3	130.44	2.09.E-04	0.33	21.57	133.10
Mean	131.72	2.07.E-04	0.33	21.79	134.41
Standard Deviation	7.71	1.57.E-06	0.01	1.98	7.87
COV (%)	5.86	0.76	3.24	9.07	5.86

표 B.7 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	200.45	3.54.E-04	0.21	20.89	102.26
No.2	205.70	3.54.E-04	0.22	22.14	104.94
No.3	201.03	3.55.E-04	0.21	20.73	102.55
Mean	202.39	3.54.E-04	0.21	21.25	103.25
Standard Deviation	2.88	6.79.E-07	0.00	0.77	1.47
COV (%)	1.42	0.19	2.25	3.64	1.42

표 B.8 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	283.80	5.39.E-04	0.18	26.09	96.12
No.2	288.18	5.41.E-04	0.19	27.67	97.61
No.3	283.81	5.41.E-04	0.18	25.54	96.13
Mean	285.26	5.41.E-04	0.19	26.43	96.62
Standard Deviation	2.53	1.21.E-06	0.01	1.11	0.86
COV (%)	0.89	0.22	3.32	4.19	0.89

표 B.9 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	327.13	6.96.E-04	0.17	27.18	83.45
No.2	328.62	6.97.E-04	0.16	26.27	83.83
No.3	323.16	6.92.E-04	0.17	27.11	82.44
Mean	326.30	6.95.E-04	0.16	26.85	83.24
Standard Deviation	2.82	2.48.E-06	0.00	0.51	0.72
COV (%)	0.86	0.36	2.55	1.90	0.86

표 B.10 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	390.88	8.57.E-04	0.13	24.80	79.80
No.2	391.22	8.52.E-04	0.14	27.08	79.87
No.3	396.05	8.54.E-04	0.16	31.04	80.85
Mean	392.72	8.54.E-04	0.14	27.64	80.17
Standard Deviation	2.89	2.43.E-06	0.02	3.16	0.59
COV (%)	0.74	0.28	10.71	11.43	0.74

B.3 Bottom thickness 5mm (Steel)

표 B.11 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	190.20	1.91.E-04	0.24	23.20	194.08
No.2	199.75	2.08.E-04	0.22	21.97	203.82
No.3	195.90	1.98.E-04	0.24	23.51	199.90
Mean	195.28	1.99.E-04	0.23	22.89	199.27
Standard Deviation	4.80	8.63.E-06	0.01	0.81	4.90
COV (%)	2.46	4.34	5.48	3.55	2.46

표 B.12 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	409.72	3.04.E-04	0.16	33.39	209.02
No.2	418.68	3.01.E-04	0.16	33.49	213.59
No.3	414.33	3.10.E-04	0.16	33.15	211.37
Mean	414.24	3.05.E-04	0.16	33.34	211.33
Standard Deviation	4.48	4.32.E-06	0.00	0.18	2.29
COV (%)	1.08	1.42	1.08	0.54	1.08

표 B.13 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	535.64	4.09.E-04	0.12	32.14	181.42
No.2	513.43	4.07.E-04	0.12	31.70	173.90
No.3	580.41	4.10.E-04	0.12	35.99	196.59
Mean	543.16	4.09.E-04	0.12	33.28	183.97
Standard Deviation	34.12	1.85.E-06	0.00	2.36	11.56
COV (%)	6.28	0.45	1.78	7.08	6.28

표 B.14 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	784.89	5.66.E-04	0.08	29.49	200.23
No.2	843.59	5.68.E-04	0.07	29.53	215.20
No.3	804.01	5.66.E-04	0.07	28.14	205.11
Mean	810.83	5.66.E-04	0.07	29.05	206.84
Standard Deviation	29.94	1.25.E-06	0.00	0.79	7.64
COV (%)	3.69	0.22	4.13	2.71	3.69

표 B.15 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	966.81	7.17.E-04	0.06	30.45	197.37
No.2	996.70	7.20.E-04	0.07	33.39	203.47
No.3	993.76	7.22.E-04	0.05	25.66	202.87
Mean	985.76	7.19.E-04	0.06	29.84	201.24
Standard Deviation	16.47	2.35.E-06	0.01	3.90	3.36
COV (%)	1.67	0.33	13.15	13.07	1.67

B.4 Bottom thickness 50mm (Wood)

표 B.16 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	192.81	0.47	45.41	196.75
No.2	210.70	0.55	57.84	215.00
No.3	219.36	0.60	65.81	223.84
Mean	207.62	0.54	56.35	211.86
Standard Deviation	13.54	0.06	10.28	13.81
COV (%)	6.52	12.03	18.25	6.52

표 B.17 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	448.45	0.41	91.93	228.78
No.2	450.20	0.42	94.88	229.67
No.3	449.70	0.40	89.94	229.42
Mean	449.45	0.41	92.25	229.29
Standard Deviation	0.90	0.01	2.49	0.46
COV (%)	0.20	2.62	2.70	0.20

표 B.18 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	605.85	0.35	104.51	205.20
No.2	610.10	0.35	105.24	206.64
No.3	605.29	0.30	90.79	205.01
Mean	607.08	0.33	100.18	205.62
Standard Deviation	2.63	0.03	8.14	0.89
COV (%)	0.43	7.87	8.12	0.43

표 B.19 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	874.17	0.29	126.75	223.00
No.2	879.20	0.32	139.79	224.29
No.3	875.20	0.30	131.28	223.27
Mean	876.19	0.30	132.61	223.52
Standard Deviation	2.66	0.01	6.62	0.68
COV (%)	0.30	4.69	4.99	0.30

표 B.20 밀면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	1090.16	0.29	158.00	222.55
No.2	1093.40	0.29	155.91	223.21
No.3	1090.20	0.30	163.53	222.56
Mean	1091.25	0.29	159.15	222.78
Standard Deviation	1.86	0.01	3.94	0.38
COV (%)	0.17	2.60	2.47	0.17

부록 C Dead-rise angle 10°

C.1 Bottom thickness 3mm (Steel)

표 C.1 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	34.68	1.20.E-04	2.27	39.29	35.39
No.2	34.68	1.20.E-04	2.29	39.63	35.39
No.3	35.13	1.21.E-04	2.03	35.68	35.85
Mean	34.83	1.20.E-04	2.19	38.20	35.54
Standard Deviation	0.26	5.08.E-07	0.14	2.19	0.26
COV (%)	0.74	0.42	6.44	5.73	0.74

표 C.2 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	64.88	1.84.E-04	1.62	52.59	33.10
No.2	65.10	1.87.E-04	1.76	57.22	33.21
No.3	63.64	1.85.E-04	1.52	48.47	32.46
Mean	64.54	1.85.E-04	1.63	52.76	32.93
Standard Deviation	0.79	1.78.E-06	0.12	4.38	0.40
COV (%)	1.23	0.96	7.20	8.29	1.23

표 C.3 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	89.91	2.40.E-04	1.35	60.59	30.45
No.2	90.14	2.42.E-04	1.66	74.83	30.53
No.3	91.71	2.38.E-04	1.50	68.97	31.06
Mean	90.59	2.40.E-04	1.50	68.13	30.68
Standard Deviation	0.98	2.20.E-06	0.16	7.16	0.33
COV (%)	1.08	0.92	10.39	10.51	1.08

표 C.4 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	108.85	3.05.E-04	1.43	77.60	27.77
No.2	110.76	3.07.E-04	1.33	73.55	28.26
No.3	108.36	3.03.E-04	1.47	79.58	27.64
Mean	109.32	3.05.E-04	1.41	76.91	27.89
Standard Deviation	1.27	2.27.E-06	0.07	3.07	0.32
COV (%)	1.16	0.74	5.12	3.99	1.16

표 C.5 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	125.01	3.66.E-04	1.41	87.89	25.52
No.2	127.62	3.68.E-04	1.31	83.50	26.05
No.3	124.20	3.70.E-04	1.45	89.76	25.36
Mean	125.61	3.68.E-04	1.39	87.05	25.64
Standard Deviation	1.79	2.02.E-06	0.07	3.21	0.36
COV (%)	1.42	0.55	5.08	3.69	1.42

C.2 Bottom thickness 4mm (Steel)

표 C.6 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	37.56	8.89.E-05	2.16	40.55	38.33
No.2	37.83	8.86.E-05	1.91	36.22	38.60
No.3	37.60	8.96.E-05	2.08	39.18	38.37
Mean	37.66	8.90.E-05	2.05	38.65	38.43
Standard Deviation	0.15	5.01.E-07	0.13	2.22	0.15
COV (%)	0.39	0.56	6.10	5.73	0.39

표 C.7 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	69.91	1.37.E-04	1.45	50.53	35.66
No.2	69.73	1.37.E-04	1.49	51.87	35.58
No.3	68.11	1.36.E-04	1.64	55.87	34.74
Mean	69.25	1.37.E-04	1.52	52.76	35.33
Standard Deviation	0.99	7.56.E-07	0.10	2.78	0.51
COV (%)	1.44	0.55	6.74	5.27	1.44

표 C.8 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	100.68	1.79.E-04	1.28	64.46	34.10
No.2	98.38	1.76.E-04	1.30	63.90	33.32
No.3	99.77	1.79.E-04	1.41	70.12	33.79
Mean	99.61	1.78.E-04	1.33	66.16	33.74
Standard Deviation	1.16	1.71.E-06	0.07	3.44	0.39
COV (%)	1.16	0.96	5.08	5.20	1.16

표 C.9 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	128.60	2.31.E-04	1.15	74.19	32.81
No.2	128.36	2.33.E-04	1.18	75.84	32.74
No.3	129.75	2.31.E-04	1.20	77.74	33.10
Mean	128.90	2.32.E-04	1.18	75.92	32.88
Standard Deviation	0.74	1.32.E-06	0.02	1.77	0.19
COV (%)	0.57	0.57	1.91	2.34	0.57

표 C.10 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	156.20	2.82.E-04	1.08	84.47	31.89
No.2	156.68	2.84.E-04	1.04	81.64	31.99
No.3	155.46	2.85.E-04	1.10	85.27	31.74
Mean	156.11	2.83.E-04	1.07	83.79	31.87
Standard Deviation	0.62	1.57.E-06	0.03	1.91	0.13
COV (%)	0.39	0.56	2.64	2.28	0.39

C.3 Bottom thickness 5mm (Steel)

표 C.11 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	42.60	6.70.E-05	1.19	25.28	43.47
No.2	42.10	6.72.E-05	1.18	24.84	42.96
No.3	43.17	6.84.E-05	1.17	25.19	44.05
Mean	42.62	6.75.E-05	1.18	25.10	43.49
Standard Deviation	0.54	7.57.E-07	0.01	0.23	0.55
COV (%)	1.26	1.12	0.86	0.93	1.26

표 C.12 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	78.70	1.17.E-04	0.80	31.64	40.15
No.2	77.15	1.16.E-04	0.82	31.63	39.36
No.3	78.91	1.18.E-04	0.81	32.12	40.26
Mean	78.25	1.17.E-04	0.81	31.80	39.92
Standard Deviation	0.96	1.00.E-06	0.01	0.28	0.49
COV (%)	1.23	0.85	0.99	0.88	1.23

표 C.13 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	115.70	1.60.E-04	0.62	35.87	39.19
No.2	115.34	1.59.E-04	0.66	37.95	39.07
No.3	117.79	1.61.E-04	0.60	35.34	39.90
Mean	116.28	1.60.E-04	0.63	36.38	39.38
Standard Deviation	1.32	1.00.E-06	0.03	1.38	0.45
COV (%)	1.14	0.63	4.71	3.79	1.14

표 C.14 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	146.55	1.90.E-04	0.57	41.69	37.39
No.2	144.43	1.91.E-04	0.58	42.17	36.84
No.3	148.76	1.89.E-04	0.55	41.28	37.95
Mean	146.58	1.90.E-04	0.57	41.72	37.39
Standard Deviation	2.17	1.00.E-06	0.01	0.45	0.55
COV (%)	1.48	0.53	2.55	1.07	1.48

표 C.15 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	178.90	2.22.E-04	0.51	45.62	36.52
No.2	177.40	2.23.E-04	0.47	41.69	36.22
No.3	180.18	2.21.E-04	0.49	44.14	36.78
Mean	178.83	2.22.E-04	0.49	43.82	36.51
Standard Deviation	1.39	1.00.E-06	0.02	1.99	0.28
COV (%)	0.78	0.45	4.08	4.53	0.78

C.4 Bottom thickness 50mm (Wood)

표 C.16 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	43.50	1.44	31.30	44.39
No.2	43.82	1.53	33.57	44.71
No.3	43.15	1.40	30.25	44.03
Mean	43.49	1.46	31.70	44.38
Standard Deviation	0.34	0.07	1.70	0.34
COV (%)	0.77	4.59	5.35	0.77

표 C.17 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	81.91	1.21	49.72	41.78
No.2	82.70	1.06	43.99	42.19
No.3	81.94	1.01	41.50	41.80
Mean	82.18	1.10	45.07	41.93
Standard Deviation	0.45	0.10	4.21	0.23
COV (%)	0.54	9.52	9.34	0.54

표 C.18 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	120.46	1.02	61.49	40.80
No.2	129.77	0.96	62.16	43.95
No.3	121.69	0.96	58.23	41.22
Mean	123.97	0.98	60.63	41.99
Standard Deviation	5.06	0.04	2.10	1.71
COV (%)	4.08	3.75	3.47	4.08

표 C.19 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	153.79	0.81	61.98	39.23
No.2	153.64	0.98	75.05	39.19
No.3	153.60	0.97	74.34	39.18
Mean	153.68	0.92	70.46	39.20
Standard Deviation	0.10	0.10	7.35	0.03
COV (%)	0.07	10.49	10.44	0.07

표 C.20 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	186.25	0.84	78.32	38.02
No.2	183.32	0.86	79.13	37.42
No.3	182.28	0.73	66.62	37.21
Mean	183.95	0.81	74.69	37.55
Standard Deviation	2.06	0.07	7.00	0.42
COV (%)	1.12	8.73	9.37	1.12

부록 D. Dead-rise angle 20°

D.1 Bottom thickness 3mm (Steel)

표 D.1 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	13.31	6.27.E-05	9.69	64.49	13.59
No.2	13.17	6.33.E-05	9.01	59.32	13.44
No.3	13.39	6.38.E-05	9.24	61.89	13.67
Mean	13.29	6.33.E-05	9.31	61.90	13.56
Standard Deviation	0.11	5.14.E-07	0.35	2.59	0.11
COV (%)	0.85	0.81	3.71	4.18	0.85

표 D.2 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	23.59	1.03.E-04	8.83	104.12	12.03
No.2	23.77	1.02.E-04	7.29	86.60	12.13
No.3	23.87	1.03.E-04	6.97	83.21	12.18
Mean	23.74	1.03.E-04	7.70	91.31	12.11
Standard Deviation	0.14	4.75.E-07	0.99	11.22	0.07
COV (%)	0.60	0.46	12.91	12.29	0.60

표 D.3 밑면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	33.39	1.35.E-04	5.70	95.22	11.31
No.2	33.73	1.36.E-04	6.50	109.69	11.42
No.3	33.84	1.36.E-04	5.92	100.12	11.46
Mean	33.65	1.36.E-04	6.04	101.68	11.40
Standard Deviation	0.23	7.13.E-07	0.41	7.36	0.08
COV (%)	0.69	0.53	6.86	7.24	0.69

표 D.4 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	42.93	1.65.E-04	5.25	112.79	10.95
No.2	43.05	1.63.E-04	5.21	112.26	10.98
No.3	42.59	1.69.E-04	5.12	108.97	10.86
Mean	42.86	1.66.E-04	5.20	111.34	10.93
Standard Deviation	0.24	2.98.E-06	0.07	2.07	0.06
COV (%)	0.56	1.80	1.36	1.86	0.56

표 D.5 밀면 두께 3mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	53.05	1.98.E-04	4.84	128.49	10.83
No.2	53.28	1.99.E-04	4.26	113.43	10.88
No.3	53.13	1.96.E-04	4.90	130.22	10.85
Mean	53.15	1.98.E-04	4.67	124.05	10.85
Standard Deviation	0.12	1.73.E-06	0.36	9.24	0.02
COV (%)	0.22	0.87	7.64	7.44	0.22

D.2 Bottom thickness 4mm (Steel)

표 D.6 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	14.07	4.46.E-05	7.83	55.07	14.35
No.2	14.09	4.58.E-05	7.82	55.07	14.38
No.3	14.18	4.61.E-05	7.46	52.90	14.47
Mean	14.11	4.55.E-05	7.70	54.35	14.40
Standard Deviation	0.06	8.38.E-07	0.21	1.25	0.06
COV (%)	0.41	1.84	2.70	2.31	0.41

표 D.7 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	25.51	7.69.E-05	6.62	84.39	13.01
No.2	25.54	7.58.E-05	6.55	83.69	13.03
No.3	25.48	7.50.E-05	6.46	82.34	13.00
Mean	25.51	7.59.E-05	6.54	83.47	13.01
Standard Deviation	0.03	9.55.E-07	0.08	1.04	0.02
COV (%)	0.12	1.26	1.17	1.25	0.12

표 D.8 밑면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	37.34	1.05.E-04	5.53	103.27	12.65
No.2	37.34	1.05.E-04	5.45	101.75	12.65
No.3	37.19	1.04.E-04	5.62	104.50	12.60
Mean	37.29	1.05.E-04	5.53	103.17	12.63
Standard Deviation	0.09	6.31.E-07	0.09	1.38	0.03
COV (%)	0.24	0.60	1.54	1.33	0.24

표 D.9 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	48.74	1.31.E-04	4.70	114.51	12.43
No.2	48.50	1.29.E-04	4.71	114.13	12.37
No.3	48.46	1.32.E-04	4.59	111.10	12.36
Mean	48.57	1.31.E-04	4.66	113.25	12.39
Standard Deviation	0.15	1.47.E-06	0.07	1.87	0.04
COV (%)	0.31	1.12	1.46	1.65	0.31

표 D.10 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	59.81	1.56.E-04	4.08	122.07	12.21
No.2	59.74	1.56.E-04	3.91	116.92	12.20
No.3	60.12	1.57.E-04	3.83	115.23	12.27
Mean	59.89	1.56.E-04	3.94	118.07	12.23
Standard Deviation	0.20	4.63.E-07	0.13	3.57	0.04
COV (%)	0.34	0.30	3.22	3.02	0.34

D.3 Bottom thickness 5mm (Steel)

표 D.11 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	19.09	3.23.E-05	2.91	27.77	19.48
No.2	19.31	3.31.E-05	2.80	27.04	19.70
No.3	19.40	3.28.E-05	2.98	28.87	19.79
Mean	19.26	3.27.E-05	2.90	27.89	19.66
Standard Deviation	0.16	3.85.E-07	0.09	0.92	0.16
COV (%)	0.83	1.18	3.07	3.30	0.83

표 D.12 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	35.75	5.30.E-05	2.10	37.50	18.24
No.2	35.16	5.28.E-05	2.16	37.97	17.94
No.3	35.33	5.26.E-05	2.22	39.25	18.02
Mean	35.41	5.28.E-05	2.16	38.24	18.07
Standard Deviation	0.31	1.80.E-07	0.06	0.90	0.16
COV (%)	0.87	0.34	2.87	2.36	0.87

표 D.13 밑면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	52.84	7.13.E-05	1.77	46.77	17.90
No.2	52.11	7.16.E-05	1.87	48.72	17.65
No.3	52.76	7.15.E-05	1.69	44.56	17.87
Mean	52.57	7.15.E-05	1.78	46.68	17.81
Standard Deviation	0.40	1.39.E-07	0.09	2.08	0.14
COV (%)	0.77	0.19	5.10	4.46	0.77

표 D.14 밀면 두께 4mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	68.43	9.11.E-05	1.57	53.65	17.46
No.2	68.43	9.13.E-05	1.60	54.75	17.46
No.3	67.49	9.12.E-05	1.68	56.69	17.22
Mean	68.12	9.12.E-05	1.62	55.03	17.38
Standard Deviation	0.54	1.30.E-07	0.06	1.54	0.14
COV (%)	0.80	0.14	3.57	2.80	0.80

표 D.15 밀면 두께 5mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, strain, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Strain	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	85.95	1.08.E-04	1.27	54.58	17.55
No.2	85.00	1.08.E-04	1.29	54.91	17.35
No.3	83.94	1.07.E-04	1.23	51.79	17.14
Mean	84.97	1.08.E-04	1.27	53.76	17.35
Standard Deviation	1.01	3.00.E-07	0.03	1.71	0.21
COV (%)	1.18	0.28	2.31	3.19	1.18

D.4 Bottom thickness 50mm (Wood)

표 D.16 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 100mm, 낙하 속도 1.40m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.40 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	26.04	2.80	36.40	26.57
No.2	28.35	3.01	42.67	28.93
No.3	28.56	3.39	48.44	29.14
Mean	27.65	3.07	42.50	28.21
Standard Deviation	1.40	0.30	6.02	1.43
COV (%)	5.06	9.85	14.16	5.06

표 D.17 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 200mm, 낙하 속도 1.98m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

1.98 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	40.91	2.44	49.99	20.87
No.2	42.08	2.37	49.82	21.47
No.3	41.97	2.34	49.04	21.41
Mean	41.66	2.38	49.62	21.25
Standard Deviation	0.64	0.06	0.51	0.33
COV (%)	1.55	2.31	1.02	1.55

표 D.18 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 300mm, 낙하 속도 2.43m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.43 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	53.95	2.08	56.02	18.27
No.2	56.55	2.28	64.38	19.16
No.3	56.20	2.25	63.11	19.03
Mean	55.57	2.20	61.17	18.82
Standard Deviation	1.41	0.11	4.50	0.48
COV (%)	2.54	4.89	7.36	2.54

표 D.19 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 400mm, 낙하 속도 2.80m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

2.80 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	69.34	2.12	73.60	17.69
No.2	70.36	2.14	75.38	17.95
No.3	70.08	2.23	78.17	17.88
Mean	69.93	2.17	75.72	17.84
Standard Deviation	0.53	0.06	2.31	0.13
COV (%)	0.75	2.65	3.05	0.75

표 D.20 밑면 두께 50mm, 자유 낙하 높이 500mm, 낙하 속도 3.13m/s에서의 최대 압력, 압력의 폭, impulse 그리고 Coefficient of pressure 값

3.13 [m/s]	Peak Pressure [kPa]	Peak Width [msec]	Impulse [pa*s]	Cp
No.1	84.60	1.82	76.90	17.27
No.2	87.72	1.94	85.08	17.91
No.3	85.65	2.05	87.70	17.49
Mean	85.99	1.94	83.23	17.55
Standard Deviation	1.59	0.12	5.64	0.32
COV (%)	1.84	5.95	6.77	1.84

A study on the effect of slamming load characteristics on changes in the shape and thickness of structures through a free drop test

Byoung Cheon Seo

Dep't of Naval Architecture and Ocean Engineering
University of Ulsan, Ulsan, Korea

Abstract

The slamming phenomenon that occurs in offshore structures operating in extreme environments is a very important factor to be considered. The slamming phenomenon can affect not only fixed and floating offshore structures and ships in operation, but also all structures operating in sea wave conditions. Although research on the slamming phenomenon has been ongoing for a long time, even now, structural damage due to the slamming phenomenon has been continuously reported. So far, tests on slamming phenomena have been conducted under the assumption that the structure is a rigid body. Therefore, it is necessary to study the effect of the structure's elasticity on the slamming load, to understand the load generated when the fluid and the structure impact, and to fully consider it in the design stage. To do so, high-quality test results must be provided, and an experimental study on the effect of structural elasticity and repeated loads rather than single loads on the structure is required.

The slamming phenomenon occurs in a very short time, and high-quality test results are required to know the effect of slamming load on the structure. In order to obtain such high-quality test results, it is necessary to secure reliability by lowering the uncertainty of the test through repeated tests. In order to reduce the uncertainty of the test, the setting of the test is a very important factor. Since the slamming phenomenon occurs repeatedly in a very short time, the setting of the test is a very important

variable. Numerous test variables must be carefully considered, such as the selection of a test device for free-falling the structure horizontally to the free water surface, selection of an appropriate sensor to measure the slamming load occurring in a short time, and the ability to store data.

In general, the slamming load can be expressed in terms of peak pressure, peak width, and duration of pressure. This slamming pressure is known to be affected by the dead-rise angle and natural period of the structure, and shows the greatest pressure value when the dead-rise angle, which is an angle with the free water surface, is 3° to 10° .

In this paper, the slamming load characteristics were understood through an experimental approach, and comparative experiments were performed on rigid and elastic bodies by using wood and iron as the material of the structure. In addition, the effect of the slamming load on the structure was studied by changing the dead-rise angle and thickness. It can be reflected in the thickness estimation formula by analyzing the correlation on the structure using the experimental value. By comparing the behavioral characteristics of structures obtained in the experiment using ABAQUS, a commercial software, it is possible to secure the reliability of the experiment and to verify and predict the cumulative repeated damage.

The test was performed in Ulsan University's marine engineering tank trimming tank and specially made slamming test equipment. The test was conducted by varying the thickness of the structure, the dead-rise angle with the free water surface, and the drop height. A pressure sensor was installed at the bottom of the structure to measure the maximum pressure, the pressure width, and the duration. By attaching a strain gauge, the slamming load measured by the pressure sensor and the behavioral characteristics of the structure were checked.