



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](#)

2013년 2월
석사학위논문

내부구조체 결합이 전단변형 가능한 반구형
내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치
판재의 충격거동에 미치는 영향 분석

조 선 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

정 우 철

내부구조체 결함이 전단변형 가능한
반구형 내부구조체를 가진 초경량
금속 샌드위치 판재의 충격거동에
미치는 영향 분석

Investigation into the influence of defects of
internal structures on the impact behaviors of
the lightweight sandwich plate with
deformable sheared dimple inner structures

2013 년 02 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

정 우 철

내부구조체 결합이 전단변형 가능한
반구형 내부구조체를 가진 초경량
금속 샌드위치 판재의 충격거동에
미치는 영향 분석

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2012 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

정 우 철

정우철의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 윤성운



위원 조선대학교 교수 한길영



위원 조선대학교 교수 안동규



2012 년 11월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
NOMENCLATURES	viii
ABSTRACT	ix
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 관련 연구	1
제 2 절 연구 목적 및 방법	4
제 2 장 초경량 금속 샌드위치 판재	6
제 1 절 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 설계/제작과정	6
제 2 절 샌드위치 판재 제작 시 발생하는 내부구조체 형상결함 및 두께 결함 고찰	7
1. 전단변형 가능한 반구형 초경량 금속샌드위치 판재의 내부구 구조체 반경 결함 분석	7
2. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재 판재의 두께 결함 분석	9
제 3 장 초경량 금속 샌드위치판재의 충격 특성 평가	11
제 1 절 초경량 금속 샌드위치판재의 충격시험 기법	11
제 2 절 평면 변형 경계조건에서의 내충격 시험	14
1. 평면 변형 경계조건에서의 내충격 시험 방법	14

2. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재에 대한 실험결과 및 고찰	15
--	----

제 4 장 초경량 금속 샌드위치 판재에 대한 3차원 유한요소 해석

제 1 절 결함을 포함한 전단 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 3 차원 유한요소 해석 방법	17
--	----

1. 유한요소 해석 방법 및 모델링	17
2. 3차원 유한요소해석의 경계조건 및 재료 물성	19

제 2 절 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속 샌드위치 판재의 결함에 따른 3차원 유한요소 해석 결과 및 고찰	21
---	----

1. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 내부구조체 반경결함 형태 및 두께결함의 영향	21
2. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 내부구조체 반경결함과 두께결함에 따른 충격해석 결과 및 고찰	23
3. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 갖는 초경량 금속 샌드위치 판재의 파손형상 분석 및 지배적인 결함 모드 도출	38

제 5 장 무차원 충격변수와 판재 파손 및 에너지 흡수 특성 상관관계 분석/고찰

제 1 절 충격변수 및 적용 범위 선정	44
제 2 절 무차원 충격변수에 따른 샌드위치 판재의 파손 및	

충격에너지 흡수특성 분석	46
1. 무차원 충격 변수 및 무차원 에너지	46
2. 변형형상 분석 및 파손모드	48
제 6 장 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 파손지도 및 무차원 충격에너지 - 무차원 흡수에너지 선도 작성	53
제 1 절 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치판재의 파손지도 작성	53
제 2 절 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 무차원 흡수에너지 - 무차원 충격에너지 선도 작성	56
제 7 장 결론 및 향후 과제	58
References	60

감사의 글

LIST OF TABLES

Table 1	Radius dimensions of inner structures for perfect and defect models	8
Table 2	Thickness for different thickness imperfection models	10
Table 3	Results of plane strain type of impact test	15
Table 4	Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis	18
Table 5	Material properties of high strength steel (DP 590) and mild steel sheet	20
Table 6	Amplitude of skin wrinkling	42
Table 7	Analysis condition for the development of failure map	44
Table 8	Applied impact energies for different impact masses and heights ...	45
Table 9	Dimension and density of the analysis model for the failure map ..	47
Table 10	Dynamic yield strength for different strain rate	47
Table 11	Analysis ranges of non-dimensional parameters	47

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Sandwich panels with three-dimensional inner structures	2
Fig. 2 Fabrication procedures of ultra-light weight sandwich panel with deformable sheared dimple inner structures	6
Fig. 3 Radius imperfection of inner structures	7
Fig. 4 Application regions of radius imperfections	8
Fig. 5 Classification of thickness defect modes	10
Fig. 6 Experimental set-up of drop impact test	11
Fig. 7 Data acquirement system of impact tests	12
Fig. 8 High speed camera system to investigate into the crush phenomenon between impact head and specimen	13
Fig. 9 Schematics for plane strain type of drop impact test	14
Fig. 10 Influence of impact energies on force per width - deflection curves and the absorbed energy per width - deflection curves	16
Fig. 11 FE model of the impact analysis	17
Fig. 12 Boundary conditions of FE model	19
Fig. 13 Result of high speed tensile tests for DP 590 sheet	20
Fig. 14 Deformed shapes of the sandwich panel for different radius imperfection modes	21
Fig. 15 Deflection - time curves of the sandwich panel for different thickness imperfection modes	22
Fig. 16 Influence of thickness defects on the force per width - deflection and the absorbed energy per width - deflection curves for the case of perfect model	24
Fig. 17 Rotation angle of inner structures of for different measured locations	25
Fig. 18 Comparison deformed shapes for different thickness imperfection mode of FE analyses (Perfect Model)	26
Fig. 19 Influence of thickness defects and radius imperfection modes on the force per width - deflection curves (Application region of the radius imperfection = upper side)	27
Fig. 20 Effects of the thickness defects and the radius imperfection mode on	

	the absorbed energy per width (Application region of the radius imperfection = upper side)	28
Fig. 21	Rotation angles of inner structures for the different measured locations (Application region of the radius imperfection = upper side)	29
Fig. 22	Deformed shapes for thickness imperfection modes when the radius imperfection is applied to the upper sheared dimples	30
Fig. 23	Influence of thickness defects and radius imperfection modes on the force per width - deflection curves (Application region of the radius imperfection = bottom side)	31
Fig. 24	Effects of the thickness defects and the radius imperfection mode on the absorbed energy per width (Application region of the radius imperfection = bottom side)	32
Fig. 25	Rotation angles of inner structures for the different measured locations (Application region of the radius imperfection = bottom side)	33
Fig. 26	Deformed shapes for thickness imperfection modes when the radius imperfection is applied to the bottom sheared dimples	33
Fig. 27	Influence of thickness defects and radius imperfection modes on the force per width - deflection curves (Application region of the radius imperfection = upper and bottom sides)	35
Fig. 28	Effects of the thickness defects and the radius imperfection mode on the absorbed energy per width (Application region of the radius imperfection = upper and bottom sides)	36
Fig. 29	Rotation angles of inner structures for the different measured locations (Application region of the radius imperfection = upper and bottom sides)	37
Fig. 30	Deformed shapes for thickness imperfection modes when the radius imperfection is applied to the upper and bottom sheared dimples	37
Fig. 31	Deformed shapes of specimen subjected to plane strain drop impact loading	39
Fig. 32	Comparison of the deformed shapes of FE analysis with those of experiment for different thickness defects modes when the radius imperfection is applied to the upper and bottom sheared dimples	40

Fig. 33 Measurement procedures of skin amplitude of skin wrinkling	41
Fig. 34 Relative amplitudes of skin wrinkling for different thickness defect modes	43
Fig. 35 Deflection - time curves for different impact masses	48
Fig. 36 Failure modes of sandwich panel with sheared dimple inner structures	49
Fig. 37 Deformation shapes of sandwich panel for different failure modes ..	51
Fig. 38 Failure maps of sandwich panel with sheared dimple inner structures for different normalized radii of the impact head	54
Fig. 39 Normalized impact energy - normalized absorbed energy curves for different normalized radii of the impact head	57

NOMENCLATURES

- E : 탄성계수
 ν : 포아송 비
 σ_t : 인장강도
 E_{in} : 시편에 가해지는 충격입력에너지
 $E_{ab,w}$: 단위 폭 당 시편이 흡수한 충격흡수에너지
 P_w : 단위 폭 당 가해지는 하중
 $P_{w,max}$: 단위 폭 당 가해지는 최대하중
 m : 질량
 g : 중력 가속도
 h : 충격 높이
 Φ : 무차원 충격 무게
 Π : 무차원 충격 속도
 Γ : 무차원 충격헤드 반경
 Ψ : 무차원 충격에너지
 X : 무차원 충격 흡수에너지
 M : 충격헤드 무게
 ρ : 샌드위치 판재의 밀도
 H : 샌드위치 판재의 두께
 b : 샌드위치 판재의 폭
 V : 충격 속도
 σ_y : 재료의 동적 항복 강도
 D : 충격헤드 충격부 직경
 L : 다이의 지지점간 거리 (유효길이)
 E_k : 운동에너지
 λ_{max} : 외판 주름 측정 폭

ABSTRACT

Investigation into the influence of defects of internal structures on the impact behaviors of the lightweight sandwich plate with deformable sheared dimple inner structures

Jung Woo Chul

Advisor : Prof. Ahn Dong-Gyu, Ph. D

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

The performance and properties of sandwich plate with three-dimensional inner structures are dependent on the shape and material of the inner structures. Hence, various researchers related on the sandwich plate with three-dimensional inner structures have an interest in the influence of the defects in the sandwich plate on the static and dynamic behaviors.

The objective of this thesis is to investigate into the influence of defects of internal structures on the impact behaviors of the lightweight sandwich plate with deformable sheared dimple inner structures. Initial defects of sandwich plate with deformable sheared dimple inner structures have been observed to estimate candidate representative defect modes. From the results of the observation, two types of radius defect mode and three types of thickness defect mode have been estimated. Each radius defect mode has classified three types of sub-defect mode according to occurrence region of the radius defect.

In order to investigate into the influence of defect modes on the impact behaviors of the sandwich plate, three-dimensional finite element analysis has been performed using ABAQUS V6.11 Explicit module. The results of FE analyses have been compared to those

of drop impact experiments from viewpoints of the force per with-deflection curve, the absorbed energy-deflection curve, the deformed shape, and the amplitude of skin wrinkling. From the results of the comparison, a dominant defect mode has been estimated.

In order to estimate the failure map and the normalized impact energy- the normalized absorbed impact energy curve, several finite element analysis have been carried out using finite element model with the dominant defect mode. Three types of failure modes have been chosen via the investigation of the deformation shapes. Through the failure mode fitting according to impact conditions, failure maps for the sandwich plate with deformable sheared dimple inner structures have been obtained. In addition, the normalized impact energy- the normalized absorbed impact energy curves for different normalized impact radius have been created using curve fitting.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 관련연구

최근 전 세계 자동차/항공기/선박 등 수송업계 관련 산업에서는 안전성 향상과 더불어 환경문제에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 환경규제 강화와 연비규제 관련 법안이 제정되고 있어 이에 대한 대처가 수송업계 관련에서는 큰 문제로 직결되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 대체 에너지 개발과 에너지 효율 증대 방안 등 여러 가지 방안에 대해 노력하고 있는 데, 그 중의 한 가지 방안으로 제품의 경량화가 있다.¹⁾ 수송기계의 연료소비는 중량에 비례하여 증가하기 때문에 연비향상과 배기가스 감소를 위해서는 부품 및 구조의 경량화가 요구 된다. 또한 안전기준 강화로 인해 자동차/항공기/선박 등 수송기계 관련 산업에서는 연비와 에너지 효율을 높이며, 동시에 승객의 안정성을 높일 수 있는 초경량 고강성/고내충격성 재료 개발 및 연구가 요구되어지고 있다.²⁻³⁾ 이러한 문제 방안으로 기존의 금속재에 비해 가벼우면서 높은 강도/강성/내충격성 특성을 가지는 초경량 금속 구조체 (Ultra-light weight structured material) 에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 초경량 금속 구조체 개발의 한 가지 방향으로 금속 판재 상하부에 3차원 형상의 내부구조체를 붙여 놓은 샌드위치구조판재에 대해 국내외적으로 다양하게 연구 및 개발이 수행되고 있다.⁴⁾

초경량 금속 샌드위치 판재 구조는 고밀도/고강도의 2 개의 얇은 외부판재 사이에 상대적으로 밀도와 강성이 낮은 내부구조체를 접착 혹은 용접하여 제작한다.⁵⁾ 샌드위치 판재의 외판은 평면하중을 지지하고 내부구조체는 전단하중을 지지하도록 설계되며, 제작된 초경량 금속샌드위치의 경우 내부구조체 부분이 비어 있어 재료의 밀도가 낮아지며 경량화 된다. 또한, 외부 충격하중이 부가 시 내부구조체 변형에 영향을 미쳐 비강도/비강성/비내충격성이 현저히 증가하게 된다. 초경량 금속 샌드위치 판재의 3차원 내부구조체 형상은 Fig. 1 과 같이 카고메 (Kagome) 구조물, 피라미드 (Pyramidal) 구조물, 트러스 (Truss) 구조물, 에그-박스 (Egg-box) 구조물 등 다양한 3차원 형상이 존재한다. 이러한 3차원 내부구조체 형상 구조를 바탕으로 경량화 및 강도/강성을 향상시키기 위한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.⁶⁻⁹⁾

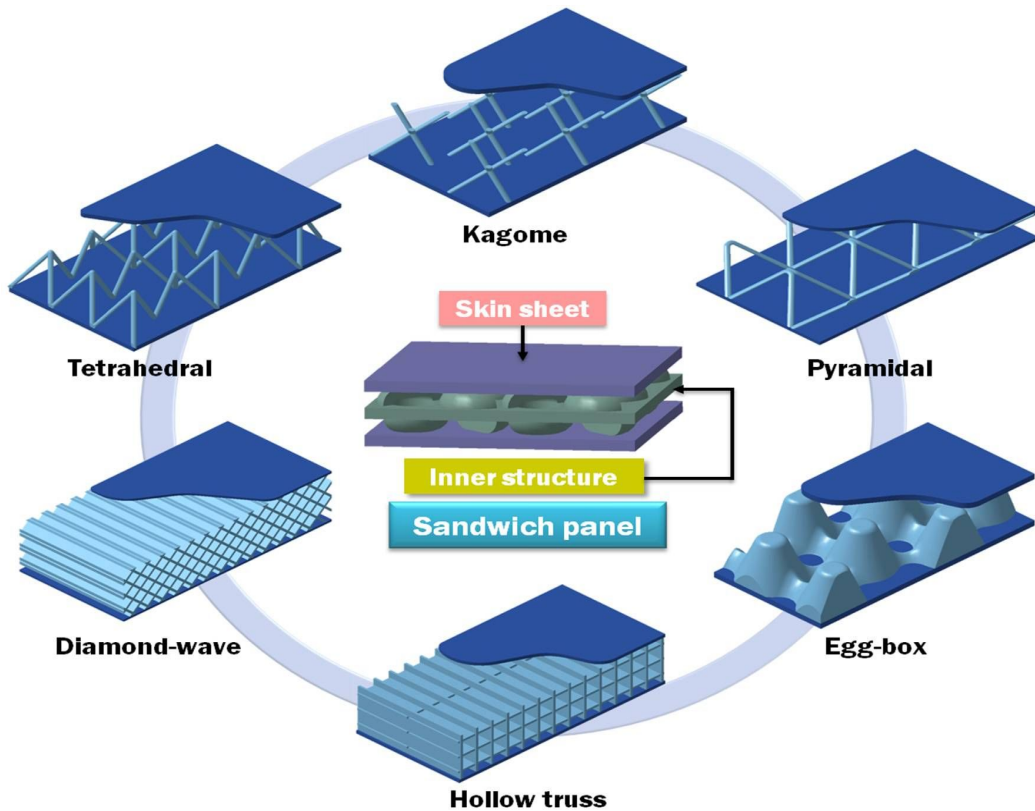


Fig. 1 Sandwich panels with three-dimensional inner structures

최근 초경량 금속샌드위치 판재는 구조 재료로의 활용성이 높아지고 있으며 각종 충격에 대한 내충격성이 중요시 되고 있다. 초경량 금속판재의 내충격성은 내부구조체의 형상 및 배치에 따라 기계적 물성 및 충격특성이 현저히 달라지며, 표면 판재와 내부구조체의 결합 방법에 따라 충격특성 및 충격거동이 현저히 다르게 나타나기 때문에 형상에 따른 충격 특성 및 충격 거동에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다.¹⁰⁻¹¹⁾ 또한 열과 압력을 이용한 다점전기저항 용접법과 같은 접합 방법은 샌드위치 판재의 내부구조체와 표면재사이의 접합부 결함과 내부구조체의 형상변형 결함 등을 유발하며¹²⁻¹⁴⁾, 이러한 결함은 판재의 변형/파손 및 충격특성에 영향을 크게 미치기 때문에 내부구조체의 결합이 판재의 충격특성에 미치는 영향성에 대한 연구 또한 국내외적으로 진행되어지고 있다.¹⁵⁻¹⁹⁾

Hutchinson²⁰⁾ 등은 준정적과 고속 충돌 조건에서의 충격실험을 통해 충격속도

변화에 따른 트러스 심재의 변화 거동을 고속카메라로 촬영하여 비교하였으며, 또한 트러스 심재의 초기 형상결함에 따른 파손거동 및 충격특성을 분석하였다. Xue²¹⁾ 등은 동적하중을 받는 조건에서 사각 허니콤 심재를 가진 샌드위치 판재의 내부구조체의 초기결함 형태에 따른 파손 모드를 유한요소 해석을 이용하여 분석하였다. Bart-Smith²²⁾ 등은 피라미드심재를 가진 샌드위치판재 제작 시 발생하는 면재와 심재의 접착 결함에 대해 압축 및 전단시험과 유한요소해석결과를 비교하여 접착결함이 미치는 강성 특성에 대해 비교/분석 하였다. Deshapnde²³⁾ 등은 할로우 (Hollow) 피라미드 심재를 가진 샌드위치 판재에 대해 전단하중이 부가되었을 때 판재의 변형거동과 유한요소해석의 판재의 거동을 비교/분석하고 내부구조체의 붕괴모드에 대해 지도를 작성하였다. Ahn²⁴⁻²⁵⁾ 등은 피라미드형 금속 트러스를 내부구조체를 가진 금속 샌드위치 판재에서 접합 시 발생하는 용접부와 내부구조체의 초기결함을 고려하여 변형/파손 메커니즘을 분석하여 지배적인 결함 모드를 도출하고 비파손 설계기술에 대해 연구 하였다. Kang²⁶⁾ 등은 벌크형 와이어 직조 카고메 트러스 심재를 갖는 샌드위치 판재에 대해 기계적 거동을 유한요소해석을 통하여 평가하였으며, 무차원해석을 통해 최적설계안을 도출 하였다.

샌드위치판재 제작 시 발생하는 용접결함, 내부구조체 형상결함, 두께결함 등이 초경량 샌드위치 판재의 성능 및 파손/파단/에너지흡수 특성에 미치는 파손특성 등에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다.²⁷⁻³⁴⁾

제 2 절 연구목적 및 방법

최근 화석연료의 고갈에 따른 연료 소비율 증대와 강화된 승객의 안정성 법규를 만족하기 위하여 수송기계 관련 산업에서는 초경량/고강성/고내충격성 재료인 초경량 금속 샌드위치 판재에 대해 많은 연구를 하고 있다. 특히, 샌드위치 판재가 구조재로 사용되어질 경우 충돌 시 발생할 수 있는 충격하중에 대하여 판재의 파손/파단 및 에너지 흡수 메커니즘에 대한 연구가 요구되어진다. 이러한 샌드위치 판재의 특성을 분석하는 방법으로 충격시험 및 인장/굽힘/압축 시험 등이 수행되어지며, 3 차원 유한요소 프로그램을 이용한 분석이 이루어진다. 그러나 3차원 유한요소해석을 이용한 대부분의 선행연구들의 경우 판재의 파손/파단 및 에너지 흡수 메커니즘에 영향을 미치는 샌드위치 판재 제작 시 발생하는 용접 결함과 내부구조체 결함, 두께결함 등을 고려하지 않는 무결함 구조 (Perfect structures) 로 가정하여 분석 되었다.³⁵⁻³⁷⁾

따라서 본 논문에서는 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재에 대해 샌드위치 판재의 제작 시 발생하는 결함들이 충격특성에 미치는 영향성을 분석하기 위해, 판재 제작 특성 분석을 통하여 대표적인 판재 초기 결함 모드를 도출하였다.

전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재에 대한 대표 초기 결함은 내부구조체의 반경결함과 금속샌드위치판재 시편의 두께에 대해 초기 결함으로 선정하였다. 선정된 대표결함은 실제 시편을 측정하여 모드를 분류하여 적용하였다. 반경 결함의 경우 내부반경결함 발생 위치에 따라 총 3 가지로, R_{upper} , R_{bottom} , $R_{upper} + R_{bottom}$ 로 분류하였다. 두께 결함의 경우 측정두께에 따라 3 가지 Type 과 기준 (Referenc) 두께로 분류하였다.

선정된 대표적인 판재 초기 결함은 3 차원 모델링 프로그램을 이용하여 분류하였으며 각각의 모드를 상용프로그램 ABAQUS V6.11³⁸⁻³⁹⁾ 를 이용하여 유한요소해석에 모델에 적용하여 3차원 충격해석을 수행하였다. 3 차원 충격해석결과를 통해 결함 모드에 따른 판재의 단위 폭 당 하중-처짐선도, 단위 폭 당 흡수에너지-처짐 선도 및 변형형상을 실제 충격실험결과 비교/분석하여 지배적인 결함 모드를 도출하였다.

지배적인 결함 모델에 대해 평면 변형형 낙하충격 시험조건과 동일한 조건으로 3차원 충격해석을 수행하였으며, 이 결과로부터 변형형상분석을 통해 대표적인 파손모드를 도출하여 파손모드에 따른 파손 지도를 작성하였다.⁴⁰⁻⁴²⁾ 또한 무차원 충격질량, 무

차원 충격 속도, 무차원 충격 헤드 반경을 무차원 충격변수로 선정하고, 무차원 충격변수 조합에 따른 파손모드를 도출 하였다. 무차원 충격변수들에 대한 파손모드 경계를 선정하여 파손지도를 작성하였다. 또한, 무차원 흡수에너지-무차원 충격에너지(N-N) 선도를 작성하여 각 파손 모드별 무차원 임계충격에너지를 예측하였다.⁴³⁻⁴⁵⁾

제 2 장 초경량 금속 샌드위치 판재

제 1 절 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 설계/제작 과정

본 논문에서 사용된 전단변형 가능한 반구형 금속 내부구조체는 0.5 mm 두께를 가진 연강 (Mild steel) 판재에 섹션성형 (Sectional forming) 을 하여 2 mm 두께의 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 제작하였다. 이 구조체를 내부구조체 보다 강성이 높은 0.5 mm 의 두께를 가진 DP 590 강판을 상/하로 배치시켜 롤형 전극을 이용한 다점 전기저항 용접기 (Multi points resistance welding using roll type electrodes) 를 이용하여 두 가지 재료를 용접시켜 전단 변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재를 제작 하였다. 완성된 전단 변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 두께가 3 mm 로 제작되어야 하지만, 실제 시편의 두께를 측정 한 결과 3 mm 이하인 2.83 ~ 2.89 mm 두께로 제작됨을 알 수 있었다. 그 이유는 롤형 다점 전기저항 용접은 외판과 내부구조체의 접촉면 사이에 전류를 흘려 고온으로 상승시킨 후 기계적 압력을 가하여 접합하게 되는데, 접합 시 사용되는 열과 압력에 의해 두께가 감소한 것으로 사료된다. Fig. 2 는 전단 반구형 내부구조체를 가진 금속샌드위치 판재의 제작 공정과정을 나타낸다.

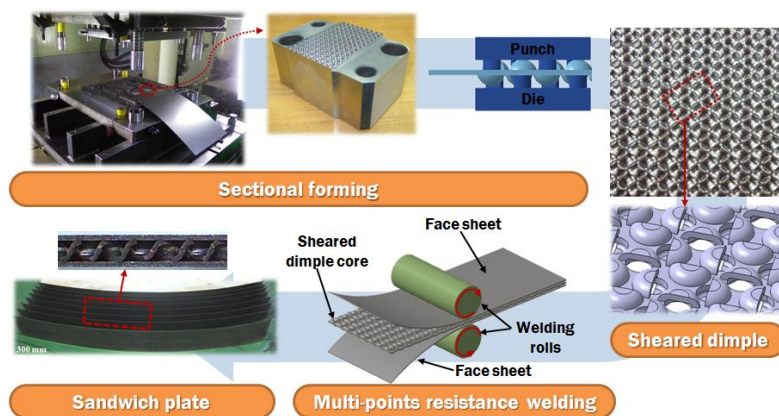


Fig. 2 Fabrication procedures of ultra-light weight sandwich panel with deformable sheared dimple inner structures

제 2 절 샌드위치 판재 제작 시 발생하는 내부구조체 형상결함 및 두께결함 고찰

본 연구에서는 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가지는 초경량 금속 샌드위치 판재 제작 시 발생하는 내부구조체의 구조적인 결함 및 판재의 두께 결함을 고려한 충격/거동 특성을 분석하고자 한다. 샌드위치 판재 제작 시 발생하는 결함은 다음과 같다.

1. 전단변형 가능한 반구형 초경량 금속 샌드위치 판재의 내부구조체 반경 결함 분석

롤형 전극을 이용한 다점 전기저항 용접방법으로 전단변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속 샌드위치 판재의 내부구조체와 외판과의 용접시 판재에 압력을 부가하게 되는데 이때 부가된 압력은 내부구조체 형상에 영향을 주게 되며, 이에 따라 내부구조체의 형상은 각각 다른 형태로 변형하게 된다. Fig. 3 은 전단변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재 제작 시 압력 의해 내부구조체에 발생할 수 있는 구조결함 중 반경 결함을 나타내었다.

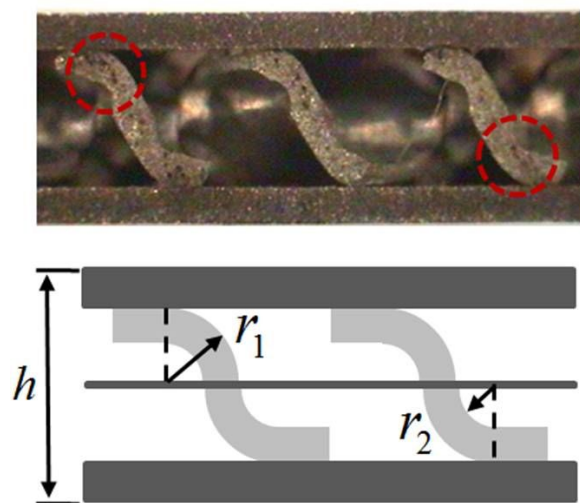


Fig. 3 Radius imperfection of inner structures

외판과 내부구조체가 용접 후 접합되는 과정에서 압력을 받을 경우, 전단변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속샌드위치 판재에서는 반경결함, 두께결함 등 여러가지 구조결함이 발생할 수 있다. 특히 반경으로 구성되어진 전단변형 가능한 반구형 내부구조체는 반경결함에 대한 분석이 필수적이다. 따라서 반경결함의 영향성을 분석하기 위하여 실제시편의 반경 결함 부분인 r_1 , r_2 을 각각 50 개씩 측정하였다.

측정된 반경결함은 Table 1 과 같이 분류했으며, Mode A 와 Mode B 의 각각은 측정된 반경 치수의 평균반경치수와 최대반경치수를 나타낸다.

Table 1 Radius dimensions of inner structures for perfect and defect models

	Perfect Model	Mode A	Mode B
r_1 (mm)	0.750	0.775	0.878
r_2 (mm)	0.250	0.280	0.389

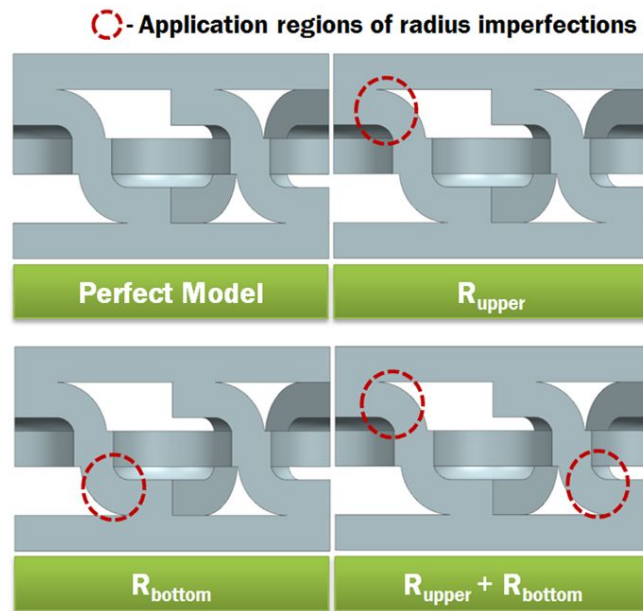


Fig. 4 Application regions of radius imperfections

시편 제작 시 발생할 수 있는 초기결함의 수는 많으며, 형태 또한 다양하다. 특히 압축하중의 영향으로 발생하는 내부구조체의 좌굴 모드는 임의의 곳에서 다양하게 나타나기 때문에 내부구조체의 결함의 경우 수를 결정하기는 힘들다. 이에 따라 본 연구에서는 초기 대표결함중 하나로 내부구조체의 반경 결함으로 선정하고 결함모드와 결함 명칭은 다음과 같이 선정하였다.

접합시 압축과정에서 발생할 수 있는 초기 반경결함모드를 Fig. 4 와 같이 결함 위치에 따라 R_{upper} 결함모드, R_{bottom} 결함모드, $R_{upper} + R_{bottom}$ 결함모드 총 3 가지로 분류하였다. 결함발생위치는 실제 측정된 반경결함 치수를 적용 하였다.

Perfect 모델의 경우는 금속샌드위치 판재 제작시 접합하는 과정에서 시편에 가해지는 압력이 내부구조체의 반경에 영향을 주지 않고 초기설계 반경과 일치하는 형상이다. R_{upper} 결함모드의 경우는 압축과정에서 발생하는 압축력이 상면 외판과 접합되어 있는 내부구조체에 좌굴을 유도하여 발생하는 결함으로 측정한 반경을 적용한 형상이다. R_{bottom} 결함모드의 경우는 R_{upper} 결함모드와 반대로 하면 외판과 접합되어 있는 내부구조체의 결함을 적용한 결함형상이며, $R_{upper} + R_{bottom}$ 결함모드는 상면 외판과 하면 외판에 접합되어 있는 모든 내부구조체가 압축력에 의해 결함이 적용된 형상이다.

다음과 같이 각각의 반경결함을 적용하여 반경결함이 미치는 충격특성에 대해 비교 분석 하였다.

2. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재 판재의 두께 결함 분석

롤형 전극을 이용한 다점 전기저항 용접방법으로 전단 변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재 판재의 내부구조체와 외판과의 용접시 가해지는 압축 하중은 내부구조체의 반경결함과 동시에 샌드위치 판재의 전체 두께에 영향을 미친다. 이러한 판재의 두께는 충격특성 및 흡수 메커니즘에 영향이 미칠 것으로 예상되어지므로 내부구조체의 반경결함과 같은 방식으로 대표적인 초기 결함으로 선정하고 측정을 통해 초기결함모드에 적용하였다.

판재의 두께 결함의 경우 내부구조체의 반경 결함과 같이 무수히 많은 결함의 경우 수를 가지고 있다. 이에 시편의 두께를 측정을 통하여 Table 2 와 같이 총 4 가지로 분류 적용 하였다. Table 2 를 보면 기준 (Reference) 두께가 있는데, 이는 실제시편의 두

계를 측정하기 전 유한요소해석의 검증을 하기위한 적용된 두께로 접합하는 과정에서 압력과 열에 의해 상하면 내부구조체가 0.5 mm 씩 감소하여 총 두께가 2.80 mm 로 가정한 두께 이다. Type 1, Type 2, Type 3 의 경우는 실제시편 40 개를 대상으로 측정한 두께로 각각 최소두께, 평균두께, 최대두께를 나타낸다.

기준 (Reference) 두께와 실제시편의 측정두께는 Table 2 에 나타내었다.

Fig. 5 는 Table 2 데이터가 적용되어 제작된 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속샌드위치 판재의 두께결함모드별 3 차원 모델을 나타낸다.

Table 2 Thickness for different thickness imperfection models

Thickness defect mode	Reference	Type 1	Type 2	Type 3
Thickness (mm)	2.80	2.83	2.87	2.89

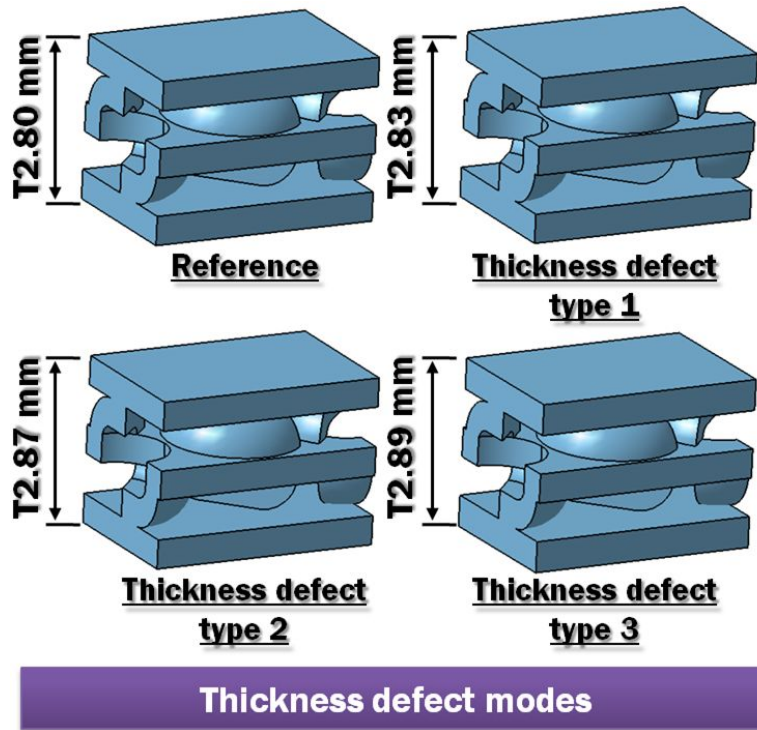


Fig. 5 Classification of thickness defect modes

제 3 장 초경량 금속 샌드위치판재의 충격 특성 평가

제 1 절 초경량 금속 샌드위치판재의 충격시험 기법

전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 충격특성 분석은 다른 샌드위치 판재와 복합재료의 판재등의 충격시험에 가장 많이 적용되는 낙하 하중 (Drop weight) 방식을 이용하여 Fig. 6 의 충격시험기기로 실험이 수행되었다. 본 연구에 사용된 충격실험의 장치의 크기는 1m×1m×3m 이며, 최대 2 m 의 Stroke 까지 수행할 수 있는 충격시험기기를 이용하였다.

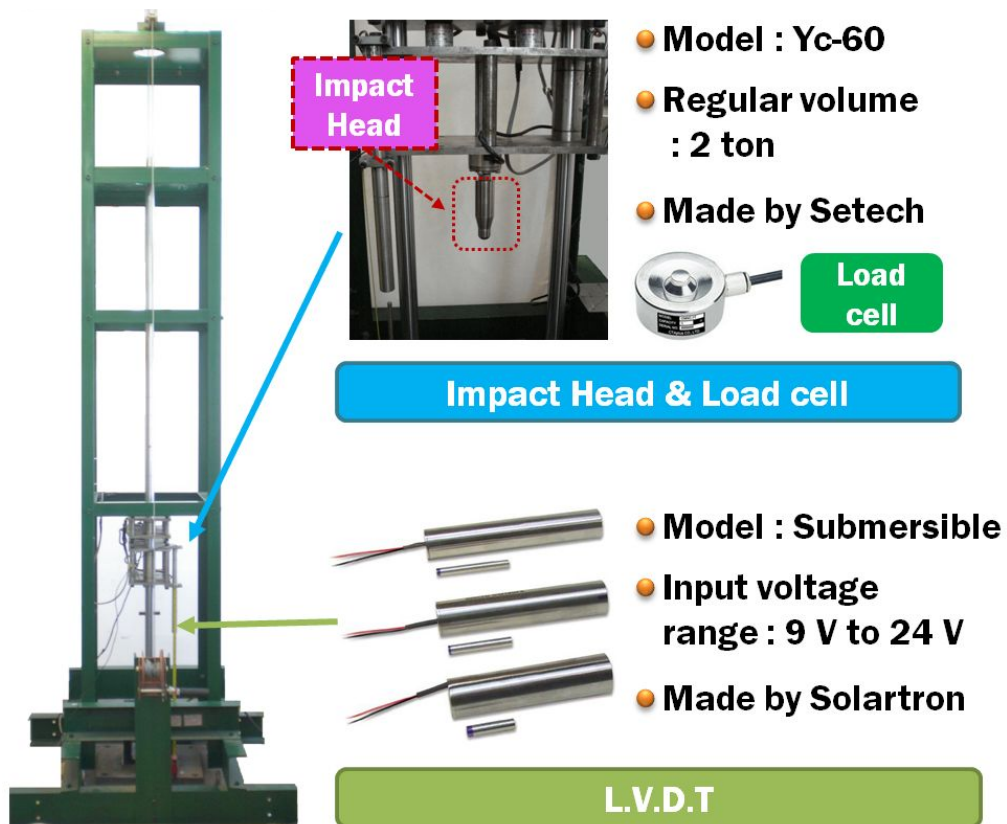


Fig. 6 Experimental set-up of drop impact test

충격 하중을 측정하기 위하여 충격헤드 상부에 로드 셀 (Load Cell) 을 부착하였으며, 재료의 충격부 변위를 측정하기 위하여 구조물 왼쪽 모서리 부분에 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 를 장착하여 충격헤드에 부착된 막대가 일정 위치를 통과하면 LVDT 내로 들어오게 되어 실시간 변위 변화를 측정하도록 하였다.

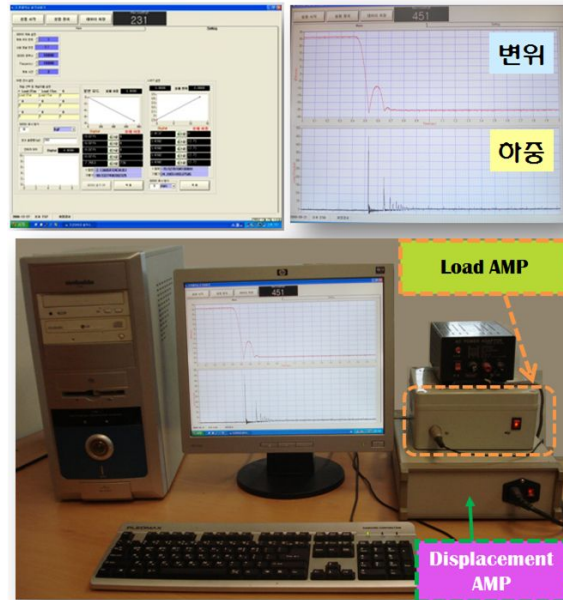


Fig. 7 Data acquisition system of impact tests

충격 시험 시 로드셀과 LVDT 로부터 받아들여진 충격 하중과 시편의 변위에 대한 데이터는 Fig. 7 과 같은 시스템을 통하여 채널별 초당 10,000 개의 데이터를 취득할 수 있다. 충격 시험 시 충격 헤드와 시편의 충돌 시간은 0.01 초 이내의 아주 짧은 시간에 이루어지므로 이와 같은 시스템은 짧은 시간에 변화하는 충격하중 및 변형량을 측정하기에 적합하게 제작되어있다.

다음과 같이, 충격헤드와 시편의 충돌시간이 짧은 시간에 완료되기 때문에 시편에 가해지는 충격하중/직경에 따른 변화거동을 관찰하기 위하여 Fig. 8 과 같이 초당 10,000 컷을 촬영할 수 있는 고속카메라를 설치하였으며, 충격시험 모습을 동일한 밝기의 환경에서 촬영하기 위하여 조명기기를 사용하였다.

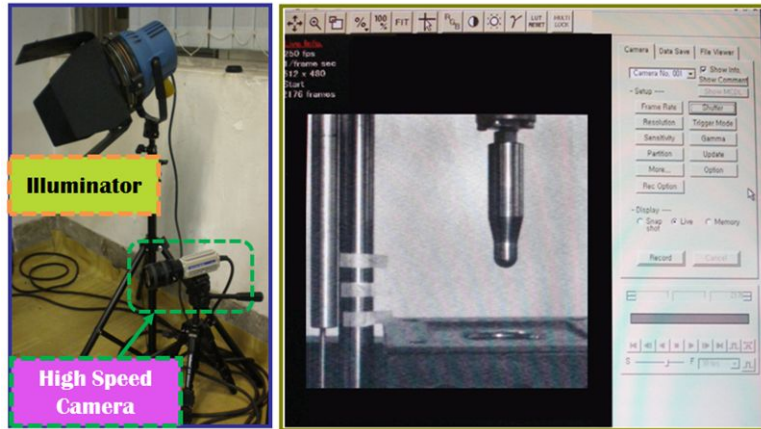


Fig. 8 High speed camera system to investigate into the crush phenomenon between impact head and specimen

제 2 절 평면 변형 경계조건에서의 내충격 시험

1. 평면 변형 경계조건에서의 내충격 시험 방법

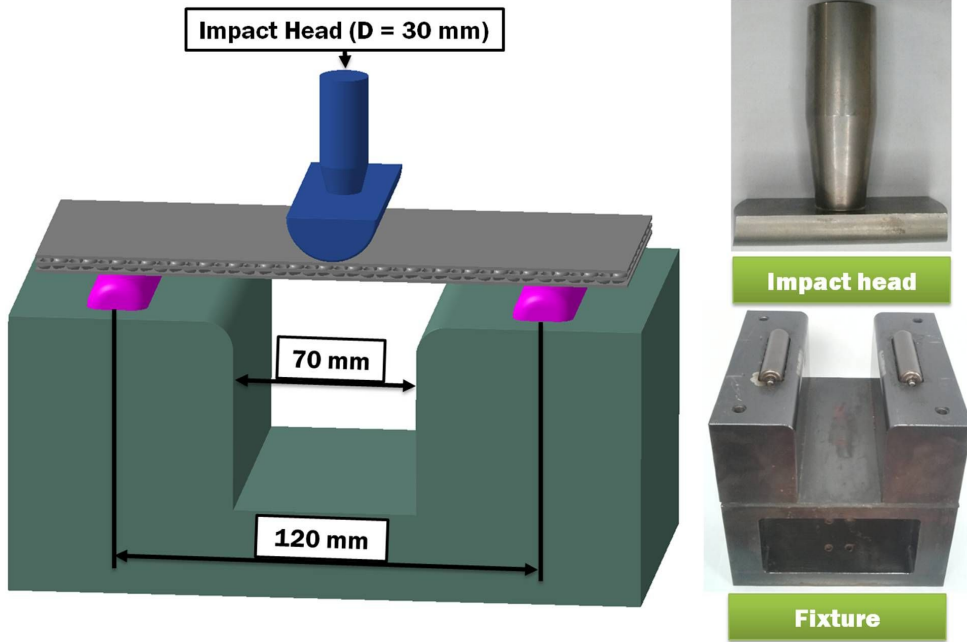


Fig. 9 Schematics for plane strain type of drop impact test

본 연구의 전단변형 가능한 반구형 내부구체를 가진 샌드위치 판재의 결함에 대한 유한요소해석 결과와 비교하기 위하여 Fig. 9 와 같은 평면 변형 경계조건에서 충격시험을 수행 하였다. 평면 변형경계 조건에서의 내충격시험은 판재의 단면 변형의 특성을 분석하기 위한 실험 방법으로 충격지지부에 올려진 충격시편에 대해 아무런 고정 및 다른 조건을 부여하지 않고 충격헤드를 판재의 중앙에 낙하시켜 충격하중이 시편중앙부분에 전달될 수 있도록 하는 실험방식이다. 본 연구에서는 충격 높이 400 mm 에 대하여 충격 헤드의 직경과 무게를 각각 30 mm 와 11.1 kg 을 이용하여 낙하 충격시험을 수행하였으며, 낙하 충격시험에 얻어진 단위 폭 당 하중 - 변위 선도와 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도 및 변형형상을 유한요소해석 결과와 비교하여 지배적인 결함모드를 선정하였다.

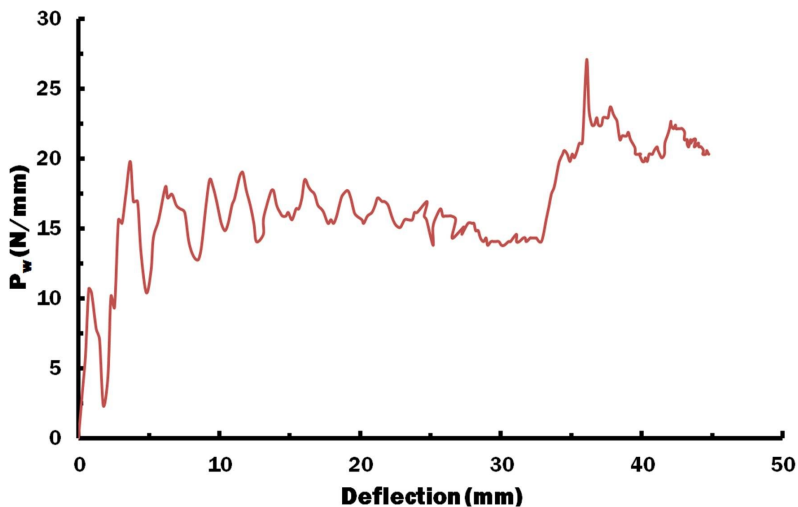
2. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재에 대한 실험결과 및 고찰

전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재에 대하여 평면 변형 경계조건에서 충격헤드무게와 헤드직경이 11.1 kg 과 30 mm 인 충격 헤드를 이용하여 충격 실험을 수행하였다.

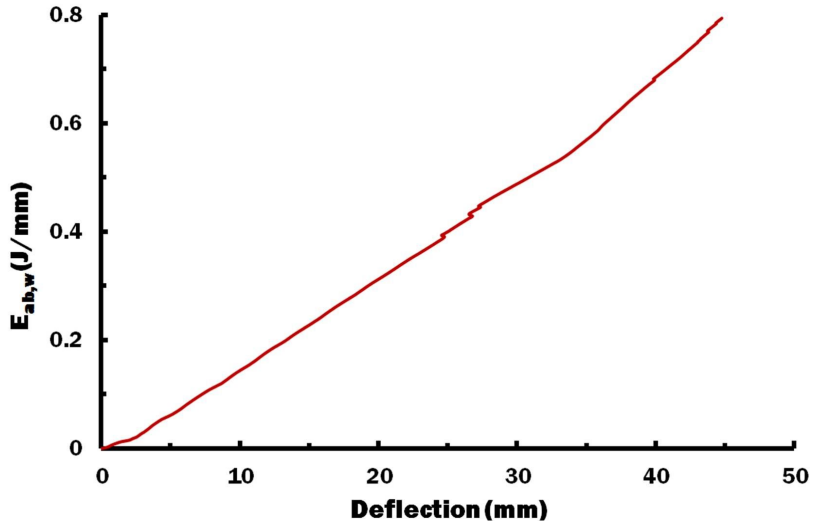
Fig. 10 과 Table 3 은 전단 변형가능한 반구형 내부구조체를 가진 샌드위치 판재를 이용하여 평면 변형 경계조건에서 충격 실험한 결과이다. Table 3 은 평면 변형 경계조건에서의 충격 실험 결과를 충격 시험 높이, 충격 입력에너지, 단위 폭 당 충격 흡수에너지, 단위 폭 당 최대하중, 최대 변위 순으로 나열하였다.

Table 3 Results of plane strain type of impact test

Specimen	Height (mm)	E_{in} (J)	$E_{ab,w}$ (J/mm)	$P_{w,max}$ (N/mm)	δ_{max} (mm)
Sheared dimple	400	44.3	0.79	27.07	44.80



(a) Force per width - deflection curves



(b) Absorbed energy per width - deflection curves

Fig. 10 Influence of impact energies on force per width - deflection curves and the absorbed energy per width - deflection curves

평면 변형경계조건에서 시험 데이터 결과는 선행연구인 “변형 가능한 전단 반구형 내부 심재를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 충격 특성 분석” 에서 수행된 실험 결과를 인용하였다.⁴⁶⁾

제 4 장 초경량 금속 샌드위치 판재에 대한 3 차원 유한요소 해석

제 1 절 결함을 포함한 전단 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속샌드위치 판재의 3차원 유한요소 해석 방법

1. 유한요소 해석방법 및 모델링

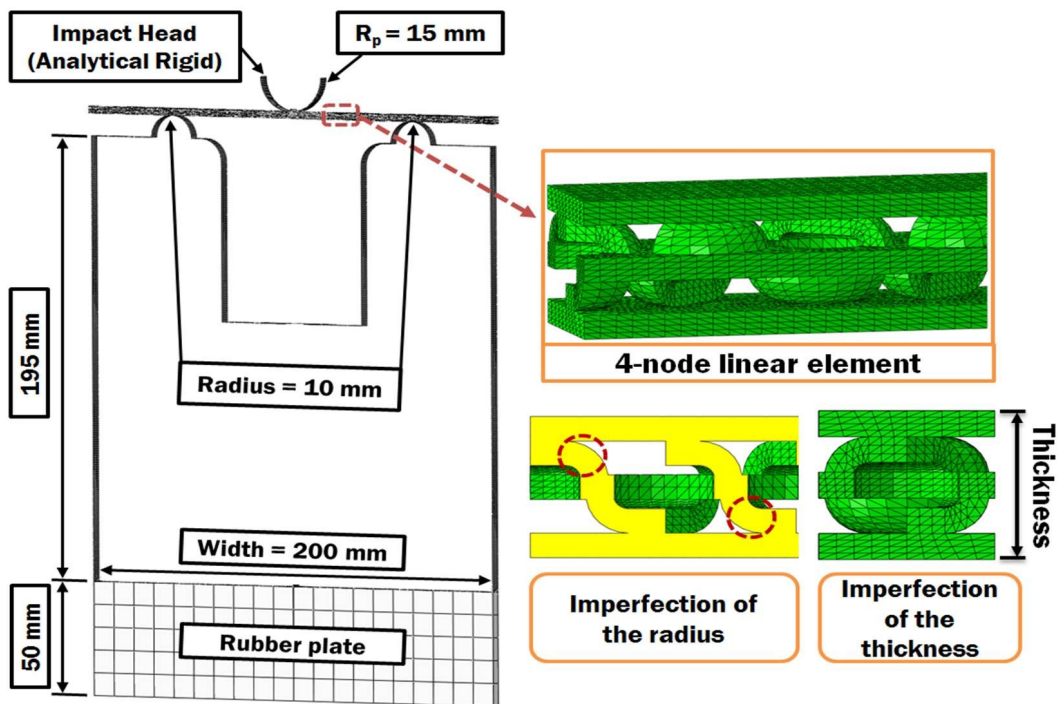


Fig. 11 FE model of the impact analysis

본 연구에서 전단 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 내충격 특성을 분석하기 위하여 Fig. 11 와 같이 평면변형 경계조건에서 ABAQUS V6.11 상용

프로그램을 이용하여 유한요소모델링을 수행 하였다. 평면변형 경계조건은 시편의 국부적인 부분의 변형이 아닌 시편 중앙 전체의 변형을 유도하여 길이방향의 변형이 폭 방향으로 유사한 경향으로 변형이 일어난다. 평면변형 경계조건을 충격시편을 실제 전체 형상으로 모델링 했을 때, 다수의 요소가 생성되어 해석시간 및 해석 메모리가 커지는 문제점이 생기기 때문에 단위 셀 크기의 한 줄에 대해서 유한요소 해석을 수행하여, 시편 내부 구조체의 변형 형상 및 내충격 특성을 비교/분석 하였다.

전단변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 샌드위치 판재의 모델링은 4 절점 사면체 요소 (Tetrahedral element) 로 생성하였다. 변형 및 충격 메커니즘을 정확히 분석하기 위하여 판재와 충격헤드의 접촉면 영역은 충격헤드와 접촉하지 않는 영역보다 3 배 정도 조밀하게 요소를 생성하였다. 또한, 금속 내부구조체와 상하 외판의 두께 방향 굽힘현상을 잘 묘사하기 위하여 외판은 4층, 내부구조체는 3층으로 유한요소 격자를 생성하였다. 충격헤드는 강체로 가정하였고, 충격지지대의 경우 충격시편에 의해 전달되는 충격응력파를 바닥부의 고무판까지 전달하고 분석하기 위해 4 절점 사각형 셀 요소로 격자를 생성하였다. 바닥부 고무판은 점탄성 특성을 고려하기 위하여 Neo-Hookean 의 Hyper-elastic 모델을 적용하였으며, 해석 시간 감소 및 해석 메모리를 최소화하기 위하여 8 절점 육면체요소 (8-node linear element) 로 된 축약형 모델을 사용하였다.

평면변형형 내충격 유한요소 해석에 사용된 유한요소 격자수는 Table 4 와 같다.

Table 4 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis

	Specimen (EA)	Die (EA)	Rubber (EA)
Node	27,114	2,320	132
Element	106,479	1,740	50

2. 3 차원 유한요소해석의 경계조건 및 재료 물성

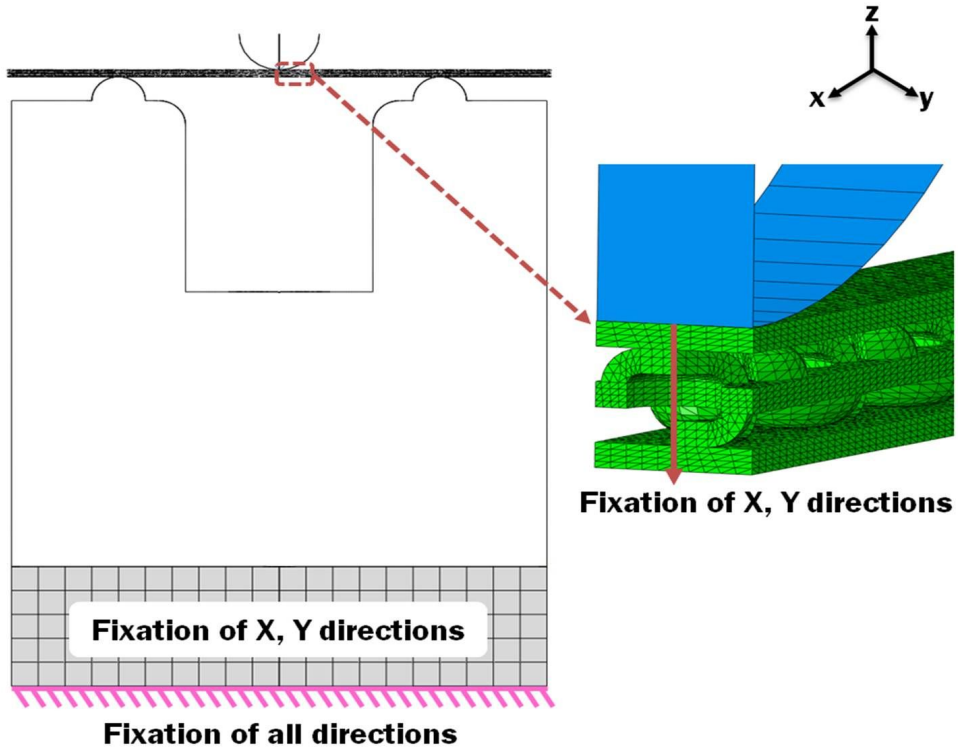


Fig. 12 Boundary conditions of FE model

3차원 충격해석에서 적용된 경계조건은 Fig. 12 와 같다. 내충격 유한요소해석에서 적용한 경계조건은 평면변형형 실험조건과 동일하게 하기 위하여 충격헤드와 충격지지대의 경우 Z 축 방향으로만 움직일 수 있게 하였으며, 실제 시편과 같은 유사한 변형을 유도하기 위하여 시편의 양 옆면 방향에 대칭 경계조건 (Symmetry boundary condition) 을 부여하였다. 고무 바닥면은 어느 방향으로도 움직일 수 없도록 고정시켰으며, 고무옆면의 경우 Z 축 방향으로만 움직일 수 있도록 하였다.

충격특성을 분석하기 위한 전단 변형 가능한 반구형을 가진 금속샌드위치 판재의 재질은 외판의 경우 고장력강 (DP 590) 을 사용하였으며, 내부구조체는 연강 (Milde steel) 재료를 사용하였다. 외판과 내부구조체의 정적 기계적 물성은 인장시험을 통하여 Table 5 와 같이 탄성계수, 포아송비, 항복강도, 인장강도 등을 구하였다.

Table 5 Material properties of high strength steel (DP 590) and mild steel sheet

	Skin sheet (DP 590)	Inner structure (Mild steel)
E (GPa)	205	176
ν	0.28	0.32
σ_y (MPa)	364	144
σ_t (MPa)	635	302

외판의 경우 변형률 속도를 고려하기 위하여 고속인장시험을 수행하여 Fig. 13 과 같은 변형률 속도별 진응력 - 진변형률 선도를 얻을 수 있었다. 이러한 외판 (DP 590) 의 고속인장데이터는 ABAQUS 에 DP 590 재료의 소성물성으로 입력하였으며, ABAQUS V6.11 Explicit 을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

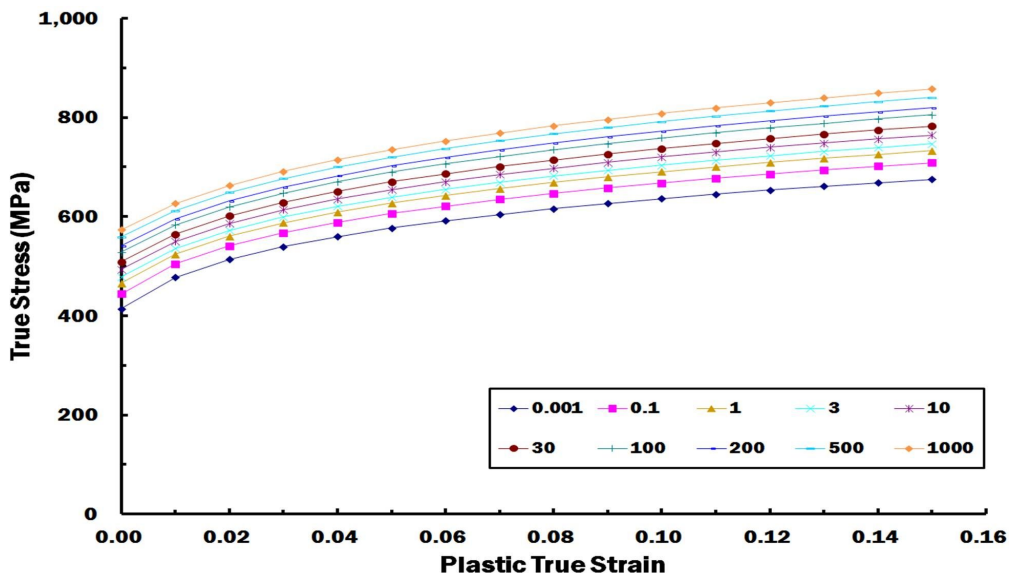


Fig. 13 Result of high speed tensile tests for DP 590 sheet

제 2 절 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 결함에 따른 3차원 유한요소 해석 결과 및 고찰

1. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 내부구조체 반경결함 형태 및 두께결함의 영향

전단 반구형 내부구조체를 가진 샌드위치 판재에 발생하는 초기결함에는 반경결함과 두께결함이 발생함을 알 수 있었다. 먼저, 반경결함이 금속샌드위치판재의 충격거동에 미치는 영향성을 분석하기 위하여, 내부구조체의 반경결함 발생 위치에 따라 3 가지 반경결함모드 (R_{upper} , R_{bottom} , $R_{upper} + R_{bottom}$) 로 분류하였다. 반경결함 발생위치에 따라 분류된 결함모드를 실제 시편의 측정된 반경인 Mode A ($r_1 = 0.775$, $r_2 = 0.280$) 와 Mode B ($r_1 = 0.878$, $r_2 = 0.389$) 로 각각 적용하여 분류 하였다. 시편의 두께는 평균두께 2.87 mm 을 적용하여 각각의 반경결함이 금속 샌드위치판재의 충격거동에 어떠한 영향을 미치는지 3 차원 충격해석을 통해 분석하였다.

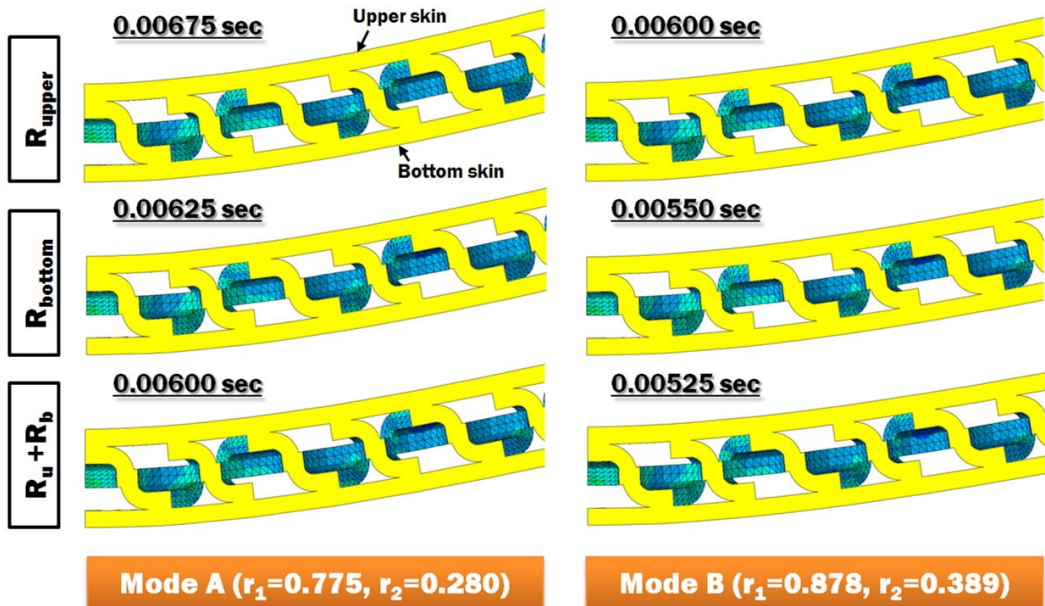


Fig. 14 Deformed shapes of the sandwich panel for different radius imperfection modes

Fig. 14 는 각각의 내부구조체 결함에 대한 변형형상으로 상하부 외판에 주름결함이 생기는 최초 발생시간을 나타내고 있다. 충격하중을 받은 샌드위치 판재는 시간이 지남에 따라 판재의 주름결함이 발생하는데 먼저 하부 외판에 주름결함이 발생하며, 그 이후 상면 외판에 주름결함이 발생함을 확인할 수 있었다.

상면 내부구조체에 반경결함이 있는 경우 상하부 외판의 주름 발생시간이 다른 결함보다 늦게 발생함을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 상면의 내부구조체 반경결함이 하면 내부구조체의 회전변위에 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 하면 내부구조체 반경결함의 경우 상하판의 주름결함시간이 상면 내부구조체 반경결함 모드의 경우 보다 빠르게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 하면의 내부구조체 반경결함이 하면 내부구조체의 좌굴을 빨리 발생시켜 하부 외판의 국부회전 변위를 증가시키는 것으로 사료된다. 상하면 내부구조체 반경결함이 있는 경우 가장 빠르게 외판의 주름을 발생시키는 것으로 확인되는데 하면의 내부구조체의 좌굴이 빠르게 발생되며 하부의 외판을 국부회전 변위를 증가시키면서 상면의 내부구조체의 반경이 결함에 의해 빠르게 좌굴되었기 때문으로 사료된다.

반경 Mode A 는 Mode B 보다 반경이 치수가 작으며, 상하부 외판의 주름 발생시간이 늦음을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해 반경크기가 클수록 외판의 주름 발생시간이 짧아짐을 예측 할 수 있었다.

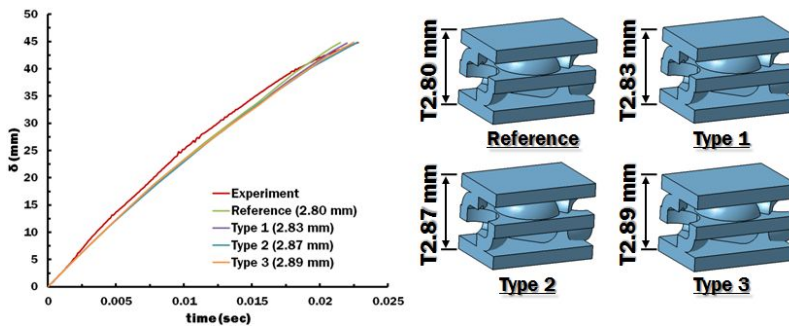


Fig. 15 Deflection - time curves of the sandwich panel for different thickness imperfection modes

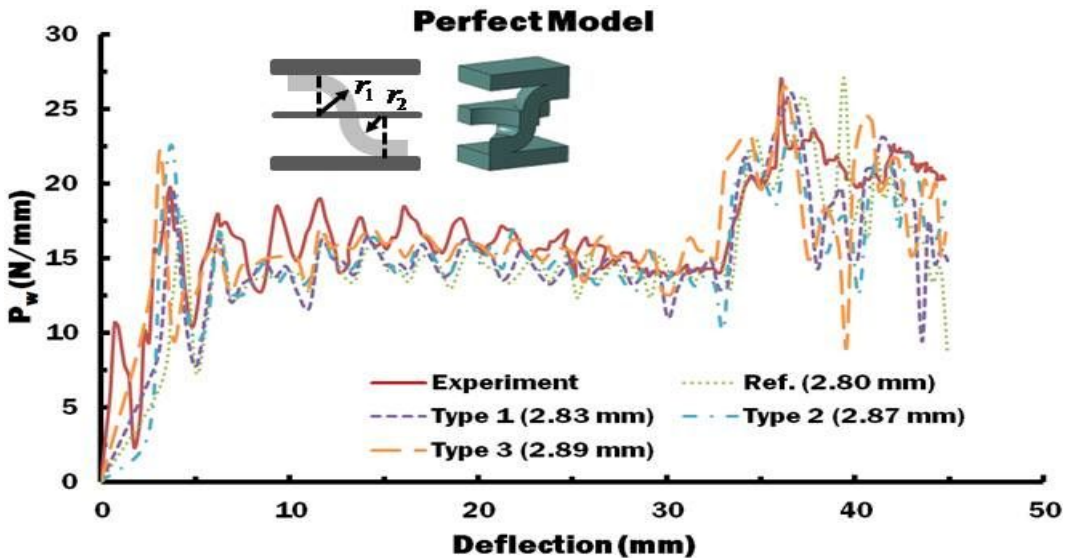
Fig. 15 의 경우 금속 샌드위치판재의 두께결함별 변위-시간 선도를 나타낸다. 두께가 증가할수록 최종변형 시간이 증가됨을 확인할 수 있었으나, 두께간의 차이가 작기 때문에 시간차가 크게 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

2. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 내부구조체 반경결함과 두께결함에 따른 충격해석 결과 및 고찰

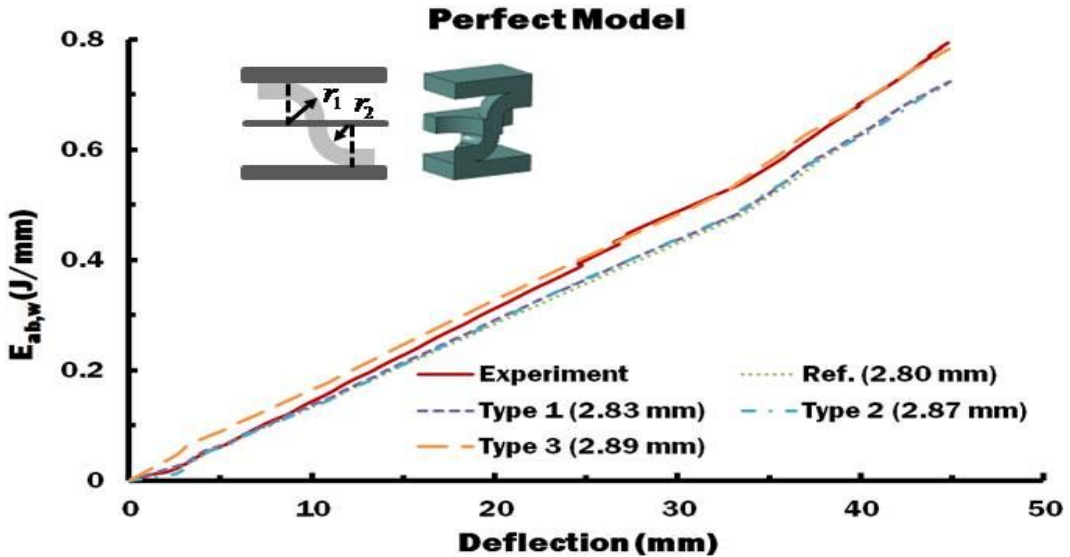
전단 변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 내부 구조체 반경결함과 두께 결함에 따른 충격 거동 특성을 분석하기 위해 실제 시편의 측정 높이와 (Type 1, Type 2, Type 3) 기준 (Reference) 두께에 대해 충격높이 400 mm 와 충격헤드 직경 30 mm 을 적용하여 3차원 충격해석을 수행하였다. 판재에 발생하는 내부반경 결함과 두께결함은 동시에 발생하기 때문에 각각의 반경 결함모드에 대해 각각의 두께 결함을 적용하여 반경과 두께 결함이 충격특성에 미치는 영향성을 비교/분석 하여 지배적인 결함 모드를 도출해 보았다.

1) 무결함 모델 (Perfect Model) 의 두께 결함

무결함 모델은 반경에 결함이 적용되지 않은 경우로 측정한 판재의 두께를 적용하여 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속샌드위치 판재에 대해 유한요소해석을 수행하였다.



(a) Force per width - deflection curves



(b) Absorbed impact energy per width - deflection curves

Fig. 16 Influence of thickness defects on the force per width - deflection and the absorbed energy per width - deflection curves for the case of perfect model

Fig. 16 는 무결함 모델에 두께결함이 적용된 모델에 대하여 3차원 유한요소해석을 수행한 결과로 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속샌드위치 판재의 단위 폭 당 하중 - 변위 선도 및 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도 이다.

Fig. 16 의 (a) 무결함 모델에 두께 결함이 적용된 모드로 유한요소해석결과로 얻어진 단위 폭 당 하중 - 변위 선도를 나타낸다. 처짐이 4 mm 이하에서 시편의 두께가 두꺼울수록 하중이 증가함을 알 수 있었다. 그 이후 처짐이 33 mm 이하까지 하중 변위 선도가 유사하게 나타났으며, 그 이후에는 하중이 증가하면서 변형이 급격하게 일어나는 구간으로 하중 변위 선도가 약간 다르게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 16 의 (b) 무결함 모델에 두께 결함이 적용된 모드로 유한요소해석결과의 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도를 나타낸다. Type 3 (2.89 mm) 의 경우 처짐이 25 mm 까지 실험의 충격흡수에너지 보다 높게 흡수하였지만, 그 이후에는 실험값과 거의 유사하게 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도가 예측됨을 알 수 있었다.

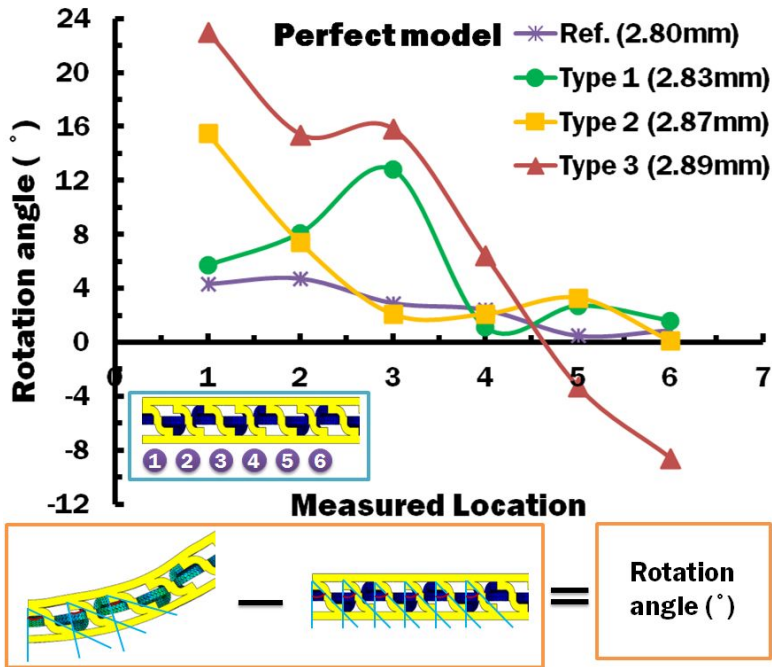


Fig. 17 Rotation angle of inner structures of for different measured locations

Fig. 17 은 반경결함이 없는 무결함모델의 두께결함별에 대한 유한요소해석 결과로 얻어진 최종형상에서의 내부구조체 회전각을 나타낸 선도이다. 내부구조체 회전각은 최종변형형상에서 발생하는 내부구조체 회전각에서 변형 전 회전각의 차를 나타낸다. 회전각 측정 위치는 충격헤드와 접촉하여 변형이 잘 유도되는 시편 중앙부의 6 개의 내부구조체에 대해 측정하였다. 이 회전각 선도는 근접되어 있는 내부구조체 간의 회전각 차에 따라 상부 외판에 발생하는 국부주름 위치를 판단 할 수 있으며, 상대적인 국부주름의 크기를 예측할 수 있다. 국부주름의 발생위치는 회전각이 높은 곳에서 낮아지는 부분에서 발생됨을 확인 할 수 있었다. Type 3 의 경우를 예를 들면 1 번 위치의 내부구조체가 회전각이 급격히 증가됨을 확인 할 수 있는데, 이러한 급격한 회전각의 증가는 내부구조체의 붕괴를 유도하며 상대적으로 내부구조체의 파손이 없는 2 번 위치에서 상부외판의 국부주름 결함이 발생됨을 확인 할 수 있었다. 또한, 회전각이 양각에서 음각으로 바뀌는 4 - 5 위치에서도 상부외판의 국부주름이 발생함을 확인 할 수 있었다.

따라서, 각각의 두께결함에 대한 최종형상의 국부주름 발생위치를 판단과 상대적인 국부주름의 크기를 예측하기 위하여 회전각 선도를 이용 하였다.

○ - Application region of skin wrinkling

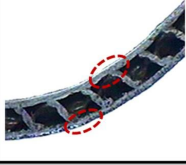
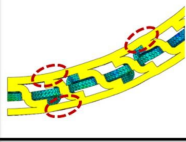
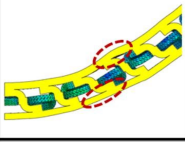
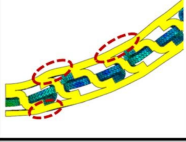
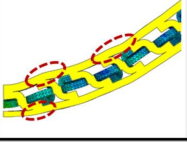
Experiment	Perfect Model			
	Ref. (2.80 mm)	Type 1 (2.83 mm)	Type 2 (2.87 mm)	Type 3 (2.89 mm)
				

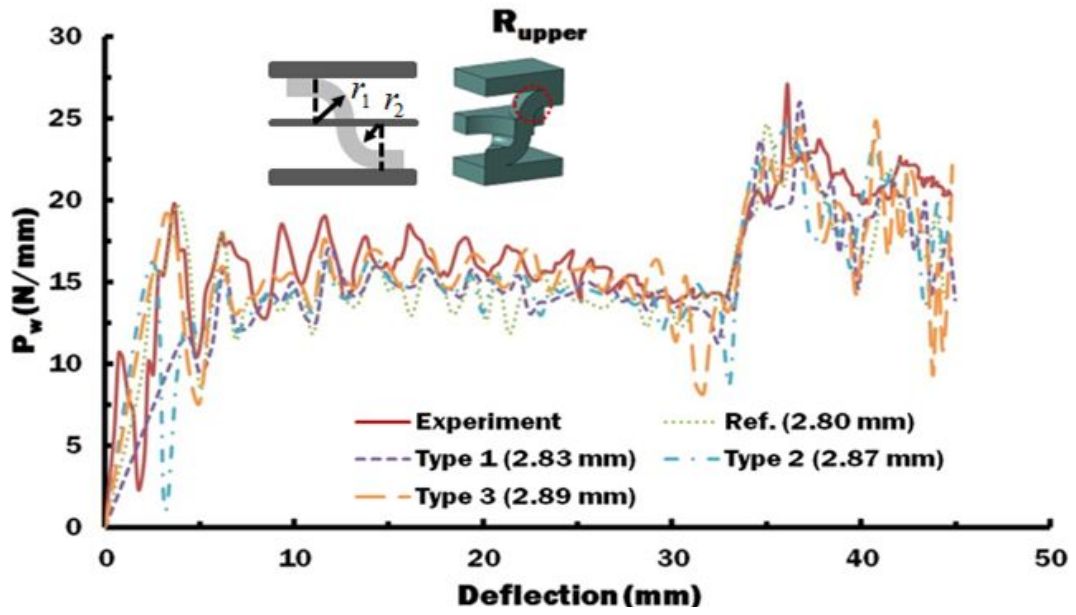
Fig. 18 Comparison deformed shapes for different thickness imperfection mode of FE analyses (Perfect Model)

Fig. 18 은 무결함 모델의 두께결함별 최종 변위 형상과 실험결과 얻어진 시편의 변형형상을 나타낸다. 실험시편과 모든 타입의 변형형상은 실험의 변형형상과 같이 외관의 국부 주름이 발생함을 알 수 있었다. 하지만 국부주름이 발생하는 위치가 Fig. 17 을 통해 실험의 변형형상과 다르게 발생됨을 알 수 있었다. 따라서, 무결함 모델에서 적용된 두께결함은 타당한 해석 결과가 아님을 알 수 있었다.

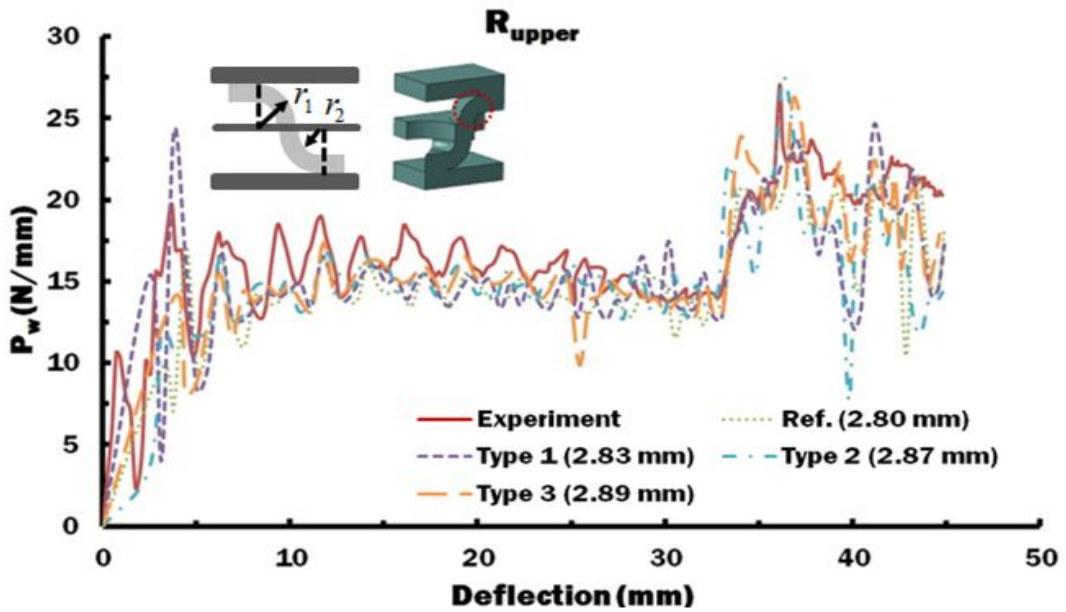
2) 상면 내부구조체 반경결함 모드 (R_{upper}) 의 두께 결함

상면 내부구조체 반경결함 모드는 상면에 접촉하는 반경에 결함이 적용된 경우로 측정된 판재의 두께를 적용하여 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속샌드위치 판재에 대해 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 19 과 Fig. 20 은 상면 내부구조체 반경결함 모드에 두께결함이 적용된 모델에 대하여 3차원 유한요소해석을 수행한 결과로 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속샌드위치 판재의 단위 폭 당 하중 - 변위 선도 및 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도 이다.

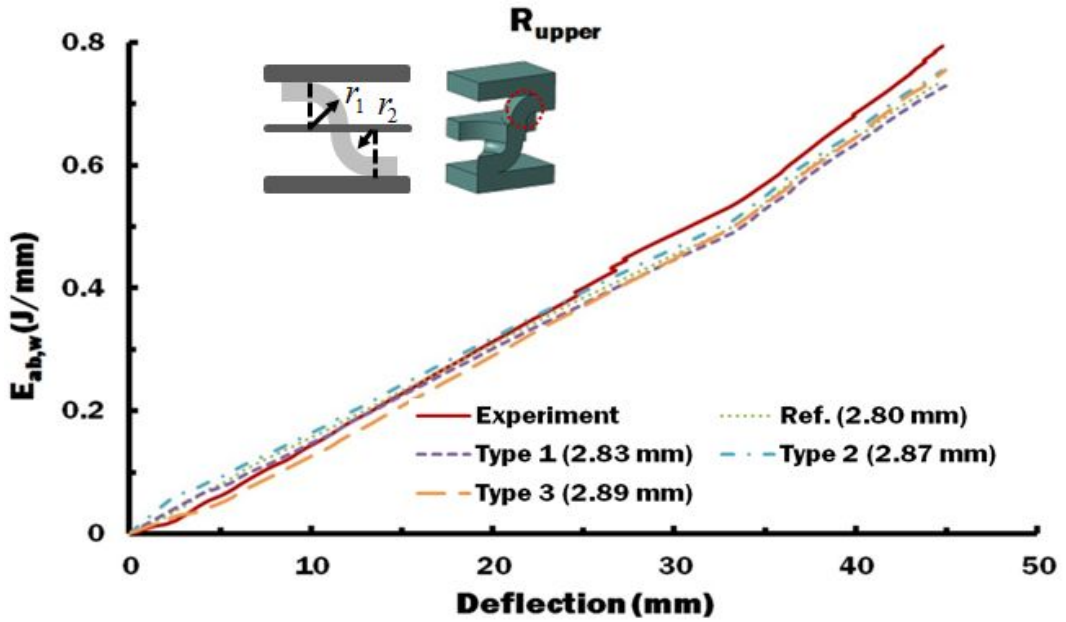


(a) Mode A

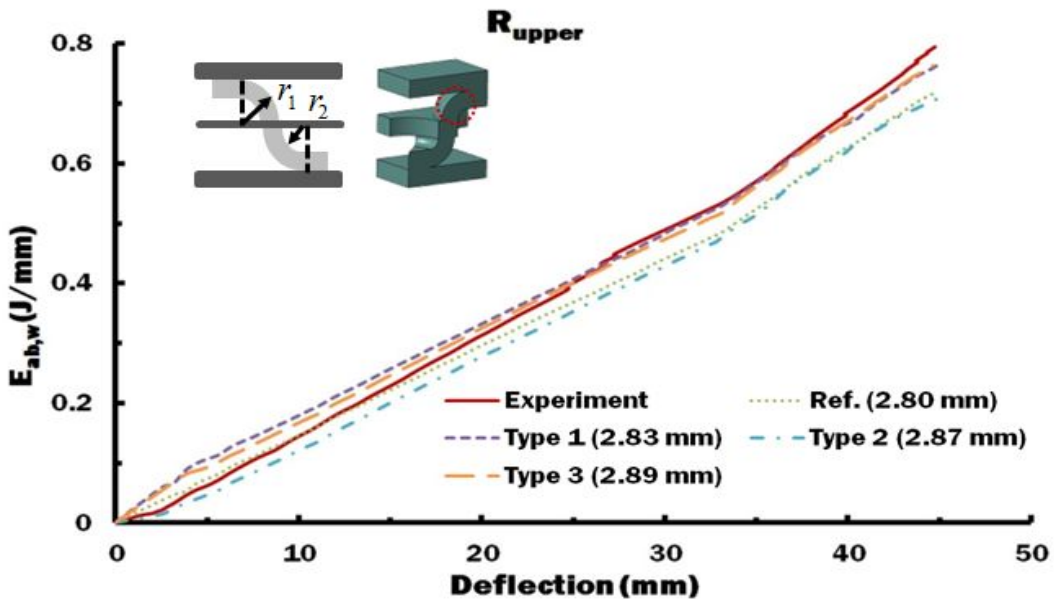


(b) Mode B

Fig. 19 Influence of thickness defects and radius imperfection modes on the force per width - deflection curves (Application region of the radius imperfection = upper side)



(a) Mode A



(b) Mode B

Fig. 20 Effects of the thickness defects and the radius imperfection mode on the absorbed energy per width (Application region of the radius imperfection = upper side)

Fig. 19 의 (a), (b) 는 상면 내부구조체 반경결함이 적용된 모드에 두께 결함이 적용된 모드로 유한요소해석결과로 얻어진 단위 폭 당 하중 - 변위 선도를 나타낸다. 반경 Mode A 의 경우 모든 두께가 실험의 단위 폭 당 하중과 거의 유사하게 나타났다. Mode B 의 경우 처짐 4 mm 이하에서 Type 2 (2.87 mm) 의 하중이 크게 증가하였고 그 이후에는 Mode A 와 같이 모든 두께가 실험의 단위 폭 당 하중과 거의 유사하게 나타났다.

Fig. 20 의 (a), (b) 는 상면 내부구조체 반경결함이 적용된 모드에 두께 결함이 적용된 모드로 유한요소해석결과로 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도를 나타낸다. (a) 의 Mode A 의 경우 실험의 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위선도 보다 최대 약 7 % 낮게 에너지흡수 하였으나 거의 유사한 선도가 예측되었다. (b) 에서 Mode B 의 경우 Type 1 과 Type 3 가 실험과 약 4 % 정도 낮게 에너지흡수를 하며 실험과 유사한 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도가 예측됨을 알 수 있었다.

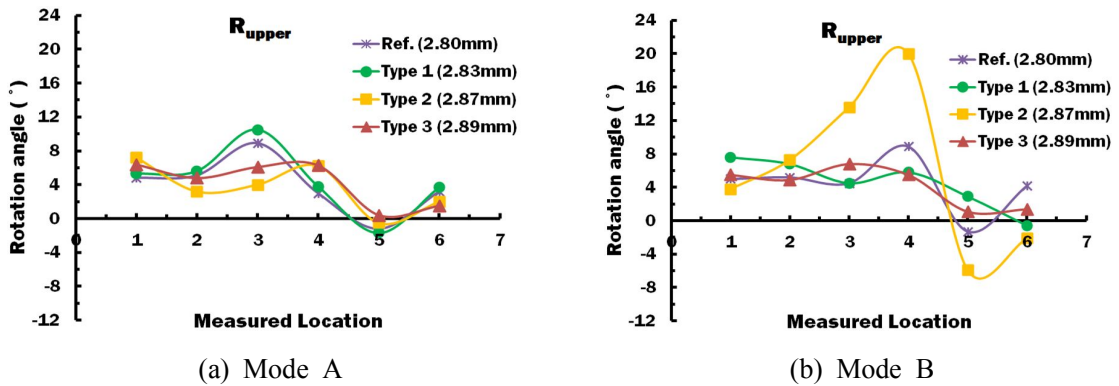


Fig. 21 Rotation angles of inner structures for the different measured locations (Application region of the radius imperfection = upper side)

Fig. 21 은 상면 내부구조체 결함이 적용된 두께결함별 회전각 선도이다. 상면 내부구조체 결함과 두께결함별 유한요소해석의 최종 형상에서 발생하는 외판의 국부주름 발생위치를 판단하는데 이용하였다.

○ - Application region of skin wrinkling


Experiment	R_{upper} (상면 내부구조체 결함)			
	Mode A		Mode B	
	Ref. (2.80 mm)	Type 1 (2.83 mm)	Ref. (2.80 mm)	Type 1 (2.83 mm)
	Type 2 (2.87 mm)	Type 3 (2.89 mm)	Type 2 (2.87 mm)	Type 3 (2.89 mm)

Fig. 22 Deformed shapes for thickness imperfection modes when the radius imperfection is applied to the upper sheared dimples

Fig. 22 는 상면 내부구조체 반경결함의 두께결함별 최종 변위 형상과 실험결과 얻어진 시편의 변형형상을 나타낸다. 실험시편과 모든 타입의 변형형상은 실험의 변형형상과 같이 외관의 국부 주름이 발생함을 알 수 있었다. 국부 주름의 발생위치는 Fig. 21 을 이용하여 확인하였다. 실험 변형형상과 비교했을 때 Mode B 의 Type 3 의 경우가 가장 실험결과와 유사한 변형형상을 보였지만, 시편 중앙부의 두 번째 내부구조체 위치에서 미소하게 판재의 주름이 더 발생하며 실험 변형형상과 차이를 보였다. 따라서 타당한 해석결과를 도출하기 위해서는 다른 결함에 대한 고려가 필요함을 알 수 있었다.

3) 하면 내부구조체 반경결함 모드 (R_{bottom}) 의 두께 결함

하면 내부구체 반경결함 모드는 상면에 접촉하는 반경에 결함이 적용된 경우로 측정한 판재의 두께를 적용하여 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속샌드위치 판재에 대해 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 23 과 Fig. 24 는 하면 내부구체 반경결함 모드에 두께결함이 적용된 모델에 대하여 3차원 유한요소해석을 수행한 결과로 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속샌드위치 판재의 단위 폭 당 하중 - 변위 선도 및 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도 이다.

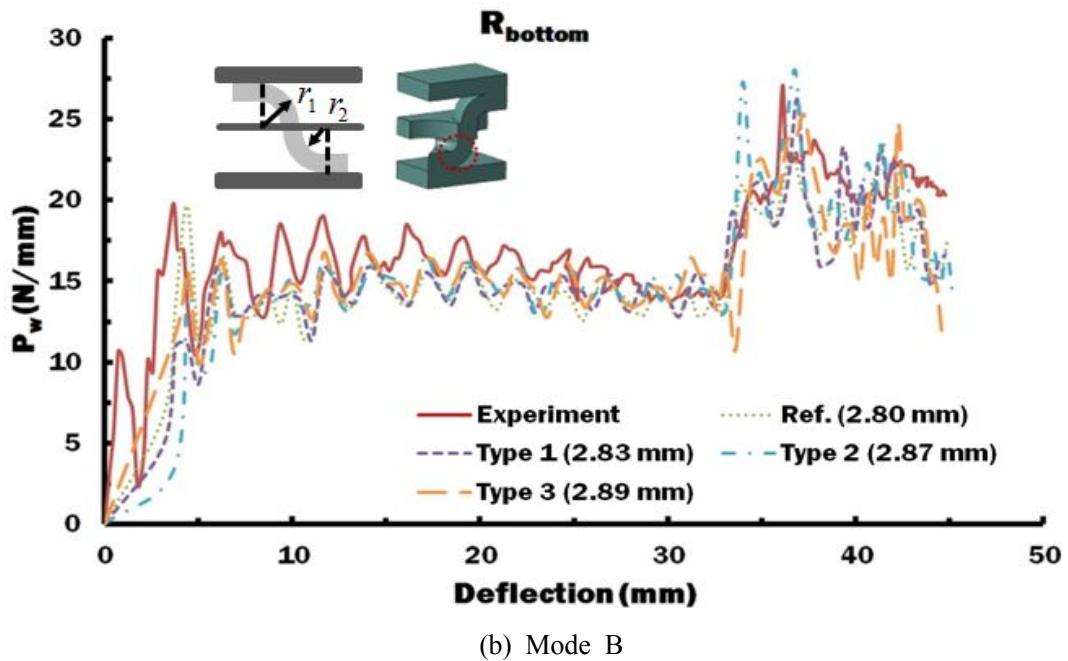
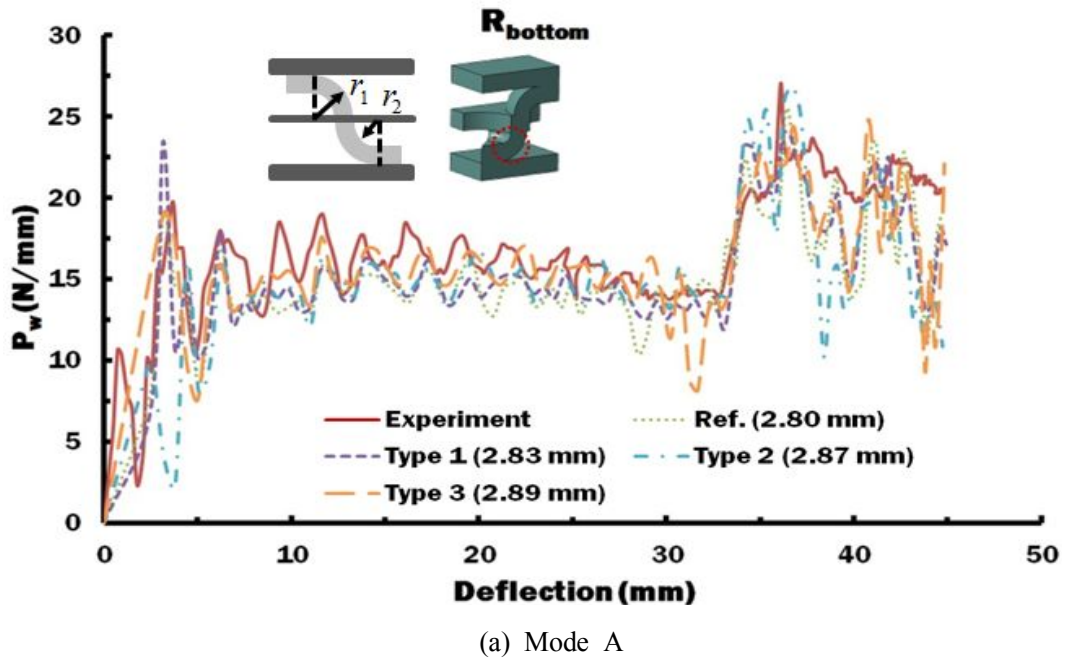
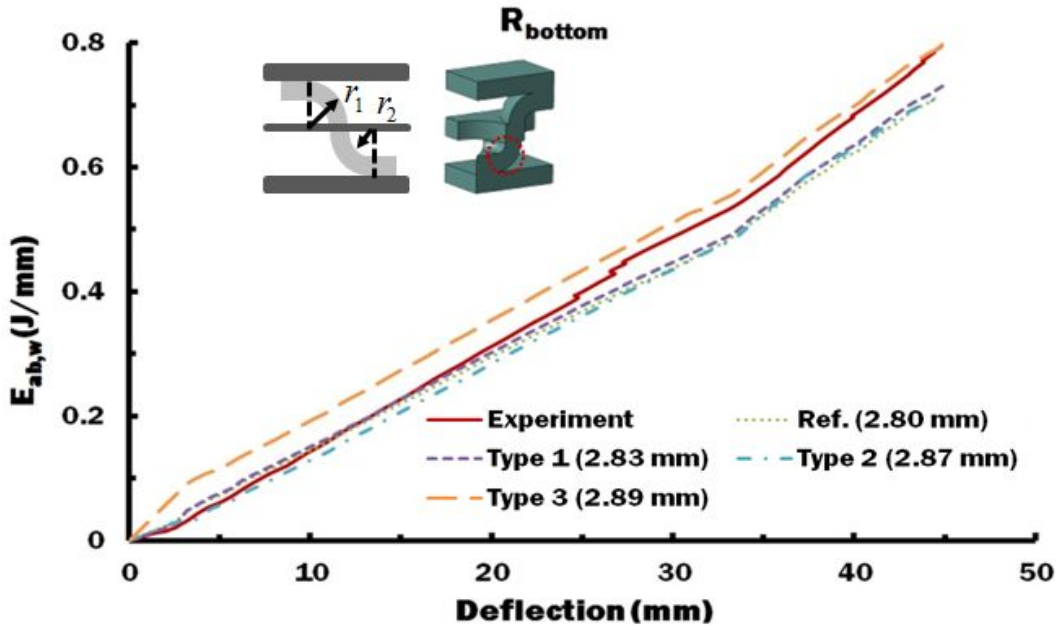
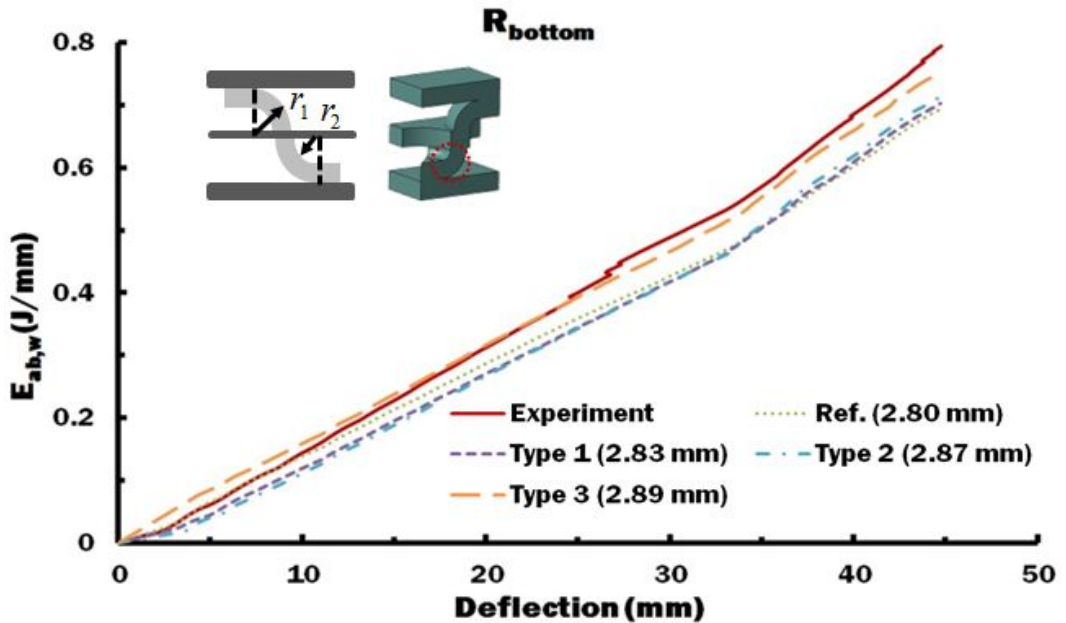


Fig. 23 Influence of thickness defects and radius imperfection modes on the force per width - deflection curves (Application region of the radius imperfection = bottom side)



(a) Mode A



(b) Mode B

Fig. 24 Effects of the thickness defects and the radius imperfection mode on the absorbed energy per width (Application region of the radius imperfection = bottom side)

Fig. 23 의 (a), (b) 는 하면 내부구조체 반경결함이 적용된 모드에 두께 결함이 적용된 모드로 유한요소해석결과로 얻어진 단위 폭 당 하중 - 변위 선도를 나타낸다. 반경 Mode A - B 는 모든 두께가 실험의 단위 폭 당 하중과 거의 유사하게 나타났다.

Fig. 24 의 (a), (b) 는 하면 내부구조체 반경결함이 적용된 모드에 두께 결함이 적용된 모드로 유한요소해석결과와 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도를 나타낸다. Mode A 의 Type 3 의 경우 실험의 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위선도 보다 높은 에너지흡수를 하는 것을 확인 할 수 있었다. (b) 의 Mode B 의 경우 Type 3 가 실험과 약 5 % 정도 낮게 에너지흡수를 하며 실험과 유사한 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도가 예측됨을 알 수 있었다.

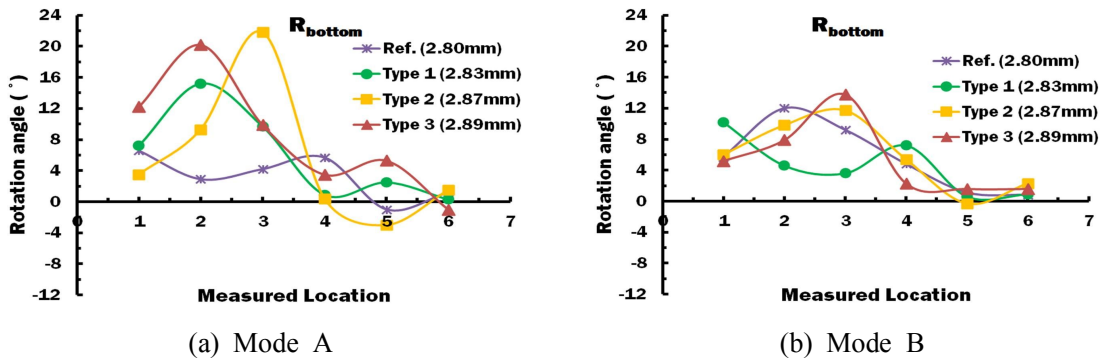


Fig. 25 Rotation angles of inner structures for the different measured locations (Application region of the radius imperfection = bottom side)

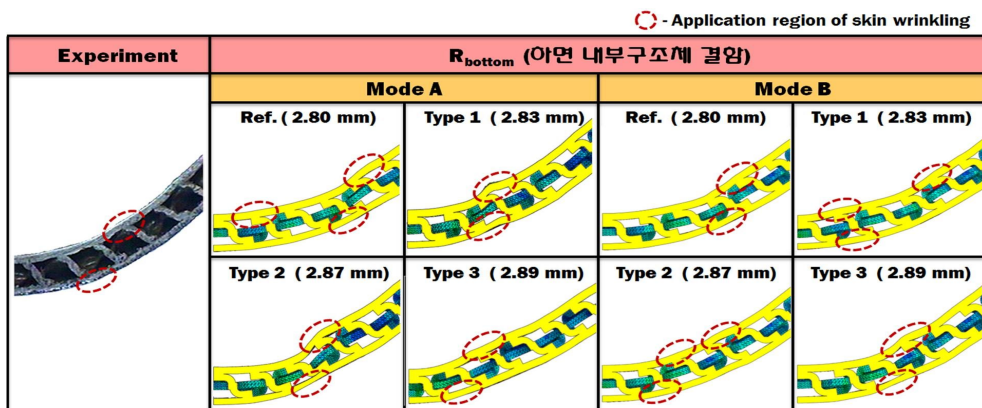


Fig. 26 Deformed shapes for thickness imperfection modes when the radius imperfection is applied to the bottom sheared dimples

Fig. 25 는 하면 내부구조체 결함이 적용된 두께결함별 회전각 선도이다. 하면 내부구조체 결함과 두께결함별 유한요소해석의 최종 형상에서 발생하는 외판의 국부주름 발생위치를 판단하는데 이용하였다.

Fig. 26 은 하면 내부구조체 반경결함의 두께결함별 최종 변위 형상과 실험결과 얻어진 시편의 변형형상을 나타낸다. 하면 내부구조체 반경결함이 고려된 두께결함별 최종 형상 또한 외판에 주름결함이 발생함을 알 수 있었으며, Fig. 25 를 이용하여 상부외판의 주름발생 위치를 판단하였다. 판재에 발생하는 주름 결함의 위치를 비교했을 때 상부외판의 Mode B 의 Type 3 의 경우가 가장 실험결과와 유사한 위치에서 발생했으나, 하판에 발생하는 판재의 주름 위치는 실제 실험 변형형상과 차이가 있음을 알 수 있었다.

4) 상하면 내부구조체 반경결함 모드 ($R_{upper} + R_{bottom}$) 의 두께 결함

상하면 내부구조체 반경결함 모드는 상하면에 접촉하는 반경에 결함이 적용된 경우로 측정된 판재의 두께를 적용하여 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속샌드위치 판재에 대해 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 27 과 Fig. 28 은 상하면 내부구조체 반경결함 모드에 두께결함이 적용된 모델에 대하여 3차원 유한요소해석을 수행한 결과로 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속샌드위치 판재의 단위 폭 당 하중 - 변위 선도 및 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도 이다.

Fig. 27 의 (a), (b) 는 상하면 내부구조체 반경결함이 적용된 모드에 두께 결함이 적용된 모드로 유한요소해석결과로 얻어진 단위 폭 당 하중 - 변위 선도를 나타낸다. 반경 Mode A 가 적용된 상하면 내부구조체 반경 결함의 두께 결함은 4 mm 이하에서 하중이 상승하는 부분에서 거의 유사한 하중 상승을 보이며, 처짐이 33 mm 이후에서도 실험과 유사한 패턴의 단위 폭 당 하중 - 변위 선도가 예측됨을 알 수 있었다. 반경 Mode B 에 상하면 내부구조체 반경결함과 두께결함이 적용된 경우 처짐 4 mm 이하 초기 하중 증가 부분과 처짐 33 mm 이후 단위 폭 당 하중 - 변위 선도는 다르게 예측됨을 알 수 있었다.

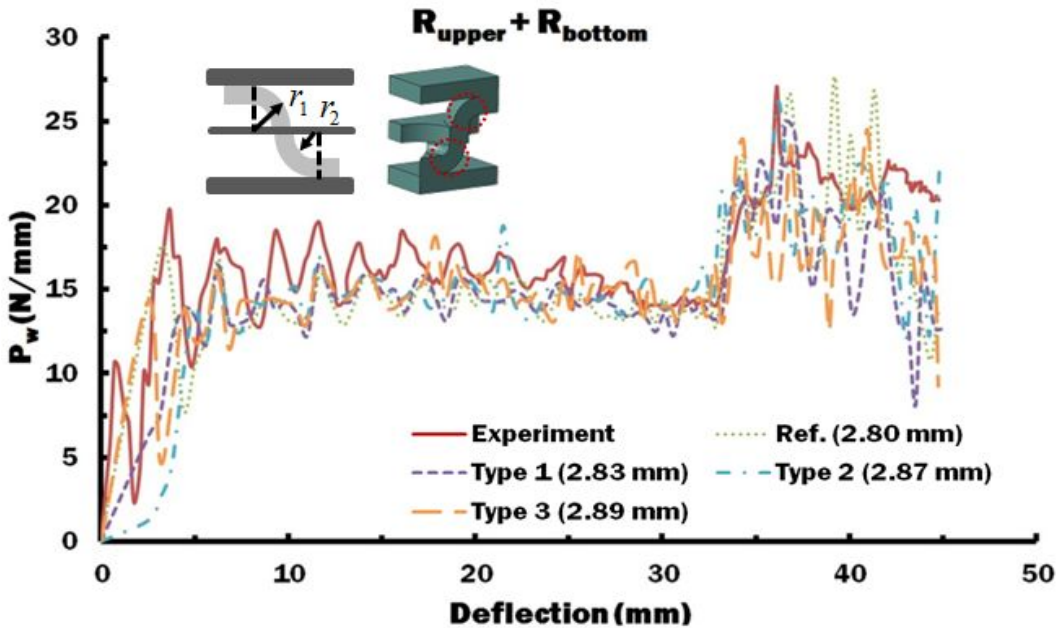
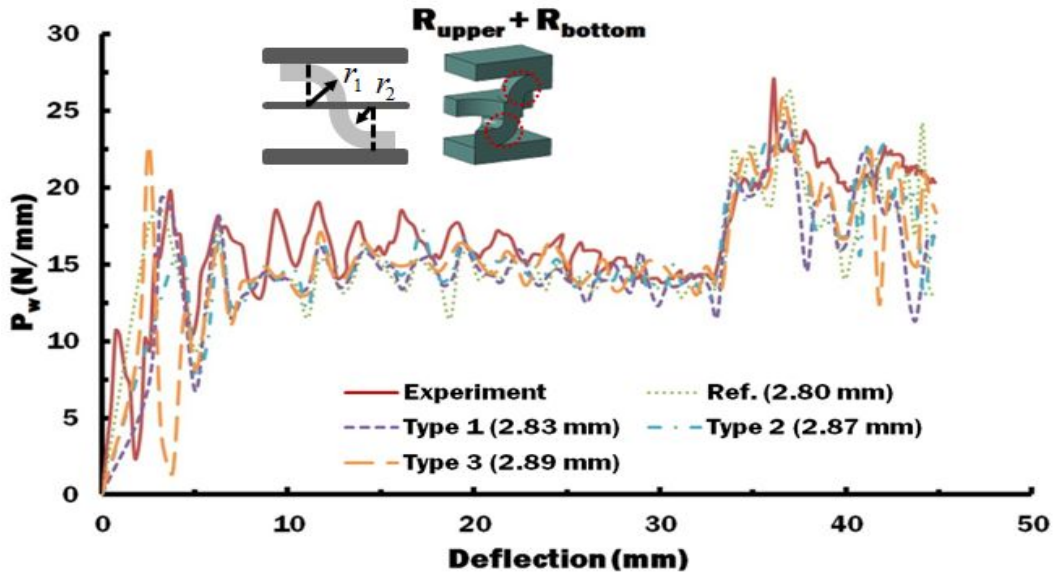
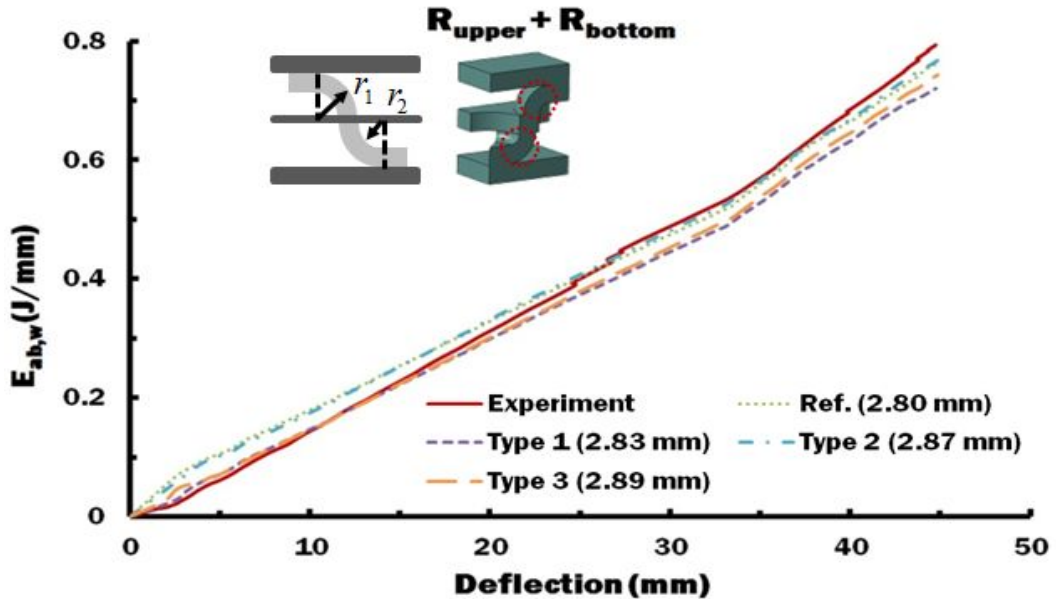
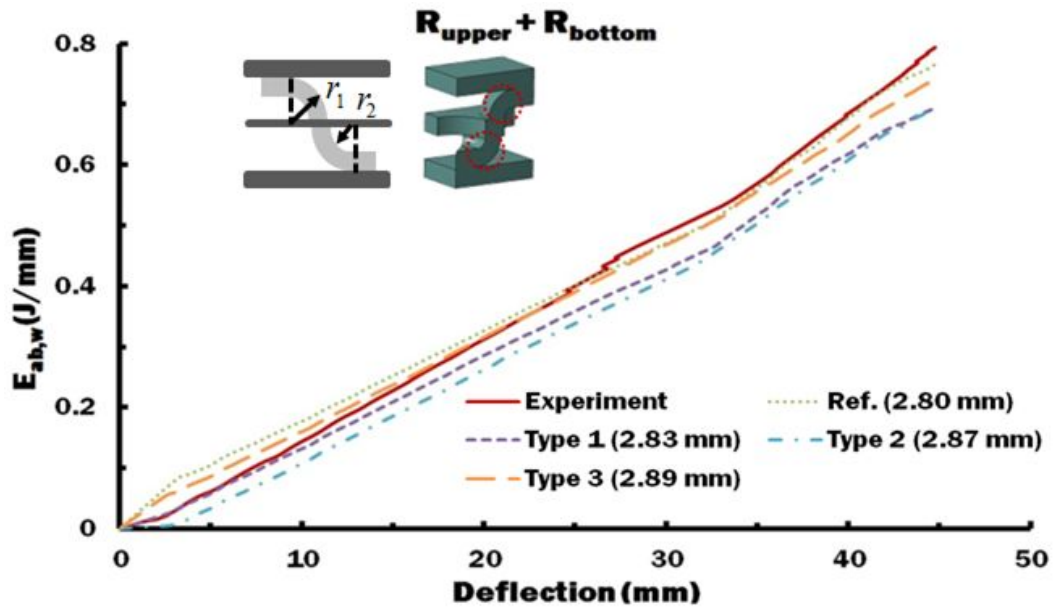


Fig. 27 Influence of thickness defects and radius imperfection modes on the force per width - deflection curves (Application region of the radius imperfection = upper and bottom sides)



(a) Mode A



(b) Mode B

Fig. 28 Effects of the thickness defects and the radius imperfection mode on the absorbed energy per width (Application region of the radius imperfection = upper and bottom sides)

Fig. 28 의 (a), (b) 는 하면 내부구조체 반경결함이 적용된 모드에 두께 결함이 적용된 모드로 유한요소해석결과의 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도를 나타낸다. Mode A 의 모든 Type 의 두께결함이 실험의 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도와 상당히 유사하게 예측됨을 확인 할 수 있었다. Mode B 의 경우는 Type 3 가 실험의 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도와 유사하게 예측됨을 알 수 있었다.

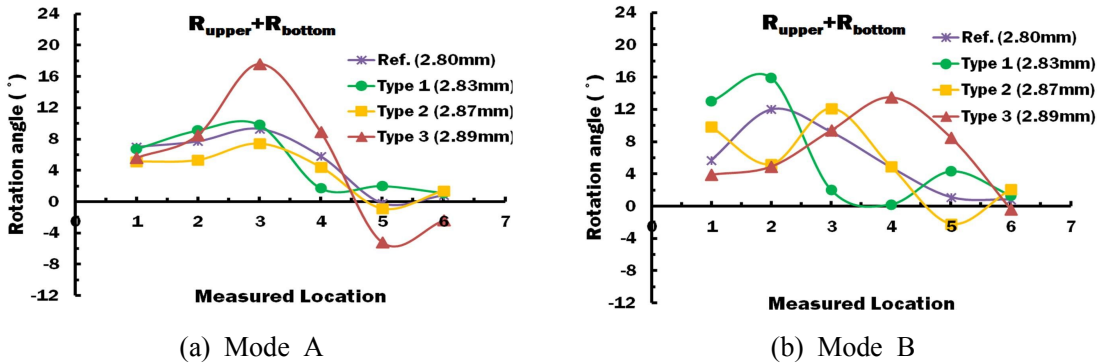


Fig. 29 Rotation angles of inner structures for the different measured locations (Application region of the radius imperfection = upper and bottom sides)

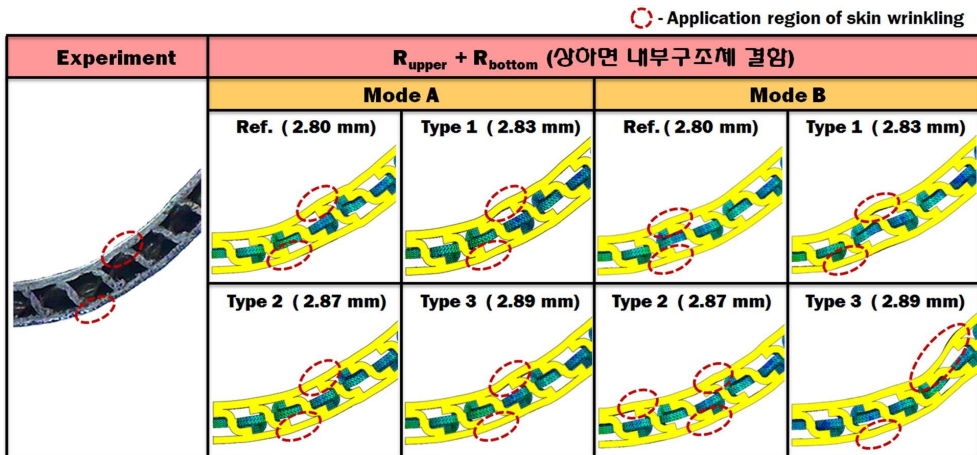


Fig. 30 Deformed shapes for thickness imperfection modes when the radius imperfection is applied to the upper and bottom sheared dimples

Fig. 29 는 상하면 내부구조체 결함이 적용된 두께결함별 회전각 선도이다. 상하면 내부구조체 결함과 두께결함별 유한요소해석의 최종 형상에서 발생하는 외판의 국부주

름 발생위치를 판단하는데 이용하였다.

Fig. 30 은 상하면 내부구조체 반경결합의 두께결합별 최종 변위 형상과 실험결과 얻어진 시편의 변형형상을 나타낸다. 상하면 내부구조체 반경결합을 가진 모든 타입의 변형형상은 실험의 변형형상과 같이 외판의 국부 주름이 발생함을 알 수 있었다. Fig. 29 을 이용한 국부 주름의 발생위치를 비교했을 때 Mode A 의 경우 모든 두께결합은 실험결과와 유사한 위치에서 발생했음을 알 수 있었다. 따라서, 단위 폭 당 하중 - 변위 선도 및 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도 측면에서 고려 했을 때, Mode A 에 상하면 내부구조체 반경결합이 고려된 두께 2.87 mm 가 가장 실험 결과와 유사하게 나옴을 확인 할 수 있었다.

4.2.2 절에서 단위 폭 당 하중 - 변위 선도 및 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도 측면에서 결과를 분석했을 때, 대부분의 결합 모드가 실험결과와 거의 유사한 패턴으로 예측됨을 확인 할 수 있었으며, 각각의 내부구조체 반경결합에 적용된 두께에 따라 변형형상이 다르게 예측됨을 확인 할 수 있었다. 따라서, 단위 폭 당 하중 - 변위 선도 및 단위 폭 당 흡수에너지 - 변위 선도 측면에서의 지배적인 모드를 분석하기에는 무리가 있으므로, 각각의 결합에 대한 최종 변형형상에서 발생하는 외판의 주름결합에 대해 회전각 선도를 이용하여 비교하였다. 그 결과, 반경 Mode A 에 상하면 내부구조체 반경결합에 두께결합이 적용된 해석이 실제 실험시편의 변형형상과 가장 유사한 위치에서 국부 주름 현상이 발생됨을 예측 할 수 있었다. 따라서 타당한 해석 결과를 도출 하기 위해서는 반경 Mode A 와 상하면 내부구조체 반경결합이 적용된 두께결합에 대해 고려해야함을 알 수 있었으며, 지배적인 결합 모드를 찾기 위해서는 최종 변형형상에 대한 정량적인 분석이 필요함을 알 수 있었다.

3. 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 갖는 초경량 금속 샌드위치 판재의 파손형상 분석 및 지배적인 결합 모드 도출

유한요소 프로그램을 이용한 3 차원 해석에 대해서 타당한 해석 결과를 도출하기 위해서는 실제 변형형상과 해석결과의 변형형상의 일치성이 가장 중요하다. 유한요소 해석에서는 절점 (Node) 간의 거리를 통해 응력과 변형률 등을 도출하기 때문에 변형형상이 일치하지 않는다면 충격 하중 및 충격흡수에너지가 일치 할지라도 정확한 해석을 수행했다고 할 수 없다. 따라서, 본 연구는 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를

가진 샌드위치 판재의 결함의 영향성을 분석하기 위해 낙하 실험으로 얻어진 변형형상과 유한요소해석을 통해 얻은 변형형상을 비교 하여 지배적인 결함 모드를 도출 하였다.

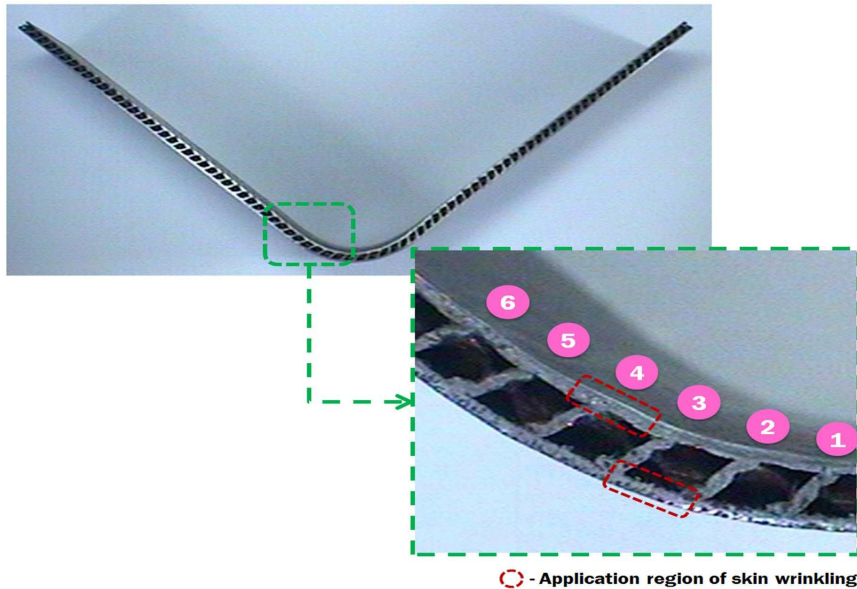


Fig. 31 Deformed shapes of specimen subjected to plane strain drop impact loading

Fig. 31 은 낙하 충격실험 후 시편의 변형형상이다. 변형형상에서 상면판재와 하면 판재에 국부주름이 관찰되었다. 상판과 하판 판재에 발생한 주름의 발생위치는 상판 국부주름은 중앙부로부터 4 번째 위치에서 발생하였고, 하판의 주름은 중앙부로부터 2 - 3 사이에서 주름이 발생함이 확인 되었다.

낙하실험 후 얻어진 변형형상과 유한요소해석결과를 통해 얻어진 변형형상은 실험의 처짐 44.80 mm 을 기준으로 변형형상을 비교 하였다. 4.2.1 절에서 4.2.2 절까지의 결과로부터 전단 반구형 내부구조체를 가진 샌드위치 판재의 충격특성에 가장 영향을 주는 모드를 반경 Mode A 의 상하면 내부구조체의 결함이 적용된 결함모드임을 알 수 있었다.

Fig. 32 는 낙하 충격실험 후 얻어진 변형형상과 유한요소해석을 통한 변형형상을 비교한 것으로 반경 Mode A 에 상하면 내부반경 결함이 적용된 모델을 비교 하였다. 유한요소해석을 통한 변형형상 비교결과 4 가지 두께 모두 실험 변형형상과 유사한 위

치에서 주름결함이 관찰되었다. 앞에서 언급한 것과 같이 유한요소해석결과가 타당한 결과인지 검증하기 위해서는 변형형상을 비교하여야 한다. 따라서, 정확한 변형형상을 비교하기 위하여 실험에서 관찰된 주름결함과 해석결과의 변형형상에서 판재에 발생하는 주름을 측정하여 지배적인 모드를 선정하였다.

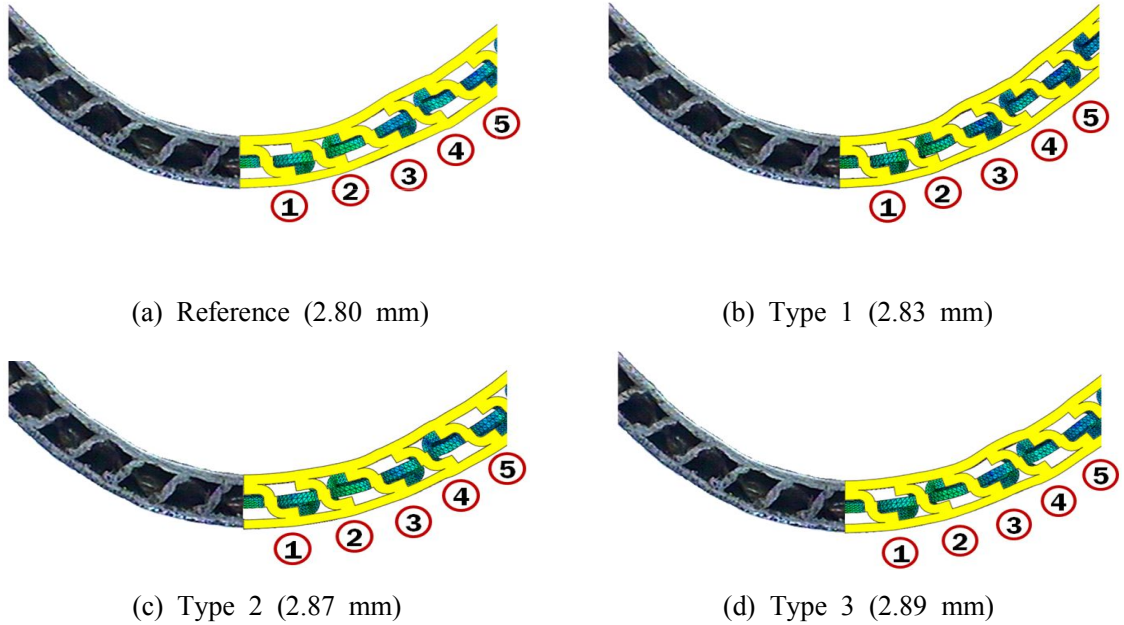


Fig. 32 Comparison of the deformed shapes of FE analysis with those of experiment for different thickness defects modes when the radius imperfection is applied to the upper and bottom sheared dimples

Fig. 33 은 외판에 발생하는 주름결함에 대한 측정 과정을 나타낸다. 각 결함모드의 유한요소해석을 통해 얻어진 최종 변형형상에서 외판에 발생하는 주름 위치를 파악한 후 상용프로그램인 ABAQUS V6.11을 이용하여 얻어진 변형형상에 대해 각점의 절점(Node) 정보를 획득하였다. 획득한 노드를 이용하여 선도를 작성하였으며 주름발생 부를 측정하기위해 주름발생이 없을 시 생기는 노드데이터 곡선에 대한 추세곡선을 도출하였다. 도출된 추세곡선의 곡선 함수에 대한 접선과 법선을 계산하여 최종 변형형상에서 발생하는 최대 주름 발생 거리를 측정하였다.

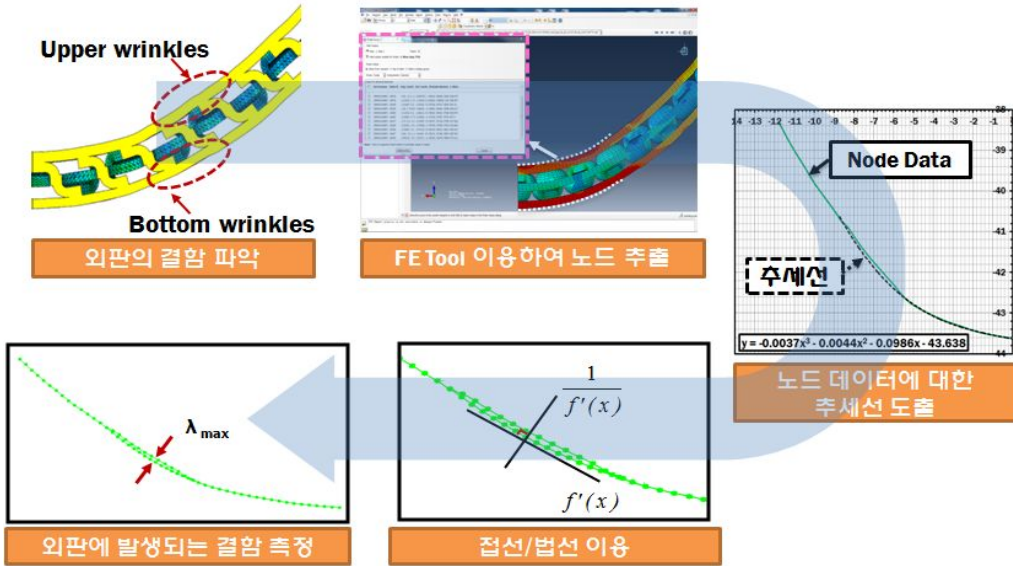


Fig. 33 Measurement procedures of skin amplitude of skin wrinkling

Table 6 은 평면변형 경계조건에서 수행된 실험시편의 최종변형형상에서 발생하는 주름결합과 반경결합과 두께결합이 고려하여 유한요소해석을 수행하여 얻어진 최종 변형형상에서 발생된 주름결합을 측정된 값이다.

Fig. 34 는 Table 6 의 측정 데이터를 이용하여 실제 시편 외판에 발생하는 주름결합과 유한요소해석을 통해 얻어진 변형형상에서 발생된 주름 결합 치수를 상대적으로 계산하여 그래프로 나타낸 것이다. 외판의 주름에 대한 상대비는 주름결합에 대한 크기에 대해서만 고려해서 산출된 값으로 외판에 발생하는 주름의 위치는 고려되지 않았다.

지배적인 결함 모드를 선정하기 위해서는 실제실험 시편의 변형형상과 가장 유사한 변형형상에 대해 선정해야한다. 따라서, 4.2.2 의 각 결함모드에 대한 최종변형형상의 분석 결과를 통해 실험 변형형상과 가장 유사하게 나타나는 반경치수 Mode A ($r_1=0.775$, $r_2=0.280$) 와 상하면 내부구조체 결함을 가진 두께결합에 대해 고려하여 분석하였다.

위 결과들을 통해 전단 변형 가능한 초경량 금속 샌드위치 판재의 지배적인 결함 모드는 실제시편의 외판에 발생하는 국부주름 위치와 크기가 가장 유사한 판재인 두께 2.87 mm 의 반경 Mode A 와 상하면 내부구조체 결함을 갖는 모드임을 도출할 수 있었다.

Table 6 Amplitude of skin wrinkling

Mode	Model	Sheet (mm)	Experiment (mm)	Reference (2.80 mm)	Type 1 (2.83 mm)	Type 2 (2.87 mm)	Type 3 (2.89 mm)
	Perfect model	Upper skin	0.12	0.03, 0.04	0.02, 0.12	0.08, 0.17	0.16
		Bottom skin	0.07	0.03	0.09	0.05	0.03
Mode A	R_{upper}	Upper skin	0.12	0.10	0.16	0.04, 0.12	0.03, 0.10
		Bottom skin	0.07	0.04	0.14	0.06	0.08
	R_{bottom}	Upper skin	0.12	0.17	0.39	0.33	0.10
		Bottom skin	0.07	0.06	0.10	0.16	0.08
	$R_{upper} + R_{bottom}$	Upper skin	0.12	0.15	0.28	0.11	0.22
		Bottom skin	0.07	0.08	0.07	0.08	0.10
Mode B	R_{upper}	Upper skin	0.12	0.04, 0.11	0.05, 0.10	0.37	0.02, 0.17
		Bottom skin	0.07	0.09	0.08	0.16	0.04
	R_{bottom}	Upper skin	0.12	0.31	0.08, 0.16	0.03, 0.11	0.20
		Bottom skin	0.07	0.16	0.01	0.06	0.09
	$R_{upper} + R_{bottom}$	Upper skin	0.12	0.11	0.18	0.05, 0.05	0.29
		Bottom skin	0.07	0.10	0.08	0.07	0.09

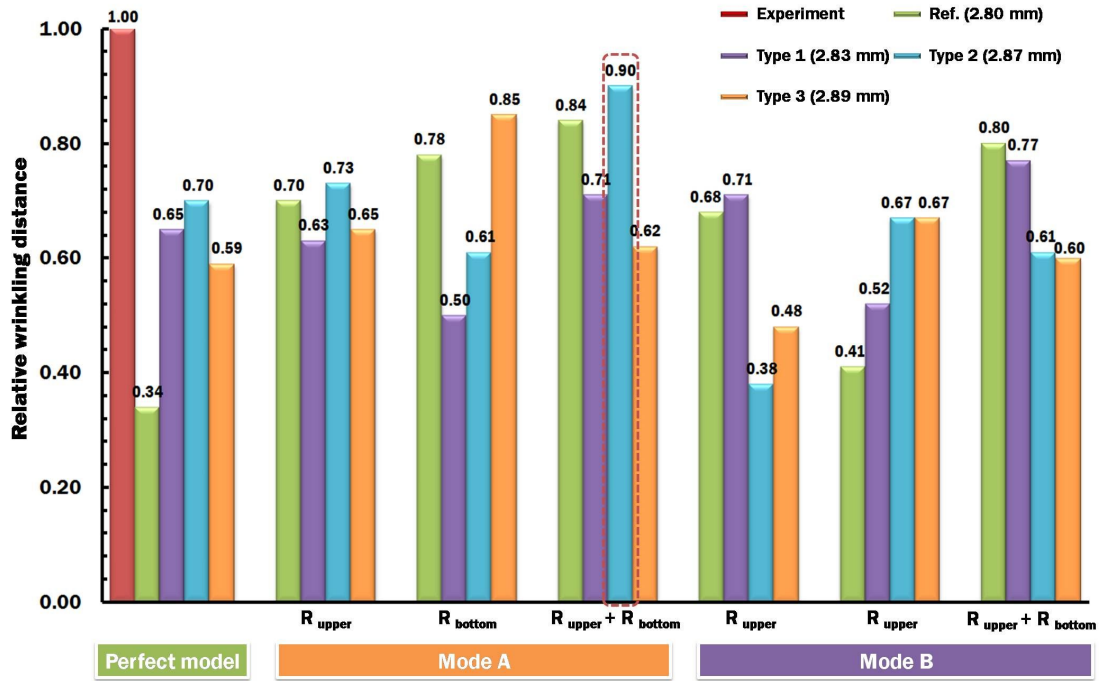


Fig. 34 Relative amplitudes of skin wrinkling for different thickness defect modes

제 5 장 무차원 충격변수와 판재 파손 및 에너지 흡수 특성 상관관계 분석/고찰

제 1 절 충격변수 및 적용 범위 선정

본 연구에서는 시편 제작 시 발생될 수 있는 내부구조체 및 두께의 결합 유형 및 형상에 대하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 이때의 충격거동 및 변형 형상에 대한 비교/분석을 하였다. 비교/분석을 통하여 실제 낙하실험에 사용되었던 시편의 변형 형상과 실험 결과와 가장 유사한 해석 결과를 나타내는 반경 Mode A 와 두께 2.87 mm 의 상하부 내부구조체 반경결합이 적용된 모드를 지배적인 결합 모드로 선정하였다.

선정된 모드에 대하여 파손/에너지 흡수 특성 상관관계 분석을 위하여 특정 충격헤드 직경, 충격헤드 질량 및 충격 속도 범위를 선정한 후 유한요소해석을 수행하였다. Table 7 은 충격 헤드 직경, 충격헤드 질량 및 충격 속도 범위를 나타낸다.

Table 7 Analysis condition for the development of failure map

D (mm)	m (kg)	V (m/s)
15, 30, 45	0.25 - 11.10	0.99 - 2.54

충격 해석은 앞서 해석과 동일하게 평면 변형 경계조건이며, 충격 헤드의 하중이 부가 된 후 충격헤드가 리바운드 (Rebound) 되는 시점까지 해석을 수행 하였다.

본 연구에서는 지배적인 모델에 대한 파손 지도를 작성하기 위해 0.25 kg ~ 11.10 kg 의 6 가지 충격 헤드 무게에 대하여 50 mm, 100 mm, 200 mm 및 400 mm 의 충격 높이에 따른 충격 해석을 통하여 결과의 종합적인 비교/분석을 통해 연구하였다.

Table 8 Applied impact energies for different impact masses and heights

무 게 (kg) 높이 (mm)	0.25	0.5	2.775	5.55	8.325	11.10
50	0.12	0.24	1.36	2.72	4.08	5.44
100	0.24	0.49	2.72	5.44	8.16	10.88
200	0.49	0.98	5.44	10.88	16.33	21.76
400	0.98	1.96	10.88	21.76	32.66	43.52

Table 8 는 각 해석 모델에 대하여 충격헤드로부터 얻어지는 충격 입력에너지 (E_{in}) 를 나타낸 것이다. 충격 입력에너지는 충격실험의 높이를 위치에너지로 계산 한 것과 같으며, (1) 과 같은 식을 이용하여 도출하였다. 또한 낙하 시 발생하는 마찰력이나 충격 시 발생하는 소리 등 손실되는 에너지는 무시하였다.

$$E = mgh \quad (1)$$

해석 시 필요한 속도를 구하기 위하여 식 (2) 를 이용하여 산출 하였다.

$$V = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

식 (1) 과 (2) 에서 m , g , h 는 각각 충격헤드 질량, 중력가속도, 충격 높이를 나타낸 것이다.

제 2 절 무차원 충격변수에 따른 샌드위치 판재의 파손 및 충격에너지 흡수특성 분석

1. 무차원 충격 변수 및 무차원 에너지

내부구조체 및 용접부의 초기 결함에 대한 기초 조사 및 선행 연구 결과를 이용하여 무차원 충격 변수 및 적용 범위를 선정하였다.²⁴⁻²⁵⁾ 무차원 충격 변수는 무차원 충격무게 (Φ), 무차원 충격 속도 (Π), 무차원 충격헤드 반경 (Γ) 으로 선정하였으며, 각 무차원 변수에 대한 정의는 다음과 같다.

$$\Phi = \frac{M}{\rho H^2 b} \quad (3)$$

식 (3) 에서 M , ρ , H 및 b 는 각각 충격헤드의 무게, 샌드위치 판재의 밀도, 샌드위치 판재의 두께 및 단위 셀을 가진 샌드위치 판재의 폭을 나타낸 것이다.

$$\Pi = \frac{V}{\sqrt{\frac{\sigma_y}{\rho}}} \quad (4)$$

식 (4) 에서 V 와 σ_y 는 각각 충격 속도와 재료의 동적 항복 강도를 나타낸 것이다.

$$\Gamma = \frac{R}{L} \quad (5)$$

식 (5) 에서 R 과 L 은 각각 충격헤드 충격부 반경과 다이의 지지점간 거리 (유효 길이) 를 나타낸 것이다.

Table 9 Dimension and density of the analysis model for the failure map

b (mm)	H (mm)	L (mm)	ρ (kg/m ³)
37.65	2.87	120	7,850

Table 10 Dynamic yield strength for different strain rate

변형율 속도(Sec ⁻¹)	0.0	0.1	1.0	3.0	10	30	100	200	500	1000
σ_y (MPa)	414	444.2	465.8	478.2	493.5	509.2	528.7	541.1	559	573.8

Table 9 는 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가지는 초경량 금속 샌드위치 판재의 치수 및 물성을 나타내며, Table 10 은 외판의 동적항복강도를 나타낸다.

Table 11 Analysis ranges of non-dimensional parameters

Φ	Π	Γ
102.69 - 4,559.58	4.14×10^{-3} - 11.90×10^{-3}	0.125, 0.250, 0.375

Table 11 은 식 (3)~(5) 을 이용하여 환산된 유한요소해석을 위한 무차원 변수들의 범위이다.

에너지 흡수 특성 분석을 위하여 무차원 충격에너지와 무차원 흡수에너지 식은 다음 (6), (7) 과 같다.²⁴⁻²⁵⁾

$$\Psi = \frac{MV^2}{\sigma_y H^2 b} \quad (6)$$

$$X = \frac{E_{ab, \max}}{\sigma_y H^2 b} \quad (7)$$

여기서, $E_{ab, \max}$ 는 최대흡수에너지이다.

2. 변형형상 분석 및 파손모드

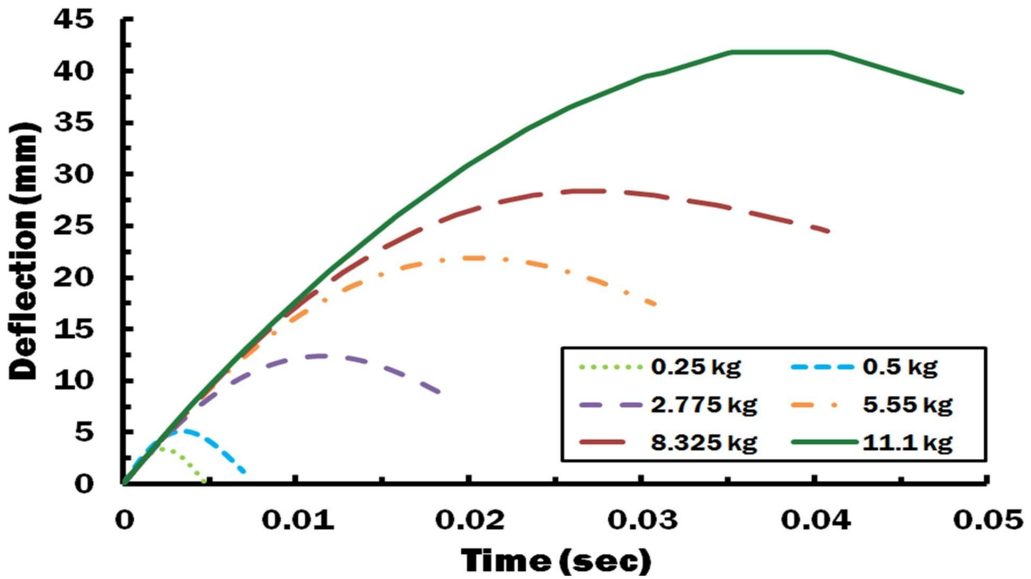


Fig. 35 Deflection - time curves for different impact masses

무차원 충격변수들의 조합을 통해 유한요소해석을 수행하였다. 해석수행시간은 충격헤드와 시편이 분리되는 리바운드 (Rebound) 시간 까지 수행하여 시편의 잔류변형에 대해 분석 하였다.

Fig. 35 는 충격헤드 무게별 변위 - 시간 선도를 나타낸다. 각 무게의 변위 - 시간 선도를 보면 무게가 증가 할수록 변위가 증가함을 알 수 있다. 또한 최대 변위까지 증가한 이후 시간이 지날 수 록 변위가 감소하는 것을 알 수 있는데, 이러한 이유는 시간이 지남에 따라 시편에 가해지는 하중이 감소되면서 전단변형이 가능한 초경량 금속 샌드위치 판재의 내부에서 변형에 저항하려는 복원력, 즉 스프링 백 (Spring back) 현상이 발생되기 때문으로 사료된다.

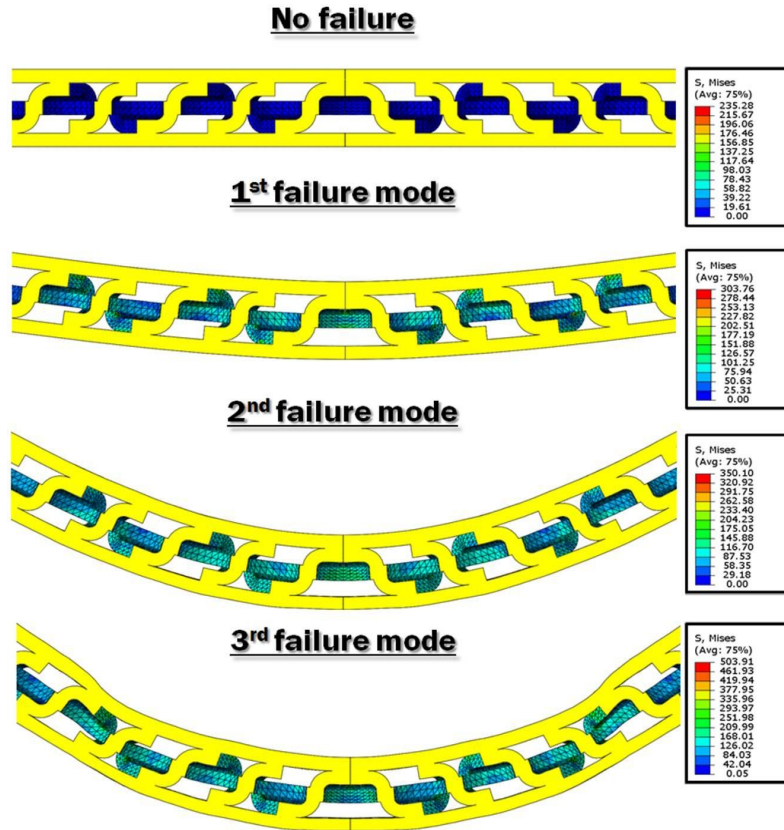
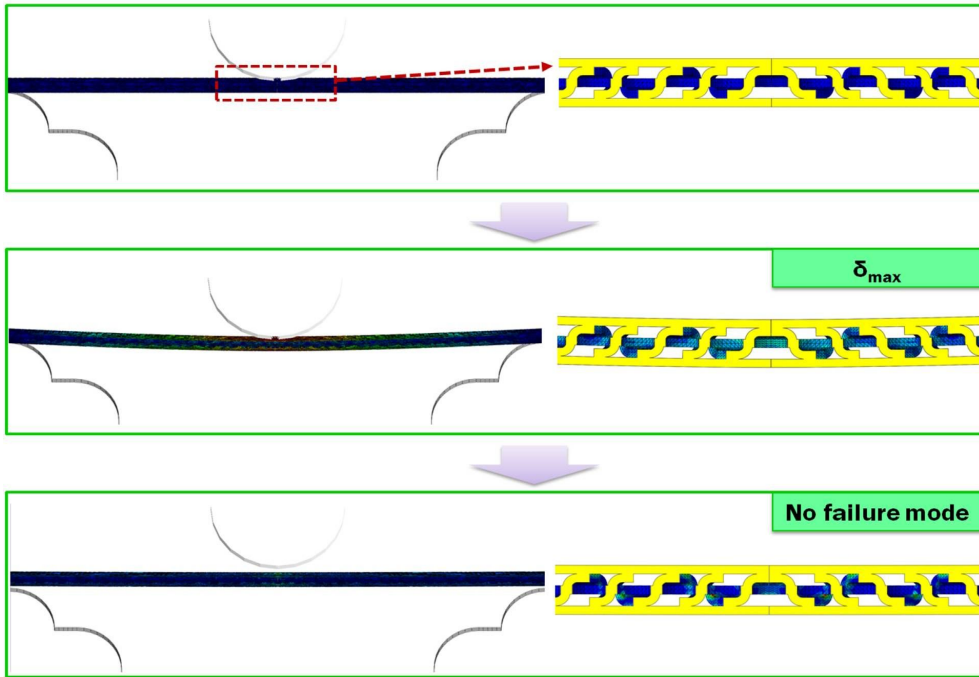
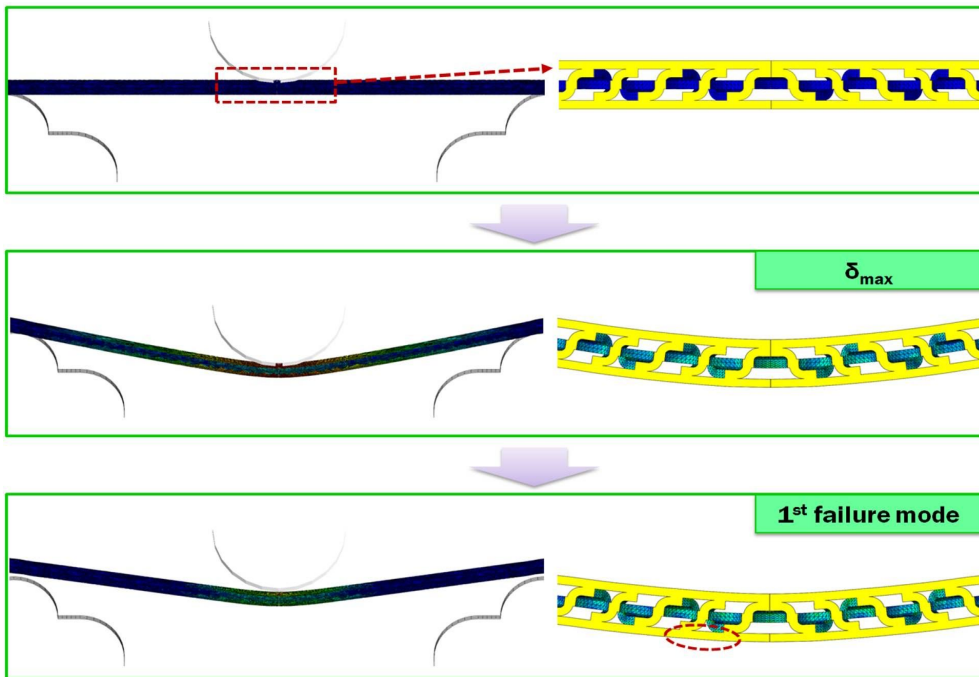


Fig. 36 Failure modes of sandwich panel with sheared dimple inner structures

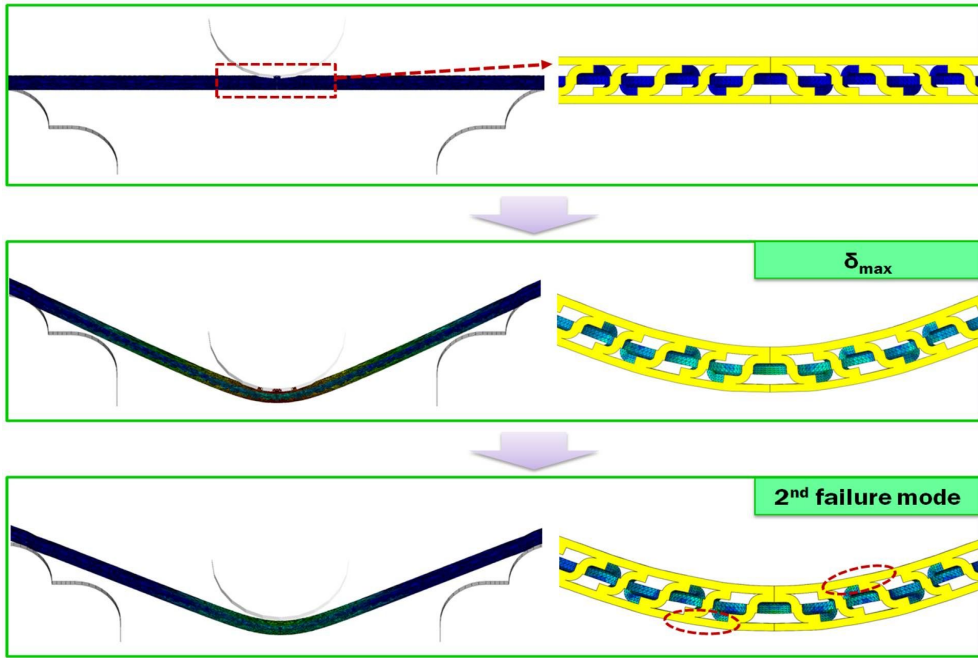
무차원 충격변수들의 통한 유한요소해석을 수행한 후 전단 변형 반구형 샌드위치 판재의 잔류변형이 나타나는 최종 변형 형상을 분석하였다. 그 결과 Fig. 36 과 같이 3 가지 파손 모드가 발생함을 알 수 있었다. 낮은 충격에너지 영역에서의 파손모드는 첫 번째 파손모드 (1st failure mode) 가 발생하는데 하부 외판 (Bottom skin) 의 영구 주름 이 발생하는 것을 알 수 있었다. 첫 번째 파손 모드보다 충격에너지를 증가시키는 경 우 두 번째 파손모드 (2nd failure mode) 가 발생되는데 하부 외판 (Bottom skin) 의 영구 주름이 발생되면서 내부구조체의 회전반경을 증가시켜 상부 외판 (Upper skin) 의 영구 주름을 동시에 발생 하는 것을 알 수 있었다. 세 번째 파손모드 (3rd failure mode) 의 경우 2 차 파손모드가 발생하는 최대 충격에너지보다 그 이상의 충격에너지가 가해졌 을 때 나타나는 파손 모드로 상부 외판 (Upper skin) 과 하부 외판 (Bottom skin) 의 영 구 주름 발생과 내부구조체가 동시에 붕괴되며, 충격헤드의 리바운드 후에도 샌드위치 판재의 내부구조체와 상하부 외판에 주름이 발생하는 잔류 변형이 나타났다.



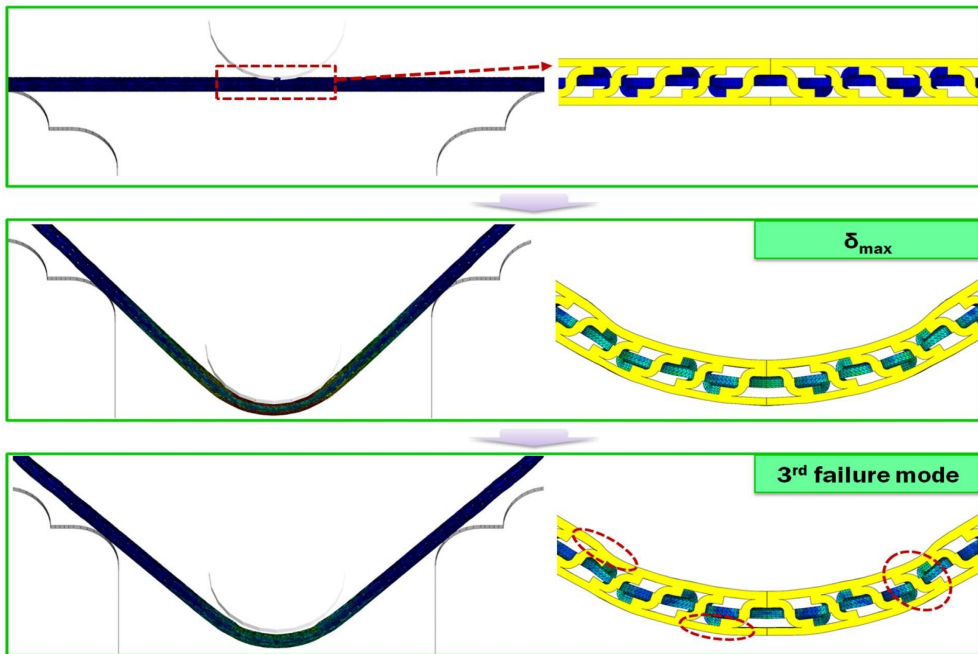
(a) No failure mode



(b) 1st failure mode



(c) 2nd failure mode



(d) 3rd failure mode

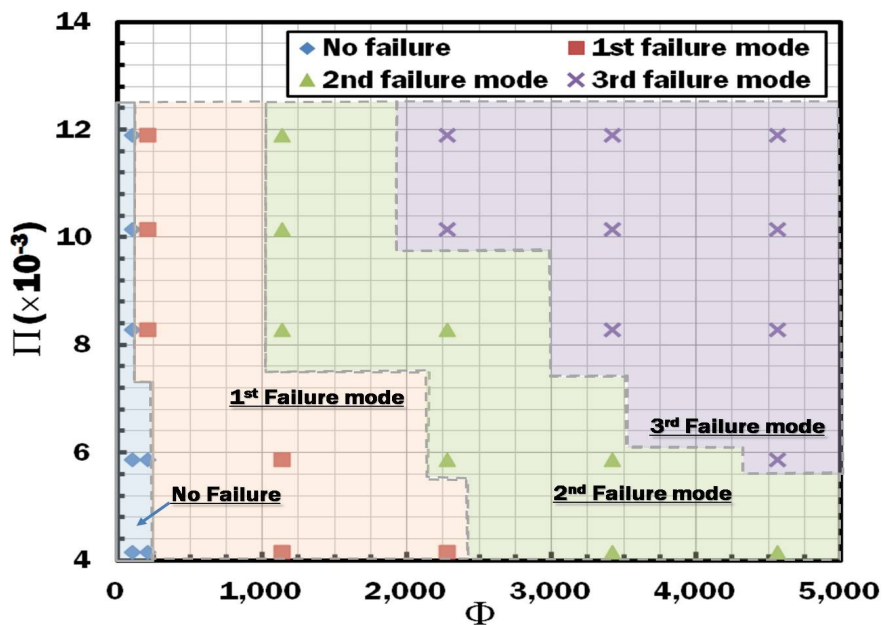
Fig. 37 Deformation shapes of sandwich panel for different failure modes

Fig. 37 은 각각의 파손모드에 따른 변형 과정을 나타낸다. 모든 파손모드의 시편은 최대변위까지 변형한 후 스프링백 (spring back) 현상으로 어느 정도 회복하는 모습을 보였다. (a) 의 무파손모드 (No failure mode) 의 경우 충격하중을 받았을 때 최대변위까지 변형 한 후에 펀치와 시편이 분리된 이후 잔류변형이 남지 않고 최초의 충격 전 형상으로 회복되는 것을 확인할 수 있다. (b) 의 첫 번째 파손모드 (1st failure mode) 의 경우 최대변형에서 생기는 하부외판의 주름이 리바운드 후에도 잔류변형이 남아 있음을 확인 할 수 있었다. (c) 의 두 번째 파손모드 (2nd failure mode) 는 최대변위에서 상하부의 외판에 주름이 발생하며 펀치와 시편이 떨어지는 리바운드 발생이후에도 잔류 변형이 남아 있어 상하부 외판의 결함을 확인할 수 있었다. (d) 세 번째 파손모드 (3rd failure mode) 의 경우 충격헤드와 시편과의 1 차 충돌 후 변형이 진행된 후 최대 변위에서는 충격지지대와 2 차 충돌이 일어나면서 변형이 일어나는데, 이때 하중이 급격히 증가하면서 상하부 외판과 내부구조체의 붕괴로 인하여 펀치와 분리되는 리바운드 후에도 잔류변형이 남아 있음을 확인할 수 있었다.

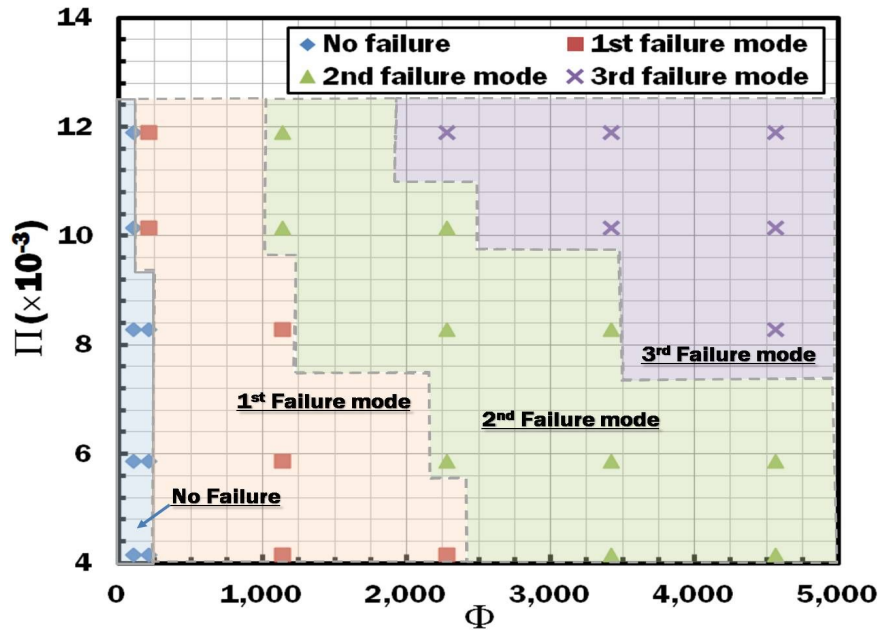
제 6 장 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 파손지도 및 무차원 충격에너지 - 무차원 흡수에너지 선도 작성

제 1 절 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치판재의 파손지도 작성

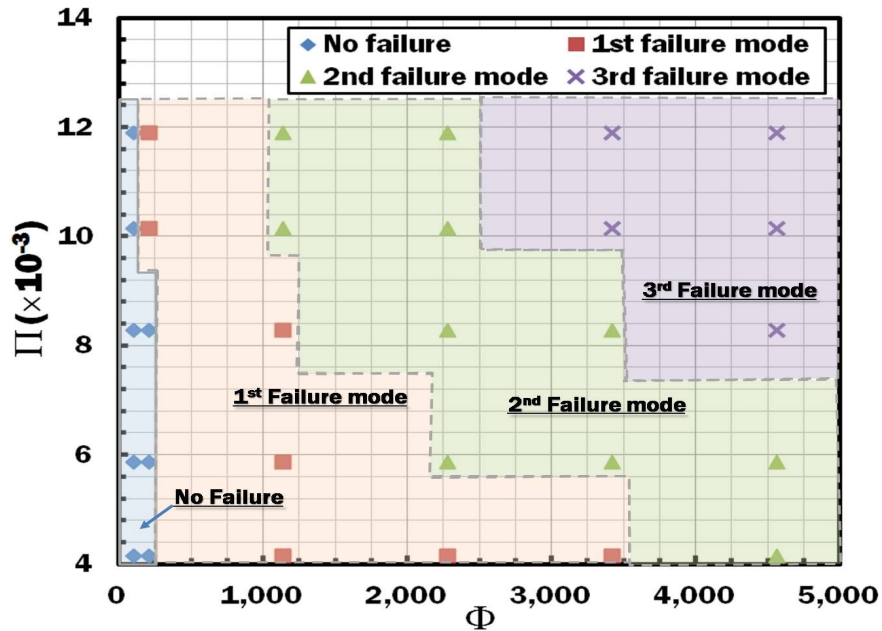
전단 변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치판재에 대해 충격헤드 직경 15, 30, 45 mm 에 대해 충격 직경별 충격 속도와 충격 질량의 상관관계를 분석 하기 위하여 식 (3) ~ (5) 식을 이용하여 각각의 무차원 변수를 구하였다. 계산된 무차원 변수에 대해 무차원 충격직경별 무차원 충격속도와 무차원 충격질량의 조합들에 대해 영구변형 형상에 따른 파손모드를 분류하여 Fig. 38 과 같은 파손지도를 작성 하였다.



(a) $\Gamma = 0.125$



(b) $\Gamma = 0.250$



(c) $\Gamma = 0.375$

Fig. 38 Failure maps of sandwich panel with sheared dimple inner structures for different normalized radii of the impact head

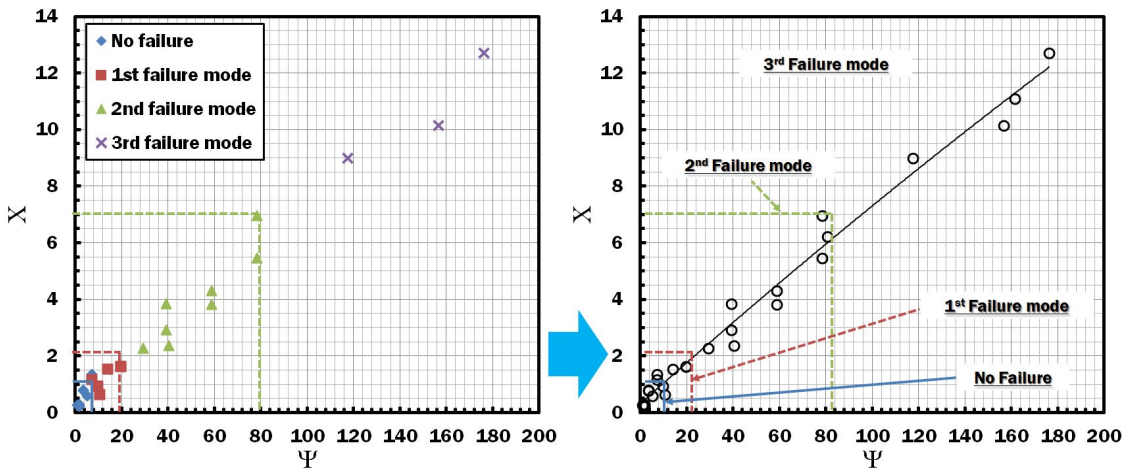
충격직경에 따른 파손지도를 비교 했을 때, (a) 의 경우 무차원 충격직경이 가장 낮은 경우로 무파손 모드의 영역은 다른 충격직경 보다 적게 나타났으며, 첫 번째 파손 모드 (1st Failure mode) 의 영역과 두 번째 파손모드 (2nd Failure mode) 또한 다른 영역 보다 적게 발생하는 반면에, 세 번째 파손모드 (3rd Failure mode) 의 경우의 영역은 크게 발생함을 알 수 있었다. 무차원 충격직경이 증가하는 (b), (c) 의 경우와 (a) 의 경우 비해, 각각의 파손모드에 대한 임계영역이 증가함을 확인 할 수 있었으며, 무차원 충격 직경이 가장 큰 (c) 의 경우가 상하면 외판과 내부구조체가 파손되는 세 번째 파손모드 (3rd Failure mode) 의 영역이 적어짐을 확인 할 수 있었다.

각각의 직경에 대한 파손모드 영역에 대한 비교를 했을 때, 충격헤드 직경이 작을수록 파손모드에 따른 무차원 충격속도와 무차원 충격질량에 대한 임계 영역이 낮아지며 파손모드의 전환이 빠르게 이리지며 파손이 많이 발생됨을 알 수 있었다.

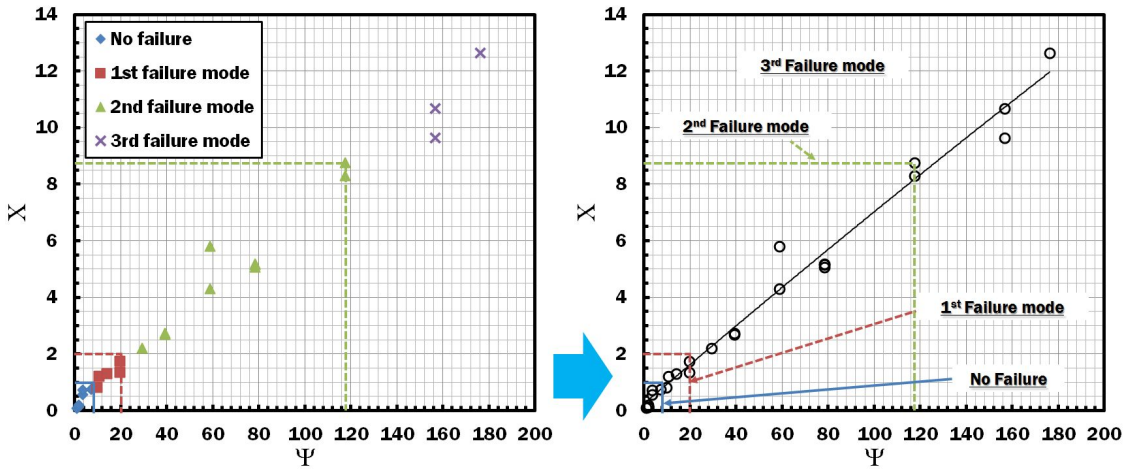
제 2 절 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 무차원 흡수에너지 - 무차원 충격에너지 선도 작성

전단변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속샌드위치 판재의 무차원 충격변수 조합에 따른 유한요소해석 결과에 대하여 식 (6), (7) 을 이용하여 무차원 흡수에너지와 무차원 충격에너지를 도출하였다. 도출된 계산 결과를 이용하여 무차원 충격에너지 - 무차원 흡수에너지 선도를 각각의 무차원 충격헤드 직경별로 분류하여 Fig. 39 와 같이 작성하여, 무차원 충격헤드 직경별 무차원 흡수에너지와 무차원 충격에너지의 상관관계를 비교하였다.

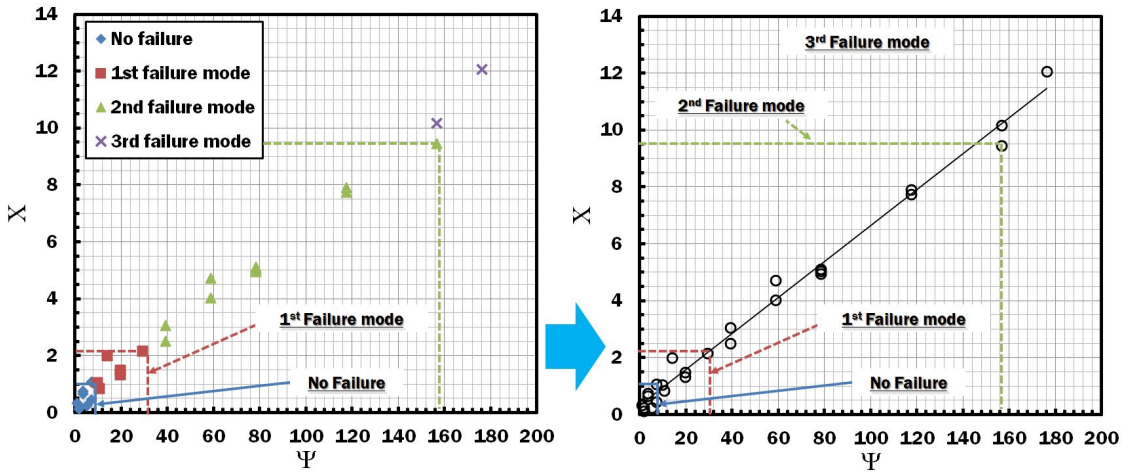
무차원 직경별 무차원 흡수에너지 - 무차원 흡수에너지 선도 비교 했을 때, 무차원 충격헤드 직경이 15 mm 인 (a) 의 경우 무파손모드 (No failure) 에서 세 번째 파손모드 (3rd failure mode) 까지 발생하는 파손모드에 대한 각각의 임계 무차원 충격에너지 영역이 낮아지며, 충격헤드 직경이 30 mm, 45 mm 로 증가 될수록 각 파손모드에 대한 임계 무차원 충격에너지 영역이 증가함을 확인 할 수 있었다. 이러한 이유는 충격헤드가 작을수록 판재의 국부변형을 많이 발생시켜 판재의 파손이 더 많이 발생되도록 유도하기 때문으로 사료 된다.



(a) $\Gamma = 0.125$



(b) $\Gamma = 0.250$



(c) $\Gamma = 0.375$

Fig. 39 Normalized impact energy - normalized absorbed energy curves for different normalized radii of the impact head

제 7 장 결론 및 향후과제

본 연구는 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속샌드위치 판재에 대해서 내부구조체의 반경 결함 및 두께결함을 적용하여 결함이 샌드위치 판재에 미치는 내충격 특성 및 충격거동에 대해 평면변형형 조건에서 낙하실험과 유한요소해석을 수행 하여 비교/분석 하였다. 그 결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 초경량 금속샌드위치 판재 제작 시 발생할 수 있는 초기 결함에는 내부구조체의 반경 결함과 시편의 두께결함이 존재함을 알 수 있었다. 결함이 발생하는 내부구조체의 반경 및 시편의 두께를 측정하여 각각의 모드로 분류하였으며 3차원 구조모델을 설계 한 후 평면변형형 조건에서 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통해 각각의 결함 모드에 대한 변형형상과 충격특성을 분석할 수 있었다.

둘째, 내부구조체의 반경결함이 발생하는 위치에 따라 분류된 상면 내부구조체의 반경결함 (R_{upper}), 하면 내부구조체의 반경결함 (R_{bottom}) 및 상하면 내부구조체의 반경결함 ($R_{upper}+R_{bottom}$) 모드에 대해 시편의 평균 두께에 적용하여 비교/분석 하였다. 그 결과 시편 외판에 발생하는 주름결함의 경우 상하부 내부구조체의 반경결함 ($R_{upper}+R_{bottom}$) 이 있는 경우 가장 빠르게 발생하며 반경치수가 Mode B ($r_1=0.878$, $r_2=0.389$) 로 적용된 경우가 외판에 주름이 더 빠르게 발생함을 알 수 있었다.

셋째, 전단변형이 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속 샌드위치 판재에 발생하는 두께 결함은 각각의 반경결함 모드에 대해 적용하여 비교/분석을 통하여 반경치수 Mode A ($r_1=0.775$, $r_2=0.280$) 가 적용된 상하면 내부구조체 반경결함이 있는 경우가 모든 두께결함에 대해 실험형상과 유사한 위치에서 국부주름이 발생함을 확인 할 수 있었다. 따라서, 충격거동을 잘묘사하기 위해서는 반경 Mode A ($r_1=0.775$, $r_2=0.280$) 의 두께 2.87 mm 의 경우에 대해 고려해야함을 알 수 있었다.

넷째, 유한요소해석의 경우 절점간의 거리에서 응력과 변형이 계산되어지기 때문에 변형형상에 대한 정량적인 분석이 요구되어진다. 따라서, 지배적인 결함 모드를 도출하기 위해 실험시편에서 발생하는 외판의 주름과 유한요소해석 결과에서 얻어진 변형형상에서 외판의 주름을 측정하여 비교하였으며, 그 결과 두께 2.87 mm 에 반경 Mode A 와 상하면 내부구조체 반경결함이 적용된 모드가 지배적인 결함 모드로 선정 할 수 있었다.

다섯째, 지배적인 결함 모드에 대해 충격헤드 직경, 충격헤드 질량 및 충격속도 범위를 선정하여 유한요소해석을 수행하였으며 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속 샌드위치 판재의 파손 모드는 충격헤드와 시편이 분리되는 리바운드 (Rebound) 후에 잔류변형하지 않고 초기 형상으로 돌아가는 무파손모드 (No failure mode) 와 리바운드후에 하면 외판의 잔류변형이 생기는 경우 (1st failure mode), 상하면 외판 모두 잔류변형이 생기는 경우 (2nd failure mode) 와 상하면 외판과 내부구조체의 파손이 동시 (3rd failure mode) 에 발생하는 경우, 총 3 가지 파손 모드가 발생함을 알 수 있었다.

여섯째, 지배적인 결함모드에 대해 무차원 충격변수별 유한요소 해석을 수행하여, 그 결과를 이용하여 파손 지도 (Failure Map) 및 무차원 충격에너지-무차원 흡수에너지 선도 (N-N) 를 작성하여 전단변형 가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속 샌드위치 판재에 대해 비파손 설계 방안을 도출 할 수 있었다.

추후 연구에서는 유한요소해석을 수행하지 못한 무차원 충격속도와 무차원 무게 및 직경에 대해 추가 해석을 수행하여 관련 파손지도와 무차원 충격에너지와 무차원 흡수 에너지를 산출하여 무차원 충격에너지-무차원 흡수에너지 선도 (N-N) 를 도출하여 비파손 설계 방안에 도출 할 것이다. 또한, 결함이 고려된 파손지도와 무차원 충격에너지-무차원 흡수에너지 선도 (N-N) 를 통하여 전단 변형가능한 반구형 내부구조체를 가진 금속 샌드위치 판재가 설계되어 실제 자동차/선박/항공기 등에 이용될 수 있도록 연구가 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

1. A. Evans, J. W. Hutchinson, M. F. Ashby, "Multifunctionality of cellular metal systems," *Progress in Materials Science*, 43(3), pp.171-222, 1998.
2. M. F. Ashby, A. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley, *Metal Foams : A Design Guide*, Butterworth Heinemann, 2000.
3. Gibson. L. J., and Ashby. M. F, "Cellular Solids : Structure and Properties," Cambridge University Press, 1998.
4. D. J. Sypeck, H. N. G. Wadley, "Cellular metal truss core sandwich structures," *Advanced Engineering Materials*, 4(10), pp.759-764, 2002.
5. H. N. G. Wadley, N. A. Fleck, A. G. Evans, "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures," *Composites Science and Technology*, Vol.63, pp.2331-2343, 2003.
6. Lin Jing, Zhihua Wang, Jianguo Ning, Longmao Zhao., "The dynamic response of sandwich beams with open-cell metal foam cores" *Composites : Part B*, Vol.42, pp.1-10, 2011.
7. V. Crupi, G. Epasto, E. Guglielmino., "Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.43, pp.6-15, 2012.
8. X. Cui, L. Zhao, Zhihua Wang, H. Zhao, D. Fang., "Dynamic response of metallic lattice sandwich structures to impulsive loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.43, pp.1-5, 2012.
9. Sohrab Kazemahvazi *, Dan Zenkert., "Corrugated all-composite sandwich structures. Part 1: Modeling," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp.913-919, 2009.
10. J. W. Hutchinson, Z. Xue, *Metal sandwich plates optimized for pressure impulses*, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(4), pp.545-569, 2005.
11. 안동규, 문경제, 정창균, 양동열., "피라미드형 내부구조체를 가지 ISB 판넬의 접합형태에 따른 충격 특성 변화," *한국정밀공학회지*, 제24권, 제9호, pp.110-118, 2007.

12. 이상민, 김진범, 김지태, 나석주., “전기저항 다점 용접에서의 용접부 형성에 관한연구,” 대한용접학회 특별강연 및 학술대회 개요집, Vol 43, pp.225-227, 2004.
13. M.A. Wahab, M.s. Alam "The significance of weld imperfections and surface peening on fatigue crack propagation life of buff-welded joints," *Journal of Materials Processing Technology*, 931 - 937, 2004.
14. D. Y. Seong, C. G. Jung, D. Y. Yang, J. Ahn, S. J. Na, W. J. Chung, J. H. Kim, Analysis of core shear stress in welded deformable sandwich plates to prevent de-bonding failure during U-bending, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(9), pp.1171-1179, 2010.
15. H. Bart-Smith, J. W. Hutchinson, N. A. Fleck, A. G. Evans, Influence of imperfections on the performance of metal foam core sandwich panels, *International Journal of Solids and Structures*, 39(19), pp.4999-5012, 2002.
16. Seth, M., Vohnout, V. J. and Daehn, G. S., "Formability of Steel Sheet in High Velocity Impact," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, pp. 390 - 400, 2005.
17. Ambur, D. R., Jaunky, N., Lawson, R. E. and Knight Jr, N. F., "Numerical Simulations for High-energy Impact of Thin Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, pp. 683-702, 2001.
18. Balden, V. H. and Nurick, G. N., "Numerical Simulation of the Post-failure Motion of Steel Plates Subjected to Blast Loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 14 - 34, 2005.
19. Liu, Z. S., Lee, H. P. and Lu, C., "Structural Intensity Study of Plates under Low-velocity Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, pp. 957 - 975, 2005.
20. S. Lee, F. Barthelat, J. W. Hutchinson, H. D. Espinosa, Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials-Experiments and modeling, *International Journal of Plasticity*, 22(11), pp.2118-2145, 2006.
21. Z. Xue, J. W. Hutchinson, Crush dynamics of square honeycomb sandwich cores, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 65(13), pp.2221-2245, 2006.
22. R. Biagi, H. Bart-Smith, Imperfection sensitivity of pyramidal core sandwich structures, *International Journal of Solids and Structures*, 44(14), pp.4690-4706, 2007.

23. S. M. Pingle, N. A. Fleck, V. S. Deshpande, H. N. G. Wadley, Collapse mechanism maps for the hollow pyramidal core of a sandwich panel under transverse shear, *International Journal of Solids and Structures*, 48(25-26), pp.3417-3430, 2011.
24. 안동규, “저속 충격조건에서 3차원 금속 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 파손특성 연구,” 대학교수해외방분연구지원사업 결과보고서, 2012.
25. 안동규, 선향선, “트러스형 심재를 가진 ISB 판재의 파손지도,” 한국정밀공학회 학술대회 논문집, Vol.1, pp.721-722. 2012.
26. 강기주, 최지은, 급힘하중 하의 벌크형 와이어 직조 카고메 트러스 중간재를 갖는 샌드위치 판재의 기계적 거동, *대한기계학회 논문집 A 권*, 제 33권, 제 4호, pp. 353 ~ 359, 2009.
27. B. K. Lee, K. J. Kang, "A parametric study on compressive characteristics of wire-woven bulk Kagome truss cores," *Composite Structures*, 92(2), pp. 445 - 453, 2010.
28. D. Y. Seong, C. G. Jung, D. Y. Yang, J. H. Kim, W. J. Chung, M. Y. Lee, Bendable metallic sandwich plates with a sheared dimple core, *Scripta Materialia*, 63(1), pp.81-84, 2010.
29. D. G. Ahn, G. J. Moon, D. Y. Seong, G. H. Nam, G. Y. Han, D. Y. Yang, Impact characteristics of ISB panel with sheared dimple inner structures subjected to plane strain condition, *Proceeding of 2008 Spring Annual Meeting of KSPE*, pp.757-758, 2008.
30. D. G. Ahn, G. H. Nam, D. Y. Seong, G. Y. Han, D. Y. Yang, Low-velocity impact response of a thin sandwich plate with a metallic sheared dimple core subjected to a free boundary condition, *Materials Science and Engineering: A*, 534, pp.26-36, 2012.
31. M. Zupan, V. S. Deshpande, N. A. Fleck, The out-of-plane compressive behaviour of woven-core sandwich plates, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 23(3), pp.411-421, 2004.
32. J. Wang, A. G. Evans, K. Dharmasen, H. N. G. Wadley, On the performance of truss panels with Kagome cores, *International journal of Solids and Structures*, 40(25), pp.6981-6988, 2003.
33. S. Hyun, A. M. Karlsson, S. Torquato, A. G. Evans, Simulated properties of Kagome and tetragonal truss core panels, *International journal of Solids and Structures*, 40(25), pp.6989-6998, 2003.
34. 선향선, “트러스 심재를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 내부 결함이 충격특성에 미치는 영향 분석,” 석사학위논문, 2012.

35. Sohrab Kazemahvazi, Daniel Tanner, Dan Zenkert, "Corrugated all-composite sandwich structures. Part 2: Failure mechanisms and experimental programme," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp.920-925, 2009.
36. H. J. Rathbun, Z. Wei, M. Y. He, F. W. Zok, A. G. Evans, D. J. Sypeck, H. N. G. Wadley, Measurement and simulation of the performance of a lightweight metallic sandwich structure with a tetrahedral truss core, *Transaction of the ASME: Journal of Applied Mechanics*, 71(3), pp.368-374, 2004.
37. F. Cote, R. Biagi, H. Bart-Smith, V. S. Deshpande, Structural response of pyramidal core sandwich columns, *International Journal of Solids and Structures*, 44(10), pp.3533-3556, 2007
38. ABAQUS/Getting Started with ABAQUS. Version 6.11, 2011.
39. ABAQUS/Analysis User's Manual. Version 6.11, Vol. 3, 2011.
40. D. D. Radford, N. A. Fleck, V. S. Deshpande, The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading, *International Journal of Impact Engineering*, 32(6), pp.968-987, 2006
41. C. J. Yungwirth, H. N. G. Wadley, J. H. O'Connor, A. J. Zakraysek, V. S. Deshpande, Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core, *International Journal of Impact Engineering*, 35(8), pp.920-936, 2008.
42. Z. Xue, J. W. Hutchinson, A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates, *International Journal of Impact Engineering*, 30(10), pp.1283-1305, 2004.
43. G. W. Kooistra, H. N. G. Wadley, Lattice truss structures from expanded metal sheet, *Materials & Design*, 28(2), pp.507-514, 2007.
44. H. J. Rathbun, D. D. Radford, Z. Xue, M. Y. He, J. Yang, V. S. Deshpande, N. A. Fleck, J. W. Hutchinson, F. W. Zok, A. G. Evans, Performance of metallic honeycomb-core sandwich beams under shock loading, *International Journal of Solids and Structures*, 43(6), pp.1746-1763, 2006
45. A. Vaziri, Y. Xue, J. W. Hutchinson, Performance and failure of metal sandwich plates subjected to shock loading, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(10), pp.1947-1963, 2007
46. 남경흠, "변형 가능한 전단 반구형 내부 심재를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 충격특성 분석", 석사학위 논문, 2010.

감사의 글

지금의 학위 논문을 완성하기까지 여러 가지 도움을 주신 많은 여러분들께 진심어린 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

처음 우연한 기회로 실험실에 들어와 아무것도 모르고 있던 시절 앞으로의 2년이라는 시간이 길게만 느껴졌는데 벌써 졸업논문을 마치고 감사의 글을 쓰고 있는 자신을 보니 실험실에서 보내왔던 시간이 이제는 짧게만 느껴집니다. 그 동안 실험실에서 힘들고 고생한 순간들도 많았지만 사회의 구성원으로써 많은 것을 배우고 느낄 수 있는 정말 의미있는 시간들이었습니다.

대학원 생활동안 부족한 저에게 학문의 길을 열어주시고 아낌없는 관심과 가르침으로 공학도로써 가져야할 마음가짐과 사회구성원으로써 가져야할 매너와 겸손에 대해 몸소 가르쳐주신 안동규 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 논문이 완성되기까지 적극적인 지도와 아낌없이 격려해주신 윤성운 교수님과 한길영 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

사회구성원으로써 현업에 매진하시느라 자주 못 뵙지만, Home coming day 때나 찾아 뵈는 때 마다 경험을 바탕으로 항상 좋은 말씀과 따듯한 충고와 조언을 해주셨던 전산설계실험실의 대선배이신 상훈 선배님과 민수 선배님, 학회에서 만나서 술한잔과 조언을 해주시는 진석 선배님과 경원 선배님, 저와 같은 충격관련 연구를 수행하여 졸업하시고 앞으로의 진로에 대해 조언과 걱정 해주신 경제 선배님, 자주 못 뵙지만 만나면 편하게 대해주시는 대원 선배님, 일본에서 박사과정 중이신 광운 선배님, 항상 저희 실험실원들 걱정해주시고 맛있는 간식을 사주시는 현우 선배님, 실험실관련 일과 진로에 대해 조언 해주시는 경흠 선배님과 승화 선배님, 요즘에는 실험실 찾아오시는게 뜸해 지셨지만 항상 오시면 웃음으로 실험실에 활력을 넣어주시는 동한 선배님, 실험실과 연구관련 궁금사항이 생기면 항상 찾게되는 세훈이형, 우리에게 좋은 문화를 전파해주시고 업무능력을 배우고 싶은 민우형, 교수님 미국에 계셨을 때 실험실을 잘 이끌어준 창규형과 향선이형 모두에게 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다.

처음 생각이 없었던 대학원에 전산설계실험실원으로 추천하여 진학의 기회를 마련해주고 2년여 동안 기쁨과 고생을 나누고 의지했던 영수 형에게 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 연구관련 알려주면 모든지 잘 습득하고 때로는 조언을 구할 수 있는 나라, 실험실 분위기와 활력을 부려넣는 에너지 넘치는 호진이, 실험실에 들어와서 잘 적응해 나가는 훈희, 경주, 동휘와 함께했던 시간들이 행복했고 소중했음을 전하고 싶습니다.

마지막으로 지금이 오기까지 항상 저의 뒤에서 묵묵히 큰 버팀목이 되어주고 믿음으로 후원해주신 사랑하는 아버지, 어머니, 큰누나, 작은누나, 그리고 매형과 예쁜 조카들과 힘들 때 위로해준 친구들 모두에게 진심으로 감사합니다.

2012년 11월
정 우 철