



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

2010년 2월
석사학위논문

변형 가능한 전단 반구형 내부 심재를
가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 충격
특성 분석

조선대학교 대학원

기계공학과

남 경 흠

변형 가능한 전단 반구형 내부
심재를 가진 초경량 금속 샌드위치
판재의 충격 특성 분석

A study on impact characteristics of a ultra-light
weight sandwich panel with deformable sheared
dimple inner structures

2010 년 2 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

남 경 흙

목 차

LIST OF TABLE	I
LIST OF FIGURES	II
NOMENCLATURES	V
ABSTRACT	

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경 및 관련연구	1
제 2 절 연구목적 및 방법	4
제 2 장 ISB 판재 제작	5
제 1 절 전단 변형이 가능한 딩플 형상의 금속 내부 구조체를 가진 ISB 판재의 제작 과정	5
제 3 장 ISB 판재의 내충격 특성 시험·평가	6
제 1 절 낙하 하중 방식의 충격 시험기기	6
제 2 절 ISB 판재의 내충격 시험 방법	9
1. 드로잉 경계조건에서 내충격 시험	9
2. 평면변형 경계조건에서 내충격 시험	10
제 3 절 ISB 판재의 내충격 특성 평가 방법	12
제 4 장 ISB 판재의 내충격 시험 및 내충격 특성 평가	

.....	13
제 1 절 드로잉 경계조건에서 내충격 시험	13
1. 전단 반구형 내부 구조체와 용접된 ISB 판재에 대한 실험 결과 및 고찰	13
2. SPFC 780 판재에 대한 내충격 실험 결과 및 고찰	20
3. 드로잉 경계조건에서의 내충격 특성 비교/분석	25
제 2 절 평면 변형 경계조건에서의 내충격 시험	34
1. 전단 반구형 내부 구조체와 용접된 ISB 판재에 대한 실험 결과 및 고찰	34
2. 평면 변형 경계조건에서의 내충격 특성 비교/분석	37
제 5 장 ISB 판재의 내충격 특성에 대한 3차원 유한 요소해석	40
제 1 절 평면 변형 경계조건에 대한 3차원 유한요소해석 기법 도출 및 유한요소해석을 통한 ISB 판재의 내 충격 특성 분석	40
1. 유한요소해석방법 및 모델링	40
2. 경계조건 및 재료 물성	42
3. 3차원 내충격 유한요소해석 모델의 검증	44
4. ISB 판재의 내충격 유한요소해석 결과 및 고찰	48
제 6 장 결 론	56

REFERENCES 58

감사의 글

LIST OF TABLES

Table 1 Design of specimen for drawing type of impact test	10
Table 2 Design of specimen for plane strain type of impact test	11
Table 3 Results of impact tests of ISB panel for the case of drawing type of impact loading	13
Table 4 Results of impact tests of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading	21
Table 5 Comparison of characteristic data of ISB panel and those of SPFC 780 panel for the drawing type of impact loading (D=20 mm)	25
Table 6 Comparison of characteristic data of ISB panel and those of SPFC 780 panel for the drawing type of impact loading (D=40 mm)	30
Table 7 Results of impact tests of ISB panel subjected to plane strain type of impact loading	35
Table 8 Comparison of characteristic data of ISB panel and those of SPFC 780 panel under plane strain type of impact loading	37
Table 9 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis	42
Table 10 Comparison of characteristic data of experiments and those of FE analyses ($E_{in}=59.8$ J)	47
Table 11 Comparison of characteristic data of experiments and those of FE analyses under plain strain type of impact loading	48

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Schematics of sandwich panel with typical inner structure	2
Fig. 2 Fabrication procedures of ISB panel with deformable sheared dimple inner structures ·	5
Fig. 3 Experimental set-up of drop impact test	6
Fig. 4 Data acquirement system of impact tests	7
Fig. 5 Measurement of crash phenomenon between the drop head and specimen	8
Fig. 6 Microfocused X-ray CT system	8
Fig. 7 Schematics and experimental devices for drawing type of impact test	9
Fig. 8 Schematic and experimental devices for plane strain type of impact test	10
Fig. 9 Influence of impact energies and nose diameters on the force - deflection and the absorbed energy - deflection curves of ISB panel subjected to drawing type of impact loading	14
Fig. 10 Variation of the deformed shape of damage area in ISB panel according to input energy and nose diameter of impact head (Drawing type of impact loading)	15
Fig. 11 Comparison of maximum deflection of ISB panel according to input energy and nose diameter of impact head (Drawing type of impact loading)	16
Fig. 12 Variation of penetration depth of ISB panel according to input energy and nose diameter of impact head (Drawing type of impact loading)	17
Fig. 13 Influence of impact energies and nose diameters on the deformed shape and the penetration depth of the inner structures subjected to drawing type of impact loading	18
Fig. 14 Influence of impact energies and nose diameters on the sheared deformation of inner structures in the drawing type of impact loading (ISB panel)	19
Fig. 15 Influence of impact energies and nose diameters on the force - deflection and the absorbed energy - deflection curves of SPFC 780 panel subjected to drawing type of impact loading	22
Fig. 16 Variation of the deformed shape of damage area in SPFC 780 panel according to input energy and nose diameter of impact head subjected to drawing type of impact	

loading	23
Fig. 17 Variation of penetration depth of SPFC 780 panel according to input energy and nose diameter of impact head subjected to drawing type of impact loading	24
Fig. 18 Influence of impact energy on the force - deflection and the absorbed energy - deflection curves of ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading (D=20mm)	26
Fig. 19 Comparison of $\delta_p - E_{in}$ and $E_{ab,m} - E_{in}$ curves for ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading (D=20mm)	27
Fig. 20 Comparison of rebounding height for ISB panel and that for SPFC 780 panel (D=20 mm)	28
Fig. 21 Comparison of pure absorbed energy for ISB panel and that for SPFC 780 panel (D=20 mm)	28
Fig. 22 Comparison of P - T curves for ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading (D=20mm)	29
Fig. 23 Comparison of $\delta_p - E_{in}$ and $E_{ab,m} - E_{in}$ curves for ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading (D=40mm)	31
Fig. 24 Comparison of rebounding height for ISB panel and that for SPFC 780 panel (D=40mm)	32
Fig. 25 Comparison of pure absorbed energy for ISB panel and that for SPFC 780 panel (D=40 mm)	32
Fig. 26 Comparison of P - T curves for ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading (D=40mm)	33
Fig. 27 Influence of impact energies on the Force per width - deflection curves and Absorbed energy per width - deflection curves of ISB panel subjected to plane strain type of impact loading	34
Fig. 28 Influence of impact energies on the maximum deflection and deformed shape of the specimen under plain strain type of impact loading	36
Fig. 29 Comparison of $P_w - E_{in}$ and $E_{ab,w} - E_{in}$ curves of ISB panel with those of SPFC 780 panel under plane strain type of impact loading	38
Fig. 30 Influence of impact energies on the maximum deflection and deformed shape for ISB panel with those of SPFC 780 panel under plain strain type of impact loading	38

Fig. 31 FE model of the impact analysis of ISB panel	40
Fig. 32 Boundary conditions of FE analysis	42
Fig. 33 Measurement of energy efficiency of ISB panel for FE analysis	43
Fig. 34 Results of high speed tensile tests of DP 590 panel	44
Fig. 35 Influence of analysis condition on the time history of node velocity in the center point	45
Fig. 36 Comparison of the force - deflection and the absorbed energy - deflection curves for experiments with those of FE analyses ($E_{in}=59.8$ J)	46
Fig. 37 Comparison deflection shapes for experiments with those of FE analyses (Estimated Impact time=22.5 ms, $E_{in}=59.8$ J)	48
Fig. 38 Comparison of $P_w - \delta$, $E_{ab,w} - \delta$ and $P_w -$ time curves of ISB panel with those of SPFC 780 panel under plane strain type of impact loading	50
Fig. 39 Variation of deformation of ISB panel according to impact time under plane strain type of impact loading ($E_{in}=59.8$ J)	51
Fig. 40 Force - deflection curve and the deflection shape for each impact time ($E_{in}=44.3$ J)	51
Fig. 41 Variation of failure time of ISB panel according to impact time under plane strain type of impact loading	52
Fig. 42 Variation of plastic strain distribution of ISB panel according to impact time under plane strain type of impact loading	53
Fig. 43 Variation of plastic dissipation energy distribution of ISB panel according to impact time under plane strain type of impact loading	53
Fig. 44 Influence of impact times on the principal stress and plastic strain for ISB panel under plain strain type of impact loading ($E_{in}=44.3$ J)	54

NOMENCLATURES

- E : 탄성계수
 E_{ab} : 시편이 흡수한 충격에너지
 $E_{ab,m}$: 단위 무게 당 충격 흡수에너지
 $E_{ab,p}$: 최대 변위까지 충격 흡수에너지
 $E_{ab,w}$: 단위 폭 당 충격 흡수에너지
 E_{ap} : 충격 헤드의 되튀김량을 제외한 순수 충격 흡수에너지
 E_i : i 구간의 충격 흡수에너지
 E_{in} : 충격 입력에너지
 E_{out} : 산출된 충격 흡수에너지
 E_{total} : 총 누적 충격 에너지 흡수량
 $\sum e_i$: 1 부터 i 구간까지의 총 흡수 에너지
 g : 중력가속도
 h : 실험 높이
 H_D : 다이의 높이
 H_R : 고무의 높이
 m : 질량
 P : 하중
 P_i : i 구간의 힘
 P_{i-1} : $i-1$ 구간의 힘
 P_{max} : 최대하중
 P_W : 단위 폭 당 최대하중
 R_P : 펀치의 직경
 R_R : 롤러의 직경
time : 충격 실험에 따른 시간
 V : 충격속도
 W_D : 다이의 폭
 δ : 변위

- δ_i : i 구간의 변위
 δ_{i-1} : $i-1$ 구간의 변위
 δ_{\max} : 최대변위
 δ_p : 최대하중까지의 최대변위
 η : 에너지 효율
 ζ : 충돌 후 충격 헤드의 튀어 오르는 높이
 χ : 충격 에너지 흡수율
 $^\circ$: 내부 구조체의 회전각도

ABSTRACT

A study on impact characteristics of a ultra-light weight sandwich panel with deformable sheared dimple inner structures

Nam Gyeong Heum

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

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, the needs for the development of the light-weight materials with high stiffness and crashworthiness have been increased to improve the safety of passengers and the energy efficiency of transport vehicles. The objective of this thesis is to investigate into the impact characteristics of ultra-light weight sandwich panel with deformable sheared dimple inner structures. Two types of impact experiments, including drawing and plane strain bending types, were performed via a drop impact tester. From the results of the experiments, the influence of impact conditions on the deformation behaviors, the force-deflection relationships and the energy absorption characteristics were investigated. The deformed shape of the inner structures were measured by the X-ray CT system. From the results of the measurement, it was shown that the excessive deformation of the dimple structures in the vicinity of the impacted region takes place and the deformation of the dimple structures in the outside of the impact region is negligible. In order to examine the performance of the ultra-light weight sandwich panel quantitatively, the impact characteristics of the designed panel were compared to those of SPFC 780 panel. The SPFC 780 panel is an advanced high strength steel, which are used in the bumper back beam. The results of the comparison showed that the energy absorption rate per mass of the ultra-light weight sandwich panel is higher than that of the SPFC 780 plane and the contact force of the ultra-light weight sandwich panel is lower than that of the SPFC 780 plane. In addition, it was noted that the deflection of the designed ultra-light weight

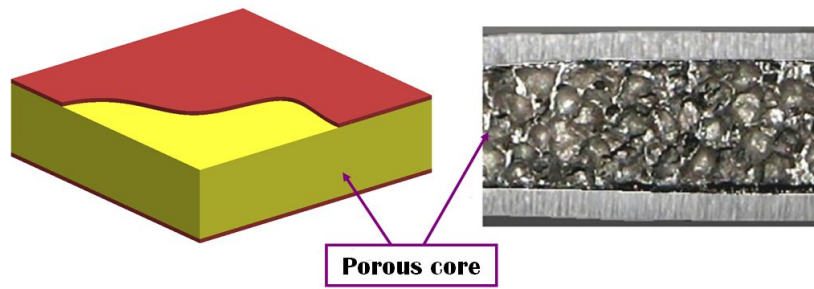
sandwich panel is lower than that of SPFC 780 before the failure initiation of the deformable sheared dimple inner structures. Three-dimensional nonlinear finite element analysis was performed via a commercial code ABAQUS Explicit in a condition of the plane strain bending. Through the comparison of the results of experiments with those of the analysis, a proper FE analysis model was obtained. The initial time of the failure of the inner structures were estimated through the FE analysis. The results of the FE analysis showed that an initial time of the failure of the inner structures decreases when the impact energy increases. In addition, it was shown that the reaction force of the impact head decreases abruptly when the failure of the inner structures initiates. From the results of the FE analysis, the influence of the impact energy on the plastic strain, the effective stress and the plastic dissipation energy distribution in the ultra-light weight sandwich panel with deformable sheared dimple inner structures.

제 1 장 서 론

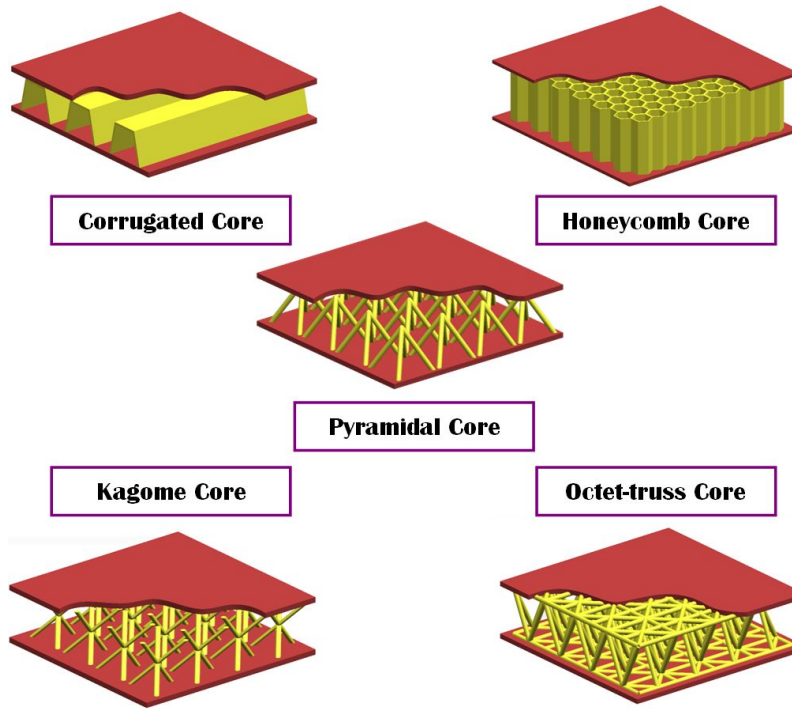
제 1 절 연구배경 및 관련 연구

최근 전 세계적으로 자국의 고도성장을 위하여 화석연료의 수요 및 사용을 증대시키고 있으며, 이것으로 인하여 각국의 사회, 경제, 문화 등 전반적으로 많은 성장을 가져왔다. 하지만 무분별한 화석연료의 사용으로 환경 문제 및 화석 연료의 보존량이 고갈됨에 따라 대체에너지 개발 및 에너지 소비율의 향상에 대한 방안은 전 세계에서 가장 큰 관심사가 되고 있다. 특히, 우주/자동차/항공기/선박 등 연료 소비가 많은 운송 산업에서는 에너지 소비를 효율적으로 하기 위하여 기기 및 제품에 경량화를 도모하고 있으며, 승객의 안전성이 보다 강화된 법규를 충족시킬 수 있는 재료에 대한 개발 및 연구가 수행되어지고 있다. 기존의 금속재에 비해 높은 비강성 및 비강도 (High specific stiffness & Strength) 특성을 가지는 초경량 금속 구조체 (Ultra-light weight structured material) 에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며,¹⁻²⁾ 이러한 초경량 금속 구조체를 이용하는 한 가지 방안으로 3차원 형상의 금속 구조체의 상하부에 금속 판재를 붙여놓은 샌드위치형 초경량 재료 개발에 대한 연구가 국내외적으로 다양하게 수행되고 있다.³⁾

초경량 샌드위치 판재 (Ultra-light weight sandwich panel) 는 내부 구조체 형상 및 특성에 따라 기계적 물성과 충격 특성에 있어 변수가 되며, 표면 판재와 내부 구조체의 결합 방법 또한 충격 특성에 변수로 작용된다. 현재 국내외적으로 많이 연구되고 있는 3차원 내부 구조체의 경우 Fig. 1 (a) 와 같은 금속 폼 (Metallic foam) 재료와 다공성 재료의 초경량 코어 (Light-weight core) 로 구성된 샌드위치 구조가 있으며, Fig. 1 (b) 와 같이 3차원 형상의 내부 구조체로 사용되는 커러게이티드 (Corrugated) 구조물, 허니콤 (Honeycomb) 구조물, 피라미드 (Pyramidal) 구조물, 카고메 (Kagome) 구조물 그리고 옥텟-트러스 (Octet-truss) 구조물 등과 결합되어 있는 초경량 샌드위치 판재 등이 있으며, 이런 대표적인 초경량 샌드위치 구조를 바탕으로 경량화, 강성, 강도 및 내충격 특성을 향상 시킨 3차원 형상의 내부 구조체에 대한 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있다.⁴⁻⁸⁾



(a) Metal foam cores



(b) Sandwich panels with three-dimensional inner structures

Fig. 1 Schematics of sandwich panel with typical inner structure

이러한 샌드위치 판재의 전체 두께 중 60% 이상 차지하는 내부 구조체의 경우 밀도가 다른 원판 소재 판재에 비해 낮으며, 외부 충격 하중이 초경량 샌드위치 판재에 부가 시 외판 판재뿐만 아니라 3차원 내부 구조체까지 판재의 변형에 영향을 미쳐 비강성/비강도/비내충격성이 현저히 증가한다.⁹⁾

한편, 금속 샌드위치 판재가 구조 재료로 활용도가 높아짐에 따라 각종 충격에 대한 내충격성이 중요한 문제로 대두되고 있다. 또한 전 세계적으로 충격 부하를 받는 금속

구조체의 충격특성 및 충격거동에 대한 관심이 높아짐에 따라 많은 연구자들이 이와 관련된 연구를 수행하고 있다.¹⁰⁻¹³⁾ 특히, 최근 이슈가 되고 있는 우주산업에서도 인공위성의 무게 및 비강성, 비강도를 높이기 위하여 샌드위치 판재를 적용해 왔으며, 발사시 높은 가속에 의한 관성력 등으로부터 발생하는 충격하중에 대하여 재료의 충격특성 및 충격거동에 대한 연구가 필수적으로 요구되고 있는 실정이다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 또한 자동차/항공기/선박 등의 관련 산업에서도 운송기기의 연료 소비율 및 대체 재료의 강성을 높이기 위하여 샌드위치 판재 중 3차원 내부 구조체의 형상 및 재질을 다양하게 바꿔가며 그 형상에 따른 충격 특성 및 충격 거동에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾

Rion 등은 인공위성의 전체적인 무게 및 강도를 높이기 위하여 인공위성 날개 부분에 태양전지, 허니콤 내부 구조체, 마지막에는 CFRP 복합체 순으로 판재를 제작하였으며, 3점 굽힘 실험을 통하여 샌드위치 판재의 정적 특성을 분석하였다.²⁰⁾ Queheillat 등은 내부 구조체 경우 바깥 판재보다 연성이 강하고 항복강도는 낮은 재질을 사용해왔던 전통적인 방법이 아닌 내부 구조체에 항복강도가 높은 티타늄 재질의 합금을 사용하여 샌드위치 판재를 제작 및 인장실험을 통하여 샌드위치 판재의 압축 및 전단 특성에 대하여 연구하였다.²¹⁾ Foo 등은 알루미늄으로 구성된 허니콤 샌드위치 판재를 제작하여 저속에서 고정형 경계 조건일 때 충격실험 및 준정적 유한요소해석 (Quasi-Static FE analysis) 을 통하여 시편 내부 구조체의 파단 및 변형경향에 대하여 연구하였다.²²⁾ Wang 은 샌드위치 허니콤 구조의 두께 및 길이에 변화를 주어 시편의 단위 부피당 충격 흡수에너지 특성 및 충격 흡수율과의 상관관계에 대하여 연구하였다.²³⁾ Dharmasena 등은 허니콤 웹이라는 구조를 이용하여 사각형 허니콤 구조를 개발하였고, 멀티 피라미드 구조, 삼각형 및 다이아몬드 모양의 커러게이트 구조를 제작하여 수중 폭발형 장치인 다이노-크러셔 기기를 이용하여 재료의 내부 구조체 변형 특성 및 변형을 그리고 응력 분포 특성 등을 분석하였다.²⁴⁾ Abbadi 등은 알루미늄의 재질로 이루어진 허니콤 샌드위치 판재를 4점 굽힘 실험을 통하여 얻어진 정적 특성을 바탕으로 동일한 조건에서 3차원 유한요소 해석 시 적용할 수 있는 이론에 대하여 연구 하였다.²⁵⁾

최근 국내에서는 3차원 구조의 전단 변형이 가능한 딥플 형상을 가진 내부 구조체를 외판 사이에 두어 롤 용접을 통하여 두 금속을 결합시킴으로써 상대밀도를 낮추며, 무게는 감소하고 비강도/비강성 및 내충격성을 향상시킨 ISB (Internally structured bonded) 판재 개발에 대한 연구가 수행되고 있으며, 충격 실험을 통하여 3차원 내부 구조체의 변형 특성 및 충격특성과 충격 흡수 특성에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다.²⁶⁻²⁷⁾

제 2 절 연구목적 및 방법

현재 우주산업의 태양전지 부분 및 항공기의 날개 부분과 자동차의 부품의 경량화 그리고 선박의 선체 중량 감소 등에 사용되고 있는 샌드위치 판재는 화석연료의 고갈에 따른 연료 소비율 증대와 강화된 승객의 안전성 법규를 만족하기 위하여 초경량/고강성/고내충격성 재료의 개발이 필요시 되고 있다. 특히, 샌드위치 판재가 구조재로 활용될 경우 충돌 시 발생될 수 있는 충격하중에 대하여 재료의 변형, 충격강도, 충격강성, 충격 흡수 메커니즘에 대한 연구가 요구되어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 전단 변형이 가능한 딥플 형상의 3차원 내부 구조체를 가진 초경량 샌드위치 판재인 ISB 판재에 대하여 충격실험 및 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 실험 및 해석결과를 통하여 판재의 하중-변위 특성, 충격 흡수 에너지-변위 특성 및 시간에 따른 충격 하중과 변위특성 그리고 내부 구조체의 변형 경향에 대하여 분석/고찰하였다.

우주/항공기/선박 등의 운송 산업에서는 부재가 거의 자유단 상태에서 발생할 수 있는 충격 특성이 필요시 되고 있어 드로잉형 경계조건에서 충격 실험을 수행하였다. 또한 ISB 판재의 충격 특성을 비교하기 위하여 현재 오피러스 자동차 임팩트 빔에 사용 중인 SPFC 780 판재에 대하여 동일한 조건에서 충격실험을 수행하였다.

낙하하중 방식의 충격 실험을 통하여 평면변형 경계조건에서 전단 변형이 가능한 내부 구조체를 가진 ISB 판재에 대하여 충격 실험을 수행하였으며, 실험을 통하여 전단 변형이 가능한 내부 구조체의 변형 경향 및 충격 하중에 대하여 충격 흡수 에너지 특성 및 흡수율을 분석/고찰하였다. 그리고 SPFC 780 판재에 대하여 동일한 조건에서 실험을 수행하여, 충격특성을 비교/분석하였다. 또한 3 차원 유한요소해석을 통하여 육안으로 확인할 수 없었던 3 차원 내부 구조체의 변형 경향 및 응력 분포 등의 특성을 비교/분석하였다.

제 2 장 ISB 판재 제작

제 1 절 전단 변형이 가능한 딩플 형상의 금속 내부 구조체를 가진 ISB 판재의 제작 과정

본 연구에서 사용된 전단 변형이 가능한 딩플 형상의 금속 내부 구조체는 Fig. 2 와 같이 전단 딩플 형상으로 맞물리도록 제작된 성형부의 펀치, 다이를 사용하여 0.5 mm 두께를 가진 연강 (Mild steel) 판재에 부분성형 (Sectional forming) 하였다. 이렇게 성형된 내부 구조체는 2 mm 두께를 가진다.

내부 구조체 보다 강성이 높은 0.5 mm 의 두께를 가진 DP 590 판재를 내부 구조체 상/하로 배치시켜 롤형 전극을 이용한 다점 전기저항 용접기 (Multi points resistance welding using roll type of electrodes) 를 이용하여 두 가지 재료를 용접시켜 ISB 판재를 제작하였다. 이렇게 완성된 ISB 판재의 경우 원래 3 mm 의 두께를 가진 판재가 제작 되어야 하지만, 평균 두께 2.8 mm 두께를 가진 ISB 판재가 제작된다. 그 이유는 롤 전기저항 용접 시 표면 판재와 내부 구조체가 붙는 부분이 용융되어 서로 녹아 두께가 감소하게 된 것으로 사료된다.

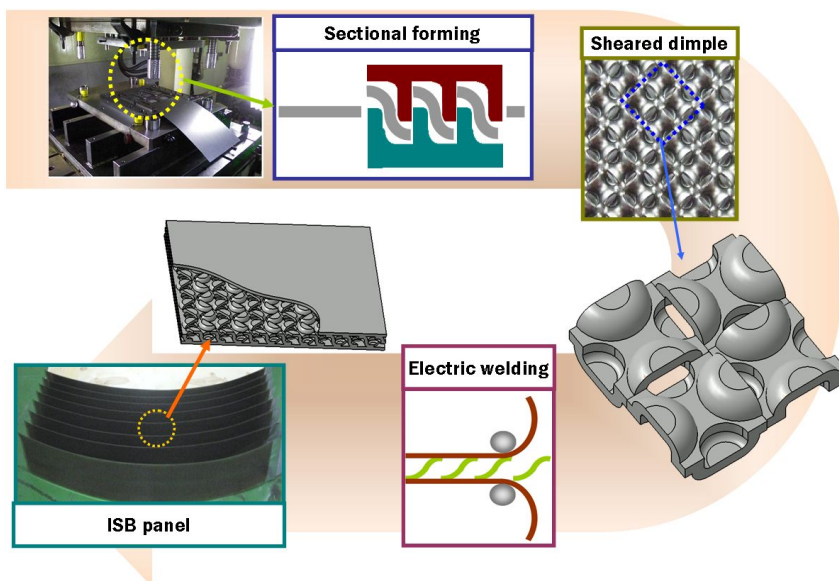


Fig. 2 Fabrication procedures of ISB panel with deformable sheared dimple inner structures

제 3 장 ISB 판재의 내충격 특성 시험 · 평가

제 1 절 낙하 하중 방식의 충격 시험기기

전단 변형이 가능한 딩플 형상의 내부 구조체를 가진 ISB 판재의 충격 특성 분석은 다른 샌드위치 판재의 충격 시험 데이터와 매치하기 쉽도록 일반적으로 사용되고 있는 낙하하중 (Drop weight) 방식의 충격 시험기기로 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 충격실험은 Fig. 3 와 같이 2,000 Stroke 까지 수행할 수 있는 충격 시험기기를 사용하였다.

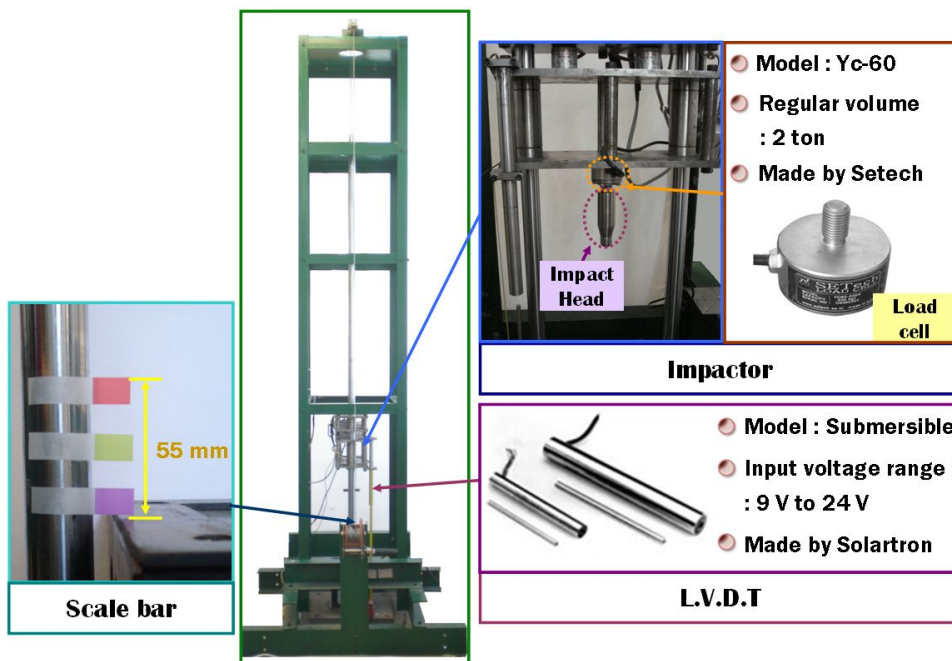


Fig. 3 Experimental set-up of drop impact test

임팩터 (Impactor) 하단부에 로드 셀 (Load cell) 을 장착하여 충격하중을 측정하였으며, 시편에 충격하중 부가 시 시편의 변위량을 측정하기 위하여 임팩터 모서리 부분에 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 를 설치하였다. 또한, 충격 헤드가 시편 타격 후 되튀어 오르는 양을 측정하기 위하여 빔에 척도를 설치하였다.

Fig. 4 는 LVDT 와 로드 셀로부터 전달되어지는 충격하중과 시편의 변위 데이터를 받는 장치로 채널별 초당 10,000 개의 데이터를 취득할 수 있다. 이는 자유 낙하 충격 시험 시 충격헤드 (Impact head) 가 시편과 충돌하는 시간은 약 0.01 초로 아주 짧은 시간에 변화하는 충격하중 및 변형량을 측정하기에 적합하도록 설계되었다.

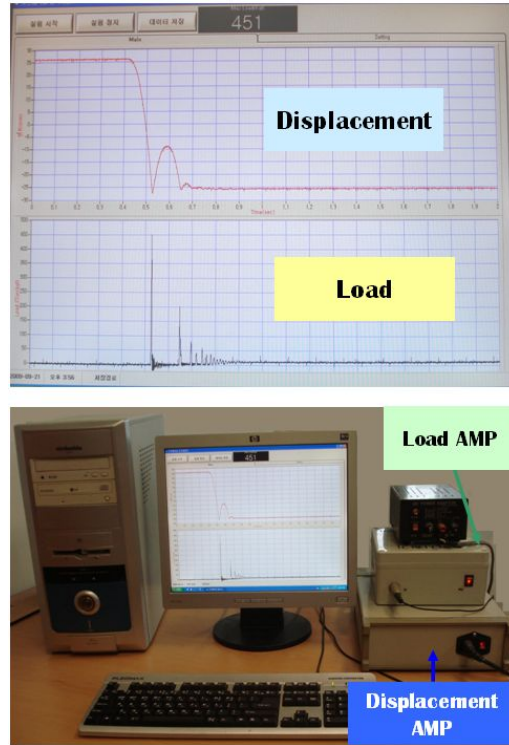


Fig. 4 Data acquirement system of impact tests

또한, Fig. 5 와 같이 충격 시험 시 실시간으로 시험 시편 및 임팩터의 충격 전후의 모습을 촬영하기 위하여 초당 10,000 컷을 찍을 수 있는 고속 카메라를 설치하였으며, 충격 시험 모습을 동일한 조건의 밝기에서 촬영하기 위하여 조명기기를 사용하였다.



Fig. 5 Measurement of crash phenomenon between the drop head and specimen

충격 하중 부가 시 ISB 판재에 발생하는 내부 구조체의 변형 형상을 분석하기 위하여 Fig. 6 과 같은 Microfocused X-ray CT system 을 활용하여 시편의 X-ray 사진을 촬영 하였다.



Fig. 6 Microfocused X-ray CT system

제 2 절 ISB 판재의 내충격 시험 방법

1. 드로잉 경계조건에서 내충격 시험

전단 반구형 내부 구조체를 가진 ISB 판재에 대한 드로잉 (Drawing) 경계조건에서 내충격 시험 방법은 Fig. 3 의 충격 시험기기를 이용하여 Table 1 과 같이 제작된 ISB 판재에 충격 헤드를 자유낙하 시켜 충격하중이 시편중앙부분에 전달 될 수 있도록 충격 하중을 가하는 방식이다. 이때, 사각 시편을 올려놓은 시편 고정부에는 아무런 고정 및 다른 조건을 부여하지 않는 상태를 유지하여 실험을 수행하였다.

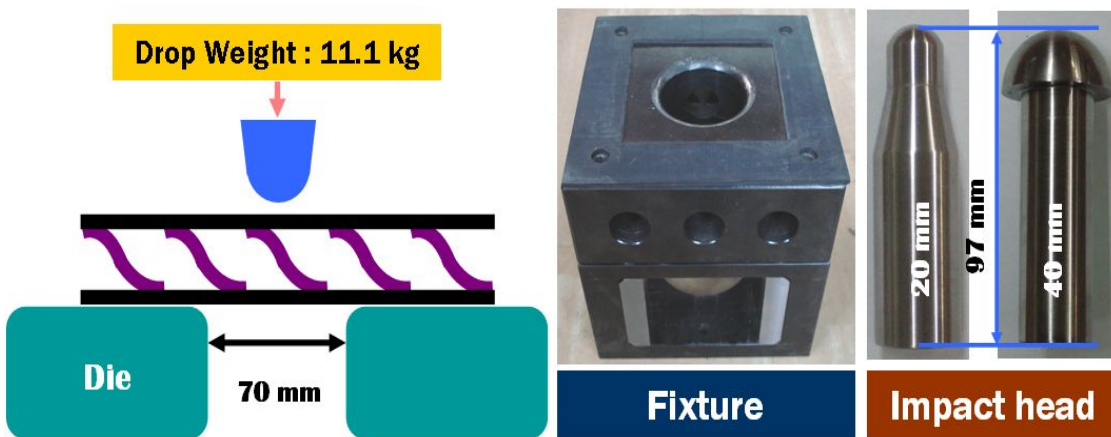


Fig. 7 Schematics and experimental devices for drawing type of impact test

이런 충격 시험의 장점은 충격하중 부가 시 충격응력과 전달에 의해 시편 파손이 발생할 수 있으며, 실제 충돌 시 발생될 수 있는 현상과 가장 유사하게 시편 변형 모습을 관측할 수 있다. 자유 낙하 충격 시험 기기의 개념도는 Fig. 7 과 같으며, 충격 시험에 사용된 충격 헤드의 경우 직경 20 mm, 40 mm 2 가지를 사용하여 ISB 판재의 내충격 특성을 분석하였다.

또한, ISB 판재가 자동차 임팩트 바에 적용되었을 때 충격 특성을 비교하기 위하여 1.7 mm 의 두께를 가진 SPFC 780 판재와 함께 충격 실험을 수행하였다. SPFC 780 판재는 현재 현대 자동차 중 오피러스 자동차의 임팩트 바에 사용되고 있는 판재이다.

드로잉 경계조건인 충격 시험에 사용된 시편의 경우 ISB 판재가 SPFC 780 판재보다

두께는 1.1 mm 정도 두꺼우나 무게의 경우 ISB 판재가 20 g 정도 가벼운 것을 알 수 있다.

Table 1 Design of specimen for drawing type of impact test

Specimen	Width (mm)	Length (mm)	Thickness (mm)	Weight (g)
ISB panel	120	120	2.8	166
SPFC 780 panel	120	120	1.7	186

2. 평면변형 경계조건에서 내충격 시험

평면변형 내충격 실험은 Table 2 와 같이 ISB 판재의 종횡비 (aspect ratio) 가 5 : 1 비율이 나오는 시편을 이용하여 판재의 단면 변형의 특성 분석을 하기위하여 수행한 실험이다.

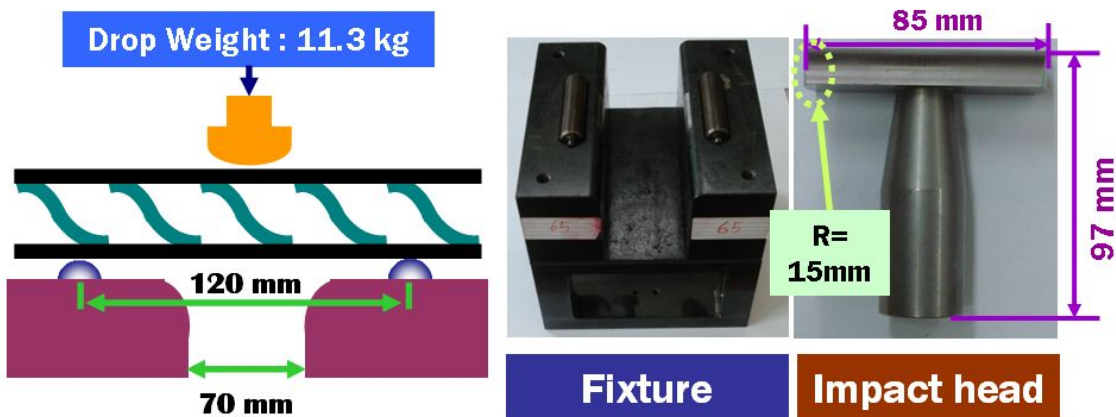


Fig. 8 Schematic and experimental devices for plane strain type of impact test

Fig. 3 의 충격 시험기기를 이용하여 Fig. 8 과 같은 평면 변형 경계 조건에서의 충격 시험을 수행하였으며, 11.3 kg 무게와 반경 15 mm 인 충격 헤드를 ISB 판재로 된 시편 중앙에 자유낙하 시켜 충격하중을 가하여 ISB 판재의 동적 내충격 특성을 분석

하였다. 이때, 시편을 올려놓은 시편 고정부에는 아무런 고정 및 다른 조건을 부여하지 않는 상태를 유지하여 실험을 수행하였다. 시편 고정 지지대에서 충격 하중에 의하여 시편이 변형할 수 있는 총 길이는 81 mm 이며, 충격 시험 수행 시 충격 헤드와 고정형 지지대가 서로 부딪힐 일 없이 하기 위하여 고무로 최대여유가 10 mm 되도록 경계 조건을 설정하였으며, 고정 지지대에서 시편이 최대 변형할 수 있는 길이는 71 mm 이다.

Table 2 Design of specimen for plane strain type of impact test

Specimen	Width (mm)	Length (mm)	Thickness (mm)	Weight (g)
ISB panel	40	200	2.8	90.1
SPFC 780 panel	40	200	1.7	103.5

평면변형 경계조건인 충격 시험에 사용된 시편의 경우 ISB 판재가 SPFC 780 판재보다 두께는 1.1 mm 정도 두꺼우나 무게의 경우 ISB 판재가 13.4 g 정도 가벼운 것을 알 수 있다.

제 3 절 ISB 판재의 내충격 특성 평가 방법

전단 반구형 내부 구조체를 가진 ISB 판재에 대한 내충격 특성 평가 방법은 로드 셀과 LVDT 에서 얻어지는 하중 및 변위 데이터를 종합하여 하중 - 변위 선도로 나타낸 후 시편에 가해지는 충격 하중의 최대 시점에서 최대변위 값을 (1) 식을 적용하여 충격 흡수 에너지량을 산출하였다.

$$\sum e_i = P_{i-1} \times (\delta_i - \delta_{i-1}) + \frac{1}{2} \times (P_i - P_{i-1}) \times (\delta_i - \delta_{i-1}) \quad (1)$$

$$E_i = \sum e_i - \sum e_{i-1}, \sum E_{total} = E_i + e_{i-1} \quad (2)$$

이렇게 얻어진 충격 흡수에너지를 식 (2) 에 넣으면, 시편의 총 누적 충격에너지 흡수량을 산출하여 시편의 내충격 특성을 평가하였다. 충격 입력에너지는 충격 실험의 높이를 위치에너지로 계산한 것으로 식 (3) 과 같으며, 낙하 시 마찰력에 의하여 손실 되는 에너지는 무시하였다. 충격 에너지 흡수율은 식 (4) 와 같이 시편에 가해지는 총 충격 입력에너지에 비하여 시편이 흡수한 충격에너지를 나누어 산출하였다.

$$E_{in} = mgh \quad (3)$$

$$\chi = \frac{E_{ab}}{E_{in}} \times 100 \quad (4)$$

또한, 해석 시 필요한 속도를 구하기 위하여 식 (5) 를 이용하여 산출 하였으며, 충격실험의 효율은 식 (6) 으로 산출하였다.

$$V = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

$$\eta(\%) = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (6)$$

제 4 장 ISB 판재의 내충격 시험 및 내충격 특성 평가

제 1 절 드로잉 경계조건에서 내충격 시험

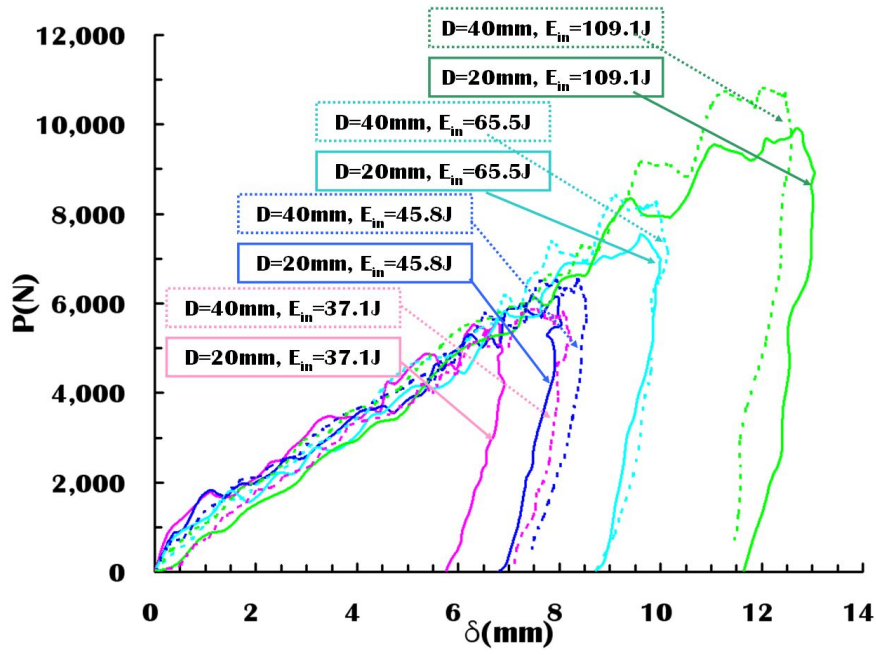
1. 전단 반구형 내부 구조체와 용접된 ISB 판재에 대한 내충격 실험 결과 및 고찰

외부 스킨 판재 (DP 590) 와 전단 반구형 딴플 내부 구조체 (Sheared dimple inner structures) 가 용접되어 있는 ISB 판재에 대하여 드로잉 경계조건에서 충격 헤드 20 mm 와 40 mm 을 이용하여 충격 실험을 수행하였다.

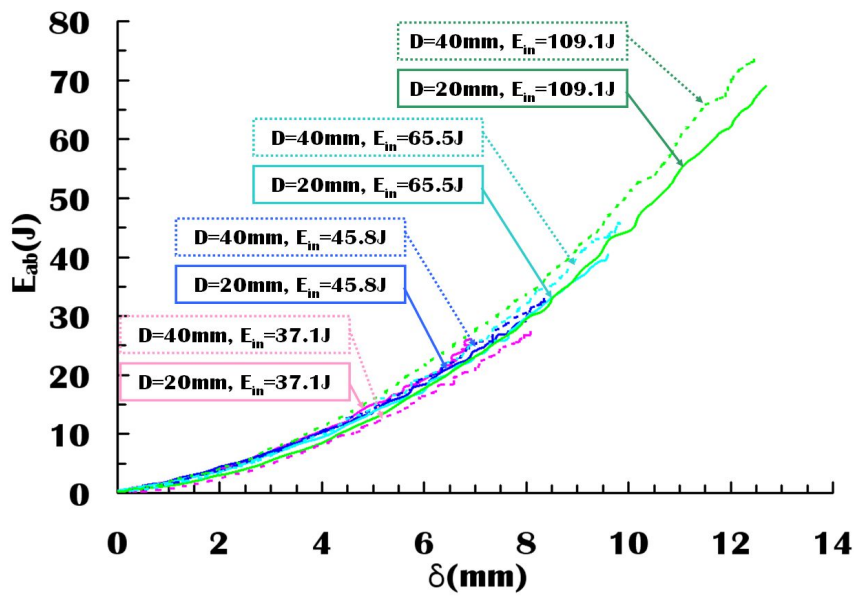
Table 3 은 충격 시험 결과를 충격헤드 직경, 시험높이, 충격 입력에너지, 최대 변위 까지 충격 흡수에너지, 충격 에너지 흡수율, 최대하중, 최대 하중에서 최대 변위 순서로 나열하였다.

Table 3 Results of impact tests of ISB panel for the case of drawing type of impact loading

Diameter (mm)	Height (cm)	E_{in} (J)	$E_{ab,p}$ (J)	χ (%)	P_{max} (N)	δ_p (mm)
20	34	37.09	24.39	65.77	5,635.00	6.74
	38	41.45	26.06	62.86	5,958.40	7.76
	42	45.82	29.06	63.43	6,144.60	7.97
	60	65.45	40.39	61.72	7,536.20	9.60
	70	76.36	46.88	61.39	8,153.60	10.99
	100	109.09	69.01	63.26	9,907.80	12.69
40	34	37.09	27.08	73.01	5,860.40	8.07
	38	41.45	29.60	71.41	6,007.40	8.24
	42	45.82	33.05	72.14	6,526.80	8.36
	60	65.45	45.88	70.09	8,418.20	9.90
	70	76.36	51.48	67.41	8,829.80	10.82
	100	109.09	73.65	67.52	10,809.40	12.47



(a) Force - deflection force



(b) Absorbed energy - deflection curves

Fig. 9 Influence of impact energies and nose diameters on the force - deflection and the absorbed energy - deflection curves of ISB panel subjected to drawing type of impact loading

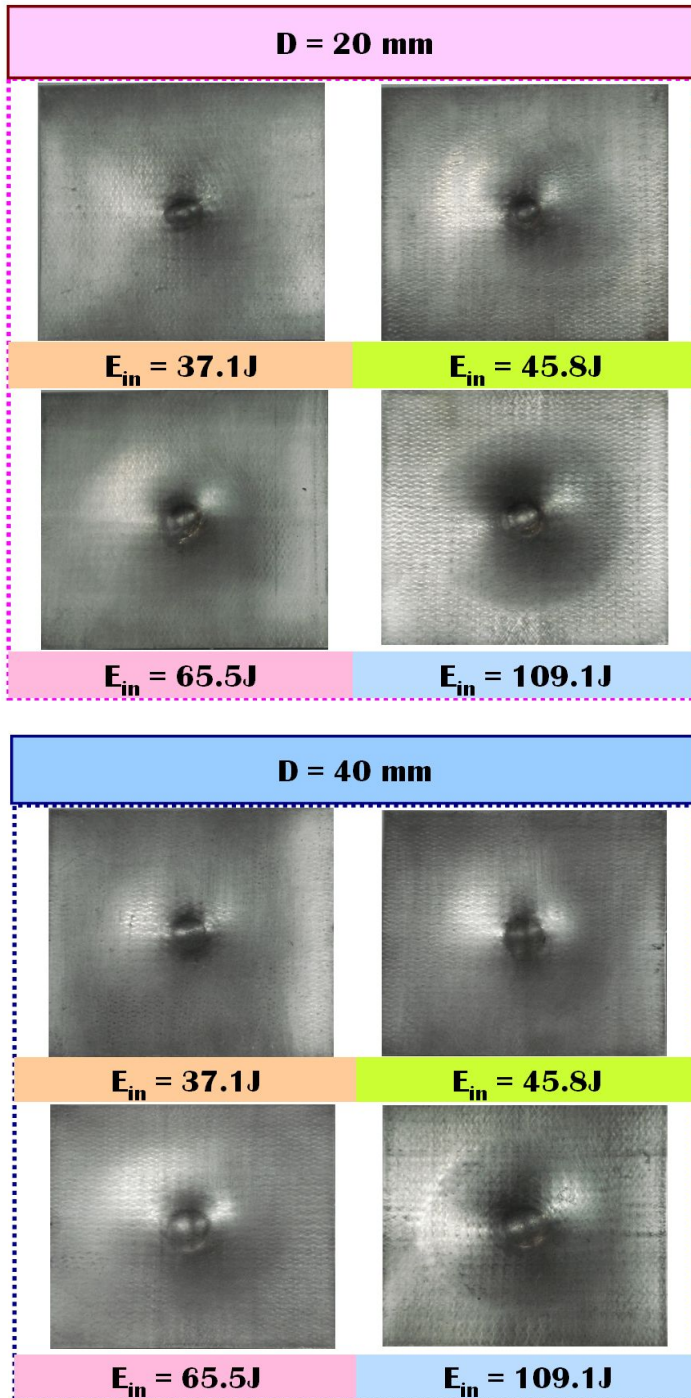


Fig. 10 Variation of the deformed shape of damage area in ISB panel according to input energy and nose diameter of impact head (Drawing type of impact loading)

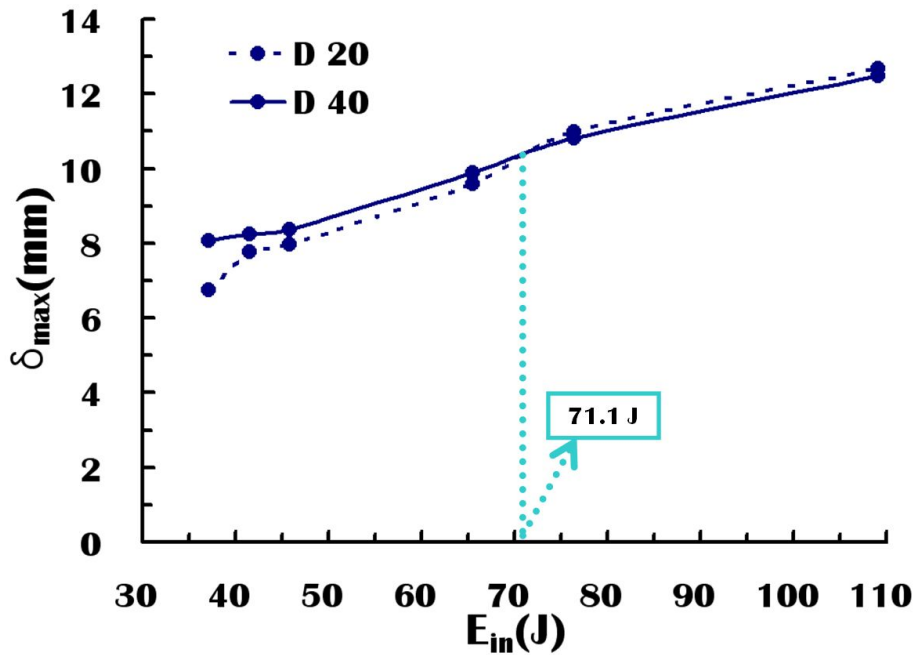


Fig. 11 Comparison of maximum deflection of ISB panel according to input energy and nose diameter of impact head (Drawing type of impact loading)

Fig. 9 에서 45.8 J 이하에서는 충격헤드의 직경이 클수록 하중 및 변위가 큰 경향을 보이며, 이에 따른 충격 흡수에너지는 직경이 40 mm 일 경우 최대 12% 정도 높은 것을 알 수 있었다. 45.8 J 이후에서는 직경이 클수록 하중은 증가하나 변위는 감소하는 경향을 알 수 있으며, 이에 따른 충격 흡수에너지는 직경이 40 mm 일 경우 최대 9 % 정도 높은 것을 알 수 있었다. 이 같은 결과로 미루어 충격 헤드 직경별 충격 흡수 에너지 차이는 충격 입력에너지가 증가 시 점차 감소하는 것을 알 수 있었다. Fig. 10 은 내충격 시험 후 시편 사진이다. 충격 헤드 직경이 20 mm 일 경우 충격 헤드와 시편과 부딪히는 부분에 충격 하중이 집중되어 중앙 부분에만 변형이 집중됨을 알 수 있었으며, 충격 헤드 직경이 40 mm 일 때는 충격 헤드와 시편과 부딪히는 부분 및 타격부 주변까지 변형시키는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11 은 충격 헤드 직경 별 최대 변위를 비교한 선도이다. 71.1 J 이하에서는 충격 헤드 직경 20 mm 일 경우 충격 헤드 직경 40 mm 일 때 보다 최대 16 % 정도 최대 변위가 작음을 알 수 있었으며, 71.1 J 이상에서는 충격 헤드 직경 20 mm 일 때 최대 변위의 경우 2 % 정도 충격 헤드 직경 40 mm 일 때 보다 높음을 알 수 있었다.

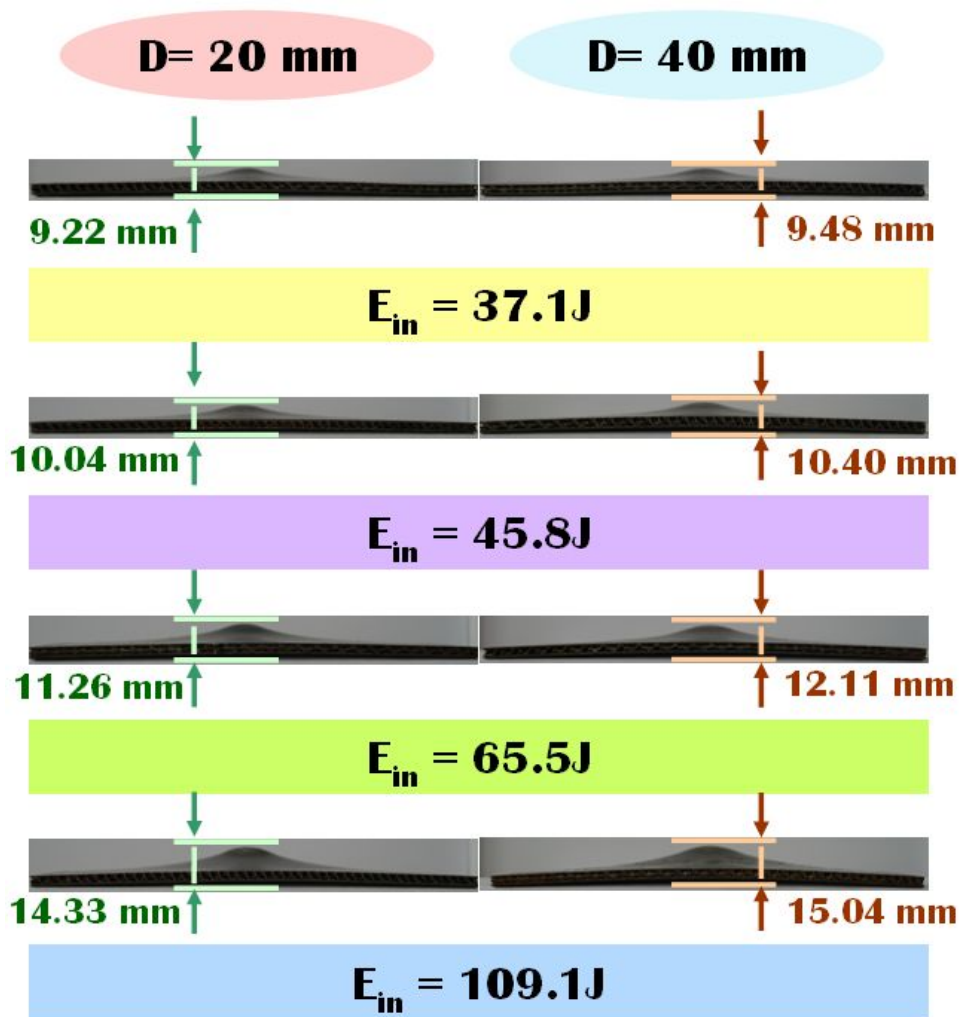
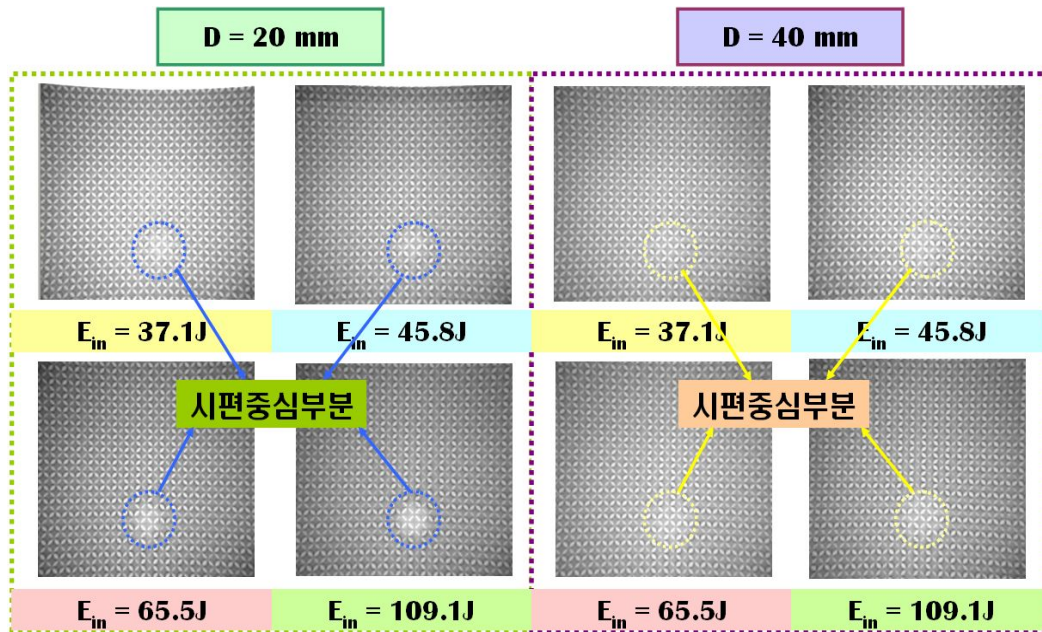
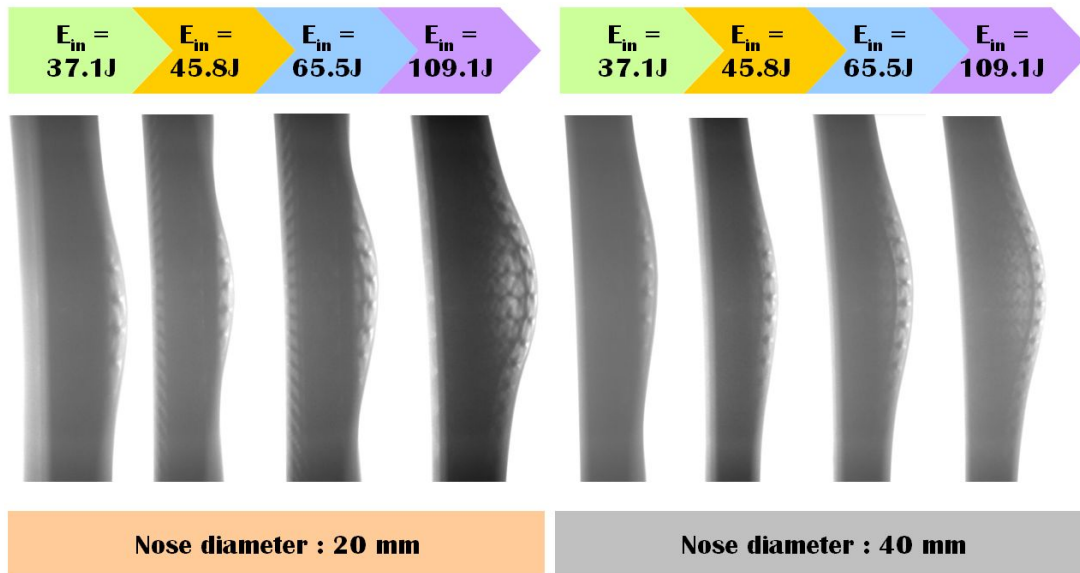


Fig. 12 Variation of penetration depth of ISB panel according to input energy and nose diameter of impact head (Drawing type of impact loading)

Fig. 12 는 충격 시험 후 시편 중심부분의 변형 높이를 비교한 사진이다. 충격 헤드 직경이 작을수록 동일 충격 입력에너지에서 변형 높이가 낮은 경향을 보였다. 이는 충격 헤드 직경이 20 mm 일 경우 충격 하중에 의해 내부 구조체 형상이 무너져 외판 까지 변형을 주지 못해 변형 높이가 낮게 나온 반면, 충격 헤드 직경이 40 mm 일 경우 내부 구조체 형상이 유지되면서 시편에 전체적인 변형을 가져와 변형 높이가 높게 나온 것으로 사료된다.



(a) Deformed shape



(b) Penetration depth

Fig. 13 Influence of impact energies and nose diameters on the deformed shape and the penetration depth of the inner structures subjected to drawing type of impact loading

충격 하중이 ISB 판재에 부가 시 반구형 뒤편 구조체가 무너지면서 충격 헤드의 원형부분을 따라 변형이 이루어지게 되며 내부 구조체 사이가 점점 멀어지게 되며, 그 이후 지속된 하중이 시편에 부가 시 외판과 떨어진 내부 구조체가 맞붙게 된다. 이러한 부분에 대하여 Fig. 6 의 기기로 촬영 시 X - Ray 가 통과하지 못하여 사진에는 하얗게 된 부분이 나타나며, 접촉 정도에 따라 많이 붙어 있을수록 화이트닝이 심하게 나타난다.

Fig. 13 은 ISB 판재의 내부 구조체를 X - Ray 를 이용하여 촬영한 사진이며, Fig. 13 (a) 와 같이 낮은 충격 입력에너지에서는 직경이 클수록 사진에 하얀색 부분이 더 많이 분포하며, 변형량을 비교해본 결과 충격 헤드 직경이 40 mm 일 때가 더 변형량이 많다는 것을 알 수 있었다. 높은 충격 입력에너지에서는 충격 헤드 직경이 20 mm 일 때 시편 중심부위 농도와 하얀색 부분의 경우 충격 헤드 직경 40 mm 일 때 보다 더 많이 분포하고 있음을 알 수 있었다. 이는 20 mm 직경의 충격 헤드가 시편에 충격 하중 부가 시 시편의 내부 구조체가 더 많이 무너짐을 의미하며, 변형량 또한 많음을 알 수 있었다..

또한, Fig. 13 (b) 사진에서 충격 입력에너지 109.1 J 의 사진들을 비교해 보면, 충격 헤드의 직경이 40 mm 인 경우 내부 구조체의 형상을 유지하면서 완만히 변형 되었으나, 20 mm 인 경우 내부 구조체가 급격히 무너져 중앙 부위의 두께가 얇아짐을 볼 수 있었다.

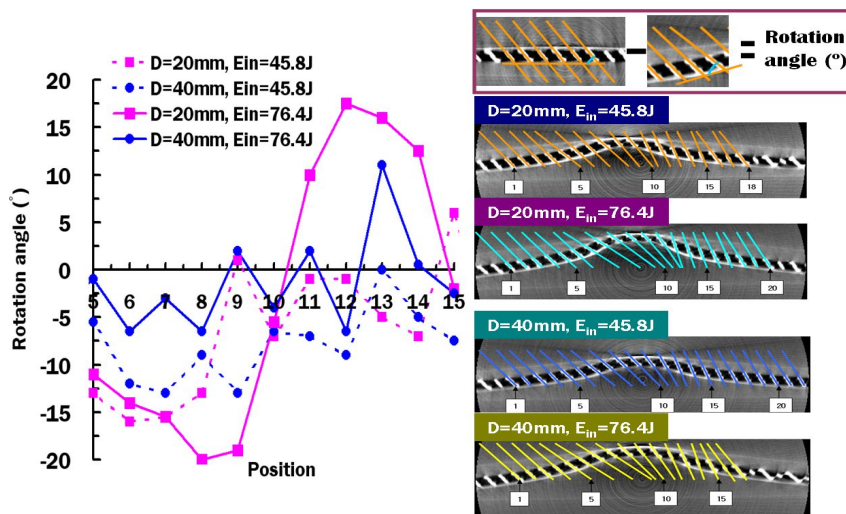


Fig. 14 Influence of impact energies and nose diameters on the sheared deformation of inner structures in the drawing type of impact loading (ISB panel)

Fig. 14 는 내부 구조체의 위치에 따른 변형량과 충격 헤드 직경/충격 에너지 별 ISB 판재의 단층 사진을 나타내었다. 내부 구조체의 변형량 같은 경우 Fig. 14 와 같이 변형 안한 부분의 각도에 변형한 부분의 각도를 산출하여 구하였다. 그래프를 보면 45.8 J 의 충격 입력에너지에서는 충격 헤드 직경이 40 mm 일 경우 변형량이 20 mm 일 때 보다 최대 14° 정도 많음을 알 수 있었으며, 76.4 J 의 충격 입력에너지에서는 충격 헤드 직경이 20 mm 일 경우 변형량이 40 mm 일 때 보다 최대 23.5° 정도 많음을 알 수 있었다.

이런 결과들은 시편의 전체적인 최대 변위에 영향을 끼치게 되며, Table 3 의 충격 헤드 직경 별 최대 변위를 비교해 보면 직경이 20 mm 일 때 시편의 중앙부분이 더 많이 드로잉 되었음을 알 수 있었다.

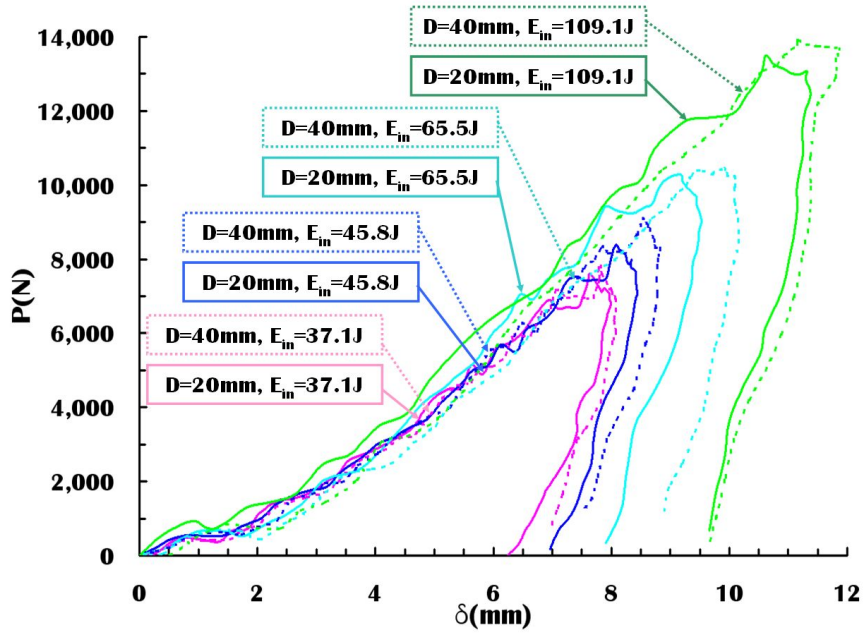
2. SPFC 780 판재에 대한 내충격 실험 결과 및 고찰

최근 승객의 안전성에 대하여 자동차 충돌법규가 강화되고 있음에 따라 자동차 차체에 고장력강을 적용하는 사례가 늘고 있다. 적용된 재료는 급격한 외부 하중이 부가 시 충분히 견딜 수 있는 강도와 강성을 갖춰야 하며, 이런 충격특성 분석에 대한 연구가 수행되고 있다. 차량 충돌 시 발생될 수 있을 만큼의 외부 하중을 고려하여 재료의 충격 거동 및 재료의 파괴 메커니즘에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.²⁸⁻³⁰⁾ 본 연구에서 ISB 판재와 함께 내충격 특성을 비교하기 위하여 함께 수행된 두께 1.7 mm 를 가진 SPFC 780 판재의 경우 앞에 제시한 사례에 적용되는 판재로 현재 현대 자동차에서 생산하고 있는 차종 중 오피러스 임팩트 바에 사용되는 재료로써 고장력강 중에서도 성형성이 우수하며 고강도를 지니며 저항복점을 가진 자동차용 냉간 압연 강판이다.

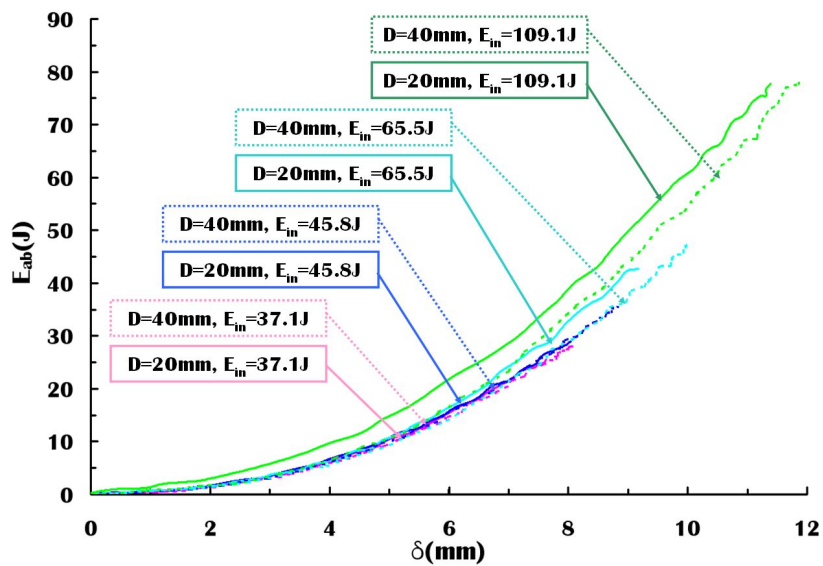
Table 4 와 Fig. 15 는 드로잉 경계조건에서 1.7 mm 두께를 지닌 SPFC 780 판재에 대하여 내충격 실험한 결과이다. Table 4 는 충격 헤드 직경, 시험 높이, 충격입력에너지, 최대 변위까지 충격흡수에너지, 충격에너지 흡수율, 최대 하중, 최대 하중에서 최대 변위 순으로 정리 되어있으며, 충격 입력에너지가 높아질수록 충격에너지 흡수율은 직경에 관계없이 전반적으로 감소함을 알 수 있었으며, 직경이 20 mm 일 때는 최대 6.2 % 정도 직경 40 mm 경우에는 최대 3.7 % 정도 충격 에너지 흡수율이 낮아짐을 알 수 있었다.

Table 4 Results of impact tests of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading

Diameter (mm)	Height (cm)	E_{in} (J)	$E_{ab,p}$ (J)	χ (%)	P_{max} (N)	δ_p (mm)
20	34	37.09	25.55	68.88	7,604.80	7.62
	38	41.45	27.64	66.67	8,006.60	7.90
	42	45.82	29.41	64.20	8,398.60	8.08
	60	65.45	42.66	65.18	10,290.00	9.17
	70	76.36	49.33	64.61	11,338.60	9.77
	100	109.09	75.51	69.22	13,484.80	11.32
40	34	37.09	26.24	70.74	7,830.20	7.82
	38	41.45	31.83	76.78	8,192.80	8.29
	42	45.82	33.39	72.87	9,084.60	8.53
	60	65.45	45.85	70.05	10,446.80	9.92
	70	76.36	52.00	68.10	11,799.20	10.44
	100	109.09	77.79	71.31	13,925.80	11.86



(a) Force - deflection force



(b) Absorbed energy - deflection curves

Fig. 15 Influence of impact energies and nose diameters on the force - deflection and the absorbed energy - deflection curves of SPFC 780 panel subjected to drawing type of impact loading

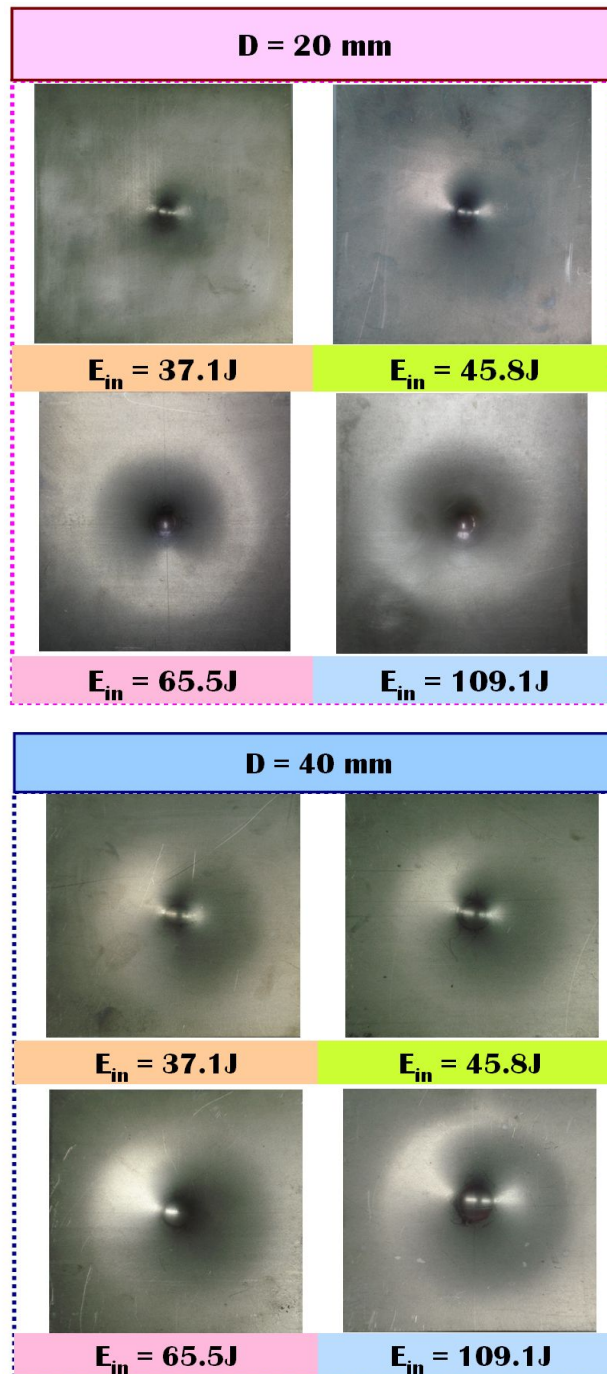


Fig. 16 Variation of deformed shape of damage area in SPFC 780 panel according to input energy and nose diameter of impact head subjected to drawing type of impact loading

Fig. 15 에서 충격 헤드 직경별 충격 특성을 분석해 보면 직경 20 mm 일 경우 최대 하중은 직경 40 mm 보다 전체적으로 작은 경향을 보였으나, 최대 변위는 충격 헤드 직경 20 mm 일 경우 더 많은 경향이 발생함을 알 수 있었다.

이는 Fig. 16 에서와 같이 직경이 작아질수록 충격하중이 전달되는 면적이 줄어들게 되며, 그 면적에 작용하는 하중은 직경에 상관없이 동일하므로, 직경이 작은 쪽에 더 많은 응력집중 발생되어 시편의 최대 변위가 직경이 큰 쪽보다 높다고 사료된다.

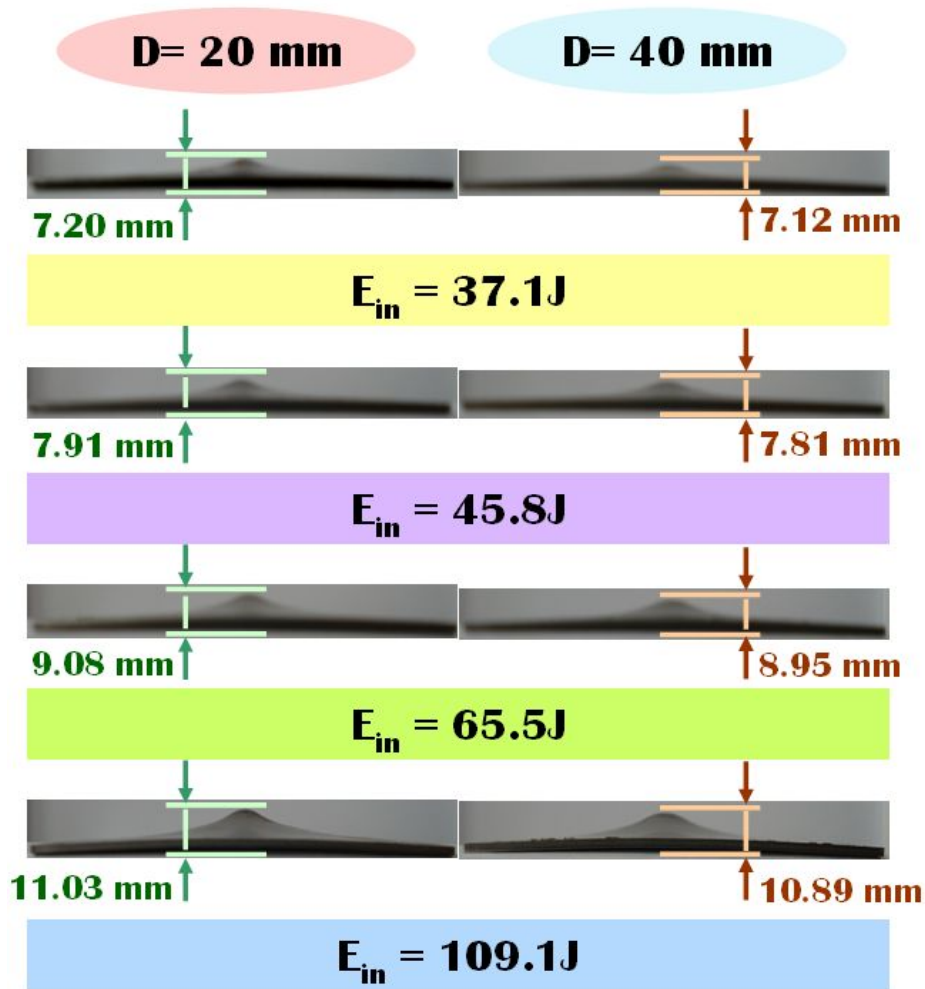


Fig. 17 Variation of penetration depth of SPFC 780 panel according to input energy and nose diameter of impact head subjected to drawing type of impact loading

Fig. 17 에서 충격 헤드의 직경이 20 mm 일 경우 낮은 충격 입력에너지에서는 충격 헤드의 면적이 적어 시편에 충격하중의 집중현상이 일어나 충격 헤드가 직접적으로 타격되는 원형의 띠 부분만 관찰할 수 있으며, 직경이 40 mm 에서는 충격 헤드의 면적이 커 시편에 전체적인 변형을 가져와 충격 헤드가 직접적으로 타격되는 원형의 띠 부분 이외에도 충격부 주위에 형성되는 원형의 띠 부분이 관찰된다. 또한, 시편이 중심 부분에 드로잉 된 양의 경우 앞서 설명한 바와 같이 동일한 충격 입력에너지에서는 충격 헤드의 직경이 작을수록 최대 3 % 까지 높게 나타난다.

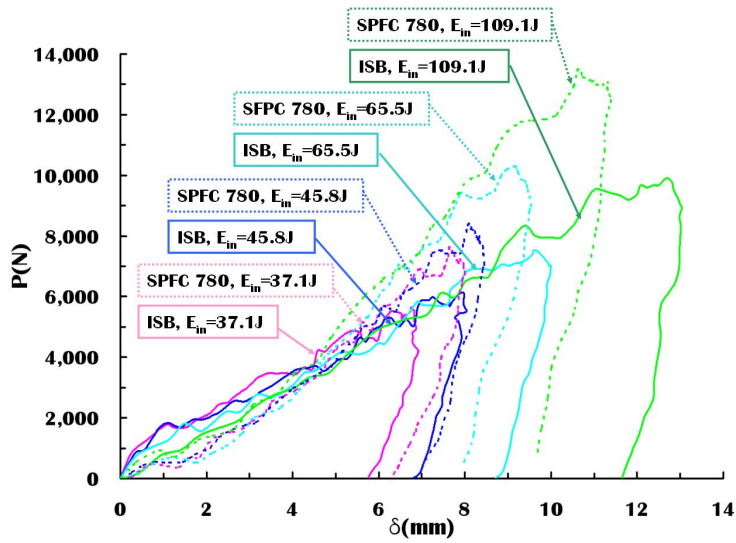
3. 드로잉 경계조건에서의 내충격 특성 비교/분석

본 연구에서는 전단 반구형 내부 구조체를 가진 ISB 판재의 내충격 특성을 분석하기 위하여 고장력 강판인 SPFC 780 판재와 함께 드로잉 경계 조건에서 충격 헤드의 직경 20 mm 와 40 mm 를 이용하여 내충격 실험을 수행하였다.

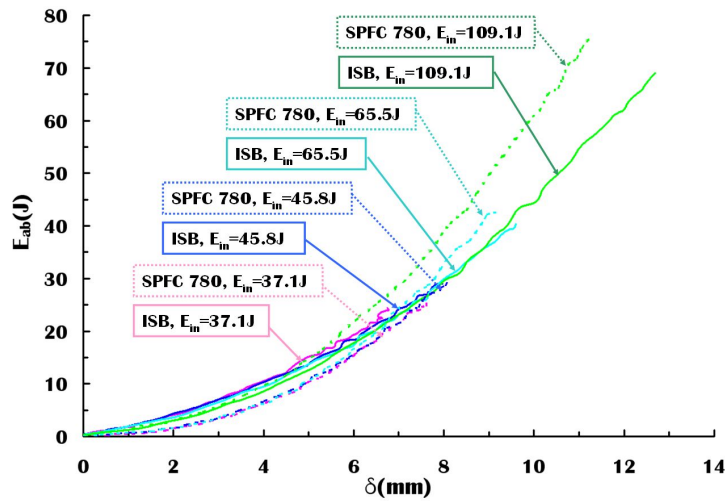
Table 5 Comparison of characteristic data of ISB panel and those of SPFC 780 panel for the drawing type of impact loading (D=20 mm)

Specimen	Height (cm)	E_{in} (J)	$E_{ab,p}$ (J)	$E_{ab,m}$ (J/g)	P_{max} (N)	δ_p (mm)
ISB (Sheet : DP 590)	34	37.09	24.39	0.15	5,635.00	6.74
	38	41.45	26.06	0.16	5,958.40	7.76
	42	45.82	29.06	0.17	6,144.60	7.97
	60	65.45	40.39	0.24	7,536.20	9.60
	70	76.36	46.88	0.28	8,153.60	10.99
	100	109.09	69.01	0.41	9,907.80	12.69
SPFC 780	34	37.09	25.55	0.14	7,604.80	7.62
	38	41.45	27.64	0.15	8,006.60	7.90
	42	45.82	29.41	0.16	8,398.60	8.08
	60	65.45	42.66	0.23	10,290.00	9.17
	70	76.36	49.33	0.26	11,338.60	9.77
	100	109.09	75.51	0.40	13,484.80	11.32

Table 5 는 충격 헤드의 직경이 20 mm 일 때 내충격 시험 결과를 시편 종류, 시험 높이, 충격 입력에너지, 최대 변위까지 충격 흡수 에너지, 단위 무게 당 충격 흡수 에너지, 단위 무게 당 최대 하중, 최대 하중에서 최대 변위 순서로 나타낸 충격 실험 결과이다.



(a) Force - deflection force



(b) Absorbed energy - deflection curves

Fig. 18 Influence of impact energy on the force - deflection and the absorbed energy - deflection curves of ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading ($D=20mm$)

Fig. 18 과 같이 45.8 J 이하에서는 SPFC 780 판재가 ISB 판재보다 하중과 변위가 큰 경향을 보였으나, 45.8 J 이상에서는 SPFC 780 판재가 ISB 판재보다 하중은 크지만 변위는 ISB 판재가 커지는 경향을 보였다. 또한 충격 흡수에너지의 경우 ISB 판재가 SPFC 780 판재보다 동일 충격 입력에너지에서 적은 경향을 보였다.

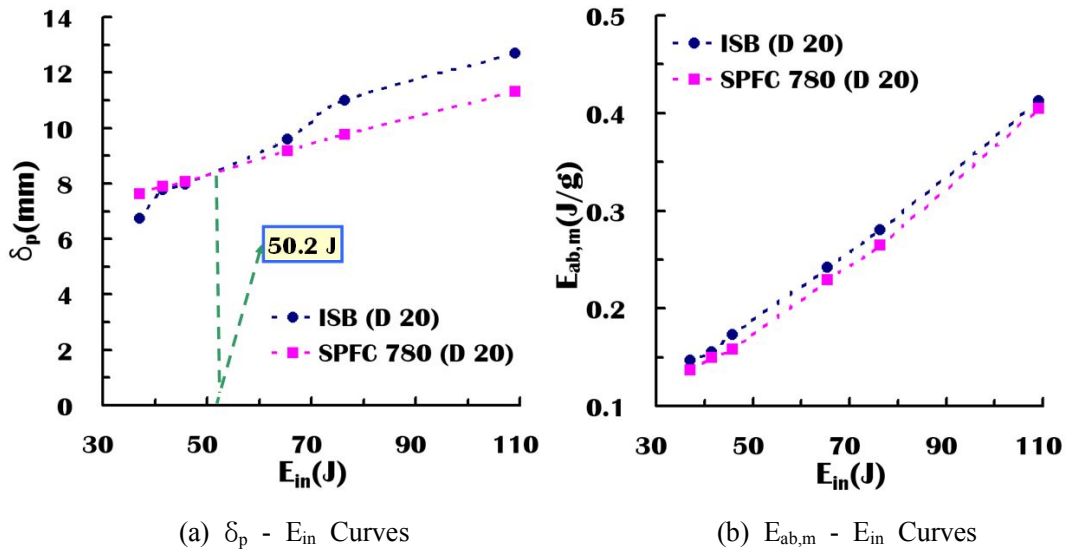


Fig. 19 Comparison of $\delta_p - E_{in}$ and $E_{ab,m} - E_{in}$ curves for ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading (D=20mm)

Fig. 19 는 충격 입력에너지에 따른 최대 하중에서 최대 변위, 단위 무게 당 충격 흡수에너지 순서로 나타내었다. Fig. 19 (a) 와 같이 최대변위의 경우 충격 입력에너지가 50.2 J 이하 일 경우 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 최대 11 % 정도 적었으며, 50.2 J 이상에서는 SPFC 780 판재가 ISB 판재에 비해 최대 13 % 정도 최대변위가 적음을 알 수 있었다. 그 이유는 Fig. 13 과 같이 낮은 충격 입력 에너지에서는 내부 구조체가 그 형상 그대로 유지하면서 변형이 되어 SPFC 780 판재에 비해 변위양이 적은 반면, 높은 충격 입력에너지에서는 ISB 판재의 내부 구조체의 형상이 무너져 SPFC 780 판재에 비해 최대 변위가 높은 것을 알 수 있었다. SPFC 780 판재가 ISB 판재보다 충격 흡수에너지가 큰 경향을 보였으나, Fig. 19 (b) 와 같이 충격 흡수에너지를 단위 무게로 나누어 산출해 본 결과 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 최대 6.4 % 정도 더 많이 충격에너지를 흡수할 수 있음을 알 수 있었다.

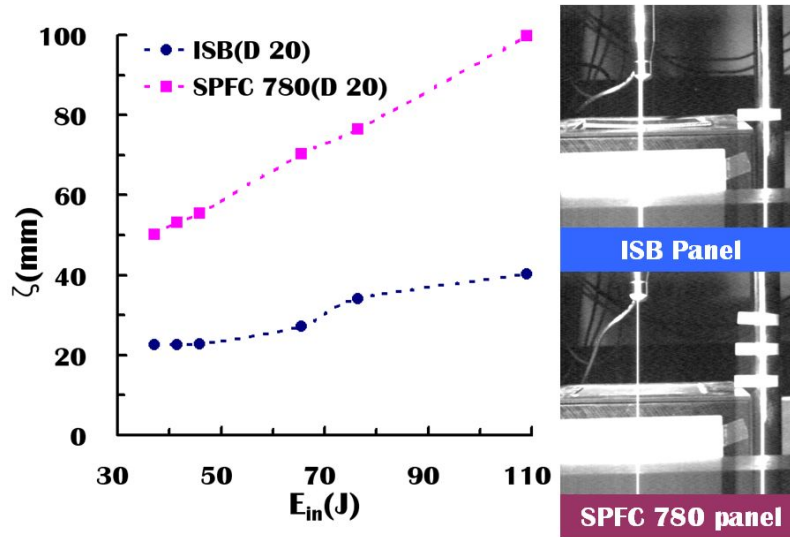


Fig. 20 Comparison of rebounding height for ISB panel and that for SPFC 780 panel (D=20 mm)

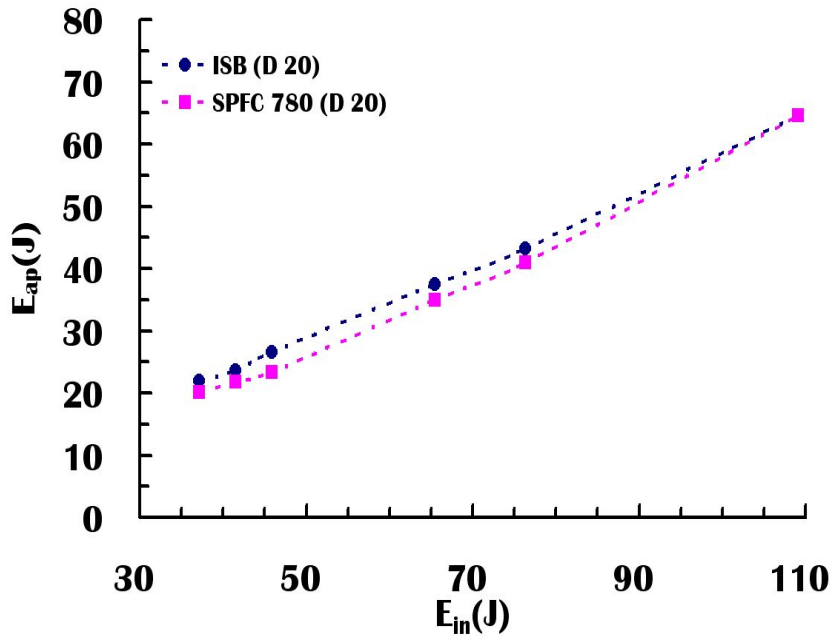


Fig. 21 Comparison of pure absorbed energy for ISB panel and that for SPFC 780 panel (D=20 mm)

Fig. 20 은 충격 헤드가 시편에 충격 하중을 전달 후 튀어 오르는 높이 (ζ) 를 측정한 곡선으로 SPFC 780 판재가 ISB 판재에 비해 튀어 오르는 높이가 최소 55 % 부터 최대 61 % 이상 높게 산출되었다. 이런 결과로 미루어 고장력 특성을 지닌 ISB 판재와 SPFC 780 판재의 충격 흡수에너지 비교 시 되튀김량 만큼의 에너지를 제외한 순수 충격 흡수에너지 (E_{ap}) 산출이 필요하다.

Fig. 21 은 다시 튀어 오르는 높이만큼의 에너지를 제외한 순수 충격 흡수에너지를 비교한 선도이며, SPFC 780 판재와 ISB 판재를 비교해본 결과 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 최대 13.6 % 정도 높은 순수 충격 흡수에너지를 가지고 있음을 알 수 있었다. 이는 시편에 충격 하중 부가 시 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 우수한 충격 흡수 특성을 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.

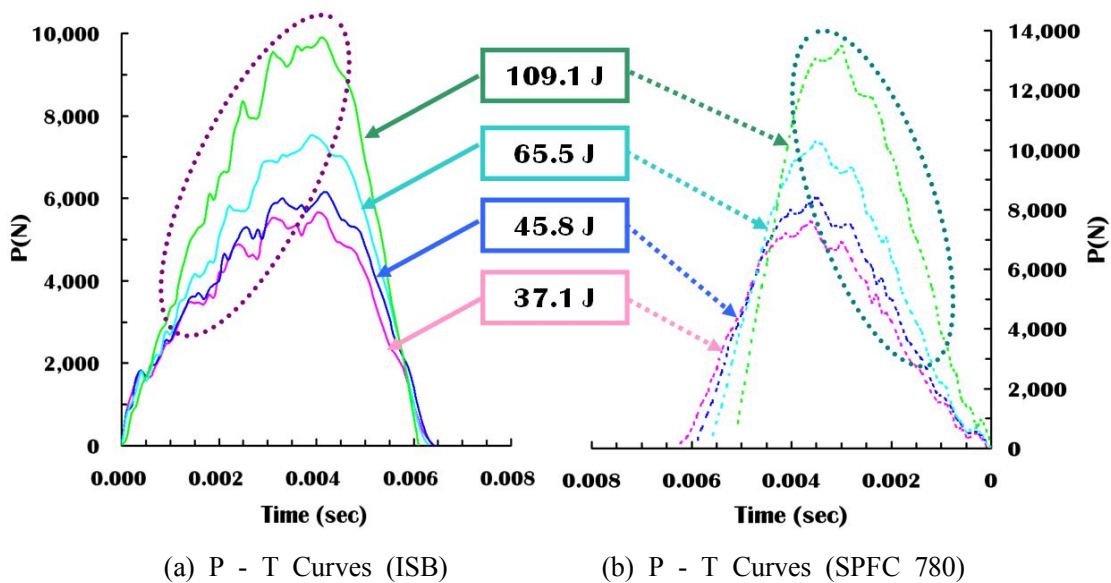


Fig. 22 Comparison of P - T curves for ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading (D=20mm)

Fig. 22 는 시간에 따른 하중의 변화를 나타낸 선도이다. Fig. 22 와 같이 충격 입력 에너지 37.1 J 에서 109.1 J 까지 높아질수록 충격 하중이 시편에 전달되는 시간의 간격은 점차 줄어드는 경향을 보였다. 또한, 두 판재의 하중-시간 선도에서 점선으로 된 부분을 비교했을 경우 ISB 판재의 선도부분이 SPFC 780 판재의 선도보다 많이 불안정한 현상이 발생하였다.

하중이 최대로 가까워지는 지점일수록 충격 하중이 시편에 집중되기 때문에 ISB 판재의 구조 중 외판과 내부 구조체 사이에 결합이 되어있는 부분이 충격하중을 견디지 못해 두 구조물이 떨어져 이러한 현상이 발생한다고 사료된다.

Table 6 Comparison of characteristic data of ISB panel and those of SPFC 780 panel for the drawing type of impact loading (D=40 mm)

Specimen	Height (cm)	E_{in} (J)	$E_{ab,p}$ (J)	$E_{ab,m}$ (J/g)	P_{max} (N)	δ_p (mm)
ISB (Sheet : DP 590)	34	37.09	27.08	0.16	5,860.40	8.07
	38	41.45	29.60	0.18	6,007.40	8.24
	42	45.82	33.05	0.20	6,526.80	8.36
	60	65.45	45.88	0.28	8,418.20	9.90
	70	76.36	51.48	0.31	8,829.80	10.82
	100	109.09	73.65	0.44	10,809.40	12.47
SPFC 780	34	37.09	26.24	0.14	7,830.20	7.82
	38	41.45	31.83	0.17	8,192.80	8.29
	42	45.82	33.39	0.18	9,084.60	8.53
	60	65.45	45.85	0.25	10,446.80	9.92
	70	76.36	52.00	0.28	11,799.20	10.44
	100	109.09	77.79	0.42	13,925.80	11.86

Table 6 는 충격 헤드의 직경이 40 mm 일 때 내충격 시험 결과를 시편 종류, 시험 높이, 충격 입력에너지, 최대 변위까지 충격 흡수에너지, 단위 무게 당 충격 흡수에너지, 단위 무게 당 최대 하중, 최대 하중에서 최대 변위 순서로 나타낸 충격 실험 결과이다.

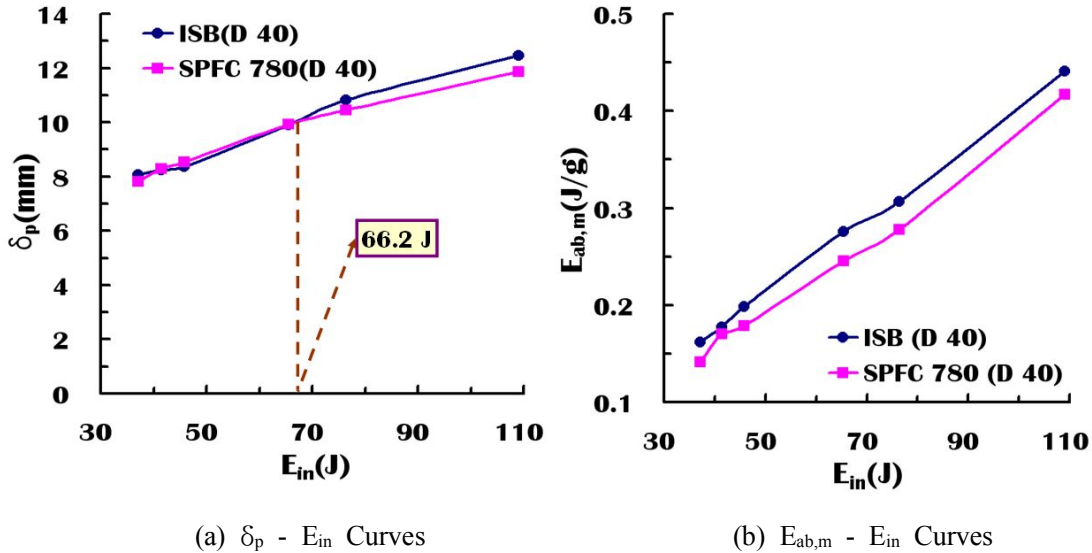


Fig. 23 Comparison of δ_p - E_{in} and $E_{ab,m}$ - E_{in} curves for ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading (D=40mm)

Fig. 23 은 충격 입력에너지에 따른 최대 하중에서 최대 변위, 단위 무게 당 충격 흡수에너지 순서로 나타내었다.

Fig. 23 (a) 와 같이 최대변위의 경우 충격 입력에너지가 66.2 J 이하 일 경우 SPFC 780 판재가 ISB 판재에 비해 최대 2 % 정도 많았으며, 66.2 J 이상에서는 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 최대 5 % 정도 최대 변위가 많음을 알 수 있었다. 그 이유는 Fig. 13 과 같이 낮은 충격 입력 에너지에서는 내부 구조체가 그 형상 그대로 유지하면서 변형이 되어 SPFC 780 판재에 비해 변위양이 적은 반면, 66.2 J 충격 입력에너지 이후에서는 ISB 판재의 내부 구조체의 형상이 무너져 SPFC 780 판재에 비해 최대 변위가 높은 것을 알 수 있었다. SPFC 780 판재가 ISB 판재보다 충격 흡수에너지가 큰 경향을 보였으나, Fig. 23 (b) 와 같이 충격 흡수에너지를 단위 무게로 나누어 산출해본 결과 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 최대 14 % 정도 더 많이 충격에너지를 흡수할 수 있음을 알 수 있었다.

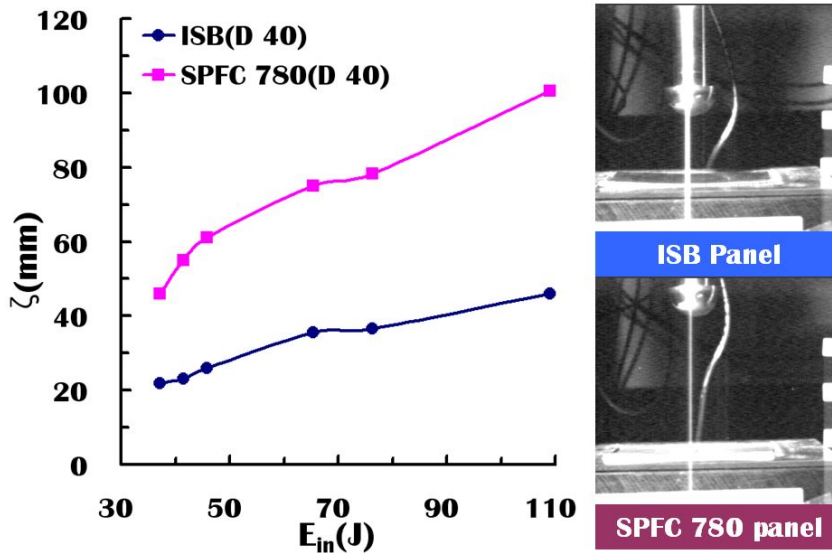


Fig. 24 Comparison of rebounding height for ISB panel and that for SPFC 780 panel (D=40mm)

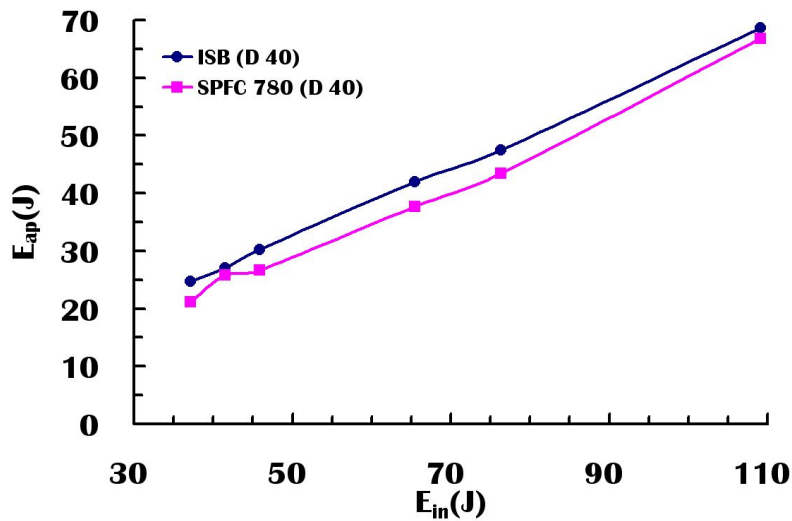


Fig. 25 Comparison of pure absorbed energy for ISB panel and that for SPFC 780 panel (D=40 mm)

Fig. 24 는 충격 헤드 가 시편 에 충격 하중 을 전달 후 튀어 오르는 높이 (ζ) 를 측정 한 곡선 으로 SPFC 780 판재 가 ISB 판재 에 비해 튀어 오르는 높이 가 최소 52 % 부터 최대

58 % 이상 높게 산출되었다. 이런 결과로 미루어 고장력 특성을 지닌 ISB 판재와 SPFC 780 판재의 충격 흡수에너지 비교 시 되튀김량 만큼의 에너지를 제외한 순수 충격 흡수에너지 (E_{ap}) 산출이 필요하다. Fig. 25 는 다시 튀어 오르는 높이만큼의 에너지를 제외한 순수 충격 흡수에너지를 비교한 선도이며, SPFC 780 판재와 ISB 판재를 비교해본 결과 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 최대 13.6 % 정도 높은 순수 충격 흡수 에너지를 가지고 있음을 알 수 있었다. 이는 시편에 충격 하중 부가 시 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 우수한 충격 흡수 특성을 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.

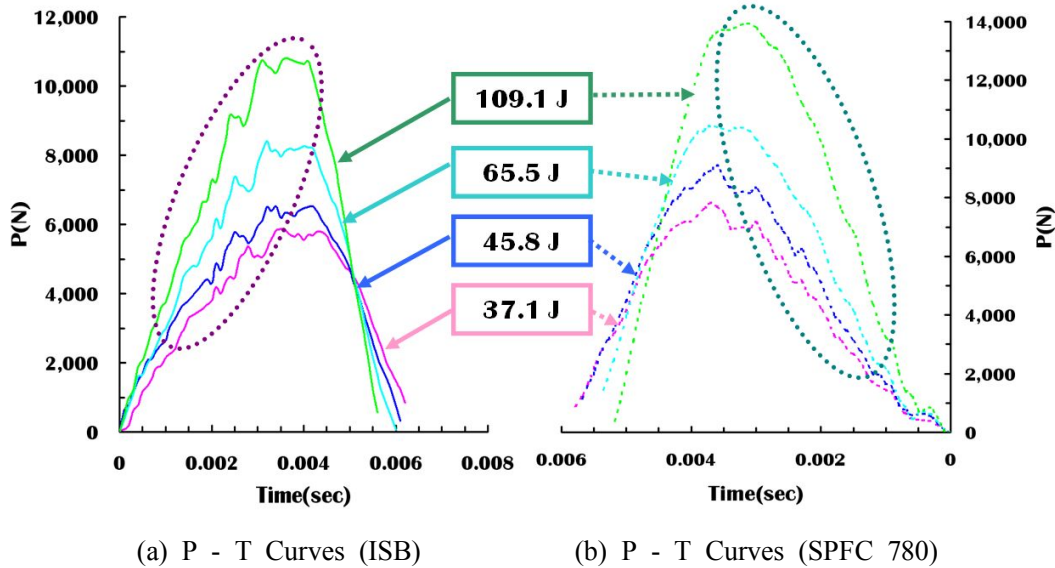


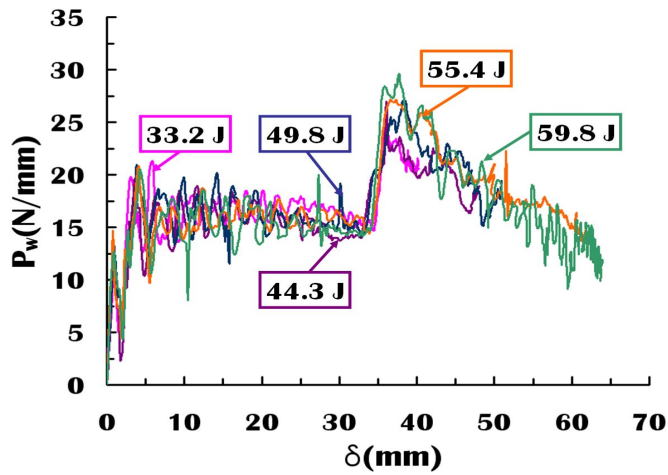
Fig. 26 Comparison of P - T curves for ISB panel with those of SPFC 780 panel for the case of drawing type of impact loading (D=40mm)

Fig. 26 은 시간에 따른 하중의 변화를 나타낸 선도이며, Fig. 26 과 같이 충격 입력 에너지 37.1 J 에서 109.1 J 까지 높아질수록 충격 하중이 시편에 전달되는 시간의 간격은 점차 줄어드는 경향을 보였다. 또한, 두 판재의 하중-시간 선도에서 점선으로 된 부분을 비교했을 경우 ISB 판재의 선도부분이 SPFC 780 판재의 선도보다 많이 불안정한 현상이 발생하였다.

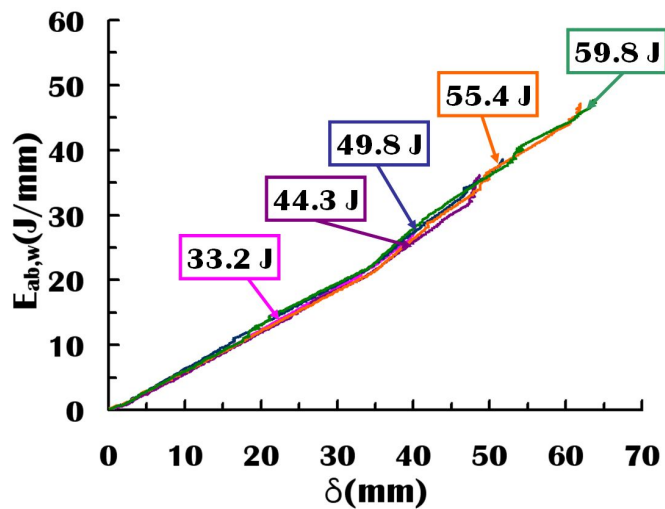
하중이 최대로 가까워지는 지점일수록 충격 하중이 시편에 집중되기 때문에 ISB 판재의 구조 중 외판과 내부 구조체 사이에 결합이 되어있는 부분이 충격하중을 견디지 못해 두 구조물이 떨어져 이러한 현상이 발생한다고 사료된다.

제 2 절 평면 변형 경계조건에서의 내충격 시험

1. 전단 반구형 내부 구조체와 용접된 ISB 판재에 대한 실험 결과 및 고찰



(a) Force per width - deflection curves



(b) Absorbed energy per width - deflection curves

Fig. 27 Influence of impact energies on the Force per width - deflection curves and Absorbed energy per width - deflection curves of ISB panel subjected to plane strain type of impact loading

외관은 DP 590 재질로 이루어져 있으며, 전단 반구형 딤플 내부 구조체 (Sheared dimple inner structure) 와 용접되어 있는 ISB 판재에 대하여 평면 변형 경계조건에서 낙하 무게 11.3 kg 을 가진 충격 헤드로 충격 실험을 수행하였다.

Table 7 Results of impact tests of ISB panel subjected to plane strain type of impact loading

Specimen	Height (cm)	E_{in} (J)	$E_{ab,w}$ (J/mm)	P_w (N/mm)	δ_{max} (mm)
ISB (Sheet : DP 590)	30	33.2	0.73	24.17	40.23
	40	44.3	0.95	26.95	48.70
	45	49.8	0.99	27.00	51.74
	50	55.4	1.23	27.16	61.96
	54	59.8	1.24	29.84	63.98

Fig. 27 과 Table 7 은 전단 반구형 딤플 내부 구조체를 가진 ISB 판재를 이용하여 평면 변형 경계조건에서 충격 실험한 결과이다. Table 7 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.

평면 변형 경계조건의 충격 시험 시편 제작 시 워터제트 (Water jet) 로 가공을 하였으며, 이런 가공은 물줄기의 두께에 따라 2 ~ 3 mm 정도 오차가 발생하는 단점이 발생한다. 본 연구에서 사용된 ISB 판재로 만들어진 충격 시편의 경우 워터제트로 시편을 절단 하여 폭이 일정치 않게 제작되었다. 이런 시편으로 충격 실험한 결과, 최대하중의 경우 충격 입력에너지 49.8 J 에서 충격 입력에너지 55.4 J 보다 10 N 정도 높게 산출 되었다. 이러한 이유로 평면 변형 경계조건의 충격 특성을 분석하기 위하여, 실험 결과를 폭 길이로 나누어 ISB 판재의 충격 특성을 비교/분석하였다.

Fig. 27 을 보면 충격 입력에너지 증가 시 단위 폭 당 최대하중은 점차적으로 증가하는 경향을 보였으며, 단위 폭 당 충격 흡수에너지 역시 동일한 결과를 보였다. 또한, 단위 폭 당 하중과 변위의 선도를 보면, 하중이 급격히 증가하고 감소하는 구간이 많이 발생하는 모습을 볼 수 있다. 이런 현상은 ISB 판재의 구조 중 외판과 내부 구조체 사이에 결합이 되어있는 부분이 충격하중을 견딜 때에는 하중이 증가하다가, 더 이상 충격 하중을 못 이기기고 두 구조물이 떨어져 하중이 감소한다고 사료되어진다.

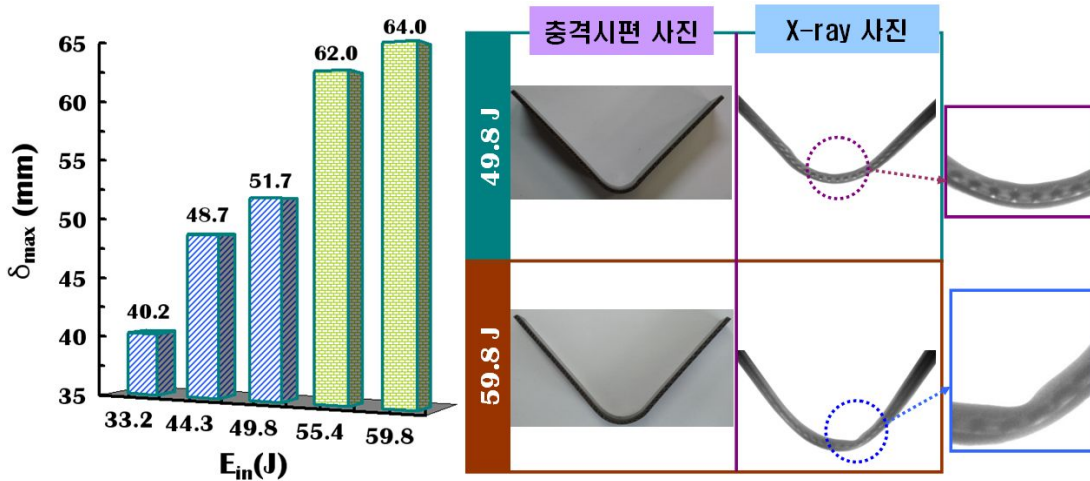


Fig. 28 Influence of impact energies on the maximum deflection and deformed shape of the specimen under plain strain type of impact loading

충격 입력 에너지 49.8 J 의 값이 55.4 J 보다 10 N 정도 하중이 높게 나왔으나 단위 폭 당 하중으로 산출해본 결과 다른 충격 입력 에너지의 경향과 비슷하게 충격 입력 에너지 55.4J 에서 1% 정도 49.8 J 보다 높게 도출됨을 알 수 있었다.

Fig. 28 의 X- ray 사진을 보면 49.8 J 에서는 ISB 판재의 내부 구조체 형상이 무너짐 없이 변형하는 모습을 관찰 할 수 있으나, 59.8 J 에는 시편 중심에서 12 mm 정도 떨어진 내부 구조체 사이의 빈 공간 위에 존재하는 외판에 하중이 집중되어 ISB 시편에 급격한 변형을 가져오게 된다. 이러한 이유로 Fig. 28 의 최대 변위를 비교해 놓은 막대 그래프를 보면, 49.8 J 이후에는 최대변위가 급격히 증가한 것을 볼 수 있다. 또한 단위 폭 당 충격 흡수에너지 역시 시편 변형이 급증함에 따라 충격 흡수량이 증가함을 알 수 있었다.

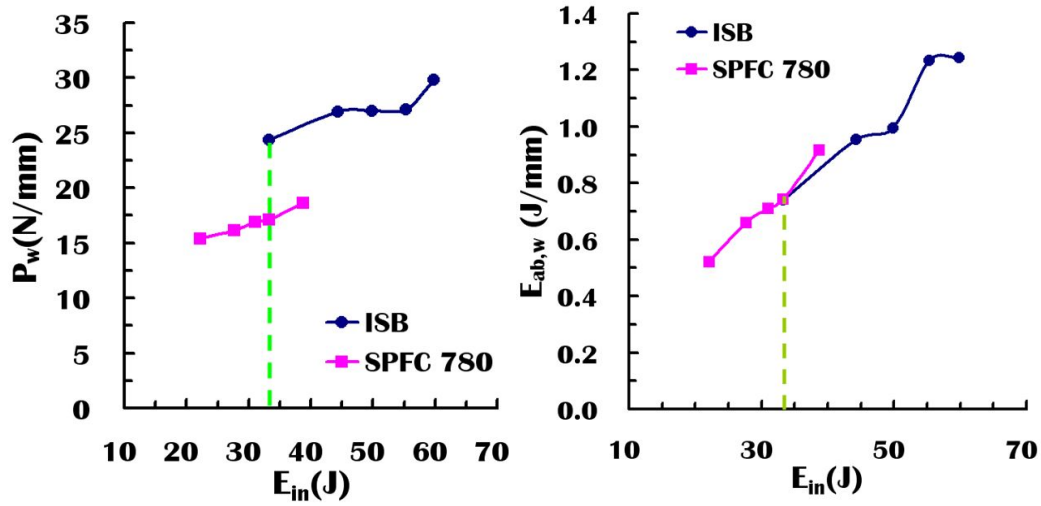
2. 평면 변형 경계조건에서의 내충격 특성 비교/분석

전단 반구형 딥플 내부 구조체를 가진 ISB 판재의 동적 내충격 특성을 분석하기 위하여 고장력 강판인 SPFC 780 판재와 함께 평면 변형 경계 조건에서 반경 15 mm 를 가진 충격 헤드를 이용하여 충격 실험을 수행하였다.

Table 8 과 Fig. 23 은 평면 변형 경계조건에서 충격 시험한 결과이며, Table 8 은 시편 종류, 시험 높이, 충격 입력에너지, 단위 무게 당 충격 흡수 에너지, 단위 폭 당 충격 흡수에너지, 단위 무게 당 최대하중, 단위 폭 당 최대하중, 최대변위 순서로 나타내었다.

Table 8 Comparison of characteristic data of ISB panel and those of SPFC 780 panel under plane strain type of impact loading

Specimen	Height (cm)	E_{in} (J)	$E_{ab,w}$ (J/mm)	P_w (N/mm)	δ_{max} (mm)
ISB (Sheet : DP 590)	30	33.2	0.74	24.17	40.23
	40	44.3	0.95	26.95	48.70
	45	49.8	0.99	27.00	51.74
	50	55.4	1.23	27.16	61.96
	54	59.8	1.24	29.60	63.98
7SPFC 780	20	22.2	0.52	15.42	43.36
	25	27.7	0.66	16.14	53.15
	28	31.0	0.71	16.89	57.46
	30	33.2	0.74	17.15	60.84
	35	38.8	0.92	18.61	69.91



(a) $P_w - E_{in}$ Curves

(b) $E_{ab,w} - E_{in}$ Curves

Fig. 29 Comparison of $P_w - E_{in}$ and $E_{ab,w} - E_{in}$ curves of ISB panel with those of SPFC 780 panel under plane strain type of impact loading

Fig. 29 (a) 와 같이 단위 폭 당 최대 하중의 경우 동일 충격 입력에너지 33.2 J 에서 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 30 % 정도 높게 나온 것으로 미루어 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 충격하중에 대한 저항성이 우수함을 알 수 있었다.

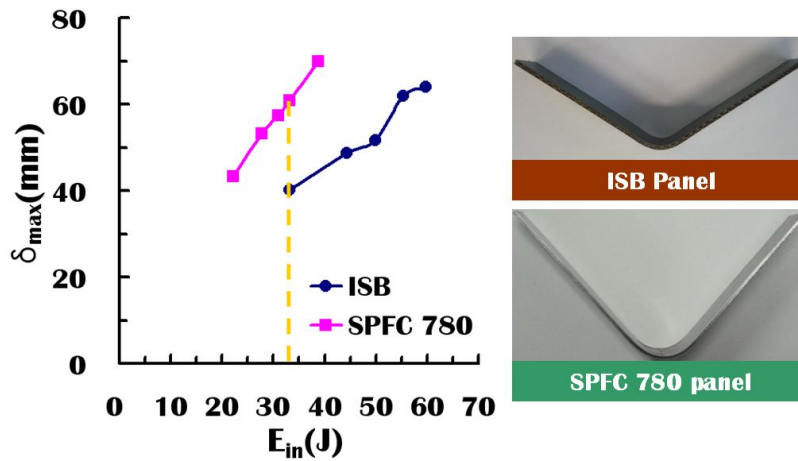


Fig. 30 Influence of impact energies on the maximum deflection and deformed shape for ISB panel with those of SPFC 780 panel under plain strain type of impact loading

Fig. 30 은 ISB 판재와 SPFC 780 판재의 최대 변위를 비교한 그래프와 사진이다. 동일 충격 입력에너지 33.2 J 에서는 SPFC 780 판재가 51 % 정도 높게 나왔으며, Fig. 29 (b) 와 같이 단위 폭 당 충격 흡수 에너지의 경우 동일 충격 입력에너지인 33.2 J 에서 SPFC 780 판재가 0.2 % 정도 차이가 난 것으로 미루어 SPFC 780 판재가 ISB 판재에 비해 많이 변형 하면서 충격하중을 흡수하여 이와 같은 결과가 나온 것으로 사료된다.

또한, SPFC 780 및 ISB 판재의 최종 시험높이가 각기 다른 이유는 각 시편별로 임팩터가 고무에 안 닿는 충격 입력에너지까지 충격 시험을 수행하였기 때문이다. 이로 미루어 ISB 판재가 굽힘에 대한 저항력이 35.2 % 정도 높음을 알 수 있었다.

이러한 결과들로 미루어 ISB 판재가 SPFC 780 판재보다 우수한 내충격 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

제 5 장 ISB 판재의 내충격 특성에 대한 3차원 유한요소해석

제 1 절 평면 변형 경계조건에 대한 3차원 유한요소해석 기법 도출 및 유한요소해석을 통한 ISB 판재의 내충격 특성 분석

1. 유한요소해석방법 및 모델링

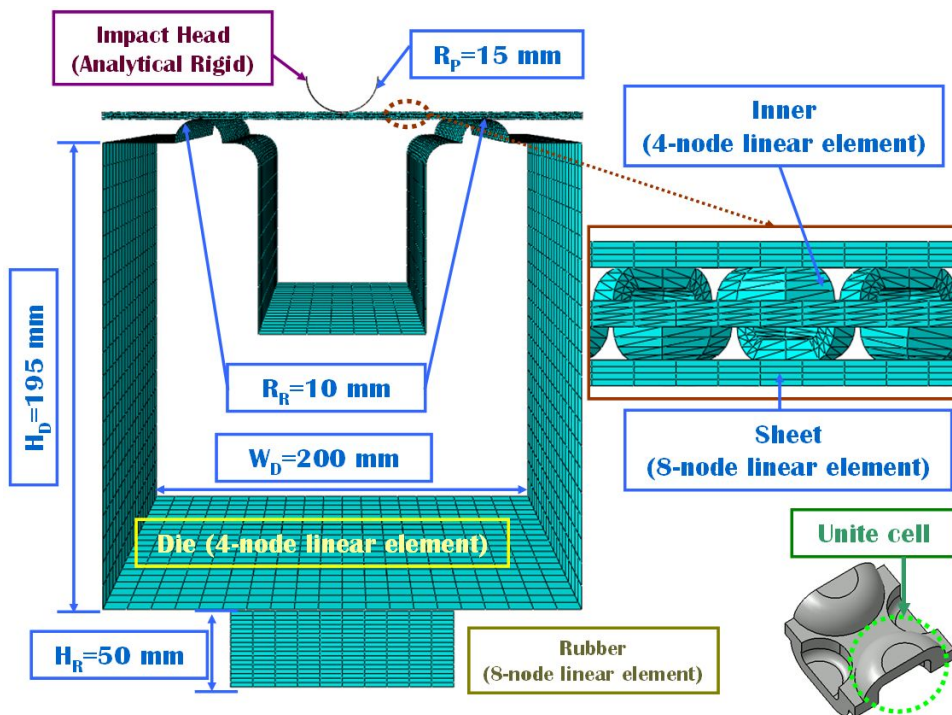


Fig. 31 FE model of the impact analysis of ISB panel

본 연구에서는 ISB 판재의 내충격 특성을 분석하기 위하여 드로잉 경계조건 및 평면변형 경계조건에서 내충격 시험을 수행하였다. 내충격 유한요소해석 또한 이러한 두 가지 경계조건에서 수행한다. 하지만 드로잉 경계조건에서 ISB 충격 시험을 유한요소

해석 모델링으로 제작할 경우 Fig. 31 의 그림 과 단위 셀 (Unit cell) 한 개가 가로세로 82 개 씩 배치되어 상하로 들어가기 때문에 총합 13,448 개의 단위 셀이 위치하게 되어 단순히 모델링만 하는데 어려움이 있다. 또한 유한요소해석 시 생성하게 되는 최적격자는 단위 셀 한 개당 207 개의 요소가 배치되어, 시편 한 개당 2,783,736 개의 요소가 단위 셀들에 배치가 되며 외판 및 단위 셀을 제외한 부분이 더해지면 약 2,800,000 개의 요소를 생성해야한다. 이러한 문제점들 때문에 드로잉 경계조건에서 유한요소해석을 수행하지 못하였다.

평면변형 경계조건은 시편의 국부적인 부분의 변형이 아닌 시편 중앙 부분 전체의 변형을 유도하기 때문에 길이 방향의 변형이 폭 방향으로 유사한 경향으로 변형이 일어난다. 그리고 평면변형 경계조건의 충격 시편 역시 전체적으로 모델링 한다면 2,624 개의 단위 셀이 배치되며, 543,168 개의 요소를 생성해야하기 때문에 단위 셀 크기의 한 줄만 유한요소해석을 하여, 시편 내부 구조체의 변형 형상 및 내충격 특성을 비교/분석하였다.

평면 변형 경계 조건에서 ISB 판재의 내충격 특성 분석을 위하여 수행한 유한요소해석 모델링의 경우 Fig. 31 과 같이 모델링을 제작하였다.

본 연구에서 내충격 해석을 위하여 사용한 유한요소해석방법은 충격 시 충격 헤드가 시편에 부딪혀 발생하는 순간적인 응력전달 및 시편의 거동 현상과 물체와 물체 사이에 존재하는 다양한 접촉 문제를 해석하기에 효율적인 외연적 유한요소법 (Explicit finite element method) 을 사용하였다. 충격 헤드 및 다이 밑에 위치해 있는 고무의 경우 해석 시간 절약을 위하여 축약형 모델로 제작하였으며, 충격 시편은 앞서 설명했던 이유로 한 줄만 제작하였다. 그리고 다이는 해석 시간 절약을 위하여 셀 (shell) 로 모델링 하였다. 유한요소모델링 및 해석은 ABAQUS V6.5 상용프로그램을 이용하여 수행하였다.

충격시편의 모델링은 외판의 경우 8 절점 육면체 솔리드 요소 (8-node linear element) 로 격자를 생성하였으며, 내부 구조체의 경우 4 절점 사면체 요소 (4-node linear element) 로 격자를 생성하였다. 충격부분의 변형 및 충격 메커니즘을 최대한 정확히 분석하기 위하여 충격헤드와 시편이 닿는 부분의 경우 안 닿는 부분보다 3 배 정도 더 많이 격자수를 생성하였다. 충격헤드는 마찰력을 제외한 나머지 조건을 충격실험과 동일하게 부여 하였으며, 분산형 강체 요소로 모델링 하였다. 다이는 충격시편에 의해 전달되는 충격 응력과 분석 및 고무까지 충격 응력파를 전달하기 위하여 4 절점 사각형 셀 (shell) 요소 (4-node linear element) 로 격자를 생성 하였다. 그리고 충격시험 치구 밑에 있는 고무의 경우 크기가 치구에 비해 4 배정도 커 해석시간 감소 및 사용메모리를 최소화하기 위하여 8 절점 육면체 요소 (8-node linear element) 로 된 축약형 모델을

사용하였다. 내충격 유한요소 해석에 사용되었던 유한요소 격자수는 Table 9 와 같다.

Table 9 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis

	Sheet (EA)	Die (EA)	Rubber (EA)
Node	22,510	3,129	3,146
Element	46,476	2,980	2,500

2. 경계조건 및 재료 물성

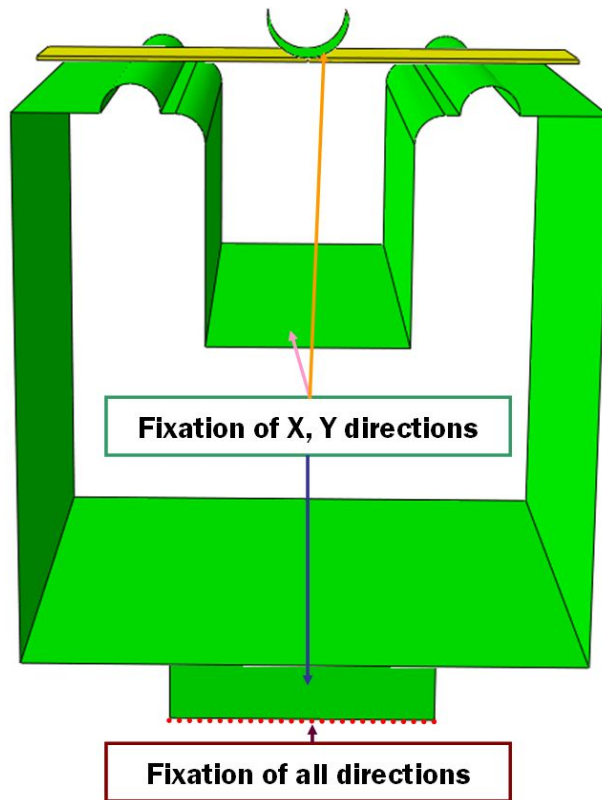


Fig. 32 Boundary conditions of FE analysis

유한요소해석에 적용한 경계조건은 Fig. 32 와 같다. 내충격 유한요소해석에 적용한 경계조건은 충격 헤드와 다이의 경우 내충격 실험과 동일하게 하기 위하여 Z 방향으로만 움직일 수 있게 하였으며, 충격시편은 한 줄로 모델링을 하였기 때문에 실제 시편과 유사하게 변형하도록 시편 옆 방향으로 대칭 경계조건 (Symmetry boundary condition) 을 부여하였다. 또한 고무의 밑 부분은 모든 방향으로 고정하였으며, 고무 옆면의 경우 Z 방향으로만 움직일 수 있게 하였다. 충격 헤드는 시편과 맞닿게 위치시켜 해석을 수행하였다.

유한요소해석에 적용되었던 충격 속도는 충격 임팩터가 내려오면서 발생하는 마찰력에 의하여 감소된 속도를 감안하기 위하여 두 가지로 나누어 적용하였다. 식 (5) 과 같이 내충격 시험 시 수행하였던 높이를 고려한 값에 식 (6) 과 같이 효율을 고려한 속도와 식 (6) 에서 나온 값을 Fig. 33 과 같이 효율 경향을 고려하여 산출한 값을 적용한 속도, 이렇게 두 가지로 선정하여 유한요소해석에 사용하였다.

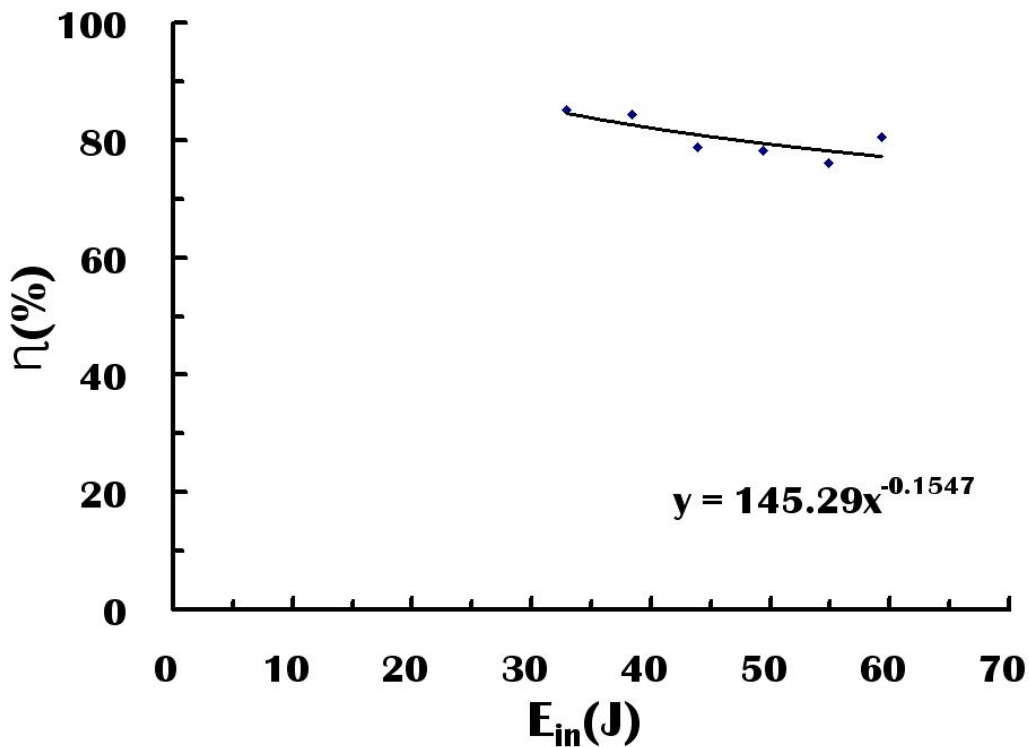


Fig. 33 Measurement of energy efficiency of ISB panel for FE analysis

충격특성을 분석하기 위하여 시편인 ISB 판재의 외판 재질인 DP 590 과 내부 구조체 재질인 Mild steel 은 탄소성 재료로 가정하였다. Mild steel 은 일반적으로 사용되는 물성치를 적용하였으며, 외판의 경우 충격 시 직접 접촉하는 부분이기 때문에 충격 시 발생하는 소성부분의 정확한 해석 결과를 얻기 위해서 변형률 속도가 고려된 재료의 물성치가 필요하다. 이러한 DP 590 판재의 고속인장물성 데이터는 (주) POSCO 에서 Fig. 34 와 같은 고속인장 데이터를 이용하여 ABAQUS 에 DP 590 재료의 소성 물성으로 입력하였으며, 해석에 사용한 DP 590 판재의 밀도는 $7,850 \text{ kg/m}^3$ 으로 설정하였다.

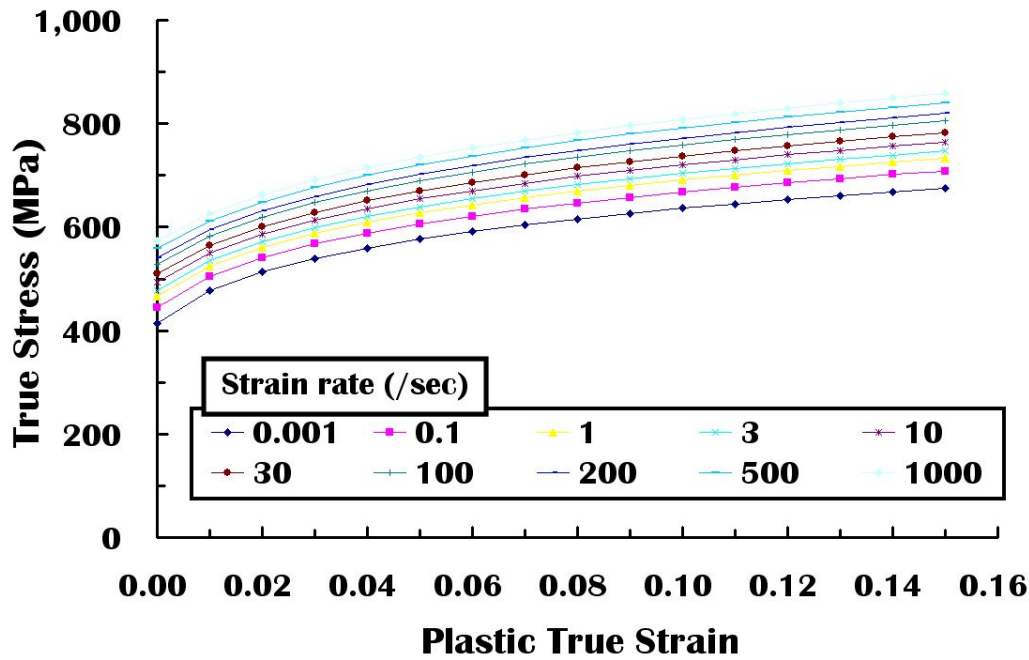


Fig. 34 Results of high speed tensile tests of DP 590 panel

고무는 연성고무로 가정하여 Neo-Hookean 의 Hyper-elastic 모델을 적용하였으며, 밀도는 960 kg/m^3 으로 설정하였다.

3. 3차원 내충격 유한요소해석 모델의 검증

본 연구에서는 ISB 판재의 내충격 특성을 분석하기 위하여 3차원 내충격 유한요소해석을 이용하여 평면변형 경계조건에서 내충격 해석을 수행하였다. CPU 3.16 GHz

인텔 코어 2 듀오 (Intel Core2 Duo CPU of 3.16GHz) 와 RAM 3.25 GB 의 고 사양을 가진 컴퓨터로 39시간 20분 정도 소요될 만큼 해석에 사용된 절점 및 요소 개수가 많았다. 이렇게 수행된 내충격 유한요소해석모델은 해석결과와 내충격 시험 결과를 비교/분석하여 검증하였다.

초기 내충격 유한요소모델에서는 실제 충격시험과 동일하게 모델링은 하였으나, Hyper - elastic 모델이 도입되지 않았다. 그 결과 Fig. 35 와 같이 충격 헤드와 시편 사이에 발생한 진동으로 인하여 해석 초기에 충격속도가 급격히 요동치는 현상이 발생하여, 시편에 충분한 충격하중을 가하지 못하였다. 이 문제를 해결하기 위하여 실제 내충격 실험과 동일하게 다이 밀 부분의 고무를 고려한 축약형 Hyper - elastic 모델을 추가하여, 진동에 의한 문제를 해결할 수 있었다. 최종으로 Fig 35 의 직선곡선과 같이 다이 밀 부분에 Hyper - elastic 모델을 추가하여 보다 실제 내충격 실험과 유사한 결과를 도출하였다.

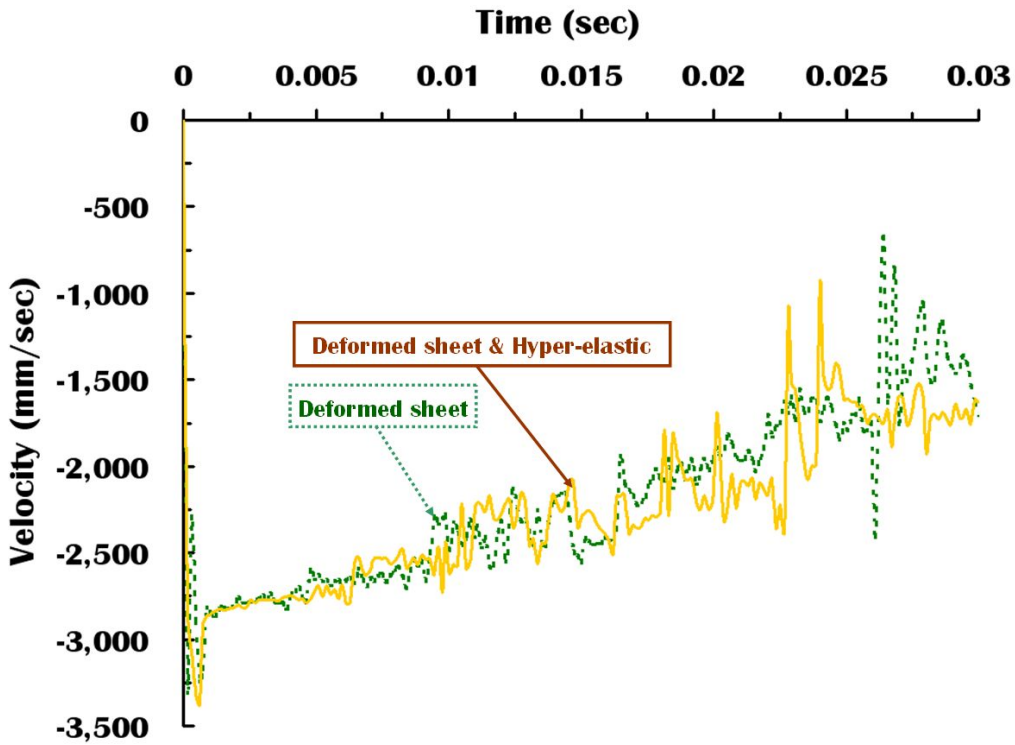
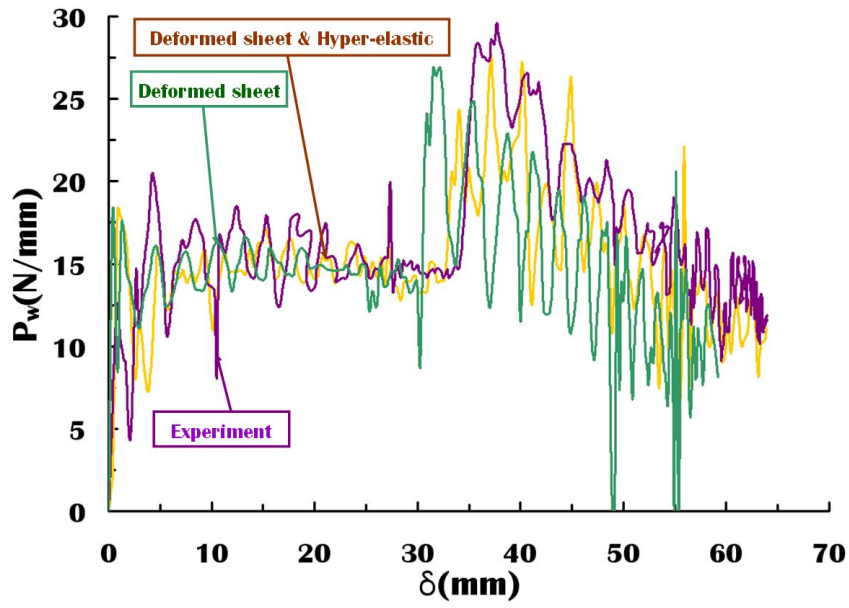
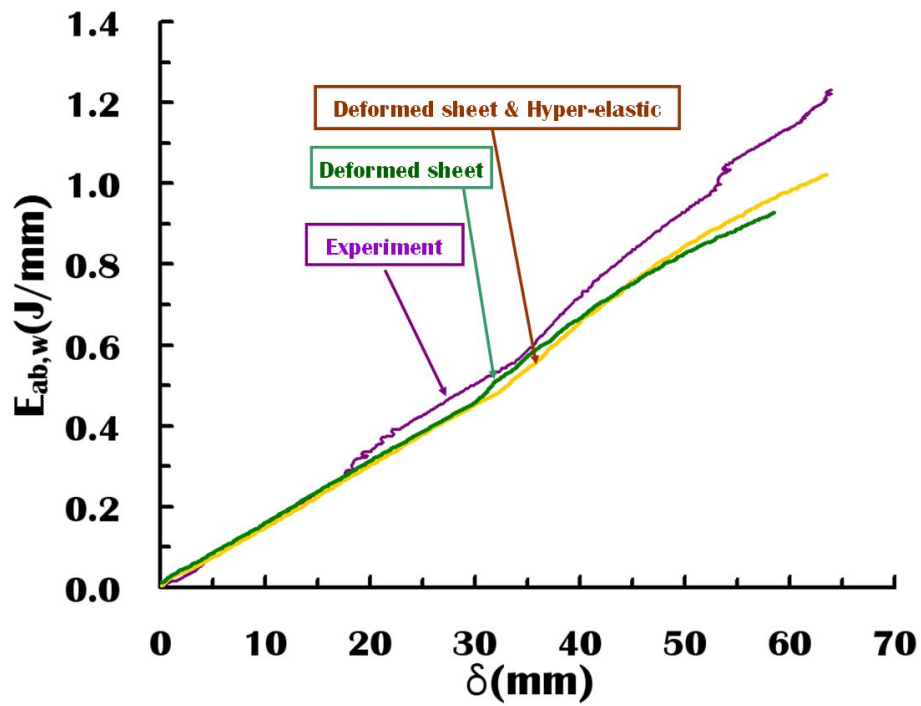


Fig. 35 Influence of analysis condition on the time history of node velocity in the center point



(a) Force per width - deflection curves



(b) Absorbed energy per width - deflection curves

Fig. 36 Comparison of the force - deflection and the absorbed energy - deflection curves for experiments with those of FE analyses ($E_{in}=59.8$ J)

Table 10 Comparison of characteristic data of experiments and those of FE analyses

($E_{in}=59.8$ J)

	E_{in} (J)	$E_{ab,w}$ (J/mm)	χ (%)	P_w (N/mm)	δ_{max} (mm)
Experiment	59.8	13.82	23.12	29.59	63.98
Deformed sheet	59.8	11.67	19.51	26.88	59.17
Deformed sheet & Hyper - elastic	59.8	12.28	20.53	27.69	63.91

ISB 판재의 평면변형 경계조건에서 3차원 충격 유한요소해석 결과와 내충격 실험결과는 Table 10 와 Fig. 36 과 같은 결과를 얻을 수 있었다. Table 10 은 충격 입력에너지, 단위 폭 당 충격 흡수에너지, 충격 에너지 흡수율, 단위 폭 당 최대하중, 최대변위 순서로 나타내었다.

Table 10 및 Fig. 36 에서와 같이 단위 폭 당 충격 흡수 에너지의 경우 Hyper-elastic 모델의 추가로 15.5 %에서 11.1 % 로 오차를 줄일 수 있었으며, 단위 폭 당 하중의 경우 초기 모델과 실험과 비교한 결과 9.2 % 정도 낮게 산출되었으나, 실험을 감안한 추가적인 경계조건인 모델로 인하여 6.4 % 까지 오차를 줄일 수 있었다. 최대 변위는 최적모델 적용 시 오차범위를 0.1 % 까지 줄일 수 있었다. Fig. 36 (a) 를 보면 P- δ 선도의 중간 부분과 같이 다시 한 번 하중이 급격히 증가하는 현상이 발생하는 이유는, 시편에 충격하중을 가했을 시 시편이 임팩터 충격 하중을 견디지 못하여 시편 형상이 무너지면서 다이 안쪽 모서리 부분에 닿았기 때문이다. 내충격 유한요소 해석 시 이러한 부분까지 고려하여 해석한 결과 실제 실험과 유사하게 결과가 산출되었다. Fig. 37에서 유한요소 해석결과의 경우 시편 중심에서 11.5 mm 정도 떨어진 부분 중 내부 구조체의 빈 공간에 위치한 외판에 국부적으로 변형이 생기는 현상이 발생했으며, 실제 실험 결과 역시 시편 중심에서 12 mm 정도 떨어진 부분에 국부적인 변형이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 결과들로 미루어 본 연구에서 제시한 평면변형 경계조건에서 유한요소 내충격 모델링이 실제 내충격 실험을 유사하게 묘사할 수 있음을 알 수 있었다.

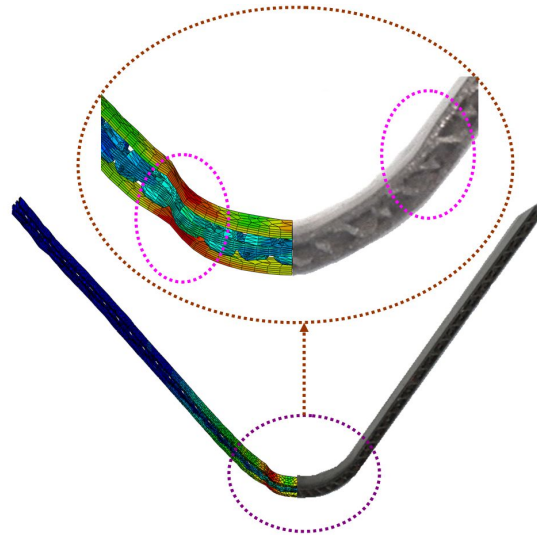


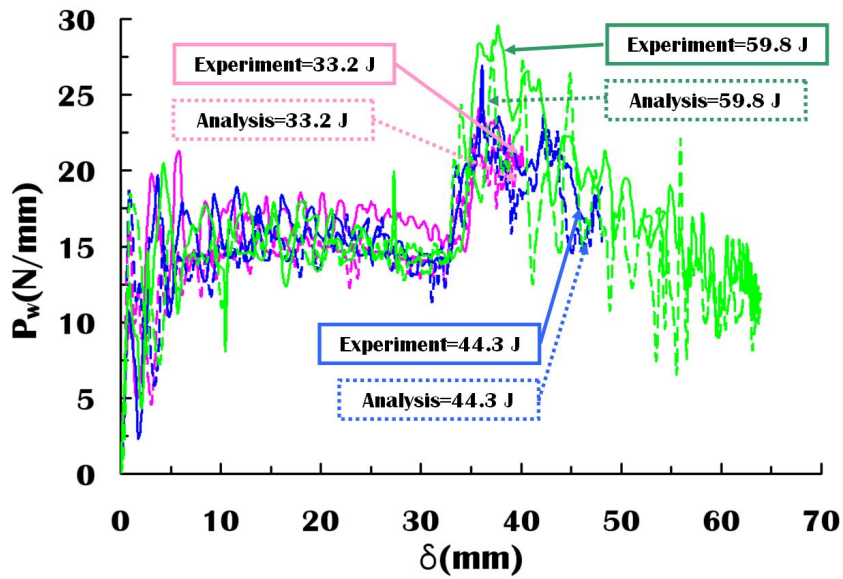
Fig. 37 Comparison deflection shapes for experiments with those of FE analyses
(Estimated Impact time=22.5 ms, E_{in} =59.8 J)

4. ISB 판재의 내충격 유한요소해석 결과 및 고찰

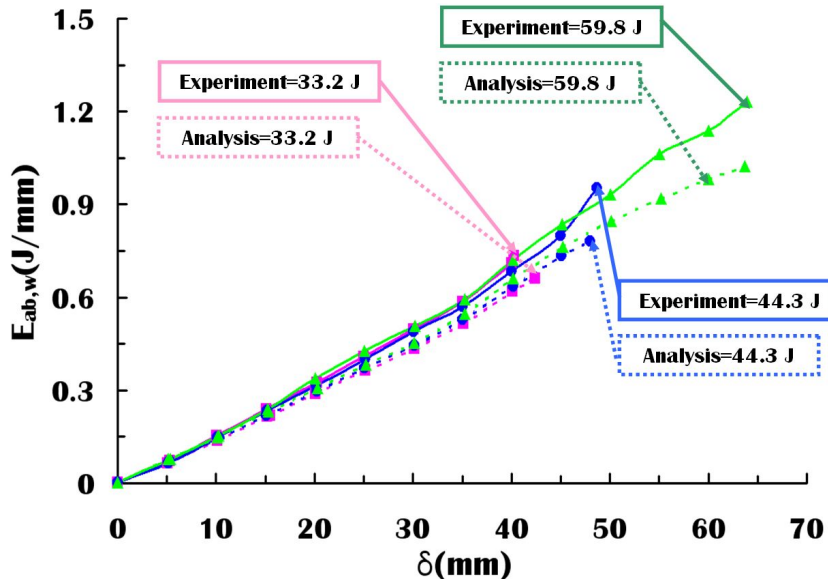
Table 11 Comparison of characteristic data of experiments and those of FE analyses under plain strain type of impact loading

Results	E_{in} (J)	$E_{ab,w}$ (J/mm)	P_w (N/mm)	δ_{max} (mm)
Experiment	33.22	0.73	24.17	40.23
Analysis	33.22	0.66	22.29	42.39
Experiment	44.30	0.95	26.95	48.70
Analysis	44.30	0.75	23.71	48.03
Experiment	59.80	1.23	29.59	63.98
Analysis	59.80	1.02	30.72	63.91

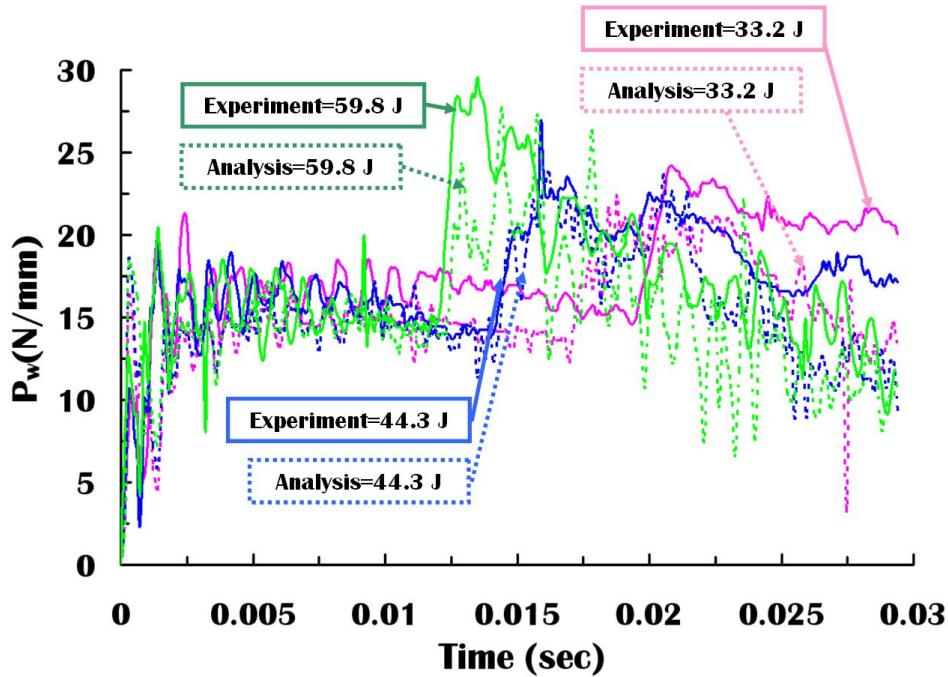
본 연구에서는 ISB 판재에 대하여 평면 변형 경계조건에서 3 차원 내충격 유한요소 해석을 수행하였다. Table 11 은 내충격 실험 결과와 해석결과를 충격 입력에너지, 단위 폭 당 충격 흡수에너지, 단위 폭 당 최대하중, 최대변위 순서로 나타내었다.



(a) Force per width - deflection curves



(b) Absorbed impact energy per width - deflection curves



(c) Force per width - time curves

Fig. 38 Comparison of $P_w - \delta$, $E_{ab,w} - \delta$ and $P_w - \text{time}$ curves of ISB panel with those of SPFC 780 panel under plane strain type of impact loading

Table 11 과 Fig. 38 은 내충격 유한요소해석 결과와 실제 내충격 실험과 같이 비교하여 나타내었다. Fig. 38 (a) 는 단위 폭 당 하중과 변위를 나타낸 선도로 내충격 실험 시 발생하였던 충격 입력에너지 59.8 J 에서 실제 내충격 실험과 비교하여 하중의 경우 6.4 % 정도 변위의 경우 0.4 % 정도 오차를 보였다. 이로 미루어 하중 및 변위를 유한요소해석결과가 유사하게 묘사할 수 있음을 알 수 있었으며 충격 입력에너지가 증가할 수 록 최대하중은 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 38 (b) 는 단위 폭 당 충격 흡수 에너지와 변위를 나타낸 선도로 내충격 실험 결과가 유한요소해석결과보다 최소 10 %에서 최대 18 % 정도 많음을 알 수 있었다. 이는 내충격 유한요소해석 시 ISB 판재의 용접부분 파손정도를 정확히 고려하지 않아 실험결과와 해석 결과가 다르게 나온 것으로 사료된다. Fig. 38 (c) 는 하중과 시간으로 나타낸 선도로 처음부분에 하중이 급격히 상승하는 이유는 Fig. 39 와 같이 0.3 ms 일 때는 하중이 시편 중앙부에 집중되어 시편 양쪽의 롤 부분에 있는 시편이 휘어지게 되어 하중

-시간 곡선에 상승을 일으키며, 0.6 ms 와 같이 다이 양쪽 롤 부분의 시편 끝부분에서 스프링백 현상이 발생하여 시편 중앙으로 변형이 집중되어 하중-시간 곡선부분의 하중이 낮아지게 된다고 사료된다.

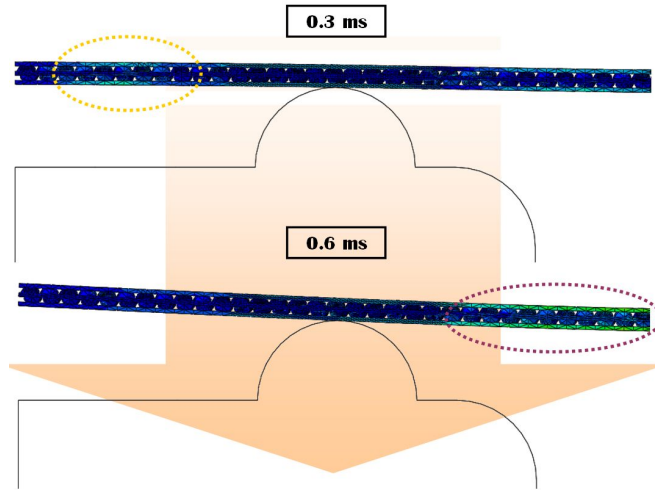


Fig. 39 Variation of deformation of ISB panel according to impact time under plane strain type of impact loading ($E_{in}=59.8$ J)

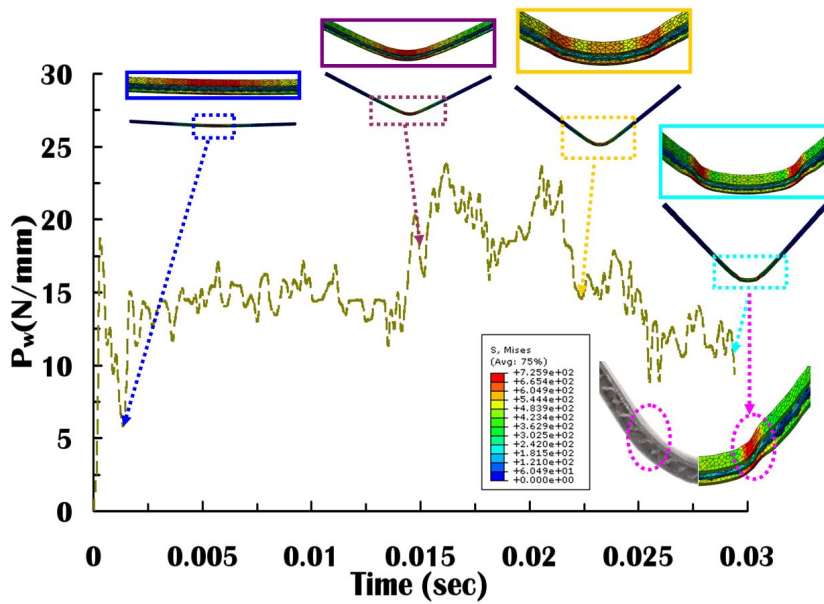


Fig. 40 Force - deflection curve and the deflection shape for each impact time ($E_{in}=44.3$ J)

Fig. 40 은 시간이 지남에 따라 시편의 변형 형상을 나타낸 그림이다. 초기에는 시편 중앙에 집중되던 하중이 14 ms 이후 시편과 다이 안쪽 모서리 부분에 닿아 다시 한 번 하중이 증가하게 되며, 22.5 ms 부터 시편 중앙에서 10.6 mm 떨어진 부분 중 내부 구조체의 빈 공간에 위치한 외판에 국부적으로 변형 발생하며, 이와 동시에 충격 헤드 중심과 시편의 중심이 떨어지게 되어 하중이 떨어지게 된다.

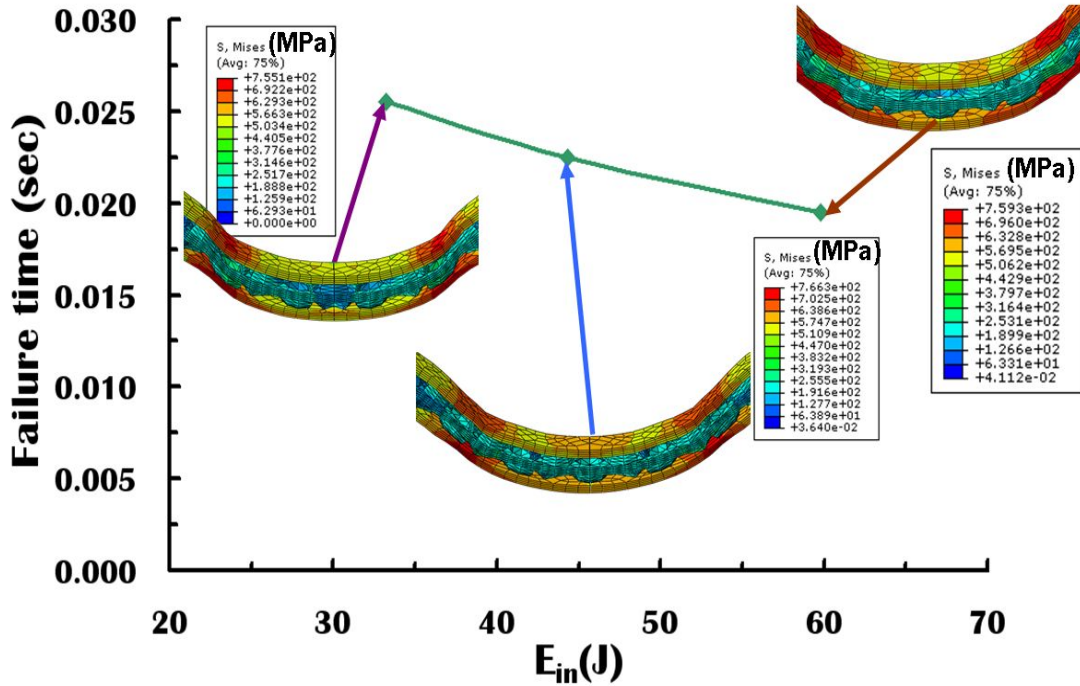


Fig. 41 Variation of failure time of ISB panel according to impact time under plane strain type of impact loading

Fig. 41 은 충격 입력에너지에 따라 시편에 국부적인 변형이 발생하는 시간을 나타낸 그림이다. Fig. 41 에서와 같이 충격 입력에너지가 증가 시 국부적인 변형이 발생하는 시간은 짧아지며, 변형되는 부위의 경우 중심에서 33.2 J 에서는 9 mm, 44.3 J 에서는 10.6 mm, 59.8 J 에서는 11.5 mm 정도 떨어져 발생하였다. 이런 결과들로 미루어 낮은 충격 입력에너지의 경우 변형되는 부분의 위치는 중심과 가까우며 변형정도가 심한 반면, 충격 입력에너지가 높아질수록 변형하는 부위의 위치는 중심에서 점점 멀어지며, 시편의 전체적인 변형을 가져오기 때문에 변형정도는 낮은 충격 입력에너지보다 약하게 발생한다.

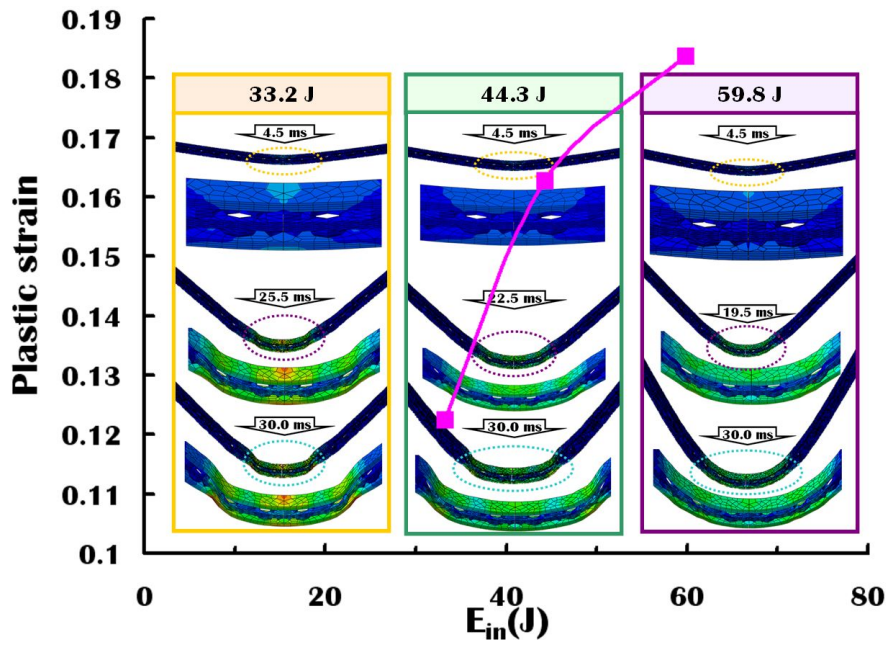


Fig. 42 Variation of plastic strain distribution of ISB panel according to impact time under plane strain type of impact loading

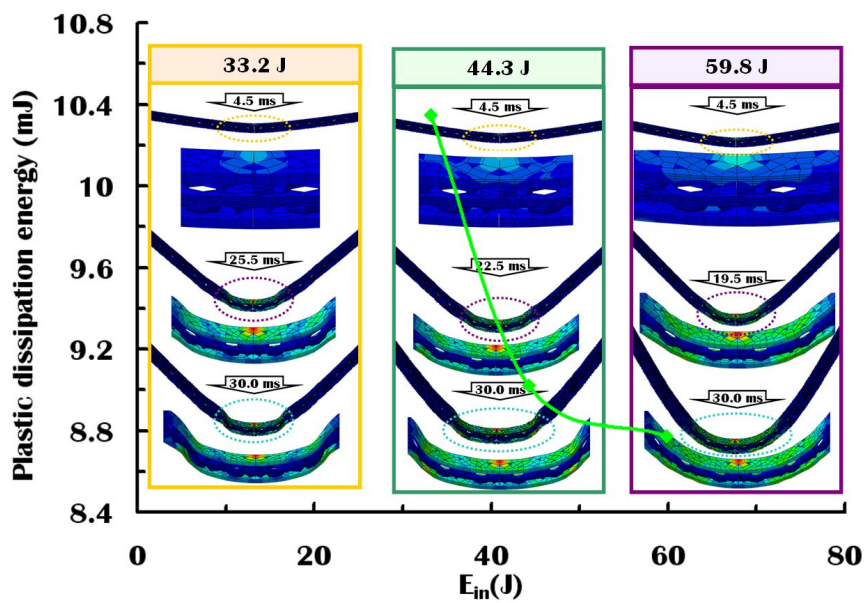
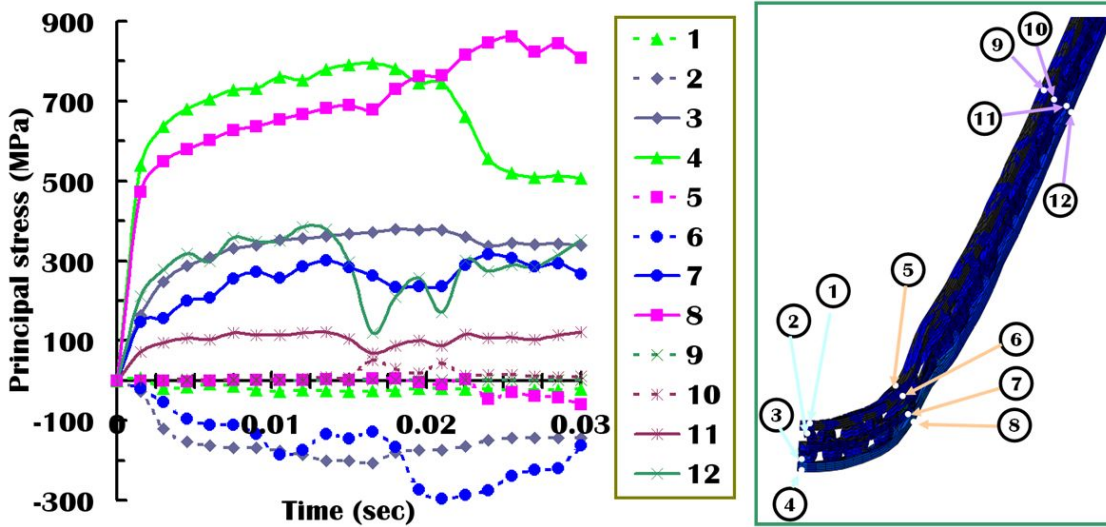
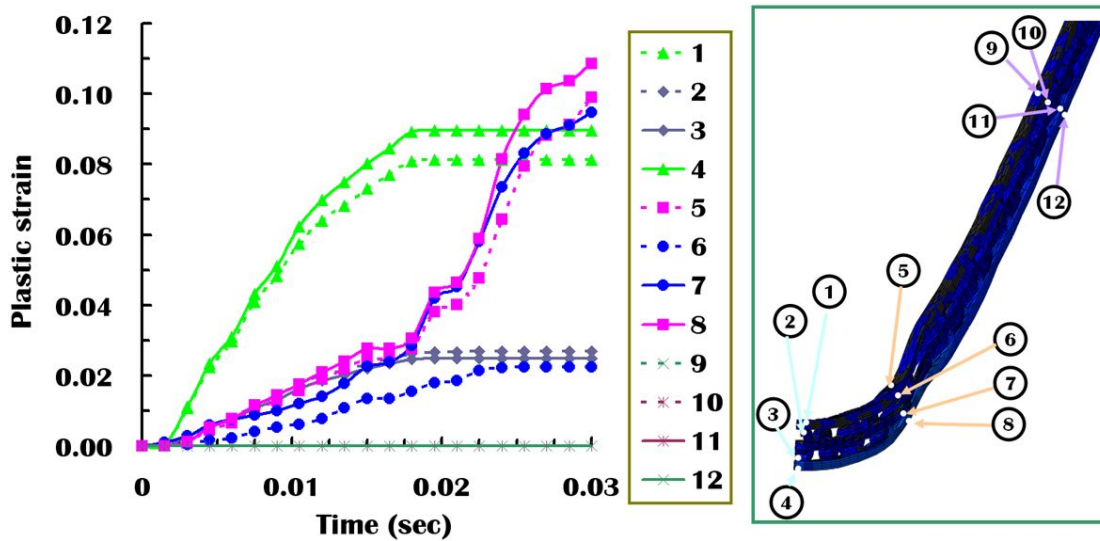


Fig. 43 Variation of plastic dissipation energy distribution of ISB panel according to impact time under plane strain type of impact loading



(a) Principal stress - time curves



(b) Plastic strain - time curves

Fig. 44 Influence of impact times on the principal stress and plastic strain for ISB panel under plain strain type of impact loading ($E_{in}=44.3J$)

Fig. 42 에서와 같이 충격 입력에너지가 증가할수록 소성 변형률은 증가함을 알 수 있었으며, 충격 입력에너지 33.2 J 과 59.8 J 비교해보면 33.5 % 정도 증가한 것을 알 수 있었다. 또한 시편의 중심과 국부적인 변형이 발생하는 곳에 소성 변형이 집중됨을 알 수 있었다. Fig. 43 은 소성변형에 의한 손실 에너지 분포를 나타낸 유한요소해석 결과이다. 충격 입력에너지가 증가 시 소성 손실 에너지는 작아지는 경향을 보였으며, 33.2 J 과 59.8 J 비교해보면 18 % 정도 차이가 남을 알 수 있었다. 이와 같은 결과들로 충격 입력에너지가 증가 할수록 시편에 높은 변형률 속도를 유도시켜 변형을 증가시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 44 (a) 는 충격 입력에너지 44.3 J 에서 유한요소해석 결과로, ISB 시편의 각 부분에 대한 주응력을 나타냈다. 기준은 충격 헤드와 맞닿는 시편의 면으로 선정하였으며, 국부적인 변형이 발생한 시간은 22.5 ms 이다. 충격하중 부가 시 충격 헤드와 맞닿는 면의 경우 시편 중심 (1번) 에서는 27 MPa 정도의 적은 압축 응력이 시편에 부가되며, 국부적인 변형이 발생하는 부분 (5번) 에서는 22.5 ms 이후에 59 MPa 정도의 압축응력이 발생된다. 내부 구조체와 외관이 맞닿는 상, 하면의 경우 시편 중심에서는 국부적인 변형이 발생되기 전까지 상, 하면에 207 MPa 정도의 압축 응력 (2번) 및 378 MPa 정도의 인장응력 (3번) 이 부가 되며 이후에는 점차 감소하며, 국부적인 변형이 발생한 부분 (6, 7번) 에서는 22.5 ms 이후 상, 하면에 인장, 압축응력이 증가한다. ISB 판재의 가장 바깥면 (4번) 의 경우 시편 중심에서는 22.5 ms 전까지 794 MPa 정도의 인장응력이 부가되며, 22.5 ms 이후에는 충격 헤드와 시편이 떨어지기 시작하면서 인장응력이 감소하기 시작한다. 또한 국부적인 변형이 발생하는 부분 (8번) 에서 22.5 ms 이후 최대 인장응력인 862 MPa 정도가 시편에 부가되며 시편에 국부적인 변형이 발생된다.

Fig. 44 (b) 에서와 같이 ISB 판재의 중심부분 중 내부 구조체 상, 하에 위치해 있는 외관 (1, 4번) 에 가장 많은 소성변형이 일어나며, 22.5 ms 이후에는 충격헤드와 ISB 시편이 떨어지기 약간의 소성변형만이 일어난다. 5~8 번 위치의 경우 17.5 ms 이후에 소성 변형률이 증가하며, 이 같이 급격히 증가하는 소성변형은 22.5 ms 이후에는 ISB 시편에 국부적인 변형을 일으키게 된다.

결론적으로 본 연구에서 제시한 ISB 판재에 대한 3차원 내충격 유한요소해석 모델은 실제 내충격 실험을 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었으며, 유한요소해석 결과를 통하여 재료의 충격 흡수 특성 및 응력과 변형률 특성 등의 재료 내/외적인 충격거동에 대한 예측이 가능함을 알 수 있었다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 3차원 형상의 변형 가능한 전단반구형 내부 심재를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재에 대한 내충격 특성에 대하여 분석/고찰하였다. ISB 판재의 충격 특성 분석을 위해 드로잉형 경계조건과 평면변형 경계조건의 충격시험기 및 시험을 수행하였으며, 고장역강판인 SPFC 780 판재와 비교하여 ISB 판재에 대한 내충격 시험 및 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 고장력 강판인 SPFC 780 판재와 변형 가능한 전단반구형 내부 심재를 가진 ISB 판재에 대하여 드로잉 경계조건에서 변형 특성과 충격에너지 흡수 특성데이터를 취득하였다. 충격에너지 흡수 특성 및 변형 특성을 분석한 결과 낮은 충격 입력에너지에서는 내부 구조체가 그 형상 그대로 유지하면서 변형이 되어 SPFC 780 판재에 비해 변형양이 적은 반면, 높은 충격 입력에너지에서는 ISB 판재의 내부 구조체가 무너져 변형이 SPFC 780 판재보다 많이 발생하였으며, 단위 무게 당 충격 흡수특성을 비교한 결과 ISB 판재가 SPFC 780 판재에 비해 더 많은 충격에너지를 흡수할 수 있음을 알 수 있었다.

둘째, SPFC 780 판재와 변형 가능한 전단반구형 내부 심재를 가진 ISB 판재에 대한 평면 변형 경계조건에서의 충격에너지 흡수 특성과 변형 특성 데이터를 비교한 결과, ISB 판재가 SPFC 780 판재보다 굽힘에 대한 저항성이 월등히 뛰어난 것을 알 수 있었다.

셋째, ISB 판재에 대한 평면 변형 경계조건에서의 내충격 특성을 묘사할 수 있는 3 차원 내충격 유한요소해석 모델을 개발하여 충격해석을 수행하였다. 그 결과 실제 내충격 실험에서는 알 수 없었던 응력 분포 특성 그리고 소성 변형 및 소성 변형에 의한 손실 에너지 분포 특성에 대하여 알 수 있었으며, ISB 시편에 발생한 국부적인 변형의 거동을 예측할 수 있었다.

결론적으로 변형 가능한 전단 반구형상의 내부 구조체를 가진 ISB 판재와 고장력 강판인 SPFC 780 판재에 대하여 내충격 시험을 수행한 결과, 실제적인 충돌 현상을 잘 묘사할 수 있는 드로잉 경계조건의 경우 ISB 판재가 SPFC 780 판재보다 뛰어난 충격 흡수 특성을 가지고 있으며, 평면 변형 경계조건에서는 ISB 판재가 SPFC 780 판재보다 우수한 내충격 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로 미루어 ISB 판재는 뛰어난 충격 특성을 필요로 하는 자동차/항공기/선박/우주 등의 산업에 매우

효율적이면서 적합한 재료임을 판단할 수 있었다.

추후, ISB 판재가 실제 자동차/항공기/선박 등의 수송기계 산업 등에 보다 유용하게 적용할 수 있도록 다음과 같은 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

첫째, 실제 자동차/항공기/선박 등의 수송기계 산업에 적용될 수 있도록 대형 폭을 가진 ISB 판재에 대한 개발 및 시험/평가 기술 개발이 이루어져야 할 것이다.

둘째, 실제 제품형상을 제작하여 성형성 및 제품이 적용되었을 때 비용절감에 대한 산업적 측면의 연구가 이루어져야 할 것이다.

셋째, 추가적인 해석을 수행하여 내부 심재의 성형 영향 조건을 고려한 ISB 판재에 대한 유한요소해석 모델을 개발해야 할 것이다.

REFERENCES

1. Ashby. M. F., Avans. A. G., Fleck. N. A., Gibson L. J., Hutchinson J. W. and Wadley. H. N. G., *Metal Foams : A Design Guide*, Boston: *Butterworth Heinemann*, 2000.
2. Gibson. L. J., Ashby. M. F, *Cellular Solids : Structure and Properties - Second Edition*, *Cambridge University Press*, 2001
3. Yungwirth. C. J., Wadley. H. N. G., O'Connor. J. H., Zakraysek. A. J. and Deshpande. V. S., Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 920 ~ 936, 2008
4. Mukherjee. M., Kolluri. M., Garcia-Moreno. F., Banhart. J. and Rammamurty. U., Strain hardening during constrained deformation of metal foams - Effect of shear displacement, *Scripta Materialia*, Vol. 61, pp. 752 ~ 755, 2009
5. Torre. L., Kenny. J. M., Impact testing and simulation of composite sandwich structures for civil transportation, *Composite Structures*, Vol. 50, pp. 257 ~ 267, 2000
6. Dharmasena. K. P., Wadley. H. N. G., Xue. Z., Hutchinson. J. W., Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 1063 ~ 1074, 2008
7. Wadley. H. N. G., Dharmasena. K. P., Chen. Y., Dudt. P., Knight. D., Charette. R. and Kiddy. K., Compressive response of multilayered pyramidal lattices during underwater shock loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 1102 ~ 1114, 2008
8. Lim. C. H., Jeon. I. S., Kang. K. J., A New type of sandwich panel with periodic cellular metal cores and its mechanical performances, *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 3082 ~ 3093, 2009
9. Bele. E., Bouwhuis. B. A., Hibbard. G. D., Work hardening as a strengthening mechanism in periodic cellular materials, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 489, pp. 29 ~ 37, 2008
10. Zhu. F., Wang. Z., Lu. G. and Zhao. L., Analytical investigation and optimal design of sandwich panels subjected to shock loading, *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 91 ~ 100, 2009
11. Lee. Y. H., Kang. K. J., A wire-woven cellular metal : Part- I , Optimal design for applications as

- sandwich core, *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 4434 ~ 4443, 2009
12. Lee. Y. H., Choi. J. E. and Kang. K. J., A wire-woven cellular metal : Part- II , Evaluation by experiments and numerical simulations , *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 4459 ~ 4468, 2009
 13. 강기주, 최지은, 굽힘하중 하의 벌크형 와이어 직조 카고메 트러스 중간재를 갖는 샌드위치 판재의 기계적 거동, *대한기계학회 논문집 A 권*, 제 33권, 제 4호, pp. 353 ~ 359, 2009
 14. Kim. B. J., Lee. D. G., Development of a satellite structure with the sandwich T-joint, *Composite Structures*, 2009
 15. Schonberg. W., Schafer. F., Putzar. R., Hypervelocity impact response of honeycomb sandwich panels, *Acta Astronautica*, 2009
 16. Francesconi. A., Pavarin. D., Bettella. A., Giacomuzzo. C. and Faraud. M., Generation of transient vibrations on aluminum honeycomb sandwich panels subjected to hypervelocity impacts, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 1503 ~ 1509, 2008
 17. 신광복, 이재열, 이상진, 초저상 버스 차체 적용을 위한 샌드위치 패널들의 저속충격 특성 연구, *대한기계학회 논문집 A 권*, 제 31권, 제 4호, pp. 506 ~ 516, 2007
 18. 안동규, 남경흠, 한길영, 성대용, 양동열, 자동차 범퍼 단면으로 정형 가공된 ISB 판재의 충격 에너지 흡수 특성 분석, *한국기체가공학회 논문집*, pp. 43 ~ 46, 2008
 19. Das. M., Oterkus. E., Madenci. E. and Razi. H., Residual strength of sandwich panels with hail damage, *Composite Structures*, Vol. 88, pp. 403 ~ 412, 2009
 20. Rion. J., Leterrier. Y., Manson. J. A. E. and Blairon. J. M., Ultra-light asymmetric photovoltaic sandwich structures, *Composites : Part A*, Vol. 40, pp. 1167 ~ 1173, 2009
 21. Queheillat. D. T., Wadley. H. N. G., Titanium alloy lattice truss structures, *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1966 ~ 1975, 2009
 22. Foo. C. C., Seah. L. K. and Chai. G. B., Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels, *Composite Structures*, Vol. 85, pp. 20 ~ 28, 2008
 23. Wang. Dongmei., Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 110 ~ 114, 2009
 24. Dharmasena. K. P., Queheillat. D. T., Wadley. H. N. G., Dudt. P., Chen. Y., Knight. D. and

- Evans. A. G., Dynamic compression of metallic sandwich structures during planar impulsive loading in water, *European Journal of Mechanics A/Solids*, pp. 1 ~ 12, 2009
25. Abbadi. A., Koutsawa. Y., Carmasol. A., Belouettar. S. and Azari. Z., Experimental and numerical characterization of honeycomb sandwich composite panels, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009
26. 안동규, 문경제, 성대용, 남경흠, 한길영, 양동열, Sheared2009년 9월 21일 Dimple 내부구조체를 가진 ISB 판넬의 평면 변형 충격 특성, *한국정밀 공학회 2008년도 춘계학술대회 논문집*, pp. 757 ~ 758, 2008
27. 안동규, 남경흠, 한길영, 성대용, 양동열, 전단형 딤플 구조체를 가진 ISB 판넬의 자유경계 조건에서의 충격특성 분석, *한국정밀 공학회 2008년도 추계학술대회 논문집*, pp. 431 ~ 432, 2008
28. Atroshenko. S. A., Naumova. N. S., S. A. Novikov, 2006, Influence of high-velocity impact on metals, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 33, pp. 62 ~ 67, 2006
29. Dey. S., Borvik. T., Hopperstad. O. S., Langseth. M., On the Influence of constitutive relation in projectile impact of steel plates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 464 ~ 486, 2007.
30. Lou. D. C., Solberg. J. K., Borvik. T., Surface strengthening using a self-protective diffusion paste and Its application for ballistic protection of steel plates, *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 3525 ~ 3536, 2009.

감사의 글

지난 2년여 동안 아낌없는 관심과 가르침으로 참된 공학도의 길을 제시해주셨으며, 사회생활에 필요한 매너와 인간으로서 지켜야 할 도리와 겸손에 대해 몸소 가르쳐 주신 안동규 교수님께 진심으로 감사드립니다. 항상 저희 기계과의 든든한 버팀목이 되어 주시고 제자들에게 따뜻한 조언과 격려를 보내주신 조규재 교수님, 윤성운 교수님께 깊은 감사드립니다.

그리고, 이 논문을 쓸 수 있도록 물심양면으로 도와주신 양동열 교수님께도 진심으로 깊은 감사드립니다.

대학원에 처음 발을 디으면서 함께 생활해왔던 곳인 전산설계실험실은 이제 저에게 제 2의 고향입니다. 이곳에서 함께 생활했던 실험실원들에게 정말 감사드립니다. 과제 수행 시 저의 부족한 점을 채워주시느라 부단히 노력하신 경제형 그리고 철없던 저희들을 이끌어 주시느라 고생하신 광운이형, 대원이형, 현우형, 잠이 많아서 고생한 승화, 분위기 메이커 동한이, 저 때문에 고생한 열혈 세훈이, 만능 민우, 그리고 우리 막내인 창규랑 향선이에게 감사드립니다. 또한 어디서든 최고가 될 것이라고 믿어 의심치 않는 우리 대학원 동기들인 재경이형, 성빈이, 재상이, 인성이에게도 진심으로 감사드립니다. 그리고 승철이형, 광호형, 미애누나를 비롯한 기계과 대학원 선·후배님들께 감사드립니다. 또한 항상 격려와 조언을 아끼지 않으셨던 호준이형께도 감사드립니다.

이 논문이 있기까지 여러 학회지 논문게제와 발표, 그리고 실험을 할 수 있게 해주신 USP 프로젝트 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다. 항상 부족한 저를 위해 조언을 아끼지 않았던 창균이형, 정말 저의 연구의 가장 큰 도움을 주시고 든든한 버팀목이 되어주신 대용이형께 진심으로 감사드립니다. 또한, 나라엠앤디의 김보환 부장님 및 이현석 연구원님, 성우하이텍의 유정수 과장님, 포스코의 임지호 박사님, 서울산업대의 김종호 교수님, 정완진 교수님을 비롯하여 프로젝트 관계자 여러분께 다시 한번 감사의 말씀을 전합니다.

대학원 생활 동안 공부하느라 힘든 친구에게 가끔씩 술한잔 기울이며 격려 아끼지 않았던 금남이, 경훈이 고등학교 친구들과 규봉이, 영택이, 성국이 등의 대학교 친구들에게 진심으로 감사드립니다.

마지막으로 저의 가장 든든한 후원자인 아버지, 어머니, 형에게 사랑한다는 말과 함께 깊은 감사드립니다.

2009년 12월

남 경 흠