

2008년 2월  
석사학위논문

3차원 형상의 금속 구조체를 가진 초경량  
금속 샌드위치 판넬의 충격 특성 분석

조선대학교 대학원

기계공학과

문 경 제

3차원 형상의 금속 구조체를 가진  
초경량 금속 샌드위치 판넬의  
충격 특성 분석

*Investigation into impact characteristics of  
ultra-light weight sandwich panel with three  
dimensional inner structures*

2008 년 2 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

문 경 제

3차원 형상의 금속 구조체를 가진  
초경량 금속 샌드위치 판넬의 충격  
특성 분석

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2007 년 10 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

문 경 제

문경제의 석사학위 논문을 인준함.

위원장   조선대학교   교수   조   규   재   인

위   원   조선대학교   교수   한   길   영   인

위   원   조선대학교   교수   안   동   규   인

2007 년 11월   일

조 선 대 학 교 대 학 원

# 목 차

<b>제 1 장 서 론</b> .....	1
1.1 연구배경 및 관련연구 .....	1
1.2 연구목적 및 방법 .....	4
<b>제 2 장 ISB 판넬 제작 공정</b> .....	6
2.1 피라미드 구조를 갖는 익스팬디드 금속 구조체의 제작 .....	6
2.2 ISB 판넬 제작 .....	8
<b>제 3 장 ISB 판넬의 충격에너지흡수특성 시험/평가 기술 개발</b> 10	
3.1 ISB 판넬의 충격시험 기법 및 시험기 개발 .....	10
3.1.1 충격시험기 개발 .....	10
3.1.2 ISB 판넬의 충격시험 기법/방법 .....	12
3.2 ISB 판넬의 충격흡수에너지 계산 알고리즘 .....	14
<b>제 4 장 ISB 판넬의 충격시험 및 충격 특성 평가</b> .....	17
4.1 스트레칭형 경계조건에서의 충격시험 .....	17
4.1.1 실험방법 .....	17

4.1.2	외판 재료(SUS304H)의 실험 결과 및 고찰	19
4.1.3	접합된 ISB 판넬의 실험 결과 및 고찰	27
4.1.4	용접된 ISB 판넬의 실험 결과 및 고찰	35
4.2	드로잉형 경계조건에서의 충격시험	45
4.2.1	실험방법	45
4.2.2	외판 재료(SUS304H)의 실험 결과 및 고찰	46
4.2.3	접합된 ISB 판넬의 실험 결과 및 고찰	52
4.2.4	용접된 ISB 판넬의 실험 결과 및 고찰	57
4.2.5	충격에너지 흡수 특성 비교/분석	65

## **제 5 장 ISB 판넬의 충격시험에 대한 3차원 유한요소해석** .... 72

5.1	스트레칭형 경계조건에서의 3차원 유한요소해석	72
5.1.1	유한요소해석 방법 및 모델링	72
5.1.2	경계조건 및 재료 물성	74
5.1.3	외판 재료(SUS304H)의 충격해석 결과 및 고찰	78
5.1.4	ISB 판넬의 충격해석 결과 및 고찰	86
5.2	드로잉형 경계조건에서의 3차원 유한요소해석	93
5.2.1	유한요소해석 방법 및 모델링	93
5.2.2	경계조건 및 재료 물성	94
5.2.3	외판 재료(SUS304H)의 충격해석 결과 및 고찰	95
5.2.4	ISB 판넬의 충격해석 결과 및 고찰	102

제 6 장 결 론 ..... 109

REFERENCES ..... 111

# 제 1 장 서 론

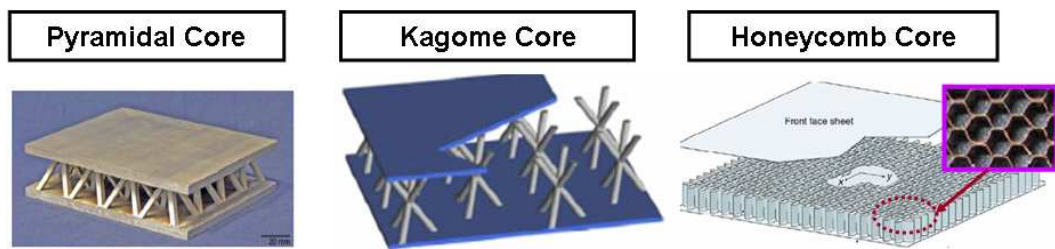
## 1.1 연구배경 및 관련연구

최근 고도의 산업화에 따른 환경오염으로 인한 환경규제 강화와 화석에너지 고갈 및 수요급증으로 인해 대체 에너지 개발과 에너지 효율 증대 방안이 전 세계에서 산업적으로 가장 큰 관심사가 되고 있다. 특히, 자동차/항공기/선박 등과 같은 수송기계 관련 산업군에서는 효율적 에너지 사용을 위한 제품의 경량화는 물론, 승객의 안전성까지 향상시킬 수 있는 초경량 고강성/고내충격성 재료 개발이 절실히 요구되고 있다. 이에 에너지 효율 증대를 통한 대기오염 요인 감소와 승객의 안전성 향상 증대를 위하여 강도/강성/내충격성을 현저히 증대시키는 초경량 금속 구조재 (Ultra-light weight structured material)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1-3)</sup> 이러한 초경량 금속 구조재 개발의 한 가지 방향으로 금속 판재 내부에 3차원 형상의 내부 구조체를 가진 샌드위치형 초경량 재료 개발에 대한 연구가 국내외적으로 다양하게 수행되고 있다.<sup>4)</sup>

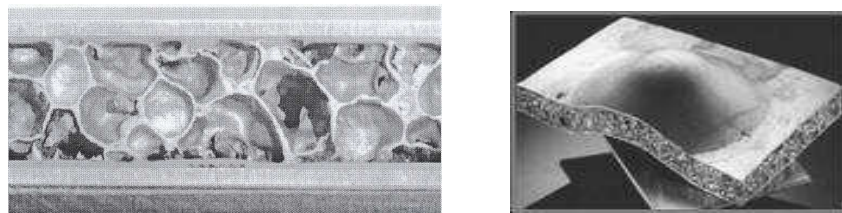
초경량 금속 구조재의 경우 상-하부 면재 (Skin sheet)와 내부 구조체가 접합과 용접 등으로 결합하여 제작된다. 그러므로 내부 구조체 특성 및 표면 판재와 내부 구조체의 결합 방법에 따라 기계적 물성과 충격특성이 결정될 수 있다. 현재 국내외적으로 많이 연구되고 있는 초경량 금속구조재의 경우 Fig. 1(a)와 같이 판재형 금속재료 내부에 피라미드(Pyramidal) 구조물, 허니콤(Honeycomb) 구조물, 카고메(Kagome) 구조물등과 같은 3차원 입체 구조물 또는 Fig. 1(b)와 같은 금속 폼 (Metallic foam) 재료와 같은 다공성 재료의 초경량 코어 (Lightweight core)로 구성된 샌드위치 구조 등이 있다.<sup>5-8)</sup>



이러한 샌드위치형 초경량 금속구조재의 경우 부피의 대부분인 코어 부분이 비어 있어 재료 밀도가 매우 낮고, 내부 구조물의 3차원적 구조가 외부 하중 부가시 샌드위치 판재의 변형에 영향을 미쳐 비강성/비강도/비내충격성이 현저히 증가한다.<sup>9)</sup>



(a) Three-dimensional inner structures



(b) Metallic foam cores

**Fig. 1 Examples of sandwich plate with three-dimensional inner structures and metallic foam cores**

한편, 최근 금속 샌드위치 판재가 구조재료로의 활용성이 높아짐에 따라 각종 충격에 의한 내충격성이 중요한 문제로 떠오르고 있다. 또한, 전 세계적으로 충격 부하를 받는 금속 구조재의 충격거동과 이에 따른 파괴에 대한 관심이 높아짐에 따라 많은 연구자들이 이와 관련된 연구를 수행하고 있다.<sup>10-15)</sup> 특히, 자동차/항공기/선박 등 수송기계 관련 산업에서 많이 연구되고 있는 초경량 샌드위치 판재의

경우 굽힘/인장/전단 등 정적특성과 더불어 구조재 활용시 많이 나타날 수 있는 충격하중에 대한 재료의 반응 특성에 대한 연구가 필수적으로 요구되고 있어 초경량 샌드위치 판재의 충격특성에 대한 연구가 다양하게 수행되고 있다.

Meo 등은 허니콤 코어를 가진 샌드위치 판넬이 고정형 경계조건에서 저속 충격하중이 부가되었을 때 충격에 의해 발생한 손상과 파단 메카니즘에 대하여 실험적/해석적 연구를 수행하였다.<sup>16)</sup> Nguyen 등은 외연적 시간 적분법(Explicit finite element method)을 이용하여 저속 충격하중이 부가되었을 때 허니콤 코어 및 접힘형 구조 코어(Folded structure core)를 가진 샌드위치 판넬의 충격 저항성과 충격 손상에 대하여 3차원 유한요소해석을 통하여 분석하였다.<sup>17)</sup> Radford 등은 금속 점힘 코어(Corrugated core) 및 피라미드형 코어를 가진 샌드위치 빔이 고정형 경계조건에서 충격하중이 부가되었을 때 빔의 처짐 특성에 대하여 연구하였다.<sup>18)</sup> 또한, Tilbrook 등은 내부 구조체로 코러게이트(Corrugate)된 스테인레스 강과 Y-프레임 샌드위치 코어를 가진 빔형 샌드위치 판재에 대해 직접 충격식 Kolsky bar 충격시험과 유한요소해석을 수행하여 내부 구조체의 변형 및 파단 특성을 분석하였다.<sup>19)</sup> Xue 등은 내부 구조체로 피라미드 트러스 구조, 알루미늄 허니콤 구조 및 접힘형 판재(Folded plate)를 가지는 빔(Beam)형 샌드위치 판넬에 대한 동적 반응을 해석하였다.<sup>20)</sup> Rathbum 등은 금속 허니콤 코어를 가지는 샌드위치 빔에 고정형 경계조건이 부가된 후 충격하중이 부가되었을 때 빔의 충격특성을 시험과 유한요소 해석을 통하여 분석하였다.<sup>21)</sup> Mcshane 등은 사각형 허니콤 코어와 피라미드형 코어 및 알루미늄 폼 코어를 가진 원형 샌드위치 판재의 고정형 충격시험과 유한요소해석을 수행하여 각 샌드위치 판재의 충격특성을 분석하였다.<sup>22)</sup> Jung 등은 트러스형 내부 구조체를 가진 ISB 판넬에 대한 스트레칭형 경계조건과 직경 10 mm 의 충격헤드를 이용한 충격시험을 수행하여 판넬의 충격특성을 분석하였다.<sup>23)</sup>

국내에서는 금속 박판 사이에 트러스 구조, 댄플 구조 및 전단형 댄플 구조의 3차원 형상의 금속 구조체를 대면적에 분포시킨 후, 면재와 구조체를 접합 또는 용접으로 연결시켜 재료의 무게를 현저히 감소시킴과 동시에 강도/강성/내충격성을 향상시키는 두께가 3mm 이하인 ISB(Inner structured and bonded) 판재 개발에 대한 연구가 수행되고 있다.<sup>24-26)</sup> 이러한 연구의 일환으로 ISB 판재의 정적 특성 분석은 물론, 구조재 활용시 많이 나타날 수 있는 충격하중에 대한 저항성 및 충격에너지 흡수 특성, 판넬과 내부 구조체의 파손 특성 등에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>27-28)</sup>

## 1.2 연구목적 및 방법

최근 자동차/항공기/선박 등 수송기계 관련 산업에서 에너지 효율 증대와 승객의 안전성 향상 증대를 위하여 초경량/고강성/고내충격성 재료 개발이 필요시 됨에 따라 초경량 샌드위치 판재 개발에 대한 연구가 전 세계적으로 시작되고 있다. 특히, 내부 구조체를 가진 초경량 샌드위치 판재의 경우 굽힘/인장/전단 등 정적 특성과 더불어 구조재 활용시 많이 나타날 수 있는 충격하중에 대한 재료의 반응 특성에 대한 연구가 필수적으로 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 트러스 형상의 금속 구조체를 가진 초경량 샌드위치 판재인 ISB 판넬에 대한 충격시험 및 비선형 유한요소해석을 통하여 ISB 판넬의 충격 특성을 분석/고찰 하였다.

충격시험은 낙하하중 방식의 충격시스템을 사용하여 스트레칭형 경계조건과 드로잉형 경계조건에서 트러스형 내부 구조체를 가진 ISB 판넬에 대한 충격시험을 수행하였다. 이를 통해 각 경계조건에서 ISB 판넬의 접합조건에 따른 하중-변위 특성, 변형특성, 충격에너지 흡수특성 및 내부 구조체의 파손 특성 등을 분석/고찰

하였다. 또한, ISB 판넬과 동일 무게의 0.7 mm 스테인레스 강관에 대하여 충격에너지 흡수특성과 변형 및 파단 특성을 비교/분석하였다.

다음으로 범용 CAE 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 먼저 3차원 유한요소해석을 수행하기 위해 스트레칭형 경계조건과 드로잉형 경계조건에 대한 유한요소해석 모델을 개발 및 검증하였다. 또한, 검증된 유한요소해석 모델을 이용하여 3차원 유한요소해석을 수행하여 재료 내부 변형 특성과 응력, 변형률, 변형률 에너지 분포 특성 등을 분석/고찰하였다.

## 제 2 장 ISB 판넬 제작 공정

### 2.1 피라미드 구조를 갖는 익스팬디드 금속 구조체

익스팬디드 금속은 마름모꼴의 격자를 가지는 철망의 한 종류로 익스팬디드 금속 혹은 메탈라스(Metal lath)라고 부른다. 익스팬디드 금속은 얇은 금속 박판을 슬릿(slit)한 후 슬릿된 방향으로 금속을 확장시켜 제조되는 철망의 한 형태로, 재료의 손실이 없고 공정이 자동화되어 대량생산되고 있다. 따라서 그 가격이 매우 저렴하여 다양한 용도로 쓰인다. 익스팬디드 금속에 대한 규격은 한국산업규격화(KSD 3601) 되어 있다.

익스팬디드 금속은 다양한 메쉬 크기로 여러 종류의 재료로 생산 되고 있으며 일반 철망, 건축 등 다양한 곳에 사용되고 있다. 익스팬디드 금속의 기하학적 치수를 Fig. 2 에 나타내었다. 익스팬디드 금속을 만들기 전의 원 박판재료의 두께( $a$ )와 박판을 슬릿할 때의 간격( $b$ )이 주요 치수를 결정한다. 슬릿되는 길이는 익스팬디드 금속의 마름모꼴 메쉬에서 장축의 길이( $A$ )를 결정하고 슬릿 후 확장되는 정도에 따라 단축의 길이( $B$ )가 결정된다.

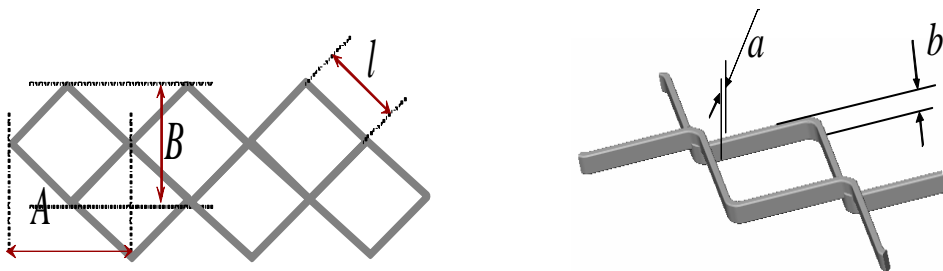


Fig. 2 Geometrical parameters of the expanded metal

본 연구에서는 단축의 길이가 약 4.5 mm, 장축의 길이가 약 6.9 mm이며 원재료의 두께 및 슬릿 폭이 0.5 mm인 강재 익스팬디드 금속을 이용하여 Fig. 3 과 같이 금형으로 크림핑각을 부여 피라미드 형성의 구조체를 생성하였다. 이 크림핑각을 변화시킴으로써 샌드위치 구조물의 상대밀도를 제어한다.

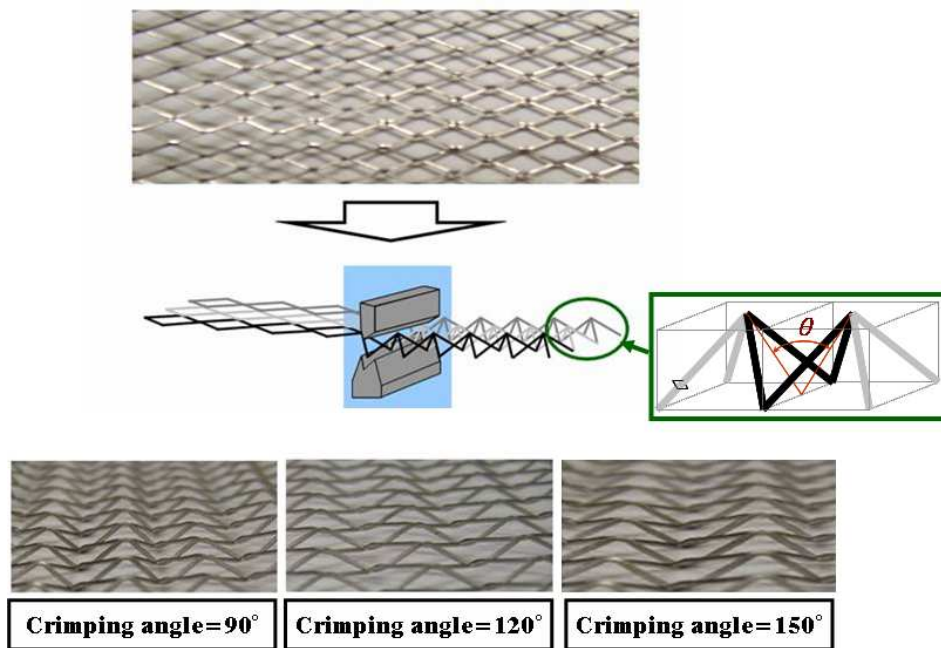


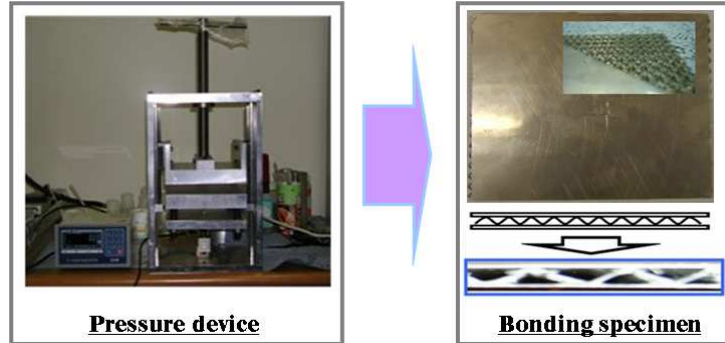
Fig. 3 Structures of expanded metal with pyramids shapes

## 2.2 ISB 판넬 제작

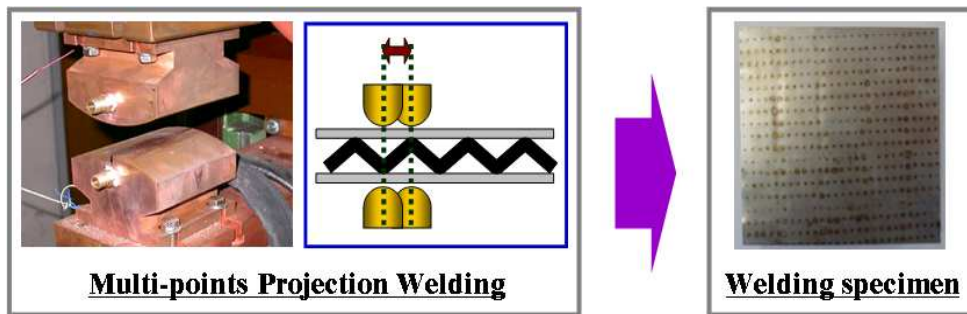
익스팬디드 금속을 사용하여 제작된 내부 구조체를 이용하여 ISB 판넬을 제작하기 위해서는 적절한 두께를 가지는 면재를 심재인 내부구조체와 접합해야 한다. 일반적으로 면재와 심재의 접합은 각각의 재료의 특성에 따라 선택되는데 비금속 복합재료의 경우 화학적 접합이 주로 사용되는데 반하여 면재와 심재가 모두 금속인 샌드위치 판넬의 경우 화학적 접합, 브레이징, 용접 등 다양한 접합이 적용될 수 있다.

본 연구에서는 접착제를 이용한 접합 방법과 내부 구조체의 꼭지점과 면재의 접촉에 의해 발생하는 접촉저항을 이용한 다점 전기저항 용접의 접합 방법이 선택되었다. 접착제를 이용한 접합 방법은 접착제에 적절한 인성을 부여하기 위해 YD-128 BPA형 에폭시에 KR-208 NBR 변성타입 에폭시를 6:4의 비율로 혼합하여 사용하였다. ISB 판넬 제작에 사용된 면재는 두께가 0.3 mm인 스테인레스 강판(Stainless sheet)이 사용되었으며 접착면은 기계적 연마 방법인 샌드블래스팅(Sandblasting)을 이용하였다. 연마입자의 크기는 80 grit 이며 접착제의 도포 두께는 약 0.8~1.0 mm 이다. 적절한 경화를 위해 Fig. 4 와 같은 장치를 이용하여 평균 300 kPa 크기로 가압한 후 12시간의 상온경화 후 80 °C에서 한 시간의 후경화를 수행하여 제작하였다.

다점 전기저항 용접을 이용한 접합 방법은 Fig. 5 와 같은 용접 공정으로 수행하였다. 전기저항 다점용접은 곡률을 가진 전극을 이용하여 동일 선상의 접점을 동시에 접합한다. 이는 대량생산을 염두에 둔 롤(Roll) 전극을 이용한 고속 대량 용접장치의 근사 모델이다. ISB 판넬 제작에 사용된 면재는 두께가 0.3 mm 인 스테인레스 강판을 이용하였다. 이는 면재가 심재의 두께보다 얇을 경우 용접시 심재가 녹아 용접이 되지 않기 때문에 심재보다 얇은 면재를 사용하기 위함이다.



**Fig. 4 Manufacturing process of bonding specimen**



**Fig. 5 Manufacturing process of welding specimen**



## 제 3 장 ISB 판넬의 충격에너지흡수특성 시험·평가 기술 개발

### 3.1 ISB 판넬의 충격시험 기법 및 시험기 개발

#### 3.1.1 충격시험기 개발

ISB 판넬에 대한 충격 시험 기법은 폼재료를 내부 구조재로 가지는 폼기반 샌드위치 판재 및 복합재료 판재의 충격시험에 가장 많이 적용하는 낙하 하중(Drop weight) 방식 충격시험기법을 선정하였다.

ISB 판넬에 대한 충격 시험을 수행하기 위하여 Fig. 6 및 Fig. 7 과 같은 낙하 하중 방식 충격시스템을 설계/제작하였다. 충격 하중을 측정하기 위하여 충격 헤드 상부에 로드 셀(Load Cell) 을 부착하였으며, 재료의 충격부 변위를 측정하기 위하여 구조물 왼쪽 모서리 LVDT 를 장착하여 충격 헤드에 부착된 막대가 일정 위치를 통과하면 LVDT 내로 들어오게 되어 실시간 변위 변화를 측정하도록 하였다. 이 충격 시험기의 사양은 다음과 같다.

- 장치 크기 : 1m×1m×3m
- 최대 충격 에너지 : 800 J
- Stroke : 2,000 mm
- 하중 측정 : Load Cell (2ton)
- 변위측정 : LVDT (±75mm)

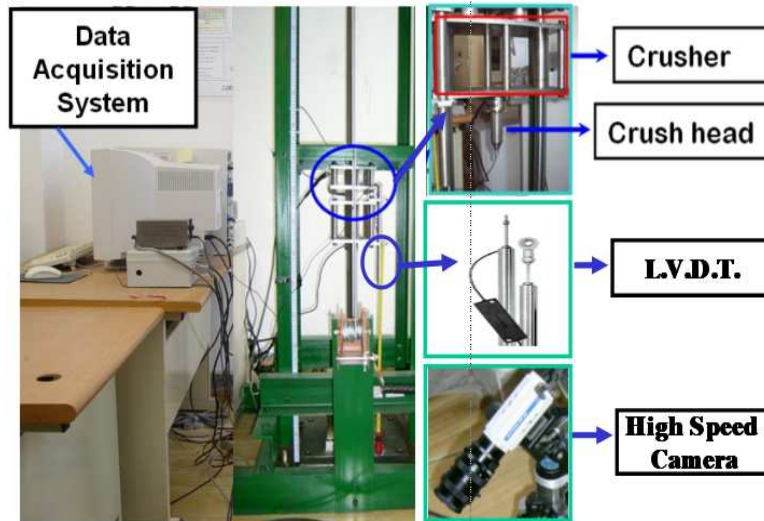


Fig. 6 Experimental set-up of impact test

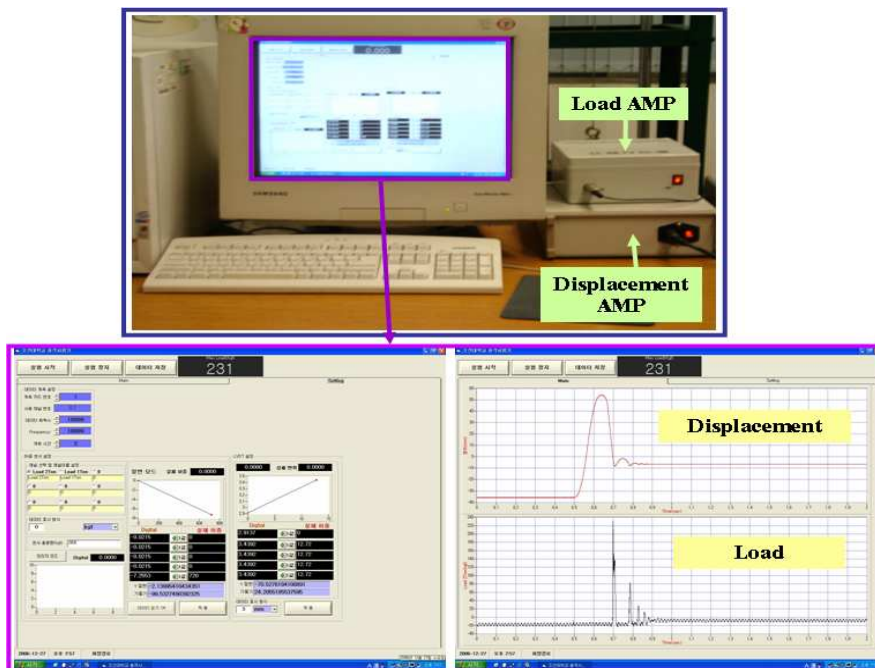


Fig. 7 Data acquisition system of impact test machine

### 3.1.2 ISB 판넬의 충격시험 기법/방법

ISB 판넬에 대한 충격 시험을 위한 충격 시험 방법은 ISB 판넬의 주위를 완전 구속하는 스트레칭 방식과 사각형 ISB 판넬의 주위를 자유단으로 하는 드로잉 방식 2가지로 개발하였다.

ISB 판넬의 주위를 완전 구속하는 스트레칭 방식에서는 Fig. 8 과 같은 치구를 사용하여 치구의 상판과 하판 사이에 고무를 첨가하여 상판과 하판이 고정구로 고정될 때 치구의 중앙 원형부를 제외한 잔여부분은 고무에 부가되는 압력으로 완전 고정시켜 충격헤드(Impact head)에 의한 중앙부 변형만을 유도하는 방법이다. 이 치구의 중앙부 지름은 80 mm, 120 mm, 150 mm 로 변경 가능하도록 하였다.

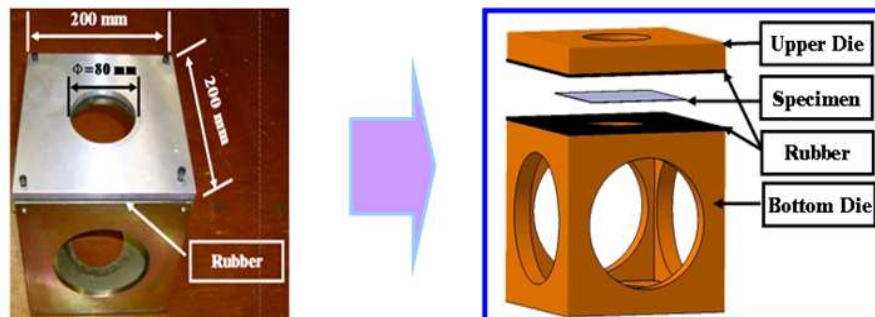


Fig. 8 Fixture of specimen for the case of stretching boundary conditions

사각형 ISB 판넬의 주위를 자유단으로 하는 드로잉 방식에서는 Fig. 9 와 같은 치구를 사용하여 ISB 판넬이 안착되는 부분에 판재에 충격 부가시 상부로 튀는 현상을 막기 위한 보조 롤러(Supporting roller) 이외에 아무런 제한 조건을 부여하지 않아 ISB 판넬이 중앙부로 드로잉 될 수 있도록 치구를 설계/제작하였다. 이 방법의 장점은 스트레칭 방식과 달리 충격 하중 부가시 응력과 전달에 의한 시편 모

서리 파단이 일어날 수 있어 자동차나 수송기계 부품의 충돌시 나타나는 실제적인 현상에 가깝게 묘사할 수 있다는 장점이 있다. 충격시험에 사용된 Fig. 10 와 같이 직경 10 mm와 20 mm로 설계/제작하였다.

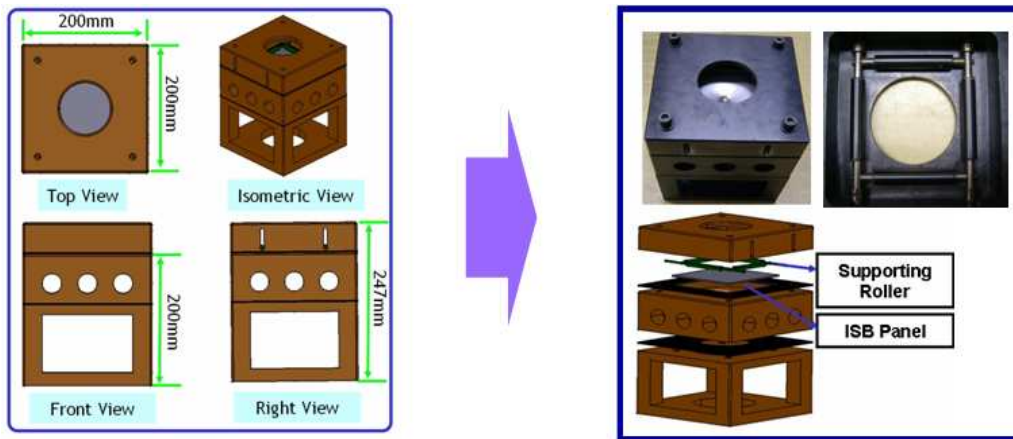


Fig. 9 Fixture of specimen for the case of drawing boundary conditions

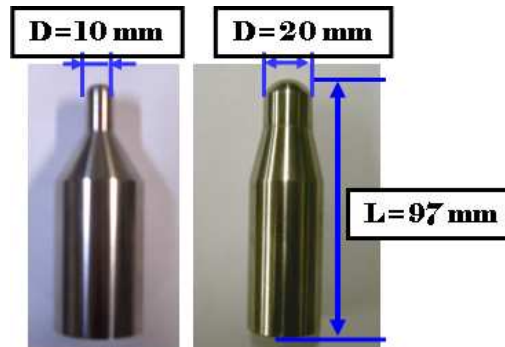


Fig. 10 Shapes of impact head

### 3.2 ISB 판넬의 충격흡수에너지 계산 알고리즘

충격 흡수에너지 계산 방법은 일반적으로 낙하추 속도를 이용하는 방법과 하중-변위선도의 직접식 적분방법 두 가지 방법이 있다.

낙하추 속도를 이용한 충격 흡수에너지 계산 방법 식 (1) 와 같이 충격 전후의 낙하추 속도차를 계산하여 충격 흡수 에너지를 계산하는 방식이다.

$$T_i = T_{i-1} + \frac{1}{2}m(v_i^2 - v_{i-1}^2) \quad (1)$$

여기서,  $T_i$ ,  $T_{i-1}$ ,  $m$ ,  $V_i$ ,  $V_{i-1}$  는 각각 시간  $t_i$ 에서 시편이 흡수한 충격에너지, 시간  $t_{i-1}$ 에서의 시편의 흡수한 충격에너지, 낙하추의 질량, 시간  $t_i$ 에서의 낙하추의 속도, 시간  $t_{i-1}$ 에서의 낙하추의 속도이다.

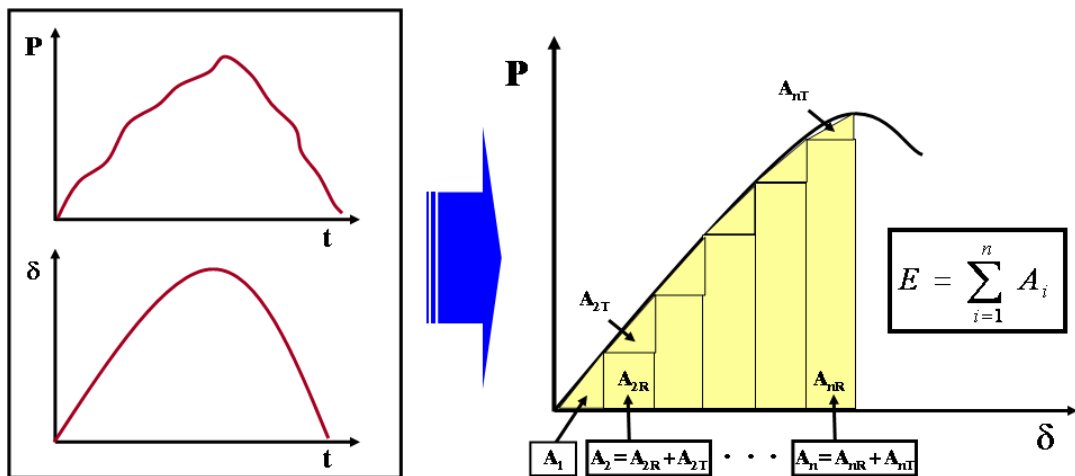


Fig. 11 Direct numerical integration method to estimate the impact energy

하중-변위 선도를 이용한 직접식 적분 방식은 로드셀(Load Cell)에서 읽어 들인 하중과 LVDT 에서 읽어 들인 변위를 1:1로 매칭(Matching) 시킨 후, 하중-변위 곡선을 생성한다. 그 후, Fig. 11 과 같이 이 곡선을 이용하여 하중이 발생한 시점부터 최대 하중점까지의 구간을 수치 적분하는 방식이다.

본 연구에서는 하중-변위 선도를 이용한 직접식 적분 방식을 이용하여 충격헤드와 시편의 접촉시점부터 최대 하중점까지 수치적분을 수행하여 전체 흡수 에너지를 계산하는 방식과 Fig. 12 와 같이 최대에 이르기까지 몇 구간에서 계속적인 누적 흡수 에너지를 계산하는 방식 두 가지를 충격 흡수 에너지 계산에 활용하였다.

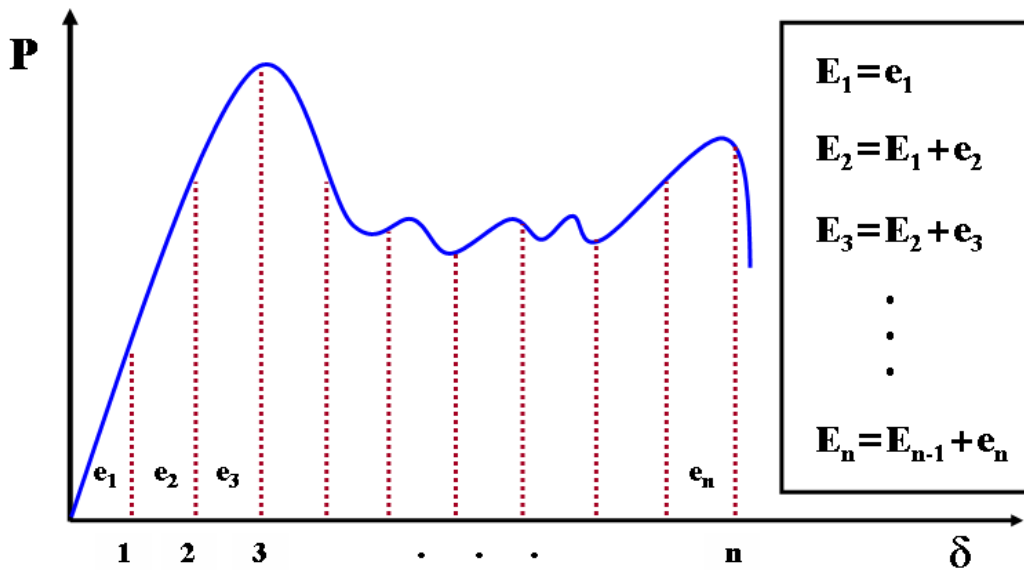


Fig. 12 Computational methodology of a cumulative absorption energy

다음으로 ISB 판넬의 충격 에너지 흡수 특성을 정량적으로 계산하기 위하여 충격 흡수 에너지 및 에너지 흡수율을 식 (3) 과 식 (4) 와 같이 정의하였다. 입력 충격에너지는 식 (2) 와 같이 충격헤드의 최초 낙하 높이에서의 위치 에너지로 산출하였다. 낙하시 마찰에 의한 에너지 손실은 무시하였다. 시편에 의하여 흡수된 에너지는 충격헤드에 측정된 하중이 최초 0에서 일정값으로 상승하기 시작하는 시점에서 다음번 0의 값으로 내려가기 전의 최대 변위까지의 시간영역에 대하여 하중-변위 선도를 생성하여 식 (3) 과 같이 적분하여 계산하였다. 충격에너지 흡수율은 식 (4) 와 같이 충격 흡수 에너지를 입력 충격에너지로 나누어 산출하였다.

$$E_m = mgh \quad (2)$$

$$E_{ab} = \int Pd\delta \quad (3)$$

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

## 제 4 장 ISB 판넬의 충격시험 및 충격특성 평가

### 4.1 스트레칭형 경계조건에서의 충격시험

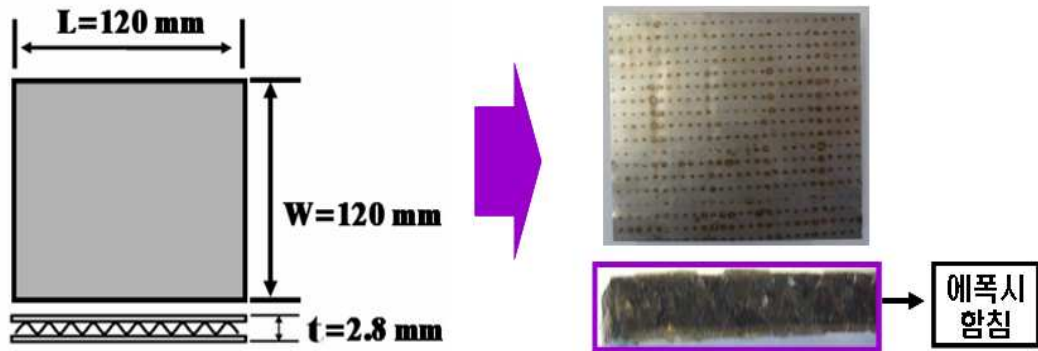
#### 4.1.1 실험방법

스트레칭형 경계조건에서의 충격시험은 Fig. 6 과 같은 낙하하중 방식의 충격시스템을 이용하여 Fig. 8 과 같은 중앙 원형부를 제외한 잔여부분을 완전 고정시키는 스트레칭 방식의 치구를 사용하여 실험을 수행하였다. 충격시험에 사용된 시편은 면재와 내부 구조체가 에폭시로 접합된 접합시편과 다점 전기저항 용접으로 접합된 용접시편의 두 가지 종류의 ISB 판넬에 대한 충격시험을 수행하였다. 또한, 충격 특성 비교를 위해 ISB 판넬의 외판 재료로 사용된 동일 무게의 스테인레스강판(SUS304H)에 대한 충격시험도 수행하였다. 각각의 시편에 대한 크기, 두께, 무게는 Table 1 과 같이 설계/제작하였다. 특히, 용접시편의 경우 완벽한 스트레칭 경계조건 부여와 치구 압력에 의한 내부 구조체 함몰을 방지하기 위해 Fig. 13 과 같이 시편외각에서 안쪽으로 각각 5 mm 씩 에폭시를 함침 시켜 제작하였다. 실험에 사용된 충격헤드는 무게 11.1 kg 에 직경 10 mm 와 20 mm 인 두 가지 타입의 충격헤드를 사용하였다.



**Table 1 Geometry of test specimen**

Specimen	$\theta$ (°)	L (mm)	W (mm)	T (mm)	m (g)
ISB (Bonding)	90	120	120	3.5	90.7
	120			2.7	86.6
	150			2.2	85.0
ISB (Welding)	90	120	120	2.8	87.9
SUS304H		120	120	0.7	80.0



**Fig. 13 Design of welding specimen**

#### 4.1.2 외판 재료(SUS304H)에 대한 실험 결과 및 고찰

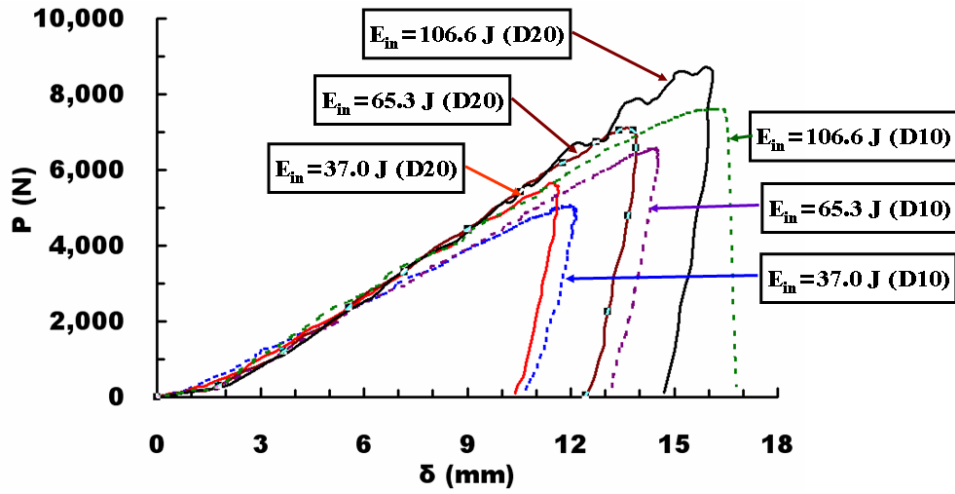
본 연구에서는 ISB 판넬의 외판 재료로 사용된 스테인레스 강판에 대해 스트레칭 경계조건에서의 충격시험을 수행하였다. 스테인레스 강은 산업적으로 많은 분야에서 활용 및 연구가 수행되고 있는 금속으로서<sup>29-36)</sup>, 충격시험을 통해 ISB 판넬과의 충격 특성을 비교/분석하기 위하여 ISB 판넬과 동일 무게에 두께 0.7 mm 로 설계/제작하여 실험을 수행하였다. 또한, 충격시험은 직경(D)10 mm 와 20 mm인 충격헤드를 사용하여 시편이 관통될 때까지 실험을 수행하였다. 그 결과 Table 2 및 Fig. 14 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 2 와 Fig. 14를 보면 스테인레스 강판은 충격헤드의 직경 10 mm 와 20 mm에서 모두 충격 입력에너지가 증가할수록 최대 하중과 최대 충격흡수에너지 및 최대 변위는 증가함을 알 수 있었다. 하지만 충격에너지흡수율은 충격 입력에너지가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있었다.

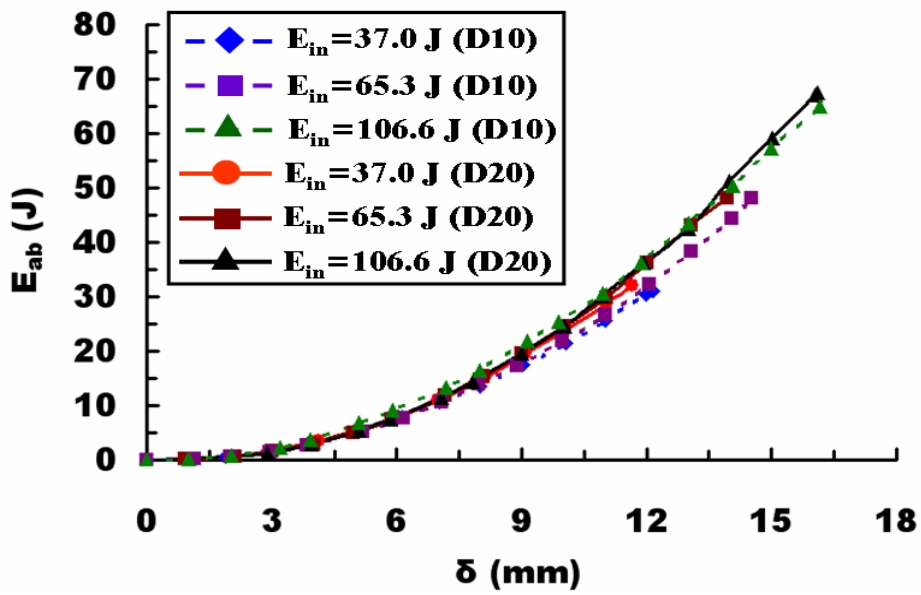
충격헤드의 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때를 비교해보면 동일 충격 입력에너지에 대하여 직경 20 mm 일 때가 최대 하중은 더 높은 반면, 최대 변위는 더 작음을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 직경이 감소할수록 시편의 전체적인 변형보다는 접촉부 국부 변형을 더 많이 유도시키기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 한편, 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율은 충격헤드의 직경과 무관하게 동일 충격 입력에너지에서 거의 동일한 값을 나타냄을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 스트레칭 경계조건에서는 표면 접힘과 같은 변형을 통한 에너지 흡수가 없이 충격에 의한 중앙부 순수 함몰 변형만이 발생하기 때문에 이와 같은 현상이 발생하는 것으로 사료된다.

**Table 2 Results of impact tests of SUS304H panel for the case of stretching boundary conditions**

D (mm)	H (cm)	E <sub>in</sub> (J)	E <sub>ab</sub> (J)	χ (%)	P <sub>max</sub> (N)	d <sub>max</sub> (mm)
10	34	37.0	32.0	86.5	5,273.1	12.0
	38	41.3	34.2	82.7	5,564.5	12.3
	42	45.7	37.3	81.6	5,861.3	13.0
	60	65.3	48.3	73.5	6,556.2	14.5
	80	87.0	57.2	65.7	7,134.4	15.6
	98	106.6	65.0	61.0	7,614.6	16.2
20	34	37.0	32.1	86.8	5,622.0	11.3
	38	41.3	34.3	83.1	5,946.8	11.4
	42	45.7	37.4	81.9	6,199.3	12.4
	60	65.3	48.2	73.8	7,105.0	13.9
	80	87.0	57.7	66.3	8,006.6	15.4
	98	106.6	67.4	63.2	8,731.8	16.1



(a)  $P-\delta$  curve



(b)  $E_{ab}-\delta$  curve

Fig. 14 Results of impact tests of SUS304H panels for the case of stretching boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

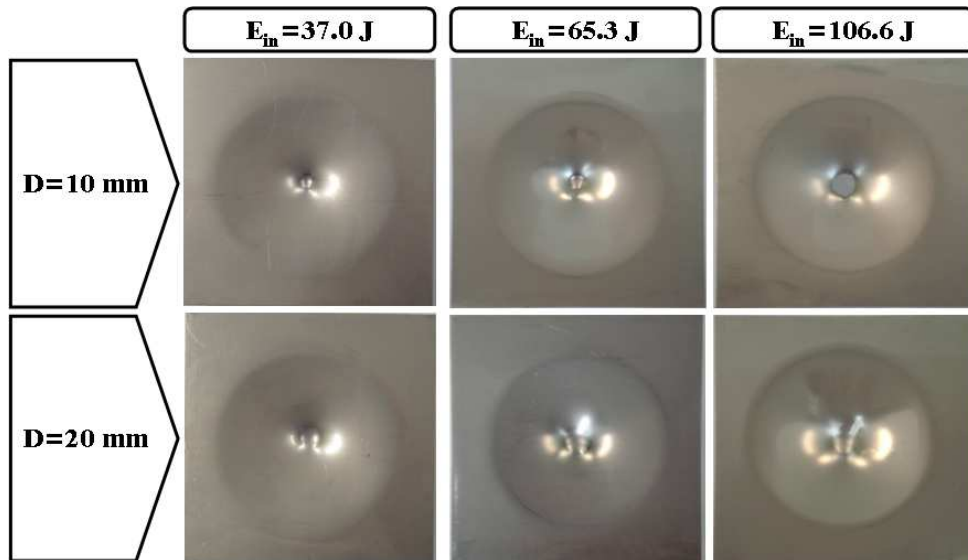


Fig. 15 Deformed shape of specimens according to the impact energy (SUS304H)

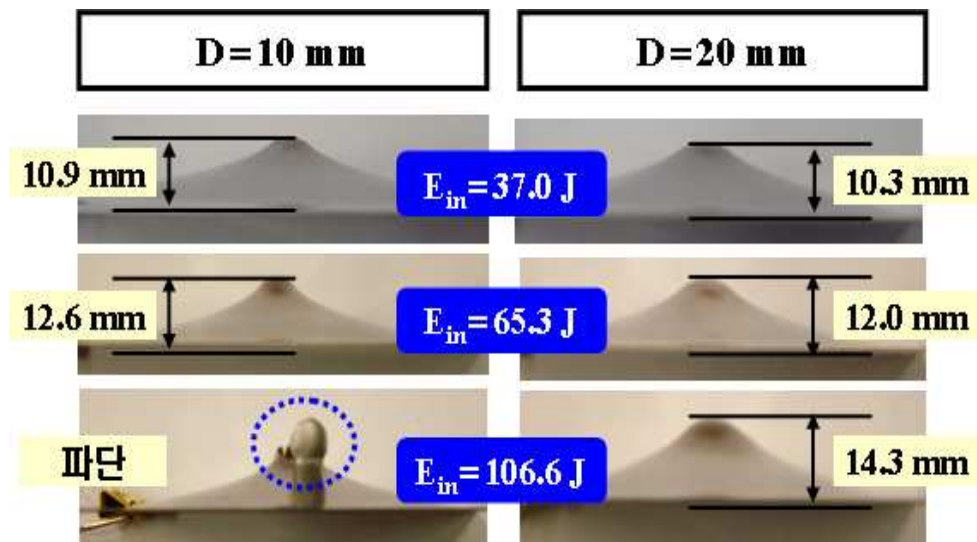


Fig. 16 Deformed depth of specimens according to the impact energy (SUS304H)

Fig. 15 와 Fig. 16은 충격시험을 수행한 스테인레스 강판의 변형 형상 및 최대 변형 깊이를 나타낸 결과이다. Fig. 15 와 Fig. 16을 통해 충격헤드 직경 10 mm 일 때 충격 입력에너지 106.6 J에서 파단이 발생함을 알 수 있었다. 하지만 동일 입력에너지에서 충격헤드 직경 20 mm 일 때는 파단이 발생하지 않았다. 또한, Fig. 16을 보면 동일 입력에너지에서 충격헤드 직경 10 mm 일 때보다 20 mm 일 때가 최대 변형 깊이가 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 충격헤드 직경이 작을수록 시편의 접촉부 국부 변형은 더 많이 유도하는 반면 전체적인 변형을 유도하지 못하게 때문에 이와 같은 현상이 나타나는 것으로 사료된다.

다음으로 Fig. 17 은 파단에 따른 충격 특성을 분석하기 위해 충격헤드 직경 10 mm 일 때 파단 직전의 입력에너지 105.5 J 에서와 파단이 발생한 입력에너지 106.6 J 에서의 충격시험 결과를 비교/분석하였다.

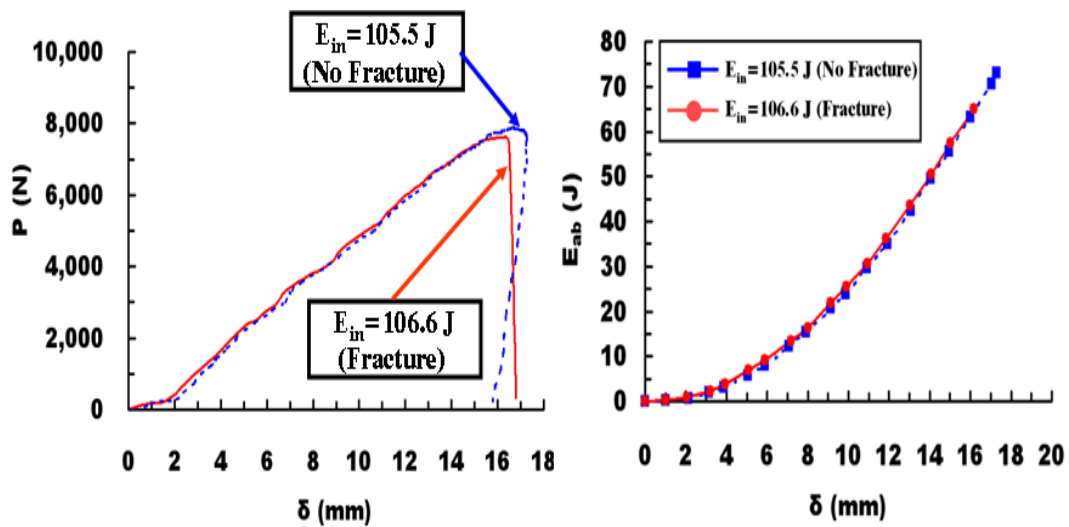


Fig. 17 Variation of energy absorption characteristics according to fracture of specimen

Fig. 17를 보면 충격 입력에너지가 증가할수록 최대 하중과 최대 하중 발생 변위가 증가하는 Fig. 14와는 달리 파단이 발생하였을 경우에는 최대하중, 최대변위, 최대 충격흡수에너지 및 최대 하중 발생 변위가 파단 직전의 충격 입력에너지에서의 결과보다 감소함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 재료의 파단으로 인해 충격 에너지를 더 이상 흡수하지 못하고 파단에 따른 에너지 손실이 발생하기 때문으로 사료된다.

Fig. 20 은 스트레칭 경계조건에서 충격하중을 받은 스테인레스 강판에 대한 Fig. 19와 같은 각 변형 위치에서의 시편 외부형상 비교와 조직의 변화를 관찰하기 위하여 충격 입력에너지 87.0 J에서 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)으로 촬영한 결과이다. 주사전자현미경은 Fig. 18과 같은 일본의 Hitachi사의 S4800 모델을 사용하였다.



**Fig. 18 Scanning electron microscope**

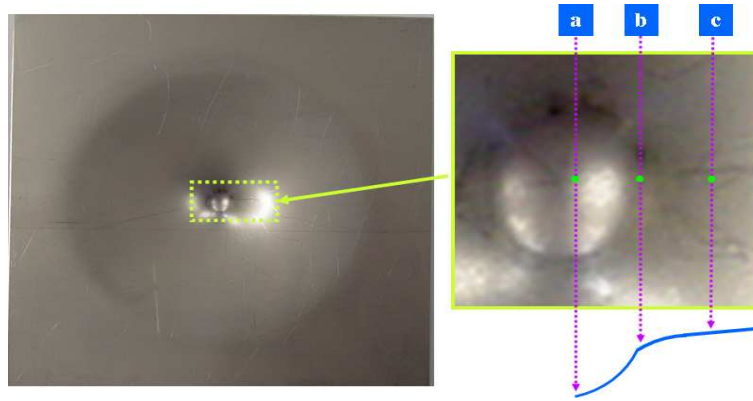
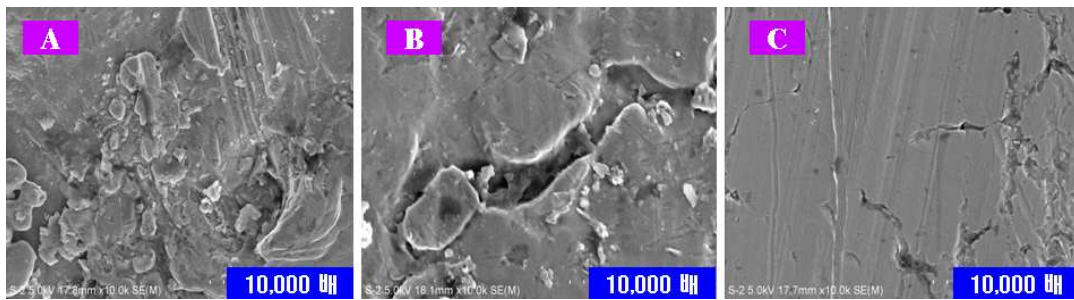
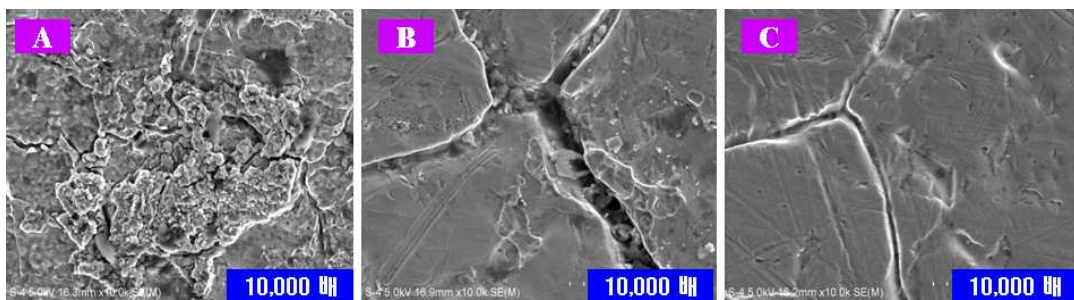


Fig. 19 Measured locations of specimen



(a) D=10 mm ( $E_{in}=65.3$  J)



(b) D=20 mm ( $E_{in}=65.3$  J)

Fig. 20 Microstructures in the vicinity of the measured locations



Fig. 20 을 보면 충격헤드 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때 모두 충격헤드에 의해 직접적으로 충격을 받은 A 영역에서는 높은 충격하중에 의해 입자들이 과도하게 스트레칭 되거나 깨지는 현상이 발생하였다. 그리고 충격에 의해 충격 부가 부위의 주위에 형성된 띠 모양의 변형인 B 영역의 조직에서는 가장 크고 깊은 패인 많은 균열이 발생하여 입자들이 작게 부서지는 현상이 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로 충격에 의한 재료의 파단은 B 영역의 띠 모양의 변형 주위에서 발생함을 예측할 수 있었고, 실제 충격시험을 통한 파단 특성 분석을 통해 이와 같은 현상을 확인할 수 있었다. 충격에 의한 영향력이 미치는 정도가 다소 낮은 C 영역에서는 재료의 조직에 균열과 변형이 크지 않음을 확인할 수 있었다.

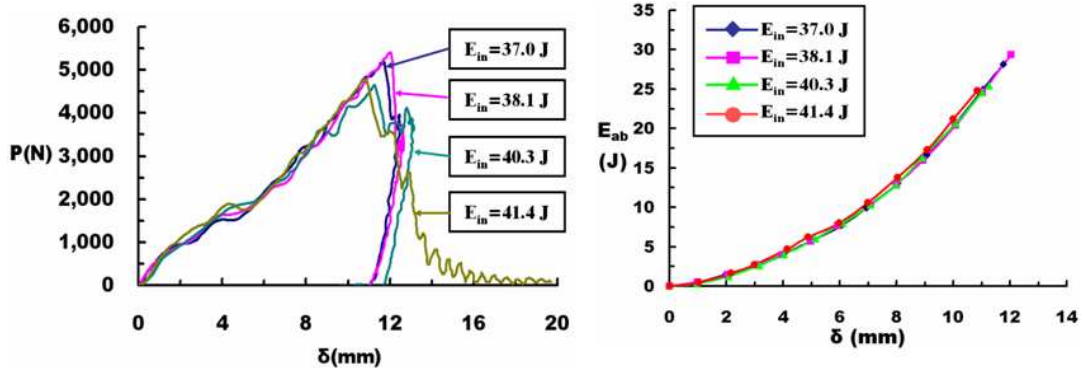
### 4.1.3 접합된 ISB 판넬에 대한 실험 결과 및 고찰

ISB 판넬에 대한 스트레칭 경계조건에서 충격시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

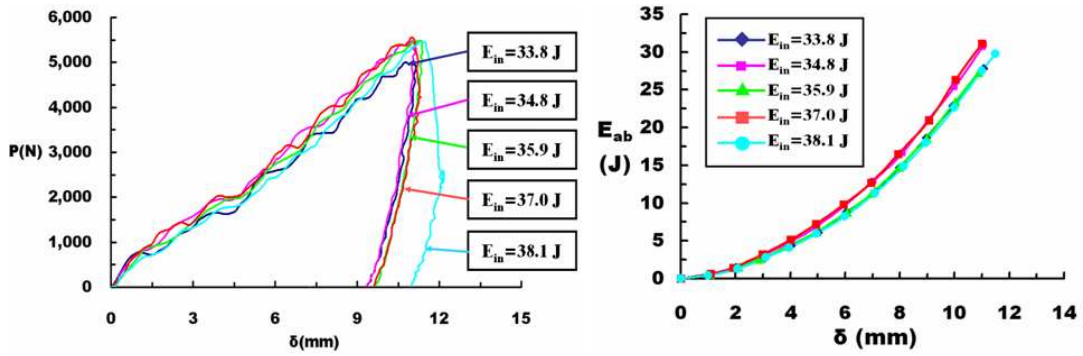
면재와 내부구조체가 에폭시로 접합된 ISB 판넬에 대해 스트레칭 경계조건에서 직경 10 mm인 충격헤드를 사용하여 충격시험을 수행한 결과 Table 3 과 Fig. 21 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

**Table 3 Results of impact tests for bonding specimens for the case of stretching boundary conditions (D=10 mm)**

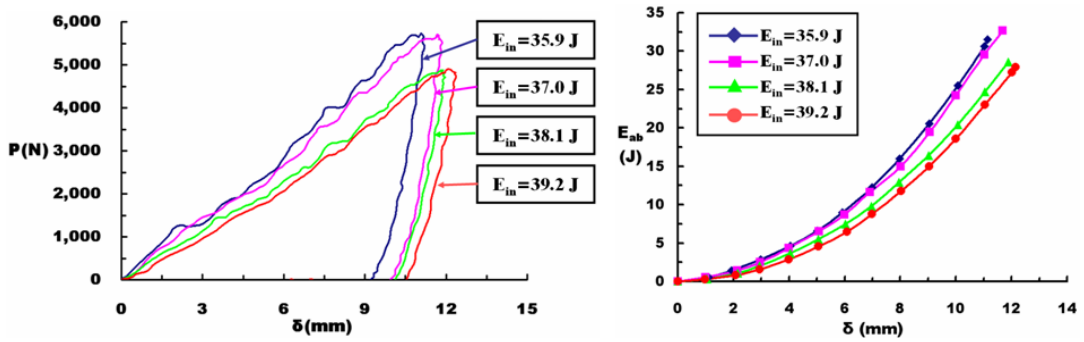
$\theta$ (°)	H (cm)	$E_{in}$ (J)	$E_{ab}$ (J)	$\chi$ (%)	$P_{max}$ (N)	$d_{max}$ (mm)
90	34	37.0	28.2	76.2	5176.9	11.6
	35	38.1	29.4	77.0	5405.8	12.0
	37	40.3	25.4	63.1	4654.3	11.3
	38	41.4	24.8	59.9	4785.2	10.8
120	31	33.8	27.8	82.4	5040.5	11.1
	32	34.8	31.0	89.0	5475.4	11.0
	33	35.9	27.4	76.1	5115.2	10.7
	34	37.0	31.1	84.0	5667.4	11.0
	35	38.1	29.8	78.0	5447.2	11.4
150	33	35.9	31.5	87.7	5732.2	11.1
	34	37.0	32.7	88.3	5704.7	11.7
	35	38.1	28.6	75.0	4879.1	11.8
	36	39.2	27.9	71.2	4902.5	12.1



(a)  $\theta = 90^\circ$  (D=10 mm)



(b)  $\theta = 120^\circ$  (D=10 mm)



(c)  $\theta = 150^\circ$  (D=10 mm)

Fig. 21 Results of impact tests of bonding specimens for the case of stretching boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

Table. 3 과 Fig. 21 을 보면 에폭시로 접합된 ISB 판넬에 대한 충격 시험 결과 3가지 크럼핑 각에 대하여 모두 ISB 판넬의 상부 외판이 파손되기 전까지는 입력 에너지가 증가할수록 최대하중과 충격 흡수에너지 및 충격에너지흡수율이 증가하다가, 상부 외판 파손 후에는 최대하중과 충격 흡수에너지 및 충격에너지흡수율이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, ISB 판넬의 경우 상부 외판이 파손된 후에도 하부 외판을 완전히 관통시키기 위해서는 2-3 J 정도의 추가적인 충격에너지가 공급되어야함을 알 수 있었다.

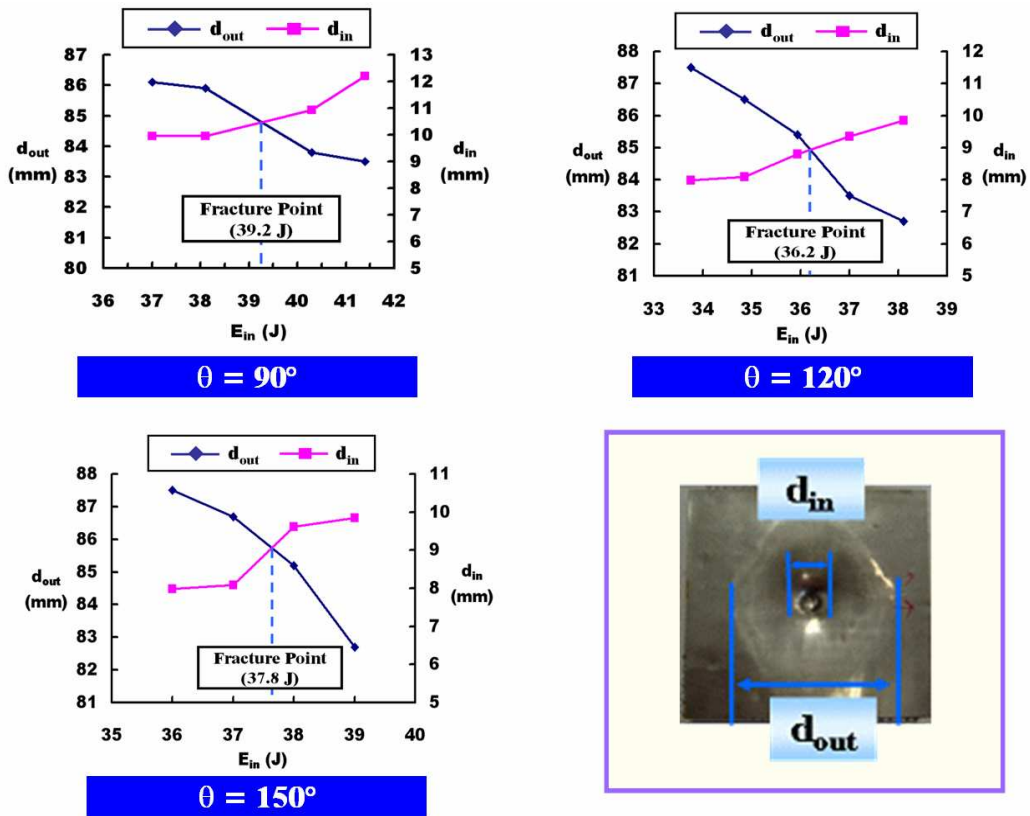


Fig. 22 Variation of inner and outer diameters according to the impact energy

외판이 파손되는 시점은 재료에 충격 부가 후 발생하는 외곽원의 직경 ( $d_{out}$ ) 과 변형률이 집중되는 타격점 주위의 작은 원 직경 ( $d_{in}$ ) 의 입력 에너지별 변화로 알 수 있었다. Fig. 22 와 같이 ISB 판넬의 상부 외판이 파손되는 시점에서  $d_{out}$  과  $d_{in}$  의 증분별 교차점이 발생함을 알 수 있었다. 크럼핑 각이  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  일 때 최대 충격 입력 에너지가 각각 39.2 J, 36.2 J, 37.8 J 로 나타났다. 접착제로 접합된 ISB 판넬의 각 크럼핑 각에 따른 시편의 파손 모드는 Fig. 23 과 같이 나타남을 알 수 있었다.

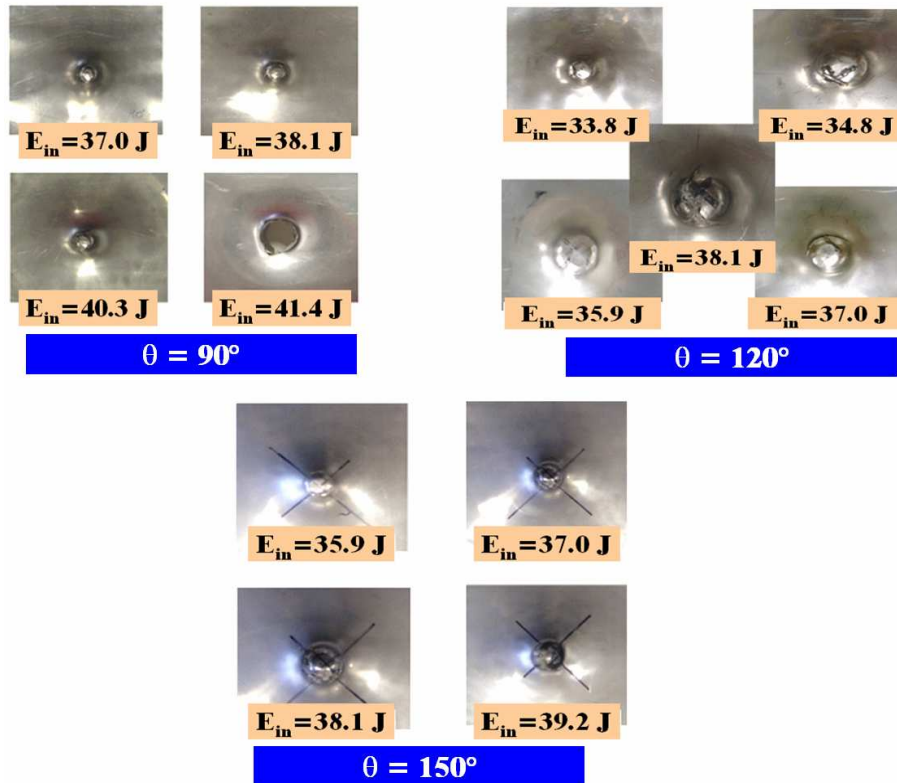


Fig. 23 Variation of deformed shape of specimens according to the impact energy (D=10 mm)

Fig. 24 와 Fig. 25 는 두께 0.7 mm인 동일 무게의 스테인레스 강판 (SUS304H)과 ISB 판넬에 충격 입력에너지 37.0 J을 부가하였을 때의 충격 특성을 비교/분석한 결과이다. 그 결과 Fig. 24 를 보면 크럼핑 각 120 ° 와 150 ° 일 때는 스테인레스 보다 최대하중은 더 높은 반면 최대변위는 더 작게 나타나 스테인레스 보다 더 우수한 충격특성을 나타냄을 알 수 있었다. 하지만 크럼핑 각 90 ° 일 때는 스테인레스가 ISB 판넬보다 조금 더 우수한 충격 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

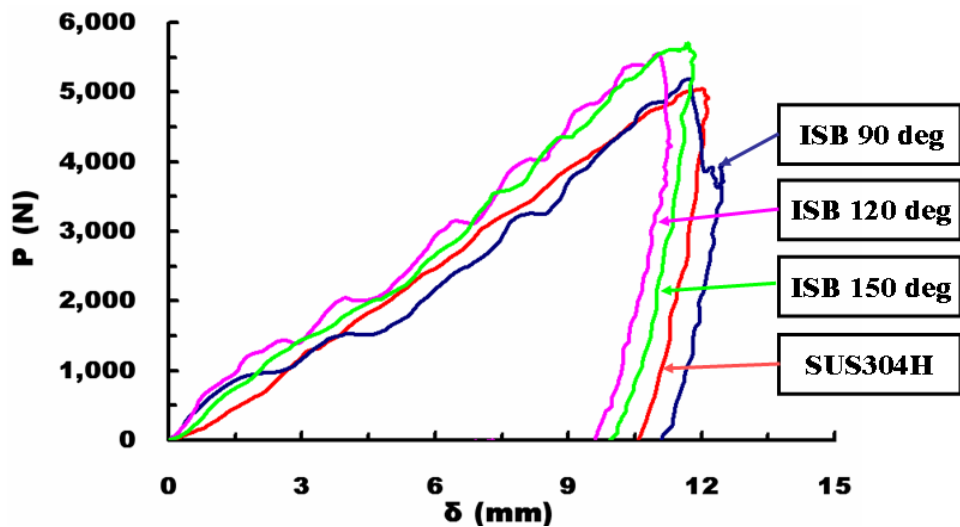


Fig. 24 Comparison of results of impact tests for ISB panel and that for SUS304H (D=10 mm)

Fig. 25 와 같이 충격 흡수에너지를 비교한 결과 크럼핑 각 120 ° 와 150 ° 일 때는 모든 변위에서 스테인레스 보다 ISB 판넬의 충격 흡수 능력이 뛰어남을 알 수 있었다. 그러나 크럼핑 각 90 ° 인 경우 Fig. 25 의 A 영역에서는 ISB 판넬이 스테인레스 강판 보다 충격 흡수 능력이 뛰어나나, 그 외 영역에서는 스테인레스

강판이 ISB 판넬 보다 충격 흡수 능력이 뛰어난 것을 알 수 있었다. 이것은 A 영역의 최대 변위 지점인 변위 6 mm에서 내부 구조체가 완전히 함몰되어 더 이상 내부 구조체로서의 역할을 하지 못하기 때문으로 사료된다. A 영역의 변위 3 mm 부근에서 ISB 판넬의 충격 흡수 능력이 Fig. 25 와 같이 동일 질량을 가진 스테인레스 강판 보다 약 60 % 이상 높은 것으로 나타났다.

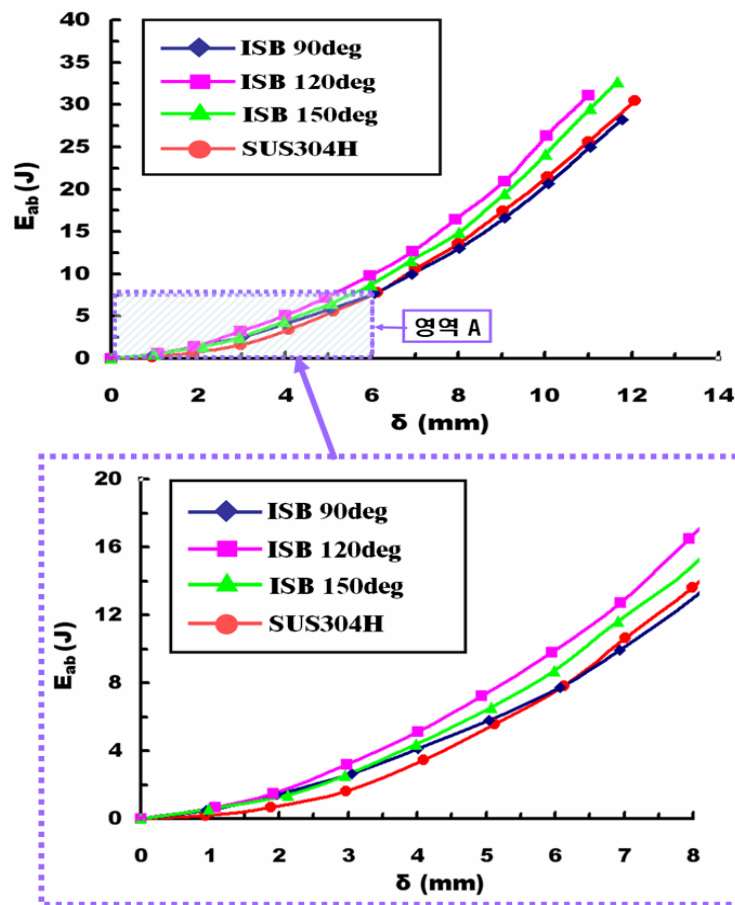
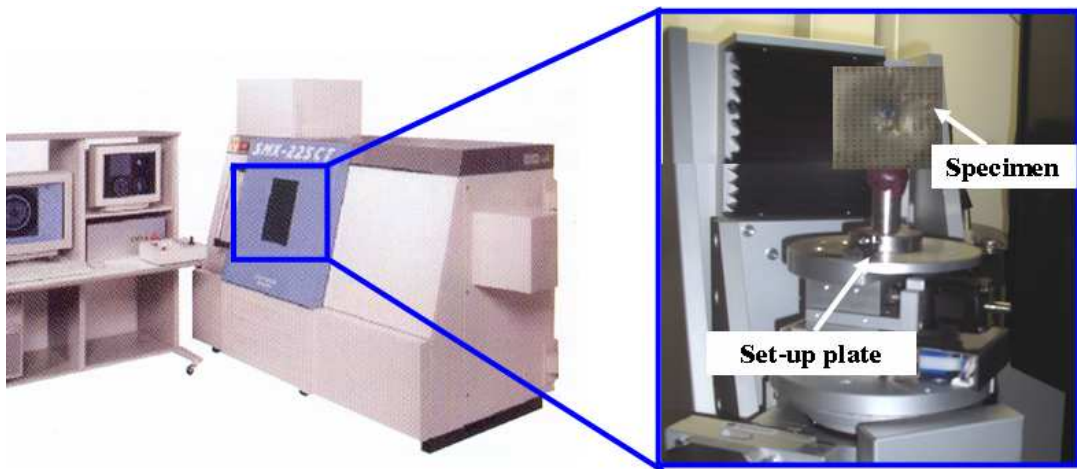


Fig. 25 Comparison of the absorbed impact energy of ISB panel and that of SUS304H (D=10 mm)

스트레칭 경계조건에서 충격시험을 수행한 충격 시편에 대한 내부 구조체 변형 및 파손 특성을 분석하기 위하여 X-RAY CT 촬영시스템을 이용하여 내부 구조체 X-RAY 촬영과 단층 촬영을 수행하였다. X-RAY CT 촬영시스템은 Fig. 26 과 같은 일본 동일 시마즈사의 SMX-225 Micro-focus X-RAY CT 시스템을 이용하여 측정하였다. XRAY-CT 촬영 결과 Fig. 27, Fig 28 과 같이 편치가 타격한 인근 영역의 내부 구조체만 완전 함몰 되었고, 다른 부분의 내부 구조체는 초기 형상을 그대로 유지하고 있는 것으로 나타났다. 그러므로 ISB 판넬과 같은 샌드위치 구조물의 장점인 전체 변형/파손을 이용한 충격 흡수를 위해서는 스트레칭 경계조건과 같은 시편 가장자리부 고정조건을 드로잉 경계조건과 같은 자유단 조건으로 변경하여 실험을 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.



**Fig. 26 Micro-focus X-RAY CT system**



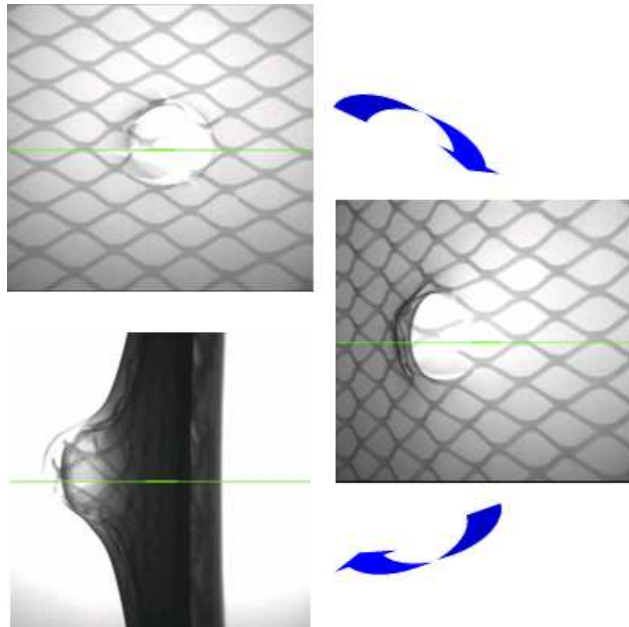


Fig. 27 X-RAY photographs of inner structures

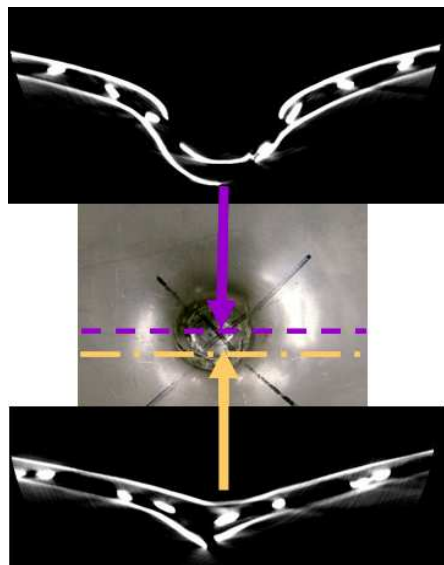


Fig. 28 CT photographs of inner structures

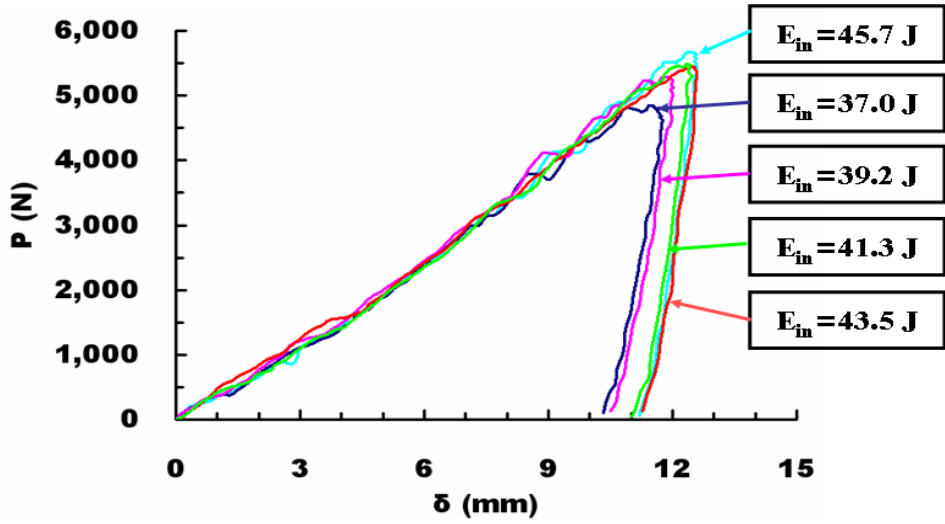
#### 4.1.4 용접된 ISB 판넬에 대한 실험 결과 및 고찰

면재와 내부구조체가 다점 전기 저항용접을 이용하여 용접된 크림핑 각  $90^\circ$  인 ISB 판넬에 대해 스트레칭 경계조건에서 직경 20 mm인 충격헤드를 사용하여 충격시험을 수행한 결과 Table 4 및 Fig. 28, Fig. 29 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

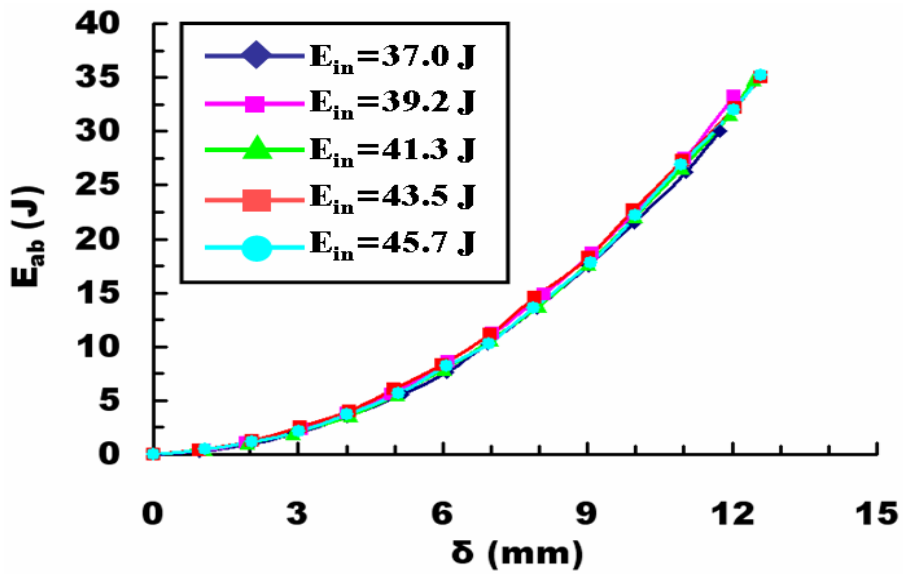
Table 4 와 Fig. 29를 통해 충격 입력에너지가 증가할수록 최대 하중, 최대 변위, 최대 충격흡수에너지가 증가함을 알 수 있었다. 하지만 충격 입력에너지가 증가할수록 충격 에너지 흡수율은 입력에너지 39.2 J일 때를 제외하고는 감소함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 30 을 통해 각 충격 입력에너지별 변형형상을 비교해 보면 모든 입력에너지에서 완벽한 스트레칭 경계조건에 의하여 중앙 원형부 변형만이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 입력에너지가 증가할수록 충격헤드의 타격점 부위의 내부 구조체가 파손되어 중앙 변형부에 더 큰 변형을 보이는 것을 알 수 있었고, 입력에너지가 증가할수록 충격에 의해 변형된 영역이 더욱 선명해지는 것을 알 수 있었다.

**Table 4 Results of impact tests for welding specimens for the case of stretching boundary conditions (D=20 mm)**

$\theta$ (°)	H (cm)	$E_{in}$ (J)	$E_{ab}$ (J)	$\chi$ (%)	$P_{max}$ (N)	$d_{max}$ (mm)
90	34	37.0	30.6	82.8	4,847.2	11.9
	36	39.2	32.5	83.0	5,303.3	11.9
	38	41.3	33.7	81.4	5,398.2	12.2
	40	43.5	34.5	79.2	5,465.1	12.4
	42	45.7	35.1	76.8	5,642.1	12.5

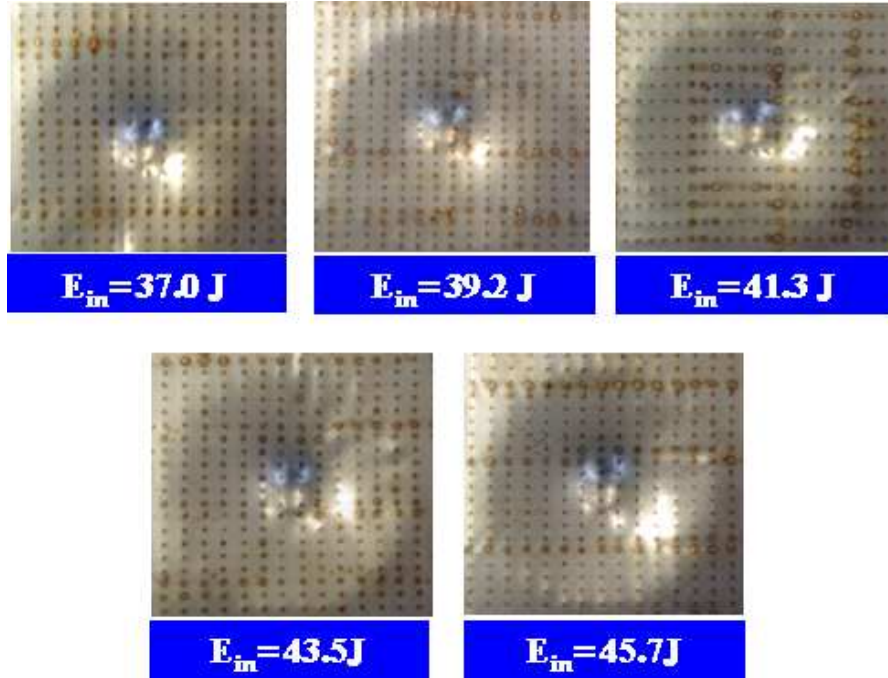


(a)  $P-\delta$  curve ( $D=20$  mm)



(b)  $E_{ab}-\delta$  curve ( $D=20$  mm)

Fig. 29 Results of impact tests of welding ISB panels for the case of stretching boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)



**Fig. 30 Deformed shape of the welded ISB panels for each impact energy for the case of stretching boundary conditions ( $D=20 \text{ mm}$ )**

Fig. 31 은 X-RAY CT 시스템을 이용한 비접촉식 내부 구조체의 측정 결과이다. 측정 결과를 비교해 보면 충격 입력에너지 37.0 J 에서는 치구의 압력에 의해 완전한 스트레칭 경계조건이 부가된 부위와 중앙 원형 변형부 사이의 경계면에서 내부 구조체의 파손이 주로 일어나 반면, 입력에너지가 증가할수록 내부 구조체의 파손 부위가 많아짐과 동시에 경계면에서뿐만 아니라 점차 중앙 원형 변형부에서도 내부 구조체의 파손이 발생함을 알 수 있었다.

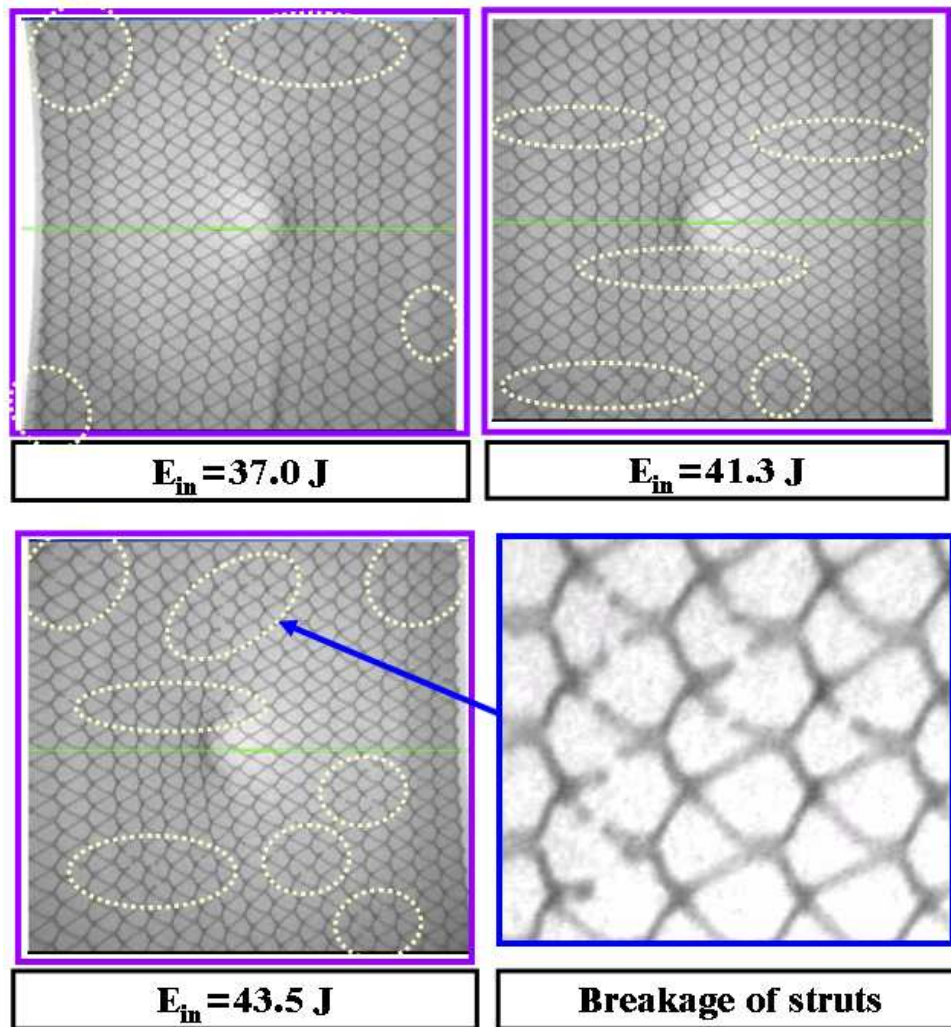


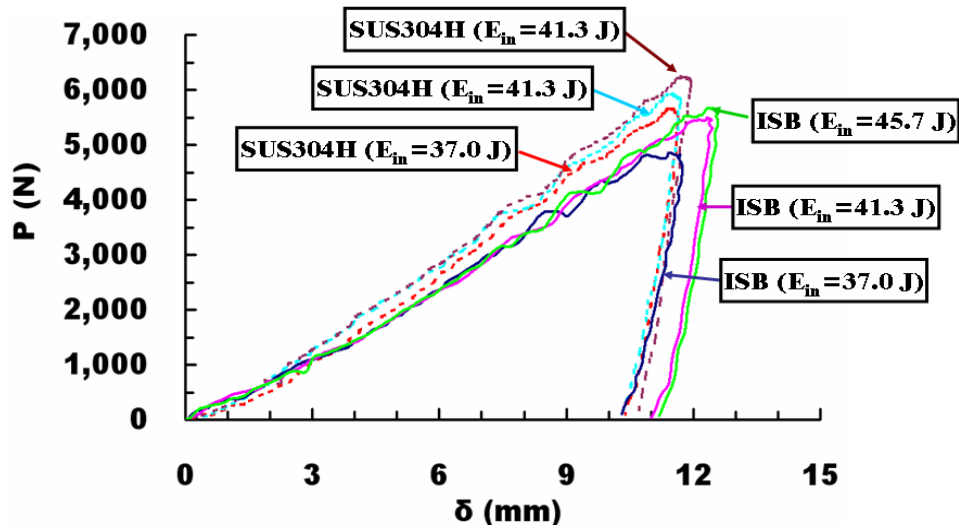
Fig. 31 Breakages of struts of inner structures for welding specimen (D=20mm)

다음으로 Table 5 와 Fig. 32 를 통해 두께 0.7 mm인 동일 무게의 스테인레스 강판과 용접 시편인 ISB 판넬의 스트레칭형 경계조건에서의 충격시험 결과를 비교/분석하였다.

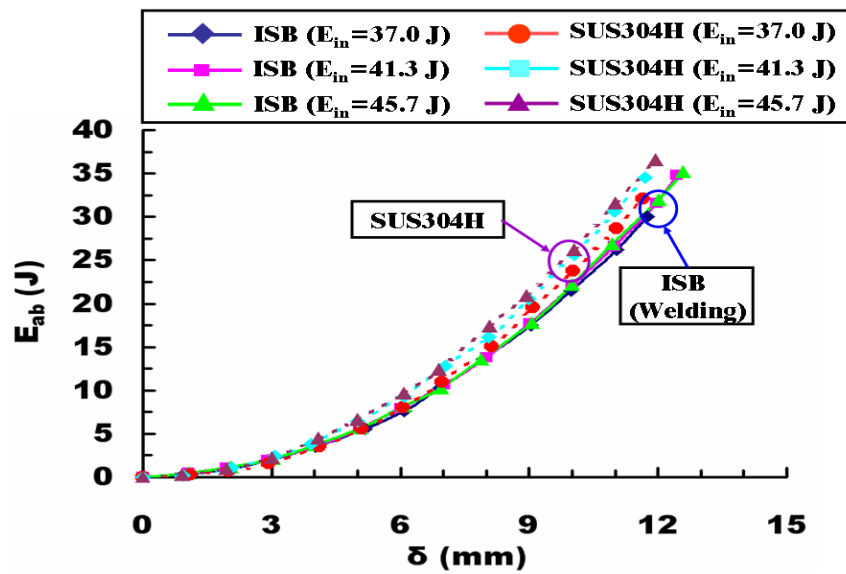
Table 5 와 Fig. 32 를 보면 동일 충격 입력에너지에서 스테인레스 강판이 용접 시편인 ISB 판넬보다 충격흡수에너지 및 충격에너지 흡수율, 최대 하중이 더 높게 나타난 반면, 최대 변위는 ISB 판넬에서 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

**Table 5 Results of impact tests of the welded ISB panel and that of SUS304H panel for the case of stretching boundary conditions (D=20mm)**

Specimen	H (cm)	E <sub>in</sub> (J)	E <sub>ab</sub> (J)	$\chi$ (%)	P <sub>max</sub> (N)	d <sub>max</sub> (mm)
ISB (Welding)	34	37.0	30.6	82.8	4,847.2	11.9
	38	41.3	33.7	81.4	5,398.2	12.2
	42	45.7	35.1	76.8	5,642.1	12.5
SUS304	34	37.0	31.6	85.5	5,592.0	11.3
	38	41.3	34.5	83.5	5,919.9	11.7
	42	45.7	37.2	81.4	6,214.3	12.2



(a)  $P-\delta$  curve ( $D=20$  mm)



(b)  $E_{ab}-\delta$  curve ( $D=20$  mm)

Fig. 32 Comparison of results of impact tests of the welded ISB panel and that of SUS304H panel for the case of stretching boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

Fig. 33 과 Fig. 34 는 용접 시편인 ISB 판넬과 스테인레스 강판의 최대 변형 깊이 ( $\Omega$ ) 를 비교한 결과이다. Fig. 33 과 Fig. 34 를 보면 충격 입력에너지가 증가할수록 ISB 판넬과 스테인레스 강판 모두 최대 변형 깊이 ( $\Omega$ ) 가 증가함을 알 수 있었다. 또한, 동일 입력에너지에서 ISB 판넬과 스테인레스 강판을 비교한 결과 ISB 판넬이 더 많이 변형하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 내부 구조체의 함몰 후 내부 구조체로 분산되던 하중이 외판으로 집중되어 동일 입력에너지에서 ISB 판넬이 더 많이 변형하는 것으로 사료된다.

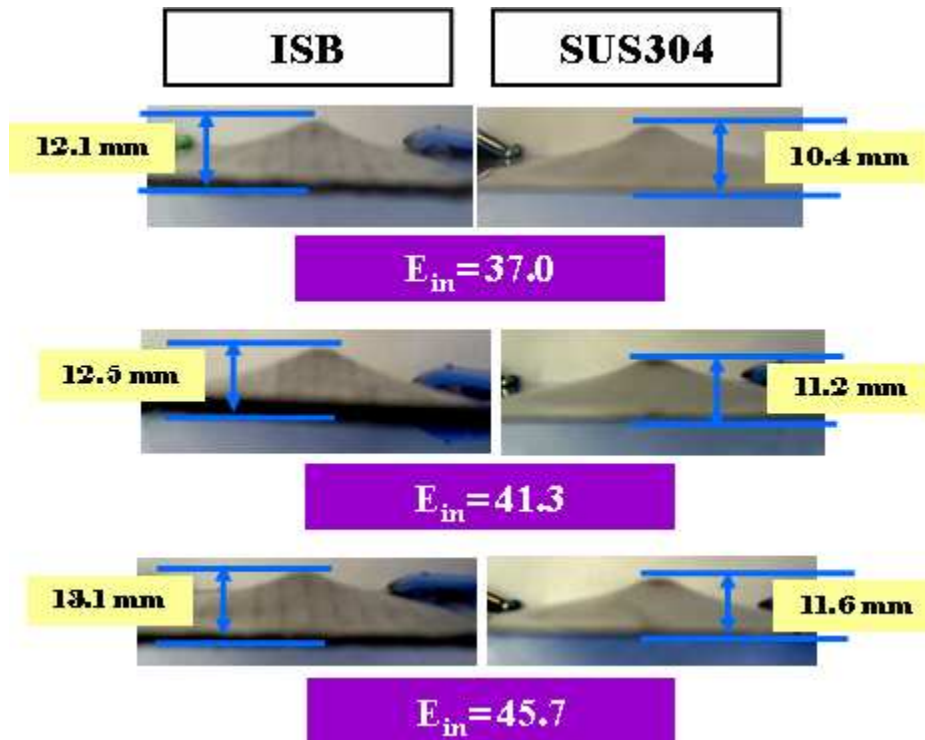


Fig. 33 Variation of maximum deformation depth according to the input energy (The welded ISB and SUS304H panels, D=20 mm)



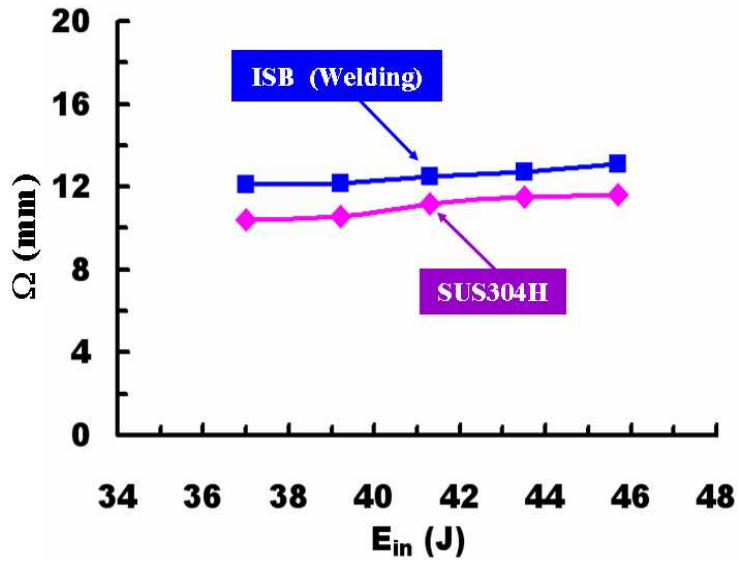


Fig. 34 Comparison of maximum deformation depth of the welded ISB panel and that of SUS304H panel (D=20 mm)

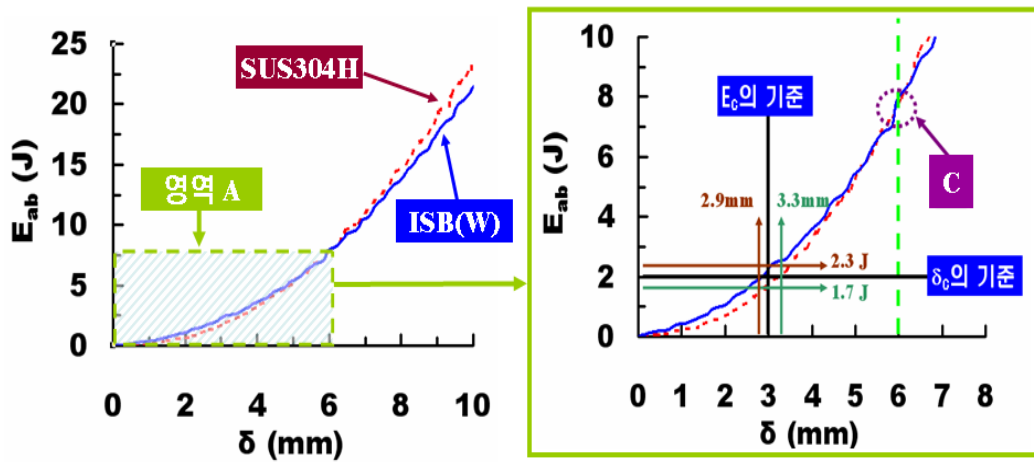


Fig. 35 Comparison of impact characteristics of the welded ISB panel and that of SUS304H panel (D=20 mm)

Fig. 35의 충격흡수에너지-변위 곡선을 보면 A 영역에서는 ISB 판넬이 스테인레스 강판 보다 충격 흡수 능력이 뛰어나나, 그 외 영역에서는 스테인레스 강판이 ISB 판넬보다 충격 흡수 능력이 뛰어난 것을 알 수 있었다. 이것은 ISB 판넬의 내부 구조체가 완전히 함몰되기 전까진 소성 변형하여 충격에너지를 흡수하지만 내부 구조체가 완전히 함몰되어 상판과 하판이 맞닿는 특이점 C 이후부터는 내부 구조체로서의 역할을 하지 못하게 되기 때문으로 사료된다. 또한, 충격흡수에너지 2 J에서 스테인레스 강판과 비교한 ISB 판넬의 변형양이 스테인레스 강판의 약 88 % 정도 밖에 변형하지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 ISB 판넬이 충격을 받을 때 상판을 통해 전달된 충격에너지가 내부 구조체로 전달되어 내부 구조체의 변형을 통해 충격 흡수율을 극대화하여 하판의 변형을 최소화하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

Table 6은 A 영역의 변위 3 mm 에서의 충격흡수에너지( $E_c$ )와 충격흡수에너지 2 J에서의 변위( $\delta_c$ ), 내부 구조체가 완전히 함몰되어 상판과 하판이 맞닿는 특이점(C) 및 변위 3 mm 에서의 충격에너지 흡수 특성 비교( $\alpha$ )와 충격흡수에너지 2 J 에서의 변형 특성 비교( $\beta$ )를 각 충격 입력에너지별로 구한 결과이다. 여기서 충격에너지 흡수 특성 비교( $\alpha$ )와 변형 특성 비교( $\beta$ )는 식 (5) 및 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$\alpha = \frac{E_{c, ISB}}{E_{c, SUS304H}} \times 100 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\delta_{c, ISB}}{\delta_{c, SUS304H}} \times 100 \quad (6)$$

**Table 6 Comparison of impact characteristics of the welded ISB panel and that of SUS304H panel according to the input energy**

Specimen	$E_{in}$ (J)	$E_c$ (J)	$\delta_c$ (mm)	C (mm)	$\alpha$ (%)	$\beta$ (%)
ISB (Welding)	37.0	2.3	2.9	6.0	135.3	87.9
	41.3	2.3	2.6	4.0	104.5	89.7
	45.7	2.0	3.0	3.0	100.0	100.0

Table 6을 보면 입력에너지가 증가할수록 내부 구조체가 완전히 함몰되어 상판과 하판이 맞닿는 특이점 C는 점차 작은 변위에서 발생함을 알 수 있었다. 또한, 입력에너지가 증가할수록 스테인레스 강판과 비교한 ISB 판넬의 충격 흡수 능력 및 변형양의 우수성이 점차 감소함을 알 수 있었다.

결과적으로 내부 구조체가 함몰되기 전까지는 ISB 판넬이 스테인레스 강판보다 변형양은 작으면서 더 우수한 충격 흡수 능력을 나타내지만 내부 구조체가 완전히 함몰된 이후에는 스테인레스 강판이 더 작게 변형하면서 더 좋은 충격 흡수 능력을 보이는 것을 알 수 있었다. 또한, 충격 입력에너지가 ISB 판넬의 충격 흡수 능력 우수성이 더 감소하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 현상들은 시편 가장자리 부를 완전히 고정시킨 가혹한 스트레칭 경계조건으로 인해 ISB 판넬과 같은 샌드위치 구조물의 특징인 전체 변형과 내부 구조체의 변형 및 파손을 이용하여 충격을 흡수하는 샌드위치 구조물의 장점을 살리지 못하였기 때문으로 사료된다. 이를 위해 샌드위치 구조물의 장점을 살릴 수 있는 드로잉 경계조건과 같은 자유단 조건에서의 충격시험을 통한 충격 특성 분석이 바람직할 것으로 판단되었다.

## 4.2 드로잉형 경계조건에서의 충격시험

### 4.2.1 실험방법

자동차, 항공기, 선박 등의 수송기계에서는 부재가 완벽하게 고정된 스트레칭 경계조건에서의 충격 특성 분석과 더불어 부재가 거의 자유단 상태로 놓인 드로잉형 경계조건에서의 충격 특성 분석이 필요시 되고 있어서 본 연구에서는 드로잉형 경계조건에서 충격시험을 수행하였다. 드로잉형 경계조건에서의 충격시험은 Fig. 7 과 같은 낙하하중 방식의 충격시험기를 이용하여 Fig. 9 와 같이 상판에 롤러를 장착하여 시편에 충격 부가시 시편의 가장자리가 자유롭게 드로잉 될 수 있도록 하는 드로잉 방식의 치구로 실험을 수행하였다. 충격시험에 사용된 시편은 스트레칭 방식과 동일하게 접합시편과 용접시편 두 가지 타입의 ISB 판넬과 동일 무게의 스테인레스 강판(SUS304H)이 사용되었다. 시편 크기, 두께, 무게는 Table 7 과 같이 설계/제작하였다. 실험에 사용된 충격헤드는 무게 11.1 kg 에 직경 10 mm 와 20 mm 인 두 가지 타입이다. 충격에너지 흡수 특성을 정량적으로 계산하기 위한 충격 입력에너지, 충격흡수에너지, 충격에너지흡수율은 스트레칭형 경계조건에서의 충격시험 결과에서 정의한 식 (2)–(4) 와 동일하다.

Table 7 Geometry of test specimen

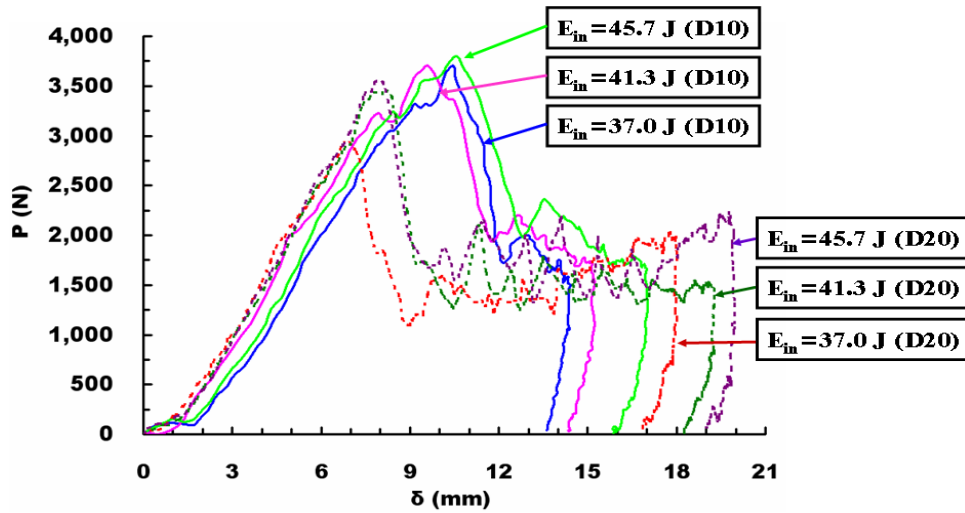
Specimen	$\theta$ (°)	L (mm)	W (mm)	T (mm)	m (g)
ISB (Bonding)	90	120	120	3.1	92.4
ISB (Welding)	90	120	120	2.8	81.6
SUS304H		120	120	0.7	80.0

#### 4.2.2 외판 재료(SUS304H)에 대한 실험 결과 및 고찰

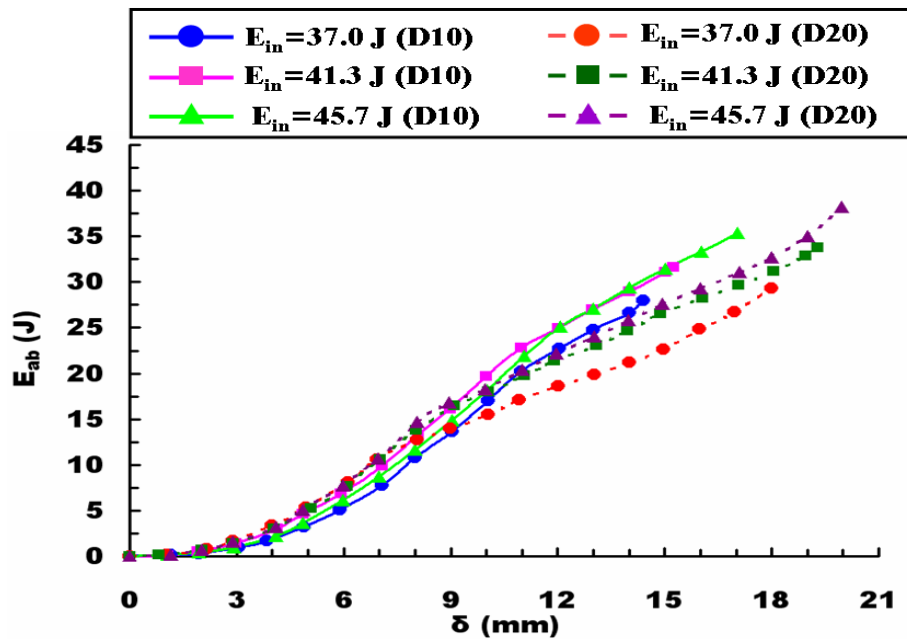
본 연구에서는 ISB 판넬의 외판 재료로 사용된 스테인레스 강판 대해 드로잉 형 경계조건에서의 충격시험을 수행하였다. 충격시험을 통해 ISB 판넬과의 충격 특성을 비교하기 위하여 ISB 판넬과 동일 무게에 두께 0.7 mm 로 설계/제작하였다. 충격시험은 직경(D)10 mm 와 20 mm 인 충격헤드를 사용하여 충격 입력에너지 37.0 J, 39.2 J, 41.3 J, 43.5 J, 45.7 J에서 충격시험을 수행하였다. 그 결과 Table 8 및 Fig. 36 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

**Table 8 Results of impact tests of SUS304H panels for the case of drawing boundary conditions**

D (mm)	H (cm)	E <sub>in</sub> (J)	E <sub>ab</sub> (J)	χ (%)	P <sub>max</sub> (N)	d <sub>max</sub> (mm)
10	34	37.0	28.0	75.7	3696.8	14.4
	36	39.2	29.4	75.0	3700.2	15.2
	38	41.3	31.6	76.5	3708.7	15.2
	40	43.5	32.2	74.0	3748.2	16.7
	42	45.7	35.4	77.5	3801.9	17.0
20	34	37.0	29.3	79.2	2928.5	18.0
	36	39.2	31.9	81.4	3389.4	18.3
	38	41.3	33.7	81.6	3448.6	19.3
	40	43.5	35.6	81.8	3500.7	19.7
	42	45.7	38.2	83.6	3544.9	20.0



(a)  $P-\delta$  curve



(b)  $E_{ab}-\delta$  curve

Fig. 36 Results of impact tests of SUS304H panels for the case of drawing boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

스테인레스 강판에 대한 저속 충격시험 결과 Table. 8 및 Fig. 36 과 같이 충격 헤드 직경 10 mm 와 20 mm 에서 모두 충격 입력에너지가 증가할수록 최대 하중, 최대 충격흡수에너지 및 최대 변위가 증가함을 알 수 있었다. 또한, 스트레칭 경계조건과는 달리 충격 입력에너지가 증가할수록 충격에너지흡수율이 다소 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 스트레칭 경계조건에서는 접촉부 국부 변형만이 발생하여 입력에너지가 증가할수록 국부 변형의 한계에 의해 충격 흡수되는 에너지가 감소하지만 드로잉 경계조건에서는 접촉부 국부 변형과 함께 시편 중앙선 방향으로 표면 접힘 현상이 발생하여 입력에너지가 증가할수록 시편 전체적인 변형양이 증가하여 충격 흡수되는 에너지 또한 증가하므로 충격흡수에너지가 증가하는 것으로 사료된다.

충격헤드의 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때를 비교해보면 동일 입력에너지에 대하여 직경이 20 mm 일 때 더 높은 충격흡수에너지 및 충격에너지흡수율과 더 큰 최대 변위를 나타내는 반면, 최대 하중은 더 작게 나타남을 알 수 있었다.

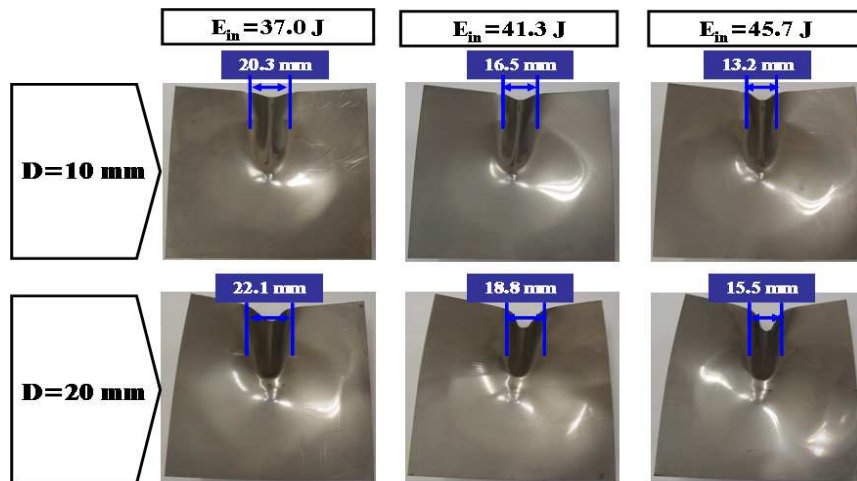


Fig. 37 Variation of deformation width according to the input energy for each diameter of impact head

Fig. 36 (a)에서 충격헤드의 직경이 감소할수록 최대하중 발생 변위는 증가하나, 최대 변위는 감소하는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 직경이 감소할수록 접촉부 국부 변형과 시편 중앙선 방향의 접힘 발생은 더 많이 유도시키나, 시편의 전체적인 변형을 유도하지는 못하기 때문으로 사료된다. 그러므로 Fig. 37 과 같이 충격헤드 직경이 감소할수록 접힘이 발생하는 부위의 폭이 감소하게 된다. 또한, Fig. 36 (a) 의 하중-변위 곡선에서 최대 하중 후 감소하던 하중이 떨리면서 다시 증가하는 현상이 발생하였다. 이 현상은 시편의 충격 하중 부가 부위가 국부 변형을 하다가 시편의 중앙선 방향으로 접힘부가 발생하여 충격헤드와의 접촉하는 시편 면적이 감소하게 되어 하중이 급격하게 감소하는 것으로 사료된다. 그 후 계속적으로 감소하던 하중은 접힘 현상 발생 부분이 다시 충격헤드와 접촉하기 시작하면서부터 충격하중이 다시 증가하여 Fig. 38 과 같이 최대 충격헤드 진행지점에서 시편 접힘부와 충격헤드와의 부딪침으로 인해 두 번째 최대하중이 나타나는 것으로 사료된다.



**Fig. 38 Deformed shape of specimens for the case of drawing boundary conditions ( $D=20$  mm,  $E_{in}=45.7$  J)**



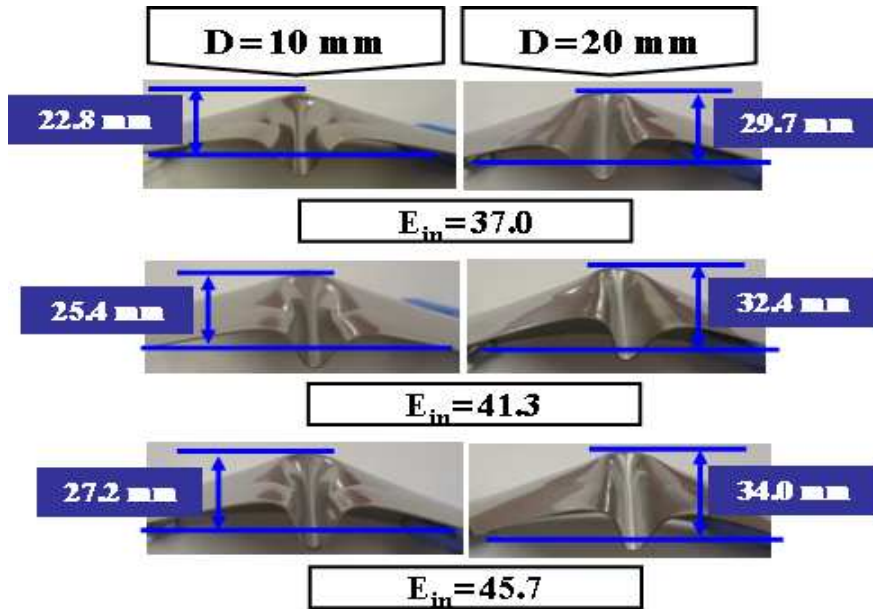


Fig. 39 Variation of deformation depth of SUS304H panel according to the input energy for each diameter of the impact head

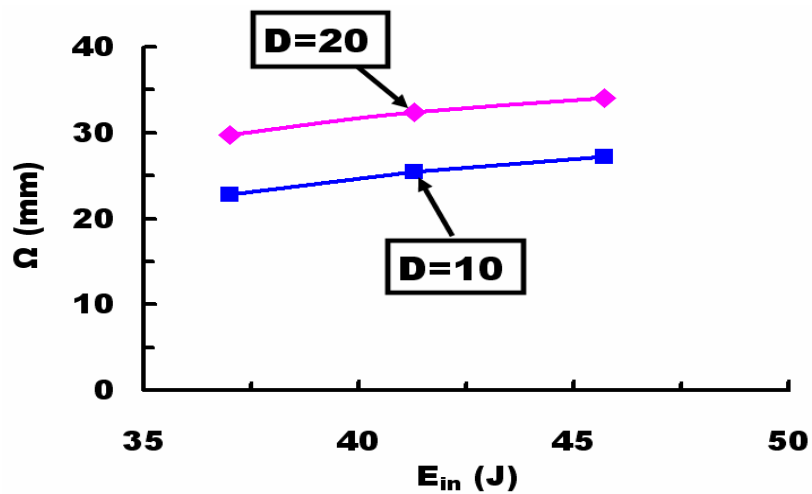


Fig. 40 Influence of the diameter of the impact head and the impact energy on the deformation depth

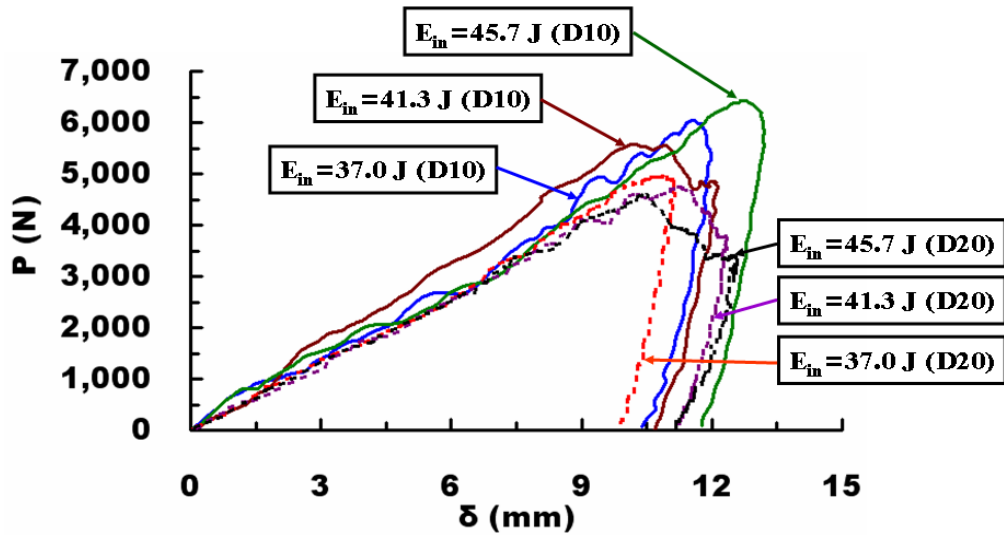
Fig. 39 와 Fig. 40 은 드로잉형 경계조건에서 충격 입력에너지와 충격헤드의 직경에 따른 최대 변형 깊이를 나타낸 결과이다. 그 결과 충격 입력에너지가 증가할수록 두 조건에서 모두 최대 변형 깊이가 증가함을 알 수 있었고 동일 입력에너지에서 충격헤드 직경 20 mm 일 때 최대 변형 깊이가 더 많이 변형함을 알 수 있었다. 이 현상은 충격헤드 직경이 클수록 접촉부 국부 변형보다는 시편의 전체적인 변형을 더 많이 유도하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

### 4.2.3 접합된 ISB 판넬에 대한 실험 결과 및 고찰

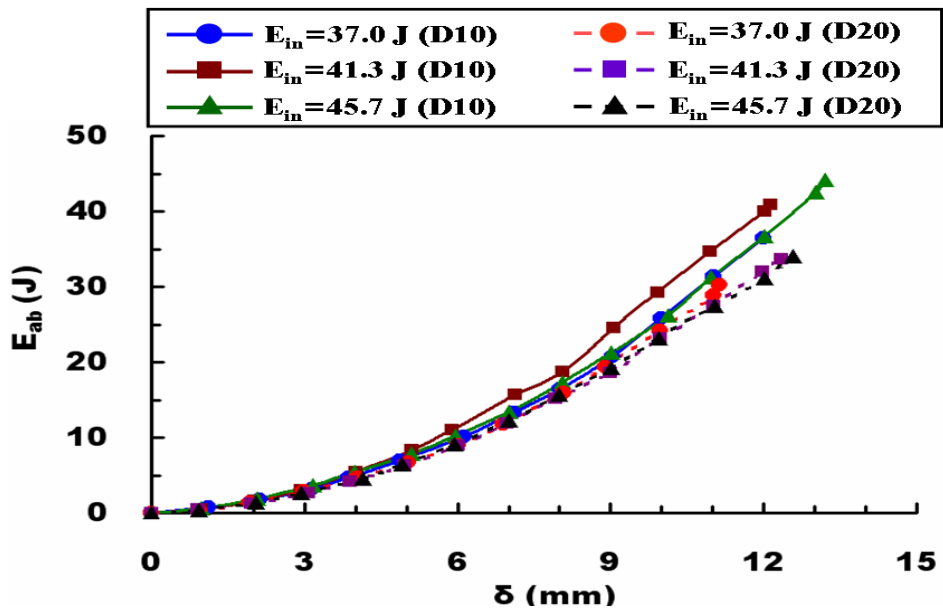
자동차, 항공기, 선박 등의 수송기계에서 부재의 충돌시 나타나는 실제적인 현상에 가깝게 묘사할 수 있다는 장점을 가지고 있으며 특히, 샌드위치 구조물의 특징인 전체 변형과 내부 구조체의 변형 및 파손을 이용하여 충격을 흡수하는 샌드위치 구조물의 충격 특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 드로잉형 경계조건에서 충격시험을 수행하였다. 충격시험은 면재와 내부구조체가 예폭시로 접합된 크립핑 각 90 ° ISB 판넬에 대해 직경 10 mm 와 20 mm인 충격헤드를 사용하여 충격시험을 수행하였다. 그 결과 Table 9 및 Fig. 41 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

**Table 9 Results of impact tests of bonding specimens for the case of drawing boundary conditions**

D (mm)	H (cm)	E <sub>in</sub> (J)	E <sub>ab</sub> (J)	χ (%)	P <sub>max</sub> (N)	d <sub>max</sub> (mm)
10	34	37.0	36.5	98.7	6045.4	12.0
	38	41.3	40.9	98.9	5582.1	12.1
	42	45.7	44.2	96.7	6432.8	13.2
20	34	37.0	30.2	81.6	4951.5	11.1
	38	41.3	33.7	81.6	4754.2	12.4
	42	45.7	34.1	74.7	4679.8	12.5



(a)  $P-\delta$  curve



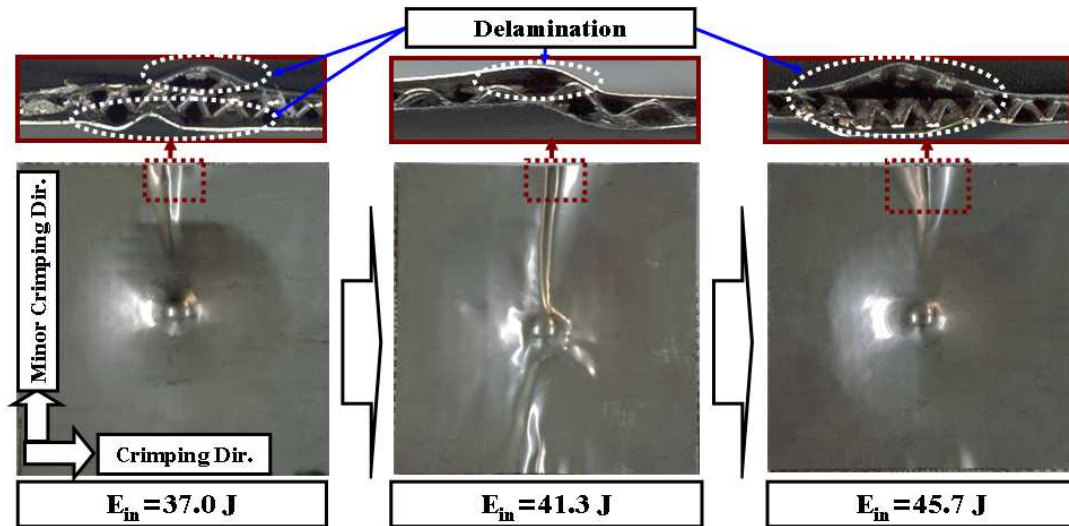
(b)  $E_{ab}-\delta$  curve

Fig. 41 Results of impact tests of bonding specimens for the case of drawing boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

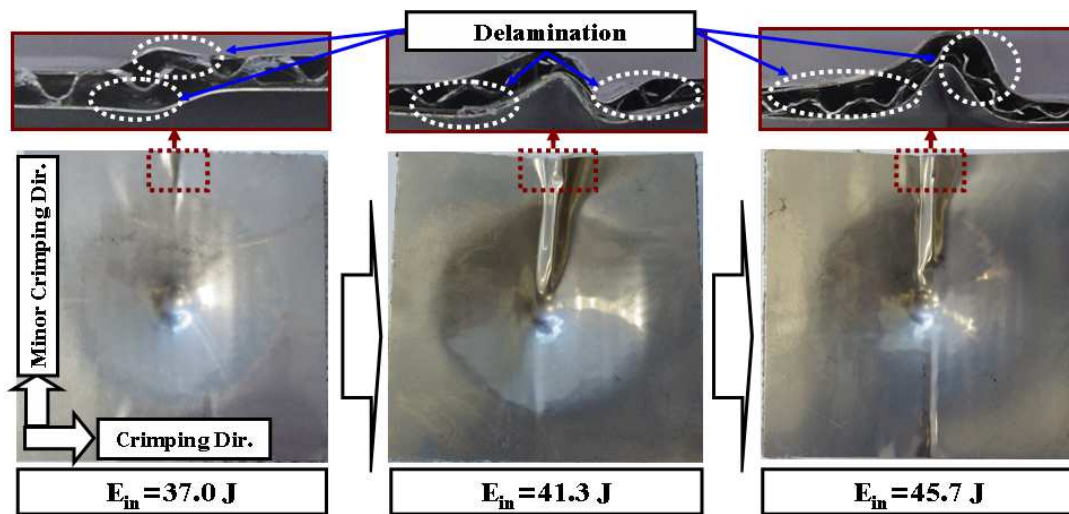
에폭시로 접합된 ISB 판넬에 대한 저속 충격시험 결과 Table 9 및 Fig. 41 과 같이 충격헤드 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때 모두 충격 입력에너지가 증가할수록 최대 충격흡수에너지와 최대 변위는 증가하는 반면, 최대 하중은 대체적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, Fig. 41 (a) 의 하중-변위 선도를 보면 충격 입력에너지 37.0 J 에서는 최대 하중 후 변위가 증가 없이 급격한 감소가 일어난 반면, 입력에너지 41.3 J 이상에서는 최대 하중 뒤 변위 증가와 함께 하중이 다소 완만하게 감소하다가 변위 증가 없이 하중이 급격히 감소하는 형태를 나타내었다. 이 현상은 충격 입력에너지 41.3 J 이상일 경우 시편의 접힘 현상 증가에 의해 충격헤드와 시편의 접촉 면적이 감소하여 하중이 감소하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

충격헤드의 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때를 비교해보면 동일 입력에너지에 대하여 직경이 10 mm 일 때가 직경 20 mm 일 때보다 충격흡수에너지, 충격에너지흡수율, 최대 하중 및 최대 변위가 더 크게 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 42 는 드로잉형 경계조건에서의 충격시험 결과 취득된 접합된 ISB 판넬의 변형 형상이다. 본 충격 시편의 변형 형상 분석 결과 Fig. 42 와 같이 충격 입력에너지 37.0 J 에서는 중앙 충격부의 함몰과 시편 가장자리부의 작은 접힘들만이 발생하였으나, 충격 입력에너지 41.3 J 이상에서는 중앙부 충격부가부의 함몰과 중앙부 크리핑 골을 따라 지배적인 접힘 발생부가 생성되는 것을 알 수 있었다. 충격헤드 직경 10 mm 일 때는 입력에너지 41.3 J, 충격헤드 직경 20 mm 일 때는 입력에너지 45.7 J 에서 접힘 발생부와 대칭되는 영역에 주름이 발생하기 시작하는 것을 알 수 있었다. 접힘 발생은 충격 입력에너지 크기에 관계없이 내부 구조체 크리핑 방향에 수직인 부 크리핑 방향에서 나타남을 알 수 있었다. 또한, 충격 입력에너지의 크기에 관계없이 시편 상부 주름 방향 부위에서 내부 구조체와 면재가 분리되는 표면박리 현상이 나타남을 알 수 있었다.

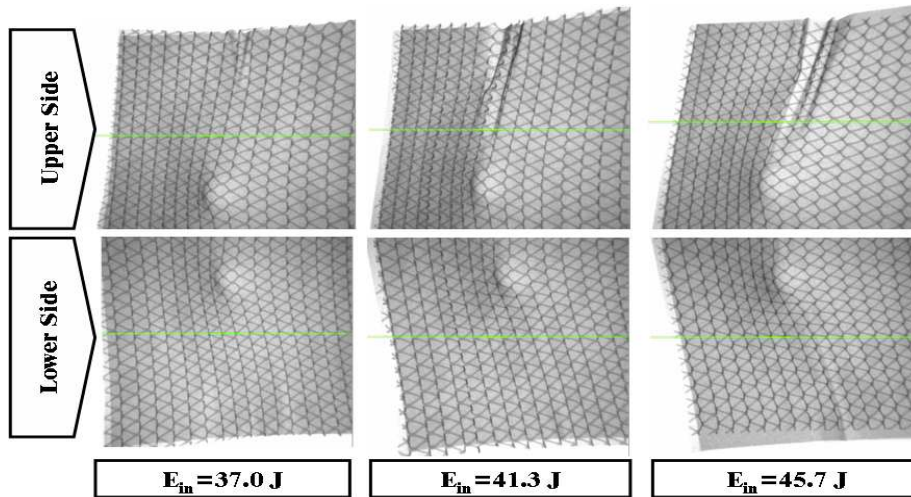


(a)  $D=10\text{ mm}$



(b)  $D=20\text{ mm}$

Fig. 42 Variation of deformed shape of bonding specimens according to the input energy for each diameter of the impact head



**Fig. 43 Deformed shape of inner structures for bonding specimens according to the impact energy for each diameter of impact head (D=20 mm)**

Fig. 43 은 직경 20 mm 일 때의 접합된 ISB 판넬의 내부 구조체 변형 형상이다. 시편의 내부 구조체는 동일 시마즈사의 SMX-225 Micro-focus X-RAY CT 시스템을 이용하여 측정하였다. Fig. 43 과 같이 접합된 ISB 판넬의 경우 충격 입력에너지가 증가하여도 중앙부 충격부가부의 내부 구조체 함몰과 접힘 발생부의 내부 구조체의 변형만 있을 뿐, 내부 구조체의 파손은 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 또한, 충격 입력에너지가 45.7 J 일 때는 주름발생이 지배적으로 일어나는 상부 영역의 반대편 영역의 내부 구조체도 접힘 현상에 의하여 변형하는 것을 알 수 있었다.

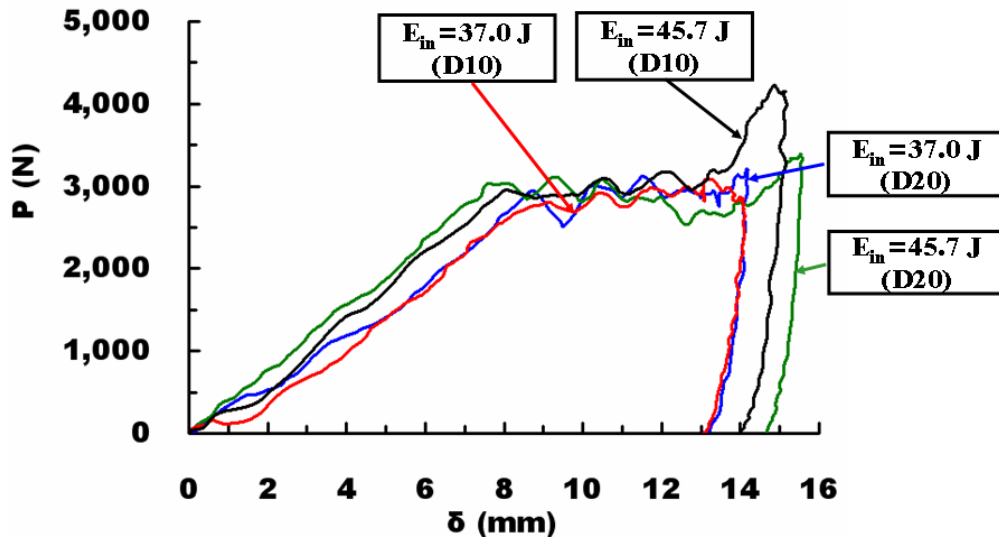
#### 4.2.4 용접된 ISB 판넬에 대한 실험 결과 및 고찰

면재와 내부구조체가 다점 전기 저항용접을 이용하여 용접된 크림핑 각 90 ° 인 ISB 판넬에 대해 드로잉형 경계조건에서 직경 10 mm 와 20 mm인 충격헤드를 사용하여 충격시험을 수행한 결과 Table 10 및 Fig. 44 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

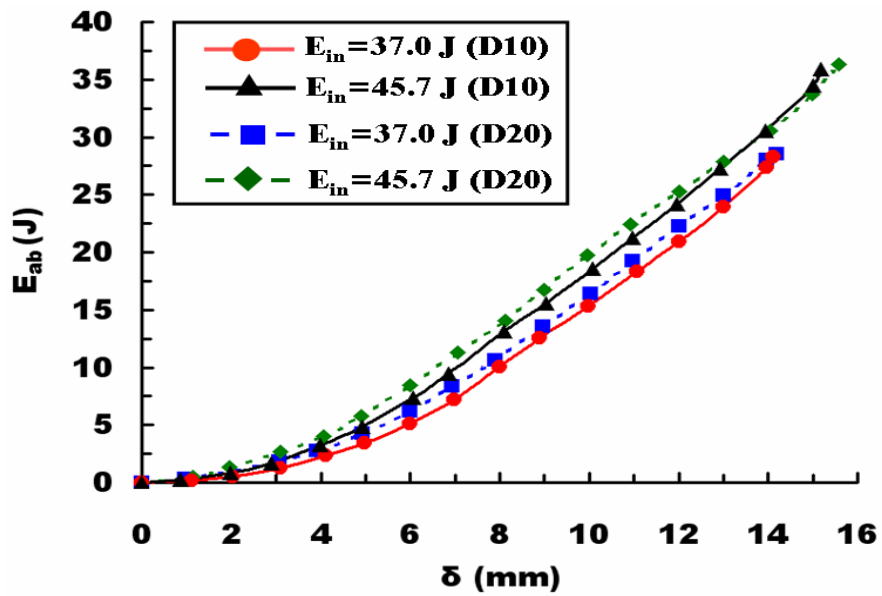
**Table 10 Results of impact tests of welding specimens for the case of drawing boundary conditions**

D (mm)	H (cm)	E <sub>in</sub> (J)	E <sub>ab</sub> (J)	χ (%)	P <sub>max</sub> (N)	d <sub>max</sub> (mm)
10	34	37.0	28.3	76.5	3,089.4	14.1
	36	39.2	30.2	77.0	3,269.9	14.3
	38	41.3	31.9	77.2	3,725.4	15.0
	42	45.7	35.9	78.6	4,225.8	15.2
20	34	37.0	28.5	77.0	3,174.5	14.2
	36	39.2	30.9	78.8	2,880.7	15.2
	38	41.3	31.2	75.5	3,138.9	15.5
	42	45.7	36.4	79.6	3,382.9	15.6





(a)  $P-\delta$  curve



(b)  $E_{ab}-\delta$  curve

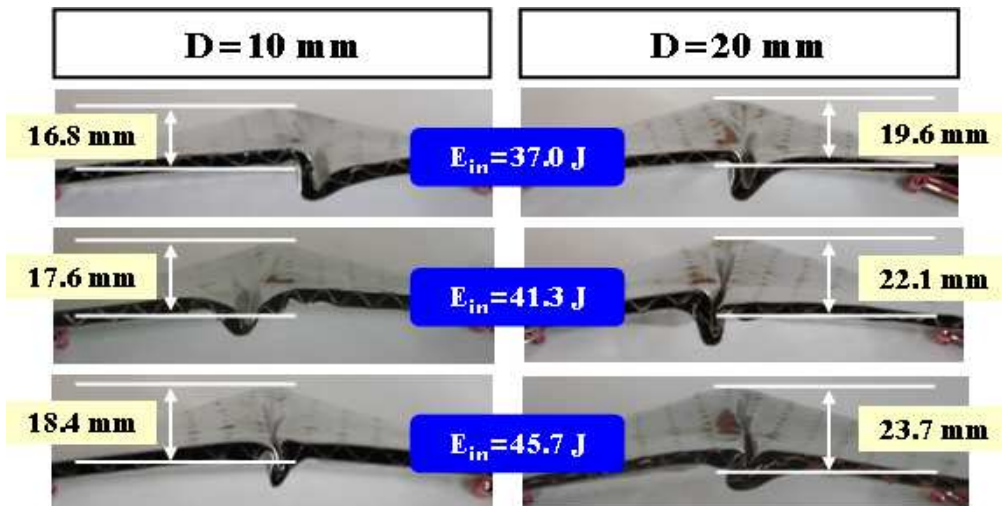
Fig. 44 Results of impact tests of welding specimens for the case of drawing boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

다점 전기 저항용접으로 용접된 ISB 판넬에 대한 드로잉 경계조건에서의 저속 충격시험 결과 Table 10 및 Fig. 44 와 같이 충격헤드 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때 모두 충격 입력에너지가 증가할수록 충격흡수에너지 및 충격에너지흡수율과 최대 하중 및 최대 변위가 증가함을 알 수 있었다. 충격헤드 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때를 비교해 보면 동일 입력에너지에서 충격헤드 직경 10 mm 일 때가 최대 하중은 더 높은 반면 최대 변위는 더 작음을 알 수 있었다. 또한, 동일 입력에너지에서 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율은 충격헤드 직경 10 mm 일 때가 직경 20 mm 일 때보다 다소 감소하는 특성을 나타내었다. 본 시험 범위에서는 75.5-79.6 % 의 충격에너지흡수율을 나타내었다.

Fig. 44 (a) 인 하중-변위 선도를 고찰하면 최초 하중 정점 (Peak) 이 발생한 후 3-4 회의 연속적인 하중 요동 (Fluctuation) 이 발생하는 것을 알 수 있었다. 하중 요동시 최후의 정점하중을 제외하고 각 정점 하중이 거의 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었다. 이것은 충격헤드에 의하여 ISB 판넬에 충격에너지가 전달된 후 첫 번째 하중 정점값 발생 시 ISB 판넬의 첫 번째 접힘 모드가 시작되어 로드셀이 부착된 충격헤드와 ISB 판넬의 접촉 면적이 감소하면서 하중이 감소하게 되고, 첫 번째 접힘 모드가 계속될수록 다시 충격헤드와 ISB 판넬의 접촉 면적이 증가하게 되면서 하중이 다시 증가하는 것으로 사료된다. 이러한 현상이 2-3 회 반복하여 나타나기 때문에 다음과 같은 하중요동 현상이 발생하는 것으로 사료된다. 즉, 하중-변위 선도의 요동은 충격에너지 부가시 시편의 국부 접힘 현상에 의하여 발생되었다.

또한, Fig. 44 (a) 의 하중-변위 선도에서 충격헤드 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때 모두 첫 번째 하중 정점은 충격 입력에너지가 증가할수록 적은 변위에서 나타나며, 하중 값은 조금씩 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 충격헤드 직경 10 mm 일 때는 충격 입력에너지 37.0 J 과 45.7 J 에서 모두 최후 하중 정점

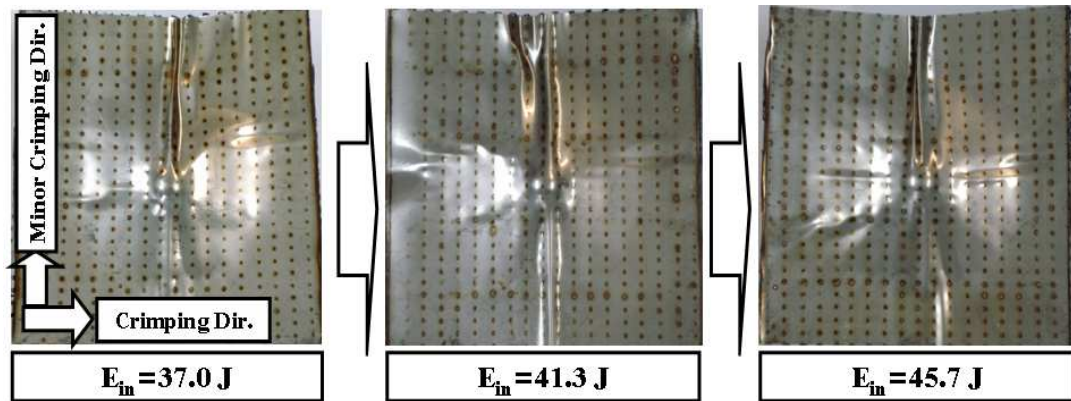
직전에 나타나는 국소 하중 최소값이 앞서 나타난 국소 하중 최소값과 거의 유사한 값을 나타냈으며 입력에너지 45.7 J 의 경우 최후 하중 정점값이 상당히 상승하는 형태를 나타내었다. 반면, 충격헤드 직경 20 mm 일 때는 충격 입력에너지 37.0 J 에서는 최후 하중 정점 직전에 나타나는 국소 하중 최소값이 앞서 나타난 국소 하중 최소값과 거의 유사한 값을 가졌지만 45.7 J 에서는 최후 하중 정점 직전에 나타나는 국소 하중 최소값이 앞서 나타난 국소 하중 최소값보다 상당히 감소하며 최후 하중 정점값만 상승하는 형태를 나타내었다.



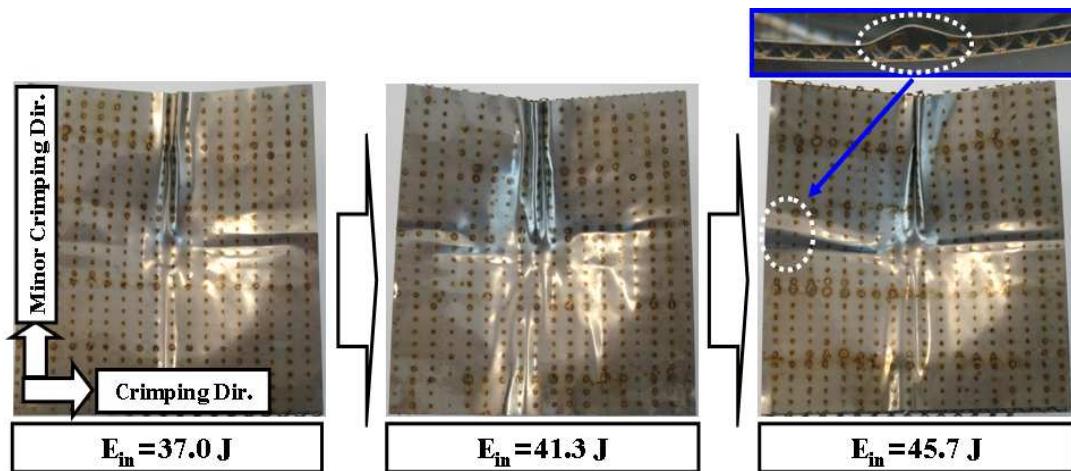
**Fig. 45** Variation of the deformation depth of ISB panel according to the input energy for each diameter of the impact head

Fig. 45 는 드로잉형 경계조건에서 충격 입력에너지와 충격헤드의 직경에 따른 최대 변형 깊이를 나타낸 결과이다. 그 결과 충격 입력에너지가 증가할수록 두 조건에서 모두 최대 변형 깊이가 증가함을 알 수 있었고, 동일 입력에너지에서 충격 헤드 직경 20 mm 일 때 최대 변형 깊이가 더 많이 변형함을 알 수 있었다. 이 현

상은 충격헤드 직경이 클수록 접촉부 국부 변형보다는 시편의 전체적인 변형을 더 많이 유도하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.



(a) D=10 mm

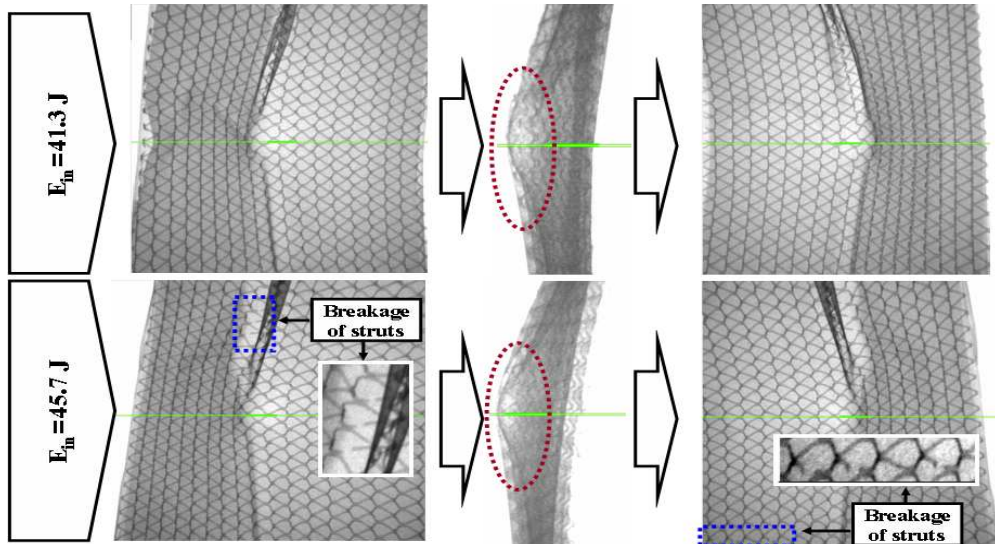


(b) D=20 mm

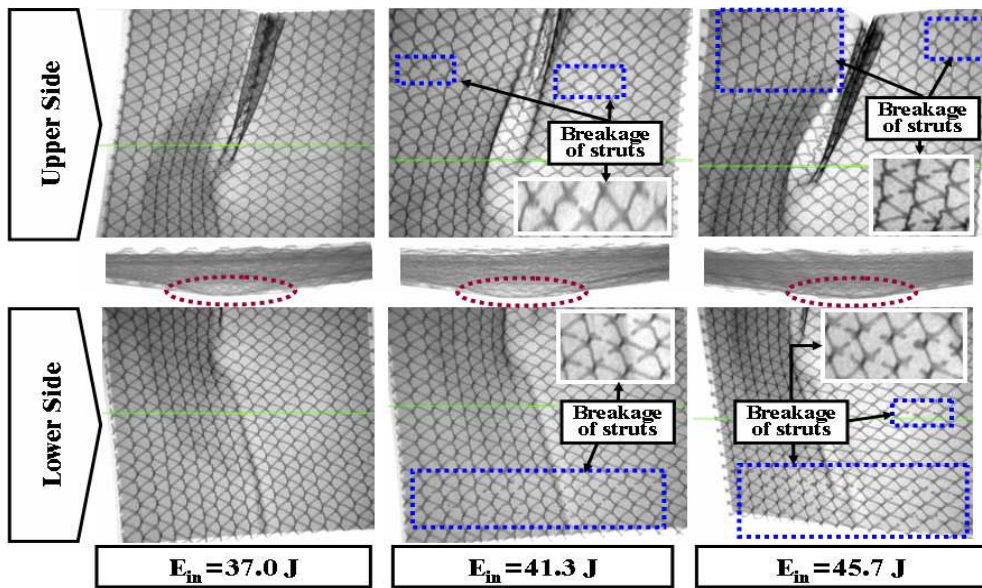
Fig. 46 Variation of the deformed shape of welding specimens according to the impact energy for each diameter of the impact head

Fig. 46 은 드로잉형 경계조건에서 충격시험을 수행한 결과 취득된 용접된 ISB 관넬의 변형 형상이다. Fig. 46 (b)의 충격헤드 직경 20 mm 일 때는 충격 입력에너지 37.0 J 에서 시편의 중앙부 함몰과 중앙부 부 크림핑 방향을 따른 시편의 접힘 현상이 지배적으로 나타났다. 그러나, 충격 입력에너지 41.3 J 이상에서는 시편의 중앙부 함몰과 중앙부 부 크림핑 방향을 따른 시편의 접힘 뿐만 아니라 시편의 중앙부 주 크림핑 방향으로의 접힘도 발생하기 시작하였다. 그 결과 Fig. 44 (a) 의 하중-변위 선도에서 충격 입력에너지 45.7 J 에서는 최후 하중 정점 직전에 나타나는 국소 하중 최소값이 앞서 나타난 국소 하중 최소값보다 상당히 감소하는 것으로 사료된다. 또한, 충격 입력에너지 45.7 J 에서는 시편의 중앙부 함몰과 중앙부 부 크림핑 방향을 따른 시편의 접힘뿐만 아니라, 시편의 중앙부 부 크림핑 방향에 수직인 크림핑 방향으로 접힘 또한 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

반면, Fig. 46 (a) 의 충격헤드 직경 10 mm 일 때는 충격 입력에너지가 37.0 J, 41.3 J, 45.7 J 에서 모두 시편의 중앙부 함몰과 중앙부 부 크림핑 방향을 따른 시편의 접힘 현상만이 지배적으로 나타나고 시편의 중앙부 주 크림핑 방향으로의 접힘 현상은 거의 없거나 미약함을 확인할 수 있었다. 이것으로 인해 Fig. 44 (a) 의 하중-변위 선도에서 충격헤드 직경 10 mm 일 때는 최후 하중 정점 직전에 나타나는 국소 하중 최소값이 앞서 나타난 국소 하중 최소값과 거의 유사하게 나타남을 알 수 있었다.



(a)  $D=10$  mm



(b)  $D=20$  mm

Fig. 47 Deformed shape of inner structures for welding specimens according to the impact energy for each diameters of impact head

Fig. 47 은 드로잉형 경계조건에서 충격시험을 수행한 결과 취득된 용접된 ISB 판넬의 내부 구조체 파손 및 변형 형상이다. X-RAY CT 시스템을 이용한 ISB 판넬의 내부 구조체 분석 결과 Fig. 47 (a) 의 충격헤드 직경 10 mm 일 때는 충격 입력에너지 41.3 J 까지는 내부 구조체의 접힘 현상만 나타났으나, 충격 입력에너지 45.7 J 에서는 주 접힘 발생 부위와 주 접힘 발생 부위의 반대 영역에서 평균 2-3 개의 내부 구조체 지주 (Strut) 들의 파단이 발생하였다. 반면, Fig.47 (b) 의 충격헤드 직경 20 mm 일 때는 입력에너지 37.0 J 에서는 내부 구조체의 접힘 현상만 나타났으나, 충격 입력에너지 41.3 J 이상에서는 내부 구조체의 접힘과 내부 구조체의 파단의 두 가지 현상이 나타났다. 특히, 충격 입력에너지 41.3 J 에서는 주 접힘 발생 부위의 반대 영역에서 많은 수의 내부 구조체 지주들의 파단이 일어나고 주 접힘 발생 부분에서는 평균 3-4 개의 내부 구조체 지주들만 파단이 발생하였다. 그러나 충격 입력에너지 45.7 J 에서는 주 접힘 발생 부위의 반대 영역과 주 접힘 발생 영역의 주위에서도 다수의 내부 구조체 지주들의 파손이 발생함을 알 수 있었다.

결과적으로 충격 입력에너지와 충격헤드의 직경이 증가할수록 내부 구조체의 파단이 증가함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 충격헤드의 직경이 증가할수록 접촉부 국부 변형보다는 시편의 전체적인 변형을 더 많이 유도하여 내부 구조체 지주들의 파단이 더 많이 일어나는 것으로 사료된다.

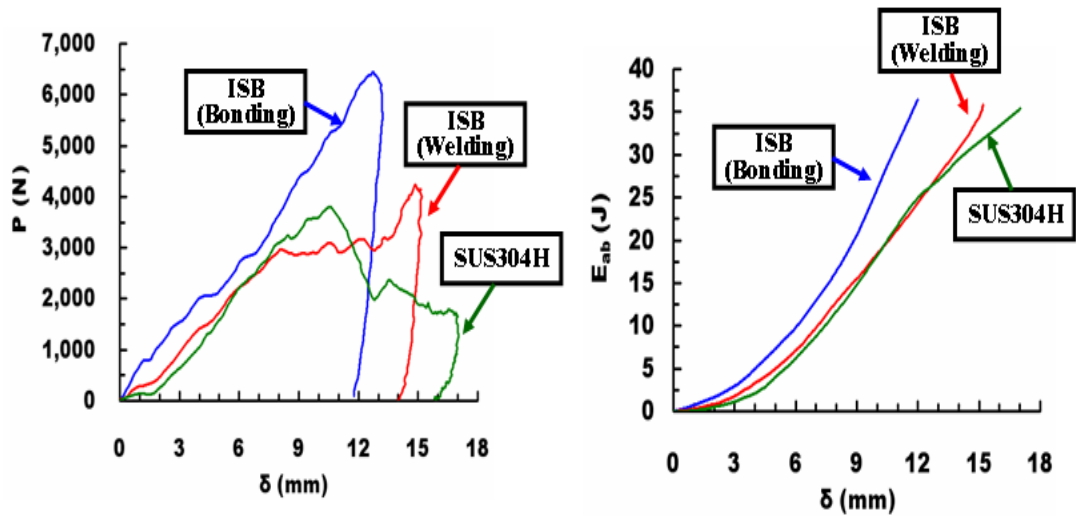
#### 4.2.5 충격에너지 흡수 특성 비교/분석

본 연구에서는 면재와 내부 구조체가 에폭시로 접합된 접합시편과 다점 전기저항 용접된 용접시편 두 가지 타입의 ISB 판넬과 ISB 판넬의 면재로 사용된 동일 무게의 0.7 mm 스테인레스 강판 (SUS304H) 에 대해 드로잉형 경계조건에서 충격시험을 수행하여 두 가지 타입의 ISB 판넬과 스테인레스 강판에 대한 충격 특성을 비교/분석하였다. 그 결과 Table 11 및 Fig. 48, 49 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

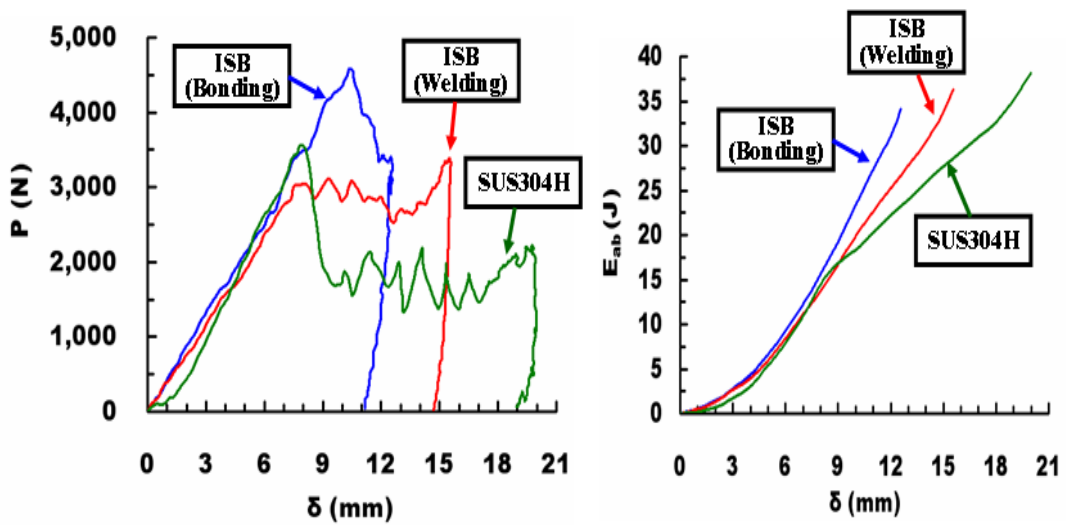
**Table 11 Comparison of results of impact tests of ISB panel and that of SUS304H panel for the case of drawing boundary conditions**

Specimen	D (mm)	H (cm)	E <sub>in</sub> (J)	E <sub>ab</sub> (J)	$\chi$ (%)	P <sub>max</sub> (N)	d <sub>max</sub> (mm)
ISB (Bonding)	10	34	37.0	36.5	98.7	6045.4	12.0
		38	41.3	40.9	98.9	5582.1	12.1
		42	45.7	44.2	96.7	6432.8	13.2
	20	34	37.0	30.2	81.6	4951.5	11.1
		38	41.3	33.7	81.6	4754.2	12.4
		42	45.7	34.1	74.7	4679.8	12.5
ISB (Welding)	10	34	37.0	28.3	76.5	3,089.4	14.1
		38	41.3	31.9	77.2	3,725.4	15.0
		42	45.7	35.9	78.6	4,225.8	15.2
	20	34	37.0	28.5	77.0	3,174.5	14.2
		38	41.3	31.2	75.5	3,138.9	15.5
		42	45.7	36.4	79.6	3,382.9	15.6
SUS304H	10	34	37.0	28.0	75.7	3696.8	14.4
		38	41.3	31.6	76.5	3708.7	15.2
		42	45.7	35.4	77.5	3801.9	17.0
	20	34	37.0	29.3	79.2	2928.5	18.0
		38	41.3	33.7	81.6	3448.6	19.3
		42	45.7	38.2	83.6	3544.9	20.0





(a)  $D=10$  mm ( $E_{in}=45.7$  J)



(b)  $D=20$  mm ( $E_{in}=45.7$  J)

Fig. 48 Comparison of results of impact tests of ISB panel and that of SUS304H panel for the case of drawing boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

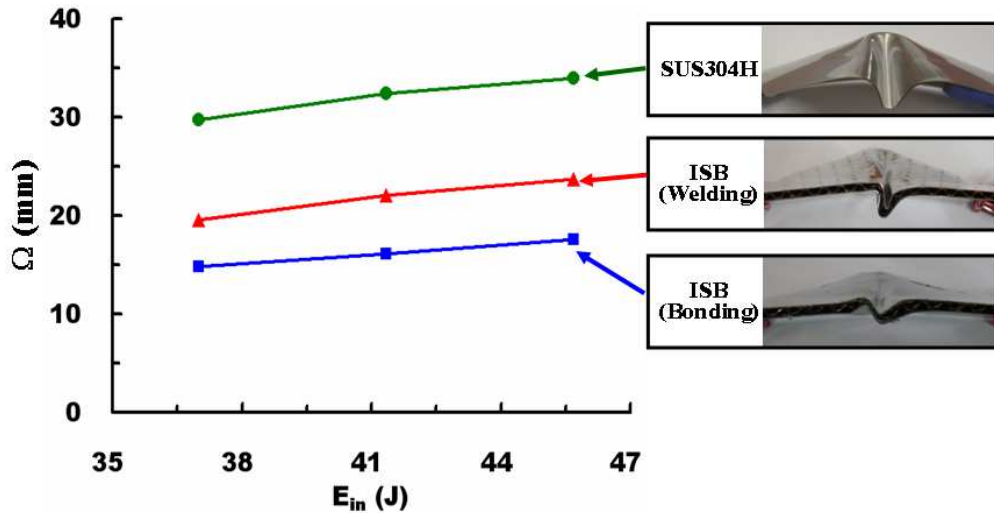


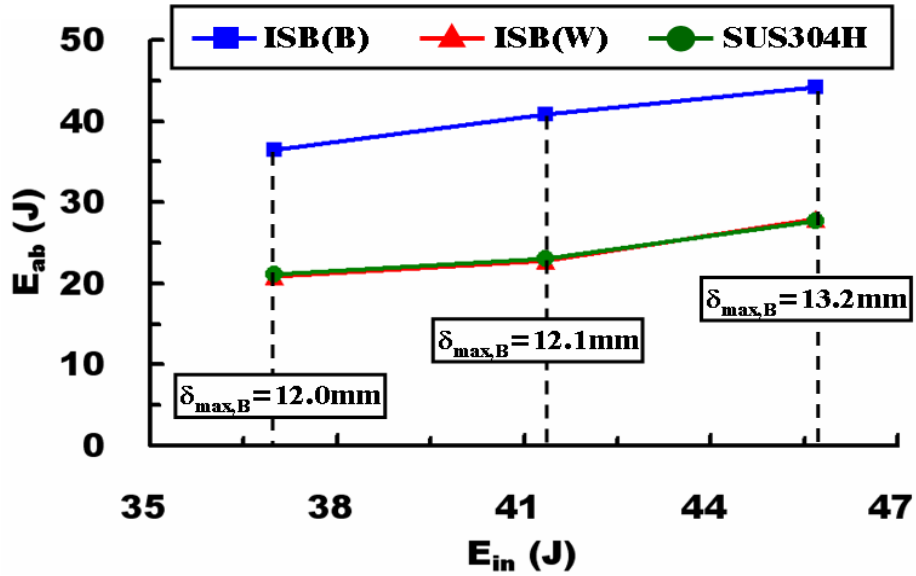
Fig. 49 Influence of types of specimen and the impact energy on the size of the deformation depth (D=20 mm)

Table 11 과 Fig. 48, 49 를 고찰한 결과 충격헤드 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때 모두 에폭시로 접합된 ISB 판넬이 충격흡수에너지, 충격에너지흡수율, 최대 하중은 용접된 ISB 판넬과 스테인레스 강판보다 더 높은 반면, 최대 변위 및 최대 변형 깊이는 세 종류의 시편 중 가장 작게 변형하는 것을 알 수 있었다. 또한, 다점 전기저항으로 용접된 ISB 판넬과 스테인레스 강판을 비교한 결과 충격헤드 직경 10 mm 일 때는 충격흡수에너지, 충격에너지흡수율 및 최대 하중은 거의 유사하거나 용접된 ISB 판넬이 조금 더 높은 반면, 충격헤드 직경 20 mm 일 때는 충격흡수에너지, 충격에너지흡수율 및 최대 하중이 스테인레스 강판에서 조금 더 높게 나왔다. 최대 변위는 충격헤드의 직경 10 mm 와 20 mm 에서 모두 용접된 ISB 판넬이 더 적게 변형함을 알 수 있었다. 결과적으로 접합 시편과 용접 시편의 두 종류의 ISB 판넬이 스테인레스 강판보다 최대 하중은 더 높거나 비슷하면서 변형은 더 적게 하여 더 우수한 충격 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

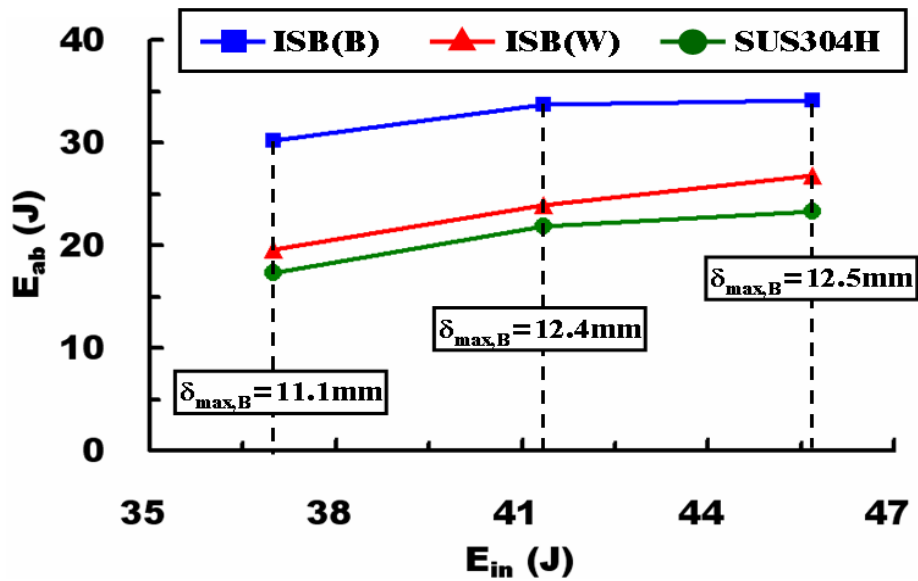
Fig. 50 은 각 충격 입력에너지별 접합된 ISB 판넬의 최대 변위에 대한 두 종류의 ISB 판넬과 스테인레스 강판의 충격흡수에너지를 비교한 결과이다. 이와 같은 방법으로 충격 흡수 능력을 비교한 이유는 재료가 충격에 의해 관통되지 않는 이상 흡수되는 최대 충격에너지량은 충격에 의한 열 발생 등과 같은 손실을 제외한다면 거의 유사하다는 가정아래 가장 변형양이 작으면서 충격에너지를 많이 흡수하는 재료가 충격 흡수 능력이 우수한 부재라고 판단하였기 때문이다.

Fig. 50 (a) 의 충격헤드 직경 10 mm 일 때는 접합된 ISB 판넬이 용접된 ISB 판넬과 스테인레스 강판보다 약 1.6-1.8 배 정도 많은 충격에너지를 흡수하는 것을 알 수 있었다. 용접된 ISB 판넬과 스테인레스 강판은 각 충격 입력에너지에서 거의 유사한 충격흡수에너지를 나타내었다. 또한, Fig. 50 (b) 의 충격헤드 직경 20 mm 일 때는 접합된 ISB 판넬이 용접된 ISB 판넬보다 약 1.3-1.5 배 정도 더 많은 충격에너지를 흡수하였고, 스테인레스 강판보다는 약 1.5-1.7 배 정도 더 우수한 충격에너지 흡수 능력을 보였다. 용접된 ISB 판넬과 스테인레스 강판을 비교해 보면 용접된 ISB 판넬이 약 1.1-1.2 배 정도 더 많은 충격에너지를 흡수하였다.

결과적으로 드로잉형 경계조건에서 충격시험을 수행한 결과 가장 작은 변형을 보였던 접합된 ISB 판넬에서 충격에너지 흡수 능력을 비교한 결과 접합된 ISB 판넬이 용접된 ISB 판넬과 스테인레스 강판보다 드로잉형 경계조건에서 충격 흡수 능력이 더 우수한 부재임을 확인할 수 있었다.

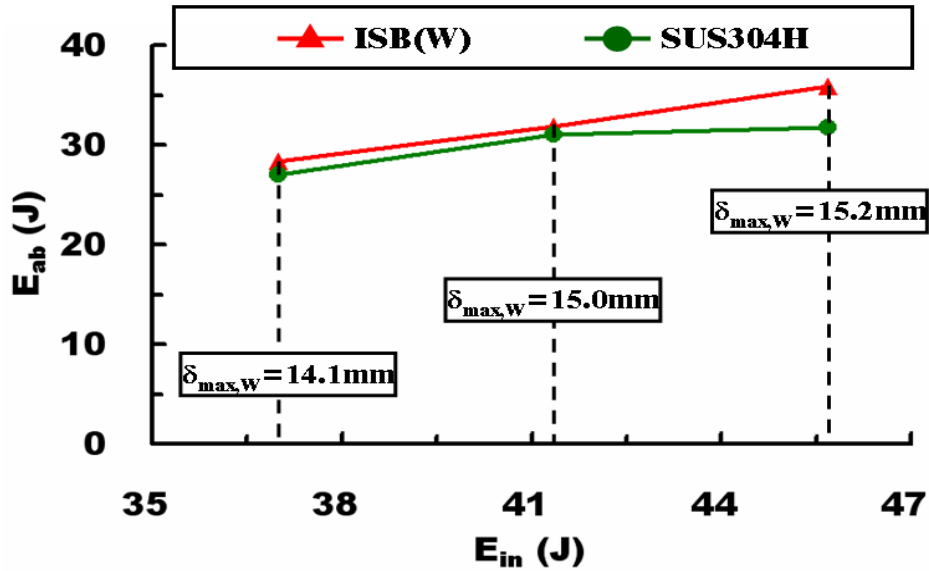


(a)  $D=10$  mm

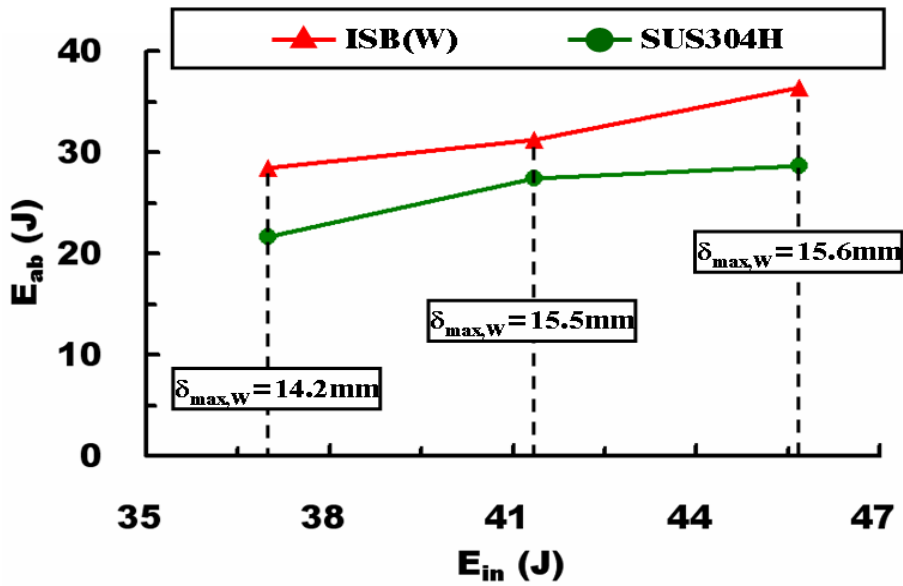


(b)  $D=20$  mm

Fig. 50 Comparison of absorbed impact energy at the maximum displacement of the bonded ISB panel



(a)  $D=10$  mm



(b)  $D=20$  mm

Fig. 51 Comparison of absorbed impact energy at the maximum displacement of the welded ISB panel

Fig. 51 은 각 충격 입력에너지별 용접된 ISB 판넬의 최대 변위에 대한 ISB 판넬과 스테인레스 강판의 충격흡수에너지를 비교한 결과이다. Fig. 51 (a) 의 충격 헤드 직경 10 mm 일 때는 용접된 ISB 판넬이 스테인레스 강판보다 약 3-13 % 정도 충격에너지 흡수 능력이 더 우수함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 51 (b) 의 충격 헤드 직경 20 mm 일 때는 용접된 ISB 판넬이 스테인레스 강판보다 약 14-31 % 정도 충격에너지 흡수 능력이 더 우수하게 나타났다.

결과적으로 용접된 ISB 판넬이 스테인레스 강판보다 변형양은 더 작으면서 더 많은 충격에너지를 흡수함을 알 수 있었고 이와 결과를 통해 용접된 ISB 판넬이 스테인레스 강판보다 드로잉형 경계조건에서 더 우수한 충격 흡수 능력을 갖고 있는 부재임을 판단할 수 있었다.

최종적으로 접한 조건에 상관없이 트러스형 내부 구조체를 가진 ISB 판넬이 드로잉형 경계조건에서 동일 무게의 스테인레스 강판보다 더 적은 변형양으로 더 많은 충격에너지를 흡수함을 통해 더 우수한 충격 흡수 능력을 갖고 있는 부재임을 판단할 수 있었다. 이와 같은 결과로 드로잉형 경계조건에서의 우수한 충격 특성을 필요시 하는 자동차/항공기/선박 등의 수송기계 산업에 매우 효율적이면서 적합한 재료임을 판단할 수 있었다.

## 제 5 장 ISB 판넬의 충격시험에 대한 3차원 유한요소해석

### 5.1 스트레칭형 경계조건의 충격시험에 대한 3차원 유한요소해석

#### 5.1.1 유한요소해석 방법 및 모델링

본 연구의 충격해석을 위한 유한요소해석 방법은 고속 동적 문제 해결에 매우 적합하며, 복잡한 접촉문제와 순간적인 동적 반응을 해석하기에 매우 효율적인 외연적 시간적분 유한요소법 (Explicit time integration finite element method) 을 사용하였다.<sup>37)</sup> 유한요소해석을 위한 ISB 판넬의 CAD 모델링은 내부 구조체와 외판이 용접점에서 연결된 구조로 설계 하였다. 또한, ISB 판넬의 내부 구조체 격자 개수와 격자 간격은 충격시험시 사용된 시편과 동일하게 설계하였다.

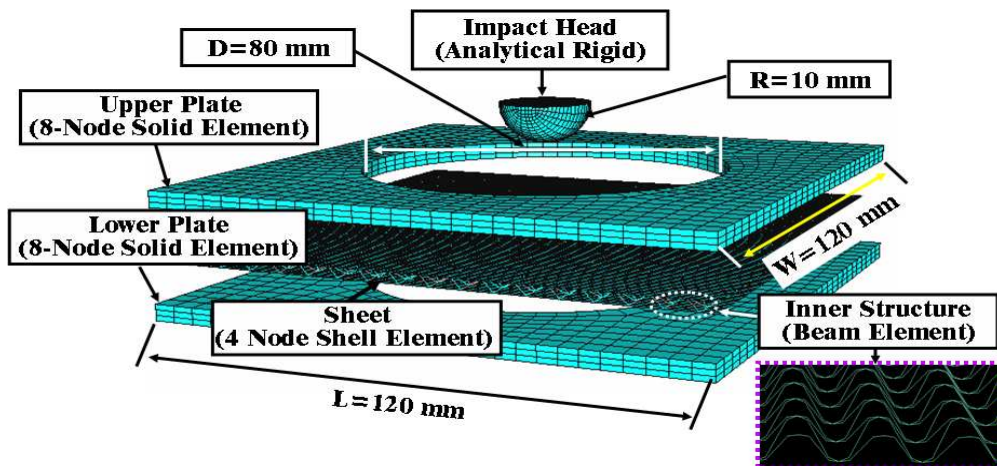


Fig. 52 FE model of the impact analysis for ISB panel for the case of stretching boundary conditions

충격해석을 위한 유한요소 모델링은 실제 충격시험과 동일한 조건을 부여하기 위해 Fig. 52 와 같이 모델링 하였으며 유한요소 모델링 및 해석은 ABAQUS V6.5 상용프로그램을 이용하여 수행하였다.<sup>38)</sup>

이때, ISB 판넬의 외판은 두께가 0.3 mm 로 얇기 때문에 해석시간 감소 및 사용 메모리 최소화를 도모하기 위하여 4절점 쉘 (Shell) 요소를 이용하였다. 내부 구조체 실제 모델과 비교하여 충분한 정확성을 확보한 축약모델을 개발하여 충격해석 시간 단축 및 메모리의 최소화를 위해 빔 (Beam) 요소로 모델링 하였다. 상판과 하판 다이의 고무는 8절점 육면체 요소로 모델링 하였으며, 충격헤드는 분산형 강체요소로 모델링 하였다. 충격헤드의 직경은 충격시험과 동일하게 20 mm 로 모델링 하였다, 충격시험과 동일하게 ISB 판넬의 외판재료로 사용된 동일 무게의 스테인레스 강판에 대한 유한요소해석도 동일한 조건으로 해석을 수행하였다. 충격해석에 사용된 ISB 판넬과 스테인레스 강판의 유한요소 격자수는 Table 12 와 같다. ISB 판넬의 경우 내부 구조체와 외판의 접합점 생성 및 정확한 결과 산출을 위해 스테인레스 강판보다 절점 및 요소 수가 더 많게 모델링 하였다.

**Table 12 Number of nodes and elements (D=20 mm)**

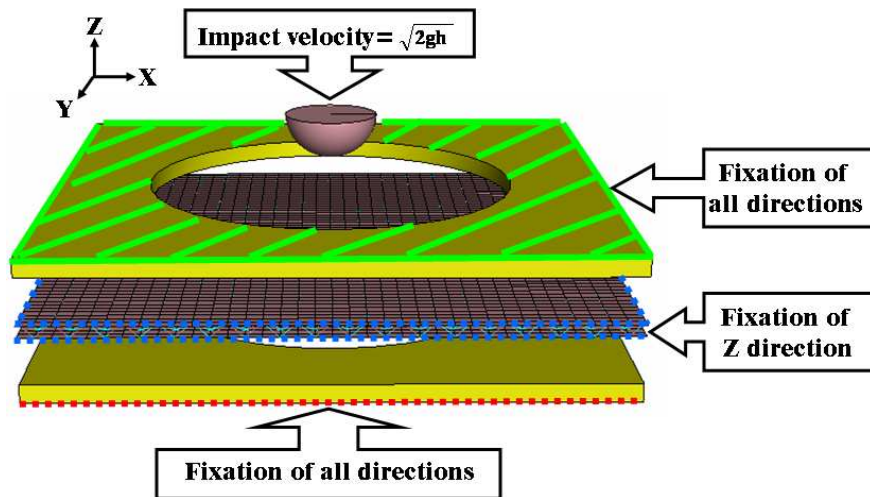
Specimen		Inner Structure (EA)	Sheet (EA)	Upper Plate (EA)	Lower Plate (EA)	Impact Head (EA)
ISB	Node	11,180	12,318	2,668	2,668	741
	Element	12,096	12,096	1,734	1,734	738
SUS304H	Node	•	3,782	3,363	4,676	827
	Element	•	3,660	2,006	3,147	824



### 5.1.2 경계조건 및 재료 물성

충격해석을 위한 경계조건은 Fig. 53 과 같이 상판의 윗면과 하판의 아랫면을 모든 방향으로 고정시켰다. 시편은 각 가장자리를 Z 방향으로만 고정시키고 그 외의 다른 방향으로서는 자유단 상태로 가정하였다. 그리고 충격헤드는 시편과 맞닿게 위치시켜 초기 충격 순간의 속도를 식 (7) 과 같이 계산하여 충격헤드에 부여하였다. 또한, 충격헤드는 Z 방향으로만 움직일 수 있도록 경계조건을 부여하였다.

$$V = \sqrt{2gh} \quad (7)$$



**Fig. 53 Boundary conditions of FE analysis for the case of stretching type**

충격 특성을 분석하기 위하여 ISB 판넬의 외판과 내부 구조체는 탄소성 재료로 가정하였다. 외판 재료는 스테인레스이며 내부 구조체 재료는 CSP 1N 이다. 해석에 사용할 재료의 물성을 구하기 위하여 만능재료시험기와 고속인장시험기를 사

용하여 실험을 수행하였다. 만능재료시험기로 정적인 인장시험을 수행하여 Table 13 과 같이 외판과 내부 구조체의 탄성계수, 포와송비, 항복강도, 인장강도 등을 구하였다.

**Table 13 Material properties of stainless steel and CSP 1N sheet**

	Stainless Steel (SUS304H)	Inner Structure (CSP 1N)
E (GPa)	180	176
$\nu$	0.28	0.32
$\sigma_y$ (MPa)	283	144
$\sigma_T$ (MPa)	667	302

한편, 충격해석시 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 재료의 변형률 속도 효과가 고려된 재료의 물성값이 필요하여 Fig. 54 와 같이 외판 재료인 스테인레스에 대한 고속인장시험을 수행하여 변형률 속도에 의존적인 소성영역의 물성을 구하였다. 이를 통해 외판 재료인 스테인레스는 정적인 인장시험에서 획득한 소성영역의 물성이 아닌 고속인장시험을 통하여 획득한 소성영역의 물성을 해석에 적용하였다.

기존의 선행 연구에서는 고속 변형에서 변형률, 온도 및 가속도의 영향을 효과적으로 반영할 수 있는 Johnson-Cook 모델이 많이 사용되었지만,<sup>39)</sup> 본 연구에서는 변형률 경화가 크다는 단점을 가지고 있는 Johnson-Cook 모델이 아닌 실제 고속인장시험을 통하여 획득한 데이터를 Fig. 55 와 같이 일정 구간별로 선형 커브 피팅을 한 좀 더 정확한 데이터를 변형률 속도에 따라 ABAQUS 상의 재료 물

성으로 직접 입력하였다. 외판 재료인 스테인레스에 대한 변형률 속도에 따른 항복강도와 인장강도는 Fig. 52 와 같다.

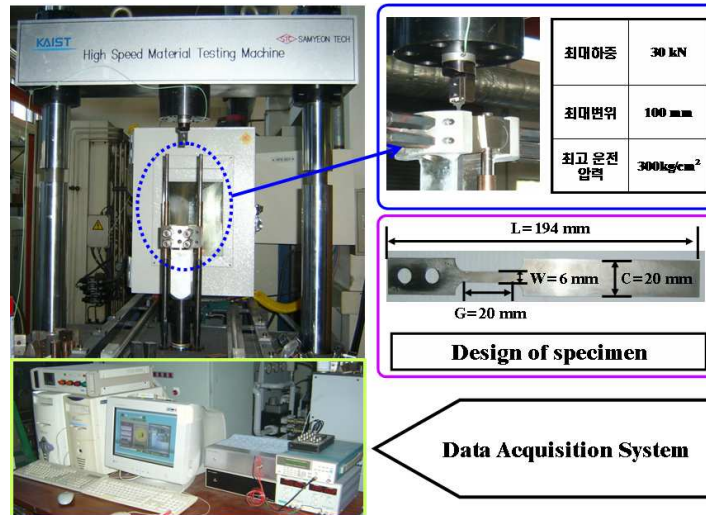


Fig. 54 High speed material testing machine

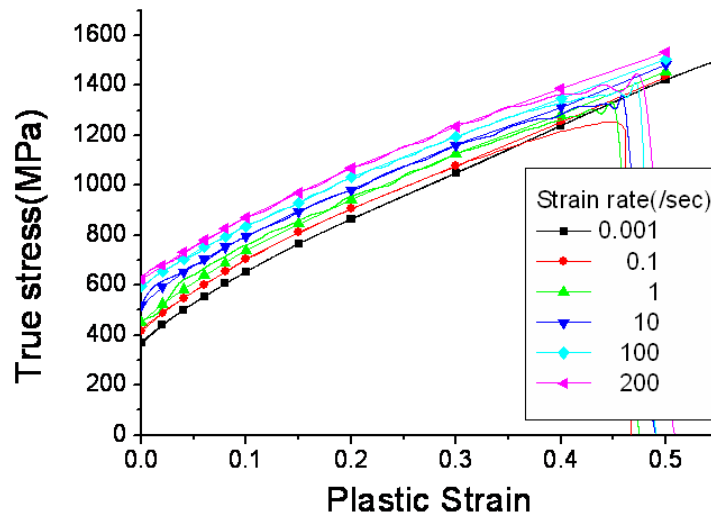


Fig. 55 Stress-strain relationships for each strain rate

상판과 하판에 부가되는 압력으로 시편을 완전 고정시키는 스트레칭 경계조건의 충격시험에서는 상판과 하판에 고무를 부착하여 시편에 압력을 부가하였다. 충격 시험과 동일 조건을 부가하기 위해 충격해석에서도 상판과 하판을 연성고무로 가정하였다. 물성은 Neo-Hookean의 Hyper-elastic 모델을 적용하였다.<sup>40)</sup> 또한, 외판과 내부 구조체 및 상·하판의 재료 물성에는 외연적 시간 적분식 해석의 정확도를 높이기 위해 강성에 비례하는 감쇠계수를 사용하였다. 감쇠계수의 값은 댐핑이 없는 초기의 안정적 시간증분의 크기와 같거나 혹은 이보다 약간 작은 값을 입력하였다. 안정적 시간증분 ( $\Delta t_s$ ) 과 재료의 응력 전파속도 ( $C_d$ ) 는 식 (8) 과 같이 계산하였다.

충격해석에 사용된 임계 요소 길이는 1 mm 이며, 재료 물성치와 임계 요소 길이를 식 (8) 에 대입하여 계산한 결과 안정적 시간증분은  $2.08 \times 10^{-7}$  초로 계산되었다. 감쇠계수의 값은  $2.05 \times 10^{-7}$  kg/sec 로 결정하였다.

$$\Delta t_s = \frac{L_c}{C_d} = \frac{L_c}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (8)$$

충격해석을 통해 도출된 충격에너지 흡수 특성을 정량적으로 계산하기 위하여 충격흡수에너지 및 충격에너지흡수율을 구하였다. 충격흡수에너지 및 충격에너지 흡수율은 충격시험과 동일한 방법으로 계산하였다.

### 5.1.3 외판재료의 충격해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 ISB 판넬과의 충격 특성을 비교하기 위하여 ISB 판넬의 외판 재료로 사용된 스테인레스 강판에 대해 3차원 유한요소해석을 이용하여 스트레칭 경계조건에서 충격해석을 수행하였다.

충격해석을 위한 스테인레스 강판의 초기 유한요소 모델에서는 판재에 대한 감쇄계수 부가와 상·하판 재료에 대한 Hyper-elastic 모델이 도입되지 않았다. 그 결과 Fig. 56 과 같이 초기 충격헤드와 판재 접촉구간에서 해의 과도 진동으로 인하여 판재의 과도 변형을 유도하여 충격하중이 과도하게 예측되고 재료 변위가 매우 감소하는 현상이 나타났다. 그러나 판재에 대한 감쇄계수 부가와 상·하판 재료에 대한 Hyper-elastic 모델이 도입된 경우는 Table 14, Fig. 57 및 Fig. 58 과 같이 충격시험 결과와 거의 유사한 하중-변위와 충격흡수에너지-변위 곡선 및 시편의 변형 형상을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

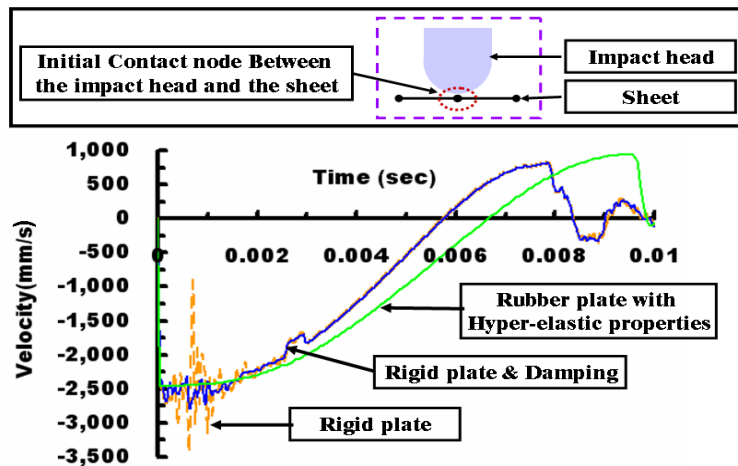


Fig. 56 Influence of damping coefficients and hyper-elastic model on the accuracy of the analysis solution ( $D=20$  mm and  $E_{in}=41.3$  J)

Table 14 Comparison of results of impact tests and that of FE analysis  
( $E_{in}=45.7$  J)

	D (mm)	$E_{ab}$ (J)	$\chi$ (%)	$P_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)
10	Experiment	37.3	81.6	5,861.3	13.0
	Analysis	37.6	82.3	6,049.8	12.4
20	Experiment	36.6	80.1	6,235.5	11.9
	Analysis	37.7	82.5	6,681.1	11.3

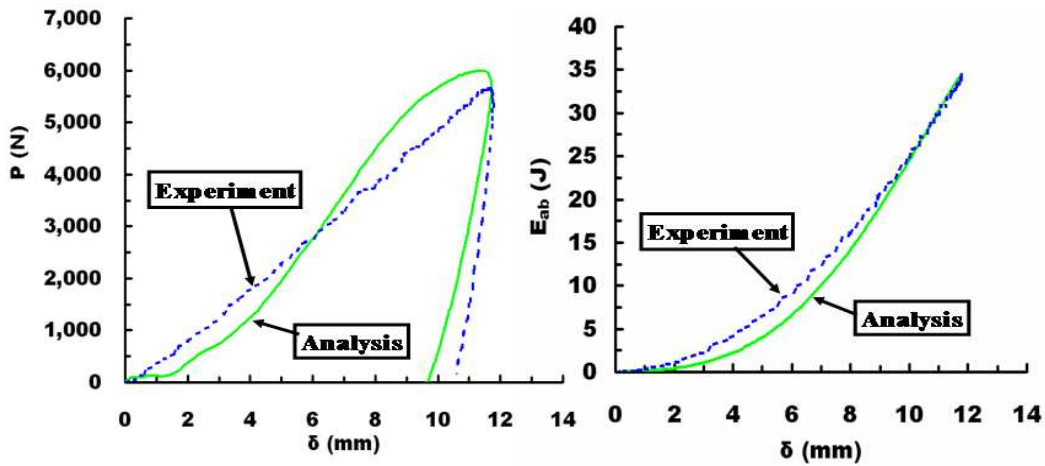


Fig. 57 Comparison of results of impact tests and FE analysis ( $E_{in}=41.3$  J and  $D=10$  mm)

Table 14 는 충격 입력에너지 45.7 J 에서 충격시험과 충격해석을 비교한 결과 이고, Fig. 57 은 충격헤드 직경 10 mm 일 때 입력에너지 41.3 J 에서 실험 및 해석을 비교한 결과이다. Table 14 와 Fig. 57 과 같이 충격헤드 직경 10 mm 와 20 mm 에 대한 유한요소해석 결과가 충격흡수에너지, 충격에너지흡수율, 최대변

위 및 최대하중 측면에서 충격시험 결과와 거의 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 58 은 충격시험과 유한요소해석을 통해 충격헤드 직경 20 mm 일 때의 시편의 최종 변형 형상을 비교한 결과이다. Fig. 58 을 보면 초기에 시편 중앙부의 충격부위로 응력이 집중되지만 스프링백이 완료된 후의 최종변형 상태에서는 시편 중앙부에 수직·수평 방향의 스트레칭 경계조건이 부여된 가장자리 영역에서 재료의 수직 방향 변형 제한에 의한 응력이 발생하는 현상을 볼 수 있었다. 이 결과를 통해 최종 변형시 중앙부 충격 부가 부분의 수직·수평 방향의 가장자리 영역에서 접힘 현상과 같은 변형이 발생할 가능성이 있음을 예측할 수 있었다. 실제 충격시험 결과 Fig. 58 과 같이 완벽한 스트레칭 경계조건이 구현되지 않았을 경우 중앙부 충격부가 부분의 수직·수평 방향 가장자리 영역에서 접힘 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 본 연구에서 제안된 스테인레스 강판에 대한 3차원 유한요소해석 모델이 본 재료의 스트레칭 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었다.

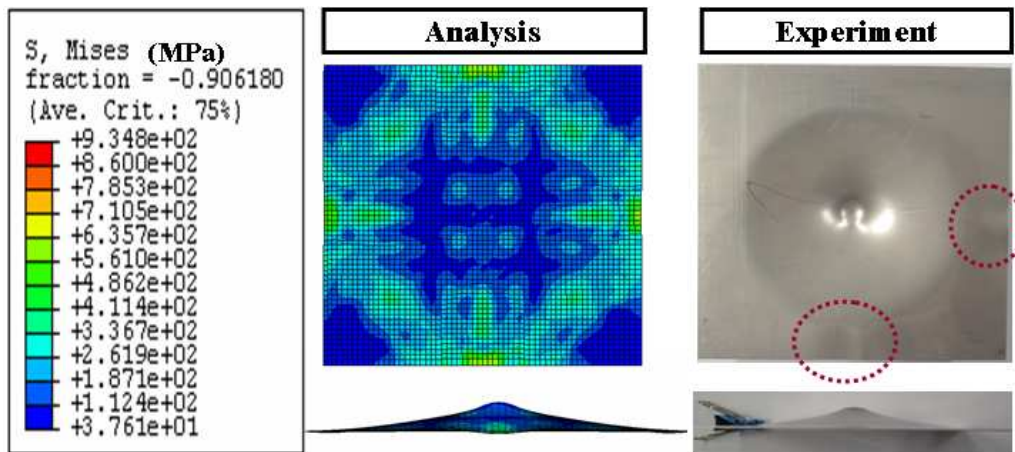


Fig. 58 Comparison of the deformed shape of FE analyses and that of experiments ( $E_{in}=41.3$  J and  $D=20$  mm)

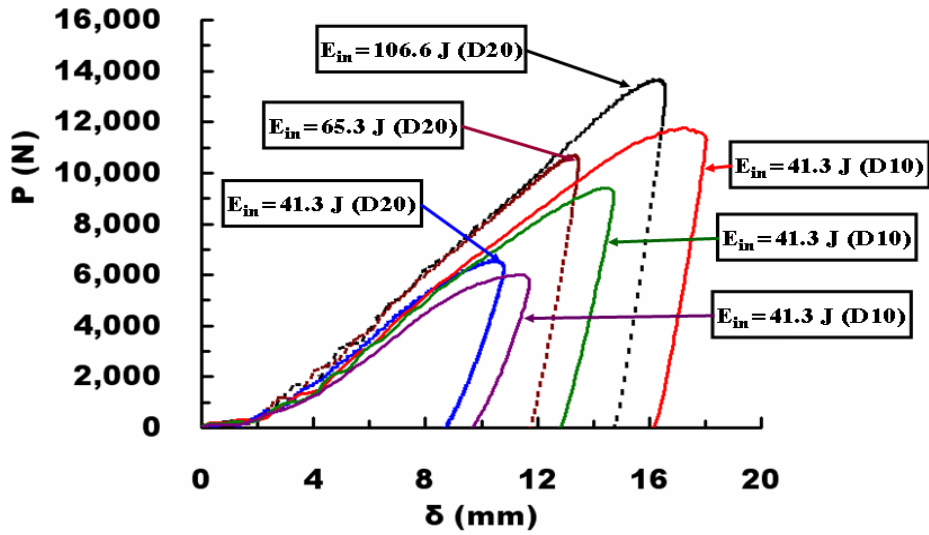
감쇄계수 부가와 Hyper-elastic 모델을 도입하여 스트레칭 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있는 유한요소해석 모델을 이용하여 충격해석을 수행한 결과 Table 15 와 Fig. 59 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

**Table 15 Results of FE analyses of SUS304H panel for the case of drawing boundary conditions**

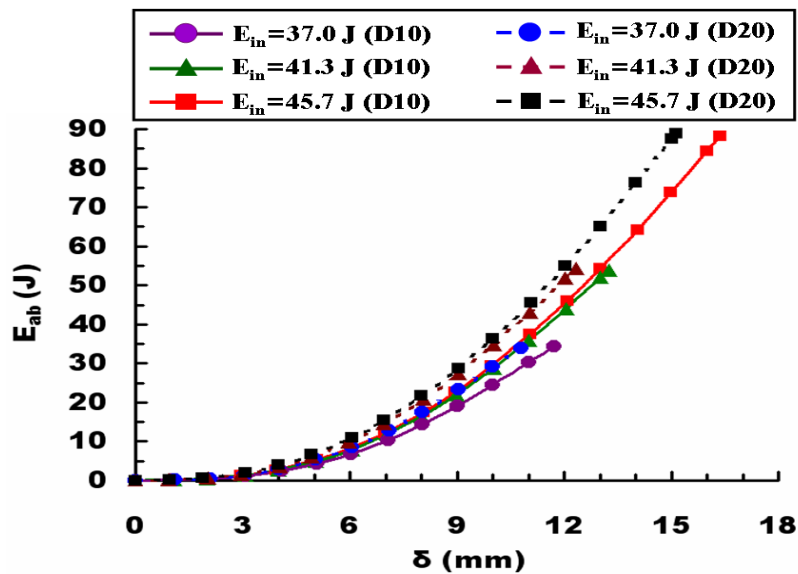
D (mm)	H (cm)	E <sub>in</sub> (J)	E <sub>ab</sub> (J)	$\chi$ (%)	P <sub>max</sub> (N)	d <sub>max</sub> (mm)
10	34	37.0	32.0	86.5	5,273.1	12.0
	60	65.3	48.3	74.0	6,556.2	14.5
	80	87.0	57.2	65.7	7,134.4	15.6
	98	106.6	65.0	61.0	7,614.6	16.2
20	34	37.0	32.1	86.8	5,622.0	11.3
	60	65.3	48.2	73.8	7,105.0	13.9
	80	87.0	57.7	66.3	8,006.6	15.4
	98	106.6	67.4	63.2	8,731.8	16.1

Table 15 와 Fig. 59 를 통해 충격헤드의 직경 10 mm 와 20 mm 일 때를 비교해보면 충격시험 결과와 동일하게 동일 입력에너지에서 충격헤드의 직경이 20 mm 일 때 더 높은 최대 하중을 나타내는 반면, 최대 변위는 더 작음을 알 수 있었다. 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율은 충격헤드의 직경에 관계없이 동일 입력에너지에서 거의 동일한 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율이 나타남을 알 수 있었다.





(a)  $P-\delta$  curves



(b)  $E_{ab}-\delta$  curves

Fig. 59 Results of FE analyses of SUS304H panels for the case of stretching boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

Fig. 60, 61, 62, 63 은 충격시험 결과 충격헤드 직경 10 mm 에서 재료 파단이 발생한 충격 입력에너지인 106.6 J 에서의 충격헤드 직경 10 mm 일 때와 20 mm 일 때의 유한요소해석 결과이다.

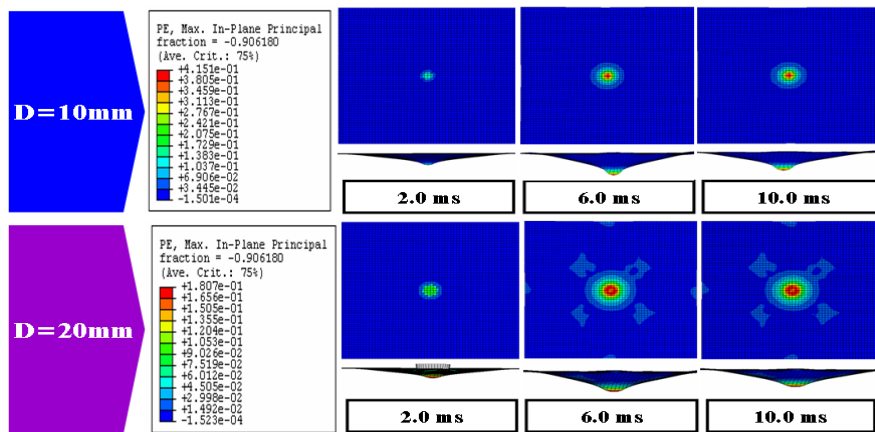


Fig. 60 Variation of the plastic strain distribution according to the impact time ( $E_{in}=106.6$  J)

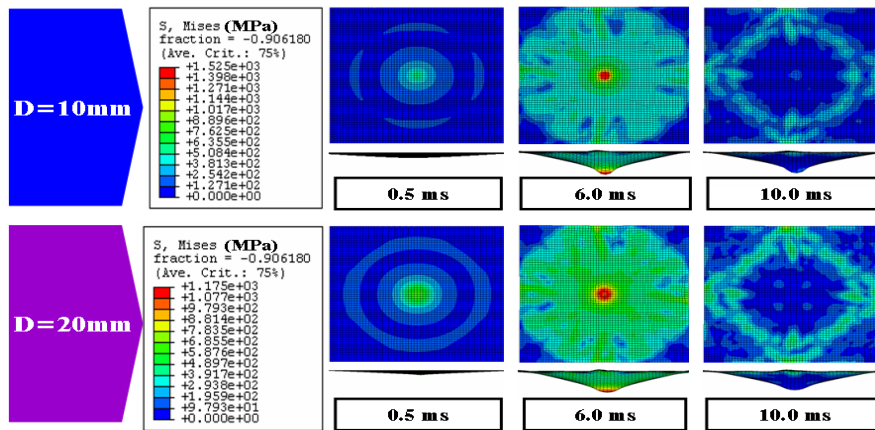


Fig. 61 Variation of the stress distribution according to the impact time ( $E_{in}=106.6$  J)

Fig. 60 과 같이 충격헤드 직경 10 mm 에서 재료 파단이 일어나 106.6 J 의 충격에너지에서 최대 소성 변형률이 0.415 정도를 나타내었다. 또한, Fig. 61 을 통하여 재료가 파단 되었을 때 1,525 MPa 정도의 최대 응력이 발생함을 알 수 있었다. Fig. 54 의 변형률 속도에 따른 소성변형률-진응력 관계에서 소성 변형률 0.4-0.425 정도에서 재료의 불안정 현상이 발생하는데, 파단 발생시점에서 계산된 최대 소성 변형률이 이 값 범위 내에 있음을 알 수 있었다. 또한, Fig. 55 의 최대 변형률 속도에서의 최대 응력이 약 1,400 MPa 이상일 때 재료의 불안정 현상이 발생하였는데, 파단 발생 시점에서 계산된 최대 응력이 이 값보다 더 크음을 알 수 있었다. 반면, 충격헤드 직경 20 mm 인 경우 최대 소성 변형률이 0.18 정도로 재료 불안정 현상이 나타나는 0.4 보다 매우 작은 변형률 영역에 있어 재료의 파단이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 그리고 최대 응력 또한 1,175 MPa 정도로 최대 변형률 속도에서 재료 불안정 현상이 발생하는 1,400 MPa 보다 훨씬 작아 재료의 파단이 발생하지 않았음을 알 수 있었다. 결론적으로, 충격헤드의 직경이 커질수록 전체적으로 낮은 응력 및 변형률 값을 나타냄을 알 수 있었다.

Fig. 62 는 변형률 속도에 의존적인 소성 변형에 의한 손실 에너지 분포를 나타낸 유한요소해석 결과이다. Fig. 62 에서 충격헤드 직경 10 mm 일 때 최대 소성 손실 에너지가 1,830 mJ 로 직경 20 mm 일 때보다 더 크음을 알 수 있었다. 또한, Fig. 63 에서 최대 탄성 변형률 에너지 밀도가 충격헤드 직경 10 mm 일 때 약  $9.2 \text{ mJ/mm}^3$  으로 직경 20 mm 일 때보다 더 높게 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 결과들로 충격헤드 직경 10 mm 일 때가 직경 20 mm 일 때보다 충격부에 높은 밀도의 충격에너지가 부가되어 충격헤드 접촉부 재료에 고 변형률 속도를 유도시켜 국부 변형을 증가시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

결론적으로 본 연구에서 제안된 스테인레스 강판에 대한 3차원 유한요소해석 모델이 본 재료의 스트레칭 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있음을

알 수 있었고, 3차원 유한요소해석을 통해 재료의 에너지흡수특성과 변형 및 파단 특성, 그리고 응력과 변형률 및 변형률 에너지 분포 특성 등의 재료 내/외적인 충격거동의 예측이 가능함을 알 수 있었다.

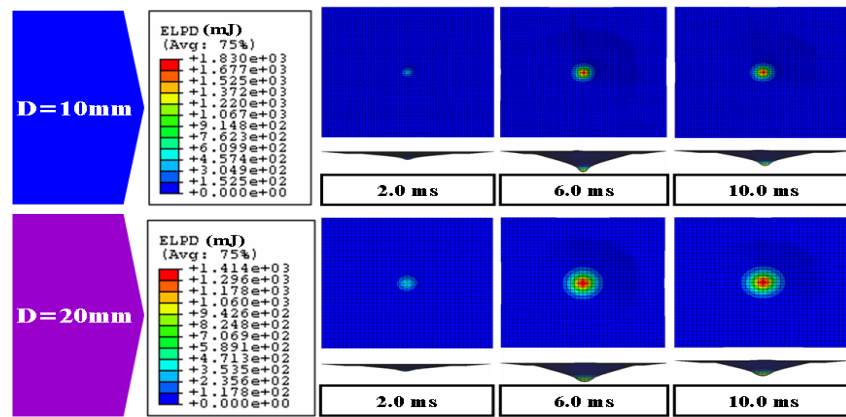


Fig. 62 Variation of the plastic dissipation energy distribution according to the impact time ( $E_{in}=106.6$  J)

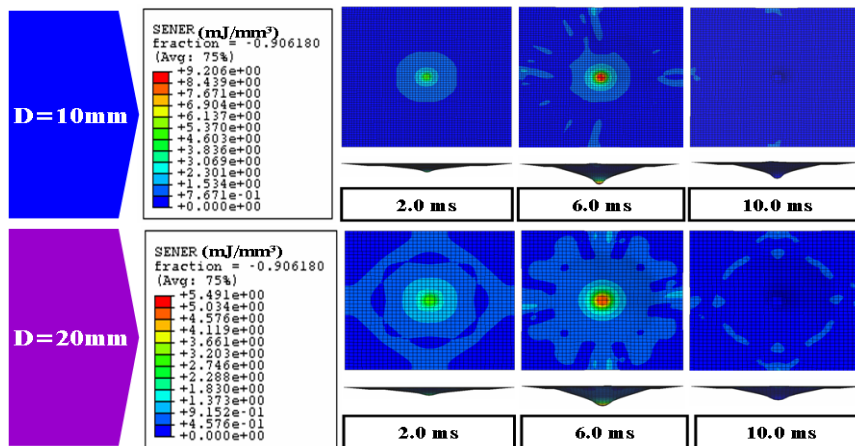


Fig. 63 Variation of the elastic strain energy density distribution according to the impact time ( $E_{in}=106.6$  J)

#### 5.1.4 ISB 판넬의 충격해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 스트레칭형 경계조건에서 ISB 판넬의 충격에 따른 재료 내부 변형 특성과 응력 분포 특성, 변형률 및 변형률 에너지 분포 특성 등을 파악하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

스트레칭형 경계조건에서의 충격해석을 통해 충격 특성을 분석하기 전에 먼저 본 연구에서 제안한 유한요소해석 모델이 본 재료의 스트레칭형 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있는 모델인지에 대한 검증은 실시하였다. Table 16 과 Fig. 64 는 충격헤드 직경 20 mm 일 때 충격시험과 충격해석을 비교한 결과이다.

**Table 16 Comparison of results of impact tests and that of FE analysis for the case of stretching boundary conditions (D=20 mm)**

	$E_{in}$ (J)	$E_{ab}$ (J)	$\chi$ (%)	$P_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)
37.0	Experiment	30.6	82.7	4,847.2	11.9
	Analysis	30.6	82.7	5,915.9	11.2
41.3	Experiment	33.7	81.6	5,398.2	11.9
	Analysis	34.0	82.3	6,030.4	11.8
45.7	Experiment	35.6	77.9	5,790.1	12.5
	Analysis	37.7	82.5	6,155.1	12.4

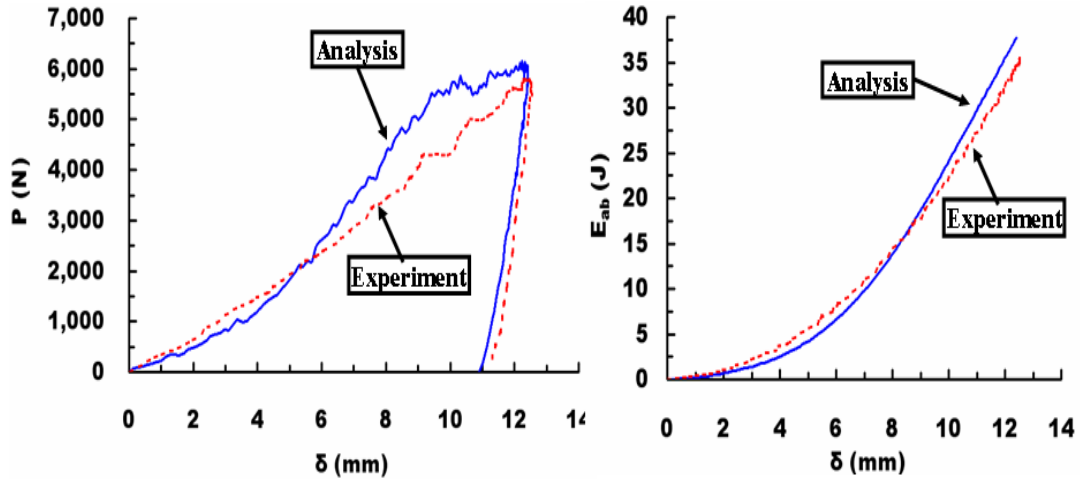


Fig. 64 Comparison of results of impact tests and FE analysis ( $E_{in}=45.7$  J and  $D=20$  mm)

Table 16 은 충격헤드 직경 20 mm 에서 충격시험과 충격해석을 비교한 결과이고, Fig. 64 는 충격헤드 직경 20 mm 일 때 충격 입력에너지 45.7 J 에서 실험 및 해석을 비교한 결과이다. 본 비교 결과 충격흡수에너지와 충격에너지흡수율, 최대 변위는 유한요소해석 결과가 시험 결과와 약 오차범위 5 % 안팎으로 매우 잘 일치하였고, 최대 하중도 입력에너지 37.0 J 일 때를 제외하고는 오차범위 10 % 안팎으로 유한요소해석 결과가 시험 결과와 상당히 일치함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 64 에서와 같이 유한요소해석 결과가 시험 결과 얻어진 하중-변위 특성과 충격흡수에너지-변위 특성을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 65 는 충격시험과 유한요소해석을 통해 충격헤드 직경 20 mm 일 때의 시편의 최종 변형 형상을 비교한 결과이다. 그 결과 3차원 유한요소해석에서는 트러스형 내부 구조체를 가진 ISB 판넬의 경우 내부 공간이 비어있고, 경계조건에서 시편의 수직 방향의 변형을 제한하였기 때문에 Fig. 65 와 같이 스트레칭 경계조건이 부여된 가장자리 부위에서 중앙부 원형 변형부위로 주름과 같은 작은 변형이

발생하여 소성 변형률이 분포하는 것을 알 수 있었다. 실제 ISB 판넬에 대한 스트레칭 경계조건에서의 충격시험 결과 Fig. 65 와 같이 완벽한 스트레칭 경계조건이 구현되지 않았을 경우 스트레칭 경계조건이 부여된 가장자리 부위에서 중앙부 원형 변형부위로 주름과 같은 작은 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이 결과로부터 본 연구에서 제안된 ISB 판넬에 대한 3차원 유한요소해석 모델이 본 재료의 스트레칭형 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었다.

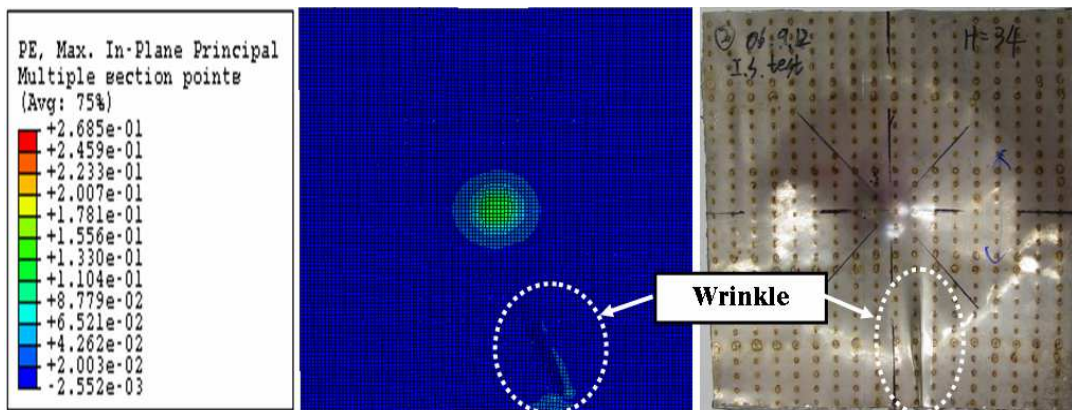


Fig. 65 Comparison of the deformed shape of FE analyses and that of experiments (D=20 mm and  $E_{in}=37.0$  J)

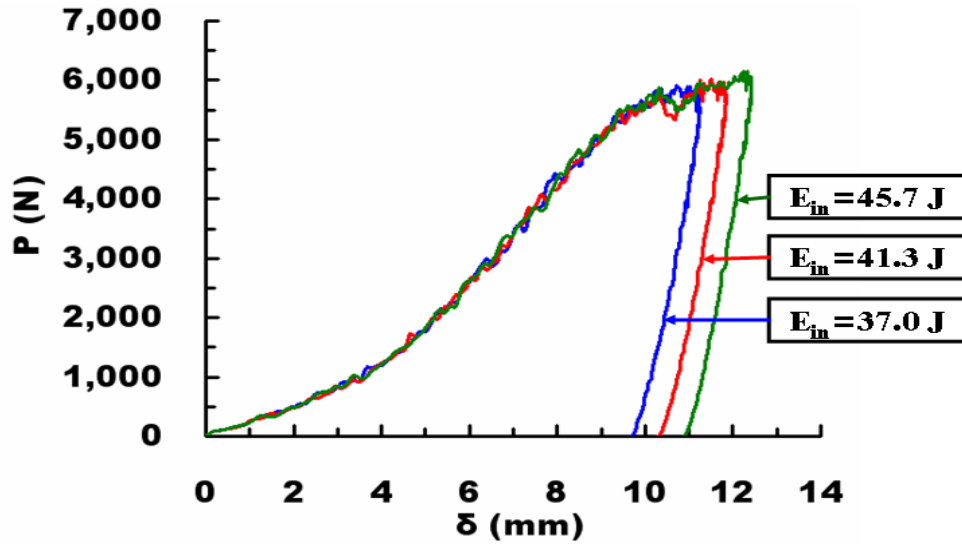
본 연구에서 제안된 최적의 유한요소해석 모델을 이용하여 ISB 판넬에 대하여 스트레칭형 경계조건에서 충격해석을 수행한 결과 Table 17 과 Fig. 66 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

**Table 17 Results of FE analyses of ISB panels for the case of stretching boundary conditions (D=20 mm)**

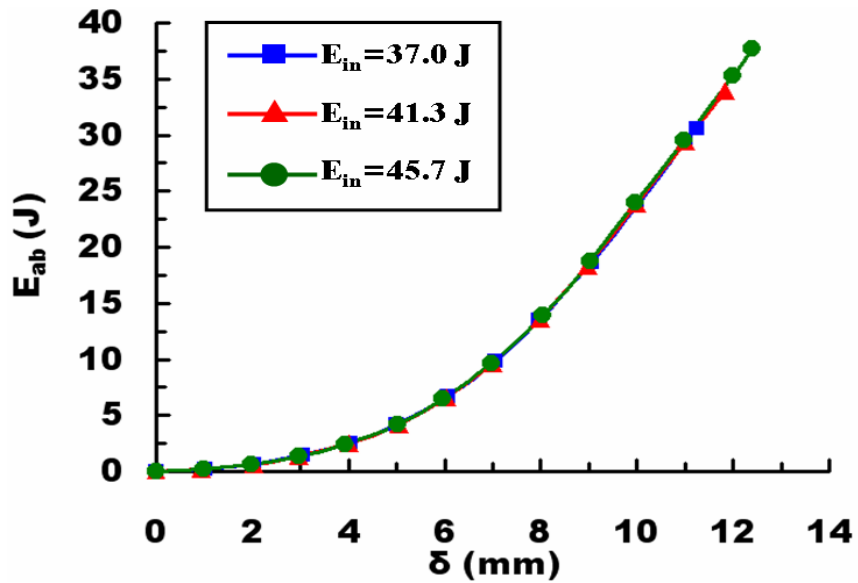
D (mm)	H (cm)	E <sub>in</sub> (J)	E <sub>ab</sub> (J)	$\chi$ (%)	P <sub>max</sub> (N)	d <sub>max</sub> (mm)
20	34	37.0	30.6	82.7	5,915.9	11.2
	36	39.2	32.4	82.7	5,926.0	11.6
	38	41.6	34.0	82.3	6,030.4	11.8
	40	43.5	35.9	82.5	6,120.9	12.1
	42	45.7	37.7	82.5	6,155.1	12.4

Table 17 와 Fig. 66 을 통해 충격시험과 동일하게 충격 입력에너지가 증가할 수록 충격흡수에너지와 최대 하중 및 최대 변위가 증가함을 알 수 있었다. 하지만, 충격에너지흡수율은 충격시험에서 얻은 결과와는 달리 충격 입력에너지가 증가하여도 약 82.3-82.7 % 정도로 거의 일정하게 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 낙하하중 방식의 충격시험에서는 충격헤드의 낙하시 발생하는 공기의 저항성과 충격헤드와 시편의 충돌시 발생하는 열에 의한 에너지 손실을 유한요소해석에서는 가정하지 않았기 때문에 충격에너지흡수율이 입력에너지가 증가하여 거의 일정하게 나타나는 것으로 사료된다.





(a)  $P-\delta$  curves ( $D=20$  mm)



(b)  $E_{ab}-\delta$  curves ( $D=20$  mm)

Fig. 66 Results of FE analyses of ISB panels for the case of stretching boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

Fig. 67 과 68 은 충격헤드 직경 20 mm 일 때 충격 입력에너지 37.0 J 에서 ISB 판넬의 외판과 내부 구조체의 충격 시간에 따른 응력 및 변형률 분포를 나타낸 결과이다. Fig. 67 에서와 같이 ISB 판넬의 외판과 내부 구조체는 충격 초기에는 시편의 중앙부의 충격부위로 응력이 집중되지만 최대 변형을 거친 다음 스프링백이 완료된 후의 최종 변형상태에서는 치구의 압력에 의해 완전한 스트레칭 경계조건이 부가된 부위와 중앙 원형 변형부 사이의 경계면에 응력이 분포함을 알 수 있었다. 또한, 트러스 형상의 내부 구조체를 가진 ISB 판넬이 내부 공간이 비어 있어서 충격에 의해 중앙부 충격부위를 중심으로 거의 대칭형상으로 잔주름과 같은 작은 변형이 발생하여 변형부 주위로도 응력이 분포하고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 68 의 ISB 판넬의 외판과 내부 구조체의 시간에 따른 소성 변형률 분포를 보면, ISB 판넬의 외판의 경우 충격 초기에는 시편의 중앙부 충격부위에 소성 변형률이 집중되지만 최종 변형 상태에서는 중앙부 충격부위와 충격에 의해 발생한 잔주름과 같은 작은 변형부위로도 소성 변형률이 전파되는 것을 알 수 있었다. 반면, 내부 구조체는 충격 초기에는 중앙부 충격부위에 소성 변형률이 집중되다가 최종 변형 상태에서는 중앙부 충격부위 및 완전한 스트레칭 경계조건이 부가된 부위와 중앙 원형 변형부 사이의 경계면으로 소성 변형률이 집중되는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로 내부 구조체의 파단은 시편의 중앙부 충격부위 및 완전한 스트레칭 경계조건이 부가된 부위와 중앙 원형 변형부 사이의 경계면에서 발생할 가능성이 높다는 것을 예측할 수 있었고, 이 결과는 스트레칭 경계조건에서의 충격시험 결과 획득한 용접된 ISB 판넬 시편의 X-RAY CT 촬영 결과인 Fig. 31 을 통해 완전한 스트레칭 경계조건이 부가된 부위와 중앙 원형 변형부 사이의 경계면에서 내부 구조체의 파단이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

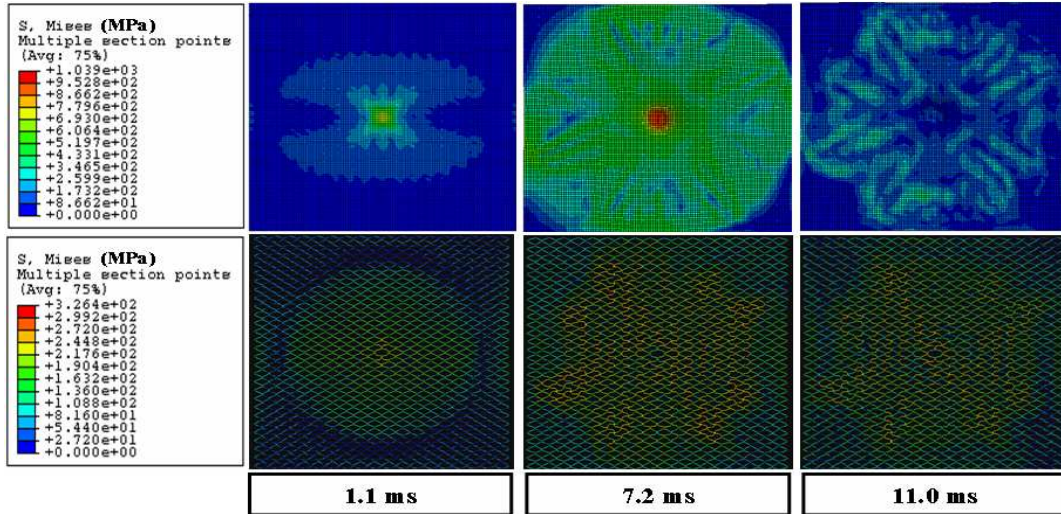


Fig. 67 Variation of the stress distribution of skin sheets and that of inner structures according to the impact time ( $D=20$  mm and  $E_{in}=37.0$  J)

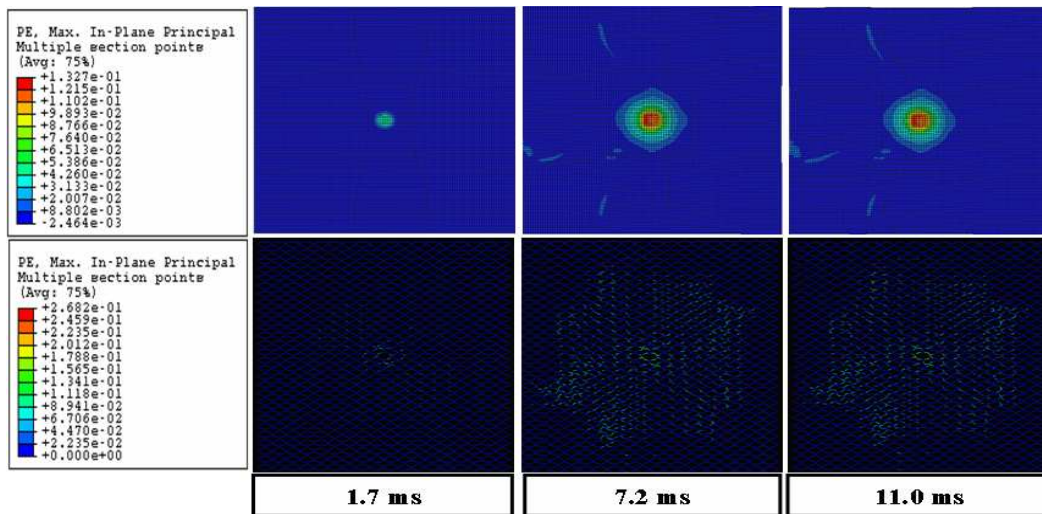


Fig. 68 Variation of the plastic strain distribution of skin sheets and that of inner structures according to the impact time ( $D=20$  mm and  $E_{in}=37.0$  J)

## 5.2 드로잉형 경계조건의 충격시험에 대한 3차원 유한요소해석

### 5.2.1 유한요소해석 방법 및 모델링

드로잉형 경계조건에서의 충격해석은 스트레칭 경계조건에서의 충격해석과 동일한 방법의 유한요소해석 방법으로 수행하였다. 또한, 충격해석을 위한 유한요소 모델링은 실제 충격시험과 동일한 조건을 부여하기 위해 Fig. 69 와 같이 모델링 하였으며, 이때 시편과 충격헤드는 스트레칭 경계조건에서와 동일하게 모델링 하였다. 하지만 하판의 다이는 스트레칭 경계조건에서와 달리 충격시험과 동일한 조건을 부여하기 위해 분산형 강체요소로 모델링 하였다. 충격해석에 사용된 ISB 판넬과 스테인레스 강판의 유한요소 격자수는 Table 18 과 같다.

Table 18 Number of nodes and elements (D=20 mm)

Specimen		Inner Structure (EA)	Sheet (EA)	Die (EA)	Impact Head (EA)
ISB	Node	11,180	12,318	2,508	741
	Element	12,096	12,096	2,398	738
SUS304H	Node	•	3,721	690	753
	Element	•	3,600	636	750

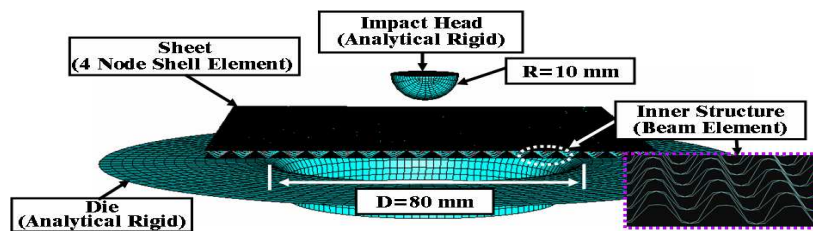


Fig. 69 FE model of the impact analysis for ISB panel in case of drawing boundary conditions

### 5.2.2 경계조건 및 재료 물성

충격해석을 위한 경계조건은 충격시험과 동일한 조건을 부여하기 위해 Fig. 70과 같이 다이를 모든 방향으로 고정시켜 움직이지 않게 가정하였으며, 시편은 어떠한 구속조건도 주지 않고 모든 방향으로 자유단 상태로 가정하였다. 충격헤드는 시편과 맞닿게 위치시켜 초기 충격 순간의 속도를 부여하여 충격헤드의 낙하방향으로만 움직일 수 있도록 경계조건을 부여하였다.

ISB 판넬과 스테인레스 강판에 대한 재료 물성은 스트레칭 경계조건과 동일하게 적용하였다. 또한, 충격 흡수 특성을 분석하기 위한 충격흡수에너지 및 충격에너지 흡수율도 스트레칭 경계조건과 동일하게 계산하였다.

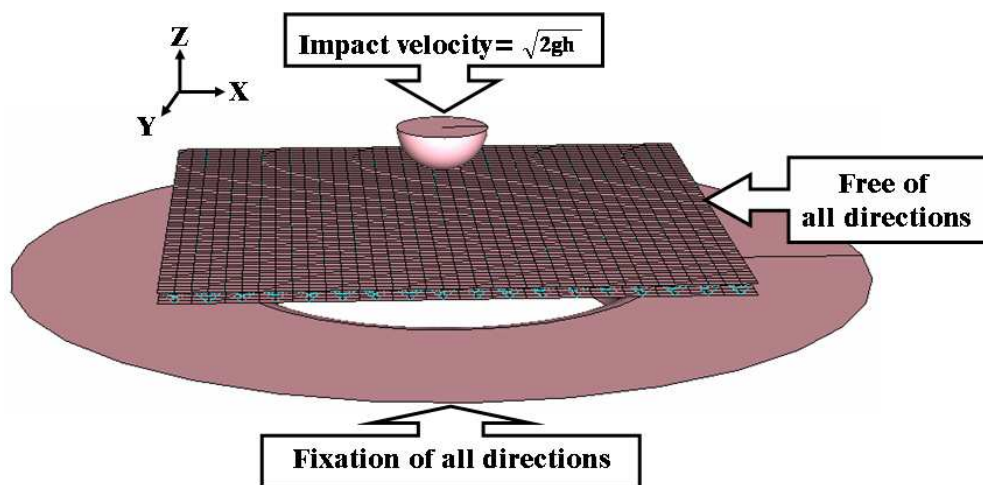


Fig. 70 Boundary conditions of FE analysis for the case of drawing type

### 5.2.3 외판재료의 충격해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 ISB 판넬과의 충격 특성을 비교하기 위하여 ISB 판넬의 외판 재료로 사용된 스테인레스 강판에 대해 3차원 유한요소해석을 이용하여 드로잉형 경계조건에서 충격해석을 수행하였다.

드로잉형 경계조건에서의 충격해석을 통해 충격 특성을 분석하기 전에 먼저 본 연구에서 제안한 유한요소해석 모델이 본 재료의 드로잉형 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있는 모델인지에 대한 검증은 실시하였다. Table 19 와 Fig. 71 은 충격헤드 직경 20 mm 일 때 충격시험과 충격해석을 비교한 결과이다.

**Table 19 Comparison of results of impact tests and that of FE analysis (D=20 mm)**

	$E_{in}$ (J)	$E_{ab}$ (J)	$\alpha$ (%)	$P_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)
37.0	Experiment	29.3	79.2	2,928.5	18.0
	Analysis	31.3	84.6	3,875.5	17.5
41.3	Experiment	33.7	81.6	3,448.6	19.3
	Analysis	35.1	85.0	4,065.8	19.7
45.7	Experiment	36.6	80.1	6,235.5	11.9
	Analysis	37.7	82.5	6,681.1	11.3

Table 19 와 Fig. 71 과 같이 충격시험과 유한요소해석을 비교한 결과 유한요소해석 결과가 시험 결과와 약 오차범위 10 % 안팎으로 상당히 일치함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 71 에서와 같이 유한요소해석 결과가 시험 결과 얻어진 하중-변위 특성과 충격흡수에너지-변위 특성을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있었다.

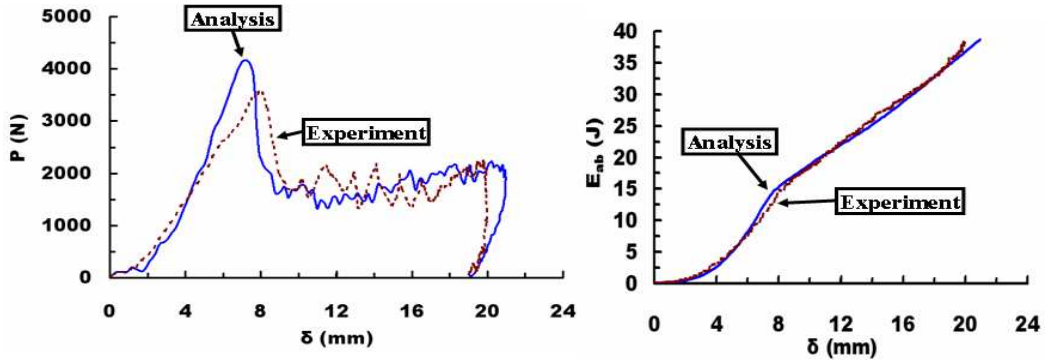


Fig. 71 Comparison of results of impact tests and FE analysis ( $E_{in}=45.7$  J and  $D=20$  mm)

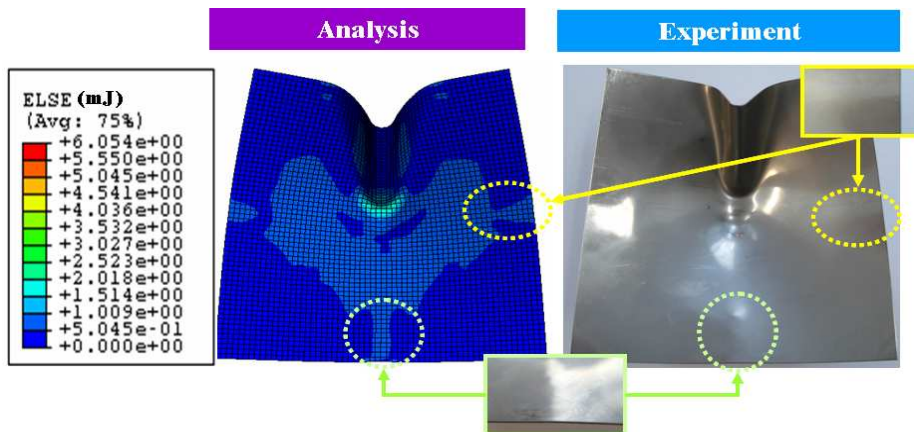


Fig. 72 Comparison of the deformed shape of impact tests and FE analysis ( $E_{in}=45.7$  J and  $D=20$  mm)

Fig. 72 는 충격시험과 유한요소해석을 통한 시편의 최종 변형 형상을 비교한 결과이다. 유한요소해석 결과를 보면 접힘 현상이 발생하지 않은 충격부에 수직/수평 방향의 가장자리 부에 적은 양의 잔류 변형률 에너지가 분포함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 시편의 최종 변형시 접힘이 발생하지 않은 충격부에

수직/수평 방향의 가장자리 부에 적은 양의 변형이 발생할 가능성이 있음을 예측할 수 있었고, 실제 충격시험을 통해 획득한 시편을 분석한 결과 Fig. 72 와 같이 접힘 변형이 발생하지 않은 충격부에 수직/수평 방향의 가장자리 부에 적은 양의 변형이 발생함을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 본 연구에서 제안된 스테인레스 강판에 대한 3차원 유한요소해석 모델이 본 재료의 드로잉형 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었다.

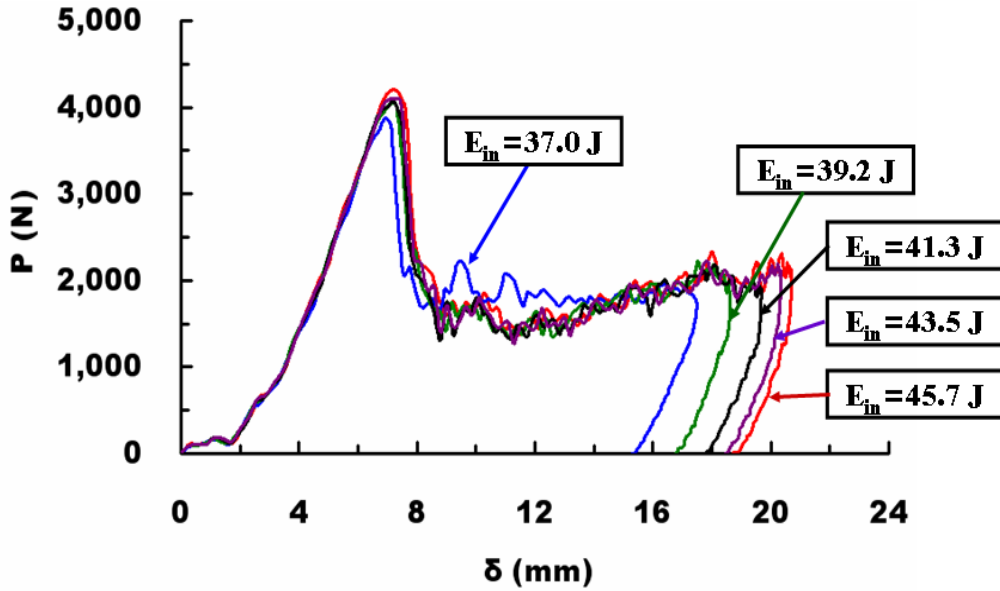
본 연구에서 제안된 최적의 유한요소해석 모델을 이용하여 스테인레스 강판에 대하여 드로잉형 경계조건에서 충격해석을 수행한 결과 Table 20 및 Fig. 73 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

**Table 20 Results of FE analyses of SUS304H panel for the case of drawing boundary conditions (D=20 mm)**

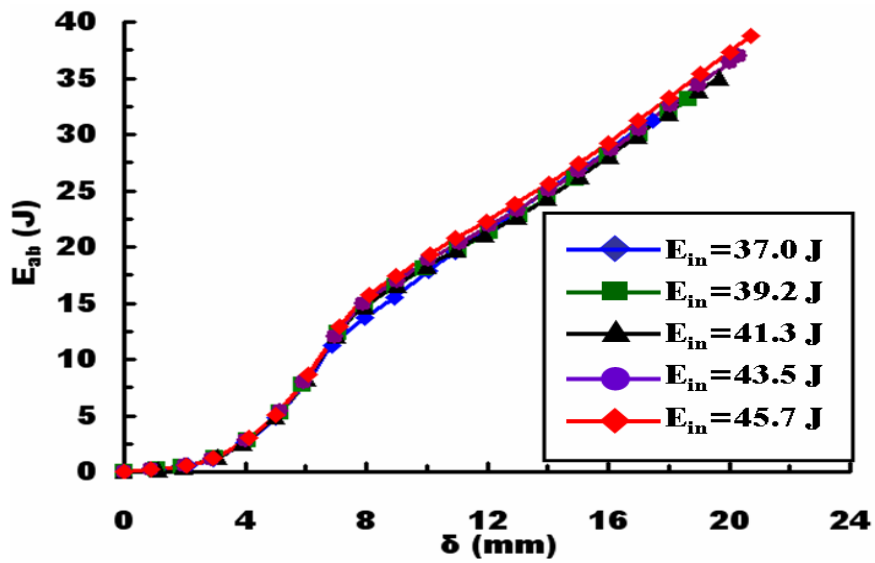
D (mm)	H (cm)	E <sub>in</sub> (J)	E <sub>ab</sub> (J)	χ (%)	P <sub>max</sub> (N)	d <sub>max</sub> (mm)
20	34	37.0	31.3	84.6	3,875.5	17.5
	36	39.2	33.2	84.7	4,039.9	18.6
	38	41.6	35.1	85.0	4,065.8	19.7
	40	43.5	37.0	85.1	4,098.6	20.3
	42	45.7	38.7	84.7	4,161.5	21.0

Table 20 와 Fig. 73 을 통해 충격시험과 동일하게 충격 입력에너지가 증가할 수록 충격흡수에너지와 최대 하중 및 최대 변위가 증가함을 알 수 있었다. 하지만, 충격에너지흡수율은 각각의 충격 입력에너지에서 84.6–85.1 % 정도로 거의 유사하게 나타남을 알 수 있었다.





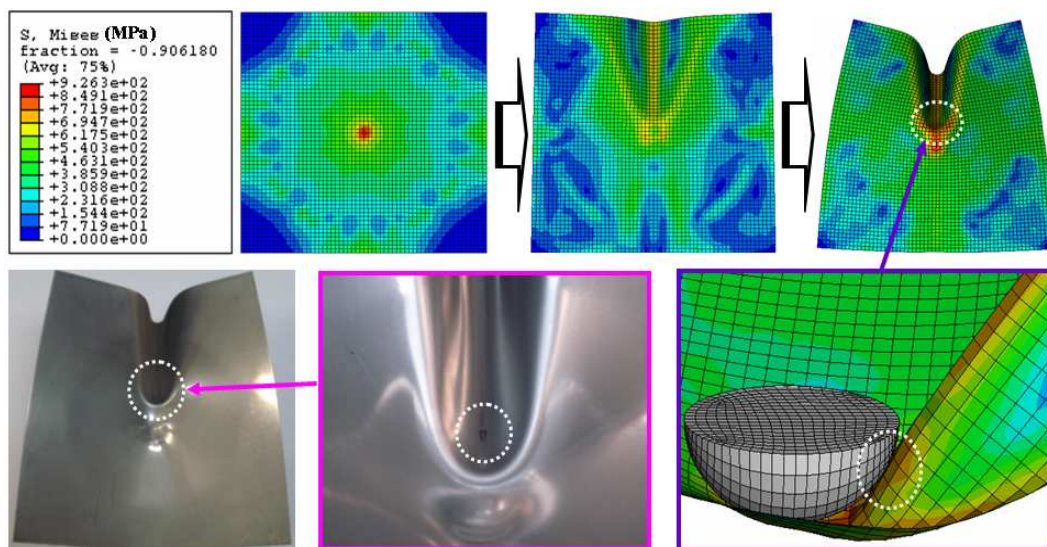
(a)  $P-\delta$  curves ( $D=20$  mm)



(b)  $E_{ab}-\delta$  curves ( $D=20$  mm)

Fig. 73 Results of FE analyses of SUS304H panels for the case of drawing boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)

본 해석 결과 Fig. 73 (a) 의 하중-변위 선도와 같이 최대 하중 후 감소하던 하중이 떨어지면서 다시 증가하다가 두 번째 최대 하중 후 다시 감소하는 현상을 보였다. 이 현상은 Fig. 74 와 같이 충격 부가부위가 국부 변형을 하면서 하중이 증가하다가 시편 중앙부에 접힘 현상이 발생하기 시작하면서 충격헤드와 접촉하는 시편 면적이 감소하게 되어 하중이 급격하게 감소하는 것으로 사료된다. 그 후, 계속적으로 감소하던 하중은 접힘 현상 발생 부분이 다시 충격헤드와 접촉하기 시작하면서부터 충격하중이 다시 증가하여 최대 충격헤드 진행 지점에서 접힘 발생부위와 충격헤드 측면의 부딪침이 발생하는 시점에서 두 번째 최대 하중이 나타나는 것으로 사료된다. 이와 같은 결과는 Fig. 74 에서와 같이 유한요소해석을 통하여 분석할 수 있었고, 실제 실험을 통한 시편 변형 형상 분석을 통해 확인할 수 있었다.



**Fig. 74 Comparison of the results of FE analysis and those of impact test for the case of SUS304H (Deformed shape)**

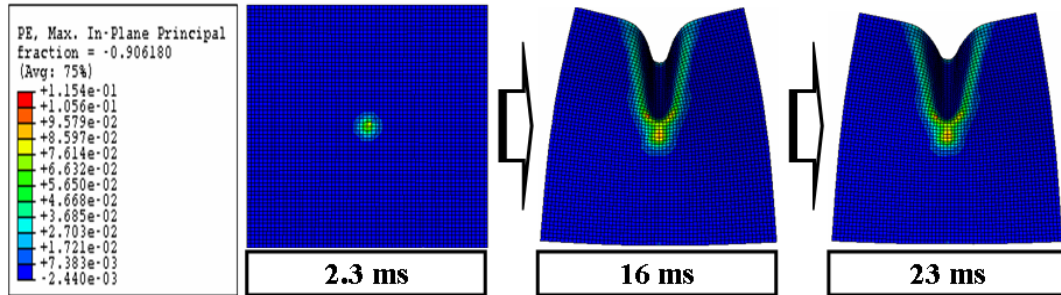


Fig. 75 Variation of the plastic strain distribution according to the impact time ( $D=20\text{mm}$  and  $E_{in}=43.5\text{J}$ )

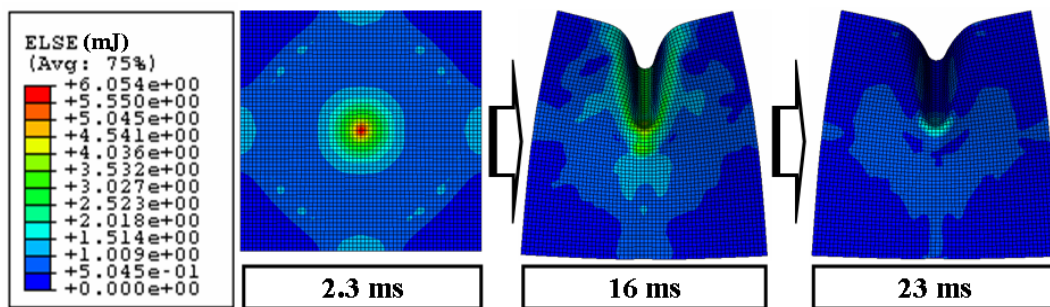


Fig. 76 Variation of the strain energy distribution according to the impact time ( $D=20\text{mm}$  and  $E_{in}=43.5\text{J}$ )

Fig. 75 와 Fig. 76 은 시간에 따른 소성 변형률과 변형률 에너지의 분포를 나타낸 결과이다. Fig. 75 에서 충격 초기에는 충격 부가부위에 소성 변형률이 집중되다가 시편 중앙부로 접힘 현상이 발생하면서 접힘에 의한 변형 부위 주위로 소성 변형률이 전파되는 것을 알 수 있었다. 변형률 에너지는 Fig. 76 과 같이 초기 충격 부위에만 집중되다가 최대 변형 시점에서는 접힘 부위 주변에 집중되는 것을 알 수 있었다. 또한, 충격하중이 제거된 스프링백 상태에서는 Fig. 76 의 23 ms 일 때와 같이 접힘 현상이 발생하지 않은 충격부의 수직/수평 방향의 가장자리에

적은 양의 잔류 변형률 에너지가 분포함을 확인할 수 있었다.

결론적으로 본 연구에서 제안된 스테인레스 강판에 대한 3차원 유한요소해석 모델이 본 재료의 드로잉형 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었고, 3차원 유한요소해석을 통해 재료의 에너지흡수특성과 변형 및 파단 특성, 그리고 응력과 변형률 및 변형률 에너지 분포 특성 등의 재료 내/외적인 충격거동의 예측이 가능함을 알 수 있었다

#### 5.2.4 ISB 판넬의 충격해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 드로잉형 경계조건에서 ISB 판넬의 충격에 따른 재료 내부 변형 특성과 응력 분포 특성, 변형률 및 변형률 에너지 분포 특성 등을 파악하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

드로잉형 경계조건에서의 충격해석을 통해 충격 특성을 분석하기 전에 먼저 본 연구에서 제안한 유한요소해석 모델이 본 재료의 드로잉형 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사할 수 있는 모델인지에 대한 검증은 실시하였다. Table 21 과 Fig. 77 은 충격헤드 직경 20 mm 일 때 충격시험과 충격해석을 비교한 결과이다.

**Table 21 Comparison of results of impact tests and that of FE analyses for the case of drawing boundary conditions (D=20 mm)**

	$E_{in}$ (J)	$E_{ab}$ (J)	$\chi$ (%)	$P_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)
37.0	Experiment	29.2	78.9	2,905.2	15.1
	Analysis	30.3	81.9	2,965.5	15.1
41.3	Experiment	31.2	75.5	3,014.0	15.5
	Analysis	34.0	82.3	2,991.9	16.3
45.7	Experiment	36.6	80.1	3,382.9	15.6
	Analysis	37.5	82.1	3,265.6	17.4

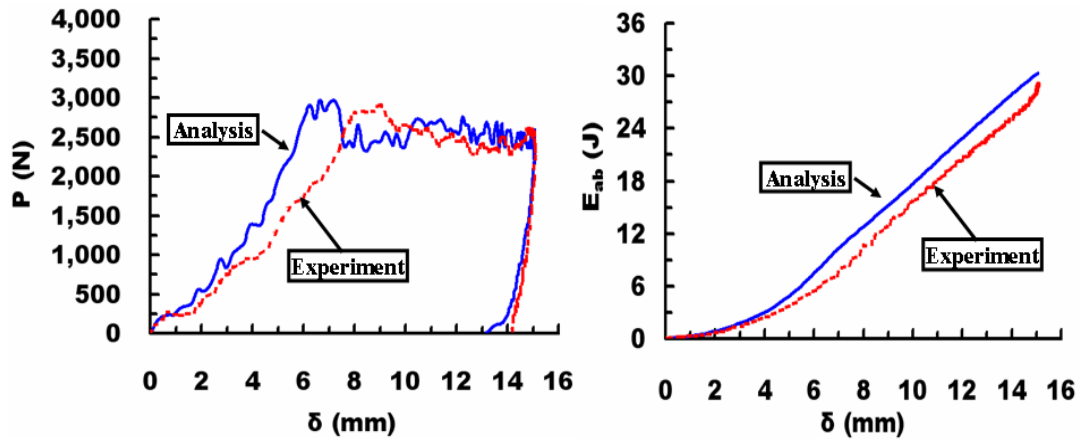


Fig. 77 Comparison of results of impact tests and FE analysis ( $E_{in}=37.0$  J and  $D=20$  mm)

Table 21 과 Fig. 77 를 통해 충격시험과 유한요소해석을 비교한 결과 충격흡수에너지, 충격에너지흡수율, 최대 하중 및 최대 변위에 대한 유한요소해석 결과가 충격시험 결과와 약 오차범위 10 % 안팎으로 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 77 에서와 같이 유한요소해석 결과가 시험 결과 얻어진 하중-변위 특성과 충격흡수에너지-변위 특성을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 78 은 충격 입력에너지 37.0 J 에서 유한요소해석과 충격시험을 통해 얻어진 시편의 최종 변형 상태를 비교한 결과이다. 본 비교 결과 시편의 중앙부 함몰과 부 크림핑 방향을 따른 시편의 지배적인 접힘 현상뿐만 아니라 시편의 중앙부 주 크림핑 방향으로의 작은 접힘까지 유한요소해석 결과가 충격시험을 통해 얻어진 시편의 변형 형상을 매우 잘 묘사하고 있음을 알 수 있었다.

이와 같은 결과들로부터 본 연구에서 제안된 ISB 판넬에 대한 3차원 유한요소해석 모델이 본 재료의 드로잉형 경계조건에 대한 충격 특성을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있었다.

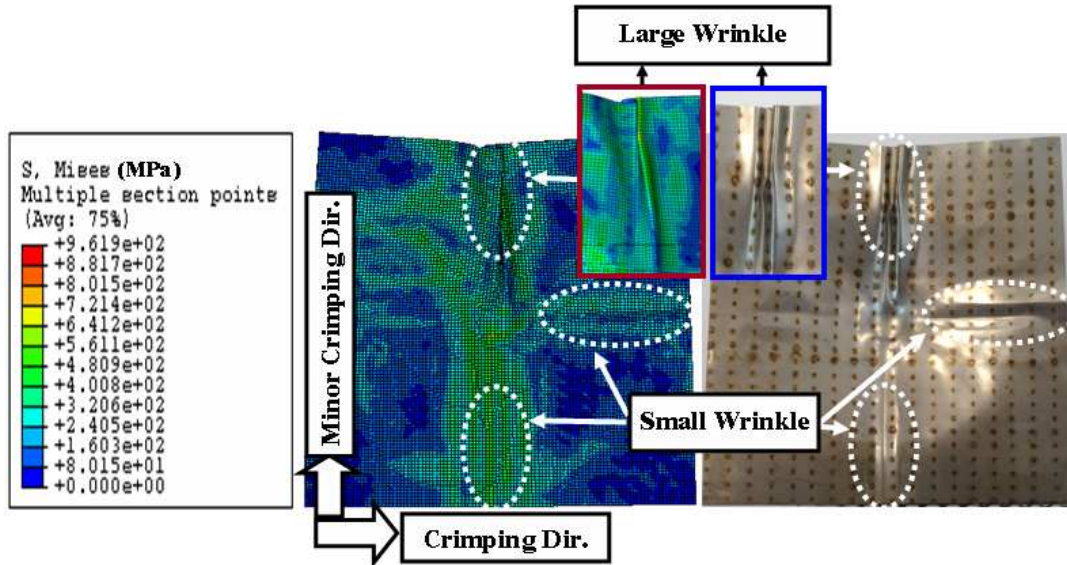
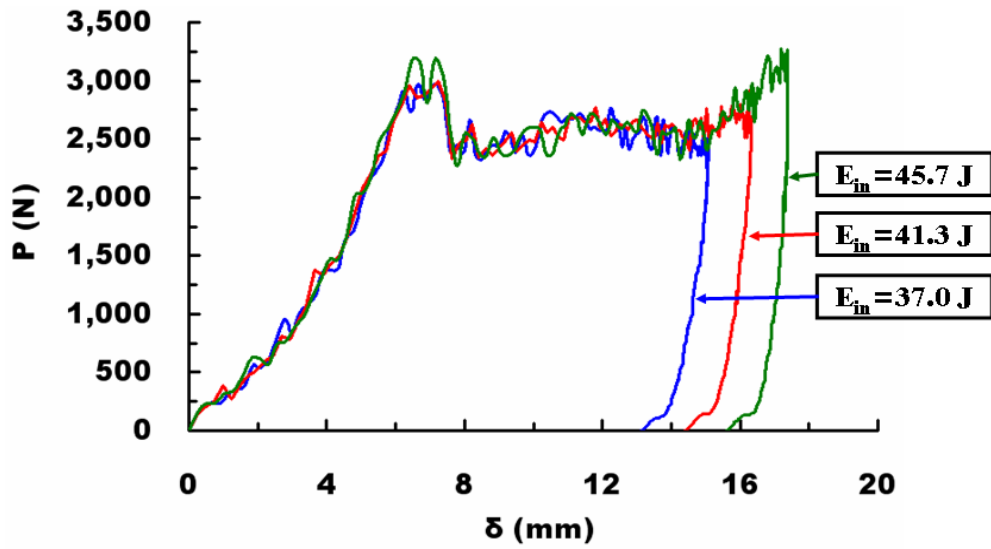


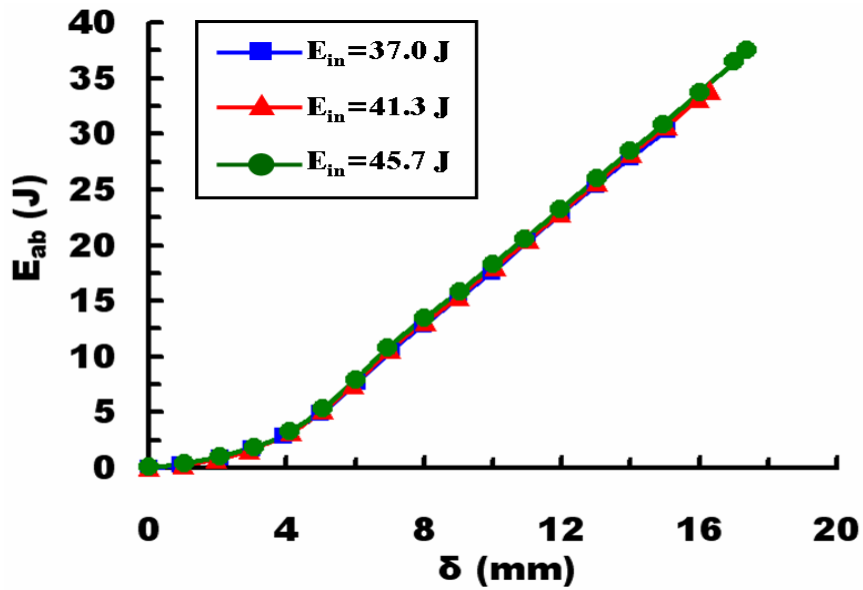
Fig. 78 Comparison of the deformed shape of FE analyses and that of experiments ( $E_{in}=37.0$  J and  $D=20$  mm)

Fig. 79 는 ISB 판넬에 대해 드로잉형 경계조건에서 각 입력에너지별로 충격해석을 수행한 결과이다. Table 21 과 Fig. 79 에서와 같이 충격해석 결과가 충격시험의 결과와 동일하게 충격 입력에너지가 증가할수록 최대충격흡수 에너지와 최대 하중, 최대 변위가 증가함을 알 수 있었다. 하지만 충격에너지흡수율은 공기의 저항성 및 충격에 따른 열 발생으로 인한 에너지 손실을 가정하지 않았기 때문에 약 81.9–82.3 % 정도로 거의 유사하게 계산되었다.

또한, Fig. 79 (a) 의 하중-변위 선도를 고찰하면 충격시험을 통해 얻은 하중-변위 선도와 유사하게 최초 하중 정점 후 연속적인 하중 요동이 발생하고 하중 요동시 최후의 정점 하중을 제외하고 각 정점 하중이 거의 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었다. 최후 하중 정점은 충격시험과 동일하게 충격 입력에너지가 증가할수록 높아지는 특징을 나타냈다.



(a)  $P-\delta$  curves ( $D=20$  mm)



(b)  $E_{ab}-\delta$  curves ( $D=20$  mm)

Fig. 79 Results of FE analyses of ISB panels for the case of drawing boundary conditions ( $P-\delta$  curve and  $E_{ab}-\delta$  curve)



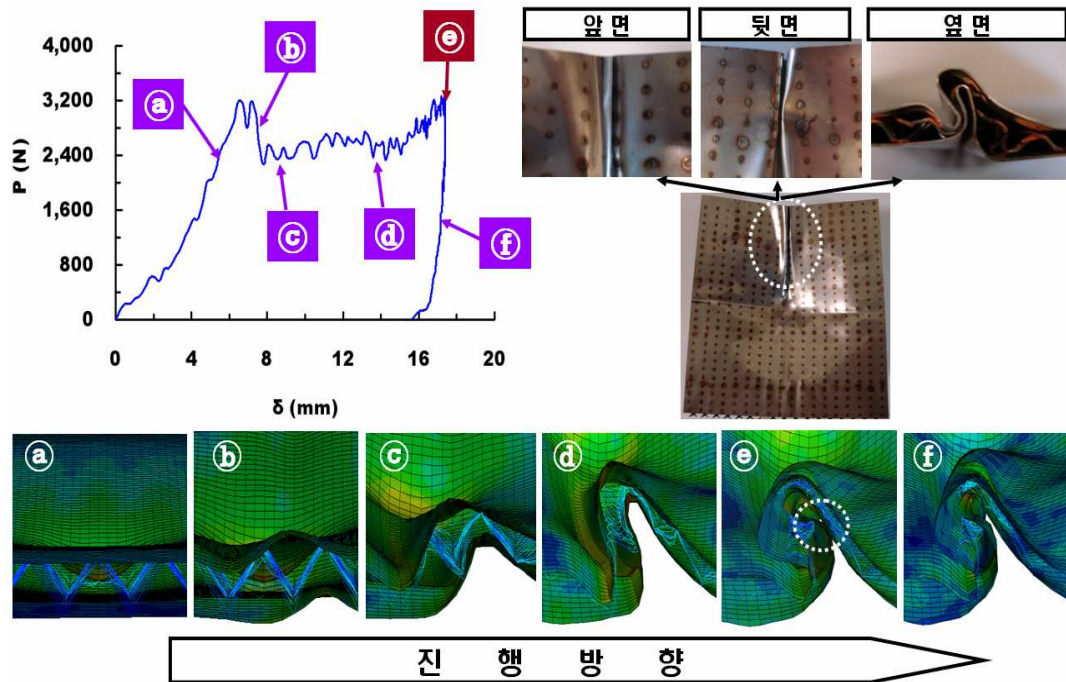
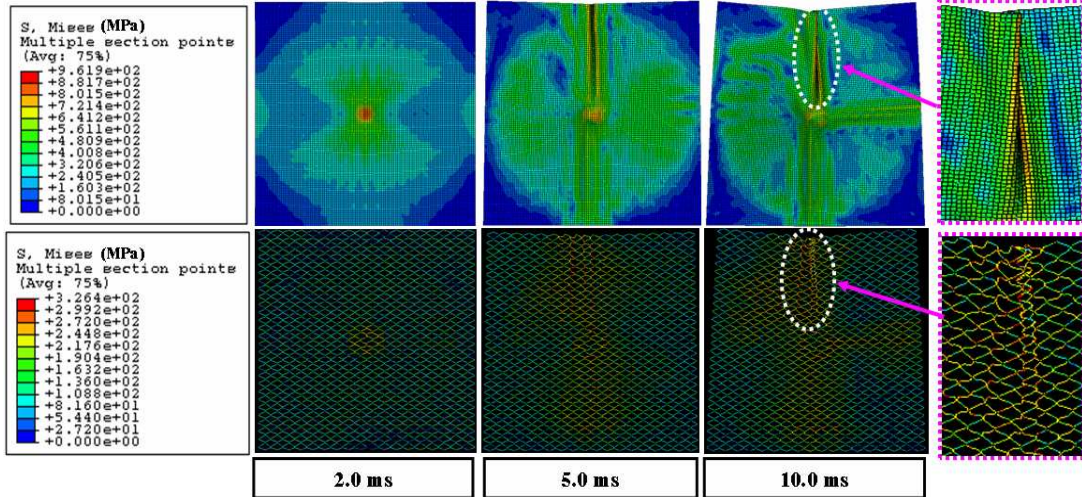
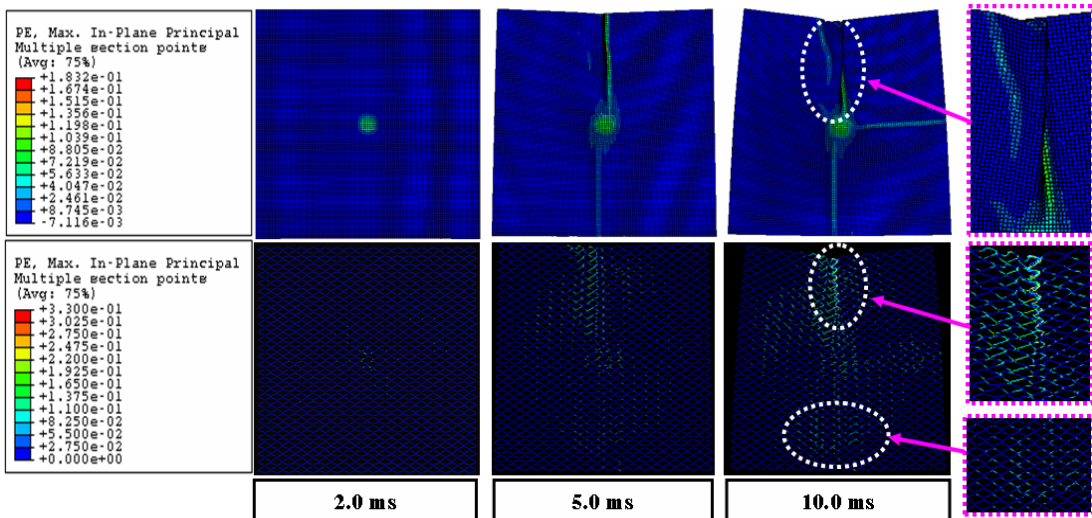


Fig. 80 Deformation shapes of the weld specimen for each location of P- $\delta$  curve (D=20mm and  $E_{in}=45.7$ )

Fig. 80 은 하중-변위 선도의 특정 위치에서의 시편의 주 접힘 변형 형상을 분석한 결과이다. ㉠ 위치에서는 ISB 판넬이 충격부 국부 변형을 하면서 하중이 증가하다가 ㉡ 위치에서 접힘 현상이 발생하면서 충격헤드와 접촉하는 시편의 면적이 감소하여 하중이 급격히 감소함을 알 수 있었다. 그 후, 감소하던 하중은 다시 충격헤드와 접촉하는 시편의 면적이 증가하여 하중이 다시 떨리면서 증가하고, 부크림핑 방향의 접힘 변형 현상이 최대가 되는 지점 ㉢ 에서 두 번째 최대 하중이 발생함을 알 수 있었다. 또한, 충격하중이 제거된 스프링백 상태인 ㉣ 에서 하중이 다시 감소함을 확인할 수 있었다.



**Fig. 81** Variation of the stress distribution of skin sheet and that of inner structures according to the impact time ( $D=20$  mm and  $E_{in}=37.0$  J)



**Fig. 82** Variation of the plastic strain distribution of skin sheet and that of inner structures according to the impact time ( $D=20$  mm and  $E_{in}=45.7$ J)

Fig. 81 과 82 는 ISB 판넬의 외판과 내부 구조체의 시간에 따른 응력 및 소성 변형률의 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 81 에서 ISB 판넬의 외판과 내부 구조체 모두 충격 초기에는 충격 부가부위에 응력이 집중되다가 시편의 중앙부 부 크림핑 방향으로 큰 접힘 현상이 발생하면서 접힘에 의한 변형 부위 주위로 응력이 전파되는 것을 알 수 있었다. 그리고 약 10 ms 때부터 시편의 중앙부 주 크림핑 방향으로도 접힘 현상이 발생하면서 주 크림핑 방향의 접힘에 의한 변형 부위 주위로도 응력이 전파되는 것을 알 수 있었다. Fig. 82 의 결과로부터 ISB 판넬의 외판과 내부 구조체 모두 충격 초기에는 충격 부가부위에 소성 변형률이 집중되다가 점차 시편의 중앙부 부 크림핑 방향과 주 크림핑 방향으로 접힘 현상이 발생하면서 접힘에 의한 변형 부위 주위로 소성 변형률이 전파되는 것을 알 수 있었다. 또한, 시편의 중앙부 부 크림핑 방향의 주 접힘 발생 부위의 반대 영역에도 많은 소성 변형률이 분포하는 것을 볼 수 있었다. 이와 같은 결과로 내부 구조체의 파단은 시편의 중앙부 부 크림핑 방향의 주 접힘 발생 부위와 그 반대 영역에서 발생할 가능성이 높다는 것을 예측할 수 있었고, 이 결과는 드로잉형 경계조건에서의 충격시험 결과 획득한 용접된 ISB 판넬 시편의 X-RAY CT 촬영 결과인 Fig. 47 (b)을 통해 주 접힘 발생 부위와 그 반대 영역에서 많은 내부 구조체의 파단이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

결론적으로 ISB 판넬에 대한 3차원 유한요소해석을 통해 ISB 판넬의 에너지 흡수특성과 변형 및 파단 특성, 그리고 응력과 변형률 분포 특성 등의 재료 내/외적인 충격거동의 예측이 가능함을 알 수 있었다. 특히, 실험에선 분석하기 힘들었던 ISB 판넬 내부 구조체의 변형 및 파단 특성을 분석 및 예측할 수 있었다.

## 제 6 장 결 론

본 연구에서는 3차원 형상의 금속 구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판넬 중의 하나인 트러스 형상의 내부 구조체를 가진 ISB 판넬에 대한 충격 특성을 분석/고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, ISB 판넬에 대한 스트레칭형 경계조건과 드로잉형 경계조건에서의 충격 시험을 통하여 하중-변위 특성, 충격에너지 흡수특성, 변형 및 파단 특성에 대한 데이터를 취득할 수 있었다.

둘째, ISB 판넬과 동일 무게의 스테인레스 판넬의 충격 특성 비교/분석을 통하여 스트레칭 경계조건에서는 접합된 ISB 판넬이 스테인레스 판넬보다 크럼핑 각  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  에서는 더 우수한 충격 특성을 보였지만 크럼핑 각  $90^\circ$  에서는 스테인레스 판넬보다 우수한 충격 특성을 나타내지 못함을 알 수 있었다. 또한, 용접된 ISB 판넬은 스테인레스 판넬보다 내부 구조체 함몰 전까지는 더 우수한 충격 특성을 보였지만, 내부 구조체 함몰 후에는 스테인레스 판넬보다 우수한 충격 특성을 나타내지 못함을 알 수 있었다. 반면, 드로잉형 경계조건에서는 접합된 ISB 판넬과 용접된 ISB 판넬 모두 스테인레스 판넬보다 더 우수한 충격 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

셋째, 스트레칭 경계조건과 드로잉형 경계조건에서의 3차원 유한요소해석을 통한 내부 변형 특성과 응력 및 변형률 분포 특성을 분석할 수 있었다. 이를 위해 스트레칭 경계조건과 드로잉형 경계조건에서의 유한요소해석 모델의 검증을 통하여

최적화된 유한요소해석 모델을 개발하였고, 검증된 유한요소해석 모델을 이용하여 충격해석을 수행한 결과 내부 구조체의 변형 및 파단 특성과 응력 및 변형률 분포의 변화에 대한 정량적 분석이 가능함을 알 수 있었다.

결론적으로 트러스 형상의 내부 구조체를 가진 ISB 판넬에 대한 충격시험 및 3차원 유한요소해석을 수행한 결과 전체 변형과 내부 구조체의 변형 및 파단을 이용하여 충격을 흡수하는 샌드위치 구조물의 장점을 살리기 힘든 스트레칭형 경계조건에서는 ISB 판넬이 우수한 충격 특성을 나타내기 힘든 반면에, 자동차/항공기/선박 등과 같은 수송기계 부품의 충돌시 나타나는 실제 현상에 가깝게 묘사할 수 있는 드로잉형 경계조건에서는 ISB 판넬이 우수한 충격 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로 ISB 판넬이 드로잉형 경계조건에서의 우수한 충격 특성을 필요로 하는 자동차/항공기/선박 등의 수송기계 산업에 매우 효율적이면서 적합한 재료임을 판단할 수 있었다.

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

첫째, 실제 자동차/항공기/선박 등의 수송기계 산업에 적용될 수 있도록 중대형 폭을 가진 대면적 ISB 판넬에 대한 시험/평가 기술 개발이 이루어져야 할 것이다.

둘째, 판넬형태뿐만 아닌 기초 특징 형상으로 정형 가공된 ISB 판넬에 대한 정적/동적 시험 평가가 수행되어야 할 것이다.

셋째, 추가적인 해석을 수행하여 ISB 판넬에 대한 최적화된 유한요소해석 모델을 개발해야 할 것이다.

## REFERENCES

1. Gibson. L. J., and Ashbyby. M. F, Cellular Solids: Structure and Properties, *Cambridge University Press*, 1998
2. Ashbyby. M. F., Avans. A. G, Fleck. N. A, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, and H. N. G. Wadley, Metal Foams: a Design Guide. *Boston: Butterworth Heinemann*, 2002.
3. Evans, A. G., Hutchinson, J. W., and Ashby. M. F., "Multifunctionality of Cellular Metal Systems," *Progress in Materials Science, Vol. 43*, pp. 171 – 221, 1999.
4. Zok, F. W., Waltner, S. A., Wei, Z., Rathbun, H. J., McMeeking, R. M. and Evans, A. G., "A Protocol of Characterizing the Structural Performance of Metallic Sandwich Panels : Application to Pyramidal Truss Cores," *International journal of Solids and Structures, Vol. 41*, pp. 6249 – 6271, 2004.
5. Wang, A. J. and Mcdowel, D. L., "Optimization of a Metal Honeycomb Sandwich Beam–bar Subjected to Torsion and Bending," *International Journal of Solids and Structures, Vol. 40*, pp. 2085 – 2099, 2003.
6. Chen. C., A–M Harte, Fleck. N. A., "The Plastic Collapes of Sandwich Beam which Metallic Foam Core" *International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43*, pp.1483 – 1506, 2001.
7. Xiaobo Yu, Liangchi Shang, Yiu–Wing Mai, "Modeling and Finite Element of Intra–ply Shearing of Woven Fabric" *Journal of Materials*

- Processing Technology, Vol. 138*, pp.47 – 52, 2003.
8. An Chen, Davalos. Julio F., "A Solution Including Skin Effect for Stiffness and Stress Field of Sandwich Honeycomb Core" *International Journal of Solids and Structures, Vol. 42*, pp.2711 – 2739, 2005.
  9. Liu, J. S. and Lu, T. J., "Multi-objective and Multi-loading Optimization of Ultralightweight Materials," *International Journal of Solids and Structures, Vol. 41*, pp.619 – 635, 2004.
  10. 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.
  11. 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.
  12. 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.
  13. Gupta, N. K., Iqbal, M. A. and Sekhon, G. S., "Experimental and Numerical Studies on the Behavior of Thin Aluminum Plates Subjected to Impact by Blunt and Hemispherical-nosed Projectiles," *International Journal of Impact Engineering, Vol. 32*, pp. 1921 – 1944, 2006
  14. 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
  15. Odeshi, A. G., Al-ameeri, S., Mirfakhraei, S., Yazdani, F. and Bassim, M.

- N., "Deformation and Failure Mechanism in AISI 4340 Steel under Ballistic Impact," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 45, pp. 18 – 24, 2006.
16. Meo, M., Vignjevic, R. and Marengo, G., "The Response of Honeycomb Sandwich Panels under Low-velocity Impact Loading," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, pp. 1301 – 1325, 2005.
17. Nguyen, M. Q., Jacombs, S. S., Thomson, R. S., Hachenberg, D. and Scott, M. L., "Simulation of Impact on Sandwich Structures," *Composite Structures*, Vol. 67, pp. 217 – 227, 2005.
18. Radford, D. D., Fleck, N. A. and Deshpande, V. S., "The Response of Clamped Sandwich Beams Subjected to Shock Loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 968 – 987, 2006
19. Tilbrook, M. T., Radford, D. D., Deshpande, V. S. and Fleck, N. A., "Dynamic Crushing of Sandwich Panels with Prismatic Lattice Cores," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, pp. 6101 – 6123, 2007.
20. Xue, Z. and Hutchinson, J. W., "A Comparative Study of Impulse-resistant Metal Sandwich Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 30, pp. 1283 – 1306, 2004.
21. Rathbun, H. J., Radford, D. D., Xue, Z., He, M. Y., Yang, J., Deshpande, V. S., Fleck, N. A., Hutchinson, J. W., Zok, F. W. and Evans, A. G., "Performance of Metallic Honeycomb-core Sandwich Beams under Shock Loading," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43,



- pp. 1746 – 1763, 2006.
22. McShane, G. J., Radford, D. D. and Deshpande, V. S., "The Response of Clamped Sandwich Plates with Lattice Cores Subjected to Shock Loading," *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 25, pp. 215 – 229, 2006.
  23. 정창균, 성대용, 양동열, 김진석, 안동규, “트러스형 내부구조를 가지는 샌드위치 판재의 저속 충격 특성 연구” *한국정밀공학회지*, 제 23권, 제 10호, pp. 80–87, 2006.
  24. 정창균, 윤석준, 양동열, 이상민, 나석주, 이상훈, 안동규, “피라미드 형상의 내부구조를 가지는 초경량 금속 내부구조 접합판재의 제작 및 정적 굽힘실험” *한국정밀공학회지*, 제 22권, 제 6호, pp. 175–182, 2005.
  25. 안동규, 이상훈, 김민수, 한길영, 정창균, 양동열, “ISB 판넬의 굽힘강성 및 파손특성에 관한 연구” *한국정밀공학회지*, 제 22권, 제 9호, pp. 162–172, 2005.
  26. 이상훈, 안동규, 김민수, 김진석, 한길영, 정창균, 성대용, 양동열, “3차원 유한요소 해석을 통한 ISB 판넬의 인장·굽힘 특성 분석” *대한기계학회 추계학술대회 논문집*, pp. 162–172, 2005.
  27. 안동규, 문경제, 정창균, 양동열, “피라미드형 내부구조체를 가진 ISB 판넬의 접합형태에 따른 충격 특성 변화” *한국정밀공학회지*, 제 24권, 제 9호, pp. 110–178, 2007.
  28. 안동규, 문경제, 김진석, 한길영, 정창균, 양동열, “트러스형 내부 구조체를 가진 ISB 판넬의 스트레칭형 경계조건에 대한 저속 충격 특성 분석” *한국정밀공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 45 – 46, 2006.
  29. Kaczorowski, D., Combrade, P., Vernot, J. Ph., Beaudouin, A. and Crenn,

- C., "Water Chemistry Effect on the Wear of Stainless Steel in Nuclear Power Plant," *Tribology International*, Vol 39, pp. 1503 – 1508, 2006.
30. Kaczorowski, D., Georges, J. M., Bec, S., Tonck, A., Vannes, A. B. and Vernot, J. P., "Wear of a Stainless Steel in Pressurised High Temperature Water," *Comptes Rendus del' Academie des Sciences–SeriesIV–Physics*, Vol. 2, pp. 739 – 747, 2001.
31. Huang, C. H., Wang, S. H., Lee, W. S., Chen, T. H. and Lien, C., "Dynamic Impact Behavior and Ferrite Variation of Special Stainless Steels," *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 843 – 849, 2005
32. Lee, W. S., Lin, C. F. and Liu, T. J., "Strain Rate Dependence of Impact Properties of Sintered 316L Stainless Steel," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 359, pp. 247 – 257, 2006.
33. Lee, W. S. and Lin, C. F., "Impact Properties and Microstructure Evolution of 304L Stainless Steel," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 308, pp. 124 – 135. 2001.
34. 안동규, 문경제, 문형철, 한길영, 정창균, 양동열, “고정형 경계조건에서의 0.7 mm SUS304H 판재의 충격에너지 흡수 특성” *한국기계가공학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 151 – 156, 2007.
35. 안동규, 문경제, 한길영, 정창균, 양동열, “고정형 조건에서의 스테인레스 강판의 충격 특성” *대한기계학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 1781 – 1786, 2007.
36. 안동규, 문경제, 김진석, 한길영, 정창균, 양동열, “SUS304 판재의 저속 충격 특성에 관한 연구” *한국기계가공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 111 – 116, 2006.

37. Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. and Witt, R. J., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis : Fourth Edition," *John Wiley & Sons. Inc*, pp. 409 – 416, 2002.
38. ABAQUS/Getting Started with ABAQUS. Version 6.5, 2004.
39. Umbrello, D., Saoubi, R. M. and Outeiro, J. C., "The Influence of Johnson–Cook Material Constants on Finite Element Simulation of Machining of AISI 316L Steel," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 462 – 470. 2007.
40. ABAQUS/Analysis User's Manual. Version 6.5, Vol. 3, 2004.