



저작자표시-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.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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](#) 

2012년 2월

석사학위논문

트러스 심재를 가진 초경량 금속 샌드위치
판재의 내부 결함이 충격 특성에 미치는 영향
분석

조선대학교 대학원

기계공학과

선 향 선

트러스 심재를 가진 초경량
금속 샌드위치 판재의 내부
결함이 충격 특성에 미치는
영향 분석

Analysis for Influence of internal
imperfections on impact characteristics of
a ultra-light weight sandwich panel with
truss cores

2012 년 2 월 24 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

선 향 선

트러스 심재를 가진 초경량
금속 샌드위치 판재의 내부
결함이 충격 특성에 미치는
영향 분석

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2011 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

선 향 선

선행선의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 조규재 ㉠

위원 조선대학교 교수 한길영 ㉠

위원 조선대학교 교수 안동규 ㉠

2011 년 12월

조선대학교 대학원

목 차

| | |
|--|----|
| List of Tables | I |
| List of Figures | II |
| Abstract | |
| | |
| 제 1 장 서론 | 1 |
| 제 1 절 연구 배경 및 관련 연구 | 1 |
| 제 2 절 연구 목적 및 방법 | 4 |
| | |
| 제 2 장 초경량 금속 샌드위치 판재 | 6 |
| 제 1 절 피라미드 구조를 가지는 익스펜디드 금속구조체 제작 .. | 6 |
| 제 2 절 샌드위치 판재 제작 시 발생하는 내부구조체 및 용접부에 대한 결함형상 분석 | 8 |
| 1. 트러스형 내부구조체에 대한 결함형상 | 8 |
| 2. 접합 용접부에 대한 결함형상 | 11 |
| | |
| 제 3 장 초경량 금속 샌드위치 판재에 대한 3차원 유 한요소 해석 | 13 |
| 제 1 절 결함을 포함한 트러스 심체를 가진 금속 샌드위치 판재 의 3차원 유한요소 해석 방법 | 13 |
| 1. 유한요소 해석 방법 및 모델링 | 13 |
| 2. 3차원 내충격 유한요소해석의 경계조건 및 재료 물성 | 16 |
| 제 2 절 트러스 심체를 가진 금속 샌드위치 판재의 설계에 따른 3차원 유한요소 해석 결과 및 고찰 | 18 |
| 1. 내부구조체의 초기결함 형태에 따른 충격해석 결과 및 고찰 ... | 19 |

| | |
|--|----|
| 2. 내부구조체의 초기결함 개수에 따른 충격해석 결과 및 고찰 | 23 |
| 3. 내부구조체 초기결함의 발생위치에 따른 충격해석 결과 및 고찰 | 30 |
| 4. 용접부 부분의 접합면적에 따른 충격해석 결과 및 고찰 | 36 |
| 5. 샌드위치 판재의 충격 변형 및 에너지 흡수특성에 따른 지배적인 결함모드 및 FE 해석 모델 도출 | 45 |
| 제 4 장 결함이 포함된 금속 샌드위치 판재의 최적설계에 대한 파손지도 작성 | 49 |
| 제 5 장 결 론 | 62 |
| References | 63 |
| 감사의 글 | |

LIST OF TABLES

- Table 1 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis
- Table 2 Material properties of stainless steel (SUS 304) and CSP 1N
- Table 3 Design of specimen for plane strain type of finite element analysis
- Table 4 Comparison of characteristic data of impact analysis for shape of initial imperfections of ISB panels in the plane strain boundary conditions (H=20 cm)
- Table 5 Comparison of characteristic data of impact analysis for the number of initial imperfections of ISB panels in the plane strain boundary conditions (H=20 cm)
- Table 6 Comparison of characteristic data of impact analysis for the positions of initial imperfections of ISB panels in the plane strain boundary conditions (H=20 cm)
- Table 7 Comparison of characteristic data of the number and shape of initial imperfections of ISB panels for the plane strain conditions of impact analysis (H=20 cm)
- Table 8 Comparison of characteristic data of the number and shape of initial imperfections of ISB panels for the plane strain conditions of impact analysis (H=20 cm)
- Table 9 Comparison of characteristic data of the number and shape of initial imperfections of ISB panels for the plane strain conditions of impact analysis (H=20 cm)
- Table 10 Comparisons of the result between finite element analysis and impact specimen of experiment
- Table 11 Table of analysis for failure map design
- Table 12 Comparison with the impact input energy (J) of failure models
- Table 13 Comparison with maximum displacement (mm) of the failure models

LIST OF FIGURES

- Fig. 1 Examples of sandwich plate with Three-dimensional inner structures
- Fig. 2 Flow chart of Research
- Fig. 3 Structures of expended metal with pyramid shapes
- Fig. 4 Manufacturing process of the sandwich panel with multi point resistance welding
- Fig. 5 Initial imperfections of inner structures in the sandwich panel
- Fig. 6 Modeling of initial imperfections on the inner structures
- Fig. 7 The number of initial imperfections on the inner structures
- Fig. 8 A location of initial imperfections on the inner structures
- Fig. 9 The welding of initial imperfections on the weld zone
- Fig. 10 The area of welding of initial imperfections on the weld zone
- Fig. 11 The welding modeling through actual measurement of the weld zone imperfections on the impact specimen
- Fig. 12 FE model of the impact analysis of sandwich panel
- Fig. 13 Unit-cell modeling of initial imperfections on the sandwich panel
- Fig. 14 Finite element model of the sandwich panel. (a) A full model (b) A half model
- Fig. 15 Boundary condition of FE analysis
- Fig. 16 Stress-Strain curves for stainless steel (SUS304)
- Fig. 17 Schematics for plane strain type of impact test
- Fig. 18 Influence of initial imperfections of the inner structures on the fore - deflection and the absorbed energy - deflection curves of ISB panel with Truss core
- Fig. 19 Variation of Effective stress distributions for shape of initial imperfections at 0.015 sec
- Fig. 20 Variation of Principal strain distributions for shape of initial imperfections at 0.015 sec
- Fig. 21 Change of Sym-Mode strut during the load on ISB panels

- Fig. 22 Influence of the number of initial imperfections of the inner structures on the fore - deflection and the absorbed energy - deflection curves (Symmetry-Mode)
- Fig. 23 Variation of Effective Stress distributions for the number of initial imperfections at maximum stress (Symmetry-Mode)
- Fig. 24 Variation of Principal strain distributions for the number of initial imperfections at maximum stress (Symmetry-Mode)
- Fig. 25 The section of maximum principal strain for Sym-Mode (2EA) at 0.0015 sec
- Fig. 26 Influence of the number of initial imperfections of the inner structures on the fore - deflection and the absorbed energy - deflection curves (Anti-Symmetry-Mode)
- Fig. 27 Variation of Principal strain distributions for the number of initial imperfections at maximum stress (Symmetry-Mode)
- Fig. 28 Variation of Principal strain distributions for the number of initial imperfections at maximum stress (Symmetry-Mode)
- Fig. 29 The section of maximum principal strain for Anti-Sym-Mode (2EA) at 0.0015 sec
- Fig. 30 Influence of a location of initial imperfections of the inner structures on the fore - deflection and the absorbed energy - deflection curves (Symmetry-Mode)
- Fig. 31 Variation of Effective stress distributions for the position of initial imperfections at loading maximum stress (Symmetry mode)
- Fig. 32 Variation of Principal strain distributions for the position of initial imperfections at loading maximum stress (Symmetry mode)
- Fig. 33 Influence of the number of initial imperfections of the inner structures on the fore - deflection and the absorbed energy - deflection curves (Anti-Symmetry-Mode)
- Fig. 34 Variation of Effective stress for shape of positions of initial imperfections at t=0.015 sec (Anti-Symmetry mode)
- Fig. 35 Variation of Principal strain for shape of positions of initial

imperfections at $t=0.015$ sec (Anti-Symmetry mode)

Fig. 36 Energy absorption on the weld zone area of standard mode

Fig. 37 Variation of Effective stress for shape of positions of initial imperfections at $t=0.015$ sec (Standard Mode)

Fig. 38 Absorbed Energy and displacement according to weld zone area on the Standard mode

Fig. 39 Variation of Effective stress according to the number of weld zone area on the Symmetry Mode

Fig. 40 Absorbed Energy and displacement according to weld zone area on the anti-Symmetry mode

Fig. 41 Variation of Effective stress according to the number of weld zone area on the Anti-Symmetry Mode

Fig. 42 Variation of Principal strain according to the number of weld zone area on the Anti-Symmetry Mode

Fig. 43 The final design for sandwich panels with initial imperfections

Fig. 44 Comparisons of between finite element analysis and impact specimen of experiment

Fig. 45 Variation of effective stress and principal stress distributions for dominant imperfections model

Fig. 46 Specimen of impact test on loading force in plane strain boundary conditions

Fig. 47 Section of maximum tensile stress of the final model in analysis

Fig. 48 Comparisons of between impact test and finite element analysis curves

Fig. 49 Comparison of the displacement (mm) of failure models at 0.015 sec

Fig. 50 Variation of Effective Stress for the weights and heights of impact head of failure models

Fig. 51 Variation of Principal Strain for the weights and heights of impact head of failure models

Fig. 52 Failure Map for impact characteristic of the failure models (Failure and Fracture)

- Fig. 53 Strain shape (Skin-Tearing) and variation of Effective Stress and Principal Strain for failure model (11.1 kg - 200 mm)
- Fig. 54 Strain shape (Strut-Crack) and variation of Effective Stress and Principal Strain for failure model (8.325 kg - 200 mm)
- Fig. 55 Strain shape (Strut-Buckling) and variation of Effective Stress and Principal Strain for failure model (8.325 kg - 100 mm)
- Fig. 56 Strain shape (Skin Wrinkling and No-Failure) and variation of Effective Stress and Principal Strain for failure models
- Fig. 57 Strain shape of fracture on the model (2.775kg 200 mm)
- Fig. 58 Failure Map ($\Gamma = 0.125$) for impact characteristic of the failure models (Failure and Fracture)

ABSTRACT

Analysis for Influence of internal imperfections on impact characteristics of a ultra-light weight sandwich panel with truss cores

Sun Hyang Sun

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

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Energy depletion has increased the need for highly energy-efficient products, and the tightening of environmental regulations due to environmental problems has raised. Especially, industries using transport carriers like automobile, aircraft and shippings are leading the way in increased product performance through high strength, high crushworthiness implementations ultra light structures for the purpose of developing passenger safety as well as increased energy consumption efficiency.

Also, there have been performed the analysis of reaction characteristic of those materials for the occurred impact force at using the structure frame in the transport industry

A prior study had been performed the analysis by supposing almost it's perfections during the finite element analysis in oder to analyze/deduct the impact characteristic of sandwich panels with truss core. However, It have been reported that mechanical properties and impact characteristic are to be decided with shape of occurred core/weld zone imperfections in producing process of the panels

So, It have been performed research the influence on the impact characteristics of sandwich panels with Truss cores by the initial imperfections in this paper. therefor, It have been performed the impact tests and non-linear finite element analysis using the impact systems of way to drop load for ISB panels on the plane strain boundary condition.

From the results of impact analysis/tests, considered force-deflection, deformation characteristics , absorption of th impact energy characteristics and failure characteristics with

ISB panels on each initial imperfection conditions. The three dimensional finite element analysis has been carried out using a commercial code ABAQUS v6.5.

First, Modeling of finite element analysis has been developed and verified in the case of plane strain boundary condition to perform three dimension finite element analysis. From the results of the FEA, the deformation/failure pattern of the inner structures, the variation of the stress and strain distribution in the ISB panel have been quantitatively evaluated when the impact energy is applied to the ISB panel.

Also, There is picked up the dominant dimensionless parameters to FM model based on the finite element analysis results for ISB panels with Truss core on the plane strain boundary conditions, deduced the Failure-Map on the weight/ velocity parameters for it's models and analyzed the influence of imperfections on each conditions

In order to examine characteristics of material deformation and failure three-points bending test has been performed. In the three-points bending test, the expanded metal with a pyramidal shape and woven metal are employed as an internally structured material. Through the three-points bending test, the influence of design parameters for ISB panel on the specific stiffness, the failure mode and the failure map has been found. In addition, it has been shown that ISB panel with expanded metal is prefer to that with woven metal from the view point of optimal design for ISB panel.

Thus, through the comparison of the results of the impact tests and those of the analyses, it could have been analyze/research the influence of occurred initial imperfections when produced the specimen to the absorption characteristic of impact energy and strain characteristic in the plane strain boundary conditions.

As a result of study, It could have decided to realize the product performance of high efficiency when the specimen are produced by comparing/deciding the influence with those imperfections for the ISB panels with Truss core used in the transport industry of a vehicle/flight/ship etc. As a results of experimental impact tests and those of the three dimension finite element analysis, The ISB panel has been considered very efficient and suitable materials at automobile /aircraft/shipping/space industry to require superior impact characteristics

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 관련연구

최근 고도의 산업화에 따른 인류의 무분별한 화석에너지 사용으로 인하여 환경오염 및 화석에너지 수급의 불균형의 문제를 겪고 있으며, 이로 인해 환경 규제 강화와 화석에너지 고갈 및 수요급증에 대한 대체 에너지 개발과 에너지 효율 증대 방안이 전 세계에서 산업적으로 가장 큰 관심사가 되고 있다. 특히, 자동차/항공기/선박 등 수송 기계 관련 산업에서는 환경 규제 강화와 안정성 및 에너지 효율 증대가 사회적인 관심사로 떠오르고 있다.¹⁾ 또한, 연비와 에너지 효율 증대를 위하여 제품의 경량화는 물론, 승객의 안전성까지 충족시킬 수 있는 초경량 고강성/고내충격성 재료 개발에 대한 연구가 절실히 필요한 상황이다. 이에 강도/강성/내충격성을 현저히 증대시키는 초경량 금속 구조재 (Ultra-light weight structured material) 에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.²⁻³⁾ 이러한 초경량 금속구조재 개발의 한 가지 방향으로 금속 판재 내부에 3차원 형상의 내부구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 재료 개발에 대한 연구가 국내외적으로 다양하게 수행되고 있다.⁴⁾

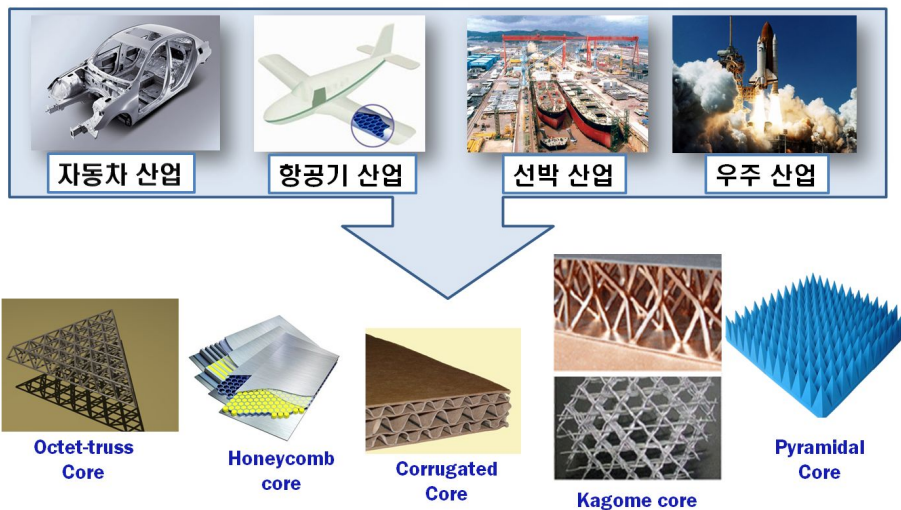


Fig. 1 Examples of sandwich plate with Three-dimensional inner structures

초경량 금속 샌드위치 판재의 경우 Fig. 1 과 같이 판재형 금속재료 내부에 피라미드(Pyramidal) 판재, 허니콤(Honeycomb) 판재, 카고메(Kagome) 판재 등과 같은 3차원 금속 샌드위치 판재가 있다.⁵⁻⁸⁾

최근 금속 샌드위치 판재가 구조재료로의 활용성이 높아짐에 따라 각종 충격에 의한 내충격성이 중요한 문제로 관심을 받고 있다. 초경량 금속 샌드위치 판재의 경우 내부구조체 부분이 비어 있어 재료 밀도가 매우 낮고, 하중 부가 시 샌드위치 판재의 변형에 영향을 미치기 때문에 비강성/비강도/비내충격성이 현저히 증가한다.⁹⁻¹⁰⁾ 또한, 전 세계적으로 충격부하를 받는 금속 구조재의 충격거동과 충격특성에 대한 관심이 높아짐에 따라 많은 연구자들이 이와 관련된 연구를 수행하고 있다. 특히, 자동차/항공기/선박 등 수송기계 관련 산업에서 연료 소비율 감소와 대체 재료의 강성 증가를 위해 초경량 샌드위치 판재의 내부구조체의 형상 및 재질을 다양하게 바꿔가며 그 형상 특성에 따른 충격 특성 및 충격 거동에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다.¹¹⁻¹⁵⁾

선행 연구에서는 샌드위치 판재의 충격특성을 분석/도출하기 위해 유한요소 해석 시 대부분 무결함으로 가정하여 해석을 수행하였다.¹⁶⁻¹⁷⁾

초경량 금속 샌드위치 판재는 상·하부 외판 (Sheet) 과 내부구조체 (Core) 가 다점 전기저항 용접 방식 및 압축공정에 의하여 접합되어 제작되기 때문에 이 과정에서 발생할 수 있는 외판 및 내부구조체가 접촉해있는 접합부분의 용접면적에 대한 결함 및 압력 부가 시 일어날 수 있는 내부구조체의 좌굴모드에 대한 결함 등의 형태에 따라 판재의 기계적 물성과 충격특성이 결정될 수 있다.¹⁸⁾

Wahab¹⁹⁾ 등은 용접을 이용해 두 재료의 접합 시 다양하게 일어날 수 있는 용접 용융부 결함을 유한요소법에 의하여 응력확대계수를 측정하여 결함된 축과 비틀리는 피로 하중에 의해 발생하는 충격 특성 분석을 하였다. Russell²⁰⁾ 등은 피라미드형태의 내부구조체를 가지는 샌드위치 판재에 압축 및 전단 시험을 통하여 나타날 수 있는 내부구조체의 결함에 대하여 발생하는 기계적인 거동을 연구하였다. Bath-Smith²¹⁾ 등은 구성 성분에 지배적인 금속성의 내부구조체를 가진 샌드위치 판재에 대하여 4점 굽힘 실험을 통해 판재의 외판에 압력을 주면서 발생할 수 있는 결함을 소개하고 부가된 하중에 대한 충격특성을 연구 하였다. Sangil²²⁾ 등은 벌크형 와이어 직조 카고메 트러스 PCM 제작 시 브레이징을 통한 접합과정에서 발생할 수 있는 접합면적에 대하여 유한요소 모델을 선정하고 유한요소해석을 통

하여 접합 결함에 대한 역학적인 강성에 주는 영향성을 분석하였다

본 연구에서는 트러스 심재를 가지는 ISB (Internally Structured bonded) 판재의 내부구조체 및 용접부분의 결함이 주는 충격 거동 및 에너지 및 변형 특성을 연구하고 실제 실험에 나타나는 무차원 변수들에 지배적인 모델을 도출하고자 연구를 수행하였다. 또한, 결함 트러스형 심재를 가지는 금속 샌드위치 판재에 주는 영향성에 대하여 평면 변형 경계조건에서 3차원 유한해석을 통한 파단모드의 분석 및 고찰을 수행하였으며, 무차원 변수에 대한 파단지도(Failure Map) 을 설계하여 결함의 충격특성에 미치는 영향성 및 무파손 설계 영역에 대한 연구를 수행 하였다.

제 2 절 연구목적 및 방법

초경량 금속 샌드위치 판재의 경우 자동차/항공기/선박 등 수송기계 관련 산업에서 많이 연구되고 사용됨에 따라 에너지 효율 증대와 승객의 안전성 향상 증대를 위하여 초경량 고강성/고내충격성 재료 개발이 필요시 되고 있다. 특히, 충격 헤드로부터 충격하중 부가 시 판재의 거동/반응 특성 및 변형, 충격강도, 충격 흡수 매커니즘에 관한 연구가 필수적으로 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 트러스 심재를 가지는 초경량 금속샌드위치 판재의 내부 구조체의 좌굴 변형과 내/외판 접합부분에 대한 용접 결합의 초기형상이 샌드위치 판재의 충격특성에 영향이 있다고 판단하고, 각 결합형태 및 결합유형에 따른 충격 특성 변화에 대하여 3차원 모델링의 유한요소 해석을 통하여 하중, 변위, 충격흡수에너지 등 충격 특성/파손 특성을 비교/분석하였다.

또한, 유한요소해석 프로그램을 이용하여 내부구조체의 구조적 초기 결합 및 용접부의 결합형태에 따라 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 먼저 3차원 유한요소 해석을 수행하기 위해 정적 인장 실험 및 고속 인장 실험을 통해 기계적 물성을 도출하였으며, ABAQUS v6.5²³⁻²⁴⁾ 상용 프로그램을 이용하여 샌드위치 판재의 결합 특성과 유형의 구성에 대한 해석 모델을 개발 및 검증 하였다.

먼저 초경량 트러스형 심재를 갖는 샌드위치 판재의 제작 시 판재의 내부구조체에 발생 가능한 구조적인 형상 결합에 대하여 Standard-Mode / Symmetric-Mode (Sym) / Anti-Symmetric-Mode (Anti-SYM) 등 3가지 형태의 결합초기 모델을 선정하여 3차원 유한요소 해석을 통해 각 형태에 대한 변형량, 유효 응력 분포, 주변형률 분포, 충격 에너지 흡수에 대하여 정략적으로 비교/분석하였다. 또한, 시편 제작 시 내부구조체의 결합이 전혀 없는 경우인 용접면적 0개의 모델에 대하여 도출된 Sym 와 Anti-Sym 의 초기결합 형태를 가지는 경우, 내부구조체의 개수가 각각 2개와 4개 일 때의 해석 결과를 비교/분석함으로써, 구조적인 결합을 가지는 내부구조체의 개수가 충격 특성에 미치는 영향성을 비교/분석하였다. 다음으로 샌드위치 판재의 내부 구조체에 발생하는 좌굴변형 결합의 발생 위치에 따른 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 앞서 제시한 Sym 와 Anti-Sym 의 2가지 형태의 좌굴변형 결합에 대하여 결합이 포함된 내부 구조체가 2개 일 때, 해당 내부구조체의 결합 위치가 단위 셀의 정중앙을 기준으로 다르게 발생할 것이라고 판단하여 2가지의 구조

결합 형태별로 앞쪽에 발생한 판재인 “Front 판재” 와 뒤쪽에 발생한 판재인 “Rear 판재” 에 대하여 결합이 발생하는 2가지 모델링을 도출하고 유한요소 해석을 수행하였다.

마지막으로, 내부구조체와 외판을 연결하는 용접부 부분의 접합 추가면적에 대하여 유한요소해석이 수행되었다. 시편 제작 시 용접할 경우 내부구조체가 앞서 언급한 대로 3가지 구조적인 결합을 이룰 때, 이와 동시에 발생할 수 있는 결합 변수로 용접부의 접합면적의 결합을 꼽았으며, 용접부 부분에 생성되는 용접면적의 개수가 0개 / 2개 / 4개 일 때 유한요소해석을 통하여 변형량, 유효 응력 분포, 주변형률 분포, 충격 에너지 흡수에 대하여 정량적으로 각각 비교/분석하였다.

이와 같이 샌드위치 판재의 모델의 3차원 유한요소 해석 결과와 실제 실시한 평면 변형 조건의 충격 낙하 실험의 결과를 비교 및 분석 하여 하중/변위/충격흡수 에너지 등 충격 및 변위특성이 가장 유사한 판재 모델을 도출하였다. 이 도출된 모델을 이용하여 무차원 충격헤드 반경별 파손 모드가 발생하는 경계의 무차원 충격 무게/속도 조건들을 이용하여 각 파손 모드 발생 영역을 도출하였다. 또한, 산출된 무차원 충격 무게 및 충격 속도를 이용하여 샌드위치 판재의 상대밀도와 형상계수를 예측하였다.

본 연구에서 위의 연구 방법 및 내용을 이용하여 3차원 금속 내부구조체를 가지는 초경량 금속 샌드위치 판재에 대한 수행 계획은 Fig. 2 와 같다.

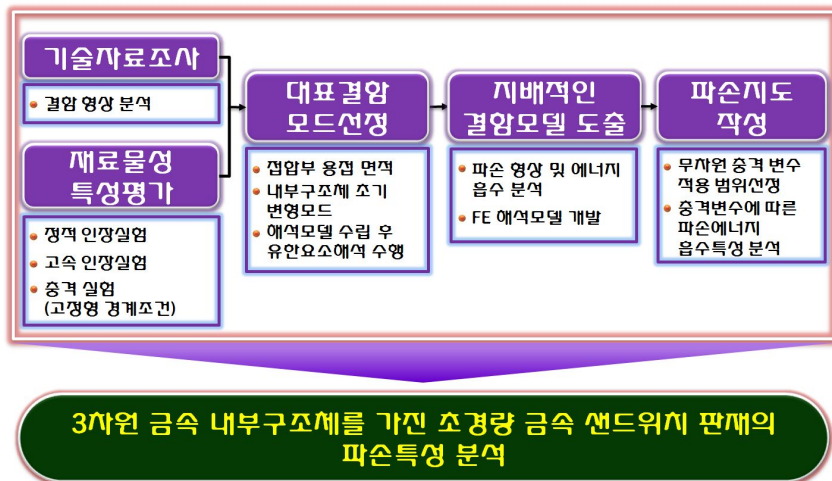


Fig. 2 Flow chart of Research

제 2 장 초경량 금속 샌드위치 판재

제 1 절 피라미드 구조를 가지는 익스펜디드 금속 구조체 제작

익스펜디드 금속(Expanded metal) 은 얇은 구리판에 일정한 간격으로 절삭 자국을 내어 이것을 절삭자국과 직각방향으로 잡아당겨 늘여서 그물 모양으로 만든 금속이다. 얇은 금속 박판을 슬릿(slit)한 후 그 방향으로 금속을 확장 시켜 제조되는 마름모꼴의 격자를 가지는 철망의 한 형태로 열간 압연 강판을 적당한 간격으로 냉간 가공하여 다이아몬드 형상으로 만든 형상이다. 재료의 손실이 없고 공정이 자동화 되어 대량생산되고 있을 만큼 그 가격이 매우 저렴하여 다양한 용도로 쓰인다. 익스펜디드 금속에 대한 규격은 한국산업규격화 (KSD 3601) 되어있다.

피라미드 형태의 트러스 구조를 가지는 내부구조체를 이용하여 샌드위치 판재를 제작하기 위해서는 적절한 두께를 가지는 외판을 트러스 심재인 내부구조체와 접합해야한다. 일반적으로 외판과 심재의 접합은 각각의 재료/기계적 특성에 따라 결정되며, 비금속 복합재료의 경우 화학적 접합이 주로 사용되는데, 외판과 심재 모두 금속인 샌드위치 판재의 경우 용접, 화학적 접합, 브레이징 등 다양한 접합 방법으로 적용될 수 있다.

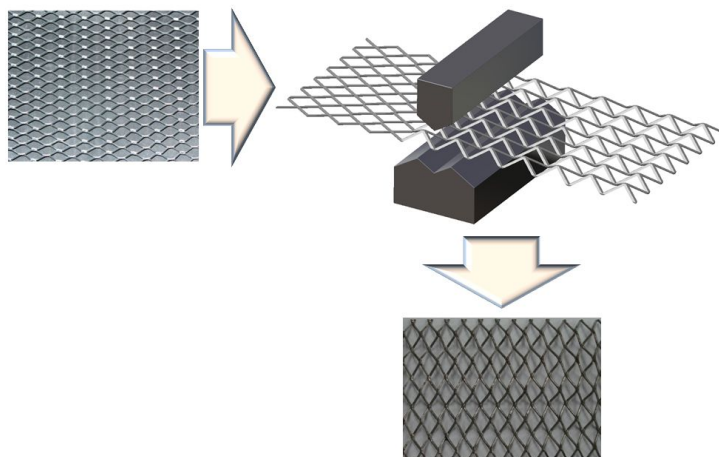


Fig. 3 Structures of expanded metal with pyramid shapes

본 연구에서 분석 할 트러스 심재를 가진 금속 샌드위치 판재를 제작하기 위하여 단축의 길이가 약 4.5 mm, 장축의 길이가 약 7 mm 이며, 원료의 두께 및 슬릿 폭이 약 0.4 5mm 인 강재 익스펜디드 형상의 구조체를 이용하여 Fig. 3 와 같이 금형으로 크립핑 각을 부여한 피라미드 형상의 구조체를 생성하였다.

샌드위치 판재 제작에 사용된 외판은 두께가 0.3 mm 인 스테인레스 강판을 이용하였으며, 이는 외판의 두께가 심재보다 얇을 경우 용접 시 심재가 녹아 용접이 되지 않을 수 있기 때문이다.

선행 연구에서는 트러스 구조의 내부구조체의 꼭지점과 외판의 접촉에 의해 발생하는 접촉저항 방식의 다점 전기저항 용접기 (Multi point resistance welding) 를 이용하여 외판과 내부구조체를 용접시켜 트러스형 금속 샌드위치를 제작하였다.

본 연구에서는 Fig. 4 와 같이 과거에 제작된 트러스형 금속 샌드위치를 이용하여 트러스형 내부구조체 및 용접부의 형상에 대한 분석을 통해 연구하였다.²⁵⁾

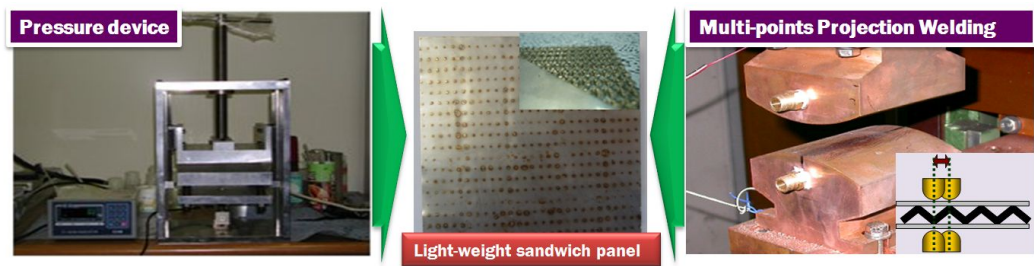


Fig. 4 Manufacturing process of the sandwich panel with multi point resistance welding

제 2 절 샌드위치 판재 제작시 발생하는 내부구조체 및 용접부에 대한 결합형상 분석

본 연구에서는 트러스 심재를 가지는 ISB (Internally Structured Bonded) 판재 제작 시 발생 가능성이 있는 내부구조체의 구조적인 결합 및 용접부의 접촉면적 결합을 고려한 충격/거동 특성을 분석하고자 한다. 이에 앞서 ISB 판재 제작 시, 압축 과정 및 용접과정에서 내부구조체에 발생할 수 있는 결합형상은 다음과 같다

1. 트러스형 내부구조체에 대한 결합형상 분석

다점 전기저항 용접방법으로 ISB 판재의 내부구조체와 외판과의 접합 후 압축 공정을 통한 제작 시, 판재가 받는 압력은 구조물의 위쪽 방향에서 아래 방향으로 영향을 주게 되며, 이에 따라 내부구조체의 형상은 각각 다른 형태로 변형하게 된다. Fig. 4 는 ISB 판재 제작 시 압축공정에 의해 내부구조체에 발생할 수 있는 구조적인 결합을 나타내었다.

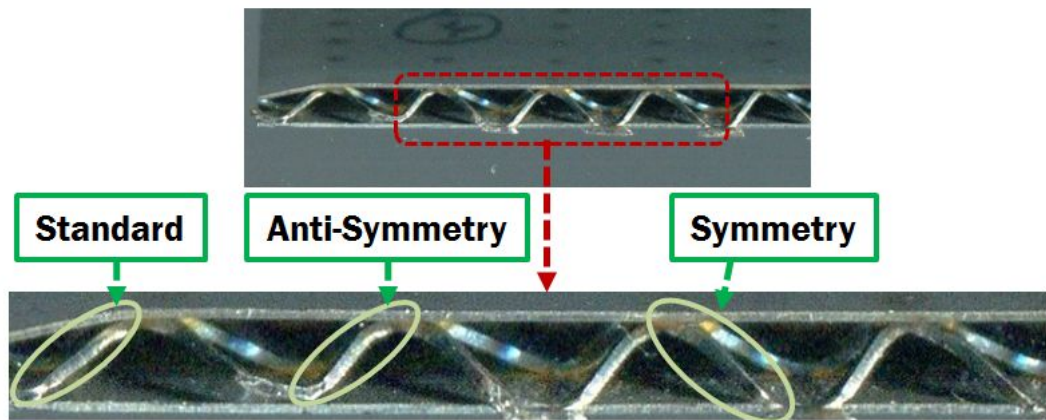


Fig. 5 Initial imperfections of inner structures in the sandwich panel

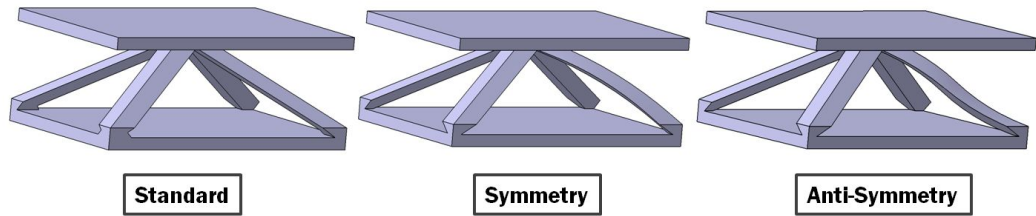
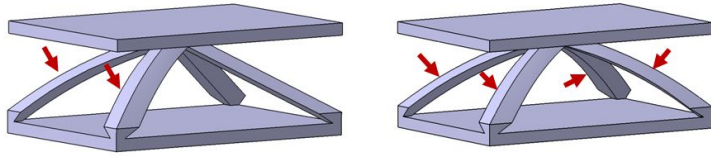


Fig. 6 Modeling of initial imperfections on the inner structures

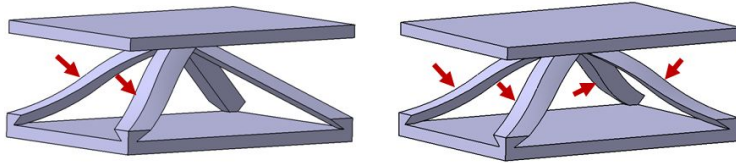
외판과 내부구조체가 용접 후 접합되는 과정에서 압력을 받을 경우, 시편에 나타날 수 있는 내부구조체의 형태는 좌굴 하중에 의해 여러 가지 좌굴 모드가 발생할 수 있으며, 그 또한 다양하다. 본 연구에서는 Fig. 6 와 같이 시편의 내부구조체에 발생할 수 있는 여러 가지 좌굴 모드에 대하여 대표적으로 Standard-Mode, Symmetry-Mode (Sym) 및 Anti-Symmetry-Mode (Anti-Sym) 가 발생한다는 것을 발견하고 이에 따라 3가지 모드에 대한 분석을 하였다. 대표적인 3가지 모드에 대한 설명은 다음과 같다.

Standard-Mode 의 형상은 압축과정에서 시편을 압축하는 압력이 용접부 혹은 내부구조체의 지지에 의해 영향이 거의 없어 내부구조체의 좌굴이 거의 생기지 않는 일반적인 형태의 내부구조체 형상이다. 발생 가능성이 있는 다른 내부구조체 형상은 Sym 이다. 이 형상은 압축과정에서 발생한 압축력이 외판과 내부구조체의 접합되어있는 접합부 안쪽 방향으로 직접적으로 전달되면서 내부구조체가 압축하중에 의해 활처럼 휘어진 형상이다. 마지막으로 시편 제작 시 발생할 수 있는 Anti-Sym 는 압축 시 발생된 압축하중이 내부구조체의 길이방향으로 전달되면서 내부구조체가 "S" 자 형태로 휘어진 형상이다.

초기 결함형태로 선정한 모델에 대하여 시편 제작 시 발생할 수 있는 경우의 수는 셀 수가 없으며, 그 또한 다양하다. 특히 내부구조체의 좌굴모드 중 Sym 과 Anti-Sym 의 경우, 결함이 나타날 수 있는 내부구조체에 대하여 단위 셀 내에서 발생하는 개수는 0개 ~ 4개 이며, 내부구조체에 압축 하중의 영향으로 발생하는 좌굴 모드가 임의의 곳에서 랜덤으로 일어나기 때문에 내부구조체의 결함에 대하여 일정한 범위와 경우의 수를 헤아리기 곤란하다. 이에 따라 본 논문에서는 Fig. 7 와 같이 각 내부구조체에 발생하는 좌굴 모드인 Sym 과 Anti-Sym 의 좌굴모드에 대하여 단위 셀 당 일어날 수 있는 개수를 가장 많은 발생 빈도수인 2개와 4개로 선정하였다.

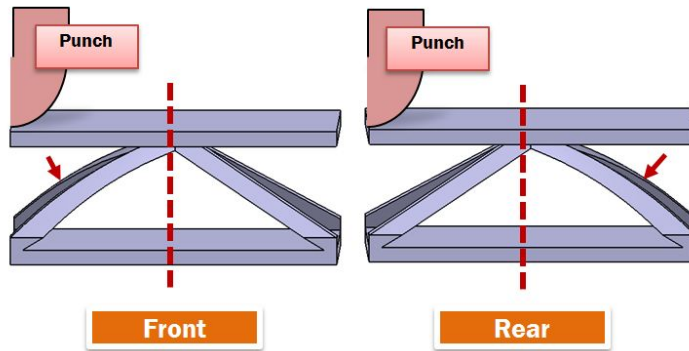


(a) Symmetry-Mode

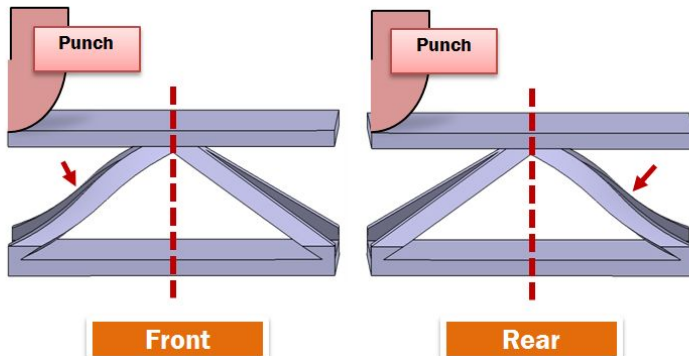


(b) Anti-Symmetry-Mode

Fig. 7 The number of initial imperfections on the inner structures



(a) Symmetry-Mode



(b) Anti-Symmetry-Mode

Fig. 8 A location of initial imperfections on the inner structures

또한, Fig. 8 와 같이 Sym 와 Anti-Sym 의 좌굴모드 경우 2개의 내부구조체의 결합이 발생 할 때, 그 결합의 위치에 따라 샌드위치 판재의 성능 및 충격특성이 달라질 수 있다고 판단하여 단위 셀의 정중앙을 기준으로 앞쪽의 내부구조체에서 좌굴이 발생한 “Front 판재” 결합 형상 과 뒤쪽의 내부구조체에서 좌굴이 발생한 “Rear 판재” 결합 형상에 대하여 나타날 수 있는 충격특성을 비교/분석 하였다.

2. 접합 용접부에 대한 결합형상 분석

다점 전기저항 용접방식으로 ISB 판재가 제작 될 때, 외판인 스트레인 강판과 내부구조체인 CSP 1N (Mild Steel 원재료) 의 접합부에서는 용접재의 용융에 의하여 용접이 이루어진다. 이 경우, Fig. 9 와 같이 용접 부위, 메커니즘 및 방법에 따라 용접되는 면적이 다르게 나타날 수 있으며, 이에 따라 용접부의 결합으로 인한 충격 특성이 다르게 나올 수 있음을 예상할 수 있으며, 내부구조체의 결합의 경우와 같은 방식으로 대표적인 경우의 결합에 대하여 분석하였다.

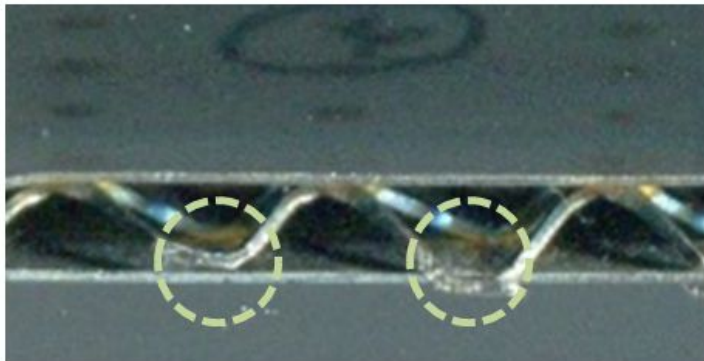


Fig. 9 The welding of initial imperfections on the weld zone

접합 용접부에 대한 결합에 대한 초기형상 선정에 있어서 용접시 발생 가능한 결합의 경우의 수는 앞서 언급했던 내부구조체 결합의 경우의 수만큼 많다. 본 연구에서는 Fig. 10 와 같이 실제 일어날 수 있는 용접부의 결합에 대하여 외판과 내부구조체가 접촉 되어있는 접합부에 용접이 정확히 이루어 지지 않을 때 외판에 맞닿은 내부구조체의 주위에 어떠한 용접면을 볼 수가 없는 경우, 용접에 의해 접합되어 있더라도 외판에 접촉되어있는 내부구조체의 절반정도의 접합 면적이 용접

이 되어 있는 경우와 외판과 내부구조체간의 정확히 이루어진 용접에 의하여 용접면이 내부구조체를 둘러싸고 있는 경우를 고려하였다.

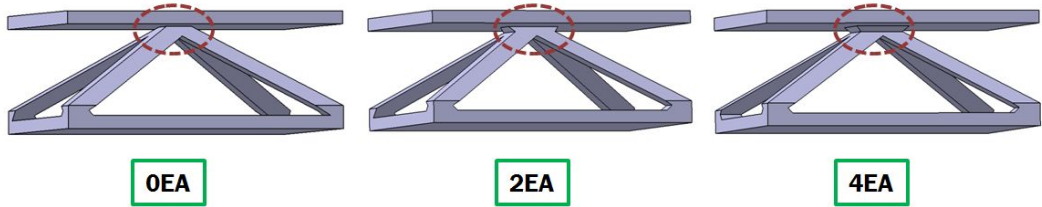


Fig. 10 The area of welding of initial imperfections on the weld zone

추가적인 접합면적인 경우, 설계 명칭의 편의상 내부구조체에 용접부가 설계된 면의 개수에 따라 용접이 정확히 이루어 지지 않은 용접 설계는 0개, 내부구조체의 절반 정도의 접합 면적이 용접이 되어 있는 용접 설계는 2개, 그리고 마지막으로 외판과 내부구조체간의 정확히 용접이 이루어져 용접면이 내부구조체를 둘러싸고 있는 용접 설계는 4개 라고 명명하기로 한다.

접합면적에 발생할 수 있는 용접부를 설계할 때, 설계의 편의 등의 이유로 내부구조체 (Strut) 에서 외판까지 수직방향으로 직선거리를 이어 직사각형의 용접면적을 설계를 하였으며, 외판에 접합/부착된 용접부의 면적은 실제 낙하 충격 실험에서 사용된 시편에 적용된 용접 직경 거리를 50 회 실측한 후 나온 평균값인 1.06 mm 으로 Fig. 11 와 같이 설계 하였다.

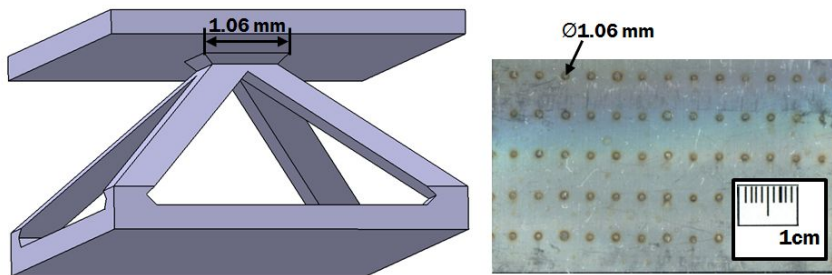


Fig. 11 The welding modeling through actual measurement of the weld zone imperfections on the impact specimen

제 3 장 초경량 금속 샌드위치 판재에 대한 3차원 유한요소 해석

제 1 절 결함을 포함한 트러스 심재를 가진 금속 샌드위치 판재의 3차원 유한요소 해석 방법

1. 유한요소 해석방법 및 모델링

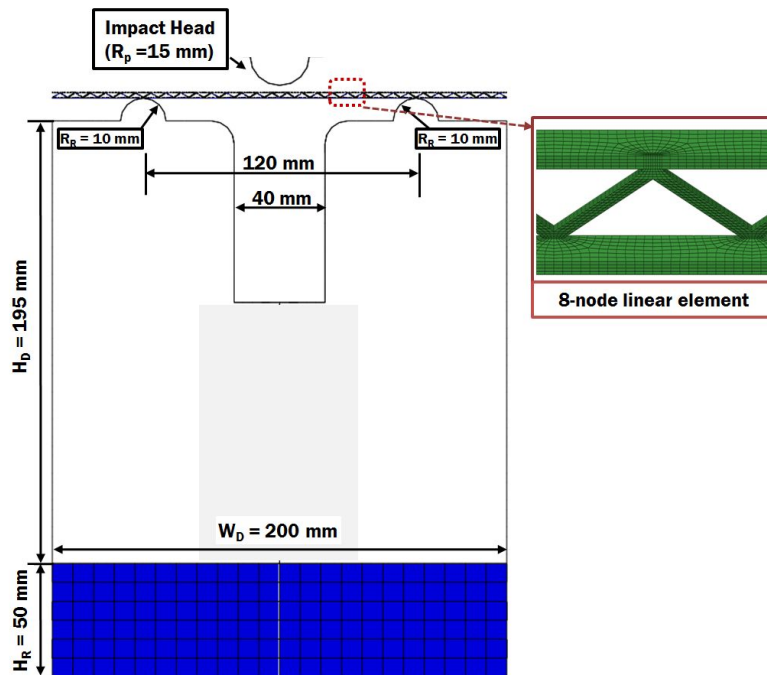


Fig. 12 FE model of the impact analysis of sandwich panel

본 연구에서는 트러스 심재를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재의 내충격 특성을 분석하기 위하여 Fig. 12 와 같이 평면변형 경계조건에서 내충격 해석을 수행하였다. 평면변형 경계조건은 시편의 국부적인 부분의 변형이 아닌 시편 중앙 전체의 변형을

유도하기 때문에 길이방향의 변형이 폭 방향으로 유사한 경향으로 변형이 일어난다. 그리고 평면 변형 경계조건에서 해석될 충격 시편을 전체적으로 모델링 한다면 다수의 요소들을 생성해야하기 때문에 단위 셀 크기의 한 줄만 유한요소 해석을 하여 시편 제작 시 발생한 내부구조체 및 용접부의 초기 결함이 충격발생 시 시편 중앙부의 변형 형상 및 내충격특성에 미치는 영향을 분석하였다.

평면 변형 경계조건에서 트러스 심재를 가진 금속 샌드위치 판재의 내충격 특성 분석을 위하여 수행한 유한요소해석 모델의 단위 셀은 Fig. 13 와 같이 설계하였다.

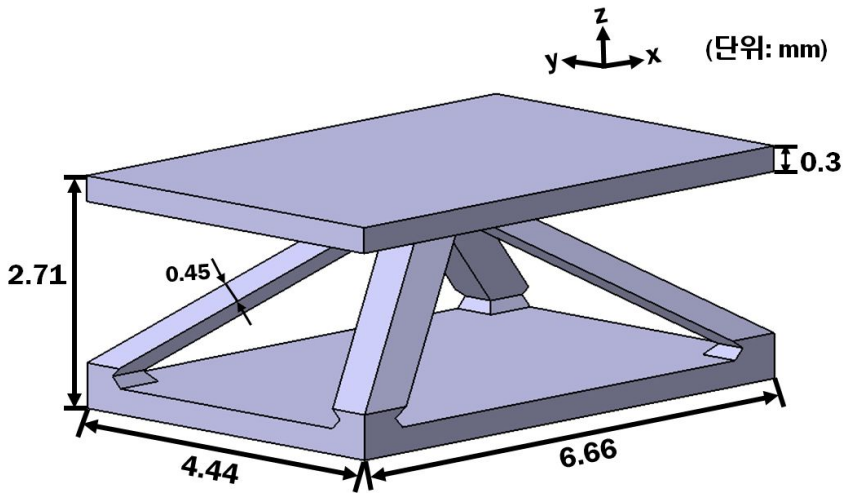


Fig. 13 Unit-cell modeling of initial imperfections on the sandwich panel

사용한 유한요소해석 방법은 충격 시 충격 헤드가 시편에 부딪혀 발생하는 순간적인 응력 전달 및 시편의 거동 현상과 충격 시 발생할 수 있는 접촉 문제들을 해석하기에 효율적인 외연적 시간적분 유한요소법 (Explicit time integration finite element method) 을 사용하였다. 유한요소 모델링 및 해석은 ABAQUS V6.5 상용 프로그램을 이용하여 수행하였다. 충격헤드 및 다이 밑에 위치해 있는 고무의 경우 해석 시간의 절약을 위하여 축약형 모델로 제작 하였으며, 충격 시편의 경우 앞에서 언급했던 대로 한 줄만 제작하였다.

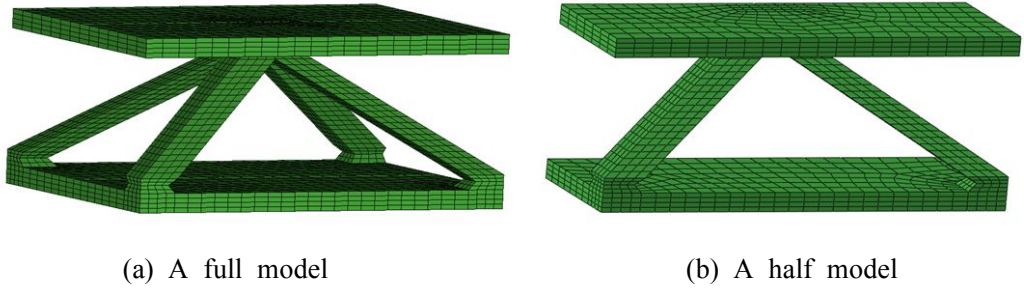


Fig. 14 Finite element model of the sandwich panel. (a) A full model (b) A half model

또한, 해석에서 사용된 모델링의 경우 내부구조체 및 외판이 폭 길이의 중앙부를 기준으로 대칭이며, 해석시간의 감소와 메모리의 최소화를 위해 Fig. 14 (b) 와 같이 1/2 형태의 모델링 하였다.

충격 시편의 모델링은 외판과 내부구조체의 경우 8 절점 육면체 솔리드 요소 (8-node linear element) 로 격자를 생성하였다. 또한, 충격 부분의 변형 및 거동 특성을 정확히 분석하기 위하여 충격헤드와 외판이 서로 맞닿는 부분의 경우 그렇지 않은 부분보다 약 3 배 정도 더 많은 격자수를 생성하였다. 충격헤드는 마찰력을 제외한 나머지 조건을 충격 실험과 동일하게 부여하였으며, 분산형 강체 요소로 모델링 하였다. 충격 시편에 의해 전달되는 충격 응력과와 고무까지 충격 응력을 전달하기 위하여 다이는 4절점 사각형 셸 (shell) 요소 (4-node linear element) 로 격자를 생성하였다. 그리고 다이 밑에 위치해 있는 고무의 경우 크기가 치구에 비해 4 배정도 크기 때문에 해석 시간 감소 및 해석 메모리를 최소화하기 위하여 8절점 육면체 요소 (8-node linear element) 로 된 축약형 모델을 사용하였다.

내충격 유한요소 해석에 사용되었던 유한요소 격자수는 Table 1 와 같다.

Table 1 Number of nodes and elements of three-dimensional finite element analysis

| | Specimen (EA) | Die (EA) | Rubber (EA) |
|---------|---------------|----------|-------------|
| Node | 52,620 | 4,998 | 1,986 |
| Element | 37,200 | 13,920 | 1,990 |

2. 3차원 내충격 유한요소해석의 경계조건 및 재료 물성

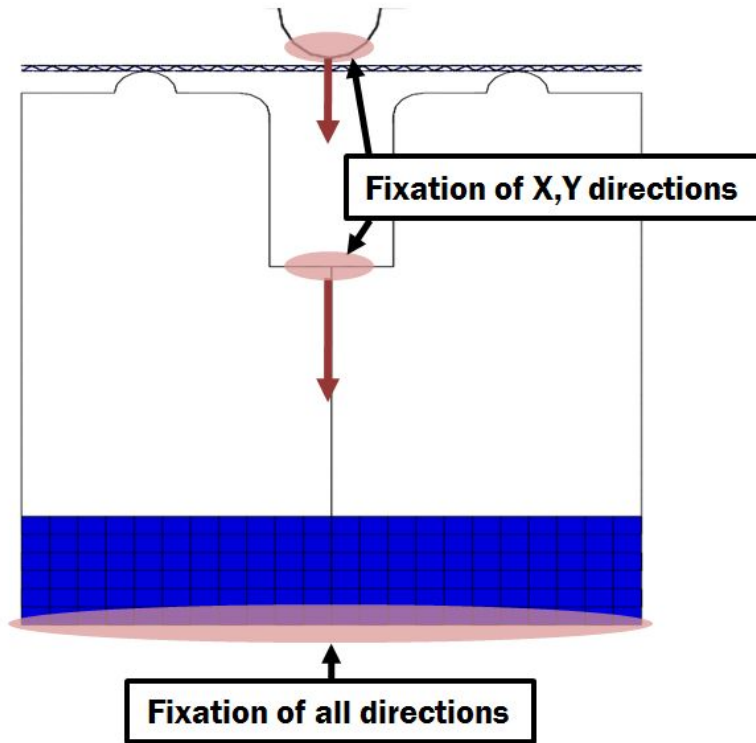


Fig. 15 Boundary condition of FE analysis

내충격 특성 분석을 위하여 유한요소해석에 적용한 경계조건은 Fig. 15 와 같이 적용하였다. 그림과 같이 충격 헤드와 다이의 경우 내충격 실험과 동일하게 하기위하여 Z 방향으로만 움직일 수 있게 하였으며, 고무의 밑 부분은 모든 방향으로 고정하였으며, 고무 옆면의 경우 Z 방향으로만 움직일 수 있게 하였다. 또한, 충격 헤드는 시편과 맞닿게 위치시켜 충격을 수행하였다.

충격 측성을 분석하기 위하여 ISB 판재의 외판과 트러스형 내부구조체는 탄소성 재료로 가정하였다. 외판의 재료는 스테인레스 (SUS 304) 이며, 내부구조체의 재료는 CSP 1N 이다.

해석에 사용할 재료의 물성을 구하기 위하여 3차원 형상의 금속 구조체를 가진 초경량 금속샌드위치 판재의 충격 특성을 분석하기 위하여 만능재료시험기와 고속인장

시험기를 사용하여 실험을 수행하였다. 만능재료시험기로 정적인 인장시험을 수행하여 Table 2 과 같이 외판과 내부구조체의 물성을 얻었다.²⁵⁾

Table 2 Material properties of stainless steel (SUS 304) and CSP 1N

| | SUS 304 (Sheet) | CSP 1N (Core) |
|------------------|-----------------|---------------|
| E (GPa) | 180 | 176 |
| ν | 0.28 | 0.32 |
| σ_t (MPa) | 667 | 302 |

3차원 유한요소법을 이용한 충격 해석 시 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 재료의 변형률 속도 효과가 고려된 재료의 물성 값이 필요하기 때문에 소성영역의 물성을 구하기 위하여 스테인레스 (SUS 304) 에 대한 고속인장실험을 수행하였다. 선행 연구에서는 고속 변형에서 변형률, 온도 및 가속도의 영향을 효과적으로 반영할 수 있는 Johnson-Cook 모델이 많이 사용되었지만²⁶⁾, 변형률 경화가 크다는 단점을 가지고 있기 때문에 실제 고속인장실험을 통하여 획득한 데이터를 Fig 16 와 같이 정확한 데이터를 변형률 속도에 따라 얻을 수 있었다.²⁵⁾

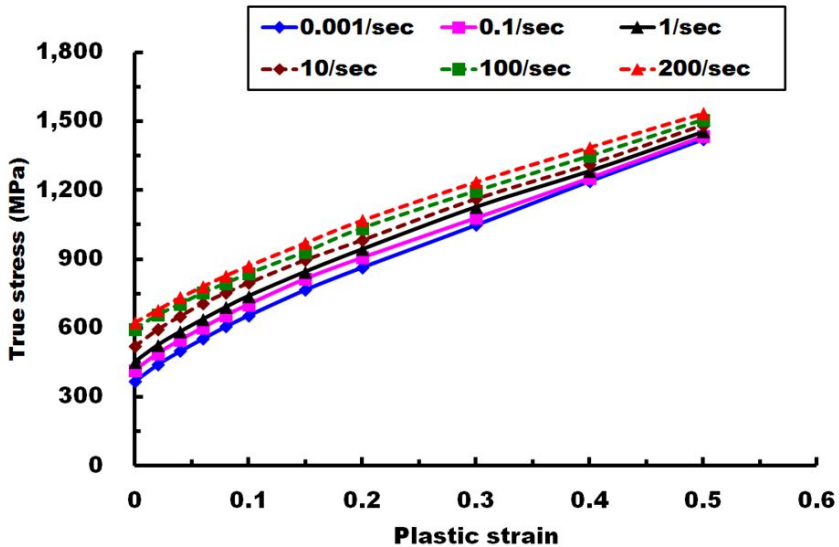


Fig. 16 Stress-Strain curves for stainless steel (SUS304)

제 2 절 트러스 심재를 가진 금속 샌드위치 판재의 설계에 따른 3차원 유한요소 해석 결과 및 고찰

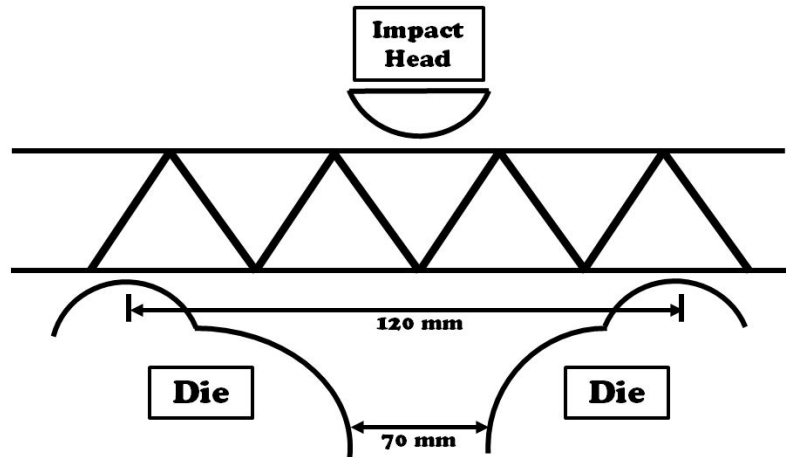


Fig. 17 Schematics for plane strain type of impact test

본 자유낙하 실험에 대한 충격 해석의 개념도는 Fig 17 과 같으며, 앞서 언급한 대로 시편을 올려놓은 시편 고정부에는 어떠한 고정 및 조건을 부여하지 않은 평면 변형 조건의 상태로 해석을 수행하였다. 또한, 선행 연구에서는 충격 헤드 무게 11.1 kg 과 충격헤드 직경 30 mm 를 사용하여 충격 낙하실험을 하였다. 이러한 낙하 실험을 통하여 폭이 각각 30 mm 와 60 mm 인 트러스 심재를 가진 ISB 판재 (SUS 304) 에 대하여 충격 높이 20 cm ($E_{in} = 11.01$ J) 에서 평면 변형형 내충격 특성 평가를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 충격 낙하 실험과 동일한 조건에서 내충격 특성을 비교/분석 하기 위하여 충격 높이와 충격 헤드 직경을 동일하게 설계를 하였다. Table 3 은 유한요소 해석에 사용된 ISB 판재의 설계 조건을 나타낸 것이다.

Table 3 Design of specimen for plane strain type of finite element analysis

| Specimen | width (mm) | Length (mm) | Thickness (mm) |
|-----------|------------|-------------|----------------|
| ISB panel | 2.22 | 100 | 2.71 |

1. 내부구조체의 초기결함 형태에 따른 충격해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 결함이 트러스십재를 가지는 ISB 판재의 내충격특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 평면 변형 경계 조건에서 직경 30 mm 의 충격 헤드를 이용하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

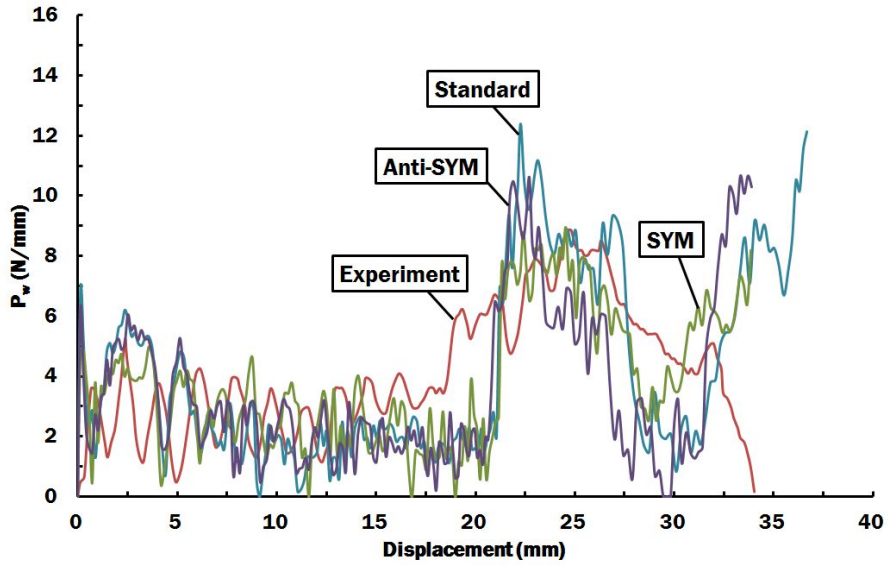
초기결함 형상을 가지는 트러스형 샌드위치 판재의 구조적인 최적 설계안을 도출하기 위하여 낙하충격 실험을 통해 결함에 따라 서로 다른 기계적 충격거동 특성을 검증할 수 있었으며, 이를 위해 하중 부가 시 내부구조체에 발생할 수 있는 좌굴 모드에 따른 유한요소 해석 결과에 대하여 비교/분석 하였다.

해석 시 사용한 모델은 외판과 내부구조체의 접합부인 용접부 면적이 없을 때에 대하여 Standard-mode, Symmetry-Mode 와 Anti-Symmetry-Mode 의 3가지 좌굴 모드이며, 충격 높이 20 cm 에서 실제 실시한 낙하 충격 실험과 해석 결과를 비교/분석 하였다.

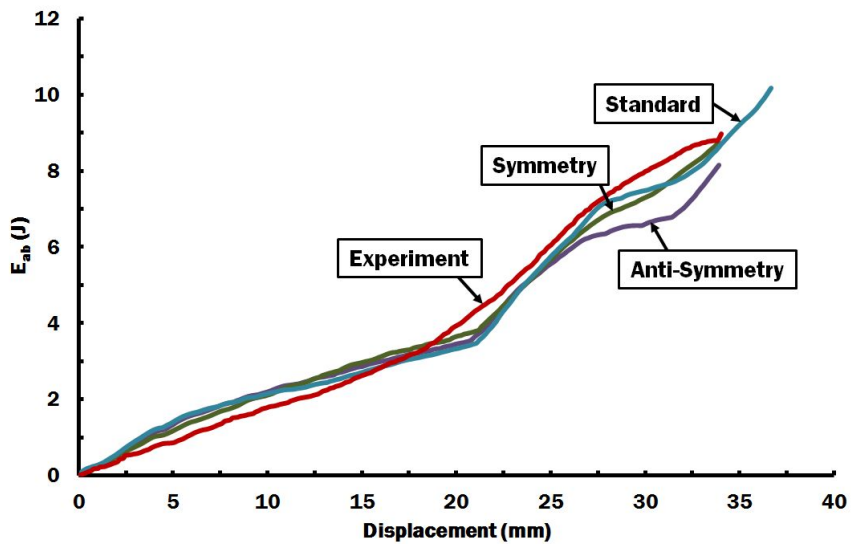
Table 4 Comparison of characteristic data of impact analysis for shape of initial imperfections of ISB panels in the plane strain boundary conditions (H=20 cm)

| Mode | $E_{in}(J)$ | $E_{ab}(J)$ | $\chi(\%)$ | $P_{w,max}(N/mm)$ | $\delta_{t=0.015}(mm)$ |
|------------|-------------|-------------|------------|-------------------|------------------------|
| Experiment | 22.01 | 8.98 | 40.80 | 8.83 | 34.02 |
| Standard | 22.01 | 10.16 | 46.16 | 12.39 | 36.68 |
| SYM | 22.01 | 8.74 | 39.70 | 8.96 | 33.85 |
| Anti-SYM | 22.01 | 8.15 | 37.03 | 10.67 | 33.90 |

Table 4 는 평면 변형 경계조건에서 충격 높이 20 cm 일 때 수행한 결과를 충격 입력에너지, 최대 하중에서 나타난 충격 흡수에너지, 충격에너지 흡수율, 최대하중, 충격 시간 0.015 sec에서 최대 변위 순서로 나타낸 3차원 유한요소 해석 결과이다.



(a) Force - deflection curves



(b) Absorbed energy - deflection curves

Fig. 18 Influence of initial imperfections of the inner structures on the fore - deflection and the absorbed energy - deflection curves of ISB panel with Truss core

Fig. 18 (a) 에서 내부구조체의 초기형태에 따른 판재의 변형량을 비교해 보면 다른 두 판재에 비해 Standard-Mode 에서 많은 변형을 확인 할 수 있었다. 특히, Sym 와

Anti-Sym의 최대변위가 거의 비슷하게 나타나는데 비해, Standarde 에서 36.68 mm의 최대 변위량을 보였다. 이러한 현상에서 Standard의 경우 내부구조체의 결합이 없이 전체적인 변형이 유도되지만, Sym와 Anti-Sym의 경우 결합이 있는 내부구조체에 충격 헤드에 의해 전달되어지는 하중에 의해 국부적인 변형이 발생하면서 이와 같은 처짐량 차이가 발생된다고 판단된다.

또한, Fig 18 (b)에서 최대 하중이 발생할 때까지의 에너지 흡수 특성을 보면, Anti-Sym가 다른 두 판재의 경우보다 8.15 J의 가장 적은 에너지 흡수 특성을 확인해 볼 수 있었다. 이는 결합 형태가 곡선형으로 복잡한 내부구조체일 수록 최대 하중까지 발생하는 변형량 적기 때문에 충격 흡수 에너지가 낮음을 확인 할 수 있다. 상대적으로 단순한 국부적인 결합이 있는 Sym과 결합이 없는 Standard의 내부구조체 변형으로 인해 충격 흡수에너지가 더 우수하다고 사료된다.

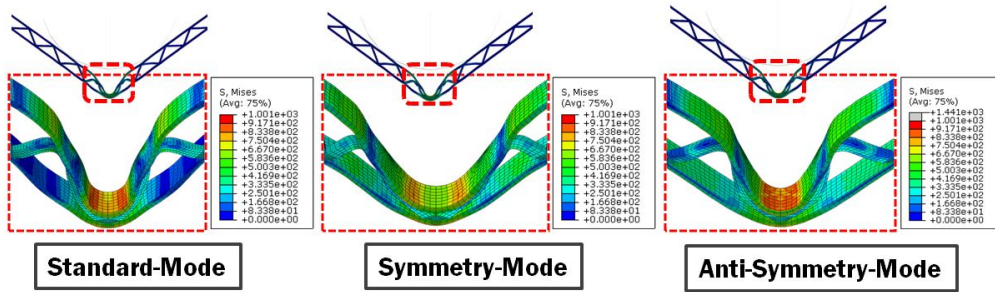


Fig. 19 Variation of Effective stress distributions for shape of initial imperfections at 0.015 sec

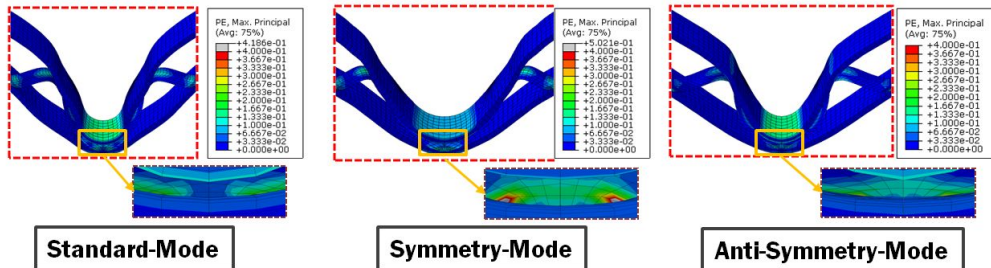


Fig. 20 Variation of Principal strain distributions for shape of initial imperfections at 0.015 sec

Fig. 19 와 Fig. 20 은 샌드위치 판재의 초기 좌굴 모드에 대하여 유효 응력 분포와 주변형률 분포를 나타낸 그림이다. Sym 의 경우 충격헤드와의 충돌 시 샌드위치 판재의 길이 방향으로 충격하중을 분산시킴으로써 시편 중앙부의 하중이 낮게 분포되는 것을 확인 할 수 있었다. 이에 반해 Anti-Sym 의 초기 좌굴 모드 경우 충격 시간 0.015 sec 일 때, 33.90 mm 의 변형이 발생되면서 샌드위치 판재의 중앙부에 최대응력이 발생 되었으며, Sym 의 경우 같은 지점에서 최대 변형률 분포영역이 집중되는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 하중 부가 시 활처럼 휘어진 초기 결함 형태의 내부구조체에 가해지는 압력이 발생되며, 국부적인 변형으로 인해 Fig. 21 과 같이 초기 형상이 늘러지고 비틀어지면서 최대 변형이 일어난 것이라 사료된다.

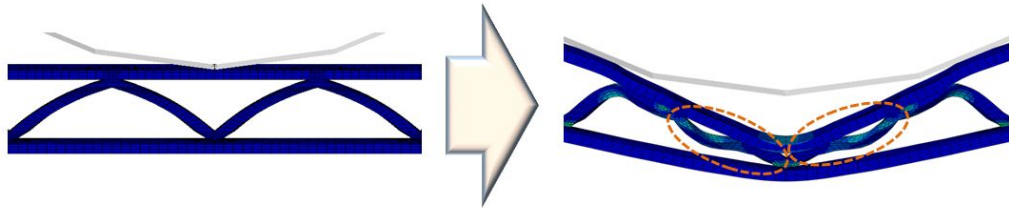


Fig. 21 Change of Sym-Mode strut during the load on ISB panels

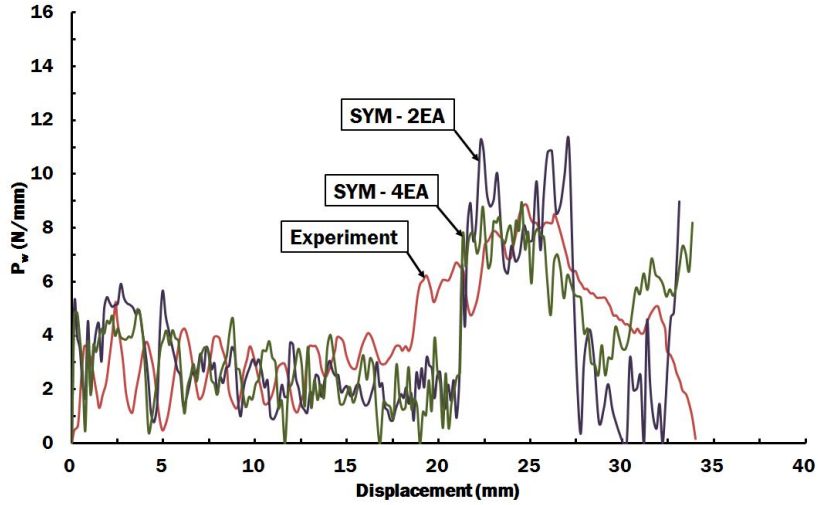
2. 내부구조체의 초기결함 개수에 따른 충격해석 결과 및 고찰

해석 시 사용한 모델은 외판과 내부구조체의 접합부인 용접부 면적이 없을 때에 대하여 Symmetry-Mode 와 Anti-Symmetry-Mode 의 2가지 좌굴 모드이며, 각 모드별로 결함이 발생한 내부구조체의 개수가 각각 2개 일 때와 4개 일 때 나타나는 해석 결과를 충격 높이 20 cm 에서 실시한 낙하 충격실험 결과와 비교/분석 하였다.

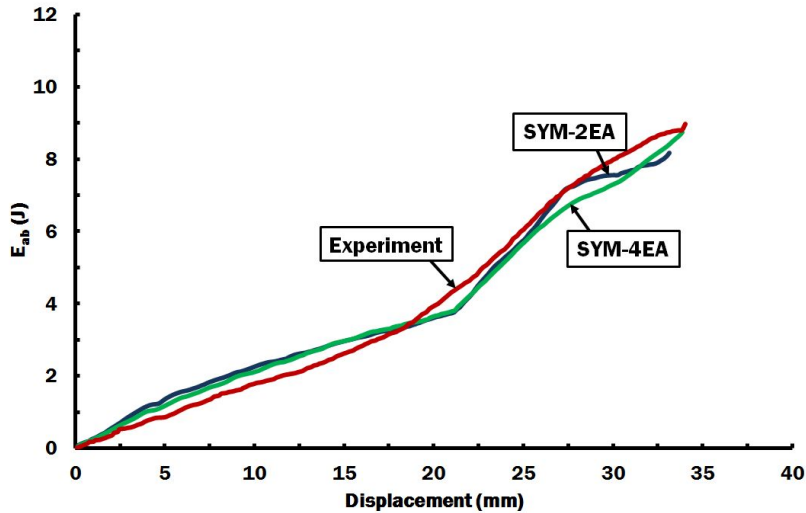
3차원 충격 유한요소 해석 결과 Table 5 과 같이 충격 입력에너지, 충격 흡수에너지, 충격 에너지 흡수율, 최대 하중 및 변위에 대한 결과를 확인 할 수 있었다.

Table 5 Comparison of characteristic data of impact analysis for the number of initial imperfections of ISB panels in the plane strain boundary conditions (H=20 cm)

| Mode | $E_{in}(J)$ | $E_{ab}(J)$ | $\chi(\%)$ | $P_{w,max}(N/mm)$ | $\delta_{t=0.015}(mm)$ |
|-------------|-------------|-------------|------------|-------------------|------------------------|
| Experiment | 22.01 | 8.98 | 40.80 | 8.83 | 34.02 |
| SYM 2개 | 22.01 | 8.16 | 37.07 | 11.28 | 33.12 |
| SYM 4개 | 22.01 | 8.74 | 39.70 | 8.96 | 33.85 |
| Anti-SYM 2개 | 22.01 | 9.81 | 44.57 | 10.12 | 37.77 |
| Anti-SYM 4개 | 22.01 | 8.15 | 37.03 | 10.67 | 33.90 |



(a) Force - deflection curves



(b) Absorbed energy - deflection curves

Fig. 22 Influence of the number of initial imperfections of the inner structures on the force - deflection and the absorbed energy - deflection curves (Symmetry-Mode)

Sym 의 좌굴 모드를 가지는 내부구조체의 개수에 따른 충격 에너지 흡수에 대하여 비교한 결과, Fig. 22 와 같이 샌드위치 판재의 단위 셀에 대하여 결함을 가진 내부구조체 개수가 4개인 경우, 2개일 경우보다 낮은 충격 하중을 보이지만, 충격시간 0.015 sec 일 때의 변위량은 높은 것으로 확인이 되었다. 이는 초기의 형상 결함이 받

생한 내부구조체의 개수가 4개 일 때, 충격헤드의 하중으로 인해 전체적인 변형을 보이는 반면, 2개의 내부구조체 결합을 가지는 판재의 경우 국부적으로 무너진 내부구조체의 변형으로 인해 발생된 것으로 판단된다.

또한, 충격 흡수 에너지의 경우 4개의 결합이 포함된 내부구조체를 가지는 판재가 2개의 내부구조체 결합을 가지는 판재와 약 0.6 J 정도의 근소한 차이를 보이고 있으며, 4개의 내부구조체 결합을 가지는 판재에서 약 2.7 % 높은 흡수율 및 약 0.7 mm 많은 변위 특성을 보여주고 있다. 이는 4개의 내부구조체 결합을 가진 판재가 구조적 초기결함으로 인한 모델 전체의 변형을 유도하는 반면, 2개의 내부구조체 결합을 가지는 판재의 경우 국부적인 결함의 영향으로 인한 충격 특성을 보이는 것을 확인 할 수 있었다.

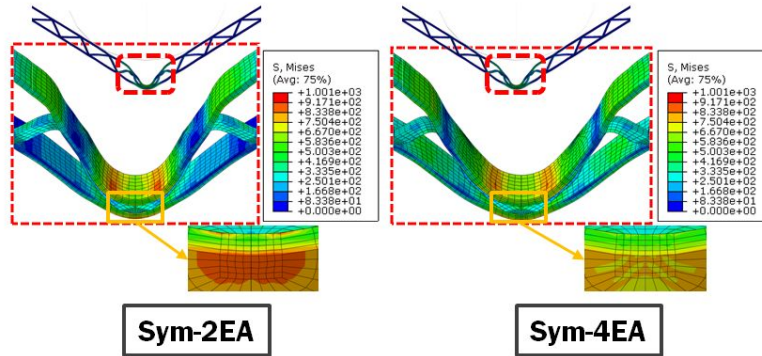


Fig. 23 Variation of Effective Stress distributions for the number of initial imperfections at maximum stress (Symmetry-Mode)

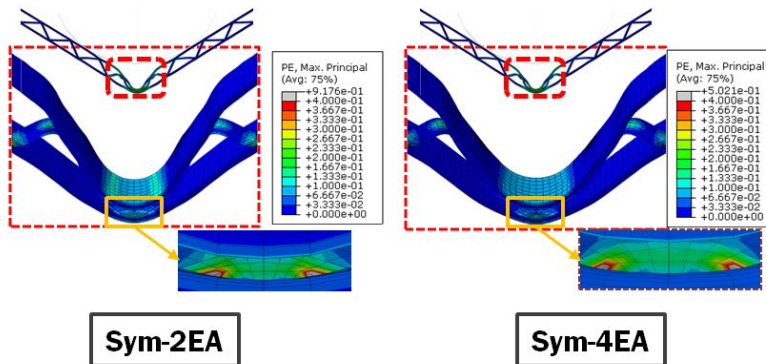


Fig. 24 Variation of Principal strain distributions for the number of initial imperfections at maximum stress (Symmetry-Mode)

Fig. 23 과 Fig. 24 는 충격 부가 시 금속 샌드위치 판재의 해석시간 0.015 sec 일 때, 유효응력 분포 및 최대 변형률 분포에 대하여 나타낸 결과이다. Sym 에 대하여 내부구조체의 결합 개수가 2개일 경우, 4개일 경우에 비해 0.015 sec 에서 최대 유효 응력의 영역이 현저히 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 내부구조체의 결합부분과 비결합 부분의 조합으로 인해 하중 부가 시 내부구조체가 무너지면서 응력이 분산이 되지 못하고 시편 중앙 하단부에 집중되어진 것으로 판단된다.

또한 주변형률을 비교해 보면, Sym 의 좌굴모드에서 2개의 내부구조체 결합을 가지는 판재에서 약 0.9176 의 다소 높은 변형률을 확인 할 수 있었다. 이는 Fig 25 와 같이 내부구조체의 결합부분과 비결합이 조합된 부분의 경계지역에서 국부적인 변형에 의해 결합부분이 심하게 비틀어지는데 비해 비결합 부분이 상대적으로 적은 변형이 발생되어 비틀어진 과정에서 일어난 현상이라고 사료된다.

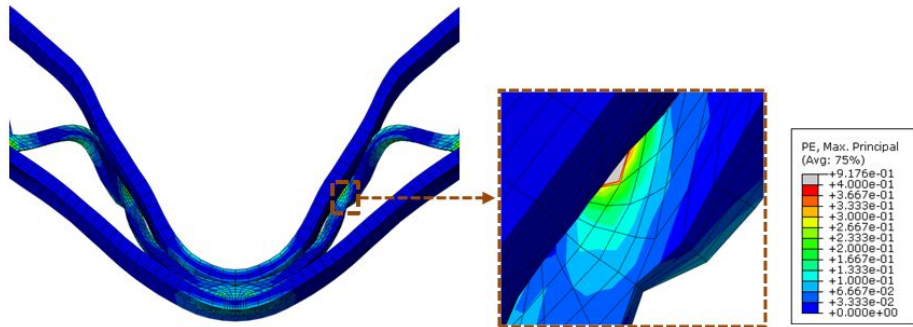
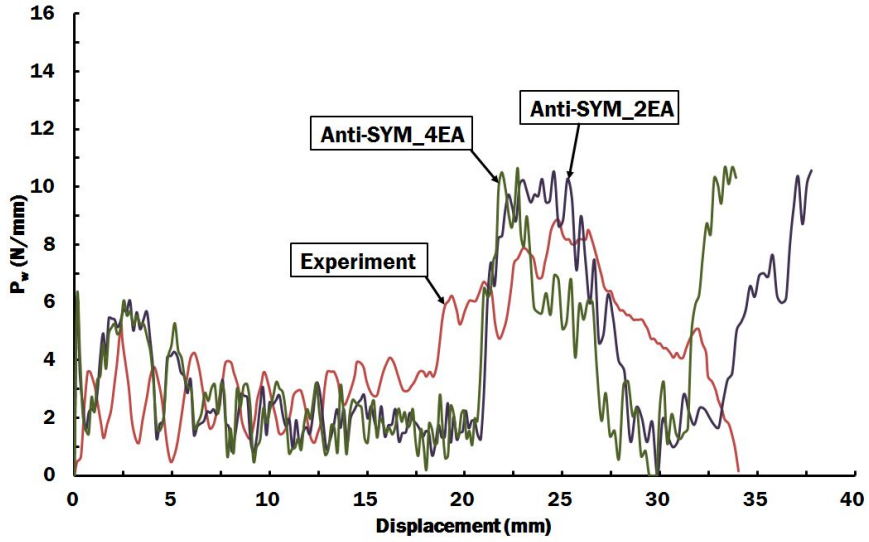
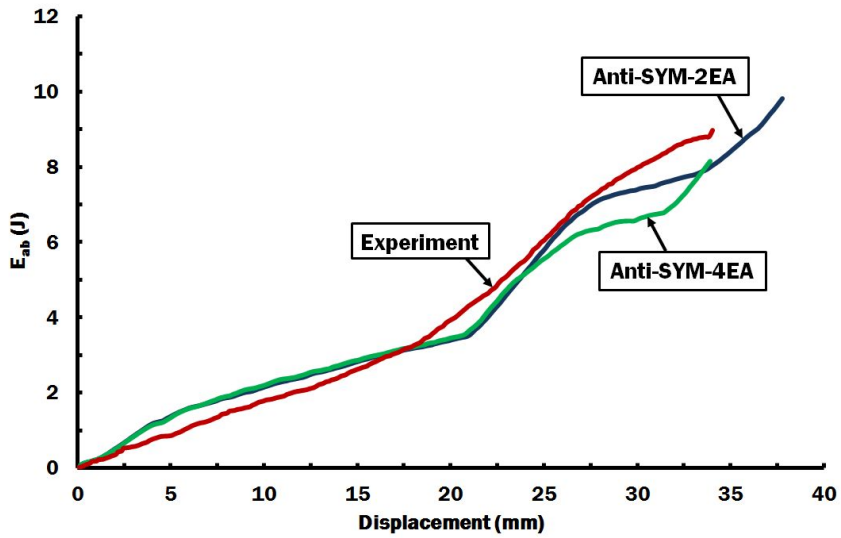


Fig. 25 The section of maximum principal strain for Sym-Mode (2EA) at 0.0015 sec



(a) Force - deflection curves



(b) Absorbed energy - deflection curves

Fig. 26 Influence of the number of initial imperfections of the inner structures on the fore - deflection and the absorbed energy - deflection curves (Anti-Symmetry-Mode)

Anti-Sym 의 좌굴 모드의 경우, Fig. 26 와 같이 결함이 있는 내부구조체가 2개인 모델이 4개의 내부구조체 결함을 가지는 판재에 비해 변위량이 약 4 mm 정도 충격

시간이 0.015 sec 일 때 높게 나타났는데, 이 현상은 내부구조체의 결함이 2개인 판재에서 상대적으로 부분적인 적은 결함 부위로 인해 하중 부가 시 버티지 못하고 내부구조체가 국부적으로 쉽게 무너져 나온 결과라고 사료된다.

최대 하중이 발생할 때까지의 에너지 흡수 특성을 보면, 내부구조체의 구조적 결함이 2개인 판재가 4개의 내부구조체 결함을 가진 판재의 경우보다 우수한 에너지 흡수 특성을 확인 해 볼 수 있었다. 이는 결함 형태가 곡선형으로 복잡한 내부구조체 일때, 구조적 결함이 부분적으로 형성이 되어있는 결함이 2개인 내부구조체를 가지는 모델에서 높은 충격 흡수에너지 및 흡수율을 보인 것으로 사료된다. 반면, 최대 하중이 결함의 내부구조체가 4개인 판재에서 약간 높게 나타났다. 이는 충격 헤드로부터 전달되는 하중에 대하여 결함을 가진 내부구조체 모두가 무너지면서 충격에너지를 흡수한 뒤, 판재의 전체적인 변형을 유도된 현상이라고 판단된다.

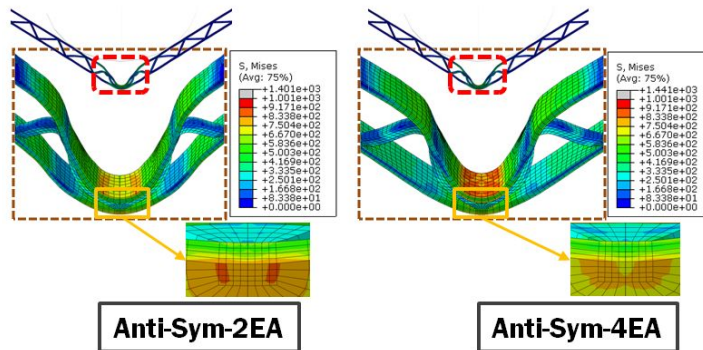


Fig. 27 Variation of Principal strain distributions for the number of initial imperfections at maximum stress (Symmetry-Mode)

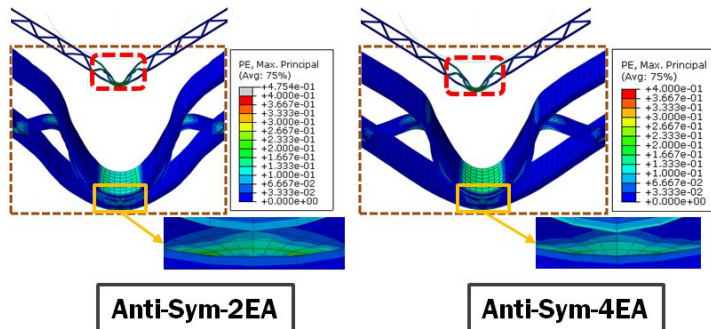


Fig. 28 Variation of Principal strain distributions for the number of initial imperfections at maximum stress (Symmetry-Mode)

Fig. 27 과 Fig. 28 은 Anti-Sym 의 내부구조체 결합 개수에 대하여 하중 부가 시 0.015 sec에서 발생한 최대 유효응력 및 최대 변형률을 나타낸 그림이다. 결합의 내부구조체를 2개 가지는 판재일 경우, 4개 모두 가지는 판재에 비해 시편 중앙부의 상단 면에서 응력 집중 분포가 감소되는 것을 확인할 수 있었으나, 시편 중앙부의 하단에서는 4개의 판재보다 다소 높은 응력이 발생된 것을 확인할 수 있었다. 이는 하중 부가 시 응력이 시편 밑 방향으로 전달이 되면서 분산이 되면서 내부구조체의 초기 형상에 의해 오는 국부적인 변형에 따라 발생된 것으로 사료된다.

또한, 주변형률의 경우 2개인 판재와 4개인 판재의 경우 시편 중앙부 부근에서 거의 비슷한 경향을 보이고 있으나, Fig. 29 와 같이 시편중앙에서 약간 떨어진 Strut 밑 단에서 최대 변형을 보이고 있었다. 이러한 현상은 내부구조체의 결합부분과 비결합이 조합된 부분의 경계지역에서 국부적인 변형에 의해 결합부분이 심하게 비틀어지는 과정에서 일어난 현상이라고 사료된다.

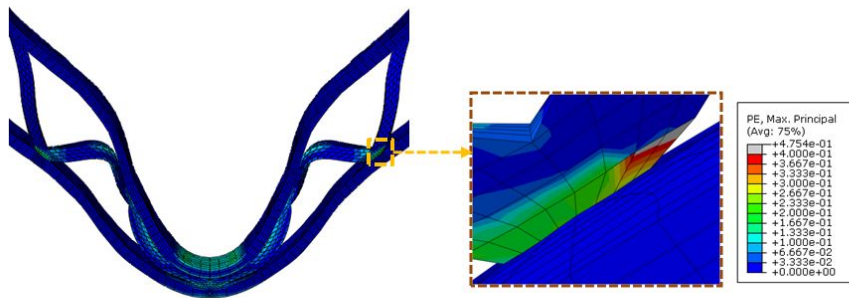


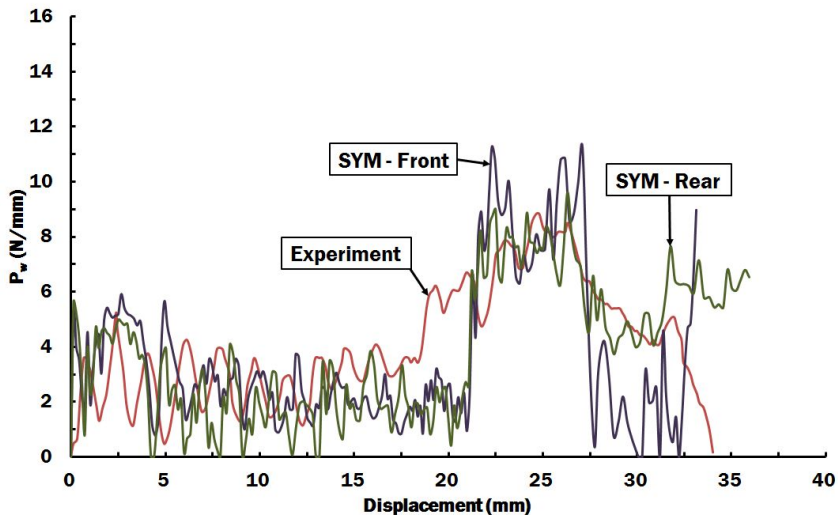
Fig. 29 The section of maximum principal strain for Anti-Sym-Mode (2EA) at 0.0015 sec

3. 내부구조체 초기결함의 발생위치에 따른 충격해석 결과 및 고찰

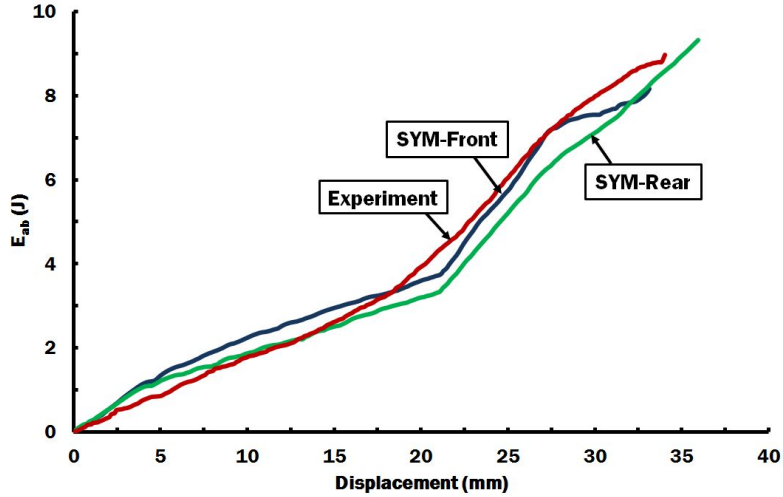
내부구조체의 초기 결함에 따른 유한요소해석 시 사용한 모델은 외판과 내부구조체의 접합부인 용접부 추가된 면적이 없을 때에 대하여 (용접부 0개) Symmetry-Mode 와 Anti-Symmetry-Mode 의 2가지 좌굴 모드이며, 각 모드별로 결함이 발생한 내부구조체의 위치가 단위셀의 중앙부를 기준으로 앞쪽(Front) 과 뒤쪽(Rear) 에 나타나는 해석 결과를 충격 높이 20 cm 에서 실시한 낙하 충격실험 결과와 비교/분석 하였다.

Table 6 Comparison of characteristic data of impact analysis for the positions of initial imperfections of ISB panels in the plane strain boundary conditions (H=20 cm)

| Mode | $E_{in}(J)$ | $E_{ab}(J)$ | χ (%) | $P_{w,max}$ (N/mm) | $\delta_{t=0.015}(mm)$ |
|----------------|-------------|-------------|------------|--------------------|------------------------|
| Experiment | 22.01 | 8.98 | 40.80 | 8.83 | 34.02 |
| SYM Front | 22.01 | 8.16 | 37.07 | 11.28 | 33.12 |
| SYM Rear | 22.01 | 9.32 | 42.34 | 9.62 | 35.95 |
| Anti-SYM Front | 22.01 | 9.81 | 44.57 | 10.12 | 37.77 |
| Anti-SYM Rear | 22.01 | 8.73 | 39.66 | 15.49 | 33.98 |



(a) Force - deflection curves



(b) Absorbed energy - deflection curves

Fig. 30 Influence of a location of initial imperfections of the inner structures on the fore - deflection and the absorbed energy - deflection curves (Symmetry-Mode)

Fig. 30 은 내부구조체의 구조적인 초기 결함의 발생 위치에 따른 Sym 에 대한 하중 - 변위선도와 충격 흡수에너지 - 변위 선도를 나타낸 것이다. 결함이 앞쪽에 발생한 Front 판재에서 시편이 충격 후 다이 모서리에 닿아 하중이 높게 튀어 오른 후 충격 시간 약 0.0125 sec 에서 다시 튀어 올라가는 것을 볼 수가 있었다. 이는 충격이 일어나 1차 최대하중이 발생한 후, 판재가 국부적으로 변형이 일어나면서 앞쪽에 구조적인 결함이 포함된 내부구조체 상단에 다시 한 번 닿음으로써 발생된 것으로 사료된다.

또한, 최대 하중이 발생할 때까지의 에너지 흡수 특성을 보면, 판재를 지지해주는 내부구조체의 앞쪽에서 결함이 발생된 Front 판재가 내부구조체 결함이 뒤쪽에 발생된 Rear 판재의 경우보다 우수한 에너지 흡수 특성을 확인 해 볼 수 있었다. 이 현상은 내부구조체에 영향을 주는 구조적 결함이 앞쪽에 형성됨으로써, 충격을 주는 부분에서 국부적인 결함이 있는 앞쪽으로 내부구조체의 급격한 무너짐이 발생함과 동시에 그에 따른 국부적인 변형이 일어나는 것으로 사료된다. 반면, 앞쪽에 내부구조체의 결함이 있는 Rear 모델의 경우, 결함 변형 위치가 전체적인 판재의 변형을 유도하기 때문에 충격 흡수 에너지 및 흡수율, 변위량이 낮은 충격 특성을 확인할 수 있었다.

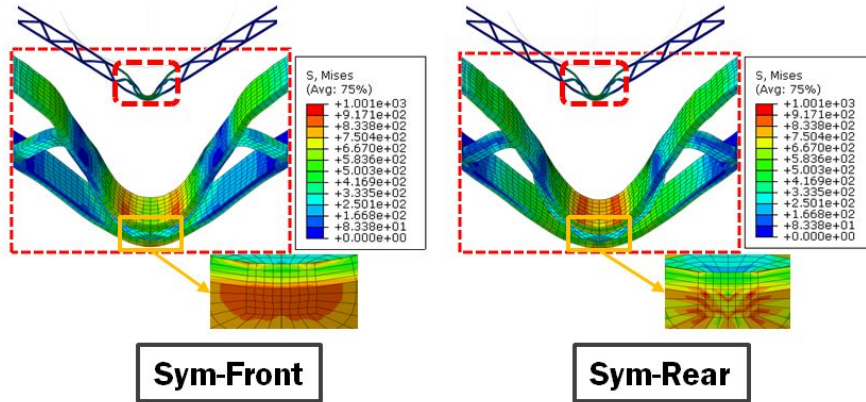


Fig. 31 Variation of Effective stress distributions for the position of initial imperfections at loading maximum stress (Symmetry mode)

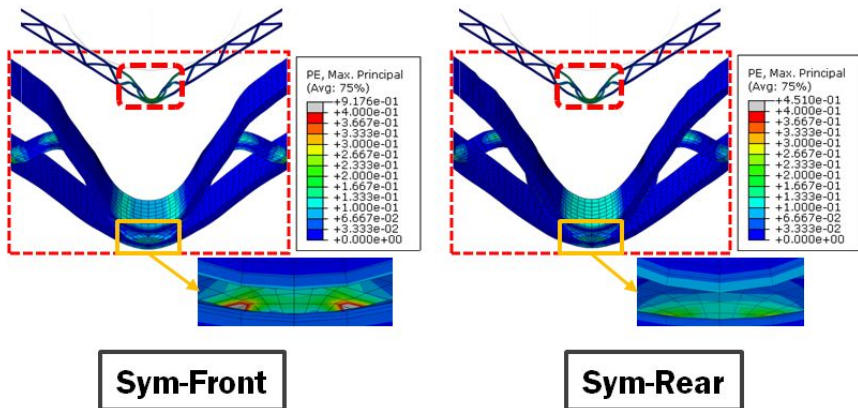
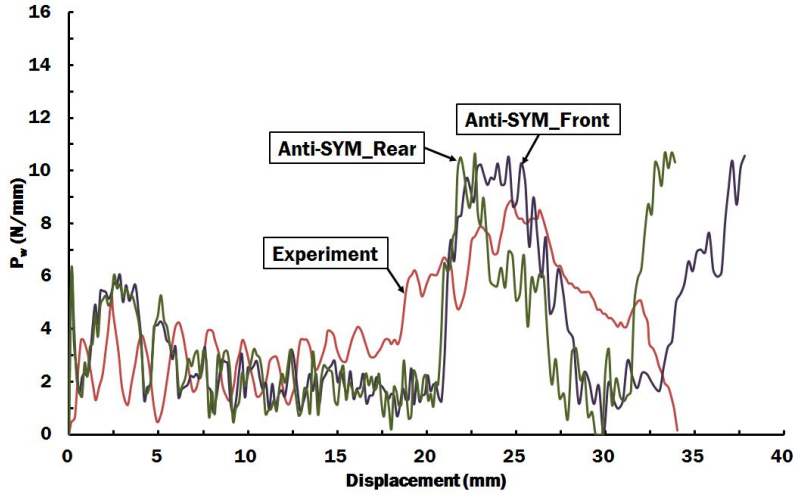
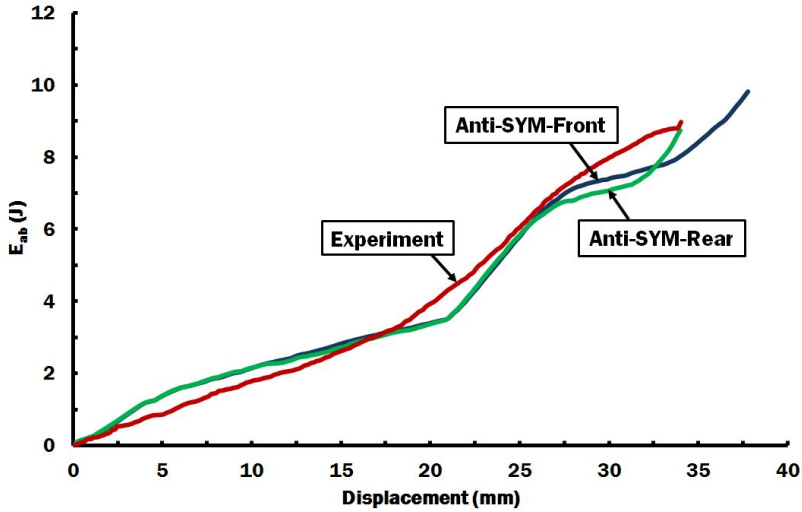


Fig. 32 Variation of Principal strain distributions for the position of initial imperfections at loading maximum stress (Symmetry mode)

Fig. 31 과 Fig. 32 는 Sym 에 대하여 내부구조체 결함의 위치에 따른 0.015 sec 에서 나타난 최대유효응력과 최대 변형률을 나타낸 그림이다. Sym 의 Front 판재 경우, Rear 판재에 비해 외판 중앙부의 상단에서 응력이 감소됨을 알 수 있었지만, 시편 하단부에서 응력집중 분포를 확인할 수 있었다. 또한, 국부적인 변형으로 인한 주변형률의 분포는 내부구조체의 결함 위치에 따른 영향을 확인할 수 있었다. 0.015 sec 에서 최대 발생된 주변형률의 위치는 Front 와 Rear 판재의 동일한 위치인 시편 중앙에서 떨어진 Strut 최하단 접촉부에서 발생되었다.



(a) Force - deflection curves



(b) Absorbed energy - deflection curves

Fig. 33 Influence of the number of initial imperfections of the inner structures on the fore - deflection and the absorbed energy - deflection curves (Anti-Symmetry-Mode)

Anti-Sym의 좌굴 모드에 대한 충격특성을 보면 Fig. 33 과 같이 시편 중앙부를 기준으로 앞쪽에 내부구조체의 결함이 있는 Rear 판재가 뒤쪽에 내부구조체 결함을 가지는 Front 판재에 비해 변위량이 약 4.2 mm 정도 높게 나타났다. 이는 뒤쪽에 생긴 내

부구조체의 결합이 샌드위치 판재에 하중 부가 시 부분적인 내부구조체의 무너짐을 가져오면서 국부적인 변형을 유도하고 높은 변위량이 발생하는 것으로 판단된다. 에너지 흡수 특성을 살펴보면, 내부구조체의 결합이 앞쪽에 발생한 Rear 판재가 뒤쪽에 발생한 Front 판재의 경우보다 우수한 에너지 흡수 특성을 확인 해 볼 수 있었다. 이 현상은 시편 제작 시 발생하는 초기 결함 형태에 대하여 하중 부가 시 나타나는 좌굴모드가 Anti-Sym 처럼 곡선형으로 복잡한 내부구조체 일 때, 하중이 발생하는 부분에서 국부적인 변형이 일어나면서 시편 중앙부를 기준으로 구조적 결합이 있는 부분의 내부구조체가 무너지고, 이에 따라 충격 하중이 분산 되어 충격에너지가 판재의 변형특성에 의해 흡수되는 현상이라 판단된다.

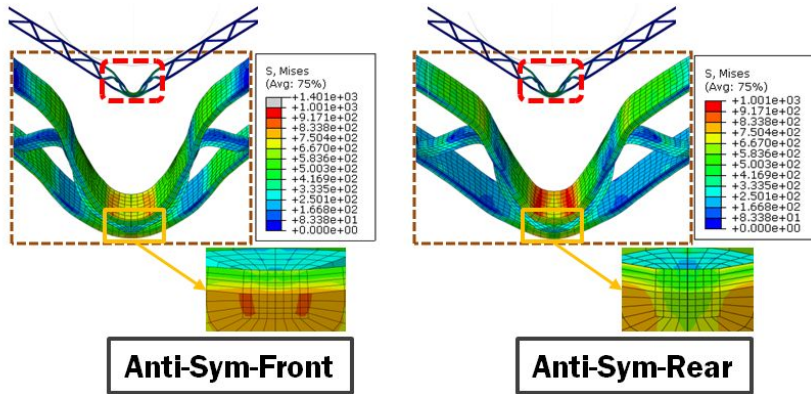


Fig. 34 Variation of Effective stress for shape of positions of initial imperfections at $t=0.015$ sec (Anti-Symmetry mode)

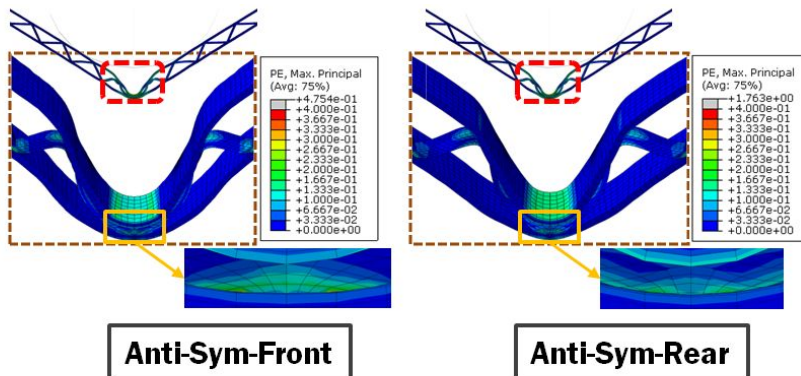


Fig. 35 Variation of Principal strain for shape of positions of initial imperfections at $t=0.015$ sec (Anti-Symmetry mode)

Fig. 34 와 Fig. 35 는 Anti-Sym 에 대하여 내부구조체 결합의 위치에 따른 0.015 sec 에서 나타난 최대유효응력과 최대 변형률을 나타낸 그림이다. Rear 판재의 경우, Front 판재에 비해 하중 부가 시 외판 상단부에 응력이 집중 분포 되어있음을 확인 할 수 있었으며, Front 판재의 외판 상단부에 발생된 응력 집중이 샌드위치 판재의 길이 방향으로 하중 전달되어 충격 에너지가 감소되었음을 판단할 수 있었다.

주변형률의 경우, 국부적인 대변형을 일으키는 시편 중앙부에서 거의 비슷한 경향의 주변형률을 보이고 있으며, Rear 판재의 시편 중앙으로부터 3 개의 단위 셀 만큼 떨어진 Strut 밑부분에서 갑작스런 내부구조체의 변형으로 가장 높은 변형률을 확인 할 수 있었다.

4. 용접부 부분의 접합면적에 따른 충격해석 결과 및 고찰

용접부의 접합면적에 따른 충격 해석 결과를 도출하기 위해 내부구조체의 초기 결함에 대한 해석과 동일한 충격 높이 20 cm 및 충격헤드를 적용하였으며, 해석 최대 시간은 0.015 sec 로 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

1) Standard-Mode

Table 7 Comparison of characteristic data of the number and shape of initial imperfections of ISB panels for the plane strain conditions of impact analysis (H=20 cm)

| Mode | $E_{in}(J)$ | $E_{ab}(J)$ | $\chi(%)$ | $P_{w,max}(N/mm)$ | $\delta_{t=0.015}(mm)$ |
|--------------|-------------|-------------|-----------|-------------------|------------------------|
| Experiment | 22.01 | 8.98 | 40.80 | 8.83 | 34.02 |
| weld zone 0개 | 22.01 | 10.16 | 46.16 | 12.39 | 36.68 |
| weld zone 2개 | 22.01 | 8.80 | 39.98 | 12.68 | 33.67 |
| weld zone 4개 | 22.01 | 9.17 | 41.66 | 12.71 | 33.38 |

Table 7 과 Fig. 36 은 내부구조체의 좌굴모드 중의 하나인 Standard 에 대하여 낙하 충격실험 결과와 용접부의 면적에 따른 해석결과를 정리한 것이다.

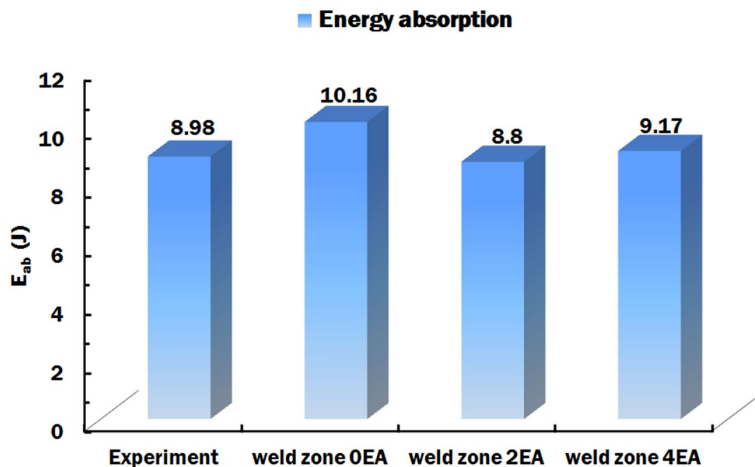


Fig. 36 Energy absorption on the weld zone area of standard mode

용접 결합 면적(개수)에 따른 충격 에너지 흡수에 대해 비교한 결과 Fig. 36 과 같이 충격 흡수 에너지의 경우 용접부 0개, 2개 및 4개의 모델에서 약 1.2 ~ 1.3 J 로써 약간의 차이를 보이고 있으나, 용접부 0개를 갖는 판재의 경우 하중을 지지해주는 면적이 적어 국부적인 변형이 크게 일어났다. 위의 결과로부터 용접부 접합 면적이 0개인 판재가 다른 두 판재에 비해 충격 및 변위 특성이 우수함을 알 수 있었으며, 용접부의 접합에 대하여 각 모델의 면적(개수)이 각 충격 에너지 특성에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.

용접부 2개 판재의 경우 하중으로 생긴 전단 응력을 내부구조체 양 측면에 접촉해 있는 용접부에 의해 지지해주면서 최대 하중이 발생 할 때까지 누적된 충격 흡수 에너지 및 0.015 sec 까지의 변위가 다른 두 판재에 비하여 비교적 낮게 측정이 되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 용접부 면적이 4개인 판재의 경우 충격 헤드로부터 부가된 하중이 추가로 용접된 내부구조체의 용접부 폭 방향으로 분산되지 못하고 용접부 2개인 판재보다 상대적으로 높은 최대하중과 낮은 변위량을 보였다. 특히, Fig. 37 와 같이 판재의 상판과 하판에 응력이 집중 분포가 됨을 확인 할 수 있었는데, 이 현상은 충격 부가 시 전체적인 대변형을 일으키다가 추가로 설계한 용접부로 인해 더 이상 변형을 일으키지 못하기 때문에 위와 같은 곳에서 응력집중이 발생한 것으로 사료된다.

이와 같은 결과로부터 용접부의 면적이 0개일 때 충격 에너지 흡수율이 크며, 용접부 면적의 개수에 따라 충격 에너지 흡수 및 변위 특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

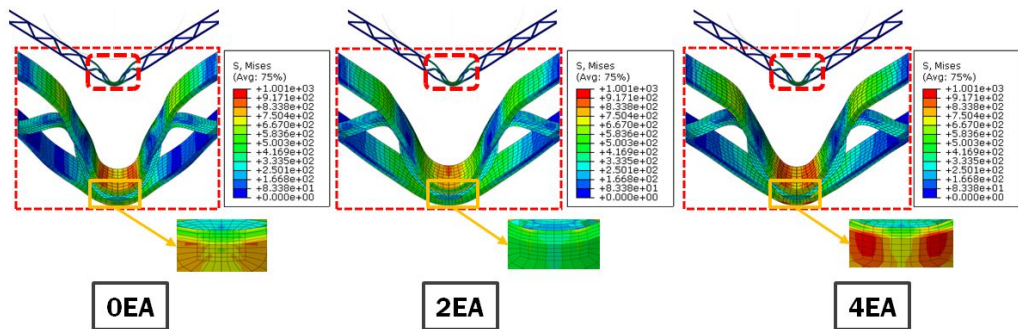


Fig. 37 Variation of Effective stress for shape of positions of initial imperfections at $t=0.015$ sec (Standard Mode)

2) Symmetry-Mode

Table 8 Comparison of characteristic data of the number and shape of initial imperfections of ISB panels for the plane strain conditions of impact analysis (H=20 cm)

| | weld zone | E_{in} (J) | E_{ab} (J) | χ (%) | $P_{w,max}$ (N/mm) | $\delta_{t=0.015}$ (mm) |
|------------|-----------|--------------|--------------|------------|--------------------|-------------------------|
| Experiment | - | 22.01 | 8.98 | 40.80 | 8.83 | 34.02 |
| Front | 0개 | 22.01 | 8.16 | 37.07 | 11.28 | 33.12 |
| | 2개 | 22.01 | 9.98 | 45.34 | 11.93 | 35.15 |
| | 4개 | 22.01 | 7.76 | 35.26 | 12.35 | 28.09 |
| Rear | 0개 | 22.01 | 9.32 | 42.34 | 9.62 | 35.95 |
| | 2개 | 22.01 | 8.68 | 39.44 | 11.39 | 33.73 |
| | 4개 | 22.01 | 9.40 | 42.71 | 11.29 | 34.61 |
| Strut 4개 | 0개 | 22.01 | 8.74 | 39.71 | 8.96 | 33.85 |
| | 2개 | 22.01 | 9.63 | 43.75 | 11.09 | 35.19 |
| | 4개 | 22.01 | 7.86 | 35.71 | 11.98 | 31.03 |

Table 8 과 Fig. 38 은 내부구조체의 좌굴모드 중의 하나인 Symmetry-Mode 에 대하여 낙하충격실험 결과와 Front, Rear 및 Strut 4EA 의 판재에 생성된 용접부의 면적에 따른 해석결과를 정리한 것이다.

내부구조체의 좌굴 모드인 Symmetry-Mode 를 가지는 초기결함 형태에 대하여 Table 8 과 같은 충격특성을 나타냈으며, 단위 셀 증앙을 기준으로 앞쪽에 생기는 Front 판재 일 때에 대하여 용접부의 추가면적이 2개인 판재의 경우 하중을 지지해주는 면적이 내부구조체 양쪽에 있기 때문에 내부구조체가 무너지면서 국부적인 변형이 발생하여 변위량이 다른 두 판재에 비해 다소 높게 일어났다. 반면, 용접부 면적이 2개인 판재의 경우 발생한 전단응력이 용접된 부분의 접합부위에 의해 지지되면서 내부구조체가 무너지짐에 의해 충격에너지가 추가 용접부 면적 0개 및 4개를 가지는 판재에 비해 비교적 많이 흡수 되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 용접부 면적이 4개인 판재의 경우 발생된 하중이 추가된 내부구조체의 용접부 방향으로 하중이 분산되면서 용접부 추가면적 2개인 판재에 비해 상대적으로 낮은 최대하중 및 변위량을 보인 것으로 판단된다.

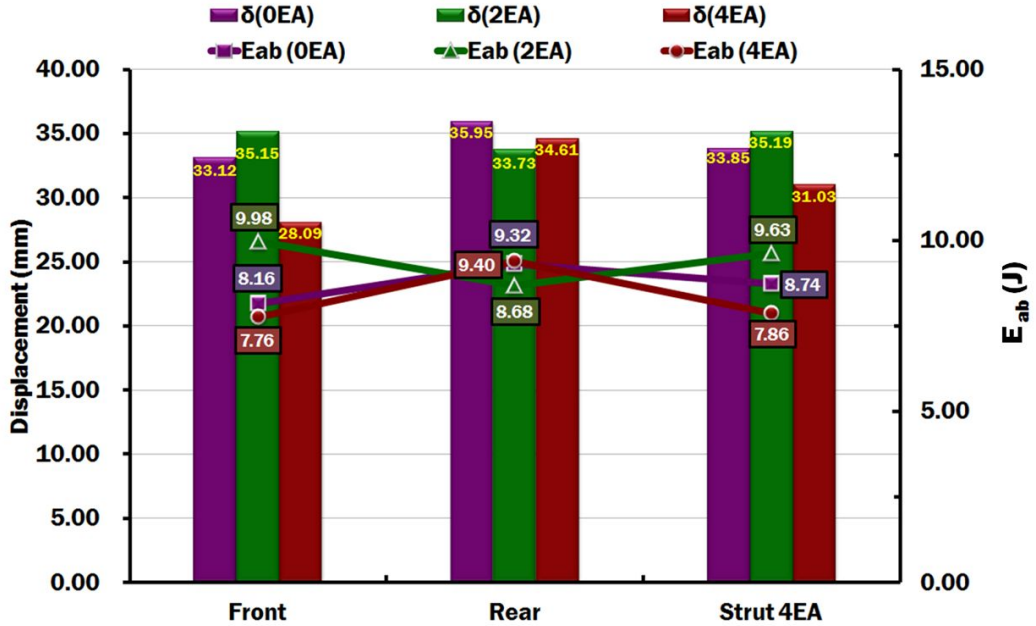


Fig. 38 Absorbed Energy and displacement according to weld zone area on the Standard mode

단위 셀 중앙을 기준으로 뒤쪽에 생기는 Rear 판재일 때, Fig. 38 과 같이 용접부 접합 추가면적 0개의 경우 용접 면적이 2개와 4개인 판재와 약 0.72 J 정도의 충격 흡수에너지 차이를 보이고 있다. 이는 용접 면적 4개인 판재에서 발생된 하중을 지지해주는 면적이 많아 내부구조체가 무너지면서 국부적인 변형이 발생하여 변위량이 다른 두 판재에 비해 다소 높게 일어나면서 나타난 현상으로 판단된다. 반면, 용접부 2개인 판재와 용접부 4개인 판재의 최대하중, 변위량 등이 거의 비슷하게 나타났는데, 이 현상은 발생된 전단응력이 용접된 부분의 접합부위에 의해 지지되면서 내부구조체가 버티면서 무너진 현상으로 사료된다.

시편 제작 시 나타나는 내부구조체의 좌굴 모드가 단위 셀에 대하여 지탱해주는 4개의 버팀대에서 발생하는 Strut 4개 판재일 때, 충격흡수에너지 부분에서 용접부 접합 추가면적 0개의 판재의 경우 용접부의 접합 추가면적 2 개를 가지는 판재에 비해 약 0.9 J 정도 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 발생된 하중을 지지해주는 면적이 적어 결함을 포함한 내부구조체가 무너지면서 낮은 최대하중이 나타나고, 국부적인 변형 유도되어진 것으로 판단된다. 반면, 용접부 접합 면적이 4개인 판재는 발생된 전단응력이

내부구조체와 외판 사이의 용접된 접합 부분에 의해 지지되면서 내부구조체가 무너짐에 따라 상대적으로 다른 두 모델에 비해 높은 충격하중 및 낮은 변위량을 보인 것으로 사료된다.

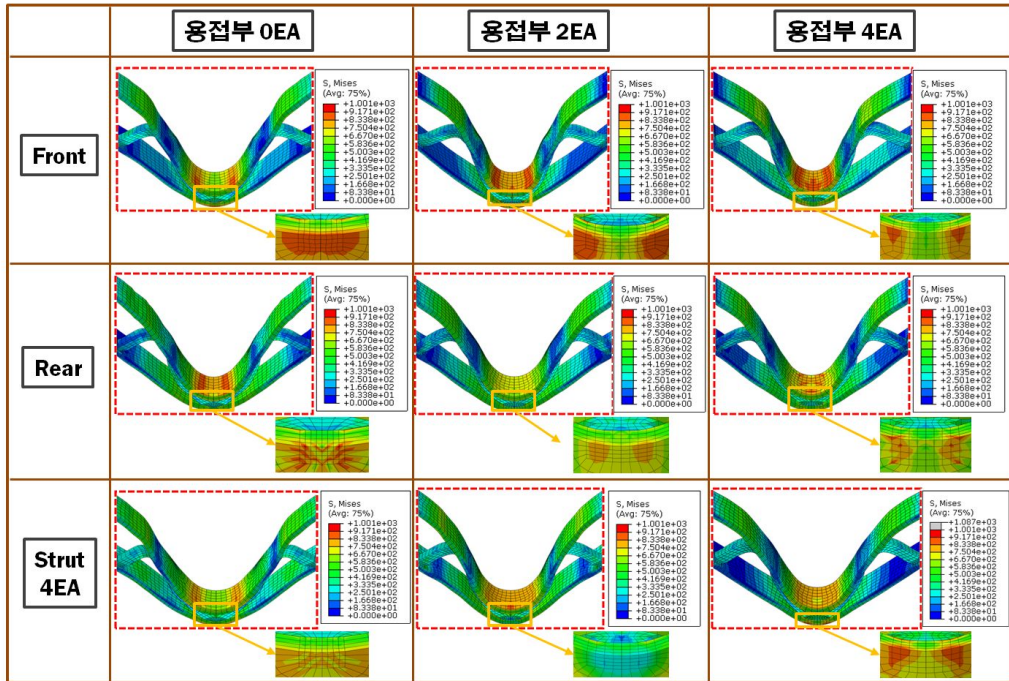


Fig. 39 Variation of Effective stress according to the number of weld zone area on the Symmetry Mode

Fig. 39 는 Sym 에서 수행한 3차원 유한 요소 해석 결과 중 유효응력 분포를 나타낸 그림이다. 그림과 같이 추가된 모든 용접부 개수에 대하여 Front 와 Strut 4개 의 판재에서 시편의 상/하판에 응력이 집중 분포 되었음을 확인 할 수 있었으며, Rear 판재의 경우 모든 용접부 개수에 대하여 하중 부가 시 응력이 전달되면서 응력이 분산되어 감소되는 것으로 판단된다.

2) Anti-Symmetry-Mode

Table 9 및 Fig. 40 은 내부구조체의 좌굴모드 중의 하나인 Anti-Symmetry-Mode 에 대하여 낙하충격실험 결과와 Front, Rear 및 Strut 4개 의 판재에 생성된 용접부의 면적에 따른 해석결과를 정리한 것이다.

Table 9 Comparison of characteristic data of the number and shape of initial imperfections of ISB panels for the plane strain conditions of impact analysis (H=20 cm)

| | weld zone | $E_{in}(J)$ | $E_{ab}(J)$ | $\chi(\%)$ | $P_{w,max}(N/mm)$ | $\delta_{t=0.015}(mm)$ |
|------------|-----------|-------------|-------------|------------|-------------------|------------------------|
| Experiment | - | 22.01 | 8.98 | 40.80 | 8.83 | 34.02 |
| Front | 0EA | 22.01 | 9.81 | 44.57 | 10.12 | 37.77 |
| | 2EA | 22.01 | 10.84 | 49.25 | 14.01 | 34.69 |
| | 4EA | 22.01 | 9.75 | 44.30 | 14.38 | 31.67 |
| Rear | 0EA | 22.01 | 8.73 | 39.66 | 15.49 | 33.98 |
| | 2EA | 22.01 | 10.80 | 49.07 | 14.34 | 34.48 |
| | 4EA | 22.01 | 8.78 | 39.89 | 13.32 | 27.59 |
| Strut 4개 | 0EA | 22.01 | 8.15 | 37.03 | 10.67 | 33.90 |
| | 2EA | 22.01 | 11.06 | 50.25 | 13.17 | 35.28 |
| | 4EA | 22.01 | 9.76 | 44.34 | 14.30 | 31.92 |

초기결함 형태에 대하여 Table 9 에 나타난 것과 같이 단위 셀 중앙을 기준으로 앞쪽에 생기는 Front 판재일 때 용접부 접합면적의 개수에 따른 충격 에너지 흡수에 대하여 비교한 결과, 높은 충격 흡수에너지를 가지는 용접부 2개의 추가 면적을 가지는 판재와 용접부 추가면적이 4개인 판재가 약 1.1 J 정도의 차이를 보이고 있으며, 2개의 용접부 면적을 가지고 있는 판재에서 약 5 % 높은 흡수율의 에너지 흡수 특성을 보여

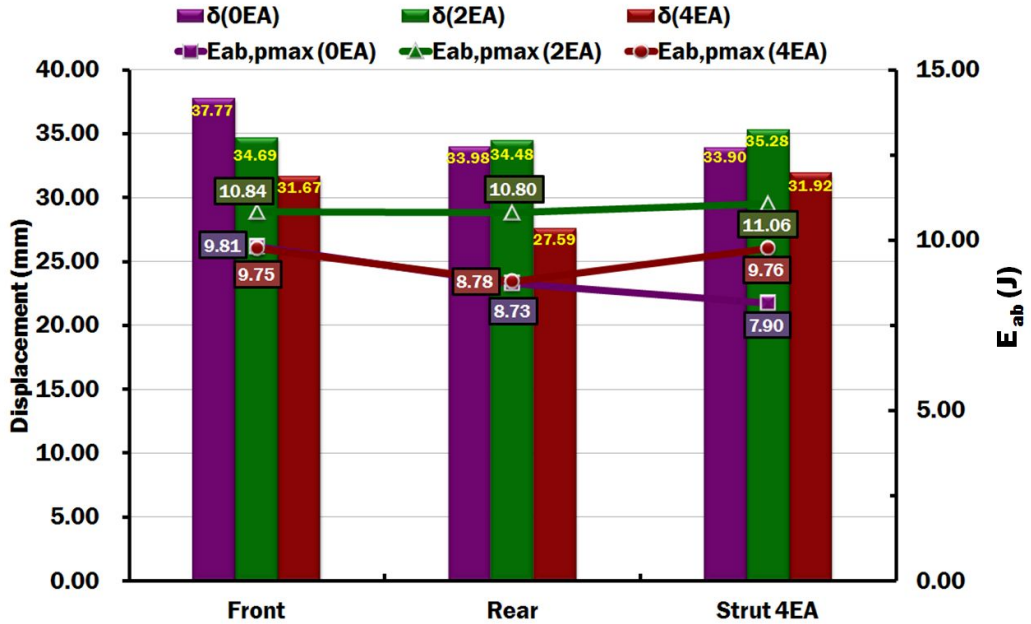


Fig. 40 Absorbed Energy and displacement according to weld zone area on the anti-Symmetry mode

주고 있다. 이는 용접부 추가면적이 2개인 판재의 외판에 발생한 하중이 내부구조체로 전달되어질 때 용접부 면적에 의해 지지되어지기 때문으로 사료된다. 용접부 면적이 4개인 Strut 4개 판재는 Fig. 40 과 같이 내부구조체에 하중 부가로 인한 판재 전체의 변형을 유도하는 반면, 용접부 추가면적이 2개인 판재는 내부구조체의 접합부에 가해지는 국부적인 영향으로 인한 충격 특성을 보이는 것을 확인 할 수 있었다.

단위 셀 증앙을 기준으로 뒤쪽에 생기는 Rear 판재일 때, 용접부 추가면적이 각각 0개, 2개 및 4개의 모델에서 약 2.1 J 의 차이를 보이고 있으나, 용접부 추가면적이 2개인 판재의 경우 용접부 추가면적 4개인 판재보다 상대적으로 하중을 지지해주는 면적이 적어 국부적인 변형이 크게 일어났다. 또한, 용접부 면적을 2개 가지는 판재의 경우 하중으로 생긴 전단 응력을 내부구조체 양측변의 용접부에 의해 지지해주면서 충격 흡수 에너지와 흡수율 등이 용접부 면적 0개와 4개인 판재에 비하여 높게 측정이 되는 것을 확인할 수 있었다. 용접부 면적이 4개인 판재의 경우, 발생된 하중이 추가된 내부구조체의 용접부 폭 방향으로 손실 되면서 용접부 면적이 0개인 판재 보다 상대적으로 높은 최대하중 및 낮은 변위량을 보였다. 위의 결과로부터 용접부 접합 면적이 2개인

판재가 다른 두 판재에 비해 충격 특성이 우수함을 알 수 있었으며, 용접부의 접합에 대하여 각 판재의 용접된 추가 면적에 따라 충격 에너지 흡수 특성 및 변위특성에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.

좌굴 모드가 단위 셀에 대하여 지탱해주는 4개의 버팀대에서 발생하는 Strut 4개 판재일 때, 용접 결함 면적에 따른 최대 하중까지 나타난 충격 에너지 흡수에 대해 비교한 결과, 용접부 추가면적이 0개의 경우 용접부 면적이 4개인 판재보다 상대적으로 하중을 지지해주는 면적이 적어 국부적인 변형이 유도되었다. 또한, 용접부 추가면적이 2개인 판재의 경우 외판에 발생한 하중으로 인한 응력을 내부구조체와 외판에 접합된 용접부분에 의해 지지해주면서 충격 흡수 에너지와 흡수율 등이 다른 두 판재에 비하여 높게 측정이 되는 것을 확인할 수 있었다. 용접부 추가 면적이 4개인 판재의 경우, 발생한 하중이 추가된 내부구조체의 용접부 폭 방향으로 분산 후 손실 되면서 용접부 추가면적이 2개인 판재보다 상대적으로 최대하중이 높게 측정이 되었지만, 용접부 면적이 0개인 판재보다 낮은 변위량을 보였다.

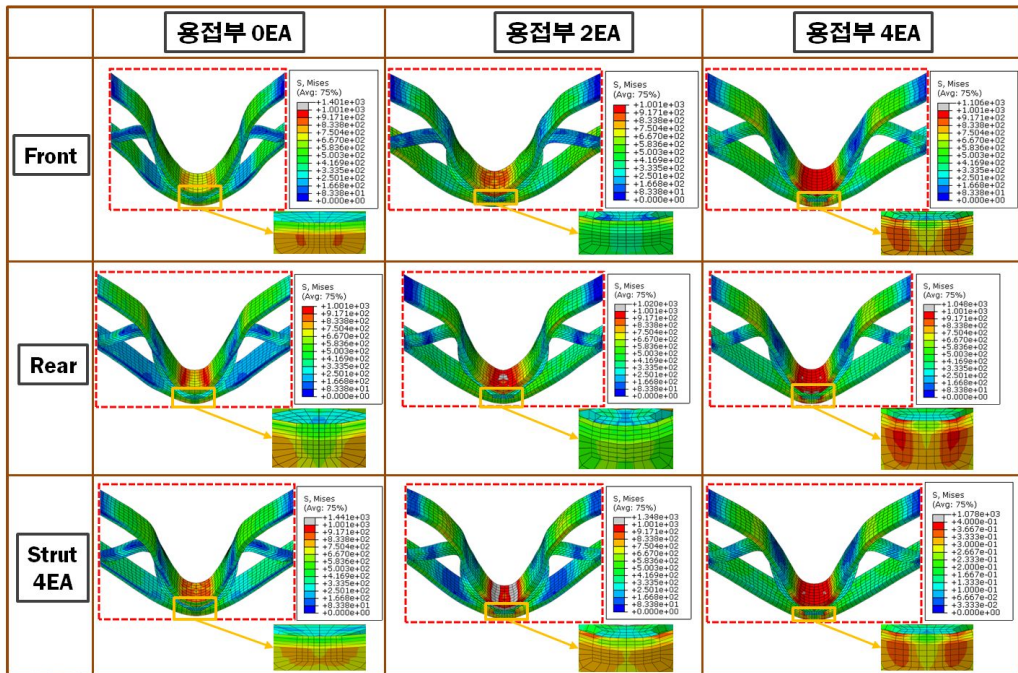


Fig. 41 Variation of Effective stress according to the number of weld zone area on the Anti-Symmetry Mode

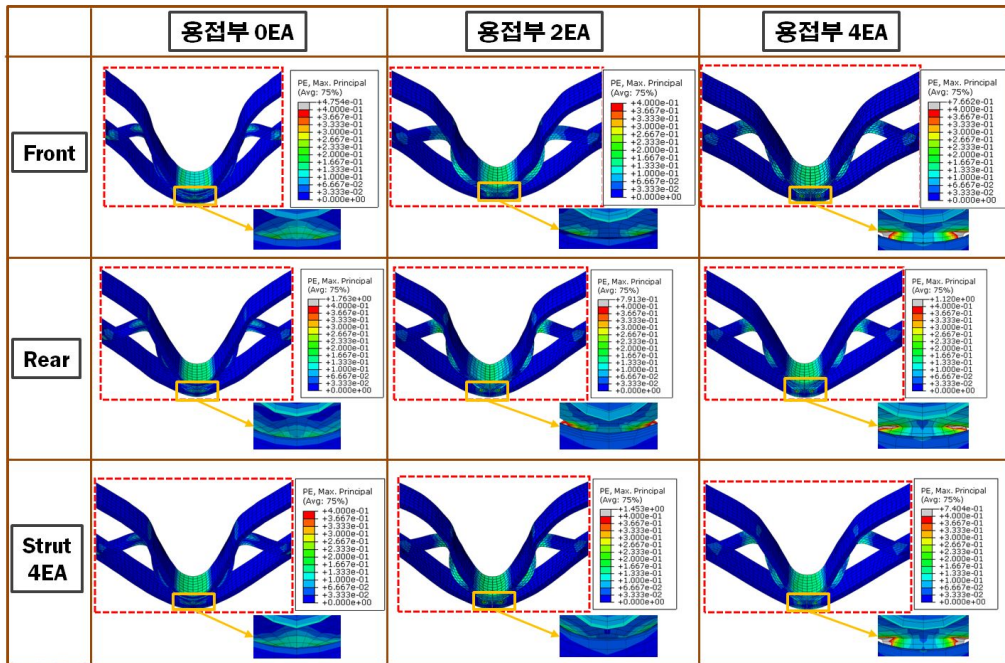


Fig. 42 Variation of Principal strain according to the number of weld zone area on the Anti-Symmetry Mode

Fig. 41 과 Fig. 42 는 Anti-Sym 에서 수행한 3차원 유한 요소 해석 결과 중 유효응력 및 주변형률 분포를 나타낸 그림이다. 용접부 면적이 0개인 경우, 용접부 면적 2개 및 4개에 비해 시편의 외판의 상/하판에서 응력이 집중되었으며, 특히 주변형률을 비교해 보면 용접부 0개 (Strut 4개) 와 용접부 2개 (Front) 판재가 적용한 진형형률을 훨씬 초과하는 높은 변형이 발생되어 모두 과단되는 현상이 일어났다. 이 현상을 실험에 수행되었던 시편과 비교해 볼 때, 보다 과도하게 도출된 결과라고 판단되며, 시편 중앙에 발생된 대 변형에 의해 Anti-Sym 의 내부구조체가 비틀어짐에 의해 이러한 현상이 일어난 것으로 사료된다.

5. 샌드위치 판재의 충격 변형 및 에너지 흡수특성에 따른 지배적인 결함모드 및 FE 해석 모델 도출

본 연구의 목적은 트러스심재를 가지는 ISB 판재의 내부구조체 및 용접부분의 결합이 주는 충격 거동 및 에너지 변형 특성에 대한 영향성을 분석하고, 실제 실험에서 나타난 결과 값과 비슷한 결과가 나오며, 충격하중-변위 및 충격 흡수에너지-변위 선도에서 실험 선도와 유사한 경향을 나타내는 지배적인 결함 모드 (Dominant imperfections mode) 를 선정하는 것이다. 따라서 본 연구에서 수행된 3차원 유한요소 해석 결과를 바탕으로 다음과 같은 최적 모델을 선정하였다.



Fig. 43 The final design for sandwich panels with initial imperfections

Fig. 43 에서 나타나 있는 최종 모델은 Sym 의 좌굴 모드 중 단위 셀에 대하여 지탱해주는 4개의 버팀대에서 발생하는 Strut 4개 판재이며, Table 10 과 Fig. 32 과 같이 수행되었던 실험 결과와 유사한 데이터 및 변형 형상을 보였다.

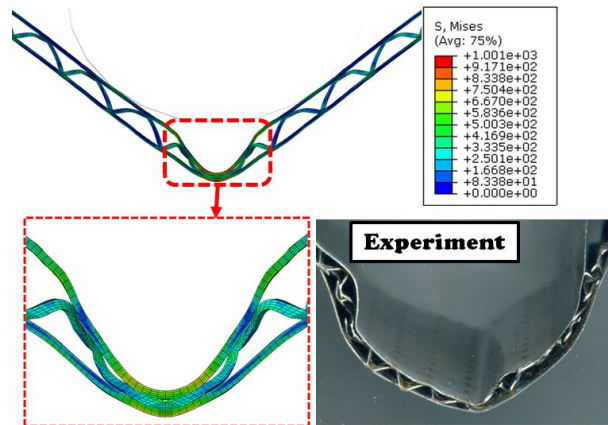


Fig. 44 Comparisons of between finite element analysis and impact specimen of experiment

Fig. 44 는 선정된 지배적인 모드에 따른 응력 분포와 주변형률 분포를 나타낸 그림이다. 금속 샌드위치 판재에 부가된 충격 헤드의 하중에 의해 해석 시간 0.015 sec 에 발생된 변형 특성에 따라 굽혀진 시편 중앙부로부터 약 0.99 mm 떨어진 부근의 상판에서 응력 분포가 집중적으로 발생하는 것으로 알 수 있었다. 이러한 현상은 충격 시 발생된 충격 하중이 시편 중앙으로부터 샌드위치 판재의 양 끝단으로 전달되면서 샌드위치 판재의 전체적인 굽힘 변형을 유도하게 되는데, 이때 일어난 내부구조체의 변형에 의해 외판이 맞닿게 됨에 따라 더 이상 변형을 일으키지 못하기 때문에 시편 정중앙에서 약 0.99 mm 떨어진 부근의 상판에서 응력 집중 현상이 발생되면서 국부적인 변형이 일어난 것으로 사료된다.

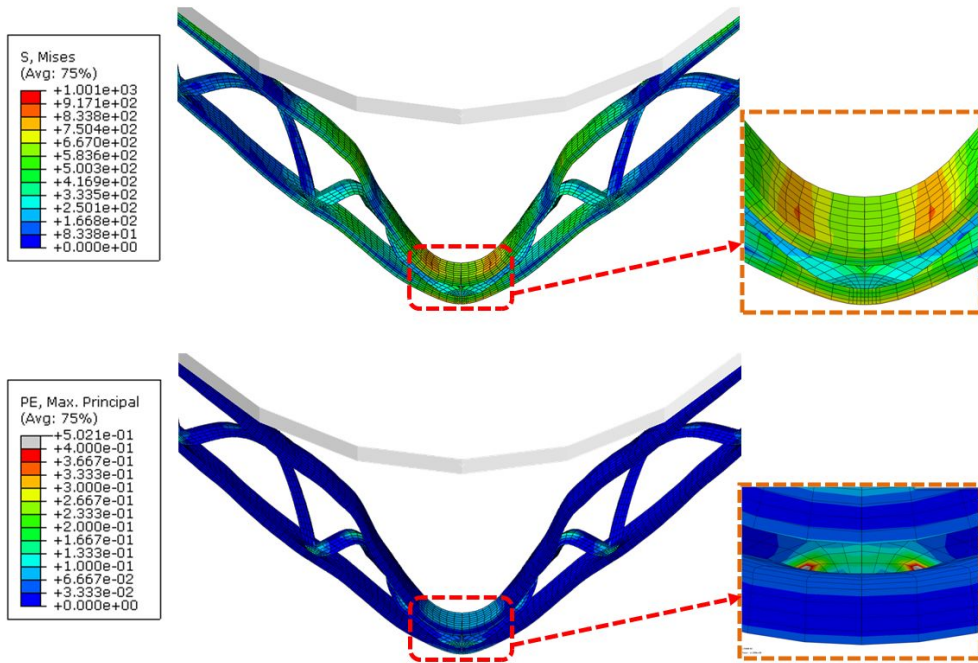


Fig. 45 Variation of effective stress and principal stress distributions for dominant imperfections model

실험에서는 낙하 충격 후에 Fig. 45 와 같이 외판과 내부구조체 접합부의 용접이 완벽하게 이루어지지 않고 옆으로 터진 현상을 보이고 있다. 이러한 경우, 최대 하중과 충격 흡수 능력이 현저히 감소하게 되어 5.88 J 의 충격 흡수에너지를 보이게 되는데, 유한요소 해석에서는 Fig. 47 과 같이 판재와 다이에 맞는 부분에서 시편의 최하단

부분에 가장 높은 인장 응력이 보임에 따라 실험에서 터진 옆 부분의 터짐 현상이 3차원 형상으로 표현 되어진 것으로 판단된다. 이런 경우에 유한요소 해석 모듈에서는 해석 진행 시 외판과 내부구조체간의 국부적인 대변형에 대한 표현이 어렵기 때문에 Sym 좌굴 모드에 대한 Strut 4개 의 최종 변형 현상은 실험 충격시편에서 보이는 실제 변형 형상과 다르게 나타난다. 이 결과로부터 외판과 내부구조체의 용접 특성에 따라 ISB 판재의 충격 흡수 특성이 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

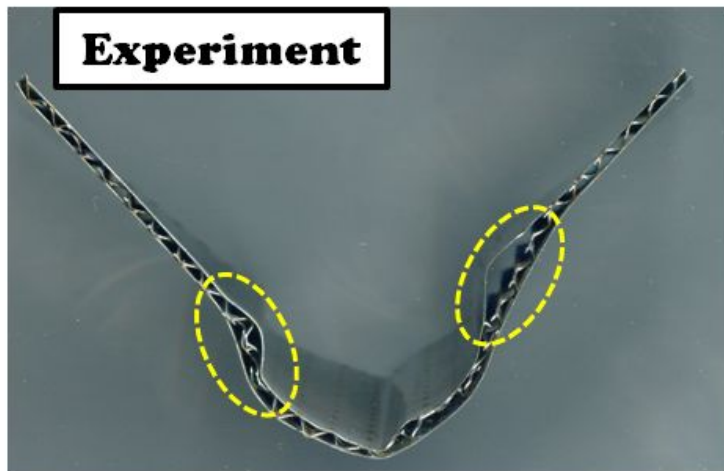


Fig. 46 Specimen of impact test on loading force in plane strain boundary conditions

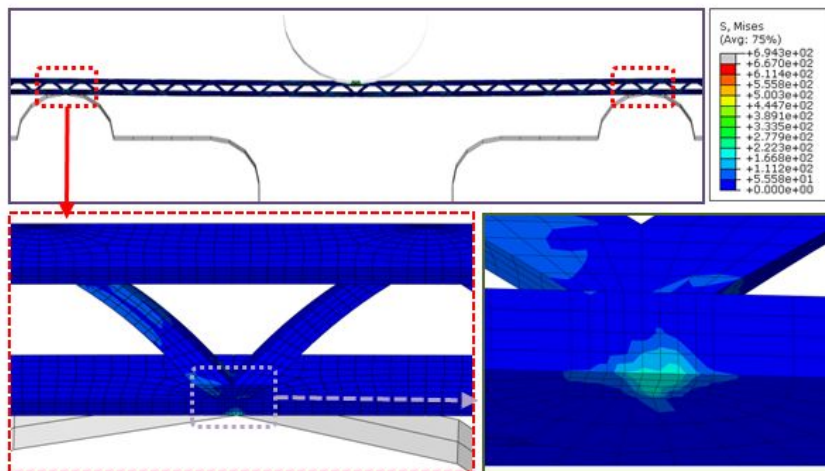


Fig. 47 Section of maximum tensile stress of the final model in analysis

Table 10 에서와 같이 낙하실험과 지배적인 모델에 대한 해석 결과를 비교한 결과 하중의 경우 약 0.13 N/mm 의 차이를 보임을 알 수 있었다. 또한, 해석 시간 t 가 0.015 sec 일 때 변형된 처짐량의 차이가 약 0.17 mm 의 미세한 정도의 차이를 보이고 있기 때문에 좌굴 모드 Sym 형상일 때 용접부 면적이 0개이고 내부구조체 모두 변형 형상이 발생한 Strut 4개 인 모델이 가장 지배적인 모델이라고 판단된다.

최적 설계된 초기 결합 형상의 경우, 충격하중과 충격흡수에너지에서 실험과 약 0.13 (N/mm) 및 약 0.3 J 정도의 차이를 확인 할 수 있었으며, Fig. 48 과 같이 다른 해석모델에 비하여 하중-변위 선도와 최대하중까지의 충격에너지 흡수-변위 선도의 경향이 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

Table 10 Comparisons of the result between finite element analysis and impact specimen of experiment

| | weld zone | $E_{in}(J)$ | $E_{ab}(J)$ | χ (%) | $P_{w,max}$ (N/mm) | $\delta_{t=0.015}(mm)$ |
|----------------------|-----------|-------------|-------------|------------|--------------------|------------------------|
| Experiment | - | 22.01 | 8.98 | 40.80 | 8.83 | 34.02 |
| Sym-Mode strut 4개 | 0개 | 22.01 | 8.74 | 37.71 | 8.96 | 33.85 |

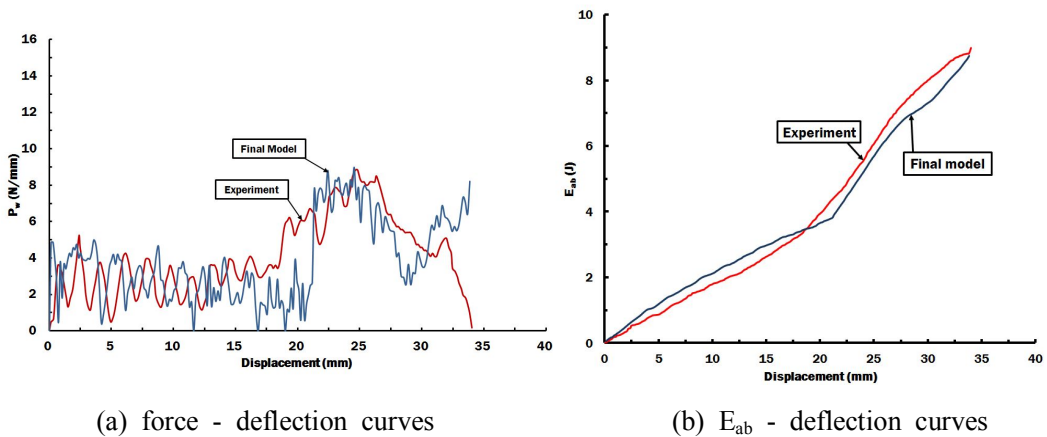


Fig. 48 Comparisons of between impact test and finite element analysis curves

제 4 장 결함이 포함된 금속 샌드위치 판재의 최적 설계에 대한 파손지도 작성

본 연구에서는 앞서 시편 제작 시 발생될 수 있는 내부구조체 및 용접부의 결함 유형 및 형상에 대하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 이때의 충격거동 및 변형 형상에 대한 비교/분석을 하였다. 또한, 이 비교/분석을 통하여 실제 낙하실험에 사용되었던 시편의 변형 형상과 실험 결과와 가장 유사한 해석 결과를 나타내는 모델을 지배적인 결함 모드로 선정하였다.

선정된 모델에 대하여 무차원 충격 변수들에 따른 판재의 파손, 충격 에너지 흡수 및 변형 특성의 분석한 결과를 토대로 충격헤드 반경별로 각 파손 모드가 발생하는 경계의 무차원 충격 무게와 속도 조건들을 이용하여 각 파손 모드의 발생 영역을 도출하게 된다. 파손모드에 따른 파손지도 작성을 위한 각 충격 변수들에 대한 조건은 Table 11 과 같다.

Table 11 Table of analysis for failure map design

| weight (kg) height (mm) | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 2.775 | 5.55 | 8.325 | 11.10 |
|----------------------------------|------|-----|---|---|-------|------|-------|-------|
| 50 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 100 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 150 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 200 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

충격 해석은 앞서 해석과 동일하게 평면 변형 경계조건이며, 충격 헤드의 하중이 부가 된 후 소성 영역에서 충분한 영구변형이 일어나는 시점까지 해석을 수행 하였다.

본 연구에서는 지배적인 모델에 대한 파손 지도를 작성하기 위해 0.25 kg ~ 11.1 kg 의 8가지 충격 헤드 무게에 대하여 50 mm, 100 mm, 150 mm 및 200 mm 의 충격 높이에 따른 충격 해석을 통하여 결과의 종합적인 비교/분석을 통해 연구하였다.

파손모드는 비파손 (No-Failure), 주름 (wrinkling), 좌굴 (Buckling), 균열 (Crack) 및 찢어짐 (Tearing) 에 따라 크게 5가지로 나눌 수 있으며, 소성 변형이 완료된 시점에서의 해석 결과를 바탕으로 파손지도를 도출 하였다.

Table 12 Comparison with the impact input energy (J) of failure models

| weight (kg) height (mm) | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 2.775 | 5.55 | 8.325 | 11.10 |
|----------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 50 | 0.12 | 0.24 | 0.49 | 0.98 | 1.36 | 2.72 | 4.08 | 5.44 |
| 100 | 0.24 | 0.49 | 0.98 | 1.96 | 2.72 | 5.44 | 8.16 | 10.88 |
| 150 | 0.36 | 0.73 | 1.47 | 2.94 | 4.08 | 8.16 | 12.25 | 16.33 |
| 200 | 0.49 | 0.98 | 1.96 | 3.92 | 5.44 | 10.88 | 16.33 | 21.77 |

Table 12 는 각 해석 모델에 대하여 충격헤드로부터 얻어지는 충격 입력에너지 (E_{in}) 를 나타낸 것이다. 충격 입력에너지는 충격헤드의 가격속도를 위치에너지로 환산한 것과 같으며, (1) 과 같은 식을 이용하여 도출하였다. 또한 충격 시 발생하는 소리 등 여타 손실되는 에너지는 무시하였다.

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

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

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

식 (2) 는 충격헤드무게 (M), 샌드위치 판재의 밀도 (ρ), 샌드위치 판재의 두께 (H) 및 샌드위치 판재의 폭 (b) 을 나타낸 것이다.

$$\Pi = \frac{V}{\sqrt{\frac{\sigma_y}{\rho}}} \quad (3)$$

식 (3) 는 충격 속도 (V) 와 재료의 동적 항복 강도 (σ_y) 를 나타낸 것이다.

$$\Gamma = \frac{R}{L} \quad (4)$$

식 (4) 는 충격헤드 충격부 반경 (R) 과 다이의 지지점간 거리 : 유효길이 (L) 를 나타낸 것이다.

해석을 위한 무차원 충격 질량의 범위는 해석 모델의 외판에서 파단이 발생하는 질량까지 설정하였으며, 충격 속도의 범위는 2 m/s 이하의 저속이다. 또한, 충격 헤드 반경에 대한 무차원 변수의 범위는 0.125 ~ 0.375 이다.

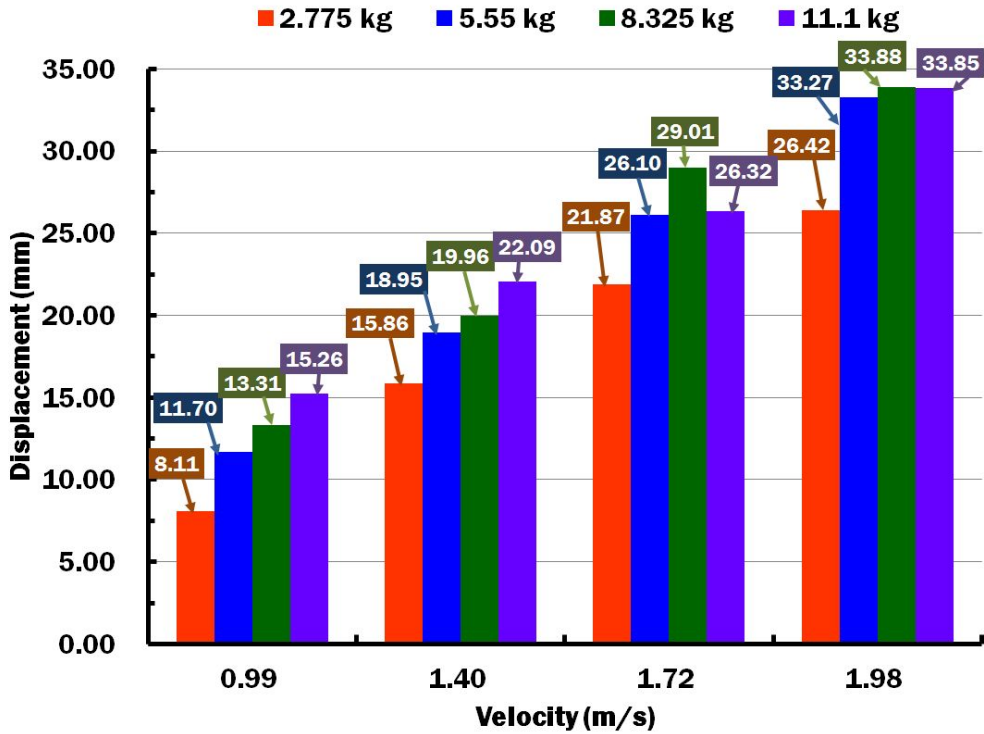


Fig. 49 Comparison of the displacement (mm) of failure models at 0.015 sec

Fig. 49 는 각 해석 모델에 대하여 충격 헤드의 무게 및 충격 속도로부터 얻어지는 0.015 sec 일 때의 변형량을 나타낸 것이다. 해석 모델의 변형 형상은 11.1 kg 의 150 mm 및 200 mm 의 해석 조건을 제외한 나머지 모델에서 충격 높이와 무게가 증가할 수록 변형량이 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 충격 헤드의 무게에 따른 변형량 증가보다 충격 속도에 따른 증가율이 높은 것으로 확인할 수 있었다. 이는 식 (5) 에 의하여 충격 높이에 따라 가격하는 충격 속도가 높아지고, 이에 따라 식 (6) 과 같이 운동 에너지 (E_k) 가 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

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

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6)$$

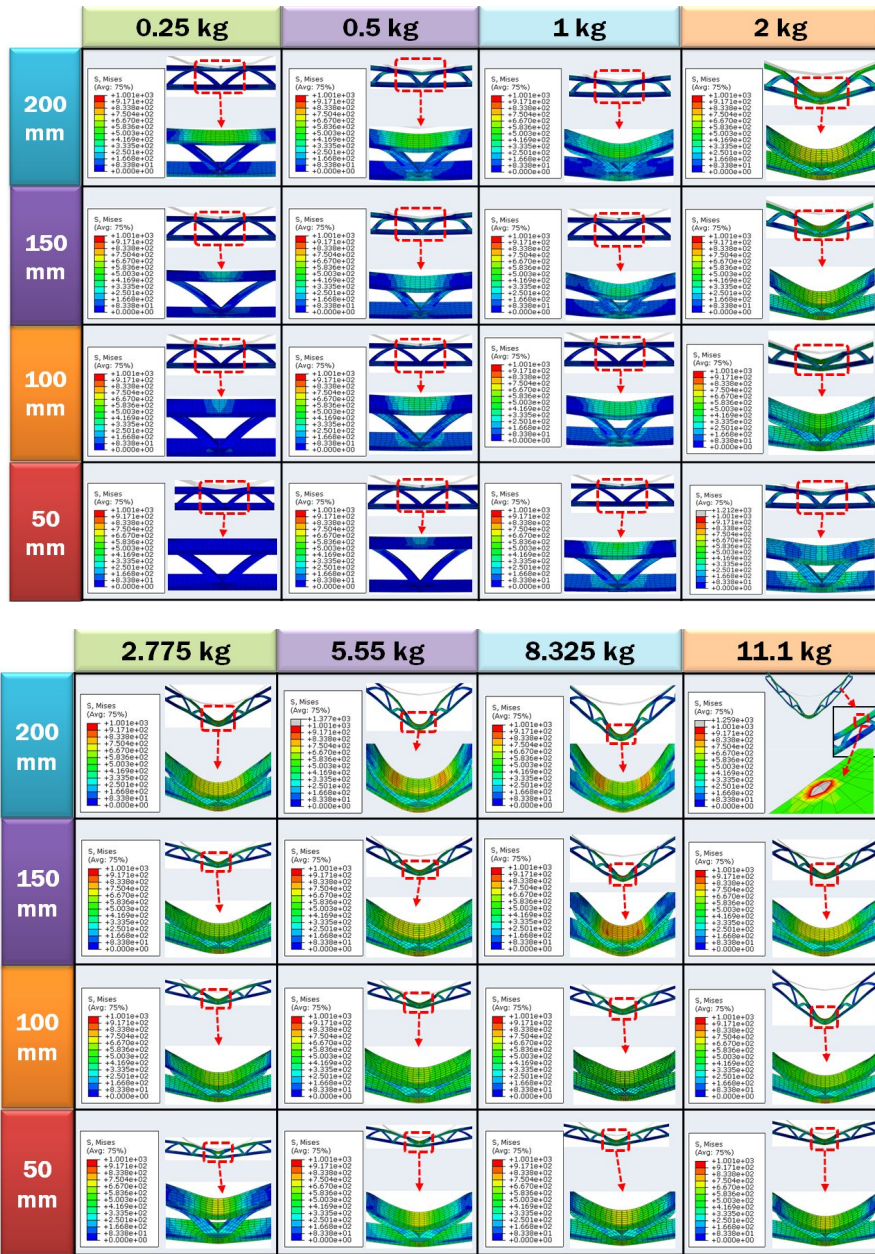


Fig. 50 Variation of Effective Stress for the weights and heights of impact head of failure models

Fig. 50 은 2.775 kg ~ 11.1 kg 의 충격 헤드를 가지는 모델에 대하여 0.015 sec 일 때 발생하는 유효응력 (Effective Stress) 분포를 나타낸 것이다.

유효응력의 경우, 하중 부가 후 대변형이 일어나는 해석 시편의 중앙 부근에서 거의 대부분 모델이 항복응력을 넘어서는 소성변형을 일으켰지만, 1000.5 MPa 의 진응력을 넘지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 충격헤드 무게 5.55 kg, 충격 높이 200 mm 조건의 해석 모델에서는 시편 하단부에 진응력을 초과하는 집중 응력을 보였다.

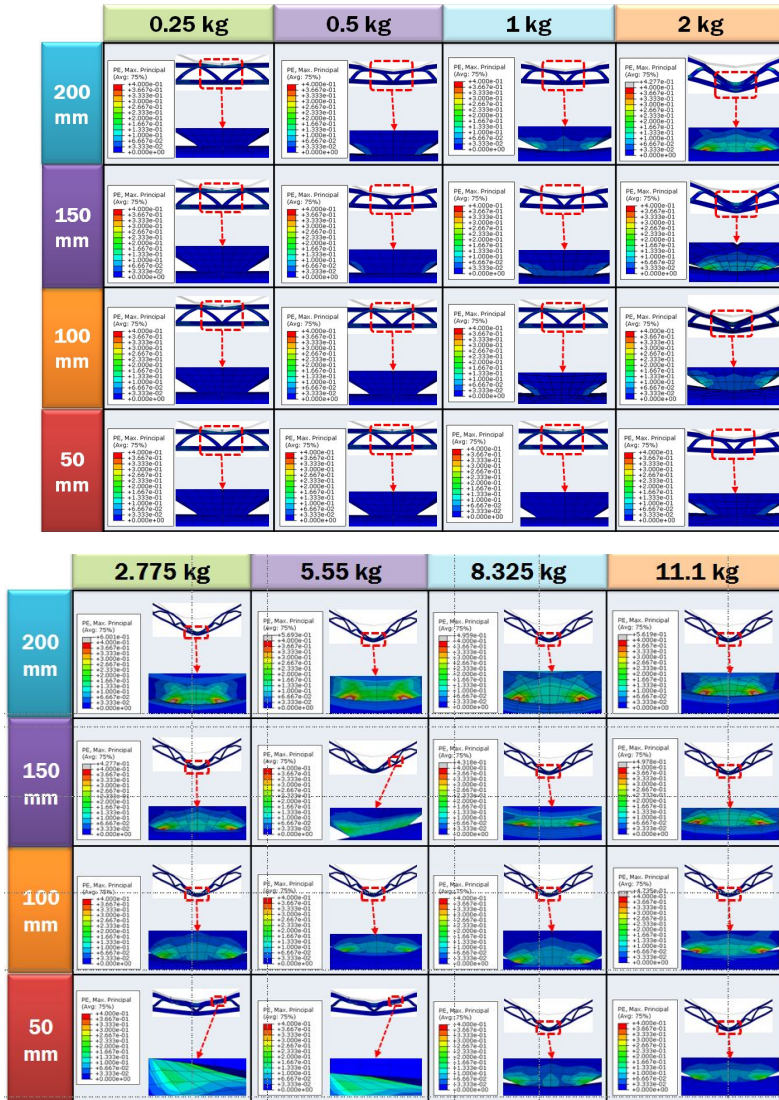


Fig. 51 Variation of Principal Strain for the weights and heights of impact head of failure models

Fig. 51 는 파손지도의 모든 조건범위에 대하여 하중 부가 시 시편 중앙부에서 대변형이 일어날 때의 주변형률 (Principal Strain) 분포를 나타낸 것이다.

주변형률의 분포를 살펴보면, 시편 중앙부에 국부적으로 대변형이 일어나면서 발생하는 소성 영역에서 일부 모델의 내부구조체에 주변형률이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 특히 2.775 kg 이상의 충격 무게에 대하여 150 mm 의 충격 높이에서 변형을 집중되는 파단모드를 확인 할 수 있었고, 11.1 kg 의 무게인 경우 100 mm 이상에서 내부구조체 중앙부 변형의 집중을 볼 수 있었다. 반면, 일부 모델에서는 국부적인 대변형 이후 소성 영역에서 시편 중앙부에서 0.4 의 주변형률이 초과되지 않은 채 내부구조체의 좌굴 형상만 확인할 수 있었다.

Fig. 52 는 무차원 충격 변수 조건에 대하여 나타낸 해석 결과에 따른 파손지도 (Failure Map) 을 나타낸 것이다. 이 때, 파손지도의 무차원 충격 헤드 반경 (Γ) 은 0.125 이다. 그림과 같이 파손지도에 나타난 파손 (Failure) 과 파단 (Fracture) 으로 2가지의 대표적인 파손 모드가 도출되었다. 여기서 파손의 경우, 표면주름 (Face-Wrinkling), 심재 좌굴 (Strut-Buckling) 및 비파손 (No-Failure) 등을 의미하며, 파단의 경우 심재 균열 (Strut-Crack) 과 표면 찢어짐 (Skin-Tearing) 등을 나타낸다.

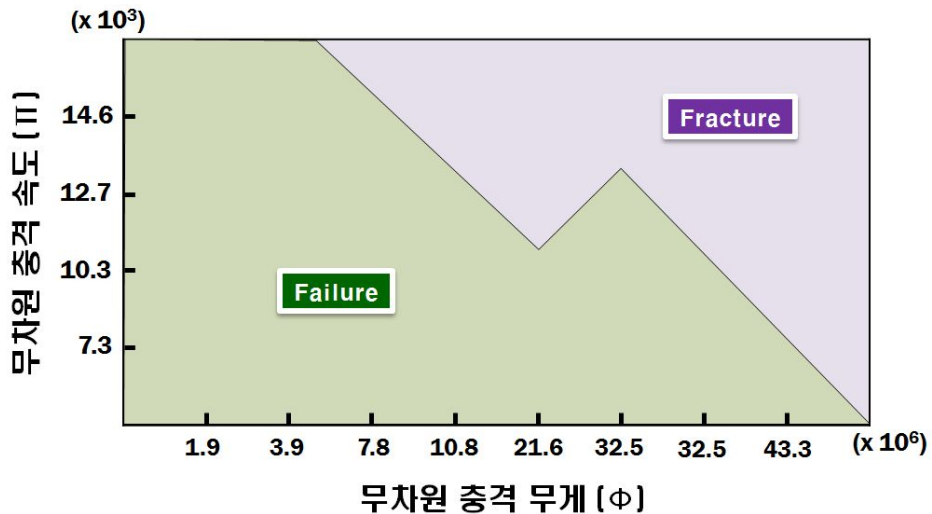


Fig. 52 Failure Map for impact characteristic of the failure models (Failure and Fracture)

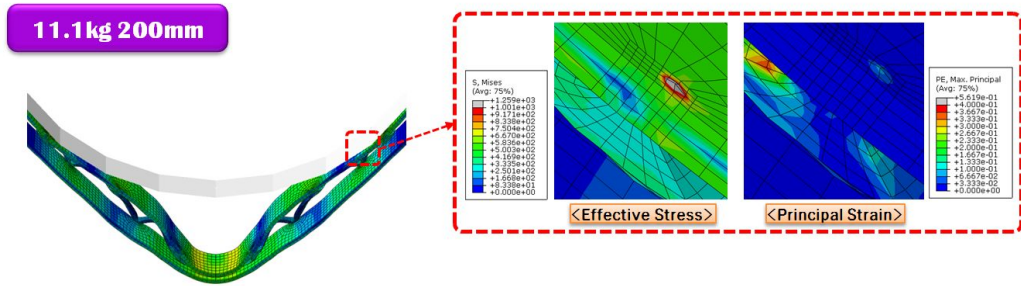


Fig. 53 Strain shape (Skin-Tearing) and variation of Effective Stress and Principal Strain for failure model (11.1 kg - 200 mm)

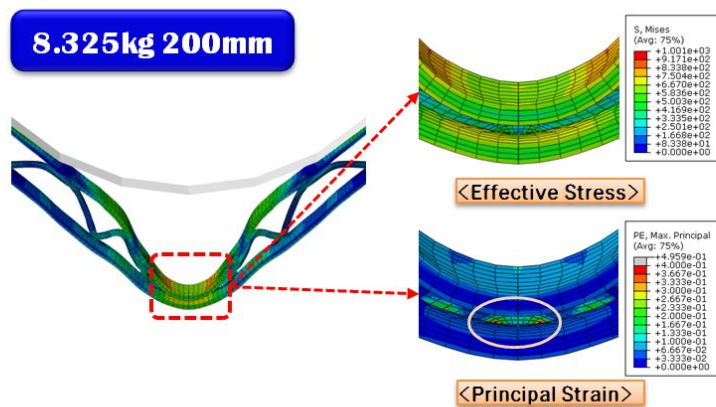


Fig. 54 Strain shape (Strut-Crack) and variation of Effective Stress and Principal Strain for failure model (8.325 kg - 200 mm)

Fig. 53 ~ 54 는 판재의 파단 모드를 나타낸 것이다. Fig. 53 의 경우, 해석 모델의 외판 표면에 응력이 집중 되는 분포를 보이고 있어 Fig. 34 와 같은 변형 형상을 예측할 수 있었다. 이에 따라 충돌 후 내부 구조체가 변형하면서 Fig 53 와 같이 시편의 외판을 파고드는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 국부적인 대 변형에 의해 내부구조체가 눌러지면서 발생한 현상이라고 판단된다. Fig. 54 에 나타낸 것과 같이 8.325 kg 의 200 mm 등 과 같이 국부적으로 대변형이 일어나는 해석 모델의 변형 형상에 의해 중앙 근처의 내부구조체에 주변형률이 집중되어 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 충격이 부가되는 시편의 중앙부에 0.4 의 주변형률을 초과하는 모델에서 “내부구조체의 균열 (Crack of inner structures)” 을 예상할 수 있었다.

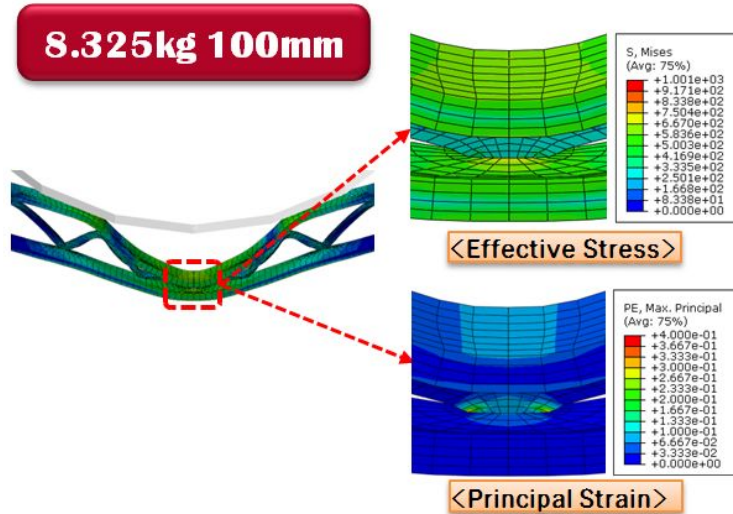


Fig. 55 Strain shape (Strut-Buckling) and variation of Effective Stress and Principal Strain for failure model (8.325 kg - 100 mm)

Fig. 55 ~ 56 는 판재의 파손 모드를 나타낸 것이다. Fig. 55 와 같이 주변형틀을 넘지않은 범위에서 8.325 kg 의 100 mm 등 과 같이 일부 모델에서는 시편 중앙부에서 내부구조체의 좌굴 형상만 확인 할 수 있었다. 이러한 “심재좌굴 (Strut Buckling)” 현상은 외판 표면 뿐만 아니라 내부구조체의 Strut 의 변형이 동시에 일어나면서 발생하는 전단변형과 충격헤드의 하중으로 인한 압축력에 의해 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 56 (a) 는 0.25 kg 의 150 mm 등 과 같이 Failure 의 파단 모드 중 충격 부가 시 탄성변형 이후 소성 영역에서 시편의 내부구조체에 좌굴 형상이 일어나지 않지만, 외판의 표면에만 약간 오목하게 들어가는 변형이 발생 할 수 있는 현상 “표면주름 (Skin Wrinkling)” 을 나타냈다. 또한, Fig. 56 (b) 는 0.25 kg 의 50 mm 과 같이 충격헤드와 시편의 충격 과정에서 되튀김 (Rebound) 하는 시편의 탄성 회복과정으로 인하여 충격 전의 상태와 같은 상태로 복귀하는 현상 “비파손 (No-Failure)” 을 나타내었다.

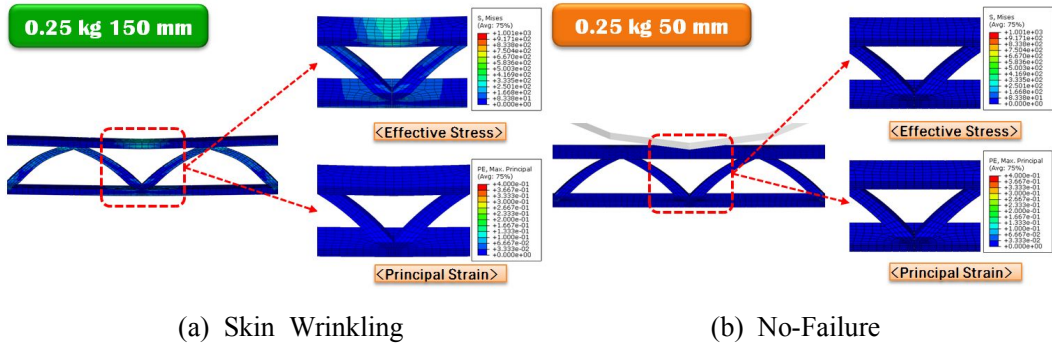


Fig. 56 Strain shape (Skin Wrinkling and No-Failure) and variation of Effective Stress and Principal Strain for failure models

충격 헤드무게 범위에 따른 해석 결과 및 파손/파단 특성에 대하여 Fig. 53 ~ 56 에서 언급했으며, 파손 및 파단이 나타나는 모든 특성은 판재의 변형 후 탄성 회복 하면서 부딪혔던 충격 헤드와 판재가 되튀김 (Rebound) 현상으로 떨어지면서 동시에 잔류 응력이 남은 소성역역의 특성이다. 특히, 2.775 kg 의 100 mm 의 경우 충격 시간 0.028 sec 에서 판재의 최대변위 약 21.65 mm 발생했지만, 이후의 시간에서 되튀김 현상으로 충격헤드와 판재가 떨어지면서 변위가 감소하는 현상을 확인할 수 있었다.

반면, 2.775 kg 의 150 mm 인 판재의 경우, 특성 해석 시간에서 되튀김이 발생되지 않고 판재의 변위가 증가 하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 탄성 회복의 영역을 지나는 항복점 이상의 응력을 받았을 때 영구변형이 일어나는 것으로, 판재가 하중 부가 시 버티지 못하고 파단 되는 현상이다. 이렇게 파단되는 판재는 Fig. 57 과 같이 충격헤드가 맞닿는 부분인 시편 중앙부에서 해석 프로그램에서 파단 묘사가 되지 않기 때문에 판재의 변형에 의한 국부적으로 심한 대변형으로 나타났다.

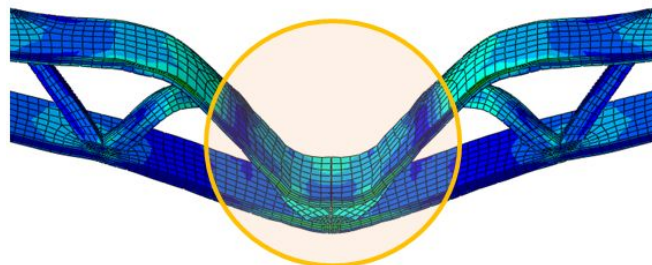


Fig. 57 Strain shape of fracture on the model (2.775kg 200 mm)

위와 같이 2.775 kg 200 mm 에서 가해지는 충격 입력에너지 5.44 J 이상을 가지는 해석 조건의 경우 샌드위치 판재의 회복과정이 없는 완전 소성 영역상태의 파단이 일어남을 확인할 수 있으며, 이에 따라 저속에서 트러스형 샌드위치 판재의 파손/파단 영역을 도출할 수 있었다.

앞서 언급한대로 파단이 일어날 경우, 되튀김 현상이 일어나지 않기 때문에 최대변위가 나타나지 않는다. Table 13 은 각 충격변수 조건에 따른 최대 변위량을 나타내었다.

Table 13 Comparison with maximum displacement (mm) of the failure models

| weight (kg) height (mm) | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 2.775 | 5.55 | 8.325 | 11.10 |
|----------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 50 | 1.03 | 1.52 | 2.41 | 5.29 | 7.71 | 11.70 | 13.31 | 파단 |
| 100 | 1.48 | 2.35 | 5.20 | 12.43 | 21.64 | 파단 | 파단 | 파단 |
| 150 | 1.87 | 3.62 | 8.59 | 22.63 | 파단 | 파단 | 파단 | 파단 |
| 200 | 2.24 | 5.04 | 12.82 | 27.49 | 파단 | 파단 | 파단 | 파단 |

Table 13 과 같이 샌드위치 판재에 대한 파손/파단을 확인 할 수 있으며, 이에 대한 무차원 충격 무게 및 충격속도의 상관관계를 나타내는 파손지도 (Failure Map) 는 Fig. 58 과 같다.

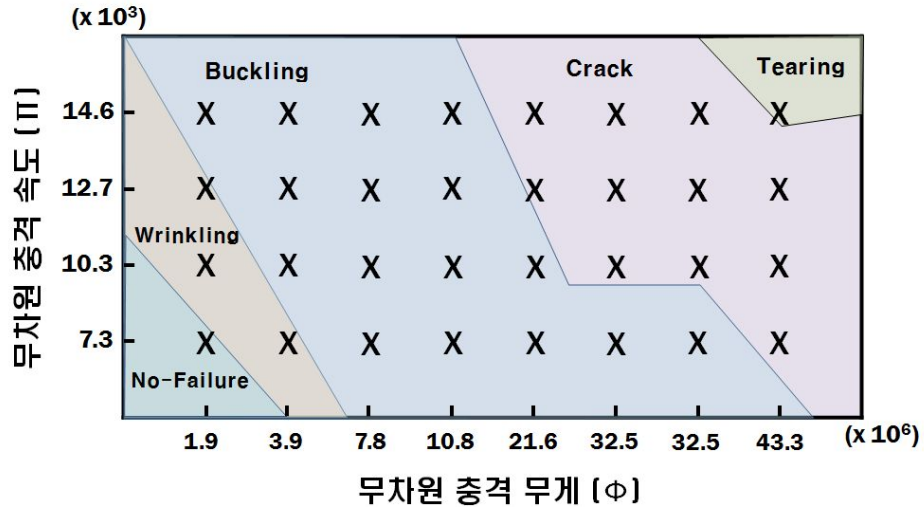


Fig. 58 Failure Map ($\Gamma = 0.125$) for impact characteristic of the failure models (Failure and Fracture)

파손지도를 통해 트러스형 샌드위치 판재에서 나타날 수 있는 비파손 (No-Failure), 주름 (wrinkling), 좌굴 (Buckling), 균열 (Crack) 및 찢어짐 (Tearing) 다섯 가지의 파손 영역을 도출 하였다. 32 가지의 해석 모델 중 거의 대부분 모델에서 좌굴 (Buckling) 과 균열 (Crack) 의 특성을 확인 할 수 있으며, 특히 시편의 내부구조체의 허용된 주변형률 범위 내에서 좌굴 변형 모드만 발생하는 좌굴 (Buckling) 파손 모드가 전체 모델의 약 50 % 를 차지하였다. 한편, 무차원 충격 무게 3.9×10^6 이하의 영역과 무차원 충격 속도 14.6×10^3 이상의 영역에서 각각 비파손 (No-Failure) 및 찢어짐 (Tearing) 의 파단 영역이 도출 되었다.

이러한 파손지도의 결과로써, 샌드위치 판재의 비파손을 위한 설계 범위는 파손지도에 도출된 영역인 좌굴 (Buckling) 이하의 영역이며, 이러한 설계 영역에서의 샌드위치 판재의 가해지는 충격 무게 및 충격 높이의 조건을 확인 할 수 있었다.

무차원 충격변수들에 따른 판재의 파손 및 에너지 흡수 특성 변화를 분석 한 결과, 취득된 충격 헤드 직경 30 mm 에 대한 파손지도 기초 데이터를 이용하여 각 파손 모

드 발생 영역을 도출할 수 있었으며, 이러한 파손 모드 발생영역을 연결하여 파손 지도를 작성하였다. 이에 따라 무차원 무게/속도/형상과 샌드위치 판재의 파손(주름/찢어짐/함몰/좌굴 등)의 상관관계를 나타내어 샌드위치 판재의 비파손 설계 범위를 개발 및 연구를 할 수 있었다.

추후 연구에서는 각 충격 헤드 반경별 파손지도 데이터를 추가로 취득하여 이러한 각 무차원 충격 충격헤드 반경에 따른 파손 영역을 추가로 도출하고, 이에 대한 무차원 충격에너지 및 무차원 흡수에너지를 산출 후 샌드위치 판재의 파손 조건의 만족성을 검증하여야 할 것이다.

제 5 장 결론

본 연구에서는 내부구조체 및 용접부에 대하여 초기결함을 가지는 금속 샌드위치 판재의 충격 특성을 분석하기 위해 낙하충격 실험과 동일한 평면 변형형 경계 조건에서 3차원 충격 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 트러스 심재를 가지는 금속 샌드위치 판재에 대하여 시편 제작 과정에서 발생 할 수 있는 내부구조체 좌굴모드 및 용접부 형상에 따라 구조적 결함을 설계하여 개발한 3 차원 내충격 유한요소해석 모델에 대하여 평면변형 경계조건에서 충격 해석을 수행하였다. 결함을 가지는 내부구조체와 용접부의 형상, 개수 및 결함의 위치에 대하여 3차원 유한요소 해석을 통하여 각 모델의 변형과 파단 특성 및 충격 에너지 흡수 특성 데이터를 얻었다. 이러한 해석 모델의 결과 분석을 통해 금속 샌드위치 판재의 충격특성에 미치는 결함에 대한 영향을 확인 할 수 있었다.

둘째, 내부구조체의 초기형태에 따른 **Standard**, **Symmetry** 및 **Anti-symmetry** 의 3가지 좌굴모드 중 결함이 발생하지 않은 **Standard** 모드를 가지는 모델에서 10.16 J 의 가장 높은 충격흡수 에너지를 확인할 수 있었다.

셋째, **Sym** 와 **Anti-Sym** 를 가지는 판재의 경우, 하중 부가 시 구조적 결함이 있는 내부구조체의 무너지는 시점과 형상에 따라 서로 다른 충격 거동을 예측할 수 있었다. 특히, **Sym** 의 좌굴 모드에 대하여 단위 셀에 지탱해주는 4개의 버팀대에서 발생하는 **Strut** 4개 판재가 낙하충격실험 값과 거의 유사하게 나왔음을 확인 할 수 있었다. 위의 결과로부터 실제 시편에 발생되었던 결함에 대하여 금속샌드위치 판재에 미치는 영향성에 대하여 분석/고찰 할 수 있었다.

넷째, 지배적인 해석 모델을 도출하고, 충격 높이, 충격헤드 무게 및 충격헤드 충격부 반경 조건의 조합에 대한 충격 해석 통하여 무차원 충격 변수를 선정하였다. 이에 따라 해석 결과에 대한 변형 및 파단 특성에 의해 파손지도를 작성 할 수 있었다.

다섯째, 파손지도(**failure map**)을 통해 무차원 충격 변수와 샌드위치 판재의 파손의 상관관계를 통하여 초경량 금속 샌드위치 판재의 비 파손 설계 범위를 도출 할 수 있었다.

REFERENCES

1. Evans, A. G., Hutchinson, J. W. and Ashby. M. F., "Multifunctionality of Cellular Metal Systems," *Progress in Materials Science*, 43, 171 - 221, 1999.
2. Gibson. L. J., and Ashby. M. F, *Cellular Solids : Structure and Properties*, Cambridge University Press, 1998.
3. 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 Heinmann, 2000
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. 안동규, 이상훈, 김민수, 한길영, 정창균, 양동열, "ISB 판넬의 굽힘강성 및 파손특성에 관한 연구" *한국정밀공학회지*, 제 22권, 제 9호, pp. 162-172, 2005.
11. 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.
12. 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.
 13. 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.
 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. Cote, F., Fleck, N. A., Deshpande and V. S., "Fatigue performance of sandwich beams with a pyramidal core," International Journal of fatigue, 29, 1402-1412, 2007.
 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. Lee, S., Barthelat, F., Hutchinson, J. W., Espinosa, H. D., "Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials - Experiments and modeling," International Journal of Plasticity, 22, 2118 - 2145, 2006.
 19. M.A. Wahab, M.s. Alam "The significance of weld imperfections and surface peening on fatigue crack propagation life of buff-welded joints," Journal of Materials Processing Technology, 931 - 937, 2004.
 20. Russell Biagi, Hilary Bart-Smith "Imperfection sensitivity pyramidal core sandwich structures," International Journal of Solid and structures, 44, 4690 - 4706, 2007.
 21. H. Bart-Smith, J.W. Hutchinson, N.A. Fleck, A.G. Evans "Influence of imperfections of the performance of metal foam core sandwich panels," International Journal of Solid and structures, 39, 4999 - 5012, 2002.
 22. Sangil Hyun, Ji-Eun Choi, Ki-Ju Kang "Effects of imperfections of the mechanical behavior of a

- wire-woven bulk kagome cellular metal under compression," *Computational Materials Science*, 46, 73 - 82, 2009.
23. ABAQUS/Getting Started with ABAQUS. Version 6.5, 2004.
 24. ABAQUS/Analysis User's Manual. Version 6.5, Vol. 3, 2004.
 25. 문경제, "3차원 형상의 금속 구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판넬의 충격 특성 분석" 석사학위논문, 2007.
 26. 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.
 27. 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.
 28. D.Y. Seong, C. G. Jung, D. Y. Yang, K. J. Moon, D. G. Ahn., "Quasi-isotropic bending responses of metallic sandwich plates with bi - directionally corrugated cores," *Materials & Design*, 31(6), pp. 2804 - 2812. 2010.
 29. M. Zupan, V. S. Deshpande, N. A. Fleck., "The out-of-plane compressive behaviour of woven-core sandwich plates," *European Journal of Mechanics A/Solids*, 23(3), pp. 411 - 421. 2004.
 30. F. Cote, R. Biagi, H. Bart-Smith, V. S. Deshpande., "Structural response of pyramidal core sandwich columns," 44(10), pp. 3533 - 3556, 2007
 31. D. D. Radford, N. A. Fleck, V. S. Deshpande., "The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading," *International Journal of Impact Engineering*, 32(6), pp. 968 - 987, 2006.
 32. Z. Xue, J. W. Hutchinson., "A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates," *International Journal of Impact Engineering*, 30(10), pp. 1283 - 1305, 2004.
 33. H. N. G. Wadley, N. A. Fleck, A. G. Evans., "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures," *Composites science and technology*, 63(6), pp. 2331 - 2343, 2003.
 34. D. G. Ahn, G. J. Moon, C. G. Jung, D. Y. Yang, "Variation of impact characteristics of ISB panels

with a pyramidal inner structure according to joining technologies, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 24(9), pp. 110 - 118, 2007.

35. B. K. Lee, K. J. Kang, "A parametric study on compressive characteristics of wire-woven bulk Kagome truss cores," Composite Structures, 92(2), pp. 445 - 453, 2010

36. <http://www.matweb.com/>

감사의 글

지금의 학위논문이 나오고 졸업하기까지 여러 가지 도움을 주신 많은 분들께 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 2년 동안 짧다면 짧고 길다면 긴 시간 동안 힘들고 고생한 순간들도 많았지만 학업뿐만 아니라 미래의 사회의 구성원으로써 많은 것을 보고 듣고 배우고 느낄 수 있는 시간들이었습니다.

학부생 시절에 가장 취업에 대한 스트레스 및 부담이 되었던 때에 취업현장실습에 추천을 해주시면서 실무에 대한 이해를 할 수 있었으며, 대학원 생활까지 아낌없는 가르침과 인간적인 도리 및 공학도로써 가져야 할 마음가짐에 대해 가르쳐주신 안동규 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 또한, 학부시절부터 지도를 해주시고, 논문이 완성되기까지 교정 및 심사하시느라 고생하신 조규재 교수님과 한길영 교수님께도 깊은 감사드립니다.

1년에 몇 번밖에 만나지 못하지만 찾아볼 때마다 항상 좋은 말씀과 따끔한 충고/조언을 해주셨던 전산설계실협실의 존경하는 선배님들께 감사의 말씀드립니다.

졸업 후에도 종종 실험실 찾아와 치킨 피자 사주신 현우형, 최근에 결혼하셔서 바빠진 경흠형, 이쁜 형수님 두신후 가~끔 실험실 찾고 데이트 하시느라 바빠진 동한형, 요즘 살빠진 승화형, 광주 가까이서 세훈형, 창원 멀리서 고생하고 있을 민우형 등 감사의 말씀을 드립니다.

실험실 동기지만 부담이 가장 큰 실험실 장으로써 갖은 고생을 한 창규형, 가끔이지만 같이 컴퓨터 게임으로 스트레스를 날려버린 영수, 저 때문에 고생 많이 하고 가끔 캐치볼도 해주는 착한 우철이, 가장 최근에 들어와서 대학원 생활에 하나둘 알아가고 있는 나라, 그밖에 20만원 쓰게 한 호진이, 시끄러운 슬기 등 많은 이야기는 못 나눴지만 그들이 있었기에 대학원 생활이 즐거웠고 소중했습니다. 진심으로 고맙습니다.

다른 실험실에서 석사 학위를 위해 같이 밤낮으로 고생하는 모든 사람들에게도 수고한다는 말을 전하고 싶습니다. 주간에는 학과실, 밤에는 실험실 투잡뛰는 규현이, 실험실은 잘 다니고 있는지 소식없는 명구, 오늘도 만렙찍느라 고생한다는 순기, 아직도 카폴한다는 영환이, 역시 다른 실험실에서 소식없는 주열이 등등 고생한다는 말 전합니다.

대학원 생활이 힘들지만 주말에 만나서 힘내라고 위로해주고 야구로 스트레스 풀게 해준 레드탑스 야구단 여러분. 특히, 상태형님, 진한형, 현택이형, 진호형, 성윤이, 선주,

규환이, 대영이, 등 진심으로 감사드립니다.

그밖에 야구 못한다고 꾸지람 주는 인환이형, 서울 멀리서 응원해주는 동호, 인구, 성욱이 포함해서 광주에 있는 봉규, 인욱, 용연이, 동구 등 늘 고맙습니다.

또한, 저를 항상 믿고 대학원에 진학 후 공부만 할 수 있도록 제 뒷바라지 해주신다고 여러가지 마음고생이 많으셨던 저희 부모님께 미안한 마음과 함께 감사의 말씀드리겠습니다. 또한, 일찍 시집가서 잘 살고 있는 동생과 타지에서 동생 힘들지 않도록 옆에서 많이 도와주는 매제에게도 감사의 말 전합니다.

2011년 12월

선 향 선