

2006년 2월
석사학위논문

초경량/고강성을 갖는 ISB판넬의 정적 특성 분석

조선대학교 대학원

기계공학과

이 상 훈



초경량/고강성을 갖는 ISB 판넬의 정적 특성 분석

Investigation into static characteristics of ISB panels
with ultra-light weight and a high stiffness

2006 년 2 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

이 상 훈

초경량/고강성을 갖는 ISB 판넬의 정적 특성 분석

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2005 년 10 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

이 상 훈

이상훈의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 종 관



위 원 조선대학교 교수 한 길 영



위 원 조선대학교 교수 안 동 규



2005 년 11월 일

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLE	I
LIST OF FIGURES	II
ABSTRACT	
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 관련연구	3
1.2 연구목적 및 방법	5
제 2 장 ISB 판넬 제작 공정	6
2.1 내부구조체 특성	6
2.1.1 피라미드 구조를 갖는 익스펜디드 금속 구조체	6
2.1.2 망형직조 금속 구조체	7
2.2 ISB 판넬 제작	8
제 3 장 인장시험 및 굽힘시험	9
3.1 내부구조체 인장시험	9
3.1.1 실험방법	9
3.1.2 실험 결과 및 고찰	10
3.2 외판재료 인장시험	11

3.2.1	실험방법	11
3.2.2	실험 결과 및 고찰	13
3.3	ISB 판넬 인장시험	15
3.3.1	실험방법	15
3.3.2	실험 결과 및 고찰	17
3.4	ISB 판넬 3점 굽힘시험	22
3.4.1	시험설계 및 제작	22
3.4.2	실험방법	27
3.4.3	실험 결과 및 고찰	28
3.4.3.1	익스텐드드 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 굽힘강성 특성	28
3.4.3.2	익스텐드드 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 파손특성	34
3.4.3.3	망형 직조 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 굽힘강성 특성	36
3.4.3.4	망형 직조 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 파손특성	40
제 4 장	ISB 판넬의 인장·굽힘 유한요소 해석	42
4.1	ISB 판넬의 인장에 대한 유한요소 해석	42
4.1.1	CAD 모델링 및 유한요소 격자 생성	42

4.1.2 물성 조건 및 경계조건	43
4.1.3 결과 및 고찰	46
4.2 ISB 판넬의 3점 굽힘에 대한 유한요소 해석	50
4.2.1 CAD 모델링 및 유한요소 격자 생성	50
4.2.2 물성 조건 및 경계조건	51
4.2.3 결과 및 고찰	53
제 5 장 결 론	57
REFERENCES	60

감사의 글

LIST OF TABLES

Table 1 Results of tensile tests	10
Table 2 Results of tensile tests for stainless steel	13
Table 3 Specific modulus, specific yield strength and specific strength of the stainless steel	14
Table 4 Results of tensile tests for ISB panels	18
Table 5 Specific modulus, specific yield strength and specific strength of ISB panels	19
Table 6 Dimension of design parameters for specimens for the case of ISB panel with a expanded metal	24
Table 7 Dimension of design parameters for specimens for the case of ISB panel with a woven metal	26
Table 8 Results of three-points bending tests for the case of ISB panel with a expanded metall	30
Table 9 Results of three-points bending tests for the case of ISB panel with a woven metal	38
Table 10 Number of nodes and elements (analysis of tensile tests)	44
Table 11 Material properties of stainless steel and CSP 1N sheet	45
Table 12 Number of nodes and elements (analysis of three points bending) ..	52

LIST OF FIGURES

Fig. 4 Examples of sandwich plate with truss cores and a metallic foam	2
Fig. 2 Structure of expanded metal with pyramid shape	6
Fig. 3 Structure of a woven wire metal	7
Fig. 4 Multi points electrical resistance welding and shpe of electrode	8
Fig. 5 Set-up of tensile test for woven wire meta	9
Fig. 6 Stress-strain relationship of woven wire metal for each material direction	11
Fig. 7 Set-up of tensile test for stainless sheet	12
Fig. 8 Stress-strain relationship of stainless steel for each material direction	14
Fig. 9 Design parameters of specimen for ISB panel	15
Fig. 10 Set-up of tensile test for ISB panel	16
Fig. 11 Influence of the crimping angle on stress-strain curve	18
Fig. 12 Influence of the crimpling angle on the specific modulus	20
Fig. 13 Influence of the crimpling angle on the specific strength	20
Fig. 14 Influence of the crimpling angle on the specific yield strength	21
Fig. 15 Fracture characteristics of the ISB panel according to the crimping angle	22
Fig. 16 Design parameters of specimen for ISB panel with expanded metal	23
Fig. 17 Design parameters of specimen for ISB panel with a woven metal	25
Fig. 18 Experimental set-up	27

Fig. 19 P- δ curve according to crimping angle (L=160mm, W=20mm)	29
Fig. 20 P- δ curve according to crimping angle (L=200mm, W=30mm)	29
Fig. 21 Relationship between specific stiffness and crimping angle ...	31
Fig. 22 Relationship between crimping angle and specific stiffness per unit width of ISB panel (equivalent mass)	33
Fig. 23 Relationship between crimping angle and specific stiffness per unit width of ISB panel (equivalent volume)	33
Fig. 24 Failure mode of ISB panel with the crimped pyramidal expanded metal	35
Fig. 25 Failure map of ISB panel with the crimped pyramidal expanded metal	35
Fig. 26 P- δ curve ISB panel with the woven metal (L=160mm) ..	37
Fig. 27 P- δ curve ISB panel with the woven metal (L=200mm) ..	37
Fig. 28 Relationship between material direction and specific stiffness of ISB panel with the woven metal (P- δ curve)	39
Fig. 29 Relationship between material direction and specific stiffness per unit width of ISB panel with the woven metal (P- δ curve) ...	39
Fig. 30 Failure mode of ISB panel with the woven metal	40
Fig. 31 Failure map of ISB panel with the woven metal	41
Fig. 32 Analysis model for the tensile test	43
Fig. 33 Boundary conditions of FE analysis for the case of a uni-axial tention	44
Fig. 34 Stress-strain curves of stainless steel and CSP 1N sheet ...	45

Fig. 35 Results of analysis for the tensile test according to the crimping angle	47
Fig. 36 Comparison of the results of FE analysis and those of tensile tests ($\theta = 90^\circ$)	48
Fig. 37 Comparison of the results of FE analysis and those of tensile tests ($\theta = 120^\circ$)	48
Fig. 38 Comparison of the results of FE analysis and those of tensile tests ($\theta = 150^\circ$)	49
Fig. 39 Comparison of the results of FE analysis and those of tensile tests	50
Fig. 40 Analysis model of specimen for three points bending	51
Fig. 41 Boundary condition for FE analysis for the case of three-points bending	52
Fig. 42 Results of analysis for three points bending	54
Fig. 43 Comparison of the results of FE analysis and those of experiments (three points bending, $P-\delta$ curve)	55
Fig. 44 Comparison of the results of FE analysis and those of experiments (three points bending, failure mode)	56

ABSTRACT

Investigation into static characteristics of ISB panels with ultra-light weight and high stiffness

Lee, Sang-Hoon

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

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, various research works of ultra-light weight structured materials with a type of sandwich panel are actively in progress to improve the efficiency of energy and the safety for transport vehicles. The sandwich panel is produced by joining metallic cores with three-dimensional inner structures, such as a honeycomb, a kagome structure, a woven metal, etc, to metallic skin sheets with welding and adhesion. Because the sandwich panel has a large empty area in the core, the panel has a light weight in comparison with the solid material with an equivalent volume. In addition, the strength, the stiffness and the crash worthiness of the sandwich panel are highly improved by the inner structures. Hence, several types of sandwich panel have been developed. However, the previously developed sandwich panel has hardly applied to automotive industries due to the heavy thickness, which is greater than several centimeters, and an expensive manufacturing cost.

In order to overcome the disadvantages of the sandwich panel, inner structured and bonded panel with three-dimensional inner structures (ISB panel) has been developed.

The objective of this research work is to investigate into static characteristics of ISB panels with ultra-light weight and high stiffness.

In order to investigate mechanical properties and deformation characteristics and of ISB panel with a pyramidal inner structure and skin sheet for the case of a tensile load, several tensile tests have been carried out. From the results of the experiments, the stress-strain curve and the mechanical properties of the ISB panel and the skin sheet have been obtained. In addition, the mechanical properties of the ISB panel have been compared with those of the skin sheet by the view point of a specific modulus, a specific yield strength and a specific strength.

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.

In order to evaluate the influence of the crimping angle on the load and

stress distribution in the ISB panel with a pyramidal inner shape, three-dimensional elasto-plastic finite element analysis has been performed using a commercial code ABAQUS. The results of the analysis showed a good agreement with those of experiments. From the results of the analysis for the case of a uni-axial tension, it has been shown that the load and stress shared by the skin sheet are increased when the crimping angle is decreased. Through the results of the analysis for the case of three-points bending, it has been shown that the load and stress shared by the inner structures are increased when the crimping angle is decreased. In addition, the local strain distribution and deformation characteristics in the vicinity of the center depression area for the case of three points bending and the center area for the case of the uni-axial tension.

Based on the above results, it has been shown that the ISB panel has an excellent mechanical properties in terms of a specific stiffness and a specific strength. In addition, it has been shown that ISB panel with a pyramidal inner structure can be optimally designed by the control of the crimping angle for the pyramidal structure in terms of mechanical properties and failure characteristics.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 관련연구

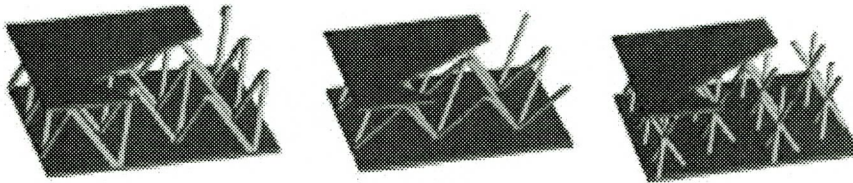
최근 자동차/항공기/선박등 수송기계들의 판재나 구조물을 첨단기능성 재료로 제작하여 연료소비량을 감소시키며 강도/강성/내충격성을 현저히 증대 시키는 동시에 승객의 안전성을 향상시키는 초경량 금속구조재 (Ultra-light weight structured material)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻³⁾

샌드위치 판재에 대한 초기연구로써는 2차 세계대전 당시 “Mosquito Aircraft”⁴⁾ 베니어 판을 외판으로 하고 발사나무를 코어로 갖는 샌드위치 판재가 적용된바 있으며, 1940년대에 벌집구조와 PVC/PUR을 코어로 갖는 샌드위치판재에 대한 연구가 활발히 진행되어 이론적 실험적 연구의 토대를 마련하였다. 이후 1960년대에 금속 샌드위치 판재에 대한 다양한 소재 개발 및 항공/군사/산업등의 사용 목적에 맞는 가공기술 개발과 FEM을 이용한 해석적 기법을 도입하였으며, 1990년대 말부터 초경량/고강성/고내충격성 뿐만 아니라 공정 및 설계변수가 용이하고 대량생산으로 가격경쟁력이 있다는 장점이 있어 관심이 높아지기 시작 하였다.⁵⁾

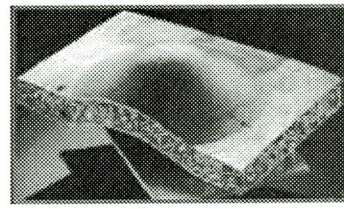
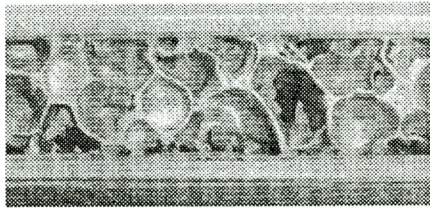
초경량 금속구조재의 경우 Fig. 1(a)와 같이 판재형 금속재료 내부에 피라미드 (Pyramidal) 구조물, 허니콤(Honeycomb) 구조물, 카고메(Kagome) 구조물등과 같은 3차원 입체 구조물 또는 Fig. 1(b)와 같은 금속 폼 (Metallic foam) 재료와 같은 다공성 재료의 초경량 코어 (Lightweight core)로 구성된 샌드위치 구조를 가진다.⁶⁻⁹⁾

이러한 샌드위치형 초경량 금속구조재의 경우 부피의 대부분인 코어 부분이 비

어 있어 재료 밀도가 매우 낮고, 내부 구조물의 3차원적 구조가 외부 하중 부가시 샌드위치 판재의 변형에 영향을 미쳐 비강성/비강도/비내충격성이 현저히 증가한다.¹⁰⁾



(a) Truss core



(b) Metallic foam core

Fig. 1 Examples of sandwich plate with truss cores and metallic foam

초경량 금속구조재를 이용한 관련 연구로는 독일의 Kopp 등에 의하여 격자 판재(Grid sheet) 개발시 내부 구조재의 정적 기계적 물성 및 변형특성 분석을 위하여 내부구조재인 망형 직조 금속격자, 외판인 퍼포레이티드 판재(Perforated sheet) 및 망형 직조 금속격자와 퍼포레이티드 판재로 구성된 샌드위치 판재에 대하여 인장시험 및 유한요소 해석을 수행하였으며, 그물망 구조물을 가진 격자 판재(Grid sheet)를 이용한 초경량 자동차용 후면 판재와 증기터어빈 재료를 개발한 바 있다.¹¹⁾ Zupan 등은 직조망형 금속을 갖는 샌드위치 판재에 대한 굽힘과 압축에 대해 이론적으로 최적화 하여 실험결과에 대해 분석 하였다.¹²⁻¹³⁾ Wadley등은

크림핑 내부구조물을 가진 샌드위치 판재에 대한 3점 굽힘실험을 수행하여 굽힘강성과 파단특성에 대한 연구를 수행하였다.¹⁴⁾ Hutchinson 등은 카고메 트러스 구조물의 변형 특성에 대한 이론적 연구를 수행하였다.¹⁵⁾ 강기주 등은 카고메 트러스에 사용되는 금속선에 대한 인장실험을 수행한 바 있다.¹⁶⁾ Wang 등은 Kagome 구조를 가진 샌드위치 판재에 대한 압축시험, 전단시험 및 3점 굽힘시험을 수행하여 설계변수의 파단특성 영향성을 분석하고, 이것을 설계데이터로 활용하였다.¹⁷⁻¹⁸⁾ Chris 등은 옥텟 트러스 (Octet-truss) 구조물을 가진 두꺼운 샌드위치 판넬에 대한 3점 굽힘시험과 전단-압축시험을 수행하였다.¹⁹⁾ Deshpanded 등은 옥텟 트러스 구조물을 갖는 샌드위치 판재의 4가지 파손모드에 대하여 상계해와 3점 굽힘시험 결과를 비교하여 붕괴 메커니즘 지도를 작성 하였다.²⁰⁾ Zok 등은 크림핑 (Crimping) 공정을 통하여 제작된 피라미드형 트러스 구조물 코어를 내부 구조물로 가진 샌드위치 판재에 대한 고정형 3점 굽힘시험을 수행하였으며, 등가물성에 대한 유한요소 해석을 수행하여 실험결과와 비교/분석 하였다.²¹⁾ Wallach 등은 격자블럭 (Lattice block)을 내부구조물로 가진 샌드위치 판재의 압축, 전단시험을 수행하여 외판재질의 실험결과 및 Alulight 금속폼의 물성과 비교 하였다.²²⁾ Bart-Smith는 금속폼을 내부구조물로 가진 샌드위치 판넬의 단축 압축실험을 통한 응력-변형을 곡선 취득 방법과 3점 굽힘시험을 이용한 파손지도 (Failure map) 생성방법에 대하여 연구하였다.²³⁾ Markaki 등은 금속섬유 구조의 샌드위치 판넬에 대한 인장, 굽힘, 전단 등에 대한 물성 실험등을 수행하였다.²⁴⁻²⁵⁾

최근 국내에서는 전체 두께 3mm 이하로 유지하면서 두개의 금속 박판사이에 3차원 금속 구조체를 대면적에 분포시킨 후, 판재와 구조체를 접합 또는 용접으로 연결시켜 재료의 무게를 현저히 감소시킴과 동시에 강도/강성/내충격성을 향상시키는 ISB 판재 개발에 대한 연구가 수행되고 있다.²⁶⁻²⁹⁾

1.2 연구목적 및 방법

초경량 금속 구조체인 ISB (Internally Structured Bonded) 판넬의 기계적 성질은 초경량 코어인 내부구조체의 기하학적 형상과 공간배치, 외판 (Skin) 의 기계적 물성 및 외판과 내부구조체의 접합 특성에 의하여 결정된다. 판재형태를 가지는 초경량 금속구조체의 경우 내부구조체와 외판의 기계적 변형 특성과 물성에 의하여 초경량 금속구조체의 기계적 성질이 결정됨으로 초기 설계/개발 단계에서는 내부 구조체와 외판의 기계적 물성에 대한 연구가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 ISB 판넬에 대한 인장·굽힘 및 비선형 유한요소해석을 통한 기계적 물성과 정적 특성을 분석/고찰 하였다.

ISB 판넬의 외판 재료인 스테인레스 강판과 내부구조체의 재료인 CSP 1N 판재에 대한 인장시험을 수행하여 기계적 특성을 분석하였으며, 이를 ISB 판넬의 인장 유한요소 해석시 재료물성값 입력 데이터로 사용하였다. ISB 판넬에 대한 기계적 특성을 분석하기 위해 인장시험을 수행하였으며, ISB 판넬과 스테인레스 강판에 대한 비탄성계수, 비강도, 비항복강도에 대해 비교·분석 하였다. 또한, 유한요소 해석을 통해 ISB 판넬의 인장 시험시 발생하는 ISB 판넬의 변형 특성과 응력분포를 분석하여 해석결과와 실험 결과를 비교함으로써, 실험을 통해 알지 못했던 재료 내부 변형 특성과 내부응력 분포 특성에 대해 고찰 하였다.

크림핑각을 갖는 익스펜디드 금속과 망형 직조 금속 구조체를 내부구조물로 가지는 ISB 판넬에 대하여 3점 굽힘시험을 통한 굽힘강성과 파단모드에 대한 분석 및 고찰을 수행하였으며, 설계변수의 굽힘강성과 파단지도(Failure Map) 영향성에 대한 연구를 수행 하였다. 크림핑각을 갖는 익스펜디드 금속과 망형 직조 금속을 각각의 내부 구조물로 가진 ISB 판넬을 설계적 측면에서의 적용성을 비교/분석 하였다. 또한, 유한요소 해석을 통해 ISB 판넬의 굽힘 시험시 발생하는 ISB 판

벨의 변형 특성과 내부하중/응력분포를 분석하고 해석결과와 실험 결과를 비교함으로써, 실험을 통해 알지 못했던 재료 내부 변형 거동과 국부응력 분포 특성에 대해 고찰 하였다.

제 2 장 ISB 판넬 제작 공정

2.1 내부구조체 특성 분석

2.1.1 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. 본 연구에서는 익스팬디드 금속을 Fig. 2 와 같이 금형으로 크림핑각을 부여 피라미드 형성의 구조체를 생성하였다. 이 크림핑각을 변화 시킴으로써 샌드위치 구조물의 상대밀도를 제어한다.

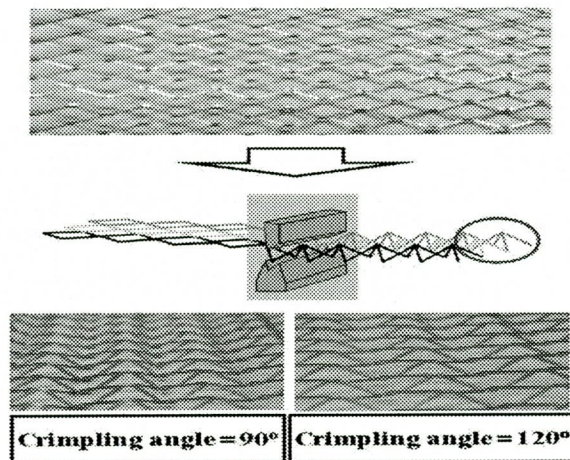


Fig. 2 Structure of expanded metal with pyramid shape

2.1.2 망형직조 금속 구조체

망형직조 금속 구조체는 Fig. 3 과 같이 한 방향으로 정렬된 와이어 사이로 정렬된 방향의 90° 방향으로 와이어가 지나가면서 직조된다. 그결과 주직조 방향(0°)인 Weft 방향의 금속선 굽힘각이 부직조방향(90°)인 Wrap 방향의 금속선 굽힘각 보다 작게 되어 직조금속망에 하중 부가시 기하학적 이방성이 발생한다. 또한 직조 금속망은 와이어간 접합이 이루어지지 않아 전단에 대한 저항 없이 전단력에 대하여 자유롭게 변형하는 특성을 지닌다.²⁶⁾

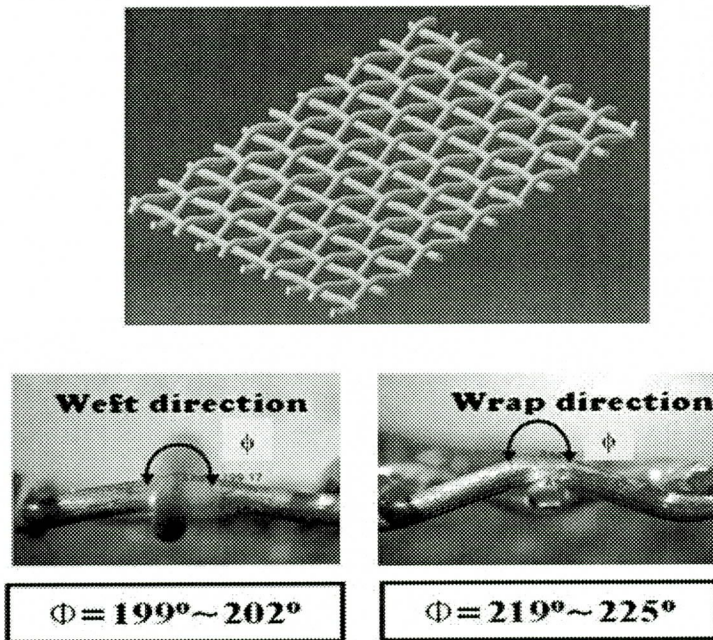


Fig. 3 Structure of a woven wire metal

2.2 ISB 판넬 제작

제작된 내부구조체를 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 내부구조체의 꼭지점과 면재의 접촉에 의해 발생하는 접촉저항을 이용한 전기저항 다점용접을 이용하여 접합되었다. Fig. 4 는 익스팬디드 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 용접 공정이다. 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 0.3mm 인 스테인레스 강판(Stainless sheet)을 이용하였다. 이는 면재가 심재의 두께보다 얇을 경우 용접시 심재가 녹아 용접이 되지 않기 때문에 심재보다 얇은 면재를 사용하기 위함이다.

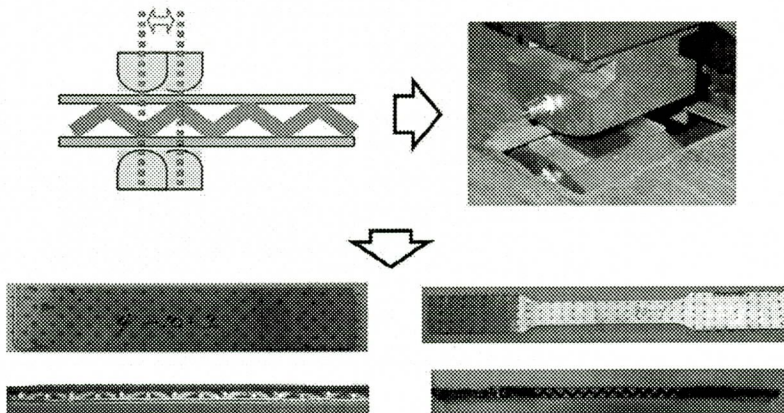


Fig. 4 Multi points electrical resistance welding and shape of electrode

제 3 장 인장시험 및 굽힘시험

3.1 내부구조체 인장시험

3.1.1 실험방법

ISB 판넬의 내부구조체중의 하나인 망형직조금속(Woven wire metal)에 대한 인장시험을 수행하였다. 시편의 설계변수인 평행부 길이와 연결부 경사각은 각각 125 mm 및 30° 로 결정하였다. 구속압력이 균일하게 시편의 그립부에 전달되도록 그립부를 에폭시로 균일하게 충전 시켰다. 실험은 Fig. 5 와 같이 Instron 5583에서 수행하였으며, 망형직조금속의 직조 특성을 고려하여 주직조방향(0°)과 부직조방향(90°)에 대하여 실험을 수행하였다. 연신율은 연신율측정기(Extensometer)를 사용하였으며, 종탄성 계수는 ASTM E111-82³¹⁾에 기준하여 실험데이터를 이용한 선형회귀법으로 계산하였다.

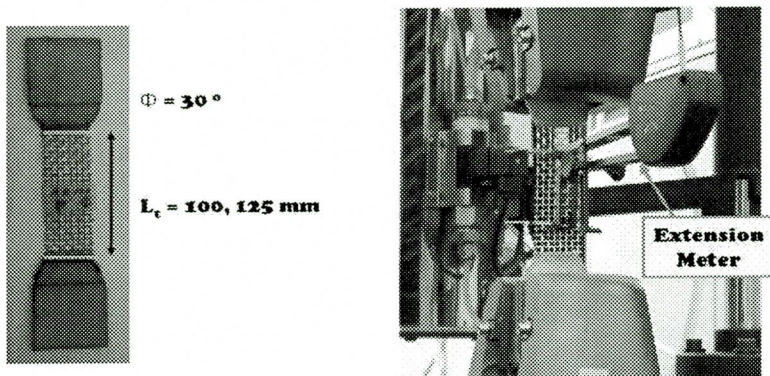


Fig. 5 Set-up of tensile test for woven wire metal

3.1.2 실험 결과 및 고찰

망형직조 금속에 대한 인장시험 결과는 Fig. 6 및 Table 1 과 같다. 직조 망형 금속 구조물에 부가되는 응력식은 식(1)과 같이 정의 하였다.

인장시험결과 망형직조 금속의 직조특성에 의하여 직조방향과 부직조방향의 이방성이 현저히 존재함을 알 수 있었다. 이것은 Fig. 3과 같이 주직조방향에 비하여 부직조방향의 변형각(θ)이 크기 때문으로 사료된다. 재료 인장시 굽혀진 와이어가 병진 및 회전 변형을 한다. 이때, 부직조방향의 경우 변형각이 주 직조방향보다 매우 큼으로 회전변형이 많이 발생함과 동시에 와이어에 부가되는 인장하중이 작아 대변형이 가능하기 때문에 부직조방향의 연신율이 큰 것으로 사료된다.

$$\sigma = \frac{4P}{n\pi d^2} \quad (1)$$

여기서, P, d, n 은 각각 부가하중, 와이어 직경 및 평행부내의 와이어 개수이다.

Table 1 Results of tensile tests

Material Direction	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_T (MPa)	ϵ_{max}
0°	110.1	596	772	0.017
90°	57.9	360	744	0.072

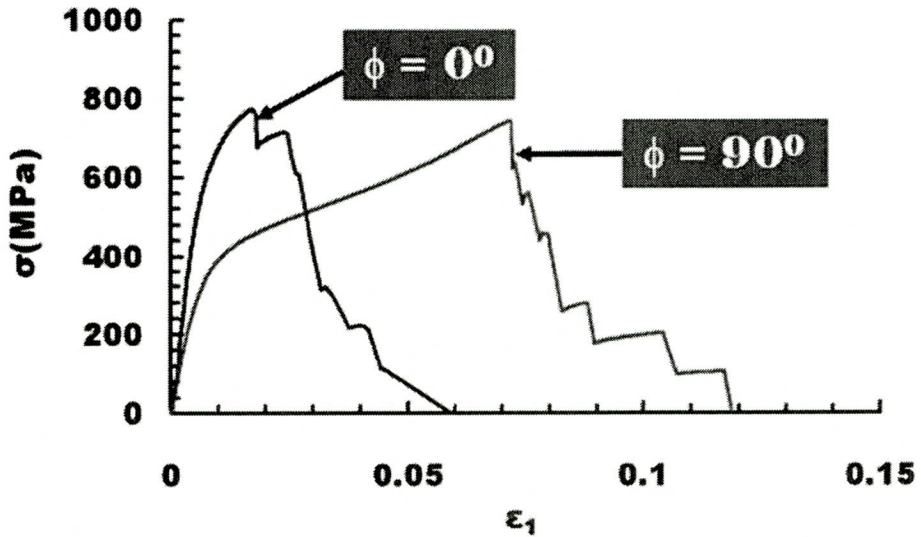


Fig. 6 Stress–strain relationship of the woven wire metal for each material direction

3.2 외판재료 인장시험

3.2.1 실험방법

ISB 판넬의 비탄성계수, 비강도, 비항복강도 및 변형특성을 비교/분석하기 위하여 ISB 판넬의 외판재료인 스테인레스 강판의 기계적 물성과 변형특성에 대한 연구가 필요하다. 본 실험에서는 스테인레스 강판에 대한 인장시험을 수행하였다. 시편은 ASTM A370-03³⁰⁾에 의하여 설계/제작되었다. 박판재의 이방성 특성을 고려하여 압연방향(0°), 압연방향에 수직인 방향(90°) 및 압연 방향의 45° 방향에 대하여 제작하였다. 스테인레스 강판의 종탄성계수, 포아송 비, 비례한도, 항복응력은 2축 스트레인게이지가 부착된 시편으로 측정 하였다.

인장강도, 최대변형을 및 응력-변형을 관계식은 연신율 측정기를 사용하여 측정하였다. 종탄성 계수와 포와송비는 ASTM E111-82³¹⁾ 에 기준하여 실험데이터를 이용한 선형회귀법으로 계산하였다. 실험은 Fig. 7 과 같이 Instron 5583 에서 수행되었다.



Fig. 7 Set-up of tensile test for stainless sheet

스테인레스 강판의 비탄성 계수 ($\beta_{E,st}$), 비강도 ($\alpha_{st,st}$) 및 비항복 강도 ($\alpha_{sy,st}$) 는 각각 식 (2), (3), (4) 와 같이 정의되었다. 이 식들에서 사용된 종탄성 계수, 인장강도, 항복강도는 압연방향(0°), 압연방향에 수직인 방향(90°) 및 압연방향(45°)의 방향에 대한 물성치를 평균하여 적용하였다.

$$\beta_{E,st} = \frac{E_{av,st}}{\rho_{st} \cdot g} \quad (2)$$

$$\alpha_{st, st} = \frac{\sigma_{T, av, st}}{\rho_{st} \cdot g} \quad (3)$$

$$\alpha_{sy, st} = \frac{\sigma_{y, av, st}}{\rho_{st} \cdot g} \quad (4)$$

3.2.2 실험 결과 및 고찰

스테인레스 강판 인장시험결과는 Table 2, 3 및 Fig. 8 과 같다.

스테인레스 강판 재료방향별 종탄성 계수, 항복강도 및 인장강도는 압연방향에서 가장 높은 값을 나타내며, 압연방향의 45° 방향에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 평균 종탄성계수, 평균 항복강도 및 평균 인장강도는 각각 179.7 MPa, 283 MPa, 677 MPa 이었다. 비탄성계수, 비항복강도, 비강도는 각각 2.47×10^6 m, 3.61×10^3 m, 8.63×10^3 m 였다.

Table 2 Results of tensile tests for stainless steel

Material Direction	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_T (MPa)	ϵ_{max}
0°	186	0.27	301	686	0.72
45°	171	0.28	271	667	0.77
90°	182	0.28	277	678	0.80
Avg.	179.6	0.28	283	677	0.76

Table 3 Specific modulus, specific yield strength and specific strength of the stainless steel

$\beta_{E, st}$ (10^6m)	$\alpha_{sy, st}$ (10^3m)	$\alpha_{st, st}$ (10^3m)
2.47	3.61	8.63

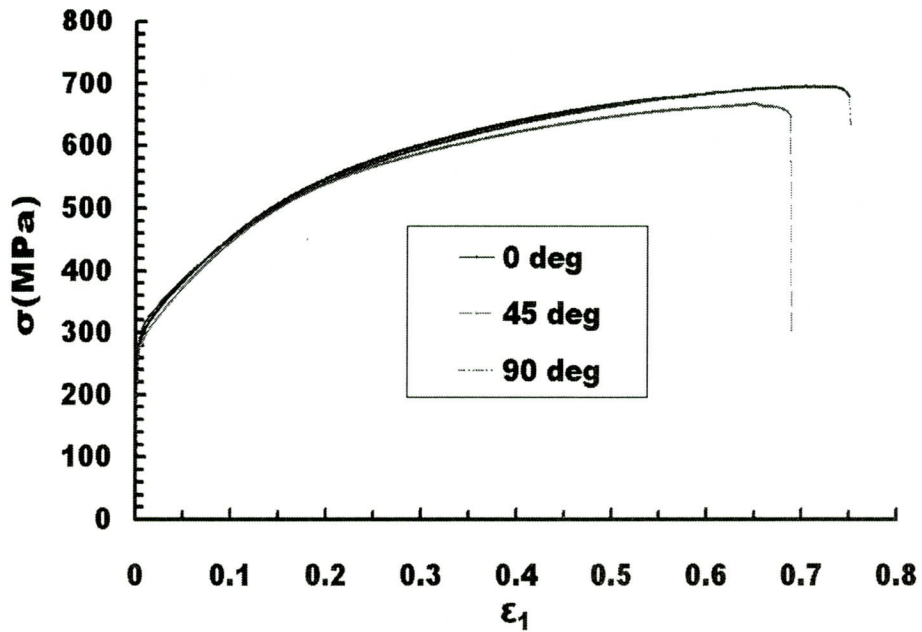


Fig. 8 Stress–strain relationship of stainless steel for each material direction

3.3 ISB 판넬 인장시험

3.3.1 실험방법

ISB 판넬의 인장시험에 사용된 시편은 Fig. 9 와 같이 ASTM A370-03³⁰⁾의 박판재료 인장시편 규격을 응용하여 설계/제작하였다. 인장시편 설계시 크립핑 각 (Crimping angle : θ)을 설계변수로 선정하였다. ISB 판넬의 인장시편의 크립핑각은 90° , 120° , 150° 로 선정하였다. ISB 판넬의 인장시편은 내부구조체의 기하학적 형상 때문에 시편내부에 공간이 발생하게 된다. 이 공간 때문에 인장시험시 시편 그립부에 함몰이 발생할 수 있다. 이러한 함몰을 최소화하기 위하여 Fig. 9 와 같이 시편 그립부를 에폭시로 충진하였다.

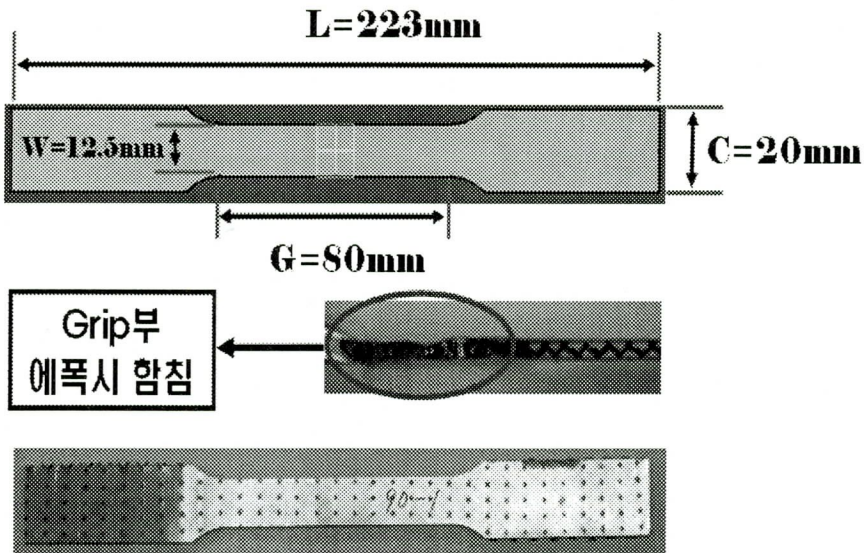


Fig. 9 Design parameters of specimen for ISB panel

ISB판넬의 종탄성계수, 포아송비, 비례한도, 항복응력은 2축 스트레인게이지가 부착된 시편으로 측정 하였다. 인장강도, 최대변형을 및 응력-변형을 관계식은 연신율 측정기를 사용하여 측정하였다. 종탄성계수와 포와송비는 ASTM E111-82³¹⁾ 에 기준하여 실험데이터를 이용한 선형회귀법으로 계산 하였다. 실험은 Fig. 10 과 같이 Instron 5583에서 수행되었다.

또한, ISB 판넬의 파단특성을 분석하기 위하여 크립핑 각도별 시편 내부 파단 형상을 분석하였다. 인장시험 완료후, ISB 판넬의 비탄성 계수 ($\beta_{E,ISB}$), 비강도 ($\alpha_{st,ISB}$), 비항복강도 ($\alpha_{sy,ISB}$) 는 식 (5), (6), (7)에 의하여 정의된다.

ISB 판넬과 스테인레스 강판의 비탄성계수, 비강도, 비항복강도를 비교/분석하여 ISB 판넬의 기계적 특성을 분석하였다.

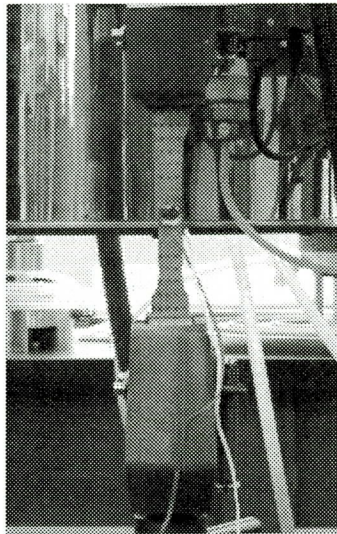


Fig. 10 Set-up of tensile test for ISB panel

$$\beta_{E, ISB} = \frac{E_{ISB}}{\rho_{ISB}g} \quad (5)$$

$$\gamma_{sy, ISB} = \frac{\sigma_{y, ISB}}{\rho_{ISB}g} \quad (6)$$

$$\gamma_{st, ISB} = \frac{\sigma_{T, ISB}}{\rho_{ISB}g} \quad (7)$$

여기서, E_{ISB} , $\sigma_{T, ISB}$, $\sigma_{y, ISB}$, ρ_{ISB} , g 는 각각 ISB 판넬의 탄성계수, ISB 판넬의 인장강도, ISB 판넬의 항복강도, ISB 판넬의 상대밀도, 중력가속도이다.

3.3.2 실험결과 및 고찰

크림핑된 피라미드 구조체를 내부구조체로 가지는 ISB 판넬의 인장시험결과는 Table 4 및 Fig. 11 와 같다.

본 실험결과 ISB 판넬의 크림핑각이 증가할수록 인장강도, 항복강도 및 최대 변형율이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 크림핑각이 증가 할수록 인장 강도 및 항복강도의 증가율에 비하여 최대변형율의 증가율이 현저히 크게 나타남을 알 수 있었다. 인장강도와 항복강도의 경우 크림핑각이 증가할수록 스테인레스의 인장강도와 항복강도에 가까워지나, 최대변형율은 크림핑각이 증가하여도 내부구조체의 내부 저항에 의하여 스테인레스 강판보다 매우 낮은 값을 나타냄을 알 수 있었다.

Table 4 Results of tensile tests for ISB panels

Crimping angle (θ)	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_T (MPa)	ϵ_{max}
90°	187	0.25	252	633	0.37
120°	183	0.26	269	648	0.49
150°	182	0.26	277	659	0.53

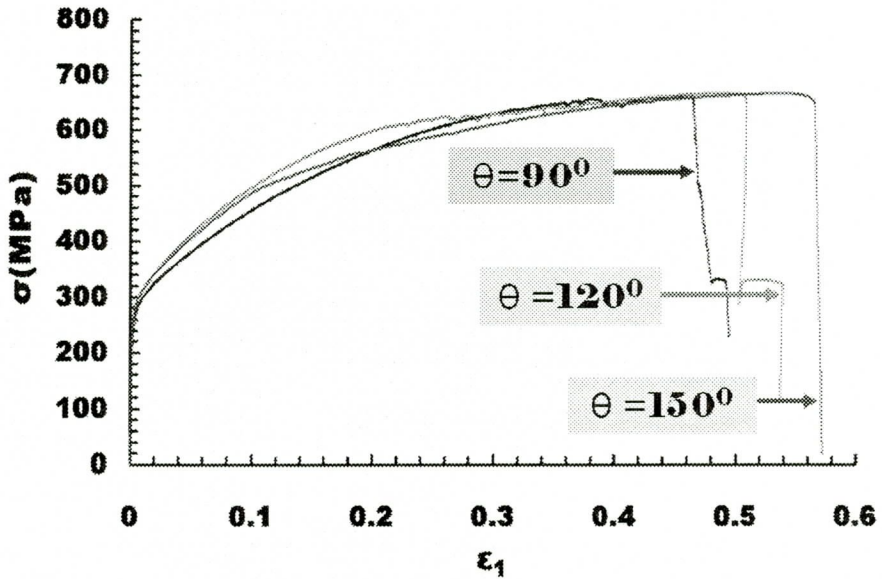


Fig. 11 Influence of the crimping angle on stress-strain curve

ISB 판넬의 비탄성계수, 비항복강도 및 비강도는 Table 5와 Fig. 12, 13, 14 와 같이 크림핑각이 증가할수록 거의 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 스테인레스 강판과 ISB 판넬을 비탄성계수, 비항복강도 및 비강도 측면에서 비교한 결과 ISB 판넬이 비탄성계수 2.1-3.9배, 비항복강도 3.0-3.6배 및 비강도 2.2-3.8배 정도 높은 값을 나타내었다.

이 결과로부터 ISB 판넬이 비항복강도, 비강성 측면에서 매우 우수한 기계적 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

Table 5 Specific modulus, specific yield strength and specific strength of ISB panels

Crimping angle (θ)	ρ_{ISB} (kg/m^3)	$\beta_{E,ISB}$ (10^6m)	$\alpha_{sy, ISB}$ (10^3m)	$\alpha_{st, ISB}$ (10^3m)
90°	1,960.2	9.7	13.1	32.95
120°	2,376.2	7.9	11.6	27.82
150°	3,480.3	5.3	10.9	19.32

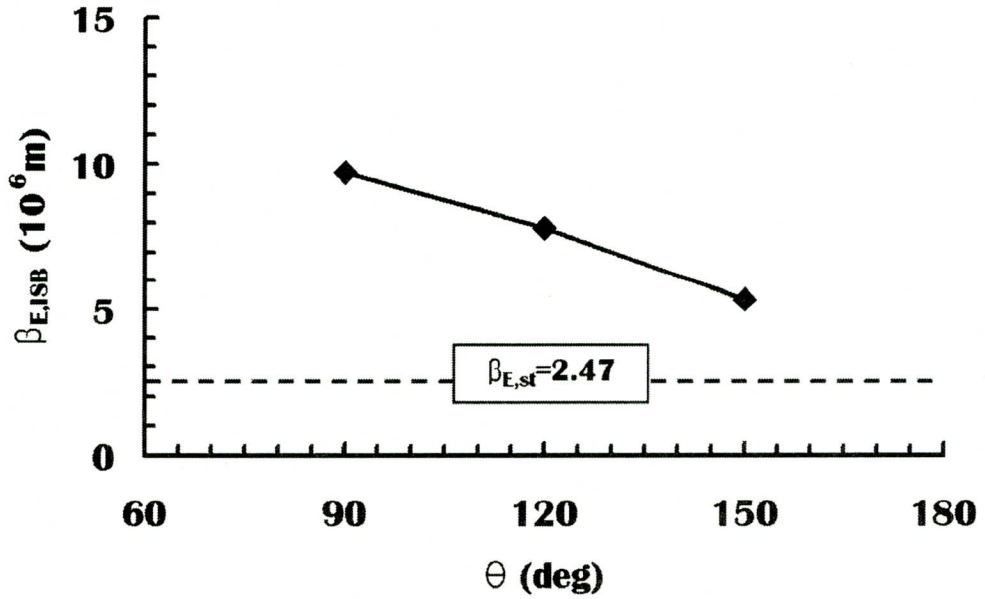


Fig. 12 Influence of the crimping angle on the specific modulus

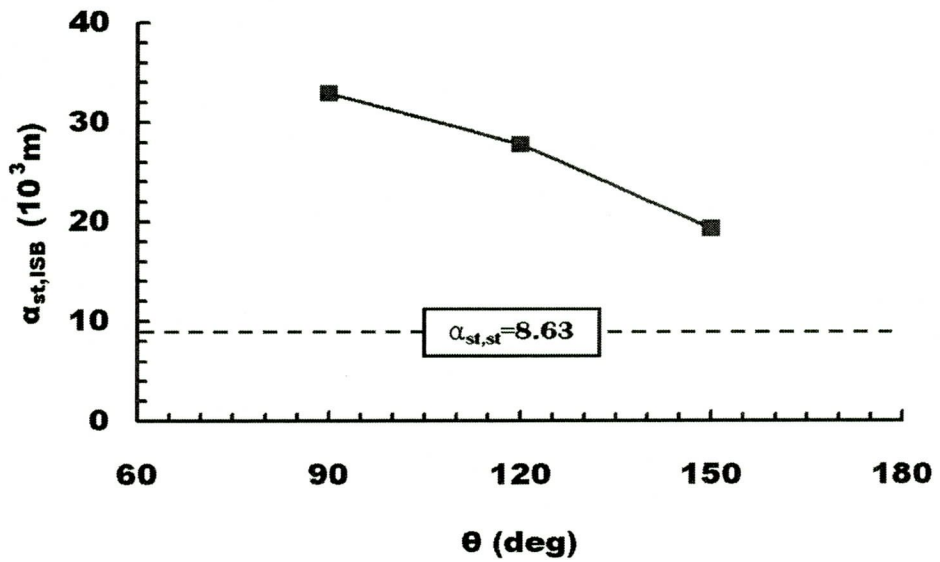


Fig. 13 Influence of the crimping angle on the specific strength

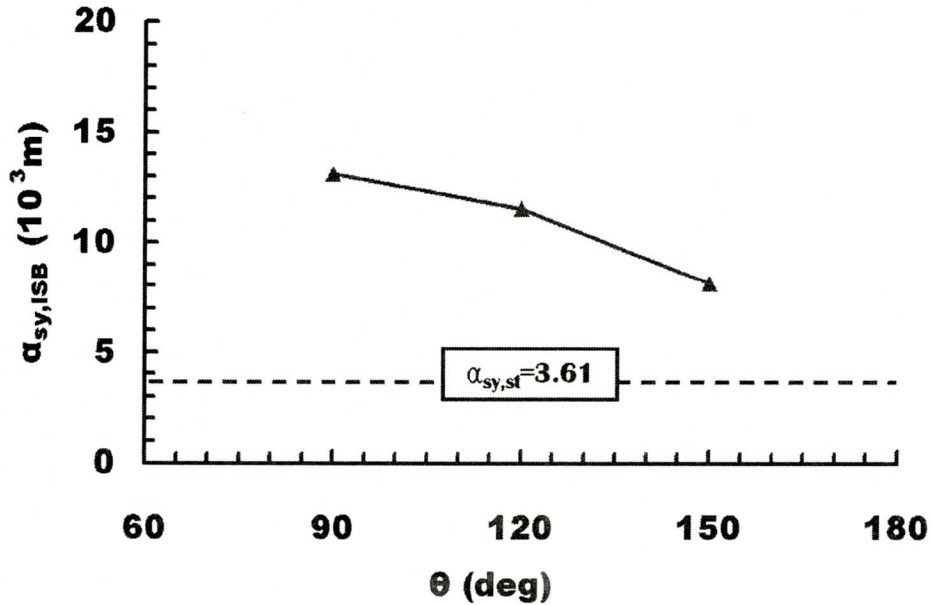


Fig. 14 Influence of the crimping angle on the specific yield strength

ISB 판넬의 경우 Fig. 15 와 같이 내부구조재가 7-12개 정도가 파단된 후 시편이 완전 파단되었다. 내부구조재가 하나씩 파단될때 마다 응력-변형을 선도해 응력이 약간 감소하다가 다시 증가하였다.

Fig. 15에서 n 은 ISB 판넬 파단 시점에서 내부구조체인 익스펜디드 금속의 파단 갯수를 나타낸 값이다. 또한, ISB 판넬 파단시 파단 단면에 굴곡이 발생하였다. 이것은 내부구조체와 외판이 용접됨으로써 용접된 부분과 용접되지 않은 부분 사이의 변형 구속차이가 발생한 것 때문으로 사료된다.

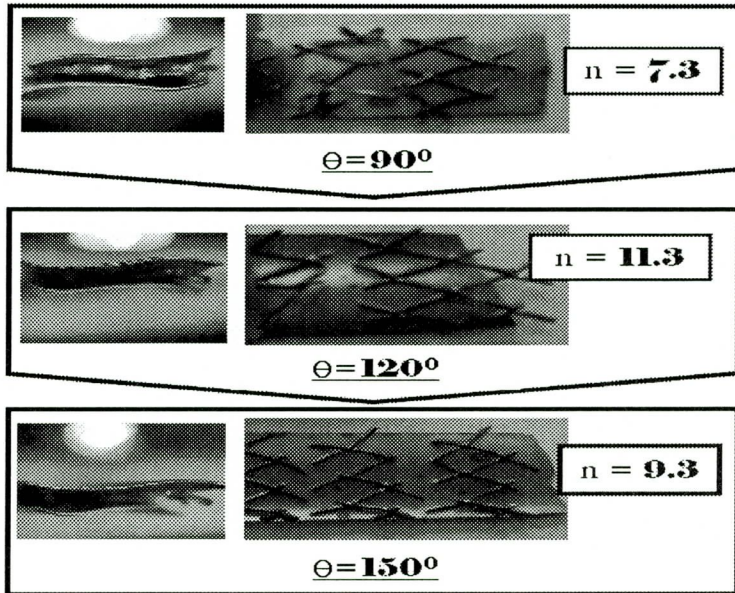


Fig. 15 Fracture characteristics of the ISB panel according to the crimping angle

3.4 ISB 판넬 3점 굽힘시험

3.4.1 시편설계 및 제작

3점 굽힘시험에 사용된 ISB판넬의 내부구조체는 피라미드 형상의 익스팬디드 금속과 망형 직조 금속을 사용 하였다. 외판은 0.3 mm 의 스테인레스 판재를 사용 하였으며, 다중점 전기저항 용접을 이용하여 내부구조체와 외판을 연결하였다. 익스팬디드 금속을 내부구조체로 가지는 ISB 판넬 시편의 경우 Fig. 16 및 Table 6 과 같이 시편길이(L), 시편폭(W), 및 크림핑각(θ)를 설계변수로 설정 하였다. 시편길이는 160mm 와 200mm, 시편폭은 20mm 와 30mm, 크림핑각

은 90° , 120° , 150° 로 하였다. 시편규격은 ASTM E290-87³²⁾, KSB 0803³³⁾에 근거하여 설계/제작 하였다. 시편은 각각이 조건에 대하여 5개씩 제작하였다.

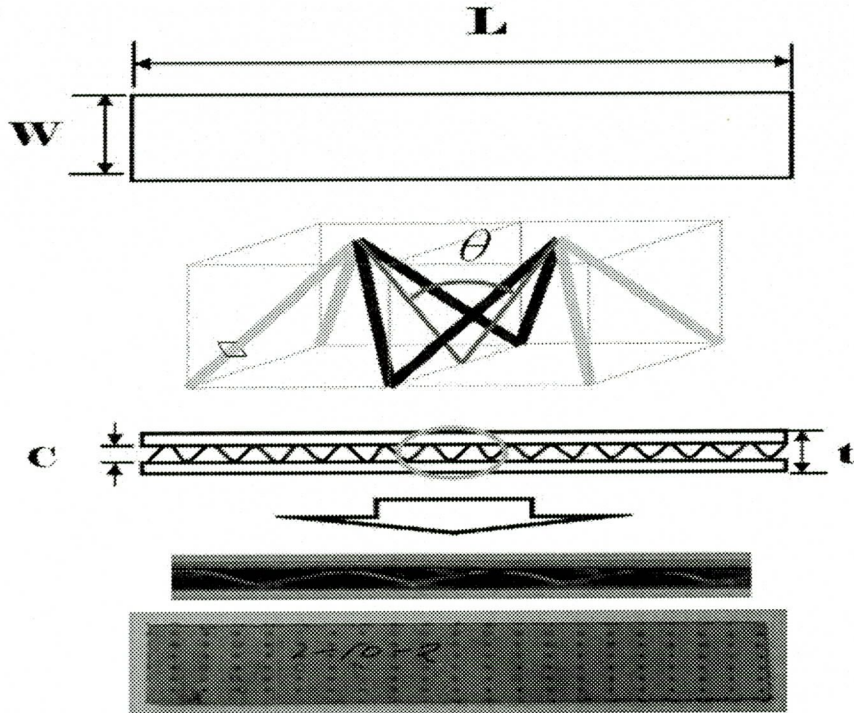


Fig. 16 Design parameters of specimen for ISB panel with expanded metal

Table 6 Dimension of design parameters for specimens for the case of ISB panel with a expanded metal

Crimping angle (θ)	L (mm)	W (mm)	t (mm)	C (mm)	m_{ISB} (g)
90°	160	20	2.77	2.17	17.5
		30	2.82	2.22	26.0
	200	20	2.80	2.20	23.0
		30	2.85	2.25	33.0
120°	160	20	2.37	1.77	17.5
		30	2.42	1.82	26.5
	200	20	2.35	1.75	25.0
		30	2.30	1.70	32.0
150°	160	20	1.61	1.01	17.5
		30	1.62	1.02	25.5
	200	20	1.58	0.98	25.0
		30	1.56	0.98	32.0

망형 직조 금속을 내부구조체로 가지는 ISB 판넬의 경우 직조방법에 따른 망형 직조 금속의 재료 이방성을 고려하기 위하여 Fig. 17 및 Table 7 과 같이 시편길이, 시편 폭, 재료방향을 변수로 설정 하였다. 시편길이는 160mm 와 200mm, 시편폭은 20mm 와 30mm, 시편 취득 방향은 망형 직조 금속의 주직조방향(0°)과 부직조방향(90°)이 되도록 하였다. 시편은 각각의 조건에 대하여 5개씩 제작하였다.

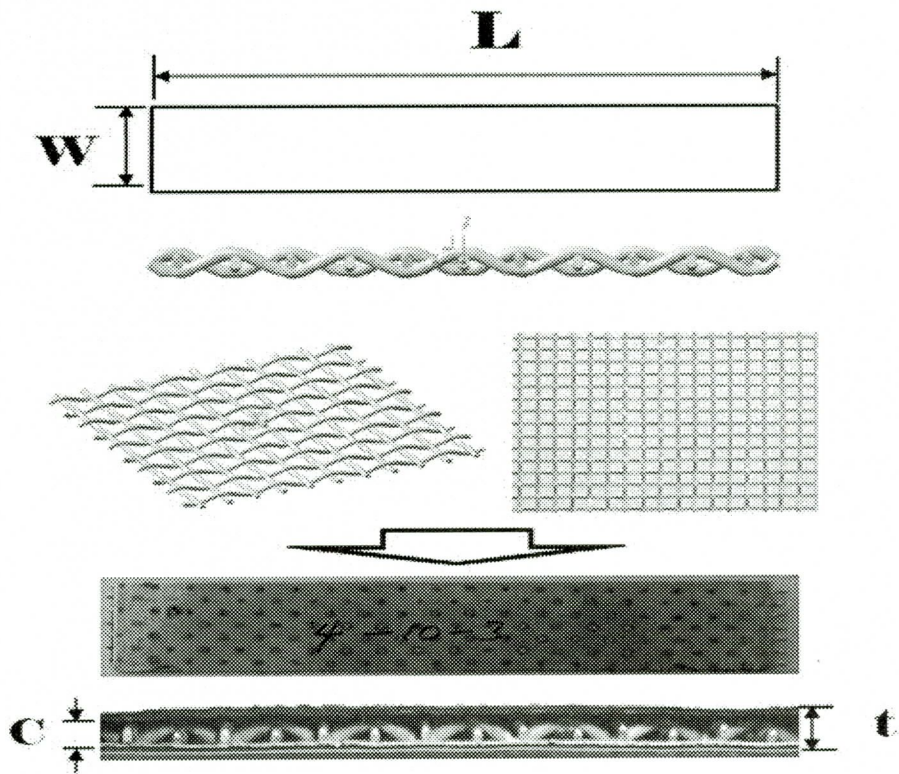


Fig. 17 Design parameters of specimen for ISB panel with a woven metal

Table 7 Dimension of design parameters for specimens for the case of ISB panel with a woven metal

Material Direction (ϕ)	L (mm)	W (mm)	t (mm)	C (mm)	m_{ISB} (g)
0°	160	20	2.26	1.71	22.5
		30	2.30	1.70	33.0
	200	20	2.25	1.65	29.0
		30	2.27	1.67	41.0
90°	160	20	2.31	1.66	22.5
		30	2.25	1.65	32.5
	200	20	2.28	1.68	29.0
		30	2.25	1.65	41.5

3.4.2 실험방법

ISB 판넬 시편의 3점 굽힘시험은 Fig 18 과 같이 ASTM E290-87³²⁾, KSB 0804³⁴⁾ 규격에 의거하여 INSTON 5583 에서 수행하였다. 3점 굽힘시험의 스패ん길이는 하부지지대 직경 밖으로 시편이 충분히 빠져나가도록 시편길이 160mm 와 200mm 에 대하여 각각 120mm 와 160mm 로 설정하였다. 시험에 사용된 펀치의 지름(Diameter of punch)은 모두 25.4mm 이며, 펀치와 하부지지대의 폭(Width of supporter)은 58mm 로 시편이 펀치와 하부지지대의 폭내에 위치하도록 하였다. 펀치의 최대 행정은 예비 실험을 통해 모든 조건에서 소성형변이가 완전히 발생하여 평탄하중(Plateau load)이 나타나는 25mm 를 결정하였다.

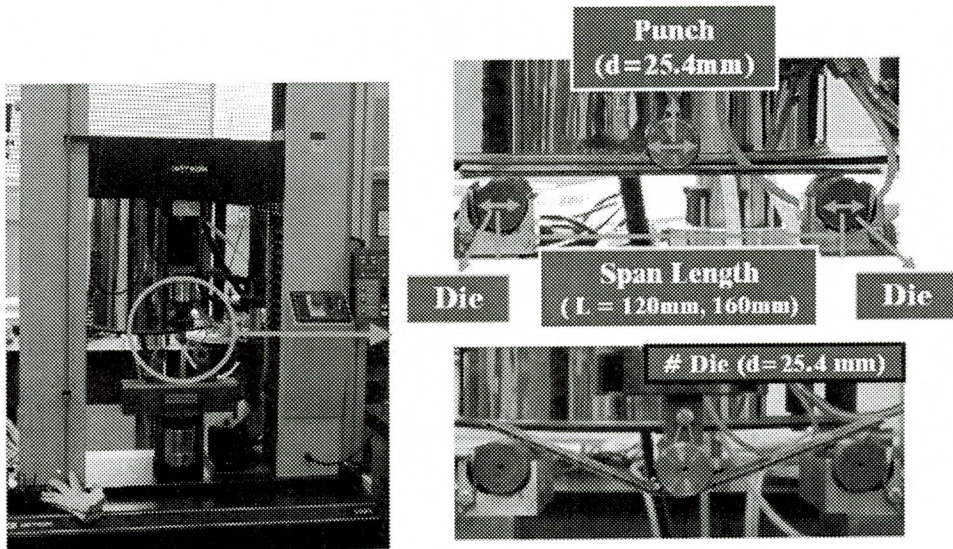


Fig. 18 Experimental set-up

3.4.3 실험 결과 및 고찰

3.4.3.1 익스팬디드 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 굽힘강성 특성

Fig. 19, 20 과 Table 8 은 익스팬디드 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 3점 굽힘시험 결과 산출된 하중-변위선도와 특성데이터이다. 상대밀도 (Relative density)와 시편폭당 최대하중(Maximum load per unit with)은 (8), (9)와 같이 정의된다. 상대밀도 계산시 가상 솔리드 밀도는 스킨 재료의 밀도를 사용하며, 부피는 ISB 판넬의 최외곽치수에 해당되는 가상 솔리드에 대한 체적을 적용하여 가상 솔리드의 질량을 계산하였다. ISB 판넬의 상대밀도는 상대밀도에 외판재료의 밀도를 곱하여 계산하였다.

$$\rho_r = \frac{m_{ISB}}{m_{solid}} = \frac{\rho_{ISB}}{\rho_{solid}} \quad (8)$$

$$P_w = \frac{P_{max}}{W} \quad (9)$$

Fig. 19, 20과 같이 피라미드 구조의 익스팬디드 금속 구조체의 크립핑각이 증가할수록 최대하중은 현저히 감소하며, 최대하중에서 변위는 조금씩 증가함을 알 수 있다. 또한, 크립핑각이 증가할수록 최대하중값과 평탄하중값의 차이가 점점 작아짐을 알 수 있었다.

각 크립핑각에 대한 같은 시편길이를 가지는 시편군은 시편폭당 최대하중 및 최대하중에서의 변위가 거의 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었다.

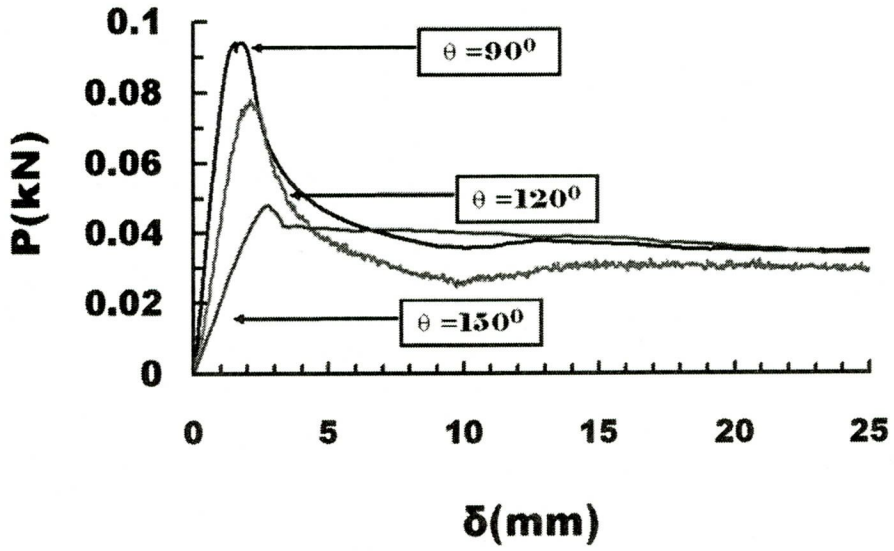


Fig. 19 P- δ curve according to crimping angle (L=160mm, W=20mm)

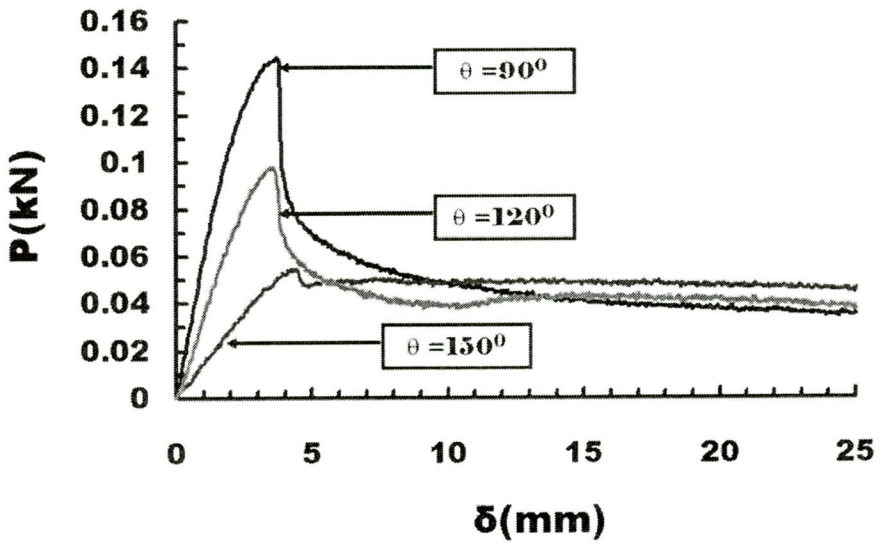


Fig. 20 P- δ curve according to crimping angle (L=200mm, W=30mm)

Table 8 Results of three-points bending tests for the case of ISB panel with a expanded metal

Crimping angle (θ)	L (mm)	W (mm)	P_{max} (kN)	δ_{α} (mm)	P_w (kN/m)	ρ_r
90°	160	20	0.09	1.48	4.40	0.25
		30	0.13	1.54	4.30	0.24
	200	20	0.09	2.98	4.35	0.25
		30	0.14	2.38	4.70	0.24
120°	160	20	0.07	2.20	3.90	0.29
		30	0.11	2.15	3.70	0.28
	200	20	0.06	3.20	3.00	0.32
		30	0.10	3.44	3.16	0.30
150°	160	20	0.05	3.01	2.40	0.42
		30	0.07	2.76	2.33	0.41
	200	20	0.04	4.21	2.00	0.48
		30	0.06	4.25	1.90	0.42

Fig. 21 은 ISB 판넬의 3점 굽힘시험에 대한 크리핑 각도별 비강성을 나타내었다. 크리핑각이 증가할수록 다른 시편설계 변수에 관계없이 비강성이 감소함을

알 수 있으며, 크림핑각과 비강성은 강한 선형 관계가 형성됨을 알 수 있었다. 비강성의 정의는 식(10) 과 같다. 특히, 크림핑각이 증가할수록 ISB 판넬 밀도가 증가하는 것을 고려하면 크림핑각이 적을수록 초경량/고강성의 재료를 제작할 수 있음을 알 수 있었다.

$$\alpha_k = \frac{k_{eq}}{\rho_{ISBG}} = \frac{P_{max}}{\delta_\alpha \rho_{ISBG}} \quad (10)$$

여기서, P_{max} , δ_α , ρ , g 는 각각 최대하중, 최대하중에서의 변위, 밀도 및 중력 가속도이다.

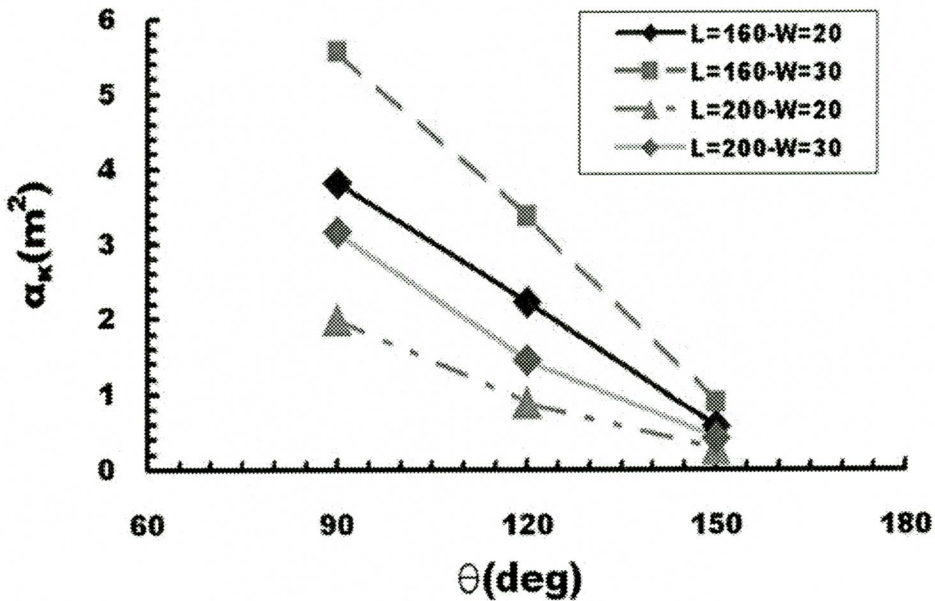


Fig. 21 Relationship between specific stiffness and crimping angle

ISB 판넬의 단위 시편폭당 비강성(β_k)은 식 (11) 과 같이 정의 하였다.

Fig. 22 는 피라미드 구조를 내부구조체로 가지는 ISB 판넬과 동일 질량을 갖는 스테인레스 강판에 대한 단위 시편폭당 비강성 관계를 나타내었다. 익스펜디드 금속을 내부구조체로 가지는 ISB 판넬의 경우 크림핑각이 증가할수록 거의 선형적으로 시편폭당 비강성이 감소하는 것을 알 수 있었다. ISB 판넬의 크림핑 각에 따라 시편 길이 160mm 일때 약 77배, 시편 길이 200mm 일때 약 45배로 동일 질량을 갖는 스테인레스 강판보다 비강성이 높게 나타남을 알 수 있었다. 이결과로부터 ISB 판넬과 동일 질량을 갖는 스테인레스 강판에 대하여 시편폭당 비강성을 비교한 결과이며, ISB 판넬이 우수한 시편폭당 비강성 특성을 보이는 것을 알 수 있었다.

$$\beta_k = \frac{k_{eq}}{w\rho_{ISB}g} = \frac{P_w}{\delta_{\alpha}\rho_{ISB}g} \quad (11)$$

또한, Fig 23 은 ISB 판넬과 동일 체적을 갖는 스테인레스 강판에 대하여 시편폭당 비강성을 비교한 결과이다. ISB 판넬의 크림핑각에 따라 시편 길이 160mm 일때 약 1.87배, 시편길이 200mm 일때 약 2배로 동일 질량을 갖는 스테인레스 강판에 대한 시편폭방 비강성과 마찬가지로 ISB 판넬이 동일 체적을 갖는 스테인레스 강판보다 우수한 시편폭당 비강성 특성을 보이는 것을 알 수 있었다.

이결과 ISB 판넬이 동일질량/체적을 갖는 스테인레스 강판 보다 시편폭당 비강성 측면에서 매우 효율적임을 알 수 있었다

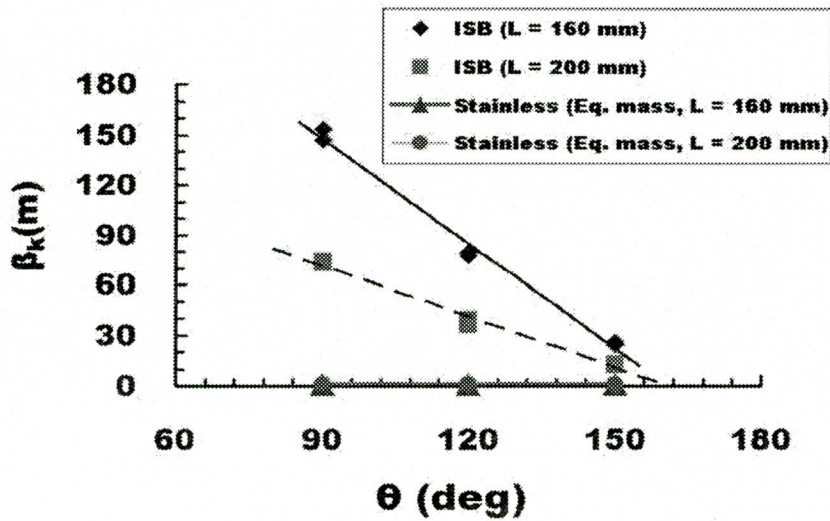


Fig. 22 Relationship between crimping angle and specific stiffness per unit width of ISB panel (equivalent mass)

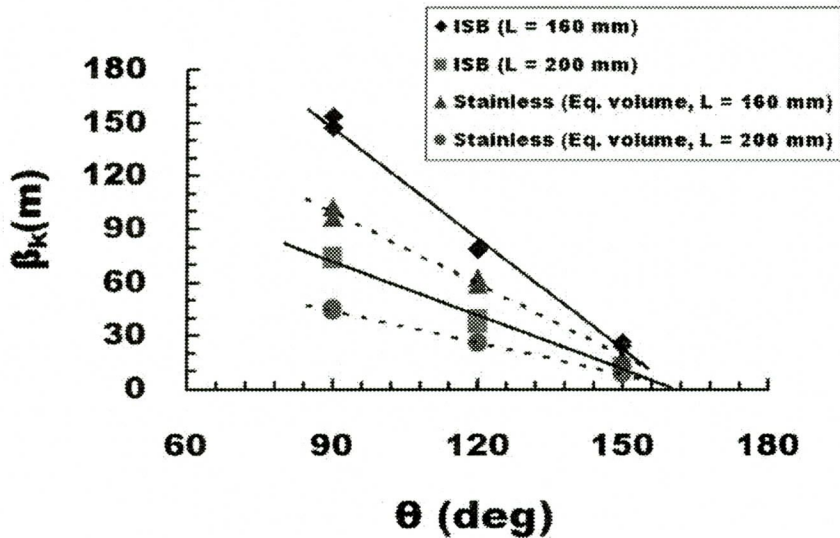


Fig. 23 Relationship between crimping angle and specific stiffness per unit width of ISB panel (equivalent volume)

3.4.3.2 익스팬디드 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 파손특성

Fig. 24 는 익스팬디드 금속을 내부구조체로 가지는 ISB판넬의 파손형상이다. Fig. 24에서와 같이 중앙함몰(Center depression)과 표면박리(Face wrinkle)의 두가지 파단모드가 발생함을 알 수 있으며, 크리핑 각이 증가 할수록 파손형상이 중앙함몰에서 표면박리로 천이됨을 알 수 있었다. 특히, 크리핑각이 120° 일 경우는 시편설계조건에 의하여 파단모드가 변경됨을 알 수 있었다. 이는 크리핑 각이 증가할수록 외판사이가 점점 가깝게 되어 코어부의 잔여 공간이 상대적으로 적게 되어 굽힘하중 부가시 재료의 상부가 압축 변형으로 중앙 함몰이 시작되나 조금만 재료 유입이 된 후 코어부의 잔여공간으로 재료가 채워지고, 압축 변형하는 외판재료가 더 이상 피라미드 구조내로 유입되지 못하게 되어 외판에 수직인 방향으로 솟아 오르기 시작하기 때문으로 사료된다. 특히, 크리핑각 120° 에서는 시편 길이 16mm 와 200mm 사이에서 파손 형상의 천이가 나타났다. 크리핑 각 120° , 시편 길이 160mm 에서는 중앙함몰 파손이 발생하였으며 크리핑 각 120° , 시편 길이 200mm 에서는 표면박리 파손이 발생하였다. 이는 3 점 굽힘시험시 스펠 길이가 길어짐에 따라 시편 길이 200mm 에서 160mm 보다 큰 대변형이 일어나기 때문으로 사료된다.

Fig. 25 는 익스팬디드 금속을 내부구조체로 가지는 ISB판넬의 3점 굽힘시험 결과 취득된 파손지도(Failure map)이다. 파손지도에서 상대밀도 0.3이상 t/L 이 0.016 이하인 경우에 해당되는 시편은 모두 표면 박리현상이 나타났으며, 상대 밀도 0.29 이하 t/L 0.017 이상인 경우에 해당되는 시편은 모두 중앙 함몰의 파손현상이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 상대밀도 0.29~0.30 과 t/L 0.016~0.017 에서 파손모드의 변경이 일어나는 천이점이 존재함을 알 수 있었다.

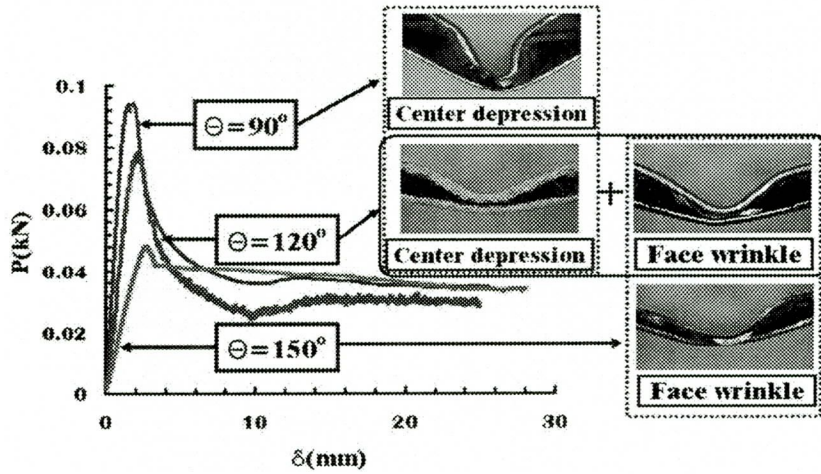


Fig. 24 Failure mode of ISB panel with the crimped pyramidal expanded metal

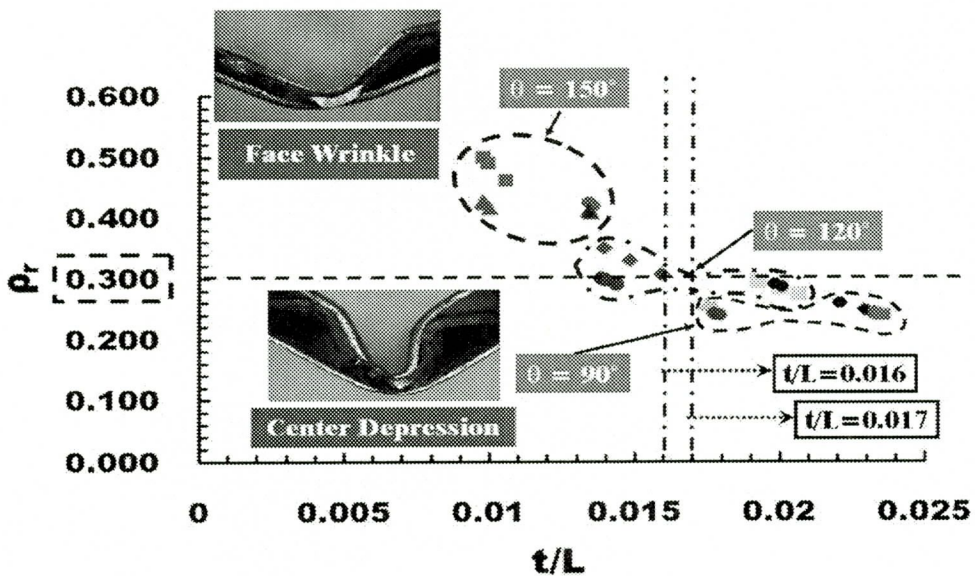


Fig. 25 Failure map of ISB panel with the crimped pyramidal expanded metal

3.4.3.3 망형 직조 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 굽힘강성 특성

Fig. 26, 27 과 Table 9 는 망형 직조 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 3점 굽힘시험 결과 취득된 하중-변위선도와 특성데이터이다. 상대밀도와 시편폭당 최대하중, 비강성 및 시편폭당 비강성은 식 (8), (9), (10), (11) 과 동일하다.

망형 직조 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 경우 직조 와이어의 부직조 방향이 길이방향으로 제작된 ISB 판넬이 주직조방향이 길이방향으로 제작된 ISB 판넬보다 높은 하중에 저항하고, 최대 하중값과 평탄 하중값 차이가 많이 발생함을 알 수 있었다. 시편폭당 최대하중은 시편길이와 시편길이방향이 동일한 경우에는 거의 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었다.

하지만 Fig. 26, 27 의 하중-변위선도를 비교하면 시편길이에 따라 조금 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 시편길이가 160mm 인 경우는 최대하중에서의 변위가 부직조방향이 길이방향인 시편이 크게 나타난다. 그러나, 시편길이가 200mm 인 경우는 최대하중 및 최대하중에서의 변위가 부직조방향이 길이방향인 시편에서 크게 나타났다.

Fig. 28, 29 는 망형 직조 금속 재료의 방향성과 비강성 및 시편폭당 비강성의 관계가 선형적으로 나타나는 것을 알 수 있었다.

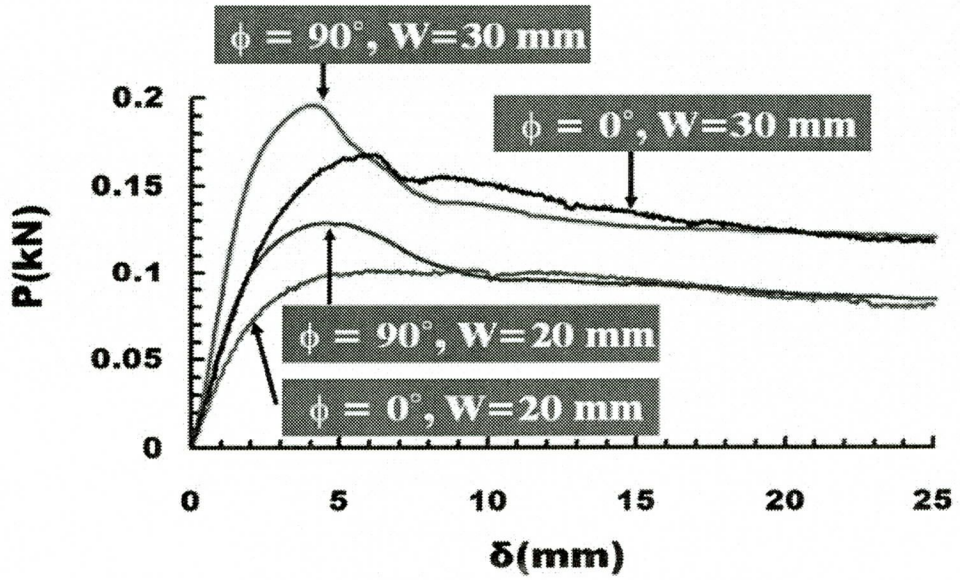


Fig. 26 $P-\delta$ curve ISB panel with the woven metal ($L=160\text{mm}$)

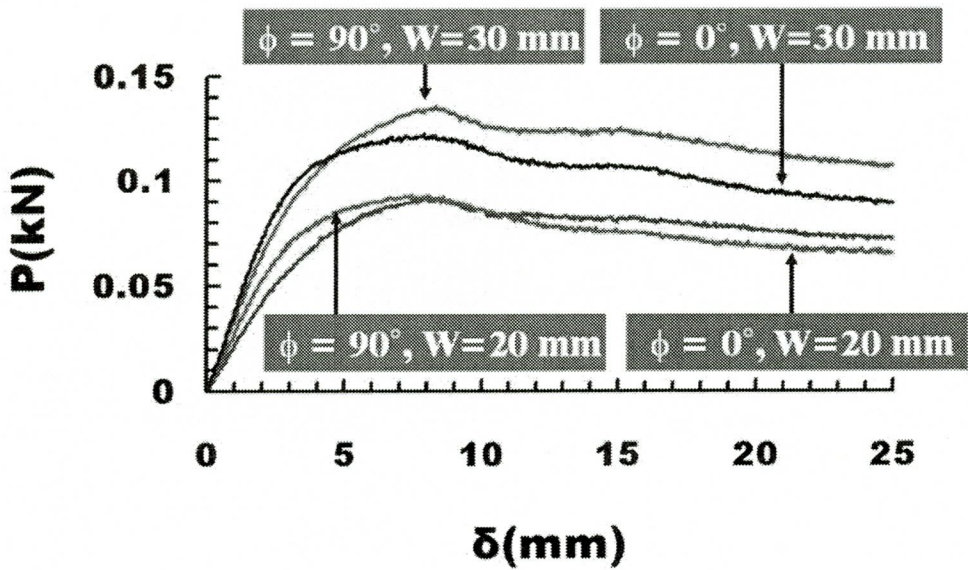


Fig. 27 $P-\delta$ curve ISB panel with the woven metal ($L=200\text{mm}$)

Table 9 Results of three-points bending tests for the case of ISB panel with a woven metal

Material Direction (Φ)	L (mm)	W (mm)	P_{max} (kN)	δ_{α} (mm)	P_w (kN/m)	ρ_r
0°	160	20	0.11	6.04	5.50	0.39
		30	0.16	5.70	5.33	0.37
	200	20	0.09	7.92	4.50	0.41
		30	0.13	7.71	4.47	0.38
90°	160	20	0.13	4.50	6.65	0.38
		30	0.19	4.04	6.53	0.37
	200	20	0.10	9.54	5.05	0.40
		30	0.15	8.74	4.87	0.38

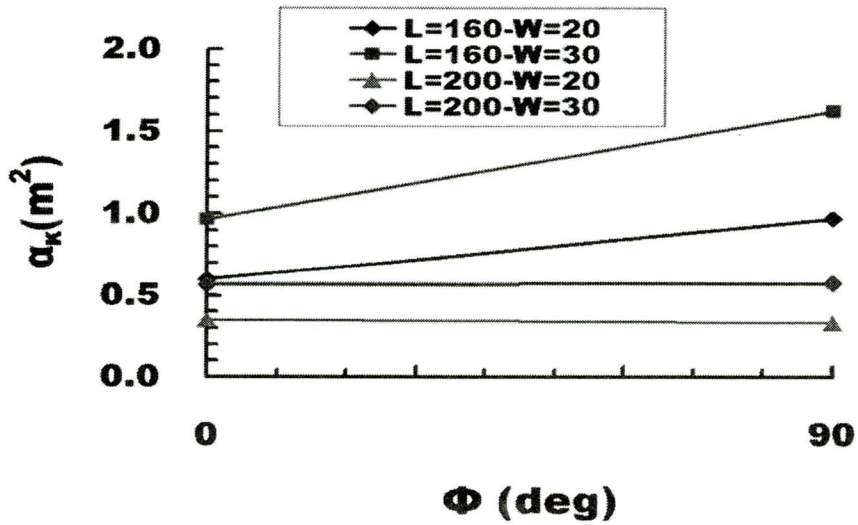


Fig. 28 Relationship between material direction and specific stiffness of ISB panel with the woven metal ($P-\delta$ curve)

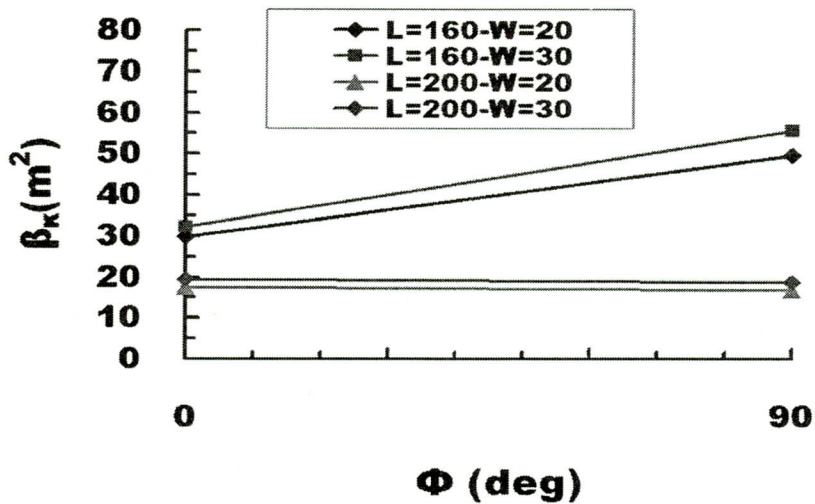


Fig. 29 Relationship between material direction and specific stiffness per unit width of ISB panel with the woven metal ($P-\delta$ curve)

3.4.3.4 망형 직조 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 파손특성

Fig. 30, 31 은 망형 직조 금속구조체를 내부구조체로 가지는 ISB판넬의 파손형상이다. 이경우 3점굽힘시험시 편치의 행정이 10mm 까지 진행될 때는 중앙부 함몰이 발생하고, 그 이후부터 표면박리가 나타났다. 이는 망형 직조 금속의 상대밀도가 익스팬디드 금속을 갖는 ISB 판넬의 크림핑각 150° 일때의 파손형상에서와 같이 코어부에 잔여공간이 부족하여 상부가 압축 변형으로 중앙부 함몰로 재료가 조금 유입이 된 후 코어부의 잔여공간으로 재료가 채워지고, 압축 변형하는 외판재료가 더 이상 망형 구조 내부로 유입되지 못하게 되어 외판에 수직 한 방향으로 솟아오르기 시작하기 때문으로 사료된다.

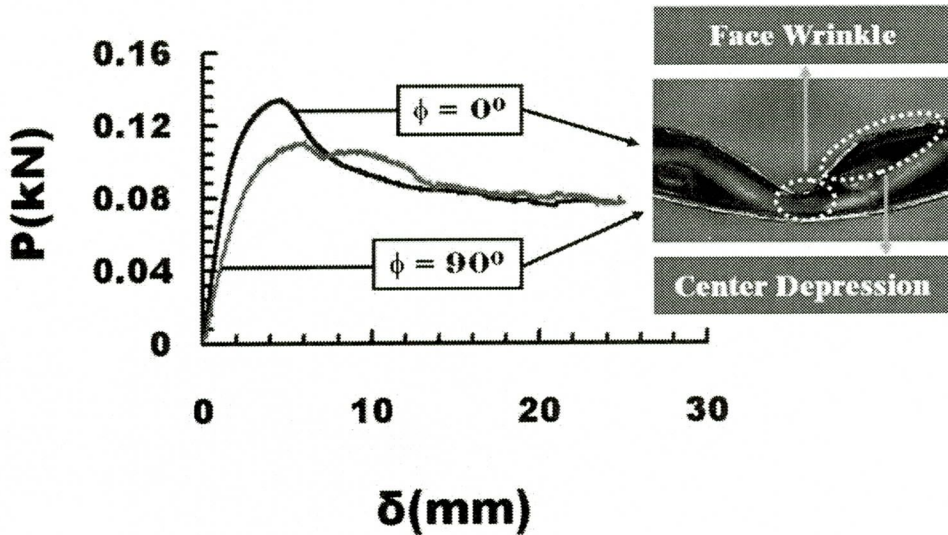


Fig. 30 Failure mode of ISB panel with the woven metal

Fig. 31 의 파손지도에서 망형 직조 금속의 경우 시편의 기하학적 형상이나 상대밀도에 관계없이 파손모드는 중앙함몰과 표면박리를 함께 가지는 1가지 모드를 알 수 있다.

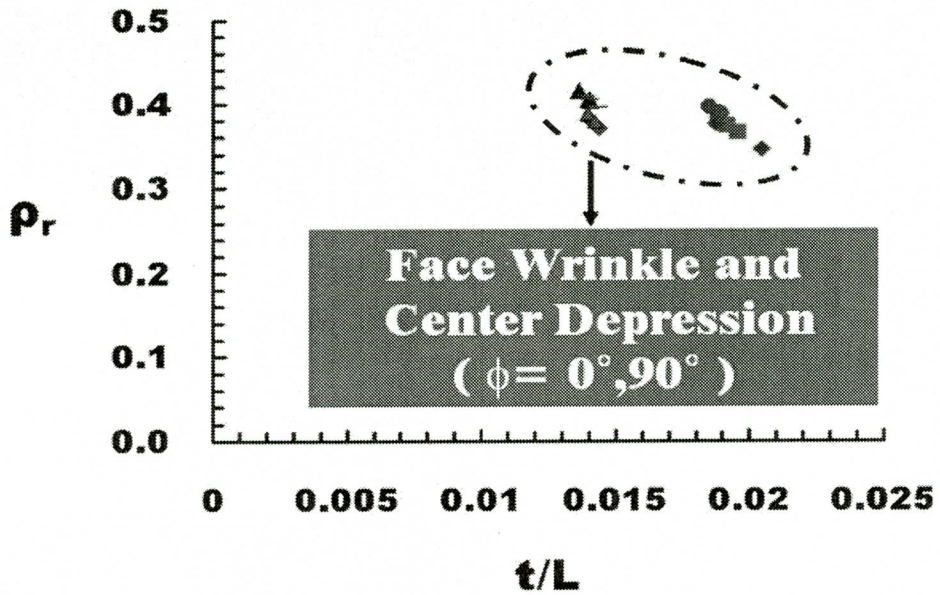


Fig. 31 Failure map of ISB panel with the woven metal

제 4 장 ISB 판넬 인장·굽힘 유한요소 해석

4.1 ISB 판넬의 인장에 대한 유한요소 해석

4.1.1 CAD 모델링 및 유한요소 격자 생성

유한요소 해석을 위한 ISB 판넬의 CAD 모델링은 내부구조체와 외판이 용접점에서 연결된 구조로 설계 하였다. ISB 판넬의 인장해석에 사용된 시편은 ASTM A370-03³⁰⁾의 박판재료 인장시편 규격을 사용하였다. 모델링은 CATIA V5 시스템을 이용하였으며, 내부 구조체 격자 갯수와 격자 간격은 인장 시험시 사용된 시편과 동일하게 설계하였다. Fig. 32 는 인장시험 유한요소 해석을 위한 ISB 판넬의 3차원 솔리드 모델이다.

인장시편 설계시 크립핑각 (θ)을 설계변수로 선정하였다. ISB 판넬 인장시편의 크립핑각은 90°, 120°, 150° 로 선정하였다.

ISB 판넬의 인장시편은 내부구조체의 기하학적 형상 때문에 시편내부에 공간이 발생하게 된다. 이 공간 때문에 인장시험시 시편 그립부에 함몰이 발생할 수 있다. 그립부 함몰을 최소화하기 위하여 시편의 그립부를 에폭시로 함침시킨다. 에폭시 함침부를 유한요소모델에서 표현하기 위하여 Fig. 32 와 같이 그립부의 일부분을 솔리드로 모델링하였다.

ISB 판넬의 유한요소 해석시 해석시간의 감소와 사용 메모리 최소화를 도모하기 위하여, 인장시편의 1/4 크기만 모델링하였다.

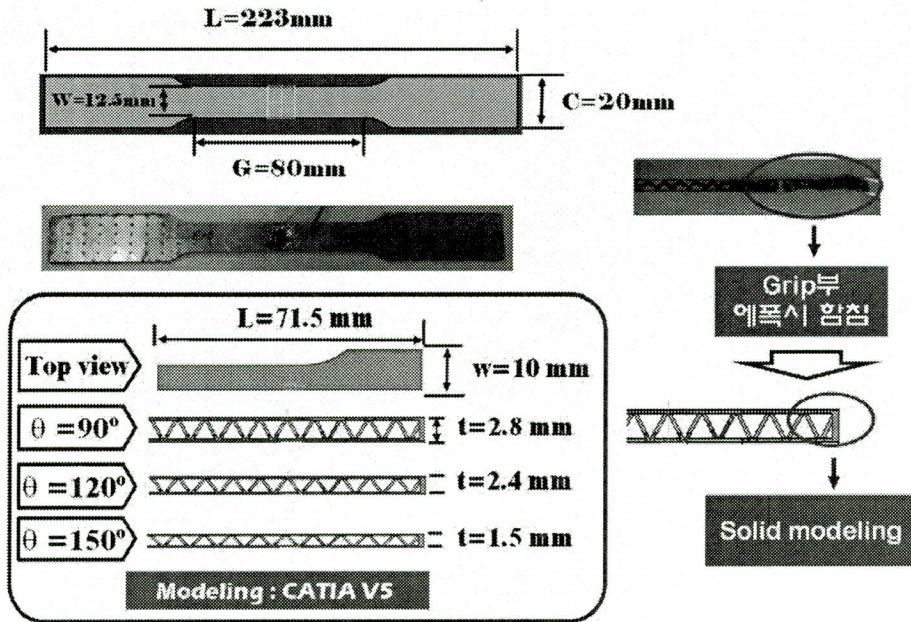


Fig. 32 Analysis model for the tensile test

4.1.2 물성 조건 및 경계조건

경계조건은 Fig. 33 과 같이 시편의 X축에 대해 대칭조건과 Z축에 대해 대칭 조건을 부여 하였으며, 종방향인 X방향에 대해 20mm 의 인장길이를 주어 해석을 수행하였다. 해석은 ABAQUS/Standard 6.5 상용프로그램을 이용하였다.

인장 변형특성을 분석하기 위해 외판과 내부구조체의 재료는 Fig. 34 와 같은 탄소성 재료로 가정하였다. 외판재료는 스테인레스이며 내부구조체 재료는 CSP 1N 이다. 해석에 사용된 요소는 대변형과 접촉문제에 효율적인 ABAQUS/Standard의 삼각형 솔리드요소를 사용하였다. Table 10 은 크럼핑 각도별 해석모델에 대한 절점과 유한요소 격자수이다.

Fig. 34 의 공칭응력-공칭변형을 선도로부터 식(12), (13) 을 이용하여 진
 응력-진변형을 선도를 도출한 후, 이 데이터를 ABAQUS 상의 재료 물성으로
 입력하였다. Table 11 은 해석에 사용된 외판과 내부구조체의 탄성계수, 포아
 송비, 항복강도, 인장강도이다.

Table 10 Number of nodes and elements (analysis of tensile tests)

Crimping angle (θ)	Nodes (EA)	Elements (EA)
90°	12,830	35,268
120°	13,397	36,314
150°	14,169	43,654

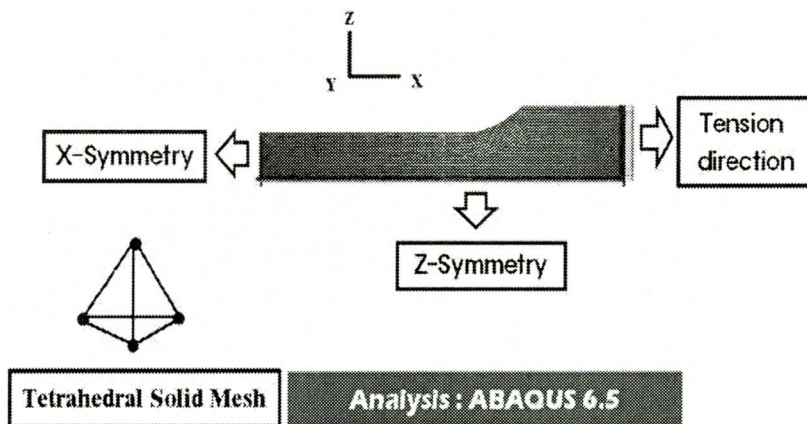


Fig. 33 Boundary conditions of FE analysis for the case of a uni-axial
 tension

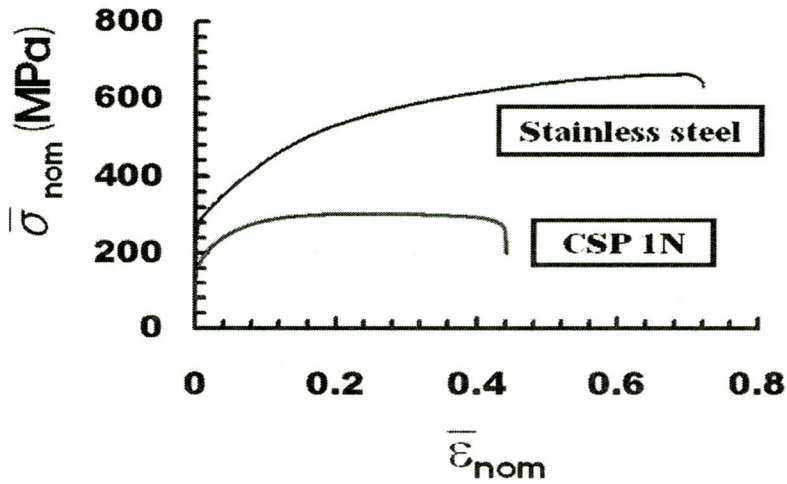


Fig. 34 Stress-strain curves of stainless steel and CSP 1N sheet

$$\bar{\sigma}_{true} = \bar{\sigma}_{nom}(1 + \bar{\epsilon}_{nom}) \quad (12)$$

$$\bar{\epsilon}_{true} = \ln(1 + \bar{\epsilon}_{nom}) \quad (13)$$

Table 11 Material properties of stainless steel and CSP 1N sheet

	Stainless Steel	CSP 1N
E (GPa)	180	176
ν	0.27	0.32
σ_y	283	144
σ_T	667	302

4.1.3 결과 및 고찰

Fig. 35 는 크림핑각에 따른 ISB 판넬의 인장해석 결과 도출된 시편의 변형 상태 및 응력분포를 나타낸다. ISB 판넬의 인장해석결과 크림핑각이 90° 에 이르면 외판으로 응력이 집중이 되고, 내부구조체로는 거의 하중이 전달되지 못함을 알 수 있었다. 그결과 재료가 ISB 판넬이 인장 변형할 때, 외판에 비하여 내부구조체는 거의 변형하지 않는 것을 알 수 있었다. 이 경우 외판과 내부구조체의 용접부에 가장 큰 응력과 변형을 차이가 발생하고 최종적으로 용접부에서 파단이 발생할 것으로 사료된다. 그러므로, 실험결과에서 나타난 것과 같이 ISB 판넬의 크림핑각이 작은 경우에 적은 변형을 영역에서 파단이 발생하는 것을 알 수 있었다. 크림핑각 120° 및 150° 로 증가될때 ISB 판넬의 외판에서 내부구조체 전달되는 하중량이 현저히 증가하여 내부구조체의 응력이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그결과 크림핑각이 증가할수록 내부구조체의 파손이 일어날 확률이 높아지게 되며, ISB 판넬의 변형을 또한 현저히 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 36, 37, 38 은 ISB판넬의 크림핑각별 해석결과와 실험결과를 하중-변위선도로 비교한 결과이다.

해석결과와 실험결과와 하중-변위선도를 비교해보면 크림핑각이 증가할수록 실험결과와 해석결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 이것은 크림핑각이 90° 에 가까워질수록 외판과 내부구조체의 용접부에서 큰 응력과 큰 변형율이 나타나게 되는데, 현재 해석 모델에서는 용접부 물성과 형상을 표현하지 못하여 이 부분의 응력과 변형상태를 정확히 묘사하지 못하였기 때문으로 사료된다. 그러나, 크림핑각이 증가하게 되면 전체 부가하중중 많은 부분이 내부구조체로 전달되게 되어 외판과 내부구조체가 동시에 변형하게되고 용접부 영향이 최소화되므로 해석결과와 실험결과가 거의 일치하는 것으로 사료된다.

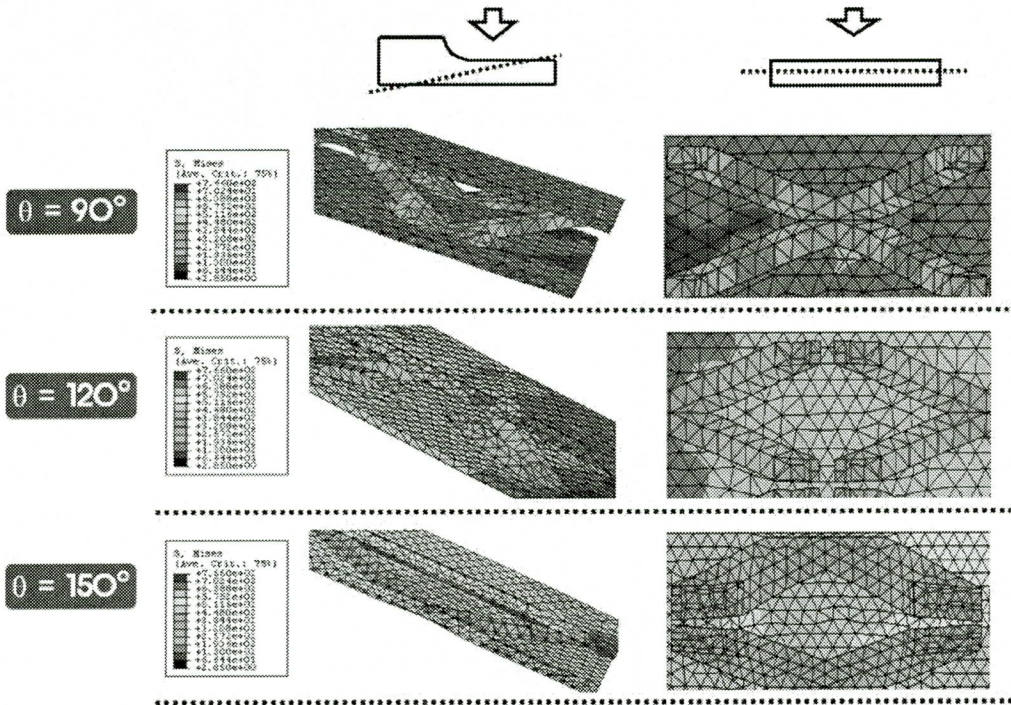


Fig. 35 Results of analysis for the tensile test according to the crimping angle

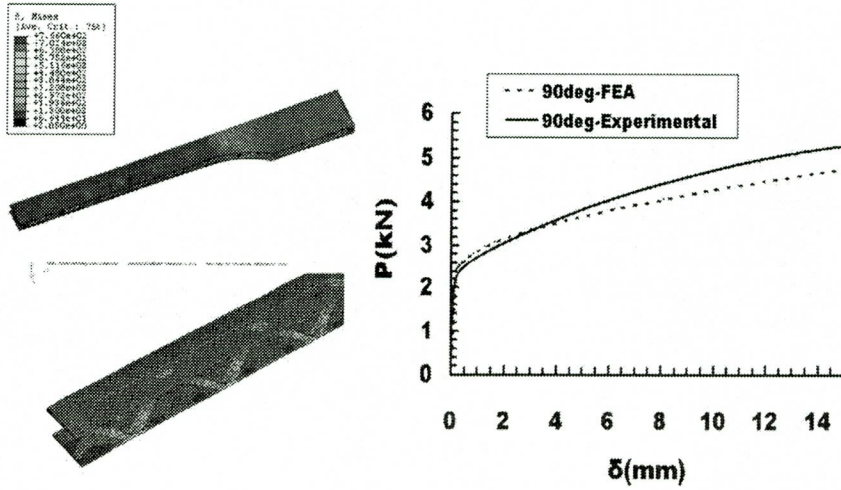


Fig. 36 Comparison of the results of FE analysis and those of tensile tests ($\theta = 90^\circ$)

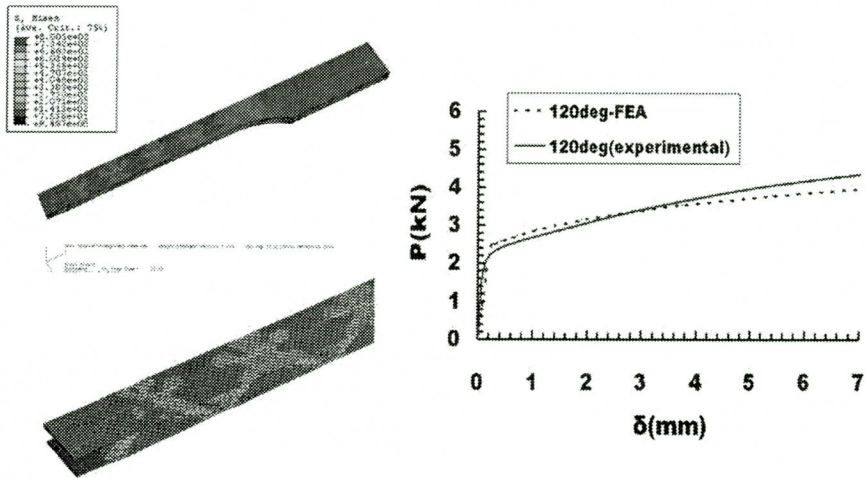


Fig. 37 Comparison of the results of FE analysis and those of tensile tests ($\theta = 120^\circ$)

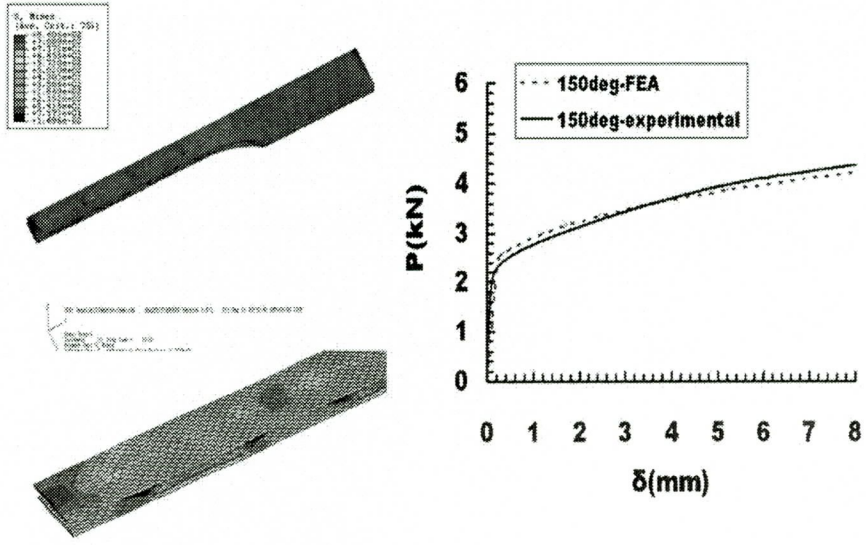


Fig. 38 Comparison of the results of FE analysis and those of tensile tests ($\theta = 150^\circ$)

Fig. 39 는 해석결과와 인장시험 결과 시편의 파손모드를 나타낸다. 파단면에 굴곡 형상이 발생되는 것을 알 수 있는데, 이는 내부구조체와 외판이 용접됨으로써 용접된 부분과 용접되지 않은 부분 사이의 변형 구속차이가 발생한 것 때문으로 사료된다.

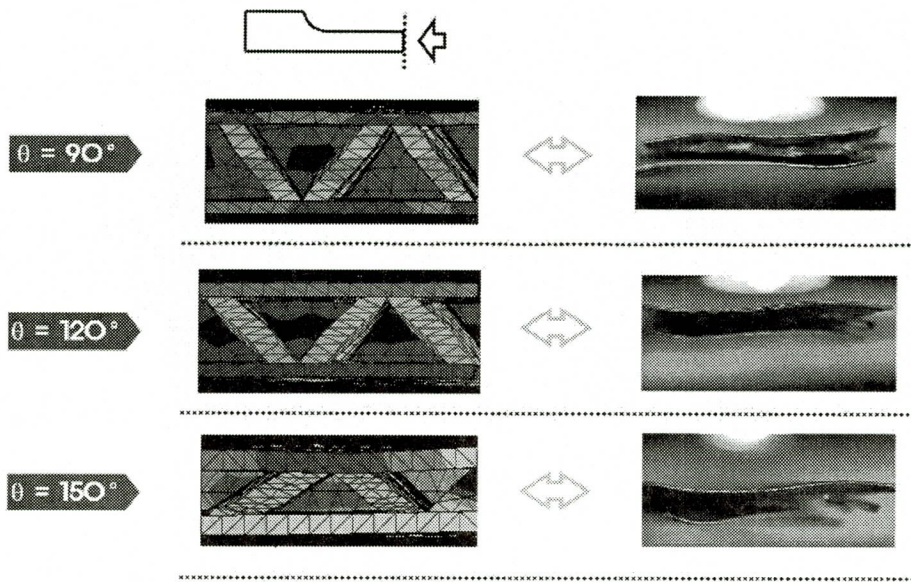


Fig. 39 Comparison of the results of FE analysis and those of tensile tests

4.2 ISB 판넬의 3점 굽힘에 대한 유한요소 해석

4.2.1 CAD 모델링 및 유한요소 격자 생성

유한요소 해석에 사용된 3점 굽힘 시편의 모델링은 시편의 대칭성을 고려하여 실제 시편규격의 1/4 크기로 하였다. 모델링을 위한 시편규격은 ASTM E290-87³²⁾, KSB 0803³³⁾에 근거하여 설계/제작 하였다. CAD 모델링은 CATIA V5 시스템을 이용하였으며, 내부구조체 격자 갯수와 격자 간격은 3점 굽힘 시험시 사용된 시편과 동일하게 설계하였다. 시편의 두께는 $90^\circ = 2.8 \text{ mm}$, $120^\circ = 2.4 \text{ mm}$, $150^\circ = 1.5 \text{ mm}$ 로 측정 되었다. Fig. 40 은 3점 굽힘시험 유한요소 해

석을 위한 ISB 판넬의 모델링이다.

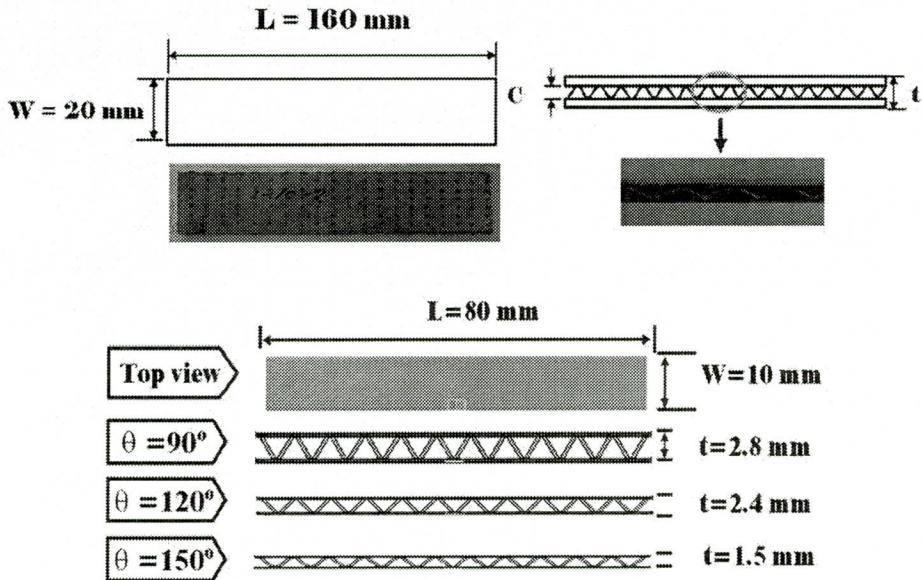


Fig. 40 Analysis model of specimen for three points bending

4.2.2 물성 조건 및 경계조건

유한요소해석 모델은 실제 시편 크기의 1/4 이기 때문에 Fig. 41 과 같이 X축 방향과 Z축방향에 대해서 각각 대칭 조건을 부여 하였다. 펀치/다이와 시편의 접촉부는 마찰 접촉처리를 하였으며, 이 접촉부에서 시편은 펀치를 침투할 수 없도록 하였다. 펀치는 시편의 아랫방향인 -Y축 방향으로 총 20mm 를 진행하도록 모델링 하였다. 펀치와 다이의 지름은 25.4 cm 로 동일하다. 펀치부와 다이부는 해석적 곡면으로 모델링하였으며, 강체로 가정하였다. ISB 판넬의 굽힘 해석을 위한 절점수와 요소수는 Table 12 와 같다. ISB 판넬의 유한요소격자는 인장해석과 동일하게 삼각형솔리드 요소를 사용하였다.

3점 굽힘시험 해석에 사용된 재료 물성치는 인장시험에 사용된 물성과 동일하나, 재료 모델은 완전탄소성재료로 가정하였다.

Table 12 Number of nodes and elements (analysis of three points bending)

Crimping angle (θ)	Nodes (EA)	Elements (EA)
90°	18,313	50,211
120°	16,641	44,959
150°	18,256	53,078

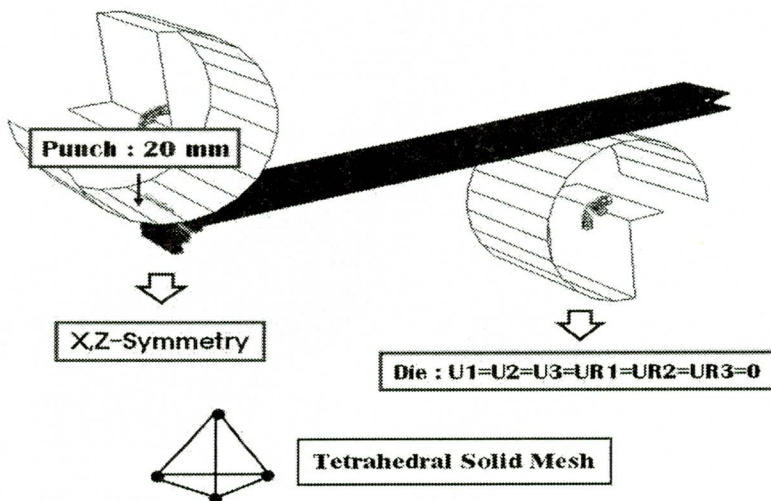


Fig. 41 Boundary condition for FE analysis for the case of three-points bending

4.2.3 결과 및 고찰

Fig. 42 는 크립핑각에 따른 ISB 판넬의 3점 굽힘해석 결과 ISB 판넬의 변형특성과 응력분포를 나타낸다.

ISB 판넬의 3점 굽힘에 대한 유한요소해석 결과에서 Fig. 42 와 같이 크립핑각이 90° 에 가까워 질수록 편치와 시편사이의 수직 접촉하중이 내부구조체로 전달되는 양이 증가하게 되어 내부 구조체에 높은 응력이 발생하였다. 내부 구조체가 국부적으로 좌굴 현상을 나타내는 것도 확인할 수 있었다. 또한, 크립핑각이 90° 에 가까워 질수록 중립축으로부터 외판의 거리가 멀어짐으로써 외판에 높은 응력과 높은 변형율이 발생함을 알 수 있었다. 그결과 Fig. 42와 같이 90° 에 가까워 질수록 높은 최대하중과 적은 최대하중에서의 변위를 나타내었다.

크립핑각이 150° 인 경우는 외판사이의 간격이 너무 가깝게 되어 3점 굽힘 후 외판-내부구조체-외판이 모두 일직선상에 위치한 것처럼 되어 재료 내부에 압축응력이 많이 발생하였다. 또한, 크립핑각이 150° 인 경우 내부구조체로의 하중 전달로 인한 ISB 판넬 저항 하중의 상승 효과가 거의 발생하지 않아, Fig. 43 과 같이 거의 일체화된 재료처럼 변형하는 특성을 보였다. Fig. 43 의 실험결과와 해석 결과 하중-변위 선도에서 최대굽힘하중이 발생하는 탄성 구간까지는 어느정도 일치하는 것을 확인할 수 있으나, 이후 소성구간은 오차범위가 비교적 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 실제 실험에서는 최대굽힘하중에서 소성현상이 발생하여 재료 붕괴가 진행되는데 유한요소 해석에서는 최대굽힘하중 이후 소성현상에 대한 묘사가 되지 않아 오차가 발생된 것으로 사료된다. Fig. 44 는 실험결과와 마찬가지로 해석결과에서도 중앙함몰과 표면 박리의 파손특성을 알 수 있었다.

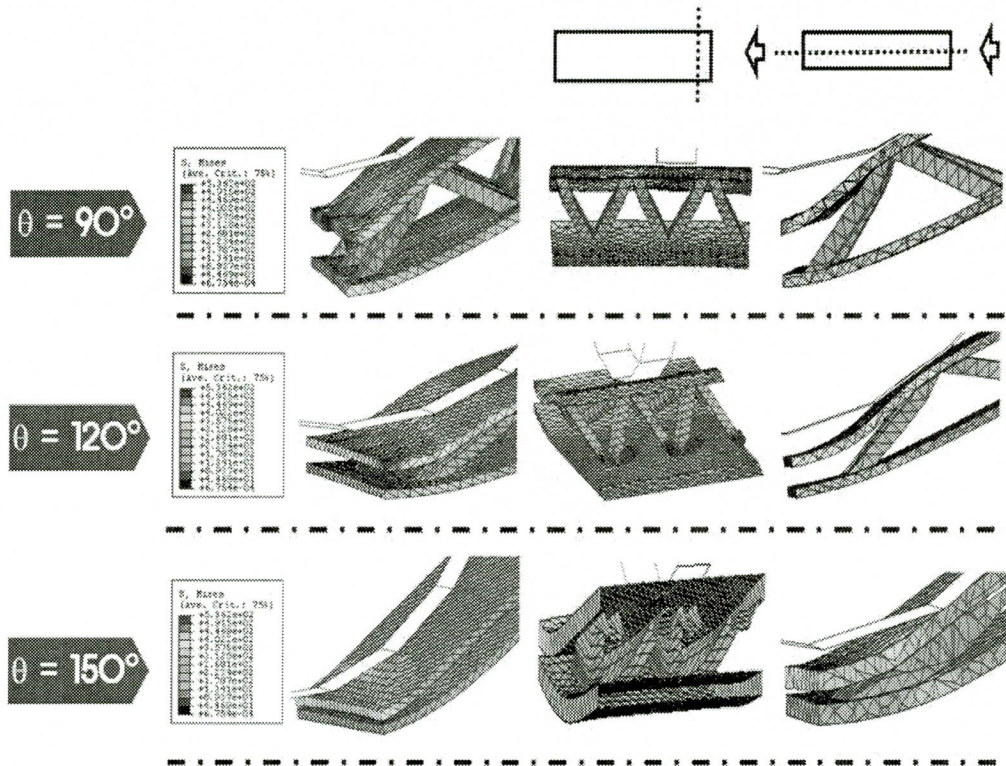


Fig. 42 Results of analysis for three points bending

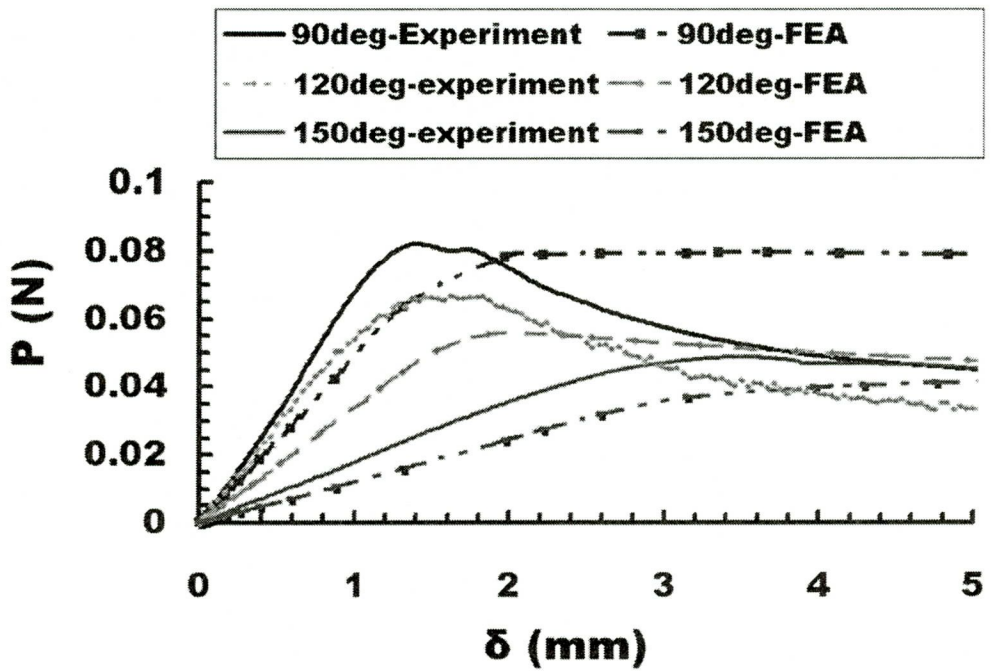


Fig. 43 Comparison of the results of FE analysis and those of experiments (three points bending, $P-\delta$ curve)

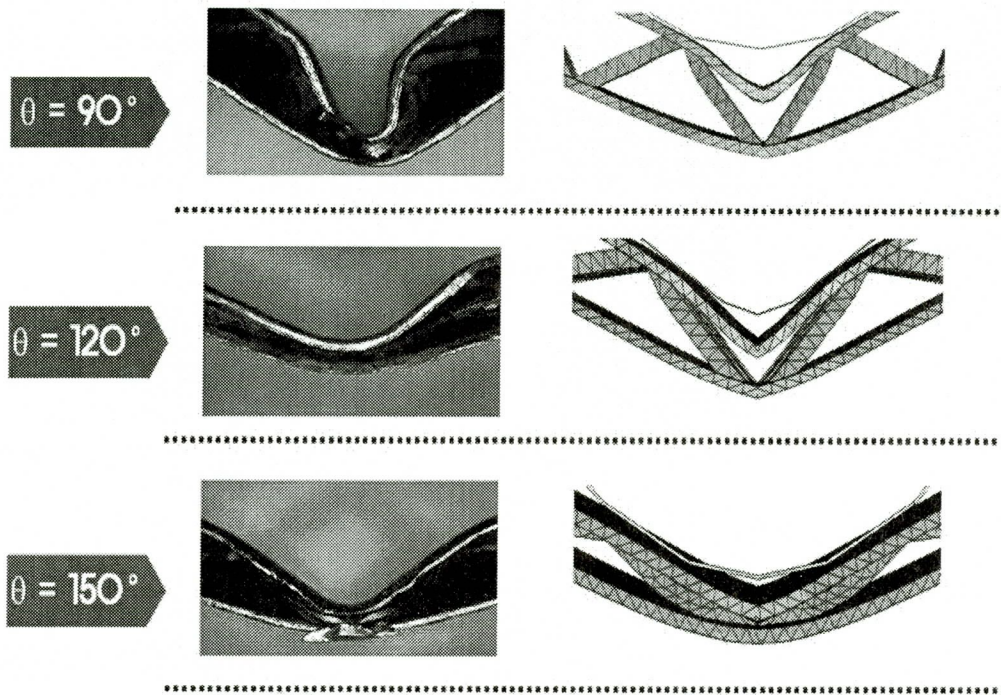


Fig. 44 Comparison of the results of FE analysis and those of experiments (three points bending, failure mode)

제 5 장 결 론

본 연구에서 피라미드형상의 익스팬디드 금속을 내부구조체로 가지는 ISB판넬에 대한 정적 특성에 대하여 분석/고찰 하였다. ISB 판넬의 정적 특성 분석을 위해 내부구조체인 망형 직조 금속과 외판재료인 스테인레스 강판에 대한 인장시험을 수행하였다. 또한, 익스팬디드 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬에 대한 인장·굽힘 시험 및 유한요소 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, ISB 판넬의 내부구조체인 망형 직조 금속과 외판재료인 0.3 mm 스테인레스 강판에 대한 기계적 물성 및 변형특성 데이터를 취득 하였다. 망형 직조 금속 구조물의 기계적물성과 변형특성을 분석한 결과 망형직조 금속 구조물의 직조형태가 망형직조 금속의 이방성 특성과 기계적물성 및 변형특성에 미치는 영향성이 매우 큼을 알 수 있었다.

둘째, 익스팬디드 금속을 내부구조체로 가지는 ISB 판넬의 기계적 물성 및 비탄성계수, 비항복강도, 비강도에 대한 정량적 데이터 취득 및 평가를 할 수 있었다. 또한 ISB 판넬이 ISB판넬의 외판 재료인 스테인레스 강판을 사용하는 재료보다 비항복강도, 비강도 측면에서 매우 우수한 기계적 성질을 나타냄을 알 수 있었다.

셋째, 3점 굽힘시험을 통해 익스팬디드 금속과 망형 직조 금속을 내부구조체로 가지는 ISB 판넬에 대한 하중-변위, 굽힘강성 및 파손특성에 대한 정량적인 데이터를 취득 할 수 있었다. 익스팬디드 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 경우 크립핑 각이 상대밀도, 굽힘강성 특성 데이터, 비강성, 시편폭당 비강성은 크립핑

각과 선형적인 관계가 있음을 알 수 있었다. 그 결과 크럼핑 각을 제어 함으로써 굽힘강성 특성 및 파손모드를 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 파손모드의 경우 상대밀도 0.29~0.3, t/L 0.016~0.017에서 파손모드가 천이됨을 알 수 있었다. 또한 익스팬디드 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬이 동일체적/무게를 갖는 스테인레스 강판 보다 시편폭당 비강성 측면에서 매우 효율적임을 알 수 있었다.

망형 직조 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬의 경우 주직조방향 및 부직조방향과 같은 재료 방향성이 굽힘, 굽힘강성 특성 및 파손모드를 결정하는 변수가 될 수 없음을 알 수 있었다. 이결과 ISB 판넬의 상대밀도 제어가 불가능 하였다. 또한 파손모드는 중앙부 함몰 후 표면박리가 발생하는 한가지 파손형태가 존재함을 알 수 있었다.

위 결과로부터 익스팬디드 금속을 내부 구조체로 갖는 ISB 판넬과 망형 직조 금속을 내부구조체로 갖는 ISB 판넬을 비교해 볼때 익스팬디드 금속의 내부구조체가 상대밀도, 굽힘강성 특성 데이터 및 파손모드를 크럼핑각으로 제어할 수 있어 최적 설계 측면에서 더욱 우수함을 알 수 있었다.

넷째, ISB 판넬의 인장해석을 통해 실험에서 알 수 없었던 내부 변형 특성 및 응력 분포에 대해 분석 및 고찰 하였다. 그 결과 ISB 판넬의 크럼핑각이 90° 에 이르면 외판으로 응력이 집중이 되고, 내부구조체로는 거의 하중이 전달되지 못함을 알 수 있었다. 또한, ISB 판넬의 크럼핑각이 증가할수록 내부구조체의 파손이 일어날 확률이 높아지게 되며, ISB 판넬의 변형을 또한 현저히 증가하는 것을 알 수 있었다. 인장 해석 모델은 크럼핑 각이 증가할수록 실험 결과와 잘 일치하였다.

다섯째, ISB 판넬의 3점 굽힘해석 결과 크럼핑각이 90° 에 가까워 질수록 수직 접촉하중이 내부구조체로 전달되는 양이 증가하게 되어 내부 구조체에 높은 응력이 발생하였다. 또한, 크럼핑각이 90° 에 가까워 질수록 중립축으로부터 외판의 거리가 멀어짐으로써 외판에 높은 응력과 높은 변형율이 발생함을 알 수 있었다. 크럼핑각이 150° 인 경우 하중이 가해지면 외판과 내부구조체가 거의 일렬로 정렬하게 되어 일체화 된 재료처럼 거동하는 것을 알 수 있었다.

추후, ISB 판넬의 정적·동적 시험을 수행하여 ISB 판넬의 정적·동적 데이터 및 유한요소 모델 개발을 위해 다음과 같은 추가 적인 연구가 수행 되어야 할 것이다.

첫째, 통계적으로 크럼핑각의 ISB 판넬 기계적 물성 영향성 평가가 수행되어야 될 것이다.

둘째, 크럼핑된 피라미드 구조체를 내부구조체로 가지는 ISB 판넬에 대한 추가 적 정적 · 동적 시험을 수행하여 ISB 판넬의 정적 · 동적 데이터 및 파손모드에 대한 통계적인 연구가 추가적으로 수행 되어야 할 것이다.

셋째, 추가적인 해석을 수행하여 최적화된 3점 굽힘 해석과 충격 해석 유한 요소 모델을 개발해야 할 것이다.

REFERENCES

1. Gibson. L. J., and Ashby. M. F, Cellular solids: Structure and properties, *Cambridge University Press*, 1998
2. Ashby. 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. Allen. H. G., "Analysis and design of structural sandwich panels", *Pergamon press, New York*, 1969.
5. Wadley, H. N. G., Fleck, N. A., and Evans, A. G., "Fabrication and Structural Performance of Periodic Metal Sandwich Structures," *Composites Science and Technology, Vol. 63*, pp. 2331 – 2343, 2003.
6. 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.
7. Chen. C., A–M Harte, Fleck. N. A., "The plastic collapes of sandwich beam wich metallic foam core" *International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43*, pp.1483 – 1506, 2001.
8. 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.
9. 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.
 10. 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.
 11. Dilthey, U., Kopp, R., Hohmeier, P., Beiss, P., Figueredo, E. L., El-Magd, E., and Kranz, A., "Development of Porous Steel Structures for Steam Turbines," *Advanced Engineering Materials, Vol. 3, No. 3*, pp. 111~119, 2001.
 12. Zupan. M, Dashpanded. V. S, Fleck. N. A., " *Europeam Fournal of Mechanics A/Solids, Vol. 23*, pp. 411–421, 2004.
 13. Zok, F. W., Rathbun. H. J., Wei. Z., Evans. A. G., "Design of metallic textile core sandwich panels," *International Journal of Solids and Structures, Vol. 40*, pp.5707–5722,2003.
 14. Wadley, H. N. G., "Cellular Metals Manufacturing," *Advanced Engineering Material, Vol. 4, No. 10*, pp. 726–733, 2002.
 15. Hutchinson, R. G., Wicks, N., Evans, A. G., Fleck, N. A. and Hutchinson, J. W., "Kagome plate structures for actuation," *International Journal of Solids and Structures, Vol. 3, No. 3*, pp. 111–119, 2001.
 16. 강기주, 건계포, 나성준, 주보성, 홍남호, "초경량 금속구조재의 제작을 위한 새로운 방안" , *대한기계학회논문집 A권, 제28권 제3호*, pp.296–303, 2004.

17. Wang, J., Evans, A. G., Dharmasena, K., and Wadley, H. N. G., "On the Performance of Truss Panels with Kagome Cores," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 6981 – 6988, 2003.
18. Wick, N., Hutchison, J. W., "Optimal Truss Plates," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 5165 – 5183, 2001.
19. Chiras, S., Mumm, D. R., Evans, A. G., Wicks, N., Hutchinson, J. W., Dharmasena, K., Wadley, H. N. G. and Fitcher, S., "The Structural Performance of Near-optimized Truss Core Panels," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 4093 – 4115, 2002.
20. Deshpande, V. S., Fleck, N. A., "Collapse of Truss Core Sandwich Beams in 3-Point Bending" *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 6275 – 6305, 2001.
21. 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.
22. Wallach, J. C. and Gibson, L. J., "Mechanical Behavior of a Three-dimensional Truss Material," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp.7181 – 7196, 2001.
23. Bart-Smith, H., Hutchinson, J. W. and Avans, A. G., "Measurment and Analysis of the Structural Performance of Cellura Metal Sandwich Construction," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 1945–1963, 2001.

24. Markaki. A. E., Clyne. T. W., " Mechanics of thin ultra-light stainless steel sandwich sheet material : Part I. Stiffness," *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 1341-1350, 2003.
25. Markaki. A. E., Clyne. T. W., " Mechanics of thin ultra-light stainless steel sandwich sheet material : Part II. Resistance to delamination," *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 1351-1357, 2003.
26. 정창균, 윤석준, 양동열, 이상민, 나석주, 이상훈, 안동규, "수직방향 직조 금속망을 이용한 초경량 금속 내부구조 접합판재의 제작 및 특성에 관한 기초 연구" *한국정밀공학회지*, 제 22권, 제 5호, pp. 152-158, 2005.
27. 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.
28. 안동규, 이상훈, 김민수, 한길영, 정창균, 양동열, "ISB 판넬의 굽힘강성 및 파손특성에 관한 연구" *한국정밀공학회지*, 제 22권, 제 9호, pp. 162-172, 2005.
29. 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.
30. ASTM "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products" *E-370-03*, 1997.
31. ASTM "Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus" *E-111-82*, 1997.
32. ASTM "Standard Test Method for Semi-guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials" *E-290-87*, 1997.

33. 한국공업규격 "금속 재료 굽힘 시험편" *KS B 0803*, 1977.

34. 한국공업규격 "금속 재료 굽힘 시험 방법" *KS B 0804*, 1977.

감사의 글

지난 2년여 동안 아낌없는 가르침과 진정한 공학자의 길을 제시해주셨으며, 오늘의 제가 있게 해주신 안동규 교수님께 진심으로 감사드립니다. 항상 따뜻한 조언과 격려를 보내주신 김종관 교수님, 한길영 교수님, 유영태 교수님께 깊은 감사드립니다.

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

지금까지 전산설계실험실에서 동고동락하며 기쁜일과 슬픈일들을 함께 해준 실험실 동기 민수에게 감사 드립니다. 학부때부터 나를 잘 따라주며 손재주가 많은 FRP성형실험실장 김진석, 모든일에 꼼꼼한 문경제, 진지하면서도 적극적인 변경원, 그리고 항상 불평불만 없는 실험실 막둥이 김대원에게 감사 드립니다. 아무리 어려운 환경에서도 타협을 잘하는 이승철, 지금쯤 달콤한 신혼여행을 보내고 있을 병희형, 비록과는 다르지만 늘 옆에서 도움이 되어준 길성이형, 항상 바빠도 할일은 다하는 건일이, 언젠가 우리를 깜짝 놀라게 할 한별이, 빈틈이 없는 광호, 항상 자신감 넘치는 석봉이, 분위기 파악을 잘 하는 준호, 행운의 사나이 상록이 그리고 머지 않아 장박사가 될 훈이에게 감사 드립니다. 그리고 기계공학과 선배님과 정대를 비롯한 후배들께 감사 드립니다.

실험실 일을 자기 일처럼 생각하고 신경써준 호준이, 병헌이에게 감사의 말을 전합니다.

이 논문이 있기까지 여러 학회지 논문게제와 발표, 그리고 실험을 할 수 있게 해주신 MRM 프로젝트 관계자 여러분께 감사 드립니다. 부족한 저를 위해 항상 조언을 아끼지 않은 창균이형, 실험이 있을때면 늘 옆에서 든든하게 지원 해준 대용이, 석준이형, 태정이형께 감사 드립니다. 아울러 컴퓨터 원형 정형가공 실험실장님을 비롯하여 실험실원 여러분께 감사드립니다. 그 외 KIMM의 최두선 박사님을 비롯하여 프로젝트 관계자 여러분께 다시한번 감사의 말씀을 전합니다. 또한, 첫 실험에서부터 지금까지 원활하게 실험을 할 수 있도록 도와 주신 노재영 선생님께 감사 드립니다.

대학원 생활 동안 여러모로 도와준 평생 우정을 같이 할 영원한 친구 “77 영우회” 안정균, 배천석, 이현일, 김상우, 송종길, 양동성께 감사 드립니다. 그리고 항상 열심히 노력하는 남주에게 감사 드립니다.

저의 평생 후원자 이시며, 항상 정직과 성실을 가르쳐 주신 존경하고 사랑하는 아버님, 어머님께 깊은 감사 드립니다. 가까운 곳에서 때론 부모님처럼 힘이 되어주신 작은누나와 매형께 감사 드립니다.

마지막으로 세상에서 가장 사랑하는 100분께 진심으로 감사 드립니다.

2005년 12월

이 상 훈