

## 피라미드 형상의 내부구조를 가지는 초경량 금속 내부구조 접합판재의 제작 및 정적 굽힘시험

정창균\*, 윤석준\*, 양동열#, 이상민\*, 나석주\*\*, 이상훈\*\*\*, 안동규\*\*\*\*

### Fabrication and Static Bending Test in Ultra Light Inner Structured and Bonded(ISB) Panel Containing Repeated Inner Pyramidal Structure

Chang Gyun Jung\*, Seok-Joon Yoon\*, Dong-Yol Yang#, Sang Min Lee\*, Suck-Joo Na\*\*, Sang-hoon Lee\*\*\* and Dong-Gyu Ahn\*\*\*\*

#### ABSTRACT

Inner structured and bonded panel, or ISB Panel, as a kind of sandwich type panel, has metallic inner structures which have low relative density, because of their dimensional shape of metal between a pare of metal skin sheets or face sheets. In this work, ISB panels and inner structures formed as repeated pyramidal shapes are introduced. Pyramidal structures are formed easily with expanded metal sheet by the crimping process. Three kinds of pyramidal structures are made and used to fabricate test specimen. Through the multi-point electrical resistance welding, inner structures are bonded with skin sheet. 3-point bending tests are carried out to measure the bending stiffness of ISB panel and experimental results are discussed.

**Key Words** : Ultra light inner structured and bonded panel(초경량의 내부구조 접합판재), Pyramidal structure(피라미드 구조), Expanded metal(익스팬디드 금속)

#### 1. 서론

최근 제품의 경량화에 대한 요구 및 고기능성 제품의 필요성에 따라 다양한 형태의 초경량 구조 재료 등이 연구되고 있다. 이중 가장 활발하게 개발 적용되고 있는 경량재료는 복합재료와 샌드위치 판재이다. 샌드위치 판재는 면재(face sheet or

skin sheet)와 심재(core)로 구성되어 있어 대부분의 굽힘응력을 면재가 부담하는 반면 심재는 전단응력을 받게 된다. 따라서 샌드위치 판재는 비교적 강한 면재와 상대적으로 낮은 밀도의 심재를 통하여 비강성을 크게 개선시킨다. 일반적으로 샌드위치 판재는 허니콤(honeycomb)류와 같은 심재를 이용하는 것이 가장 일반적이다. 그 밖에 심재의 재

\*\*\* 접수일: 2004년 9월 8일; 게재승인일: 2005년 4월 15일

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

# 교신저자, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail dyyang@kaist.ac.kr Tel.(042) 869-3214

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\* 조선대학교 공과대학 기계공학과 대학원

\*\*\*\* 조선대학교 공과대학 기계공학과

료로서 내부에 금속 폼(metal form)을 주입하여 샌드위치 판재와 유사한 형태의 초경량재료를 만드는 연구도 활발하나 제조 가격이 높은 단점이 있다.<sup>1</sup> 최근 초경량 샌드위치형 판재의 또 한가지 방안으로 트러스 구조와 같은 규칙적인 3 차원 금속 구조를 이용한 샌드위치 형 판재를 개발하려는 연구가 활발히 수행되고 있다. 트러스 형태의 내부구조는 3 차원 구조의 특징으로 인해 양쪽 면재 사이에서 구조물이 차지하는 공간점유율이 매우 낮은 반면 심재는 3 차원구조로 인해 높은 비강성을 가진다. 최근 3 차원 트러스 구조에 대한 많은 연구가 진행되었다. 사면체(Tetrahedron), 피라미드(Pyramid), 직조금속망(Woven metal) 및 카고메(Kagome) 등 다양한 형상에 대한 연구가 진행되었으며 비강성 측면에서 매우 우수한 것으로 보고된다.<sup>2,6</sup>

이러한 트러스 구조를 가지는 초경량 판재는, 기계적 성질이 매우 우수함에도 불구하고 심재로 사용되는 3 차원 구조의 제조방식 및 대량생산 기술 그리고 외부 판재와의 고속접합 문제에서 결코 쉽지 않은 난제를 가지고 있다. 또한 현재 연구되고 있는 재료들은 두께가 수 cm 단위이며, 제조 단가가 높아 자동차 등에 적용하기에는 부적합하다.

본 연구에서는 이러한 샌드위치형 판재를 초경량의 내부구조 접합판재(Inner Structured and Bonded panel, ISB panel)라 명명하였으며 이를 간단히 ISB 판재로 칭하였다. 본 연구는 산업재로서 활용이 용이하도록 두께가 1mm 이내인 ISB 판재를 대량생산하는 기술을 개발함을 연구의 최종 목표로 한다. 따라서 ISB 판재는 적용 특성에 맞는 내부형상의 설계, 설계된 형상을 대면적에 대량복제하기 위한 생산기술 및 고속 접합기술, 제작된 ISB 판재의 가공기술 등이 필요하다.

본 논문에서는 상기 연구 목적을 달성하기 위한 기초연구로서 상용재료를 간단히 가공하여 내부구조를 제작하고 접합하여 시작품을 제작하였다. 전체 제작 두께는 기초연구임을 감안하여 두께를 3mm 이내로 하였다.

기초 연구를 위해 제작된 ISB 판재는 트러스형 구조의 한 종류인 피라미드 형상을 내부구조재로 이용하였다. 피라미드 구조의 성형은, 시중에 흔히 구할 수 있는 익스팬디드 금속(expanded metal)을 크림핑(crimping)하여 3 차원 피라미드 구조를

손쉽게 성형할 수 있음이 알려져 있다.<sup>2</sup> 본 논문에서는 간이 크림핑 공정을 통해 피라미드 구조를 제작하여 ISB 판재를 제작하고 제작 공정에 의해 발생하는 ISB 판재의 결함을 관찰하였다. 또한 제작된 ISB 판재의 강성을 파악하기 위해 3 점 굽힘 시험을 수행하여 그 기계적 특성을 평가하였다.

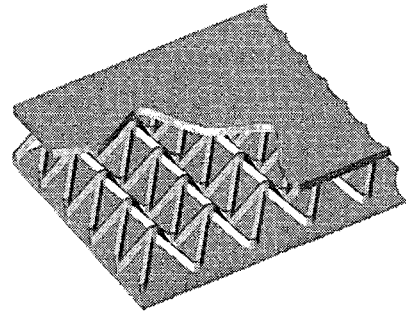


Fig.1 The concept ISB panel using pyramidal structures

## 2. 굽힘 강성

3 점 굽힘시험은 판재의 굽힘강성을 파악하기 위해 수행되는 가장 일반적인 실험 방법이다. 일정한 폭을 가진 단순 지지된 빔 형태의 판재에 편치로 중앙에 집중하중을 가하여 하중-인장 선도를 얻어 이 결과로부터 강성과 강도를 판단한다.

샌드위치 판재에서 단순지지보가 중앙에 집중하중을 받을 때 전체 처짐량은 판재의 굽힘에 의한 처짐량과 내부구조재의 전단변형에 의한 처짐의 합이다.<sup>11</sup>

$$\delta = \delta_{normal} + \delta_{shear} = \frac{PL^3}{48E_f I} + \frac{PL}{4S} = \frac{PL^3}{48(EI)_{eq}} \quad (1)$$

$$EI = \frac{E_f t_f d^2}{2} \quad (2)$$

$$S = \frac{G_c d^2}{t_c} \quad (3)$$

$$d = t_f + t_c \quad (4)$$

여기서 P 는 작용하중, L 은 단순지지보 사이의 거리(스팬 길이), E 는 탄성 계수, G 는 전단 탄성 계수, t 는 두께를 나타내며 아래첨자 f 는 면재(face), c 는 심재(core), eq 는 등가값(equivalent value) 을 의미한다.

(1)식으로부터 등가 굽힘강성은 다음과 같다.

$$(EI)_{eq} = \frac{PL^3}{48\delta} = \frac{L^3}{48} k_{eq} \quad (5)$$

$$k_{eq} = \frac{P}{\delta} \quad (6)$$

굽힘강성을 비교할 때에는 식 (5) 와 식 (6) 모두를 이용해도 좋으나 (6)식의 경우 실험에서 얻어지는 인장-변위 선도의 기울기를 나타내므로 결과의 비교를 위해서 스프링 강성 값인 (6)식을 이용하는 것이 편리하며 본 논문에서도 굽힘강성을 스프링 강성 값으로 표현하였다.

### 3. 내부구조재의 제작

#### 3.1 익스팬디드 메탈

익스팬디드 메탈(expanded metal)은 마름모꼴의 격자를 가지는 철망의 한 종류로 익스팬디드 메탈 혹은 메탈라스(metal lath)라고 불린다.

익스팬디드 메탈은 얇은 금속 박판을 슬릿(slit)한 후 슬릿 된 방향으로 금속을 확장시켜 제조되는 철망의 한 형태로, 재료의 손실이 없고 공정이 자동화되어 대량생산되고 있다. 따라서 그 가격이 매우 저렴하여 다양한 용도로 쓰인다. 익스팬디드 메탈은 한국산업규격화 되어 있다.<sup>8</sup>

본 연구에서는 단축의 길이가 약 4.5mm, 장축의 길이가 약 6.9mm 이며 원 재료의 두께 및 슬릿 폭이 0.5mm 인 강재 익스팬디드 메탈을 이용하였다.

#### 3.2 피라미드 구조의 성형

ISB 판재의 내부 구조물은 다양한 형태가 될 수 있다. 그러나 구조의 생산에 필요한 경제성이나 생산의 용이성 혹은 대량 생산성 등을 고려할 때 적용 가능한 내구구조의 형상은 매우 제한적이다. 본

연구에서는 다양한 내부구조 중 앞서 설명된 익스팬디드 메탈을 크림핑하여 피라미드 향상의 내부구조를 제작하였다.

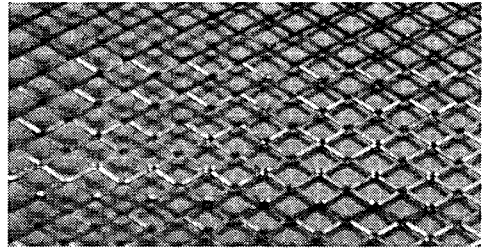


Fig. 2 The example of the expanded metal

익스팬디드 메탈의 마름모꼴 메쉬의 대각선 방향을 따라 적절한 각도를 주어 굽히면 피라미드 구조로 쉽게 변형한다. 이런 크림핑 공정은 구현하기가 쉽고 롤을 이용할 경우 대량고속 생산이 가능하다. 사용되는 재료 역시 익스팬디드 금속을 사용하므로 연속된 자동화 공정을 구현하기 유리한 장점이 있다. Fig. 3 에 익스팬디드 메탈을 크림핑하여 피라미드 구조를 성형하는 공정의 개략도를 나타내었다.

간이 크림핑 장치는 익스팬디드 메탈을 한 라인식 크림핑 할 수 있도록 제작하였으며 크림핑 각의 변화를 주기 위해 펀치와 다이는 교체가 가능하도록 하였다. Fig. 4 에 간이 크림핑 장치를 나타내었다.

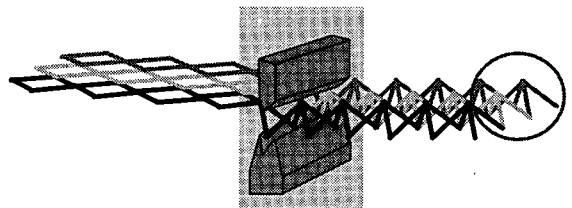


Fig. 3 The crimping process and pyramidal structures

크림핑 공정을 통해 3 가지 종류의 피라미드 구조를 생산하였다. 피라미드 구조는 크림핑 각도에 따라 높이와 상대밀도가 달라진다. 본 연구에서는 90° , 120° , 150° 의 3 가지 크림핑 각도를

이용하여 내부구조재를 제작하였다. 제작된 피라미드 구조 중 90°, 120° 크림핑 된 피라미드 구조를 Fig. 5 에 나타내었다.

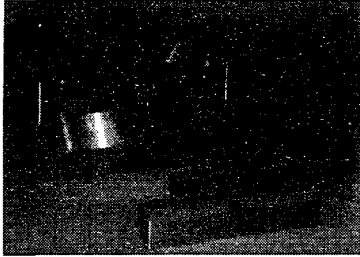


Fig. 4 Crimping die-set

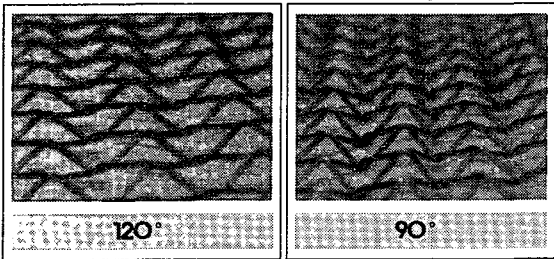


Fig. 5 The example of pyramidal structures

#### 4. ISB 판재의 제작 및 정적 굽힘시험

##### 4.1 ISB 판재 제작

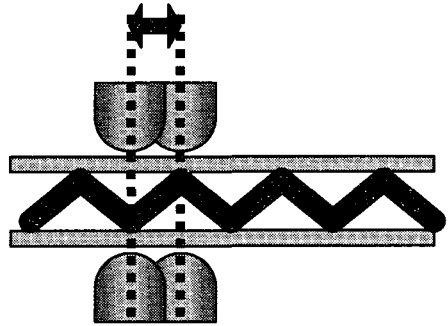
제작된 피라미드 형상의 내부구조재를 이용하여 ISB 판재를 제작하기 위해서는 적절한 두께를 가지는 면재를 심재인 내부구조재와 접합해야 한다. 일반적으로 면재와 심재의 접합은 각각의 재료의 특성에 따라 선택되는데 비금속 복합재료의 경우 화학적 접합이 주로 사용되는데 반하여 면재와 심재가 모두 금속인 샌드위치 판재의 경우 화학적 접합, 브레이징, 용접 등 다양한 접합이 적용될 수 있다.

본 연구에서는 피라미드 구조의 꼭지점과 면재의 접촉에 의해 발생하는 접촉저항을 이용한 전기저항 다점용접을 이용하여 접합되었다.<sup>9</sup>

전기저항 다점용접은 곡률을 가진 전극을 이용하여 동일 선상의 접점을 동시에 접합한다. 이는 대량생산을 염두에 둔 롤(roll) 전극을 이용한 고속

대량 용접장치의 근사 모델이다. 전기저항 다점용접의 특성에 대한 연구는 본 논문에서는 생략한다

ISB 판재제작에 사용된 면재는 두께가 0.3mm 인 스테인레스 스틸(stainless steel)을 이용하였다. 이는 면재가 심재의 두께보다 얇을 경우 용접시 심재가 녹아 용접이 되지 않기 때문에 심재보다 얇은 면재를 사용하기 위함이다.



(a) Multi-point electrical resistance welding



(b) Shape of electrode

Fig. 6 Multi points electrical resistance welding and shape of electrode.

##### 4.2 제작된 ISB 판재의 제작특성 및 결합

전기저항 다점 용접은 기본적으로 접촉저항을 유발하기 위해 약간의 압력을 가하게 되고 접점부가 용접이 되므로 두께 변화를 유발한다. 최종 제작된 ISB 판재의 두께 변화를 Table 1 에 나타내었다.

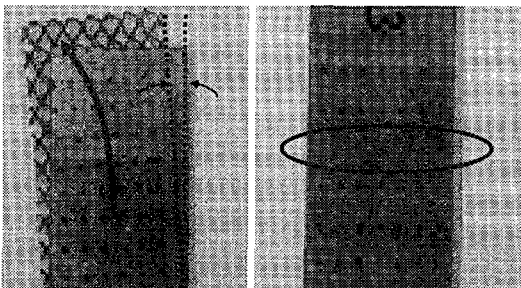
Table 1 에서 ISB 판재의 두께는 면재의 두께와 심재의 두께를 합한 것이며 크림핑 각이 90°인 경우는 높이 변화가 0.2mm 내외이며 120°, 150°의 경우는 기하학적 계산 값과 유사하다.<sup>10</sup>

Table 1 Height of ISB panel

Crimping angle		90°	120°	150°
		Thickness [mm]		
Skin sheet		0.3		
Pyramid structure (calculated)		2.44	1.73	0.89
ISB Panel	Calculated	3.04	2.33	1.49
	Measured	2.8x	2.4x	1.5x

내부구조의 제작 결함은 크림핑 라인의 비틀어짐과 크림핑 펀치의 기울어짐에 의한 하중의 불균일 등으로 유발되며 그 결과 구조재의 높이가 불균일하게 된다. 높이의 불균일은 심재의 기계적 특성을 불완전하게 할 뿐 아니라 전기저항 다점용접을 통한 ISB 판재의 접합에서 접촉저항이 발생하지 않거나(높이가 낮을 경우), ISB 판재가 휘는 등의 결함을 유발한다. 특히 크림핑 하중이 불균일하거나 기울어 질 경우 동일 크림핑 라인내에서 높이 변화를 수반하게 되고, 순차적인 전기저항 다점용접 시 그 결함이 누적되어 내부구조재의 뒤틀림 현상을 보이며 심각한 제작 결함을 야기한다.

이러한 현상은 ISB 판재의 크기가 증가할수록 점점 확대되므로 향후 대면적 판재 제작에서는 반드시 고려되어야만 한다. Fig. 7에 심재의 불균일에 의해 발생하는 제작 결함을 나타내었다



(a) Warping defect

(b) Unwelded defect

Fig. 7 Defects of ISB panels due to inaccurate cores.

### 4.3 정적 굽힘시험 시편의 제작

ISB 판재를 제작함에 있어 제작된 ISB 판재가 어느 정도의 기계적인 특성을 가지는지를 판단하

기 위해 정적 시험인 3점 굽힘 시험을 수행하기 위한 시편을 제작하였다. 3가지의 크림핑 각에 대하여 길이 200mm, 폭 방향으로 30mm 의 크기를 가지며 크림핑 각도 별로 5개의 시편을 제작하였으며 3점 굽힘시험의 스패ん길이(span length)는 시편 길이 200mm 에 대하여 160mm 를 가진다. 펀치의 지름은 25.4mm 이며 INSTRON사의 표준 장치를 이용하였다.<sup>11-12</sup>

Table 2 Experiment condition

	Case 1	Case 2	Case 3
Size [mm]	200 x 30	200 x 30	200 x 30
Thickness [mm]	2.8	2.4	1.5
Mass [g]	37.11g	35.51g	34.72g
# of specimen	5	5	5



Fig.8 Test specimen of ISB panel ( length 200mm , width 30mm , total thickness 2.8mm)



Fig.9 Apparatus of 3-point bending test (Instron)

3가지의 시험조건당 얻어진 5개의 시험결과 중 편차가 심하지 않은 3개의 결과를 평균하여 사용하였다.

### 5. 실험 결과

Fig. 10 에 3 점 굽힘시험의 하중-변위 선도를 나타내었다. 그래프에서 사각 박스 안의 1, 2, 3 은 크림핑 각도가 각각 90°, 120°, 150° 임을 나타낸다.

굽힘시험에서의 하중-변위 선도는 각 실험별로 매우 유사한 변형 특성을 나타냄을 정성적으로 판단할 수 있다. 따라서 판재의 제작은 일관된 특성

을 가지도록 충분한 재연성을 가지는 비교적 안정된 공정으로 생각된다.

하중-변위 선도에서 초기 선형구간을 가지면서 변위화 하중이 증가하다가 최고점에 이르러 하중이 급격히 떨어진 후 변위만 증가하는 현상을 나타낸다. 하중-변위곡선의 초기 선형부를 스프링 강성(k) 값으로 정의하고 이를 통해 강성을 비교한다. 또한 최대하중 값을 강도특성을 나타내는 값으로 평가하였다.

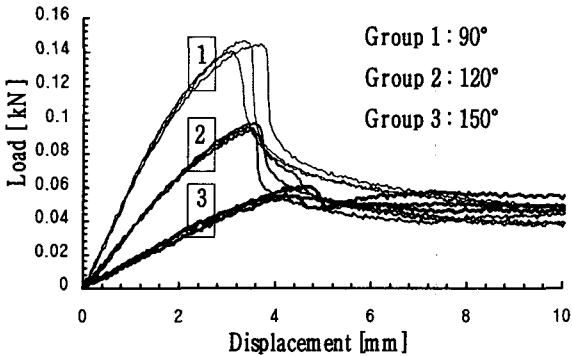


Fig.10 Load-displacement curve of ISB panel

3 가지의 그룹에서 스프링 강성 값과 최대하중은 크럼핑각에 절대적인 영향을 받는다. 따라서 피라미드-형상의 내부구조재에서 크럼핑각은 ISB 판재의 특성을 결정 짓는 매우 중요한 인자임을 판단할 수 있다.

3 점 굽힘시험은 단순 지지된 보의 중앙부를 원형의 펀치로 하중을 가하게 된다. 따라서 판재와 펀치의 표면부에 집중하중이 걸리게 되는 단점이 있다. 본 실험에서도 이러한 집중하중의 결과로 면재의 국부적인 파단이 우선적으로 발생하였고 이후 심재가 압축된다. 이는 굽힘하중에 의해 상부 면재가 압축을 받으면서 피라미드 구조와 면재의 점점 사이의 공간으로 침투하면서 발생한다. 이러한 현상은 크럼핑 각이 작을수록 높은 하중에서 발생하며 따라서 피라미드의 단위 면적당 밀도 역시 면재의 파단을 막는 중요한 인자이다.

3 가지 실험의 선형구간내의 기울기는 실험 1, 2, 3 에 대하여 각각 58.6, 34.1, 15.6 kN/m 의 평균 값을 가진다. 200mm x 30mm 의 크기를 가지는 1 종

냉연 강판 (탄성계수 180GPa, 밀도 7850kg/m<sup>3</sup>)<sup>13</sup> 이 동일한 스프링 강성 값을 가질 때의 두께를 등가 두께( $t_e$ , equivalent thickness)라 정의하고, 등가 두께를 가질 때 냉연강판의 질량( $m_{solid}$ )를 계산함으로써 동일한 강성을 가지는 두 판재의 무게를 비교하여 경량화 정도를 비교해 보았다.

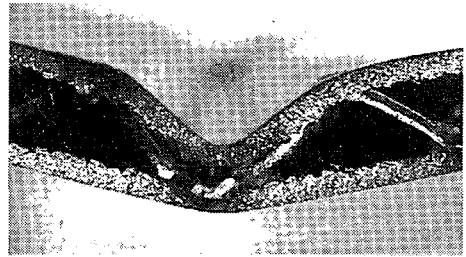


Fig.11 Buckling of skin sheet due to localized loading

크기 200mm x 30mm 인 1 종 냉연강판이 실험 1, 2, 3 과 동일한 강성을 얻기 위해 냉연 1 종 강판의 두께( $t_e$ )는 각각 2.23mm, 1.86mm, 1.44mm 이어야 한다. ISB 판재의 두께가 등가두께보다 두꺼움을 확인할 수 있다. 그러나 이때 ISB 판재와 냉연 강판의 무게를 비교해 보면 ISB 판재의 질량이 37.1g ~ 34.7g 인데 반하여 등가두께를 가지는 냉연 강판의 경우 질량은 105g ~ 67.6g 으로 모든 경우에 있어 질량이 반 이하로 감소했다. 정량적 비교를 위해 질량감소의 정도를 식 (7)과 같이 정의하였다.

$$R_m = \frac{m_{solid} - m_{ISB}}{m_{solid}} \times 100 \quad (7)$$

여기서  $R_m$  은 질량감소율(Reduction ratio)이다.

실험 1 의 경우 일반 강판을 쓰는 곳에 ISB 판재를 대체하면 굽힘 강성을 그대로 유지하면서도 질량을 64% 경량화 시킬 수 있다. 즉 질량을 반 이상 줄일 수 있다는 의미이다. 실험 1, 2, 3 에 대한 등가두께 및 무게비교 결과를 Table 3 에 나타내었다.

Table 3 Equivalent value of ISB panel

	$t_e$ [mm]	$m_{solid}$ [g]	$m_{ISB}$ [g]	reduction rate [%]
Case 1	2.23	105	37.1	64.7
Case 2	1.86	87.8	35.5	59.6
Case 3	1.44	67.6	34.7	48.7

## 6. 결론

본 연구에서는 면재와 심재가 모두 금속인 샌드위치형 복합판재인 ISB 판재를 소개하였다. 상용 익스팬디드 금속을 크럼핑 공정을 통해 피라미드 구조로 성형한 후 이를 ISB 판재의 심재로 활용하여 다점 전기저항 용접을 통해 ISB 판재를 제작하고 정적 굽힘시험을 통해 간단히 그 기계적 특성을 평가하였다.

내부구조의 제작에서 형상의 불균일은 다점 전기용접에 의한 접합 때 오차가 누적되어 나타나므로 대면적의 판재 생산 시 고정도의 정밀도가 요구된다.

ISB 판재는 내부구조의 형상에 따라 그 기계적 특성이 크게 바뀌는데 본 연구에서 사용된 피라미드 구조는 크럼핑 각에 따라 최대 굽힘하중 및 스프링 강성(k)을 나타내었다.

동일한 크기(200mm x 30mm)와 굽힘강성(스프링 강성, k)을 가지는 1 종 냉연 강판의 두께는 ISB 판재의 두께보다 얇으나 그 무게는 두 배 이상으로 비강성이 매우 높다. 따라서 경량화 측면에서 매우 유리하다.

이상의 연구로부터 ISB 판재는 내부구조재의 형상에 따라 그 특성이 달라지며 따라서 필요한 목적에 맞도록 내부구조재가 설계 및 제작될 수 있는 다기능 초경량 판재로서 매우 높은 가능성을 가짐을 확인할 수 있다.

다만 일반 강판에 비해 공정이 복잡한 만큼 대량생산 공정개발이 반드시 수반되어야 할 것이다.

## 후 기

이 논문은 과학기술부의 국책연구개발사업인 마이크로 첨단복제생산 시스템 개발사업결과의 일부이며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- Gibson, L. J., Ashby, M. F., "Cellular solids-structure and properties," Cambridge University Press, second edition, 2001.
- Wadley, H. N. G., Fleck, N. A. A., Evans, A.G., "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures," Composites Science and Technology, Vol. 63, Issue 16, pp. 2331-2343, 2003
- Wicks, N., Hutchison, J. W., "Optimal truss plates," International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, pp.5165-5183, 2001
- Wang, J., Evans, A. G., Dharmasena, K., Wadley, H.N.G., "On the performance of truss panel with Kagome cores," International Journal of Solids and Structures, Vol. 40, pp.5165-5183, 2003.
- Liu, J.S., Lu, T. J., "Multi-objective and multi-loading optimization of ultralightweight truss materials," International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, pp.619-635, 2004.
- Kang, K. J., Jeon, G. P., Nah, S. J., Ju, B. S., Hong, N. H., "A new way to manufacture Ultra light metal structures," Trans. KSME, Vol. A, No. 8, pp. 296-303, 2004.
- Ashby, M. F., Evans A.G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., Wadley, H.N.G., "Metal Forms; A design guide, Butterworth-Heinemann, 2000.
- KS D3601, "Expanded metal", 1993.
- Lee, S.M., Kim, J.T., Na, S.J., "A study on multi points electrical resistance welding," Proceedings of the spring meeting of Korean Welding Society, Vol. 42, pp.30-32, 2004.
- Jung, C. G., Yoon, S. J., Seong, D. Y., Yang, D. Y., Ahn, D. G., "Analysis of design parameter in Ultra light inner structured and bonded metal panel made of the metallic pyramidal structure," Proceedings of the KSPE Spring meeting, pp.928-931, 2004.
- Zenkert, D., "The handbook of Sandwich Construction," EMAS publishing, 1997.
- ASTM E270 "Standard test method for semi-guided bend test for ductility of metallic materials," 1995.
- Ahn, D. G., Lee, S. H., Kim, M. S., Hahn, G. Y.,

Jung, C.G., Yang, D. Y., "Mechanical properties of CSP 1N sheet metal and development of a tensile test method for woven wire structured materials," Proceedings of the KSPE spring meeting, pp.977-980, 2004.