

# 수직방향 직조 금속망을 이용한 초경량 금속 내부구조 접합판재의 제작 및 특성에 관한 기초 연구

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

## Basic Study in Fabrication and Mechanical Characteristics of Ultra Light Inner Structured and Bonded(ISB) Panel Containing Perpendicularly Woven Metal

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, due to their dimensional shape of metal between a pair of metal skin sheets or face sheets. Previous works showed that ISB panels containing inner structures formed as repeated pyramidal shapes saved weight up to 60% in condition of same stiffness comparing with solid sheet. In this work, woven metal is adapted to inner structures replacing pyramidal structures. The test specimens of ISB panel containing woven metal made by multi-point electric resistance welding and 3-point bending test have been carried out. The results of experiments and comparisons of process parameters, stiffness and failure mode are discussed.

**Key Words :** Inner structured and bonded panel(내부구조 접합판재), Woven metal (직조금속망), Expanded metal(익스팬디드 금속), Light material (경량 재료)

### 1. 서론

면재(面材, face sheet) 사이에 특별히 가볍고 구조적으로 안정된 재료를 심재(心材, core)로 사용하는 샌드위치 형 판재는 역학적으로 비강성이 매우 높다. 샌드위치 형 판재에 사용되는 면재와 심재는

개발 목적과 특성에 따라 다양하며 대표적인 예로 복합재료, 메탈 폼(metal foam), 금속 구조를 이용한 샌드위치 판재를 들 수 있다.

복합재료를 이용한 샌드위치 판재는 가장 일반적인 경량재료로서, 그 경량화 정도가 매우 높고 특성이 우수하여 다양한 공정이 개발되고 적용되

\* 접수일: 2004년 11월 12일; 게재승인일: 2005년 2월 18일

# 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* 교신 저자, 한국과학기술원 기계공학과

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

\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\*\* 조선대학교 공과대학 기계공학과 대학원

\*\*\*\*\* 조선대학교 공과대학 기계공학과

고 있다.<sup>1,2</sup> 그러나 재료의 특성상 친환경적 재활용이 어렵고, 화학적 접착 및 복잡한 공정 등으로 인해 사용이 제한적이다. 유사한 샌드위치 형 판재로서 메탈 폼을 이용하기도 한다. 메탈 폼은 금속재료가 특별한 공정을 통해 내부에 수많은 기공과 같은 공간을 가지도록 한 재료를 말하며, 이를 심재 등으로 이용하여 금속 샌드위치 판재를 만드는데, 기계적 특성이 우수하고 금속을 활용하므로 재활용이 가능하나, 상대적으로 고가인 메탈 폼 재조 공정으로 인해 이에 대한 경제적인 공정 개발이 연구되고 있다.<sup>2</sup>

유사한 금속 샌드위치 형 판재로서 규칙적인 금속 3 차원 구조형상을 제작하여 심재로 활용하고자 하는 연구가 최근에 진행되었다.

심재로 사용되는 3 차원 구조는 공간율이 매우 높아 경량화에 유리한 반면 구조의 특성으로 인해 상대적으로 튼튼하여 비강성 개선에 크게 기여할 수 있다. 현재까지 시도된 주요 형상들은 사면체(Tetrahedron), 피라미드, 직조 금속망(Woven metal) 및 카고메(Kagome) 등 다양한 형상에 대한 연구가 진행되었으며 보다 효율적인 구조를 개발하기 위한 노력 역시 계속되고 있다.<sup>3~7</sup>

이러한 연구들 중 Wadley<sup>7</sup> 등은 익스팬디드 메탈(expanded metal) 및 타공망(perforated metal)을 크림핑(crimping)하여 손쉽게 피라미드 구조 등을 제작 할 수 있는 방법을 제시하였고, TLP (Transient Liquid Phase) 접합을 이용하여 수십 mm 두께의 다양한 내부구조를 가지는 샌드위치 형 접합판재를 제작한 바 있다.

그러나 이러한 재료 역시 금속 3 차원 구조의 제작이 매우 어렵고 단가가 높아 적용이 어려울 뿐만 아니라 아직까지 두께가 두꺼워 산업재료로 적용하기는 무리가 따른다.

본 연구에서는 이러한 샌드위치 형 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 연구에 앞선 선행 기초연구로서 다점 전기저

항용접(multi-point electric resistance welding)을 이용하여 전체 두께가 3mm 이내인 피라미드형 시험시편을 제작하였으며 3 점 굽힘 실험을 통해 동일 강성 대비 최대 60%에 가까운 경량화를 구현한 바 있다.<sup>8,9</sup>

본 연구에서는 소개된 선행 연구와는 달리, 수직방향의 직조 금속망(perpendicularly woven metal)을 이용한다. 여기서 수직방향은 금속 와이어가 직조될 때 와이어간의 교차점에서 면에 수직으로 적층 됨을 나타내며 대부분의 상용 금속망이 이에 해당한다. 이는 향후 새로운 직조방식 개발에 의해 만들어 질 다단으로 직조된 망에서 와이어의 적층방향이 달라지는 것을 염두에 둔 표현이다. 와이어의 직조형태 및 적층방향 의해 만들어 지는 와이어간의 3 차원 구조를 최적화 하여 고비강성의 두께 1mm 이하의 ISB 판재를 제작하기 위한 최종목표를 달성하기 위해 선행 기초 연구로서 일반 시중에서 쉽게 구할 수 있는 상용 직조 금속망을 이용하여 3mm 내외의 ISB 판재를 제작하여, 주요 공정 변수들을 도출하며 제작된 판재를 실험하여 그 특성을 평가, 비교하여 직조 금속망을 이용한 초경량 금속 ISB 판재의 가능성을 고찰한다.

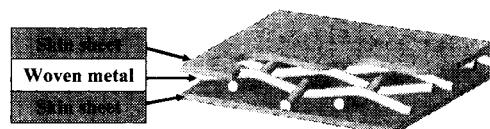


Fig. 1 ISB Panel containing commercial woven metal

## 2. 상용 직조 금속망의 특성

### 2.1 개요

상용 직조 금속망은 시중에서 흔히 구할 수 있는 철망을 말한다. 직조 금속은 재료와 크기, 직조 방식에 따라 매우 다양한 종류가 있으며 산업적으로 다양하게 사용된다. 본 연구에서 사용된 직조 금속망은 직조 형태가 사각인 가장 일반적인 형태를 사용하였으며 그 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

망의 재료가 되는 금속 와이어는 원하는 굽기로 제작되기 위해 수 차례의 신선(wire drawing)과정을 거치기 때문에 그 강도가 매우 높아 구조재로 사

용하기에 유리한 특성을 가진다. 또한 잘 발달된 직조 기술로 인해 대량생산에 유리한 장점을 가지고 있으므로 본 연구의 내부구조의 기초 연구 재료로서 적당하다고 판단하였다.

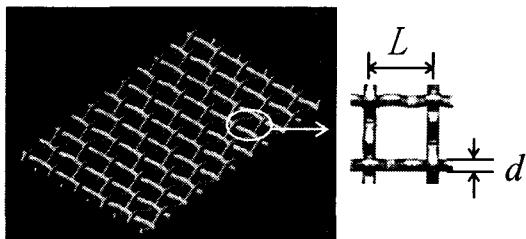


Fig. 2 Commercial woven metal

서론에서 밝힌 바와 같이 본 연구에서는 두께 3mm 이내의 직조 금속망을 이용한 ISB 판재를 제작하기 위해 금속 와이어의 직경이 0.8mm인 철재질의 상용 직조 금속망을 이용하였다.

## 2.2 기하학적 이방성 및 평면 전단특성

본 연구에서 사용된 직조 금속망은 일방향으로 정렬된 와이어 사이로  $90^\circ$  방향으로 씨실 역할을 하는 와이어가 지나가면서 직조된다. 따라서 일방향의 와이어는 씨실 역할을 하는 와이어를 교차 관통시키기 위해 상대적으로 굴곡이 심하다. 이러한 직조 특성으로 인해 발생되는 특성 중, 와이어의 굴곡이 심한 방향을 warp 방향이라 칭하고 상대적으로 굴곡이 적은 와이어의 방향을 weft 방향이라 칭한다. 측정을 통해 warp 와 weft 방향의 굴곡 정도를 측정한 결과 각각 약  $222^\circ$ ,  $200^\circ$ 로 약  $20^\circ$  정도의 차이를 보인다. 이러한 방향성을 기하학적 이방성(geometrical anisotropy)이라고 칭하여 향후 표현의 편의를 도모하였다.

또한 직조 금속망은 와이어간 접점이 붙어있지 않다. 따라서 전단에 대한 저항이 없어 평면 내전단력에 대하여 자유롭게 변형하는 특성을 지닌다.

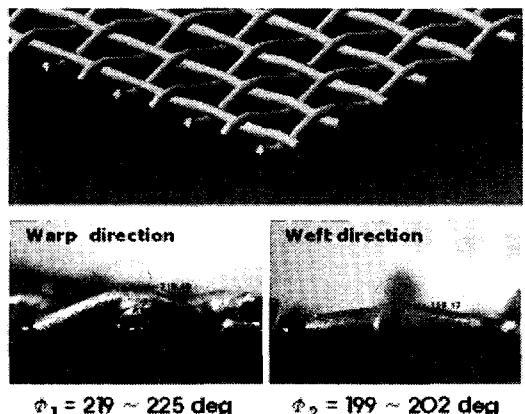


Fig.3 Geometrical anisotropy in woven metal

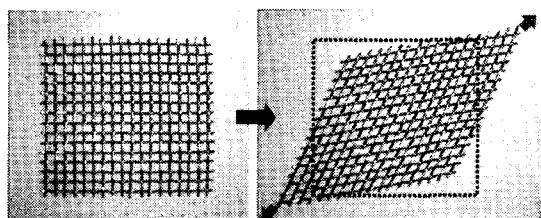


Fig. 4 No resistance in in-plane shear

## 2.3 상대밀도

파라미드 형상의 미세패턴과 마찬가지로 직조금속망 역시 공간율을 가진다. 이러한 공간율을 정량적으로 나타내기 위해 상대밀도(relative density)를 정의한다. 상대 밀도는 단위 내부구조가 차지하는 공간을 동일 재료가 채웠을 때의 밀도에 대한 내부구조의 밀도의 비를 의미한다. 상대밀도에 영향을 주는 직조 금속망의 설계변수는 와이어의 지름(d)과 와이어간의 거리(L) 그리고 와이어의 굽힘각(warp angle) 등이다. 그러나 상대밀도를 계산할 때에는 와이어의 굽힘은 고려하지 않아도 되며 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.<sup>10</sup>

$$\rho_r = \frac{\pi d}{4L} \quad (1)$$

본 연구에서 사용한 재료는 와이어의 직경(d)이 0.8mm 이고 와이어간 중심간격(L)이 4.2mm 인 직조금속망이다. 본 연구에서 사용된 직조 금속망의 상태 밀도는 0.18~0.20 정도로 계산된다.

샌드위치 판재에서 단순지지보가 중앙에 집중하중을 받을 때 전체 처짐량은 판재의 굽힘에 의한 처짐량과 내부구조의 전단변형에 의한 처짐의 합이며 이를 등가 굽힘강성으로 치환하여 계산하면 식(2)와 (3)같이 계산됨이 알려져 있다.<sup>11</sup>

$$(EI)_{eq} = \frac{PL^3}{48\delta} = \frac{L^3}{48} k_{eq} \quad (2)$$

$$k_{eq} = \frac{P}{\delta} \quad (3)$$

여기서 P 는 작용하중, L 은 단순지지보 사이의 거리(span length), δ 는 전체 처짐량, E 는 탄성계수, eq 는 등가 값(equivalent value)을 의미한다.

굽힘강성을 비교할 때에는 실험에서 얻어지는 인장·변위 선도의 기울기를 나타내는 스프링 강성(k)값인 식 (3)을 이용하는 것이 편리하며 본 논문에서도 스프링 강성 값을 이용하여 강성을 평가하였다.

### 3. 3 점 굽힘실험 시편 제작 및 실험

#### 3.1 다점 전기저항용접

직조 금속망을 이용한 ISB 판재는 상용 금속망을 그대로 사용하기 때문에 비교적 간단하다.

예비 실험을 통해 내부구조의 두께가 면재의 두께보다 같거나 얇으면 저항 용접 시 면재가 녹기 전에 내부구조가 녹아버려 저항용접이 불가능함을 파악하였다. 따라서 내부구조로 사용되는 금속망의 직경이 0.8mm 인 점을 고려하고, 서론에서 언급된 선행연구와의 결과 비교를 위해 이와 동일한 면재인 0.3mm 의 두께를 가지는 스테인리스 스틸(SUS 304)을 이용하였다. 면재와 심재인 금속망의 접합을 위해 원형 전극을 가진 다점 전기저항용접을 이용하여 접합하였다. 원형 전극은 향후 대량 생산을 위해 연구 될 룰(roll)형 전극을 가지는 연속 용접공정을 구현하기 위한 기초연구를 위해 모사한 것이다.<sup>12</sup>

다점 전기저항용접에서 용접공정의 일반적인 공

정변수인 전류량, 통전시간 이외에도 제작시편의 특성으로 인한 용접 압력도 매우 중요한 공정 변수이다.

시편은 용접을 유발하는 접촉부의 저항발생을 위해 적절한 압력으로 눌러 주어야 한다. 만약 이러한 압력이 적정수준을 벗어나면 용접이 발생하지 않거나 내부구조의 붕괴, 면재의 인덴테이션(indentation)등이 발생하여 용접성이 크게 떨어진다. 본 실험에서는 균일한 압력을 위해 일정한 두께를 가지는 스토퍼(stopper)를 전극 사이에 두어 일정수준 이상의 하중이 가해지지 않도록 하였다. 반복된 실험의 결과 스토퍼의 높이는, 면재와 심재의 접합 전 각각의 높이의 합에서 85% 내외로 하는 것이 가장 적절한 저항을 유발하며, 통전 전류 4~5kA, 통전시간 2.5cycle 에서 가장 양호한 결과를 나타내었다. 본 실험에 사용된 용접기에서 최대 용접폭은 35mm 정도까지 가능하였으며 용접기의 용량이 크면 보다 넓은 폭으로 용접이 가능할 것으로 판단된다.

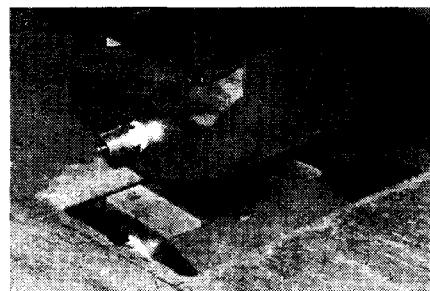


Fig. 5 Shape of electrode in Multi points electrical resistance welding

#### 3.2 시편 제작

시편은 길이 200mm 이고 폭이 20mm, 30mm 그리고 기하학적 이방성의 영향을 파악하기 위해 warp 방향과 weft 방향의 경우를 나누어 제작하였다.

기하학적 이방성에 대한 방향의 정의를 Fig. 6에 나타내었으며, 전체 실험에 대한 조건을 Table 1에 나타내었다. 제작된 판재의 전체 두께는 2.4mm 내외이다.

3 점 굽힘시험의 스팬길이(span length)는 시편길이 200mm 에 대하여 160mm 이다. 편치의 지름은

25.4mm이며 INSTRON 사의 표준 장치를 이용하였다.<sup>13</sup>

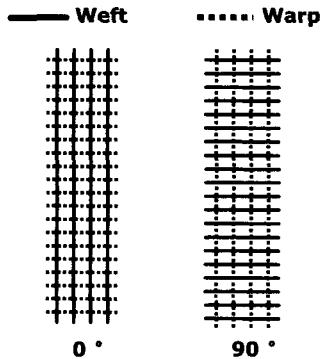


Fig.6 Definition of direction

Table 1 Experiment sets

No.	Direction	Length [mm]	Width [mm]	Number of specimen
1	0 °(weft)	200	20	5
2	0 °(weft)	200	30	5
3	90 °(warp)	200	20	5
4	90 °(warp)	200	30	5



Fig.7 Test specimen for 3-point bending

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 제작 특성

ISB 판재의 기계적 물성은 내부구조의 형상, 즉 심재의 기하학적 형상에 따라 변화한다. 따라서 직조 금속망이 가지는 기하학적 이방성은 ISB 판재의 기계적 물성의 이방성을 유발할 가능성을 충분히 가진다. 반면 이러한 특성은 다점 전기저항용접을 수행할 때에는 접합에 보다 유리한 조건으로 작용하였다. 이는 앞서 보인 금속망의 weft 방향

금속 와이어는 warp 방향 와이어의 굽힘 때문에 면재와 접촉하지 않는다. 이로 인해 용접 시 면재와 심재간의 접촉저항이 warp 방향의 와이어에서만 발생하여 보다 효율적인 접합이 가능하였기 때문이다.

와이어 간의 접합은 발생하지 않았다. 이는 다점 전기저항 용접은 접점에 적절한 접촉저항을 유발하기 위해 약간의 압력을 가하게 되는데, 이런 압력은 warp 방향의 와이어가 지탱하게 되어 용접에 충분한 와이어간의 접촉저항을 유발시키지 못하는 것으로 판단된다.

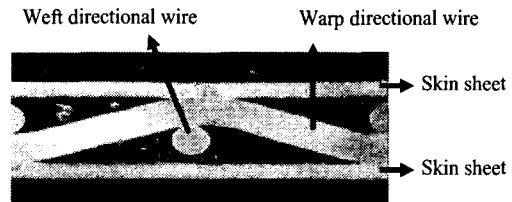


Fig. 8 The cross section of ISB panel and not contacted point between weft directional wire and skin sheet

##### 4.2 강성 평가

4 가지 경우에 대한 3 점 굽힘 실험의 결과를 Table 2에 정리하였다. 실험 결과는 각 실험에서 얻어진 5개의 결과 중 최대 최소를 제외한 3개의 값에 대한 평균으로 계산하였다.

배열각의 변화에 대한 특성에 따른 강성 변화의 유무를 파악하기 위해 실험 1과 3, 실험 2와 4를 비교해 보면 weft 방향과 warp 방향에 대한 영향은 크게 없는 것으로 나타났다. 이는 와이어의 교차지점에 접촉저항이 미약하여 와이어간 용접이 되지 않으므로 두 가지 방향의 와이어간 상호 구속이 발생하지 않은 결과로 판단된다.

선행연구에서 피라미드 구조를 가지는 ISB 판재는 최소 상대밀도가 0.06 일 때 강성은 최대 0.058 kN/mm 정도를 나타내었다. 이 결과와 비교해 볼 때 직조 금속망을 이용한 ISB 판재는 상대밀도가 높은 반면 강성 개선 정도가 낮아 트러스형 구조에 비해 비효율적임을 확인할 수 있다.

실험 1과 2 및 3과 4는 각각의 경우에 대하여 시편의 폭을 서로 달리 한 것이다. 폭에 대한 영향성을 파악하기 위해 각 경우의 굽힘 강성 (k)

을 시편의 폭으로 나누어 단위 폭당의 강성을 계산해 보면 모든 경우에 있어 동일하게  $10 \text{ kN/mm}^2$  의 값을 가진다.

Table 2 The results of Experiments

No.	P(kN)	$\delta$ (mm)	k (kN/mm)
1	0.09	7.84	0.02
2	0.13	7.6	0.03
3	0.10	9.5	0.02
4	0.13	7.25	0.03

판재의 파단 형태는 크게 면재의 파단(face failure), 면재의 주름(face wrinkling), 심재의 파단(core failure), 접합부 파단(bonding failure) 등이 가능하다. 본 연구의 ISB 판재는 모든 경우에 있어 상부 면재가 심재의 빈 공간 사이로 험몰되는 면재의 주름이 가장 먼저 발생하였다.



Fig. 9 Face wrinkling in ISB Panel containing woven metal

## 5. 결 론

본 연구는 직조 금속망을 이용한 ISB 판재에 대한 기초 연구로서 상용 금속망을 이용하여 연구의 목적에 비교적 가까운 ISB 판재를 제작해 보고 공정의 특성 및 제품의 특성을 파악하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 직조 금속망은 제조 특성상 기하학적 이방성이 존재한다.
- 접합에 있어 망 형태의 내부구조는 와이어간의 접촉부 등이 존재하여 일체형의 내부구조에 비해 접합이 어렵고, 직조된 와이어간에는 접합이 거의 발생하지 않는다.

- 기하학적 이방성의 경우 면재와의 접합에서는 유리한 요소로 작용하며, 굽힘 강성에는 크게 영향을 주지 않는다.
- 전체 굽힘 강성은 피라미드 구조를 가지는 ISB 판재에 비해 무겁고 굽힘 강성이 낮아 비효율적이다.
- 3과 4의 결과는 2의 결과에서 보듯 와이어간 접점이 서로 접합되지 않아 와이어간 구속력이 발생하지 않고, 이는 사각의 망 형태가 3차원 구조로서의 역할을 수행하지 못하였기 때문으로 생각된다.
- 따라서 망 형태의 내부구조를 가지는 ISB 판재를 설계 할 때는 망들간의 접점이 접합이 될 수 있도록 하는 것이 강성 개선에 유리할 것으로 판단 된다.
- 굽힘 시험 시 파단은 얇은 면재와 상대적으로 강한 심재로 인해, 면재의 주름(face wrinkling)이 가장 먼저 발생하였다. 따라서 강성 및 강도 개선을 위해 설계 시 반드시 고려 되어야 할 사항이다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- Kim, y., Kim, J., Yang, I., "Influence of stacking conditions on the absorbed energy characteristics of composite tubes," J. of KSPE, Vol. 18, No. 11, pp. 34-41, 2001
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., "Cellular solids-structure and properties," Cambridge University press, second edition, 2001.
- 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
5. 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 ,
  6. 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
  7. 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
  8. 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 annual meeting 2004, pp. 928-931
  9. Jung, C. G., Yoon, S. J., Seong, D. Y., Yang, D. Y., Ahn, D. G., "Fabrication and Static Bending Test in Ultra Light Inner Structured and Bonded(ISB) Panel Containing Repeated Inner Pyramidal Structure," Proceedings of the KSPE fall annual meeting 2004, pp. 483-486
  10. 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
  11. Zenkert, D., "The handbook of Sandwich Construction," EMAS publishing ,1997
  12. Lee, S.M., Kim, J.T., Na, S.J., " A study on multi points electrical resistance welding," Proceedings pf the 2004 spring annual meeting of Korean welding society, Vol. 42, pp. 30-32,2004
  13. ASTM E270 "Standard test method for semi-guided bend test for ductility of metallic materials," 1995