한국공작기계학회 2005 춘계학술대회 논문집 pp.354~359

내부에 피라미드 구조를 가지는 ISB 판넬의 정적 특성 분석

안동규[+],이상훈*, 김민수[+], 한길영[+], 김진석[+], 정창균[++], 양동열[++]

Investigation into static characteristics of ISB panels with the pyramidal structure as a internally structured material

Dong-Gyu Ahn[+], Sang-Hoon Lee*, Min-Su Kim[++], Gil-Young Hahn[+], Jin-Suk Kim[++], Chang-Gyun Jung[+++], Dong-Yol Yang[++++]

Abstract

The objective of this research work is to investigate into static characteristics of ISB panels with the pyramidal structure as a internally structured material. In order to investigate the behavior of material deformation and frracture characteristics , several tensile tests have beeen carried out for the ISB panel and skin sheet. Through the results of the experiments, the mechanical properties of ISB panel and skin sheet and fracture characteristics have been obtained. In addition, the mechaical properties of the ISB panel have been compared with that of the skin sheet by the view point of a specific modulus, a specific yield strength and a specific strength. From the results of the comparision, it has been shown that the ISB panel has an excellent static characteristics.

Key Words : ISB panel(ISB 판재), specific modulus (비탄성계수), specific strength (비강도), specific yield strength (비항복강도)

1. 서 론

자동차,항공기,선박등 수송기계들의 판재나 구조물을 초경량/고강성/고내충격성을 갖는 첨단 기능성 재료로 제작하여 에너지 효율 향상과 승객의 안전성 향상 및 대기오염 감소 시키는 초경량 금속구조재(Ultra-light weight structured material)**에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.**[1] 초경량 금속 구조재의 경우 판재형 금속재료 내부에 직조망형 금속격자(Woven wire mesh) 구조물, 허니콤(Honeycomb) 구조물, 카코메(Kagome) 구조물등과 같은 3차원 입체구조물 또는 금속 폼(Metalic foam) 재료와 같은 다공성 재료등의 초경량 코어(Lightweight- core)

* 조선대학교 일반대학원 기계공학과 (sj7717@hanmail.net)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지
+ 조선대 기계공학과
++ 조선대학교 일반대학원 기계공학과
+++ 한국과학기술원 대학원 기계공학과
++++ 한국과학기술원 기계공학과

로 구성된 샌드위치 구조를 가진다.[2,3] 이러한 샌드위치형 초경량 금속구조재의 경우 부피의 대부분인 코어 부분이 비어 있어 재료 밀도가 매우 낮게 되며, 3차원적 구조가 외부 하중 부가시 샌드위치 판재의 변형에 영향을 미쳐 비강성/비강도/비내충격성이 현저히 증가 하게 된다.[4]

초경량 기능성 판재관련 연구로써 KOPP등은 격자판재 (Grid sheet) 개발시 내부구조재의 정적 기계적 물성 및 변형특성 분석을 위하여 내부구조재인 직조망형 금속격자, 외판인 퍼포레이티드 (Perforated sheet) 판재 및 직조 망형 금속격자와 퍼포레이티드 판재로 구성된 샌드위치 판재에 대하여 인장시험을 수행한 바 있다.[5]

Hutchinson 등은 카고메 트러스 구조물의 변형특성에 대한 이론적 연구를 수행 하였다.[6]

최근 국내에서는 두개의 금속 박판사이에 3차원 금속 구조체를 대면적에 분포시킨 후, 판재와 구조체를 접합 또는 용접으로 연결시켜 재료의 무게를 현저히 감소시키는 반면 강도/강성/내충격성을 향상시키는 전체 두께 3mm 이하의 ISB 판재(Internally structured bonded sheet) 개발에 대한 연구가 수행되고 있다.[7-9] ISB 판재의 초기 설계/개발을 위하여 ISB 판재 및 외판에 대한 기계적 물성과 변형특성에 대한 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 ISB 판재와 외판인 스테인레스 판재에 대하여 인장시험을 통하여 기계적 물성 및 변형특성을 분석 · 고찰 하였다. 또한, ISB 판재와 스테인레스 강판에 대한 비탄성계수, 비강도, 비항복강도에 대해 비교 · 분석 하였다.

2. ISB 판넬 제작 방법

피라미드 구조를 가진 익스펜디드 금속을 내부구조체로 가지는 ISB 판넬은 익스펜디드 금속을 크림핑하여 생성한 피라미드 구조체를 외판인 스테인레스 강판과 전기저항용접으로 용접시켜 제작된다.

익스펜디드 금속은 마름모꼴의 격자를 가지는 철망의 한 종류로 익스펜디드 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 익스펜디드 금속을 Fig. 1 과 같이 금형으로 크림핑각을 부여하여 피라미드 형상의 구조체를 생성 하였다. 이 크림핑각을 변화 시킴으로써 샌드위치 구조물의 상대밀도를 제어할 수 있다.

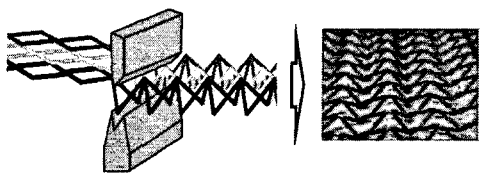

Fig. 1 Structure of expanded metal with pyramid shape

크림핑 공정을 통해 3가지 형상의 피라미드 구조를 생산하였다. 본 연구에서는 크림핑각 90°, 120°, 150°를 갖는 내부구조체에 대해 ISB 판재를 제작하였다.

3. 실험 방법

3.1. 스테인레스 강판 인장 시험

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 A370-03 에 의하여 설계제작되었다. 박판재의 이방성 특성을 고려하여 압연방향(0°), 압연방향에 수직인 방향(90°) 및 압연방향의 45° 방향에 대하여 제작 하였다. 스테인레스 판재의 종탄성계수, 포아송비, 비례한도, 항복응력은 2축 스트레인게이지가 부착된 시편으로 측정 하였다. 인장강도, 최대변형율 및 응력-변형율 관계식은 연신율 측정기를 사용하여 측정하였다. 종탄성 계수와 포와송비는 ASTM E111-82 에 기준하여 실험데이터를 이용한 선형회귀법으로 계산하였다. 실험은 Fig. 2 와 같이 Instron 5583 에서 수행되었다.

스테인레스 강판의 비탄성 계수 ($\beta_{E,st}$), 비강도 ($\alpha_{st,st}$) 및 비항복 강도 ($\alpha_{sy,st}$) 는 각각 식 (1), (2), (3) 과 같이 정의되었다. 이 식들에서 사용된 종탄성 계수, 인장강도, 항복강도는 압연방향(0°), 압연방향에 수직인 방향(90°) 및 압연방향의 45° 방향에 대한 물성치를 평균하여 적용하였다.

Fig. 2 Set-up of tensile test for stainless steel

$$\beta_{E,st} = \frac{E_{av,st}}{\rho_{st} \cdot g} \quad (1)$$

$$\alpha_{st,st} = \frac{\sigma_{T,av,st}}{\rho_{st} \cdot g} \quad (2)$$

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

3.2. ISB 판넬의 인장시험

ISB 판넬의 인장시험에 사용된 시편은 Fig. 3 과 같이 ASTM A370-03 의 박판재료 인장시편 규격을 응용하여 설계/제작하였다. 인장시편 설계시 크림핑 각 (Crimping angle : Θ)을 설계변수로 선정하였다. ISB 판넬의 인장시편의 크림핑각은 90°, 120°, 150° 로 선정하였다. ISB 판넬의 인장시편은 내부구조체의 기하학적 형상 때문에 시편 내부에 공간이 발생하게 된다. 이 공간 때문에 인장시험시 시편 그립부에 함몰이 발생할 수 있다. 이 함몰을 최소화하기 위하여 Fig. 3 과 같이 시편 그립부를 에폭시로 충진하였다.

ISB판넬의 종탄성계수, 포아송비, 비례한도, 항복응력은 2축 스트레인게이지가 부착된 시편으로 측정 하였다. 인장강도, 최대변형율 및 응력-변형율 관계식은 연신율 측정기를 사용하여 측정하였다. 종탄성 계수와 포와송비는 ASTM E111-82 에 기준하여 실험데이터를 이용한 선형회귀법으로 계산 하였다. 실험은 Fig. 4 와 같이 Instron 5583 에서 수행되었다.

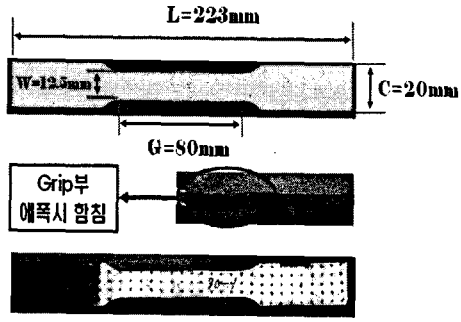

Fig. 3 Design of sepcimen for the tensile test of ISB panel with a pyramidal structures as a internally structuared material

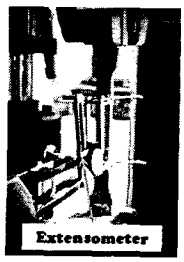

Fig. 4 Set-up of tensile tests for the ISB panel

또한, ISB 판넬의 파단특성을 분석하기 위하여 크림핑 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 (4), (5), (6)에 의하여 정의된다.

$$\beta_{E,ISB} = \frac{E_{ISB}}{\rho_{ISB} \cdot g} \quad (4)$$

$$\alpha_{st,ISB} = \frac{\sigma_{T,ISB}}{\rho_{ISB} \cdot g} \quad (5)$$

$$\alpha_{sy,ISB} = \frac{\sigma_{ys,ISB}}{\rho_{ISB} \cdot g} \quad (6)$$

위식에서 E_{ISB}, $\sigma_{T,ISB}$, $\sigma_{y,ISB}$, ρ_{ISB}, g는 각각 ISB 판넬의 탄성계수, ISB 판넬의 인장강도, ISB 판넬의 항복강도, ISB 판넬의 상대밀도, 중력가속도이다.

ISB 판넬과 스테인레스 강판의 비탄성 계수·비강도·비항복강도를 비교·분석하여 ISB 판넬의 기계적 특성을 분석하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 스테인레스강판 인장시험 결과 및 고찰

스테인레스 강판 인장시험결과는 Fig. 4 및 Table 1, 2 와 같다.

스테인레스 강판 재료방향별 종탄성 계수, 항복강도 및 인장강도는 압연방향에서 가장 높은 값을 나타내며, 압연방향의 45° 방향에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 종탄성계수, 항복강도 및 인장강도는 각각 평균 179.7 MPa, 283 MPa, 677 MPa 이었다. 비탄성계수, 비항복강도, 비강도는 각각 2.47×10^6 m, 3.61×10^3 m, $8{,}63\times10^3$ m 였다.

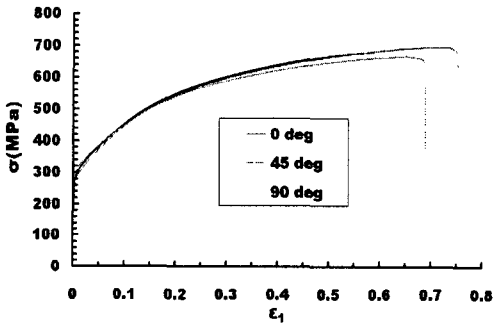

Fig. 4 σ - ε relationship of stainless steel for each material direction

Table 1 Results of tensile tests for stainless steel

Mat. Dir.	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 2 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

4.2. ISB 판넬의 인장시험 결과

크림핑된 피라미드 구조체를 내부 구조체로 가지는 ISB 판넬의 인장시험결과는 Table 3 및 Fig. 5 와 같다.

본 실험결과 ISB 판넬의 크림핑각이 증가할 수록 인장강도, 항복강도 및 최대변형율이 모두증가하는 것으로 나타났다. 또한, 크림핑각이 증가할수록 인장강도 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 3 Results of tensile tests for ISB panels

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

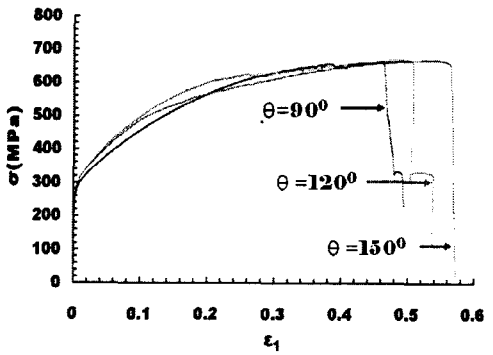

Fig. 5 Influence of the crimping angle on σ - ε curve

Table 4 Specific modulus, specific yield strength and specific strength of ISB panels

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

ISB 판넬의 비탄성계수, 비항복강도 및 비강도는 Table 4 와 Fig. 6, 7, 8과 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 2.1-3.9 배, 비항복강도 3.0-3.6 배 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.

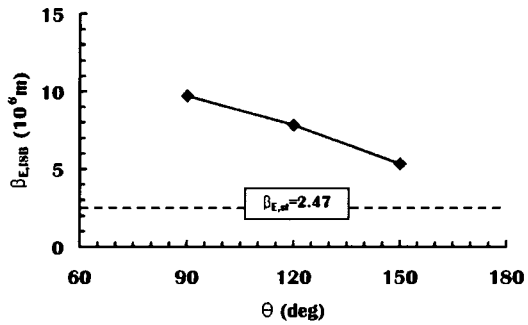

Fig. 6 Influence of the crimpling angle on the specific modulus

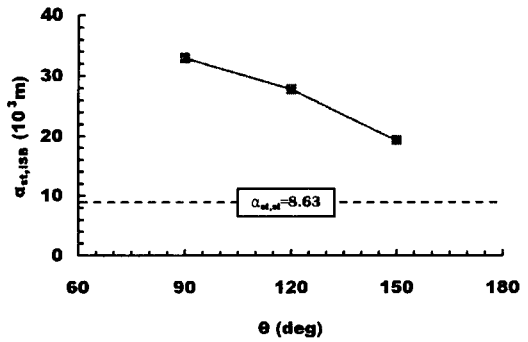

Fig. 7 Influence of the crimpling angle on the specific strength

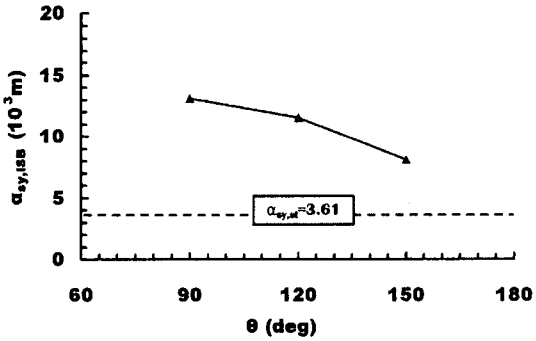

Fig. 8 Influence of the crimpling angle on the specific yield strength

ISB 판넬의 경우 Fig. 9 와 같이 내부구조재가 7-12개 정도가 파단된 후 시편이 완전 파단되었다. 내부구조재가 하나씩 파단될때 마다 응력-변형율 선도에 응력이 약간 감소하다가 다시 증가하였다. Fig. 9에서 n은 ISB판넬 파단 시점에서 내부 구조체인 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.

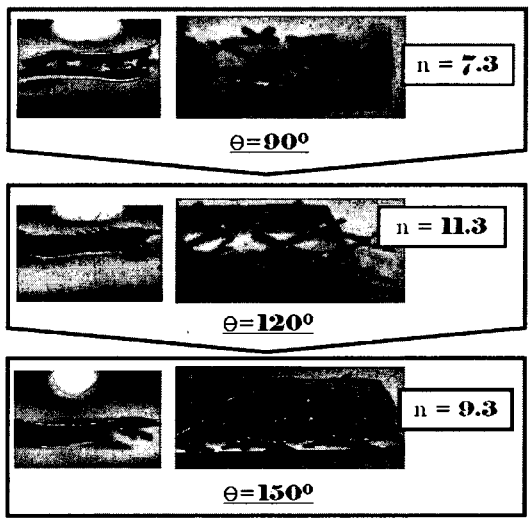

Fig. 9 Fracture characteristics of the ISB panel according to the crimping angle

6. 결 론

본 연구에서 크림핑각을 가지는 피라미드형상의 익스펜디드 금속를 내부구조체로 가지는 ISB 판넬과 ISB 판넬의 외판재료인 스테인레스 강판에 대한 인장실험을 통한 ISB 판넬의 정적 특성을 분석/고찰 하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, ISB 판넬의 외판재료인 0.3 mm 스테인레스 강판에 대한 기계적 물성 데이터를 취득하였다.

둘째, 크림핑각을 가지는 피라미드형상의 익스펜디드 금속를 내부구조체로 가지는 ISB 판넬의

기계적 물성 및 변형특성에 대한 정량적 데이터 취득 및 평가를 할 수 있었다. 크림핑각을 가지는 피라미드형상의 익스펜디드 금속를 내부구조체로 가지는 ISB 판넬의 경우 크림핑각이 재료의 비탄성계수, 비항복강도, 비강도 및 변형특성을 제어할 수 있는 주요 설계변수임을 알 수 있었다. 또한, ISB 판넬이 순수 스테인레스 강판만을 사용하는 재료보다 비항복강도 및 비강성 측면에서 매우 우수한 기계적 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

추후, 추가적인 ISB 판넬의 인장시험을 수행하여 통계적으로 크림핑각의 ISB 판넬 기계적 물성 영향성 평가가 수행되어야 될 것이다. 또한, 크림핑각을 가지는 피라미드형상의 익스펜디드 금속를 내부구조체로 가지는 ISB 판넬에 대한 충격특성 및 강성 특성을 평가하여 ISB 판넬의 효율성에 대한 종합적 평가가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 핵심연구개발사업인 "마이크로 첨단복제 생산시스템개발사업" 연구결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 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.

(2) 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.

(3) 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.

(4) 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

(5) 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.

(6) Hutchinson, R. G., Wicks, N., Evans, A. G., Fleck, N. A. and Hutchinson, J. W., "Kagome plate structures for actuation," Int. J. of Solids and Structures, Vol. 3, No. 3, pp. 111-119, 2001

(7) 정창균, 윤석준, 성대용, 양동열, 안동규, "초경량 내부구조 접합판재 제작을 위한 금속내부구조의 설계변수 분석," 2004년도 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집 pp. 928-931, 2004.

(8) 정창균, 윤석준, 성대용, 양동열, 안동규, "피라미드 구조를 가진 초경량 금속 내부구조 접합 판재의 제작 및 특성평가," 2004년도 한국 정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 483-486, 2004

(9) 안동규, 이상훈, 김민수, 한길영, 정창균, 양동열, "CSP 1N 박판재료의 기계적 물성 및 Woven Wire 구조물 인장시험기법 개발에 관한 연구," 2004년도 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 977-980, 2004.