

피라미드 트러스형 금속 샌드위치 판재의 적외선 브레이징을 이용한 효율적 적층식 제작 및 특성에 관한 연구

Efficient Layered Manufacturing Method of Metallic Sandwich Panel with Pyramidal Truss Structures using Infrared Brazing and its Mechanical Characteristics

이세희¹, 성대용¹, 양동열^{1,✉}Se-Hee Lee¹, Dae-Yong Seong¹ and Dong-Yol Yang^{1,✉}

1 한국과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, KAIST)

✉ Corresponding author: dyyang@kaist.ac.kr, Tel: 042-350-3214

Manuscript received: 2010.1.19/ Revised: 2010.5.25/ Accepted: 2010.5.31

Metallic sandwich panels with pyramidal truss structures are high-stiffness and high-strength materials with low weight. In particular, bulk structures have enough space for additional multi-functionalities. In this work, in order to fabricate 3-D structures efficiently, Layered Manufacturing Method (LMM) which was composed of three steps, including crimping process, stacking process and bonding process using rapid infrared brazing, was proposed. The joining time was drastically reduced by employing infrared brazing of which heating rate and cooling rate were faster than those of conventional furnace brazing. By controlling the initial cooling rate slowly, the bonding strength was improved up to the level of strength by conventional vacuum brazing. The observation of infrared brazed specimens by optical microscope and SEM showed no defect on the joining sections. The experiments of 1-layered pyramidal structures and 2-layered pyramidal structures subject to 3-point bending were conducted to determine structural advantages of multi-layered structures. From the results, the multi-layered structure has superior mechanical properties to the single-layered structure.

Key Words: Pyramidal Truss Structure (피라미드형 트러스 구조), Infrared Brazing (적외선 브레이징), Shear Bonding Tests (전단 접합 실험), Three-point-bend Test (3점 굽힘 실험)

1. 서론

최근 금속 구조재의 경량화를 위해서 다양한 제조방법이 연구되고 있다. 면재(face sheet) 사이에 구조적으로 안정되고 상대적으로 가벼운 내부구조(core structure)를 접합하여 높은 비강성을 가진 샌드위치 판재를 많이 제작한다. 특히 내부구조가 정규적인 옥테트 트러스(octet-truss), 카고메 트러스(kagome-truss)형 구조의 경우 인장 변형에 의해 주된 붕괴가 되는 구조(stretching dominated structure)

로써 굽힘 변형에 의해 주된 붕괴가 되는 구조(bending dominated structure)인 불균일한 메탈 폼(metal foam)구조보다 동일한 공간 밀도 대비하여 약 3 배의 강도, 약 10 배의 강성을 가짐이 이론적으로 증명되었다.¹ 또한 이런 정규적인 내부구조를 3 차원 체적 구조체(3-D bulk structure)로 제작한다면 구조적 이점 외에도 내부의 열린(open cell)구조를 유체의 이동, 저장 공간이나 열 전달 체, 전자기 차폐 등의 다기능소재로의 실효적 이점이 예측되고 있다.² 이에 이를 생산적인 방법으로 제작하

기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다.

Wadley 등³은 롤 금형으로 박판을 성형하여 벌집구조(honey comb)를 제작하는 방법과 상용 확장 금속망(expanded metal)을 성형하여 만든 피라미드 구조를 타공망(perforated sheet)과 적층 후 브레이징(brazing)하여 제작하는 방법을 소개하였다.

또한, Kang⁴과 Lim 등⁵은 선재를 다양한 방향으로 위치시키거나 꼬아서 제작 후 브레이징 접합한 준-카고메 체적구조체를 제작하였다.

브레이징 방법의 경우 많은 접합점이 있는 금속 체적구조체 제작에 적합한 공정으로 널리 사용되고 있지만 오랜 접합 시간과 고가의 장비로 인하여 효율적인 제작에 어려움이 있다.

접합 방법의 효율성을 증가시키기 위해 단층의 내부구조를 접합의 경우 레이저 점 용접⁶이나 전기저항용접⁷을 이용한 연구가 진행되었으나, 다층 구조의 경우, 내부 구조의 복잡성으로 인한 공정적인 제약으로 체적구조체 접합에 시도된 사례가 알려지지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 상용 확장 금속망을 이용한 피라미드형 체적 구조체를 제작하는 적층식 제작방법(Layered Manufacturing Method)과 승은 속도, 냉각 속도가 빠른 적외선 브레이징 방법을 이용하여 접합시간을 단축하고자 한다. 정확한 적층을 위해서 평탄한 접합부를 가지는 단위 구조층을 금형으로 절곡(crimping)하여 제작하였다. 그 후 적외선 브레이징의 접합전단강도를 기존에 널리 사용되는 재래식 로 브레이징의 접합전단강도와 비교 분석하였고 접합면을 관찰하였다. 또한 적외선 브레이징 방법으로 접합한 단층내부구조와 2층 내부구조를 가지는 3 점 굽힘 시험을 제작하였고 이를 굽힘 실험을 통해 평가, 분석하여 다층 구조를 가지는 샌드위치 판재의 가능성을 확인하였다.

2. 피라미드형 금속 구조의 적층식 제작

2.1 내부구조 제작

적층식 제작 방법은 내부구조를 제작하여 적층한 뒤 접합하는 3 단계를 거친다. 상용 확장 금속망은 마름모 꼴의 격자를 가지는 철망으로 Fig. 1과 같이 소형 절곡 장치로 절곡하여 단위 내부 구조를 제작하였다. 피라미드 구조의 윗 부분이 평탄부가 생기도록 펀치와 다이 금형을 제작하였다.

유한 요소해석을 통하여 절곡시 발생하는 연신율을 고려한 시행착오방법으로 금형을 설계하였다.

사용한 확장 금속망은 STS304 재질의 압연한 상용제품을 사용하였다. Fig. 1과 같이 표현된 금속망의 상세 치수는 다음과 같다. $L_1=8\text{mm}$, $L_2=4.3\text{mm}$, $W=0.7\text{mm}$, 두께=0.3mm 인 조밀한(dense) 금속망과 $L_1=13.3\text{mm}$, $L_2=7.5\text{mm}$, $W=1\text{mm}$, 두께=0.7mm 인 성긴(sparse) 금속망 두 가지를 사용하였다. 절곡각도(α) 70° 로 고정하여 제작하였으며 제작된 실제 단위 구조층은 Fig. 2와 같다. 제작된 1층 내부 구조의 경우 높이가 약 4.24mm, 2층 내부구조의 경우 약 3.00mm 로 균일한 내부구조를 성형할 수 있었다.

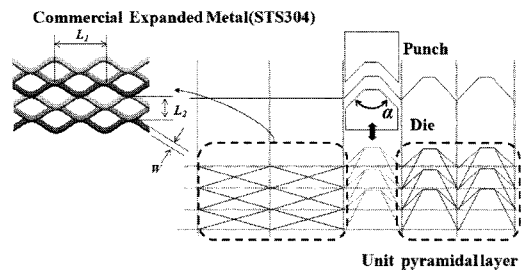


Fig. 1 The crimping process and unit pyramidal structure

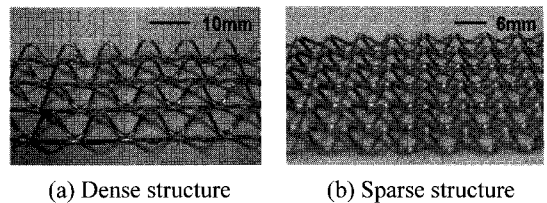


Fig. 2 The unit pyramidal structures

이렇게 제작된 Fig. 2(b)과 같은 단위 구조층을 적층하여 2층의 내부구조를 제작하였다. 2층 구조의 중간층으로 사용되는 타공망은 앞서 제작한 단위 구조층의 평탄부와 접합하는 면이 일치하도록 하여 금속망의 폭(W)의 두 배인 1.4mm, 두께 0.3mm 로 제작하였고 Fig. 3(a)과 같다. Fig. 3(b)와 같이 접합점을 정확히 일치시켜 적층 한 뒤 면재와 같이 브레이징하면 다층의 체적구조를 내부에 가지는 금속 판재를 제작할 수 있었다.

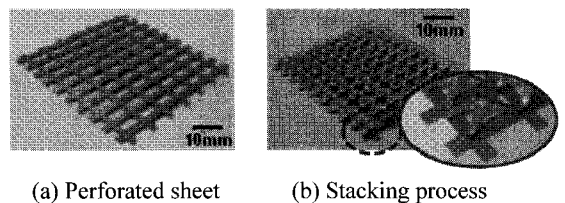


Fig. 3 Stacking process with perforated sheet

2.2 적외선 브레이징을 통한 접합

2.2.1 적외선 가열 개요

열전달 기구 중 특히 적외선 복사의 경우 매우 빠른 열전달 기구로 알려져 있는데, 이는 대부분의 물체의 원자 결합이 적외선 복사 영역에서의 전자기파에 의하여 여기(excitation)되기 쉽기 때문으로 알려져 있다.⁸ 또한 적외선 가열은 냉벽(cold-wall)공정으로 원하는 시편만 직접 복사하여 가열하지만, 기존 브레이징에 사용되는 전기저항 가열 방식은 열벽(hot-wall)공정으로 로의 내벽을 전도로 가열 후 내벽의 복사열로 피사체를 간접 가열하기 때문에 느린 응답 속도와 낮은 열효율을 가진다. 이런 이유로 적외선 가열방법은 높은 열효율과 100°C/sec 이상의 승온이 가능하여 5mm 이하의 얇은 금속 열처리, 열경화 복합수지 접합, 마이크로 회로 접합 등에 널리 사용되어 왔다.^{9,11}

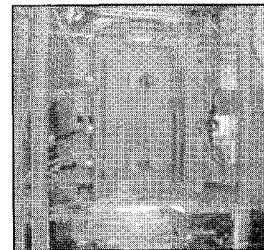
트리스 구조체의 경우 기공률이 높아 다층인 체적 구조가 되어도 내부 구조가 직접 복사열을 흡수 할 수 있으며 구조의 두께가 수 mm 이하로 얇다. 따라서 적외선 가열을 이용한 빠른 접합이 가능할 것으로 파악하여 이를 새롭게 도입하였다.

2.2.2 접합 방법

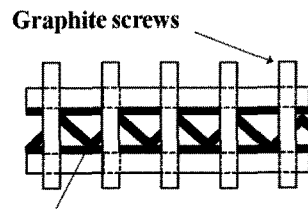
브레이징의 경우 모재의 용융온도보다 낮은 온도의 삽입금속(filler metal)만을 선택적으로 용융시켜 야금학적으로 접합되게 된다. 삽입금속은 스테인레스 스틸과 잘 어울리는 나켈기 금속 중 적외선 가열로의 성능을 고려해 BNi-6 규격¹²의 비결정질(amorphous)상 두께 38.1 μm 인 박판(foil)형태의 MBF-60 을 사용하였다. 적외선 브레이징의 타당성을 확인하기 위하여 Fig. 2(a)의 단층 구조 상하에 180mm(길이) x 30mm(폭) x 0.5mm(두께)크기의 STS304 재질의 표면관재를 접합하여 접합품질을 확인하였다. 모재 표면은 400 mesh SiC 사포로 연마하여 산화층을 제거하였고, 아세톤으로 5 분 초음파 세척 후, 증류수로 10 분 초음파 세척하여 불순물을 제거하였다. 사용한 적외선 가열로는 분위기 조절이 가능한 Fig. 4(a) ULVAC-RIKO 사의 모델 P30 이고 Fig. 4(b)와 같이 그라파이트(graphite) 치구를 이용하여 시편과 삽입금속을 고정시킨 후 접합하였다.

접합 품질을 비교하기 위하여 기존에 널리 사용되는 VFS 사의 모델 SP-WP-4 M001, 재래식 전기로를 이용하여 동일한 시편을 접합하였다. 분위기는 적외선 브레이징의 경우 이슬점 -60°C의

100% 수소 환원 분위기, 재래식 로 브레이징의 경우 1×10^{-4} Torr. 의 낮은 진공 분위기로 설정하여 고온에서 산화되는 것을 방지하였다. 접합을 수행한 실험 온도이력곡선은 Fig. 5 와 같다.



(a) Infrared heating furnace



Specimens

(b) Graphite fixture

Fig. 4 Equipments of infrared brazing process

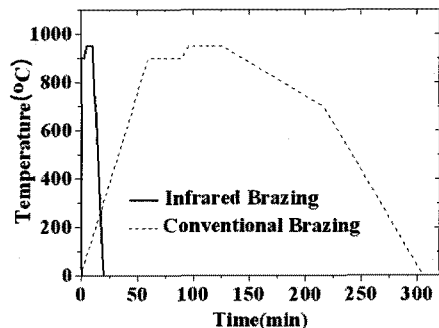


Fig. 5 Temperature profile of infrared and conventional brazing processes

최대온도는 950°C로 고정하였고, 적외선 브레이징의 경우 빠른 승온, 냉각으로 총 접합 시간이 약 20 분 내외가 걸렸고 재래식 로 브레이징의 경우 약 300 분 내외가 소요되었다. 재래식 로 브레이징의 은 승온 속도 약 15°C/min 로 최대온도에서 30 분유지 한 후, 로냉 하였다. 적외선 브레이징의 경우 공정 변수의 영향을 알아보기 위하여 최대온도에서의 유지시간을 30 초, 180 초, 300 초 3 단계로,

냉각속도를 Fig. 6 과 같이 냉각속도를 제어하지 않은 급랭(quick cooling case, 평균 약 8°C/sec)과 초기 냉각을 제어한 서냉(slow cooling case, 평균 약 0.5°C/sec), 2 단계로 나누어 살펴보았다. 브레이징의 경우 급격한 냉각에 따른 잔류 열응력에 의한 삽입 금속과 모재의 계면에서 결함이 알려져 있다.¹³ 적외선 가열로 구조는 전원 공급을 해주지 않으면 외벽이 급격하게 온도가 냉각되어 시편의 냉각이 빠르게 일어나므로 냉각속도가 주요한 변수로 예상되었다.

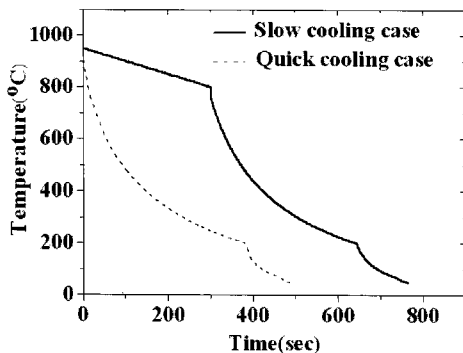


Fig. 6 Temperature profiles of slow cooling case and quick cooling case during cooling step

3. 접합 특성실험 및 결과

3.1 접합 특성 실험

금속 샌드위치 구조에 관한 접합강도를 평가하는 규격이 정해지지 않아 금속간 접착제의 접합강도를 측정하는 싱글랩(single lap)시편의 규격을 참조하였다.¹⁴ 2.2.2 항에서 제작한 시편을 Fig. 7 과 같이 접침부 약 24mm 를 만들어, 접침부에 전단인장 하중이 집중되도록 하였고 접침부가 회전하지 않도록 치구를 이용한 기하학적 구속조건을 주어 실험하였다. 만능재료시험기 Intstron 5583 을 이용하여 1mm/min 의 속도로 실시하였다.

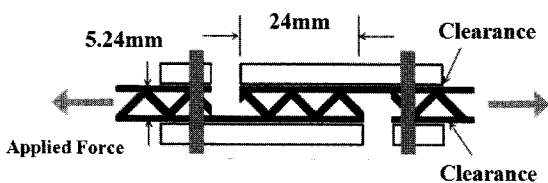
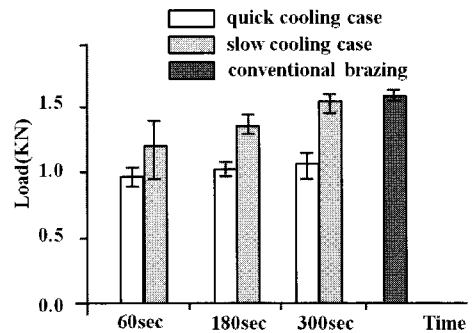


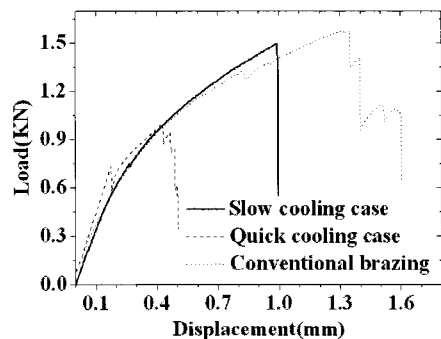
Fig. 7 Shear test configuration for strength testing of a bonded joint by tension

적외선 브레이징의 경우 유지시간과 냉각속도에 따른 총 6 개의 경우에 대하여 3 번씩의 실험하였고, 제레식 로 브레이징 또한 3 번씩 실험하였다. 그리고 접합 계면을 다이아몬드 커팅기로 절단한 후, 에폭시(epoxy)로 고정하여 1 μm 까지 정면 연마하여 Siron 의 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰



(a) Peak loads with respect to holding time



(b) Load-displacement curves

Fig. 8 Comparison of load curves of conventional brazing with load curves of infrared brazing of quick cooling and slow cooling

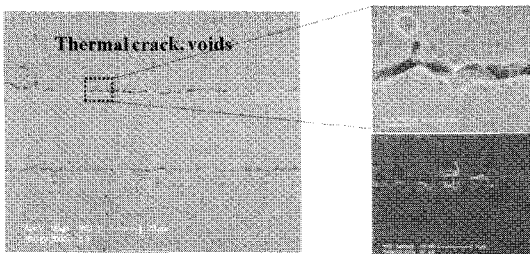
모든 경우에서 모재와 모재 사이 삽입금속에서 만 파단되었고, 시간, 실험 종류에 따른 강도를 Fig. 8(a)와 같이 막대 그래프를 이용하여 살펴 보았다. 최대 온도에서의 유지시간을 길게 하면 증가하며, 3 분이 넘어가는 시점에서는 크게 증가하지 않았다. 급랭시편의 접합강도가 기존 브레이징 시편과의 상대적인 비율이 약 0.73 정도로 현저히 저하되나 서냉 시편의 경우 유지 시간 5 분에서 약 0.97 정도로 대등한 강도를 가짐을 관찰할 수 있다.

세 경우의 대표 하중-변위선도는 Fig. 8(b)와 같다. 탄성 변형 후 소성변형이 거의 없는 파단 형태를 확인하였다. 낮은 접합 강도뿐 아니라 파단이 일어날 때까지 변형된 길이가 다른 두 경우의 절반 정도로 취성적 파단형태가 급랭시편에서 두드러짐을 관찰하였다. 이런 이유를 정확하게 파악하기 위하여 접합계면을 SEM 을 이용하여 관찰한 결과는 Fig. 9 와 같다.

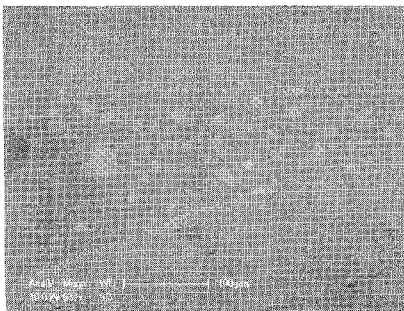
급랭 시편에서는 Fig. 9(a)와 같이 접합계면에서 열적 균열(thermal crack)과 기공(void) 모습을 관찰할 수 있었다. 살펴보면 접합계면을 따라 건전하지 않은 모습들을 관찰하였다. 그러나 Fig. 9(b) 서냉 시편에서는 그런 모습을 거의 발견할 수 없었다. 즉, 급랭 시편의 결함은 빠른 냉각에 의해 액화되었던 삽입금속이 응고되는 과정에서 잔류에 의한 균열이나 기공으로 파악할 수 있었다.

브레이징 접합시 냉각속도에 따른 경계면에서의 결함은 이미 널리 알려져 있는 결함으로, 이러한 결함 때문에 기계적 전단 접합 강도가 저하되는 것으로 판단되었다.

따라서 적외선 브레이징 공정에서는 냉각속도가 주요한 공정변수이며, 추후 공정의 도입에 있어서 이를 고려하여 수행하여야만 한다.



(a) Quick cooling case



(b) Slow cooling case

Fig. 9 SEM images of infrared brazed joints

결론적으로 적외선 브레이징 공정을 체적 구조체의 제작에 도입함에 있어서 알맞은 초기냉각속도로 실험을 수행하여야 함을 알 수 있었다. 그리고, 초기 냉각속도를 약 평균 약 0.5℃/sec 로 조절하여 재래식 로 브레이징의 접합시간의 약 1/15 의 짧은 시간으로 재래식 로 브레이징과 대등한 접합 강도를 가지는 샌드위치 판재를 제작할 수 있었다.

4.3 점 굽힘 실험 및 결과

4.1.3 점 굽힘 실험

3 절의 새롭게 도입한 적외선 브레이징을 통하여 1 층, 2 층의 내부구조를 가지는 샌드위치 금속 판재를 제작하였다. 제작된 판재의 굽힘 특성을 평가하기 위한 실험 조건은 Table 1 에 나타내었다.

제작한 2 가지 시편 모두 표면판재두께는 0.5mm 이고, 단위 면적당 샌드위치 판재의 무게는 약 1.15g/cm² 로 동일하다. 제작된 판재의 실제 모습은 Fig. 10 과 같다. 굽힘 시험의 지지간 거리는 120mm, 펀치의 지름은 25.4mm, 만능시험기 INSTRON 5583 으로 표준 규격을 참고하여 수행하였다.¹⁵

Table 1 3-point bending experiment sets

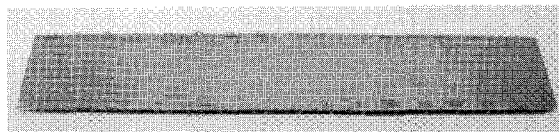
No.	The number of unit layers	Length [mm]	Width [mm]	Core height [mm]
1	1	160	30	4.24
2	2	160	25.4	6.31



(a) Single-layered sandwich panel



(b) Bi-layered sandwich panel



(c) Test specimen for 3-point bending

Fig. 10 Photographs of sandwich panels manufactured by infrared brazing

4.2 실험 결과 및 고찰

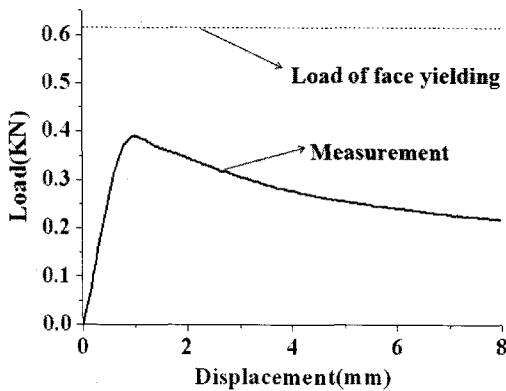
피라미드형 내부구조를 가진 샌드위치판재의 굽힘에 의한 파손은 내부구조를 균질한 구조로 가정하였을 때, 표면판재항복(face yielding), 표면판재 좌굴(face buckling), 내부구조전단변형(core shear failure), 압입(indentation)이 있으며 판재의 설계변수에 따라 주된 파손 모드가 결정된다.¹⁶

이에 따르면 제작한 1 층, 2 층 구조 모두 표면판재항복에 의하여 파손되는 것으로 예측된다.

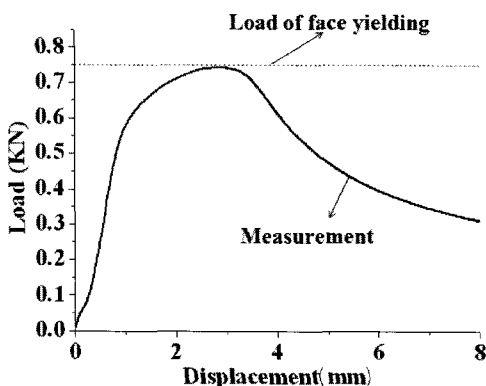
그 때의 표면판재항복하중은 식(1)과 같다.

$$P = \frac{4wt(H+t)}{L} \sigma^{FY} \quad (1)$$

여기서 P 는 작용하중, w 는 판재의 폭(width), t 표면판재의 두께, H 는 내부구조높이(core height), L 은 지지간 거리, σ^{FY} 는 표면판재의 항복응력이다.



(a) Experimental result of the single-layered panel

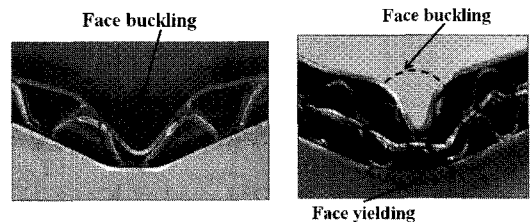


(b) Experimental result of the bi-layered panel

Fig. 11 Experiment load-displacement curves with face yielding load

실험결과와 표면판재항복 하중을 Fig. 11 에 같이 표현하였다. 단층의 내부구조를 갖는 샌드위치의 경우 탄성 변형 구간 후 바로 최대지지하중에 도달 한후 급격하게 떨어지게 된다. 그러나 다층의 구조의 경우 탄성 변형 후에 내부구조가 상부 표면판재의 붕괴를 방지하는 것으로 예상되며, 이에 하부 표면판재의 내부구조가 균일하다고 가정하였을 때 예측한 항복하중에 이르러서야 붕괴되었다. 1 층 구조의 경우 표면판재항복하중 보다 약 45%정도 낮은 하중에서 붕괴되고 2 층 구조의 경우 표면판재항복하중과 오차 약 4% 내외에서 일치한다.

우선, 굽힘 시험후의 변형된 샌드위치 판재의 모습 Fig. 12 에서 보듯이 소성 변형 후에도 접합점의 파단이 일어나지 않았다. 따라서 적외선 브레이징을 통한 제작방법이 충분한 접합강도를 지니 체적구조를 가지는 금속 샌드위치 판재의 제작에 적합한 방법임을 확인할 수 있었다.



(a) Single layered panel (b) Bi-layered panel

Fig. 12 Collapse mode of sandwich panels after 3-point bending

그리고 앞선 3 점 굽힘 실험결과와 예측 하중의 큰 차이의 이유를 굽힘 변형된 모습으로부터 판단하면, 1 층 구조에서는 Fig. 12(a)와 같이 등근 하중편치에 의하여 상부 표면판재에 소성 힌지(plastic hinge)가 생긴 후 표면판재가 내부구조 사이로 밀려들어가게 되면서 상부 표면판재가 급격하게 좌굴되어 붕괴하기 때문에 예측한 하중보다 낮은 하중에서 붕괴되는 것으로 판단하였다. 그러나 2 층 구조의 경우 접점간의 간격이 좁게 되어 상부 표면판재의 좌굴 지지능력이 증가하고, Fig. 12(b)와 같이 상부표면판재를 내부구조가 지지해 표면판재가 밀려들어가게 것을 방지해주어 하부의 표면판재항복에 의해 파손된 후 붕괴되는 것으로 판단하였다. 이러한 이유로 조밀한 2 층 구조의 경우에는 내부구조를 균일하다고 한 가정에 의한 예

측식과 유사한 강도를 가지는 최대 강도 값이 관찰되었다. 따라서 2 가지 실험 조건에서 살펴보면, 동일한 단위 면적당 무게의 실험 조건에서 2 층의 구조가 1 층의 구조에 비하여 안정적인 구조가 됨을 확인할 수 있으며, 이를 통하여 다층 구조가 되었을 때의 장점을 유추할 수 있다.

같은 공간을 차지하는 동일한 질량을 가진 내부구조가 다층이 될 경우 점점 간격이 좁아지므로 지지간격을 작게 조절 할 수 있고, 층수가 높아지면서 내부구조의 높이와 단위 구조의 길이를 변화시킬 수 있다. 변수들 간의 관계에서 단층 구조에 비하여 다층 구조의 효율적인 면을 찾아 낼 수 있다면 추후의 실용적 제작에 있어서 효율적인 구조를 제시할 수 있을 것이다. 따라서 향후 이에 관한 최적 설계나 이론적 접근에 대한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 내부에 피라미드형 체적 구조를 가지는 금속 샌드위치 판재를 효율적으로 제작하기 위하여 적외선 브레이징을 도입하여 접합하였다. 재래식 로 브레이징과 시간, 접합강도를 비교 분석하였고, 이를 통해 제작한 1 층, 2 층의 내부구조를 가지는 샌드위치 판재의 굽힘 특성을 비교 분석하였다. 이상의 연구 결과를 다음과 같이 정리 하였다.

(1) 적층식 제작방법에 적외선 브레이징을 이용하여 다층의 피라미드형 내부구조를 가지는 금속 판재를 효율적으로 제작하였다.

(2) 적외선 브레이징 접합공정에서 초기 냉각속도를 제어하지 않은 급랭 시편의 경우 전단 인장접합강도가 재래식 로 브레이징과 비교하여 약 0.73 으로 현저하게 저하되었으며, 접합계면에서 균열, 기공으로 보아 냉각속도를 조절해야 한다고 판단하였다.

(3) 이에 초기 냉각속도를 0.5℃/sec 로 느리게 제어한 서냉 시편의 경우 약 0.97 의 대등한 전단 인장접합 강도를 얻었고, 도입한 공정이 견실한 접합면을 얻을 수 있는 공정으로 접합 시간을 단축하는 장점을 가짐을 확인하였다.

(4) 3 점 굽힘 실험의 결과 단층의 구조의 경우 상부 표면판재가 밀려들어가 급격한 좌굴에 의하여 붕괴되고, 2 층의 구조는 표면판재항복에 의해 파손이 발생 후 붕괴된 것으로 판단하였다.

(5) 이런 이유로 단층의 구조는 내부구조가 균일하다고 가정된 예측 강도 보다 현저하게 낮으나, 2 층 구조는 약 4%의 오차로 잘 일치하였다.

(6) 이는 다층 구조로 내부구조가 변화할수록 접점간 간격이 좁아지고 단위 구조 길이가 짧아지게 되어 지지능력이 증가함에 따른 장점으로 파악되며 추후 이에 관한 최적설계와 이론적 접근이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원의 HRHP (High Risk High Return Project)인 다공질 적층 구조체를 이용한 기능제어 소재의 개발 연구결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Deshpande, V. S., Ashby, M. F. and Fleck, N. A., "Foam topology bending versus stretching dominated architectures," *Acta Mater.*, Vol. 49, No. 6, pp. 1035-1040, 2001.
2. Evans, A. G., Hutchinson J. W. and Ashby, M. F., "Multi functionality of cellular metal systems," *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 43, No. 3, pp. 171-221, 1999.
3. Wadley, H. N. G., Fleck, N. A. and Evans, A. G., "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structure," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 63, No. 16, pp. 2331-2343, 2003.
4. Kang, K. J., "A wire-woven cellular metal of ultrahigh strength," *Acta Mater.*, Vol. 57, No. 6, pp. 1865-1874, 2009.
5. Lim, J. H. and Kang, K. J., "Mechanical behavior of sandwich panels with tetrahedral and Kagome truss cores fabricated from wires," *Int. J. Solids. Struct.*, Vol. 43, No. 17, pp. 5228-5246, 2006.
6. Yungwirtha, C. J., Wadley, H. N. G., O'Connorb, J. H., Zakraysekb, A. J. and Deshpande, V. S., "Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 35, No. 8, pp. 920-936, 2008.
7. Kim, J. B., Lee, S. M. and Na, S. J., "Study on resistance welding of metallic sandwich panel," *Sci. Technol. Weld. Joi.*, Vol. 12, No. 5 pp. 376-381, 2007.
8. Bischoff, H., "The Answer is Electrical Infrared," J.

- Microwave Power EE, Vol. 25, No. 1, pp. 47-52, 1990.
9. Meyer, K., "Surface Treatment with a High-intensity Arc Lamp," *Adv. Mater. Process*, Vol. 138, No. 3, pp. 37-41, 1990.
 10. Swartz, H. D. and Swartz, J. L., "Focused Infrared Melt Fusion: Another Option for Welding Thermoplastic Composites," *SME Technical Paper*, EM89-175, 1989.
 11. Brown, R. W., "Infrared Vacuum Soldering Process for Thick-Film, Hybrid Microcircuits," *Allied Signal Aerospace Co. Final Report*, KCP-613-4983, 1990.
 12. AWS UGFM, "AWS User's Guide to Filler Metals," 1995.
 13. Saxton, H. J., West, A. J. and Barrett, C. R., "The effect of cooling rate on the strength of brazed joints," *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 2, No. 4, pp. 1019-1028, 1971.
 14. ASTM D3164, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesively Bonded Plastic Lap-Shear Sandwich Joints in Shear by Tension Loading," 2003.
 15. ASTM C393, "Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich constructions by Beam Flexure," 2006.
 16. Deshpande, V. S. and Fleck, N. A., "Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending," *Int. J. Solids. Struct.*, Vol. 38, No. 36-37, pp. 6275-6305, 2001.