

저항 용접을 이용한 금속 샌드위치 판재 접합에 관한 연구 : Part 1 - 공정변수의 선정

이 상 민* · 김 진 범** · 나 석 주**

*삼성전자 기술총괄 메카트로닉스 연구소

**한국과학기술원 기계공학과

A Study on the Resistance Welding of Metallic Sandwich Panel : Part 1 - Determination of Process Parameters

Sang-Min Lee*, Jin-Beom Kim** and Suck-Joo Na**

*Mechatronics Center of Samsung Electronics, Suwon 442-742, Korea

**Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

Abstract

Inner Structured and Bonded(ISB) panel, a kind of metallic sandwich panel, consists of two thin skin plates bonded to a micro-patterned inner structure. Its overall thickness is 1~3mm and it has attractive properties such as ultra-lightweight, high efficiency in stiffness-to-weight and strength-to-weight ratio. In many previous studies, resistance welding, brazing and adhesive bonding are studied for joining the panel. However these methods did not consider productivity, but focused on structural characteristics of joined panels, so that the joining process is very complicated and expensive. In this paper, a new joining process with resistance welding is developed. Curved surface electrodes are used to consider the productivity and the stopper is used between electrodes during welding time to maintain the shape of inner structure. Welding time, gap of electrodes and distance between welding points are selected as the process parameters. By measuring the tensile load with respect to the variation of welding time and gap of electrodes, proper welding conditions are studied. Welding time is proper between 1.5-2.5cycle. If welding time is too long, then inner structures are damaged by overheating. Gap of electrode should be shorter than threshold value for joint strength, when total thickness of inner structure and skin plate is 3.3mm, the threshold distance is 3.0mm.

* Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received June 10, 2005)

Key Words : Sandwich panel, ISB panel, Resistance welding, Ultra-light structure, Curved surface electrode

1. 서 론

차체의 경량화는 자동차의 효율을 높이는 데에 기여하는 바가 크므로, 이에 대한 연구는 오랜 시간동안 진행되어 왔다. 그중에서 동일 질량에 비해 강도와 강성이 뛰어난 금속 샌드위치 판재(metallic sandwich panel)를 개발하려는 노력은 세계 각국에서 시도되고 있다. 내부구조재를 가진 초경량 판재(Inner Structured

and Bonded panel, ISB panel)역시 이런 경량화 추세에 적극 활용 가능한 판재라고 여겨진다. ISB 판재란 금속 샌드위치 판재의 일종으로 Fig. 1과 같이 3차원 형상의 미세 구조를 갖는 내부 구조물을 두 판 사이에 위치시켜 서로를 접합한 판재이다. 전체 두께가 1~3mm내이며, 내부구조재가 강성 및 강도를 증가시키는 반면, 부피의 대부분이 비어 있어 비강도 및 비강성이 크게 개선된다¹⁾. 유사 연구 사례에 의하면 이런 형태의 판재는 비강성 및 비강도 면에서 우수할 뿐만

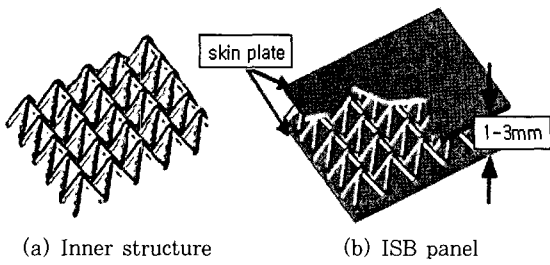


Fig. 1 ISB panel

아니라 충격, 소음흡수성, 고효율 냉각성 등 물리적, 기계적 성질이 매우 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 내부가 비어 있어 다른 물질을 충전 시킬 경우 판재의 특성을 극대화 할 수 있는 장점을 가지고 있다²⁾. 최근의 연구는 저항 용접, 진공 브레이징, 레이저 용접, 천이 액상 브레이징, 솔더링 등 다양한 방법에 의한 ISB 판재의 제작과 접합이 이루어진 상태의 판재 특성에 관한 것이 주를 이루고 있으며 생산성을 고려한 접합에 관한 연구는 미진한 실정이다³⁻⁵⁾.

본 연구에서는 전기 저항 용접을 이용하여 생산성을 고려한 ISB 판재의 제작을 위한 접합 방법을 개발하고 주요 공정 변수가 접합 강도에 미치는 영향을 실험적 해석적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 적절한 접합 조건을 선정하였다.

2. 접합 방법 및 공정 변수 선정

2.1 접합 방법

저항 용접은 짧은 시간에 용접을 이룰 수 있고 가열 영역이 용접 근처에만 한정 되므로 용접 후의 열 변형이 적으며, 자동 용접이기 때문에 작업자의 숙련도가 거의 필요 없다. 또한, 용가재나 플럭스가 불필요하므로 용접부의 품질 재현성이 뛰어나다는 장점이 있다. 이러한 저항 용접을 ISB 판재의 접합에 적용할 경우 열 영향 부가 접합부에만 한정되기 때문에 판재를 제작함에 있어 판재의 뒤틀림이나 취약 부분을 최소화 할 수 있으며, 자동 용접이기 때문에 추후 대량 생산 시 우수한 기능공이 필요하지 않다. 또한 ISB 판재의 장점인 경량화 측면에서도 용가재나 플럭스가 불필요하기 때문에 ISB 판재의 무게 증가를 막을 수 있어 ISB 판재를 제작하기 위한 접합 방법으로 적합하다.

ISB 판재의 대량 생산을 위해서는 판재의 제작이 연속적으로 이루어져야 하기 때문에 Fig. 2와 같이 롤러형 전극이 회전하면서 판재를 접합 해야만 한다. 롤러형 전극은 심 용접기의 전극과 원리는 같지만 넓은 면적에 대해서 동시에 용접을 수행해야 하기 때문에 심 용

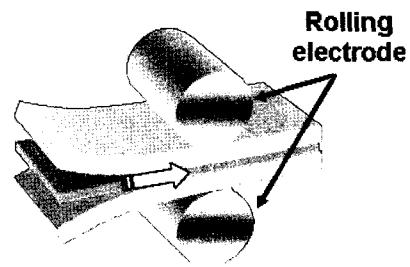


Fig. 2 Schematic diagram of rolling electrode

접기에서 쓰이는 원형 전극보다 전극이 더 두껍다. 그러나 현재로서는 이 같은 시스템을 구축하기에는 어려움이 많기 때문에 이를 모사하기 위하여 Fig. 3과 같이 곡면 전극을 설계하여 사용하였다. 이때 전극의 곡률 반경은 현재 심 용접기에서 쓰이고 있는 전극을 모사하기 위하여 심 용접기에서 쓰이는 전극의 반지름과 같은 100mm로 설계하였으며 두께는 심 용접기의 회전 전극보다 두꺼운 100mm로 설계하였다.

2.2 내부 구조물의 형상유지를 위한 방법

ISB 판재의 내부 구조물의 형상은 ISB 판재의 특징인 초경량, 고비강성, 고내충격성 등을 결정짓는 매우 중요한 요인이다. 그러나 일반적인 점용접 공정과 같이 아무런 제약 없이 가압과 통전을 시키면 용접 시 발생하는 열에 의한 기계적 물성치의 약화로 인해 내부 구조물의 형상이 유지 되지 못한다. ISB 판재 제작 시 내부 구조물 형상을 유지하기 위해서 Fig. 4와 같이 상

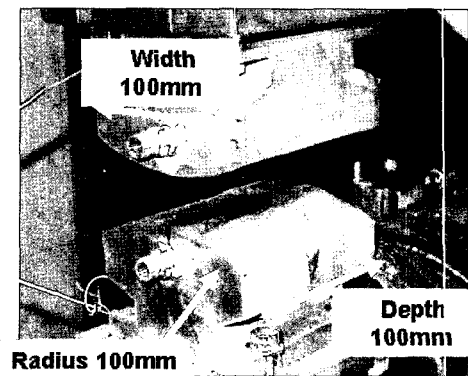


Fig. 3 Curved surface electrode

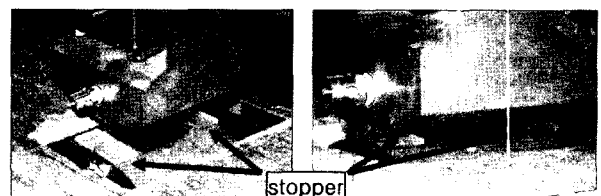


Fig. 4 Method of welding

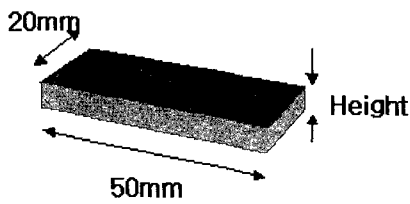


Fig. 5 Stopper

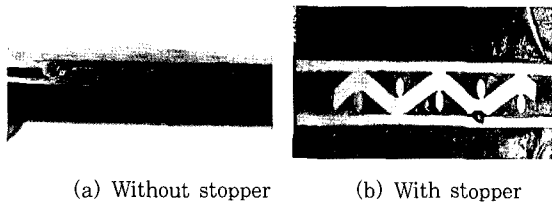


Fig. 6 Cross section of results

부전극과 하부전극 사이에 스톱퍼(stopper)를 위치시켜 용접시간 동안 전극 간격을 유지 할 수 있도록 하였다. 스톱퍼는 폴리카보나이트 재질로 제작되었으며, Fig. 5와 같은 직육면체의 형상으로 크기는 20mm×50mm 이고 높이 방향으로 크기를 다양하게 제작하였다. 폴리카보나이트는 동일두께를 갖는 유리의 300배, 아크릴의 30배 이상의 강도를 가지며 $-100^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$ 의 비교적 넓은 온도범위에서 사용할 수 있고 온도 변화에 따른 물성변화가 거의 없으며 절연성이 우수한 특징을 가진다. 스톱퍼를 이용하여 두 전극 사이의 간격을 통전시간동안 일정하게 유지시켜, 제작된 ISB 판재의 단면 사진인 Fig. 6-(b)와 같이 내부 구조물의 형상을 유지 시킬 수 있었다.

2.3 ISB 판재 접합을 위한 공정변수 선정

일반 저항 용접에서는 전류량, 통전시간, 가압력이 주요 공정 변수이다. 그러나 ISB 판재 제작을 위한 저항 용접에서는 전극 간격을 유지시키기 위하여 스톱퍼를 사용하였고, 스톱퍼 두께를 조절함으로써 내부구조재와 외부판재 사이의 접촉면적을 조절하고 압력을 간접적으로 제어하였다. 최대전류를 설정하고 5개의 접점을 동시에 용접할 때 용접시간이 충분히 짧아도 양호한 용접품질을 얻을 수 있었고, 이때의 용접전류는 약 3kA로 측정되었다. 그 결과, ISB 판재를 제작하기 위한 저항 용접의 공정 변수는 통전시간, 스톱퍼 두께가 되었고 용접전류의 설정은 일정하게 하였다.

3. 공정변수 연구: 실험적 방법

선정한 공정 변수들이 실제 접합된 시편에서의 접합

강도에 미치는 영향에 대해 알아보고, 적절한 용접 조건을 선정하였다.

3.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 용접기는 공압 점 저항 용접기로서 최대 용량이 96kVA인 3상 직류 용접기이다. 전극은 2.1에서 설명한 바와 같이 곡면 전극을 사용하였다. 전류 및 전압 측정을 위한 시스템 구성 도는 Fig. 7에 나타내었다. 전극에서의 전압 차는 양쪽 전극과 연결된 두 개의 구리선의 전압 차를 이용하여 측정하였다. 전류의 측정을 위해 토로이달 코일은 저항(10k Ω)과 병렬 연결 되어 있으며 저항에 걸린 전압은 용접전류의 시간에 따른 변화율이기 때문에 신호를 시간에 따라 적분하여 용접 전류 파형을 얻을 수 있었다. 위 측정을 통해 얻어진 데이터는 잡음 제거를 위해 여과를 하였다.

용접 시편은 두께 0.5mm의 연강(mild steel)을 외부 판재로 선정 하였고 내부 구조물은 전선의 지름이 0.9mm이고 전체 두께는 2.3mm 인 와이어 메시(wire mesh)를 이용하였다(Fig. 8). 외부 판재는 폭 40mm 길이 100mm로 절단하였고, 와이어 메시는 와이어가 5줄과 7줄이 되도록 폭 20mm 길이 30mm로 절단하여 5줄이 동시에 용접이 되도록 하였다. 이는 반복적인 실험과 필시험(peel test)을 통해 두께 0.5mm의 외부 판재와 와이어 메시 간의 접합이 이루어질 수 있는 와이어의 최대수가 5 줄임을 확인하였기 때문이다. 시편은 Fig. 9와 같이 외부 판재 2장 사이에 내부 구조물을 위치시켜 준비하였으며 준비된 시편의 총 두께는 3.3mm이었다. 스톱퍼의 두께와 통전시간에 의한 공정의 영향을 확인하기 위하여 전극사이에 위치시킨 스톱퍼의 두께와 용접 시간을 변화 시키며 용접을 실행

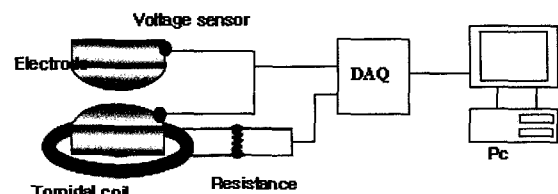


Fig. 7 Schematic diagram of current and voltage measuring unit

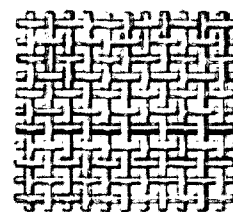


Fig. 8 Woven type wire mesh



Fig. 9 Skin plate and woven type wire mesh

하였다. 이 때 접합이 이루어지는 메쉬의 접점과 전극의 중심축이 일치하도록 정렬하였다. 용접된 시편의 단면 사진은 Fig. 6-(b)와 같다. 그림에서 스톱퍼의 두께가 시편의 전체 두께와 같거나 더 클 경우 전극이 시편에 압력을 가할 수 없다. 실험에 사용한 시편의 전체 두께가 3.3mm 이기 때문에 스톱퍼의 두께는 최고 3.2mm 로 하였다. 본 연구에서 수행한 실험들의 조건을 Table 1에 제시하였으며 각각의 조건에 대해서 3회씩 실험을 수행하여 총 144개의 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 Fig. 10과 같이 각각의 외부판재의 폭 40mm, 길이 100mm이고, 전체 길이는 140mm이다. 제작된 시편에 대해서 그림과 같이 상부 외부판재와 하부 외부판재에 하중을 가하여 접합부에 대한 인장전단 시험을 수행하였다.

3.2 결과 및 고찰

Fig. 11은 각각의 조건에서 제작된 시편의 인장전단 시험 결과의 평균값을 표현한 그래프이다. x축은 통전 시간 y축은 접합 강도이며 스톱퍼 두께에 따라 그래프가 그려졌다. 각 조건에서의 접합강도를 비교해 봄으로써 통전 시간과 스톱퍼 두께의 영향을 알 수 있었다. 접합 강도가 가장 높은 조건은 통전시간 1.5사이클 (cycle), 스톱퍼 두께 3.0mm 인 경우였지만 전체적인

Table 1 Experimental condition

Welding time (cycle)	0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5
Thickness of stopper(mm)	2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2

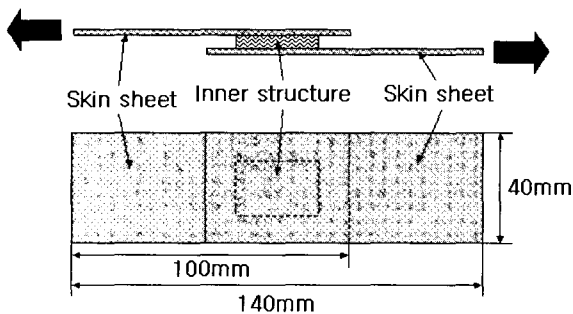


Fig. 10 Specimen for tensile-shear test

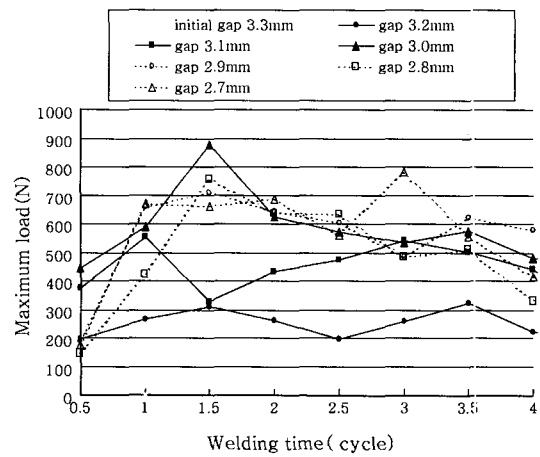
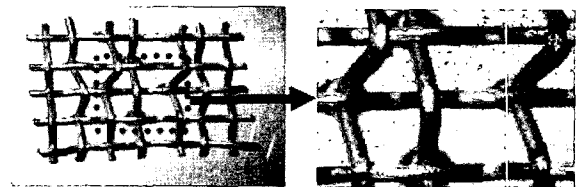
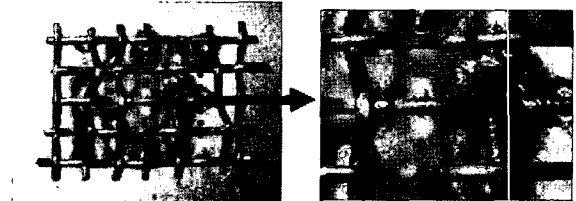


Fig. 11 Result of tensile shear test

그래프의 경향으로 볼 때 통전시간 1.5~2.5사이클에서, 스톱퍼 두께 3.0mm 이하에서 비슷한 접합 강도를 보이고 있음을 알 수 있다. 저항용접의 경우 가압력이 용접공정에 있어서 중요한 변수이며 가압력이 낮을 경우에는 접촉저항이 불안하고 스패터로 용융부가 다 빠져나가게 된다. 스톱퍼의 높이가 3.0mm보다 높은 경우에는 시편의 높이와 별로 차이가 나지 않아서 시편에 작용하는 압력이 낮기 때문에 동저항의 거동이 불안정함을 보이고 용접 강도 또한 낮았다. 통전시간의 경우는 두께가 0.5mm인 연강 판재를 저항 점용접으로 접합할 경우 통전시간이 7사이클 정도라는 사실과 비교해 보면 매우 짧은 용접 시간이다⁷⁾. ISB 판재의 경우 접촉면의 한쪽은 판재이고 다른 한쪽은 와이어인데, 와이어의 질량이 판재의 질량보다 상대적으로 작아서 일정 시간이 지나가면 와이어에 과도한 용융이 발생하기 때문에 판재와 판재를 용접할 때보다 최적의 용접시간이 더 짧은 것으로 판단된다. Fig. 12는 통전시간이 각각 1.5사이클과 6.5사이클에서 제작된 ISB 판재의 내부



(a) welding time: 1.5 cycle



(b) Welding time: 6.5 cycle

Fig. 12 Inner structure after welding

구조물 사진이다. 통전시간이 1.5사이클인 경우와 달리 통전시간이 6.5사이클인 경우에는 용접 시 발열에 의해 와이어 메시 일부가 과도하게 용융되었음을 확인할 수 있다.

이 실험을 통해 ISB 판재 제작을 위해서는 적절한 스토퍼의 두께가 결정 되어야 하며 가급적 짧은 시간 동안 통전시켜서 내부구조재의 과도한 용융을 막아야 한다는 사실을 알 수 있었다. 또한, 전체 두께 3.3mm의 시편을 접합할 경우 적절한 스토퍼의 두께는 3.0mm이하, 적절한 통전시간은 1.5~2.5사이클이라는 것을 확인하였다. ISB 판재의 경우 두께가 두꺼운 시편이 얇은 시편에 비교해서 질량대비 강도와 강성이 뛰어나므로¹⁾ 이를 고려할 때에 최적의 스토퍼 두께는 3.0mm라고 할 수 있다.

Fig. 13은 통전시간 6.5사이클인 경우에 대해서 스토퍼 두께 변화에 따른 동저항을 측정된 결과이다. 스토퍼 두께가 3.1mm, 3.2mm인 경우 동저항의 거동이 불규칙함을 알 수 있었고, 스토퍼 두께가 3.0mm이하인 경우 일정 용접시간(약 3.5사이클) 이후에는 증가율이 감소하는 경향을 보이는 것을 관찰 할 수 있었다. 이는 스토퍼 두께가 3.0mm이상인 경우에는 외부판재와 내부구조재 사이의 접촉면에서의 압력이 약하기 때문에 용접이 시작되는 순간 접촉면에서 많은 양의 스파터(splatter)가 발생하기 때문이라고 생각된다. 이는 인장전단시험 결과에서 스토퍼 두께 3.0mm이상인 경우에 접합 강도가 매우 약하게 나온 결과와도 연관된다. 또한 강의 온도가 1000℃이상으로 올라가면 전기 저항의 증가율은 감소한다. 이를 근거로, 두께 3.0mm 이하에서 일정 시간(약 3.5사이클) 이후에는 내부 구조물인 와이어 메시의 전류경로 전체가 1000℃이상으로 올라가는 것으로 추정할 수 있다. 이는 통전시간이 6.5사이클인 경우 내부구조재가 열에 의해 끊어진 Fig. 12(b)의 결과와 일관성을 지닌다.

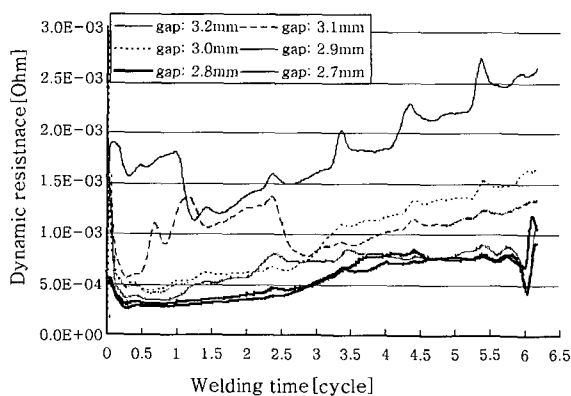


Fig. 13 Dynamic resistance

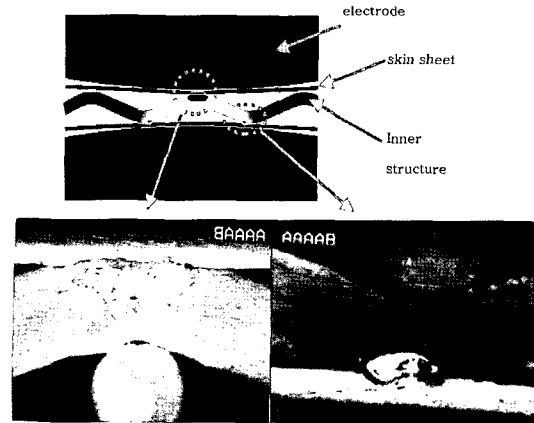


Fig. 14 Microstructure of welded area

Fig. 14에서 용접부의 조직사진을 제시하였다. 내부 구조물은 선재의 형태로 판재형태인 외부판재보다 열이 빠져나가는 속도가 낮고, 열용량이 작아 외부판재에 비해서 내부구조재에서 더 넓은 부위에 용융부가 형성되었음을 확인할 수 있다. Fig. 12의 결과와 비교하여 볼 때 보다 얇은 판재를 외부판재로 사용할 경우 내부 구조물의 상대적인 열용량 차이가 줄어들게 되어 보다 강한 접합 강도를 유지할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 일반적인 저항용접에서 형성되는 너겟의 모양과는 매우 다른 형상으로 너겟이 형성되며, 너겟의 모양이 전극과 내부구조물의 위치관계에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 이는 접합부의 면적이 매우 좁으며 접합부에서 압력의 분포가 일반적인 저항용접에서의 분포와는 크게 다르기 때문이다. 이에 대한 해석적인 연구가 part 2에서 수행되었으며, 보다 자세한 이론적인 설명을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 생산성을 고려하여 저항용접을 이용한 ISB 판재 제작을 위한 공정 개발과 그 변수에 의한 영향을 연구하였다. 생산성을 위해서는 롤러형의 전극을 공정에 사용하는 것이 적절하며 본 연구에서는 이를 모사하기 위하여 곡면형 전극을 제작하여 공정을 수행하였다. ISB 판재 제작 시 스토퍼를 상부전극과 하부전극 사이에 위치시켜 압력이 가해지는 동안 전극 간격을 유지 하였으며 이를 통해 내부 구조물의 형상이 손상됨을 막을 수 있었다. 본 공정에서는 통전시간, 스토퍼의 두께가 공정의 주요 공정변수로 선정 되었으며, 용접전류는 용접기의 최대 설정 치로 일정하게 유지하였다. 스토퍼의 두께는 내부구조물과 외부판재 사이에 작용하는 압력을 간접적으로 제어하는 변수이다. 선정된 공정 변수 중 통전 시간과 스토퍼 두께 변화에 따른 접합 강도 변화를 총 두께 3.3mm인 시편에 대한 실험을 수행하

여 연구하였으며, 이때의 최적 조건은 통전시간 1.5-2.5cycle, 스토퍼의 두께는 3.0mm로 선정되었다.

후 기

본 연구는 마이크로 첨단복제 생산시스템개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. G. Jung, S. J. Yoon, D. Y. Sung, D. Y. Yang, D. G. Ahn : Fabrication and Static Bending Test in Ultra Linner Structured and Bonded(ISB) Panel Containing Repeated Inner Pyramidal Structure, Proceeding of 2004 Autumn Annual Proceeding of KSPE, **10** (2004) 483-486
2. A. G. Evans, J. W. Hutchinson, M. F. Ashby : Multifunctionality of Cellular Metal Systems, Progress in Materials Science, **43** (1999), 171-221
3. H. Hanebuth, A. Dotzer, K. Nielsen, K. Gronning Sorensen : Joining of Cellular and Stratified Laminates for Light Weight Construction and Thermal-acoustic Insulation, Journal of Materials Processing Technology, **115-1** (2001), 31-37
4. H. N. G., Wadley, N. A. Fleck, A. G., Evans : Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures, Composites Science and Technology, **63** (2003), 2331-2343
5. K. J. Kang, G. P. Jeon, S. J. Nah, B. S. Ju, N. H. Hong : A New Way to Manufacture Ultra Light Metal Structures, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, **A28-3** (2004) 296-303 (in Korean)
6. Y. S. Kim : A Study on the Measurement of Shunt Current in Resistance Spot Welding Process, Master's Thesis, KAIST, (1993) (in Korean)
7. Z. Feng, S. S. Babu, M. L. Santella, B. W. Riemer, H. E. Gould : An Incrementally Coupled Electrical-thermal-mechanical Model for Resistance Spot Welding, 5th International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, June (1998), 1-5