

Cu-Al 판재의 냉간 및 온간 압접에서 낮은 접합강도를 갖는 공정 조건에 관한 연구

심경섭* · 이용신#

(2004년 7월 22일 접수)

Process Conditions for Low Bonding Strength in Pressure Welding of Cu-Al Plates at Cold and Warm Temperatures

K. S. Sim and Y-S. Lee

Abstract

This paper is concerned with pressure welding, which has been known as a main bonding mechanism during the cold and warm forming such as clad extrusion or bundle extrusion/drawing. Bonding characteristics between the Cu and Al plates by pressure welding are investigated focusing on the weak bonding. Experiments are performed at the cold and warm temperatures ranging from the room temperature to 200°C. The important factors examined in this work are the welding pressure, pressure holding time, surface roughness, and temperature. A bonding map, which can identify the bonding criterion with a weak bonding strength of 1MPa, is proposed in terms of welding pressure and surface roughness for the cold and warm temperature ranges.

Key Words : Pressure Welding, Bonding Pressure, Local Extrusion, Bonding Map

1. 서 론

현대 첨단 산업의 발전은 다기능, 고정밀, 고강도의 소재와 그러한 소재를 이용한 소형 부품에 대한 요구가 빠르게 증대하고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위한 새로운 소재 및 생산기술의 개발에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 해결책의 한 예로는 MEMS 및 나노 생산기술의 개발을 들 수 있다. 이러한 생산기술들은 기존의 생산기술과는 기본적인 개념이 다르게 개발되었으며 성공적으로 응용이 진행되고 있다. 그러나 다양한 산업분야에서의 응용 및 실용화를 위해서는 고비용 생산에 대한 문제점을 해결해야 한다. 다른 해결책은 전통적인 생산 기술을 발전시켜 다기능,

고정밀, 초소형부품을 생산하는 방법을 들 수 있다. 일례로 클래드 성형은 다기능의 복합재를 생산할 수 있고, 번들 압출/인발 공정은 초소형의 선재나 튜브를 생산하는 기술로 대두되어 왔다. 이중금속 선재들의 번들 인발은 수많은 이중금속 선재들을 동시에 인발하여 수 마이크로미터 내지는 수백 나노미터급의 이중선재를 생산할 수 있다. 마지막 단계에서는 전해질을 이용하거나 화학적 방법으로 바깥쪽의 튜브를 제거하여 초미세 선재를 얻는다. 만약에 바깥쪽 튜브와 내부의 선재사이의 접촉부에서 압출/인발이 진행되는 동안에 새로운 조직을 생성하며 접합되는 경우에는 계획된 전해박리에 의하여 원하는 재질의 미세 선재를 얻기 어렵게 된다. 따라서 접합부에는 확

* 국민대학교 대학원 기계설계학과

교신저자: 국민대학교 기계·자동차공학부

산이나 용융에 의한 결합은 원하지 않는 형태이고, 소성변형에 의한 기계적 접합이 바람직하다. 반면에 클래드 성형에 의한 복합재의 생산에서는 접합부에서 모재의 강도에 근접하는 강한 접합강도를 필요로 한다. 이와 같이 후속 공정이나 생산된 소재의 용도에 따라 요구되는 접합특성이 다르다.

강한 접합강도를 필요로 하는 고온에서의 압접에 관해서는 비교적 많은 연구가 과거에 수행되었다⁽¹⁻³⁾. 일례로 T. Tabata⁽⁴⁾ 등은 알루미늄의 냉간 압접에서 접합에 미치는 영향 인자에 관한 접합 특성을 실험적으로 규명하였다. Kim⁽⁵⁾ 등은 간접 압출 방식으로 Al/Cu 층상 복합재 제조에 관한 접합 특성 및 이에 관한 기초자료를 제시하였다. 반면에 약한 접합강도를 목적으로 하는 압접에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 압접에 의한 약한 강도의 접합을 기계적접합(Mechanical bonding)이라고 칭한다.

냉간 및 온간에서 이중재의 성형중에는 접합부에서의 소성일 발산에 의한 용융접합이나 확산접합보다는 국부적 소성변형에 의한 기계적 접합이 주된 접합기구이다. 따라서 그러한 기계적 접합은 냉간 압접 즉, 고체 상태에서의 접합으로 분류된다. 냉간 압접에 의한 고상 접합의 기구는 (1)접합부 표면의 팽창에 의한 미세 크랙의 발생과 (2)발생된 크랙 사이로 모재의 국부압출(Local extrusion)로 요약되는 단계를 Fig. 1에서 나타내고 있다. 따라서 Fig. 1 (a)에서 (b)로 변하는 첫 단계에서는 국부압출형태를 만드는 과정으로 두 모재 A와 B 표면 층의 거칠기와 표면의 팽창이 주요인자이고, 두 번째 단계에서는 국부압출에 의한 소성 유동을 일으키는 접촉부의 압력과 소재의 유동응력 등이 주요인자가 될 수 있다.

본 연구에서는 Cu-Al 판재의 압접에 의한 접합 특성을 실험적으로 조사하였다. 표면거칠기, 압접압력 및 압접압력 유지시간 등의 공정변수가 접합에 미치는 영향을 냉간 및 온간에서 실험으로 살펴보고자 한다. 이를 바탕으로 압접압력과 거칠기에 따른 접합조건을 명시하는 접합지도(Bonding map)를 제시하고자 한다.

2. 압접 실험

2.1 실험장치

압접 실험에 사용한 장비는 최대하중이 25kN,

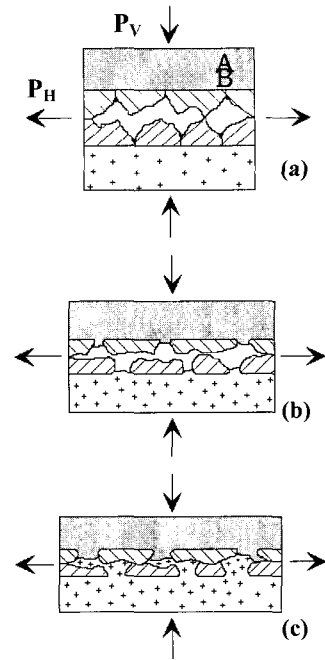


Fig. 1 Bonding mechanism in cold pressure welding: (a) original contact shape showing surface roughness, (b) local fracture by microcrack at the contact surface, (c) completion of local extrusion

스트로크가 100mm 인 재료시험기(MTS 858)를 사용하였다. 본 연구의 실험장비는 MTS858 과 연결되어 있는 컨트롤러(MTS 493.01)와 프로그램(Test Star II s)을 이용하여 압접시 시편에 작용하는 하중과 변위의 값을 쉽게 얻을 수 있도록 시스템이 구성되어 있다. 압접시 시험기에 장착된 가열로(Furnace 653)의 온도를 제어하기 위해 온도조절기(MTS 409.83)를 사용하였다. 압접 실험 온도는 상온, 60℃, 130℃, 200℃ 4 가지로 설정하였다. 압접 실험용 펀치는 열간 압접 실험이 가능한 STD61 종(열간합금공구강)을 사용하였으며, 상하 펀치의 가압면은 정밀 연삭 작업으로 마무리하였다.

2.2 시편

시편은 시중에서 보편적으로 사용되고 있는 두께가 1mm 인 순수알루미늄(Al1050)과 인탈산동(C1220)을 사용하였다. 재료시험기의 용량과 소재의 강도를 고려하여 알루미늄은 직경 4.7mm 인 원형으로, 구리는 10(폭)× 20(길이)mm 사각 판재로 준비하였다. Fig. 2 ~ 3 은 압접 시편의 형상과 압접 실험에 사용한 실험장비를 보여주고 있다.

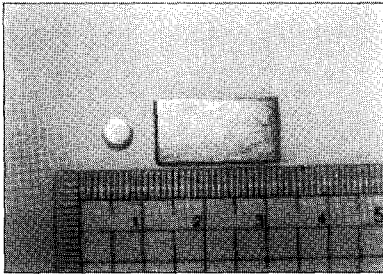


Fig. 2 Pressure welding specimens

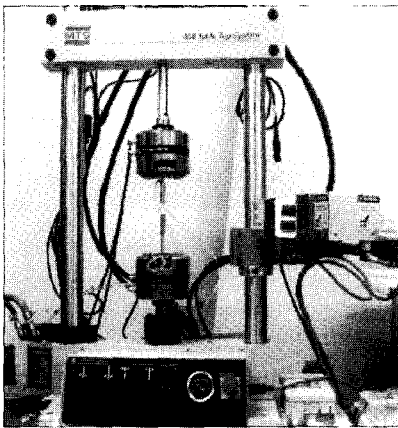


Fig. 3 Experimental apparatus(MTS 858)

2.3 실험방법

알루미늄과 구리의 시편을 한쪽 면씩 사포로 연마하여 아세톤으로 세척한 후, 표면조도측정기를 이용하여 시편의 표면거칠기를 측정한다. 표면거칠기는 중심선 평균 거칠기(Ra)를 변수로 I 구간(0.4a~0.8a), II구간(0.8a~1.6a), III구간(1.6a~3.2a)의 3가지 구간을 정하였다. 사용된 사포 번호와 연마된 시편의 표면거칠기 측정값의 관계를 Table 1에 나타내고 있다.

압접 실험에 영향을 미치는 온도, 표면거칠기, 압력 및 압력유지시간 등의 인자들을 변수로 하여 한 조건별로 3 회씩 실험을 실시하였다. 실험 준비 단계에서는 상하 펀치를 가열로에서 1 차 가열하여 설정온도에 도달하면 구리 시편을 먼저 펀치 위에 올려 놓고, 그 위에 알루미늄 시편을 올려 놓은 다음 가열로를 닫아 밀폐를 유지하며 알루미늄과 구리 시편이 설정온도에 이르기까지 기다린다. 시편의 크기가 작아서 200℃의 설정온도

에 이르는 시간은 1 분 정도이며, 펀치로 시편에 압력을 가하여 실험이 종료될 때까지는 2 분 미만의 시간이 소요되도록 하였다. 참고문헌 [6]에 의한 압접실험 조건 즉 가압 전에 가열로에서 접합면이 공기에 노출되는 시간이 2 분 이내이면 접합면에는 산화막이 안 생긴다는 조건을 만족시키도록 하였다.

압접 실험의 각 설정온도에서 압접 압력이 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500MPa 이 되도록 압접 하중을 결정하였다. 이때 하중 유지 시간은 1 분을 기준으로 하였고, 5 분, 10 분, 20 분으로 증가시켜 하중 유지시간의 영향도 조사하였다. 압접 실험 후 육안상으로 붙어 있는 시편을 채취하여 전단 접합 강도를 측정하였고, 일부는 조직 관찰을 위하여 수지로 마운팅 한 후 연마하여 접합면을 500 배 배율로 광학현미경으로 관찰하였다.

Table 1 Data of sandpaper and surface roughness

Roughness Range (Ra)	C1220		A11050	
	Sand Paper #	Ra μm	Sand paper #	Ra μm
I Div. (0.4a ~ 0.8a)	400	0.4304	1000	0.7340
		0.4099		0.8533
II Div. (0.8a ~ 1.6a)	100	1.4908	220	1.5992
		1.1221		1.4716
III Div. (1.6a ~ 3.2a)	80	1.9515	100	2.7863
		2.2672		2.3876

3. 결과 및 고찰

본 실험에서는 알루미늄과 구리가 각각의 위치를 유지하며 접촉부에서 1MPa 정도의 낮은 접합강도를 갖는 기계적 접합만을 고려하였다. 소재의 물성치를 조사하여 유동응력의 차이를 알아보고자 알루미늄 시편과 구리 시편의 인장시험을 상온, 60℃, 130℃, 200℃에서 수행하였다. 두 소재 모두 상온과 60℃에서는 응력 - 변형률 곡선이 거의 일치하였으며, 130℃, 200℃에서는 유동응력이 온도의 증가에 따라 작아지는 경향을 알 수 있다. 이러한 응력 - 변형률 관계로 인하여 아마도 상온과 60℃에서 접합 실험 결과, 접합 강도 차이가 거의 없음을 예측할 수 있다.

Fig. 4 ~ 6 은 압접하중의 유지 시간을 1 분으로 하였을 때, 온도 변화에 따른 기계적 접합 여부

를 판별하는 실험결과를 나타내고 있다. 압접 실험 후에 육안으로 판단하여 시편의 결합이 이루어졌을 경우, 본 연구에서는 기계적 결합이 이루어진 것으로 간주하였다. 그림에서 검은 원은 전단 접합 강도가 1MPa 이상인 경우를 의미하고, 흰 원은 기계적 결합은 이루어졌으나 접합 강도가 1MPa 미만인 경우를 나타낸다. 전단 접합 강도 1MPa 을 나타내는 접합 지도에서 빗금 친 띠는 전단 접합 강도가 1MPa 인 경계를 의미한다. 표면거칠기 조건과 온도 변화(상온 ~ 200℃)에 따라 접합 구간의 차이가 있음을 뚜렷이 보여주고 있다.

각각의 접합 공정 온도에서의 접합 조건은 표면거칠기 구간에 관계없이 최저 접합 압력이 있음을 보여주고 있다. 즉, 상온에서는 250MPa 이상, 130℃에서는 200MPa 이상, 200℃에서는 150MPa 이상일 때 기계적 접합이 이루어지고 있다. 상온에서 200℃까지의 온도 구간을 비교해 볼 때 접합 조건의 압력은 온도가 증가함에 따라 최대 40%정도 감소되고 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이 온도가 높을수록 낮은 압력에서 접합이 이루어지는 경향을 알 수 있다.

표면거칠기에 관해서는 표면거칠기 값이 클수록 같은 온도에서 접합 압력이 낮아지고 있다. 일례로 상온의 경우에는 3 가지의 표면거칠기 구간인 I 구간(0.4a ~ 0.8a)에서 III구간(1.6a ~ 3.2a)으로 변해가는 동안 접합 압력은 250MPa 에서 150MPa 로 낮아져 40%정도의 압력 감소를 나타내고 있다. 130℃에서는 50%, 200℃에서는 67%의 압력이 감소되어 거의 비슷한 기울기로 압력이 낮아지는 경향을 알 수 있다.

Fig. 7 은 압력이 500MPa 일때, 압접 하중의 유지시간에 따른 접합 강도의 변화를 나타내고 있다. 130℃, 200℃의 압접에서는 유지 시간의 증가에 따라 접합강도가 증가하고 있음을 알 수 있다.

반면에 하중 유지 시간이 10 분 이상이 되면 접합 강도의 증가 속도는 대체로 줄어들며 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 온간 압접의 경우에 압접압력 유지시간의 증가는 일정하중 크립에 의한 소성변형을 증가시키고 접합력을 강하게 하는 것으로 사료된다.(Fig. 8 (a) (b) 참조) 상온에서는 하중 유지시간이 접합강도의 증가에 미치는 영향이 상대적으로 작음을 알 수 있다.

Fig. 8 (a), (b)는200℃의 시편 온도에서 500 MPa의 고압을 각각 1분, 10분간 유지하여, 압접

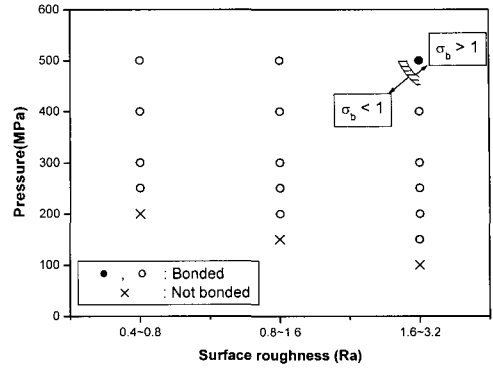


Fig. 4 A map for mechanical bonding of 1 MPa bonding strength at the room temperature

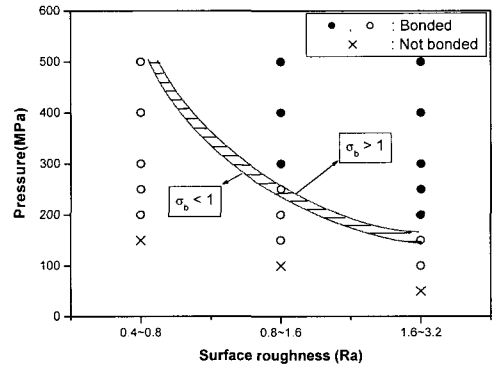


Fig. 5 A map for mechanical bonding of 1 MPa bonding strength at 130℃

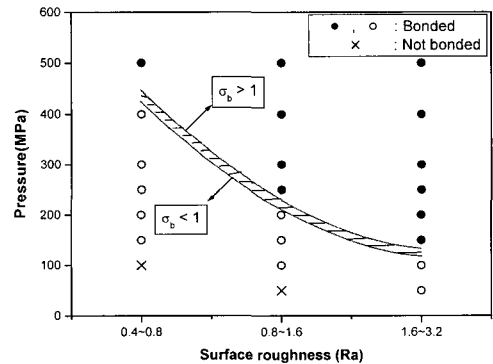


Fig. 6 A map for mechanical bonding of 1 MPa bonding strength at 200℃

실험에 의해 접합이 이루어진 알루미늄과 구리의 접합부를 광학현미경의 500 배율로 인화한 단면 조직 사진을 보여 주고 있다. 압력 유지시간을

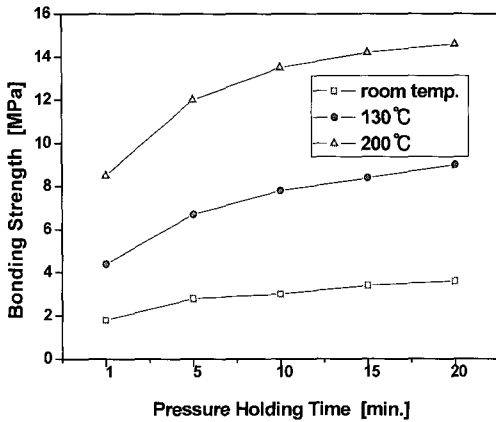


Fig. 7 Variation of bonding strength with pressure holding time

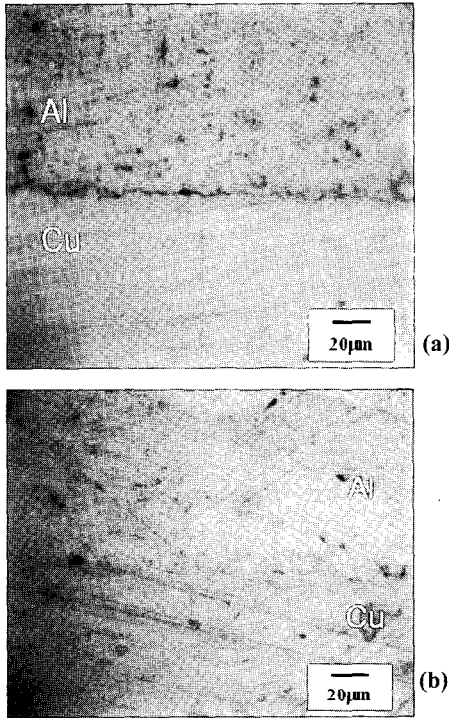


Fig. 8 A micrograph of the bonded cross section under 500MPa at 200 °C (× 500) : Pressure holding time of (a) 1min, (b) 10min

10 분으로 한 경우의 사진 (b)는 (a)보다 접합부 전체에 걸쳐 밀착된 것이 확연하게 나타나고 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 온간에서 일정 하중 크립에 의한 국부적 소성변형의 증가에 의한 것이며, 접촉부의 넓은 범위에서의 접합으로

접합강도를 높인 것으로 사료된다. 두 사진 모두에서 보여지는 바와 같이 접합 계면의 뚜렷한 존재는 확산 접합이 아니며, 대체로 약한 접합강도의 기계적 접합인 것으로 사료된다. 이는 구리와 알루미늄 판재의 상온 및 온간에서의 압접은 접합면에서의 확산보다는 소성변형이 접합의 주된 기구임을 입증하고 있는 것이다.

4. 결론

접합강도가 낮은 경우의 압접 조건을 조사하기 위하여 냉간 및 온간에서의 구리와 알루미늄 판재를 압접 실험하였다. 본 연구에서는 육안으로 판별하여 접합이 이루어진 상태를 기계적 결합으로 정의하였으며, 기계적 결합은 온도가 높을수록 표면거칠기 값이 클수록 접합이 잘 되는 경향이 나타났다. 실험 결과를 바탕으로 전단 접합강도가 1MPa 인 압접 조건을 규명할 수 있도록, 거칠기와 압접 압력을 독립변수로 하여 상온, 130°C, 200°C에서의 접합지도를 제시하고, 다음과 같은 특성을 확인하였다.

(1) 압접 실험의 온도에 따라 표면거칠기 구간에 관계없이 접합을 일으키는 최저 접합 압력이 있음을 보여주고 있다. 즉, 상온에서는 250MP 이상, 130°C에서는 200MPa 이상, 200°C에서는 150MPa 이상일 때 기계적접합이 이루어짐을 알 수 있다.

(2) 표면거칠기 값이 클수록 같은 온도에서 접합 압력은 낮아지고 있다. 표면거칠기가 I 구간에서 III구간으로 변해가는 동안 상온에서는 40%, 130°C에서는 50%, 200°C에서는 67%의 압력 감소를 나타내고 있다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원(밀리구조 생산 기술 2 단계 개발사업)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) N. Bay, 1979, "Cold pressure welding-The Mechan-

- isms Governing Bonding”, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 101, pp. 121~127.
- (2) W. Zhang, N. Bay, 1992, “Influence of Hydrostatic Pressure in Cold Pressure Welding”, *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1, pp. 293~297.
- (3) 박훈재, 나경환, 조남선, 이용신, 1998, “이중복합봉 정수압 압출시 접합면 거동에 관한 연구”, *한국소성가공학회지*, Vol. 7, No. 1, pp. 66~71.
- (4) T. Tabata, S.Masaki, K.Azekura, 1989, “Bond criterion in cold pressure welding of aluminium”, *Materials Science and Technology*, Vol. 5, pp. 377~381.
- (5) 김종호, 서병권, 권혁천, 윤우영, 2000, “Al/Cu 층상복합재의 간접압출 조건도출 및 접합특성”, *대한금속·재료학회지*, Vol. 38, No. 3, pp. 474~479.
- (6) 이철구, 1988, “이종 금속의 냉간 인발 압접법 개발에 관한 연구”, 박사학위 논문, 한양대학교.