

중첩된 구리 판재의 전기저항가열 표면마찰 점용접(RSFSW)에 관한 연구

순샤오광*, 진인태**,#

*부경대학교 대학원 기계공학과, **부경대학교 기계공학과

A Study on Electric Resistance Heated Surface Friction Spot Welding Process of Overlapped Copper Sheets

Xiao-Guang Sun*, In-Tai Jin**,#

*School of Mechanical Eng. PKNU, **Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received 27 August 2020 ; received in revised form 29 August 2020 ; accepted 30 September 2020)

ABSTRACT

Copper sheets has been used widely in electric and electron industry fields because they have good electric and heat conduction property of the material. And, in order to bond copper material, a kind of soldering process is generally used. But, because it is difficult to bond by soldering between overlapped thin copper sheets, so, another kind of brazing bonding process can be used in that case. But, because the brazing process needs wide bonding area, it needs heat treatment process in electric furnace. Generally, for spot welding of sheets, a conventional electric Resistance Spot Welding process(RSW) has been used, it has welding characteristics using contact resistance heating induced by electric current flow between sheets. But, because copper sheets has the low electric resistance, it is difficult to weld by electric resistance spot welding. So, in this study, an electric Resistance heated Surface Friction Spot Welding process(RSFSW) is suggested and is testified for the spot welding ability of thin copper sheets. It is known from the experimental results and simulation that the suggested spot welding process will be able to improve the spot welding ability of copper sheets by the combined three kinds of heating generated by surface friction by rotating pin, and conducted from heated steel electrode, and generated by contact resistance of electricity.

Key Words: Spot Welding(스팟용접), Electric Resistance Heating(전기저항가열), Surface Friction Heating(표면마찰가열), Steel Electrode(철계전극), Rotating Pin(회전핀), Copper Sheets(구리판재)

1. 서 론

일반적으로 구리소재 부품의 접합방법은 납땜

(soldering)^[1] 또는 브레이징(brazing)^[2]의 접합방법을 사용하고 있으며 구리판재를 사용하는 구조물의 접합에 있어서 일정강도이상이 요구될 때 부득이 소재자체를 부분적으로 용융하여 점용접하는 용융용접법의 개발에 대한 필요성이 높아지고 있

Corresponding Author : jint@pknu.ac.kr

Tel: +82-51-629-6137

다. 그리고 판재금속의 구조물 특성상 중첩된 구리금속판재 사이에 부분적으로 납땀용 솔더링재료를 충전하는 방법에는 제한이 있으며 브레이징 용접법을 사용하는 경우에도 부분적으로 브레이징하기가 쉽지않고 용접물 전체를 전기로에서 일정한 온도를 가열해야하는 단점을 가지고 있다.

또한 중첩된 판재의 용접부에서 마찰교반 핀을 이용하여 마찰열과 소재의 교반을 이용하여 점용접하는 마찰교반점용접(friction stir spot welding) 방법이 사용될 수 있으나 이 방법에 사용되는 금속소재의 형상이 얇은 판재의 경우에는 금속을 교반할 수 없어 마찰교반 점용접법의 사용에 있어서 한계를 가지고 있다^[3]. 그리고, 구리의 점용접방법에 전기를 사용하는 저항 점용접인 열보상 점용접(thermo-compensated resistance spot welding)을 구리와 마그네슘판재의 점용접에 적용한 바 있으며^[4] 유사한 연구로서 보조 가열금형을 사용한 점용접(spot welding)방법을 사용하여 알루미늄과 알루미늄판재의 점용접과 강철과 알루미늄판재의 이중점용접(double spot welding)에 대한 연구가 진행되어 왔다^[5-6].

이와 같은 연구를 바탕으로 지금까지 전기저항 점용접을 사용할 수 없었던 중첩된 구리금속판재의 점용접방법에 있어서 기존의 구리전극대신에 강철전극을 사용하여 발열된 강철전극의 전도열과 소재사이의 전기저항 접촉발열과 회전하는 마찰핀에 의한 표면마찰열을 이용하는 전기저항가열 표면마찰 점용접방법^[7-8]을 적용하여 중첩된 얇은 구리금속판재의 접촉면 사이를 용융하여 구리판재를 점용접(spot welding)할 수 있는 구리판재의 점용접한계를 극복하는 새로운 점용접방법을 모색하고자 한다.

2. 전기저항가열 표면마찰 점용접 개요 및 용접부 온도분포시물레이션

2.1 전기저항가열 표면마찰 점용접 개요

중첩된 구리금속 판재의 접촉부 일부분을 녹여서 점용접하기 위해서는 접합되는 접촉부위에 높은 열이 발생하도록 용접장치와 용접전극을 구성

할 필요가 있다.

기존의 점용접에서는 전류의 통전에 따른 접촉 저항발열이 효과적으로 유지하기 위해서는 용접하고자 하는 금속소재가 비교적 전기저항이 큰 소재에 적용되어 왔다.

본 연구에 사용되는 소재가 구리금속판재이므로 전기저항이 작아 전기에 의한 접촉발열만으로 접촉부를 용융하여 점용접하기에는 한계가 있으므로 추가의 열량을 접촉부 사이로 공급할 필요가 있다.

추가의 열량을 공급하기위한 방법으로서 판재의 부에서 열량을 공급하는 방법중에는 비전기적 열량공급으로서 레이저 빛에 의한 열량공급과 마찰열에 의한 열량공급을 예를 들 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 전기통전에 따른 소재의 접촉저항발열을 기본열량으로 하고 추가의 용접열량으로서 구리금속판재의 표면에 회전 마찰핀을 접촉하여 회전시킬때에 구리판재와의 접촉회전 마찰열을 추가로 공급하도록 하였다.

또한 점용접에 사용되는 구리전극을 사용하는 대신에 저항이 높은 강철전극을 사용하여 통전된 전류에 의하여 발열된 강철전극으로부터 구리금속판재의 표면에 추가의 열량이 전도되도록 하는 방법등의 상기 세가지 종류의 용접열량이 공급되도록 구성된 것이 특징이다^[7-8].

Fig. 1 은 전기저항가열 표면마찰점용접(electric Resistance heated Surface Friction Spot Welding : SFSW)에 사용되는 세가지의 용접열량을 공급하는

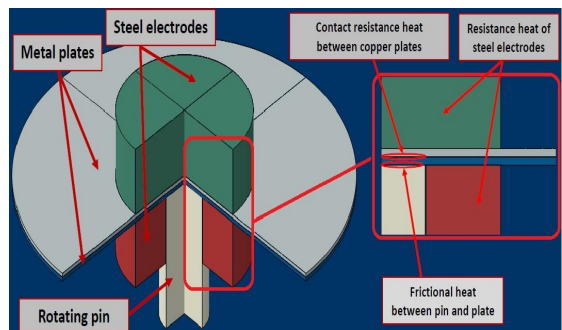


Fig. 1 Three types of heating method in weld zone of electric Resistance heated Surface Friction Spot Welding (RSFSW) process

용접부 가열방법을 도시하는 그림이다.

상기에 언급된 세 가지의 가열방법이 용접부에 집중되도록 구성함으로써 본 연구의 목적인 구리 금속의 낮은 전기저항발열과 높은 열전도에 따른 부족한 용접부 열량을 외부로부터 보강하도록 구성된 것이 특징이다.

이와 같이 여러가지 열원으로 구성된 점용접장치를 구성하여 전기에 의한 소재의 접촉저항발열과 강철전극의 자체의 저항발열로부터의 전도열과 표면에서의 회전마찰핀과의 접촉마찰열을 합하여 용접접촉면을 용융하게 함으로써 얇은 구리금속판재를 점용접(spot welding)할 수 있도록 하였다.

2.2 전기저항가열 표면마찰 점용접 용접부 온도분포 시뮬레이션 및 고찰

전기저항가열 표면마찰 점용접에 있어서 용접부 온도해석을 위하여 상용소프트웨어인 ADINA 프로그램을 사용하였으며 세 가지의 가열방법의 효과를 분석하기 위하여 Fig. 1 과 같이 구성된 요소에 따라 각각의 열온도 해석모델을 구성하였다.

Fig. 2 는 세가지 가열방법을 동시에 사용하는 경우에 해석모델의 해석조건을 도시한 그림으로서 마찰회전핀과 구리소재의 마찰열의 입력은 1423K 의 온도로 그리고 강철전극의 발열에 따른 구리금속판재로의 전도열은 673K 의 온도로 입력하였다.

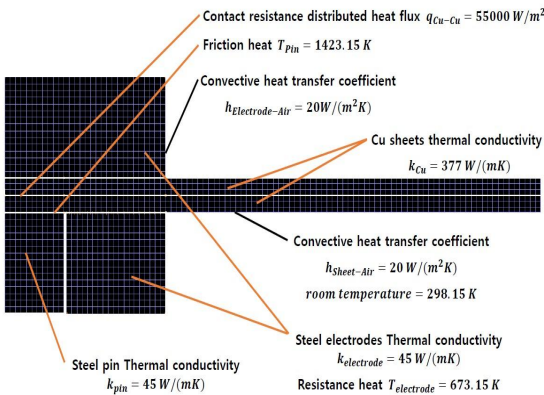


Fig. 2 Boundary conditions for temperature simulation analysis of electric Resistance heated Surface Friction Spot Welding (RSFSW)

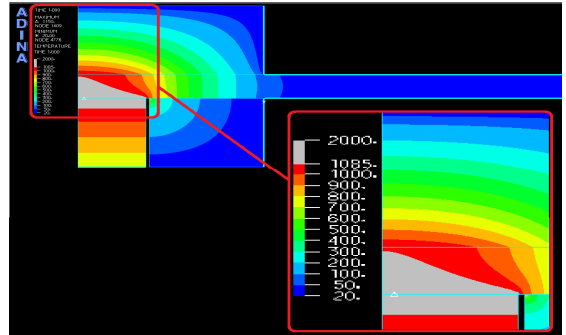


Fig. 3 Temperature distribution in spot welded zone of electric thermo-compensated Resistance Spot Welding (thermo-compensated RSW) process

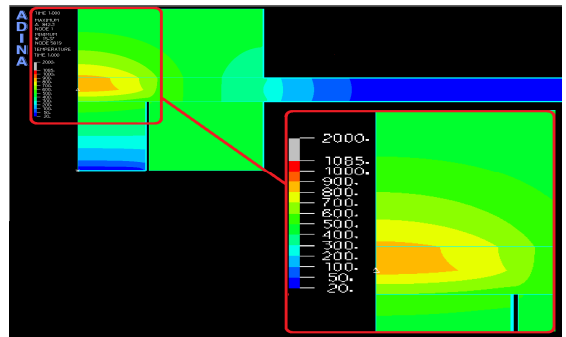


Fig. 4 Temperature distribution in spot welded zone of Surface Friction Spot Welding (SFSW) process

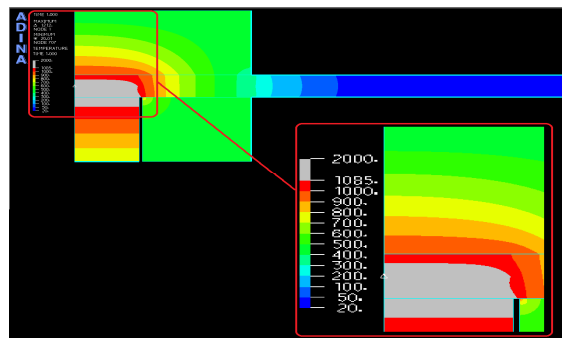


Fig. 5 Temperature distribution in spot welded zone of electric Resistance heated Surface Friction Spot Welding (RSFSW) process

그리고 구리금속판재사이의 접촉열은 $55000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 열용량으로 입력하였다. 그리고 구리금속판재와 강철전극의 열전도계수와 판재와 공기의 접촉부 그리고 강철전극과 공기와 접촉되는 부분의 열복사계수가 도시되어 있다.

상기와 같은 해석조건에 따라 상기 세 가지 경우의 열공급방법을 조합하여 구리금속의 스폿용접부 온도가 용융온도이상이 되는 너겟영역의 온도 분포를 조사한 그림은 다음과 같다.

Fig. 3은 표면마찰열을 공급하지 않고 강철전극에 전기를 통전하여 가열하는 용접부 주위의 온도 분포를 나타내고 있다. 용접부 접촉저항에 의한 전기적 발열과 강철전극의 발열에 의한 열량공급으로 인한 용접부 주위의 온도를 보면 판재외부로부터의 마찰열이 공급되지 못하고 구리의 높은 열전도율과 낮은 저항발열로 인하여 열량이 주위로 소실되어 접촉부에서 용융온도를 유지 못하는 경우이다.

Fig. 4는 전기를 통전하지 않고 회전마찰핀의 표면마찰열만 사용하는 경우를 살펴보면 회전마찰핀으로부터 구리 금속판재의 표면으로부터 전도된 마찰열이 판재의 용접부를 용융할 수 있는 온도에도달하지만 구리금속의 높은 열전도율 특성에 의해서 용접부 너겟 가장자리의 열량이 빠르게 유실됨을 알 수 있다.

그러나 Fig. 5는 전기통전과 동시에 표면회전 마찰열과 강철전극의 발열에 의한 열을 동시에 추가로 공급하는 경우의 온도분포를 보이고 있다. 중심부 온도경계선의 회색부분이 구리금속의 용융된 온도분포를 나타내고 있으며 이상적인 점용접 너겟을 형성하는 타원형 온도분포를 나타낸다. 회전마찰핀에 의한 마찰열과 전류를 통전하면서 발열된 강철전극에 의한 전도가열과 중첩된 구리금속판재 사이의 접촉 저항발열에 의한 세가지 종류의 열량공급으로 용접부 접촉면에서 용융되는 온도의 분포가 넓게 나타나고 있음을 보이고 있다. 발열된 강철전극으로부터 전도된 추가열량이 마찰열과 접촉저항 발열열량을 판재외부로 유실하는 열량을 차단하는 효과로 인해 접촉부에서 넓은 용융온도범위를 유지하고 있음을 알 수 있다.

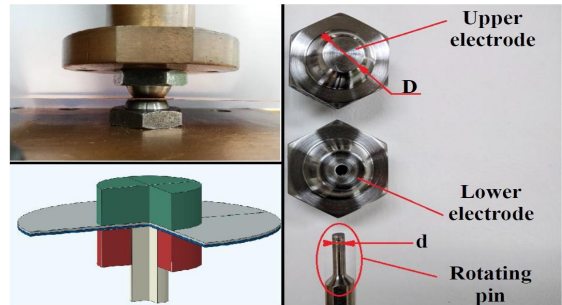


Fig. 6 Shape of rotating pin and steel electrode (D: diameter of steel electrode, d: diameter of rotating pin)¹⁷⁻⁸⁾

3. 전기저항가열 표면마찰 점용접 실험 및 고찰

3.1 실험장치 및 점용접 공정 단계

상기의 점용접방법을 구현할 수 있는 실험 장치의 제작을 위해서 마찰열을 발생시킬 수 있는 마찰회전핀과 전도열을 공급하기위한 강철전극의 구조는 그림 Fig. 6과 같이 제작되었다. 마찰회전핀은 회전과 동시에 압축 하중을 받기 때문에 작은 직경에서도 높은 비틀림 강성과 압축 강성이 좋아야 하며 강철전극에 삽입되어 회전하기 때문에 외주면에 정밀하게 가공된 경면일 필요성이 있다.

따라서 이 모든 조건을 만족하는 금속인 특수강을 연마하여 사용한다. 마찰회전핀의 직경(d)은 4.4mm로 하였고, 강철전극 팁의 외경(D)은 10mm로 제작 되었다. 마찰회전핀을 가지는 전기저항가열 표면마찰 점용접과정은 Fig. 7과 같이 총 네 단계로 이루어진다.

먼저 Fig. 7의 (a)는 그림에서와 같이 용접하고자 하는 두 장의 구리판재를 강철 하부전극(lower electrode)위에 안착 시킨 다음 Fig. 7의 (b)와 같이 두 장의 구리금속판재를 강철 상부전극(upper electrode)으로써 눌러줌으로써 고정하고 하부 마찰회전핀의 회전에 의해 점용접부 하부표면을 마찰가열 시키면서 용접계면에 열전도에 의한 마찰열을 공급한다. 다음의 Fig. 7의 (c)와 같이 금속

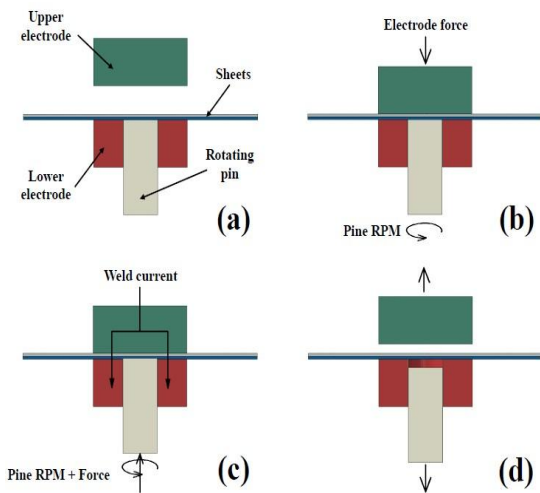


Fig. 7 Process step of electric resistance heated surface friction spot welding process: (a) overlapping sheets, (b) pressing of electrode and rotating of pin, (c) applying current and heating (d)seperation after welding of sheets

판재 하부표면으로부터 마찰회전핀에 의한 마찰열이 공급되고 있는 과정 중에 동시에 강철전극에 전류를 통전하여 구리판재표면과 접촉된 강철전극의 저항에 의해 발열됨과 동시에 구리판재 표면에 열전도에 의한 열을 추가로 공급하게 된다.

그리고 전류의 통전에 의하여 판재 사이의 용접계면에서 발생하는 접촉저항 발열과 상승작용하여 용접계면에 열을 집중시키면서 용접부를 용접한다.

이와 같이 집중가열된 접촉부의 용융열과 강철전극과 마찰회전핀의 압력으로 용융된 용접계면이 용접되도록 하는 것이 마찰회전핀을 사용하는 전기저항가열 표면마찰 점용접의 특징이다.

마지막으로 Fig. 7의 (d)와 같이 마찰회전핀이 원위치로 후퇴하고 강철전극을 구리판재와 분리하게 되면 마찰회전핀을 사용하는 전기저항가열 표면마찰 점용접이 끝난 후 점용접(spot welding)이 완료된 상태가 된다^[7-8].

점용접후 용접된 소재의 표면에는 약간의 마찰회전핀의 흔적과 강철전극의 압흔만이 발생하는데

이 전극의 압흔과 마찰회전핀의 흔적은 기존의 마찰교반 스폿용접(FSW)에 비하여 작은 것이 특징이다.

3.2 점용접 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 두께가 0.3mm인 구리금속판재를 전기저항가열 표면마찰 점용접(RSFSW)한 후 구리금속판재의 용접부 표면형상을 보여주고 있다. 외관상으로 구리판재의 표면에서 강철전극의 압력에 의한 압흔과 회전마찰핀에 의한 마찰흔적을 확인할 수 있다.

점용접방법의 평가를 위해서 첫째로 전류를 통전하면서 발열된 강철전극에 의한 전도가열과 중첩된 구리금속판재사이의 접촉저항발열과 마찰회전핀에 의한 마찰열의 세가지 가열방법에 의한 전기저항가열 표면마찰 점용접법(RSFSW)으로 용접한 시편의 용접강도 시험결과를 분석하였다.

둘째로 전류를 통전하지 않은 상태에서 회전마찰열로만 점용할 때의 표면마찰 점용접법(SFSW)의 용접방법과 셋째로 마찰열을 사용하지않고 전류만을 통전하여 강철전극에 의한 표면가열과 판재사이의 접촉저항발열을 이용하는 열보상 전기저항 점용접 (thermo-compensated RSW)의 점용접방법에 의한 실험결과를 분석한 다음 상기 세 가지 유형의 점용접방법에 의한 그 결과값을 비교 분석하였다. 각 실험별 실험조건은 Table 1 과 같다.

Fig. 9는 세 종류의 점용접법에 대해서 첫번째 그룹의 점용접시편에 대한 인장실험후 용접부의 인장강도를 나타내는 그림이다.

Table 1 Experimental conditions for three types of spot welding method

Factor	RSFSW	SFSW	thermo-compensated RSW
Electrode force(kN)	4	4	4
Friction time (S)	3.45	3.45	
RPM	1200	1200	
Welding time (S)	0.45		0.45
Welding AC(kA)	12.5		1.25
Test number	10	3	3
Test methodology	lap shear coupon configuration		

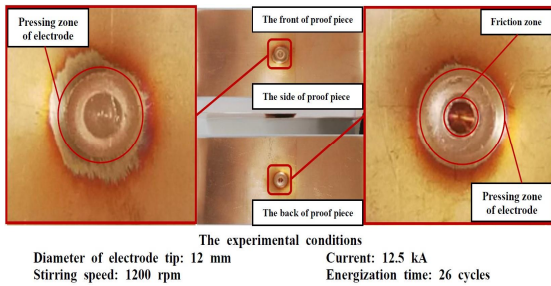


Fig. 8 The shape of surface of spot welded sheets by electric Resistance heated Surface Friction Spot Welding (RSFSW)

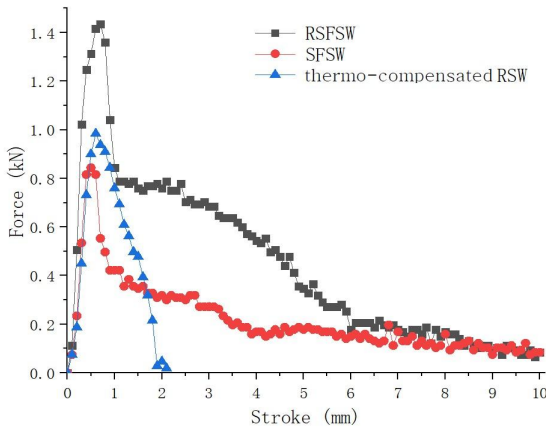


Fig. 9 Comparison of tensile strength result for lap shear coupon configuration with RSFSW, SFSW and thermo-compensated RSW

그림에서처럼 마찰회전편에 의한 마찰열과 전류를 통진하면서 발열된 강철전극에 의한 전도가열과 중첩된 구리금속판재사이의 접촉저항발열에 의한 전기저항가열 표면마찰 점용접법의 경우에서 용접강도가 제일 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9의 그림과 Table 2와 같이 인장시험후의 용접강도와 용접부 파단형태를 비교하여 살펴보면 다음과 같다.

점용접시험에 사용되는 구리금속판재의 두께가 0.3 mm로 얇기 때문에 강철전극의 압력과 열의 작용으로 용접부에서 소성변형 즉 얇은 구리판재 표면상에서 작은 요철형태의 소성변형된 상태를 고려하여 인장시험후 각각의 용접부 파단상태와 인장강도를 고려하여 고찰하였다.

따라서 Fig. 9와 Table 2를 참고하여 RSFSW의 점용접시험의 인장시험후 파단형태를 살펴보면 SFSW와 RSW 두 가지 용접법에 의한 효과가 동시에 나타나는 경우의 파단형태를 보이고 있다.

즉 회전마찰열과 강철전극의 저항발열에 의한 전도열이 용접부의 전기에 의한 접촉저항발열과 동시에 작용한 시험편의 인장시험후 용접부 상태를 보면 중첩된 구리금속판재의 접촉면에서 소재의 용융이 발생하여 한 쪽의 구리금속판재의 소재가 다른 한쪽에 용융되어 찢어진 상태로 붙어 있는 흔적을 보아 크기가 큰 너겟이 형성되었음을 관찰할 수 있다.

따라서 용접된 시험편의 인장시험후 파단형태로 볼 때 비교대상이 되는 두 용접법인 SFSW와 열

Table 2 Local interfacial fracture type after tensile shear tests of specimens welded by each different three spot welding process

Methods of spot welding process	Shape of upper surface	Shape of lower friction surface	Welded nugget fracture shapes after tensile strength test	Shearing load by tensile test (kN)
RSFSW				1.39
SFSW				0.88
Thermo-compensated RSW				1.01

Table 3 Value of means and interval plot for 95% confidence level

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
RSFSW	10	1.3856	0.1032	(1.3261, 1.4451)
SFSW	3	0.8848	0.0297	(0.7761, 0.9935)
RSW (thermo-compensated)	3	1.0092	0.0239	(0.9005, 1.1178)

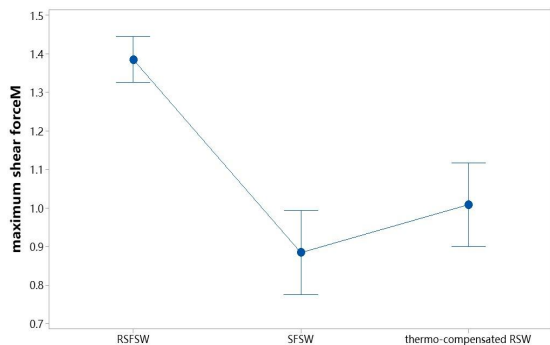


Fig. 10 Interval plot of three spot welding methods (95CI for the mean)

보상 RSW 용접법보다 용접강도가 크게 됨을 예측할 수 있다.

SFSW 점용접 경우에서 파단형태를 보면 마찰회전핀에 의해서 마찰열이 많이 발생하지만 구리의 높은 열 전도성 때문에 열량이 많이 손실되어 용접부에서 큰 너겟을 만들 수 없을 정도의 파단형태를 보이고 있으며 동시에 용접강도도 작게 됨을 알 수 있다.

열보상 RSW 점용접의 파단형태를 보면 버튼파단이 발생하지 않기 때문에 인장강도곡선을 보면 급격히 줄어드는 형태를 보이고 있으나 마찰열에만 의존하는 SFSW 용접법보다는 인장강도가 다소 높게 나타남을 알 수 있다.

이 경우를 보면 전류를 통전하여 용접하는 것이 점용접에는 효과적임을 알 수 있으나 구리금속판재가 소성변형과 접촉저항발열의 효과로 초기에 인장강도가 크게 나타나지만 용접부의 요철부분이 끊어진 후 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있으며 용접합의 흔적인 버튼파단의 형태가 아님을 알 수

있다.

그러나 RSFSW 점용접은 강철전극의 중심에 회전 핀을 삽입하여 마찰열을 공급함과 동시에 전류에 의해 발생한 강철전극의 저항발열과 판재접촉저항열이 작용하여 마찰핀과 판재의 접촉계면 주위에 마찰열 손실을 줄여서 SFSW 용접법보다 접촉면에서 용융열을 유지할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

따라서 RSFSW 점용접은 열보상 RSW 와 SFSW 용접법의 장점을 살리면서 구리금속판재의 점용접의 단점을 보완하여 너겟 크기나 인장강도를 대폭 향상시킬 수 있는 점용접(Spot welding) 방법임을 알 수 있다.

그리고 Table 2 를 보면 RSFSW 와 SFSW 경우 용접부 버튼파단의 형태가 나올 수 있을 정도의 파단후에 용접부주위에서 소재의 찢어짐도 생겼다.

Table 3 은 통계적으로 총 16 조 실험데이터에 의하여 각각의 스폿용접법에 따른 최대 인장강도의 95% 신뢰구간을 구하여 나타낸 표이다.

Fig. 10 은 세 종류의 용접법에 따른 시편의 인장실험 후 최대인장강도의 95% 신뢰구간의 그림이다. 그림과 표를 보면 RSFSW 점용법에 의해 열번의 점용접실험후 구한 평균 최대용접강도는 1.39kN 이고 95% 신뢰구간은 1.33~1.45kN 이다.

RSFSW 용접법에 의한 점용접 시편의 최대 인장강도값은 SFSW 점용접 방법의 인장강도값의 1.57 배를 나타내고 있으며 RSW 점용접방법의 인장강도값의 1.37 배를 보이고 있다.

4. 결론

기존의 전기저항 점용접 방법에 추가로 회전마찰핀의 표면마찰열을 공급하여 구리금속판재도 전기저항 점용접할 수 있음을 실험과 시뮬레이션을 통하여 다음과 같이 알 수 있었다.

1. 마찰회전핀에 의한 마찰열과 전류를 통전하면서 발열된 강철전극에 의한 전도가열과 중첩된 구리금속판재 사이의 접촉저항발열에 의한 세가지 종류의 열량공급을 동시에 적용하여 점용접하는 전기저항가열 표면마찰 점용접(RSFSW)

의 경우에서 비교대상 점용접 보다 점용접강도가 1.39KN으로 제일 크게 나타남을 알 수 있었다.

2. 구리금속판재는 낮은 전기저항과 높은 열전도율의 특성이 있기 때문에 표면마찰 점용접(SFSW)방법과 같이 금속표면상에서 회전마찰열만을 사용할 경우에 접촉면에서 소재의 용융을 유도하기에는 열량이 부족하다는 것을 용접 후 시편의 파단형태를 보아 알 수 있었다.
3. 전기만을 사용하는 열보상 전기저항 점용접방법(RSW)에 있어서는 인장시험후 용접강도와 시편의 파단형태를 보아 구리금속소재의 낮은 전기저항과 높은 열전도율로 인하여 중첩된 판재의 접촉저항만으로 접촉부를 용융하여 너겟을 발생할 수 없음을 알 수 있었다.
4. 시뮬레이션을 통하여 너겟발생 영역을 크기를 비교한 바 RSFSW 점용접 방법이 SFSW 점용접 방법과 열보상 RSW 점용접 방법의 단점을 보완할 수 있음을 알 수 있었다.

따라서 구리금속판재의 용접방법중에서 납땀(soldering)과 브레이징(brazing) 용접법 이외의 새로운 점용접방법으로서 전기접촉 저항가열과 강철전극의 전기저항 발열에 의한 전도가열과 회전편에 의한 표면마찰가열을 동시에 적용하여 구리금속판재의 접촉면을 부분적으로 용융용접(fusion welding)하는 방법으로 중첩된 구리금속판재를 점용접(spot welding)할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

“이 논문은 부경대학교 자율창의 학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음”

REFERENCES

1. Baek, D. H., Lee, K. K. and Lee, D. J., “The Solderability and Mechanical Properties of In, Bi Added Sn-9Zn/Cu Joint”, Journal of Korean Foundry Society, Vol. 20, No. 2, pp.116-121, 2000.
2. Jung, H. S., Bae, D. S. and Ko, S. W., “Study on the Improvement of Brazing ability for Copper-Aluminum Dissimilar Materials Joint”, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 49-57, 2001.
3. Ding, C. G., Ni, Y. Q., Guo, C. J., Quan, G. F. and Ge, J. P., “Study on Procedure of Bonding-FSSW Hybrid Joints of AZ31 Magnesium Alloy”, Journal of Adanced Materials Research, VOL. 314-316, NO. 2, pp. 953-956, 2011.
4. Shan, Zhang, Y., Li, Y., Luo, Z., “Dissimilar joining of AZ31B magnesium alloy and pure copper via thermo-compensated resistance spot welding”, Journal of Manufacturing Processes, VOL. 30, NO. 1, pp. 570-581, 2017.
5. Kim, T. H., Jin, I. T., “Characteristics of Drawing and Concurrent Spot Welding of Overlapped Aluminum Plates with Copper Electrodes Inserted in Heated Dies”, Transactions of Materials Processing, Vol. 26, No. 3, pp. 174-180, 2017.
6. Kim, T. H., Sun, X. G. and Jin, I. T., “Electric Resistance Double Spot Welding Process of Dissimilar Metal Plates of Steel and Aluminum by Using Heating Dies”, Transactions of Materials Processing, Vol. 27, No. 1, pp. 37-47, 2018.
7. Kim, T. H., Jang, M. S. and Jin, I. T., “Electric Resistance Heated Friction Stir Spot Welding of Overlapped Al5052 Alloy Sheets”, Transactions of Materials Processing, Vol. 24, No. 4, pp. 256-263, 2015.
8. Kim, T. H., Sun, X. G. and Jin, I. T., “Electric Resistance Surface Friction Spot Welding Process of AZ31 Mg Alloy Sheets by Using Rotating Dies”, Transactions of Materials Processing, Vol. 27, No. 3, pp. 145-153, 2018.