

중첩된 알루미늄 5052 합금판재의 전기저항가열 마찰교반점용접에 관한 연구

김태현¹ · 장민수² · 진인태[#]

Electric Resistance Heated Friction Stir Spot Welding of Overlapped Al5052 Alloy Sheets

T. H. Kim, M. S. Jang, I. T. Jin

(Received December 15, 2014 / Revised January 29, 2015 / Accepted February 11, 2015)

Abstract

Electric resistance spot welding has been used to join overlapped steel sheets in automotive bodies. Recently to reduce weight in automotive vehicles, non-ferrous metals are being used or considered in car bodies for hoods, trunk lids, doors parts, etc. Various welding processes such as laser welding, self-piercing rivet, friction stir welding are being used. In the current study, a new electric resistance heated friction stir spot welding is suggested for the spot welding of non-ferrous metals. The welding method can be characterized by three uses of heat -- electric resistance heating, friction stir heating and conduction heating of steel electrodes -- for the fusion joining at the interfacial zone between the two sheets. The welding process has variables such as welding current, diameter of the steel electrodes, revolutions per minute (rpm) of the friction stir pin, and the insert depth of the stir pin. In order to obtain the optimal welding variables, which provide the best welding strength, many experiments were conducted. From the experiments, it was found that the welding strength could be reached to the required production value by using an electrode diameter of 10mm, a current of 7.6kA, a stirring speed of 400rpm, and an insert depth of 0.8mm for the electric resistance heated friction stir spot welding of 5052 aluminum 1.5mm sheets.

Key Words : Spot Welding, Friction Stir Welding, Electrical Resistance Heating, Aluminum Sheet, Welding Strength, Electrode

1. 서론

수송기계의 경량화를 위해 가볍고 강한 재질을 사용하여 에너지를 줄이면서 강도가 우수한 수송기계를 만들 필요가 있다. 이 분야의 재질을 사용하기 위해서는 고강도를 가지는 경량금속의 개발이 필요하다. 특히 알루미늄합금의 경우 비강성이 우수하고 성형성이 뛰어나므로 경량화 금속으로 주목 받고 있다. 그러나 스폿용접을 주로 하는 수송기계 산업분

야에서는 가볍고 좋은 재질의 용접성이 확보되지 않으면 그 이용이 제한 받게 된다[1~2].

마찰교반점용접은 접합하고자 하는 접합면에 회전 공구를 삽입하여 빠르게 회전시킬 때 발생하는 회전 공구와 금속면상의 마찰열과 교반에 의한 소성유동 및 회전공구의 가압력을 이용하여 중첩된 두 금속판재를 접합한다. 하지만 접합시간이 많이 소요되고 접합부 표면에 회전공구의 삽입으로 인한 홀 형상의 접합흔적이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 기존의

1. 부경대학교 대학원 기계공학과

2. 부경대학교 산업대학원 기계공학과

Corresponding Author : Pukyong National University Mechanical Engineering, E-mail: jint@pknu.ac.kr

마찰교반점용접은 회전공구를 접합면에 삽입할 때 회전공구와 금속판재 사이의 마찰열을 얻기 위하여 일정시간과 일정한 강도이상의 회전공구가 소요되었으나 마찰열과 함께 외부로부터 스폿용접에 사용되는 전극의 전기저항에 의한 열원을 추가로 동시에 공급함으로써 용접시간을 줄임과 동시에 표면의 구멍을 제거할 필요가 있었다. 이러한 필요성에 입각하여 제시된 전기저항가열 마찰교반점용접은 마찰교반점용접의 단점들을 보완하기에 적합한 새로운 접합기술이다[3~5].

새로운 접합기술이 산업에 적용되기 위하여 가장 중요한 항목은 새로운 접합방법으로 접합된 판재의 강도가 규격에서 요구하는 충분한 접합강도를 가지는지를 파악하는 것이다. 따라서 본 연구의 주요 목적은 전기저항가열 마찰교반점용접을 이용하여 비철금속인 알루미늄합금 판재를 용접하였을 때 산업현장에서 요구하는 표준 점용접강도를 얼마만큼 만족하는지를 파악하는 것이다. 부가적으로 몇 가지 주요 인자들과 접합강도 사이의 영향력에 대한 자료와 최적의 접합강도를 가지는 조건 등에 대하여 조사하는 것이 부가 목적이다.

이러한 목적을 달성하기 위하여 전기저항가열 마찰교반점용접된 판재의 정적 전단 인장시험을 통하여 접합강도를 분석하였고, 분산분석을 이용하여 주요인자들의 영향력을 분석하였다. 실험 조건의 설정에는 간이 테스트법인 필 테스트(peel test)를 이용하여 서로 다른 선단경(diameter of the electrode tip)을 가지는 전극들에 대한 용접가능 적합전류조건을 찾아내어 실험조건의 범위를 좁혔다.

2. 전기저항가열 마찰교반점용접의 개요[6]

전기저항가열 마찰교반점용접의 접합기구는 접합계면의 용융접합을 사용하고 있으며 발열의 형태로는 소재와 소재 사이의 접촉저항에 의한 발열과 철계전극의 전도열, 그리고 교반핀에 의한 마찰열로 구성된다. 접합시간 내에 다양한 형태의 발열이 추가되어 마찰열에만 의존하는 마찰교반점용접보다 단시간에 접합이 가능하고, 소재 계면사이의 접촉저항열에만 의존하는 스폿용접에 비해 용접부에 열을 집중적으로 공급하여 비철금속의 스폿용접을 할 수 있는 장점이 있다.

전기저항가열 마찰교반점용접의 용접과정은 Fig. 1과

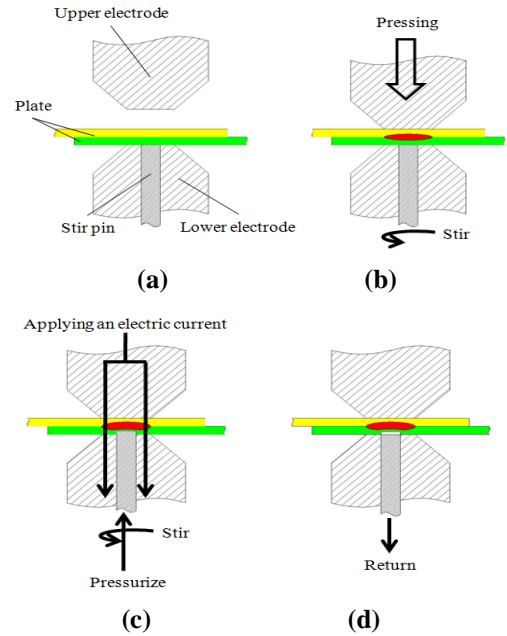


Fig. 1 Process step of electric resistance heating friction stir spot welding:(a) overlapping plates, (b) pressing and stirring of pin, (c) applying and heating of current, (d) welding of plates

같이 총 네 단계로 이루어진다. 먼저 Fig. 1의 (a)는 그림에서와 같이 용접하고자 하는 두 장의 판재를 안착 시킨 다음 Fig. 1의 (b)와 같이 두 장의 판재를 상부 전극으로 눌러줌으로써 고정하고 하부 교반핀의 회전에 의해 용접부 표면을 마찰가열 시키면서 접합계면에 전도에 의한 열을 공급한다. 다음의 Fig. 1의 (c)와 같이 마찰열이 공급되고 있는 과정 중에 이어서 철계전극에 전류를 통전하여 판재표면과 접촉된 철계전극의 저항에 의해 발열됨과 동시에 판재 표면에 열전도에 의한 열을 공급하게 된다. 그리고 전류의 통전에 의하여 판재 사이의 접합계면에서 발생하는 전기저항 가열도 이용하여 접합부에 열을 집중시키면서 용접부를 가열한다. 이와 같이 집중가열된 열과 교반핀의 압력으로 접합경계면이 용융되고 접합되도록 하는 것이 전기저항가열 마찰교반점용접의 특징이다. 마지막으로 Fig. 1의 (d)와 같이 교반핀이 원위치로 후퇴하고 전극을 판재와 분리하게 되면 전기저항가열 마찰교반점용접공정이 끝나고 두 소재는 서로 점용접된 상태가 된다. 용접 후 접합된 소재의 표면에는 약간의 교반흔적과 미세한 전극압흔만이 발생하는데 이 압흔과 교반흔적은 기존의 마찰교반점용접에 비하여 작은 것이 특징이다.

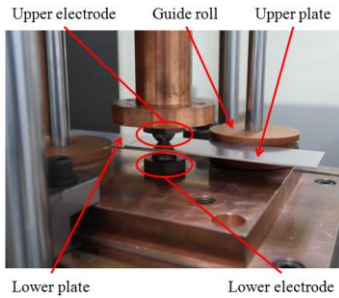


Fig. 2 Layout of steel electrodes and overlapped aluminum plates for experiment

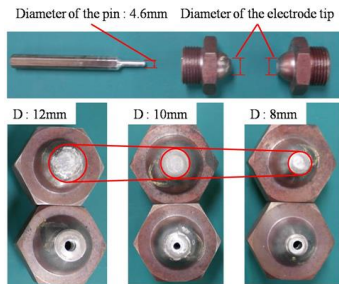


Fig. 3 Shape of stirring pin and steel electrodes

3. 실험장치 및 실험조건

3.1 실험장치

전기저항가열 마찰교반 점용접용 실험장비는 기본적으로 기존의 프로젝션(projection) 용접기에 설계 제작된 전극부품을 장착하여 사용하였다. 용접 실험 시 Fig. 2와 같이 두 장의 금속 판재가 안착되고 상부실린더의 압력에 의해 판재가 고정된다. 이때 절연재(insulation material)로 이루어진 두 개의 가이드롤(guide roll)에 의해 정확한 위치에 판재가 놓이도록 할 수 있고 교반시에 자칫 발생할 수 있는 시험편 판재의 회전을 예방하도록 하였다.

용접장비의 중요한 부분인 교반핀(stirring pin)과 철계전극(steel electrode)은 Fig. 3과 같이 제작되었다. 교반핀은 회전과 동시에 압력에 의한 압축하중을 받기 때문에 작은 면적에서도 높은 비틀림 강성과 압축 강성이 좋아야 하고, 철계전극과 접촉하여 회전하기 때문에 외주면이 매우 경면일 필요성이 있다. 따라서 이모든 조건을 만족하는 금속인 초경합금을 사용하였다.

철계전극의 경우 열간금형강(SKD61)을 이용하여 높은 온도와 압력에도 버틸 수 있도록 설계 제작되었다. 세부 치수로는 교반핀의 교반영역을 4.6mm로

Table 1 The characteristics of the specimen

Component (wt%)	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Na	other
	95.65	0.3	0.1	0.4	0.6	0.8	0.15
Size (mm)	Thickness		Width		Height length		
	1.5		150		50		
Tensile strength (Ultimate)					193 MPa		
Tensile strength (Yield)					89.6 MPa		
Modulus of elasticity					70.3 GPa		
Melting point					607.2~649 °C		
Annealing temperature					343 °C		

하였고, 전극 끝단의 직경인 접촉 선단경(diameter of electrode tip)은 총 세 가지 수준의 실험을 위하여 12mm, 10mm, 8mm로 제작되었다. 교반핀의 직경을 4.6mm로 정한 것은 본 연구에 앞선 연구자료를 참고하여 1.5mm의 두께를 가지는 알루미늄 판재를 소성유동 점접합할 경우 소성유동 핀의 직경은 4.6mm~5mm정도가 적합함을 기초로 하여 결정되었다[7~8].

3.2 실험조건

실험에 사용된 금속은 알루미늄 5052합금 소재를 사용하였고, 세부적인 물성치 및 형상치수는 Table 1과 같다. 본 소재를 사용한 이유는 차량용 외판소재로 주로 많이 사용되는 5000계열 알루미늄 합금 중에서도 국내에 쉽게 구할 수 있고 현장에 사용되는 소재와 매우 흡사한 물성을 가지기 때문이다. 또한 실험소재의 두께를 1.5mm로 정한 것도 차량용 외판소재로 많이 사용되는 두께의 범위가 1.0mm~2.5mm이기 때문이다. 시편의 표면에 불순물을 제거하기 위하여 메탄올을 이용한 세척이 추가 진행 되었다.

실험의 인자로는 Table 2와 같이 총 3개의 인자를 잡았고, 인자의 수준은 총 3수준으로 정하였다. 전극의 선단경은 전열면적, 전류밀도, 접촉저항 등과 관련해서 접합온도를 결정하고 접합부의 압흔과 소재의 클램핑 등과 관련하여 접합부 변형에 영향을 준다. 핀의 삽입깊이(insertion depth of pin)는 용접부 중앙의 온도를 증가시키는 영향과 교반효과에 영향을 주는 형태로 접합강도에 영향을 준다. 교반속도(stirring speed)는 용접부 중앙의 온도상승시간과 소성유동시간에 영향을 준다. 이러한 영향을 참고하여 3가지 주요인자를 결정하였다.

Table 2 The major factor and the level of factor

Factor	The name of factor	The level of factor		
A	Diameter of the electrode tip(mm)	12	10	8
B	Insertion depth of pin(mm)	0.8	0.4	0
C	Stirring speed(rpm)	1200	800	400

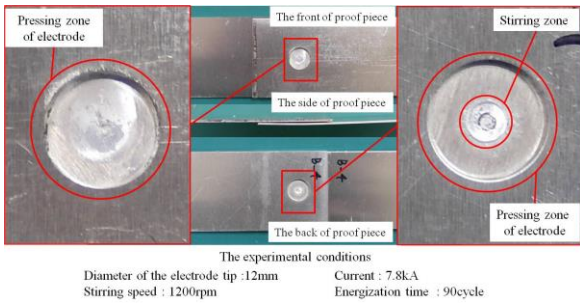


Fig. 4 The shape of surface of welded plates

4. 전기저항가열 마찰교반 점용접 실험

4.1 용접가능 적합 전류조건 실험

Fig. 4는 전기저항가열 마찰교반점용접된 알루미늄 판재소재의 형상을 보여주고 있다. 외관상으로 한 면에서 교반의 흔적을 확인할 수 있었고, 양쪽면 모두 접합부에 약간의 전극 압흔을 발견할 수 있었다. 그 외적으로 표면상에 큰 접합흔적은 발견되지 않았고 기존의 마찰교반점용접과 같은 교반편의 구멍 흔적도 없는 상태이다. 이렇게 접합된 소재를 이용하여 펠 시험(peel test) 및 인장전단시험(lap shear test)을 진행하였다.

용접가능 적합 전류조건 실험의 목적은 인자로 결정된 3 가지 수준의 선단경에서 용접이 이루어지는 전류조건을 찾아내는 것이다. 따라서 용접판단 여부를 확인하기 위하여 KS B ISO 10447 표준에 응시되어 있는 간이 테스트 방법인 펠 테스트를 Fig. 5와 같이 시행하였고, 시험에 의해 얻어진 결과로 각각의 선단경에 용접이 가능한 전류의 세기를 정하였다.

용접가능 적합 전류조건 실험에서는 Fig. 6과 같이 총 네 가지 부류의 접합부 계면형상 및 표면형상을 이용하여 용접가능 전류세기를 결정하였다. 먼저 전류의 세기가 약해서 용접이 이루어질 정도의 온도가 되지 못한 경우로 비접합 부류가 있다. 다음으로는 접합이 이루어지고 펠 테스트를 하였을 때 충분히 접합강도가 나와서 버튼(button) 파단의 형태가 나왔

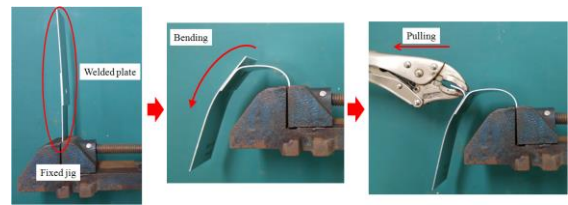


Fig. 5 The method of peel test

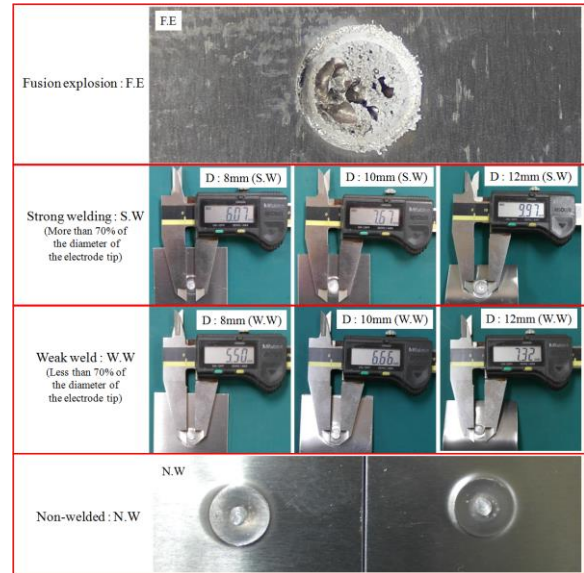


Fig. 6 Four types of Peel test results

Table 3 Results of peel test

Current(kA)	Diameter of the electrode tip(mm)		
	8	10	12
7.0	N.W		
7.2	W.W	N.W	
7.4	S.W	W.W	N.W
7.6	F.E	S.W	W.W
7.8		F.E	S.W
8.0			F.E

F.E : Fusion Explosion

W.W : Weak Weld

S.W : Strong Welding

N.W : Non-Welded

으나 너겟의 직경이 사용된 선단경의 70%를 넘지 못하는 경우로 약한 용접 부류가 있다. 그 다음으로 접합이 전류조건이 충분하고 용접도 강하게 이루어져서 버튼파단이 발생할 뿐만 아니라 너겟 직경도 사용된 선단경의 70%이상인 강한 접합 부류가 있다. 마지막으로 과도한 전류의 세기로 인하여 소재가 비

산(fusion explosion)되어 소재손실이 발생하는 경우가 많다. 이 같은 부류는 실제 필 테스트를 해보아도 소재손실에 의해 매우 쉽게 파괴되는 것을 알 수 있다.

용접가능 적합 전류조건 실험은 선단경과 전류의 세기를 제외한 변수인 통전시간, 삽입깊이, 교반속도를 90cycle, 0mm, 1200rpm으로 고정 하였다. 이렇게 얻어진 선행 실험 결과는 Table 3과 같다. 4개의 형태로 분류한 필테스트 결과에서 각각의 선단경당 용접 가능한 전류의 세기가 하나씩 있음을 확인하였다. 결과적으로 선단경이 12mm일 때 7.8kA, 10mm일 때 7.6kA, 8mm일 때 7.4kA의 전류 세기를 사용하는 것으로 용접이 가능함을 파악 할 수 있었다.

4.2 주요 인자 실험

선행실험을 바탕으로 정해진 전류의 세기를 이용하여 접합 강도실험을 진행 하였다. 통전 시간은 90cycle로 고정된 상태에서 선단경과 삽입 깊이와 교반속도를 세 가지 수준으로 분류하여 실험 계획을 잡았다. 각각의 선단경당 전류의 세기는 선행 실험에서 결정된 전류의 세기로 실험을 진행하였다. 실제로 모든 실험을 할 경우 동일조건 3회 반복실험을 가정하면 81회 실험이 되어야한다. 하지만 세 가지 인자의 교호작용을 무시할 수 있다고 가정하고 각각의 인자가 접합강도에 주는 영향을 분석하기 위한 실험임을 가정하면 L₉(3⁴)형 직교배열표에 의한 실험 계획법으로 27회의 실험만으로도 원하는 정보를 얻을 수 있다.

실험계획을 바탕으로 전기저항 마찰교반점용접된 시험편을 제작하였고, 제작된 시험편을 KS B 0801규격을 기초하여 Fig. 7과 같이 정적 인장 전단 시험을 진행 하였다. Table 4는 KS B 0801규격에 의해 얻어진 인장시험 결과 값을 나타내고 있다. 직교배열표에 의해 구해진 이 자료를 바탕으로 분산분석을 할 경우 각각의 인자가 용접강도에 영향을 주는지에 대하여 알 수 있다. 각각의 실험번호에 반복실험의 평균을 보면 최대 5903.19N에서 최저 2314.94N까지 나오는 것을 알 수 있다.

인장시험후의 파단형태는 Fig. 8과 같이 3가지 형태로 파단 되었다. 3가지 형태로는 2000N~3000N대의 최대인장하중에서 나타나는 계면파단(interfacial fracture)과 3000N~5000N사이에 발생하는 반 버튼 파단(semi button fracture) 및 5000N이상의 최대인장하중에서 발생하는 완전한 버튼 파단(perfect button fracture)으로

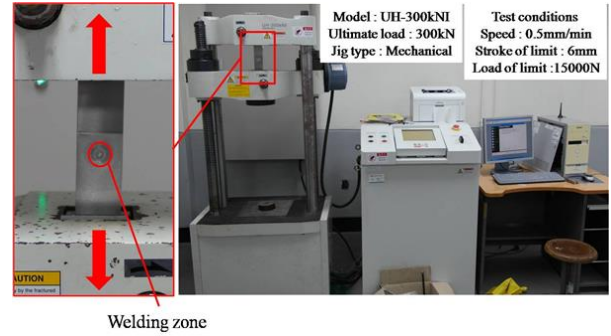


Fig. 7 The lap shear test machine and method

Table 4 Results of lap shear test(ultimate tensile load)

Experiment No.	Load (N)	Average (N)
1 (D:12 I:0.8 S:1200)	2754.16	2727.05
	2837.06	
	2589.94	
2 (D:12 I:0.4 S:800)	2091.19	2314.94
	2208.75	
	2644.88	
3 (D:12 I:0 S:400)	2009.06	2332.75
	2787.38	
	2201.81	
4 (D:10 I:0.8 S:400)	6040.88	5903.19
	5757.38	
	5911.31	
5 (D:10 I:0.4 S:1200)	5952	5902.51
	5859.38	
	5896.15	
6 (D:10 I:0 S:800)	4232.62	4294.62
	4567.03	
	4084.22	
7 (D:8 I:0.8 S:800)	4645.78	4763.91
	5152.03	
	4493.91	
8 (D:8 I:0.4 S:400)	4312.26	4445.70
	4400.16	
	4624.69	
9 (D:8 I:0 S:1200)	3262.97	3430.55
	3570.06	
	3458.62	

D : Diameter of the electrode tip(mm)

I : Insertion depth of pin(mm)

S : Stirring speed(rpm)

나눌 수 있다. 계면 파단의 경우 상부 판재와 하부 판재 사이의 계면이 충분히 용접되지 못해서 용접부 원통방향으로의 전단강도보다 계면의 전단 강도가 낮아서 일어나는 파단형태로 용접이 강하게 되지 않았다는 것을 파악할 수 있다. 다음으로 반 버튼 파단은 버튼 파단이 발생하였으나 일부 영역에서 계면

Table 5 Analysis of variance

	S	ϕ	V	F_0	F(0.1)	F(0.05)	F(0.01)
A	12870343.26	2	6435171.63	27.56	9	19	99
B	2050220.87	2	1025110.44	4.39	9	19	99
C	285455.12	2	142727.56	0.61	9	19	99
e	467006.04	2	233503.02				
T	15673025.28	8					

A : Diameter of the electrode tip S : Sum of squares F_0 : Test statistic
 B : Insertion depth of pin ϕ : Degrees of freedom F(0.1) : Critical value at $\alpha=0.1$
 C : Stirring speed V : Mean square F(0.05) : Critical value at $\alpha=0.05$
 e : Error T : Total sum of squares F(0.01) : Critical value at $\alpha=0.01$

Table 6 Analysis of variance (pooled error term b and c)

	S	ϕ	V	F_0	F(0.1)	F(0.05)	F(0.01)
A	12870343.26	2	6435171.63	13.78	3.46	5.14	10.9
e	2802682.028	6	467113.67				
T	15673025.28	8					

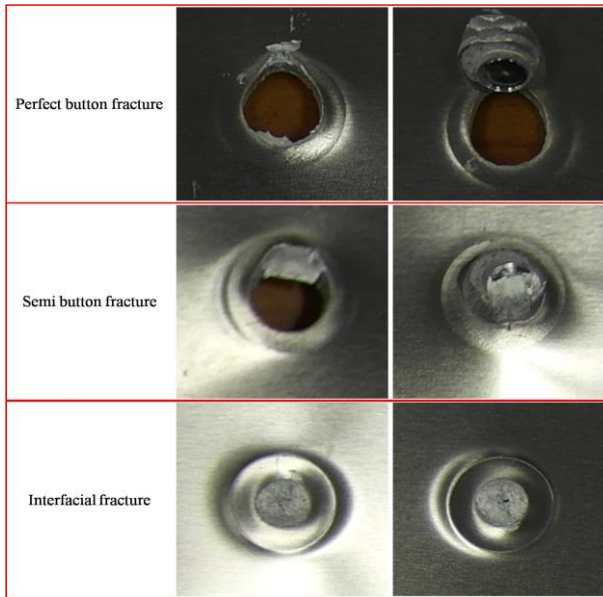


Fig. 8 Fracture shape after lap shear test

파단과 같은 형상으로 파단이 이루어지는 것으로 용접부에 고루 용접이 되지 못한 것을 알 수 있다. 마지막으로 완전한 버튼 파단은 용접부 원통방향으로의 전단강도보다 용접부의 용접강도가 더 높아서 소재부분에 파단이 발생하는 형태로 용접부에 용접이 충분히 발생하였고 고루 용접이 분포되었음을 짐작할 수 있다.

Table 4의 자료를 활용하여 Table 5와 같은 분산 분석표를 만들어서 설정된 3수준의 세 가지 인자들에 대한 영향도를 분석하고자 하였다. 결과적으로 접합 강도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 선단경임을 표를 통하여 알 수 있다. F-검정에 의해 선단경은 99%의 확률에는 도달하지 못했지만 95%의 확률로 접합 강도에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 다음으로 교반핀의 삽입깊이의 경우 90%의 기각치에도 도달하지 못하는 것으로 보아 교반핀의 삽입깊이 인자가 접합강도에 영향이 크지 않거나 없음을 짐작할 수 있다. 마지막으로 교반속도는 어느 기각치보다도 높지 못했을 뿐더러 F_0 값이 매우 작게 나와 이 또한 용접강도에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 B인자와 C인자를 오차항에 플링시켜서 다시 검증해 보았다. 그 결과 Table 6과 같은 표가 나왔고, 표를 살펴보면 플링전과는 달리 모든 기각치를 F_0 을 넘는 것을 알 수 있다. 따라서 결과적으로 선단경의 수준변화는 99%의 확률로 전기저항 마찰교반점용접 강도에 영향을 주는 것으로 사료된다.

연구에 설정된 세 가지 인자 중에서 용접강도에 가장 큰 영향을 주는 인자가 선단경임을 감안하여 일원 배치법을 활용한 99%신뢰구간 그래프를 Fig. 9와 같이 나타내었다. 그리고 현장에 사용되기 적합한지를 판단하기 위하여 KA B ISO 18595규격의 두께

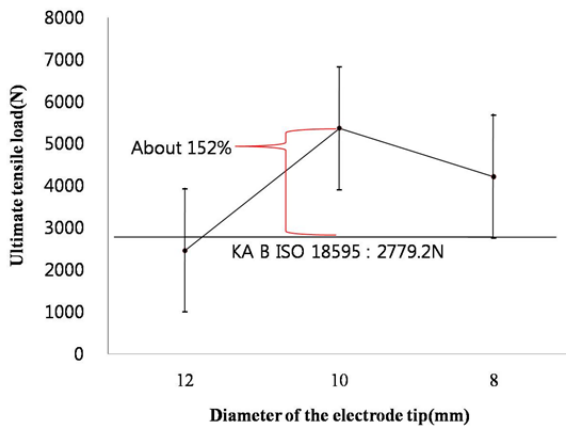


Fig. 9 99% confidence interval graph

1.5mm의 알루미늄 판재를 점용접 할 때 요구하는 최소 전단 용접강도를 구하여 비교해 보았다. 결과적으로 선단경이 12mm일 때는 그 요구치를 만족하지 못했지만 10mm와 8mm에서는 만족하였다. 추가적으로 선단경이 10mm일 때 가장 높은 용접강도가 나왔으며 그 크기는 규격에서 요구하는 용접강도의 약 152%에 달하는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 알루미늄 5052판재를 효율적으로 점용접 하기 위하여 고안된 전기저항가열 마찰교반점용접의 실험용 장치를 설계 및 제작하였고, 실험 장치를 이용하여 필 시험에 의한 전류조건의 확립 및 인장전단실험을 통하여 용접에 영향을 줄 수 있는 몇 가지 인자에 대하여 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Peel test 실험을 통하여 교반편의 직경이 4.6mm 일 때 가열전극의 접촉직경인 선단경 12mm, 10mm, 8mm의 철계전극을 사용할 때 선단경의 70% 이상에 해당하는 너겟직경을 가지는 적합한 용접전류조건은 7.8kA, 7.6kA, 7.4kA임을 알 수 있었다.

(2) KS B 0801 규격에 의거한 인장 전단 실험으로 가열전극의 선단경 10mm, 교반편의 삽입깊이 0.8mm, 교반편의 교반속도 400rpm의 조건에서 가장 높은 용접강도가 나오는 것을 알 수 있었다.

(3) 분산분석을 통하여 선단경, 삽입깊이, 교반속도 중 선단경의 수준변화가 용접강도에 지배적인 영향을 주는 것을 알 수 있었고, 1.5mm 두께의 알루미늄 5052 판재의 전기저항 마찰교반점용접에 있어서 선

단경 10mm가 99% 확률로 가장 높은 용접강도를 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

(4) 최적의 조건에서 얻어진 용접강도는 KA B ISO 18595 규격에서 요구하는 최소 전단강도의 약 152%가 됨을 알 수 있었고, 산업 현장에 충분히 사용가능한 용접강도를 얻을 수 있었다.

상기와 같이 전기저항가열 마찰교반점용접으로 접합된 시편에 대한 접합강도를 조사한 결과 새로 제안된 전기저항가열 마찰교반점용접법에 대한 사용가능성을 알 수 있었고 용접변수들의 영향에 따른 접합강도의 일정한 변화가 있는 것으로 보아 용접변수들의 적절한 선택에 따라 용접의 성능조절이 가능함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의 학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (C-D-2014-0183)

REFERENCES

- [1] J. H. Lee, T. H. Kim, M. Y. Lee, I. T. Jin, 2010, A Study on Welding Strength of Extrusion-Riveting Process of Aluminum Plates, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 8, pp. 460~467.
- [2] L. Shang, T. H. Kim, I. T. Jin, 2012, A Shaving Shear-Welding Process for Overlapped Aluminum Plates, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 8, pp. 467~472.
- [3] Y. S. Kim, 2012, Future of the Friction Stir Spot Welding Technology for Non-Ferrous Metal, J. of Kor. Welding Joining Soc., Vol. 30, No. 3, pp. 202~212
- [4] D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Pan, J. Chen, Z. Feng, M. L. Santella, 2006, Structure-properties Relations in Spot Friction Welded (Also Known as Friction Stir Spot Welded) 6111 Aluminum, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 441, No. 1, pp. 79~96.
- [5] H. Badarinarayan, Y. Shi, X. Li, K. Okamoto, 2009, Effect of Tool Geometry on Hook Formation and Static Strength of Friction Stir Spot Welded Aluminum 5754-O Sheets, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 49, No. 11, pp. 814~823.
- [6] I. T. Jin, 2013, Electric Resistance Heated Friction Stir Welding, Korea Patent, 10-1331735.

[7] S. J. Lee, I. T. Jin, 2013, A Study of the Weld Strength of Extrusion Spot Welding Using Electrodes Heated by Electric Resistance, Trans. Mater. Process, Vol. 22, No. 4, pp. 189~195.

[8] S. J. Lee, T. H. Kim, I. T. Jin, 2014, A Study on the Effect of Pin Height on Weld Strength in Extrusion Spot Welding of Aluminum Plates, Trans. Mater. Process, Vol. 23, No. 5, pp. 282~288.