



C1020/Al6063 이중 합금의 맞대기 마찰교반접합의 접합특성

고영봉^{a*}, 최준웅^b, 조제형^b, 김현우^b, 박경채^c

^a한국화학시험연구원, ^b중소조선연구원, ^c경북대학교 금속신소재공학과

The Joining Characteristics of Butt Friction Stir Welded C1020/Al6063

Young-Bong Ko^{a*}, Jun-Woong Choi^b, Je-Hyoung Cho^b,
Hyen-Woo Kim^b, Park Kyeong Chae^c

^aKorea Testing & Research Institute

^bResearch Institute of Medium & Small Shipbuilding

^cMaterials Science and Metallurgical Engineering of Kyungpook National University

(Received October 7, 2009 ; revised October 28, 2009 ; accepted October 30, 2009)

Abstract

The Friction Stir Welding (FSW) has mainly been used for making butt joints in Al alloys. Development of FSW would expand the number of applications. The FSW is a relatively solid-state joining process. This study possibility of a welding between C1020 and Al6063 by means of FSW has fundamentally clarified. The primary process parameters, such as a rotating speed, rotating direction of tool and off-set of pin periphery from materials interface were optimize, respectively.

Keywords: Friction stir welding, Rotating speed, Off-set of pin, Al6063

1. 서 론

마찰교반접합(Friction Stir Welding : FSW)이라는 소성유동을 이용한 고상 접합법의 개발로 저용접 금속의 접합이 가능해졌을 뿐만 아니라, 접합부의 성능이 비약적으로 향상되었다¹⁾. 이와 관련하여 현재 많은 연구가 진행되고, 그 결과가 계속 보고되고 있다.

주로 자동차 산업, 항공 우주 산업 등의 분야에서 수송기기의 경량화 및 신뢰성의 향상을 목적으로 Al, Ti, Mg 등 동종금속재료의 마찰교반접합이 활발히 진행되고 있으나 이종간 접합에서는 활발한 연구가 진행되지 못하고 있다²⁻⁴⁾. 최근, 선박 및 자동차용 열교환기인 냉각기와 방열기의 재질로 알루미늄 합금의 사용은 증가했지만, 열교환기의 부재 중 일부는 구리 및 구리합금 등이 사용되고 있다.

특히, 냉방 및 난방용 열교환기의 재질은 경제성 및 경량화를 목적으로 동 및 동합금재료부터 알루미늄 합금재료 점차 대체되고 있다.

그리고 중전기기의 핵심재료인 구리대신 알루미늄 합금을 적용한 부스덕트, 경량복합 부스바 (Economic Light Copper: ELC)가 연구 되었으나, 기술적 노하우로 인해 대체 기술개발이 필요하다. 그러므로 마찰교반접합 공정을 이용한 구리와 알루미늄 합금의 이중접합을 검토하고자 한다⁵⁻⁷⁾.

본 연구에서는 C1020/Al6063 이중접합에서 회전 속도 및 핀(pin)의 삽입 위치에 따른 맞대기 접합의 소성유동 및 기계적 성질을 검토하였다.

2. 실 험

2.1 사용재료

본 실험에서는 무산소동인 C1020과 열처리형 합금인 Al6063을 사용하였으며, 합금의 조성은 표 1

*Corresponding author. E-mail : kobong@ktr.or.kr

Table 1. Chemical composition of material (wt%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A6063	0.46	0.28	0.05	0.03	0.55	0.02	0.02	0.02	Bal.
C1020			99.97						

Table 2. Mechanical properties of alloys

	Tensile strength (MPa)	Hardness (Hv)
A6063-T6	240	90
C1020- $\frac{1}{4}$ H	225	90

에 정리하였고 표 2는 기계적 성질을 나타내었다. 시편 제작은 A16063과 C1020판재를 아세톤으로 초음파 세척한 후 53(L)×100(W)×4(T) mm³으로 가공하였다.

2.2 실험방법

접합 장비는 자체 제작하였으며 회전속도 - 최대 2100 rpm, 이송속도 - 최대 2000 mm/min, 하중 - 최대 15 kN까지 제어가 가능하다. 숄더(shoulder)와 핀의 직경은 각각 15 mm, 5 mm이며 핀의 길이는 3.5 mm인 원통형으로 제작하였고, 접합 툴(tool)의 재질은 초경소재를 사용하였다.

그림 1은 마찰교반접합의 개략도이고, 접합 조건은 표 3에 나타내었다. 재료 측면에 백킹 플레이트

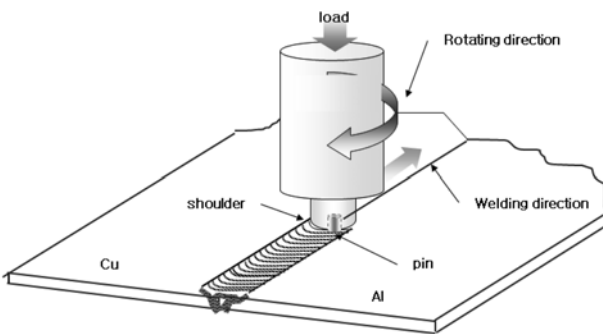


Fig. 1. Schematic of friction stir welding process.

(backing plate)를 제작하여 핀 삽입시 걸리는 하중에 의해 시편의 밀림현상을 방지하였다. 이때 마찰교반접합의 조건으로서 재하하중을 9.8 kN, 시편과 툴 사이의 각도를 3°로 고정하였고 접합속도(Joining Speed)를 100 mm/min으로 고정하였고, 회전속도(Rotating Speed)와 삽입 핀의 위치를 변수로 하였다.

그림 2는 삽입된 핀의 모식도를 나타내었다. 계면과 핀 중심간의 거리가 “+”일수록 핀 중심이 구리 쪽으로 치우쳐서 접합하였으며, “-” 일수록 알루미늄 쪽으로 치우쳐서 접합하였다. 핀의 삽입 위치에 따른 접합계면과 비드면의 조직을 실측현미경과 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy: SEM)으로 관찰하였다. 그리고 물질 이동을 알아보기 위해 전자현미분석기(Electron Probe Micro Analyzer: EPMA)를 이용하여 구리, 알루미늄의 분포를 통해 관찰하였다.

접합 조건에서의 접합부 특성 평가를 위해 시험

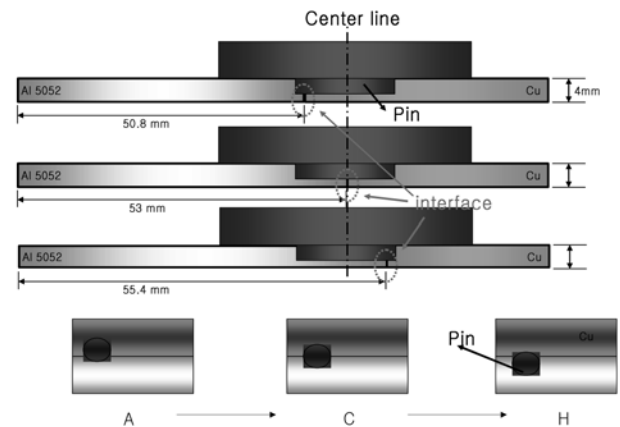


Fig. 2. Schematic of Off-set pin.

Table 3. Friction stir welded conditions

Specimen No	Off set distance between interface and tool center (mm)	Rotating speed (rpm)	Tool force (kN)	Tool tilt (°)	Welding speed (mm/min)
A	+2.2	1400 1600 1800 2000	9.8	3	100
B	+2.0				
C	0				
D	-2.0				
E	-2.2				
F	-2.3				
G	-2.4				
H	-2.5				

속도 $1.6 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ 로 인장시험을 수행하였으며, 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 하중 200 g, 압입시간 10초로 영역별 경도를 측정하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 회전방향과 핀 위치에 따른 접합성에 미치는 영향

일반적인 구리와 알루미늄의 이종접합에서 맞대기 마찰교반접합시에 핀의 파손 및 마모가 쉽게 발생하고, 건전한 접합성을 갖는 조건은 매우 까다롭다. 이종간 맞대기 접합시 중요한 변수로서 회전방향, 핀의 위치, 회전속도 등이 있다.

그림 3은 틀의 회전방향이 시계방향으로 회전시키고 접합했을 때 접합비드면의 사진과 모식도이고 그림 4는 틀 이동방향은 동일하지만 틀 회전방향은 반시계방향으로 접합한 비드면 사진과 모식도이다.

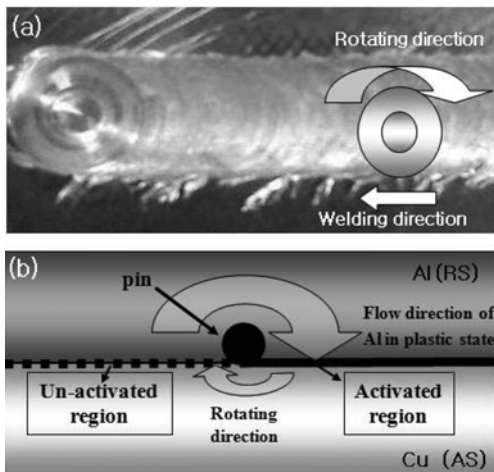


Fig. 3. (a) Appearances of bead, (b) Schematic of material flow at clockwise rotating of pin.

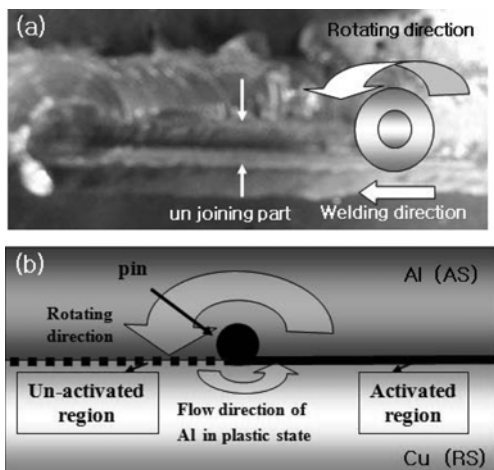


Fig. 4. (a) Appearances of bead, (b) Schematic of material flow at counterclockwise rotating of pin.

그림 3의 비드면은 일정한 폭과 결함은 없었으나, 그림 4의 비드면에는 접합되지 않은 곳이 관찰되었다. 이것은 이종소재를 사용하여 마찰교반접합 할 때는 접합 위치에 따라 접합성이 달라지는데, 소성 유동이 우수한 알루미늄을 뒷부분(Retreating Side: RS)으로 소성유동이 나쁜 구리를 앞부분(Advancing Side: AS)으로 위치함으로써 이는 앞부분이 틀의 회전방향과 접합방향이 동일한 운동으로 인해 교반효과가 증가되었기 때문이라고 사료된다⁸⁾.

또한 알루미늄 모재일부가 구리 모재쪽으로 날림(flash) 형태의 결함이 발생한 것으로 보아 틀의 고속 회전과 저속 접합 속도로 인해 입열량이 증가되고 plunge depth도 증가한 것으로 판단된다⁹⁾. 그러나, 이종소재의 접합이므로 용융점이 낮은 알루미늄보다 용융점이 높은 구리의 소성유동을 높이기 위해 입열량의 증가해야 접합이 가능할 것으로 사료된다.

접합 후 A, B시편은 계면에서 C~H 시편에서는 모재 알루미늄에서 파단이 일어났다. 이는 A, B시편은 마찰열로 인해 구리가 알루미늄 쪽으로 교반이 아닌 밀림현상에 의해 완전한 접합이 일어나지 않았기 때문이고 C~H 시편에서는 경질재료내의 핀에 의해 강제적 교반이 일어나서 접합성이 우수할 것으로 판단된다.

3.2 접합부 기계적 성질 및 소성유동

회전속도와 접합위치 따른 인장강도를 그림 5에 나타내었다. 여기에서 시편 G의 회전속도 1600, 1800 rpm에서 접합강도가 가장 높았다. 시편 A~C는 접합계면에서 파단이 일어났고, 시편 D~H는 알루미늄 쪽에서 파단되었다. 회전속도가 증가함에 따라 발열량이 증가하여 소성 유동성이 우수하여 접

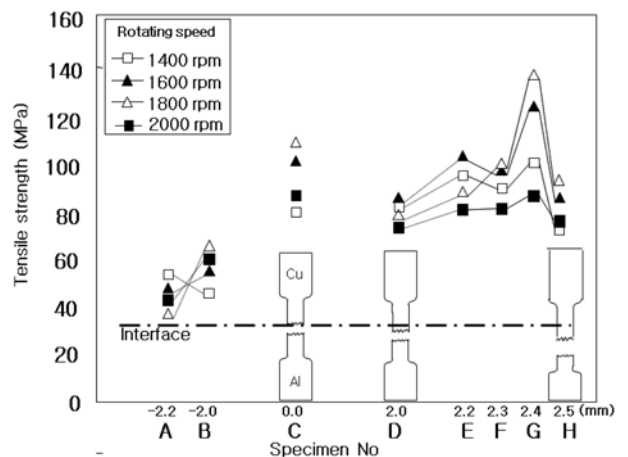


Fig. 5. Relationship between tensile strength of a joint and pin offset distance.

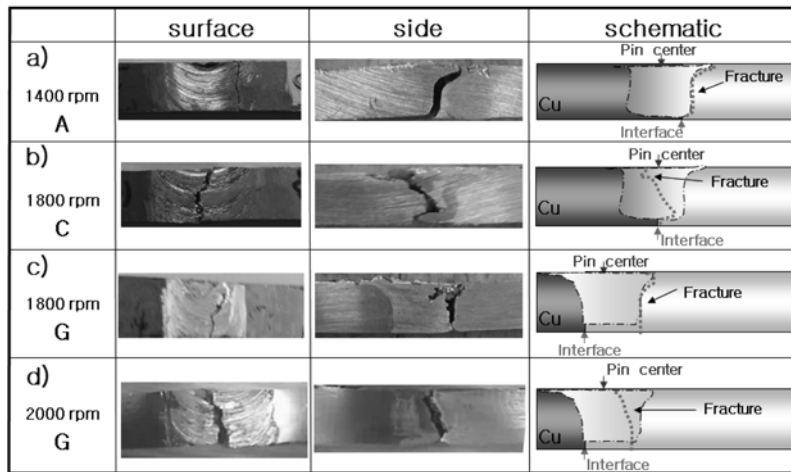


Fig. 6. Fracture appearance of joint.

합강도는 증가되었으나, 회전속도가 2000 rpm 보다 클 경우 재료의 과도한 연화를 일으켜 접합강도는 감소한 것으로 사료된다.

그림 6은 회전속도와 접합위치에 따른 인장 파단면 형상과 모식도이다. 그림 6(a)는 핀의 위치가 구리 쪽에서 알루미늄 방향으로 0.2 mm 삽입된 조건인 A에서 회전속도 1400 rpm일 때의 인장 파단면 형상이며, 계면에서 파단이 발생했다. 이는 접합 계면의 변형에 의한 미접합면의 증가로 핀이 지나는 경계 지점에서 파단된 것으로 판단된다. 그림 6(b)는 계면과 핀의 중심부가 같은 조건인 C에서 1800 rpm일 때의 인장 파단면 형상이다. 접합 중심부에서 파단이 일어났고, 이것은 구리의 소성유동은 많았으나 알루미늄의 채워짐이 부족하여 생긴 공공들에 의한 것으로 사료된다. 그림 6(c)는 핀의 대부분이 알루미늄 쪽에서 구리방향으로 0.1 mm에 삽입된 조건인 G에서 회전속도 1800 rpm일 때의 인장 파단면 형상이며, 파단은 열기계적 영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone: TMAZ)에서 파단이 일어났다. 이는 이중간 접합시 가장 건전한 파단으

로 판단된다. 그림 6(d) 핀과 구리 계면에서의 접합 조건인 G에서 회전속도가 2000 rpm일 때 인장파단면 형상이다. 적은 소성유동과 고회전으로 인한 알루미늄 모재의 과연화로 인해 외부로 방출되어 내부결함이 발생하였고, 이로 인한 파단이 일어난 것으로 사료된다.

인장강도 결과 중 접합위치에 따른 회전속도 1800 rpm, 시편 G의 경우에서 최고 인장강도(140 MPa)가 나타났으므로 앞으로 회전속도 1800 rpm에서의 소성유동, 경도, 미세조직 등을 검토하고자 한다.

그림 7은 1800 rpm에서 접합위치에 따른 마크로 사진을 나타내었다. 그림 8은 마찰교반접합시 소성유동의 모식도이다¹⁰. 고상상태에서 접합이 이루어지므로 접합부의 형상은 일반적인 용접부와 같은 조직은 형성되지 않는다. 접합부의 형상은 접합 비드면의 면적이 아래 부분보다 넓게 나타나다가 중간부분은 좁아지며, 하단부에서 다시 넓어지는 형상을 하고 있다. 이는 고속회전에 의한 접합부의 윗면이 핀에 의한 소성변형과 마찰열을 받고, 솔더의 직접적인 접촉으로 인한 마찰력이 더해져 아래 부

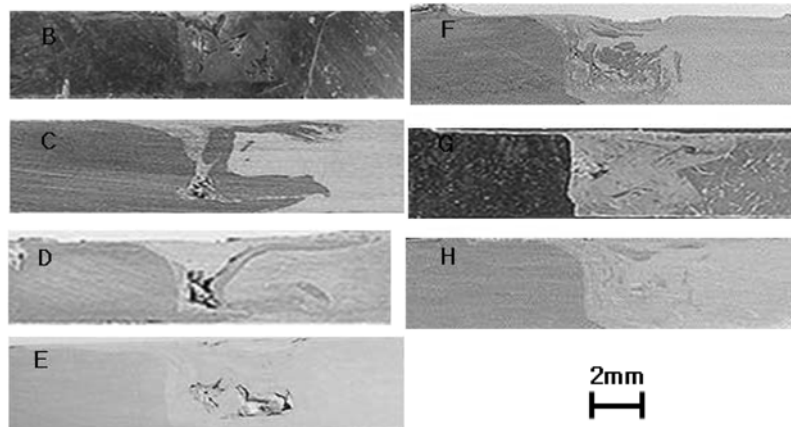


Fig. 7. Joint bead shape of cross section macrostructure (SN : B~H at 1800 rpm).

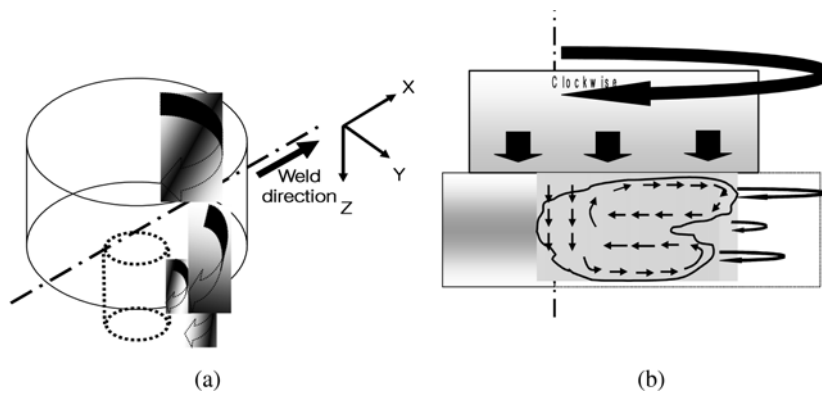


Fig. 8. Plastic flow of joint: (a) Rotating tool schematic diameter, (b) Flow joint.

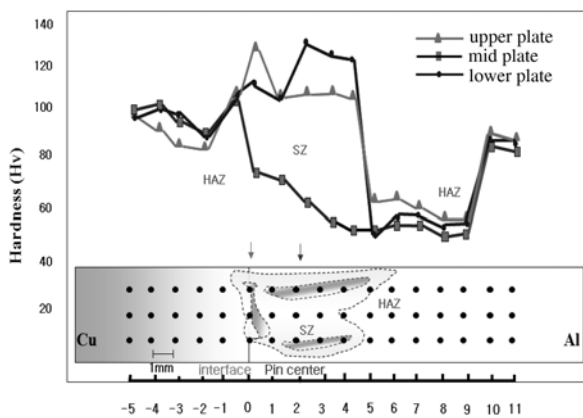


Fig. 9. Hardness distribution of friction stir welding across to top, mid and bottom (SN : G, 1800 rpm).

분 보다 더 많은 입열량을 받기 때문이다. 접합계면에서는 급격이 가파른 모습을 하는 것은 구리보다 알루미늄이 마찰열에 의한 영향이 많아 수직인 형상이고, 하부에서는 핀과 솔더의 마찰열과 교반에 의한 영향으로 하부에서도 많은 양의 소성유동을 일으키지만 중심부는 교반의 상부와 하부에 비해 상대적으로 적은양의 소성유동이 일어난 것으로 사료된다.

그림 9는 각 접합 변수중 인장강도 값이 가장 높은 시편 G의 1800 rpm에서 접합부의 상부, 중간부, 하부를 접합부 거리에 따른 경도를 나타내었다. 상부와 하부의 접합부는 경도가 높으나 중간부는 모재 구리와 알루미늄 경도의 중간값을 나타내었다. 이것은 상부와 하부는 소성유동이 매우 크게 됨으로 인해 구리와 알루미늄 입자들의 분포가 많이 되어서 경도가 높아졌으나 중간부는 소성유동이 상부와 하부에 비해 구리와 알루미늄 입자들의 분포도가 적어 경도가 낮아진 것으로 사료된다.

3.3 접합부 조직관찰

그림 10은 EPMA를 이용하여 시편 G의 1800

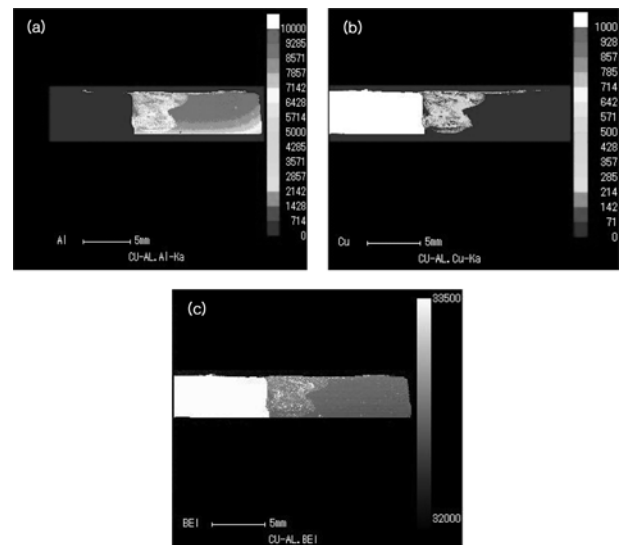


Fig. 10. EPMA overview of the cross-section. (a) Al-Ka, (b) Cu-Ka, (c) Cu-Al (SN : G, 1800 rpm).

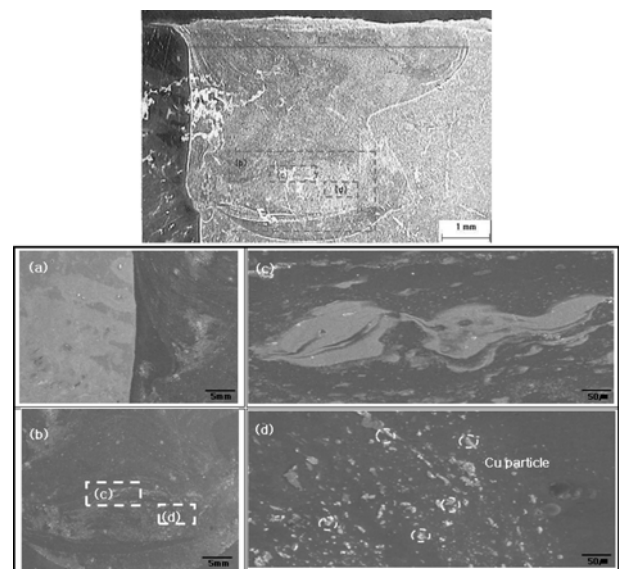


Fig. 11. Macroscopic and SEM overview of the cross-section (a) interface, (b),(c),(d) bottom (SN : G, 1800 rpm).

rpm에서 접합부의 소성유동과 각 미립자들의 분포를 관찰하여 그림 9에 대해 서술한 내용을 증명하였다. 그림 10(a)는 알루미늄의 분포를 나타내었고, 그림 10(b)는 구리의 분포를 나타내었고, 그림 10(c)는 구리와 알루미늄의 혼합분포를 가시적으로 나타내었다. 알루미늄 쪽으로 구리의 입자가 혼입되어 있는 것으로 나타났다.

그림 11은 SEM을 이용하여 시편 G의 1800 rpm에서 단면형상을 관찰한 것이다. 구리 입자들의 분포가 평균 5.91 mm로서 가장 넓은 분포를 보였다. 핀의 직경보다 더 많이 분포 된 것은 고속회전으로 인하여 핀의 떨림 현상과 이송 시 알루미늄과 구리의 변형 저항으로 인해 그 폭이 넓어진 것으로 판단된다¹¹⁾. 접합 계면과 접합 하단부에서도 구리 입자들을 관찰할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰교반접합을 통해 C1020/Al6063접합의 가능성을 검토하였다. 근본적인 접합 변수는 틀의 회전속도와 회전방향, 계면에서부터 핀의 삽입위치 등이다. 얻어진 결과는 아래와 같다.

1) 소성유동이 우수한 알루미늄을 뒷부분(Retreating Side: RS)으로 소성유동이 나쁜 구리를 앞부분(Advancing Side: AS)으로 위치함으로써 접합이 가능하였다.

2) 핀의 중심과 구리/알루미늄 계면 사이의 거리가 구리 측로 0.1 mm인 경우가 가장 접합성이 양호했다. 이음부는 알루미늄 내에서 파단되었다. 접합강도는 140 MPa로 최대값을 나타내었다. 알루미늄 모재 경도의 60%에 상당 했다.

3) 열처리형 Al6063은 마찰열에 의한 현저한 경도 차이가 발생했다. 이는 기지내 미세한 제2상 입자가 조밀하게 분산 석출되어 강화되지만, 접합시 회전 틀에 의한 마찰열로 제2상이 Al6063기지 속으로 재고용되면서 경도가 감소한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 장웅성, 대한용접학회, 18-6 (2000) 704.
2. T. Shinoda, J. Jpn. weld. Soc., 67 (1998) 326.
3. C. J. Dawes, Proceedings of 6th Int'l Symp. Jpn. Weld. Soc., (1996) 60.
4. F. R. Collins, Welding J., 37 (1964) 443.
5. D. Lohwasser, Second International Symposium on FSW, Gothenburg, Sweden (2000).
6. G. Liu, L. E. Murr, Scripta Mater., 37, (1997) 355.
7. O. T. Midling, First International Symposium on FSW, Thousand Oaks, USA, (1999).
8. J.-C. Park, 한국표면공학회지 42(1) (2009) 13.
9. Radovan Kovacevic, JMEPEG 16 (2007) 477.
10. William J. Arbegast, Scripta Materialia, 58 (2008) 372.
11. J. H. Hattel, Acta Materialia, 54(4) (2006) 1199.