

접치기 마찰교반접합 된 Al6061/HT590 합금의 기계적 특성 평가

김 은 혜* · 이 광 진** · 송 국 현*,†

*한국생산기술연구원 비철금속소재부품그룹

**한국생산기술연구원 융복합부품·농기계그룹

Evaluation of mechanical properties on friction stir lap jointed Al6061/HT590 alloys

Eun-Hye Kim*, Kwang-Jin Lee** and Kuk-Hyun Song*,†

*Non-Ferrous and Components R&BD Gangwon Regional Division, Korea Institute of Industrial Technology, Gangneung 210-340, Korea

**Convergence Components & Agricultural Machinery Application Group, Jeonbuk Regional Division, Korea Institute of Industrial Technology, Jeonju 561-202, Korea

†Corresponding author : skhyun7@kitech.re.kr

(Received April 14, 2015 ; Accepted April 24, 2015)

Abstract

This study was carried out to evaluate mechanical properties of the jointed Al6061/HT590 alloys by friction stir welding (FSW). FSW was conducted under the conditions with tool rotating speed of 500 RPM and traveling speed of 300 mm/min., where Ar gas was introduced to prevent the materials from corrosion during the welding process. Electron back-scattering diffraction (EBSD) was used to characterize microstructures such as grain size, misorientation angle and crystal orientation. Evolution of intermetallic compounds in Al6061 during the process were examined in terms of morphology, size and aspect ratio at three distinct zones Al base material, heat affected zone and stir zone, where transmission electron microscope (TEM) was used. It was revealed that FSW gave rise to refinement of grains as well as growth of intermetallic compounds in Al6061. The morphological changes of intermetallic compounds exerted an influence on mechanical properties, resulting in occurrence of fracture in the part of the base material instead of the jointed parts (heat affected zone and stir zone). This study systematically evaluated the microstructural evolutions during the FSW for joining Al6061 with HT590 and their effect on mechanical properties

Key Words : Friction stir lap joint, Al6061/HT590, Microstructure, Electron back-scattering diffraction (EBSD), Transmission electron microscope (TEM), Mechanical properties

1. 서 론

Al6061 합금은 석출강화형 합금으로서, 인성, 가공성이 우수할 뿐만 아니라 내부식성이 뛰어나 자동차, 선박, 기계부품 등의 부품소재로 주로 사용되고 있다¹⁾. 또한, 구조용 소재로 주로 사용되어 왔던 철계(Fe-base) 소재에 비해 비중이 1/3 수준이기 때문에, 부품의 경량화 소재로서 각광을 받고 있으며, 그 활용범위가 점진적으로 증가되고 있는 추세이다. 특히, 자동차

연비향상을 통한 탄소배출 저감을 위하여, 국내·외 자동차 메이커들은 차체와 부품 경량화를 목적으로 알루미늄 합금을 채택하고 있으며, 이에 대한 연구개발을 활발히 진행하고 있다. 그 중 알루미늄합금과 철강재료 간의 이종재료 접합기술은 차체와 새시 경량화에 관심이 집중되어 있으며, 국외 유명 완성차 메이커들은 이미 여러 부품에 대하여 상용화에 성공하였다. 그러나 국내의 경우, 경량화에 대한 연구는 꾸준히 수행되어 왔으나, 상용화 단계에 이른 결과는 아직까지 부족한 실정이다.

Table 1 Details of chemical composition of materials

Material	Chemical composition(Wt%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al6061	0.60	0.66	0.35	0.08	1.22	0.07	0.04	0.02	Bal.
HT590	C		Si		Mn		P		Fe
	0.08		0.23		1.55		0.03		Bal.

마찰교반접합은 고체상태에서 접합할 수 있는 신개념의 프로세스로서, 기존의 gas tungsten arc welding, laser welding, electron beam welding 등의 용융용접과 비교하여 결함발생이 적은 장점이 있다²⁻³⁾. 또한, 가압하중, 톨 회전속도와 이송속도의 제어에 의해 접합재의 미세조직 전개양상을 제어할 수 있으며, 이를 통해 기계적 물성의 향상을 촉진시킬 수 있다. 특히, 이종재료 접합 시 마찰교반접합을 도입할 경우, 종래의 용융용접에서 발생하는 결함들을 억제할 수 있을 뿐만 아니라, 결정립 미세화를 동반한 우수한 기계적 성질을 확보할 수 있기 때문에, 다양한 분야에서 연구개발이 진행되고 있다⁴⁻⁶⁾. 그 중 자동차 차예와 새시에 경량소재 도입 시 용접공정이 필수적으로 요구되는데, 고체상태에서 접합할 수 있는 마찰교반접합의 도입이 적극 추천되고 있다. 따라서 이 연구는 자동차 경량화의 관점에서 Al6061(경량소재)과 HT590(고장력강) 합금을 채택하여, 겹치기 마찰교반접합을 도입하였고, 접합재의 미세조직 발달에 근거하여 기계적 특성에 미치는 영향을 평가하고자 수행되었다.

2. 실험 방법

2.1 이종재료의 마찰교반접합

이 연구에 사용된 소재는 석출강화형 합금인 Al6061 합금을 상부재료, HT590 합금을 하부재료로 사용하였고, 합금의 조성을 표 1에 나타내었다. 마찰교반접합을 위하여 두 소재는 120 mm(w) × 150 mm(l) × 1 mm(t) 크기로 제단 되었으며, 두 판재를 40 mm 겹치게 하여 마찰교반접합이 수행되었다. 접합은 톨 압입하중 19 kN, 회전속도 500 RPM과 이송속도 300 mm/min의 조건으로 수행되었고, shoulder 직경 15 mm, probe 직경 6 mm와 길이 2 mm 크기를 갖는 WC-Co 톨이 사용되었다. 또한, 접합 시 시편표면과 내부의 산화방지를 위하여, 아르곤 가스를 충분히 흘려주며 마찰교반접합을 수행하였다.

2.2 조직 관찰

마찰교반접합 된 소재의 접합계면을 관찰하기 위해, 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 에너지분산형분광계(energy dispersive spectroscopy, EDS)를 도입하였고, 두 소재의 계면에서 발현되는 접합성을 평가하였다. 또한, 모재와 접합부의 결정립 특성분포를 통한 동적재결정 양상을 평가하기 위하여, 전자후방산란회절(electron back-scattering diffraction, EBSD)법이 도입되었다. 이를 위해 시편은 기계적 연마를 통하여 경면을 획득하였고, FEG-SEM에 장착된 TSL-OIM을 활용하여 분석되었다. 접합된 소재의 금속간화합물 형성을 관찰하기 위하여, 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)을 이용한 분석이 도입되었고, 이를 위해 3 mm disc 형태의 시험편이 제작된 후, 기계적 연마와 전해연마를 수행하여 분석 시험편이 제작되었다.

2.3 물성 평가

마찰교반접합 된 소재의 기계적 물성을 평가하기 위하여, Vickers 경도시험과 인장시험이 도입되었다. 경도시험을 측정하기 위하여, 시편은 20 mm(l) × 2 mm(t)의 크기로 절단되었고, 기계적 연마를 통하여 경면을 얻은 후 접합방향의 횡단면에 대하여 500 μm간격으로 측정하였다. 이 때 사용된 장비는 Mitsutoyo HM-211이었으며, 측정은 다이아몬드 압입자를 0.1 N의 하중으로 10초간 압입하는 방식을 채택하였다. 인장시험의 경우, 표점거리 15 mm를 갖는 인장시험편이 방진가공으로 제작되었으며, INSTRON사의 기계식 만능시험기(3382 Model)을 이용하여 0.72 mm/min의 변형속도로 인장하였다.

3. 실험 결과

3.1 접합재의 거시조직

Al6061과 HT590 합금 간의 접합계면이 SEM을 통



Fig. 1 Cross sectional SEM micrograph of welded materials

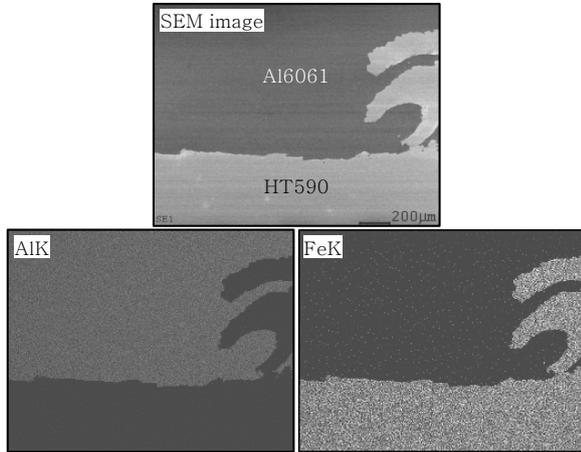


Fig. 2 EDS results of the hook formed at joint interface between the Al6061 and HT590

해 분석되었고, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 실험 결과, 두 소재 간의 계면은 접합 시 발생하는 crack, void, segregation 등의 결함이 없이 건전하게 접합되었다. 그러나 600 μm정도 크기의 hook이 후진측에서 Al6061 소재로부터 HT590 소재로 소성유동 streamline 형태로 형성되었다. 이에 대해 EDS를 이용하여 분석한 결과(Fig. 2), hook은 Fe 성분으로 확인됨에 따라, HT590 소재로부터 형성된 것임을 알 수 있었다.

3.2 접합재의 EBSD 평가

Al60601 합금의 모재와 마찰교반접합부의 결정립 특성분포가 EBSD로 분석되었고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 초기 모재는 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같

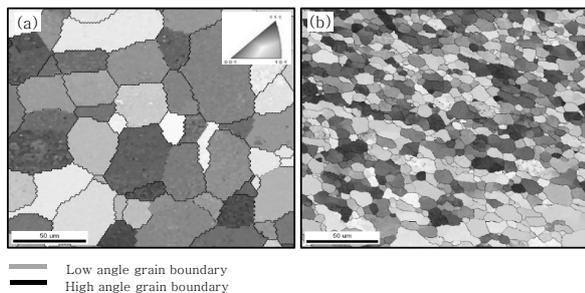


Fig. 3 Orientation image maps of friction stir welded Al6061 acquired by EBSD; (a) base material and (b) stir zone

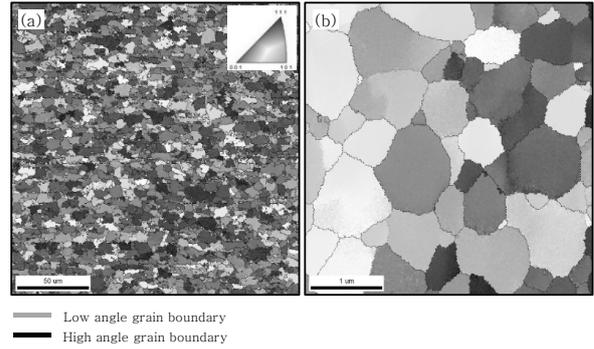


Fig. 4 Orientation image maps of friction stir welded HT590 acquired by EBSD; (a) base material and (b) stir zone

이 10 μm에서 60 μm크기의 결정립들로 분포되어 있었으며, 평균 결정립 크기는 42 μm로 확인되었다. 이에 대하여 마찰교반접합을 수행한 결과, 교반부는 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 2 μm에서 20 μm크기의 비교적 균일한 등축정들로 분포되어 있었으며, 평균 결정립 크기가 11 μm로 나타났다. 한편, 방위분포의 경우, 모재가 <001>//ND 방향으로 발달된 반면, 교반부는 <111> //ND 방향으로 발달된 양상을 나타내었다.

HT590 합금의 결정립 특성분포 역시 EBSD를 통하여 분석되었고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. HT590 모재는 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 3 μm에서 10 μm 사이의 결정립 분포를 갖고 있었으며, 평균 결정립 크기가 6 μm로 확인되었다. 이에 대하여 마찰교반접합을 적용한 결과, 교반부는 0.1 μm에서 1 μm크기의 등축정들로 구성되어 있었으며, 평균 결정립 크기가 0.75 μm로 나타남으로써, 모재보다 현저하게 미세화 되었다. 또한 HT590 합금의 방위 분포의 경우, Fig. 4(a)와 (b)에 나타난 바와 같이, 모재는 <111>//ND 방향으로 발달 되었으나, 교반부는 <101>//ND 방향으로 발달되는 양상을 나타내었다.

마찰교반접합 된 소재의 동적재결정 양상을 평가하기 위하여, 입계어긋남각분포가 EBSD로 분석되었고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Al 6061 합금의 교반부는 Fig. 5(a)에 도시된 바와 같이 전체 입계 중 15° 이상의 고경각 입계가 87% 이상을 나타내었다. HT590 합금 또한 Fig. 5(b)에 도시된 바와 같이, 전체 입계 중 고경각 입계가 93% 이상을 차지함으로써, Al6061 합금과 비슷한 양상을 나타내었다. 이를 통해 두 소재 모두 접합과정 중 건전하게 동적재결정이 완결되었음을 확인하였다.

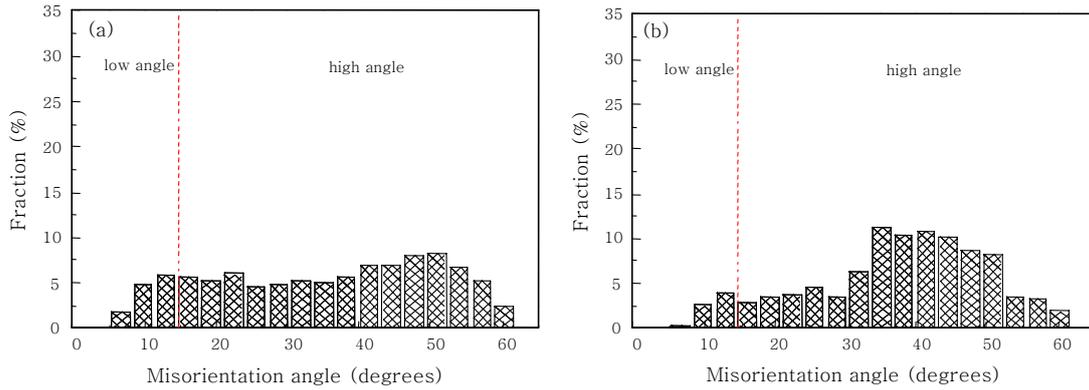


Fig. 5 Misorientation angle distributions of friction stir welded Al6061 and HT590 acquired by EBSD; (a) stir zone of Al6061 and (b) stir zone of HT590

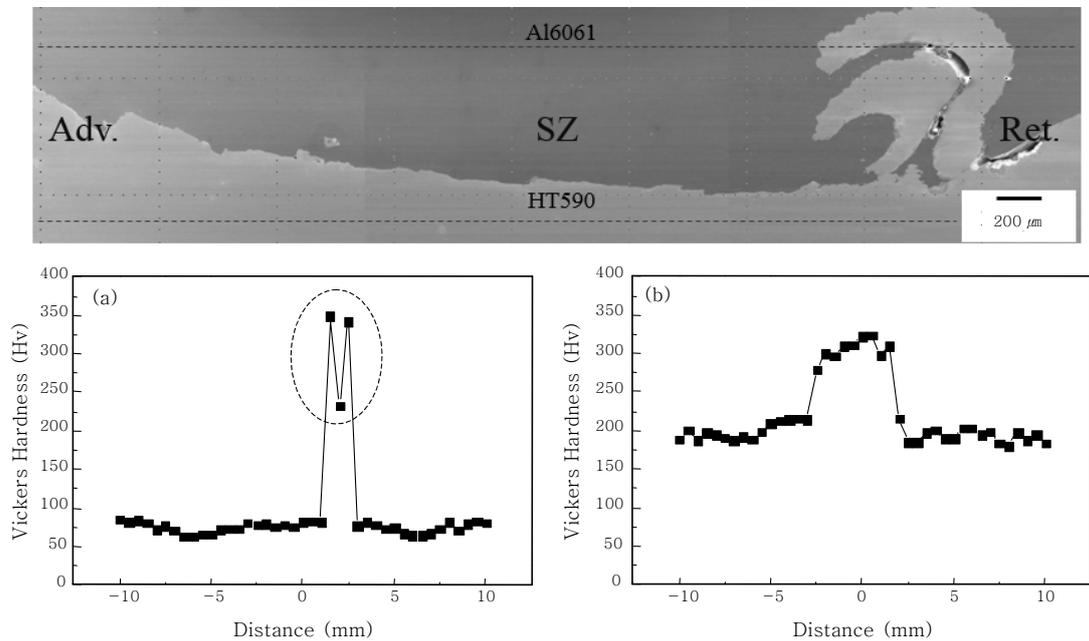


Fig. 6 Vickers hardness distributions along the cross sectional direction of dissimilar friction stir welded dissimilar materials; (a) Al6061 and (b) HT590

3.3 기계적 물성 평가

마찰교반접합 된 소재의 경도분포 전개양상을 평가하기 위해 Vickers 경도시험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Al6061의 모재부는 75 ~ 88 Hv 정도의 경도분포를 나타내었으나, 교반부는 50 ~ 82 Hv 정도의 경도분포를 나타냄으로써, 다소 감소된 양상을 나타내었다. 특히 후진측에서 일부 200 Hv 이상의 높은 경도값을 나타내긴 하였으나, 이는 후진측에 형성된 hook의 영향으로 확인되었다. HT590의 경우, 모재의 경도값이 180 ~ 205 Hv 정도의 분포를 나타내었으나, 교반부는 모재 보다 현저히 높은 275 ~

320 Hv의 정도의 경도분포를 나타내었다.

마찰교반접합 된 소재의 인장특성을 평가하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 인장시험편의 외관을 분석한 결과, Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이, Al6061과 HT590의 접합부 파단이 아닌 Al6061의 모재부에서 파단되는 양상을 나타내었다. 인장특성을 평가한 결과, Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이, Al6061 모재의 항복강도와 인장강도는 각각 217 MPa와 352 MPa로 나타났고, 연신율은 32%로 확인되었다. 이에 대하여 마찰교반접합을 수행한 결과, 항복강도와 인장강도는 모재 보다 다소 감소한 195 MPa와 263 MPa로 나타났으며, 연신율은 현저히 감소한 5%로 나타났다.

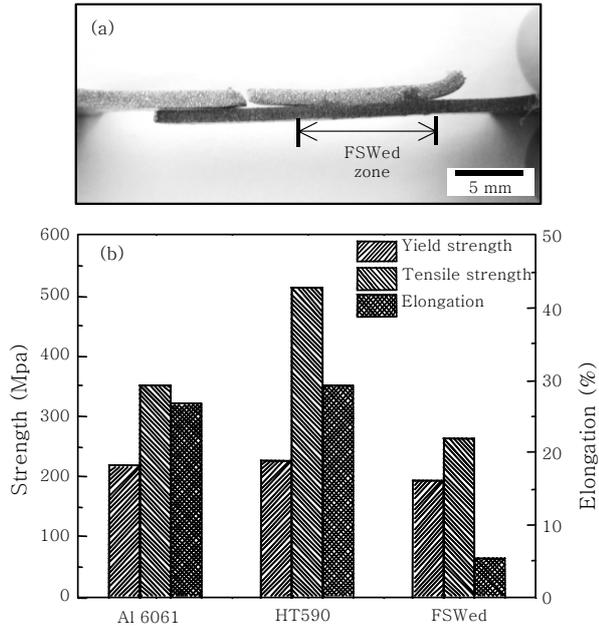


Fig. 7 (a) Top views of the specimen subjected to the tensile test and (b) tensile properties of base materials and friction stir welded material

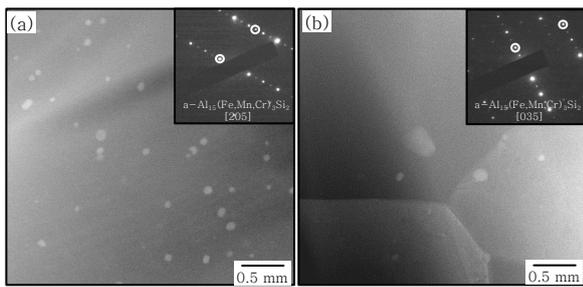


Fig. 8 TEM image of Al6061; (a) initial base material of Al6061 and (b) friction stir welded base material of Al6061

3.4 TEM 분석 평가

Al6061의 모재부에서 발견된 금속간화합물의 전개양상이 TEM을 통해 분석되었고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Al6061의 초기 모재는 Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이, 대략 104.6 nm 정도 크기의 금속간화합물 [α -Al₁₅(Fe, Mn, Cr)₃Si₂, Simple cubic]이 구상으로 분포되어 있었으며, 기지에 대한 금속간화합물의 평균 면밀도가 $2.026 \times 10^8 \text{ cm}^2$ 를 나타내었다. 마찰교반접합을 수행한 후 모재에 대하여 분석한 결과, Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이, 초기 보다 비대하게 성장한 금속간 화합물(α -Al₁₅(Fe, Mn, Cr)₃Si₂, Simple cubic)이 분포하고 있었다. 특히, 0.5 μm 이상의 크기를 갖는 금속간화합물이 분포되었고, 초기 모재에 비해 비교적 불균질한 분포를 나타내었다. 이 때 금속간화합물의 평

균 면밀도는 $7.129 \times 10^7 \text{ cm}^2$ 로 나타남으로써, 모재에 비해 현저히 감소된 것으로 확인되었다.

4. 실험 고찰

4.1 마찰교반접합

마찰교반접합의 도입으로 두 소재가 건전하게 접합되었다. 마찰교반접합은 고상접합 프로세스로서 용융용접에 비해 입열량이 현저하게 낮은 특징이 있다. 이와 같은 특징은 접합재의 결함발생을 억제할 수 있을 뿐만 아니라, 결정립 미세화에 기초한 미세조직 발달에 큰 효과가 있는 것으로 보고된 바 있다⁷⁾. 이 연구의 결과에서도 알 수 있듯이, 두 소재의 접합계면에서 delamination, crack, blow hole 등의 결함발생이 없이 건전하게 접합된 양상을 나타내었다(Fig. 1). 다만, 접합재의 후진측에서 hook이 형성되었고, 두 소재간의 소성유동 차이에 의해 hook의 계면에서 일부 hole이 관찰되었다. 이와 같은 현상은 마찰교반접합 시 가압되는 툴 압입하중에 의해 형성되는 side effect로 보고된 바 있으며, 오히려 기계적 물성에 효과가 있는 것으로 알려져 있다⁸⁾.

4.2 결정립 미세화

마찰교반접합은 교반부의 결정립을 현저하게 미세화시켰다. 초기 Al6061 합금과 HT590합금의 모재는 각각 42 μm 와 6 μm 의 결정립 크기를 나타내었으나, 마찰교반접합 된 교반부는 각각 11 μm 와 0.75 μm 로 현저히 미세화 되었다(Fig. 3과 4). 이와 같은 교반부의 결정립 미세화는 마찰교반접합 과정 중 발생하는 동적재결정으로 설명될 수 있다. 마찰교반접합은 툴의 압입하중과 회전력으로 인하여 툴과 재료간에 마찰열($\geq 0.5 \text{ Tm}$)을 유발시키며, 접합 중 강한 소성유동이 동반되는 특징이 있다⁹⁾. 이와 같은 소성유동과 마찰열은 재료가 재결정 되기에 충분한 응력과 열을 수반하기 때문에, 교반부의 결정립이 현저히 미세화 될 수 있다.

4.3 기계적 물성 발달

마찰교반접합으로 인한 결정립 미세화는 기계적 물성의 향상을 초래하였다. HT590의 경우, 모재 대비 교반부의 경도분포가 Fig. 6에 나타난 바와 같이 60% 이상 향상되는 것으로 확인되었다. 일반적으로 재료의 물성은 결정립 크기에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 이 연구에서도 분명히 알 수 있듯이, 교반부의 현저한 결정립 미세화가 경도값의 향상에 기여한 것으로 나타났다. 특히, Fig. 5의 결과를 통해 알

수 있듯이 교반부의 결정립이 등축의 형태를 나타내고 있으며, 결정립 내 저격각 입계 분포가 없음을 통해 순수하게 결정립 크기의 영향이라는 것을 다시 한 번 뒷받침 해주고 있다.

한편, Al6061의 경우 교반부의 결정립이 모재 대비 두드러지게 미세화 되었음에도 불구하고, 경도값이 오히려 소폭 감소한 양상을 나타내었다. 또한, 마찰교반접합 된 소재의 인장강도가 263 MPa를 나타냄으로써, 모재 대비 75% 수준의 인장강도를 나타내었다. 이와 같은 물성의 감소는 Al6061 합금에서 형성된 금속간화합물로 설명될 수 있다. 이 연구에서 사용된 Al6061 합금은 석출강화형 합금으로서, 열에 의해 금속간화합물이 형성되거나 조대화 되는 특성이 있다¹¹⁾. 이 연구의 결과(Fig. 8)에서도 알 수 있듯이, 초기 모재에 비해 마찰교반접합 후 모재부의 금속간화합물이 현저하게 조대한 것을 확인할 수 있고, 그 분율 또한 감소되었음을 분명하게 알 수 있었다. 따라서, 이와 같은 물성의 감소는 Al6061 합금에서 형성된 금속간화합물의 조대화와 분율감소에서 비롯된 것이라 여겨진다.

5. 결 론

Al6061과 HT590 합금간의 접치기 마찰교반접합이 결함 없이 건전하게 수행되었다. 마찰교반접합은 두 소재의 동적재결정을 동반하였고, 이를 통해 교반부의 결정립이 모재 대비 현저하게 미세화 되었다. 이와 같은 결정립 미세화는 HT590 합금의 경도분포 향상에 직접적인 영향을 주었으나, Al6061 합금은 큰 변화를 동반하지 않았다. 특히, Al6061 합금에서 금속간화합물의 조대화와 분율감소는 초기재료 대비 인장강도의 감소를 동반하였으나, 인장 시 모재부에서 파단됨에 따라 건전하게 접합되었음을 알 수 있었다. 따라서 Al6061과 HT590 합금에 대한 접치기 마찰교반접합의 적용은 미세조직 발달을 동반한 건전한 접합성을 얻는데 효과적임을 알 수 있었다.

References

1. H.S. Bang, H.J. Kim, M.S. Go, and W.S. Chang, A Study on the Mechanical Characteristic in Al 6061 Alloys welded by Friction Stir Welding, *Journal of KWJS*, 20 (2002), 105-108, 6 (in Korean)
2. P. M. G. P. Moreira, M. A. V. de Figueiredo, and P. M. S. T. de Castro, "Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 48(2007), 169-177, 10
3. C. J. Dawes, Introduction to friction stir welding and its development, *Welding and Metal Fabrication*, 63(1995)
4. Y.B. Ko, J.H. Lee and K.C. Park, Microstructures of Friction Stir Lap Welded in A5052-H112 Alloy, *Journal of KWJS*, 27(2009), 17-24, 12 (in Korean)
5. C. M. Chen and R. Kovacevic, Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(2004), 1205-1214, 9
6. T. Watanabe, H. Takayama, and A. Yanagisawa, Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 178 (2006), 342-349, 9
7. Y.S. Sato, S.H.C. Park, M. Michiuchi and H. Kokawa, "Constitutional Liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg Alloys," *Scripta Materm* 50 (2004)
8. R. S. Mishra and M. W. Mahoney, "Friction stir welding and processing," *ASM Int*, (2007)
9. R.S. Mishra and Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mater. Sci. Eng. R*, 50(2005)
10. Y.S. Sato, M. Urata, H. Kokawa, K. Ikeda, "Hall-petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, 1. 354(1) (2003)
11. W.B. Lee, Y.M. Yeon, and S.B. Jung, "Mechanical Properties Related to Microstructural Variation of 6061 Al Alloy Joints by Friction Stir Welding," *ATERIALS TRANSACTIONS*, 45(2004), 1700-1705



- 김은혜
- 1990년생, 공학사
- 한국생산기술연구원
- 신소재공학
- e-mail : eunhye622@kitech.re.kr



- 송국현
- 1976년생, 공학박사
- 한국생산기술연구원
- 융합공정 프로세스 개발
- e-mail : skhyun7@kitech.re.kr



- 이광진
- 1973년생, 공학박사
- 한국생산기술연구원
- FSW&FSP, 이종금속 접합 및 분석
- e-mail : kjlee@kitech.re.kr