

알루미늄 합금 (Al6005-T6)의 마찰교반접합 시 공구의 회전속도와 접합 특성의 상관관계 연구

최두호
동의대학교 신소재공학부 교수

Relationship Between Tool Rotating Speed and Properties of Friction Stir Welded Al 6005-T6

Dooho Choi
Professor, School of Materials Engineering, Dong-Eui University

요 약 마찰교반용접법(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년에 영국 용접연구소 TWI(The Welding Institute)에서 최초 개발된 후 여러 산업분야에 걸쳐 적용연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 철도차량 차체의 주요 구성 소재인 알루미늄 합금 (Al-6005-T6) 평판 압출재에 대한 마찰교반접합 적용 기초연구를 수행하였다. 접합속도를 500 mm/min으로 고정된 채 회전공구의 회전속도를 600-1600 rpm으로 변화될 때 미세구조와 기계적 물성 변화에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 경도 측정 결과 nugget부는 모재의 70% 수준의 경도값을 가지며 설정된 범위 내의 공구 회전속도와 연관성은 관찰되지 않았으며 용접계면에서 약 5 mm 벗어나게 되면 모재의 경도값을 가지는 것으로 확인되었다. 인장시험 결과 회전속도가 올라갈수록 항복강도와 인장강도가 소폭 하락하는 경향을 보였으며 연신률의 변화는 관찰되지 않았다.

주제어 : 마찰교반접합, 비커스 경도, 인장시험, 기계적 성질, 미세구조

Abstract Friction stir welding was first reported by TWI(The Welding Institute) in 1991, and this welding method has been rapidly used in various industrial areas such railway, automobile, aerospace and shipbuilding industry. Here, we study core characteristics of friction stir welding (FSW) applied to Al 6005-T6 extruded sheets, which is the typical alloy used for railway car bodies. With the fixed welding speed of 500 mm/min, the rotating tool speed was varied from 600 to 1800 RPM. The results of hardness measurement revealed that the hardness of nugget area is ~70% with respect to the parent material, and for the selected range of rotation speed, no clear dependence was observed and the hardness values close to the parent materials were achieved for the area located 5 mm away from the welding interface. The tension test shows that yield strength and tensile strength were slightly decreased with increasing RPM, with no observed difference for the elongation.

Key Words : Friction stir welding, Vickers hardness, Tension test, Mechanical properties, Microstructure

1. 서론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 용가제가 필요없는 고상 접합법으로써 자동차, 철도, 우주항공, 조선해양 등 여러 산업분야에 적용을 위해 스테인리스 강,

마그네슘 합금, 알루미늄 합금 등 다양한 금속소재에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-4]. 특히, 영국, 일본, 중국 등의 나라에서는 마찰교반접합 관련 다수의 특허를 구축하며 다방면에서 실용화 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

*Corresponding Author : Dooho Choi(dhchoi@deu.ac.kr)

마찰교반접합법은 고상접합공정이기 때문에 기존 용융접합 공정인 MIG 등과 비교할 때 응고에 의한 기공이나 균열의 발생이 없으며 용접변형량이 작으며 인장강도, 항복강도, 연신율, 잔류응력 등의 기계적 성질이 우수할 뿐만 아니라 뒤튤림, 변색이 급격히 감소된다는 장점을 가진 것으로 알려져 있다[5-8]. 특히, 철도차량의 경우에는 20-25 m 길이의 직선부를 용접해서 차체가 완성되기 때문에 마찰교반접합법을 적용하기에 이상적인 조건이며 마찰교반접합법의 적용연구가 가장 적극적으로 행해지고 있는 분야이다. Hitachi는 마찰교반접합법을 이용하여 알루미늄 합금 차체로 구성된 철도차량인 A-train의 양산에 성공하였으며 Kawasaki와 Nippon Saryo 등도 역시 철도차량에 대한 마찰교반접합법 적용 연구를 수행중이다[9]. 하지만 국내에서의 철도차량 차체 제작은 MIG 용접법에 의존하고 있으며 실제 마찰교반접합법의 철도차량 적용을 위해서는 체계적인 적용연구가 필요한 상황이다[10].

본 연구에서는 철도차량 차체 소재로 흔히 사용되는 Al-6005 T6 압출재에 대한 마찰교반 접합법의 적용성에 대한 기초 연구를 수행하였다. 회전공구의 이동속도를 500 mm/min으로 고정된 채 회전속도를 600-1600 rpm로 변화될 때 미세구조와 기계적 물성의 변화를 관찰하였다. 특히 동일 소재에 대해 기존의 용접법인 MIG 용접 시편과의 특성 비교를 실시하였다.

2. 실험방법

2.1 용접 방법

본 연구에서 사용된 소재는 Al 6005-T6로서 200 mm(W) × 1000 mm(L) × 5 mm(T)의 치수를 가지는 평판 압출재 2점을 길이방향으로 맞대고 고정된 상태에서 마찰교반접합을 수행하였다. 회전공구의 회전속도에 대한 영향력을 분석하기 위하여 우수한 접합 외관을 보이는 500 mm/min으로 용접진행속도를 고정시킨 상태에서 공구의 회전속도를 각각 600, 900, 1200, 1600 rpm으로 변화시켰다. Fig. 1는 본 연구에서 수행한 마찰교반접합 공정을 보여준다. 접합에 사용된 회전 공구 소재는 텅스텐 중합금(W-Mo-Ni-Fe)으로서, 공구의 깊이는 5mm, 공구의 상단부와 하단부 지름은 각각 6 mm와 4 mm, shoulder의 지름은 16 mm이다. MIG 용접은 동일한 Al 6005-T6 압출재를 이용하여 용접전류 185 A와 용접속도 450mm/min의 조건상에서 맞대기 용접을 실시하였다. MIG 용접 시편

은 Al-6005-T6의 철도차량 적용과 관련된 국제규격 (EN 13981-1)인 항복강도 115 MPa 이상, 인장강도 165 MPa 이상을 만족하도록 제작이 되었다.



Fig. 1. Image showing the FSW process.

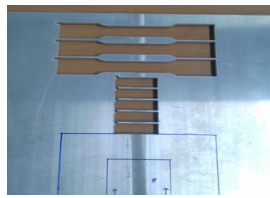
2.2 용접부 미세조직 분석

광학현미경을 이용하여 마찰교반접합 시편 및 MIG 접합 시편의 용접 단면부의 너겟(nugget)부, 열기계적 영향부 (Thermally Mechanically Affected Zone, TMAZ), 열적 영향부(Heat Affected Zone, HAZ) 및 모재 부위의 미세구조를 관찰하였다. 용접부의 원활한 조직 관찰을 위해 표면 연마 후 Keller 용액에서 40초 동안 에칭을 실시하였다.

2.3 기계적 특성 측정

KS B 0811:2003를 준용하여 일정온도 (25 ± 2) °C 및 일정습도 (33 ± 5) % R. H. 조건에서 비커스 경도 측정을 실시하였다. 표면에서 2mm 하단 지점을 기준으로 용접부 좌우를 완전히 포함하도록 측정지역을 설정하였으며 1 mm 간격으로 경도를 측정하였다.

또한 KS B 0802:2003를 준용하여 용접부위의 인장시험을 실시하여 항복강도, 인장강도, 연신율 값을 추출하였으며, 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 동일 조건의 시편에 대하여 인장시험을 3회씩 실시하였다. 인장시험 및 경도 시험을 위한 시편의 추출부위를 Fig. 2에 나타내었다.



(a)



(b)



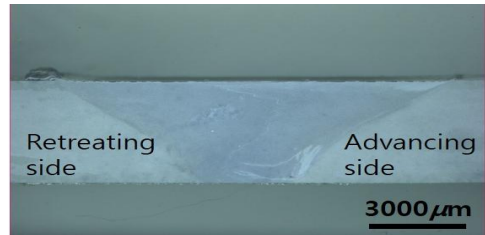
(c)

Fig. 2. (a) Welded plates showing the locations of the extracted specimens for (b) tensile test and (c) hardness measurement.

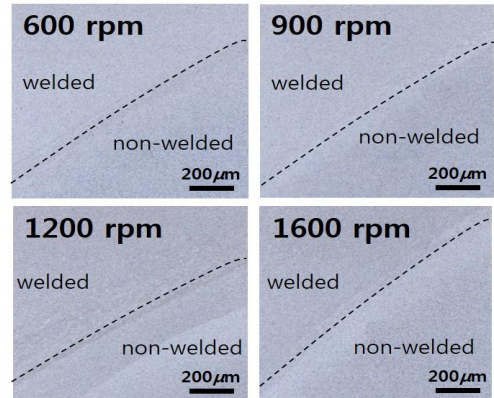
3. 결과 및 고찰

3.1 용접부 조직 관찰

용접속도를 500 mm/min으로 고정한 채 회전공구의 회전속도를 600, 900, 1200, 1600 rpm으로 변화시킬 때 마찰교반접합된 시편과 MIG 용접법으로 접합된 시편에 대한 현미경 조직 사진을 Fig. 3와 Fig 4에 나타내었다. 마찰교반접합부의 용접계면이 명확하지 않으며 미세기공의 흔적이 관찰되지 않았지만, MIG 용접 시편은 용접부 경계가 FSW 용접 시편에 비하여 뚜렷하며 화살표로 표시된 것처럼 용융 후 급냉에 따른 미세 기공이 다수 형성된 것을 확인하였다.

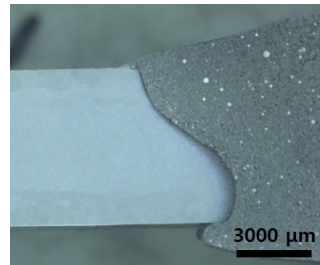


(a)

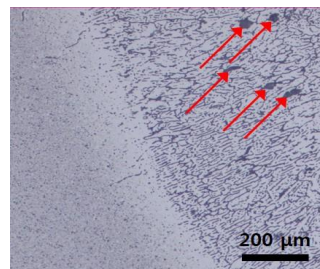


(b)

Fig. 3. (a) Low-magnification optical micrographs and (b) high-magnification optical micrographs for the FSW welded parts.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Low-magnification optical micrographs and (b) high-magnification optical micrographs for the FSW welded parts.

3.2 기계적 특성

Al6005-T6 판재의 FSW 및 MIG 접합 시편의 단면부에 대해 용접부 좌우를 완전히 포함하도록 측정지역을 설정하여 측정된 경도값을 Fig. 5에 나타내었다. 접합 방법 및 조건에 관계없이 모든 시편은 좌우 대칭적인 경도측정값을 보였다. 마찰교반접합 및 MIG 접합된 용접부는 모두 모재 대비 약 70%의 경도값을 가졌다. nugget과 TMAZ간의 경도값의 경계는 명확하게 관찰이 되지 않았으며, 마찰교반접합의 경우 회전공구의 shoulder 기준으로 약 5mm 정도 벗어나게 되면 모재와 동일한 경도값을 가지는 것에 반해 MIG 접합 시편의 경우 높은 입열량으로 인해 용접계면에서 약 15 mm정도 벗어나서야 모재의 경도값을 가지는 것으로 확인되어, 마찰교반접합의 경우 현저히 줄어든 HAZ의 폭을 가지는 것을 알 수 있다. 주목할 점은 nugget부에서 접합 계면까지의 경도값은 공구의 회전속도와 관계없이 일정한 값을 가지는 경향을 보였다.

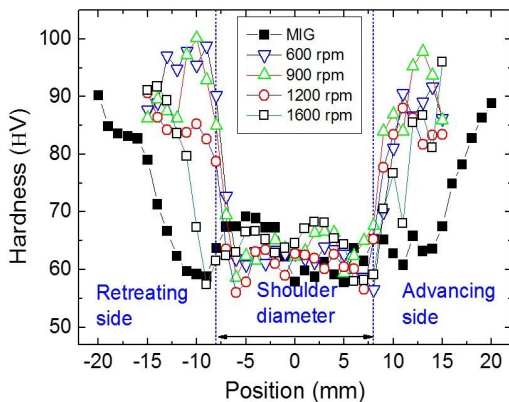


Fig. 5. Hardness profiles for the FSW and MIG specimen.

Fig. 6(a)는 회전공구의 회전 속도 변화에 따른 마찰교반 접합 시편의 인장시험 결과를 나타내었으며, Fig. 6(b)는 추출된 항복강도와 인장강도를 공구 회전속도의 변화와 함께 표현하였다. 회전 공구의 회전 속도 증가에 따른 연신율의 변화는 관찰되지 않았지만 항복강도 및 인장강도는 서서히 감소되는 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 입열량의 증가로 인해 접합부의 결정립 조대화가 발생하게 되고 이에 따라 전위의 움직임이 상대적으로 용이하게 되어 재료의 강도가 저하된 것으로 판단된다. 접합부의 경도가 MIG 용접 시편과 유사한 값을 가지는 Fig. 5의 결과와는 다르게 모든

조건인 마찰교반접합 시편은 MIG 용접 시편보다 항복강도와 인장강도가 상당히 우수한 것으로 나타났는데, 이는 MIG 용접 시편 내 존재하는 미세 기공(Fig. 4)에서의 응력 집중 현상이 기계적 강도 저하를 발생시킨 원인으로 작용한 것으로 판단된다. Table 1에는 회전공구의 회전 속도 변화에 따른 마찰교반접합 시편의 항복강도, 인장강도, 연신율의 측정 결과값을 제시하였고, 모재와 MIG 용접 시편의 측정값 역시 함께 제시하였다. 향후, 평판 압출재가 아닌 실제 철도차량 차체와 동일한 구조의 압출재를 이용한 마찰교반 접합 연구를 통하여 마찰교반접합법의 철도차량 적용 심화 연구를 수행할 계획이다.

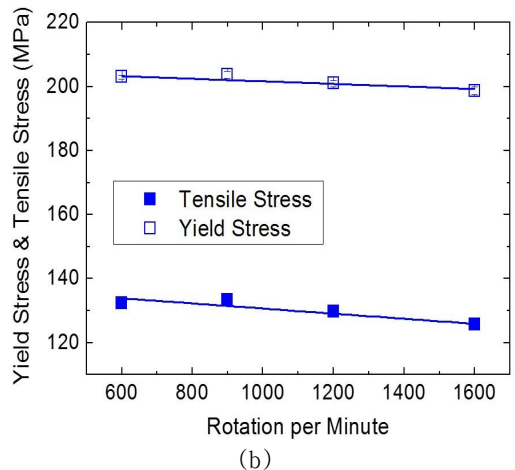
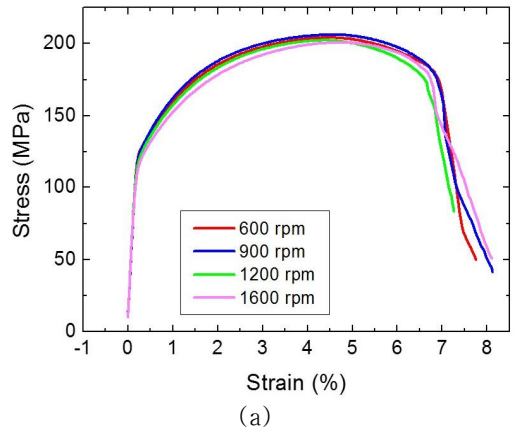


Fig. 6. (a) Measured stress-strain curves for the FSW specimens and unwelded parent material. (b) yield stress and tensile stress vs. rotation per minute.

Table 1. Summray of yield stress, tensile stress, elongation for the FSW specimens, MIG specimen and parent material.

Specimen	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)
Parent Material	252	277	9
FSW (600 rpm)	132	203	8
FSW (900 rpm)	133	203	8
FSW (1200 rpm)	129	201	7
FSW (1600 rpm)	125	198	8
MIG	116	167	8

4. 결론

본 연구에서는 철도차량용 경량소재로 흔히 사용되는 알루미늄 합금 (Al 6005-T6) 압출재에 대한 마찰교반접합법의 적용 연구를 수행하였다. 용접속도는 500 mm/min으로 고정한 채 회전공구의 회전속도를 600, 900, 1200, 1600 rpm으로 변화시키면서 회전속도가 미세구조와 기계적 특성에 미치는 상관관계를 연구하였으며, 전통적인 용접 방법인 MIG 접합법과 비교를 통해 마찰교반접합법의 철도차량 적용성에 대해 분석하였으며, 본 연구의 중요 결과는 다음과 같다.

(1) 동일한 Al 6005-T6 평판 압출재에 대한 MIG 용접 시편과 비교 시, 마찰교반접합부에는 미세 기공의 존재가 발견되지 않았다.

(2) 본 연구에서 설정한 공구의 회전속도 범위내에서는 nugget 부의 경도값은 모재와 비교할 때 약 70% 수준의 값을 가지며, 용접계면(shoulder 외경 기준)에서 약 5 mm 벗어나게 되면 모재의 값을 가지는 것으로 확인되었다. MIG 접합 시편과 비교한 결과 용접부의 경도값은 유사한 것으로 관찰되었으나 MIG의 경우 높은 입열량으로 인하여 용접계면에서 약 15 mm 벗어나야 모재의 경도값을 가지는 것으로 확인되었다. 즉, 경도 측정값을 바탕으로 추정된 HAZ 영역의 넓이는 마찰교반접합 시편이 MIG 시편과 비교하여 약 30% 수준인 것으로 나타났다.

(3) 인장시험 결과 회전공구의 회전속도가 600 rpm에서 1600 rpm으로 상승할 때 항복강도는 132에서 125 MPa로, 인장강도는 203에서 198 MPa로 감소되었으며 연신율의 변화는 관찰되지 않았다.

REFERENCES

- [1] G. Liu, L. E. Murr, C-S. Niou, J. C. McClure & F. R. Vega. (1997). Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum. *Scripta Materialia*, 37, 355-361.
- [2] W. M. Thomas & E. D. Nicholas. (1997). Friction stir welding for the transportation industries. *Materials & Design*, 18, 269-273.
- [3] R. Nandan, T. DebRoy & H. K. D. H. Bhadeshia. (2008). Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53, 980-1023.
- [4] B. Heinz & B. Skrotzki. (2002). Characterization of a Friction-stir-welded Aluminum Alloy 6013. *Metall. Mater. Trans. B*, 33B, 489-498.
- [5] A. P. Reynolds, W. Tang, T. Gnaupel-Herold & H. Prask. (2003). Structure, properties and residual stress of 304 L stainless steel friction stir welds. *Scripta Mat.*, 48, 1289-1294.
- [6] Hideshi Ohba, Chiaki Ueda & Kouji Agatsuma. (2001). Innovative Vehicle-the "A-train". *Hitachi Review*, 50, 130-133.
- [7] W. Woo, G. B. An, E. J. Kingston, A. T. DeWald, D. J. Smith & M. R. Hill. (2013). Through-thickness distributions of residual stresses in two extreme heat-input thick welds: A neutron diffraction, contour method and deep hole drilling study. *Acta Materialia*, 61, 3564-3574.
- [8] J. H. Cho & S. H. Ko. (2019). A Study on the Prediction of Welding Flaw Using Neural Network. *J. Digital Convergence*, 17, 217-223.
- [9] C. K. Chun, W. S. Chang, C. Y. Kang, Y. J. Kwon & D. H. Park. (2009). Friction Stir Welding Technology for Aluminum Rolling Stocks. *J. Kor. Weld. & Join.* 27, 16-20.
- [10] H Yamamoto , S Harada , T Ueyama & S Ogawa. (2009). Development of low-frequency pulsed MIG welding for aluminium alloys. *Welding International*, 6, 580-583.

최 두 호(Dooho Choi)

[정회원]



- 2011년 : Carnegie Mellon University
재료공학 (공학박사)
- 2015 ~ 2017년 : 한국기계연구원 부설
재료연구소 (선임연구원)
- 2017년 ~ 현재 : 동의대학교 신소재공
학부 교수

- 관심분야 : 접합, 표면처리, 재료의 기계적 성질, 재료 분석
- E-Mail : dhchoi@deu.ac.kr