

용접 속도에 따른 AZ61 마그네슘 합금 마찰교반용접부 기계적 특성 평가

선승주¹, 김정석^{*}, 이우근¹, 임재용²
¹한국철도기술연구원, ²대구대학교 기계공학부

Evaluation of Mechanical Properties of AZ61 Magnesium Alloy Joints at various Welding Speeds

Seung-Ju Sun¹, Jung-Seok Kim^{1*}, Woo-Geun Lee¹, Jae-Yong Lim²

¹Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute

²School of Mechanical Engineering, Daegu University

요약 본 연구에서는 일정한 회전 속도에서 용접 속도를 제어하여 AZ61 마그네슘 합금에 적합한 입열량 조건을 도출하였다. 또한 산업적 측면에서는 더 빠른 용접 속도가 요구되기 때문에 용접 속도에 따른 효과를 연구하였다. 회전 속도 변수는 800rpm으로 일정하게 적용하였고, 용접 속도는 100 - 500mm/min 으로 변화시켜 용접부의 거동을 관찰 및 평가하였다. 기계적 물성 평가를 위하여 인장 및 경도 시험을 수행하였으며, 미세구조 관찰과 용접부의 건정성을 판단하기 위하여 광학현미경을 사용하였다. 용접 속도가 400mm/min 이상 적용되었을 때 용접부 내부에서 결함이 관찰되었다. 용접 속도가 증가할수록 교반부의 결정립 크기는 작아졌으며, 경도 또한 비례 증가하는 경향을 보였다. 회전속도 800rpm, 용접 속도 200mm/min과 300mm/min 일 때, 용접부 내·외부 적으로 결함이 없었으며, 우수한 기계적 물성이 기록되었다. 이때, 접합 효율은 각각 100.5%, 101.2%이었고, 최대인장강도가 모재의 강도와 유사하였다. 인장 시험의 파괴는 시험의 전진측과 교반부 사이에서 발생하였으며, 이는 횡단면부 경도 분포에서 경도가 일시적으로 감소하는 위치와 일치하였다.

Abstract In this study, the heat input conditions suitable for the AZ61 magnesium alloy were derived by controlling the welding speed at a constant rotational speed. In addition, from an economic point of view, industry demands higher welding speeds. Therefore, the effects of the welding speed were studied. The rotational speed applied was 800rpm, and the welding speed was varied from 100 to 500mm/min to evaluate the behavior of the welded regions. Tensile and hardness tests were conducted to examine the mechanical properties. Optical microscopy was used to observe the microstructure and soundness of the welded regions. Defects were observed at the welded region when the welding speed was more than 400mm/min. As the welding speed increased, the grain size of the stir zone decreased and the hardness tended to increase proportionally. When the rotational speed was 800 rpm and the welding speed was 200mm/min and 300mm/min, there were no defects in the welded region and excellent mechanical properties were recorded. In addition, the joint efficiencies were 100.5% and 101.2%, respectively, and the ultimate tensile strength was similar to that of the base metal. Fracture of the tensile specimen occurred between the advancing side and stir zone, and the fracture location coincided with the region where the hardness decreased temporarily.

Keywords : Friction Stir Welding, Hardness, Magnesium Alloys, Microstructure, Tensile test

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

본 논문은 한국철도기술연구원 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jung-Seok Kim(Korea Railroad Research Institute, KRRI)

Tel: +82-31-460-5663 email: jskim@krii.re.kr

Received April 14, 2017

Revised April 27, 2017

Accepted May 12, 2017

Published May 31, 2017

1. 서론

마그네슘은 상용 금속 중 가장 가벼운 금속으로 비중 (1.74)이 알루미늄의 2/3, 철의 1/4 수준이다. 또한 높은 비강도, 비강성 등과 같은 이점으로 인해서 산업에 적용 되는 빈도는 점차 증가하는 추세이다. 특히, 수송산업에서는 온실가스의 주요 원인인 이산화탄소 규제와 에너지 효율 등의 문제점을 극복하기 위해서 마그네슘 합금의 구조물 적용에 대한 경량화 연구가 활발하다[1]. 이러한 마그네슘 합금을 구조물에 적용하기 위해서는 접합 기술이 매우 중요하다. 접합 기술 중 하나인 용접은 금속소재를 접합하는 경우에 가장 많이 사용된다. 하지만 기존의 용융 용접의 경우, 소재의 변형(Distortion), 응고 균열(Solidification cracking) 등과 같은 결함[2]으로 인해 용접부의 우수한 기계적 물성을 확보하기 어려웠다. 또한 마그네슘 합금은 산소와 친화적인 특징으로 인해서 용융점 이하에서 용접 공정이 이뤄져야 결함을 최소화 할 수 있다. 마찰교반용접(Friction stir welding, FSW)은 고상 접합(Solid-state joining) 공정[3]으로 용융 용접의 단점을 극복 가능하며, 소재의 용융 없이 고상인 상태로 접합을 수행하기 때문에 쉽게 산소와 반응하는 마그네슘 합금에 적합한 용접 기술이다.

마찰교반용접 공정 동안에 발생하는 입열량은 용접부의 건정성과 기계적 물성에 많은 영향을 미친다. 입열량이 부족할 경우, 터널 결함(Tunnel defect), 키싱 본드(Kissing bond)와 같은 결함을 야기한다. 반면 입열량이 과도한 경우, 많은 양의 플래시(Flash), 산화물(Oxide) 석출과 같이 기계적 물성 악화의 원인이 되는 결함이 발생하게 된다. 식 (1)[4]은 입열량 관계식으로 입열량에 영향을 미치는 변수가 언급되어 있다.

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \eta \mu P R^3 \frac{\omega}{v} \quad (1)$$

Q [J/mm]는 전체 입열량(Total heat input), η 는 입열 효율(Heat input efficiency), μ 는 마찰계수(Friction coefficient), P [N]는 압력(Pressure), R 은 용접 툴 솔더의 반지름(Radius of the shoulder), ω 는 용접 툴의 회전 속도(Rotational speed), v 는 용접 속도(Welding speed)를 의미한다. 해당 관계식은 입열 효율, 마찰계수, 용접 툴 솔더의 반지름 그리고 적용 하중이 동일하다는 조건하에 식 (2)[5]와 같이 표현 가능하다.

$$Q \propto \frac{\omega}{v} \quad (2)$$

식 (2)는, 일정한 용접 속도에서 회전속도의 증가 또는 일정한 회전속도에서 용접 속도의 감소가 입열량의 증가를 의미한다. 따라서, 회전속도와 용접속도는 마찰교반용접부의 건정성과 우수한 기계적 물성 결정하는 주요 변수이다. 특히, 산업적 측면에서 살펴볼 때, 우수한 기계적 물성 확보와 동시에 빠른 용접 속도를 만족하는 것은 매우 중요하다.

따라서, 본 연구의 목적은 입열량 관계식을 기반으로 용접 속도가 기계적 물성, 미세구조에 미치는 영향과 AZ61 마그네슘 합금에 적합한 용접 조건을 도출하는데 있다.

2. 시험

본 연구에서 사용된 AZ61 마그네슘 합금 압출 판재의 크기는 가로 55mm, 세로 145mm, 두께 5mm 이다. Fig. 1 (a) 와 같이 맞대기 용접 방식으로 마찰교반용접이 수행되었으며, 압출 방향과 동일한 방향으로 용접을 수행하였다. 마찰교반용접 장비는 3축 변위 제어가 가능한 Gantry type을 사용하였다.

사용된 용접 툴의 형상은 Fig. 1 (b) 와 같다. 용접 툴 핀은 테이퍼(Taper) 형상으로 핀의 상위 지름은 6mm, 하위 지름은 1.8mm 이며, 핀의 길이는 4.5mm 이다.

본 연구는 용접 속도에 따른 영향을 알아보기 위함으로 회전 속도는 800rpm으로 고정된 회전 속도를 적용하였고, 용접 속도를 100 - 500mm/min 으로 변화시켜 5가지의 용접 조건을 수행하였다.(Table 1)

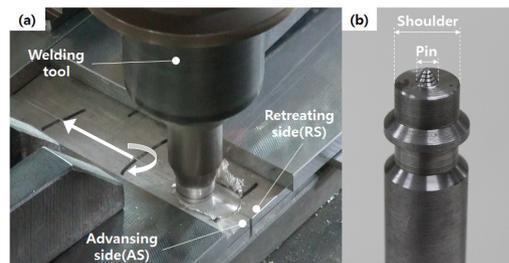
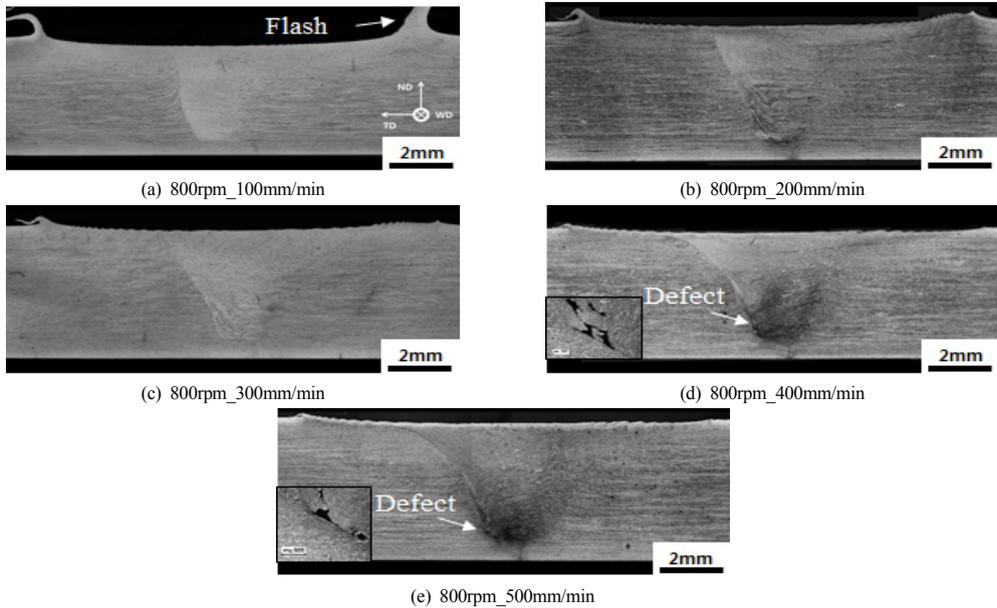


Fig. 1. (a) Schematic view of FSW process; (b) welding tool with threaded taper pin



* ND(Normal direction), TD(Transverse direction), WD(Welding direction)

Fig. 2. Cross-sectional macrographs of FS welded region

Table 2. Welding parameters

Welding condition	Rotational speed [rpm]	Welding speed [mm/min]
(a)	800	100
(b)		200
(c)		300
(d)		400
(e)		500

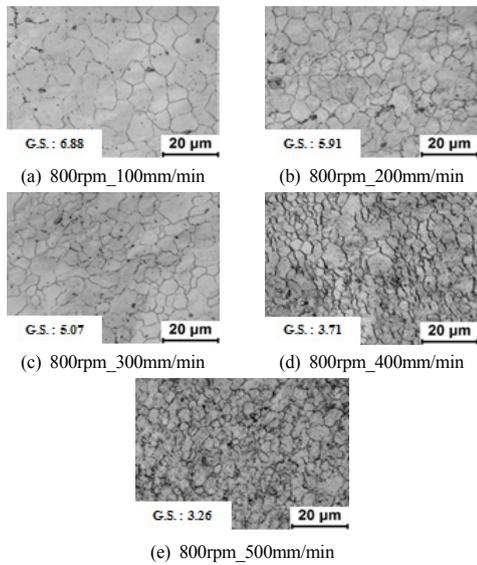
인장 시편은 ASTM E8을 적용하여 용접부 중심에서 3개씩 제작하였다. 인장 시험 장비는 Instron 5982를 사용하였으며, cross-head 속도는 1.5mm/min으로 수행하였다. 경도 시험은 HM-112를 사용하였고, 하중은 2kgf로 10초간 지속하였으며, 측정점 사이 거리는 0.5mm를 유지하였다. 마찰교반용접을 수행한 방향의 수직인 횡단면부를 채취하여 미세구조 분석을 수행하였으며, 미세구조 관찰을 위하여 피크릭산(picric acid) 3g, 아세트산(acetic acid) 10ml, 증류수(water) 10ml, 에탄올(ethanol) 100ml를 혼합한 에칭액을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Macro/microstructure 분석

마찰교반용접 이후 육안을 통하여 관찰한 결과, 시편

의 표면에서 눈에 띄는 결함은 발견되지 않았다. Fig. 2에 각 용접조건에 대한 마찰교반용접부 횡단면을 나타내었다. Fig. 2 (d)와 (e)에서 관찰되는 바와 같이 용접부내에 결함이 발견되었다. 이러한 결함은 터널 결함(Tunnel defect)으로 용접 방향 (Welding direction)을 따라 연속적으로 형성 되어있다. 터널 결함은 불충분한 입열량 (Insufficient heat input)에 의해 야기되며, 기계적 물성 저하의 주요 원인이다. Z.W. Chen 등[6]은 용접부내에서 더 많은 소성 유동을 발생시킴으로써 해당 결함이 제거됨을 확인하였다. 본 연구에서도 마찬가지로 일정한 회전 속도 아래에서 용접 속도가 감소함에 따라 결함은 작아졌고, 용접 조건 (a), (b), (c) 에서 결함이 관찰되지 않았다. 더 많은 소성 유동을 얻기 위해서 회전 속도의 증가 또는 용접 속도의 감소는 과도한 입열량을 초래하며, 이 경우 또한 결함 발생의 원인이 된다. 특히 마그네슘 합금의 경우, 산소와 친화력이 높기 때문에 과도한 입열량으로 인해서 용접부 내부에 산화물(Oxide)을 야기한다. 용접부 내부에 생성되는 산화물의 경우 터널, 구멍 결함과 같이 기계적 물성 저하의 요인이다. N. Afrin 등 [7]은 마찰교반용접된 AZ31 마그네슘 합금 파면에서 산화물을 관찰하였으며, 인장 강도와 연신을 저하의 원인으로 판단하였다.



* G.S.(Grain size)

Fig. 3. Effect of welding speed on SZ microstructure

이외에도 과도한 입열량은 용접부 표면에 더 많은 양의 플래시 (Flash, Burr)를 생성한다. 플래시는 마찰교반 용접 공정중에 용접부의 소재가 마찰교반용접 틀에 의해서 표면으로 압출되어 나오는 현상이다. 따라서 많은 양의 플래시가 생성되면, 용접부가 모재보다 얇아지게 되어 기계적 물성 저하의 잠재적 요인일 뿐만 아니라 용접 영역의 치수에 대한 추가적인 검사가 요구된다. Y. G. Kim 등[8]은 많은 양의 플래시를 결함으로 분류하였으며, 본 연구에서 마찬가지로 결함으로 분류하였다. Fig. 2 (a)에서 확인할 수 있는 바와 같이 과도한 입열량으로 인해 용접부가 얇아지며, 주위에 플래시의 양도 많아짐을 확인할 수 있다. Fig. 3 는 각 용접조건에 따른 교반부(Stir zone, SZ)의 미세구조이다. 미세구조를 구성하는 결정립의 크기는 마찰교반용접 공정상에서 용접부에 유입되는 입열량의 수준에 의해 결정된다. 결정립이 가장 큰 경우는 용접조건 (a) 였으며, 결정립 크기는 6.88 μm 로 나타났다. 반면 가장 작은 결정립은 용접조건 (e)인 경우였으며, 그 크기는 3.26 μm 로 나타났다. 즉, 용접 속도가 100mm/min 에서 500mm/min 까지 점차 증가할수록 교반부의 결정립이 더욱 작아지는 것을 확인하였고, 이는 입열량이 적어짐에 따라 결정립의 크기가 작아진 것으로 판단된다. 해당 결과는 본 연구에서 사용된 마그네슘 합금 이외에 마찰교반용접 된 알루미늄 합금[9]과

순 구리[10]에서도 동일하게 관찰되었다. 마찰교반용접 공정에 의해서 교반부의 결정립은 높은 온도와 용접 틀에 의한 물리적 영향에 노출된다. 이로 인해 결정립들은 동적 재결정(Dynamic recrystallization, DRX)을 거쳐 새로운 미세구조를 형성한다[11-13]. 이 과정에서 입열량이 높을수록 더 큰 결정립이 형성된다.

3.2 기계적 물성 및 파괴 거동

용접 속도에 따른 용접 조건들의 경도 시험 결과, 교반부를 제외한 다른 영역은 모재의 평균 경도(68.7 Hv)와 비교하여 큰 차이는 없었다. 각 용접조건에 대한 교반부의 평균 경도는 용접조건 (a) 일 때 63.7 Hv 로 가장 낮았으며, 용접 속도가 가장 빠른 조건인 용접조건 (e) 일 때 70.5 Hv 로 가장 높았다. 이러한 결과는 S.H.C Park 등[14] 이 보고한 경도 분포와 유사하였다. 마찰교반용접부에서 교반부의 결정립 크기 변화는 입열량에 따른 결정립의 성장 또는 미세화가 주요 원인으로 Arin, N 등[7]에 의해 문헌보고 되었다. 미세화된 결정립으로 인해 더 많은 결정립계(Grain boundary)를 형성하며, 이러한 결정립계는 전위 슬립을 방해하는 역할을 한다. 따라서 결정립의 크기가 작을수록 전위 운동을 더욱 제한하기 때문에 높은 경도 또는 강도를 갖는다.

각 용접조건 별 교반부의 결정립 크기와 경도 분포에 대한 관계를 알아보기 위하여 Hall-Petch 관계식[15, 16]을 적용하였고, 해당 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 용접 속도가 증가할수록 경도 또한 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 용접 속도가 증가할수록 입열량은 감소하여, 미세화된 결정립으로 인해 경도가 증가한 것으로 판단된다.

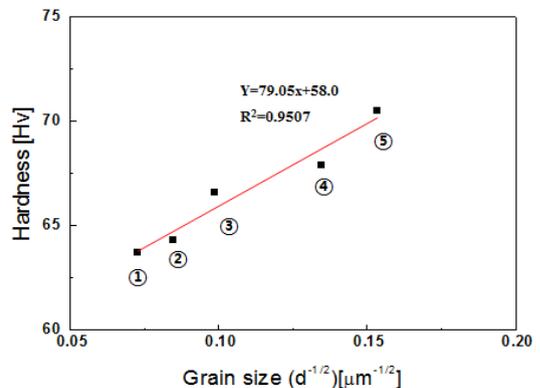


Fig. 4. Relationship between hardness and inverse square root of grain size

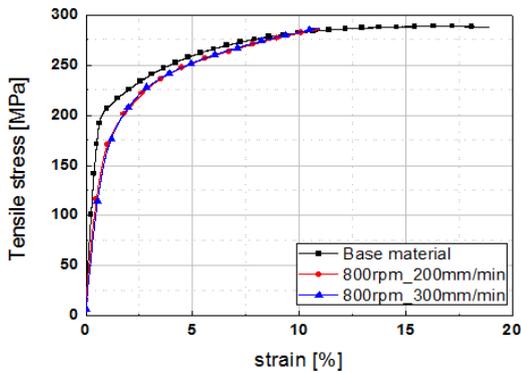


Fig. 5. Tensile strength results of welded joints

Fig. 5 와 Table 2 는 용접조건 (b), (c)의 인장시험 결과이다. 용접조건 (a), (d) 그리고 (e) 는 용접부에 결함이 확인되었기 때문에 인장시험을 생략하였다. 본 연구에서 접합 효율은 식 (3) 에 의해 도출된다. 식 (2) 에서 UTS(SZ)은 용접부를 포함하는 시편의 최대인장강도 (Ultimate tensile strength, UTS)이며, UTS(BM)은 모재의 최대인장강도를 의미한다. 용접조건 (b), (c) 의 접합 효율은 각각 100.5% 와 101.2%로 기록되었으며, 이는 모재와 비슷한 수준으로 나타났다. 반면 항복강도는 모재와 비교하여 더 낮게 나타났다.

$$\text{Joint efficiency [\%]} = \frac{\text{UTS(SZ)}}{\text{UTS(BM)}} \times 100 \quad (3)$$

Table 3. Tensile strength results of welded joints

Welding condition	UTS [MPa]	YS [MPa]	Joint efficiency [%]
Base material	289	202.3	100
800rpm 200mm/min	290.5	167.3	100.5
800rpm 300mm/min	292.5	169.0	101.2

*Ultimate tensile strength(UTS), Yield strength(YS)

이러한 결과는 마찰교반용접 공정상에서 발생된 용접부 주위의 잔류응력에 의한 것으로 판단된다. 마찰교반 용접이 진행되는 동안에 용접부를 포함한 용접부 주위는 마찰열로 인해 열 팽창을 겪으며, 용접 틀이 지나간 이후 다시 냉각이 진행된다. 이에 용접부에서 수축 변형이 발생하게 되며, 그 결과 국부적으로 잔류응력이 발생된다. 따라서, 마찰교반용접 공정을 거친 시편의 경우 더 낮은 항복강도가 기록된 것으로 사료된다.

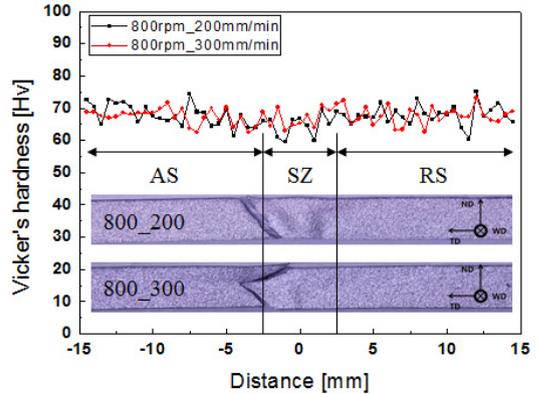


Fig. 6. Comparison of hardness fracture location of tensile specimens

인장강도 시험을 통해서 확인할 수 있는 파괴 위치는 시편의 상대적으로 가장 약한 부위임을 보여준다. 특히 용접부의 기계적 물성 향상 및 구조물 설계 등을 연구하기 파괴 위치에 대해서 이해하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 6 는 인장강도 시험 이후에 파괴된 시편이다. 모든 인장 시편은 회전방향과 진행방향이 일치하는 전진측 (Advancing side, AS) 영역과 교반부 사이에서 파괴되었다. 해당 영역에서 파괴가 발생하는 경향은 2017 알루미늄 합금[17]과 AZ31 마그네슘 합금[7]의 마찰교반용접부를 대상으로 한 인장시험 결과와 일치하였다. 또한 파괴 위치와 경도 분포를 비교한 결과, 교반부 인근의 전진측 영역이 후진측(Retreating side, RS) 영역에 비해 경도가 더 낮았으며, 경도가 일시적으로 감소하는 영역이 존재했다. 이러한 원인은 회전하는 용접 틀에 의해서 변화된 결정립의 위상이 강도와 경도에 영향을 준 것으로 보고되어 있다[14, 18, 19]. 따라서, 전진측과 교반부 사이 영역에서 상대적으로 가장 약하게 나타났으며, 경도 또한 일시적으로 감소한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 동일한 회전속도에서 다양한 용접 속도 변수를 적용하여 AZ61 마그네슘 합금 판재에 적합한 용접조건을 제시하였고, 이에 따른 기계적 물성 평가와 미시적 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용접 속도가 가장 느린 100mm/min일 경우, 많은 양의 플래시를 야기했다. 또한 용접 속도가 400mm/min과 500mm/min일 때, 용접부 내부에 터널 결함이 관찰되었다.
- (2) 회전속도 800rpm, 용접 속도 200mm/min과 300mm/min인 경우, 접합효율은 각각 100.5%, 101.2% 로 모재의 최대인장강도와 비슷하였다. 반면 항복강도의 경우, 모재대비 약 80% 수준으로 모재보다 더 낮은 기록되었다.
- (3) 인장시험을 통해 파괴 위치를 살펴본 결과, 모든 시편은 전진측과 교반부 사이에서 파괴가 발생하였으며, 파괴된 위치와 경도가 일시적으로 감소하는 영역과 일치하였다.

용접 속도가 빠를수록 산업적 측면에 유리하지만 기계적 물성을 고려하여 적절한 용접 속도를 선정하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다. 또한 추후 시험에서 회전 속도를 증가하여 적용할 경우 더 빠른 용접 속도를 적용 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] D. H. Jang, 'Process Development for Automotive Hybrid Hood using Magnesium Alloy AZ31B Sheet', *Transactions of Materials Processing*, vol. 20, no. 2, pp. 160-166, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.5228/KSTP.2011.20.2.160>
- [2] H. B. Chen, K. Yan, T. Lin, S. B. Chen, C. Y. Jiang, Y. Zhao, "The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 433, no. 1, pp. 64-69, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.056>
- [3] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1, pp. 1-78, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msre.2005.07.001>
- [4] O. Frigaard, O. Grong, B. Bjorneklett, OT. Midling, In *Proceedings of the 1st international symposium on friction stir welding*, Thousand Oaks, CA, USA; 14 - 16 June, 1999.
- [5] M. S. Moghaddam, R. Parvizi, M. Haddad- Sabzevar, A. Davoodi, "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded Cu - 30Zn brass alloy at various feed speeds: Influence of stir bands", *Materials & Design*, vol. 32, no. 5, pp. 2749-2755, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.015>
- [6] Z. W. Chen, T. Pasang, Y. Qi, "Shear flow and formation of Nugget zone during friction stir welding of aluminium alloy 5083-O", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 474, no. 1, pp. 312-316, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.074>
- [7] N. Afrin, D. L. Chen, X. Cao, M. Jahazi, "Microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 472(1), 179-186, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.03.018>
- [8] Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata, "Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 415, no. 1, pp. 250-254, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.072>
- [9] Y. B. Tan, X. M. Wang, M. Ma, J. X. Zhang, W. C. Liu, R. D. Fu S. Xiang, "A study on microstructure and mechanical properties of AA 3003 aluminum alloy joints by underwater friction stir welding", *Materials Characterization*, vol. 127, pp. 41-52, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.01.039>
- [10] G. M. Xie, Z. Y. Ma, L. Geng, "Development of a fine-grained microstructure and the properties of a nugget zone in friction stir welded pure copper", *Scripta Materialia*, vol. 57, no. 2, pp. 73-76, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.03.048>
- [11] G. M. Xie, Z. Y. Ma, L. Geng, "Development of a fine-grained microstructure and the properties of a nugget zone in friction stir welded pure copper", *Scripta Materialia*, vol. 57, no. 2, pp. 73-76, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.03.048>
- [12] T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka, S. W. Chung, Y. Takigawa, K. Higashi, "Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 456, no. 1, pp.344-349, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.079>
- [13] S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, "Microstructural evolution and its effect on Hall-Petch relationship in friction stir welding of thixomolded Mg alloy AZ91D," *Journal of materials science*, vol. 38, no. 21, pp. 4379-4383, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1026351619636>
- [14] S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, "Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test", *Scripta Materialia*, vol. 49, no. 2, pp. 161-166, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00210-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00210-0)
- [15] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results", *Proceedings of the Physical Society Section B*, vol. 64, no. 9, pp. 747, 1951.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/303>
- [16] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals", *The Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [17] H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, "Tensile properties and fracture locations of friction-stir- welded joints of 2017-T351 aluminum alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, no. 3, pp. 692-696, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00806-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00806-9)
- [18] J. Yang, D. Wang, B. L. Xiao, D. R. Ni, Z. Y. Ma,

"Effects of rotation rates on microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of friction stir-welded (FSW) AZ31 magnesium alloy", Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 44, no. 1, pp. 517-530, 2013.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1373-4>

- [19] W. Woo, H. Choo, D. W. Brown, P. K. Liaw, Z. Feng, "Texture variation and its influence on the tensile behavior of a friction-stir processed magnesium alloy", Scripta materialia, vol. 54, no. 11, pp. 1859-1864, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.02.019>

선 승 주(Seung-Ju Sun)

[준회원]



<관심분야>
경량소재, 기계

- 2017년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 석사후연구원

김 정 석(Jung-Seok Kim)

[정회원]



<관심분야>
신소재, 철도차량 경량화

- 1994년 2월 : 한국과학기술원 항공우주공학과 (항공공학석사)
- 1999년 8월 : 한국과학기술원 항공우주공학과 (항공공학박사)
- 2000년 1월 ~ 2003년 3월 : LG전선 연구소 선임연구원
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

이 우 근(Woo Geun Lee)

[정회원]



<관심분야>
구조해석, 경량소재

- 2013년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학 (공학석사)
- 2017년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학 (공학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 박사후연구원

임 재 용(Jae-Yong Lim)

[정회원]



<관심분야>
구조해석, 경량소재

- 1999년 3월 ~ 2001년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과(기계공학석사)
- 2005년 1월 ~ 2007년 6월 : 자동차부품연구원 연구원
- 2008년 1월 ~ 2012년 12월 : University of Virginia 기계공학과(기계공학박사)
- 2013년 2월 ~ 2016년 2월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 대구대학교 기계공학부 조교수