

철도차량 적용을 위한 Al alloy(A6005)-Mg alloy(AZ61) 이종소재 마찰교반용접 특성 연구

이우근¹, 김정석^{2*}, 선승주¹, 임재용³

¹과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학과, ²한국철도기술연구원, ³대구대학교 기계공학부

Characteristics of Dissimilar Materials Al alloy(A6005)-Mg alloy(AZ61) Under Friction Stir Welding for Railway Vehicle

Woo-Geun Lee¹, Jung-Seok Kim^{2*}, Seung-Ju Sun¹, Jae-Yong Lim³

¹Dept. of Railway System Engineering, University of Science and Technology

²Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute

³School of Mechanical Engineering, Daegu University

요 약 본 연구에서는 이종소재 A6005-AZ61 접합을 위하여 마찰교반용접의 툴 삽입 위치와 모재의 냉각 유·무에 따라 용접부 특성을 분석하였다. 다른 용접 조건들인 툴 회전속도와 이송속도는 500rpm-30mm/min으로 고정하고 Advancing side에 알루미늄 합금(A6005), Retreating side에 마그네슘 합금(AZ61)을 배치하여 용접을 진행하였다. 용접은 여섯 가지 케이스를 진행하였다. 용접부 특성을 관찰하기 위하여 인장 시험을 진행하고, 광학현미경을 사용하여 용접부의 미세조직을 관찰하였다. 인장시험 결과 마그네슘 합금 방향으로 툴을 1mm 이동시키고 모재에 냉각을 시킨 조건에서 강도가 가장 높게 나타났다. 동일한 용접 조건에서 냉각을 한 경우에 냉각을 하지 않은 것 보다 강도가 약 2배 높게 측정되었다. 툴의 위치는 용접부 중심에서 알루미늄 합금 방향으로 1.7mm, 마그네슘 합금 방향으로 1.7mm 이동시켜 과도한 편심을 적용한 용접 조건에서는 교반이 잘 이루어지지 않아 용접부의 건전성이 가장 좋지 않았다. 과도한 편심을 적용한 용접 조건에서는 교반이 잘 이루어지지 않아 용접부의 건전성이 가장 좋지 않았다. 본 연구를 통해 A6005-AZ61 이종 마찰교반용접시 용접속도와 툴 회전속도 만큼 모재의 온도 조절과 툴 삽입위치가 중요한 용접변수임을 확인 하였다.

Abstract In this study, the welding characteristics of friction stir welding were investigated in accordance with the tool plunge position and cooling to the base materials for the joining of dissimilar materials (A6005-AZ61). Other different welding conditions, such as the tool rotation speed and welding speed, were fixed to 500rpm-30mm/min, respectively, and welding was then carried out by placing the Mg alloy (AZ61) on the advancing side and Al alloy(A6005) on the retreating side. Welding was conducted under six different conditions. To investigate the welding characteristic, tensile test and microstructure observations using an optical microscope were carried out. As the tensile test result, the maximum strength appeared under the condition in which the tool is moved 1 mm to the Mg alloy direction and cooling to the base materials. Under the same welding conditions, the strength with cooling was approximately two times higher than that without cooling. The tool was located in each direction of 1.7 mm from the weld line. Therefore, in the excessive off-set of tool position, the welding integrity was in an extremely poor condition due to the lack of stirring. This study was confirmed by the A6005-AZ61 dissimilar friction stir welding the welding speed and the tool rotation speed. In addition, the temperature control and tool plunge position are important welding parameters.

Keywords : A6005, AZ61, Cooling, Dissimilar, Friction Stir Welding

본 논문은 한국철도기술연구원 연구과제로 수행되었음.

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

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

Received July 1, 2016

Revised July 25, 2016

Accepted August 11, 2016

Published August 31, 2016

1. 서론

최근 철도차량의 에너지 절약 및 고속화가 진행 되면서 차체에 대한 경량화가 요구되고 있다. 이러한 이유로, 과거 일반 강재나 스테인레스 강재를 적용하여 제작된 차체에서 현재 알루미늄 합금 압출재를 적용한 차체가 대부분을 차지하고 있다. 하지만, 알루미늄 합금 압출재를 적용한 차체의 경량화 기술은 한계에 다다랐기 때문에 최근에는 철도차량 차체에 알루미늄 합금보다 더 가벼운 소재인 마그네슘 합금 적용 연구가 활발히 이루어지고 있다.[1]

마그네슘 합금은 비중이 알루미늄 합금의 2/3, 강재의 1/5 수준으로 상용금속으로는 가장 가벼운 금속 소재이다. 또한, 전자과 차폐성과 진동흡수성이 우수하여 자동차, 항공기 산업분야에서 그 수요가 빠르게 증가하고 있다.[2-3]

마그네슘 합금 압출재의 철도차량 차체 적용을 위해서는 현재 철도차량 차체에 가장 많이 쓰이는 소재인 알루미늄 합금과의 접합 및 용접 기술에 관한 연구·개발 역시 매우 중요하다고 할 수 있다. 마그네슘 합금과 알루미늄 합금 같은 이종소재간의 접합방법으로는 볼트체결과 같은 기계적 결합, MIG, TIG와 같은 용접접합 그리고 최근 경량금속재료의 접합 방법으로 주목을 받고 있는 마찰교반용접(Friction Stir Welding; FSW)이 있다.[4-5]

FSW 공법은 고상 접합 기술로 1991년 영국의 The Welding Institute(TWI)에서 개발되었다.[6] FSW는 마찰열만을 열원으로 소재의 용점 이하의 온도에서 재료를 접합시키기 때문에 기존의 전기아크용접 방법들에 비해 용접부의 기계적 성질이 우수하다. 또한, 화염이나 기공 및 용접잔해가 남지 않아 용접 후 특별한 표면 처리가 필요하지 않다. 이러한 이유로, 최근 마그네슘 합금-알루미늄 합금 이종소재간 FSW에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있지만, 자동차 산업에 주로 쓰이는 마그네슘 합금 AZ31에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 예를 들어 이광진 등은[7] 알루미늄 합금 A6061-T6와 마그네슘 합금 AZ31간의 마찰교반용접시 접합 톨의 삽입위치에 따른 접합부의 기계적 특성에 대해 연구를 위해 A6061-T6와 AZ31를 각각 Retreating side(RS)와 Advancing side(AS)에 위치시켜 AZ31 판재 쪽으로 톨을 1mm 이동 삽입하여 용접부의 미세조직, 경도분포, 인장강도, 충격특성을 분석한 결과 톨을 이동 삽입한 공정에서 그렇지 않은 공정에 비해 인장강도와 충격특성이

약 10% 향상되었다. Ichinori Shigematsu 등은[8] 알루미늄 합금 A5052P-O를 AS, 마그네슘 합금 AZ31B-O를 RS에 배치하고 톨의 편심을 적용하지 않고 톨의 회전속도와 이송속도만 변경하여 시험을 진행하였다. 시험 결과 톨 이송속도 300mm/min의 1000, 1220, 1400rpm 조건에서 용접표면에 결함이 발생하지 않았지만, 결론적으로 톨회전속도와 이송속도변화에 따라 기계적 물성은 크게 차이를 보이지 않았다. 또한, S. Malarvizhi 등은[9] 알루미늄 합금 AA6061를 RS, 마그네슘 합금 AZ31B를 AS에 배치하고 판재 두께에 따른 최적의 Shoulder 지름비를 찾기 위해 다섯 종류의 다른 Shoulder 지름을 갖는 톨로 용접하였다. 시험결과 두께와 Shoulder지름의 비가 3.5인 경우에 가장 좋은 물성을 보였고 다른 시험조건에서는 용접부에 터널결함이 나타났다. 이와 같이 마그네슘 합금과 알루미늄 합금간의 이종접합에 대한 많은 연구가 진행되고 있지만 아직까지 정확한 용접 공정을 확정하지 못하고 있을 뿐만 아니라 주로 AZ31소재에 집중되어있다. 하지만, AZ31은 상용 소재로서 구조재로 사용하기에는 강도가 충분하지 않다. AZ61의 경우 AZ31보다 알루미늄 합금의 함량을 높여 강도를 증가시켜 구조재에 적용이 가능하지만 상용소재가 아니기 때문에 AZ61의 마찰교반용접에 관한 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 마그네슘 합금의 철도차량 차체 적용을 위해 알루미늄 합금 A6005와 마그네슘 합금 AZ61간의 이종접합에 대한 마찰교반용접 최적조건을 찾기 위하여 압출 판재의 맞대기 용접(butt welding)을 진행 하였다. 용접툴의 용접위치와 모재의 냉각 유·무에 따라 교반부의 건정성을 인장시험과 조직 관찰을 통해 평가하고, 향후 철도차량 제작에 적용 가능성을 검토하였다.

2. 시편 제작 및 시험 방법

2.1 시험 방법

본 연구에서는 철도차량 차체에 적용되고 있는 알루미늄 합금 A6005(Si 0.6-0.9 wt.%, Fe 0.35 wt.%, Mg 0.4-0.6 wt.%, balance Al)와 마그네슘 합금 AZ61(Al 5.6 wt.%, Zn 0.78 wt.%, Mn 0.2 wt.%, balance Mg)의 압출된 판재를 55mmx150mmx5mm(폭x길이x두께)의 크기로 가공하였다. 각각의 판재들은 용접시 AS에 A6005, RS에 AZ61을 위치시켜 두 종류의 압출 판재에 대한 맞대기 용접을 수행하였다.(Fig. 1-2)



Fig. 1. Friction stir welding equipment

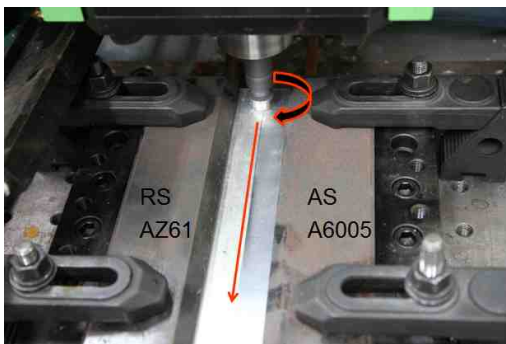


Fig. 2. Scene of friction stir welding at room temperature

본 시험에서는 톨 회전속도와 용접속도를 500rpm-30mm/min, Tilting 각도를 0°로 고정하고, 톨 삽입위치, 모재의 온도와 같은 용접 공정변수들을 변경하며 용접부의 강도 특성을 파악하였다. 편심의 정도 및 냉각 온도와 같은 자세한 용접 조건들을 Table 1에 나타내었다. 모재의 냉각은 Fig. 3과 같이 Back plate와 Zig에 있는 냉각 장치를 이용하여 실시하였다. 수냉식 냉각기를 이용하여 Zig와 Back plate 내부에 냉각수를 순환시켜 냉각하는 방식이다.

Table 1. Welding conditions

Case	Eccentricity	Temperature
1	Mg, 1mm	Room temperature
2	Al, 1mm	Room temperature
3	0mm	Cooling(-0.6℃)
4	Mg, 1mm	Cooling(0.0℃)
5	Mg, 1.7mm	Cooling(0.1℃)
6	Al, 1.7mm	Cooling(0.2℃)

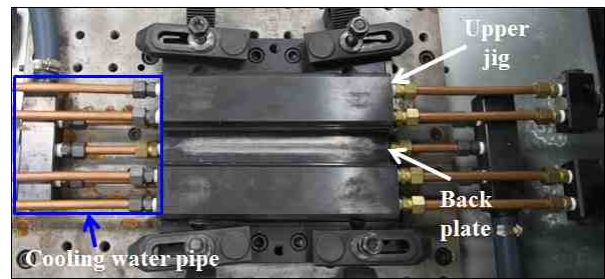


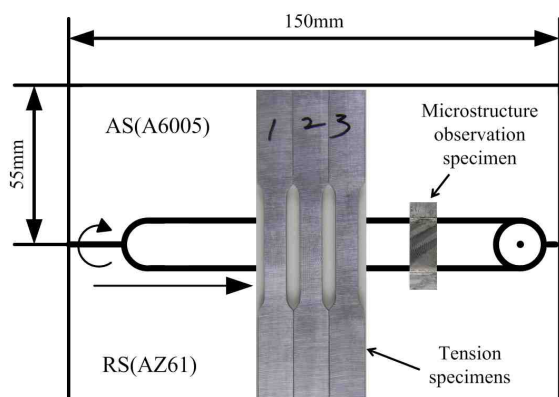
Fig. 3. Cooling system of friction stir welding

Fig. 4은 용접 시 사용된 톨로 재질은 SKD61, Shoulder의 지름은 18mm, 핀의 지름은 3.4~6mm로 테이퍼형상에 원나사산이 있고, 핀의 길이는 4mm 이다. 용접시 톨의 회전 방향은 시계방향으로 제작하였다.

Fig. 4. Shape and dimension of FSW tool

2.2 용접부 평가 방법

용접부의 강도 평가를 위하여 용접방향의 수직 방향으로 인장시편을 ASTM E8 규정에 따라 각 케이스별 3개씩 채취하였고, 자세한 인장시편의 치수는 Fig. 5에 나타나 있다. 인장시험은 Instron 5982 장비를 사용하여 1mm/sec의 속도로 상온에서 진행하였다.



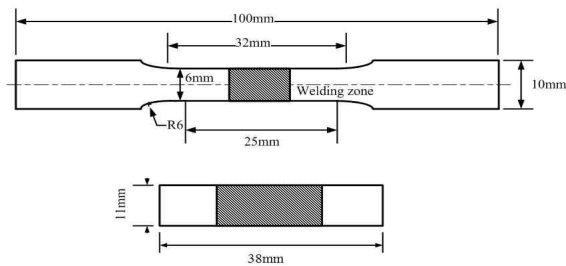


Fig. 5. Tensile and microstructure observation specimens

용접부의 미세조직을 관찰하기 위해 Fig. 5와 같이 시편을 가공하고 광학현미경 Nikon Epiphot 200 장비를 사용하였다. 미세조직관찰은 용접방향의 수직단면에서 수행되었다. 광학현미경 관찰을 위한 시편은 3 g picric acid + 10 ml acetic acid + 10 ml distilled water + 100 ml ethanol로 AZ61에 맞춘 에칭액을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부 인장 시험 결과

각 용접시편에 대한 인장시험 결과는 각 케이스별 3개의 시편의 평균값으로 Fig. 6에 나타나있다. 용접부의 인장강도는 약 33~81MPa로 Case 5에서 가장 낮게 나타났으며 Case 4에서 가장 높게 나타났다. Case 1과 Case 2의 결과를 보면 상온에서 마그네슘 합금 방향의 편심을 준 경우 보다 알루미늄 합금 방향으로 편심을 준 용접부의 강도가 더 높게 측정 되었다. Case 1과 Case 4의 결과를 통해 동일한 용접조건에서 모재의 냉각 유무에 따른 용접부의 강도 차이를 확인 하였다. 상온의 Case 1보다 모재를 냉각 시킨 Case 4에서 강도가 약 2배 높게 측정되었다. 따라서, 모재 냉각의 효과가 강도를 증가시킨 것을 확인하였다. Case 3~5의 결과를 보면 모재 냉각시 편심 정도에 따른 용접부의 강도 변화를 확인할 수 있다. 모재 냉각 상태에서는 마그네슘 합금 방향으로 1mm 편심을 준 경우에 강도가 가장 높게 나타났고, 마그네슘 합금 방향 1.7mm 편심의 용접부강도가 가장 낮게 나타났다. 편심의 경우 지나치게 적용할 경우 오히려 강도가 떨어지지만 적절한 편심을 적용하게 되면 용접부의 강도를 증가시킬 수 있다. Case 5와 Case 6의 결과를 통해 모재 냉각시 마그네슘 합금과 알루미늄 합금 방향에 관계없이 1.7mm 편심을 준 경우에는 용접부 강도가 매우 낮게 나타났다.

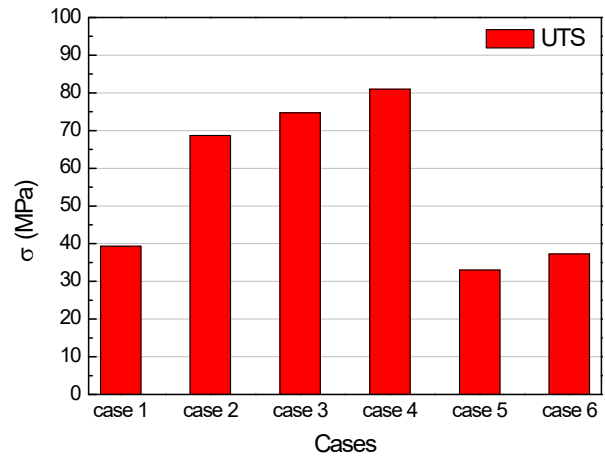


Fig. 6. Result of tensile strength

결과적으로 AZ61(Mg)-A6005(Al) 이종소재의 마찰교반 용접시 상온에서는 알루미늄 합금 방향으로 1mm 편심이 좋았지만, 모재 냉각시에는 마그네슘 합금 방향으로 1mm 편심의 경우가 더 좋게 나타났다. 또한, 과도한 편심의 설정은 두모재를 고르게 교반 시키지 못하고, 한 방향의 소재끼리의 교반되었기 때문에 용접부의 강도저하의 주요원인으로 나타났다.

모든 경우의 용접시편의 인장강도가 모재의 항복강도 전에 파단이 일어났고, 인장 강도(A6005: 260MPa, AZ61: 310MPa) 보다 매우 낮게 측정되었다. 이러한 원인을 좀 더 자세히 알아 보기위해 용접부의 단면과 미세조직을 관찰하였다.

3.2 용접부 조직 특성

Fig. 7는 모든 용접 조건의 용접부 단면을 보여주고 있다. 앞의 인장시험에서 Case 1, 5, 6에서 강도가 낮게 나타났는데 단면 관찰 결과 용접부에서 기공이 발생한 것을 확인하였다. 특히 Case 6은 알루미늄 합금과 마그네슘 합금이 전혀 섞이지 않고 교반부 윗부분에 알루미늄 합금으로만 덮여있고, 각 합금간의 경계가 가장 선명하게 나타났다. Case 5의 경우는 틀의 삽입위치가 마그네슘 합금 방향으로 1.7mm 편심 되었기 때문에 마그네슘 합금이 알루미늄 합금과 거의 섞이지 않은 것을 확인할 수 있다. Case 5, 6의 단면 관찰 결과 과도한 편심으로 인해 두 합금의 교반이 이루어지지 않고 마그네슘 합금에 비해 알루미늄 합금이 교반이 쉽게 이루어짐을 알 수 있다. 이는 향후 마그네슘 합금과 알루미늄 합금 이종접합시 AS 방향에 알루미늄 합금을 배치 할 수 있는 근

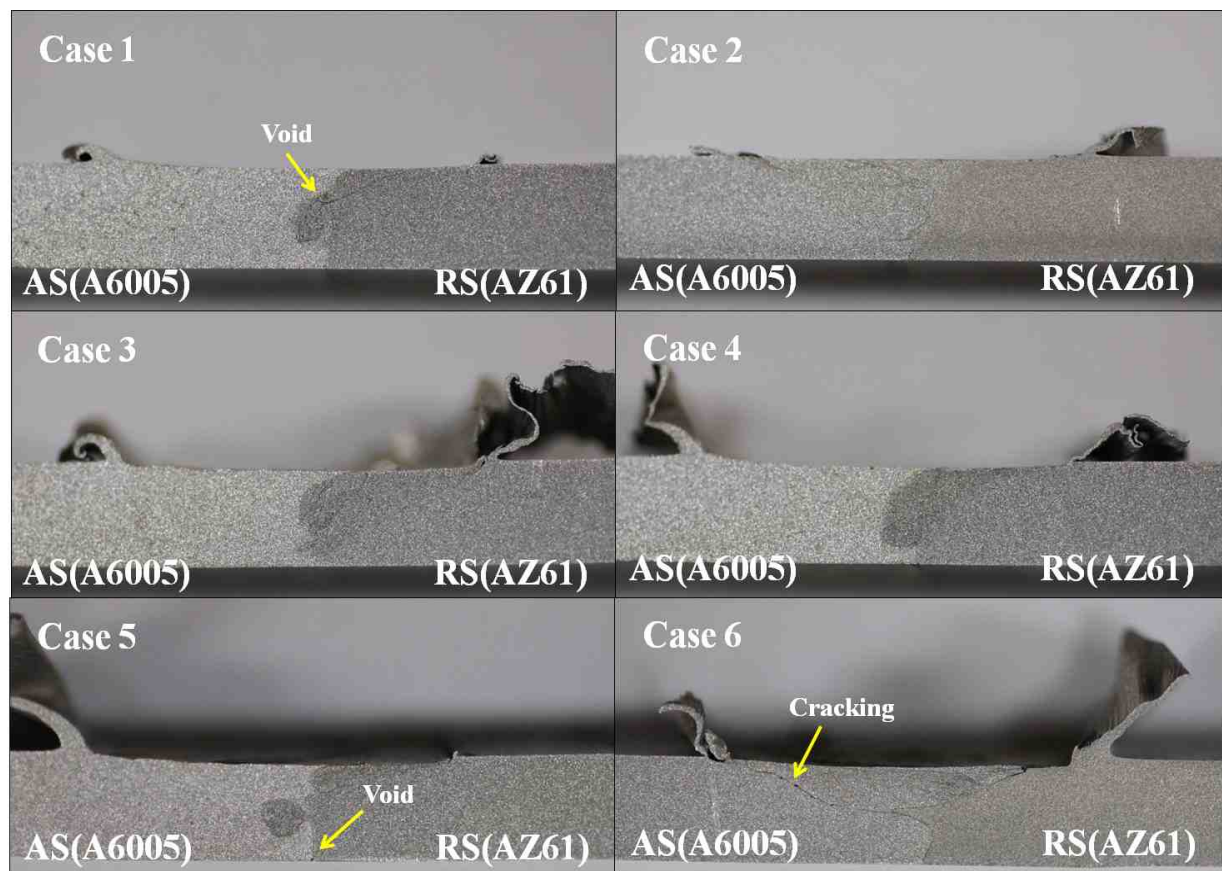


Fig. 7. Cross section of welded zone

거가 될 것이다. 인장 강도가 비교적 높게 나타난 Case 3, 4의 단면을 관찰해보면 마그네슘 합금과 알루미늄 합금의 용접부에 육안으로 관찰할 수 있는 결함이 없고 두 합금의 경계면도 결함이 없이 잘 교반된 것을 알 수 있다. 용접부 단면 관찰 결과 상대적으로 강도가 낮고 연질인 알루미늄 합금을 AS에 배치하고 강도가 높고 경질인 마그네슘 합금 방향으로 편심을 1mm 주어 툴을 삽입하였을 때 강도가 가장 높게 측정되었다.

Fig.8과 Fig. 9에는 마찰교반용접부 단면의 미세조직을 광학현미경을 통해 관찰한 결과가 나타나 있다. 애칭액이 AZ61에 맞추었기 때문에 애칭이된 어두운 부분이 AZ61이고 밝은 부분이 A6005이다. Fig. 8에는 1mm 편심중에 인장강도가 가장 낮은 Case 1와 인장강도가 가장 높았던 Case 4의 미세조직을 나타내고 있다. Case 1의 조직을 보면 Shoulder 부에서는 AZ61과 A6005가 섞여 Onion ring이 형성되었지만, 교반부(Stir zone)와 그 아래쪽으로 내려갈수록 터널, 보이드 결함이 발생한 것을 확인할 수 있다. 따라서 인장 시험시 낮은 강도를 보

인 것으로 사료된다. Case 4의 경우에는 용접부 전체적으로 Onion ring이 형성되어있고 AZ61과 A6005의 계면에 결함이나 금속간화합물이 발생하지 않고 양호하게 접합되어있는 것을 확인하였다. Fig. 9에는 Case 2, 3의 미세조직이 나타나 있다. 두 단면에서는 Onion ring이 전체적으로 형성되었고, 결함이 발생하지 않았지만 교반부에 마그네슘 합금이 알루미늄 합금과 완전히 교반되지 않고 마그네슘 합금 덩어리가 나타나있는 것을 확인할 수 있다. Case 4와 비교했을 때 이러한 결정들이 인장 강도저하에 영향을 미친 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 철도차량적용을 위한 알루미늄 합금 A6005과 마그네슘 합금 AZ61 압출판재의 마찰교반용접을 실시하였고, 툴 삽입위치와 모재 냉각 유·무에 따라 용접부의 특성을 관찰하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

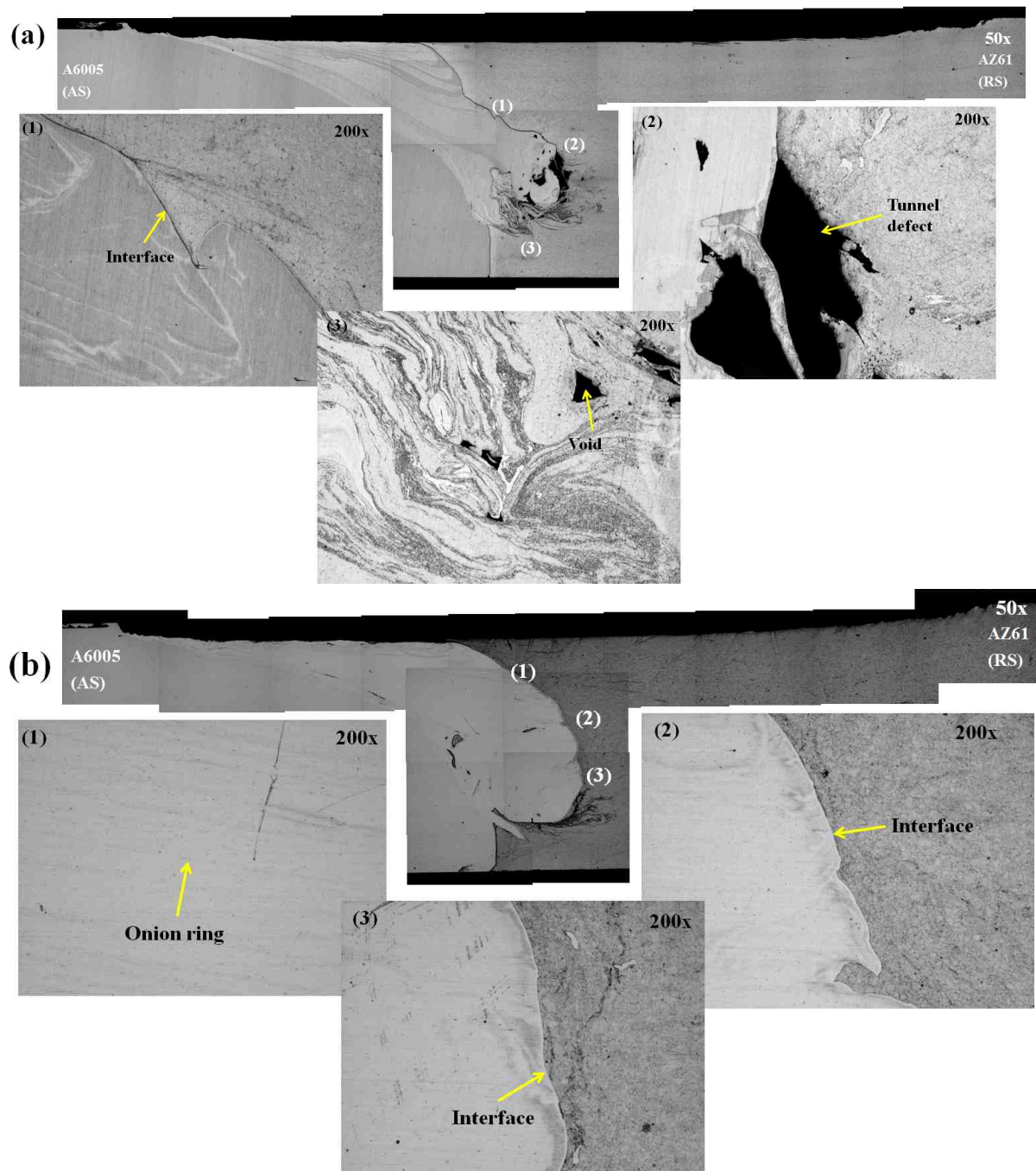


Fig. 8. Optical microstructure of the welding cross section (a)Case 1 (b)Case 4

(1) 모재를 냉각하고 AZ61 방향으로 1mm 편심을 가한 용접조건에서 강도가 가장 높게 측정되었고, 인장강도가 확연히 조건들에서는 용접 부 결함이 발생하였다.

(2) 본 연구를 통해 이종소재의 마찰교반용접시 모재의 냉각과 톨 삽입위치가 용접부 강도에 중요한 용접변수임을 확인하였고, 과도한 편심은 방향에 상관없이 교반력을 급격하게 저하시키는 것을 확인하였다.

(3) 하지만, 가장 높은 강도가 알루미늄 합금 대비 약 31%, 마그네슘 합금 대비 약 26%로 여전히 낮은 결과를 보였다. 향 후 모재 냉각뿐만 아니라, 톨 냉각 또는 톨 핀 치수 변경을 통해 A6005-AZ61 이종소재 마찰교반용접부의 용접강도를 상승 시킬 수 있을 것으로 예상된다.

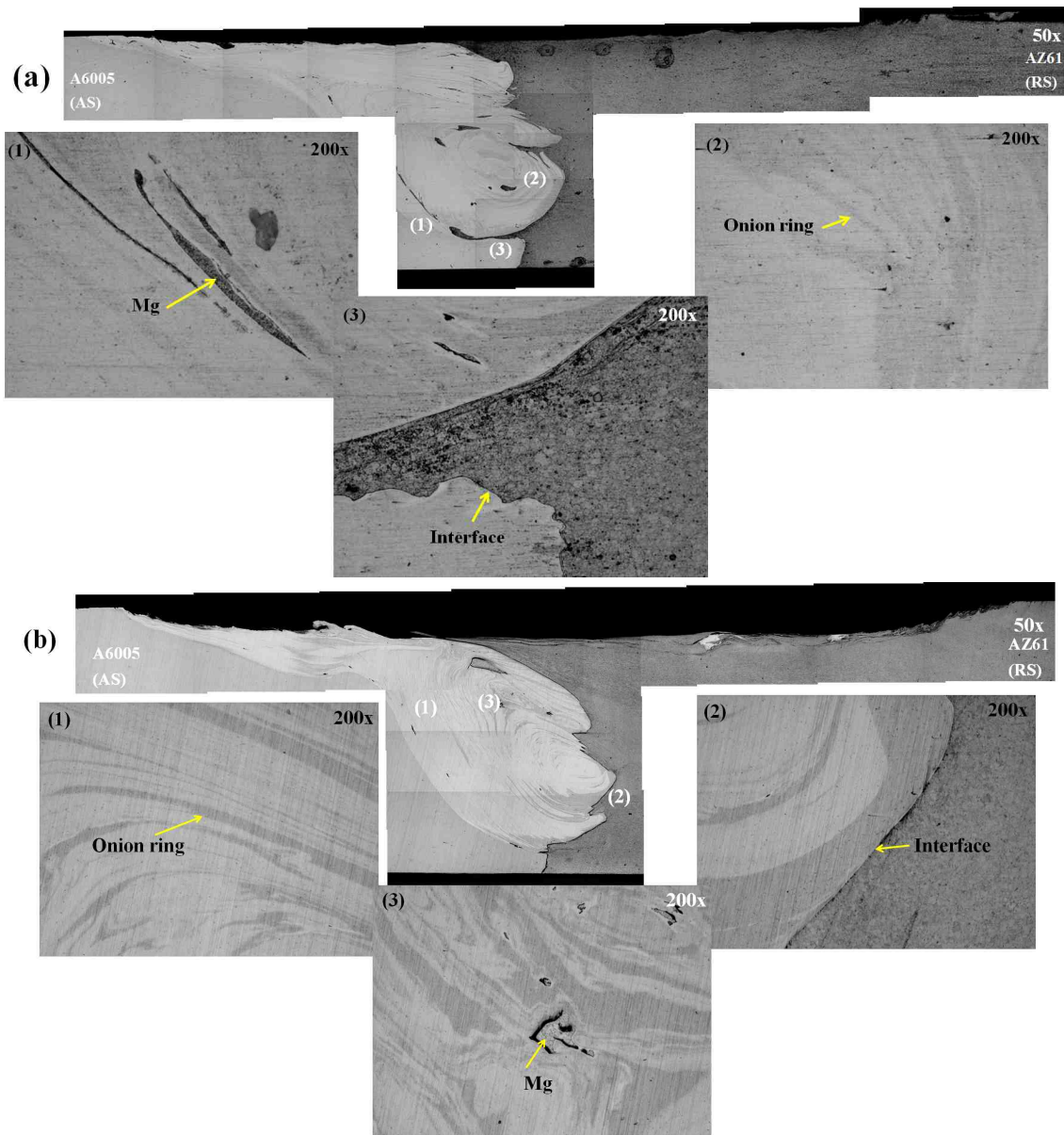


Fig. 9. Optical microstructure of the welding cross section (a)Case 2 (b)Case 3

References

- [1] W. G. Lee, J. S. Kim, S. J. Sun, J. Y. Lim, "The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys", Journal of Rail and Rapid Transit, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F, 0954409716646140. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0954409716646140>
- [2] J. Liao, N. Yamamoto, K. Nakata, "Effect of dispersed intermetallic particles on microstructural evolution in the friction stir weld of a fine-grained magnesium alloy", Metallurgical and Materials Transactions A, 40, 9, pp. 2212-2219, September, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-009-9921-2>
- [3] Yu, Lina, K. Nakata, J. Liao, "Microstructural modification and mechanical property improvement in friction stir zone of thixo-molded AE42 Mg alloy", Journal of Alloys and Compounds, 480, 2, pp. 340-346, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.02.015>
- [4] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing." Materials Science and Engineering, R: Reports, 50, 1, pp. 1-78, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- [5] G. Padmanaban, V. Balasubramanian, "Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy - an experimental approach", Materials & Design, 30, 7, pp. 2647-2656, 2009.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.021>

- [6] W. M. Thomas et al.: Friction Stir Butt Welding, International Patent Application No. PCT/GB92 Patent Application No. 9125978.8, 1991.
- [7] K. J. Lee, S. H. Kim, "Effects of Tool Plunge Position on Mechanical Properties of Friction-stir-welded Region in A6061-T6/AZ31 Dissimilar Metals", Journal of Korean Welding and Joining Society, 30, 5, pp. 416-420, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/kwjs.2012.30.5.416>
- [8] Shigematsu, Ichinori, Y. J. Kwon, and N. Saito, "Dissimilar friction stir welding for tailor-welded blanks of aluminum and magnesium alloys", Materials transactions, 50, 1, pp. 197-203, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.MER2008326>
- [9] S. Malarvizhi, V. Balasubramanian, "Influences of tool shoulder diameter to plate thickness ratio (D/T) on stir zone formation and tensile properties of friction stir welded dissimilar joints of AA6061 aluminum - AZ31B magnesium alloys", Materials & Design, 40, pp. 453-460, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.008>

이 우 근(Woo Geun Lee)

[정회원]



- 2013년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 2016년 6월 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학 박사과정

<관심분야>

구조해석, 경량소재

선 승 주(Seung-Ju Sun)

[준회원]



- 2015년 3월 ~ 2016년 6월 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학 석사 과정

<관심분야>

경량소재, 기계

임 재 용(Jae-Yong Lim)

[정회원]



- 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

<관심분야>

구조해석, 경량소재

김 정 석(Jung-Seok Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

신소재, 철도차량 경량화