

# 회전공구 회전속도에 따른 알루미늄 합금 (Al6005-T6)의 마찰교반접합 특성 연구

최두호  
동의대학교 신소재공학부

## Evaluation of the Effect of Rotating Tool for Friction Stir Welding Al6005-T6

Dooho Choi

Division of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University

**요약** 본 연구에서는 철도차량의 경량 차체 소재로 주로 사용되는 알루미늄 합금 (Al-6005-T6) 압출체에 대한 마찰교반접합 적용 연구를 수행하였다. 용접속도를 300 mm/min으로 고정시킨 채 회전 공구의 회전속도를 600, 900, 1200, 1600 rpm으로 변화시킬 때 미세구조 및 기계적 특성의 변화에 대해 평가하였다. 특히, 동일 소재에 대해 전통적인 용접방법인 MIG 용접된 시편과의 비교를 통해 마찰교반접합법의 철도차량 적용성에 대해 논하였다. MIG 용접방법과는 달리, 마찰교반접합부에는 미세기공이 발견되지 않았으며, 경도 측정 결과 공구의 회전속도가 빨라질수록 높아진 입열량에 따라 heat affected zone (HAZ)의 범위가 넓어지고 결정립 조대화에 따라 HAZ의 경도 또한 낮아지는 것을 확인하였다. 인장시험 결과 HAZ지역에서 파단이 발생하였으며, 본 연구에서 설정한 공구의 회전속도 범위에서는 nugget 부의 경도 변화는 발견되지 않았으나 rpm이 올라갈수록 인장강도와 항복강도가 떨어지는 경향을 보였으며 이는 경도 시험에서와 같이 HAZ지역의 결정립 크기의 증가로 인한 현상으로 판단된다.

**Abstract** In this study, we report characteristics of friction stir welding (FSW) technique applied to Al-6005-T6 extruded sheets, which is a common material for railway car bodies. With the welding speed fixed at 300 mm/min, the revolution per minute (RPM) of the rotating tool was varied from 600 to 1800 RPM, with the aim at evaluating the resultant microstructure and mechanical behaviors. Comparison is also made with the conventional Metal Inert Gas (MIG) welding technique. Unlike MIG, no micro-voids were observed for FSW specimens. Hardness measurement revealed that the increased heat input by increasing RPM results in widened heat affected zone (HAZ) and decreased hardness for HAZ due to grain coarsening. Hardness results for the nugget do not show difference. During tensile tests, specimens fractured at HAZ, and increasing rpm led to decrease of the yield stress and tensile stress for the selected RPM range, which is considered to be due to the grain coarsening for HAZ.

**Keywords** : Friction stir welding, Mechanical properties, Microstructure, Rollingstock, Tension test

### 1. 서론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 1991년 영국의 용접연구소 TWI(The Welding Institute)에서 특허출원한 이래 짧은 기간 동안에 철도산업, 자동차, 우주

항공, 조선해양 등 여러 산업분야에 걸쳐 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, 타이타늄 합금, 스테인리스 강 등 다양한 소재에 대한 적용연구가 활발히 이루어지고 있다[1-4]. 마찰교반접합법은 용가제가 필요없는 고상접합 공정으로 용융이나 응고 등에 의한 기공이나 균열의 발생이 없

\*Corresponding Author : Dooho Choi(Dong-Eui Univ.)

Tel: +82-10-2851-8592 email: dhchoi@deu.ac.kr

Received July 24, 2017

Revised September 5, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

고 용접변형량이 작으며 기존의 MIG (Metal Inert Gas) 등과 비교하여 인장강도, 연신율, 잔류응력 등의 기계적 성질이 우수하며 뒤틀림, 변색이 없는 것으로 알려져 있다[5-7].

영국, 독일, 일본, 프랑스 등의 선진국에서는 마찰교반접합 방법에 대해 다수의 특허를 보유하고 있으며 다방면에서 실용화 기술 개발에 박차를 가하고 있다. 미국에서는 Delta IV 프로젝트를 통해 군수사업이나 항공분야에 마찰교반접합법의 적용 연구를 수행하고 있으며, 중국은 국가 주도로 TWI사와 전략적 기술 제휴를 맺고 CFSW(China Friction Stir Welding) 센터를 설립하는 등 적극적으로 마찰교반접합법 적용 산업에 대해 육성을 하고 있는 실정이다. 특히, 철도차량의 차체는 약 20-25 m에 달하는 직선부를 용접해서 완성되기 때문에 마찰교반접합법을 적용하기에 이상적인 조건이며 따라서 마찰교반접합법의 적용이 가장 적극적으로 행해지고 있는 분야이다. 소재 측면에서는 차체의 경량화를 통한 에너지 절감을 위해 기존의 스테인리스를 대신하여 사용되는 알루미늄 합금에 대한 연구가 증가 되고 있다. 일본의 Hitachi는 마찰교반접합법을 이용하여 알루미늄 합금 차체의 철도차량인 A-train을 양산하였으며 Kawasaki와 Nippon Saryo 등의 철도차량 회사도 다양한 구조의 마찰교반접합법에 연구를 수행중이다[8]. 하지만 국내에서는 마찰교반접합법의 철도차량 적용은 아직 걸음마 상태이며 모든 철도차량 차체를 MIG 용접법에 의존하고 있는 실정이다[9].

본 연구에서는 철도차량 차체에 주로 사용되는 Al-6005 T6 압출재의 마찰교반 접합 시 회전공구의 이송속도를 고정하고 회전속도를 변수로 두어 회전속도가 위 합금의 마찰교반접합에 미치는 미세구조 및 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였으며, 특히 동일 소재에 대해 전통적인 용접방법인 MIG 용접된 시편과의 비교를 통해 마찰교반접합법의 철도차량 적용성에 대해 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 용접 방법

본 연구에 사용된 알루미늄 합금 Al 6005-T6의 화학적 성분을 Table 1에 정리하였다. 마찰교반용접은 200

mm(W) × 1000 mm(L) × 5 mm(T) 크기의 평판 압출재를 길이방향으로 맞대어 고정 후 마찰교반접합을 수행하였다. 회전공구의 회전속도에 대한 영향력을 알아보기 위하여 접합속도는 우수한 접합 외관을 보이는 300 mm/min으로 고정시킨 채 회전속도를 600, 900, 1200, 1600 rpm으로 변화시켰다. 접합에 사용된 회전 공구 (Fig. 1)의 소재는 텅스텐 중합금 (W-Mo-Ni-Fe)이며, 공구의 깊이는 5mm, 공구의 하단부 지름과 상단부 지름은 각각 4 mm와 6 mm, 그리고 shoulder 지름은 16 mm이다. MIG 용접은 용접전류 185 A, 용접속도 450mm/min의 조건으로 맞대기 용접을 실시하였다.



Fig. 1. Rotating tool used for this study

### 2.2 용접부 분석

압출된 용접재의 상 분석 및 결정립의 방향성 분석을 수행하기 위하여  $\Theta$ -2 $\Theta$  X-선 회절 스캔을 실시하였으며 Cu K-alpha (파장: 0.154 nm) 광선을 이용하였다.

시편 접합부에서의 미세구조 및 기공이나 균열 등의 결함을 관찰하기 위하여 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 용접부 횡단면의 너겟(nugget)부, 열-기계적 영향부(Thermally Mechanically Affected Zone, TMAZ), 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ) 및 모재를 관찰하였다. 원활한 조직 및 경계 관찰을 위하여 시편 표면 연마 후 Keller 용액에 40초 동안 에칭을 실시하였다.

용접된 시편의 기계적 특성을 관찰하기 위하여 접합 단면부에 대하여 정온 ( $25 \pm 2$ ) °C 및 정습 ( $33 \pm 5$ ) % R. H. 조건에서 KS B 0811:2003를 준용하여 비커스 경도 측정을 실시하였다. 표면에서 2mm 하단 지역을 스캔하였으며, 용접부 좌우를 완전히 포함하도록 경도측정지

역을 설정하여 1 mm 간격으로 경도를 측정하였다. 또한 KS B 0802:2003를 준용하여 인장시험을 실시하여 항복강도, 인장강도, 연신율 항목을 추출하였으며, 재현성 확인을 위해 동일 용접 시편에 대하여 인장시험을 3회씩 실시하였다. 경도 시험과 인장시험은 마찰교반접합 시편 및 MIG 용접 시편, 그리고 모재에 대하여 실시하였으며, 인장시험편 추출부 및 인장 시험 후 시편의 사진을 Fig. 2에 나타내었다.

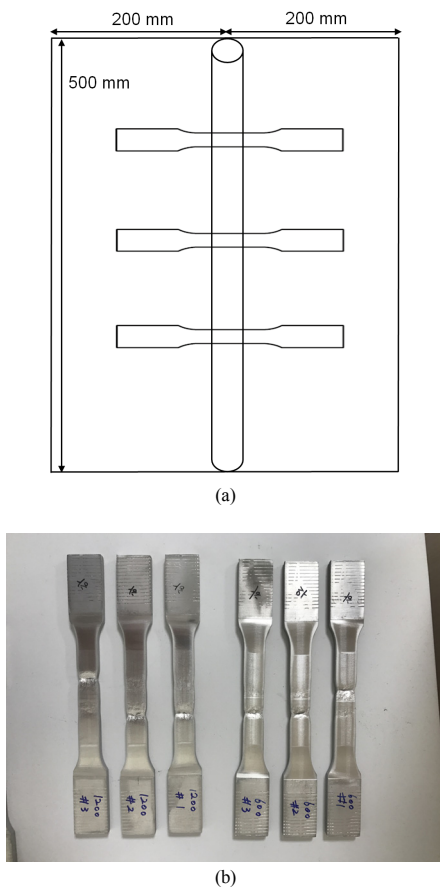


Fig. 2. (a) Dimensions of parent weld plate, and location of the specimens for tensile test, and (b) the specimens used for tensile tests.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 용접부 조직 관찰

600, 900, 1200, 1600 rpm으로 마찰교반접합된 시편

에 대한 현미경 조직 사진 및 회전공구의 전진부(advancing side)와 후진부(retreating side)를 Fig. 3에 나타내었다. 조직 사진상에서 특이한 점은 rpm이 빨라질수록 모재와 용접부 계면의 폭이 넓어지는 데, 이는 rpm이 빨라질수록 입열량이 늘어나 HAZ 지역이 넓어지는 것으로 여겨진다. Fig. 4은 MIG 용접된 시편의 조직사진이다. 용접부의 경계가 FSW 용접에 비하여 뚜렷하며, 화살표로 표시되었듯이 용융 후 급냉에 따른 미세 기공과 크랙이 형성된 것을 알 수 있지만 고상접합 공정인 마찰교반접합부에서는 이러한 결함이 관찰되지 않았다.

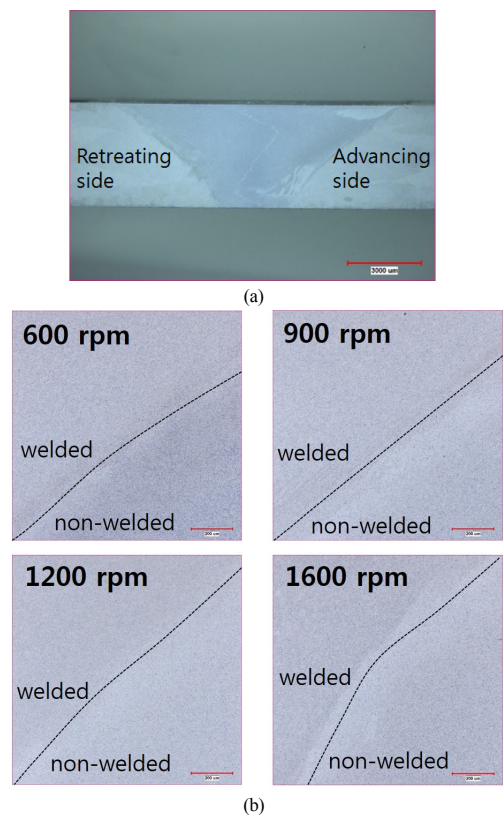


Fig. 3. (a) Microstructures of the FSW welded specimens for (a) low-magnification image and (b) high-magnification images for the specimens with the different rpm speeds.

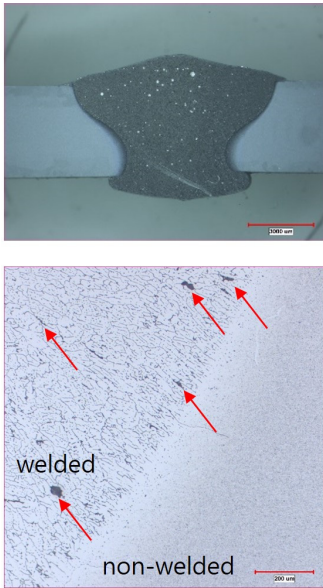


Fig. 4. Microstructures for the MIG welded specimen. Arrows represents pores and cracks in the welded side.

### 3.2 X-선 분석

Fig. 5은 모재 시편과 600 rpm 및 1,200 rpm으로 진행된 마찰교반접합부 및 모재에 대한 X-선 회절 결과를 보여준다. 600 rpm으로 공정된 시편의 경우 모재와 비교할 때 회절피크의 위치 변화가 거의 없으며 실제 이론적으로 예측되는 피크의 위치와 일치하는 것을 통해 잔류응

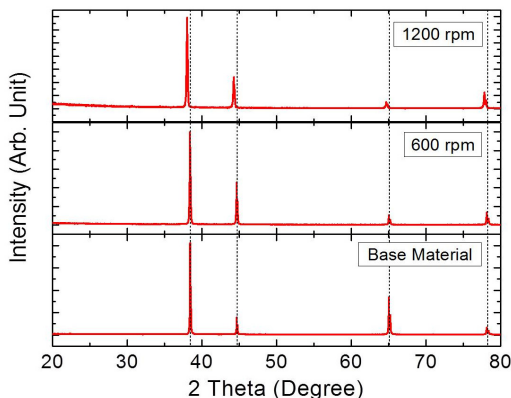


Fig. 5. X-ray diffraction patterns for the FSW specimens having 600 rpm and 1200 rpm, shown together with the pattern for the base material. The vertical dotted lines represent theoretical, unstrained peak positions for (111), (200), (220) and (311) planes, respectively.

력이 거의 발생하지 않은 것으로 결론 내릴 수 있다. 이와 반해 1200 rpm으로 공정된 시편은 이론적인 피크 위치보다 왼쪽으로 이동되어 있기 때문에 시편 표면에 수직 한 방향으로 원자면간 거리가 이상적인 값보다 늘어나 있음을 알 수 있다. 우선 배향의 경우 1200 rpm 시편과 600 rpm 시편 모두 모재와 비교할 때 시편 표면에 수직 한 방향으로 (200) 방향의 그레이인이 증가하였으며 (220) 방향의 그레이인은 감소한 것을 알 수 있다.

### 3.3 기계적 특성

Fig. 6에는 Al6005-T6 판재의 마찰교반접합 및 MIG 접합된 시편의 단면부에 대해 “모재-접합부-모재” 순서로 실시된 경도 측정 결과를 나타내었으며, 두 종류의 접합 시편 모두 좌우 대칭적인 경도측정값을 보였다. 마찰교반접합 시편의 경우 nugget 부의 경도가 모재 대비 약 70% 정도였으며, HAZ/TMAZ 지역보다는 높았다. nugget부의 경도는 공구의 회전속도에 의존하지 않고 일정한 값을 가지는 경향을 보였으나, 회전속도가 빨라질수록 (입열량이 증가할수록) 접합 계면부 (TMAZ/HAZ) 영역이 넓어졌으며 이 부분의 경도 감소 또한 확연하게 관찰이 되었다. 가장 빠른 rpm과 느린 rpm 시편의 HAZ 범위가 양 쪽으로 각각 약 2mm 넓어지게 되었다.

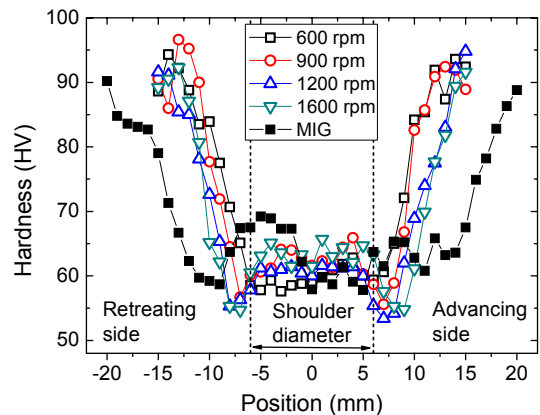


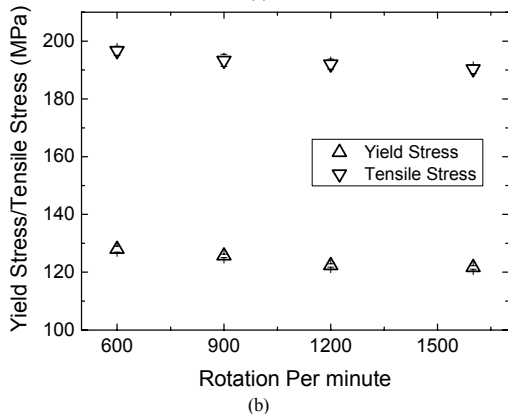
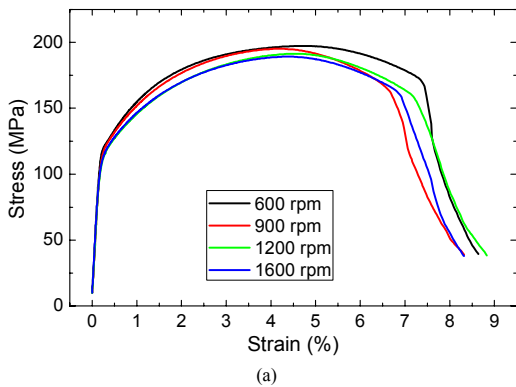
Fig. 6. Hardness profiles for the FSW specimens and MIG specimen.

Table 1에는 마찰교반접합 시 공구의 회전 속도 변화에 따른 항복강도, 인장강도, 연신율의 측정 결과값을 나타내었으며, 모재와 MIG 용접된 시편의 측정값 역시 비교를 위해 함께 표시하였다. MIG 용접된 시편은 Al-6005-T6 소재의 철도차량 적용 관련 국제규격 (EN

13981-1)인 인장강도 165이상, 항복강도 115 이상 을 만족하도록 제작이 되었다. Fig. 7에는 마찰교반접합된 시편의 인장시험 결과와 추출된 항복강도와 인장강도를 공구의 회전속도의 함수로 표현하였다.

**Table 1.** Yield stress, tensile stress, elongation for the FSW welded specimens, MIG welded specimen and parent material.

Specimen	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)
FSW (600 rpm)	128	197	8
FSW (900 rpm)	126	193	8
FSW (1200 rpm)	122	192	9
FSW (1600 rpm)	122	190	8
MIG	116	167	8
Parent Material	252	277	9



**Fig. 7.** (a) stress-strain curves for the FSW welded specimens and parent material. (b) Measured yield stress and tensile stress as a function of rotation per minute.

마찰교반접합 시편의 경우 공구의 회전 속도가 증가함에 따라 연신율의 변화는 관찰되지 않았지만, 항복강도와 인장강도는 서서히 감소되는 것이 확인되었다. 파단은 모두 접합계면 (TMAZ 또는 HAZ)에서 발생하였으며, 이는 공구의 회전속도가 빨라짐에 따라 입열량의 증가로 인해 결정립의 크기가 커지게 되고 이에 따라 전위의 움직임이 상대적으로 용이하게 됨에 따라 재료의 강도가 저하된 것으로 판단되며 이는 경도시험결과와도 일치한다. 접합부에서 MIG 용접 시편과 유사한 경도값을 가지는 결과와는 다르게 이 연구에서 적용된 모든 조건의 마찰교반접합된 시편은 MIG 용접된 시편보다 항복강도와 인장강도가 우수하게 나타났는데, 이는 MIG 용접 시편 내에 존재하는 미세 기공(Fig. 4)에서의 응력 집중 현상이 기계적 강도 저하를 발생시킨 것으로 판단된다. 향후 Al6005-T6 소재의 마찰교반접합 특성 최적화 연구를 통하여 마찰교반접합법의 철도차량 적용 연구에 대한 추가연구를 수행할 계획이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 철도차량의 경량화를 위한 차체 소재로 주로 사용되는 알루미늄 합금 (Al-6005-T6) 압출재에 대한 마찰교반접합 적용 연구를 수행하였다. 회전공구의 회전속도에 따른 미세구조 및 기계적 특성 변화를 분석하기 위하여 용접속도를 300 mm/min으로 고정시킨 채 공구의 회전속도를 600, 900, 1200, 1600 rpm으로 변화시켰다. 동일한 압출재에 대해 전통적인 사용되는 용접방법인 MIG 접합 시편과의 비교 분석을 통한 마찰교반접합법의 철도차량 적용성에 대해 분석하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 동일 소재에 대해 MIG 용접된 시편과 비교 시, 마찰교반접합부에는 미세기공이 발견되지 않았다.
- (2) X-선 회절 분석 결과 마찰교반접합부의 결정 배향이 모재와 비교할 때 (200)방향의 그레인은 증가하였고 (220) 방향의 그레인은 줄어든 것을 확인하였다.
- (3) 경도 측정 결과 공구의 회전속도가 빨라질수록 높아진 입열량에 따라 heat affected zone (HAZ)의 범위가 양쪽으로 각각 약 2mm 넓어지고 결정립

조대화에 따라 HAZ의 경도 또한 낮아지는 것을 확인하였다.

- (4) 인장시험 결과 HAZ지역에서 파단이 발생하였다. 본 연구에서 설정한 공구의 회전속도 범위에서는 nugget 부의 경도 변화는 발견되지 않았으나 600에서 1600 rpm으로 올라갈수록 인장강도는 197에서 190 MPa, 항복강도는 128에서 122 MPa로 떨어지는 것으로 확인되었다.

## References

- [1] Recent advances in friction-stir welding - process, weldment structure and properties, R. Nandan, T. DebRoy, H. K. D. H. Bhadeshia, Progress in Materials Science vol. **53**, pp. 980-1023, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>
- [2] Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum, G. Liu, L. E. Murr, C-S. Niou, J. C. McClure, F. R. Vega, Scripta Materialia, vol. **37**, pp. 355-361, 1997.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(97\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(97)00093-6)
- [3] Friction stir welding for the transportation industries, W. M. Thomas and E. D. Nicholas, Materials & Design, vol. **18**, pp. 269-273, 1997.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(97\)00062-9](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(97)00062-9)
- [4] B. Heinz, B. Skrotzki, "Characterization of a Friction-stir-welded Aluminum Alloy 6013," Metall. Mater. Trans. B, vol. **33B**, pp. 489-498, 2002.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-002-0059-5>
- [5] Hideshi Ohba, Chiaki Ueda, Kouji Agatsuma, Innovative Vehicle-the "A-train", Hitachi Review, vol. **50**, pp. 130-133, 2001.
- [6] W. Woo, G. B. An, E. J. Kingston, A. T. DeWald, D. J. Smith, M. R. Hill, "Through-thickness distributions of residual stresses in two extreme heat-input thick welds: A neutron diffraction, contour method and deep hole drilling study", Acta Mat, vol. **61**, pp. 3564-3574, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.02.034>
- [7] A. P. Reynolds, W. Tang, T. Gnaupel-Herold, H. Prask, "Structure, properties and residual stress of 304 L stainless steel friction stir welds," Scripta Mat, vol. **48**, pp. 1289-1294, 2003.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00024-1)
- [8] C. K. Chun, W. S. Chang, C. Y. Kang, Y. J. Kwon, D. H. Park, "Friction Stir Welding Technology for Aluminum Rolling Stocks", J. Kor. Weld. & Join, vol. **27**, pp. 16-20, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.5781/KWJS.2009.27.5.016>
- [9] H. Yamamoto, S. Harada, T. Ueyama, S. Ogawa, Development of low frequency pulsed MIG welding for aluminium alloys, Welding International, vol. **6**, pp. 580-583, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/09507119209548246>

최 두 호(Dooho Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 부산대학교 재료공학과 (재료공학박사)
- 2005년 8월 : 광주과학기술원 신소재공학과 (재료공학석사)
- 2011년 12월 : Carnegie Mellon University 재료공학과 (재료공학박사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 동의대학교 신소재공학부 교수

<관심분야>

Thin Film Deposition, Plasma Processing, Transparent Electrode for Optoelectronic Applications, Semiconductor Interconnects, Nano-electronic Solid-state Devices, Nano-fabrications and Characterizations, Surface Treatments, Carrier transport and Scattering Phenomena in Nano-scale Conductors