

# 유동 해석을 통한 마그네슘 합금의 마찰교반용접 분석 연구

김무선\*, 선승주<sup>2</sup>, 김정석<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 광역도시철도융합연구실, <sup>2</sup>한국철도기술연구원 첨단소재연구팀

## Analysis of Friction Stir Welding Process of Mg alloy by Computational Fluid Dynamics

Moosun Kim<sup>1\*</sup>, Seung-Ju Sun<sup>2</sup>, Jung-Seok Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Metropolitan Transit Convergence Research Division, Korea Railroad Research Institute

<sup>2</sup>Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute

**요약** 마찰 교반 용접(Friction Stir Welding)은 금속 소재 대상으로 용접 툴과 용접 재료의 마찰열을 이용하여 재료 용접 이하의 온도에서 접합하는 용접 기법이다. 이번 연구에서는 금속 접합시 쓰이는 마찰 교반 용접 기법을 활용하여 마그네슘 합금(AZ31)을 용접할 때, 용접시 발생하는 용접 대상인 마그네슘 합금의 온도 및 속도 변화에 대해 유동 해석 기법을 활용하여 분석하였다. 분석을 위해 유동 해석 툴인 플루언트를 활용하여 모델링 및 해석을 진행하였다. 먼저 용접 소재는 온도에 따라 변하는 고점도 뉴턴 유체로 가정하였으며, 나선형 홈이 있는 용접 툴의 회전에 의한 회전 유동 발생을 모사하기 위해 회전 영역과 정지 영역으로 구분하여 모사하였다. 용접 툴과 용접 재료 사이의 인터페이스는 마찰 및 미끄러짐 경계조건을 부여하여 용접 툴로의 열전달 효과를 고려하였다. 위의 유동 해석 모델링을 통한 과도 해석 결과로부터 시간의 변화에 따른 용접 소재의 속도와 온도 특성을 파악할 수 있었다.

**Abstract** Friction Stir Welding is a metal welding technique, in which friction heat between a welding tool and a welding material is used to weld parts at temperatures below the melting point of a material. In this study, the temperature and velocity changes in a magnesium alloy (AZ31) during the welding process were analyzed by computational flow dynamics technique while welding the material using a friction stir welding technique. For the analysis, the modeling and analysis were carried out using Fluent as a fluid analysis tool. First, the welding material was assumed to be a temperature-dependent Newtonian fluid with high viscosity, and the rotation region and the stationary region were simulated separately to consider the rotational flow generated by the rotation of the welding tool having a helical groove. The interface between the welding tool and welding material was given the friction and slip boundary conditions and the heat transfer effect to the welding tool was considered. Overall, the velocity and temperature characteristics of the welded material according to time can be understood from the results of transient analysis through the above flow analysis modeling.

**Keywords** : AZ31, Boundary Condition, Computational Fluid Dynamics, Friction Stir Welding, Transient analysis

### 1. 서론

오늘날의 운송 수단은 연비 향상 및 에너지 절감을 위하여 경량화에 대한 관심이 커지고 있다. 경량화를 위한

방안 중의 하나인 경량 소재를 적용하는 경우, 대표적인 경량소재로 마그네슘 합금의 개발이 활발히 진행되고 있다. 마그네슘 합금은 알루미늄 합금보다 비중이 낮은 금속으로, 항공기 제작뿐만 아니라 자동차 산업에도 그 활

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음

\*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5546 email: mskim@krrri.re.kr

Received October 27, 2017

Revised November 21, 2017

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

용도가 확대되고 있다. 또한 마그네슘 합금을 철도차량에 적용하기 위해 난연 특성이 우수한 마그네슘 제작에 관한 연구도 활발히 진행 중이다. 일반적으로 마그네슘 합금을 철도 차량에 적용시 압출 등의 공정과 용접을 통하여 차체 구조물을 제작하게 된다. 이 때 경량소재의 용접을 위한 대표적인 기술로 마찰교반용접(Friction Stir Welding; FSW) 기법을 들 수 있다. FSW 기법은 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 기술로서, 용접툴과 용접소재의 마찰로부터 발생하는 열을 이용하여, 고상의 소재를 용융점 이하에서 접합하는 기술이다. 마찰에 의한 용접 온도는 용접 이하이기 때문에 용접부의 기계적 성질이 상대적으로 우수한 장점이 있으며, 기존 용융방식 용접과 달리 용접봉과 같은 별도의 용접재가 필요하지 않다. 그 외 장점으로, 용접시 유해가스 및 유해 광선을 발생하지 않기 때문에 친환경적인 특성을 가지고 있으며, 자동화 설비를 기반으로 공정이 이루어지기 때문에 일관된 물성을 얻을 수 있다[1].

마찰교반용접에 관한 주요 연구로, Sun[2,3]은 마그네슘 합금 용접시 온도 특성을 시험과 해석을 통하여 분석하고 기계적 물성에 관한 연구를 진행하였고 Lee[4]는 알루미늄 합금 및 마그네슘 합금의 이중소재 마찰교반용접 특성에 관하여 시험을 통해 접근하였다. 용접현상 분석을 위한 접근 방법으로 해석을 활용한 연구로는 Gok[5]은 FEM 기법을 활용하여 AZ31 및 알루미늄 합금에 관한 용접 특성을 분석하였고, Colegrove[6]와 Ji[7]는 알루미늄 합금을 대상으로 CFD기법을 활용하여 FSW공법에 따른 현상 분석 연구를 진행하였다. 그리고 Albakri[8]는 AZ31을 대상으로 용접 툴 형상을 단순화한 모델링을 기반으로 유동해석을 진행하였다.

본 연구에서는 AZ31을 대상으로 용접툴과 용접 베드 및 대기 중으로의 열전달 현상을 고려하고 나선형의 툴을 가지는 툴 형상에 따른 유동 특성을 고려한 CFD 기법을 적용하여 FSW 공정의 온도 및 속도 특성에 관한 과도해석을 진행 및 결과를 검토하였다. 유동해석 툴은 Fluent를 활용하였다.

## 2. 본론

### 2.1 마찰교반용접기법 특성

Fig.1 은 마찰교반용접 공정과 이번 연구에서 고려한

용접 툴 형상을 보여준다.[2,3]용접 공정은 용접툴의 회전운동과 용접 소재의 병진운동으로 구분하며, 용접 툴은 솔더와 핀으로 나뉜다. 툴의 회전 방향에 따라 용접소재는 전진영역(Advancing side) 및 후퇴영역(Retreating side)로 구분할 수 있다.

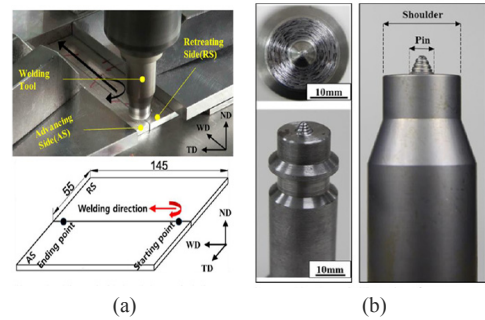


Fig. 1. (a) Schematic of friction stir welding and (b) tool shape

### 2.2 지배방정식 및 해석 모델링

비압축성 유체의 유동해석을 위한 지배방정식으로 연속 및 Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식을 고려하였다[8].

연속방정식 :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes 방정식 :

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{u_j \partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

에너지 방정식 :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p \frac{u_i dT}{dx_i} = \frac{u_i dP}{dx_i} + \nabla^2 k T - \frac{\partial u_i}{\partial x_i} P \quad (3)$$

$$+ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

이 때,  $u_i$ 는 x, y, z 방향으로의 속도 성분을 나타내며,  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\mu$ ,  $k$ 는 각각 용접 소재의 밀도, 비열, 점도 및 열전도계수를, 그리고  $P$ ,  $T$ 는 압력과 온도를 의미한다.

툴과 용접소재 인터페이스의 경계조건은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Q_s = (\delta\tau_{yield} + (1-\delta)\eta p_r)(\omega\sqrt{(x^2+y^2)} - U\frac{y}{\sqrt{(x^2+y^2)}}) \quad (4)$$

여기서  $\tau_{yield}$ 는 전단 항복응력,  $\omega$ ,  $U$ 는 톨의 회전 각속도 및 소재의 병진속도를 의미한다. 그리고  $p_r$ 은 톨의 압축력(Plunge force),  $\eta$ 는 마찰계수를 나타낸다. 인터페이스에서 정의되는 열원  $Q_s$ 는 톨과 용접소재의 고착에 따른 항복응력에 의한 열원과 마찰에 따른 열원으로 구분하여 정의할 수 있으며, 이 때  $\delta$ 는 고착과 미끄러짐의 비율을 나타내는 slip rate으로 정의할 수 있다.

톨과 용접소재의 인터페이스 영역에서 전도 열전달 및 톨과 용접소재 주변으로의 대류열전달은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$-k\frac{\partial T}{\partial z} = Q_s \quad (5)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad (6)$$

이때  $h$ 는 대류 열전달 계수,  $T_\infty$ 는 주변 대기 온도이다.

톨과 용접소재의 해석영역은 Fig.2에 나타내었다.

톨 형상은 Fig.1과 같이 나선형 홈을 가지고 있으며, 톨 형상 모델링에 이를 모사하였다. 나선형 톨의 회전시 계산 격자의 재생성 없이 유동 특성을 고려하기 위해, 해석 영역을 회전 영역과 비회전 영역으로 구분하여 정의하였다.

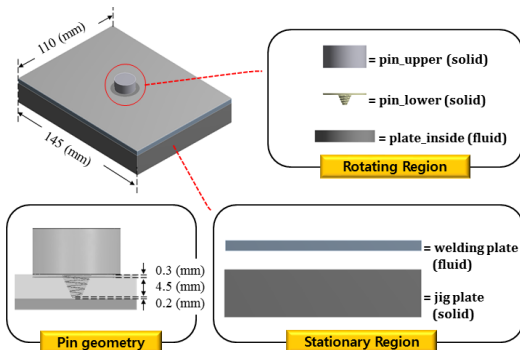


Fig. 2. Geometry of FSW model

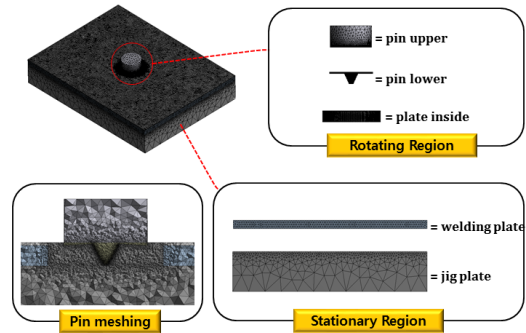


Fig. 3. Meshing of FSW model

### 2.3 수치 해석 조건

격자생성은 사면체 격자를 활용하였으며, 생성 격자수는 350만개로 구성하였다. 그리고 톨 주변의 유동 특성을 정확하게 구현하기 위해 톨 주변으로 조밀 격자를 생성하였다. (Fig. 3)

Table 1. Material property

| Materials | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Specific heat (J/kgK) | Thermal conductivity (W/mK) |
|-----------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| AZ31      | 1750                         | 1050                  | 80                          |
| SKD61     | 7700                         | 460                   | 25                          |
| Steel     | 8030                         | 502.48                | 16.27                       |

적용 소재 물성은 용접툴(SKD61), 용접소재(AZ31), 지그(Steel) 등 3가지로 나누어 table 1과 같이 정의하였다.

해석 대상 유동 소재인 AZ31의 점도는 Newtonian 유체로 가정하여 온도에 관한 함수로 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \mu &= 1000 \text{ when } T < T_{sol} \\ \mu &= 0.001 \text{ when } T > T_{liq} \\ \mu &= 0.001 \exp\left[-13.82 \frac{(T - T_{liq})}{(T_{liq} - T_{sol})}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

이 때  $T_{sol}$ ,  $T_{liq}$ 는 AZ31의 고화 및 액화 기준온도를 나타내며, 575°C와 630°C로 각각 정의하였다[9].

AZ31의 전단 항복응력은 Nguyen[10]의 연구결과에서 얻어진 온도에 따른 인장항복 응력값을 토대로 정의하였다. 인장항복응력으로부터 계산되는 전단항복응력

정의는 다음과 같다.

$$\tau_{yield} = \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

다음으로 해석 경계조건으로 유체 입력 및 출력 속도는 용접소재의 이송 속도로 정의하였으며, 대류 열전달 계수  $h$ 는  $30W/m^2K$ 로, 외부 온도는  $25^\circ C$ 로 가정하였다. 소재 이송 속도는  $100mm/min$ , 용접 툴의 회전속도는  $1600rpm$ 으로 지정하였다.

위와 같이 정의한 모델링을 기반으로 유동 수치해석을 진행하기 위해서는, Slip rate의 값을 정의하여야 하는데, 이번 연구에서는 용접 시험 결과로부터 얻어진 온도 데이터를 기반으로 온도 결과값과 가장 유사한 해석 결과 값을 얻을 수 있는 Slip rate를 찾아내어 그 값을 기반으로 한 해석 결과를 분석하였다.

### 2.4 수치 해석 결과 분석

앞서 정의한 해석 모델링 기반으로 유동해석을 수행하여 온도와 속도에 관하여 검토하였다. 먼저 시간에 따른 온도 분포를 툴 및 용접소재의 단면과 형상 경계면을 기준으로 각각 Fig. 4와 Fig.5 에 나타내었다.

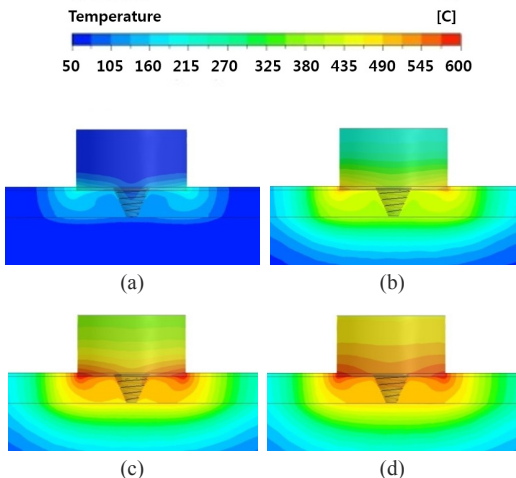


Fig. 4. Temperature contours in the middle cross section of tool and part at time (a) 0.4 sec (b) 6.2 sec (c) 10.4 sec and (d) 14.2 sec

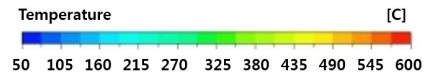


Fig. 5. Temperature contours on the boundary of tool and part at time (a) 0.4 sec (b) 6.2 sec (c) 10.4 sec and (d) 14.2 sec

용접 시간에 따른 온도 분포에서 온도 최대 상승치는 용접 툴의 솔더 부분에서 나타나며 툴 팁 주변의 온도는 툴의 다른 부분에 비해 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이는 식(4)로부터 예상 할 수 있듯이 마찰에 따른 열원 정의에서 각속도에 따른 절대 속도가 가장 높은 곳에서 열유속이 가장 크기 때문이다. 온도 분포는 툴의 중심을 기준으로 시간이 지날수록 비대칭의 특성을 보임을 확인할 수 있다. 이는 용접소재의 이송에 따른 속도 차이로 전진면과 후진면의 온도 차이가 발생함을 의미한다.

용접 툴로의 열전달 효과를 고려한 계산 결과로부터, 용접툴 내부의 온도상승이 초기에는 용접소재 대비하여 느리게 진행되지만, 시간이 지날수록 그 상승속도는 빨라져 용접소재 내부의 온도 상승보다 빨리진행됨을 알 수 있다.

다음으로 용접소재의 유동속도에 관한 유선(stream line)과 내부의 속도 벡터에 관한 결과를 Fig.6과 Fig.7에 각각 표시하였다.

먼저 유선을 살펴보면 툴의 바깥에서 안쪽으로 점차적으로 속도가 낮아진다. 초기 용접시에는 소재의 낮은 온도에 따른 높은 점도에 의해 유선 분포가 일정한 방향으로 단순하게 분포하지만 시간이 지날수록 온도 상승에 의해 점도가 낮아지면서 복잡한 유동 패턴을 보이게 된다. 또한 용접툴의 진행방향을 기준으로 툴의 회전속도

와 용접 소재의 병진 속도의 차이에 의해 유선분포가 비대칭의 특성을 가진다. 이는 앞서 설명한 FSW 공정 특유의 전진 영역과 후진 영역의 구분이 발생하는 현상을 보임을 알 수 있다.

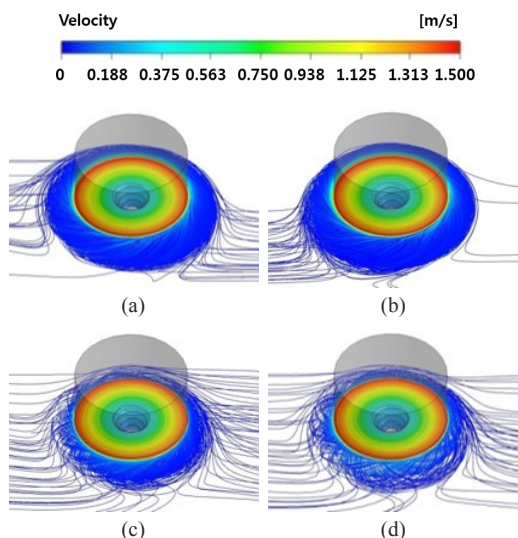


Fig. 6. stream line of velocity in welded part at time (a) 0.4 sec (b) 6.2 sec (c) 10.4 sec and (d) 14.2 sec

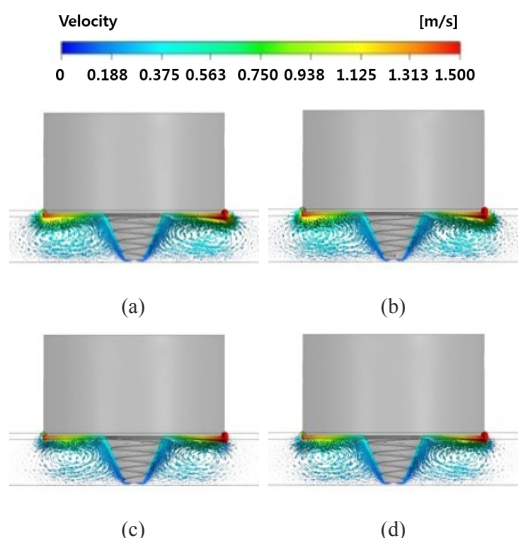


Fig. 7. velocity vector in welded part at time (a) 0.4 sec (b) 6.2 sec (c) 10.4 sec and (d) 14.2 sec

용접소재의 단면을 기준으로 속도벡터를 살펴보면, 툴 솔더와 팁 벽면에서는 툴의 회전 및 진행방향에 따라 경계면의 속도와 동일한 속도 벡터를 보이는 반면, 솔더

와 팁의 중간 영역에서는 복잡한 유형의 속도 벡터 특성을 보인다. 이는 나선형 툴 형상의 회전에 의하여 발생하는 불규칙한 유동 특성의 영향으로 양측 용접소재간의 혼합이 균일하게 진행될 수 있는 장점이 있다. 속도벡터장은 시간에 따라 그 범위가 줄어들음을 알 수 있는데, 이는 온도 상승에 따른 낮아진 점도의 영향으로 유동장의 크기가 축소됨을 의미한다.

### 3. 결론

이번 연구에서는 유동해석 기법을 활용하여 마그네슘 합금인 AZ31을 대상으로 시간에 따른 FSW의 용접특성을 분석하였으며 다음과 같이 결과를 정리할 수 있다.

- (1) FSW 용접의 유동해석기법 적용을 위해 용접툴과 용접소재간의 마찰에 따른 열원 정의와 함께 용접 툴로의 열전달 효과를 함께 고려하였다. 그 결과 유속이 가장 높은 곳으로 예상한 용접 툴의 솔더 부근에서 가장 높은 온도 값을 확인하였으며, 툴의 회전과 용접소재의 이송속도의 차이에 따라 온도 분포가 비대칭을 보임을 확인하였다.
- (2) 온도 상승에 따라 점도가 낮아지는 영향으로 인하여, 유선의 분포가 시간에 따라 달라짐을 확인하였으며, 나선형 형상 툴의 회전에 의해 속도 벡터의 불규칙성이 발생하여 솔더와 팁 중간 영역에서 용접소재의 혼합이 균일하게 이루어질 수 있음을 확인하였다.

이번 연구에서는 slip rate 값을 정의하기 위해, 해석 조건과 동일한 조건의 시험을 진행하여 얻은 특정 위치의 온도 값을 근거로, 그 값에 최대한 근접한 해석 값을 얻을 수 있도록 slip rate 값을 가정하여 그 값을 해석조건으로 부여하였다. 향후 연구로는 다양한 조건에서의 해석결과가 타당할 수 있도록, 회전 및 이송속도에 따른 slip rate 변화 특성을 시험을 통하여 분석하고자 한다.

### References

[1] H. I. Dawood, K. S. Mohammed, M. Y. Rajab, "Advantages of the green solid state FSW over the

conventional GMAW process”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, pp. 1-10, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/105713>

- [2] S. Sun, J. Kim, W. Lee, “Evaluation on Temperature of FSW Zone of Magnesium Alloy using Experiment and FE Analysis”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 7, pp. 434-441, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.7.434>
- [3] S. Sun, J. Kim, W. Lee, J. Lim, “Evaluation of Mechanical Properties of Extruded Magnesium Alloy Joints by Friction Stir Welding : Effect of Welding Tool Geometry”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 10, pp. 280-288, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.10.280>
- [4] W. Lee, J. Kim, S. Sun, J. Lim, “Characteristics of Dissimilar Materials Al alloy(A6005)-Mg alloy(AZ61) Under Friction Stir Welding for Railway Vehicle”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 8, pp. 706-713, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.8.706>
- [5] K. Gok, M. Aydin, “Investigations of friction stir welding process using finite element method”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 68, pp. 775-780.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4798-z>
- [6] P.A. Colegrove, H.R.Shercliff, “3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169, pp. 320-327, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.015>
- [7] S.D. Ji, Q.Y. Shi, L.G. Zhang, A.L. Zou, S.S. Gao, L.V.Zan, “Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry”, *Computational Materials Science*, vol. 63, pp. 218-226, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.06.001>
- [8] A.N. Albakri, B. Mansoor, H. Nassar, M. K. Khraisheh, “Thermo-mechanical and metallurgical aspects in friction stir processing of AZ31 Mg alloy – A numerical and experimental investigation”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 279-290, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.09.015>
- [9] W. Gale, T. Totemeier, *Smithells Metals Reference Book (8th Edition)*, Elsevier, 2004.
- [10] N. Nguyen, O.S. Seo, C.A. Lee, M. Lee, J. Kim, H.Y. Kim, “Mechanical Behavior of AZ31B Mg Alloy Sheets under Monotonic and Cyclic Loadings at Room and Moderately Elevated Temperatures”, *Materials*, vol. 7, pp. 1271-1295, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma7021271>

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학박사), France Ecole des Mines de Saint-Etienne 기계공학(공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

최적화, 열유동 및 구조 해석

선 승 주(Seung-Ju Sun)

[정회원]



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

<관심분야>

경량소재, 기계

김 정 석(Jung-Seok Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

신소재, 철도차량 경량화