

수치해석을 활용한 마찰교반용접 공정의 온도 특성 분석 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구팀

Study on Temperature Characteristics of Friction Stir Welding Process by Numerical Analysis

Moosun Kim

Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 마찰교반용접(Friction Stir Welding) 기술은 금속 소재를 대상으로 하는 용접기술 중의 하나로 용접대상이 되는 소재와 고속으로 회전하는 용접툴 사이의 마찰로 인한 열을 활용하여 소재의 용접 이하 온도에서 접합하는 기술이다. 이번 연구에서는 마찰교반용접을 진행할 때, 용접 대상물의 내부 온도 변화를 분석하기 위한 방법으로 수치해석기법을 사용하였다. 용접소재로는 마그네슘 합금인 AZ31을 고려하였으며, 용접현상을 멜팅풀(melting-pool)이 생성되는 유동 특성으로 간주하고 유동해석을 수행하기 위해 유동특성 수치해석 툴인 FLUENT를 이용하였다. 용접과정의 유동해석을 진행하기 위해 용접소재는 고점도 뉴턴 유체로 가정하였고, 용접툴과 용접대상 소재의 경계면은 마찰 및 미끄러짐이 동시에 발생하는 조건으로 경계조건을 선정하였다. 그리고 용접툴의 회전속도 및 용접속도를 변수로 하여 다양한 해석을 진행하였다. 해석 결과로부터 용접툴의 회전속도가 높을수록, 용접속도가 느릴수록 소재 내 최고온도가 증가함을 확인할 수 있었으며, 그 중 용접툴의 회전속도 차이가 온도 변화에 더 큰 영향을 보임을 확인하였다.

Abstract Friction Stir Welding is a welding technique for metal materials that utilizes the heat generated by friction between the material to be welded and the welding tool that rotates at high speed. In this study, a numerical analysis method was used to analyze the change in the internal temperature of the welded material during friction stir welding. As the welding target material, AZ31 magnesium alloy was applied and the welding phenomenon was considered a flow characteristic, in which a melting-pool was formed. FLUENT was used as the numerical tool to perform the flow analysis. For flow analysis of the welding process, the welding material was assumed to be a high viscosity Newtonian fluid, and the boundary condition of the welding tool and the material was considered to be the condition that friction and slippage occur simultaneously. Analyses were carried out for various rotational speeds and the translational moving speed of the welding tool as variables. The analysis results showed that the higher the rotational speed of the welding tool and the slower the welding tool movement speed, the higher the maximum temperature in the material increases. Moreover, the difference in the rotational speed of the welding tool has a greater effect on the temperature change.

Keywords : AZ31, Computational Fluid Dynamics, Friction Stir Welding, Moving speed, Rotational Speed, Temperature

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B07044505)

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

email: mskim@krii.re.kr

Received October 11, 2019

Accepted December 6, 2019

Revised November 1, 2019

Published December 31, 2019

1. 서론

마그네슘 합금은 높은 비강도와 소재의 진동감쇄 특성이 우수한 소재로서, 차량 경량화를 위한 목적의 주요 소재 중 하나로, 마그네슘을 활용한 합금 소재 개발 및 차량 제작을 위한 공정기술 등이 활발히 연구되고 있다.

대표적 운송 수단인 철도 분야에서도 차체 제작에 적용하기 위해 난연 특성을 가진 마그네슘 합금에 관한 연구가 진행 중이다.

철도 차량의 차체 구조물 제작을 진행하기 위해서는 압출에 의한 판형 소재 생산과 이의 결합을 위한 용접기술 등을 주요 제작 기술로 고려할 수 있다.

경량소재에 적용하기 적합한 용접방법 중의 하나인 마찰교반용접(Friciton Stir Welding)기술은 영국의 TWI(The Welding Institue)에서 개발한 기술로 용접대상물과 용접툴 사이의 마찰열을 활용하여, 금속소재를 용접 이하에서 용접하는 기술이다.

마찰교반용접시 용접툴은 높은 토크와 고속의 회전속도를 기반으로 용접 대상물과의 경계면에서 마찰을 생성하고 그로부터 열이 발생된다. 마찰교반용접은 용접온도를 넘어서지 않아서 소재의 물성변화가 적고 기계적 물성치가 우수하다는 장점과 함께, 별도의 용접소재를 필요로 하지 않기 때문에 유해가스나 유해 광선 발생이 없으며 자동화된 설비의 활용으로 균질의 용접품질을 얻을 수 있다[1]. 이러한 친환경 특성으로 마찰교반용접 기술에 관한 활용도는 지속적으로 증가하고 있다. 따라서 마찰교반용접의 용접 품질 향상을 위해 물리적 현상 이해를 통한 공정최적화 기술이 필요하며, 그 방안으로 수치해석을 통한 공정 분석을 고려할 수 있다.

2. 연구동향

현재까지 해석을 통한 마찰교반용접의 분석 연구가 많이 진행되었는데, 그 중 유한체적기법(Finite Volume Method) 기반의 CFD를 활용한 연구로, Kim[2]은 마찰교반용접을 내부 유동특성으로 고려하여 FLUENT를 이용한 해석을 수행하였으며, 유동속도 분석에 관한 연구를 진행하였다.

Colegorve[3]도 FLUENT를 활용하여 알루미늄 합금 대상으로 용접툴의 기울기에 따른 용접소재 내의 유동속도 분포를 분석하였고, Ji[4]는 알루미늄 합금을 대상으로 용접툴 형상에 따른 유동속도 분포에 대해 FLUENT를

활용하여 해석 연구를 수행하였다. 그리고 Albakri[5]는 STAR-CCM 해석툴을 활용하여 AZ31 마그네슘 합금대상으로 단순화된 형상의 용접툴을 사용할 때 생성되는 내부 유동특성을 분석하였다. 그리고 Gok[6]은 FEM 기법 기반의 Deform 3D 해석툴을 활용하여 AZ31 마그네슘 합금과 알루미늄 합금을 대상으로 하는 이종소재의 용접 특성을 분석하였다.

이번 연구에서는 나선형 팁을 가지는 툴을 기반으로 한 마찰교반용접 기술을 적용할 때, AZ31 마그네슘 합금 소재 대상으로 유동특성을 고려한 CFD 해석기술을 적용하여 용접 대상 소재 내부에서 발생하는 온도 특성 분석을 위한 시뮬레이션을 진행하였다.

그리고 용접툴의 회전속도와 용접속도를 변수로 정의하여 용접소재 내부의 온도 변화를 비교 분석하였다.

3. 수치해석 모델링

마찰교반용접은 나선형의 팁을 가지는 용접툴과 용접 대상 소재의 마찰열에 의해 소재간 접합을 진행하는 원리이다. 용접툴의 팁은 마찰력 증가 및 접합 소재간의 고른 혼합을 위해 나선형을 가진다.

용접툴은 용접 시작시 강한 회전력으로 마찰에 의한 열에너지를 발생하게 되고, 이 열에너지를 이용하여 소재 내부에 침투한 후 병진운동을 진행하면서 연속적으로 접합을 진행하게 된다.

Fig. 1은 툴 형상과 용접공정을 보여 준다[2].

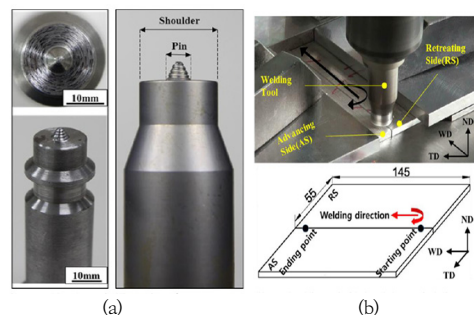


Fig. 1. (a) Tool shape and (b) Schematic of friction stir welding[2]

본 연구에서는 마찰교반용접에 의한 멜팅풀 생성을 유동해석 기반으로 진행하였다. 용접 과정을 유동 특성으로 모사하기 위해서는 용접툴이 용접을 진행하며 이동하는 과정을 고점도의 유체가 일정속도로 이동하는 현상으로

가정할 수 있다.

이 때 멜팅풀 내 용접 소재의 유동은 비압축성 유체 특성으로 가정할 수 있으며, 기본 지배방정식으로 식(1)의 연속 방정식, 식(2)의 운동량 방정식 및 식(3)의 에너지 방정식을 고려하였다[2].

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

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

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

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

여기서 u_i , P , T 는 용접 소재의 x , y , z 축 방향 유동 속도 성분, 압력과 온도를 의미하며 ρ , C_p , μ , k 는 밀도, 비열, 점도 및 열전도계수를 의미한다.

용접툴의 움직임에 의해 발생하는 열원의 모델링은 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

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

이 때 Q_s 는 용접툴과 용접소재 사이에서 발생하는 마찰 현상과 관련된 열원을 의미하는데 두 가지 발생 요인으로 분류할 수 있다.

먼저 툴과 용접소재 사이의 미끄러짐 현상으로 인해 발생하는 마찰열원과, 고착에 의해 발생하는 용접 소재 내의 항복응력에 의한 열원으로 구분할 수 있다. 그리고 두 현상의 발생 비율을 구분하기 위하여 slip rate인 δ 를 정의하였다. 그리고 툴의 회전운동과 병진운동을 고려하기 위해 회전속도와 용접속도를 ω , U 로 정의하였다.

나머지 τ_{yield} , p_r , η 는 각각 전단 항복응력, 툴 압축력 및 마찰계수를 의미한다.

그리고 열전달 현상으로는, 툴과 용접 소재 사이의 인터페이스에서 전도열전달을, 툴 및 용접 소재 주변으로는 대류열전달 현상을 고려하였다.

다음으로 유동분석을 위한 해석 영역은 Fig. 2와 같이 정의하였다.

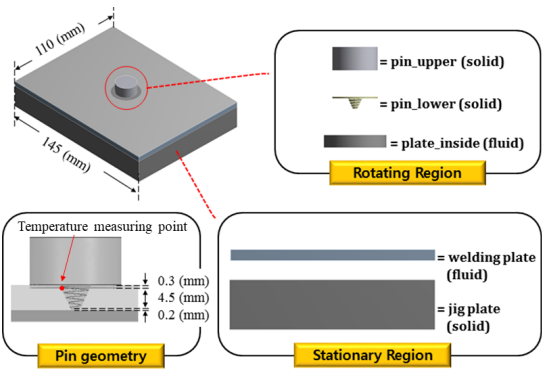


Fig. 2. Geometry of FSW model for numerical analysis [2]

앞서 언급한 바와 같이 용접툴 팁은 나선형 형상을 가지는데, 이 때 회전에 의한 유동해석을 진행하기 위해서는 유동 영역의 계산 격자를 매 time step 마다 재생성해야 한다.

하지만 계산시간 증가 및 재생성되는 격자계의 품질 저하 등으로 인하여, 본 연구에서는 FLUENT의 Moving Reference Frame Modeling 기능을 적용하여 툴 주변의 유동 구간은 회전영역으로, 그 외의 지역은 고정영역으로 구분하여 모델링을 진행하였다.

형상 모델링에 이어, 물성 모델링을 다음과 같이 정의하였다. 소재 물성은 용접툴과 용접소재, 지그 등으로 구분하였으며 각각의 소재는 SKD61, AZ31, Steel로 구성하였다.

각 소재의 주요물성을 Table 1에 표시하였다.

Table 1. Material properties of modeling components

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

용접소재인 AZ31 마그네슘 합금은 우수한 성형성과 강도 및 내식성이 뛰어나 압출재 등으로 주로 가공되며, 성분함량은 마그네슘을 주 소재로 3 wt% Al, 1 wt% Zn, 0.3 wt% Mn으로 구성된다. 본 연구에서는 AZ31을 Newtonian 유체로 가정하였으며, AZ31의 점도는 온도에 관한 함수로 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \mu &= 1000 \text{ when } T < T_{sol} \\ \mu &= 0.001 \text{ when } T > T_{liq} \\ \mu &= 0.001 \exp\left[-13.82 \frac{(T - T_{liq})}{(T_{liq} - T_{sol})}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 T_{sol} , T_{liq} 는 AZ31의 고화 및 액화 기준온도를 나타낸다[7].

식(4)에서 언급된 AZ31의 전단항복응력은 Nguyen [8]의 연구에서 얻어진 온도에 따른 인장항복응력값을 토대로 계산하였다.

전단항복응력과 인장항복응력의 관계는 식(6)과 같이 정의하였다.

$$\tau_{yield} = \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

툴 압축력 p_r 은 8.6 kpa, 마찰계수 η 은 0.26으로 정의하였으며, 툴과 용접소재 사이의 미끄러짐 및 항복응력에 의한 열원의 발생비율을 결정하는 slip rate인 δ 값의 정의는 용접툴의 회전속도와 용접속도가 각 1600 rpm 및 100 mm/min 조건의 해석 결과와 용접시험 결과가 가장 근접하게 나오는 값을 기반으로 하여 해석에 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

마찰교반용접의 멜팅풀 내 유동해석을 진행한 공정조건을 용접툴의 회전속도와 용접속도 기준으로 구분하여 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Processing conditions of FSW

Case no	Rotation speed (rpm)	Welding speed (mm/min)
1	400	100
2	800	100
3	1600	100
4	400	300
5	800	300
6	1600	300

먼저 수치해석을 위해 수립된 모델링의 검증을 위해 case 3에 대한 수치해석 결과를 시험 결과와 비교하였다.

Fig. 3에 시간에 따른 멜팅풀 내의 온도 변화를 나타내었다.

수치해석 상의 온도 결과는 유동 흐름의 방향을 따라 유동 입구로부터 Fig. 2에서 나타낸 측정 위치를 지나 유동 출구까지의 연장선을 지나는 측정점의 시간에 따른 온도 데이터를 표시하였다.

결과로부터 알 수 있듯이 수치해석 상의 온도 변화와 시험치가 비슷한 양상을 보이며 변하는 것을 알 수 있다.

그러나 최대 온도는 근접한 값을 보이지만, 최대 온도 점을 제외한 온도 변화율은 시험결과에서 더 커짐을 알 수 있다.

이는 수치해석시 용접소재의 경계면 조건으로 정의한 대류열전달 효과와 실제 시험에서 지그로 전도되는 열전달 효과가 상이하고, 또한 툴의 회전에 의한 주변 공기의 와류효과에 따른 대류열전달 효과가 더해지기 때문에 실제 시험에서 최대온도점을 제외한 주변 온도의 변화는 빠르게 진행되는 것으로 유추할 수 있다.

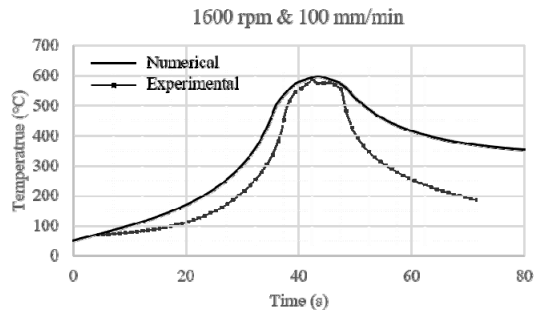


Fig. 3. Comparison of numerical and experimental results of case 3

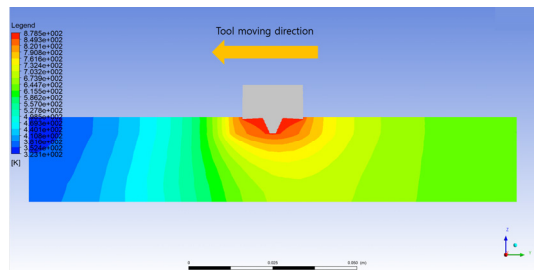


Fig. 4. Temperature distribution on a sectional plane of welding material in the case 3

Fig. 3의 시간에 따른 온도 분포와 함께 소재 내부의 위치에 따른 온도 분포를 확인하기 위해 Fig. 4에 case 3의 조건에서 용접툴의 움직임에 따른 용접소재 내 온도 분포를 나타내었다. 최고온도는 용접툴 인접 구역에서 확

인 할 수 있으며, 용접틀의 이동때문에 온도 분포가 비대칭으로 분포함을 확인할 수 있다.

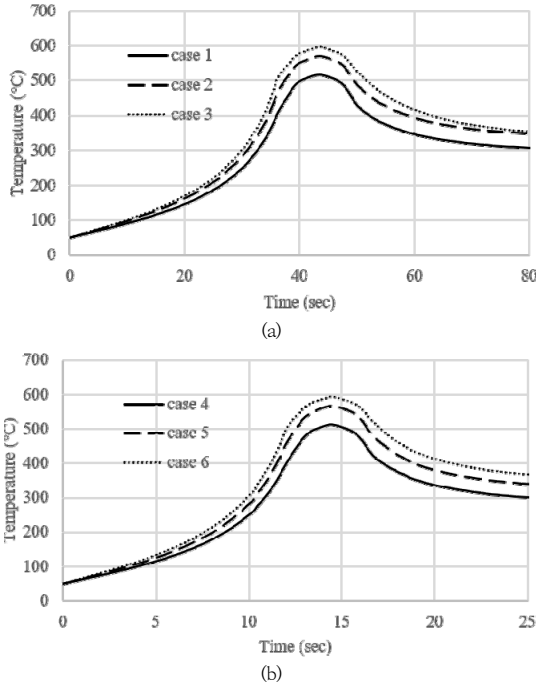


Fig. 5. Comparison of temperature results with welding speed of (a) 100 mm/min and (b) 300 mm/min

Fig. 4와 Fig. 5에는 용접틀의 회전속도에 따른 온도 변화값을 각 이동속도별로 구분하여 나타내었다.

먼저 용접속도가 100 mm/min의 조건에서 용접틀의 회전속도에 따른 온도 변화를 살펴보면, Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 용접 회전속도가 증가할수록 용접소재 내 최대온도는 점차적으로 증가한다.

이는 마찰에 의한 열원이 회전속도에 비례하는 관계의 식(4)로부터 유추할 수 있다.

상세 최대 온도값을 비교하면 400 rpm에서는 514℃, 800 rpm에서는 570℃, 1600 rpm에서는 595℃의 최대 온도값을 가진다.

다음으로 용접속도가 300 mm/min의 경우, 용접틀의 회전속도에 따른 온도변화는 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

용접속도가 증가하였기 때문에 온도는 100 mm/min의 결과보다 빠르게 변하지만, 온도 변화 형태는 유사하다. 이 용접속도 조건에서도 용접틀의 회전속도에 비례하여 최대온도값이 증가함을 확인할 수 있다. 400 rpm, 800 rpm, 1600 rpm 별로 각각 511℃, 567℃, 593℃

의 최대 온도값을 보인다.

Fig. 6은 용접틀의 회전속도와 용접속도 별로 최대 온도 결과값을 보여 준다.

두 조건의 용접속도 모두에서, 용접틀 회전속도가 400 rpm에서 800 rpm으로 증가할 때의 최대 온도 상승률보다 800 rpm에서 1600 rpm으로의 증가 조건에서 상승률이 상대적으로 줄어들음을 확인할 수 있다.

이는 열원의 크기는 회전속도에 비례하여 증가하지만, 회전속도가 증가하는 만큼, 용접소재 내의 유동속도가 증가함으로써 대류현상이 증가하고 이는 용접소재 내부 열에너지 소산 효과로 연결되기 때문으로 판단된다.

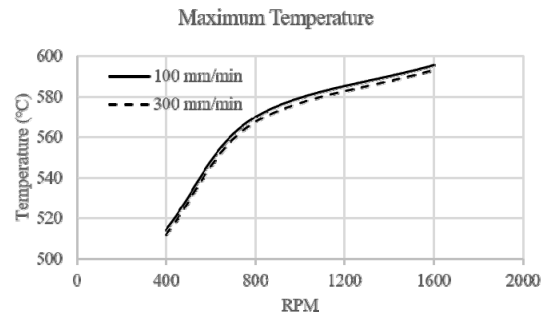


Fig. 6. Comparison of temperature results with rpm and welding speed

다음으로 용접틀의 이동속도가 최대온도에 미치는 영향을 살펴보면, 이동속도가 느릴수록 도달할 수 있는 최대온도값은 증가함을 알 수 있다. 하지만 온도 증가량은 미미하여, 이동속도가 300 mm/min에서 100 mm/min으로 감소하더라도, 각 rpm에서 최대온도값은 2~3℃의 차이밖에 나지 않아 이동속도의 영향이 틀의 회전속도보다 상대적으로 적음을 알 수 있다.

5. 결론

이번 연구에서는 AZ31소재를 대상으로 마찰교반용접 기술 적용시 용접소재 내 온도 분포를 확인하기 위하여 소재내 접합과정을 유동특성으로 가정하였으며 유동해석 툴인 FLUENT를 활용하여 수치해석을 진행하였다. 용접 조건에 의한 온도 분포의 차이를 확인하기 위하여 용접틀의 회전속도를 400 rpm, 800 rpm, 1600 rpm으로, 용접속도는 100 mm/min과 300 mm/min으로 구분하고 각 case에 관한 해석 결과값을 비교 분석하였다. 그 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 수치해석과 시험 결과의 비교에서, 시험 결과에서의 온도 변화율이 상대적으로 높는데, 이는 단순 대류 현상만으로 가정할 수치해석의 경계조건과 전도 및 톨 회전에 의한 주변 공기의 와류가 영향을 미치는 시험의 경계조건의 차이에서 발생하는 것으로 판단된다.
- (2) 최대온도값은 용접툴의 회전속도가 증가할수록 함께 증가함을 확인하였다. 하지만, 회전속도가 증가할수록 온도상승률은 낮아지는데, 이는 증가한 회전속도만큼 멜팅풀 내부의 유동속도가 함께 증가하여 열에너지 소산효과로 이어지기 때문이다.
- (3) 용접툴의 용접속도가 낮을수록 최대온도값이 증가하였다. 그러나 회전속도에 따른 온도 변화량에 비하여 상대적으로 그 영향은 줄어들었다.

이상과 같이 용접툴 회전속도와 이동속도의 다양한 조건 별로 멜팅풀 내부의 온도변화를 수치해석적으로 접근하였다. 향후 연구로는 멜팅풀 내부 온도변화율의 정확도를 높이기 위해서 실제 시험과 유사한 경계조건을 부여할 수 있는 방안을 적용하고자 한다.

References

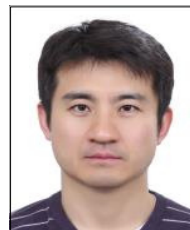
- [1] H. I. Dawood, K. S. Mohammed, M. Y. Rajab, "Advantages of the green solid state FSW over the conventional GMAW process", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, pp. 1-10, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/105713>
- [2] M. Kim, S. Sun, J. Kim, "Analysis of Friction Stir Welding Process of Mg alloy by Computational Fluid Dynamics", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.12, pp.679-684, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.12>
- [3] 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.imatprotec.2005.03.015>
- [4] 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>
- [5] 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.imatprotec.2012.09.015>

- [6] 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>
- [7] W. Gale, T. Totemeier, *Smithells Metals Reference Book (8th Edition)*, Elsevier, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7509-3.50047-6>
- [8] 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)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석