

# 마그네슘 합금의 온간 동적재결정 구성방정식 최적화

조윤희, 윤종헌\*

한양대학교 ERICA 캠퍼스 기계공학과

## Material model optimization for dynamic recrystallization of Mg alloy under elevated forming temperature

Yooney Cho, Jonghun Yoon\*

Department of Mechanical engineering, Hanyang University ERICA campus

**요약** 상용 마그네슘 합금의 경우, 상온에서 낮은 성형성을 갖기 때문에, 온간 성형 조건 하에서 성형 공정을 수행하는 것이 일반적이다. 마그네슘 합금은 온간 성형 과정 중에 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)이 발생하여, 초기 결정립 사이즈가 급격하게 작아지며, 내부 전위 밀도가 낮아지게 된다. 이에 따라, 유동 응력 곡선은 세 단계의 복잡한 변형 경화 및 연화 현상을 보이게 된다. 첫 번째 구간에서는 변형률이 증가함에 따라, 가공 경화에 의해 응력이 증가하는 경향을 보이며, 두 번째 구간에서는 동적 재결정 현상에 의한 가공 연화로 응력이 갑작스럽게 감소한다. 세 번째 구간에서는 가공 경화와 가공 연화 사이의 평형에 의해, 응력이 일정하게 나타난다. 본 연구에서는, 성형 온도 300°C, 변형률 속도는 0.001, 0.1, 1, 10/sec에서 AZ80 합금의 구성 방정식의 18개 변수들을 체계적으로 최적화하며, 유동 곡선의 정확도를 높일 수 있는 방식에 대해 제안하려고 한다. 또한 AZ80외에 AZ61도 추가적으로 최적화하여 본 논문에서 제안한 최적화 방식의 성능을 증명하였다.

**Abstract** A hot forming process is required for Mg alloys to enhance the formability and plastic workability due to the insufficient formability at room temperature. Mg alloy undergoes dynamic recrystallization (DRX) during the hot working process, which is a restoration or softening mechanism that reduces the dislocation density and releases the accumulated energy to facilitate plastic deformation. The flow stress curve shows three stages of complicated strain hardening and softening phenomena. As the strain increases, the stress also increases due to work hardening, and it abruptly decreases work softening by dynamic recrystallization. It then maintains a steady-state region due to the equilibrium between the work hardening and softening. In this paper, an efficient optimization process is proposed for the material model of the dynamic recrystallization to improve the accuracy of the flow curve. A total of 18 variables of the constitutive equation of AZ80 alloy were systematically optimized at an elevated forming temperature (300°C) with various strain rates (0.001, 0.1, 1, 10/sec). The proposed method was validated by applying it to the constitutive equation of AZ61 alloy.

**Keywords** : AZ80, AZ61, dynamic recrystallization, material model, optimization, thermo-mechanical flow curve

### 1. 서론

마그네슘 합금은 자동차, 항공 산업 등에서 금속 소재의 경량화 요구에 대한 대책으로서 기존에 쓰이던 알루미늄이나 철 합금을 대체하기 위해 최근 많은 연구가 이루어지고 있다[1-3]. 그러나 상용 마그네슘 합금의 경우,

상온에서 낮은 성형성을 갖기 때문에, 온간 성형 조건 하에서 성형 공정을 수행하는 것이 일반적이다[4,5]. 마그네슘 합금은 온간 성형 과정 중에 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)이 발생하여 초기 결정립 사이즈가 급격하게 작아지며, 내부 전위 밀도가 낮아지게 된다. 이러한 동적 재결정의 효과로 인하여 마그네슘 합금의

본 논문은 2016년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2016R1C1B1006875).

\*Corresponding Author : Jonghun Yoon(Hanyang Univ.)

Tel: +82-31-400-5255 email: yoonecsmd@gmail.com

Received February 21, 2017

Revised June 8, 2017

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

유동 응력 곡선은 세 단계의 복잡한 변형 경화 및 연화 현상을 보이게 된다. 첫 번째 구간에서는 동적 재결정 현상에 의한 가공 연화로 응력이 갑작스럽게 감소한다. 세 번째 구간에서는 가공 경화와 가공 연화 사이의 평형에 의해, 응력이 일정하게 나타난다[6,7]. 따라서 온간 성형 조건에서 마그네슘 합금의 유동 응력 곡선을 유한 요소 해석에 도입하기 위해서는 동적 재결정에 대한 유동 응력 곡선을 모델링 할 필요가 있다. Takuda 등 [8]은 AZ31, AZ91의 semi-log Zener-Hollomon parameter와 내부 응력 사이의 선형적 관계를 바탕으로 내부 유동 응력을 표현하기 위한 매개 변수 방법을 제안하였다. Zhou 등 [9]은 AZ61과 AZ31의 유동 응력 모델을 제안했으며, Sheng 등 [10]은 Hollomon 방정식을 확장시켰다. Raghunath 등 [11]은 Zener-Hollomon parameter을 도입함으로써 온도, 변형률, 변형률속도를 모두 고려할 수 있는 유동 응력 교정 방법을 제안했다. Qin 등 [7]은 온간 성형 시, 발생하는 유동 응력의 가공 연화 현상을 분석하기 위해 Avrami-type의 재결정 동역학 방정식을 도입할 것을 제안했다. Ahn 등 [12]은 온간 성형 시 마그네슘 합금의 동적 재결정을 고려한 재료 모델을 제안하였다. 그러나 앞서 제안된 재료 모델의 18개 변수들에 대한 최적화 방식은 체계적이라고 보기 어렵다.

따라서 본 연구에서는, 성형 온도 300°C, 변형률 속도는 0.001, 0.1, 1, 10/sec에서 AZ80 합금의 구성 방정식의 18개 변수들을 체계적으로 최적화하며, 유동 곡선의 정확도를 높일 수 있는 방식에 대해 제안하려고 한다. 또한 AZ61 합금의 추가적인 최적화를 통하여, 논문에서 제안한 방식을 검증하였다.

## 2. 동적재결정 구성방정식

### 2.1 변형률속도 의존 모델

고온에서의 마그네슘 합금의 유동 곡선은 동적 재결정에 의해 3단계의 경화 행동을 보인다. 초기 변형률 단계에서는 최대 응력까지 가공 경화가 발생한 후, 동적 재결정이 발생함에 따라 가공 연화가 이루어지며, 그 이후에는 준정적 평형 단계에 이른다. 본 논문에서는 Ahn 등 [12]에서 제안한 재료 모델을 채택하여, 마그네슘 합금의 동적 재결정을 고려한 유동 곡선을 나타내었다. 고온에서의 AZ80 마그네슘 합금의 변형률속도 의존 재료 모

델의 형식은 식(1)과 같다.

$$\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = |\sigma_b + k(d_a^{-0.5} - d_0^{-0.5})| [1 + (M-1)f_d] \quad (1)$$

where  $\sigma_b = \sigma_b(\epsilon, \dot{\epsilon})$

$$= \left( A + B \left( 1 + \frac{\ln \dot{\epsilon}^*}{\ln D^p} \right)^{n_1} \epsilon^{n_0(1+C_n \ln \dot{\epsilon}^*)} \right) \times (1 + C(\ln \dot{\epsilon}^*)^p)$$

$$d_a = d_a(\epsilon, \dot{\epsilon})$$

$$= (d_1(\dot{\epsilon}) - d_0) \times \tanh \left( \pi \frac{\langle \epsilon - \epsilon_d(\dot{\epsilon}) \rangle}{\epsilon_s(\dot{\epsilon}) - \epsilon_d(\dot{\epsilon})} \right) + d_0$$

$$\epsilon_d(\dot{\epsilon}) = \epsilon_d \times (1 + C_l \ln \dot{\epsilon}^*)$$

$$\epsilon_s(\dot{\epsilon}) = \epsilon_s \times (1 + C_d \ln \dot{\epsilon}^*)$$

$$d_1(\dot{\epsilon}) = d_1 \times (1 - C_d \ln \dot{\epsilon}^*)$$

$$f_m(\dot{\epsilon}) = f_m \times (1 + C_f \ln \dot{\epsilon}^*)$$

$$D_0^p = 1.0 \times 10^6 / s$$

$$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_r (\dot{\epsilon}_r = 0.001 / s)$$

Table 1. Physical meaning of each coefficient

Coefficients	Physical meaning
$\epsilon_s, C_s$	Saturated strain of DRX effect
$f_m, M, C_f$	Effect of change in the grain orientation on hardening behavior
$n_0, C_n$	Convexity of stress-strain curve
A	Change of Yield stress at quasi-static state
$\epsilon_d, C_l$	Initial strain of DRX effect
B, $n_1$	Slope of stress-strain curve
C, P	Change of yield stress according to strain-rate
$d_1, d_0, k, C_d$	Change of grain size according to strain hardening

고온에서의 AZ80합금의 변형률속도 의존 모델은 크게 3개의 물리적인 식으로 구성된다.  $\sigma_b(\epsilon, \dot{\epsilon})$ 은 변형률 속도 증가에 따른 최대 응력까지의 초기 가공 경화 단계를 나타낸다.  $k(d_a^{-0.5} - d_0^{-0.5})$ 항과  $[1 + (M-1)f_d]$ 항은 동적 재결정의 발생 이후와 관련되며, 가공 경화와 가공 연화를 동시에 고려한다. 특히  $k(d_a^{-0.5} - d_0^{-0.5})$ 항은 온간 성형 과정에서 발생하는 재결정 및 결정립 성장과 관련된 Hall-Petch mechanism을 나타내며,  $[1 + (M-1)f_d]$ 항은 집합조직에 의한 강화를 묘사한 부분이다. 식(1)과 관련된 18개 변수들은 각각의 물리적

인 의미를 갖는다. 변수 A는 준정적 상태에서의 항복 응력을 나타내며, 변수 B와 변수  $n_1$ 은 유동 곡선의 기울기와 변형률 의존도를 나타낸다. 변수  $n_0$ 와  $C_n$ 은 유동 곡선의 불룩함과 관련이 있으며, 변수 C와 변수 P는 항복 응력의 변형률속도 의존도를 의미한다. 변수  $d_1$ ,  $d_0$ , k,  $C_d$ 는 모두 가공 경화 발생 시 결정립 크기 변화의 효과와 관련 있으며, 변수  $f_m$ , M,  $C_f$ 는 결정립의 방향 변화를 의미한다. 변수  $\epsilon_d$ ,  $C_t$ 는 동적 재결정 현상 발생 시작 시의 변형률과 관련 있으며,  $\epsilon_s$ ,  $C_s$ 는 동적 재결정 현상 발생 후 포화 시의 변형률과 관련 있다[12]. Table 1은 고온에서의 마그네슘 합금의 변형률속도 의존 모델에 대한 각 변수의 물리적 의미를 요약하였다.

### 3. 동적재결정 구성방정식의 최적화

#### 3.1 AZ80 합금의 구성방정식 최적화

본 논문에서는 AZ80 합금의 구성 방정식을 교정하는 데에 있어서 실험적 유동 곡선과의 정확도를 증가시키기 위한 체계적인 최적화 방법을 연구하였다.

Table 2은 AZ80합금의 화학적 조성을 나타내었다. AZ80 마그네슘 합금의 고온에서의 실험적 유동 곡선은 Gleeble3800 시험기에서의 압축 실험을 통하여 얻었다. 압축 실험은 300°C, 변형률속도는 0.001, 0.1, 1.0, 10/sec 에서 각각 진행하였다. 직경 10mm, 높이 15mm 인 (D10L15) 원통형 압축 시편(압출 비 16:1)은 압출 방향(ED)을 따라 제작되었다. Fig. 1은 300°C, 변형률속도는 0.001, 0.1, 1, 10/sec 에서의 실험적 유동 곡선과 피팅 곡선을 비교한 결과를 보여 주며, 기존 Ahn 등 [12]의 근사 결과에 비해 피팅 정확도가 향상 되었다. Table 3에서는 제안된 최적화 방식으로 교정된 식(1)의 변수들의 값을 제공하였다. 이와 같은 결과를 얻기 위해 3단계의 최적화 과정을 거쳤다. 본 논문에서의 모든 최적화는 Mathcad 프로그램의 Quasi-Newton 알고리즘을 사용하였다. 첫 번째 단계의 최적화 과정은 식 (1)에서 보여 주듯이, 최대 응력이 발생하기까지의 초기 가공 경화 단계인 의 7개 변수 A, B,  $n_1$ ,  $n_0$ ,  $C_n$ , C, P를 최적화 하는 과정이다.

Table 2. Chemical composition of AZ80 (wt.%).

Al	Zn	Mn	Cu	Si	Mg
8.10	0.52	0.25	≤0.05	≤0.10	Bal.

Table 3. Model coefficients for Fig. 1

A	B	$n_1$	$n_0$	$C_n$	C
60.456	75.352	3.831	1.143	-0.026	0.648
P	$d_1$	$d_0$	$C_d$	$\epsilon_d$	$\epsilon_s$
0.214	0.001	0.001	-0.043	0.0093	2.734
$f_m$	$C_f$	$C_t$	$C_s$	k	M
0.973	0.022	1.498	-0.053	59.362	0.245

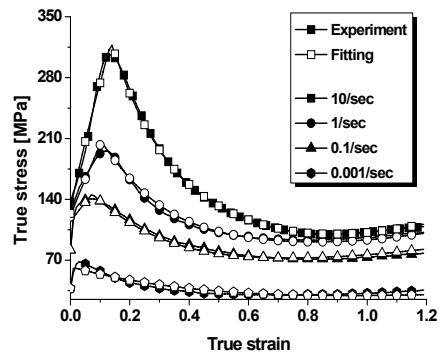


Fig. 1. Comparison results of the compressive stress - strain curve between experimental and fitting at 300°C

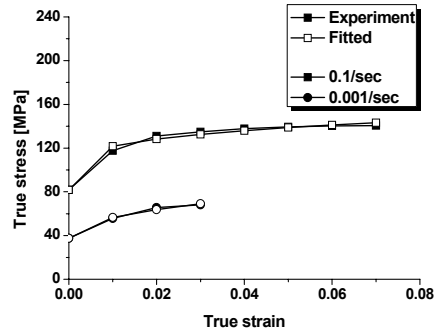


Fig. 2. Comparison results of the compressive stress - strain curve of AZ80 between experimental and fitting at first step optimization.

Fig. 2는 300°C, 변형률 속도는 0.001, 0.1/sec에서 실험적 유동 곡선과, 피팅 된 유동 곡선을 비교한 결과를 보여 주며, 두 곡선 사이에서 낮은 오차율을 보인다. Table 4는 초기 가공 경화와 관련된 의 7개 변수 A, B,

$n_1, n_0, C_n, C, P$  최적화 결과 값을 나타낸다. 최적화의 두 번째 단계에서는 마그네슘 합금의 동적 재결정 현상과 준정적 포화 상태를 포함한 전체 응력 곡선을 변형률속도 0.001, 0.1, 1/sec 에서 최적화하였으며, 실험적 곡선과 피팅 된 유동 곡선을 비교한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 식(1)은 전체 응력 곡선을 표현하는 식이며, 18개 변수들을 포함하고 있다. 이때 A, B,  $n_1, n_0, C_n, C, P$ 의 7개 변수들의 초기 값은 앞 단계에서 구한 최적화 값을 사용했다. Table 5는 두 번째 단계에서 전체 응력 곡선과 관련된 18개 변수들의 최적화 결과 값을 나타낸다. 마지막으로, 세 번째 단계에서는 두 번째 단계와 마찬가지로 전체 유동 곡선을 최적화 하며, 변형률속도 범위는 0.001, 0.1, 1, 10/sec 이다.

Table 4. Model coefficients for Fig. 2

A	B	$n_1$	$n_0$	$C_n$	C	P
37.5	26.6	6.1	0.038	1.431	0.154	1.031

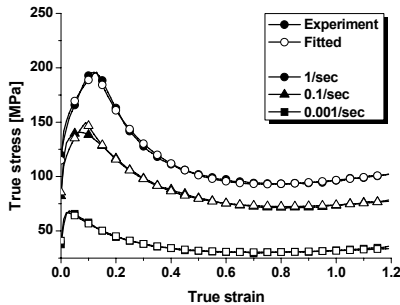


Fig. 3. Comparison results of the compressive stress - strain curve of AZ80 between experimental and fitting at second step optimization

Table 5. Model coefficients for Fig. 3

A	B	$n_1$	$n_0$	$C_n$	C
40.882	139.16	-1.600	0.422	0.006	0.160
P	$d_1$	$d_0$	$C_d$	$\epsilon_d$	$\epsilon_s$
1.253	0.001	0.0003	0.038	0.018	2.313
$f_m$	$C_f$	$C_t$	$C_s$	k	M
0.924	-0.001	0.834	-0.06	4.420	0.378

### 3.2 AZ61 합금의 구성방정식 최적화

본 논문에서 제안한 최적화 방식의 성능을 증명하기 위하여, AZ80외에 AZ61도 추가적으로 최적화하였다.

Table 6은 AZ61의 화학적 조성을 나타낸다. AZ61 마그네슘 합금의 고온에서의 실험적 유동 곡선은 Gleeble 3800 시험기에서의 압축 실험을 통하여 얻었다. 압축 실험은 350°C, 변형률속도는 0.001, 0.1, 1.0, 10/sec 에서 각각 진행하였다. 직경 10mm, 높이 15mm인(D10L15) 원통형 압축 시편(압축 비 16:1)은 압축 방향(ED)을 따라 제작되었다. AZ61의 최적화는 Mathcad 프로그램의 Quasi-Newton 알고리즘을 사용하여 진행하였으며, 최적화 방식은 AZ80과 동일하게 3단계로 나누어 단계적인 최적화를 하였다. 첫 번째 단계의 최적화 과정은 Equation (1)에서 보여 주듯이, 최대 응력이 발생하기까지의 초기 가공 경화 단계인 의 7개 변수 A, B,  $n_1, n_0, C_n, C, P$ 를 최적화 하는 과정이다. 두 번째 단계에서는 Mg합금의 동적 재결정 현상과 준정적 포화 상태를 포함한 전체 응력 곡선을 변형률속도 0.001, 0.1, 1/sec에서 최적화하였다. 마지막으로 세 번째 단계에서는 두 번째 단계와 마찬가지로 전체 유동 곡선을 최적화하며, 변형률속도는 0.001, 0.1, 1, 10/sec으로 진행하였다. Fig. 4는 350°C, 변형률속도는 0.001, 0.1, 1, 10/sec 에서의 실험적 유동 곡선과 피팅 곡선을 비교한 결과를 보여 주며, 낮은 오차율을 보인다. Table 7에서는 제안된 최적화 방식으로 교정된 변수들의 값을 제공하였다.

Table 6. Chemical composition of AZ61 (wt. %).

Al	Zn	Mn	Cu	Si	Mg
6.1	0.46	0.22	0.002	0.0006	Bal

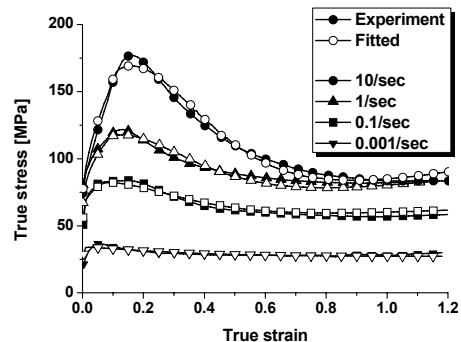


Fig. 4. Comparison results of the compressive stress - strain curve between experimental and fitting of AZ61 at 350°C

Table 7. Model coefficients for Fig. 4

A	B	n <sub>1</sub>	n <sub>0</sub>	C <sub>n</sub>	C
29.051	5.235	6.559	0.019	3.801	0.252
P	d <sub>1</sub>	d <sub>0</sub>	C <sub>d</sub>	ε <sub>d</sub>	ε <sub>s</sub>
0.852	0.003	0.003	0.094	0.028	1.365
f <sub>m</sub>	C <sub>f</sub>	C <sub>i</sub>	C <sub>s</sub>	k	M
0.368	0.330	0.309	-0.009	0.085	0.440

#### 4. 결론

본 논문에서는 동적 재결정의 효과로 고온에서 마그네슘 합금의 복잡한 변형 경화 및 연화 현상이 발생하는 유동 응력 곡선을 유한요소 해석에 도입하기 위해서 개발된 동적 재결정에 대한 유동 응력 곡선의 정확성을 향상을 위한 최적화 방법을 제안하였다.

마그네슘 합금의 구성 방정식과 관련된 18개 변수의 최적값을 도출하기 위해, 세 단계의 최적화 방법을 제시하였다. 첫 번째 단계에서는 최대 응력이 발생하기까지의 초기 가공 경화 단계와 관련된 7개 변수 A, B, n<sub>1</sub>, n<sub>0</sub>, C<sub>n</sub>, C, P를 최적화를 수행하였다. 두 번째 단계에서는 마그네슘 합금의 동적 재결정 현상과 준정적 포화 상태를 포함한 전체 응력 곡선을 변형률속도 0.001, 0.1, 1/sec에서 최적화를 수행하였으며, 마지막 단계에서는 전체 유동 곡선을 최적화를 수행하여, Ahn 등 [12]의 결과와 비교하여 정확성이 향상된 것으로 판단된다. 또한, 제시된 방법을 AZ61 마그네슘 합금에 적용하여 다양한 마그네슘 소재에 적용이 가능함을 증명하였다. 제시된 최적화 방법을 통해 고온에서 마그네슘의 복잡한 유동 응력 곡선을 효과적으로 표현하여, 유한요소해석에 적용 시 마그네슘 합금의 온간성형 공정모사의 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

[1] X.Y. Lou, M. Li, R.K. Boger, S.R. Agnew, R.H. Wagoner, Hardening evolution of AZ31B Mg sheet, *International Journal of Plasticity*, vol. 23, pp. 44-86, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.03.005>

[2] Jonghun Yoon, Junghwan Lee, Effect of initial microstructure on Mg scroll forging under warm forming condition, *Materials Transactions*, vol. 55, no. 2, pp. 238-244, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2013274>

[3] Jonghun Yoon, Juseok Lee, Junghwan Lee, Enhancement of the microstructure and mechanical properties in as-forged Mg-8Al-0.5Zn alloy using T5 heat treatment, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 586, pp. 306-312, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.08.031>

[4] S. R. Agnew, O. Duygulu, 2005, Plastic anisotropy and the role of non-basal slip in magnesium alloy AZ31B, *International Journal of Plasticity*, vol. 21, pp. 1161-1193, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.05.018>

[5] J.H. Yoon, O. Cazacu, R.K. Mishra, Constitutive modeling of AZ31 sheet alloy with application to axial crushing, *Materials Science & Engineering A*, vol. 565, 203-212, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.054>

[6] T. Al-Samman, G. Gottstein, Dynamic recrystallization during high temperature deformation of magnesium, *Materials Science & Engineering A*, vol. 490, pp. 411-420, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.02.004>

[7] Y. Qin, Q. Pan, Y. He, W. Li, X. Liu, X. Fan, Modeling of flow stress for magnesium alloy during hot deformation, *Materials Science & Engineering A*, vol. 527, pp. 2790-2797, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.035>

[8] H. Takuda, H. Fujimoto, N. Hatta, Modeling on flow stress of Mg-Al-Zn alloys at elevated temperatures, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80-81, pp. 513-516, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00154-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00154-X)

[9] H. T. Zhou, X.Q. Zeng, Q. D. Wang, A flow stress model for AZ61 Magnesium alloy, *Acta Metallurgica Sinica*, vol. 17, no. 2, pp. 155-160, 2004.

[10] Z.Q. Sheng, R. Shivpuri, Modeling flow stress of magnesium alloys at elevated temperature, *Materials Science & Engineering A*, vol. 419, pp. 202-208, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.12.020>

[11] B. K. Raghunath, K. Raghukandan, R. Karthikeyan, K. Palanikumar, U.T.S. Pillai, R. Ashok Gandhi, Flow stress modeling of AZ91 magnesium alloys at elevated temperature, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 509, pp. 4992-4998, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.01.182>

[12] K. Ahn, H. Lee, J. Yoon, Material model for dynamic recrystallization of Mg-8Al-0.5Zn alloy under uni-axial compressive deformation with variation of forming temperatures, *Materials Science & Engineering A*, vol. 651, pp. 1010-1017, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.055>

조 윤 희(Yooney Cho)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한양대학교 ERICA 캠퍼스 기계공학과 (학사)

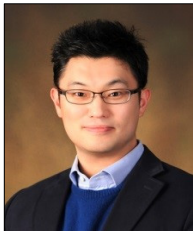
<관심분야>

제품 공정개발, 구성방정식 최적화

---

윤 종 헌(Jonghun Yoon)

[정회원]



- 2001년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2014년 8월 : 재료연구소 선임연구원
- 2014년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 ERICA 캠퍼스 기계공학과 조교수

<관심분야>

소성가공, 박판성형