

# 마그네슘 합금 판재의 변형률, 변형률 속도 및 온도 환경을 고려한 유동응력 모델에 대한 연구

송우진<sup>1</sup> · 허성찬<sup>2</sup> · 구태완<sup>1</sup> · 강범수<sup>2</sup> · 김 정<sup>#</sup>

## Evaluation of Strain, Strain Rate and Temperature Dependent Flow Stress Model for Magnesium Alloy Sheets

W. J. Song, S. C. Heo, T. W. Ku, B. S. Kang, J. Kim

(Received February 22, 2011 / Revised April 20, 2011 / Accepted April 22, 2011)

### Abstract

The formability of magnesium alloy sheets at room temperature is generally low because of the inherently limited number of slip systems, but higher at temperatures over 150°C. Therefore, prior to the practical application of these materials, the forming limits should be evaluated as a function of the temperature and strain rate. This can be achieved experimentally by performing a series of tests or analytically by deriving the corresponding modeling approaches. However, before the formability analysis can be conducted, a model of flow stress, which includes the effects of strain, strain rate and temperature, should be carefully identified. In this paper, such procedure is carried out for Mg alloy AZ31 and the concept of flow stress surface is proposed. Experimental flow stresses at four temperature levels (150°C, 200°C, 250°C, 300°C) each with the pre-assigned strain rate levels of  $0.01s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$  and  $1.0s^{-1}$  are collected in order to establish the relationships between these variables. The temperature-compensated strain rate parameter which combines, in a single variable, the effects of temperature and strain rate, is introduced to capture these relationships in a compact manner. This study shows that the proposed concept of flow stress surface is practically relevant for the evaluation of temperature and strain dependent formability.

**Key Words** : Flow Stress Surface, Magnesium Alloy, Strain Rate, Temperature-Compensated Strain Rate, Elevated Temperature

### 1. 서 론

판재성형공정에서의 성형성 평가는 가공공정 중 혹은 최종 성형제품에 판재의 찢어짐(fracture)이나 국부적인 넥킹(necking) 현상이 발생하는나 여부에 따라 판단된다. 마그네슘 합금은 재료 내부의 슬립면(slip plane)의 제한성으로 인해, 일반적

으로 상온에서의 성형한계가 제한된다[1, 2]. 하지만, 마그네슘 합금판재는 성형온도가 150 8C 이상인 경우, 큰 연성과 높은 드로잉 한계영역을 보여주고 있다[1]. 따라서, 온도 및 변형률 속도에 따라 변형거동이 상이한 판재금속에 대한 고온성형 공정설계 및 적용에 있어 성형한계 영역 규명이 요구된다.

1. 부산대학교 부품소재산학협력연구소

2. 부산대학교 항공우주공학과

# 교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,

E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

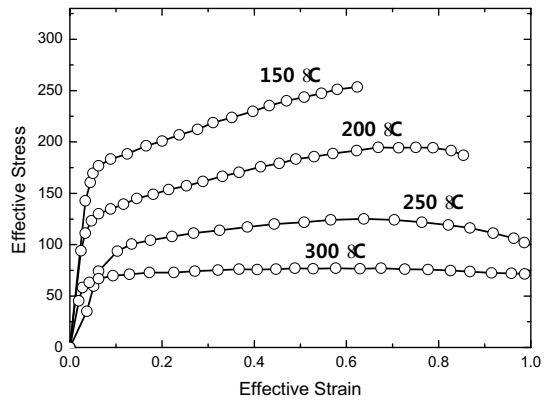
판재성형공정의 성형성은 적용 판재재료에 대한 일련의 성형성 시험과 이론적인 과정을 통하여 판단 가능하다[3]. 이러한 이론적인 판재성형성 예측은 성형성 예측 대상 판재재료의 유동응력 (flow stress) 모델을 정의하는 것이 매우 중요하다. 특히, 마그네슘 합금과 같이, 재료의 유동특성이 온도 및 가공속도에 영향을 받는 재료는 성형되는 온도 및 가공속도에 따른 변형특성을 모사 가능한 유동응력으로 정의 되어야만 실질적인 성형성 판단이 가능하다.

성형공정 설계관련 이론적 연구 및 수치적 해석에 필수적인 온도 및 변형속도 의존형 금속재료의 유동응력 정의에 관한 다수의 연구가 현재 진행되고 있다[4-9]. 하지만, 대부분의 재료 유동응력 규명이 압축하중 상태에서의 변형거동을 고려한 연구가 주를 이루고 있는 실정이다[4-6]. 판재성형공정은 체적성형과는 달리 판재평면상의 인장하중이 변형거동 유발에 지배적인 영향을 미친다. 이와 관련된 인장하중 상태에서 마그네슘 합금판재의 유동응력 모델을 정의한 연구도 진행되었으나[7-9], 도출된 유동응력 모델이 성형공정 설계 관련 이론적 연구 및 수치적 해석에 적용되기에는 다소 복잡한 형태를 취하고 있다. 본 논문에서는, 온도 및 변형속도 의존형 금속재료인 마그네슘 합금 AZ31에 대한 유동응력 모델 도출에 대한 연구가 수행되었다. 이러한 유동응력 모델은 온도와 변형률 속도를 고려하고, 유동응력 모델을 이용한 후속 연구 적용이 용이한 형태로 도출하기 위하여 온도보상형 변형률 속도 인자(temperature-compensated strain rate)를 고려하고 있다. 마그네슘 합금 AZ31 판재소재에 대한 150 8C, 200 8C, 250 8C, 300 8C 네 가지 온도 환경과 0.2mm/s, 2.0mm/s, 20.0mm/s 세 가지 변형속도 영역에서 수행된 참고문헌의 인장시험 결과[1]가 적용되었으며, 이를 바탕으로 유동응력 모델을 도출하였다. 아울러, 이렇게 정의된 유동응력 모델을 기반으로 온도, 변형률 및 변형률 속도에 따른 유동응력 평면을 제시하였다.

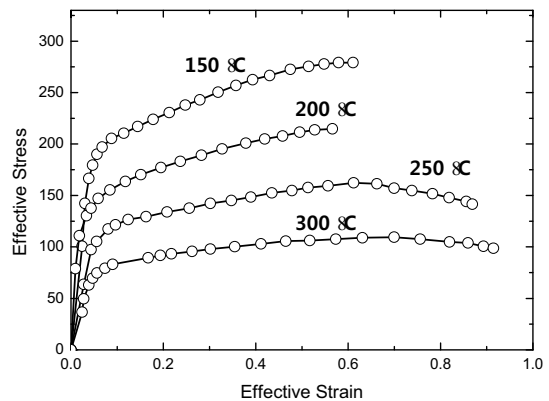
## 2. 마그네슘 합금 판재 유동응력 선도

### 2.1 응력-변형률 선도

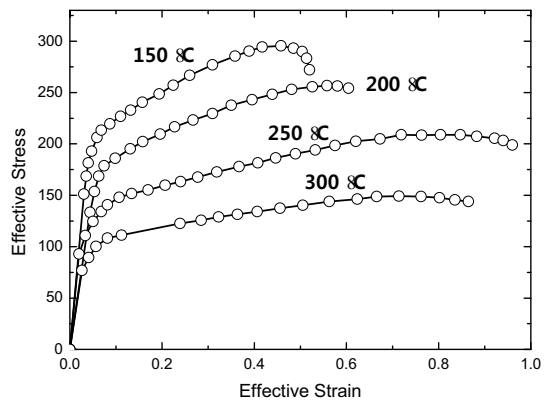
상용 마그네슘 합금 AZ31 (Mg - 3% Al - 1% Zn) 판재의 단순인장 시험결과는 Fig. 1에 나타내었다 [1]. 단순인장시험은 150 8C, 200 8C, 250 8C, 300 8C 네 가지 온도 환경과 0.2mm/s, 2.0mm/s, 20.0 mm/s



(a) Stress-strain curve at crosshead speed 0.2mm/s



(b) Stress-strain curve at crosshead speed 2.0mm/s



(c) Stress-strain curve at crosshead speed 20.0mm/s

Fig. 1 Stress-strain curves from the tensile test of magnesium based alloy AZ31 sheet material [1]

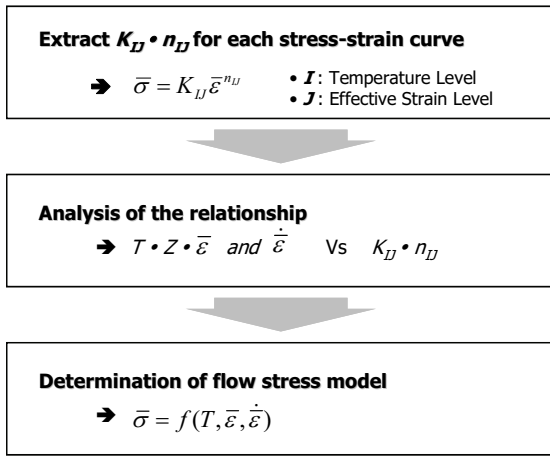


Fig. 2 Procedure to determine flow stress model of magnesium based alloy AZ31 sheet material with strain, strain rate and temperature

세 가지 변형속도 영역(변형률 속도:  $0.01 s^{-1}$ ,  $0.1 s^{-1}$ ,  $1.0 s^{-1}$ )에서 수행되었다. 도출된 응력변형률 선도를 살펴보면, 높은 온도와 낮은 변형률 속도 영역에서 큰 연신율을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

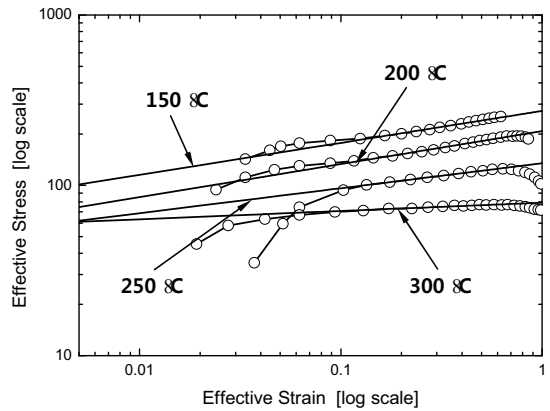
### 2.2 유동응력 선도 모델링

일반적으로 강소성 재료 가정을 통한 재료의 유동응력은 다음의 식으로 표현 가능하다.

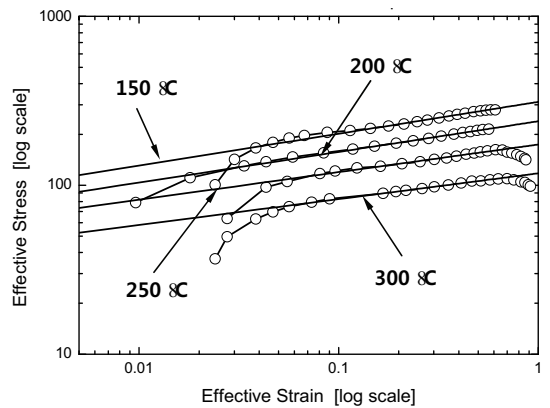
$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

여기서,  $K$ 는 강도계수(strength coefficient)이며,  $n$ 은 가공경화지수(work hardening exponent)이다. 온도 및 변형속도에 따라 변형거동이 달라지는 마그네슘 합금판재의 유동응력은 Fig. 2의 절차를 통하여 정의하였다. 먼저, Fig. 3과 같이 선형 곡선접합(curve fitting) 방법을 이용하여 각각의 온도 및 변형속도 영역에서의 강도계수와 가공경화지수를 추출하고, 이렇게 도출된 각각의 강도계수 및 가공경화지수에 대하여 온도, 변형률 및 변형률 속도의 연관관계를 분석함으로써 최종적인 유동응력 모델을 결정하였다. 사전 정의된 온도 및 변형률 속도 영역에서 도출된 강도계수 및 가공경화지수는 Table 1에 정리하였다.

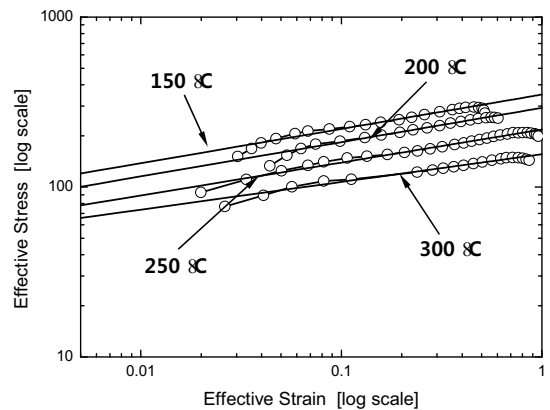
가해지는 외력에 의해 변형이 발생하는 과정에서, 강도계수 및 가공경화지수는 가공온도와 변형률 속도의 영향을 받아 연신율이 증가하는 영역



(a) Crosshead speed 0.2mm/s



(b) Crosshead speed 2.0mm/s



(c) Crosshead speed 20.0mm/s

Fig. 3 Relationships between effective stress and strain under various temperatures and crosshead speed levels

**Table 1 Strength coefficients and work hardening exponents under various temperatures and crosshead speed levels**

Crosshead Speed [mm/s]	Temperature [°C]	Strength Coefficient, <i>K</i> [MPa]	Work Hardening Exponent, <i>n</i>
20	150	350.3	0.2021
	200	292.5	0.2017
	250	217.9	0.1940
	300	156.1	0.1632
2	150	311.7	0.1886
	200	239.3	0.1816
	250	174.3	0.1634
	300	117.7	0.1528
0.2	150	273.6	0.1876
	200	208.2	0.1937
	250	134.8	0.1468
	300	79.1	0.0488

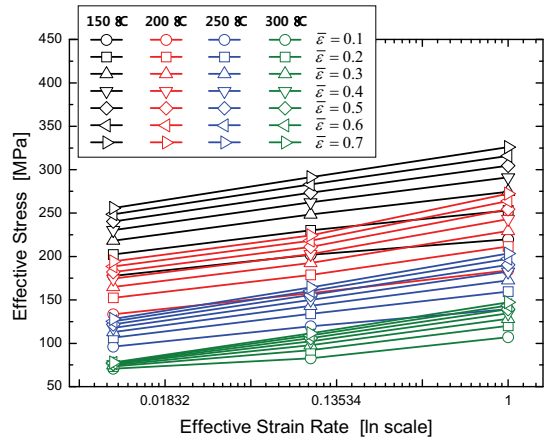
으로 변화되고 있음을 알 수 있으며, 다음의 식과 같이 표현 가능하다.

$$K = K(\dot{\epsilon}, T), n = n(\dot{\epsilon}, T) \quad (2)$$

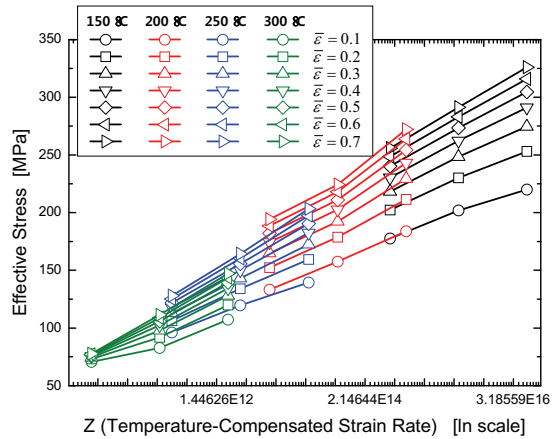
유동응력과 변형률, 변형률 속도 및 온도 사이의 연관성을 규명하기 위하여, 본 논문에서는 온도와 변형률 속도에 의한 영향성을 동시에 고려 가능한 온도 보상형 변형률 속도 인자(temperature-compensated strain rate, *Z*)를 도입하였다. 온도 보상형 변형률 속도 인자는 다음이 식으로 정의 된다 [10].

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

여기서, *R*은 일반기체상수(universal gas constant,  $8.31 J mol^{-1} K^{-1}$ )이며, *Q*는 마그네슘 합금의 변형에 필요한 활성화 에너지(activation energy)이며, 본 연구에서는 참고문헌의  $135 kJ mol^{-1}$ 를 적용하였다 [11]. Fig. 4 (a)와 같이, 유동응력과 유효변형률 속도와의 관계를 각각의 온도 및 유효 변형률에 따라 비교해 본 결과, 유효변형률 속도가 증가함에 따라 유동응력 수준이 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 특히 온도가 300 8C 수준에서는 유효



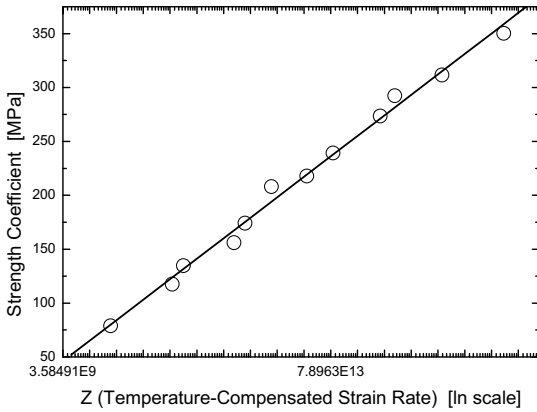
**(a) Relationship between stress and strain rate under various temperatures and strain levels**



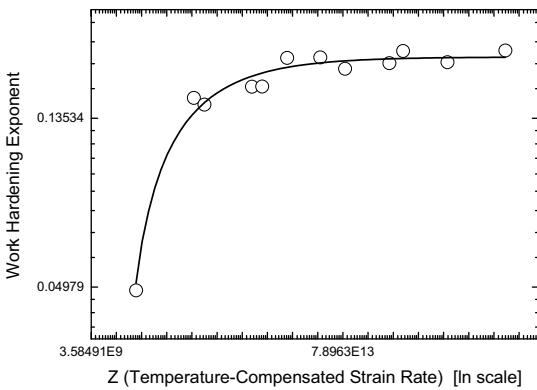
**(b) Relationship between stress and temperature-compensated strain rate (*Z*) under various temperatures and strain levels**

**Fig. 4 Relationships among stress, strain, strain rate and temperature**

변형률 속도가 작을 경우 변형률에 상관없이 상대적으로 동일한 수준의 유동응력이 나타남을 알 수 있다. 이를 기반으로, Fig. 4(b)와 같이 동일한 조건에서 유동응력과 온도 보상형 변형률 속도 인자와의 상관관계를 검토해 보면, 각각의 변형률 수준에서 온도가 증가함에 따라 온도 보상형 변형률 인자와 유동응력이 모두 선형적 관계를 가짐을 알 수 있다. 이것은 유동응력 수준을 나타내는 강도계수 또한 온도 보상형 변형률 속도인자와 선형적 관계를 가짐을 판단 가능하게 한다.



(a) Relationship between strength coefficient and temperature-compensated strain rate (Z)

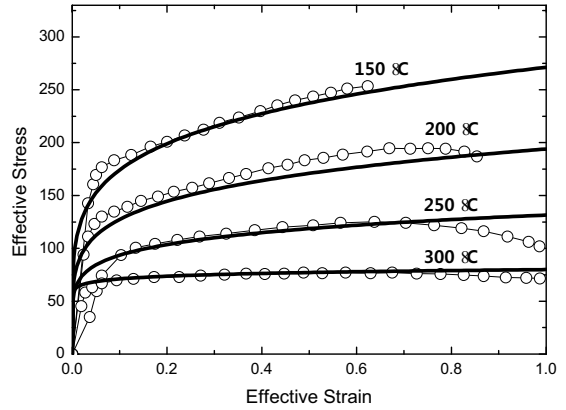


(b) Relationship between work hardening exponent and temperature-compensated strain rate (Z)

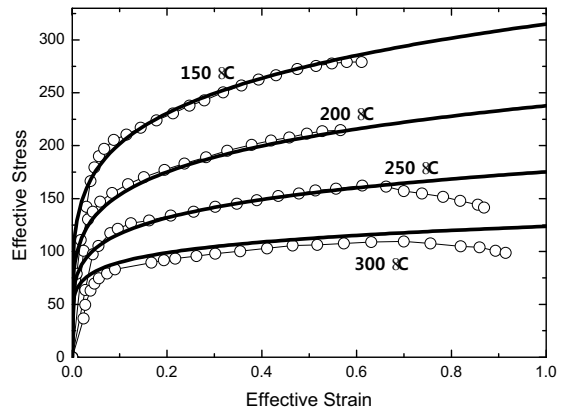
Fig. 5 Relationships among strength coefficient, work hardening exponent and temperature-compensated strain rate (Z)

Table 2 Curve-fitted parameters in flow stress model

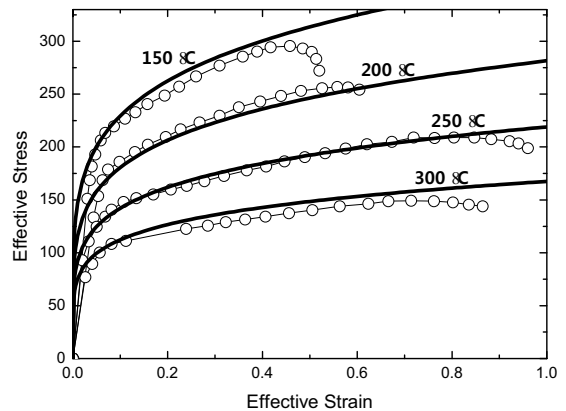
Parameter	Curve-Fitted Value
$K_1$	- 372.122
$K_2$	19.009
$n_1$	0.195
$n_2$	- 2986.919
$n_3$	- 0.418



(a) Crosshead speed 0.2mm/s

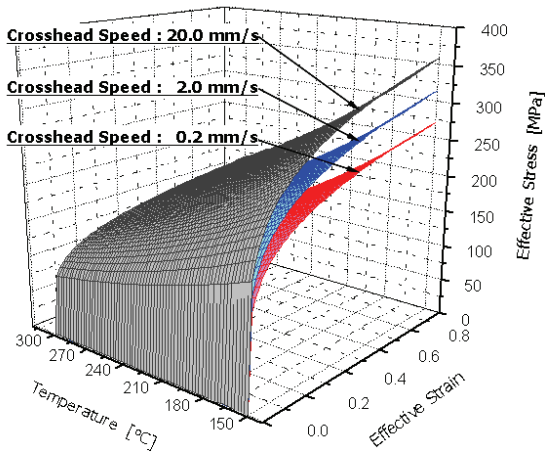


(b) Crosshead speed 2.0mm/s

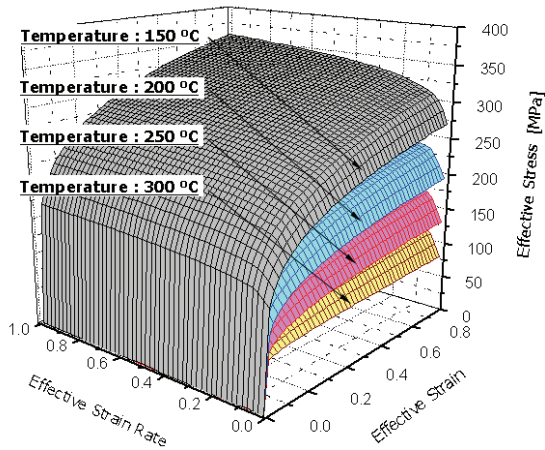


(c) Crosshead speed 20.0mm/s

Fig. 6 Comparison between the measured stress-strain curves and the modeled flow stress curves



(a) Flow stress surfaces with respect to the crosshead speed



(b) Flow stress surfaces with respect to the temperature  
 Fig. 7 Comparisons of flow stress surfaces under various temperatures and crosshead speed levels

이러한 판단근거를 바탕으로, Fig. 5 (a)에 각각의 조건에서의 강도계수와 온도 보상형 변형률 인자를 도시하였으며, 앞서 분석한 결과와 같이 온도 보상형 변형률 속도 인자와 강도계수가 선형적 관계를 가짐을 알 수 있다. 아울러, 가공경화지수와 온도 보상형 변형률 속도 인자도 Fig. 5 (b)에 도시하였다. 강도계수 및 가공경화지수와 온도 보상형 변형률 속도 인자와의 상관관계를 선형 보간기법을 통하여 곡선접합하면 다음과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$K(Z) = K_1 + K_2 (\ln Z) \quad (4)$$

$$n(Z) = n_1 + n_2 (Z^{n_3}) \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서의 곡선접합 인자( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ )는 Table 2에 정리하였다.

본 논문에서 제안된 온도 보상형 변형률 속도 인자 기반의 유동응력 모델 결과와 Fig. 1에서 도시한 인장시험 결과를 Fig. 6에서 비교하였다. 높은 온도영역과 큰 변형률 속도영역에서 발생하는 재료의 가공연화(work softening) 현상은 제안된 유동응력 모델에 고려하지 않았기 때문에, 다소 차이를 보이고 있으나, 각각의 온도 및 변형률 속도 영역에서 대체적인 재료 변형거동은 원활하게 묘사하고 있다. 식 (4)와 (5)를 기반으로, 식 (1)에 제시한 유동응력 모델을 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = K(Z) \bar{\epsilon}^{n(Z)} \quad (6)$$

이러한 응력 변형률 선도를 기반으로, 마그네슘 합금 판재재료의 온도 및 변형률 속도에 따른 변형거동은 Fig. 7과 같이 변형률, 온도 및 변형률 속도를 3축으로 하는 3차원 좌표계에 유동응력 평면으로 도시할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문은 온도 및 변형률 속도 의존형 금속재료인 마그네슘 합금 판재재질 AZ31에 대한 유동응력을 온도 및 변형률 속도를 고려하여 도출하였다. 유동응력 모델을 이용한 후속 연구 수행에 용이한 형태로 도출하기 위하여, 본 논문에서는 유동응력 모델에 온도 보상형 변형률 속도 인자를 고려하고 있다.

유동응력 모델 도출과정에서, 온도 및 변형률 속도에 따른 판재의 유효응력은 온도 보상형 변형률 속도와 선형적인 관계를 가짐을 알 수 있었다. 또한, 이렇게 정의된 유동응력 모델을 기반으로 상용 마그네슘 합금 판재재질 AZ31의 온도, 변형률 및 변형률 속도에 따른 유동응력 평면을 제시하였다.

아울러, 온도와 변형률 속도에 따른 유동응력 모델 도출기법은 향후 온도 및 변형률 속도에 민감

한 관재재료의 가공공정 설계해석에 유용하게 적용되리라 판단된다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 주저자는 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Takuda, T. Morishita, T. Kinoshita, N. Shirakawa, 2005, Modelling of formula for flow stress of a magnesium alloy AZ31 sheet at elevated temperatures, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 164-165, pp. 1258~1262.
- [2] J. H. Lee, S. H. Kang, Forming technologies of magnesium alloy sheet and automobile applications, 2007, *Auto J.*, pp. 24~31.
- [3] M. H. Lee, K. K. Kim, H. Y. Kim, S. I. Oh, 2008, Evaluation of the formability of warm forming simulation of magnesium alloy sheet using FLD, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, pp. 501~506.
- [4] Y. C. Lin, M. S. Chen, J. Zhong, 2008, Constitutive modelling for elevated temperature flow behavior of 42CrMo steel, *Comp. Mater. Sci.*, Vol. 42, pp. 470~477.
- [5] Y. C. Lin, M. S. Chen, J. Zhong, 2008, Prediction of 42CrMo steel flow stress at high temperature and strain rate, *Mech. Res. Commun.*, Vol. 35, pp. 142~150.
- [6] Y. J. Qin, Q. L. Pan, Y. B. He, W. B. Li, X. Y. Liu, X. Fan, 2010, Modelling of flow stress for magnesium alloy during hot deformation, *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, Vol. 527, pp. 2790~2797.
- [7] K. Mathis, Z. Trojanova, P. Lukac, C. H. Caceres, J. Lendvai, 2004, Modelling of hardening and softening processes in Mg alloys, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 378, pp. 176~179.
- [8] X. Huang, K. Suzuki, A. Watazu, I. Shigematsu, N. Saito, 2008, Mechanical properties of Mg-Al-Zn alloy with a tilted basal texture obtained by differential speed rolling, *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, Vol. 488, pp. 2790~2797.
- [9] Z. Zeng, S. Jonsson, H. J. Roven, Y. Zhang, 2009, Modelling the flow stress for single peak dynamic recrystallization, *Mater. Design*, Vol. 30, pp. 1939~1943.
- [10] C. Zener, H. Hollomon, 1944, Effect of strain rate upon plastic flow of steel, *J. Appl. Phys.*, Vol. 15, pp. 22~32.
- [11] Z. Q. Sheng, R. Shivpuri, 2006, Modelling flow stress of magnesium alloys at elevated temperature, *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, Vol. 419, pp. 202~208.