

# 변형율에 따른 AZ31 합금의 변형율 속도 민감도 지수 변화와 미세조직 특성에 관한 연구

김동욱<sup>1, #</sup> · 강찬우<sup>1</sup> · 이수연<sup>2</sup>

## The Study of the Variation of Strain Rate Sensitivity Index depending on the Strain and Microstructural Observations of AZ31 Mg Alloy Sheet

D. O. Kim, C. W. Kang, S. Y. Lee

(Received August 23, 2011 / Revised September 27, 2011/ Accepted September 28, 2011)

### Abstract

The strain rate sensitivity index,  $m$ , plays an important role in plastic deformation at elevated temperatures. It is affected by strain rate, temperature, and the microstructure of the material. The strain rate sensitivity index has been used as a constant in numerical analysis of plastic forming at a specified strain rate and temperature. However, the value of  $m$  varies as deformation proceeds at an elevated temperature and a certain strain rate. Thus, in this present study, the value of  $m$  has been characterized as a function of strain by multiple tensile jump tests for AZ31 magnesium alloy sheet, and the variation of  $m$  has been discussed in conjunction with the microstructural observations before and after deformation. The experimental results show that the variation of  $m$  is dependent on the temperature and strain rate. Grain growth with dynamic recrystallization also affects the variation of  $m$ .

**Key Words** : Magnesium Alloy, Strain Rate Sensitivity, Microstructural Observation, Strain, Temperature, Strain rate

### 1. 서 론

마그네슘 합금은 구조용 재료로서 가장 가벼운 금속 중 하나이며, 플라스틱 소재와 비교할 때 재 활용성도 우수하여 최근까지 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 마그네슘은 조밀육방 결정구조를 가지고 있어, 슬립면(slip system)의 수가 제한되어 상온에서는 소성가공이 어려워, 대부분 온간 또는 열간에서 이루어지고 있다. 따라서 마그네슘 합금의 적절한 가공성을 얻기 위해서는, 200°C 이상에서 성형을 해야 다른 슬립계도 활성화 되어 가공성을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다

[1~3]. 이러한 마그네슘 소재는 성형해석을 위해, 판재에 대한 변형율, 변형율 속도 및 온도 환경을 고려하여 유동응력 모델을 얻고자 하는 연구도 진행되어 왔다[4]. 또한 마그네슘 합금의 연신율을 향상시키는 몇가지 고온 변형 메커니즘이 존재하고 있으며 그것들은 변형율 속도와 온도에 민감하다고 보고되었다[3]. 특히 소성변형 중 넥킹에 영향을 미치는 변형율 속도 민감도 지수  $m$  은, 변형율 속도 및 온도에 영향을 받으므로 소성가공에 있어 중요한 역할을 한다. 이러한  $m$  값은 기존 연구에서, 주어진 판재 소재에서 변형율 속도, 온도에 따른 일정한 상수로 여겨져 성형해석 등에

1. 자동차부품연구원 금속소재공정연구센터  
2. 전남테크노파크 신소재기술산업화지원센터  
# 교신저자: 자동차부품연구원, E-mail:dokim@katech.re.kr

사용되어 왔으나, 변형이 진행됨에 따라 달라지는 현상은 대부분 고려하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 다양한 조건(온도, 변형율 속도, 초기 관재 미세조직 상태)에서, 변형이 진행됨에 따라  $m$  값이 변형율에 대해 어떻게 변화하는지 분석하였고, 이를 변형 전/후 미세조직 분석을 통해 관계성을 규명하고자 하였다.

## 2. 실험 결과

### 2.1 실험방법

실험에 사용한 관재는 POSCO사에서 제작한 1mm, 2mm, 3mm 두께를 갖는 AZ31 마그네슘 소재들을 사용하였고, 시편은 압연방향에 평행한 방향으로 채취하였으며, 인장시험은 세종류 온도 환경(300℃, 400℃, 450℃)과 네종류 변형율 속도(0.001/s, 0.005/s, 0.01/s, 0.05/s)에서 수행하였다. 균일한 온도환경에서 시험을 실시하기 위해 인장 시험편은 챔버내에서 5분 유지 하였으며, 사용한 인장시험편 형상은 Fig. 1과 같다. 인장시험은 INSTRON 5585H 장비를 사용하였으며, 일정한 변형율 속도를 유지하기 위해 그립속도를 일정한 비율로 증가시켰다. 또한 변형율 속도 민감도 지수를 얻기 위한 시험은 일반적으로 사용되는 인장 점프시험을 실시하였으며, 특히 점프시험은 변형량에 따른 영향을 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 변형율별로 멀티 점프시험을 실시하였다. 변형율 속도 민감도 지수는 점프테스트에서 통상적으로 낮은 변형율 속도를 기준으로 정의한다 [5]. 미세조직 분석은 에칭용액 picric acid 3g, acetic acid 20ml, 증류수 10ml, ethanol 70ml를 사용하였으며, 관재 단면을 변형 전/후에 광학현미경을 사용하여 관찰 하였다.

### 2.2 변형율 속도 민감도 지수 분석

Fig. 3 은 온도 450℃, 변형율 속도 0.001/s 에서 관재 두께별로, 변형이 진행됨에 따라  $m$  값의 변화 그래프를 나타내고 있다. 관재 두께에 따라  $m$  값의 차이가 나타났으며, 관재 두께가 작은, 즉 좁더 미세한 조직을 가진 시편에서 전체적으로  $m$  값이 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 모든 시편들에서, 변형이 진행됨에 따라  $m$  값이 감소되는 경향을 나타냈으며, 변형율 0.8 이상에서는  $m$  값이 0.4 와 0.3 사이의 유사한 값으로 수렴되고 있음을 알 수 있다.

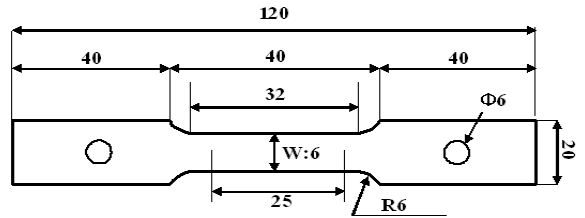


Fig. 1 The geometry of the test specimen

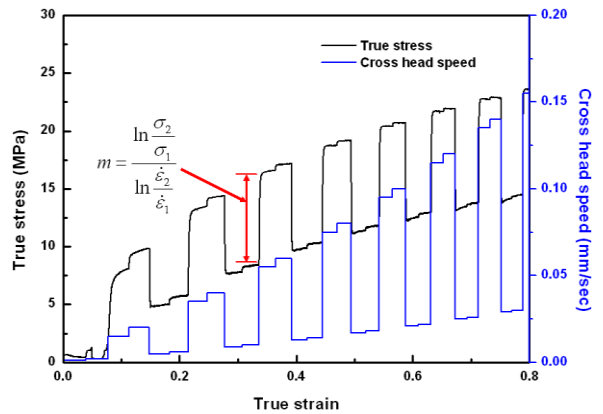


Fig. 2 Multiple-jump test to achieve the strain rate sensitivity index

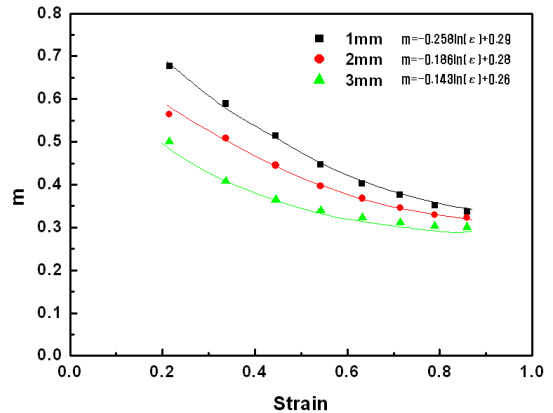


Fig. 3 Strain rate sensitivity of 1mm, 2mm, and 3mm thick AZ31 with strain rate of 0.001/s at 450℃

Fig. 4 는 450℃에서 3mm 두께의 관재에 대해 변형율 속도별로 고온 인장점프 테스트 결과를 나타내고 있다. 변형율 속도 0.005/s 이하 시편에서는 변형이 진행됨에 따라  $m$  값이 점점 감소하는 경향을 나타내고 있으나 변형율 0.8 이상에서는 일정한 값

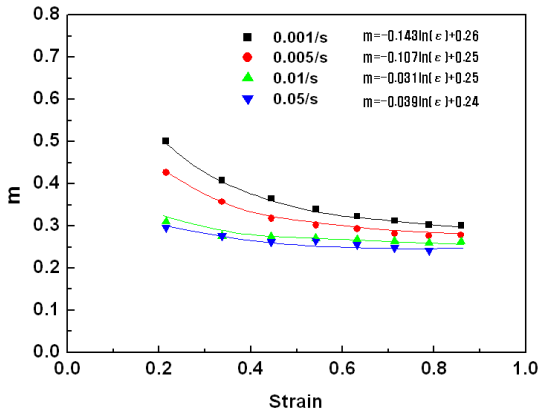


Fig. 4 Strain rate sensitivity of 3mm thick AZ31 with various strain rate at 450°C

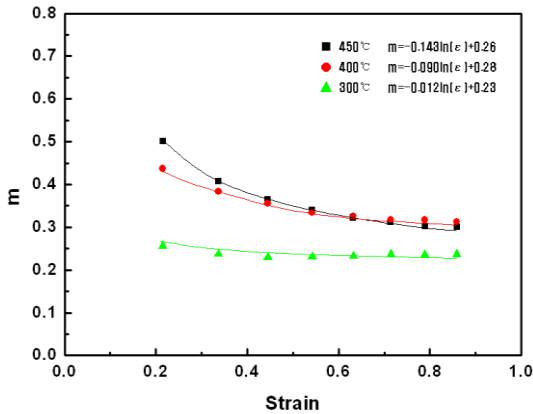
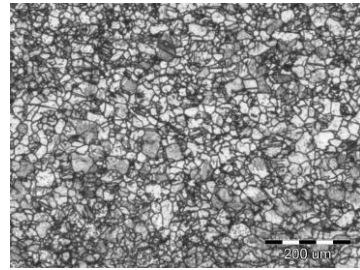


Fig. 5 Strain rate sensitivity of 3mm thick AZ31 with strain rate of 0.001/s at various temperatures

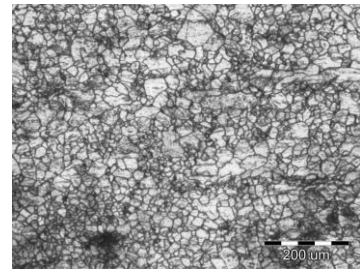
으로 유지되는 경향을 보이고 있다. 또한 변형 속도가 상대적으로 빠른 0.01/s 이상의 시편들에서는 m 값 감소 폭이 그다지 크지 않았으며 대체적으로 모든 변형율에 대해 일정한 값을 나타내고 있다.

Fig. 5 는 3mm 판재를 변형율 속도 0.001/s 에서 온도별로 시험한 결과, 변형율에 대한 m 값 그래프를 나타내고 있다. 400°C 이상의 시편에서는 변형초기 m 값이 0.45 이상으로 높은값을 나타내다가, 변형이 진행됨에 따라 점점 감소하는 추세를 나타내었으나, 300°C 시편에서는 변형초기, m 값이 0.3 이하로 상대적으로 낮았으며 변형이 진행되어도 거의 일정한 값을 나타내었다.

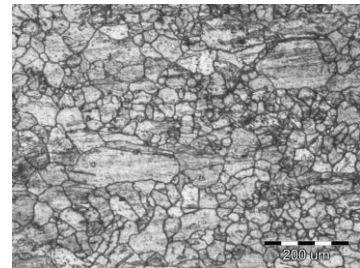
따라서, m 값은 초기 판재 두께에 따라서 다르며, 일정 변형율 속도 이하에서는 변형이 진행됨



(a)



(b)



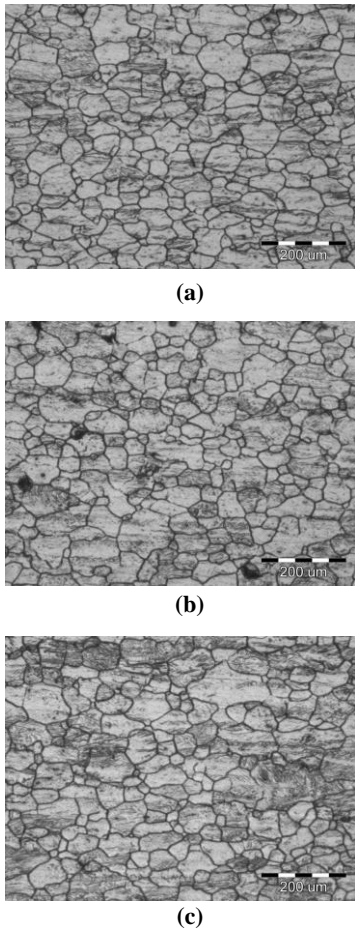
(c)

Fig. 6 (a) Microstructure of 1mm thick AZ31 sheet, (b) Microstructure of 2mm thick AZ31 sheet, (c) Microstructure of 3mm thick AZ31 sheet

에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, 일정 온도 이상에서도 변형이 진행됨에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다.

### 2.3 미세조직 분석 및 고찰

Fig. 6 (a), (b), (c)는 판재 두께별 초기 미세조직을 나타내고 있다. 일반적으로 두께가 작을수록 압연에 의한 가공량이 많고, 열처리에 따른 조직미세화로 인해 균일한 등축조직이 많음을 알 수 있다. KS D 0305 에 따른 Grain size 분석결과 1mm 두께의 판재는 평균조직 크기가 16µm 으로 나타났으며, 2mm 판재는 23µm, 3mm 판재는 28µm 으로 나타



**Fig. 7 (a) Microstructure of 1mm thick AZ31 sheet after jump test with 0.001/s at 450°C, (b) Microstructure of 2mm thick AZ31 sheet after tensile test with 0.001/s at 450°C, (c) Microstructure of 3mm thick AZ31 sheet after tensile test with 0.001/s at 450°C**

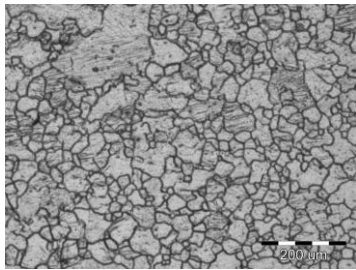
났다. 특히, 상대적으로 두께가 큰 3mm 판재에서는 200µm 크기의 조대한 조직들도 다수 관찰되었다.

Fig. 7 (a), (b), (c)는 판재 두께별로 멀티점프시험을 실시한 후 시편들의 미세조직을 나타내고 있다. 소성 변형 후 세 개의 시편 모두 낮은 변형율 속도에 의해 어느 정도 조직성장이 일어났으나 모두 동적 재결정에 의해 등축조직이 나타났다. 미세조직 평균크기는 1mm 두께 판재가 48.9µm, 2mm 두께 판재가 45.6µm, 3mm 두께 판재가 45.7µm로 대체로 비슷하게 나타났다.

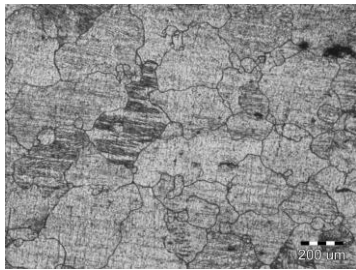
따라서, Fig. 3 으로부터, 판재 두께가 작은 시편에서 전체적으로 m 값이 높게 나타난 것은, 초기 미세한 조직에서 Grain boundary sliding 이 더 용이함으로 판단되며, 세 종류의 시편들 모두에서 m 값이 변형이 진행됨에 따라 감소하는 이유는, 동적 재결정과 함께 빠른 조직성장이 동반되어 Grain boundary sliding 이 점차 용이하지 않게 됨으로 판단된다. 특히, 세 종류 시편 모두, 변형율 0.8 이상에서는 일정한 비율로 조직성장과 동적 재결정이 일어나 m 값이 0.4 와 0.3 사이에 수렴되는 것으로 추정되나, 좀 더 정확한 현상을 규명하기 위해서는, 향후 변형율별로 조직관찰을 실시하여 이를 분석할 예정이다. 세 개의 시편 모두 인장시험 장비 최대 변위량을 초과하여 파단시까지 시험은 진행되지 못하였다.

Fig. 8 (a)는 3mm 두께의 시편을 450°C에서 0.05/s로 멀티 점프시험을 실시한 후 시편의 미세조직 사진을 나타내고 있다. 앞서 언급하였듯이, 변형율 속도 0.001/s 로 인장시험을 실시한 시편은, 느린 변형율 속도에 의해 고온에 노출된 시간이 길어, 평균 조직크기가 약 45.7µm 으로 조직성장이 일어났으나, 이에 비해, 변형율 속도 0.05/s 로 비교적 빠른 속도에서 고온인장 시험을 실시한 시편의 경우는 평균 조직크기가 약 37.4µm 으로 상대적으로 작으나, 충분하지 못한 재결정으로 인해 일부 조대한 조직들이 관찰되었다. Fig. 8 (b)는 파단부 주위의 미세조직으로써, 파단부 주위에는 조대한 조직이 관찰되었으며, 결정립계를 따라 미세한 등축 조직이 혼재하여 나타나 있는 것을 알 수 있었다. 따라서, 낮은 변형율 속도(0.001/s)에서는 소성가공에 의한 동적 재결정 시간이 충분하여 파단 전 연신율이 증가되나, 빠른 변형율 속도(0.05/s)에서는 충분한 동적 재결정이 일어나지 못한 부위에서 파단이 진행됨을 알 수 있다.

특히, 본 미세조직 관찰로부터 Fig. 4 의 m 값 결과를 고찰해보면, 0.005/s 이하의 낮은 변형율 속도에서는 변형초기 충분한 변형시간과 미세한 조직에 의해 Grain boundary sliding 이 용이하게 일어나 m 값이 0.4 이상의 값을 나타낸 것으로 판단되며, 이후 변형이 진행됨에 따라 조직성장이 일어나면서 Grain boundary sliding 이 용이하지 않아 m 값이 점점 감소되는 현상이 나타난 것으로 추정된다. 특히 변형율이 0.8 이후에는 조직성장과 함께 동적 재결정 현상이 일정한 비율로 동반되어 일정한 m 값으로 유지되는 경향이 나타난 것으로 판

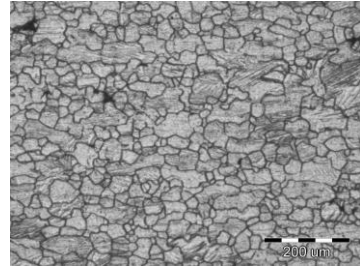


(a)

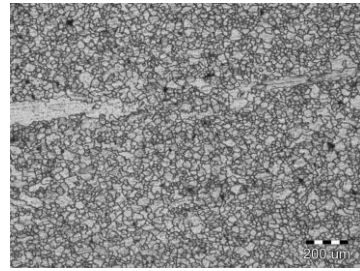


(b)

**Fig. 8 (a) Microstructure of 3mm thick AZ31 sheet after tensile test with 0.05/s at 450°C, (b) Microstructure of 3mm thick AZ31 sheet after tensile test with 0.05/s at 450°C near fracture**



(a)



(b)

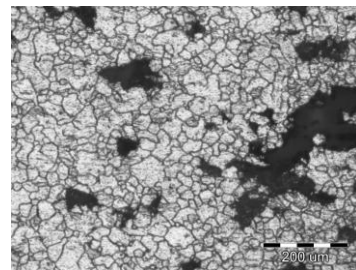
**Fig. 9 (a) Microstructure of 3mm thick AZ31 sheet after tensile test with 0.001/s at 400°C, (b) Microstructure of 3mm thick AZ31 sheet after tensile test with 0.001/s at 300°C**

단된다. 이와 달리, 0.1/s 이상의 높은 변형 속도에 대해서는  $m$  값이, 변형 초기 빠른 변형 속도에 의해 Grain boundary sliding 이 용이하지 않아 초기  $m$  값이 낮은 것으로 판단되며, 변형이 진행되어도 조직 성장과 동적 재결정 현상이 변형 속도 0.005/s 이하의 시편보다 활발하지 않아  $m$  값이 큰 변화가 없는 것으로 추정된다.

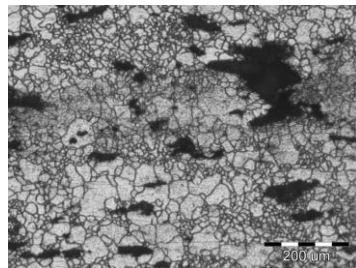
Fig. 9 (a), (b)는 3mm 판재를, 400°C 및 300°C에서 변형 속도 0.001/s 로 멀티 점프시험 후 미세조직을 나타내고 있다. 400°C에서는 42.5µm 을 나타냈으며, 조직 성장과 함께 동적 재결정이 일어나 대부분 등축조직을 나타내었다. 그러나 300°C 시편의 경우, 미세조직의 크기는 약 31.8µm 이나, 국부적으로 조대조직이 존재함을 알 수 있었다.

Fig. 10 (a), (b)는 파단부 주위의 미세조직을 나타내고 있다. 400°C 시편의 경우 파단부에서도 비슷한 크기의 등축조직이 나타났으나, 300°C 시편에서는 파단부에서 좀더 미세한 결정립이 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 300°C 시편의 경우에는 조직 성장보다는 소성 변형에 의한 동적 재결정이 빠르게 진행되는 것으로 판단된다.

본 미세조직 분석으로부터 Fig. 5 의  $m$  값 결과



(a)



(b)

**Fig.10 (a) Microstructure of 3mm thick AZ31 sheet after tensile test with 0.001/s at 400°C near fracture, (b) Microstructure of 3mm thick AZ31 sheet after tensile test with 0.001/s at 300°C near fracture**

그래프를 고찰해보면, 온도가 높을수록(특히 400°C 이상의 시편) 높은 열에너지에 의해 초기 Grain boundary sliding 이 용이하여  $m$  값이 높게 나타나며, 변형이 진행됨에 따라 높은 온도에 의해 조직성장이 일어나  $m$  값이 감소하는 경향을 나타내다가 0.8 이후에서는 앞서 언급하였듯이, 일정비율의 조직성장과 재결정현상에 의해 0.3 정도로 균일화되는 것으로 판단되며 향후 추가적인 연구를 통해 정확한 이해가 필요하다. 온도가 낮은 300°C 시편에서는 낮은 열에너지에 의해 grain boundary sliding 현상이 상대적으로 활발하지 못하여 낮은  $m$  값을 나타내며 변형이 진행되어도 큰 변화가 없는 것은 조직성장 현상은 적게 나타나고 동적 재결정과 함께 일정한 비율의 Grain boundary sliding 조건이 형성되기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 온도, 변형율 속도, 초기 판재 미세조직 상태에 따라,  $m$  값이 변형율에 대해 어떻게 변화하는지 분석하였고, 이를 변형 전/후 미세조직과 함께 고찰하였다.

(1) 450°C, 0.001/s 시험조건에서는 초기 마그네슘 조직이 미세할수록  $m$  값이 높게 나타났으며, 이는 Grain boundary sliding 이 조직이 미세할수록 용이한 것이 원인으로 판단된다. 또한 변형이 진행됨에 따라  $m$  값은 감소하는 경향은, 조직성장이 발생되어 Grain boundary sliding 현상이 제한되는 것으로 판단된다.

(2) 450°C에서는 변형율 속도가 낮을수록  $m$  값은 높게 나타났으며, 이는 변형율 속도가 낮을수록 Grain boundary diffusion 에 의한 Grain boundary sliding 이 활발한 것으로 판단된다. 0.01/s 이상의 속도에서는 변형율에 관계없이 비교적 일정한 값을 나타내는 것은, 변형율 속도가 빠른 경우, Grain boundary sliding 을 위한 시간이 부족한 것으로 판단된다.

(3) 0.001/s 의 변형율 속도에서는 온도가 높을수

록  $m$  값이 높게 나타났으며, 이는 높은 열에너지에 의한 Grain boundary sliding 의 활성화에 의한 것으로 판단된다. 300°C에서는 변형이 진행되어도  $m$  값이 일정한 값을 나타내었으며, 이는 조직성장 현상은 적게 나타나고 동적 재결정과 함께 일정한 비율의 Grain boundary sliding 조건이 형성되기 때문으로 판단되나 향후 변형율별로 조직관찰을 통해 좀 더 정확한 분석을 실시할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 2010 년 울산광역시와 교육과학기술부의 지역과학단지육성사업의 연구비로 수행되었으며 이에 감사 드린다.

#### 참 고 문 헌

- [1] E. Doege, K. Droder, 2001, Sheet Metal Forming of Magnesium wrought Alloys-formability and Process Technology, J. Mater. Process. Technol., Vol. 115, No. 1, pp. 14~19.
- [2] H. Watanabe, H. Tsutsui, T. Mukai, M. Kohzu, S. Tanabe, K. Higashi, 2001, Deformation Mechanism in a Coarse-grained Mg-Al-Zn Alloy at Elevated Temperatures, Int. J. Plast., Vol. 17, No. 3, pp. 387~397.
- [3] W. J. Kim, S. W. Chung, C. S. Chung, D. Kum, 2001, Superplasticity in Thin Magnesium Alloy Sheets and Deformation Mechanism Maps for Magnesium Alloys at Elevated Temperatures, Acta Mater., Vol. 49, No. 16, pp. 3337~3345.
- [4] W. J. Song, S. C. Heo, T. W. Ku, B. S. Kang, J. Kim, 2011, Evaluation of Strain Rate and Temperature Dependent Flow Stress for Magnesium Alloy Sheets, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 3, pp. 229~235.
- [5] K. A. Padmanabhan, R. A. Vasin, F. U. Enikeev, 2010, Superplastic flow: Phenomenology and Mechanics, Springer, Berlin, pp. 5~26.