

# 유한요소법을 이용한 AZ31 마그네슘합금의 직/간접 압출 전산모사

이형욱<sup>1</sup> · 윤덕재<sup>2</sup> · 박성수<sup>3</sup> · 유봉선<sup>3</sup> · 최시훈<sup>#</sup>

## The simulation of direct/indirect extrusion of AZ31 magnesium alloy by FEM

H. W. Lee, D. J. Yoon, S. S. Park, B. S. You, S. H. Choi

### Abstract

A finite element analysis has been conducted to simulate direct/indirect extrusion process for AZ31 Mg alloy at various ram and die speeds. Uniaxial compression test on AZ31 Mg alloy was carried out at various strain rates and temperatures and the result was used as input data for finite element analysis. It was found that ram speed affects the distribution of dead zone area during direct extrusion. The inhomogeneous temperature and strain distributions through the thickness direction can be simulated under the various extrusion process conditions.

**Key Words** : direct/indirect extrusion , finite element analysis , magnesium alloys.

### 1. 서 론

현재까지 마그네슘합금의 제품생산은 다이캐스팅 공법이나 프레스 성형을 통해 90%이상을 생산하고 있으나, 이러한 다이캐스팅 공법이나 프레스 성형의 경우 금형가격이 높고 수율이 낮아 시장 경쟁력이 떨어진다. 반면, 압출을 이용한 벌크가공 공정은 복잡한 단면 형상을 갖는 재료를 가공하는데 적용되어 왔으며, 최종 제품의 미세조직이 미세하여 연성과 강도를 향상시키는데 효과적인 것으로 알려져 있다 [1,2]. 일반적으로 압출가공에 의해 제조된 제품은 일정한 압출속도에도 불구하고 불균일한 치수, 미세조직 및 기계적 성질을 갖기 쉽고 표면불량이 많이 발생된다고 알려져 있다 [3-6]. 이런 거동은 압출재의 단면에 걸쳐 변형, 변형속도 및 온도가 불균일하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 주어진 압출비에 대해서 최적의 미세조직 및 기계적 성질을 갖는 압출재의 제조와 압출된 최종 제품의 표면산화 및 균열결함을 최

소화하기 위한 압출온도, 압출속도 등의 압출공정 조건을 결정하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 AZ31 마그네슘합금을 300℃에서 다양한 램과 다이 속도로 봉 형상의 직접압출 (Direct extrusion, DE)과 간접압출 (Indirect extrusion, IDE) 시 압출재의 두께방향으로 발생하는 변형률 및 온도분포의 불균일성 등 소성변형거동을 예측하기 위해 축대칭 2 차원 유한요소해석을 수행하였다.

### 2. 실험 및 유한요소해석

#### 2.1 마그네슘합금의 기계적 물성

AZ31 마그네슘합금의 직/간접압출 시 발생하는 소성변형 거동을 해석하기 위한 입력데이터를 확보하기 위해 Gleeble 3500 시스템을 사용하여 고온 일축압축 실험을 수행하였다. Fig. 1과 같은 일축 압축 실험 시편을 이용하여 300℃, 400℃의 온도 구간에서, 변형률속도가 0.1/sec, 1/sec, 10/sec인

1. 순천대학교 재료금속공학과

2. 한국생산기술연구원

3. 한국기계연구원 부설 재료연구소

# 최시훈: 순천대학교 미래전략신소재공학과

E-mail: shihoon@sunchon.ac.kr

각 조건으로 50%까지 압축하여 물성을 확보하였다. 구체적인 thermo-mechanical 조건을 Fig. 2에 나타내었다.

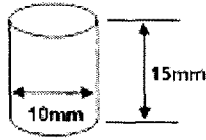


Fig. 1 Dimension of specimens for uniaxial compression

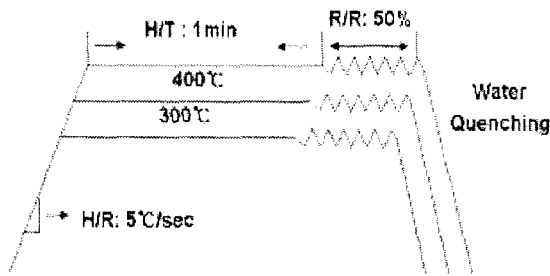


Fig. 2 Thermo-mechanical conditions for uniaxial compression

마그네슘합금의 압출 시 50/sec 의 높은 변형률 속도에서의 유동곡선은 변형률속도 민감도 (m)값을 이용하여 결정하였다. m 값은 일정한 변형률 조건에서 각각의 변형률속도와 이에 상응하는 유동응력 값으로서 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$m = \frac{\ln(\sigma_2 / \sigma_1)}{\ln(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)}$$

## 2.2 유한요소해석

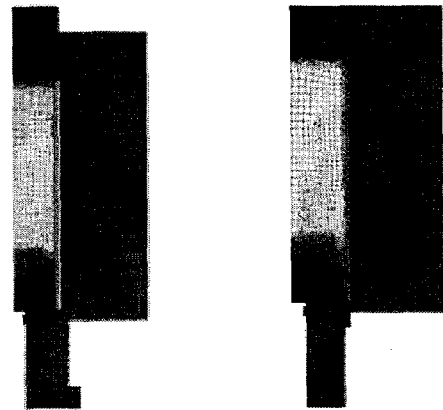
AZ31 마그네슘합금을 사용한 봉 형상의 직/간접 압출공정을 모사하기 위해 2 차원 축대칭으로 가정하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 2D V9.1 을 이용하여 해석을 수행하였다. 유한요소해석에 필요한 형상에 대한 기본정보는 Table 1 과 같이 실제 직/간접 압출공정 설비의 형상과 동일하게 구현하여 작성하였다.

Table 1 Dimensions of extrusion equipment

	Direct extrusion	Indirect extrusion
Billet length (mm)	200	200
Billet diameter (mm)	80	98
Die bearing length (mm)	5	5
Die R (mm)	5	5

Billet length (mm)	200	200
Billet diameter (mm)	80	98
Die bearing length (mm)	5	5
Die R (mm)	5	5

Fig. 3 은 직/간접 압출공정을 유한요소로 해석하기 위한 초기 mesh 작성 결과를 보여준다. 유한요소해석에 사용된 총 요소의 수는 직접압출법과 간접압출법에서 각각 8000 개, 9000 개 내외가 되도록 하였으며, 객체간 간섭 깊이를 0.3 으로 설정하여 remesh 가 일어나도록 하였다. 초기 빌렛 및 컨테이너의 온도는 300°C로 고정하였으나, 압출공정 시 발생하는 소성변형 열 및 열전달을 고려하여 300~400°C에 해당하는 물성을 입력데이터로 활용하였다.



(a) direct extrusion (b) indirect extrusion

Fig. 3 Initial mesh for FEM

해석에 사용된 마찰계수(0 ≤ f ≤ 1)는 기존 연구 결과 [7]를 참고하여, 300°C와 가장 일치된 0.6 의 일정 전단마찰계수를 사용하였다. 일정 전단마찰계수는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$|\tau_s| = f k = f \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

빌렛과 금형(램, 컨테이너, 다이) 그리고 빌렛, 금형과 공기와의 열전달 계수는 각각 11N/°C smm<sup>2</sup>, 0.02N/°C smm<sup>2</sup>로 가정하였으며, 직/간접 압출공정 모두 압출비 25 에 1.3mm/s, 4.0mm/s, 6.7 mm/s 의 램과 다이 속도로 해석을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험결과

AZ31 마그네슘합금의 일축압축 거동을 측정하여 유한요소해석에 필요한 입력데이터로 활용하고자 하였다. Fig. 4는 AZ31 마그네슘합금을 300°C의 온도에서 변형률속도 0.1/sec, 1/sec, 10/sec로 일축압축 실험을 수행하여 얻은 결과와 m 값을 이용하여 변형률속도 50/sec에서의 유동응력을 계산한 결과를 함께 나타낸 것이다. 300°C의 온도에서 변형률속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하였으며, 모든 변형률속도에서 peak stress 이후에 연화현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

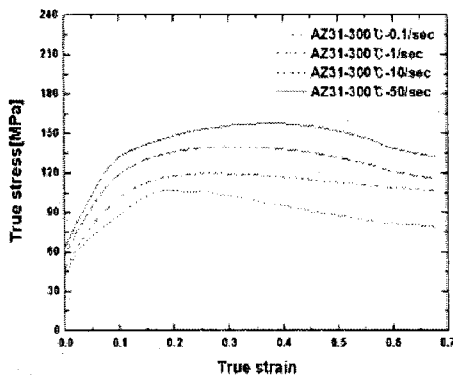


Fig. 4 True stress-strain curves of AZ31 alloy at 300°C

#### 3.2 유한요소해석 결과

유한요소해석을 이용하여 AZ31 마그네슘합금의 직/간접 압출 시 압출재의 두께방향으로 불균일 변형률과 온도분포를 이론적으로 해석하였다. Fig. 5는 압출온도 300°C에서 램과 다이의 속도에 따라 압출되는 봉 형상의 압출재가 다이 출구(다이 입구에서 85mm인 지점)를 통과하는 순간 두께방향으로 발생하는 유효변형률의 분포 결과를 보여준다. 간접압출보다 직접압출의 경우 압출재의 두께방향으로 불균일한 유효변형률이 발생하며, 압출방법에 무관하게 압출재의 표면에서 가장 높은 유효변형률이 발생하는 것으로 해석되었다. 램과 다이 속도는 유효변형률 불균일성에 크게 영향을 주지 않는 것으로 해석되었다.

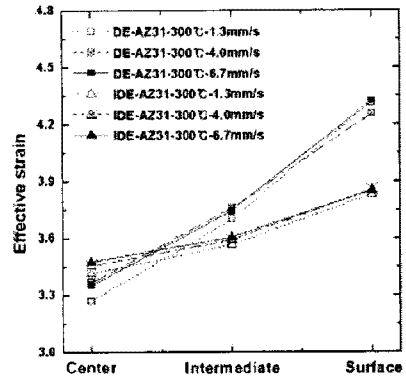


Fig. 5 Distribution of effective strain through the thickness direction

Fig. 6은 압출온도 300°C에서 압출되는 봉 형상의 압출재가 다이 출구를 통과하는 순간 두께방향으로 발생하는 온도분포 결과를 보여준다. 압출 공정 시 온도분포는 램, 다이, 컨테이너와 빌렛의 접촉면에서의 열전달 계수, 재료의 열용량, 열전도율 등에 따라 달라진다. 해석 결과 직/간접 압출 시 1.3mm/s의 램과 다이 속도에서는 직접압출보다 간접압출 시 압출재의 두께방향으로 보다 높은 온도를 보였으나, 4.0mm/s, 6.7mm/s의 속도에서는 간접압출보다 직접압출 시 보다 높은 온도를 보였다. 결과적으로, 마그네슘합금의 직/간접 압출 시 압출재의 두께방향으로 발생하는 온도는 램과 다이 속도가 증가함에 따라 높아지는 것으로 해석되었다.

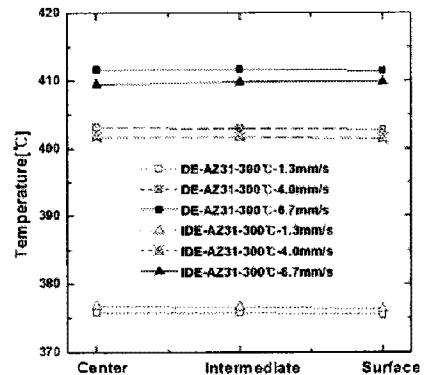
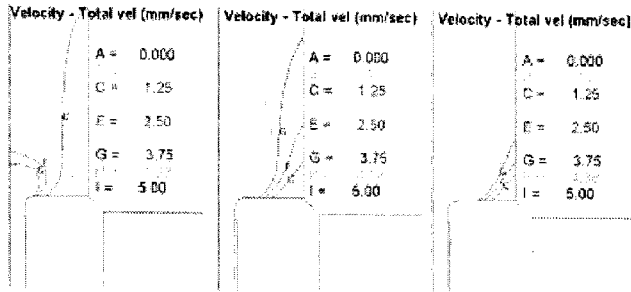


Fig. 6 Distribution of temperature through the thickness direction

압출 시 다이의 코너에서 소성변형이 거의 발생하지 않는 영역인 dead zone의 유무를 확인하기 위해 속도 분포를 최대 5mm/s까지 표시하여 해석을 수행하였다. Fig. 7은 직접압출 공정 시 램속도에 따른 속도분포를 보여준다. 속도가 가장 낮은

B 영역은 dead zone 으로써, 램속도가 증가할수록 감소하였다. 간접 압출 공정 시 에서는 dead zone 이 발생하지 않는 것으로 해석되었다.



(a) 1.3mm/s (b) 4.0mm/s (c) 6.7mm/s

Fig. 7 Distribution of velocity during direct extrusion of AZ31 Mg alloy

#### 4. 결론

본 연구에서는 AZ31 마그네슘합금을 300°C에서 다양한 램과 다이 속도로 직/간접 압출 공정 시 압출재의 두께방향으로 발생하는 불균일 소성변형거동과 dead zone 을 이론적으로 예측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 직/간접 압출 공정 시 압출재의 두께방향으로 불균일 소성변형거동을 확인할 수 있었다. 간접압출보다 직접압출의 경우 유효변형률의 불균일성이 큰 것으로 해석되었다. 압출재의 중심에서는 간접압출이 1/4 구간과 표면구간에서는 직접압출이 상대적으로 큰 유효변형률을 발생시키는 것으로 해석되었다. 압출재의 온도는 램과 다이 속도가 증가 할수록 증가하였으며, 램과 다이 속도가 1.3mm/s 에서는 간접압출의 경우에서 온도가 더 높았으며, 4.0mm/s, 6.7mm/s 에서는 직접압출의 경우에서 온도가 더 높았다.

2. Dead zone 의 분포는 간접압출에서는 확인 할 수 없었으며, 직접압출에서만 확인 할 수 있었다. 직접압출 시 분포하는 dead zone 은 램속도가 증가할수록 감소하는 것으로 해석되었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 부품·소재기술개발사업의 연구비 지원으로 이루어진 결과입니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] N.V. Ravi Kumar, J.J. Blandin, C. Desrayaud, F. Montheillet, N. Suery, 2003, Grain refinement in AZ91 magnesium alloy during thermomechanical processing, Mater. Sci. Eng. A Vol. 359 pp. 150-157.
- [2] B.M. Closset, J.F. Perey, C. Bonjour, P.A. Moos, in: B.L. Mordike, K.U. Kainer (Eds.), 1998, Microstructure and Properties of Wrought Magnesium Alloys, Magnesium Alloys and Their Applications, Wiley-VCH, Weinheim, pp. 195-200.
- [3] J.W. Song, J.W. Han, M.S. Kim, S.K. Hwang, 2004, Fabrication of magnesium alloy (AZ31) sheet by extrusion, Mater. Sci. Forum Vol. 449-452 pp. 65-68.
- [4] A.J. den Bakker, W.H. Sillekens, J. Bohlen, K.U. Kainer, G. Barton, in: K.U. Kainer (Ed.), 2004, The MAGNEXTRUSCO Project: Process and Alloy Development for Hydrostatic Extrusion of Magnesium, Magnesium Alloys and Their Applications, Wiley-VCH, Weinheim, pp. 324-330.
- [5] R.Ye. Lapovok, M.R. Barnett, C.H.J. Davies, 2004, Construction of extrusion limit diagram for AZ31 magnesium alloy by FE simulation, J. Mater. Process. Technol. Vol. 146 pp. 408-414.
- [6] K. Siegert, S. Jager, M. Vulcan, C. Wizemann, 2005, Forming tubes, extrusions and sheet metal from magnesium AZ31, Mater. Sci. Forum 488/489 pp. 499-508.
- [7] E. Doege, St. Janssen and J. Wieser, 2001, Characteristic values for the forming of the magnesium alloy AZ31, Mater. -Wiss. Werkst. Vol. 32, pp. 48-51