

결정립 성장을 고려한 초소성 성형공정의 유한요소해석 -II. AZ31 합금의 초소성 거동

김용관¹ · 김상현² · 권용남² · 김용환[#]

Finite Element Analysis of Superplastic Forming Considering Grain Growth-II. Superplastic Behavior of AZ31 Alloy

Y. G. Kim, S. H. Kim, Y. N. Kwon, Y. H. Kim

(Received July 5, 2012 / Revised September 7, 2012 / Accepted September 17, 2012)

Abstract

The aim of this study was to predict the results of superplastic forming on magnesium alloy, by considering the grain growth using numerical simulations. Superplastic behavior of AZ31 alloy was investigated through a set of uniaxial tensile tests that cover the forming temperatures ranges from 375 to 450°C. All the material parameters in the model, which consists of a constitutive equation and a grain growth equation, were determined. The model was used in the finite element analysis for uniaxial tensile tests and superplastic blow forming, through a user-subroutine available within ABAQUS. From this study, the effect of grain growth during forming was evaluated. The results show that it is essential to include the effect of grain growth in predicting the behavior during superplastic forming of this magnesium alloy.

Key Words : AZ31 Alloy, Superplasticity, Superplastic Blow Forming, Grain Growth, Finite Element Analysis

1. 서 론

마그네슘은 실용금속 중 가장 가벼운 재료로 경량이면서 높은 기계적 성질을 보유하고 있어, 알루미늄이나 티타늄 합금을 대체할 수 있는 가장 적합한 재료이다[1~7]. 최근에는 마그네슘 합금의 재활용성, 내충격성, 진동흡수성 및 전자파 차단성 등의 우수한 특성을 이용하여 가전기기, 휴대용 전자제품 등에도 사용이 증가하고 있다[1].

마그네슘의 결정구조는 티타늄과 같은 조밀육방구조(HCP)로 상온에서 기계가공이 어려운 단점이 있다. 따라서 마그네슘합금 부품은 냉간 소성가공보다는 대부분 다이캐스팅과 같은 주조공법

으로 생산되어 왔다. 하지만 주조공법은 후처리 공정에 많은 공수가 소요되어 원가상승의 요인이 되고 있으며, 국외에서는 이를 해결하기 위하여 판재나 전신재를 이용하여 원가가 저렴한 프레스 성형방법을 개발해왔다[2~3]. 국내에서도 사출부품이나 압연판재로 생산하여 소성가공하는 방향으로 연구가 집중되고 있으며, 포스코(POSCO Co.)에서는 대형 마그네슘 판재를 상품화하여 생산하기 위한 연구가 진행되고 있다[4].

난가공재인 마그네슘합금 판재를 프레스나 드로잉 공정으로 성형하기 위해서는 온간 및 열간에서 마그네슘합금 판재의 성형성을 파악해야 하며, 다수의 연구자들이 온간 및 열간 소성변형에

1. 충남대학교 기계설계공학과 대학원
2. 한국기계연구원 부설 재료연구소
교신저자: 충남대학교 기계설계공학과,
E-mail: yonghkim@cnu.ac.kr

대하여 연구하였다[5~7]. 특히 적절한 가공온도 조건에 대하여 연신량 혹은 가공경화 등을 연구하고 있다. 또한 미세 결정립의 경우 초소성 가공을 비교적 용이하게 할 수 있어 마그네슘합금 판재의 초소성 거동을 조사한 연구도 많이 진행되었다[8~11]. 이들 연구에서는 초소성 변형중의 기계적 특성과 미세구조적 변화를 연구하였으며, 다양한 온도 범위와 변형률 속도 범위에서의 인장 및 성형 시험을 함께 수행하고 있다.

본 연구에서는 AZ31 합금에 대해 수행된 고온 인장 시험 데이터를 기반으로 초소성 거동을 조사하고 결정립 크기의 변화를 고려할 수 있는 구성 모델의 재료상수를 계산하여 유한요소해석에 적용하였으며 이를 바탕으로 기존 구성 모델과 결정립 성장을 고려한 구성 모델의 초소성 거동 예측의 차이점을 비교하였다. 또한 AZ31 합금 판재에 대한 초소성 성형공정 해석을 통해 변형 특성 및 공정 변수의 영향을 검토하였다.

2. AZ31 합금의 초소성 거동 모델

2.1 고온 인장 시험

본 연구에서는 한국재료연구소(KIMS)에서 AZ31 마그네슘합금 판재에 대해 수행한 변형속도 변화 시험 및 인장 시험을 이용하여 고온 변형 특성을 조사하였다. 시험은 2.5mm 두께의 AZ31 판재에서 압연방향으로 추출한 시편이 사용되었으며, 375~450°C의 온도 영역과 0.002~2mm/s의 일정 크로스헤드속도(cross-head speed, CHS) 영역에서 실시되었다. 고온 인장시험을 실시한 후에는 광학 현미경을 이용하여 평균 결정립 크기가 측정되었다.

모든 온도에서 얻어진 결과를 조합하여 변형률 속도의 효과를 정량적으로 평가하였다. 변형률이 0.2 일 때, 온도에 따른 유동 응력과 변형률 속도 선도를 Fig. 1에 나타내었다. 선도는 초소성 재료에서 일반적으로 보이는 S자형 곡선의 일부분으로 나타났으며, 변형률 속도가 증가함에 따라 곡선의 기울기가 작아지고 온도가 증가함에 따라 낮은 응력을 나타내었다[10~13].

각 변형률 속도에 대한 변형률 속도 민감도 수($m = \partial \log \sigma / \partial \log \dot{\epsilon}$) 값을 나타낸 Fig. 2를 보면, 각 온도에 대하여 변형률 속도가 낮아짐에 따라 변형률 속도 민감도 수가 높아지는 것으로 나타났으며, 변형률 속도 0.001/s를 기준으로 0.3 이상의 높은 값을 나타내었다. 이는 초소성 거동이

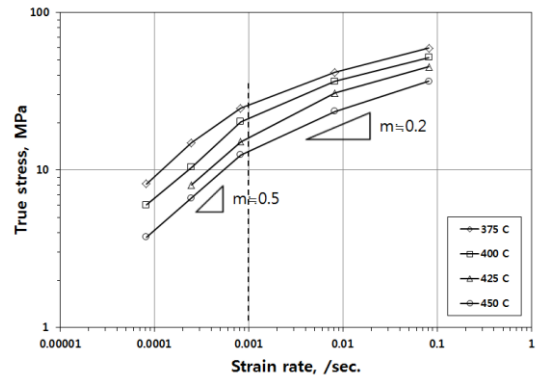


Fig. 1 Variation of true stress with strain rate at various temperatures

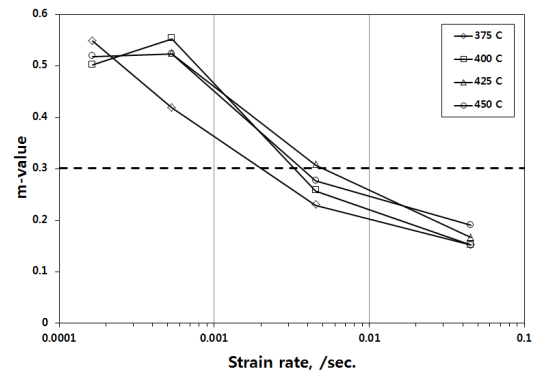


Fig. 2 Variation of strain rate sensitivity m with strain rate at various temperatures

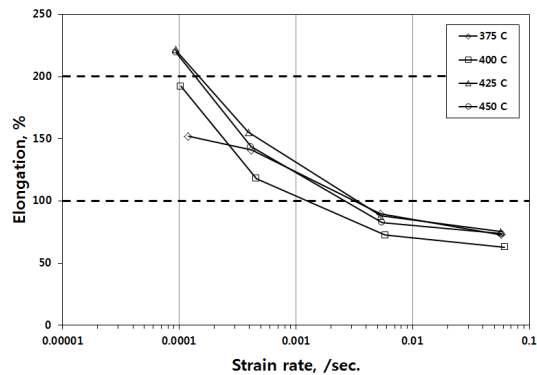


Fig. 3 Variation of elongation with strain rate at various temperatures

0.3에서 0.7 사이의 변형률 속도 민감도 수를 갖는 점으로부터 낮은 변형률 속도 영역(<0.001/s)에서 초소성 현상이 있는 것으로 판단할 수 있다 [14].

초소성 판단을 위한 또 다른 기준인 최대 연신량을 변형률 속도에 대하여 Fig. 3에 나타내었다. 보통 200%의 연신율이 초소성의 기준으로 고려함 [14]으로 이를 만족하는 온도영역은 400°C 이상인 것으로 나타났다.

위의 결과들로부터 AZ31 합금에는 초소성 거동이 보이는 것으로 판단할 수 있으며, 초소성 특성이 보이는 영역으로는 0.001/s 이하의 낮은 변형률 속도영역과 400°C 이상의 높은 온도인 것으로 확인되었으며, 이상적인 초소성 거동을 보이는 온도는 425°C로 선택할 수 있다.

한편 AZ31 합금의 인장시험 후 열간 노출과 변형에 의해 유발된 결정립 성장을 확인하기 위해 Fig. 4에 나타낸 결정립 크기의 측정결과를 검토하였다. 초기 시편의 결정립 크기는 15.66 μm 이고, 인장시험 후 예상대로 결정립 성장이 발생하였다. 변형에 의한 결정립 성장의 영향은 변형양이 가장 많은 A 지점과 상대적으로 변형양이 덜한 B 지점의 결정립 크기를 통해 확인 할 수 있으며, 변형속도가 작아질수록 A 지점의 결정립 성장이 B 지점의 결정립 성장보다 큰 것으로 나타났다. 이로써 본 연구에 사용된 AZ31 합금의 초소성에서 결정립 성장이 동반함을 알 수 있고, 특히 변형에 의한 동적 결정립 성장의 영향도 있을 것으로 판단할 수 있다.

2.2 구성 모델 및 결정립 성장 모델

본 연구에 사용된 구성방정식은 Caceres와 Wilkinon[15]에 의해 사용된 것으로 결정립 크기를 고려한 가장 단순한 식이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{K}{d^p} \sigma^m \quad (1)$$

여기서 $\dot{\varepsilon}$ 은 변형률 속도, σ 는 유동응력, m 은 변형률 속도 민감 지수, d 는 평균 결정립 크기, p 는 결정립 성장 지수, K 는 재료상수이다.

변형동안의 결정립 성장을 고려하기 위해 평균 결정립 크기에 대한 성장식이 사용되었으며, 마그네슘 합금[16]과 알루미늄 합금[17]의 결정립 성장 모델링에 사용된 바 있다. 결정립 성장 모델은 다음과 같다[15].

$$d = d_0 + C\varepsilon \quad (2)$$

여기서, ε 은 소성 변형률, d_0 는 초기 결정립 크기, C 는 재료상수이다.

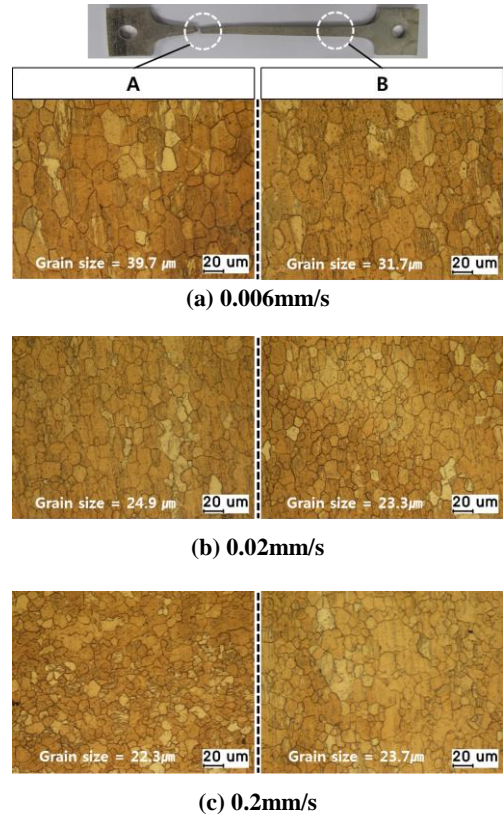


Fig. 4 Comparison of grain size on the position of A and B after uniaxial tensile tests at temperature of 425°C and various CHS

2.2.1 결정립 성장식의 재료상수 결정

결정립 성장은 일반적으로 열간 노출과 변형률, 변형률 속도에 의존하며 초소성 재료들에서 각기 다른 양상으로 나타난다. 따라서 AZ31 합금에 대한 결정립 성장을 조사하기 위해서는 정적과 동적 결정립 성장이 모두 분석되어야만 한다. 하지만, 본 연구에서 수행된 미세구조 분석은 정적과 동적 결정립 성장을 나누기보다는 전체적인 결정립 성장에 초점을 두고 있으며, 동적 결정립 성장은 시편의 A 지점과 B 지점으로 나누어 결정립 크기를 측정함으로써 간접적으로 확인하였다.

결정립 크기 측정결과를 바탕으로 A 지점의 판단 변형률에 대한 최종 결정립 크기를 Fig. 5에 나타내었다. 그다음 선형 최소자승법(linear least-square method)을 이용하여 피팅하였다. 여기서 초기 결정립 크기(d_0)는 15.66 μm 로 하였다.

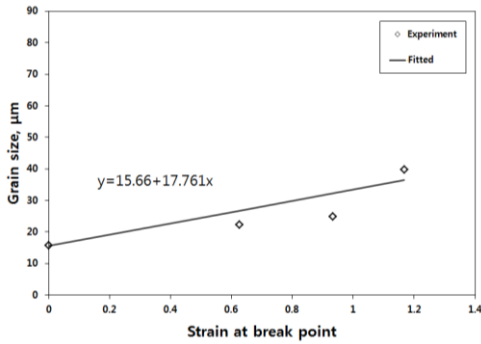


Fig. 5 The relationship between grain size and strain for AZ31 alloy at 425 °C

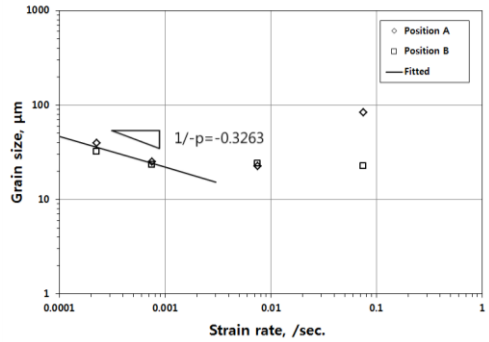


Fig. 7 The relationship between grain size and strain rate for AZ31 alloy at 425 °C

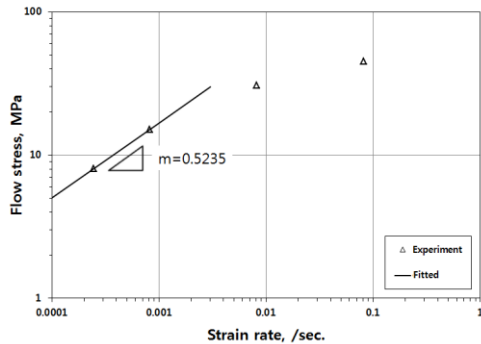


Fig. 6 The relationship between flow stress and strain rate for AZ31 alloy at strain 0.2 and 425 °C

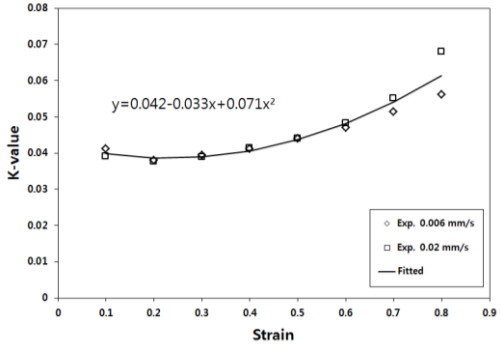


Fig. 8 The relationship between K-value and strain for AZ31 alloy at 425 °C

2.2.2 구성 방정식의 재료상수 결정

각 변수들의 관계를 조사하기 위해 식 (1)의 양변에 로그를 취하면 다음과 같다.

$$\log \dot{\epsilon} = \log K + \frac{1}{m} \log \sigma - p \log d \quad (3)$$

변형률 속도 민감도 지수 m 과 결정립 성장 지수 p 는 각각 유동응력과 결정립 크기로 미분함으로써 다음의 관계를 갖는다[18].

$$\frac{\partial \log \dot{\epsilon}}{\partial \log \sigma} = \frac{1}{m} \quad \frac{\partial \log \dot{\epsilon}}{\partial \log d} = -p \quad (4)$$

먼저 변형률 속도 민감도 지수를 구하기 위하여, 변형률이 0.2일 때의 응력과 변형률 속도 관계를 그린 후, 변형률 속도 0.001/s 이하에서 선형 최소자승법으로 피팅하였다(Fig. 6).

결정립 성장 지수는 결정립 크기와 변형률 속도의 관계로부터 구할 수 있으며, 특정 응력에서 결정립 크기를 구하는 것이 어렵기 때문에 최종 결정립 크기와 변형률 속도를 그린 후에 피팅하

였다(Fig. 7).

마지막 재료상수인 K 는 구성관계식을 K 에 대해 정리한 후, 실험데이터를 이용하여 구하였다.

$$\log K = \log \dot{\epsilon} - \frac{1}{m} \log \sigma + p \log d \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 CHS 0.006mm/s 와 0.02mm/s 에 대해 구한 K 값을 Fig. 8에 나타내었으며, 변형 속도보다는 변형률에 의한 의존도가 높아 변형률에 대한 2차식으로 가정하여 피팅하였다. 지금까지 구한 재료상수들을 Table 1에 나타내었다.

3. 유한요소해석

초소성 성형공정 해석을 위하여 결정립 성장을 고려한 구성방정식과 결정립 성장방정식이 적용되어 결정립 크기 및 변형률 증분을 계산하는 절차는 다음과 같다[19~20].

주어진 프로그램인 ABAQUS 에서는 사용자에게

의해 작성된 입력정보인 해석모델, 경계조건 그리고 마찰조건을 바탕으로 해석을 시작하게 되는데, 초기에 가정된 성형압력이 가해지면 초소성 재료의 구성방정식을 표현하는 User subroutine CREEP에서는 전체 요소에 대한 각각의 변형률 증분을 다음 식에 의해 계산해야만 한다.

$$\Delta \bar{\epsilon}^{cr} = B \tilde{q}_{t+\Delta t}^n f(\bar{\epsilon}_{t+\Delta t}^{cr}) \Delta t = h^c (\tilde{q}_{t+\Delta t}^n, \bar{\epsilon}_{t+\Delta t}^{cr}) \quad (6)$$

여기서 \tilde{q} 는 Mises 와 Hill 응력 포텐셜, $\bar{\epsilon}^{cr}$ 은 유효 크립 변형률, B 는 상수이고 f , h^c 는 각 변수의 비선형 함수이다. 앞으로 도입될 구성방정식을 예로 들면, 구성모델이 각각 식 (1), (2)와 같을 때 변형률 증분으로 정의된 증분형태로 변환하면,

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &\approx \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} = \frac{K}{d^p} \sigma^m \\ \Delta \epsilon &= \frac{K}{d^p} \sigma^m \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 또한, Newton-Raphson 법에 의한 비선형 방정식을 풀기 위해 $\Delta \bar{\epsilon}^{cr}$ 에 대한 함수 h^c 의 편미분을 구하면 최종적으로 모델은,

$$\frac{\partial \Delta \epsilon}{\partial \sigma} = \frac{1}{m} \frac{K}{d^p} \sigma^{m-1} \Delta t \quad (8)$$

와 같이 변환된다.

결정립 성장 방정식은 속도 형태로 주어지지 않았으므로 변형률에 대한 미분항으로 변환하여 결정립 크기 증분을 표현한다.

$$\begin{aligned} \frac{dd}{d\epsilon} &\approx \frac{\Delta d}{\Delta \epsilon} = C \\ \Delta d &= C \Delta \epsilon \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 결정립 크기를 포함하는 구성방정식은 첫 번째 시간 증분에서 초기 결정립 크기 d_0 를 사용하여 변형률 증분을 계산하며, 두 번째 시간 증분부터는 결정립 성장식을 통하여 성장된 결정립 크기를 반영한다.

종합해 보면 먼저 결정립 크기 d 를 계산하고, 변형률 증분 $\Delta \epsilon$ 이 계산된 후에는 미분계수 $\partial \Delta \epsilon / \partial \sigma$ 를 계산하고 ABAQUS solver 로 되돌아간다. 그 후에는 최대 변형률 증분과 시간 증분으로부터 얻어진 최대 변형률 속도를 이용하여 최대 변형률 속도와 최적의 변형률 속도의 비인 $\gamma_{max} (= \dot{\epsilon}_{max} / \dot{\epsilon}_{opt})$ 를 구하고 다음 단계로의 압력을 예측하게 된다.

Table 1 Determined material parameters for AZ31 alloy at 425°C

Parameter	Value
<i>Constitutive equation</i>	
m	0.524
p	3.064
K	$0.0424 - 0.033\epsilon + 0.071\epsilon^2$
<i>Grain growth equation</i>	
d_0	15.66 μm
C	17.761

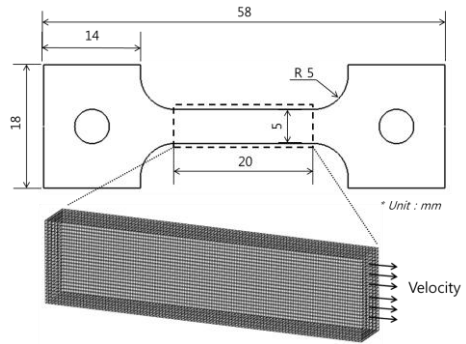


Fig. 9 The numerical model of specimen for uniaxial tensile simulation of AZ31 alloy

4. 결과 및 토론

4.1 단축 인장 시뮬레이션

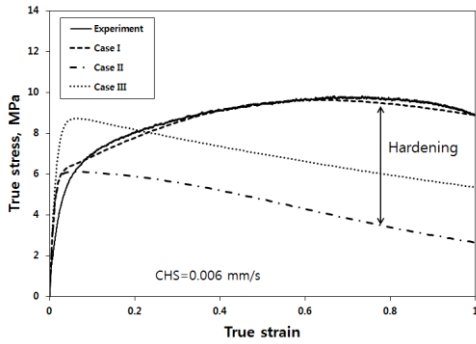
본 절에서는 2.2 절에서 결정된 결정립 성장을 고려한 모델의 유효성을 확인하기 위하여 단축 인장 시뮬레이션이 수행되었으며 결정립 성장을 고려하지 않을 때의 경우도 함께 비교하기 위하여 다음과 같이 3가지 모델을 이용하여 AZ31 합금의 초소성 거동을 평가하였다.

Case I : 결정립 성장을 고려한 모델로 구성 방정식 식 (1)과 결정립 성장 방정식 식 (2)로 구성된 모델이다.

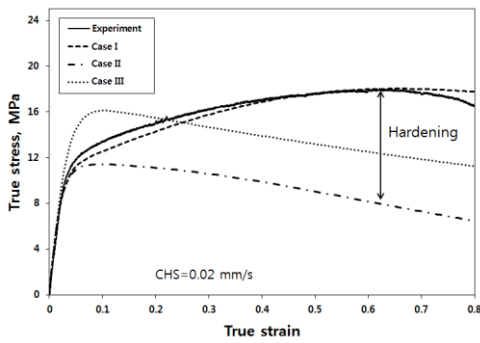
Case II : 결정립 성장을 고려하지 않은 모델로 Case I의 구성식에서 결정립 크기가 초기 결정립 크기로 일정하다($d = d_0$).

Case III : 결정립 크기를 제외하고 변형률 속도만을 고려한 멱법칙(power-law) 형태의 구성 방정식이다.

해석 모델은 균일 신장이 이루어지는 시편의



(a)



(b)

Fig.10 Variation of true stress with true strain in experiment and Case I, II, III at CHS of (a) 0.006mm/s and (b) 0.02mm/s

중양 부분만을 고려하였으며(Fig. 9), 3차원 1/8 모델로 구성하였고 요소는 32500개의 8절점 연속체 요소인 C3D8이 사용되었다. 해석 온도는 425°C이고 일정 CHS 0.006과 0.02mm/s에 대해 수행되었으며, 초기 결정립 크기 15.66 μm 이다.

결정립 크기를 제외한 멱법칙 모델(Case III)의 구성식은 초소성 재료에 대해 가장 일반적으로 사용하는 구성방정식이다. 변형률 속도 민감 지수 (m)는 2.22 절에서 구한 값을 사용하였고, 재료 상수 K 는 Fig. 6에서 변형률 속도가 1 ($\log \dot{\epsilon} = 0$)일 때의 응력값으로 구하였다. 이렇게 결정된 모델은 다음과 같다.

$$\sigma = 625\dot{\epsilon}^{0.5235} \text{ MPa} \quad (10)$$

각 CHS 속도에 대한 인장 시뮬레이션 후의 진 응력-변형률 선도를 Fig. 10에 나타내었다. 먼저 결정립 성장을 고려하지 않은 두 모델(Case II, III)의 경우 탄성구간에서 급속히 증가하다가 항복 이후부터는 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이

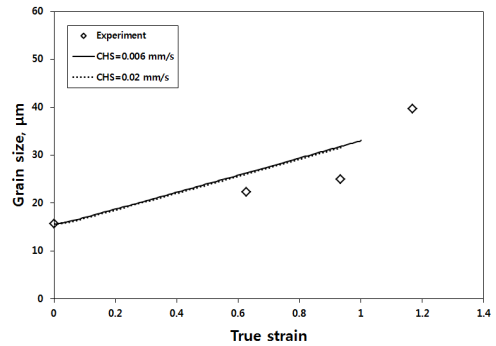


Fig.11 Variation of grain size with true strain in experiment and Case I at CHS of 0.006mm/s and 0.02mm/s

는 구성식 특성상 일정 CHS 조건에서 변형률이 증가함에 따라 변형률 속도가 작아지는 것을 감안하면 응력이 감소함은 타당한 결과이다. 그러나 Case I의 경우는 CHS 조건임에도 불구하고 발생하는 변형경화 현상을 잘 예측하고 있다. 실험결과와의 비교에서도 결정립 성장을 고려하지 않은 모델들은 AZ31의 변형특성을 거의 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 CHS가 0.006 mm/s, 0.02mm/s일 때 모두 같은 경향을 보여줌으로써 결정립 성장을 고려한 모델의 유효성을 판단할 수 있다.

Fig. 11은 변형률에 따른 결정립 크기를 실험값과 비교한 것이다. 변형률의 함수로 가정된 결정립 성장식은 CHS 속도에 관계없이 일정한 기울기로 결정립 크기가 증가함을 나타내고 있으며, 결정립 성장식이 초소성 해석에 잘 적용되고 있음을 확인하였다.

4.2 초소성 블로우 성형공정 해석

초소성 블로우 성형 해석에 사용된 해석모델은 Fig. 12와 같으며, AZ31 판재의 두께는 2.5mm이고 지름이 120mm인 원판을 해석에 사용하였다. 해석 모델은 3차원 1/4 모델이며, 판재는 3차원 연속체 요소인 C3D8로, 금형은 강체로 가정하여 R3D4로 유한요소 모델링하였다. 판재 요소의 노드점이 접촉면을 찾을 때 발생하는 탈락(falling-off) 현상을 막기 위해 금형은 대칭면을 기준으로 5mm 크게 모델링하였으며 금형의 플랜지(flange) 부분도 40 mm 크게 하였다. 압력제어는 ABAQUS에 내재된 알고리즘을 사용하였고, 판재와 금형 사이의 마찰 계수는 0.4[16]로 하였다. 성형온도는 425°C이며,

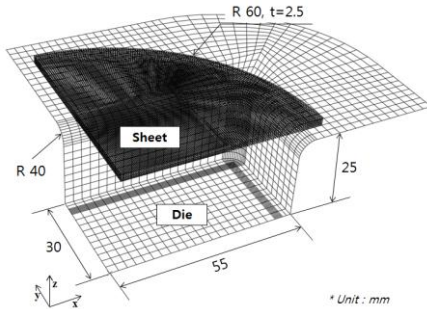


Fig.12 The numerical model for superplastic blow forming of rectangular box

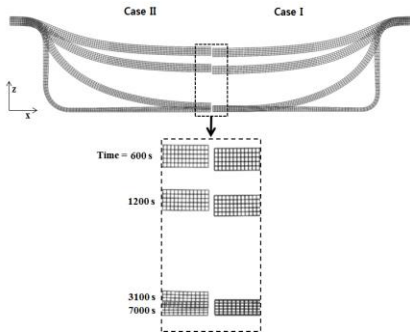


Fig.13 Comparison of deformed shape at different forming time in Case I and II

최적 변형률 속도는 3×10^{-4} /s, 그리고 초기 결정 크기는 $15.66 \mu\text{m}$ 로 하였다.

초소성 성형해석은 4.1 절과 마찬가지로 결정립 성장을 고려한 모델(Case I)과 고려하지 않은 두 모델(Case II, III)에 대하여 수행되었다. Case I과 Case II의 시간에 따른 변형형상을 나타낸 Fig. 13 을 보면, 성형 시간 3100초 이후에, Case I이 하부 금형의 바닥과 접촉이 이루어진 데 비해 Case II는 접촉이 일어나지 않아 결정립을 고려한 모델의 변형 속도가 빠름을 알 수 있다. 이와 함께 시간에 따른 성형압력 선도(Fig. 14)를 살펴보면, Case I 이 Case II 보다 높은 성형 압력을 나타냄을 알 수 있다. 특히 3000 초 이후에는 Case I의 압력이 급속하게 증가됨에 따라 두 모델간의 압력차가 크게 발생하였다. 결과적으로 결정립 성장이 재료가 변형하기 위해 필요한 응력을 증가시켜 높은 성형압력을 유도한다는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 변형속도는 증가되는 것으로 나타났다.

Fig. 15는 성형된 판재의 바닥부분의 필렛 값이 약 5mm일 때 대칭면의 두께 분포를 나타낸 것으

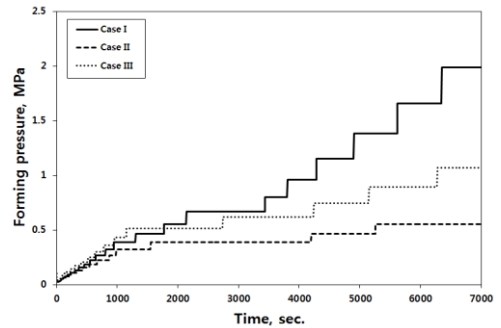


Fig.14 Variation of the forming pressure with time in Case I, II, III

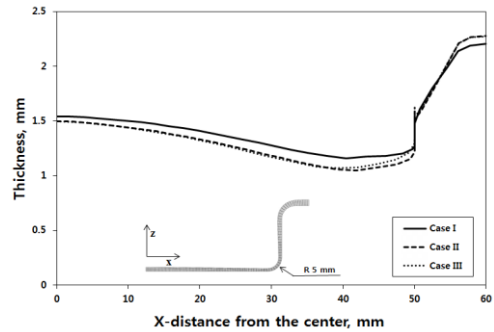


Fig.15 Variation of thickness for x-distance from the center in Case I, II, and III

로, Case I의 두께가 Case II, III보다 높은 것으로 나타났다. 이러한 두께의 차이는 사각박스 바닥의 중심보다는 코너 쪽으로 갈수록 차이가 컸다.

이처럼 결정립 성장을 고려한 모델은 결정립 성장에 의해 변하는 초소성 재료의 변형특성을 고려함에 따라 최적 변형률 속도를 유지하기 위한 성형압력과 성형 후의 두께 분포 예측에서 기존의 구성 모델 즉, 결정립 성장을 고려하지 않은 모델과의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 실제로 이러한 예측이 제품을 성형하기 위해 직접적으로 사용되기 때문에 결정립 성장을 고려함에 따른 공정 변수의 변화는 필수적으로 검토해야 됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 AZ31 합금에 대해 선정된 결정립 성장을 고려한 구성 모델의 재료상수를 결정하여 ABAQUS가 제공하는 User subroutine에 적용시키고, 단축 인장 시뮬레이션, 초소성 블로우 성

형해석을 수행함으로써 모델의 적용가능성을 확인하고 결정립 성장이 초소성 성형공정에 미치는 영향을 알아보았다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 고온 인장 시험 결과로부터 AZ31 합금의 초소성을 특성을 나타내는 온도와 변형률 속도의 의존성을 확인하였으며, 도입된 모델들의 재료상수를 구하는 일련의 과정을 수행하였다.

(2) 단축 인장 시뮬레이션에서는 결정립 성장을 고려한 모델이 진 응력-변형률 관계 및 결정립 성장의 실험값을 잘 예측하였으며, 특히 일정 CHS 조건임에도 발생하는 변형경화 현상을 모사할 수 있었다.

(3) 초소성 블로우 성형해석에서는 결정립 성장을 고려한 모델과 고려하지 않은 모델들의 변형 속도, 성형압력-시간 선도, 두께분포와 같은 공정 변수 예측에 있어서 상당한 차이가 있었다.

지금까지의 결과들로부터 결정립 성장은 초소성 변형의 예측에 있어 중요한 인자로 고려해야 됨을 알 수 있었다. 향후 초소성 성형 시험을 통하여, 결정립 성장을 고려한 모델로 예측한 결과와 비교하는 것이 필수적이다.

참 고 문 헌

- [1] W. S. Lee, 2006, A Trend on Manufacturing of Parts using Magnesium Alloy, *Mach. Ind.*, Vol. 36, No. 7, pp. 104~109.
- [2] E. M. Taleff, L. G. Hector, R. Verma, P. E. Krajewski, J. K. Chang, 2010, Material Models for Simulation of Superplastic Mg Alloy Sheet Forming, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 19, No. 4, pp. 488~494.
- [3] R. Verma, L. G. Hector, P. E. Krajewski, E. M. Taleff, 2009, The Finite Element Simulation of High-Temperature Magnesium AZ31 Sheet Forming, *JOM*, Vol. 61, No. 8, pp. 29~37.
- [4] Y. T. Jun, 2011, A Trend on Domestic Production Technology and Information of R & D, *Mach. Tool*, Vol. 229, pp. 36~38.
- [5] 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.
- [6] D. M. Kang, 2004, Analysis of Formability of Magnesium Alloy using Finite Element Method, *J. Korean Soc. Manuf. Technol.*, Vol. 3, No. 2, pp. 60~66.
- [7] W. J. Song, S. C. Heo, T. W. Ku, B. S. Kang, J. Kim, 2011, Evaluation of Strain, Strain Rate and Temperature Dependent Flow Stress Model for Magnesium Alloy Sheets, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 3, pp. 229~235.
- [8] Y. N. Kwon, Y. S. Lee, J. H. Lee, 2006, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring, Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 59~62.
- [9] S. D. Kim, Y. N. Kwon, Y. S. Lee, B. M. Kim, J. H. Lee, 2006, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring, Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 67~69.
- [10] G. Giuliano, S. Franchitti, 2008, The Determination of Material Parameters from Superplastic Free-Bulging Tests at Constant Pressure, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 48, No. 12-13, pp. 1519~1522.
- [11] D. E. Cipoletti, A. F. Bower, P. E. Krajewski, 2011, A Microstructure-Based Model of the Deformation Mechanisms and Flow Stress during Elevated-Temperature Straining of a Magnesium Alloy, *Scr. Mater.*, Vol. 64, No. 10, pp. 931~934.
- [12] F. K. Abu-Farha, M. K. Khraisheh, 2007, Mechanical Characteristics of Superplastic Deformation of AZ31 Magnesium Alloy, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 16, No. 2, pp. 192~199.
- [13] A. K. Ghosh, C. H. Hamilton, 1979, Mechanical Behavior and Hardening Characteristics of a Superplastic Ti-6Al-4V Alloy, *Metall. Trans. A*, Vol. 10, No. 6, pp. 699~706.
- [14] F. K. Abu-Farha, M. K. Khraisheh, 2007, Analysis of Superplastic Deformation of AZ31 Magnesium Alloy, *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 9, No. 9, pp. 777~783.
- [15] C. H. Caceres, D. S. Wilkinson, 1984, Large Strain Behaviour of a Superplastic Copper Alloy-I. Deformation, *Acta Metall.*, Vol. 32, No. 3, pp. 415~422.
- [16] M. A. Nazzale, M. K. Khraisheh, 2004, Finite Element Modeling and Optimization of Superplastic Forming using Variable Strain Rate Approach, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 13, No. 6, pp. 691~699.

- [17] F. S. Jarrar, F. K. Abu-Farha, L. G. Hector, M. K. Khraisheh, 2009, Simulation of High-Temperature AA5083 Bulge Forming with a Hardening /Softening Material Model, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 18, No. 7, pp. 863~870.
- [18] D. H. Bae, A. K. Ghosh, 2000, Grain Size and Temperature Dependence of Superplastic Deformation in an Al-Mg Alloy under Isostructural Condition, *Acta Mater.*, Vol. 48, No. 6, pp. 1207~1224.
- [19] ABAQUS Analysis User's Manual., 2010, Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- [20] ABAQUS Theory Manual., 2010, Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA.