

# AZ31 합금의 부풀림 성형시 공공의 거동

김상현<sup>1</sup> · 강남현<sup>1</sup> · 권용남<sup>#</sup>

## Cavitation Behavior of AZ31 Sheet during Gas Blow Forming

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

(Received September 15, 2011 / Revised October 11, 2011 / Accepted October 17, 2011)

### Abstract

Based on the facts that AZ31 magnesium alloy can be blow formed just like superplastic aluminum alloys and that most superplastic alloys fail by cavitation, the present study was undertaken to investigate the cavitation behavior of a fine-grained AZ31 sheet during blow forming at the elevated temperature. Other points of interest included the much lower strain rate and temperature dependencies of the magnesium alloy compared with conventional superplastic alloys. It was also aimed to find if cavitation in the AZ31 alloy can be suppressed by hydrostatic pressure, as is the case in most superplastic alloys. Interestingly, the application of hydrostatic pressure did not increase the blow formability of AZ31 sheet, even though it reduced the degree of cavitation. A possible reason for this behavior is discussed.

**Key Words** : AZ31 Sheet, Superplasticity, Blow Forming, Cavity, Hydrostatic Pressure, Grain Boundary Sliding

### 1. 서 론

마그네슘 합금은 구조용 금속재료로 가장 많이 사용되고 있는 철강과 알루미늄 합금에 비해 상대적으로 우수한 비강도 및 비탄성 계수를 가지는 장점이 있다. 이 밖에도 진동, 충격, 전자파 등에 대한 흡수 능력이 뛰어나고 전기 및 열 전도도가 비교적 우수하기 때문에 자동차, 항공산업의 경량화 소재로 적용이 유망하며 휴대용 전화기, 노트북, 카메라 등의 전자 산업에서는 일부 산업화가 이루어지고 있다[1, 2].

조밀육방결정구조(hexagonal closed packed structure)를 가지는 마그네슘은 활성 슬립계가 저면(basal plane)에 속한 3개에 국한되기 때문에 성형성이 매우 낮다[3, 4]. 마그네슘 고유의 낮은 성형성으로 인해 소성가공법을 통한 부품의 제조가 매우 어렵기 때문에 현재 공업적으로 사용되는 마그네슘

부품은 95% 이상이 각종 주조법을 통해 제조되고 있다[4~6]. 하지만, 자동차를 포함한 수송기기용 부품 중에는 판재성형을 비롯한 소성가공을 통하여 부품을 제조하는 것이 유리한 형상들이 많이 있기 때문에 앞으로 마그네슘 부품 산업이 활성화되기 위해서는 낮은 성형성을 극복할 수 있는 기술이 개발되어야 한다.

마그네슘의 성형성을 향상시키기 위한 연구는 크게 성형성이 높은 새로운 합금을 설계, 제조하는 기술 분야와 소성가공 공정 최적화 및 새로운 성형공정을 개발하는 분야로 나뉘어 최근 10여년간 활발하게 연구가 진행되어 오고 있다[1~6]. 특히, 마그네슘 합금 판재 성형 기술 분야에서는 마그네슘 합금이 온도가 증가하면 비저면 슬립계(non basal slip system)의 임계전단응력이 낮아져 성형성이 향상되는 점을 이용하여 금형 및 판재를 가열한후 성형하는 온간 혹은 열간 판재 성형기

1. 부산대학교

# 교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소,

E-mail: kyn1740@kims.re.kr

술에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다[4~6].

일반적으로 마그네슘 합금 판재는 열간 압연을 통해 제조되는데 낮은 재결정 온도로 인해 마그네슘 압연판재는 다른 금속재료 판재에 비해 결정립도를 미세화하기가 용이하다. 미세한 결정립을 가지는 재료는  $0.5T_m$  이상의 고온에서 결정립계 미끄러짐(*grain boundary sliding*)이 주요 변형기구로 작동하는 초소성 특성을 나타낸다. 마그네슘 합금 판재의 초소성 성질을 이용하여 가스압으로 성형을 하는 부풀림 성형(*blow forming*) 공정은 온/열간 판재성형에 비해 상대적으로 소재의 성형성이 높아지기 때문에 복잡한 형상을 구현하는데 유리한 특징을 가진다. 하지만, 이전 연구결과에 따르면 전신재 마그네슘 합금인 AZ31합금의 초소성 특성 보고에서 기존의 초소성 알루미늄 혹은 타이타늄 합금과 달리 상대적으로 낮은 연신율과 변형율속도 민감도를 나타내는 것으로 보고되었다[7~10]. 이상의 현상은 AZ31합금의 고온변형시 발생하는 결정립계 미끄러짐(*grain boundary sliding*)에 기인하는 공공(*cavity*)이 원인으로 작용하는 것으로 추정하고 있다. 초소성 알루미늄 합금에서 공공은 조대한 제 2상 입자(*second phase particle*) 주위에 응력집중이 확산이나 슬립 등의 보완기구(*accommodation mechanism*)에 의해 해소되지 않을 경우 공공의 핵생성이 발생된다. 이어 결정립계를 따라 형성되는 인장응력의 영향으로 공공이 성장하며 합체가 이루어져 최종적으로 파단이 발생하는 것으로 알려져 있다[8~12]. 초소성 알루미늄 합금에서 공공의 분율을 감소시킬 수 있는 방법으로는 먼저 결정립 미세화가 있다. 결정립 크기가 작아질수록 제 2상 입자 주위에 발생하는 응력의 크기가 작아지므로 공공의 생성 확률이 낮아진다. 하지만, 공공의 생성은 주로 확산기구에 의존을 하기 때문에 제어가 어려운 측면이 있는 반면 결정립계에 작용하는 인장 응력크기를 감소시켜 공공의 성장을 억제하는 방안이 효과적일 수 있다. Pilling 및 다수의 연구자들은 초소성 알루미늄 합금에 초소성 성형시 판재내에 정수압 상태(*hydrostatic stress state*)를 유도하여 초소성 알루미늄 합금에서 공공의 성장을 효과적으로 제어할 수 있음을 보고하였다[13~15].

알루미늄과 유사하게 단상 기지에 제2상 입자가 결정립계에 분포하는 AZ31합금에서도 결정립계 미끄러짐 중에 발생하는 공공을 정수압 상태로 유도하여 억제할 수 있을 것으로 기대된다. 하

지만, 아직까지 AZ31 뿐만 아니라 마그네슘 판재의 초소성 혹은 고온 변형시 공공의 발생 및 제어에 관한 연구가 이루어지지 않은 상태이다. 본 연구에서는 AZ31합금의 결정립계 미끄러짐이 발생하는 온도구역에서 변형중 응력상태를 변화시킴에 따라 공공의 발생 및 성장 거동에 미치는 영향을 조사하였으며 이를 바탕으로 공공발생과 성형성간의 관계를 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험 소재

본 연구는 평균 결정립 크기가  $15.7\mu\text{m}$ 를 가지는 두께 2.5mm의 상용 압연판재를 사용하여 수행하였다. 본 연구에 사용한 압연판재는 POSCO에서 strip casting법 및 열/온간 압연 공정을 거쳐 제조되었다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 비교적 등방성의 결정립을 나타내는 미세조직을 가지고 있어 고온에서 결정립계 미끄러짐이 용이하게 진행될 수 있을 것으로 판단하였다.

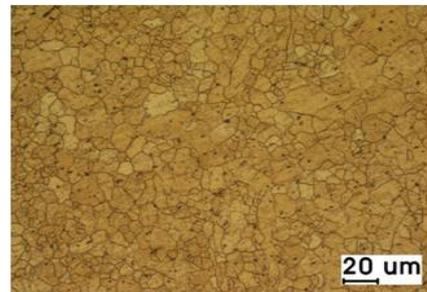


Fig. 1 As-received AZ31 sheet with grain size of  $15.7\mu\text{m}$

### 2.2 인장 시험

본 연구에 사용한 AZ31판재의 고온에서 기초적인 성형성을 평가하기 위하여 고온 인장시험을 실시하였다. 인장 시험편은 표점 길이가 20mm, 어께 반경이 5mm로 가공하여 사용하였으며 본 논문에서 기술한 인장시험 결과는 모두 판재 압연 방향(*rolling direction*)으로 가공하여 실험한 결과이다. 인장시험은 연구에 사용한 AZ31판재의 온도 및 변형속도 의존성을 조사하기 위하여 일정온도와 변형율 속도범위 구간에서 실시하였고 일정 변형속도 조건(*constant crosshead speed*)으로 수행하였다. 실험시 장착된 시편과 금형의 온도가 평형

을 유지하기 위해 실험온도에서 10분간 유지한 후 실험을 하였다.

인장시험과 함께 AZ31판재의 초소성 특성을 조사하기 위하여 인장시험을 실시한 온도범위에서 응력이완시험을 실시하였다. 인장시험 및 응력이완시험 결과는 부풀림 성형을 수행할 압력 조건을 결정하는 기초자료로 활용하였다.

### 2.3 부풀림 시험

이축응력상태에서 AZ31판재의 성형성을 평가하기 위하여 부풀림 성형시험(blow forming test)을 실시하였다. 부풀림 성형시험에 지름 55mm, 깊이 80mm, 코너반경이 5mm인 원통형상의 금형을 사용하였다. 부풀림 성형에 사용한 판재는 가스누출을 방지하기 위하여 외각 플랜지(flange)부의 폭을 약 30mm로 비교적 넓게 준비하였다. 부풀림 성형시험은 판재와 금형을 시험온도까지 가열한 후 10분간 유지한 후 시험을 실시하였다. 외각 플랜지부가 성형시 원통 금형의 내부로 말려들어오는 것을 방지하기 위하여 판재를 약 10톤의 하중으로 잡은 후 가스를 주입하였다. 부풀림 성형이 450°C의 고온에서 이루어지기 때문에 소재의 표면산화를 방지할 수 있는 불활성 아르곤(Ar) 가스를 사용하였다. 또한, 시편과 금형 사이의 마찰을 최소화하기 위하여 보론 나이트(boron nitride)를 도포하였다.

본 연구에서 사용한 부풀림 성형시험 조건은 Table 2에 나타낸 것과 같이 인장시험에 사용한 온도 범위에서 변형을 속도와 일정한 관계를 가지는 압력을 변화시키면서 실시하였다. 일반적으로 초소성 소재는 특정한 온도 및 변형을 속도에서 가장 우수한 성형성을 나타낸다고 알려져 있다 [8~11]. 이에 따라 초소성 판재의 부풀림 성형도 성형품의 특정 부위의 변형속 속도를 최적조건으로 유지하는 압력-시간 선도(pressure-time curve)를 바탕으로 성형이 이루어진다[16]. 하지만, 본 연구에서는 원통형 금형에 대한 성형 최적화가 목적이 아니라 AZ31판재의 고온 부풀림 성형성을 상대적으로 비교에 초점을 맞추었다. 이를 통해 AZ31판재의 고온 부풀림 성형성에 미치는 공정 조건 영향을 평가하며 그 원인을 분석하고자 본 연구에서는 일정압력 부풀림 성형조건을 사용하였다. 부풀림 성형시 전방압력(forward pressure) 및 후방압력(backward pressure)의 차이를 변화시키는 방법으로 성형압력(forming pressure)의 크기 및 정

Table 1 Tensile test condition

Temperature	375, 400, 425, 450°C
Strain rate	0.1, 0.01, 0.001, 0.0001/s

Table 2 Blowing test condition

Temperature	375, 400, 425, 450°C
Forward pressure	5, 10, 15, 20kg/cm <sup>2</sup>
Back pressure	0, 5, 10kg/cm <sup>2</sup>

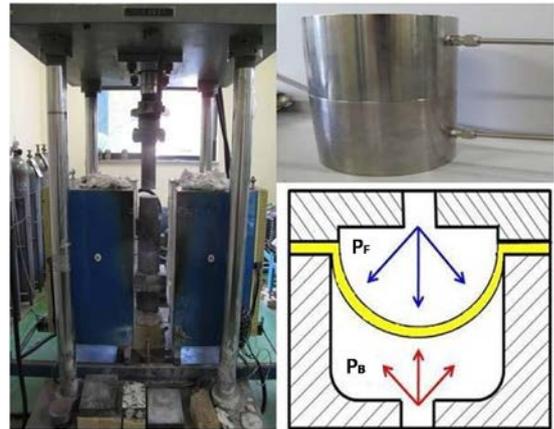
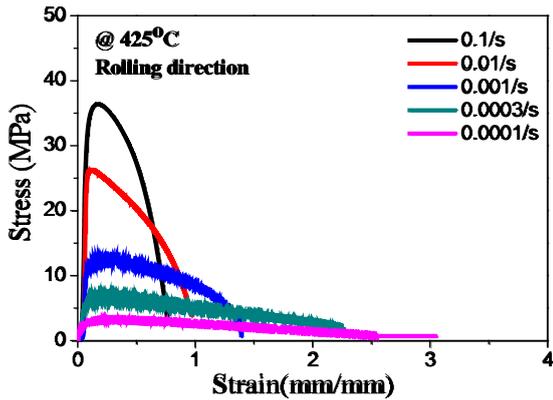


Fig. 2 Experimental set-up for blow forming test

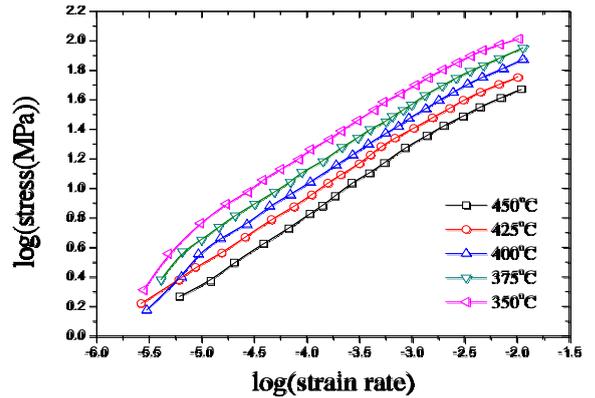
수압의 크기를 변화시킴으로써 성형성의 변화를 평가하였다.

성형 후, 성형품 높이, 성형 시간 그리고 두께 분포를 조사하여 AZ31판재의 고온 부풀림 성형성을 평가하였다. 부풀림 성형시험에 대한 유한요소 해석을 수행하여 실험 결과의 해석에 보조 자료로 활용하였다. 성형해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 FORGE 2009을 이용하여 수행하였다. 해석에 사용된 AZ31판재의 물성치는 압연방향시편의 인장시험에서 얻은 값을 사용하였으며 마그네슘 합금의 소성해석에 중요한 요소인 소성이방성은 시험온도가 상대적으로 높기 때문에 소성이방성의 영향이 매우 낮은 수준일 것으로 판단되어 고려하지 않았다.

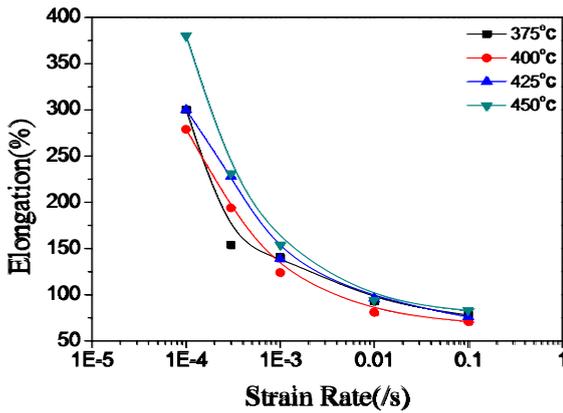
미세조직 관찰을 통해 공공의 발생 거동을 조사함으로써 공공이 성형성에 미치는 영향을 고찰하였다. 부풀림 성형조건에 따른 공공의 거동을



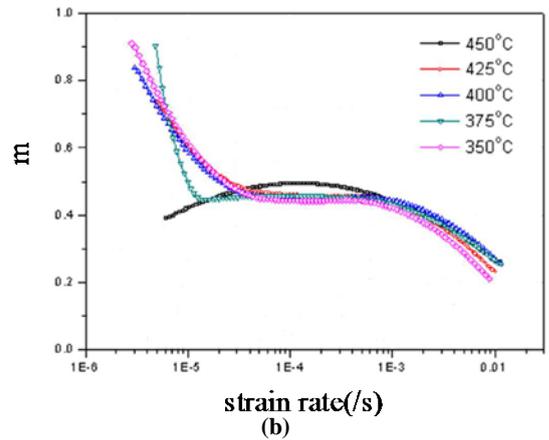
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 3 Result of tensile test, (a) stress-strain curves at 425°C, (b) elongation versus strain rate curves

Fig. 4 (a) Flow curves of AZ31 alloy sheet (b) Strain rate sensitivity with strain rate variation

정량적으로 조사하기 위하여 먼저 광학현미경으로 공공을 촬영한 후 이미지 분석기(image analyzer i-solution DT™)를 사용하여 공공 분율을 측정하였다. 미세조직 관찰에서 얻어지는 2차원적 정보의 유효성을 검증하기 위하여 성형시편을 일정한 크기(가로 6mm, 세로 6mm, 성형두께)로 절단하여 밀도 측정을 통해 공공의 분율을 3차원적으로 정량화하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 인장 시험

Fig. 3(a)는 425°C에서 초기 변형률 속도를 변화시키면서 인장 시험한 결과로 고온에서 미세 결정립 소재들이 나타내는 유동응력과 연신율의 변형률속도 민감성을 확인할 수 있었다. 변형률 속

도가 가장 빠른 조건(strain rate 0.1/s)에서는 75%, 가장 낮은 변형률 속도 조건(strain rate 0.0001/s)에서는 300% 수준의 연신율을 나타내었다. Fig. 3(b)는 변형률 속도에 따른 연신율 변화를 나타낸 것으로 온도가 높아지고 변형률 속도가 낮아질수록 연신율이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 연신율 변화는 일반적으로 초소성 재료에서 관찰할 수 있는 경향과 달리 변형률 속도 의존성이 매우 낮은 것을 확인할 수 있었다. 또한, 일정온도에서 변형률 속도 변화에 따른 연신율의 차이도 다른 초소성 합금에 비해서는 낮은 수준임을 확인할 수 있었다[10~14]. Fig. 4는 AZ31판재의 응력이완시험(load relaxation test)결과로  $10^{-3}$ ~ $10^{-5}$ /s의 변형률속도 영역에서 변형률 속도 민감지수(strain rate sensitivity)가 0.45 정도의 값을 가지고 있어 결정립계 미끄러짐이 발생하기가 용이할 것으로 판단된다.

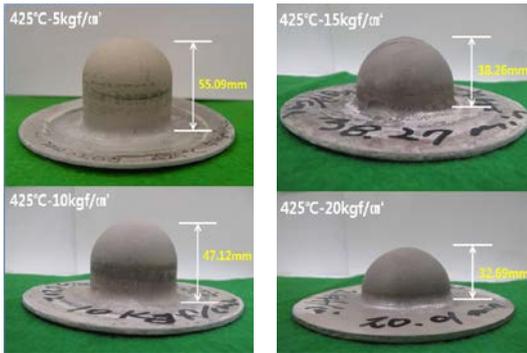


Fig. 5 Blow formed at various conditions

### 3.2 부풀림 시험

Fig. 5는 425°C 에서 성형압력을 변화시키면서 성형을 실시한 결과이다. 동일한 온도에서는 성형압력이 낮은 조건에서 성형량이 커지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 성형시 배압력(backward pressure)이 부풀림 성형성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 성형압력(정압력(forward pressure)-배압력(backward pressure))은 동일하나 배압력을 사용하지 않은 조건과 배압력을 5kg/cm<sup>2</sup> 및 10kg/cm<sup>2</sup> 을 사용한 경우를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 성형량은 배압력의 유무에 관계가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6(b)는 성형시 소요된 시간을 나타낸 그림으로 배압력의 유무에 따라 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6(c)은 배압력의 크기에 따른 성형품의 위치변화에 따른 두께 분포를 나타낸 그림이다. 배압력이 커질수록 두께 분포가 보다 균일한 양상을 보이는 경향을 나타내나 그 정도는 크지 않은 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 추가한 배압력의 크기의 변화에 따라 성형하는 관재가 받는 응력의 변화를 조사하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 7은 성형압력을 5kg/cm<sup>2</sup> 로 고정하고 배압력 크기를 증가시키면서 성형품의 높이 변화를 계산한 결과이다. AZ31 관재의 성형성은 해석에서 사용한 파단조건(관재의 두께가 급격히 얇아져서 해가 수렴하지 못하는 시점)을 적용할 때 배압력의 크기에 따라 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 성형품 단면의 유효응력, 유효변형률 및 주응력 분포를 나타낸 그림이다. 또한, 성형품 형상이 축대칭이기 때문에 1차 및 3차 주응력의

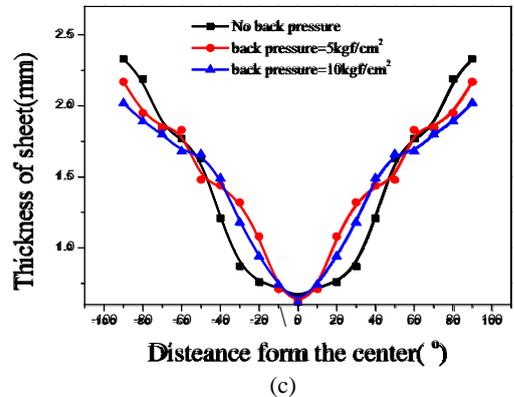
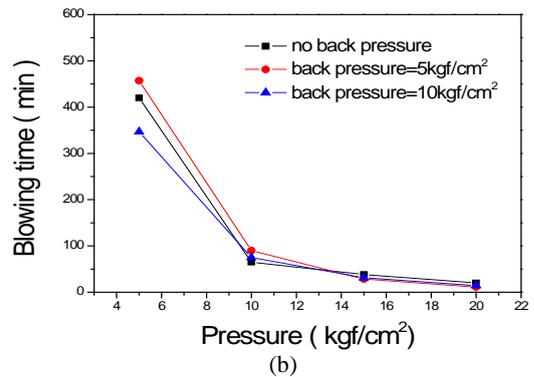
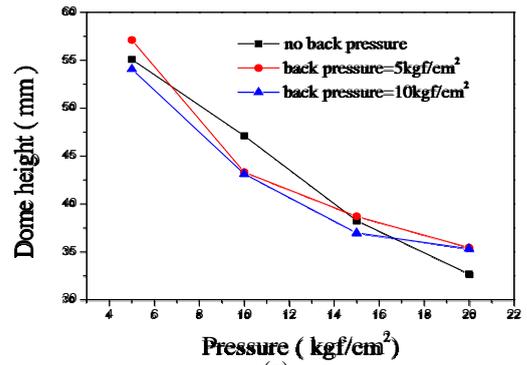


Fig. 6 (a) Dome height (b) Forming time and (c) Thickness with the variation of backward pressure (425°C , Forming stress 5kgf/cm<sup>2</sup>)

분포만을 나타내었다. 유효응력과 유효변형률은 배압력의 크기에 따라 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 하지만, Fig. 8(c)와 (d)에서 확인할 수 있듯이 배압력의 크기가 증가함에 따라 1차 주응력의 크기 및 분포에는 차이가 없는 반면에 3차 주응력은 배압력에 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 즉, 배압력 증가에 따라 두께 방향의 압축

성분이 작용하고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 3차 주응력의 차이는 공공의 거동에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 공공 관찰

AZ31판재의 고온 성형시 공공의 형성이 성형성에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위하여 인장시험과 부풀림 성형 후 시편을 광학현미경으로 조사하였다. Fig. 9에 인장시편, 정압력 부풀림 시편 및 배압력을 부가한 부풀림 시편의 미세조직을 나타내었다. 응력상태 변화에 따른 미세조직 차이를 상대적으로 비교하기 위하여 유사한 유동응력 조건으로 판단되는  $10^{-4}/s$  조건의 인장시험시편과 성형압력이  $5kg/cm^2$  인 부풀림 시편을 조직관찰에 사용하였다. 또한, 3가지 서로 다른 성형조건의 시편에서 변형량이 동일한 구역을 채취하여 조직을 비교함으로써 발생할 수 있는 오차를 가능한 한 줄이고자 노력하였다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 변형량이 증가함에 따라 공공의 성장이 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 공공 생성 및 성장은 AZ31판재의 부풀림 성형성을 제한하는 파괴의 원인으로 작용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 주목할 점은 성형조건에 따라 공공의 분율이 변화하는 것을 확실히 관찰할 수 있다는 점으로 인장시험시편, 즉 일축응력 시편에서 공공의 분율이 가장 높게 발생하며 배압력을 부가함에 따라 공공이 약간이나마 감소하는 경향을 나타낸 것을 확인할 수 있었다. 또한, 변형율이 증가함에 따라 일축인장시편의 경우 공공이 인장방향으로 길게 연결이 되는 양상으로 보인 반면 이축응력상태의 부풀림 성형품에서는 이러한 경향이 상대적으로 약해지는 것을 확인할 수 있었다.

이상의 경향을 정량적으로 평가하기 위하여 이미지 분석기(image analyzer)를 이용하여 Fig. 9의 공공의 양을 측정하였다. Fig. 10은 변형율 증가에 따른 공공의 면적비율을 나타낸 그림이다. 앞선 연구에서 공공의 생성(nucleation)은 확산에 지배를 받는 반면 공공의 성장(growth)은 변형율에 지수함수적인 관계를 가짐이 보고되었다. 식 (1)은 공공의 부피와 변형율과의 관계를 나타낸 식으로 공공성장률( $\eta$ : cavity growth rate)이 크기에 따라 공공의 성장 속도가 결정됨을 확인할 수 있다.

$$C_v = C_0 \exp(\eta \epsilon) \quad (1)$$

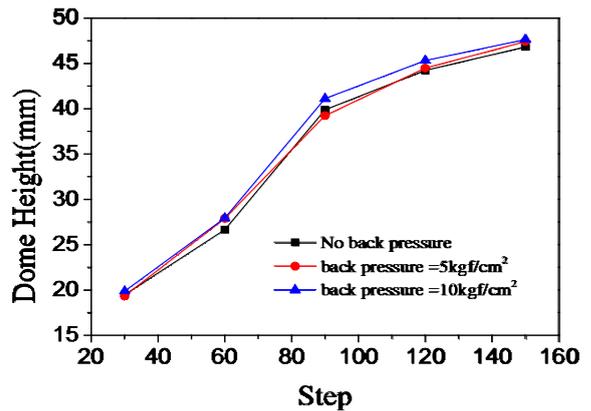


Fig. 7 FEM analysis results of dome height with variation of backward pressure ( $425^\circ C$ )

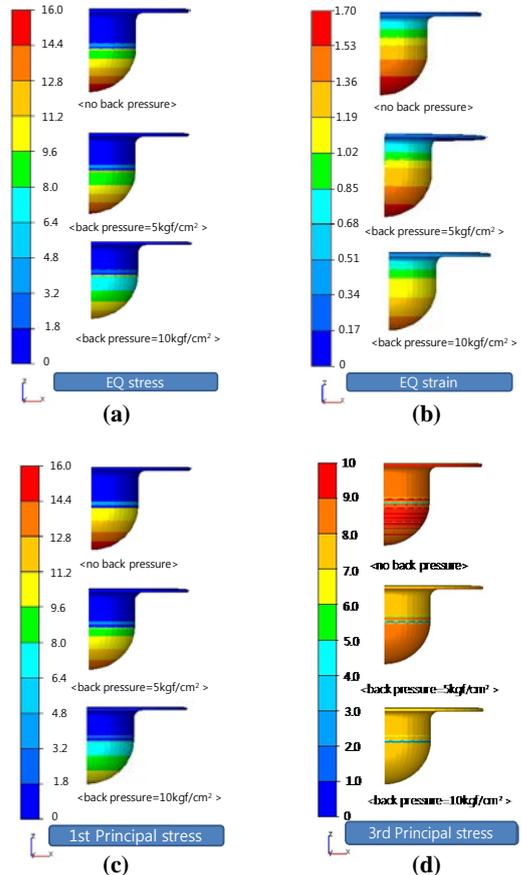
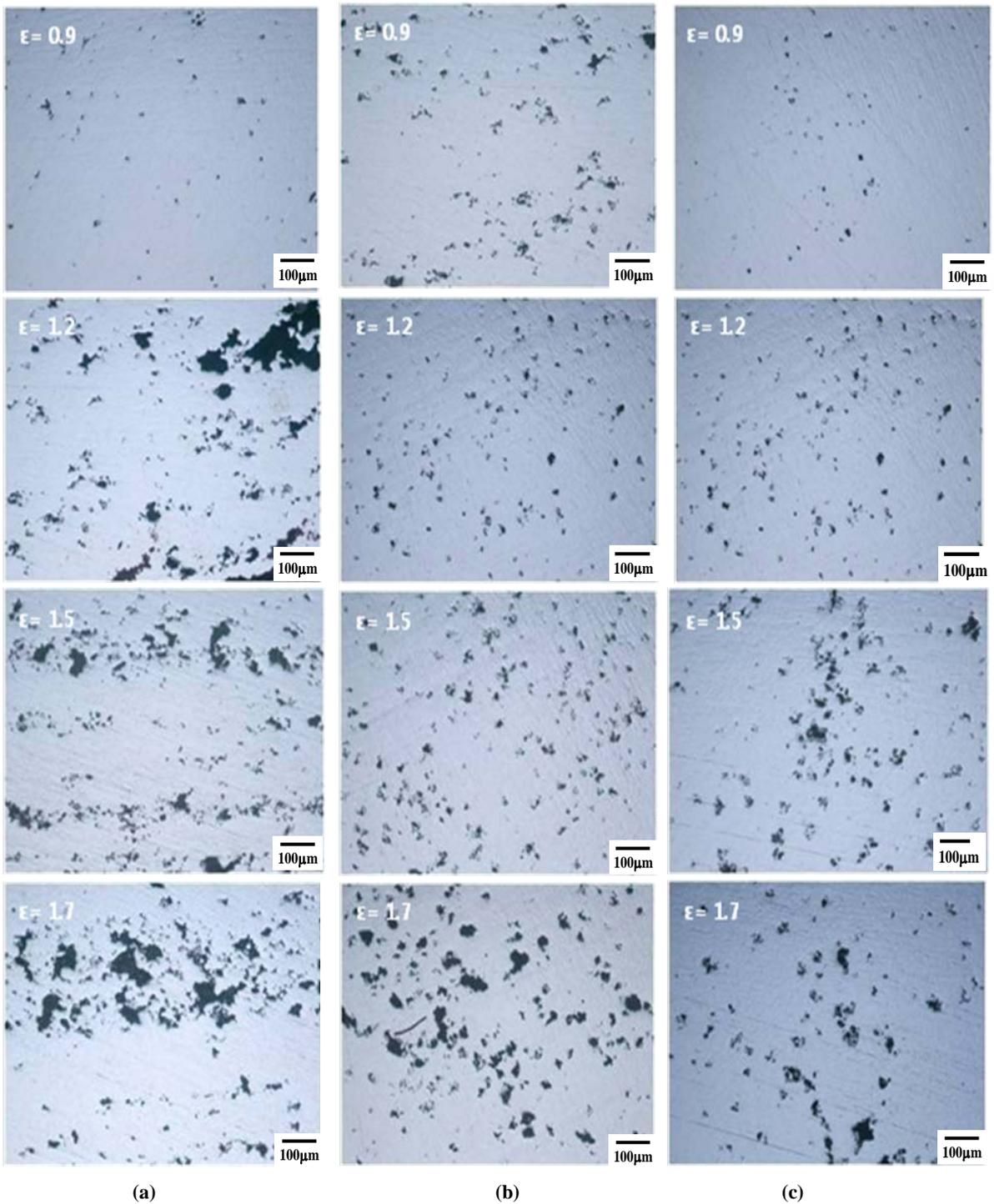


Fig. 8 (a) Equivalent stress, (b) Equivalent strain, (c) 1<sup>st</sup> principal stress and (d) 3<sup>rd</sup> principal stress distribution varies with the variation of backward pressure level



**Fig. 9** Optical micrographs showing cavitation of AZ31 alloy deformed at different strain level under (a) uniaxial tension(strain rate  $10^{-4}$ /s) (b) biaxial stress (Forward pressure 5kgf/  $\text{cm}^2$ ) (c) hydrostatic state (Forward pressure 15kgf/  $\text{cm}^2$  Backward pressure 10kgf/  $\text{cm}^2$ ) at 425°C

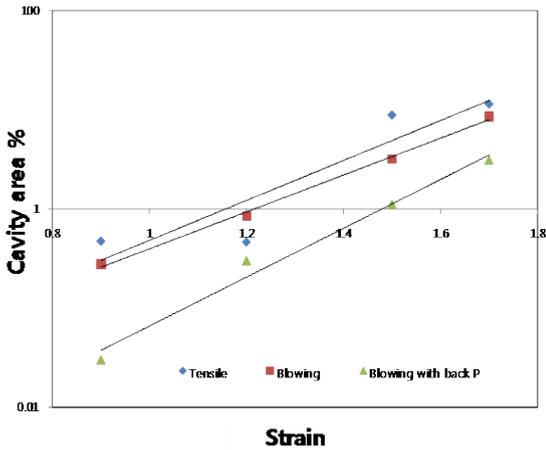


Fig.10 Cavity area fraction with the variation of forming condition

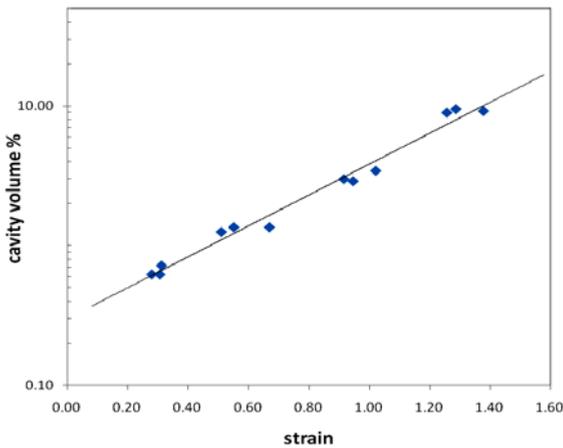


Fig.11 Cavity volume fraction of blow formed parts (425°C Forward pressure, 5kgf/cm<sup>2</sup> Backward pressure 0kgf/cm<sup>2</sup>)

Table 3에 AZ31판재의 응력상태에 따른 공공의 성장 특징을 나타내주는 지수를 정리하였다. Fig. 9에서 정성적으로 관찰한 결과와 달리 공공 성장률은 배압력을 부가한 조건에서 오히려 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 초기 공공의 분율이 상대적으로 낮아 공공의 절대량은 Fig. 9에 나타난 것과 같이 낮은 것으로 추정되었다.

Fig. 10 및 Table 3은 2차원 미세조직에서 얻은 공공의 양에 기반한 공공 성장 특성이다. 또한, Fig. 9에 나타난 최소 변형량이 0.9로 공공의 생성이 이루어진 후 성장이 활발하게 이루어지는 조건에서 얻은 값으로 판단된다. 하지만, 공공의 3차원적 특

Table 3 Cavity growth rate with the variation of forming condition

Forming condition	$\eta$	C0
Tensile	4.64	0.0047
Only forward pressure	4.29	0.0055
Backward pressure	5.67	0.0002

Table 4 Cavity growth rate of blow formed dome with the variation of forming pressure

Forward P (kgf/cm <sup>2</sup> )	Backward P (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\eta$	C0
5	0	2.62	0.2836
10	5	1.38	1.1105
15	10	1.91	0.2829
20	15	0.78	1.8493

징을 반영하기 위해서는 공공의 부피 분율을 측정할 필요가 있다. 이를 위하여 AZ31 성형시편의 밀도측정을 실시하였다.

Fig. 11에 나타난 것과 같이 부풀림 시편 중 변형량이 다른 부위의 시편을 이용하여 밀도를 측정한 후 변형량과의 관계에서 공공성장률 등의 인자를 결정하였다. Table 4는 부풀림 성형압력이 5kg/cm<sup>2</sup> 조건에서 배압력을 변화시킨 시편의 공공성장거동을 정량화한 결과이다. Fig. 6에서 나타난 부풀림 성형성은 배압력에 크게 영향을 받지 않았지만, 공공의 성장은 배압력과 밀접한 관계가 있는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 배압력이 증가함에 따라 공공성장률이 감소하여 공공의 성장이 억제되고 있었다.

배압력의 부가에 따라 공공의 성장이 억제됨에도 AZ31판재의 부풀림 성형성이 Fig. 6에 나타난 것과 같이 크게 증가하고 있지 않은 원인은 아직까지 명확하지 않다. 가장 큰 원인으로 공공의 성장을 완벽히 억제할 수 정도로 배압력이 높지 않기 때문으로 판단된다. AZ31합금의 결정립계 미끄러짐시 결정립계 삼중점 등에 집중되는 응력을 완화시키기 위한 보완기구들은 전위슬립과 확산이 있다. 만약, AZ31합금에서 결정립계 미끄러짐의 보완기구로 확산이 주도적인 역할을 한다면 공공의 성장이 응력상태에 따른 영향이 크지 않을 가능성이 높을 것으로 판단된다. 이에 반해 전위슬립에 의해 보완기구로 작동한다면 여전히 고온에서

도 존재하는 슬립계 사이의 임계전단응력 차이로 인해 응력집중의 이완이 어려워지며 이로 인해 공공의 성장에 따른 빠른 과단이 낮은 성형성의 원인으로 작용할 수 있을 것으로 추정된다. 또한, 동일한 이유로 성형하중의 차이에 따른 성형성 차이가 크지 않을 가능성이 클 것으로 추정할 수 있다. 이상의 추론을 확인할 수 있는 추가적인 실험을 진행하고 있으며 이에 대한 보고를 다음 논문에서 기술하고자 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 AZ31 합금의 고온 부풀림 성형성에 영향을 미치는 공공의 거동을 조사하였으며 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 인장시험 결과 온도가 높아지고 변형율이 낮아질수록 연신율이 증가하는 일반적인 결과를 얻었다. 하지만 AZ31 마그네슘 합금은 다른 초소성 재료에 비해 온도와 변형율 속도 의존성이 매우 낮은 것으로 확인되었다.

(2) 변형율이 증가함에 따라 공공의 성장이 진행되는 것을 확인함으로써 공공의 활발한 성장은 AZ31판재 빠른 과단을 가져와 낮은 성형성의 원인으로 작용한다.

(3) 응력 조건에 따라 공공의 분율과 공공의 모양이 달라짐을 확인하였다. 배압력의 부가를 통한 정수압 환경을 조성할 경우 공공의 성장이 억제되는 것을 확인하였다.

(4) 하지만, 공공 성장의 억제는 AZ31 판재의 부풀림 성형성 향상에는 크게 기여하지 않는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 초소성 알루미늄 합금에서와 상이한 결과로 마그네슘 합금에서 성형성과 공공 사이의 상관관계에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 산업원천기술개발사업(과제명: 환경부 하 및 에너지 저감을 위한 Eco-Mg 생산기반기술 개발- 과제번호: 10035292)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

[1] B. L. Mordike, T. Ebert, 2001, Magnesium Properties-applications-potential, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 302,

- No. 1 pp. 37~45.
- [2] M. T. Perez-Prado, 2002, Texture Evolution during Annealing of Magnesium AZ31 Alloy, Scr. Mater., Vol. 46, No. 2, pp. 149~155.
- [3] H. Takuda, T. Enami, K. Kubota, 2000, The Formability of a Thin Sheet of Mg 8.5 Li 1Zn Alloy, J. Mater. Process Technol., Vol. 101, No. 1-3, pp. 281~286.
- [4] Y. Z. Lu, Q. D. Wang, W. J. Ding, 2000, Fracture Behavior of AZ91 Magnesium Alloy, Mater. Lett., Vol. 44, No. 4, pp. 265~268.
- [5] N. Ogawa, M. Shiomi, K. Osakada, 2002, Forming Limit of Magnesium Alloy at Elevated Temperatures for Precision Forging, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 42, No. 5, pp. 607~614.
- [6] J. T. Carter, P. E. Krajewski, 2008, The Hot blow Forming of AZ31 Mg Sheet: Formability Assessment and Application Development, JOM, Vol. 60 No. 11, pp. 77~81.
- [7] M. K. Khraisheh, F. K. Abu-Farha, 2006, Combined Mechanics-materials Based Optimization of Superplastic Forming of Magnesium AZ31 Alloy, CIRP Ann. Manuf. Technol., Vol. 55, No. 1, pp. 233~236.
- [8] Gouthama, K. A. Padmanabhan, 2003, Transmission Electron Microscopic Evidence for Cavity Nucleation during Superplastic Flow, Scr. Mater., Vol. 49, No. 8, pp. 761~766.
- [9] D. L. Yin, K. F. Zhang, G. F. Wang, 2005, Superplasticity and Cavitation in AZ31 Mg Alloy at Elevated Temperatures, Mater. Lett., Vol. 59, No. 14-15, pp. 1714~1718.
- [10] K. K. Chow, K. C. Chan, 2002, Effect of Stress State on Cavitation and Hot Forming Limits of a Coarse-Grained Al5052 Alloy, Mater. Lett., Vol. 52, No. 1-2, pp. 62~68.
- [11] K. C. Chan, K. K. Chow, 2002, The Stress State Dependence of Cavitation in Commercial Superplastic Al5083 Alloy, Mater. Lett., Vol. 56, No. 1-2, pp. 38~42.
- [12] A. C. F. Cocks, M. F. Asyby, 1982, On Creep Fracture by Void Growth, Prog. Mater. Sci., Vol. 27, No. 3-4, pp. 244~244.
- [13] J. Pilling, R. Raj, 1985, Effect of Hydrostatic Pressure on Cavitation in Superplastic Aluminium

- Alloys, Acta Metall., Vol. 34, No. 4, pp. 669~679.
- [14] A. H. Chokshi, Amiya K. Mukherjee, 1993, The Influence of Hydrostatic Pressure on Grain Boundary Sliding in Superplasticity: Implications for Cavitation, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 171, No. 1-2, pp. 47~54.
- [15] H. S. Yang, H. K. Ahmed, W. T. Robert, 1989, Process Control of Superplastic Forming under Superimposed Hydrostatic Pressure, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 122, No. 2, pp. 193~203.
- [16] A. K. Ghosh, C. H. Hamilton, 1982, Influences of Material Parameter and Microstructure on Superplastic Forming, Mater. Sci., Vol. 13, No. 5, pp. 733~743.