

## Al-Cu-Zr 합금 초소성 성형품의 기계적 성질

이승준\*, 이영선\*, 이정환\*, 김원일\*\*

### Mechanical properties of Al-Cu-Zr alloy parts by superplastic forming

Seung-Jun Lee\*\*, Young-Seon Lee\*, Jung-Hwan Lee\*, and Won-Il Kim\*\*

#### Abstract

Although the bulge forming technique is currently employed in commercial superplastic forming processes, the uniaxial tensile test is still the most commonly used method for the evaluation of the superplasticity of materials due to its simplicity in testing. However, the results obtained from the uniaxial tensile test can not be applied in analyzing the characteristics of the real parts formed in multi-axial stress state.

In this paper, using the tensile test specimen obtained from the square cup manufactured by superplastic forming, tensile strength and elongation have been investigated according to the strain and cavity volume fraction. From the result of experiment, tensile strength and elongation are decreased according to the strain and cavity in Al-6%Cu-0.4%Zr alloy. On condition of uniaxial stress, cavity volume fraction is increased on linear according to the increasement of thickness strain. However, on condition of biaxial stress there are critical point( $\epsilon_t=1.5\sim 1.6$ ) that the slope, the ratio of cavity volume fraction and strain, have been changed. Therefore, cavity volume fraction is different with respect to stress condition, although the same strain.

**Key Words** : Multi-axial stress(다축 응력), Square cup(사각컵), Tensile strength(인장강도), Elongation(연신률), Cavity(공동), Thickness(두께)

#### 1. 서론

초소성 현상의 유력한 가설중 하나인 입계미끄러짐은 결정립간의 상대 운동으로 초소성 변형이 이루어진다는 것이다.<sup>(1)</sup> 그러므로 1축 응력이 작용하는 경우와 2축, 3축 응력이 작용하는 경우 입계미끄러짐의 양상이 달라질 것으로 예상되기 때문에

초소성 인장 시험을 통한 1축 응력상태에서 얻어진 결과들은 대부분 3축 응력이 작용하는 실제 성형품에 적용하기가 곤란하다. 이런 이유로 인해서 3축 응력이 작용하는 성형품에서의 인장시편 채취를 통해 기계적 특성을 조사하였다. 또한, 최종 형상의 두께분포는 최종 제품의 기계적 물성치 요구 조건에 큰 영향을 미치게 되므로 가능한 한 두께분포를 균일하게 하는 방향으로 공정을 설계하는 것은 매우 중요한 일이며 다축 응력이 작용하고 형상이 복잡할수록 이런 요구사항이 증가하게 된다.

\*한국기계연구원 재료공정연구부  
\*\*경남대학교 공과대학 기계공학부

본 연구에서는 초소성 성형품을 구조재료로서 적용할 목적으로 신뢰성 확보를 위하여 변형률에 따른 인장강도(Tensile strength)와 연신율(Elongation, %)등의 기계적 성질을 측정하였으며, 기계적 성질의 변화를 나타내는 변수를 관찰하기 위해 부위별 조직, 두께, 공동<sup>(1-3)</sup>에 관해 조사하였다. 실험에 사용된 초소성 성형품은 직사각형 단면을 갖는 사각집으로 변형률에 따른 영향을 조사하기 위해 집 깊이를 3종류로 변화시켰다. 그리고, 컴퓨터 시뮬레이션(PAM-STAMP)을 통해 성형깊이에 따른 성형품 형상을 비교하였다.

## 2. 실험 및 유한요소 해석

### 2.1 실험 방법

성형은 가열로의 분위기 온도를 초소성 성형 온도까지 상승시킨 후 상부 금형과 하부 금형 사이에 운활제(Boron nitride)를 도포한 판재를 위치시키고, 유압프레스를 작동시켜 금형 내의 가압 가스가 누설되지 않도록 상하 금형을 Clamping 한다. 선행연구결과로부터 얻은 최적 성형 온도인 450℃에서 소재가 분위기 온도에 도달되기까지는 약 30분이 소요되며 사용된 압력-시간 선도는 Fig.1 과 같다<sup>(4)</sup>.

실험에서 사용된 소재는 Al-6%Cu-0.4%Zr 합금인 Supral 100으로 두께는 2mm 이며, 소재 미세조직은 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 변형률에 따른 공동의 생성 부위와 그 양을 관찰하였다.

사용된 사각집 모델은 초소성 성형시 변형특성과 응력분포를 부위별로 변화시키고자 양변의 길이를 각각 110mm와 90mm 로 직사각형 형상을 선정 하였다. 성형직후와 T6 처리후의 사각집 형상 제품의 측면과 바닥에서 인장 시편을 채취하여 변형특성에 따른 인장 시험과 연신률 측정을 통해 각각의 기계적 특성을 조사하였다.

두께 2mm의 균일한 두께의 판재를 초소성 성형 압력-시간 선도에 의해 성형 깊이를 30, 40, 50mm의 세 종류로 변화시켜 초소성 성형하였고, 성형품의 단면을 관찰하기 위하여 부위별 두께 분포를 측정하였으며, 같은 조건하에서 성형한 제품의 성형 깊이에 따른 성형품과 해석결과의 형상을 비교하였다. 또한, 변형률과 응력 상태에 따른 공동의 발생을 분석하기 위해 1축 응력이 작용하는 초소성 인장시험을 통한 결과와 2축

응력이 작용하는 반구형 성형품에서의 결과를 비교분석 하였다.

### 2.2 유한 요소 해석

사용된 사각집의 형상 치수는 110L×90W×(50H, 단위:mm)이며, 대칭형상이기 때문에 사각집 전체의 1/4만 해석하였다. 초소성 현상 이론의 수치적 정의를 위해 변형률속도 민감지수(Strain rate sensitivity,  $m$ )와 소성계수(Strain rate constant,  $k$ )는 실험을 통해 식(1)을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 159\dot{\epsilon}^{0.4} \text{ ----- (1)}$$

운활제(Boron nitride)로부터 소재와 다이간의 마찰 정의를 위해 쿨롱(Coulomb)마찰 법칙을 사용하여 마찰계수값  $\mu=0.3$ 을 사용하였다<sup>(4)</sup>. 성형 깊이에 따른 성형품의 형상을 관찰하기 위해 바닥 깊이 30, 40, 50 mm의 3종류로 해석하였고, 실제 성형품의 형상과 해석결과를 비교 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 부위별 조직 및 두께 분포

Fig. 2 에서 원소재의 압연으로 인한 영향에 의해 압연 방향으로 섬유구조를 가지고 있는 것이 확인되었으며, 기지 전체에 석출물들이 균일하게 분포하고 있는 미세조직을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 결정립 크기를 관찰하기 위해 투과전자현미경으로 미세조직을 관찰한 결과 평균 결정립 크기는 2.5 $\mu$ m의 미세결정립 구조를 가지고 있었으며, 기지 전체에 0.03 $\mu$ m이하의 매우 미세한 석출물이 균일하게 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 3은 삼중점에서 발생하는 공동의 변형률에 따른 양상을 보여주고 있다. Fig.4에서 성형품의 성형 후 조직을 부위별로 관찰하면 측면에서 바닥쪽으로 갈수록 두께 변형률의 증가로 인해 공동의 발생량이 증가함을 알 수 있다.

성형깊이 30, 40, 50mm인 사각집 성형품의 바닥 중심에서 Clamping 부위까지의 두께 분포를 Fig. 5 에 나타내었다. 바닥 중심에서부터 약 40mm까지는 두께가 감소하는 경향을 나타내고 있으며 측면 부위에서는 두께가 반대로 증가하는 경향을 보인다. 중심으로부터 40mm 부위에서 가장 얇은 것은 성형시 바닥의 중심이 가장 먼저 소재와 접촉하게 된 후 측면으로 성형이 진전되므로 변형량과 마찰효과가 가장 크게 나타나기 때문으로 생각된다.

### 3.2 성형품의 기계적 특성

Fig.6 과 같은 치수의 시편으로 초소성 인장 시험을 통한 1축 응력 상태의 인장변형률에 따른 공동 부피 분율의 조사 결과를 Fig.7에 나타내었는데, 공동의 부피 분율이 지수함수적으로 증가하는 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이것을 로그 함수로 환산 하면 공동 부피의 증가가 인장 변형률이 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 2축 응력 상태인 반구형 성형품에서 원소재의 두께 변형률에 따른 공동의 양은 Fig. 8과 같다. 2축 응력 상태인 경우는 공동 부피 분율이 1축 인장의 경우와는 달리 두께 변형률이 증가할수록 기울기가 변하는 임계점 ( $\epsilon_i=1.5$ )이 존재하였다. 이러한 임계점은 삼중점에서 발생하는 공동과 관계가 깊으며, Fig.3이 설명해 주고 있는 것을 통해 볼 때 공동은 높은 변형률에서는 결정립의 삼중점에서 생성되어 인접한 공동과 합체한 후 성장이 일어남을 확인할 수 있다.

성형직후와 T6처리후의 각각의 성형품에서 상온인장 시험을 하여 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 성형직후의 성형품에서 인장시험결과 Fig. 9(a)와 같이 변형률이 클수록 인장강도는 감소하는 경향이 나타났으며,  $\epsilon_i = 0.3$ 인 낮은 변형률에서 인장강도는  $21\text{kgf}/\text{mm}^2$ 으로 Table. 1 에서의 원소재의 인장강도  $32\text{kgf}/\text{mm}^2$ 보다 약  $10\text{kgf}/\text{mm}^2$ 의 강도가 저하되었다. 또한, 두께 변형률이 증가할수록 인장강도가 일정한 기울기로 감소되는 것은, 변형률의 증가에 따라 공동의 량도 증가함으로써 공동주위의 결합이 더욱 증가되기 때문으로 생각된다<sup>(6)</sup>. 또한, T6처리후의 인장강도 역시 두께 변형률이 증가할수록 공동의 영향으로 인하여 일정한 기울기로 감소되는 경향을 보이고 있다. 또한, T6 처리후의 공동은 그 양이 T6처리전 보다 감소하였지만 인장강도는 동일한 기울기로 감소되고 있다. 따라서, 공동 발생은 일정량 이상에서는 기계적 성질의 저하에 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 9(b)에서 성형직후와 T6 처리후의 연신율 모두 변형률의 증가에 의해 연신율이 감소하였다. 이것은 인장강도와 같이 공동의 발생으로 인한 영향으로 생각된다. T6처리후의 연신율이 성형직후의 연신율보다 높게 나타난 것은 성형전 원소재가 압연율이 90%이상 되기 때문에 내부에 잔류응력이 불안정하게 잔존하고 있는 상태이고,

T6처리를 함으로써 잔류응력이 감소되기 때문으로 생각된다.

### 3.3 유한요소 해석을 통한 형상 관찰

PAM-STAMP를 통한 해석 모델 및 결과를 Fig.10 에 나타내었다. 성형깊이에 따른 사각컵의 실제 성형품과 성형 해석결과를 Fig.11에 나타내었는데, 매우 유사한 형상의 결과치를 보여 주었다. (a)의 성형깊이 30mm의 실제 성형품과 (b)의 해석결과를 살펴보면 실제 성형품과 같은 성형 결과를 보여 주었으며, 40, 50mm 성형 해석결과도 실제 성형품과 매우 유사한 형상임을 관찰 할 수가 있었다.

## 4. 결론

이상의 결과에서 Al-6%Cu-0.4%Zr 합금의 변형률에 따른 공동의 량과 인장강도, 연신율과의 관계를 통해 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 알 수 있었다. 이것을 통해 초소성 성형품의 구조재로서의 신뢰성을 입증하기 위한 자료로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

- (1) 공동의 형상은 변형초기 구형에서 변형률이 증가할수록 인장방향으로 연신, 성장, 합체되어 조대한 공동을 형성하고, 그 크기는 변형률이  $\epsilon_i=1.5\sim 1.6$ 이하에서는 길이가  $5\mu\text{m}$  이상인 것이 거의 관찰되지 않았지만, 그 이상의 변형률에서는 급격히 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다.
- (2) 공동부피분율은 1축 인장의 경우 두께 변형률이 증가할수록 직선적으로 증가하지만 2축 인장의 경우에는 기울기가 변하는 임계점 ( $\epsilon_i=1.5\sim 1.6$ )이 존재한다.
- (3) 변형률이 증가함에 따라 공동의 량도 증가함을 보였고, 3축 응력 상태에서는  $\epsilon_i=0.7$  이상의 변형률에서 공동의 량이 급격히 증가함을 알 수 있었다.
- (4) 두께 변형률이 증가할수록 인장강도가 감소하는 것을 알 수 있는데, 이것은 변형률에 따른 공동의 관계를 통해 공동이 인장강도의 감소를 가져온다는 것을 알 수 있었다.

- (5) 성형직후와 T6처리후의 연신율은 변형률이 증가함에 따라 감소하였고, T6처리 후의 연신율이 성형직후의 연신율 보다 높게 나타났다.
- (6) 초소성 성형에 의해 발생하는 공동은 결국 인장강도와 연신율 저하의 요인으로 기계적 성질을 악화시키는 원인이 되므로 사용 소재와 제품의 요구 특성에 따라 성형 기준을 설정할 필요가 있음을 알 수 있다.

## 참고 문헌

- (1) J. Pilling and N. Ridley, " Cavitation in aluminium alloys during superplastic flow", Superplasticity in Areospace, 1988. pp. 183~198
- (2) H.Ahmed, R.Pearce : Superplasticity in Aerospace-Aluminium(1985), pp. 146~159
- (3) R.Grimes, R.G.Butler : Superplasticity in Aerospace(1987), pp. 97~113
- (4) 이정환,이영선,이상용 (1997), "판재성형기술 개발", 한국기계연구원 보고서, 과학기술처, UKN006-2241.C
- (5) Shah, K. N. and Story, J. M. 1989, "SPF Model applications for aluminum," J. Mater. Shaping Technol., Vol. 7, No. 3, pp. 137~144
- (6) 이정환,김현철,이영선,이상용,신평우 (1998) "초소성 블로우 성형품의 두께분포 균일화 연구", 한국소성가공학회, Vol. 7, No. 6, pp. 617~618

Table. 1 Mechanical properties of Supral 100

Material Property	Supral 100	
	as-received	after heat treatment(T6)
UTS(MPa)	316	450.9
Elongation(%)	6.25	21.6

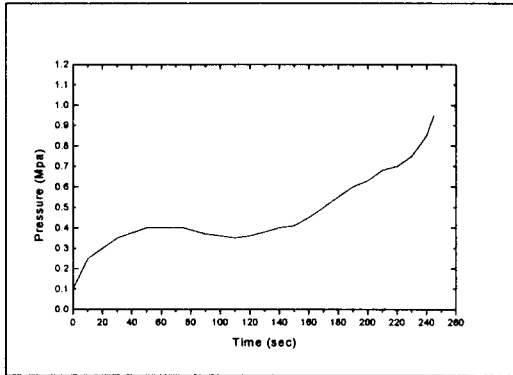


Fig.1 Time-Pressure curve of superplastic forming for square cup

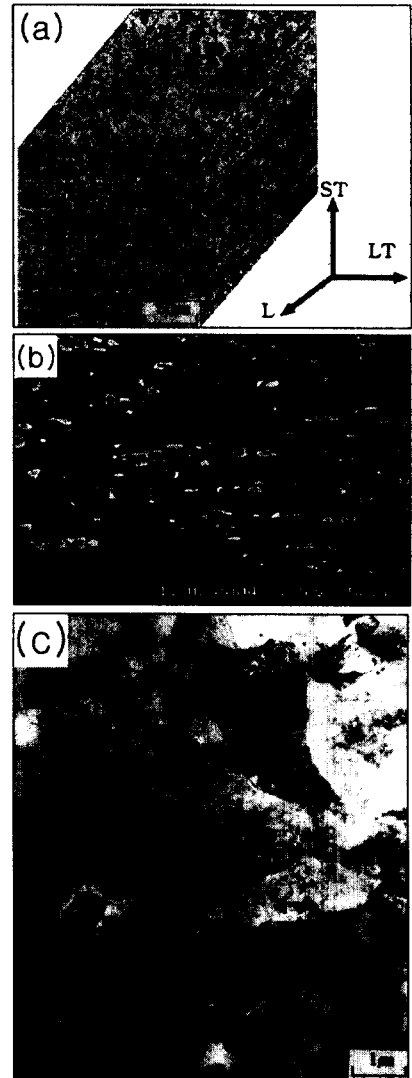


Fig.2 Microstructure of Supral 100 as received  
 (a) OM (b) SEM (c) TEM

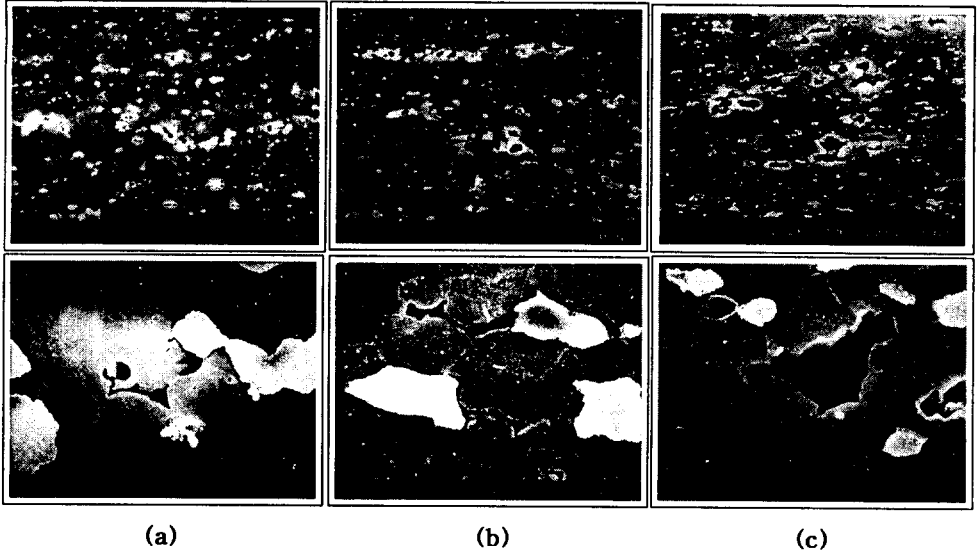


Fig.3 Morphology for the cavitation according to the thickness strain.  
 (a)  $\epsilon_t=1.0$  (발생)    (b)  $\epsilon_t=1.6$  (성장)    (c)  $\epsilon_t=1.9$  (합체)

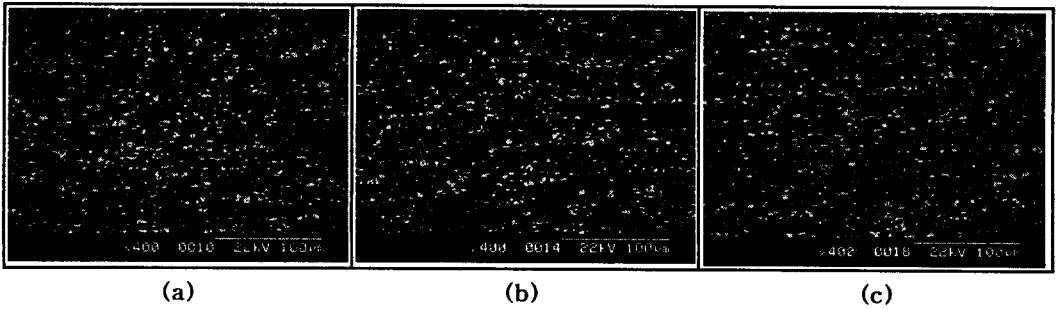


Fig.4 Microstructure at part position after superplastic forming for square cup  
 (a) Top part    (b) Middle part    (c) Bottom part

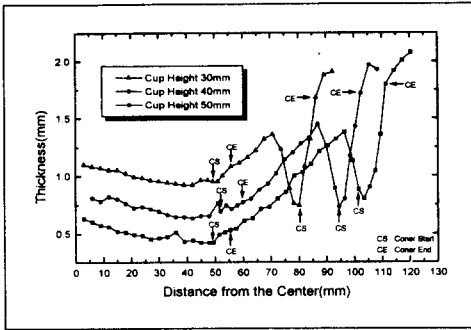


Fig.5 Thickness distribution of superplastic square formed product

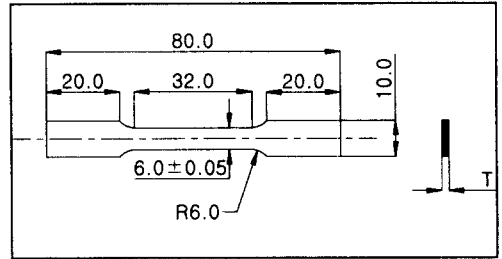


Fig.6 Specimen size and shape for the superplastic tensile test

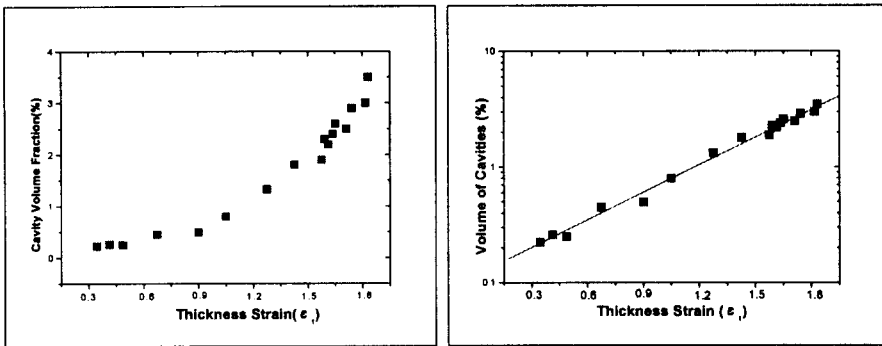


Fig.7 The comparison of volume fraction of cavity using Supral 100 and with respect to thickness strain after superplastic tensile test

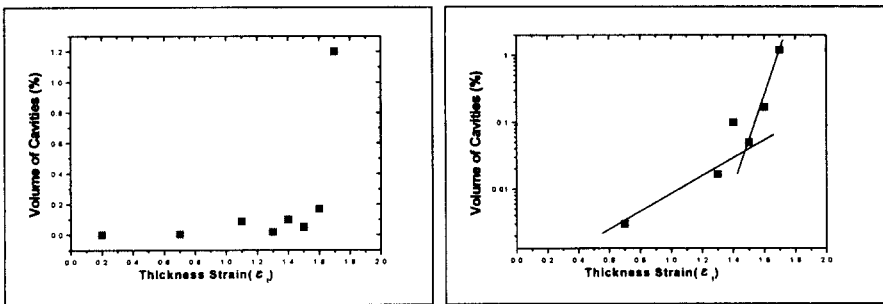


Fig.8 The comparison of volume fraction of cavity with respect to thickness strain in hemisphere formed part using supral 100

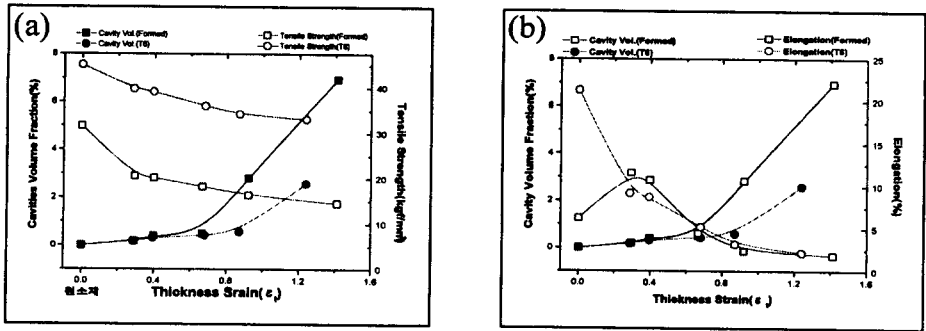


Fig.9 Tensile strength(a) and Elongating(b) with respect to the thickness strain and cavity analyzed from the square cup parts

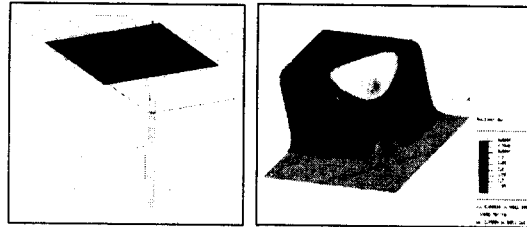


Fig.10 The mesh system and the result of superplastic forming for square cup

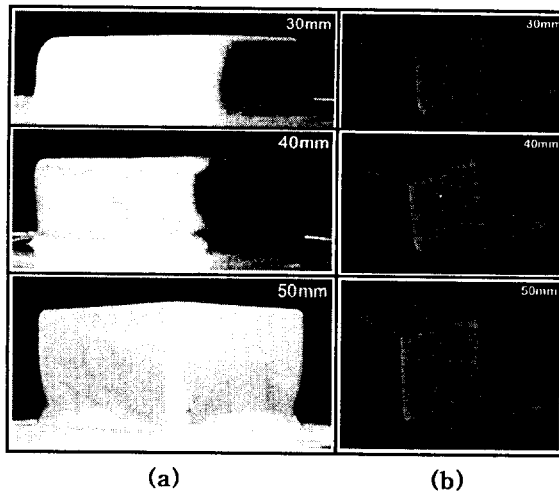


Fig.11 The comparison of morphology according to the deformed depth of square cup  
 (a) Experimental results      (b) F.E.M. analysis