

초소성 블로우 성형품의 두께분포 균일화 연구

이정환* · 김현철** · 이영선* · 이상용* · 신평우**

(1998년 7월 15일 접수)

A Study on the Uniform Thickness Distribution in Superplastic Blow Forming Process

Jung-Hwan Lee, Hyun-Chul Kim, Young-Seon Lee, Sang-Yong Lee and Pyung-Woo Shin

Abstract

The superplastic blow forming technology has advantages of cost reduction and low material consumption, compared to the conventional sheet metal forming technology due to the capability of precisely forming with high elongation and low flow stress. However, it has a disadvantage that its partial thickness distribution is non-uniform. A processing technology like diaphragm forming has been developed, even though it is difficult to prepare materials for superplastic blow forming. In this study, a hemisphere forming part with uniform thickness was obtained by using the unique technique that controls thickness by rotary forming of sheet before superplastic forming. It was found that the rotary forming material was less in quantity of cavitation at pole than that of hemisphere part that was superplastic formed without rotary forming treatment. Also discussed are the critical strain which is closely related to cavity shape and size.

Key Words : Superplastic Blow Forming(초소성 블로우 성형), Rotary Forming(회전성형),
Uniform Thickness Distribution(두께 분포 균일화), Cavity(공동)

1. 서론

미세결정립 초소성 성형 기술은 낮은 응력 하에서 초미세결정립구조를 갖는 재료가 특정온도($>0.5T_m$)에서 수백%이상 연신되는 성질을 이용한 것으로서 이에 대한 연구는 실험의 간편성 때문에 초소성 발현 조건하에서 인장 시험을 이용한 것이 주류를 이루었다.⁽¹⁻⁴⁾ 초소성 인장 시험을 통하여 얻어진 결과들은 1축 응력상태에서 얻어진 결과로서 3축 응력이 작용하는 실제 성형 공정에 그 결과

들을 적용하기가 곤란하므로 본 연구에서는 실제 블로우 성형(Blow Forming) 공정을 통한 변형 특성을 연구하였다. 초소성 성형 기술과 확산 접합기술을 조합하면 고효율 일체화 성형이 가능하여 부품 수를 삭감할 수 있고 응력전달불연속 등이 해소되어 조립이 간편해지는 등 구조용 부품제조에 특성상로나 경제적으로 매우 우수하여 항공기 부품과 제진 및 흡음용 부품 성형에 적용이 가능하다. 초소성 성형 기술은 금속 판재 성형 기술에 비해 최종 형상에 가깝게 성형이 가능하므로 기계 가공비용이 절감되고,

* 한국기계연구원 소성가공연구팀

** 창원대학교 공과대학 금속재료공학과

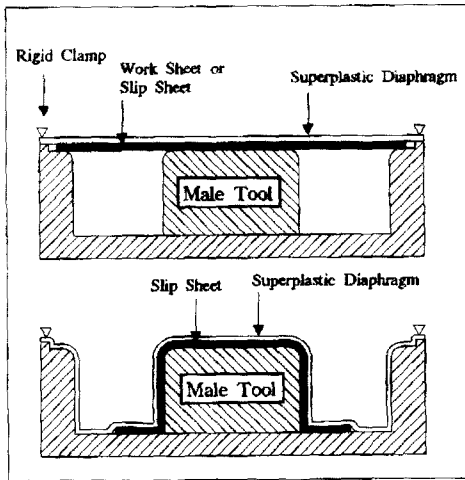


Fig. 1 The diaphragm forming technique

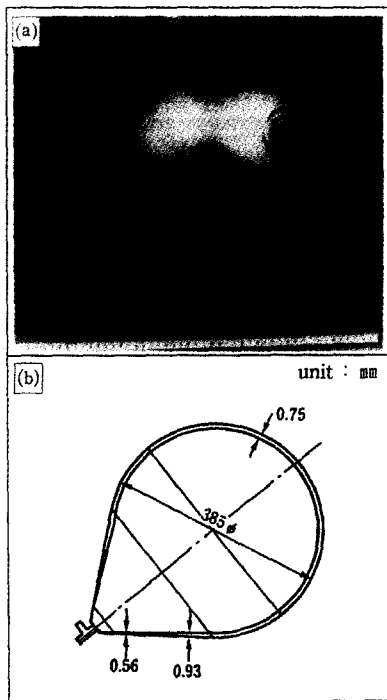


Fig. 2 A fuel tank for satellite

재료의 소모가 적어 재료의 절감뿐 아니라 경량화가 매우 중요한 항공 우주 부품에 적합하며, 기존의 다단계 공정 대신 단 한 번의 초소성 성형으로 복잡한 형상의 부품 제작이 가능하다는 장점이 있다. 실제 성형 공정으로는 소재

의 상태에 따라 판재 성형과 체적 성형으로 구분할 수 있는데, 본 연구에서는 대표적인 초소성 판재성형 기술인 블로우 성형을 이용하여 초소성 성형하였다. 블로우 성형 공정은 가열된 금형 내에서 가스가 누설되지 않도록 경계면에서 판재를 클램핑(Clamping)한후 가스를 이용하여 성형하는 것으로, 펀치가 이동하는 신장성형(Stretch Forming)과 성형 결함의 방지에 효과적인 횡경막 성형(Diaphragm Forming)등이 있다.⁽⁵⁾ 그러나 실제 성형품의 경우 부위별 변형률의 차이로 인하여 두께 분포가 다르고 변형량이 커질수록 공동 부피 분율(Cavity Volume Fraction)이 증가하는데 초소성 성형품의 구조재 적용을 위해서는 이에 대한 정확한 원인 규명이 필요하다. 현재 부위별 두께 분포를 균일하게 하는 기술로는 Fig. 1과 같은 횡경막 성형 기술이 특허 출원 되어 있으나 소재를 준비하는 과정이 복잡한 공정이라는 단점을 가지고 있다. 횡경막 성형 기술은 Fig. 1에서 나타난 것과 같이 양각 금형(Male Tool) 위에 성형판재를 놓고 그 위에 초소성 횡경막 판재를 겹쳐서 클램핑한후 가스를 가압하여 성형하는 기술로서 두께 균일화를 어느 정도 실현하였지만 반구형 형상의 제품을 얻기에는 곤란한 성형 기술이다. 본 연구에서 이용한 방법은 Fig. 2와 같이 인공위성용 연료탱크 등의 반구형 제품의 두께 분포 균일화를 위한 기술로서 성형 전 판재를 회전성형에 의해서 초기 두께를 제어함으로써 성형 후 균일한 두께를 갖는 반구형 형상의 제품을 얻는 공정을 개발하였다. 성형 전 소재를 회전성형에 의해서 두께 제어를 한 소재와 원소재를 동일한 조건으로 블로우 성형공정으로 초소성 성형하여 회전 성형후 소재의 성형성과 성형품의 두께 분포를 비교 분석하였으며, 이에 따른 기계적 성질의 변화를 관찰하기 위해 공동 부피 분율을 측정하여 상호 비교하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용한 Al-6%Cu-0.4%Zr합금은 Supral 100 이라는 상품명으로 Alcan사에서 생산되는 두께 2 mm 소재를 사용하였다. 이 합금의 화학 조성을 Table 1에,

Table 1 Chemical compositions of Supral 100

| | | (wt.%) | | | | | | | | |
|----------|------------|--------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| Element | | Cu | Zr | Mg | Si | Fe | Mn | Zn | Ti | Al |
| Material | Supral 100 | 6.02 | 0.34 | 0.05 | 0.17 | 0.16 | 0.09 | 0.03 | 0.007 | Bal. |

Table 2 Mechanical properties of Supral 100

| Property | Supral 100 | |
|---------------|-------------|--------------------------|
| | As-received | After Heat Treatment(T6) |
| UTS(MPa) | 316 | 450.9 |
| Elongation(%) | 6.25 | 21.6 |

기계적 특성을 Table 2에 나타내었다. 회전성형은 지름 200 mm 원판 형태의 원소재를 준비한 후 원추 형상을 가진 상부 금형이 축 중심에 대하여 일정 각도로 경사지게 하고 축 중심으로 상부 금형을 회전운동 시키면서 상부 금형이 축 중심에 대하여 요동운동(搖動運動)을 하게 하여 소재를 상부 금형으로 압축시켜 상부 금형과 소재가 순차적으로 접촉하면서 점진적으로 성형이 이루어지게 하여 제조하였다. 이렇게 회전성형에 의해서 성형된 소재(이후 회전성형 소재라고 함)와 원소재를 가열로에서 성형 온도인 450℃까지 가열후 소재에 보론 나이트라이드(Boron Nitride)를 함유한 윤활제를 뿌린 후 상부 금형과 하부 금형 사이에 위치시켜 클램핑하여 30분간 유지후 컴퓨터로 제어되는 초소성 성형장치에서 반구형 형상의 제품을 성형하였다. 일반적으로 Supral 소재의 최적 변형률속도(Strain Rate)는 $10^3 \sim 10^4/s$ 로 알려져 있는데, 본 연구에서 사용한 두께 2 mm 소재를 $10^3 \sim 10^4/s$ 의 변형률속도로 성형하기 위해서 압력 변화에 따른 변형률을 측정하

여 압력을 선정하였다. 예비실험에서 0.2MPa의 압력으로 성형할 경우 $10^3 \sim 10^4/s$ 의 변형률속도를 얻을 수 있었으며, 이때의 성형속도는 0.02 mm/sec로 확인되었다. 본 연구에서 사용한 초소성 성형 장치의 개략도는 Fig. 3과 같으며 가압 가스가 밖으로 누설되지 않도록 소재의 클램핑을 위한 유압 장치, 소재를 초소성 성형 온도까지 가열하는 장치, 성형량을 측정하는 LVDT, 제어기 및 컴퓨터 제어 시스템으로 크게 5부분으로 구성되어 있다. 온도와 성형 압력은 컴퓨터 제어 시스템에 의해서 조절되고 성형량은 LVDT에 의해 측정되어 컴퓨터로 저장되며 이 모든 것들이 실시간으로 모니터에 나타내게 되어있다. 원소재 분석은 10 mm×10 mm의 크기로 시편을 채취하여 광학현미경 및 주사전자현미경으로 미세조직을 관찰하였으며, 회전성형에 의한 원소재의 성형성과 기지(Matrix) 변화를 분석하기 위해 XRD를 이용하여 $2\theta = 20^\circ \sim 90^\circ$ 범위에서 회절강도(Peak Intensity)를 측정하였다. 원소재와 회전성형 소재의 초소성 성형품에서 동적결정 발생 여부를 결정립 방향의 회절강도로 확인하였으며, 원소재와 회전성형 판재의 기지 변화도 관찰하였다. 초소성 성형 후의 부위별 연신율은 격자 마크를 이용하여 측정하였으며 두께 분포는 성형품을 절단 후 포인트 마이크로미터를 이용하여 측정하였다. 공동 부피 분율은 두께 방향으로 연마후 주사전자현미경으로 400배의 배율에서 사진 촬영 후 상 분석기(Image Analyzer)를 이용하여 $6.4 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ 의 면적에서 측정하였다.

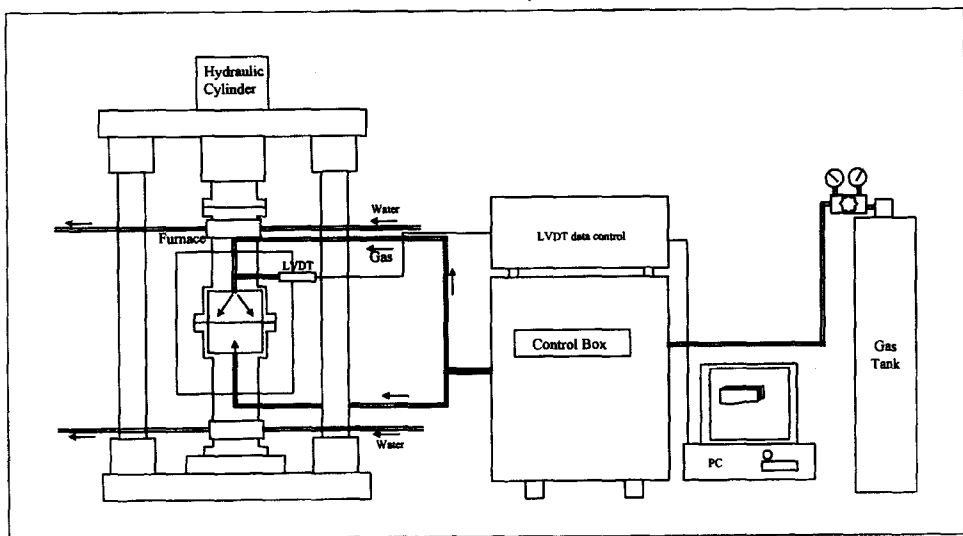


Fig. 3 Diagram of the superplastic forming machine

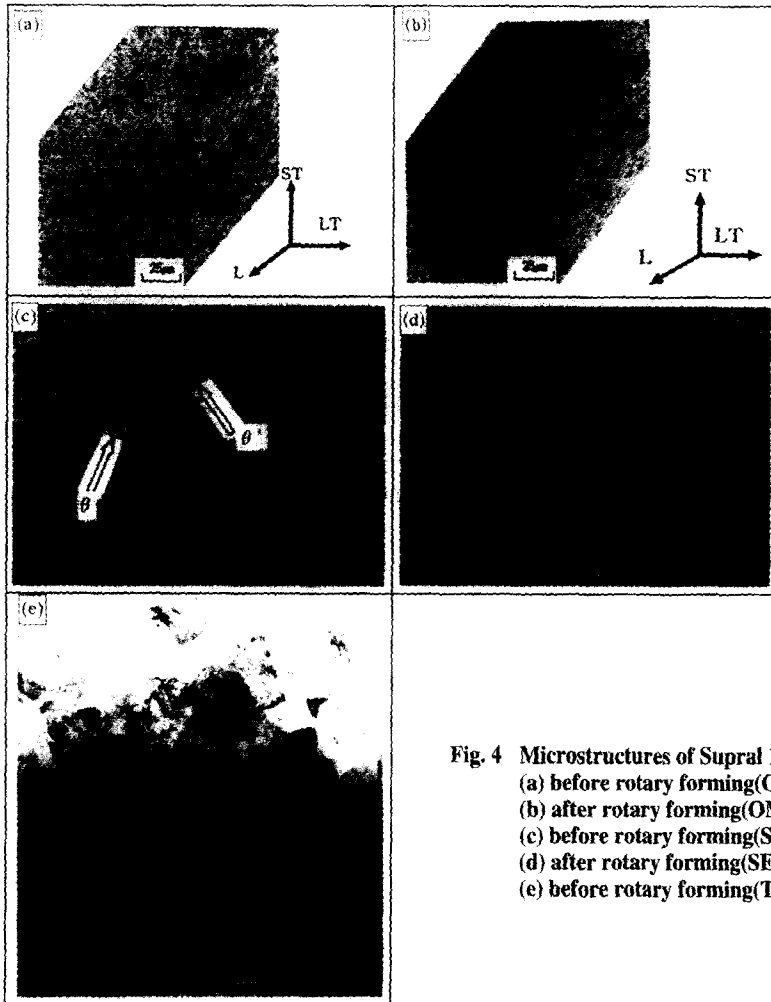


Fig. 4 Microstructures of Supral 100 :
 (a) before rotary forming(OM)
 (b) after rotary forming(OM)
 (c) before rotary forming(SEM)
 (d) after rotary forming(SEM)
 (e) before rotary forming(TEM)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 원소재 및 회전성형 판재 분석

원소재의 압연율(90%)이 높기 때문에 광학현미경으로 결정립 크기를 Fig. 4(a), (c)에서는 관찰 할 수 없었지만 압연 방향으로 섬유구조를 가지고 있는 것이 확인되었으며, 기지 전체에 석출물들이 균일하게 분포하고 있는 미세조직을 가지고 있는 것이 확인되었다. 석출물의 직경은 그림 4(c), (d)에서 0.5 μm이하인 것과 1 μm 이상인 석출물이 존재하고 있으며, 결정립 크기는 Fig. 4(e)에서 2.5 μm로 매우 미세하였다. 원소재와 회전성형 후의 기지 변화를 관찰하기 위하여 XRD 분석을 한 결과 그림 5에서 알루미늄 회절 강도는 회전성형후 (111), (200) 방향의 회절 강도

가 증가하고 (220), (311) 방향의 회절 강도가 약간 감소하는 미소한 변화가 나타났다. 이는 회전성형 공정동안 소재를 전면 압축하지 않고 일부분을 반복하여 요구 형상을 만들기 때문에 같은 재료를 성형시키는데 소요되는 가공하중이 일반 단조 공정보다 매우 작기 때문에 알루미늄 기지의 결정립 방향이 미소한 변화에 의한 것으로 생각된다. 본 연구에서 사용한 소재를 관찰한 결과 CuAl₂ 와 ZrAl₃ 두 종류의 석출물이 존재하였다. Fig. 4(c), (d)에서 CuAl₂ 는 안정상인 θ상과 준안정상인 θ'상이 공존하고 있다. 안정상인 θ상과 준안정상인 θ'상은 일반적으로 석출물의 크기로 구분 할 수 있는데 1 μm를 기준으로 이것보다 큰 것은 안정한 θ상이고 작은 것은 준안정한 θ'상으로 추정된다.⁽⁶⁾ 본 연구에서 사용한 소재에서 첨가 원소의 영향을

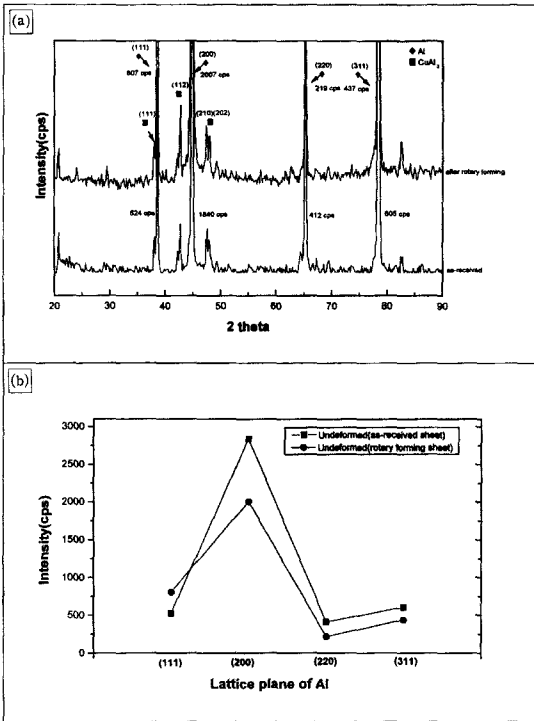


Fig. 5 The XRD analysis result of Supral 100 before and after rotary forming

살펴보면 Cu는 최종 제품의 강도에 기여하며, 성형 초기 적층 결함 에너지(Stacking Fault Energy)를 낮추어 동적 재결정이 쉽게 발생하도록 하고, 성형 초기 결정립 크기를 제어하며, 주조시 미세한 주조 조직을 유도하고, 조대한 θ 입자는 전위를 축적시키며, Zr은 주조시 결정립 미세화를 시키고 ZrAl₃ 미세 분산에 의해 정적재결정을 억제시킨다.⁽⁶⁻⁸⁾

3.2 원소재 성형품과 회전 성형품의 특성 비교

3.2.1 부위별 두께 분포 변화

균일한 두께의 판재를 0.02 mm/sec의 변형속도로 성형 시간을 변화시켜 초소성 성형한 성형품의 단면을 Fig. 6(a)에 나타내었다. 성형품 단면을 관찰해 본 결과 클램핑 부위에서 극점(Pole)으로 갈수록 두께가 얇아지는 것을 볼 수 있으며 성형 시간이 증가할수록 극점의 두께가 더욱 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상을 정량적으로 확인하기 위하여 성형품에서 부위별 두께 분포를 측정하여 Fig. 6(b)에 나타내었다. 0.02 mm/sec 속도로 20분 성형한 성형품에서 극점의 두께(DH=30 mm, DH

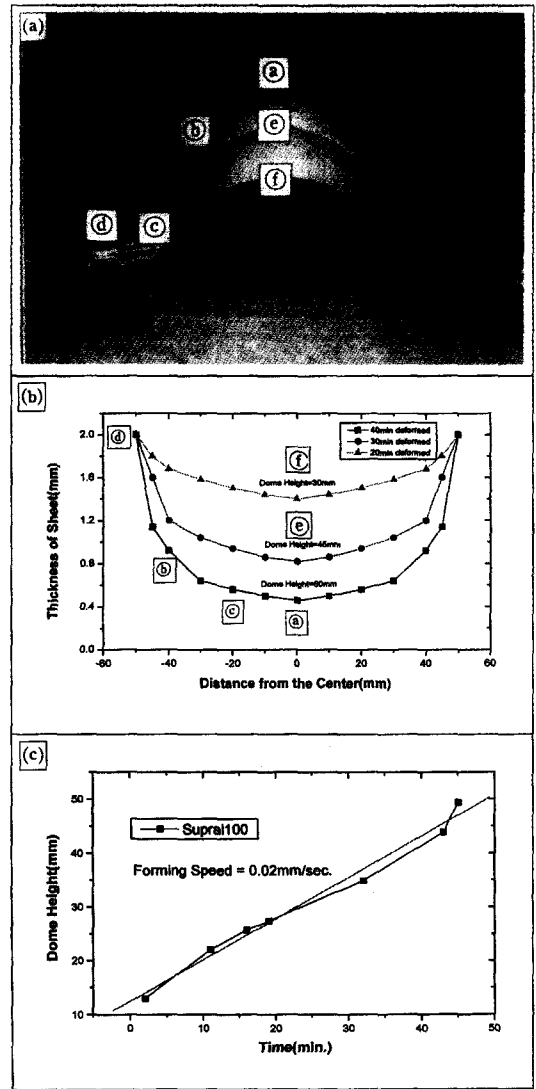


Fig. 6 Appearance and thickness change of superplastic forming part using the as-received sheet

: Dome Height) 변형률은 약 $\epsilon_f=0.4$ 이고, 40분 성형한 성형품에서는 약 $\epsilon_f=1.6$ 으로 나타났다. 20분 성형품에서는 원소재와 극점의 두께비(극점 두께/원소재 두께)가 약 0.7이지만, 40분 성형품에서는 약 0.2로 두께가 매우 불균일한 것으로 확인되었다. 동일한 성형품에서는 극점으로 갈수록 두께가 감소하는 것을 Fig. 6(b)에서 확인할 수 있었다. 반구형 형상의 성형품은 클램핑 부위에서 극점으로 갈수록 두께가 감소하므로 성형품에 내부 압력이 가해질 경우 두께가 가장 얇은 극점에서 파괴가 일어날 것으로

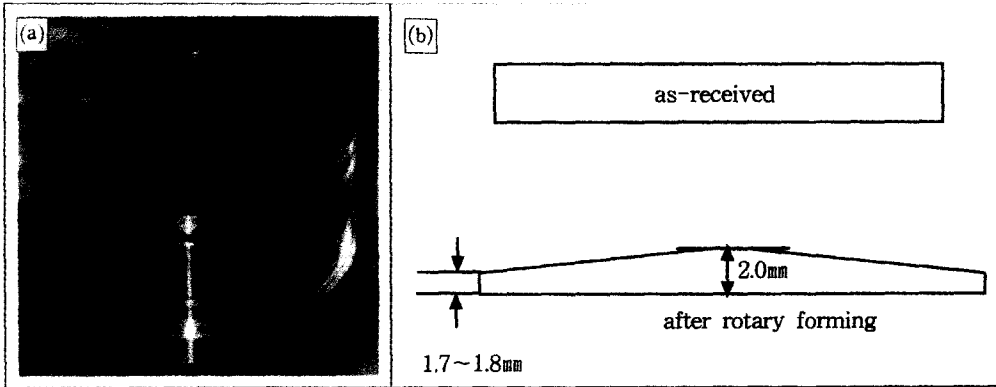


Fig. 7 A rotary forming die and the thickness change of supral 100 after rotary forming

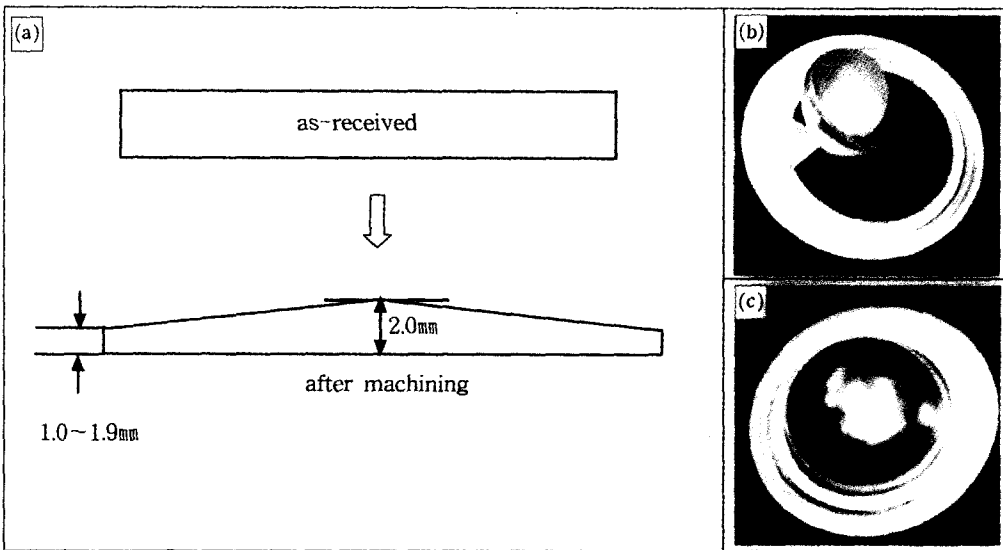


Fig. 8 Thickness distribution of the machined sheet and appearance of superplastically formed parts

예상된다. 또한 극점으로 갈수록 변형률이 증가하기 때문에 공동(Cavity)의 발생량도 증가하여 더욱 더 취약하게 된다. 따라서 본 연구에서는 소재를 회전성형에 의해 원소재 두께를 원하는 형상으로 예비 성형을 거친 후 블로우 성형을 하여 성형품의 두께를 균일하게 얻을 수 있었다. 회전성형 금형 외관을 Fig. 7(a)에, 회전성형 전의 소재와 회전성형 후의 소재를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 종래의 성형공정은 소재를 전면 압축하기 때문에 높은 하중이 필요하고 탄성 회복량이 매우 크기 때문에 판재의 두께를 조절하는 것은 매우 곤란하다. 그러나, 회전성형 공정은 소재 전체를 동시에 가공하지 않고 부분적 가공을 반복하

여 제품을 만들기 때문에 비교적 작은 하중으로 같은 제품을 성형할 수 있는 장점이 있다. 중심점과 클램핑 부위의 최적 두께는 Fig. 8(a)의 조건으로 기계 가공으로 변화시킨 소재를 이용한 예비 실험을 통하여 최적 값을 선정하였다. 기계가공은 원소재 초소성 성형품에서의 두께 분포를 기초 자료로 하여 변형률이 가장 큰 중심점을 가장 두껍게 하고 클램핑 부위로 갈수록 얇게 가공하였다. 중심부와 클램핑부의 두께차이가 많을 경우에는 Fig. 8(b)처럼 클램핑 부위가 파손 되었고, 두께차이가 적을 경우에는 Fig. 8(c)처럼 클램핑 부위에서 파손이 없었다. 기계가공 소재의 예비 실험으로 얻은 최적 값을 회전성형을 이용하여 소재의

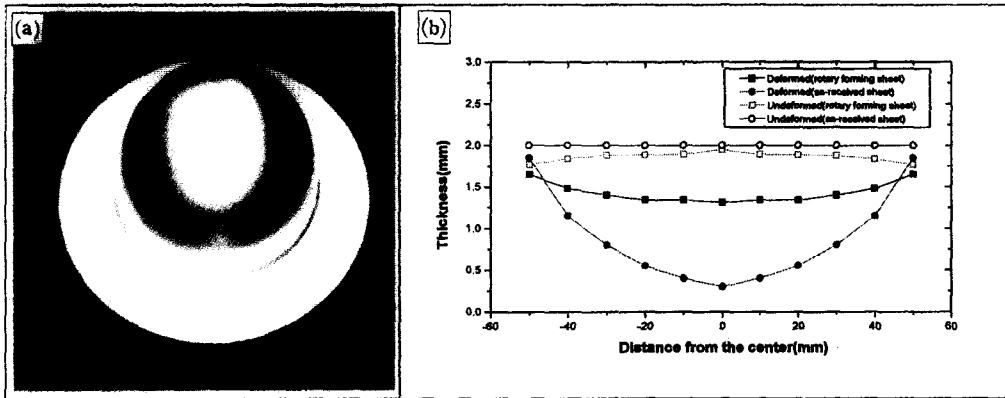


Fig. 9 Thickness distribution in the superplastically formed parts using the differently prepared sheets

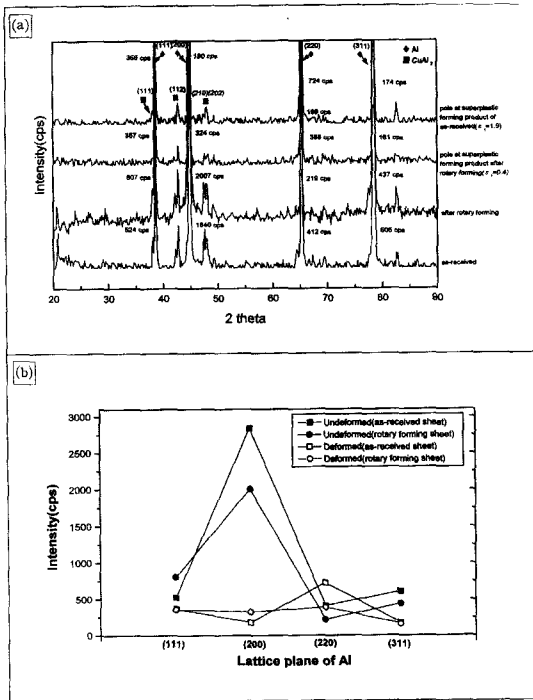


Fig. 10 The comparison of XRD patterns and peak intensities of lattice plane of aluminum of superplastic forming product and undeformed sheet

두께 분포를 극점 부위와 클램핑 부위의 두께 비가 약 0.1 ~ 0.2 정도를 유지하도록 하였다. 회전 성형품을 원소재 성형품과 비교하기 위하여 변형률속도 0.02 mm/sec의 속도로 초소성 성형하였으며, 성형품의 외관을 Fig. 9(a)에 나타내었다. Fig. 9(b)에는 회전 성형한 소재의 초

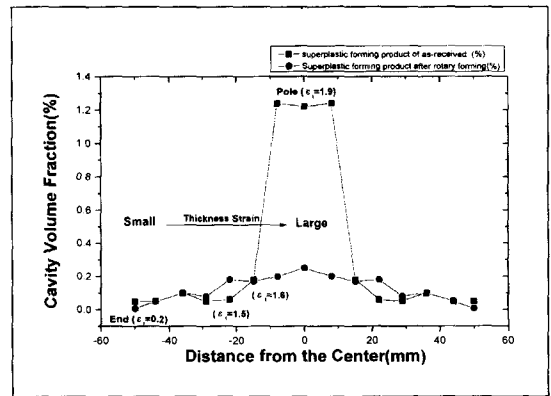


Fig. 11 Cavity volume fractions according to distance from the center

소성 성형품 두께 분포를 측정하여 원소재 초소성 성형품과 비교하였으며 회전성형 소재와 원소재와의 두께 분포도 비교하였다. 회전성형을 거친 소재의 성형품이 회전성형을 수행하지 않은 원소재의 성형품과 비교해서 전체적으로 두께의 균일화가 이루어진 것을 볼 수 있다. 극점의 두께는 1.31 mm이고, 클램핑 부위 두께는 1.65 mm로 극점의 두께가 클램핑 부위와 비슷함을 알 수 있었다. 이것은 원소재 성형품의 경우 클램핑 부위가 1.85 mm이고 극점이 0.4 mm인 것과 비교하면 회전성형 소재의 초소성 성형품이 두께 균일화가 매우 향상된 것을 알 수 있다. 극점과 클램핑 부위의 두께 차이가 약 0.3 mm 정도의 차이를 보이고 있는데 이 두께 차이를 줄이기 위해서는 회전성형시 소재의 극점과 클램핑 부위의 두께 차이를 조절하는 것과, 성형시 성형 속도를 조절함으로써 얻을 수 있다.

Fig. 10에는 두 성형품의 성형전과 후의 극점을 XRD 분석한 결과 알루미늄 기지의 주 방향이 (200)에서 (220)으로 바뀐 것을 알 수 있는데, 이는 초소성 성형과정 동안 동적 재결정이 발생하여 기지의 주 방향이 바뀐 것으로 예측된다. 성형 전의 알루미늄 기지 회절 강도가 (200)>(111)>(311)>(220)의 순으로 되어 있던 것이 성형 후 (220)>(111)>(200)>(311)으로 모두 바뀐 것으로 보아 기지 전체가 재결정이 이루어진 것임을 알 수 있었다.

3.2.2 변형량에 따른 공동의 변화

원소재의 성형품과 회전성형에 의한 초소성 성형품의 극점에서부터 클램핑까지 부위별 공동 부피 분율을 각각 조사하여 Fig. 11에 나타내었다. 원소재의 성형품에서 $\epsilon_t=1.6$ 의 변형률까지는 공동 부피 분율의 변화가 거의 없지만 $\epsilon_t=1.6$ 이상에서는 그 양이 급격히 증가하고 있는 것이 확인되었다. 이는 공동의 양상과 관계가 있는 것으로 생각되는데 $\epsilon_t=1.0$ 이하의 변형률에서는 결정립계에 존재하는 조대한 θ 상과 결정립과의 경도 차이에 의해서 분리 가 되는 공동이 나타나고 있는 것을 Fig. 12(a), (b), (c)에서 볼 수 있으며, 그 이상의 변형률에서는 결정립의 삼중점에서 공동이 발생, 성장, 합체되어 $\epsilon_t=1.6$ 이상의 변형

률에서는 삼중점에서 공동이 급격하게 증가되고 $\epsilon_t=1.9$ 의 변형에서는 공동의 크기가 커지는 것이 Fig. 12(d)에서 확인할 수 있다. 따라서 $\epsilon_t=1.6$ 에서의 공동 부피 분율의 급격한 증가는 결정립의 삼중점에서 발생한 공동에 기인하는 것으로 예상되어 $\epsilon_t=1.5$ 를 임계변형률로 정의하였다. 회전성형 소재의 성형품에서 공동 부피 분율을 조사한 결과 극점은 클램핑 부위에 비해서 미소한 증가만이 관찰되었는데, 이는 두께 균일화를 통한 극점의 두께 변형률이 $\epsilon_t=0.4$ 로 매우 작기 때문이다. 회전성형 소재의 성형품에서의 공동을 관찰한 결과 Fig. 13(a), (b), (c)에서 보는 바와 같이 거의 관찰되지 않았지만 Fig. 13(d)의 극점에서는 인장방향으로 연신된 공동들이 관찰되었다. 원소재 성형품의 공동 부피 분율을 조사한 결과 공동의 급격한 증가에 대한 임계 변형률이 존재함을 알 수 있었다. 변형률이 증가할수록 공동의 수가 증가하지만 $\epsilon_t=1.0$ 이상의 변형률에서는 공동의 성장에 의한 성장 및 합체가 이루어져 조대한 공동이 발생하고 결정립의 삼중점에서 발생한 공동도 변형률이 증가할수록 조대화 되었다. 본 연구에서 사용한 Supral 100 소재의 반구형 성형품에서는 두께 변형률이 1.6이상에서 공동의 급격한 증가가 발생되었으며, 이러한 변형률은 결정립의 삼중점에서 발생하는 것임을 알 수 있

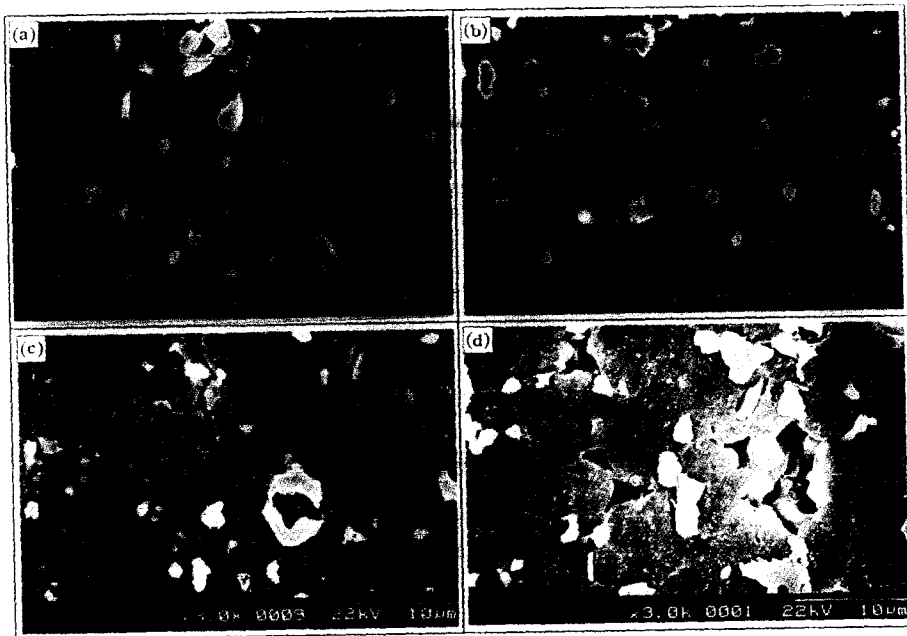


Fig. 12 Effect of thickness strain on the formation of cavities in superplastic forming of as-received sheet : (a) $\epsilon_t=0.2$ (b) $\epsilon_t=0.5$ (c) $\epsilon_t=1.0$ (d) $\epsilon_t=1.9$

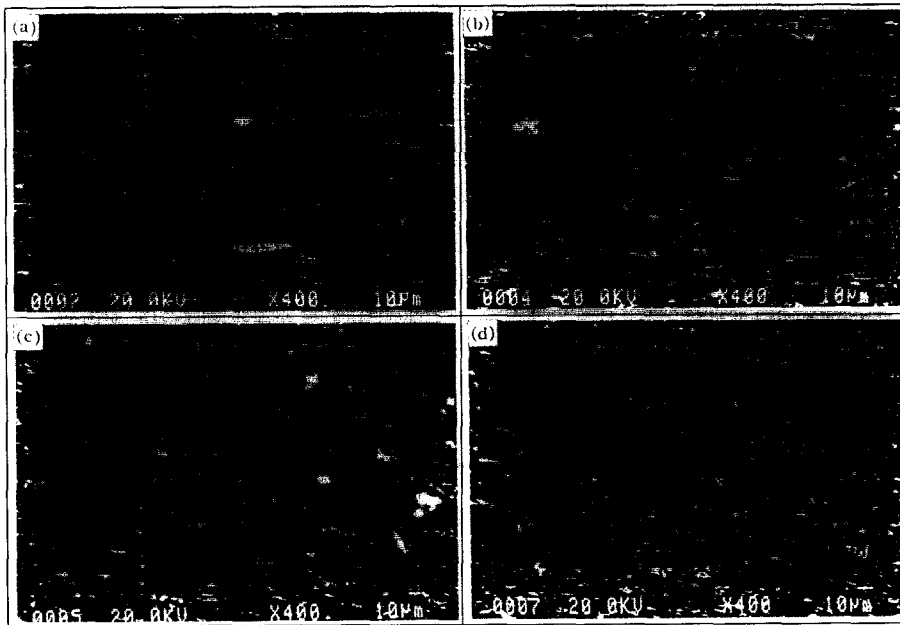


Fig. 13 Effect of thickness strain on the formation of cavities in superplastic forming of rotary formed sheet : (a) $\epsilon_t = 0.1$ (b) $\epsilon_t = 0.2$ (c) $\epsilon_t = 0.3$ (d) $\epsilon_t = 0.4$

었다.

원소재 성형품에서 변형률 증가에 따른 공동의 형상을 관찰한 결과 초소성 성형 초기에는 구형의 형상으로 존재하고, 변형률이 증가할수록 인장방향으로 연신되면서 성장한다. 성장한 공동은 이웃한 공동과 합체하여 Fig. 12 (d)와 같이 조대한 공동을 형성한다. 공동의 크기는 변형률이 $\epsilon_t = 1.6$ 이하에서는 길이가 $5 \mu\text{m}$ 이상인 것이 거의 관찰되지 않았지만, 그 이상의 변형률에서는 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

4. 결론

이상의 연구 결과로 회전성형에 의한 초기 소재의 두께 제어에 의해 성형 후 각 부위별 균일한 두께를 갖는 반구형 형상의 초소성 성형품을 얻을 수 있었으며, 두께가 임의로 변화되는 제품 성형에도 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

(1) 회전성형으로 초기 두께를 제어한 소재를 이용하는 독창적인 기술을 이용함으로써 블로우 성형 공정에 의해 균일한 두께의 성형품을 얻을 수 있다.

(2) 원소재와 회전 단조 소재의 XRD 분석 결과 알루미늄

높 기지의 결정립 방향에 약간의 변화가 있었지만 초소성 성질의 발현에는 영향을 미치지 않았다.

(3) 동일한 성형 속도(0.02 mm/sec) 및 성형량(60 mm)으로 회전성형에 의한 두께 제어가 되지 않은 원소재와 두께 제어된 소재를 초소성 성형한 결과 회전성형에 의한 두께 제어 소재의 초소성 성형품이 두께 균일화의 이점 뿐만 아니라 공동의 양도 감소시킬 수 있었다.

(4) Supral 100 소재의 반구형 성형품에서 공동이 급격히 증가하는 임계 변형률($\epsilon_t = 1.6$ 이상)이 존재하며 임계 변형률에서의 공동은 결정립의 삼중점에서 발생하는 것임을 알 수 있었다.

(5) 공동의 형상은 변형초기 구형에서 변형률이 증가할수록 인장방향으로 연신, 성장, 합체되어 조대한 공동을 형성하고, 그 크기는 변형률이 $\epsilon_t = 1.6$ 이하에서는 길이가 $5 \mu\text{m}$ 이상인 것이 거의 관찰되지 않았지만, 그 이상의 변형률에서는 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있었다

참고문헌

- (1) A. J. Shakesheff, 1985, "The effect of superplastic deformation on the post-formed properties of

- the chemically produced supral alloys”, Superplasticity in Aerospace-Aluminium, pp.36~54.
- (2) B.M.Watts, M.J.Stowell, B.L.Baikie, and D. G. E. Owen, 1976, “Superplasticity in Al-Cu-Zr alloys, Part I: Material preparation and properties”, Metal Science 10(1976), pp.189~197.
- (3) R.Grimes, R.G.Butler, 1988, “The forming behavior of commercially available superplastic aluminium alloys”, Superplasticity in Aerospace, pp.97~113.
- (4) H.C.Kim, T.H.Ahn, C.H.So, Y.Ha, X.Zhao, T.G.Langdon, 1992, “A first report on the use of a non-destructive technique to investigate cavitation in a superplastic Al alloy”, Scripta Metallurgica et Materialia 26, pp.423~428.
- (5) 이정환, 이영선, 이상용, 1996, “초소성 성형 기술의 현황과 전망”, 기계와 재료(한국기계연구원), vol. 8, No. 3, pp.117~131.
- (6) N. Ridley, E. Cullen and F. J. Humphreys, 1998, “Development of superplastic microstructures during the thermomechanical processing of Al-Cu-Zr Alloys”, Superplasticity and Superplastic Forming, pp.65~74.
- (7) R. Grimes, M. J. Stowell and B. M. Watts, 1976, “Superplastic Al-base alloys”, Metals Technology, March, pp.154~160.
- (8) B. M. Watts, M. J. Stowell, B. L. Baikie and D. G. E. Owen, 1976, “Superplasticity in Al-Cu-Zr alloys, Part II : Microstructural study”, Metal Science 10(1976), pp.198~206.