

# 초소성 판재 성형을 위한 유한요소 해석 및 실험에 관한 연구

이승준\* · 이정환\* · 이영선\*

## A Study on the Superplastic Sheet Forming by the FEM and Experiment

Seung-Jun Lee, Jung-Hwan Lee, Young-Seon Lee

**Key Words** : Superplastic forming(초소성 성형), Implicit(내연적), Explicit(외연적),  
Flow stress(유동응력), Elongation(연신율)

### Abstract

Superplastic forming processes by characteristic of low flow stress and high elongation have advantages to reducing on production cost and weight because of the product of complex form could be made in one part. However, superplastically formed part has a characteristic of non-uniform thickness distribution along forming direction. Especially, since the thickness distribution affects on mechanical properties of product, the uniform thickness is very important.

There are two solution procedure of implicit and explicit procedure to analyze the superplastic forming. In this study, to analyze the thickness distribution two kinds of commercial programs of DEFORM and PAM-STAMP which implicit and explicit code are used respectly. The results from the two programs were compared with each other. As a result, implicit code were more suitable than explicit code for superplastic forming analysis.

### 1. 서론

초소성 재료에서 가장 중요한 특성은 유동응력의 변형률속도 민감지수로서, 변형률속도 민감 지수를  $m$ 이라 부르며  $\sigma = k \dot{\epsilon}^m$ 에 의해서 규정되는데, 실제 성형에서  $m$ 값에 변화를 주는 인자로서는 성형온도와 변형률 속도이다<sup>(1-2)</sup>. 또한, 낮은 유동

응력에 매우 큰 변형률 속도 민감도를 나타내며, 매우 좁은 영역의 특정한 변형률 속도 영역에 제한되어 나타난다. 재료의 초소성 특성이 매우 좁은 구간에 존재하므로 이 영역에서 성공적인 성형을 위하여 최적 변형률 속도를 공정간에 일정 하게 유지하기 위한 압력-시간 선도를 예측하는 것은 매우 중요하며, 최종 부품에 대한 두께 분포 등을 예측하는 것 또한 중요한 일이다. 특히 최종 형상의 두께 분포는 최종 제품의 기계적 물성치 요구

\* 한국기계연구원

조건에 큰 영향을 미치게 되므로 가능한 두께 분포를 균일하게 하는 공정을 설계하는 것은 매우 중요한 일이며 다축 응력이 작용하고 형상이 복잡할수록 이런 요구 사항이 증가하게 된다. 이러한 성형에 필요한 공정 변수의 예측을 보다 정확하게 하기 위해서는 성형 공정의 모델링 및 해석이 수행되어야 한다.

유한요소법의 해석 기법에는 Implicit 코드에 의한 해석 기법과 Explicit 코드에 의한 해석 기법이 있는데, 본 연구에서는 초소성 성형시 제품의 두께 분포를 해석하기 위해 Implicit 해석 기법을 이용하는 DEFORM과 Explicit 해석 기법을 이용하는 PAM-STAMP를 사용하였고, 직사각형상 및 반구형 형상의 성형 실험 결과와 비교하여 적용 타당성을 검토·분석하였다.

## 2. 유한요소 해석 및 실험

### 2.1 유한요소 해석

DEFORM에 의한 초소성 성형 해석을 하기 위해서 평면 변형률 상태로 판재와 다이를 실제 형상의 1/2인 대칭 단면 형상으로 하였고, PAM-STAMP에서의 해석에서는 3D로 실제 제품의 1/4인 축 대칭 형상으로 사각접과 반구형으로 모델링 하였다.

사각접 형상의 경우는 장축×단축이 110mm×90mm 의 직사각형 형태이며 반구형 형상은  $\phi$  100mm 의 크기로 모델링 후 해석에 이용하였다.

DEFORM에 의한 해석에서는 강소성 유한요소법을 적용하여 판재와 금형의 접촉을 정의하였으며, 소재와 금형 사이의 경계 마찰은 두 해석 모두 초소성 성형 해석에 적합한 쿨롱(Coulomb)마찰로 정의하였다<sup>(3)</sup>.

소재 정의를 위해 영계수(Young's modulus), 포아송 비(Poisson ratio), 열팽창 계수(Thermal expansion)와 유동응력(Flow stress)에서의 소성계수 값(C)과 변형률 속도 민감도(m) 값 등이 사용되었고, 가스에 의한 성형 조건의 정의를 위해 Fig. 1의 압력-시간(Pressure-time) 선도를 사용하였다<sup>(4)</sup>. 그리고, 사용된 소재는 알루미늄 합금인 Supral 100과 Al 7475가 사용되었고, 소재 정의를 위해 여기서는 유동응력( $\bar{\sigma}$ ) 식  $\bar{\sigma} = C(\bar{\epsilon})^n$  이 사용 되었다.

### 2.2 실험 방법

반구형과 사각접 성형을 위해 Fig. 2의 초소성 성형 장치로 가열로의 분위기 온도를 초소성 성형 온도까지 상승시킨 후 상부 금형과 하부 금형 사이

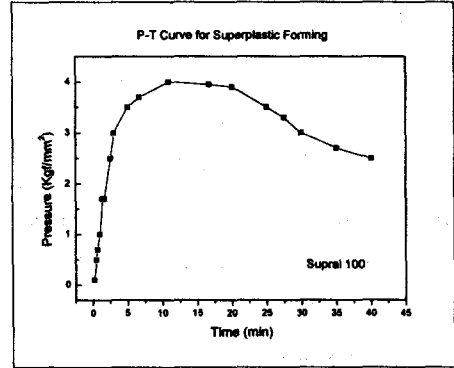


Fig. 1 Time-pressure curve of superplastic forming for square cup and hemisphere cup

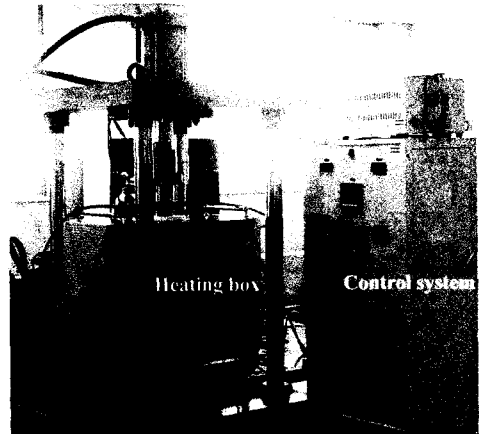


Fig. 2 The superplastic forming machine of heating box and control system

에 윤활제(Boron nitride)를 도포한 판재를 위치시키고, 유압 프레스를 작동시켜 금형 내의 가압 가스가 누설되지 않도록 상하 금형을 클램핑(Clamping)한다. 선행 연구 결과로부터 얻은 최적 성형 온도는 Supral 100의 경우 450℃, Al 7475는 515℃이며, 소재가 분위기 온도에 도달 되기까지는 약 30분이 소요된다<sup>(5)</sup>. 그리고, 앞의

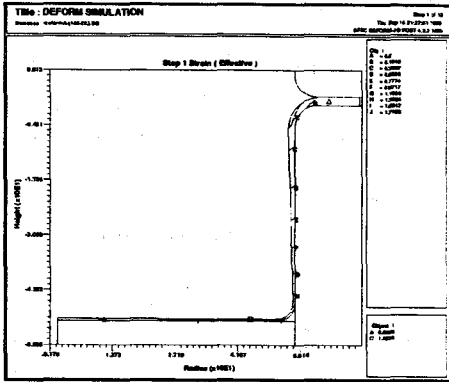


Fig. 3 The result of supral 100 square cup of 50mm by simulation

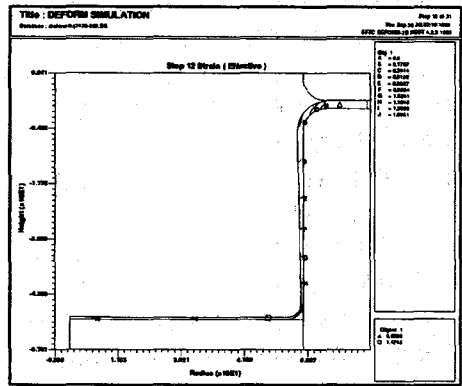
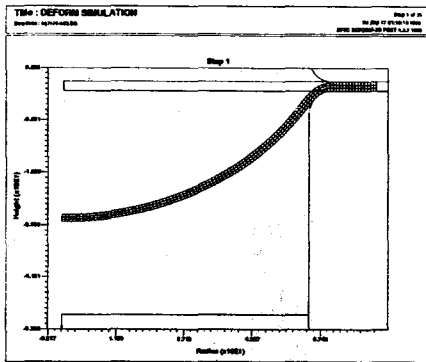
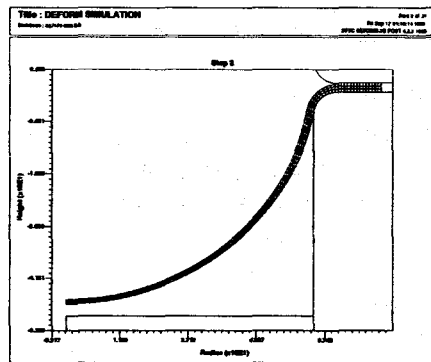


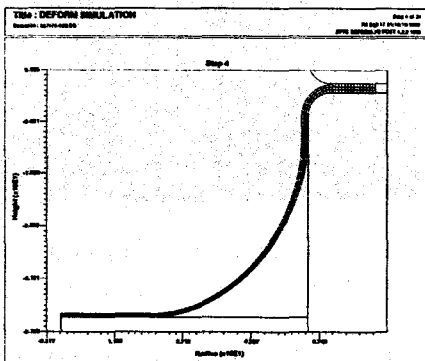
Fig. 4 The result of Al 7475 square cup of 50mm by simulation



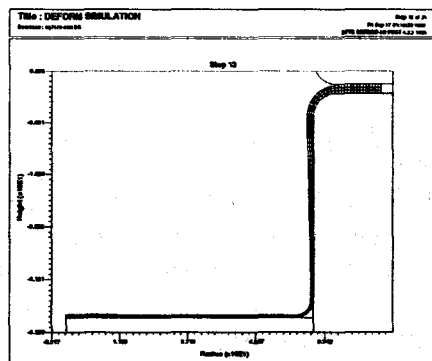
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 Forming processes according to the forming time by simulation

- (a) 100 sec      (b) 300 sec  
 (c) 400 sec      (d) 1200 sec

해석에서 사용된 압력-시간 선도를 통해 각 제품을 성형 하였다. 실험에서 사용된 소재는 Al-6% Cu-0.4%Zr 합금인 Supral 100과 Al-5.8% Zn-1.6%Cu-2.3%Mg-0.22% Cr 합금인 Al 7475 로써 두께는 모두 2mm 이다.

사용된 사각컵 모델은 초소성 성형시 변형 특성과 응력분포를 부위별로 변화시키고자 양변의 길이를 각각 110mm와 90mm로 직사각형 형상을 성형 길이 30, 40, 50mm 의 세 가지 종류로 성형하였고, 반구형은  $\phi 100$ mm 의 크기로 성형하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Implicit code에 의한 초소성 성형 해석

Supral 100과 Al 7475의 50mm 사각컵 성형 해석의 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었는데, 성형품 모두 바닥 중심에서부터 측면으로 갈수록 두께 변형률이 증가하였다. 바닥 중심에서부터 약 40mm 까지는 두께가 감소하는 경향을 나타내고 있으며 측면 부위에서는 두께가 반대로 증가하여 두 소재 모두 동일한 경향을 나타내는데, 바닥 중심으로부터 40mm 부위에서 가장 얇은 것은 Fig. 5에서의 성형 시간에 따른 성형량에서 보는 바와 같이 성형시 바닥의 중심이 가장 먼저 소재와 접촉하게 된 후 측면으로 성형이 진전되므로 변형량과 마찰 효과가 가장 크게 나타나기 때문으로 생각된다.

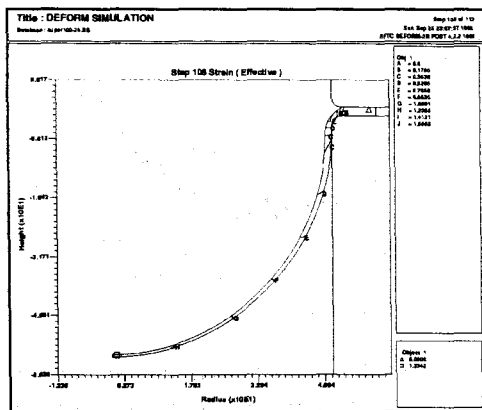


Fig. 6 The result of supral 100 hemisphere of 56 mm by Simulation

Fig. 6은 Supral 100 반구형 성형 해석 결과를 성형량에 따라 나타내었는데, 중심의 극(Pole) 부분이 두께 변형률이 가장 크며 측면으로 갈수록 두께가 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 3.2 Explicit code에 의한 초소성 성형 해석

Fig. 7은 Al 7475의 50mm 사각컵 성형 해석 결과로써 측면에서 클램핑 부위까지의 두께 분포에서 두께 변형률이 감소 후 다시 증가하는 부분이 나타났다.

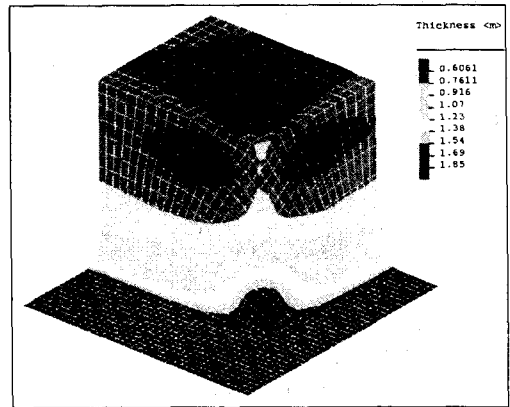


Fig. 7 The result of Al 7475 square cup of 50mm by simulation

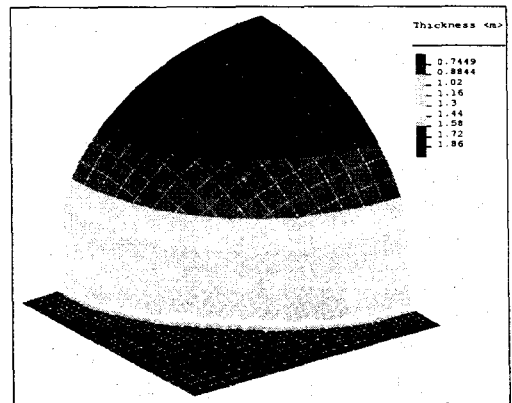


Fig. 8 The result of supral 100 hemisphere of 56 mm by simulation

반구형 성형 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었는데

데, Supral 100의 성형 해석 결과에서 성형량에 따른 부위별 두께 분포를 관찰하면, 모두 극(Pole) 부분이 가장 큰 두께 변형률을 나타내고, 클램핑 부위로 갈수록 두께 변형률이 감소하는 동일한 경향을 나타내었다.

### 3.3 Simulation과 실험 결과와의 비교

성형 실험을 통한 부위별 두께 분포 측정 결과와 해석 코드에 따른 컴퓨터 시뮬레이션에서의 해석 결과를 서로 비교하였다.

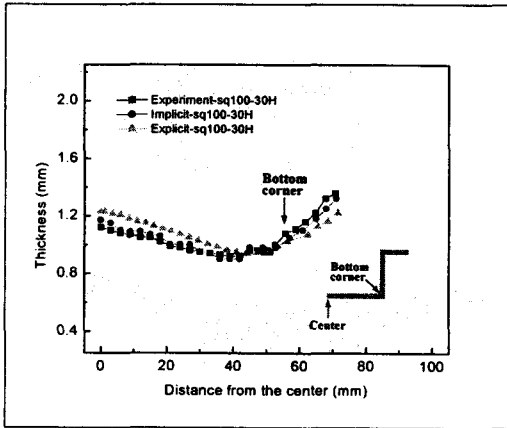


Fig. 9 The comparison of thickness distribution between experiment and simulation results by implicit code and explicit code of square cup of 30mm by supral 100

Fig. 9에서 Supral 100의 30mm 사각컵 성형의 부위별 두께 비교 값을 보면, Implicit code에 의한 두께 분포와 Explicit code에 의한 두께 분포가 실제 실험값과 동일하게 바닥 중심에서부터 약 40mm 부위에서 두께 변형률이 가장 크게 나타남으로 일반적인 경우와 동일한 경향을 보였다<sup>(6~8)</sup>. 부위별 두께 편차를 보면 Implicit code에 의한 해석 결과가 Explicit code에 의한 해석 결과보다 더 잘 일치함을 보였다. Fig. 10의 Supral 100의 40mm 사각컵 성형의 부위별 두께 비교에서 Explicit code에 의한 결과는 실험 값과 큰 차이를 나타낸 반면, Implicit code에 의한 결과는 실험 값과 거의 동일하였다. Fig. 11와 Fig. 12

는 Supral 100의 50mm 사각 컵의 부위별 두께 분포와 Al 7475 사각컵 부위별 두께 분포를 보여주는데, 이것을 통해 다른 소재를 사용하여도 Implicit code에 의한 결과가 실험 값과 더 잘 일치되는 것을 알 수 있다.

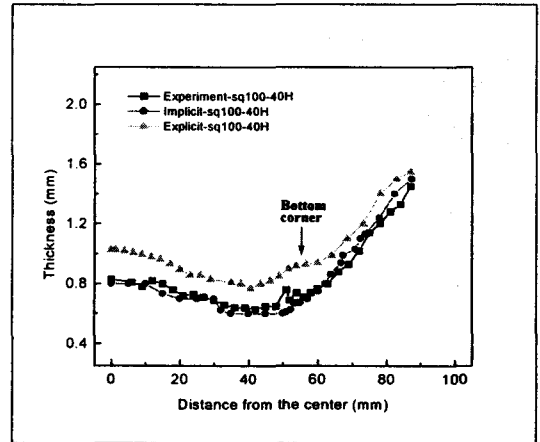


Fig. 10 The comparison of thickness distribution between experiment and simulation results by implicit code and explicit code of square cup of 40mm by supral 100

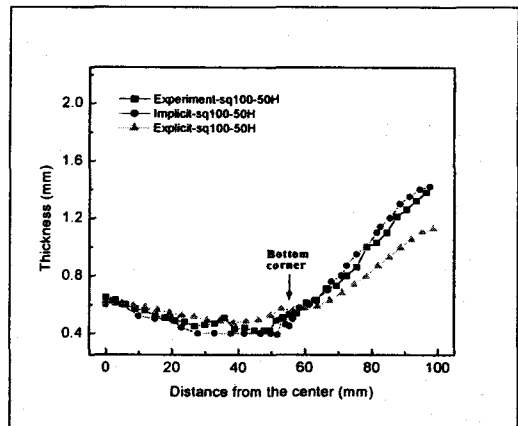


Fig. 11 The comparison of thickness distribution between experiment and simulation results by implicit code and explicit code of square cup of 50mm by supral 100

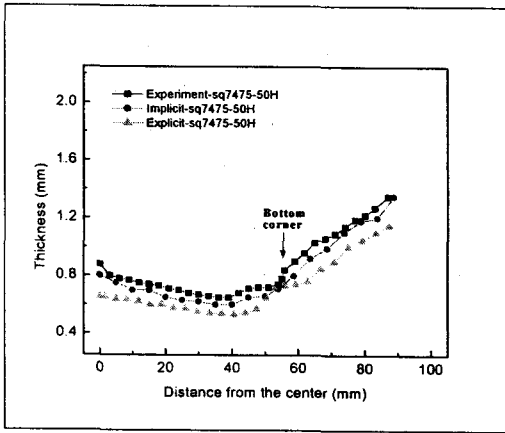


Fig. 12 The comparison of thickness distribution between experiment and simulation results by implicit code and explicit code of square cup of 50mm by supral 100 Al 7475

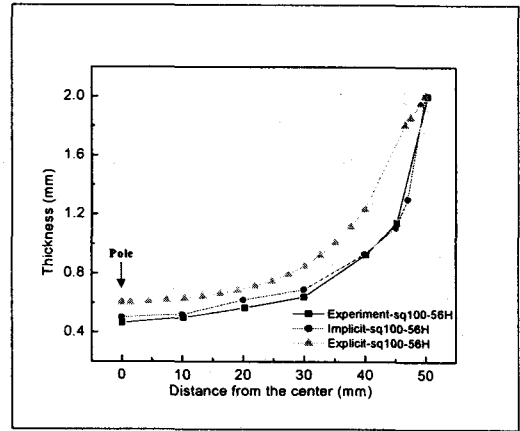


Fig. 14 The comparison of thickness distribution between experiment and simulation results by implicit and explicit code of hemisphere of 56mm by supral 100

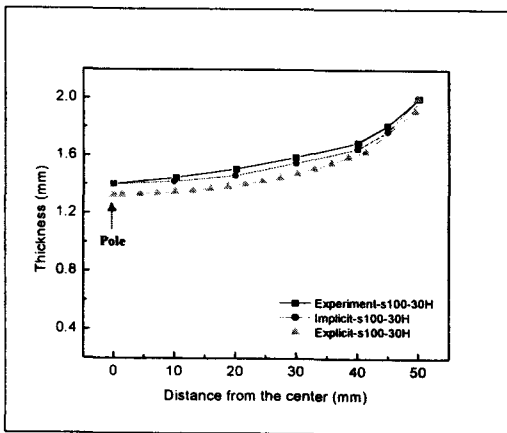


Fig. 13 The comparison of thickness distribution between experiment and simulation results by implicit and explicit code of hemisphere of 30mm by supral 100

Fig. 13과 Fig. 14에서 반구형 성형 부위별 두께 분포 결과를 나타내었는데, 실험 값과 해석 결과 모두 중심부의 극(Pole)에서 두께 변형률이 가장 컸고, 클램핑 부위로 갈수록 두께가 증가하는 동일한 경향을 나타내었으며, 성형량이 클수록 두께 변형률이 증가하여 일반적인 경우와 잘 일치하였

다<sup>(9)</sup>. 또한, Supral 100의 30, 56mm 모두 Implicit code에 의한 두께 분포 결과가 실험에 의한 두께 분포와 거의 동일한 결과를 보였지만, Explicit code에 의한 결과는 0.1~0.2mm까지 최대 10%의 두께 편차를 나타내었다.

이상과 같이 실험을 통한 부위별 두께 분포 결과와 Implicit code 및 Explicit code를 이용한 초소성 성형 해석 결과의 비교에서, Explicit code에 의한 두께 분포 결과보다는 Implicit code에 의한 두께 분포가 실험 값과 잘 일치함으로 초소성 성형 해석에 적합함을 알 수 있었고, 실제 성형으로의 적용 타당성이 입증되었다.

#### 4. 결론

Implicit code의 해석 기법을 이용한 DEFORM과 Explicit code의 해석 기법을 이용한 PAM-STAMP에서의 초소성 유한요소 해석과 실험을 통해 성형 깊이에 따른 성형품의 부위별 두께 분포를 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Implicit code를 이용한 해석 결과, 소재에 관계 없이 사각컵 성형품 모두 바닥 중심에서부터 약 40mm까지는 두께가 감소하였으나, 측면 부위에서는 반대로 두께가 증가하는 경향

을 나타내어 실험 결과와 잘 일치됨을 알 수 있었다.

- (2) Explicit code를 이용한 해석 결과는 실험에 의한 부위별 두께 분포와 같은 경향을 나타내었지만, 전체적인 부위별 두께는 실험 결과에 비해 5~10 % 정도의 두께 오차를 보였다.
- (3) Implicit code에 의한 반구형 성형 해석 결과 실제 실험에 의한 부위별 두께 분포와 거의 동일한 값을 나타냄으로, Implicit code가 초소성 성형 해석에 적합함을 알 수 있었고, 또한 해석 결과가 실험 결과와 잘 일치함으로 실제 성형으로의 적용 타당성이 입증되었다.

### 참고 문헌

- (1) C. H. Hamilton, A. K. Ghosh and J. A. Wert, "Superplasticity in engineering alloys", Metals Forum, Vol. 8, No. 4, pp. 172~190, 1985
- (2) C. H. Hamilton, A. E. Bayoumi, "On the stability of biaxial stretching with application to the optimization of superplastic blow-forming", Transactions of the ASME, Vol. 119, January, pp. 26~31, 1997
- (3) Oden, J. T. and Pires, E. B., "Nonlocal and nonlinear friction laws and variational principles for contact problems in elasticity" J. applied Mechanics, Vol. 1, 50, pp. 67~76, 1983
- (4) 이영선, 이승준, 이정환, "Al 합금 초소성 성형을 위한 유한요소해석 기술", 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 118~128, 1999
- (5) 이승준, 이영선, 이정환, 김원일, "Al-Cu-Zr 합금 초소성 성형품의 기계적 성질", 한국소성가공학회 '99추계학술대회 논문집, pp. 163~170, 1999
- (6) M. A. Khaleel, K. I. Hohson, C. H. Hamilton and M. T. Smith, "Deformation modeling of superplastic AA- 5083 ", International Journal of

Plasticity, Vol. 14, pp. 1133~1154, 1998

- (7) Shyong Lee, "Thickness distribution in a superplastically formed rectangular pan under plane-strain conditions", Journal of Materials Processing Technology 65, pp. 59~64, 1997
- (8) Y.M. Hwang, J.S. Yang, T.R. Chen, J.C. Huang, "Analysis of superplastic sheet metal forming in a circular closed die considering non-uniform thinning", Journal of Materials Processing Technology 65, pp. 215~227, 1997
- (9) 홍성석, 김민호, 김용환, "유한요소법을 이용한 초소성 성형 공정 해석", 대한기계학회 논문집, 제19권 제6호, pp. 1411~1421, 1995