

# 외연적 유한요소법을 이용한 세장비가 큰 타원형 컵 성형공정의 다단계 해석

김세호\* · 김승호\* · 허 훈\*

(2000년 2월 2일 접수)

## Multi-stage Analysis of Elliptic Cup Drawing Processes with the Large Aspect Ratio by an Explicit Elasto-plastic Finite Element Method

S. H. Kim, S. H. Kim and H. Huh

### Abstract

Finite element analysis is carried out for simulation of the multi-stage elliptic cup drawing process with the large aspect ratio. The analysis incorporates with shell elements for an elasto-plastic finite element method with the explicit time integration scheme. For the simulation, LS-DYNA3D is utilized for its wide capability of solving forming problems. The simulation result shows that the non-uniform drawing ratio at the elliptic cross section and the small shoulder radius cause failure such as tearing and wrinkling. The result suggests the guideline to modify the tool shape for prevention of the failure during the drawing process.

**Key Words** : Elliptic Cup, Multi-stage Deep Drawing Process, Elasto-plastic Finite Element Method, Die Design

### 1. 서론

세장비가 큰 타원형 및 직사각형의 컵은 산업현장에서 건전지 케이스와 반도체, 수정 진동자 등의 초정밀 부품으로 널리 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 정밀한 부품사용의 요구에 따라 계속적으로 수요가 증가하고 있는데, 설계기술 및

생산기술은 수요를 충족시키지 못하고 있다. 실제 생산설계의 경우에 이러한 제품들은 모두 순송식 프레스(Progressive Press)를 이용한 다단계 디프 드로잉 공정에 의하여 생산되어야 하며, 공정중간에 열처리나 부가적인 가공이 없는 것이 생산성과 원가절감 측면에서 바람직하다. 따라서, 원하고자 하는 형상과 재질의 제품을

\* 한국과학기술원 기계공학과

생산하기 위한 금형 및 공정의 설계는 매우 어려운 실정이다. 특히, 타원형 단면의 세장비가 큰 컵의 경우에는 다단계 성형공정 중에 금형형상의 지속적인 변화에 의한 변형양상 및 접촉의 변화에 의하여 제품의 파단 및 주름 등의 불량에 쉽게 발생할 수 있으므로, 공정설계가 더욱 어렵다. 또한, 박판부재는 초기 생산시에 압연에 의한 이방성을 가지게 되므로 변형양상을 정확하게 예측하지 않을 경우 귀의 발생과 파단 및 최종 드로잉된 제품의 최대길이 등의 예측이 정확하게 이루어 질 수 없다. 따라서, 복잡한 형상과 기하학적, 재료, 접촉 등의 여러가지 비선형성을 가지는 문제를 비교적 정확하게 모사할 수 있는 유한요소법의 도입이 필수적이다.

1940년대에 재 드로잉에 관한 연구가 Swift에 의해 시작된 이후로 여러 연구자와 산업현장에서 다단계 성형에 관한 연구가 다방면으로 수행되고 있다. Chung과 Swift<sup>(2)</sup>는 원통형 컵의 재드로잉에 관한 실험적인 연구를 수행하였다. Nakamura와 Nakagawa<sup>(3)</sup>는 한계 드로잉 비를 향상시키기 위하여 역압 역 재 드로잉에 관한 실험적 연구를 수행하였다. Gotoh 등<sup>(4)</sup>은 2단계 디프 드로잉 공정에서 펀치의 곡률반경을 매우 작게 하여 성형을 할 수 있는 기법을 개발하고, 유한요소 해석을 통하여 검증하였다. Satoh 등<sup>(5)</sup>은 티타늄 판의 캔 모양의 디프 드로잉 공정에서 용융 스프레이 피막을 입힌 금형을 사용하여 성형을 하였다. Yamaguchi 등<sup>(6)</sup>은 십자 모양으로 전개된 블랭크를 이용하여 파단문제 없이 깊이가 깊은 컵을 성형하는 공정을 제안하였으며, 그에 따른 후처리 가공문제에 대한 대안을 제시하였다. Watanabe<sup>(7)</sup>는 성형성이 떨어지는  $\alpha$ 계 스테레스 강판의 다단계 성형의 가공성에 관하여 실험적 연구를 수행하였다. Shimizu와 Wada<sup>(8)</sup>는 스테레스 강판의 다단계 공정에서 발생하는 Shock Line의 인자에 관한 연구를 수행하였다.

유한요소 해석에 관한 연구로는 Parsa 등<sup>(9)</sup>이 2단계 드로잉 공정에서 정방향 드로잉 및 역방향 드로잉에 관하여 강소성 축대칭 유한요소해석을 수행하였다. 성형의 성공과 실패여부는 재 드로잉 비 뿐만 아니라, 재료의 가공경화지수, 1차 드로잉 비, 금형의 형상과 중간단계의 풀림 등에 큰 영향을 받는다는 사실을 밝혀 내었다. Huang 과 Li<sup>(10)</sup>는 2단계 드로잉 공정을 2차원 탄소성 유한요소법으로 해석하였으며, 실험과 비교하였다. 정완진과 조진우<sup>(11)</sup>는 3차원 쉘 요소를 기본으로 하는 다단계 성형공정을 위한 탄소성 유한요소 시뮬레이터를 개발하였고, 요크(Yoke)의 4단계 성형공정을 해석하였다. 조천수 등<sup>(12)</sup>은 축대칭 다단계 성형 문제에서 유한요소 역해석을 이용하고 불량없는 성형을 위하여 중간단계의 수와

단계 형상을 결정하고, 각 단계 블랭크 형상과 변형을 분포를 예측하였다.

현재까지의 연구에서는 세장비가 작고 길이가 길지 않은 제한된 다단계 성형 공정의 해석이므로 대부분 변형 형상과 두께분포를 예측하는 것이 어렵지 않았다. 그러나, 본 논문의 대상인 타원형 컵의 다단계 공정 해석의 경우에는 각 단계마다 원형 단면에서 타원형 단면으로 모양이 점차적으로 변화해 가므로 정확한 금형의 모델링 및 간격(Clearance)의 선정, 정확한 두께 분포의 예측이 필요하다.

본 논문에서는 유한요소해석을 도입하여 성형공정을 전산 모사해석하였으며, 초기 설계 단계에서 기존설계의 문제점과 경향을 파악하는 것을 주요 목표로 수행하였다. 모사해석은 외연적 시간적분을 사용하는 상용유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D<sup>(13)</sup>를 이용하였으며, 각 단계의 금형의 형상을 모델링하여 직접해석을 수행하였다. 재료의 물성은 평면 이방성을 가지는 탄소성 재료로 가정하였다. 이상의 조건을 바탕으로 하여 세장비가 큰 타원형 컵의 4단계 성형공정을 해석하였고, 각 단계에서 얻어진 변형형상 및 변형률 분포를 이용하여 기존설계의 문제점을 고찰하고, 개선된 설계 방안을 제시하였다.

## 2. 해석조건 및 개요

해석하고자 하는 타원형 단면을 가지는 길이가 긴 컵은 일반적으로 4단계의 공정에 의해 성형된다. 제1, 2단계의 해석에서는 단면이 원형이 원통형 컵 모양으로 성형하여 점차적인 변형을 부과하며, 제3, 4단계에서는 2개의 원호를 합쳐놓은 타원형과 유사한 형상의 단면을 가지는 컵을 성형하게 된다. 본 해석에서는 4단계의 해석을 실제 공정과 동일한 조건으로 해석하였다.

본 해석은 외연적 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 외연적 유한요소법은 복잡한 접촉의 고려가 요구되는 실제 문제에 널리 사용되고 있으며, 유용한 결과를 내고 있다. 해석은 상용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하였고, 요소의 종류로는 계산시간이 빠르며, 굽힘 등의 문제에도 정확한 결과를 낼 수 있는 쉘 요소를 채택하여 해석을 수행하였다. 블랭크의 모델링에는 상당량의 뒤뜰림에 대해서도 정확한 해석이 가능하도록 하기 위하여 저감적분 BWC 쉘요소<sup>(14)</sup>를 사용하였으며 무에너지 모드의 제어는 Flanagan과 Belytschko가 제안한 방법<sup>(15)</sup>을 이용하였다.

각 단계의 해석에 사용된 금형의 단면도를 Fig. 1에, 금형의 형상과 블랭크의 형상을 Fig. 2에 도시하였다. 블

랭크의 형상은 Fig. 3과 같고 717개의 절점과 670개의 4절점 쉘 요소로 모델링하였다. 모델의 대칭성에 의하여 1/4만을 모델링하였고, 대칭면을 구속하였다.

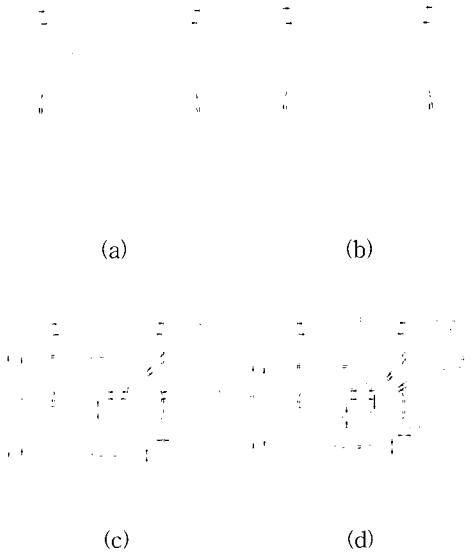


Fig. 1 Punch and die profiles at each forming stage : (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4

해석에 사용된 재료는 SPCE-SB계의 압연강판으로 물성치는 인장시험으로부터 직접 구하였으며, 다음과 같다.

- 탄성계수 : 201 GPa
- 포와송비 : 0.3
- 초기 항복응력 : 187.09 MPa
- 항복곡선:  $\bar{\sigma} = 521.86(0.014834 + \bar{\epsilon}^p)^{0.23373}$  MPa
- 이방성 계수 :  $r_0=2.103, r_{45}=1.246, r_{90}=1.872$
- 밀도 :  $7.98 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>
- 초기 박판 두께 :  $t = 0.5$  mm

금형은 해석을 단순화하기 위하여 강제 쉘요소로 모델링하였다. 블랭크와 금형간의 접촉은 각각의 요소의 분표면(Surface Segment)을 정의하고, 블랭크-펀치, 블랭크-다이, 블랭크-블랭크 홀더의 분표면 간의 접촉을 고려하였다. 접촉면에서의 마찰은 쿨롱 마찰계수 0.15로 하였다.

외연적 해석 시에는 해석의 시간중분을 재료의 탄성계수, 밀도 및 요소의 크기로부터 결정하게 되는데, 본 해석에서는 해석 시간을 단축하기 위하여 밀도를 실제 밀

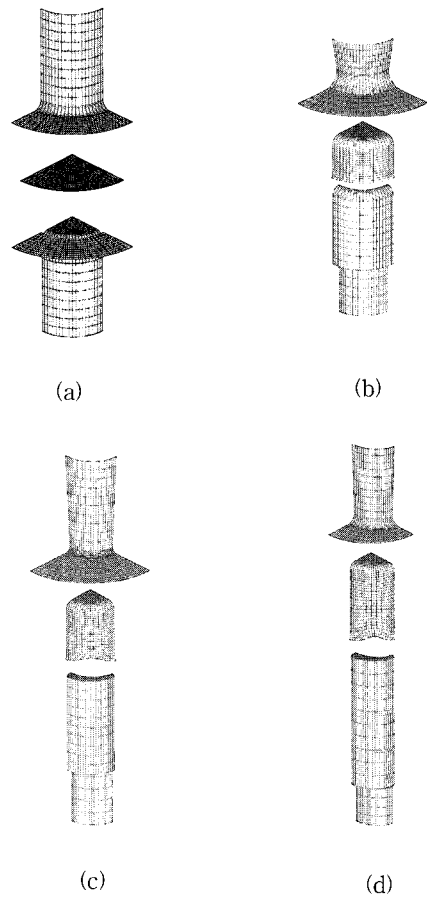


Fig. 2 Shapes of the tool and blank at each forming stage: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4

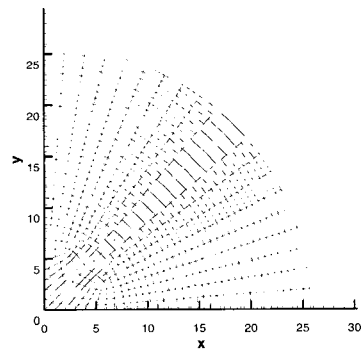


Fig. 3 Initial finite element mesh system for the blank

도의 10배로 하여 해석을 수행하였으며, 그 결과 운동에 너지의 과도 발생 등의 문제점은 발생하지 않았다. 해석에 사용한 펀치의 속도는 1 m/s로 하였다. 1단계 해

석에서의 블랭크 홀딩력은 일정한 크기인 10 kN을 부과하여 해석하였고, 2단계부터는 다단계 공정의 특성상 블랭크 홀더를 사용하지 않았으며 대신 컵 홀더를 사용하여 해석을 수행하였다.

### 3. 다단계 성형해석

2장에서 기술한 해석조건을 이용하여 유한요소 해석을 각 성형단계마다 수행하였고, 얻어진 결과로부터 초기 설계의 문제점을 고찰하였다.

1단계 해석은 펀치 행정이 20 mm가 될 때까지 수행하였다. Fig. 4에 제1단계 성형에서 펀치의 행정이 5, 10, 15 mm와 성형이 완전히 끝난 후의 블랭크의 변형 형상을 도시하였다. 변형형상에서 문제없이 잘 해석이 이루어진 것을 알 수 있으며, 압연방향의 45도 방향으로 재료가 더 많이 빨려 들어가는 귀현상을 볼 수 있다.

Fig. 5에는 성형후의 두께 변형률 분포를 도시하였으며, 이방성의 영향으로 압연방향의 45도 방향이 많이 두꺼워 짐을 알 수 있다. 최대의 두께 변형률은 -0.079이고 압연방향의 90도 방향의 펀치 곡률부에서 발생하였으며, 펀치의 밑바닥 부위에서는 거의 변형이 이루어지지 않았다. 펀치의 밑바닥 부위가 변형이 거의 생기지 않을 경우 이후의 성형공정에서 단면의 면적을 축소시켜 가는 과정에서 블랭크가 과도하게 남아 주름이 발생할 가능성이 있다.

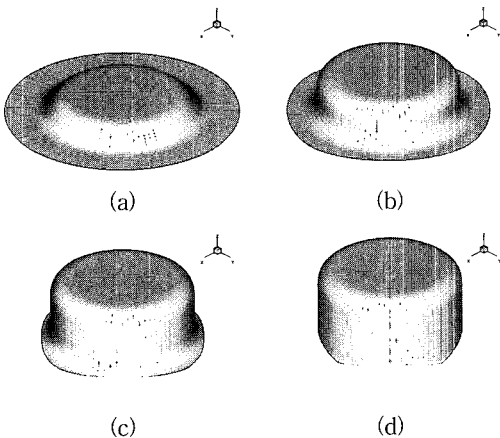


Fig. 4 Deformed shapes of the blank at the stage 1: (a) punch stroke = 5 mm; (b) punch stroke = 10 mm; (c) punch stroke = 15 mm; (d) fully drawn shape

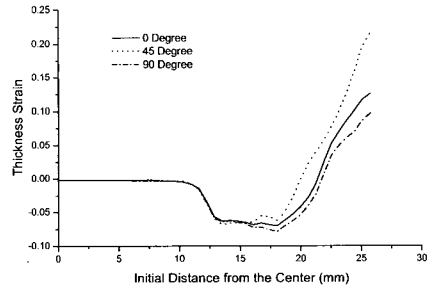


Fig. 5 Thickness strain distribution at the stage 1

제2단계 금형의 도면은 Fig. 1(b)에 도시하였으며, 제1단계에서 구한 변형형상과 응력분포를 이용하여 제2단계 해석을 수행하였다. 제1단계와 다른 점은 제1단계에서는 주름발생을 억제하기 위한 홀딩력을 가하기 위하여 블랭크 홀더를 사용하였으나 제2단계부터는 컵 홀더를 사용한 것이다. 컵 홀더의 형상은 내경이 펀치의 외경보다 크고 외경이 제1단계 성형품의 내경보다 작게 설계되어 상호간의 간섭을 방지하고 수직운동을 가능하게 하여야 한다. 금형 형상 이외의 재료 물성치와 해석조건은 제1단계와 동일하게 하였으며, 펀치 행정 25 mm까지 해석을 수행하였다.

먼저 컵 홀더 설치의 영향을 알아보기 위하여 컵 홀더를 제거하고 해석을 수행하였으며, 변형형상을 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 펀치 행정이 20 mm 일 때 아직 빠져 나가지 못한 블랭크 끝부분에서 상당히 심한 주름이 발생하고 있는 것을 알 수 있으며, 완전 성형후에도 드로잉된 끝부분에서 작은 주름들이 발견되고 있음을 보이고 있다. 따라서 제2단계 이상의 성형공정에서는 블랭크의 위치를 고정시켜 주며, 주름의 발생을 억제할 수 있는 컵홀더의 설치가 필수적임을 알 수 있다.

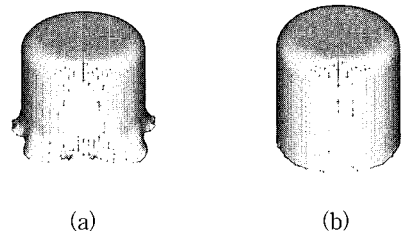


Fig. 6 Deformed shapes of the blank at the stage 2 without cup holder: (a) punch stroke = 20 mm; (b) fully drawn shape

Fig. 7에는 컵 홀더를 추가하고 해석한 형상을 도시하고 있으며, 성형 형상에 문제가 없음을 알 수 있다. 제1단계와 비슷한 형상을 보이고 있으며, 귀현상의 발생이 더욱 심하여 졌음을 알 수 있다. Fig. 8에는 성형품의 압연방향에 따른 두께 변형률 분포를 도시하고 있으며, 이 방성에 의한 영향으로 압연방향의 45도 방향으로 제1단계보다 더 두꺼워진 양상을 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 제2단계의 성형에 사용된 펀치의 곡률부위에서 재료가 많이 얇아 졌으며, 제 1단계의 성형에 사용된 펀치의 곡률부에서 얇아졌던 부분이 다시 두꺼워지면서 두께변형률의 분포가 진동하고 있음을 보이고 있다. 특히 이 현상은 압연방향에서 가장 크게 나타나고 있다.

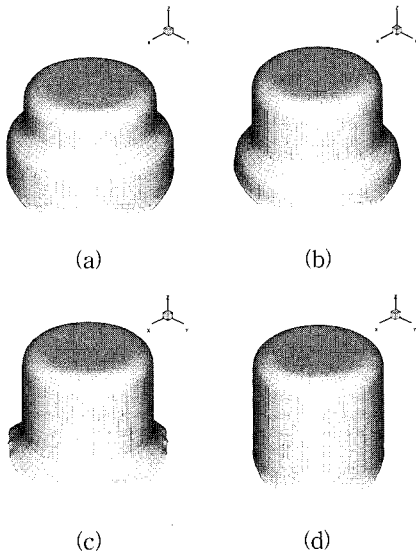


Fig. 7 Deformed shapes of the blank at the stage 2 with cup holder: (a) punch stroke = 10 mm; (b) punch stroke = 15 mm; (c) punch stroke = 20 mm; (d) fully drawn shape

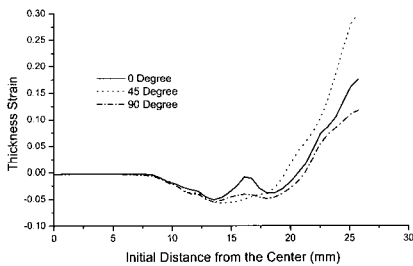


Fig. 8 Thickness strain distribution at the stage 2

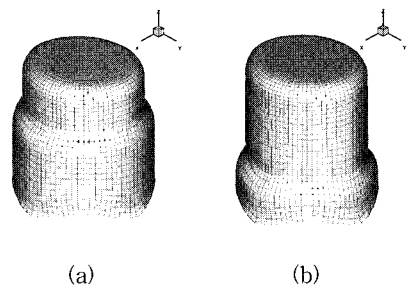
제3단계 금형의 도면은 Fig. 1(c)에 도시하였으며, 제3 단계부터의 단면 형상은 원통형이 아닌 2개의 원을 합쳐

놓은 타원과 유사한 형상이다. 압연방향은 단축과 일치시켜 해석을 수행하였다. 해석 조건은 제2단계와 동일하게 하여 펀치행정 30 mm까지 해석하였다.

Fig. 9에는 변형형상을 도시하고 있으며, 단면의 형상이 변함에도 불구하고 성형은 잘 진행되고 있음을 알 수 있다. 형상의 변화로 인해 전단계보다 귀현상이 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10에는 성형품의 두께 변형률 분포를 도시하였다. 단면 형상의 변화로 인하여 장변부 모서리에서 급격히 두께 변형률이 감소하고 있다. 최대 변형률은 -0.18 였으며, 타원형태 금형의 사용과 단변부 반경의 축소로 인하여 매우 큰 변형률이 발생하였다. 압연방향, 즉 단변부에서는 두께가 두꺼워지는 경향을 보이고 있는데, 이는 단변부의 반경이 급격하게 줄어드는 현상에 의해 해당부위의 블랭크가 남음에 따라 발생하는 것으로 이런 현상이 과도하게 발생할 경우 주름의 발생이 예측된다.

제4단계 금형의 도면은 Fig. 1(d)에 도시하였으며, 제4 단계 역시 다이 형상은 2개의 원을 합쳐놓은 타원형과 유사한 단면형상이다. 해석은 펀치행정 35 mm까지 수행하였다.

Fig. 11에는 변형형상을 도시하고 있으며, 성형은 비교적 잘 진행되었음을 알 수 있다. 단면형상의 변화로 인해 제3단계와 마찬가지로 귀현상이 많이 발생하였다. 또한, 단면부위의 급격한 변화에 따른 문제로 장변부 쪽의 과도한 인장변형과 단변부 부위에서 거의 인장상태의 변형이 일어나지 않고 오히려 블랭크 재료가 남게 되어 주름발생의 가능성이 나타나고 있다. 이러한 문제는 단변부의 어깨부를 반경이 더 큰 보다 부드러운 곡선으로 하여 줄 경우 단변부 부분에서 인장이 발생할 것이며, 단변부의 인장에 따라 장변부의 굽부 변형도 완화될 것이라 기대된다. Fig. 12에는 성형품의 두께 변형률 분포를 도시하였다. 단면 형상의 변화로 인하여 장변부 모서리에서 급격히 두께 변형률이 증가하여 파단의 가능성이 커지고 있으며, 단변부 쪽으로는 반대로 두께가 두꺼워지는 경향을 보이고 있어 주름발생의 가능성이 점점 커지고 있다.



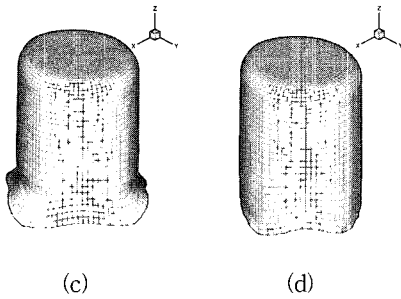


Fig. 9 Deformed shapes of the blank at the stage 3: (a) punch stroke = 10 mm; (b) punch stroke = 20 mm; (c) punch stroke = 25 mm; (d) fully drawn shape

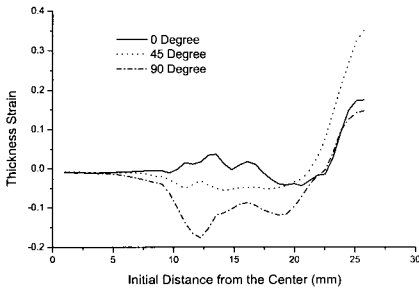


Fig. 10 Thickness strain distribution at the stage 3

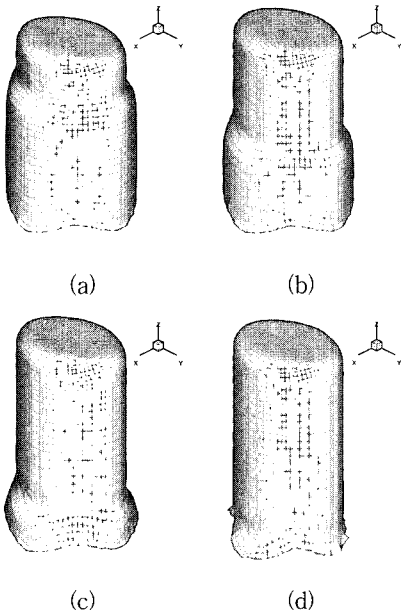


Fig. 11 Deformed shapes of the blank at the stage 4: (a) punch stroke = 10 mm; (b) punch stroke = 20 mm; (c) punch stroke = 30 mm; (d) fully drawn shape

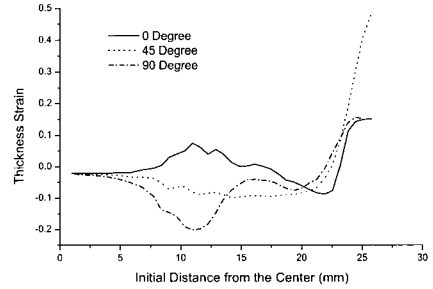


Fig. 12 Thickness strain distribution at the stage 4

Fig. 13에는 4단계 각각의 펀치의 하중을 도시하였다. 제1단계의 최대 펀치 하중은 13.62 kN 정도였으며, 펀치 행정 7 mm에서 발생하였다. 행정이 15 mm를 지나면서 홀더의 하중이 진동하는 현상을 볼 수 있는데 이것은 블랭크가 홀더에서 빠져나가기 시작하는 것에 기인한다. 행정이 18 mm가 넘게 되면 블랭크의 모든 부분이 완전히 빠져 나가 컵이 성형되게 되며, 그로 인해 하중이 떨어지게 된다. 제2단계의 최대하중은 8.32 kN으로 펀치 행정 14.36 mm에서 발생하였다. 제3,4단계에서는 단면의 변화에 따라 접촉이 불규칙해지므로 하중이 지속적으로 진동하는 경향을 보이고 있다. 또한, 하중의 진동은 금형의 위치 설정에 따라서도 많은 차이를 보이게 되므로 추후 이에 대한 추가 검토가 필요하다

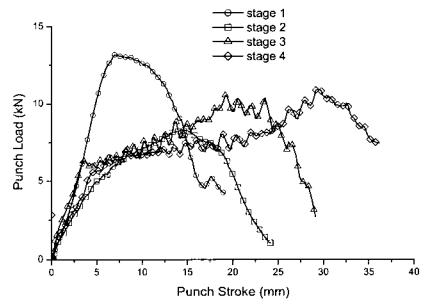


Fig. 13 Punch load versus Punch stroke diagram in each stage of the forming process

본 해석의 결과를 가능하다면 실제 다단계 성형해석 결과와 비교하는 것이 바람직하나, 본 논문의 대상인 타원형 컵의 경우에는 제품 설계단계의 해석이므로 실험 결과가 도출되지 않아 실험결과와 비교하지 못하였다. 또한, 현재까지의 다단계 성형에 관한 해석적인 연구들이 2차원 요소를 이용한 축대칭 해석이 대부분이기 때문에 타원형 컵의 성형해석 결과를 비교할 수 있는 자료를

연기가 매우 어렵다. 외연적 탄소성 유한요소법을 사용한 기존의 해석들이 실제 성형공정에 잘 적용되고 있으므로, 본 논문의 결과들을 실제 설계의 변경에 반영하고 검증할 계획이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 타원형 컵의 다단계 디프 드로잉 공정을 해석하고 초기 설계에서의 문제점을 정성적으로 고찰하기 위하여 외연적 탄소성 유한요소법을 이용하여 성형공정을 해석하였다. 해석의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 성형해석을 위하여 탄소성 유한요소해석을 이용하였으며, 재료의 평면 이방성을 고려하였다. 금형과 블랭크의 접촉을 모사하기 위하여 실제 공정과 같은 각 단계의 금형을 모두 모델링하였으며 접촉을 고려하고, 각 단계의 해석을 수행하였다.

(2) 제1,2단계의 원통컵 드로잉 공정에서는 이방성에 의하여 압연방향의 45도 방향으로 플랜지와 벽부분의 두꺼워짐이 발생하였으며, 압연방향의 90도 방향으로 가장 많은 두께 감소가 발생함을 알 수 있었다.

(3) 제3,4단계에서는 단면의 변화로 인하여 편지의 하중곡선이 심하게 진동하였으며, 압연방향의 90도 방향인 장변부로는 과도한 변형이 집중되어 파단이 예측되었고, 압연방향의 0도 방향인 단변부로는 급격한 변길이의 축소에 따른 블랭크 재료의 주름이 발생하여 불량률이 예측되었다.

(4) 제3,4단계의 파단 및 주름의 발생을 억제하기 위하여 단변부의 어깨부 반경의 대폭적인 수정이 요구되며, 추후의 해석에서는 이와 같은 문제점을 고찰하고 설계변경 방법에 관한 연구를 수행할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 허 훈, 2000, "디프 드로잉 - 소형 2차전지 사각케이스의 성형", LG 생산기술, 2월호, pp. 16~18.
- (2) Chung, S. Y. and Swift, H. W., 1952, "An Experimental Investigation of Redrawing of Cylindrical Cups", Process. Inst. Mech. Eng., Vol. 1B, pp. 437~447.
- (3) Nakamura, K. and Nakagawa, T., 1984, "Fracture Mechanism and Fracture Control in Deep Drawing with Hydraulic Counter Pressure - Studies on Hydraulic Counter Pressure Forming I", J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 25, pp. 831~838.

- (4) Gotoh, M., Kim, Y. S. and Yamashita, Y., 1998, "A Research on Double Stretch-Drawing Process", Proc. Japanese Conf. Tech. Plast., pp. 169~170.
- (5) Satoh, J., Gotoh, M. and Maeda, Y., 1998, "Can Forming of Ti-Sheets by Stretch-Drawing Process, and Adaptability of Spray-coated Dies", Proc. Japanese Conf. Tech. Plast., pp. 167~178.
- (6) Yamaguchi, K., Takakura, N. and Shirakawa, S. and Yamaguchi, T., 1998, "Mechanical Joining of Seams at Wall of Cup Produced by using Developed Blank", Proc. Japanese Conf. Tech. Plast., pp. 337~338.
- (7) 渡部豊臣, 1998, "ステンレス鋼板のプレス成形技術に關する最新の話", 第10回金屬プレス加工技術研究會, pp. 23~29.
- (8) Shimizu, K. and Wada, T., 1997, "Thinning in the Cylindrical Cup Wall Thickness by Ironing with Redrawing", J. JSTP, Vol. 38, pp. 40~45.
- (9) Parsa, M. H., Yamaguchi, K., Takakura, N. and Imatani, S., 1994, "Consideration of the Re-drawing of Sheet Metals based on Finite Element Simulation", J. Mater. Process. Technol., Vol. 47, pp. 87~101.
- (10) Huang, Y. M. and Li, C. L., 1999, "An Elasto-plastic Finite-element Analysis of the Metal Sheet Redrawing Process", J. Mater. Process. Technol., Vol. 89, pp. 331~338.
- (11) 정완진, 조진우, 1999, "박판성형 성형공정 해석시스템 개발", 한국소성가공학회지, 제 8권, 제 1호, pp. 29~37.
- (12) 조천수, 이충호, 허 훈, 1997, "유한요소 역해석을 이용한 축대칭 다단계 박판성형에서의 공정변수설계에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제6권, 제4호, pp. 300~310.
- (13) Hallquist, J. O., 1997, LS-DYNA3D Users Manual, Livermore Software Technology Corporation.
- (14) Belytschko, T., Wong, B. L. and Chiang, H. Y., 1992, "Advances in One-point Quadrature Shell Elements", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol. 96, pp. 93~107.
- (15) Flanagan, D. P. and Belytschko, T., 1981, "A Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral with Orthogonal Hourglass Control", Int. J. Numer. Meth. Engrg., Vol. 17, pp. 679~706.