

## 유한요소해석을 이용한 세장비가 큰 직사각컵 다단계 성형공정의 금형설계 – Part I. 금형설계

김세호\* · 김승호\* · 허 훈\*

(2000년 12월 6일 접수)

### Tool Design in a Multi-stage Rectangular Cup Drawing Process with the Large Aspect Ratio by the Finite Element Analysis - Part I. Tool Design

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

#### Abstract

Tool design is introduced in a multi-stage rectangular cup drawing process with the large aspect ratio. Finite element simulation is carried out to investigate deformation mechanisms with the initial tool design. The analysis reveals that the difference of the drawing ratio and the irregular contact condition produces non-uniform metal flow to cause wrinkling and severe extension. For remedy, the modification guideline is proposed in the design of the tool and process. Analysis results confirm that the modified tool design not only improves the quality of a deep-drawn product but also reduces the possibility of failure.

**Key Words :** Tool Design, Rectangular Cup, Multi-stage Deep Drawing Process, Finite Element Analysis

#### 1. 서 론

세장비가 큰 타원형 및 직사각형의 컵은 산업현장에서 전전지 케이스와 반도체, 수정 진동자 등의 초정밀 부품으로 널리 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 세장비가 큰 컵은 경밀한 부품사용의 요구에 따라 계속적으로 수요가 증가하고 있는데, 설계기술 및 생산기술은 수요를 충족시키지 못하고 있다. 이러한 직사각컵은 제품의 강도와 형상 등에 관한 수요자의 복잡한 요구에 따라서 다단계 디프 드로잉 공정에 의하여 생산되고 있다. 다단계 디프드로잉 공정에

서 블랭크 재료는 각 성형 단계마다 1단계 드로잉 공정보다 부가적인 복잡한 변형을 하게 된다. 일반적으로 1단계 성형공정 이후부터 각 단계별로 변화하는 드로잉비에 따라 굽힘, 폐짐, 인장, 압축과 전단 등의 복잡한 변형기구를 거쳐야 한다. 따라서, 최종단계에서의 형상 및 기계적 특성을 쉽게 예측하기는 매우 어렵다. 특히, 직사각컵을 만들기 위한 공정중에 사용되는 타원형 중간단계 컵의 경우에는 다단계 성형공정 중에 금형형상의 지속적인 변화에 따른 변형양상 및 접촉의 변화에 의하여 제품의 파단 및 주름 등의 불량이 쉽게 발생할 수 있으므로, 공

\* 한국과학기술원 기계공학과

정설계가 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 문제의 결과를 비교적 정확하게 예측할 수 있는 비선형 대변형 유한요소법의 도입이 효과적인 설계의 필수조건이다.

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. Yamaguchi 등<sup>(3)</sup>은 십자 전개 블랭크 형상을 이용하여 깊이가 깊은 사각컵을 제작하였으며, 체결 공정에 관한 연구를 수행하였다.

유한요소 해석에 관한 연구로는 Parsa 등<sup>(4)</sup>이 2단계 드로잉 공정에서 정방향 드로잉 및 역방향 드로잉에 관하여 강소성 축대칭 유한요소해석을 수행하였다. 정완진과 조진우<sup>(5)</sup>는 3차원 웨일 요소를 기본으로 하는 다단계 성형공정을 위한 탄소성 유한요소 시뮬레이터를 개발하였고, 요크(Yoke)의 4단계 성형공정을 해석하였다. 조천수 등<sup>(6)</sup>은 축대칭 다단계 성형 문제에서 유한요소 역해석을 이용하고 불량없는 성형을 위하여 중간단계의 수와 단계 형상을 결정하고, 각 단계 블랭크 형상과 변형률 분포를 예측하였다.

현재까지 대부분의 연구는 세장비가 작고 단면의 형상이 원형 등으로 단순하며 길이가 길지 않은 제한된 다단계 공정해석이 대부분이었으며, 금형 설계에 유한요소해석이 적절적으로 사용된 경우는 거의 없다. 본 논문의 대상인 직사각컵 다단계 성형공정의 경우에는 각 단계마다 원형단면에서 타원형 단면으로 점차적으로 변해가므로 정확한 금형의 모델링 및 간격의 선정, 정확한 두께 분포의 예측이 필요하다. 허 훈 등은 세장비가 큰 타원형 컵의 성형공정에 외연적 탄소성 유한요소해석<sup>(7)</sup>과 중간 미끄럼면을 고려한 다단계 유한요소 역해석<sup>(8)</sup>을 도입하여 최종형상 및 변형률 분포 등을 계산하였고, 각 단계의 변형을 정성적으로 검토하였다.

본 논문에서는 김세호 등<sup>(7)</sup>의 논문에 기술된 탄소성 유한요소법을 이용한 성형공정의 다단계 해석을 바탕으로 직사각컵의 6단계 성형공정의 기본적 변형 기구를 분석하였다. 초기 설계의 타당성 및 문제점을 검토하였고 해석에서 얻어진 문제점을 기본으로 하여 금형의 수정 설계안을 제시하였다. 수정 설계안으로부터 유한요소해석을 수행하여 제안된 설계가 기존 설계의 문제점을 해

결하였음을 검증하였다.

## 2. 해석 조건

해석하고자 하는 직사각형 단면을 가지는 길이가 긴 컵은 일반적으로 6단계의 공정에 의해 성형된다. 제1, 2 단계의 해석에서는 단면이 원형인 원통형 컵 모양으로 성형하여 점차적인 변형을 부과하며, 제3-6단계에서는 2 개의 원호를 합쳐놓은 타원형과 유사한 형상의 단면을 가지는 컵을 성형하게 되며, 최종단계로 갈수록 타원형 단면의 형상이 점점 직사각형 단면에 가까운 형상으로 변하게 된다. 본 해석의 대상인 직사각컵의 세장비는 약 7.6 정도이다. 본 논문에서는 6단계의 해석을 실제 공정과 동일한 조건으로 해석하였다.

본 논문에서는 김세호 등<sup>(7)</sup>의 해석과 동일한 조건으로 해석을 수행하였다. 해석은 외연적 탄소성 유한요소법을 사용하는 상용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D<sup>(9)</sup>를 이용하였다. 블랭크의 모델링에는 상당량의 뒤틀림에 대해서도 정확한 해석이 가능하도록 하기 위하여 저감적분 Belytschko-Wong-Chiang 웨일요소<sup>(10)</sup>를 사용하였으며 무에너지 모드의 제어는 Flanagan과 Belytschko가 제안한 방법<sup>(11)</sup>을 이용하였다.

각 단계의 해석에 사용된 금형의 단면도를 Fig. 1에 도시하였다. 해석에 사용된 재료는 SPC-E-SB계의 압연 강판으로 물성치는 인장시험으로부터 직접 구하였으며, 다음과 같다.

탄성계수	: 201 GPa
포화송비	: 0.3
항복곡선:	$\sigma = 521.86(0.014834 + \frac{1}{\epsilon})^{0.2373}$ MPa
초기 항복응력	: 194.72 MPa
이방성 계수	: $r_0=2.103, r_{45}=1.246, r_{90}=1.872$
초기 박판 두께	: $t = 0.5$ mm
밀도	: $7.96 \times 10^{-6}$ kg/mm <sup>3</sup>
쿨롱 마찰 계수	: 0.1

블랭크의 압연방향과 금형의 단축방향을 일치시켜 해석하였다. 제1단계 해석에서의 블랭크 홀딩력은 일정한 크기인 5 kN을 부과하여 해석하였고, 제2단계부터는 다단계 공정의 특성상 블랭크 홀더를 사용하지 않았으며 대신 컵 홀더를 사용하여 해석을 수행하였다.

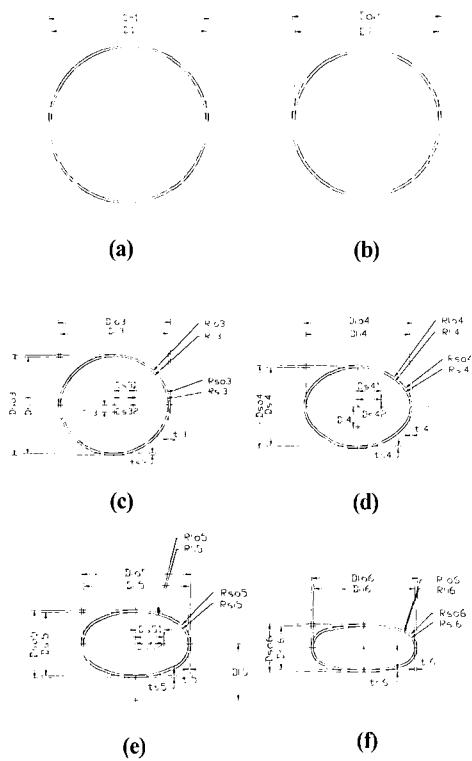


Fig. 1 Punch and die profiles at each forming stage in the initial design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5; (f) stage 6

### 3. 초기 설계안의 해석 결과

2장에서 기술한 해석조건을 이용하여 각 단계의 유한요소 해석을 수행하고 초기 설계의 문제점을 고찰하였다.

Fig. 2에 제1-5단계의 완전성형된 유한요소 격자의 형상을 도시하였다. 제4단계 이후부터 단축방향으로는 심한 주름발생이 관찰되고, 장축방향으로는 심한 인장변형이 발생되고 있다. 제5단계 이후부터는 단축부근의 유한요소가 주름발생에 의해 심하게 변형되어 해석이 진행되지 못하였다. 이러한 주름발생 및 과도한 인장 등의 문제점의 이유는 단면내에서 단축방향의 드로잉비가 장축방향보다 훨씬 크기 때문이다. 또한, 초기 단계에서 원형이던 단면형상이 제3단계부터 타원의 형상으로 변화하기 때문에 단면의 전체적인 드로잉비가 불균일하게 변화하게 된다. 이에 따라 블랭크의 변형이 불규칙하게 일어나 국부적인 주름이나 과도한 인장 등의 문제가 발생하게 된다.

Fig. 3에 제1-4단계의 두께 변형률 분포를 도시하였다.

위에서 기술한 바와 같이 장축방향으로는 두께가 얕아지는 현상을 보이고 있고, 단축방향으로는 두께가 두꺼워지는 현상을 보이고 있다. 이러한 문제점들로 인하여 성형이 계속될수록 단축방향으로는 과도한 주름의 발생이 예측되고, 장축방향으로는 파단이 예측된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 장, 단축 방향의 드로잉비를 보다 균일하게 변화시킬 수 있는 단면형상의 설계가 요구된다.

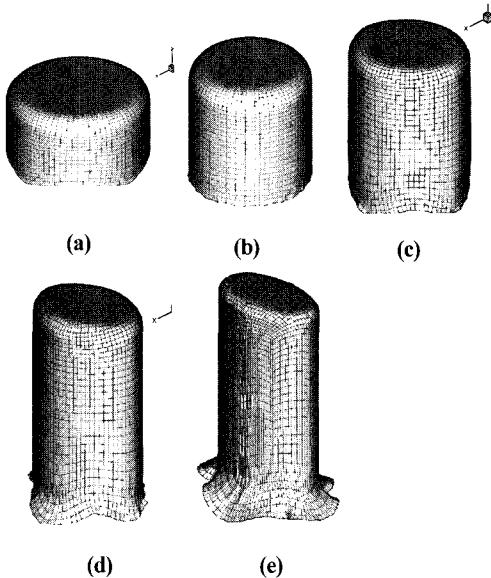


Fig. 2 Deformed shape of the blank at each forming stage with the initial design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5

제3단계 이후의 주름 및 과도인장의 현상은 성형중의 블랭크와 금형간의 접촉양상에서도 원인을 찾을 수 있다. Fig. 4에는 제3단계 공정의 성형전의 장, 단축방향에서의 블랭크와 다이의 접촉양상을 도시하였으며, Fig. 5에는 변형과정중의 접촉양상을 도시하였다. 초기 접촉시의 그림에서 알 수 있듯이 장축부위의 블랭크가 다이에 접촉하지 않고 단축부위만 먼저 다이에 접촉하게 된다. 2단계 성형품의 단면형상이 원형이고 3단계 다이의 단면형상이 타원형이므로, 초기 접촉조건에서 다이와 블랭크가 완전한 접촉을 이룰 수 없게 된다. 이에 따라 단면전체가 균일하게 금형에 접촉되지 않아 블랭크가 다이 속으로 빨려 들어갈 때 불균일한 접촉에 의한 불균일한 변형이 발생된다. 이러한 불균일한 변형은 장축방향으로 편치 어깨부에서 과도한 접촉에 따른 심한 인장을 유발하게 된다. 반면에 단축방향으로는 인장보다는 굽힘현상에 의한 변형이 주가 되어 일어나므로 충분한 인장력이 걸리지 않아 주름발생의 원인이 된다.

초기설계의 문제점은 각 성형단계의 단면에서의 드로잉비의 불균일성과 블랭크와 다이 접촉의 문제점으로 크게 나눌 수 있으며, 이러한 불균일한 변형기구가 주름 및 파단의 원인이 된다. 문제점의 해결을 위해서는 보다 균일한 변형과 접촉을 고려한 금형의 합리적인 형상변경이 필수적이다.

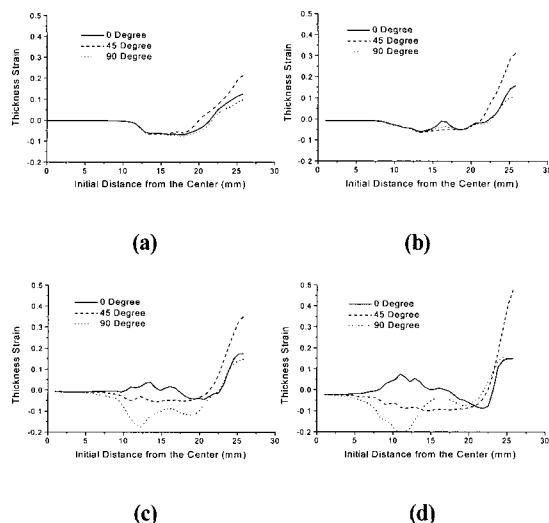


Fig. 3 Thickness strain distribution with the initial design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4

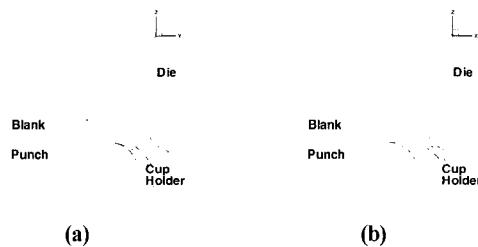


Fig. 4 Initial shape of the tool positioning at the stage 3 with the initial design: (a) major axis; (b) minor axis

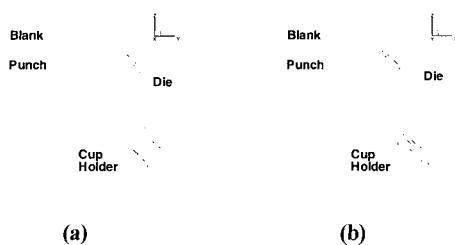


Fig. 5 Deformed shape of the tool set at the stage 3 with the initial design (stroke = 6 mm): (a) major axis; (b) minor axis

#### 4. 설계 변경

3장에서는 유한요소해석의 결과로부터 초기설계에서 일어나는 변형기구의 현상적인 문제점 및 이유를 기술하였다. 불균일한 드로잉 비와 접촉에 따른 성형불량을 방지하기 위하여 다음과 같은 설계변경기준을 바탕으로 금형형상을 수정하였다.

(1) 단면내에서의 불균일한 드로잉 비를 균일화하기 위하여 인접한 성형단계간의 드로잉 비를 줄였다. 이를 위하여 각 성형단계의 다이와 펀치의 단면형상을 수정하였다.

(2) 각 성형단계의 초기에 다이와 블랭크의 균일한 접촉을 보장하기 위하여 펀치 형상을 수정하였다.

(3) 타원형 및 직사각형 단면의 형상을 변형 집중이 없도록 가능한 부드러운 곡선의 형태로 구성하였다. 본 논문에서는 2개의 원호로 이루어진 타원형 단면의 외곽선을 3개의 원호로 이루어진 단면으로 수정하였다.

(2)에서 제시한 펀치형상의 수정을 위하여 다이와 블랭크가 장, 단축에서 동시에 접하도록 수정하였다. Fig. 4에 나타난 초기설계에서 장축 방향으로 접촉이 일어나지 않는 문제를 개선하기 위하여 단축부의 펀치의 곡률을 큰 값으로 수정하여 장, 단축부가 동시에 접하도록 하였다. 또한, 다단계 성형에서 쉽게 나타나는 충격선(Shock Line)을 방지하기 위하여 다이설계 시에 도입각을 설치하였다. 이상의 설계변경안을 바탕으로 하여 재설계한 금형의 3차원 형상을 초기설계안의 금형형상과 함께 Fig. 6에 도시하였다. 변경설계의 경우가 보다 직사각에 가까운 단면을 가지게 되며, 초기설계에 비하여 단축방향으로 많이 깎여 있는 금형의 형상을 가진다.

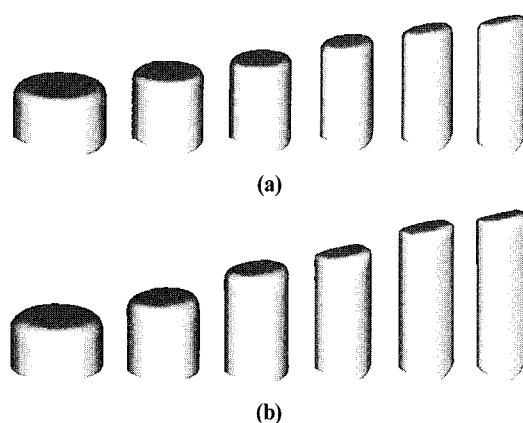
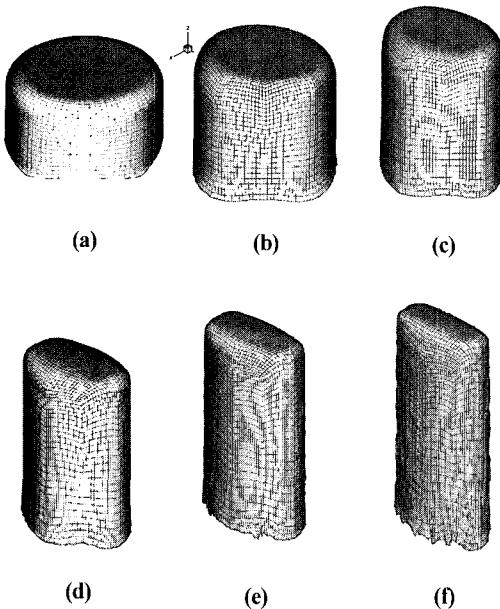


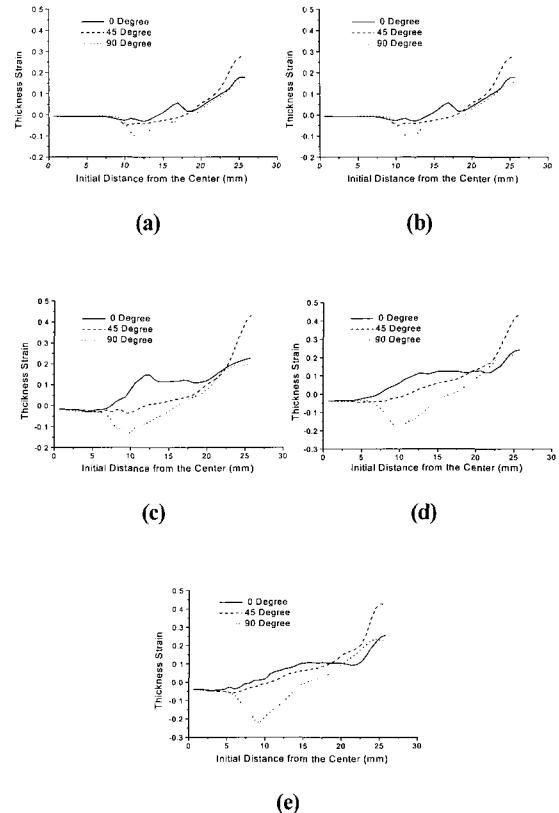
Fig. 6 Intermediate punch shapes in each forming stage: (a) initial design; (b) modified design



**Fig. 7** Deformed shape of the blank at each forming stage with the modified design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5; (f) stage 6

설계변경의 영향을 확인하기 위하여 변경된 금형의 형상을 초기조건으로 하여 유한요소해석을 다시 수행하였다. 금형형상을 제외한 해석조건은 2장과 동일하다. Fig. 7에는 제2-6단계에서의 최종 변형형상을 도시하였다. 점진적으로 직사각형으로 성형되어 가고 있음을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 단축부에서의 주름발생이 여전히 관찰되고 있으나, 이러한 문제점은 아이어닝 공정을 도입할 경우 방지할 수 있다.

Fig. 8에는 제2-6단계의 두께 변형률 분포를 도시하였다. Fig. 3에서 도시한 초기설계의 제4단계 최대 두께 변형률이 -0.202이었던 반면에 수정설계에서는 제4단계 최대 두께 변형률이 -0.133에 불과하였으며, 수정설계의 경우 제6단계에서도 최대 두께 변형률이 -0.225에 불과하여 초기설계에서 우려된 과도한 두께 변형이 개선되었다. 초기설계에서 장축부의 두께가 과도하게 얇아지는 현상이 수정설계에서 현저하게 감소하였음을 알 수 있다. 제4단계까지 두꺼워졌던 단축방향의 블랭크가 제5,6 단계를 거치며 직사각형으로 단면형상이 성형될 때 다시 얇아지는 것을 알 수 있으며, 이는 주름발생의 문제가 완화되고 있음을 의미한다.



**Fig. 8** Thickness strain distribution with the modified design: (a) stage 2; (b) stage 3; (c) stage 4; (d) stage 5; (e) stage 6

Fig. 9에 수정설계에서의 제3단계 성형 시의 초기 접촉조건을 도시하였다. 장축과 단축 부분에서 블랭크가 다이에 동시에 접하고 있으므로 초기 성형단계에서의 접촉조건이 향상되었음을 확인할 수 있으며, 수정된 접촉조건에 의해서 보다 균일한 변형이 생기게 된다. Fig. 10에 도시한 것과 같이 성형이 진행되면 장, 단축에서 초기설계의 경우보다 균일한 접촉이 일어나고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에 초기설계와 변경설계의 각 성형단계에서의 편치행정에 따른 편치력을 도시하였다. 변경설계의 경우가 초기설계의 경우보다 편치력의 크기가 매우 작아졌다. 또한, 초기설계에서 3단계 이후의 편치력의 전동현상이 변경설계 이후에 모두 제거되었다. 이는 변경된 설계의 금형형상이 초기설계보다 균일한 변형과 접촉을 부과하고 있으며, 특히 단면내에서 재료의 유동의 양상이 크게 개선되었음을 의미한다.

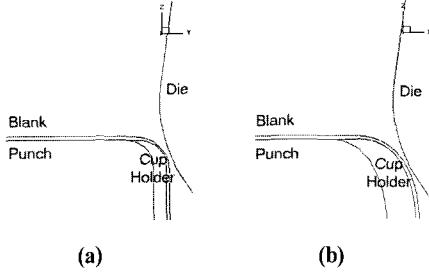


Fig. 9 Initial shape of the tool positioning at the stage 3 with the modified design: (a) major axis; (b) minor axis

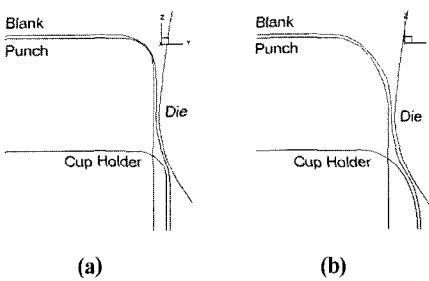


Fig. 10 Deformed shape of the tool set at the stage 3 with the modified design (stroke = 8 mm): (a) major axis; (b) minor axis

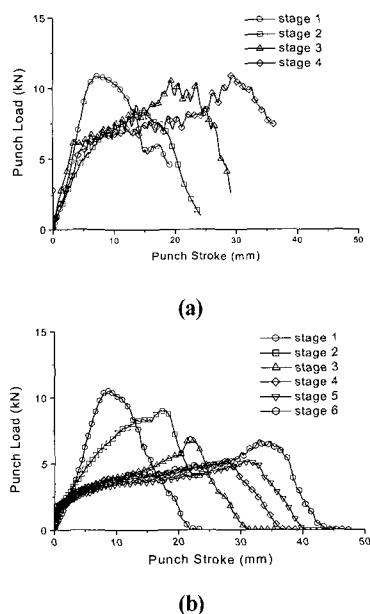


Fig. 11 Diagram for punch load versus punch stroke in each stage of the forming process: (a) initial design; (b) modified design

## 5. 결 론

본 논문에서는 세장비가 큰 직사각컵의 다단계 성형공정의 금형 설계를 탄소성 유한요소 해석을 이용하여 수행하였다. 초기 설계의 금형을 이용하여 유한요소 해석을 수행하고 해석의 결과로부터 성형중에 일어나는 변형 기구의 문제점을 파악하였다. 실제공정 시에 발생할 수 있는 주름과 파단의 발생의 원인은 각 단계 단면에서의 드로잉 비와 접촉조건의 불균일성이었다. 이러한 문제점을 제거하기 위하여 설계변경의 기준이 제시되었으며, 제시된 기준에 따라 금형형상을 재설계하였다. 재설계된 금형으로 유한요소해석을 다시 수행하였으며 해석결과로부터 변형 및 접촉의 균일성이 확보되었으며 파단 및 주름의 가능성성이 감소하였음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) 허 훈, 2000, “디프 드로잉 – 소형 2차전지 사각케이스의 성형”, 월간 LG 생산기술, Vol. 3, No. 2, 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) 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. (in Japanese), pp. 337~338.
- (4) Parsa, M. H., Yamaguchi, K., Takakura, N. and Imatani, S., 1994, "Consideration of the Re-drawining of Sheet Metals based on Finite Element Simulation", J. Mater. Process. Technol., Vol. 47, pp. 87~101.
- (5) 정완진, 조진우, 1999, "박판성형 성형공정 해석시스템 개발", 한국소성가공학회지, 제8권 제1호, pp. 29 ~37.
- (6) 조천수, 이충호, 허 훈, 1997, "유한요소 역해석을 이용한 축대칭 다단계 박판성형에서의 공정변수설계에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제6권 제4호, pp. 300~310.
- (7) 김세호, 김승호, 허 훈, 2000, "외연적 유한요소법을 이용한 세장비가 큰 타원형컵 성형공정의 다단계 해석", 한국소성가공학회지, 제9권 제3호, pp.313~319.

- (8) 김승호, 김세호, 허 훈, 2000, “세장비가 큰 타원형  
컵 성형공정의 다단계 유한요소 역해석”, 한국소성  
가공학회지, 제9권 제3호, pp. 304~312.
- (9) Hallquist, J. O., 1997, LS-DYNA3D Users Manual,  
Livermore Software Technology Corporation.
- (10) 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.
- (11) Flanagan, D. P. and Belytschko, T., 1981, "A  
Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral with  
Orthogonal Hourglass Control", Int. J. Numer.  
Meth. Engng., Vol. 17, pp. 679~706.
- (12) Huh, H., Kim, S. H. and Kim, S. H., 2000,  
"Multi-stage Inverse Analysis of Elliptic Cup  
Drawing with the Large Aspect Ratio", proc.  
Metal Forming 2000, pp. 107~114.
- (13) Huh, H., Kim, S. H. and Kim, S. H., 2000,  
"Process Design for Multi-stage Elliptic Cup  
Drawing with the Large Aspect Ratio", proc.  
ECCOMAS 2000 (CD-rom publication), pp. 1~16.