

유한요소해석을 이용한 세장비가 큰 직사각컵 다단계 디프 드로잉-아이어닝 공정의 최적 금형설계

김세호* · 김승호* · 허 훈†

(2001년 7월 27일 접수, 2002년 3월 23일 심사완료)

Optimum Tool Design in a Multi-stage Rectangular Cup Drawing and Ironing Process with the Large Aspect Ratio by the Finite Element Analysis

Se-Ho Kim, Seung-Ho Kim and Hoon Huh

Key Words : Optimum Tool Design(최적 금형설계), Multi-stage Cup Drawing and Ironing Process(다단계 디프 드로잉-아이어닝 공정), Rectangular Cup(직사각컵), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

Optimum tool design is carried out for a multi-stage rectangular cup deep-drawing and ironing process with the large aspect ratio. Finite element simulation is carried out to investigate deformation mechanisms with the initial design made by an expert. The analysis considers the deep drawing process with ironing for the thickness control in the cup wall. The analysis reveals that the difference of the drawing ratio within the cross section and the irregular contact condition produce non-uniform metal flow to cause wrinkling and severe extension. For remedy, the modification guideline is proposed in the design of the tool and the 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. The numerical result shows fair coincidence with the experimental one. After tryouts of the tool shape, the rectangular cup has been produced in the transfer press.

1. 서론

세장비가 큰 직사각형의 컵은 산업현장에서 건전지 케이스와 반도체 등의 초정밀 부품으로 널리 사용되고 있다.⁽¹⁾ 직사각컵은 제품의 강도와 형상 등에 관한 수요자의 복잡한 요구에 따라서 아이어닝 공정이 포함된 다단계 디프 드로잉 공정에 의하여 생산되고 있다. 아이어닝 공정을 사용하면 컵의 높이와 벽면두께를 사용자의 요구에 따라 조절할 수 있으며, 제품에서 원하는 강도를 얻을 수 있다. 다단계 아이어닝 공정에서는 각 단계별로 변화

하는 드로잉 비에 따라 굽힘, 퍼짐, 인장, 컵 벽의 아이어닝, 압축과 전단 등의 복잡한 변형기구를 거쳐야 한다. 따라서, 최종단계에서의 형상 및 기계적 특성을 쉽게 예측하기는 매우 어렵다. 특히, 직사각컵을 만들기 위한 공정 중에 사용되는 중간 단계 컵의 경우에는 다단계 성형공정 중에 금형형상의 3 차원적인 변화, 금형간격(clearance), 아이어닝 양 등에 따른 변형양상 및 접촉의 변화에 의하여 제품의 파단 및 주름 등의 불량에 쉽게 발생할 수 있으므로 공정설계가 어렵다. 따라서, 여러 가지 비선형성을 가지는 문제의 결과를 비교적 정확하게 예측할 수 있는 유한요소법의 도입이 효과적인 설계의 필수 조건이다.

재 드로잉에 관한 연구가 Swift⁽²⁾에 의해 시작된 이후로 여러 연구자와 산업현장에서 다단계 성형에 관한 연구가 주로 실험적으로 수행되고 있다. 유한요소 해석에 관한 연구로는 Parsa 등⁽³⁾이 2 단계 드로잉 공정에서 정방향 드로잉 및 역방향 드

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : hhuh@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3222 FAX : (042)869-3210

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

로잉에 관하여 강소성 축대칭 유한요소해석을 수행하였으나, 실제 설계에 적용된 예는 극히 드문 실정이다.

아이어닝에 관한 연구는 실험을 중심으로 계속 수행되어 왔다. Saito 등⁽⁴⁾은 아이어닝 공정에서 편차력과 마찰력을 측정하였으며, 다양한 윤활조건에서의 성형품질의 변화를 고찰하였다. Kawai 등⁽⁵⁾은 알루미늄 재료의 아이어닝 공정에서 마찰의 영향을 밝혔다.

해석적인 연구로는 Avitzur⁽⁶⁾는 상계해법을 이용하여 공정을 해석하였으며, Sachs 등⁽⁷⁾은 하계해법을 이용하여 비가공경화 재료에 대한 아이어닝 공정을 해석하였다. Chang 과 Wang⁽⁸⁾은 초등해석(slab method)을 이용하여 해석해를 유도하고 1 단계 컵 성형에서 공정 변수들의 영향을 파악하였다. Odell⁽⁹⁾은 2 차원 연속체 요소를 이용하여 아이어닝 공정을 해석하였고, 마찰과 도입각에 대한 영향을 고찰하였다. Baillet 등⁽¹⁰⁾은 2 차원 외연적 유한요소법을 이용하여 원형컵의 아이어닝 공정에 관한 해석을 수행하였으며, 파단의 여부를 판단하였다.

현재까지 대부분의 연구는 세장비가 작고 단면의 형상이 원형 등으로 단순하며 길이가 길지 않은 제한된 다단계 공정해석이 대부분이었으며, 아이어닝이 포함된 설계의 예는 찾아보기 힘들다. 본 논문의 대상인 직사각컵 다단계 성형공정의 경우에는 각 단계마다 원형 단면에서 타원형 단면으로 점차적으로 변해가므로 정확한 금형의 모델링 및 간격의 선정, 정확한 두께분포의 예측이 필요하다. 허 훈 등은 세장비가 큰 타원형 컵의 성형 공정에 셀요소를 이용한 외연적 탄소성 유한요소 해석⁽¹¹⁾과 박막요소를 이용하고 중간 미끄럼면을 고려한 다단계 유한요소 역해석⁽¹²⁾을 도입하여 최종형상 및 변형을 분포 등을 계산하였고, 각 단계의 변형을 정성적으로 검토하였다.

박막요소나 셀요소를 이용한 디프 드로잉 성형 공정해석의 경우에는 빠른 시간 안에 변형형상과 접촉의 양상을 쉽게 구할 수 있는 장점을 가지고 있으나 아이어닝이 포함되어 있는 공정에서는 재료 두께보다 작은 크기의 금형간격에 따른 접촉력에 의한 블랭크 두께의 감소의 고려가 불가능하다. 따라서, 셀요소를 이용한 해석으로는 본 연구의 대상인 직사각컵의 변형형상을 정확하게 예측할 수 없다. 또한 다단계 성형공정에서는 블랭크가 다이 속으로 빨려 들어갈 때 편치, 컵홀더, 다이와 양면으로 접촉을 하게 되는데 이를 정확히 고려하기 위해서는 셀요소보다 연속체요소가 더욱 효과적으로 정확도를 높일 수 있다.

본 논문에서는 세장비가 7.6 에 이르는 직사각컵의 5 단계 성형공정을 탄소성 해석을 바탕으로 기본적 변형 기구를 분석하였다. 숙련자의 시행오차를 바탕으로 설계된 초기 설계의 타당성 및 문제점을 검토하였고 해석에서 얻어진 문제점을 기본으로 하여 금형의 최적 설계안을 제시하였다. 최적 설계안으로부터 유한요소해석을 수행하여 제안된 설계가 초기 설계의 문제점을 해결하였음을 검증하였다. 또한, 세장비가 7.6 인 직사각컵의 실제 시제품 생산에 성공하였다.

2. 해석 조건

해석하고자 하는 컵은 일반적으로 10 단계 이상의 공정에 의해 성형된다. 본 해석에서는 대부분의 변형이 발생하는 5 단계까지의 공정을 대상으로 하였다. 제 1, 2 단계의 해석에서는 단면이 원형인 원통형 컵 모양으로 성형하여 점차적인 변형을 부과하며, 제 3-5 단계에서는 2 개의 원호를 합쳐놓은 타원형과 유사한 형상의 단면을 가지는 컵을 성형하게 되며, 최종단계로 갈수록 타원형 단면의 형상이 점점 직사각에 가까운 형상으로 변하게 된다. 본 해석의 대상인 직사각컵의 세장비는 약 7.6 정도이다.

해석은 외연적 탄소성 유한요소 프로그램을 사용하는 상용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D⁽¹³⁾를 이용하였다. 블랭크의 모델링에는 3 차원 8 절점 연속체 요소를 사용하였다. Fig. 1 에는 초기 원형 블랭크의 유한요소 격자형상을 도시하였다. 블랭크는 1950 개의 유한요소와 3093 개의 절점을 이루어져 있으며 대칭성을 이용하여 1/4 만 모델링하였다. 소성 영역에서의 굽힘의 영향을 보다 정확히 고려하기 위하여 두께방향으로의 요소 수를 2 개로 하였다. 각 단계의 해석에 사용된 금형의 단면도를 초기설계에 대하여 Fig. 2 에 도시하였으며, 아이어닝에 의한 각 단계 벽면의 두께를 Table 1 에 도시하였다. 해석에 사용된 재료는 SPCE-SB 계의 압연강판으로 물성치는 인장시험으로부터 직접 구하였으며, 다음과 같다.

탄성계수	: 201 GPa
포와송비	: 0.3
항복곡선	: $\bar{\sigma} = 521.9(0.014834 + \bar{\epsilon}^p)^{0.23373}$ MPa
초기 항복응력	: 194.72 MPa
초기 박판두께	: t = 0.5 mm
마찰계수	: 0.1

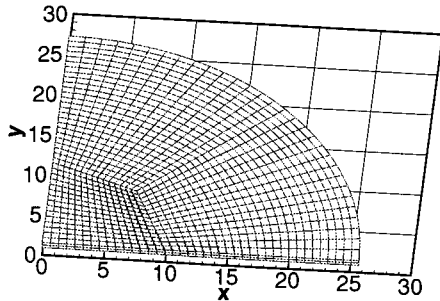


Fig. 1 Initial mesh system for the blank discretized by continuum elements

접촉에서 아이어닝에 의한 변형을 정확하게 계산하기 위하여 라그랑지안 승수기법을 사용하였다. 해석을 단순화하기 위하여 블랭크의 재료는 등방성 재료로 가정하였다. 제 1 단계 해석에서의 블랭크 홀딩력은 일정한 크기인 5 kN 을 부과하여 해석하였고, 제 2 단계부터는 다단계 공정의 특성상 블랭크 홀더를 사용하지 않았으며 대신 컵 홀더를 사용하여 해석을 수행하였다. 이상의 해석조건을 바탕으로 하여 초기 설계안에 관하여 아이어닝을 고려한 다단계 디프 드로잉 공정의 해석을 수행하였으며 변형기구상의 문제점을 파악하였다.

3. 초기설계안의 해석

제 2 장에서 기술한 해석조건을 이용하여 각 단계의 유한요소 해석을 수행하였으며, 초기설계에서 일어나는 변형기구상의 문제점을 파악하였다. 초기 설계안은 숙련자에 의하여 드로잉비가 균일하게 하도록 하는 초등이론⁽¹⁴⁾을 사용하고 여러 차례의 수정을 거쳐 구성된 것이다.

Fig. 3 에 제 1-5 단계의 완전 성형된 유한요소 격자의 형상을 도시하였다. 블랭크 재료의 이방성을 고려하지 않았기 때문에 실제와는 달리 곡면상은 거의 발생하지 않았다. Fig. 4 에는 각 성형단계의 두께 분포를 벽면의 아이어닝 기준선과 함께 도시하였다. 일반적으로 다이의 간격이 블랭크의 두께보다 큰 경우에는 플랜지쪽으로 갈수록 재료가 두꺼워짐이 발생하지만 아이어닝을 고려한 경우에는 벽면에서 두꺼워짐이 발생되지 않고 있다. 각 단계에서 상당히 작은 오차 범위 내에서 아이어닝 기준선에 잘 일치하는 두께분포를 보이고 있다.

Fig. 4 와 Fig. 5 에 컵 단면에서의 위치별 두께 분포를 도시하였다. 펀치 어깨부 B-C 에서 가장 많은 두께감소가 발생하고 있으며, 컵벽면 C-D 에서 아이어닝 기준선을 잘 만족하고 있다. Fig. 6 에 성형 후 컵 벽면의 형상을 도시하였다. 접촉조건을 제거한 후 컵의 외곽 부분이 전체적으로 바깥쪽으로 휘어지고 있음을 알 수 있으며 그 현상은 최외곽에서 가장 심하게 나타나고 있다. 플랜지에서 먼 부분의 블랭크는 다이에서의 굽힘과 펴짐 후에 아이어닝을 계속 받음으로써 직선도가 유지되지만 플랜지에 가까운 블랭크는 굽힘 후 아이어닝을 지속적으로 받지 못하고 다이에서 빠져 나오기 때문에 이러한 현상이 발생하였다. 펀치 속도에 따른 동적효과가 수치적 오차로 작용되었다고 판단된다.

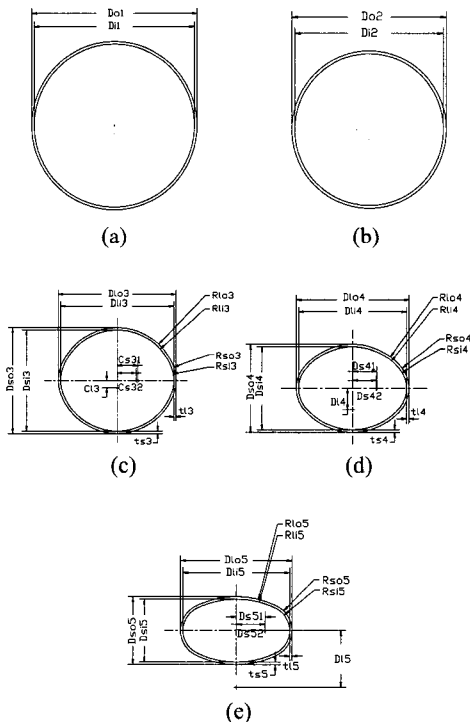


Fig. 2 Punch and die profiles at each forming stage in the initial design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5

Table 1 Desired thickness reduction for the ironing process in each stage

Thickness (mm)	stage 1	stage 2	stage 3	stage 4	stage 5
Major Axis	0.4925	0.46	0.43	0.42	0.41
Minor Axis	0.4925	0.46	0.45	0.44	0.43

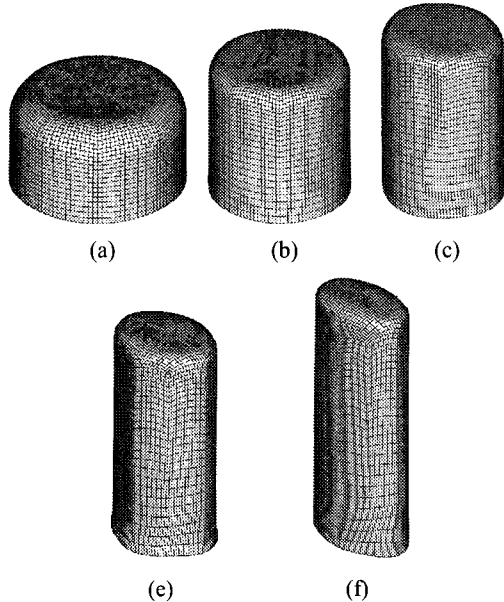


Fig. 3 Deformed shape of the blank at each forming stage with the initial design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5

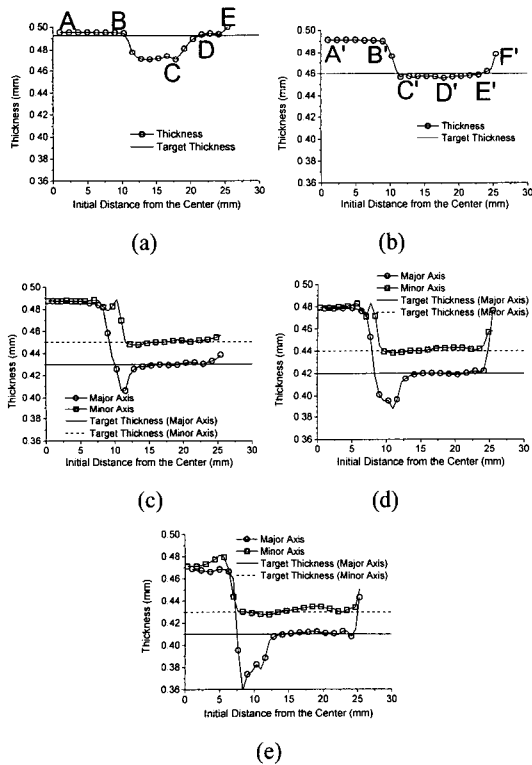


Fig. 4 Thickness distribution with the initial design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5

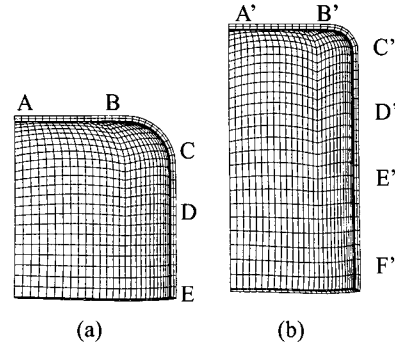


Fig. 5 The location of the thickness measuring points of Fig. 4: (a) position of measuring points at the stage 1; (b) position of measuring points at the stage 2

제 5 단계 성형후 최대의 두께감소율은 28%였으며 편치 어깨부에서 발생하였으며, 상당히 큰 두께 변형이 발생하였음을 알 수 있다. 과도한 인장의 이유는 단면 내에서 단축방향의 드로잉비가 장축 방향보다 크기 때문이다. 초기 단계에서 원형이던 단면형상이 제 3 단계부터 타원의 형상으로 변화하기 때문에 단면의 전체적인 드로잉비가 불균일하게 변화하게 된다. 이에 따라 블랭크의 변형이 불규칙하게 일어나 과도한 인장의 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 장,단축 방향의 드로잉 비를 보다 균일하게 변화시킬 수 있는 단면형상의 재설계가 요구된다.

제 3 단계 이후의 과도인장의 현상은 블랭크와 금형간의 접촉양상에서도 원인을 찾을 수 있다. Fig. 7에는 제 4 단계 공정의 성형 전의 장, 단축방향에서의 블랭크와 다이의 접촉양상을 도시하였다. 초기 접촉시의 그림에서 알 수 있듯이 장축부위의 블랭크가 다이에 접촉하지 않고 단축부위만 먼저 다이에 접촉하게 된다. 균일한 변형을 위해서는 블랭크가 다이와 홀더의 양면에 접촉하여 다이 안으로 블랭크가 빨려들어 갈 때 적절한 저항력을 받으며 다이 입사각에서 굽힘-파접 변형을 하여야 한다. 그러나, 초기단계의 설계에서는 장축 방향의 블랭크가 다이에 접촉하지 못하여 과도한 인장 변형을 하게 되어 파단의 가능성이 높아지게 되는 문제가 있다.

초기설계의 문제점은 각 성형단계의 단면에서의 드로잉 비의 불균일성과 블랭크와 다이 접촉의 문제점으로 종합될 수 있으며, 불균일한 변형기구가 주름 및 파단의 원인이 된다. 문제점의 해결을 위해서는 설계 초기단계부터 균일한 변형과 접촉을 위한 금형의 합리적인 재설계가 필수적이다.

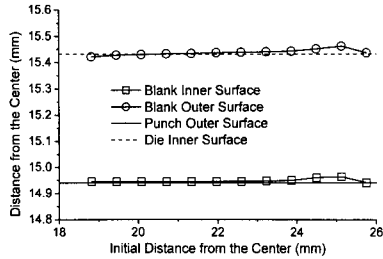


Fig. 6 Shape of the cup wall at the stage 1

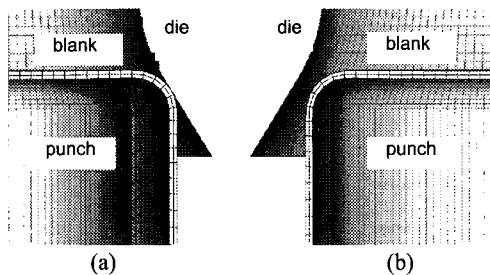


Fig. 7 Initial shape of tool positioning at the stage 4 with the initial design: (a) minor axis; (b) major axis

4. 최적 금형설계

제 3 장에서는 유한요소해석의 결과로부터 초기 설계에서 일어나는 변형기구의 문제점 및 이유를 기술하였다. 불균일한 드로잉 비와 접촉에 따른 성형불량을 방지하기 위하여 다음과 같은 설계변경기준을 바탕으로 금형형상을 재설계하였다.

(1) 단면 내에서의 불균일한 드로잉 비를 균일화하기 위하여 인접한 성형 단계간의 드로잉 비를 줄였다. 이를 위하여 각 성형단계의 다이와 펀치의 단면형상을 수정하였다.

(2) 각 성형단계의 초기에 다이와 블랭크의 균일한 접촉을 보장하기 위하여 펀치 형상을 수정하였다. 장축과 단축에서 블랭크가 다이와 동시에 접하도록 단축 방향으로 펀치의 형상을 타원형으로 설계하였다. 이 과정을 Fig. 8에 도시하였다.

(3) 타원형 및 직사각형 단면의 형상을 변형 집중이 없도록 가능한 부드러운 곡선의 형태로 구성하였다. 본 논문에서는 2 개의 원호로 이루어진 타원형 단면의 외곽선을 3 개의 원호로 이루어진 단면으로 수정하였다. 제 4 단계에서의 수정의 예를 Fig. 9에 도시하였다.

(4) Fig. 2 에 도시한 바와 같이 초기설계의 단면은 직사각형보다 타원형에 가깝게 설계되어 있다.

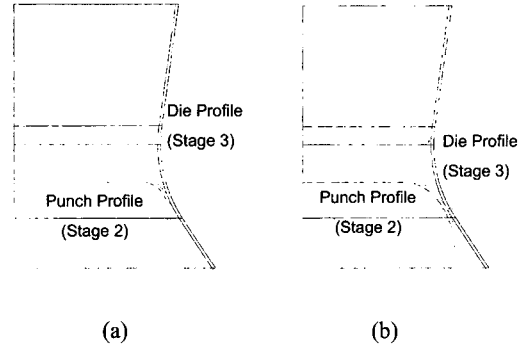


Fig. 8 Modifying procedure for the shoulder part of the punch at the stage 2: (a) major axis; (b) minor axis

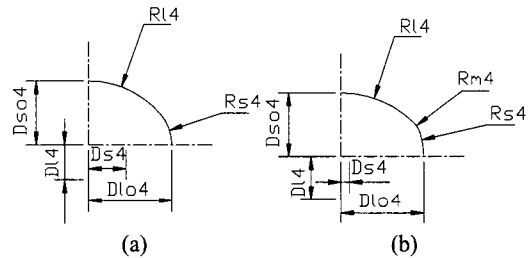


Fig. 9 Modification procedure for the cross section of the punch head at the stage 4 (a quarter model): (a) initial design; (b) modified design

재설계에서는 직사각엽의 형상을 제 3, 4 단계에서 구형하도록 하였다.

(5) 다단계 성형에서 쉽게 나타나는 쇼크마크 (Shock Mark)를 방지하기 위하여 다이 설계 시에 도입각의 크기를 재설계하였다.

이상의 설계 변경안을 바탕으로 하여 재설계한 금형의 3 차원 형상을 초기 설계안의 금형형상과 함께 Fig. 10 에 도시하였다. 변경설계의 경우가 보다 직사각에 가까운 단면을 가지게 되며, 초기설계에 비하여 단축방향으로 많이 깎여 있는 금형의 형상을 가진다.

설계변경의 영향을 확인하기 위하여 변경된 금형의 형상을 초기조건으로 하여 유한요소해석을 다시 수행하였다. 금형형상을 제외한 해석조건은 2 장과 동일하다. Fig. 11 에는 제 1-5 단계에서의 최종 변형형상을 실험결과와 함께 도시하였다. 점진적으로 직사각엽 형상으로 성형 되어 가고 있음을 알 수 있으며 실험의 경향과 잘 일치함을 알 수 있다. 제 4 단계의 단축 어깨부에 쇼크마크가 발생하고 있음을 알 수 있으며, 이것은 수정 공정 시에 펀치의 곡률을 완만하게 하여 제거할 수 있었다.

Fig. 12 에는 각 성형단계의 두께 분포를 아이어닝 기준선과 함께 실험 결과와 비교하였다. 각 단계에서 상당히 작은 오차 범위내에서 아이어닝 기준선에 잘 일치하는 두께분포를 보이고 있다. 또한, 실험결과와도 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 실험결과에서는 벽면의 아이어닝 기준선에서 0.01~0.02 mm 정도의 오차를 보이고 있으며, 이는 금형의 중심맞춤이 완전하게 이루어지지 않았음을 의미한다. 또한, 금형 연마 등의 수정 공정에서 금형형상이 약간 변한 것도 두께분포에 영향을 미쳤다.

제 3,4 단계 성형 후에 초기설계와는 달리 단축 방향으로 곡률을 크게 한 부분에서 두께가 증가하고 있다. 이는 장축보다 단축부에서 큰 곡률의 영향으로 충분한 굽힘 변형이 일어나지 않았음을 의미하며, 쇼크마크가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 제 5 단계에서는 단축부위에서 두께가 다시 얇아지는 현상을 보이고 있어 직사각형을 성형하는데 문제가 없음을 보이고 있으며, 쇼크마크의 크기가 줄어들었음을 의미한다.

Fig. 12(e)에서 알 수 있듯이 제 5 단계 성형 후 최대 두께 감소율이 23% 정도로 초기설계에 비하여 과도인장이 완화되었으며, 변형이 집중된 곡률부의 전반적인 변형이 완화되었다. 초기설계의 경우 제 5 단계 성형 후에 직사각컵이 아닌 타원형의 형태로 이루어져 있어, 마지막 공정에서 직사각형상으로 단면의 형상을 수정을 하여야 하며, 추가적인 변형률의 발생이 예측된다.

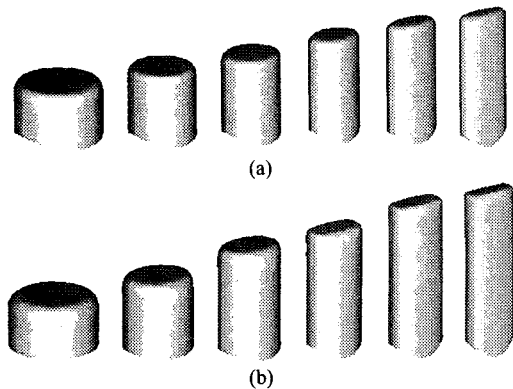


Fig. 10 Intermediate punch shapes in each forming stage: (a) initial design; (b) modified design

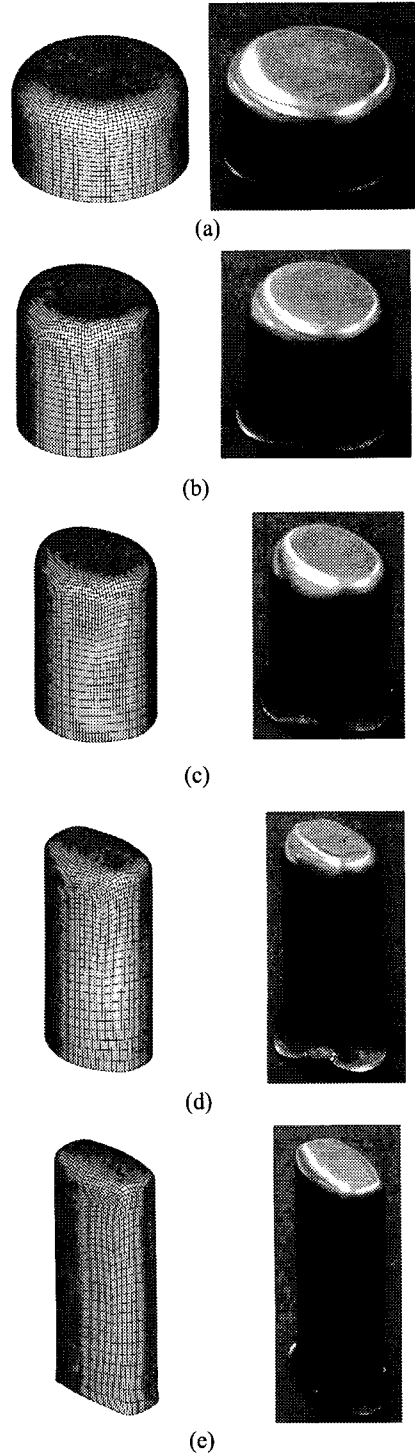


Fig. 11 Deformed shapes of the blank at each forming stage with the modified design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5

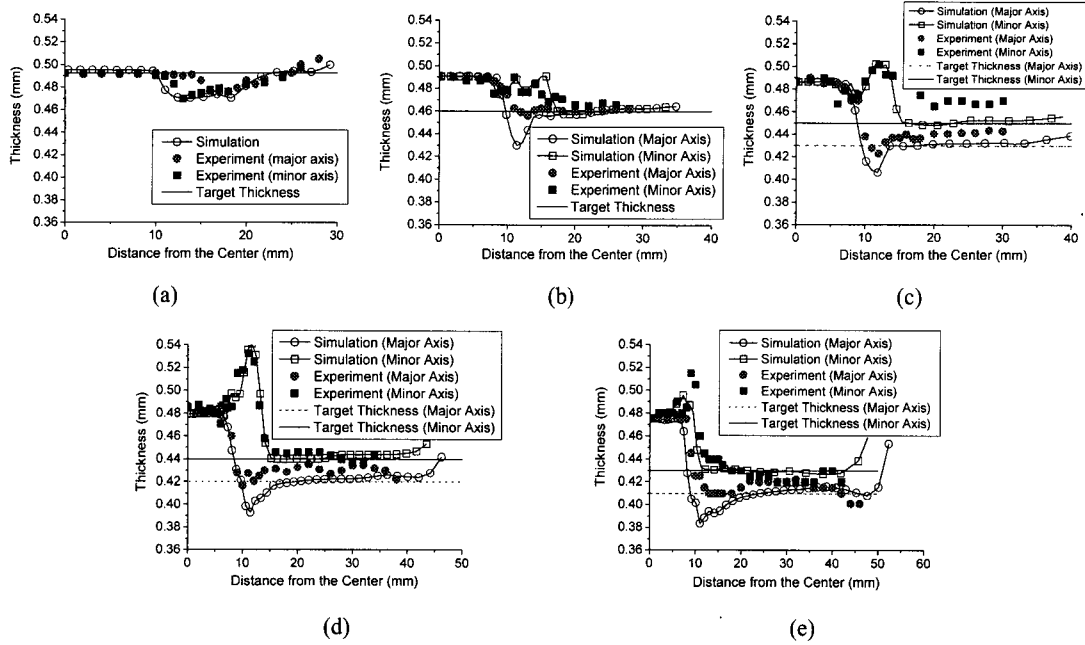


Fig. 12 Thickness distribution in each forming stage with the modified design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5

5. 결론

본 논문에서는 세장비가 높은 직사각컵의 다단계 아이어닝 공정의 설계확인 및 최적 금형설계에 관한 연구를 연속체 요소를 사용한 외연적 탄소성 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 해석에 의하여 얻어진 결과로부터 컵의 벽면에서 두께감소가 아이어닝 기준을 큰 오차 없이 만족함을 확인하였다.

현장에서 사용하는 초기 설계의 금형을 이용하여 유한요소 해석을 수행하고 해석의 결과로부터 성형 중에 일어나는 변형기구의 문제점을 파악하였다. 실제공정 시에 발생할 수 있는 주름과 파단의 발생의 원인은 각 단계 단면에서의 드로잉 비와 접촉조건이 불균일성이었다. 이러한 문제점을 제거하기 위하여 설계변경의 기준이 제시되었으며 제시된 기준에 따라 금형형상을 최적설계하였다.

제안된 설계안으로 해석을 수행하여 초기설계에 비해 접촉양상이 향상되었음을 확인하였으며, 두께감소가 초기설계안보다 현저하게 줄어들어 파단의 가능성이 감소하였음을 확인하였다. 또한, 수정 설계안에 따라 제작한 시제품이 유한요소해석에서 얻은 결과와 변형형상과 두께 변형을 분포에서 유사한 결과를 얻었으며, 파단없이 우수한 기계적 성질의 직사각컵을 얻을 수 있었다.

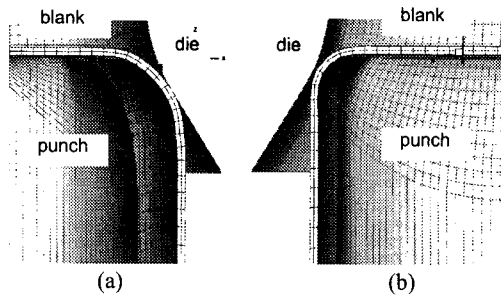


Fig. 13 Initial shape of tool positioning at the stage 4 with the modified design: (a) minor axis; (b) major axis

따라서, 추가적인 변형률이 발생할 것으로 판단되어 더 심한 국부적인 인장이 발생될 것으로 예측된다. 이런 점을 고려한다면 수정설계의 경우가 초기설계에 비해서 향상된 결과를 보이고 있다고 판단되었다.

Fig. 13 에는 제 3 단계 성형 전의 장, 단축 방향에서의 블랭크와 다이의 접촉양상을 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 블랭크의 장, 단축 부위가 다이에 동시에 접촉하여 보다 균일한 접촉을 하고 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 실시한 산업기반기술 개발사업에 의하여 연구한 결과 중 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 허 훈, 2000, "디프 드로잉 - 소형 2 차전지 사각케이스의 성형," 월간 LG 생산기술, 제 3 권, 제 2 호, pp. 16~18.
- (2) Chung, S. Y. and Swift, H. W., 1952, "An Experimental Investigation of Redrawing of Cylindrical Cups," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 1B, pp. 437~447.
- (3) Parsa, M. H., Yamaguchi, K., Takakura, S. 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.
- (4) Saito, M., Saiki, H. and Kawai, N., 1989, "Experimental Analysis of Ironing of Thin Metal Cups," *Trans. ASME, J. Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 56~63.
- (5) Kawai, N., Dohda, K., Saito, M., Hayashi, N. and Wang, Z., 1992, "Friction Behavior in the Cup Ironing Process of Aluminum Sheets," *Trans. ASME, J. Engineering for Industry*, Vol. 11, pp. 175~180.
- (6) Avitzur, B., 1983, *Handbook of Metal Forming Process*, John Wiley & Sons.
- (7) Tirosh, J., Iddan, D. and Silviano, M., 1992, "Hydrostatic Ironing - Analysis and Experiments," *Trans. ASME, J. Engineering for Industry*, Vol. 114, pp. 237~243.
- (8) Chang, D. and Wang, J. E., 1997, "Influence of Process Parameters on the Ironing of Deep-drawn Cups," *Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Engrg.*, Vol. 119, pp. 699~705.
- (9) Odell, E. I., 1978, "A Study of Wall Ironing by the Finite Element Technique," *Trans. ASME, J. Engineering for Industry*, Vol. 100, pp. 31~36.
- (10) Baillet, L., Brunet, M. and Berthier, Y., 1996, "Experimental and Numerical Dynamic Modeling of Ironing Process," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 60, pp. 677~684.
- (11) 김세호, 김승호, 허 훈, 2000, "외연적 유한요소법을 이용한 세장비가 큰 타원형컵 성형공정의 다단계 해석," 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 3 호, pp. 313~319.
- (12) 김승호, 김세호, 허 훈, 2000, "세장비가 큰 타원형 컵 성형공정의 다단계 유한요소 역해석," 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 3 호, pp. 304~312.
- (13) Hallquist, J. O., 1997, *LS-DYNA3D User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation.
- (14) 전기찬, 1993, *박판금속의 성형 - 이론과 실제 -* 반도출판사.