

유한요소해석을 이용한 세장비가 큰 직사각컵 다단계 성형공정의 금형설계 - 아이어닝 해석과 실험적 검증

김세호* · 김승호* · 허 훈*

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

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

Abstract

Examination of the die design is carried out for a multi-stage rectangular cup drawing process with the large aspect ratio with the aid of the finite element analysis. The analysis considers the deep drawing process with the ironing process for the thickness control in the cup wall. Simulation is performed to investigate the deformation mechanism in the initial design and the modified design. The analysis clarifies that the irregular cross section and the irregular contact condition produces unfavorable deformation. The analysis results show that the modified design improves the quality of a deep-drawn product with the low possibility of failure. The analysis result also shows good agreement with the experimental one.

Key Words : Multi-stage Ironing Process, Rectangular Cup, Finite Element Analysis

1. 서 론

세장비가 직사각컵은 산업현장에서 건전지 케이스와 반도체, 수정 진동자 등의 초정밀 부품으로 널리 사용되고 있다. 이러한 컵은 제품의 강도와 형상 등에 관한 수요자의 복잡한 요구에 따라서 아이어닝 공정이 포함된 다단계 디프 드로잉 공정에 의하여 생산되고 있다. 아이어닝 공정을 사용하면 컵의 높이와 벽면 두께를 사용자

의 요구에 따라 조절할 수 있으며, 재료의 양을 절약할 수 있으므로 일반적인 컵이나 캔 성형공정에도 많이 사용된다.

다단계 디프드로잉 공정에서 블랭크 재료는 각 성형단계마다 1단계 드로잉 공정보다 부가적인 복잡한 변형을 하게 된다. 일반적으로 1단계 성형공정 이후부터 각 단계별로 변화하는 드로잉비에 따라 굽힘, 퍼짐, 인장, 접축에 의한 아이어닝, 압축과 전단 등의 복잡한 변형기구

* 한국과학기술원 기계공학과

를 거쳐야 한다. 따라서, 최종단계에서의 형상 및 기계적 특성을 쉽게 예측하기는 매우 어렵다.

현재까지의 연구에서는 주로 축대칭 형상의 다단계 드로잉 성형공정이나 아이어닝 공정의 설계가 주로 이루어졌으며, 세장비가 매우 큰 직사각컵에 관한 성형해석이나 컴퓨터 원용 설계가 이루어진 예가 거의 없다.

김세호 등⁽¹⁾은 셀요소를 이용한 외연적 탄소성 유한요소해석을 도입하여 최종형상 및 변형률 분포 등을 계산하였다. 유한요소해석결과를 바탕으로 금형설계안을 제시하였고, 변경된 설계안이 보다 우수한 품질의 제품을 얻을 수 있음을 유한요소해석을 이용하여 검증하였다. 셀요소를 이용한 디프 드로잉 성형공정해석의 경우에는 비교적 빠른 시간안에 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. 또한 다단계 성형공정에서는 블랭크가 다이속으로 빨려 들어갈 때 펀치, 킵홀더, 다이와 양면으로 접촉을 하게 되는데 이를 정확히 고려하기 위해서는 셀요소보다 연속체요소를 사용하여야 한다.

본 논문에서는 3차원 연속체 요소를 이용한 외연적 탄소성 유한요소해석을 수행하여 직사각컵의 5단계 성형공정을 해석하였다. 김세호 등⁽¹⁾의 논문에 기술된 다단계 성형공정을 위한 초기설계와 변경설계의 경우를 해석하며, 변경설계의 타당성을 입증하였다. 수정 설계안으로부터 유한요소해석을 수행하여 제안된 설계가 기존 설계의 문제점을 해결하였음을 확인하였으며, 실험결과와 비교, 검증하였다.

2. 해석 조건

해석하고자 하는 직사각형 단면을 가지는 길이가 긴 컵은 일반적으로 5단계의 공정에 의해 성형된다. 제1, 2단계의 해석에서는 단면이 원형인 원통형 컵 모양으로 성형하여 점차적인 변형을 부과하며, 제3-5단계에서는 2개의 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. 본 논문에서는 5단계의 해석을 실제 공정과 동일한 조건으로 해석하였다.

본 논문에서는 사용된 요소와 접촉기법을 제외하고 김세호 등⁽¹⁾의 연구와 동일한 조건으로 해석을 수행하였다. 해석은 상용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D⁽²⁾를 이

용하였다. 블랭크의 모델링에는 선택적 저감적분을 사용한 3차원 8절점 연속체 요소를 사용하였다.

각 단계의 해석에 사용된 펀치의 3차원 형상을 초기설계와 변경설계에 대하여 Fig. 1에 도시하였으며, 아이어닝에 의한 두께감소량을 Table 1에 도시하였다.

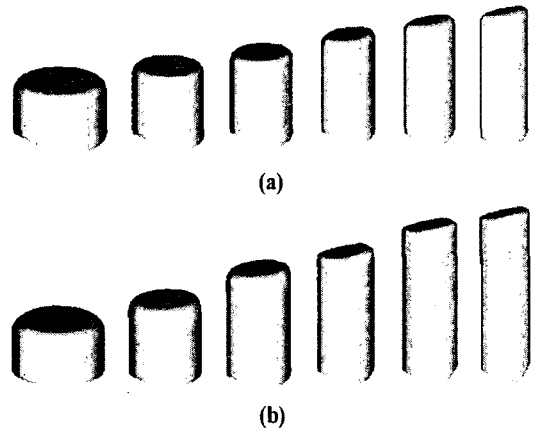


Fig. 1 Intermediate punch shapes in each forming stage: (a) initial design; (b) modified design

Table 1 Desired wall thickness 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

해석을 단순화하기 위하여 블랭크의 재료는 등방성 탄소성 재료로 가정하였다. 접촉에서 아이어닝을 정확하게 고려하기 위하여 벌칙기법 대신에 라그랑지안 승수기법을 사용하였다. 이상의 해석조건을 바탕으로 하여 아이어닝을 고려한 다단계 디프 드로잉 공정의 해석을 수행하였으며 기존설계에 비하여 수정설계의 경우 개선점을 파악하였다.

3. 해석 결과 및 검증

3.1 초기 설계안의 해석

Fig. 2에 제1-5단계의 완전성형된 유한요소 격자의 형상을 도시하였다. 블랭크 재료의 이방성을 고려하지 않았기 때문에 귀현상은 거의 발생하지 않고 있으며, 주름이 전혀 없는 제품을 얻을 수 있었다.

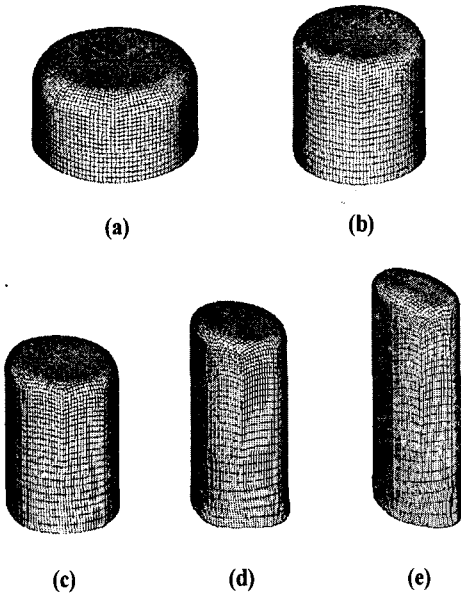


Fig. 2 Deformed shape of the blank at each forming stage with the initial design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5

Fig. 3에 제1,3,5 단계의 두께 분포를 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 범위내에서 아이어닝 기준선에 잘 일치하는 두께분포를 보이고 있다. 제5단계 성형후 최대의 두께 감소율은 28%였다.

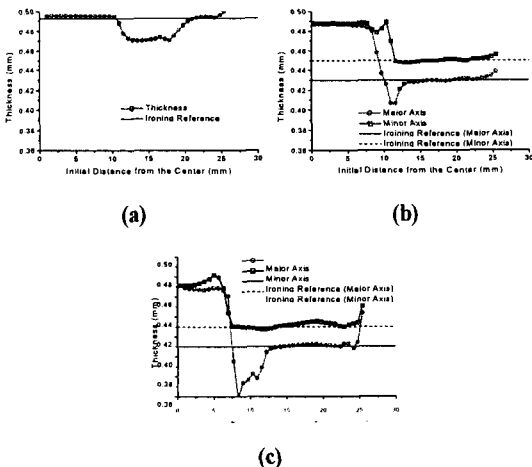


Fig. 3 Thickness distribution with the initial design: (a) stage 1; (b) stage 3; (c) stage 5

이러한 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 과도한 인장의 문제가 발생하게 된다. 제3단계 이후의 과도인장의 현상은 성형중의 블랭크와 금형간의 접촉양상에서도 원인을 찾을 수 있다. Fig. 4에는 제3단계 공정의 성형전의 장, 단축방향에서의 블랭크와 다이의 접촉양상을 도시하였다. 초기 접촉시의 그림에서 알 수 있듯이 장축부위의 블랭크가 다이에 접촉하지 않고 단축부위만 먼저 다이에 접촉하게 된다. 이러한 문제점은 셀요소를 이용한 해석⁽¹⁾에서도 밝혀진 바 있다.

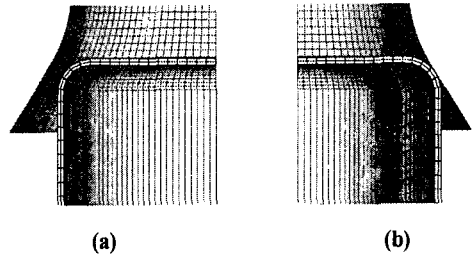


Fig. 4 Initial shape of the tool positioning at the stage 3 with the initial design: (a) major axis; (b) minor axis

3.2 변경 설계안의 해석

Fig. 5에 제1-5단계의 완전성형된 유한요소 격자의 형상을 도시하였다. Fig. 6에는 제 1,3,5단계의 두께 분포를 아이어닝 기준선과 함께 실험결과와 비교하였다. 각 단계에서 상당히 작은 오차 범위내에서 아이어닝 기준선에 잘 일치하는 두께분포를 보이고 있다. 또한, 실험결과와도 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 실험결과에서는 아이어닝 기준선에서 0.01 mm 정도의 오차를 보이고 있음을 알 수 있으며, 이는 금형에서 중심맞춤이 이루어지지 않았음을 의미한다. 또한, 금형 연마 등의 tryout공정에서 금형의 형상이 약간 변한 것도 두께분포에 영향을 미쳤다.

초기설계와는 달리 단축방향으로 곡률을 크게 한 부분에서 제3단계 성형후 두께가 증가하고 있다. 이는 장축보다 단축부위에서 큰 곡률의 영향으로 충분한 굽힘 변형이 일어나지 않았음을 의미한다. 그러나, 제5단계에서는 단축부위에서 두께가 다시 얇아지는 현상을 보이고 있어 직사각형을 형성하는데 문제가 없음을 보이고 있다.

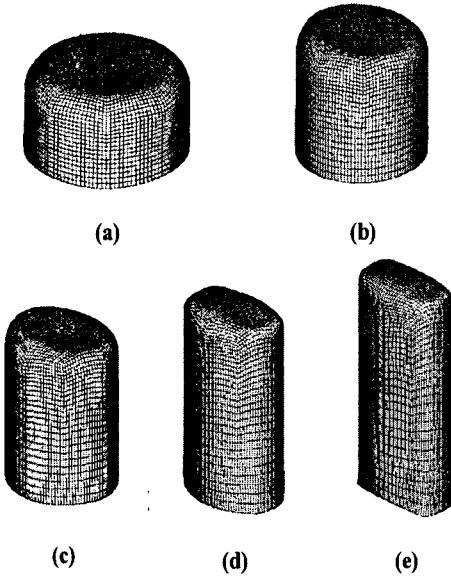


Fig. 5 Deformed shape of the blank at each forming stage with the modified design: (a) stage 1; (b) stage 2; (c) stage 3; (d) stage 4; (e) stage 5

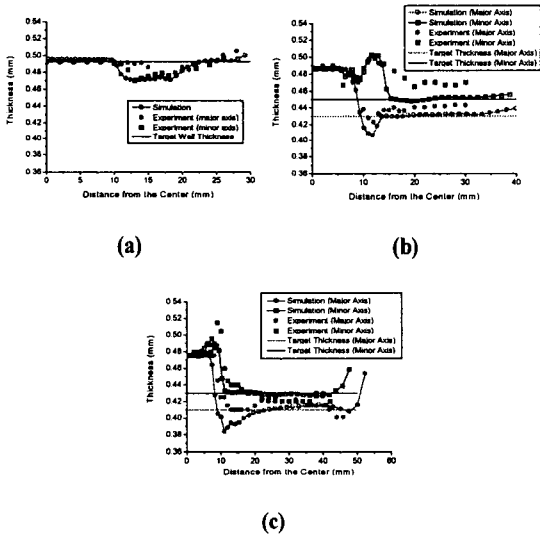


Fig. 6 Thickness distribution with the modified design: (a) stage 1; (b) stage 3; (c) stage 5

5단계 성형후 최대 두께 변형률이 23% 정도로 초기설계에 비하여 과도인장이 완화되었으며, 변형이 집중된 곡률부의 전반적인 변형이 완화되었다. 초기설계의 경우가 제5단계 성형 후에 직사각형이 아닌 타원형의 형태로 이루어져 있어, 마지막 공정에서 직사각형상으로 단면의 형상을 수정을 하여야 한다. 따라서, 추가적인 변형률이 발생할 것으로 판단되어 더 심한 국부적인 인장이 발

생될 것으로 예측된다. 이런 점을 고려한다면 수정설계의 경우가 기존설계에 비해서 향상된 결과를 보이고 있다고 판단되었다.

Fig. 7에 제3단계 성형전의 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.

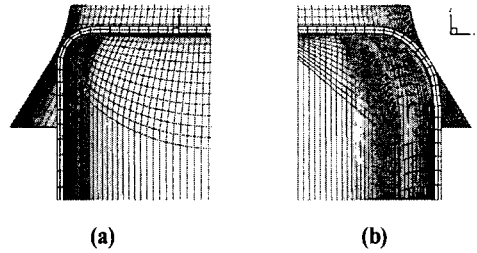


Fig. 7 Initial shape of the tool positioning at the stage 3 with the modified design: (a) major axis; (b) minor axis

4. 결론

본 논문에서는 세장비가 높은 직사각형의 다단계 아이어닝 공정의 설계안의 검증을 연속체 요소를 사용한 외연적 탄소성 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 공정의 초기설계안과 변경설계안에 대해 해석을 수행하여 초기설계안의 문제점을 확인하였다. 초기설계안의 해석으로부터 과도한 두께감소현상이 발생하였으며 이는 불균일한 드로잉비와 접촉양상에 따라 발생한 결과이다. 변경설계안의 해석으로부터 초기설계에 비해 접촉양상이 향상되었음을 확인하였으며, 두께감소가 초기설계안보다 현저하게 줄어들어 파단의 가능성이 감소하였음을 확인하였다. 변경된 설계에 따라 생산된 검과 해석결과를 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 경향을 얻을 수 있었으며, 유한요소해석만으로 성공적인 설계를 수행하였다.

참고 문헌

- (1) 김세호, 김승호, 허 훈, 2001, "유한요소해석을 이용한 세장비가 큰 직사각형 다단계 성형공정의 금형설계", 한국소성가공학회지, 제10권, 제2호, pp. 147~150.
- (2) Hallquist, J. O., 1998, LS-DYNA3D Users Manual, Livermore Software Technology Corporation.