

세장비가 큰 직사각컵 다단계 성형공정의 합리적 금형설계 변경

김세호* · 김승호* · 허 훈*

Rational Design Modification in a Multi-stage Rectangular Cup Drawing Process with the Large Aspect Ratio

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

Abstract

Finite element analysis of a multi-stage deep drawing process is carried out for the die design of rectangular cup drawing with the large aspect ratio. Simulation is performed for thorough investigation of unfavorable mechanisms in the initial 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. In this paper, the modification guideline is proposed in the design of the process and the tool shape. The analysis result confirms that the modified design not only improves the quality of a deep-drawn product but also reduces the possibility of failure.

Key Words : Rational Design Modification, Multi-stage Rectangular Cup Drawing Process

1. 서 론

세장비가 직사각컵은 산업현장에서 건전지 케이스와 반도체, 수정 진동자 등의 초정밀 부품으로 널리 사용되고 있다⁽¹⁾. 정밀한 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

일반적으로 다단계 디프 드로잉 공정에 의하여 생산되고 있다. 다단계 디프드로잉 공정에서 블랭크 재료는 각 성형 단계마다 일반적인 1단계 드로잉 공정보다 추가적인 복잡한 변형을 하게 된다. 일반적으로 1단계 이후부터 각 단계별로 다른 드로잉비에 따라 굽힘, 찌짐, 인장, 압축과 전단 등의 복잡한 변형기구를 거쳐야 한다. 따라서, 최종단계에서의 형상 및 기계적 특성을 쉽게 예측하기는 매우 어렵다. 특히, 직사각컵을 만들기 위한 공정중에 사

* 한국과학기술원 기계공학과

용되는 타원형 중간단계 컵의 경우에는 다단계 성형과정 중에 금형형상의 지속적인 변화에 따른 변형양상 및 접촉의 변화에 의하여 제품의 파단 및 주름 등의 불량일 쉽게 발생할 수 있으므로, 공정설계가 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 유한요소법의 도입이 효과적인 설계의 필수조건이다.

1940년대에 재드로잉에 관한 연구가 시작된 이후로 많은 연구가 실험과 유한요소해석에 관하여 현재에도 진행되고 있으나, 대부분의 연구는 세장비가 작고 단면의 형상이 원형 등으로 단순하며 길이가 길지 않은 제한된 다단계 공정해석이 대부분이었다. 그러나 본 논문의 대상인 직사각컵 다단계 성형공정의 경우에는 각 단계마다 원형단면에서 타원형 단면으로 점차적으로 변화하므로 정확한 금형의 모델링 및 간격의 선정, 정확한 두께분포의 예측이 필요하다. Huh 등은 세장비가 큰 타원형 컵의 성형공정에 탄소성 유한요소해석⁽²⁾과 역해석⁽³⁾을 도입하여 최종형상 및 기계적 성질 등을 계산하였고, 각 단계의 변형을 정성적으로 검토하였다.

본 논문에서는 Kim 등⁽²⁾의 논문의 탄소성 유한요소해석을 바탕으로 직사각컵의 6단계 성형공정의 초기 설계의 타당성 및 문제점을 검토하였고 해석에서 얻어진 문제점을 기본으로 하여 수정 설계안을 제시하였다. 수정 설계안으로부터 유한요소해석을 수행하여 제안된 설계가 기존 설계의 문제점을 해결하였음을 검증하였다.

2. 해석 조건

해석하고자 하는 직사각 단면을 가지는 길이가 긴 컵은 일반적으로 6단계의 공정에 의하여 성형된다. 제 1, 2 단계의 해석에서는 원통형 컵 모양으로 성형하여 점차적인 변형을 부과하며, 제 3-6단계에서는 2개의 원호를 합쳐놓은 타원형과 유사한 형상의 단면을 가지는 컵을 성형하게 된다. 마지막 6단계의 형상은 거의 직사각 단면을 가지게 된다. 본 해석의 대상인 직사각컵의 세장비는 약 7.6 정도이다. 본 논문에서는 6단계의 해석을 실제의 성형공정과 동일한 조건으로 해석하였다.

본 논문에서는 Kim 등⁽²⁾의 해석과 동일한 조건으로 해석을 수행하였다. 해석은 외연적 탄소성 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D⁽⁴⁾를 이용하였고, 블랭크 재료의

모델링을 위하여 BWC 셀요소⁽⁵⁾를 이용하였다.

해석에 사용된 재료는 SPCE-SB계의 압연강판으로 물성치는 인장시험⁽²⁾으로부터 직접 구하였으며 다음과 같다.

탄성계수 : 201 GPa

포와송비 : 0.3

항복곡선: $\bar{\sigma} = 521.86(0.014834 + \bar{\epsilon}^n)^{0.23373}$ MPa

이방성 계수 : $r_0=2.103, r_{45}=1.246, r_{90}=1.872$

초기 박판 두께 : $t = 0.5$ mm

쿨롱 마찰계수 : 0.10

컵 단면의 단축방향을 블랭크의 압연방향과 일치시켜 해석을 수행하였다. 제 1단계 해석에서의 블랭크 홀딩력은 5 kN으로 부과하였으며, 제 2단계 해석부터는 블랭크 홀더 대신 컵홀더를 사용하여 해석을 수행하였다.

3. 초기 설계안의 해석 결과

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

Fig. 1에 제 3-5단계의 완전성형된 유한요소 격자의 형상을 도시하였다. 제 4단계 이후부터 단축방향으로는 심한 주름발생이 관찰되고, 장축방향으로는 심한 인장변형이 발생되고 있다. 제 5단계 이후부터는 단축부근의 유한요소가 주름발생에 의해 심하게 변형되어 해석이 진행되지 못하였다. 이러한 주름발생 및 과도한 인장 등의 문제점의 이유는 단면내에서 단축방향의 드로잉비가 장축방향보다 크기 때문이다. 또한, 초기 단계에서 원형이던 단면형상이 제 3단계부터 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. 2에 제 3, 4단계의 두께 변형률 분포를 도시하였다. 위에서 기술한 바와 같이 장축방향으로는 두께가 얇아지는 현상을 보이고 있고, 단축방향으로는 두께가 두꺼워지는 현상을 보이고 있다. 이러한 문제점들로 인하여 성형이 계속될수록 단축방향으로는 과도한 주름의 발생이 예측되고, 장축방향으로는 파단이 예측된다.

3-4단계의 주름 및 과도인장의 현상은 성형중의 블랭크와 금형간의 접촉양상에서도 원인을 찾을 수 있다.

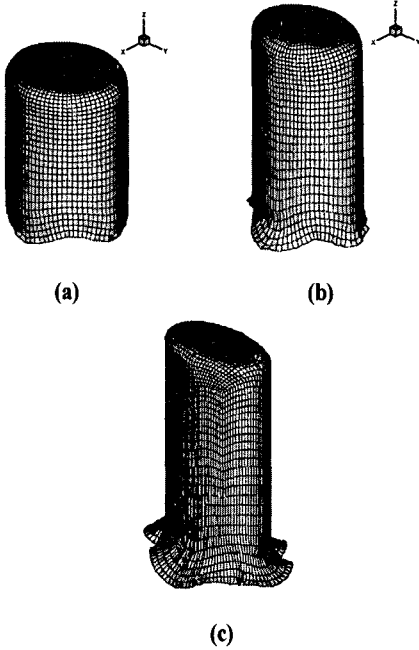


Fig. 1 Deformed shape of the blank at each forming stage with the initial design: (a) stage 3; (b) stage 4; (c) stage 5

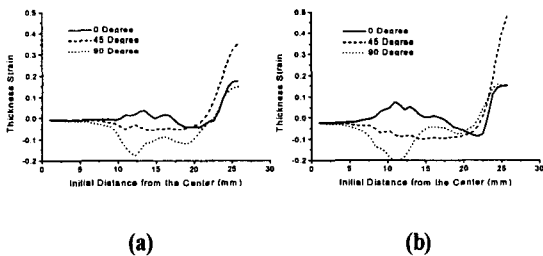


Fig. 2 Thickness strain distribution with the initial design: (a) stage 3; (b) stage 4

Fig. 3에는 제 3단계 공정의 성형전의 블랭크와 다이의 접촉양상을 도시하였다. 초기 접촉에서 알 수 있듯이 장축부위의 블랭크가 다이에 접촉하지 않고, 단축부위만 다이에 접촉함으로써 단면전체가 균일하게 금형에 접촉되지 않아 블랭크가 다이속으로 빨려 들어갈 때 불균일한 접촉에 의한 불균일한 변형이 일어나게 된다. 이에 따라 장축방향으로 펀치 어깨부에서 과도한 접촉에 따른 인장이 심하게 발생한다. 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.

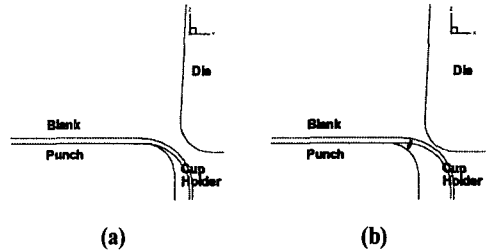


Fig. 3 Initial shape of the tool positioning at the stage 3 with the initial design: (a) major axis; (b) minor axis

4. 설계 변경

3장에서는 유한요소해석 결과로부터 초기설계에서 일어나는 변형기구의 현상적인 문제점 및 이유를 기술하였다. 불균일한 드로잉 비와 접촉에 따른 성형불량을 방지하기 위하여 설계변경이 다음과 같은 설계변경기준이 필요하다.

- (1) 단면내에서의 불균일한 드로잉 비를 균일화하기 위해서는 인접한 성형단계간의 드로잉 비를 줄여야 한다.
- (2) 각 단계의 초기에 다이와 블랭크의 균일한 접촉을 보장하기 위하여 펀치 형상을 수정하여야 한다.
- (3) 타원형 및 직사각 단면의 형상을 변형 집중이 없도록 가능한 부드러운 곡선의 형태로 만들어야 한다.

(2)에서 제시한 펀치형상의 수정은 다이와 블랭크가 장, 단축에서 동시에 접하도록 수정하였다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 초기설계에서 장축 방향으로 접촉이 일어나지 않던 것을 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.

설계변경의 영향을 확인하기 위하여 변경된 금형의 형상을 초기조건으로 하여 유한요소해석을 다시 수행하였다. 금형형상을 제외한 해석조건은 2장과 동일하다. Fig. 4에는 제 4-6 단계에서의 최종 변형형상을 도시하였다. 점진적으로 직사각형상으로 성형되어 가고 있음을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 단축부에서의 주름발생이 여전히 관찰되고 있으나, 이러한 문제점은 아이어닝 공

정을 도입할 경우 방지할 수 있다. Fig. 5에는 제 3,4 단계의 두께 변형률 분포를 도시하였다. 초기설계에서 장축부의 두께가 과도하게 얇아지는 현상이 수정설계에서 현저하게 감소하였음을 알 수 있다.

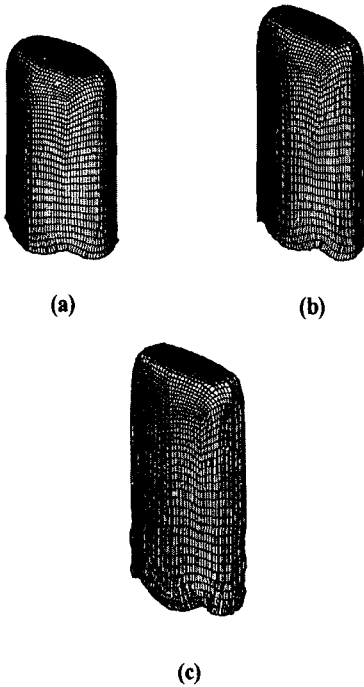


Fig. 4 Deformed shape of the blank at each forming stage with the modified design: (a) stage 4; (b) stage 5; (c) stage 6

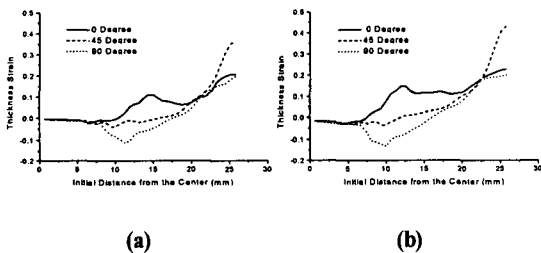


Fig. 5 Thickness strain distribution with the modified design: (a) stage 3; (b) stage 4

Fig. 6에 수정설계에서의 제 3단계 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.

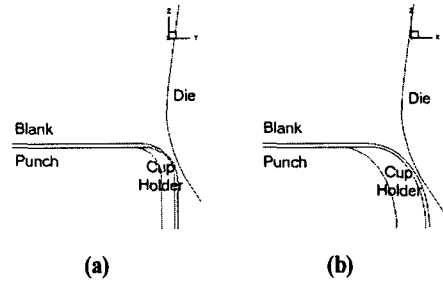


Fig. 6 Initial shape of the tool positioning at the stage 3 with the modified design: (a) major axis; (b) minor axis

5. 결론

본 논문에서는 세장비가 높은 직사각컵의 다단계 성형공정의 금형 형상 변경을 유한요소 해석을 이용하여 수행하였다. 초기 설계의 조건을 이용하여 유한요소 해석을 수행하고 해석의 결과로부터 변형기구의 문제점을 파악하였다. 실제공정시에 발생할 수 있는 주름과 파단의 발생의 원인은 각 단계 단면에서의 드로잉 비와 접촉조건에 불균일성이었다. 이러한 문제점을 제거하기 위하여 설계변경의 기준이 제시되었으며, 제시된 기준에 따라 금형형상을 재설계하였다. 재설계된 금형으로 유한요소 해석을 다시 수행하였으며 해석결과로부터 변형 및 접촉의 균일성이 확보되었으며 파단 및 주름의 가능성이 감소하였음을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) 허 훈, 2000, "디프 드로잉 - 소형 2차전지 사각케이스의 성형", LG 생산기술, 2월호, pp. 16~18.
- (2) 김세호, 김승호, 허훈, 2000, "외연적 유한요소법을 이용한 세장비가 큰 타원형 컵 성형공정의 다단계 해석", 한국소성학회지, 제9권 제3호, pp. 313~319.
- (3) Huh, H., Kim, S. H. and Kim, S. H., "Multi-stage Inverse Analysis of Elliptic Cup Drawing with the Large Aspect Ratio", proc. Metal Forming 2000, pp. 107~114.
- (4) Hallquist, J. O., 1998, LS-DYNA3D Users Manual, Livermore Software Technology Corporation.
- (5) 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.