

변형이력을 고려한 세장비가 큰 직사각컵 성형공정의 다단계 유한요소 역해석

김승호* · 김세호* · 허 훈*

Multi-stage Inverse Finite Element Analysis of Multi-stage Rectangular Cup Drawing Processes with Large Aspect Ratio Considering Deformation History

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

Abstract

An inverse finite element approach is employed for more capability to design the optimum blank shape from the desired final shape with small amount of computation time and effort. For multi-stage deep-drawing processes, numerical analysis is extremely difficult to carry out due to its complexities and convergence problem, as well as tremendous computation time. In this paper, multi-stage finite element inverse analysis is applied to multi-stage rectangular cup drawing processes to calculate intermediate blank shapes and strain distributions in each stages. Deformation history of the previous stage is considered in the computation. Finite element patches are used to describe arbitrary intermediate sliding constraint surfaces.

Key Words : Rectangular Cup Drawing, Multi-stage Inverse Finite Element Analysis, Deformation History

1. 서론

박판금속 성형기구는 다양한 공정변수들에 의하여 매우 복잡한 영향을 받기 때문에 공정변수에 대한 최적 조건은 경험과 시행착오 등에 의하여 결정되고 있는 실정이다. 최근에 이와 같은 시행착오를 줄이고 짧은 시간 안에 공정변수들을 예측하기 위하여 일단계 유한요소 역해석이 이용되고 있으며, Guo와 Batoz⁽¹⁾, Chung과

Richmond⁽²⁾, Liu와 Karima⁽³⁾, Lee와 Huh⁽⁴⁾ 등에 의해 연구가 이루어지고 있다. 변형 이론을 기본으로 한 일단계 유한요소 역해석은 블랭크 형상과 두께변형을 분포 등을 매우 짧은 계산시간에 예측이 가능하고 일반적인 형상에 적용이 가능하다. 그렇지만, 변형경로를 고려하지 못하기 때문에 변형 경로가 복잡해질 수록 오차가 커지는 단점을 가지고 있다. Lee와 Huh⁽⁵⁾는 일단계 역해석을 일반적인 3차원의 다단계 역해석으로 확장하여 일단계

* 한국과학기술원 기계공학과

역해석의 단점을 해결하면서 빠르게 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

다단계 성형공정으로 생산되어 지는 세장비가 큰 직사각컵은 휴대폰 충전지를 비롯해 활용 범위가 광범위한데 비하여 중간 단계의 공정들을 설계하기 어려워 대부분 수입하여 사용하고 있다. 이러한 다단계 성형 공정을 설계하는데 유한요소 해석을 이용한다면 매우 유용할 것으로 전망되어진다. 그러나, 기존의 방법으로는 성형공정이 복잡하고 해의 수렴성이 좋지 않으며, 해석시간이 매우 오래 걸리므로 현실적으로 적용하기가 어려운 분야이다. Kim등은 외연적 유한요소법을 이용하여 타원형 컵의 성형공정을 해석하였고⁽⁶⁾, Kim과 Huh등은 세장비가 큰 타원형 컵의 다단계 성형공정을 다단계 유한요소 역해석을 이용하여 해석하였다.⁽⁷⁻⁸⁾ 본 논문에서는 다단계 역해석을 다단계 직사각 컵 성형공정 설계에 적용하여 각 단계의 변형 형상 및 변형률 분포를 구하는데 적용하였다. 단계별로 계산을 수행할 때, 1단계, 2단계, 전체 단계의 변형이력을 각각 고려한 해석을 수행하였다. 중간 단계의 미끄럼 구속면의 표현은 유한요소 격자 방법을 사용하였다.

2. 다단계 직사각 컵 성형공정의 설계

다단계 직사각컵 성형 공정의 단계별 초기 형상 설계는 전문기술자의 경험과 드로잉 비를 고려하여 수행하였다. 제 1, 2단계는 원통형 컵으로 설계하였고, 제 3-6단계에서는 2~3개의 원호를 합쳐 놓은 타원형과 유사한 형상의 단면을 가지는 컵으로 설계하였다. 마지막 6단계의 형상은 거의 직사각 단면을 가지게 된다⁽⁹⁾. Fig. 1은 초기설계된 각 단계의 컵 형상을 나타낸 것이다. 초기설계는 각 성형단계의 단면에서의 드로잉 비의 불균일성과 블랭크와 금형의 초기 접촉에 문제점이 있었으며, 중간형상의 단면이 최종형상의 직사각 단면을 제대로 확보하지 않은 문제점을 가지고 있다. 결과적으로 단축 부분에서 살이 물리는 현상이 발생하였고, 장축 부분에서 과도한 인장력으로 파단이 발생하였다. 수정된 설계는 외연적 방법을 사용한 직접해석과 유한요소 역해석의 결과를 이용하여, 금형과 블랭크가 공정 초기에 장축과 단축에서 동시에 접하도록 펀치의 어깨부를 수정하였다. 초기설계에서 장축 방향으로 접촉이 제대로 일어나지 않았는데 이를 보완하기 위하여 단면부의 펀치의 곡률을 큰 값으로 수정하였다⁽⁹⁾. 또한, 최종형상의 직사각 단면을 확보하기 위하여 펀치 뒷면의 단면을 수정하였고, 금형면에서 블랭크가 빨리 들어가기 쉽게 설계하였다. Fig. 2는 수정 설계된 각 단계의 컵 형상을 나타낸다.



Fig. 1 Intermediate cup shapes for the original design

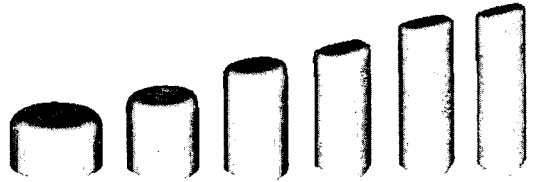


Fig. 2 Intermediate cup shapes for the modified design

3. 해석 조건

해석에 사용된 재료는 SPCE-SB계의 압연강판으로 단순인장 실험을 통한 물성치는 다음과 같다.

응력-변형률 관계식 :

$$521.86 (0.014834 + \bar{\epsilon})^{0.23373} \quad (\text{MPa})$$

이방성계수 : $R_{avg} = 1.617$

초기 판재 두께 : 0.5 mm

마찰 계수 : 0.15

블랭크 홀딩력 : 1000 kgf

수직이방성을 가정하고, 기하학적인 대칭성을 고려하여 1/4모델만 해석을 수행하였다. 각 단계의 해석에 있어서 유한요소 격자법을 사용하여 미끄럼 구속면을 묘사하였다. 모델링된 미끄럼 구속면에 오프셋을 주게되면 금형 형상도 추출할 수 있을 것이다. 6단계 이상의 공정을 가지는 건전지 케이스 성형공정을 해석하기 위해서는 각 단계 별 변형이력의 고려가 필요하다. 본 논문에서는 초기 형상으로부터 단계별로 역해석을 수행하여 각 단계의 변형 이력을 다음 단계에서 사용하는 형식으로 두께 변형률을 포함한 변형이력을 고려하였다. 먼저, 전체적인 단계별의 변형 양상을 살펴보기 위해 단계별로 변형 이력을 고려하지 않은 해석을 1단계부터 6단계까지 수행하였고, 이전 단계의 변형 이력만을 고려한 해석을 1단계부터 6단계까지 수행하였으며, 1단계부터 4단계까지 전체의 변형이력을 고려한 해석을 수행하였다.

4. 수치해석 결과

4.1. 변형이력을 고려하지 않은 1단계 역해석

본 절에서는 전체적인 변형 양상을 신속히 살펴보기 위해서 단계별로 변형이력을 고려하지 않고 해석을 수행하였다. 즉 이전단계의 두께나 변형률은 초기상태와 마찬가지로 일정하다고 가정하고 다음 단계로 넘어갈 때의 변형 형상과 두께 변형률 분포를 1단계 유한요소 역해석을 사용하여 해석하였다. 단계별 양상을 파악하게 되면 성형시의 발생할 수 있는 취약점을 정성적으로 파악할 수 있을 것이다. Fig. 3에 초기 설계안에 대한 각 단계의 계산된 컵 형상을 도시하였고, Fig. 4에 수정 설계안에 대한 결과를 도시하였다. Fig. 5는 각 단계의 두께변형률 분포를 장축 및 단축방향에 대해서 정량적으로 나타낸 것이다.

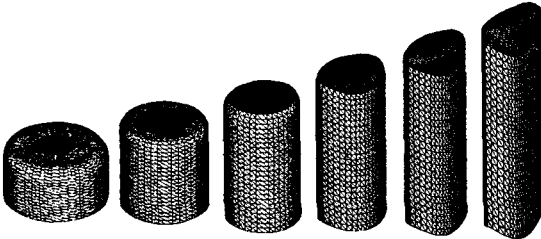


Fig. 3 Calculated intermediate shapes of each stage for the original design

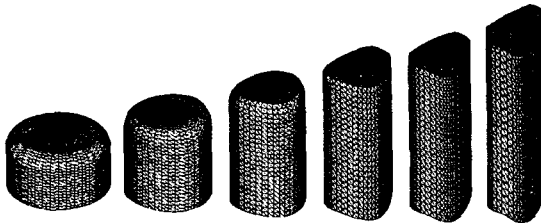


Fig. 4 Calculated intermediate shapes of each stage for the modified design

3단계에서 수정된 설계안의 경우 단축 방향의 곡률을 크게 부가하였으므로 펀치 반경 부분에서 초기 설계안보다 두께 변형률이 작아짐을 알 수 있고 이러한 양상은 이후의 단계에서도 나타나고 있다. 4단계의 경우, 수정된 설계안이 초기 설계안보다 형상 변화가 펀치 반경 부분에서 더 심하게 일어나 장축 부분에서 더 얇아지는 경향을 나타내고 있다. 전체적으로 펀치 반경 이외의 부분에서 수정된 설계안의 두께가 덜 두꺼워지는 양상을 확인할 수 있고, 5단계와 6단계에서 펀치 반경 부분의 극부적인 변형 양상이 수정된 설계안의 경우 많이 완화되어 있음을 알 수 있다.

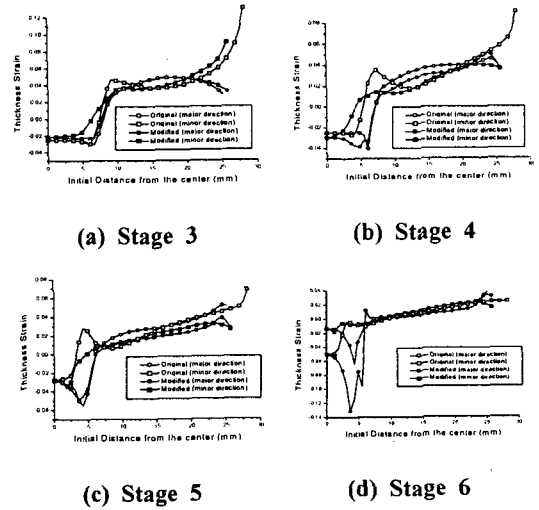


Fig. 5 Computed thickness strain distributions of each stage for the one step analysis

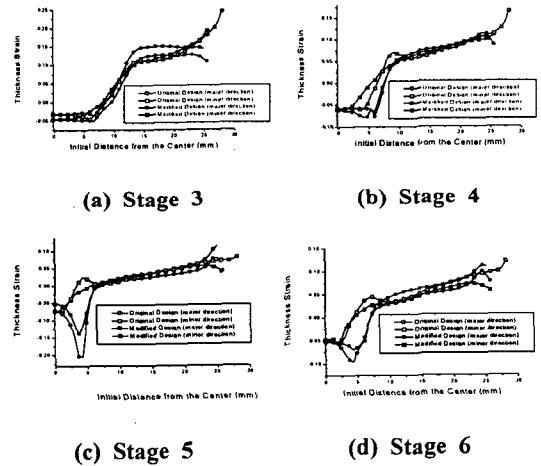


Fig. 6 Computed thickness strain distributions of each stage considering deformation history of the previous stage

4.2. 이전 단계의 변형이력을 고려한 2단계 역해석

본 절에서는 해석하고자 하는 단계의 바로 전 단계의 변형이력을 고려하여 해석을 수행하였다. 즉, 3단계의 해석을 위해 1단계를 초기 조건으로 놓고 1단계와 2단계 사이의 역해석을 수행한 후 이 2단계의 컵 결과를 초기 형상으로 놓고 3단계의 역해석을 수행하는 방법이다. 이렇게 함으로써 변형이력을 전혀 고려하지 않은 4.1절의 결과보다는 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다. Fig. 6에 각 단계의 두께변형률 분포를 장축 및 단축

방향에 대해서 정량적으로 나타내었다. 3단계와 4단계까지는 변형률 분포 양상이 비슷한 형태를 보이고 있는데, 형상의 변화가 수정된 설계안의 경우가 보다 심하므로 변형률 분포가 장축방향에서는 약간 더 얇아지는 양상을 보이고 있다. 5단계와 6단계의 변형률 분포에서 수정된 설계안의 경우가 초기 설계안의 경우보다 국부적인 변형 양상의 훨씬 좋아 졌음을 알 수 있다.

4.3. 변형이력을 모두 고려한 다단계 유한요소 역해석

본 절에서는 이전 단계의 변형이력을 모두 고려한 해석을 수행하였다. 건전지 케이스의 경우 국부적인 변형도 심하게 일어나고 형상의 변화도 심하므로 이전 단계의 이력을 모두 고려한 해석이 역해석이 가지는 오차를 줄일 수 있고 신뢰성이 있는 해석이라 할 수 있을 것이다. 4단계 이후로는 축적된 변형이력이 커서 수렴성이 현저히 떨어져 본 연구에서는 4단계를 최후 형상으로 설정하고 다단계 역해석을 수행하였다. Fig. 7에 각 단계의 두께변형률 분포를 장축 및 단축방향에 대해서 정량적으로 나타내었다. 전체적인 두께의 분포 정도는 비슷한 양상을 보이고 있지만, 수정된 설계안의 경우가 벽면에서 두꺼워 지는 양상이 많이 완화되어 있음을 알 수 있다. 실제 공정에서는 단축 부분에서 살이 물리는 현상이 발생하고 장축 부분에서 과도한 스트레칭이 일어나는데 수정된 설계안을 사용하면 이런 현상을 현저히 줄일 수 있을 것으로 예측되어 진다.

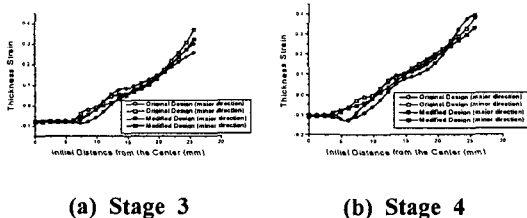


Fig. 7 Computed thickness strain distributions of each stage considering full deformation history

5. 결론 및 토론

본 논문에서는 유한요소 역해석을 이용하여 초기 설계안 및 수정 설계안에 대해 정성적인 해석을 수행하였다. 변형이력을 모두 고려한 해석과 부분적인 이력만을 고려한 해석을 모두 수행하였다. 부분적인 변형이력을 고려한 해석의 경우 4단계 이후에서 수정된 설계안의 경우가 더 좋은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 전체의 변형이력을 고려한 해석의 경우 수정된 설계안의 경우, 초기

설계안에 비해 상부에 직사각 단면을 확보하였고, 장축과 단축에서 금형과 컵 사이에 균일한 접촉이 일어나도록 하였으므로 보다 좋은 설계안이라고 할 수 있을 것이고, 부분적인 이력을 고려한 경우의 결과에서 5단계 이후에서도 보다 좋은 결과를 얻을 수 있음을 예측할 수 있었다. 유한요소 역해석은 해의 정확도가 직접해석에 비해 떨어지지만 빠른 계산시간으로 중간형상과 변형률 등을 쉽게 구할 수 있으므로 초기 설계 시에 매우 유용한 도구가 될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- (1) Batoz, J.L., Guo, Y.Q., Duroux, P. and Detraux, J.M, 1989, "On the Estimation of Thickness Strain in Thin Car Panels by the Inverse Approach", NUMIFORM89, pp.383~388.
- (2) Chung, K. and Richmond, O., 1994, "The Mechanics of Ideal Forming", ASME trans: J. of Applied Mechanics, Vol.61, pp.176~181.
- (3) Liu, S.D. and Karima, M., 1992, "A One Step Finite Element Approach for Production Design of Sheet Metal Stampings", NUMIFORM92, pp.497~502.
- (4) Lee, C.H. and Huh, H., 1997, "Blank Design and Strain Prediction of Automobile Stamping Parts by an Inverse Finite Element Approach", J. Mater. Process. Technol., Vol.63, pp.645~650.
- (5) Lee, C.H. and Huh, H., 1998, "Three Dimensional Multi-step Inverse Analysis for the Optimum Blank Design in Sheet Metal Forming Processes", J. of Mater. Process. Technol., Vol. 80, pp. 76~82.
- (6) 김세호, 김승호, 허 훈, 2000, "외연적 유한요소법을 이용한 세장비가 큰 타원형 컵 성형공정의 다단계 해석", 한국소성가공학회지, 제9권, 제3호, pp. 313~319.
- (7) 김승호, 김세호, 허 훈, 2000, "세장비가 큰 타원형 컵 성형 공정의 다단계 유한요소 역해석", 한국소성가공학회지, 제9권, 제3호, pp. 304~312.
- (8) 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. 107~116.
- (9) 김세호, 김승호, 허 훈, 2001, "유한요소해석을 이용한 세장비가 큰 직사각컵 다단계 성형공정의 금형설계", 한국소성가공학회지, 제10권, 제2호, pp. 147~150.