

사각형 캔 드로잉 다단 공정에서 성형성과 제품형상을 동시에 고려한 초기 블랭크 형상 최적 설계

박상민¹, 김동규², 홍석무^{1*}

¹국립공주대학교 금형설계공학과, ²상신이디피(주) 기술연구소

Initial Blank Optimization Design of Square Can Multistage Drawing considering Formability and Product Shape

Sang-Min Park¹, Kim Dong Kyu², Seokmoo Hong^{1*}

¹Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University

²R&D Center, SangsinEDP

요약 다단 딥드로잉 기술은 제품의 생산성 향상과 비용 절감을 위해 휴대폰 배터리 케이스 제품의 생산 공정으로 많이 사용하고 있다. 휴대폰 배터리 케이스는 용량과 강성을 목적으로 세장비가 큰 사각 컵 형상으로 제조된다. 사각 컵 형상의 다단 딥드로잉은 세장비가 크고, 복잡한 변형 형태 메커니즘으로 인한 제품의 좌우 높이 차이가 발생한다. 이로 인해 제품 조립과 표면 품질에 문제가 발생한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 제품의 높이 차이가 최소가 되는 블랭크 형상에 대해 연구했다. 제품 좌우 높이 차이가 최소가 되는 블랭크 형상을 찾기 위해 최적 설계와 해석을 수행했다. 타원형 블랭크의 장변과 단변을 설계 변수로 설정하고, 목적 함수는 높이 차이가 최소가 되도록, 제품의 두께 감소율이 목표 범위에 도달하도록 설정했다. 또한 최종 제품 형상의 높이를 구속 조건으로 설정하였다. 그 결과 최적 설계를 통한 초기 블랭크 설계로 높이 차이가 최소가 되었으며, 원하는 공정을 지정하여 높이 차이가 최소화 되도록 수행 가능하다. 향후 개발된 자동화 프로세스로 인해 모든 각형 타입의 초기 소재 설계가 가능할 것으로 판단된다.

Abstract Multistage deep-drawing technology is used widely in the production of mobile phone battery cases to improve productivity and economy. To ensure adequate capacity and rigidity, such cases are fabricated as a rectangular cup with a high slender ratio. The multistage deep-drawing of a rectangular cup entails a high slender ratio, and the heights of the product sides may be non-uniform because of the complicated deformation mechanisms. This causes problems in product assembly that affects the surface quality of the case. This study examined a blank shape that minimizes the height variations of the product to resolve the aforementioned problems. Optimization design and analysis were performed to identify the shape that yields the least variation. The long and short sides of an oval blank were set as the design variables. The objective function was set to yield the lowest height difference, and the thickness reduction rate of the product was set to the target range. In addition, the height of the final shape was set as a constraint. The height difference was minimized successfully using the optimized design. The design process of the initial blank for all rectangular shapes can be automated in the future.

Keywords : Deep drawing, Die design, Initial blank, Multi-stage stamping, Optimization

1. 서론

최근에 휴대용 이동 통신 기기 및 멀티미디어 기기의

빠른 보급으로 인한 휴대폰 부품의 수요도 매우 빠른 속도로 증가하고 있다. 이러한 휴대폰 부품 중 가장 중요한 것 중의 하나가 전원을 공급하는 리튬 계열의 2차 전지

*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Kongju Univ.)

Tel: +82-41-521-9291 email: smhong@kongju.ac.kr

Received December 14, 2016

Revised (1st January 25, 2017, 2nd February 7, 2017)

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

이다. 이 리튬 계열 2차 전지는 종류 및 크기에 따라 용도와 특성이 정해진다. 이중 리튬 이온 2차 전지는 최근 성능 개선을 통해 휴대폰 전원 공급원으로 각광받고 있으며, 다양한 분야의 전원 공급원으로 확대되고 있다. 이러한 전원 공급용 리튬 이온 2차 전지를 휴대폰에 저장하기 위해 저장 용기 역할을 하는 사각형 케이스가 필요하다[1]. 사각형 배터리 케이스는 용량과 강성을 목적으로 세장비가 긴 사각 컵 형상으로 제조되고 있다. 사각 컵 형상을 성형하기 위해 드로잉 공정을 수행한다. 그러나 세장비가 큰 사각형 드로잉 제품의 생산성 향상과 비용 절감을 위해서 다단 딥드로잉 공정이 이루어져야 한다. 다단 딥드로잉 공정은 성형 과정에 있어서 판재의 과도한 변형에 의한 두꺼워짐, 얇아짐, 찢어짐 그리고 주름 등의 발생 없이 초기 평판재로부터 원하는 형상을 다단으로 성형하는 공정이다. 하지만 세장비가 큰 사각 컵 드로잉에 경우 원통형 딥드로잉에 비해 더 복잡한 변형 형태를 보이고 있다. 이런 복잡한 변형 메커니즘으로 인하여 최종 형상의 기계적 성질 등을 예측하기가 어렵고, 원하는 최종 형상에 도달하기 힘들다[2-3]. 이에 Kim 등[4]은 유한요소법을 이용해 사각 컵의 다단 딥드로잉 성형 공정 해석을 수행하였으며, Park 등[5]은 타원형 딥드로잉 공정에서의 성형성 향상을 위한 연구를 수행하였고, Ku 등[1]은 세장비가 큰 사각 컵 성형을 위한 초기 블랭크의 설계 및 개선에 관한 연구를 수행했다. 그리고 Hong 등[6]은 타원형 다단 딥 드로잉 제품의 성형성 향상을 위해 초기 블랭크 형상을 하나의 목적함수에 도달할 수 있도록 최적 설계를 진행 하였다.

본 논문에서는 Hong 등이 수행한 타원형 다단 딥드로잉 제품의 블랭크 최적 설계에 대한 연구 결과를 바탕으로 사각 컵 케이스 제품의 성형성에 영향을 미치는 초기 블랭크 형상에 대한 다중 목적 함수를 설정하여 최적 설계를 수행하였다. 그리고, 개선된 블랭크를 실제 양산 금형에 적용하여 초기 블랭크와 개선된 블랭크의 성형성을 비교하였다.

2. 사각컵 다단 딥드로잉 성형공정

본 연구에서 적용된 사각 컵 케이스의 성형 공정은 최종 제품 형상을 구현하기 위해 여러 개의 다이와 펀치를 갖추어 성형하는 다단 딥드로잉 공정 방식으로 성형되며, 드로잉(Drawing), 아이어닝(Ironing) 두 공정이 주를

이루게 된다. 다단 딥드로잉 성형 공정으로 생산되는 사각 컵 케이스의 성형 시 가장 큰 특징은 세장비가 크고, 복잡한 변형 형태 메커니즘으로 인한 제품의 좌우 높이 차이가 나타나며, 이 현상으로 인해 제품의 품질이 떨어져 불량품이 발생한다.

Fig.1에서는 사각 컵 케이스의 1~6공정 제품을 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 복잡한 변형 형태를 가지고 있기 때문에 성형 제품의 장변과 단변 높이차가 발생한다. 특히 4공정(OP40)에서 높이차가 발생하며, 이후 다단 공정을 진행할수록 높이차가 급격하게 증가한다. 높이차가 증가할수록 그 부분의 두께가 증가되어 제품의 불량을 초래하고 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 현장에서는 Fig. 2와 같이 블랭크 형상을 임의로 늘이거나 줄여 시행착오(Try-out)를 통해 문제를 해결했다. Fig. 2에서 a, b는 각각 장변과 단변 반지름 길이고, Δl 은 변경 길이를 의미한다. 현장에서는 경험에 의존하여 Δl 을 조절하여, OP40에서 제품 높이 단차가 최소가 될 때까지 반복 실험을 통해 소재형상을 결정한다. 본 연구에서는 유한 요소 해석과 최적화 설계법을 이용하여 목표 공정인 4공정 이후 제품의 높이가 균일해지는 최적의 초기 블랭크 형상을 제안하고자 한다.



Fig. 1. Product sequence of square cup through multi-stages deep drawing process

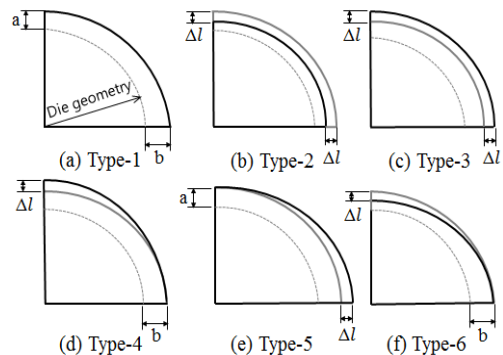


Fig. 2. Tryout design to determine initial blank for square type drawing

3. 유한 요소 해석

본 연구에서는 다단 딥드로잉 공정으로 성형되는 사각 컵 케이스의 유한 요소 성형 해석을 수행하기 위해 동적 외연적 유한 요소 프로그램인 LS-DYNA[7]를 이용하였다. 해석에서 진행한 공정은 전체 6공정 중 1~4공정까지 진행하였다. 4공정에서의 좌우 높이 차이가 최소가 된 후 다음 공정을 진행하였을 때 성형성이 향상된다는 가정 하에 4공정 후 높이차이가 최소화되는 것을 목적함수로 선정하였다.

해석에 사용된 각 부분의 마찰 조건은 일정하게 쿨롱 마찰계수 0.125를 적용하였다. 또한, 블랭크를 제외한 펀치와 다이, 블랭크 홀더 및 가이드 펀치 등은 변형되지 않는다는 가정하에 4절점 강체 쉘(shell) 요소로 정의하였으며, 블랭크는 성형 공정 과정에서의 굽힘 변형과 아이어닝 공정의 효과를 고려하기 위해 8절점 솔리드 요소와 두께 방향으로 두 개의 층(layer)을 사용하였다. 솔리드 요소로 두 개의 층을 사용하였을 시는 굽힘 변형을 모사하기에 충분하지 않아 일반적으로 세 개 층이상을 사용해야 하지만, 0.55mm 소재 두께에 3개층을 사용할 경우 요소의 세장비(aspect ratio)를 고려하여 0.2mm 요소를 사용해야 한다. 이 때 해석에 사용되는 층 요소의 수는 13만 5천개 정도로 과도하게 사용된다. 사전 연구를 통해 2층 요소와 3층 요소의 변형 결과는 차이가 없어서 본 연구에서는 해석 시간을 고려하여 2층 요소를 사용하였다. 2층 요소 최소 요소 크기는 0.3 mm, 9만개의 요소가 사용되었다. Dell precision 1910 컴퓨터를 사용하였으며, 사양은 CPU 3,2GHz, 16 multi-cores이다. 이 때 1공정 당 대략 6시간이 소요되어, 1~6공정의 1 사이클 해석 시 36시간 정도가 소요되었다. 전 단계 드로잉 블랭크의 형상 및 변형 응력, 변형률의 값을 그대로 유지한 채 다음 단계 드로잉에 적용하여 연속해석이 수행되었다. 해석 시간을 단축하기 위해 Fig. 3과 같이 1/4 대칭(symmetric) 모델을 적용하였다.

사각 컵 케이스 제품의 소재는 Al 3005이고, 소재 두께는 0.55t이다. Al 3005의 항복응력은 41.5 MPa, 탄성계수는 69 GPa 그리고 푸아송비는 0.33이다. 유한 요소 해석에 사용된 소재의 유동응력(flow stress)은 식 (1)의 Swift 식이 사용되었다.

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유동응력, K 는 강도계수, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률, ϵ_0 초기 변형률, n 은 가공경화 지수이다($K=191.4$ MPa, $n=0.22$, $\epsilon_0=0.0002$). 소재의 물성치는 다음 Table 1과 같으며, 1공정의 상형에는 펀치와 바인더로 구성되며, 하형에는 다이와 패드로 구성되어 있다. 펀치 속도는 2m/s, 패드력(pad force)는 98 N으로 적용하였다. 펀치 행정(punch stroke)은 제품의 목표 치수인 33.55 mm에서 소재의 두께 0.55 mm만큼 제외한 33.0 mm로 하였다.

Table 1. Material properties of Al 3005

Material & Thickness	Al 3005, 0.55t
Young's Modulus (GPa)	69.0
Yield Stress (MPa)	41.5
Initial Strain	0.002
Poisson's Ratio (ν)	0.33
Strain Hardening	Isotropic hardening

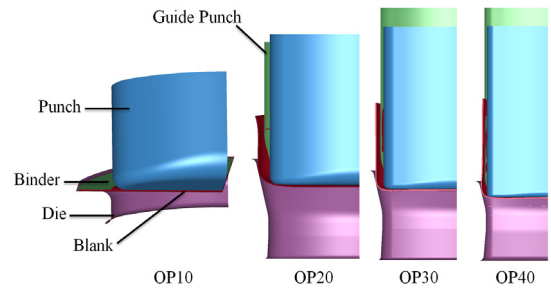


Fig. 3. Finite element modeling of four operation stages

4. 초기 블랭크 형상 최적 설계

4.1 최적 설계

사각 컵 케이스 제품의 블랭크 형상은 타원 형상이다. 타원 형상의 블랭크는 다단 공정을 진행하면서 단차가 발생하는데, 단차를 최소화하기 위해서 최적의 블랭크 형상을 설계해야 한다. Fig. 4에 제시한 것과 같이 최적의 블랭크를 설계하기 위한 설계 변수로 타원 형상의 블랭크의 장변을 px , 단변을 py 로 설정하였다. 우선, 설계 변수 px 와 py 가 제품의 단차를 최소화하는데 얼마만큼의 영향을 끼치는지 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하였다. 민감도 분석에서는 설계 변수의 최소, 최대 값은 0과 1사이의 값으로 정규화(normalizing)되어 비교되기 때문에 서로 다른 차원의 설계 변수가 목적함수에

끼치는 영향도를 정량적으로 평가가 가능하게 된다 [8]. Fig. 5의 민감도 해석 결과에서 보이는 바와 같이 제품의 단차는 py (단변)보다는 px (장변)에 더 많은 영향을 받으며 23.1%의 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있다.

최적 설계 프로세스는 Fig. 6와 같이 초기 블랭크를 설정하여 최초 공정에서 4공정까지 시뮬레이션을 수행한 후 장변과 단변의 제품 높이 차이 Δh 의 값을 확인한다. Δh 가 최소화 값에 수렴하지 않으면 설계변수를 수정한 뒤, 다시 초기 단계로 돌아가서 Δh 값이 최소화될 때까지 자동으로 프로세스를 진행한다. 최적화 해석 및 자동화 프로세스 구현은 상용 최적화 프로그램인 LS-OPT[7]와 LS-PREPOST[8]를 조합해서 구현하였다.

최적의 블랭크 형상 설계를 수행하기 위해 전제 조건이 필요하다. 단지 단차만 줄인다면 제품의 품질이 만족하는 조건에 부합되지 않게 된다. 따라서 최적 설계를 진행하면서 Fig. 4와 같이 설계 변수는 px , py 로 설정하고, 4공정 제품의 장변 높이를 $H1$, 단변 높이를 $H2$ 로 설정하여 만족하는 제품의 높이를 구속 조건으로 설정한다. 최종 목표로 하는 목적 함수를 높이 단차 Δh 의 값이 최소화 되도록, 제품의 품질을 위해 두께 감소율(thinning)이 -30% 초과, 25% 미만이 되도록 설정하였다. 자세한 최적 설계의 변수와 설정 조건들을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Design variables, objective function and constraints

Objective function	Minimize $F(x) = ABS(\Delta h)$
Design variables	px , py
Constraint	$-30\% < \text{Thinning} < 25\%$
	$44 < H1$
	$44 < H2$

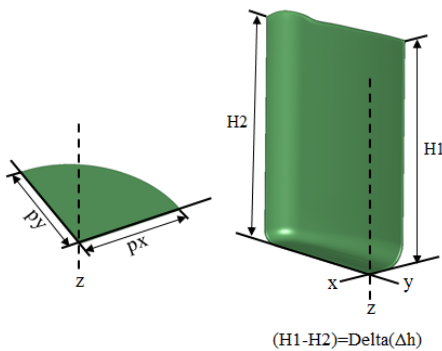


Fig. 4. The shape of initial blank and blank after OP40

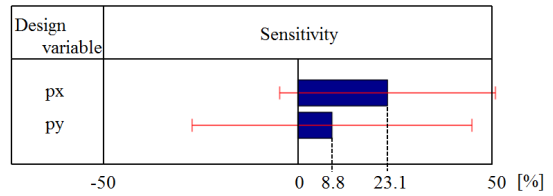


Fig. 5. Sensitivity analysis of design variables

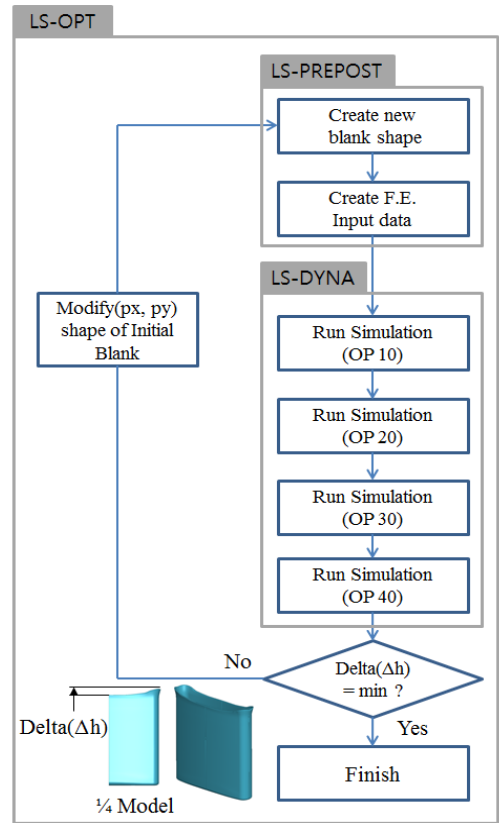


Fig. 6. Process of optimization and automation

4.2 최적 설계 결과

최적 설계 프로세스는 설계 변수의 수정에 따라 해석이 진행되는데, 진행된 해석의 결과를 기반으로 설계 변수에 대한 효과를 확인할 수 있게 된다. 이러한 해석 결과를 이용하여 초기 메타모델(Meta model)을 구성하게 된다. 메타모델이 구성되면 최적화 알고리즘을 적용하여 3D 표면에서 최소점을 찾을 수 있게 된다[7]. Fig. 7이 메타모델을 3차원에 표현한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 x 축은 px (장변), y 축은 py (단변), z 축은 Δh 값이다. 3D 표면 곡선에서 Δh 의 값이 최소가 되는 최소

점을 확인할 수 있다. 최소점에서 px는 42.4 mm, py는 37.2 mm이다.

최적화된 블랭크 형상과 현재 양산중인 초기 블랭크 형상에 대한 비교를 위해 Fig. 8에 도시하였다. 현재 양산 중인 초기 블랭크 형상을 4공정까지 수행하였을 때 Δh 의 값은 3.809 mm이다. 최적 설계를 통해 얻어진 블랭크를 4공정까지 진행하였을 때 Δh 의 값은 0.429 mm로 높이차가 88% 감소하였다.

최적화된 블랭크의 성형성 향상을 확인하기 위해 초기 블랭크와 최적 블랭크의 4공정 해석 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 그림에서 두께 감소율의 결과를 비교하였다. 초기 블랭크의 경우 4공정에서 제품 상단에 두께가 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. 초기 블랭크의 두께는 양끝단 귀 부분에서 최대 7% 증가하였으나, 이에 비해 최적 설계 결과는 양끝단 부분에서 두께 증가가 최대 3.875%이다. 이런 고른 두께 분포로 인해서 4공정 이후 공정에서 두께 증가로 인한 제품의 과단과 불량품 발생 문제가 생기지 않을 것으로 판단된다.

Table 3. Initial vs. optimized design variables

Design variables		Initial	Optimized
	px	36	37.2
py	42	42.4	
Objective	Δh	3.809	0.429

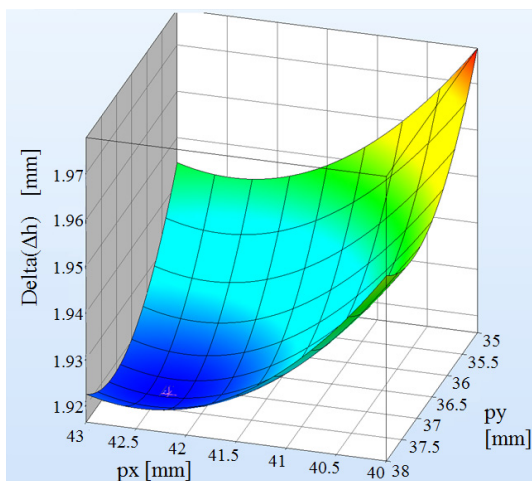


Fig. 7. Result from meta model based optimization

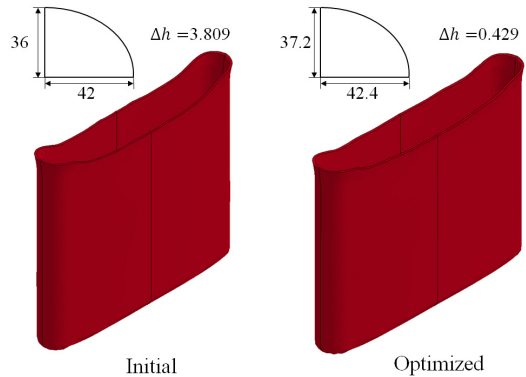


Fig. 8. Comparison of Δh [mm] between drew results from initial and optimized initial blanks

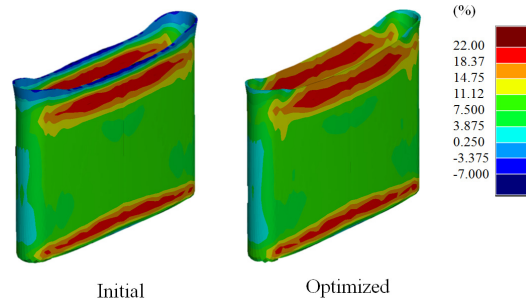
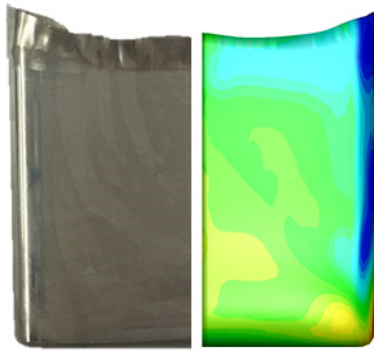


Fig. 9. Comparison of thickness distribution between initial blank and optimized blank

4.3 최적설계 실험 검증

최적화된 블랭크를 이용하여 제품을 생산하였을 때, 해석 결과와 어떠한 차이를 보이는지 확인하기 위해 실제 금형으로 제품 생산을 수행했다. Fig. 10은 그 결과를 보여주며, 그림에서 보이는 바와 같이 왼쪽은 최적화 블랭크로 생산한 제품의 그림이다. 오른쪽은 최적화된 블랭크의 해석결과 그림이고, 최적화된 블랭크를 이용하여 제품 생산 결과 장변 단변 높이 차이가 해석 결과와 일치함을 확인하였다. 그리고 Fig.11과 같이 제품의 9개 포인트에서 다이얼 게이지로 두께를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 그 결과 제품의 평균 두께는 0.36 mm 이고, 해석 결과의 평균 두께는 0.40 mm로 0.04 mm의 오차 수준을 보여준다.



(a) Experiment (b) Simulation

Fig. 10. Verification of simulation result

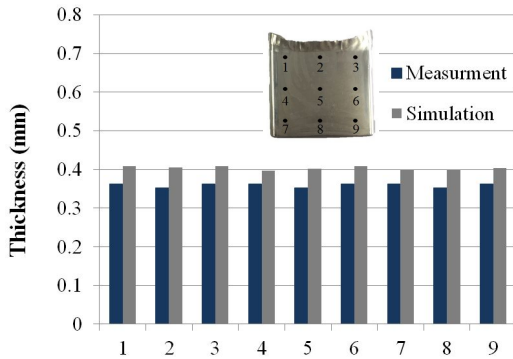


Fig. 11. Comparison of thickness between measurement and simulation

5. 결론

본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 최적 설계를 통한 초기 블랭크 설계로 높이 단차 Δh 값이 3.38 mm 감소하였다. 이를 통해 제품 전체 영역에 균일한 두께 분포를 확보할 수 있었다.
2. 본 연구에서 제안한 최적설계 자동화 기법을 적용한다면, 초기 공정 또는 최종 공정이 아니라 문제가 발생하는 공정을 지정하여 높이 단차 최소화 설계가 가능하다.
3. 향후 자동화 프로세스로 인해 모든 각형 타입의 초기 소재 설계가 자동으로 계산 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] T. W. Ku, C. S. Park, B. S. Kang, "A Study on Initial Blank Design and Modification for Rectangular Case Forming with Extreme Aspect Ratio", Trans. Mater. Process, vol. 13, no. 4, pp. 307-318, 2004. DOI: <https://doi.org/10.5228/KSP.2004.13.4.307>
- [2] Y. Kim, J. Kim, B. S. Kang, "Analysis of Multi-Stage Deep Drawing Process for Rectangular Container Using Finite Element Method", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. Spring Conf., pp. 1454-1457, 2005.
- [3] S. H. Kim, S. H. Kim, H. Huh, "Optimum Tool Design in a Multi-stage Rectangular Cup Drawing and Ironing Process with the Large Aspect Ratio by the Finite Element Analysis", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A., vol. 26, no. 6, pp. 1077-1084, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2002.26.6.1077>
- [4] S. H. Kim, S. H. Kim, H. Huh, "Analysis of Rectangular Cup Drawing Processes with Large Aspect Ratio Using Multi-Stage Finite Element Inverse Analysis", Trans. Mater. Process, vol. 10, no. 5, pp. 389-395, 2001.
- [5] D. H. Park, S. B. Park, S. S. Kang, "An Experimental Study on Improvement of Formability for Elliptical Deep Drawing Process", Trans. Mater. Process., vol. 9, no. 2, pp. 120-127, 2000.
- [6] S. Lee, S. Park, S. Hong, "Optimization of Initial Blank Shape of Multi-Stage Deep Drawing for Improvement of Formability", J. of the KAIS, vol. 17, no. 10, pp. 696-701, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.10.696>
- [7] LS-DYNA, User's Manual, 2014.
- [8] LS-OPT User's Manual, 2014.

박 상 민(Sangmin Park)

[정회원]



• 2014년 3월 ~ 현재 : 국립공주대
금형설계공학과 재학중

<관심분야>

금속 판재성형 및 단조성형 해석

김 동 규(Kim Dong Kyu)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울과학기술대학교 기계공학과 (학사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 상산EDP 종합연구소

<관심분야>

프로그래시브 금형설계

홍 석 무(Seokmoo Hong)

[종신회원]



- 1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (학사)
- 2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (석사)
- 2007년 8월 : Technical University of Munich 기계공학과 (박사)
- 2007년 1월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자, 수석연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 공주대 금형설계공학과 교수

<관심분야>

금속 관계성형 및 단조, 하이드로포밍, 유한요소해석, 최적설계