

사각 컵 배터리 케이스 바닥 벤트 성형을 위한 단조 금형 설계

이상훈¹, 권순호¹, 정훈², 홍석무^{*}
¹국립공주대학교 금형설계공학과, ²상신이디피(주)

Forging Die Design for Vent Forming of Square Cup Battery Case

Sang-Hoon Lee¹, Soon-Ho Kwon¹, Hoon Chung², Seokmoo Hong^{1*}

¹Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University

²Sangsin EDP

요약 최근 자동차 산업에서 전기 모터 연료 전지에 대한 수요가 급증했으며, 연료 전지 케이스로 사용되는 사각형 알루미늄 캔에 대한 수요 또한 증가하고 있다. 직사각형 배터리 케이스의 바닥에 있는 에어 벤트는 비정상적으로 높은 압력이 발생할 때 미리 압력을 방출하여 큰 폭발을 방지하는 역할을 한다. 직사각형 컵 배터리 케이스는 6 단계의 다단계 딥 드로잉으로 외형을 만들고 직사각형 배터리 케이스와 용접하여 벤트 부품을 제작해왔다. 그러나 본 연구에서는 직사각형 케이스의 바닥면에 공기 벤트 형상을 직접 추가 하는 연구를 수행하였다. 단조의 초기 형상으로는 사각 컵 다단계 딥 드로잉 성형 해석에서 추출한 두께와 형상을 이용한 유한 요소 해석 기법을 사용 하였다. 그 결과, 예측 정밀도가 향상되고, 배부름 및 파단 등의 결함을 미리 예측할 수 있었다. 초기 분석 결과를 토대로 두 가지 단조 형상이 후보로 제시되었고 성형 해석을 통해 최적의 단조 형상을 결정 하였다. 이러한 결과를 바탕으로 금형을 제작하고 실제 결과와 분석 결과를 비교하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

Abstract The demand for electric motor fuel cells has surged in the automotive industry, leading to a recent increase in the demand for square aluminum cans used as fuel cell battery casings. The air vent located on the bottom of the rectangular battery casing prevents large explosions by intermittent pressure release prior to the accumulation of abnormally high pressures. Conventionally, the square cup battery casing is produced via six-step deep drawing, with the outer shape of the vent being manufactured by welding to the square battery casing. On the other hand, this study directly incorporated the air vent outlet into the bottom surface of the rectangular casing. The product of a coupled finite element analysis technique applying the thickness and contour generated from the square cup multi-step deep drawing formation analysis was used as the forging input shape. The results yielded increased prediction accuracy and the advanced prediction of defects, such as swelling and fracture. Based on the results of the initial analyses, two of the generated forging shapes were determined to be suitable, with the optimal forging shape being determined by molding analysis. The results presented here were validated by mold fabrication and a subsequent comparison of the actual and analytical results.

Keywords : Cold Forging, Finite Element Analysis, Square Cup Battery Case, Vent Forming, Welding process

1. 서론

최근 내연기관을 대체할 수 있는 전기 자동차가 등장하였고 휴대용 전자기기 등의 수요가 급격하게 증가함에 따라 연료전지에 관한 관심 또한 높아지고 있다[1]. Fig.

1과 같이 연료전지는 과충전, 과전류 등에 의해 내부 이상 고압 발생 시 폭발 위험이 있기 때문에 사용자의 안전을 위하여 압력을 배출하는 에어 벤트(air vent) 형상이 필요하다[2]. 기존의 배터리 케이스는 다단계 딥 드로잉(drawing) 공정을 통해 제작되며 바닥부 벤트 형상을 개

*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Kongju Univ.)

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

Received March 2, 2017

Revised April 26, 2017

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

별적으로 단조 가공하여 용접 접합하는 방식이 사용되고 있다[3]. 용접 접합의 경우 이로 인한 강도가 저하되거나 공정이 늘어나는 단점이 있다[4]. 이에 Kim 등은 프로그래시브 금형(progressive die)을 통한 일체형 벤트 설계에 관한 연구를 단조 해석 프로그램을 통해 수행하였다[5]. 앞선 연구에서는 벤트 형상의 단조 공정 해석만을 고려하였으나 본 연구에서는 판재 성형 해석 전용 프로그램과 단조 해석 전용 프로그램을 활용하여 6공정의 드로잉 해석 후 형상 데이터(CAD)를 추출하여 단조 해석에 활용하였다[6].

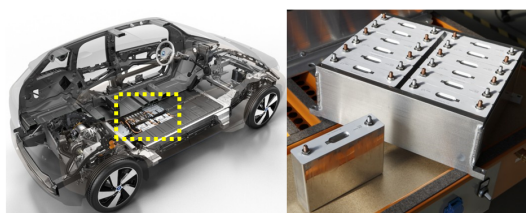


Fig. 1. Square cup battery shape of electric car[7~8]

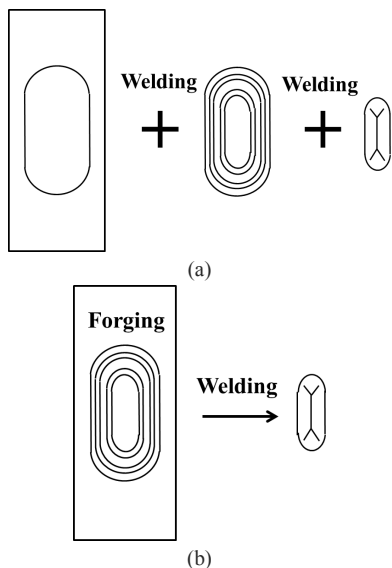


Fig. 2. Comparison between (a) welding and (b) forging process

초기 금형으로 단조 해석한 결과와 실제 발생한 배부름과 유사함을 확인하여 해석의 타당성을 검증하고, 이를 바탕으로 성형 시 발생하는 불량을 제어하기 위해 금형 구조를 보강하여 두 가지 type으로 단조 금형을 재설계하였다. 단조 해석을 통해 최적화된 금형 구조를 확인하고 실제 금형을 제작하여 해석의 타당성을 검증하였

다. 최종적으로, 단조 공정을 통해 사각형 배터리 케이스 바닥부 벤트를 생산하는 방법의 유효성을 검토 하였으며, 결과적으로 공정 수를 감소시킬 수 있는 기법을 제시 하였다.

2. 초기 단조 금형설계

2.1 단조 공정 설계

벤트는 높이 단차를 가지기 때문에 치수 정밀도가 우수한 단조 공정을 통한 성형이 유리하다[9~10]. 그러나 단조 금형설계 시 제품에 미성형(underfill), 버(burr) 등의 불량이 발생하고 평탄도(flatness), 직각도(perpendicularity)가 나오지 않아 현장에서 수차례의 시행착오(try-out)가 요구된다. 사각형 배터리 케이스 바닥 벤트 성형에서 발생하는 미성형, 버와 같은 문제점을 사전에 예측하기 위하여 Fig. 3에서 보여지는 것과 같이 금형을 3D 모델링 하였고 1/4 symmetric view로 나타내었다. 벤트 형상 성형은 2회의 단조 공정으로 이루어지며, OP. 10에서 홀더(holder)가 소재를 잡아주며 예비 성형(pre-forming)을 한 후 OP. 20에서 상형 펀치(upper punch)가 작동하여 벤트 형상을 완전히 성형하는 구조이다. OP. 10의 예비 성형에서 국부적으로 가공경화(work hardening)를 가하여 OP. 20에서 완전 성형 시에 직각도를 높여줄 것으로 예상하였다. 벤트 형상의 높이 단차를 성형하기 위해 다이(die)에 각도를 주어 경사가 진 형상으로 모델링 하였다.

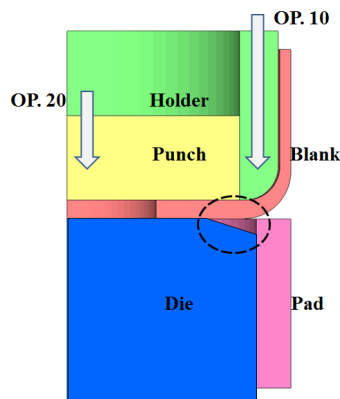


Fig. 3. Die design concept

2.2 유한요소해석

판단조 해석 후 추출한 드로잉 형상을 단조 설계의 초기 소재로 활용 하였다. 드로잉 형상은 6공정의 유한요소 해석을 필요로 하며, DYNAFORM 5.9.2.1을 사용하였고 해석 시간은 한 공정 당 6시간으로 총 36시간이 소요된다[11]. 드로잉 공정에서 소재에 발생하는 굽힘(bending), 전단(shear), 압축 응력(compressive stress) 상태의 변형 거동을 묘사하기 위해 Hexahedral 솔리드 요소(solid mesh)를 사용하였다[12]. 이로 인해 요소망 재구성(re-meshing)이 불가하다. 그러나 단조 성형 해석에서는 변형량에 따라 요소망 재구성이 필수이기 때문에, 이 연구에서는 단조 전용 해석 프로그램 AFDEX-3D를 사용하여 연계 해석을 수행하였다[13]. 본 연구에서는 드로잉에서 응력과 변형률이 단조에 비해 상대적으로 작다고 판단하여 스탬핑(stamping) 해석 시 발생한 잔류 응력(residual stress)과 잔류변형률(residual strain)은 고려하지 않았다. 이를 바탕으로 모델링 한 초기 형상은 높이 10mm, 폭 26.5mm이며 중앙의 코너부 반지름 5.3mm로 피어싱(piercing) 된 사각의 배터리 케이스이다. 강소성(rigid plasticity) 유한 요소법을 적용하여 진행 하였으며 소재의 초기 두께가 1.1mm인 Al3003을 소재로 사용하였다. 해석에 사용된 재료의 물성은 (1)과 같은 hardening curve을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = K \cdot \varepsilon^n \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유동응력, K 는 강도계수, ε 는 변형률, n 값은 가공경화지수이다. 소재의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 요소(mesh) 수는 1830개로 진행을 하였으며 해석 시간을 줄이기 위하여 1/4 symmetric 으로 진행하였다. 스트로크(stroke)는 1.23mm로 설정 하였고 마찰 계수(friction coefficient)는 0.1로 하여 진행하였다. 해석에 사용된 공정조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Al 3003 material properties

Thickness(mm)	1.1
Tensile strength(MPa)	130
Yield stress(MPa)	125
modulus of elasticity(GPa)	70.25
Poisson's ratio(-)	0.33
Elongation (%)	10
K	191.4
n	0.22

Table 2. Forging parameter used in FEM

Symmetric	1/4
Number of Meshes	1830
Stroke(mm)	1.23
Friction coefficient(-)	0.1

2.3 해석 결과 검증

해석 결과 바닥부의 성형은 목표 형상에 일치하도록 성형이 되었으나 단조 공정 시 측벽이 편 측 기준 1.0mm 가량 벌어지는 현상이 발생하였으며 제품 단면을 보았을 때 단차의 직각도나 평탄도를 만족하지 못하였다. 실제 제품을 성형하기 위하여 제작한 금형을 Fig. 4에 나타내었다. 실험에 사용된 프레스는 가압능력 80ton, 스트로크 길이와 스트로크 수는 각각 450mm, 10~20SPM 이다. 초기 설계에 따라 단조 공정으로 제품을 성형한 결과 벤트 형상 주변의 측벽이 0.5~1.5mm 가량 벌어지는 문제점이 발생하였다. 해석 결과 역시 벤트 형상 주변의 측벽이 1.2mm 가량 벌어지는 현상이 발생하는 것을 Fig. 5에 나타내었다. 제품의 측벽의 벌어지는 양을 측정한 결과, 해석에서 발생하는 배부름 치수(1.2mm)가 실제 공정에서 발생하는 치수의 범위(0.5~1.5mm)를 만족하여 해석의 결과가 타당하다고 판단하였다. 따라서 금형의 구조를 두 가지 type으로 나누어 보강하여 벤트 형상을 완전히 성형하는 최적화된 금형 구조를 결정하고자 하였다.



Fig. 4. Forging die for air vent manufacturing

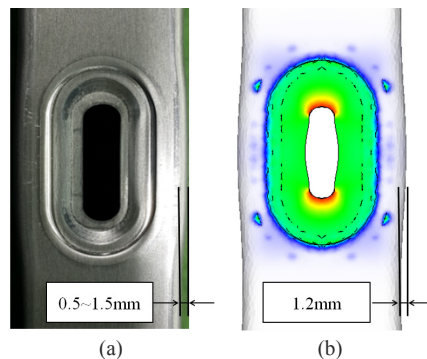


Fig. 5. Comparison of thickness between (a) experiment and (b) result of finite element analysis

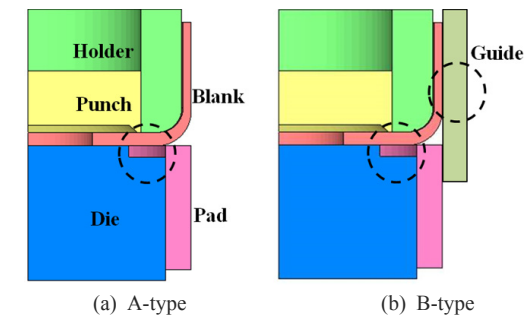


Fig. 6. Process designs of different die concepts

3. 최적화된 단조 금형설계

3.1 Case study

초기 금형설계를 바탕으로 보강된 두 가지 type의 금형 구조를 결정 하였다. A-type은 다이 형상이 기존 경사가 있는 것과 달리 계단형의 높이 단차를 주어 예비 성형 시 소재에 발생하는 국부적인 가공경화를 증가시켜 제품의 벌어짐 현상을 줄이고자 하였다. OP. 10에서 피어싱 된 부분의 최종 두께($t=0.47\text{mm}$)를 만족시키기 위해 최종 두께의 약 93%($t=0.50\text{mm}$)까지 성형하고 OP. 20에서 최종 치수인 0.47mm 까지 성형하였다. B-type은 측면에 배부름 현상을 제어하기 위해 가이드(guide)를 추가하였고, OP. 10에서 피어싱 부의 두께($t=1.1\text{mm}$)를 목표 치수의 약 57%($t=0.9\text{mm}$)로 예비 성형 한 후 OP. 20에서 최종 치수($t=0.47\text{mm}$)까지 2차 성형을 통해 벤트 형상을 성형되도록 하였다.

3.2 해석 결과 및 검증

Fig. 7에 A-type과 B-type의 단면도를 나타내었다. A-type의 경우에는 OP. 10에서 최종 두께의 약 93%를 성형 하여 OP. 20에서 미성형 불량 발생하였다. 국부적인 가공경화를 통해 제품의 변형을 제어하고자 하였으나 과도한 변형으로 인해 OP. 20에서 성형 되어야 하는 두께 여유가 부족한 것이 확인되었다. 측면의 가이드가 없기 때문에 측벽이 편측 기준 1.2mm 가량 벌어지는 현상이 발생하였다. B-type의 경우 OP. 10에서 홀더가 소재를 예비 성형할 때 나타나는 배부름 현상을 가이드를 통해 제어하였다. B-type의 금형 구조 및 치수를 바탕으로 금형을 제작하였고 실제 제품을 스탬핑 하여 해석의 타당성을 검증하기 위하여 실제 제품과 해석결과를 비교

하였다.

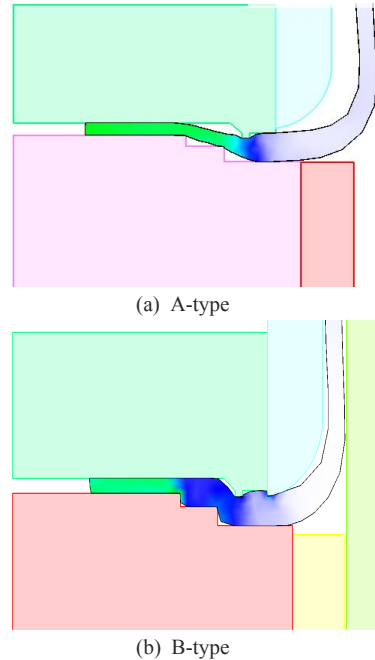


Fig. 7. Comparison of Cross section of A and B-type from FE results

Fig. 8에 B-type을 토대로 성형한 벤트 형상과 해석 결과를 나타내었다. 실제 금형을 제작하여 성형한 제품을 확인한 결과 예측된 결과와 형상이 매우 유사함을 확인 하였다. 또한 Fig. 9과 같이 해석 결과와 실제 제품의 높이 단차를 측정하여 비교한 결과를 Table 3에 나타내었다. T₁의 경우 오차가 0.04mm 로 실제 제품과 해석의 결과가 유사하였으나 T₂의 경우는 실험과 해석 결과의 오차가 0.25mm 발생하였다. 해석과 실제 제품에서 오차가 나타나는 원인은 마찰계수로 인한 소재의 유동 차이, 클리어런스 차이 등의 문제와 연계해석 과정에서 판재 성형 해석 후 형상만 추출하여 두께는 고려하였으나, 변형률과 잔류응력은 고려하지 않았기 때문에, 오차가 누적되어 발생하는 것으로 사료된다. 해석과 제품의 비교 검증을 통해 드로잉 후 단조 연계 공정을 통해 벤트 형상을 제조함에 있어서 유효성을 확인 하였으며 유효요소해석을 통한 공정 시 발생하는 불량 예측을 통해 제어할 수 있었다.

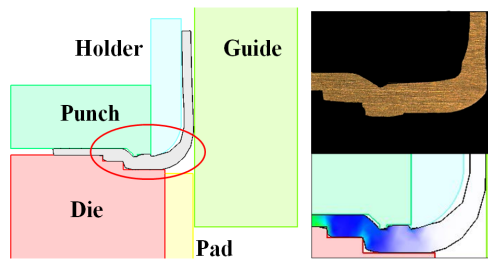


Fig. 8. Comparison of B-type product and FE result

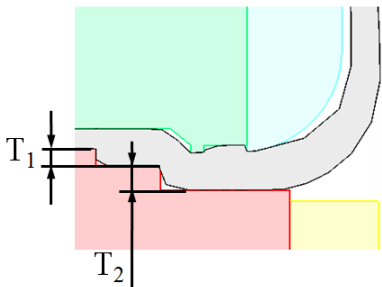


Fig. 9. Measurement points of analysis result

Table 3. Comparison of measurement results of products and simulation

Point	T ₁ [mm]	T ₂ [mm]
FEM result	0.43	0.6
Experiment	0.39	0.85

4. 결론

본 연구에서는 배터리 케이스의 용접을 최소화시키기 위해 벤트 형상 단조 금형설계 연구를 수행하였다. 벤트 형상의 초기 금형설계 시 양쪽 측벽이 벌어지는 불량 발생하였다. 실제 공정에서 발생한 불량을 단조 해석을 통해 확인하였고, 이를 바탕으로 보강된 2가지 type의 금형을 설계하여 단조 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 아래와 같다.

- (1) 기존 용접을 통해 가공한 벤트 형상을 단조 가공으로 전환하여 공정을 최소화하고, 그 유효성을 검토하는 연구를 수행하였다.
- (2) 유한요소해석을 통하여 초기 금형설계 시 측벽이 0.5~1.5mm 가량 벌어지는 배부름 현상을 확인하였다. 이를 제어하기 위해 금형 구조의 type을 나

누어 유한 요소 모델링을 수행하였고 B-type에서 배부름 현상 제어를 확인하였다.

- (3) 최적화된 금형을 실제 제작하여 얻은 제품과 해석 결과가 최대 0.25mm의 오차로 유사하여 해석의 타당성을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 결정된 프로세스를 통해 벤트 형상 금형설계 시 용접 공정을 대체하여 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J. H. Lim, W. Choi, J. H. Shin, J. Lee, "FE Analysis of Impact Extrusion Process on Lithium Ion Rectangular Battery Case", Proc of Fall Conference on Korea Society for Technology of Plasticity, pp. 192-195, October, 2014.
- [2] T. Ohsaki, T. Kishi, T. Kuboki, N. Takami, N. Shimura, Y. Sato, M. Sekino, A. Satoh, "Overcharge Reaction of Lithium-ion Batteries", Journal of Power Sources, vol. 146, pp. 97-100, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.105>
- [3] M. J. Kang, T. S. Park, C. H. Kim, J. H. Kim, "Laser Welding Characteristics of Aluminum and Copper Sheets for Lithium-ion Batteries", Journal of Welding and Joining, vol. 31, no. 6, pp. 58-64, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.6.58>
- [4] J. H. Kim, S. Hong, "Process and Die Design of Square Cup Drawing for Wall Thickening", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 16, no. 9, pp. 5789-5794, 2015.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.9.5789>
- [5] J. H. Kim, K. H. Lee, Y. J. Lim, B. M. Kim, "Manufacturing Integral Safety Vents in Prismatic Lithium-ion Batteries", Transactions of Materials Processing, vol. 24, no. 4, pp. 293-298, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5228/KSTP.24.4.293>
- [6] D. J. Cha, S. S. Kim, W. Y. Byun, S. W. Kang, E. Z. Kim, H. J. Park, "Combination of Deep Drawing and Forging Process for Forming Drum Shape Product Having Thickness Variation", Transactions of Materials Processing, vol. 14, no. 5, pp. 439-443, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.5228/KSP.2005.14.5.439>
- [7] B. Preston, BMW Unveils i3 Electric Car, The New York Times, 2013, wheels.blogs.nytimes.com, 2016.
- [8] Tom Moloughney, The 2017 BMW i3: 94 Ah Cells and a 125 Mile EPA Range Rating?, 2013, bmwi3.blogspot.kr, 2016.
- [9] 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", Transactions of Materials Processing, vol. 13, no. 4, pp. 307-318, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.5228/KSP.2004.13.4.307>
- [10] H. J. Bang, C. G. Cho, C. H. Han, "A Study on the Cold Forging Processes of a Small Size Part in the Mobile Phone", Proc of Fall Conference on Korea Society for

Technology of Plasticity, pp. 403-405, May 2010.

- [11] LS-dyna User manual, 2015.
- [12] Y. Kim, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, "Numerical Approach to Development of Rectangular Section Cup Used for Battery of Hybrid Car", proc of spring conference on Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 128-132, Jun. 2006.
- [13] AFDEX User manual, 2015.

이 상 훈(Sanghoon Lee) [정회원]



•2012년 3월 ~ 현재 : 국립공주대 금형설계공학과 재학중

<관심분야>
금속 판재성형 및 단조성형 해석

권 순 호(Soonho Kwon) [정회원]



•2012년 3월 ~ 현재 : 국립공주대 금형설계공학과 재학중

<관심분야>
금속 판재성형 및 단조성형 해석

정 훈(Hoon Chung) [정회원]



- 2004년 7월 : 건국대학교 기계설계학 (학사)
- 2007년 7월 : 건국대학교 기계설계학 (석사)
- 2013년 5월 ~ 현재 : 상신EDP 근무

<관심분야>
소성가공, CAE

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 4월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자, 수석연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 공주대 금형설계공학과 교수

<관심분야>
금속 판재성형 및 단조, 하이드로포밍, 유한요소해석, 최적설계