

충격압출 공정을 이용한 직사각형 배터리 케이스 성형 시 불균일 금속 유동 발생 원인 고찰

임재혁¹ · 김용배¹ · 이종섭[†]

한국생산기술연구원^{1,†}

An investigation of non-uniform metal flow during rectangular battery case using impact extrusion process

Jae-Hyuk Lim¹ · Yong-bae Kim¹ · Jong-sup Lee[†]

Korea Institute of Industrial Technology^{1,†}

(Received May 10, 2016 / Revised May 30, 2016 / Accepted June 03, 2016)

Abstract: In this study, relevant to impact extrusion process of the rectangular batter case for electric vehicles, numerical and experimental analyses were conducted to reduce the earring defects induced in the unevenness of metal flow. Since the earring is caused by the non-uniform metal flow induced in the friction and aspect ratio in the bottom section. As a way to reduce the earring, variable land die concept was applied. In order to analyze numerically the complex metal flow by using commercial finite element package, DEFORM 3D, impact extrusion process was simplified in upsetting mode at bottom section and extrusion mode at land section. The impact extrusion experiments were conducted to verify the assessment of process parameter for impact extrusion. As results, variable land die which has longer longitudinal section makes reduce earring defects. In addition, it was confirmed that the effect that slug shape like dog-bone also can reduce the earring. This study is expected to be able to present the useful design guidelines for manufacturing the battery case.

Key Words: Die design, Earring, Impact extrusion, Slug shape

1. 서 론

기존의 상용 디젤·가솔린 차량에서 배출되는 배기가스에 의한 환경문제가 가속화됨에 따라, 전기 배터리를 장착한 친환경 차량(Eco-friendly vehicle) 시장이 증가하고 있다. 특히, 전기자동차(EV, Electric vehicle)는 100% 전기 에너지를 이용하여 주행하므로 배기가스를 전혀 배출하지 않는 장점이 있다. 또한, 낮은 배터리 용량과 효율 등이 문제가 되고 있지만 배터리의 중·대형화 및 고효율화에 따라 크게 개선되고 있다.

전기자동차용 배터리는 다수의 셀(Cell)이 하나의 모듈(Module)을 구성하며, 다시 다수의 모듈이 하나

의 팩(Pack)으로 구성되어 차량 하단부에 장착된다. 따라서 더 많은 배터리 셀을 내장하기 위해선, 공간 효율성이 높은 형태의 배터리를 사용할 필요가 있다. 직사각형의 배터리 셀은 잉여 공간 없이 모듈을 효율적으로 채울 수 있다는 장점이 있다. 따라서 다수의 배터리 제조업체에서 직사각형 배터리 케이스를 제조하고 있으며, 가벼우면서도 저렴하게 제조할 수 있는 공법이 증가하고 있는 실정이다.

배터리 케이스를 제조하는 방법으로는 대표적으로 충격압출 공정과 딥드로잉 공정이 있다. 딥드로잉공정은 펀치를 이용하여 블랭크를 다이 공동부로 밀어 넣음으로써 컵 형상을 만드는 제조 방법이다. 그러나 형상비가 크고, 깊은 사각형 또는 타원형 컵 제조 시, 단단 공정이 요구되기 때문에 공정에 비례한 프레스와 금형이 필요하다. 결과적으로 생산성이

^{1,†} 교신저자: 한국생산기술연구원
E-mail: jongsup@kitech.re.kr

저하되고, 제조원가가 증가하는 단점이 있다¹⁾. 반면 충격압출 공정은 다이에 안착된 소재를 펀치로 가압하여 펀치와 다이 사이의 틈새로 유동시킴으로써 컵 형상의 성형품을 만드는 공정이다. 충격압출 공정은 깊은 컵 형상의 성형품을 1-2회의 공정만으로 제조가 가능하기 때문에 딥드로잉에 비하여 생산성과 제조원가가 저렴하다는 장점을 갖는다.

전술한 이유로 전기자동차용 직사각형 배터리 케이스 및 에너지 저장 장치의 케이스 제조 시 충격압출 공정이 많이 시도되고 있다^{2,4)}.

그러나 충격압출 공정은 몇 가지 기술적인 어려움이 있다. 첫 번째로, 배터리 케이스 제조 시 금형 및 프레스의 높은 정밀도가 요구된다. 펀치와 다이의 정렬이 잘 맞지 않는 경우 케이스의 장변 측과 단변 측 소재의 유동을 균일하게 조절하기 어렵기 때문에 이어링 및 터짐 불량 발생하기 쉽다^{3,4)}.

두 번째로, 배터리 케이스의 형상비가 클수록 소재의 유동 속도 조절이 어려워진다. 즉, 장변 중심부의 유동 속도가 빠르지만, 코너 부는 장변부에 비하여 큰 유동 저항으로 인하여 유동 속도가 저하된다. 이러한 이유로 유동 속도 구배가 발생하고 결과적으로 이어링이 발생하게 된다⁵⁾.

마지막으로, 마찰에 따라 유동 속도가 큰 차이를 보인다. 마찰이 증가할수록 단변 측과 코너부에서 큰 유동 저항으로 인하여 소재 유동이 제한되기 때문에 장변부에서 이어링이 발생하기 쉽다⁵⁾.

결과적으로 이어링을 줄이기 위해선, 형상비나 마찰에 의해 발생하는 불균일한 소재 유동을 제어할 필요가 있다. 불균일한 소재 유동 제어를 위해 충격압출 공정에서 하중을 줄이거나, 높은 소성변형을 통해 성형품의 강도를 증가시키는 연구³⁾는 많이 진행되었으나, 금형 형상을 변경하여 금속 유동을 조절하기 위한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이어링을 줄이기 위한 공정 변수로써 금형과 슬러그 형상을 변경하여 해석과 실험을 수행하였다.

2. 해석 조건

2.1. 공정 변수

공정 변수는 Table. 1과 같이 금형과 슬러그 형상을 변경하였다. 금형 형상은 Fig. 1과 같이 단변부와 장변부의 측벽 랜드부 높이가 동일한 동일랜드(Straight land) 금형과 장변부가 더 높은 가변랜드(Variable

land) 금형을 비교하였다. 가변랜드 금형은 장변 중심부의 랜드부(LC+LV)가 단변부의 랜드부(LC) 보다 더 길기 때문에 압출 구간 내 슬러그에 마찰을 더 많이 부가하여 금속 유동을 억제할 수 있다. 따라서 동일랜드 금형에 비하여 단·장변부의 높이가 균일한 케이스를 성형할 수 있을 것으로 예상된다.

Table 1 Process parameters

Classifications		Specifications	
Die design [unit: mm]	Straight land	$L_C=14.5$	$L_V=0$
		$L_C=12.5$	$L_V=0$
	Variable land	$L_C=12.0$	$L_V=2.5$
		$L_C=9.5$	$L_V=2.5$
		$L_C=7.0$	$L_V=5.0$
Slug shape [unit: %]	Rectangular	$W/W_0=100$	
	Dog-bone	$W/W_0=90$	
		$W/W_0=80$	
		$W/W_0=70$	

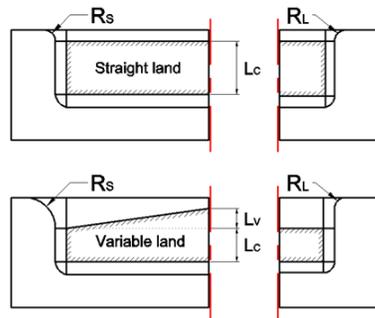


Fig. 1 Comparison of die designs

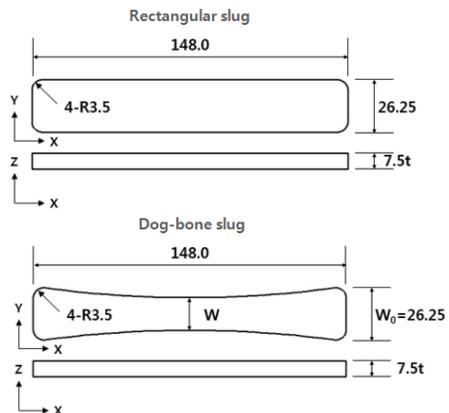


Fig. 2 Comparison of slug designs

한편, 슬러그 형상은 Fig. 2와 같이 직사각형 슬러그와 Dog-bone 형상의 슬러그를 비교하였다. Dog-bone 형상의 슬러그는 장변 중심부 폭(W)이 단변부 폭(W₀)에 비하여 좁기 때문에, 직사각형 슬러그 대비 동일한 펀치 스트로크에서 압출되는 시점이 늦어지므로 상대적으로 높이가 균일한 성형품을 제조할 수 있을 것으로 기대된다.

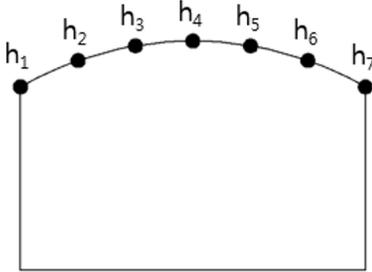


Fig. 3 Measuring points

$$\bar{h} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 \quad (1)$$

$$\text{Standard deviation} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (\bar{h} - h_i)^2}{7}} \quad (2)$$

2.2. 이어링 측정

이어링은 마찰 및 금속 유동 양상에 따라 장변부가 더 높은 볼록형 또는 단변부가 더 높은 오목형 이어링이 발생할 수 있다. 따라서 단순히 최대·최소 높이를 이용한 측정이 아닌 형상을 고려한 측정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 형상을 고려한 이어링 평가를 위하여, Fig. 3과 같이 7개 위치에서 높이를 측정 후 식 (1), (2)와 같이 표준편차를 이용하여 결과를 검토하였다.

2.3. 해석 및 실험 조건

해석에는 상용 유한요소 해석 S/W인 DEFORM 3D를 사용하였으며, 해석 모델과 슬러그 소재에 대한 기계적 물성은 각각 Fig. 4와 Fig 5에 나타내었다. 펀치속도는 100 mm/sec이며, 해석 효율을 고려하여 1/4 대칭 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 마찰 모델은 전만수 등⁶⁾의 논문을 참고하여 전단·쿨롱 마찰을 복합한 하이브리드 마찰을 사용하였으며 이때 마찰계수는 $\mu=0.04$, $m=0.1$ 인 관계를 갖는다.

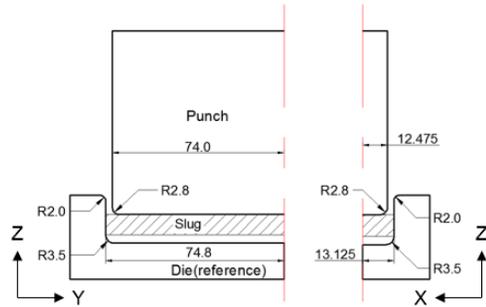


Fig. 4 Schematic of impact extrusion

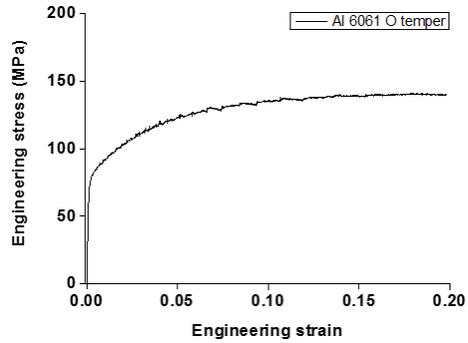


Fig. 5 Engineering stress-strain curve of Al6061-O

한편, 충격압출 실험은 500 ton 수평식 충격압출 프레스를 이용하였다. 해석과 동일한 펀치속도 100 mm/sec 조건에서 실험을 수행하였으며, 금형 재질은 약 400 ton의 하중을 버틸 수 있도록 고 인성을 갖는 AISI M4 재질을 사용하였다. 슬러그 재질은 Al 6061-O를 사용하였으며, 재질에 따른 이어링 변화를 확인하기 위하여 Al 3xxx 소재를 사용하여 Fig. 6과 같이 실험을 수행하였다.

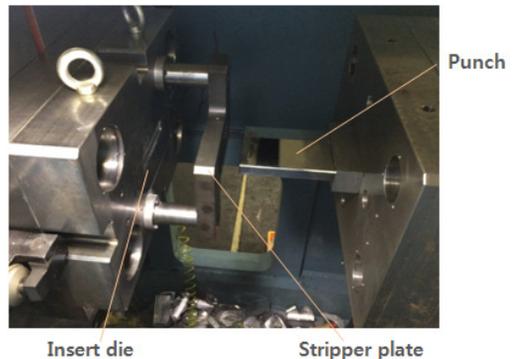


Fig. 6 Illustration of Impact extrusion process

3. 성형 결과

3.1. 금형 형상에 따른 해석 및 실험 결과

동일랜드 금형과 가변랜드 금형에 따른 성형 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 각 장변, 단변 폭에 대하여 좌측은 Deform 3D의 해석 결과이며, 우측은 실험 결과 나타난 이어링의 형상을 나타낸다.

Al 3xxx 계열의 소재는 약 350 ton의 성형하중이 발생하였으나, Al 6061-O 소재는 약 450 ton까지 증가하여 금형 파손이 우려되어 실험을 수행하지 못하였다.

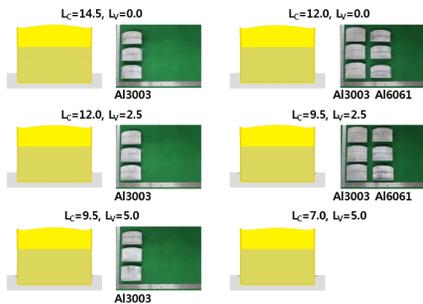


Fig. 7 FE analysis results for the earring with die designs

Fig. 8은 해석적으로 나타난 결과를 각 포인트에 대해 표준편차를 나타내었다. 정량적으로 이어링을 평가했을 때, 동일랜드 금형은 가변랜드 금형에 비해 큰 표준편차 값을 보이며, 이는 이어링이 발생하여 높이 값이 차이를 보임을 의미한다. 가변랜드 금형은 가변량(LV)이 증가할수록 대체로 이어링이 감소하는 결과를 보였다.

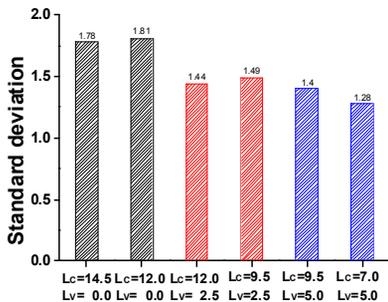


Fig. 8 Standard deviation for the earring measured by FE analysis

Fig. 9는 실험적으로 측정된 성형 결과를 표준편차 값으로 나타난 그래프이다. 해석결과와 마찬가지로

로 동일랜드 금형 (LV=0)에서는 가변랜드 금형에 비해 이어링이 크게 발생하여 표준편차 값이 높게 나타난 것을 알 수 있다. 마찬가지로 가변랜드 금형에서는 가변량(LV)이 증가할수록 표준편차 값이 줄어드는 것을 알 수 있으며 이는 곧 이어링의 발생이 줄어들었음을 의미한다.

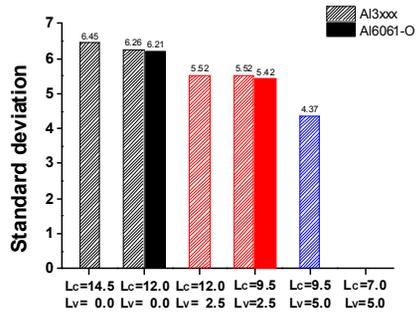


Fig. 9 Standard deviation for the earring measured by experiments

Al 3xxx와 Al 6061-O 소재별 이어링 발생은 가변금형을 적용하는 것 보다는 작지만 동일랜드 금형에서 표준편차가 약 0.05, LC=9.5 LV=2.5 가변금형에서 0.1가량 표준편차가 감소하는 정도의 이어링 발생 억제가 나타났다. Al 6061-O의 재료강도가 크기 때문에 억제되는 이어링의 발생을 감안하였을 때 가변랜드 금형의 이어링 억제효과가 효율적임을 알 수 있다.

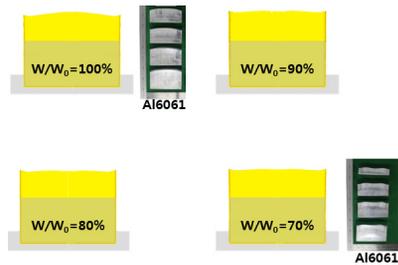


Fig. 10 FE analysis results for the earring with slug shapes

3.2. 슬러그 형상에 따른 해석 및 실험 결과

Fig. 10은 슬러그 형상에 따른 성형 결과를 나타내었다. 직사각형 슬러그의 경우 마찰에 의해 바닥부에서 단축방향을 따라 변형률이 증가하기 때문에 장변 중심부가 높은 볼록형 이어링이 발생한다. 반면, Dog-bone 형상의 슬러그를 사용한 경우 장변 중심부 높이가 감소하여 이어링이 저감된 것을 육안으로 확인할 수 있다.

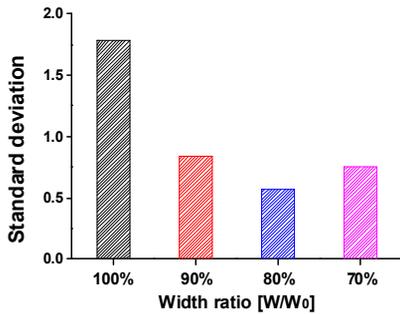


Fig. 11 Standard deviation for the earring measured by FE analysis

이어링을 해석적으로 평가한 결과, Fig. 11과 같이 장변부 폭이 감소할수록 이어링이 감소하지만, 폭 비율 70%에서는 폭비율 80%에서 보다 표준편차 값이 더 증가하였다. 이때는 장변 중심부의 높이는 거의 일정하였으나 장변 끝단에서 높이가 높아졌기 때문으로 보여지며 실험 결과와 비교해 보았을 때, 이는 해석적으로 발생된 오류일 수 있다고 판단되나 좀 더 실제적인 검토를 해 볼 필요가 있다.

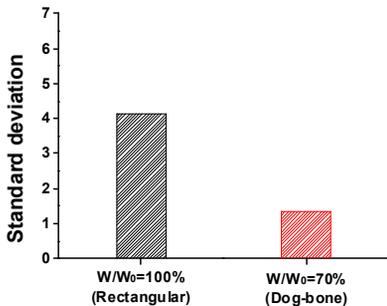


Fig. 12 Standard deviation for the earring measured by experiments

Fig. 12는 폭 비율에 따라 실험적으로 비교한 결과이며 폭비율 70%에서 표준편차가 1/4 수준의 이어링 저감효과를 보였다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서 이어링을 저감시키기 위한 공정변수 영향평가를 해석과 실험을 통해 수행하였으며, 각각의 결과는 다음과 같다.

1) 동일랜드 금형과 가변랜드 금형을 비교한 결과, 장변부의 랜드부가 단변부에 비해 길수록 압출시 지속적인 마찰에 의해 장변부 금속 유동을 저하시킬 수 있다. 이어링 발생 저감을 위해 슬러그의 재질 보다는 가변금형을 사용하는 것이 더 효율적이다.

2) 슬러그 형상의 경우, 초기 압출량을 조절하여 성형품의 높이를 균일화하기 위한 방안으로써 장변 중심부 폭이 좁은 Dog-bone 형상을 사용한다면 가장 효율적으로 이어링을 저감시킬 수 있다.

본 연구에서 실험과 해석은 유사한 경향을 보이나, 해석 결과가 과소평가된 이유는 금형에 소착된 슬러그에 의한 유동 저하, 고속 변형에 따른 소성발열 미고려 등에 의한 것으로 판단된다. 따라서 더 정확한 해석 결과를 얻기 위해선 위와 같은 영향들이 충분히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) S. H. Kim, S. H. Kim, H. Huh, "Finite element inverse analysis for the design of intermediate dies in multi-stage deep-drawing processes with large aspect ratio", J. Mater. Process. Technol, Vol. 113, pp. 779-785, 2001.
- 2) S.H. Kim, S.W. Chung, "Investigation of sectional aspect ratio on the Backward extrusion process of Aluminum container", No.1, Issue, pp.950-956, 2005.
- 3) J. Danckert, "The influence of the punch land in backward can extrusion", CIRP Annals, Vol.53, Issue 1, pp. 227-230, 2004.
- 4) Tsubasa WATANABE, Mitsugu MOTOMURA, Akio HAGIWARA, Genta KONISHI, "Investigation on defects generation mechanism and method for reducing defects in impact extrusion of battery cases for vehicles", J. Light Met, Vol. 10, No. 10, pp. 363-369, 2012.
- 5) S.H. Kim, S.W. Chung, S. Padmanaban, "Investigation of lubrication effect on the backward extrusion of thin-walled rectangular aluminum case with large aspect ratio", J. Mater. Process. Technol, Vol. 180, pp 693-701, 2012.
- 6) M. S. Joun, H. K. Moon, S. M. Hwang, "Consideration of Frictional Laws and their Effect on Finite Element Solutions in Bulk Metal Forming", Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf, pp. 233-237, 1995.