

금속판재의 하프피어싱 공정에서의 틈새 영향 연구

연시모¹ · 이슬기² · 정완진² · 김종호[#]

Influence of Clearance in Half-piercing of Sheet Metal

S. M. Yeon, S. K. Lee, W. J. Chung, J. H. Kim

(Received May 31, 2013 / Revised November 15, 2013 / Accepted November 19, 2013)

Abstract

Recently, the engraving of letters or a pattern on a product surface has received more attention especially in trying to satisfy the customer requirements. Half-piercing is a protrusion forming process that pierces only 40~50% of the material thickness. In the current study, the half-piercing technique for making clear letters by protruding sheet material was selected and studied. The influence of clearance and penetration depth was investigated by measuring the camber and extruded length of a protrusion after experiments. In addition, a numerical analysis was performed for the same working conditions and compared with experimental results. It is shown that, as the clearance increases, the camber of a protrusion increases rapidly and the extruded length decreases slightly. The deformation pattern around the cutting edge during half-piercing changes from an extrusion mode to a shearing mode as the clearance changes from minus to plus values. It is also confirmed that the experimental results show a good agreement with the numerical analyses.

Key Words : Half-Piercing, Protrusion, Clearance, Penetration Depth, Camber, Extruded Length

1. 서론

최근 제품의 외관품질에 대한 수요 증가로 제품 표면에 표시되는 무늬나 문자의 성형정밀도에 대한 요구가 증대되고 있다. 각인(marking)은 문자나 형상을 제품표면에 표시하는 방법으로 과거에는 공정의 용이성으로 인해 잉크나 라벨 또는 기계가공의 방법이 주로 사용되었다. 잉크나 라벨은 사용환경이 좋지 못한 경우에는 각인 형상이 유실되고 기계가공의 경우에는 재료 손실이 크며 제품의 기계적 강도를 떨어뜨리고 공정 중의 칩(chip) 발생으로 작업 환경이 악화된다. 하지만 소성가공법을 이용한 각인 공정은 접촉이나 절삭 가공이 아닌 소재의 소성변

형을 이용하여 성형하기 때문에 선명성이 우수하고 영구변형으로 각인형상 손실의 우려가 감소한다. 소성가공법을 이용한 각인방법에는 소재에 국부적인 인장변형을 부가하여 돌기형상을 만드는 엠보싱(embossing), 소재를 펀치로 강하게 압축하여 펀치형상이 제품 표면에 음각으로 새겨지도록 하는 인덴테이션(indentation)과 피어싱(piercing) 공정에서 소재 두께의 40~50%만을 피어싱하여 돌기를 형성하는 하프피어싱(half-piercing) 등이 있다[1].

박판의 전단에 관한 연구로는 지금까지 유한요소법에 의한 이론연구[2,3]와 실험연구[4] 등이 진행되면서 전단하중, 마찰, 틈새, 소재 변형, 전단면 파단, 공구 마모 등에 관해 많은 연구가 수행되었다. 또한

1. 서울과학기술대학교 일반대학원 제품설계금형공학과
2. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
Corresponding Author: Dept. of Mechanical System Design Engineering,
Seoul National University of Science and Technology, E-mail:
jhkim365@seoultech.ac.kr

엠보싱을 이용한 돌기 성형에 관한 연구[5]와 각인의 선명성 향상을 위해 하프피어싱을 이용한 돌기 성형에 관한 실험 연구[6]도 최근에 연구된 바 있다.

본 연구에서는 지난 연구결과[6]를 토대로 보충실험을 수행하고 이를 비교 분석하기 위한 이론적인 시뮬레이션을 병행하였다. 펀치의 침입깊이(penetration depth)와 틈새를 변화시키면서 하프피어싱할 때 압출되는 돌기 밑면의 휨량을 표시하는 캠버(camber)와 압출길이(extruded length)에 대해서 이론과 실험 결과를 비교하여 이론 해석의 유용성을 조사하였다.

2. 실험 및 해석

2.1 소재 물성치 평가

연구에 사용된 소재는 두께 2mm의 알루미늄 합금(AL6061-O)으로 기계적 성질 시험을 위해 INSTRON 8516 만능시험기로 준정적 변형을 속도에서 인장시험을 수행하였다. 시험을 통해 얻어진 결과가 Table 1에 주어져 있다. 유동응력 곡선은 시험 데이터를 최소자승법(least square method)에 의한 곡선맞춤(curve fitting)으로 구하였으며, 이의 응력-변형을 관계식은 다음과 같다.

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

Table 1 Mechanical properties of specimen

Material	AL6061-O
Thickness (mm)	2.0
Tensile strength (kgf/mm ²)	13.7
Elongation (%)	26.6
Yield stress (σ_y , kgf/mm ²)	4.9
Strength coefficient (K , kgf/mm ²)	17.4
Strain hardening coefficient (n)	0.3

2.2 실험

본 연구에 사용된 금형은 Fig. 1의 피어싱 금형으로, 틈새(펀치, 다이 사이의 편측 간극을 나타내는 것으로 소재두께에 대한 간극 비율을 %로 표시) 효과를 연구하기 위해 인서트방식의 다이버튼(die button)을 바꾸어 가면서 실험하였다. 소재 직경은 10mm이고, 실험에 사용한 인장시험기의 작업속도는 50mm/min(0.833mm/sec)이다. 펀치는 직경 3mm로

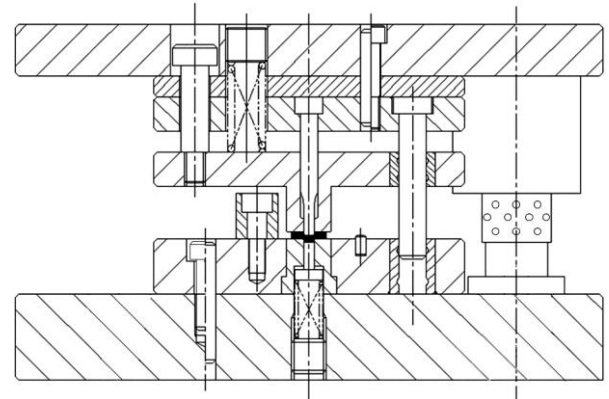


Fig. 1 Experimental die for half-piercing

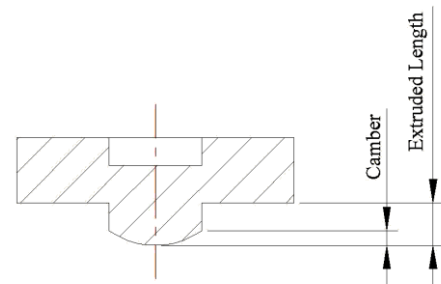


Fig. 2 Sectional view of half-pierced specimen

고정하고, 틈새는 -10%에서 +10%까지 5%(0.2mm) 간격으로 변화시키면서 침입깊이를 0.7, 0.9mm의 두 경우에 대해 하프피어싱 실험을 하였다.

성형된 시편의 제품 품질 비교를 하기 위해 하프 피어싱된 시편의 중심 단면을 절단하고 폴리싱(polishing)하여 광학 현미경으로 단면의 형상과 치수를 측정하였다.

단면형상의 측정 요소는 Fig. 2에서와 같이 압출된 돌기 밑면의 곡면부 단차를 표시하는 캠버와 돌출된 압출길이를 선정하였다.

2.4 해석

해석은 상용 해석프로그램인 AFDEX을 사용하여 축대칭 해석을 진행하였다. AFDEX는 강소성 유한요소법을 사용하는 프로그램으로 지금까지 다양한 체적공정에 적용된 바 있다. 해석에 사용된 금형의 배치도는 Fig. 3과 같으며, 실험과 동일한 펀치 직경(3mm)을 적용하고, 다이 내경은 2.6mm부터 3.4mm까지 0.2mm 간격으로 증가시키면서 해석을 진행하였다. 펀치와 다이 날끝의 반경은 R계이지를 이용해 실험 금형을 측정한 0.05mm를 적용하였다. 또한 소재는 등방가공경화를 고려한 강소성체로 가정하

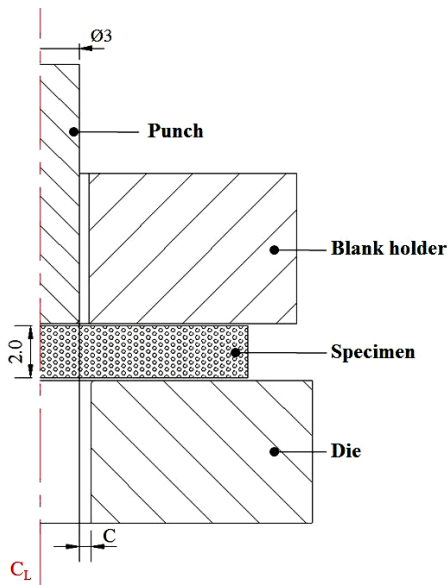


Fig. 3 Tool modeling for analysis

Table 2 Analysis conditions for half-piercing

	AFDEX
Clearance (C/t, %)	-10, -5, 0, 5, 10
Penetration depth (H,mm)	0.7, 0.9
Frictional coefficient (μ)	0.15
Punch speed (mm/sec)	0.833
Number of elements	5,000
Blankholding force(kgf)	21.5

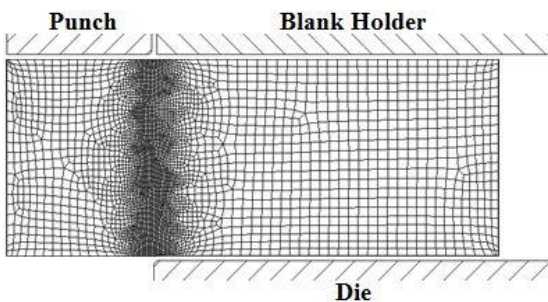
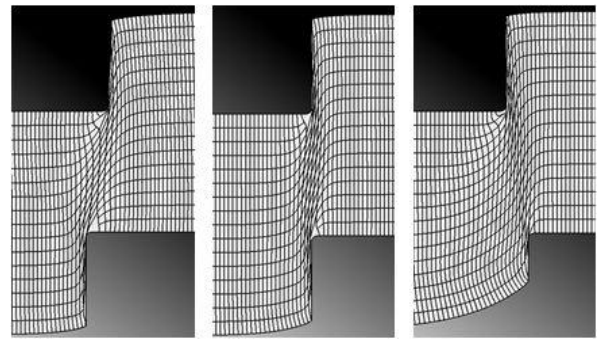
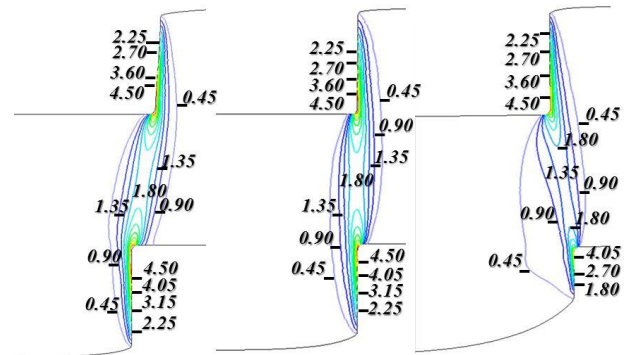


Fig. 4 Initial mesh of a specimen

였다. 해석 모델의 격자(mesh)수와 마찰계수 등의 해석 조건은 Table 2와 같으며, Fig. 4에 초기 상태의 소재 격자형상을 나타내었다. 주요 성형부인 날끝 주변의 소재 격자수는 국부적으로 증가시켰으며, 초기 격자수는 5,000개를 적용하였다.



(a) C = -10% (b) C = 0% (c) C = 10%
Fig. 5 Deformed pattern of initial mesh with respect to clearance (H = 0.9mm)



(a) C = -10% (b) C = 0% (c) C = 10%
Fig. 6 Distribution of effective strain around the cutting edge of punch and die (H = 0.9mm)

3. 결과 및 고찰

3.1 날끝 부위의 변형 패턴

소재로의 침입깊이 0.9mm(침입률 45%)일때 초기 격자의 변형 패턴을 틈새 별로 정리한 것이 Fig. 5에 주어져 있다. 격자의 변형이 펀치 날끝과 다이 날끝사이에 집중되어 있고, 틈새가 음(-)의 값에서 양(+)의 값으로 바뀌면서 압출되는 길이는 작아지는 대신에 돌기 밀면의 굴곡은 더 심해지고 있다. 즉 음의 틈새에서 보다 더 균일하고 선명한 돌기 형상을 얻을 수 있었다.

3.2 날끝 주변의 유효변형률과 응력 분포

Fig. 6은 침입깊이 0.9mm 일 때, 각각의 틈새(-10, 0, 10%)에 대해 이론 해석된 유효변형률 분포를 시편 단면상에 비교한 것이다.

펀치와 다이 날끝을 연결하는 주위에 소성변형이

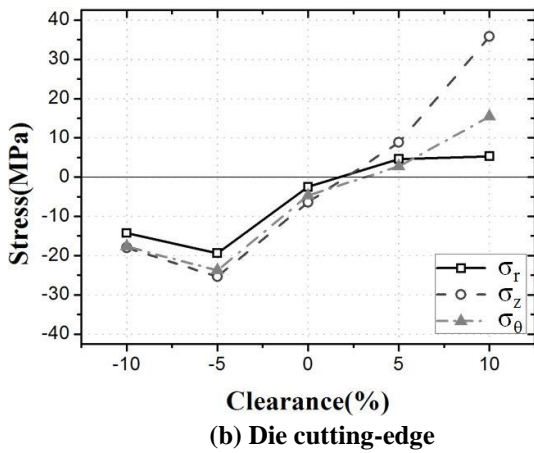
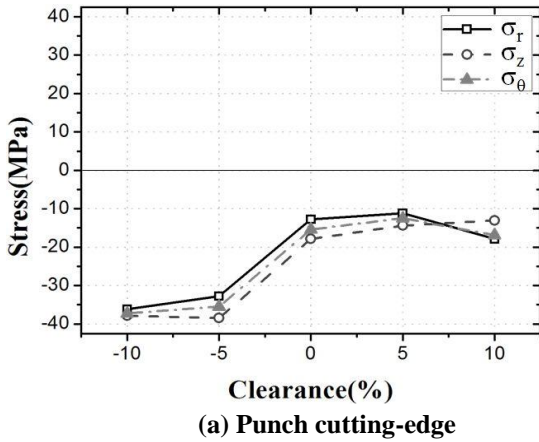


Fig. 7 Distribution of stresses on the cutting edge of punch and die (H = 0.9mm)

집중되어있고, 틈새가 커지면서 소재 변형이 압축변형에서 전단변형으로 바뀌어지면서 날끝 인접부근의 유효변형률은 감소되고 변형 영역은 더 확대되는 것을 알 수 있다 또한 같은 틈새 조건에서는 다이 날끝보다 펀치 날끝 부근에 더 큰 소성변형이 일어나는 것도 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 같은 작업조건에 대해, 펀치와 다이 날끝의 라운딩된 모서리(R=0.05mm)의 중앙 위치점(45°방향)에서 응력 상태를 비교한 것이다. 펀치 날끝부에서는 3방향의 응력 성분이 모두 압축상태를 보여주고, 틈새가 증가될수록 압축응력의 크기가 감소되는 것을 알 수 있다. 반면에 다이 날끝부에서의 응력상태는 틈새가 음에서 양으로 변해감에 따라 압축응력에서 인장응력 상태로 변화되고 있다.

즉 틈새가 양인 경우에는 인장응력 상태가 되어 크랙이 쉽게 발생할 수 있음을 나타내는데 이러한 경향은 펀치 날끝보다는 다이 날끝부에 더 쉽게 발

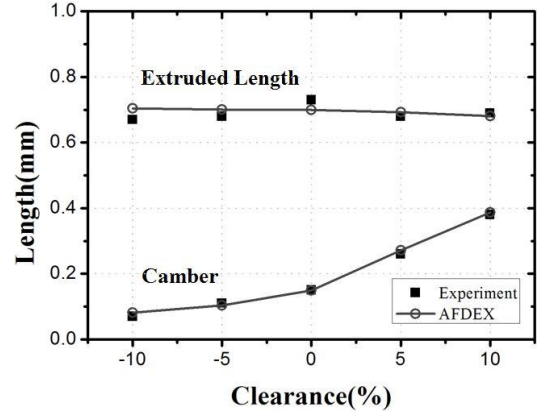


Fig. 8 Comparison of camber and extruded length(H = 0.7mm)

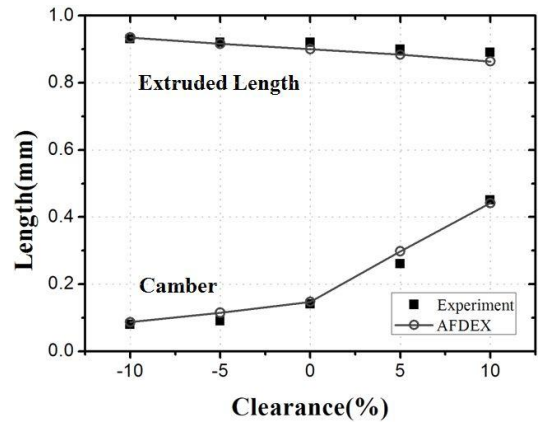


Fig. 9 Comparison of camber and extruded length(H = 0.9mm)

생할 수 있다. 선행연구[6]의 실험에서 크랙이 발생하지 않는 소재의 최대 침입률이 틈새 -10%에서는 90%이고, 틈새 10%에서는 45% 밖에 되지 못한 결과를 쉽게 이해할 수 있다.

3.3 이론과 실험 결과 비교

틈새와 침입깊이를 변화시키면서 이론 해석한 결과와 실험치와의 비교가 압출길이와 캠버에 대해 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타나 있다. Fig. 8은 침입깊이가 0.7mm일때 비교한 것으로 틈새가 증가함에 따라 굽힘 영향이 큰 캠버는 크게 증가하고 있는 반면에, 압출길이는 틈새 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났으며 이론치와 실험치는 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

침입깊이를 0.9mm로 증가시켜서 이론과 실험을 Fig. 9에서와 같이 비교해도 마찬가지로 잘 일치하고 있다. 그림에서처럼 침입깊이를 증가시키면 캠버보

다는 압출길이에 더 큰 영향을 미쳐 압출길이가 크게 증가하고 있으며, 압출길이는 틈새가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 8과 Fig. 9의 결과를 비교할 때 캠버는 침입깊이 초기에 결정되고, 압출길이는 침입깊이에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 또한 틈새가 증가할수록 압출길이는 상대적으로 감소하면서 돌기 밑면의 굴곡이 더 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 이들 결과를 고찰할 때 하프피어싱된 돌기의 선명한 형상을 얻기 위해서는 틈새를 음으로 설계하는 것이 더 합리적인 것으로 판단할 수 있다

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 합금 소재를 사용하여 원형돌기의 하프피어싱 공정에서 틈새와 침입깊이의 변화에 따른 이론적, 실험적 비교연구를 수행하였으며, 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 하프피어싱 공정에서 틈새를 음(-)으로 설계하면 압출변형과 유사한 변형패턴을 보이며 날끝주위에 강한 압축응력과 높은 소성변형상태를 나타내고, 틈새를 양(+)으로 설계하면 전단변형모드로 되면서 다이날끝 주위에 인장응력이 발생되어 크랙이 쉽게 발생할 수 있다

(2) 틈새가 음(-)에서 양(+)으로 증가함에 따라 돌기 밑면의 캠버는 크게 증가하는 반면에, 돌출된 압출길이에겐 큰 변화없이 미미한 감소 현상을 나타낸다. 또한 침입깊이를 증가시키면 캠버보다는 압출길이 증가가 더 두드러지게 나타나고 있다.

(3) 하프피어싱의 실험 결과와 AFDEX에 의한 유한요소해석 결과가 비교적 잘 일치하고 있어 향후 이 공정의 이론적 예측이 가능함을 확인하였다. 또한 본 연구의 돌기 성형에 관한 결과는 추후 금속

판재표면에 선명한 각인 작업을 위한 설계조건으로도 충분히 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] D. F. Eary, E. A. Reed, 1974, *Techniques of Press Working Sheet Metal*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 198~199.
- [2] S. K. Maiti, A. A. Ambekar, U. P. Singh, P. P. Date, K. Narasimhan, 2000, Assessment of Influence of Some Process Parameters on Sheet Metal Blanking, *J. mater. Process. Technol.*, Vol. 102, No. 1, pp. 249~256.
- [3] Y. J. Kim, T. S. Kwak, W. B. Bae, 2000, Finite Element Analysis on Effect of Die Clearance on Shear Planes in Fine Blanking, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 9, No. 2, pp. 724~729.
- [4] K. B. Lee, Y. G. Lee, J. H. Kim, 2003, A Study on the Blanking Characteristic of Anti-vibration Sheet Metal, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 12, No. 8, pp. 152~158.
- [5] C. S. Namoco Jr., T. Iizuka, K. Narita, N. Takakura, K. Yamaguchi, 2007, Effects of Embossing and Restoration Process on the Deep Drawability of Aluminum Alloy Sheets, *J. mater. Process. Technol.*, Vol. 187, pp. 202~206.
- [6] H. K. Jung, J. H. Kim, 2012, Forming of Circular Protrusion by Half-Piercing and its Application to Marking of Sheet Metal, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 3, pp. 202~206.