

후방압출공정의 corner cavity형성에 관한 해석 Analysis on the corner cavity formation in backward extrusion process

김 영 호, 배 원 병(부산대 정밀 정형 및 금형가공연구소), 변 홍 석*(부산대 대학원)
Young-Ho Kim, Won-Byong Bae(ERC/NSDM, Pusan National University.),
Hong-Seok Byun*(Graduate School, Pusan National University.)

ABSTRACT

In this paper, Upper bound analysis to predict the formation of corner cavity during the final stage of backward extrusion is used. The critical condition for corner cavity formation is obtained by upper bound analysis. The quantitative relationships between corner cavity formation and process parameters are studied. To broaden forming limit area, driven container and multi-step forming process is proposed. As a result of FEM, forming limit is enlarged. And this results is compared with the analytic results

Key Words : Backward extrusion(후방압출), Corner cavity(코너 캐비티), Upper bound analysis(상계해석), FEM simulation(FEM 시뮬레이션), Hodograph(속도벡터도), Forming limit(성형한계)

1. 서론

종래의 금속성형공정은 전문가의 노하우를 바탕으로 경험에 의해 발달되었다. 그러나 최근 금속성형공정은 재료비의 상승, 작업환경악화로 인한 숙련기술자의 부족 및 다품종 소량생산등의 문제점을 극복하기 위하여 생산성 향상, 소재 손실의 최소화, 공정의 최소화등 비용절감에 주력하고 있다.

후방압출공정은 제조산업 및 분말야금산업에 기초적 공정으로 다른 가공방법에 비해 가공속도가 빠르기 때문에 제품의 대량생산에 주력해 왔으나, 오늘날에는 대량생산방식에서 탈피하여 중, 소량의 정밀제품을 생산하는 추세에 있다. 후방압출된 정밀한 최종 제품을 얻기 위해서는 공정중에 생기는 결함을 없애야 하는 것이 중요하다. 그래서 현재까지 결함예측에 대해 수행되어져 왔는데, 이에 관한 연구로는 Wu shichun^[1]등이 수정된 슬래범에 최소에너지이론과 극한정리를 적용하여 후방압출공정에서 발생하는 코너캐비티(corner cavity)을 간단하게 해석하였고, Avitzur^[2]등은 축대칭전방압출에 관하여 central cavity을 상계해석을 이용해 해석하였다. 그리고, Ståhlberg^[3]등은 상계해석을 이용해 피어싱공정에서 코너캐비티(corner cavity) 발생조건을 예측하고 성형영역의 한계를 제시하였다. 또, Dean^[4]등은 정밀단조에서 코너캐비티의 채움(filling)과 단조하중관계를

상계해석을 통해 해석한 바가 있다.

그러나, 위의 논문들은 펀치의 폭에 대한 제품두께비가 성형영역을 넘어서 제품을 제조할 필요가 있을 시 그 방향성은 제시하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 후방압출동안 최종단계까지는 동안 생기는 코너캐비티를 예측하고, 동시에 구동 콘테이너와 단단계 성형공정을 통해 성형영역의 한계를 넓혀 결함을 줄이는 방법을 모색하고자 하였다. 그리고, FEM 시뮬레이션을 통해 얻은 결과값과 상계해와 비교를 통해 그 타당성을 검증하고자 한다..

2. 상계해석

상계법은 일반적으로 강소성재료의 가공하중을 근사적으로 평가하는 한 방법으로, 속도경계조건과 체적 일정조건을 만족하는 동적가용속도장을 이용하여 가공하중의 상계를 얻을 수 있는 해법으로 본 연구의 후방압출공정을 해석하는 데 이용하였다. 그리고 상계해법을 후방압출공정을 적용하는 데 문제를 간결화하기 위해 다음과 같은 가정을 두었다.

- (1)가공하고자하는 재료는 등방성이고, 균질하다.
- (2)가공경화효과와 소성유동응력에 미치는 변형률속

도의 효과는 무시한다.

(3) 변형의 특정한 면들에서 전단이 일어나고 특정면을 제외하고는 재료가 강체이다.

(4) 소성유동은 평면변형이고 모든 변형은 몇 개의 평면상에서 전단변형이 이루어진다.

2.1 후방압출공정의 최종단계에서의 상계해석

Fig.1(a)은 펀치가 컨테이너 가까이 갈 때 비정상상태의 평면후방압출공정의 개략도, 캐비티형성 및 상계해석영역을 보여주고 있다. 소재의 cropping시 평행도 유지가 일반적으로 어려우므로 업셋팅으로 약간의 예비성형한 후 후방압출제품을 만든다. 이 경우 치수정밀도 유지 및 편심방지를 이룰 수 있도록 펀치형상은 아래의 그림처럼 펀치헤드쪽에 경사를 주었다.

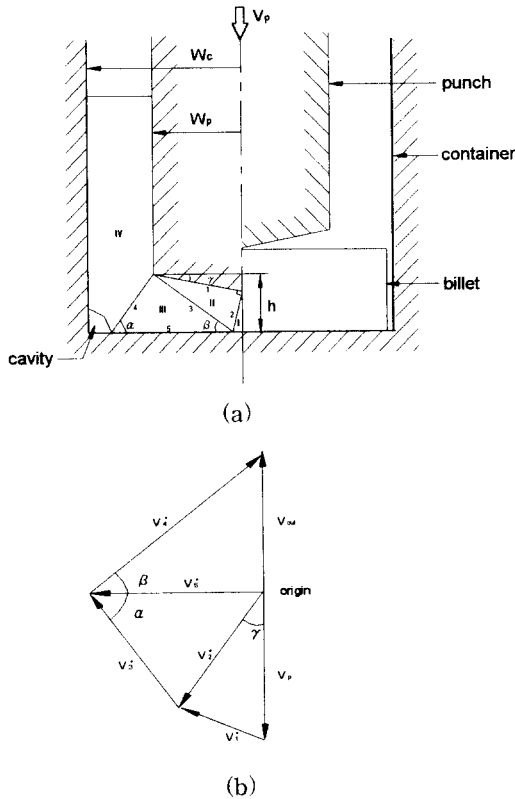


Fig.1 Mode of deformation for upper bound analysis in backward extrusion and Hodograph

이 공정에서 단면감소율(r)은 다음과 같이 표현된다.

$$r = \frac{W_p}{W_c}$$

여기서, W_p 는 펀치의 반폭이고, W_c 는 컨테이너의 반폭이다

Fig.1(b)는 가정한 변형장의 속도벡터도인 호도그래프를 나타낸다. 여기서, 영역 I 은 데드메탈존(dead metal zone)으로 가정한다. Fig.1(a),(b)의 α, β 그리고 γ 에 대해 펀치압력 q 은 방정식(1)에 의해 결정할 수 있다.

$$q W_p V_p = \sum_{i=1}^4 m_i k \cdot V_i^* \cdot S_i \quad (1)$$

Fig.1(a),(b)로부터 속도불연속면과 속도불연속의 크기를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{W_p}{\cos \gamma} \\ S_2 &= \frac{h - W_p \tan \gamma}{\cos \gamma} \\ S_3 &= \frac{h}{\sin \alpha} \\ S_4 &= \frac{h}{\sin \beta} \\ S_5 &= h \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_1^* &= \frac{\tan \gamma \cdot V_p}{\cos \gamma + \sin \gamma \cdot \tan \gamma} \\ V_2^* &= \frac{V_p}{\cos \gamma + \sin \gamma \cdot \tan \gamma} \\ V_3^* &= \frac{\cos \gamma}{\sin \alpha} \cdot \frac{V_p}{\cos \gamma + \sin \gamma \cdot \tan \gamma} \\ V_4^* &= \frac{V_p (\sin \gamma + \cot \alpha)}{\cos \gamma + \sin \gamma \cdot \tan \gamma} \cdot \frac{1}{\cos \beta} \\ V_5^* &= \frac{V_p (\sin \gamma + \cot \alpha)}{\cos \gamma + \sin \gamma \cdot \tan \gamma} \end{aligned} \quad (3)$$

방정식(1), (2) 및 (3)을 조합하여 펀치압력 q 을 구하면 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} q &= k \left[(m_1 - 1) \tan \gamma + \frac{h}{W_p} + \frac{\cos^2 \gamma}{\sin^2 \alpha} \cdot \frac{h}{W_p} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sin \gamma + \cot \alpha}{\sin \beta \cos \beta} \cdot \frac{h}{W_p} \cdot \cos \gamma + m_5 \frac{h}{W_p} \right. \\ &\quad \left. \times (\sin \gamma + \cot \alpha) \cdot \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) \cdot \cos \gamma \right] \end{aligned} \quad (4)$$

이 식에서 β 에 관해서 펀치압력을 최소화시키면

$$\frac{\partial q}{\partial \beta} = 0, \quad \beta = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{m_5 + 2}} \text{ 이다.}$$

이 값을 (4)식에 넣고 계산하면 다음과 같은 무차원 편치압력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{q}{\sigma} = & \frac{1}{2} \left[(m_1 - 1) \tan \gamma + \frac{h}{W_p} + \left[\left(\frac{\sec^2 \gamma}{h/W_p} - \tan \gamma \right)^2 + 1 \right] \times \frac{h}{W_p} \cdot \cos^2 \gamma \right. \\ & + \frac{\sin \gamma + \frac{\sec^2 \gamma}{h/W_p} - \tan \gamma}{\sin(\cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{m_5 + 2}}) \cdot \cos(\cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{m_5 + 2}})} \\ & \times \frac{h}{W_p} \cdot \cos \gamma + m_5 (\sin \gamma + \frac{\sec^2 \gamma}{h/W_p} - \tan \gamma) \\ & \left. \times \left(\frac{\sec^2 \gamma}{h/W_p} - \tan \gamma + \frac{1}{\tan(\cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{m_5 + 2}})} \times \frac{h}{W_p} \cos \gamma \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 캐비티 생성시 다음을 만족한다.

$$\frac{W_c - W_p}{h} \geq \frac{1}{\tan(\cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{m_5 + 2}})} \quad (6)$$

$$r = \frac{W_p}{W_c} \text{ 이므로}$$

$$\frac{h}{W_p} \leq \left(\frac{1-r}{r} \right) \cdot \tan(\cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{m_5 + 2}}) \quad (7)$$

식(5)에서 $\gamma=0$ 인 경우 평편치를 사용한 결과가 되므로

$$\frac{q}{\sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{h}{W_p} + \frac{1}{h/W_p} + 2 \right] \quad (8)$$

로 나타낼 수 있고, 이 식은 U. Ståhlberg의 식과 일치한다.^[3]

2.2 성형한계를 증가시키는 방법모색

상용유한요소프로그램을 이용하여 공정시물레이션을 실시하였다. 시물레이션 공정은 Fig.2에서 보여주고 있는 공정(a)에서 컨테이너를 구동하여 압출하고, 공정(b)와 같이 압력을 가하므로써 성형한계확대 및 코너캐비티의 방지울 하는 이중효과를 가져오도록 하였다. 컨테이너 양쪽쪽에 대해 소재의 클리어런스 양은 동일하다.

시물레이션에 사용된 소재는 알루미늄 Al 2024이며,

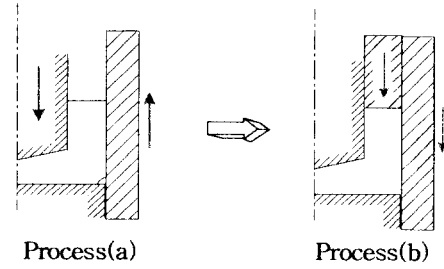


Fig.2 Display of Process (a) & (b) for the simulation

응력-변형률관계식은 $\bar{\sigma} = 357 \bar{\epsilon}^{0.1588} [N/mm^2]$ 이다. 수행된 시물레이션의 조건은 Table.1에서 보여 주고 있다.

Table.1 Process conditions for the simulation

Process	Backward Extrusion		
	Friction on the Punch	Friction on the container	Friction on the moving container
a	m=0.2	m=0.2	m=0.2
b	m=0.2	m=0.2	m=0.2

Table.1에서 보듯이 공정 a, b에서 편치와 콘테이너에 마찰상수값(m)은 0.2로 모두 같게 주었다.

이에 대해 공정 a, b의 캐비티(cavity)의 경향을 알아보고, h/W_p 에 따른 성형영역을 조사하고, 상계해와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3은 식(5)에 대한 결과로서 편치경사각도(γ)의 $0^\circ, 10^\circ$, 및 20° 일 때 각각의 편치폭에 대한 두께비와 무차원편치압력사이의 관계값을 도시하였다.

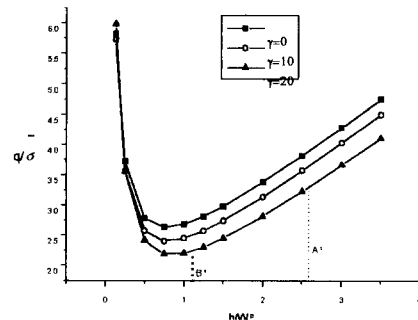


Fig.3 Non-dimensional punch pressure when a cavity is formed: $m_1=m_5=0.2$, γ is deg.

γ 가 크짐에 따라 h/W_p 에 대해서 편치압력이 감소되는 것을 볼 수 있다. h/W_p 가 0.75에서 모든 γ 에 대해서 $q/\bar{\sigma}$ 가 최소값을 가지는 것을 알 수 있다. 단면감소율(r)이 0.3와 0.5일 때 코너캐비티 발생시점을 각각 $A_1(h/W_p=2.56)$, $B_1(h/W_p=1.1)$ 라 표시할 수 있다. h/W_p 가 이들 값보다 작을 때 캐비티(cavity)발생영역이라 할 수 있다.

Fig.4는 코너캐비티(corner cavity)형성에서 소재바닥의 임계두께를 보여주어 주고 있다. 여기서 알 수 있듯이 소재바닥의 임계상대두께는 단면감소율이 커질수록 감소되는 것을 볼 수 있다.

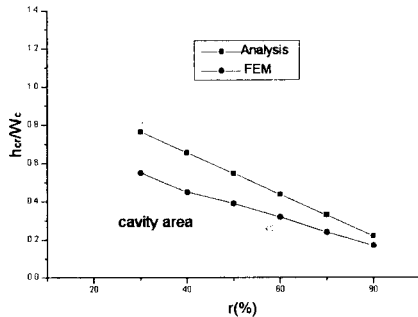


Fig.4 Limit area for a corner cavity: (h_{cr} -critical thickness of the bottom of the billet, $W_c=10mm$)

Fig.2의 두 공정에 대한 성형한계영역을 Fig.5에 도시하였다. 도시상에서 알 수 있듯이, 공정(a)를 거쳐 공정(b)로 가는 다단계공정으로 압출했을 때가 공정(a)로만 압출했을 때보다 소재바닥에 상대임계두께

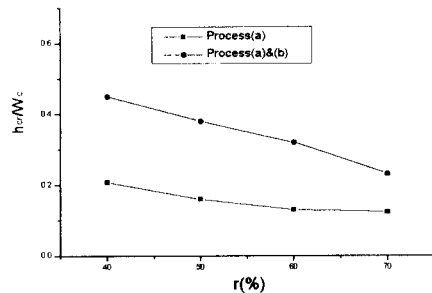


Fig.5 Comparison of limit area between Process(a) and Process(a) & (b)

가 작은 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이것은 성형한계영역이 더 확대되었다는 것을 말한다.

4. 결론

평면후방압출공정에서 최종단계까지 가는 동안 생기는 코너캐비티(corner cavity)를 상계해석을 이용해 해석을 하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 얻은 결과를 상계해와 비교하였고, 성형결함을 줄일 수 방법을 행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 상계해석에 이용해 성형결함의 예측을 간단하고, 편리하게 계산하여, 코너 캐비티(corner cavity)형성의 임계조건을 제시하였다.

② 구동콘테이너와 다단계 공정을 통해 성형한계영역을 넓혔다.

③ 코너 캐비티(corner cavity)형성은 다이의 폭에 대한 소재의 바닥임계두께비가 단면감소율이 증가함에 따라 감소되는 것을 알 수 있다.

④ 해석해서 얻은 성형임계영역과 시뮬레이션결과값이 잘 일치하였다.

참고문헌

- [1] Wu Shichun, Dang Zhen and Li Miaoquan., "Prediction of corner-cavity formation during backward extrusion by the modified slab method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 31, pp113~118, 1992
- [2] B. Avitzur, "Analysis of Central Bursting Defects in Drawing and Extrusion and Rolling", *Trans. ASME B*, Vol. 90, No. 1, pp79~91, 1968.
- [3] Ulf. Ståhlberg, *Flytlinjefältmetoden Och ϕ vrc Gränslastimetoden*, Kapitel 14, pp163~174, Royal Institute of Technology, 1986(in Swedish)
- [4] A. O. A. Ibadode and T. A. Dean, "Corner Filling Characteristics in Precision Forging", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 28, No. 2, pp103~122, 1988