

반응용 재료의 물성치 평가에 관한 연구(I) -후방압출의 상계해석을 위한 동적 가용 속도장의 제안-

이주영* · 김낙수**

(1999년 3월 29일 접수)

A Study on Material Characterization of Semi-Solid Materials (I) -Proposal of New Velocity Field for Upper Bound Analysis of Backward Extrusion-

Joo-Young Lee and Naksoo Kim

Abstract

For material characterization of semi-solid materials, backward extrusion process, which has been used in forming of hollow-sectioned products, was analyzed by the upper bound analysis in the current study. The existing kinematically admissible velocity field was applied to steady state at which there was no change in the assumed regions of velocity field. For unsteady state, new velocity field, as a function of dead zone angle, was proposed. Through the whole analysis, friction between die and workpiece was also considered. It has been studied how the process variables, such as friction factor and punch velocity, and material parameters, such as strength coefficient, strain rate sensitivity could affect on analysis results. Finally, by the comparison with the finite element analysis, the reliability and efficiency of the proposed velocity field were discussed.

Key Words : Backward Extrusion, Upper Bound Method, Velocity Field, Dead Zone Angle, Kinematically Admissible Velocity Field

1. 서 론

소성변형문제는 근본적으로 강한 비선형성을 갖기 때문에 이 문제의 정해(exact solution)를 구하기는 어렵지만 소성학이라는 학문이 체계를 갖추어 가면서 이에 대한 근사해를 구하고자 하는 시도가 계속 이루어져 왔다. 변형영역내의 미소체적요소를 고려하여 한 방향의 미소치수에 대해서만 응력변화를 고려하고 다른 방향에 대해서는 균일한 응력분포를 가정한 후 이 요소 즉, 자유물체에 대한

평형방정식을 세워 풀이하는 슬랩법(slab method), 평면 변형률 조건에서 소성영역에서의 탄성변형률을 무시하고 가공경화가 없는 등방성재료의 소성변형문제를 풀이하는 마끄림 선장법(slip line field method), 상계 및 하계정리에 기초한 상계법(upper bound method) 및 하계법(lower bound method)등이 근사해법으로서 이용되어 왔다.^(1,2) 근래에 들어서는 컴퓨터의 급속한 발달 및 보급으로 인하여 해석대상영역을 작게 나누어 근사해를 구하는 유한요소법(finite element method)이 널리 이용되고 있으

* 서강대학교 기계공학과 대학원

** 서강대학교 기계공학과

며, 이 방법은 상당히 높은 정확도를 제공할 뿐만 아니라 기존의 방법들에서는 얻을 수 없는 다양한 정보들을 제공하고 있다. 이러한 근사해중에서 압연, 압출, 인발, 엷팅 등 2차원 또는 축대칭 문제의 상계해가 알려지면서 이를 소성가공 공정설계에 많이 이용하고 있으며 현재까지도 유한요소법과 더불어 문제해결에 흔히 적용되고 있다.

본 연구에서는 반용용 재료(semi-solid materials)의 물성치 평가를 위한 일부분으로서 후방압출(backward extrusion)의 상계해석을 시도하였다. 반용용 재료의 변형 거동은 고상과 액상이 공존하는 상태이므로 고체변형과 유체유동 특성이 복합적으로 작용하여 나타난다. 이 때문에 단순압축 또는 전단실험을 이용한 반용용 재료의 물성치 평가⁽³⁻⁷⁾와 유한요소해석을 통한 변형거동 파악에 관한 연구들⁽⁶⁻¹³⁾이 수행되었다. 특히, Charreyron과 Flemings는 단순압축 실험을 통해서 변형률속도 민감성 재료로 가정된 Sn-Pb 반용용 합금의 강도계수(strength coefficient)와 변형률속도 민감지수(strain rate sensitivity)를 구한 후, 이로부터 단순압축을 상계해석 한 바 있다.⁽¹⁴⁾ 최근 들어서는 김태준과 김낙수는 보편적인 물성치 평가법으로는 재료의 유동응력식을 산출할 수 없음을 파악하여 실제 부품성형 공정에 많이 이용되는 후방압출 실험과 이의 상계해석을 통한 Al2024반용용 합금의 물성치 평가를 시도하였다.⁽¹⁵⁾ 그러나 이들의 연구에서는 후방압출 공정의 정상상태에 대해서만 상계해석을 수행하고 이로부터 Al2024 반용용 합금의 물성치를 평가하였다. 이에 본 연구에서는 문헌⁽¹⁵⁾에서 시도한 후방압출 실험과 이의 비정상상태까지 포함한 상계해법을 직접 물성치 평가에 적용하는 방법을 고려하였다. 유한요소법이 상계해보다 비교적 정확하지만 해석수행에 필연적으로 따르게 되는 요소망 재구성 과정은 경험적 판단을 필요로 할 뿐만 아니라 해석수행에 과도한 시간이 소비되는 단점이 있다. 따라서, 유한요소해석에 대해서 해석의 효율성을 높이기 위해 상계법을 적용하였고 이때, 비정상상태에 대해서는 새로운 동적 가용 속도장을 제시함으로써 구해진 상계해의 정확도를 향상시키고자 하였다. 또한, 해석 전체에 걸쳐 소재와 금형간의 마찰을 고려하였으며, 본 해석에서 얻은 결과와 유한요소해석 결과를 비교해 봄으로써 제안된 속도장의 신뢰성 검증을 수행하였다.

2. 후방압출 공정에 대한 상계해

후방압출공정은 하중상태가 거의 일정하게 나타나는 정상상태와 하중의 급격한 상승이 일어나는 비정상상태 두

가지로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 정상상태에 대한 속도장은 Avitzur가 제시한 속도장⁽¹⁾을 그대로 적용하였고, 비정상상태에 대해서는 개선된 속도장을 제안하여 해석에 활용하였다.

2. 1 정상상태에 대한 동적 가용 속도장 및 일률

정상상태에 대한 상계해석은 문헌⁽¹⁾에서 상세히 서술하고 있으므로 여기서는 그 결과들을 간략히 나타내기로 하고 문헌⁽¹⁾에서는 고려하지 않은 강제변형의 마찰항에 대해서만 자세히 서술하기로 한다.

(1) 동적 가용 속도장

정상상태는 해석대상 영역을 Fig. 1과 같이 4개의 속도장 영역으로 나눌 수 있으며, 각 영역에서의 동적 가용 속도장은 다음과 같다.

$$v_r = v_\theta = 0, v_z = v_0 = v_f \left(\frac{r_f}{r_0} \right)^2 \quad : \text{영역 I} \quad (1)$$

$$v_r = v_0 \cos\theta \left(\frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right), v_\theta = v_0 \sin\theta, v_\phi = 0; \text{영역 II} \quad (2)$$

$$v_r = v_\theta = v_z = 0 \quad : \text{영역 III} \quad (3)$$

여기서,

$$r_f = R_f / \sin\alpha \quad (4a)$$

$$r_0 = R_0 / \sin\alpha \quad (4b)$$

이다.

(2) 총일률, \dot{W}_{total}

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_i + \dot{W}_\Gamma + \dot{W}_F \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= \dot{W}_i + \dot{W}_n + \dot{W}_m + \dot{W}_v = 0 + \int_V \sigma \dot{\epsilon} dV + 0 + 0 \\ &= \int_{r_f}^{r_0} \int_0^\alpha \left(K \dot{\epsilon}^m \right) \dot{\epsilon} (2\pi r \sin\theta) (rd\theta) dr \\ &= 2\pi K \int_{r_f}^{r_0} \int_0^\alpha \left(2v_0 \frac{r_0^2}{r^3} \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2\theta} \right)^{m+1} r^2 \sin\theta d\theta dr \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{W}_\Gamma = \dot{W}_{\Gamma_1} + \dot{W}_{\Gamma_2} + \dot{W}_{\Gamma_3} \quad (7)$$

$$\dot{W}_{\Gamma_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi v_f r_f^2 \int_0^\alpha \left(1 - \frac{11}{12} \sin^2\theta \right)^{\frac{m}{2}} \sin^2\theta d\theta \quad (8)$$

$$\dot{W}_{\Gamma_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi v_0 r_0^2 \left(2 \frac{v_0}{r_0} \right)^m \int_0^\alpha \left(1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta \right)^2 \sin^2 \theta d\theta \quad (9)$$

$$\dot{W}_{\Gamma_3} = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi v_0 \cos \alpha \sin \alpha \left(2 v_0 r_0^2 \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \theta} \right)^m \int_0^\alpha \left(r_0^2 r^{-3m-1} - r^{1-3m} \right) dr \quad (10)$$

여기서, 소재는 변형률속도 민감성 재료 ($\bar{\sigma} = K \dot{\epsilon}^m$)로 가정하였고 K 는 강도계수 m 은 변형률속도 민감지수이다. \dot{W}_{total} 은 총일률, \dot{W}_i 는 내부 변형일률, \dot{W}_F 는 속도 불연속면에서 소모된 일률이고 \dot{W}_F 는 마찰일률을 나타낸다.

접촉하는 두 물체간에 상대운동이 존재할 때, 필수적으로 마찰이 수반 된다. 본 연구에서는 일정 마찰상수(constant friction factor)를 고려하여, 소재와 금형간의 마찰로 인한 일률손실 또한 전체일률에 포함시켰다. 금형 측, 컨테이너 및 펀치에 대해서 상대운동을 하는 소재부분은 영역 I로서 펀치의 행정거리가 l 일 경우, 소재가 컨테이너 및 펀치와 접촉하는 길이 l_1, l_2 는 체적일정 조건과 기하학적 조건에 의해 각각 아래와 같이 구할 수 있다.

$$l_1 = l + \frac{R_f^2}{R_0^2 - R_f^2} l + l(r_0 - r_f) \cos \alpha : \text{for container} \quad (11)$$

$$l_2 = l + \frac{R_f^2}{R_0^2 - R_f^2} l = 0 : \text{for punch} \quad (12)$$

식(11), (12)를 이용하여, 마찰일률 \dot{W}_F 를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{W}_F = \dot{W}_{\Gamma_4} + \dot{W}_{\Gamma_5} \quad (13)$$

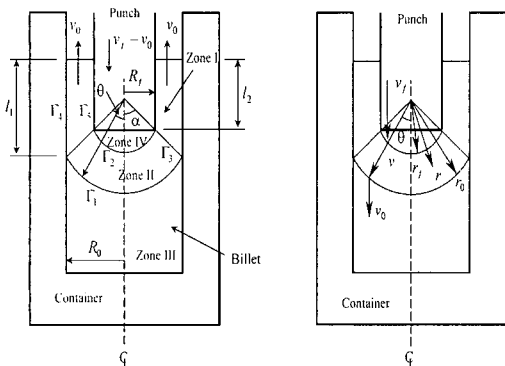


Fig. 1 Assumed velocity field in steady state

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\Gamma_4} &= \int_{\Gamma_4} k |\Delta v| d\Gamma \\ &= m_f \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right) \frac{r_f^2}{r_0^2 - r_f^2} v_p (2\pi R_0) \left(l + \frac{r_0^2}{R_0^2 - R_f^2} l \right. \\ &\quad \left. + (r_0 - r_f) \cos \alpha \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\Gamma_5} &= \int_{\Gamma_5} k |\Delta v| d\Gamma \\ &= m_f \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right) \left(l + \frac{r_f^2}{r_0^2 - r_f^2} \right) v_p (2\pi R_f) \left(l + \frac{R_f^2}{R_0^2 - R_f^2} l \right) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, k 는 전단 항복강도, m_f 는 마찰인자이다.

2. 2 사영역각 (dead zone angle) α 의 결정 및 하중의 계산

사영역각은 총일률 \dot{W}_{total} 을 최소화 시키는 조건으로 구할 수 있고 이를 다시 식(6), (8)~(10), (14), (15)에 대입하면 최종적인 \dot{W}_{total} 을 결정할 수 있으며, 아래의 관계식으로부터 펀치의 행정에 따른 하중 P_{ram} 을 계산할 수 있다.

$$P_{ram} \cdot v_p = \dot{W}_{total} = \dot{W}_i + \dot{W}_F + \dot{W}_F \quad (16)$$

2. 3 비정상상태에 대한 가용속도장의 제한

펀치의 행정이 증가함에 따라 어느 시점 이후부터는 하중의 급격한 변화가 일어나며 이때부터는 앞서 가정한 속도장을 더 이상 적용할 수 없게 된다. 즉, 행정이 증가하여 영역 II의 반지름 r_0 가 펀치와 컨테이너 사이의 높이보다 크게 될 때 Avitzur가 제안한 정상상태의 속도장은 더 이상 의미가 없게 되므로 원추형 변형영역을 새로이 추가하여 상세해석을 하였다.

본 연구에서는 소성변형영역의 반지름 r_0 가 컨테이너의 바닥에 닿는 순간 이후를 비정상상태라 가정하였고, 판별조건은 다음의 식(17)과 같다.

$$h \leq r_0 - r_f \cos \alpha = \frac{R_0}{\sin \alpha} - R_f \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (17)$$

여기서 h 는 컨테이너 바닥에서 펀치까지의 거리를 나타낸다.

한편, 위의 가정에 따르면 정상상태의 경우에는 영역 II의 영역이 원추각이 α 로 일정한 구의 일부분 형태를 유지하였으나 비정상상태에서는 바닥에 닿는 부분은 원추각 β ($0 \leq \beta \leq \alpha$)인 원추형태를, 나머지 부분은 구형태를 나타내게 될 것이다. 여기서, β 는 기하학적 조건을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

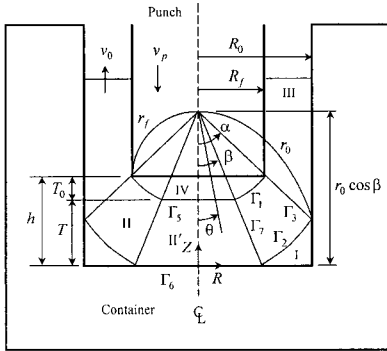


Fig. 2 Assumed velocity field in unsteady state

$$r_0 \cos \rho = r_r \cos \alpha + n \quad (18)$$

$$\cos \beta = \frac{r_f}{r_0} \cos \alpha + \frac{h}{r_0}$$

비정상상태에서는 정상상태의 영역 II (이하에서는 단순히 영역 II 라고 칭함)를 제외한 나머지 영역의 기하학적 변화는 정상상태와 동일하므로 본 절에서는 영역 II의 속도장을 Fig. 2와 같이 두 부분으로 나눈 것 중에서 영역 II'에 관해서만 언급하기로 한다.

(1) 영역 II'에 대한 속도장의 제안 - 원추형 영역

영역 II가 컨테이너 바닥에 닿으면서 형성되는 원추각을 β 라 하면 이는 α 의 함수가 되며, 이를 이용하여 정상상태에서 사용했던 속도장을 다음과 같이 수정한다.

$$\begin{aligned} v_r &= v_0 \cos \theta \left(\frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{r^2 \cos^4 \theta} - 1 \right) \\ &= v_p \frac{r_f^2}{(r_0^2 - r_f^2)} \cos \theta \left(\frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{r^2 \cos^4 \theta} - 1 \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$v_\theta = v_0 \sin \theta = v_p \frac{r_f^2}{(r_0^2 - r_f^2)} \sin \theta$$

$$v_\phi = 0$$

변형률속도 성분 및 유효 변형률속도는

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= -2v_p \frac{r_f^2}{(r_0^2 - r_f^2)} \cos \theta \left(\frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{r^3 \cos^4 \theta} \right), \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= v_p \frac{r_f^2}{(r_0^2 - r_f^2)} \cos \theta \left(\frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{r^3 \cos^4 \theta} \right), \\ \dot{\epsilon}_{\phi\phi} &= v_p \frac{r_f^2}{(r_0^2 - r_f^2)} \left(\frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{r^3 \cos^4 \theta} \right), \\ \dot{\epsilon}_{r\theta} &= \frac{3}{2} v_p \frac{r_f^2}{(r_0^2 - r_f^2)} \sin \theta \left(\frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{r^3 \cos^4 \theta} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\epsilon}} &= \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_{rr}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}^2 + \dot{\epsilon}_{r\theta}^2)} \\ &= 2v_p \frac{r_f^2}{(r_0^2 - r_f^2)} \frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{r^3 \cos^4 \theta} \sqrt{1 - \frac{1}{4} \sin^2 \theta} \end{aligned} \quad (21)$$

와 같다. 식 (20)은 체적일정조건 ($\dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + \dot{\epsilon}_{\phi\phi} = 0$)을 만족시키므로 본 연구에서 식 (19)의 형태로 제안한 속도장은 적절함을 알 수 있다.

(2) 영역 II'의 변형일률

내부변형일률의 적분은 영역 II'이 원추형을 이루고 있기 때문에 극좌표계를 이용하여 적분하면,

$$\dot{W}_i = 2\pi \int_0^R \int_0^{\Gamma_5} \dot{\bar{\epsilon}}^{m+1} R dR dZ = 2\pi K \int_0^R \int_0^{\Gamma_5} \dot{\bar{\epsilon}}^{m+1} R dR dZ \quad (22)$$

여기서, $R_1 = r_0 \sin \theta - z \tan \beta$ 이며, 극좌표계로 나타낸 유효 변형률속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\epsilon}} &= 2v_p \frac{r_f^2}{(r_0^2 - r_f^2)} \frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{r^3 \cos^3 \theta} \sqrt{1 + \frac{3}{4} \tan^2 \theta} \\ &= 2v_p \frac{r_f^2}{(r_0^2 - r_f^2)} \frac{r_0^2 \cos^2 \beta}{(r_0 \cos \beta - z)^3 \cos^3 \theta} \sqrt{1 + \frac{3}{4} \frac{R^2}{(r_0 \cos \beta - z)^2}} \end{aligned} \quad (23)$$

영역 II'과 관련된 속도 불연속면에서 일률을 계산함에 있어서, Γ_1 , Γ_2 와 관련된 항들은 정상상태의 경우에 대한 적분범위 $[0, \alpha]$ 를 $[\beta, \alpha]$ 로 바꾸어 적분하면 되고, Γ_3 는 정상상태와 동일하다. Γ_5 는 영역 II'과 IV가 만나는 경계면으로서 속도 불연속량 $|\Delta v|_{\Gamma_5}$ 는 소성변형영역의 r 방향 전단 속도성분 $v_r \sin \theta$ 와 θ 방향 전단 속도성분 $v_r \cos \theta$ 의 합과 같다. 즉,

$$|\Delta v|_{\Gamma_5} = (v_r \sin \theta + v_\theta \cos \theta) \Big|_{z=R_0 \cos \beta - r_r \cos \beta} = v_0 \frac{r_0^2 R}{r_f^3 \cos \beta} \quad (24)$$

따라서, Γ_5 에서 소모된 일률 \dot{W}_{Γ_5} 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\Gamma_5} &= \int_{\Gamma_5} \int_0^R k |\Delta v|_{\Gamma_5} d\Gamma = 2\pi \int_0^R \left(\frac{\dot{\bar{\sigma}}}{\sqrt{3}} \right) v_0 \frac{r_0^2 R}{r_f^3 \cos \beta} R dR \\ &= \frac{2\pi K v_0}{\sqrt{3}} \frac{r_0^2}{r_f^3 \cos \beta} \int_0^R \dot{\bar{\epsilon}}^m R dR \end{aligned} \quad (25)$$

단, $R_3 = r_f \sin \beta$, $\dot{\bar{\epsilon}} = \dot{\bar{\epsilon}}_{\Gamma_5}$ 및 $|\Delta v|_{\Gamma_5} = v_0 \frac{r_0^2 R}{r_f^3 \cos \beta}$ 이다.

Γ_6 는 원추형 변형영역이 컨테이너와 접촉하는 마찰면으로서, 속도 불연속량은

$$|\Delta v|_{\Gamma_6} = v_R|_{Z=0} = v_0 \frac{v_0 R}{r_0 \cos \beta} \quad (26)$$

와 같고, Γ_6 에서 소모된 일률 \dot{W}_{Γ_6} 은 일정 전단마찰 모델(constant shear friction model)을 적용하여 계산하면 다음과 같다.

$$\dot{W}_{\Gamma_6} = \int_{\Gamma_6} m_f k |\Delta v|_{\Gamma_6} d\Gamma = 2\pi \int_0^{R_2} m_f \left(\frac{K}{\sqrt{3}} \dot{\epsilon}^m \right) \frac{v_0}{r_0 \cos \beta} R^2 dR \quad (27)$$

여기, $R_2 = r_f \sin \beta$, $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{r_0}$ 및 $|\Delta v|_{\Gamma_6} = v_0 \frac{r_0^2 R}{r_f^3 \cos \beta}$ 이다.

Γ_7 은 원추형 소성변형영역과 구형 소성변형영역이 만나는 경계면으로서 속도 불연속량은 다음과 같다.

$$|\Delta v|_{\Gamma_7} = v_R = v_0 \frac{r_0^2}{r^2} \sin \beta \tan \beta \quad (28)$$

따라서, Γ_7 에서 소모된 일률 \dot{W}_{Γ_7} 은

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\Gamma_7} &= \int_{\Gamma_7} k |\Delta v|_{\Gamma_7} d\Gamma = 2\pi \int_{r_0}^{r_f} \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right) \left(v_0 \frac{r_0^2}{r^2} \sin \beta \tan \beta \right) r \sin \beta dr \\ &= 2\pi \int_{r_0}^{r_f} \frac{K}{\sqrt{3}} \left(2v_0 \frac{r_0^2}{r^3} B(\beta) \right)^m \left(v_0 \frac{r_0^2}{r^2} \sin \beta \tan \beta \right) dr \end{aligned} \quad (29)$$

단, $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{r_0}$, $|\Delta v|_{\Gamma_7} = v_0 \frac{r_0^2}{r^2} \sin \beta \tan \beta$ 및 $B(\beta) =$

$$\frac{1}{\cos^2 \beta} \sqrt{1 - \frac{1}{4} \sin^2 \beta} \text{ 이다.}$$

컨테이너 및 펀치와의 접촉으로 인한 마찰일률의 계산은 정상상태와 동일하고, 비정상상태에 대한 사영역각 α 및 펀치의 행정에 따른 하중 또한 정상상태와 마찬가지로 방법으로 구할 수 있다.

3. 해석결과

3. 1 후방압출 공정의 상계해석 결과

Avitzur의 정상상태 속도장 및 본 연구에서 제안한 비정상상태 속도장을 이용하여 후방압출 전체 공정의 상계 해석을 수행하였으며 이때, 상계해를 구하기 위해 가장 먼저 결정되어야 할 변수는 사영역각 α 이다. 따라서, 정상상태 및 비정상상태 각 경우에 대해서 변형률속도 민감지

수 m , 마찰인자 m_f 및 펀치 속도 v_p 등과 같은 변수들을 변화시키면서 사영역각의 변화경향을 살펴보았다.

Fig. 3은 정상상태 해석시 마찰인자 m_f 의 변화에 따른 α 의 변화경향을 나타낸 것이다. 펀치속도가 일정할 경우 마찰인자가 증가할수록 마찰일률의 영향이 전체일률에 미치는 영향이 커지므로 이를 최소화 하기 위해서 α 는 증가함을 알 수 있다. 하지만 펀치속도가 증가할수록 동일한 마찰인자에 대해서는 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 성형속도가 빠를수록 소재의 전체 변형저항이 증가하게 되고 따라서 마찰저항 또한 증가하게 된다. 본 연구에서는 일정전단 마찰모델을 적용하였는데 마찰저항의 증가를 일으킬 수 있는 요인으로는 전단 항복강도의 증가와 마찰영역의 증가 두 가지가 있다. 후방압출의 경우 두 가지 요인 모두가 마찰저항을 증가 시키는데 기여한 것으로 판단되며, 마찰영역의 증가가 결과적으로 α 의 감소를 유발한 것이다.

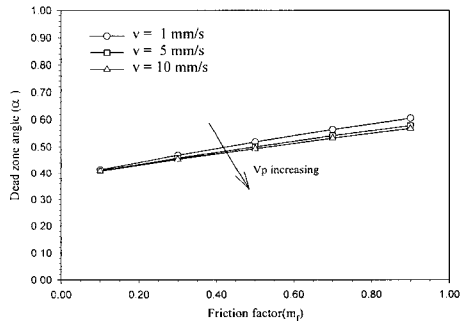


Fig. 3 Variation of dead zone angle α according to friction factor increment in steady state ($K = 1.0, m_f = 0.1, \dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$)

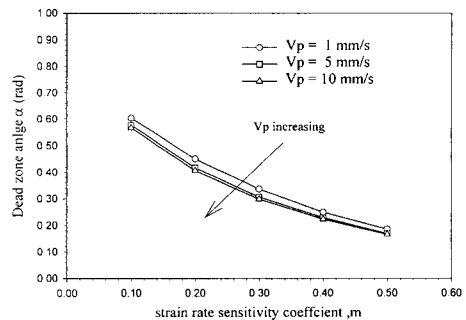


Fig. 4 Variation of dead zone angle α according to strain rate sensitivity increment in steady state ($K = 1.0, m_f = 0.9, \dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$)

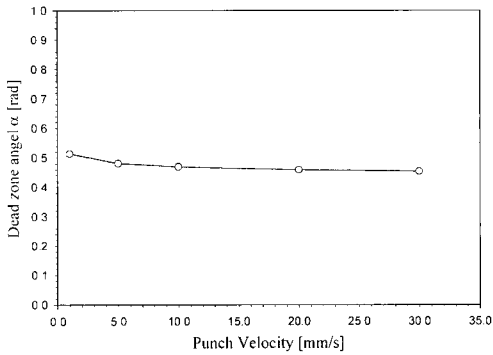


Fig. 5 Variation of dead zone angle α according to punch velocity increment in steady state
($K = 1.0, m_f = 0.9, \dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$)

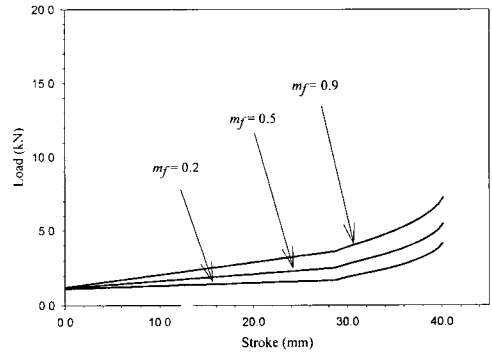


Fig. 8 Variation of load-stroke curve according to friction factor increment
($K = 5.0, m = 0.1, v_p = 5.0 \text{ mm/s}, \dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$)

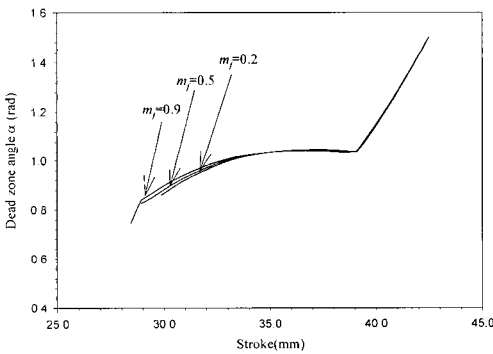


Fig. 6 Variation of dead zone angle α according to friction factor increment in unsteady state
($K = 1.0, m = 0.1, v_p = 1 \text{ mm/s}, \dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$)

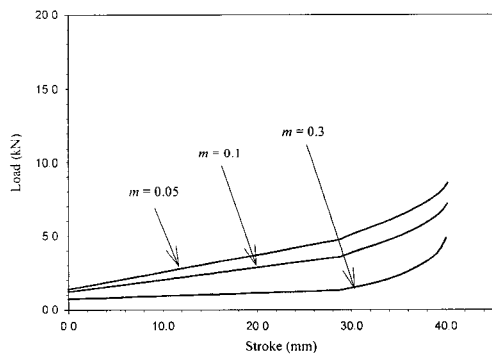


Fig. 9 Variation of load-stroke curve according to strain rate sensitivity increment
($K = 5.0, m_f = 0.9, v_p = 5.0 \text{ mm/s}, \dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$)

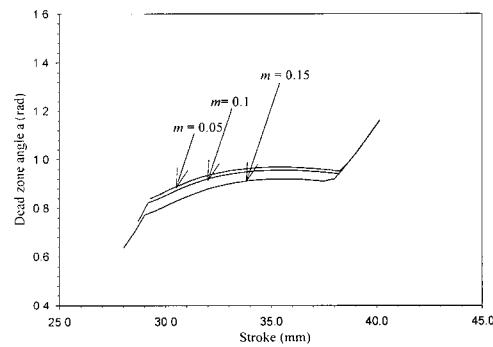


Fig. 7 Variation of dead zone angle α according to strain rate sensitivity increment in unsteady state
($K = 1.0, m_f = 0.9, v_p = 1 \text{ mm/s}, \dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$)

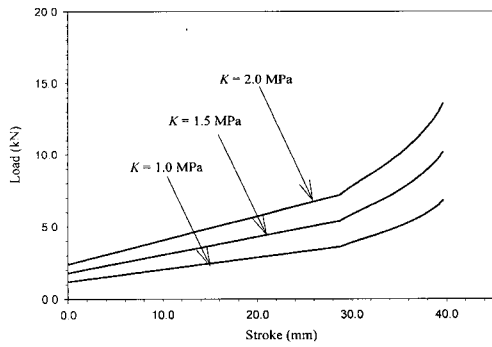


Fig. 10 Variation of load-stroke curve according to strain rate sensitivity
($m = 0.1, m_f = 0.9, v_p = 5.0 \text{ mm/s}, \dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$)

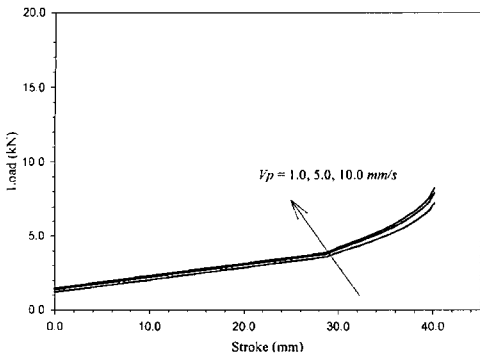


Fig. 11 Variation of load-stroke curve according to punch velocity ($K = 5.0, m = 0.1, m_f = 0.9, \dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$)

Fig. 4에서는 변형률속도 민감지수 m 의 증가에 따라 α 가 감소함을 관찰할 수 있다. 변형률속도 민감지수는 소성변형영역과 속도 불연속면에서의 일률 및 마찰일률을 구하는데 사용되는데 m 이 감소할수록 전체 변형 및 마찰 일률이 증가하므로 총일률의 최소화를 위해 α 는 변형률속도 민감지수 m 과 반비례관계에 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 펀치속도 v_p 의 α 에 대한 영향을 살펴본 것으로 속도가 증가할수록 변형일률이 증가하므로, 전체일률의 최소화를 위해 α 는 감소하는 경향을 보인다.

이상의 정상상태 해석을 통해서 α 는 변형률속도 민감지수와 펀치속도에 대해서는 반비례관계를, 마찰인자에 대해서는 비례관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

비정상상태 해석의 경우 α 는 정상상태와는 달리 펀치 행정에 따라 증가하는 경향을 나타내었고 곡선의 변화경향도 모두 동일하였다. 변형률속도 민감지수, 마찰인자 및 펀치속도에 대해서 큰 영향을 받지 않고 증가함을 Fig. 6과 Fig. 7에서 볼 수 있으며, 펀치와 강도계수 또한 α 의 변화에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 관찰 되었다.

Fig. 8~11은 상계해석으로 구한 후방압출 공정의 하중-변위관계를 정상상태 및 비정상상태를 이어서 나타낸 것이다. 강도계수, 마찰인자 및 펀치속도 등에 비례하여 하중이 증가하며, 변형률속도 민감지수의 증가에 대해서는 하중이 감소함을 관찰할 수 있다.

3.2 유한요소 해석 및 상계해석 결과와의 비교

본 연구에서 제안한 속도장의 타당성 검증을 위해 하중-변위관계를 판별수단으로 삼아서 유한요소 해석결과와 비교해 보았다. 후방압출 공정의 유한요소해석은 상용 해석

패키지인 DEFORM을 이용하였으며, 각 경우마다 해석에 소요된 시간은 HP-C100기종에서 약 40분 정도였다.

Fig. 12는 후방압출의 해석단계에 따른 소재의 변형양상을 나타낸 것으로써 비구속면이 균일한 높이를 갖지 않으면서 상대속도가 큰 펀치쪽의 높이가 컨테이너쪽의 높이보다 낮음을 관찰할 수 있다. 이는 마찰의 영향에 기인한 것이며 본 연구의 상계해석에서 고려된 금형과 소재간의 마찰이 타당함을 입증한다고 볼 수 있다.

Fig. 13은 해석단계별로 속도장을 나타낸 것으로써 상계해석에서 강제영역으로 가정하였던 부분의 절점 속도 벡터들은 균일함을 나타내고 있으며, 변형되지 않은 부분이라고 가정된 영역의 속도 벡터들은 0을 나타내고 있다. 또한, 소성변형 영역으로 가정한 부분에서는 속도장의 크기 변화가 가장 크게 나타남을 관찰 할 수 있다. 특히, 정상상태에서 가정된 영역 II에 해당하는 속도 벡터들이 펀치의 행정이 증가함에 따라서 바닥에 닿고, 원추형태로 변

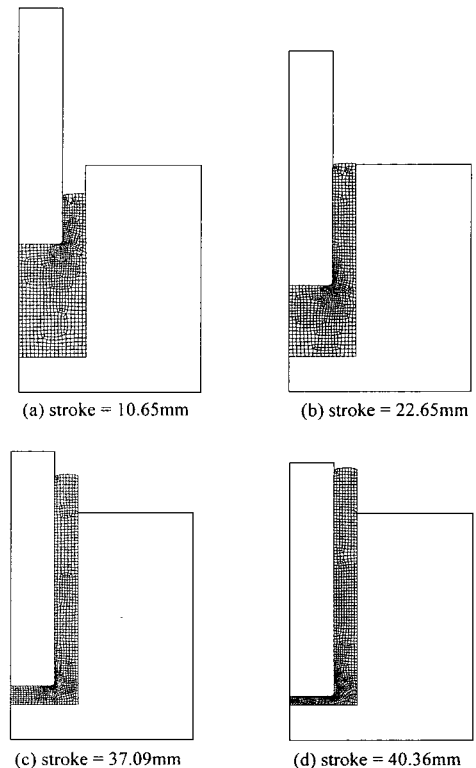


Fig. 12 Mesh deformation in FEM analysis of backward extrusion ($K = 1.0, m = 0.1, m_f = 0.9, \dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-4}, v_p = 5.0 \text{ mm/s}$)

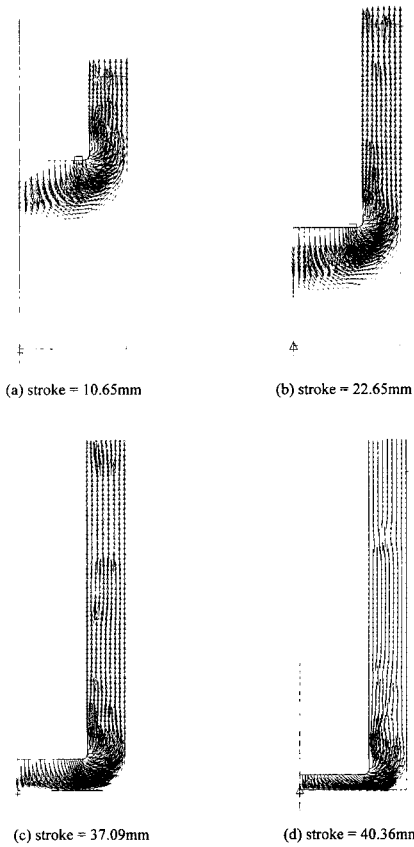


Fig. 13 Plot of velocity field in FEM analysis of backward extrusion ($K = 1.0$, $m = 0.1$, $m_f = 0.9$, $\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-4}$, $v_p = 5.0 \text{ mm/s}$)

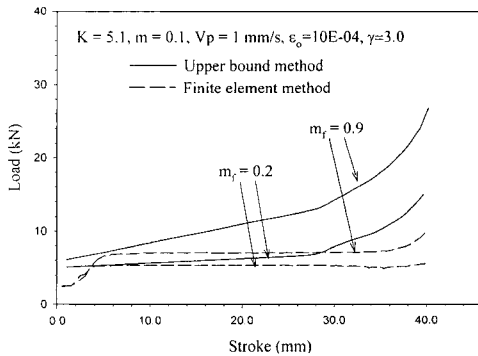


Fig. 14 Comparison of load-stroke curves between UBM vs. FEM according to friction factor increment

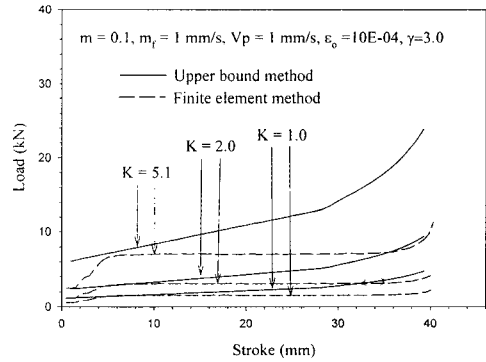


Fig. 15 Comparison of load-stroke curves between UBM vs. FEM according to strength coefficient increment

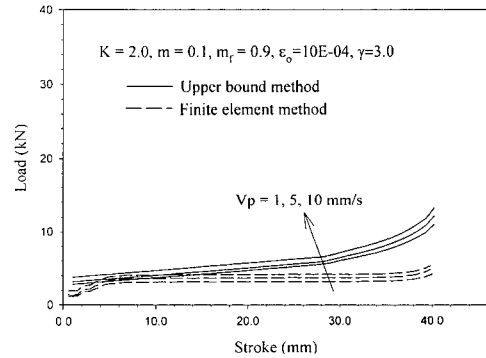


Fig. 16 Comparison of load-stroke curves between UBM vs. FEM according to punch velocity increment

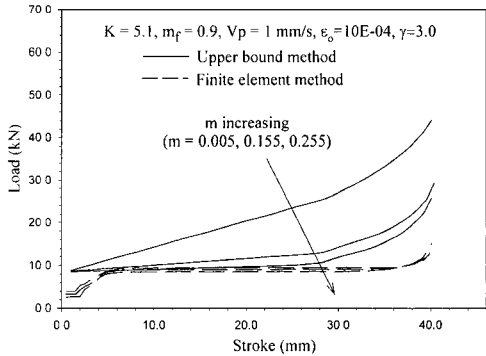


Fig. 17 Comparison of load-stroke curves between UBM vs. FEM according to strain rate sensitivity increment

형하는 것과 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제시한 비정상상태 속도장 영역 구분이 타당함을 알 수 있다.

Fig. 14~17은 하중-변위 관계에 대해서 유한요소 해석과 상계해석 결과를 비교한 것으로써 상계해법으로 구한 하중이 유한요소해석 결과보다는 크게 나타났고, 곡선의 개형은 유한요소 해석결과와 비슷한 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다. 상계해석에서는 펀치와 컨테이너 사이로 빠져나가는 소재부분을 강제영역이라고 가정하였기 때문에, 강제영역의 변형률속도는 0이 된다. 하지만, 실제로는 이 영역에서 마찰이 존재하므로, 이를 고려하기 위해 마찰영역에 아주 작은 크기의 변형률속도 값을 넣어 마찰에 의한 하중을 고려하였다. 본 연구에서 사용된 변형률속도 값은 10^{-4} 으로 이는 DEFORM의 해석결과를 참조하였다. 즉, 유한요소 해석에서 강제영역에 해당되는 부분의 변형률속도의 대략적인 평균치이다.

Fig. 14~17에서 나타나는 하중-변위 곡선 중 유한요소 해석 시 얻어지는 곡선이 약 5mm정도의 Stroke이후에는 하중의 변화가 거의 없음을 볼 수 있는데, 이는 후방 압출공정 시 나타나는 전형적인 하중곡선의 형태으로써 유한요소해석의 오류나, DEFORM의 문제가 아니다. 즉, 이러한 하중양상은 DEFORM은 반응용 상태의 금속을 해석할 수 없으며, 따라서 완전 고체상태의 금속으로 취급하여 해석을 수행했기 때문에 나타났다고 할 수 있다.

Fig. 14는 마찰인자의 변화에 따른 하중-변위를 나타내는 그림으로서, 마찰인자가 작을수록 하중곡선의 초기 기울기가 완만하면서 유한요소 해석결과에 가까운 값을 나타내었고, 마찰인자가 증가할수록 마찰일률이 증가하기 때문에 초기 기울기가 급해지고 펀치 행정이 증가함에 따라 유한요소 해석과의 차이가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 15는 강도계수의 변화에 따른 상계해석과 유한요소해석을 비교한 것으로 강도계수가 감소할수록 두 결과간의 차이가 감소함을 알 수 있다. 이는 상계해석 시 강도계수가 클수록 전단 항복강도 또한 증가하여 마찰의 영향이 증가하는 결과를 낳게 되기 때문이다.

Fig. 16은 펀치속도의 변화에 따른 해석결과를 비교한 것으로서 마찰인자나 강도계수의 경우에 비해서는 오차가 크지 않는 결과를 나타내었다. 이 결과를 통해서 펀치속도에 따른 사영역각 변화와 이로 인한 마찰저항의 변화는 강도계수의 변화가 마찰저항에 기여하는 정도보다는 작음을 알 수 있다.

Fig. 17은 변형률속도 민감지수의 영향을 살펴 본 것으

로서 값이 증가할수록 상계해석으로부터 구한 하중과 유한요소해석으로 구한 하중의 모양이 비슷해 짐을 알 수 있다. 변형률 속도 민감지수의 범위를 0.05에서 0.255의 사이로 잡은 이유는 Cherreyron과 Flemings⁽¹⁴⁾에 의하면, 반응용 상태의 Sn-Pb합금을 단순 압축시험 했을 때 변형률 속도민감지수는 0.22 정도까지의 값을 가지므로 위와 같은 범위내에서 변형률 속도를 변화시켰다.

4. 결론 및 향후 계획

이상의 연구를 통해서 후방압출 공정의 상계해석을 위한 속도장을 제안하였으며, 공정변수와 물성치 변화에 따른 해석결과를 고찰하였다. 마찰인자와 변형률속도 민감지수가 상계해석 결과에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었고 변형률속도 민감지수가 클수록 해의 정확도는 증가하기 때문에 반응용 재료와 같이 변형률 속도 민감성이 상대적으로 큰 재료의 물성치 평가에는 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

향후, 마찰을 고려하지 않은 상태에서 정상상태와 비정상상태의 하중연속성을 만족시키기 위한 연구가 이루어진다면 반응용 재료의 물성치 평가 뿐만 아니라 일반적인 소재의 후방압출 또한 효과적으로 해석할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- (1) B. Avitzur, 1968, Metal Forming: Process and Analysis, McGraw-Hill, pp.274~291.
- (2) 김동원, 1990, 소성학, 청문각.
- (3) M. C. Flemings, 1976, "Rheocasting", Mater. Sci. Eng. Vol. 25, pp.103~117.
- (4) P. A. Joly and R. Mehrabian, 1976, "The Rheology of Partially Solid Alloy", J. of Mater. Sci. Vol. 11, pp.1393~1418.
- (5) V. Laxmanan and M. C. Flemings, 1980, "Deformation of Semi-Solid Sn-15 Pct Pb Alloy", Metall. Trans. A, Vol. 11A, pp.1927~1937.
- (6) M. Suery and M. C. Flemings, 1982, "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-Solid Dendritic Alloys", Metall. Trans. A, Vol. 13A, pp.1089~1819.
- (7) D. A. Pinsky, P. O. Charreyron and M. C. Flemings, 1984, "Compression of Semi-Solid Den-

dritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates", Metall. Trans. B, Vol. 15B, pp.173~181.

- (8) 이주영, 김낙수, 김중재, "반용융단조 공정의 유한요소 해석에 관한 연구", 1997, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.179~184.
- (9) N. Kim, J. H. Yoon, D. Li, S. I. Oh, 1997, "Flow Simulation of Semisolid Forging by FEM", Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 1, pp.183~186.
- (10) 윤중훈, 김낙수, 김현영, 김중재, 임용택, 1997, "반용융상태에서 재료의 변형거동에 관한 유한요소해석", 한국소성가공학회 논문집, 제6권 4호, pp.319~328.
- (11) 윤중훈, 김낙수, 임용택, 이준두, 1998, "강열점소성 유한요소법을 이용한 반용융단조시 성형인자들의 영향에 관한 연구", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.159~164.
- (12) S. Toyoshima and Y. Takahashi, 1991, "A Numerical Simulation of Forming Processes for Semi-Solid Materials", ISIJ Int'l., Vol. 31, No. 6, pp.577~582.
- (13) L. A. Lalli, 1984, "A Model for Deformation and Segregation of Solid-Liquid Mixtures", Metal. Trans., Vol. 16A, pp.1393~1403.
- (14) P. O. Charreyron and M. C. Flemings, 1985, "Rheology of Semi-Solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates: Application to Forming Process", Int. J. of Mech. Sci., Vol. 27, No. 11-12, pp.781~791.
- (15) 김태준, 김낙수, 1998, "후방압출을 통한 반용융재료의 유동응력식 결정", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 214~219.