

비틀림 전방압출 공정의 최적 다이각에
관한 연구

부산대학교 대학원 정밀기계공학부*
부산대학교 기계공학부**

이상인*, 김영호**

비틀림 전방압출 공정의 최적다이각에 관한 연구

이상인^{*}·김영호^{**}·Xiang Ma^{***}

A Study on the Optimal die angle of the Torsional Forward Extrusion Process

S. I. Lee, Y. H. Kim and Xiang Ma

Abstract

The torsional forward extrusion is the process that is executed by punch travel and die rotation. The advantages of having the die rotation on this process are that forming load can be reduced and optimal die angle can be increased. This provides a possibility to extrude cold-worked material where a large extrusion force and die angle are required. Also, this process can improve the material properties owing to the high deformation and uniform strain distribution. The forming load and optimal die angle of this process are determined by the upper bound analysis using stream function and the optimization technique. To verify the theoretical result, we have carried out experiments and FE simulations using DEFORM3D.

Key Words : Torsional forward extrusion(비틀림전방압출), Stream function(유선함수), Upper bound analysis(상계해석), Optimal die angle(최적각), Conical die(원추형다이), FEM(유한요소법)

1. 서론

급속성형 공정에서 성형하중은 상당히 중요한 요소이다. 특히 냉간성형 공정에서는 과도한 성형하중이 요구되며, 이는 다이 마모를 가속시키며 다이 수명 또한 짧게 만든다. 이에 성형하중을 감소시키기 위한 노력이 지속되고 있으며 그 중 전방압출 공정에서 기존의 압출공정에 회전공정을 추가함으로써 성형하중 감소와 성형성을 증가시키는 방법의 일례로서 Kemin[1], Kim[2][3],

Kong[4], Loginov[5]등에 의하여 연구되었다. Kemin[1]은 업셋팅 공정에 회전공정을 추가하여 성형하중이 감소됨을 유한요소 해석에 의해 검증하였고, Kong과 Hodgson[4]은 전방압출 공정에 다이의 주기적인 회전(cyclic torsion)을 주어 성형하중이 감소됨을 입증하였다. 그러나 상계해법을 이용한 규형신개 측면에서 접한 연구는 없으며 단지, Kim[2][3], Loginov[5]등에 의하여 업셋팅 및 후방압출 공정에 다이의 회전공정을 추가하여 성형하중이 감소됨을 상계해석 또는 변형해석을 통

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

*** Sch. of Eng. & Tech., Deakin University, Australia

다이 검증된 바 있다.

또한 전방압출 공정은 원추형 다이의 경우 데드메탈 층 생성으로 인하여 하중의 심각한 증가를 초래한다. 이에 Alexandrov[6]등은 추대성 전방압출 공정에 관한 이론적 분석에 의해 데드메탈 층 생성각도에 관하여 연구한 바 있다.

본 논문에서는 전방압출 공정에 다이의 회전을 추가하여 유선함수에 의한 속도장으로 상세해석하여 성형허중을 예측하였으며 이 결과를 토대로 최적화 기법을 사용하여 성형허중을 최소화하는 압출다이의 최적각도를 계산하였다. 이론해석 결과를 토대로 실험과 DEFORM3D를 이용한 시뮬레이션에 의해 이를 검증하였다.

2. 수학적 접근

2.1 이론적 배경

3차원 공간에서의 속도장을 두 개의 유선함수(stream function)를 이용하여 유도하였다. Yin[7]에 의한 3차원 비압축성 유체의 속도 성분을 원통 좌표계에 적용하면 다음과 같다.

$$V = \nabla \phi \times \nabla \psi \quad (1)$$

즉,

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (2)$$

$$v_\theta = -\frac{\partial \phi}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (3)$$

$$v_z = \frac{\partial \phi}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (4)$$

유선함수에 의한 속도장 접근은 수식(1)에 의하여 미지수의 수를 둘로 줄일 수 있으며, 비압축성 조건은 자동적으로 만족하게 된다. 또한 형상함수 정의에 의해 conical 형상뿐만 아니라 stream-lined die, cosine die, hyperbolic die 등에도 형상함수의 변화에 따라 적절하게 응용이 가능하다.

2.2 비틀림 전방압출 공정에서의 유선함수

편차는 v_θ 의 속도로 움직이고, 다이는 각속도 ω 로 회전하는 공정이다. 다이의 형상은 형상함수 $R(z)$ 로 표현하였으며, 본 논문의 공정에서는 직선형인 코니컬 다이(conical die)형상으로 다음과 같은 함수를 사용하였다.

$$R(z) = r_0 - \tan \alpha \cdot z \quad (5)$$

여기서, r_0 는 재료의 초기 반경이며, α 는 압출다이의

다이각도이다.

Fig.1은 비틀림 전방압출 공정에서 원통 좌표계에 의한 해석모델이다.

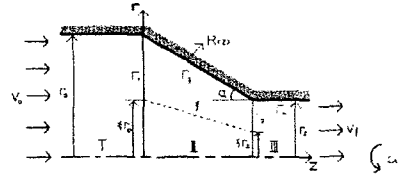


Fig.1 analytical model of torsional forward extrusion

속도장을 결정하기 위해 원통 좌표계에 의해 두 개의 유선함수를 이용하였다.

$$\phi = \phi(r, z), \quad \psi = \psi(\theta, z) \quad (6)$$

위의 유선함수에 의한 속도장은 다음과 같다.

$$v_r = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (7)$$

$$v_\theta = -\frac{\partial \phi}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (8)$$

$$v_z = \frac{\partial \phi}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (9)$$

Fig.1의 해석모델에서 입구부분의 임의의 위치 $r_0 \xi$ 에서의 유량을 고려하여 다음과 같이 유선함수를 가정할 수 있다.

$$\phi = \frac{\pi v_0}{2} (r_0 \xi)^2 \quad (10)$$

여기서 ξ 는 변형구간 내에서의 임의의 유선을 나타내며 다음과 같은 관계를 가진다.

$$r = \xi R(z), \quad (0 \leq \xi \leq 1) \quad (11)$$

또한 유선 ξ 에 따라 유동한다는 가정하에 경계조건을 적용하여 편미분 정리하면 또 하나의 유선함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\psi = \frac{1}{\pi} \theta - \frac{1}{2\pi} \frac{a r \omega}{v_0 r_0^2} \frac{R^2(z)}{R(z)} \quad (12)$$

여기서, a 는 미끄럼 상수로서 다음과 같다.

$$a = \omega_b / \omega \quad (13)$$

여기서, ω 는 다이의 각속도를 나타내며, ω_b 는 빌렛의 각속도를 나타낸다.

2.3 유선함수를 이용한 속도장

편지와 다이는 상체로 가정하였으며 재료는 등방성이고 비압축성이며 Von-Mises 항복조건을 따른다. 변형 중의 온도 변화는 무시하며, 마찰 조건은 소성 변형중 일정하며 다음과 같은 조건을 따른다.

$$\tau = mk \quad (14)$$

여기서, m 은 마찰상수를 k 는 순수 선단 항복 응력을 나타낸다.

수식 (7),(8),(9)에 (10),(12)식을 적용하여 편미분 정리하면 다음과 같은 속도장을 얻을 수 있으며 이 속도장은 경계조건 및 비압축성 조건을 모두 만족한다.

$$v_r = v_0 r_0^2 R'(z) \cdot \frac{r}{R^3(z)} \quad (15)$$

$$v_\theta = a\omega \frac{r^2}{R(z)} \quad (16)$$

$$v_z = v_0 \frac{r_0^2}{R^2(z)} \quad (17)$$

2.4 상계해석에 의한 성형하중

위에서 유도되어진 속도장에 의해 비틀림 전방압출 공정의 성형하중을 상계해석(upper bound analysis)을 이용하여 계산하였다.

$$J^* = W_i + W_s + W_f \quad (18)$$

여기서, J^* 는 외부에서 가한 에너지 율, W_i 는 내부변형 에너지 율, W_s 는 전단변형 에너지 율, W_f 는 마찰손실 에너지 율을 각각 나타낸다.

다음은 내부변형 에너지 율을 구하기 위한 변형률 속도 성분이다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} \\ &= v_0 r_0^2 R'(z) \frac{1}{R^3(z)} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \\ &= v_0 r_0^2 R'(z) \frac{1}{R^3(z)} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{zz} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ &= -2 v_0 r_0^2 R'(z) \frac{1}{R^3(z)} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) \\ &= a\omega \frac{r}{2R(z)} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{z\theta} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) \\ &= -a\omega R'(z) \frac{r^2}{2R^2(z)} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \\ &= -\frac{3}{2} v_0 r_0^2 \frac{R'(z)^2}{R^3(z)} \end{aligned} \quad (24)$$

위의 변형률 속도 성분에 의해 내부변형 에너지를 구하면 다음과 같다.

$$W_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV \quad (25)$$

속도 불연속면, 즉 요소와 요소 사이의 경계에서의 전단 변형 에너지 율은 다음과 같다.

$$W_s = \int_s \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} |\Delta v_s| ds \quad (26)$$

여기서, $|\Delta v_s|$ 는 전단면에서의 속도 불연속 량으로 Fig.1에서 경계 Γ_1, Γ_2 에서 발생하며 다음과 같다.

경계 Γ_1, Γ_2 에서의 속도 불연속량

$$|\Delta V_s|_{\Gamma_1, \Gamma_2} = \sqrt{v_r^2 + ((1-a)r\omega)^2} \quad (27)$$

마찰손실 에너지 율은 소재와 다이 접촉면사이에서의 마찰에 의한 손실 에너지 율을 나타내며 다음과 같다.

$$W_f = \int_{S_f} m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} |\Delta v_f| dS_f \quad (28)$$

여기서, $|\Delta v_f|$ 는 소재와 다이 접촉면 사이의 속도 불연속 량으로 경계 Γ_3, Γ_4 에서 발생하며 다음과 같다.

경계 Γ_3

$$|\Delta V_f|_{\Gamma_3} = \sqrt{\left\{ (1 + \tan \phi) \frac{V_a r_0^2}{r^2} \right\}^2 + ((1-a)r\omega)^2} \quad (29)$$

경계 Γ_1

$$|dV_{d\Gamma_1}| = \sqrt{V_f^2 + ((1-a)r_f a)^2} \quad (30)$$

외부에서 가해지는 에너지율은 수직방향 편치의 이송과 다이의 회전으로 인한 에너지율이며 다음과 같다.

$$J^* = P_k \cdot v_p + M \cdot \omega \quad (31)$$

여기에서, M은 재료와 다이 사이의 마찰에 의해 재료로 전달되어서는 회전에 의한 모멘트(moment)로서 Fig.1에서 코니컬(conical) 부분과 랜드(land) 부에서 발생하며 다음과 같다.

$$M = \int_{s_m} \tau_c r ds_m \quad (32)$$

여기서, τ_c 는 비틀림 모멘트에 기여하는 전단 응력으로 다음과 같다.

$$\tau_c = \tau \frac{v_\theta}{\sqrt{v_z^2 + v_\theta^2}} \quad (33)$$

단, τ 는 재료의 전단응력을 말한다.

코니컬 부분과 모멘트 부분의 비틀림 모멘트에 기여하는 전단응력은 각각 다음과 같다.

$$\tau_c = \tau \frac{a\omega R(z)}{\sqrt{\left(v_\theta + \frac{r_0^2}{R^2(z)}\right)^2 + (a\omega R(z))^2}} \quad (34)$$

$$\tau_c = \tau \frac{a\omega R(z)}{\sqrt{v_f^2 + a\omega r_f^2}} \quad (35)$$

따라서, 비틀림 전방압출 공정의 성형하중은 다음과 같이 표현된다.

$$P_k = \frac{W_i + W_s + W_f - M \cdot \omega}{v_p} \quad (36)$$

또한, 비틀림에 의한 변형양상을 분석하기 위하여 변형률 속도 성분을 이용하여 shear strain rate intensity를 계산하였다.

Loginov[5]에 의하면 shear strain rate intensity는 다음과 같다.

$$H = 2\sqrt{\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}} \quad (37)$$

3. 실험

해석결과를 검증하기 위하여 플라스틱인을 이용하여 실험을 수행하였으며 DEFORMED를 이용하여 시뮬레이

션을 수행하였다.

Fig.2는 실험 장치도이다.

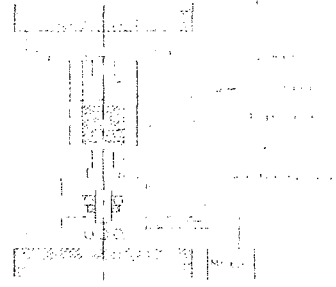


Fig.2 schematic view of equipment

플라스틱인의 기초 실험에 관한 마찰 특성과 유동 특성은 Kim[8]등의 연구에서 언급되었으며, 유동응력과 변형률 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 0.224 \bar{\epsilon}^{0.117} [Mpa] \quad (38)$$

실험상치는 5ton hydraulic model press로 다이의 회전을 주기 위한 장치를 고안하여 프레스에 장착하였으며, DC 서보 모터의 회전력이 기어 트래에 의해 다이에 전달된다.

조기 소재는 원통재료로서 직경 40mm, 높이 40mm로 준비하였다. 펀치의 속력은 1mm/s, 다이의 회전속도는 0.264, 0.446, 0.572, 0.723, 0.836, 0.968, 1.144 rad/sec 이며 윤활은 탈크 파우더(Talc powder)를 이용하였으며 마찰계수는 0.4이다.

또한, 실제 제품의 적용가능 여부를 조사하기 위하여 순수 상용납을 이용한 실험을 병행하였다. 실험에 사용된 소재의 지름은 8mm이며 압출제품의 지름은 4mm이다. 실험조건은 펀치 속도 10 mm/min, 압출 다이각도 45°, 마찰계수는 0.4이다.

4. 결과 및 고찰

비틀림 전방압출 공정에서 유도되어진 속도장에 의해 성형 하중을 예측하였으며, 최적화 기법인 FTM (Flexible Tolerance Method)를 사용하여 최적각도를 계산하였다. 여기서, 최적각도는 성형하중이 최소일 때의 다이 각도를 나타내며 기본이론은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{P}{2k} \right) = 0 \quad (39)$$

여기서, P 는 압축력으로 비틀림 전방압출 공정에서의 성형하중을 나타내며, k 는 재료의 순수 전단 항복 응력을 나타낸다.

Fig.3은 수식(37)에 의한 shear strain rate intensity 값을 표현한 그래프로 다이의 각속도를 변수로 두어 회전속도 변화에 따른 shear strain rate intensity 값을 표현한 것이다.

아래 그림에서 알 수 있듯이 회전속도가 증가할수록 shear strain rate intensity 값은 증가하며 그 증가비는 압출 다이각도가 클수록 가속됨을 알 수 있다. 이는 비틀림 공정이 재료내부의 변형량을 증가시킬 수 의미하며, 이 변형량은 다이 각도가 클수록 커지게 된다.

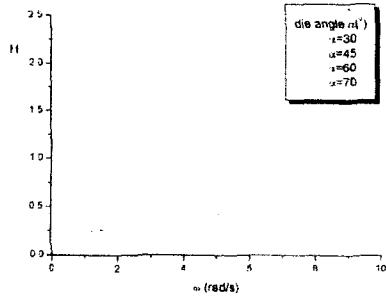


Fig.3 Distribution of shear strain rate intensity

Fig.4는 플라스틱에 의한 실험결과를 그래프로 표현한 것이다. 회전속도가 증가함에 따라 하중이 감소됨을 알 수 있다.

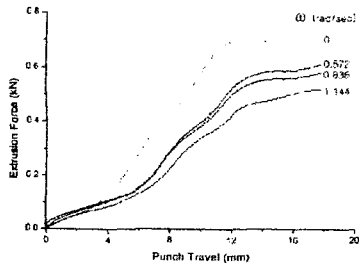


Fig.4 Comparison of extrusion force with and without rotation (plasticine)

Fig.5는 플라스틱을 이용한 실험결과이다. 단순 압출공정(a)보다 비틀림 공정이 추가된 공정(b),(c)에서 더 많은 유동이 일어남을 확인할 수 있다. 특히, a 위치에서의 유동양상을 보면 회전속도가 증가함에 따라 더 많은 유동이 일어나며 이는 전방압출 공정에서의 재료내부 유동량을 비틀림 공정으로 더욱 크게 만들며 제품의 내부결함을 완화시킬 수 있음을 의미한다.

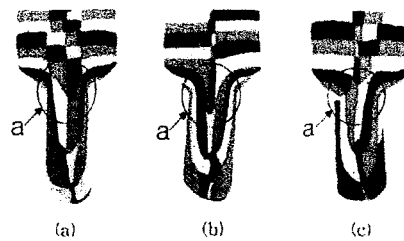


Fig.5 Experimental results of deformed flow patterns in conventional and torsional forward extrusion
(a)conventional extrusion
(b)torsional extrusion at 0.571(rad/s) angular velocity
(c)torsional extrusion at 0.836(rad/s) angular velocity

Fig.6은 순수 상용납에 의한 실험결과를 그래프로 표현한 것이다. 회전속도가 증가할수록 하중이 감소됨을 확인할 수 있다.

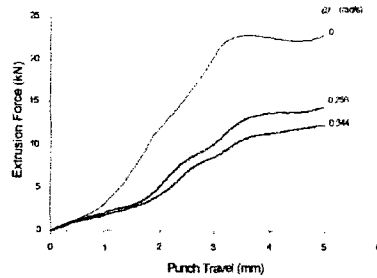


Fig.6 Comparison of extrusion force with and without rotation (pure commercial lead)

Fig.7은 순수 상용납을 이용하여 실험 후 콘테이너 내부와 다이의 코니컬 부분의 유동을 파악하기 위한 사진이다. 그림에서의 같이 회전에 의한 효과가 재료에 전달됨



(a) (b)

Fig.7 Deformed sample after torsional extrusion
(a)shear deformation of material within container
(b)shear deformation of material within conical die

Fig.8은 순수 상용납의 이론분석결과로 압출비의 변화에 따른 응력을 다이 각도 변화에 따라 그래프로 표현한 것이다.

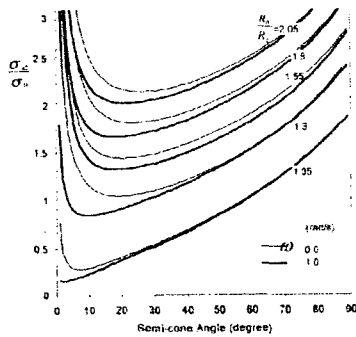


Fig.8 Reduction of extrusion load

Fig.9는 다이의 회전속도 변화에 따른 성형하중을 상계해석에 의해 계산한 그래프이다. 여기서, 마찰계수는 0.4이며 다이의 각도는 45°, 압출비 $\lambda=4$ ($\lambda=d_0^2/d_1^2$)이다. 다이의 회전속도가 증가함에 따라 성형하중은 최대 30%까지 감소됨을 알 수 있으며, 이는 실험 및 시뮬레이션 결과와 잘 일치한다.

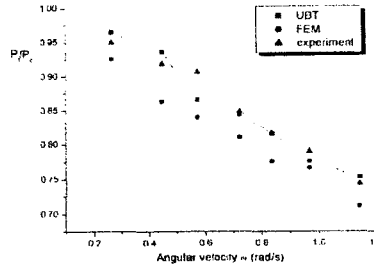
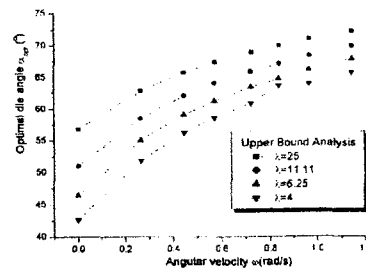


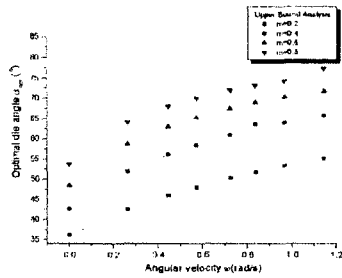
Fig.9 the relative pressure(P_t/P_c) to the angular velocity (ω)

P_t, P_c : the pressure of the torsional & conventional forward extrusion

Fig.10은 다이의 회전속도에 따른 최적각도의 변화를 나타낸 그래프이다. (a)는 압출비의 변화에 따라 그리고 (b)는 마찰계수의 변화에 따른 양상을 나타낸 것이다. 두 그래프에서 알 수 있듯이 회전속도가 증가함에 따라 다이의 최적각도는 증가한다. 또한 (a)의 결과와 같은 다이 각도 상에서 단순압출이 압출비 25인 경우 56°의 다이 각도에서 압출이 용이하나 비틀림 공정에서는 압출비 4인 경우 다이에 0.572rad/sec의 회전속도를 주면 58°까지 압출이 가능하다. 이는 큰 압출비를 요구하는 공정에서 비틀림 공정의 기존의 압출방식보다 공정단계를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그리고 최적다이의 결과는: $\lambda=4, P/\sigma_0=2.63$ 일 때 최적각도 $\alpha_{opt}=42^\circ$ 로서, Alexandrov[6]의 $\lambda=4, P/\sigma_0=2.87$ 일 때 최적각도 $\alpha_{opt}=45^\circ$ 와 근사한 값을 가짐을 알 수 있다.



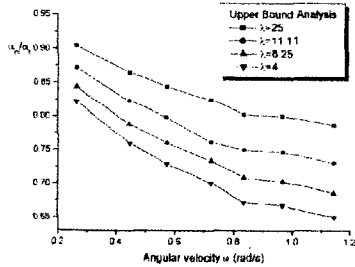
(a)



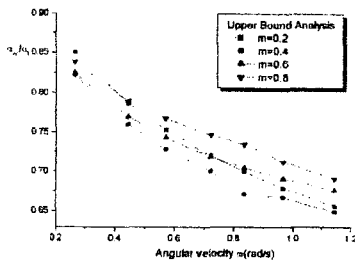
(b)

Fig.10 the optimal die angle(α_{opt}) to the angular velocity(ω)
 (a) the optimal die angle to the extrusion ratio, λ
 (b) the optimal die angle to the friction factor, m

Fig.11은 다이의 회전속도에 따른 최적각도의 비율 나타낸 그래프이다. (a)에서 알 수 있듯이 압출비가 증가할수록 최적각도의 증가비가 가속됨을 알 수 있으며, 압출비 $\lambda=4$ 인 경우 최적각도는 최대 35%까지 증가한다. (b)는 마찰계수의 변화에 따른 최적각도의 증가비이다.



(a)

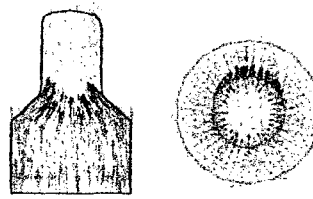


(b)

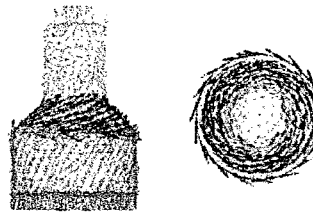
Fig.11 the relative optimal die angle(α_c/α_0) to the angular velocity(ω)

(a) relative optimal die angle to the extrusion ratio, λ
 (b) relative optimal die angle to the friction factor, m
 α_c , α_0 : the optimal die angle of the torsional & conventional forward extrusion

Fig.12는 FE-simulation에 의한 속도분포도이다. 다이 부분에 회전이 적용됨을 속도분포로서 확인 할 수 있다.



(a)



(b)

Fig.12 velocity distributions ($m=0.4$, $\lambda=4$)
 (a) conventional forward extrusion
 (b) torsional forward extrusion($\omega=0.572$ rad/sec)

Fig.13은 FE-simulation에 의한 재료 내부단면의 유효변형률 분포이다. 압출 제품의 변형률 분포를 비교하면 단순 압출공정(a)보다 비틀림 공정이 추가된 공정 (b),(c)에서 더 크고 균일한 분포를 보이고 있다. 그리고 회전속도가 증가할수록 더욱 균일하고 큰 변형이 생김을 알 수 있으며 단순 압출의 경우 제품 내부의 변형이 적으며 다이 접촉부에 변형이 밀집되어 있는 것을 볼 수 있는 반면 비틀림 공정에서는 제품 내부에까지 큰 변형을 가지며 고른 분포양상을 보인다. 이러한 결과로 central burst 등의 내부결함을 방지 할 수 있으며 기계적 성질 향상에 도움을 줄 있음을 알 수 있다. 그러나 회전속도가 너무 크게 되면 (d)와 같이 변형률 값은 크나 단순압출과 유사하게 재료내부의 변형이 적어 불균일 변형을 가지게 된다.

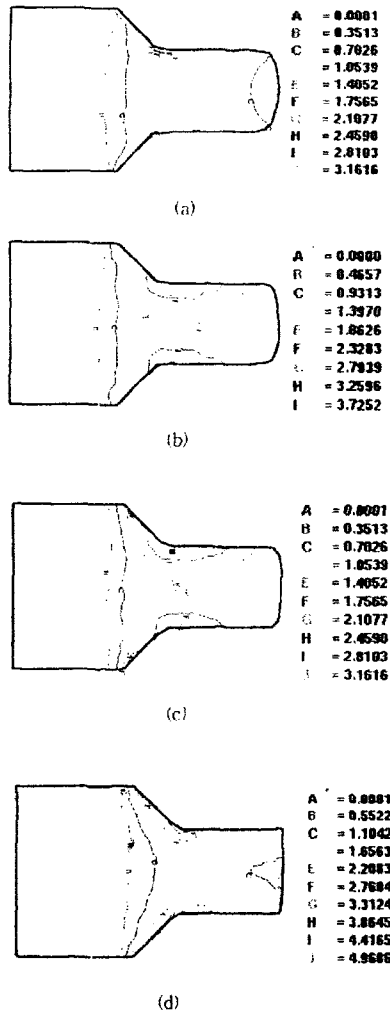


Fig.13 Effective strain distributions ($m=0.4$, $\lambda=4$)
 (a) conventional forward extrusion
 (b) torsional forward extrusionrelative($\omega=0.264\text{rad/sec}$)
 (c) torsional forward extrusionrelative($\omega=0.572\text{rad/sec}$)
 (d) torsional forward extrusionrelative($\omega=1.144\text{rad/sec}$)

5. 결론

비틀림 전방압출 공정은 기존의 전방압출 공정에 비해 성형하중을 감소시키며 회전에 의한 효과로 압출다이의 최적각도를 증가시킬 수 있다. 성형하중 감소는 큰 성형하중이 요구되는 냉간 성형공정에서 유용하며 다이 수명 향상에 도움을 줄 수 있다. 그리고 압출다이의 최적각도의 증가는 큰 압출비율 요구하는 공정에서 기존의 압출 방식보다 공정단계를 줄일 수 있는 이점이 있다.

또한 비틀림 공정에 의한 제품은 단순압출의 경우보다 큰 유효 변형률과 고른 분포를 가지어 소재 내부결함 방지 및 기계적 성질을 우수하게 할 수 있다.

참고 문헌

- (1) X. Kemin, W. Zhen and L. Yan, 1997, "FEM Analysis of Cylinder Twist-Compression Deformation Regularity", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 69, pp. 148-151.
- (2) Y. H. Kim, Y. E. Jin, J. H. Park, Y. Lee, 2000, "An Analysis of the Torsional Forming Process using the Dual Stream Function", Proceedings of the 8th Int. Con. on Metal Forming, Poland, pp. 741-745.
- (3) Y. H. Kim, Y. E. Jin, J. H. Park, 2000, "An Analysis of Plastic deformation for twist-assisted upset forging of cylinder billets", Instn Mech Engrs, Vol. 215, Part. B, pp. 883-886.
- (4) L. X. Kong, P. D. Hodgson, 2001, "Material Properties under Drawing and Extrusion with Cyclic Torsion", Material Sciences and Engineering, A308, pp. 209-215.
- (5) Yu. N. Loginov, S. P. Burkin, 1995, "Investigations of the Process of Extrusion through a rotating die", Steel in Translation, Vol. 25, No. 4, pp. 37-42.
- (6) S. Alexandrov, G. Mishuris, W. Miszuris, R. E. Siliwa, 2001, "On the dead-zone formation and limit analysis in axially symmetric extrusion", International journal of Mechanical Sciences, Vol. 43, pp. 367-379.
- (7) C. S. Yih, 1957, "Stream Function in Three Dimensional Flows", La Houllie Blanche, Vol. 12, pp. 445-450.
- (8) 김영호, 배원병, 이종현, 1993, "MMT를 이용한 Al-7075 열간 압출 단조의 가공하중 예측", 한국소성가공학회 논문집, 2권, 3호, pp.37-50.