

<論 文>

곡면금형을 통한 타원형 형재의 압출에 대한 3차원 소성유동 해석

韓 哲 虎* · 梁 東 烈**

(1986년 9월 30일 접수)

Analysis of Three-Dimensional Plastic Flow for Extrusion of Elliptic Sections through Continuous Dies

Chul-Ho Han and Dong-Yol Yang

Key Words: Elliptic Sections(타원형 형재), Three-Dimensional Plastic Flow (3차원 소성유동), Flow Pattern(유동형태), Work-Hardening Materials(가공경화재료), Upper-Bound Method(상계해법)

Abstract

A new kinematically admissible velocity field for a generalized three-dimensional flow is introduced, in which the flow is bounded by an analytic die-profile function. Then, by applying the upper-bound method to the velocity field, the flow patterns as the upperbound method are obtained. Extrusion of elliptic sections from round billets is chosen as a computational example. Computation and experiments are carried out for workhardening material such as aluminum alloy 2024. In order to visualize the plastic flow, the grid marking technique is employed. The theoretical predictions both in extrusion load and deformed pattern are in good agreement with the experimental data.

기 호 설 명

a, b, c, d, p, q : 최적매개변수
 C, D : 형상함수 $f(z)$ 와 $g(z)$ 의 변곡점과 관련된 계수
 $f(z), g(z)$: 금형의 내칭면상에서 정의된 형상함수
 J^* : 상계 압출동력

L : 무차원 금형길이, 즉 소재경으로 금형 길이를 나눈 값
 L_s, L_e : $f(z)$ 와 $g(z)$ 의 변곡점 위치
 m : 금형과 소재 경계면의 마찰상수
 $R(\theta, z)$: 연속금형 형상함수
 $S(z)$: $z=z$ 에서의 단면적 함수
 V : 소성역의 부피
 $V_m(z)$: $z=z$ 에서의 축방향의 평균속도
 V_0, V_f : 소재의 초기속도 및 최종속도

* 正會員, 金烏工科大学
** 正會員, 韓國科學技術院 生産工學科

- ΔV : 속도 불연속량
- W_i, W_s, W_r : 각각 내부변형 에너지율, 마찰손실 및 전단변형 에너지율
- $(\)', (\)''$: z 에 대한 1차 및 2차 도함수
- Γ_1, Γ_2 : 압출구의 강-소성 경계
- Γ_3 : 금형 표면
- $\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}$: 유효변형도율과 유효변형도
- $\bar{\epsilon}_{ij}$: 변형도율 텐서성분
- $\bar{\epsilon}_f$: 압출제품의 최종 유효변형도
- $\bar{\epsilon}_{1avg}$: 단면상의 평균 최종 유효변형도
- λ, μ : 최종제품의 장반경과 단반경
- γ : λ/μ
- $\bar{\sigma}$: 가공경화재의 유동응력
- $\bar{\sigma}_n$: 평균 유동응력

1. 서 론

윤활된 연속곡면 금형을 통한 압출공정은 평균형 또는 원추형 금형의 압출보다 균일한 변형을 얻을 수 있으며 특히 소성역의 입출구에서 변형이 연속적이기 때문에 제품결함을 배제하고 표면정도가 개선되는 이점이 있다. 지난 10여년간 알루미늄, 강과 타이타늄 합금소재를 이용한 각종의 정밀부품 제조 및 구조용 소재 제조산업과 연관하여 이 분야의 연구가 활발해지고 있다. 제품형상은 초기에는 단순한 축대칭형상이 대부분이었으나 최근에는 기어, 스플라인류와 터어빈과 콤프레셔의 블레이드, 정밀한 예비형상에까지 적용범위가 넓어지고 있다.

일반적인 단면형상 제품을 압출하는 3차원 압출의 연속금형곡면을 설계 제작하는 것은 매우 어렵다. 최근들어 전산 관련분야의 비약적 발달과 수치제어 공장 기계들의 출현으로 제작에 있어서의 난점은 점차 해소되고 있다. 그러나 3차원 압출공정의 해석에 있어서는 아직 초기단계에 있으며 실제 금형설계에 있어서는 직관이나 실험에 의존하고 있다.

Nagpal 등^(1,2)은 이중유동함수(dual stream function)를 이용한 동적 가용속도장(kinematically admissible velocity field)을 유도해서 원형소재로부터 타원형 형제의 압출에 대한 압출하중의 상계해를 제안하였다. Cho와 Yang⁽³⁾은 Nagpal의 동적가용속도장을 이용하고 유체 윤활이론을 적용하여 이 형상의 정수압 압출에 대한 상계해를 구하였으나 유동함수 결정에 있어서의 난점으로 일반적 단면형상에 대한 확장이 필요하였다.

입의 단면형제의 원형소재로부터의 압출에 대한 해석은 Yang 등⁽⁴⁾에 의해 시도되었으며 금형곡면형상과 내부유동을 사상변환법을 이용해서 표현하였다. 후에 Yang과 Lange⁽⁵⁾는 곡면의 표현법을 보다 일반화하였으며 박막식 정수압 압출공정의 상계해를 얻었다. Gunasekera와 Hoshino 등⁽⁶⁻⁸⁾은 유선정의에 의한 금형곡면 구성법을 제안하고 변형역의 각 단면상에서 반경방향선 위의 축방향 속도성분이 일정하다고 가정하였다. Kiuchi 등^(9,10)은 금형곡면이 해석함수로 주어졌던 경우 변형역의 단면에서 축방향속도가 일정하다고 가정하여 동적가용속도장을 유도하여 해석하였다. Gunasekera와 Kiuchi의 해석은 그들의 해석상의 속도장에 대한 가정으로 인하여 축중심축 또는 변형역내의 특정단면이 수학적으로 특이(Singular)한 것을 피할 수 없었다.

금속성형 공정에서 소성유동의 예측은 매우 중요하며 효율적인 공정설계와 최종제품의 물성을 좌우하는 필수요소로 알려져 있다. 그러나, 전술한 종래의 해석들은 기하학적 제한 또는 속도장의 일반성 결여로 압출하중의 근사예측만 가능한 뿐 소성유동에 대한 유용한 정보를 주지 못하고 있는 실정이다.

이 연구에서는 터어빈과 콤프레셔 블레이드의 정밀 예비형상 및 캠 부품의 제조에 사용되는 원형소재로부터의 타원형제의 압출에 대한 일반적인 해석방법을 제안할 것이다. 해석결과는 실제 가공경화재인 알루미늄 합금(Al 2024)의 압출실험을 수행하여 타당성을 검토하도록 할 것이며 기존의 해석 및 실험결과와도 비교 논의하도록 하겠다.

2. 입의 형상제의 3차원 압출에 대한 동적 가용속도장

Fig. 1은 금형곡면이 해석함수 $R(\theta, z)$ 로 표현된 일반적 3차원 압출의 개략도이다. 이전의 해석방법들은 대부분 축방향 속도성분 V_z 가 변형역의 각 단면에서 일정하다고 가정하였다. 따라서 V_z 는 단면형상이 주어지면 일의적으로 결정되며 압출소재나 금형의 윤활 조건에 무관하다. 그러므로 제공정변수에 영향을 받는 실제의 속도장을 구성할 수 없게 된다.

본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 소성변형역을 금형 압출구에서 z 축에 수직한 두 단면 사이의 영역으로 가정한다. 소재를 비압축성으로 보면 3차원유동의 경우 연속방정식은 원통좌표로 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (1)$$

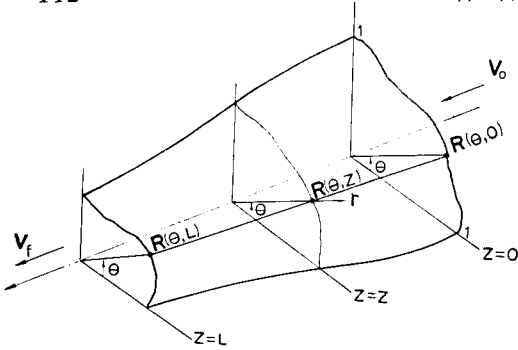


Fig. 1 Schematic of generalized three-dimensional extrusion of arbitrarily-shaped sections through a continuous dies

식 (1)의 일반해는 r, θ 와 z 의 함수형, 즉 $V_r(r, \theta, z)$, $V_\theta(r, \theta, z)$ 와 $V_z(r, \theta, z)$ 로 표현된다. 해석의 편의상 V_z 를 다음 두 성분으로 나눌 수가 있다.

$$V_z(r, \theta, z) = V_m(z) + F(r, \theta, z) \tag{2}$$

식 (2)의 첫째항은 평균속도를 의미하며 다음식으로 정의한다.

$$V_m(z) = V_0 S(0) / S(z) \tag{3}$$

둘째항은 주어진 단면상의 일점 (r, θ, z) 에서의 속도 변화량이다. 식 (2)의 축방향 속도성분은 식 (1)의 연속조건을 만족해야 하기 때문에 $F(r, \theta, z)$ 는 다음과 같은 제한조건이 있다.

$$\int_{S(z)} F(r, \theta, z) dS = 0 \tag{4}$$

식 (4)를 만족하는 $F(r, \theta, z)$ 는 무수히 많이 존재하나 유동특성을 고려하고 압출 축선상의 대칭성 및 속도경계조건을 만족하는 해석함수를 취할 수 있다.

$$F(r, \theta, z) = \alpha(z) G(r, \theta, z) \tag{5}$$

여기서

$$\alpha(z) = cz^2(z-d)(z-L)^2$$

$$G(r, \theta, z)$$

$$= R(\theta, z)^p \left[\left(\frac{r}{R(\theta, z)} \right)^3 + a \left(\frac{r}{R(\theta, z)} \right)^2 + b \right]$$

윗 식에서 a, b, c, d, p 는 계수들이며 F 는 식 (4)을 만족해야 함으로 a 와 b 는 다음 관계를 갖는다.

$$\frac{1}{5} + \frac{a}{4} + \frac{b}{2} = 0 \tag{6}$$

식 (5)를 식 (2)에 대입하면 축방향 속도성분 $V_z(r, \theta, z)$ 는 결정되고 이것은 금형 입출구에서 다음 속도 경계조건을 만족한다.

$$V_z|_{z=0} = V_0, \quad V_z|_{z=L} = V_f \tag{7}$$

원주방향 속도성분 V_θ 는 입출구와 압출축 선상의 다음 속도 경계조건을 고려하면

$$V_\theta(r, \theta, z)|_{r=0} = 0,$$

$$V_\theta(r, \theta, z)|_{z=0} = V_\theta(r, \theta, z)|_{z=L} = 0 \tag{8}$$

일반적인 함수형태로 표현할 수 있다. 즉,

$$V_\theta(r, \theta, z) = r^q \Omega(\theta, z) \tag{9}$$

반경방향의 속도성분 V_r 과 식 (9)의 $\Omega(\theta, z)$ 를 결정하기 위해서는 금형면에서의 다음 경계조건을 고려하고

$$\begin{aligned} V_r(r, \theta, z) \Big|_{r=R(\theta, z)} &= -\frac{1}{R(\theta, z)} \frac{\partial R(\theta, z)}{\partial \theta} \\ V_\theta(r, \theta, z) \Big|_{r=R(\theta, z)} &+ \frac{\partial R(\theta, z)}{\partial z} V_z(r, \theta, z) \Big|_{r=R(\theta, z)} \end{aligned} \tag{10}$$

식 (2)와 식 (9)를 연속방정식 식 (1)에 대입하여 적분해서 얻을 수 있으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_r(r, \theta, z) &= -\frac{r}{2} V_m' - \frac{r}{q+1} \frac{\partial \Omega}{\partial \theta} - \alpha' R(\theta, z)^{p+1} \\ &\left[\frac{1}{5} \left(\frac{r}{R(\theta, z)} \right)^4 + \frac{a}{4} \left(\frac{r}{R(\theta, z)} \right)^3 + \frac{b}{2} \left(\frac{r}{R(\theta, z)} \right) \right] \\ &+ \alpha R(\theta, z)^p \left[\frac{p-3}{5} \left(\frac{r}{R(\theta, z)} \right)^4 + \frac{a(p-2)}{4} \right. \\ &\left. \left(\frac{r}{R(\theta, z)} \right)^3 + \frac{pb}{2} \left(\frac{r}{R(\theta, z)} \right) \right] \frac{\partial R(\theta, z)}{\partial z} \tag{11} \\ \Omega(\theta, z) &= -\frac{q+1}{2 R(\theta, z)^{q+1}} \int_0^\theta \frac{\partial}{\partial z} [R(\theta, z)^2 V_m(z) d\theta] \end{aligned} \tag{12}$$

이상에서 유도된 속도성분들은 비압축성 조건식으로 부터 얻어졌으며 모든 속도경계조건을 만족하므로 임의의 금형곡면 $R(\theta, z)$ 를 통한 일반적 3차원 압출의 동적가용 속도장이 된다.

3. 타원형 형재의 압출

Fig. 2에서와 같이 원형소재로부터 타원형 형재를 압출하는 경우 임의의 타원형 중간단면을 갖도록 직교좌표계상의 다음과 같은 일반함수를 정의할 수 있다.

$$\frac{x^2}{f^2} + \frac{y^2}{g^2} = 1 \tag{13}$$

식 (13)은 원통좌표계로 쉽게 변환되며 이를 정리하면 다음과 같다.

$$R(\theta, z) = \frac{fg}{[(g \cos \theta)^2 + (f \sin \theta)^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{14}$$

여기서 f 와 g 는 금형의 장·단 대칭면들의 형상을 표현하는 형상함수로 금형 입출구에서 연속변형을 갖는 다음의 4차연속함수를 선정할 수 있다.

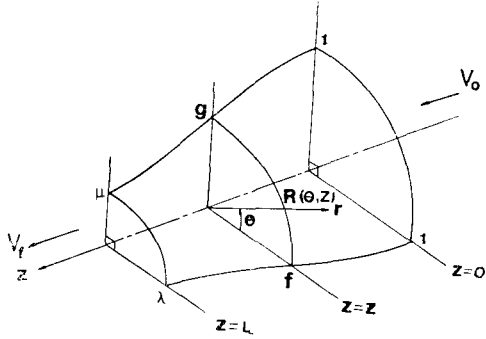


Fig. 2 Schematic of three-dimensional Extrusion of an elliptic section from round billet

$$f(z) = 1 + \left[CL^2 - \frac{3(1-\lambda)}{L^2} \right] z^2 + 2 \left(\frac{1-\lambda}{L^3} - CL \right) z^3 + Cz^4 \quad (15a)$$

$$g(z) = 1 + \left[DL^2 - \frac{3(1-\lambda)}{L^2} \right] z^2 + 2 \left(\frac{1-\lambda}{L^3} - DL \right) z^3 + Dz^4 \quad (15b)$$

식 (14)의 금형 곡면식을 전절에서 유도한 속도장에 대입하면 타원형 압출의 동적가용 속도장을 얻게 되며 이로부터 변형도율장은 다음 식으로 구해진다.

$$\dot{\epsilon}_{i,j} = \frac{1}{2} (V_{i,j} + V_{j,i}) \quad (16)$$

상계정리에 의하면 가용한 속도장에 대해 다음 식으로 구성된 상계에너지율을 최소화하여야 한다.

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f \quad (17)$$

앞에서 유도한 속도장은 입출구에서 속도 불연속이 존재하지 않으므로 \dot{W}_s 는 없으며 \dot{W}_i 와 \dot{W}_f 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{W}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_m \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^{R(\theta,z)} \left(\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{i,j} \dot{\epsilon}_{i,j} \right)^{\frac{1}{2}} r dr d\theta dz \quad (18a)$$

$$\dot{W}_f = \frac{m}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_m \int_0^L \int_0^{2\pi} (V_r^2 + V_\theta^2 + V_z^2)^{\frac{1}{2}} \Big|_{r=R} [1 + \frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial R}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z} \right)^2]^{\frac{1}{2}} R d\theta dz \quad (18b)$$

여기서 $\bar{\sigma}_m$ 은 가공경화를 고려한 평균 유효응력이며 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\sigma}_m = \frac{\int_0^{\dot{\epsilon}_{f,avg}} \sigma d\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{f,avg}} \quad (19)$$

그러면 압출압력의 상계해는 다음 식으로 표현할 수가 있다.

$$P_{avg} = \frac{J^*_{min}}{\pi V_0} \quad (20)$$

4. 실험

실험장치는 400톤 유압프레스(Wilson Co.)에 설치하였으며 금형곡면은 f 와 g 를 각각 3차의 다항식으로 선정하였다. 3차원 금형곡면은 직접 기계가공이 어렵기 때문에 전구를 NC 밀링기(FANUC 5-M)로 가공한 후 금형의 공동부위를 방전가공기로 성형해서 최종 랩핑하여 완성하였다.

Fig. 3은 타원형의 금형곡면을 전산설계한 결과이며 좌측에서와 같이 대화식 프로그램에 의한 시뮬레이션을 해 전구봉의 3차원 형상을 가공하기 위한 공구경로를 창성시켰다. Fig. 4는 NC가공한 전구봉 형상이며 전구의 마모를 고려 황삭용과 정삭용의 두 개의 전구를 제작하였다. 금형길이는 30mm로 단면감소율은 60%로 제작했으며 소재는 Al 2024를 풀립처리하여 사용하였으며 $\phi 29.5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 크기로 하였다. 압축실험 결과 얻은 응력변형도 곡선식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 357.7 \bar{\epsilon}^{0.156} (\text{MPa}) \quad (21)$$

소성변형의 형상을 보기 위해 타원형의 두 대칭면상

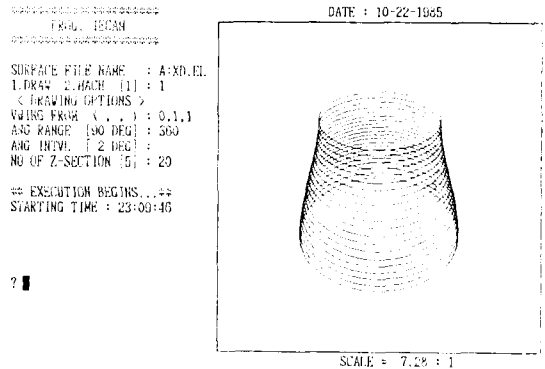


Fig. 3 Surface geometry and cutter locations



Fig. 4 NC machined electrodes

을 기준하여 반쪽시편에 균등간격 (1 mm×1 mm)의 격자를 각인하여 실험하였다. 압출실험시 사용한 윤활제는 MoS₂ 가루(10% 중량)와 Grease의 혼합물을 사용하였으며 링압축시험 결과 $m=0.12$ 였다. 실험시는 하중 및 변위를 측정하였으며 정상상태에서의 압출하중을 얻었으며 상온에서 실험을 수행하였다.

5. 결과 및 토론

타원형 형재의 3차원 압출의 계산에 적용한 형상 데이터는 Table 1에 나타나 있다.

Fig. 5에는 반경비 $\gamma=1.5$ 인 타원형재의 정수압 압출($m=0.001$)의 경우 단면감소율의 영향을 보여주고 있다. 현 이론결과는 Cho와 Yang의 결과^[3]에 비해 실험과 잘 일치하며 전 단면감소율에 걸쳐 보다 좋은 상계압출압력을 예측하고 있다.

금형형상이 정해진 경우 마찰상수가 압출압력에 미치는 영향이 Fig. 6에 나타나 있다. 마찰상수가 커질수록 소요압출압력은 선형적으로 증가하며 이는 마찰에 의한 소요압력항 $P_f/\bar{\sigma}_m$ 의 증가에 기인한다. 윤활상태가 좋은 경우 전체 소요압출압력은 내부변형항

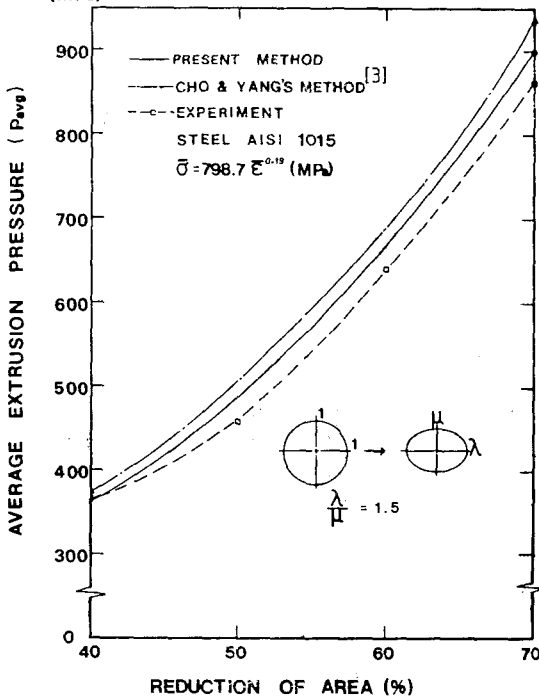


Fig. 5 Comparison of average extrusion pressures between theoretical predictions and experimental results for various area reductions

Table 1 Computational models of elliptic sections from round sections

R.A. (%)	γ	L/R_0	L_f/L	L_g/L
40	1.5	2.08	0.457	0.444
50	1.5	2.08	0.461	0.442
60	1.5	2.08	0.464	0.442
70	1.5	2.08	0.468	0.442
60	1.0	2.0	0.5	0.5
60	1.5	2.0	0.5	0.5
60	2.0	2.0	0.5	0.5
80	1.5	2.0	0.5	0.5

γ : axis ratio R_0 : billet radius
 L : die length
 L_f, L_g : inflection points of f and g , respectively

$P_i/\bar{\sigma}_m$ 에 의한 것이 대부분이지만 마찰상수가 증가해 $m=0.3$ 근처가 되면 $P_i/\bar{\sigma}_m$ 와 $P_f/\bar{\sigma}_m$ 값이 거의 같아진다.

일정 단면감소율과 금형질이 및 마찰상수하에서 최종 타원형 압출단면의 축비 γ 의 변화가 압출압력에 미치는 영향을 Fig. 7은 보여주고 있다. $\gamma=1$ 인 경우는 축대칭에 해당되며 γ 가 커지면 $P_f/\bar{\sigma}_m$ 에는 거의 영향이 없으나 내부변형의 소요에너지가 증가하여 전체 소요압출압력은 점진적으로 커진다.

Fig. 8은 최종 압출단면의 축비 γ 가 1과 1.5인 경

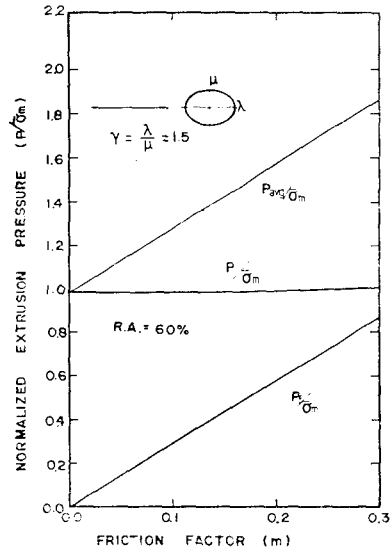


Fig. 6 Influence of friction factor on the normalized extrusion pressures for extrusion of elliptic sections from round billets

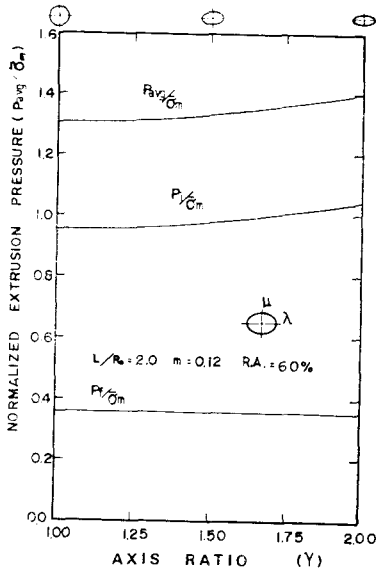
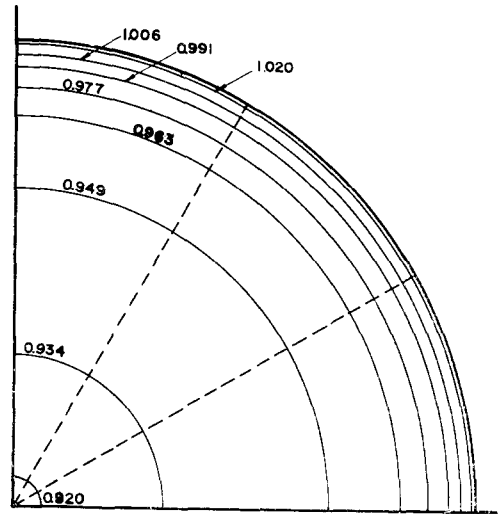


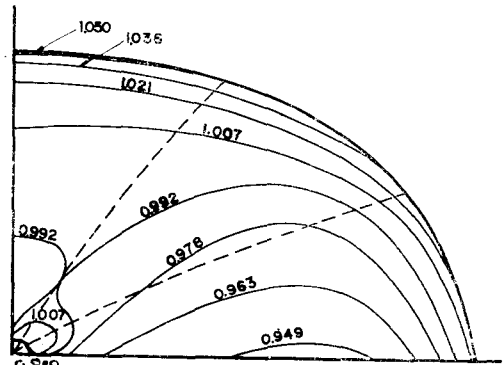
Fig. 7 Effect of axis ratio γ on normalized extrusion pressures for elliptic sections

우 압출제품의 단면상의 유효변형도(ϵ_f)의 분포를 얻은 결과이다. 축대칭압출은 중심에서부터 동심원상으로 표면 가까이로 갈수록 증가한다. γ 가 1.5로 커지면 장축상의 값보다 단축상의 값이 커지며 이는 반경 방향으로의 심한 변형이 생겼기 때문이다. ϵ_f 의 증가는 제품의 가공경화의 정도를 나타내며, 즉 타원형 압출제품의 경우 경도는 일반적으로 표면에 가까이 갈수록 커지며 단축방향이 장축보다 크다는 것을 알 수 있다. 그림에서 점선은 최초 원형 단면상의 등각도 직선성분이 최종 압출단면상에서의 변형된 상태를 나타내며, 축대칭의 경우는 회전방향 속도성분이 존재하지 않으므로 등각도를 유지하지만 타원형의 경우 두 대칭축을 제외하고는 회전방향으로 변형을 받기 때문에 곡선형으로 바뀐다. 이것은 3차원압출시 비례변형을 가정한 기준해석들^(1-2, 6-8)이 물리적으로 모순이 있음을 시사하고 있다.

Fig. 8(b)의 중앙부 가까이에서 $\epsilon=0.007$ 의 유효변형도가 펼쳐 있으며 중앙부로 갈수록 $\epsilon=0.949$ 를 거쳐서 $\epsilon=0.920$ 까지 작아지는 유효변형도의 분포를 볼 수 있다. 이러한 분포는 보다 정밀한 수치적인 해법에 의해 분석이 가능하겠으나 정성적으로 다음과 같은 정성적인 설명이 가능하다. 반경 방향으로의 부분단면감축이 장축에서 단축쪽으로 가면서 커지고 있는데 유효변형도도 이러한 경향이 확인되고 있다. 그런데 단축 자체를 보면 외곽에서 유효변형도가 최대이고 점차 작아지



(a) $\gamma = 1.0$



(b) $\gamma = 1.5$

Fig. 8 Influence of axis ratio γ on the distribution of the final effective strain

고 있다. 이것은 또한 이론결과인 Fig. 9(b)와 실험유동패턴 Fig. 10(a, b)에서 장경방향으로 flow line이 안쪽으로 갈수록 밀집되어 있고 단경방향으로는 이와 반대로 flow line이 반대경향을 보이는 것으로 일부 설명될 수 있다.

소성변형역의 두 대칭축면상의 소성유동형상이 단면감소율이 다를 때 어떻게 변화하는지 Fig. 9에 나타나 있다. 낮은 단면감소율에서 보다 높은 단면감소율에서 변형된 등간격을 유지하던 종방향의 등시간선(isotime line)의 변화가 크며 심한 소성변형을 받고 있다. 횡방

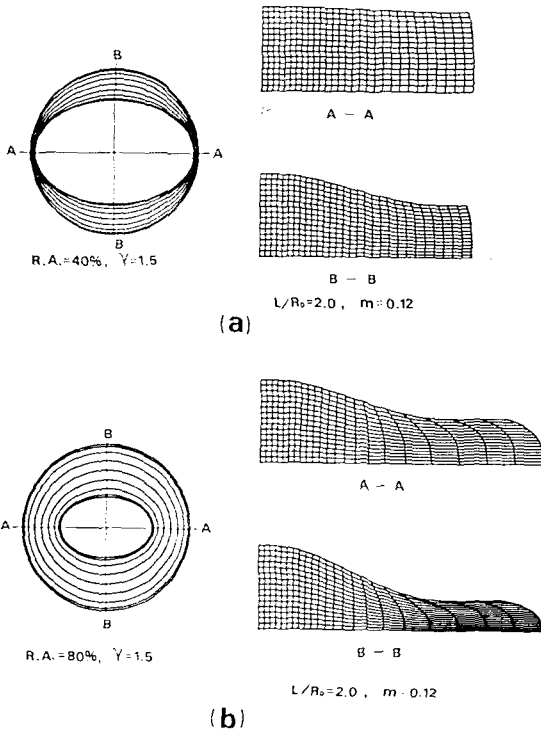


Fig. 9 Grid distortion patterns for two area reductions of 40% and 80%

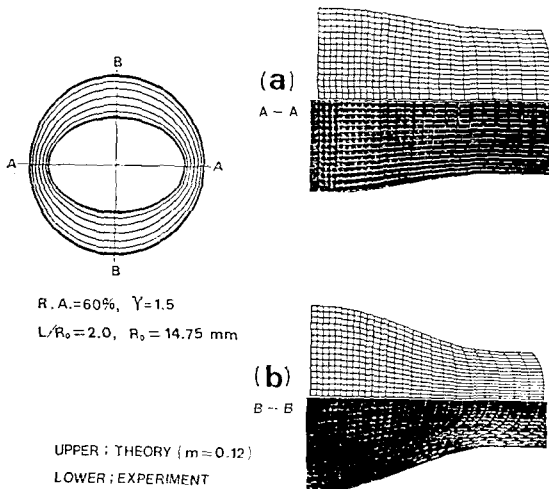


Fig. 10 Comparison of grid distortion between theoretical prediction and experimental result for extrusion of an elliptic section

향의 유선은 변형전 등간격에서 변형후 비등간격으로 바뀌며 타원형 형상의 단대칭면에서는 중심으로 갈수록 조밀하며 장대칭면에서는 외곽으로 갈수록 조밀하다. 이것 또한 비례변형을 이용한 종래의 해석⁽⁶⁻⁸⁾에 무리가 있다는 것을 알려주고 있다.

Fig. 10은 단면감소율 60%, 소재경 14.75 mm의 시편으로 금형 형상합수 f 와 g 를 각각 3차함수로 한 금형을 통한 타원형재의 압출시 두 대칭면상의 격자변형형상의 이론 및 실험결과를 비교한 것이다. 예측했던대로 실험결과에서도 유선사이의 간격은 단대칭면상에서는 축 중심으로 갈수록 조밀하며 장대칭면에서는 반대 경향을 보인다. 이론예측은 실험결과와 그 경향과 크기에 있어 비교적 잘 일치하고 있다. 시편의외곽 부위에 있어서 실험결과는 이론과 약간의 차이를 보이고 있는데 이것은 소성유동 형상실험시 분할시편을 겹쳐서 실험을 하기 때문에 생긴 모서리 효과도 일부 요인이 된다.

6. 결 론

일반적 함수형으로 표현된 임의 단면형재의 3차원 압출에 대한 등적가용 속도장을 도입하였다. 제안된 속도장으로부터 상계이론을 적용하여 원형소재에서 타원형재의 압출시 소성유동 특성 및 압출공정 변수의 영향을 보였다. 현 해석법은 기존해법에 비해 좋은 상계 압출압력을 주며 종래해법의 미해결 분야인 소성유동의 해석 및 최종압출제품의 가공경화정도도 예측할 수가 있다. 해석 및 실험결과 타원형형재의 압출시 종래의 비례변형 가정의 모순점을 규명했으며 해석은 실험결과와 비교적 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- (1) V. Nagpal and T. Altan, Analysis of the Three-Dimensional Metal Flow in Extrusion of Shapes with the Use of Dual Stream Functions, Proc. the third North American Met. Research Conf. Pittsburgh, Pennsylvania, pp.26~40, 1975
- (2) V. Nagpal, On the Solution of Three-Dimensional Metal Forming Process, J. Eng. Ind. Trans. ASME Ser. B. Vol. 99, pp. 624~629, 1977
- (3) N.S. Cho and D.Y. Yang, Analysis of Hydrofilm Extrusion of Elliptic Shapes Using Perturbation Method, Int. J. Mech. Sci. Vol. 25, No. 4, pp. 283

- ~292, 1983
- (4) D.Y. Yang, M.U. Kin and C.H. Lee, A New Approach for Generalized Three-Dimensional Extrusion of Sections from Round Billets by Conformal Transformation, IUTAM Symposium, Germany, Metal Forming Plasticity, pp. 204~221, 1979
- (5) D.Y. Yang and K. Lange, Analysis of Hydrofilm Extrusion of Three-Dimensional Shapes from Round Billets, Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, No. 1, pp. 1~19, 1984
- (6) S. Hoshino and J.S. Gunasekera, An Upper-Bound Solution for the Extrusion of Square Section from Round Bar through Converging Dies, Proc. 21st Int. Mach. Tool. Des. Res. Conf., Swansea, England, pp. 97~105, 1980
- (7) J.S. Gunasekera and S. Hoshino, Analysis of Extrusion or Drawing of Polygonal Sections through straightly Converging Dies, J. Eng. for Ind. Trans. ASME Ser. B, Vol. 104, pp. 38~45, 1982
- (8) J.S. Gunasekera and S. Hoshino, Analysis of Extrusion of Polygonal Sections through Streamlined Dies, J. Eng. for Ind. Trans. ASME Ser. B, Vol. 107, pp. 229~233, 1985
- (9) M. Kiuchi, H. Kishi and M. Ishikawa, Upper-Bound Analysis of Extrusion and/or Drawing of Square, Rectangular, Hexagonal and Other Asymmetric Bars and Wires: Study on Nonsymmetric Extrusion and Drawing I, Journal of JSTP, Vol. 24, No. 266, pp. 290~296, 1983
- (10) M. Kiuchi, Overall Analysis of Non-axisymmetric Extrusion and Drawing, Proc. the 12th North American Manufacturing Res. Conf., p. 111, 1984