

비원형 중공 압출의 유효 압출비를 이용한 실험적 해석

한철호* · 김상화**

(1999년 7월 7일 접수)

An Experimental Analysis in Non-Circular Tube Extrusion Using the Effective Extrusion Ratio

C. H. Han and S. H. Kim

Abstract

In this study a practical formula based on the experiment for the estimation of load in the non-circular tube extrusion with the mandrel is proposed by using the effective extrusion ratio. Through some experiments for the several shaped sections, the coefficients of the empirical equation are determined by measuring the variation of extrusion load in the extrusion. Experiments are carried out with the plasticine as a model material at room temperature. The proposed empirical formula for the estimation of extrusion load will be applicable to the non-steady state as well as steady state for the extrusion of various shaped tubes from hollow billets.

Key Words : Effective Extrusion Ratio, Load Estimation, Mandrel, Non-Circular Tube Extrusion, Plasticine

1. 서 론

다양한 형상의 단면 형상재들이 열간의 평금형압출 공정을 통하여 제작되고 있으며 경량화와 내부식성이 요구되는 각종 자동차 부품, 항공기 부품, 건축용 샤워 등 구조용 형상재가 압출가공법에 의해 생산되고 있다. 특히 알루미늄, 구리 등의 연질 금속재를 이용한 중공재 압출가공법은 각종 건축용 자재에 많이 활용되고 있으며, 중공 압출에 대한 연구는 전후 군수품의 제조와 각종 소재 생산이 가속됨에 따라 급진전하게 되었다.^(1~3)

중공형 형재압출에는 맨드렐(mandrel)을 이용한 압출과 porthole, spider, bridge 금형을 이용한 압출 등이 있

다. 그 중 맨드렐을 이용한 중공형 형재압출은 가장 일찍부터 사용된 방법 중의 하나이다.⁽⁴⁾

중공 전방압출은 Fig. 1과 같이 컨테이너 속의 소재(billet)를 편치로 눌러서 맨드렐(mandrel)과 다이(die) 틈새를 통하여 같은 방향으로 소재를 압출하여 튜브형 제품을 성형하는 공정이며 본 논문에서는 이 형태의 중공 압출 시 단면 형상과 압출행정 진행에 따른 비정상상태의 압출 하중 까지 효율적으로 예측할 수 있는 실험적 방법에 의한 예측식을 연구하고자 한다.

압출하중의 예측은 장비의 선정 및 공정설계에 매우 중요하며 중실형 압출에 대해서는 이미 여러 이론 및 실험적 연구들이 진행된 바 있다.^(5~6)

* 금오공과대학교 기계공학부

** 금오공과대학교 대학원 기계설계공학과

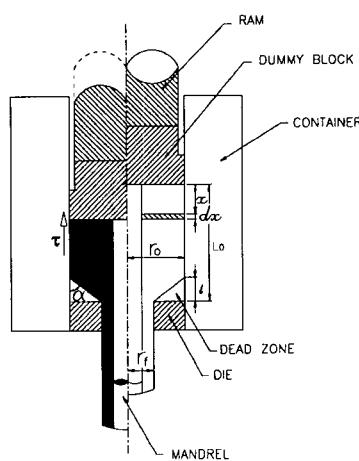


Fig. 1 Schematic diagram of tube shape in direct extrusion

Farag와 Ahmed⁽⁵⁾는 유효 압출비(ERe, effective extrusion ratio)의 개념을 이용하여 압출재 단면형상이 직사각형에 대해 소재의 길이의 변화에 따른 압출 압력을 구하였다. 또한 초기온도와 압출 후의 온도와의 관계를 이용하여 압출하중을 예측하였다.

Kihara⁽⁶⁾ 등은 L, T형 단면재의 중실 전방 압출시 압출비(extrusion ratio)에 따른 압출압력을 예측한 바 있다.

후방압출 공정에 대해서 우⁽⁷⁾는 형재의 내외부모양이 비원형인 단면형상에 유효 압출비의 개념을 정의하여 단면형상에 따른 정상상태의 하중 실험식을 제안하였다.

김⁽⁸⁾ 등은 중공 원형 소재로부터 다각형관 제품의 평균형 전방 압출에서 상계해석에 의해 압출하중과 압출된 제품 형상을 예측하는 법을 제안하였다.

최근 이⁽⁹⁾ 등은 맨드렐을 가진 평균형을 통한 3차원 중공형재의 압출공정을 유한 요소법으로 시뮬레이션하는 프로그램을 개발하여 속도분포, 온도분포, 압력분포, 압출하중에 대하여 검토하였다.

중공형 압출하중의 예측은 정상상태에서 이론 및 실험적 연구들이 진행된 바 있으나^(8~9) 비정상 상태에서 압출하중에 대한 연구는 드물다.

특히 중공형 압출하중의 예측에 있어서 유효 압출비를 이용하여 압출시 램의 이동에 따른 하중변화를 고려한 연구는 거의 없다.

본 연구에 있어서는 중공 단면 형상에 따른 여러 압출실험을 통하여 유효 압출비, 금형 단면형상 (원, 정삼각형, 정사각형, 직사각형, 트랙형, 육각형) 등 공정인자들이 압

출하중에 미치는 영향을 검토하고, 맨드렐형 중공압출에서 비원형 단면형상의 고려가 가능한 새로운 유효압출비를 정의하고 이를 이용하여 비정상 상태의 중공 압출시 압출하중을 예측할 수 있는 단순한 실험식을 제안하려고 한다.

2. 압출하중의 실험식 표현

2. 1 단면형상인자와 실험식 모형 설정

압출에 필요한 하중에 미치는 공정인자는 소재의 재료, 압출방법(전방압출, 후방압출), 마찰계수, 압출비(or 유효 압출비), 가공온도 및 변형속도, 다이의 형상 등이며 이러한 공정인자들은 각각 독립된 공정인자가 아니고 상호 영향을 미치고 있다.⁽¹⁰⁾

Johnson⁽¹¹⁾은 축대칭에서 압출하중과 압출비의 관계식을 다음과 같이 표현하였다.

$$P_e = a + b \ln \frac{A_o}{A_f} = a + b \ln ER \quad (1)$$

A_o 는 압출전 소재(billet)의 단면적, A_f 는 압출재 단면적, ER 은 압출비 ($ER = A_o / A_f$)이다.

재료의 이방성(anisotropy)을 무시하면 재료의 가공 경화는 간단히 고려될 수 있다.

압출 공정에 있어서 평균 유동응력 (mean flow stress) $\bar{\sigma}_m$ 은

$$\bar{\sigma}_m = C \dot{\varepsilon}_{avg}^m \quad (2)$$

여기서 $\dot{\varepsilon}_{avg}$ 는 압출시 평균변형률속도.

전방 압출의 편차 압력은 일반적으로 식(1)로 표시되고 무차원된 압출 압력은 다음과 같다.

$$\frac{P_e}{\bar{\sigma}_m} = A + B \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (3)$$

소재가 원형이며 압출비가 같더라도 압출 후 단면형상이 원형일 때와 원형이 아닌 경우 압출하중은 같지 않다.

따라서 압출재 단면형상이 원형이 아닌 경우의 압출하중은 식(3)만으로는 표시할 수 없다.

압출재 단면형상이 변화함에 따라 압출하중의 변화를 보다 정확하게 나타내기 위해 Farag⁽⁵⁾는 유효 압출비(ER_e) 개념을 정의하여 중실 전방 압출에서 압출하중 실험식을 결정하였지만 중공재의 경우는 보다 일반적 접근이 필요하다.

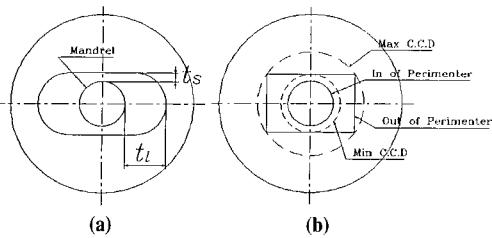


Fig. 2 Schematic diagram of the various shape factors

Fig. 2와 같은 중공재 금형 단면형상의 변화를 고려하기 위한 기하학적 인자들은 다음과 같다.

즉 압출재의 외곽 둘레 길이의 비를 나타내는 perimeter ratio, 압출재의 장경과 단경에 대한 비를 나타내는 aspect ratio, 압출비(ER), 단면 형상의 변화에 따른 유효 압출비(ERe)와 압출재의 가장 긴 방향의 두께와 가장 짧은 방향의 두께에 대한 비로 나타낸 thickness ratio(β), 압출재의 외접원(circumscribing circle diameter, CCD)과 맨드렐 지름(mandrel diameter, MD)과의 비를 나타낸 CCD/MD, 금형 다이랜드 길이 등에 따라서 압출하중은 변화한다.

본 연구는 중공 전방압출에서 압출비 대신에 동일한 압출 단면 감소율에서도 단면형상에 따라 압출비의 변화를 고려할 수 있는 유효 압출비 (ERe : effective extrusion ratio)를 제안하려고 한다. 이를 위해 압출속도와 온도는 일정하게 유지시키면서 동일한 압출비와 금형 다이랜드(4 mm)를 기준으로 하여 맨드렐 반경 r_m (직경 : $\phi 10.0$ mm)으로 램이 이동하는 거리에 따라서 압출하중의 변화를 관찰하며, 마찰 계수, 유효 압출비와 금형 단면형상에 따른 공정인자와의 관계를 알 수 있고 램의 이동거리에 따른 압출하중을 예측할 수 있는 다음과 같은 실험식 모형을 설정하였다.

$$\frac{p_e}{\bar{\sigma}_m} = A[m_f \frac{\{L_B - l_s - (r_o - r_{fe}) - \Delta u\}}{L_B}] + B \ln ERe \quad (4)$$

여기에서 각 기호는 다음과 같다.

P_e : ram의 이동 거리에 따른 압출 압력

L_B : 소재(billet)의 길이

l_s : 램 이동 거리

r_o : 소재의 반경

r_{fe} : 압출재의 평균 유효 반경

Δu : 소재가 업셋팅 될 때까지 거리

A, B : 상수

2. 2 유효 압출비 (effective extrusion ratio)

유효압출비는 압출 금형의 소재 형상과 압출재 단면 형상과의 상대적인 형상차를 고려한 개념으로 Farag⁽⁵⁾ 등은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 형상을 무한한 부분으로 나누어 각 부분에서 압출비를 계산하고 각 부분의 전체에 대한 비를 곱한 후에 합해서 유효 압출비를 구할 수 있다고 제안하였고 원형에서 직사각형인 압출에 적용한 바 있다.

우⁽⁷⁾는 후방압출공정에서 Fig. 4와 같이 임의의 sector 의 외부 컨테이너 형상과 금형 단면형상이 임의의 직선이라 가정하고 유효 압출비를 결정하는 식을 유도하였다.

그림에서 임의의 두점 $(\alpha_k, \beta_k), (\alpha_{k+1}, \beta_{k+1})$ 을 지난 L_o 에 대해서 구할 수 있다.

$$L_o = \frac{[(\alpha_k - \alpha_{k+1})\beta_k + (\beta_{k+1} - \beta_k)\alpha_k]}{\sqrt{(\beta_{k+1} - \beta_k)^2 + (\alpha_k - \alpha_{k+1})^2}} \quad (5)$$

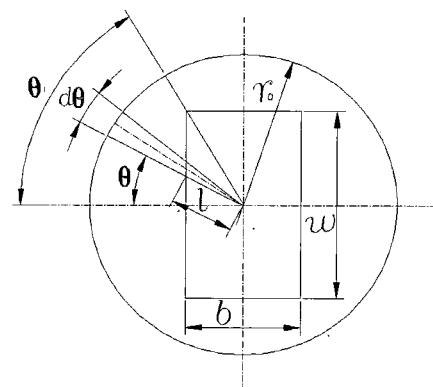


Fig. 3 Farag and Ahmed's model

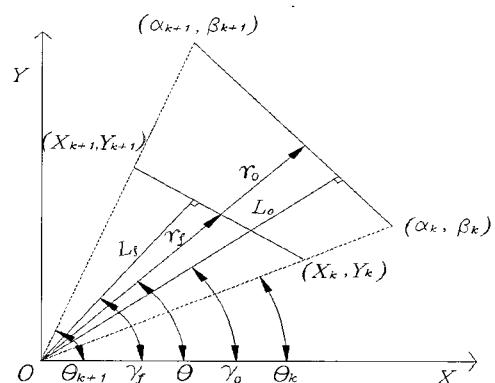


Fig. 4 Woo's modified model

한 sector에 대한 유효 압출비 ER_k 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$ER_k = \frac{\delta\theta}{2\pi} \sum_{j=1}^M \left(\frac{r_{oj}^2}{r_{fj}^2} \right) \quad (6)$$

여기서 M 은 $(\theta_{k+1} - \theta_k)$ 각의 등분 수임.

$$ER_k = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{L_o}{L_f} \right)^2 \int_{\theta_k}^{\theta_{k+1}} \frac{\cos^2(\theta - r_f)}{\cos^2(\theta - r_o)} d\theta \quad (7)$$

전체 sector에 대한 유효 압출비 ER_e 는

$$ER_e = \sum_{k=1}^N ER_k \quad (8)$$

$$ER_e = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{L_o}{L_f} \right)^2 \sum_{k=1}^N \int_{\theta_k}^{\theta_{k+1}} \frac{\cos^2(\theta - r_f)}{\cos^2(\theta - r_o)} d\theta \quad (9)$$

Fig. 5와 같이 맨드렐이 있는 중공 단면재의 유효 압출비는 원형 중공 형상의 임의 압출재 형상에 대해 유효 압출비 개념을 확장 정의하면

$$ER_e = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N \int_{\theta_k}^{\theta_{k+1}} \frac{(r_o^2 - r_m^2)}{(r_f^2 - r_m^2)} d\theta \quad (10)$$

식(10)이 유도되고 기하학적 관계를 이용하면

$$r_o = L_o, \quad L_f = r_f \cos(r_f - \theta) \quad (11)$$

식(12)를 얻을 수 있다.

$$ER_e = \frac{(r_o^2 - r_m^2)}{2\pi} \sum_{k=1}^N \int_{\theta_k}^{\theta_{k+1}} \frac{\cos^2(r_f - \theta)}{L_f^2 - r_m^2 \cos^2(r_f - \theta)} d\theta \quad (12)$$

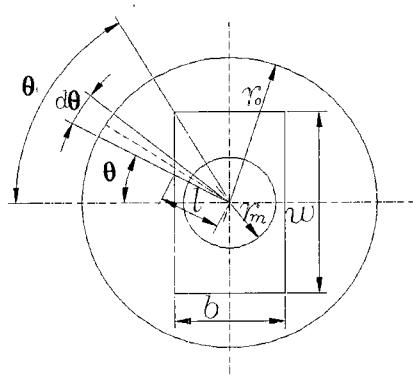


Fig. 5 Model to calculate the effective extrusion ratio with mandrel

3. 실험장치

3. 1 실험방안

실험은 플라스티신의 특성을 알아보기 위한 재료실험과 압출실험을 하였으며 변형률 속도를 일정한 조건에서 실험하였다.

실험에 사용된 계측장비는 하중을 측정하는 로드셀, 램의 변위를 측정하는 변위 지시계 및 엔코더가 있고, 계측한 자료의 기록은 로드셀 및 변위계의 출력을 A/D 변환기를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다.

플라스티신은 밀도가 변할 경우 항복응력, 마찰조건 등 재료의 물성치가 변화하므로 시편내의 기포를 완전히 제거하였으며 만들어진 시편은 시편 제작시 발생한 응력 분포와 온도구배를 소산시키기 위하여 2-3일간 실험 온도(20°C)로 밀폐된 용기에 보관하여 실험을 실시하였다.

시편의 크기는 압축 및 압출 시편이 Ø40 H40 mm이고 링 압축시편은 외경:내경:높이의 비가 6:3:2인 48x24x16 mm로 제작하였다.

3. 2 금형 장치의 설계 제작

금형 공구는 압출 실험 후 압출재의 분리를 쉽게 하기 위해 분할형 금형으로 제작하였다. 단면 형상에 따른 변화를 고려하기 위해 단면감소율을 일정하게 유지하도록 하여 대표적 단면형상에 대한 CAD 도면을 완성하고 그 형상에 따른 가공 program은 auto programing system을 사용하였다. 단면가공은 Wire-Cut E.D.M(대우중공업, A320)을 이용하고 다이 랜드부 형상가공을 위해서 별도로 전극을 만들어 방전 가공기(대한정공, CX60S)로 성형하였다.

가공한 금형 단면 형상은 Fig. 6과 같다.

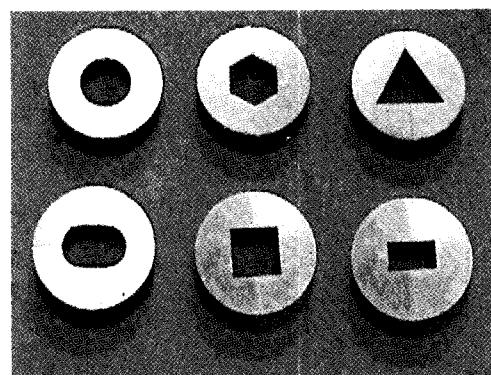


Fig. 6 Manufactured dies

3. 3 재료 실험

응력-변형률 관계를 구하기 위한 압축 시험에서 가능한 오차를 최대로 줄이기 위해서 시험 도중 벌징(bulging) 현상이 일어나지 않도록 주의하여 실험하였다.

변형률 속도 민감지수 m 을 구하기 위해서 일정 변형률 속도로 실험을 하다가 압축 시험 도중에 일정한 변형률에 대해 변형률 속도를 갑자기 변화시켜서 응력-변형률에 나타나는 응력의 차이를 얻은 후 다음과 같은 식에 대입하면 m 값을 구하였다.

$$m = \frac{\log \bar{\sigma}_1 - \log \bar{\sigma}_2}{\log \dot{\varepsilon}_1 - \log \dot{\varepsilon}_2} \quad (13)$$

금형과 재료의 마찰 상태를 알아보기 위하여 링 압축 시험을 하였으며, 윤활제는 베이비 파우더, 바셀린 등을 이용하여 실험하며 압출 실험과 동일한 1mm/sec의 일정 램 속도로 높이 감소율 50%가 될 때까지 압축하며, 내경의 변화는 높이 감소율 10%간격으로 링 내경 부위의 배부름 현상이 일어난 곳을 측정한 후 보정곡선에 데이터 값을 표시하여 비교 후, 마찰 상수(m_f) 값을 얻었다.

3. 4 중공 형재 압출 실험

압출하중을 예측할 수 있는 실험식을 얻기 위하여 다이 형상을 바꾸어가며 램에 고정된 이동 맨드렐에 의한 중공 압출실험을 하였으며 램 속도는 1 mm/sec, 다이 랜드부 4 mm로 실험하였다.

특히 삽입된 소재와 편치와의 편심도가 크면 압출 하중에 상당한 오차를 유발시키기 때문에 중심을 맞추는데 주의를 기울여 실험하였다.

윤활제로는 파우더를 사용하여 20°C에서 압출실험을 수행하였다. 금형 단면 형상은 원형, 정삼각형, 정사각형, 직사각형, 트랙형, 육각형상이며 단면 감소율은 85.3%이다.

원형의 경우는 단면감소율 변화의 영향을 보기 위해 46.7%, 63.9% 2종을 추가하였다.

4. 결과 및 고찰

변형률 속도 민감지수 m 값을 구하기 위해 압축 시험을 행하였는데 변형률이 0.1~0.5인 구간에서 변형률 속도를 0.1/s로 압축을 하다가 0.3/s로 증가시켜 m 값을 구하였다.

$$\bar{\sigma}_m = 121.5 \dot{\varepsilon}^{0.094} (\text{KPa}) \quad (14)$$

Table 1 Geometrical parameters of shaped sections

Shape	RA (%)	Ratio of perimeter	E.R	ERe
원 형	85.3	1.00	6.8	6.80
정삼각형	85.3	1.18	6.8	9.48
정사각형	85.3	1.08	6.8	7.44
정육각형	85.3	1.03	6.8	7.01
직사각형	85.3	1.10	6.8	9.85
원 형	46.7	1.00	1.86	1.86
원 형	63.9	1.00	2.77	2.77

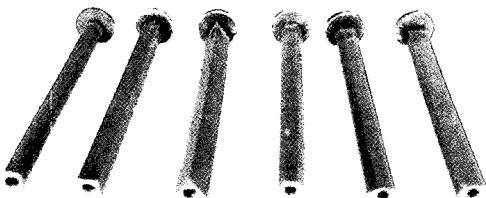


Fig. 7 Shaped tube extrusion products

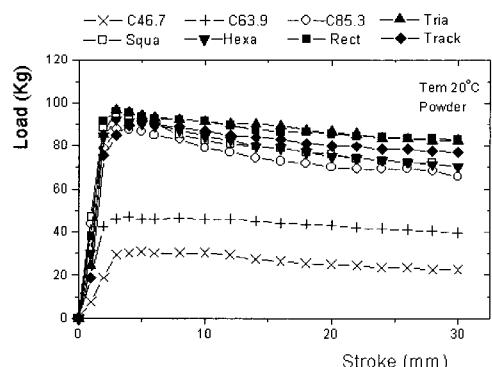


Fig. 8 Displacement- extrusion load for several RA and shapes (Model Material)

실험을 통하여 마찰상수를 구한 결과가 파우더인 경우 전단마찰상수 m_f 는 약 0.5정도이다.

맨드렐($\phi 10 \text{ mm}$)을 기준으로 금형 형상에 따른 공정 인자 값을 계산한 결과가 Table 1과 같다.

Fig. 7은 압출실험 후 시편의 사진으로 파이핑이 발생하기 직전까지 압출된 것들이다.

실제로 플라스티신을 압출소재로 사용해서 압출실험을 한 결과 램 이동거리에 따른 압출하중의 변화는 Fig. 8와 같다.

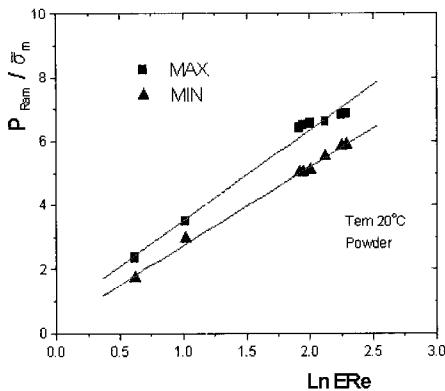
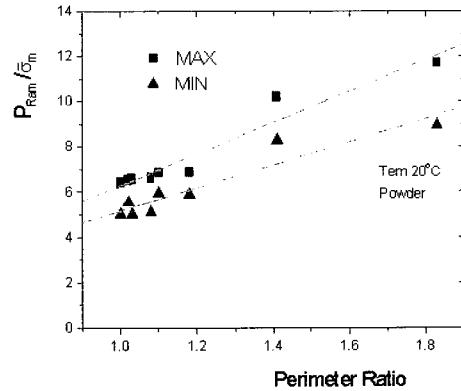


Fig. 9 Normalized ram pressure-effective extrusion ratio

Fig. 10 Normalized ram pressure on the perimeter ratio
(RA:85.3%)

전방 중공 압출인 경우에는 소재가 컨테이너 속에 완전히 채워질 때까지 하중은 급격히 증가하다가 압출시 시작될 때 최대값이 되며 압출이 시작된 후에 램이 진행되면서 압출하중은 계속 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9은 앞에서 정의한 유효 압출비에 따른 압출하중의 최대값과 최소값을 표현한다. 그림에서 우측면의 데이터 군들은 동일 단면 감소율의 경우이며 단면 감소율이 같더라도 단면형상에 따라 유효 압출비가 변하며 압출하중은 그 비의 로그값에 비례하고 있다.

실험결과를 최소자승법에 의한 직선으로 표시된 다음과 같은 식으로 결정할 수 있다.

$$\frac{P_e}{\sigma_m} = 3.56 \left[\frac{m_f \{ L_B - l_s - (r_o - r_{fe}) - \Delta u \}}{L_B} \right] + 2.53 \ln ER_e \quad (15)$$

여기서 m_f 값은 0.5, L_B 는 소재(billet)의 길이로 40 mm, l_s 는 램 이동거리, $(r_o - r_{fe})$ 는 dead zone에서의 값으로 각도는 45° 를 기준으로 하였고, Δu 는 소재가 upsetting될 때까지 이동 거리로 2 mm 이다.

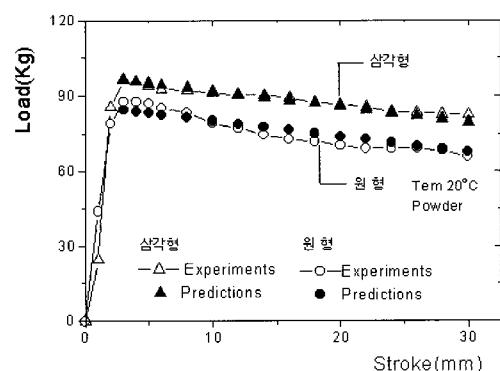
동일한 단면 감소율을 가진 경우 형상 변화에 따라 perimeter ratio가 달라지며 그 영향이 Fig. 10에 표현되어 있다.

Fig. 10에서 동일한 압출비를 가진 금형에서 압출하중은 perimeter ratio 값이 증가함에 따라 압출하중은 점차적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10의 결과를 1차식(최대값을 기준으로 함)으로 표현하여 다음과 같다.

$$\frac{P_{Ram}}{\sigma_m} = 0.23 + 6.57 P.R. \quad (16)$$

여기서 P.R은 perimeter ratio이다.

Fig. 11 Displacements-extrusion loads between predictions and experiments
[Die shapes : ○, ● (Circle), △,▲(Triangle),
RA: 85.3%]

본 연구에서 제안된 실험식 식(15)은 램의 이동에 따라 압출하중의 변화를 표현할 수 있으며 Fig. 11은 제안된 식과 실제 실험에 의한 비정상 상태의 중공 압출에 대한 압출하중의 변화를 보여주고 있다. 제안 식에 의한 예측치는 실제 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서 무차원화된 식(15)의 압출 압력식을 활용하면 다양한 재료의 중공 압출시 비정상상태의 압출하중 예측이 가능하다.

또한 식(10)에 맨드렐 반경 (r_m)이 0인 경우는 중실형이 되므로 중실인 경우에도 유효압출비를 구할 수 있다.

따라서 무차원화된 식(15)의 압출 압력식을 활용하면 중공 압출 및 중실 압출에서 비정상상태에 대한 압출하중 예측이 가능할 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서 비대칭 단면형상을 갖는 맨드렐 중공 압출 시 유효압출비를 새로 정의하고 압출하중을 예측하는 식을 유도하였으며 모델재를 이용한 압출실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중공 형상 모양의 압출하중은 ERe, 단면 감소율, perimeter ratio 등의 영향을 받으며 그 중에서도 ERe의 영향이 크다.

(2) 비정상 상태의 압출하중을 예측할 수 있도록 무차원화한 식(15)의 실험식이 결정되었으며 이 식은 압출재 형상의 외곽이 불록한 형상 압출에 유용할 것으로 기대된다.

(3) 동일한 압출비를 가진 금형에서 압출하중은 perimeter ratio의 값이 증가함에 따라 증가한다.

(4) 식(10)에 맨드렐 반경 (r_m)이 0인 경우는 중실형이 되므로 중실인 경우에도 유효압출비를 구할 수 있다.

후 기

본 연구는 1999년 금오공과대학교 학술연구비에 의해 지원되었으며 관계자 여러분께 감사드린다.

참 고 문 헌

- (1) K. Lange, 1985, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill, New York, pp. 16.1~16.66.
- (2) ASM Handbook Committee, 1988, "Metals Handbook, Forming and Forging", Vol. 14, ASM International.

- (3) 한철호, 엄태복, 1996, "모델재를 이용한 축대칭 평금형 압출공정의 변형가시화 해석", 한국소성가공학회지, Vol.5, No. 2, pp. 156~164.
- (4) 강연식, 양동열, 정순길, 이준곤, 1998, "세라믹 금형을 이용한 열간 튜브 압출의 축 대칭 유한요소해석", 한국소성가공학회지, Vol.7, No. 1, pp. 72~80.
- (5) M.M Farag and M.H Ahmed, 1975, "Effective Extrusion Ratio in Hot Extrusion of Non-Circular Aluminium Shapes", Materials Science and Engineering, Vol. 17, pp.131~137.
- (6) J. Kihara, Y. Fujishiro and A.Ueno, 1984, "The Dependence of Load for Extrusion of Plasticine on the Extrusion Ratio and Shape", Journal of the JSTP, Vol. 25, No. 282, pp. 646~651.
- (7) 우호길, 1980, "비 원형 튜브 형재의 후방압출에 대한 실험적 유도에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문.
- (8) 김동권, 조종래, 배원병, 1995, "중공 원형 소재로부터 다각형 튜브 제품의 평금형 전방 압출에 대한 최종단계의 상계해석", 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 11, pp. 91~97.
- (9) 이춘만, 이승훈, 조종래, 1998, "평금형을 통한 중공형재의 압출의 유한 요소해석", 한국소성가공학회지, Vol. 7, No. 4, pp. 375~381.
- (10) 이동녕, 1995, 소성가공학, 문운당, pp. 351~383.
- (11) W. Johnson and H. Kudo, 1962, "The Mechanics of Metal Extrusion", Manchester University Press.