

〈論 文〉

평금형을 이용한 원형 소재에서 다각형바의 최종단계 전방압출에 관한 연구

김동권* · 조종래* · 배원병**

Investigation of the Final-Stage Forward Extrusion of Regular Polygonal-Shaped Bars From Circular Billets Using Square Die

Dong Kwon Kim, Jong Rae Cho and Won Byong Bae

Abstract

A simple kinematically admissible velocity field is proposed to determine the final-stage extrusion load and the average extruded length in the square-die forward extrusion of regular polygonal-shaped bars from circular billets. From the proposed velocity field, the upper-bound extrusion load and the average extruded length are determined by minimizing the total power consumption with respect to four parameters. Experiments have been carried out with hard solder billets at room temperature. The theoretical predictions of the extrusion load are in good agreements with the experimental results and there is generally reasonable agreement in average extruded length between theory and experiment.

Key Words : Square Die Extrusion(평금형 압출), Final Stage(최종단계), Kinematically Admissible Velocity Field(동적가용속도장), Regular Polygonal Shape(다각형 형상), UBET(상계요소법)

1. 서 론

평금형을 이용한 전방압출은 자동차 및 항공기부품, 선박부품, 건설, 기계공구, 가정용품 등에 이르기까지 그 용도가 매우 광범위한 대표적인 소성 공정 중의 하나이다. 이 평금형 압출은 금형 제작이 용이하고 제품 정밀도와 표면이 우수하고 또한 한 번의

변형으로 복잡하고 다양한 형상을 쉽게 얻을 수 있는 등의 여러가지 장점을 가지고 있는 반면, 형상금형에 비해 비교적 높은 변형저항을 가지므로 주로 열간상태에서 작업이 행해지고 있다.⁽¹⁾

많은 평금형 전방압출 공정에 대한 연구가 수행되었다. Kudo⁽²⁾는 단위변형영역(unit deformation region)의 개념을 도입해서 UBET로 해석을 하였다. Halling과 Mitchell⁽³⁾은 여러 조건의 변화에 따르는 비유동영역(dead metal zone)의 생성과 변

*한국중공업(주) 기술연구소

**부산대학교 기계설계공학과

화를 해석하였고, Chen과 Ling⁽⁴⁾은 3가지 곡면 금형 형태를 통한 압출문제를 풀었으며, Iwata 등⁽⁵⁾은 유한요소법을 이용해서 정수압 압출해석을 하였다. 또한, Chen 등⁽⁶⁾은 원추형 금형을 통한 연성과괴를 해석하였고, Johnson 등⁽⁷⁾은 slip line 장을 이용해서 해석을 하였으며, Takuda 등⁽⁸⁾은 단면감소율 및 재료특성에 따른 비유동영역의 형태를 조사하였다. 또한, 강연식⁽⁹⁾은 금형과의 열전달을 고려한 비정상상태 열간 해석을 수행하였고, Keife 등⁽¹⁰⁾은 개발한 2D 프로그램을 이용하여 다이출구를 2개 가진 경우에 대한 해석을 하였다. 최인근 등⁽¹¹⁾은 축대칭 압출시 최종상태에서 파이핑 발생에 대해 상계요소법을 이용해 해석을 하였고, 강연식 등⁽¹²⁾은 ALE 묘사에 의해 강-점소성 유한요소를 수식화하고 평금형 압출에 적용하였다. 전술한 평금형 전방압출에 대한 연구는 모두 축대칭, 평면변형 등 소위 2차원 문제에 대한 해석이다. 이에 비해 형상을 가진 바(bar) 혹은 튜브(tube) 제품의 평금형 전방압출은 그것의 3차원적 특징때문에 거의 없는 실정이다. Kiuchi 등^(13,14)은 이형전방압출의 비정상변형을 UBET로 해석한 바 있는데, 실제에 가까운 비유동영역의 모양을 제안하여 실험과 잘 일치하였으나 형상이 한정되고 평금형인 경우 많이 쓰이지 않는 냉간해석이었다.

본 연구에서는 3차원 해석의 기본 모델로서 원형 소재에서 다각형바 제품을 압출하는 경우를 선정하여 해석을 수행하고 그 이론의 타당성을 검증하기 위해 경납을 사용하여 실험을 수행하였다.

2. 동적가속도장의 유도

전방압출 공정은 구속된 소재를 펀치로 눌러서 펀치와 금형사이의 틈새를 통해 같은 방향으로 소재가 밀려나와 바 또는 튜브형 제품이 성형되는 것이다. 평금형 압출시

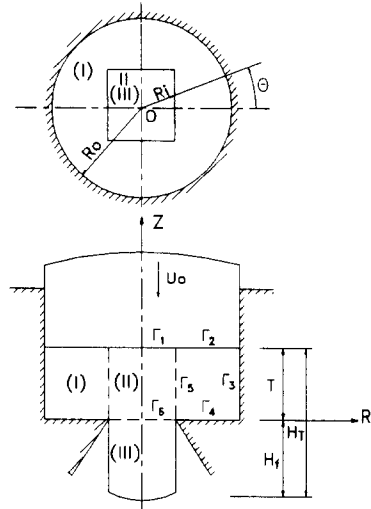


Fig. 1 A general scheme for the deformation model

에는 보통 비유동영역이 생겨 이를 고려하여 요소를 분할하는 것이 타당하지만, 이 경우 수식의 유도가 어렵고, 열간상태에서의 최종단계임을 고려하여 본 논문에서는 이를 무시하고 요소를 분할하였다. 그러나, 좀 더 실제에 가까운 모델을 선정할 수 있다면 보다 좋은 상계해를 구할 수 있으리라 예측된다.

원형소재로부터 다각형 바제품이 3차원 전방압출된 후의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 그림에 있는 것처럼 원점이 원형 소재의 밀면의 중심에 놓이고, 기하학적 대칭축에 $\theta=0$ 축이 놓이는 원통좌표계가 사용되었다. 전체 영역을 3개의 요소로 나눈 후, 요소 I 과 II는 소성변형 중에 있고, 요소 III은 변형이 끝난 준-강체(pseudo-rigid body)로 가정한다.⁽¹⁵⁾ 재료는 등방성, 비압축성이고 강-소성체이며 Von Mises의 유동법칙을 따른다고 가정한다.

2.1 요소 I

축방향 속도성분 U_z 는 아래의 경계조건을 만족시켜야 한다.

$$Z=0, U_z=0 \quad (1)$$

$$Z = T, U_z = -U_o \quad (2)$$

따라서, 축방향 속도성분 U_z 를 다음과 같이 가정한다.

$$U_z = -\frac{U_o}{T}Z \quad (3)$$

접선방향 속도성분 U_θ 의 경계조건은

$$R = R_o, U_\theta = 0 \quad (4)$$

$$\theta = 0, \frac{\pi}{N}, U_\theta = 0 \quad (5)$$

이다. 여기서, N 은 대칭축의 수를 나타낸다.

위 경계조건을 만족시키기 위하여 접선방향 속도성분 U_θ 를 다음과 같이 가정한다.

$$U_\theta = -\frac{U_o}{T}(R_o - R)\omega_1(\theta) \quad (6)$$

여기서, $\omega_1(\theta)$ 는 접선방향의 속도경계조건을 만족시키기 위한 함수로서 다음과 같다.

$$\omega_1(\theta) = A \sin(N\theta) \quad (7)$$

단, A 는 요소 I에서 접선방향 속도의 퍼짐량을 나타내는 최적화 변수이다.

반경방향의 속도경계조건

$$R = R_o, U_R = 0 \quad (8)$$

와 비압축성조건

$$\frac{\partial U_R}{\partial R} + \frac{U_R}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial U_z}{\partial Z} = 0 \quad (9)$$

을 만족시키는 반경방향 속도성분 U_R 은

$$U_R = \frac{U_o}{2TR} \left\{ (R^2 - R_o^2) - (R - R_o)^2 \frac{d\omega_1}{d\theta} \right\} \quad (10)$$

와 같이 얻어진다.

2.2 요소 II

$V_b(\theta)$ 는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 요소 I과 II 사이의 전단경계면상의 한 점에서 수직속도를 나타낸다.

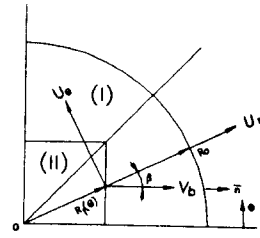


Fig. 2 Shear boundary between element I and element II

$$V_b(\theta) = (U_{Ri} \cos \beta - U_{\theta i} \sin \beta)_{R=R_i} \quad (11)$$

요소 II에서의 속도경계조건은 다음과 같다.

$$R = R_i, U_{Rii} = V_b \cos \beta \quad (12)$$

$$R = R_i, U_{\theta ii} = -V_b \sin \beta \quad (13)$$

$$R = 0, U_{Rii} = 0 \quad (14)$$

$$\theta = 0, \frac{\pi}{N}, U_{\theta ii} = 0 \quad (15)$$

위 경계조건을 만족하는 반경방향 속도성분 U_R 과 접선방향 속도성분 U_θ 를 다음과 같이 가정한다.

$$U_R = C \frac{(R_i - R)}{R_i} \frac{R}{R_i} \frac{d\omega_2}{d\theta} + V_b \cos(\beta) \frac{R}{R_i} \quad (16)$$

$$U_\theta = D \frac{(R_i - R)}{R_i} \frac{R}{R_i} \omega_2(\theta) - V_b \sin(\beta) \frac{R}{R_i} \quad (17)$$

여기서, $\omega_2(\theta)$ 는 접선방향의 속도경계조건을 만족시키기 위한 함수로서 다음과 같다.

$$\omega_2(\theta) = B \sin(N\theta) \quad (18)$$

단, B 와 D 는 요소 II에서 접선방향 속도의 퍼짐량을 결정하고, C 는 반경방향 속도의 크기를 결정하는데 필요한 최적화 변수이다.

식(16)과 (17)을 식(9)에 대입하여 적분하고 축방향의 속도경계조건

$$Z = T, U_z = -U_o \quad (19)$$

를 적용하면 축방향 속도성분 U_z 는

$$U_z = (\dot{\epsilon}_R + \dot{\epsilon}_\theta)(T - Z) - U_o \quad (20)$$

와 같이 얻어진다.

3. 상계해석

상계이론에 의하면, 완전 강소성체의 변형에 관한 모든 동적가용속도장 중에서 실제의 공정에 필요한 에너지율은 다음에 주어진 J^* 값을 최소화하는 것이다.

$$J^* = \Sigma \dot{W}_i + \Sigma \dot{W}_s + \Sigma \dot{W}_f \quad (21)$$

여기서, J^* 는 실제 공정에 필요한 에너지율의 상계이다.

내부변형에너지소비율 \dot{W}_i 는 다음과 같다.

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV \quad (22)$$

여기서,

$$\dot{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\dot{\epsilon}_R^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_Z^2}{2 + \dot{\epsilon}_{R\theta}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta Z}^2 + \dot{\epsilon}_{ZR}^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

그리고, 전단에너지 소비율 \dot{W}_s 는 다음과 같다.

$$\dot{W}_s = \int_s k |\Delta V|_s dS \quad (23)$$

여기서, k 는 전단항복응력이고, $|\Delta V|_s$ 는 전단경계면에서의 속도불연속양이다.

또한, 마찰에너지소비율 \dot{W}_f 는 다음과 같다.

$$\dot{W}_f = \int_{s_f} mk |\Delta V|_f dS \quad (24)$$

여기서, m 은 마찰상수(friction factor)이고, $|\Delta V|_f$ 는 마찰경계면에서의 속도불연속양이다.

평균편치압력과 압출하중은 다음 식으로 구해진다.

$$P_{avg} = \frac{J^*}{A_r U_o} \quad (25)$$

$$L = \frac{J^*}{U_o} \quad (26)$$

여기서, A_r 은 편치 면적, U_o 는 편치하강속도이다.

Fig. 1에 나타나는 압출된 제품의 전방압출길이 H_f 는 다음 식으로 계산하였다.

$$H^{(j+1)} = H^{(j)} + U^{(j)} \cdot \Delta t \quad (27)$$

여기서, $H^{(j+1)}$ 과 $H^{(j)}$ 는 $j+1$ 번째 단계와 j 번째 단계에서의 전방압출길이이고, $U^{(j)}$ 는 j 번째 단계에서 전방압출되는 소재의 속도이다.

4. 실험

4.1 물성시험

응력-변형률속도 관계식을 얻기 위하여 열간압축용 시험기인 Greeble 5000에서 압축시험을 행하여 다음과 같은 응력-변형률속도 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 73.063 (\dot{\epsilon})^{0.0293} \text{ MPa} \quad (28)$$

그리고, 마찰상수의 영향을 파악하기 위하여 윤활과 무윤활의 두 가지 마찰조건에 대한 링압축시험을 수행하였다. 본 연구의 실험에서는 윤활의 경우에 있어서는 M_oS_2 분말을 그리스(grease)에 섞어서 사용하였으며, 윤활조건을 일정하게 유지하기 위해 M_oS_2 의 양을 혼합물 전체의 중량에 대해 10%가 되게 하였다. 구해진 마찰상수의 값은 윤활시에는 0.1, 무윤활시에는 0.28이다.

4.2 실험장치 및 방법

원형 소재로부터 다각형 형상을 가진 바제품의 평금형 전방압출의 실험을 위하여 다이 세트(die set)를 제작하였다. 제작된 다이의 조립상태 도면과 실제제품의 부품들의

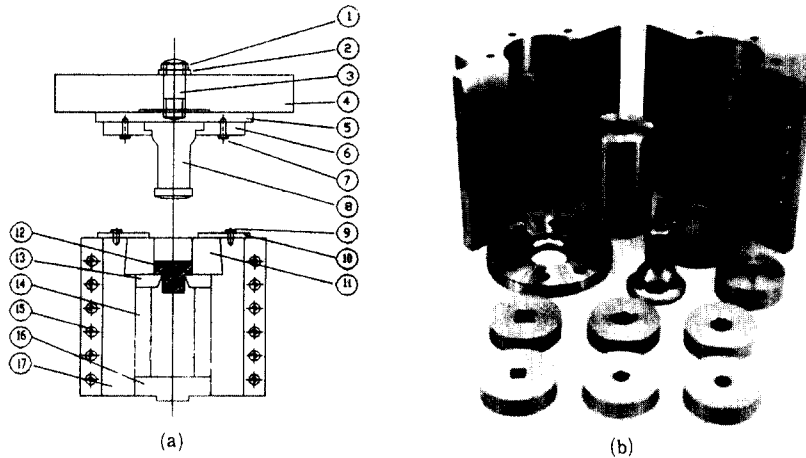


Fig. 3 Assembly drawing of the die set and the photograph of the manufactured parts

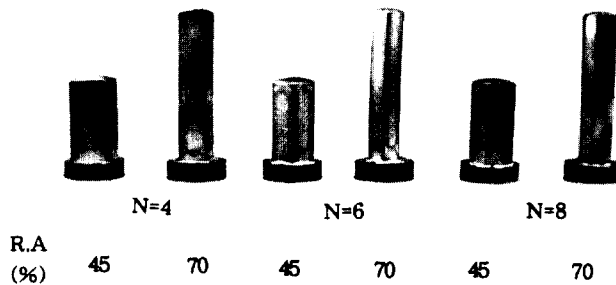


Fig. 4 The extruded regular polygonal-shaped bars for various number of axes of symmetry

모양을 Fig. 3에 나타내었다.

다각형(4각, 6각 및 8각)의 형상과 각각의 경우에 있어서 단면감소율의 영향을 파악하기 위해서 하다이를 4각, 6각 및 8각의 경우에 단면감소율 45%와 70%에 대해 각각 두 가지씩 제작하여 이를 교체해 가면서 실험할 수 있도록 제작하였다.

압출실험은 제작된 다이 세트를 설치한 SHIMATZU UH-100A Universal Testing Machine에서 수행하였다. 본 실험에서는 GPIB Interface를 이용하여 PC에서 실험중의 행정과 하중이 자동으로 제어되게끔 하여 실제 압출실험을 수행하였다.

Fig. 4는 단면감소율이 45%, 70%인 경우에 있어서 다각형(4각, 6각 및 8각)의 수에 따른 압출 후의 제품의 형상을 보여주고 있다.

5. 결과 및 고찰

이론 해석에 의한 결과식을 직접 계산할 수 없으므로 수치계산법을 이용하여 계산하였다. 변형 중 각 단계에서의 전체 에너지 소비율(total power consumption rate)을 4개의 매개변수들(A, B, C와 D)에 대하여 최소화시켰다. 최소화 방법으로는 직접탐색법(direct search method)의 일종인 FPS법(flexible polyhedron search method)⁽¹⁶⁾을 이용하였다.

원형에서 다각형 바제품의 평균형 전방압출시 초기에 하중이 증가한 후 펀치가 진행함에 따라 마찰면과 전단면의 감소로 인해 하중이 서서히 감소하다가 높이감소율이 약 80% 이후에 파이핑 결함(piping defect)이

발생하기 시작하고 하중이 증가한다. 원형에서 사각형 바제품의 압출시 단면감소율이 45%, 70% 두 가지 경우에 대하여 높이감

소율이 80%와 92%일 때의 성형된 제품의 형태를 Fig. 5에서 보여주고 있다. 펀치 바로 아래 부분에서 높이감소율이 80% 정도

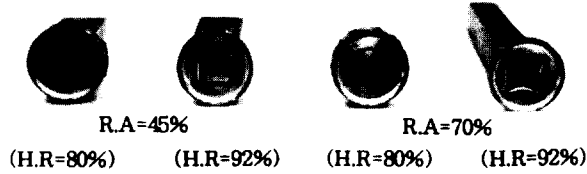


Fig. 5 The photographe of piping defect in the 3-dimensional square die extrusion for the height reduction of 80% and 92%

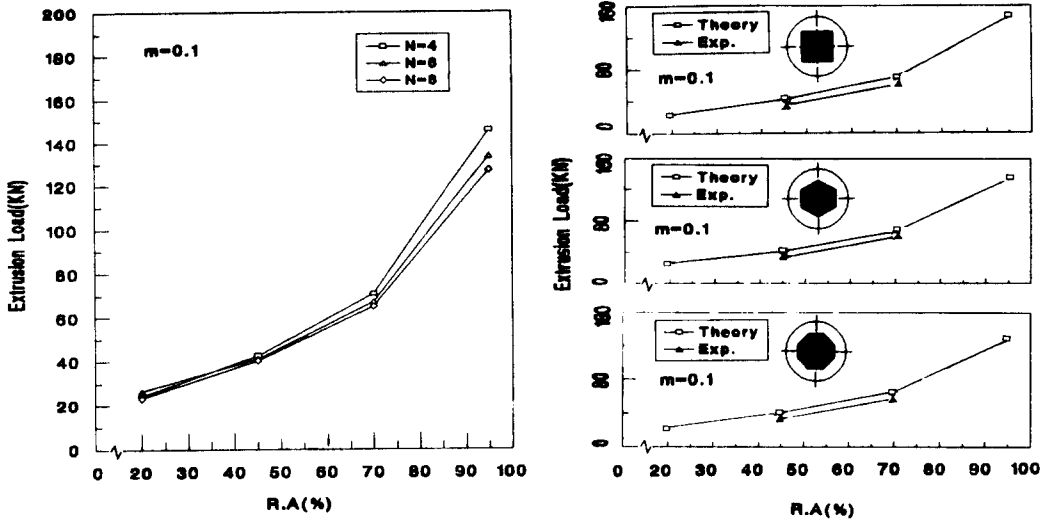


Fig. 6 Comparison between theoretical and experimental extrusion loads for various area reductions(R.A) and number of axes of symmetry(N)

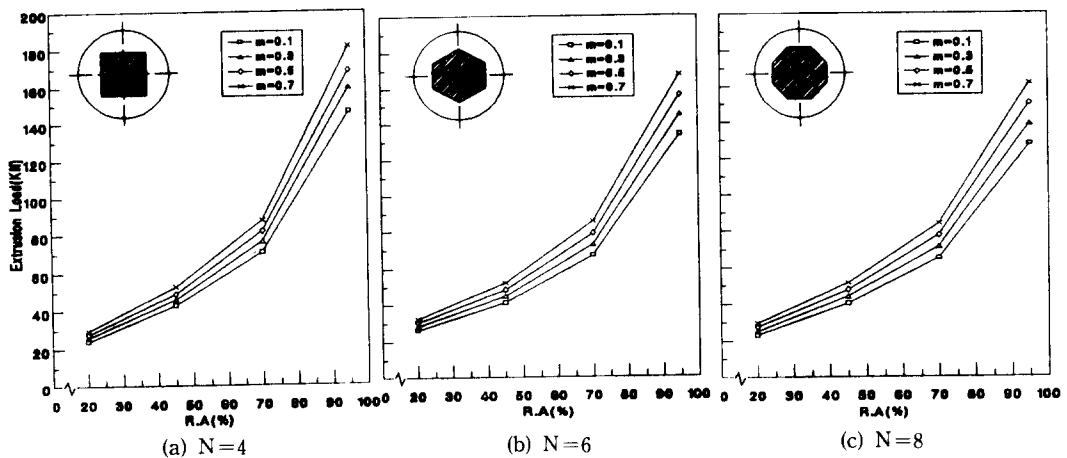


Fig. 7 Theoretical extrusion loads for various frictional conditions

가 될때부터 파이핑 결함이 발생하기 시작하여 92%일 때는 결함부가 훨씬 크고 깊어지는 것을 보여준다. 따라서 실제 성형시에도 높이감소율이 약 80%가 될 때 성형을 마치는 것이 바람직하다고 생각된다. 이 파이핑 결함은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 단면감소율이 작으면 결함부가 얇은 반면, 반대로 단면감소율이 커지게 되면 결함부가 깊게 발생하고 있다. 따라서, 본 해석에서는 높이감소율 80%일 때를 최종단계로 보고 해석을 수행하였다.

5.1 압출하중

Fig. 6은 압출하중에 대한 단면감소율과 대칭축의 수의 영향을 보여준다. 주어진 마찰상수의 조건에서 압출하중은 단면감소율이 증가할수록 증가하고, 그 증가속도도 단면감소율이 증가할수록 증가한다. 또한, 대칭축의 수가 증가할수록 하중은 미세하지만 오히려 감소하는 경향을 보이는데 이는 대칭축의 수가 많아질수록 유동이 단순해지는 원인이라고 생각된다. Fig. 6(b)에서는 본 연구에서 제시된 방법과 실험결과가 비교되어 있는데, 이론에 의한 예상과 실험결과가 잘 일치하고 있다.

Fig. 7은 압출하중에 대한 마찰상수의 영

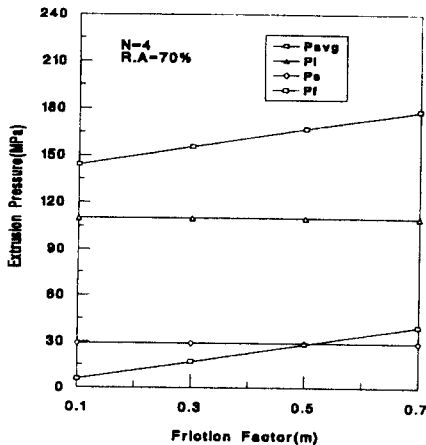
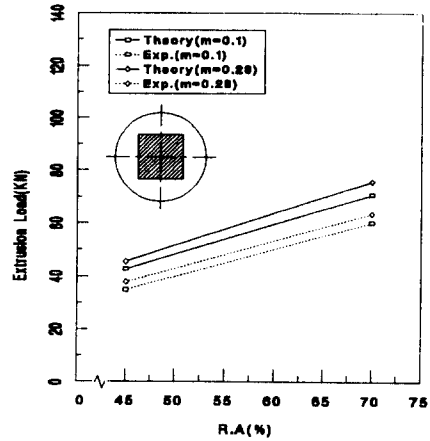
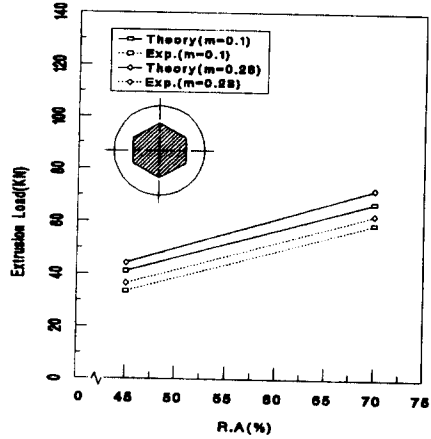


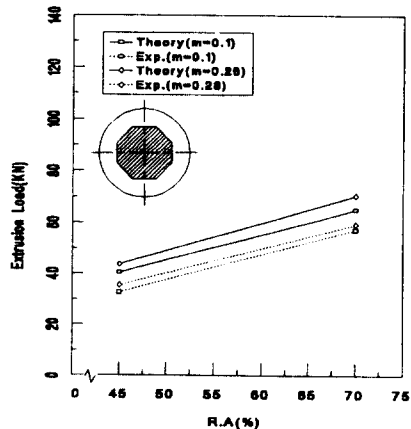
Fig. 8 Effect of friction factor on extrusion pressure



(a) N=4



(b) N=6



(c) N=8

Fig. 9 Comparison between theoretical and experimental extrusion loads for various frictional conditions

향을 보여준다. 마찰상수는 실제 열간압출 시 무운활조건의 경우에 해당하는 0.7까지 해석을 수행하였다.⁽¹⁷⁾ 마찰상수가 증가할수록 압출하중은 증가하는데 이는 Fig. 8에 보인 바와 같이 마찰상수가 증가하게 되면 내부에너지와 전단에너지는 변화가 없기 때문에 이들에 의한 압력상승은 없고 단지 마찰에너지가 선형적으로 증가하기 때문에 이에 비례해서 평균압출압력이 선형적으로 증가하게 되기 때문이다.

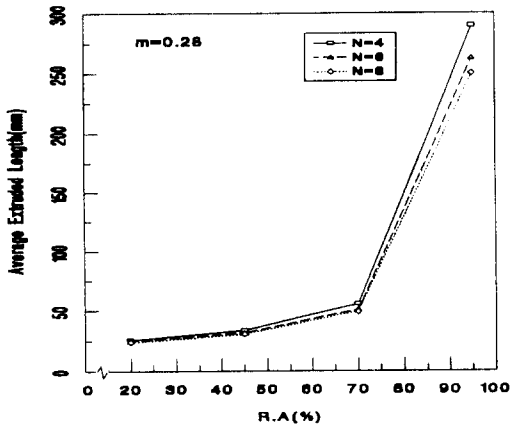


Fig. 10 Theoretical average extruded length for various area reductions(R.A) and number of axes of symmetry(N)

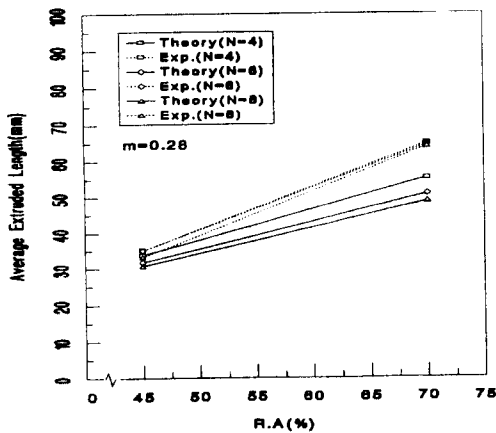
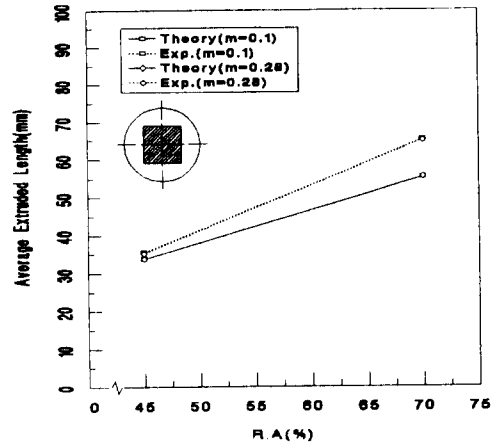
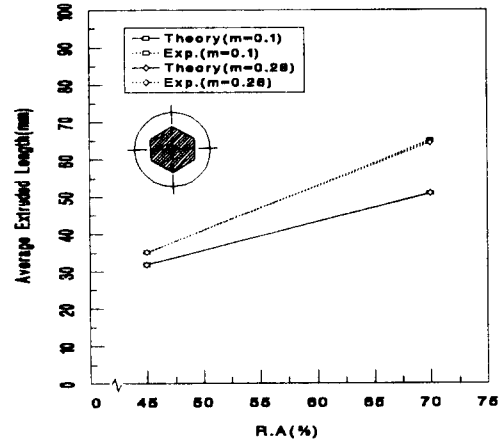


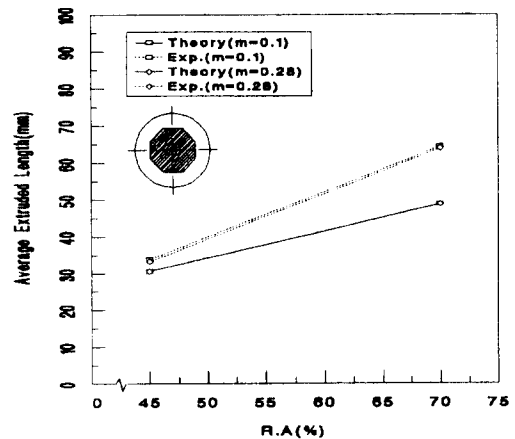
Fig. 11 Comparison between theoretical and experimental average extruded lengths for various area reductions(R.A) and number of axes of symmetry(N)



(a) N=4



(b) N=6



(c) N=8

Fig. 12 Comparison between theoretical and experimental average extruded lengths for friction factor

Fig. 9는 윤활과 무윤활의 경우에 있어서 이론과 실험하중을 비교한 것인데 서로 잘 일치하고 있다.

5.2 평균압출길이

Fig. 10은 평균압출길이에 대한 단면감소율과 대칭축의 수의 영향을 보여 준다. 단면감소율이 증가할수록 평균압출길이는 증가하고 그 증가속도도 단면감소율이 증가함에 따라 증가하고 있다. 또한, 대칭축의 수가 증가할수록 이론적인 평균압출길이는 미세하지만 조금씩 줄어들고 있다. Fig. 11에서는 본 연구에서 제시된 방법과 실험결과가 비교되어 있는데, 대칭축의 수에 관계없이 대체적인 경향은 유사하나 단면감소율이 높은 경우에는 차이가 제법 난다.

Fig. 12는 평균압출길이에 대한 마찰상수의 영향을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 해석상 마찰상수는 평균압출길이에 전혀 영향을 미치지 못하는데 이는 속도장이 마찰상수의 함수로 되어 있지 않기 때문이다. 실험을 통해서도 마찰상수의 변화에 대해서는 평균압출길이의 변화는 거의 없음을 보여주고 있어 해석과 실험이 잘 일치한다고 볼 수 있다.

6. 결 론

평균형을 이용하여 원형 소재에서 다각형 바제품의 전방압출 공정을 해석하기 위한 단순화된 동적가용속도장을 제시하였다. 제시된 속도장으로부터 4개의 독립변수에 대하여 전에너지 소비율을 최소화시킴으로써 압출하중, 평균압출길이를 구하였다.

이론의 타당성을 검토하기 위해 4각, 6각 및 8각형 바모양에 대해 해석하고, 경납을 소재로 상온에서 실험을 수행하였다. 여러 종류의 단면감소율, 대칭축의 수와 마찰상수에 대한 압출하중의 이론치와 실험치가 잘 일치하였다. 그런데, 평균압출길이에 있

어서는 그 경향은 이론치와 실험치가 대체로 잘 일치하나 그 크기는 어느 정도의 차이를 보이고 있어 이에 대한 개선이 요청된다.

따라서, 본 논문에서 제시된 속도장은 원형에서 다각형 바제품의 압출공정에서 압출하중 및 압출된 제품의 형상을 예측하는데 간편하게 사용할 수 있다.

참고문헌

- (1) Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, New York, pp. 16.1 ~ 16.66.
- (2) Kudo, H., 1960, "An Upper-Bound Approach to Plane-Strain Forging and Extrusion- II," Int. J. Mech. Sci., Vol. 1, pp. 229~252.
- (3) Halling, J. and Mitchell, L. A., 1965., "An Upper-Bound Solution for Axisymmetric Extrusion," Int. J. Mech. Sci., Vol. 7, pp. 277~295.
- (4) Chen, C. T. and Ling, F. F., 1968, "Upper-Bound Solution to Axisymmetric Extrusion Problems," Int. J. Mech. Sci., Vol. 10, pp. 863~879.
- (5) Iwata, K., Osakada, K. and Fujino, S., 1972, "Analysis of Hydrostatic Extrusion by Finite Element Method," Trans. ASME, J. Eng. for Ind., May, pp. 697 ~ 703.
- (6) Chen, C. C., Oh, S. I. and Kobayashi, S., 1979, "Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing," Trans. ASME, J. Eng. for Ind., Vol. 101, pp. 23~35.
- (7) Das, N. S. and Johnson, W., 1988, "Slip-Line Fields of Indirect Type for End Extrusion through Partly Rough Square Dies," Int. J. Mech. Sci., Vol. 30, No. 1, pp. 61~69.

- (8) Takuda, H., Hatta, N. and Lippmann, H., 1990, "Upper Bound Approach to Plane Strain Extrusion Under Non-Standard Conditions," J. of the JSTP, Vol. 31, pp. 202~207.
- (9) 강연식, 1991, "평금형을 이용한 축대칭 열간압출의 유한요소해석," 한국과학기술원 석사학위논문.
- (10) Hans Keife, 1993, "Extrusion Through Two Die Opening : A 2D Upper-Bound Analysis Checked by Plasticine Experiments," J. of Materials Processing Technology, Vol. 37, pp. 189~202.
- (11) 최재찬, 최인근, 1994, "상계요소법에 의한 축대칭 압출의 최종공정에서의 파이핑 발생에 관한 연구," 한국소성가공학회지, 제3권 제1호, pp. 23~37.
- (12) 강연식, 양동열, 1994, "ALE 묘사에 근거한 강-점소성 유한요소 수식화와 축대칭평금형 압출에의 적용," 한국소성가공학회지, 제3권 제2호, pp. 156~166.
- (13) Kiuchi, M., Hoshino, M. and Iijima, S., 1987, "Simulation of Unsteady Flow in Non-Axisymmetric Forward Extrusion," 生産研究, 39卷 10號, pp. 417~420.
- (14) Kiuchi, M., Hoshino, M. and Iijima, S., 1988, "Simulation of Unsteady Flow in Non-Axisymmetric Forward Extrusion- II," 生産研究, 40卷 4號, pp. 184~187.
- (15) Avitzur, B., Bishop, E. D. and Hahn, W. C., 1973, "Impact Extrusion-Upper Bound Analysis of the End of Stroke," Trans. ASME, Vol. 95, No. 3, pp. 849~857.
- (16) Kiuchi, M. and Kim, H. K., 1983, "A Study on Application of F.P.S Method to the Limit Analysis," Rep. Inst. Ind. Sci., Tokyo Univ., Vol. 40, No. 3, pp. 144~147.
- (17) Taylan Altan, Soo-Ik Oh, Harold L. Gegen, 1983, Metal Forming : Fundamentals and Applications, American Society for Metals.