

원형 소재에서 비축대칭 봉재의 최종단계 평금형 압출 해석

김동권*, 배원병**, 김영호**

* 한국중공업 기술연구소

**부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

An Analysis of the Square Die Extrusion of Non-Axisymmetric Bars
from Circular Billets at Final-Stage

Dong Kwon Kim*, Won Byong Bae**, Young Ho Kim**

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 non-axisymmetric bars from circular billets. The proposed velocity field is applied to the square-die extrusion of trochoidal gear-shaped bars and rectangular-shaped bars, the profile function of a rectangular being approximated by using a Fourier series. 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 agreements in average extruded length between theory and experiment.

Key Words : Square Die Extrusion, Kinematically Admissible Velocity Field, non-axisymmetric, Fourier Series

1. 서론

평금형을 이용한 전방압출은 제품의 품질이 우수하고 생산성이 높고 또한 생산단가가 낮은 등의 여러가지 장점이 있으므로 복잡한 형상을 가진 제품의 제조시에 많이 이용되고 있다.[1] 복잡한 형상의 제품을 평금형 압출하는 동안에 소재의 단면을 따라서 형성되어지는 유동은 균일하지 않다.

적절한 금형설계와 공정제어를 위해서는 압출하중과 소재유동을 효과적으로 예측할 수 있는 방법에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 현재 평금형 전방압출 공정에 대

한 연구들은 대부분 초기단계의 2차원 평금형 압출에 관한 연구인데 적절한 공정설계를 위해서는 최종단계의 비정상상태의 해석이 중요하지만, 비축대칭 형상의 최종단계의 해석은 거의 없는 실정이다. 따라서, 일반화된 형상의 최종단계에서의 속도장을 개발할 필요성이 있는데, 본 연구에서는 이를 위하여 비축대칭 형상을 가진 제품의 평금형 압출시에 적용할 수 있는 최종단계의 동적가용속도장을 제시하였다. 제시된 속도장을 직사각형 봉제품과 트로코이드기어 봉제품에 적용하여 압출하중과 압출된 재료의 평균길이를 단면감소율, 형상비, 대칭축의 수 등에 대해서 이론해석을 하고 그 이론의 타당성을 검증하기 위해 경납의 실험결과와 비교 검토하였다.

2. 동적가용속도장의 유도

원형소재로부터 비축대칭 형상을 가진 봉제품이 3차원 평금형 전방압출된 후의 형상을 Fig. 1에 나타낸다. 그림에 있는 것처럼 원점이 원형 소재의 밑면의 중심에 놓이고, 기하학적 대칭축에 $\theta=0$ 축이 놓이는 원통좌표계가 사용되었다. 전체 영역을 3개의 요소로 나눈 후, 요소 I과 II는 소성변형 중에 있고, 요소 III은 변형이 끝난 준-강체(pseudo-rigid body)로 가정한다. [2]

요소 I의 속도장은 속도경계조건과 비압축성을 고려하여 다음과 같이 구해진다.

$$U_R = -\frac{U_o A}{TR} \frac{(R_o - R)^{p+1}}{(p+1)} \frac{d\omega_1}{d\theta} + \frac{u_0(R^2 - R_o^2)}{2TR} \quad (1a)$$

$$U_\theta = -\frac{U_o}{T} A(R_o - R)^p \omega_1(\theta) \quad (1b)$$

$$U_z = -\frac{U_o}{T} Z \quad (1c)$$

여기서, A, p 는 최적화변수이다. 속도경계조건을 만족시키는 함수 $\omega_1(\theta)$ 를 결정하기 위하여 $R_i(\theta)$ 를 다이의 횡단면을 나타내는 형상함수라고 하면 $\omega_1(\theta)$ 는 아래와 같이 일반적인 형태로 표현될 수 있다. [3]

$$\omega_1(\theta) = R_i^q(\theta) \left[\sum_{i=1}^M \{ B_i \sin(iN\theta) + C_i \cos(iN\theta) \} \right] \quad (2)$$

여기서, N 은 대칭축의 수, p, B_i, C_i 는 각 변형단계에서 총에너지소비율을 최소화하는 매개변수들이다.

한편, 다이의 형상함수를 나타내는 $R_i(\theta)$ 는 Fourier 계수를 사용한 유한개의 항들에 의하여 아래와 같은 일반적인 형태로 근사화되어질 수 있다. [3, 4]

$$R_i(\theta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{ A_n \cos(N\theta) + B_n \sin(N\theta) \}, \quad 0 < \theta < 2\pi \quad (3)$$

그러므로, 비축대칭 단면은 (3)식에 의해서 해석적으로 표현될 수 있다. 같은 방법으로 구한 요소 II의 속도장은 아래와 같다.

$$U_R = E \frac{(R_i - R)}{R_i} \frac{R}{R_i} \frac{d\omega_2}{d\theta} + V_b \cos(\beta) \frac{R}{R_i} \quad (4a)$$

$$U_\theta = F \frac{(R_i - R)}{R_i} \frac{R}{R_i} \omega_2(\theta) - V_b \sin(\beta) \frac{R}{R_i} \quad (4b)$$

$$U_Z = (\dot{\epsilon}_R + \dot{\epsilon}_\theta)(T - Z) - U_0 \quad (4c)$$

여기서, E, F 는 최적화변수이고, $\omega_2(\theta)$ 는 속도경계조건을 만족시켜야 하는 함수인데 (I)영역의 $\omega_1(\theta)$ 와 같은 형태로 가정한다.

$V_b(\theta)$ 는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 요소 I과 II 사이의 전단경계면 DE 상의 한 점에서의 수직속도를 나타낸다. 그리고, β 는 같은 경계 DE 상의 한 점에서의 수직방향과 원주좌표계에서의 법선방향 속도성분(U_R)방향 사이의 각도이다. $V_b(\theta)$ 와 β 는 다음과 같이 주어진다.

$$V_b(\theta) = (U_{R_i} \cos \beta - U_{\theta_i} \sin \beta)_{R=R_i} \quad (5)$$

$$\beta = D(\theta^2 - \frac{\pi}{N}\theta) \quad (6)$$

여기서, D 는 최적화 변수이다.

3. 실험

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

$$\bar{\sigma} = 73.063 (\bar{\epsilon})^{0.0293} \quad MPa \quad (7)$$

그리고, 무윤활시의 마찰상수를 측정하기 위하여 링압축시험을 수행하여 0.28의 마찰상수값을 얻었다.

직사각형과 트로코이드기어의 형상과 각각의 경우에 있어서 단면감소율, 형상비, 대칭축의 수의 영향을 파악하기 위해서 다이를 제작하여 이를 교체해 가면서 실험할 수 있도록 제작하였다.

Fig. 3은 트로코이드기어 모양과 직사각형 모양의 평균형 압출시에 단면감소율, 형상비 및 대칭축의 수의 변화에 따른 압출 후의 제품의 형상을 보여주고 있다.

4. 결과 및 고찰

본 해석에서는 저자들의 이전 논문[5]에서 언급한 이유로 높이감소율이 80%일 때를 최종단계로 보고 해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

4.1 압출하중

압출하중의 계산결과를 Fig. 4~7에 나타낸다.

① 트로코이드기어 제품

Fig. 4는 압출하중에 대한 단면감소율의 영향을 보여준다. 주어진 형상비와 마찰상수의 조건에서 압출하중은 단면감소율이 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 제시된 방법과 실험결과가 비교되어 있는데, 이론에 의한 예상과 실험결과가 잘 일치하고 있다. Fig. 5는 압출하중에 대한 대칭축의 수의 영향을 보여준다. 정해진 마찰상수, 형상비, 단면감소율의 조건에서 대칭축의 수가 증가할수록 소재내부의 유동이 복잡해져 압출하중이 미세하지만 조금씩 증가하게 된다. 대칭축의 수에 관한 이론적 결과도 실험치와 잘 일치한다.

② 직사각형 제품

Fig. 6은 압출하중에 대한 단면감소율의 영향을 보여준다. 주어진 형상비와 마찰상의 조건에서 압출하중은 단면감소율이 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 이론치와 실험결과가 잘 일치하고 있다. Fig. 7은 압출하중에 대한 형상비의 영향을 보여준다. 주어진 마찰상수와 단면감소율에서 형상비가 증가할수록 하중이 증가하고 있음을 보여준다. 이것은 형상비가 증가할수록 단면감소율이 커지는 효과가 생기는 유동이 많아져 그에 따른 유동이 복잡해지기 때문으로 생각된다.

4.2 평균압출길이

압출된 재료의 평균압출길이를 Fig. 8~11에 나타낸다.

① 트로코이드기어 제품

Fig. 8은 평균압출길이에 대한 단면감소율의 영향이 보여진다. 주어진 마찰상수, 형상비의 조건에서 단면감소율이 증가할수록 평균압출길이는 증가한다. 이론과 실험결과가 잘 일치하고 있다. 대칭축의 수에 따른 평균압출길이 변화를 Fig. 9에 나타낸다. 평균압출길이는 대칭축의 수에는 크게 영향을 받지 않는 것을 보여준다. 이는 실험치와 잘 일치하고 있다.

② 직사각형 제품

Fig. 10은 단면감소율에 따른 직사각형 제품의 평균압출길이의 변화를 나타내고 있다. 평균압출길이는 단면감소율의 증가와 함께 커지고 있으며, 이 경향은 실험치와 잘 일치하고 있다. 형상비에 따른 평균압출길이의 변화를 Fig. 11에 나타내고 있다. 평균압출길이는 형상비에 따라 상당히 증가하고 있지만 실제로는 차이가 거의 나타나지 않을 것으로 예측된다. 이는 실제유동을 단순한 속도장으로 표현하는데 원인이 있는 것으로 생각되며 이에 대한 개선이 요청된다.

5. 결론

평금형을 이용하여 원형 소재에서 비축대칭 형상을 가진 비제품의 전방압출 공정을 해석하기 위한 단순화된 동적가용속도장을 제시하였다. 제시된 속도장으로부터 주어진 독립변수에 대하여 전에너지 소비율(total power consumption rate)을 최소화시킴으로써 압출하중, 평균압출길이를 구하였다.

이론의 타당성을 검토하기 위해 트로코이드기어 형상과 직사각형 모양에 대해 해석하고, 경납을 소재로 상온에서 실험을 수행하였다. 여러종류의 단면감소율, 대칭축의 수와 형상비에 대한 압출하중의 이론치와 실험치가 잘 일치하였다. 그런데, 평균압출길이에 있어서는 전반적으로는 그 경향이 잘 일치하지만 직사각형 제품의 경우에 있어서는 예측을 완전하게 하지 못해 이에 대한 개선이 요청된다.

따라서, 본 논문에서 제시된 속도장은 원형에서 비축대칭 형상을 가진 비제품의 평금형 압출공정에서 압출하중 및 압출된 제품의 형상을 예측하는 데 간편하게 사용할 수 있다.

참고문헌

1. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, pp. 16.1-16.66, McGraw-Hill, New York.
2. B. Avitzur, E.D.Bishop and W.C.Hahn, 1973, "Impact extrusion-Upper bound analysis of the end of stroke," Trans.ASME, Ser.B, Vol.95, pp.849-857
3. J.H.Kim, 1986, A study on the three-dimensional upset forging of prismatic blocks, Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology
4. C.H.Han, 1986, Analysis of extrusion of generalized sections considering three-dimensional plastic deformation, Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology
5. 김동권, 조종래, 배원병, 1995, "평금형을 이용한 원형 소재에서 다각형바의 최종 단계 전방압출에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제4권 제1호, pp. 59-68.

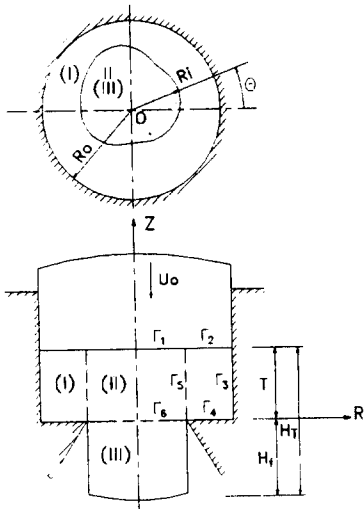


Fig. 1 A general scheme for the deformation model

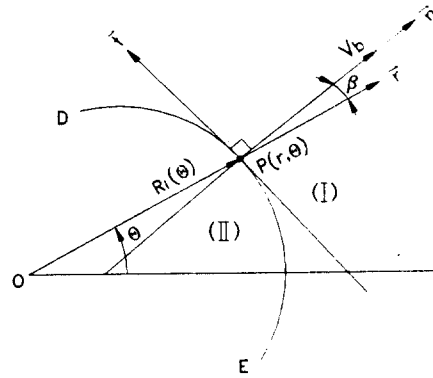


Fig. 2 Shear boundary between element I and element II

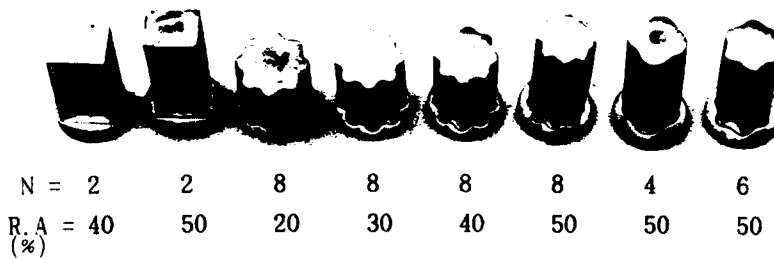


Fig. 3 The extruded trochoidal gear and rectangular bars for various process conditions

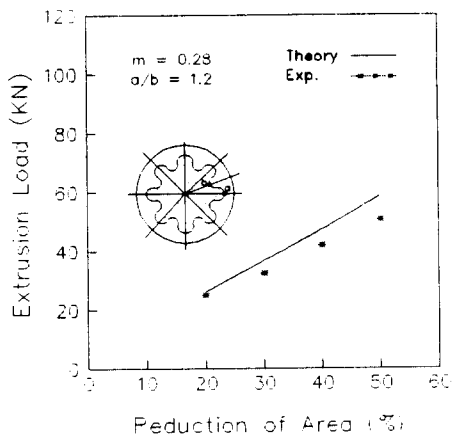


Fig. 4 Comparison between theoretical and experimental extrusion loads of trochoidal gear-shaped bars for various area reductions (R.A)

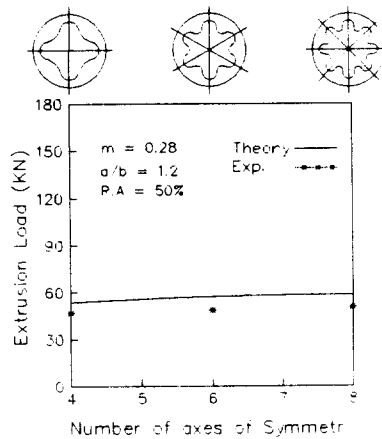


Fig. 5 Comparison between theoretical and experimental extrusion loads of trochoidal gear-shaped bars for various number of axes of symmetry (N)

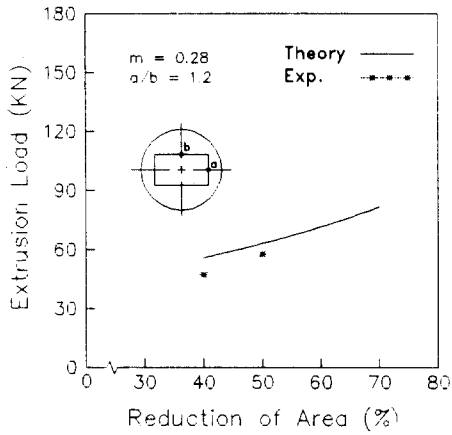


Fig. 6 Comparison between theoretical and experimental extrusion loads of rectangular-shaped bars for various area reductions (R.A)

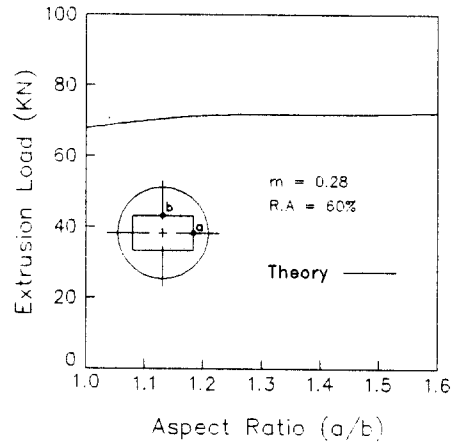


Fig. 7 Theoretical extrusion loads of rectangular-shaped bars for various aspect ratios

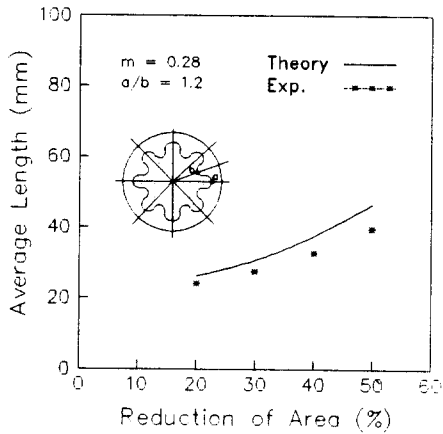


Fig. 8 Comparison between theoretical and experimental average lengths of trochoidal gear-shaped bars for various area reductions (R.A)

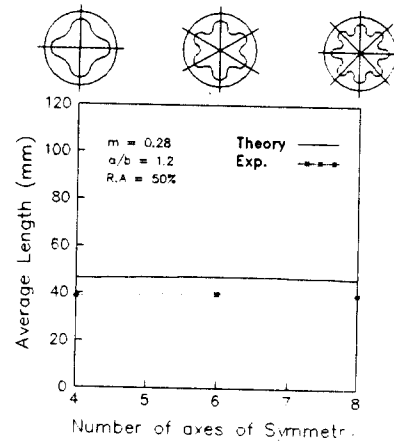


Fig. 9 Comparison between theoretical and experimental average lengths of trochoidal gear-shaped bars for the number of axes of symmetry (N)

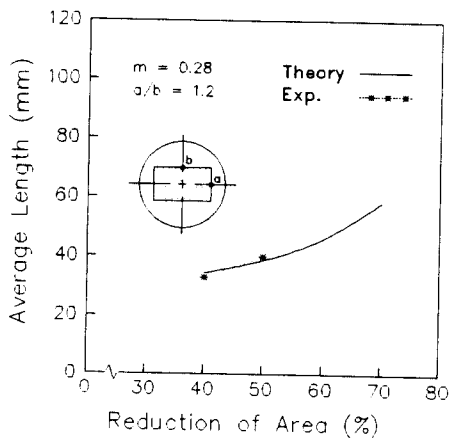


Fig. 10 Comparison between theoretical and experimental average lengths of rectangular-shaped bars for various area reductions (R.A)

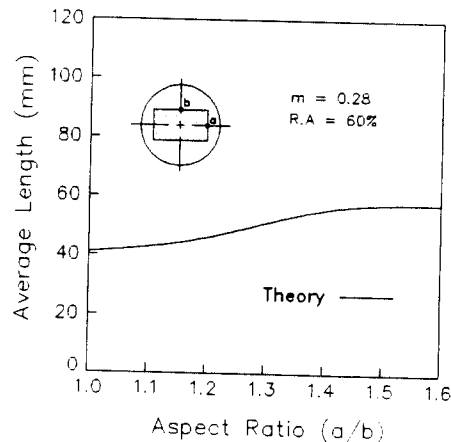


Fig. 11 Theoretical average lengths of rectangular-shaped bars for various aspect ratios