한국정밀공학회지 제 16 권 제 9 호 (1999 년 9 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 9, September 1999.

다각형의 머리를 가진 봉의 압출/단조 공정에 관한 UBET 해석

김명훈*, 황범철*, 김호윤*, 배원병**

A UBET Analysis of the Extrusion/Forging Process of Polygonal Headed Bars

Myung Hun Kim*, Bum Chul Hwang*, Ho Yoon Kim* and Won Byong Bae**

ABSTRACT

A new KAVF(kinematically-admissible velocity field) is proposed to determine the forming load, the average extruded length and the flow pattern in the extrusion/forging process of polygonal headed bars. Experiments are carried out with lead billets at room temperature using regular polygonal shaped punches. The theoretical predictions of the forming load and the average extruded length are in good agreement with the experimental results.

Key Words : KAVF(동적가용속도장), forming load(성형하중), extruded length(압출길이), UBET(상계요소법)

기호설명

D_2, D_3, P_2, P_3 : pseudo-independent parameters
J* = upper-bound on the forming power
L = upper-bound on the forming load
m = friction constant at the die(or punch)-material interface
R_b = radius of the orifice
R_{fo} = radius of the polygonal shaped head
R_n = neutral radius function
R_{no} = neutral radius at $\theta = 0$ in Stage II
R, θ , Z : cylindrical coordinates
T : height of the polygonal head
U_o : velocity of the punch
U_r, U_θ, U_Z : velocity components in cylindrical coordinates
$|\Delta V|$: magnitude of velocity discontinuity
V_D : extrusion velocity
$\dot{W}_i, \dot{W}_s, \dot{W}_f$: power consumptions due to internal deformation, shear and friction
X, Y, Z : cartesian coordinates
α : angle between symmetric axes (Fig. 2)
β : angle between the fully filled boundary and the axis of symmetry in the cavity (Fig. 2)
$\dot{\bar{\varepsilon}}$: effective strain rate
$\bar{\sigma}_m$: mean effective stress
$\omega(\theta)$: function to satisfy velocity boundary conditions on the axis of symmetry in the cross-section

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
** 부산대학교 기계기술연구소

1. 서론

압출/단조성형 공정은 재료를 금형의 캐비티(cavity)에 채우기 위해 다이와 펀치 사이에서 업셋팅에 의한 측면 퍼짐과 동시에 다이에 있는 구멍을 통하여 압출이 진행되므로 유동이 한 방향이상으로 이루어지는 압출과 단조의 복합공정이다.

동력전달장치와 같이 머리부와 축부분이 있는 제품의 경우, 각각 따로 제작되어 키박음 등에 의한 조립을 통하여 제작되었다. 이러한 여러 공정에 의해 만들어지는 제품을 하나의 압출/단조공정으로 제작함으로써 제조공정수를 줄여 제조원가를 낮출 수 있으며, 생산성을 향상시킬 수 있다.

압출/단조에 관한 연구를 살펴보면, Rowe[1]는 평면 변형률과 축대칭 조건에 관한 다양한 유동체계를 제안하였고, Monaghan 과 Vickery[2]는 머리부에서 구속이 없는 경우의 축대칭 형상에 대해 압출/단조를 상계해석과 실험을 통하여 3 단계의 변형과정을 제시하였다. Kiuchi[3]는 비축대칭형상인 플래쉬부의 충만과정을 원통좌표계와 직교좌표계를 복합적으로 이용하여 해석하였다.

이들의 연구는 주로 축대칭 제품에 한정되었고, 비축대칭 제품에 대해서는 연구가 아주 미흡한 형편이다.

따라서 본 연구에서는 정다각형의 머리를 가진 제품을 압축/단조 공정으로 생산할 때의 가공하중과 압출길이를 UBET 해석으로 예측하고, 나아가 실험을 하여 그 결과를 비교· 검토하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 해석 모델 및 속도장

다각형 형상에 관한 비축대칭 압출/단조 공정의 UBET 해석을 위해 변형양상은 3 단계로 가정하였고, 각 단계에 관한 해석모델과 좌표계 및 요소분할은 Fig. 1~3 과 같다. 1 단계는 머리부에서 소재가 다이의 측면에 내접할 때까지로 소재는 캐비티 내에서 업셋팅되면서 압출이 일어난다. 2 단계는 머리부가 완전히 충만될 때까지로 압출과 단조공정이 동시에 일어난다. 마지막 3 단계에서는 머리부의 성형이 끝나고 압출공정만이 일어난다.

각 단계에서 각 요소에 대한 동적가용속도장의 유도과정은 다음과 같다.

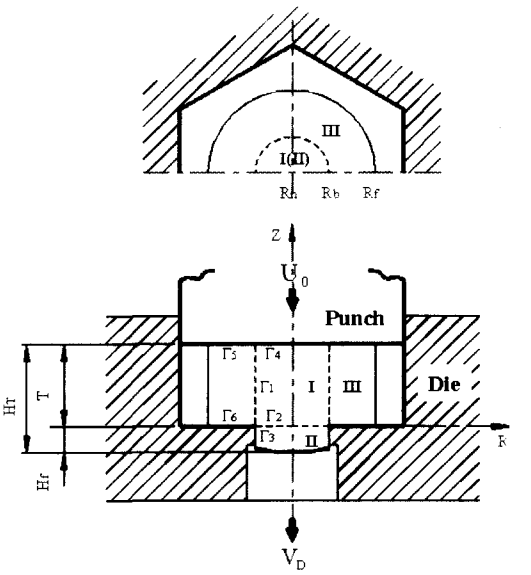

Fig. 1 A general scheme for Stage I in the extrusion/forging process of polygonal headed bars

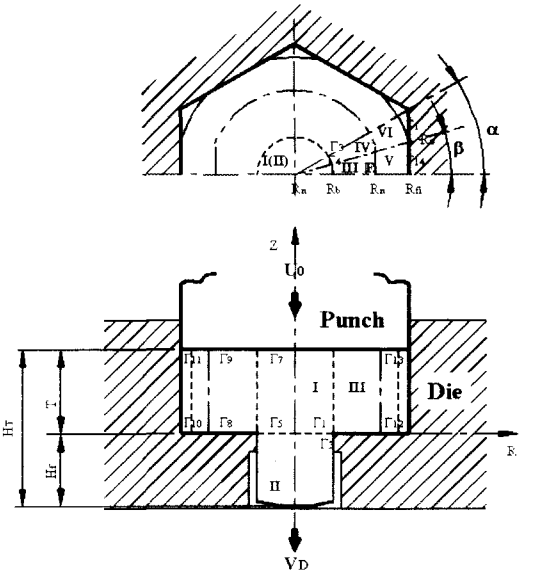

Fig. 2 A general scheme for Stage II in the extrusion/forging process of polygonal headed bars

매 단계에서 요소 II 의 속도장은 변형이 끝난 준강체(pseudo-rigid body)로 가정하여 랜드부와의 마찰만을 고려하며, Z 방향 속도는 모든 요소에서

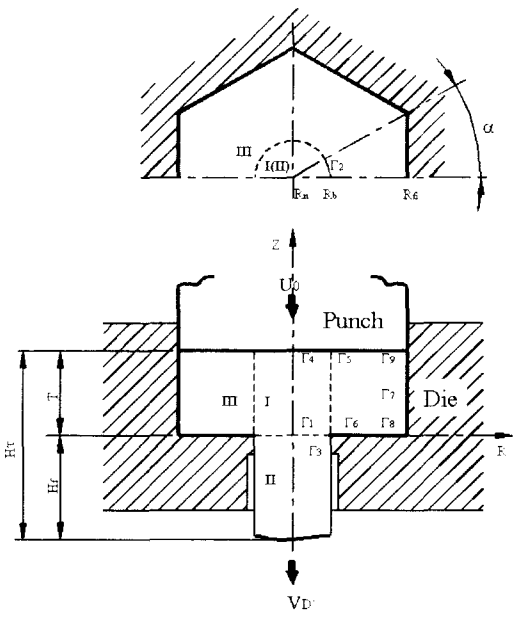

Fig. 3 A general scheme for Stage III in the extrusion-forging process of polygonal headed bars

선형적으로 가정한다. 또한 모든 요소는 아래와 같은 비압축성조건을 만족한다.

$$\frac{\partial U_r}{\partial R}+\frac{U_r}{R}+\frac{1}{R}\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta}+\frac{\partial U_Z}{\partial Z}=0$$

2.1.1 1 단계의 속도장

1 단계에서 요소 I, II 는 모두 축대칭변형을 하여 회전방향의 속도는 없다고 가정하면,

$U_{\theta 11}=U_{\theta 13}=0$

요소 I 에서 Z 방향의 속도를 선형적으로 가정하고 아래의 속도경계조건,

i) $Z=0$ 에서 $U_Z=V_D$

ii) $Z=T$ 에서 $U_Z=-U_0$

을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_{Z11}=-\frac{U_0+V_D}{T}Z+V_D$$

여기서, 원통좌표계의 체적일정조건을 이용하여 적분하면,

$$RU_r=\frac{U_0+V_D}{2T}R^2+C$$

속도경계조건 $R=0$ 에서 $U_r=0$ 을 대입하면,

$$U_{r11}=\frac{U_0+V_D}{2T}R$$

이 된다.

요소 III 에서도 Z 방향의 속도를 요소 I 과 같은 방법으로 아래의 속도경계조건,

$Z=0$ 에서 $U_Z=0$

$Z=T$ 에서 $U_Z=-U_0$

을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_{Z13}=-\frac{U_0}{T}Z$$

여기서, 체적일정조건을 적분하여 아래의 경계조건,

$R=R_b$ 에서 $U_{r13}=U_{r11}$

을 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_{r13}=\frac{U_0R}{2T}\left[1+\frac{V_D}{U_0}\left(\frac{R_b}{R}\right)^2\right]$$

2.1.2 2,3 단계의 속도장

2 단계에서는 요소 I 은 축대칭변형을 하며, 요소 III 에서 경계면에서의 속도연속조건을 만족시키기 위해 ω_2 를 사용하였다. 요소 IV 와 VI 은 회전방향의 속도를 선형적으로 가정하여 유도하였으며, 요소 V 는 직교좌표계(Fig. 4)를 이용하여 X 방향의 속도성분은 없고 Y 방향은 속도 성분은 선형적이라고 가정하였다.

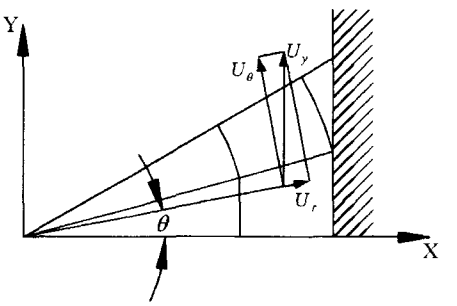

Fig. 4 The kinematically-admissible velocity field of element V for Stage II

3 단계의 요소 I 은 축대칭변형요소이고, 요소 III 에서는 2 단계에서와 같이 ω_3 을 사용하여 속도장을 유도하였다.

2, 3 단계의 각 요소의 속도장 유도는 1 단계와 마찬가지로 수직속도경계조건과 체적일정조건을

Table 1 The kinematically-admissible velocity fields for three stages

Stage I

	U_z	U_r	U_θ
Element I	$-\frac{U_0+V_D}{T}Z+V_D$	$\frac{U_0+V_D}{2T}R$	0
Element III	$-\frac{U_0}{T}Z$	$\frac{U_0 R}{2T}\left[1+\frac{V_D}{U_0}\left(\frac{R_b}{R}\right)^2\right]$	0
Pseudo-independent parameter : V_D			

Stage II

Element I	$-\frac{U_0+V_D}{T}Z+V_D$	$\frac{U_0+V_D}{2T}R$	0
Element III	$-\frac{U_0}{T}Z$	$\frac{U_0}{2T}R\left(1+\frac{d\omega_2}{d\theta}\right)+\frac{C_2^*}{R}$	$-\frac{U_0}{T}R\omega_2(\theta)$
Element IV	$-\frac{U_0}{T}Z$	$\frac{U_0}{2T}R\left[1-\left(\frac{R_n(\beta)}{R_b}\right)^2\right]\left[1-\frac{1}{\alpha-\beta}\omega_2(\beta)\right]$	$-\frac{U_0}{T}R\frac{\alpha-\theta}{\alpha-\beta}\omega_2(\theta)$
Element V	$-\frac{U_0}{T}Z$	$\frac{U_0}{T}R\sin^2\theta$	$\frac{U_0}{T}R\sin\theta\cos\theta$
Element VI	$-\frac{U_0}{T}Z$	$\frac{U_0}{2T}R\left[1-\left(\frac{R_n}{R}\right)^2\right]\left(\frac{1}{\alpha-\beta}\sin\beta\cos\beta+1\right)$	$\frac{U_0}{T}\frac{\alpha-\theta}{\alpha-\beta}R\sin\beta\cos\beta$
Pseudo-independent parameter : P_2, D_2, R_{n0}			
$\omega_2(\theta)=R_n^{P_2}\cdot D_2\cdot\sin<n\cdot\theta>$, $C_2^*=\frac{U_0}{2T}R_n^2\left[2\omega_2(\theta)\tan(\theta)-\left(1+\frac{d\omega_2}{d\theta}\right)\right]$			
$R_n=R_{n0}\sec\theta$ $(0\le\theta\le\beta)$ or $R_n=R_{n0}\sec\beta$ $(\beta\le\theta\le\alpha)$			
$V_D=U_0\frac{d\omega_2}{d\theta}+\frac{2T}{R_b^2}C_2^*$ $(0\le\theta\le\beta)$ or $V_D=U_0\left[1-\left(\frac{R_n(\beta)}{R_b}\right)^2\right]\left[1-\frac{1}{\alpha-\beta}\omega_2(\beta)\right]-U_0$			

Stage III

Element I	$-\frac{U_0+V_D}{T}Z+V_D$	$\frac{U_0+V_D}{2T}R$	0
Element III	$-\frac{U_0}{T}Z$	$\frac{U_0}{2T}R\left(1+\frac{d\omega_3}{d\theta}\right)+\frac{C_3^*}{R}$	$-\frac{U_0}{T}R\omega_3(\theta)$
Pseudo-independent parameter : P_3, D_3			
$\omega_3(\theta)=R_{fo}^{P_3}\cdot D_3\cdot\sin<n\cdot\theta>$, $C_3^*=\frac{U_0}{2T}R_{fo}^2\left[2\omega_3(\theta)\tan(\theta)-\left(1+\frac{d\omega_3}{d\theta}\right)\right]$			
$V_D=U_0\frac{d\omega_3}{d\theta}+\frac{2T}{R_b^2}C_3^*$			

이용하여 유도할 수 있다.

단계별로 유도된 속도장의 결과는 Table 1과 같다.

2.2 상계해

상계이론은 완전 강소성체의 변형에 관한 모든 동적 가용속도장 중에서 실제의 공정에 필요한 에너지율인 J^* 값을 최소화하는 것이다.

$$J^* = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_S + \sum \dot{W}_f$$

내부변형에너지 $\dot{W}_i$는 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{W}_i = \bar{\sigma}_m \int \dot{\bar{\varepsilon}} dV$$

전단에너지소비율 $\dot{W}_S$는 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{W}_S = \frac{\bar{\sigma}_m}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta V| dS$$

여기서, $|\Delta V|$는 전단경계면에서의 속도불연속양이다.

마찰에너지소비율 $\dot{W}_f$는 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{W}_f = m \frac{\bar{\sigma}_m}{\sqrt{3}} \int_{S_f} |\Delta V|_f dS_f$$

여기서, $|\Delta V|_f$는 마찰 경계면에서의 속도불연속양이고, m은 다이(또는 펀치)와 재료사이의 마찰상수이다.

압출하중은 다음 식으로 구해진다.

$$L = \frac{J^*}{U_0}$$

압출길이는 다음 식으로 구해진다.

$$H = V_D \times Stroke$$

3. 실험

3.1 실험장치

실험은 50ton 유압프레스에 금형을 설치하고 스트로크에 따른 하중을 측정하기 위하여 변위측정기(최대측정길이 100mm)와 로드셀(최대 용량 5ton)을 설치하였다. 실험에 사용한 펀치와 다이를 Table2에 나타내었으며, 펀치와 다이의 재질은 기계구조용탄소강(S45C)을 사용하였다.

3.2 실험소재 및 실험방법

Table 2 Punches and dies used in the experiment

	Punch	Die	
	Area (mm^2)	Orifice Dia. (mm)	Reduction of Area (%)
□	900	12.5	13.6
⬡	888	10.0	8.84
		12.5	13.81
		15.0	19.9

Table 3 The properties of lead billet

Tensile strength (kg_f/mm^2)	1.2 ~ 1.4
Yield strength (kg_f/mm^2)	0.6
Elongation (%)	30

실험소재로는 납을 사용하였으며, 납의 기계적 성질은 Table 3에 나타내었다.

그리고, 실험은 무윤활상태에서 하였으며, 마찰상수값은 링압축시험을 통하여 0.38의 값을 얻었다. 실험에서 정사각형과 정육각형에 대해 성형하중과 압출길이를 구하였으며, 정육각형에 대해서는 오리피스의 크기(10.0mm, 12.5mm, 15.0mm)에 따른 성형하중과 압출길이의 변화를 비교하였다. 성형된 제품을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5 Hexagonally headed bars

4. 결과 및 고찰

4.1 성형하중

Fig. 6에 육각형에 대해 스트로크에 따른 성형하중을 나타내었으며, 실험치와 이론치가 대체로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

여기서 스트로크가 9mm 정도에서 하중이 급상승하기 시작하는데 이는 머리부분이 다이측면부에 접하면서 하중이 상승하는 것으로 1단계에서 2단

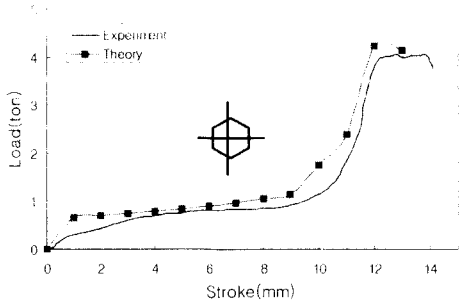

Fig. 6 Load-Stroke curve in the extrusion/forging process of hexagonally headed bars

Fig. 7 Flow pattern at each stroke

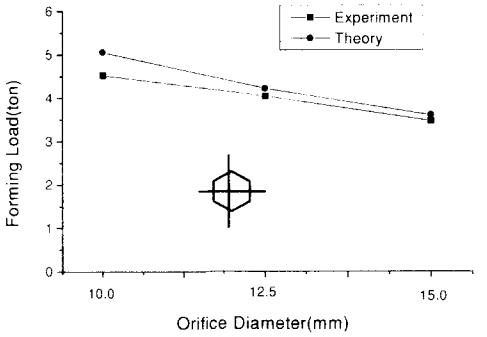

Fig. 8 Comparison between theoretical and experimental forming loads for the various orifice diameters

계로 넘어가는 지점이다[4]. 이후 하중이 계속 증가하다가 스트로크가 12mm 되는 지점에서 최대치를 보인다. 즉 스트로크가 12mm 이후에는 압출만이 일어난다는 것을 알 수 있다[5]. 즉 스트로크가 12mm 정도에서 2 단계에서 3 단계로 넘어가는 지점이다. 이는 Fig. 7 의 실제 유동 패턴에서도 잘 알 수 있다.

Fig. 8 에 오리피스의 크기에 따른 최대성형하중을 비교하였다. 여기서 오리피스의 크기가 커질수록 최대성형하중은 작아진다. 이는 오리피스의

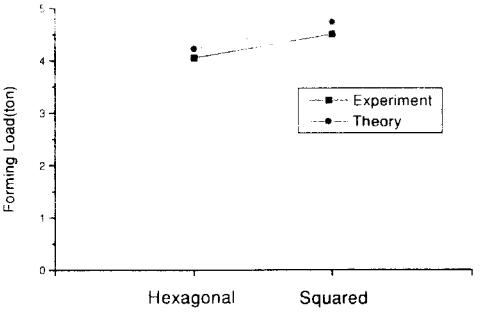

Fig. 9 Comparison of forming load between squared and hexagonal heads

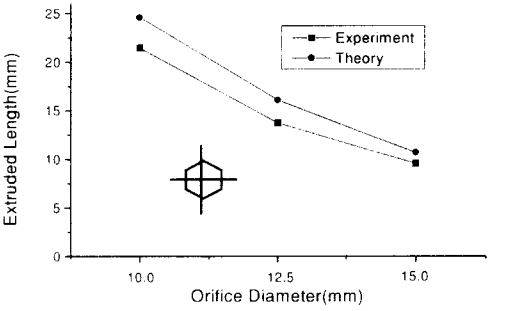

Fig. 10 Comparison between theoretically and experimentally extruded lengths for various orifice diameters

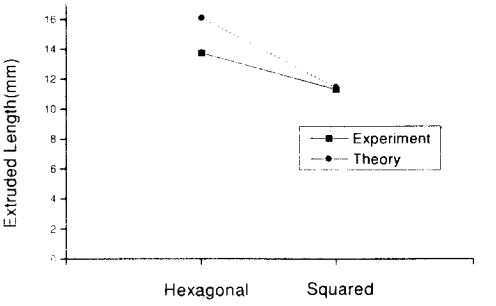

Fig. 11 Comparison of extruded length between squared and hexagonal heads

크기가 커질수록 단면감소율이 작아지기 때문이다.

Fig. 9에 사각형과 육각형의 최대성형하중을 비교하였는데 사각형의 경우가 하중이 많이 나온다. 이는 다각형의 변의 수, 즉 대칭축의 수가 증가할수록 소재와 다이의 접촉표면적이 적어지기 때문이다[5].

4.2 압출길이

Fig. 10에 오리피스의 크기에 따른 압출길이의 변화를 나타내었으며, Fig. 11에서 오리피스의 크기가 12.5mm인 경우에 대해 사각형과 육각형의 압출길이의 변화를 나타내었다. 실험결과와 이론치가 대체로 잘 일치한다.

5. 결론

봉의 머리부의 형상이 정다각형인 해석하기 위한 동적가용속도장을 제시하였고, 제시된 속도장으로부터 스트로크에 따른 성형하중과 압출길이를 UBET(상계요소법)를 이용하여 해석하였다.

이론 해석의 타당성을 검토하기 위해서 납을 사용하여 실험한 결과, 오리피스 크기 및 정다각형 머리부의 형상에 따른 성형하중과 압출길이의 변화가 잘 일치하였다.

따라서, 본 논문에서 제시된 속도장은 다각형 머리형상의 봉을 압출/단조공정에서의 성형하중과 압출길이를 예측하는 데 간편하게 사용할 수 있다.

참고문헌

1. Rowe, G.W., Principles of Industrial Metalworking Process, Edward Arnold, London, 1977.
2. Vickery, J., and Monaghan, J., "An upper-bound analysis of a forging-extrusion process," J. Mech. Proc. Tech., Vol. 55, pp. 103 - 110, 1995.
3. Kiuchi, M., and Karato, A., "Application of Flow Behaviours of Billet to Fill Side-Flush Cavity of Die," J. JSPT, Vol. 26, No. 290, pp. 307 – 315, 1985.
4. Kiuchi, M., Chung, H.K., and Yanagimoto, J., "Application of UBET to Non-Axisymmetric Upsetting Process(2)," Res. Rep. of Ind. Inst. of Tech., Tokyo Univ., Vol. 41, No. 10, pp. 25 – 28, 1989.
5. Altan, T., Oh, S.I., and Gegel, H.L., Metal Forming, American Society for Metals, 1983.