

UBET에 의한 측방압출에서의 재료유동특성에 관한 연구

김강수*, 김영호**

A Study on Characteristics of the Material Flow in Side-Extrusion by UBET

Kang-Soo Kim*, Young-Ho Kim**

ABSTRACT

Since the material flow near the die part in CONFORM (Continuous Extrusion Forming) process is similar to that of side-extrusion, the side-extrusion model of tube shaped aluminum profiles was studied for the die design in CONFORM process. In this paper, the effects of process parameters in the side -extrusion through a two-hole die face, such as material flow, height and thickness of the tube, velocities of punch and lengths of bearing land were investigated using UBET program and DEFORM commercial FEM code. The optimum lengths of the bearing lands and punch velocities for obtaining the straight shape products required were determined.

Key Words : Side-Extrusion (측방압출), Continuous Extrusion Forming (연속압출법), UBET (상계요소법), FEM (유한요소법), optimum lengths of the bearing lands (최적 베어링랜드 길이), optimum punch velocities (최적 펀치속도)

기호설명

J^* = directional orientation of the system
 W_i = internal deformation energy rate
 W_s = shear deformation energy rate
 W_f = friction energy rate
 F = forming load
 U_0 = die velocity
 m = friction factor
 k = pure shear yield stress
 σ_0 = effective flow stress
 u = velocity component in direction x
 v = velocity component in direction y

W = width of tube
 T = thickness of tube
 V_0 = punch velocity
 H = height of tube
 $\bar{\sigma}$ = effective stress
 $\bar{\epsilon}$ = effective strain
 B = length of bearing land

1. 서론

현재 알루미늄 제품의 압출에서 금형설계는 현장경험, 간단한 해석 그리고 많은 실험에 기본

* 한국원자력연구소

** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

을 두고 있다. 이러한 근거는 압출에서의 재료유동이 일반적으로 3차원문제이므로 이론적 해석은 매우 어렵기 때문이다. 따라서 평면변형문제로 근사화시켜 해석하는 경우가 많다.

금형설계에서 중요한 문제는 금형에서 압출되는 출구단면 전부분의 재료유동의 균형을 이루는 것이다. 만약 출구속도가 다르면 제품은 요구되는 정확한 형상을 갖지 못할 것이고, 재료 결함이 일어날 것이다. 따라서 금형 출구 전단면에서 재료유동의 균형이 이루어지도록 die를 설계하는 것이 필요하다.

압출에서 출구부분의 재료유동 균형을 이루는 방법에 관한 연구로 Keife^[1]는 완전 강소성재료에 대해 평면변형 조건에서 상계법과 실험으로 재료유동의 균형을 맞추고, 최적의 다이오프닝 위치를 구하였다. Aderet와 Strehmel^[2]은 평면변형 조건에서 두개의 다른 형상을 가지는 다이오프닝으로 소재가 압출될 때, 베어링랜드의 길이가 출구속도에 매우 큰 영향이 있음을 파악하였다.

한편, 최근 압출의 한 방법으로 연속압출인 CONFORM^[3,4]법이 개발되어 발전하여 왔다. 회전하는 휠의 마찰력을 이용한 CONFORM은 기존 압출법의 비연속성을 개선하여 높은 생산성과 제품정도를 가지는 새로운 공법으로 기존 단순 압출법에 비해 재료 손실이 적고, 압출되기 전까지 휠과 소재의 마찰로 인하여 많은 열을 발생하기 때문에 예열장치가 필요하지 않는 장점이 있다.

CONFORM에서 컨테이너형상은 곡률반경을 가지고, 컨테이너 벽면과 소재의 마찰로 압출력을 얻기 때문에 컨테이너 내에서 재료의 유동은 매우 복잡하여 이론적해석이 매우 어렵다. 그러나, CONFORM의 die부근에서 재료의 흐름은 측방압출의 재료유동과 유사하므로 복잡한 유동의 CONFORM에서 재료유동과 die 설계에 대한 기초 연구로서, tube형 제품의 측방압출시 재료유동의 특성을 연구하였다.

즉, 측방압출시 평면변형 조건에서 tube의 높이, 벽의 두께, 펀치의 속도, 베어링랜드의 길이에 대하여 재료유동양상과 그에 따른 결함을 연구하였다.

tube형 제품의 측방압출시 재료유동의 분석을 위해 UBET(Upper Bound Element Technique)에 의한 해석을 수행하였고, 상용 FEM code인 DEFORM의 시뮬레이션 결과와 비교, 검토하였다.

2. 이론해석

2.1 상계이론과 상계요소법

상계이론은 한계하중이론(limit load theorem)의 하나로 강소성의 재료의 경우에 대해 Prager와 Hodge^[5]에 의해 정립되었다. 완전 강소성체의 변형에 관한 모든 동적 가용속도장 중에서 실제공정에 필요한 에너지 소비율은 다음에 주어진 J^* 값을 최소화하는 것이다.

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^* \varepsilon_{ij}^*} dv + \int_S \tau_i \Delta v^* | ds - \int_{S_f} T_i v_i^* ds_T \quad (1)$$

따라서 본 연구에서는 UBET의 개념을 도입하여 다음 식으로 이론계산에 적용하였다.

$$J^* = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_s + \sum \dot{W}_f \quad (2)$$

에너지 소비율의 상계치로부터 가공하중(forming load)은 다음과 같이 구해진다.

$$F = \frac{J^*}{U_0} \quad (U_0 : \text{다이의 하강 속도}) \quad (3)$$

각각 에너지 소비율 항은 가우스 적분법을 사용하여 적분하였으며 여섯 개의 준독립변수를 포함하고 있는 전체 에너지 소비율 식을 FTM (Flexible Tolerance Method)을 사용하여 최적화하였다. Fig. 1은 UBET 이론에서의 계산과정을 전체적으로 나타내는 Flow Chart이다.

2.2 기본가정

UBET 모델은 다음과 같다고 가정한다.

- 1) 재료는 등방성, 비압축성이고 강소성체이며, Von Mises 항복조건을 따른다.
- 2) 재료는 평면변형 조건하에서 변형된다.
- 3) 체적 일정 조건을 만족한다.
- 4) 금형은 완전 강체(Rigid body)이다.
- 5) 소성변형중 온도변화는 무시하고 유효응력은 유효변형률만의 함수이다.

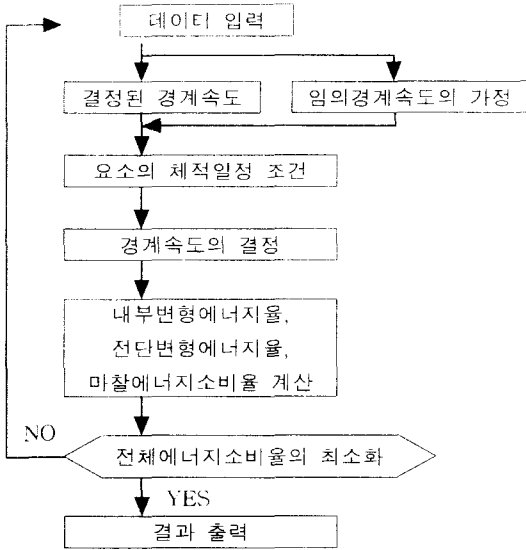


Fig. 1 Flow chart for numerical calculation

6) 마찰조건은 소성변형 중 일정하며 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = m k, \quad (0 < m < 1) \quad (4)$$

$$(k = \sigma_0 / \sqrt{3})$$

2.3 동적가용속도장

동적가용속도장은 Oudin^[6] 등이 제안한 4각형상의 요소를 사용하여 평면변형부를 해석하였다. 4각형요소의 체적 일정 조건은 다음과 같다.

$$(y_{j+1} - y_j)(u_{i+1,j} - u_{i,j}) + (x_{i+1} - x_i)(v_{i,j+1} - v_{i,j}) = 0 \quad (5)$$

4각형 요소내의 동적가용속도장은 다음과 같이 가정하고 속도분포는 Fig. 2와 같다.

$$u(x) = -c_1 x + c_3, \quad v(y) = c_1 y + c_2$$

$$c_1 = \frac{(v_{i,j+1} - v_{i,j})}{(y_{j+1} - y_j)},$$

$$c_2 = \frac{(v_{i,j} y_{j+1} - v_{i,j+1} y_j)}{(y_{j+1} - y_j)}$$

$$c_3 = u_{i,j} + c_1 x_i \quad (6)$$

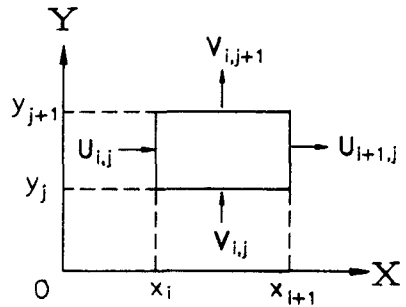


Fig. 2 Velocity distribution of rectangular element

2.4 해석모델

압출제품의 형상은 tube 형 제품으로써 아래 Fig. 3과 같다. 여기서 W는 tube의 폭, T는 tube의 두께, H는 tube의 높이이며 W는 T,H에 대해 매우 크다고 가정한다.

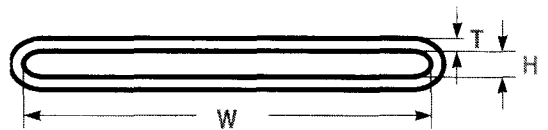
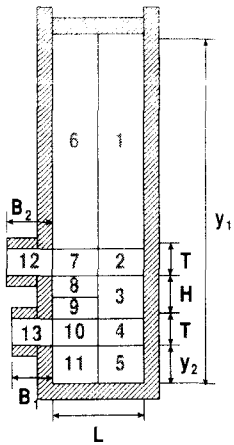


Fig. 3 Analysis model

UBET 요소는 재료유동의 경향에 따라 편치면과 다이출구면에 대해 수직과 수평으로 Fig. 4와 같이 13개의 요소로 나누어진다.

2.5 FEM 시뮬레이션

상용 FEM Code인 DEFORM을 사용하여 해석한 결과를 UBET 해석결과와 비교하고 각종 변수변화에 대한 재료의 유동특성 및 가공하중을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 조건은 평면변형에서 항온 압출을 실시 하였으며, stroke 10mm일 때까지 시뮬레이션하였고 이에 대한 상하 다이의 출구속도



Nomenclature
 T=height of die opening
 H=distance of die opening
 y₁=height of container
 y₂=y-positions of the edges of the lower opening
 B₁, B₂=lengths of bearing land of lower and upper die opening
 L=width of billet

Fig. 4 Tool geometry and workpiece divided into UBET elements

분포성향과 휘어짐을 조사하였다.

시뮬레이션에 사용된 소재는 Al2024이며, 응력-변형률관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 357 \bar{\epsilon}^{0.1588} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (7)$$

시뮬레이션변수는 T/H, V_o, B₁, B₂이며 아래와 같다.

Table 1 Simulation parameter

T/H ratio	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
V _o (Punch Velocity)	1, 5, 10, 20 [mm/sec]
B ₁ , B ₂ (lengths of bearing land)	5, 10, 15, 20 [mm]

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 보여진 stroke와 하중의 관계는 두께 30mm, 높이 200mm, 폭 30mm의 알루미늄 빌렛으로 마찰계수 m=0.9인 조건에 대하여 실행한 결과이다. 평균 유동응력은 357MPa로 하였다.

3.1 UBET 시뮬레이션 결과

tube의 T/H 비의 변화에 따라 두 개의 다이출구면의 속도가 UBET에 의해 계산되었다. 여기서 다이출구면의 크기를 T=5mm로 일정하게 하고, 그것의 각각에 따라 베어링랜드의 길이 B₁, B₂를 변화함으로써 두 개의 다이출구속도를 균형이 되도록 하였다.

Fig. 5는 T/H=0.5일 때, 베어링랜드비 B₁/B₂=1, B₁/B₂=0.5일 때의 다이 출구속도를 UBET로 해석한 결과이다. 이것은 상용 FEM code인 DEFORM에 의해서 T/H에 따라 구해진 최적의 베어링랜드의 비(B₁/B₂)에서 출구속도의 결과와 일치한다.

Fig. 6은 T/H에 대해 베어링랜드의 길이비 (B₁/B₂)에 따라 아래 다이출구면의 속도(V_d)와 위 다이출구면의 속도(V_u)의 차를 UBET로 구해 백분율로 표시한 것이다. 아래다이의 출구면의 위치를 15mm로 고정 시켰기 때문에 T/H가 클수록 속도차

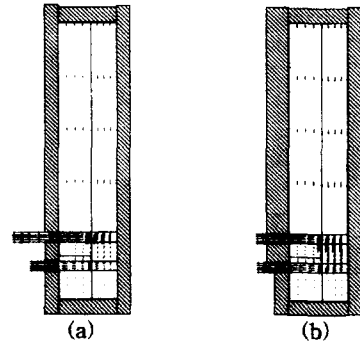


Fig. 5 Material flow predicted by UBET-model [(a) T/H=0.5, B₁/B₂=1, (b) T/H=0.5, B₁/B₂=0.5]

는 크게 나타나고, B₂/B₁가 증가할수록 속도차는 줄어들다 일정한 값 이상이 되면, 아래다이의 출구면의 속도가 더 빠르게 된다. 따라서 각각의 제품에 따른 최적의 베어링랜드비를 구할 수 있다.

Fig. 7(a)는 T/H=0.5, V_o=1mm/s, B₁/B₂=1일 때, 위와 아래의 다이출구면의 재료유동의 형태를 보이며, 아래다이의 출구면을 나온 제품의 휘어짐을 보여준다. Fig. 7(b)는 펀치속도를 10mm/s로 하여, 시뮬레이션한 결과이며, 보다 좋은 직진도를 나타냄을 보여준다. 이상에서 다이출구면을 나온 재료의 휘어짐은 펀치속도와 관계있음을 알 수 있다.

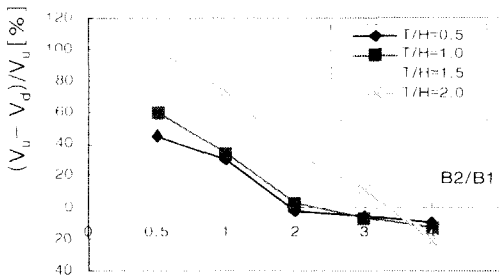


Fig. 6 Theoretical results considering bearing length on the exit velocities by UBET

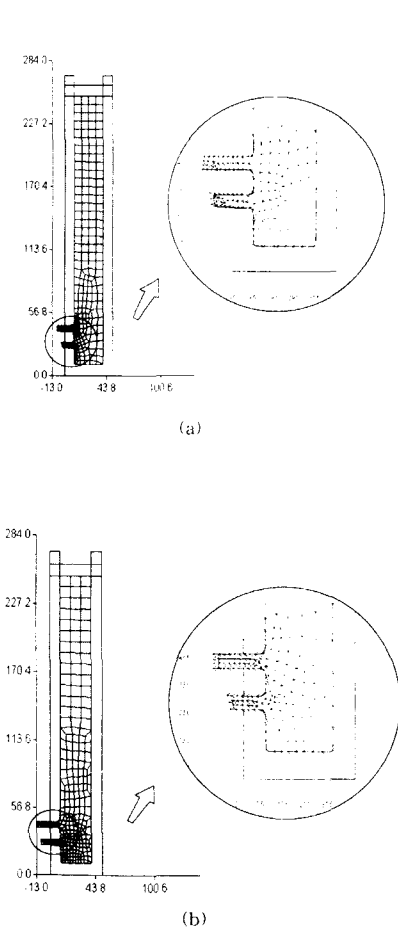


Fig. 7 Material flow predicted by the FEM-model [(a)T/H=0.5, $V_0=1\text{mm/s}$. (b)T/H=0.5, $V_0=10\text{mm/s}$]

Fig. 8은 펀치속도 $V_0=10\text{mm/s}$ 인 경우의 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 베어링랜드의 비는 1이지만, 펀치속도를 크게 했을 때, 상하의 출구속도는 거의 같게 나타났으므로 변형율이 다이출구에서 정상적으로 이루어져 제품의 결함발생을 억제시킬 것이다.

Fig. 9는 압출초기 즉, 비정상상태에서 펀치속도에 따른 압출하중 변화를 나타낸다. 첫단계의 작은 하중은 재료가 다이출구부에 채워질 때까지의 변형 하중이며, 중간부의 하중은 압출이 이루어지기 위한 압출력과 마찰력의 합이다.

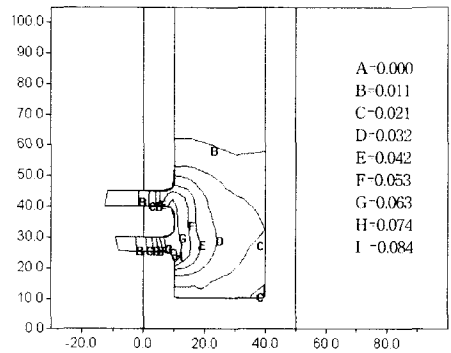


Fig. 8 Effect Strain T/H=0.5, $V_0=10[\text{mm/s}]$

펀치속도가 클수록 압출하중이 감소하였고 stroke 7 mm 이상일 때, 펀치속도가 작은 경우는 압출하중이 점차 작아지고 펀치속도가 큰 경우는 압출하중이 점차 작아졌다. stroke 10mm 이상에서 즉, 정상상태에서는 압출하중이 같아져 펀치속도가 압출하중에 무관함이 확인되었다.

이상에서 펀치속도의 결정은 제품의 결함뿐만 아니라 하중의 감소에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

CONFORM의 컨테이너내에서 재료유동이 매우 복잡하므로 이론적 해석이 어렵다. 그러나 CONFORM의 die부근에서 재료의 흐름은 측방압출의 재료유동과 유사하므로 복잡한 유동의 CONF-

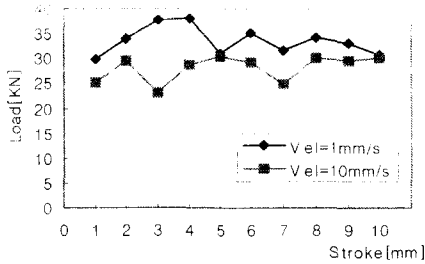


Fig. 9 Extrusion load by FEM

[T/H=0.5, (a)V₀=1[mm/s], (b)V₀=10[mm/s]]

ORM에서 재료유동과 die 설계에 대한 기초연구로써, tube형 제품의 측방압출시 재료유동의 특성을 UBET와 상용FEM code인 DEFORM을 이용하여 평면변형 조건하에서 몇 가지 기본적인 연구를 하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 두 개의 다이출구 압출속도는 베어링랜드의 길이에 영향을 받고있음을 파악하였고, T/H 비가 다른 각각의 제품에 대해, 같은 출구속도를 얻기 위해 최적의 베어링랜드의 길이비(B₁/B₂)를 결정하였다.

2) 압출시 제품의 직진도는 편치속도와 관계있다는 것을 파악하였고, 압출된 제품의 휘어짐을 방지하기 위해 최적의 편치속도를 결정하였다.

3) 이상의 연구결과는 CONFORM의 tube형 die 설계시 반영될 수 있으며 해석모델로부터 얻어진 수치적 결과는 측방압출, 연속압출의 die 최적설계와 공정의 조절 및 최적화를 위한 guide line이 되고 매우 유용한 자료가 될 것이다.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소의 협력하에 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

참고문헌

1. Keife, H., "Extrusion through Two Die Openings," Asia pacific Conference on Materials Processing, Feb. 23-25, Singapore, 1993.
2. Aderet, R., and Strehmel, "Control of Metal Flow

- in Extrusion Dies." Proceedings of the conference Extrusion Technology (E1-88), Chicago, pp.357-367, 1988.
3. Bridgewater, M., Maddock, B., Treadwell, C., "Manufacture of Extruded Profiles by the Conform Process." Proceedings of the Copper '90 Conference, Sweden, pp.229-237, 1990.
4. Hawkes, D. J., Morgan, R. E., "Conform Extrusion Current Method and Capabilities." Wire Industry, pp.323-326, 1991.
5. W. Prager and P.G.Hodge, Theory of Perfectly Plastic Solids, Chapman and Hall, London, 1951.
6. J. Oudin and Y. Ravalard, "An Upper Bound Method for Computing Loads and Flow Patterns in Plane-Strain Forging." Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 21, pp. 237-350, 1981.