

측방압출에서의 재료유동특성에 관한 연구

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

김 영 호(부산대학교, 정밀정형 및 금형가공연구소)

김 강 수(한국원자력 연구소), 윤 상 식*(부산대학교 대학원)

Young-Ho Kim(ERC/NSDM Pusan National University)

Kang-Soo Kim(KAERI), Sang-Sik Youn*(Graduate School, Pusan National University)

ABSTRACT

A side-extrusion model, meant for deeper understanding of the material flow in the CONFORM (continuous extrusion forming) of tube shaped aluminum profiles is presented. In order to get the desired straight shape of the extrudate, every part of its cross-section must exit the die with the same velocity. Problem is assumed by plane strain UBET-model to analyze it in a simplified way. This has been done by studying the side-extrusion through a two-hole die face. The flow is balanced by determining the optimum lengths of the bearing lands, i.e., those lengths which result in equal exit velocities of the extrudates. Furthermore, the material flow, as influenced by the punch velocity, has been investigated.

Key words : Side-Extrusion(측방압출), Continuous Extrusion Forming(연속압출법), UBET(상계요소법), bearing lands lengths (베어링랜드길이)

1. 서론

현재 알루미늄 제품의 압출에서 금형설계는 현장경험, 간단한 해석 그리고 많은 실험에 기본을 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 출구부분의 재료유동의 균형을 맞추는 것이 필요하다.

압출에서 출구부분의 재료유동의 균형을 이루는 방법에 관한 연구로 Keife^[1]는 완전한 강소성재료에 대해 평면변형조건에서 상계법과 실험으로 재료유동의 균형을 맞추고, 최적의 다이오프닝 위치를 구하였다. Aderet과 Strehmel^[2]는 평면변형조건에서 두 개의 다른형상을 가지는 다이오프닝로 소재가 압출

될때, 베어링랜드의 길이가 출구속도에 매우 큰영향을 미친다는 것을 밝혀냈다.

최근 압출의 한방법으로 CONFORM^[3,4]법이 개발되었다. 회전하는 휠의 마찰력을 이용한 CONFORM은 종래의 압출법의 비연속성을 개선하여 높은 생산성과 제품정도를 가지는 새로운 공법으로 종래의 압출법에 비해 재료 손실이 적고, 압출되기전까지 휠과 소재의 마찰이 일어나 많은 열을 발생하기 때문에 예열장치가 필요하지 않는 장점이 있다.

CONFORM에서 컨테이너형상은 곡률반경을 가지고, 컨테이너벽면의 마찰로 압출력을 얻지만, 이에 대한 이론적해석은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 CONFORM에서 재료유동에 대한 기초연구로, 다이형상이 근사한 측방압출에 대해, tube형 제품의 압출시 재료유동의 특성을 연구하였다.

본 연구는 평면변형조건에서 tube의 높이, 벽의 두께, 펀치의 속도, 베어링랜드의 길이에 대해 재료유동양상과 그에 따른 결합에 대해 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^[6]에 의해 정립되었다. 완전 강소성체의 변형에 관한 모든 동적 가용속도장 중에서 실제공정에 필요한 에너지 소비율은 다음에 주어진 \mathcal{J} 값을 최소화하는 것이다.

$$\mathcal{J} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_0 \int_v \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij}^* \dot{\epsilon}_{ij}^*} dv + \int_s \tau |\Delta v^*| ds - \int_{s_i} T_i v_i^* ds_i$$

여기서, \mathcal{J} 는 실제공정에서 필요한 에너지 소비율의 상계이며 *표는 동적가용속도장에서 얻은 값을 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 UBET의 개념을 도입하여 다음식으로 이론계산에 적용하였다.

$$\mathcal{J} = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_s + \sum \dot{W}_j$$

\dot{W}_i : 내부 변형 에너지 소비율

\dot{W}_s : 요소 사이의 전단 변형 에너지 소비율

\dot{W}_j : 다이와 재료사이의 마찰 에너지 소비율

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

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

각각 에너지 소비율 항은 가우스 적분법을 사용하여 적분하였으며 여섯개의 준독립변수를 포함하고 있는 전체 에너지 소비율 식을 FTM(Flexible Tolerance Method)를 사용하여 최적화하였다.

2.2 기본가정

UBET 모델은 다음과 같다고 가정한다.

- 1)재료는 등방성, 비압축성이고 강소성체이며, Von Mises 항복조건을 따른다.
- 2)재료는 평면변형조건하에서 변형된다.
- 3)체적 일정조건을 만족한다.
- 4)금형은 완전 강체(Rigid body)이다.
- 5)소성변형중 온도변화는 무시하고 유효응력은 유

효변형률만의 함수이다.

5)마찰조건은 소성변형 중 일정하며 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = m k, \quad 0 < m < 1$$

(m:마찰상수, k:순수전단 항복응력, $k = \sigma_0 / \sqrt{3}$)

2.3 동적가용속도장

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

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

4각형 요소내의 동적가용속도장은 다음과 같이 가정한다.

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

$$c_1 = \frac{(v_{i,j+1} - v_{i,j})}{(y_{j+1} - y_j)}, \quad c_2 = \frac{(v_{i,j} y_{j+1} - v_{j+1} y_j)}{(y_{j+1} - y_j)}$$

$$c_3 = u_{i,j} + c_1 x_i$$

2.4 해석모델

압출제품의 형상은 아래와 같다. 여기서 W는 T,H 에 대해 매우 크다고 가정한다.

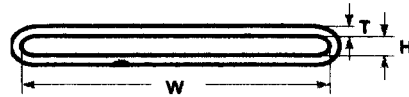


Fig.1 Analysis model

요소는 재료유동의 경향에 따라 편치면과 다이출구면에 대해 수직과 수평으로 Fig.2와 같이 13개의 요소로 나누어진다.

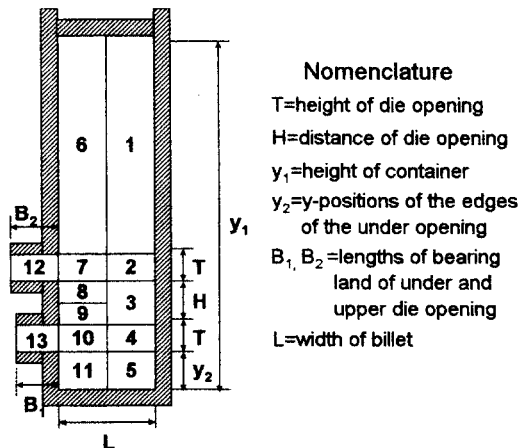


Fig.2 Tool geometry and workpiece divided into UBET elements

2.5 FEM 시뮬레이션

본 연구에서 상용 FEM Code인 Deform을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 소재는 초기 항복강도가 357N인 A12024이며, 응력-변형률관계는 아래와 같다.

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

시뮬레이션변수는 T/H, V_o , B_1 , B_2 이며 아래와 같다.

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]

Table.1 Simulation parameter

시뮬레이션 조건은 평변변형에서 항온압출을 실시하였으며, stroke 10mm일때까지 시뮬레이션하였다. 이에 대해 상·하다이의 출구속도분포경향과 휘어짐을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 보여진 stroke와 하중의 관계는 두께 30mm, 높이 200mm, 폭 30mm의 알루미늄 빌렛으로 마찰계수 $m=0.9$ 인 조건에 대하여 실행한 결과이다. 평균 유동응력은 0.357KN으로 하였다.

3.1 시뮬레이션 결과

T/H의 변화에 따라 두 개의 다이출구면의 속도가 계산되었다. 여기서 다이출구면의 크기 $T=5\text{mm}$ 로 일정하고, 각각에 따라 베어링랜드의 길이 B_1, B_2 를 조정함으로써 두 개의 출구속도의 균형을 이루었다.

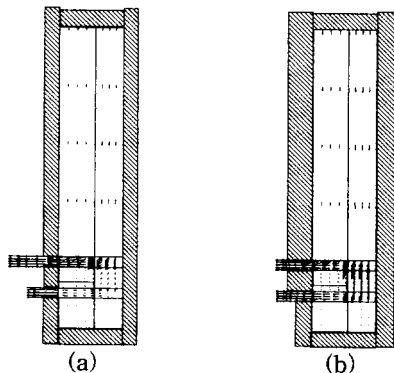


Fig.3 Material flow predicted by the UBET-model
[(a) T/H=0.5, $B_1/B_2=1$, (b) T/H=0.5, $B_1/B_2=0.5$]

Fig.3은 T/H=0.5일 때, 베어링랜드비 $B_1/B_2=1, 0.5$ 의 출구속도를 UBET로 해석한 결과이다. 이것은 상용 FEM code인 Deform을 통해서 T/H에 따라

구해진 최적의 베어링랜드의 비(B_1/B_2)에서 출구속도의 결과와 일치한다.

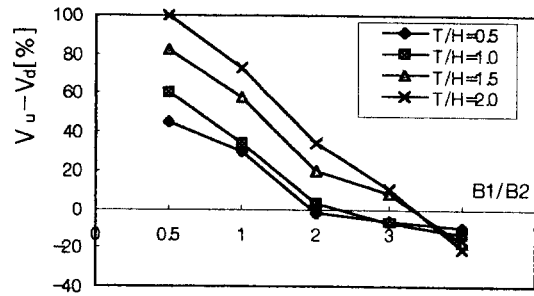


Fig.4 Theoretical results considering bearing length on the exit velocities by UBET

Fig.4는 T/H에 대해 베어링랜드의 길이비(B_1/B_2)에 따라 아래 다이출구면의 속도(V_d)와 위 다이출구면의 속도(V_u)의 차를 UBET로 구해 백분율로 표시한 것이다. 아래다이의 출구면의 위치를 15mm로 고정시켰기 때문에 T/H가 클수록 속도차는 크게 나타나고, B_1/B_2 가 증가할수록 속도차는 줄어들다 일정한 값 이상이면, 아래다이의 출구면의 속도가 더빠르게 된다. 따라서 각각의 제품에 따른 최적의 베어링랜드비를 구할 수 있다.

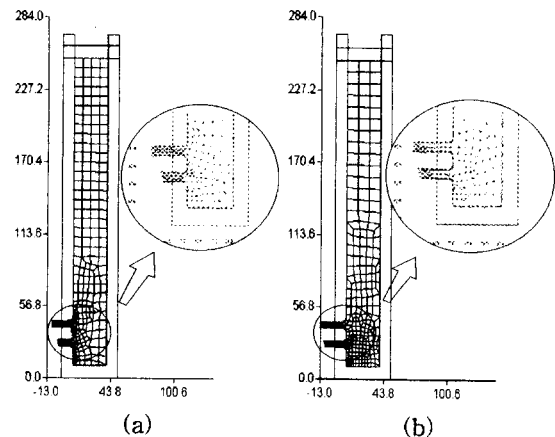


Fig.5 Material flow predicted by the FEM-model
[(a) T/H=0.5, $V_o=1\text{mm/s}$, (b) T/H=0.5, $V_o=10\text{mm/s}$]

Fig.5(a)는 T/H=0.5, $V_o=1\text{mm/s}$, $B_1/B_2=1$ 일 때, 위와 아래의 다이출구면의 재료유동의 형태를 보이며, 아래다이의 출구면을 나온 제품의 휘어짐을 보여준다. Fig.5(b)는 펀치속도를 10mm/s로 하여, 시뮬레이션한 결과이며, 보다 좋은 직진도를 나타냄을 보여준다. 각각의 제품에 따라 적합한 펀치속도가 정해지지만, 본 연구에서는 다이출구면을 나온 재료의

휘어짐이 편치속도와 관계있다는 것을 밝혀냈다.

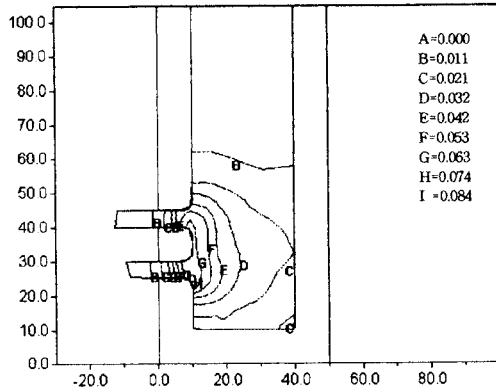


Fig.6 Effect Strain T/H=0.5, $V_0=10$ [mm/s]

Fig.6은 $V_0=10$ mm/s로 시뮬레이션하여 유효변형율 분포를 나타낸 것이다. 베어링랜드의 비는 1이지만, 편치속도를 크게 했을 때, 상하의 출구속도를 비슷하게 하였고, 변형율의 다이출구에서 정상적으로 이루어져 제품의 결함발생을 억제시켰다.

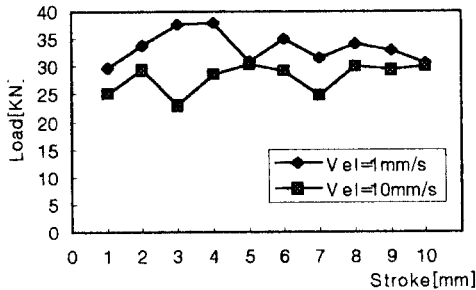


Fig.7 Comparison load by FEM

[T/H=0.5, (a) $V_0=1$ [mm/s], (b) $V_0=10$ [mm/s]]

Fig.7은 속도에 따른 하중변화를 나타낸다. 첫단계의 작은 하중은 재료가 다이출구부에 채워질때까지의 변형하중이며, 중간부의 하중은 압출이 이루어지기위한 압출력과 마찰력의 합이다. 이상에서 편치속도의 결정은 제품의 결함뿐만아니라 하중의 감소에도 영향을 미친다는 것을 밝혀냈다.

4. 결론

컴퓨터에서 tube형 알루미늄제품의 압출시 재료유동의 깊은 이해를 위해, 컴퓨터와 근사한 측방압출에서 UBET와 상용 FEM code인 Deform을 통해 평면변형조건하에서 몇가지 기본적인 연구를 하였다.

연구결과는 다음과 같다.

- ① 두 개의 다이출구의 압출속도는 베어링랜드의 길이에 영향을 받는다는 것을 밝혀냈고, T/H가 다른 각각의 제품에 대해, 같은 출구속도를 얻기 위해 최적의 베어링랜드의 길이비(B_1/B_2)를 결정하였다.
- ② 압출시 제품의 직진도는 편치속도와 관계있다는 것을 밝혀냈고, 압출된 제품의 휘어짐을 방지하기 위해 최적의 편치속도를 결정하였다.

참고문헌

1. Keife, H., "Extrusion through Two Die Openings" Asia pacific Conference on Materials Processing, Feb. 23-25, Singapore. 1993
2. Akeret, R., and Strehmel, "Control of Metal Flow in Extrusion Dies", Proceedings of the Conference Extrusion Technology (ET-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, 58:323-326, 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 Lodas and Flow Patterns in Plane-Strain Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.21, pp.237-350, 1981
7. U. Ståglberg, J. Hou, "A UBET-Simulation Meant form Basic Understanding of the Extrusion of Aluminum Profiles", Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.117 No.4, pp.485-493. 1995