

# 평금형을 통한 3차원 압출의 정상상태 유한요소해석 (Steady-state finite element analysis of three-dimensional extrusion of sections through square die)

이승훈\*(창원대학교 기계공학과 대학원), 이춘만(창원대학교 기계설계공학과)  
S. H. LEE(Changwon National Univ.), C. M. LEE(Changwon National Univ.)

## Abstract

This study presents steady-state finite element analysis of three-dimensional hot extrusion of sections through square dies. The objective of this study is to develop a steady-state finite element method for hot extrusion through square dies, and to provide theoretical basis for the optimal die design and process control in the extrusion technology. In the present work, steady-state assumption is applied to both analyses of deformation and temperature. The analysis of temperature distribution includes heat transfer. Convection link element is adopted for the heat transfer analysis between billet and container, and also billet and die. Distributions of temperature, effective strain rate, velocity and mean stress are discussed to design extrusion die effectively.

### 1. 서론

압출공정은 밀폐된 용기(Container)에 구속된 소재(Billet)를 밀어 성형하는 방법으로 일정한 단면형상을 갖는 제품생산에 가장 경제적인 공정중의 하나이다. 여러 압출공정 중에서도 평금형(Flat or square die)을 통한 형재의 압출공정은 비교적 금형 제작이 간편하고 생산성이 높아 그 수요가 높아지고 있다. 또한, 알루미늄 등의 경금속을 이용하여 봉재 뿐만 아니라 튜브 형재 또는 각종 복잡한 형상의 단면형재를 큰 압출비로 저렴하게 가공할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 압출작업 중에 꼬임이나 굽힘 등의 불규칙적인 소성유동이 발생할 경우 제품이 못쓰게 되므로 적절한 금형랜드(Die land)의 길이의 결정, 압출구멍의 크기 및 위치의 결정 등이 금형설계의 중요한 요소이다. 현재 산업현장에서의 금형설계 방법은 경험적인 지식과 판단에 의존하므로 여러 번의 시행착오를 거치는 것이 보통이다. 양질의 제품을 생산하기 위해

서는 실제 금형을 제작하기 전에 최적의 금형설계 및 공정변수를 얻기 위한 체계적인 압출해석이 요구된다. 최근 유한요소법(Finite element method)등의 수치해석방법으로 금형설계에 필요한 좀더 구체적인 정보를 얻을 수 있게 되었다. 3차원 압출해석은 최근 들어 연구가 되었다. Yang<sup>(1)</sup> 등은 3차원 임의형상에 대해 냉간 및 정상상태(Steady-state)로 해석하였고, Mori<sup>(2)</sup> 등도 같은 방법으로 압출제품의 꼬임을 예측하였다. Lam<sup>(3)</sup> 등은 정상상태와 등온과정으로 유동안내(Flow guide)를 가진 압출을 해석하였다. Mooi 등<sup>(4)</sup> 과 Kang<sup>(5)</sup> 은 Updated Lagrangian법 또는 Arbitrary Lagrangian-Eulerian법 등의 비정상상태(Non steady-state) 해법으로 해석하였다.

본 연구에서는 평금형을 통한 열간 압출에 대해 3차원 형재를 해석할 수 있는 강-점소성 유한요소해석 프로그램을 개발하고, 유동해석과 온도해석을 행하여 복잡한 단면형상을 가진 금형설계에 도움이 되

고자 하였다. 사용된 해석방법은 소성유동을 정상상태 해석하고, 그 결과를 넘겨서 온도해석을 하는 비연계(Decoupled)방법을 사용하였다. 대류연결요소(Convection link element)를 사용하여 소재(Billet)와 컨테이너(Container), 소재와 금형(Die)사이의 열전달을 고려하도록 하였다. 개발된 해석 프로그램을 이용하여 만드렐(Mandrel)을 가진 중공형재와 자동격자생성 알고리즘을 도입한 L-단면을 가진 형재에 시뮬레이션(Simulation)해 보았다. 압출공정 및 금형설계에 온도, 유효변형률, 속도와 평균응력 분포 등의 계산결과를 활용하는데 대한 토론을 하였다.

## 2. 이론

본 연구에서의 해석 방법은 강-소성 재료 모델에 근거한 벌칙함수 유한요소법으로 초기 속도장은 선형 점성재료(Linear viscous material)로 가정하는 방법을 사용하였다. 소재가 등방성이고, Von-Mises항복조건을 따르고, 변형 중에 소재의 체적변화가 없다고 가정한다. 구성방정식은 다음 식 (1)로 된다.

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}$ ,  $\bar{\sigma}$ ,  $\dot{\sigma}_{ij}$ 은 유효변형률속도(Effective strain rate), 유통응력(Flow stress), 편차응력텐서(Deviatoric stress tensor)이다. 식 (1)에 변분원리를 적용하고, 유한요소 분할화하여 유동해석을 행한다.

정상상태 온도문제를 해석하기 위한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$K_1 T_{,ii} + k^* \bar{\sigma} \dot{\epsilon} = 0 \quad (2)$$

여기서,  $K_1$ 은 열전도 계수,  $T$ 는 소재 온도,  $k^*$ 는 소성변형 에너지가 열로 바뀌는 비율이며, 보통 0.9로 가정한다. 이 식을 정리하고 유한요소 분할화하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$KT - Q - Q_n = 0 \quad (3)$$

여기서  $Q_n$ 은 열유동 벡터로 다음식과 같다.

$$Q_n = \int_{s_r} h(T_\infty - T_s) N^T dS + \int_{s_d} h_{lub}(T_d - T_s) N^T dS + \int_{s_f} q_n^f N^T dS \quad (4)$$

## 3. 결과 및 토론

열간압출 성형과정을 정상상태 유한요소법으로 해석하기 위한 프로그램을 개발하였고, 개발된 프로그램을 이용하여 2가지 모양의 형재에 적용해 보았다.

개발된 프로그램의 타당성을 검토하기 위해 Kang<sup>(5)</sup>에 의한 비정상상태해법과 동일한 예제를 계산해 보았다. 즉, 소재의 직경이 29mm이고, 제품의 한번 길이가 14.5mm인 정사각형 단면형재를 압출하는 공정에 대해 소재, 컨테이너, 금형 및 대기의 온도를 각각 450°C, 420°C, 420°C, 17°C로 하고 마찰상수는 0.2, 램속도는 10mm/sec로 계산한 결과, Fig. 1, Fig. 2에 온도분포와 변형률속도분포를 나타내었으며, 거의 비슷한 결과를 얻었다. 계산시간은 펜티엄급에서 비정상상태해법에 비해 1/50~1/100 정도의 시간내에 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 3의 육각형 단면형재는 직경이 200mm, 길이 120mm, 램속도 5.0mm/sec로 하여 계산한 결과, Fig. 4에 온도분포를 나타냈는데, 금형입구에서 금형랜드부로 갈수록 소성변형에너지의 증가 때문에 급격히 온도가 상승함을 알 수 있었다. Fig. 5는 변형률속도분포를 나타냈는데 금형출구의 코너부에서 변형률이 커짐을 알 수 있다. Fig. 6은 평균응력분포를 나타냈으며, 단축단면에서의 코너부에서 가장 큰 응력을 받고 있음을 알 수 있다.

유한요소 해석에 가장 중요한 과정중의 하나가 새로운 격자를 생성하는 것인데, 3차원 임의형상의 압출해석에 필요한 격자

를 자동 생성할 수 있는 프로그램을 제시하여 Fig. 7과 같이 L-단면을 가진 형체에 적용한 결과, Fig. 8은 출구 단면위에 생성된 격자구조를 나타내며, Fig. 9은 Fig. 8을 기본로 하여 각각 빌렛방향과 제품길이 방향으로 확장생성(Shifting)시켜 나타내었다. Fig. 10는 온도분포를 나타내었다. 금형출구부에서의 온도가 가장 높음을 알수 있다.

#### 4. 결론

평균형을 통한 3차원 임의형체의 압출공정을 유한요소법으로 시뮬레이션하는 프로그램을 개발하였고, 이를 비정상상태해석에 의한 방법과 비교한 결과 짧은 계산시간으로도 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

3차원 임의형체의 압출공정을 유한요소 해석하기 위한 전처리과정인 격자구조 생성 알고리즘을 이용하여 실제 문제에 적용해 보았다.

#### 참고문헌

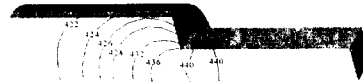
1. D. Y. Yang, J. H. Yoon and C. M. Lee, "Computer-aided numerical analysis and design for cold extrusion of a spur gear", Proc. Instn Mech. Engrs, Vol.204, pp.203-209 (1990)
2. K. Mori, K. Osakada and H. Yamaguchi, "Prediction of curvature of an extruded bar with noncircular cross-section by 3-D rigid-plastic finite element methods", Int. J. Mech. Sci., Vol. 35, No. 10, pp. 878-887 (1993)
3. X. Q. Zhang, Y. C. Lam, S. S. Xie and P. F. Thompson, "A three-dimensional rigid-viscoplastic finite element analysis of shape extrusion", The Sixth Int. Conf. in Australia on Finite Element Methods, pp. 100 -103 (1991)
4. H. G. Mooi and J. Huetink, "Simulation of complex aluminum extrusion using an arbitrary

Eulerian-Lagrangian", Proc. 5th NUMIFORM, Ithaca, New-York, USA, pp. 869-874 (1995)

5. Y. S. Kang and D. Y. Yang, "Rigid-viscoplastic finite element analysis of hot square die extrusion of complicated profiles with flow guides and lands by arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation", Proc. 5th NUMIFORM, Ithaca, New-York, USA (1995)



(a) Result of Kang *et al.*



(b) Result by the present method

Fig. 1 Comparison of temperature distribution



(a) Result of Kang *et al.*



(b) Result by the present method

Fig. 2 Comparison of effective strain rate distribution

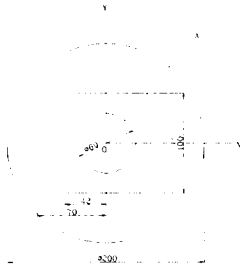


Fig. 3 Section shape for extrusion of hexagonal section

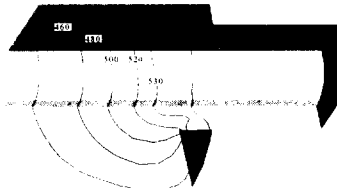


Fig. 4 Distribution of temperature

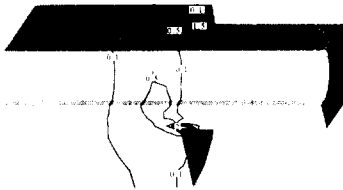


Fig. 5 Distribution of strain rate

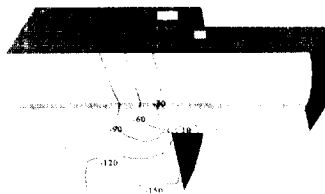


Fig. 6 Distribution of mean stress

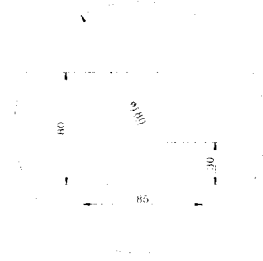


Fig. 7 Section shape for extrusion of L-shaped section

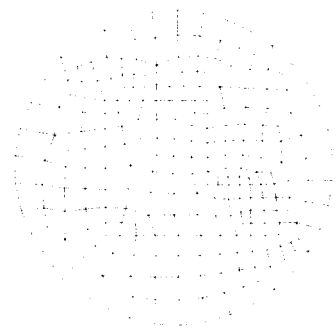


Fig. 8 Mesh configuration on exit cross section before shifting

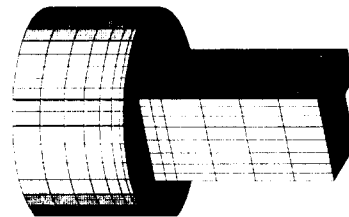


Fig. 9 Mesh configuration after shifting

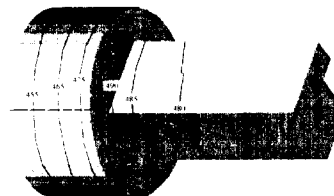


Fig. 10 Distribution of temperature