

축대칭 압출에서의 유동경로를 이용한 실용적 금형설계

이용신* · 윤상현**

A Practical Method to Determine the Die Shape using a Streamline in Axisymmetric Extrusion

Y.S. Lee and S.H. Yoon

Abstract

A new, simple method to determine the die shape using a streamline in extrusion is presented. This method assumes that a billet deforms naturally to minimize the energy input for the given process condition. Then, an optimal die shape can be determined along a streamline. Extrusion operations with two types of materials, strain-hardening material and strain-rate hardening material, are examined using this method. Predictions with the proposed method are compared with those by the previous optimizing model to show its efficiency.

Key Words : Die shape, Stramline, Extrusion, Finite Element Method

1. 서 론

압출 가공의 성공 여부는 적절한 압출 공정 조건 외에도 올바른 금형 설계에 좌우된다. 금형 설계의 목적으로는 제품의 정밀도를 유지하면서 금형의 수명을 연장시키는 데 있다. 적절치 못한 압출 금형의 형상은 압출하중을 증가시키며, 고품질 제품의 생산에 치명적 영향을 준다. 한편 압출 가공 제품들은 형상의 다양화 및 품질의 고급화를 요구하는 추세이나 최적의 금형 형상을 결정하는 것은 난이하여 실제 산업현장에서는 경험적 기술에 의존하고 있는 실정이다.

최근에는 실험적 그리고 해석적 연구가 있어 왔다.

Richmond와 Devenpeck⁽¹⁾은 스트립 드로잉에서 에너지 효율을 극대화하도록 금형 형상을 결정하는 수학적 모델을 제시하였다. 그러나 이 방법은 slip-line method를 이용하여 무 마찰 하에서 완전 소성재료의 가공에 제한되었다. 그 이후에 상계법⁽²⁻⁴⁾, 유한요소법⁽⁵⁻⁶⁾를 이용하여 마찰 효과, 유동 응력, 비 균질재 등을 고려한 금형 설계 방법이 시도되었다. Roy⁽⁷⁾ 등은 adaptive microgenetic algorithm을 사용하여 최적화 설계에 응용했으며, Duggirala⁽⁸⁾ 등은 비정상상태에 이기술을 응용하였다. Hwang⁽⁹⁾은 유전자 알고리즘을 이용하여 금형형상을 최적화하는 기법을 제시하고, 다양한 목적함수에 따라 최적화된 형상을 보여주었다. 본 연구에서는 기존 연구

* 국민대학교 기계·자동차공학부

** 국민대학교 생산기술연구소

들의 방법보다 획기적으로 간편하며, 빠르게 금형의 형상을 결정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 유선을 이용한 금형형상 설계

압출에서는 빌렛이 금형을 통과하여 단면적이 크게 감소하므로 금속 유동의 양상은 공정 전반에 걸쳐 중요한 인자이다. 원형 봉의 압출에서 무 마찰의 경우 가장 균일한 유동양상에서 빌렛이 직각 금형을 통과할 때는 Fig. 1의 (a)에서 보는 바와 같이 소성변형 영역(plastic zone)내에서 금속이 유동경로(streamline)를 따라 압출(변형)하게 된다. 접촉면에 마찰이 크다면 Fig. 1의 (b)와 같은 데드메탈영역(dead metal zone)이 발생하며 이때에도 데드메탈영역과 경계를 이루는 소성변형 영역 내에 유동경로를 따라 압출된다.

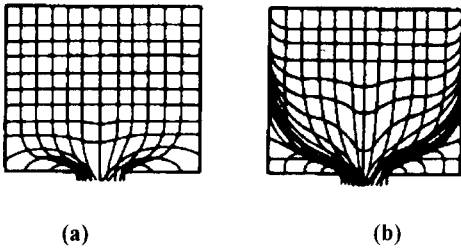


Fig 1 Form of metal flow during direct extrusion

압출 시에 금속의 유동경로는 자연스러운 물리적 현상이라 생각된다. 물방울이 맺힐 때 물방울에 생기는 물분자 간의 결합력과 대기압의 힘의 평형이 물의 표면장력으로 작용하여 물방울의 형태를 이루는 것이 자연적인 에너지 최소화 상태인 것처럼 물체가 변형을 한다면 그 변형은 에너지를 최소화하는 상태를 유지하면서 변형하게 될 것으로 가정된다. 유동경로 또한 외부의 조건에 따라 그 상태에서 최소에너지 상태를 이루면서 변형할 것이라 예상된다.

직각형 금형에서의 압출시에 금속의 유동경로가 변형 에너지를 최소화한 상태라면 같은 압출비에서 유동경로를 따른 금형에서의 압출이 최적의 압출상태를 유지하는 상태가 될 것이다.

따라서 본 논문에서는 빌렛 물질 입자의 유동경로가 변형 에너지(forming energy)를 최소화하는 경로라는 가정

하에 초기 금형의 벽면에 근접한 입자의 유동경로를 따라 금형 형상을 결정하는 방법을 제시하고자 한다. 또한 빠르게 형상을 결정하기 위해 본 연구에서는 직각형 금형에서의 정상상태 압출을 오일러리안 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션한 모델에서 유동경로를 찾아 금형 형상을 결정한다. 본 연구의 방법에 의해 결정된 금형을 이용한 압출을 시뮬레이션하여 Hwang의 최적화 모델을 이용한 결과의 비교를 수행하여 효율성을 검증한다.

3. 축대칭 압출 응용

이 방법의 응용으로 n차승 변형경화 소성재와 점·소성재의 두재료의 축대칭 압출을 선택하였다. 직각 금형에서의 정상상태 유동에서 구한 유동경로를 따라 결정한 금형 형상과 Hwang⁽⁹⁾의 genetic algorithm으로 구한 최적설계 금형 형상을 이용하여 정상상태 오일러리안 유한요소 해석을 수행, 결과를 비교한다.

3.1 n차승 가공경화소성 재료

본 연구를 위해서 선택한 공정 조건들은 다음과 같다.

압출 금형의 입구측 직경	= 60 mm
압출 금형의 출구측 직경	= 40 mm
단면 감소비	= 55.6 %
펀치 속도	= 100 mm/sec
물성 모델	$\bar{\sigma} = 157.54(0.3193 + \bar{\epsilon})^{0.34}$

위에서 말한 조건을 만족하는 금형의 형상을 구하기 위해 직각 금형에서의 정상유동 상태의 압출을 시뮬레이션하여 유동경로를 구한다. 오일러리안 해석에서 해의 수렴을 원활하도록 직각보다 1-2도 작은 각을 선택하였다. 또한 직각 금형의 입·출구 크기가 같은 경우 금형에 근접한 입자(particle)를 선택해야 하는데 이때도 유선이 데드메탈영역으로 향하는 현상이 발생하므로 원하는 형상보다 약간 큰 크기의 금형을 선택하여 빌렛 표면에서 두께의 10분지 1정도에 있는 물질 점의 유동경로를 찾았다. 이 유선을 이용한 금형 형상과 Hwang의 유전자 알고리즘에 의해 압출 하중을 목적 함수로 하여 최적화된 금형 형상에 의거한 공정해석용 유한요소 격자가 각각 Fig. 2 (a) 와 (b) 에 보여진다.

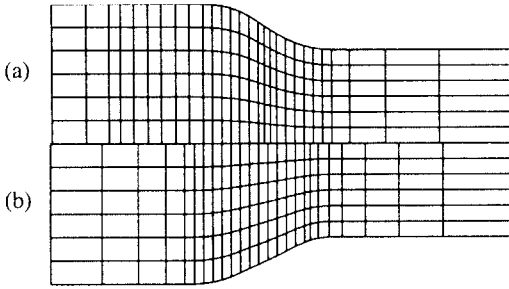


Fig 2 Comparison of the meshes obtained using (a) the present method and (b) Hwang's load optimization for a strain hardening material

Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 유선을 이용한 (a)의 경우가 압출 하중 최적화 금형 형상과 비교하여 변형구간의 형상이 오목하나, 길이는 거의 유사하다. Fig. 3 에는 유효응력의 분포를 비교하여 보여주고 있는데, 비슷한 크기의 최대 값과 유사한 분포를 확인할 수 있다.

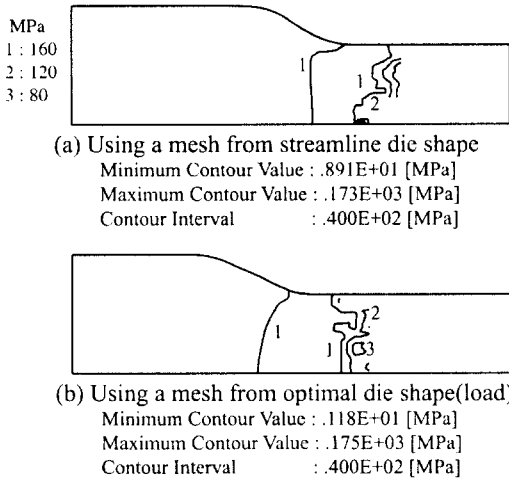


Fig. 3 Effective stress distributions

변형구역 내에서 금형과 소재가 접촉하는 면을 따라 금형에 가해지는 압력의 크기나 분포는 거의 유사하나 압력의 크기변화에 대한 안정성이 유선을 따라 설계된 금형이 좋음을 보여 주었다. 축의 중심선을 따라 σ_m (정수압응력)을 조사하였는데 최적화 금형 형상에서와 거의 유사한 분포를 보여주지만, 변형구간이 시작되기 전 부분에 정수압 응력이 유선을 따라 설계된 금형에서 훨씬 큰 폭의 응력 변화가 일어나는데 양의 값으로 이차인장을 유발하여 중심부 균열이 발생할 수 있으나 그 값이

크지 않으므로 문제가 없을 것으로 예측된다.

유효변형률 분포 또한 유사하고 거의 비슷한 값의 최대 유효 변형률 값을 보여 주었다. 그러나 여기서 유의해야 할 점은 비교대상의 최적화 금형은 압출 하중에 최적화한 것이라는 점이다. 유선을 이용하여 설계한 금형의 압출 하중이 381kN이고, 압출 하중 최적화 금형 형상의 압출 하중이 383kN으로 큰 차이가 없다.

3.2 점소성 재료

본 연구를 위해서 선택한 공정 조건들은 다음과 같다.

- 압출 금형의 입구측 직경 = 60 mm
- 압출 금형의 출구측 직경 = 40 mm
- 단면 감소비 = 55.6 %
- 펀치 속력 = 100 mm/sec
- 물성 모델 $\bar{\sigma} = 1.0 \bar{\epsilon}^{0.1}$

공정조건을 만족하는 금형 형상을 얻는 방법은 n차승 가공경화소성 재료의 시뮬레이션 방법과 동일하다. 유선을 이용한 금형 형상과 Hwang⁽⁹⁾의 genetic algorithm에 의해 $\bar{\epsilon}$ 을 목적 함수로 하여 최적화된 금형 형상에 의거하여 공정해석을 위한 유한요소격자를 각각 Fig. 4 (a)와 (b)에 보여준다.

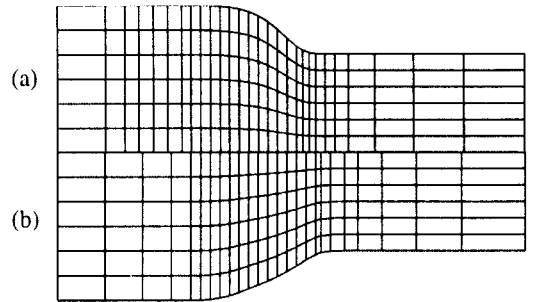


Fig 4 Comparison of the meshes obtained using (a) the present method and (b) Hwang's strain optimization for a strain-rate hardening material

두 금형 형상은 유선을 이용한 경우의 금형이 변형률을 목적함수로 최적화하여 얻은 금형 형상과 비교하여 변형구간 부분에 형상이 오목하나, 길이는 거의 유사하다. n차승 가공경화 소재에 비해서는 더 오목한 모양을 내고 있다. 유효변형률 속도분포는 Fig. 5에서 보여주고 있는데 변형구간의 출구 부위에 변형률 속도 구배가

크게 나타났고, 유선을 이용한 경우에서 약간 낮은 최대 값을 가지며 분포는 유사하게 나타난다. 유효응력 분포는 최대 값과 분포가 유사함을 확인하였고, 변형구간의 금형과 소재가 접촉하는 면을 따라 가해지는 압력의 크기나 분포는 거의 유사하고, 축의 중심선을 따라 구한 정수압 응력의 분포도 비슷하였다.

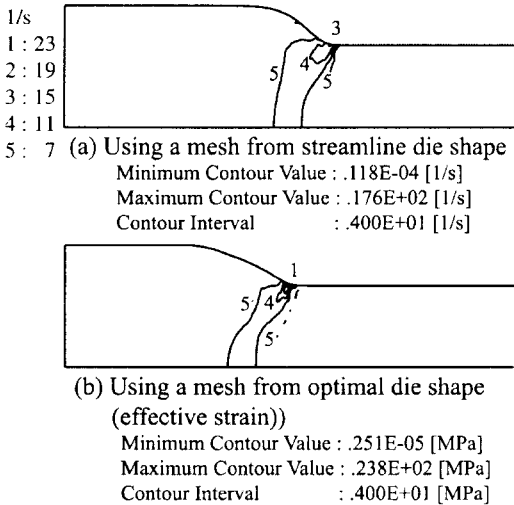


Fig. 5 Effective strain rate distributions

5. 결론

본 논문에서는 자연스러운 상태에서의 물체 변형은 변형 에너지를 최소화하는 상태를 유지하면서 진행될 것으로 가정하여 소재의 변형경로와 같은 외형을 갖도록 금형 형상을 결정하는 방법을 제시하였다. 또한 제시된 방법에 의한 금형과 Hwang의 최적화 기법에 따른 금형을 이용한 축대칭 압출공정을 유한요소법으로 시뮬레이션하여 결과를 비교하였다.

(1) n차승 가공경화성 소재를 압출하는 공정의 유한요소 해석에서는 압출 하중을 목적함수로 최적화한 금형을 이용한 해석과 비교하여 응력과 변형률, 정수압 등의 분포가 유사하였고, 압출 하중도 비슷하였음을 확인하였다.

(2) 점소성 물성 소재를 압출하는 공정의 유한요소 해석에서는 변형률을 목적함수로 최적화한 금형을 이용한 해석과 비교하여 응력과 변형률 속도, 정수압 등의 분포가 유사하였음을 확인하였다.

(3) 위와 같은 비교로부터 제시된 유선을 이용한 금형형상 결정은 제한적으로는 타당함을 검증할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) O. Richmond, M.L. Davenport, 1962, "A die profile for maximum efficiency in strip drawing", 4th US Cong. App. Mech., ASME
- (2) V.Nagpal, C.H. Billhardt, T. Altan, 1979, "Lubricated extrusion of 'T' section from aluminum, titanium and steel using computer aided techniques", J. Eng. Ind. 101.
- (3) N.S. Cho, D.Y. Yang, 1982, "Analysis of hydrofilm extrusion through optimized curved dies", Int. J. Mech. Sci. 24 No.10, pp. 589~595.
- (4) K.T. Chang and J.C. Choi, 1971, "Upper Bound solution to Extrusion problems through Curved Died", Proceeding of the 12th Midwestern Mech. Conf., pp. 383~396.
- (5) J. Kusak, E.G. Thompson, 1989, "Optimization technique for extrusion die shape design", International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processing., Fort Collins, CO, pp. 644~650.
- (6) P.A. Balaji, T. Sundarajan, G.K. Lai, 1991, "Viscoplastic deformation analysis and extrusion die design by FEM", J. Appl. Mech. Trans. ASME 58, pp. 644~650.
- (7) S. Roy, S. Ghosh, R. Shivpuri, 1996, "Optimal design of process variables in multi-pass wire drawing by genetic algorithms", J. Manuf. Sci. Eng. 118 pp. 224~251.
- (8) R. Duggirala, R. Shivpuri, S. Kini, S. Ghosh, S.Roy, 1994, "Computer aided approach for design and optimization of cold forging sequences for automotive parts", J. Mater. Proc. Technol. 46, pp. 185~198.
- (9) J.S. Chung, S.M. Hwang, 1997, "Application of a genetic algorithm to the optimal design of the die shape in extrusion", J. Mater. Proc. Tech. 72, pp. 69~77.