

알루미늄 압출공정에서의 변형이방성에 대한 연구

이창희* · 양동열*

Deformation Induced Anisotropy in Profile Extrusion of Aluminium Alloys

C. H. Lee and D. Y. Yang

Abstract

Extruded Profiles of Aluminum alloys have been widely used as parts and frames in mechanical and construction structures. Nowadays, mechanical processing of extruded Al alloy profiles is often employed for various industrial applications. Especially, the bending process is more and more applied and the process is greatly influenced by the distributed mechanical properties in the extruded profiles.

Due to large reduction of area or extrusion ratio in ordinary production of extruded profiles, anisotropy is naturally induced by large severe deformation during the extrusion process. Therefore, the anisotropic properties play a great role in the bending process, as a post processing of extruded profiles and errors will be involved when the extruded profiles are treated as isotropic material, ignoring the induced anisotropy in the thin-walled extruded product. In the present work, the anisotropic material change is simulated, as a simplified method, employing Barlat's six-component yield criterion in the rigid-plastic finite element method. Finite element computations are carried out for extrusion of a thin-walled part.

Key Words : Extrusion, Finite Element Method, Deformation Induced Anisotropy

1. 서론

소성가공 공정은 금속을 성형하는 여러 공정중의 하나로써 재료의 손실을 최소화하면서 좋은 품질의 제품을 얻어낼 수 있는 장점이 있어, 여러 분야에서 폭넓게 사용되고 있는 공정이다. 이 중 특히 알루미늄 압출공정은

일정한 단면형상을 가지는 제품에 대해 높은 생산성과 품질, 가격 경쟁력 등을 보장하기 때문에 자동차나 건설 구조물 등의 생산에 많이 사용되어지는 효과적인 공정이다.

지금까지의 연구에서는 알루미늄 압출공정에 유한요소법을 도입하여 근사적인 거동을 묘사하는 해를 구해내고

* 한국과학기술원 기계공학과

이를 이용하여 공정에 대해 검토함으로써 공정의 개선이나 품질의 평가등에 효과적으로 사용하여 왔다. 그러나 지금까지의 연구가 강소성 유한요소법의 도입을 통한 재료의 거시적인 변형 거동에 의한 것이었다면, 본 연구에서는 알루미늄이라는 재료의 금속적, 재료적인 특성에 대해 이해하고, 내부 조직이 변형이나 온도 등의 외부 조건에 의해 변화할 수 있는 가능성에 대해서도 검토가 가능하도록 하는 방향으로 진행함을 그 목적으로 한다. 그러한 내부 조직에 대한 접근의 하나로 재료의 이방성을 들고 이에 대한 고려를 할 수 있도록 한다. 이를 위해서는 Barlat등이 제안한 항복식을 도입하고, 이를 이용하여 강소성 유한요소법의 약점중의 하나인 응력 계산의 신뢰성 개선에 대한 효과를 기할 수 있도록 한다.

2. 알루미늄 압출 공정 해석

2.1 압출공정의 유한요소 해석

유한요소 해석은 고체의 변형 문제, 열전달문제 등 자연계의 여러 가지 공학적인 문제를 수치적으로 모델링하고 이를 가상실험 함으로써 실제적으로 유용한 정보를 제공해준다. 소성가공 공정의 유한요소 해석에 관해서도 그간 많은 연구가 이루어져 실제적인 문제를 해석하고 해석 결과를 공정의 설계 및 개선에 응용할 수 있는 수준에 이르렀다. 유한요소법에 의한 공정의 가상실험을 통해 공정의 특성인 공정 중 재료의 변형형상, 내부에서의 변형률 및 응력 분포, 성형 하중, 소재와 금형의 온도 분포 등을 미리 알 수 있게 된다. 그러므로, 이를 이용하면 공정의 문제점을 진단하고 개선할 수 있게 되어 보다 효율적인 공정 및 금형의 설계가 가능하게 된다.

압출공정을 해석하기 위해서는 공정 중 재료의 거동을 묘사할 수 있는 재료 모델을 설정해 주어야 한다. 압출공정은 금속의 소성변형을 유발하는데, 이러한 소성가공공정의 효과적인 해석을 위해서 강소성 유한요소 모델링을 사용하였다. 이를 이용하면 신속하고 정확한 공정의 수치모사가 가능하다.

2.2 공정에 따른 미세 구조의 변화

일반적으로 금속들과 중합체들은 그들의 구조가 상당히 바뀌는 변형에도 충분히 견뎌낼 수 있는 유일한 재료이다. 변형에 의해 생긴 변화는 특히 금속에서만 언급하도록 한다. 주철주괴로부터 금속박판, 봉 그리고 로드 스톱을 만들기 위해서는 주괴를 일정한 공정을 통해 변형시켜 주어야 한다.

이러한 변형 공정은 크게 압연, 단조, 압출 등을 들 수

있고, 모든 공정을 통해 전위가 결정립들을 통과해 감으로써 결정립의 모양이 바뀐다. 미끌어짐계를 가로질러 결정립을 통해 지나가는 전위들은 서로에게 영향을 미치며 얽혀진 전위배열을 낳는다. 이 얽혀진 전위들은 더욱 전위들의 통과를 방해하고 결정립들을 변형시키기 어렵게 만든다. 이 경화공정을 변형경화라고 하는데, 그 이유는 금속들이 변형되었을 때 일어나기 때문이다. 즉 결정립들의 방향성이 변형을 통해 정렬되면서 특별한 방위를 지니게 되는 것이다. 이 우선방위는 몇몇의 재료들에서 매우 지향적인 성질을 나타낸다.

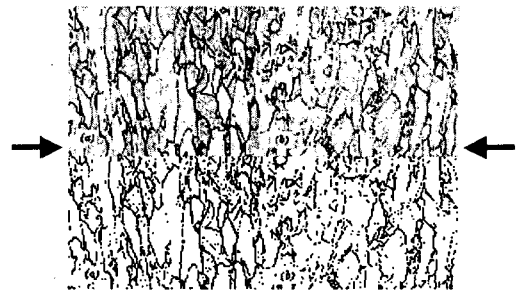


Fig. 1 Texture evolution due to hot forming

3. Barlat의 항복식에 의한 재료 이방성 예측

3.1 현상학적 항복식의 적용

재료의 소성특성은 선형적인 관계로 표현되지 않는다. 즉 고전적인 소성 이론인 유동이론에 의하면, 유동법칙은 편차응력과 유효변형률 속도의 관계에 의해 표현되어진다. 예를 들어, Levy-Mises 관계에서는 이 두 개의 텐서량이 동일한 관계로써 표현되어진다고 가정함으로써 나타내었고, 여기서 von Mises 항복식을 채택할 경우 유동식을 표현하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\epsilon_{ij} = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1)$$

이러한 항복식에 대한 접근은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 어떤 물리적인 양의 한계치를 이용하여 단성한계를 설정하는 방법이며, 이는 von Mises나 Tresca 항복식을 들 수 있다. 또 다른 방법으로는, 실험을 통해 얻어진 데이터나, 물리적인 개념에 기반을 둔 재료 모델링에 의해 얻어진 재료의 상태변수 값들을 가장 잘 근사시키는 함수를 항복식으로 선정하는 방법이다. 이는 Hershey나 Hosford에 의해 제안되어진 방법으로 현상학

적 항복식이라고 불리기도 한다.

$$\Phi = |S_1 - S_2|^m + |S_2 - S_3|^m + |S_3 - S_1|^m = 2 \bar{\sigma}^m \quad (2)$$

본 연구에서는 이러한 현상학적 항복식의 접근방법중의 하나인 Barlat의 항복식을 사용하도록 한다. 현상학적인 항복식은 미세구조를 기반으로 하는 계산의 결과로부터 바로 나오지는 않는다. 그러나, 그런 항복식들은 다결정 집합체의 결정립조직으로부터 항복면을 계산해 낼 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 소성변형과 같이 변형량이 큰 영역에 대해서도 안정성이 검증되어진 변형률 속도 기반 항복식을 압출공정의 해석에 적용하도록 한다.

3.2 변형률 속도기반 항복식의 수식화

소성 변형률 속도는 편차면에서 정의되어지기 때문에, 변형률 속도를 선택하는 것은 이 포텐셜의 미분치가 편차응력과 연관되어짐을 보장할 수 있다. 이러한 배경을 이용한 변형률 속도기반 항복식을 이방성 재료에 대해 확장하면 다음과 같은 순서에 의해 표현할 수 있게된다. 일반적으로 직교 대칭성을 지닌 이방성 재료에 대한 현상학적인 변형률 속도 포텐셜은 앞절의 응력기반 항복식의 경우에서와 같이, 등방성 항복식을 다음의 절차에서와 같이 확장시킴으로써 구해낼 수 있다.

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & c_6 \dot{\epsilon}_{12} & c_5 \dot{\epsilon}_{31} \\ c_6 \dot{\epsilon}_{12} & L_{22} & c_4 \dot{\epsilon}_{23} \\ c_5 \dot{\epsilon}_{31} & c_4 \dot{\epsilon}_{23} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } L_{11} &= \frac{c_3(\dot{\epsilon}_{11} - \dot{\epsilon}_{22}) - c_2(\dot{\epsilon}_{33} - \dot{\epsilon}_{11})}{3} \\ L_{22} &= \frac{c_1(\dot{\epsilon}_{22} - \dot{\epsilon}_{33}) - c_3(\dot{\epsilon}_{11} - \dot{\epsilon}_{22})}{3} \\ L_{33} &= \frac{c_2(\dot{\epsilon}_{33} - \dot{\epsilon}_{11}) - c_1(\dot{\epsilon}_{22} - \dot{\epsilon}_{33})}{3} \end{aligned}$$

이 행렬은 여섯 개의 변형률 속도 성분을 지니고, 1,2,3 세 축에 대한 직교 대칭성의 특성을 갖는 재료에 대해 정의된다. 여기서 여섯 개의 상수 c_i 는 재료의 이방성을 표현하는데 사용된다. 이 행렬의 특성식에 대한 해는 Cardan의 풀이법을 이용하여 구해낼 수 있으며, 구해진 특성값을 이용하여 항복식 포텐셜 Ψ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi = |\dot{\epsilon}_1|^m + |\dot{\epsilon}_2|^m + |\dot{\epsilon}_3|^m = 2 \cdot \dot{\epsilon}_e^m \quad (4)$$

여기서 유효변형률 속도 $\dot{\epsilon}_e$ 는 단축인장 평면변형시의 변형률 속도를 통해 정의되어진다. 항복 포텐셜 면의 응력에 대한 직교성을 이용하면, 이렇게 수식화된 소성 포텐셜의 구배를 통해 편차응력항을 다음에서와 같이 구해낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \alpha \frac{\partial \Phi}{\partial \epsilon_{ij}} = \alpha \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\epsilon}_k} \left(\frac{\partial \dot{\epsilon}_k}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \epsilon_{ij}} + \frac{\partial \dot{\epsilon}_k}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \epsilon_{ij}} \right) \quad (5)$$

이상과 같이 하면 이방성 재료의 대변형 예제에 대해 응력을 구해낼 수 있게 되며, 이를 이용하면 강소성 재료에 대해서도 타당성있는 응력성분을 구해낼 수 있는 개선 가능성을 지닌다.

3.3 변형에 의한 이방성의 예측

압출공정에 의한 변형 이방성을 예측하기 위해 다음의 Fig. 2에서 소개된 순서대로 접근하였다.

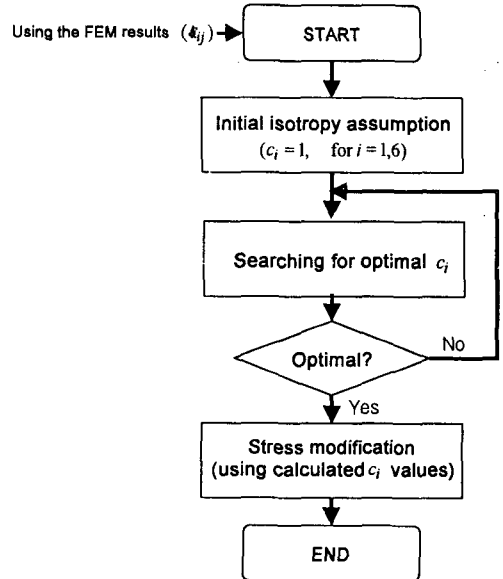


Fig. 2 Algorithm for anisotropic coefficient prediction

압출에 사용되는 초기 소재인 빌렛은 특별한 처리를 가하지 않은 상태라면, 주로 용융을 통해 제조된 후 충분한 열처리를 통해 균질화 된 상태이므로 초기 등방성을 가정할 수 있다. 재료의 초기등방성($c_i = 1$)을 가정

한 후, 이 재료가 일정한 공정을 거치면서 다음의 안정적인 방향성의 상태를 찾아가게 되고, 이것을 적당한 최적화 방법을 도입하여 유추함으로써 이를 통해 재료의 이방성 계수를 계산할 수 있게 된다. 이때 재료의 소성 포텐셜을 공정의 변형률 속도를 통해 수식화한 Barlat의 93년도 항복식을 사용함으로써 재료의 큰 소성변형 영역에 대해서도 안정화를 기할 수 있도록 하였다. 이때 도입한 재료의 항복식은 (4)식과 같으며, 재료는 초기 등방성 상태를 가정한다.

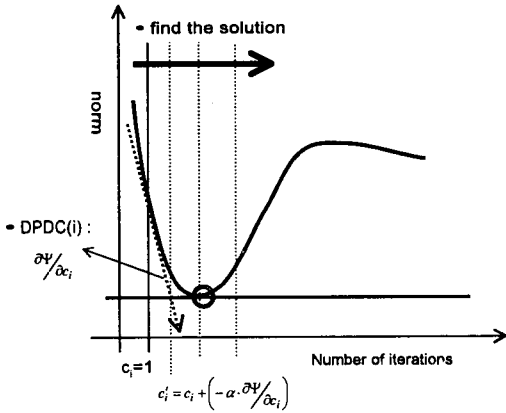


Fig. 3 Searching for optimal values

이때 다음의 안정적인 이방성 상태를 찾기 위해 그 변형의 경로를 설정해야 하는데, 재료가 변형을 통해 초기 등방성 상태에서부터 바로 다음의 이방성 상태로 전이하게 될 때, 그때의 경로는 Fig. 3과 같이 가장 구배가 큰 방향으로 움직이게 됨을 가정하도록 하였다. 따라서 재료의 이방성 계수는 다음의 식에서와 같은 방향으로 변화한다고 할 수 있다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial c_i} = \frac{\partial \Psi}{\partial \xi_k} \left(\frac{\partial \xi_k}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial c_i} + \frac{\partial \xi_k}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial c_i} \right) \quad (6)$$

이때 항복면을 찾기 위해 다음의 식에서와 같은 탐색 기법을 도입하였으며, 적절한 환산인자, α 를 도입하여 찾아갈 수 있도록 하였다. 이렇게 찾아진 안정화된 c_i 를 이용하여 안정화된 항복면을 구해 낼 수 있게 된다.

$$m = \frac{\partial \Psi}{\partial c_i} \quad (7)$$

$$c'_i = c_i + (-\alpha \cdot m) \quad (8)$$

4. 예제적용 및 고찰

본 수식화를 강소성 유한요소법에 도입하여 적용한 후, 이의 효과를 확인하기 위해 평균형 압출공정에 대해 적용하여 보았다. 본 그림에서와 같은 C-형 압출 예제에 대해 적용한 후 그 결과에 대해 고찰해 볼 수 있도록 한다. 이때 해석을 위해서 육면체 요소를 사용하였으며, 사용된 소재는 Al6061재료이고, 이의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 53.60 \bar{\epsilon}^{-0.0826} \quad (\text{MPa}) \quad (9)$$

이렇게 해석을 통해 얻어진 이방성 계수는 다음의 Fig. 4에서와 같이 분포를 구할 수 있었으며, 이를 기존의 이방성 척도로 많이 사용되어지는 R-값과 비교하여 고찰할 수 있도록 하였다. 이방성 계수와 변형률 속도를 비교하여 살펴 본 결과에 의하면, 변형률 양과 변형 이방성의 유도가 매우 밀접함을 확인 할 수 있었다. 또한 연구를 통해 등가 R-값과의 비교도 이루어 보았는데, 이를 통해서 변형의 특성에 따라 방향성이 다르게 유도되어짐을 확인 할 수 있었다.

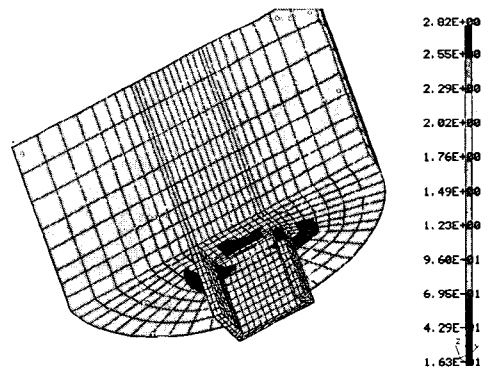


Fig. 4 Distribution of effective value of anisotropic coefficient

이상에서와 같이 Barlat의 항복식을 압출 공정에 적용시켜, 변형을 통해 유도되는 이방성을 예측하는 방법에 대해 고찰하였다. 항후의 연구를 통해서는 이를 실제의 예제에 적용시켜보고, 이방성의 유추를 보다 효과적으로 진행할 수 있도록 해야 할 것으로 생각된다. 또한, 실험을 통해 이를 검증하고 그 효용성에 대해 검토해 볼 수 있도록 할 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) Hosford, William F., 1993, The mechanics of crystal and textured polycrystals, Oxford Univ. press, NY
- (2) Yang, D.Y., Lee, C.M. and Yoon, J.H., 1989, "Finite element analysis of steady-state three dimensional extrusion of sections through curved dies", Int. J. Mech. Sci., Vol.31, p.145
- (3) Barlat, F., Lege, Daniel J. and Brem, John C., 1991, "A Six-component yield function for anisotropic materials", Int. J. of Plasticity, Vol.9, p.693.