한국소성가공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집 pp.86~89

평금형 압출공정에 대한 변형이방성 예측 알고리즘의 적용

이창희* · 양동열* · 이용신**

Observation of the Deformation-Induced Anisotropy in the Square-Die Extrusion Process

C. H. Lee, D. Y. Yang and Y. S. Lee

Abstract

Due to extremely 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 post processing of extruded profiles, such as in bending. Moreover, undesirable deformation will be involved when the deformation-induced anisotropy is ignored. In order to observe the deformation-induced anisotropy of the thin-walled product, the proposed algorithm is applied to some chosen industrial extrusion processes. In the present work, the method for prediction of deformation-induced anisotropy employing the Barlats six-component yield potential to the rigid-plastic finite element method is proposed. The proposed algorithm is verified with the comparison to the crystallographic texture analysis, and then applied to the C-section extrusion process using a square die. The predicted anisotropy is then compared with the experimental and computational observations for validating the proposed algorithm.

Key Words : Deformation-Induced Anisotropy, Barlat's Six-Component Yield Potential, Rigid-Plastic Finite Element Method

1. 서 론

압출, 인발, 단조 등과 같은 금속 성형 공정에서, 소성변형은 재료의 기계적 성질을 변화시키는 가장 중요한 원인중의 하나가 된다. 변형 공정을 통해, 재료의 미끄럼계(slip system)의 방향이 변화하게 되며, 이는 어떠한 특정한 우선방위(preferred orientation)를 형성한다. 변형에 적응되어 형성되는 이러한 우선방위는 '변형 집합조직(deformation texture)'이라고 불리며, 이는 변형에 의해 재료에 형성되는 이방성과 매우 밀접한 관계를 지닌다. 변형공정을 통해 유도되는 이방성은 재료의 기계적 성질에 중요한 영향을 끼치며, 이는 공정의 성형성에 중

* 한국과학기술원 기계공학과
** 국민대학교 기계공학과

요한 인자가 된다.

유한요소 해석에서 재료 이방성을 고려하기 위해서, 이방성은 여러 방법의 구성방정식을 통해 표현 할 수 있 이방성은 여러 방법의 구성방정식을 통해 표현 할 수 있다. 기존의 금속에서의 소성변형을 표현하기 위한 구성방적식은 항복식, 응력-변형률 관계식 (또는 변형경화), 직교성(normality)을 만족하는 유동응력식의 세 가지 부분으로 이루어진다. 지금까지의 연구에서는, 이방성 특성은 재료의 이방성을 잘 묘사할 수 있는 적절한 항복식의 선정을 통해 표현할 수 있다고 보고되어져 왔다.

본 연구에서는 실제적인 소성가공공정에서의 재료 변형에 따른 변형이방성의 유도를 예측할 수 있는 방법을 제안하고, 그 타당성을 검증한 후, 이를 실제의 평금형 압출 공정에 적용하여 변형 이방성을 예측하도록 한다.

2. 변형 이방성 예측 알고리즘

2.1 알고리즘의 소개

본 연구를 통해 제안한 변형 이방성 예측 방법은 Barlat의 현상학적 항복식의 이방성 계수를 예측함으로써 고려할 수 있도록 하였다. 제안된 방법에 의하면 일반적인 소성가공 공정의 해석에서 편리하게 적용됨으로써, 변형 공정을 통해 발생하는 이방성을 매우 적은 계산량만으로 예측이 가능하게 한다. 따라서, 본 연구에서 제안된 방법은 소성 가공 공정에서 변형을 통해 유도되는 이방성을 예측하기 위한 매우 편리한 방법이라고 할 수 있다. 제안된 알고리즘은 다음의 과정을 따른다.

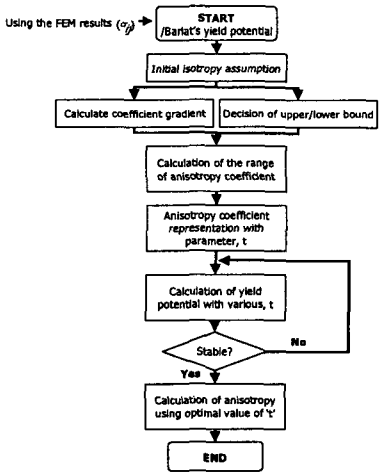


Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

2.2 이방성 예측 알고리즘의 수식화

Barlat의 응력기반 항복식에서 이방성 계수에 대한 항복식 구배를 계산하고, 이를 이방성 계수의 주된 변화방향으로 가정한다. 이때, 항복면은 일정한 변형 상태에서의 상계와 하계사이에서 변화한다고 볼 수 있으므로, 본 연구에서는 다음의 식 (1)에서와 같이, 일정한 범위 내에서의 이방성 계수의 변화를 고려한다.

$$R_{\Phi,\,Tresca} \le R_{\Phi,\,Barlat}\left[\frac{\partial \Phi}{\partial c_i}\right] \le R_{\Phi,\,von-Mises} \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial \Phi}{\partial c_i}\right] \equiv \left(\frac{\partial \Phi}{\partial c_i} \Big/ \left\|\frac{\partial \Phi}{\partial c_i}\right\|\right) \quad (2)$$

식 (1)에서 이방성 계수의 변화량은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta c_i = \Delta c_{lower} + t(\Delta c_{upper} - \Delta c_{lower}) \quad (3)$$

여기서, Δc_{lower}와 Δc_{upper}는 식 (1)에서 계산되고, 매개변수 t는 0과 1사이의 범위에서 결정된다. 따라서, 이방성 항복식에 대한 계수의 변화는 매개변수 t만으로 나타낼 수 있다. 2차원 X-Y 평면상에서, 매개변수의 변화에 따른 항복면의 변화를 관찰하면 Fig. 2와 같다.

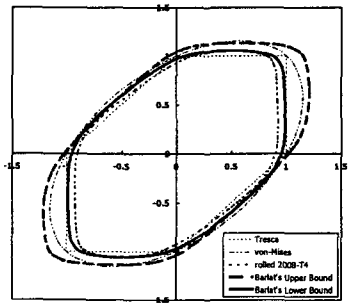


Fig. 2 Change of yield potential with variation of param -eter , t

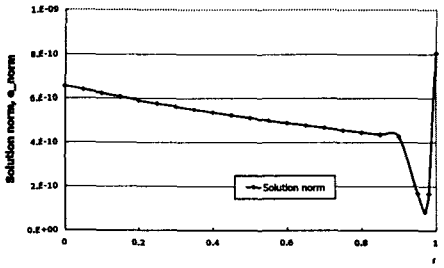


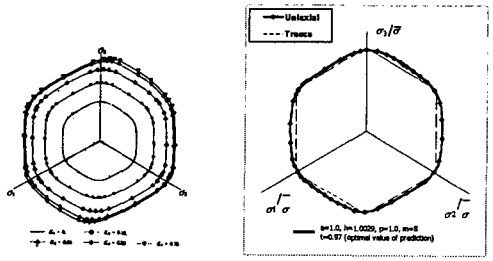
Fig. 3 Determination of the optimal value of parameter

Fig. 3은 식 (4)와 같은 특정한 응력상태에 대해 매개변수의 변화에 따른 해의 노음의 변화를 나타낸다. 이를 통해 0.97을 안정적인 항복면에 대한 매개변수 값으로 정할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

2.3 단순 변형 모드에 대한 검증

본 연구를 통해 제안된 알고리즘은 단축인장과 순수전단 응력 상태에 대해 적용하고, 예측된 결과를 결정학적 조직 해석(crystallographic texture analysis)에 의한 결과와 비교함으로써, 그 타당성에 대해 검증하였다. 다음의 Fig. 4는 제안된 이론을 단축인장 응력상태에 대해 적용한 결과를 비교한 그림이다. 두 개의 그림에서 가해진 변형에 의해, 항복면이 변화경향이 상당히 일치하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Texture analysis (b) proposed algorithm
Fig. 4 Comparison of change in yield potential under the uniaxial stress state

3. 평금형 압출 공정에의 적용

3.1 평금형 압출 공정의 고찰을 위한 인자

평금형 압출은 다음과 같이 개략적으로 나타낼 수 있으며, 이는 중실형 제품의 생산을 위해 매우 효과적으로 사용되는 공정이다. 본 공정을 통해 유도되는 압출 변형 이방성을, 평판에서의 실험에 의한 결과와 비교하기 위해 유효 영향 영역과 영역 선정 인자에 대해 제안한다.

평금형 압출에서 대부분의 소성변형이 압출구를 통해 이루어지므로, 압출구 부근에서 유도되는 변형 이방성이 가장 주도적으로 영향을 미칠 것을 예상할 수 있는데, 이를 고려하여 압출구 부근의 영역을 유효 영향 영역(region of influence)이라 하였다. 그리고, 단면 형상에 대해 다음의 식 (5)와 같은 인자를 제안하므로써, 변형에 의해 유도되는 이방성이 평판에서 유도되는 경향과 유사할 것으로 예상되는 부분을 선정하고자 하는 영역 선정 인자(region sampling factor)를 제안한다.

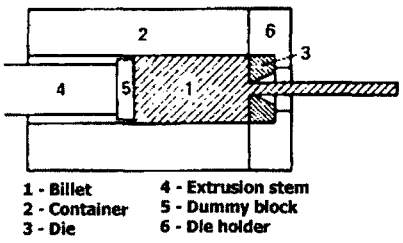


Fig. 5 Schematic diagram of square-die extrusion

$$RSF_e = \left| \left(\frac{1}{\left(\bar{\varepsilon}_e / \bar{\varepsilon}_{\max} \right)} \right)_i - \left(\frac{1}{\left(\bar{\varepsilon}_e / \bar{\varepsilon}_{\max} \right)} \right)_{i-1} \right| \times eFactor \tag{5}$$

위의 식에서 *eFactor*는 다음의 **Fig. 6**에서와 같이 정의되며, 이는 제품의 기하학적인 특성에 대한 고려 인자이다.

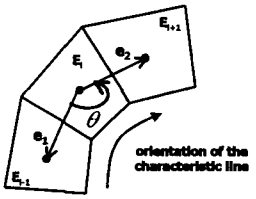


Fig. 6 Definition of the *eFactor*

3.2 C-형 단면에 대한 적용 및 고찰

본 연구에서는 다음의 Fig. 7과 같은 중실형 C-자형 단면 형상에 대한 평금형 압출 공정을 고려하였으며, 이 때 발생하는 변형 이방성을 기존의 연구에서 평판 압출에서의 유도되는 변형 이방성과 비교함으로써 고찰하였다.

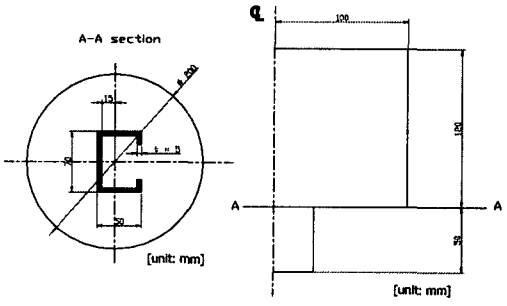


Fig. 7 Schematic diagram of C-section extrusion

다음의 Fig. 8은 강소성 유한요소 해석을 이용한 C-형 압출공정의 해석결과이며, Fig. 9는 본 연구를 통해 제안된 조건을 이용하여 C-형 제품에서의 변형 이방성을 예측한 결과를 나타낸다.

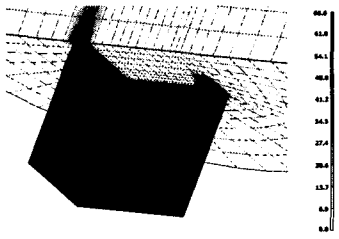


Fig. 8 Distribution of outlet velocity [mm/sec]

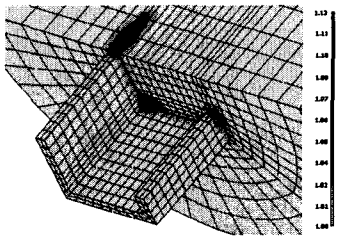


Fig. 9 Distribution of the effective anisotropic coefficient

또한, 이렇게 예측된 결과를 실험에 의한 결과와 비교하기 위해 영역 선정 인자를 고려하면, 다음의 Fig. 10에서처럼, 평판 압출에서의 이방성 유도와 유사한 경향을 보일 것으로 예상되는 선정된 영역을 구할 수 있다.

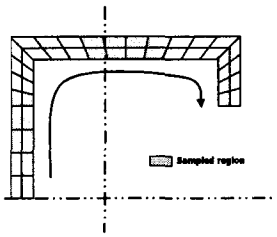


Fig. 10 Sampled region of the extruded C-section

이렇게 선정된 영역에서, 압출 방향으로 정규화된 항복 응력을 평판 압출 실험에서의 항복응력과 비교하여 보았다. Fig. 11은 비교를 통해 실험에 의한 결과와 예측에 의한 결과가 상당히 일치되고 있음을 나타내고 있다. 또한, 본 연구를 통해 제안된 변형 이방성 예측 알고리즘에 의한 결과를 실제적으로 물리적인 모델링에 의거한 결정 소성학 모델에 의한 결과와 비교하기 위해, 특정 요소에 대한 항복면을 비교함으로써 그 결과의 타당성을 고찰할 수 있다. Fig. 12에서도 볼 수 있듯이, Taylor모델에 기반을 둔 결정 소성학 항복식과 본 연구에 의해 제안된 변형 이방성 항복식의 거동이 상당히 일치하는 것을 확인할 수 있다.

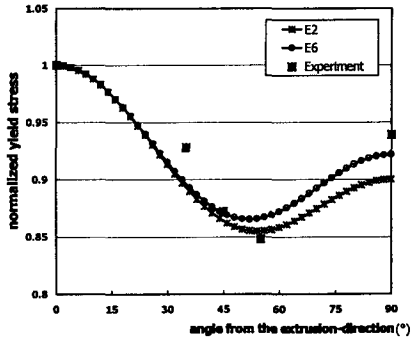
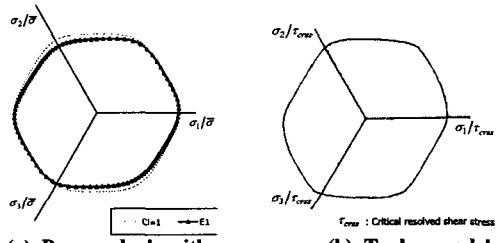


Fig. 11 Comparison of yield stress with the experimental results



(a) Proposed algorithm **(b) Taylor model**

Fig. 12 Change of yield locus of a specified element

4. 결 론

이상에서 본 연구를 통해 제안된 현상학적 항복식을 이용한 변형 이방성 예측 알고리즘의 타당성에 대해 검증하여 보았으며, 예측 알고리즘을 평금형을 이용한 C-형 단면 압출에 적용시킴으로써 그 효용성에 대해 고찰하여 보았다. 평금형을 이용한 압출공정을 효과적으로 고려하기 위해, 유효 영향 영역 개념과 영역 선정인자를 제안하였으며, 영역 선정 인자에 의해 선정된 영역에서의 이방성 예측 결과를 실제 실험 및 결정소성학 이론에 근거한 평판 압출에서의 변형 이방성 예측 결과와 비교함으로써 그 타당성에 대해 고찰하여 보았다.

참 고 문 헌

(1) Barlat, F., Lege, D. J. and Brem, J. C., 1991, "A six-component yield function for anisotropic materials", Int. J. Plasticity, Vol. 7, p. 693.

(2) Fjeldly, A. and Roven, H.J., 1997, Phenomenological modeling of the mechanical anisotropy in AlZnMg extruded profiles, Mater. Sci. and Engineering A, Vol. 234-236, p. 606.