

## 밀리봉의 압출/인발의 유한요소해석

김용일\* · 이용신\*\*

### Finite Element Analysis for Extrusion/Drawing of Milli-Size Bar

Y. I. Kim and Y. S. Lee

#### Abstract

A finite element analysis model is suggested for analysis of forming process of milli structure whose size is from a few hundreds  $\mu m$  to a few  $mm$ . In this paper, finite element formulation which assemble crystal plasticity theory considering texture development with damage mechanics is developed, since orientation development and growth of micro voids became the primary factors for deformation aspects in large deformation of milli structure. Applying to, extremely, extrusion process of single crystal and extrusion/drawing process of polycrystal milli-size bar, extrusion force, preferred orientation, and damage evolution are examined to understand the characteristics of deformation of milli-size bar.

**Key Words** : Micro Forming, Crystal Plasticity, Damage, Finite Element Method

#### 1. 서 론

최근의 전자제품, 통신제품 및 정밀의료 부품들은 초소형화, 초정밀화 되는 경향이 있다. 이러한 제품들에 쓰이는 다양한 형태의 밀리단위의 미세구조 부품(이후 밀리부품으로 초칭한다.)을 경제적으로 생산할 수 있는 미세소성가공이 새롭게 높은 관심을 끌고 있다. 밀리부품은 치수가 작아 성형후에 치수정밀도를 높이기 위해서는 다단계의 미세 복합성형 공정 시스템을 요하게되므로

제품 생산라인의 설계에는 컴퓨터나 시험을 통한 예비연구가 필수적이다. 이에 미세 인발/압출, 미세단조, 미세압연등의 미세체적성형과 미세급힘, 미세드로잉과 같은 미세박판성형을 해석할 수 있는 연구가 급속히 발달하고 있는 추세이다. 밀리부품을 생산하는 미세소성가공에서는 결정립의 크기나 우선방위에 따라 성형 특성이 달라지게 되고, 결정립 경계나 내부에 존재하는 미세기공의 성장에 따라 기계적 성질의 열성화가 성형의 성공 여부를 좌우하는 중요한 요인으로 대두하게 된다. 전형

\* 국민대학교 기계설계대학원

\*\* 국민대학교 기계·자동차 공학부

적인 금속의 경우에는 결정립의 크기가 수  $\mu m$  에서 1000  $\mu m$  이고, 밀리부품은 크기가 수백  $\mu m$ 에서 수  $mm$ 정도로 단결정에서부터 수백개의 결정립 집합체의 구조를 가지므로, 본 연구에서는 다양한 구조의 밀리부품 소성가공을 결정립 우선방위와 미세결합의 성장을 반영하여 해석하는 기술을 개발하고자한다.

## 2. 이론

소성가공의 해석에서는 연성금속의 결합이 형태적인 특성으로부터 종종 기공률로 정의 되어 왔으며, 본 연구의 밀리부품의 경우에도 크기가 수  $\mu m$  이하인 미세기공의 국부적인 분포를 상태변수(결합)로 다룰 수 있다. 한편 우선 방위의 영향은 밀리부품 구조적 특성 즉 밀리부품을 이루고 있는 결정립의 갯수에 따라 Mezzoscopic 해석의 기법이 다르게되나 극한의 경우에는 기존의 단결정 성형해석 기법과 다결정론을 이용한 해석 기법이 사용된다.

### 2.1. 결합성장

본 연구에서 연성결합으로 정의되는 미세기공의 성장을 반영하는 기공률 발전식  $\dot{\phi}$ 는 Lee와 Dawson이 제안한 기공률 성장모델이 이용되었으며 유효변형률 속도, 기공률 그리고, 정수압 응력 ( $\sigma_m$ )을 변형정화를 모사하는 하드니스 ( $\sigma^*$ )로 나눈 비의 함수로서 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\dot{\phi} = C_1 \frac{\phi}{1-\phi} \text{Exp}(C_2 \frac{\sigma_m}{\sigma^*}) d_e \quad (1)$$

여기서, C1과 C2는 재료 고유의 상수이다. 기공률의 성장은 정수압응력 자체보다는 소재의 소성변형에 대한 저항을 나타내는 하드니스와의 비에 지수함수로 비례하는 것으로 표현하여 소성유동이 작은 변형에서도 기공률의 성장을 정확히 예측할 수 있는 것이 특징이다.

### 2.2. 결정소성학

금속내부의 슬립은 슬립면상에서 슬립방향으로 전단변형을 일으키며, 여러 개의 작용 슬립시스템에 일어나고 있는 전단변형의 조합으로 외부의 거시적 소성변형이 나타난다.

슬립시스템의 구성방정식에 결정립의 변형률속도와 슬립시스템상의 전단변형과의 관계식과 결정립에 미치는 응력과 슬립시스템상의 전단 응력의 관계식을 적용하면 단결정에 대한 응력( $\sigma^{(g)}$ )과 변형률속도( $d^{(g)}$ )의 관계식을 구할 수 있다.

$$d^{(g)} = \left\{ \sum_{a=1}^N \frac{\dot{\gamma}^{(a)}}{\hat{\tau}^{(a)}} \left| \frac{\tau^{(a)}}{\hat{\tau}^{(a)}} \right|^{(\frac{1}{m}-1)} P^{(a)} \otimes P^{(a)} \right\} \sigma^{(g)} \quad (2)$$

결정립 집합체의 거시적 소성변형은 각 결정립들의 미시적 점소성 변형의 중첩으로 나타난다. 본 연구에서는 Taylor가 제시한 바와 같이 각 결정립의 변형률속도텐서 ( $d^{(g)}$ )는 다결정집합체의 변형률속도텐서( $d$ )와 같은 것을 가정하여 결정립 집합체의 응력과 변형률 속도의 관계식을 구한다.

### 2.3. 유한요소해석

집합조직의 발전과 결합성장을 고려한 정상상태 성형공정의 오일러리안 유한요소 해석을 위해서는 선형운동량 보존식 외에도 질량보존식을 고려해야한다. 가상일률의 정리를 적용하여 선형운동량 보존식을 유한요소 이산화하고, 소재의 체적변화는 단지 미세기공의 성장에 의한 것으로 가정한 질량 보존식을 압력으로 벌칙화하여 유한요소 이산화한 후에 절점에서의 속도 {U}에 대한 식으로 정리하면 다음의 유한요소 정식을 얻는다.

$$[[K_\mu] + [K_\lambda]] \{U\} = \{F_t\} \quad (3)$$

위와 같이 각 요소에서 구한 유한요소 정식은 전영역에 걸쳐 중첩되고 표면력 벡터, 속도 등의 경계조건을 적용시켜 반복법에의해 비선형 해를 구하게 된다.

## 3. 응용

미세선재 크기의 구조적인 극단으로 다결정론을 이용한 해석과 단결정으로 이루어진 미세선재의 압출성형 해석을 시도하였다.

### 3.1. 다결정 봉재의 인발/압출

단결정론과 결합 해석을 복합한 유한요소 해석을 시도하였다. 즉 결정립의 크기가 작아 반경방향으로 수백개의 결정립이 있는 경우이다. 반경 2.5mm 인 미세봉을 다이 반각은 20°, 단면적감소는 51%가 되도록 똑 같은 공정조건을 갖는 인발/압출 공정을 해석하였다. Fig. 1에서는 성형된 봉재의 중심부와 표면에서의 집합조직과 축적된 결합을 비교하였다. 예측한 바와 같이 인발의 경우에는 [111] 방향이 소재의 축과 나란한 섬유상 집합조직이 주도적으로 나타나며, [001] 성분도 부수적으로 나타나고 있다. 표면에서는 전단 변형의 영향으로 [001] 성분이 흐트러짐을 알 수 있다. 또 인발공정에서는 인장 변형이 주도적으로 작용하여 결합도 압출공정에 비해 훨씬 크게 일어난다. 압출의 경우에는 인발과 같은 면적의 감소율에도 불구하고 집합조직의 발달이 상대적으로 작으며, 그 양상도 인발의 경우와 다르고 압축이 주도적인 변형으로 결합의 성장이 훨씬 작게 나타났다.

### 3.2. 단결정 봉재의 압출

단결정으로 이루어진 알루미늄 밀리봉재의 압출공정을 시뮬레이션 하였다. 전질의 경우와 같이 미세봉의 반경은 2.5mm로 하였으며, 20°의 다이 반각 그리고 36%의 단면적 감소율의 범위에서 미세압출성형의 변형 특성을 조사하였다. Fig. 2에서는 Case 1과 2의 초기 극점에서 소재의 [111] 방향이 압출방향과 일치하는 경우(Case 1)와 압출방향과 15° 경사진 경우(Case 2)의 각도차에 따른 [111] 극의 위치 차를 보여주고 있으며, Fig. 3에서는 미세압출에서의 Case 1과 Case 2의 결과를 비교하여 보여주고 있다. Fig. 4에서는 표면의 유선을 따라 [111]극의 방향 변화에 따른 위치의 변화를 보여주는데 변형구역의 중간 부분(위치 4)에서 가장 큰 회전(약 다이 반각 정도)을 겪고 다시 압출 방향으로 되돌아오는 것으로 예측하고 있다. 압출방향과 일치하는 중심부를 따르는 유선을 따라서는 예상한 바와 같이 극의 방향이 변화가 없었다.

Fig. 5에서는 Case2의 경우에 표면과 중앙부의 유선을 따라 [111]극이 이동하는 경로를 보여 주고 있는데, 초기에 압출방향과 15°의 경사를 갖는 소재의 [111]방향이 변형구역을 지난 후에는 압출방향과 평행하게 되는 것을 보여 주고 있다. 이와 같은 현상으로부터 단결정의 압출은 소재의 [111]방향이 압출방향에 평행하게 될 때 안정방위를 갖도록 하는 특성을 지닌 것으로 판단된다.

시뮬레이션은 Case 1이 가장 작은 압출하중을 필요로 하는 것으로 예측하고 있는데, 이는 [111] 방향이 슬립시스템들 중에서 원자의 움직임이 가장 쉬운 방향으로 단

결정 소재의 [111]극이 압출방향과 일치할 때에 요구되는 압출하중이 가장 작기 때문인 것으로 생각된다. 결합의 성장은 Case 2가 중심부를 따라서 훨씬 큰 결합성장을 나타내었다.

단결정 밀리봉의 압출성형에서 탄성변형을 무시하면 소재의 회전은 모든 점에서 같아지게 되어야 한다. 따라서 평형조건을 만족시키는 앞의 해석은 결정립 회전에 관한 단결정 기구학을 위반하게 된다. 이에 압출공정에서 초기의 우선방위를 유지하는 경우를 해석한 결과를 Fig. 6에서 보여준다. Fig. 3의 경우와 비교하여 압출하중, 결합의 분포 및 크기에 변화가 미미한 것으로 나타났다. 따라서 밀리봉의 해석에서는 초기의 우선방위가 가장 중요한 인자이고, 변형중에 우선방위의 회전을 고려한 해석은 그렇지 않은 경우보다 결합의 성장을 약간 작게 하는 것으로 판단된다.

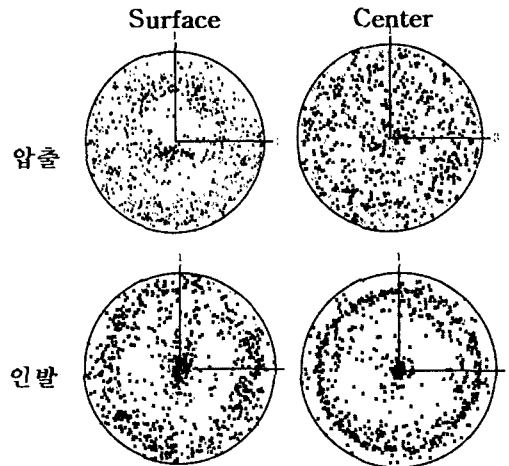
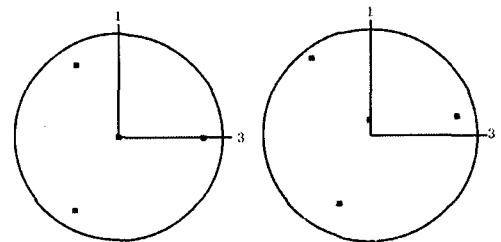


Fig. 1 Extrusion/Drawing of polycrystal milli-size bar



Case1 Case2

Fig. 2 Initial [1 1 1] pole figure

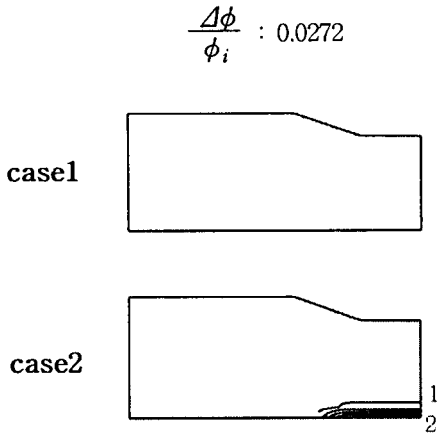


Fig. 3  $\frac{\phi}{\phi_i}$  distribution for extrusion of single crystal milli-size bar (with Euler's angle evolution)

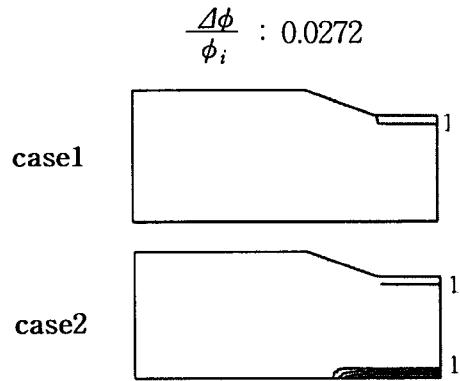


Fig. 6  $\frac{\phi}{\phi_i}$  distribution for extrusion of single crystal milli-size bar (without Euler's angle evolution)

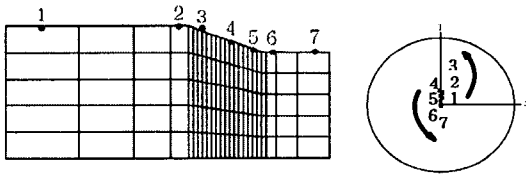


Fig. 4 [111] Pole along a Surface Streamline (case1)

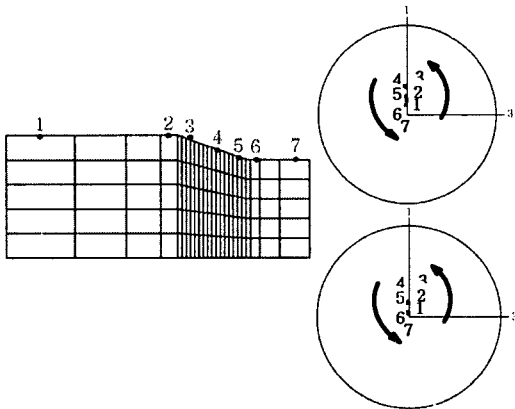


Fig. 5 [111] Pole along a Surface and a Center Streamline (case2)

### 후기

본 연구는 한국생산기술연구원(밀리구조 생산기술 개발사업)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고 문헌

- (1) Taylor, G.I., 1938, "Plastic strain in metals", J. Inst. Metals., Vol.62, pp307~324.
- (2) Kocks, U.F., 1958, Acta Metall., Vol.6, pp85-94.
- (3) Mathur, K., Dawson, P.R., 1989, Int. J. Plast., Vol.5, pp67~94.
- (4) 김응주, 이용신, 1996, 소성가공 제5권 제4호, pp297~304.
- (5) Asaro, R.J., 1983, "Crystal plasticity", J. App. Mech., Vol.50, pp921~934.
- (6) Lee, Y-S and P. R. Dawson, 1993, Mechanics of Materials, 15: 21~34.