

단결정 밀리 부품의 입체성형 해석에 관한 연구

이용신* · 김용일**

A Study on Analysis for Bulk Forming of a Single Crystal Milli-Product

Y S. Lee and Y. I. Kim

Abstract

This paper is concerned with numerical analyses for bulk forming of a single crystal milli-product, whose typical size ranges from a few hundreds μm to a few mm . The numerical formulation invoked in this paper combines the crystal plasticity theory considering texture development and the ductile damage mechanics for growth of micro voids, since orientation development and growth of micro voids become the primary factors for bulk forming of milli-size products. As applications, milli-extrusion of a single crystal round bar and milli-rolling of a single crystal plate are simulated and the results are discussed in detail.

Key Words : Milli-Forming, Milli-product, Crystal Plasticity, Damage.

1. 서 론

판재의 압연을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 본 연구에서 지칭하는 밀리 부품은 크기가 수백 μm 에서 수 mm 되는 것으로 전자제품, 통신제품 및 정밀의료 부품들이 이에 해당된다. 이러한 밀리 단위의 미세구조 부품(이후 밀리 부품으로 총칭한다.)은 주로 기계가공에 의존도가 크나, 최근에는 경제적으로 생산할 수 있는 밀리 성형가공 (Milli-Forming)이 새롭게 높은 관심을 끌고 있다. 이에 밀리 인발/압출, 밀리 단조, 밀리 압연 등의 밀리 체적성형을 해석할 수 있는 연구도 급속히 진행되고 있는 추세이다.

전형적인 금속 결정은 크기가 수 μm 에서 수 mm 에 이르므로, 밀리 부품은 단결정에서부터 수천 개의 결정으로 이루어지는 경우들로 나누어 질 수 있다. (Fig. 1 참조) 따라서 밀리부품과 결정립의 상대적인 크기에 따라 모델링 기법이 달라 지게됨을 알 수 있다. 과거에 제시한 다결정 소재 성형 해석모델은 다결정 밀리 부품 성형해석에 그대로 적용이 가능하므로, 본 연구에서는 단결정 소재의 밀리 성형 해석 모델을 개발하고자한다.

단결정 부품의 성형에 수반되는 대변형에서는 결정립 방위와 결정립 내부에 존재하는 미세기공의 성장이 지대한 영향을 미친다. 이에 결정소성학과 결함역학을 결합하는 수치해석 모델을 제시하고, 단결정 봉의 압출과 단

* 국민대학교 기계·자동차 공학부

** 국민대학교 기계설계대학원

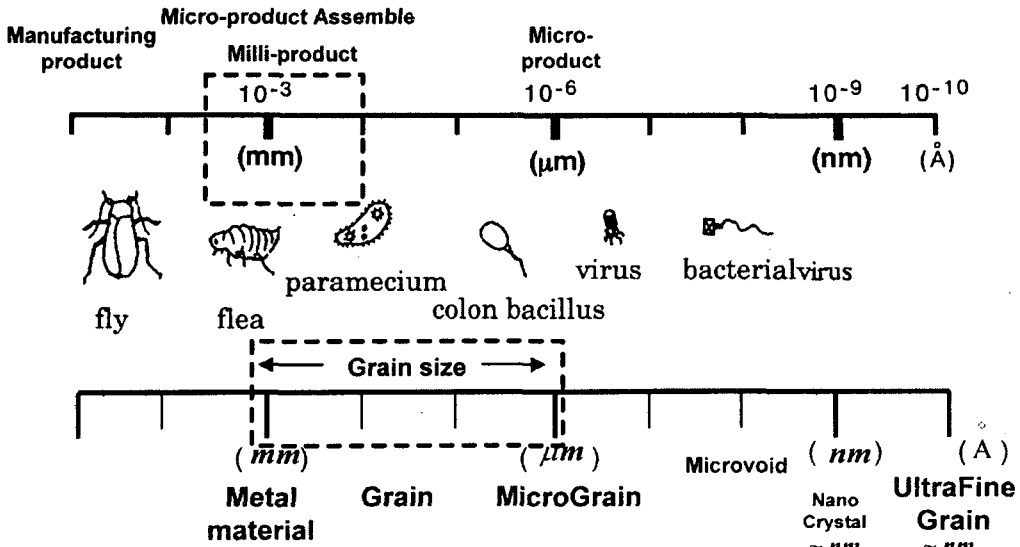


Fig. 1 Length Scale

결정 판의 압연에 적용 예를 보여주하고자 한다.

2. 이론

단결정 밀리 연성 금속 내부의 결함의 성장과 단결정 변형을 모사하는 결정 소성학을 결합하는 수치해석 모델을 간략히 소개한다.

2.1. 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 단결정 소재 내부의 임의 지점에서의 미시 응력(σ')과 변형률속도(\mathbf{d})의 관계식을 구할 수 있다.

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

위의 식에서 우측 컴플라이언스의 역행렬인 스티프니스가 유한요소해석에 필요하며, FCC 결정재의 점소성 해석에서는 12개의 슬립시스템의 작동으로 역행렬을 구하는데 수치해석상의 문제가 야기되지는 않는다. 이에 관한 상세한 유도과정은 참고문헌^(4,5)에 주어진다.

2.2. 결함성장

본 연구에서 연성결함으로 정의되는 미세기공의 성장을 반영하는 기공률 발전식 $\dot{\phi}$ 는 Lee와 Dawson이 제안한 기공률 성장모델이 이용되었으며 유효변형률 속도, 기공률 그리고, 정수압 응력(σ_m)을 변형경화를 모사하는 하드니스(σ^*)로 나눈 비의 함수로서 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\dot{\phi} = C_1 \frac{\dot{\phi}}{1-\phi} \text{Exp}(C_2 \frac{\sigma_m}{\sigma^*}) d_e \quad (2)$$

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.

2.3. 유한요소해석

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.

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

위 식에서 $[K_{\mu}]$ 는 슬립작용과 결정립 방위의 함수이고, $[K_{\lambda}]$ 와 $\{F_t\}$ 는 기공률의 함수로 비선형성을 내포하고 있어 반복법에 의해 해를 구하게 된다.

3. 응용

결합성장과 방위변화에 따른 이방성 발전을 복합 반영하는 해석 모델을 단결정 밀리봉의 압출과 단결정 밀리판재의 압연에 응용하였다.

3.1 단결정 밀리봉의 압출

단결정으로 이루어진 알루미늄 밀리봉의 압출공정을 시뮬레이션 하였다. 밀리봉의 반경은 1.25mm 로 하였으며, 20° 의 다이 반각 그리고 36%의 단면적 감소율의 범위에서 미세압출성형의 변형특성을 조사하였다. Fig. 2에서는 밀리 봉의 초기 $[111]$ 방향이 압출 방향과 일치하는 경우(Case 1)에 대하여 $[111]$ 극과 그에 상응하는 π -평면에서의 항복곡면의 변화를 표면과 중심부에서 보여주고 있다. Fig. 3에서는 같은 공정조건을 갖으나 밀리 봉의 초기 $[111]$ 방향이 압출 방향과 15° 경사진 경우(Case 2)에 해석한 결과를 보여주고 있다. Case 1의 경우에는 표면의 유선을 따라 $[111]$ 극의 방향 변화를 추적하면 변형구역의 중간 부분(위치 4)에서 가장 큰 회전(약 다이 반각 정도)을 겪고 다시 압출 방향으로 되돌아오는 것으로 예측하고 있으며 압출 방향과 일치하는 중심부를 따르는 유선을 따라서는 예상한 바와 같이 극의 방향이 변화가 없었다. Case2의 경우에는 밀리 봉의 $[111]$ 방향이 변형구역을 지난 후에는 압출 방향과 평행하게 되려는 경향을 보여준다. 이와 같은 현상으로부터 단결정의 압출은 소재의 $[111]$ 방향이 압출 방향에 평행할 때 안정방위를 갖는 것으로 예측된다.

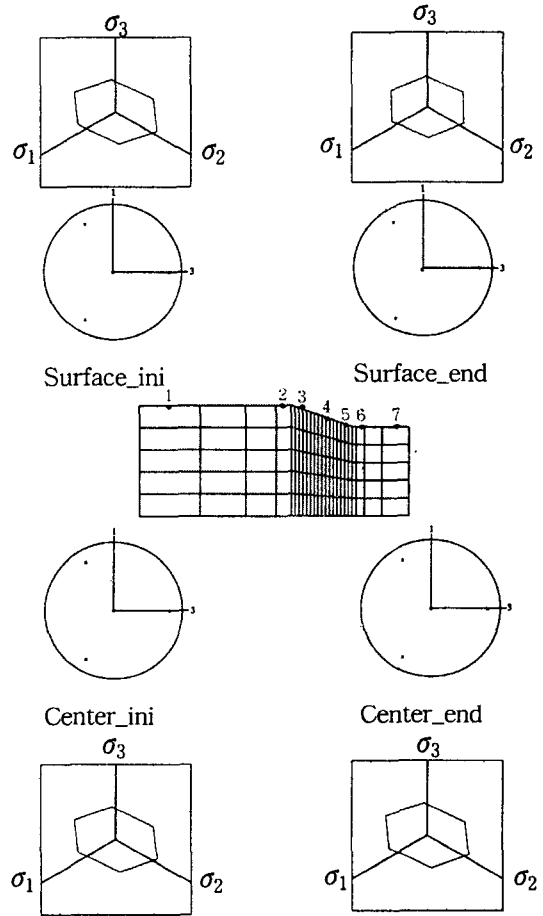


Fig. 2 Extrusion of milli-bar(Case1)

시뮬레이션은 Case 1이 가장 작은 압출하중을 필요로 하는 것으로 예측하고 있는데, 이는 $[111]$ 방향이 슬립시스템들 중에서 원자의 움직임이 가장 쉬운 방향으로 단결정 소재의 $[111]$ 극이 압출방향과 일치할 때에 요구되는 압출하중이 가장 작기 때문인 것으로 생각된다. 결합의 성장은 Case 2가 중심부를 따라서 훨씬 큰 결합성장을 나타내었다 (Fig. 4 참조).

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 해석하였는데 압출하중, 결합의 분포 및 크기에 변화가 미미한 것으로 나타났다. 따라서 밀리봉의 해석에서는 초기의 우선방위가 가장 중요한 인자이고, 변형 중에 우선방위의 회전을 고려한 해석은 그렇지 않은 경우와 큰 차이가 없는 것

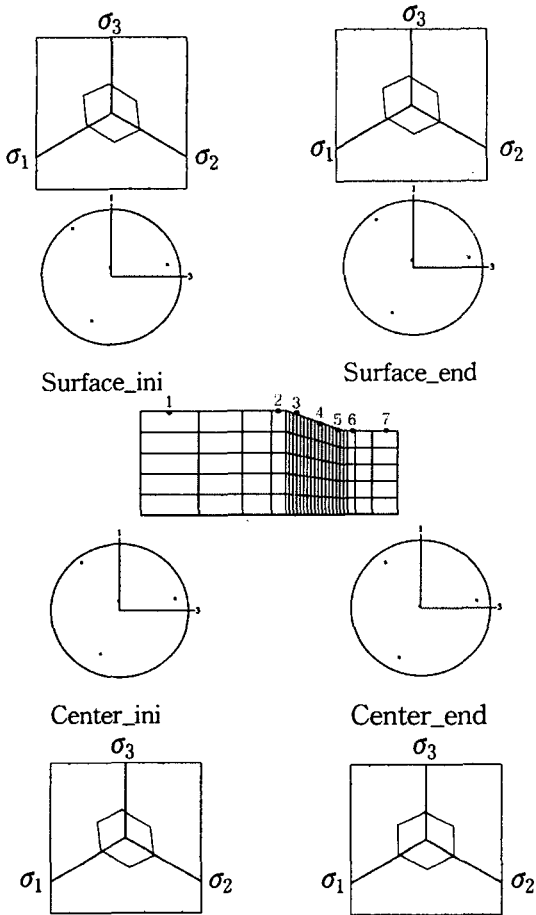


Fig. 3 Extrusion of milli-bar(Case2)

로 예측된다.

3.2 단결정 밀리판재의 압연

단결정 밀리판재를 압하율 25%의 압연 공정을 평면 변형을 해석으로 시뮬레이션 하였다. 초기 밀리판재의 [111]극이 압연방향으로 놓여 있는 경우(Case 1)과 [100]극이 압연방향으로 있는 경우(Case 2, 재결정 집합조직의 우선방위)를 해석한 결과가 각각 Fig. 5 와 Fig. 6에 보여진다.

Fig. 5에서 보이는 바와 같이 Case 1의 경우에 [111]극의 발전이 표면과 중심부에서 큰 차이가 없어 보이나 출구에서의 항복곡면은 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 예를 들어 $\sigma_3 = 0, \sigma_2 = -\sigma_1$ 인 순수전단의 하중을 받는 경우에 표면에 있는 소재는 항복 응력도 작고 변형을 증분도 σ_2 방향으로 보다 치우치게 됨을 알 수 있다. 중심부에서 두께방향으로의 큰 항복 응력은 후속 드로잉

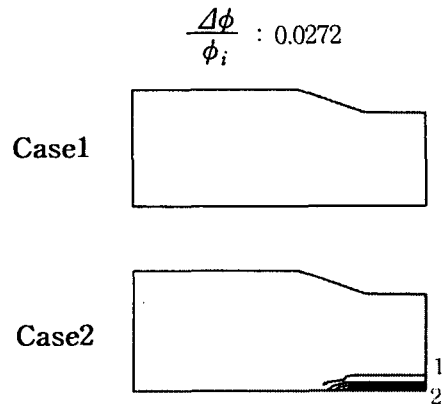


Fig. 4 $\frac{\Delta\phi}{\phi_i}$ distribution for extrusion of single crystal milli-bar

성형비를 크게하는 효과가 있을 것으로 기대된다. 반면에 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 Case 2의 경우 즉 [100]극이 압연방향으로 놓여 있는 밀리 판재는 표면과 중심부에서 모두 방위변화가 전혀 없는 것으로 나타났다. 즉 재결정 집합조직의 방위를 갖는 단결정 밀리판재는 압연된 후에도 압연 전과 같은 방향성을 유지하고 있을 것으로 예측하고 있다.

4. 결론

밀리부품의 입체성형공정을 해석하기 위하여 결정립 우선방위와 미세결함의 성장을 복합 반영하는 유한요소 정식화를 개발하고, 단결정 밀리봉의 압출과 단결정 밀리판재의 압연을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

단결정 밀리봉의 압출에서는 초기 소재의 [111] 방향과 압출 방향이 이루는 각도가 커질수록 압출하중과 결함의 성장을 증가시키고 초기소재의 [111] 방향이 압출 방향과 평행할 경우에 압출하중이 최소화되고 결함의 성장도 가장 작게 만드나 하드니스의 분포와 크기는 변화가 미미한 것으로 예측된다.

단결정 밀리판재의 압연에서는 중심부에는 평면변형을 변형이 물 접촉부에는 전단변형이 주로 있는 변형특성에 의해 표면과 중심부의 방위발전이 다를 것으로 예측된다. 그러나 재결정 집합조직의 우선방위처럼 [100]극이 압연방향을 향하는 경우에는 압연 후에도 표면과 중심부에서 모두 방위 변화가 없는 것을 예측하고 있다.

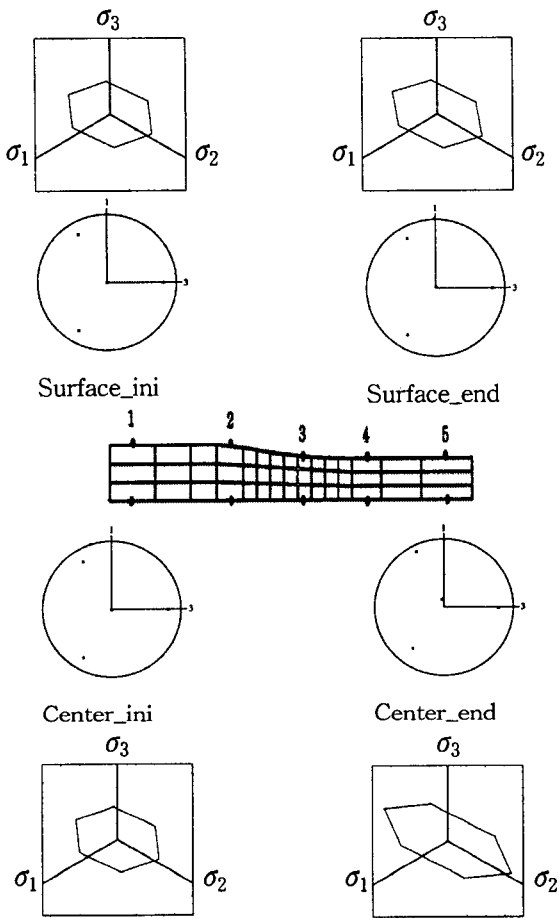


Fig. 5 Rolling of milli-plate(Case1)

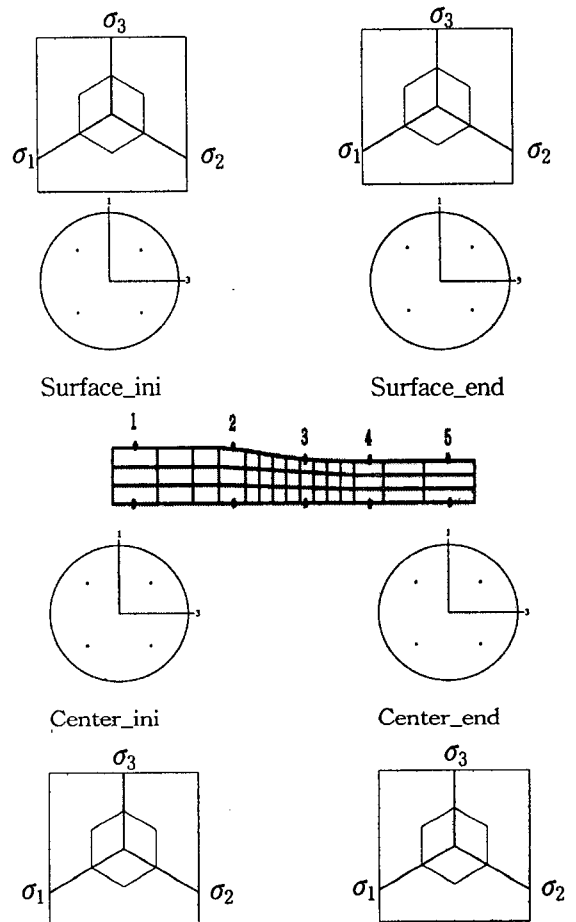


Fig. 6 Rolling of milli-plate(Case2)

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Taylor,G.I., 1938, "Plastic strain in metals", J. Inst. Metals., Vol.62, pp. 307~324.
- (2) Kocks,U.F., 1958, Acta Metall., Vol.6, pp.85~94
- (3) Mathur,K, Dawson,P.R., 1989, Int. J. Plast., Vol.5, pp. 67~94.
- (4) 김웅주, 이용신, 1996, 소성가공 제5권 제4호, pp. 297~304.
- (5) 배석용, 이용신, 1998, 소성가공 제7권 제5호, pp. 459~464.
- (6) Asaro,R.J., 1983, " Crystal plasticity", J. App. Mech., Vol.50, pp. 921~934.
- (7) Lee. Y-S and P. R. Dawson, 1993, Mechanics of Materials, 15: pp. 21~34.