

유한요소법의 입자요소를 이용한 박판 성형해석

구태완*·강범수**

Development of FE Analysis Scheme for Milli-Part Forming Using Grain Element

T.W. Ku and B.S. Kang

Abstract

This study presents a new computational model to analyze the grain deformation in a polycrystalline aggregate in a discrete manner and based directly in the underlying physical micro-mechanisms. As a result, specific characteristics have to be considered for the numerical analysis. The grains and grain boundary elements are introduced to model individual grains and grain boundary facets, respectively, to consider the size effects in the micro forming. The constitutive description of the grain elements accounts for the rigid-plastic and the grain boundary elements for elastic relationships. The capability of the proposed approach is demonstrated through application of grain element and grain boundary element in the micro forming.

Key Words : Milli-Structure, Grain Element, Grain Boundary Element, FEM, Rolling Process

1. 서 론

최근 컴퓨터 및 이동 통신과 관련된 전자 제품의 소형화 및 고성능화 추세로 인하여 초소형 제품의 수요가 크게 증가하고 있다. 기존의 금속성형 기술은 이러한 초소형 제품을 생산할 수 있는 좋은 가공법이기도 하지만, 성형 공정 설계 측면에서는 아직까지 체계적인 연구결과가 없어 경험적인 방법이나 기존의 수치해석적 방법을 이용하여 제한적으로 적용되고 있다.^(1,2)

소재의 기계적 성질은 제품의 크기와 관련이 있다. 비록 제품의 크기가 작아지더라도 소재의 절대적인 입자의

크기는 일정하게 유지된다. 이러한 일정한 입자의 크기의 크기는 제품의 크기가 클 경우에는 소재의 기계적 성질에 영향을 주지 않게 되지만, 제품의 크기가 작아지게 되면 소재의 기계적 성질에 영향을 주는 크기효과(Size effect)가 나타나게 된다.⁽³⁾ 이러한 효과는 초소형 제품의 성형에 큰 영향을 미치므로 미세성형(Micro forming) 공정 설계에서 반드시 고려하여야 한다.

압연 공정은 컴퓨터, 전자 통신, 자동차 등에 많이 사용되는 판재를 생산하는 매우 중요한 공정으로, 소재의 기계적 성질을 향상시키면서 초기 소재의 단면을 줄여서 원하는 단면을 가지는 제품으로 성형하게 된다. 이러한

* 정희원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

** 정희원, 부산대학교 항공우주공학과

공정은 적용 제품의 형태에 따라 열간, 온간 및 냉간에서 이루어진다. 박판의 경우 두께의 치수 정도로 인하여 통상 냉간에서 수행되고 있으며, 직경이 작은 롤러를 사용하는 경우에는 두께가 매우 얇은 박판의 성형도 가능하다. 유한요소법은 소재의 유동뿐만 아니라 각 변수들이 공정에 미치는 영향을 평가할 수 있어 압연 공정설계에 널리 활용되고 있다. 그러나 유한요소법은 연속체 조건을 사용하고 있어 소재의 입자(Grain)의 영향에 대한 평가를 하지 못하고 있다. 따라서 기존의 유한요소법으로는 초소형 제품과 같이 크기효과가 나타나는 재료의 거동을 정확히 해석할 수 없기 때문에 새로운 해석 방법의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 이러한 입자간의 상호작용 및 변형 거동을 해석하기 위하여 입자요소 및 입자경계요소 개념을 도입하여, 유한요소해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 미세구조물의 성형시 나타나는 크기효과를 고려할 수 있어, 기존 프로그램의 단점을 보완할 수 있을 것이다. 개발된 프로그램을 박판 압연 공정에 적용하여, 각 입자의 변형 거동을 해석하였으며, 기존의 유한요소해석 결과와 비교, 분석하였다.

2. 유한요소 수식화

2.1 입자요소를 위한 강소성 유한요소법

본 연구에서 Fig. 1(a)와 같은 입자요소의 변형 거동은 강소성 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 강소성 재료에 대한 범함수(Functional) Π 는 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_r} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형을 속도, \bar{t}_i 는 표면력, v_i 는 절점속도, K 는 벌칙함수, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형속도이다.

위의 식 (1)은 일반적인 유한요소 이산화 과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법을 이용하여 구한다.

2.2 입자경계요소를 위한 탄성 유한요소법

입자간의 상대 미끄럼(Sliding)과 인장, 압축을 고려하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 입자경계요소를 도입하였다. 입자경계요소는 두 개의 접촉한 입자요소 사이에서 정의

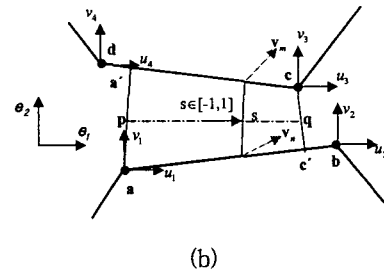
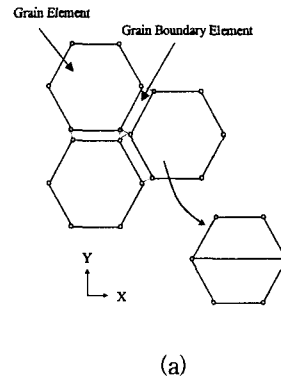


Fig. 1 Schematic diagram of grain element and grain boundary element
(a) grain element (b) grain boundary element

되며, 절점 c에서 이웃한 입자요소에 수직으로 연결한 점 c'과 절점 a에서 인접한 입자요소에 수직으로 연결한 점 a'로 네 개의 절점으로 구성된다. 선 cc', 선 aa'의 중점 p와 q를 연결한 국부좌표계인 (e_1 , e_2)을 설정하여, 압축율(Compression rate) α 과 전단율(Shearing rate) β 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\alpha = (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n) \cdot \mathbf{e}_1 \quad (2)$$

$$\beta = (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n) \cdot \mathbf{e}_2 \quad (3)$$

여기서 \mathbf{v}_m , \mathbf{v}_n 은 절점 a, b, c, d에서 선행 보간하여 구해지는 속도이며, \mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 는 국부좌표계의 단위 벡터이다.

압축율과 전단율은 비선형 점성과 유사한 구성방정식을 가지며, 입자요소의 강소성 구성방정식과는 다르다. 그러나 압축율과 전단율의 구성식이 점탄성과 유사하기 때문에, 수치적 해석을 위하여 가상의 스프링을 고려하여 다음과 같은 구성식으로 근사화 하였으며⁽⁵⁾, 입자경계요소에 대한 지배방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있

고, 이에 대한 입자경계요소의 일차 변분 범함수 $\delta \Pi_{GBE}$ 는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Pi_{GBE} = \int_V [k_n(\alpha - \alpha_c) + k_s(\beta - \beta_s)] dV \quad (4)$$

$$\delta \Pi_{GBE} = \int_V (k_n \alpha \delta \alpha + k_s \beta \delta \beta) dV \quad (5)$$

여기서 k_n 은 수직방향의 탄성계수이고, k_s 는 전단방향의 탄성계수이다. 그리고, α_c 와 β_s 는 각각 수직방향과 전단방향의 보정 상수이다.

식 (5)는 입자요소에 대한 식 (1)과 같이 이산화 과정을 거쳐 속도가 미지수인 비선형 방정식이 된다. 이 식은 식 (1)과 마찬가지로 뉴우턴-랩슨법에 의해 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법을 이용하여 구하였다.

3. 미세 박판 압연 공정 해석

입자와 입자간의 변형을 고려하기 위하여 입자요소 및 입자경계요소를 사용하여 압연 공정을 해석하였다. 본 성형 해석에 사용된 소재는 초기 박판의 두께는 $0.3t$, 압연 후의 두께는 $0.2t$ 이다. 그리고, 소재는 냉간압연강인 SPCE로 기계적 물성치는 Table 1과 같다. 입자요소 및 입자경계요소를 사용한 유한요소 해석은 평면 변형 (Plane strain) 상태로 가정하여 부품의 대칭 조건으로부터 1/2 형상을 모델링 하였다. 사용된 절점의 수는 2388개, 요소의 수는 910개로 두께 $0.15t$ 에 두께방향으로 6개의 요소가 들어갈 수 있도록 Fig. 2과 같은 기본 입자요소 모델을 사용하여 Fig. 3과 같이 입자요소 격자를 구성하였다. 입자요소 격자의 크기는 입자요소간의 경계인 입자경계요소의 두께를 포함하여 약 $25 \mu m$ 가 되어 전체적으로 1/2 모델인 소재의 두께인 $150 \mu m$ 를 이루게 된다. 또한 입자경계요소의 수직강성과 접선강성은 각각 $65MN/mm$ 와 $15MN/mm$ 로 가정하였다. 본 연구에서는 M. Otsu가 탄성해석에서 구한 강성값을 유한요소 해석에 이용하였다.⁽⁶⁾

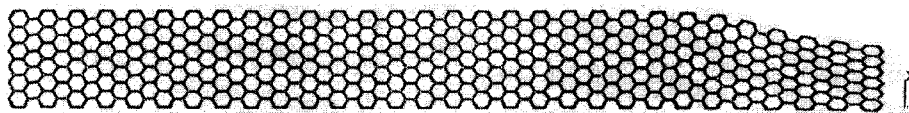


Fig. 3 Initial mesh system of grain element and grain boundary element

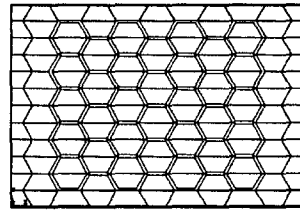


Fig. 2 Basic mesh system for strip rolling using grain element and grain boundary element

Table 1 Mechanical properties of SPCE

Specifications	SPCE
Yield strength	158 MPa
Ultimate tensile strength	213 MPa
r-value	0.17
Stress-strain relation	$\bar{\sigma} = 537 \bar{\epsilon}^{0.25}$ MPa

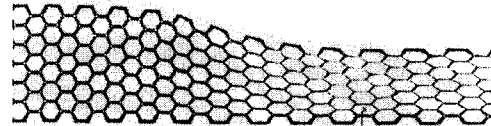


Fig. 4 Deformed configuration at steady state

Figure 4과 Fig. 5에서는 정상상태까지의 해석 결과를 나타내고 있다. 롤러를 지난 입자요소는 높이가 줄어들면서 길이 방향으로 변형하는 것을 관찰할 수 있었으며, 중심부와 표면 사이의 입자가 더 많은 변형을 하였다. 특히 이 영역의 입자경계요소가 과도하게 변형되는 것을 관찰할 수 있었고, 입자경계요소 사이의 기공은 압착되어 거의 존재하지 않음을 알 수 있었다.

이러한 결과는 여러 문헌을 통하여 알 수 있듯이, 압연된 소재는 기공과 같은 불순물과 금속조직이 더욱 치밀해져서 기계적 성질이 향상되고, 압연 방향으로의 변형에 따른 이방성이 생기게 된다는 것을 나타내고 있다.⁽⁷⁾

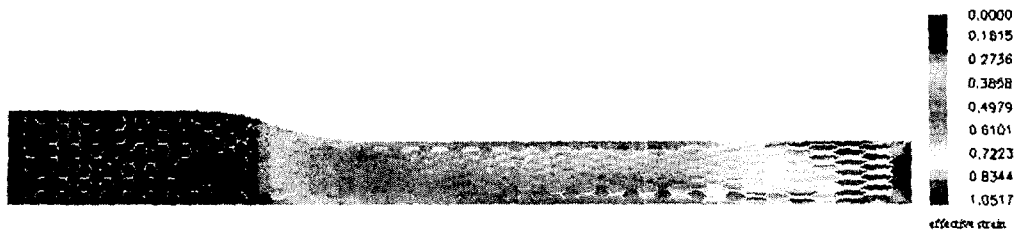


Fig. 5 Distribution of effective strain except grain boundary element at steady state

4. 결과 및 결론

입자요소 및 입자경계요소를 사용한 해석 결과에서는 압연후의 입자들과 입자경계들의 변형을 관찰할 수 있다. Figure 5에서와 같이 압연을 받은 소재의 경우, 입자 사이의 간격은 감소하게 되고, 입자는 압연방향으로 주로 변형하게 된다. 또한 입자 사이의 간격에서는 중심부와 롤러 접촉부 사이가 많이 압축된 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 입자요소 및 입자경계요소를 사용한 해석에서는 입자 및 입자간의 변형 형태로도 압연 전후의 소재 변형, 변형형태 등을 직접적으로 관찰할 수 있다.

본 연구에서는 입자요소(Grain element) 및 입자경계요소(Grain boundary element)를 이용한 새로운 유한요소 해석 프로그램을 개발하여 압연공정에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 입자요소 및 입자경계요소를 이용한 유한요소 해석에서는 입자의 변형을 해석할 수 있었고 입자간의 변형 거동도 해석할 수 있었다.
- (2) 입자요소 및 입자경계요소를 이용한 압연해석에서 압연 후 재료내의 입자들이 한 방향으로 변형하고, 입자 사이의 기공이 압착되어 조직이 치밀해지는 결과를 얻을 수 있었다.
- (3) 입자경계요소의 변형거동을 나타내는 수직강성과 접선강성에 대한 정확한 결과가 없어서 정확한 입자간의 변형거동은 해석할 수 없었으나, 실험적 방법과 해석적 방법을 이용하며 정확한 강성치를 얻는다면 정확한 입자간의 변형 거동을 해석할 수 있을 것으로 생각된다.
- (4) 개발된 프로그램은 크기효과와 입자간의 변형 특성을 고려할 수 있기 때문에, 급형 가공, 인발을 통한 미세선 가공 등 미세구조물을 해석에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대 신기술 개발사업중, Milli-Structure 생산기술개발사업에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) N. Tiesler, et.al, 2000, "Microforming-Effects of miniaturization", Proceedings of the 8th Int. Conf. Metal Forming 2000, pp.355-360.
- (2) M. Geiger, et.al, 1996, "Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Microparts", Annals of the CIRP, vol.45, pp.227.
- (3) 구태완, 강범수, 2001, "소형부품의 사각 컵 드로잉 성형 해석에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, 제10권, 제6호, pp.471-477.
- (4) O.C. Zienkiewicz, 1997, The Finite Element Method, McGraw-Hill, 3rd ed.
- (5) P. Onck, et.al, 1997, "Microstructurally-based Modelling of Intergranular Creep Fracture using Grain Elements", Mechanics of Materials, vol.26, pp.109-126.
- (6) M. Otsu, et.al, 1996, "Determination of Optimum Working Conditions in Mushy-state Upsetting of Magnet using Distinct Element Simulation", J. Materials Processing Technology, vol.60, pp.691-696.
- (7) K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill.