

입자요소를 이용한 미세 박판 부품의 유한요소 해석 기법 개발

구태완* · 김동진* · 강범수*

(2002년 4월 26일 접수)

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

T. W. Ku, D. J. Kim 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. When scaling down a metal forming process, the dimensions of the workpiece decrease but the microstructure of the workpiece remains the similar. Since the dimensions of the workpiece are very small, the microstructure especially the grain size will play an important role in micro forming, which is called size effects. 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 visco-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. 서론

최근 컴퓨터 및 이동 통신과 관련된 전자 제품의 소형화 및 고성능화 추세로 인하여 초소형 제품의 수요가 크게 증가하고 있다. 기존의 금속성형 기술은 이러한 초

소형 제품을 생산할 수 있는 좋은 가공법이기는 하지만, 성형 공정 설계 측면에서는 아직까지 체계적인 연구결과가 없어 경험적인 방법이나 기존의 수치해석적 방법을 이용하여 제한적으로 적용되고 있다.⁽¹⁻³⁾

소재의 기계적 성질은 제품의 크기와 관련이 있다. 비

* 부산대학교 항공우주공학과

록 제품의 크기가 작아지더라도 소재의 절대적인 입자의 크기는 일정하게 유지된다.⁽⁴⁾ 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.^(5~6) 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 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. 압연 공정은 그 중요성으로 인하여 많은 해석적, 수치적 및 실험적인 연구들이 수행되어져 왔으며, 특히 수치해석적 방법인 유한요소법에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.^(7~9) 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.

미세구조물(Milli-structure)은 캠코더(Camcorder)의 데크(Deck)나 DVD의 광학 헤드(Optical head)처럼 수 mm의 크기에, 수 μm 의 정밀도를 갖는 기계요소부품 또는 조립체와 같은 초소형 제품을 지칭하는 것으로, 일반적 기계 구성품의 크기인 수십 mm이상의 거시구조(Macro-structure)와 MEMS(Micro Electro Mechanical System)기술에 의한 초미세구조(Micro-structure)에 대응되는 개념으로 Fig. 1과 같다.⁽¹⁰⁾ 미세구조물은 그 내부에 수 μm 단위의 입자(Grain)를 포함하며, 특정 목적을 수행하기 위하여 정보 및 물질의 전달, 작동 및 취급이 가능하도록 일정한 정도 이상의 크기를 갖고 있는 작동 가능한 전체 시스템을 의미한다.

기존의 강소성(Rigid-plastic) 유한요소법은 크기효과를 고려할 수가 없기 때문에 미세구조물에 대한 정확한 해석이 불가능하다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 입자요소(Grain element) 및 입자경계요소(Grain boundary element)를 사용하여 미세구조물 성형에 따른 크기효과를 고려하였다. 입자요소 및 입자경계요소는 다결정 재료의 입자간(Intergranular) 고온 크립(Creep) 및 크랙(Cracking)을 해석하기 위하여 개발되어, 입자간의 전단변형, 기공의 성장 및 입자경계의 확산 등을 해석하였다.⁽¹¹⁾

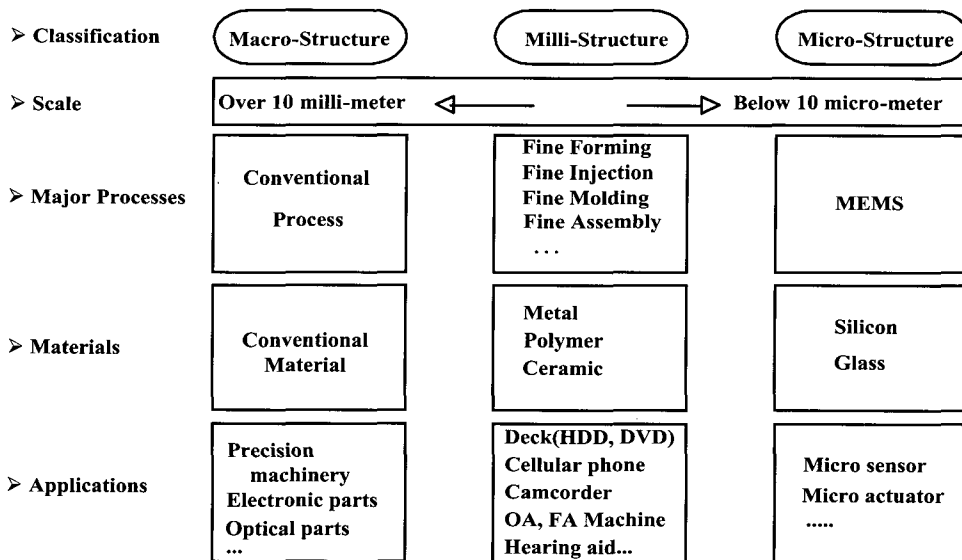


Fig. 1 Classification of Macro-Milli-Micro structure

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 유한요소 해석 결과와 비교, 분석하였다.

2. 유한요소 수식화

2.1 입자요소를 위한 강소성 유한요소법

본 연구에서 Fig. 2(a)와 같은 입자요소의 변형 거동은 강소성 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 강소성 재료에 대한 범함수(Functional) Π 는 다음과 같다.⁽¹²⁻¹³⁾

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dV - \int_{S_f} \bar{t}_i v_i dS \quad (1)$$

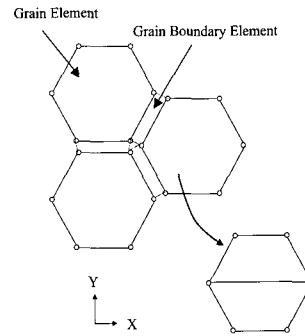
여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률 속도, \bar{t}_i 는 표면력, v_i 는 절점속도이다. 비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(Penalty function), K 를 도입하면 위의 식 (1)에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

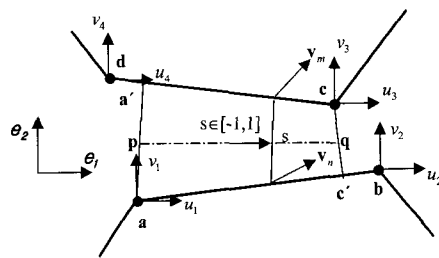
여기서 $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률 속도이다. 위의 식 (2)는 일반적인 유한요소 이산화 과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴턴-랩슨법(Newton - Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법(Direct iteration method)을 이용하여 구한다.

2.2 입자경계요소를 위한 점탄성 유한요소법

미세구조물의 크기효과를 고려하기 위하여 각 입자를 유한요소 격자로 나타내는 입자요소를 도입하였다. 일반적으로 금속재료는 많은 입자요소로 구성되어 있으며, 이러한 입자요소는 입자 경계를 통하여 서로 연결되어 있다. 입자요소는 Fig. 2(a)와 같이 여섯 개의 절점으로 이루어져 있으며 그 주위는 입자경계요소로 연결되어 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 Schematic diagram of grain element and grain boundary element

입자간의 상대 미끄럼(Sliding)과 인장, 압축을 고려하기 위하여 Fig. 2(b)와 같이 입자경계요소를 도입하였다. 입자경계요소는 두 개의 접촉한 입자요소 사이에서 정의되며, 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 ($\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$)을 설정하여, 압축율(Compression rate) α 과 전단율(Shearing rate) β 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\alpha = (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n) \cdot \mathbf{e}_1 \quad (3)$$

$$\beta = (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n) \cdot \mathbf{e}_2 \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{v}_m, \mathbf{v}_n$ 은 절점 a, b, c, d 에서 선형 보간하여 구해지는 속도이며, $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 는 국부좌표계의 단위 벡터이다. 또한 위의 식 (3)과 식 (4)는 식 (5)와 식 (6)에

서 보여지는 바와 같이 각 노드에 대한 압축율과 전단율을 표현할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{2}(u_1 - u_4)(1-s)e_1 + \frac{1}{2}(u_2 - u_3)(1+s)e_1 + \frac{1}{2}(v_1 - v_4)(1-s)e_2 + \frac{1}{2}(v_1 - v_3)(1+s)e_2 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{2}(u_1 - u_4)(1-s)e_2 - \frac{1}{2}(u_2 - u_3)(1+s)e_2 + \frac{1}{2}(v_1 - v_4)(1-s)e_1 + \frac{1}{2}(v_1 - v_3)(1+s)e_1 \quad (6)$$

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 하였다.⁽¹⁴⁾

$$\dot{\sigma}_n = k_n(\alpha - \alpha_c) \quad (7)$$

$$\dot{\tau}_n = k_s(\beta - \beta_s) \quad (8)$$

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

$$\Pi_{GBE} = \int_V [k_n(\alpha - \alpha_c) + k_s(\beta - \beta_s)] dV \quad (9)$$

$$\delta \Pi_{GBE} = \int_V (k_n \alpha \delta \alpha + k_s \beta \delta \beta) dV \quad (10)$$

입자경계요소에 대한 지배방정식은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있고, 이에 대한 입자경계요소의 일차 변분 범함수 $\delta \Pi_{GBE}$ 는 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

식 (10)은 입자요소에 대한 식 (2)와 같이 이산화 과정을 거쳐 속도가 미지수인 비선형 방정식이 된다. 이 식은 식 (2)와 마찬가지로 뉴우턴-랩슨법에 의해 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법을 이용하여 구하였다.

3. 미세 박판 압연 공정 해석

3.1 강소성 유한요소법을 이용한 미세 박판의 압연 공정 해석

앞서 언급한 입자요소와 입자경계요소의 적용 타당성을 고려하기 위해 유한요소 해석에서 널리 사용되고 있는 상용 코드인 DEFORM을 사용하여 미세 박판의 압연 성형해석을 수행하였다. 본 성형 해석에 사용된 소재는 초기 박판의 두께는 0.3t이며 압연 후의 두께는 0.2t이다. 그리고, 소재는 냉간압연강인 SPCE로 기계적 물성치는 Table 1과 같다. 유한요소 해석은 평면 변형(Plane strain) 상태로 가정하여 부품의 대칭 조건으로부터 1/2 형상을 모델링하였다. 사용된 절점의 수는 1193개, 요소의 수는 1088개로 두께 0.15t에 두께방향으로 12개의 요소가 들어갈 수 있도록 Fig. 3에서와 같이 요소 격자를 구성하였다. 따라서 각 요소 격자의 크기는 12.5 μm 로 일반적인 금속재료의 입자크기와 유사하게 설정하였다.⁽¹⁵⁾

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

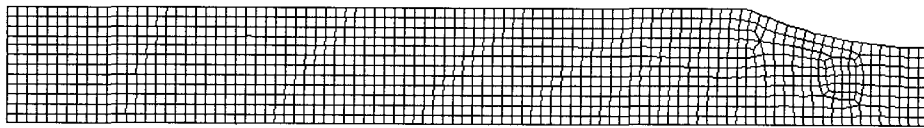


Fig. 3 Initial mesh system for strip rolling with rigid-plastic FE simulation

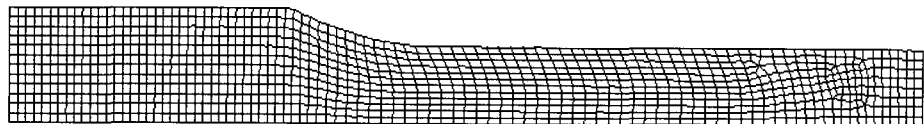


Fig. 4 Deformed configuration at steady state with rigid-plastic FE simulation



Fig. 5 Distribution of effective strain with rigid-plastic FE simulation

Fig. 4와 Fig. 5에서는 정상상태(Steady state)까지의 해석 결과를 나타내었다. 변형 형상에서 소재의 두께가 줄어들면서 길이가 늘어나는 것을 관찰할 수 있지만 명확한 관찰은 어렵다.(Fig. 4) 속도장의 분포에서도 명확한 소재의 유동을 관찰하기는 어렵다.(Fig. 6) 이를 보완하기 위해서 Fig. 5의 유효변형률 분포를 보면 소재의 유동을 좀더 명확히 관찰할 수 있다. 물러를 지난 소재의 유효변형률 값이 크며 또한 일정한 분포를 가짐을 알 수 있다. 특히 중심부의 변형보다는 중심부에서 약간 떨어진 곳의 변형률 분포가 더 크다는 것을 알 수 있다.

이를 명확히 관찰하기 위해서 DEFORM에서 지원하는 Flow-net 기능을 이용하여 원형 격자(Circular grid)의 변형을 분석하였다. Fig. 7에서와 같이 원형 격자들이 물러를 지나면서 타원형의 격자 형태로 변형되었고, 중심부의 격자보다는 중심부에서 약간 떨어진 곳의 격자들의 장변경이 더 길게 변형되었다. 이것으로부터 소재의 두께가 얇아지고 길이가 늘어나는 것을 간접적으로 관찰할 수 있었다.

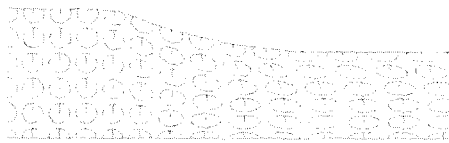


Fig. 6 Distribution of velocity fields

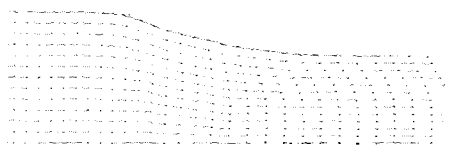


Fig. 7 Deformed shape of circular grid using flow-net

그러나, 연속체 조건을 사용한 강소성 유한요소 해석에서는 입자의 변형이나 입자간의 변형 및 기공의 변형 등을 해석할 수가 없기 때문에 유효변형률, 유효응력, 연성 파괴값 및 유동선 추적 등으로부터 입자 및 입자간의 변형을 간접적으로 예측할 수 밖에 없다. 특히 열처리에 따른 입자의 크기, 입자간의 결합력과 같은 것은 전혀 고려할 수 없다. 따라서 미세구조물과 같이 크기가 작고 두께가 매우 얇은 부품의 해석에서는 이러한 효과를 고려할 수 있는 새로운 유한요소 수식 및 해석 방법이 필요하다.

3.2 입자요소 및 입자경계요소를 이용한 미세 박판의 압연 공정 해석

입자와 입자간의 변형을 고려하기 위하여 입자요소 및 입자경계요소를 사용하여 3.1절과 동일한 조건의 압연 공정을 해석하였다. 본 성형 해석에 사용된 소재는 초기 박판의 두께는 0.3t, 압연 후의 두께는 0.2t로 3.1 절에서 수행한 해석 조건과 동일하다. 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 0.15t에 두께방향으로 6개의 요소가 들어갈 수 있도록 Fig. 8과 같은 기본 입자요소 모델을 사용하여 Fig. 9와 같이 입자요소 격자를 구성하였다. 여기서 입자요소의 개수가 6개라는 것은 하나의 입자요소는 두 개의 사각 요소의 조합으로 이루어지므로, 하나의 사각 요소를 하나의 입자라고 하고, 이 때 두 개의 사각요소인 두 개의 입자를 하나의 입자요소로 간주하여 입자의 근사적 구형화를 수행한다.(Fig. 2) 결국 6개의 입자요소로 모델링 하는 것은 실질적으로는 12개의 입자가 두께 방향으로 설정되는 것이다. 그러므로 각 입자요소 격자의 크기는 입자요소간의 경계인 입자경계요소의 두께를 포함하여 약 25 μm 가 되어 전체적으로 1/2 모델인 소재의 두께인 0.15t(150 μm)를 이루게 된다. 또한 입자경계

요소의 수직강성(Normal spring stiffness)과 접선강성(Tangential spring stiffness)은 각각 65MN/mm와 15MN/mm로 가정하였다. 여기서 입자경계요소의 수직강성과 접선강성은 실험을 통하여 구해야 하지만, 아직까지 이를 측정·평가할 수 있는 실험법이 체계화되어 있지 못하다. 일반적으로 경험적인 방법 또는 탄성해석에서 얻은 결과를 이용하여 각 강성값을 구하기도 한다. 본 연구에서는 M. Otsu가 탄성해석에서 구한 강성값을 유한요소 해석에 이용하였다.^(16~17)

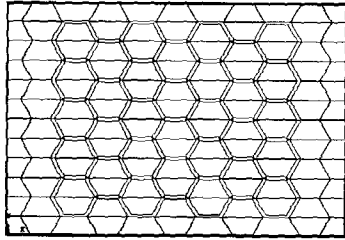


Fig. 8 Basic mesh system for strip rolling using grain element and grain boundary element

Fig. 10과 Fig. 11에서는 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.^(18~19)

그리고 입자요소의 변형보다는 입자경계요소의 변형이 더 많이 일어남을 알 수 있다. 이러한 입자경계요소의 변형은 소성변형을 입자사이의 전단변형으로 가정하는 것을 간접적으로 나타내는 것으로 입자경계요소의 강성만 정확하게 묘사할 경우 이러한 변형을 더욱 정확하게 해석할 수 있을 것으로 생각된다.

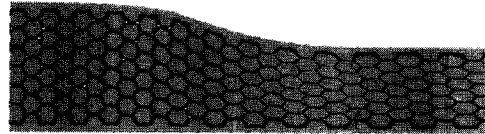


Fig. 11 Deformed configuration at steady state

유효변형률(Fig. 10)과 속도장(Fig. 12)의 분포는 앞 절에서 강소성 유한요소 해석으로 구한 결과와 유사하나, 유효변형률 값은 다르게 나타나고 있다. 이러한 차이는 입자요소의 경우 변형이 강소성 유한요소 해석으로 구한 결과와 비슷하나, 입자경계요소의 경우 탄성체와 유사한 변형 거동을 보이기 때문에 전체적으로는 다르게 나타나는 것이다. 또한, 압연 전반부의 변형 집중은 초기 격자를 Fig. 9와 같이 구성했기 때문에 정상상태까지 도달하는데 생긴 비정상 상태 변형에 의해 발생한 것으로 생각된다.

4. 결과 및 고찰

연속체 조건을 사용한 강소성 유한요소 해석 결과인 전단변형률 분포에서 전단변형도 소재의 중심부와 롤러 접촉면 사이에서 가장 많이 일어난 것을 알 수 있다.(Fig. 13) 이러한 결과와 3.1절의 결과에서 소재의 중심부와 롤

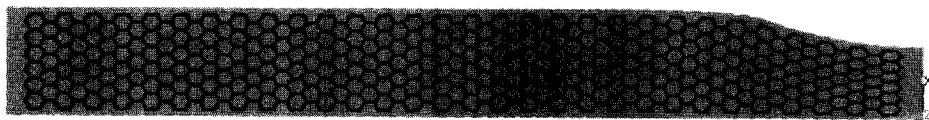


Fig. 9 Initial mesh system of grain element and grain boundary element

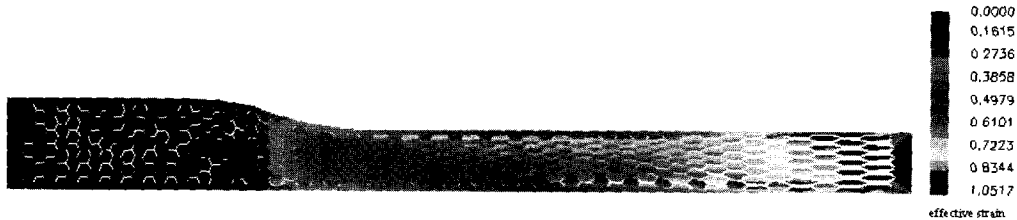


Fig. 10 Distribution of effective strain except grain boundary element at steady state

5. 결론

미세 구조물은 결정 소성학이나 입자 크기 등과 같은 미시적 특성과 기존의 금속 성형에서의 거시적 특성을 모두 가지고 있다. 거시적 특성을 해석하는 기존의 강소성(Rigid-plastic) 유한요소법은 크기효과를 고려할 수가 없기 때문에 미시적 특성도 가지고 있는 미세구조물에 대한 정확한 해석이 불가능하다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 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) 연속체 조건을 이용한 강소성 유한요소 해석결과와 입자요소 및 입자경계요소를 이용한 유한요소 해석을 비교하였다.

(2) 연속체 조건을 이용한 강소성 유한요소 해석에서는 입자의 변형을 해석할 수 없었고, 유효 변형을 분포, 속도분포 및 유동선 추적을 통하여 간접적으로 해석할 수 있었다.

(3) 입자요소 및 입자경계요소를 이용한 유한요소 해석에서는 입자의 변형을 해석할 수 있었고 입자간의 변형 거동도 해석할 수 있었다.

(4) 입자요소 및 입자경계요소를 이용한 압연해석에서 압연 후 재료내의 입자들이 한 방향으로 변형하고, 입자 사이의 기공이 압착되어 조직이 치밀해지는 결과를 얻을 수 있었다.

(5) 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.

(6) 개발된 프로그램은 크기효과와 입자간의 변형 특성을 고려할 수 있기 때문에, 박판의 굽힘 가공, 인발을 통한 미세선 가공 등 미세구조물을 해석에 유용하게 적

려의 접촉부 내에서 대부분의 변형이 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한 유효변형을 분포(Fig. 5)와 전단변형을 분포(Fig. 13)로부터 전단변형이 주된 변형임을 알 수 있다. 연속체 조건을 사용한 강소성 유한요소 해석에서, 입자 및 입자경계는 재료의 유동식으로는 표현할 수 없다. 그러므로, 입자의 성장 및 변형 등은 응력, 변형을 등의 값으로부터 간접적으로 예측할 수 밖에 없으며, 유동선 추적과 같은 후처리 기능을 이용하여 변형 형태를 예측할 수 있지만, 특히 입자간의 변형 거동은 정확한 해석이 불가능하다.

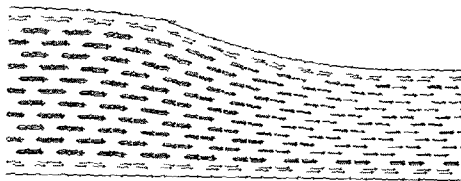


Fig. 12 Distribution of velocity field except grain boundary element

이에 반하여 입자요소 및 입자경계요소를 사용한 해석 결과에서는 압연후의 입자들과 입자경계들의 변형을 관찰할 수 있다. Fig. 10에서와 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. 또한 입자크기에 따른 입자경계의 강성을 정확히 평가할 수 있다면, 미세구조물과 같이 크기효과가 지배적인 제품에 대한 변형해석과 이에 따른 공정설계를 정확하게 할 수 있다. 그러나 입자만의 유동식과 입자 사이의 강성과 같은 상호작용에 대한 기계적 성질을 평가할 수 있는 실험방법이 정립되어 있지 않기 때문에 이에 따른 해석의 한계가 존재한다.

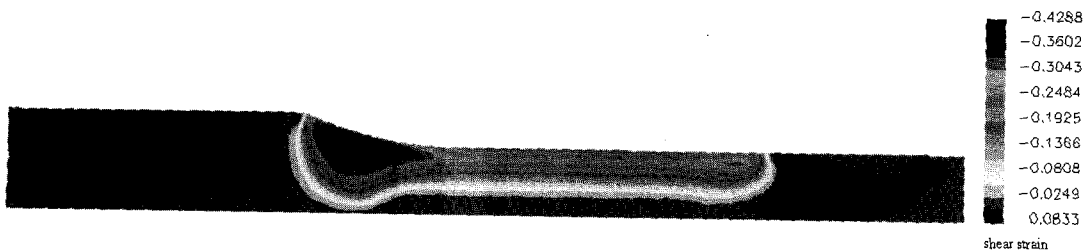


Fig. 13 Distribution of shear strain with rigid-plastic FE simulation

용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2001-선도연구자지원-E00115), 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, p. 227.
- (3) A. Tseng, et.al, 1990, "Material Characterization and Finite Element Simulation for Forming Miniature Parts", Finite Element Annals. Des., vol.6, p. 251.
- (4) P. Picart, et.al, 1999, "Effects of Size and Texture on the Constitutive Behavior for Very Small Components in Sheet Metal Forming", Proceedings of the 6th ICTP, vol.2, pp. 895~900.
- (5) S. Miyazaki, et.al, 1979, "Effect of Specimen Size on the Flow Stress of Polycrystalline Cu-Al Alloy", Scripta Met., vol.6, p. 447.
- (6) 구태완, 강범수, 2001, "소형부품의 사각 칩 드로잉 성형 해석에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, 제10권, 제6호, pp. 471~477.
- (7) Y. Lee, et.al, 2001, "Analytic Model for the Prediction of Mean Effective Strain in Rod Rolling Process", J. Materials Processing Technology, vol. 114, pp. 129~138.
- (8) J. Park, et.al, 2001, "Prediction of the Flow Stress and Grain Size of Steel during Thick-plate Rolling", J. Materials Processing Technology, vol.113, pp. 581~586.
- (9) Z. Jiang, et.al, 2001, "A Simulation of Three-dimensional Metal Rolling Processes by Rigid-plastic Finite Element Method", J. Materials Processing Technology, vol.112, pp. 144~151.
- (10) 박훈재, 나경환, 조남선, 2000, "소성가공에 의한 미세부품 성형기술", 한국정밀공학회지, 제17권 제7호, pp. 14~19.
- (11) P. Onck, et.al, 1999, "Growth of an Initially Sharp Crack by Grain Boundary Cavitation", J. Mechanics & Physics of Solids, vol.47, pp. 99~139.
- (12) O.C. Zienkiewicz, 1997, The Finite Element Method, McGraw-Hill, 3rd ed.
- (13) S. Kobayashi, et.al, 1989, Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford Univ. Press.
- (14) P. Onck, et.al, 1997, "Microstructurally-based Modelling of Intergranular Creep Fracture using Grain Elements", Mechanics of Materials, vol.26, pp. 109~126.
- (15) R. Eckstein, et.al, 2000, "Behavior of the Grain Structure in Micro Sheet Metal Working", Proceedings of the 8th Int. Conf. Metal Forming 2000, pp. 453~459.
- (16) 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.
- (17) K. Iwashita, et.al, 2000, "Micro-deformation Mechanism of Shear Bending Process Based on Modified Distinct Element Method", Powder Technology, no.109, pp. 192~205.
- (18) K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill.
- (19) T. Altan, et.al, 1983, Metal Forming, ASM.