〈학술논문〉 **DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.10.1463** ISSN 1226-4873

미세성형 공정에서 다결정 금속재료의 크기효과에 관한 연구§

김 홍 석*†· 이 용 성*
* 서울산업대학교 기계공학과

Investigation on the Size Effects of Polycrystalline Metallic Materials in Microscale Deformation Processes

Hong Seok Kim*† and Yong Sung Lee*
* Dept. of Mechanical Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Technology

(Received May 10, 2010 ; Revised June 1, 2010 ; Accepted June 1, 2010)

Key Words : Microforming(미세성형), Size Effect(크기효과), Flow Stress(유동응력), Polycrystalline Material(다결정 재료)

초록: 미세성형 기술은 다양한 소재의 활용, 높은 생산성과 적은 재료의 손실, 고품질 생산과 같은 기존 소성가공의 장점을 실현할 수 있기 때문에 마이크로 크기의 부품생산에 매우 유망한 기술로 간주되고 있다. 하지만 기존의 매크로 영역에서 축적된 많은 기술과 노하우들은 소재의 크기가 마이크로 단위에 줄어듦에 따라 나타나는 소위 "크기효과"로 인해 미세성형 공정에 그대로 적용될 수는 없다. 따라서, 본 연구에서는 마이크로 영역에서 나타나는 재료거동의 크기효과를 이론적, 실험적 연구를 통하여 고찰하였다. 다양한 두께의 구리시편에 열처리를 실시하여 결정립의 크기를 다양화 하였고, 인장시험을 통하여 시편의 두께와 결정립의 크기가 유동응력에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 이러한 크기효과의 정량적인 분석을 위하여 마이크로 및 매크로 영역에서 적용 가능한 소재의 유동응력 모델을 이론적으로 도출하였다.

Abstract: Microforming, which exploits the advantages of metal forming technology, appears very promising in manufacturing microparts since it enables the production of parts using various materials at a high production rate, it has high material utilization efficiency, and it facilitates the production of parts with excellent mechanical properties. However, the conventional macroscale forming process cannot be simply scaled down to the micro-scale process on the basis of the extensive results and know-how on the macroscale process. This is because a so-called "size effect" occurs as the part size decreases to the microscale. In this paper, we attempt to develop an effective analytical and experimental modeling technique for explaining the effects of the grain size and the specimen size on the behavior of metals in microscale deformation processes. Copper sheet specimens of different thicknesses were prepared and heat-treated to obtain various grain sizes for the experiments. Tensile tests were conducted to investigate the influence of specimen thickness and grain size on the flow stress of the material. In addition, an analytical model was developed on the basis of phenomenological experimental findings to quantify the effects of the grain size and the specimen size on the flow stress of the material in microscale and macroscale forming.

1. 서 론

최근 전자, 의료, 광학, 에너지, 항공우주 등 광범위한 산업분야에서 고집적 다기능의 제품생산을 위한 초정밀 마이크로 부품의 필요성이 크게 증대되고 있다. 현재까지 마이크로 스케일의 부품 및 형상 가공을 위해 가장 발전된 기술은 나노급의 높은 가공정밀도 구현이 가능한 LIGA(lithography galvonoforming abforming) 공정으로 알려져 있다. 하지만 LIGA 공정은 삼차원 자유형상의 가공이 어렵고 가공재료에 한계가 있으며 공정속도가 느린 단점을 가지고 있다. 대체 생산방법 중 하나인 미세 절삭가공 기술은 삼차원 자유형상의 가공이 가능하고 가공재료를 다양화 할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 역시 가공속도의 한계로 인하여 대량생산에 적용하기는 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로서 다양한 소재에 초소형 고

§ 이 논문은 2010 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임.

† Corresponding Author, hongseok@snut.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

정밀 생산이 가능하면서 높은 생산성을 유지할 수 있는 미세성형(microforming) 기술이 최근 많은 주목을 받고 있다.[1]

미세성형은 그 스케일이 마이크로 단위로 줄어듦에 따라 가공재료의 변형영역에 단 몇 개의 입자만이 존재하는 특성을 가지게 된다. 따라서 변형재료를 더 이상 균질한 연속체(homogeneous continuum)로 가정할 수 없고 기존의 매크로 영역에서 축적된 기술과 노하우들도 미세성형 공정에 그대로 적용하기 어렵다. 특히 가공재료의 크기가 마이크로 단위로 감소하면서 재료의 거동특성이 입자 크기 뿐 아니라 시편 크기의 변화에도 민감하게 변화하는 소위 "크기효과(size effect)"가 관찰되고 있기 때문에[1~4] 이에 대한 근본적인 이해를 확대하는 것이 미세성형의 실용화를 위하여 절실히 요구되고 있다.

지난 수 십년 동안 미세성형 공정에서 나타나는 다양한 크기효과를 고찰하기 위하여 많은 연구가 진행되었다. 특히 성형 하중이나 금형의 마모, 성형 품질에 직접적인 영향을 미치는 유동응력(flow stress)은 마이크로 영역에서 상사이론(theory of similarity)을 따르지 않고 소재의 크기가 작아질수록 그 크기가 감소하는 것으로 보고되었다. CuNi18Zn20,[5] CuZn15,[6] 알루미늄,[7] 스테인리스 스틸[8] 등 다양한 소재에 대하여 유사한 현상이 관찰되었고, Engel 등[1]은 이러한 크기효과를 표면층모델(surface layer model)을 이용하여 정성적으로 설명하였다. 즉, 재료의 표면에 위치한 표면입자(surface grain)는 내부입자(internal grain)에 비하여 입자간 구속력이 약화되기 때문에 강도가 감소하게 되는데, 미세성형에서는 내부입자에 대한 표면입자의 상대적인 비율이 증가하기 때문에, 결국 마이크로 영역에서 유동응력의 감소로 이어진다는 것이다. Nakamachi 등[9]은 입자의 경계영역(grain boundary)에서 발생하는 응력집중 현상에 근거하여 유동응력의 크기효과를 설명하였고, Peng 등[10]과 Kim 등[11]은 입자와 시편의 크기를 고려한 이론적 물성모델(constitutive model)을 수립하여 미세성형에서 재료의 거동특성을 정량적으로 설명하고자 하였다.

현재까지의 많은 노력에서 불구하고 마이크로 영역에서의 재료의 크기효과를 견실하게 묘사할 수 있는 모델은 아직 수립되지 못하였다. 이와 같은 모델의 수립은 미세성형에 대한 근본적인 이해를 확대하고 다양한 공정조건에서 재료의 변형특성을 정확하게 예측하게 하여, 유한요소해석(finite element analysis) 모델의 수립과 공정 최적화를 통한 미세성형의 실용화에 유용한 가이드라인을 제공하게 될 것이다. 따라서, 본 연구에서는 마이크로 영역에서 시편과 결정립의 상대적인 크기에 따른 유동응력의 변화를 이론적, 실험적 방법을 통하여 고찰하였다. 다결정(polycrystal) 재료의 결정립을 내부영역(internal region)과 경계영역(boundary region)으로 분리하고, 시편의 크기에 따라 변화하는 각 영역의 강도 차이를 고려하여 이론적 물성모델을 개발하였다. 이를 통해 미세성형에서 입자의 크기와 시편의 크기에 따른 유동응력의 변화를 정량적으로 해석하고자 하였다. 또한 구리 소재에 열처리를 통해 다양한 결정립의 크기를 구현하였고, 인장시험을 통해 시편의 두께에 대한 결정립의 상대적인 크기가 유동응력에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 시편 대 결정립의 상대적인 크기가 작아질수록 유동응력이 감소하는 것이 관찰되었으며, 이론적 물성모델의 유효성은 실험결과와의 비교를 통하여 검증할 수 있었다.

2. 이론적 모델링

다결정 재료의 유동응력은 재료의 미세 구조(microstructure)와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 Hall-Petch 관계식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0(\varepsilon) + \frac{k(\varepsilon)}{\sqrt{d}} \tag{1}$$

여기서 σ(ε)는 결정립의 크기가 d 일 때 재료의 유동응력이고 $\sigma_0(\varepsilon)$와 $k(\varepsilon)$은 변형률(ε)의 함수로 표현되는 재료 계수들로, 각각 재료 단결정(single crystal)의 강도와 결정립 경계영역의 변형저항을 나타낸다.[9]

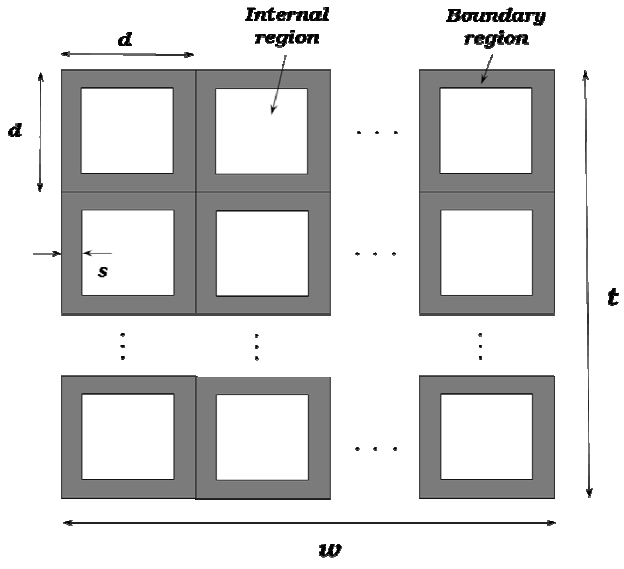


Fig. 1 Internal and boundary regions of a grain in polycrystalline materials

식 (1)에 따르면 결정립의 크기가 증가할수록 재료의 유동응력이 $d^{-1/2}$ 에 비례하여 감소하는 것을 예측할 수 있지만, 이는 매크로 영역에서 재료의 거동특성을 모델링 한 것으로, 소재의 변형영역에 단 몇 개의 입자만이 존재하는 미세성형의 경우에는 위의 관계식을 그대로 적용할 수 없다.

마이크로 영역에서 크기효과를 모델링 하기 위하여 Fig. 1 에 나타난 것처럼 소재의 단면이 정사각형 결정립으로 구성되었다고 가정하였다. 각 결정립은 일정한 비율의 내부영역과 경계영역으로 분리할 수 있는데, 일반적으로 경계역역은 높은 전위밀도(dislocation density)를 가지며 인접 입자와 변형적합성(deformation compatibility)을 만족해야 하기 때문에, 내부입자에 비하여 높은 강도를 가진다. 따라서 다결정 재료의 유동응력은 내부영역과 경계영역의 강도차이를 고려하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma(\varepsilon) = f_{gb}\sigma_{gb}(\varepsilon) + f_i\sigma_i(\varepsilon) \tag{2}$$

여기서 $\sigma_{gb}(\varepsilon)$와 $\sigma_i(\varepsilon)$는 각각 변형률의 함수로 표현되는 결정립 경계영역과 내부영역의 유동응력이고 f_{gb}, f_i 는 각각 경계영역과 내부영역의 상대적인 면적비율(area ratio)이다.

한 개의 결정립에 대한 내부영역과 경계영역의 면적비율 f_{gb}^*, f_i^* 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_i^* = \frac{(d-2s)(d-2s)}{d^2} = 1 - \frac{4s(d-s)}{d^2} \tag{3}$$

$$f_{gb}^* = 1 - f_i = \frac{4s(d-s)}{d^2} \tag{4}$$

여기서 d 는 결정립의 크기로 Fig. 1 에서 정사각형 한변의 길이를 나타내며, s 는 결정립 내에서 경계영역이 차지하는 두께를 나타낸다.

Fig. 1 에 나타난 것처럼 소재 단면의 가장자리 부분에도 결정립의 경계영역이 위치하고 있으나, 이는 소재의 내부에 존재하는 경계영역과는 달리 입자간 구속력이 약해지기 때문에 전위밀도나 변형적합성에 의해 높은 강도를 가진다고 가정하기 어렵다. 매크로 성형에서는 소재 단면에 많은 수의 결정립이 존재하기 때문에 가장자리 영역의 상대적인 면적비율을 무시할 수 있으나, 미세성형에서는 결정립의 상대적인 수가 줄어들기 때문에 소재 가장자리 영역의 거동특성이 재료의 거시적인 유동응력에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 결정립의 경계영역 중 소재의 가장자리에 위치하는 면적 비율을 식 (5)와 같이 f_s 로 정의하고 이 영역에서 재료의 유동응력은 내부영역과 유사한 것으로 가정하면, 식 (2)에서의 내부영역과 경계영역의 상대적인 면적비율을 식 (6)과 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$f_s = \frac{wt - (w-2s)(t-2s)}{wt} \tag{5}$$

$$f_i = f_i^* + f_s \tag{6}$$

$$f_{gb} = f_{gb}^* - f_s \tag{7}$$

여기서 w 와 t 는 각각 소재 단면의 너비와 두께를 나타낸다.

미세성형에서의 크기효과를 정량화 하기 위하여 소재의 너비 및 두께에 대한 결정립의 상대적인 크기를 크기인자(scale factor) λ_1, λ_2 로 식 (8)과 식 (9)와 같이 정의하였고, 결정립 중 경계영역의 두께 s 는 Fu[14] 등의 연구를 참고하여 식 (10)과 같이 결정하였다.

$$\lambda_1 = \frac{w}{d} \tag{8}$$

$$\lambda_2 = \frac{t}{d} \tag{9}$$

$$s = m\sqrt{d} \tag{10}$$

여기서 m 은 재료상수(material constant)로 결정립의 응력분포와 전위 상호작용(dislocation interaction)에 의하여 결정되는 값이다.

식 (5)~(10)을 식 (2)에 대입하면 유동응력 관계식을 크기인자 λ_1 과 λ_2 를 포함하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_i(\varepsilon) + c(d,\lambda_1,\lambda_2)\cdot\left(\sigma_{gb}(\varepsilon) - \sigma_i(\varepsilon)\right) \tag{11}$$

$$c(d,\lambda_1,\lambda_2) = \frac{4m\left(1 - \dfrac{\lambda_1+\lambda_2}{2\lambda_1\lambda_2}\right)}{\sqrt{d}} - \frac{4m^2\left(1 - \dfrac{1}{\lambda_1\lambda_2}\right)}{d} \tag{12}$$

여기서 c 는 결정립의 크기 d 와 크기인자 λ_1, λ_2 에 의해 결정되는 크기함수(scale function)로 정의한다.

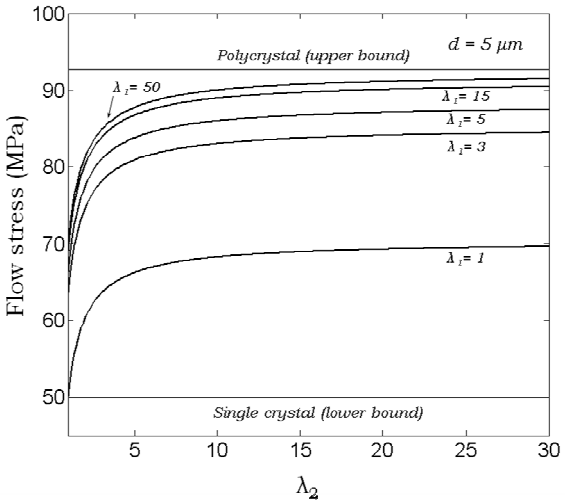
식 (11)에서 λ_1=1, λ_2=1 인 경우에는 소재의 단면에 단 한 개의 결정립만 존재하게 되어 식 (13)과 같이 단결정 재료의 유동응력을 나타내게 되고, λ_1=∞, λ_2=∞ 인 경우에는 식 (14)와 같이 매크로 영역에서 일반적인 다결정 재료의 유동응력을 나타내게 된다. 미세성형에서는 유동응력의 크기가 λ_1 과 λ_2 의 값에 따라 식 (13)과 식 (14)의 사이에서 결정된다.

Single crystal :

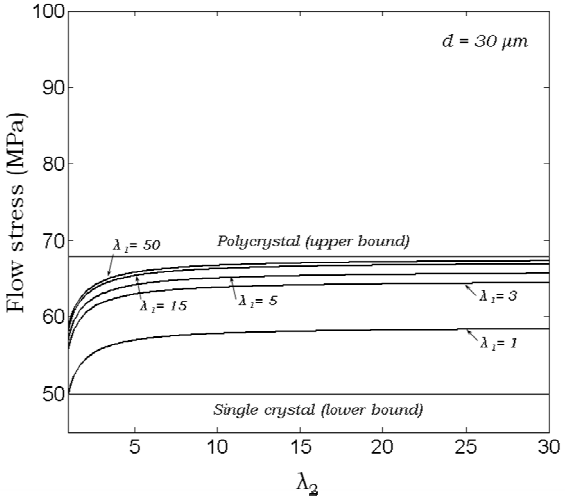
$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_i(\varepsilon) \tag{13}$$

Polycrystal :

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_i(\varepsilon) + \left(\frac{4m}{\sqrt{d}} - \frac{4m^2}{d}\right)\left(\sigma_{gb}(\varepsilon) - \sigma_i(\varepsilon)\right) \tag{14}$$



(a) Grain size=5μm



(b) Grain size=30μm

Fig. 2 Flow stress as a function of the grain size and the scale factors(λ_1, λ_2)

식 (14)에서 d^{-1} 항은 $d^{-1/2}$ 항과 비교할 때 상대적으로 작은 값을 가지므로 무시할 수 있어 식 (14)는 결국 식 (1)의 Hall-Petch 관계식과 일치하게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (11)은 매크로 영역에서 널리 알려진 Hall-Petch 관계식을 따르면서도 마이크로 영역에서의 크기효과를 정량적으로 표현할 수 있는 보다 일반적인 관계식이 된다.

Fig. 2 는 결정립의 크기가 각각 5μm 및 30μm 일 때, 유동응력이 크기인자 λ_1 과 λ_2 에 대하여 변화하는 특성을 나타낸 것이다. 해석을 단순화 하기 위하여 내부영역과 경계영역의 유동응력은 특정 변형률에서 일정한 값을 가진다고 가정 하였으며 (σ_i=50MPa, σ_{gb}=300MPa) 재료상수 m 은 0.1μm$^{-1/2}$ 로 결정하였다.[14] 매크로 영역(λ_1=∞, λ_2=∞)에서 유동응력의 상한(upper bound) 값은 입자크기가 5μm 및 30μm 일 때 각각 93MPa, 68MPa 로 결정립의 크기가 감소할수록 증가하는 것이 관찰되었다. 이는 식 (1)과 식 (14)에서 설명한 것처럼 매크로 영역에서의 유동응력은 주로 $d^{-1/2}$ 항에 영향을 받아 변화하기 때문이다. 마이크로 영역에서의 유동응력은 Fig. 2 에 표시된 상한과 하한(lower bound) 값 사이에서 크기인자 λ_1 과 λ_2 에 따라 민감하게 변화하는 것이 확인되었다. 일반적으로 λ_1 과 λ_2 가 모두 15 이상일 때에는 유동응력이 상한 값에 근접하기 때문에 크기효과가 미미해 보인다. 하지만 λ_1 과 λ_2 가 모두 15 보다 작아지면 유동응력이 감소하기 시작하여, 5 보다 작아질 경우에는 유동응력의 변화가 현저한 것을 확인할 수 있었다. 즉, 소재 대 결정립의 크기 비율이 15 이하인 미세성형의 경우에는 시편의 크기변화에 따른 유동응력의 크기효과가 현저할 것으로 예상되기 때문에 미세성형의 장비 및 공정 설계 시에 이러한 크기효과가 반드시 고려되어야 한다.

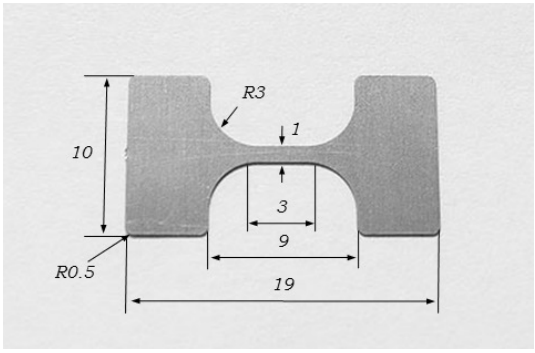
결정립의 모양은 일반적으로 모서리의 개수가 n 개인 다각형으로 가정하는 것이 타당하나 본 연구에서는 해석을 단순화 하기 위해 개별 결정립의 기하학적 특성을 무시하고 정사각형 모양의 결정립을 가정하였다. 결정립의 모양에 따라 입자 경계영역의 면적비율이 변화하기 때문에 결정립의 기하학적인 특성은 이론적 모델의 정확도에 영향을 미치게 된다. 즉 n=∞인 원형 결정립을 가정할 경우에는 정사각형 입자와 비교할 때 약 10%의 유동응력 감소를 관찰할 수 있다. 따라서 가공소재의 미세구조에 따라 이론적 모델의 정확도는 다소 변화가 있을 것으로 예측된다.

3. 실험적 고찰

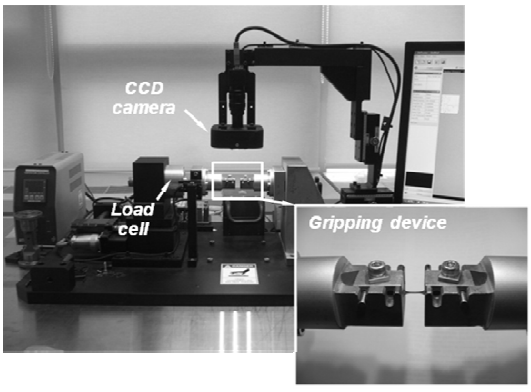
미세성형에서의 크기효과를 실험적으로 고찰하고 이론 모델의 유효성을 검증하기 위하여, 다양한 두께의 구리 소재에 결정립의 크기를 변화시키면서 인장시험을 실시하였고 소재의 변형특성을 고찰하였다.

3.1 실험 방법

구리시편을 두께 별로 준비하고 와이어 방전가공(wire electrical discharge machining)을 이용하여 Fig. 3(a)와 같은 인장시편을 가공하였다. 인장시험은 Fig. 3(b)에 보여진 마이크로 인장시험기를 이용하여 실시하였다. 변형률 측정 시 시편 그립부의 미끄러짐에 의한 오차를 보상하기 위하여 시편에 표점을 찍고 전하결합소자(charge coupled device) 카메라를 이용하여 표점거리 변화를 실시간으로 측정하였다. 변형률 속도(strain rate)가 유동응력에 미치는 영향을 배제하기 위하여 시험속도는 100μm/min 를 유지하였고, 온도는 상온에서 실시하였다.



(a) Tensile specimen



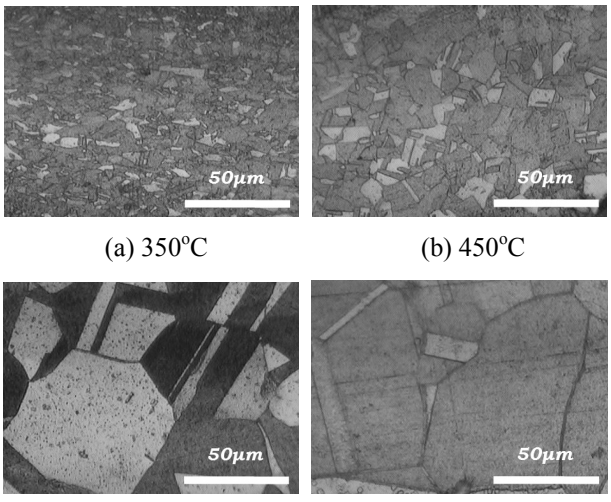
(b) Tensile tester(SMT-H50)

Fig. 3 Experimental set-up for micro scale tensile tests

(rolling) 공정에 의하여 박판(sheet)으로 가공된 구리 시편은 가공 중 결정립의 모양변화, 변형경화, 전위밀도의 증가 등으로 인한 미세구조 및 재료성질의 변화를 일으킨다. 따라서, 재료의 기계적 성질을 원상태로 복귀시키고 다양한 크기의 재결정 입자를 구현하기 위하여 열처리를 실시하였다. 재결정된 입자의 크기는 일반적으로 재결정 온도(recrystallization temperature) 부근에서 가장 미세해 지며, 재결정 온도와 열처리 시간이 증가할수록 커진다. 따라서, 본 연구에서는 열처리 온도의 제어를 통해서 다양한 크기의 결정립을 구현하였고, 열처리 된 재료의 미세구조는 소재의 단면을 화학적으로 식각(etching)한 후 현미경(microscope)을 통하여 관찰하였다. 결정립의 크기는 ASTM E112 기준에 따라 결정하였다. Table 1 과 Fig. 4 는 열처리 조건 및 열처리 후 시편의 미세구조 변화를 나타내고 있다. 열처리 온도가 250°C 일 때는 결정립의 평균크기가 4μm 였고 온도에 증가할수록 결정립의 크기도 증가하여

Table 1 Annealing parameters and average grain sizes in recrystallized copper samples

Annealing parameters		Average grain diameter (μm)
Temp. (°C)	Time (min)	
250	60	4
350	60	5
450	60	8
650	60	35
800	60	45



(a) 350°C (b) 450°C

(c) 650°C (d) 800°C

Fig. 4 Microstructures of copper samples developed in different annealing temperatures

800°C 조건에서는 평균 45μm 크기의 결정립이 압연 관찰되었다.

3.2 실험 결과

Fig. 5 는 두께 500μm 의 구리 시편에 다양한 결정립의 크기를 구현하여 인장시험을 실시한 결과를 보여주고 있다. 이론적 모델 식 (11)에서 예측한 것처럼 결정립의 크기가 커질수록 유동응력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 크기인자 λ_2 가 15 이상인 경우(즉, d=4μm, 5μm, 8μm)에는 식 (1)에서 설명한 매크로 영역에서의 크기효과가 유동응력에 주요한 영향을 미치는 것으로 보이며, λ_2 가 15 보다 작은 경우(즉, d=35μm, 45μm)에는 마이크로 영역의 크기효과가 추가적으로 재료의 유동응력에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 결정립의 크기가 더욱 증가하게 되면 유동응력은 Fig. 5 에 표시된 재료 단결정의 유동응력에 해당하는 값(σ_i)[15] 으로 수렴할 것이 예상된다.

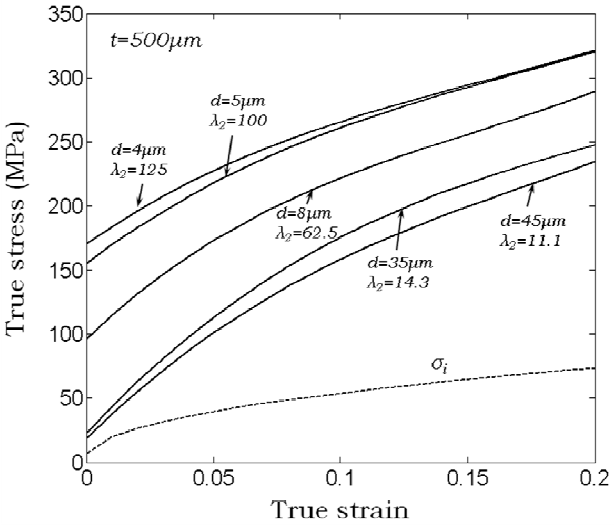


Fig. 5 Stress-strain curves of copper for various grain sizes (thickness=500μm)

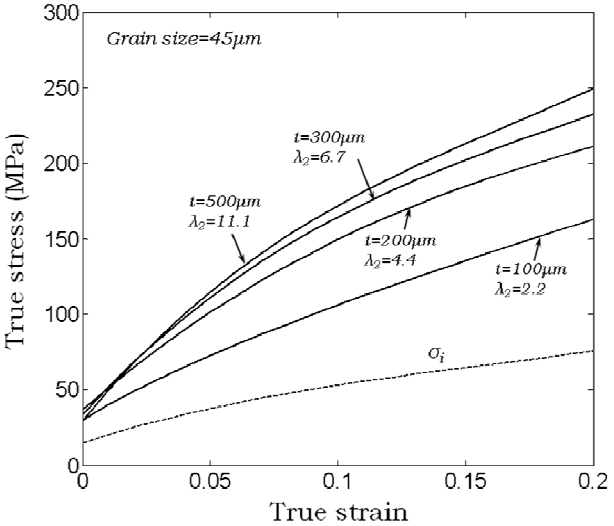


Fig. 6 Stress-strain curves of copper for various specimen thicknesses (grain size=45μm)

마이크로 영역에서 발생하는 크기효과를 고찰하기 위하여 Fig. 6 에서 볼 수 있는 것처럼 동일한 크기의 결정립 조건에서 다양한 두께의 인장시편을 시험하였다. 식 (1)에 따르면 결정립의 크기가 동일한 경우 소재의 유동응력 값도 동일할 것이 예상되나, 실제로는 식 (11)에 나타난 마이크로 영역의 크기효과로 인해 시편두께에 대한 결정립의 상대적인 크기가 증가할수록 유동응력이 감소하는 것이 관찰되었다. 시편의 두께가 100μm 인 경우에는(즉 λ_2=2.2) 20% 변형률에서 약 160MPa 의 유동응력이 관찰되었고, 두께가 500μm 로 증가하면(즉 λ_2=11.1) 해당 유동응력이 250MPa 로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 크기인자가 작아질수록 유동응력의 변화가 현저한 것을 다시 한번 확인할 수 있었다.

미세성형에서 유동응력을 결정하는 인자로는 결정립의 절대적인 크기보다 시편의 두께에 대한 상대적인 결정립의 크기가 더욱 중요한 것으로 판단된다. 따라서 다양한 변형률 값에서 결정립의 상대적 크기(t/d)와 유동응력과의 관계를 Fig. 7 과 같이 나타내었다. 시편의 크기효과가 현저한 마이크로 영역(t/d<15)에서는 유동응력이 결정립과 시편의 상대적인 크기에 매우 민감하게 변화하였고, t≥15 인 매크로 변형 구간에서는 마이크로 영역의 크기효과가 거의 소멸하여 유동

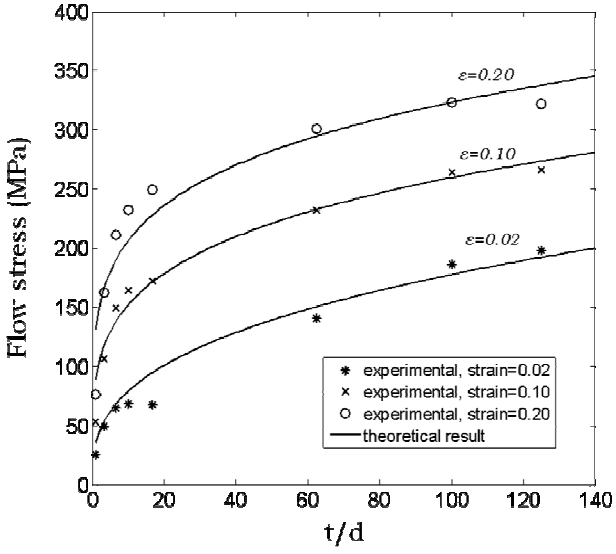


Fig. 7 Thickness and grain size effects on the flow stresses at various strains

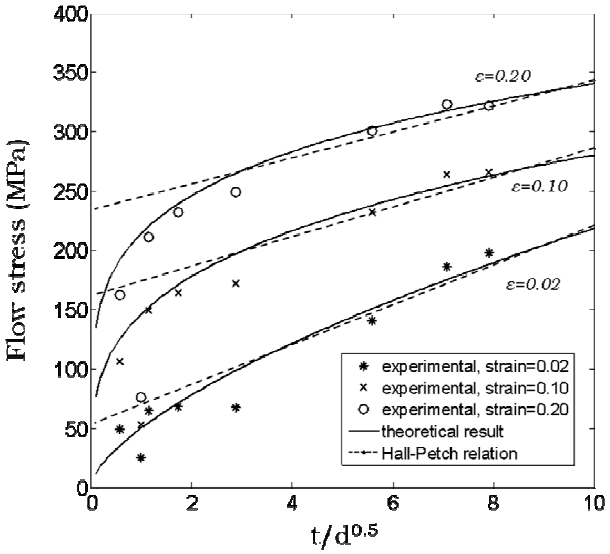


Fig. 8 Comparison of the tensile test results with Hall-Petch relation

응력이 균일하게 변화하는 특성을 보였다. 또한 인장실험 결과와 식 (1)과 식 (11), 식 (14)를 활용하면 소재의 유동응력 변화와 크기효과를 이론적 모델을 활용하여 예측할 수 있으며, Fig. 7 에 나타난 것처럼 이론적 모델은 매크로 및 마이크로 영역에 걸쳐 재료의 유동응력 특성을 비교적 정확하게 예측하였다. 하지만, 결정립의 상대적인 크기가 작아질수록 오차는 증가하는 경향을 보였다.

인장시험 결과와 기존의 Hall-Petch 관계식을 비교하여 Fig. 8 에 도시하였다. Hall-Petch 관계식에서는 결정립의 크기에 대한 유동응력의 변화를 설명할 뿐 시편의 크기효과는 고려되지 않기 때문에 유동응력은 시편 두께 t 에 관계없이 $d^{0.5}$ 항에 비례하여 변화하는 특성을 보인다. 하지만 본 연구에서 예측한 것처럼 t 가 임계값 이하로 감소하는 마이크로 영역에서는 유동응력의 감소가 선형적인 Hall-Petch 관계식을 따르지 않고 그 폭이 현저히 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 즉 미세성형에서 소재의 거동특성은 기존의 Hall-Petch 관계식만으로는 완전히 설명할 수 없으며 본 연구에서와 같이 시편의 크기효과가 추가적으로 고려되어야 함을 확인할 수 있다.

마이크로 영역에서는 변형영역에 존재하는 결정립의 절대적인 수가 작기 때문에 결정립 자체의 물성(property)이 재료의 거시적인 거동에 현저한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[1]. 즉 결정립마다 방향성 (orientation)이나 크기 등과 같은 기하학적 특성(geometric features)이 다르기 때문에 소수의 결정립만이 존재하는 미세성형에서는 결정립의 성질에 따라 재료의 물성 값의 변동이 커지게 된다. 한편 매크로 성형에서는 변형영역에 많은 수의 결정립이 존재하기 때문에 그 평균 값으로 결정되는 재료의 거동특성은 상대적으로 변동 폭이 작아지게 되는 것을 예상할 수 있다. 따라서 재료의 평균적인 물성값을 활용하는 본 연구의 이론적 모델은 실험결과와 비교할 때 오차를 일으킬 가능성이 있는 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 추가적인 연구를 수행할 계획이다.

4. 결 론

본 연구에서는 미세성형 공정에서 나타나는 재료거동의 크기효과를 이론적, 실험적 방법을 활용하여 고찰하였다.

(1) 소재의 변형영역에 작은 수의 결정립이 존재하는 미세성형에서 재료의 변형특성, 특히 유동응력의 크기효과를 고찰하기 위한 이론적 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 Hall-Petch 관계식에 따라 결정립의 크기효과가 주요한 영향을 미치는 매크로 영역에서 뿐 아니라 시편의 크기에 따른 재료의 거동특성 변화가 현저해 지는 마이크로 영역에서도 유동응력의 크기효과를 동시에 설명할 수 있다.

(2) 다양한 두께의 구리소재에 결정립의 크기를 변화시켜 인장시험을 실시하였고, 결정립과 소재의 크기에 대한 유동응력의 변화특성을 정량적으로 고찰하였다. 마이크로 영역에서는 시편의 두께에 대한 결정립의 상대적인 크기가 유동응력을 결정하는 매우 중요한 인자로 파악되며, 그 상대적인 크기가 커질수록 유동응력의 민감도가 증가하였다. 하지만 결정립의 크기가 소재의 크기보다 커지는 경우($t/d<1$)나 나노 크기의 입자($t/d\rightarrow\infty$)를 가지는 경우에는 재료의 변형 메커니즘이 현저하게 변화하는 것으로 알려져 있기 때문에 본 결론의 적용범위에 해당하지 않는다.

(3) 시편 두께 100~500μm, 입자크기 4~45μm 의 구리시편에 대하여 이론적 분석 및 실험적 고찰을 수행한 결과 미세성형의 크기효과는 재료 대 결정립의 크기 비율이 15 이하인 영역에서 현저한 것으로 확인되었다.

(4) 이론적 모델의 정확성과 견실성은 매크로 및 마이크로 영역의 다양한 조건에서 계산된 유동응력 특성을 실험결과와 비교함으로써 검증할 수 있었다. 하지만 마이크로 영역에서의 재료의 거동특성은 개별 결정립의 성질에 따라 그 변동 폭이 큰 것으로 판단되기 때문에 이에 대한 추가적인

연구가 필요하다.

(5) 본 연구를 통해 얻어진 마이크로 영역에서의 재료의 크기효과 및 거동특성에 대한 지식은 미세성형에 대한 근본적인 이해를 확대하고, 공정 및 장비 설계, 해석모델의 개발, 공정 최적화 등을 통한 미세성형의 실용화에 유용한 가이드라인을 제공할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 기초연구사업 (No. 2009-0068593)의 일환으로 수행 되었습니다.

참고문헌

(1) Engel, U. and Eckstein, R., 2002, “Microforming-from Basic Research to Its Realization,” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 125-126, pp. 35~44.

(2) Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N. and Engel, U., 2001, “Microforming,” *51st General Assembly of CIRP*, Vol. 50(2), pp. 445~462.

(3) Engel, U. and Egerer, E., 2002, “Basic Research on Cold and Warm Forging of Microparts,” *Key Eng. Mater.*, Vol. 233~236, pp. 449~455.

(4) Tiesler, N. and Engel, U., 2000, “Microforming-Effects of Miniaturization,” *Proceedings of the 8th International Conference on Metal Forming*, pp. 355~360.

(5) Kals, T. A. and Eckstein, R., 2000, “Miniaturization in Sheet Metal Working,” *J. Mater. Process. Technol.,* Vol. 103, pp. 95~101.

(6) Messner, A., Engel, U., Kals, R. and Vollersten, F., 1994, “Size Effect in the FE-Simulation of Micro-Forming Processes,” *Proceedings of the 5th International Conference on Metal Forming*, pp. 371~376.

(7) Raulea, L. V., Goijaerts, A. M., Govaert, L. E. and Baaijens, F. P. T., 2001, “Size Effects in the Processing of Thin Metal Sheets,” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 115, pp. 44~48.

(8) Kim, G. Y., Koc, M. and Ni, J. “Experimental and Numerical Investigations on Microcoining of Stainless Steel 304,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 130, Issue 4.

(9) Nakamachi, E., Hiraiwa, K., Morimoto, H. and Harimoto, M., 2000, “Elastic/Crystalline Viscoplastic Finite Element Analyses of Single- and Poly-Crystal Sheet Deformations and Their Experimental Verification,” *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, Issue 12, pp. 1419~1441

(10) Peng, L., Lai, X., Lee, H. J., Song, J. H. and Ni, J., 2009, “Analysis of Micro/Mesoscale Sheet Forming Process with Uniform Size Dependent Material Constitutive Model,” *Materials Science and Engineering A*, Vol. 526, pp. 93~99.

(11) Kim, G. Y., Ni, J. and Koc, M., 2007, Modeling of the Size Effects on the Behavior of Metals in Microscale Deformation Processes,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 129, pp. 470~476.

(12) Hall, E. O., 1951, “Deformation and Ageing of Mild Steel,” *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 64, pp. 747~753.

(13) Petch, N. J., 1953, “Cleavage Strength of Polycrystals,” *J. Iron Steel Inst.*, Vol. 174, pp. 25~28.

(14) Fu, H. H., Benson, D. J. and Meyers, M. A., 2001, “Analytical and Computational Description of Effect of Grain Size on Yield Stress of Metals,” *Acta Mater.*, Vol. 49, pp. 2567~2582.

(15) Cuitino, A. M. and Ortiz, M., “Computational Modeling of Single Crystals,” *Modeling and Simulation in Material Sciences and Engineering*, Vol. 1, pp. 225~263.