

마이크로 성형 공정을 위한 금속재료의 크기효과 고찰

An Experimental Study on the Size Effects of Metals for Micro-scale Deformation Processes

이용성¹, 김극릉², 심상미², 한유하², 신기훈²,*[#]김홍석²

Y. S. Lee¹, G. R. Kim², S. M. Shim², Y. H. Han², K. H. Shin²,*[#]H. S. Kim(hongseok@snut.ac.kr)²
¹서울산업대학교 NID 융합기술전문대학원, ²서울산업대학교 기계공학과

Key words : Microforming, Miniaturization, Size effect, Grain size, Tensile test

1. 서론

최근 반도체, 디스플레이, 휴대폰 등을 생산하는 전자 산업 뿐 아니라 의료, 광학, 에너지, 항공우주, 방위산업 등의 분야에서도 고집적 다기능의 제품 생산을 위한 마이크로 부품의 필요성이 크게 증대되고 있다. 현재까지 마이크로 형상가공 및 부품 생산을 위해 가장 발전된 기술은 1 μ m 이상의 높은 가공정밀도를 구현할 수 있는 LIGA(lithography galvanofforming abforming) 공정으로 알려져 있다. 하지만 LIGA 공정은 주로 2 차원 혹은 2 1/2 차원의 제품 생산을 위한 것으로, 3 차원 자유형상의 가공이 어렵고, 가공 재료에 한계가 있으며, 공정속도가 느린 단점을 가지고 있다. 대체 생산방법 중 하나인 마이크로 절삭가공 기술은 3 차원 자유형상의 가공이 가능하고 가공재료를 다양화 할 수 있는 측면에서는 장점을 가지고 있으나, 역시 가공속도의 한계로 인하여 대량생산에 적용하기에는 어려운 단점을 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로서 다양한 소재에 대하여 초소형 고정밀 생산이 가능하면서 높은 생산성을 유지할 수 있는 마이크로 성형(microforming) 기술이 최근 많은 주목을 받고 있다.

마이크로 성형은 그 스케일이 마이크로 단위로 줄어들며 따라 재료의 변형 영역에 단 몇 개의 입자(grain)만이 존재하는 특성을 가지게 된다. 이 때 변형 재료는 더 이상 균질한 연속체(continuum)로 가정할 수 없으며, 기존 매크로(macro) 스케일 성형에서 축적된 노하우들도 그대로 마이크로 성형에 적용하기 어렵다. 현재 마이크로 성형 관련 원천기술 확보 및 상용화를 위해 전 세계적인 투자와 노력이 지속되고 있으며 일본과 유럽이 핵심 기술에 대한 기술적 우위를 가지고 관련 산업을 독점하고 있는 상태이다. 마이크로 성형에 의한 초정밀 핵심 부품 생산기술은 단기간의 기술 확보는 어려우나 미래의 잠재적인 활용 가능성이 매우 큰 중점기술이므로 중장기적 기술개발 목표와 지원 하에 반드시 확보되어야 할 기술 중 하나이다. 마이크로 성형 시스템은 재료(material), 금형(tooling), 제품(product), 공정(process), 장비(machine/equipment)의 5 가지 세부 분야로 나눌 수 있으며 각 분야에서 소위 “크기효과(size effect)”를 고려한 심도 있는 연구를 통해 마이크로 성형에 대한 근본적인 이해를 넓힐 필요가 있다.

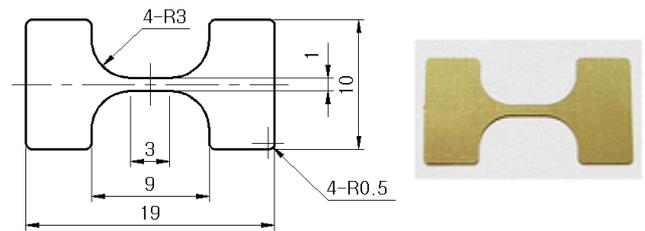
지난 수 십년간 마이크로 성형 공정에서 재료의 크기효과를 밝히기 위한 많은 연구가 진행되었다. 특히 성형하중, 금형마모, 성형품질에 직접적인 영향을 미치는 유동응력(flow stress)은 마이크로 영역에서 상사이론(similarity theory)에 따르지 않고 그 크기가 감소하는 것으로 관찰되었다. 그 원인은 주로 표면층모델(surface layer model) [1-3]을 이용하여 설명되었는데 재료의 자유로운 표면입자(surface grain)와 구속된 내부입자(internal grain)의 비율이 마이크로 영역으로 이동할수록 증가하여 재료의 경화효과(hardening effect)가 감소하게 된다는 것이었다. 최근에는 마이크로 영역에서의 유동응력 감소를 입자크기(grain size)와 시편크기(specimen size)의 비에 근거하여

정량적으로 모델링 하려는 많은 연구가 진행되고 있다 [4,5]. 이처럼 마이크로 영역에서 재료의 거동특성에 대한 정확한 정보는 마이크로 성형 공정에 대한 근본적인 이해를 확대하고, 유한요소해석(finite element analysis)을 통한 공정의 분석 및 설계, 최적화를 가능하게 할 것으로 기대된다.

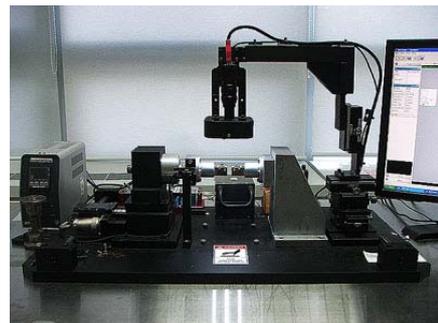
본 연구에서는 마이크로 성형 공정에서 재료의 크기효과를 모델링 하기 위한 기초연구를 수행하였다. 황동과 인청동을 대상으로 미세 박판 인장시험을 실시하였으며, 입자크기 및 시편크기가 유동응력에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 실험 방법

다양한 두께의 황동(brass) 및 인청동(phosphor bronze) 재료를 대상으로 인장시험을 실시하였다. 황동의 경우에는 150, 200 μ m 두께의 박판을, 인청동의 경우에는 150, 200, 250 μ m 두께의 박판을 준비하였으며 와이어 방전가공기(wire electric discharge machine)를 이용하여 Fig. 1(a)과 같은 형상의 인장시편을 제작하였다. Fig. 1(b)에서 보여진 것처럼 인장시험은 스페이스 솔루션에서 제작된 마이크로 인장시험기(SMT-H50)를 이용하여 실시하였다. 변형률 측정시 시편 그림부의 미끄러짐에 의한 오차를 보상하기 위하여 시편에 표점을 찍고, CCD 카메라를 이용하여 표점거리의 변화를 실시간으로 측정하였다. 시험속도는 200 μ m/min, 온도는 상온에서 실시하였다.



(a) tensile test specimen



(b) tensile tester

Fig.1 Micro tensile test for thin metals

3. 실험 결과

본 연구에서 박판의 두께별 결정입도를 조사하였다. 황동의 경우 열처리를 하지 않고 재료를 잘라 각 단면을 연마하였고, $\text{FeCl}_3(0.5\text{g}) - \text{HCl}(50\text{ml}) - \text{H}_2\text{O}(100\text{ml})$ 의 시약으로 30 sec 동안 부식시켜 광학 현미경으로 관찰하였다 [6]. Fig. 2 에 나타난 것처럼 두 개의 시편에서 입자의 균질성이 확보되지는 않았지만 입자의 평균 직경은 약 $9.4\mu\text{m}$ 로 비슷하였다. 따라서 시편두께(t)와 조직크기(d)의 상대적 비율 t/d 는 $150\mu\text{m}$ 와 $200\mu\text{m}$ 두께의 박판의 경우 각각 약 16 과 21 이었다.

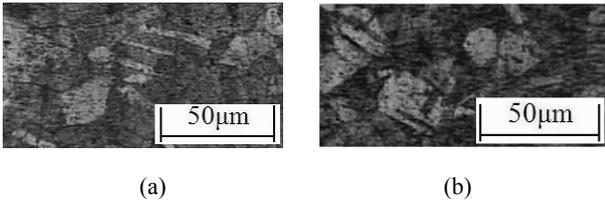


Fig. 2 Brass microstructure samples (a) $t=150\mu\text{m}$ (b) $t=200\mu\text{m}$

Fig. 3 는 황동 시편의 인장시험의 결과를 보여준다. 전체적으로 $150\mu\text{m}$ 두께의 시편이 $200\mu\text{m}$ 두께의 시편보다 응력이 높은 것으로 관찰되었고 최대 차이는 약 20MPa 이었다. 하지만 샘플의 크기가 작아 황동의 크기효과를 일반화 하기에는 무리가 있었다.

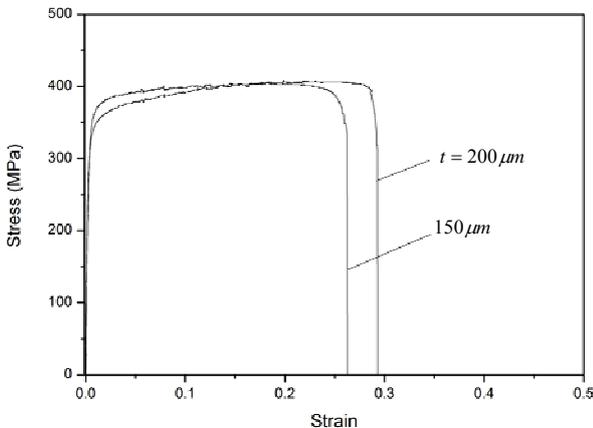


Fig. 3 Engineering stress-strain curves of brass

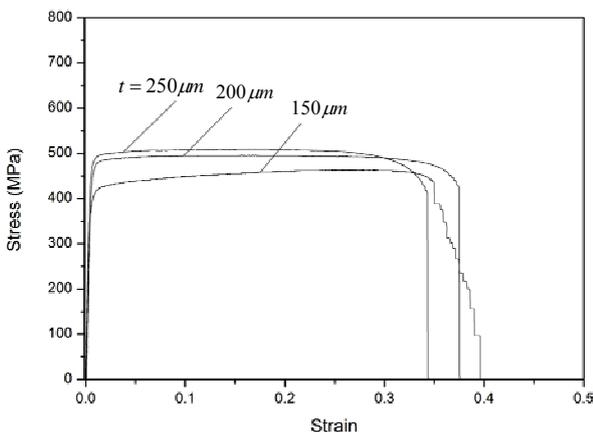


Fig. 4 Engineering stress-strain curves of phosphor bronze

Fig. 4 는 인청동 시편의 인장시험의 결과를 보여준다. 시편의 두께가 작을수록 인장응력의 감소함을 관찰할 수 있었고, 이는 이전 연구자들의 표면층모델(surface layer model) 해석 결과와 일치하였다. $150\mu\text{m}$ 두께의 박판의 경우 $250\mu\text{m}$ 두께의 박판과 비교할 때 약 80MPa 의 강도 감소가 관찰되었다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 마이크로 성형 공정에 대한 근본적인 이해를 넓히기 위하여 마이크로 영역에서의 금속재료 거동특성을 인장시험을 통하여 분석하였다. 일반적으로 마이크로 성형의 경우 표면입자(surface grain)의 내부입자(internal grain)에 대한 상대적인 비율이 증가하여 재료의 강도가 감소하는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서도 인청동의 경우 유사한 결과를 관찰할 수 있었다.

하지만 마이크로 영역에서의 재료의 거동은 입자의 방향성(orientation) 및 균질성에 크게 영향을 받고 일반적으로 변동(variation)이 심한 것으로 알려져 있다. 따라서, 보다 견실한 결과를 얻고 이를 정량적으로 모델링 하기 위해서는 열처리를 통한 조직의 크기 조절과 보다 다양한 두께의 재료에 대한 반복시험이 필요할 것으로 판단된다.

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_0(\epsilon) + \frac{K(\epsilon)}{\sqrt{d}} \tag{1}$$

식(1)은 매크로 영역에서 입자의 크기 d 와 유동응력 σ 을 관계시키는 가장 널리 알려진 Hall-Petch 관계식이다. 수집된 Data 를 이용하여 재료계수 σ_0 와 K 를 입자크기 및 시편크기의 함수로 표현한다면 마이크로 영역에서 재료의 일반화된 거동특성을 밝힐 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 논문은 2009 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (과제번호 : 2009-0068593).

참고문헌

- Engel, U. and Eckstein, E., "Microforming - from basics to its realization," *Journal of Materials Processing Technology*, **125-126**, 35-44, 2002.
- Engel, U. and Egerer, E., "Basic research on cold and warm forging of microparts," *Key Engineering Material*, **233-236**, 449-456, 2003.
- Engel, U., "Tribology in microforming," *Wear*, **260**, 265-273, 2006.
- Yu., S. and Yu, H., "Construction of a composite model of decreasing flow stress scale effect," *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 5845-5850, 2009.
- Peng, L., Lai, X., Lee, H.J., Song, J.H. and Ni, J., "Analysis of micro/mesoscale sheet forming process with uniform size dependent material constitutive model," *Materials Science and Engineering: A*, **526**, 94-99, 2009.
- 박현식, 나형용, "고력황동의 Hard Spots 형성에 미치는 첨가원소의 영향," *한국주조공학회지*, **6**, 12-19, 1986.