

# 미세 부품 성형을 위한 소형 마이크로 성형시스템 개발 및 재료의 변형 거동 고찰

## Development of a Miniaturized Microforming System and Investigation of Deformation Behavior of Material for the Production of Micro Components by Forming

남정수<sup>1</sup>, 박일구<sup>2</sup>, 이상원<sup>3</sup>, 김홍석<sup>2,✉</sup>  
Jung Soo Nam<sup>1</sup>, Il Gu Park<sup>2</sup>, Sang Won Lee<sup>3</sup>, and Hong Seok Kim<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 성균관대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Sungkyunkwan Univ.)

<sup>2</sup> 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology)

<sup>3</sup> 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

✉ Corresponding author: hongseok@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-6333

Manuscript received: 2012.6.14 / Accepted: 2012.8.14

*As demands on micro-products increase significantly with raising functional integration and increasing complexity, microforming attracts a lot of attention in the manufacture of micro-products. Since the conventional big forming systems are not adequate to achieve sufficient tolerances of micro-scale parts, it is necessary to reduce the scale of the forming equipment and devices. In addition, understandings on the size effects, which exist in the material behavior and process characterization of microforming processes, need to be expanded. In this study, a miniaturized forming system based on the ball screw and servo motor actuator was developed for the efficient micro-parts production. In addition, tensile tests and cylindrical upsetting experiments were performed to evaluate the performance of the microforming system and to investigate the flow stress and friction size effects in microforming processes.*

Key Words: Microforming (미세성형), Size Effect (크기효과), Flow Stress (유동응력), Desktop Forming System (데스크 탑 성형시스템), Friction (마찰)

### 기호설명

$\sigma_0$  = friction stress at zero dislocation density

M = Taylor orientation factor

G = shear modulus

b = magnitude of the Burgers vector

$\alpha$  = geometric constant related to the crystal

$\epsilon$  = plastic strain

d = grain size

$D_M$  = maximum diameter of the disk

$D_T$  = top diameter of the disk

### 1. 서론

최근 기계, 전자, 바이오, 에너지 등 다양한 산업 분야에서 제품의 소형화(Miniaturization)에 대한 요구가 증대되고 있어, 관련 생산기술을 확보하기 위한 투자와 노력이 전세계적으로 지속되고 있다. 그 중에서도 미세성형(Microforming)기술은 마이크로 절삭가공, MEMS(Micro electro mechanical system), 특수가공 등과 비교할 때 높은 생산성과 제조비용 절감의 경제적인 이점을 가지고 있고, 다양한 재료의 활용, 균질한 품질의 제품 생산 등을 가능하

게 하기 때문에 마이크로급 정밀부품 생산을 위한 매우 유망한 가공방법으로 고려되고 있다.<sup>1</sup> 하지만 미세성형 공정에서는 소재의 변형영역이 감소하면서 상사이론(Rule of similarity)에 위배되는 소위 크기효과(Size effect)<sup>2</sup>가 관찰되고 있어 기존의 성형 공정에서 축적된 다양한 기술과 노하우들을 그대로 적용하기는 어렵다. 따라서 미세성형 공정의 실용화를 위해서는 마이크로 영역에서 재료의 거동 및 공정변수의 영향, 소형화 된 부품에 적합한 가공 및 측정장비의 개발, 정밀금형 설계, 부품 핸들링 기술 등에 대한 폭넓은 연구가 필요한 실정이다.

미세성형에 대한 이해와 적용을 확대하기 위하여 국내외에서 많은 연구가 진행되고 있으며, Engel<sup>3</sup> 등은 미세성형 공정의 기술 현황과 문제점 및 해결책에 대한 전반적인 연구사례를 조사하였다. Kals<sup>4</sup>와 Kim<sup>5</sup> 등은 인장시험을 통해 소재의 크기가 감소함에 따라 나타나는 유동응력(Flow stress)의 변화를 이론적, 실험적으로 고찰하였고, Barbier<sup>6</sup> 등은 실린더의 직경을 감소시키면서 소재변형 실험을 수행하여 유동응력의 크기효과를 검증하였다. 미세성형 공정에서는 마찰특성의 변화도 현저한 것으로 보고되고 있으며, Engel<sup>7</sup>과 Kim<sup>8</sup> 등은 실험 및 이론적 고찰을 통해 마이크로 영역에서 접촉면의 평균 마찰응력이 증가하게 됨을 보였다. Presz<sup>9</sup> 등은 미세부품 크기에 적합한 가공시스템 및 관련 장비 개발의 필요성을 언급하였고, 압전소자(Piezoelectric element)를 적용한 마이크로 성형시스템을 개발하여 블랭킹(Blanking), 형단조(Closed-die forging), 후방압출(Backward extrusion) 등의 공정을 수행하였다.

미세성형은 본질적으로 공정의 복잡성과 비선형적 특성을 가지고 있어 실용화 및 근본적인 이해를 확대하기 위해서는 마이크로 영역에서의 재료, 공정, 장비, 금형, 제품 품질 등에 대한 지속적인 추가 연구가 필요하다. 본 연구에서는 효율적인 미세성형 공정을 수행하기 위한 데스크 탑 크기의 다목적 마이크로 성형시스템을 개발하였고 그 성능을 평가하였다. 개발된 마이크로 성형시스템을 통한 유동응력 측정 결과는 이론적 모델링에서의 예측 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 성형공정의 특성을 결정하는 가장 중요한 인자인 유동응력과 마찰특성을 대상으로 이론적 모델링과 실험을 수행하여 마이크로 영역에서의 크기효과를 정량적으로 고찰하였다.

## 2. 마이크로 성형시스템의 개발

효과적인 미세성형 실험을 위하여 Fig. 1 과 같은 데스크 탑 크기의 마이크로 성형시스템을 제작하였다. 본 시스템은 최대 회전속도 6,000 rpm 을 가지는 AC 서보모터(Servo motor), 감속비 10:1 을 가지는 모터 감속기(Reducer), 두 개의 리니어 모션(LM) 가이드, 볼 스크류(Ball screw), 100 nm 의 분해능을 가지는 리니어 엔코더(Linear encoder)로 구성되었다. 또한 하부 프레임에는 인장 및 압축 힘 측정을 위한 로드셀(Load cell)을 부착하였으며, 로드셀 위로 x-y 스테이지를 설치하여 성형 실험시 상하중심선이 일치하도록 조정하였다. 다이와 펀치는 가공영역의 상부 및 하부 판에 설치하였으며, 인장시험을 비롯한 다양한 성형 공정을 수행할 수 있도록 탈부착이 가능한 형태로 설계하였다. 마이크로 성형시스템의 전체 크기는 350×400×650 (mm) 이고, 최대 이송속도는 100 mm/s, 성형하중용량은 최대 1.5 톤이다.

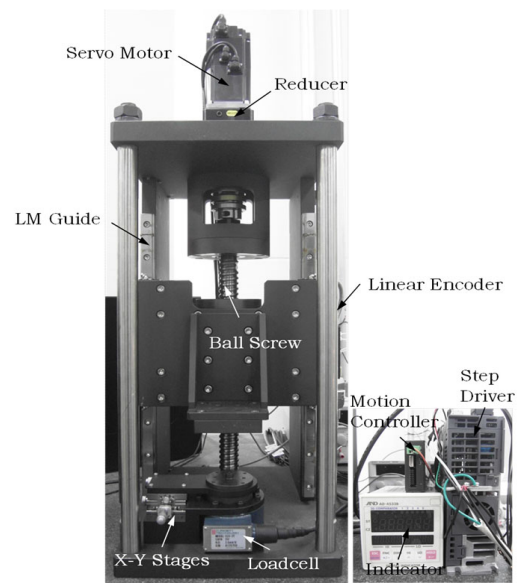


Fig. 1 Miniaturized desktop microforming system

개발된 마이크로 성형시스템의 가공 성능을 평가하기 위하여 인장시험을 수행하였고, 그 결과를 기존의 마이크로 인장시험기(SMT-H50)와 비교하였다. 알루미늄(Al6061) 소재를 방전 가공하여 Fig. 2(a)와 같은 형태의 인장시편을 가공하였다. 시편은 초기 표점거리(gauge length)와 표점

폭(gauge width)을 각각 3 mm 및 1 mm 로 고정하였고, 3 mm 의 곡률반경을 통해 응력집중을 줄이고자 하였다. 시편은 Fig. 2(b)와 같은 인장그립을 통해 성형시스템에 고정되었다. 변형률 측정시 그립부의 미끄러짐 및 오차를 최소화하기 위하여 시편 양단에 구멍을 뚫어 그립부에 고정하였다. 한편, 마이크로 인장시험기의 경우는 시편에 표점을 찍고 CCD 카메라로 표점거리를 실시간으로 측정하여 변형률을 측정하였다.

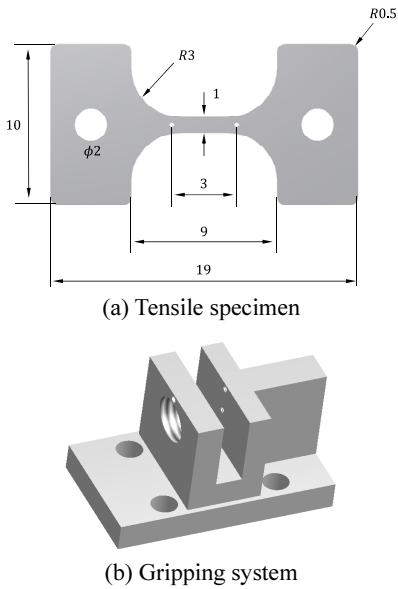


Fig. 2 Gripping system and specimen for micro scale tensile tests

마이크로 성형시스템과 기존의 마이크로 인장시험기를 통한 실험 결과를 Fig. 3 에 비교하였다. 인장시험 속도를 200  $\mu\text{m}/\text{min}$  으로 고정하였을 때 응력-변형률 곡선이 거의 일치함을 확인할 수 있었고 개발된 마이크로 성형시스템의 정확성과 성능을 검증할 수 있었다.

3. 미세성형 공정의 크기효과

미세성형 공정에서는 소재의 변형영역이 마이크로 단위로 줄어들기 때문에 기존 매크로 영역에서 축적된 많은 성형 관련 기술과 노하우들을 그대로 적용하기 어렵다. 성형 공정에서 제품의 품질과 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 유동응력과 마찰특성으로, 이들 인자들에 대한 이론적

모델링 및 개발된 마이크로 성형시스템을 활용한 실험적 연구를 통해 미세성형 공정의 특성 및 크기 효과를 규명하고자 하였다.

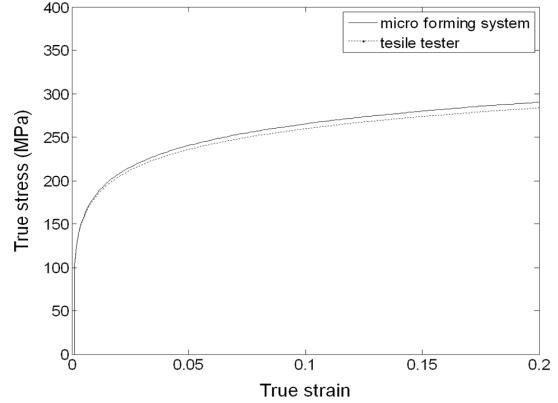


Fig. 3 Comparison of tensile test results between microforming system and tensile tester

3.1 유동응력 분석

소재가 소성변형을 하게 되면 결정립 내에 전위(dislocation)가 발생하여 축적되고, 소재는 변형 경화를 일으키게 된다. 결정립 내의 전위밀도는 통계적 축적전위(statistically stored dislocation)와 기하학적 필요전위(geometrically necessary dislocation)를 이용하여 표시할 수 있으며, 테일러 식<sup>10</sup>을 활용하여 유동응력 관계식을 나타낼 수 있다. 미세성형에서 유동응력의 변화는 시편의 크기가 작아질수록 소재의 자유표면에 존재하는 결정립 경계 영역의 비율이 상대적으로 증가하기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 결정립 경계영역에는 주로 기하학적 필요전위가 축적된다. 따라서 크기인자(size factor)  $\lambda$ 를 추가하여 테일러 식을 매크로 영역뿐 아니라 마이크로 영역에도 적용 가능하도록 다음과 같이 수정할 수 있다.<sup>11</sup>

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_0 + M\alpha Gb \left[ (C_1 \epsilon^n)^\mu + \frac{\lambda - 1}{\lambda} \left( f \frac{C_2 \epsilon^m}{bd} \right)^\mu \right]^{\frac{1}{2\mu}} \quad (1)$$

여기서 f는 기하학적 필요전위의 체적 비율,  $\mu$ 는 기하학적 필요전위와 통계적 축적전위가 유동응력에 미치는 영향을 나타내는 계수이고,  $C_1, C_2, n, m$ 은 재료 계수이다. 크기인자  $\lambda$ 는 시편단면 내부의 결정립의 개수  $g_t$ 와 시편단면과 결정립의 자유표

면 길이 C 와 L 을 이용하여 다음과 같이 정량화 할 수 있다.

$$\lambda = \frac{Lg_r}{C} \quad (2)$$

Fig. 4 는 구리소재에 대한 압축실험 결과를 보여주고 있다.  $\Phi 3 \times 3$  원기둥 시편을 사용하였고 변형률 속도는  $0.0005s^{-1}$  로 고정하였다. 실험 전 시편을 다양한 온도에서 풀림 처리(300, 500, 700°C)하여 결정립 크기를 각각 15, 30, 70  $\mu m$  로 조절하였다. Fig. 4 에 나타난 것처럼 개발된 성형시스템을 통한 실험결과는 이론적 모델링을 통한 유동응력의 계산 결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 결정립의 크기가 커질수록 유동응력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

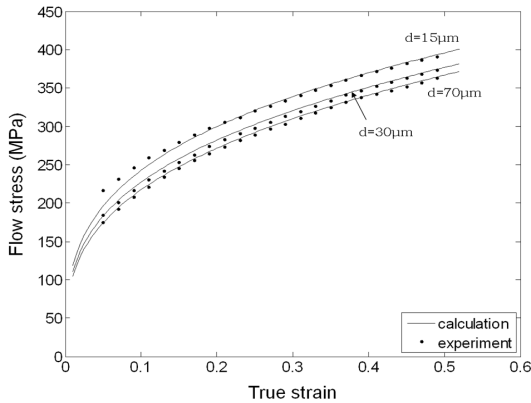


Fig. 4 Comparison of the calculated and experimental results of flow stresses with various grain size

결정립의 크기가 커지면 소재의 자유표면에 존재하는 결정립 경계영역이 증가하기 때문에 미세성형과 유사한 공정 조건으로 접근하게 된다. 따라서 다양한 변형률 조건에서  $d^{-1/2}$  과 유동응력의 관계를 고찰하여 기존 Hall-Petch<sup>12</sup> 관계식의 유효성을 조사하였다. Fig. 5 에 나타난 것처럼 모든 변형률 조건에서 유동응력이  $d^{-1/2}$  과 선형적인 관계에 있음을 확인할 수 있으며, 그 기울기 값도 변형률 값에 관계없이 차이가 거의 없었다. 실제로 마이크로 영역에서는 크기인자  $\lambda$  의 영향이 증가하여 Hall-Petch 곡선이 비선형적으로 변환될 것으로 예상되지만, 본 실험에서는 결정립의 크기가 시편의 크기보다는 상대적으로 작아 이러한 효과가 나타나지 않은 것으로

판단된다. 즉 시편의 크기가 더욱 작아지거나 결정립의 크기가 커질 경우 소재의 자유표면에 존재하는 결정립의 상대적인 비율이 증가하여 미세성형에서의 유동응력 크기효과가 더욱 현저하게 나타날 것으로 예상된다. 향후 시편의 크기와 미세조직을 조절하여 추가적인 실험 및 검증이 필요하다.

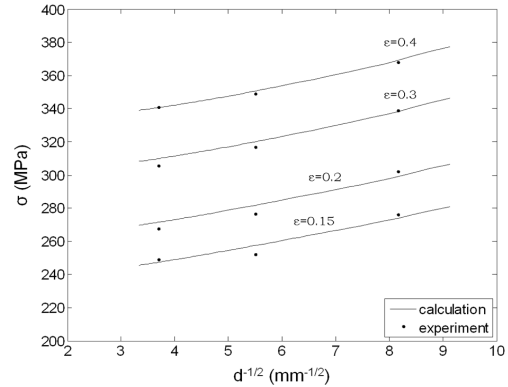


Fig. 5 Calculated  $\sigma-d^{-1/2}$  curves in comparison with the experimental measurements

### 3.2 마찰특성 분석

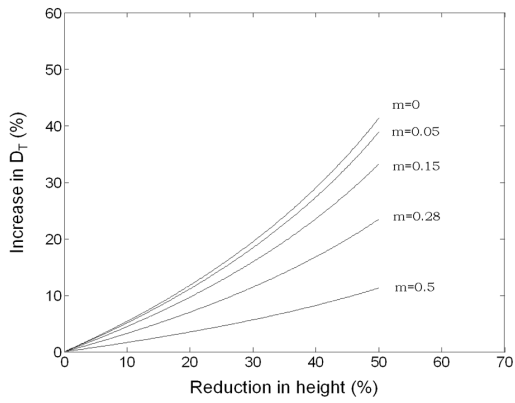
마이크로 영역에서는 성형 시 마찰특성이 현저하게 변화하는 것으로 관찰되며, 이는 주로 윤활포켓모델<sup>7</sup>을 통하여 설명하고 있다. 즉 소성변형 시 소재 접촉표면의 가장자리에는 윤활제가 쉽게 빠져나가는 열린윤활포켓(open lubricant pocket)이 생성되는데, 미세성형에서는 그 기하학적인 특성상 열린윤활포켓의 상대적인 비율이 증가하여 마찰력이 증가하게 된다는 것이다. 이러한 마찰특성의 정량적인 분석을 위하여 다양한 크기를 가지는 원기둥 시편의 업세팅(upsetting) 공정을 대상으로 이론적, 실험적 연구를 진행하였다.

원기둥 시편의 축대칭(axisymmetric) 변형을 가정하면 질량보존 법칙에 따라 속도장을 다음과 같이 표시할 수 있다.<sup>13</sup>

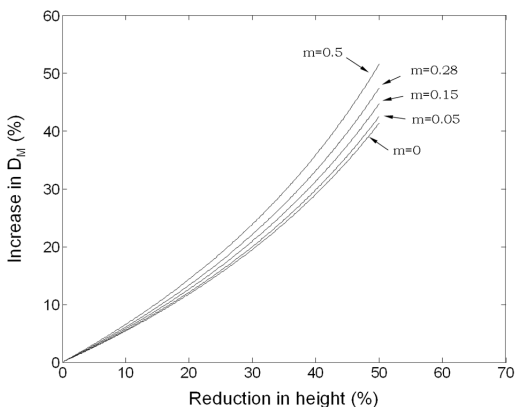
$$V_r = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi(r, z)}{\partial z} \quad (3)$$

$$V_z = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi(r, z)}{\partial r} \quad (4)$$

여기서  $V_r$  과  $V_z$  는 각각 반경방향 속도와 축방향 속도이다.



(a) Top diameter



(b) Maximum diameter

Fig. 6 Change of diameter vs. height of cylinder during deformation at different friction conditions

또한  $\psi(r, z)$ 은 포텐셜 함수로 대칭조건을 고려하여 다음과 같이 가정하였다.<sup>14</sup>

$$\psi(r, z) = \frac{4\pi Ar^2}{h} \left( z - \frac{\beta}{1+\gamma} \left( \frac{2}{h} \right)^\gamma z^{1+\gamma} \right) \quad (5)$$

여기서 h는 시편의 높이이고, A,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 마찰 특성에 따라 결정되는 계수이다.

식(3)과 (4)를 이용하여 원기둥 시편의 변형을 예측하였으며 마찰인자에 따른 시편의 최대지름과 상부지름의 변화를 정량적으로 분석할 수 있었다. Fig. 6에 나타난 것처럼 시편의 상부지름의 경우 마찰력에 대한 민감도가 최대지름보다 컸으며, 마찰력이 클수록 시편의 최대지름과 상부지름의 차이가 증가하여 배럴링(barreling) 현상이 두드러진 것을 확인할 수 있다.

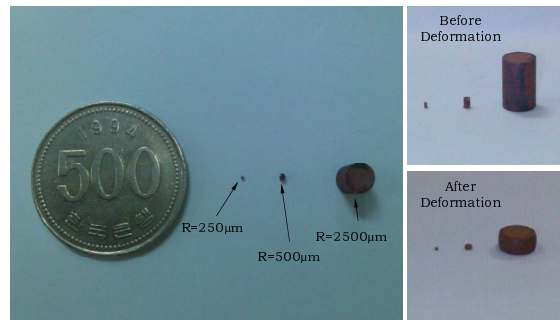


Fig. 7 Disk specimens of various sizes

마이크로 성형시스템을 활용하여 다양한 크기의 시편에 대한 실험을 실시하였고, 시편의 변형 특성 및 배럴링을 측정하여 시편 크기에 따른 마찰력의 변화를 정량적으로 분석하였다. Fig. 7에 나타난 것처럼 반지름 250, 500, 2500 µm의 원기둥 시편을 절삭가공하였고, 시편의 상대적인 크기는 지름:높이=1:1.5로 고정하였다. 시편은 아세톤을 이용하여 세척한 후 윤활제(engine oil + MoS<sub>2</sub>)를 시편 표면에 적용하였다. 변형률 민감도(strain rate sensitivity) 효과를 제거하기 위하여 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>의 변형률 속도로 실험을 실시하였다.

다양한 크기의 시편에 대한 압축실험을 실시한 결과 디스크의 최대지름은 마찰력에 대한 민감도가 작아 시편의 크기변화에 따른 변형특성의 변화가 두드러지지 않았다. 하지만 Fig. 8에 나타난 것처럼 상부지름의 경우에는 시편의 크기가 작아질수록 지름의 증가율이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 시편의 크기가 감소함에 따라 마찰력의 크기가 증가하게 됨을 의미하며, Fig. 6을 이용

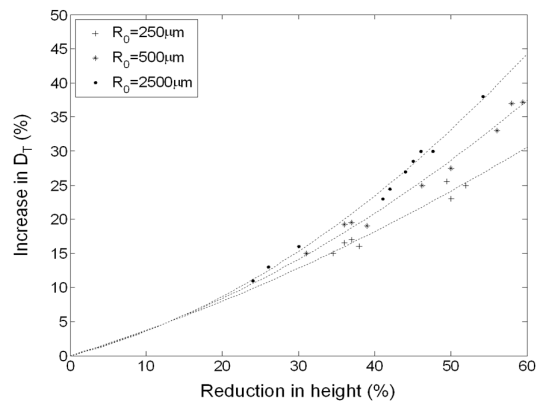


Fig. 8 Change of shape geometry of the disks with deformation

하여 마찰력의 값을 정량적으로 측정할 수 있다. 250  $\mu\text{m}$  시편의 경우 마찰인자가 0.28~0.31 범위에 있었고, 500  $\mu\text{m}$  및 2500  $\mu\text{m}$  시편은 각각 0.2~0.2, 0.15~0.2 의 범위에서 마찰인자가 결정되었다. 따라서 본 실험을 통하여 마이크로 영역에서 열린윤활 포켓의 상대적인 증가에 따른 마찰력의 증가를 설명할 수 있었고, 시편의 크기에 따른 마찰력의 정량적인 변화를 분석할 수 있었다.

본 연구의 결과는 마이크로 성형에 대한 근본적인 이해를 확대하고, 마이크로 성형공정에서 효율적인 공정설계 및 최적화를 위한 가이드라인을 제공하는데 활용될 수 있을 것이다. 향후 다양한 소재 및 공정을 대상으로 본 연구의 결과를 적용하고, 변형률 속도, 이방성, 표면특성 등 추가적인 재료 및 공정변수를 고려한 지속적인 연구가 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 보다 효과적인 미세성형 공정을 수행하기 위하여 데스크 탑 크기의 마이크로 성형 시스템을 개발하였고 이론적 모델링 및 실험적 고찰을 통하여 미세성형 공정의 크기효과를 연구하였다.

(1) 볼스크류 및 AC 서보모터를 이용하여 1.5 톤의 성형하중용량을 가지는 마이크로 성형시스템을 개발하였다. 개발된 성형시스템을 활용하여 인장 및 압축실험을 실시하였으며, 실험결과는 기존의 마이크로 인장시험기를 통한 예측결과와 매우 유사함을 확인하였다.

(2) 다양한 크기의 결정립을 가지는 시편에 대한 유동응력 측정 결과 마이크로 영역에서 이론적 모델링을 통한 계산 값과 일치함을 확인할 수 있었다. 하지만 결정립의 크기가 시편의 크기보다는 상대적으로 작아 Hall-Petch 곡선의 비선형성은 확인하지 못하였으며 향후 시편의 크기 및 미세조직을 조절한 추가적인 실험이 요구된다.

(3) 다양한 크기의 원기둥 시편에 대한 업세팅 공정을 실시하여 미세성형에서 접촉면의 평균마찰응력이 증가하는 것을 확인하였다. 또한 이론적 모델링과의 비교를 통하여 시편의 크기에 따른 마찰인자의 변화를 정량적으로 분석할 수 있었다.

(4) 본 연구는 마이크로 성형에 대한 이해 및 실용화 확대, 효율적인 마이크로 성형의 공정설계 및 최적화에 기여할 것으로 기대된다. 향후 다양

한 소재와 공정을 대상으로 지속적인 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

#### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N., and Engel, U., "Microforming," CIRP-Manufacturing Technology, Vol. 50, No. 2, pp. 445-462, 2001.
- Vollertsen, F., Hu, Z., Niegoff, H. S., and Theiler, C., "State of the Art in Micro Forming and Investigations into Micro Deep Drawing," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 151, pp. 70-79, 2004.
- Engel, U. and Eckstein, R., "Microforming-from basic research to its realization," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 2111-2121, 2009.
- Kals, T. A. and Eckstein, R., "Miniaturization in Sheet Metal Working," Journal of Material Processing Technology, Vol. 103, pp. 95-101, 2000.
- Kim, H. S. and Lee, Y. S., "Investigation on the Size Effects of Polycrystalline Metallic Materials in Microscale Deformation Processes," Transactions of the KSME A, Vol. 34, No. 10, pp. 1463-1470, 2010.
- Barbier, C., Thibaud, S., Richard, F., and Picart, P., "Size Effects on Material Behavior in Microforming," International Journal of Material Forming, Vol. 2, pp. 625-628, 2009.
- Engel, U., "Tribology in microforming," Wear, Vol. 260, pp. 265-273, 2006.
- Kim, H. S. and Kim, G. R., "A study of friction in microforming using ring compression tests and finite element analysis," Transactions of the KSME A, Vol. 34, No. 10, pp. 1471-1478, 2010.
- Presz, W., Andersen, B., and Wanheim, T., "Piezoelectric driven micro-press for microforming," Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 18, pp. 411-414, 2006.
- Taylor, G. I., "Plastic strain in metals," J. Inst. Met., Vol. 62, pp. 307-324, 1938.

11. Kim, H. S. and Lee, Y. S., "Size dependence of flow stress and plastic behavior in microforming of polycrystalline metallic materials," Proc. IMechE Part C: J. Mechanical Engineering Science, Vol. 226, pp. 403-412, 2012.
12. Petch, N. J., "Cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., Vol. 174, pp. 25-28, 1953.
13. Wu, M. C. and Yeh, W. C., "Effect of natural boundary conditions on the upper-bound analysis of upset forging of ring and disks," Materials and Design, Vol. 28, pp. 1245-1256, 2007.
14. Kim, N. S. and Kim, H. J., "Metal Forming and Analysis," Munundang, 2002.