

# 진동 하중을 이용한 마이크로 부품 및 표면 패턴 성형 기술

나영상<sup>1#</sup>, 이종훈<sup>1</sup>, 이원식<sup>2</sup>

## Micro Forming of Metallic Micro-parts and Surface Patterns by Employing Vibrational Load

Y. S. Na, J. H. Lee, W. S. Lee

### Abstract

Vibrational micro-forming of pyramidal shape patterns was conducted for an Al superplastic alloy, Al 5083 and a Zr-based bulk metallic glass,  $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$ . A vibrational micro-forming system was specially designed for generating vibrational load by combining a PZT actuator with a signal generator. Single crystal Si micro dies with wet-etched pyramidal patterns were used as master dies for vibrational micro-forming. The micro-formed pattern height was increasing with increasing the frequency of the vibrational load. In particular, the vibrationally-microformed pattern height was similar or even higher than the statically-microformed pattern height when the load frequency exceeded about 125 kHz. It was also observed that the crystal grains affect the surface quality of the microformed pattern and the distribution of the pattern height in the die cavity array.

**Key Words** : Micro-manufacturing, Micro-forming, Vibrational micro-forming, Superplastic alloy, Bulk metallic glass

### 1. 서론

최근, 수  $\mu\text{m}$ 에서 수 mm의 크기를 갖는 미세한 금속 부품을 대량 생산하기 위한 유망한 기술로서 마이크로 제조기술 (micro-manufacturing)이 각광받고 있다. 마이크로 제조기술의 발전을 위해서는 공정기술 자체뿐 아니라 마이크로 제조기술에 적합한 소재, 마이크로 제조를 위한 금형 및 틀 등의 분야에서 새로운 기술 발전이 요구된다[1]. 이러한 관점에서 Al5083 초소성 합금과 벌크 비정질합금(bulk metallic glass, BMG)은 초소성 거동 및 유사 초소성 특성을 보이는 점성 변형 거동을 보이기 때문에 마이크로 제조 공정에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 이는 PMMA와 같은 고분자 소재가 그들의 점성 변형 특성으로 인해 고온 엠보싱 (hot embossing) 공정에 적용되는 것과 유사하다.

초소성 합금과 벌크 비정질 합금의 마이크로

성형에 관한 활발한 연구에도 불구하고 여전히 극복해야 할 많은 난제들이 존재하고 있다. 이러한 문제점 중 하나로서 마이크로 성형성을 향상시키고 마이크로 성형된 패턴의 표면 거칠기를 개선시킬 필요가 있다. 마이크로 부품 성형기술은 일반적인 벌크 성형에 비해 부피당 표면적의 비가 높기 때문에 마이크로 성형성 등을 향상시키기 위해서는 마찰 및 유착 등과 같은 표면 특성이 상대적으로 중요하다. 따라서 본 연구에서는 마이크로 부품 성형 중에 금형과 소재간의 마찰 및 유착을 최소화하기 위해 진동 하중을 적용하였다. Al5083 초소성 합금과 Zr계 벌크 비정질합금 ( $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$ )에 대해 복제된 패턴의 높이에 미치는 진동하중의 진동수 효과를 조사하였다. 또한 금형내 캐비티(cavity)의 위치에 따른 성형 패턴의 높이 변화를 조사하였다. 마이크로 성형시 진동 하중을 발생시키기 위해 PZT 액츄에이터와 신호 발생기를 결합한 진동 마이크로 성형 장치를 제작하여 실험에 사용하였다.

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 (KIMS)

2. 한국생산기술연구원

# 교신저자: KIMM 부설 재료연구소, nys1664@kims.re.kr

## 2. 실험 방법

본 실험을 위해 평균 결정립 크기가  $10\mu\text{m}$ 인 Al 5083 초소성합금과 suction 주조법 (suction casting)에 의해 제조된  $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{13}\text{Al}_8$  벌크 비정질합금을 사용하였다. 마이크로 성형용 마스터 금형으로는 밑변의 길이가  $100\mu\text{m}$ 인 피라미드 형상의 패턴을 갖는 단결정 실리콘을, 가로 x 세로가  $5 \times 5 \text{ mm}$ 의 크기를 갖도록 절단하여 사용하였다. 진동 마이크로 성형 시스템은 아래 그림 1에 보인바와 같이 PZT 액추에이터와 신호 발생기를 연결하여 sine파형 진동 하중이 작동하도록 제작하였다. 아래 그림 2에 나타낸 바와 같이 정하중 및 2가지 종류의 진동하중 싸이클을 마이크로 성형에 적용하였다. 마이크로 성형된 피라미드형상의 패턴은 주사 전자현미경을 사용하여 관찰하였으며, 비접촉식 3차원 표면형상측정기를 사용하여 복제된 패턴의 높이를 측정하였다.

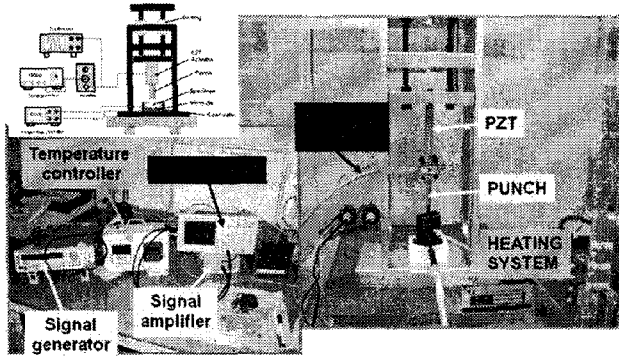


Fig. 1 Vibrational micro-forming system

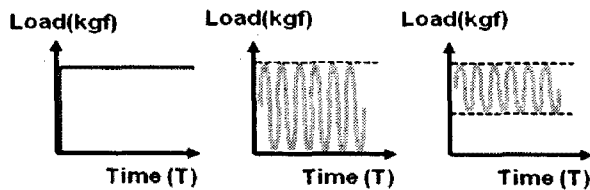


Fig. 2 Applied load cycles for micro-forming

## 3. 실험 결과

피라미드 패턴의 복제는 Si 금형의 가장자리 부

분에 비해 중심부 부분에서 더 효과적으로 이루어졌다. 그림 3은 30분동안 447 N의 정하중 조건에서 마이크로 성형한 후, 실리콘 금형의 중심부에서 얻어진 전형적인 피라미드 형상의 마이크로 성형 패턴을 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 Zr계 벌크 비정질합금의 경우 매우 매끄러운 표면을 보여주는 반면에, Al 5083 합금의 경우 마이크로 성형된 피라미드의 표면이 매우 거칠게 관찰되었다. Al 5083 합금으로부터 얻어진 피라미드 패턴 표면에는 Al 5083 합금의 평균 결정립 크기 ( $10 \mu\text{m}$ )와 유사한 크기의 굴곡이 관찰되고 있으며, 반면에 Zr계 비정질합금의 경우 일부 표면에 노출된 결정입자 외에는 매우 매끄러운 표면을 보여주고 있다. Al 5083 성형 패턴 표면의 거친 특성은 Al 5083 합금의 결정입자에 기인하는 것으로 판단되며, 이는 소재의 결정립이 마이크로 성형 패턴의 표면 거칠기에 악영향을 미침을 보여준다.

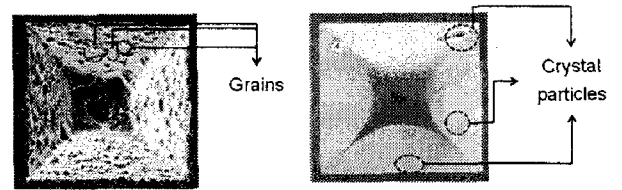


Fig. 3 Typical pyramidal patterns obtained from the center region of the micro-formed patterns of Al 5083 superplastic alloy (left), and  $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{13}\text{Al}_8$  bulk metallic glass (right)

마이크로 성형 대상 소재의 결정립 존재 여부는 금형내 캐비티(cavity) 위치에 따른 마이크로 성형된 패턴의 높이 분포에도 영향을 미쳤다. 그림 4와 그림 5는 각각 Al5083과  $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{13}\text{Al}_8$  BMG 합금에 대해 캐비티 위치에 따른 성형 패턴 높이의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 C/R은 실리콘 금형의 중심부에 있는 패턴을 의미하며, nR은 그림 4에 함께 나타낸 사진에서와 같이 중심부로부터 n번째 패턴을 의미한다. Zr-BMG 합금에 마이크로 성형된 패턴의 높이는 금형내 캐비티의 위치에 매우 민감하게 측정되었다. 이러한 형태의 높이 분포는 대상소재와 금형간의 마찰에 의해 발생하는 마찰언덕(friction hill)[2]에 기인하는 것으로 판단된다. 반면에 Al5083에 마이크로 성형된

패턴 높이의 경우 금형 중심부 부근에서는 캐비티 위치에 무관하게 거의 일정하였다. 이는 마이크로 성형된 패턴이 특정 높이에 도달한 후에는 금형 내 피라미드 형상의 캐비티에 Al5083 thwork 더 이상 충전되지 못함을 의미한다. 즉 결정립을 갖고 있는 Al5083 소재의 경우 마이크로 성형된 패턴의 높이가 더 이상 높아지지 않는 지점이 존재하며 이는 초소성 합금의 변형 기구와 관련되어 있을 것으로 판단된다. 즉 피라미드 형상을 갖는 캐비티의 미세한 끝단(tip)에 Al5083 소재가 침투하기 위해서는 일반적인 초소성 변형 기구인 결정립 회전(grain rotation) 및 결정립계 미끄러짐(grain boundary sliding) 대신 결정립 자체의 소성 변형이 요구된다. 결정립 자체의 소성 변형을 위해서는 초소성 변형에 필요한 하중 이상의 응력이 요구되며 따라서 본 연구에 적용된 하중 조건에서는 결정립의 소성변형이 발생하지 못할 것이다.

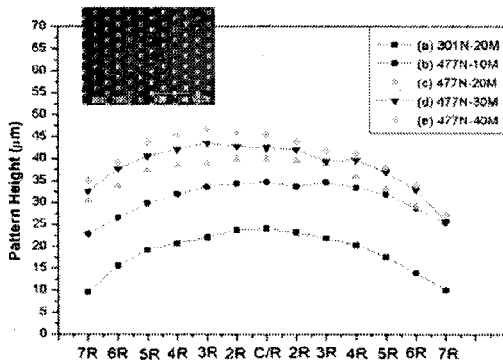


Fig. 4 Pattern height distribution in cavity array (Al5083, 530°C)

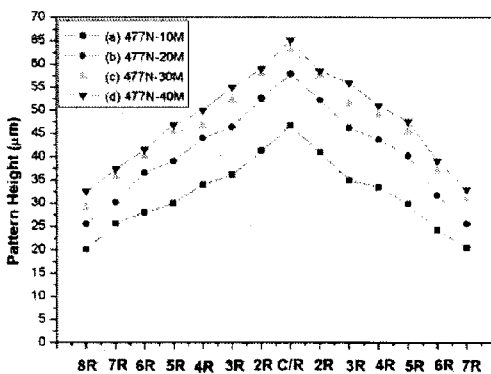


Fig. 5 Pattern height distribution in cavity array (Zr<sub>62</sub>Cu<sub>17</sub>Ni<sub>13</sub>Al<sub>8</sub> BMG, 420°C)

한편 그림 3에 나타난 바와 같이, 피라미드 형상 캐비티의 끝단 부분은 결정립이 없는 Zr계 비정질합금의 경우에도 채워지지 않은 채 남아 있다. 이에 대한 원인은 금형과 대상소재간의 마찰과 더불어 캐비티 끝단에 갇힌 공기가 소재 충전에 대한 저항으로 작용하기 때문으로 판단된다. 이를 해소하기 위해 마이크로 성형에 진동하중을 적용하고자 하였으며, 진동하중을 적용함으로써 금형과 대상소재간의 접촉을 최소화하고 유착을 방지함과 동시에 금형 내 캐비티 끝단에 갇힌 공기를 방출함으로써 마이크로 성형성을 개선시킬 수 있을 것으로 기대된다.

그림 6은 Al5083합금에 대해 정하중 조건에서 마이크로 성형된 패턴의 높이에 미치는 하중 및 성형 시간의 효과를 보여준다. 성형 하중과 성형 시간이 증가함에 따라 중심부 패턴의 높이가 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 한편 그림 7에 Al5083 합금에 대해 진동하중 조건에서 마이크로 성형된 패턴의 높이에 미치는 하중 진동수의 효과를 보여주고 있다. 복제된 패턴의 높이는 진동하중의 진동수가 증가할수록 증가하였다. 특히 125 kHz 이상의 하중 진동수 조건에서는 진동하중 조건에서 성형된 패턴의 높이가 정하중 조건에서 기대되는 패턴의 높이 (그림 6의 실험 결과로부터 예상) 보다 더 높은 결과를 보여주고 있다. 마이크로 성형성에 미치는 진동하중의 효과를 정확히 이해하기 위해서는 여전히 더 많은 연구가 요구되고 있지만, 본 연구의 결과는 금형과 소재간의 마찰 및 유착의 방지와 캐비티 끝단에 갇힌 공기의 방출이 진동수가 125 kHz를 넘으면서 효율적으로 이루어짐을 짐작할 수 있게 한다

#### 4. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 결정립이 없는 Zr<sub>62</sub>Cu<sub>17</sub>Ni<sub>13</sub>Al<sub>8</sub> 비정질합금에 비해 결정질인 Al5083 소재의 미세 패턴 표면은 매우 거친 형상을 나타냈으며, 소재에 존재하는 결정립은 패턴의 표면 거칠기를 악화시키는 주요한 원인이다.
- (2) 마이크로 성형된 패턴의 높이는 진동하중의 진동수가 증가할수록 증가하였으며, 특히 진동수 125 kHz 이상의 조건에서 진동 마이크로 성형을 통해 정하중 보다 높

## 참고 문헌

- [1] U. Engel et al, 2002, Microforming-from basic research to its realization, J. Mater. Process. Tech., Vol. 125-126, pp. 1-10.
- [2] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, Manufacturing Processes for Engineering Materials, Prentice Hall, 2002

은 패턴을 성형할 수 있었다.

- (3) 마이크로 성형에 진동 하중을 활용함으로써 금형과 소재간의 마찰과 유착을 최소화하고, 동시에 캐비티 끝단에 갇히 공기를 배출함으로써 마이크로 패턴 성형 공정의 효율성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

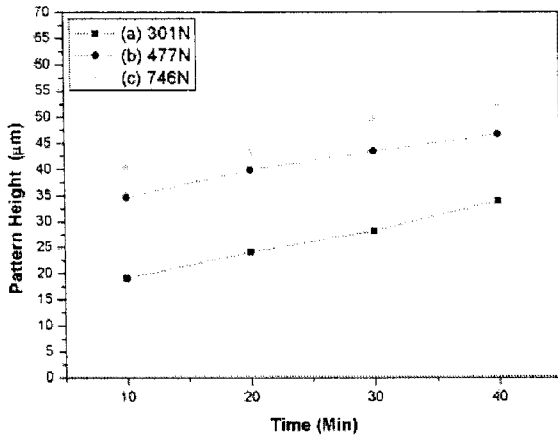


Fig. 6 Variations of pattern height with load and loading time under static loading condition (Al5083, 530°C)

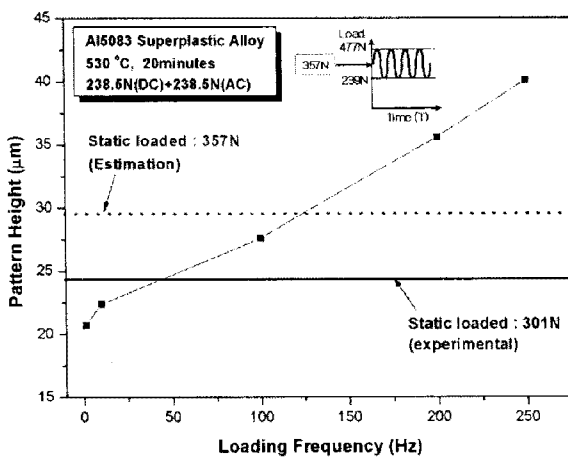


Fig. 7 Variations of pattern height with loading frequency (Al5083, 530°C)