

## Zr 계 벌크비정질합금의 마이크로 단조를 이용한 미세 성형성 평가와 유한요소해석 적용에 관한 연구

강성규\*(울산대 자동차선박기술대학원), 나영상(한국기계연구원 첨단재료연구본부),  
박규열(울산대 대학원 기계자동차공학부), 손선천(울산대 대학원 기계자동차공학부),  
이종훈(한국기계연구원 첨단재료연구본부)

A study on the micro-formability of  $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$  bulk metallic glass using  
micro-forging and finite element method application

S. G. Kang(Mechanical and Automotive Engineering, University Of Ulsan),  
Y. S. Na(Advanced Materials Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials),  
K. Y. Park(Mechanical Eng. Dept., UOU), S. C. Son(Mechanical Eng. Dept. UOU ),  
J. H. Lee(Advanced Materials Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials)

### ABSTRACT

Micro-forming is a suited technology to manufacture very small metallic parts(several mm~ $\mu$ m). Micro-forming of  $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$  bulk metallic glass(BMG) as a candidate material for this developing process are feasible at a relatively low stress in the supercooled liquid state without any crystallization during hot deformation. In this study, micro-formability of a representative bulk metallic glass,  $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$ , was investigated for micro-forging of U-shape pattern. Micro-formability was estimated by comparing  $R_f$  values ( $=A_f/A_g$ ), where  $A_g$  is cross-sectional area of U groove, and  $A_f$  the filled area by material. Microforging process was simulated and analyzed by applying finite element method. FEM simulation results should reasonable agreement with the experimental results when the material properties and simulation conditions such as top die speed, remeshing criteria and boundary conditions tightly controlled. The micro-formability of  $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$  was increased with increasing load and time in the temperature range of the supercooled liquid state. Also, FEM Simulation using DEFORM was confirmed to be applicable for the micro-forming process simulation.

**Key Words** : Micro-forming(마이크로 성형), Micro-forging(마이크로 단조), Bulk Metallic Glass(벌크 비정질 합금), Finite Element Method(유한요소법)

### 1. 서론

최근 첨단 산업의 급속한 발전으로 인하여 고기능·소형화를 요구하는 제품들이 증가함에 따라 경량화 및 집적화를 갖춘 미세부품의 생산기술이 필수적으로 요구된다. 따라서, 작은 공간상에서 많은 기능을 가지며 이동성의 편의를 동시에 추구하기 위해서는 기존 부품들의 형상이 더욱 미세 복잡하게 되므로, 성형 정밀도 또한 만족되어야 할 것이

다. 인쇄법(Lithography)로 대변되는 기존의 생산 기술들은 고비용에 따른 생산단가의 증가로 인하여 실용화에 많은 부담이 되고 있다. 반면에 마이크로 소성을 이용하여 미세부품을 제조하게 된다면 대량 생산에 따른 가격경쟁력을 높일 수 있고, 기존의 제조방법으로 어려웠던 3 차원 형상의 부품 제조가 가능하므로 앞으로 미세 부품 제조에 적합한 생산 기술로 기대된다.<sup>1-2</sup> 따라서 마이크로 소성을 이용한 미세부품의 제조는 향후 독자적인 기술개발에

의한 기술선점 및 파급효과도 매우 클 것이라 생각 된다. 단, 우수한 정밀도와 기계적 강도를 가지는 미세 제품을 제조하기 위해서는 우수한 성형성을 가지는 소재가 반드시 필요하다. 이러한 이유로 하여 결정립 크기가 작은 초소성 합금이나 결정립이 존재하지 않는 비정질 합금 등을 적용하는 것이 용이하리라 판단된다. 비정질 합금은 초소성현상이 발생하는 과냉각액체영역의 구간에서 작은 하중으로도 결정립에 의한 변형제한이 없는 뉴토니안 점성유동으로 인하여 우수한 성형성을 지니므로 미세 성형에 적합한 소재이다.<sup>3-4</sup>

이에 본 논문에서는  $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$  벌크 비정질 합금을 소재로 하고, 자체 제작한 마이크로 단조 시스템을 사용하여 진공환경에서 마이크로 단조 실험을 하였다. 또한, 유한요소해석 프로그램(DEFORM)의 시뮬레이션을 통하여 3 차원 형상의 마이크로 성형에 대한 적용 가능성을 분석하였다. 실제 실험 및 유한요소해석을 통한 성형해석으로부터 가공시 주요공정변수가 성형성에 미치는 영향을 예측할 수 있었다.

## 2. 실험장치 및 성형성 평가법

$Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$  벌크 비정질 합금의 마이크로 성형 실험을 하기 위하여, 그림 1 과 같이 마이크로 단조 시스템을 자체 제작하였다. 본 시스템은 크게 시편에 하중을 가하는 하중 제어부와 목표 온도를 설정하여 열을 공급하는 온도 제어부로 구성되어 있다. 직접적으로 시편에 가해지는 시하중(dead weight)은 15kgf ~ 19kgf범위로 하였으며, 비정질 합금은 온도의 변화에 매우 민감하기 때문에 K 타입의 열전대 2 개를 사용하여 코일히터 온도와 실제적인 시편의 온도를 측정 및 제어하였다. 열간 성형시 시편의 산화방지와 공기 중에 포함된 불순물의 영향을 배제하고자 진공환경에서 실시하였다.

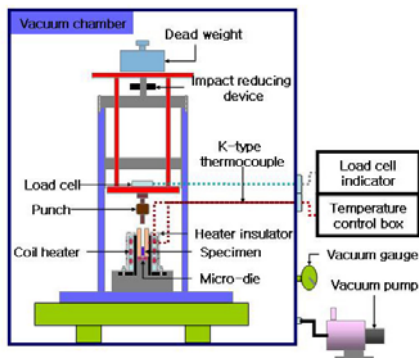


Fig. 1 Schematic illustration of micro-forging system

마이크로 부품 성형 및 성형성 평가를 위해서는 무엇보다도 마이크로 금형의 제작이 우선시 되어야 한다. 평면상의 단결정 실리콘 표면에 U형태의 패턴을 제작하기 위해서 포토리소그래피(Photolithography) 및 DRIE(Deep reactive ion etching)을 적용하여 마이크로 금형을 제작하였다. 그림 2 는 제작된 미세 금형을 주사전자현미경(SEM)으로 찍은 사진이며, 금형의 폭( $W_d$ )은 30  $\mu m$ , 높이는 60  $\mu m$  이다. 비정질 합금의 유사 초소성현상이 발생하는 온도구간인 유리전이온도( $T_g$ )와 결정화개시온도( $T_x$ ) 사이의 과냉각액상영역구간( $\Delta T_x$ )인 400 $^{\circ}C$  ~ 440 $^{\circ}C$  범위에서 실험을 수행하였다. 성형하중의 경우 마이크로 단조장치의 자중인 5kgf를 고려하였으며, 성형시간은 15 분, 20 분, 25 분으로 실험을 하였다.

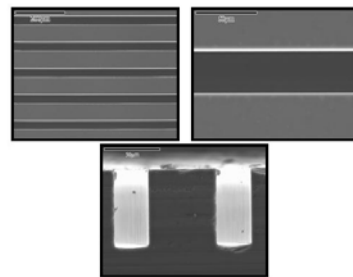


Fig. 2 SEM microphotographs of U-grooved die with 30  $\mu m$  width

그림 3 은 마이크로 성형실험을 한 후 성형성을 평가하기 위한 평가시스템으로서, 마이크로 금형의 U홈 형상의 전체 단면적과 성형 후 마이크로 금형에 전사되어진 소재의 단면적의 비로써 성형성을 평가하였다. 마이크로 성형성 평가지수인  $R_f$  값은 U 홈에 유입된 재료의 단면적인  $A_f$  에 대한 U 홈 금형의 단면적  $A_g$ 의 비( $R_f=A_f/A_g$ )를 나타내며, 각각의 실험에서 얻어진  $R_f$ 값을 종합하여 Zr계 벌크 비정질 합금의 성형성을 평가하였다.

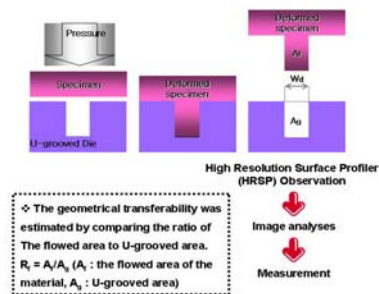


Fig. 3 Evaluation system of micro-formability for Zr-based BMG

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Zr<sub>62</sub>Cu<sub>17</sub>Ni<sub>13</sub>Al<sub>8</sub> 벌크 비정질 합금의 특성

벌크 비정질 합금은 급랭응고를 통하여 제조가 가능하기 때문에 벌크화에 어려운 점이 많다. 그러나 최근에 낮은 임계냉각속도로도 벌크 비정질 합금을 제조하기 위해서 다성분계 합금들의 개발 및 제조기술들이 연구되고 있다. 비정질 합금은 결정질 금속에 비하여 기계적 특성이 우수하고 내부식성이 좋은 특성을 지니고 있다. 그림 4 는 X 선 회절기(XRD)와 고분해능 투과전자현미경(HRTEM)을 이용하여 비정질 합금의 비정질상을 확인한 사진이다.

그림 4 에서 보는 바와 같이 소재 내부가 완전 비정질 상태임을 확인할 수 있었으며, HRTEM 이미지에서도 원자 배열상의 뚜렷한 규칙성을 관찰 할 수 있었다.

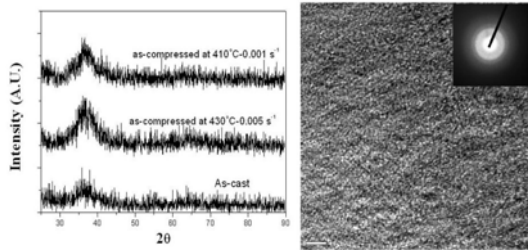


Fig. 4 XRD profiles and HRTEM image of Zr<sub>62</sub>Cu<sub>17</sub>Ni<sub>13</sub>Al<sub>8</sub> BMG

#### 3.2 Zr 계 벌크 비정질 합금의 마이크로 성형성 평가

##### 3.2.1 성형시간 변화에 따른 마이크로 성형성

성형시간에 따른 Zr계 벌크 비정질 합금의 마이크로 성형성을 조사하기 위하여 시하중 17kgf, 성형온도 420°C에서 U홈 폭이 30 μm인 금형을 사용하여 마이크로 성형 실험을 하였다. 그림 5 는 성형시간의 변화를 주어 실험 한 시편의 표면형상을 주사전자현미경(SEM)과 고분해능 미세 표면 형상 측정기(High resolution surface profiler)로 찍은 사진이다. 성형된 시편에 대한 이러한 분석을 통해 각 성형조건에서 R<sub>f</sub>값을 측정하였다. 그림 6 은 성형시간에 따른 성형률(R<sub>f</sub>)의 변화를 나타낸 그래프로서, 성형시간이 증가할수록 R<sub>f</sub>값은 증가하는 경향을 보이고 있다.

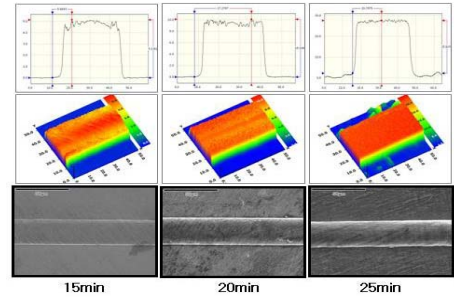


Fig. 5 Geometrical measurements using high resolution surface profiler and SEM micro-photographs under various times (420°C/17kgf)

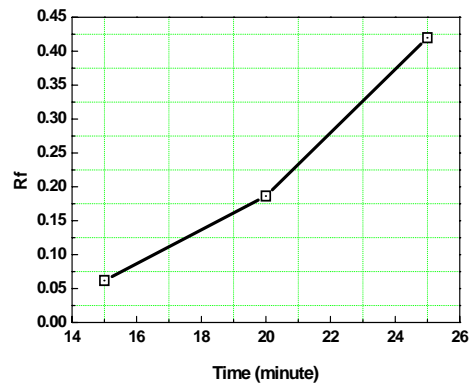


Fig. 6 Variation of micro-formability with time

##### 3.2.2 성형하중 변화에 따른 마이크로 성형성

성형하중에 따른 마이크로 성형성의 평가를 위하여, Zr계 벌크 비정질 합금의 고온압축실험을 통해 성형이 이루어지는 응력을 결정하였다. 성형온도 420°C, 성형시간 20 분에서 폭 30 μm 인 마이크로 금형을 사용하여 15kgf, 17kgf, 19kgf의 하중을 인가하여 성형실험을 수행하였다. 그림 7 에서 볼 수 있듯이 성형하중이 증가할수록 성형성 평가지수인 R<sub>f</sub>값이 증가함을 볼 수가 있다.

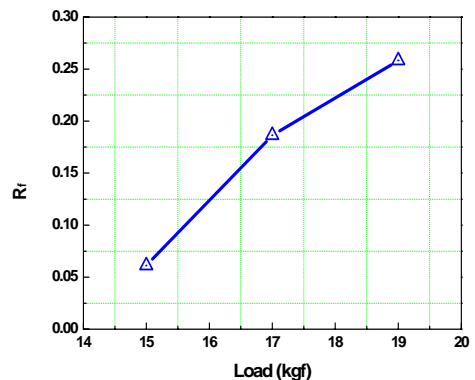


Fig. 7 Variation of micro-formability with load

### 3.2.3 성형온도 변화에 따른 마이크로 성형성

DSC 열분석을 통해 측정된 유리전이온도(Tg)와 결정화개시온도(Tx)범위인 400℃, 420℃, 440℃에서 시하중 17kgf, 성형시간 20 분으로 성형실험을 하였다. 그림 8 은 미세 표면 형상 측정기로 측정된 성형높이를 이용하여 Rf 값을 나타낸 그래프이며, 성형온도 증가에 따라 우수한 형상전사특성을 보이는 것을 알 수 있다.

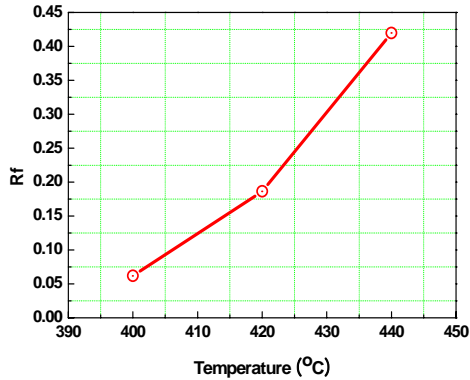


Fig. 8 Variation of micro-formability with temperature

### 3.3 유한요소해석(DEFORM)의 적용

소성가공 공정 해석에 사용되는 DEFORM-2D프로그램을 이용하여 Zr계 벌크 비정질 합금의 마이크로 단조를 적용한 시뮬레이션을 수행하였다. 시편과 금형의 마찰계수는 윤활시 열간 단조계수인 0.3으로 정하였으며, 시편과 주변환경온도는 420℃로 고정하였다. 그림 9 는 top die의 속도를 각각  $1 \times 10^{-4} s^{-1}$ 과  $5 \times 10^{-5} s^{-1}$ 으로 시뮬레이션을 한 결과이다. 변형률 속도가 증가하면서 비정질 합금의 논 뉴토니안 거동(non-Newtonian behavior)이 발생함으로 항복응력이 증가함을 알 수 있다.

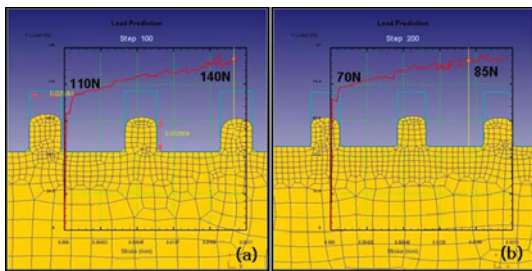


Fig. 9 Simulations results at different top die moving speeds of (a) $1 \times 10^{-4} s^{-1}$  (b) $5 \times 10^{-5} s^{-1}$

변형률 속도에 따른 유한요소해석 결과에서 70MPa 이상의 응력에서 성형이 이루어 짐을 예측할 수가 있었고, 이러한 결과들을 통하여 top die 에 성형하중을 각각 4kgf(40N), 7kgf(70N), 10kgf(100N)로 주어 성형해석을 실행해 보았다. 그림 10 은 이

한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 4kgf 로 인가하중을 주었을 때 성형된 높이가 2 μm로써, 성형이 잘 이루어 지지 않음을 알 수가 있었다. 그리고, 7kgf 로 성형해석을 한 경우에는 12 μm, 10kgf 를 주었을 때에는 27 μm의 성형성을 보였다.

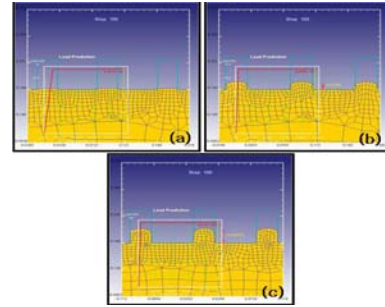


Fig. 10 Simulations results at different loads of (a)40N(4kgf) (b)70N(7kgf) (c)100N(10kgf)

## 4. 결론

본 연구에서는  $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$  벌크 비정질 합금을 이용하여 마이크로 단조실험을 수행하였으며, 미세 성형에 적합한 재료의 선택이 본 논문에서 중요한 인자임을 확인하였다. 또한, 마이크로 단조 실험과 유한요소해석의 시뮬레이션을 통한 비교분석으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.  $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$  벌크 비정질 합금을 이용한 마이크로 단조실험을 통해 과냉각액체영역구간에서 비교적 낮은 응력으로도 미세 성형이 가능하다.
2. 유리전이온도(Tg)와 결정화개시온도(Tx)사이의 구간에서 성형하중, 온도 및 시간을 증가시키에 따라 마이크로 성형지수( $R_f$ )는 증가하였다.
3. 마이크로 성형에서 성형속도와 성형하중의 영향에 대한 실험적 방법과 해석적 방법의 적용가능성을 확인하였다.

## 참고문헌

1. Lee, Y. S., "Deformation Behavior of Bulk Amorphous Alloys During Hot Forming Process," KSTP, Vol. 12, No. 8, pp. 696~703, 2004.
2. Na, K. H., Park, H. J., Cho, N. S., "Development of Manufacturing Technology for Milli-Structure," KSPE, pp. 1039~1042, 2000
3. A. Inoue., "Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys," Acta Mater, Vol. 48, pp. 279~306, 2000
4. Y. Saotome, T. Hatori, A. Inoue., "Superplastic micro/nano-formability of  $La_{60}Al_{20}Ni_{10}Co_5Cu_5$  amorphous alloy in supercooled liquid state," Material Science and Engineering, Vol A304-306, pp. 716~720, 2001