

마이크로 단조를 이용한 Zr계 벌크 비정질합금의 미세 성형성 평가와 유한요소해석 적용에 관한 연구

강성규*, 나영상#, 박규열**, 손선천**, 이종훈***

A study on the micro-formability of $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$ Bulk Metallic Glasses using micro-forging and Finite Element Method applications

Sung Gyu Kang*, Young Sang Na#, Kyu Yeol Park**, Seon Cheon Son**, Jong Hon Lee***

ABSTRACT

Micro-forming is a suited technology to manufacture very small metallic parts(several mm~ μ 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. Micro-forging process was simulated and analyzed by applying finite element method. FEM simulation results showed reasonable agreement with the experimental results when the material properties and simulation conditions such as top die speed, remeshing criteria and boundary conditions were 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 a commercial software, DEFORM was confirmed to be applicable for the optimization of micro-forming process.

Key Words : Micro-forming(마이크로 소성), Micro-forging(마이크로 단조), Micro-formability(마이크로성형성), Bulk metallic glass(벌크 비정질 합금), Finite element method(유한요소법)

1. 서론

최근 첨단 산업의 급속한 발전으로 인하여 고기능과 소형화를 요구하는 제품들이 증가함에 따라 경량화 및 집적화를 갖춘 미세부품의 생산기술

이 필수적으로 요구된다. 따라서 좁은 공간상에서 많은 기능을 가지며 이동성의 편의를 동시에 추구하기 위해 기존 부품들의 형상이 더욱 미세하고 복잡해지고 있으며, 이에 따른 성형 정밀도도 만족되어야 할 것이다. 이러한 요구로 인하여 지금까지 미세 형상 부품의 가공을 위해 마이크로 에

☞ 접수일: 2005년 11월 18일; 게재승인일: 2006년 3월 3일

* 울산대학교 자동차선박기술대학원

교신저자: 한국기계연구원 첨단재료연구본부

E-mail: nys1664@kmail.kimm.re.kr Tel. (055) 280-3377

** 울산대학교 기계자동차공학부

*** 한국기계연구원 첨단재료연구본부

칭 또는 MEMS 기술, 고 에너지빔을 이용한 LIGA 프로세스, Laser 에 의한 미세 가공기술 등이 적용되어져 왔으나, 인쇄법(Lithography)로 대변되는 기존의 생산기술들은 고비용에 따른 생산단가의 증가로 인하여 실용화에 많은 부담을 가지고 있다.

반면에, 마이크로 소성을 이용한 미세부품의 제조기술 개발은 대량생산에 따른 가격경쟁력을 높일 수 있으며, 기존의 제조방법으로 어려웠던 3차원 형상의 부품 제조가 가능한 것으로 기대되어 미세 부품 제조분야에 지대한 공헌이 기대된다.^{1,3}

단, 우수한 정밀도와 기계적 강도를 가지는 미세 제품을 제조하기 위해서는 우수한 성형성을 가지는 소재가 반드시 필요하다. 즉, 통상의 금속재료를 사용하여 마이크로 부품을 생산할 경우 결정립의 크기에 따른 성형성의 문제가 발생하며, 따라서 미세 성형이 가능한 소재의 개발 및 선택이 중요하다. 이러한 이유로 인하여 결정립 크기가 작은 초소성 합금이나 결정립이 존재하지 않는 비정질 합금 등을 적용하는 것이 용이하리라 판단된다. 비정질 합금은 유사 초소성현상이 발생하는 과냉각액체영역(Supercooled liquid state)의 구간에서 변형제한이 거의 없는 뉴토니안 점성유동(Newtonian viscous flow) 거동을 보임으로써, 작은 하중으로도 성형이 가능하고 우수한 성형성을 지니기 때문에 미세 성형에 적합한 소재이다.^{4,5}

이에 본 논문에서는 $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$ 벌크 비정질 합금을 소재로 자체 제작한 마이크로 단조 시스템을 사용하여 진공환경에서 마이크로 단조 실험을 하였다. 또한, 과냉각액체영역의 구간에서 성형하중, 성형시간의 변화를 주어 마이크로 단조(Micro-forging) 실험을 수행하고, 마이크로 성형성을 평가하였다. 또한, 유한요소해석기법을 적용하여 해석을 시도하였다. 마이크로 성형 공정에 대한 실제 실험결과와 유한요소해석을 통한 성형해석결과를 비교하고, 주요공정변수가 성형성에 미치는 영향을 예측하고자 하였다. 마이크로 성형 공정의 해석은 사용의 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 을 활용하였다.

2. 실험장치 및 성형성 평가법

2.1 실험장치 및 방법

$Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$ 벌크 비정질 합금의 미세 성형성 실험을 하기 위하여 Fig. 1 과 같이 마이크로 단

조 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 소재의 유동응력을 고려하여 15 ~ 19 kgf 범위로 설정하였다.

과냉각액체영역에서 벌크 비정질 합금은 작은 온도의 변화에도 민감하게 반응하기 때문에 K 타입의 열전대 2 개를 사용하여 열을 공급해 주는 코일히터와 실제적인 시편의 온도를 측정 및 제어하도록 실험조건 및 장치를 설계하였다. 그리고, 열간 성형공정으로 인하여 발생하기 쉬운 시편의 산화와 미세 형상내에 갇힌 공기로 인해 성형성에 미칠 수 있는 악영향을 배제하고자 마이크로 단조 시스템을 진공챔버안에 구축하여 열간 성형실험을 진공환경에서 실시하였다.

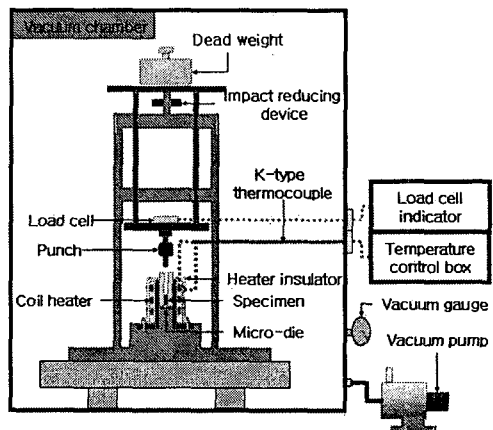
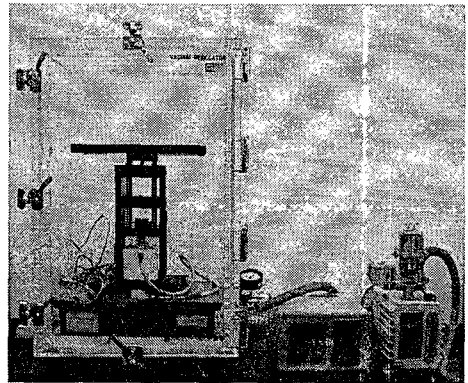


Fig. 1 Photograph and schematic illustration of micro-forging system

비정질 합금은 분당 열공급량, 즉 가열속도에 따라 유리전이온도(Glass transition temperature, T_g)와 결정화개시온도(Crystallization temperature, T_x)가 미세하게 변하는 현상이 발생한다.

가열속도에 따른 비정질 합금의 열적특성 변화 및 이에 따른 성형성 변화를 최소화하기 위해 PID 온도제어기를 사용하여 실험온도까지의 승온속도를 15 °C/min 로 정밀하게 제어 하였다. Fig. 2 는 성형실험시 온도제어를 개략적으로 나타낸 그림이다.

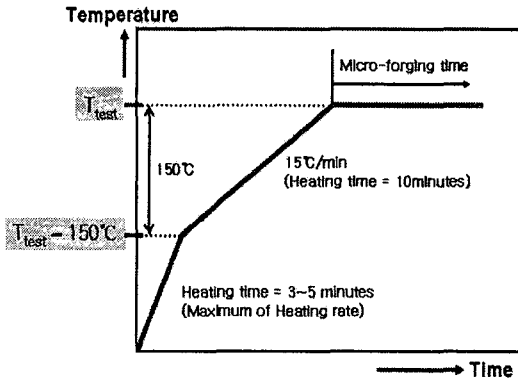


Fig. 2 Schematic of micro-forming process

2.2 마이크로 성형성평가

마이크로 단조 실험을 통하여 성형성을 평가하기 위해서는 마이크로 금형의 제작이 우선시 되어야 한다. 본 연구에서는 인쇄법을 적용하여 단결정 Si 에 미세 패턴을 새기고 이를 마이크로 금형으로 이용하였다. 평면상의 단결정 실리콘 표면에 U 형태의 패턴을 제작하기 위해서 포토리소그래피(Photolithography) 및 DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 기법을 적용하여 마이크로 금형을 제작하였다. Fig. 3 은 이러한 기법으로 제작한 U 홈 형상을 갖는 실리콘 미세 금형을 주사전자현미경(SEM)으로 찍은 사진으로서, 금형의 폭(W_d)은 30 μm , 높이는 60 μm 의 크기로 제작하였다. 또한, 시편의 표면조도가 마이크로 성형에 지대한 영향을 미치기 때문에 우수한 표면상태를 가지는 시편의 준비가 필수적이다. 마이크로 성형 실험에 사용된 벌크 비정질 합금의 시편은 직경이 3 mm 인 봉상을 0.3 ~ 0.5 mm 높이로 절단한 후 미세 연마지를 사용하여 시편의 표면조도를 1 μm 까지 제어하였다.

그리고, 마이크로 단조 실험 시 U 홈 형상의 미세 금형 위에 비정질 합금을 위치시키고, 설정 온도로 제어한 후 하중과 시간의 변화를 주어 실험을 수행하였다. 비정질 합금의 유리전이온도와 결정화개시온도 범위인 400 ~ 440 °C 범위에서 마이크로 단조장치의 자중인 5 kgf 를 고려하여 시하중을 가하였다.

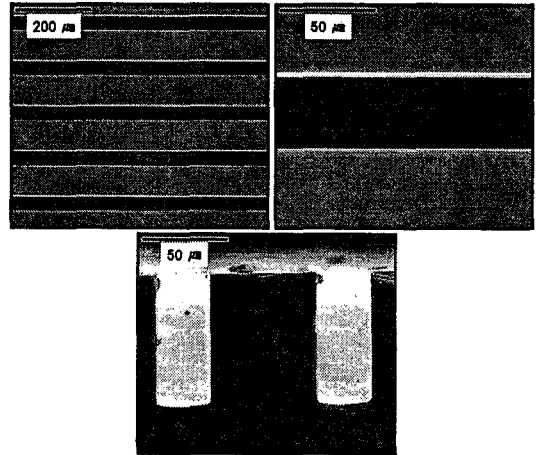


Fig. 3 SEM microphotographs of U-grooved silicon die with 30 μm width and 60 μm depth

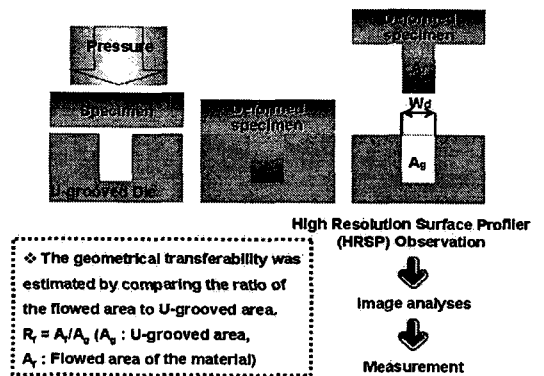


Fig. 4 Evaluation system of micro-formability for Zr-based BMG

Fig. 4 는 마이크로 성형성을 평가하기 위한 평가 시스템의 개략도를 나타내고 있다. 마이크로 성형성을 평가하기 위해 실리콘 원판에 건식식각

으로 제조된 폭 30 μm 인 미세 U 홈의 단면적(A_g)과 마이크로 단조 실험에서 금형 내 U 홈에 비정질합금의 유입으로 성형이 이루어진 패턴의 단면적(A_f) 값을 측정하였으며, 성형이 이루어진 재료 단면적 A_f 에 대한 미세 U 홈 금형의 단면적 A_g 의 비($R_f = A_f/A_g$)로 마이크로 성형성 평가 지수인 R_f 값을 비교함으로써 성형성을 평가하였다.⁶⁻⁸

성형된 시편의 단면적들은 주사전자현미경과 고분해능 미세 표면형상 측정기(High Resolution Surface Profiler)로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{13}\text{Al}_8$ 벌크 비정질 합금의 특성

일반적으로 벌크 비정질 합금은 급랭응고를 통하여 제조가 가능하기 때문에 벌크화가 어렵고 이로 인해 상용화도 어려움이 많다. 그러나, 최근에 낮은 임계냉각속도로도 비정질 합금을 제조할 수 있는 다성분계 합금들의 개발 및 제조기술들이 보고되었다. 이러한 추세로 인하여 신 기능성 엔지니어링 소재로의 응용이 점차 확대될 것으로 기대된다. 또한, 비정질 합금은 결정질 금속에 비하여 기계적 특성이 우수하고 내부식성이 뛰어난 특성을 지니고 있다.⁹

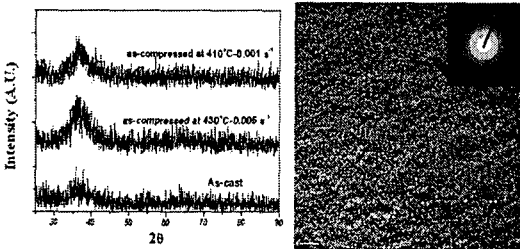


Fig. 5 XRD profiles and HRTEM image of $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{13}\text{Al}_8$ BMG

Fig. 5는 Arc melting furnace system을 사용하여 Suction casting 방법으로 Zr 계 벌크 비정질 합금을 제작한 후에 X 선 회절기(XRD)와 고분해능투과 전자현미경(HRTEM)을 이용하여 벌크 비정질 합금의 비정질상을 확인한 사진이다. XRD의 결과에서 보는 바와 같이 소재 내부가 완전 비정질 상태를 확인할 수 있었으며, HRTEM 이미지에서도

원자 배열상의 뚜렷한 규칙성을 관찰 할 수 없었다. 추가적으로 비정질 합금의 초소성현상이 발생하는 온도구간을 확인하고자 시차열분석기(DSC)를 통해 $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{13}\text{Al}_8$ 벌크 비정질 합금의 열분석을 하였다. 그리고, 열분석시 heating rate에 따라 미세한 온도의 변화가 발생하는 것을 Table 1에서 확인 할 수 있다. Fig. 6의 열분석 곡선으로부터 유리 천이현상과 결정화 반응의 존재를 확인할 수 있으며, 이에 따른 유리천이온도(T_g)와 결정화개시온도(T_x)에 따른 과냉각액체영역(ΔT_x) 구간 범위를 측정할 수 있었다.

Table 1 Glass transition temperature(T_g) and crystallization temperature(T_x) with heating rate

Scan rate	T_g	T_x	$\Delta T_x(^\circ\text{C})$
10 $^\circ\text{C}/\text{min.}$	384	453	69
20 $^\circ\text{C}/\text{min.}$	390	462	72
30 $^\circ\text{C}/\text{min.}$	398	475	77

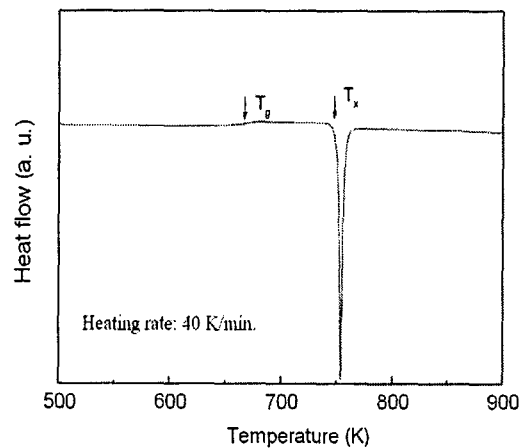


Fig. 6 Typical differential scanning calorimetric(DSC) curve of $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{13}\text{Al}_8$ bulk metallic glass

3.2 Zr 계 벌크 비정질 합금의 마이크로 성형성 평가

3.2.1 성형시간 변화에 따른 마이크로 성형성
 성형시간에 따른 Zr 계 벌크 비정질 합금의 마이크로 성형성을 조사하기 위하여 시하중 17 kgf, 성형온도 420 $^\circ\text{C}$ 에서 U 홈 폭 30 μm 인 금형을 사

용하여 마이크로 성형 실험을 하였다. Fig. 7 은 성형시간의 변화에 따른 성형된 시편의 표면형상과 성형높이를 주사전자현미경과 고분해능 미세 표면형상 측정기로 측정한 사진이다. 대체적으로 성형된 비정질 합금들은 U 모양의 형태를 잘 반영하고 있음을 볼 수 있다.

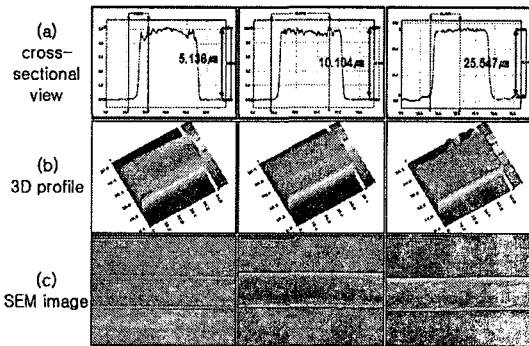


Fig. 7 Geometrical variations of micro-formed patterns with forming time (420 °C / 17 kgf) (a) cross-sectional views, (b) 3D profiles (c) SEM images

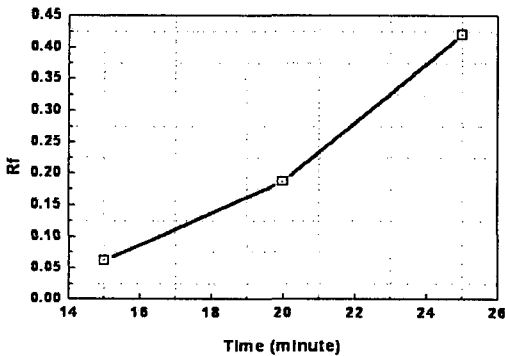


Fig. 8 Variations of micro-formability depending on time

Fig. 8 은 성형시간에 따른 성형률(R_f)의 변화를 나타낸 그래프로서, 성형시간이 증가할수록 R_f 값은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 성형시간이 증가할수록 뉴토니안 점성거동이 충분히 일어남으로써 마이크로 금형 내 미세 U 홈으로 비정질 합금의 유입이 증가하여, R_f 값이 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

3.2.2 성형하중 변화에 따른 마이크로 성형성

성형하중에 따른 마이크로 성형성의 평가를 수행 하고 적절한 하중조건을 선정하기 위해 벌크 비정질 합금의 초소성 현상이 발생하는 온도에서 성형응력을 측정하였다. 이를 위해 직경 3 mm, 높이 5 mm 크기인 원통형 Zr계 벌크 비정질 합금 시편을 준비하여, 유리천이온도와 결정화개시온도 사이의 온도인 390 °C, 410 °C, 430 °C에서 고온압축 실험을 수행하였다. 변형률 속도는 각각 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$, $1 \times 10^{-3} s^{-1}$, $5 \times 10^{-3} s^{-1}$ 로 변화시키면서 최대 70 %까지의 압축률로 압축실험을 수행하였다.

압축장비는 Instron 8501 시험기를 사용하였으며, 스테이지 위에 올려진 시편과의 마찰로 인하여 발생하는 배럴링(Barreling)현상등을 최대한 줄이고자 평균직경 1 μm 인 미세 BN 분말 윤활제를 시편 표면에 도포한 후 압축실험을 수행하였다.

분당 15 °C(15 °C/min)의 가열속도로 목표온도까지 시편을 가열하고 목표온도에서 2 분간 유지한 후 압축실험을 하였다. Fig. 9 는 고온압축실험을 통하여 얻어진 진응력-진변형률 곡선으로서, 변형률 속도의 변화에 따른 최대응력(peak stress), 정상상태응력(steady-state stress) 및 overshoot stress의 변화를 관찰할 수 있었다.

이렇게 얻어진 데이터들을 이용하여, 마이크로 단조 실험시 성형이 가능한 하중조건을 결정하였다.

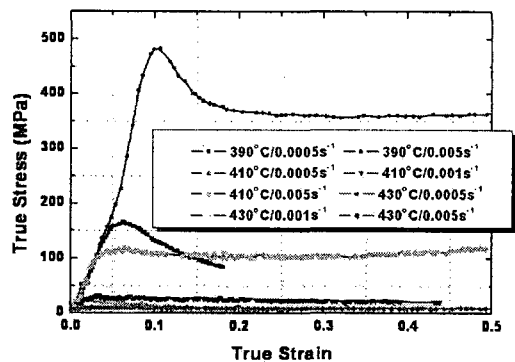


Fig. 9 True strain-true stress curves under the various strain rates and temperatures

성형하중 변화에 따른 마이크로 단조 실험은

성형온도 420 °C, 성형시간 20 분에서 폭 30 μm 인 마이크로 금형을 사용하여 각각 15 kgf, 17 kgf, 19 kgf 의 하중 변화를 주어 마이크로 성형실험을 하였다. Fig. 10 은 성형하중에 따른 시편의 표면형상과 성형높이를 주사전자현미경과 고분해능 미세 표면형상 측정기로 측정한 사진이다. 한편, Fig. 11 에서 성형하중이 증가할수록 일정한 시간동안 뉴토니안 점성거동으로 인하여 성형성 평가 지수인 R_f 값이 증가하는 것을 볼 수 있다.

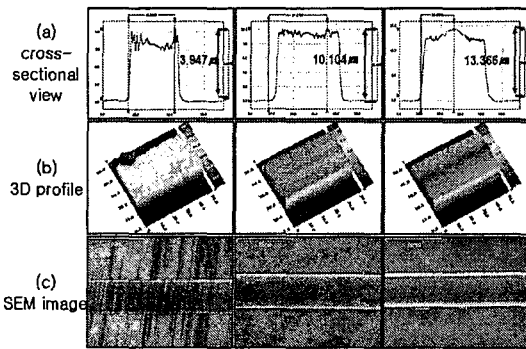


Fig. 10 Geometrical variations of micro-formed patterns with load (420 °C / 20minutes) (a) cross-sectional views, (b) 3D profiles (c) SEM images

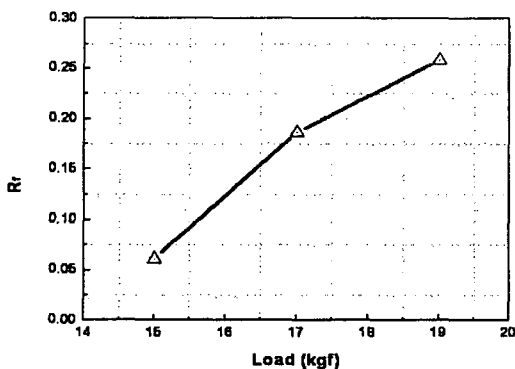


Fig. 11 Variations of micro-formability depending on load

3.2.3 성형온도 변화에 따른 마이크로 성형성

DSC 열분석을 통해 얻어진 Zr 계 벌크 비정질 합금의 유리전이온도와 결정화개시온도 범위인 400 °C, 420 °C, 440 °C 에서 성형실험을 하여 온도에 따른 성형성 변화를 관찰하였다.

코일히터에서 가해지는 열은 온도제어기의 제어기를 통해 조절하면서, 최대한 시편에 가까운 곳에 K 타입의 열전대를 위치시켜 실제적인 시편의 온도를 측정하였다. Fig. 12 는 단조실험 후에 성형온도에 따른 시편의 표면형상과 성형높이 변화를 측정한 사진이다. 그러나, 성형온도 440 °C에서는 마이크로 실리콘 금형이 시편에 달라 붙는 문제점이 발생하였다. Fig. 13 은 과냉각액체영역 온도범위내에서 성형온도 증가에 따른 형상전사특성을 보여주고 있는데, 성형온도가 증가함에 따라 R_f 값이 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 성형온도가 증가할수록 과냉각 액체 영역에서 벌크 비정질 합금의 점도가 감소하기 때문인 것으로 판단되며, 실제로 온도가 증가할수록 점도가 감소하는 사실은 본 저자에 의해 별도로 보고된 바 있다.¹⁰

이상의 연구 결과로부터 벌크 비정질 합금에 대한 마이크로 단조를 통해 약 0.5 정도의 R_f , 즉 약 1 정도의 중형비를 갖는 패턴 성형이 가능할 것으로 기대된다. 하지만 본 연구에서 사용했던 금형 패턴의 중형비 (=2)를 달성하기 위해서는 성형온도를 높이고, 금형과 소재간의 sticking 및 마찰을 줄이기 위한 lubricant 적용 등 공정 최적화를 위한 보다 많은 연구가 요구된다.

3.3 유한요소해석(DEFORM)의 적용

3.3.1 성형 속도의 영향

소성가공 공정 해석에 사용되는 프로그램인 DEFORM-2D 를 이용하여 $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$ 벌크 비정질 합금의 마이크로 단조 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이때, 시편과 금형의 마찰계수는 윤활을 했을 때 일반적으로 알려진 열간마찰계수 값, 즉 0.3 으로 설정하였으며 시편과 주변환경온도는 420 °C로 고정하였다. 실제 성형실험과 최대한 같은 조건에서 성형해석을 수행하기 위해 30 μm의 폭을 가진 U 형상의 마이크로 금형 형상을 입력하여 top die 로 설정하였다. 그리고, 시편의 mesh 수는 총 7000 개로 생성하였으며 마이크로 금형과 시편이 직접적으로 접촉하여 성형이 이루어지는 부분의 mesh 는 가능한 작게 생성하였다. Fig. 14 는 본 논문에 사용한 유한요소해석 프로그램에 입력된 값으로 비정질 합금의 물성치 데이터이다.

그림에서 보듯이 stress overshoot 는 고려하지 않았으며, steady state stress 만을 고려하여 해석을

수행하였다.

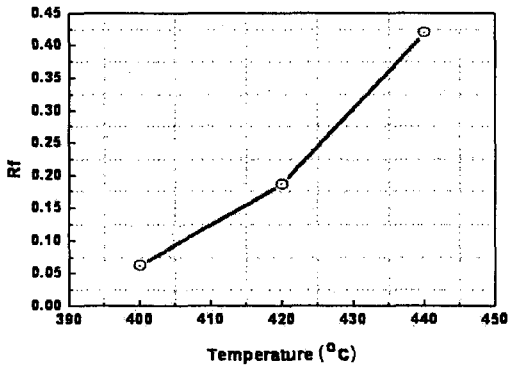


Fig. 12 Geometrical variations of micro-formed patterns with temperature (17 kgf / 20minutes) (a) cross-sectional views, (b) 3D profiles (c) SEM images

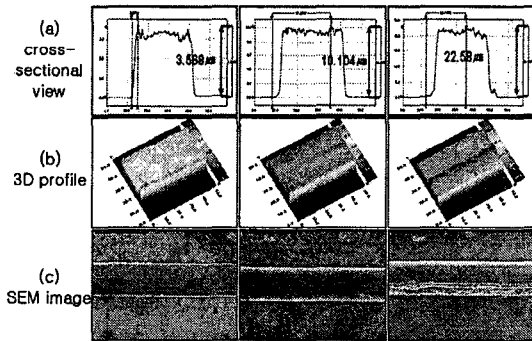


Fig. 13 Variations of micro-formability depending on temperature

Top die 에 작용하는 성형 속도에 따른 마이크로 성형공정 변화를 관찰하고자 유한요소해석을 수행하여, Fig. 15 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 top die 의 속도가 각각 $2 \times 10^{-4} s^{-1}$, $1 \times 10^{-4} s^{-1}$, $8 \times 10^{-5} s^{-1}$, $5 \times 10^{-5} s^{-1}$ 으로 증가하게 되면, 성형이 이루어지는 성형하중 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편, 초기변형이 발생한 후 상부 금형의 스트로크(stroke)가 증가함에 따라 성형하중이 조금씩 증가하는 경향을 볼 수 있는데 이것은 시편과 금형 사이의 마찰이 작용하여 유동응력이 증가한 것이라 판단된다. Top die 의 속도를 $1 \times 10^{-4} s^{-1}$ 로 설정하여 성형해석을 하였을 경우에는 110 ~ 140 N 즉, 36.7 ~

46.7 MPa 사이의 평균 유동응력을 보였으며, $5 \times 10^{-5} s^{-1}$ 일 때에는 25 ~ 30 MPa의 평균 유동응력이 가해져야 성형이 이루어 진다는 것을 알 수가 있다. 실제 마이크로 단조 실험 조건인 420 °C, 시하중 19 kgf(평균유동응력 = 26.4 MPa)의 조건에서 실험한 결과들과 비교해 보면, top die 속도를 $5 \times 10^{-5} s^{-1}$ 로 설정하여 해석한 시뮬레이션 결과(25 ~ 30 MPa) 범위에 포함되는 것을 볼 수 있다.

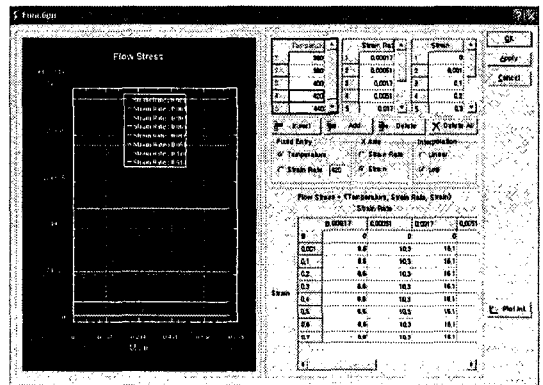


Fig. 14 Material flow data of a Zr-based BMG used for finite element simulation

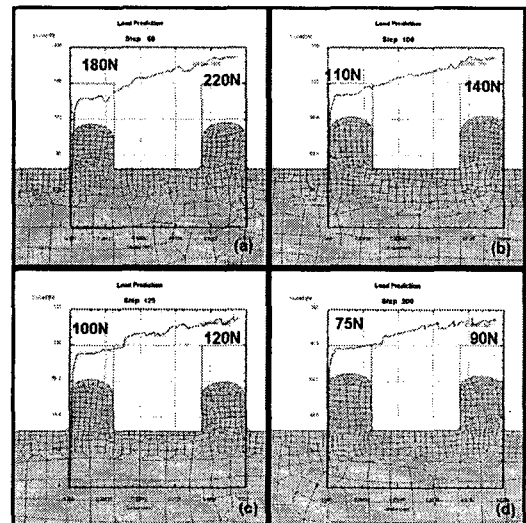


Fig. 15 FEM simulation results at different top die speed; (a) $2 \times 10^{-4} s^{-1}$ (b) $1 \times 10^{-4} s^{-1}$ (c) $8 \times 10^{-5} s^{-1}$ (d) $5 \times 10^{-5} s^{-1}$

3.3.2 성형 온도의 영향

소재의 온도에 따른 마이크로 성형성 변화를 알아보기 위해 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 속도에서 400 °C, 420 °C, 440 °C 온도로 성형해석을 수행하였다.

Fig. 16 은 성형이 이루어지는 온도만 달리하여 성형해석을 한 결과이다. 과냉각액체구간 안에서도 성형온도가 높아 질수록 성형하중이 더 작아지는 것을 볼 수가 있다. 400 °C에서 성형해석을 한 결과에서는 120 N(40 MPa), 420 °C에서는 70 N(23.2 MPa), 440 °C에서는 40 N(13.3 MPa)의 성형하중이 요구되었다.

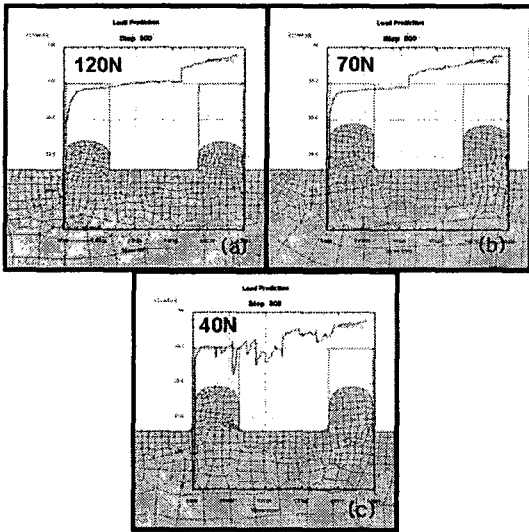


Fig. 16 FEM simulation results at different temperatures; (a) 400 °C (b) 420 °C (c) 440 °C

3.3.3 성형 하중의 영향

Top die 의 이송속도 변화에 따른 유한요소해석 결과에서 보듯이 70 N(23.3 MPa)이상의 성형하중에서 성형이 이루어지는 것을 확인하였다. 또한, 실제 마이크로 단조 실험에서도 시하중을 17 kgf (23.6 MPa)이상을 가한 성형실험에서 성형이 이루어지는 것을 볼 수가 있다. Fig. 17 은 시편에 가해주는 성형하중에 변화를 주어 성형해석 한 결과이며, 50 N(16.7 MPa), 100 N(33.3 MPa), 150 N(50 MPa), 200 N(66.6 MPa) 의 성형하중을 설정하여 성형해석을 하였다. Fig. 17 에서와 같이 성형하중을 증가시키면 따라 성형성이 좋아지는 경향을 볼 수가 있

다. 100N 이상의 인가하중을 주어 성형해석을 한 경우에는 눈으로도 확인이 가능할 정도로 성형이 이루어지는 것을 볼 수가 있다. 하지만 유한요소 해석 결과로부터 얻어지는 마이크로 성형성은 실제 실험결과보다 더 높게 나타났다. 본 유한요소 해석 결과들은 Zr 계 벌크 비정질 합금의 물성치 데이터에서 stress overshoot 를 고려하지 않고 얻은 결과로써, 이는 해석결과로부터 얻어지는 높은 성형성의 원인이 되는 것으로 판단된다.

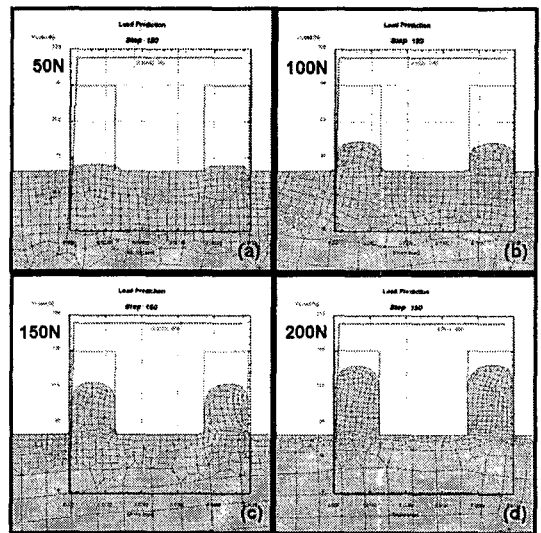


Fig. 17 FEM simulation results at different forming loads ; (a) 50N(16.7 MPa) (b) 100N(33.3 MPa) (c) 150N(50 MPa) (d) 200N(66.6 MPa)

4. 결론

본 연구에서는 $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{13}\text{Al}_8$ 벌크 비정질 합금을 이용하여 마이크로 단조실험을 수행하였으며, 미세 성형에 적합한 재료의 선택이 본 논문에서 중요한 인자임을 확인하였다. 그리고 변형률 속도의 변화를 주어 고온압축실험을 한 데이터들을 이용하여 벌크 비정질 합금의 변형거동을 확인할 수 있었다. 또한, 마이크로 단조 실험과 유한요소해석 결과를 비교분석함으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) $\text{Zr}_{62}\text{Cu}_{17}\text{Ni}_{13}\text{Al}_8$ 벌크 비정질 합금을 이용한 마

- 이크로 단조실험에서 뉴토니안 점성거동을 보이는 과냉각액체영역 구간에서의 열간성형공정은 비교적 낮은 응력으로 성형이 가능하다.
- 2) 유리전이온도(T_g)와 결정화개시온도(T_x)사이의 구간에서 성형하중과 성형시간을 증가시킴에 따라 마이크로 성형지수(R_f)는 증가하는 경향을 보였다.
 - 3) 성형온도 420 °C, 성형하중 17 kgf, 성형시간 25 분에서 약 0.5 로 가장 큰 R_f 값이 나왔다.
 - 4) 마이크로 성형에서 성형속도와 성형하중의 영향에 대한 실험적 방법과 해석적 방법의 적용 가능성을 확인하였다.
8. Saotome, Y., Hatori, T., Zhang, T., Inoue, A., "Superplastic micro/nano-formability of $La_{60}Al_{20}Ni_{10}Co_5Cu_5$ amorphous alloy in supercooled liquid state," Materials Science and Engineering, Vol. A304-306, pp.716~720, 2001.
 9. Ok, M. R., Suh, J. Y., Hong, K. T., "Micro forming of Bulk Metallic Glass using the deformation behavior in the supercooled liquid region," Transactions of Materials Processing, Vol. 13, pp. 9~14, 2004.
 10. Na, Y. S., Kang, S. G., Yi, S. H., Park, K. Y., Lee, J. H., "Homogeneous deformation behavior of the bulk metallic glass $Zr_{62}Cu_{17}Ni_{13}Al_8$," J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 43, pp.685~689, 2005.

후 기

본 연구는 한국기계연구원(KIMM) 재료안전연구센터의 마이크로 성형사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

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. Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N., Engel, U., "Microforming," Annals of the CIRP, Vol. 50, pp. 445~462, 2001.
3. Engel, U., Eckstein, R., "Microforming-from basic research to its realization," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125-126, pp. 1~10, 2002.
4. Na, K. H., Park, H. J., Cho, N. S., "Development of Manufacturing Technology for Milli-Structure," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference (II), KSPE, pp. 1039~1042, 2000.
5. Inoue, A., "Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys," Acta Mater, Vol. 48, pp. 279~306, 2000.
6. Saotome, Y., Inoue, A., "Superplastic Micro-Forming of Microstructures," IEEE, pp. 343~348, 1994.
7. Son, S. C., Kang, S. G., Park, K. Y., Na, Y. S., Lee, J. H., "A study on the Micro-Formability of Al 5083 Superplastic alloy using Micro-Forging System," KSTP, Vol. 14, No. 5, pp. 432~438, 2005.