

BMG/결정질 복합재의 과냉각 액상구역에서 압축 변형 거동

박은수¹, 이주호¹, 김상현¹, 허무영^{1#}, 김휘준², 배정찬²

Plastic deformation behavior of BMG/crystalline composites in the supercooled liquid region during compression

E. S. Park, J. H. Lee, S. H. Kim, M. Y. Huh, H. J. Kim and J. C. Bae

Abstract

Bulk metallic glass (BMG)/crystalline composites comprising a copper based BMG alloy and crystalline nickel were produced by means of electroless plating of nickel on $\text{Cu}_{54}\text{Zr}_{22}\text{Ti}_{18}\text{Ni}_6$ BMG powder and subsequent consolidation using spark plasma sintering. The plastic deformation behavior of BMG/crystalline composites was examined by uniaxial compression test at various temperatures in the supercooled liquid region (SLR) of the BMG alloy. The evolution of strain states during uniaxial compression was tackled by microstructure observations. Deformation temperature played an important role in the deformation behavior of BMG/crystalline composites, which was attributed to a strong temperature dependence of the flow stress of the BMG alloy in the SLR. BMG/crystalline composites deformed homogeneously in the temperature range where the flow stress of the BMG alloy was close to that of crystalline nickel. In contrast, inhomogeneous deformation was observed in the temperature range where the flow stress of the BMG alloy largely differs from that of crystalline nickel.

Key Words : BMG/crystalline composites, Supercooled liquid region

1. 서론

BMG(bulk metallic glass) 합금은 결정질 금속에 비해 높은 강도와 탄성을 그리고 우수한 내식 특성을 가지고 있음에도 불구하고, 상온에서 소성 변형이 몇 개의 shear band에 의해 국부적으로 발생함으로써 급작스럽게 파괴되는 단점이 있다[1]. 이러한 Shear band에 의한 급작스런 파단을 막기 위해 비정질내에 제 2상을 석출시키거나, 연성의 결정질 금속을 BMG 분말과 함께 성형하여 복합재를 제조함으로써 상당량의 소성 변형구간을 갖는 BMG 복합재가 얻어진다[2, 3].

BMG 합금은 유리전이온도(T_g)와 결정화온도(T_x) 사이의 온도 구간인 과냉각 액상구역(supercooled

liquid region)에서 Newtonian flow의 특성을 가지고 있어, 이 온도 영역에서는 균일한 변형을 하게 된다. 또한 BMG/결정질 복합재도 BMG 합금의 과냉각 액상구역 내에서 균일 변형을 하게 된다[4]. 그러나 아직까지 과냉각 액상구역 내에서 BMG particle의 강도에 따른 변형 거동에 관한 연구는 거의 보고 되지 않고 있다.

본 연구에서는 BMG의 과냉각 액상구역에서 BMG의 강도에 따른 복합재의 변형 거동을 알아보기 위하여, 결정질 Ni 이 30%의 부피 분율을 갖는 BMG/결정질 복합재를 제조하고 BMG의 과냉각 액상구역 내의 다양한 온도에서 복합재를 일축 압축 하에서 변형 거동을 측정하였다.

1. 고려대학교 신소재 공학부

2. 한국생산기술연구원 신기능 소재팀

교신저자: 고려대학교, E-mail: myhuh@korea.ac.kr

2. 실험 방법

$Cu_{54}Ni_6Zr_{22}Ti_{18}$ 의 BMG 분말은 고정정 고압 가스 분무법에 의해 제조되었다[5]. 63-90 μm 크기를 갖는 BMG 분말을 이용하여 Ni 무전해 도금을 행하여 결정질 Ni의 부피 분율이 30% 갖는 복합 분말을 제조하였다. BMG/결정질 복합재는 SPS(spark plasma sintering)를 이용하여 과냉각 액상구역에서 소결하여 얻었다. 소결 시 결정화와 같은 상변화는 DSC와 XRD를 통해 측정하였다.

BMG/결정질 복합재의 변형 거동은 Gleeble system(3500)를 이용하여 BMG 합금의 과냉각 액상구역내의 온도인 713K~733K의 온도에서 일축 압축 시험을 통하여 얻어졌다. 또한, 광학 현미경을 통해 얻어진 조직 사진을 분석하여 변형 상태를 해석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

BMG/결정질 복합재는 Ni 코팅 분말을 이용하여 SPS(spark plasma sintering) 방법을 통하여 제조하였다. DSC와 XRD 측정 결과로부터 BMG particle은 결정화와 같은 상변화가 일어나지 않았음을 알 수 있었다[4]. 반면, Ni 코팅층은 도금 후 비정질 상으로 존재하고 소결시 결정질 Ni, Ni₃P로 상변화가 일어남을 확인할 수 있었다.

압축 시험은 $Cu_{54}Ni_6Zr_{22}Ti_{18}$ BMG 합금의 과냉각 액상구역내의 온도인 713K~733K의 온도에서 단상의 BMG와 복합재를 측정하였다. BMG 합금은 과냉각 액상구역내의 온도에서 일반적으로 Newtonian flow를 하게 된다. 이러한 변형은 변형 속도와 온도에 의존하게 된다[6].

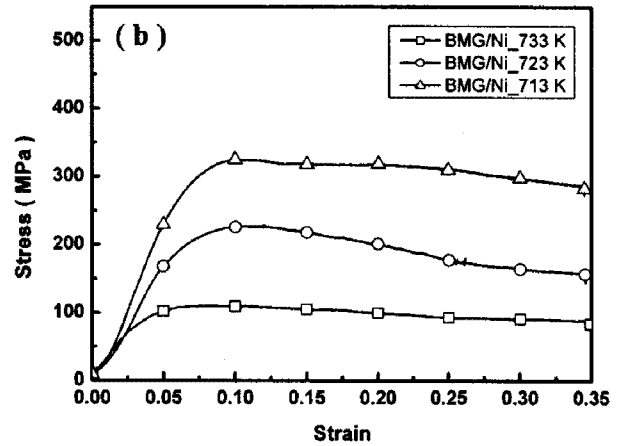
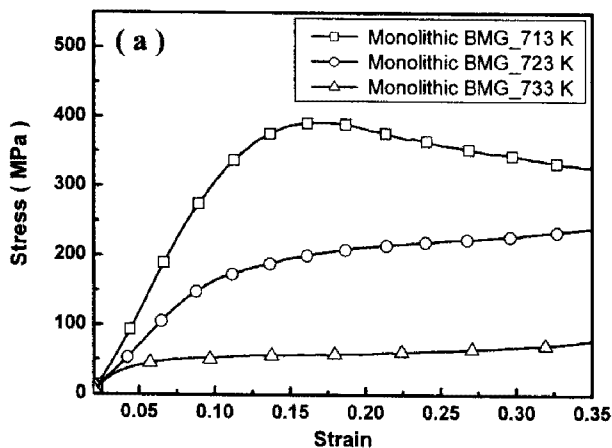


Fig. 1 Stress-strain curves of (a) Monolithic BMG and (b) BMG/Ni composite determined at a strain rate of 2×10^{-3}

Fig. 1(a)는 변형속도가 2×10^{-3} 일 때, 단상의 Cu-base BMG의 stress/strain 곡선이다. 온도가 증가함에 따라 flow stress가 크게 감소함을 알 수 있다. 각 온도에 따른 flow stress는 713K, 723K, 733K 각각 380MPa, 220MPa, 50MPa를 갖는다. 반면, 결정질 Ni이 포함된 복합재는 (fig. 2(b)) 723K의 온도에서 거의 유사한 flow stress 값을 갖지만 713K와 733K의 온도에서는 단상의 BMG의 flow stress와 다른 값을 가짐을 알 수 있다. 713K의 온도에서는 단상의 BMG의 flow stress 값보다 낮은 값을 나타내고, 733K의 온도에서는 높은 값을 나타낸다.

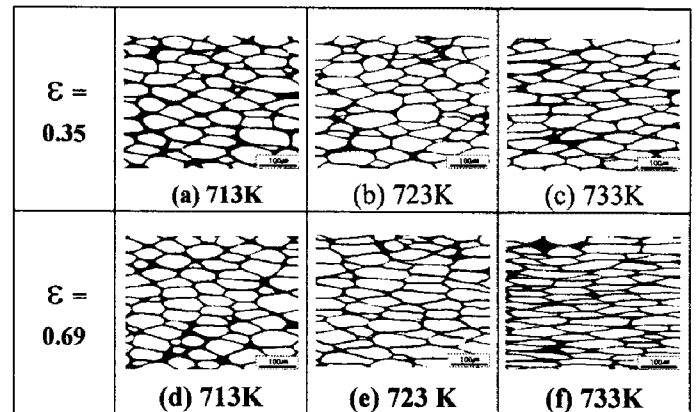


Fig. 2 Optical microstructures observed from the transverse direction of BMG/Ni composites after compression to $\epsilon = 0.35$ and $\epsilon = 0.69$.

Table 1. Change of the aspect ratio (AP) of BMG particles after compression.

Temperature (K)	$\epsilon=0.35$		$\epsilon=0.69$	
	AP	ϵ	AP	ϵ
713	1.89	0.31	3.32	0.58
723	2.23	0.40	4.43	0.73
733	3.12	0.55	7.45	0.89

Fig 2는 압축 시험 후 시편의 단면을 절단하여 광학 현미경을 통하여 관찰 한 미세조직 사진이다. 조직 사진에서 흰색 부분은 BMG particle 이고 검정색 영역은 Ni 코팅층이다. 압축 시험 온도가 증가함에 따라 BMG particle 이 더 많이 변형하였음을 알 수 있다.

BMG particle 의 변형량은 폭/두께로 정의되는 aspect ratio 를 조직 사진을 통하여 측정하여 얻었다. Imposed strain 이 0.69 일 때, BMG particle 의 aspect ratio 와 관계되는 변형량은 713K, 723K, 733K 각각 0.58, 0.73, 0.89 의 값을 갖는다. 측정된 값은 Table 1 에 정리하여 나타내었다. 723K 의 온도에서는 imposed strain 값과 거의 유사한 변형량 값을 갖지만 713K 는 imposed strain 보다 낮은 값을 733K 에서는 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서, 723K 에서 BMG/결정질 복합재는 코팅층과 BMG 가 균일한 변형을 하게 되고 713K 와 733K 는 불균일 변형을 하게 된다.

결정질 Ni 코팅층의 flow stress 를 측정하기 위하여 순수 Ni 분말과 부피 분율이 50%를 갖는 Ni 코팅 분말을 SPS 를 이용하여 소결 후 713K~733K 온도에서 압축 시험을 행하였다. Fig 3(a)와 (b)는 순수 Ni 과 Ni/50Ni 복합재의 stress/strain 곡선이다. Mixture rule 을 이용하여 Ni 코팅층의 flow stress 를 계산하였다. Fig 4 는 온도에 따라 계산된 Ni 코팅층의 stress/strain 곡선이다. 곡선에서 알 수 있듯이 코팅층의 flow stress 는 온도 변화와는 상관없이 거의 250MPa 의 일정한 값을 가진다.

앞에서 언급했듯이 Cu-based BMG 합금은 온도에 따라서 flow stress 가 크게 변한다. 반면 Ni 코팅층은 온도에 따라서 변화가 발생하지 않는다. 그러므로, 723K 의 온도에서는 BMG 의 강도와 Ni 코팅층의 강도가 비슷하므로 균일한 변형이 발생하고, 713K 와 733K 의 온도에서는 BMG 와 Ni 코팅층의 강도 차에 의하여 불균일 변형이 발생하게 된다.

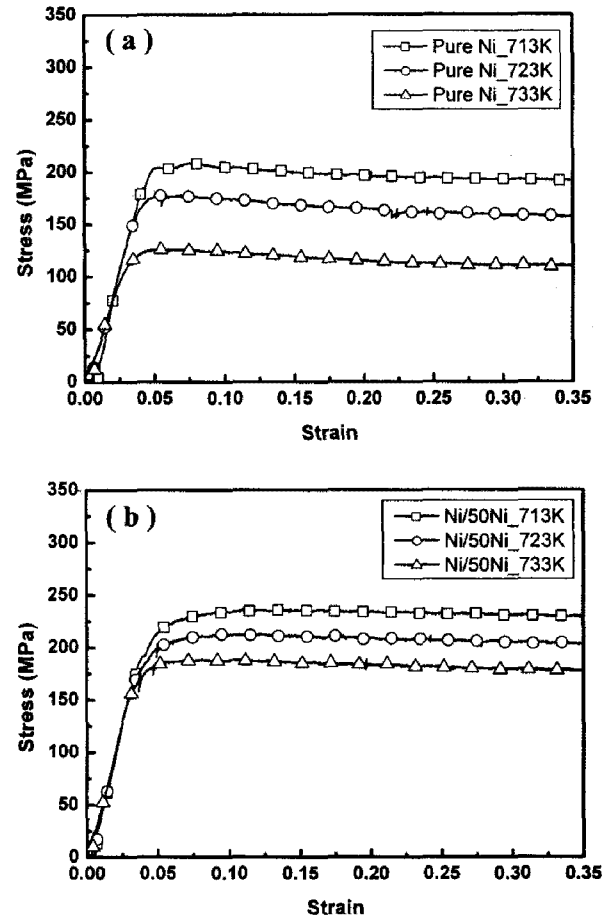


Fig. 3 Stress-strain curves of (a) Pure Ni and (b) Ni/50Ni composite determined at a strain rate of 2×10^{-3} .

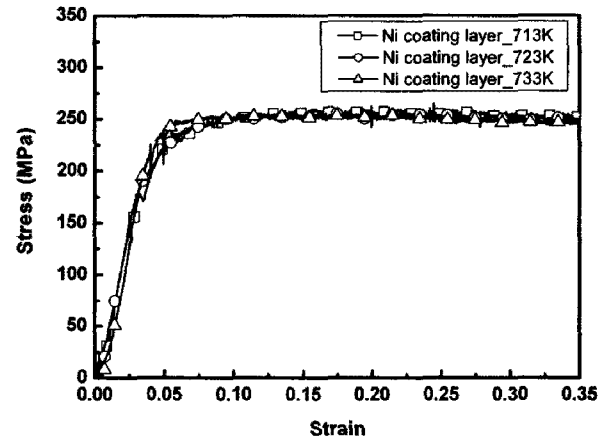


Fig. 4 Stress-strain curves of Ni coating layer calculated by mixture rule.

4. 결 론

본 연구에서는 BMG/결정질 복합재의 과냉각 액상구역에서 소성 변형 거동을 조사하기 위하여 BMG 분말에 Ni를 무전해 도금하여 복합재 분말을 제조하고 SPS 후 과냉각 액상구역에서 일축 압축 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

BMG/결정질 Ni 복합재는 압축 변형 시 결정질 Ni과 BMG particle의 flow stress 가 비슷한 값을 갖는 온도에서 균일 변형이 발생하고, 낮거나 높은 flow stress 값을 갖는 온도에서는 불균일 변형이 발생한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Inoue, 2000, Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. *Acta mater.*, Vol. 48, pp. 279~306.
- [2] C. C. Hays, C. P. Kim, W. L. Johnson, 2000, Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic prop-erties, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 84, pp. 2901~2904.
- [3] E. S. Park, J. C. Lee, M. Y. Huh, H. J. Kim, J. C. Bae, 2007, Finite element method analysis on the stress and strain states in amorphous composites containing crystalline copper during compression, *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 449-451, pp. 704~708.
- [4] M. Y. Huh, E. S. Park, H. J. Kim, J. C. Bae, 2007, Deformation behavior of amorphous composites containing crystalline nickel in the supercooled liquid region, *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 449-451, pp. 916~919.
- [5] H. J. Kim, J. K. Lee, S. Y. Shin, H. G. Jeong, D. H. Kim, J. C. Bae, 2004, Cu-based bulk amorphous alloys prepared by consolidation of amorphous powders in the supercooled liquid region, *Intermetallic*, Vol. 12, pp. 1109~1113.
- [6] J. Lu, G. Ravichandran, W. L. Johnson, 2003, Deformation behavior of the $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ bulk metallic glass over a wide range of strain-rates and temperatures, *Acta Mater.*, Vol. 51, pp. 3429~3443.