

동적재료모델에 의한 벌크 비정질 금속의 판재성형성에 대한 고찰

방원규* · 이광석* · 안상호** · 장영원*

Dynamic Materials Model-Based Study on the Formability of Bulk Metallic Glass Sheets

W. Bang, K.S. Lee, S. Ahn, and Y.W. Chang

Abstract

Viscoplastic deformation and sheet forming behavior of multicomponent Zr-based bulk metallic glass alloy has been investigated. From a series of mechanical test results, basic processing maps based on Dynamic Materials Model have been constructed to establish feasible forming conditions. Stamping in laboratory scale was then performed at the various stroke speeds and temperatures using a hydraulic press. Failure in macroscopic level was examined to check the validity of constructed processing maps.

Key Words : Viscoplastic Deformation, Bulk Metallic Glass, Dynamic Materials Model, Sheet Forming

1. 서론

1960년에 액체상태의 금속을 매우 빠른 속도로 냉각시킬 경우 금속 비정질(metallic glass)이 형성된다고 처음 보고된 이후 많은 연구자들에 의해 이들 금속 비정질 재료의 구조 및 물리적 성질에 대한 연구가 진행되어져 왔다. 비정질 합금이 관심을 끄는 이유는 그들이 탄성적으로 매우 강하고 이온강도에 가까운 항복강도를 가진다는 것, 탄성적으로 매우 강인하면서도 일반 유리처럼 취약하지 않고 최고 100% 이상의 소성 변형 능력을 보인다는 점, 낮은 전기 및 열 전도도를 갖는다는 점, 자기적으로는 높은 투자율과 낮은 보자력을 갖는다는 점 그리고 높은 부식 저항성을 보여주고 음파진행의 매질로서는 낮

은 감쇄 현상을 보인다는 점등을 들 수 있다. 그러나, 비정질 합금이 처음으로 발견된 이후 1980년대 후반까지 연구의 대상이 되었던 합금계들은 대부분 임계 냉각속도가 10^6 K/s 전후로 매우 높아 우수한 기계적 특성을 구조용재에 적용하기 위한 벌크화에 어려움이 많았다.

최근 들어 비정질 형성능이 획기적으로 개선된 다원계 합금들이 발견됨에 따라 벌크 비정질 금속의 구조용 재료로서의 응용이 새롭게 부각되고 있으며, 그에 필수적이라 할 수 있는 소성변형특성의 이해 및 가공성 평가의 중요성이 높아지고 있다.

이에 본 연구에서는 높은 비정질 형성능 및 우수한 강성을 갖는 것으로 알려진 상용 Zr 계 벌크 비정질 합금의 압축 시험을 통해 유리 천이 온도 근방에서의 소성

* 포항공과대학교 항공재료연구소

** 포항산업과학연구원 재료공정연구소

변형 현상을 확인하고, 초기 변형률 속도와 온도 조건이 기계적 성질과 변형 거동에 미치는 영향을 확인하였다. 또한 기계적 시험결과에 Prasad 등에 의해 제안된 동적 재료모델을 적용하여 공정지도를 작성하고, 실험실 규모의 판재성형을 통하여 설정된 공정조건의 타당성을 검토하고자 하였다.

2. 동적재료모델

2.1 파워분산효율

최근 Prasad 등에 의해 제시된 동적재료모델(Dynamic Materials Model)은 열간가공시 재료에 투입된 에너지가 얼마나 효율적으로 사용되는가에 대한 비율을 파워분산 효율(Power Dissipation Efficiency)로 정량화하여 나타낸다.⁽¹⁾

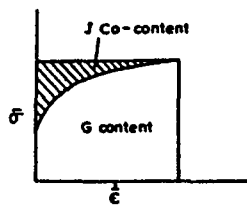


Fig. 1 Schematic representation of the constitutive relation in a nonlinear power dissipator

그림 1에서 열간가공시에 시편에 공급된 총 에너지는 가공에너지 G 항과 역항 J의 합으로 나타내어진다. G 항은 소성가공과정 자체로 소모되는 항이며 대부분 열에너지로 방출된다. 이에 대하여 J 항은 소재의 금속학적 변화에 의한 구조적 변화(Structural Relaxation)에 해당하는 것으로, 이 J 항의 비율이 클수록 열간가공효율이 증가한다고 볼 수 있다. 파워분산효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (1)$$

2.2 변형안정도

동적재료모델의 분산함수(Dissipative Function)에 입각한 불안정변형조건의 정량화는 Ziegler, Kumar 등에 의해 제시되었으며, 열간가공시 균일한 재료유동이 일어나기 위한 조건을 다음과 같은 온도와 변형률속도의 함수로 나타내었다.^(2, 3)

$$\xi = \frac{\partial \ln(m/m+1)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m > 0 \quad (2)$$

ξ 는 소성변형 불안정 인자로, 이 값이 음의 값을 나타내면 재료의 유동이 불안정해짐을 나타낸다.

전술한 파워분산효율과 불안정변형조건을 비교하면 균일변형영역에서 높은 변형효율을 가지는 조건으로 최적의 열간가공조건을 설정할 수 있다.

3. 실험과정

본 연구에서 사용된 합금은 판상의 상용 벌크 비정질 $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 합금으로, 미국의 Liquidmetal Technologies에서 제조한 것이며, 상온에서 1.9GPa의 항복 강도와 2% 정도의 탄성 변형을 갖는 등 매우 우수한 기계적 물성을 갖는 것으로 이미 보고된 바 있다.⁽⁴⁾

방전 가공 및 습식 연마를 통해 최종 치수가 $3 \times 3 \times 6$ mm인 압축 시편을 제작하였고, 시험 온도가 기계적 성질 및 변형 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 고정된 변형률 속도 조건에서 351, 371, 401, 431 및 461°C의 각기 다른 온도에서 압축 시험을 행하였다. 마찬가지로 변형률 속도가 기계적 성질 및 변형 거동의 변화에 미치는 영향을 조사하기 위해 같은 온도 조건에서 $2 \times 10^{-4} s^{-1}$, $5 \times 10^{-4} s^{-1}$, $2 \times 10^{-3} s^{-1}$, $2 \times 10^{-2} s^{-1}$ 의 각기 다른 변형률 속도로 압축 시험을 행하였다.

압축시험의 결과로부터 조건별 변형률속도 민감지수를 결정하였으며, 이에 따라 파워분산효율 및 변형불안정인자에 대한 변형공정지도(Deformation Processing Map)를 작성하였다.

공정지도의 주요 영역에 걸쳐 $70 \times 50 \times 0.7$ mm³의 판재를 8.5mm 깊이로 stamping을 실시하였으며, 거시적인 failure의 발생정도로 제시된 공정조건의 타당성을 검토하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 고온변형특성

그림 2는 압축시험결과의 일부로, 시험 온도를 351°C ~ 461°C 사이에서 변화시켜 가면서 초기 변형률 속도 $2 \times 10^{-4} s^{-1}$ 및 $2 \times 10^{-2} s^{-1}$ 로 최대 35%까지 압축 시험한 결과이다. 그림 2(a)의 경우 351°C 및 371°C에서는 stress overshoot, yield drop 및 steady state flow를 거치는 유동곡선의 개형은 유사하나 유동용력수준은 온도 상승에 따라 절반 이하로 크게 감소하는데, 이는 느린

변형을 속도 및 T_g 근방의 온도에서 벌크 비정질금속의 소성 변형에 필요한 유동 응력이 온도에 매우 민감하게 변한다는 기존의 연구 결과와 일치한다.⁽⁶⁾ 이와는 달리, 과냉 액상 영역의 중간 온도에 해당하는 401°C 이상의 시험 온도에서는 steady state flow 현상만 존재하는 현상을 확인할 수 있다. 또한 461°C에서는 시험중에 상당한 결정화를 수반하기 때문에 유동응력이 오히려 증가하는 현상을 보인다.

반면 빠른 변형을 속도에서는 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 과냉 액상 영역의 중간 부근에 해당하는 온도 조건에서만 어느 정도의 소성 변형 거동을 보이는 것으로 나타났다.

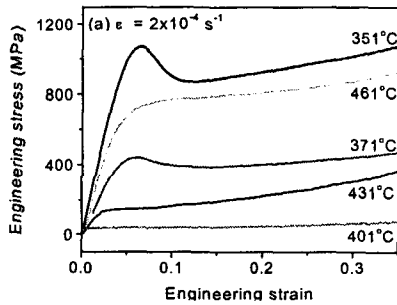


Fig. 2(a) The nominal compressive stress-strain curves obtained at the various temperatures under the strain rate of $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

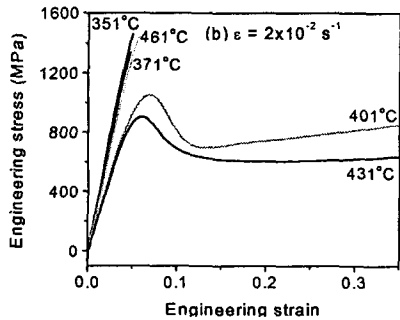


Fig. 2(b) The nominal compressive stress-strain curves obtained at the various temperatures under the strain rate of $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

4.2 변형공정지도

그림 3과 4는 진변형율 0.45에서 온도와 변형율속도에

따른 파워분산효율 및 소성변형 불안정 인자값을 각각 나타낸 것이다.

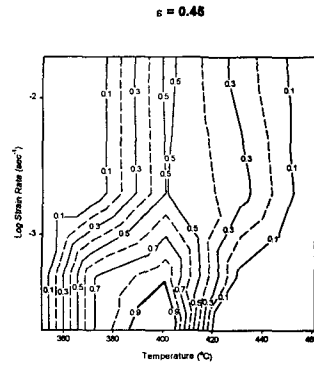


Fig. 3. Power dissipator contour map for Liquidmetal alloy. Iso-efficiency contour lines with the numbers represent power dissipation efficiency.

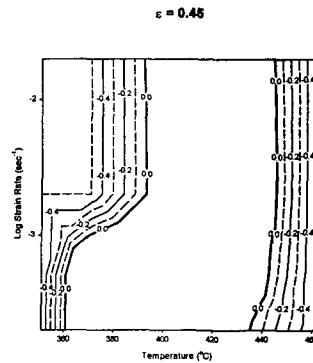


Fig. 4. Instability map for Liquidmetal alloy showing variation of ζ parameter with temperature and strain rate. Flow instability occurs when ζ is negative.

파워분산효율은 그림 3에 나타난 바와 같이 380~400°C, $2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 정도에서 가장 높은 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 그림 4와 비교해 보면 높은 변형 효율을 가지는 영역과 ζ 에 의해 결정된 균일변형영역이 대체로 일치하는 것을 알 수 있다. 이를 종합할 때 전술한 고 분산효율 영역에서 효과적인 structural relaxation이 일어나 가공중의 금속유동이 원활할 것으로 예측할 수 있다.

4.3 판재성형성 평가

스트로크 속도 및 성형온도를 변화시켜가며 stamping

을 수행하였으며, 결과를 표 1에 정리하였다. 360°C 이하 혹은 420°C 이상의 온도에서는 각각 내재적인 점성유동성의 부족 및 변형중의 결정화에 의해 낮은 성형성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1 Different deformation behavior at the various process conditions

(○: No failure, △: Partial Crack, ×: Total Rupture)

Stroke Speed (mm/sec)	360°C	380°C	400°C	420°C
1.5	×	○	○	△
1.5	×	△	○	×
4.5	×	×	△	×

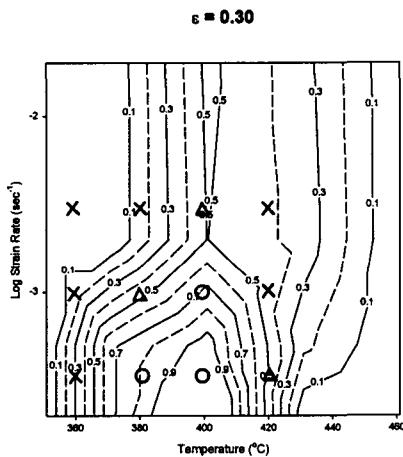


Fig. 5 Formability overlapped onto power dissipation efficiency

위 성형성 평가결과를 파워분산효율과 매칭시켜 보면 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있다. 고 분산효율 영역과 거시적인 failure 없이 우수한 성형성을 보이는 영역이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 기존

의 구조재 뿐만 아니라 비정질 금속에서도 동적재료모델이 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 상용 Zr 계 벌크 비정질 합금을 사용하여 고온 소성변형 특성 및 판재성형성을 평가하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 벌크 비정질 금속은 유리전이온도 부근에서 높은 연성을 나타내며, 변형률속도 및 온도에 유동응력이 매우 민감하게 변화한다.

(2) 높은 온도 영역에서 벌크 비정질 금속의 변형거동은 변형중 결정화에 크게 의존한다.

(3) 동적 재료모델을 통하여 벌크 비정질 금속의 열간 성형조건을 효과적으로 예측할 수 있다.

후기

본 연구는 미국 Liquidmetal Technologies 사의 지원 하에 수행된 과제 "Study on the Formability of Liquidmetal Bulk Metallic Glass" 연구결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Y.V.R.K. Prasad, H.L. Gegel, S.M. Doraivelu, J.C. Malas, J.T. Morgan, L.A. Lark and D.R. Barker, 1984, Met. Trans. Vol. 15A, p. 1883.
- (2) H. Ziegler, 1963, Progress in Solid Mechanics, Vol. 4, Eds. I.N. Sneddon and R. Hill, John Wiley and Sons, New York, p. 93.
- (3) A.K.S. Kumar, 1987, M.S. Thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India
- (4) A. Peker and W. L. Johnson, 1993, Appl. Phys. Lett., Vol 63, p. 2342.
- (5) A. Reger-Leonhard, M. Heilmaier and J. Eckert, 2000, Scripta Mater., Vol. 43, p. 459.