

Zr-기 벌크 금속 유리의 마찰 접합 공정 개발

신형섭[†]·정영진^{*}·김기현^{*}

Development of Friction Welding Process of Zr-based Bulk Metallic Glasses

Hyung-Seop Shin[†], Young-Jin Jeong^{*} and Ki-Hyun Kim^{*}

Key Words: Bulk Metallic glass(벌크 금속 유리), Supercooled liquid region(과냉각 액상영역), Friction Welding(마찰접합), Superplasticity(초소성), Crystallization(결정화)

Abstract

Bulk metallic glasses(BMG) with good mechanical properties have problems that engineering application fields have been limited because of limitation of the alloy size. In order to solving this problem, the friction welding of BMG has been tried using the superplastic-like deformation behavior under the supercooled liquid region. The apparatus for friction welding test was designed and constructed using pneumatic cylinder and gripper based on a conventional lathe. Friction welding have been tried to combination of same BMG alloy and crystalline alloys. The results of welding test were evaluated by X-ray diffraction, measurement of hardness and mechanical properties test. In order to obtain the optimized welding test conditions the temperature of friction interface was measured using Infrared thermal imager.

1. 서 론

종래의 아몰퍼스 금속(amorphous metal)에서는 냉각 속도의 영향으로 인해 벌크 형태의 소재를 얻을 수 없었고, melting spinning 법을 이용한 $\sim 10^6$ K/s의 높은 냉각 속도에서 $\sim 10 \mu\text{m}$ 두께의 얇은 리본 시험편만을 얻을 수 있었다⁽¹⁾. 그로인해 아몰퍼스 금속의 응용분야는 가공성, 제작성으로 인해 제한되어져 왔다.

최근 다수의 다원계 합금계의 개발로 인해,

100 K/s보다 낮은 냉각 속도에서도 유리상 형성이 가능하게 되었고, melt casting과 water quenching⁽¹⁾ 그리고 consolidation을 이용한 벌크 형태의 소재 제작이 가능하게 되었다. 하지만 그 크기가 수 밀리미터에 불과하여, 공학적 응용분야에 적용하기에는 여전히 어려움이 있다. 최근, 이러한 문제점을 해결하기 위해 벌크 금속 유리(BMGs)를 여러 가지 공정, 즉 마찰, 펄스-전류, 전자빔, 스파크 등을 이용한 용접이 시도되었으며⁽²⁾, 성공적인 결과가 보고 되고 있다. 본 연구에서는 과냉각 액상영역에서 낮은 점성을 갖으며 고변형률 초소성과 같은 변형 특성 나타내는 벌크 비정질 금속의 특성을 이용하여, $\text{Zr}_{55}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5\text{Cu}_{30}$ 의 조성을 갖는 BMG 합금의 마찰 접합을 시도하였고 비교재로 결정질 합금인 Ti-6V-4Al 합금을 사용한 접합 시험을 수행하였다.

먼저, 마찰 접합 실험을 위해 마찰 접합 장치를 고안, 제작 하였다. 마찰시 발생하는 열의 영

† 회원, 안동대학교 기계공학부

E-mail : hsshin@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5675 FAX : (054)820-5495

* 회원, 안동대학교 대학원 기계공학부

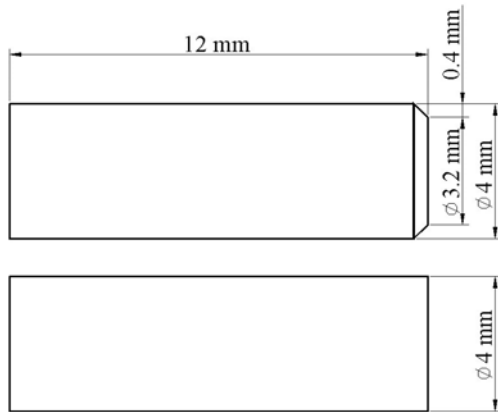


Fig. 1 Dimension of specimen to be welded by friction method.

향으로 인한 BMG의 결정화 방지를 위해 적외선 열화상기(Infrared thermal imager)를 사용하여 시료간 계면에서 발생하는 온도를 측정하였다

2. 실험방법

본 연구에서는 Ar 분위기에서 수냉 Cu 몰드(copper mold) 주조법으로 제작된 $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ 조성의 직경 4 mm, 길이 50 mm의 BMG 봉과 Ti-6V-4Al 판재로부터 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 직경 4mm, 길이 12mm의 2가지 종류의 시험편을 가공하였다. BMG 시료의 열특성은 차분 주사 열량계(Differential scanning calorimetry : DSC)를 이용하여 측정하였고, 주사속도 0.33 K/s에서 DSC

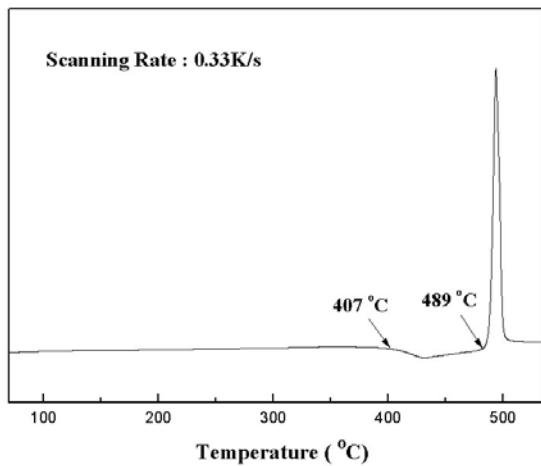
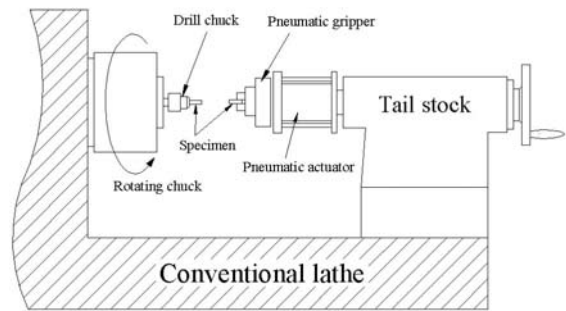


Fig. 2 DSC curve of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ bulk metallic glass.



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Schematic illustration and (b) appearance of constructed testing apparatus equipped with pneumatic actuator and gripper for friction welding testing of specimen at high speed rpm.

분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 유리 전이온도 (T_g)와 결정화 온도(T_x)는 각각 407 °C, 489 °C이다.

마찰접합 시험시, 접합에 필요한 마찰열을 얻기 위한 회전력을 얻기 위해 상용 선반을 사용하였다. 시험편은 회전축과 고정축에 한 쌍으로서 접합에 사용되었다. 한쪽 시험편을 선반의 주축에 고정시킨 후 척(chuck) 회전시킴으로써 마찰 접합에 필요한 회전수를 얻을 수 있었다. 다른 쪽 시험편은 Fig. 3에 나타낸 제작된 마찰 접합용 홀더를 선반의 심압대에 부착하여 다른 시험편을 일정한 압력으로 회전부로 가하여 시험을 수행하였다.

본 시험을 위해 고안된 마찰 접합 장치는 시험편을 회전축으로 이동하면서 가압할 수 있는 공압 액츄에이터(Pneumatic actuator)와 가압축 시험편의 고정과 회전 방지를 위한 공압 그립퍼(Pneumatic gripper)로 구성되어 있다.

마찰 접합은 선반의 주축을 목표 RPM으로 회전시키고, 심압대에 장착된 공압 액츄에이터

Table 1 Testing conditions of friction welding test.

	Friction	Upsetting
RPM	1800	-
Pressure (P)	100 ~ 200 MPa	-
Time (t)	0.6 ~ 3 s	-

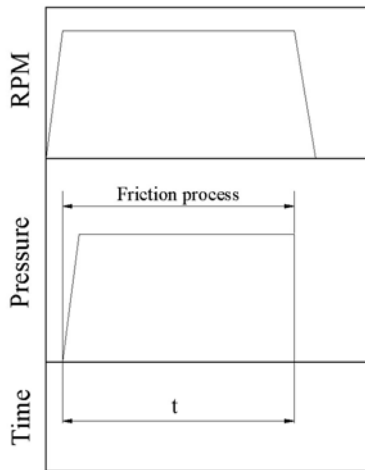


Fig. 4 Process of friction welding

(Pneumatic actuator)를 작동하여 시험 압력을 마찰 시간동안 시험편에 가한 후 브레이크를 작동시켜 척을 정지시킴과 동시에 공압 그립퍼를 사용하여 브레이크의 작동과 동시에 시료를 분리시켜서, 마찰 시간의 제어와 시료의 접합 후 시편 손상을 방지하였다. 그리고 마찰 후 업셋(upsetting)은 가하지 않았다. 시험조건은 Fig. 4와 Table 1에 나타내었다.

그리고 마찰 접합시 접합의 계면의 온도를 측정하기 위하여, 적외선 열화상기(FLIR - ThermoCam SC-2000)을 사용하여 계면 주위에서 발생하는 온도를 측정하였다.

접합된 시료는 광학 현미경 (Optical microscopy : OM)을 사용하여 접합 계면을 관찰하였다. 그리고 비커스 경도(Micro-Vickers hardness)를 측정하여 접합 후 접합 계면 부근에서 기계적 특성의 변화를 평가하였다.

Table 2 Summary of testing conditions specimens friction.

		Friction Pressure (MPa)	Friction time (s)	Volume of protrusion (mm ³)	Thickness of protrusion (μm)
BMG	(a)	200	0.9	27	203
	(b)	150	1.7	30.6	573
	(c)	100	0.6	6.48	201
Ti-6V-4Al	(d)	150	2	1.9	-

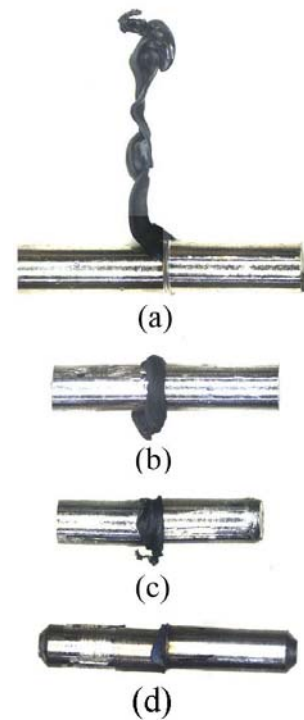


Fig. 5 Appearance of welded BMGs specimens.

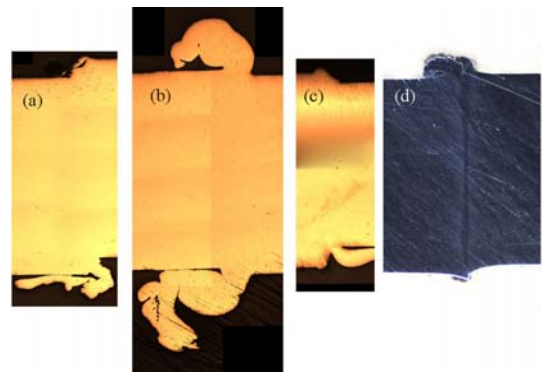


Fig. 6 Optical micrographs of cross-section after polishing friction welded

3. 실험결과 및 고찰

마찰 용접된 BMG와 Ti-6V-4Al 합금의 시험 조건을 Table 2에 나타내었다. Fig. 5는 마찰 용접된 Zr₅₅Al₁₀Ni₅Cu₃₀ BMG의 모양을 나타내고 있다. 마찰압력과 시간에 따라서 접합 계면에서 다른 형태의 돌기부가 형성되었음을 볼 수 있다. 이러한 돌기부는 두 시험편의 상대운동에 의해 생성된 마찰열로 인해 BMG 계면이 유리 전이 온도 (T_g) 이상으로 가열되어, 과냉각 액상 상태가 됨

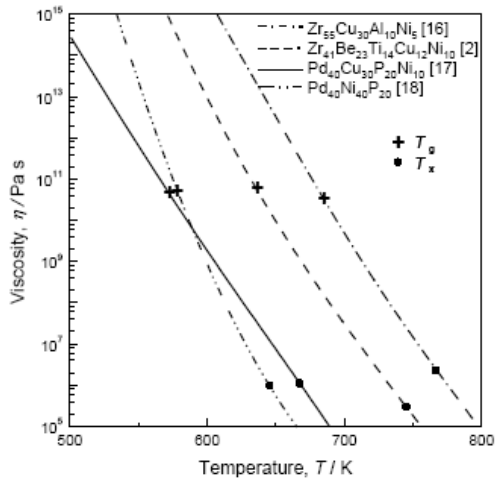


Fig. 7 Temperature dependence of viscosity in the supercooled liquid state of Zr-based bulk metallic glasses.

으로써, 낮은 점성을 갖으며 고변형률 초소성파 같은 변형에 의해서 형성되었다.

마찰용접에서 이러한 돌기부의 형성은 접합부 표면에 형성된 산화 피막을 파괴시켜서 외부로 방출함에 따라서 표면을 창생 함으로써, 야금학적 접합이 가능하다고 알려져 있다⁽³⁾. Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 용접된 시험편의 계면의 단면을 나타낸다. 세 시험편 모두 계면에서 돌기부가 형성되었고, 접합부에는 기공이나 결함 등이 관찰되지 않아서 양호한 용접이 이루어졌음을 알 수 있다⁽⁵⁾. Fig. 5와 Table 2에 보여진 것처럼 마찰 압력과 마찰 시간이 마찰 접합에서 돌기부 형성에 영향을 미쳐, 마찰압력이 높은 (a) 시험편의 보다 낮은 마찰압력에서 약 두 배의 긴 마찰시간을 갖는 (b) 시험편에서 보다 균형잡힌 뚜렷한 돌기부가 형성된 것을 볼 수 있다. 계면의 산화 피막의 방출이 많음으로써 용접에 긍정적인 영향을 미치리라 생각된다.

그러나 BMG의 마찰접합 시험에서 고려해야 할 인자 중에서 가장 중요한 요소는 온도이다. 이는 용접동안 결정화를 일으키는 가장 중요한 요소이다. 이는 용접동안 결정화를 일으키는 가장 중요한 요소이기 때문이다. 이전의 연구를 통해 과냉각 액상영역에서 온도와 가열 시간에 따라 결정화가 발생한다는 것이 보고 되었다⁽⁴⁾. 따라서 이러한 결정화를 피하기 위해서는 결정화의 개시에 대한 시간-온도 선도인 T-T (Time-Temperature-Transformation) 선도의 노즈(nose) 보다 짧은 시간

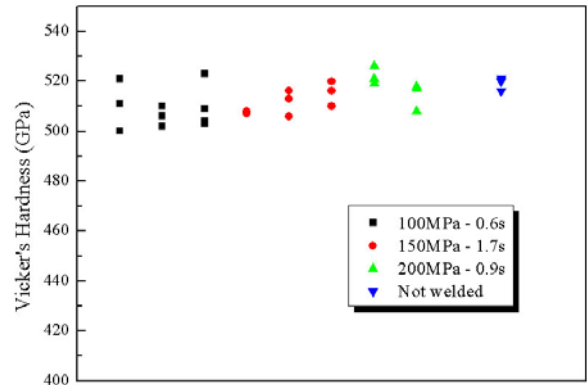


Fig. 8 Vickers hardness values at interface of welded specimens.

내에 접합이 완료되어야 결정화를 피할 수 있다. Zr₄₁Ti₁₄Cu_{12.5}Ni₁₀Be_{22.5} BMG(Vit 1)의 경우, 용융-냉각과 고상 가열 시간은 각각 70 s와 5 s로 보고된바 있으며, Zr₅₅Al₁₀Ni₅Cu₃₀ BMG의 경우는 용융-냉각, 고상 가열은 각각 2 s와 약 0.2 s로 보고되어 있다^{(3),(8)}. 실제로 마찰접합시 계면에서 발생하는 온도를 측정함으로써, 마찰압력에 따른 온도 특성을 예상할 수 있고, 정미 마찰 시간을 추정할 수 있게 된다. 0.2 s보다 더 긴 마찰작업 시간을 유지할 수 있고, 이로 인해 마찰열로 인한 BMG의 결정화를 방지하면서 새로운 접합면의 생성에 긍정적인 영향을 미치게 된다. 이를 위해, 적외선 열화상기(FLIR - ThermoCAM2000)를 사용하여 마찰접합시 발생하는 계면 주위의 온도를 측정하였다. 그 결과, Zr₅₅Al₁₀Ni₅Cu₃₀ BMG에서는 최대 552.5°C, Ti-6V-4Al에서는 503.9°C가 측정되었다.

Ti-6V-4Al 합금의 경우, Fig. 5 (d)에 보여진 것처럼 150 MPa의 마찰압력과 2 s의 마찰시간에서 계면에 돌기부가 형성되면서 접합되었다. 그러나, Fig. 8의 연마된 단면의 계면에는 용접선이 남아있어서 BMG와 같은 성공적인 용접이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 이는 마찰 용접이 Ti-6V-4Al 합금과 같은 결정질 금속의 경우 고상 공정으로 간주되지만, BMG의 경우, 과냉각 액상 공정으로 간주되기 때문이다⁽²⁾. 이는 유리 전이 온도 이상에서 BMG 합금이 낮은 점성을 갖는 과냉각 액상의 영향이며, 상온에서 급격한 파단을 나타내며, 높은 강도와 경도를 갖는 Zr₅₅Al₁₀Ni₅Cu₃₀ BMG 합금이 같은 마찰 압력과 보다 적은 마찰시간에서도 Ti-6V-4Al 합금에 비해

우수한 변형거동을 나타내는 것을 Fig. 5 (b)와 (d)의 비교를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 8은 마찰 접합된 시료 접합계면 부근의 Micro-Vickers 경도 측정 결과이다. 부가 하중은 1 kg이다. 가열되지 않은 영역에서 516~521 범위의 경도값을 가지며 접합부의 상부, 중간 그리고 하부의 3영역에서 측정을 실시하였다. 그 결과, 모든 시료에서 500~529 범위의 값을 가짐으로써, 마찰열을 받지 않은 모재와 유사한 값을 나타내었다⁽⁶⁾. 따라서 마찰 용접에 따른 결정화가 일어나지 않았다는 것을 간접적으로 알 수 있다. 보다 명확한 측정을 위하여, 차후 X-선 회절(X-ray diffractometry), 차분 주사 열량계(differential scanning calorimetry : DSC) 그리고 인장시험⁽⁷⁾ 등의 시험을 통해 조직학적 특성 또는 열적 특성 평가를 계획하고 있다.

4. 결 론

1) 공압식 실린더와 그립퍼를 사용하여 보통 선반을 개조한 마찰 접합 시험장치를 구성하여, $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ 의 조성을 갖는 BMG 합금은 마찰 압력 100~200 MPa, 마찰시간 0.6~2 s의 시험조건에서, 접합부에 어떠한 기공이나 결함 없이 마찰 접합이 가능하였다.

2) 마찰열로 인한 접합부의 결정화 방지 하기 위한 시험 조건을 구하기 위하여 적외선 열화상기(FLIR-ThermaCAM2000)를 사용하여 온도를 측정하였고 BMG의 경우 최대 약 550°C, Ti-6V-4Al의 경우 약 504°C의 온도가 발생하였다.

3) 마찰 접합된 시료 접합부 단면의 Micro-Vicker 경도 시험 결과, 모재와 유사한 값을 나타내 결정화가 일어나지 않음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구사업 중 지방대우수연구자사업(Grant No. R05-2003-000-11614-0)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 실험에 사용한 시료는 Tohoku Univ. IMR로부터 제공된 것으로, Prof. A. Inoue와 Dr. H. Kato에게 감

사를 드린다.

참고문헌

- (1) Takuo. Shoji, Yoshihito. Kawamura and Yasuhide. Ohno, 2004, " Friction welding of bulk metallic glasses to different ones", Materials Science and Engineering A, in press.
- (2) Y. Kawamura, T. Shoji and Y. Ohno, 2003, "Welding technologies of bulk metallic glasses", Journal of Non-Crystalline Solids, Vol 317, pp. 153-157.
- (3) Y. Kawamura, 2004, "Liquid phase and supercooled liquid phase welding of bulk metallic glasses", Materials Science and Engineering, in press.
- (4) 신형섭, 정영진, 김기현, 2004, "Deformation Behavior of a $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ Bulk Metallic Glass at High Temperatures", 대한 기계학회, Vol 49, pp. 1067-1073.
- (5) Takuo. Shoji, Yoshihito. Kawamura and Yasuhide. Ohno, 2002, "Joining of $Zr_{41}Be_{23}Ti_{14}Cu_{12}Ni_{10}$ bulk metallic glasses by a friction welding method", Japan Inst. Metals, Vol 66, pp. 1055-1062.
- (6) C. H. Wong and C. H. Shek, 2003, "Friction welding of $Zr_{41}Ti_{143}Cu_{12}Ni_{10}Be_2$ bulk metallic galss", Scripta Materialia, Vol 49, pp. 393-397.
- (7) Yhshihito. Kawamura and Yasuhide. Ohno, 2001, "Superplastic bonding of bulk metallic glasses using friction", Scripta Materialia, Vol 45, pp. 279-285.
- (8) Yhshihito. Kawamura and Yasuhide. Ohno, 2001, "Spark weldign of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ bulk metallic glasses", Scripta Materialia, Vol 45, pp. 127-132.