〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.7.687

벌크 비정질 금속 봉재 및 튜브재의 마찰접합 특성

신형섭† · 박정수* · 정윤철*

(2009년 4월 16일 접수, 2009년 6월 15일 수정, 2009년 6월 16일 심사완료)

Characteristics of Friction Welding of Bulk Metallic Glass Rods and Tubes

Hyung-Seop Shin, Jung-Soo Park and Yoon-Chul Jung

Key Words: Friction Welding(마찰접합), Bulk Metallic Glass(벌크 비정질 유리), Tube(튜브), Superplasticty(초소성), Supercooled Liquid Region(과냉각 액상영역), Dissimilar Materials(이종재)

Abstract

The friction welding of Zr-based bulk metallic glass (BMG) rods and tubes to similar BMGs, and to crystalline metals were performed. An infrared thermal imager (FLIR-Thermal Cam SC-2000) was used to measure the temperature distribution at joining interface of the specimens during friction welding. All BMGs adopted in this study showed a successful friction joining to similar BMG. The shape of the protrusion formed at the weld interface were examined. In order to characterize the friction weld interface, the micrographic observation and the X-ray diffraction analysis on the weld cross-section were carried out. The obtained results were discussed based on the temperature distribution measured at the weld interface A successful joining of the BMGs to crystalline metals could be obtained for certain pairs of the material combination through the precise control of the friction condition. The residual strength after dissimilar friction welding of BMG was evaluated by the four-point bending test and compared with the cases of friction welding to similar materials.

기호설명

T_g : 유리 천이 온도
T_x : 결정화 온도
t_f : 마찰 시간
P_f : 가압력
V_p : 돌기부 체적

1. 서 론

물질을 구성하는 원자는 열역학적 안정 상태에서는 그 물질 특유의 기본격자인 결정형으로 배열되어 있다. 그러나 벌크비정질금속(bulk metallic glass; BMG)은 결정질 재료(crystalline materials)와는 달리 장 범위에 걸쳐 불규칙적인 원자구조를 가지고 있어, 이러한 경우를 아몰퍼스(amorphous) 또는 비정질 구조라고 한다. 결정질 재료는 원자구조가 주기적이면서 장 범위에 걸쳐 규칙적이며 반복적인 배열을 나타내고 결정립계가 존재함과 동시에, 전위와 같은 초기결함을 갖고 있어서, 전위의 이동이 변형의 근원이 됨과 동시에 강도 저하의 원인도 된다. 그에 반해 아몰퍼스 구조는 원자의 불규칙한 배열에 따른 자유체적(free volume)이 존재하고 이들의 연결, 합체에 의한 보이드(voids) 및 전단띠 형성에 기인하는 불균일 변형 기구를 나타내는 것이 특징이다. 또한 BMG는 일반 결정질 금속에서는 나타나지 않는 열적 특성인, 유리천이온도(glass transition temperature;

† 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학부
E-mail : hsshin@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5675 FAX : (054)820-5167
* 안동대학교 대학원 기계설계공학과

T_g) 및 결정화온도(crystallization temperature; T_x)를 갖는 것이 특징이다. 즉 T_g 이상의 온도 영역에서는 탄성에서 점탄성으로 천이하는 변형거동을 나타나게 된다. 또한 T_x 이상의 온도에서 장시간 노출될 경우 결정화가 일어나 취화되는 특성을 가진다. 이때 T_g 와 T_x 사이의 온도 구간을 과냉각 액상영역(supercooled liquid region, ΔT)으로 부르고, 이 구간에서는 점성 변형을 나타내면서 균일 초소성 변형을 나타내는 것이 특징이다.[1~4] 최근 다수의 다원계 합금의 개발로 인해, 100 K/s 보다 낮은 냉각 속도에서도 유리상 형성이 가능하게 되었고, 그로 인해 벌크 형태의 소재 제작이 가능하게 되었다. 그러나 그 크기는 수십 mm에 불과하여, 여전히 구조부재에 적용하기에는 어려움이 남아있다. 최근, 이러한 사이즈 문제를 해결하기 위해 BMG 봉재 및 판재에 대하여, 즉 마찰, 펄스-전류, 전자빔, 스파크 등 다양한 접합 공정이 시도되었고[5~12], 일부 성공적인 결과가 보고되고 있다. 그러나 BMG튜브재의 마찰접합에 대하여 거의 보고되어 있지 않은 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 BMG의 사이즈 한계 해결, 가공성 향상 및 적용분야 확대를 위하여, Zr-기 BMG 봉재의 동종재간 및 결정질 금속과의 이종 마찰접합을 시도하였고, 그 결과를 바탕으로 BMG 튜브재에 대하여 동종 및 이종재간 마찰접합을 실시하여 그 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 마찰접합 시험편

본 연구에서 사용된 BMG 시험편은 Zr-Cu-Al계 벌크 유리상 합금인 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ 및 시판의 $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ (제품명: Vit-1) BMG 봉재를 사용하였다. 한편, 결정질금속의 경우, 시판의 Al합금(A5056, A5083)을 사용하였다.

$Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG 봉재 시편의 경우, 2단 아크 용융 공정 및 경사 주조법으로 제작된 직경 5 mm 및 8 mm 환봉 주조재로[12] 부터 직경 5 mm 및 직경 6 mm, 길이 27 mm의 봉재 시험편을 각각 가공하였다. Vit-1의 경우, 두께 7 mm의 판재로부터 직경 6 mm, 길이 27 mm의 봉재 시험편을 가공하였다. 마찰 접합 시험에 사용된 각 Zr-기 BMGs 시편의 열 특성치를 Table 1에 나타내었다. 한편, 결정질 금속과의 이종접합에 사용된 Al합금재의 경우, 시판 A5056과 A5083 판재로부터 직경 6 mm의 봉재 시험편을 각각 가공하였다. 한편 튜브재의 경우 소형 선반에서 초경 드릴을 사용하여 Fig. 1와 같이 내경 4 mm의 구멍을 추가 가공하였다.

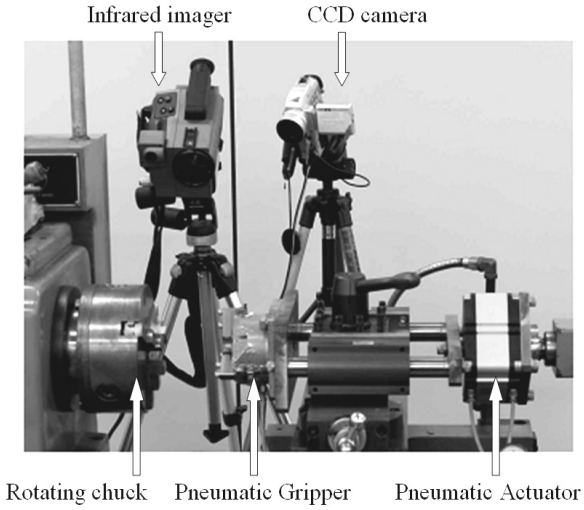
Table 1 Thermal properties of Zr-based BMG alloys

BMGs	T_g (K)	T_x (K)	ΔT (K)
$Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$	706	792	86
$Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ (Vit-1)	623	705	82

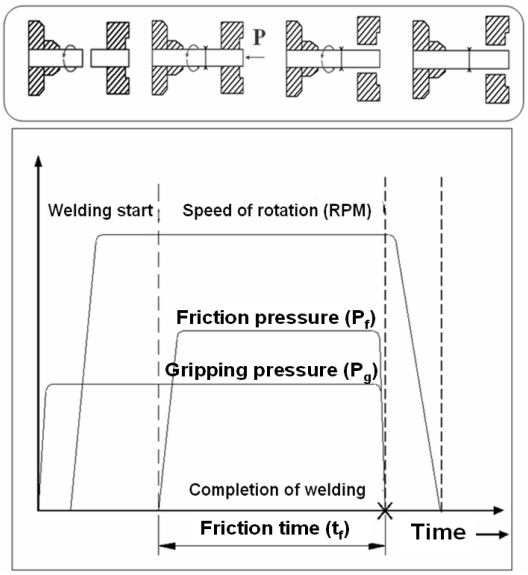
Fig. 1 Dimensions of specimen for friction welding of BMG alloys

2.2 마찰 접합 장치 및 시험 방법

마찰접합은 상용 선반을 사용하여 구성하였다. 마찰접합 장치의 사진을 Fig. 2(a)에 보여주고 있다.[6,10] 선반의 주축(회전측) 및 심압대(가압측)에 각 한 쌍의 시험편을 고정하여 실시하였다. 이때 가압측 시험편은 공압 그립퍼(pneumatic gripper)로 고정하였고, 공압 엑츄에이터(actuator)에 의해 가압하는 구조로 되어 있다. Fig. 2(b)는 본 연구에 사용된 마찰 접합 공정을 나타내고 있다. 선반의 주축에 물린 시험편을 목표 RPM까지 회전시킨 후, 심압대에 장착된 공압 엑츄에이터를 작동시켜 시험편에 압력(friction pressure; P_f)을 소정의 마찰 시간(friction time; t_f) 동안 가한 후, 가압력을 제하함과 동시에 그립퍼로부터 가압측 시험편을 개방 분리시켜 접합공정을 종료하게 된다. 이들 공정은 LabVIEW S/W로 제어하였다.[13] 본 연구에서는 기존 연구결과[6,10,11]를 바탕으로 하여, P_f는 150와 200 MPa, t_f는 0.8초로 고정하였다. 마찰접합동안 적외선 열화상기(FLIR-Thermal



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Testing apparatus and (b) process for friction welding

Cam SC-2000)를 사용하여 접합부계면 주위의 온도분포를 실시간(0.25초 간격)으로 측정하였다.[10,11] 마찰접합후 시험편의 접합 계면에 생성된 돌기부의 형상을 관찰하였고, 그 체적을 길이의 차로부터 계산하였다. 접합부 특성을 평가하기 위해 접합된 시험편을 연마한 후 광학현미경하에서 접합 계면에서의 결함 존재여부를 조사하였고, 접합계면에서 BMG의 결정화 여부를 Micro-

(a) P_f=200 MPa_t_f=0.8 sec (V_p=86 mm^3)

(b) P_f=150 MPa_t_f=0.8 sec (V_p=79 mm^3)

Fig. 3 Appearances after friction welding of similar $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG specimens

beam XRD해석을 통해 조사하였다. 4점 굽힘시험에 의해 접합강도를 평가하였다. 파단면에 대해 SEM관찰을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 BMG 봉재의 동종 마찰접합

직경 5mm의 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG에 대하여 동종 BMG간 마찰접합을 실시하였다. 가압력, P_f=150 MPa 및 200 MPa, 마찰 시간, t_f=0.8 sec에서 마찰접합한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 (a) P_f=200 MPa_t_f=0.8 s 접합조건에서는 돌기부가 접합계면 주위에 충분히 형성되면서 접합이 이루어졌다. 돌기부는 두 시험편의 상대운동에 의해 발생하는 마찰열로 인해 형성되는데, BMG의 경우는 두 시험편의 접합계면이 T_g 이상으로 가열되어 과냉각 액상영역에서 점성이 낮아진 상태에서 가압에 의해 초소성 변형(superplastic deformation)에 의해서 돌기부가 형성되었다. 이러한 돌기부의 형성은 접합부 표면에 형성된 산화 피막을 파괴시켜 외부로 방출시킴에 따라 새로운 표면을 만들어냄으로써, 야금학적 접합을 가능하게 하였다.[5,6] (b) P_f=150 MPa_t_f=0.8 s의 경우 역시 돌기부가 접합계면 주위에 충분히 형성되면서 접합이 이루어졌다. 따라서 가압력이 증가함에 따라 접합계면에서 생성되는 돌기부의 양이 증가한다는 것을 알 수 있다.

$Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG의 동종 마찰접합 동안 적외선 열화상기로 측정한 접합계면 온도 분포 최대

값의 마찰 경과시간에 따른 온도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 접합계면에서의 온도 이력을 살펴보면, 접합 개시와 더불어 마찰열로 인해 T_x부근까지 단열 급상승 한다. 그러나 돌기부의형성 및 성장에 따른 열전달(확산)이 일어나고, 그에 따라 새로운 계면이 만들어지면서 계면부근의 온도는 더 이상 상승하지 않고 거의 일정한 온도를 유지하다가 마찰접합 종료 후 냉각되는 거동을 나타내었다. 이때 냉각 속도는 35 K/s로 약 2초 이내에 T_g 이하로 떨어져 접합부의 결정화에 필요한 시간이 짧아서 접합부는 결정화(crystallization) 없이 비정질상을 유지하게 된다는 것을 예측할 수 있다. 또한 4점 굽힘시험에 의한접합된 시험편의 접합 강도를 평가한 결과 접합부가 아닌 모재부에서 파단이 일어났고 이를 통해 양호한 접합이 이루어진 것을 알 수 있다.

3.2 BMG 튜브재의 동종 마찰접합

BMG튜브재 마찰접합 시험편의 경우, 접합계면에서 생성되는 돌기부의 양상이 봉재의 경우와 달라서 우선 Al합금(A5xxx)을 사용하여 튜브재의 마찰 접합을 시도하였다. 그 결과 Fig. 5(a)와 같이 돌기부가 튜브재 내측 및 외측에서 동시에 형성되었고, 내측에 형성된 돌기부는 추가가공을 필요로 한다. 이러한 문제점을 해결하고자 다양한방법이 시도되었고, 그 결과, Fig. 5(b)와 같이 접합부에 경량 코어(core)재를 삽입하여 마찰 접합 후 코어재를 제거함으로써, 튜브재 내측에는 돌기부 형성이 없는, 즉 앞 절 봉재의 경우와 마찬가지로 마찰접합이 가능하게 되었다.

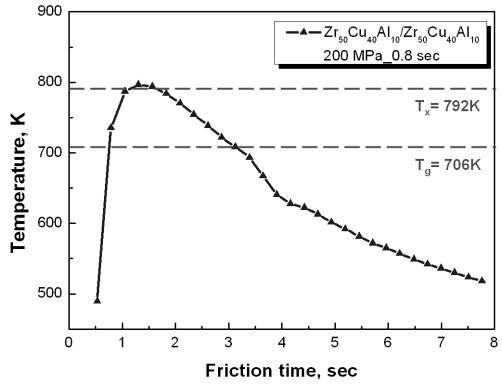
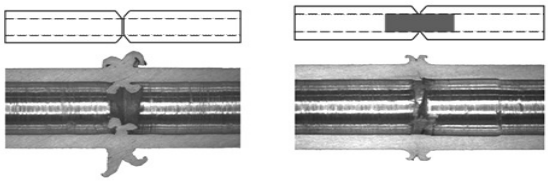


Fig. 4 History of maximum temperature measured at the interface during friction welding of similar $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG

봉재의 경우와 동일한 마찰 접합 조건 (P_f=150 MPa, t_f=0.6 s)에서 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ BMG 튜브재의 마찰 접합을 실시하였다. 시험편의 형상 변화에 따른 마찰접합 시 돌기부 체적과 접합계면에서 온도분포의 변화를 Fig. 6 에 나타내었다. BMG튜브재의 경우, 봉재 마찰접합의 경우보다 작은 양의 돌기부를 생성하였고, 접합계면에서 최대온도 역시 상대적으로 낮다는 것을 알 수 있다. 즉 열전달 속도의 증대가 온도의 저하 및 그로인한 형성된 돌기부 체적의 상대적 감소를 가져왔다.

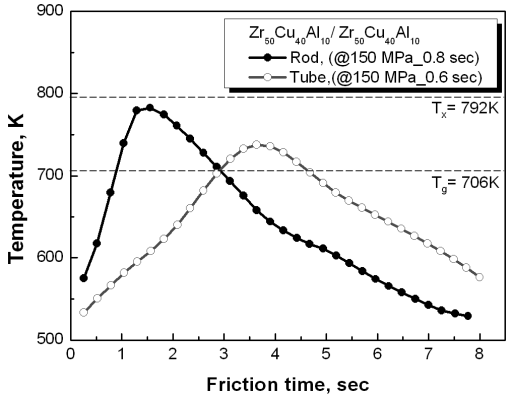
3.3 BMG와 결정질금속 튜브재의 이종마찰접합

앞 절의 동종 BMG간 마찰 접합결과 및 본 연구자 그룹의 BMG와 결정질 금속의 마찰접합 결과를 바탕[6,10,11]으로 BMG튜브재와 Al합금간 이종



(a) Without insert (b) With insert

Fig. 5 Optical micrographs of cross-section after friction welding of A5XXX series tubes

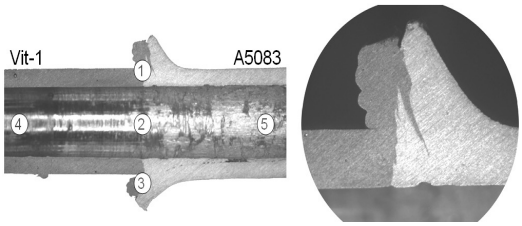


Combination	Cross section	Protrusion volume (mm^3)	Maximum temperature (K)
$Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$	Rod	79	787
/$Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$	Tube	55	733

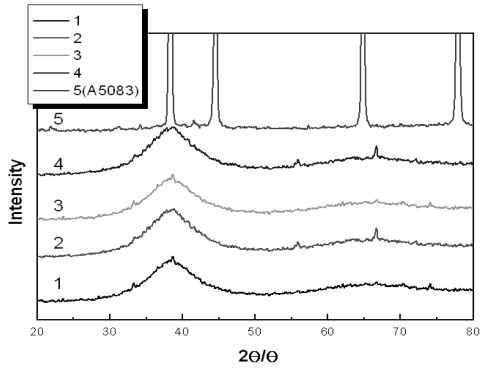
Fig. 6 The effect of specimen geometry on protrusion volume and weld interface temperature

재의 마찰접합을 실시하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 Vit-1/A5083 조합의 경우는 시험편 양쪽 모두에서 돌기부가 발생하면서 양호한 접합이 이루어진 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 8(a)의 단면 사진에서 볼 수 있듯이 돌기부가 시험편 양쪽에서 동시에 발생하였고 접합계면은 결함없이 양호한 접합이 이루어진 것을 확인할 수 있다. 또한 단면상 각부에 대한 XRD분석 결과, Fig. 8(b)에서 볼 수 있듯이 BMG측 접합계면(1, 2, 3) 및 기계가공된 튜브재의 모재부분(4) 모두 A5083 결정질 금속의 패턴과는 달리, 비정질상의 할로우 패턴을 나타내 결정화없이 양호한 접합이 일어났다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7 Appearances of friction weld specimens of Vit-1/A5083 (at P_f=150 MPa, t_f=0.6 s)



(a)

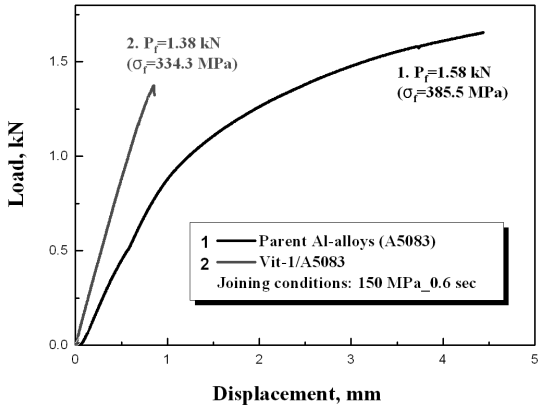


(b)

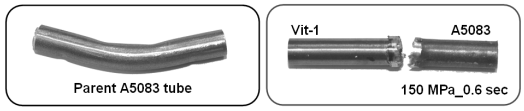
Fig. 8 (a) Cross-sectional view and (b) X-ray diffraction pattern at the interface of dissimilar friction weld specimen of Vit-1 BMG/A5085

3.4 BMG 튜브재의 마찰 접합 특성 평가

Vit-1 BMG와 Al합금 조합간 이종재 마찰접합한 시험편의 접합 강도를 4점 굽힘시험을 실시하여 평가하였다. 그 결과, Fig. 9에서 볼 수 있듯이 접합계면 부근에서 파단이 이루어졌다. 파단시의 굽힘응력은 A5083 모재의 항복강도에 상응하는 값을 나타내었다. 한편 BMG측 파단면에는 Al합금이 일부 부착되어 있었다. 이들 파단면을 SEM 하에서 관찰 한 결과, Fig. 10과 같이 파단면에 부착되어 있는 Al합금은 딤플(dimple)을 수반하는 연성파면을 형성하고 있는 것으로부터 접합계면에서는 결정화 없이 양호한 금속학적 결합이 이루어졌음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 9 (a) Load-displacement curve of weld specimens of BMG to Al-alloys by 4-point bending test and (b) appearance of fractured specimens

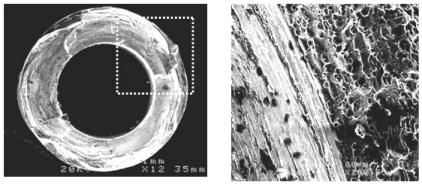


Fig. 10 SEM fractography of BMG side specimens after 4-point bending test of friction weld specimens of Vit-1/A5083

4. 결 론

(1) Zr-기 BMG 튜브재 마찰접합의 경우, 접합계면에 코어재를 삽입함으로써, 시험편 바깥쪽에서만 돌기부가 발생하면서 성공적인 마찰접합을 나타내었다.

(2) BMG 튜브재의 마찰접합시 발생하는 접합계면의 최대온도는 전열면적 증가로 인해 BMG 봉재 마찰접합의 경우보다 낮은 값을 나타내었고, 이로 인해 상대적으로 적은 양의 돌기부를 형성하였다.

(3) BMG 튜브재와 Al합금 튜브재와의 이종 마찰접합 결과, 접합계면에서 결정화없이 양호한 금속학적 접합을 얻을 수 있었고, 굽힙 접합강도도 Al합금의 항복강도에 상응하는 값을 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자 사업(KRF-2006-041-D00280) 및 문제해결형 인력양성 지원사업(KRF-2007-511-D00003) 지원으로 수행되었기에 감사드린다. Zr-Cu-Al BMG시료는 IMR. Tohoku Univ.로부터 제공되었기에 감사드린다.

참고문헌

(1) Inoue, A., 2000, "Stabilization of Metallic Supercooled Liquid and Bulk Amorphous Alloys," *Acta Mater*, Vol. 48, pp. 279~306.

(2) Lu, J., Ravichandran, G. and Johnson, W. L., 2003, "Deformation Behavior of the $Zr_{41}Ti_{14.3}Cu_{12}Ni_{10}Be_2$ Bulk Metallic Glass over a Wide Range of Strain-Rate and Temperature," *Acta Mater.,* Vol. 51, pp. 3429~3443.

(3) Nieh, T. G., Wadsworth, J., Liu, C. T., Ohkubo, T. and Hirotsu, Y., 2001, "Plasticity and Structural Instability in a Bulk Metallic Glass Deformed in the Supercooled Liquid Region," *Acta Mater.*, Vol. 49, pp. 2887~2896.

(4) Shin, H. S., Jeong, Y. J. and Ahn, J. H., 2007, "Strain Rate Dependance of Deformation Behavior in Zr-Based Bulk Metallic Glasses in the Supercooled Liquid Region," *J. Alloy compound,* Vol. 434-435, pp. 40~43.

(5) Shoji, T., Kawamura, Y. and Ohno, Y., 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) Shin, H. S., Jeong, Y. J., Choi, H. Y., Kato, H. and Inoue, A., 2005, "Friction Welding of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ Bulk Metallic Glasses," *Mater. Trans*, Vol. 446, pp. 2678~2772.

(7) Kawamura, Y. and Ohno, Y., 2001, "Spark Welding of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ Bulk Metallic Glasses Using Glasses," *Script. Mater.*, Vol. 45, pp. 127~132.

(8) Kagao, S., Kawamura Y. and Ohno, Y., 2004, "Electron-Beam Welding of Zr-Based Bulk Metallic Glasses," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 375-377, pp. 312~316.

(9) Kim, J. H., Lee, C. H., Lee, D. M., Sun, J. H., Shin, S. Y. and Bae, J. C., 2007, "Pulsed Nd:YAG Laser Welding of $Cu_{54}Ni_6Zr_{22}Ti_{18}$ Bulk Metallic Glass," *Mater. Sci. Eng.,* Vol. 449-451, pp. 872~875.

(10) Shin, H. S., Jeong, Y. J., Choi, H. Y., Kato, H. and Inoue, A., 2007, "Joining of Zr-Based Bulk Metallic Glasses Using the Friction Welding Method," *J. Alloy Compound*, Vol. 434-435, pp. 102~105.

(11) Shin, H. S., Park, J. S., Jung, Y. C., Ahn, J. H., Yokoyama, Y. and Inoue, A., 2008, "Similar and Dissimilar Friction Welding of Zr-Cu-Al Bulk Glassy Alloys," *J. Alloy compound,* doi:10.1016/j.jallcom.2008.07.231.

(12) Yokoyama, Y., Inoue, H., Fukaura, K. and Inoue, A., 2002, "Relationship Between The Liquidus Surface and Structures of Zr-Cu-Al Amorphous Alloys," *Mater. Trans*, Vol. 43, pp. 575~579.

(13) Gwak, D. Y., 2007, "LabVIEW," *Ohm*, pp. 335~339.