Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속의 충격 파괴 거동

고동균* · 정영진* · 신형섭† · 오상엽** ·

Impact Fracture Behaviors of Zr-Based Bulk Amorphous Metals

Dong-Kyun Ko, Young-Jin Jeong, Hyung-Seop Shin, Sang-Yeob Oh

Key words: Zr-based Bulk Amorphous Metal (Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속), Instrumented Impact Testing Apparatus (계장화 충격시험장치), Subsize Specimen (미소 시험편), Vein pattern(베인 형태)

Abstract

The fracture behaviors of Zr-based bulk amorphous metals(BAMs) having compositions of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$, were investigated under impact loading and quasi-static conditions. For experiments, a newly devised instrumented impact testing apparatus and the subsize Charpy specimens were used. The influences of loading rate and the notch shape on the fracture behavior of the Zr-based BAM were examined. The Zr-based BAMs showed an elastic deformation behavior without any plastic deformation on it before fracture. Most fracture energies were absorbed in the process of the crack initiation. The maximum load and fracture absorbed energy under quasi-static condition were larger than those under impact condition. However, there existed relatively insignificant notch shape effect. Fracture surfaces under impact loading were smoother than those under quasi-static loading. The absorbed fracture energy appeared differently depending on the extent of the vein-like pattern region due to the shear bands developed at the notch tip. It can be found that the fracture energy of the Zr-Al-Ni-Cu alloy is closely related with the development of shear bands during fracture.

1. 서 론

최근, 벌크 아몰퍼스 금속(BAM)과 벌크 유리상 금속(BMG)은 이전의 ~10^6 K/s 의 높은 냉각 속도와 melting spinning 법에 의해 리본 시험편을 얻을 수 있었던 것과 달리, ~1 K/s 의 비교적 낮은 냉각 속도에서도 특정원소의 용융에 의해 보다 쉬운 유리상 형성과 체적을 갖는 벌크로써 제작이 가능하게 되었다. 장 범위에 걸쳐 불규칙한 원자배열에 따른 낮은 밀도에도 불구하고 결정립(grain boundary)과 같은 초기 결함이 존재하지 않음에 따라 높은 강도 및 파괴인성, 우수한 내마모성과 내부식성을 나타낸다. 따라서, 골프클럽 헤드와 통신기기용 케이스로 사용되는 등 철강, 플라스틱에 이은 제 3 세대 물질로써 큰 관심을 불러 일으키고 있다.(1-3)

특히, 전위의 이동에 기인하는 결함으로 인해 파괴거동이 지배되는 결정질 금속과는 달리, BAM 에서 파괴는 자유체적(free volume)이 존재하여 하중의 증가와 더불어 보이드(void)의 연결과 합체에 따른 순간적인 전단띠의 발생으로 인해 급작스런 파단이 발생하는 거동을 나타낸다. 이러한 비정질 금속은 군사용 관통자로의 적용과 관련하여 큰 관심을 불러 일으키고 있다. 또한, BAM 은 전단띠의 발생과 더불어 단열로 인해 국부적인 용융과 점성유동에 기인한 베인 형태(vein-like pattern)가 표면에 나타남이 특징이다. 물론, 이러한 뛰어난 특성은 재료의 조성에 따라 차이를 나타낸다. 따라서, 재료의 조성을 달리함으로써 보다 향상된 특성을 갖는 아몰퍼스 합금을 얻기 위한 많은 연구가 진행되어 오고 있다.

그러나 이들 BAM 을 구조용 재료로 적용하기 위해서 필요한 준정적 및 충격 하중 하에서의 벌크 비정질 금속에 대한 유효 데이터가 제한적인 것이 현실이다. 이전 연구에서, $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}$-$Be_{22.5}$ 의 조성을 갖는 Zr-BAM(Vit-1, Howmet Inc.)에 대한 준정적 및 충격 변형거동을 조사하였다. 두 하중조건하에서, 파단이 발생하기까지 소성변형이 없는 탄성거동을 나타내었다. 또한, 변형률 속도가 증가할수록 최대하중이 증가하는 결정질 금속이나

† 회원, 책임저자, 안동대학교 기계공학부
E-mail:hsshin@andong.ac.kr
TEL:054-820-5675 FAX: (054) 823-5495
* 학생회원, 안동대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 가톨릭상지대학

세라믹과는 달리, 파단하중이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나, 파단변위의 증가로 인해 파괴 흡수에너지 값은 거의 비슷하게 나타났고, 곡률반경이 클수록 파괴저항의 증가를 나타내었다.[4]

본 연구에서는, 화학적 조성이 다른 Zr-BAM ($Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$)의 미소 샬피 시험편을 사용하고, 부하속도에 따른 영향을 비교하기 위해, 낙추식 계장화 장치와 만능재료시험기(Instron 8516, load cell: 5kN)를 이용하여 충격 및 준정적 조건에서의 흡수에너지와 노치선단반경 따른 파괴저항에 미치는 영향을 조사하고, 파면 관찰을 통해 파괴거동을 고찰하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 시험편

Fig. 1 은 계장화 충격시험에 사용한 미소 샬피 시험편의 형상과 치수를 나타낸다. 본 연구에 사용된 시험편은 Tohoko Univ. IMR 으로부터 제공 받은 $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ 의 화학조성을 갖는 직경 4 mm, 길이 50 mm 의 원형 주조 봉으로부터 V-노치 시험편을 기계 가공하였다. 정규 시험편과는 달리, 미소 시험편은 아직 표준화가 이루어지지 않아, 제공된 시료로부터 가급적이면 최대의 단면적을 갖도록 Fig. 1 과 같은 형상의 시험편으로 가공하였다. 이때, V-노치의 선단반경을 일반적인 경우와 달리, R=0.1 과 0.2 mm 로 예리하게 가공하여 파괴인성 시험편에 준하게 하였다.

2.2 낙추식 계장화 샬피 충격 시험장치

Fig. 2 는 미소시험편에 대한 샬피 충격실험을 위해 자체 개발한 충격봉 낙하식 계장화 충격 시험장치를 나타낸다. 이 장치는 기존의 진자식 계장화 샬피 충격 장치의 충격텁(striker tup)에서 발생하는 응력파 전파에 따른 하중신호에 나타나는 진동형상을 배제하기 위해, 직경 10 mm, 길이 1 m(무게: 0.8 kg)의 긴 봉을 충격봉으로 사용한다.[5,6] 또한, 충격봉의 자유낙하를 보장하기 위해, Fig. 2 (b)에 보인 바와 같이 원형가이드 판을 부착하였고, 이를 통해 낙하시 회전방지 및 시험편 중앙부에 정확한 충격을 보장한다. 충격 봉의 최대 낙하 높이(H)는 1 m 이고, 낙하 높이를 조절하면 ~4.4 m/s 까지 다양한 충격 속도범위에서 시험이 가능하다. 충격시 발생하는 시험편의 변위, X_1 은 아래의 식으로부터 구하였다.[7]

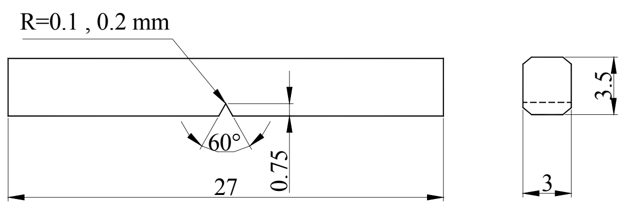


Fig. 1 Geometry and dimension of subsize Charpy specimens in Zr- BAM

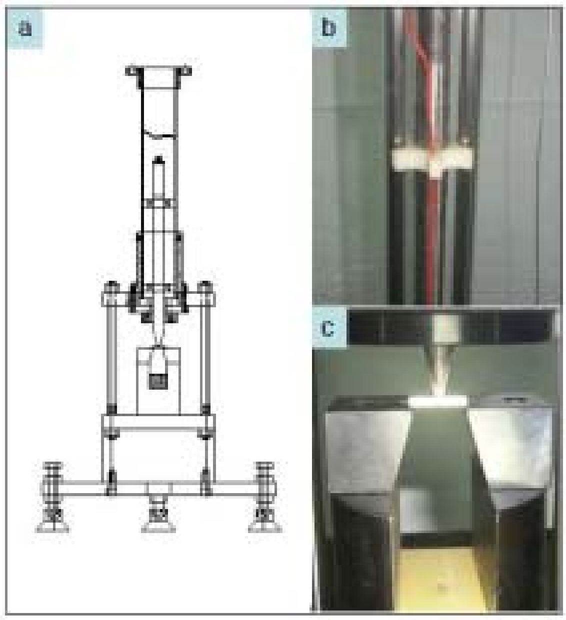


Fig. 2 Schematic illustration of the instrumented impact test apparatus and magnified parts

$$X_1^{\exp} = \int_0^t (v_0 - \frac{1}{m}\int_0^t P_1^{\exp}(\tau)d\tau)d\tau \qquad (1)$$

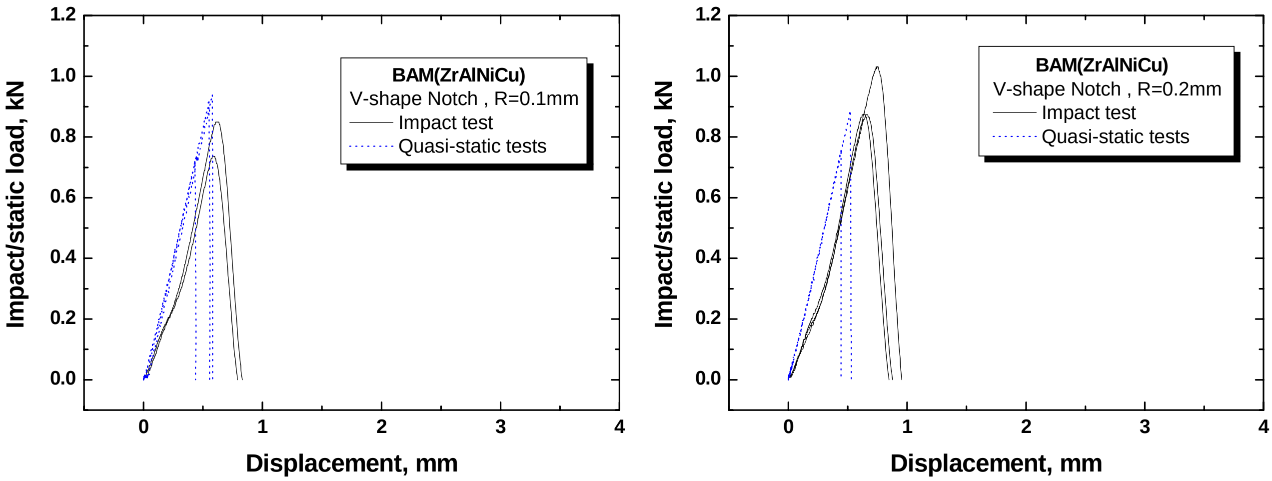
여기서, V_0 는 초기 충격 속도이고, m 은 충격봉의 질량, P(τ)는 충격봉 텁(tup)에서 측정된 충격하중이다.

부하속도에 따른 BAM 시험편의 파괴거동을 비교하기 위해, 만능 재료시험기(Instron 8516, load cell: 5kN)를 사용하여 3 점 굽힘 상태에서 준정적 하중을 가하여 파괴거동을 조사하였다. 충격 및 준정적 시험시 균열 진전에 따른 전단띠 및 분지균열의 발생상황을 관찰하기 위해 시험편의 한쪽 표면을 경면 연마하고 시험 후, 측면은 광학 현미경(OM)으로, 파면은 SEM 을 사용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격 시험 결과

Fig. 3 은 준정적 및 충격조건하에서 Zr-기 BAM 미소 샬피 시험편의 하중-변위 선도를 나타낸다.



(a) (b)

Fig. 3 Load-displacement curves for the notched subsize specimens of Zr-based BAM having a notch tip radius (a) R=0.1 and (b) R=0.2.

본 연구에서 구축한 긴 충격봉 낙하식 계장화 충격시험기를 사용한 결과, 기존의 진자식 계장화 충격 시험의 경우와는 달리, 하중 선도의 초기구간에 진동(oscillations)의 발생 없이 비교적 매끄러운 곡선으로 나타났다. 이에 따라 충격하중 하에서 재료의 항복하중과 극한하중의 결정이 용이하여, 균열의 발생 및 진전에 소요된 흡수에너지의 파악이 가능하였다. 통상 하중-변위 선도에서 항복 하중을 지나 극한하중까지의 아래 면적이 균열발생시(crack initiation)까지 흡수된 에너지, 그 이후의 면적은 균열진전(crack propagation)에 사용된 에너지로 구분한다.[8]

Fig. 3 에서 보듯이, 두 다른 노치선단 반경을 갖는 시험편에서, 최대하중에 도달한 후 파단 직전까지 어떠한 소성변형이 없이 급격한 파단을 일으키는 거의 탄성적인 변형거동만을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이것은 인장이나 압축하중모드에서 BAM 의 특성으로 알려져 있고, Zr-기 BAM 에서 흡수에너지의 대부분이 균열발생에 사용되었다는 것을 의미한다.

(a) R=0.1 mm 의 노치선단반경을 갖는 시험편에서, 충격하중 하에서는 준정적 하중에서보다 낮은 최대하중을 나타내는 것을 알 수 있다. 이때, 부하속도는 준정적 및 충격하에서 각각 0.07×10^3 N/s, 5.5×10^6 N/s 에 해당한다. 이와 같이 부하속도의 현저한 증가(약 10^5N/s)에도 불구하고 Zr-기 BAM 에서 경화거동이 나타나지 않는 것은 특이한 현상으로, 이것은 Hufnagel et al.의 Zr-BAM 에 대한 연구결과와 유사한 거동이다.[9] 한편, (b) R=0.2 mm 의 경우는 거의 부하속도의 차가 나타나지 않았고 오히려 충격시가 큰 하중을 가져오는 것을 볼 수 있다. 한편, 파단변위는 충격의 경우가 보다 현저한 값을 나타내, 낮은 충격하중에도 불구하고 변위의 증가로 전체적인 흡수에너지의 유사함을 나타내었다.. 일반적으로 시료의 최대하중 및 파단에너지는 노치선단 반경에 크게 영향을 받게 된다고 알려져 있지만, 본 연구의 경우, 노치반경의 차와 최대하중, 흡수에너지 등 다른 특성 값과 반드시 비례하지 않음을 볼 수 있다. 이것은 노치선단에 발생한 vein-like pattern 발생역의 사이즈 및 양상에 크게 의존 하였고, 또한 시험편 제조시 주조결함 및 노치가공의 정도에도 다소 기인하였다고 생각된다. 실제로 시험편의 가공과정과 시험 후 파면 관찰을 통해 노치부와 리거먼트부에서의 다양한 크기의 주조결함(voids) 등이 관찰되었다.

Table 1 은 계장화를 통해 얻을 수 있는 특성 값을 나타낸 것이다. 그러나, Fig. 3 과 Table 1 의 결과를 볼 때, 전반적으로 충격하중 하에서 최대하중이 감소함에도 불구하고, 이에 상응하는 변위의 증가로 전체적인 흡수에너지의 증가를 볼 수 있고, 대부분의 에너지가 균열의 발생에 관여해, 위에서 언급된 이전 실험에서의 결과와 같은 경향을 나타내었다. 앞서 보고한 $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 의 경우에 비해[4] 상대적으로 낮은 최대 하중을 나타내지만, 흡수에너지는 오히려 증가하였다. 특히, 단위면적당 흡수에너지는 약 10kJ 정도 증가하였다. 이는, 비정질 금속이 공공의 이 동과 병합의 변형기구를 갖는 것으로, 원자간 공공(vacancy)의 체적이 상대적으로 더 크므로 더 많 은 변형을 초래하기 때문이다. 따라서, 균일하고 적절한 공공의 형성은 최대하중이 다소 감소하더라도 변위를 활성화시켜 흡수에너지를 증가시킬 수 있으리라 생각

Table 1. Test results obtained using subsize specimens.

R, mm	Conditions	F_{max}, kN	E_i, J	E, kJ/m^2	K_{max}, MPa.√m	K_t	σ_{max}, GPa
0.125	Impact 1	0.85	0.24	33.2	48.7	3.85	6.41
0.15	Impact 2	0.74	0.2	27.9	42.7	3.55	5.18
0.125	Static 3	0.92	0.25	35.2	53.6	3.85	7.06
0.15	Static 4	0.72	0.15	21.1	42.0	3.55	5.10
0.15	Static 5	0.94	0.26	35.7	53.5	3.55	6.50
0.2	Impact A	1.03	0.34	47.4	59.5	3.13	6.37
0.225	Impact B	0.87	0.26	36.0	50.0	3.00	5.10
0.2	Impact E	0.88	0.26	36.0	49.8	3.13	5.33
0.225	Static C	0.89	0.23	31.7	50.8	3.00	5.18
0.225	Static D	0.76	0.16	22.0	43.3	3.00	4.41

된다. 특히, 긴 봉을 사용함으로써 미소 시험편 임에도 불구하고 쉽게 최대하중을 얻을수 있었고, 그 값을 사용하여 파괴인성(K_{IC})에 상응하는 최대 응력확대계수(K_{max})값을 식 (2)로부터 쉽게 얻을 수 있다.[8]

$$K_{max} = [F_{max} * S * f(N/D)]/[W * D^{3/2}] \qquad (2)$$

여기서, F_{max}는 최대하중, S는 스팬(span)의 길이, W는 시험편의 폭, D는 시험편의 높이, N은 노치의 높이, f(N/D)는 형상계수로써, 약 1.48 의 값을 갖는다.

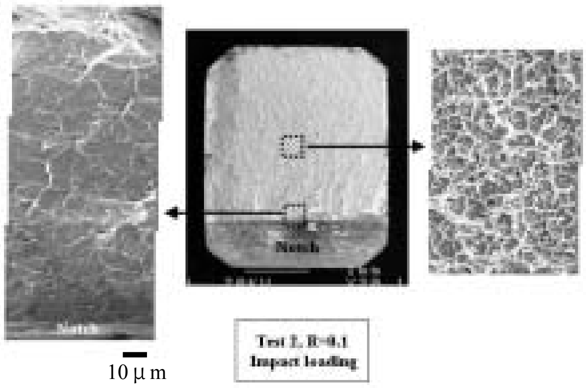
이들 K_{max} 값들은 본 시험의 경우 예리한 노치를 갖는 두께 3 mm 의 시험편에 대한 것이다. 따라서, 정규시험편을 사용하여 평면 변형률상태에서 구한 K_{IC} 에 해당하는지 확실치 않으나, 그 값은 40-60 MPa√m 의 범위로 구조용 Al 합금보다 큰 값을 나타내고, Ti 합금에 필적하는 파괴인성을 나타냄을 알 수 있다.

또한, 노치선단에서의 최대탄성인장응력(σ_{max})과 이를 얻기 위한 응력 집중계수(K_t)값을 Kumar 에 의해 확립된 경험 식으로부터 얻을 수 있었다.[10,11] 응력 집중계수(Kt)값은 단지 노치선단반경, R과 리거먼트 길이, b만의 함수이다.

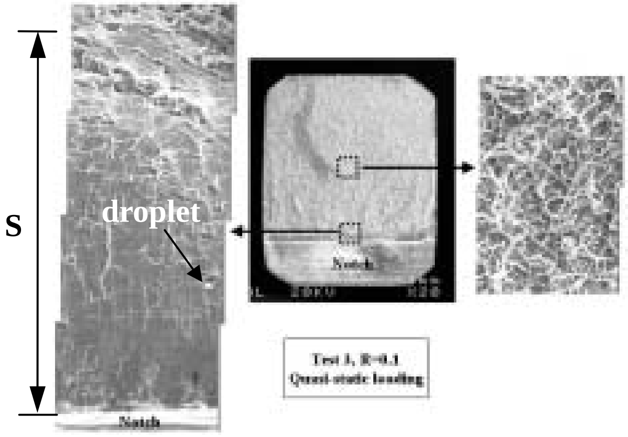
3.2 파면 관찰 결과

Fig. 4 는 Zr-기 BAM 시험편 파단면의 SEM 사진을 나타낸다. 파단면은 예리한 노치팁을 갖는 관계로 거의 평탄한 파면을 나타내지만, 노치선단부근에서 전형적인 vein pattern 의 비교적 평탄한 띠상 영역(그 폭을 S 로 표시)과 균열이 진전함에 따라서 원형에 가까운 딤플(equiaxial dimple)로 이루어진 균열 전파 영역으로 구성되어 있고, 균열전파부가 전 파면의 대부분을 차지하는 것을 볼 수 있다. 또한 이들 균열전파부는 부하속도나 노치선단반경에 관계없이 거의 유사한 파면양상을 나타내었다.

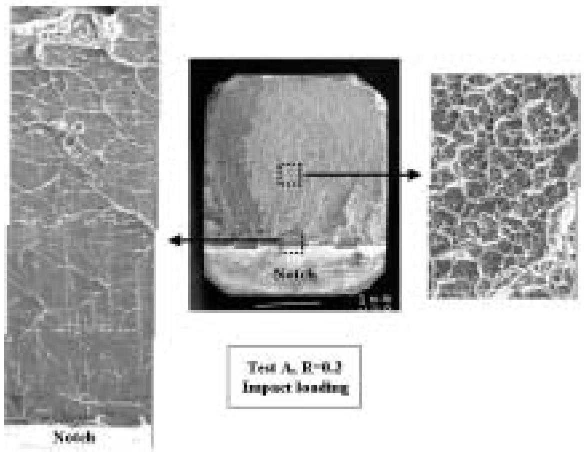
하중의 부하시 노치 근방파면에는 vein pattern 과 더불어 기공과 용융에 기인한 droplet 을 관찰할 수 있어서 높은 소성 변형성을 나타내고 있다. vein pattern 역은 전체적으로 준정적인 경우와 노치선단 반경이 큰 경우 현저하게 발생하였다. 이들 vein pattern 은 내부로 진전함에 따라서 닫힌 형태로 바뀌면서 그 깊이도 점차 깊어져 거친 파면을 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 노치선단에서의 vein pattern 의 발생상황은 Fig. 3 의 하중-변위선도와 Table 1 의 결과와 잘 대응하고 있다. Fig. 4 에서 보듯이, 노치선단에서 측정된 vein pattern 의 폭, S 는 0.12 mm ~ 0.16 mm 의 범위를 나타내었다. 가장 큰 S 값을 갖는 (b)와 (c)의 경우, Table1 에서 가장 높은 최대하중과 흡수에너지를 나타낸 반면, (a)는 가장 낮은 최대하중과 흡수에너지를 나타내었다. 그러나, 0.16 mm 의 같은 vein pattern 의 폭을 갖는 (b), (c)중에서도 (c)가 더 큰 최대하중과 흡수에너지를 나타낸다. 또한, (d)의 경우, vein pattern 의 폭, S 가 0.15 mm 로써 (b), (c)와 비슷하지만, 최대하중과 흡수에너지는 S=0.12mm 를 나타낸 (a)의 경우와 비슷한 낮은 값을 나타낸다. 이것으로부터, Zr-Al-Ni-Cu 합금의 최대하중과 흡수에너지는 첫째, vein pattern 의 분포가 넓을수록 둘째, 편평하고 매끈한 잎맥구조를 나타낼수록 증가함을 알 수 있다. 이는 높은 흡수에너지를 방출할수록 노치선단에서의 온도상승과 더불어 용융이 더욱 활발해지고, 이로 인해 점성계수가 낮아져 더욱 매끈(fine) 하고 편평한 잎맥에 가까운 vein pattern 을 형성하였지만, 노치에서부터 멀어질수록 점성계수가 증가



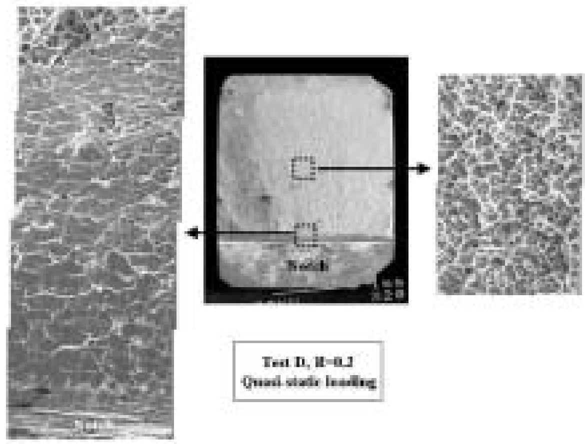
(a) R=0.1 mm, Impact 2 (S=0.12 mm)



(b) R=0.1 mm, Quasi-static 3, (S=0.16 mm)

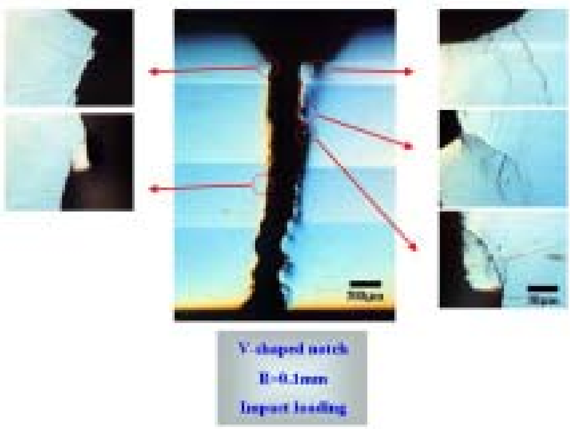


(c) R=0.2 mm, Impact A, (S=0.16 mm)

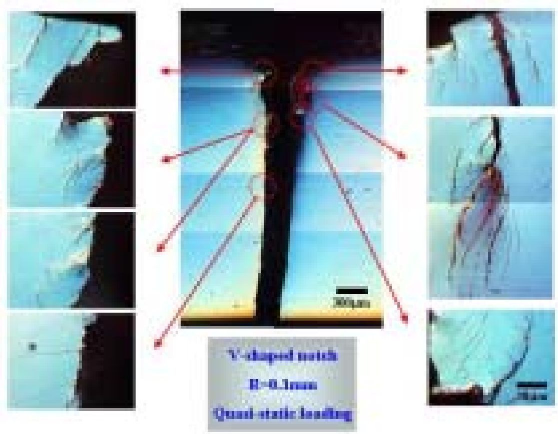


(d) R=0.2 mm, Quasi-static D, (S=0.15 mm)

Fig. 4 SEM images of fracture surfaces in Zr-BAM specimens under impact and quasi-static loading conditions.



(a) Test 2 under impact loading, R=0.1 mm



(b) Test 3 under quasi-static loading, R=0.1 mm

Fig. 5 Appearances of cracking behavior and shear bands formation depending on notch radius on surfaces of Zr-based BAM specimens. The results are based on table 1.

하면서 잎맥은 폐곡선을 이루면서 그 깊이가 깊어져 가는 것을 알 수 있다.

Takao Kobayashi et al.는 균열이 노치로부터 발생되지 않고, 노치선단에서 일정거리 떨어진 곳에서 45°방향으로 전단띠의 발생과 동시에 급격히 진전됨으로써 파단이 발생한다고 보고 하였다.(12)
또한, Hufnagel. T. C.는 노치부에서의 온도상승으로 인한 열 방출과 탈락된 입자의 산화에 의해 섬광이 발생한다고 보고하였다.(9) 본 연구에서도 일부 실험에서 섬광을 관찰할 수 있었다. 균열이 노치와 리거먼트 양방향으로 급격하게 전파됨으로써 파단이 발생하게 되고 이때, 입자의 탈락으로 인한 산화가 발생했으리라 생각되며, 순간적인 전단띠의 형성과 흡수에너지의 방출에 따른 국부적인 온도상승으로 인한 용융의 증거인 vein pattern 과 droplet 이 형성된다.

Fig. 5 는 Zr-기 BAM 의 파단측면을 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 모든 조건에 대해 대부분의 균열 및 전단띠는 노치선단에 밀집해 있다. 노치선단반경 R=0.1 mm 인 Fig. 5 (a), (b)의 경우, 충격조건보다 준정적 조건하에서 노치선단의 전단띠 및 균열이 더 현저하게 분포함으로써 더 높은 흡수에너지를 나타낸다. 그러나, R=0.2 mm 인 경우, 파면의 경로와 전단띠 및 균열의 분포에 따른 최대하중과 흡수에너지의 관계는 일치하지만, 부하조건에 따른 구분이 명확하지 않다.

종합적으로 볼 때, 노치선단에서의 전단띠 및 균열의 분포와 매끈한 잎맥구조를 갖는 vein-like pattern 의 발생 정도가 흡수파괴에너지에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

1) Zr-Al-Ni-Cu 합금은 최대하중에 도달함과 동시에 급격한 전단띠의 발생 및 진전으로 파단에 이르는 탄성거동을 나타내었다. 준정적인 경우가 충격시보다 높은 파단 하중을 나타내었지만, 충격조건에서는 변위증가의 활성화로 흡수에너지가 증가하여, 전반적으로, 극히 낮은 하중의 경우를 제외하면 충격하중 하에서와 준정적하중 하에서의 흡수파괴에너지는 유사하게 나타났다.
2) 노치선단영역에서 높은 온도하의 용융으로 인해 vein pattern 이 넓게 분포함과 동시에 매끈하고 편평한 잎맥구조를 가질수록 그리고, 파면측면에 전단띠와 분지균열이 밀집할수록 높은 흡수에너지를 나타냄을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구사업중 지방대우수연구자사업(Grant No. 2001-1-30400-002-2)의 지원을 받았습니다.

참고문헌

(1) Inoue, A., 2000, "Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys", Acta. Mater., Vol. 48, pp. 279-306.
(2) Johnson, W. L., 1999, "Bulk glass-forming metallic alloys: Science and Technology", MRS Bull. Vol. 24, pp. 42-56.
(3) Bruck, H. A., Christman, T., Rosakis, A. J. and W. J. Johnson, 1994 , "Quasi-static constitutive behavior of Zr-Ti-Ni-Cu-Be bulk amorphous alloys", Scripta Metal. Master., Vol. 30, pp. 429-434.
(4) Shin H. S., Ko D. K. Jeong Y. J., Oh. S. Y., 2003, "Influences of Loading Rate and Notch type on Fracture Behaviors of Zr-based Bulk Amorphous metal", KSME., pp. 161-166.
(5) Shin H. S., Ko D. K., Jeong Y. J., Oh. S. Y., 2003, "Instrumented impact test using subsize Charpy specimen for evaluating impact fracture behavior in bulk amorphous metals", KSME., pp. 9.
(6) Kalthoff, J. F., and Gregor, M., 1997, "Instrumented impact testing of subsize Charpy V-notch specimens, small specimen test techniques", ASTM 1329.
(7) Lorriot. T., 2000, "Specimen loading determined by displacement measurement in instrumented Charpy impact test", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 65, pp. 703-713.
(8) 1992, "Standard test methods for Notched bar impact testing of metallic materials", ASTM, E23.
(9) Hufnagel. T. C., Jiao. T., Li. Y., Xing. L. O., Ramesh. K. T., 2002, "Deformation and failure of $Zr_{57}Ti_5Cu_{20}Ni_8Al_{10}$ bulk metallic glass under quasi-static and dynamic compression", J. Mater. Res., Vol. 17, No. 6, pp. 1441-1445.
(10) Nahm S. H., Kim A. K., Park J. H., 2001, "Evaluation on toughness degradation of Cr-Mo-V steel using miniaturized impact specimen technology", International J. Impact Engineering, Vol. 25, pp. 805-816.
(11) Kumar A. S., Schubert L. E., Hamilton M. L., Cannon N. S., 1995, "Size effects of the upper shelf energy of a neutron irradiated pressure vessel weld metal", J. Nuclear Materials, Vol. 225, pp. 238-244.
(12) Takao Kobayashi and Donald A. Shockey, "Fracture mechanisms of bulk amorphous metal under impact loading", SRI International., Private conference.