벌크 아몰퍼스 금속의 충격파괴 거동 평가를 위한 미소 샬피 시험편을 사용한 계장화 충격 시험법

신형섭†·고동균*·정영진*·오상엽**·김문생***

Instrumented Impact Test using Subsize Charpy Specimen for Evaluating Impact Fracture Behavior in Bulk Amorphous Metals

Hyung-Seop Shin, Dong-Kyun Ko, Young-Jin Jung, Sang-Yeob Oh, Moon-Saeng Kim

Key words: Bulk Amorphous Metal (벌크 아몰퍼스 금속), Subsize Charpy Specimen (미소 샬피 시험편), Instrumented Charpy Impact Test (계장화 샬피 충격 시험), Long Rod (긴 봉).

Abstract

In order to investigate the mechanical behavior of newly developed materials, the evaluation of mechanical properties using small-size specimen is essential. For those purposes, an instrumented impact testing apparatus, which provides the load-displacement curve under impact loading without oscillations, was devised. To develop the test procedure with the setup, the impact behaviors of various kinds of structural materials such as S45C, SCM4, Ti alloys (Ti-6V-4Al) and Zr-based bulk amorphous metal, were investigated through the instrumented Charpy V-notch impact tests. The calibrations of the dynamic load and displacement that was calculated based on the Newton's second law were carried out through the quasi-static load test and the comparison of a directly measured value using a laser displacement meter. Satisfactory results could be obtained. The crack initiation and propagation processes during impact fracture could be well divided on the curve, depending on the intrinsic characteristic of specimen tested; ductile or brittle. The absorbed impact energy in Zr-basd BAM was largely used for crack initiation not for crack propagation process. The fracture surfaces under impact loading showed different feature when compared with the static cases.

1. 서 론

. 결정질 금속에 비해 높은 강도와 높은 파괴인성 그리고 우수한 내 마모성과 부식성을 지니고 있는 벌크 아몰퍼스 금속은 철강재료, 알루미늄이나 티탄합금의 뒤를 잇는 신금속으로 최근 큰 관심을 모으고 있다.[1,2] 따라서, 이들 재료의 강도특성 및 동적파괴거동의 평가가 필요하다.

중성자 조사에 노출되어 있는 원자로나 화력발전소 터빈의 경우, 고온에서 장기간 사용에 따라 재료 취화가 발생하게 되고, 이 경우 균열 개시와 진전 메커니즘을 아는 것은 중요하다. 따라서, 재료의 파괴 특성을 비교적 용이하게 평가하는 방법으로 샬피 충격시험이 널리 사용되고 있다.

한편 새로운 구조용 재료 개발시, 획득 가능한 시료치수의 제한에 따라 정규사이즈 시험편을 사용한 시험이 어려워지게 되고, 이를 해결하기 위해서는 미소사이즈 시험편을 사용한 평가기법의 확립이 필요하다.

정규 샬피 시험편에 대한 충격시험 방법 및 규정은 ISO 14556 에 명시되어 있다.[3] 하지만, 운전중인 장비의 안전성을 고려한 샘플의 채취와 작은 시험편으로 여러 번의 실험을 통한 연성 및 취성의 흡수 에너지 파악이 용이하다는 점에서 미소 샬피 시험편을 사용한 시험이 많은 관심을 모으고 있다. 이에 따른 시험 방법은 단순한 위치에너지의 차에 의한 흡수에너지의 천이를 구하는 진자식 실험장치에서부터 J.F. Kalthoff 등에 의해 제안된 계장화 진자식 실험장치를 사용한 평가로 발전되

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

어 오고 있다. 그러나, 계장화 진자식 샬피충격시험장치는 현저한 oscillation 의 발생으로 인해 직접적인 하중곡선, 특히 항복하중 등의 결정을 어렵게 한다.[4,5]

따라서, 본 논문에서는 벌크 아몰퍼스합금의 충격파괴거동의 정확한 평가를 위하여, 진자식 계장화 충격시험기에서 문제가 되고 있는 응력파 전파에 따른 하중신호의 진동(oscillations) 효과를 피하고자, 긴 봉을 사용한 낙추식 계장화 충격 장치를 구성하였다. 개발한 계장화 충격시험 장치의 검증을 위하여 각종 강재 및 티탄합금의 동적파괴거동을 파악하고자 하였다. 최종적으로 Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속($Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$, Vitreloy)의 충격파괴거동을 평가하고자 하였다. 이를 위해 흡수에너지와 파면 양상을 준정적인 경우와 비교 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편

Fig. 1 은 계장화 충격시험에 사용한 미소 샬피 시험편의 규격을 나타낸다. 시험편은 3x4 mm^2 의 단면적에 깊이 1 mm 의 V-노치를 도입하였고, 이때 노치 선단부의 곡률 반경을 ρ=0.1 mm 로 하였다. 본 연구에서는 Zr-Ti-Cu-Ni-Be 을 구성원소로 하는 Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속(BAM, Howmet, Inc.)주물 판재로부터 미소 샬피 시험편을 정밀가공하였다. 아울러 S45C, SCM4, 그리고 Ti 합금(Ti-6V-4Al)의 시험편을 제작하였다. 이때노치 선단부의 곡률 반경이 ρ=0.2 mm 인 것을 제외한 다른 규격은 벌크 아몰퍼스 금속의 경우와 동일하였다.

2.2 계장화 샬피 충격 시험장치

Fig. 2(a)는 낙추식 계장화 샬피 충격 시험장치의 모식도를 나타낸 것이다. 본 장치는 진자식 계장화 샬피 충격 장치의 충격텁(striker tup)에서 발생하는 응력파 전파에 따른 하중신호의 진동을 배제하기 위해, 직경 20 mm, 길이 1 m(무게 2.4 kg)의 긴 봉을 충격봉으로 사용하였다. 이때 봉의 선단은 곡률반경 2 mm, 사이각 30°의 V 자형으로 가공한 후, 담금질처리 하였다.

충격봉의 자유낙하를 보장하기 위해, Fig. 2 (b)에 보인 바와 같이 내경 60mm, 길이 2m 인 PMMA 관을 충격봉의 가이드튜브로 사용하였다. 이때 충격봉의 상하에 구멍을 갖는 원형 가이드 판을 부착하였고, 이들 가이드 판이 아크릴

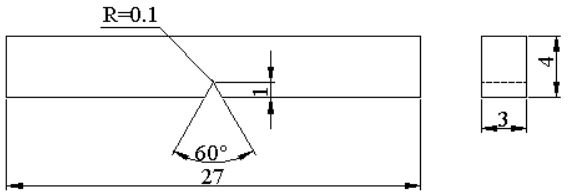

Fig. 1 Geometry and dimension of Zr- BAM specimen

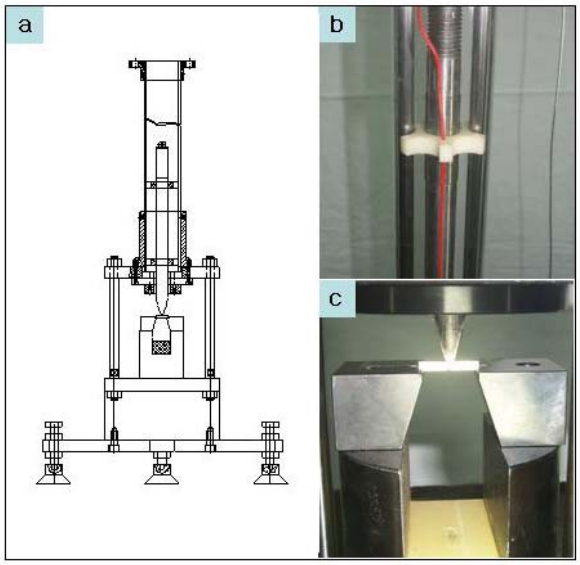

Fig. 2 Schematic illustration of the instrumented impact test apparatus and magnified parts

봉내에 설치한 직경 10 mm 인 2 개의 강재 봉(steel rod)을 따라서 자유 낙하하게 하여 낙하도중 충격봉의 회전을 방지하였고, 시험편 중앙부에 정확한 충격을 보장하였다. Fig. 2(c) 에 보인 바와 같이, 시험편 거치대의 하부에 경질 고무판을 두어 시험편 충격후 충격봉의 손상을 방지하였다.

낙추식 계장화 충격 시험 장치에서 충격봉의 최대 낙하높이, H 는 1 m 이고, 낙하 높이를 조절하여 다양한 충격 속도범위에서(~4.4m/s) 시험이 가능하게 하였다. 또한 시험편의 고유강성과 파괴저항에 따라서 충격봉의 하중 검출감도를 높이기 위해, 단면적이 보다 작은 직경 10 mm 혹은 15 mm 의 원형 봉을 사용할 수 있어 세라믹과 같은 취성재료의 파괴거동도 평가가 가능한 구조로 되어 있다. 또한 충격하중을 증가시키고자 하는 경우 충격봉의 끝단에 하중을 부가할 수 있도록 설계되어 있다.

한편 각 재료의 파괴거동 비교를 위해, 준정적 조건에서도 샬피 시험편의 파괴거동을 조사하였다. 이를 위해 만능 재료시험기(Instron 8516, load cell: 5kN)를 사용하여 $7x10^{-4}s^{-1}$ 의 변형률 속도에서 3 점 굽힘상태의 시험편에 압축 하중을 가하였다. 이때,

충격시험에 사용한 것과 동일한 형상의 봉을 사용하였다.

한편 충격 및 준정적시험 후 파단 양상의 관찰을 위해 시험편의 한 면을 경면 연마하였고, 파면은 주사전자현미경(SEM)과 광학 현미경(OM)을 사용하여 관찰하였다.

2.3 충격 하중-변위선도의 교정

Fig. 3 은 시험 중 하중 및 변위 신호를 얻기 위한 측정계의 계략도를 나타낸 것이다. 충격시 시험편에 가해진 하중 계측을 위해 충격봉의 선단으로부터 12 mm 위치 텁부의 양쪽에 스트레인 게이지 (Strian gages, Koywa , 120Ω)를 붙여 측정부를 구성하였다. 충격시 스트레인 게이지로부터 나온 하중 신호는 휘스턴 브릿지(Wheaston bridge)를 통해 변형률 증폭기(Strain amplifier)를 거친 후 디지털 오실로스코프(Oscilloscope, Classic 6000, 200MHz) 에 저장되었다. 이렇게 얻은 하중 신호는 ASCII 코드로 변환하여 PC 에서 처리하였다.

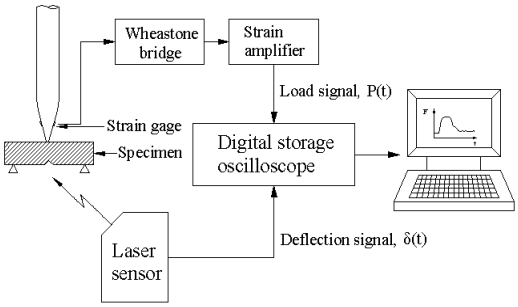

Fig. 3 Block diagram of the measurement system

이때, 충격봉에 얻은 하중신호는 만능 재료 시험기(Instron 8516, loadcell: 100kN)를 사용하여 압축 실험으로 얻은 정적인 경우의 스트레인게이지 출력과 하중관계 선도의 관계를 사용하여 교정하였다.

한편 충격시 시험편의 변위, X_1 는 뉴턴의 제 2 법칙에 의해 아래의 식으로부터 구하였다.[5]

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

여기서, V_0는 초기 충격 속도이고, m 은 충격 봉의 질량, P(τ)는 충격 봉 텁(tup)에서 측정된 충격하중이다.

식 (1)을 사용하여 구한 변위의 타당성을 입증하기 위하여 초정밀 레이저 변위계(LC-2400A, 분해능 0.1μm)를 사용하여 충격시 시험편 충격부의 실제 변위를 측정하여 식 (1)로 구한 값과 비교하였다. 이를 시험편의 중앙단부에 45°의 경사를 갖는 플라스틱 조각을 붙이고 레이저 변위계의 센서부에서 나오는 빔(beam)이 경사면과 수직이 되도록 센서헤드를 위치시킨다. 이때 얻어지는 변위신호 역시 오실로스코프와 연결하여 동일시간에 대하여 하중-변위선도를 얻을 수 있다.

여기서 식 (1)을 사용하여 구한 동적변위의 타당성을 검토하기 위해, 충격하중의 작용시 고정도 레이저변위계를 사용하여 계측한 시험편의 변위를 비교하였다. Fig. 4 는 S45C 와 Ti 합금에 대하여 두 방법에 의해 구한 변위를 사용하여 그린 하중-변위선도를 나타내고 있다. 두 재료 모두에서 각 선도는 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 여기서 제하의 후반부에 조금의 차이가 생기는 것을 볼 수 있는데, 이것은 실제 변위의 측정시 균열이 진전하면서 다소 변위가 크게 되면서 불안정하였기 때문이다.

또한, 흡수에너지의 비교를 위해 진자식 샬피 충격시험 장치를 사용하여 구한 S45C 와 SCM4 시험편의 흡수 에너지는 각각 3~4 J, 2~2.5 J 의 범위

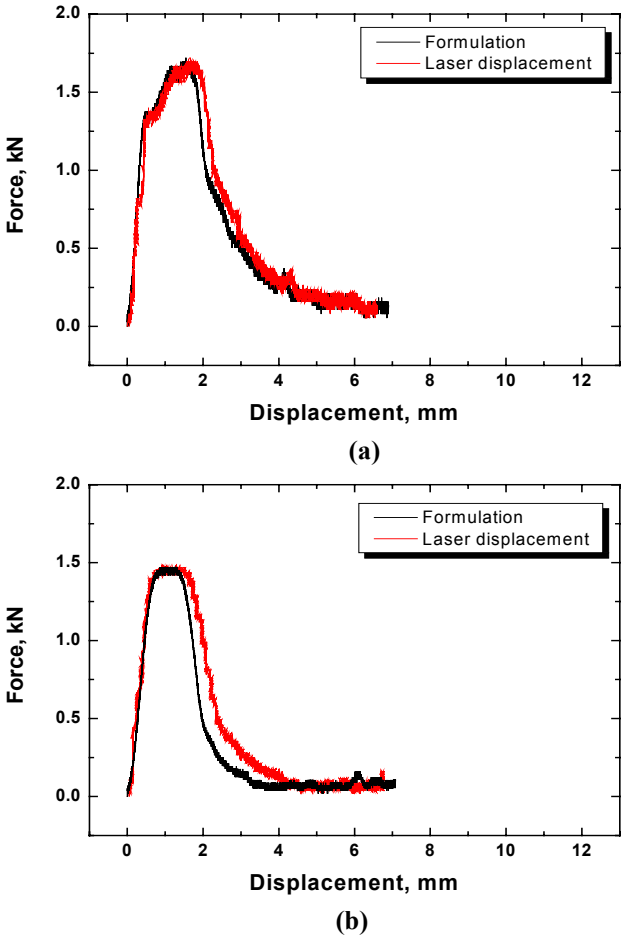

Fig. 4 Comparison of obtained displacement curve by formulation and by laser displacement device in (a) S45C and (b) Ti-alloy specimens.

로 본시험에서 얻어진 값들은 그 범위 안에 들어가는 것을 확인할 수 있었다.[7]

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자유 낙하식 충격 시험

Fig. 4 는 각 재료의 시험편에 대해 계장화 장치를 사용하여 얻은 실험 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서 구축한 긴 충격봉을 이용하여 계장화 충격시험기를 사용한 결과, 기존의 진자식 계장화 샬피충격 시험의 경우와는 달리, 하중 선도의 초기구간에 진동 (oscillation) 발생 없이 비교적 매끄러운 직선으로 나타났다. 이에 따라 충격하중 하에서 재료의 항복하중과 극한하중의 결정이 용이하여, 균열의 발생 및 진전에 소요된 흡수에너지의 파악을 가능하게 한다. 통상 하중-변위 선도에서 항복 하중을 지나 극한하중까지의 아래 면적이 균열 발생시까지 재료가 흡수한 에너지이고, 그 이후의 면적은 균열이 진전에 소모된 에너지로 나눌 수 있다.

계장화 충격시험의 경우, 봉의 낙하높이 1 m, 즉 초기속도 V_0=4.4 m/s 의 조건에서 실시하였다. 준 정적 굽힘시험은 만능 재료 시험기의 크로스헤드 속도 0.5 mm/min 에서 실시하였으며, $7x10^{-4}s^{-1}$ 의 변형률 속도에 상응하는 값이다.

Fig. 5(a), (b)는 S45C 와 SCM4 의 동적 및 정적 시험에 대한 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 두 재료 모두 충격조건에서 준정적일 때와 비교하여 변형률속도 경화를 나타내고 있다. 파단 되기까지의 선도는 거의 비슷한 거동을 나타낸다. S45C 와 SCM4 에서 충격의 경우, 항복하중의 구분이 뚜렷하였고, 동일한 시험편 사이즈에 대하여 SCM4 가 S45C 보다 다소 낮은 강도를 나타내었다. 이는 충격시 높은 탄성에너지로 인해 균열의 개시에 대해 저항성이 크게 되고, 균열의 진전시에는 다수의 이차적인 균열을 생성하는데 필요한 에너지의 증가에 따른 것이다. SCM4 의 경우, 동적인 조건에서 준 정적인 조건에서보다 소성영역이 적음에도 불구하고, 높은 탄성에너지로 인한 전체적인 에너지의 증가를 보여주고 있다.

Fig. 5 (c)는 Ti 합금 시험편에서 대한 하중-변위 선도로, S45C 와 SCM4 와는 달리 준정적인 조건하에서의 항복하중과 극한 하중이 동적 조건에서보다 더 큰 값을 나타내었다. 이는 균열의 개시에 있어서는 더 큰 에너지를 필요로 하게한다. 하지만, 준정적인 조건에서는 균열의 진전에 대한 흡

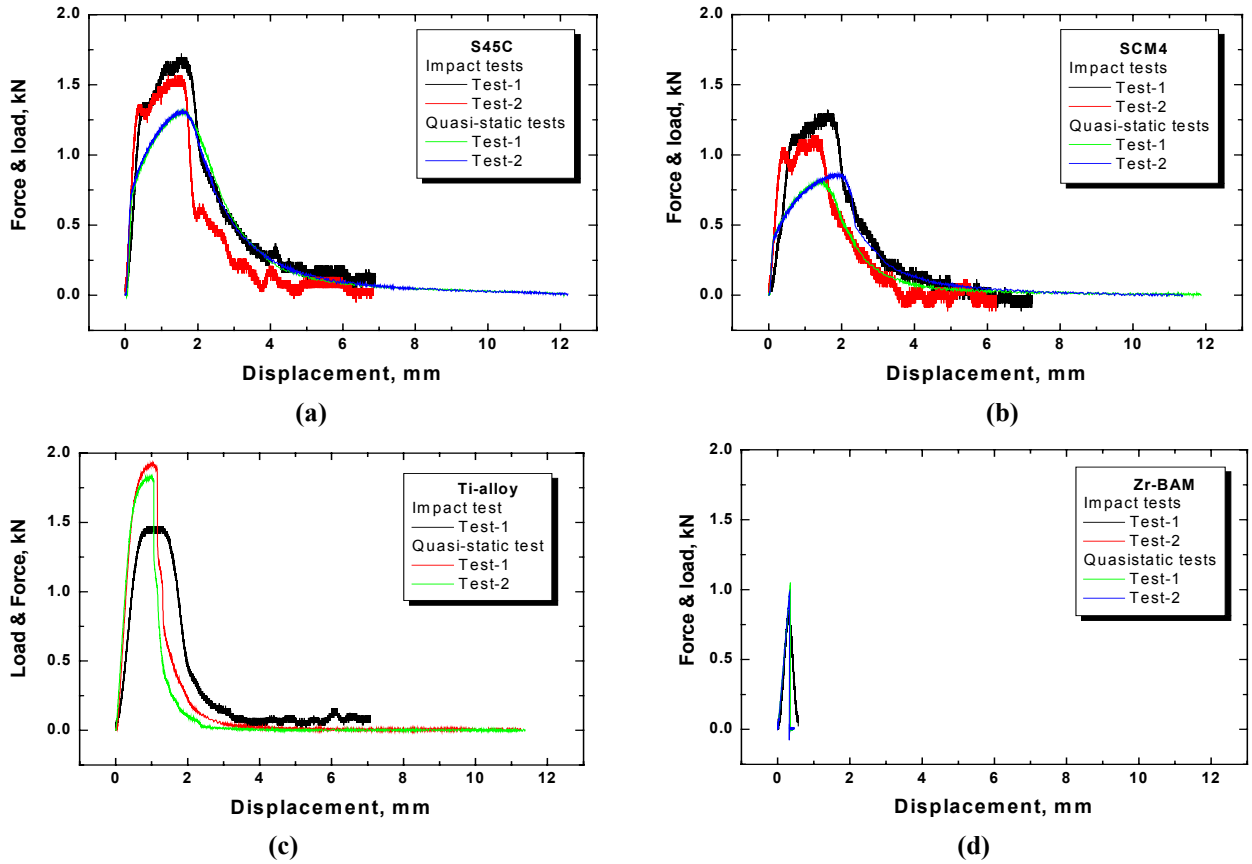

Fig. 5 Load-displacement curves in (a) S45C, (b) SCM4, (c) Ti alloy and (d) Zr-BAM specimens

Table 1 Results obtained using subsize Charpy specimens.

		F_{max}, kN	S_{max}, mm	E_i, J	E_p, J	E_{total}, J
S45C	Impact	1.72	1.55	1.96	2.28	4.24
	Static	1.32	1.55	1.58	2.25	3.83
SCM4	Impact	1.32	1.61	1.50	1.30	2.80
	Static	0.87	1.80	1.19	1.13	2.32
Ti-alloy	Impact	1.47	0.86	0.72	1.96	2.68
	Static	1.83	0.96	1.13	0.61	1.74
Zr-BAM	Impact	0.90	0.30	0.13	0.10	0.23
	Static	0.98	0.33	0.16	0.00	0.16

수에너지가 동적인 조건에 비 해 매우 작게 나타남을 볼 수 있다. 동적 조건하에서는 균열의 개시에는 상대적으로 작은 에너지를 나타내지만, 오히려 진전에 있어서는 균열의 개시에 필요한 에너지와 비슷한 에너지를 포함한다.

Fig. 4(d)는 Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속에 대한 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 비정질 금속인 Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속은 항복 이후 급격한 전단띠의 진전에 의해 파단이 발생한다. 이는 그래프에 나타낸 준정적 압축조건하에서의 결과에서 확인할 수 있고, 균열의 개시에 필요한 에너지에 비해 거의 영에 가까운 에너지 값을 보여준다.

Table 1 은 각 재질에서 충격 및 준정적 하중조건하에서 구한 극한하중과 이에 상응하는 변위, 균열의 개시와 진전에 필요한 흡수에너지를 나타낸 것이다. 결정질 금속들의 경우, 비교적 높은 에너지를 수반하지만, 비정질 금속인 Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속은 낮은 에너지를 포함한다. 특히, Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속의 경우, 준정적 압축조건하에서 항복 이후 급격한 전단띠의 발생으로 파단이 발생한다고 보고하였다.[8] Fig. 4 (d)와 Table 1 의 결과를 보면 이를 잘 뒷받침하지만, 동적인 경우는 균열의 발생에 상응하는 진전에 대한 에너지가 존재함을 볼 수 있다. 이러한 영향으로 전체적인 흡수에너지는 증가되었다.

본 연구에서 사용한 시험편의 노치 선단부 곡률반경이 벌크아몰퍼스금속에서는 0.1 m, 다른 결정질 금속에서는 0.2 mm 로 다르게 가공되어서 절대비교는 어렵다. 곡률반경이 작을수록 응력 집중이 크게 되고 파단이 용이하게 되므로 시험편 파단시 흡수되는 에너지는 적게 된다.

3.2 파면관찰 결과

Figs. 6~8 는 충격과 준정적부하 조건에서 파단된 S45C, Ti 합금 그리고 Zr-기 BAM 시험편의 파면을 광학현미경과 주사식 전자 현미경으로 관찰한 사진이다. 아울러 노치부근과 중앙부의 SEM 사진을 확대하여 제시하였다.

먼저, Fig. 6 의 S45C 의 경우, 광학현미경을 통한 거시적인 관찰에서 충격하에서는 준정적 조건에서와는 달리, 노치부근의 딤플의 발생에 따른 연성 파면을 나타내나, 균일 진전부에 해당하는 중앙부는 밝은 반짝이는 부분으로, 벽개파괴(cleavage fracture)의 전형인 파셋(facet)이 현저하게 발달한 것을 볼 수 있다. 연성재료는 공동(dimple)의 성장과 합체로 인한파괴기구를 나타내는데, 이런 연성재료인 S45C 가 취성 파괴 기구인 파셋 구조의 벽개파면을 나타냄은 충격 조건하에서 취성파괴를 한다는 것을 의미한다. 비슷한 원소를 갖는 SCM4 의 경우도 S45C 와 비슷한 파면을 나타

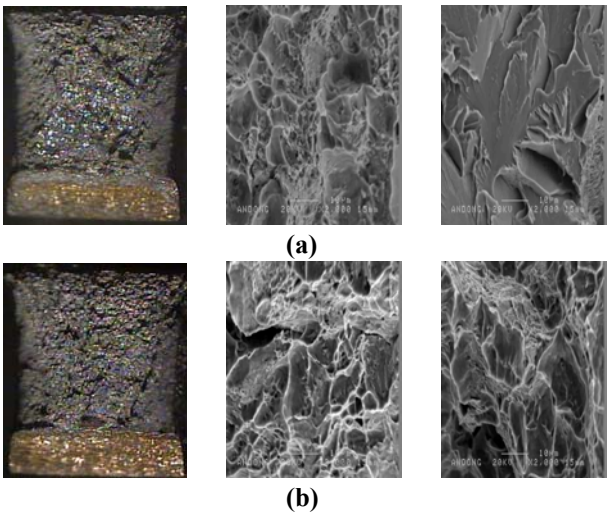

Fig. 6 Optical and SEM images of fracture surface in S45C specimen under (a) impact and (b) quasi-static conditions.

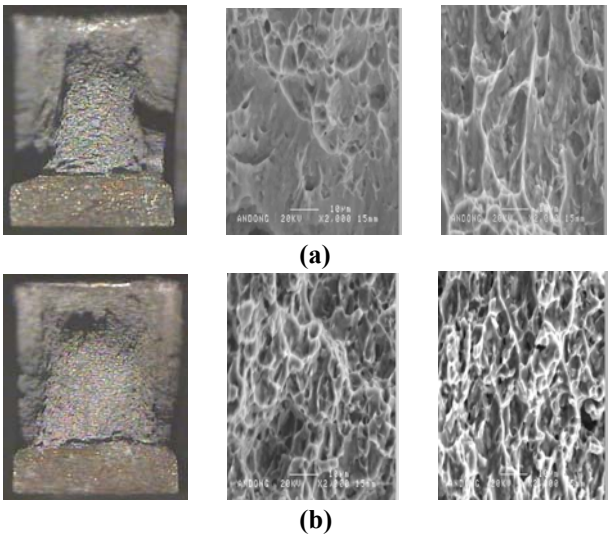

Fig. 7 Optical and SEM images of fracture surface in Ti-alloy specimen under (a) impact and (b) quasi-static loading conditions.

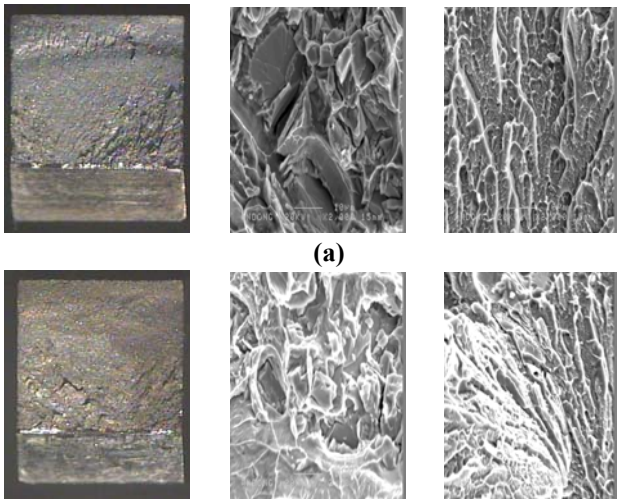

Fig. 8 Optical and SEM images of fracture surface in Zr-BAM specimen under (a) impact and (b) quasi-static conditions.

낸다. 이는 상대적으로 취성 재료인 경우보다 연성 재료에서 보다 더 확연히 구별된다.

한편, Fig. 7 에서와 같이 Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속에 대한 관찰은 전형적인 파단기구인 vein-like pattern 이 파단 전면에 걸쳐 나타난다.

동적 충격 조건하에서는 리거먼트(ligament) 후단에서 여러 개의 분지 크랙에 의한 파단이 2 차적으로 발생한 것을 볼 수 있다. 또한, 동적 조건하에서는 균열 진전방향과 같은 방향으로 직선적으로 vein-like pattern 이 분포한 반면, 준정적 조건하에서는 다소 방향성 없이 분포함을 볼 수 있다. 이는 Ti 시험편에 대한 이전의 연구에서 보고 되었듯이, 고 변형률 속도하에서 더욱 직선적인 균열의 진전이 발생한다는 것과 유사하다.

4. 결 론

1) 긴 충격봉을 사용하여 구성한 계장화 샬피 충격 시험기는 종래의 진자식 계장화 샬피 충격 시험기에서 문제가 된 하중신호의 oscillation 이 없는 하중-변위선도를 얻을 수 있었다. 계산식으로 구한 변위는 레이져 변위계로 측정한 변위와 거의 일치하여, 양호한 계장화 시험범이 가능하였다.
2) S45C 와 SCM4 재의 경우, 충격하중하에서 변형률속도 강화거동을 나타내, 강도 및 흡수에너지의 증대를 나타내었다. Ti-합금의 경우, 균열 개시에 필요한 에너지는 준정적인 경우가 충격시 보다 큰 값을 나타내었지만, 균열 진전에 필요한 에너지는 충격조건이 더 크게 나타내었다.
3) Zr-기 벌크 아몰퍼스 금속(Zr-BAM)의 경우, 두 부하조건에서 거의 탄성적 변형 거동을 나타내었고, 균열 개시에 필요한 에너지가 전체 흡수 에너지의 대부분을 차지하였다.
4) 긴 충격봉을 사용하는 계장화 샬피 충격시험장치로 구한 하중-변위 선도는 재료의 파괴양상에 따른 차를 나타내었고, 파면관찰결과로 뚜렷이 할 수 있었다. 벌크 아몰퍼스 금속은 두 조건에서 파면 전반에 걸쳐 vein-like pattern 이 분포하였고, 특히 동적 충격 조건 하에서 리거먼트 부에 여러 개의 분지 균열이 발생함을 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구사업중 지방대우수연구자사업(Grant No. 2001-1-30400-002-2)의 지원을 받았습니다. 또한 본 연구에 협조해 준 스텐포드연구소(SRI International)의 Dr. D. A. Shockey 와 Dr. K. Kobayashi, 그리고 BAM 시험편을 제공해 준 Howmet Co.와 Liquidmetal Technology 에 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Bruck, H. A., Christman, T., Rosakis, A. J. and W. J. Johnson, “Quasi-static constitutive behavior of Zr-Ti-Ni-Cu-Be bulk amorphous alloys”, Scripta Metal. Mater., Vol. 30, pp. 429-434, 1994.
(2) Lowhaphandu. P., Ludrosky, L. A., Montgomery, S. L. and Lewandowski, J. J., “Deformation and fracture toughness of a bulk amorphous Zr-Ti-Ni-Cu-Be alloy”, Intermetallics, Vol. 8 pp. 487-492, 2000.
(3) ISO 14556, “Steel-Charpy V-notch pendulum impa -ct Instrumented test method”, 1997.
(4) Kalthoff, J.F., and Gregor, M.,“Instrumented impact testing of subsize Charpy V-notch specimens, small specimen test techniques”, ASTM 1329, 1997.
(5) Lorriot. T., “Specimen loading determined by displacement measurement in instrumented Charpy impact test”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 65, pp. 703-713, 2000
(6) Katharine M. Flores and Reinhold H. Dauskardt, “Enhanced toughness due to stable crack tip damage zones in bulk metallic glass”, scripta materialia, Vol.41, pp. 937-943, 1999.
(7) Shin H.-S. and Ahn S.-Y., “Evaluation of ductile-brittle transition behavior of structural materials using subsize Charpy impact specimens”, Proc. KSME, pp. 24-30, 1998.
(8) Shin H.-S, Ko. D. K. et al, “Deformation and fracture behavior of structural Bulk Amorphous Metal under impact loading”, Trans. KSME 2003. in press