

# 세브론노치 세라믹시편을 이용한 동적파괴인성측정

이연수\*\*, 이영선\*\*\*\*, 박래석\*\*\*, 문영득\*\*, 윤희석\*

## Measurement of Dynamic Fracture Toughness Using Chevron Notched Ceramic Specimen

Yeon-Soo Lee\*\*, Young-Sun Lee\*\*\*\*, Rae-Seok Park\*\*\*, Young-Deuk Moon\*\*, Hi-Seak Yoon\*

### ABSTRACT

A dynamic fracture toughness test method with a chevron notched ceramic specimens is proposed. The notch angles of the chevron specimens were 90, 100° and 110°. Finite element analysis(FEA) were done to determine the geometrical properties of chevron-notch specimens according to notch angles. The static fracture toughness of the chevron notched alumina specimen was  $3.8 MPa\sqrt{m}$  similar to that of the general fracture specimen with a precrack. Dynamic fracture toughness was  $4.5 MPa\sqrt{m}$  slightly higher than the static one. These research showed the possibility of the split Hopkinson pressure bar test method using the newly proposed chevron notched specimens to get the dynamic fracture toughness of extremely brittle materials such as ceramics.

**Key Words** : the split Hopkinson pressure bar, dynamic fracture toughness(동적파괴인성), Chevron notch(세브론노치), FEA(유한요소해석), dimensionless stress intensity factor (무차원 응력확대계수)

### 기호설명

- $P_{max}$  = Maximum tensile load
- $K_{IC}$  = Static fracture toughness
- $K_{IcM}$  = Static fracture toughness of Chevron notch specimen determined by  $P_{max}$
- $Y$  = Dimensionless stress intensity factor

### 1. 서론

세라믹재료가 열차폐성 때문에 공업응용분야에서 사용이 늘고 있는 반면, 강한 취성에 기인한 저인성 때문에 충격에 약한 맹점이 있다. 세라믹재료의 동적인성을 향상시키기 위해서는 첨가제 및 복합재료에 관한 연구와 더불어 세라믹재료와 같이 매우취성이 강한 재료에 대한 신뢰할 만한 동적파괴인성측정법의 확립 또한 매우 중요하다.

세라믹재료는 시편제작에 있어 기계가공이 용이하지 않기 때문에 노치시험편에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. R.W. Davidge와 G. Tappin<sup>(1)</sup>은 유리나 구조용 세라믹과 같은 재료로 된 시험편에

- \* 전남대학교 자동차공학부
- \*\* 전남대학교 대학원
- \*\*\* 국방과학연구소 (창원)
- \*\*\*\* 금호타이어 기술연구소

날카로운 예비균열을 만들기 위해, 시편길이방향에서 압축하중을 가하고 시편의 중간에서 시편단면에 수직으로 하중을 가하여 날카로운 예비균열을 만드는 시도를 하였다. 그러나 이 방법은 매우 지루하고 시간이 많이 소비될 뿐 아니라 많은 시편의 예비균열발생시 일관성이 떨어지는 결과를 가져올 수 있다. Nobuki Miyahara 등<sup>(2)</sup>은 세라믹 시편의 정적파괴인성측정법의 효용성을 평가하였다. 그 연구에서 FP법(The fatigue pre-cracking from a crack introduced by the BC method), CSF법(The controlled surface flow method) 및 CN법(The Chevron notch method)은 적합한 결과를 보인 반면, BC법(The bridge compression method), IF법(The indentation fracture method)은 부적합한 결과를 보였다고 했다.

CN법에 대한 표준으로 ASTM E1304<sup>(3)</sup>가 있고 고강도 알루미늄합금과 같은 취성금속재료 즉, 일정한 균열저항곡선을 갖는 재료로 된 인장시편에 세브론노치를 만들으로써 최대인장하중만으로 파괴인성을 구할 수 있다는 사실을 밝히고 있다<sup>(4)</sup>. 그러나, ASTM E1304은 인장시험에 의한 컴플라이언스측정법에 의한 것으로 실제 세라믹과 같은 매우 취성이 강한 재료의 경우엔 균열이 순간적으로 불안정 성장에 이르므로 원하는 예비균열를 피로하중을 이용해 확보하기가 매우 어렵다. 그런데, 취성재료중에서 재료내에 기공이나 편석이 심한 광석과 같은 재료를 제외한 비교적 균일한 조직을 갖는 세라믹이나 취성금속은 임의의 균열진전이후 일정한 균열저항을 갖는 특성이 있다. 그래서 균열 성장에 대하여 오목한 형태의 균열유도하중곡선의 특징을 갖는 세브론노치 시편을 이용하여 단순인장시험을 하고 거기서 측정된 최대인장하중만 이용하여 파괴인성을 계산하는 최대인장하중법을 사용할 수가 있다.

재료의 동적파괴특성에 관한 연구는 주로 흡킨슨봉법에 의해 이루어지고 있는데, 그에 적용할 시편의 크기와 형상에 있어서는 흡킨슨봉의 크기와 재질에 따른 제약이 있다. 특히, 취성재료로 된 시편은 그 크기가 아주 크지 않을 경우에 예비균열를 만드는 일은 매우 힘들다. Weinong Chen과 G. Ravichandran<sup>(5)</sup>은 수축맞춤 금속 슬리브관(Shrink-fit metal sleeve)을 이용하여 세라믹과 같은 시편을 슬리브관의 열수축에 의해 고정하고, 흡킨슨봉에 의해 파괴된 후에도 파편이 흩어지지

않게 하여 그 파단면관찰에 의한 동적파단의 양상을 연구하였다. Richard J. Anton과 Ghatu Subhash<sup>(6)</sup>는 흡킨슨봉에서 동적 흡경도측정법(The dynamic indentation hardness measurement method)으로 ASTM C1327에 의해 비이커스경도를 구하고 Lankford의  $K_{IC}$ 추정식을 사용하여 동적파괴인성을 계산하였다. 그러나 이런 연구들은 Nobuki Miyahara 등<sup>(2)</sup>의 연구에서 언급되었듯이 세브론노치시편을 이용한 파괴인성측정법에 비하여 부적절한 것으로 평가되고 있다. 취성재료의 정적파괴인성의 측정에 있어서 세브론노치를 이용한 방법은 매우 유용한 것임은 앞에서 언급한 여러 연구사례와 ASTM E1304가 뒷받침하고 있다. 그러나 아직까지 세브론노치 세라믹시편을 흡킨슨봉에 적용하여 성공적으로 동적파괴인성을 연구한 예는 거의 없으며 그 표준시험법 또한 없는 실정이다.

이와 같은 이유로, 본 연구에서는 세라믹의 일종인 알루미늄( $Al_2O_3$ )로 된 세브론 노치시편을 흡킨슨봉장치에 적용하여 동적파괴인성을 구하는 방법에 관하여 연구를 하게 되었다. 첫째, 흡킨슨봉에 장착할 수 있는 세라믹 시편은 매우 작고 취성이 강하여 가공성이 좋지 않기 때문에, 세라믹 시편의 형상 및 시편을 흡킨슨봉에 고정할 지그의 개발에 역점을 두었다. 둘째, 시편에 단일 동적인장하중이 가해지도록 흡킨슨봉장치를 장착하고, 세브론 노치시험편의 노치각을 달리하여 이 세라믹시편의 동적파괴인성의 측정에 가장 적합한 형상을 찾는 연구를 하였다.

## 2. 세브론노치 시험편 및 실험법

### 2.1 인장형 세브론노치 시험편

Fig. 1은 이 연구에서 제안된 인장형 세브론노치 시험편의 형상을 개략적으로 도시한 것이다.  $L$ 은 시험편의 길이,  $\theta$ 는 세브론노치각도,  $t$ 는 노치홈의 두께를 나타낸다. Fig. 1에서  $\alpha$ 는 상대균열길이를 나타내며 다음과 같다.

$$\alpha = a/D \quad (1)$$

이와 같은 세브론노치를 갖는 시험편이 거의 이상

적인 선형탄성거동을 하는 경우에는, 파괴인성을 결정하기 위해서는 파괴될 때의 최대하중만을 사용하여 계산할 수 있다<sup>(5)</sup>. 즉, 세브론노치가 있는 취성재료의 경우 최대하중 ( $P_{max}$ )을 이용하여 구한 정적파괴인성( $K_{IC}$ )을  $K_{IIM}$ 라고 정의하며 (ASTM E1304) 다음과 같이 표현된다<sup>(3)</sup>.

$$K_{IIM} = \frac{P_{max}}{D^{3/2}} Y_c \quad (2)$$

여기서  $Y_c$  는 기하학적 형상인 균열길이 및 노치폭  $D$ 에 의해 달라지는 최소무차원응력확대계수를 의미한다.

전체적인 시편 형상은 Fig. 2 및 3에서 보듯이 도그본(dogbone) 형태로서 중앙단면에 90, 100, 110°의 3가지 노치각도를 갖는다. 사용된 정적 인장시편은 99.5%이상의 순도를 갖는 알루미늄( $Al_2O_3$ -99.5%)봉에 세브론 노치를 가공하여 만들었으며, 알루미늄은 일정 균열진전이후에 일정한 균열저항곡선을 나타내는 것으로 알려져 있다. 시편의 전체길이는 48.7mm, 균일직경부의 직경은 5mm, 측정길이는 12.7mm로 하였고, 정적인장시험기 및 흡킨슨봉시험기에서 동시에 사용될 수 있도록 하였다. 또한, 시편을 직접 나사가공을 하기가 용이하지 않기 때문에 Fig. 4와 같은 나사형 지그를 사용하여 고정하였다. 즉, 지그에 물릴 부분을 경사지게 가공하고, 시편을 감싸서 나사홈에 끼울 수 있도록 숫나사형의 지그를 만들었다.

## 2.2 정적인장시험

정적인장시험에서는 최대인장하중을 구하게 된다. 취성의 세브론노치시편의 모드I 파괴인성을 최대인장하중의 측정만으로 결정하는 방법을 적용하기 위해 세브론 노치시편에 대하여 인장시험을 했다. INSTRON 만능인장시험기에서 0.01mm/sec의 속도로 변위제어를 하여 인장시험을 실시하였다.

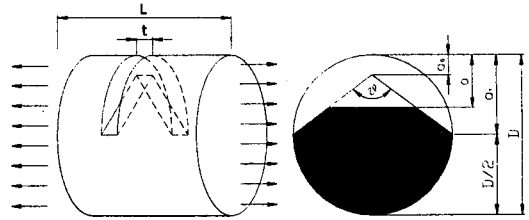


Fig. 1 Schematic drawing of chevron notched specimen newly proposed in this study

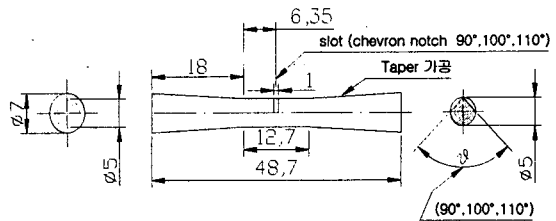


Fig. 2 Detail sketch of tensile specimen

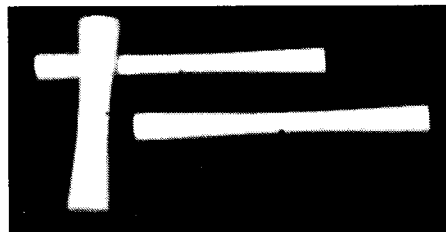


Fig. 3 Ceramic specimens with a chevron notch

정적인장시험에 사용될 시편은 흡킨슨봉에서 사용될 시편과 같은 것으로 그 크기가 작고 매우 취성이 강하기 때문에 시험에 매우 주의를 해야 한다. 인장시험기의 상하 헤드, 시편 및 지그 등이 조합될 때 중심도 및 수직도가 서로 맞지 않을 수 있다. 그럴 경우 시편의 편심이 많지 않더라도 시편을 장착하는 동안에 시편이 파괴될 수 있고, 최대파단하중이 비정상적으로 낮게 되어 잘못된 결과를 야기할 수 있다. 그러므로, 인장시험기의 헤드와 시편 및 지그의 조합체를 연결하는 데는 신뢰성이 있도록 유니버설 조인트를 사용했다.

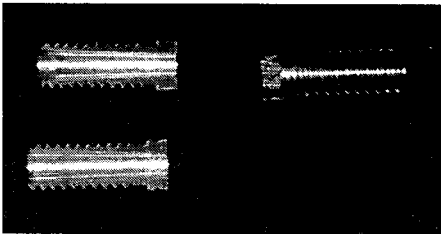


Fig. 4 Screw jigs to cover ceramic specimen

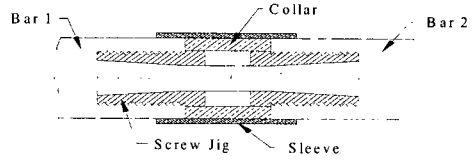


Fig. 6 Detail sketch of ceramic specimen fitted in bars

### 2.3 SHPB 실험

Fig. 5는 충격시험기(SHPB)의 개략도를 보여주며 주요부의 구성은 타격봉(striker bar), 입사봉(input bar), 반사봉(transmitted bar)으로 크게 나누어 볼 수 있다. 각각의 치수는 25cm, 150cm, 75cm이며 그 재료는 Inconel 718이다. 응력파는 시편에서 동일한 거리에 있는 strain gage A 및 B를 사용하여 측정되었으며, 최대인장하중을 계산하는데 사용되었다.

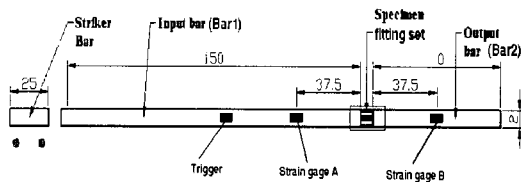


Fig. 5 Schematic diagram of the SHPB setup used. (Dimensions are in cm.)

Fig. 6에서 보면 세라믹 시편은 나사형 지그를 사용하여 흡킨슨봉에 장착 시켰으며, 시편의 바깥쪽에는 인장모드를 형성하기 위해 중공형의 칼라를 입사봉과 반사봉 사이에 끼워 넣었다. 봉1에서 전달된 압력파는 시편에 거의 영향을 주지 않고 칼라를 통하여 봉2로 전달되고, 봉2의 오른쪽 끝에서 반사되어 인장파로 변하여 시편에 돌아와 인장력을 가하게 된다.

### 3. 유한요소해석모델

식 (2)의 기하학적 형상에 의존하는 무차원응력 확대계수( $Y_c$ )를 결정하기 위해서는 실험적 방법인 컴플라이언스법<sup>(3)</sup>과 유한요소해석방법<sup>(7,8)</sup> 등이 있는데, 본 연구에서는 유한요소해석을 수행했다.

해석모델은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 실제 인장시편의 중앙에 위치한 동일 직경부분의 치수와 같이 지름 5mm, 길이 12.7mm로 하였고 노치 끝의 각도는 90°, 100° 및 110°에 대해서 각각 해석을 수행했다(Fig. 7). 균열선단부분을 제외한 부분에 대해서는 20-절점 아이소파라메트릭 브릭요소를 사용했고, 균열선단에서는 Fig. 8에서와 같이 20-절점 아이소파라메트릭 브릭요소와 16-절점 웨지요소를 요소의 형태에 따라 달리 사용하였다. 균열의 특이성을 표현하기 위해 균열선단과 교차하는 요소의 변위에 있는 중간절점을 균열선단쪽으로 1/4 만큼 이동시켜 균열특이성을 주었다<sup>(9,10)</sup>.

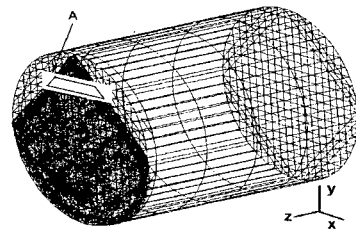


Fig. 7 FEM Model for chevron notch specimen

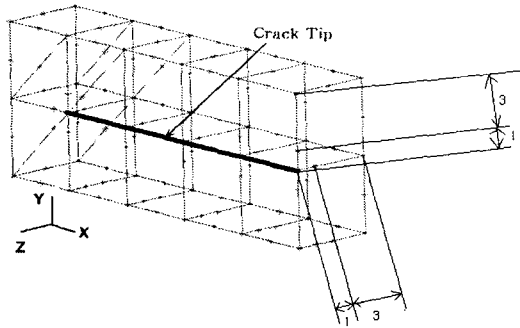


Fig. 8 FE modeling of crack tip singularity

모델링은 IDEAS를 사용하여 만들었고, ABAQUS를 사용하여 선형해석하였다. Table 2는 해석에 사용된 알루미나( $Al_2O_3$ )의 물성치<sup>(11)</sup>이다.

Table 1 Properties of alumina(99.5%  $Al_2O_3$ )

$Al_2O_3$	Young's modulus(E)	Poisson ratio( $\nu$ )	Density( $\rho$ )
	343 GPa	0.23	3.90 g/cm <sup>3</sup>

#### 4. 결과

##### 4.1 유한요소법에 의한 해석결과

Fig. 9는 노치각이 90°인 세브론노치 모델에 대한 FEM 해석결과로서, 크랙길이의 진전에 따른 하중-변위 관계를 도시한 것이다. 직선형의 실선은 4단계의 상대균열길이를 나타내며, 이 기울기의 역을 사용하여 컴플라이언스(CED)를 구할 수 있다. 또한, 각 균열길이에에서 구한 컴플라이언스의 변화를 조합하면 Fig. 10과 같이 되는데, 가는 직선은 각 단계에서의 변화량이며, 굵은 곡선은 이를 다항식으로 곡선 처리한 것이다. 이와 같은 방법으로, 각 노치각에서 균열길이에 따른 무차원 컴플라이언스 변화를 구할 수 있으며, 식 (2)에서와 같이 노치각 90°인 경우에 CED의 변화를 식 (3)과 같이 균열의 시편직경에 대한 상대길이( $a$ )의 3차 다항식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 CED_{(\theta=90^\circ)} &= 21.454a^3 - 9.3611a^2 + 2.053a + 1.3585 \\
 CED_{(\theta=100^\circ)} &= 68.336a^3 - 30.921a^2 + 8.6368a - 0.0454 \\
 CED_{(\theta=110^\circ)} &= 29.223a^3 - 19.003a^2 + 4.8485a + 1.0275
 \end{aligned}$$

(3-a) ~ (3-c)

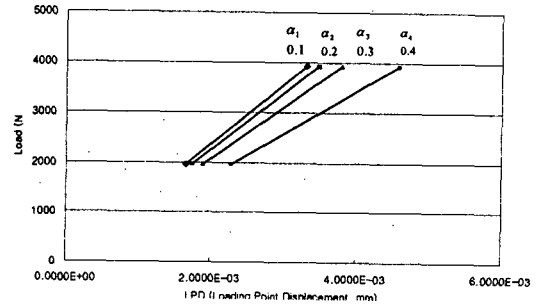


Fig. 9 Load-displacement diagram vs. crack length (notch angle=90°)

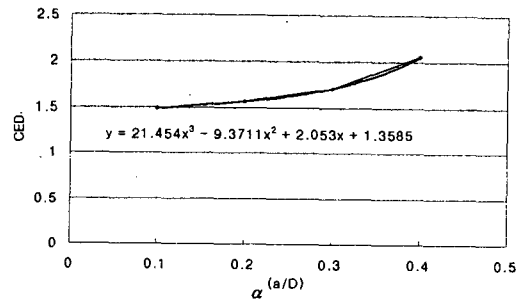


Fig. 10 Variation of dimensionless compliance vs. crack length (notch angle=90°)

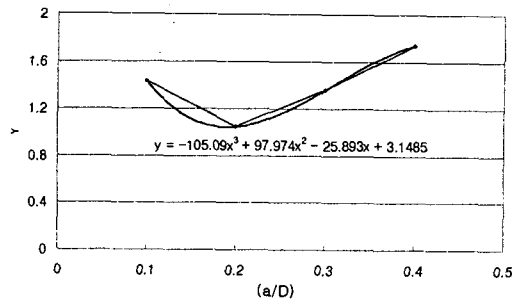


Fig. 11 Variation of dimensionless SIF vs. crack length (notch angle=90°)

위의 컴플라이언스 변화를 이용하여 각 균열길이에 대한 무차원 응력확대계수( $Y$ )를 구할 수 있으며, 노치각  $90^\circ$ 인 경우의 그래프는 Fig. 11과 같다. 이 무차원 응력확대계수 그래프에서 굵은 선은 각 균열진전에 따른 4개의 무차원 응력확대계수의 값을 3차 다항식으로 표현한 것이며, 각각의 노치각도에 대해 구하면 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 Y_{(\theta=90^\circ)} &= -105.09\alpha^3 + 97.974\alpha^2 - 25.893\alpha + 3.1485 \\
 Y_{(\theta=100^\circ)} &= -112.83\alpha^3 + 109.98\alpha^2 - 31.196\alpha + 3.9118 \\
 Y_{(\theta=110^\circ)} &= -153.37\alpha^3 + 169.52\alpha^2 - 58.1581\alpha + 7.5736
 \end{aligned}
 \tag{4-a)~(4-c)}$$

마지막으로, 최소 무차원응력확대계수  $Y_c$ 는 위의 무차원 응력확대계수식을 미분하여 최소값을 구하였다. Fig. 11을 보면 균열상대길이가 0.2인 부근에서 최소 무차원응력확대계수는 1정도임을 관찰할 수 있다.

#### 4.2 홉킨슨봉장치에서 충격 응력파

Fig. 12는 노치각이  $90^\circ$ 인 알루미늄 세브론노치 시편에 타격봉의 속도 ( $v_0$ )를 4.76 m/sec로 충격을 가했을 때 얻은 결과이다. 스트레인게이지 A에서의 시험편을 통과한 응력파( $\epsilon_T$ )는 Fig. 12에서 시간이 900  $\mu$ sec 부근에 파선으로 된 원으로 표시된 부분에 나타나 있는데, 아주 작은 통과 응력파가 검출되었음을 알 수 있다. 이는 세라믹이 충격에 쉽게 파괴됨을 나타낸다.

Table 2는 시험에 사용된 알루미늄 정적인장시험에 따른 파괴하중과 홉킨슨봉을 이용한 동적 파괴시험에 따른 파괴하중을 비교한 표이며, 동적 파괴하중이 정적파괴하중보다 더 큰 값을 보이고 있다. 이 결과는 선형탄성재료의 경우 동적파괴하중이 정적파괴하중에 비해 높은 값을 나타내는 경향과 일치한다<sup>(8)</sup>. 그러나, 노치각이  $110^\circ$ 인 경우엔 비정상적으로 낮은 파괴강도를 보였다. 노치각이  $110^\circ$ 처럼 크면 파단면의 면적이 균열진전에 따라 노치각이 작은 경우보다 급격히 변하게 되고, 초기 균열길이가  $90^\circ$ 나  $100^\circ$ 에 비해 상대적으로 크기 때문에 응력집중이 심하며, 사용된 알루미늄이

취성재료이기 때문에 불안정 파단의 경향이 강하게 된다. 따라서, 불안정 파단의 경향이 강할수록 낮은 파단강도를 보이는 것으로 여겨진다.

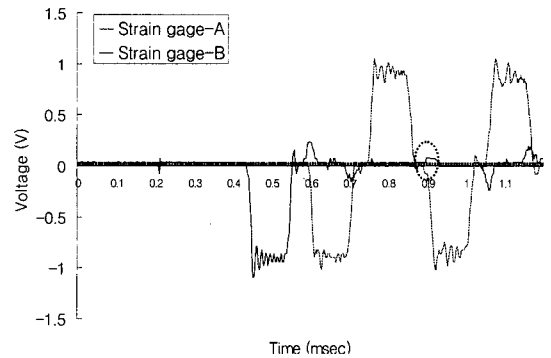


Fig. 12 Strain gage A and B (notch angle  $90^\circ$ ,  $v_0 = 4.76$ m/sec) for a ceramic specimen

Table 2 A comparison of static and dynamic fracture forces for a ceramic specimen

Chevron notch angle		$90^\circ$	$100^\circ$	$110^\circ$
$P_s(N)$		1305	1064.87	869
$P_D(N)$		1530	1276	956
$Y_c$		1.04	1.2	1.22
$K_{IcM}$ ( $MPa\sqrt{m}$ )	Static	3.839	3.614	2.99(N/A)
	Dynamic	4.4993	4.329	3.289(N/A)

일반적으로 세라믹의 정적파괴인성은  $4 MPa\sqrt{m}$  정도로 알려져 있는데<sup>(7)</sup> 본 실험에서는 노치각이  $90^\circ$ 인 시편의 경우  $3.839 MPa\sqrt{m}$ 의 값을 보였으며, 홉킨슨봉을 이용한 동적파괴인성은 그보다 좀 높은  $4.5 MPa\sqrt{m}$ 정도의 값을 보였다. 노치각이  $100^\circ$ 인 시편의 경우에도 비슷한 결과를 보였다. 동적파괴인성은 고속변형의 관성을 고려하면 정적파괴인성보다 조금 높은 값이 되는데 본 실험에서도 동일한 경향을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 동적 인장하중에서 균열개구모드에 의한 파괴인성측정이 가능하도록 인장형 세브론 노치시편을 제안하고 그에 대한 적용성을 흡킨슨봉법을 사용하여 검증하였으며, 아래와 같은 결과를 얻었다.

- 1) 알루미늄( $Al_2O_3$ )의 정적파괴인성은 노치각이  $90^\circ$ 인 시편의 경우  $3.8 MPa\sqrt{m}$ 의 값을 보였으며, 흡킨슨봉을 이용한 동적파괴인성은 그보다 좀 높은  $4.5 MPa\sqrt{m}$  정도의 값을 보였으며, 노치각이  $100^\circ$ 인 시편의 경우에도 비슷한 결과를 보였다.
- 2) 동적파괴인성이 정적파괴인성보다 20% 정도 높게 나와, 통상적인 주철의 경우의 10% 정도의 차이에 비하면 크게 나타났다. 예비균열을 갖지 않는 세브론노치시편을 이용하여 매우 취성이 강한 알루미늄시편의 정적파괴인성의 측정 및 흡킨슨봉을 이용한 동적파괴인성의 측정 방법은 그 가능성을 보여주었다고 할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1998년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. R.W. Davidge and G. Tappin, In Proceedings of the British Ceramic Society, Vol. 15, pp. 47-60, 1970.
2. Nobuki Miyahara, Yoshiharu Mutoh, Kohich Tanaka and Manabu Takahashi, "Fracture Toughness Evaluation of Five Structural Ceramic Materials by Various Testing Methods," 일본기계학회논문집(A편), 57권, 538호, pp. 1326-1333, 1991.
3. ASM Handbook Committee, ASM Handbook Volume 8 Mechanical Testing, ASM international, pp.382-386, 1992.
4. T. L. Anderson, Fracture Mechanics 2nd ed., pp.

- 50-55, pp. 451-454, 1995.
5. Weinong Chen, G. Ravinchandran, "Dynamic compressive failure of a glass ceramic under lateral confinement," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 45, No. 8, pp. 1303-1328A, 1997.
6. Richard J. Anton, Ghatu Subhash, "Dynamic Vickers indentation of brittle materials," Wear, Vol. 239, pp. 23-35, 2000.
7. Beech, J. F., Ingraffea, A. R., "Three-Dimensional Finite Element Calibration of The Short Rod Specimen, International Journal of Fracture," Vol. 18, pp. 217-229, 1982.
8. Raju, I. S., Newman, J. C. Jr., "Three-Dimensional Finite-Element Analysis of The Chevron Notched Fracture Specimen," Technical Memorandum 85798, NASA Langley Research Center, April, 1984.
9. Anthony R. Ingraffea, "Stress-Intensity Factor Computation in Three Dimensions with Quarter-Point Elements," International Journal for Numerical Methods In Engineering, Vol. 15, pp. 1427-1445, 1980.
10. M. H. Aliabadi and D. P. Rooke, Numerical Fracture Mechanics, Computational Mechanics Pub., 1991.