

## 입자충격속도에 따른 세라믹재료의 콘크랙 형상 변화

오상엽\* · 신형섭† · 서창민\*\*  
(2001년 7월 24일 접수, 2001년 11월 21일 심사완료)

### Variation of Cone Crack Shape in Ceramic Materials According to Spherical Impact Velocity

Sang-Yeob Oh, Hyung-Seop Shin and Chang-Min Suh

**Key Words:** Spherical Impact(구형입자충격), Zenithal Angle of Cone Crack(콘크랙의 정점각도),  
Impact Velocity(충격속도), Impact Damage(충격손상), Silicon Carbide(탄화규소)

#### Abstract

Damage behaviors induced in silicon carbide by an impact of particle having different material and size were investigated. Especially, the influence of the impact velocity of particle on the cone crack shape developed was mainly discussed. The damage induced by spherical impact was different depending on the material and size of particles. Ring cracks on the surface of specimen were multiplied by increasing the impact velocity of particle. The steel particle impact produced larger ring cracks than that of SiC particle. In the case of high velocity impact of SiC particle, radial cracks were produced due to the inelastic deformation at the impact site. In the case of the larger particle impact, the damage morphology developed was similar to the case of smaller particle one, but a percussion cone was formed from the back surface of specimen when the impact velocity exceeded a critical value. The zenithal angle of cone cracks developed into SiC material decreased monotonically with increasing of the particle impact velocity. The size and material of particle influenced more or less on the extent of cone crack shape. An empirical equation,  $\theta = \theta_{st} - v_p(90 - \theta_{st})/500 R^{0.3}(\rho_1/\rho_2)^{1/2}$ , was obtained as a function of impact velocity of the particle, based on the quasi-static zenithal angle of cone crack. It is expected that the empirical equation will be helpful to the computational simulation of residual strength in ceramic components damaged by the particle impact.

#### 1. 서 론

세라믹과 같은 취성재료는 낮은 인장강도와 파괴인성으로 인해 복잡한 파괴양상과 미세한 균열의 발생에도 급격한 파손을 나타낸다. 이러한 취성재료를 구조용 부재에 적용하기 위해서는, 부재의 강도설계, 안전성 및 신뢰성 확보 차원에서

외력 작용점에서 손상거동과 파괴기구의 이해가 필요하다.

최근 열효율 증대 및 에콜로지 측면에서, 세라믹 재료를 발전기용 가스터빈 또는 자동차용 엔진 등에 사용할 때 발생하는 입자충격 손상에 관한 연구가 수행되어 왔다.<sup>(1~3)</sup> 또한 안전성 확보 측면에서 자동차 및 건축물 재료로 사용되는 적층구조의 유리(soda-lime glass laminated structure)에 대한 외래물 충돌 손상(FOD: foreign object damage)에 대한 연구가 행해져오고 있다.<sup>(4,5)</sup> 한편 얇은 취성판재 가공법으로, 편침시 발생하는 레디얼크랙 발생을 억제하면서 콘크랙의 성장기구를 이용하여 비교적 쉽게 피어싱(piercing)이나 블랭킹(blanking)을 가능케 하는, 충격하중을 이용한

\* 회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학과

E-mail : hsshin@andong.ac.kr

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

\*\* 회원, 경북대학교 기계공학과

가공기술 개발이 진행되고 있다.<sup>(6)</sup>

일반적으로, 취성 평판에 구형 입자 충격시 충격부에 발생하는 손상은, 탄성 응력장의 지배를 받아 발생하는 링크랙/콘크랙(ring crack/cone crack) 과, 소성적 변형에 따른 잔류응력 등에 기인하는 메디안크랙(median crack), 래터럴크랙(lateral crack) 및 레디얼크랙(radial crack)을 들 수가 있다.<sup>(7)</sup> 특히, 세라믹 재료는 정적 및 동적 하중 부하시 변형이 거의 일어나지 않아서, 탄성적 거동에 의한 파괴가 지배적이다. 따라서 취성판재에 구형물체의 저속충격시, 최대 인장응력의 발생 경로의 영향을 받는 축대칭 형상인 콘크랙의 파괴기구가 주요 관심의 대상이 된다.<sup>(5,8)</sup> 이 경우, 충격속도에 따른 콘크랙의 형상 거동을 파악하는 것이 취성재료의 적층 구조에 대한 FOD 문제를 해결하고, 손상에 기인하는 잔류장도의 평가, 취성판재의 고속 펀칭가공 기술 개발을 위해 필요하다.

그동안 콘크랙의 형상거동에 관한 연구로는, 미끄럼하중하의 콘크랙의 기울어짐(tilting)과 발생 경로에 관한 연구가 진행되어, 접선방향 응력성분의 부가가 콘크랙이 표면과 이루는 각도에 영향을 미쳐서 입사방향이 보다 경사진 콘크랙을 형성한다는 것을 알았다.<sup>(9)</sup> 한편 콘크랙의 경로가 최소주응력의 경로를 따른다고 가정하고 정적인 경우의 콘크랙 형상에 대한 수치해석이 행해졌으나, 실험결과와 콘크랙 각도에 있어서 차이를 나타내었다.<sup>(10,11)</sup> 최근 파괴역학적 해석 결과로 그 차이를 설명하려고 하는 연구가 수행되었다.<sup>(8)</sup> 그러나 충격하중하에서 콘크랙 형상 거동에 관한 보고<sup>(12)</sup>는 많지 않아, 수치해석을 위한 토대를 마련하기 위해서는 이에 대한 실험적 연구결과가 필요하다. 따라서, 구형입자 충격시 취성재료판에 발생하는 콘크랙의 파괴기구를 포함한 손상거동의 파악과 더불어, 충격속도에 따른 콘형상의 거동에 관한 실험적 연구는 중요하다.

본 연구에서는, 입자 충격시 발생하는 콘크랙 형상의 거동을 파악하기 위하여, 탄성변형이 지배적인 단상 탄화규소(SiC) 세라믹에 대하여, 충격속도에 따른 손상과 콘크랙 형상의 변화를 조사하였다. 충격입자의 재질과 크기에 따른 영향을 검토하였고, 보고된 자료<sup>(12)</sup>와 비교하였다.

## 2. 콘크랙의 발생기구

### 2.1 입자충격시 준정적 접촉인자

입자의 충격속도가 시험편내 응력파의 전파속도에 비해 매우 작을 때는 준정적 및 탄성접촉으로 가정하여, 충격입자와 시험편의 상호접촉에 의해 발생하는 인자들을 헤르츠의 접촉이론 해로부터 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(13,14)</sup> 이때 충격입자의 운동에너지는 최대 압입시간에서의 입자의 변형에너지와 같다는 관계식으로부터 시험편에 가해지는 최대 동적하중,  $P_{max}$ 를 구할 수 있다.

$$P_{max} = 3.03k^{-0.4} \rho_1^{0.6} R^2 v^{1.2} \quad (1)$$

$$k = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2 \quad (2)$$

$$a = (1.25\pi k \rho_1 v^2)^{0.2} R \left( 0.995 \sin\left(\frac{\pi t}{D}\right) \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$q = \frac{3}{2} \left( \frac{P_{max}}{\pi a^2} \right) \left( 1 - \left( \frac{y}{a} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (4)$$

$$D = 2.94 (1.25 \rho_1 \pi k)^{0.4} \left( \frac{R}{v^{1/5}} \right) \quad (5)$$

여기서,  $R$ 과  $v$ 는 구형입자의 반경과 충격속도,  $a$ 는 충격입자와 시험편간 접촉반경을 나타낸다.  $k$ 는 푸아송비와 탄성계수의 함수로 나타낸 계수이다.  $\nu_1$ 와  $E_1$ 은 충격입자(첨자 1),  $\nu_2$ 와  $E_2$ 는 시험편(첨자 2)의 푸아송비와 탄성계수를 나타낸다.  $y$ 는 반경방향 좌표를 나타낸다. 그리고  $\rho_1$ 은 입자의 밀도,  $q$ 는 접촉부에 작용하는 반경방향으로 압력, 즉  $y$ 위치에서의 면압을 나타낸다.  $D$ 는

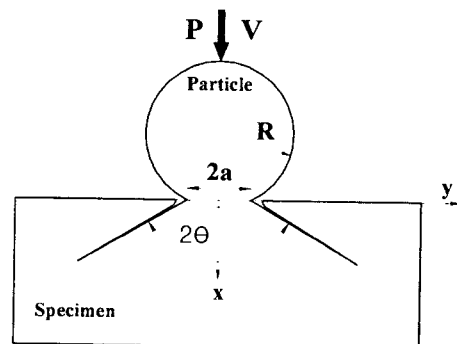


Fig. 1 Schematics of idealized cone crack geometry and zenithal angle( $2\theta$ ) in an infinite half-space during a spherical impact

충격입자와 시험편의 접촉시간을 나타낸다.

## 2.2 헤르츠안 응력장

또한, Fig. 1과 같이 반 무한체의 시험편에서 접촉 면적을 원형으로 가정하면, 직교좌표계로 표시한 시험편내의 응력장은 다음과 같다.<sup>(10)</sup>

$$\frac{\sigma_{xx}}{p_0} = -1.5 \left( \frac{x}{u^{1/2}} \right)^3 \left( \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 x^2} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{yy}}{p_0} = & \left( \frac{1-2\nu}{2} \right) \frac{a^2}{y^2 + x^2} \left[ 1 - \left( \frac{x}{u^{1/2}} \right)^3 \right] \\ & + 1.5 \left( \frac{x}{u^{1/2}} \right)^3 \left( \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 x^2} \right) \\ & + 1.5 \left( \frac{x}{u^{1/2}} \right) \left[ (1-\nu) \left( \frac{u}{a^2 + u} \right) \right. \\ & \left. + (1+\nu) \left( \frac{u^{1/2}}{a} \right) \arctan \left( \frac{a}{u^{1/2}} \right) - 2 \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\tau_{xy}}{p_0} = -1.5 \left( \frac{yx^2}{u^2 + a^2 x^2} \right) \left( \frac{a^2 u^{1/2}}{a^2 + u} \right) \quad (8)$$

여기서,  $p_0 = P/\pi a^2$ 는 평균 접촉압력이고,

$u = \frac{1}{2} \{ [(y^2 + x^2 - a^2) + [(y^2 + x^2 - a^2)^2 + 4a^2 x^2]^{1/2}] \}$  이다.

여기서 입자 충격시의 시험편 표면에서 링크랙의 발생과 관련이 있는 반경방향 주응력,  $\sigma_{yy}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(13)</sup>

$$\sigma_{yy} = \frac{2(1-2\nu)}{3\pi} \left( \frac{5\pi\rho v^2}{4k^2} \right) \left( \frac{a}{y} \right)^2 \quad (9)$$

또한, 시험편 내부에 발생하는 주응력은 다음 식과 같다.

$$\sigma_{1,3} = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \pm \left\{ \left[ \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \right]^2 + \tau_{xy}^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \sigma_\theta \quad (11)$$

시험편 표면에서는  $\sigma_2$ 는 후프 응력(hoop stress)이며,  $\sigma_1$ 과 크기는 같고 방향이 반대이다.  $\sigma_3$ 는 최소주응력을 나타낸다. 또한 최대주전단응력은 다음 식과 같다.

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (12)$$

또한, 시험편 내부에 발생하는 콘크랙의 근사 경로는 최대주응력,  $\sigma_1$ 방향에 수직인, 최소주응력,  $\sigma_3$ 의 궤적방향을 따른다. 따라서, Fig. 1에 나타난  $2\theta$ 는 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$\tan(2\theta) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (13)$$

## 3. 실험방법

### 3.1 시험편 및 입자

시험편은 a-SiC 분말에 보론(B)과 탄소(C)를 소결제로 첨가시켜 2100℃ 상압에서 소결해 2% 이하의 기공율을 갖는 시판의 탄화규소(SiC)를 사용하였다. 시험편의 크기는 10x50x4mm이며, 10x50mm의 양면을 래핑 연마하여 표면거칠기,  $R_a$  0.8 이하로 가공하였다. 그리고 충격시험에는 직경이 1.2mm와 2.0mm인 탄화규소(SiC) 구와 볼베어링용 강구를 사용하였다. 이하 각각 SiC 입자와 Steel 입자로 불렀다. Table 1에는 이들 시험편 및 입자의 기계적 성질을 각각 나타내고 있다.

### 3.2 충격시험

입자의 충격시험은 Fig. 2에 보인바와 같이 소형 에어건을 사용하여 실온에서 시험편에 대하여 직각으로 수행하였다. 먼저 시험편을 뒷판에 설치한 후, 입자를 플라스틱 캐리어 내부에 실어서

Table 1 Mechanical properties of specimen and particle

Material		Density ( $g/cm^3$ )	Poisson's ratio	Young's modulus (GPa)	Hardness Hv (GPa)	Bending strength (MPa)	Fracture toughness ( $MPa\sqrt{m}$ )
Specimen	SiC	3.10	0.15	418	27.4	460	3.1
	Steel	7.85	0.29	210	8.0	-	-
Particle	SiC	3.13	0.14	402	25.5	450	4.5
	Steel	7.85	0.29	210	8.0	-	-

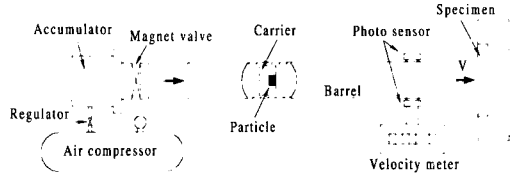


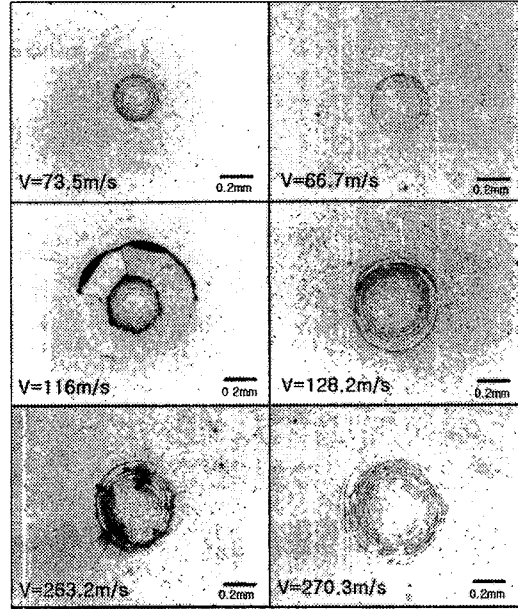
Fig. 2 Schematic illustration of experimental apparatus

배럴의 안쪽에 위치시킨다. 공기 압축기를 사용하여 어큐뮬레이터에 일정한 압력을 유지한 후, 어큐뮬레이터의 출구에 부착한 솔레노이드 밸브를 개방하여 순간적으로 방출된 압축공기가 배럴 내에 위치한 캐리어를 가속시켜 소정의 충격속도를 얻을 수 있었다. 캐리어가 배럴 속을 비행한 후 선단의 스톱퍼에 의해 정지할 때의 관성으로 충격입자만이 시험편에 충격을 가하게 된다. 이때 충격속도는 배럴 선단에 100mm 간격으로 위치한 2개의 광다이오드 사이의 비행 시간을 측정하여 계산하였다. 충격실험후, 표면에서의 손상을 광학현미경과 SEM을 사용하여 관찰하였다. 또한, 시험편 내부에 형성된 콘크랙의 형상을 관찰하기 위하여, 입자충격후 4점굽힘하중에 의해 파단시킨 후 충격속도가 높은 경우는 콘크랙의 중심을 지나서 파단면이 형성되어 그 상태에서 측정하였고, 충격속도가 낮은 경우는 콘크의 단을 지나가는 경우가 많아서, 중앙부까지 연마한 후 콘크랙의 정점각도를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 표면손상 거동

Fig. 3은 직경이 1.2mm인 입자 충격시 시험편 표면에 발생한 손상의 충격속도에 따른 양상을 나타낸다. 충격속도가 증가하면서 입자 재질에 따라 시험편 표면에 발생하는 손상은 차이를 보이고 있다. Fig. 3(a)의 SiC 입자 충격의 경우, 충격속도가 낮은 영역에서는 링크랙(ring crack)이 발생한 후, 충격속도가 약 100m/s를 넘으면 링크랙 주위에 반경 방향의 레디얼크랙 또는 레터럴크랙 등 부가적인 형태의 크랙이 발생하였다.<sup>(14)</sup> 충격속도가 더욱 증가하면 발생하는 레디얼크랙의 수 및 크기는 증가하였다. 그러나 Fig. 3(b)의 Steel 입자 충격의 경우, SiC 입자 충격시와는 달리, 충격속도가 증가하여도 표면에는 링크랙의 증대 이외 다른 형태의 크랙은 발생하지 않았다.

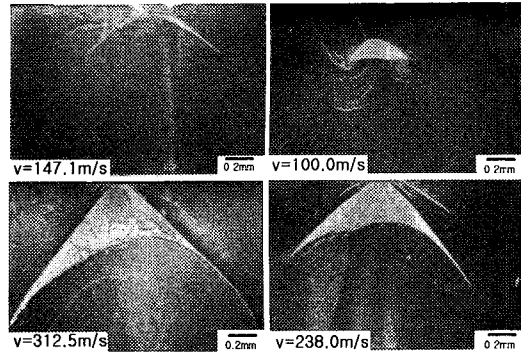


(a) SiC particle (b) Steel particle

Fig. 3 Morphologies of surface damage induced in SiC by particle impacts at respective impact velocity. Ref. (15)

이것은 Steel 입자의 경도가 시험편보다 낮아 (Table 1 참조), 시험편 충격부는 탄성적 변형을 나타내었기 때문이다. 또한, 비슷한 충격속도에서 링크랙의 크기는 Steel 입자의 경우가 SiC 입자보다 크게 나타났다. 이것은 충격시 Steel 입자의 소성변형에 따른 접촉 면적의 증대에 기인하였다.

충격속도가 증가하여 시험편에 가해지는 하중이 커지면, 시험편 내부에 콘크랙이 수직방향으로 발생하여 바깥쪽으로 향해 성장하였다. 콘크랙은 다중으로 발생하였고, 이때 콘크랙 면상에서 미끄럼 마찰에 의해 콘크랙의 바깥쪽 부분은 위로 상승하여 이것이 누적되어 입자 충격부에는 크레이트(crater)를 형성하게 되고, 충격점에서 변형거동을 나타내게 된다.<sup>(11)</sup> 따라서 시험편 타겟에 비하여 상대적으로 입자 경도가 낮은 Steel 입자 충격의 경우는, 충격부에 형성된 크레이트의 저면은 원래 표면과 동일하여 탄성적 변형을 나타내었다. 이에 반하여, SiC입자의 고속 충격의 경우는 크레이트 저면이 시험편 표면보다 다소 침하하는 영구(소성)변형을 나타내었다.<sup>(15,16)</sup> 이러한 영구변형은 접촉부 주위의 반경방향 응력을 완화



(a) SiC particle (b) Steel particle

**Fig. 4** Morphologies of cone cracks developed in target interior in the case of spherical impact at fracture surface. Ref. (15)

시키는 대신 원주방향 인장 응력 성분을 크게 하여 링크랙 주위에 레디얼크랙을 발생시켰다. 즉 충격입자와 시험편간 상대 경도 차가 충격부에서 손상 거동에 큰 영향을 미쳤다는 것을 알 수 있다. 구조용 세라믹 중 특히 SiC는 경도가 높고 푸아송비가 작은 관계로, SiC 입자 충격시에도 충격점에서 영구변형량은 매우 작은 값을 나타내었고, 이에 따라 레디얼크랙의 발생 규모 또한 질화규소( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )나 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )의 경우보다 작았다.

한편 입자 직경이 2.0mm의 경우도 충격속도의 증가에 따른 손상 거동은 입자 직경이 1.2mm의 경우와 유사하였다. 다만 각 균열의 발생 임계속도가 링크랙의 경우는 8m/s까지, SiC 입자 충격시의 레디얼크랙은 80m/s까지 저하하였다.

#### 4.2 내부손상 거동

충격속도가 증가함에 따라 충격부 표면에 발생한 링크랙은 시험편 내부로 콘크랙으로 발달하였다. Fig. 4는 입자충격후 파단면상 콘크랙의 형태를 나타내고 있다. 시험편 표면에 형성된 다수의 링크랙 중 최내측 링크랙에서 가장 현저한 콘크랙이 깊이방향으로 발생하였고, 그 주위에 다중으로 콘크랙이 발생해 있음을 알 수 있다. 이것은 준정적 상태의 헤르츠안 콘파괴의 특성과 유사하였다.<sup>(15)</sup> 한편, 입자 크기가 증대하여도 콘크랙의 형태에는 별 변화 없이, 단지 손상발생 임계속도의 저하를 가져왔다. 그러나 큰 충격속도에서는 Fig. 5와 같이 시험편 뒷면에 원주형으로



**Fig. 5** Percussion cone formation (Steel particle,  $d=2.0\text{mm}$ ,  $v=102.3\text{m/s}$ )

이탈하는 퍼커션콘(percussion cone)<sup>(17)</sup>이 형성되었다. 이 퍼커션콘의 발생 임계속도는 충격입자의 크기가 커지면 급격히 저하하였다.<sup>(16)</sup> 퍼커션콘의 형성은 시험편의 두께와 강도에 따른 동적응답 특성의 영향을 받는 파괴 현상이다. 취성재료판의 적층구조에서는 손상중 퍼커션콘의 발생이 큰 비중을 차지하리라 예상된다.<sup>(5)</sup> 이를 파악하기 위해서는 단상재에서 시험편 두께를 고려한 검토가 향후 필요하다.

#### 4.3 콘크랙 형성의 거동

Fig. 6은 단면에서 관찰한 콘크랙의 정점각도( $2\theta$ )의 충격속도에 따른 변화를 나타내고 있다. 콘크랙의 정점각도는 다소 분산을 나타내지만, 전체적으로 충격속도가 증가함에 따라 단순 감소하는 거동을 나타내었다. 이것은 입자의 충격속도가 클수록 예리한 콘형상의 크랙이 시험편 내부에 형성되었다는 것을 의미한다. 또한 동일한 충격속도에서는 입자의 크기와 밀도가 클수록 정점각도가 작은 콘크랙이 형성되었다. 동일한 입자 재질에 대하여는 입자 직경에 따라서 다소 테이터의 분산이 있지만, 거의 유사한 콘 각도의 속도에 따른 저하 거동을 나타내었다.

입자 직경이 동일한 경우, 입자 재질에 따라 차를 나타내, Steel 입자충격이 SiC 입자충격보다 작은 각도의 콘크랙을 가져왔다. 직경 1.2mm의 경우는  $v=150\text{m/s}$ 를, 직경 2.0mm의 경우는 약  $60\text{m/s}$ 를 넘으면서 차를 나타내었다. 이것은 Steel 입자가 SiC 입자보다 밀도가 약 2.5배 정도 크기 때문에 운동에너지가 더 큰 동적하중을 작용시키면서, 이에 따라 시험편 내부에 걸리는 깊이방향의 압축응력이 전단응력 성분에 비해 상대적으로 크게 되었기 때문으로 생각된다.

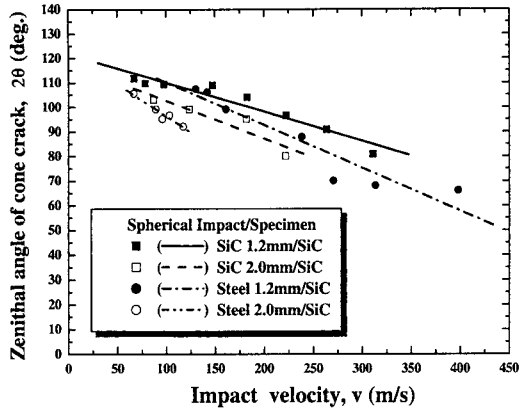


Fig. 6 Behavior of the zenithal angle of cone crack with impact velocity

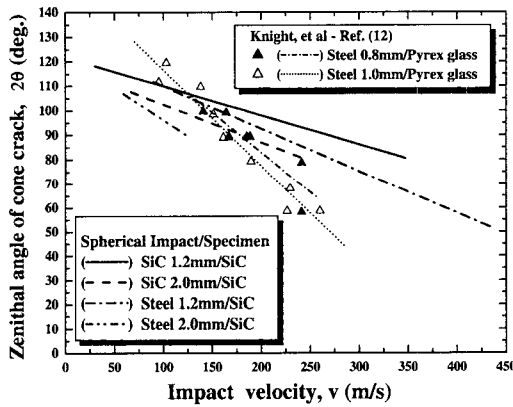


Fig. 7 Comparison of the cone crack behavior in Pyrex glass to that in SiC

준정적 상태(입자충격의 경우는 링크랙 발생 개시속도에 해당)에서 콘크랙의 정점각도는 충격 입자의 재질 및 크기에 관계없이 약 120° 에 근접함을 알 수 있다. 이 준정적 상태에서의 각도를 사용하여, 입자 충격속도에 따른 콘크랙의 정점각도( $2\theta$ )의 변화를 선형적으로 근사하여 입자의 재질 및 크기를 고려한 실험식을 유도하였다.

$$\theta = \theta_{st} - v_p \frac{(90 - \theta_{st})}{500} R^{0.3} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2} \quad (14)$$

여기서  $R$ ,  $v_p$ 는 각각 입자의 반경(mm), 충격속도(m/sec)를 나타내고,  $2\theta_{st}$ 는 준정적 상태의 콘

크랙의 정점각도(deg.)로 여기서는  $2\theta_{st}=120^\circ$  에 해당한다. 첨자 1, 2는 각각 입자 및 시험편을 나타낸다.

한편 Pyrex glass에 강구충격시 발생하는 콘크랙의 형상에 대한 Knight<sup>(12)</sup> 등의 결과를 Fig. 7에 나타내어 본 연구에서 얻어진 결과와 비교 검토하였다. 두께,  $t=10\text{mm}$ 의 Pyrex 유리에 직경이 0.8mm와 1mm인 강구충격의 경우도 충격속도가 증가함에 따라서 콘크랙의 정점각도는 단순 감소하는 거동을 나타내었다. 또한 입자 크기가 큰 경우가 작은 경우보다 작은 정점각도를 나타내, 앞에서 SiC에 대하여 얻어진 결과와 같은 거동을 나타내었다. Pyrex 유리에 대한  $2\theta_{st}=124^\circ$  를 사용하여, 식 (14)로부터 콘크랙의 정점각도와 충격속도사이의 관계를 다음의 실험식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta = 62 - 0.11 R^{0.3} v_p \quad (15)$$

다만, Pyrex 유리에 대해 얻어진 정점각도의 입자 충격속도에 따른 감소율이 SiC 시험편에서보다 훨씬 현저하였다. 특히 같은 강구충격이면서 입자 크기가 작음에도 불구하고 SiC보다 큰 감소율을 나타낸 것은 Pyrex 유리의 푸아송비가 SiC보다 큰 값을 나타내기 때문으로 생각된다.

위에 제시한 실험식은, 충격입자의 재질과 크기에 무관하게 입자충격속도에 따른 콘크랙의 정점각도 변화를 잘 나타내고 있다. 이들 실험식은 소정의 충격속도에서 발생한 콘크랙 선단에서 응력확대계수의 추정에 중요한 형상관련 정보를 제공한다. 또한, 준정적 상태의 콘크랙 형성에 관련된 이론해와 본 연구의 실험식을 접목시킨다면, 동적 콘크랙의 거동을 파악할 수 있다. 따라서 이것은 입자충격손상에 따른 부재 잔류강도의 수치해석을 가능케 하여, 세라믹과 같은 취성재료 부재의 손상허용설계에 크게 기여하리라 기대된다.

### 5. 결론

탄화규소에 대한 구형입자 충격시 충격속도에 따른 손상 및 콘크랙의 정점각도의 변화 거동을 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 입자충격시 탄화규소 세라믹에 발생한 손상은 입자의 충격속도와 재질에 의존하였다. 한편 입자 크기의 영향은 균열발생 임계속도의 저하를 가져왔고, 손상 형태의 차이는 없었다. 입자 크기가 큰 경우, 충격속도가 임계치를 넘으면 퍼커션 콘이 시험편의 뒷면에서 발생하였다.

(2) 시험편 내부에 형성된 콘크랙의 정점각도는 입자의 충격속도가 증가함에 따라 감소하였다. 동일한 충격속도에서는 입자의 밀도와 크기가 클수록, 시험편 내부에는 정점각이 작은 예리한 콘크랙이 형성되었다. 동일한 입자 재질에서는 입자 크기에 무관하게 거의 같은 정도로 콘크랙 정점각도의 저하 거동을 나타내었다.

(3) 입자 충격속도에 따른 콘크랙의 정점각도에 관해 얻어진 실험식은, 세라믹 부재의 충격후 잔류강도 수치계산에 큰 도움이 되리라 예상된다.

## 후 기

본 연구는 2000년도 한국학술진흥재단의 신진연구인력 연구장려금의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Maekawa, I., Shin, H. S. and Miyata, H., 1991, "Damage Induced in SiC by a Partial Impact," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 40, pp. 879~886.
- (2) Shockey, D. A., Erlich, D. C. and K. C., 1990, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, pp. 1613~1619.
- (3) Akimune, Y., 1989, "Spherical-Impact Damage and Strength Degradation in Silicon Nitride," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 27, pp. 1422~1428.
- (4) Bennison S. J., Jagota A. and Smith C. A., 1999, "Fracture of Glass/ Poly(vinyl butyral)(Butacite®) Laminates in Biaxial Flexure," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, No. 7, pp. 1761~1770.
- (5) Flocker F. W. and Dharani L. R., 1997, "Modelling Fracture in Laminated Architectural Glass Subject to Low Velocity Impact," *J. Mater. Sci.*, Vol. 32, pp. 2587~2594.
- (6) 신형섭, 김진환, 오상엽, 2001, "취성재료의 편차가공을 위한 충격장치 개발 및 편칭기구 해석," 대한기계학회논문집(A), Vol. 25, No. 4, pp. 629~636.
- (7) Cook, R. F. and Pharr, George M., 1990, "Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, pp. 787~817.
- (8) Kocer C. and Collins R. E., 1998, "Angle of Hertzian Cone Cracks," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 81, No. 7, pp. 1736~1742.
- (9) Lawn, B. R., Wiederhorn, S. M. and Robert, D. E., 1984, "Effect of Sliding Friction Forces on the Strength of Brittle Materials," *J. Mater. Sci.*, Vol. 19, pp. 2561~2569.
- (10) Chaudhri, M. M., Phillips, M. A., 1990, "Quasi-static Indentation Cracking of Thermally Tempered Soda-lime Glass with Spherical Vickers Indenters," *Phil. Mag. A*, Vol. 62, No. 1, pp. 1~27.
- (11) Lawn, B. R., Wilshaw, T. R., and Hartley, N. E. W., 1974, "A computer Simulation Study of Hertzian Cone Crack Growth," *Int. J. Fracture*, Vol. 10, No. 1, pp. 1~16.
- (12) Knight C. G., Swain M. V., Chaudhri M. M., 1977, "Impact of Small Steel Spheres on Glass Surface," *J. Mater. Sci.*, Vol. 12, pp. 1573~1586.
- (13) Lawn, B. R., 1998, "Indentation of Ceramics with Spheres : A Century after Hertz," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 8, pp. 1977~1994.
- (14) Tasi, T. M., 1971, "Dynamic Contact Stresses Produced by the Impact of an Axisymmetrical Projectile on an Elastic Half-Space," *Int. J. Solid Structure*, Vol. 7, pp. 543~558.
- (15) 신형섭, 1996, "탄화규소에 구형입자의 정적 압입 및 충격시 부하속도의 영향," 대한기계학회 논문집(A), Vol. 20, No. 12, pp. 3847~3855.
- (16) 신형섭, Maekawa, I., 서창민, 1992, "탄화규소세라믹의 충격손상 및 강도저하에 미치는 입자의 재질 및 크기의 영향," 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 10, pp. 1869~1876.
- (17) Suzuki, A, Natsumura, T, Sugiyama, S, Tera-mae, T and Hamada, S, 1990, "Particle Impact Damage in Silicon Carbide," *Trans. Japan Soc. Mech. Eng. (Ser. A)*, Vol. 56, No. 532, pp. 2431~2436.