

세라믹에서 충격속도에 따른 충격손상 및 콘크랙 형상의 변화

오상엽*·신형섭**·서창민***

Variation of Cone Crack Shape and Impact Damage According to Impact Velocity in Ceramic Materials

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

Key Words: Zenithal Angle of Cone Crack(콘크랙의 정점각도), Impact Velocity(충격속도), Particle(입자), Silicon Carbide(탄화규소), Foreign Object Damage(FOD, 외래입자 손상)

Abstract

Effects of particle property variation of cone crack shape according to impact velocity in silicon carbide materials were investigated. The damage induced by spherical impact having different material and size was different according to materials. The size of ring cracks induced on the surface of specimen increased with increase of impact velocity within elastic contact conditions. The impact of steel particle produced larger ring cracks than that of SiC particle. In case of high impact velocity, the impact of SiC particle produced radial cracks by the elastic-plastic deformation at impact regions. Also percussion cone was formed from the back surface of specimen when particle size become large and its impact velocity exceeded a critical value. Increasing impact velocity, zenithal angle of cone cracks in SiC material was linearly decreasing not effect of impact particle size.

An empirical equation, $\theta = \theta_{st} - v_p(180 - \theta_{st})(\rho_p/\rho_s)^{1/2}/415$, was obtained from the test data as a function of quasi-static zenithal angle of cone crack(θ_{st}), the density of impact particle(ρ_p) and specimen(ρ_s). Applying this equation to the another materials, the variation of zenithal angle of cone crack could be predicted from the particle impact velocity.

1. 서 론

취성재료는 파괴인성이 낮아서 미세한 균열의 발생 및 성장에 따른 급격한 파괴를 나타낸다. 또한 높은 경도를 나타내고 있어서 금속재료와는 달리 종래의 가공법에 의한 가공이 어려운 난가공성이 특징이다. 최근 자동차 및 건축물 재료로 많이 사용되는 유리 적층재(soda-lime glass lamin-

ated structure)에 대한 안전성 확보 측면에서 FOD에 대한 연구가 행해져오고 있다.⁽¹⁾ 한편, 세라믹 재료를 열효율 증대 및 에너지 절감 등을 위하여 발전기용 가스터빈 또는 자동차용 엔진 등의 재료로 사용시 발생하는 입자 충격손상에 관한 연구도 수행되어지고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 따라서 취성재료 판에 대한 외래입자 손상(FOD: foreign object damage)은 고성능 세라믹을 포함한 취성재료를 적층구조로 사용하기 전에 반드시 해결되어야 할 중요한 과제이다.⁽¹⁾

일반적으로, 취성재 평면에 구형 입자가 충격하는 동안 발생하는 크랙은 탄성변형하에서 링크랙/콘크랙(ring crack/cone crack)과 소성변형에 기인하는 메디안크랙(median crack), 래터럴크랙(late-

* 회원, 가톨릭상지대학 자동차계열

E-mail : osyeob@unitel.co.kr

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

** 회원, 안동대학교 기계공학부

*** 회원, 경북대학교 기계공학부

ral crack) 및 레이디얼크랙(radial crack)을 들 수 있다. 특히, 세라믹 재료는 정적 및 동적 접촉하중 부하시 소성영역이 거의 형성되지 않아서, 탄성적 거동에 의한 파괴가 지배적이다. 따라서, 비교적 저속충격 조건에서 축대칭이며, 최대 인장응력이 발생하는 경로의 영향을 받는 콘크랙의 파괴기구가 주요 관심의 대상이다. 이 경우, 충격속도에 따른 콘크랙의 형상 거동을 파악하는 것이 취성재료의 적층 구조에 대한 FOD 문제를 해결하고, 손상에 기인하는 잔류강도의 평가, 고속편칭가공 기술을 개발하기 위해서 필요하다. 따라서, 구형입자 충격시 발생하는 콘크랙의 파괴기구를 규명하는 것은 중요하다.

최근에는 압입 파괴역학을 이용한 취성재료의 가공법으로서 레이디얼크랙 발생을 억제하면서 콘크랙의 성장기구를 이용하여 비교적 쉽게 피어싱(piercing)이나 블랭킹(blanking)을 가능케 하는 충격하중을 이용한 편칭가공 기술 개발에 관한 연구도 진행되고 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는, 입자 충격시 발생하는 콘크랙 형상의 거동을 조사하기 위하여, 탄성변형 거동이 지배적인 단상 탄화규소(SiC) 세라믹에 대하여, 구형입자 충격시 발생하는 콘크랙의 형상에 미치는 충격속도의 영향을 조사하였고, 충격입자의 크기와 재질에 따른 영향을 검토하였다.

2. 콘크랙의 발생기구

2.1 준정적 접촉

입자의 충격속도가 시험편내 응력파의 전파속도에 비해 매우 작을 때는 준정적 및 탄성접촉으로 가정하여, 충격입자와 시험편의 상호접촉에 의해 발생하는 여러 가지 인자들을 헤르츠의 접

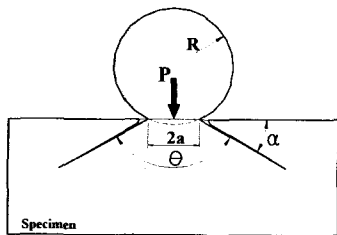


Fig. 1 Schematic of idealized cone crack geometry and zenithal angle(θ) in an infinite half-space during particle impact.

촉 이론해로부터 다음과 같이 구할 수 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

$$x = a^2/R \quad (1)$$

여기서 R 은 구형입자의 반경, a 는 접촉 반경, x 는 시험편과 충격입자 사이의 상호 근접거리를 나타낸다. 또한 충격입자 강구의 운동에너지는 최대 압입시간에서의 변형에너지와 같다면 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi \rho R^3 \right) v^2 = \int_0^{x_{\max}} P(x) dx \quad (2)$$

$$P_{\max} = 3.03k^{-0.4} \rho^{0.6} R^2 v^{1.2} \quad (3)$$

$$k = (1 - v_s^2)/E_s + (1 - v_p^2)/E_p \quad (4)$$

$$q = \frac{3}{2} \left(\frac{P_{\max}}{\pi a^2} \right) \left(1 - \left(\frac{y}{a} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$a = (1.25 \pi k \rho v^2)^{0.2} R \left(0.995 \sin \left(\frac{\pi t}{D_t} \right) \right)^{0.5} \quad (6)$$

$$D_t = 2.94 (1.25 \pi k)^{0.4} \left(\frac{R}{v^{1/5}} \right) \quad (7)$$

여기서 v_s 와 E_s 은 시험편(첨자 s), v_p 와 E_p 은 충격입자(첨자 p)의 푸아송비, 탄성계수를 각각 나타낸다. y 는 링크랙이 발생하는 반경방향의 위치를 나타낸다. 그리고 ρ 는 구형입자의 밀도, v 는 충격속도, q 는 y 위치에서의 면압, P_{\max} 는 시험편에 가해지는 최대 동적하중, D_t 는 충격입자와 시험편의 접촉시간을 나타낸다. 접촉부에는 반구형 압력분포로 나타내며, 시간의 함수로서 접촉반경 a 를 나타낼 수 있다.

또한, 입자 충격시의 시험편 표면에서 링크랙의 발생과 관련이 있는 반경 방향 주응력, σ_{yy} 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.^(7,8)

$$\sigma_{yy} = \frac{2(1-2\nu)}{3\pi} \left(\frac{5\pi\rho v^2}{4k^2} \right) \left(\frac{a}{y} \right)^2 \quad (8)$$

2.2 헤르츠안 응력장

또한, Fig. 1과 같이 반 무한체의 시험편에서 접촉 면적을 원형으로 가정하면, 원통 좌표계 (y, θ, z)의 응력장은 다음과 같다.⁽⁷⁻⁹⁾ p_0 는 평균 접촉압력이다.

$$p_0 = P/\pi a^2 \quad (9)$$

$$u = \frac{1}{2} \{ [(y^2 + z^2 - a^2) + [(y^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2]^{1/2}] \} \quad (10)$$

$$\frac{\tau_{yz}}{p_0} = \frac{3}{2} [yz^2/(u^2 + a^2 z^2)] [a^2 u^{1/2}/(a^2 + u)] \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_y}{p_0} = \frac{1}{2}(1-2\nu)(a/y)^2[1-(z/u^{1/2})^3] + \frac{3}{2}(z/u^{1/2})[(1-\nu)u/(a^2+u) + (1+\nu)(u^{1/2}/a)\arctan(a/u^{1/2})-2] \quad (12)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{p_0} = \frac{1}{2}(1-2\nu)(a/y)^2[1-(z/u^{1/2})^3] + \frac{3}{2}(z/u^{1/2})^3[a^2u/(u^2+a^2z^2)] + \frac{3}{2}(z/u^{1/2})[(1-\nu)u/(a^2+u) + (1+\nu)(u^{1/2}/a)\arctan(a/u^{1/2})+2\nu] \quad (13)$$

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = \frac{3}{2}(z/u^{1/2})^3[a^2u/(u^2+a^2z^2)] \quad (14)$$

또한 주응력은 다음 식과 같다.

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_z) + \left\{ \left[\frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_z) \right]^2 + \tau_{yz}^2 \right\}^{1/2} \quad (15)$$

$$\sigma_2 = \sigma_\theta \quad (16)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_z) - \left\{ \left[\frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_z) \right]^2 + \tau_{yz}^2 \right\}^{1/2} \quad (17)$$

여기서, σ_2 (압축)는 후프 응력(hoop stress)이며, σ_1 (인장)과 크기는 같고 방향이 반대가 된다. σ_3 (압축)는 최소주응력을 나타낸다. 또한 최대주전단응력은 다음과 같다.

$$\tau_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (18)$$

또한, 시험편 내부에 발생하는 콘크랙의 근사 경로는 최대주응력, σ_1 방향에 수직인, 최소주응력, σ_3 방향으로서 Fig. 1에 나타난 θ 로서 다음 식과 같다.

$$\tan(\theta) = \frac{2\tau_{yz}}{\sigma_z - \sigma_y} \quad (19)$$

3. 실험방법

3.1 시험편 및 입자

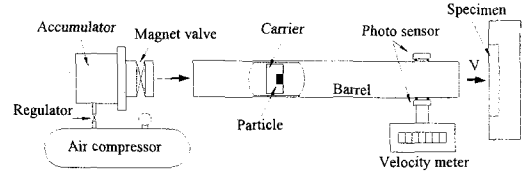


Fig. 2 Schematic illustration of experimental apparatus.

시험편은 α -SiC 분말에 보론(B)과 탄소(C)를 소결제로 첨가시켜 2100°C 상압하에서 소결해 2%이하의 기공율을 갖는 시판의 탄화규소(SiC)를 사용하였다. 시험편의 크기는 10×50×4mm이며, 10×50mm의 양면을 래핑 연마하여 표면거칠기 $R_{max}0.8 \mu m$ 이하로 가공하였다. 그리고 충격시험에는 직경이 1.2mm와 2.0mm인 탄화규소와 볼베어링용 강구를 사용하였다. 본 논문에서는 각각 SiC입자와 Steel입자로 불렀다. Table 1에는 이들 시험편 및 입자의 기계적 성질을 각각 나타내고 있다.

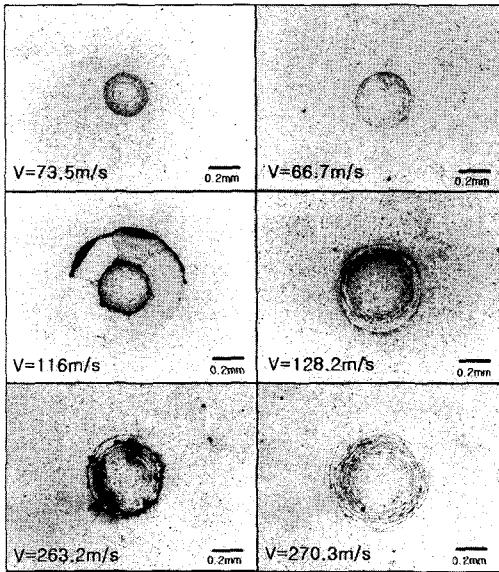
3.2 충격실험

충격시험은 Fig. 2와 같이 소형 에어건을 사용하여 시험편에 대하여 직각으로 실온에서 수행하였다. 먼저 시험편을 뒷판에 설치한 후, 충격입자를 플라스틱 캐리어 내부에 실어서 배럴의 안쪽에 위치시킨다. 공기 압축기로부터 어큐뮬레이터에 일정한 압력을 유지한 후, 어큐뮬레이터의 출구에 부착된 솔레노이드 밸브를 개방하여 순간적으로 방출된 압축공기가 배럴내에 장착한 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 선단에서 100mm 간격으로 위치한 2개의 광다이오드 사이의 비행 시간을 측정하여 계산하였다.

충격실험후, 표면에서의 손상을 광학현미경과 SEM을 사용하여 관찰하였다. 또한 시험편 내부

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√m)
Specimen	SiC	3.10	0.15	418	27.4	460	3.1
Particle	SiC	3.13	0.14	402	25.5	450	4.5
	Steel	7.85	0.29	210	8.0	-	-



(a) SiC particle (b) Steel particle

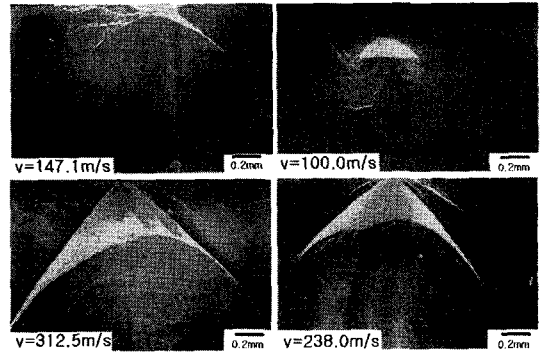
Fig. 3 Morphology of surface damage induced in SiC by particle impact at each impact velocity.

에 형성된 콘크랙의 형상을 관찰하기 위하여, 콘크랙의 중심을 지나는 깊이 방향으로 절단하여 콘크랙의 정점각도를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 입자충격시 표면 손상거동

Fig. 3은 입자의 직경이 1.2mm인 구형 입자충격시 충격속도에 따른 시험편 표면에 발생한 손상의 변화를 나타낸다. 충격속도가 증가하면서 입자 재질에 따라 시험편 표면에 발생하는 손상양상은 차이를 보이고 있다.⁽¹⁰⁾ Fig. 3(a)의 SiC입자 충격의 경우, 충격속도가 낮은 영역에서는 링크크랙(ring crack)이 먼저 발생하였고, 충격속도가 약100m/s를 넘으면 링크크랙 주위에 반경 방향의 레이디얼크랙 또는 래터럴크랙 등 부가적인 형태의 크랙이 발생하였다.⁽¹¹⁾ 또한 충격속도가 증가하면 레이디얼크랙의 수 및 크기는 증가하였다. 그러나 Fig. 3(b)의 Steel입자 충격의 경우, SiC입자 충격시와는 달리, 충격속도가 증가하여도 표면에는 링크크랙의 증대 이외에는 다른 형태의 크랙이 발생하지 않았다. 이것은 입자 충격시 입자 재질(경도)에 따른 시험편 충격부에서 변형거동의



(a) SiC particle (b) Steel particle

Fig. 4 Morphologies of cone cracks developed in target interior in the case of particle impact at fracture surface.



Fig. 5 Percussion cone formation.
(Steel particle, d=2.0mm, v=102.3m/s)

차이로 생각되어진다.⁽¹¹⁾ 즉 시험편 내부에 콘크랙이 발생할 경우, 크랙면상에서 미끄럼에 의해 입자 충격부에 크레이트(crater)를 형성하고, 충격입자의 경도가 타겟에 비하여 상대적으로 낮은 Steel입자 충격의 경우, 충격부에 형성된 크레이트 저면이 원래 표면과 동일하게 나타나 거의 탄성적인 변형을 나타내었다.^(10,11) 그러나 경도가 시험편과 동일한 SiC입자 충격의 경우, 크레이트 저면이 원래 표면보다 침하하는 영구(소성)변형을 나타내었다.⁽¹⁰⁾ SiC입자 고속충격시 충격부에 발생한 영구변형은 접촉부 주위의 반경 방향 응력을 완화시키는 대신 원주방향 인장 응력을 크게 하여 링크크랙 주위에 레이디얼크랙을 발생시켰다. 이러한 손상 거동의 차이는 충격입자와 시험편간 상대 경도가 큰 영향을 미쳤다고 생각된다. 한편, 입자의 직경이 2.0mm의 경우도 충격속도의 증가에 따른 손상 거동은 직경이 1.2mm의 경우와 유사하였고, 다만 균열 발생 임계속도가 저하하였다.

4.2 콘크랙의 거동

충격속도가 증가함에 따라 충격부 표면에 발생한 링크랙은 콘크랙으로 시험편 내부로 발달하였다.^(11,12) Fig. 4는 입자충격후 파단면에 나타난 콘크랙 형태를 나타내고 있다. 콘크랙은 충격표면의 수직 깊이 방향으로 Fig. 3에서와 같이 형성된 다수의 링크랙중 최내측 링크랙 하부에서 가장 현저한 콘크랙이 발생되었다. 이것은 준정적상태의 헤르츠안 콘파괴의 특성과 유사하였다.⁽¹⁰⁾

한편, 입자 크기의 증대에 따른 콘크랙의 형태에 있어서 뚜렷한 변화는 없고 단지 충격입자의 크기가 큰 경우, 낮은 손상발생 임계속도를 나타내었고, 충격속도가 큰 경우, Fig. 5와 같이 시험편 뒷면에 원추형으로 이달하는 퍼커션콘(percussion cone)이 형성되었다. 이 퍼커션콘의 발생 임계속도는 충격입자의 크기가 커지면 급격히 저하하였다.⁽¹¹⁾ 퍼커션콘의 형성은 시험편의 두께와 강도에 따른 동적응답 특성의 영향을 받는 파괴현상이다. 향후 취성재료의 적층판에 얇은 두께의 판재를 사용하는 경우에 손상거동중에 퍼커션콘의 발생이 예상되고, 이를 파악하기 위해서는 단상재에서 시험편의 두께를 고려한 검토가 필요하다.

4.3 콘크랙의 정점각도의 변화 거동

Fig. 6은 콘크랙의 단면을 관찰하여 측정된 콘크랙의 정점각도(θ)의 충격속도에 따른 변화를 나타내었다. 콘크랙의 정점각도는 다소의 분산을 나타내지만, 충격입자의 종류 및 크기에 관계없이 충격속도가 증가하면 전체적으로 거의 선형적으로 감소하였다. 동일한 충격속도에서는 입자크기가 클수록, 입자의 밀도가 클수록 콘크랙의 정점각도(즉 열림각도)가 작은 값을 나타내, 예리한형상의 콘크랙이 시험편의 내부에 형성되었다는 것을 알 수 있다. 입자 재질에 따른 차이는 직경 1.2mm의 경우는 $v=150\text{m/s}$ 를, 직경 2.0mm의 경우는 약 60m/s 를 넘으면서 나타났고, 이후 기울기는 Fig. 6의 표에 제시한 대로 2.0mm 강구의 경우가 가장 큰 값을 나타내었다. 충격속도에 따라 동일한 재질에 대하여는 입자 크기에 무관하게 거의 유사한 저하 정도를 나타내었다.

입자직경이 동일한 경우, SiC입자 충격시보다는 Steel입자 충격에 의한 콘크랙 정점각도 변화

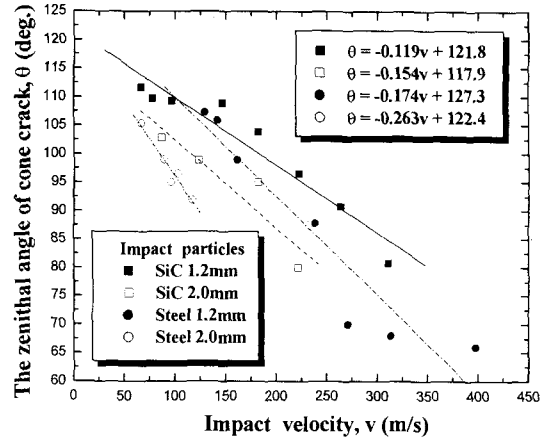


Fig. 6 Behaviour of the zenithal angle of cone crack with impact velocity.

율이 더 크게 나타났다. 이 현상은 Steel 입자가 SiC입자보다 밀도가 약 2.5배 정도 큼에 따른 충격 운동에너지가 더 크게 작용하였기 때문으로 생각된다.

준정적 상태(충격속도가 0인 경우)에서의 콘크랙의 정점각도는 충격입자의 재질 및 크기에 관계없이 약 123° 에 근접함을 알 수 있다. 실험 데이터를 사용하여 충격속도에 따른 콘크랙의 정점각도(θ) 변화를 1차 regression에 의해 입자 재질의 영향을 고려한 경험식을 유도하였다.

$$\theta = \theta_{st} - \frac{v_p(180 - \theta_{st})}{415} \left(\frac{\rho_p}{\rho_s} \right)^{1/2} \quad (20)$$

여기서 v_p 는 입자의 충격속도(m/sec), θ_{st} 는 준정적상태의 콘크랙의 정점각도(deg.), 여기서는 $\theta_{st}=123^\circ$ 에 해당한다. ρ_p 와 ρ_s 는 각각 충격입자 및 시험편의 밀도를 나타낸다. 식 (20)에서는 입자 사이즈의 영향은 고려하지 않았다.

식 (20)을 Pyrex glass 판재에 Steel입자가 충격하는 경우인 Knight^(13,14) 등의 실험 데이터에 적용해 보면, 콘크랙의 정점각도와 충격속도 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\theta = 124 - 0.218 v_p \quad (21)$$

이때 충격속도가 35.8m/s 인 경우 콘크랙의 정점각도가 116° 로 추정할 수 있었고 이 추정치는

실험 데이터와 잘 일치하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 경험식은, 충격입자 및 시험편의 재질에 무관하게 콘크랙의 정점각도 변화를 예측할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 식 (20)은 입의 재질의 구형 충격입자와 취성재료 시험편에 대하여 충격속도에 대한 콘크랙의 정점각도 변화 거동을 예측할 수 있는 일반식으로 사용할 수 있을 것이다.

5. 결론

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

(1) 탄화규소 세라믹에 입자충격시 발생하는 손상은 충격 입자 재질에 따라 달랐다. 시험편 표면에 발생한 콘크랙의 크기는 입자 충격속도가 증가함에 따라 Steel입자가 SiC입자보다 큰 콘크랙을 발생시켰다. 또한 SiC입자의 고속충격인 경우에는 Steel입자와는 달리 충격점의 소성변형에 기인한 레이디얼크랙이 발생하였다.

(2) 손상의 형태는 입자 재질에 따라 다르게 나타났고, 특히 입자 크기가 큰 경우에는 충격속도가 임계치를 넘으면 퍼져선공이 발생하였다.

(3) 입자 충격속도가 증가함에 따라 탄화규소 판재에 형성된 콘크랙의 정점각도는 선형적으로 감소하였다. 콘크랙의 열림각은 준정적 상태의 정점각도와 충격입자 및 시험편의 밀도를 고려한 경험식으로 나타낼 수 있었다.

참고문헌

- (1) Bennison Stephen J., Jagota Anand, and Smith Anthony, 1999, "Fracture of Glass/ Poly(vinyl butyral)(Butacite®) Laminates in Biaxial Flexure," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, No. 7, pp. 1761~1770.
- (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) 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.
- (5) Evans, A. G. and Wilshaw, T. R., 1976, "Quasi-Static Solid Partial Damage in Brittle Solids 1. Observations, Analyses and Implications," *Acta Metall.*, Vol. 24, pp. 939~956.
- (6) 신형섭, 김진한, 오상엽, 2001, "취성재료의 편칭가공을 위한 충격장치 개발 및 편칭기구 해석," 대한기계학회논문집(A), Vol. 25, No. 4, pp. 629~636.
- (7) R. F. Cook, George M. Pharr, 1990, "Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, pp. 787~817.
- (8) B. R. Lawn, 1998, "Indentation of Ceramics with Spheres : A Century after Hertz," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 8, pp. 1977~1994.
- (9) 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.
- (10) 신형섭, 1996, "탄화규소에 구형입자의 정적 압입 및 충격시 부하속도의 영향," 대한기계학회논문집(A), Vol. 20, No. 12, pp. 3847~3855.
- (11) 申亨燮, 前川一郎, 徐昌敏, 1992, "탄화규소 세라믹의 충격손상 및 강도저하에 미치는 입자의 재질 및 크기의 영향," 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 10, pp. 1869~1876.
- (12) Kocer C. and Collins R. E., 1998, "Angle of Hertzian Cone Cracks," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 81, No. 7, pp. 1736~1742.
- (13) Knight C. G., Swain M. V., Chaudhri M. M., 1977, "Impact of small steel spheres on glass surface," *J. of Materials Science*, Vol. 12, pp. 1573~1586.
- (14) Flocker F. W. and Dharani L. R., 1997, "Modelling Fracture in Laminated Architectural Glass Subject to Low Velocity Impact," *J. of Materials Science*, Vol. 32, pp. 2587~2594.