

〈論 文〉

# 탄화규소 세라믹의 충격손상 및 강도저하에 미치는 입자의 재질 및 크기의 영향

申亨燮\* · 前川一郎\*\* · 徐昌敏\*\*\*

(1992년 4월 30일 접수)

## Influences of Particle Property and Its Size on Impact Damage and Strength Degradation in Silicon Carbide Ceramics

H.S. Shin, I. Maekawa and C.M. Suh

**Key Words :** Particle Size(입자크기), Impact Damage(충격손상), Cracks(균열), Strength Degradation(강도저하), Silicon Carbide(탄화규소)

### Abstract

The effect of particle property on FOD(foreign object damage) and strength degradation in structural ceramics especially, silicon carbide was investigated by accelerating a spherical particle having different material and different size. The damage induced showed significant differences in their patterns with increase of impact velocity. Also percussion cone was formed at the back part of specimen when particle size became large and its impact velocity exceeded a critical value. The extent of ring cracks was linearly related to particle size, however the impact of steel particle produced larger ring cracks than that of SiC particle. Increasing impact velocity, the residual strength showed different degradation behaviors according to particle and its size. In the region the impact site represents nearly elastic deformation behavior, the residual strength was dependent upon the depth of cone crack regardless of particle size. However in elastic-plastic deformation region, the radial cracks led to rapid drop in residual strength.

### 1. 서 론

최근, 열효율증대 및 에너지절감을 위하여 고온에서 우수한 특성을 나타내는 구조용 세라믹을 석탄가스화 혼합발전용 가스터빈 또는 자동차용 엔진 등의 재료에 사용하기 위한 연구가 행해지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 그러나, 세라믹은 취성재료인 동시에 파괴인성이 낮기 때문에, 재료의 불균질성 및 기계

가공 등에 기인하는 결함으로부터 균열의 발생성장에 의한 강도 및 재료의 결손이 문제가 된다.

특히 세라믹 가스터빈(CGT : ceramic gas turbine)의 경우, 연소가스에 포함되어 날아오는 이물질의 충돌에 의한 손상(FOD : foreign object damage)은 가스터빈의 靜翼, 動翼 등 세라믹부재에 균열발생의 주요한 원인이 되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 또 발생한 균열은 강도의 저하를 가져옴과 동시에 다수회 충돌시 표면으로부터 재료의 부분적인 탈락을 초래한다.<sup>(3)</sup> 그리하여 강도측면에서 열기관용재료로 세라믹 사용시 신뢰성확보라는 관점에서 FOD에 관한 연구가 질화규소(silicon nitride)를 중심으로 행

\*정회원, 東北大学 工学部

\*\*東北大学 工学部

\*\*\*정회원, 경북대학교 기계공학과

해져 왔다.<sup>(4-6)</sup>

구조용 세라믹의 FOD 문제에는 다수의 인자가 관계하지만, 그중 충돌하는 입자의 영향이 특히 크다. 실제 세라믹 가스터어빈의 경우 충돌이 예상되는 입자크기는 수백  $\mu\text{m}$  정도로, 단발충격에 의한 연구결과를 實機의 안전성 확보에 적용하기 위해서도 입자크기 등의 영향에 관한 연구가 필요하다.

본 연구는, 고온에서 높은 강도특성을 유지하면서 동시에 내마모성이 뛰어나 가스터어빈의 부재로서의 사용이 기대되는 탄화규소(SiC) 세라믹에 대하여, 고체입자의 충격에 의해 생기는 손상에 미치는 입자의 재질 및 크기의 영향을 조사하였다. 또 각 형태의 손상발생 임계치와 강도저하에 미치는 입자크기의 영향에 관해서도 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편 및 입자

시험편은 2100°C, 상압하에서 소결해 2%이하의 기공율을 갖는 탄화규소(silicon carbide, SiC)를 사용하였다. 그 형상은 10×50×4 mm의 각형으로, 10×50 mm면을 래핑연마해 표면조도  $R_{\text{max}} 0.8 \mu\text{m}$  이하로 가공하였다. 한편 충격시험에 사용한 입자는 시험편과의 경도비가 각각 1.0과 0.3인 탄화규소와 볼베어링용강(SUJ2)의 球로서, 본 연구에서는 이들 입자를 각각 SiC입자 및 鋼입자로 구별하였다. 이때 그 직경을 1.2 mm, 2.0 mm 및 3.2 mm로 하여 입자크기의 영향을 조사하였다. Table 1은 이들 시험편과 입자의 기계적성질을 나타내고 있다.

### 2.2 충격시험 및 강도평가

입자의 충격시험은 Fig. 1에 보인 바와 같이 예

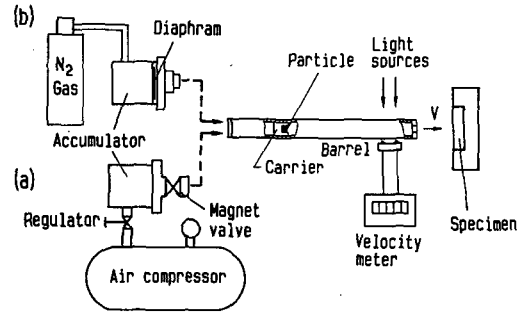


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus

건(air-gun)을 사용하여 시험편에 대하여 직각으로 실온에서 행하였다. 이때 입자의 충격속도가 낮은 경우는 (a)와 같이 압축공기를 솔레노이드밸브로 개방하여,<sup>(6,7)</sup> 또 250 m/s 이상의 경우는 (b)와 같이 어큐레이터 속에 설치한 플라스틱박막을 고압가스로 파열시킴으로써, 입자를 실온 플라스틱 캐리어를 가속해서 각각 얻을 수 있었다. 본 실험에서 입자충격속도의 범위는, 1300°C級 석탄가스화 복합발전용 세라믹 가스터어빈 각단에서의 입구속도를 고려하여,<sup>(2)</sup> 10-400 m/s로 하였다.

한편 충격시험후 잔류강도의 평가는 내측스팬이 10 mm, 외측스팬이 30 mm인 정적 4점굽힘시험에 의하여 부하속도 0.5 mm/min 하에서 행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 손상형태의 관찰

입자충격시 발생하는 손상은 충격속도의 증가와 더불어 그 형태가 변화한다. Fig. 2는 그 대표적인 예로서 입자크기가 1.2 mm인 경우 각 충격속도에

Table 1 Mechanical properties of specimen and particle

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

\*The data of silicon carbide particle were measured for bulk material.

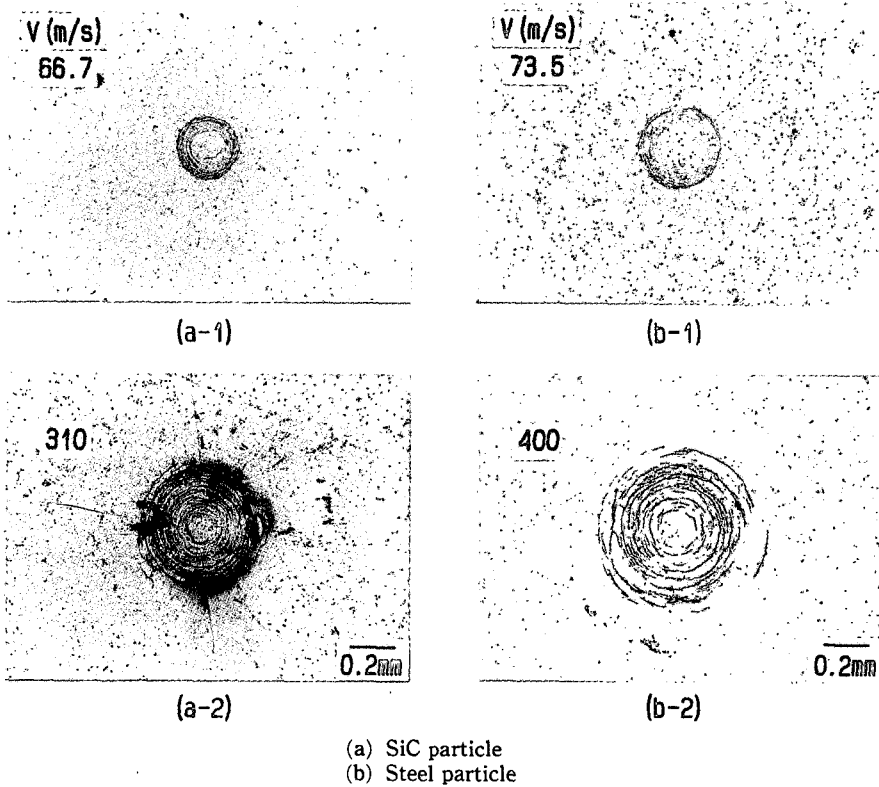


Fig. 2 Morphology of surface damage caused by a 1.2 mm-diameter particle impact

서 생긴 표면손상의 형태를 나타내고 있다. 입자의 충격속도가 손상 발생의 임계치를 넘으면 시험편의 충격점에는 표면에 존재하는 결함으로부터 링크랙(ring crack)이 발생하여, 충격속도의 증가와 더불어 Fig. 2(a-1)와 (b-1)에서 볼 수 있듯이 손상이 주위로 확대되어 갔다. 또 표면상의 링크랙은 시험편내부에 콘크랙(cone crack)으로 발달하였고, 그 중 내측 링크랙에 연결된 콘크랙이 가장 깊게 성장하는 것을 강도평가후의 파단면 관찰로부터 알 수 있었다.

한편 SiC 입자충격의 경우는 입자크기별 임계속도를 넘으면, 입자의 정적압입의 경우<sup>(7)</sup> 또는 Fig. 2(b)의 鋼입자충격의 경우와는 달리, 링크랙의 주위에는 레이디얼크랙(radial crack), 경우에 따라서는 횡크랙(lateral crack) 등 2차적 크랙이 생겨났다. 또한 충격속도가 증가하면 레이디얼크랙의 수 및 크기는 증가하였다. 그러나 鋼입자충격의 경우는 Fig. 2(b-2)와 같이 충격속도의 증가에도 불구하고 링크랙의 확대를 가져올 뿐 레이디얼크랙 등 2차적 크랙은 생기지 않았다. 그것은 충격시 입

자재질에 따른 시험편 충격부의 변형거동의 차에 기인한 것으로 생각되어진다. 즉 시험편 내부에 콘크랙 발생시는 크랙면상에서의 미끄럼에 의해 충격부에 크레이트(crater)를 형성하게 되고,<sup>(6)</sup> 그 형상은 SiC입자충격의 경우는 크레이트底面이 원래 표면보다 침강하여 영구변형을 나타내고 있는 반면, 鋼입자충격의 경우는 크레이트底面이 원래 표면과 동일하여 거의 탄성적변형을 나타내었다.<sup>(7)</sup>

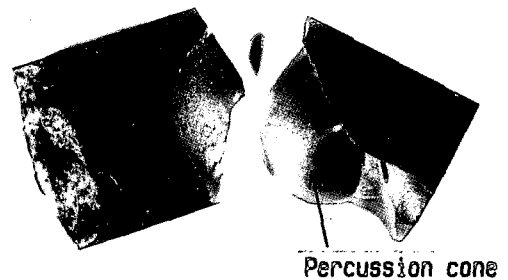


Fig. 3 Percussion cone formation  
(Steel particle,  $d=2.0$  mm,  $V=102.3$  m/s)

Table 2 Critical values for ring crack initiation

Particle		Critical velocity $v_c$ (m/s)	Ring crack Diameter $D_i$ (mm)	Max. contact diameter $2a$ (mm)	Radial stress $\sigma_{rr}$ (GPa)
Size (mm)	Material				
1.2	SiC	10.5	0.140	0.135	3.02
	Steel	15.7	0.178	0.166	2.67
2.0	SiC	9.0	0.183	0.172	2.37
	Steel	11.3	0.240	0.243	2.76
3.2	SiC	6.1	0.227	0.236	2.48
	Steel	7.3	0.315	0.326	2.42

SiC 입자충격의 경우 충격부에 생기는 영구(소성) 변형이 접촉부 주위의 반경 방향응력을 완화시키는 대신 원주방향의 인장응력을 크게 하여<sup>(6)</sup> 링크랙 주위에 반경방향의 레이디얼크랙을 발생시킨 것으로 짐작된다. 이러한 충격부 변형거동의 차에는 특히 입자와 시험편간의 경도비가 크게 영향을 미쳤다고 생각되어진다.

이상의 손상형태에 대하여, 입자크기의 증대에 따른 영향은 그다지 나타나지 않았고, 단지 입자크기가 큰 경우도 충격속도가 임계치를 넘으면 Fig. 3에 보인 바와 같이 시험편의 뒷편에서 원추형으로 이탈하는 퍼커션콘(percussion cone)이 형성되었다. 퍼커션콘의 발생 임계속도는 입자크기가 커지면 급격히 저하하나 그때 입자가 갖는 충격에너지가 일정치 않아서, 퍼커션콘 형성은 시험편의 사이즈(특히 두께)와 강도에 의존하는 동적응답응력(dynamic response stress)의 영향을 받는 파괴현상으로 생각되어진다. 그리하여 세라믹 가스터빈 날과 같이 비교적 얇은 부재에서, 입자충돌에 의한 퍼커션콘 발생거동의 파악을 위해서는 시험편의 두께를 고려한 검토가 필요하다.

3.2 손상의 정량적고찰

(1) 링크랙 발생에 미치는 입자크기의 영향

Table 2는 링크랙 발생시의 임계치들을 각 입자 크기에 대하여 나타낸 것이다. 이때 링크랙 발생은 표면에 분포하는 초기결함의 상태에 의존하므로, 링크랙 발생시의 임계속도  $V_c$ 와 그때의 링크랙 직경  $D_i$ 는 평균한 값을 나타내고 있다. 또 입자와 시험편간 접촉원의 최대직경  $2a$ 와 접촉원주위의 반경방향응력  $\sigma_{rr}$ 는, 구형입자가 평판시험편에 충

격시 작용하는 최대충격하중  $P_{max}$ 을 準靜的 및 탄성조건하의 식(1)로부터 계산해,<sup>(9)</sup> 이것을 Hertz의 접촉이론<sup>(10,11)</sup>에 대입하여 식(2), (3)으로부터 각각 구하였다.

$$P_{max} = 3.03 \kappa^{-\frac{3}{5}} \rho^{\frac{3}{5}} R^2 V^{\frac{6}{5}} \tag{1}$$

$$2a = 2(1.25 \pi \kappa \rho V^2)^{\frac{1}{5}} R \tag{2}$$

$$\sigma_{rr} = \frac{2(1-2\nu)}{3\pi} \left( \frac{5\pi V^2 \rho}{4\kappa^4} \right)^{\frac{1}{5}} \left( \frac{a}{r} \right)^2 \tag{3}$$

$$\kappa = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_p^2)}{E_p}$$

여기서  $\rho$ ,  $R$ 과  $V$ 는 각각 입자의 밀도, 반경 및 충격속도이며,  $r$ 는 반경방향의 좌표를 나타낸다.  $\kappa$ 는 시험편과 입자의 포아송 비  $\nu$  및 횡탄성계수  $E$ 에 의존하며, 이때 첨자  $s$ 와  $p$ 는 각각 시험편과 입자를 나타낸다.

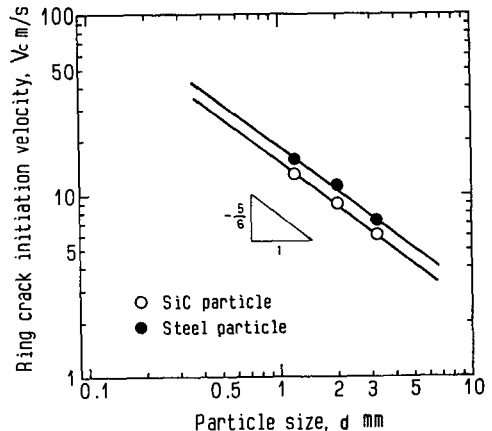


Fig. 4 Relation between critical velocity for ring crack initiation and particle size

각 입자크기에 대하여,  $D_i$ 는  $2a$ 와 거의 일치하여, 링크랙은 식(3)에서  $\sigma_{rr}$ 이 최대가 되는 접촉원 주상에서 발생하는 것을 알 수가 있다. 또 이때 구한 링크랙 발생시의 응력  $\sigma_{rr}$ 은 Table 1에 보인 정적응력에 의한 강도치 또는 인장시험에 의한 강도치<sup>(12)</sup>보다 훨씬 큰 값을 나타내고 있다. 그것은 식(3)에서 구한 응력이 탄성조건하에서 계산된 것으로, 실제로는 구형입자의 밑에 발생하는 소성유동이 응력치를 저하시키게 된다. 또 링크랙 발생시는 굽힘 및 인장상태하에서 균열발생의 경우와는 달리 마찰에 의한 구속도 존재하는 복잡한 응력상태하에서 형성되었다는 것도 원인의 하나로 생각된다.<sup>(4)</sup>

한편  $V_c$ 는 입자의 단발충격에 의한 손상발생 뿐만 아니라 미소입자가 다수회 충돌시 크랙의 상호 작용에 의해 표면으로부터 재료의 탈락을 가져오는 칩핑(chipping) 또는 에로존(erosion)의 발생에도 관계가 있어서,  $V_c$ 에 미치는 입자크기  $d$ 의 영향을 Fig. 4에 나타내었다.  $d$ 가 커짐에 따라  $V_c$ 는 감소하였고, SiC 입자의 경우가 鋼입자보다 낮은 충격속도에서 링크랙을 발생시켰다. 또  $V_c$ 는 입자재질에 관계없이, 거의  $d$ 의  $-5/6$ 승에 비례하는 관계를 나타냈다. 이것을 정적압입의 경우 링크랙발생 임계하중  $P_c$ 와  $d$ 에 관한 Auerbach의 관계식<sup>(13)</sup>으로부터 고찰하면,

$$P_c = AR = Ad/2 \quad (4)$$

여기서  $A$ 는 Auerbach의 상수이다. 식(4)의  $P_c$ 에 식(1)에서 구한 입자충격시의 임계최대하중  $P_{max}$ 을 대입함으로써 입자충격에 의한 링크랙 발생시  $V_c$ 와  $d$ 사이에는 다음의 관계가 얻어진다.

$$V_c = 0.707 A^{5/6} \kappa^{1/2} \rho^{-1/2} d^{-5/6} \quad (5)$$

이로부터 Fig. 4에서 실험적으로 구한  $V_c$ 와  $d$ 사이의 관계는, 준정적조건하에서 구한 식(5)와 거의 일치하는 것을 알 수 있고, 특히 입자크기가 작은 경우 문제가 되는 칩핑 및 에로존 발생의 임계속도 추정을 가능케 한다는 점에서 의미가 있다.

## (2) 표면손상의 정량적 고찰

입자충격에 의해 시험편 표면에 발생하는 링크랙은 에로존 등에 영향을 미치므로 증대거동의 정량적 고찰이 필요하다. Fig. 5는 충격속도의 증가에 따른 링크랙의 증대거동을 나타낸 것으로, (a)는 SiC 입자, (b)는 鋼입자충격의 경우이다. 두 경우

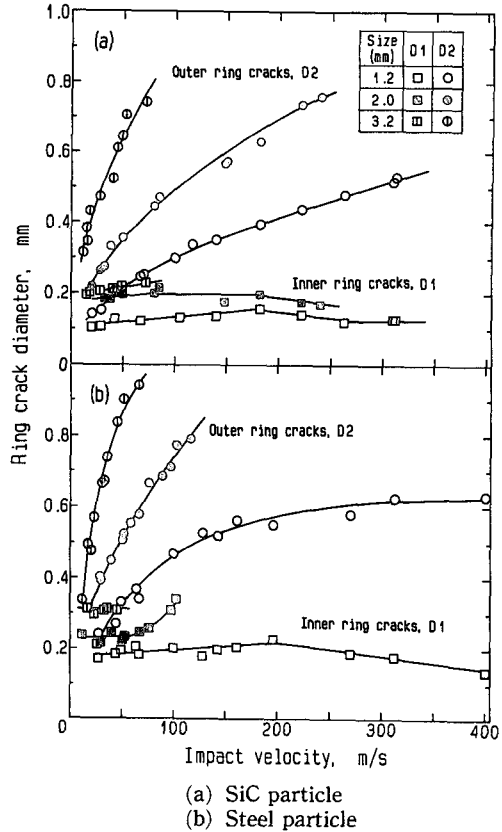


Fig. 5 Influence of impact velocity on ring crack diameter for each particle size

모두 링크랙의 최외측직경(이하 외경이라 부름)  $D_2$ 는 충격속도가 커짐에 따라 증대하였지만, 그 최내측직경(이하 내경이라 부름)  $D_1$ 은 충격속도에 관계없이 거의 일정치를 나타내었다. 또 입자크기가 커짐에 따라 링크랙의 직경 특히  $D_2$ 는 급격히 증가였다.

Fig. 6은 입자크기의 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 5의 각 링크랙의 직경을 입자크기로 무차원화해 충격속도에 대하여 나타낸 것이다. 또한 탄성접촉이론과 비교하기 위하여 식(2)으로부터 계산한  $2a$ 를  $d$ 로 무차원화해 실선으로 나타내었다.

그 결과, 링크랙의 내경 및 외경은 각각의 입자재질에 따라 거의 동일 곡선상에 표시되는 거동을 나타내, 표면에 발생하는 링크랙의 크기(표면손상의 정도)는 입자크기에 비례하는 것을 알 수 있다. 또 충격속도의 증가에 따른 거동을 Hertz의 접촉이론과 비교해 보면,  $D_2/d$ 는 처음에는  $2a/d$ 와 거의 같은 거동을 나타내지만 충격속도가 커짐에 따

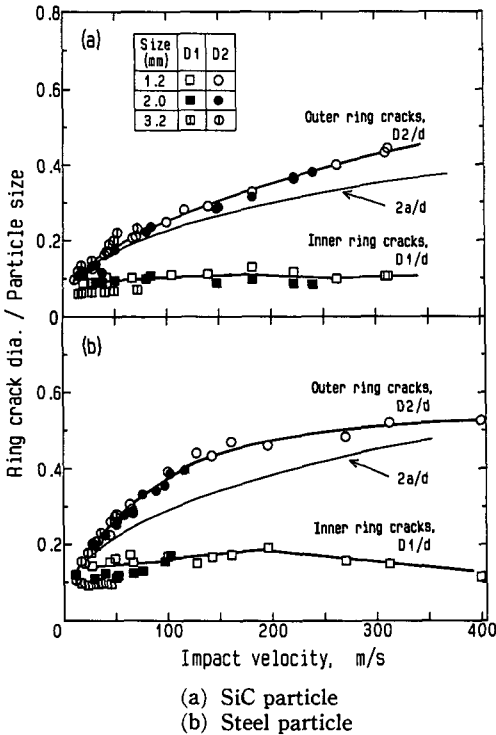


Fig. 6 Relation between normalized ring crack diameter and impact velocity

라 접촉원경보다 크게 되었다. 이것은 입자자체의 변형 및 파손에 기인하는 것으로, 특히 Fig. 6(b)의 鋼입자의 경우는 충격속도가 커지면 입자자체의 소성변형에 의해 접촉원경이  $2a/d$ 보다 커져 그 차가 더욱 크게 되었다. 그리하여 鋼입자의 경우가, 충격시 입자의 변형에 의한 접촉면적의 증대로 인해, SiC입자충격의 경우보다 큰 링크랙을 발생시켰다. 한편, 충격속도가 200 m/s를 넘으면, 입자 자체의 변형 또는 파손에 충격에너지의 상당부분이 소모되어 시험편에 가해지는 압력은 그다지 증가하지 않아서, 링크랙의 증대는 거의 포화상태에 달하는 것을 알 수 있다.

이상으로부터, 입자충격시 탄화규소 시험편에 발생하는 링크랙의 증대거동은 입자재질에 따라서는 다소의 차를 나타내었지만, 그 크기는 입자크기와 선형적 상관관계가 있음을 알 수 있다.

(3) 레이디얼크랙의 증대에 미치는 입자크기의 영향

3.1절에서 보인 바와 같이 SiC 입자충격의 경우

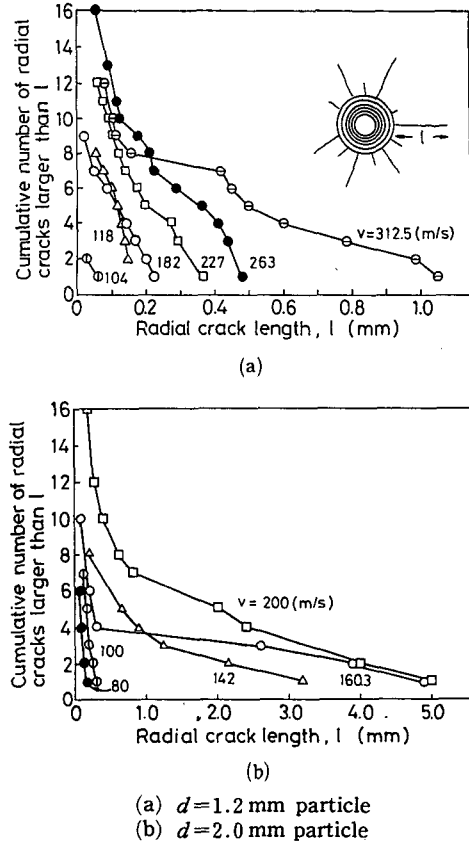


Fig. 7 Radial crack size distributions in the case of SiC particle impact as a function of impact velocity

는 충격속도가 증가함에 따라 링크랙의 주위에 레이디얼크랙이 발생하였다.  $d$ 에 따른 레이디얼크랙 발생의 임계속도는  $d$ 가 1.2 mm인 경우는 103 m/s, 2.0 mm인 경우는 80 m/s 그리고 3.2 mm인 경우는 40 m/s로서, 입자크기가 커짐에 따라 감소하였다. Fig. 7은 각 충격속도에서 발생한 레이디얼크랙의 누적분포를 비교한 것으로, (a)는  $d$ 가 1.2 mm, (b)는 2.0 mm의 경우이다.

두 경우 모두 충격속도가 커짐에 따라 레이디얼크랙의 길이 및 그 수는 급격한 증가를 나타내고 있다. 거의 동일한 충격속도에서 레이디얼크랙의 성장에 미치는 입자크기의 영향을 보면, (b)의 경우가 (a)의 경우보다 레이디얼크랙은 크게 성장하였고, 또 그 수도 증가하였다. 그것은 입자가 갖는 충격에너지가 레이디얼크랙의 발생 및 성장에 크게 영향을 미쳤기 때문이다. 한편으로 이와 같이 크게 성장한 레이디얼크랙은 강도저하에 영향을 미쳐서,

동일 충격속도에서는 (b)의 경우가 (a)보다 큰 강도저하를 가져올 것이 예상된다.

3.3 강도저하에 미치는 입자재질 및 크기의 영향

입자충격에 의한 손상은 그후 재료의 잔류강도를 저하시킨다. Fig. 8은 정적 4점 굽힘시험에 의해 평가한 잔류강도와 충격속도의 관계를 나타내고 있다. 잔류강도는 손상의 발생과 더불어 저하해, 충격속도가 50 m/s를 지나면 입자재질에 따라 다른 거동을 보여주고 있다. 먼저 SiC 입자의 경우는 충격속도의 증가와 더불어 잔류강도가 감소해 가는 데 비하여, 鋼입자의 경우는 충격속도가 증가하여도 현저한 강도저하는 일어나지 않고 거의 일정치를 나타내고 있다. 그것은 SiC 입자충격의 경우 충격부의 소성변형에 기인하는 레이디얼크랙의 발생 및 증대가 콘크랙에 부가하여 강도저하에 영향을 미쳤는데 대하여, 鋼입자충격의 경우는 충격속도가 증가하여도 3.2.2 절에서 설명한 바와 같이 입자자체의 변형과 그에 따른 접촉면적의 증가가 시험편 내부에서 콘크랙의 증대에 그다지 영향을 미치지 않았다는 것과 관계가 있다.<sup>(6,7)</sup> 한편 입자 크기의 영향을 보면, 먼저 SiC 입자의 경우는  $d$ 가 큰 경우가 동일 충격속도에서 보다 낮은 잔류강도를 나타내고 있다. 그것은  $d$ 가 큰 경우는 충격에너지의 증대가 3.2.3에서 설명한 바와 같이 레이디얼크랙 길이의 현저한 증가를 가져와 잔류강도를 더욱 저하시켰기 때문이다. 그에 비하여 鋼입자의 경우는  $d$ 가 크게 되면 퍼커션콘 발생에 의해 잔류강도가 급격히 감소하였다.

이와같이 충격부의 변형거동에 따른 손상형태의 차가 잔류강도의 저하거동에 영향을 미치므로, 충격부의 변형거동과 강도저하의 관계를 보다 구체적으로 고찰할 필요가 있다. Fig. 9는 잔류강도를 파단면상에서 측정된 콘크랙 깊이의 관계로 나타낸 것이다. 먼저 충격부가 거의 탄성적 접촉변형거동을 나타내는 영역<sup>(6)</sup>에서는, 즉 鋼입자충격 및 레이디얼크랙 발생이전의 SiC입자 저속충격의 경우는, 잔류강도가  $d$ 에 관계없이 콘크랙의 깊이에 의존하여 선형적인 관계를 나타낸다. 그러나 충격부의 영구변형 또는 탄소성 접촉변형거동에 의해 레이디얼크랙이 발생하는 SiC 입자의 고속충격 영역에서는, 콘크랙에 부가하여 레이디얼크랙이 강도저하에 영향을 미쳐, 잔류강도는 탄성적 접촉변형 거동의 관계로부터 멀어져 급격히 감소하는 것을 볼 수 있

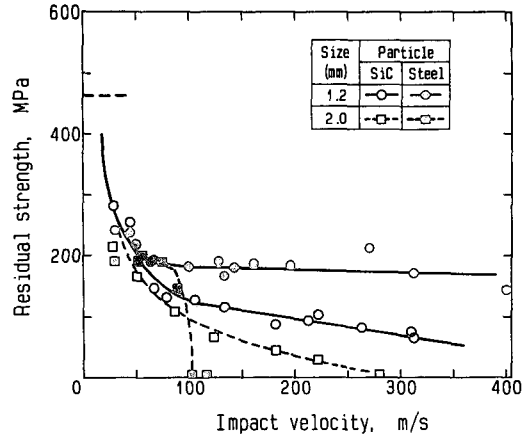


Fig. 8 Relation between residual strength and impact velocity

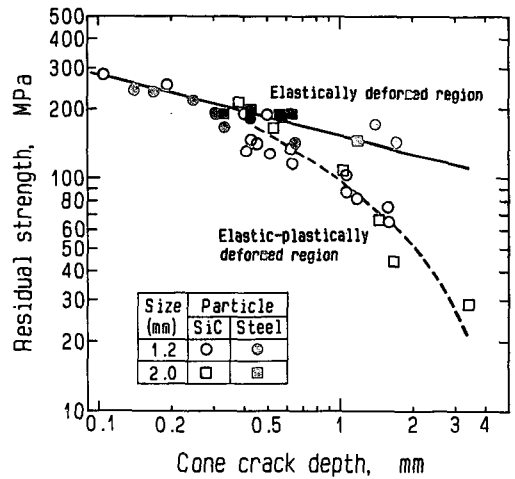


Fig. 9 Relation between residual strength and cone crack depth

다. 그리하여 입자충격후의 잔류강도의 저하거동은 특히 입자재질에 따른 충격부의 접촉변형거동의 차에 크게 의존하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

입자충돌에 의한 손상 및 이로 인한 강도저하에 미치는 입자재질 및 크기의 영향을 조사한 결과는 다음과 같다.

(1) 손상형태는 입자크기에 관계없이 입자재질에 따라 다른 양상을 나타내었고, 입자크기가 큰 경우는 충격속도가 임계치를 넘으면 퍼커션콘이 발생하였다.

(2) 시험편 표면에 발생한 링크랙의 크기의 입자 크기에 선형적으로 비례하였지만, 입자재질에 따라 차를 나타내 鋼입자가 SiC입자보다 큰 링크랙을 발생시켰다. 또 링크랙의 발생 및 증대거동은 Hertz의 접촉이론과 파괴역학적 고찰에 의해 설명할 수 있었다.

(3) 입자와 시험편의 경도비가 손상형태에 영향을 미쳐, 그 비가 약 1인 SiC 입자의 고속충격은 충격점의 소성변형에 기인한 레이디얼크랙을 발생시켰다. 또한 충격속도 및 입자크기의 증대에 따른 레이디얼크랙의 증대는 잔류강도를 크게 저하시켰다.

(4) 입자충격후 시험편의 잔류강도는 입자크기에 관계없이 충격부가 탄성접촉 변형영역에서는 콘크랙의 크기에 의존하였지만, 변형거동이 탄소성접촉 변형을 나타내는 영역에서는 레이디얼크랙이 더욱 잔류강도를 저하시켰다.

### 참고문헌

- (1) 山田幸生, 1990, セラミックスガスター빈の研究開発, 日本機械學會誌, Vol. 93, pp. 129~135.
- (2) 宮田寛, 1989, 発電用ガスタービンにおけるセラミックスの利用, 日本機械學會講習會, No. 890~77, pp. 17~27.
- (3) 申亨燮, 前川一郎, 宮田寛, 小川原凱紀, 1991, 粒子の繰返し衝撃による炭化けい素の損傷, 日本機械學會論文集 A編, Vol. 57, pp. 3057~3062.
- (4) 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.
- (5) Akimune, Y., 1989, Spherical-Impact Damage and Strength Degradation in Silicon Nitride, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 72, pp. 1422~1428.
- (6) Maekawa, I., Shin, H.S. and Miyata, H., 1991, Damage Induced in SiC by a Particle Impact, Eng. Fract. Mech., Vol. 40, pp. 879~886.
- (7) Maekawa, I., Shin, H.S. and Miyata, H., 1991, Particle Impact Damage on Ceramics, Proc. of Fracture and Strength'90, Seoul, Trans Tech. Pub., pp. 173~178.
- (8) Evans, A. G. and Wilshaw, T. R., 1976, Quasi-Static Solid Particle Damage in Brittle Solids 1. Observations, Analyses and Implications, Acta. Metall., Vol. 24, pp. 939~956.
- (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) Hertz, H. R., 1896, Hertz's Miscellaneous Papers, Chapt. 5 and 6, Macmillan, London.
- (11) Timoshenko, S. and Goodier, J. N., 1951, Theory of Elasticity, 3rd Ed. McGraw-Hill.
- (12) Sedhadri, S. G. and Srinivasan, M., 1983, Analysis of Flexure Strength Data of Ceramics, J. Eng. Mat. Tec., Vol. 105, pp. 219~223.
- (13) Ruff, A. W. and Wiederhorn, S. M., 1979, Erosion by Solid Particle Impact, Treatise Mat. Sci. Tech., Vol. 16, pp. 69~126.