

〈논 문〉

탄화규소에 구형입자의 정적압입 및 충격시 부하속도의 영향

신 형 섭*

(1996년 3월 25일 접수)

Loading Rate Effects During Static Indentation and Impact on Silicon Carbide with Small Sphere

Hyung-Seop Shin

Key Words : Quasi-Static Indentation(준정적압입), Impact(충격), Spherical Particle(구형입자), Loading Rate(부하속도), Silicon Carbide(탄화규소), Damage(손상), Hertzian Cracks(헤르츠안크랙), Strength Degradation(강도저하)

Abstract

In order to study the relationship between static and dynamic behaviors of silicon carbide, both quasi-static indentation and impact experiments of spherical particle have been conducted. The difference in material behavior when using the two methods suggests a loading rate difference in the damage pattern and fracture strength of silicon carbide. This investigation showed some difference in damage pattern according to particle property, especially in the case of particle impact. There was no differences in deformation behaviors according to the loading rate when the crater profiles were compared with each other at the same contact radius. From the result of residual strength evaluation, it was found that the strength degradation began at the initiation of ring crack and its behavior was closely related to morphologies of the damage developed which was also dependent upon the extent of deformation at the loading point. In the case of static indentation, there did not exist the particle property effects on the strength degradation behavior.

1. 서 론

두 고체간의 정적접촉에 관한 헤르츠의 이론이 발표된 이래, 취성재료의 접촉변형 및 파괴문제에 관하여는 이론 및 실험적으로 광범위하게 연구가 진행되어 오고 있다.^(1~3) 또한 정적접촉이론을 동적 부하의 경우에 확장시키려는 시도도 행해져 오고 있다. 그리하여 충격체가 갖는 운동에너지가 전

부 변형에너지로 변환된다는 가정 하에, 구형입자 충격시 타겟에 전달되는 최대동적하중에 관한 표현식이 유도되었다.^(4,5)

세라믹은 내열성이 뛰어나 고온에서 우수한 강도 특성을 나타내기 때문에 우주항공분야와 가스터빈의 부재 등에 적용되어 오고 있다. 세라믹재료를 가스터빈의 로터나 브레이드와 같이 고속으로 회전하는 구조부재에 적용하기 위해서는 동적강도특성의 평가와 더불어 연소가스에 포함되어 날아오는 입자 충격에 의한 손상문제의 해결이 가스터빈의 신뢰성 및 내구성 확보 측면에서 중요한 과제이다.

*회원, 안동대학교 기계공학과

그래서 세라믹부재의 FOD에 관하여는 저자를 비롯하여 많은 연구가 진행되어 오고 있다.^(6~12) 세라믹부재에 균열의 발생은 설계강도의 저하뿐만 아니라 에로존과 같은 재료 탈락을 초래하여 사용 불능의 상태로 만들어 버린다.

구형입자의 정적압입과 관련된 연구의 한 측면으로 부하속도 의존성을 검토할 수 있다. 부하속도가 충분히 큰 경우는 충격이라 불리어, 정적압입의 경우와 다른 거동을 나타낼 것이 예상된다. 그리하여 유리와 같은 취성재료의 충격손상에 관하여는 이전부터 많은 연구가 진행되어 오고 있지만, 정적압입의 경우와 비교 검토를 행한 것은 많지 않고,^(13,14) 세라믹 특히 탄화규소에 관하여는 보고의 예가 많지 않은 것이 현 상황이다.^(8~10) 최근에는 압입 파괴역학(indentation fracture mechanics)을 이용한 재료의 파괴저항 평가에 관한 연구도 많이 행해져 오고 있다. 이와 관련하여 취성재료의 가공법으로서 접촉응력을 부과하여 콘크랙의 발생각도를 변화시켜 비교적 용이하게 피어싱(piercing)이나 블랭킹(blanking)을 가능케 하는 세라믹판재의 가공기술의 개발에 관하여 특히 고속 가공 측면에서 동적(충격)하중을 이용하려는 연구도 진행되고 있다.⁽¹⁵⁾ 이러한 충격을 이용한 신가공법의 개발은 반도체 칩과 같은 취성재료 가공 효율증대에 미치는 영향이 크리라 기대된다.⁽¹⁶⁾

본 연구에서는, 탄화규소에 구형입자의 준정적압입과 충격시 발생하는 손상형태 및 변형거동에 미치는 부하속도의 영향을 실험적으로 규명하였다. 이때 발생하는 손상이 잔류강도의 저하거동에 미치는 영향에 관하여도 검토를 하였다.

2. 접촉이론

먼저 정적접촉의 경우, 반경 R 인 구형입자를 수직하중 P 로 시험편에 압입시 구형입자와 평판시험편사이의 접촉부반경 a 는 헤르츠의 접촉이론⁽³⁾으로부터

$$a = \left(\frac{3}{4} kPR \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$k = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu'^2}{E'} \quad (2)$$

와 같다. 여기서, k 는 재료의 특성치에 의존을 나타내는 항으로, ν 와 E 는 시험편의 푸아송비와 횡

탄성계수를, ν' 와 E' 는 입자의 푸아송비와 횡탄성계수를 각각 나타낸다.

이때 시험편 표면에서 링크랙을 발생시키는 반경방향 주응력, σ_{yy} 는 다음과 같이 표시된다⁽¹⁾.

$$\sigma_{yy} = \frac{(1-2\nu)}{2} \left(\frac{P}{\pi a^2} \right) \left(\frac{a}{y} \right)^2 \quad (3)$$

여기서, ν 는 시험편의 푸아송비, y 는 링크랙이 발생하는 곳의 좌표값을 나타낸다.

한편 반경 R , 밀도 ρ 인 구형입자가 충격속도 V 로 평판시험편에 충돌하는 때, 시험편에 가해지는 동적하중의 최대치 P_{max} 는, 입자의 충격속도가 시험편내 응력파의 전파속도에 비해 작은 경우, 준정적 및 탄성접촉의 가정하에서 헤르츠의 접촉해로부터 다음과 같이 구해진다.⁽⁴⁾

$$P_{max} = 3.03k^{-0.4} \rho^{0.6} R^2 V^{1.2} \quad (4)$$

이때 접촉부는 반구형 압력분포를 나타내어 그 반경방향 압력분포 q 및 접촉반경 a 는 시간 의존형으로 다음과 같이 표시되어진다.

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

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

$$D_t = 2.94 (1.25\pi k \rho v^2)^{0.4} \left(\frac{R}{V} \right) \quad (7)$$

여기서, D_t 는 입자와 시험편의 접촉시간을 나타낸다.

또한 입자충격시 시험편 표면에서 링크랙 발생에 관계 있는 반경방향 주응력은 식 (4)를 식 (3)에 대입하여

$$\sigma_{yy} = \frac{2(1-2\nu)}{3\pi} \left(\frac{5\pi V^2 \rho}{4k^4} \right)^{0.2} \left(\frac{a}{y} \right)^2 \quad (8)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 한편 부하방식에 따른 변형거동에 미치는 부하속도의 영향을 조사하기 위하여 본 연구에서는 접촉반경을 비교 파라미터로 하였다.

3. 실험방법

3.1 시험편

시험편은 α -SiC 분말에 보론(B)과 탄소(C)를 소결조제로 첨가하여 상압에서 소결한 시판의 탄화규소를 사용하였다. 이때 기공률은 2%이다. 시험

Table 1 Mechanical properties

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Hardness(Hv)	Fracture strength (MPa)	Fracture toughness (MPa \sqrt{m})
Target SiC	418	0.15	2800	460	3.1
Projectile SiC	402	0.14	2600	450	4.5
Steel	210	0.29	820	—	—

편의 크기는 입자의 정적압입 및 충격실험, 그리고 부하후 잔류강도 평가가 가능하도록 $10 \times 50 \times 4$ mm로 하였다. 10×50 mm의 양면을 래핑연마하여, 표면 거칠기를 $R_{max} 0.8 \mu\text{m}$ 이하로 하였다.

정적압입 및 충격실험에는 입자의 직경이 1.2 mm인 SiC구와 강구를 사용하였다. 이후 각각 SiC 입자와 Steel입자로 부르기로 한다. 시험편 및 입자의 기계적 성질을 Table 1에 각각 나타내고 있다.

3.2 부하실험 및 잔류강도평가

구형입자의 준정적 압입실험은 Fig. 1(a)에 보인

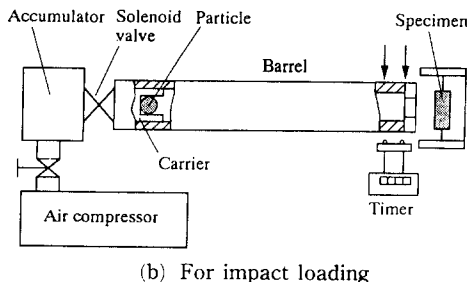
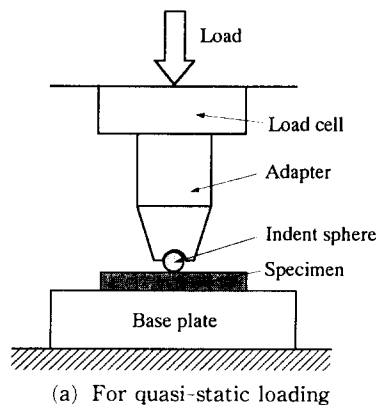


Fig. 1 Schematic Illustration of experimental setups

바와 같이 만능재료시험기(Shinko Co., 용량 10 kN)의 로더셀에 부착한 콘형상 어댑터에 입자를 설치한 후, 크로스헤드속도 0.2 mm/min로 시험편에 수직으로 압입하중을 가하여 행하였다. 이때 하중의 부하속도는 약 50 N/s에 해당하였고, 입자의 재질에 따라 다소의 차를 나타내었다. SiC입자압입의 경우, 입자에 균열이 발생할 때까지 하중을 가하였고, 이때 균열발생은 하중-변위곡선상의 돌발적인 하중감소로 감지가 가능하였다. 본 실험에서 SiC입자에 대한 압입한계하중은 약 660 N이었다.

입자의 충격실험은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같은 소형 에어건을 제작하여 수행하였다. 작동원리는 다음과 같다. 먼저 입자를 실은 플라스틱 캐리어를 배럴의 안쪽에 위치시킨다. 공기압축기를 사용하여 압축공기를 소정의 압력으로 어큐뮬레이터에 충전시킨다. 그후 솔레노이드 밸브를 사용하여 어큐뮬레이터로부터 순간적으로 방출시킨 압축공기가 배럴 내에 장착한 캐리어를 가속시킨다. 캐리어가 배럴 속을 비행한 후 그 선단에 위치한 스톱퍼에 의해 정지할 때의 관성으로 입자만이 시험편에 충격을 가하게 된다. 이때 충격속도는 배럴 선단에 위치한 2개의 다이오더간 비행시간을 측정하여 계산하였다. 입자의 충격속도는 압축공기의 압력으로 조절하였고, 그 범위는 10~300 m/s로 하였다. 충격실험의 경우, 부하속도는 식 (4)으로부터 구한 충격하중의 최대치를 동적접촉시간 D_t 로 나누어서 구하였고, 본 실험의 충격속도 범위에서는 수 GN/s의 높은 부하속도를 나타내었다.

정적압입 및 충격실험후, 표면에서의 손상을 광학현미경과 SEM을 사용하여 관찰하였고, 그 크기를 측정하였다. 또 변형거동을 평가하기 위하여 표면거칠기 시험기로 하중점의 표면 윤곽을 측정하였다. 그 뒤 손상에 따른 강도 저하거동을 평가하기

위하여 내측스페이스 10 mm, 외측스페이스 30 mm인 4 점 굽힘치구를 사용하여 크로스헤드 속도 0.5 mm/min로 굽힘시험을 하여 잔류강도를 평가하였다. 이때 손상부를 인장축으로하여 굽힘시험을 하였다. 잔류강도 평가실험후 내부에 생긴 손상에 관한 정보를 얻기 위하여 파면관찰도 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 구형입자의 정적압입시 손상거동

탄화규소에 구형입자를 정적으로 압입하였을 때 시험편의 표면에는 링형상의 균열이 발생하였다. Fig. 2에 각 입자재질에 대하여 발생한 표면손상의 예를 나타내고 있다. 압입부 표면에는 링크랙(ring crack)이 발생하였고, 하중이 증가함에 따라 링크랙은 동심원 형태로 증대한 것을 볼 수가 있다. 이러한 손상의 발생 모양은 (a), (b) 모두에서 유사한 형태를 나타내고 있다. 이때 링크랙 발생에 필요한 압입하중의 임계치는 SiC입자의 경우가 50.0 N, Steel 입자의 경우가 62.7 N으로, 높은 정도 값

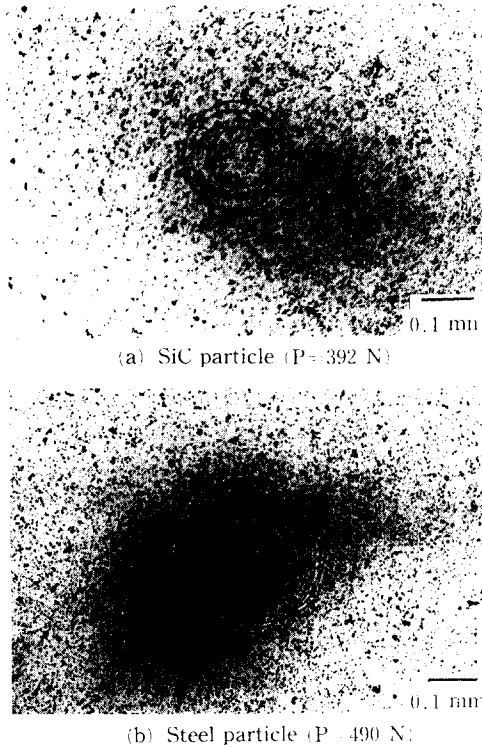


Fig. 2 Morphologies of surface damage caused by quasi static indentation

을 갖는 SiC입자가 Steel입자보다 압입에 따른 표면장벽층에 있어서 보다 민감함을 알 수 있다. 이것은 탄화규소 시험편의 경우 입자의 경도 값이 조직구조상의 발생일개하중에 영향을 미친다는 것을 보여준다.

링크랙 발생후 압입하중의 증가에 따른 링크랙의 증가대동을 Fig. 3에 나타내고 있다. 압입하중의 증가와 더불어 링크랙의 최외측직경(이후 D_2 로 한다)은 증대하는데 대하여, 최내측직경(이후 D_1 로 부른다)은 거의 일정한 값을 나타내고 있다. D_1 은 SiC입자에서 0.11 mm, Steel입자에서는 0.16 mm로 입자재질에 따라 차를 나타내었다. 또한 동일한 압입하중하에서 발생한 표면손상의 크기를 비교해 보면, Steel입자의 경우가 SiC입자의 경우보다 큰 표면손상을 초래하였다. 이러한 표면손상의 차는, 압입시 입자의 변형특성의 차로 인해 동일 압입하중에도 불구하고 접촉면적에 차가 생겨서 이것이 접촉부 표면에 발생하는 링크랙의 크기에 차를 가져왔다고 생각된다.⁽⁸⁾

헤르츠의 접촉이론을 사용하여 압입하중에 대하여 앞의 식 (1)로 계산한 접촉원경(2a)을 그림 중에 각각 점선으로 나타내었다. 그 결과 표면에 발생한 링크랙은 접촉원보다 바깥쪽에까지 발생하였음을 알 수 있다. 이것은 압입시 접촉원 주위에 존재하는 잔향으로부터 링크랙이 발생하는데 이때 결핍의 선단에서 응력화대개수의 값은 접촉이 일어나기 직전에 최대치를 갖는다는 사실과도 관계되고,⁽¹⁶⁾ 또한 Steel입자의 경우는 입자의 소성변형으로 인한 접촉면적의 증가도 그 원인으로 생각되어진다.

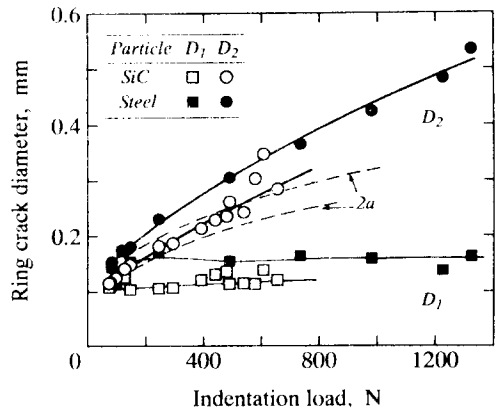


Fig. 3 Behaviors of ring crack multiplication in the case of quasi static indentation

한편 압입하중이 커지면 입자에도 손상이 발생하였다. SiC입자의 경우 약 660 N에서 균열이 발생하여 일부가 결락하는 파괴가 일어났다. Steel 입자의 경우는, 압입하중이 약 150 N을 넘어서면 시험편과의 접촉부에 영구변형이 발생하고 하중의 증가와 더불어 접촉부에 더 큰 소성변형이 생겨났다. 이 때문에 구형입자를 사용한 준정적압입의 경우, 입자자체의 파괴 또는 현저한 변형으로 인해 부하가능 한계하중이 존재하였고, 탄화규소 시험편의 경우, 압입하중을 한계하중까지 증대시켜도 앞에서 말한 링크랙의 발생, 증대만을 초래하였고, 다른 형태의 손상은 일어나지 않았다.

4.2 입자충격시 손상거동

Fig. 4(a), (b)는 입자충격시 시험편 표면에 발생하는 손상형태의 충격속도에 따른 변화를 보여준다. 충격속도가 증가함에 따라 정적압입시와 달리 입자재질에 따라서는 발생하는 손상형태에 차를 나타내고 있다.

(a) SiC 입자충격의 경우, 충격속도가 낮은 범위에서는 먼저 링크랙이 발생하였고, 충격속도가 100 m/s를 넘으면 그 주위에 반경방향 레이디얼크랙(radial crack) 또는 표면에 평행하게 발생하는 레이터럴크랙(lateral crack) 등 변형거동의 차에 기인하는 2차적 형태의 균열이 생겨났다.⁽⁹⁾ 이에

비하여 (b) Steel 입자의 경우는 충격속도가 증가하여도 링크랙 증대만을 가져왔을 뿐, SiC입자충격의 경우처럼 손상형태 변화는 일어나지 않았다. 한편 입자충격시 링크랙발생 임계속도는 SiC입자에서 10.5 m/s, Steel입자에서 15.7 m/s로, 준 정적압입시와 같이 SiC입자충격의 경우가 손상발생에 보다 민감함을 알 수 있다.

입자의 충격속도 증가에 따른 링크랙의 증대거동을 Fig. 5에 나타내고 있다. 충격속도가 커짐에 따라 입자충격의 경우도 링크랙의 최외측직경(D₂)은 증대하지만, 최내측직경(D₁)은 거의 일정치를 나타내고 있다. 또한 입자재질의 영향을 살펴보면, 동일한 충격속도에 대하여는 정적압입시와 같이 Steel입자충격의 경우가 SiC입자충격의 경우보다 큰 표면손상을 초래하였다. 이처럼 입자의 준정적압입 및 충격시 링크랙은 앞절의 식 (3)과 식 (5) 반경방향 응력에 의해서 표면에 존재하는 결함으로부터 발생하고, 그 발생임계속도 및 D₁의 크기는 표면결함의 분포상태에 의존하였다고 생각된다.

시험편표면에 발생한 링크랙은 압입하중이 증대하면 시험편내부로 진전하여 콘크랙(cone crack)으로 성장한다. Fig. 6과 Fig. 7에 각각 준정적압입과 입자충격후 파단면상에 나타난 콘크랙 형상을 나타내고 있다. 먼저 준정적압입의 경우, 콘크랙의 스커트(skirt)부를 지나서 파괴가 일어나 파면에는 콘크랙의 일부만이 관찰되었고, 입자재질에 따른 영향은 볼 수가 없다. Fig. 7의 입자충격의 경우를 보면, 손상 중앙부를 가로질러 파단이 일어났기 때문에 파면에는 완전한 형태의 콘크랙이 충격접하에

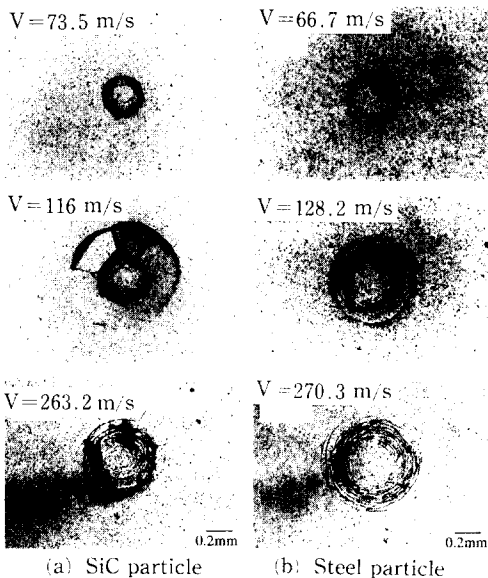


Fig. 4 Morphologies of surface damage pattern induced at each impact velocity

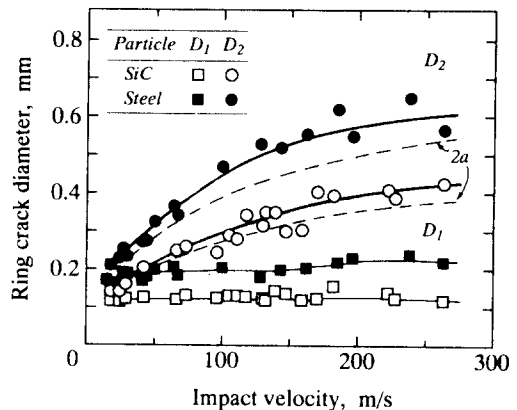
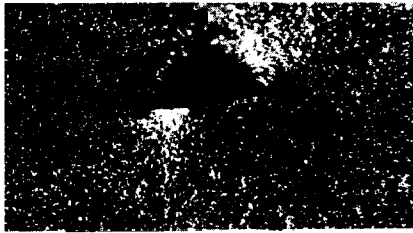


Fig. 5 Behaviors of ring crack multiplication in the case of particle impact

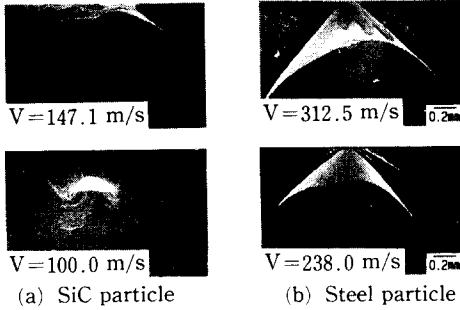


(a) SiC particle (P=500 N)



(b) Steel particle (P=1225 N)

Fig. 6 Morphologies of cone cracks developed in target interior at fracture surface in the case of quasi-static indentation



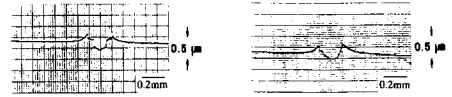
(a) SiC particle

(b) Steel particle

Fig. 7 Morphologies of cone cracks developed in target interior at fracture surface in the case of particle impact

대칭으로 발생하였고, 특히 내측콘크랙이 가장 현저하게 발달한 것을 볼 수 있다. 이것으로부터 탄화규소에 구형입자의 정적압입 및 충격에 의해 발생하는 손상은 헤르츠안 콘파괴(Hertzian cone fracture)의 특성을 나타냄을 알 수 있다. 특히 입자충격시 콘크랙의 형상 및 진전거동과 관련하여 접촉압과 충격속도의 영향 등이 거론되고 있어 그 규명을 위해서는 보다 많은 연구를 필요로 하고 있다.⁽¹⁷⁾

4.3 하중점 변형거동에 미치는 부하속도의 영향
 입자의 준정적압입 및 충격시 발생하는 손상형태



(a-1) Static indentation (a-2) Impact (V=44.4 m/s, P=369 N, D₂=0.220 mm) D₂=0.210 mm

(a) SiC particle (at a=0.095 mm)



(b-1) Static indentation (b-2) Impact (V=44.4 m/s, P=735 N, D₂=0.328 mm) D₂=0.270 mm

(b) Steel particle (at a=0.128 mm)

Fig. 8 Comparisons of crater profile formed under conditions having a similar contact radius

는 시험편 접촉부의 변형거동에 의존하므로,⁽¹²⁾ 부하후 하중점의 표면윤곽(surface profile)을 측정하여 부하방식에 따른 변형거동을 비교 검토하였다. 비교의 파라미터로 식 (1)과 식 (6)에서 구한 접촉반경을 사용하였다.

동일한 접촉반경을 갖는 경우에 대하여 각 하중점 중심을 지나는 표면윤곽을 Fig. 8에 나타내었다. 접촉부는 크레이트(crater) 형상을 하고 있고, 그 가장자리부가 표면으로부터 솟아올라 있다. 이것은 표면상의 링크랙이 콘크랙으로 발달할 때, 즉 부하시 균열이 열림과 동시에 진전이 일어나고, 제하시는 균열이 닫히게 되는데, 세라믹의 경우 이때 균열면상에 결락한 결정립 등의 존재로 인해 완전한 닫힘이 일어나지 않고 콘크랙면의 위부분이 들어올린 상태로 되어 불연속적인 단차를 갖는 윤곽을 발생시켰다고 생각된다.⁽⁹⁾ 각 입자에 대하여 크레이트 형상을 비교하면, 정적압입의 경우가 입자충격의 경우에 비하여 다소 큰 링크랙의 발생을 나타내지만, 전체적인 크레이트 형상에는 거의 차를 나타내지 않았다. 특히 시험편의 변형거동을 나타내는 크레이트깊이(crater depth)도 거의 동일한 값을 보여주고 있다. 이것은 상압소결한 탄화규소의 경우, 압입에 의해 발생하는 하중점의 변형거동에는 부하속도의 영향이 거의 나타나지 않았다는 것을 의미한다. 이것은 탄화규소의 충격강도에 미치는 변형률속도 의존성에 관한 다른 실험결과⁽¹⁸⁾와도 유사한 거동이다. 앞으로 충격하중에서 세라믹 손상거동의 해석을 위해서는 보다 고하중영역의 변형거동에 관한 연구를 필요로 한다.

5. 잔류강도에 미치는 부하속도의 영향

탄화규소에 구형입자의 준정적압입 및 충격은 시험편 표면뿐만 아니라 내부에도 손상을 초래하였고, 그로 인한 설계강도 저하가 예상된다. 이때 손상으로 인한 강도저하는 내부에 가장 현저하게 발생한 콘크랙의 형상 및 사이즈에 의존한다.⁽¹¹⁾ 손상 허용설계와 내부손상평가의 관점에서 4점굽힘시험에 의해 손상후 잔류강도를 평가하였다.

Fig. 9는 준정적압입의 경우로, 4점 굽힘시험으로 구한 잔류강도와 압입하중의 관계를 나타내고 있다. 강도는 손상발생에 해당하는 임계하중에서부터 저하하기 시작해, 압입하중의 증가와 더불어 약 300 MPa까지 급격히 저하한 뒤 저하의 정도가 완만하게 되었다. 압입하중이 600 N을 넘어서면 잔류강도는 더 이상 저하를 나타내지 않고, 200 MPa 부근에서 거의 일정한 값을 갖는다. 또 압입하중과 잔류강도사이에는 입자재질에 따른 영향은 나타나지 않고 동일 곡선상 거동을 나타내고 있다. 그것은 구형입자의 준정적압입시, 시험편 압입부는 거의 탄성적 변형을 나타내었고, 4.1절에서 언급한 바와 같이 헤르츠안 링크랙/콘크랙만이 발생하였다. 이 경우 시험편의 잔류강도는 내부에 가장 현저하게 발생한 최내측 콘크랙의 형상 및 크기에 의존하였기 때문이다.⁽¹⁶⁾ 즉, Steel입자 압입의 경우는 압입하중을 SiC입자의 경우보다 증가시켜도 최내측 콘크랙이 내부로 성장하기보다는 그 주위에 새로운 콘크랙을 생성시켜, 결과적으로 최내측 콘

크랙의 형상에는 거의 영향을 미치지 않았기 때문에 더 이상의 강도저하는 일어나지 않았다. 그 때문에 입자재질의 영향이 나타나지 않았다. 이것은 4.1 절에서 언급한 표면손상의 정도를 압입하중에 대하여 나타냈을 때 입자재질에 따라 다소 차이를 나타낸 거동과는 다르다.

한편 입자충격의 경우는 Fig. 10에 보인바와 같이, 손상발생 임계속도를 넘으면 잔류강도는 급격히 저하하여, 충격속도 60 m/s부근에서 약 200 MPa 까지 저하하였다. 그 이후 입자재질에 따라 다른 거동을 나타내, SiC입자의 경우는 충격속도 증가와 더불어 잔류강도가 더욱 저하하였는데 대하여, Steel입자충격의 경우는 충격속도가 증가하여도 더 이상 저하를 나타내지 않았다. 이것은 SiC 입자충격의 경우, 4.2 절에서 언급한 바와 같이 충격속도가 100 m/s를 넘으면 충격점의 소성적변형에 기인하여 반경방향 레이디얼크랙이 발생하였고, 그것이 강도평가시 콘크랙에 부가하여 굽힘하에서 강도 저하에 영향을 미쳤기 때문이다. 한편 Steel 입자충격의 경우, 충격속도가 증가하여도 Steel입자 자체의 변형과 그로 인한 집중면적의 증대가 콘크랙 주위에 증식을 가져왔을 뿐 최내측 콘크랙의 확대에는 크게 영향을 미치지 못하였기 때문에 정적압입시와 같은 거동을 나타내었다고 생각되어진다.

이상으로부터 입자충격후 평가한 잔류강도와 충격속도의 관계는 4.2 절에서 언급한 링크랙의 증대 거동과 반드시 일치하지 않았고, 또한 충격속도가 큰 경우에는 정적압입의 경우와는 달리 입자재질의

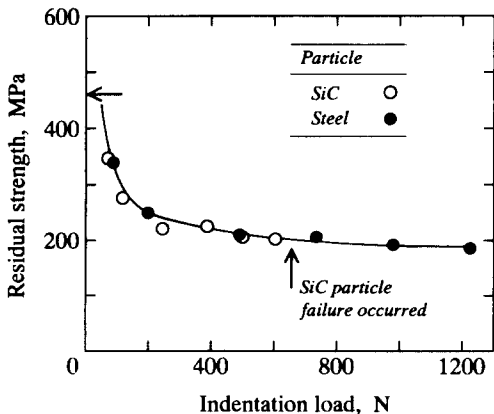


Fig. 9 Relation between residual strength with indentation load

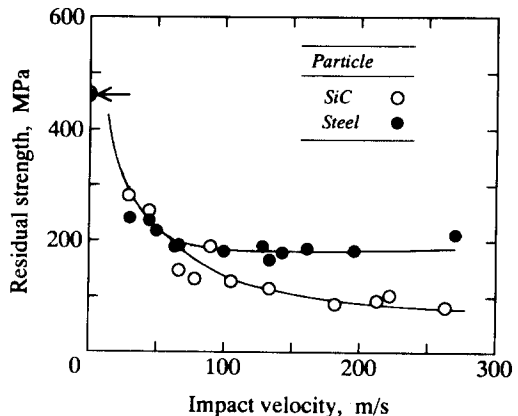


Fig. 10 Relation between residual strength with impact velocity

영향이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 탄화규소세라믹을 가스터빈 등 고속으로 회전하는 부재의 재료로 사용할 경우, 예상되는 입자충격에 의해 발생하는 손상 및 에로존, 그로 인한 강도저하의 거동을 단순히 구형입자의 준정적압입의 결과로부터 예측 평가하는 것은 강도의 과대평가 가능성이 있어서 적절하지 않다는 것을 보여준다.

6. 결 론

탄화규소에 구형입자의 준정적압입과 충격실험을 행해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 탄화규소 세라믹에 입자충격시 발생하는 손상은 시험편 충격부가 탄성적 접촉거동을 나타내는 범위에서는 정적압입시와 같이 링크랙과 콘크랙의 형상을 하였지만, 입자의 충격속도가 증가하면 SiC 입자충격시는 접촉부의 소성변형에 기인하는 레이디얼크랙 등 형태가 다른 손상을 초래하였다.

(2) 시험편 표면에 생긴 링크랙의 증대거동은 정적압입과 입자충격시의 부하속도에 관계없이 유사하였다. 그러나 입자재질에 따른 영향이 나타나, 동일한 부하속도하에서 Steel입자가 SiC입자보다 큰 링크랙을 발생시켰다.

(3) 구형입자 압입시 발생한 크레이터의 형상을 동일한 접촉반경에 대하여 비교한 결과, 거의 동일한 형상과 변형을 나타내 탄화규소의 변형거동에 부하속도의 영향은 거의 나타나지 않았다.

(4) 손상에 의한 잔류강도의 저하거동은 부하방식에 따라 차이를 나타내었고, 그것은 발생한 손상 형태의 차에 기인하였다. 입자충격의 경우는 고속영역에서 입자재질에 따른 영향이 나타나 SiC입자충격의 경우는 레이디얼크랙이 발생하여 Steel입자충격의 경우보다 낮은 강도값을 나타내었다.

참고문헌

- (1) Chaudhri, M. M. and Phillips, M. A., 1990, "Quasi-Static Indentation Cracking of Thermally Tempered Soda-Lime Glass with Spherical and Vicker's Indenters," *Phil. Mag.*, Vol. A-62, pp. 1~27.
- (2) Frank, F. C. and Lawn, B. R., 1967, "On the Theory of Hertzian Fracture," *Proc. R. Soc.*, Vol. A 209, pp. 291~306.
- (3) Johnson, K. L., 1985, "Contact Mechanics," Cambridge University Press, New York.
- (4) Tsai, T. M., 1971, "Dynamic Contact Stresses produced by the Impact of an Axisymmetrical Projectile on an Elastic Half-Space," *Int. J. Solid Struct.*, Vol. 7, pp. 543~558.
- (5) Knight, C. G., Swain, M. V. and Chaudhri, M. M., 1977, "Impact of Small Steel Spheres on Glass Surfaces," *J. Mater. Sci.*, Vol. 12, pp. 1573~1586.
- (6) Shin, H. S. and Maekawa, I., 1995, "Characterization of Particle Impact Damage and Residual Strength Degradation Behaviors in Structural Ceramics," *JSME Int. J.*, Vol. 38, pp. 116~122.
- (7) 신형섭, Maekawa, I, 서창민, 1992, "탄화규소 세라믹의 충격손상 및 강도저하에 미치는 입자의 재질 및 크기의 영향," 대한기계학회논문집, Vol. 16, pp. 1869~1876.
- (8) Shockey, D. A., Rowcliffe, D. J. and Dao, K. C., 1990, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, pp. 1613~1619.
- (9) 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.
- (10) Tsuruta, H., Takao, M., Soma, T. and Matsui, M., 1990, "Foreign Object Damage Resistance of Silicon Nitride and Silicon Carbide," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, pp. 1714~1718.
- (11) Wiederhorn, S. M. and Lawn, B. R., 1977, "Strength Degradation of Glass Resulting from Impact with Spheres," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 60, pp. 451~458.
- (12) Cook, R. F. and Pharr, G. M., 1990, "Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, pp. 787~817.
- (13) Kirchner, H. P. and Larchuk, T. J., 1982, "Comparisons of Static and Impact Loading Damage in Zinc Sulfide," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 65, pp. 506~510.
- (14) Persson, J., Breder, K. and Rowcliffe, D. J., 1993, "Loading Rate Effects During Indentation and Impact on Glass with Small Spheres," *J.*

- Mater. Sci.*, Vol. 28, pp. 6484-6489.
- (15) Nojima, T., Sakaguchi, K. and Sugiyama, F., 1995 "Formation of Holes in Engineering Ceramic Plates by Press-Working (Formation Patterns and Practical Applications)," *Trans. Jpn Soc. Mech. Eng. Series C*, Vol. 61, pp. 1697~1702.
- (16) Ohgushi, K. and Ichikawa, M., 1995, Fracture "Mechanics Study of Ring Crack Initiation in Ceramics by Sphere Indentation," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series A*, Vol. 61, pp. 953-958.
- (17) Shin, H. S., Kim, M. S., Lee, H. M. and Maekawa, I., 1996, "Hertzian Cone Crack Formation in Brittle Materials by an Oblique Impact," *Proc. of 2nd. Int. Sym. Impact Eng., Beijing*, pp. 301~309.
- (18) Nojima, T. and Ogawa, K., 1989, "Impact Strength of Ceramics at High Temperatures," *Int. Conf. Mech. Prop. Materials at High Strain Rates of Strain*, Oxford, pp. 371~378.