

# 취성재료의 소구충돌에 의한 충격손상( I )

우수창\* · 김문생\*\* · 신형섭\*\*\* · 이현철\*\*\*\*

## Impact Damage on Brittle Materials with Small Spheres( I )

S.C. Woo\*, M.S. Kim\*\*, H.S. Shin\*\*\*, H.C. Lee\*\*\*\*

### ABSTRACT

Brittle materials are very weak for impact because of typical characteristics which happen to be easily fractured with low fracture toughness and crack sensitivity. When brittle materials are subjected to impact due to small spheres, high contact pressure is occurred to impact surface and then local damage on specimen is developed, since there are little plastic deformations due to contact pressure compared to metals. This local damage is a dangerous factor which gives rise to final fracture of structures. In this research, the crack propagation process of soda lime glass by impact of small sphere is explained and the effects of the constraint conditions of impact spheres and materials for the material damage were studied by using soda-lime glass. that is the effects for the materials and sizes of impact ball, thickness of specimen and residual strength. Especially, this research has focused on the damage behavior of ring crack, cone crack and several kinds of cracks.

**Key Words** : Impact damage(충격손상), Ring crack(원형균열), Cone crack(원추형 균열), Crushing(분쇄), Erosion(표면탈락), Radial crack(반경방향균열), Lateral crack(가로방향균열) Splinter crack(수지상균열)

### 1. 서 론

오늘날 산업용 재료로 이용되고 있는 대부분의 재료는 금속, 세라믹, 플라스틱으로 분류할 수 있다. 이들 중에서 세라믹은 비강성, 내열성 및 내마모성이 우수한 취성 재료로써 고온, 부식등의 가혹한 환경에 노출되어있는 각종 구조용 부재, 특히 자동차엔진, 항공용엔진, 가스터빈의 로터나 브레이크등에 사용되어지고 있다. 하지만 취성재료의 대표적인 특징중의 하나인 낮은 파괴인성과 균열민감도로 인해 미세한 결함이나 균열에서도 파

괴가 일어날 수 있어 충격에 아주 약한 특징을 보이고 있다. 세라믹이나 유리등의 취성재료에 수  $\mu\text{m}$ ~수 $\text{mm}$  크기의 고체 입자가 충돌하면 금속재료에 비해 소성변형에 의한 접촉압력의 완화가 적기 때문에 상당한 압력이 충돌표면에 발생하여 국부적인 손상이 발생한다. 이 국부적인 손상은 구조물의 최종 파괴를 유발시키는 위험한 요소이다. 따라서 세라믹 표면손상의 메카니즘과 함께 손상 발생에 의한 재료의 강도저하 현상을 규명하기 위해서 Hertz의 접촉이론을 기초로 하여 고체입자를 작은 구로 모델링한 많은 연구들<sup>(1~8)</sup>이 수행되어 왔으나, 실제로 이들 크랙의 성장과 파괴에 미치는

2001년 5월 14일 접수  
\* 부산대학교 기계설계학과 대학원  
\*\* 부산대학교 기계공학부  
\*\*\* 안동대학교 기계공학과  
\*\*\*\* 두원공과대학 컴퓨터 응용설계학과

취성재료의 경계조건 등이 충격손상에 어떤 영향을 미치는가에 대한 구체적인 제시가 미흡하다. 본 논문에서는 대표적인 취성재료이면서 우리가 일상생활에서 많이 접할 수 있는 soda-lime glass를 시편으로 사용하여 시편에 대한 충격입자의 재질, 크기, 속도에 따른 영향 뿐만 아니라 시편의 두께에 따른 영향을 연구하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험방법

#### 2.1.1 충격실험

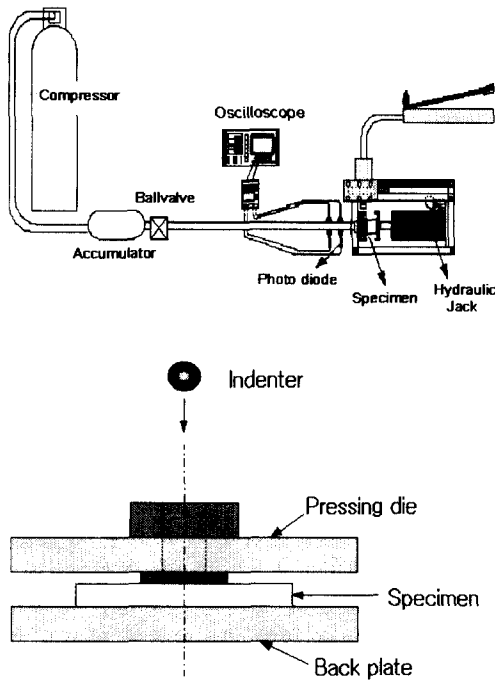


Fig. 1 Schematic diagram of whole experimental system and specimen combined with pressing die.

충격실험은 Fig.1과 같이 에어 콤푸레샤를 사용하여 에어건의 원리로 실험을 수행하였으며 작동 원리는 볼을 실은 캐리어를 배럴의 안쪽에 위치시키고, 공기 압축기로 공기압을 제어하여 볼밸브를 순간적으로 개방시킨다. 이때 캐리어는 압축공기에 의해 가속되며 시편의 40mm전방에 위치한

stopper에 의해 캐리어는 정지가 되고, 볼은 관성에 의해 비행을 계속하여 시편에 충격을 가하게 된다. 이때 볼의 충격 속도는 압축공기의 압력 조절에 의해 수행되었다. 볼의 충격속도 측정은 배럴 선단의 끝, 즉 시편을 전방으로 100mm와 200mm지점에 위치한 2쌍의 속도측정 적외선다이오드를 설치하여 캐리어가 지날때의 신호를 잡아 오실로스코프를 통해 시간을 측정하여 속도를 계산하였다.

#### 2.1.2 시험편

시험편은 우리가 일상생활에서 접할 수 있는 대표적인 취성재료인 soda-lime glass를 사용하였으며, 시편의 크기는 40mm × 100mm × 5mm로 하였다. Table.1은 시편과 충격입자의 물성치를 나타내고 있다.

Table 1 Mechanical properties of the specimen and indenters

Material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	H <sub>v</sub> (Gpa)	C <sub>0</sub> (m/s)
Glass	2.5	75	0.25	6.5	5477
Steel ball	7.85	210	0.29	8.0	.
Zirconia ball	6	300	0.14	10	.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 soda lime glass의 크랙진전과정

Fig.2 는 3mm steel ball에 의한 충격입자의 속도에 따른 전체적인 크랙진전과정을 나타낸다. 가장 먼저 링크랙(v=9m/s)이 발생하고 이어 초기 링크랙의 끝에서 콘크랙(v=10.3m/s)이 나타나기 시작한다. 속도가 계속 증가하면 링크랙이 반경방향으로 성장을 계속하며 콘크랙은 두께방향으로 성장을 한다. 그리고 콘크랙의 사면에서는 래터럴 크랙(v=24.9m/s)이 성장하고 최외곽 링크랙으로부터 레디얼크랙(v=29.5m/s)이 성장하기 시작한다. 충격입자의 속도가 계속 증가하면crushing, erosion(표면탈락)현상이 발생하며 이어 콘크랙이 시편으로부터 분리되며 최종적으로 시편이 파단(v=47.6m/s)된다. 시편의 파단 원인은 반경방향으로 성장하는 레디얼크랙이 주요 원인이며 가끔 콘크랙 사면에

서 발생하여 시편 표면으로 성장하는 래터럴크랙이 레디얼크랙과 결합하여 파단이 발생한다.

시편으로부터 완전분리되었다. Fig.4에서 링크랙의 진전을 살펴보면 최대폭 링크랙(di)의 경우 거의

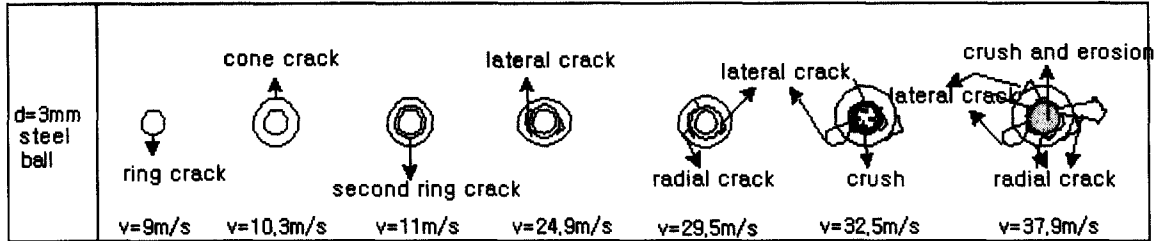


Fig. 2 Crack propagation process by impact of small sphere

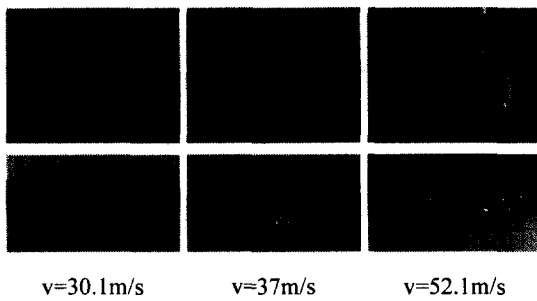


Fig. 3 Behavior of specimen by impact of steel ball

재질에 상관없이 속도가 증가할수록 서서히 크기가 증가한다. 반면에 최외곽 링크랙( $d_o$ )은 충격입자의 속도가 30m/s 이상에서는 steel ball의 경우가 zirconia ball의 경우보다 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 steel ball의 밀도( $\rho = 7.85$ )가 zirconia ball의 밀도( $\rho = 6.0$ )보다 크기 때문에 운동량의 차이에 의해 나타나는 결과로 여겨진다. 이러한 링크랙은 충격입자가 시편과 접촉할 때 접촉면 아래 부분은 압축상태에 놓여 레디얼 응력이 압축을 나타내는 반면 접촉면 바깥부분은 레디얼 응력이 인장상태에 놓이게 된다. 따라서 그 경계부근에서 최대전단 응력이 발생하여 링크랙을 유발하게 된다.<sup>(9)</sup>

### 3.2 충격입자의 재질에 따른 영향

#### 3.2.1 링크랙의 변화

입자의 재질에 따른 영향을 관찰하기 위하여 지름이 3mm인 steel ball과 zirconia ball를 충격입자로 사용하여 실험을 수행하였으며 Fig.3는 steel ball에 의한 시편의 손상을 정면과 측면에서 촬영한 실험사진을 나타내고 있으며 Fig.4는 충격입자의 재질과 속도에 따른 링크랙의 크기변화를 그래프로 나타내고 있다.

위의 실험사진을 살펴보면,  $v=30.1\text{m/s}$ 의 경우 링크랙과 콘크랙이 함께 나타나고 있으며 실제 눈으로 콘크랙을 분별하기는 힘들다. 그리고  $v=37\text{m/s}$  경우는 콘크랙의 사면 끝부분에서 나타나고 있는 래터럴 크랙을 관찰할 수 있다.  $v=52.1\text{m/s}$ 에서는 크게 성장한 레디얼 크랙과 래터럴 크랙, crushing 영역, 표면탈락현상등을 관찰할 수 있으며 측면 사진에서 알 수 있듯이 콘크랙이

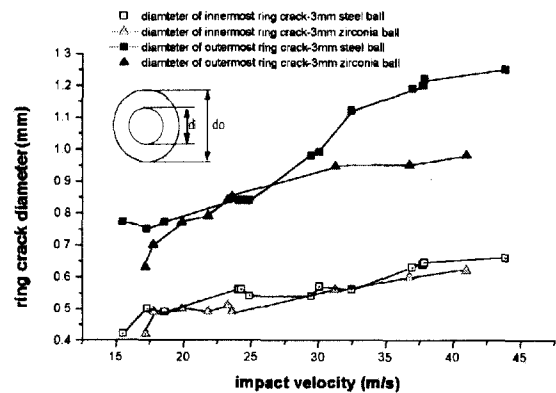


Fig. 4 Diameter of ring crack by steel ball and zirconia ball

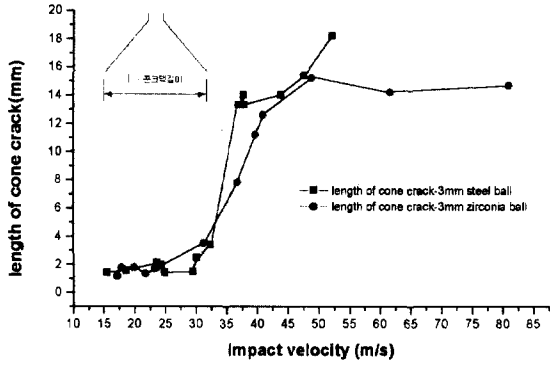


Fig. 5 Length of cone crack by steel ball and zirconia ball

### 3.2.2 콘크랙의 변화

링 크랙에 이어 나타나는 콘 크랙의 변화를 Fig.5에 나타내었다. 이러한 콘 크랙의 진전은 충격시 접촉면 하부에서 발생하는 응력파의 진행방향을 따라 일어나고 최내곽 링 크랙으로부터 발생하기 시작하는 것으로 알려져있다.

실제 충격입자의 재질에 따른 콘 크랙의 변화를 Fig.5에서 살펴보면 콘 크랙의 길이는 steel ball의 경우와 zirconia ball의 경우 모두다  $v=30\text{m/s}$ 까지는 거의 일정한 길이를 유지하다가 그 이후에 급격한 증가를 보였다. steel ball인 경우, 급격한 증가후 완만한 증가를 보이다  $50\text{m/s}$  부근에서 다시 급격한 증가를 보인 후 파단이 일어났다. zirconia ball인 경우에는  $50\text{m/s}$  이후에서 더 이상 콘 크랙의 길이가 증가하지 않고 속도의 증가에 따라 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 링 크랙과 콘 크랙에 이어 충격속도가 커지면 시편에 crushing이 발생하게 되는데 steel ball의 경우  $v=32.5\text{m/s}$ 에서 crushing이 발생하였고, zirconia ball의 경우  $v=48.9\text{m/s}$ 에서 발생하였다. 이러한 crushing이 발생한 이후에는 래터럴 크랙과 링 크랙이 크게 성장함을 알 수 있었다. 이것은 접촉면 아래에서 발생한 소성변형영역에 축적된 변형에너지가 래터럴 크랙과 래디얼 크랙의 구동력을 제공하기 때문으로 여겨진다.

또한 steel ball의 경우 충격속도가  $v=47.6\text{m/s}$ 에 이르면 콘 크랙이 시편으로부터 완전히 분리가 되고 그 이후에 완전한 파단이 일어났다. 상대적으로 운



Fig. 6 Cone crack separated from specimen ( $v=49\text{m/s}$ , zirconia ball)



Fig.7 Turn-up phenomenon and development of lateral crack ( $v=42\text{m/s}$ , zirconia ball)

Table 2 Critical velocities for the impact ball materials

materials	ring crack (m/s)	crushing (m/s)	cone crack separation (m/s)	fracture (m/s)
steel	9	32.5	47.6	50
zirconia	11.5	39.7	49	67.1

동량이 적은 zirconia ball은  $v=49\text{m/s}$ 에서 콘 크랙이 분리되고(Fig.6참고)  $v=67.1\text{m/s}$ 에서 시편이 완전 파단되었다. 이러한 재료의 파단은 대부분 ball의 속도증가에 따른 래디얼 크랙의 성장에 의해 발생하며 가끔은 래터럴 크랙이 래디얼 크랙과 결합하여 재료에 큰 손상 또는 파단을 초래하는 경우도 있다.<sup>(10)</sup> 특히 콘 크랙 사면의 끝에서 turn-up현상이 발생할 때 이 부분에서 래터럴 크랙이 급격하게 성장함을 알 수 있었다. Fig.7는 콘 크랙 사면에서 발생하고 있는 래터럴 크랙과 turn-up영역과 결합하여 급격히 성장하고 있는 lateral crack을 보여준다. 그리고 충격입자의 재질에 따른 크랙 발생의 임계속도를 Table2에 정리하였다.

### 3.3 충격입자의 크기에 따른 영향

충격입자의 크기에 따른 영향을 알아보기 위하여 지름이 각각 2,3,4mm인 steel ball을 사용하여 충격 시험을 수행하였으며, Fig.8은 입자크기에 따른 링 크랙의 크기변화를 나타내고 있다. 그래프를 살펴보면 최내·외곽 링 크랙의 크기는 충격입자의 크

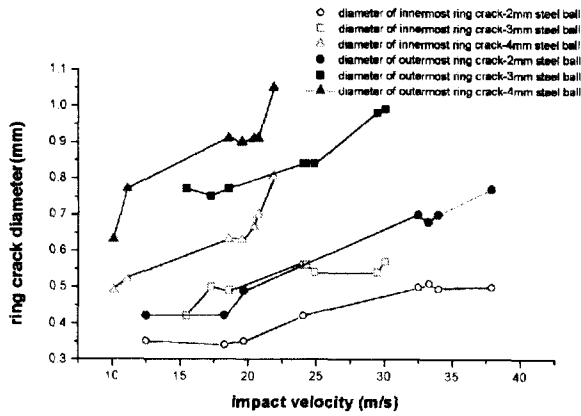


Fig. 8 Diameter of ring crack by the size of steel ball

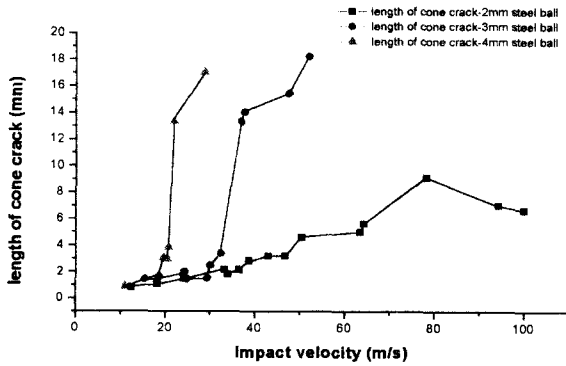


Fig. 9 Length of cone crack by the size of steel ball

기에 비례하고 충격입자의 속도가 증가할수록 점진적인 크기의 증가를 나타내며 ball의 크기가 커질수록 최내·외곽 링 크랙 값의 기울기도 커짐을 알 수 있다. 특히 지름4mm steel ball의 경우  $v=19.6\text{m/s}$  이후에서 최내곽 링 크랙(di)과 최외곽 링 크랙(do)의 값이 급격히 증가하였다. 그리고 ball의 크기가 커질수록 data 구간도 짧아지는데 이는 충격입자가 클수록 낮은 속도에서 crushing이 발생하기 때문이다.

Fig.9 에서는 콘 크랙 길이의 변화를 보여준다. 직경 2mm인 강구에서는  $v=78.1\text{m/s}$ 까지 완만한 증가를 보이다가 그 이후 속도에서는 콘 크랙의 크

기가 감소하는 현상이 보였으며, 깊이 방향의 성장 또한 이루어지지 않았다. 이것은 직경이 작은 강구가 고속에서 소성 변형하여 충격에너지를 흡

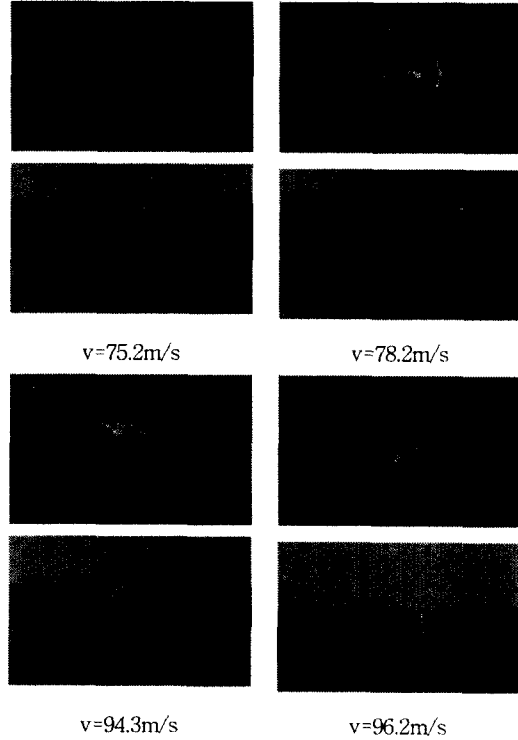


Fig. 10 Appearance of splinter cracks by impact of steel ball (d=2mm)

수한 결과로 여겨진다. 실제  $v=60\text{m/s}$  이상에서 강구의 소성변형된 모양을 관찰할 수 있었다.

직경3mm, 4mm강구의 경우는 특정속도 이상이 되면 급격한 증가를 나타내 보였다. 그리고 직경 2mm 강구인 경우, ball속도가  $v=110\text{m/s}$ 에 이를때 까지 콘 크랙의 분리와 파단을 발생하지 않았다.

그러나 ball의 속도가  $v=75.2\text{m/s} \sim 100\text{m/s}$ 에서 Fig.10에서 보는바와 같이 수직상균열이 출현했다. 이러한 수직상균열은 시편의 두께에 비해 충격입자의 질량이 작은 경우(두께 5mm, 강구 직경 2mm)에 발생하는 특징이 있다. 충격입자의 크기에 따른 크랙 발생의 임계속도를 Table.3에 정리하였다.

Table 3 Critical velocities for the size of steel ball

ball size	ring crack (m/s)	crushing (m/s)	cone crack separation (m/s)	fracture (m/s)
2mm	12.5	43.1	×	×
3mm	9	32.5	47.6	50
4mm	7.8	21	21.9	28.7

3.4 시편의 두께에 따른 영향

시편의 두께에 따른 영향을 관찰하기 위하여 시편의 두께를 5mm와 8mm로 하여 실험을 수행하였다. Fig.11은 시편 두께에 따른 링 크랙의 성장거동을 나타내고 있으며, 그래프에서 알 수 있듯이 시편의 두께가 두꺼울수록  $d_i$ 와  $d_o$ 의 크기는 작아지고 시편의 두께에 따른 최내·외곽 링 크랙은 유사거동을 보이며, 속도에 따라 완만하게 증가함을 알 수 있다.

반면 콘 크랙의 변화(Fig.12참조)는 두께가 5mm 시편의 경우는  $v=30m/s$  이후에서 급격한 성장을 내고 있으나, 두께가 8mm 시편에서는 속도의 증가에 따라 완만한 증가를 보이고 있다. 이것은 앞서 두께 5mm시편, 직경 2mm강구에 의한 결과와 같이 두께 8mm 시편에서도  $v=36.8m/s \sim 100m/s$ 에서 수지상균열의 발생으로 콘 크랙의 형성이 늦어지기 때문이다

그리고 두께 5mm인 시편이 47.6m/s에서 콘 크랙이 시편으로부터 완전 분리가 되는 반면, 두께 8mm시편은  $v=100m/s$ 에 이를 때까지 콘크랙 분리가 일어나지 않았다. crushing이 발생하는 속도를 살펴보면 두께 5mm시편의 경우  $v=32.5m/s$ 에서, 8mm시편의 경우  $v=34.7m/s$ 에서 각각 발생하였으나, 8mm 시편의 경우 crushing이 발생한 이후 콘 크랙이 깊이 방향으로 거의 성장을 하지 못하였으며 콘 크랙의 크기도 성장이 둔화됨을 관찰할 수 있었다.

3.5 잔류강도의 평가

잔류강도를 평가하기 위하여 Fig.13과 같이 4점 굽힘시험을 수행하였다. Fig.14는 불재질에 따른 잔류강도를 그래프로 나타내고 있다. 그래프에서 불의 재질에 관계없이 충격입자가 32.5m/s이하의

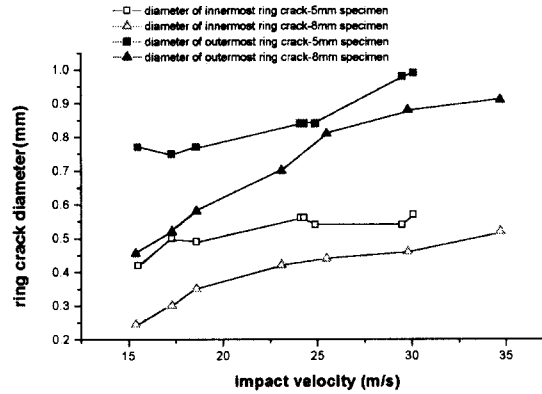


Fig. 11 Diameter of ring crack by steel ball for the thickness of specimen

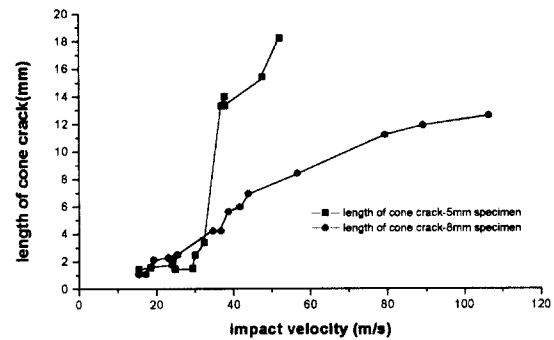


Fig. 12 Length of cone crack by steel ball for the thickness of specimen

저속으로 시편에 충돌하였을 때 시편의 잔류강도는 70~80MPa의 값을 갖는다. 이러한 값의 분산은 시편의 폭이 40mm로 링 크랙이나 초기단계의 콘 크랙의 크기보다 훨씬 크기 때문에 링 크랙이나 초기단계의 콘 크랙이 잔류강도에 전혀 영향을 못 미치고 있음을 알 수 있다. 실제 시편을 관찰해보면 파단면이 링 크랙이나 콘 크랙을 지나고 있지 않음을 관찰할 수 있다. 따라서 저속충돌의 경우 잔류강도는 입자 충격에 의한 손상부보다는 시편 절단면의 표면 거칠기나 결합정도에 더 영향을 받는다고 할 수 있다. 그리고 steel ball은  $v=37m/s$ 에서, zirconia ball은  $v=31.3m/s$ 이후에 콘 크랙의 급격한 성장으로 인해 잔류강도가 급격히 저하되고 있음을 관찰할 수 있다.

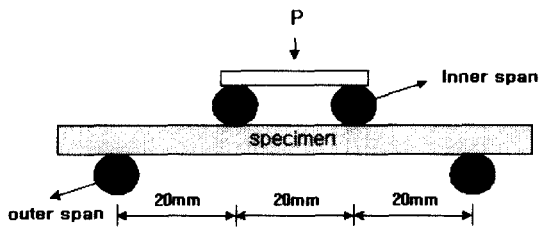


Fig. 13 Scheme of 4-point bending test

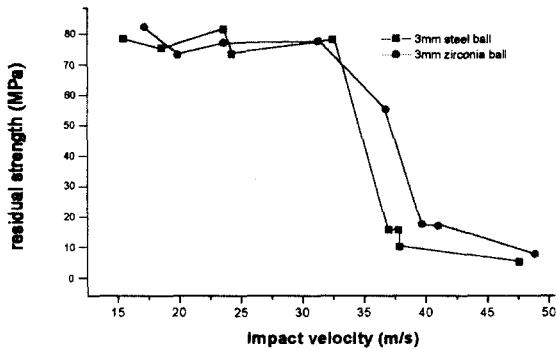


Fig. 14 Residual strength for the impact ball material

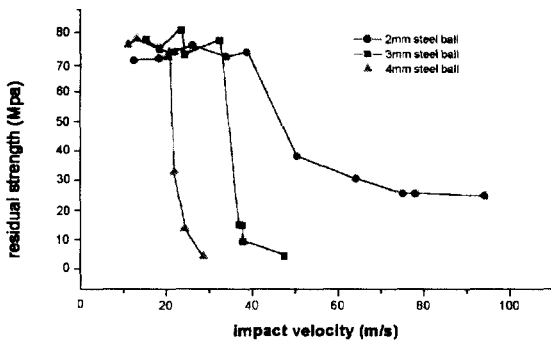


Fig. 15 Residual strength for the size of steel ball

그리고 충격입자의 크기가 잔류강도에 미치는 영향을 Fig.15에서 살펴보면 ball의 크기가 2mm일 경우 콘 크랙의 크기가 4mm 이상이 되는  $v=50.5\text{m/s}$ 에서 강도가 크게 저하되고 있음을 관찰할 수 있으며, 3mm steel ball은  $v=37\text{m/s}$ 에서, 4mm

steel ball의 경우는  $v=21.9\text{m/s}$ 이상에서 강도가 급격히 저하되었다. 이렇듯 ball의 크기에 상관없이 시편의 폭에 대해 콘 크랙의 크기가 4mm 이상이 되면 굽힘 강도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한 순수 굽힘시험에서 콘 크랙의 길이보다는 콘 크랙의 깊이가 잔류강도에 더 큰 영향을 미치는 것을 관찰할 수 있었다.

#### 4. 결론

soda lime glass의 충격손상에 대한 영향을 크랙의 진전과정과 함께 충격입자, 충격재료의 구속조건 및 잔류강도등을 통해 평가해 보았다.

- I. soda lime glass의 충격에 의한 크랙진전 과정을 파악할 수 있었다.
- II. 충격입자의 재질은 최내곽 링 크랙(di)의 변화에는 영향을 주지 못하나, 최외곽 링 크랙(do)의 변화에는 밀도가 높은 재질이 그 변화폭이 크다. 그리고 콘 크랙의 길이는 충격입자의 재질에 무관하게 어느 특정속도 이상에서 급격한 증가를 보인다.
- III. 최내, 외곽 링 크랙의 크기는 충격입자의 크기에 비례하고 충격입자의 속도가 증가할수록 점진적인 크기의 증가를 나타낸다. 그리고 충격입자의 크기가 커질수록 최외곽 링 크랙의 크기는 급격히 증가한다.
- IV. 시편의 두께에 비해 상대적으로 충격입자의 질량이 작을 경우 수직상균열이 발생, 성장하고 콘 크랙의 성장이 지연되었다.
- V. 링 크랙이나 초기단계의 콘 크랙은 잔류강도에 전혀 영향을 미치지 못한다. 그러나 충격입자의 크기에 관계없이 콘 크랙의 크기가 4mm 이상이 되면 굽힘강도에 큰 영향을 미친다. 콘 크랙의 길이보다는 콘 크랙의 깊이가 잔류강도에 더 큰 영향을 미친다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단 지역대학 우수과학자 지원연구에 의해 수행된 것이므로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. S. Timoshenko and J. N. Gooder. , "Theory of Elasticity," McGraw-Hill Book Co., New york, pp. 383, 1965.
2. Frankm F. C. and Lawn, B.R., "On the Theory of Hertzian Fracture," Proc. R. Soc., Vol. A209, pp. 291~306, 1967.
3. Johnson, K. L., "Contact Mechanics," Cambridge University Press, New York, 1985.
4. Tsai, T.M., "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, 1971.
5. Knight, C.G., Swain, M. V. and Chaudhri, M. M., "Impact of Small Steel Spheres on Glass Surfaces," J. Mater. Sci., Vol. 12. pp. 1573~1586, 1977.
6. Tillet. J.R.A., "Fracture of Glass by Spherical indenters.," Proc. Roy. Soc., Vol. B69. pp. 47~54, 1956.
7. Fields. J.E., Sun. Q. and Townsend. D., "Ballistic Impact of Ceramics," Inst. Phy. Conf. Series No. 102. pp. 387~393, 1989.
8. Persion, J., Breder, K. and Rowcliffe, D.J., "Loading Rate Effects During Indentation and Impact on Glass with Small Spheres," J. Mater. Sci., Vol. 28, pp. 6484~6489, 1993.
9. Chaudhri, M.M. and Walley, S.M., "Damage to Glass Surfaces by the Impact of small Glass and Steel Sphere," Philos. Mag., Part A, Vol. 37, No. 2, pp. 153~165, 1978.
10. Suh, C.M, Shin, H.S, Chung, S.M., and Hwang, B.W.: "An Experimental Study on Damage Mechanism of Glass Resulting from Partical Impact," Trans KSME(A), Vol. 20, No. 6, pp. 1903~1912, 1996.