

<논 문>

## 표면거칠기를 가진 유리의 입자충격 손상기구에 관한 실험적 연구

서창민\* · 정성묵\*\* · 이문환\*\*\*

(1996년 1월 27일 접수)

### An Experimental Study on the Damage Mechanism of Particle Impact in a Scratched Glass

C. M. Suh, S. M. Chung and M. H. Lee

**Key Words :** Ring Crack(링크랙), Cone Crack(콘크랙), Lateral Crack(횡크랙), Radial Crack(레이디얼크랙), Crushing(분쇄), Particle Impact(입자충격)

#### Abstract

The damage mechanism by the impact of steel ball on the soda-lime glass having a different surface roughness was investigated. An initiation and a propagation behavior of cracks formed by each impact velocity were quantitatively studied. A 4-point bending test was carried out to evaluate the remaining bending strength of a scratched soda-lime glass which impacted by the steel ball. As the surface roughness was increased, the shape of cracks became more irregular rather than those of the smooth specimens. The phenomenon of turning up in the wing of cone cracks occurred even at the lower velocity than the critical velocity caused the crushing. The threshold velocity of cracks initiation generally became lower than those of smooth specimen. An initiation and a propagation behavior of radial cracks had no relation with the direction of scratch on the surface. The remaining bending strength of the scratched specimen according to impact velocity had no big difference compared with those of the smooth specimen.

#### 1. 서 론

일반적으로 유리와 같이 극히 취성적인 재료는 재료의 표면에 존재하는 결함에 매우 민감한 것으로 알려져 있으며 외부 물체의 충격에 의한 손상 또한 재료의 강도에 큰 영향을 미칠 것으로 기대된다. 그리고 취성재료인 유리와 세라믹에 대한 입자 충격에 관한 연구<sup>(1~9)</sup>가 외국에서 꾸준히 행하여져

왔다.

전보<sup>(10)</sup>에서는 평활재 유리의 충격시험을 실시하여 충격속도와 강구와의 관계에서 크랙의 종류와 파단형태를 정량적으로 연구하였다.

본 연구에서는 이의 연속 연구로서 대표적인 취성재료인 유리에 서로 다른 표면거칠기를 주어 표면상의 거칠기가 강구의 충돌에 의해 발생하는 손상에 미치는 영향을 충돌속도에 따라 정량적으로 연구하였다. 또한 충격손상이 가해진 시험편에 대해 4점 굽힘시험을 실시하여 충돌속도에 따른 굽힘강도의 저하를 조사하였다. 이러한 표면거칠기 재료에서의 결과를 인공적인 거칠기를 가하지 않은

\*회원, 경북대학교 기계공학과

\*\*회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*회원, 구미전문대학 자동차과

평활재와 비교하여 보았다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편과 입자

유리는 일반 상업용 유리인 소다석회 유리를  $15 \times 100 \times 5$ (mm)의 크기로 절취하여 사용하였으며 표면거칠기가  $R_{\max}=2\sim 4 \mu\text{m}$ ,  $R_{\max}=6\sim 9 \mu\text{m}$ 인 두 종류의 시험편을 준비하였으며 이러한 시험편의 표면조도는 거칠기 테스트로 확인하였다.

실험에 사용된 강구는 베어링강 STB2로 직경 1 mm와 직경 2 mm의 것이며 시험편과 강구에 대한 기계적 성질과 화학성분은 전보<sup>(10)</sup>와 동일하다.

### 2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 입자충격의 실험장치는 Fig. 1과 같이 공압을 이용하는 에어건(air gun)으로서 본 실험실에서 자체 설계하여 제작하였다.

충격시험은 0~10기압 사이의 저기압에서 행하였고 소기의 압력을 얻기위해 10기압 용량의 공기 압축기를 사용하였다. 어큐무레이터는 소형의 압력용기를 사용하였고 조정기는 10기압, 솔레노이드 밸브는 9기압 용량의 것을 각각 사용하였다. 배럴은 광센서의 사용을 가능하게 하기 위하여 내경 8 mm, 두께 2 mm의 투명 아크릴 관을 사용하였다.

실험방법은 압축기의 공기를 조정기를 통해 소기의 압력으로 어큐무레이터에 축적시키고 이렇게 축

적된 공기를 솔레노이드 밸브를 통해 순간적으로 개폐 시킴으로써 강구를 실은 캐리어를 가속시켰다. 강구를 실은 캐리어가 배럴 끝부분의 스톱퍼에 부딪히게 되면 캐리어는 정지하게 되지만 강구는 관성력으로 인해 속도를 유지한 채 시험편과 충돌한다. 이때 강구의 충돌속도는 스톱퍼에 부딪히기 직전의 캐리어의 속도를 측정함으로써 추정하였고, 캐리어의 속도는 두개의 광센서 사이를 통과할때 발생하는 신호를 오실로스코프로 측정하였다.

충격시험은 강구를 7~130 m/s의 범위 내의 여러 종류의 속도에서 유리표면에 충돌하도록 하여 실시하였다. 실험이 완료된 시험편은 실체 현미경을 이용하여 생성된 크랙의 형태를 면밀히 관찰, 비교한 뒤 4점 굽힘시험을 통하여 강도저하를 측정하였다.

## 3. 실험결과와 고찰

입자충격에서 재료의 표면의 거칠기가 크랙의 생성에 미치는 영향을 알아보기 위해 재료의 표면을 사포(sand paper)로서 스크래칭하였다.  $R_{\max}=2\sim 4 \mu\text{m}$ 의 표면에 직경 2 mm의 강구로 실험이 행해진 시험편을 2S, 그리고 직경 1 mm 강구로 실험이 행해진 시험편을 1S로 명명하였으며  $R_{\max}=6\sim 9 \mu\text{m}$ 의 표면에 대해서도 동일한 방법으로 각각 실험한 경우를 2R, 1R로 각각 명명하였다.

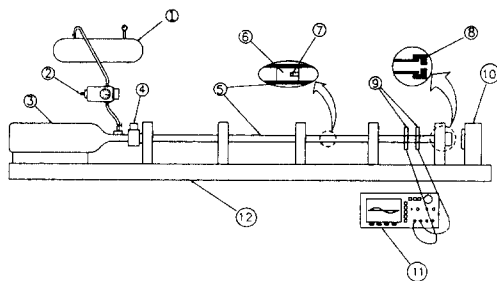
### 3.1 직경 2 mm 강구충돌에 대한 표면거칠기의 영향

#### 3.1.1 링크랙과 표면거칠기와의 관계

표면거칠기재에 대한 2 mm 강구충돌의 결과를 Fig. 2에 개략적으로 도시하였다.

표면거칠기를 준 시험편에 대한 직경 2 mm 강구의 충격시험에서 각 크랙발생의 하한계 속도는 평활재의 결과보다 낮아지는 경향을 알 수 있다. 링크랙의 발생은 2S재는 약 6 m/s, 2R재는 약 5 m/s에서 발생하였는데 이 값은 평활재의 약 9 m/s보다 매우 낮은 값을 나타내고 있다.

표면거칠기가 증가할수록 링크랙은 불규칙한 형상을 나타내어 완전한 원형을 이루지 않고 Fig. 3(a)처럼 타원형을 이루는 경우가 많았으며 더욱 심한 경우 링크랙의 경계부가 불분명한 경우도 있었다. 이러한 경향은 2S재보다는 표면거칠기가 큰



- |                             |                  |
|-----------------------------|------------------|
| ① Compressor                | ② Regulator      |
| ③ Accumulator               | ④ Solenoid valve |
| ⑤ Barrel                    | ⑥ Carrier        |
| ⑦ Steel ball                | ⑧ Stopper        |
| ⑨ Photosensor               |                  |
| ⑩ Supporter with a specimen |                  |
| ⑪ Oscilloscope              | ⑫ Supporter      |

Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup for a particle impact tester

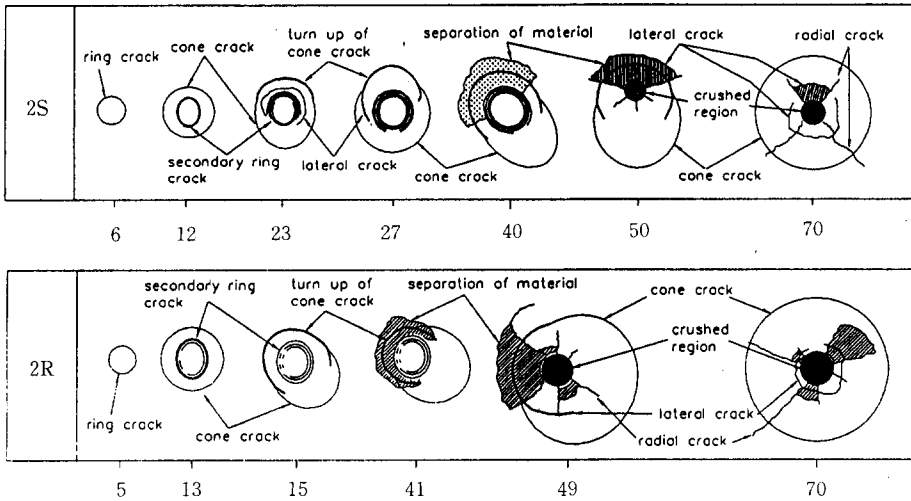


Fig. 2 Variation of crack pattern according to impact velocity at the 2S and the 2R specimens

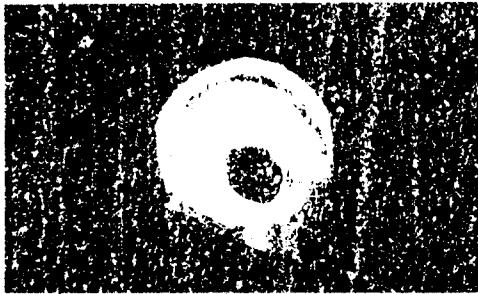


Fig. 3(a) Elliptical shape of ring crack

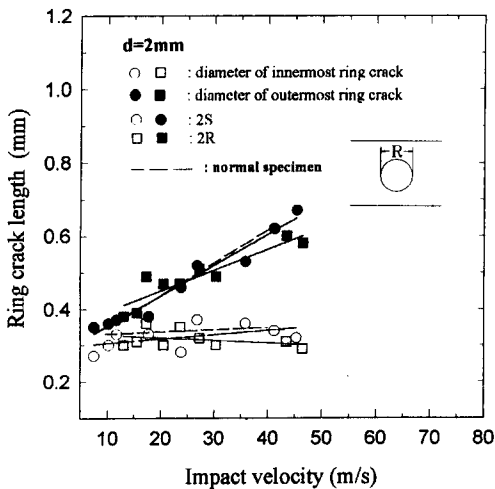


Fig. 3(b) The variation of a ring crack diameter according to impact velocity on 2S and 2R specimen

2R재의 경우가 더욱 심하였다. 또한 2차적 링크랙의 원주방향의 손상의 정도가 균일하지 않고 초기 링크랙이 발생된 부분에서 더욱 심한 손상이 발생한 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 3(b)에는 2S재와 2R재에 대한 충돌속도에 따른 링크랙의 크기를 나타내었다. 여기에서 최내곽 링크랙의 크기에서 표면거칠기에 대한 효과는 거의 확인할 수 없이 점선으로 표시된 평활재의 결과와 거의 일치하였다. 최외곽 링크랙의 크기는 표면거칠기가 적은 2S재의 결과는 평활재의 결과와 거의 일치하였지만 표면거칠기가 심한 2R재에서는 자료의 분산폭이 커졌고 2S재와 평활재보다 25 m/s 이상에서 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

3.1.2 콘크랙과 표면거칠기와의 관계

표면거칠기를 가한 시험편상의 콘크랙의 성장형태는 평활재와 비교했을 때 매우 다른 양상을 나타내었다. 콘크랙의 크기가 증가함에 따라 콘크랙의 성장이 매우 불규칙하게 되었다. 즉, 대부분의 시

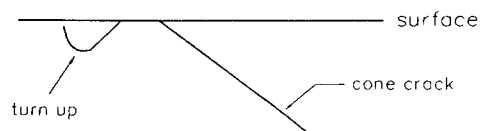


Fig. 4 Local turn up of cone crack in scratched specimen

험편에서 콘크랙의 날개의 일부는 Fig. 4처럼 시편 내부로 성장을 계속한 반면 일부는 성장의 방향을 급하게 바꾸어 표면쪽으로 성장하는 되돌림 현상을 나타내었다. 일부 시험편에서는 콘크랙 날개의 모든 부분에서 되돌림현상이 발생하기도 하였다.

이러한 콘크랙의 되돌림부는 급격히 표면으로 성장하여 표면 바로 아래부분에서 표면과 평행하게, 넓게 성장한 뒤 크랙의 끝단이 Fig. 5와 같이 표면과 만나기도 하며 심한 경우 표면의 일부가 탈락되기도 하였다. 콘크랙 성장의 불규칙성은 표면의 조도가 크고 거칠수록 심하게 되었으나 표면분쇄 후 충돌속도가 높아짐에 따라 되돌림현상이 적어져서 충돌속도가 약 70 m/s 근방에 도달하면 콘크랙 끝단에서의 되돌림현상이 거의 발생하지 않았다. 평활재에서는 분쇄현상이 일어나기 전의 시험편에서는 콘크랙의 되돌림현상도 없었으며 재료의 탈락도 없었고 분쇄현상이 발생한 시험편에서도 큰 되돌림 현상은 발생하지 않았다. 콘크랙이 시편 내부로 성장을 계속한 부분에서 초기 횡크랙이 발생하였고 이것이 되돌림부와 연결되어 전체적인 횡크랙을 형성하였다.

Fig. 6에서 2S재와 2R재의 콘크랙의 크기를 평활재의 경우와 비교하여 보았다. 콘크랙의 성장이 매우 불규칙하게 된, 즉 되돌림현상이 심하게 일어난 속도 구간 30~50 m/s에서 콘크랙의 크기가 평활재의 경우에 비해 상대적으로 작음을 확인할 수 있었고 강구의 속도가 증가함에 따라 되돌림현상이 적어짐으로써 콘크랙 크기의 차이가 없어지는 것을 관찰할 수 있다.

콘크랙의 성장곡선은 분쇄현상을 기점으로 그 크기와 성장 기울기에서 평활재보다 더욱 큰 변화를 나타내었다. 분쇄현상이 일어나기 전까지의 콘크랙의 성장은 아주 작았고 성장 기울기 또한 매우 작았다. 하지만 분쇄현상의 발생을 기점으로 콘크랙의 크기가 급작스럽게 증가하였고 성장 기울기 또한 매우 크게 되었다.

2S재와 2R재 모두 약 50 m/s에서 표면의 분쇄현상이 발생하였다. 이는 평활재의 45 m/s와 거의 같은 속도로서 직경 2 mm 강구의 실험에서는 표면거칠기가 재료의 소성변형인 분쇄현상에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 보여 주고 있다.

분쇄현상을 일으킨 시험편중 일부에서는 횡크랙이 표면으로 성장한 부분 아래의 콘크랙 사면에서 초기 횡크랙으로 보이는 또 다른 크랙이 관찰되었

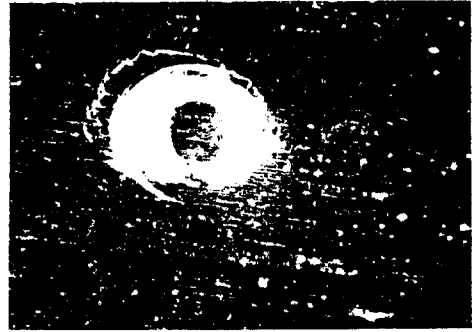


Fig. 5 The meeting of turned up crack and surface

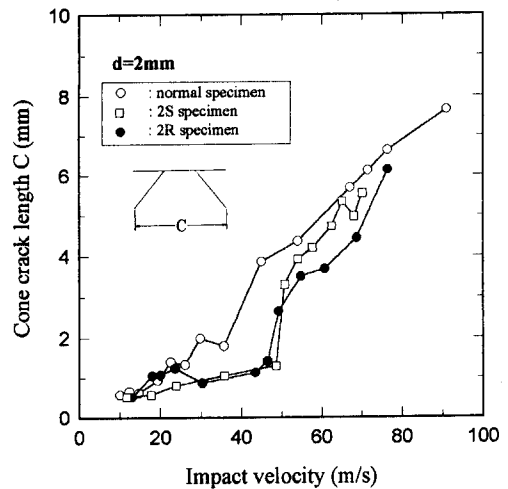


Fig. 6 The comparison of a cone crack size on the experiment of d=2 mm steel ball at smooth specimen and scratched specimen

다. 이는 횡크랙이 하나가 아닌 여러 개가 따로 발생할 수 있다는 것을 보여 준다.

### 3.1.3 레이디얼 크랙과 표면거칠기와의 관계

표면거칠기재에 대한 2 mm 강구충돌에 의해 발생한 레이디얼 크랙의 크기를 Fig. 7에 나타내었다. 여기에서 평활재와 거칠기재 사이에서 레이디얼 크랙의 크기는 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 레이디얼 크랙의 성장방향은 표면 스크래치의 방향과는 관계가 없었고 크랙의 길이도 평활재에 비해 크지는 않았다. 그러므로 표면 스크래치가 레이디얼 크랙의 발생과 성장에 영향을 미친다고 판단하기가 어려웠다. 직경 2 mm 강구충돌에서 표면거칠기가 증가할수록 분쇄된 접촉부 아래의 스플린터 크랙(splinter crack)이 시편의 깊이 방향으로

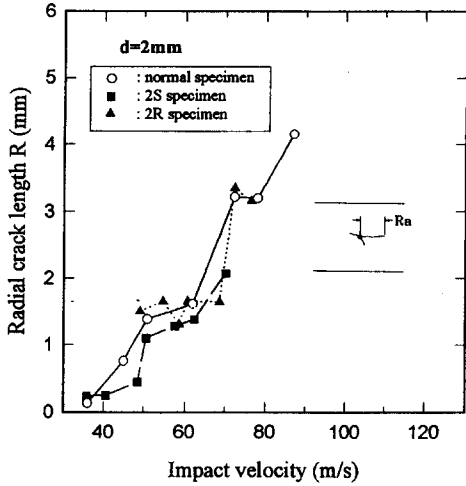


Fig. 7 The comparison of a radial crack length on the experiment of d=2mm steel ball at smooth specimen and scratched specimen



Fig. 8 Large splinter crack

찬가지로 표면거칠기가 심해짐에 따라 링크랙의 형상이 불규칙하게 되었다. 하지만 링크랙 발생의 하한계 속도는 표면의 거칠기로 인하여 관측할 수 없었다.

크게 성장하여 Fig. 8처럼 마치 half-penny 크랙과 같은 형상을 띄었다.

3.2 직경 1mm 강구충돌에 대한 표면거칠기의 영향

두 종류의 표면거칠기 재료에 대한 직경 1mm 강구충돌 시험의 결과를 Fig. 9에 간략히 도시하였다. 직경 2mm 강구에 대한 실험에서의 결과와 마

3.2.1 링크랙과 표면거칠기와의 관계

Fig. 10과 같이 2차적 링크랙의 손상 크기는 평활재와 비교했을 때 1S재와 1R재 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 2차적 링크랙의 손상은 초기 링크랙이 존재하는 쪽에서 더욱 심하게 발생하였고 그 반대 쪽은 손상의 정도가 훨씬 작았다. 또한 속도 증가에 따른 2차적 링크랙 손상의 증가율은 직경 2mm 강구충돌의 경우에 비해 매우 낮음을 알 수 있다.

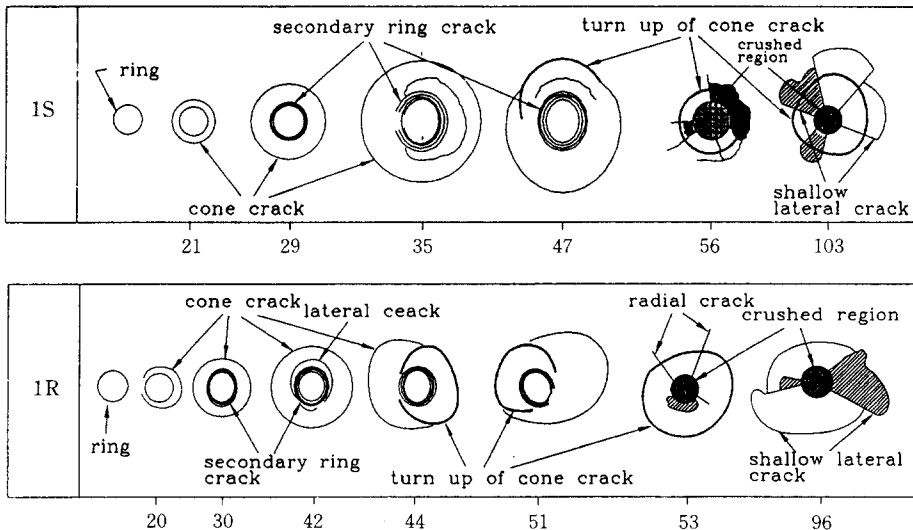


Fig. 9 Variation of crack pattern according to impact velocity at the 1S and the 1R specimens

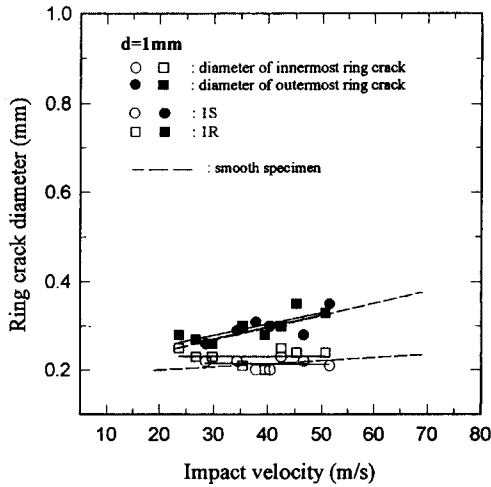


Fig. 10 The variation of a ring diameter and impact velocity at 1S specimen

### 3.2.2 콘크랙과 표면거칠기와의 관계

저속의 강구의 충돌에서는 콘크랙은 시편 내부로 안정적인 성장을 하였지만 그 속도가 증가함에 따라 분쇄현상이 일어나기 전의 시험편임에도 불구하고 콘크랙의 한쪽 날개부분이 성장방향을 표면 쪽으로 바꾸는 되돌림현상을 나타내었다.

직경 2 mm 강구의 충돌에서는 콘크랙 날개의 모든 부분이 되돌림현상을 일으킨 시험편도 있었지만 직경 1 mm 강구충돌의 경우에는 그런 시험편은 찾아 볼 수 없었다. 되돌림을 일으키지 않은 시험

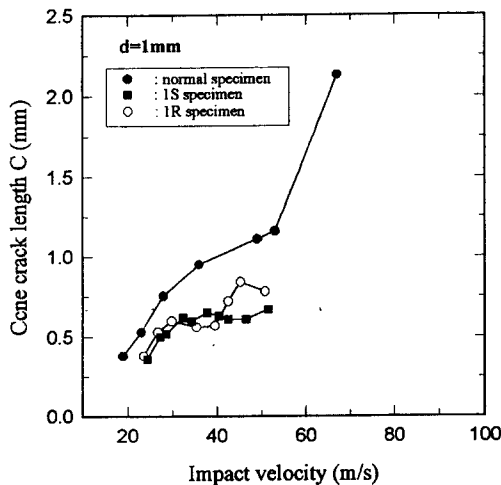


Fig. 11 Cone crack size at the experiment of  $d=1$  mm steel ball

편은 내부로 성장한 콘크랙의 사면에서 초기 횡크랙이 생성되었고 되돌림이 발생한 시험편은 이러한 되돌림부가 시편 내부로 성장한 콘크랙의 날개 부위의 초기 횡크랙과 연결되어 큰 횡크랙을 형성하였다.

Fig. 11에는 1S재와 1R재의 콘크랙의 크기를 평활재와 비교하여 보았다. 1S재와 1R재의 콘크랙의 크기는 콘크랙 날개의 되돌림현상이 발견되지 않은 저속 충돌에서도 평활재보다 작은 것을 확인하였고 되돌림현상이 발생한 시험편에서는 평활재와 비교했을 때 더욱 적은 것을 알 수 있다.

그리고 1S재와 1R재 사이에서 콘크랙의 크기는 거의 차이가 없었다. 1S재에서 콘크랙의 크기는 0.6 mm의 크기에서 성장이 정체되는 경향을 보였으며 1R재의 경우에는 0.6 mm의 크기에서 조금의 성장 정체기간이 있은 뒤 다시 성장이 시작되었다. 반면 평활재에서는 이러한 정체기간이 발견되지 않았다. 직경 2 mm 강구에 대한 충격시험에서는 분쇄현상을 기점으로 콘크랙의 크기와 성장율이 크게 바뀌었지만 직경 1 mm의 경우에는 분쇄현상 이후의 시험편에서는 콘크랙이 모두 되돌림현상을 일으켜 횡크랙으로 전이됨으로써 이러한 경향을 확인할 수 없었다. 또한 직경 1 mm 강구에 의한 Fig. 10의 결과는 2 mm 강구의 결과에 비하면 콘크랙의 길이가 대단히 적음을 쉽게 알 수 있다.

최초의 분쇄현상은 1S재, 1R재 모두 약 55 m/s의 충돌속도에서 발생하였는데, 이는 평활재의 약 70 m/s보다 훨씬 낮은 속도이며 직경 2 mm 강구에 대한 실험결과와는 매우 상이한 결과이다. 이러한 결과는 강구에 대한 크기의 영향을 나타내는 것이 아닌가 생각이 된다.

### 3.2.3 레이디얼크랙과 표면거칠기와의 관계

분쇄현상 이후 콘크랙은 성장방향을 표면으로 바꾸어 횡크랙으로 성장하였다. 이러한 횡크랙은 표면 근방에서 표면과 평행하게 넓게 성장하여 넓은 부위의 입자탈락을 초래하였다. 이렇게 발생된 넓은 횡크랙과는 별도로 1S재와 1R재에서는 shallow lateral crack이 많이 발생하였는데 이러한 크랙은 Fig. 12에서 보는 것처럼 일반적으로 작은 각도 ( $180^\circ$  미만)를 이루는 두개의 레이디얼크랙 사이로 횡크랙이 성장하여 발생하는 것으로 그 크기는 콘크랙의 되돌림에 의한 횡크랙보다 매우 작은 경우 또는 이러한 횡크랙의 경계를 넘는 큰 경우도 있었

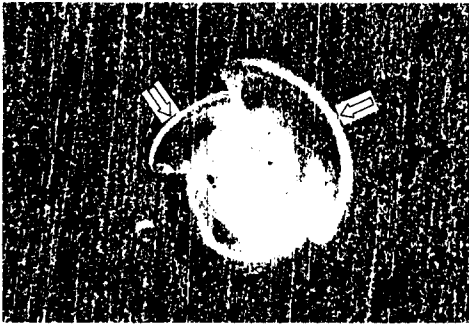


Fig. 12 Shallow lateral crack

고 여러 개가 동시에 발생하는 경우도 있었다.

1S재와 1R재에서는 넓은 횡크랙에 의한 입자의 탈락보다는 shallow lateral crack에 의한 입자 탈락이 많이 발생하였다. 평활재에서는 이러한 크랙보다는 콘크랙의 되돌림에 의해 생성된 횡크랙으로 인해 넓은 범위의 표면이 탈락하는 것을 보였다. 표면거칠기가 심해질수록 이런 shallow lateral crack의 발생이 많아지는 것을 관찰할 수 있었다. 직경 2mm 강구의 실험에서도 이러한 경향을 확인할 수 있었다.

Fig. 13에서 알 수 있듯이 1mm 강구에 대한 레이디얼크랙의 크기는 평활재와 비교했을 때 그 차이를 발견할 수 없었다. 거칠기재의 경우 표면분쇄에 대한 임계속도가 평활재보다 매우 낮았으므로

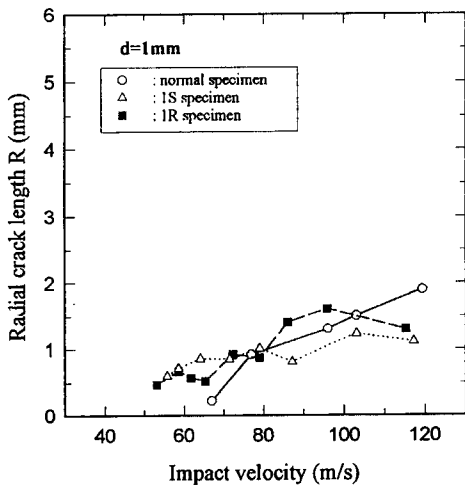


Fig. 13 The comparison of a radial crack length on the experiment of d=1mm steel ball at smooth specimen and scratched specimen

더욱 낮은 속도에서 레이디얼크랙이 발생한 것을 확인할 수 있다. 직경 1mm 강구의 실험에서도 표면에 가해진 스크래치가 레이디얼크랙의 생성과 성장에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 또한 2mm 강구의 결과와 비교해 볼 때 1mm 강구의 레이디얼크랙의 크기는 저속에서는 비슷하지만 속도가 큰 쪽으로 갈수록 그 크기 R은 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

### 3.3 강구 충격에 의한 유리의 굽힘강도의 변화

강구의 충격으로 생성된 크랙이 재료의 굽힘강도 저하에 미치는 영향을 알아보기 위하여 4점 굽힘시험을 행하였다. 4점 굽힘시험에 사용된 지그는 ASTM D790에 의거하였으며 부하속도는 2.4 mm/min을 유지하였다.

Fig. 14에는 강구의 크기에 따라 표면거칠기재의 강구충돌에 의한 강도저하를 평활재와 비교하였다. 직경 1mm 강구충돌의 경우 표면에 미세한 형태를 나타내며 재료의 내부로는 거의 성장을 하지 않은 링크랙은 재료의 강도저하에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 굽힘시험시에 생긴 파단면의 위치도 이러한 링크랙이 생성된 곳에서 먼 곳이었다. 그러나 충격속도가 증가함에 따라 링크랙으로부터 콘크랙이 형성됨에 따라 표면을 거칠게 한 시험편과 평활재 모두 급격한 강도저하가 발생하였다.

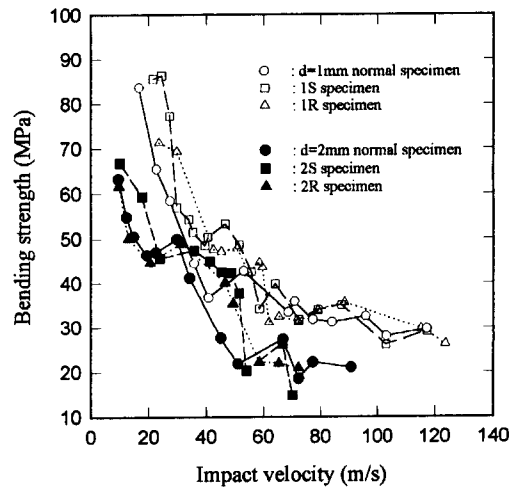


Fig. 14 The comparison of a residual strength of specimens that impacted by d=1mm and d=2mm steel ball at smooth specimen and scratched specimens

특히, 콘크랙이 성장한 시험편의 굽힘강도는 표면이 거친 시험편 쪽이 좀 더 높은 경향이 있다. 이것은 콘크랙의 한쪽 날개부의 되돌림현상으로 인한 이 재료의 콘크랙의 크기가 Fig. 11과 같이 평활재보다 작기 때문이라 생각된다.

이러한 굽힘강도의 급격한 저하는 재료의 표면에 분쇄현상이 발생하기 전까지 계속된다. 분쇄현상 이후 증가되는 충돌속도로 충격시험을 행한 시험편에서는 굽힘강도의 저하가 더 이상 진행되지 않고 일정한 값 약 27 MPa로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 분쇄현상 이후의 굽힘강도는 평활재와 1S재, 1R재와의 사이에서 차이가 나타나지 않았고 그 분산 폭은 대체로 작은 것을 알 수 있었다.

이러한 결과는 강구의 고속충돌시 일반적으로 분쇄현상이 발생하면 추가적인 급격한 강도저하가 발생할 것으로 예상되었지만 실험결과는 분쇄현상으로 인한 표면손상과 레이디얼크랙의 증가로 인한 재료의 급격한 강도저하는 발생하지 않았다. 그림에서 알 수 있듯이 강도의 급격한 저하는 오히려 저속충돌에 의해 발생하는 미소한 콘크랙에 의해서 발생하였다. 그러므로 입자충돌로 인한 재료 표면의 분쇄는 강도저하의 측면보다는 표면 입자의 탈락으로 인한 표면마멸의 측면에 더 큰 의미가 있으리라 판단된다. 또한 표면거칠기 증가로 인한 뚜렷한 강도저하, 즉 1S재와 1R재 사이에서의 강도저하의 차이를 확인할 수 없었다.

직경 2mm의 경우에도 직경 1mm의 경우와 거의 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 즉 링크랙만이 존재했을 때, 거의 일어나지 않던 강도저하가 콘크랙의 증가와 더불어 갑작스레 일어났다. 콘크랙의 되돌림현상이 심하게 일어난 속도 구간의 시험편에서 평활재보다 더욱 높은 굽힘강도를 나타내었으며 2S재와 2R재 사이에서 강도의 차이는 거의 없었다.

1S재와 1R재의 굽힘강도는 분쇄현상이 일어난 이후에 강도저하가 한차례 급격히 일어난 이후 일정하게 유지하는 것을 나타내었다. 분쇄현상 이후의 굽힘강도의 수렴치는 약 20 MPa이었다.

2mm 강구충돌시험과 1mm 강구충돌시험으로 인한 굽힘강도의 저하를 비교하여 보면 강구의 크기가 큰 2mm 강구에 의한 충돌이 유리에 미치는 손상의 영향이 커서 잔류강도가 크게 저하하는 것을 알 수 있다.

## 4. 결 론

(1) 표면거칠기 10  $\mu\text{m}$  이하, 즉 S재, R재의 시험편에 대해 표면거칠기 정도에 비례하여 링크랙은 형상이 불규칙하고 발생 하한계속도가 낮아지며 콘크랙의 경우 되돌림현상에 의한 초기 입자 탈락속도도 낮아졌다.

(2) 크랙의 크기에 있어서 2S재, 2R재의 경우 표면분쇄 후 콘크랙의 크기 및 성장률이 커졌으나 그 이전에는 오히려 작았으며 레이디얼크랙은 표면거칠기 정도에 관계없이 2mm 강구 결과가 1mm 강구 결과보다 고속으로 갈수록 더 커짐을 알 수 있었다.

(3) 굽힘강도 저하는 콘크랙의 유무와 크기, 강구의 크기에 의존하였고 표면분쇄는 강도저하의 하한계로 작용했으며 콘크랙에서의 되돌림현상은 오히려 굽힘강도를 향상시켰다. 또한 표면분쇄에는 침식형 마모에 큰 영향을 준다.

## 후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성부(기계공학 ME94-C-01)에 의하여 연구되었으며, 관계자에 감사드립니다

## 참고문헌

- (1) Chaudhri, M. M. and Kurkjian, C. R., 1986, "Impact of Small Steel Spheres on the Surface of Normal and Anomalous Glasses," *J. Am. Ceram. Soc.*, No. 69, Vol. 5, pp. 404~410.
- (2) 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.
- (3) Chaudhri, M. M. and Walley, S. M., 1978, "Damage to Glass Surfaces by the Impact of Small Glass and Steel Spheres," *Philos. Mag., Part A*, No. 37, Vol. 2 pp. 153~165.
- (4) Wiederhorn, S. M. and Lawn, B. R., 1977, "Strength Degradation of Glass Resulting from Impact with Spheres," *J. Am. Ceram. Soc.*, No. 60, Vol. 9~10, pp. 451~458.



- (5) Evans, A. G., 1973, "Strength Degradation by Projectile Impacts," *J. Am. Ceram. Soc.*, No. 56, Vol. 8, pp. 405~409.
- (6) Shockey, D. A., Rowcliffe, D. J., Dao, K. C. and Lynn Seaman, 1990, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride," *J. Am. Ceram. Soc.*, No. 73, Vol. 6, pp. 1613~1619.
- (7) Evans, A. G. and Wilshaw, T. R., 1976, "Quasi-Static Solid Particle Damage in Brittle Solid-1. Observations, Analysis and Implications," *Acta Metall.*, Vol. 24, pp. 939~956.
- (8) Shockey, D. A., Erlich, D. C. and Dao, K. C., 1981, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride at 1400°C," *J. Metal. Sci.*, Vol. 16, pp. 477~482.
- (9) Shin, H. S., Maekawa, I. and Suh, C. M., 1992, "Influences of Particle Property and Its Size on Impact Damage and Strength Degradation in Silicon Carbide Ceramics," *Trans. of KSME*, Vol. 16~10, pp. 1869~1876.
- (10) 서창민, 신형섭, 정성목, 황병원, 1996, "입자충격에 의한 유리의 손상기구에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제20권, 제6호, pp. 1903~1912.