

< 논 문 >

입자충격에 의한 유리의 손상기구에 관한 실험적 연구

서창민* · 신형섭** · 정성목*** · 황병원****

(1996년 1월 25일 접수)

An Experimental Study on Damage Mechanism of Glass Resulting from Particle Impact

Suh, C. M., Shin, H. S., Chung, S. M. and Hwang, B. W.

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

Abstract

A quantitative study of impact damage of a soda-lime glass was carried out. An initiation and a propagation of cracks by the impact of two kinds of steel ball was investigated. The front, side and rear view of cracks were observed by a stereo-microscope. And the lowering of the bending strength due to the impact of steel balls was examined through the 4-point bending test. A transparent glass is very helpful to understand and analyze the impact damage behavior of another brittle material. A diagram about crack patterns according to the threshold impact velocity was sketched. A ring crack and a cone crack were formed at the low impact velocity. And as the impact velocity was higher, initial lateral crack was generated on the slanting surface of cone crack, and radial cracks were generated from the outermost ring crack. When the impact velocity of steel balls exceed a critical velocity, the contact site of specimens were crushed. According to the propagation of a cone crack, a rapid strength degradation occurred. In the specimen having crushed region, a bending strength was converged to a constant value instead of strength degradation.

1. 서 론

유리나 구조용 세라믹과 같은 취성재료는 금속재료와 비교해서 파괴인성치가 매우 낮고 재료의 표면 또는 내부에 존재하는 결함에 아주 민감하다. 그러므로 재료에서의 국부적인 손상이 예상치 못한 구조물 전체의 급격한 파괴를 초래할 가능성이 크

다. 특히, 취성재료에 대한 입자 충돌의 결과는 금속과 같은 연성재료에 대한 결과와는 상이한 결과를 보이며 입자 충돌로 인해 취성재에 발생한 손상들은 재료의 강도 저하에 큰 영향을 미친다. 또한 이러한 충돌이 재료 표면에서 표면 입자의 탈락을 초래하여 에로존(erosion)의 문제를 야기시킨다.

세라믹과 같은 취성재료가 기계의 구조용 부재에 사용될 현 시점에서 취성재료의 동적하중에 의한 충격손상에 관한 연구가 중요한 과제로 대두되고 있다. 미국에서 유리에 대한 입자 충돌의 정성적인 연구⁽¹⁻⁴⁾가 수행되었고 최근 들어 미국과 일본 등에서 구조용 세라믹에 대한 입자 충돌의 연구⁽⁵⁻¹²⁾

*회원, 경북대학교 기계공학부
**회원, 안동대학교 기계공학과
***회원, 경북대학교 대학원 기계공학과
****회원, 산업기술연구소

가 활발하게 행하여지고 있음에도 국내에서는 이에 관련된 연구가 부진하여 자료의 축적이 요구되고 있다.

본 연구에서는 대표적인 취성재료인 유리를 이용하여 입자충격과 충격속도에 따른 크랙의 발생상태, 종류 및 손상형태를 정량적으로 연구하였다. 즉, 유리의 투명성을 이용하여 정면과 측면 그리고 배면을 실제현미경으로 관찰하여 손상상태를 정량적으로 파악하도록 시도하였다. 또한, 충격손상이 가해진 시험편에 대해서는 4점 굽힘시험을 실시하여 강구충돌에 따른 굽힘강도의 저하를 연구하였다. 이러한 유리에 대한 입자충격손상에 관한 연구는 유리의 투명성을 이용하여 충격파손현상을 입체적으로 관찰함으로써 다른 취성재료의 동적 충격손상에 대한 일반적인 거동을 이해하기 위하여 실시되었다.

2. 실험방법

2.1 시험편과 입자

Table 1에는 본 연구에 사용된 유리(soda-lime glass)와 충격입자인 강구(steel ball)의 기계적 성질을 나타내고 Table 2에는 강구의 화학성분을 나타내었다. 시험편에는 투명하며 등방성과 균질성을 가진 건축용 자재로 사용되는 두께 5mm인 일반 상업용 유리가 사용되었다. 이것은 유리가 대표적인 취성재료이므로 이 재료의 충격시험의 결과는 다른 취성재료의 동적 충격거동을 예상할수 있을 것으로 판단되기 때문이다. 시험편은 압연방향과 동일한 방향으로 15×100×5(mm)의 크기로 절단

하였고 강구는 베어링 강인 STB2로 직경 1mm와 2mm의 것을 사용하여 강구 크기가 손상에 미치는 영향을 관찰하였다.

2.2 충격시험장치

본 연구에 사용된 입자충격의 실험장치는 Fig. 1과 같이 공압을 이용하는 에어건(air gun)으로써 본 실험실에서 자체 설계하여 제작하였다. 충격시험은 0~10기압 사이의 저기압에서 행하였고 소기의 압력을 얻기위해 10기압 용량의 공기압축기를 사용하였다. 어큐무레이터는 소형의 압력용기를 사용하였고 조절기는 10기압, 솔레노이드 밸브는 9기압 용량의 것을 각각 사용하였다. 배럴은 광센서의 사용을 가능하게 하기위하여 내경 8mm, 두께 2mm의 투명 아크릴관을 사용하였다.

실험방법은 압축기의 공기를 조절기를 통해 소기의 압력으로 어큐무레이터에 축적시키고 이렇게 축적된 공기를 솔레노이드 밸브를 통해 순간적으로 개폐시킴으로써 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 통과 할때 발생하는 신호를 오실로스코프로 측정하였다.

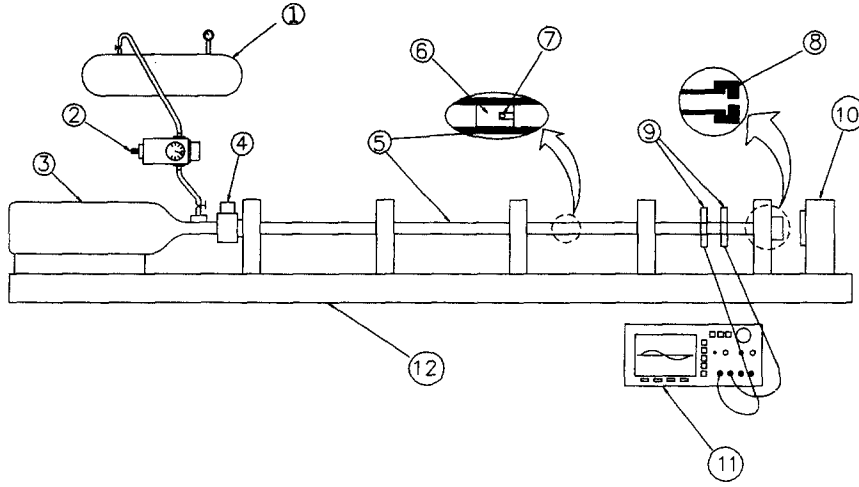
충격시험은 강구를 7~130 m/s의 범위 내의 여러 종류의 속도에서 유리 표면에 충돌하도록 하여 실시하였다. 실험이 완료된 시험편은 실제 현미경을 이용하여 생성된 크랙의 형태를 면밀히 관찰,

Table 1 Mechanical properties of specimen and particle

Material		Young's modulus (GPa)	Hardness (Hv)	Specific Gravity	Ultimate Strength (Gpa)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})	Poisson's ratio (ν)
Specimen	Soda-lime glass	70	560	2.6	—	0.75	0.2~0.27
Particle	Steel	208	880	7.83	1.7	—	0.3

Table 2 Chemical composition of particle(steel ball)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
STB2	0.95 -1.10	0.15 -0.35	≤0.50	≤0.025	≤0.025	1.3 -1.6	≤0.25	≤0.08



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

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

비교 한 뒤 4점 굽힘시험을 통하여 강도저하를 측정하였다.

3. 최대 충격하중과 최대 평균응력

반경 R 의 강구가 속도 V 로 평면에 충돌할 때 발생하는 최대 하중 F_{max} 은 Knight 등⁽²⁾에 의해 식 (1)과 같이 제안되었다.

$$F_{max} = \left(\frac{5}{3}\pi\rho\right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{4}{3}k\right)^{-\frac{2}{5}} V^{\frac{6}{5}} R^2 \quad (1)$$

여기서, F_{max} 은 반경 R , 밀도 ρ 의 충격구가 속도 V 로 평면에 충돌하였을 때 발생하는 최대 하중이며, $k = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)$ 이고, E_1 , ν_1 과 E_2 , ν_2 는 각각 구와 평면에 대한 탄성계수와 푸아송비이다.

Chaudhri 등⁽³⁾에 의하면 F_{max} 에 의한 최대 평균 압력은 식 (2)로 된다.

$$P_m = \frac{1}{\pi} \left(\frac{5}{3}\pi\rho\right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{4}{3}k\right)^{-\frac{4}{5}} V^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

충돌로 인해 발생한 최대하중 F_{max} 에 의해 시험편의 접촉부 아래에서 압축응력이 발생하며, 또한 이 표면 압착에 의해 접촉 면적에서 접촉 축을 향하는 반경 방향으로의 탄성적인 표면 변위가 발생한다. Knight 등⁽²⁾에 의하면 이 변위가 표면에서

식 (3)의 레이디얼 응력(radial stress) σ_r 과 압축 원통응력(hoop stress) σ_θ 를 유발하게 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{(1-2\nu_1)}{2\pi} \frac{F}{r^2} = \frac{(1-2\nu_1)}{2} P_m \left(\frac{a}{r}\right)^2 \\ &= -\sigma_\theta; r \geq a \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, r 은 접촉축에서의 반경방향의 거리이며 최대 인장응력은 접촉원의 모서리부에서 발생한다. F_{max} 에 의한 최대 전단응력이 접촉면으로부터 0.5 a 길이의 시험편 아랫 부분에서 발생하고 그 크기는 0.45 P_m 정도이며 이는 푸아송비에 의존한다.

표면 내부에서의 최대 전단응력이 항복응력을 초과하게 되면 소성변형이 형성되고 유리와 같은 극히 취성적인 재료에서는 접촉부에서 파손현상이 발생하게 된다. 소성변형에 의해 분쇄(crushing)현상이 발생하면 탄성적인 해석은 적용될 수 없고 응력의 정확한 해석은 어렵게 된다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 충격시험 결과

충격시험은 8기압을 최고압력으로 하여 행하였다. 이 최고압력으로 실험한 결과 강구의 속도는 최고 약 130 m/s 까지의 속도를 얻을 수 있었으며

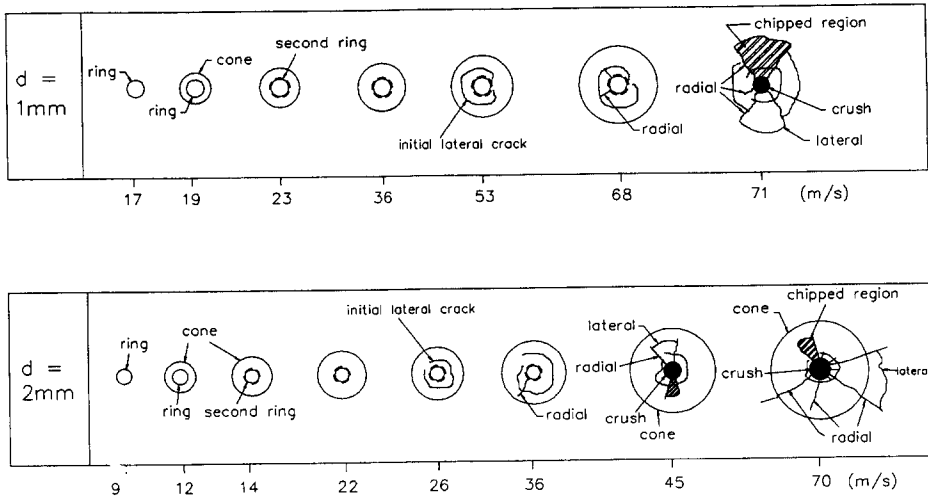


Fig. 2 Variation of crack pattern according to impact velocity and steel ball diameter

어큐레이터의 압력이 증가함에 따라 충격속도가 포물선의 형태로 증가하였다.

Fig. 2는 평활재의 충격시험에서 얻은 충격속도에 따른 형성크랙의 종류와 그 형태의 변화를 개략적으로 도시한 것이다. 충격속도가 손상 발생의 임계치를 넘어서면 강구와 접촉한 시험편의 충격부에서 크랙이 발생하였으며 충격속도의 증가와 더불어 크랙이 주위로 성장하였다.

Fig. 2에서 가장 저속의 충돌에서 최초로 발생한 크랙은 링크랙(ring crack)이었다. 이러한 링크랙의 발생에 대한 임계속도 이하의 충돌에서는 시험편의 충돌부에서 아무런 손상도 발견할 수 없었다. 충돌속도가 높아짐에 따라 링크랙으로부터 시험편 내부로 콘의 형상으로 콘크랙(cone crack)이 성장하였고 링크랙 주위에서의 손상이 확대되어 갔다. 또한 콘크랙의 사면에서 초기 횡크랙(initial lateral crack)이 발생하였으며 충돌로 인해 표면에서 소성변형이 발생하기 전에 최외곽 링크랙(outermost ring crack)으로부터 수개의 짧은 레이디얼 크랙이 반경방향으로 발생하였다. 직경 1mm와 2mm 강구 모두의 충돌에서 충돌속도가 임계속도에 도달하게 되면 충돌부가 소성변형을 일으켜 완전히 분쇄되는 현상이 나타났고 이러한 분쇄현상을 기점으로 크랙의 성장형태가 분쇄 전과 매우 다르게 되어 레이디얼 크랙과 횡크랙이 크게 성장하였으며 이러한 크랙들로 인해 시험표면에서의 재료의 탈락이 심화되었다.

4.1.1 링크랙의 생성 및 성장

충돌속도에 따라 형성된 최초의 크랙은 링크랙이었다. Fig. 3에 시험편상에서 강구직경 2mm, 속도 9m/s일 때 발생한 링크랙의 예를 나타내었다. 사진에서 볼 수 있듯이 초기 링크랙 발생에 대한 하한계 속도에서는 링크랙으로부터 Fig. 4와 같은 길이 방향으로 성장하는 콘크랙은 거의 찾아볼 수 없고 단지 거의 원형을 유지한 아주 얇은 표면 손상을 발견할 수 있다. 이러한 링크랙은 강구의 충돌로 인하여 재료 표면에 σ_r 의 응력성분이 발생하고, 이 성분에 의해 표면에 존재하던 결함들이 연결되어 생성되었다. 이것은 Chaudhri⁽³⁾에 의하면 탄성접촉면에서는 압축 레이디얼 응력이 그 면의

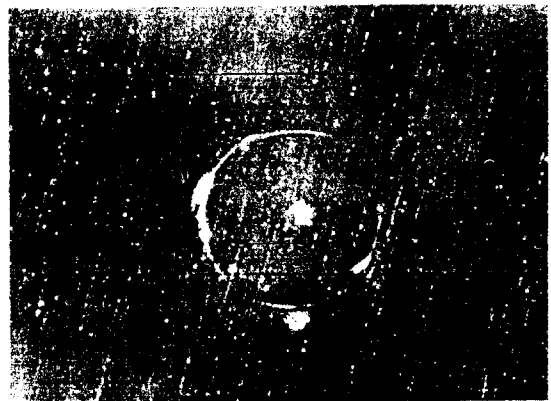
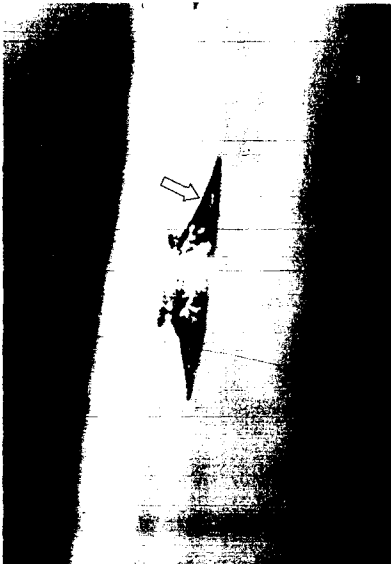


Fig. 3 The shape of ring crack ($d=2$ mm, $v=9$ m/s)



(a) Plane view of cone crack
($d=1\text{ mm}$, $v=48\text{ m/s}$)



(b) Side view of cone crack
($d=2\text{ mm}$, $v=30\text{ m/s}$)

Fig. 4 The shape of cone crack

외부에서는 인장 레이디얼 응력이 작용하기 때문이다.

링크랙의 발생에 대한 하한계 속도(threshold velocity)는 강구의 직경에 따라 다르며 $d=1\text{ mm}$ 에서 약 17 m/s , $d=2\text{ mm}$ 에서 9 m/s 로 강구의 직경이 크면 작은 값이 됨을 알 수 있다. 속도가 증

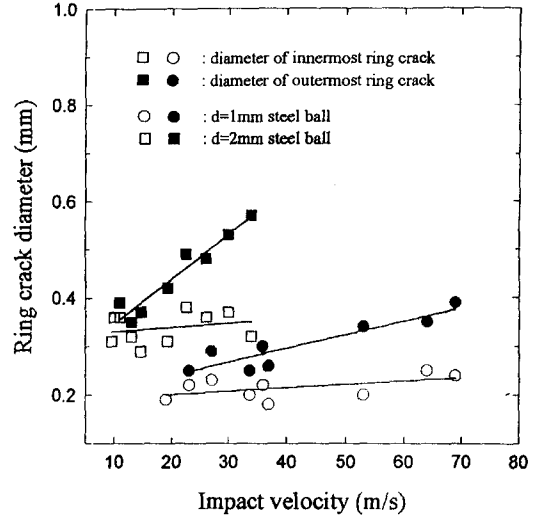


Fig. 5 The variation of ring crack diameter according to impact velocity and steel ball diameter

가함에 따라 링크랙 주위로 손상이 확대되어 갔다. 이런 손상은 초기 링크랙 주위에 또 다른 링크랙들이 발생하여 생성된 것으로 보인다. 이 크랙을 2차적 링크랙(secondary ring crack)이라 하였고 가장 안쪽 링크랙을 최내곽 링크랙, 그리고 가장 바깥쪽 링크랙을 최외곽 링크랙이라 하였다.

Fig. 5에는 최내곽 링크랙의 크기와 최외곽 링크랙의 크기를 충격속도에 대하여 나타내었다. 이 그래프에서 최내곽 링크랙은 $d=1\text{ mm}$ 인 경우 자료의 분산이 다소 있지만 충격속도에 거의 의존하지 않는 값을 가지는데 이는 Knight⁽²⁾가 제안한 탄성 접촉의 식에서 접촉반경은 충격력의 세제곱근에 비례한다는 것으로 설명되어질 수 있다. 그러나 최외곽 링크랙의 크기는 충격속도에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 Chaudhri⁽³⁾에 의한 고속카메라의 사진촬영에서 충격속도 증가에 따른 충격파의 주위 확산에 의한 것으로 볼 수 있다. 또한 $d=2\text{ mm}$ 의 강구가 $d=1\text{ mm}$ 보다 충격속도가 낮은 경우에도 최내곽과 최외곽 링크랙의 크기가 더 크고 최외곽 링크랙의 크기가 속도에 따라 더욱 큰 폭으로 증가함을 나타내며 링크랙의 크기 변화에 대한 강구크기에 의한 효과를 확인할 수 있다.

Fig. 6은 2차적 링크랙이 발생한 충격부를 표면 거칠기로 측정된 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 강구와의 접촉부는 탄성변형으로 인해 거의 변형을

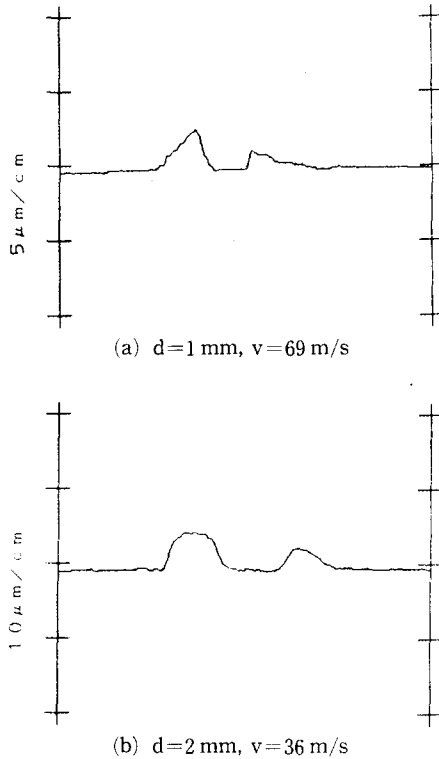


Fig. 6 The results of surface roughness test on the impact site

하지 않고 충격전과 동일한 높이를 유지한 반면 2차적 링크랙이 발생한 부위는 원래의 표면에서 높게 부풀어 오른 것을 알 수 있다. 여기에서 강구 직경이 큰 쪽이 작은 쪽 보다 더욱 낮은 속도에서 더욱 큰 손상을 초래하는 것을 알 수 있다.

4.1.2 콘크랙의 성장

충격속도가 증가함에 따라 2차적 링크랙의 손상과 더불어 링크랙으로부터 시험편 내부로 콘크랙이 성장하였다. 시험편의 측면과 배면을 실제 현미경으로 관찰한 결과 이러한 콘크랙은 최내곽 링크랙으로부터 성장하였음을 알 수 있었다. 2차적 링크랙에서도 시험편 내부로 콘크랙의 성장이 관찰되었지만 그 크기는 매우 작았다.

Fig. 4는 이러한 콘크랙의 성장형태를 나타낸 것이다. (a)는 충격 표면을 정면에서 촬영한 것이며 (b)는 유리의 투명성을 이용하여 이것을 측면에서 촬영한 것이다. (a)의 중앙부에 생성된 원형의 검은 부분은 강구와 압축되면서 접촉하는 부분이며

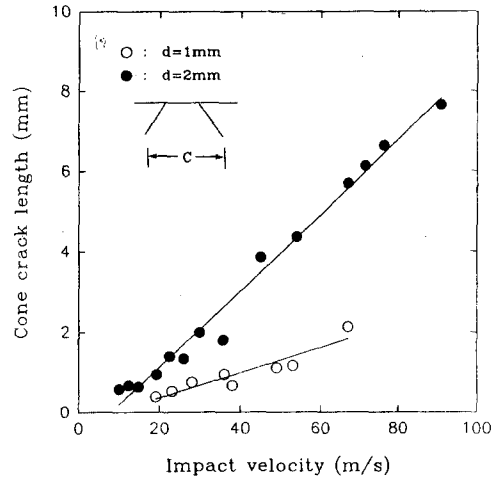


Fig. 7 Variation of cone crack length according to impact velocity and steel ball diameter

(b)에서도 확인되듯이 탄성적인 변형에 의하여 손상은 발생하지 않았다. 이것은 실제 사진에서 (a)의 검은 부분은 분쇄가 일어나지 않아 투명하며 다만 현미경 바닥의 색과 반사과정에서 검게 나타난 것이다.

Fig. 7은 강구직경과 충격속도에 따른 콘크랙의 길이 C의 관계를 각각 나타내었다. 이 그림에서 콘크랙의 길이는 다소의 자료 분산이 존재하지만 충격속도에 따라 대체로 직선적으로 변화함을 알 수 있다.

강구직경 1mm의 경우는 시험편에 분쇄현상이 일어난 이후에는 콘크랙의 존재를 판단하기가 애매해졌으므로 파손 직전까지의 자료이다. 강구의 직경 2mm의 경우는 분쇄현상 이후에도 콘크랙의 성장이 계속되었을 뿐만 아니라 표면 분쇄현상을 기점으로 콘크랙의 크기가 급격히 커지며 크기에서의 증가 기울기도 커지는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 강구의 크기에 의한 효과로 인해 직경 2mm 강구의 충돌이 직경 1mm 강구의 충돌의 경우 보다 더욱 큰 콘크랙의 크기와 성장률을 나타내었다.

4.1.3 초기횡 크랙과 레이디얼 크랙의 발생

강구의 충돌속도가 직경 1mm 강구의 경우는 53 m/s, 2mm 강구의 경우는 34 m/s에 이르렀을 때 콘크랙의 사면에 초기횡크랙이 발생하였다.

Fig. 8에 이러한 횡크랙의 예를 나타내었다. 시험편의 배면 관찰 결과 이 크랙은 콘크랙 사면의

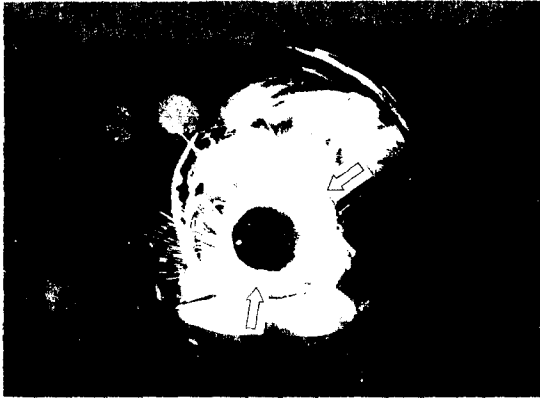


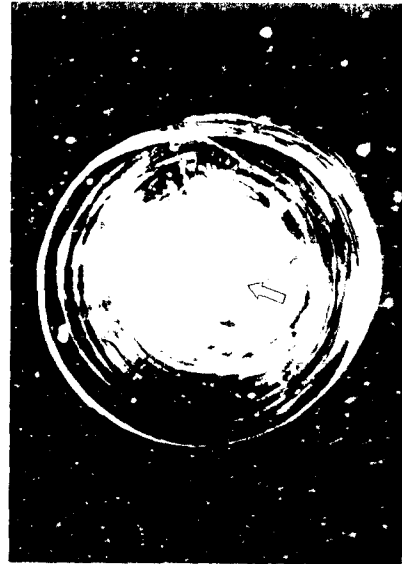
Fig. 8 Initiation of lateral crack and damage around ring crack at a $d=2$ mm steel ball and impact velocity of 36 m/s

바깥 쪽에서 생성되었으며 표면에 대하여 비스듬한 방향으로 생성되었다. 이 경우에는 충격부 아래에서의 변형영역이 제하 후에 회복이 되지 않은 결과로 측면방향으로 진행되는 링크랙에 대한 구동력을 제공하는 것으로 생각되며 다른 연구결과^(2~4)에서도 비슷한 경향이 관찰되고 있다.

Chaudhri⁽³⁾에 의하면 접촉에 의해 콘크랙의 표면은 압축상태에 있게 되고 이로인해 경계면에서 마찰력을 유발하여 경계면상에 인장응력에 의한 크랙의 생성을 초래하여 제하 동안에 횡크랙으로 성장하는 것이다. 이러한 횡크랙은 시험편의 표면이 분쇄현상이 생길 때까지는 뚜렷한 성장을 보이지 않았고 횡크랙 발생 후에 반경방향의 레이디얼 크랙이 링크랙으로부터 1~2개가 형성되기 시작하였다.

4.1.4 접촉부에서의 분쇄현상

강구의 충돌속도가 어느 임계치에 이르렀을 때, Fig. 2와 같이 $d=1$ mm 강구충돌에서는 ~ 71 m/s, $d=2$ mm는 ~ 45 m/s의 속도에서 접촉부가 갑작스레 분쇄되어 파손이 일어났다. Fig. 9에 파손에 대한 임계속도에서 발생한 표면의 손상을 보이고 있다. 강구와 접촉한 부분은 완전히 분쇄되었고 그 주위로 유리 표면의 일부가 탈락하는 현상이 나타났다. 이러한 파손현상은 충격에 의해 발생한 표면아랫부분(subsurface), 즉 시편 내부의 전단응력이 항복응력을 초과할 때 재료의 내부에서 먼저 소성변형이 발생되고 이 변형이 표면까지 확장되어 취성재료의 경우 분쇄현상이 발생한다고 판단된다.



(a) $d=1$ mm, $v=70$ m/s



(b) $d=2$ mm, $v=45$ m/s

Fig. 9 Surface observation of crushing phenomenon at critical velocity

접촉부에 이러한 파손이 발생하면 접촉부의 응력상태를 해석하기가 어렵게 된다고 알려져 있다. 이 파손을 기점으로 크랙의 형성 특징은 이전과 매우 다른 형태를 보임을 볼 수 있었다. 그리고 강구의 크기도 크랙의 성장의 형태에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4.1.5 분쇄현상 이후의 크랙의 발생 및 성장

분쇄현상 이후의 고속충돌에서는 분쇄 이전의 충돌과는 달리 레이디얼 크랙과 횡크랙이 크게 성장하였으며 이로 인한 표면 입자의 탈락이 심화되는 것을 관찰하였다. 직경 1mm 강구 충돌의 경우 표면 분쇄 이후에는 콘크랙 날개의 끝단의 성장방향 이 Fig. 10과 같이 시편 내부로부터 표면으로 향하게 되는 되돌림 현상을 일으켜 콘크랙이 횡크랙으로 전이되었고 이로 인해 콘크랙의 존재는 모호하게 되었다.

Fig. 11은 직경 1mm 강구의 고속충돌에 의해 크게 성장한 레이디얼 크랙과 횡크랙의 예를 나타내었다. 여기에서 짧게 성장한 콘크랙의 끝이 표면으로 되돌려져 횡크랙을 형성하여 표면으로 성장하고 이렇게 성장하던 크랙의 끝단이 표면 근방에 이르면 표면과 평행하게 아주 넓게 성장하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 성장한 횡크랙이 표면과 접촉하게 되고 레이디얼 크랙과 합체하게 되면 재료의 표면 일부가 분쇄되면서 탈락하게 되는 것을 관찰할 수 있었다.

충격속도가 증가할수록 횡크랙은 크게 성장하였고 입자의 탈락현상도 심하게 되었다. 이러한 결과로 미루어 입자의 고속충돌의 경우 표면 에로존 (surface erosion)이 표면손상에 큰 비중을 차지할 것이라 생각된다.

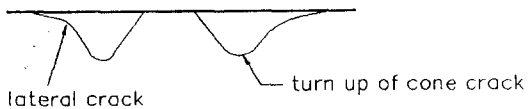


Fig. 10 Turn up of a cone crack



Fig. 11 Fomation of radial crack and lateral crack at the high impact velocity $v=70$ m/s of 1mm steel ball

직경 2mm 강구 충돌에서는 콘크랙의 사면에서 형성된 횡크랙이 표면 파손 후에 급격히 표면으로 성장하여 입자를 탈락시킴을 알 수 있었다. 횡크랙은 표면과 평행되어 성장하는 양은 매우 적었고 급격히 표면으로 성장함을 나타내었으며 파손의 하단부에서는 Fig. 12와 같은 많은 스프린터 크랙 (splinter crack)이 관찰되었다.

직경 1mm에 비해 직경 2mm의 경우에는 특히 레이디얼 크랙의 성장이 두드러졌다. 레이디얼 크랙은 횡크랙의 영역을 넘어서 아주 크게 성장하였다. 이러한 레이디얼 크랙은 소성변형 발생 후 표면의 원주방향 응력은 인장이 된다. 이러한 원주방향의 인장응력은 표면의 소성변형부 주위에서 반경 방향으로 레이디얼 크랙을 발생 및 성장시키게 된다.



Fig. 12 Pattern of splinter crack initiated below crushing area ($d=2$ mm, $v=62$ m/s)

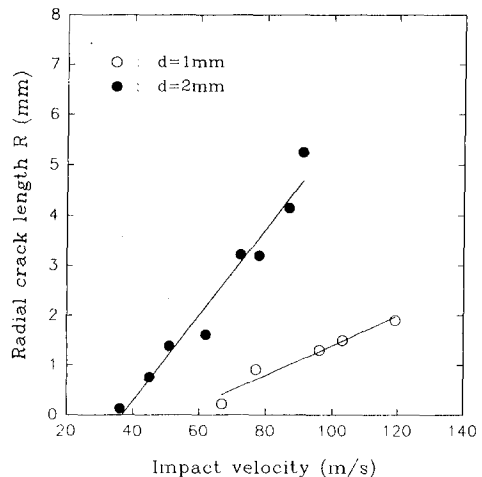


Fig. 13 Relationship of radial crack length and impact velocity according to the diameter of steel ball about unscratched specimen

Fig. 13에 충격속도의 증가에 따른 레이디얼 크랙의 길이를 도시하였다. 충격속도가 증가하면 레이디얼 크랙의 길이는 선형적으로 증가하며 직경 1 mm보다 직경 2 mm의 경우가 더욱 심한 레이디얼 크랙의 성장을 초래하는 것을 확인할 수 있다. 직경 1 mm의 경우 레이디얼 크랙은 링크랙과 합체하여 표면 입자의 탈락을 초래하는 정도였지만 직경 2 mm의 강구에서는 링크랙의 영역을 완전히 벗어나 속도의 증가에 따라 급격한 증가를 나타내었다.

4.2 유리의 손상에 의한 굽힘강도 저하

강구의 충격으로 생성된 크랙이 재료의 굽힘강도 저하에 미치는 영향을 알아보기 위하여 4점 굽힘시험을 행하였다. 이때 사용된 지그는 ASTM D790에 의거하여 본 실험실에서 설계하였으며 부하속도는 2.4 mm/min를 유지하였다.

충격시험을 행하지 않은 시험편 즉, 표면에 크랙이 없는 시험편에 대해 4점 굽힘시험을 행하여 유리 본래의 굽힘강도를 조사하여 본 결과 약 65~80 MPa의 범위내의 굽힘강도를 가졌다. 이러한 유리의 굽힘강도의 큰 분산폭은 유리 측면의 절단면의 거칠기와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 평활재에 대한 직경 1 mm와 2 mm 강구의 충돌에 대한 굽힘강도의 저하를 나타내었다. 직경 2 mm 강구에 의한 충돌이 1 mm 강구보다 더욱 큰 강도저하를 초래하는 것을 관찰 할 수 있다.

직경 1 mm 강구 충돌의 경우, 표면에 미세한 형

태로 나타나서 재료의 내부로는 거의 성장하지 않은 링크랙은 재료의 강도저하에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 굽힘시험시에 생긴 파단면의 위치도 이러한 링크랙이 생성된 곳에서 번꼴이었다. 그러나 충격속도가 증가함에 따라 링크랙으로부터 콘크랙이 형성됨에 따라 급격한 강도저하가 발생하였다.

이러한 굽힘강도의 급격한 저하는 재료의 표면에 분쇄현상이 발생하기 전까지 계속되었다. 분쇄현상 이후의 시험편에서는 굽힘강도의 저하가 더 이상 진행되지 않고 일정한 값 약 27 MPa로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 강구의 고속 충돌시 일반적으로 분쇄현상이 발생하면 추가적인 급격한 강도저하가 발생할 것으로 예상되었지만 실험 결과는 분쇄현상으로 인한 표면 손상과 레이디얼 크랙의 증가로 인한 재료의 급격한 강도저하는 발생하지 않았다. 그림에서 알 수 있듯이 강도의 급격한 저하는 오히려 저속충돌에 의해 발생하는 미소한 콘크랙에 의해서 발생하였다. 그러므로 입자 충돌로 인한 재료 표면의 분쇄는 강도 저하의 측면보다는 표면 입자의 탈락으로 인한 표면마멸의 측면에 더 큰 의미가 있으리라 판단된다.

5. 결 론

본 충격시험에서는 두 종류의 강구는 모두 저속에서의 손상, 즉 파쇄현상(crushing)이 일어나기 전의 손상은 링크랙과 콘크랙이 주류를 이루었다. 가장 최초로 나타난 크랙은 링크랙이었고 이 크랙을 기점으로 콘크랙이 시험편의 깊이방향으로 성장해 나갔다.

강구가 임계속도를 넘으면 재료의 표면은 파편의 분리현상이 생겨 심한 파손현상을 보였다. 표면 파손 이후의 크랙 생성기구는 파손 전과 매우 다른 양상을 나타내었다.

d=1 mm의 경우 파손 후에 콘크랙의 끝단부에 되돌림 현상이 발생되어 표면 방향으로 성장함으로써 링크랙으로써 성장하였으며, 이러한 링크랙이 표면까지 성장하면 표면의 일부가 탈락하는 현상을 나타내었다. 그리고 파손 후에는 속도가 증가할수록 링크랙과 레이디얼 크랙의 크기가 커져갔고 표면의 탈락도 심화되었다.

d=2 mm 강구의 경우는 분쇄현상 이후에도 콘크랙의 성장은 계속되었고 속도가 증가함에 따라

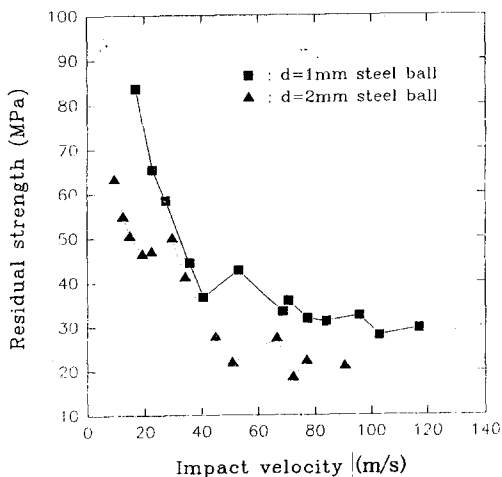


Fig. 14 Residual strength according to impact velocity and steel ball diameter

콘크랙의 끝단부에서 조금의 외돌림현상을 나타내었지만 이것이 표면으로까지 성장하지는 않았다. 횡크랙은 콘크랙의 사면에서 생성되어 표면으로 급격히 성장하는 것이 관찰되었다. 그리고 속도의 증가에 따라 레이더얼 크랙의 길이가 크게 성장함을 나타내었다.

강구의 충격에 의한 유리의 굽힘강도는 콘크랙이 생성되어 성장함에 따라 급격하게 저하했으며 분쇄현상 이후에는 강도 저하가 더 이상 일어나지 않고 수렴하는 현상이 일어났다.

후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비 (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.*, Vol. No. 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* 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, Vol. 37, No. 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.*, Vol. 60, Nos. 8, 9, pp. 451-458.
- (5) Evans, A. G., 1973, "Strength Degradation by Projectile Impacts," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 56, No. 8, pp. 405-409.
- (6) Shockey, D. A., Rowcliffe, D. J., Kim C. Dao and Lynn Seaman, 1990, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, No. 6, pp. 1613-1619.
- (7) 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, No. 4, pp. 787-817.
- (8) Evans, A. G. and Wilshaw, T. R., 1976, "Quasi-Static Solid Particle Damage in Brittle Solid-1. Observations, Analysis and Implications," *Acta Metall.*, 24, pp. 939-956.
- (9) Lawn, B. R., Evans, A. G. and Marshall, D. B., 1980, "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radian Crack System," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 63, No. 9, 10, pp. 574-581.
- (10) Shockey, D. A., Erlich, D. C. and Dao, K.C., 1981, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride at 1400°C," *J. Metal. Sci.*, 16, pp. 477-482.
- (11) Shin, H. S., 1991, *Particle Impact Damage In Ceramics*.
- (12) 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, No. 10, pp. 1869-1976.