

## 취성재료의 소구충돌에 의한 충격손상 (II)

김문생<sup>†</sup> · 신형섭<sup>\*</sup> · 이현철<sup>\*\*</sup> · 우수창<sup>\*\*\*</sup>  
(2001년 5월 14일 접수, 2001년 9월 20일 심사완료)

### Impact Damage of Brittle Materials by Small Spheres (II)

Moon Saeng Kim, Hyung Seop Shin, Hyun Chul Lee and Soo Chang Woo

**Key Words:** Impact Damage(충격손상), Ring Crack(원형균열), Cone Crack(원추형균열), Crushing(분쇄), Erosion(표면탈락), Radial Crack(반경방향균열), Lateral Crack(가로방향균열), Splinter Crack(수지상균열)

#### Abstract

Brittle materials such as ceramics and glasses show fragile fracture due to the low toughness and the crack sensitivity. When brittle materials are subjected to impact loading by small spheres, high contact pressure occurs to the surface of the specimen. Local damage is subsequently generated in the specimen. This local damage is a dangerous factor which gives rise to the final fracture of structures. In this research, impact damage of soda-lime glass plates by small spheres was evaluated by considering the effects of impact directions of indenter, pressure condition of specimen and residual strength after impact loading.

#### 1. 서론

취성재료는 대표적인 특징중의 하나인 낮은 파괴 인성과 균열민감도로 인해 미세한 결함이나 균열에서도 파괴가 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 메커니즘(mechanism)과 함께 손상발생에 의한 재료의 강도저하 현상을 규명하기 위해서 Hertz의 접촉

이론을 기초로 하여 고체입자를 작은 구로 모델링한 많은 연구들<sup>(1~9)</sup>이 수행되어 왔으나, 실제로 이들 크랙의 성장과 파괴에 미치는 충돌입자 및 취성재료의 경계조건 등이 충격손상에 어떤 영향을 미치는가에 대한 구체적인 제시가 미흡하다. 본 논문에서는 대표적인 취성재료이면서 우리가 일상생활에서 많이 접할 수 있는 유리(soda-lime glass)를 시편으로 사용하여 전보(I)<sup>(10)</sup>에 이어 충격입자의 입사방향, 가압조건에 의한 영향 및 잔류강도에 대해서 충격손상을 평가하였다.

#### 2. 실험

##### 2.1 실험방법

##### 2.1.1 충격실험

충격실험은 Fig. 1과 같이 에어 콤푸레샤를 사용하여 에어건(air gun)의 원리로 실험을 수행하였으며 작동원리는 시험편을 클램프(clamp) 사이에 위치시키고 치구에 장착한다. 가압조건에 경우는 유압실린더를 사용하여 시험편에 압력을 가하였으

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail : kimos@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2318 FAX : (051)514-7640  
<sup>\*</sup> 회원, 안동대학교 기계공학과  
<sup>\*\*</sup> 두원공과대학 컴퓨터 응용설계학과  
<sup>\*\*\*</sup> 부산대학교 기계설계학과 대학원

며, 이 때 시험편에 가해지는 힘은 풀브릿지(full bridge) 회로로 구성된 로드셀(load cell)을 사용하여 측정하였으며, 압력계산은 시험편을 가압하는 클램프의 면적과 유압실린더에서 나온 힘으로 계산하였다. 클램프를 치구에 장착한 다음 불을 실은 캐리어(carrier)를 배럴(barrel)의 안쪽에 위치시키고, 공기 압축기로 공기압을 제어하여 볼 밸브(ball valve)를 순간적으로 개방시킨다. 이때 캐리어는 압축공기에 의해 가속되며 시험편의 40mm 전방에 위치한 stopper에 의해 캐리어는 정지가 되고, 불은 관성에 의해 비행을 계속하여 시험편에 충격을 가하게 된다.

불의 충격 속도는 압축공기의 압력 조절에 의해 수행되었다. 불의 충격속도 측정은 배럴 선단의

끝, 즉 시험편을 전방으로 100mm와 200mm 지점에 위치한 2쌍의 속도 측정 광다이오드를 설치하여 캐리어가 지날 때의 신호를 잡아 오실로스코프(oscilloscope)를 통해 시간을 측정하여 속도를 계산하였다.

충격 실험 후 표면에서의 손상을 관찰하기 위하여 실제현미경(저배율현미경)을 사용하였다. 손상 영역이 큰 경우는 실제 현미경으로 촬영이 불가능하여 디지털 캠코더(digital camcorder)를 사용하여 실물을 확대하여 촬영하였다.

2.1.2 시험편

시험편은 우리가 일상생활에서 접할수 있는 대표적인 취성재료인 soda-lime glass를 사용하였으며, 시험편의 크기는 40×100×5mm로 하였다. 사용된 충격입자는 직경 d=3mm 인 강구(steel ball)를 사용하였다. Table 1은 시험편과 충격입자의 물성치를 나타내고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격입자의 입사방향에 따른 영향

시험편과 충격입자가 이루는 방향에 따른 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2에서와 같이 시험편을 x축에 대하여 0°, 15°, 30° 로 위치시켰다. Fig. 3에서 시험편이 x축과 15° 를 이룰 때 최내(d<sub>i</sub>)·외곽(d<sub>o</sub>) 링크랙(ring crack)을 살펴보면 최내곽 링크랙은 충격각도에 거의 영향을 받지 않는 반면 최외곽 링크랙은 시험편의 방향이 증가할수록 크기가 감소한다. 이것은 각도가 증가함에 따라 운동량이 감소한 결과로 여겨진다. 그리고 각도 증가에 따른 링크랙의 형상은 변화가 거의 없었다. 그리고 Fig. 4에서 콘크랙(cone crack)의 변화를 살펴보면 충격각도가 증가한 30° 인 경우에는 상당히 완만해졌음을 알 수 있다. 또한 시험편이 0° 일 때는 콘크

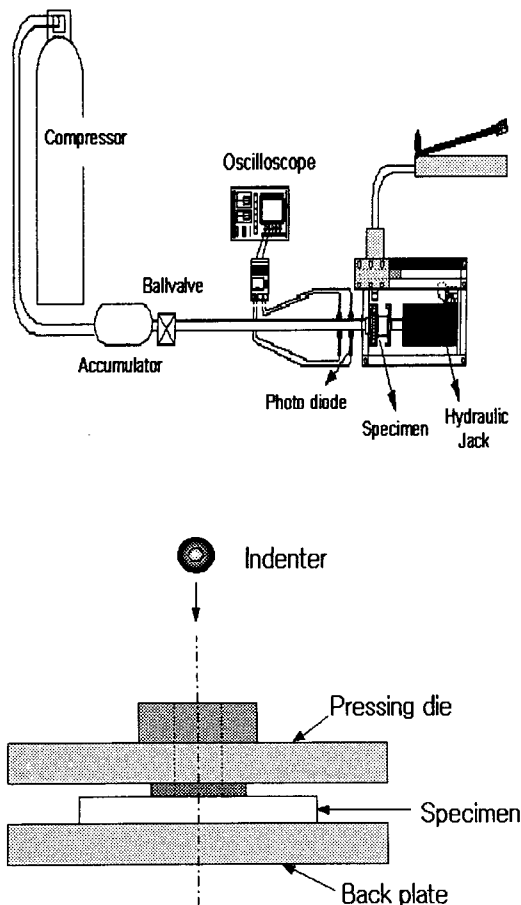


Fig. 1 Schematic diagram of whole experimental system and specimen combined with pressing die

Table 1 Mechanical properties of the specimen and indenter pressing die

material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	H <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (m/s)
Glass	2.5	70	0.25	6.5	5,291
Steel ball	7.85	210	0.29	8.0	.

랙의 크기가 래터럴크랙(lateral crack)으로 인해 그 경계가 불분명해질 때까지 계속적인 증가를 나타내는 반면, 각도가 증가할수록 콘크랙의 크기가 일정한 값에 수렴해 가는 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 분쇄(crushing)영역에서 충격에너지를 흡수한 결과로 여겨진다. 또한 Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 경사각도의 차이에 따라 약 10m/s의 속도천이가 있음을 알 수 있다. 따라서 경사각도에 따른 속도를 속도의 수직성분으로 표시해보면 Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같이 속도천이가 상당히 줄어들음을 알 수 있고, 특히 콘크랙의 경우는 거의 동일한 데이터를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그리고 각도가 증가할수록 강구속도의 증가에 따라 콘크랙의 전체적인 형상은 Fig. 7과 Fig. 8에서처럼 비대칭을 이루었으며 콘크랙 사면도 점점 거칠어지고 또한 콘크랙 사면에서 많은 수의 래터럴크랙이 발생하였다. 레디얼크랙 역시 각도가 증가할수록 비대칭적으로 성장하여 거의 한쪽(15°)방향에서만 나타나고 있는 현상을 관찰할 수 있다(Fig. 9 참조). 각종 균열들이 발생하는 최초의 속도인 임계속도를 충격각도에 따라 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Critical velocities for the impact angle of indenter

impact angle of indenter	ring crack (m/s)	crushing (m/s)	cone crack separation (m/s)	fracture (m/s)
0°	9	32.5	47.6	50.1
15°	9.8	37.3	52.1	83.3
30°	11	45	66.4	86.2

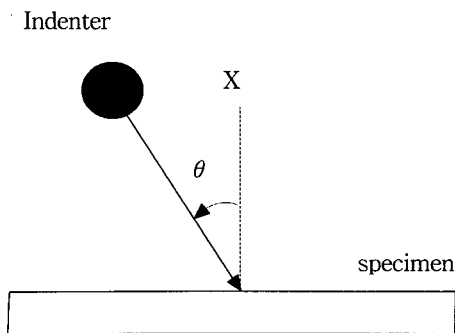


Fig. 2 Impact angle of indenter

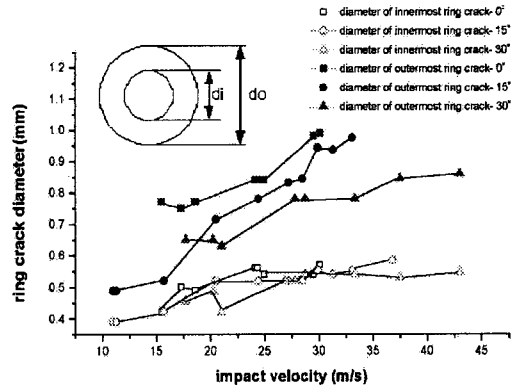


Fig. 3 Diameter of ring crack by steel ball in inclined specimen

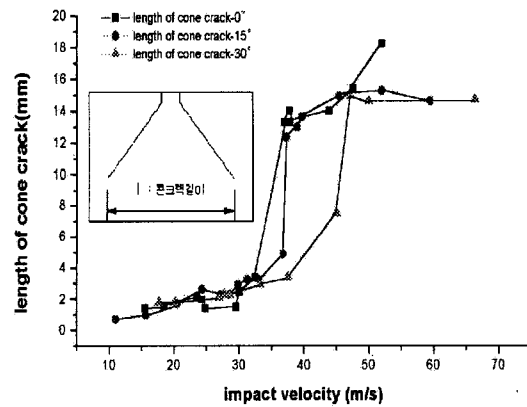


Fig. 4 Length of cone crack by steel ball in inclined specimen

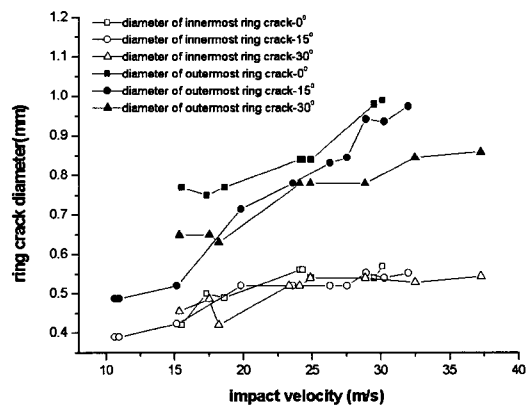


Fig. 5 Diameter of ring crack for vertical component of velocity with inclined angle of indenter

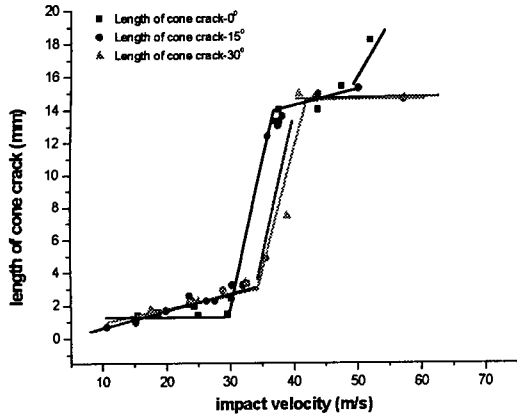


Fig. 6 Length of cone crack for vertical component of velocity with inclined angle of indenter

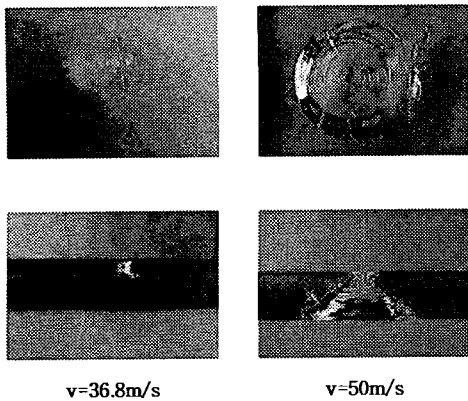


Fig. 7 Behavior of specimen by impact of 3mm-steel ball at  $\theta=15^\circ$

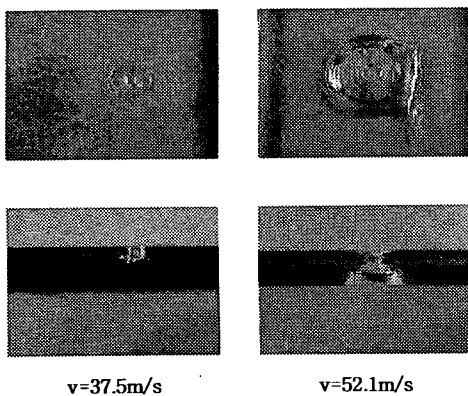


Fig. 8 Behavior of specimen by impact of 3mm-steel ball at  $\theta=30^\circ$

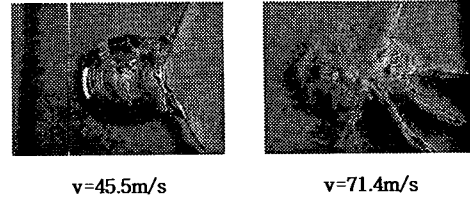


Fig. 9 Crack propagation in specimen at  $\theta=15^\circ$

3.2 가압조건에 따른 영향

시편에 가압조건을 부여하였을 경우( $\theta=0^\circ$  인 경우)에 대한 재료의 충격거동을 관찰하기 위하여 두 가지 경우로 실험을 수행하였다. 첫째는 가압용 치구(pressing die)가 없는 경우 즉, 시편에 하중경계조건이나 변위경계조건이 전혀 부여되지 않은 경우를 말한다. 두 번째 경우는 시편의 충격부에  $P=40\text{MPa}$ 의 접촉압을 부여하였다. Fig. 10은 시편에 접촉압을 부여하였을 때 외부입자에 의한 충격손상영역을 촬영한 사진이다. 그림에서 알 수 있듯이 시편을 가압하였을 경우가 하지 않은 경우<sup>(10)</sup>보다 외부입자 충격에 의한 손상영역이 훨씬 작음을 알 수 있다. 실제 링크랙과 콘크랙의 크기를 Fig. 11과 Fig. 12의 그래프를 통해서 살펴보면 최내곽 링크랙( $d_0$ )은 가압을 하였을 경우에도 별다른 차이를 나타내고 있지는 않지만 전체적으로 값이 약간 작음을 알 수 있다. 하지만 최외곽 링크랙( $d_0$ )의 값은 많은 차이를 나타낸다. 가압을 하지 않은 경우  $d_0$ 값은  $v=25\text{m/s}$ 까지 서서히 증가하다가 그 이후 속도에서 급격한 증가를 나타내는 반면 가압을 한 경우는 그러한 갑작스런 변화없이  $d_0$ 가 서서히 증가한다. 실제 가압을 하지 않은 경우  $d_0$ 값이 1.22mm까지 성장을 하지만 가압을 한 경우는  $d_0$ 가 0.89mm까지 성장을 하였다. 콘크랙의 경우를 살펴보면, 가압조건을 부여하였을 경우 강구의 속도증가에 따라 콘크랙의 성장이 크게 이루어 지지는 않았다. 가압을 하지 않은 경우 32m/s 부근에서 큰 변화가 있었다. 실제 콘크랙의 크기를 보면 가압용 치구가 없는 경우 콘크랙의 크기가 최대 18.2mm까지 성장을 한 반면, 접촉압을 부여하였을 경우 콘크랙의 크기는 4.65mm까지의 성장만을 나타낸다. 그리고 같은 속도에서 크랙의 진전을 비교해 보면 접촉압이 작용하는 경우가 훨씬 느리게 성장을 한다.

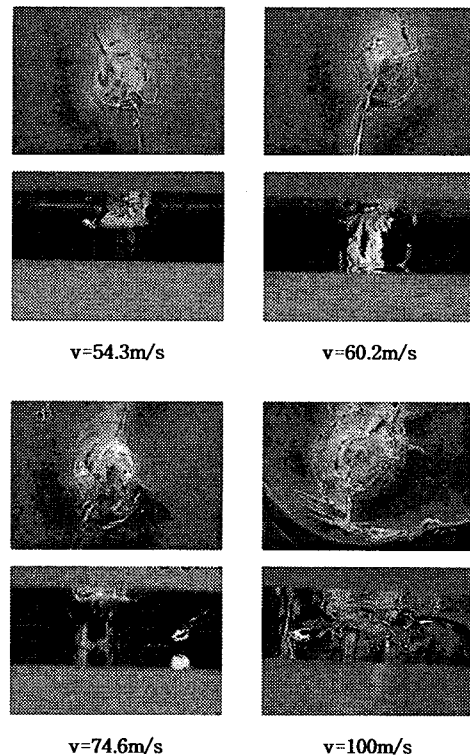
강구의 속도가 50m/s 이상인 시편의 사진(Fig. 10)을 보면 전보(I)에서 알 수 있는 바와 같이 가압을 하지 않은 경우  $t=5\text{mm}$  시편에  $d=2\text{mm}$  강구가, 그리고  $t=8\text{mm}$  시편에  $d=3\text{mm}$  강구가 충돌하였을 때와 마찬가지로 수지상균열(splinter crack)을 관찰할 수 있다.<sup>(10)</sup> 이러한 수지상균열은 강구의 속도가 50m/s 이상이 되면 충격부에 분쇄(crushing)가 발생하게 되고 분쇄의 발생과 더불어 수지상균열이 발생, 성장하는 모습을 관찰할 수 있었다. 볼의 속도 증가에 따라 수지상균열이 깊이방향으로 계속적인 성장을 보이는 것과는 달리 콘크랙의 깊이방향 성장은 상당히 둔화되었다. 그런 이유로 인해 시편으로부터 콘크랙의 분리도 발생하지 않았다. Fig. 10의 사진에서  $v=54.3\text{m/s}$ 와  $v=60.2\text{m/s}$ 의 시험편을 서로 비교해보면 콘크랙은 성장하지 않고 수지상균열만이 급격히 성장한 모습을 관찰할 수 있다. 전보(I)에서 알 수 있는 바와 같이 가압을 하지 않은 경우 두께 5mm 시편에  $d=2\text{mm}$ 인 강구가 충돌하였을 때 강구의 속도가 고속(100m/s)에 이르면 수지상균열이 사라지고 콘크랙이 다시 성장하는 모습을 관찰할 수 있었지만, 가압을 한 경우는 Fig. 10에서와 같이 수지상균열이 계속적으로 성장하였으며 콘크랙은 거의 성장하지 않았다.

레이디얼크랙은 가압용 치구없이 충격실험을 한 경우  $v=47.6\text{m/s}$ 에서 레이디얼크랙의 급격한 성장으로 시편이 파단하였지만 접촉압이 작용한 경우는  $48.1\text{m/s}$ 에서 콘크랙 반경 크기(2.25mm)의 레이디얼크랙이 생성된 이후 그 크기가 조금씩 증가하며  $v=100\text{m/s}$ 에 이를 때까지 파단은 발생하지 않았다. 레이디얼크랙의 크기도 크게 성장을 하지 않았으며 양적으로도 많이 발생하지 않았다. 그리고 전체적인 손상영역을 살펴보면, 속도가 54m/s에서 분쇄가 발생한 이후 표면탈락(erosion)현상으로 인해 표면손상이 조금씩 깊어지고 그 면적도 조금씩 확대되었다. 하지만 가압을 한 경우가 하지 않은 경우에 비해 손상영역이 절반이상으로 줄어들었다. 이렇게 충격속도가 증가함에도 불구하고 크랙이 크게 성장하지 못하는 이유는 시편에 가해진 접촉압이 시험편내에서 원주방향 축면구속력으로 작용하여 원주방향과 반경방향의 응력구동을 억제시키는 작용을 하기 때문인 것으로 여겨진다. 그리고 Fig. 10에서 강구의 속도가 100m/s일 때 표면의 원주방향으로 형성된 균열은 가압용 치구의 둘레에서 발

생한 것이다. 이러한 균열은 강구의 충격에 의한 응력파가 가압용치구까지 도달한 후 기계적 임피던스 차에 의해 반사파의 형태로 시험편에 인장력을 전달하게 되어 크랙이 가압용 치구하부의 가장 자리를 따라서 발생한 것으로 생각된다. Table 3은 가압 조건에 따른 각각의 임계속도(critical velocity)를 나타내고 있다.

**Table 3** Critical velocities for the pressure condition of specimen

Pressure condition	ring crack (%)	crushing (%)	cone crack separation (%)	fracture (%)
without pressing die	9	32.5	47.6	50.1
P=40MPa	10	53.8	×	×



**Fig. 10** Behavior of specimen by impact of 3mm-steel ball( $t=5\text{mm}$ ,  $P=40\text{MPa}$ )

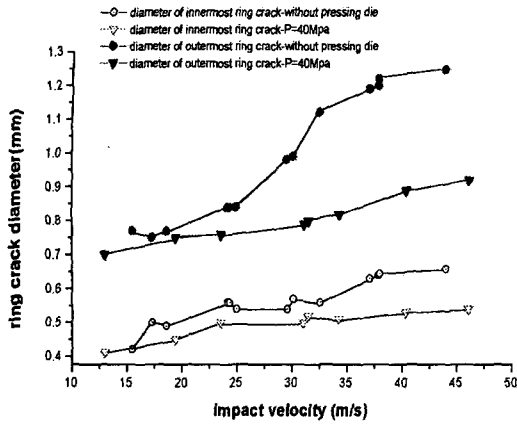


Fig. 11 Diameter of ring crack by steel ball for the contact pressure condition

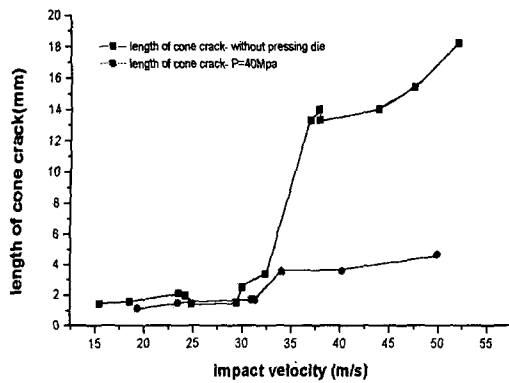


Fig. 12 Length of cone crack by steel ball for the contact pressure condition

3.3 잔류강도의 평가

잔류강도를 평가하기 위하여 Fig. 13과 같이 4점 굽힘시험을 수행하였다. 충격속도가 32.5m/s 이하의 저속에서 충격을 받은 시편들의 파단 하중값들을 로드셀로부터 얻을 수 있었으며 그 하중값의 분포는 P=1177N~1377N이었다. Fig. 14는 충격입자의 입사각에 따른 잔류강도를 나타내고 있다. 그래프에서 충격입자의 입사각에 관계없이 충격속도가 32.5m/s 이하의 저속에서 시편의 잔류강도는 70~80MPa의 값을 갖는다. 이러한 값의 분산은 시편의 폭이 40mm로 링크랙이나 초기단계의 콘크랙의 크기보다 훨씬 크기 때문에 링크랙이나 초기단계의 콘크랙이 잔류강도에 전혀 영향을 못 미치고 있음을 알 수 있다. 실제 시편을 관찰해보면 파단면이 링크랙이나 콘크랙을 지니고 있지 않음을 관

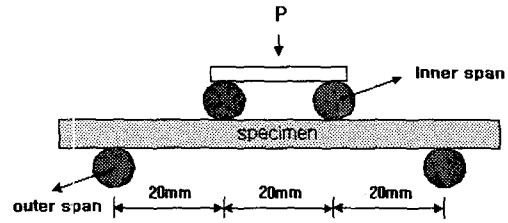


Fig. 13 Scheme of 4-point bending test

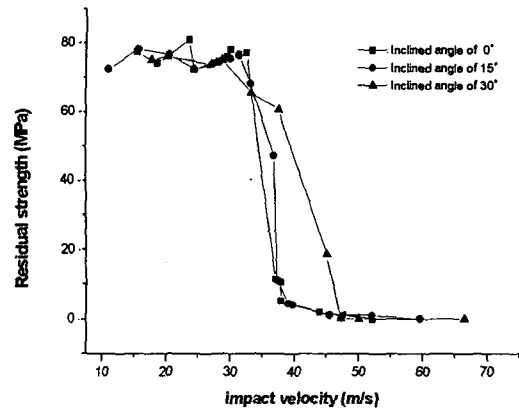


Fig. 14 Residual strength for the inclined angle of indenter

찰할 수 있다. 따라서 저속충돌의 경우 잔류강도는 입자 충격에 의한 손상부 보다는 시편 절단면의 표면 거칠기나 결합정도에 더 영향을 받는다고 할 수 있다.

그리고 시편에 부과한 가압 조건이 잔류강도에 미치는 영향을 Fig. 15에서 살펴보면 v=32.5m/s 이하에서는 가압한 경우나, 하지 않은 경우 모두 70~80MPa의 잔류강도를 나타내며, 가압을 하지 않은 경우는 v=32.5m/s 이후에는 급격한 강도저하를 보이는 반면, 가압을 한 경우는 v=50m/s에서 약간의 감소를 보였다. 이것은 Fig. 12에서 보는바와 같이 가압한 경우 콘크랙의 증가가 완만히 진행되었기 때문이다. 또한, 경사각도 및 가압 조건과 관계없이 시편의 폭에 대해 콘크랙의 길이가 4mm 이상으로 증가하게되면 굽힘 강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 순수 굽힘 시험에서 콘크랙의 길이보다는 콘크랙의 깊이가 잔류강도에 더 큰 영향을 미치는 것을 관찰할 수 있었다. 가압을 하였을 경우에는 재료의 탈락과 레디얼크랙의 성장으로 인해 50m/s이후에 강도가 서서히 저하되었다.

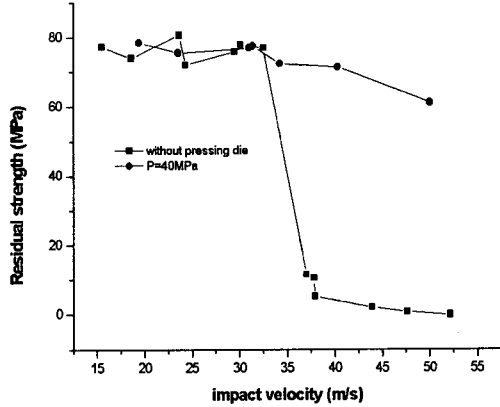


Fig. 15 Residual strength for the contact pressure condition

#### 4. 결론

대표적인 취성재료인 soda-lime glass를 시편으로 사용하여 충격입자의 입사방향에 따른 영향, 가압 조건의 영향 및 잔류강도의 영향에 따른 충격손상을 평가하였다.

(1) 시편이 x축과 이루는 경사각이 증가할수록 전체적인 크랙의 성장이 둔화되고 콘크랙, 레디얼크랙이 비대칭적으로 성장하였으며 콘크랙 사면에서 많은 수의 래터럴크랙이 성장하였다.

(2) 시편에 가압 조건이 부과되면 전체적인 손상면적이 현저히 줄어들고 콘크랙이 거의 성장하지 못하는 반면, 분쇄가 발생한 이후 수지상균열이 계속적으로 성장하였다.

(3) 링크크랙과 초기단계의 콘크랙은 잔류강도 저하에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그리고 잔류강도의 급격한 저하는 콘크랙의 길이가 4mm 이상이 되었을 때 발생하였으며 수지상균열도 잔류강도 저하를 초래하였다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단 지역대학 우수과학자 지원연구에 의해 수행된 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Timoshenko, S. and Gooder, J. N., 1951, "Theory of Elasticity," p. 383. McGraw-Hill Book Co., New York.
- (2) Frankm F. C. and Lawn, B.R., 1967, "On the Theory of Hertzian Fracture," *Proc. R. Soc.*, Vol. A209, 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) Tillet, J.R.A., 1956, "Fracture of Glass by Spherical indenters," *Proc. Roy. Soc.*, Vol. B69, pp. 47~54.
- (7) Fields, J.E., Sun, Q. and Townsend, D., 1989, "Ballistic Impact of Ceramics," *Inst. Phy. Conf. Series No. 102*, pp. 387~393.
- (8) Persion, 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.
- (9) Chaudhri, M.M. and Walley, S.M., 1978, "Damage to Glass Surfaces by the Impact of small Glass and Steel Sphere," *Philos. Mag., Part A*, Vol. 37, No. 2, pp. 153~165.
- (10) 우수창, 김문생, 신형섭, 2001, "취성재료의 소구충돌에 의한 충격손상(I)," 대한기계학회 재료 및 파괴부문 1차 학술대회 논문집 2001년 3월 pp. 222~227.