

# 직물형 유리섬유/에폭시 프리프레그로 피막된 판유리의 강구 충격 파괴 거동

김형구\* · 최낙삼\*\*

## Steel-Ball-Impact Fracture Behavior of Soda-Lime Glass Plates Bonded with Glass Fabric/Epoxy Prepreg

Hyoung-gu Kim, Nak-Sam Choi

**Key Words:** Glass/Epoxy Prepreg(유리/에폭시 프리프레그), Soda-Lime Glass(소다유리), Strain Gage(스트레인 게이지), Maximum Stress(최대응력), Absorbed Fracture Energy(흡수파괴에너지)

### Abstract

In order to study the impact fracture behavior of brittle materials, a steel-ball-impact experiment was performed. Five kinds of materials were used in this study : soda-lime glass plates, glass/epoxy prepreg-one layer-bonded and unbonded glass plates, glass/epoxy prepreg-three layers-bonded and unbonded glass plates. Fracture patterns, the maximum stress and absorbed fracture energy were observed according to various impact velocities 40~120m/s. With increasing impact velocity, ring crack, cone crack, radial crack and lateral crack took place in the interior of glass plates. The generation of such cracks was largely reduced with glass/epoxy prepreg coating. Consequently, it is thought that the characteristics of the dynamic impact fracture behavior could be evaluated using the absorbed fracture energy and the maximum stress measured at the back surface of glass plates.

### 1. 서론

최근 많은 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있는 세라믹계의 취성재료는 표면이나 내부의 작은 결함에 의해 균열과 파손이 발생하고 급격히 진전한다. 특히 구조용 세라믹 재료에서 작은 입자에 의한 충격을 받는 경우 미소 국부영역에서 발생한 균열과 파손은 전체 구조물의 파손을 초래할 수 있다. 최근 세라믹 재료의 내충격성 개선 방법의 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 취성 재료의 동적 충격 특성은 이론적인 접근이 난이 하여 주로 실험적인 연구에 의존하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 미소강구 충격에 따른 균열의 종류와 진전을 관찰하기 쉬운 단순 소다

유리와 이에 직물형 유리섬유/에폭시 프리프레그(glass/epoxy prepreg)를 피막 하여 미소 강구 충격시 발생하는 균열의 종류와 형태, 진전 거동, 충격 완화 효과를 연구하고자 공기충식 강구 충격 시험장치를 제작하여 미소 강구 충격실험을 하였다. 또한, 시험편의 충격부위의 뒷면에 스트레인 게이지를 부착하여 충격시 발생하는 최대응력(maximum stress)과 흡수파괴에너지(absorbed fracture energy)를 측정하여 균열의 종류와 진전 형태를 관찰함으로써 유리의 내충격 특성을 파악하고자 하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구를 위하여 제작한 공기충식 충격실험 장치의 개략도이다. 이 충격 실험 장치는 7기압 용량의 공기 압축기(air compressor)를

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 정희원, 한양대학교 기계공학과

이용하여 방아쇠(trigger kit)용 공기탱크와 주 공기탱크에 공기를 압축시킨다. 방아쇠용 공기탱크는 주 공기탱크의 압축 공기를 개폐시키는 2/2 way valve를 작동시킬 때 사용한다. 방아쇠 키트를 이용하여 2/2way valve를 개폐시켜 압축된 공기를 토출시켜 충격실험을 하였다. 총열(gun barrel) 안에는 캐리어와 강구( $\phi=1.25\text{mm}$ ,  $m=0.0079\text{g}$ ,  $\rho=7800\text{ kg/m}^3$ )가 함께 장착되어 있다. 캐리어(carrier)의 재질은 폴리에탄올로 길이 10mm, 지름 4.8mm이며 깊이 5mm, 지름 2mm의 구멍을 내어 강구를 캐리어 안에 넣을 수 있도록 자체 가공하여 사용하였다.

총열(gun barrel) 끝단부에 간격 100mm, 지름 3mm의 구멍을 통해 레이저(O5LLR811, Melles Griot)와 광센서(DET110, Thorlabs, Inc)가 작동하며 강구를 실은 캐리어가 총열 끝부분의 두 개의 광센서(photo sensor)를 통과할 때 레이저의 광로가 일시 차단된다. 이 때 발생하는 전압 신호의 차이를 오실로스코프(oscilloscope)로 측정하여 충격 속도를 구하였다. 강구 속도 범위는 약 40m/s의 저속에서 약 125m/s의 고속까지 가능하였다.

총열을 통과한 캐리어와 강구는 캐리어 스톱퍼에 의해 분리되어 시편 지지대에 고정되어 있는 시편에 강구가 충격을 가하게 된다.

본 실험에 사용한 시험편은 시중에서 판매되고 있는 단순유리(Soda-lime glass)를 사용하였으며 시험편의 크기는  $120 \times 30 \times 3\text{mm}$ 로 절단하여 제작하였다. 또한 이 유리 시편 위에 직물형 유리섬유/에폭시 프리프레그( $30 \times 30\text{mm}$ )를 1층(one layer, 0.125mm), 3층(three layers, 0.375mm)으로 피막하여 적층후 오토클레이브(autoclave)를 사용하여 경화시켰다. 이와는 별도로 직물형 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층, 3층으로 경화시킨 뒤 이를 절단( $30 \times 30\text{mm}$ )하여 유리시편에 비접촉 고정된 시험편을 만들어 총 다섯종류의 시험편을 제작하였다.

충격에 따른 시편의 동적 변형상태를 스트레인 게이지로 측정하였는데, 정적인 굽힘 실험을 통하여 스트레인 게이지의 특성을 파악하고 동일 종류의 스트레인 게이지를 시편 뒷면(배면)에 부착하였다. 미소 강구가 유리 시편에 충격을 가하는 부위는 시편 뒷면에 부착된 스트레인 게이지 그리드(strain gage grid)의 중앙 부위와 대응하도록 하였다. 충격 시 발생하는 충격 변형률 신호를 스트레인 게이지로 측정하여 컴퓨터로 보냄으로써, 이 때의 충격 변형률 신호를 분석하여 충격과 파괴 거동 특성을 나타내는 최대 응력과 흡수 파괴 에너지를 구하였다.

## 2.2 최대응력(maximum stress)과 흡수 파괴 에너지(absorbed fracture energy)

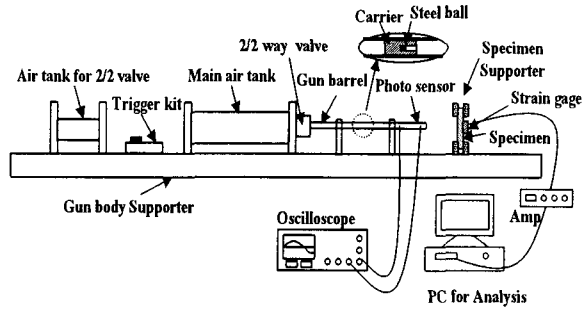


Fig. 1 Schematic for air gun impact tester

미소강구 충격 실험을 통하여 유리시편 배면에 부착한 스트레인 게이지를 통하여 얻은 충격 신호는 Fig. 2와 같다. 사각형 안에 있는 첫 주기 신호에서 최대값을 충격 시 시편에 발생하는 최대 응력(maximum stress)으로 정의하였다. 또한 시편의 강구 충격 시 시편이 흡수한 파괴 에너지가 포함된 양의 부분의 첫 번째 펄스의 면적과 충격으로 발생하는 시편 자체의 굽힘 공진에 해당하는 음의 부분의 첫 번째 펄스의 면적과의 차이를 흡수 파괴 에너지(absorbed fracture energy)라 정의하였다. 최대응력과 흡수 파괴 에너지 값이 클수록 시편 내부의 균열과 파손이 크음을 의미한다. 시편 배면에서의 최대응력과 흡수 파괴 에너지를 취성재료의 미소강구 충격시의 충격과 파괴 거동을 해석할 수 있는 파라미터로 사용하였다.

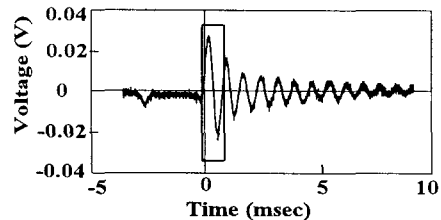


Fig. 2 Measurement of absorbed fracture energy from the impact signal

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 단순유리 배면에서의 최대응력과 흡수 파괴 에너지

미소 강구의 충격속도가 증가함에 따라 충격시 발생하는 단순유리의 경우에는 Fig. 3과 4와 같이 강구 충격속도 40~120m/s의 영역에서 각각 시험편 배면의 최대응력과 흡수 파괴 에너지값의 거동을 나타낸다. 충격속도가 약 95m/s이하에서는 최대응력과 흡수 파괴 에너지는 좁은 범위에서 다소

증가하는 경향을 보였으나 약 100m/s 이상에서는 최대 응력과 흡수파괴에너지가 급격하게 증가했다. 이는 100m/s 이상의 충격속도에서 시편내부로 진전한 균열이 시편 배면의 변형을 크게 하여 스트레인 게이지에 큰 변형을 주었던 것이다.

### 3.1.1 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층으로 접착 및 비접착한 유리시험편

유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층으로 접착 및 비접착한 시험편의 최대응력과 흡수파괴에너지값을 Fig. 3 과 Fig. 4 에 나타낸다.

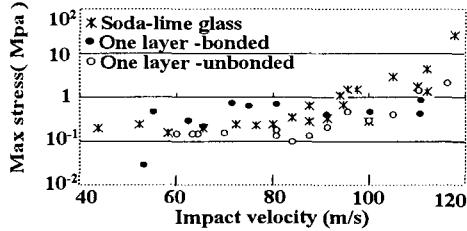


Fig. 3 Back surface stress of glass plates with one layer (bonded, unbonded)

충격속도 100m/s 이하에서는 최대 응력과 흡수파괴에너지 값이 1층 접착한 시험편이 비접착한 경우보다 큰 값을 갖지만, 100m/s 이상에서는 작은 값을 보였다. 비접착한 시험편의 경우, 프리프레그가 강구 충격시에 파손되어 유리 시험편에 충격을 가하게 되므로 충격속도 약 100m/s 이상에서는 최대 응력과 흡수파괴에너지가 큰 값을 가졌

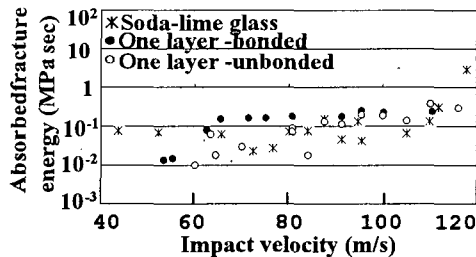


Fig. 4 Absorbed fracture energy of glass plates with one layer (bonded, unbonded)

다고 볼 수 있는데 접착한 시험편의 경우보다 비접착한 시험편에서 내부의 균열이 더 많이 진전하였음과 일치한다. 또한 단순유리와 비교하여 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층 피막한 경우 충격속도가 100m/s 이상에서 시편 배면에서의 최대응력과 흡수파괴에너지는 크게 감소하였다.

### 3.1.2 유리섬유/에폭시 프리프레그를 3층으로 접착 및 비접착한 유리시험편

Fig. 5과 6은 강구 충격속도 40~120m/s 범위에서 유리섬유/에폭시 프리프레그를 3층 접착 및

비접착한 경우에 시편 배면에서 최대응력과 흡수파괴에너지값을 나타낸 것이다. Fig. 5와 6의 1층 피막한 경우와 마찬가지로 충격속도 증가에 따라 약 100m/s 이하에서는 3층으로 접착한 경우가 비접착한 경우에 비해 큰 값을 갖지만 100m/s 이상에서는 작은 값을 갖는다.

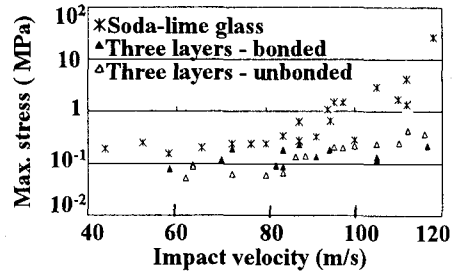


Fig. 5 Back surface stress of glass plates with three layers (bonded, unbonded)

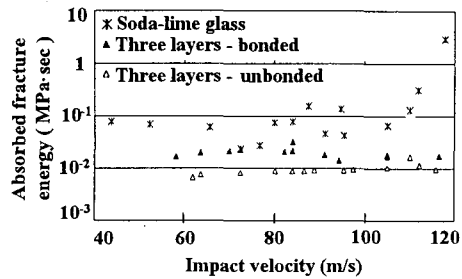


Fig. 6 Absorbed fracture energy of glass plates with three layers (bonded, unbonded)

프리프레그를 3층 접착한 경우의 최대응력은 95m/s 충격속도에서 거의 일정한 값을 가지며 비접착한 경우보다 평균적으로 다소 큰 값을 보였다. 고속에서는 최대응력이 비접착한 경우가  $3.77 \times 10^{-1}$  MPa 정도로 커져 접착의 경우보다 오히려 큰 값을 보였다. 흡수파괴에너지의 경우는 전반적으로 접착의 경우가 다소 큰 값을 보였으므로 비접착의 경우가 우수한 내충격성을 보였다.

### 3.2 균열의 발생형태와 크기에 미치는 충격속도의 효과

#### 3.2.1 단순 유리시험편

Fig. 7은 단순유리(soda-lime glass)에서 발생한 균열의 형태와 진전 특성을 충격속도 증가에 따라 나타내었다. 1번사진은 링균열이며 2, 3, 4, 5번은 콘균열이 발생하여 시편내부로 진전하고 있으며 단순유리의 콘균열 발생 임계속도는 약 55m/s임을 알 수 있었다. 6번은 레이디얼균열이

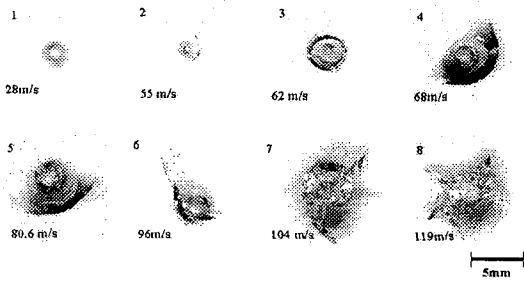


Fig. 7 Patterns generated in crack soda-lime glass as a function of impact velocity

며 7, 8번은 다양한 균열이 시편 내부로 진전한 것을 볼 수 있다. 충격속도가 100m/s 이상이 되면 발생한 균열은 시편 내부까지 완전히 진전함을 알 수 있으며 시편 내부에 큰 파손을 발생시켰다. 100m/s 이상에서 이러한 균열의 진전형태는 단순유리에서 최대 응력과 흡수파괴에너지가 충격속도 약 100m/s에서 급격히 증가하는 현상과 잘 일치하였다.

### 3.2.2 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층으로 접착 및 비접착한 유리 시험편

Fig. 8은 강구 충격속도가 증가함에 따라 발생한 프리프레그의 손상과 내부 균열을 보여준다. 유리섬유 에폭시/프리프레그가 충격으로 파손되고 유리내부에 큰균열이 발생하여 시편 내부로 진전하였으나, 레이디얼균열, 레터럴균열 등의 추가적인 균열은 발생하지 않았다. 유리섬유/에폭시 프리프레그가 유리에 접착되어 있는 경우, 내부의 균열 관찰이 어렵고 시편 사면에서 관찰해야 하기 때문에 균열 크기의 정확한 측정은 어려웠으나 1층 비접착한 경우보다 다소 작게 나타났다.

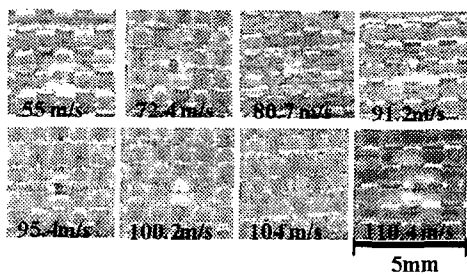


Fig. 8 Fractures of glass/epoxy-prepreg (one layer) bonded glass plates

Fig.9는 강구 충격속도가 증가함에 따라 직물형 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층으로 비접착한 시험편에서 발생한 파손을 나타낸 것이다.

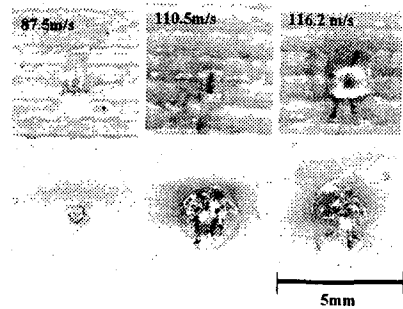


Fig. 9 Fractures of glass/epoxy prepreg (one layer) unbonded glass plates

상단은 1층으로 비접착한 유리섬유/에폭시 프리프레그의 파손을 나타내며 하단은 시편내부의 균열 관찰을 위하여 상단의 비접착된 유리섬유/에폭시 프리프레그를 제거한 후 관찰한 시편내부의 균열을 나타낸다. 고속충격에서도 단지 큰균열만 발생했으며 큰균열의 발생 임계속도는 약 62m/s였고, 시편 내부에서 균열의 진전은 현저히 감소하였다. 또한 시편 균열은 1층으로 접착한 경우보다 다소 크게 나타났으며 이와 같은 균열의 관찰 결과로 비추어 볼때 충격속도가 약 100m/s 이상에서 비접착한 경우가 접착한 경우보다 최대응력과 흡수파괴에너지가 더 큰 값을 가진 것은 충격시 발생한 균열이 시편 내부로 더 크게 진전했던 것과 일치하였다.

### 3.2.3 유리섬유/에폭시 프리프레그를 3층으로 접착 및 비접착한 유리 시험편

충격속도 증가에 따른 프리프레그의 파손 부위의 면적이 크게 달라지지 않았고, 시편내부의 유리부위에는 균열이 전혀 발생하지 않았다. 이는 3.1.2절에서 언급한 바와 같이 시편 배면에서 측정되는 최대응력과 흡수파괴에너지가 아주 낮은 값으로 거의 일정한 값을 가지며 다소 증가하는 경향을 보이는 것과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

프리프레그를 3층으로 비접착한 시험편에 발생한 파손의 경우, 3층으로 접착한 경우와 파괴 형태가 거의 같으며 충격속도 증가에 따른 프리프레그 파손의 크기 변화가 거의 없었고 유리내부의 균열은 전혀 발생하지 않았다. 이는 3.1.2절의 Fig. 5, 6에서 살펴본 바와 같이 최대응력과 흡수파괴에너지가 모든 충격속도 범위에서 거의 일정한 값을 갖는 것과 잘 일치하였다.

### 3.2.4 콘균열 (cone crack)의 평가

전 절에서는 충격실험에서 발생한 다양한 균열을 관찰하였는데, 이 중에서 콘균열의 최대 지름을 예측한 실험식<sup>(2)</sup>은 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$D = 2[(125\pi^3/48)^{2/15}(E/K)^{4/15}\rho^{2/5}r^{4/3}/\beta_R^{2/3}K_C^{2/3}]v^{4/5} \quad (3)$$

$$K = (9/16)[(1-\nu^2) + (1-\nu'^2)E/E'] \quad (4)$$

여기서,  $E$ ,  $\nu$ 는 각각 단순유리(soda-lime glass)의 탄성계수, 푸아송비이며,  $E'$ ,  $\nu'$ ,  $\rho$ ,  $r$ ,  $\nu$ 는 각각 강구(steel ball)의 탄성계수, 푸아송비, 밀도, 반지름, 충격속도이다.  $\beta_R$ ,  $K_C$ 은 실험적으로 구해지는 상수이며 단순유리(soda-lime glass)의 경우  $\beta_R$ ,  $K_C$ 은 각각 8.5, 740000이다<sup>(2)</sup>.

Fig. 10은 이 실험식을 이용하여 충격속도 증가에 따른 콘균열 지름을 예측한 값과 본 연구에서 충격실험으로 얻은 값을 비교하여 나타낸 것이다. 단순유리의 경우는 실험식과 비교적 일치하였으며 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층으로 비접착한 경우는 콘균열 길이가 현저히 감소하였다. 또한 콘균열 발생 임계속도는 단순유리와 유리섬유 에폭시 프리프레그를 1층으로 비접착한 경우 각각 약 50m/s, 약 60m/s였다. 콘균열 지름을 비교한 결과, 균열이 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층으로 피막한 경우 현저히 감소하여 충격완화 효과가 매우 크게 나타났음을 알 수 있다.

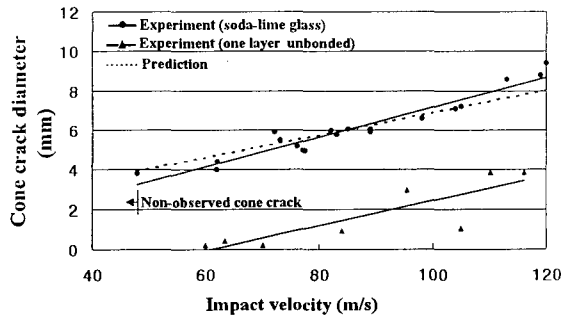


Fig.10 Cone crack diameter versus impact velocity

### 3.3 프리프레그 피막 유리판의 내충격 효과

Fig. 11은 단순유리와 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층과 3층으로 접착한 유리에 대해 강구 충격속도 증가에 따른 시편 배면에서의 최대 응력을 나타낸 것이다. 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층(0.125mm)으로 접착한 경우, 충격속도가 약 100m/s이하에서 시편 배면에서 측정된 최대 응

력은 단순유리와 프리프레그를 3층으로 접착한 경우보다 큰 값을 보였다. 그렇지만 100m/s 이상에서는 거의 일정한 값으로 유지되어 단순유리에 비하여 오히려 낮은 값을 보였으며 이는 고속에서는 저속에서와 달리 프리프레그를 1층으로 접착한 경우가 현저한 충격완화 효과가 있음을 알 수 있었다.

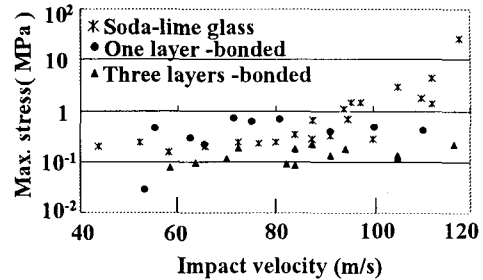


Fig.11 Back surface stress of bonded glass plates (one layer, three layers)

유리섬유/에폭시 프리프레그를 3층(0.375mm)으로 접착한 경우는 모든 충격속도 범위에 걸쳐 최대응력뿐만 아니라 흡수파괴에너지값도 낮은 값을 보이면서 일정하게 유지되었으며, 이는 프리프레그 두께가 충격완화 효과에 큰 영향을 주었음을 나타낸다.

## 4. 결론

공기총식 강구 충격 시험장치를 제작하고 취성 재료인 단순유리(soda-lime glass)에 직물형 유리섬유/에폭시 프리프레그를 피막한 유리시험편을 이용하여 미소강구에 의한 충격 실험을 행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 취성 재료인 단순유리(soda-lime glass)의 강구 충격 실험 시 발생한 균열의 종류와 형태 및 충격속도 증가에 따른 균열 진전 특징을 파악하였고, 충격파괴거동 특성을 최대응력과 흡수파괴에너지로 평가하였다.
- (2) 단순유리에 직물형 유리섬유/에폭시 프리프레그를 피막한 경우 충격으로 인한 파괴에너지는 단순유리에 비해 1/2~1/4정도 현저히 감소하였고, 특히 고속충격에서 큰 감소 효과를 보였다.
- (3) 단순유리에 직물형 유리섬유/에폭시 프리프레그를 1층(0.125mm) 피막한 경우 단순유리에 비해 균열의 진전이 현저히 감소하였고, 3층(0.375mm) 피막한 경우 균열이 전혀 발생하지 않았다.
- (4) 직물형 유리섬유/에폭시 프리프레그가 피막 처리된 취성재료는 미소입자충격에 대해 효과적으로 충격파괴를 완화할 수 있는 것으로 평가 되었다.

## 참고문헌

- (1) S. M. Wiederhorn, B. R. Lawn, 1977, "Strength Degradation of Resulting from Impact with Spheres", *Journal of Ceramic Society*, Vol. 60, No. 9~10. pp. 451~458
- (2) Brain R. Lawn, Fernando Guiberteau, Nitin P. Padture, 1994, "Effect of Grain Size on Hertzian Contact Damage in Alumina" , *J.Am.Ceram. Soc.*, Vol. 77 [7], pp. 1825~31
- (3) Robert F. Cook, George M. Pharr, 1990, "Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73 [4], pp. 787~817
- (4) J. Persson, K. Breder, D. J. Rowcliffe, 1993, "Loading Rate Effects during Indentation and Impact on Glass with Small Spheres", *Journal of Materials Science*, Vol. 23, pp. 6484~6489
- (5) D. A. Shockey, D. C. Elich, K. C. Dao, 1981, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride at 1400°C", *Journal of Materials Science*, Vol. 16, pp. 477~482
- (6) 서창민, 신형섭, 정성목, 황병원, 1996, "입자 충격에 의한 유리의 손상기구에 관한 실험적 연구", *대한기계학회논문집(A)*, 제 20권 제 6호, pp. 1903~1912