

## 論文

## 일방향 및 직교형 유리섬유/에폭시 복합재로 피막된 판유리의 미소강구 충격에 의한 표면파괴거동

장재영\*, 최낙삼\*+

## Surface Fracture Behaviors of Unidirectional and Cross Ply Glass Fiber/Epoxy Lamina-Coated Glass Plates under a Small-Diameter Steel Ball Impact

Jae-Young Chang\*, Nak-Sam Choi\*+

## ABSTRACT

Fiber orientation effects on the impact surface fracture of the glass plates coated with the glass fiber/epoxy lamina layer were investigated using a small-diameter steel-ball impact experiment. Four kinds of materials were used: soda-lime glass plates, unidirectional glass fiber/epoxy layer(one ply, two plies)-coated, crossed glass fiber/epoxy layer (two plies)-coated glass plates. The maximum stress and absorbed fracture energy were measured on the back surface of glass plates during the impact. With increasing impact velocity, various surface cracks such as ring, cone, radial and lateral cracks appeared near the impacted site of glass plates. Cracks in the plate drastically diminished by glass fiber coating. The fiber orientation guided the directions of delamination and plastic deformation zones between the fiber layer and the glass plate. Impact surface-fracture indices expressed in terms of the maximum stress and absorbed energy could be used as an effective evaluation parameter of the surface resistance.

## 초 록

유리섬유/에폭시 복합재료로 피막한 판유리의 표면파괴거동에 대한 섬유방향효과를 미소강구 충격실험을 통해 연구했다. 본 연구에서는 단순소다유리판(soda-lime glass plates), 일방향 유리섬유/에폭시박막 (glass/epoxy lamina ply)을 1층 및 2층 접착, 직교형 유리섬유/에폭시 박막 (2층)을 접착한 4종류의 시편을 사용하였다. 유리판 배면에 스트레인게이지를 부착하여 충격 중의 최대 응력과 흡수파괴에너지를 측정하였다. 피막없는 판유리의 경우 충격속도 증가에 따라 링균열, 콘균열, 레이디얼 균열이 충격표면부에서 발생하였다. 복합재료 박막으로 피막한 결과, 소다유리판의 균열은 현저히 감소하였으며 섬유층과 판유리사이의 박리 및 소성변형영역의 방향은 섬유방향으로 진행했다. 최대응력과 흡수파괴에너지를 이용하여 구한 충격 표면파괴지수는 표면저항의 효과적인 평가지수로서 사용될 수 있었다.

**Key Words** : 복합재피막 판유리(composite layer-coated glass plate), 미소강구충격(small steel ball impact), 섬유배향효과(fiber orientation effects), 표면파괴지수(surface fracture index)

## 1. 서 론

세라믹이나 유리와 같은 취성재료가 하중을 받으면 작은 결함에 의해 파손이 급격히 진전한다. 세라믹 재료가 입자에

\* 한양대학교 기계공학과

\*+ 한양대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:nschoi@hanyang.ac.kr)

의한 충격을 받는 경우 표면근처의 국부영역에 미소파손이 발생하여 전체 세라믹구조물의 파손을 초래할 수 있는 것이다.

취성재료의 충격거동은 이론적인 접근이 난해하여 주로 실험적인 연구가 진행되고 있다. Knight(1), Bruno(2), Persson(3) 등은 준정적인 하중(quasi-static load)을 가하여 발생하는 균열의 종류와 하중 증가에 따른 이들의 진전 형태를 연구하였다. Wiederhorn(4,5), Chaudhri(6,7), Hagan(8-10)은 취성재료에 집중하중을 증가시킬 때 발생하는 균열의 종류와 크기를 관찰하고, 동적인 충격실험을 통하여 얻은 균열진전거동과 비교하여 충격시의 하중을 예측하였다.

Shockey(11), Zeng(12), Munawar(13)는 고속도 촬영장치(high-speed-photography)를 이용한 취성재료의 강구 충격실험을 통해 충격속도별로 발생하는 균열과 파손형태를 관찰하고 정량적 분석을 시도하였다. Robert(14), Brain(15), 서창민(16~18), Flocker(19)등은 단순유리(soda-lime glass)에 금속산화물을 피막 처리하여 유리표면부의 강도와 내충격성 향상을 위한 실험연구를 하였다. 이들 표면충격파괴 연구는 충격속도에 관련시켜 표면균열형태와 크기를 관찰한 것이 대부분이고, 충격 중에 발생하는 응력과 흡수 파괴에너지를 정량적으로 측정하여 세라믹의 내충격 효과를 평가한 결과는 거의 없었다. 이에 본 저자는 충격 파괴 거동이 세라믹과 유사하고, 균열을 관찰하기 쉬운 투명한 판상의 유리 뒷면에 전기저항식 스트레인게이지를 접착하고, 앞면에 미소강구 충격실험을 행하여 충격 시 발생하는 최대 응력(maximum stress)과 흡수파괴에너지(absorbed fracture energy)를 측정하여 직물형 복합재료 박막층의 두께에 따른 충격저항 효과를 계측하였다(20). 또한, 최대 응력(maximum stress)과 흡수파괴에너지(absorbed fracture energy)를 통해 구한 충격저항지수를 제안하고 유리의 표면파괴거동과 관련시켜 해석하였다(21).

본 연구에서는 소다유리판(soda-lime glass plates)의 표면충격 파괴거동을 기본 대상으로 하고, 이에 일방향 및 직교형의 유리섬유/에폭시 복합재 박막(glass/epoxy lamina)을 동시경화 피막한 판유리를 대상으로 미소강구 충격 시 발생하는 표면균열의 종류와 방향성을 관찰하면서 복합재료 박막의 충격 완화 효과를 연구한다. 공기충식 강구충격 시험장치를 통해, 충격 시 유리 뒷면에 발생하는 최대 응력(maximum stress)과 흡수파괴에너지(absorbed fracture energy)를 스트레인게이지로 측정하여 복합재료 박막층의 섬유방향과 두께에 따른 내충격 효과를 평가한다.

## 2. 실험

### 2.1 일방향 및 직교형 복합재피막 판유리

실험재료는 두께 3mm의 소다유리판(soda-lime glass plates)을 기본재료로 하였으며 이 판유리를 Fig. 1과 같이 길이 120mm, 폭 30mm로 절단하여 시편을 제작하였다. 또한 이 판유리 시편

위에 일방향 유리섬유/에폭시 프리프레그 박막(30×30mm)을 시편 길이방향에 맞추어 일방향 1층(one unidirectional ply, 0.125mm)과 일방향 2층(two unidirectional plies, 0.25mm)으로 적층(Table 1에 [0°], [0°/0°]로 표기함)하고, 시편표면을 일방향 1층으로 먼저 피복 후 수직방향 1층을 직교형으로 적층(two cross plies, Table 1에 [0°/90°]로 표시)함으로써 3종류의 피막을 만들었다. 이들 피막시편을 오토클레이브(autoclave)에 넣어 진공백 처리 상태에서 5기압의 압력을 가하면서 Fig. 2와 같은 경화 사이클로 피막부를 경화하였다.

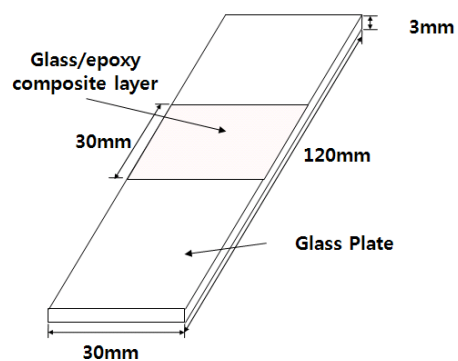


Fig. 1 Geometry of glass/epoxy lamina-coated glass plate specimens.

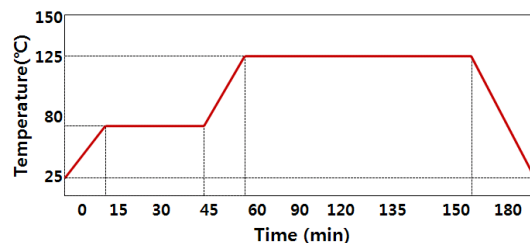


Fig. 2 Curing cycle for glass/epoxy lamina-coated glass plates.

### 2.2 표면충격실험 장치

Fig. 3은 본 충격시험에 사용된 공기충식 충격실험 장치의 개략도이다. 총열(gun barrel) 안에는 미소강구( $\phi=1.5\text{mm}$ ,  $m=13.8\text{mg}$ ,  $\rho=7.800\text{ kg/m}^3$ )를 실은 폴리에틸렌 재질의 캐리어(carrier)가 장착되어 있다. 캐리어는 길이 10mm, 지름 4.9mm이며 깊이 5mm, 지름 2mm의 구멍을 중심축에 내어 미소강구가 캐리어 안에 삽입되어 있다. 7기압 용량의 공기압축기(air compressor)를 이용하여 방아쇠(trigger kit)용 공기탱크와 주 공기 탱크에 공기를 압축시킨 후, 주 공기 탱크의 압축공기를 개폐시키는 2/2 way 밸브를 방아쇠용 공기탱크로 작동시킨다. 방아쇠 키트를 이용하여 2/2way 밸브를 개폐시켜 압축된 공기를 토출시켜 충격실험을 한다.

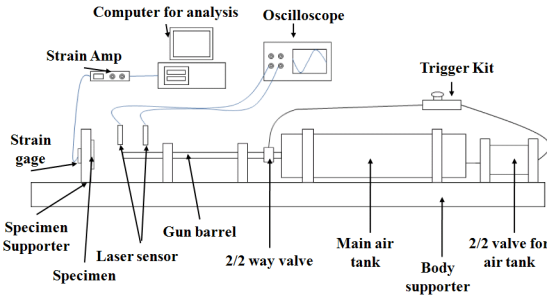


Fig. 3 Schematic of steel ball impact tester.

충열 끝단부에는 간격 100mm, 지름 3mm의 구멍두 개가 충열의 중심축과 수직으로 관통되어 있다. 캐리어가 이 두 개의 구멍을 지나가는 순간 레이저 광로의 일시 차단현상을 레이저(05LLR811, Melles Griot)와 광센서(DET110, Thorlabs.Inc)의 작동을 통해 시간차로 계속하여 강구의 속도를 측정하였다. 이렇게 충열을 통과한 캐리어는 Fig. 4와 같이 캐리어스토퍼(carrier stopper)에 막혀 분리되고 강구만이 계속 운동하여 시편 지지대에 고정되어 있는 시편 표면에 충격을 가하게 된다. 미소강구의 속도 범위는 약 40-120m/s로 설정하였다.

### 2.3 시편배면의 충격변형률 계측

Fig. 4와 같이 전기저항식 박편형 스트레인게이지(AP(AB)-11-S80N-120, CAS)를 시편 배면(뒷면)에 접착하여 충격 시 시편의 동적 변형상태를 측정하였다. 미소강구가 충격을 가하는 유리 시편 앞면의 충격 부위는 시편 배면(뒷면)에 부착된 스트레인 게이지 그리드(strain gage grid, 그리드면적 8mm×2.5mm)의 중앙 부위와 일치하도록 하였다. 시편의 정적인 인장 실험을 통하여 스트레인 게이지의 전압-변형률 특성을 구했으며, 충격 시 발생하는 충격 변형률 신호를 스트레인게이지로 검출하여 스트레인 증폭기(DAS-406B DC Strain Amp., MINEBEA)를 거쳐 컴퓨터로 보냄으로써, 충격 변형률 신호를 해석하였다.

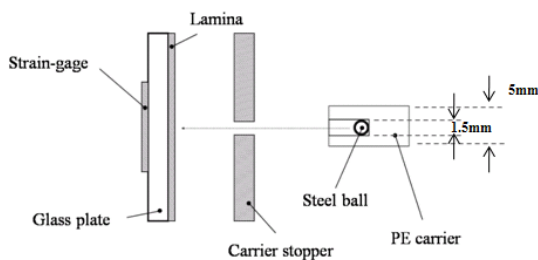


Fig. 4 Strain gage adhered specimen subjected to a steel ball impact.

### 2.4 최대 응력과 흡수파괴에너지 측정

Fig. 5(a)는 유리시편 배면에 접착한 스트레인게이지를 통

하여 얻은 미소강구 충격신호이며, Fig. 5(b)는 스트레인게이지 그리드 중앙에 근접한 판유리 앞면의 충격부위를 나타낸다. 충격 시 시편의 배면에 발생하는 최대 응력(maximum stress)  $\sigma_{max}$ 은, 시편 배면의 스트레인 게이지에서 측정된 Fig. 5(a)의 사각형 안에 있는 첫 펄스 신호에서 최대 변형률을 가리키는 최대 전압값  $V_{max}(\text{volt})$ 를 계측하여 다음 실험식(1)로  $\sigma_{max}(\text{MPa})$ 를 구하였다.

$$\sigma_{max} = 0.83E V_{max} \quad (1)$$

여기서 E는 유리판의 영률(Young's modulus, 72GPa)이다.

이전 논문(21)에서는 비례상수가 0.87이었으나 이는 스트레인 앰프의 미세조정에 따른 차이로부터 생겼으며, 본 실험에서 스트레인앰프의 조정다이얼을 고정시킨 후에 상기 (1)의 실험식을 구하여 일관성 있는 실험조건으로 충격시험을 하였다.

충격 직전의 강구의 운동에너지는 충격 직후에, 시편에서의 충격응력과 전파와 굽힘 공진을 야기시키는 탄성 에너지, 시편의 표면파괴와 크랙발생 및 소성변형에 따른 흡수파괴 에너지, 강구의 되튐이나 관통에 따른 충격후의 강구운동 에너지로 나누어지는데(22), 충격속도의 크기에 따라 각 모드의 에너지 배분율은 달라질 것이다. 따라서 본 충격시험에서는 시편 배면의 어떤 한 점에서의 진응력은 매우 복잡한 거동을 나타내겠지만, 배면에 부착된 스트레인 게이지의 그리드 면적당 평균 표면응력을 식 (1)과 같은 정적 해석을 통해 구할 경우 충격속도에 따른 파손의 정도를 상대적으로 평가 가능할 것이다.

Fig. 5(a)의 충격신호에는 탄성에너지와 흡수파괴에너지가 포함되어 있으며 대부분의 강구충격에너지는 시편의 변형 및 파손, 굽힘공진을 일으킬 것이다. 강구 충격 시 강구가 시편 표면부위와 접촉하는 시간대는 충격신호 첫펄스에 포함되므로 시편의 흡수파괴 에너지 U (absorbed fracture energy)는 첫 번째 주기신호의 양의 부분(첫 펄스 신호) 면적(A)과 충격으로 발생하는 시편 자체의 굽힘 공진 신호에 해당하는 음의 부분 면적(B)과의 차(A-B)를 통해 구할 수 있다.

충격신호의 원파형이 Fig. 5(a)의 윗그림에서 볼 수 있듯이 거칠은 고주파 노이즈신호를 포함하고 있으므로 OriginLab Corp.의 Origin program에 의해 신호처리하여 7kHz 이상의 고주파 노이즈 신호를 제거한 후의 충격신호(Fig. 5(b))를 이용하여 흡수파괴에너지 U를 측정하였다. 충격에 의한 시편 내부의 균열 발생과 파손이 커지면 시편 배면의  $\sigma_{max}$ 과 U가 커지므로, 이들 값이 작을수록 시편의 내충격성이 좋아짐을 가리킨다. Fig. 5(c)는 시편배면에 부착된 스트레인게이지의 중앙근처를 향해 부딪친 강구 충격의 파괴흔적을 보여주고 있다. 실험계측의 정확성을 위해 시편 앞면에 대한 강구 충격위치는 매 시편마다 위와 같이 스트레인게이지의 중앙근처가 되도록 조정하였다.

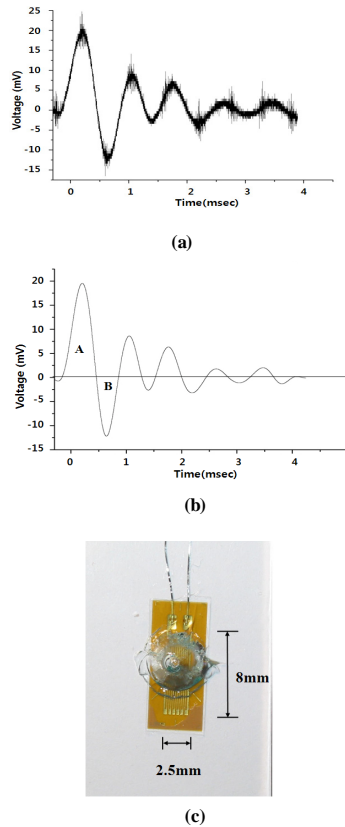


Fig. 5 Strain-gage signals (a) and (b), and the corresponding impacted site (c) during the impact test.

## 2.5 표면파괴형태의 관찰

투명한 판유리에 생긴 강구충격에 따른 표면파괴의 형태를 조사하기 위해, 입체형 광학현미경(stereo microscope, Olympus SZX12)을 통해 반사광과 투과광을 적절히 조절하여 표면손상을 동일배율로 관찰하였다. 섬유층으로 피막된 유리의 경우, 광학현미경 관찰용으로서 스트레인게이지를 배면에 부착하지 않은 상태로 강구 충격을 한 뒤 대물렌즈를 시편 배면쪽으로 대하고 유리투명성을 활용하여 투과광으로 현미경초점을 섬유층상부위에 맞추어 섬유층과 판유리 내부, 이들 사이의 계면부 박리를 함께 관찰하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 판유리 표면균열의 발생에 미치는 복합재피막 및 충격속도의 효과

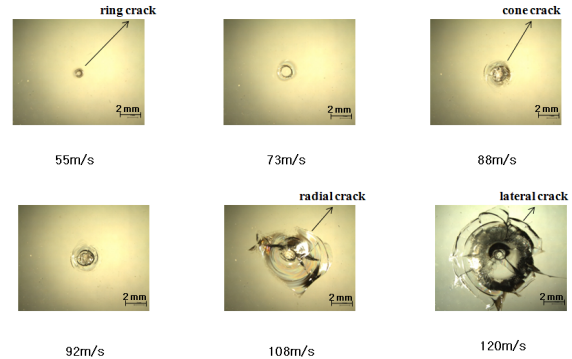


Fig. 6 Generation of surface cracks in soda-lime glass as a function of ball-velocity.

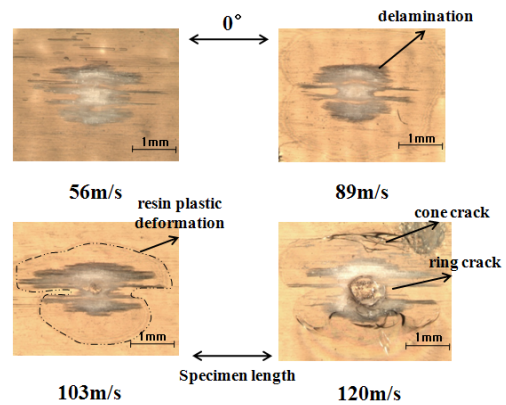


Fig. 7 Extent of plastic deformation and delamination between  $[0^\circ]$  fiber layer and glass plate as a function of ball-velocity.

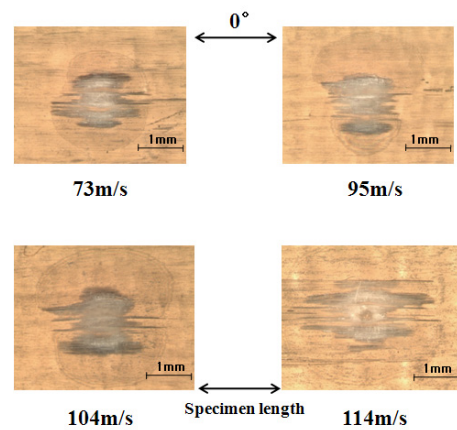


Fig. 8 Extent of plastic deformation and delamination between  $[0^\circ/0^\circ]$  fiber layer and glass plate as a function of ball-velocity.

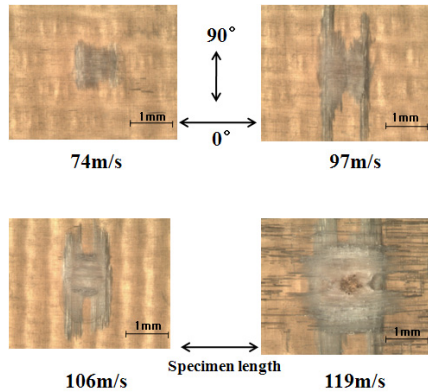


Fig. 9 Extent of plastic deformation and delamination between  $[0^\circ/90^\circ]$  fiber layer and glass plate as a function of ball-velocity

저자는 이전 논문(20)에서 직경 1.25mm의 강구(질량 7.9mg)를 사용하여 소다유리판(soda-lime glass plates)에 대한 표면충격을 가한 결과, 저속에서 링균열이 발생하다가 충격속도 약 55m/s 이상에서 콘균열이 발생하여 판유리 두께방향으로 진전함을 알았다. 레이디얼균열은 90m/s 이상에서 콘균열에 추가하여 발생하였으며 충격속도가 100m/s 이상에서는 이들 다양한 모드의 균열이 시편 내부까지 진전하였다. 본 연구에서는 직경 1.5mm의 강구(질량 13.8mg)를 충격시험에 사용하였으며, Fig. 6과 같이 충격속도 약 60m/s 이상에서 콘균열이 발생하였으며 레이디얼균열은 90m/s 이상에서 콘균열에 추가로 발생하여 충격속도가 100m/s 이상에서는 래터럴 균열까지 추가한 다양한 모드의 균열이 급격히 큰 영역으로 함께 발생하고 시편 내부까지 진전하여 국부적이면서 큰 파손을 유발시켰다.

또한, 이전 논문(20)에서 밝힌 바와 같이 직물형 복합재 박막을 1층만 접착하여도 고속충격에서 레이디얼균열, 래터럴균열 등의 추가적인 균열은 발생하지 않았고 시편 내부의 콘균열 진전은 현저히 감소하였다. 또한 콘균열 직경에 대한 실험값을 충격속도의 함수로 분석한 결과, 복합재 박막 1층으로 피막한 경우에 콘균열 직경이 각 충격속도에서 피막없는 판유리의 결과와 비교하여 거의 일정한 폭만큼 현저히 감소하여 충격완화 효과가 전체 속도범위에서 매우 크게 나타났음을 알았다.

한편, Fig. 7은 일방향 섬유층을 1층으로 피막( $[0^\circ]$ )한 시편에 대해 강구충격 후 유리뒷면쪽에서 투과광으로 관찰한 손상사진을 충격속도의 함수로서 배열한 것이다. 섬유층과 판유리 사이의 계면부에서  $0^\circ$  섬유방향으로 층간박리(delamination)가 진전하였으며 또한, 층간박리면적보다 3-7배 큰 면적으로 소성변형이 층간박리부분의 외곽쪽으로 넓게 전개되었음을 알 수 있다. 충격속도 100m/s 근처에서 판유리에 작은 링균열이 발생하였고, 115m/s 이상에서 콘균열이  $0^\circ$  섬유방향의 영향을 받아, 섬유를 가로지르는 방향으로 발생이 억제되고 섬유길 이방향으로 진전되고 있었다. 일방향 섬유층을 2층으로 피막( $[0^\circ/0^\circ]$ )한 시편의 경우(Fig.8), 층간박리 면적과 소성변형 면

적이  $[0^\circ]$  피막 시편에 비해 훨씬 감소했으며 판유리에의 균열발생은 본 연구의 충격속도 범위에선 관찰되지 않았다.

직교형 2층 섬유층을 피막( $[0^\circ/90^\circ]$ )한 시편의 경우(Fig. 9), 강구가  $90^\circ$  표면층(Fig. 9 사진의 세로방향에 해당)에 부딪치고  $0^\circ$  층(Fig. 9 사진의 가로방향)은 판유리와 맞닿아 접착되어 있는 구조인데, 강구가 직접 부딪치는 표면섬유  $90^\circ$  층과 내부섬유  $0^\circ$  층 사이에서 층간박리가  $90^\circ$  방향으로 크게 진전하였다. 반면에  $0^\circ$  층과 판유리 사이에는 115m/s 이상의 고속충격에서 다소의 층간박리가  $0^\circ$  방향으로 형성되었다.  $90^\circ$  층과  $0^\circ$  층 사이의 층간박리 면적은  $[0^\circ/0^\circ]$  피막 시편보다 훨씬 크게 진전하였으나 판유리에서의 균열발생은  $[0^\circ/0^\circ]$  피막의 경우처럼 본 연구의 충격속도 범위에서 보이지 않았다.

### 3.2 최대응력과 흡수파괴에너지에 미치는 충격속도의 효과

Fig. 10은 미소강구 충격속도 40~120m/s의 영역에서 피막 없는 판유리 시편 배면에서의 최대응력  $\sigma_{max}$  과 흡수파괴에너지 지U의 변화거동을 나타낸다. 80m/s 이하의 저속구간에서  $\sigma_{max}$  값은 속도증가에 따라 거의 일정한 값을 보였지만 그 이상의 중속 및 고속에서 점차적으로 증가하였다. 이는 충격속도가 증가함에 따라 균열이 스트레인 게이지가 부착된 시편 뒷면 근처까지 진전하면서 배면변형 값이 커져  $\sigma_{max}$  값이 증가하였던 것이다. 흡수파괴에너지의 경우에는 동일속도구간에서  $\sigma_{max}$  거동보다도 훨씬 급격한 변화거동을 보였다.

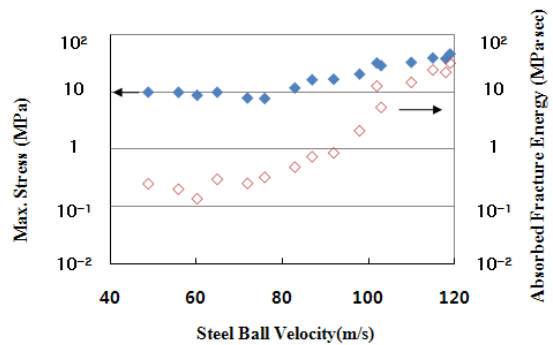


Fig. 10 Maximum stress(◆) and absorbed fracture energy(◇) of uncoated glass plates under a steel ball impact.

Fig. 11은 일방향 섬유층을 1층( $[0^\circ]$ )과 2층( $[0^\circ/0^\circ]$ )으로 피막한 시편에 대해  $\sigma_{max}$  거동을 나타낸다. 1층 피막 시편은 단순유리시편과 비교하여 전체 속도영역에서  $\sigma_{max}$  값이 현저히 감소하였으며, 90m/s 이상의 속도에서 최대응력이 다소 증가하여 단순유리시편의 저속충격시에 측정된  $\sigma_{max}$ 의 수준에 도달했다. 한편,  $[0^\circ/0^\circ]$  피막의 시편은  $[0^\circ]$  피막 시편보다  $\sigma_{max}$ 이 더욱 감소하여 고속충격에서도 단순유리시편의 저속충격에 따른 응력값보다 훨씬 낮아서 내충격 효과가 탁월했음을 보였다.



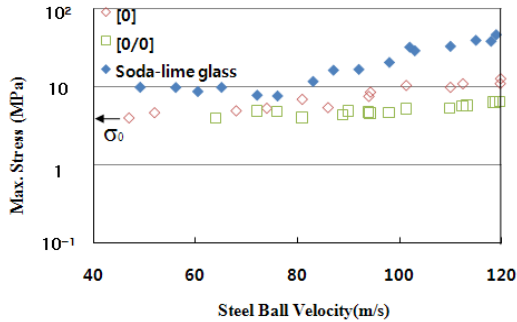


Fig. 11 Behaviors of the maximum stress of uncoated, [0°] fiber coated and [0°/0°] fiber coated glass plates under a steel ball impact.

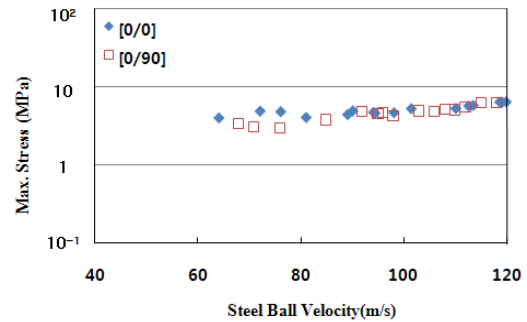


Fig. 13 Behaviors of the maximum stress of [0°/0°] fiber coated and [0°/90°] fiber coated glass plates under a steel ball impact.

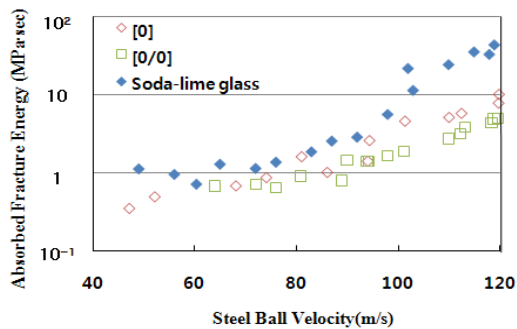


Fig. 12 Behaviors of the absorbed fracture energy of uncoated, [0°] fiber coated and [0°/0°] fiber coated glass plates under a steel ball impact.

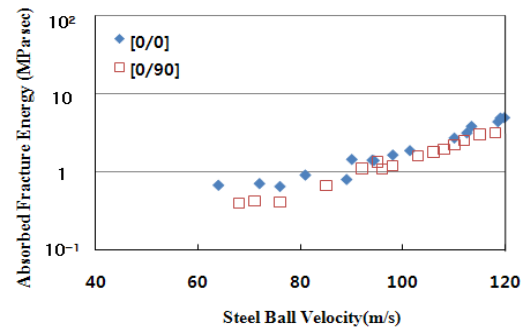


Fig. 14 Behaviors of the absorbed fracture energy of [0°/0°] fiber coated and [0°/90°] fiber coated glass plates under a steel ball impact.

Fig. 12는 [0°]과 [0°/0°]으로 피막한 시편에 대한 U거동을 나타낸다. 충격속도의 증가에 따른 U의 변화거동은 피막없는 경우보다 낮아져 피막층 두께의 내충격효과를 확실히 보였으며, 속도증가에 따라 그 값이 더욱 증가하였다. 이는 Fig. 7과 8에서 보이듯이 강구충격에 따른 층간박리 및 소성변형거동이 흡수 파괴에너지의 측정값에 크게 영향을 주었기 때문으로 생각된다.

### 3.3 섬유층 피막의 배향 효과

Fig. 13은 [0°/0°]로 피막한 시편과 [0°/90°]로 피막한 시편의 최대응력값을 충격속도별로 비교하고 있다. 시편배면에 부착된 스트레인게이지는 게이지의 길이방향이 시편길이방향과 일치하여 게이지의 길이방향 변형에 민감하게 신호를 계속할 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 90m/s이하의 속도일 경우 [0°/90°]시편이, 시편길이방향으로 더욱 강화된 [0°/0°]시편보다  $\sigma_{max}$  값이 조금 낮게 나왔다. 이것은 Fig. 8과 9의 파손사진을 비교하여 볼 때 [0°/90°] 피막구조가 보다 크게 박리되면서 충격력을 흡수하여 시편 배면에서의  $\sigma_{max}$ 를 완화했기 때문으로 생각된다. 하지만, 90m/s를 넘어 고속충격으로 갈 경우 두 값의 수준이 거의 유사하였다. 흡수파괴에너지의 변화거동에서도(Fig. 14), [0°/0°]피막

시편과 [0°/90°]피막 시편은  $\sigma_{max}$ 의 거동과 기본적으로 유사한 비교결과를 보였다.

### 3.4 충격 표면파괴지수의 평가

위에서 측정한  $\sigma_{max}$ 와 U의 측정값을 토대로 충격표면파괴의 정도를 평가하기 위한 지수  $\alpha$ 가 다음과 같이 정의될 수 있다(21).  $\sigma_{max}$ 의 거동을 이용할 경우 충격파괴지수

$$\alpha_{\sigma} \quad (0 \leq \alpha_{\sigma} \leq 1) \text{ 는}$$

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_0}{\sigma_p - \sigma_0} \quad (2)$$

로 표현할 수 있다. 여기서  $\sigma_0$ 는 표면파괴를 전혀 발생시키지 않는 최대응력(Fig. 11의 실험결과에서 7.5MPa),  $\sigma_p$ 는 강구가 판유리를 관통하는 경우의 최대응력(1778±565MPa)으로 하였다. 식 (2)에서 알 수 있듯이  $\alpha_{\sigma}$ 는 Fig. 10, 11, 13에 나타난  $\sigma_{max}$ 의 변동을 따르게 된다. Fig. 15는 이들 그림의 데이터를 식 (2)를 통해 재가공하여 비피막 판유리, 일방향 섬유 1층([0°])피막과 2층([0°/0°])피막, 직교형 섬유 2층([0°/90°])피막한 유리시편의  $\alpha_{\sigma}$ 거동들을 함께 나타낸 것이다. 섬유 일층피막에

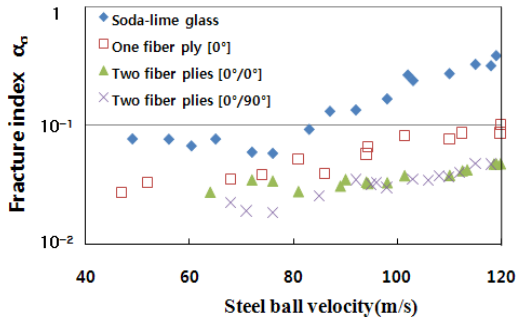


Fig. 15 Behavior of stress-based fracture index  $\alpha_\sigma$  as a function of impact velocity.

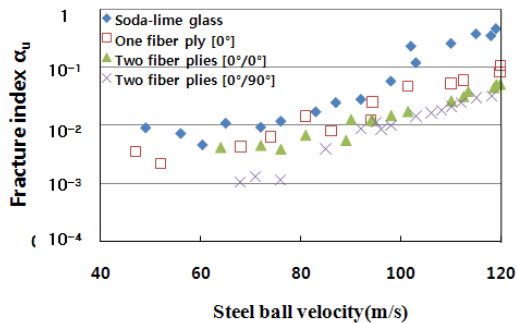


Fig. 16 Behavior of energy-based fracture index  $\alpha_U$  as a function of impact velocity.

의하여 충격파괴지수가 전체속도에 걸쳐 각각 현격히 저하했으며, 2층피막([0°/0°], [0°/90°])의 경우도 1층피막의 경우에 비해 추가적인 큰 저하를 보였다. 또한, 충격속도 약 80m/s 이상에서 비피막 유리에 비해 내충격효과가 크게 두드러졌음을 알 수 있다.

한편 U의 거동을 이용할 경우, 충격파괴지수  $\alpha_U$  ( $0 \leq \alpha_U \leq 1$ )는

$$\alpha_U = \frac{U - U_0}{U_p - U_0} \quad (3)$$

로 표현된다. 여기서  $U_0$ 는 표면파괴를 발생시키지 않는 최대 뎀핑흡수에너지(0.7 MPa·sec),  $U_p$ 는 강구가 판유리를 관통하는 경우의 흡수파괴에너지(91.4±32.2MPasec)로 하였다. 비피막 판유리, 일방향 섬유 1층([0°])피막과 2층([0°/0°])피막, 직교형 섬유 2층([0°/90°])피막한 유리시편의  $\alpha_U$ 거동(Fig.16)은, 섬유 1층피막에 의하여  $\alpha_U$ 지수가 전체속도에 걸쳐 상당히 저하했으며 2층피막([0°/0°], [0°/90°])의 경우도 1층피막의 경우에 비해 다소간의 저하를 보였다.

상기의  $\alpha_\sigma$ 와  $\alpha_U$ 의 변화거동은 충격응력분포거동뿐만이 아니라 Figs. 6-9에서 보인 섬유층과 판유리의 파괴거동과 직접적인 관계가 있을 것이다.

## 4. 결 론

취성 재료인 소다유리판 시편(soda-lime glass plate specimen)과 일방향 및 직교형 유리섬유/에폭시로 피막한 유리 시편을 이용하여 미소강구에 의한 표면충격 실험을 행하였으며 다음과 같은 충격거동 특성을 얻었다.

- (1) 소다유리판(soda-lime glass plates)의 충격시 발생한 표면 균열의 종류와 크기는 충격속도 증가에 따라 다양하게 증가하였고, 충격속도 100m/s 이상에서 레이디얼균열의 진전은 최대응력과 흡수파괴에너지가 급격히 증가하는 결과와 잘 일치하였다.
- (2) 일방향 및 직교형 유리섬유/에폭시로 피막한 유리시편의 경우, 표면층의 섬유방향으로 강구의 충격은 강구가 직접 닿는 표면층의 섬유방향으로 중간박리와 소성변형이 진전되었다. 강구속도 115m/s 이상에서 발생하는 판유리표면의 큰 균열은 섬유수직방향으로는 진전이 억제되고 섬유방향으로 길게 진전하였다. 섬유층을 2층으로 피막한 판유리에서는 본 충격속도의 범위에서 판유리의 균열발생 및 진전은 보이지 않았다.
- (3) 판유리 시편 배면에서의 최대응력과 흡수파괴에너지의 변화거동을 분석한 결과, 섬유층 피막 시편은 단순유리시편과 비교하여 90m/s이상의 속도에서 최대응력이 다소 증가하지만 피막두께의 효과가 현저하여 미소입자충격에 의한 표면파괴를 효과적으로 감소시키는 것으로 평가되었다.
- (4) 시편 배면에서의 최대응력과 흡수파괴에너지를 측정하여 표면파괴지수를 구하였으며, 이들 지수를 통해 강구입자에 의한 취성재료의 내충격성 평가가 정량화 가능하였다.

## 참고문헌

- 1) C.G. Knight, M.V. Swain, M. M Chaudhri, *Journal of Materials Science*, Vol. 12, 1977, pp. 1573-1580.
- 2) B.A. Iatella, Brain H. O'Connor, "Hertzian Contact Damage in Porous Alumina Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 80 [4], 1997, pp. 1027-1031.
- 3) J. Persson, K. Breder, D.J. Rowcliffe, "Loading Rate Effects during Indentation and Impact on Glass with Small Spheres," *Journal of Materials Science*, Vol. 23, 1993, pp. 6484-6489.
- 4) S.M. Wiederhorn, B.R. Lawn, "Strength Degradation of Resulting from Impact with Spheres," *Journal of Ceramic Society*, Vol. 60, No. 9-10, 1977, pp. 451-458.
- 5) S.M. Wiederhorn, B.J. Hockey, "Effect of Material Parameters on the Erosion Resistance of Brittle Materials," *Journal of Materials Science*, Vol. 18, 1983, pp. 766-80.

- 6) M.M. Chaudhri, Patrica A. Brophy, "Single Particle Impact Damage of Fused Silica," *Journal of Materials Science*, Vol. 15, 1980, pp. 345-352.
- 7) M.M. Chaudhri, C.R. Kurkjian, "Impact of Small Steel Spheres on the Surfaces of Normal and Anomalous Glasses," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 69, 1986, pp. 404-410.
- 8) J.T. Hagan, "Micromechanics of Crack Nucleation during Indentations," *Journal of Materials Science*, Vol. 14, 1979, pp. 2975-2980.
- 9) J.T. Hagan, "Cone Cracks around Vickers Indentations in Fused Silica Glass," *Journal of Materials Science*, Vol. 14, 1979, pp. 462-466.
- 10) J.T. Hagan, "Shear Deformation under Pyramidal Indentations in Soda-Lime Glass," *Journal of Materials Science*, Vol. 15, 1980, pp. 1417-1424.
- 11) D.A. Shockey, D.C. Elich, K.C. Dao, "Particle Impact Damage in Silicon Nitride at 1400°C," *Journal of Materials Science*, Vol. 16, 1981, pp. 477-482.
- 12) K. Zeng, K. Breder, D.J. Rowcliffe, C. Herrstorm, "Elastic Modulus Determined by Hertzian Indentation," *Journal of Materials Science*, Vol. 27, 1992, pp. 3789-3792.
- 13) M. Munawar, Chaudhri, Chen Hen Liangyi, "The Orientation of the Hertzian Cone Crack in Soda-Lime Glass Formed by Oblique Dynamic and Quasi-Static Loading with a Hard Sphere," *Journal of Material Science*, Vol. 24, 1989, pp. 3441-3448.
- 14) R.F. Cook, G.M. Pharr, "Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73 [4], 1990, pp. 787-817.
- 15) B.R. Lawn, F. Guiberteau, N.P. Padture, "Effect of Grain Size on Hertzian Contact Damage in Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 77, 1994, pp. 1825-31.
- 16) 서창민, 이문환, 김성호, "Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 용사 코팅된 유리에 지속 입자 충격에너지에 따른 손상거동," 대한기계학회 1998년도 추계학술대회논문집 A, 1998, pp. 126-131.
- 17) 서창민, 이 문환, 김성호, 이동화, "입자충격에 따른 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - TiO<sub>2</sub> 플라스마 코팅유리의 손상체적 변화에 관한 연구," 대한기계학회 '99년도 제 2차 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, 1999, pp. 98-104.
- 18) 서창민, 신형섭, 정성목, 황병원, "입자 충격에 의한 유리의 손상기구에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 (A), 제 20권 제 6호, 1996, pp. 1903-1912.
- 19) F.W. Flocker, L.R. Dharani, "Modeling Fracture in Laminated Architectural Glass subject to Low Velocity Impact," *Journal of Materials Science*, Vol. 32, 1997, pp. 2587-2594.
- 20) 김형구, 최낙삼, "직물형 유리섬유/에폭시 복합재료로 피막된 판유리의 미소강구 충격에 의한 표면 파괴거동," 한국 복합재료학회지, 제13권 4호, 2000, pp. 75-82.
- 21) H.G. Kim, N.S. Choi, N.Cho, "Evaluation of the impactive-surface-fracture behavior of glass plates using a back-surface strain measurement," *Journal of Materials Research*, Vol. 16 (11), 2001, pp. 3042-3045.
- 22) R. Olsson, "Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates," *Composites, Part A* 32, 2000, pp. 879-887.