

論文

직물형 유리섬유/에폭시 복합재료로 피막된 판유리의
미소강구 충격에 의한 표면파괴거동

김형구* · 최낙삼**

**Surface Fracture Response of Glass Fabric/Epoxy Lamina-Bonded
Glass Plates to Impact with a Small-Diameter Steel Ball**

Hyoung-gu Kim* and Nak-Sam Choi**

ABSTRACT

A small-diameter steel-ball impact experiment was performed to study the impact resistance of the surface of glass plates bonded with glass fabric/epoxy lamina. Five kinds of materials were used in this study: soda-lime glass plates, glass/epoxy lamina(one layer)-bonded and unbonded glass plates, glass/epoxy lamina(three layers)-bonded and unbonded glass plates. The range of impact velocity was 40~120m/s. The maximum stress and absorbed fracture energy were measured on the back surface of glass plates. With increasing impact velocity, various types of surface cracks such as ring, cone, radial and lateral cracks took place in the interior near the impacted site of glass plates. The cracks drastically decreased with glass/epoxy lamina coating. The surface fracture behavior could be evaluated using the maximum stress and the absorbed fracture energy.

초 록

유리섬유/에폭시 복합재료로 피막한 유리판의 표면파괴거동을 연구하기 위하여 미소강구 충격실험을 수행하였다. 본 연구에서는 다섯 종류의 재료, 단순소다유리판(soda-lime glass plates), 유리섬유/ 에폭시박막(glass/epoxy lamina)을 1층 접착, 비접착한 시편과 박막을 3층 접착, 비접착한 시편을 사용하였다. 충격속도 범위 40~120m/s에서 유리판 배면에서의 최대 응력과 흡수파괴에너지를 측정하였다. 충격 속도증가에 따라 링균열, 콘균열, 레이디얼 균열이 시편 내부에서 발생하였다. 복합재료 박막으로 피막한 결과, 소다유리판의 균열은 현저히 감소하였으며 측정된 최대 응력과 흡수파괴에너지를 이용하여 표면 파괴거동 특성을 평가할 수 있었다.

1. 서 론

최근 많은 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있는

세라믹이나 유리와 같은 취성재료는 표면이나 내부의 작은 결함에 의해 균열과 파손이 발생하고 급격히 진전한다. 특히 구조용 세라믹 재료에서 작은 입자에 의

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계공학과

한 충격을 받는 경우 표면 근처의 미소 국부영역에서 발생한 균열과 파손은 전체 구조물의 파손을 초래할 수 있다. 따라서 세라믹 재료의 내충격성 개선 방법의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

취성재료의 충격 특성은 이론적인 접근이 난이하여 주로 실험적인 연구가 진행되고 있는데, Knight(1), Bruno(2), Persson(3)은 준정적인 하중을 가하여 발생하는 균열의 종류와 하중 증가에 따른 진전 형태를 연구하였다.

Wiederhorn(4,5), Chaudhri(6,7), Hagan(8~10)은 재료의 균열과 파손에 관한 연구를 위해 취성재료에 집중하중을 가하고 점차 증가시켜 발생한 균열의 종류와 크기를 관찰하고, 동적인 충격실험을 통하여 얻은 균열의 종류와 크기를 비교하여 충격시의 하중을 예측하였다.

Shockey(11), Zeng(12), Munawar(13)은 재료에 강구 충격 실험을 행하여 충격속도 증가에 따라 발생하는 균열과 파손을 정량적으로 파악하고자 강구 충격시 발생하는 파손형태를 고속도 촬영장치(high-speed-photography)로 관찰하였다.

Robert(14), Brain(15), 서창민(16~18), Flocker 등(19)은 단순유리(soda-lime glass)에 금속산화물을 피막하거나 표면의 강도 증가를 목적으로 표면 처리를 하여 기계적 특성과 내충격성 향상을 위해 실험적인 연구를 하였다. 그렇지만, 위의 표면충격파괴 연구는 표면 균열을 충격속도에 관련시켜 관찰한 것이 대부분이고, 충격중에 발생하는 응력과 흡수 파괴에너지를 정량적으로 측정하여 세라믹의 내충격 효과를 평가한 결과는 거의 없었다.

본 연구에서는 충격 파괴 거동이 세라믹과 유사하고, 균열을 관찰하기 쉬운 투명한 소다유리판(soda-lime

glass plates)과 이에 직물형 유리섬유/에폭시 박막(glass/epoxy lamina, 이하 '복합재 박막'으로 칭함)을 피막한 유리를 대상으로 미소강구 충격시 발생하는 표면 균열의 종류와 형태를 관찰하면서 복합재료 박막의 충격 완화 효과를 연구하고자 한다. 직물형 유리섬유/에폭시 복합재료는 강도와 인성이 크므로 세라믹 재료의 표면에 피막하면 상당한 내충격 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 이 연구를 위해 공기총식 강구 충격 시험장치를 제작하여 미소강구 충격실험을 행하고 충격시 발생하는 최대 응력(maximum stress)과 흡수파괴에너지(absorbed fracture energy)를 측정하여 복합재료 박막층의 두께에 따른 내충격 효과를 파악하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구를 위하여 제작한 공기총식 충격실험 장치의 개략도이다. 총열(gun barrel) 안에는 미소강구($\phi = 1.25\text{mm}$, $m = 7.9\text{mg}$, $\rho = 7.800\text{ kg/m}^3$)를 실은 캐리어가 장착되어 있다.

폴리에틸렌 재질의 캐리어(carrier)는 길이 10mm, 지름 4.8mm이며 깊이 5mm, 지름 2mm의 구멍을 중심축에 내어 미소강구가 캐리어 안에 장착되어 있다. 7기압 용량의 공기 압축기(air compressor)를 이용하여 방아쇠(trigger kit)용 공기 탱크와 주 공기 탱크에 공기를 압축 시킨 후, 주 공기 탱크의 압축공기를 개폐시키는 2/2 way 밸브를 방아쇠용 공기 탱크로 작동시킨다. 방아쇠 키트를 이용하여 2/2way 밸브를 개폐시켜 압축된 공기를 토출시켜 충격실험을 한다.

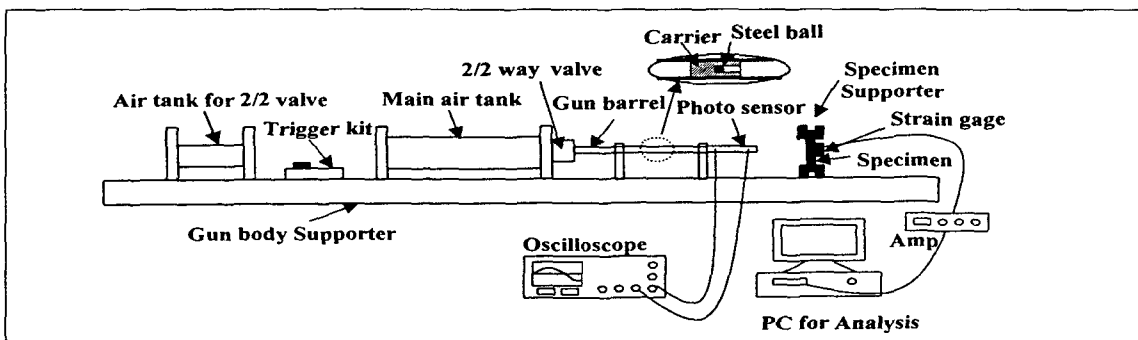


Fig. 1. Schematic for air gun impact tester

총열(gun barrel) 끝 쪽에는 간격 100mm, 지름 3mm의 구멍 2개를 총열의 중심축과 수직으로 내어, 이를 통해 레이저(05LLR811, Melles Griot)광과 광 센서(DET110, Thorlabs, Inc)가 작동함으로써 미소강구를 실은 캐리어가 이 두 개의 구멍을 통과할 때 레이저 광로의 일시 차단현상을 시간차로 계측하여 충격 속도를 구한다. 미소강구의 속도 범위는 약 40m/s에서 약 125m/s까지 가능하였다. 총열을 통과한 캐리어와 미소강구는 캐리어 스톱퍼에 의해 분리된 후, 미소강구는 시편 지지대에 고정되어 있는 시편 표면에 충격을 가하게 된다.

2.2 실험 재료

본 실험에 사용한 시편은 소다유리판(soda-lime glass plates)이며 이 판유리를 크기 120×30×3mm로 절단하여 시편을 제작하였다. 또한 이 시편 위에 직물형 유리섬유/에폭시 박막(30×30mm)을 1층(one layer, 0.125mm), 3층(three layers, 0.375mm)으로 적층후 오토클레이브(autoclave)를 사용하여 Fig. 2와 같은 경화사이클로 피막하였다. 이와는 별도로 동일 종류의 유리섬유/에폭시 박막을 1층, 3층으로 경화시킨 뒤 이를 절단(30×30mm)하여 유리시편에 비접착 고정된 시편을 만들어 총 다섯 종류의 시편을 제작하였다.

2.3 충격변형을 계측

충격시 시편의 동적 변형상태를 측정하기 위해, 스트레인게이지(AE-11-W80N-120-EL, CAS)를 시편 배면(뒷면)에 부착하였다. 미소강구가 충격을 가하는 유리시편 앞면의 충격 부위는 시편 배면(뒷면)에 부착된 스트레인 게이지 그리드(strain gage grid, 그리드면적

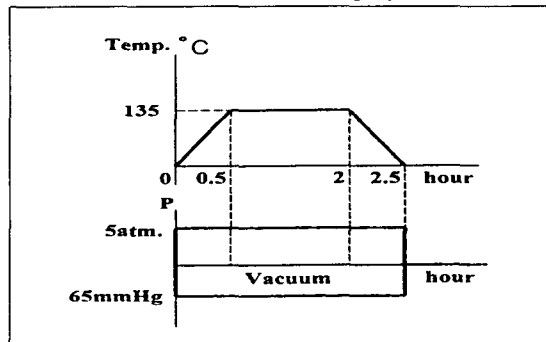


Fig.2. Curing cycle for manufacturing of glass/ epoxy lamina glass plates

10×3mm)의 중앙 부위와 일치하도록 하였다. 시편의 정적인 굽힘 실험을 통하여 스트레인 게이지의 전압-변형률 특성을 파악하였으며, 충격시 발생하는 충격 변형률 신호를 스트레인게이지로 검출하여 스트레인 증폭기를 거쳐 컴퓨터로 보냄으로써, 충격 변형률 신호를 해석하였다.

2.4 최대 응력과 흡수파괴에너지 측정

Fig. 3(a)는 유리시편 배면에 접착한 스트레인게이지를 통하여 얻은 미소강구 충격신호의 한 예이다. 또한 Fig. 3(b)는 스트레인게이지 그리드 중앙에 근접한 충격부위를 나타내는, Fig. 3(a)에 대응하는 충격손상을 입은 유리시편의 한 예이다. 충격시 시편에 발생하는 최대 응력(maximum stress) σ_{max} 은 시편 배면의 스트레인 게이지에서 측정된 최대 변형률을 정적인 굽힘해석(static analysis of bending)으로 변환한 값으로 구하였다. 즉, Fig. 3(a)의 사각형 안에 있는 첫 펄스 신호에서 최대 변형률을 가리키는 최대 전압값 V_{max} (volt)를 계측하여 다음 실험식(1)로 σ_{max} (MPa)를 구하였다.

$$\sigma_{max} = 0.103E V_{max} \tag{1}$$

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

충격전의 강구의 운동에너지는 충격 후에, 응력과 전파와 굽힘 공진을 야기시키는 탄성 에너지, 표면파괴와 크랙의 발생을 일으키는 흡수파괴 에너지, 강구의 되튐에 따른 충격후의 운동 에너지로 나누어지는데(20), 충격속도의 크기에 따라 각 모드의 에너지 비율은 달라지게 된다. 따라서 충격시험에서는 시편 배면의 어떤 한 점에서의 진동력은 매우 복잡한 거동을 나타내겠지만, 배면에서의 스트레인 게이지의 그리드 면적당 평균 표면 응력을 식(1)과 같은 정적 해석을 통해 구할 경우 충격속도에 따른 파손의 정도를 상대적으로 평가할 수 있을 것이다.

Fig.3 (a)의 충격신호에는 탄성에너지와 흡수파괴에너지가 포함되어 있으며 대부분의 충격에너지는 시편의 파손과 굽힘공진을 일으킬 것이다. 강구 충격시 강구가 시편 표면부위와 접촉하는 시간대는 충격신호 첫 펄스에 포함되므로 시편의 흡수 파괴 에너지 U (absorbed fracture energy)는 첫 번째 주기신호의 양의 부분(첫 펄스 신호) 면적(A)과 충격으로 발생하는

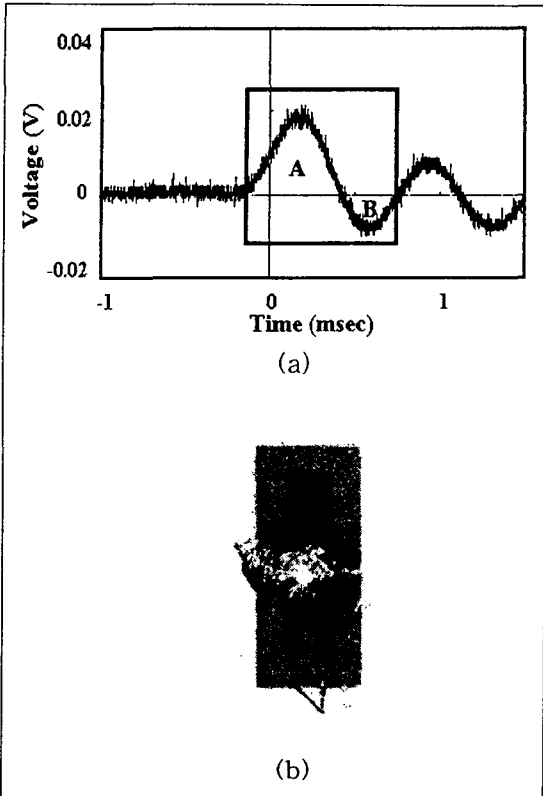


Fig. 3. Strain-gage signal (a) and the corresponding impacted site (b) during the impact test

시편 자체의 굽힘 공진 신호에 해당하는 음의 부분 면적(B)과의 차(A-B)를 통해 구할 수 있다.

최대 응력과 흡수파괴에너지 값이 클수록 충격에 의한 시편 내부의 균열 발생과 파손이 커서 시편의 내충격 효과는 작아짐을 의미한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 균열의 발생과 진전에 미치는 충격속도의 효과

Fig. 4는 소다유리판(soda-lime glass plates)에서 발생한 균열의 형태와 진전 특성을 충격속도 증가에 따라 나타낸 것이다. 1번 사진은 링균열이며 2, 3, 4, 5 번은 콘균열이 발생하여 시편내부로 진전하고 있으며 콘균열 발생 임계속도는 약 55m/s임을 알 수 있다. 6 번은 레이디얼균열(화살표참조)이 추가로 발생하였으며 7, 8번은 다양한 균열이 시편 내부로 진전한 것을

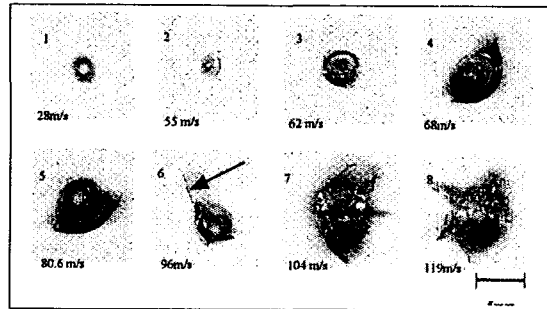


Fig. 4. Surface cracks generated in soda-lime glass as a function of ball-velocity

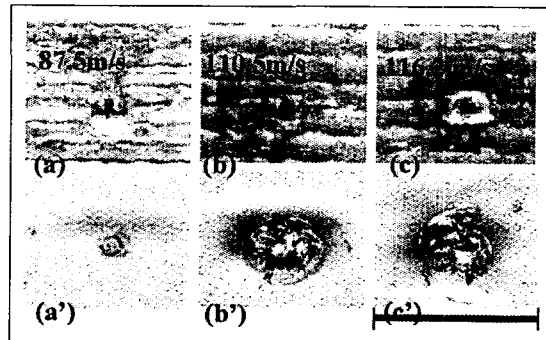


Fig. 5. Surface fractures of glass/epoxy lamina(one layer) unbonded glass plates

볼 수 있다. 충격속도가 100m/s 이상에서는 균열이 시편 내부까지 진전하여 큰 파손을 발생시켰다.

Fig. 5는 미소강구 충격 속도가 증가함에 따라 복합재 박막을 1층 비접착한 시편에서 발생한 복합재 박막의 손상과 내부 균열을 보여준다.

상단(a, b, c)은 1층으로 비접착한 복합재 박막의 파손을 보여주고 있으며 하단(a', b', c')은 비접착한 복합재 박막을 제거한 후 유리 시편 내부에서 관찰된 균열을 나타낸다. 복합재 박막이 충격으로 파손되고 유리에서는 콘균열이 발생하여 시편 내부로 진전하였으나, 레이디얼균열, 래터럴균열 등의 추가적인 균열은 발생하지 않았다. 콘균열의 발생 임계속도는 약 62m/s였고, 고속충격에서 시편 내부의 균열 진전은 현저히 감소하였다. 복합재 박막을 3층으로 접착 및 비접착한 유리 시편의 경우 충격속도 증가에 따른 복합재 박막의 파손의 형태가 복합재 박막 1층의 경우와 유사했으며 시편 내부에는 균열이 전혀 발생하지 않았다.

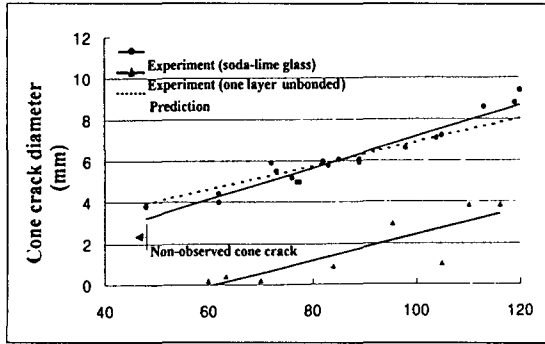


Fig. 6. Cone crack diameter versus impact velocity

3.2 콘균열 (cone crack)의 평가

3.1절에서 관찰한 콘균열의 최대 지름은 다음의 실험식(4)(2)을 통해 예측하였다.

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

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

여기서, E , v 는 각각 소다유리판(soda-lime glass plates)의 탄성계수(70GPa), 푸아송비(0.25)이며, E' , v' , ρ , r , v 는 각각 미소강구(steel ball)의 탄성계수(210GPa), 푸아송비(0.3), 밀도($7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$), 반지름(0.625mm), 충격속도이다.

β_R , K_c 은 실험적으로 구해지는 상수이며 일반유리(soda-lime glass)의 경우는 각각 8.5, 7.4×10^5 이다 (4).

Fig. 6은 이 실험식을 이용하여 충격속도 증가에 따른 콘균열 지름을 예측한 결과와 본 연구에서 충격실험으로 측정된 값을 비교하여 나타낸 것이다. 복합재 피막이 없는 시편의 경우, 실험값은 예측값과 비교적 잘 일치하였으며, 이는 콘균열의 크기가 실험식(2)을 통해 설명될 수 있음을 의미한다. 이에 비해 복합재 박막 1층으로 피막(비접착)한 경우는 콘균열 길이가 속도의 증가에 따라 거의 일정한 폭만큼 현저히 감소하고 충격완화효과가 매우 크게 나타났음을 알 수 있다.

3.3 최대응력과 흡수파괴에너지에 미치는 충격속도의 효과

Fig. 7과 8은 미소강구 충격속도 40~120m/s의 영역에서 각각 시편 배면의 최대응력과 흡수파괴 에너지 값의 거동을 나타낸다.

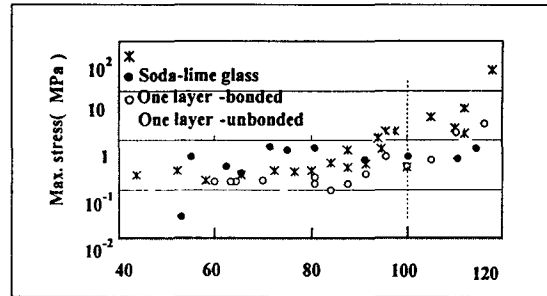


Fig. 7. Back surface stress of glass plates with one layer (bonded, unbonded)

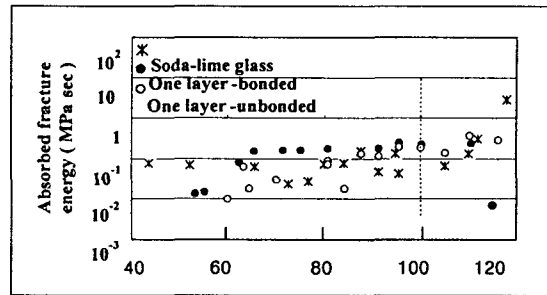


Fig. 8. Absorbed fracture energy of glass plates with one layer (bonded, unbonded)

피막이 없는 소다유리판의 경우, 충격속도가 약 90m/s이하에서 최대응력과 흡수파괴에너지는 완만하게 증가하는 경향을 보였으나 약 100m/s이상에서는 급격하게 증가했다. 이는 100m/s이상의 충격속도에서 Fig. 4에 보인바와 같이 시편 내부로 진전한 콘균열에 추가로 레이디얼균열의 전파가 시편 배면의 변형을 크게 하여 스트레인 게이지에 큰 변형을 주었던 것으로 생각된다.

복합재 피막을 1층으로 접착 또는 비접착한 시편의 최대응력과 흡수파괴에너지 값도 Fig. 7과 Fig. 8에 나타낸다. 단순소다유리판과 비교하여 복합재 박막을 1층 피막한 경우 충격속도가 100m/s이상에서 최대응력이 크게 감소하였으며 이는 레이디얼균열 발생이 없었던 Fig. 5의 결과와 일치한다. 또한 Fig. 7의 최대응력과 Fig. 8의 흡수파괴에너지를 비교할 때, 최대응력의 경우가 고속영역에서 피막에 의한 내충격 효과를 잘 구분하여 나타냈다.

복합재 박막을 1층 접착한 시편과 1층 비접착한 시편의 결과를 비교할 때, 충격속도 100m/s이하에서 1층 접착 시편의 최대 응력과 흡수파괴에너지 값이 다소 컸지만, 100m/s이상에서는 오히려 작은 값을 보였다.

이는 복합재 박막 접착상태의 양호성은 고속충격에서 내충격 효과를 나타내나 저속충격에서는 오히려 효과가 떨어짐을 나타낸다.

Fig. 9와 10은 복합재 박막을 3층 접착 및 3층 비접착한 경우에 최대응력과 흡수파괴에너지값을 나타낸 것이다. 3층 피막에 의해 최대응력과 흡수 파괴에너지가 확실히 감소하였고 100m/s 이상의 고속에서 현저한 차이를 보이는 것은 그만큼 내충격 효과가 컸음을 의미한다. Fig. 7과 8의 1층 피막한 경우와 마찬가지로 3층으로 접착한 경우가 3층 비접착한 경우에 비해 약 100m/s 이하에서 최대응력과 흡수파괴에너지가 함께 큰 값을 갖지만 100m/s 이상에서는 최대응력 값이 오히려 작아졌다. 여기서도 피막층의 접착여부가 저속 및 고속의 충격속도 영역에 따라 내충격 효과에 차이를 주고 있음을 알 수 있다.

3층 피막한 경우, 최대응력은 충격속도의 증가에 따라 완만한 증가를 보였으나 흡수파괴에너지는 본 실험 속도영역에서 거의 일정한 값을 나타냈다.

3.3 프리프레그 피막 두께의 내충격 효과

Fig. 11은 단순소다유리판과 복합재 박막을 1층과 3

층으로 접착한 시편의 최대응력을 미소 강구의 충격속도 증가에 따라 나타낸 것이다. 흡수파괴에너지보다 최대응력(Fig. 7 과 Fig. 8 참조)이 본 실험 속도 영역에서 복합재 피막효과를 잘 보여주고 있다.

미소강구에 의한 90m/s 이상의 고속충격에서 단순소다유리판에 비해 1층 접착유리의 최대응력은 현저히 낮은 값을 보였으며 이는 복합재 박막 피막처리에 의해 고속에서 현저한 충격완화 효과가 있음을 나타낸다. 복합재 박막을 3층으로 접착한 경우는 모든 충격속도 범위에 걸쳐 최대응력이 1층 피막의 경우보다 낮은 값으로 거의 일정하게 유지되었으며, 이는 복합재 박막의 피막 두께가 충격완화 효과에 큰 영향을 주었음을 나타낸다. 한편, 90m/s 이하의 속도에서는 1층 접착에 의해 최대응력이 오히려 커졌으나 그 이유는 단순소다유리의 경우 충격시 발생한 응력이 충격 부위에서 국부적으로 전파하는 반면 복합재 박막이 접착된 경우에는 복합재 박막 표면부에 1차적으로 충격을 주어 2차적으로 유리판 내부에 보다 넓게 충격파를 전파시켜 시편 배면의 스트레인 게이지그리드의 전체 변형을 오히려 크게 하였기 때문으로 추정된다. 그렇지만 3층 접착에 의해서는 최대 응력이 현저히 낮아져 피막의 충격완화 효과가 더 컸음을 보였다.

4. 결 론

공기총식 강구 충격 시험장치를 제작하고 취성 재료인 소다유리판(soda-lime glass plates)에 직물형 유리 섬유/에폭시 복합재료를 피막한 유리 시편을 이용하여 미소강구에 의한 표면충격 실험을 행하였으며 다음과 같은 내충격 특성을 얻었다.

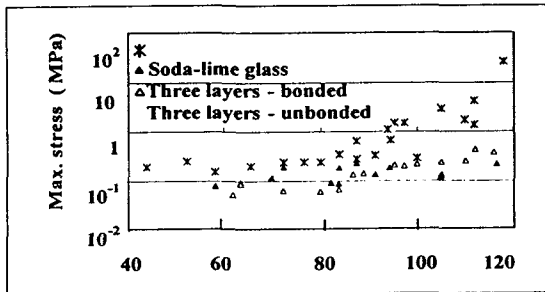


Fig. 9. Back surface stress of glass plates with three layers (bonded,unbonded)

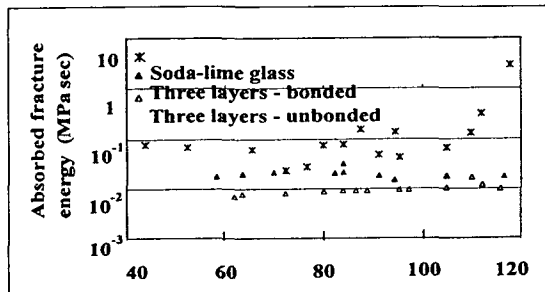


Fig. 10. Absorbed fracture energy of glass plates with three layers (bonded, unbonded)

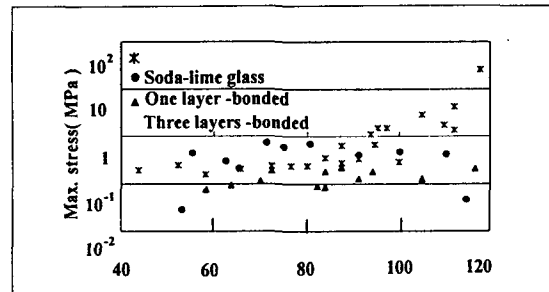


Fig. 11. Back surface stress of bonded glass plates (one layer, three layers)

(1) 취성재료인 소다유리판(soda-lime glass plates)의 충격시 발생한 표면균열의 종류와 형태를 충격속도 증가에 따라 파악하였고, 충격속도 100m/s 이상에서 레이디얼균열의 진전은 이 속도 이상에서 최대응력과 흡수에너지가 급격히 증가하는 현상과 잘 일치하였다.

(2) 소다유리판에 직물형 유리섬유/에폭시 복합재 박막을 1층(0.125mm) 피막한 경우 균열의 진전이 현저히 감소하였고, 3층(0.375mm) 피막한 경우 균열은 전혀 발생하지 않았다.

(3) 직물형 유리섬유/에폭시 복합재료 박막이 피막 처리된 취성재료는 미소입자충격에 의한 표면파괴를 효과적으로 감소시키는 것으로 평가 되었다.

(4) 피막층 접착의 양호성 여부는 충격속도 영역에 따라 내충격 효과에 상당한 차이를 나타냈다.

후 기

이 논문은 2000년도 한양대학교 교내 연구비 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

1. C. G. Knight, M. V. Swain, M. M Chaudhri, *Journal of Materials Science*, Vol. 12, 1977, pp. 1573~1580
2. Bruno A. latella, Brain H. O'Conor, "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. 766~780

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. Robert F. Cook, George 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. Brain R. Lawn, Fernando Guiberteau, Nitin 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, "Cr₂O₃ 용사 코팅된 유리 에 저속 입자 충격에너지에 따른 손상거동", 대한기계학회 1998년도 추계학술대회 논문집 A, 1998, pp. 126~131

17. 서창민, 이 문환, 김성호, 이동화, "입자충격에 따른 Al_2O_3 - TiO_2 플라즈마 코팅유리의 손상체적 변화에 관한 연구", 대한기계학회 '99년도 제2차 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. R. Olsson, "Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates", *Composites, Part A* 32, 2000, pp. 879~887