

고온·고습하에서 CFRP 적층 원통부재의 충격 압괴특성

A study on impact collapse characteristics of CFRP thin-walled laminates under high temperatures and hygrothermals

김 정 호* · 광 훈 이* · 양 인 영**

J.H. Kim · H.Y. Kwak · I.Y. Yang

(1998년 3월 4일 접수, 1998년 5월 2일 채택)

ABSTRACT

In this study, in order to measure energy-absorbing characteristics in impact test of CFRP thin-walled laminates and interpret the cause of decreasing age when collapse test is carried out under the environments of high temperatures and hygrothermals, the moisture absorbing behavior according to the variety of orientation angle is observed and impact collapse characteristics of no moisture absorbing status is compared with that under the environments of high temperatures and hygrothermals. Especially, we try to obtain quantitative design data to develop CFRP thin-walled laminates with energy characteristics of optimum impact absorbing.

The value of the maximum loading, mean loading, rate of energy absorption energy per unit volume and mass in CFRP thin-walled laminates on the high temperatures and hygrothermals is measured much lower than under no moisture absorbing. The maximum collapse loading in dynamic impact test is taken measurements lower than in static collapse test CFRP circular laminates in high temperatures and hygrothermals. But the absorbed energy per unit mass and volume is almost same each other and the biggest amount of energy is shown in CFRP circular laminates with orientation angle of 15°. Therefore, in the case of using CFRP circular laminates with axisymmetric mode, CFRP thin-walled structural members with orientation angle of 10°, 15° has generally best condition.

* 조선대학교 대학원

** 조선대학교 기계공학부

1. 서 론

자동차 등의 수송기계는 충돌시 인체에 심각한 상해를 주지 않을 정도의 충격력 흡수능력이 요구되고 있으며, 이러한 개념이 차체 구조 설계에 점차 이용되어 승객의 안전에 중점을 두고 개발이 진행되고 있다¹⁻⁵⁾. 이제까지 차체 구조 부재에는 금속재료가 사용되었으나, 최근에는 금속 재료보다도 20~50% 정도의 구조 경량화가 가능한 탄소섬유강화 복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics: 이하 CFRP라 한다)와 같은 플라스틱 재료들이 점차 사용되고 있다⁶⁾. 특히, 경량화가 요구되는 여객기나 전투기 주익(main blade)의 일부와 경주용 차의 샤시에 이미 실용화되고 있으며, 레저 스포츠, 의료기기 부품 및 에너지 관련 분야 등의 구조용 재료로 널리 사용되고 있다⁷⁾.

CFRP는 비강도, 비강성이 우수하며, 구조 재료로 사용되는 경우 두께나 섬유배향을 강도 요구에 적합하도록 쉽게 변화시킬 수 있는 이점이 있다. 그러나, 정적 부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 가진 반면에 고온·고습환경 및 충격 부하에 대해서는 기지의 분자배열 및 화학적 성질의 변화와 복합재료의 계면 특성, 재질의 기계적 성질의 저하를 가져와 강도 저하의 주된 원인으로 지적되고 있어 앞으로 해결하여야 할 중요한 문제점의 하나로 제기되고 있다⁸⁻¹⁰⁾.

따라서, CFRP 적층 원통부재가 고온·고습하에 노출되었을 때 강도 저하현상을 개선하기 위한 정량적인 평가는 CFRP 부재의 안전 설계의 관점에서나 우수한 고강도의 첨단재료 개발의 관점에서 대단히 중요한 과제라고 생각된다. 그러나, 지금까지의 연구 결과들은 주로 금속 재료와 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics) 부재에 관하여 국한되어 있으며, CFRP 적층부재가 자동차 등 수송기계의 구조부재로 사용되었을 때 에너지 흡수특성에 관한 연구 등은 아직 미진한 상태이다.

본 연구에서는 CFRP 적층 원통부재가 충격 하중을 받아 압쇄가 진행될 때의 에너지 흡수특성과 고온·고습하에서 사용되었을 때 수명 저하의 원인을 규명하기 위하여, 섬유배향의 차에

따른 흡습거동을 관찰하고, 무흡습 상태와 고온·고습하에서의 충격 압쇄특성을 비교하고자 한다. 특히, 최적 충격 흡수에너지 특성을 갖는 적층구성의 CFRP 구조부재를 개발하기 위한 정량적인 설계 자료를 얻고자 한다.

2. 시험편

본 연구에서 사용한 CFRP 적층 원통시험편은 일방향 프리프레그(한국 화이바, CF/EPOXY NS-125)시트를 직경 30mm인 맨드릴에 소정의 섬유배향이 되도록 8매 적층하고, 그 위에 나선상으로 열수축 테이프를 감아 오토클레브(Auto-clave)장치를 이용하여, 3기압 상태에서 130℃로 1시간 동안 큐어링하여 제작하였다. 섬유배향은 시험편의 축방향을 0°로 하여 0°, ±10°, ±15°, ±20°, ±30°로 변화시켜서 성형하였다. 성형된 시험편은 다이아몬드 커터(Powemet 2000 Abrasive)를 사용하여, 좌굴을 일으키지 않도록 100mm의 길이로 제작하였다. Fig. 1에 CFRP 시험편의 형상 및 적층방법을 나타냈다. Table 1은 시험편 배향에 따른 CFRP 적층 원통시험편의 종류를, Table 2는 CFRP 프리프레그 시트의 재료 정수를 나타냈다.

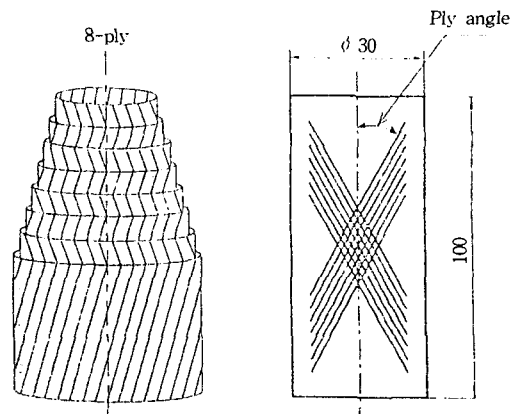


Fig. 1 Configuration of CFRP thin-walled specimen

3. 실험방법 및 실험장치

3.1 흡습실험

Table 1 Fiber stacking sequences of specimens

| Type | Fiber stacking | Prepreg No. [Ply] | Material |
|------|------------------------------------|-------------------|----------|
| A | [0°] ₈ | 8 | CF/Epoxy |
| B | [10°/-10°/10°/-10°] _{svm} | 8 | CF/Epoxy |
| C | [15°/-15°/15°/-15°] _{svm} | 8 | CF/Epoxy |
| D | [20°/-20°/20°/-20°] _{svm} | 8 | CF/Epoxy |
| E | [30°/-30°/30°/-30°] _{svm} | 8 | CF/Epoxy |

Table 2 Material constants of CFRP

| Material constant | Carbon fiber | Matrix |
|------------------------------|--------------|--------------|
| Density [kg/m ³] | 1750 | 1200 |
| Strength [MPa] | 3240 | 80 |
| Modulus [GPa] | 230 | 3.2 |
| Fiber content [%] | 56~58 | 33~34 |
| Curing temp. [°C] | 130°C × 1 hr | 130°C × 1 hr |

CFRP 적층 원통부재의 흡습실험은 정밀 항온조(Model AB1701, Sedae testing instrument Co.)를 이용하였다. 정밀 항온조의 내부 온도는 항공기 수평미익 등의 강도 부재로 사용되는 경우의 온도 범위인 70°C를 유지시켰다. 정밀 항온조 내의 온도구배를 막기 위하여 순환펌프를 설치하여 항온조 내부 온도가 항상 일정하도록 하였다. 흡습율은 1/10,000g까지 측정이 가능한 정밀 전자저울을 이용해 실온 상태에서 표면의 물기를 제거한 후 시험편의 중량을 측정하여 계산했다. 흡습은 대부분이 수지에 의해 이루어지지만 같은 조건인 경우 시험편 표면층 계면의 섬유길이가 긴 경우가 흡습량의 증가가 컸으며, 이는 섬유에서의 흡습차라고 생각된다. 시험편의 수분 흡습율은 다음식을 사용하여 계산하였다.

$$M = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100$$

여기서, M은 수분흡습율(%), W_d는 흡습전의 시험편의 무게(g), W_m는 흡습후의 시험편 무게(g)이다.

3.2 정적 및 충격압축실험

준정적 압축실험은 만능재료시험기의 로드셀과 액츄레이터 사이에 두개의 압축지그를 평행

이 되도록 설치하여 실시하였다. 시험편과 지그 사이에는 오일 윤활하여 시험편 끝단의 구속을 원활하게 하였으며, 변형속도의 영향이 나타나지 않도록 10 mm/min 속도로 균일한 압축 하중을 가하였다. 실험시 편심하중이 작용되지 않도록 지그의 중앙에 얇은 단을 만들어 하중이 가해질 때 시험편의 미끄럼을 방지했으며, 예비실험을 실시하여 실험 결과의 재현성이 좋도록 하였다. 또한, 실험 결과에 단부효과가 나타나지 않고 압축이 발생하도록 변형량이 60 mm가 되도록 압축시켰다. 시험중의 하중-변형선도는 변위를 제어하면서 연속적으로 측정하였다.

충격압축실험은 Fig. 2와 같은 공기압식 가속장치를 설계 제작하여, 크로스 헤드를 로드셀 위에 놓은 CFRP 적층부재에 충돌시켜 압축시켰

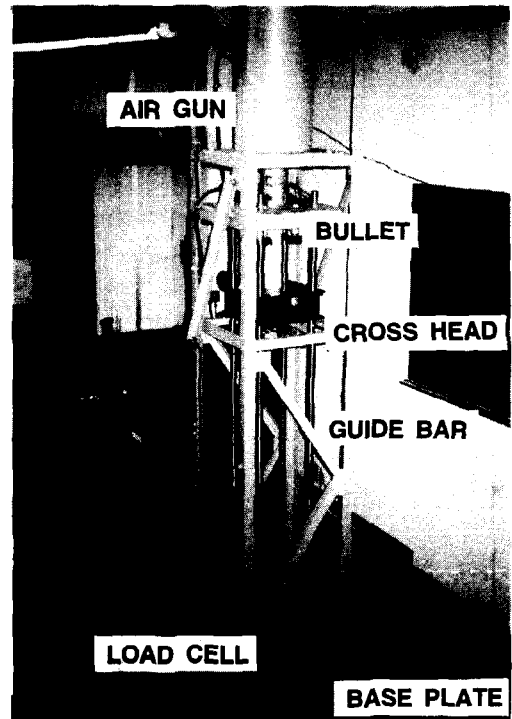


Fig. 2 Impact testing setup for crushing

다. 크로스 헤드는 시험편에 편심되어 충격이 가해지는 것을 방지하고 보다 재현성이 높은 실험을 할 수 있도록 2층 구조로 제작하였으며,

무게는 약 23.5 kg이다. 또한, 가속장치는 비교적 안전하고 취급이 용이한 공기압식을 사용하였다. 충격압레시 시험편의 변형량은 크로스헤드에 부착된 표적의 움직임을 광학식변위계(Zimmer, 100F)로 비접촉 계측하여 변형 데이터를 구했다.

또한, 광학식변위계에서 얻어진 데이터로부터 크로스 헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 속도를 구했다. 하중은 로드셀에 부착된 변형게이지의 출력으로부터 구한 변형률에 변형게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 구했다. 변위계와 로드셀의 출력은 제작한 브리징박스, 동적변형계 및 파형 기억장치를 거쳐 컴퓨터에 기록되도록 하였다. 또, 측정된 변형 및 하중에서 시간축을 소거함으로써 충격압레가 진행하고 있는 과정에서의 하중-변형선도 즉, 압레선도를 구할 수 있었다. 압레선도에서 둘러싸

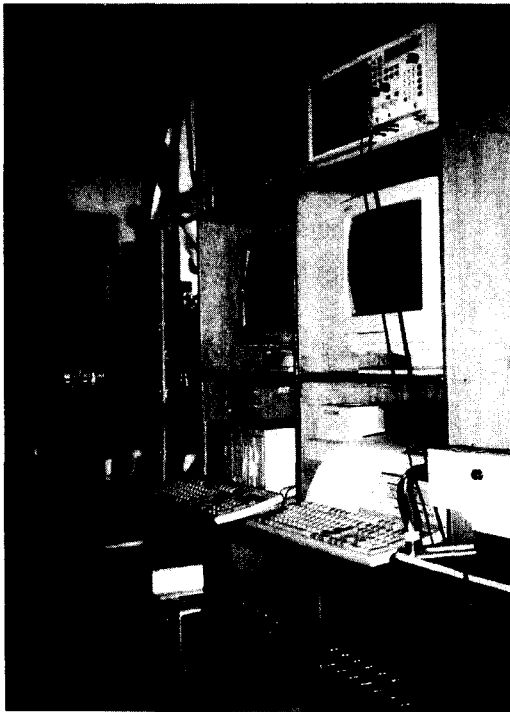


Fig. 3 Measurement system

인 부분의 면적을 구함으로써 시험편이 흡수한 에너지를 구했다. 본 연구에서 개발한 계측 시

스템을 Fig. 3에 나타냈다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 CFRP 적층 원통부재의 흡습거동

CFRP 적층 원통부재의 시간에 따른 흡습량의 증가를 Fig. 4에 나타냈다. 초기에 흡습량이 빨리 이루어지는 것은 흡습이 대부분 수지에 의해 이루어지기 때문이며, 그림에서 알 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 흡습량이 증가하여 습기 평형 상태에 도달하게 된다. Type A와 Type E 시험편이 다른 적층배향의 시험편에 비해 흡습량이 약간 적었으나, 다른 적층배향에서는 거의 같은 흡습상태를 보이고 있다. 적층배향에 따른 흡습량의 차이는 크지 않다고 생각된다.

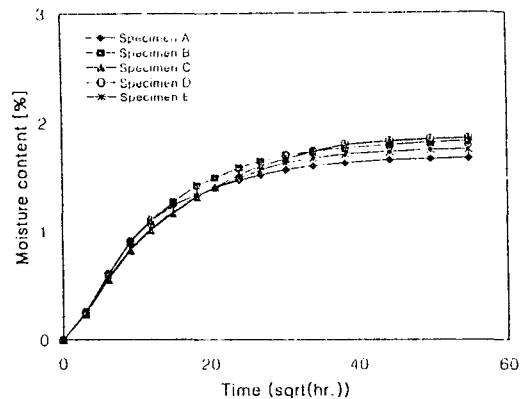
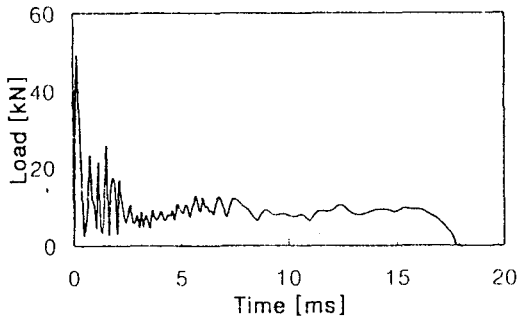


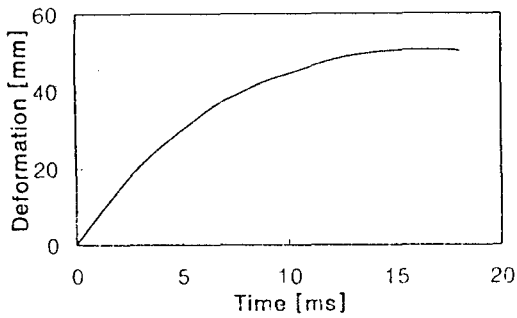
Fig. 4 Moisture content of CFRP specimens as a function of time

4.2 CFRP 적층 원통부재의 압레특성

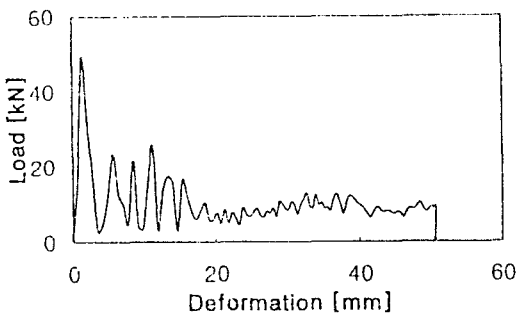
Fig. 5, 6에 무흡습 및 흡습 상태에서의 CFRP 적층박육부재의 충격압레 실험결과를 나타냈다. CFRP 적층 원통부재를 축방향으로 준정적 및 충격압레시키면 축방향 하중이 시험편내부에 에너지로 축적되고, 어떤 값을 넘으면 파괴에 의해 에너지를 해방하는데 이것이 흡수에너지이다. 파괴후에도 계속해서 축방향으로 하중을 가하면 에너지의 축적과 해방이 반복되며 에너지가 흡수된다. 이 때의 파괴 형식이 압레모드로서 원통 벽면 중앙부에 생기는 원환상 썪기형의



(a) Load history



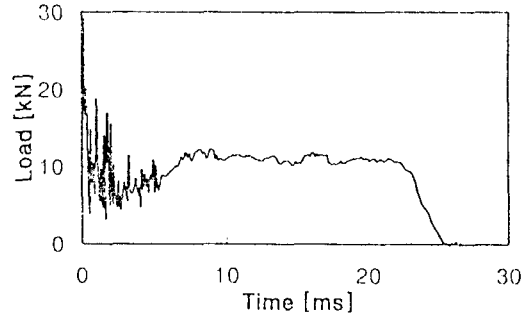
(b) Deformation history



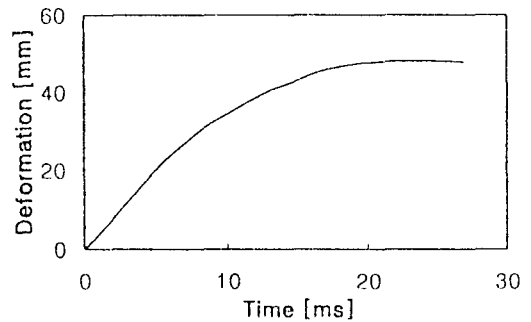
(c) Load deformation curve

Fig. 5 Impact crushing characteristics of CFRP specimen (Type C, $v=4.97$ m/s)

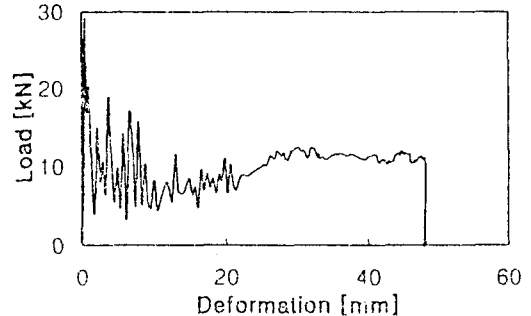
크랙이 진전하여, 원통벽의 내측과 외측으로 확장되는 Fig. 7과 같은 splaying mode로 나타났다. 특히, CFRP 적층 배향각이 작은 경우에는 splaying mode의 발생이 많았다. 축방향 0° 인 경우에는 최대 압쇄하중이 작용함과 동시에 파괴되었다. 적층배향 부재의 경우 많은 에너지를 흡수시키기 위해서는 축방향에 대하여 배향각을



(a) Load history



(b) Deformation history



(c) Load deformation curve

Fig. 6 Impact crushing characteristics of CFRP specimen (Type C, $v=5.12$ m/s, moisture content 1.85%)

작게 적층하는 경우가 가장 안정적으로 파괴가 진행되며, 에너지 흡수특성 또한 우수함을 알 수 있었다.

Table 3에 적층배향에 따른 CFRP 적층 원통 부재의 압쇄실험결과 얻은 최대 압쇄하중, 평균 압쇄하중, 평균 응력, 흡수에너지, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지를 나타냈다. 흡수에너지는

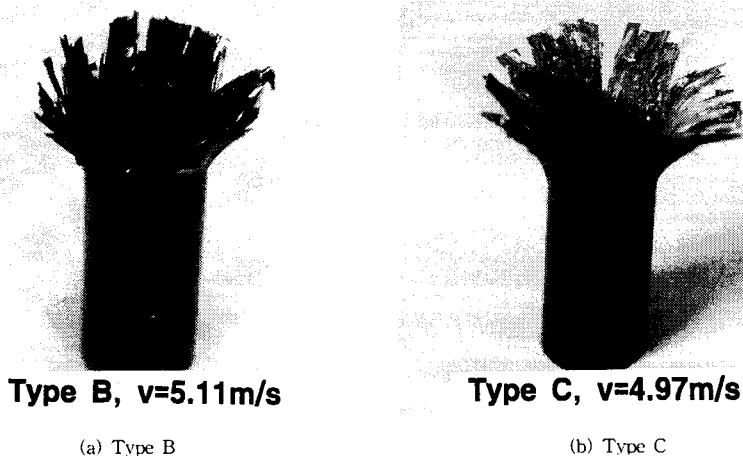


Fig. 7 Shape of specimen (splaying mode)

Table 3 Mean values of CFRP specimens from experimental data

| Type | Moisture Content [%] | Static test | | | | | Dynamic test | | | | |
|------|----------------------|---------------|-----------|-----------------|----------------------|------------------------|---------------|-----------|-----------------|----------------------|------------------------|
| | | Maximum Load | Mean Load | Absorbed Energy | Energy per Unit Mass | Energy per Unit Volume | Maximum Load | Mean Load | Absorbed Energy | Energy per Unit Mass | Energy per Unit Volume |
| | | $F_{max}[kN]$ | $F_m[kN]$ | $E_r[J]$ | [KJ/Kg] | [MJ/m ³] | $F_{max}[kN]$ | $F_m[kN]$ | $E_r[J]$ | [KJ/Kg] | [MJ/m ³] |
| A | 0 | 29.008 | 2.704 | 162.359 | 10.426 | 15.629 | 26.770 | 8.378 | 349.790 | 22.678 | 35.140 |
| B | 0 | 65.856 | 16.214 | 972.869 | 62.472 | 93.614 | 46.355 | 9.886 | 356.891 | 23.137 | 35.779 |
| C | 0 | 52.136 | 19.735 | 1184.114 | 76.036 | 113.941 | 48.967 | 10.274 | 519.860 | 33.703 | 55.226 |
| D | 0 | 32.928 | 7.610 | 456.789 | 29.333 | 43.955 | 26.105 | 5.267 | 449.396 | 29.128 | 45.042 |
| E | 0 | 22.393 | 4.448 | 266.886 | 17.136 | 25.681 | 17.244 | 4.588 | 425.402 | 27.580 | 42.737 |
| A | 1.67 | 30.200 | 3.156 | 189.357 | 12.276 | 19.023 | 20.079 | 10.757 | 481.909 | 31.243 | 48.413 |
| B | 1.85 | 36.456 | 10.176 | 610.564 | 39.582 | 61.338 | 25.738 | 8.173 | 323.642 | 20.982 | 32.514 |
| C | 1.86 | 36.064 | 9.274 | 556.431 | 36.074 | 55.900 | 29.050 | 10.210 | 492.136 | 31.906 | 49.337 |
| D | 1.77 | 21.168 | 52.411 | 313.703 | 20.337 | 31.515 | 20.262 | 8.045 | 560.405 | 36.332 | 56.299 |
| E | 1.76 | 14.504 | 31.796 | 190.298 | 12.337 | 19.118 | 16.683 | 5.885 | 416.264 | 26.987 | 41.818 |

압쇄실험에서 얻은 하중-변위선도를 적분하여 구하고, 그것을 압쇄길이로 나누어 평균 압쇄하중을 구했으며, 평균 응력은 평균 압쇄하중을 단면적으로 나누어 구했다.

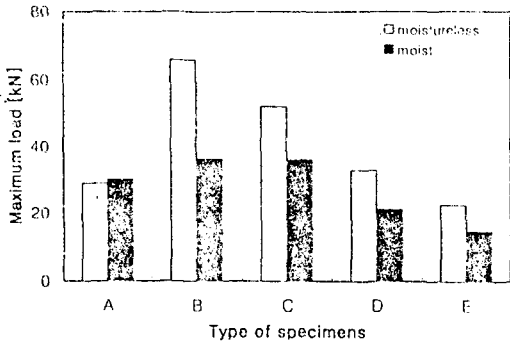
Fig. 8에 적층배향에 따른 최대 압쇄하중과의 관계를, Fig. 9에 흡수에너지와의 관계를, Fig. 10에 단위질량당의 흡수에너지와의 관계를, Fig. 11에 단위체적당의 흡수에너지와의 관계를 나타냈다.

이상의 실험결과로부터 알 수 있는 바와 같이 적층배향이 $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$ 인 CFRP 적층 원통부재

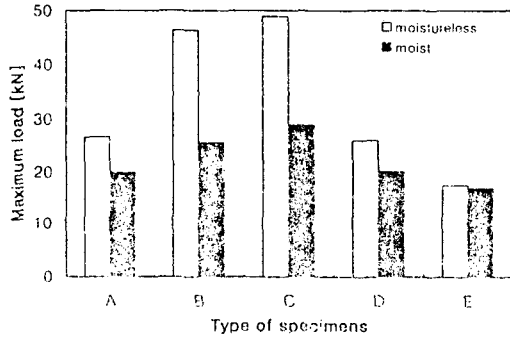
가 최대 압쇄하중, 평균 압쇄하중, 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지 및 단위체적당 흡수에너지 모두 가장 우수했다. 즉, CFRP 적층 원통부재를 축방향 구조 부재로 사용할 경우 적층배향이 $\pm 10^\circ \sim \pm 15^\circ$ 부근에서의 압쇄특성이 최적의 조건이라 생각된다.

특히, 고온·고습의 영향을 받은 CFRP 원통부재는 준정적 압쇄인 경우 최대 압쇄하중, 평균 압쇄하중, 흡수에너지, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지 모두 흡수를 받지 않았을 때 보다 낮게 나타났다. 흡수를 받지 않은 CFRP 적

층 원통부재의 적층 배향각 변화에 따른 압溃특성을 비교해 보면 최대 압溃하중은 충격인 경우가 정적인 경우보다 낮게 나타났으며, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 배향각이 $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$ 인 CFRP 적층 원통부재가 우수하게 나타

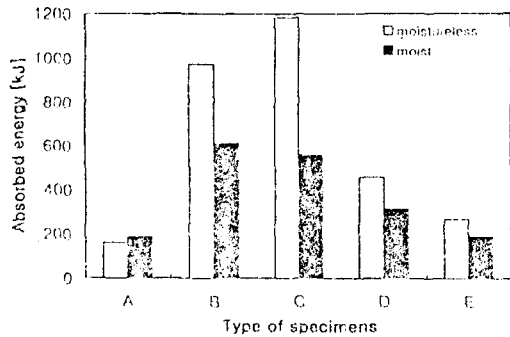


(a) Static collapse test

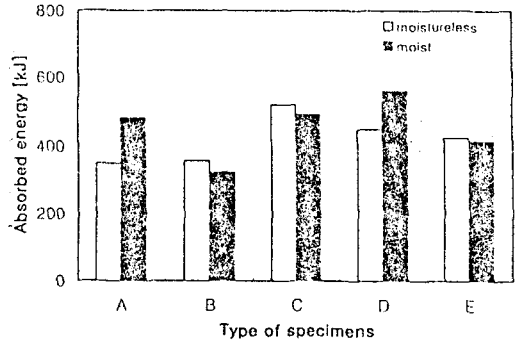


(b) Impact collapse test

Fig. 8 Maximum load for the CFRP specimens (a) Static collapse test, (b) Impact collapse test

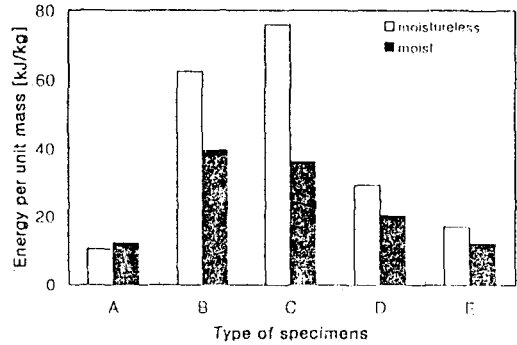


(a) Static collapse test

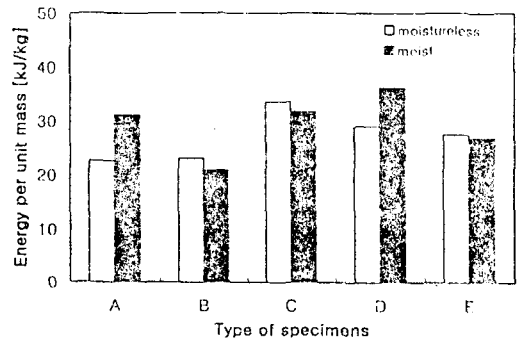


(b) Impact collapse test

Fig. 9 Absorbed energy for the CFRP specimens (a) Static collapse test, (b) Impact collapse test



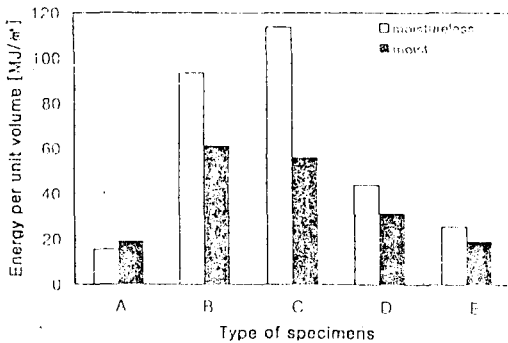
(a) Static collapse test



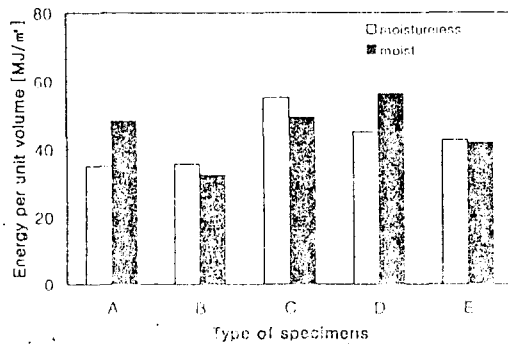
(b) Impact collapse test

Fig. 10 Absorbed energy per unit mass by collapse test (a) Static collapse test, (b) Impact collapse test

났다. 또한, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 최대 압溃하중과는 달리 충격압溃인 경우



(a) Static collapse test



(b) Impact collapse test

Fig. 11 Absorbed energy per unit volume by collapse test

(a) Static collapse test, (b) Impact collapse test

가 낮게 나타났다. 이와 같은 특성은 고온·고습의 영향을 받았을 때도 거의 비슷하였으나 충격 압쇄인 경우 정적 압쇄와는 달리 최대 압쇄하중에서만 큰 저하를 가져왔을 뿐 흡수에너지, 평균 압쇄하중, 단위질량당 에너지, 단위체적당 에너지 면에서는 큰 영향을 미치지 못했다.

5. 결 론

고온·고습하에서의 적층구성에 따른 CFRP 원통부재의 충격 압쇄특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CFRP 원통부재의 압쇄모드는 적층배향각이 작은 경우($0^\circ \sim \pm 20^\circ$) 섬유가 파단하지 않고 내의 축으로 확장해 가는 splaying mode로 압쇄 되었다.

- 2) 흡습을 받지 않은 CFRP 원통부재의 적층 배향각 변화에 따른 압쇄특성을 비교해 보면, 최대 압쇄하중, 평균 압쇄하중, 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 모두 충격 압쇄인 경우가 정적 압쇄인 경우보다 낮게 나타났다. 적층 배향각이 $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$ 인 CFRP 시험편이 다른 적층배향의 시험편보다 축방향 압쇄특성이 우수하게 나타났으며, 충격 압쇄의 경우 적층 배향각이 $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$ 인 CFRP 부재의 최대압쇄하중은 정적 압쇄에 비해 각각 29.6%, 6.1% 낮게 나타났다.

- 3) 고온·고습의 영향을 받은 CFRP 원통부재는 정적 압쇄인 경우 최대 압쇄하중, 평균 압쇄하중, 흡수에너지, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지 모두 고온·고습의 영향을 받지 않았을 때보다 현저히 낮게 나타났다.

- 4) 고온·고습의 경우나, 무흡습의 경우 모두 적층 배향이 $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$ 인 CFRP 시험편이 다른 시험편에 비해 압쇄특성이 우수하였으며, 고온·고습의 경우와 무흡습시의 최대 압쇄하중을 비교해 보면, 정적인 경우는 각각 44.6%, 30.9%, 충격인 경우는 44.5%, 40.7% 정도 낮게 나타났다. 따라서, CFRP 적층 박육부재를 축방향 구조 부재로 사용할 경우 적층 배향이 $\pm 10^\circ \sim \pm 15^\circ$ 부근이 최적의 조건이라고 생각된다.

이 논문은 1997년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) 양인영, 심재기, 김선규 “충돌에 의한 차체 박육구조부재의 에너지 흡수특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제5호, pp. 74~81, 1995.
- 2) 김정호, 임성훈, 양인영, “차체구조용 박육부재의 압쇄특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 논문집, 제5권, 제3호, pp. 1~14, 1997.
- 3) 山屋, 雅敏, 谷 正紀, “薄板箱形部材の塑性變形によるエネルギー吸収”, 三菱重工技報, Vol.

- 8, No. 1, pp. 124~130, 1971.
- 4) W. Johnson and A.G Mamalis. "Crashworthiness of Vehicles", Mechanical Engineering Publications, London, 1978.
 - 5) 大島惠, "環境問題と自動車の軽量化", 第70期 日本機械學會講演論文集(I), No. 930-9, pp. 812~817, 1993.
 - 6) 小林昭, "入門複合材料", 日本經濟新聞社, ISBN4-532-08 730-9.
 - 7) 炭素纖維懇談會便, "炭素纖維の應力技術", シーエムシー社, p. 116, 1984.
 - 8) 後呂學, "FRP圓筒の軸壓縮エネルギー吸收特性", 自動車技術會講演展刷集, No. 933, pp. 21~24, 1993.
 - 9) 김정호, "경량화용 차체 구조부재의 충격 압괴특성에 관한 연구", 조선대학교 박사학위논문, 1997.
 - 10) Greszczuk L.B and Chao H., "Impact Damage in Graphite Fiber Reinforced Composite", pp. 389~408, 1977.
-