

# 고온·고습환경이 CFRP 적층 원통부재의 압괴특성에 미치는 영향

## Effects of high temperatures and hygrothermals on the collapse characteristics of CFRP thin-walled laminates

곽 훈 이, 김 정 호(조선대 대학원), 양 인 영(조선대 기계공학부)  
H. Y. Kwak, J. H. Kim(Graduate School, Chosun Univ.), I. Y. Yang(Chosun Univ.)

### ABSTRACT

In this study, in order to measure energy-absorbing characteristics in collapse test of CFRP thin-walled laminates and interpretate 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 collapse characteristics is compared with the influence of high temperatures and hygrothermals. Especially, we supposed to clearly understand relationship between collapse characteristics in proportion to the variety of orientation angle and moisture 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 lower than under no moisture absorbing. The maximum collapse loading in dynamic impact test is taken measurements lower than in static collapse test regarding compared with collapse characteristics conformity with the variety of the CFRP circular laminates in high temperatures and hygrothermals. But the absorbed energy per unit mass and volume is almost same and the biggest amount of energy is shown in the CFRP circular laminates with orientation angle of 15°. Therefore, in the case of use to CFRP circular laminates with axisymmetric mode, CFRP thin-walled structural members with orientation angle of 10°, 15° are generally useful.

**Key Words** : CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics ; 탄소섬유 강화복합재료), Impact load(충격하중), Collapse(압괴), Thin-walled structural member(박육구조부재), Hygrothermal(고습)

### 1. 서 론

자동차 등의 수송기계는 충돌시 인체에 심각한 상해를 주지않을 정도의 충격력 흡수능력이 요구되고 있으며, 이와 같은 개념이 자동차 등의 차체구조설계에 점차 이용되어<sup>1-3)</sup> 승객의 안전에 중점을 두고 개발이 진행되고 있다<sup>4)</sup>. 이전까지 차체구조부재에는 금속재료가 사용되었으나 최근에는 금속재료보다도 20~50%정도 경량화 시킬 수 있는 탄소섬유강화 복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics : 이하 CFRP라 한다)와 같은 플라스틱 재료들이 점차 사용되고 있다<sup>5)</sup>. 특히 경량화가 요구되는 여객기나 전투기 주익(main blade)의 일부와 경주용 차의 샤프에 이미 실용화되고 있으며, 레저 스포츠, 의료기기 부품 및 에너지 관련 분야 등의 구조용 재료로 널리 사용되고 있다<sup>6)</sup>.

CFRP는 비강도(인장강도/밀도), 비강성(탄성율/밀도)이 우수하며, 구조재료로 사용되는 경우 두께나 섬유배향을 강도요구에 적합하도록 쉽게 변화시킬 수 있는 이점이 있다. 그러나, CFRP는 정적부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 가진 반면에 고온·고습환경 및 충격부하에 대해서는 기지의 분자배열 및 화학적 성질의 변화와 복합재료의 계면 특성, 재질의 기계적 성질의 저하를 가져와 강도저하의 주된 원인으로 지적되고 있어 앞으로 해결하여야 할 중요한 문제점의 하나로 제기되고 있다<sup>7-9)</sup>.

따라서, 고온·고습하에 CFRP 적층 원통부재가 노출되었을 때 강도저하 현상을 개선하기 위한 정량적인 평가는 CFRP의 안전설계의 관점에서나 우수한 고강도의 첨단재료 개발의 관점에서 대단히 중요한 과제라고 생각된다. 그러나, 지금까지의 연구 결과들은 주로 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)에

대에서만 국한되어 있으며, CFRP가 자동차 등 수송 기계의 구조부재로 사용되었을 때 에너지흡수특성에 관한 연구 등은 아직 미진한 상태이다, 또한 CFRP의 적층배향에 따른 압축특성에 관한 정량적인 해석 결과는 거의 찾아볼 수 없다.

본 연구에서는 CFRP 적층 원통부재가 압제가 진행될 때의 에너지 흡수특성과 CFRP가 고온·고습의 환경에서 사용되었을 때 수명저하의 원인을 규명하기 위해서, 섬유배향에 따른 흡습거동을 관찰하고, 무흡습과 고온·고습하에서의 압축특성을 비교한다. 특히, 섬유배향의 차에 따른 압축특성과 흡습에 따른 압축특성의 관계를 명확히 하고자 한다.

## 2. 시험편

본 연구에서 사용한 CFRP 적층 원통시험편은 핸드레이법으로 소정의 섬유배향이 되도록 일방향 프리프레그(한국 화이버 ; CF/EPOXY NS-125)를 직경 30mm의 연강봉에 8매 적층하고, 그 위에 나선상으로 열수축테이프를 감아 오토크레브(autoclave)장치를 이용하여 3기압 상태에서 135℃로 1시간 동안 큐어링하여 제작하였다. 섬유배향은 시험편의 원주 방향을 0°로 하여 0°, 10°, 15°, 20°, 30°로 변화시켜서 성형하였다.

성형된 시험편은 다이아몬드 커터(Powermet 2000 Abrasive)를 사용하여, 좌굴을 일으키지 않도록 길이를 100mm로 제작하였다.

Table 1은 시험편 배향에 따른 CFRP 적층 원통 시험편의 종류를, Table 2는 CFRP 프리프레그 시트의 재료정수를 나타냈다.

Table 1 Fiber stacking sequences of specimens

Type	Fiber stacking	Prepreg No. [Ply]	Material
A	[ 0° ] <sub>8</sub>	8	CF/Epoxy
B	[ 10° /-10° /10° /-10° ] <sub>sym</sub>	8	CF/Epoxy
C	[ 15° /-15° /15° /-15° ] <sub>sym</sub>	8	CF/Epoxy
D	[ 20° /-20° /20° /-20° ] <sub>sym</sub>	8	CF/Epoxy
E	[ 30° /-30° /30° /-30° ] <sub>sym</sub>	8	CF/Epoxy

Table 2 Material Constants of CFRP

Material constant	Carbon fiber	Matrix
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1750	1200
Strength [MPa]	3240	80
Modulus [GPa]	230	3.2
Fiber content [%]	56~58	33~34
Curing temp. [℃]	135℃×1hr	135℃×1hr

## 3. 실험방법

### 3-1 흡습실험

고온·고습 환경에 노출되었을 때 적층배향이 다른 CFRP 적층 원통부재의 흡습은 정밀항온조(Model AB1701, Sedae testing instrument Co.)를 이용하였다. 정밀 항온조의 내부온도는 항공기 수평미익 등의 강도부재로 사용되는 경우의 온도 범위인 70℃를 유지시켰다. 흡습율은 1/10,000 g까지 측정이 가능한 정밀 전자저울을 이용해 실온 상태에서 표면의 물기를 제거한 후 시험편의 중량을 측정하여 계산했다.

### 3-2 정적압축실험

만능재료시험기의 로드셀과 액추레이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행이 되도록 설치하고, 시험편과 지그 사이에는 오일 윤활하여 시험편 끝단의 구속을 원활하게 하였으며, 변형속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min 속도로 균일한 압축하중을 가하였다. 실험시 편심하중이 작용되지 않도록 지그의 중앙에 얇은 단을 만들어 하중이 가해질 때 시험편의 미끄러움을 방지했으며, 예비실험을 실시하여 실험결과와의 재현성이 좋도록 하였다.

또한, 실험결과에 단부효과가 나타나지 않고 압제가 발생하도록 변형량이 60mm가 되도록 압제시켰다. 시험중의 하중-변위선도는 변위를 제어하면서 연속적으로 측정하였다.

### 3-3 충격압축실험

충격압축실험은 공기압식 가속장치를 사용하여 5m/s로 충돌시켰다. 충격압제시 시험편의 변형량은 크로스헤드에 부착된 표적의 움직임을 광학식변위계(Zimmer, 100B)로 비접촉 계측하여 변형 데이터를 구했다.

또한, 광학식변위계에서 얻어진 데이터로부터 크로스헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 속도를 구했다. 하중은 로드셀에 부착된 변형계이지의 출력으로부터 구한 변형률에 변형계이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 구했다. 변위계와 로드셀의 출력은 제작한 브리지박스, 동적변형계 및 파형기억 장치를 지나 컴퓨터에 기록되도록 하였다. 또, 측정된 변형 및 하중에서 시간축을 소거함으로써 충격압제가 진행하고 있는 과정에서의 하중-변형선도 즉, 압제선도를 구할 수 있었다. 압제선도에서 둘러싸인 부분의 면적을 구함으로써 시험편이 흡수한 에너지를 구했다.

#### 4. 실험결과고찰

##### 4-1 CFRP 적층 원통부재의 흡습거동

CFRP 적층 원통부재의 시간에 따른 흡습량의 증가를 Fig. 1에 나타냈다. 초기에 흡습량이 큰 것은 흡습이 대부분 수지에 의해 이루어지기 때문이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 흡습량이 증가하나 습기 평형상태에 도달하면 모든 적층배향에서 거의 같은 흡습상태를 나타냈다.

##### 4-2 CFRP 적층 원통부재의 압괴특성

CFRP 적층 원통부재를 축방향으로 압괴시키면 축방향하중이 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 파괴형식이 압괴 모드로써 원통벽면 중앙부에 생기는 원환상 썩기형의 크랙이 진전하여, 원통벽의 내측과 외측으로 확장되는 Photo. 1과 같은 splaying mode, 원통단부로부터 파편이 원통의 내측과 외측으로 붕괴되어 떨어져 나가는 Photo. 2와 같은 fragmentation mode가 발생했다. 충격압괴실험에서는 CFRP 적층 배향각이 작은 경우에는 splaying mode의 발생이 많았으며, 배향각이 클수록 fragmentation mode의 발생이 많았다. 많은 에너지를 흡수시키기 위해서는 배향각을 작게 적층하는 경우가 가장 안정적으로 파괴가 진행되며, 에너지흡수특성 또한 우수함을 알 수 있었다.

CFRP 적층 원통부재의 압괴실험결과 최대하중, 평균하중, 평균응력, 흡수에너지, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지에 대하여 정리했다. 흡수에너지는 압괴 실험에서 얻은 하중-변위선도를

적분하여 구하고, 그것을 압괴길이로 나누어 평균하중을 구했으며, 평균응력은 평균하중을 단면적으로 나누어 구했다. Table 3에 적층배향 따른 CFRP 적층 원통부재의 압괴특성 실험결과를 나타냈다. Fig. 2에 적층배향에 따른 최대하중과의 관계를, Fig. 3에 평균하중과의 관계를, Fig. 4에 흡수에너지와의 관계를, Fig. 5에 단위질량당의 흡수에너지와의 관계를, Fig. 6에 단위체적당의 흡수에너지와의 관계를 나타냈다.

고온·고습하에서 CFRP 적층 원통부재는 최대하중, 평균하중, 흡수에너지 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지 모두 흡습을 받지 않는 경우 보다 낮게 나타났다. 흡습을 받지 않은 CFRP 적층 원통부재의 적층 배향각 변화에 따른 압괴특성을 비교해보면 최대압괴하중은 충격인 경우가 정적인 경우보다 낮게 나타났으며, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 배향각이 10°, 15° 인 CFRP 적층 원통부재가 우수하게 나타났다. 또한, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 최대압괴하중과는 달리 충격인 경우가 낮게 나타났다. 고온·고습하에서는 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 거의 같게 나타났으며, 배향각이 15° 인 CFRP 적층 원통부재가 우수하게 나타났다.

이상의 실험결과로부터 알 수 있는 바와 같이 적층배향이 10°, 15° 인 CFRP 적층 원통부재가 최대하중, 평균하중, 흡수에너지, 단위질량당흡수에너지 및 단위체적당 흡수에너지 모두 가장 우수했다. 즉, CFRP 적층 원통부재를 축방향 구조부재로 사용할 경우 적층배향이 10° ~15° 부근에서 최적의 조건이라 생각된다.

#### 5. 결론

CFRP 적층 원통부재의 섬유배향에 따른 압괴특

Table 3 Mean values of CFRP specimens from experimental data

Type	Moisture Content (%)	Static test					Dynamic test				
		Maximum Load $F_{max}$ (kN)	Mean Load $F_m$ (kN)	Absorbed Energy $E_T$ (J)	Energy per Unit Mass (KJ/Kg)	Energy per Unit Volum (MJ/m <sup>3</sup> )	Maximum Load $F_{max}$ (kN)	Mean Load $F_m$ (kN)	Absorbed Energy $E_T$ (J)	Energy per Unit Mass (KJ/Kg)	Energy per Unit Volum (MJ/m <sup>3</sup> )
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	5.241	313.703	20.337	31.515	21.168	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

성과 고온·고습하에서의 압괴특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CFRP 적층 원통부재의 압괴모드는 배향각이 작은 경우 섬유가 파단하지 않고 내외측으로 확장해가는 splaying mode로, 배향각이 클수록 내외측으로 붕괴되면서 fragmentation mode로 압괴되었다.
- (2) 흡습을 받지 않은 CFRP 적층 원통부재의 적층 배향각 변화에 따른 압괴특성을 비교해보면 최대 압괴하중은 충격인 경우가 정적인 경우보다 낮게 나타났다. 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 충격인 경우가 낮게 나타났으며, 배향각이 10°, 15° 인 CFRP 적층 원통부재가 우수하게 나타났다.
- (3) 고온·고습하에서 CFRP 적층 원통부재는 최대하중, 평균하중, 흡수에너지 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지 모두 흡습을 받지않는 경우보다 낮게 나타났다.
- (4) 고온·고습하에서 CFRP 적층 원통부재의 적층 배향각 변화에 따른 압괴특성을 비교해보면 최대 압괴하중은 충격인 경우가 정적인 경우보다 낮게 나타났다. 그러나, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 거의 같게 나타났으며, 배향각이 15° 인 CFRP 적층 원통부재가 우수하게 나타났다. 따라서, CFRP 적층 원통부재를 축방향 구조부재 사용할 경우 적층배향이 10°, 15° 부근이 최적의 조건이라 생각된다.

#### 참고문헌

1. 양인영, 심재기, 김선규 "충돌에 의한 차체 박육구조부재의 에너지 흡수특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 제3권 제5호, pp. 74~81, 1995.
2. 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.
3. W. Johnson and A. G Mamalis. "Crashworthiness of Vehicles". Mechanical Engineering Publications, London, 1978.
4. 大島恵, 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.
5. 小林昭, 入門複合材料, 日本經濟新聞社, ISBN4-532-08730-9.
6. 炭素纖維懇談會便:炭素纖維の應力技術, シーエムシー社, pp. 116, 1984.
7. 後呂學, FRP圓筒の軸壓縮エネルギー吸収特性, 自動車技術會講演展刷集, 933, 21/24, 1993.

8. Greszczuk L. B and Chao H., "Impact Damage in Graphite Fiber Reinforced Composite", pp. 389~408, 1977.
9. 김정호, "경량화용 차체구조부재의 충격압괴특성", 조선대학교 박사학위논문, 1997.

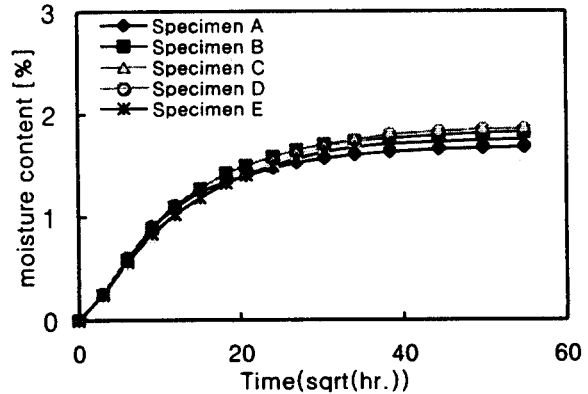


Fig.1 Moisture content of specimens as a function of time



Photo.1 Shape of specimen (splaying mode)



Photo.2 Shape of specimen (fragmentation mode)

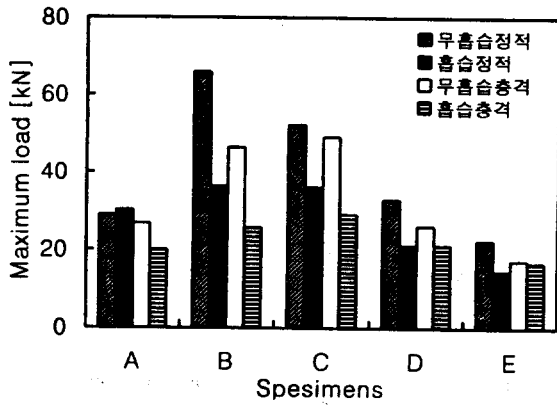


Fig.2 Maximum load for the CFRP specimens

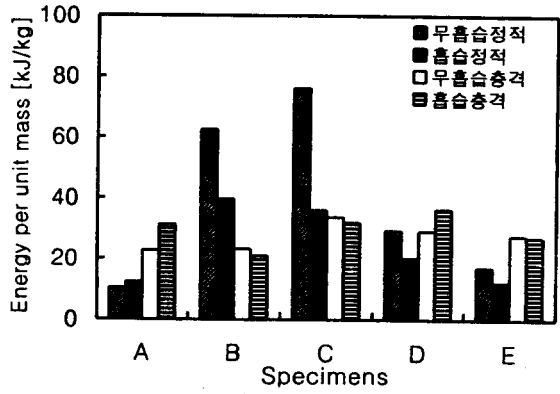


Fig.5 Absorbed energy per unit mass by collapse test

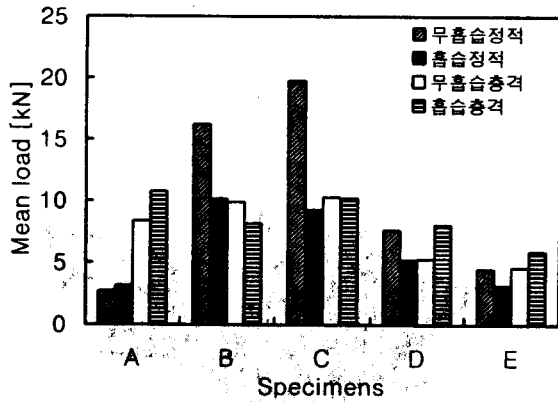


Fig.3 Mean load for the CFRP specimens

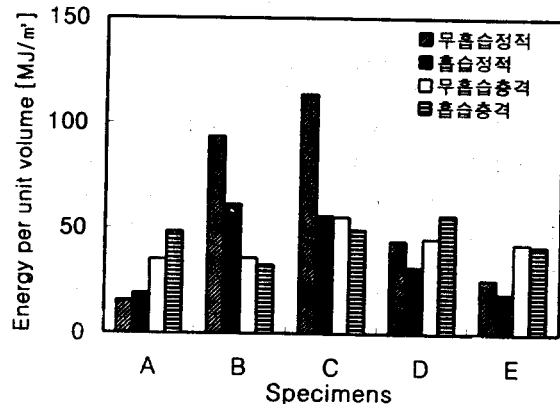


Fig.6 Absorbed energy per unit volume by collapse test

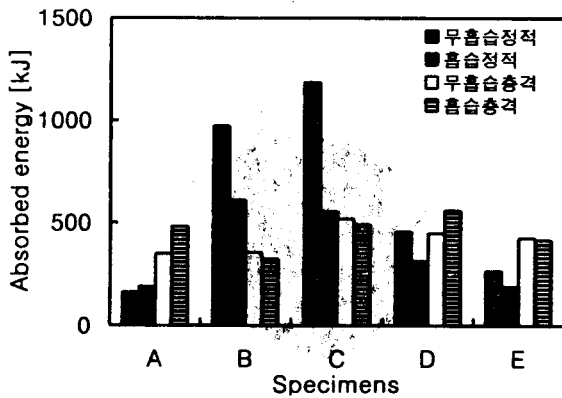


Fig.4 Absorbed energy for the CFRP specimens

성과 고온·고습하에서의 압괴특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CFRP 적층 원통부재의 압괴모드는 배향각이 작은 경우 섬유가 파단하지 않고 내외측으로 확장해가는 splaying mode로, 배향각이 클수록 내외측으로 붕괴되면서 fragmentation mode로 압괴되었다.
- (2) 흡습을 받지 않은 CFRP 적층 원통부재의 적층 배향각 변화에 따른 압괴특성을 비교해보면 최대 압괴하중은 충격인 경우가 정적인 경우보다 낮게 나타났다. 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 충격인 경우가 낮게 나타났으며, 배향각이 10°, 15° 인 CFRP 적층 원통부재가 우수하게 나타났다.
- (3) 고온·고습하에서 CFRP 적층 원통부재는 최대하중, 평균하중, 흡수에너지 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지 모두 흡습을 받지않는 경우보다 낮게 나타났다.
- (4) 고온·고습하에서 CFRP 적층 원통부재의 적층 배향각 변화에 따른 압괴특성을 비교해보면 최대 압괴하중은 충격인 경우가 정적인 경우보다 낮게 나타났다. 그러나, 단위질량당 및 단위체적당 흡수에너지는 거의 같게 나타났으며, 배향각이 15° 인 CFRP 적층 원통부재가 우수하게 나타났다. 따라서, CFRP 적층 원통부재를 축방향 구조부재 사용할 경우 적층배향이 10°, 15° 부근이 최적의 조건이라 생각된다.

#### 참고문헌

1. 양인영, 심재기, 김선규 "충돌에 의한 차체 박육구조부재의 에너지 흡수특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 제3권 제5호, pp. 74~81, 1995.
2. 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.
3. W. Johnson and A. G Mamalis. "Crashworthiness of Vehicles". Mechanical Engineering Publications, London, 1978.
4. 大島恵, 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.
5. 小林昭, 入門複合材料, 日本經濟新聞社, ISBN4-532-08730-9.
6. 炭素纖維懇談會便:炭素纖維の應力技術, シーエムシー社, pp. 116, 1984.
7. 後呂學, FRP圓筒の軸壓縮エネルギー吸収特性, 自動車技術會講演展刷集, 933, 21/24, 1993.

8. Greszczuk L. B and Chao H., "Impact Damage in Graphite Fiber Reinforced Composite", pp. 389~408, 1977.
9. 김정호, "경량화용 차체구조부재의 충격압괴특성", 조선대학교 박사학위논문, 1997.

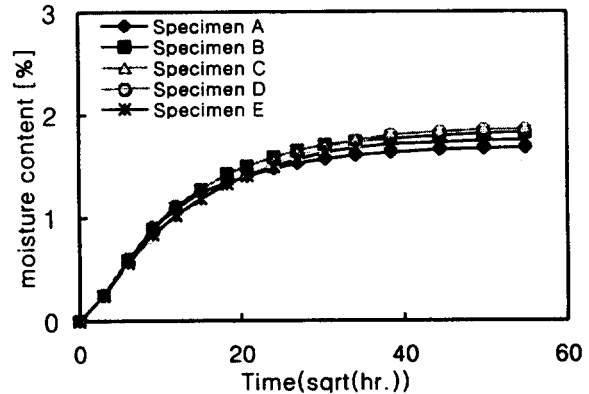


Fig.1 Moisture content of specimens as a function of time



Photo.1 Shape of specimen (splaying mode)



Photo.2 Shape of specimen (fragmentation mode)

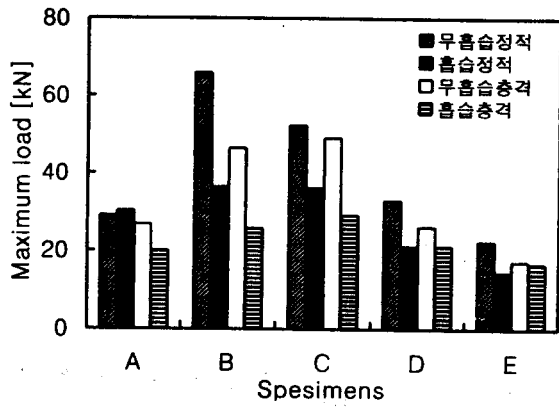


Fig.2 Maximum load for the CFRP specimens

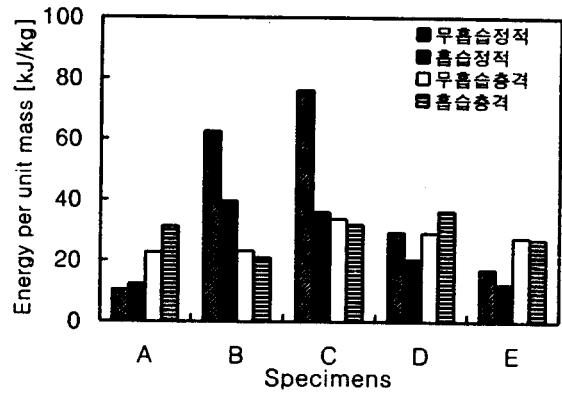


Fig.5 Absorbed energy per unit mass by collapse test

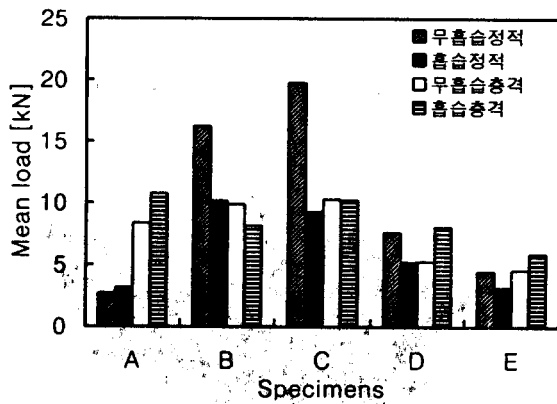


Fig.3 Mean load for the CFRP specimens

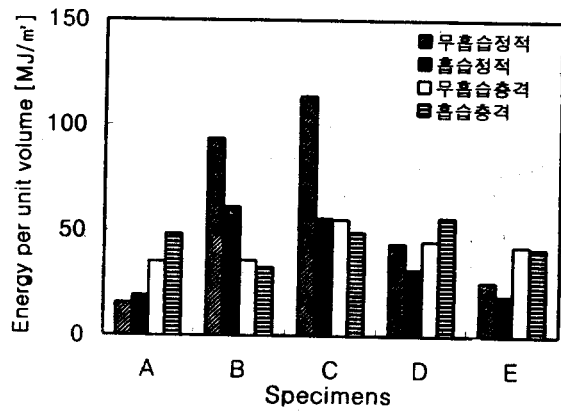


Fig.6 Absorbed energy per unit volume by collapse test

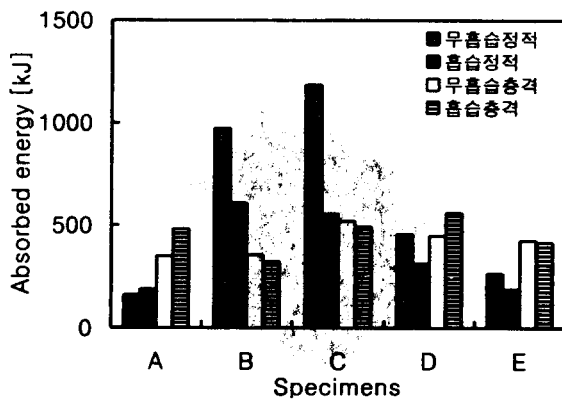


Fig.4 Absorbed energy for the CFRP specimens