

<논 문>

고온·고습 환경에서 CFRP 적층재의 충격손상과 잔류강도

정종안* · 양인영**

(1995년 10월 25일 접수)

Impact Damages and Residual Strength of CFRP Laminates under the Hygrothermal Environment

J. A. Jung and I. Y. Yang

Key Words : Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP : 탄소섬유강화복합재), Hygrothermal Effect(열습효과), Impact Damage(충격손상), Residual Strength(잔류강도), Elastic Modulus(탄성률), Moisture Content(수분 함유율), Diffusion Coefficient(확산계수)

Abstract

This study is to investigate experimentally relationships between the impact energy and moisture absorption characteristics vs. the residual bending strength with the variation of stacking sequences. When Carbon-fiber reinforced plastics(CFRP) impact-induced laminates are subjected to the high temperatures and hygrothermal effects, it is found that what CFRP laminates formed with some stacking composition resist on the impact strength. CFRP laminates are impacted by a steel ball (5 mm in diameter) ; thus, the generated delamination is observed by the ultrasonic microscope. And the residual bending strength is evaluated by a three-point bending test. Also, a thermostat is used in test with the unimpacted and impacted specimens for the moisture experimentation. The precision electron lever scales is used to measure the moisture content(1/10,000 g).

1. 서 론

탄소섬유강화복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics; 이하 CFRP라고 한다)는 정적 부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 가진 반면에 고온·고습 및 충격부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 기대할 수 없고, 복합재료의 유용한 기계적 성질이 장시간 주위환경에 놓여 있어도 충분히 유지되어야 하지만 온도, 습도 등과 같은 환경적 요인

으로 습기가 복합재료 내로 침투하여 기지의 분자 배열 및 화학적 성질을 변화시키고 복합재료의 계면특성 및 구성재료의 기계적 성질을 저하시키며, 특히 충격손상을 받은 적층재는 강도저하가 크게 나타나는 문제점이 있다. 그 몇가지 예로 CFRP 적층판을 항공기용 엔진의 팬 블레이드(fan blade)로 이용할 때, 우박, 새 등의 이물질이 혼입하여 CFRP재 팬 블레이드가 충격파괴 되는 일이 보고되기도 하였고,⁽¹⁾ 공구낙하(tool drop)나 새와의 충돌(bird strike), 이착륙시의 작은 돌이나 파편 등 사소한 충돌에 의한 이물충격손상(Foreign Object Damage : FOD)⁽²⁾을 피할 수가 없다.

*회원, 송원전문대학 자동차과

**회원, 조선대학교 기계설계공학과

특히, 충격을 받은 CFRP 적층재가 고온·고습 분위기에 노출되면 잔류강도 특성치가 저하하게 된다.⁽³⁾ 또한, CFRP 적층재가 충격손상을 받으면 표면으로부터는 거의 보이지 않는 충격손상, 즉 섬유유리의 파단, 수지의 균열, 섬유와 수지의 박리, 섬유배향이 변하는 계면에서의 박리 등이 적층판 내부에 발생하여 이것에 의하여 강도가 저하하는 것이 주된 원인으로 생각되며 앞으로 해결하여야 할 중요한 문제점으로 지적되고 있다.^(4,5)

그러나 이제까지의 연구결과들을 보면 흡습상태에서의 잔류강도 저하문제는 GFRP에 대한 연구결과와 같으며, CFRP 적층재의 고온·고습하에서의 충격손상 및 잔류강도 저하문제에 대한 연구결과는 거의 찾아보기 힘들다.

따라서, 본 연구에서는 우주항공분야에 주로 사용되는 첨단재료인 CFRP 적층부재가 무충격 및 충격손상을 받은 상태에서 고온·고습(85℃, 증류수)하에 노출되었을 때 CFRP 적층재의 적층수의 차 및 계면수의 차에 따라 또한 적층배향의 차에 따라 잔류굽힘강도가 어떻게 변화하는가를 실험적

으로 고찰하여 우주항공 구조부재 설계에 적용하기 위한 수분흡수특성 및 잔류강도 저하관계에 대해 실험적으로 규명하고자 한다. 또한 적층구조가 다른 CFRP 적층재의 흡습률 및 확산계수를 구하여 적층구성의 차에 따른 수분흡수 특성에 관해 고찰하고자 한다.

2. 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 탄소섬유/에폭시(CF/EPOXY)수지로 조합된 일방향 탄소섬유 프리프레그를 이용하여 오토크레브(autoclave)방법으로 제작된 CFRP 적층판으로 탄소섬유는 섬유직경이 약 7 μm인 장섬유이다. 본 연구에서 이용한 CF/에폭시 프리프레그 특성을 Table 1에 나타냈고, 시험편 배향에 따른 시험편 종류를 Table 2에 나타냈다.

본 연구에서는 충격에 의해서 초기손상이 생긴 시험편을 3점 굽힘시험하기 때문에 시험편은 초기손상보다 크게 하지 않으면 안된다. ASTM D790M

Table 1 Characteristics of CF/EPOXY specimen

Type	Carbon fiber	EPOXY resin	Prepreg
Characteristics			
Maker	日本TORAY	日本TORAY	日本TORAY
Model	T300-3000	#2500	P. 3051-15
Density	1.75 × 10 ³ [kg/m ³]	1.24 × 10 ³ [kg/m ³]	
Tension strength	3530 [MPa]	78 [MPa]	
Elastic modulus	230 [GPa]	3.96 [GPa]	
Elongation	1.5 [%]	2.0 [%]	
Resin content			37[%WT]

Table 2 Fiber orientation of specimens

Type	Fiber orientation	Ply	Thickness[mm]	Matrix
H	[0 ₂ /90 ₂ /45 ₂ /-45 ₂] _s	16	2.5	CF/EPOXY
I	[0 ₂ /45 ₂ /90 ₂ /-45 ₂] _s	16	2.5	
T	[0 ₄ /90 ₇ (0 ₁)/0 ₄]	16	2.65	
D	[0 ₄ /90 ₄] _s	16	2.5	
G	[0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s	16	2.5	

Method I⁽⁶⁾(3-point bending)에서는 시험편의 폭은 25 mm를 권장하고 있으나, 충격을 받을 때 생긴 계면박리나 충격면 표면의 크랙의 크기를 참고하여 시험편의 크기를 결정하였다. 따라서, 충격 시험에 의해 생긴 내부 박리영역의 크기가 시험편 단의 영향을 받지 않도록 시험편의 크기를 충분히 크게 하여 40 mm로 했다. 또, 충격손상을 받은 시험편 및 무충격 시험편에 대하여 열습효과가 잔류 강도 저하에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 180×40 mm의 직사각형 시험편으로 절단했다. 또 섬유 의 0° 방향이 시험편의 길이방향과 일치하도록 했다.

3. 실험방법

3.1 충격실험

CFRP 적층시험편에 충격손상을 주기 위하여 공기압 고속 충격시험장치를 이용하였으며 시험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 공기압에 의해 직경 5 mm의 강구를 발사시켜 시험편에 충격손상을 부여했다. 충격에너지는 강구의 발사속도로 계산하였으며, 발사속도는 강구가 가속튜브로부터 나온 직후 2정점간(10 cm)의 통과시간을 레이저로 측정하고, 2정점간 거리를 통과시간으로 나누어 계산하였다. 발사속도는 공기압에 의해 조절하였고, 본 실험에 이용한 강구의 질량은 0.5 mg이었다.

3.2 흡습실험

무충격 및 충격손상을 받은 CFRP 적층재의 흡습율은 시험편이 충분히 흡습이 되도록 장시간 정

밀 항온조(Model AB1701, Size : 400×400×450 mm, SEDAE TESTING INSTRUMENT CO.)에 침적시킨후 1/10,000 g까지 측정이 가능한 정밀전자저울을 이용해 실온상태에서 습기를 제거한 시험편의 중량을 측정하고, 매 실험시마다 흡습 시험편의 중량을 12시간 간격으로 측정하여 이들의 비를 백분율로 나타냈다. 정밀 항온조의 내부온도는 예폭시수지의 유리(glass) 전이온도 이하인 85°C를 유지시켰고, 정밀 항온조 내의 온도구배를 막기 위하여 순환펌프를 설치하여 항온조 내부 전체 온도가 항상 일정하도록 하였다. 고온·고습하에서 시험편의 수분흡습률은 다음식⁽⁷⁾과 같다.

$$M(\%) = \frac{W_m - W_a}{W_a} \times 100 \quad (1)$$

여기서, M 는 수분 흡습률(%), W_a 는 흡습전의 시험편 무게(g), W_m 는 흡습후의 시험편 무게(g)이다.

또한, 각 적층재의 확산계수를 구하기 위하여 흡습시험편의 무게를 측정하고, 식 (1)로부터 수분함유량의 백분율을 계산하여 이 값이 더 이상 증가되지 않을 때까지 계속 시험하였으며, 확산계수는 다음과 같은 Fick의 법칙⁽⁸⁻¹⁰⁾을 이용하였다.

$$\frac{M - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \left(\frac{1}{(2j+1)^2} \exp\left[-\pi^2 \frac{Dt}{h^2} (2j+1)^2\right] \right) \quad (2)$$

여기서, h 는 시험편 두께(mm), M 는 수분흡습률, M_0 는 초기 흡습률, M_∞ 는 평형상태 흡습률, t 는 시간(sec)이다.

식 (2)를 근사시키면 다음과 같다.

$$\frac{M - M_0}{M_\infty - M_0} = 4 \left(\frac{Dt}{\pi h^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 확산계수(D) 값을 구하면 다음식과 같다.

$$D = \frac{\pi}{16} \left(\frac{M_2 - M_1}{M_\infty - M_0} \right)^2 \left(\frac{h}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (4)$$

3.3 3점 굽힘시험

열습효과가 CFRP 적층판의 잔류강도에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 일정량의 습기를 흡수한 무충격 및 충격손상을 받은 CFRP 시험편을 재료시험기(SHIMADZU AG2000A U. T.

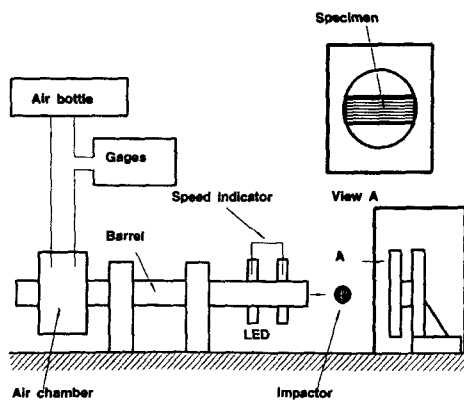


Fig. 1 Apparatus of impact testing

M.)를 이용하여, 3점 굽힘시험에 의해 잔류 굽힘 강도를 계산하였다.

본 실험에 이용한 3점 굽힘시험시 시험지그는 ASTM D790M⁽⁶⁾의 규격을 참고하여 제작하였다. 또한, 충격손상을 받은 CFRP 시험편의 경우는 충격면이 압축을 받는 상태에서 3점 굽힘시험을 행하여 얻은 하중-변위 데이터로부터 파괴시까지의 하중-변위선도를 구했다. 파괴굽힘응력은 시험편을 균질등방성보로 가정하여 계산했다. 파괴굽힘응력의 계산식은 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

$$\sigma = \frac{(PL/4)(d/2)}{I} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (5)$$

여기서, σ 는 파괴굽힘응력(Pa), P 는 최대하중(N), b 는 시험편의 폭(m), L 는 지점간의 거리(m), d 는 시험편의 두께(m), I 는 관성모멘트(m⁴)이다.

4. 손상재의 박리면적 측정

4.1 시험편의 기호

본 연구에서 이용한 6종류의 CFRP 적층재 시험편의 기호설명을 Table 3에 나타냈다.

4.2 박리면적의 측정방법

충격에 의해 생긴 CFRP 시험편 내부의 층간박리형상 및 박리면적을 관찰하기 위하여, 올림퍼스(Olympus UH 펄스 100) 초음파현미경(렌즈의 주

파수는 30 MHz)을 이용하였다.

초음파현미경의 원리는 Fig. 2와 같다. 음향렌즈 위의 압전 트랜스듀서에 고주파전압을 가하면 압전 효과에 의해서 고주파전압과 같은 주파수의 초음파가 발생하여 음향렌즈의 구면부에 의해서 수렴되어 시험편에 도달한다. 이때 초음파가 렌즈로부터 매체에 투과하는 진폭을 크게 하기 위하여 공기보다 밀도가 높은 것이 매체로서 이용되며 여기서는 물을 사용한다.

시험편에 도달한 초음파는 시험편 내부에 투과하여 내부손상부에서 반사되고 매체에 투과해서 다시 음향렌즈에 모여져 압전트랜스듀서에 되돌아오는 전기적 신호로 변환된다. 이 신호에 게이트를 걸면 시험편 표면으로부터 임의의 깊이에서의 반사파만을 얻을 수 있다. 이 시점의 신호가 시험편 내부의 1점의 정보로 된다. 그래서 초음파 비임을 시험편의 2차원 방향에 주사하여 2차원의 정보를 모아 반사예코의 레벨에 대응해서 백색으로부터 흑색까지 단계적으로 변화시키면, 초음파화상이 CRT상에 나타난다. 여기서, 나타난 화상을 초음파현미경 내장의 소프트웨어를 이용하여 박리면적을 계산한 후 각 계면을 구별하기 위해 서로 다른 색을 부여한 후 촬영하였다.

CFRP 시험편의 층간계면은 충격면에 가까운 쪽으로부터 계면 A, B, C, D, E, F로 하였으며, 시험편 D, G, T의 경우 박리면적 측정은 충격면에서 계면 A를 충격면 반대측에서 계면 B를 관찰하여 전박리면적을 계산하였다. 또 시험편 H, I는 계면이 6개이므로 충격면에서 계면 A, B, C의 박리면적

Table 3 Symbols of CFRP specimen

H(I, T, D, G)	D(M)	1(2, N)	1(2, 3, 4, 5, 6)	
				Specimen type
				Moisture condition
				D : Dry
				M : Moisture
				Impact velocity
				(impact energy)
				1 : 83.3 m/sec (1.7J)
				2 : 100 m/sec (2.5J)
				N : Unimpacted
				Specimen No.

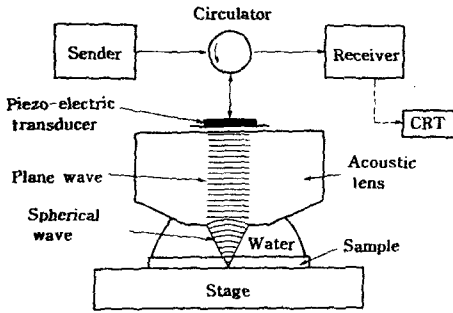


Fig. 2 Principle of scanning acoustic microscope

을 관찰하고 반대측에서 계면 D, E, F의 박리면적을 관찰하였다.

5. 실험결과 및 고찰

본 장에서는 흡습량의 증가에 따라 CFRP 적층재의 적층구조의 차에 따른 흡습특성을 고찰하고 흡습특성이 잔류강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 충격손상이 있는 시험편 및 무충격 시험편을 85°C의 증류수에 침적하여 각 시험편의 흡습량의 변화관계 및 잔류굽힘강도에 관해 고찰하였다.

5.1 흡습거동

먼저 의사등방성 적층재의 섬유배향의 차에 따른 흡습거동에 관해 고찰한다. Fig. 3은 적층수가 각각 16매, 계면수가 6계면인 의사등방성 적층재의 적층배향의 차이에 따른 흡습거동을 나타냈다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 흡습 시험초기에는 시험편 H, I 모두 흡습량의 변화는 별로 나타나지 않으나 시간이 경과 함에 따라 시험편 I[0₂/45₂/90₂/-45₂]_s가 시험편 H[0₂/90₂/45₂/-45₂]_s보다 흡습량의 증가폭이 약간 큼을 알 수 있다. 이는 시험편 I의 A계면 [0/45] 및 F계면 [45/0]이 시험편 H의 A계면 [0/90] 및 F계면 [90/0]보다 흡습이 쉽기 때문이라 생각된다. 흡습은 대부분이 수지에 의해 이루어지지만 같은 수지인 경우 시험편 표면층에 가까운 계면의 섬유길이가 길때 흡습량의 증가가 컸다. 이는 섬유를 따라 흡습이 진행되기 때문이라 생각된다.

또한, Fig. 4는 약 2.5J의 충격손상을 받은 시험편 H, I의 흡습거동을 나타낸 것으로 Fig. 3에서와 똑같이 시험편 H보다 시험편 I가 시간이 경과 함에 따라 흡습량이 증가하나 평형상태에 도달하면

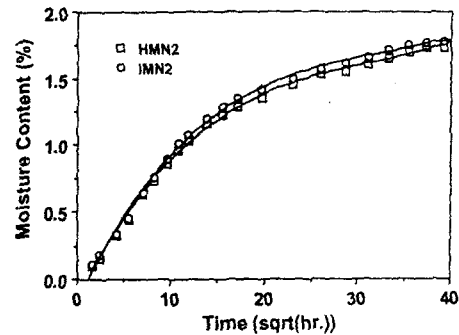


Fig. 3 Moisture content of unimpacted specimens H, I as a function of time

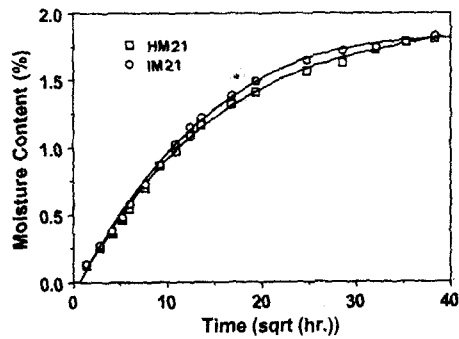


Fig. 4 Moisture content of impacted specimens H, I as a function of time (2.5J)

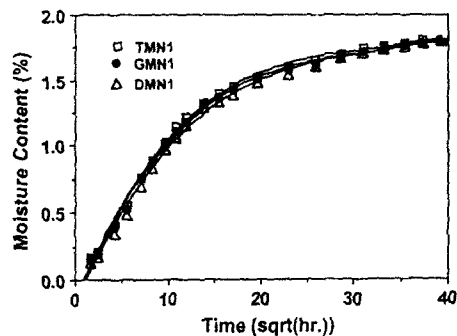


Fig. 5 Moisture content of unimpacted specimens T, G, D as a function of time

시험편 H, I 모두 거의 같은 흡습상태를 나타냈다.

또한, 직교이방성 적층재의 계면수의 차에 따른 흡습거동에 관해 고찰하기 위하여 적층수가 각각 16매이며, 계면수가 2계면인 시험편 D, 계면수가 2계면이고 탄소섬유 1매 대신에 직물을 1매 적층한 시험편 T 및 계면수가 4계면인 시험편 G에 대하여 흡습실험을 행했다.

Fig. 5는 무충격 시험편 D, T, G에 대한 흡습거동을 나타냈다. Fig. 5에서 알수 있는 바와 같이 시험편 D[0₄/90₄]_s가 흡습량이 가장 적고 시험편 G [0₂/90₄/0₂]_s, 시험편 T[0₄/90₇(0₁)/0₄]_s순으로 흡습량이 증가하였다. 즉 같은 계면수를 갖는 시험편에서는 시험편 내부에 직물을 포함한 시험편 T가 흡습량이 가장 많았으며, 시험편 G가 시험편 D보다 흡습량이 많았다. 탄소섬유 1매 보다 직물 1매의 두께가 더 두껍기 때문에 시험편 D, G, T 중 시험편 T의 흡습량이 가장 많은 것으로 생각된다.

Fig. 6은 약 2.5J의 충격손상을 받은 시험편 D, G, T의 흡습거동을 나타낸 것으로 흡습 초기에는 흡습량이 Fig. 5에서 보다도 크게 나타났으나 결국에는 Fig. 5에서와 거의 비슷한 습기평형상태에 도달하였다.

각각의 시험편 별로 시간의 변화에 따른 수분 흡수량 $M(\%)$ 을 정식화하기 위하여 Figs. 3~6에서의 실험데이터를 최소자승법으로 도기한 결과 $M(\%) = A + B \ln(\sqrt{t})$ 의 식이 가장 적절했다. Table 4에 각각의 시험편의 수분 흡수량 $M(\%)$ 을 정식화하기 위한 정수 A, B의 값을 나타냈다.

또한, CFRP 적층재의 적층구성의 차에 따른 수분흡습의 정도를 알아 보기 위하여 식 (4)에 흡습 실험데이터를 대입하여 확산계수를 구했다. 확산계수를 구할 때는 흡습시험시 초기의 직선 부분을 선정하여 식 (4)에 대입하였으며, 본 연구에서는 시험 시작 후 12시간과 21시간 사이의 데이터를 이용하

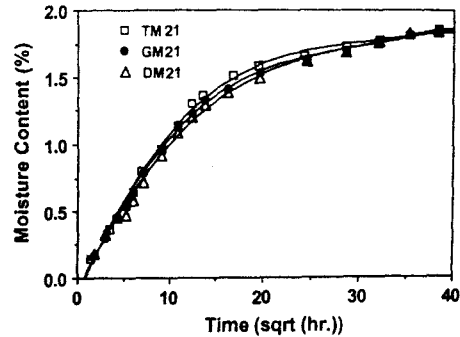


Fig. 6 Moisture content of impacted specimens T, G, D as a function of time (2.5J)

였다.

Table 5에 적층구성이 다른 무충격 및 충격시험편의 확산계수를 나타냈다.

Table 5로부터 적층수가 각각 16매, 계면수가 6 계면인 의사등방성 적층재의 적층배향의 차이에 따른 흡습거동에 관해 고찰해 보면 확산계수는 시험편 I가 시험편 H보다 약간 컸다. 이는 시간의 경과에 따른 흡습량의 측정결과로부터 알 수 있는 바와 같이 시험편 I의 A계면 [0/45] 및 F계면 [45/0]이 시험편 H의 A계면 [0/90] 및 F계면 [90/0]보다 흡습이 쉽기 때문이라 생각된다.

또한, 직교이방성 적층재의 계면수의 차에 따른 확산계수에 관해 고찰해 보면 시험편 D가 확산계수가 가장 적었고 다음으로 시험편 G, 시험편 T 순으로 확산계수가 컸다.

Table 4 Constant value A, B of moisture content equation

Specimen	A	B
HMN1	-0.45835	0.59997
HM22	-0.37799	0.58981
IMN1	-0.45928	0.6132
IM22	-0.3661	0.6001
TMN1	-0.3674	0.6111
TM22	-0.2926	0.5790
GMN1	-0.38059	0.60862
GM21	-0.19734	0.52588
DMN1	-0.42141	0.61348
DM21	-0.40638	0.62006

Table 5 Diffusion coefficient (D)

Specimen	Moisture time (t)		Moisture rate (M)		M_{∞} (%)	Thickness (h)	D (mm/sec)
	t_1	t_2	M_1	M_2			
HMN2	21	12	0.457	0.2933	1.768	2.5	30×10^{-8}
HM21	21	12	0.559	0.361	1.798	2.5	42×10^{-8}
IMN2	21	12	0.476	0.308	1.802	2.5	30.7×10^{-8}
IM21	21	12	0.588	0.386	1.848	2.5	42.2×10^{-8}
TMN1	21	12	0.565	0.398	1.886	2.65	31×10^{-8}
TM22	21	12	0.618	0.437	1.888	2.65	36.5×10^{-8}
GMN1	21	12	0.548	0.382	1.865	2.55	29.1×10^{-8}
GM22	21	12	0.638	0.461	1.823	2.5	33.3×10^{-8}
DMN1	21	12	0.515	0.347	1.842	2.5	28.8×10^{-8}
DM22	21	12	0.558	0.378	1.888	2.5	32.1×10^{-8}

즉, 같은 계면수를 갖는 시험편에서는 시험편 내부에 직물을 포함한 시험편 T가 흡습이 가장 빨랐으며 시험편 G가 시험편 D보다 흡습이 빠름을 알 수 있었다.

또한, CFRP 적층판에 직경 5 mm의 강구를 이

용하여 충격을 가했을 때 CFRP 적층판의 층간계면에 생긴 대표적인 각 시험편의 박리현상을 Figs. 7~11에 나타냈다.

Figs. 7, 8은 적층수가 16매, 계면수가 6계면인 의사등방성 CF/에폭시 시험편 H, I의 실온에서의 박리현상을 나타내며, Figs. 8, 9는 적층수가 16매, 계면수가 2계면이며 탄소섬유 1매 대신 직물을 1매 첨가한 시험편 T의 박리현상이고, Fig. 10은 적층수가 16매, 계면수가 2계면인 직교이방성 시험편의 박리현상이며, Fig. 11은 적층수가 16매, 계면수가 4계면인 직교이방성 시험편의 박리현상을 나타내고 있으며, Fig. 중 적색은 계면 A를, 녹색은 계면 B를, 청색은 계면 C의 박리현상을 나타낸다.

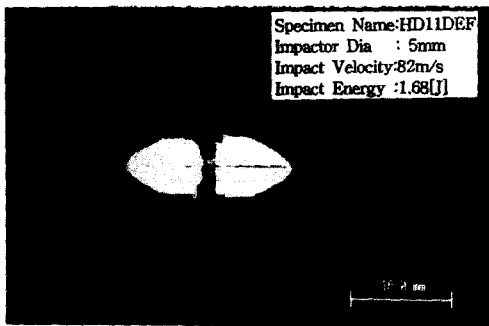
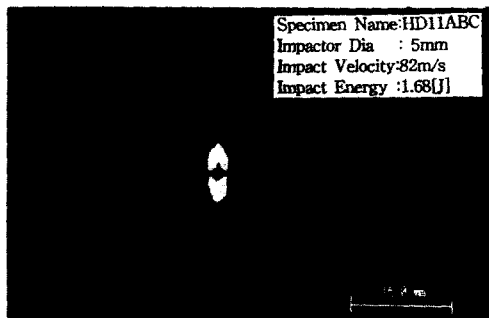


Fig. 7 Delamination shapes of the specimen H

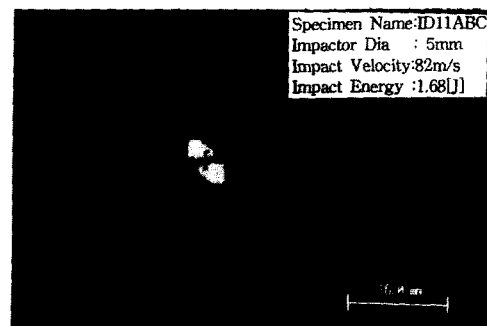


Fig. 8 Delamination shapes of the specimen I

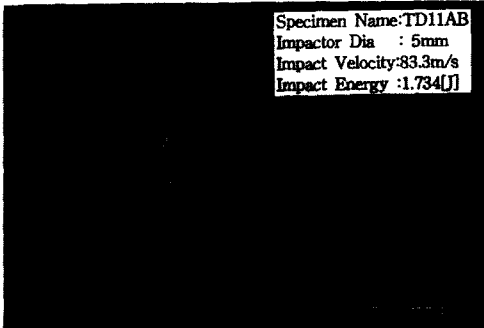


Fig. 9 Delamination shapes of the specimen T

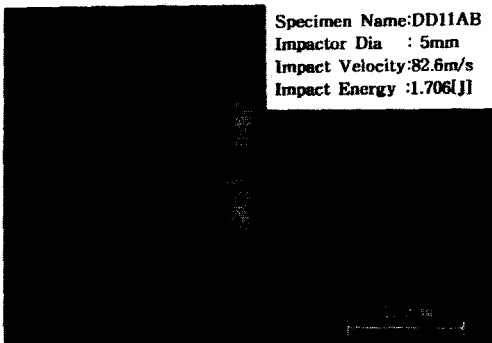


Fig. 10 Delamination shapes of the specimen D

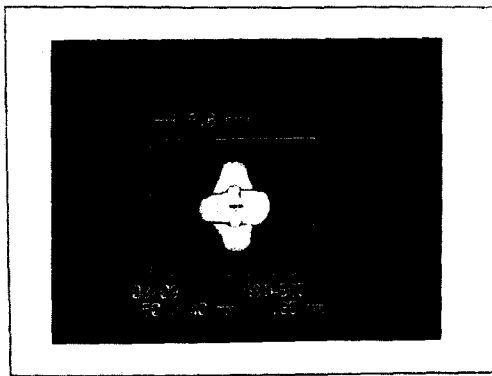


Fig. 11 Delamination shapes of the specimen G

5.2 흡습률과 잔류굽힘강도와와의 관계

Fig. 12는 무충격 시험편 H, I의 흡습량의 증가와 파괴굽힘응력과의 관계를, Fig. 13은 약 2.5J의 충격손상을 받은 시험편 H, I의 흡습량의 증가와 파괴굽힘응력과의 관계를 비교해서 나타냈다. Fig. 12로부터 알 수 있는 바와 같이 무충격 시험편의 경우 흡습률이 증가함에 따라 시험편 I가 시험편 H보다 잔류강도저하현상이 약간 커짐을 알 수 있다. 이는 흡습거동에서 알 수 있는 바와 같이 시험

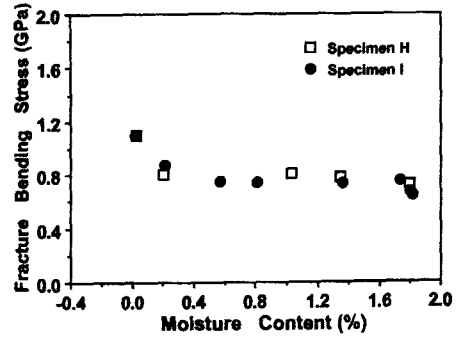


Fig. 12 Relation between moisture content and fracture bending stress of unimpacted specimens H, I

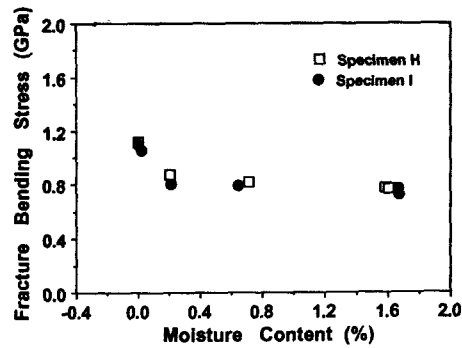


Fig. 13 Relation between moisture content and fracture bending stress of impacted specimens H, I (2.5J)

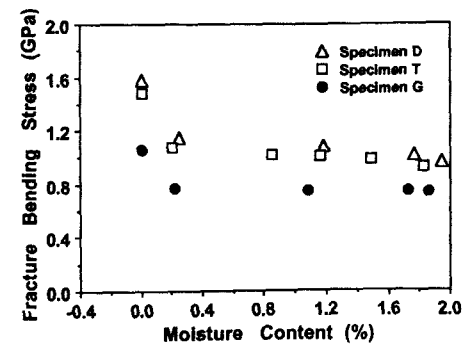


Fig. 14 Relation between moisture content and fracture bending stress of unimpacted specimens D, T, G

편 I가 시험편 H보다 시간의 경과에 따른 흡습량의 증가가 컸으며, 강도저하현상은 흡습량이 증가하기 때문이라고 생각된다. 특히, 수분흡습률이 약 0.2%일 경우는 급격한 강도저하현상이 나타났으며 0.2% 이상 증가하면 강도저하 현상은 나타나지 않

았다. 또한 Fig. 13은 약 2.5J의 충격손상을 받은 시험편 H, I의 흡습량의 증가에 따른 파괴굽힘응력과의 관계를 비교해서 나타낸 것으로 Fig. 12에서와 거의 유사하게 나타났다. 이는 CFRP 적층재는 충격손상의 크기보다는 흡습량의 크기에 따라 강도저하 현상이 크게 나타남을 의미한다.

Fig. 14는 직교이방성 적층재인 무충격 시험편 D, T, G에 대한 흡습량의 증가와 파괴 굽힘응력과의 관계를, Fig. 15는 약 2.5J의 충격손상을 받은 시험편 D, T, G에 대한 흡습량의 증가와 파괴 굽힘응력과의 관계를 나타냈다. Fig. 14로부터 시험편 G보다 시험편 D, T의 강도가 훨씬 컸으며, 계면수가 많을수록 잔류강도가 작아짐을 알 수 있었다. 특히, 흡습률이 약 0.2%근방에서는 의사등방성 적층재에서와 같이 급격한 강도저하를 나타냈으며 0.2%를 넘어서면서부터는 강도저하가 거의 없었다.

Fig. 15에서도 Fig. 14에서와 비슷한 결과를 얻었으며 충격손상을 받은 시험편이 무충격 시험편 보다 약간 강도가 더 저하하였다. 따라서 충격손상에 의한 강도저하 보다는 고온·고습상태에서의 수분의 확산이 강도저하에 더 큰 영향을 미친다고 생각된다.

5.3 충격에너지의 크기와 잔류굽힘강도와의 관계

Fig. 16은 적층수가 각각 16매, 계면수가 6계면인 의사등방성 적층재의 적층배향의 차이에 따른 충격에너지의 크기와 파괴굽힘응력과의 관계를 나타낸 것으로 Fig. 16에서 알 수 있는 바와 같이 2.5J의 충격손상을 기준으로 할때 시험편 H의 경

우 무충격 시험편에 비해 약 30.4% 정도의 잔류강도가 감소하였고 시험편 I의 경우는 무충격 시험편에 비해 약 34.3% 정도의 잔류강도가 감소하였다.

또한, Fig. 17은 계면수가 서로 다른 직교이방성 적층재의 계면수의 차에 따른 충격에너지의 크기와 파괴 굽힘응력과의 관계를 나타낸 것으로 Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 2.5J의 충격손상을 기준으로 할때 각각 시험편 D, T 및 G의 경우 무충격 시험편에 비해 각각 약 36.9%, 약 33.5%, 약 29.1% 정도의 잔류강도가 감소하였다. 즉, 계면수가 적은 시험편일수록 강도저하현상이 크게 나타남을 알 수 있었다.

Table 6에 적층구조의 차에 따른 흡습률, 잔류굽힘강도 및 손상재의 잔류굽힘강도와의 관계를 정리하여 나타냈다.

위의 결과로부터 직교이방성 적층재의 경우 흡습으로 인한 잔류굽힘강도의 저하현상은 의사등방성 적층재보다 심하게 나타나며, 직교이방성 적층재중

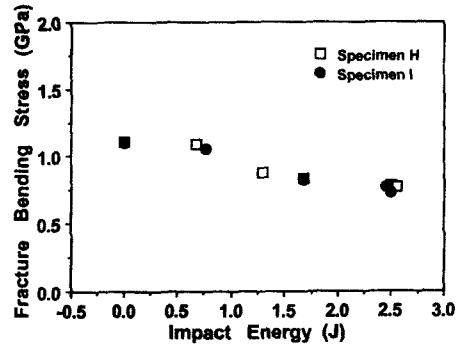


Fig. 16 Relation between impact energy and fracture bending stress of the specimens H, I at moisture equilibrium level

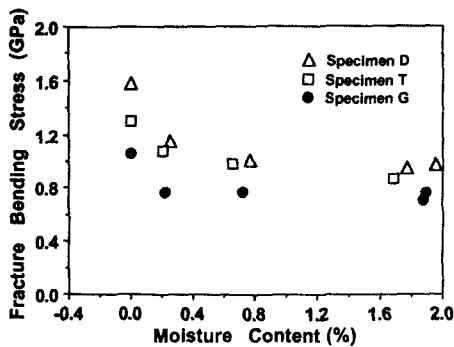


Fig. 15 Relation between moisture content and fracture bending stress of impacted specimens D, T, G (2.5J)

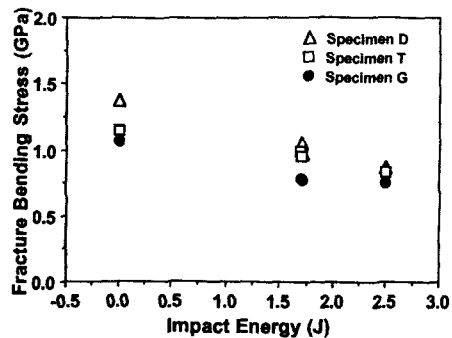


Fig. 17 Relation between impact energy and fracture bending stress of the specimens D, T, G at moisture equilibrium level

Table 6 Relation between fracture bending stress, elastic modulus and impact energy by moisture contents

Specimen	Quasi-isotropic laminates	Orthotropic laminates
Laminates orientation	H[0 ₂ /90 ₂ /45 ₂ /-45 ₂] _s I[0 ₂ /45 ₂ /90 ₂ /-45 ₂] _s	T[0 ₄ /90 ₇ (0 ₁)/0 ₄] _s D[0 ₄ /90 ₄] _s G[0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s
Mositure content (%-√t)	I>H	T>G>D
Bending strength (Stress-%)	H>I	D>T>G
Bending strength by impact energy	H>I	D>T>G

에서도 계면수가 적은 적층재일수록 흡습으로 인한 잔류굽힘강도의 저하현상이 큼을 알 수 있다.

6. 결 론

(1) 의사등방성 적층재의 경우 흡습시 시험편 I [0₂/45₂/90₂/-45₂]_s가 시험편 H[0₂/90₂/45₂/-45₂]_s보다 흡습량의 증가폭이 약간 증가함을 알 수 있었다. 이는 시험편 표면층에 가까운 섬유길이가 길때 흡습량의 증가가 크기 때문이며, 직교이방성 적층재의 경우 계면수가 2계면인 시험편 D[0₄/90₄]_s가 흡습량이 가장 적고 계면수가 4계면인 시험편 G [0₂/90₄/0₂]_s, 계면수가 2계면이고, 탄소섬유 1매 대신에 직물을 1매 적층한 시험편 T[0₄/90₇(0₁)/0₄]_s 순으로 흡습량이 증가하였다. 수분 흡습량 $M(\%)$ 을 수식으로 정식화하면 $M(\%) = A + B \ln(\sqrt{t})$ 의 식이 가장 적절했다.

(2) 확산계수는 의사등방성 적층재의 경우 흡습시, 무충격일 때 시험편 I가 시험편 H보다 약간 2.3% 정도 컸으며, 직교이방성 적층재의 경우는 무충격 및 약 2.5J의 충격손상을 받을 때 시험편 D가 가장 적었고, 다음으로 시험편 G, 시험편 T 순으로 컸다.

(3) 직교이방성 적층재의 경우 흡습으로 인한 잔류굽힘강도의 저하현상은 의사등방성 적층재 보다 심하게 나타나며, 직교이방성 적층재 중에서도 계면수가 적은 적층재일수록 흡습으로 인한 잔류굽힘강도의 저하현상이 컸다.

(4) 특히, 흡습률이 약 0.2% 근방에서는 의사등

방성 및 직교이방성 적층재 모두 급격한 강도저하를 나타냈으며 0.2%를 넘어서면서부터는 강도저하의 변화가 거의 없었다. 이는 약 0.2% 흡습이 되면 수분이 기지의 분자배열 및 화학적 성질을 변화시켜 기계적 성질이 변화하기 때문이다.

(5) 흡습평형상태에 도달하면 의사등방성 적층재의 경우, 2.5J의 충격손상을 기준으로 할 때 무충격시험편에 비해 시험편 H는 30.4%, 시험편 I는 약 34.3% 정도의 잔류강도가 감소하였다. 또한, 직교이방성 적층재에서는 시험편 D, T 및 G의 경우 각각 약 36.9%, 33.5%, 29.1%순으로 잔류강도가 감소하였다.

후 기

이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비 지원 및 우수연구센터 기자재 활용에 의해 연구되었다.

참고문헌

- (1) Goatan, J. I., 1970, "Proc. R. Soc.," London, Ser. A, 319, pp. 45~57.
- (2) 武田展雄, 1985, "複合材料の衝撃應答と破壊(I)," 日本複合材料學會, 第11卷, 第4號, pp. 151~161.
- (3) Ma, C. C. M., Huang, Y. H. and Chang, M. J., 1991, "Hygrothermal Effect on the PEEK/CF and PPS/CF under Impact Loading(I)," ANTEC, pp. 2092~2096.

- (4) Challenger, K. D., 1986, "The Damage Tolerance of Carbon Fiber Reinforced Composite," *A Workshop Summary, Composite Structure*, Vol. 6, pp. 295~318.
- (5) Ishai, O. and Shragi, A., 1990, "Effect of Impact of Loading on Damage and Residual Compressive Strength of CFRP Laminated Beam," *Composites Struct.*, Vol. 14, No. 4, pp. 319~337.
- (6) *Annual Book of ASTM Standards*, 1988, "D790M-86 Standard Method for Flexural Properties of Unreinforced Plastics and Electrical Insulating Material [Metric]," pp. 290~298.
- (7) Nakanishi, Y. and Shindo, A., 1982, "Deterioration of CFRP and GFRP in Salt Water," *Progress in Science and Engineering of Composites, ICCM-IV*, pp. 1009~1016.
- (8) Lo, S. Y., Hahn, H. T. and Chiao, T. T., 1982, "Swelling of KEVLAR 49/Epoxy and S2-Glass/Epoxy Composites," *Progress in Science and Engineering of Composites*, pp. 987~1000.
- (9) Mallick, P. K., 1993, *Fiber Reinforced Composites*, Marcel Dekker. Inc., pp. 303~313.
- (10) Stephen, W. Tasi and Thomas, H. Han, 1980, *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing Company, pp. 329~342.
- (11) Liu, D., Sun, C. T. and Malvern, L. E., 1986, "Structural Degradation of Impacted Graphite/Epoxy Laminates," *The Shock and Vibration Bulletin*, Bulletin 56, Part 2, pp. 51~60.