



CFRP 적층재의 잔류피로굽힘강도에 미치는 열습의 영향

Influence of Hygrothermals on Residual Fatigue Bending Strength of CFRP Composite Laminates

박노식*·임광희*·양인영**

No-Sick Park · Kwang-Hee Im · In-Young Yang

(1997년 2월 3일 접수, 1997년 6월 10일 채택)

ABSTRACT

This paper evaluates the static and fatigue bending strengths of CFRP(carbon fiber reinforced plastic) laminates subjected to hygrothermals. The specimens which had different stacking composition, orthotropic and quasi-isotropic laminated plates, were prepared for this experiment. A steel ball launched by the air gun collides against CFRP laminates to generate impact damages, and the 3-point fatigue bending test is carried out by using the impacted laminates to investigate the influence of hygrothermals on the effect on the residual bending fatigue strength of CFRP laminates.

1. 서 론

탄소섬유 강화복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics :이하 CFRP라고 한다)는 선진복합재(Advanced Composite Materials :ACM)의 대표적인 재료로써 금속재료에 비해서 대략 20~50% 정도의 중량을 감소시킬 수 있다는 장점^{1~3)}이 있어 구조경량화가 요구되는 항공우주분야를 비롯하여 자동차 산업분야, 조선산업분야, 일반산업분야, 레저스포츠, 의료기기 부품 및 에너지 관련분야 등의 구조용 재료로 널리 사용되고 있다.

그러나 CFRP는 정적 부하에 대해서는 우수한 역학적 특성을 가진 반면에 고온·고습환경 및 충격부하에 대해서는 우수한 특성을 기대할 수 없고 복합재료의 유용한 기계적 성질이 장시간 주위환경에 놓여 있어도 충분히 유지되어야 하는데 온도, 습도 등과 같은 환경적 요인으로 습기가 복합재료 내로 침투하여 기지의 분자배열 및 화학적 성질의 변화와 복합재료의 계면특성 및 구성재료의 기계적 성질의 저하를 가져오며, 특히 충격손상을 받은 CFRP 적층판은 잔류굽힘강도 및 피로굽힘강도가 현저하게 저하되는 문제점⁴⁾이 있다.

* 조선대학교 대학원 기계설계공학과

** 조선대학교 기계설계공학과

그 몇 가지 예로 CFRP 적층판을 항공기에 사용할 경우 항공기제조, 수리, 정비 중의 공구 낙하, 항공기의 이착륙시 작은 돌과의 충돌, 비행중의 폭우, 우박, 새 등의 비교적 경량인 물체의 저속충격에 의한 이물충격손상(Foreign Object Damage : FOD)⁵⁾을 받는 경우가 많다.

현재까지의 CFRP적층재의 FOD에 관한 연구는 충격후의 잔류인장강도⁶⁾, 잔류압축강도(Compression Strength After Impact : CAI)⁷⁾ 및 피로굽힘강도 문제가 대부분이다. 최근에 Rotem⁸⁾ 등은 횡충격을 받는 적층판은 파괴굽힘강도가 아주 낮다는 점에 주목하여 횡충격에 의해 충격손상을 받는 CFRP 적층판을 3점 및 4점 굽힘시험을 실시하여 잔류피로굽힘시험 저하관계를 실험적으로 설명하고 있다. 또한 운행중 충격손상을 받은 CFRP 적층판이 고온·고습환경에 놓여 있을 때 CFRP 적층판의 잔류강도 저하현상을 정량적으로 평가하는 것은 CFRP 적층판의 안전설계의 관점에서나 내충격성이 우수한 고강도의 첨단재료 개발의 관점에서 대단히 중요한 과제이다. 그러나 지금까지의 국내·외의 연구결과들을 살펴보면 실온상태에서 CFRP 적층판에 충격력을 가하여 충격손상 및 잔류강도의 저하현상을 평가한 실험적 연구⁹⁾와, 흡습상태에서의 잔류강도 저하 문제를 취급한 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)에 대한 연구결과 뿐¹⁰⁾이며, 항공기용 재료에 있어서 온도변화에 따른 CFRP 적층판의 인장강도, 층간전단강도, 잔류굽힘강도, 압축강도특성등에 관한 연구결과 및 서로 수지가 다른 CFRP 적층판의 온도가 충격강도, 정적인장 및 굽힘강도, 피로강도 및 크리프강도에 미치는 영향을 고찰한 연구결과 뿐¹¹⁾으로 고온 및 고온·고습 환경하에 노출된 CFRP 적층판의 잔류피로굽힘강도의 저하현상을 정량적으로 평가한 연구결과는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 받은 CFRP 적층재가 고온·고습(55°C 증류수)하에 노출되었을 때 고온·고습하¹²⁾에서 피로굽힘강도가 어떻게 변화하는가를 실험적으로 고찰하여 구조물에 적용하기 위한 수분흡수특성 및 잔류피로 굽힘강도의 저하관계에 대해 고찰하고자 한다. 특히, 적층구조의 차가 수분흡수 특성 및 잔류피로굽힘강도에 미치는 영향에 관해 고찰하고자 한다.

2. 흡습 이론

일방향재 섬유강화 복합재료의 열전도는 다음 식으로 표현된다¹³⁾.

$$q^T = -D^T T \dots\dots\dots (1)$$

여기서 q^T : 열유속
 D^T : 열전도
 T : 온도구배 이다.

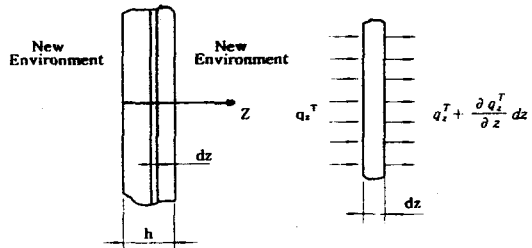


Fig. 1 A thin laminate subjected to an environmental change

미소 요소 dz 만을 고려하면, Fig. 1에서와 같이 온도(T)에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$q_z^T - \left(q_z^T + \frac{\partial q_z^T}{\partial z} dz \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dz \dots\dots\dots (2)$$

여기서 q_z^T : 열유속, ρ : 밀도, C : 비열

식 (1)을 식 (2)에 대입하면 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(D_z^T \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

여기에서 D_z^T 및 ρC 는 상수이다. 따라서 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{D_z^T}{\rho C} \partial^2 \frac{T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots (4)$$

식(4)에 재료가 무한히 긴 평판이고 수분의 흡습은 재료의 두께 방향으로만 일어난다고 가정하에서 흡습확산에 적용하면 다음과 같은 Fick의 식이 된다¹⁴⁾.

$$D_z \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 M : 흡습농도
 D_z : Z방향의 확산계수
 t : 시간(sec)

식 (5)의 경계 조건은 다음과 같으며 $t \leq 0$ 이고 $0 < z < h$ 일 때, $M = M_0$

$t > 0$ 이고 $z = 0, z = h$ 일 때, $M = M_{\infty}$ 이다. (6)

여기서 h : 시험편의 두께

z : 시험편의 두께방향

식 (5), (6)의 해는 다음과 같다.

$$\frac{M - M_0}{M_{\infty} - M_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{2j+1} \sin \left[\frac{(2j+1)\pi z}{h} \exp \left[-\frac{\pi^2 Dt}{h^2} (2j+1)^2 \right] \right\} \right. \dots\dots\dots (7)$$

여기서 M : 임의의 시간에서 재료 내부의 수분 흡습률

M_{∞} : 포화 수분 흡습률

M_0 : 초기 수분 흡습률

재료 내에 함유된 수분함량 G 는 식 (5)를 재료 두께에 관해 적분하면 얻을 수 있다. 즉,

$$G = \int_0^h M(z, t) dz \dots\dots\dots (8)$$

식 (5), (6), (8)을 풀어 정리하면 다음과 같다.

$$G = \frac{M - M_0}{M_{\infty} - M_0} = 1 - \exp \left[-7.3 \left(D_z \frac{t}{h^2} \right)^{0.75} \right] \dots\dots\dots (9)$$

또한 재료 내에 포함된 수분 흡습률은 다음과 같다¹⁵⁾.

$$M = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \dots\dots\dots (10)$$

여기서 M : 수분 흡습률 (%)

W_d : 흡습전의 재료무게 (g)

W_m : 흡습후의 재료무게 (g)

본 연구에서는 섬유배향이 다른 직교·의사등방성 적층판이 고온·고습하에 노출될 때 다음 식인 Fick의 법칙을 이용하여 확산계수를 구하였다.

흡습률은 다음과 같이 평균흡습농도로 나타낼 수 있으며

$$\bar{M} = \frac{1}{h} \int_0^h M dz \dots\dots\dots (11)$$

식 (11)의 경계 조건은 다음과 같다.

$t = 0$ 일 때, $\bar{M} = M_0$

$t = \infty$ 일 때, $\bar{M} = M_{\infty}$ (12)

식 (7) 및 (11)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\bar{M} - M_0}{M_{\infty} - M_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(2j+1)^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 Dt}{h^2} (2j+1)^2 \right] \right\} \dots\dots\dots (13)$$

시간 t 가 큰 경우에는 식 (13)에서 첫 번째 항을 근사시키면 식 (14)와 같다.

$$\frac{\bar{M} - M_0}{M_{\infty} - M_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\pi^2 \frac{Dt}{h^2} \right) \dots\dots\dots (14)$$

한편 시간 t 가 작은 경우에는 식 (13)을 근사시키면 식 (14)와 같다.

$$\frac{\bar{M} - M_0}{M_{\infty} - M_0} = 4 \left(\frac{Dt}{\pi h^2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (15)$$

또한 식 (15)으로 부터 확산계수(D)의 값을 구하면 다음 식과 같다.

$$D = \frac{\pi}{16} \left(\frac{\bar{M}_2 - \bar{M}_1}{M_{\infty} - M_0} \right)^2 \left(\frac{h}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \dots\dots\dots (16)$$

여기서 h : 시험편 두께 (mm)

\bar{M} : 수분 흡습률

M_0 : 초기 수분 흡습률

M_{∞} : 포화 수분 흡습률

t : 시간 (sec)

3. 실험 방법

3.1 시험편의 형상

본 실험에 이용한 CFRP 적층판은 1방향 프리프레그 시트 (prepreg sheet)를 이용하여 오토클레이브 (autoclave) 성형방법으로 제작하였다. 본 연구에서는 CFRP 프리프레그 시트를 이용하였으며, 탄소섬유 (일본 TORAY T300-3000)/EPOXY 수지 (#2500) (이하 CF/EPOXY라 한다.)의 조합이다.

본 실험에 이용한 CFRP 시험편은 2종류이며, 적층구성 Table 1과 같다. 시험편의 형상은 Fig. 2와 같고, 40×180mm (폭×길이)의 띠판이며, 시험편 표면의 섬유배향이 0°방향이 되도록 시험편의 길이방향과 일치시켰다.

Table 1 Code of CFRP laminates

Specimen types	Stacking sequences	Number of plies	Thickness (mm)	Matrix
B	[0°, 90°] _n	16	2.5	Epoxy
C	[0°/45°/90°/-45°] _n	16	2.5	Epoxy

3.2 충격 실험

직경 150mm의 원공이 있는 두께 10mm의 강판 2

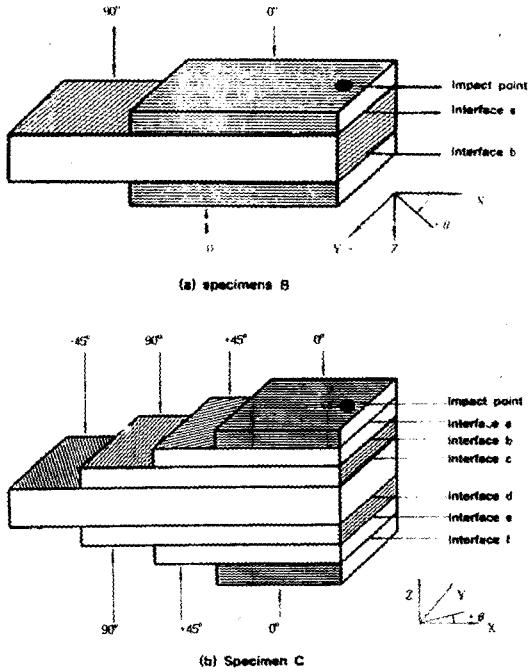


Fig. 2 Interface configuration for CFRP specimens

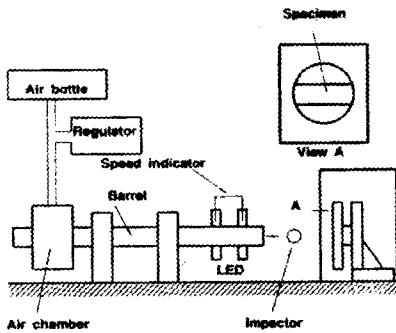


Fig. 3 Schematic of experimental setup

매에 같은 직경 150mm의 원공이 있는 고무판을 붙여서 한중앙에 시험편을 크램프로 고정하여 지지하고, Fig. 3와 같은 압축공기건 이용한 충격시험 장치로 직경 5mm(0.5g)의 강구를 시험편에 충돌시켰다.

강구의 충격속도는 충격시험기의 앞에 설치된 1 조의 포토셀(photo-electric cell)에 의해 강구가 2 정점(10cm)간을 통과한 시간을 체크해서 측정했다. 충격속도는 압축공기압력을 변화시켜 얻었고,

본 실험에서는 대략 82m/s(1.71J)의 속도로 충격을 가했다. 충격에너지 [단위(J)]는 충돌직전의 충돌체의 운동에너지를 나타냈다.

3.3 3점굽힘 피로시험

충격손상을 받은 CFRP적층재의 정적굽힘강도 및 피로굽힘강도에 미치는 적층구성의 영향을 고찰하기 위하여 3점굽힘시험을 행했다. 정적 및 피로시험은 Fig. 4(a)와 같은 고정구(Fixture)를 재료시험기(INSTRON 8501)에 부착하여 Fig. 4(b), (c)와 같이 충격면이 인장을 받는 경우와 압축을 받는 경우를 구별해서 시험을 행했다. 피로시험은 축하중제어로 했으며 하중을 정현파 형상으로 편진 진폭시켜 시험편에 부하하였다. 하중비는 0.1로 했으며 피로시험의 주파수는 1.5Hz로 했다. 피로 굽힘시험에서는 시험편이 파괴되는 최대하중을 구하여 굽힘 응력을 계산하였고, 파괴굽힘 응력을 구할때는 시험편을 균질등방성으로 가정하였으며¹⁶⁾, 계산에서는 시험편의 폭과 판두께는 실측치를 이용해서 시험편의 치수오차의 영향을 제거했다.

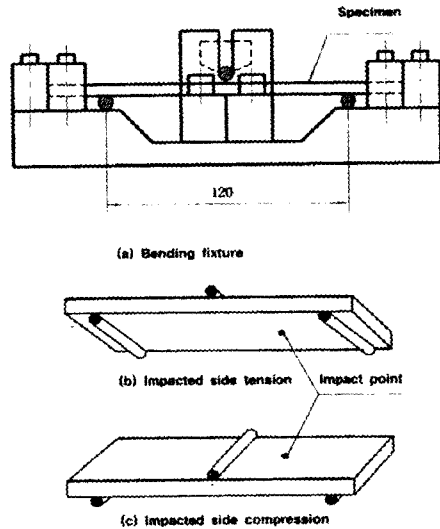


Fig. 4 Specimen supporting fixture for 3-point bending test

파괴 굽힘 응력 계산식은 다음과 같다.

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

$$\sigma = \frac{(PL/4)(d/2)}{I} = \frac{3PL}{2bd^2} \dots\dots\dots (17)$$

- 여기서 σ : 굽힘 응력(P_a)
- P : 파괴시의 최대하중(N)
- L : 스팬의 길이(m)
- b : 시험편의 폭(m)
- d : 시험편의 두께(m)
- I : 관성모우멘트(m^4) 이다.

그리고 시험편을 셋팅(setting)할 때는 시험편과 지지누름자, 하중 누름자의 사이에 테프론(teflon)을 끼워 누름자와 접촉하는 부분이 파괴하는 것을 방지했으며, 충격면이 인장인 경우와 압축인 경우를 구별해서 정적굽힘시험 및 피로굽힘시험을 행했고, 고온·고습하에서 흡습상태(0%, 0.2%, 0.7%, 1.5%)에 따라 수중에서 정적굽힘시험 및 피로굽힘시험을 행했다. Fig. 5는 고온·고습하에서의 3점굽힘 피로시험 개략도를 나타낸다. 또한, 고온·고습시험의 경우 흡습율을 가속화시키기 위해 고온·고습시험조건인 55°C의 증류수(비저항 $\rho > 50k\Omega \cdot m$)에 침적하여 일정시간 간격에서 시험편이 흡습평행상태에 도달할 때까지 흡습율을 측정했다. 시험전에 시험편내에 존재하는 습기를 제거하기 위해 시험편을 80°C에서 진공기(vacuum oven, Model 5831, 30 in Hg, Napco)내에 24시간 보관한 후 데시케이터(silica gel desiccator)내에서 냉각시켰다. 흡습량의 측정은 1/100,000g까지 측정가능한 전자저울로 정확히 계량하고 시험시 마다의 흡습상태의 중량을 계량하여 이들의 비를 백분율로 나타냈다. 또 흡습된 시험편을 수중에 침적한 상태에서 피로 굽힘시험을 실시하였으며 적층구성이 서로 다른 직교이방성 적층판 및 의사등방성 적층재 모두 수분 함유율이 약 0.2%, 0.7%, 1.5%일 때마다 3점굽힘 피로실험을 실시하였다.

특히 충격손상을 받은 CFRP 적층판은 모재크랙이 발생되는데, 4점굽힘시에는 순수굽힘상태이므로 전단력이 발생되지 않아 모재크랙에 의한 강도저하 현상을 고찰할 수 없어, 3점굽힘시험에 의해 충격손상을 받은 CFRP 적층판의 3점굽힘 피로강도를 평가하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 장에서는 적층구성이 서로 다른 CFRP 적층

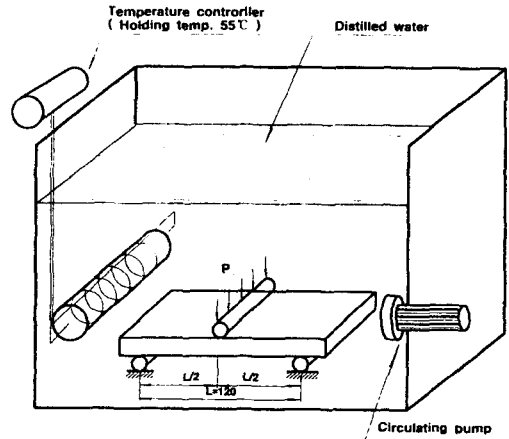


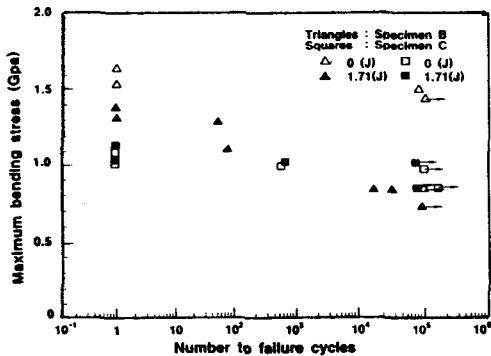
Fig. 5 Test arrangement of 3-point bending fatigue test under water

판의 흡습율의 크기와 잔류피로 굽힘강도 의 변화 관계를 고찰하고, 적층수가 같고 적층배향이 다른 직교·의사등방성 CFRP적층판에 충격손상을 가한 후 정적 및 3점 피로 굽힘실험을 행하여 충격손상을 받은 CFRP적층재의 굽힘피로 강도에 미치는 적층배향의 영향을 실험적으로 고찰하였다. 또한 고온·고습시험의 경우는 CFRP 적층시험편을 항온조에 넣어 흡습특성을 고찰한 후, 정적굽힘 강도 및 3점굽힘 피로실험을 행하였다.

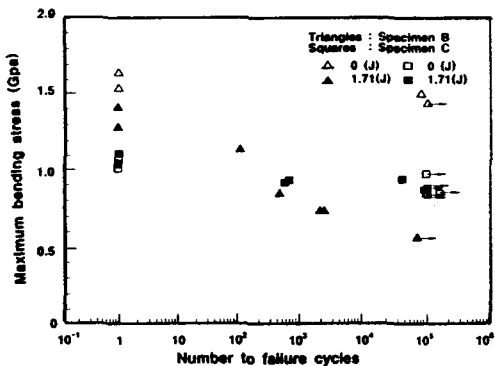
4.1 충격손상과 잔류피로 굽힘강도와와의 관계

Fig. 6는 CFRP 적층시험편 $B[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4]_s$ 와 시험편 $C[0^{\circ}_2/45^{\circ}_2/90^{\circ}_2/-45^{\circ}_2]_s$ 의 피로시험결과를 나타냈다. 종축은 최대굽힘응력, 횡축은 파괴까지의 반복수를 잡아 적층재의 S-N 선도로 나타냈으며 화살표는 미파괴를 나타낸다.

Fig. 6는 충격손상을 받은 적층수 및 매트릭스가 같고 적층배향이 다른 CFRP적층재의 잔류굽힘피로 시험결과를 충격면이 인장을 받는 경우와 충격면이 압축을 받는 경우를 구분하여 나타냈다. Fig. 6(a)로부터 무충격 시험편의 경우에 대해서는 직교이방성 시험편 B가 의사등방성 시험편 C보다 잔류굽힘강도는 크게 나타났지만, 시험편 B, C 모두 잔류굽힘피로강도는 그다지 저하지 않았다. 그러나 충격손상을 받은 경우, 직교이방성 시험편 B는 잔류굽힘피로강도가 급격하게 감소하나, 의사등방성 시험편 C는 시험편 B에 비해 잔류



(a) Impacted side tension



(b) Impacted side compression

Fig. 6 Residual fatigue bending strength of damaged specimens B, C

굽힘피로강도의 저하현상은 그다지 나타나지 않았다. 또한 Fig. 6(b)로부터 충격면이 압축을 받는 경우에 있어서도 충격면이 인장을 받는 경우와 같이 직교이방성 시험편 B가 의사등성 시험편 C보다 굽힘강도는 크나, 잔류피로굽힘강도는 의사등방성 시험편의 경우가 오히려 더 컸다. 특히, 충격손상을 받은 직교등방성인 시험편 B는 충격면이 인장을 받은 경우보다 충격면이 압축을 받은 경우가 잔류굽힘 피로강도의 저하현상 크게 나타났다. 이 원인은 직교이방성 시험편이 충격을 받은 경우 충격점부근에 생긴 모재크랙이 잔류굽힘 피로강도에 영향을 미치지 때문이라 생각되는데, 충격면이 압축을 받는 경우의 모재크랙의 개구점이 충격면이 인장을 받는 경우보다, 하중작용점으로부터 곡률반경이 작기 때문이라 생각된다.

4.2 고온·고습하에서의 강도거동

흡습량의 증가에 따라 CFRP 적층판의 적층구조의 차에 따른 흡습특성을 고찰하고 흡습특성이 잔류강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 CFRP 시험편을 55°C의 증류수에 침적하여 각 시험편의 흡습량의 크기에 따른 잔류굽힘 피로강도에 관해 고찰하였다.

메트릭스 및 적층수가 같은 직교이방성 및 의사등방성에 대하여 흡습거동을 관찰하였고, 흡습량의 증가에 따른 잔류강도의 저하관계 및 흡습에 의한 잔류굽힘 피로강도의 변화관계를 고찰하였다.

4.2.1 흡습 거동

적층수 및 메트릭스가 같은 직교이방성 및 의사등방성 적층판의 흡습거동에 관해 고찰한다. Fig. 7은 적층수가 각각 16매, 계면수가 2계면인 직교이방성 적층시험편 B $[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4]_{sym}$ 와 시험편 C $[0^{\circ}_2/45^{\circ}_2/90^{\circ}_2/-45^{\circ}_2]_{sym}$ 는 흡습거동을 나타냈다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 흡습시험 초기에는 시험편 B, C 모두 흡습량의 변화는 별로 나타나지 않으나, 시간이 경과함에 따라 시험편 B가 시험편 C보다 흡습량의 증가폭이 큼을 알 수 있다. 이는 계면수가 많은 시험편보다 계면수가 적은 시험편이 흡습이 쉽기 때문이라 생각된다.

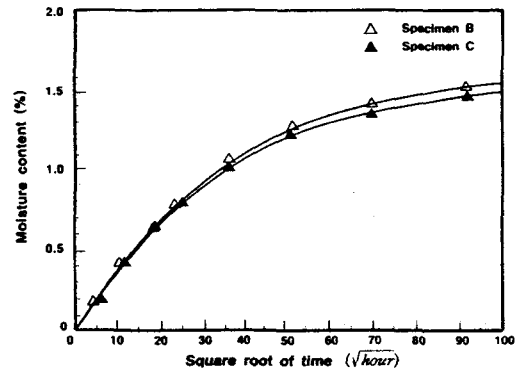


Fig. 7 Moisture content of specimens B, C as a function of time under the hygrothermals

각각의 시험편 별로 시간의 변화에 따른 수분 흡습율 $M(\%)$ 을 정식화 하기 위하여 Fig. 7에서의 실험데이터를 최소자승법으로 플로트한 결과 $M(\%) = \alpha + \beta \text{Ln}\sqrt{\text{hr}}$ 의 식이 가장 적절했다. Table 2에 각각의 시험편의 수분 흡습량 $M(\%)$ 을 정식화하기 위한 정수 α, β 의 값을 나타냈다.

Table 2 Constant values α , β of moisture content equation

Specimen	α	β
B	-0.64	0.47
C	-0.59	0.45

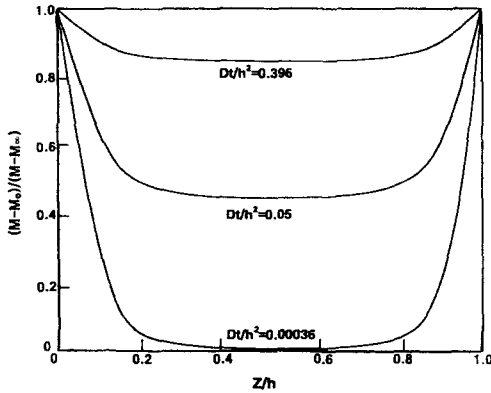


Fig. 8 Moisture profile as a function of time with the variations of nondimensional time for specimen B

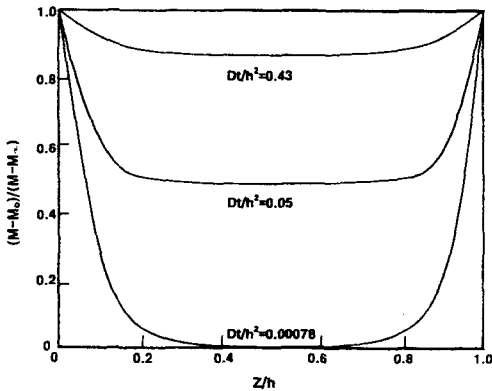


Fig. 9 Moisture profile as a function of time with the variations of nondimensional time for specimen C

Fig. 8~10는 직교·의사등방성 시험편 내부의 흡습진전상태를 나타낸 것으로 Fig. 8~9은 식 (7)을 Fig. 10는 식 (13)을 이용하여 각각 무차원하여 나타냈으며, 고온·고습실험의 데이터를 이용하였다. Fig. 8~10로 알 수 있는 바와 같이 직교·의사등방성 시험편사이에는 흡습초기에는 약간의 흡습진전량의 차이가 보이지만 흡습이 진전됨에 따라 양자간에는 큰 변화가 없었다. 따라서 의사·직교이방성 모두 흡습진전상태를 나타내는 흡습확산계

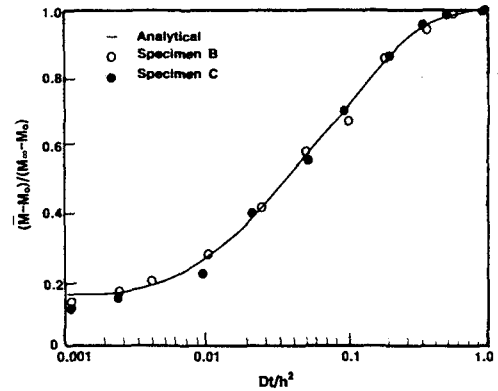


Fig. 10 Experimental correlation with the variations of nondimensional time

수를 구하는데 식 (16)의 적용이 타당함을 알 수 있었다.

따라서, CFRP 적층판의 적층구성의 차에 따른 수분흡습의 정도를 알아 보기 위하여 식 (16)에 흡습 실험데이터를 대입하여 확산계수를 구했다. 확산계수를 구할때는 흡습 실험시 초기의 직선 부분을 선정하여 식 (16)에 대입 하였으며, 본 연구에서는 시험시작 후 70시간과 180시간 사이의 데이터를 이용 하였다. Table 3에 적층구성이 다른 시험편의 확산계수를 나타냈다.

Table 3 Diffusion coefficient(D)

Symbols Types	Moisture time(t)		Moisture rate(M)		M _∞ (%)	Thickness (h)	D (mm ² /sec)
	t ₂	t ₁	M ₂	M ₁			
B	180	70	0.501	0.304	1.501	2.610	16.6×10 ⁻⁸
C	180	70	0.488	0.299	1.502	2.570	14.8×10 ⁻⁸

Table 3으로 부터 적층수 및 매트릭스가 같은 직교이방성 및 의사등방성 적층판의 흡습거동에 대해 나타냈다. 확산계수는 시험편 B가 시험편 C보다 약간 컸는데 이는 시간의 경과에 따른 흡습량의 측정결과로부터 알 수 있는 바와같이 계면수가 적은 직교이방성 시험편 B가 계면수가 많은 의사등방성 시험편 C보다 흡습속도가 빠르기 때문이라 사료된다.

4.2.2 흡습률과 잔류균형 피로강도와의 관계

적층수 및 매트릭스가 같은 직교·의사등방성 적층판에 대해 흡습량의 증가에 따른 파괴 균열응력 및 잔류균형 피로강도의 관계에 대해 고찰한다.

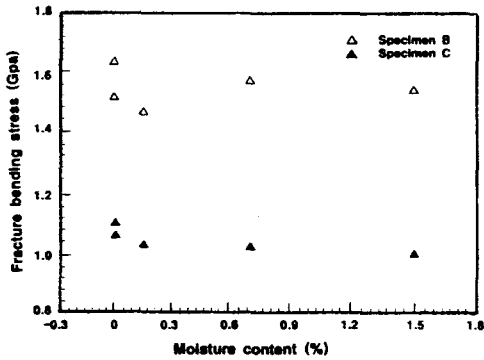


Fig. 11 Relation between fracture bending stress and moisture content of specimens B, C

무흡습상태에서는 Fig. 11으로 부터 알 수 있는 바와 같이 2계면인 시험편 B가 계면수가 6계면인 시험편 C보다 강도가 훨씬 컸으며 잔류강도는 낮았다. 특히, 흡습률이 약 0.2% 근방에서 직교이방성 적층재 시험편 B 및 의사동방성 적층재 시험편 C 모두 강도저하 현상이 크게 나타났다. 즉 흡습률이 0.2% 근방에서 잔류강도가 급격히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 12~13는 CFRP 적층시험편 B, C의 고온·고습하에서 흡습량(0%, 0.2%, 0.7%, 1.5%)에 따른 피로시험결과를 나타냈다. 종축은 최대굽힘 응력, 횡축은 파괴까지의 반복수를 잡아 적층재의 S-N 선도로 나타냈으며 화살표는 미파괴를 나타낸다.

Fig. 12~13는 적층수와 매트릭스가 같고 적층 배향이 다른 CFRP 적층시험편 B, C의 잔류굽힘 피로시험 결과를 흡습량에 따라 전체적으로 나타냈다. 무흡습상태에서는 시험편 B는 피로강도가 약 11%정도 감소하였지만, 시험편 C는 약 5%정도 저하현상을 나타내어 시험편 C가 B에 비하여 강도저하가 적음을 알 수 있었으며 무흡습상태와 약 0.2% 흡습된 시험편의 정적굽힘강도를 비교해보면 시험편 B는 약 10% 저하하였고, 시험편 C는 약 5% 저하하여 시험편 B가 강도저하가 크나, 반면에 잔류굽힘피로강도는 시험편 B보다 오히려 시험편 C의 경우가 저하현상이 뚜렷했다. 또한 무흡습 상태와 흡습량이 약 0.7%, 1.5%인 시험편의 정적굽힘강도를 비교해 보면 시험편 B는 약 3.8% 및 5.73%가 각각 저하하였고, 시험편 C는 6.73%, 10.55%가 저하하였다. 특히 흡습량이 약 0.

2%인 경우 굽힘피로강도는 시험편 C가 시험편 B에 비해 약 2배 정도 저하가 컸다. 이 원인은 무층격의 경우 시험편이 약 1.5%의 흡습률에 도달하는데 걸리는 시간이 직교이방성 시험편 B보다 의사동방성 시험편 C가 더 오래 걸리며, 반면에 고온·고습하에서 3점굽힘피로실험을 행할 경우 직교이방성시험편 B보다 의사동방성시험편 C가 섬유 배향을 따라 수지에 의해 빨리 흡습되기 때문이라 생각된다. 따라서 고온·고습하에서 수분확산이 정적굽힘강도 저하에 미치는 영향보다는 잔류굽힘피로강도에 보다 더 큰 영향이 미친다고 생각된다.

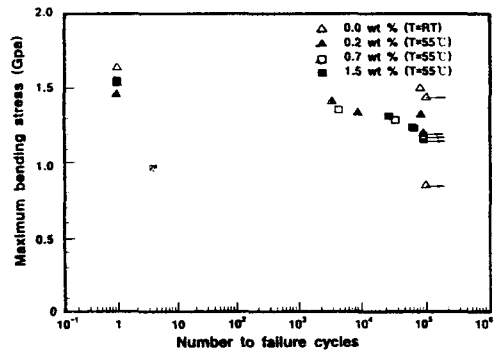


Fig. 12 Residual fatigue bending strength variations according to moisture conditions of specimen B

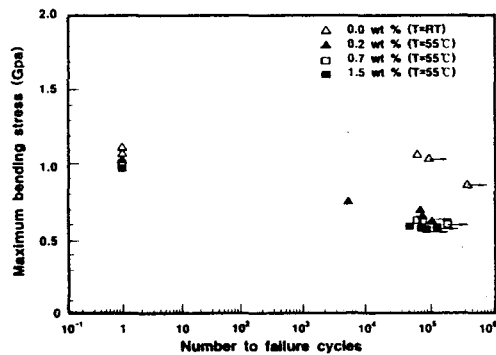


Fig. 13 Residual fatigue bending strength variations according to moisture conditions of specimen C

Table 4은 고온·고습하에서의 시험편의 흡습량에 따른 잔류피로굽힘강도를 나타냈으며, Fig. 14은 고온·고습상태에서 시험편 B, C의 흡습량에 따른 잔류굽힘피로강도를 나타냈다. Table 4 및 Fig. 14으로부터 직교이방성 시험편 B 보다 의사

등방성 시험편 C가 수분 함유량이 증가함에 따라 잔류굽힘피로강도가 더욱 감소함을 알 수 있다.

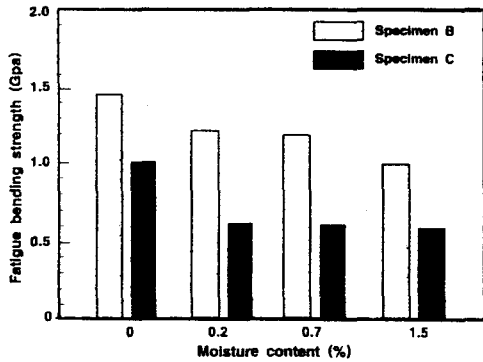


Fig. 14 Comparisons of residual bending fatigue strength with the variation of moisture content

Table 4 Comparisons of residual bending fatigue strength for specimens B, C under the hydrothermals

Moisture content (%)	0	0.2	0.7	1.5	Decreasing ratio* (%)
Specimens					
B	1.460 (Gpa)	1.215	1.196	1.162	20.41
C	1.050	0.606	0.601	0.592	43.62

* Decreasing ratio : the ratio of maximum residual fatigue strength decreasing over the residual fatigue strength of moisture weight 0%.

5. 결 론

메트릭스와 적층수가 같고 섬유배향방향이 다른 직교·의사등방성 CFRP 적층판에 충격손상을 가한 후 실온 및 열습하에서 CFRP 적층판을 정적·3점 굽힘피로실험을 행하여 열습효과가 CFRP 적층재의 굽힘피로강도 및 수분흡수특성에 미치는 영향에 관해 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 적층수와 메트릭스가 같은 직교이방성 CFRP 적층재 시험편 B $[0^{\circ}_2/90^{\circ}_2]_s$ 가 의사등방성 적층재 시험편 C $[0^{\circ}_2/45^{\circ}_2/90^{\circ}_2/-45^{\circ}_2]_s$ 보다 정적굽힘강도는 크나, 잔류굽힘 피로강도는 거의 같았다. 그러나 충격손상을 받은 경우에는 의사등방성 적층판이 직교이방성 적층판보다 잔류굽힘 피로강도가 높았다.
- 2) 직교·의사등방성 적층재 모두 충격면이 압축을

받은 경우가 인장을 받은 경우 보다 잔류피로 굽힘강도가 낮았으며, 특히 직교이방성 적층재가 저하현상이 현저하게 나타났다.

- 3) 적층수와 메트릭스가 같은 직교·의사등방성 적층재에 있어서 흡습률이 약 0.2% 근방에서 잔류굽힘강도가 급격히 저하하였고, 흡습률이 평형상태에 도달할때까지 큰 변화는 없었다.
- 4) 고온·고습하에서 직교이방성 적층재가 의사등방성 적층재보다 정적굽힘강도 및 굽힘피로강도가 높았으며, 충격손상보다는 열습효과가 잔류굽힘피로강도에 미치는 영향이 현저히 나타났다.

이 논문은 1996년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) 強化プラスチック協會編：新版FRP入門, p. 8, 1987.
- 2) G. Lubin : Handbook of Composites, Van Nostrand Reinhold, p. 147, 1982.
- 3) 炭素纖維懇談會便：炭素纖維の應力技術, シェムシ-社, p. 116, 1984.
- 4) T. Yagasaki and Y. Kimura, "The Effects of Surface Improvement by Ultraviolet Ray Irradiation on Fatigue Behavior of FRP", JSME (A), Vol. 60, No. 571, pp. 16~22, 1994.
- 5) 武田展雄, 複合材料の衝擊應答と破壊(I), 日本複合材料學會, Vol. 11, No. 4, pp. 151~161, 1985.
- 6) E. T. Camponeschi Jr., "Compression of Composite Materials : A Review", Composite Materials : Fatigue and Fracture(Third Volume), ASTM STP 1110, Philadelphia, pp. 550~578, 1991.
- 7) E. Demuts, R. S. Whithead, and R. B. Deo, "Assessment of Damage Tolerance in Composites, Comp. Struct. 4, pp. 45~58, 1985.
- 8) A. Rotem and H. G. Nelson, "Residual Strength of Composite Laminate Subjected to Tensile-Compressive Fatigue Loading",

- Journal of Composites Technology & Research, Vol. 12, No. 2, pp. 76~84, 1990.
- 9) D. S. Cairns and P. A. Lagace, "Residual Tensile Strength of Graphite/Epoxy and Kevlar/Epoxy Laminates with Impact Damage", Composite Materials : Testing and Design, Vol. 9, ASTM STP 1059, Philadelphia, pp. 48~63, 1990.
 - 10) J. S. Sirkis, C. C. Chang and B. T. Smith, "Low Velocity Impact of Optical Fiber Embedded Laminated Graphite/Epoxy Panels. Part I : Macro-Scale", Journal of Composite Materials, Vol. 28, No. 14, pp. 1347~1371, 1994.
 - 11) 梁仁榮, 松本 浩之, 足立忠晴, "高温環境下におけるCFRP積層板の衝撃損傷", 日本機械學會論文集(A卷), Vol. 60, No. 571, pp. 841~845, 1994.
 - 12) 横田 英, 平原 誠, "複合材料を適用した民間旅客機の水平尾翼構造", 日航空宇宙學會誌, Vol. 34, No. 394, pp. 608~618, 1986.
 - 13) W. Stephen and H. T. Hahn, : Introduction to Composite Materiale, Technomic Publishing C., Inc., pp. 329~340, 1980.
 - 14) O. Ishai and V. Arnon, "Instantaneous Effects of Internal Moisture Conditions on Strength of Glass-Fiber-Reinforced Plastics", ASTM, pp. 267~276, 1978.
 - 15) J. M. Whitney, I. M. Daniel and R. B. Pipes, "Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials" Prentice-Hall, Inc, pp. 250~255, 1984.
 - 16) L. E. Malvern, C. T. Sun and D. Liu, "Delamination Damage in central Impacts at subperforation speeds on Laminated Kevlar/EPOXY plates", ASTM. STP. 1012, pp. 387~405, 1989.