

◎ 論 文

# 흡습효과가 섬유강화 고분자 복합재료의 압축·굽힘 잔류강도에 미치는 영향

김 혁\* · 한 길 영\*\* · 이 동 기\*\*\* · 김 이 곤\*\*\*\* · 김 기 성\*\*\*\*\*

(1995년 8월 29일 접수)

## Effect of Moisture Absorption on the Compressive and the Bending Residual Strength in Fiber-Reinforced Polymeric Composites

Hyuk Kim\* · Gil-Young Han\*\* · Dong-Gi Lee\*\*\* · E-Gon Kim\*\*\*\* · Ki-Sung Kim\*\*\*\*\*

**Key Words** : Effect of Moisture Absorption(흡습효과), Compressive and Bending Residual Strength(압축·굽힘잔류강도), Fiber-Reinforced Polymeric Composites(섬유강화 고분자 복합재료), Unidirectional Fiber(일방향 섬유), Randomly Fiber(무배향 섬유), Moisture Content(습기함유율), Diffusion Coefficient(확산계수)

### Abstract

This paper deals with the residual strength characteristics of composite materials under the environment of high temperature and humidity. Two types of GFRP, one with unidirection and randomly oriented, are used to investigate the features of moisture absorption and the residual strength.

The results show that, when exposed longterms in high temperature and humidity, the randomly oriented composites is more stable than the unidirection one.

### 1. 서 론

거시적 관점의 복합재료란 형태와 화학조성이 다르고 서로 용해되지 않는 2개 이상의 이질·이형의 재료를 조합하여, 원래의 소재에서 얻을수

없는 뛰어난 특성을 얻을 수 있는 재료이다<sup>(1)</sup>. 이것은 높은 비강도(인장강도/밀도)와 비강성(탄성율/밀도)의 기계적 특성과 내식성, 내마멸성 및 경량성 등의 우수한 특성으로 인하여 우주항공 산업, 자동차 산업, 해양개발 분야에 이르기까지

\* 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 조선대학교 선박해양공학과 수송기계부품 공장자동화 연구센터

\*\*\* 조선대학교 정밀기계공학과 수송기계부품 공장자동화 연구센터

\*\*\*\* 국민대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

\*\*\*\*\* 인하대학교 공과대학 선박해양공학과

구조용 재료로서 사용이 급증하고 있다. 종래의 플라스틱 복합재료는 열경화성 수지를 모재로한 성형품이 대부분이었으나, 최근 환경보호와 자원의 유효활용 및 재생이용과 같은 문제가 세계적으로 문제화 되고 있어 소재자체를 보는 관점이 계속적으로 변화하고 있다.

각종 소재 중에서도 열가소성 수지를 모재로한 재료는 재생이용이 가능하고 최종 처리로서의 소각도 용이하기 때문에 그 활용방법이 주목되고 있다. 또한 이 재료는 비중이 작기 때문에 구조부품의 경량화에 유효하고 열가소성 수지계의 복합재료이므로 내식성 및 생산성이 뛰어나며 비강도, 비강성 등의 기계적 특성이 뛰어나 최근 자동차, 선박, 항공기 등의 연비개선과 경량화 추세에 힘입어 그 용도의 확대가 기대되고 있다. 또한, 일방향강화 등 필요한 방향으로 매트구조를 설계할 수 있어 효율이 좋은 고강도 재료를 만들 수 있기 때문에 단일재료로는 기대할 수 없는 여러 우수한 특성을 가지고 있다<sup>(2)</sup>.

습기는 고분자재료와 유리섬유의 강도를 감소시키며, 정적피로에 대해 민감하다. 흡습의 특성은 수분의 증기압에 의해 복합재료 표면을 통한 물분자의 이동과 섬유와 모재의 계면 및 모재의 기공 사이로의 모세관 현상에 의한 물분자의 이동으로 구분되고 온도, 습도가 지배적이다. 온도의 영향에 의한 흡습은 수분 및 모재의 열에너지 증가로 인한 복합재료 내의 분자구조 변화로 일어난다<sup>(3)</sup>. 따라서 흡습과 온도변화에 의해 복합재료는 강도 저하가 크게 나타나는 문제점이 있다.

Turker<sup>(4)</sup> 등은 해수 2000피트하에서 그래파이트/폴리머 복합재료의 습기흡수에 관하여, Shen<sup>(5)</sup> 등은 습기와 온도 변화에 따른 복합재료 인장강도에 관하여, Aveston<sup>(6)</sup> 등은 습기 환경하에서 GRP의 장기장(longterm)강도에 관해서, Springer<sup>(7)</sup> 등은 복합재료의 습기흡습과 탈습에 관한 연구에서 S2-글라스/에폭시 복합재료에 대해 1차 흡습을 행하여 건조시킨 후 다시 2차 흡습을 시켰을 때의 흡습율은 1차 흡습시의 흡습율과 일치하지 않고, 탈습 후 2차 흡습을 시켰을 때의 흡습율이 더 높게 나타났다고 하였다. 그러나 이와같은 흡습에 의한 압축, 굽힘강도 저하현상을 정량적으로

평가한 연구 결과는 별로 찾아보기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 섬유함유율이 서로 다른 일방향재와 랜덤재 GFRP 복합재료에 대하여 고온, 고습 환경하에서 장시간 노출 되었을 때 섬유함유율과 배향상태에 따른 수분흡수 특성, 흡습율의 크기와 흡습확산계수 및 잔류강도와의 관계를 실험적으로 고찰하여 어떠한 배향성을 갖는 GFRP 복합재료가 실제 사용환경하에서 잔류강도 특성이 우수한가를 실험적 관점에서 고찰하고자 한다.

## 2. 흡습 이론

섬유강화 고분자 복합재료가 고온, 고습 환경하에서 장시간 노출되었을 때 재료내에 포함된 수분 흡습율은 식(1)과 같다<sup>(7)</sup>.

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

여기서 M : 수분 흡습율(%)

$W_d$  : 흡습전 시험편 무게(g)

$W_m$  : 흡습후 시험편 무게(g)

흡습확산계수는 Fick의 법칙을 이용하여 식(2)로 구하였다<sup>(1)</sup>.

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

식(2)를 근사시키면 식(3)으로 된다.

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

식(3)으로부터 흡습확산계수(D)의 값을 구하면 식(4)와 같다.

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

- 여기서 h : 시험편 두께 (mm)
- M : 수분 흡습율
- M<sub>0</sub> : 초기 흡습율
- M<sub>∞</sub> : 포화 흡습율
- t : 시간 (sec)

식(1)과 식(4)로부터 섬유함유율과 섬유배향상태에 따른 흡습율의 크기와 흡습확산계수를 구한다.

### 3. 실험

본 연구에서 사용한 실험재료인 복합재료는 E-글라스/폴리프로필렌으로서 유리섬유와 모재의 비중량은 각각 2.55g/cm<sup>3</sup>, 0.9g/cm<sup>3</sup>이며 섬유함유율이 40wt%이고, 섬유가 강하게 엉켜져 있는 랜덤재(이하 R-40이라 한다)와 섬유함유율이 42wt%, 50wt%인 일방향재(이하 U-42, U-50이라 한다)의 3종류를 이용하였으며 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Mechanical properties of GFRP composites

Specimen	R-40	U-42	U-50
	40wt%	42wt%	50wt%
Tensile strength	64.75 MPa	92.2 MPa	216.58 MPa
Compressive strength	63.21 MPa	85.65 MPa	118.48 MPa
Bending strength	137.2 MPa	207.37 MPa	218.25 MPa

흡습은 수분 이외의 요소에 대한 영향을 적게하기 위하여 증류수를 이용하였고, 고온·고습하에서 시험편의 수분 흡습율은 식(1)로 구하였다. 흡습율의 측정에는 흡습개시 직전에 1/10,000(g)까지 측정이 가능한 분석용 정밀 전자저울을 이용해 실온상태에서 습기를 제거한 시험편의 중량을 측정하고, 매 측정 때 마다 흡습 시험편의 중량을 측정하여 이들의 비를 백분율로 나타내었다.

확산계수를 구하기 위하여 흡습 시험편의 무게를 측정하고, 식(1)에 따라 수분함유량의 백분율을 계산하여 이 값이 더 이상 증가되지 않을 때까지 계속 시험하였으며, 확산계수는 Fick의 법칙을 이용하여 식(4)로 구하였다.

흡습효과가 GFRP 복합재료의 잔류강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 일정량의 습기를 흡습한 GFRP 시험편에 대해 재료시험기(INSTRON, 4206-001)를 이용하여 압축, 굽힘시험에 의해 잔류강도를 구하였다.

GFRP 복합재료의 흡습율을 조사하기 전 GFRP 시험편이 완전 건조상태가 되도록 가공된 시험편을 진공 오븐에서 약 24시간 동안 유지시켰고, 건조된 시험편을 정밀 항온조(Size : 400×400×450mm, SEDA TESTING INSTRUMENT AB1701)를 이용하여 흡습을 시켰다.

정밀 항온조에는 열전대를 부착시키고 가열은 봉히터를 사용하였으며, 항온조 내의 온도구배를 막기 위하여 순환팬프를 설치하여 항온조 내부온도가 항상 일정하도록 하였다. 항온조 내의 시험편을 같은 위치의 수심에서 시험편을 세로로 세워 1열로 배열하였으며, 시험편 지지대는 온도와 습도에 의한 변형을 방지하기 위하여 스테인레스강을 이용해 제작하였다. 압축, 굽힘시험에서는 컴퓨터 에디터 컨트롤(GP-IB)을 이용해서 재료시험기를 컴퓨터로 제어하여 시험 후에 데이터를 컴퓨터에 전송하였다.

#### 3-1. 압축잔류강도 실험

흡습효과가 GFRP 복합재료의 압축잔류강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 일정량의 습기를 흡수한 R-40인 랜덤재와 U-42, U-50인 일방향재의 GFRP 시험편을 압축시험하여 압축잔류강도를 계산하였다.

Fig. 1은 본 실험에 이용한 압축 지그로서 ASTM D3410-87<sup>(8)</sup>, IITRI(Illinois Institute of Technology Research Institute)의 규격을 참조하여 제작하였다.

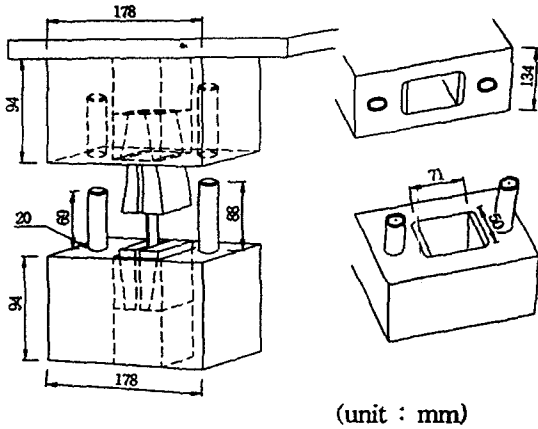


Fig. 1 Compression test fixture

한편, 시험편은 ASTM D3410-87 규격을 고려하여 Fig. 2와 같은 치수와 형상으로 제작하였다. 정밀 항온조의 내부온도는 실제 사용온도를 고려하여 50℃를 유지시켰고, 압축시험에서 구해진 시험 데이터는 하중-변위 데이터의 최대하중이며, 크로스 헤드 속도는 1.26mm/min로 하였다.

압축응력의 계산식은 식(5)와 같다.

$$\sigma_c = \frac{P}{bt} \tag{5}$$

- 여기서  $\sigma_c$  : 최대 압축강도(MPa)
- P : 최대 하중(N)
- b : 시험편 폭(mm)
- t : 시험편 두께(mm)

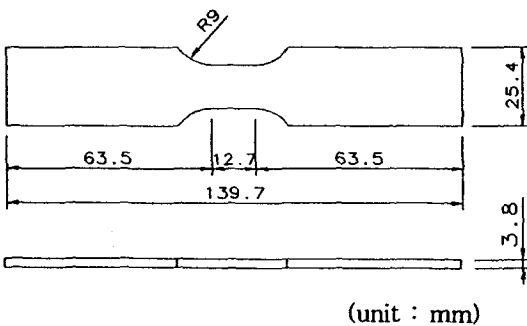


Fig. 2 Configuration of compression specimen

### 3-2. 굽힘잔류강도 실험

흡습효과가 GFRP 복합재료의 굽힘잔류강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 일정량의 습기를 흡수한 R-40인 랜덤재와 U-42, U-50인 일방향재의 GFRP 시험편을 3점 굽힘시험에 의하여 굽힘잔류강도를 계산하였다.

본 실험에 이용한 굽힘시험기는 ASTM D790M Method I(three-Point Loading)<sup>(9)</sup>의 규격을 참고하여 제작하였다. 또한, 시험편은 ASTM D790M Method I (three-point bending)의 규격으로, GFRP 복합판은 다이아몬드 커터를 이용하여 80×10mm의 직사각형으로 가공하였다. 일방향재의 경우 섬유 0° 방향이 길이방향과 일치하도록 하였으며, 정밀 항온조의 내부온도는 실제 사용온도를 고려하여 50℃를 유지시켰다.

굽힘시험에서 구해진 시험 데이터는 하중-변위 데이터의 최대하중이며, 크로스 헤드속도는 1.76 mm/min로 했다. 시험편은 균질등방성 보로 가정하여 계산했으며 파괴 굽힘응력의 계산식은 식(6)과 같다<sup>(10)</sup>.

$$\sigma_b = \frac{(PL/4)(h/2)}{I} = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{6}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \tag{7}$$

- 여기서  $\sigma_b$  : 파괴 굽힘응력(MPa)
- P : 최대하중(N)
- b : 시험편 폭(mm)
- L : 지점간 거리(mm)
- h : 시험편 두께(mm)
- I : 관성모멘트(mm<sup>4</sup>)

## 4. 결과 및 고찰

### 4-1. 흡습에 의한 압축잔류강도

흡습율의 증가에 따른 GFRP 복합재료의 압축잔류강도 특성을 고찰하기 위하여 시험편을 50℃의 증류수에 침적하여 시간의 변화에 따른 흡습율을 구하였다. 그리고 흡습율의 증가에 따른 복합재료의 섬유 배향상태와 섬유함유율의 차이에 따라서

흡습거동을 고찰하였고, 흡습율의 증가에 따른 압축잔류강도 특성을 고찰하였다.

Fig. 3은 시험편 R-40, U-42, U-50에 대한 시간경과에 따른 흡습거동을 나타낸 것으로 흡습초기에 3종류 시험편 모두가 비슷한 형태의 흡습율을 나타냈다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 R-40인 랜덤재는 U-42와 U-50재인 일방향재에 비해서 흡습율이 훨씬 높게 나타난 반면 U-42와 U-50재는 이보다 낮은 습기 평형 상태에 도달하였다.

또한, 50℃의 증류수에서 시간경과에 따른 흡습율 분포는 선형구간인 약 100시간까지의 경우 랜덤재인 R-40의 경우는  $y=0.054x$ , 일방향재인 U-42와 U-50은 각각  $y=0.046x$ ,  $y=0.040x$ 인 관계식을 얻었다. 여기서  $x$ 는 흡습시간이고  $y$ 는 흡습율이다.

그리고 Shirrel<sup>(11)</sup> 등에 따르면 탄소섬유/에폭시 적층판의 경우 24℃ 45%RH에서 포화흡습율은 약 0.6%, 75%RH의 경우 약 1%, 97%RH의 경우 약 1.4%의 실험결과를 나타내고 있다. Springer<sup>(12)</sup> 등의 연구결과에 의하면 E-글라스/폴리에스터의 섬유함유율이 50wt%인 경우 50% RH 23℃에서 포화흡습율은 약 0.1%, E-글라스/비닐에스터 50%RH 23℃에서 포화흡습율은 약 0.13%의 실험결과를 나타내고 있다.

열가소성 수지의 성능 일람표<sup>(13)</sup>에 의하면 유리섬유 함유율이 40wt%(모재:폴리프로필렌)인 경우 압축강도는 약 6.3~6.9kg/mm<sup>2</sup>, 굽힘강도는 7.4~15kg/mm<sup>2</sup>로 나타나 있다.

이와같이 본 연구의 실험 결과와 다른 연구자들의 결과를 비교하여 보면 실험 결과의 일부분이 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편, 포화 흡습율에 도달한 시간은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 랜덤재인 R-40은 약 160시간, 일방향재인 U-42는 약 220시간, U-50은 약 240시간이었으며, 포화흡습율은 랜덤재인 R-40재는 약 0.78%, 일방향재인 U-42는 약 0.52%, U-50은 약 0.49%이었다.

50℃ 증류수에서 흡습확산계수는 Fig. 3으로부터 선형적인 구간인  $\sqrt{t_1}$ 과  $\sqrt{t_2}$ 인 경우에 대하여 식(4)로부터 구한 결과를 Table 2에 나타내었다.

또한, Piggott<sup>(14)</sup> 등에 따르면 복합재료의 압축강도는 섬유의 종류, 섬유함유율, 모재의 항복강도 등에 따라서 다르며 케블라49 강화 복합재료의 압축강도는 인장강도보다 훨씬 낮다고 지적하고 있다.

탄소섬유 및 유리섬유 강화 복합재료의 압축강도는 인장강도보다 약간 낮고 보론섬유강화 복합재료는 인장강도와는 큰 차이가 없다는 연구 결과를 나타내고 있다.

Fig. 4는 랜덤재인 R-40, 일방향재인 U-42, U-50에 대한 흡습율과 압축잔류강도와의 관계를 비교해서 나타냈다. Fig. 4로부터 알 수 있는 바와 같이 R-40, U-42, U-50 모두 흡습율이 약 0.2% 부근에서 R-40의 경우가 약 23%, U-42의 경우가 약 28%, U-50의 경우가 약 30%의 급격한 압축강도 감소를 나타냈으며, 그 이후부터는 강도 감소가 아주 적었다. 이는 모재인 폴리프로필렌과 강화재인 유리섬유와의 함침성이 랜덤재인 R-40의 경우가 일방향재인 U-42 및 U-50의 경우보다

Table 2. Diffusion coefficient(D) of test specimen at 50℃ distilled water

Specimen	R-40	U-42	U-50
	40 wt%	42 wt%	50 wt%
Value of D	$390.5 \times 10^{-8}$ (mm <sup>2</sup> /s)	$243.4 \times 10^{-8}$ (mm <sup>2</sup> /s)	$24.7 \times 10^{-8}$ (mm <sup>2</sup> /s)

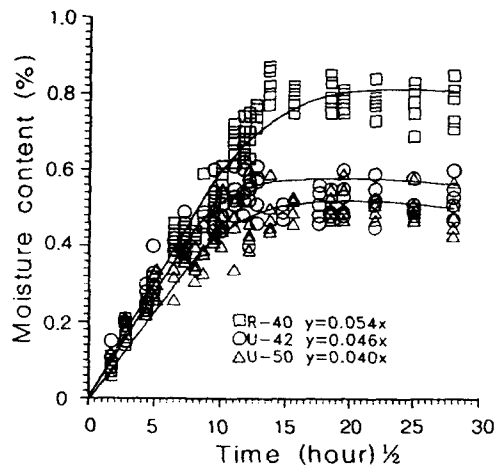


Fig. 3 Moisture content of specimens as a function of time at 50℃

양호하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5는 3종류의 시험편에 대한 흡습시간과 압축잔류강도와의 관계를 비교해서 나타냈다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 50°C의 증류수에서는 약 18시간 경과 후에 압축잔류강도의 감소가 심하게 나타났으며, 그 이후부터는 감소가 아주 적게 나타났다.

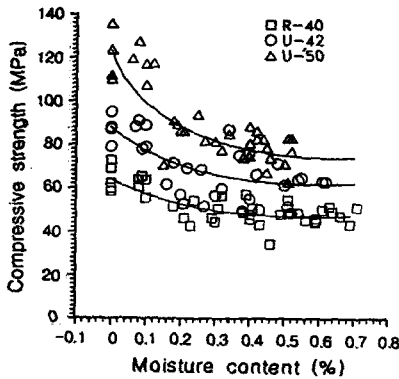


Fig. 4 Relation between compressive strength and moisture content of specimen

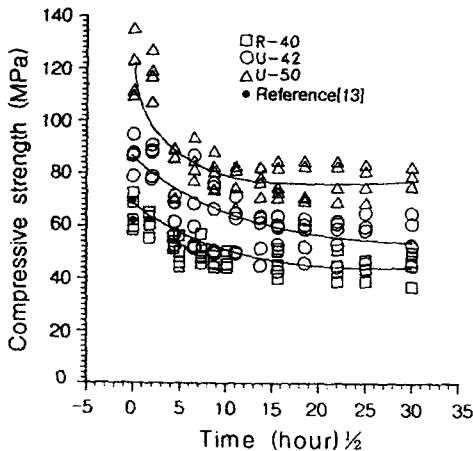


Fig. 5 Relation between compressive strength and moisture absorption time of the specimen

#### 4-2. 흡수에 의한 굽힘잔류강도

흡습량의 증가에 따라 GFRP 복합재료의 잔류 굽힘강도 저하관계를 고찰하기 위하여 시험편을 50°C의 증류수에 침적하여 시간의 변화에 따라 실험하였다. 흡습율의 변화관계에 대한 GFRP 복

합재료의 섬유 배향상태, 섬유함유율의 차이에 따른 흡습거동과 흡습율의 증가에 따른 잔류굽힘강도의 변화를 고찰하였다.

Fig. 6은 시험편 R-40, U-42, U-50에 대한 흡습율과 잔류굽힘강도와의 관계를 비교해서 나타냈다. Fig. 6으로부터 알 수 있는 바와 같이 랜덤재인 R-40은 흡습율이 약0.4%, 일방향재인 U-42, U-50은 약 0.5% 부근까지는 잔류굽힘강도가 크게 저하하였으며 그 이후부터는 강도저하가 거의 없이 일정하게됨을 보였다. 특히 흡습율이 0.4%까지 전체적인 잔류굽힘강도 저하율은 시험편 R-40이 가장 크게 나타났으며, U-42, U-50 순으로 작게 나타났다. 이는 섬유함유율이 높고 섬유 배향상태가 일방향재인 시험편이 섬유함유율이 낮고 섬유 배향상태가 랜덤한 랜덤재보다 잔류굽힘강도가 우수하기 때문인 것으로 생각된다.

한편 장<sup>(15)</sup>의 연구결과에 의하면 CFRP 적층재에서 흡습율과 잔류굽힘강도의 관계는 흡습율이 약 0.2% 근방에서 급격한 굽힘잔류강도 저하현상이 나타난다는 연구결과를 보여주고 있다.

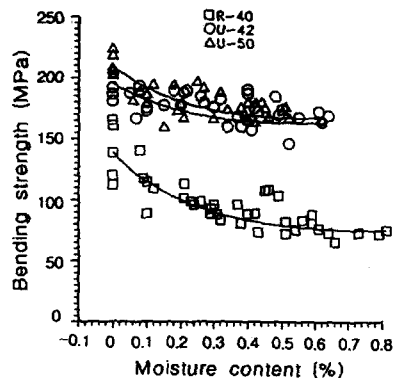


Fig. 6 Relation between bending strength and moisture content of specimen

Fig. 7은 시험편 R-40, U-42, U-50에 대한 흡습시간과 굽힘잔류강도와의 관계를 비교해서 나타냈다. Fig. 7로부터 알 수 있는 바와 같이 50°C의 증류수에서 흡습시간이 약120시간 까지는 잔류굽힘강도가 크게 감소하였으나 그 이후부터는 강도저하 없이 거의 일정하게 되는 경향을 나타냈다.

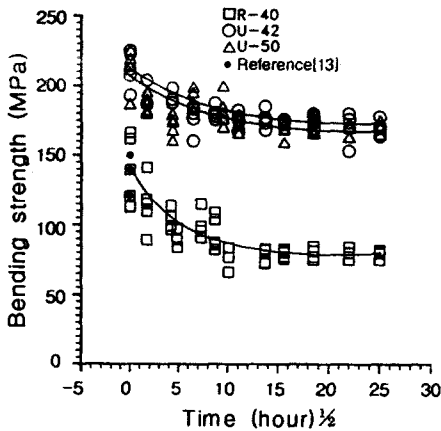


Fig. 7 Relation between bending strength and moisture absorption time of the specimen

### 5. 결 론

흡습효과가 섬유강화 고분자 복합재료의 잔류강도에 미치는 영향에 대해 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 흡습율과 잔류강도와의 관계에서 압축의 경우는 3종류 시험편 모두 흡습율이 약 0.2% 부근에서, 굽힘의 경우는 R-40은 약 0.4%에서 U-42 와 U-50은 약 0.5% 부근에서 강도저하가 크게 나타났으나, 그 이후부터는 강도저하가 거의 없이 일정하게 나타났다.
- (2) GFRP 복합재료의 시간 경과에 따른 흡습율 분포는 50℃ 증류수에서 선형구간인 약 100시간 까지의 경우 랜덤재인 R-40은  $y=0.054x$ , 일방향재인 U-42와 U-50은 각각  $y=0.046x$ ,  $y=0.040x$ 인 관계식을 얻었다( $x$ : 흡습시간,  $y$ : 흡습율).
- (3) GFRP 복합재료가 포화 흡습율에 도달한 시간은 50℃의 증류수에서 랜덤재인 R-40은 약 160시간, 일방향재인 U 42와 U-50은 각각 약 220시간, 240시간으로 나타났다.
- (4) GFRP 복합재료의 포화 흡습율은 50℃의 증류수에서 랜덤재인 R-40은 약 0.78%, 일방향재인 U-42, U-50은 각각 약 0.52%, 약 0.49%로서 흡습율이 가장 높은 것은 R-40이었다.

### 후 기

이 논문은 한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터의 1995년도 연구비의 지원에 의해 연구되었음.

### 참고 문헌

- 1)李大吉, “복합재료역학 및 가공론”, 성안당, pp. 165-168, 1993.
- 2) 森田幹郎, 金原動, 福田博, “複合材料”, 日刊工業新聞社, 1988.
- 3) anning. J. R., “Theory of Diffusion”, ASTM Seminar, pp. 5-23, 1972.
- 4) Turker, W. C. and Brown, R., “Moisture Absorption of Graphite/Polymer Composites under 2000 feet of Seawater”, J. of Composite Materials, vol.23, pp. 787-797, 1989.
- 5) Shen, C. H. and Springer, G. S., Effect of Moisture and Temperature on the Tensile Strength of Composite Materials, J. of Composite Materials., vol.2, pp. 2-16, 1976.
- 6) Aveston, J., Kelly, A. and Sillwood, J. M., “Longterm Strength of Glass Reinforced Plastics in wet Environments”, Advance in Composite Material, vol.1, pp. 556-568, 1980.
- 7) Shen, C. H. and Springer, G. S., “Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials”, J. of Composite Materials, Vol.10, pp. 2-20, 1976.
- 8) Mallic, P. K., “Fiber-reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design”, Marcel Decker, Inc. pp. 224-227, 1993.
- 9) Annual Book of ASTM Standards, “D790M-86 Standard Method for Flexural Properties of Unreinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”, pp. 290- 298, 1988.
- 10) Malvem, L. E., Sun, C. T. and Liu, D., “Delamination Damage in Central Impacts at Subperformation Speeds on Laminated

- Kevlar/Epoxy plates", ASTM STP-1012, pp. 387-405, 1989.
- 11) Shirrell, C. D., Halpin, J. C. and Browning, C. E., Moisture An Assessment of Its Impact on the Design of Resin Based Advanced Composites, NASA Technical Report, NASA- 44-X-3377, April, 1976.
  - 12) Springer, G. S., Sanders, B. A. and Tung, R. W., Environmental Effects on Glass Fiber Reinforced Polyester and Vinylester Composites, J. of Composite Material, Vol.14, pp. 297-310, 1980.
  - 13) 李國雄, 文洪國 共譯, "最新 플라스틱 技術", 성안당, 부록, 1994.
  - 14) Piggott, M. R. and Harris, B., "Factors Affecting the Compression Strength of Aligned Fiber Composites", Advanced in Composite Materials. vol.1, pp. 305-312, 1980.
  - 15) 張澤鉉, "熱濕效果가 CFRP 積層板의 衝擊損傷과 殘留強度에 미치는 影響에 관한 研究" 朝鮮大學校 大學院 碩士學位論文, 1993.