

● 論 文

열습효과가 GFRP의 잔류강도에 미치는 영향⁺

한길영* · 이동기** · 김이곤*** · 김기성****

(94년 12월 20일 접수)

The Influence of Hygrothermal Effect to Residual Strength GFRP Composites

G.Y.Han* · D.G.Lee** · E.G.Kim*** · K.S.Kim****

Key Words : Hygrothermal Effect(열습효과), Residual Strength(잔류강도), Unidirectional Fiber(일방향섬유), Randomly Oriented Fiber(무배향 섬유), Fiber content(섬유함유율), Moisture Content(습기함유율)

Abstract

The hygrothermal effect on three different types of Glass/Polypropylene was investigated under the environment of 40°C distilled water. The residual strength of Glass/Polypropylene with randomly oriented and fiber content of 40wt%(R40) was found stable under the moisture content of 0.2%. In this case, the maximum moisture content was 0.53%. On the other hand, Glass/Polypropylene with unidirection and 42wt%(U42) and 50wt%(U50) fiber content, respectively, showed the residual strength less stable than R40. However, the maximum moisture contents were 0.52% and 0.45% respectively.

1. 서 론

복합재료는 형태와 화학조성이 다르고 서로 용해되지 않는 두 가지 이상의 성질이 다른 물질이 혼합되어 원래의 소재보다 뛰어난 특성을 얻을 수 있는 재료이다. 이것은 높은 비강도(인장강도/밀도)와 비강성(탄성율/밀도)의 기계적 특성과 내

식성, 내마멸성 및 경량성 등의 우수한 특성으로 인하여 우주항공 산업, 자동차 산업, 해양개발 분야에 이르기까지 구조용 재료로서 사용이 급증하고 있다.

종래의 플라스틱 복합재료는 열경화성 수지를 모재로한 성형품이 대부분이었으나 재생문제, 폐기물 처리 및 환경라운드(G.R)가 강조되는 현상

+ 이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

* 정희원, 조선대학교 선박해양공학과

** 조선대학교 정밀기계공학과

*** 국민대학교 기계설계학과

**** 인하대학교 선박해양공학과

상황에서 소재자체를 보는 관점이 계속적으로 변화하고 있다.¹⁾

최근에는 각종 재료 중에서도 이들 재료에 대응하는 플라스틱 재료로서 고성능, 고기능, 성형성이 뛰어난 열가소성 수지를 모재로 하고 유리섬유를 강화제로한 섬유강화 고분자 복합재료가 대두되고 있다. 이 재료는 비중이 작기 때문에 구조부품의 경량화에 유효하고 수지계의 복합재료이므로 내식성 및 생산성이 뛰어나며, 또한 열가소성 수지이므로 재생이 가능하고 최종처리로서 조각도 용이하기 때문에 여러 산업분야에서 각광을 받고 있다.²⁾

이러한 복합재료의 유용한 특성들이 장시간 주위환경에 놓여 있어도 충분히 유지되어야 하지만 온도, 습도, 압력 등과 같은 환경적 요인으로 수분 및 습기가 복합재료의 계면 특성 및 기계적 성질을 저하시키며, 특히 열습에 의해 적층재는 강도저하가 크게 나타나는 문제점이 있다.

Ma³⁾ 등은 충격을 받은 CFRP 적층재가 고온, 고습 분위기에 노출될 때 잔류강도 저하에 대해서, Lo⁴⁾ 등은 복합판의 흡습에 의한 팽창거동 및 확산에 관한 연구에 관하여, Shen⁵⁾ 등은 복합재료의 습기흡습과 탈습에 관한 연구에서 S2·Glass/Epoxy 복합재에 대해 1차 흡습을 행하여 건조시킨 후 다시 2차 흡습시켰을 때의 흡수율은 1차 흡습을 시켰을 때의 흡습율과 일치하지 않고, 탈습 후 2차 흡습을 시켰을 때의 흡습율이 더 높게 나타났다고 하였다. 그러나 이와 같은 열습에 의한 강도저하 현상을 정량적으로 평가한 연구 결과는 별로 찾아보기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 섬유함유율이 서로 다른 일방향(-方向)재와 랜덤재 GFRP 복합재료에 대하여 고온, 고습 환경하에서 장시간 노출되었을 때 섬유함유율과 배향상태에 따른 수분흡수 특성, 흡습율의 크기와 흡습확산계수 및 잔류강도와의 관계를 실험적으로 고찰하여 어떠한 배향성을 갖는 GFRP 재가 실제 사용환경하에서 잔류강도 특성이 강한가를 실험적 관점에서 규명하고자 한다.

2. 흡습율 및 확산계수

고온, 고습하에서 시험편의 수분 흡습율은 다음 식과 같다.⁶⁾

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

여기서 M : 수분 흡습율(%)

W_d : 흡습전의 시험편 무게(g)

W_d : 흡습후의 시험편 무게(g)

흡습은 수분 이외의 요소에 대한 영향을 적게 하기 위하여 증류수를 이용하였다. 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 흡습시험편의 중량을 측정하여 이들의 비를 백분율로 나타냈다.

확산계수를 구하기 위하여 흡습시험편의 무게를 측정하고 식(1)에 따라 수분함유량의 백분율을 계산하여 이 값이 더 이상 증가되지 않을 때까지 계속 시험하였다. 이 확산계수는 Fick의 법칙을 이용하여 다음 식으로 구하였다.^{4),7),8)}

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

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 확산계수(D)값을 구하면 다음식과 같다.^{9),10)}

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

여기서 h : 수분 흡수율(%)
 W : 수분 흡수율
 W_0 : 초기 흡수율
 W_∞ : 초기 흡수율
 t : 시간(sec)

3. 실험

본 연구에서 사용한 실험재료인 GFRP 복합판 (모재 : 폴리프로필렌, 강화재 : 유리 장섬유)은 시판되고 있는 미국 AZDEL사 시이트(섬유함유율 : 40wt, 장섬유는 서로 강하게 엉켜져 있음, 이하 R-40이라 한다)와 일본 NSG 시이트(섬유함유율 : 42wt%, 50wt%, 일방향 시이트임, 이하 각각 U-42, U-50이라 한다)의 3종류를 이용하였다.

GFRP의 잔류강도를 측정하기 위하여 시이트를 250mm(폭)×300mm(길이)×3.8mm(두께)의 직사각형판으로 절단한 다음에 다이아몬드 휠톱을 사용하여 인장시험편을 제작하였다.

열습효과가 GFRP 복합재료의 잔류강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 일정량의 습기를 흡수한 GFRP 시험편에 대해 재료시험기(INSTRON, 4206-001)를 이용하여 인장시험에 의해 잔류강도를 구하였다.

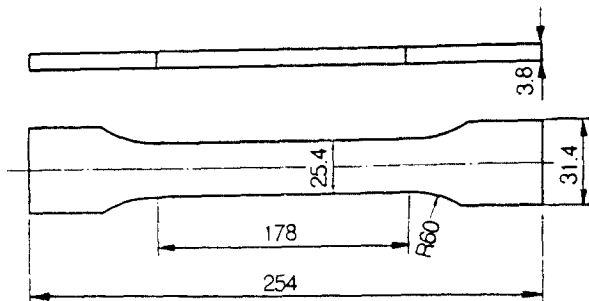


Fig. 1 Configuration of test specimen (unit : mm)

여기서 재료시험기의 크로스 헤드속도는 1mm/min의 일정변위 속도로 하였다. 인장시험편에 탭을 부착하면 흡습시 이중재료가 되어 정확한 흡습

의 측정이 어렵고, 판 시험편으로 제작하였을 경우 인장시험 때 그립(grip)부분이 파괴되어 정확한 강도측정이 어렵기 때문에, ASTM D3039규격을 고려하여 Fig. 1과 같은 치수와 형상으로 제작하였으며 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Mechanical properties.

Specimen	AZDEL Sheet	NSG Sheet	
	40wt%	42wt%	50wt%
	R-40	U-42	U-50
Tensile strength	64.75MPa	92.2MPa	216.58MPa

GFRP 복합재의 흡수율을 조사하기 전에 GFRP 시험편이 완전 건조상태가 되도록 하기 위해 가공된 시험편을 진공 오븐에서 약 24시간 동안 유지시켰고, 건조된 시험편으로 정밀 항온조(Size : 40×400×400×450mm, SEDAE TESTING INSTRUMENT AB1701)를 이용하여 흡수시켰다. 정밀 항온조의 내부온도는 실제사용에 적용될 온도를 고려하여 40℃를 유지시켰고, 정밀 항온조에는 열전대를 부착시키고 가열은 봉히터를 사용하였다. 항온조 내의 온도구배를 막기 위하여 순환펌프를 설치하여 항온조 내부온도가 항상 일정하도록 하였다.

항온조 내의 시험편을 Fig. 2와 같이 정밀항온조 내에 같은 위치의 수심에서 시험편을 세로로 세워 1열로 배열하였으며, 시험편 지지대는 온도와 습도에 의한 변형을 방지 하기 위하여 스테인레스 강을 이용해 제작하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 시험편 R-40, U-42, U-50에 대한 시간경과에 따른 흡습거동을 나타낸 것으로 3종류 시험편 모두가 초기에는 비슷한 형태의 흡수율을 나타냈다. 그러나 시간이 경과함에 따라 섬유함유율이 유사한 R-40, U-42는 거의 비슷한 습기평형상태에 도달하였으나, 섬유함유율이 높은 U-50은 이보다 낮은 습기형평상태에 도달하였다. 이는 강

화재인 유리섬유는 습기를 거의 흡수하지 않고 모재인 폴리프로필렌이 습기를 흡수하기 때문에 섬유함유율이 높을수록 흡습율이 낮게 나타났다고 생각되며, 섬유함유율이 같을 경우 섬유의 배향상태와는 무관하였다.

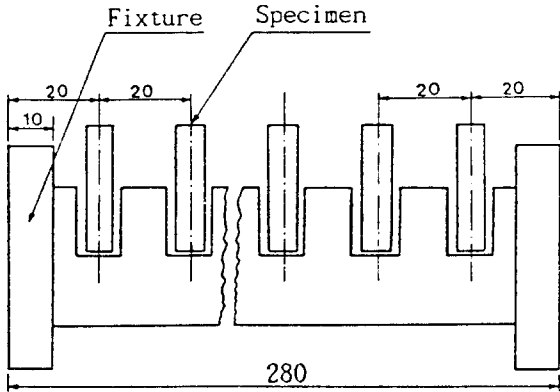


Fig. 2 Amangement of specimens (unit : mm)

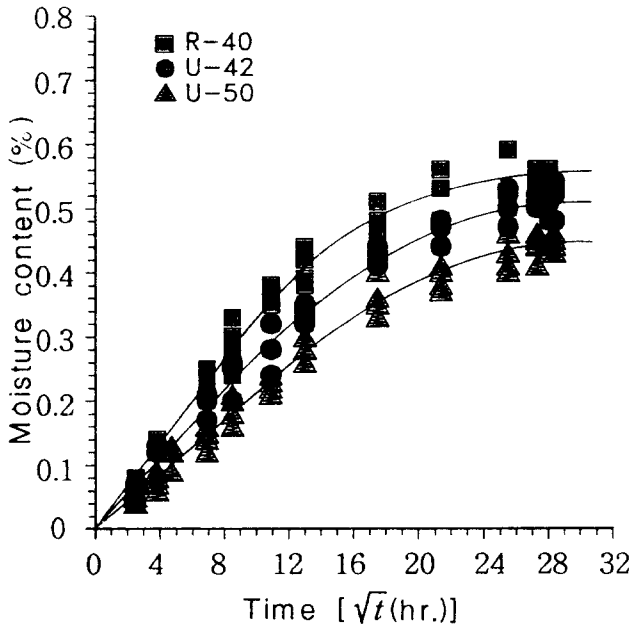


Fig. 3 Moisture content of specimens as a function of time

열가소성 수지의 성능 일람표¹¹⁾에 의하면 유리섬유함유율이 20wt%(모재 : 폴리프로필렌)인 경우 24시간 경과 후에 흡습율은 0.09~0.1%로 나타나 있으며, Lo¹¹⁾ 등의 실험결과에 의하면 S2-Glass/Epoxy의 포화 흡습율은 75°C/75% RH에서 약 2.47%(약 225시간 경과), 75%의 물에서 약 5.5%(약 730시간 경과)의 실험 결과를 보여주고 있다.

Ma³⁾ 등의 연구결과에 의하면 충격력을 받은 CERP 적층재의 경우 85°C 물에서의 굽힘 잔류강도는 흡습율이 0.2%에서 급격한 강도저하를 나타냈으며, 0.2%를 넘어서면서 부터는 강도저하가 거의 없었다는 실험결과를 보여주고 있다.

열가소성 수지의 특성¹²⁾을 참조하면 유리섬유함유율이 20wt%(모재 : 폴리프로필렌)인 경우 인장강도 5.6kg/mm², 굽힘강도 7kg/mm²로 나타나 있으며, 열가소성 수지의 성능 일람표¹¹⁾에 의하면 유리섬유함유율이 40wt%(모재 : 폴리프로필렌)인 경우 인장강도 6~11kg/mm², 압축강도 6.3%~6.9%/mm², 굽힘강도 7.4~15kg/mm²로 나타나 있다.

이와 같이 본 연구의 실험결과와 다른 연구자들의 결과를 비교하여 보면 실험결과와 일부가 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편, 시험편에 습기가 더 이상 흡수되지 않는 습기평형상태인 포화 흡습율에 도달한 시간은 Fig. 3에서 약 740시간이었으며, 포화 흡습율은 랜덤재인 R-40은 약 0.53%, 일방향재인 U-42는 약 0.52%, U-50은 약 0.45%이었다. 흡습확산계수는 Fig. 3으로부터 선형적인 구간인 $\sqrt{t_1}$ 과 $\sqrt{t_2}$ 인 경우에 대하여 식(4)로부터 구한 결과를 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Diffusion coefficient(D) of test specimen

Specimen	AZDEL Sheet		NSG Sheet	
	40wt%	42wt%	50wt%	
	R-40	U-42	U-50	
Value of D	39.4×10^{-8} (mm ² /s)	24.8×10^{-8} (mm ² /s)	18.1×10^{-8} (mm ² /s)	

Fig. 4는 시험편 R-40, U-42, U-50에 대한 흡수율과 인장강도와의 관계를 비교해서 나타냈다. Fig. 4로 부터 알 수 있는 바와 같이 흡수율이 약 0.2% 근방에서 급격한 강도저하를 나타냈으며 0.2%를 넘어서면서 부터는 강도저하가 아주 적었다. 특히, 흡수율이 약 0.2%까지 전체적인 강도 저하율은 시험편 R-40이 가장 적었다. 이는 모재인 폴리프로필렌과 강화재인 유리섬유와의 합침성이 랜덤체인 R-40의 경우가 일방향체인 U-42 및 U-50의 경우보다 양호하기 때문인 것으로 생각된다.

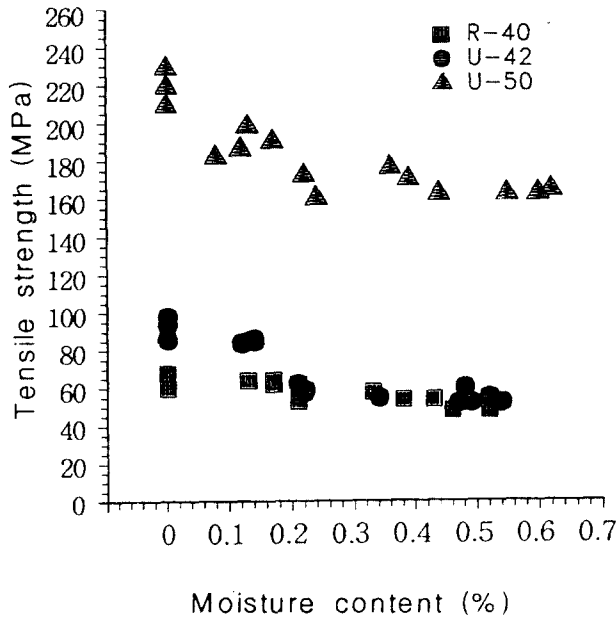


Fig. 4 Relation between tensile strength and moisture content of the specimens.

Fig. 5는 시험편 R-40, U-42, U-50에 대한 시간과 인장강도와의 관계를 비교해서 나타냈다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 40°C의 증류수 분위기에서 약 48시간 경과 후 일방향체인 U-42와 U-50은 급격한 강도저하를 나타내었으나, 랜덤체인

R-40은 강도저하가 비교적 완만한 경향을 나타냈다.

한편, 흡습시간에 따른 잔류강도 저하에 관한 연구와 섬유배향상태가 흡수율 및 잔류강도 저하에 미치는 영향에 관한 연구결과는 찾아보기 어렵기 때문에 이점에 대한 연구가 계속 이루어져야 될 것으로 생각된다.

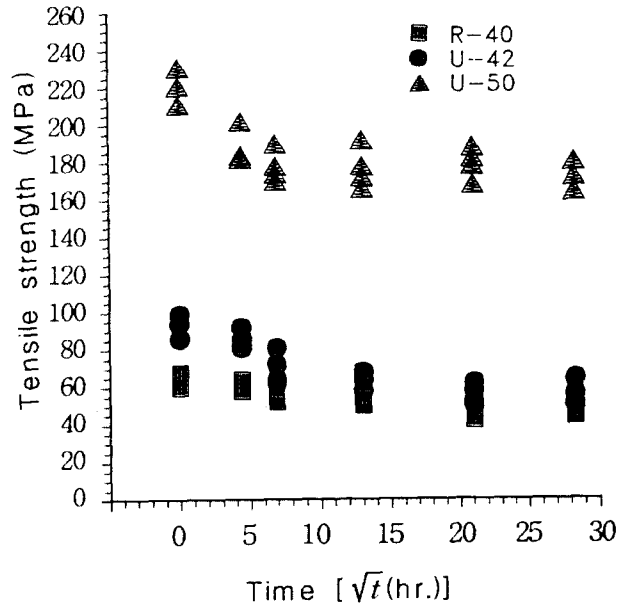


Fig. 5 Relation between tensile strength and moisture absorption time of the specimens.

5. 결 론

열습효과가 섬유강화 고분자 복합재의 잔류강도에 미치는 영향에 대해 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 흡수율과 잔류강도와의 관계는 흡수율이 약 0.2% 근방에서 급격한 강도 저하현상이 나타났으며, 랜덤체인 R-40의 경우가 가장 낮은 강도 저하율을 보였다.
- (2) 흡수율은 섬유함유율이 높을수록 낮고, 섬유

함유율이 같은 경우에는 섬유의 배향상태와는 무관함을 나타냈다.

(3) 복합재의 각 시험편 모두 포화 흡습율에 도달한 시간은 약 740시간이었으며, 포화흡습율은 랜덤재인 R-40의 경우 약 0.53%, 일방향재인 U-42는 약 0.52%, U-50은 약 0.45%로서 흡습율이 가장 큰 것은 R-40이었다.

(4) 확산계수값은 섬유함유율이 낮은 랜덤재인 R-40이 가장 크게 나타났다.

참고 문헌

- 1) 엄문광, 이우일, "복합재료와 성형공정", 대한기계학회지, Vol.34, No.5, pp. 310~325, 1994.
- 2) 이동기, "섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 분리·배향의 상관관계에 관한 연구", 국민대학교, 박사학위논문, 1992.
- 3) C. C. M. MA, Y. H. HONG, and M. J. CHANG. "Hygrothermal Effect on the PEEK/CF and PPS/CF under Impact Loading (I)", ANTEC, pp. 2092~2096, 1991.
- 4) S. Y. Lo, H. t. Hahn, T. T. Chiao, "Swelling of KEVLAR 49/Epoxy and S2-Glass/Epoxy Composites", Progress in Science and Engineering of Composites, pp. 987~1000, 1982.
- 5) C. H. Shen and G. S. Springre, "Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials", J. of Composite Materials, Vol. 10, pp. 2~20, 1975.
- 6) Y. Nakanishi and A. Shindo, "Detrioration of CFRP and GFRP in Salt Water", Progress in science and Engineering of Composites, ICCM-IV, pp. 1009~1016.
- 7) K. Mallick, "Fiber Reinforced Composites", Marcal Dekker, Inc., pp. 303~313, 1993.
- 8) Stephen W. Tsai and H. Thomas Han, "Introduction to Composite Materials", Technomic Publishing Company, pp. 329~342, 1980.
- 9) J. Crank, Mathematics of Diffusion, Second Edition, Oxford University Press, 1975.
- 10) J. M. Whitney, "Moisture Diffusion in Fiber Reinforced Composites", Proceedings of the Second International Conference on Composite Materials, The Metallurgical Society of AIME, pp. 1584~1601, 1978.
- 11) 李國雄, 文洪國 共譯, "最新 機械材料學", 普文堂, pp. 417~426, 1995.
- 12) 朴煥奎, 洪錫柱, 朱鉉均 共著, "最新 機械材料學", 普文堂, pp. 417~426, 1995.