

E-Glass/Polyester 복합재료의 피로균열성장거동에 미치는 흡습의 영향

김연직* · 권일현** · 임재규*** · 정세희****

*전북대학원 기계공학과

**전북대학원 정밀기계공학과

***전북대학교 기계설계학과

****전북대학교 정밀기계공학과

Effect of Water Absorption on Fatigue Crack Growth Behavior of E-Glass/Polyester Composite

Kim Yon-Jig* · Kweon Il-Hyun** · Lim Jae-Kyoo*** and Chung Se-Hi****

*Dept. of Mech. Eng., Graduate School of Chonbuk National Univ

**Dept. of precision Mech. Eng., Graduate School of Chonbuk National Univ

***Dept. of Mech. Design, Chonbuk National Univ

****Dept. of precision Mech. Eng., Chonbuk National Univ

초 록 GFRP 복합재료의 피로거동은 하중형식, 재질 및 섬유 강화구조, 환경적인 인자들의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 GFRP의 피로거동에 미치는 증류수 흡습의 영향을 알아보기 위해 chopped strand glass mat 강화 불포화 polyester 수지 복합재료의 피로특성을 조사하였다. 피로균열은 건조재와 흡습재 모두 피로 cycle초기에 발생하며 그 후 균열성장이 점차 둔화되는 영역과 가속되는 영역으로 나뉘어졌다. 또한 증류수의 흡습은 섬유와 기지재 사이의 결합력을 저하시키며 그로 인해 균열성장방향에 수직인곳에서의 fiber pull-out 발생과 균열성장방향에 있는 섬유들에서의 debonding이 증가하여 피로강도가 저하하였다.

Abstract This paper deals with the fatigue properties of chopped strand glass mat/polyester composite to understand the effect of water absorption on fatigue behavior of GFRP. The fatigue crack in the both no water and a water absorption materials initiated at the initial of cycle. Thereafter, it was divided with two regions that one decreased with the crack extension and the other increased with the crack extension. The absorption of distilled water degrades the bond strength between fiber and matrix, thereby the tendency of fiber pull-out is increased in perpendicular to crack growth direction and the debonding of fibers increased to the place which is parallel to crack growth direction. Therefore, the reduction of fatigue strength was caused by these factors.

1. 서 론

섬유강화 플라스틱(Fiber Reinforced Plastic:FRP)중 가장 먼저 개발된 유리섬유강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic:GFRP)은 각종 산업전반에 걸쳐 금속에 대한 대체재료로서의 기능을 훌륭히 수행하고 있다.

최근에는 후발 선진 복합재료의 등장과 함께 그의 사용영역이 다소 축소되는 듯한 경향

이 있기는 하지만 우주항공분야에 있어서 과학위성용 안테나와 위성방송수신용 지상안테나, 항공기의 레이돔(Radome)등에 적용되고 있으며, 특히 경량성과 내구성이 우수하고 설계변경 및 보수유지, 작업성등이 용이한 점으로 인해 각종 선박을 비롯한 해양공학분야에서 GFRP가 차지하는 비중은 대단히 크다¹⁻²⁾.

GFRP의 특성은 파괴직전까지 영구변형이 극히 작고, 아주 크게 변형시켜도 외력을 제

거하면 거의 원래의 형태로 복원하는 성질을 가지고 있어서 수류의 영향을 크게 받는 해양 구조물에의 적용은 매우 적절하다³⁾

한편 복합재료구조물에 있어서 기지재료와 강화섬유사이의 결합상태는 구조물의 성능에 큰 영향을 미치게 되는데, 물은 섬유와 수지사이의 계면결합력을 떨어뜨리며⁴⁾ 복합재료의 강성(Stiffness)과 강도를 저하시키는 것으로 알려져 있다⁵⁾. 또한 유기 matrix복합재료의 수중피로수명은 섬유, 섬유와 수지사이의 계면, 수지등에서의 가수분해반응에 대한 안정성에 의해 크게 영향을 받게 되는데⁶⁾ Romans등은 GFRP의 피로특성을 결정하는데 있어서 기지재성분의 중요성에 대해 언급하였으며 물과 동적하중이 조합될때 보통 정적응력에 대한 손상의 10~100배까지 피로손상이 가속됨을 보였다⁷⁾.

결국 각종 구조물에 적용되는 GFRP가 불환경에 노출된 상태로 수압에 의한 피로하중을 받게되는 경우 흡습상태에 따른 피로균열성장거동의 변화는 대단히 중요하며 그에 대한 올바른 해석을 통해 구조물설계에 있어서 안전성과 신뢰성을 확보할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 가장 기본적인 복합재료 제작방법인 수적법(Hand Lay Up:HLU)⁸⁾을 이용하여, 단 섬유포(Chopped Strand Mat:CSM)형태의 유리섬유(E-glass)를 내식성이 좋은 불포화 폴리에스테르 수지에 강화시킨 복합적층판을 대상으로 건조재와 흡습재에 대한 피로수명 및 피로균열성장거동을 관찰하고 파면관찰을 통하여 그의 피로특성을 검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에서는 기지재료로서 기계적성질이 우수하며 내식성이 좋은 Vinylester type 액상 불포화 폴리에스테르 수지인 Vinylester type 에폭시 아크릴레이트 액상수지(Epoxy acrylate:Stylene monomer = 55:45(Vol.%))를 사용하였으며 강화섬유로는 표면에 실란(Silane) 집속제를 처리한 CSM형 E-glass fiber를 이용하였다. 유리섬유의 평균직경은 약 11 μ m였으며 그 조성과 기계적성질을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of E-glass fiber.

(a) Composition(wt.%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	CaO, MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	F ₂
55.2	14.8	7.3	22.0	0.3	0.2	0.3	0.3

(b) Mechanical properties(25 $^{\circ}$ C)

Filament tensile strength(Kgf/mm ²)	Strand tensile strength(Kgf/mm ²)	Coefficient of thermal expansion(10 ⁻⁶ / $^{\circ}$ C)	Young's modulus(Kgf/mm ²)
370	225	5	7700

GFRP의 제작은 수적법을 이용하여 CSM형 유리섬유포 4장과 폴리에스테르수지를 교대로 적층하였으며 상하면에 표면섬유포(Surface Mat)를 각 1장씩 적층하였다. 한편 수지의 경화시약은 3액형으로 MEKPO(Methyl Ethyl Ketone Peroxide), Co-octoate(8%) 및 DMA(D-methyl aniline)(5% in Xylene)를 사용하였다. 이상과 같이 적층한 GFRP판재를 약 3.25kPa의 압력하에서 24시간동안 상온경화 시킨 후 대기압하에서 120 $^{\circ}$ C의 온도로 2 시간동안 후 경화시켜 두께 3.2mm의 판재를

얻었다. 이때 유리섬유의 함유량은 30-35wt.%였다.

실험에 제공된 피로시험편은 제작된 GFRP 판재로부터 두께가 3.2mm로 균일한 부분을 JIS K 7119⁹⁾ 규격에 따라 CNC자동밀링으로 기계가공 하였으며 두께 0.14mm의 wheel cutter를 이용하여 깊이 3mm의 double edge notch를 정밀가공 하였다. 피로시험편에 대한 상세도는 Fig 1에 나타낸다.

한편 흡습시험편의 경우는 ASTM D 570¹⁰⁾에 의해 Fig 2와 같은 증류수에서의 흡수율

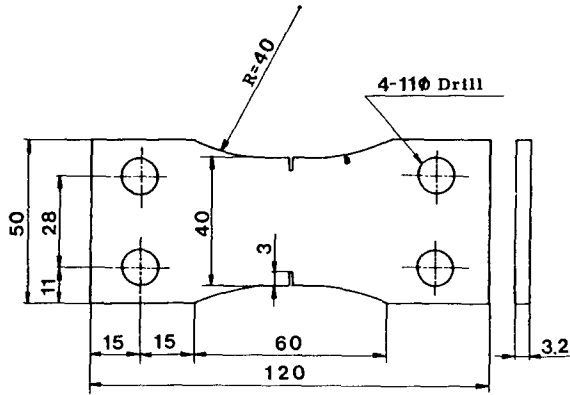


Fig. 1. Dimension of specimen for fatigue test.(JIS K 7119)

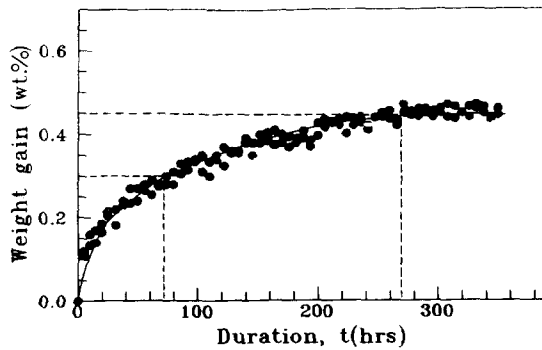


Fig. 2. Diffusion behavior of distilled water into GFRP at $50 \pm 3^\circ\text{C}$.

곡선을 얻고, 0.3% 흡습제는 약 72시간, 포화 상태인 0.45% 흡습제는 약 270시간 증류수 ($50 \pm 3^\circ\text{C}$)에 침지시켜 사용하였다.

2.2 실험방법

GFRP재의 흡습상태에 따른 피로특성을 알아보기 위해 용량 $5\text{Kf}_1 \cdot \text{m}$ 인 반복 비틀림·굽힘·피로시험기(Model:FTS-10-01)를 이용하여 반복속도 30Hz, 응력비 $R = -1$ ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)인 양진 굽힘·피로시험을 행하였다.

시험편은 건조재와 0.3% 흡습제, 0.45% 흡습제의 세 종류이며 흡습제인 경우 시험도중 수분의 증발을 방지하기 위해 증류수에 적신 가제로 시험편을 감싼 상태에서 실험을 진행하였다.

한편 cycle이 진행됨에 따라 성장하는 균열

길이는 일정 cycle간격마다 시험기를 정지시킨 후 균열선단에 잉크를 주입하는 dye injection penetrant 법을 이용하여 시험편표면에서의 균열길이를 광학현미경을 통해 측정하였다.

또한 미시적 파괴가 흡습 상태에 따라 어떤 양상을 보이고 또 균열성장과는 어떠한 관계가 있는지를 알아보기 위해 피로시험을 행한 시험편의 파면을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope:SEM)을 통해 관찰하였다.

관찰에 앞서 모든 시험편은 균열길이 측정을 위해 주입된 잉크와 각종 이물질들을 제거할 목적으로 순도 99.9%의 ethyl alcohol을 이용한 초음파 세척을 행하였고 SEM관찰을 위해 시험편의 파면을 IB-2 Ion coater를 이용하여 금(Au)으로 코팅(coating)하였으며 이때 코팅두께는 약 200 \AA 정도였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로수명 평가

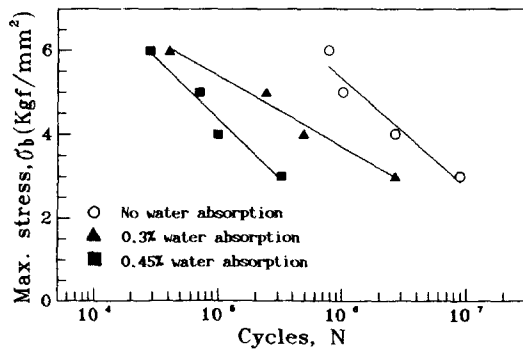


Fig. 3. Effect of water absorption on fatigue strength.

Fig 3은 건조재와 0.3%, 0.45% 흡습제에 대한 S-N curve이다 하중 cycle은 최대 10^7 회까지로 하였으며 시험편의 양쪽 notch로부터 발생하여 성장한 피로균열이 시험편의 중앙부에서 만났을때를 파괴 cycle로 결정하였다.

일반적인 FRP재의 피로수명곡선이 그렇듯이 본 실험에 사용한 E-glass/polyester 복합재료의 경우에도 건조재나 흡습제 모두 $N = 10^7$ 회까지의 범위에서 피로한도가 나타나지 않음을 알 수 있다.

또한 건조재에 비해 흡습재의 피로강도가 현저히 저하하고 있는것을 알 수 있는데 이는 흡습량이 증가할수록 수지의 경화정도가 크고 그로 인해 섬유와 수지사이의 결합력이 약화되었기 때문이라고 생각된다.

Fig 4는 건조재와 흡습재의 수지부분에 대한 경도시험 결과이다. 흡습량이 증가할수록 수지가 다소 경화되고 있음을 알 수 있다. Fig 5는 건조재와 0.3%, 0.45% 흡습재의 시험편표면에 대한 SEM사진으로 건조재인 경우 섬유와 수지사이에 비교적 좋은 결합상태를 유지하고 있는 반면 흡습량이 증가할수록 섬유와 수지사이의 결합이 다소 불완전해져 debonding이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 계면에서의 결합력 약화는 그곳에서의 가수분해반응 이외에도 섬유와 수지의 수축변형의 차이에 의한 미결합부의 증가에 원인이 있는것으로 생각된다.

Fig 6은 건조재와 흡습재에서 pull-out된 섬유의 외측면 사진이다. 섬유에 묻어있는 잔

여수지의 상태로보아 건조재에 비해 흡습량이 증가할수록 섬유와 수지사이의 결합력이 저하되고 있음을 알 수 있다.

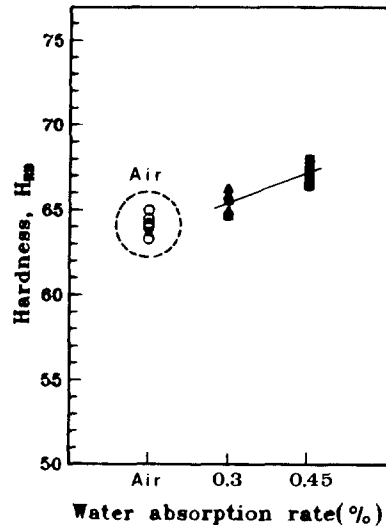


Fig. 4. Relation between hardness of resin and water absorption rate.

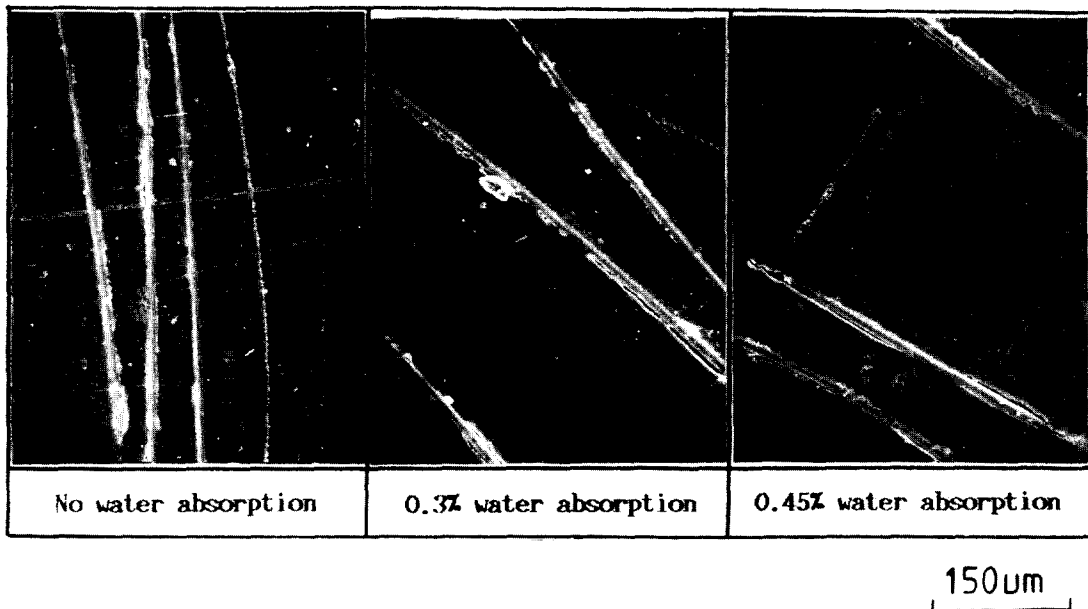


Fig. 5. SEM photographs of GFRP surface.(X200)

이러한 수지의 경화와 그로 인한 결합력의 약화는 건조재와 흡습재에 대해 서로 상이한 파면양상을 보여준다. Fig 7은 건조재와 흡습

재의 피로파면 사진이다. 흡습재의 경우 증류수의 흡습으로 인한 섬유와 수지사이의 결합력 약화로 건조재에 비해 fiber pull-out 및

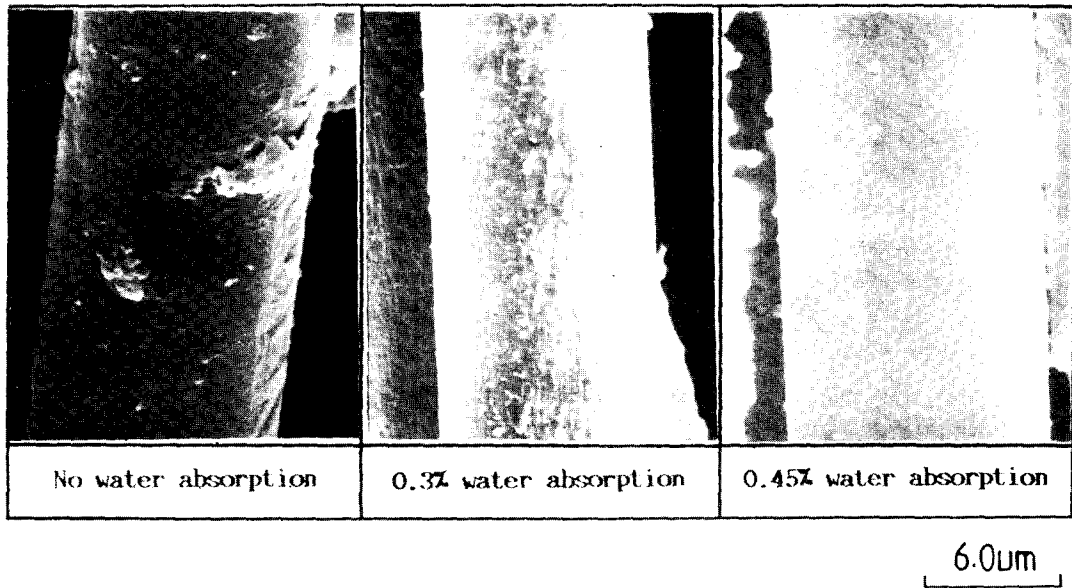


Fig. 6. SEM photographs of outward appearance of single fiber pull-out.(X5000)

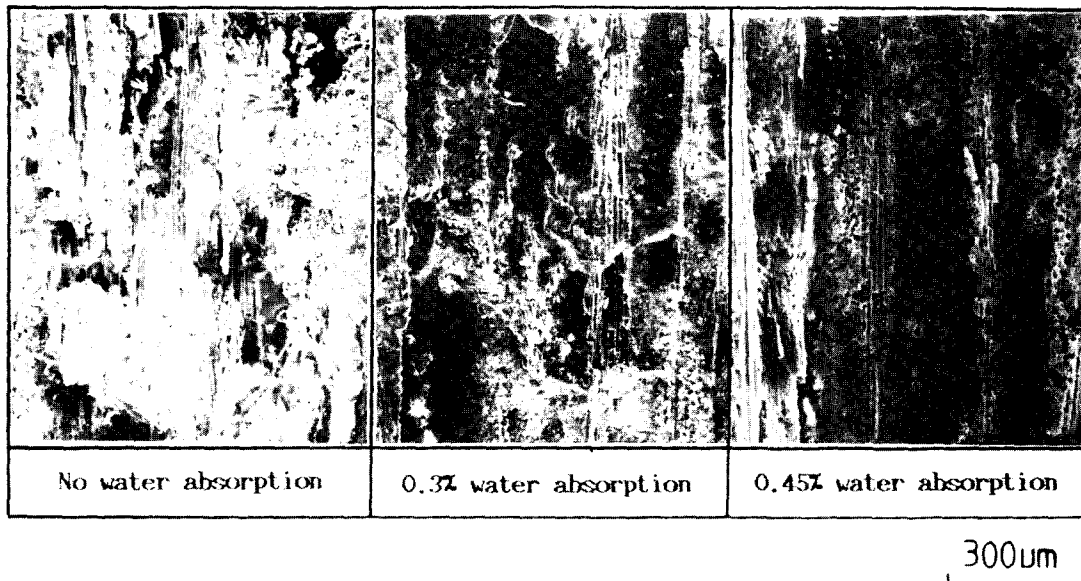


Fig. 7. Fracture surface of specimens of fatigue test.(X100)

debonding의 흔적이 다소 증가한 반면 건조재인 경우 흡습재에 비해 섬유들이 상당부분 수지에 묻혀있는 양상을 보이고 있어서 증류수의 흡습이 수지의 경화 및 섬유와 수지사이의 결합력저하를 촉진시킨다는 사실을 뒷받침하

고 있다.

3.2 피로균열 성장거동

Fig 8은 $\sigma_b = 4.0 \text{Kgf/mm}^2$ 일때 건조재와 0.3%, 0.45% 흡습재에 대한 a-N curve를 나타낸 것이다.

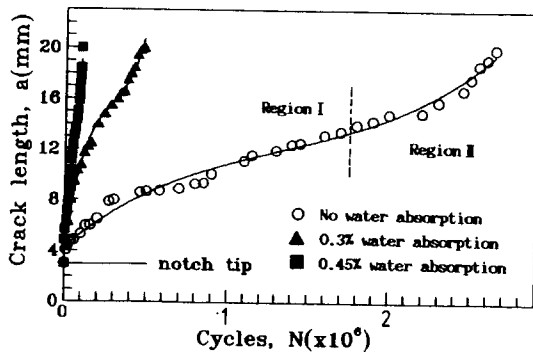


Fig. 8. Fatigue crack growth. ($\sigma_b = 4.0 \text{Kgf/mm}^2$)

흡습량이 증가할수록 피로균열의 성장이 매우 빠르게 진행되고 있어서 피로균열성장속도

에 미치는 증류수 흡습의 영향이 크게 나타나고 있으며 FRP복합재료의 피로균열은 어느 정도 cycle이 진행된다음 균열이 발생하여 점차 빠른속도로 성장해가는 금속재료와는 달리 cycle초기부터 발생하여 피로수명 전체기간동안 성장해가는 것을 알 수 있다.

또한 전체적인 피로균열 성장거동을 보면 균열방생후 빠른속도로 성장하다 점차 둔화되는 I 영역과 균열성장이 점차 가속되는 II 영역으로 나누어지고 있는데 이러한 피로균열성장의 가속과 둔화영역의 존재는 복합재료의 압축피로시험에서 보고된 바 있다¹¹⁾.

즉 기계가공된 notch에서 시작된 균열은 압축과정에서 섬유와 좌굴에 의해 섬유와 수지층 사이에 하중방향쪽으로 축 균열(Fig 9)이 생겨 피로균열의 성장을 억제하기 때문에 균

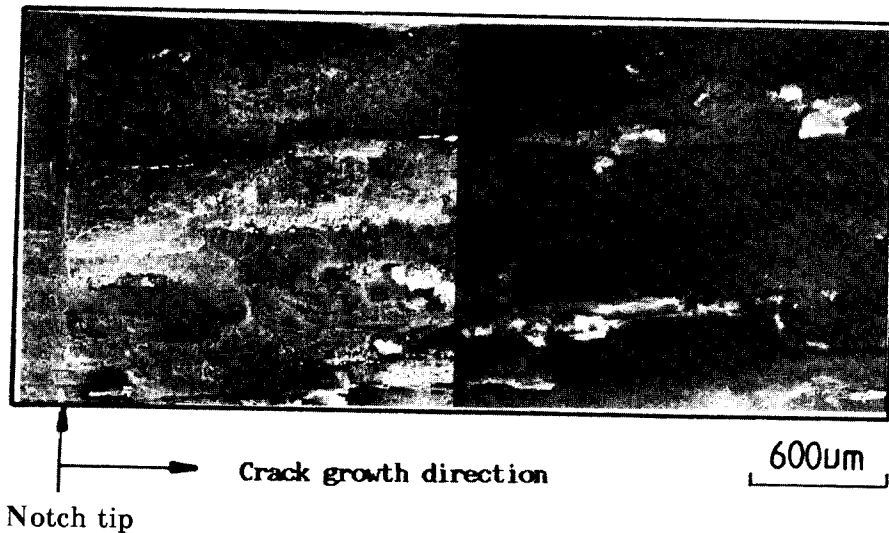


Fig. 9. Axial cracking along the fiber-matrix interface at load direction in no water absorption material. (X50)

열성장의 둔화가 이루어지며 축 방향으로 성장이 한계에 이를때 재 가속이 이루어진다.

그러나 순수한 압축 피로시험인 경우 재 가속이후 계속되는 압축하중으로 축균열이 더욱 진전하여 피로균열성장이 다시 둔화하여 arrest되는 경우도 발생하지만 본 실험에서와 같이 $R = -1$ 인 양진 굽힘 · 피로시험인 경우 인장과 압축이 반복되므로 인장하중에 의해

피로균열성장이 다시 둔화되는 III 영역은 존재하지않고 II 영역에서 파괴에 이르게 된다.

한편 섬유강화 복합재료의 피로균열성장은 선형탄성파괴역학인자들의 향으로 평가될 수 있는데¹²⁾ 안정균열성장과 그 다음의 불안정파괴는 응력확대계수 K의 지배를 받는다¹³⁾.

본 연구에서는 하중방식이 면외굽힘식이고 edge notch재 이므로 일본재료학회에서 추천

한 다음의 응력확대계수식¹⁴⁾을 사용하였다.

$$K = f(s/w) \cdot \sigma_b \sqrt{\pi a}$$

$$f(a/w) = 1.98 + 0.36(a/w) - 2.12(a/w)^2 + 3.42(a/w)^3$$

여기에서 σ_b 는 굽힘응력 이며 a 는 균열길이, w 는 시험편의 폭이다. 또 본 실험의 경우 $R = -1$ 이므로 압축상태에서는 균열이 닫혀지게 되어 $K_{min} \approx 0$ 이 된다. 따라서 응력확대계수범위(ΔK)는 $\Delta K = K_{max}$ 으로하여 정리하였다.

Fig 10, 11, 12는 각각 건조재, 0.3% 흡습재, 0.45% 흡습재에 대해 작용응력에 따른 $da/dN - \Delta K$ 의 관계를 도시한 것이다. ΔK 값이 증가함에 따라 피로균열 성장속도의 변화는 점진적으로 성장속도가 둔화되는 구간과 다시 성장이 가속되는 구간으로 나누어지고 있으며 작용하중이 클수록 da/dN 값이 상대적으로 높은 위치에 있어서 전반적으로 균열성장이 빠름을 알 수 있다. 또한 I 영역에서 II영역으로 옮겨가는 천이점의 위치는 작용하중이 증가할수록 높은 ΔK 값으로 이동하고 있어서 하중 의존성을 보여주고 있다.

Fig 13에서는 하중이 일정할때 건조재와

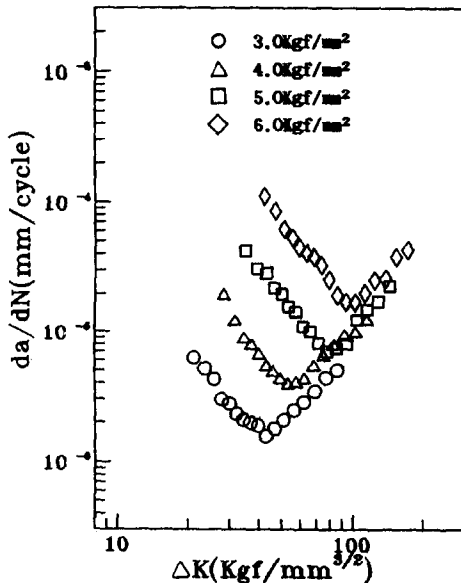


Fig. 10. Relation between crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) of no water absorption material.

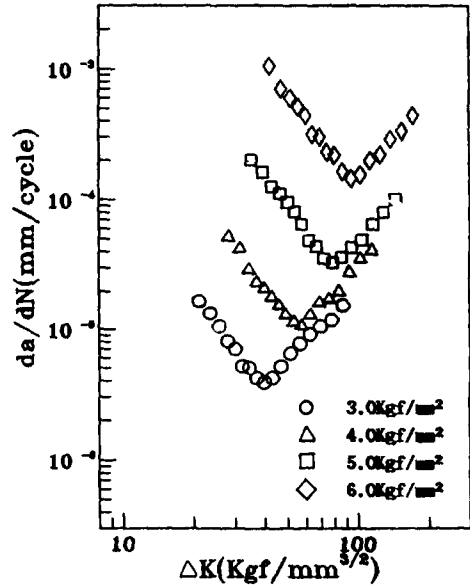


Fig. 11. Relation between crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) of 0.3 % water absorption material.

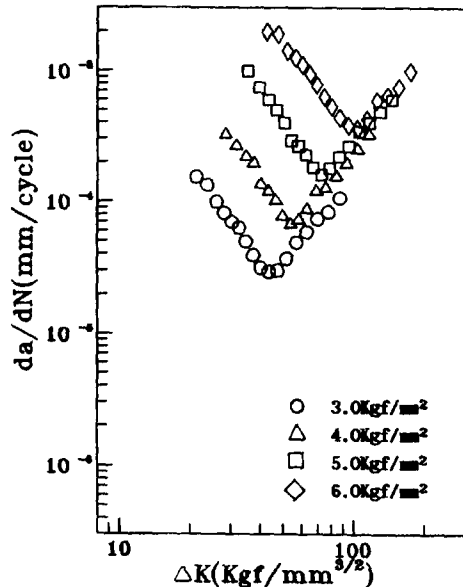


Fig. 12. Relation between crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) of 0.45 % water absorption material.

흡습재 모두 비슷한 ΔK 에서 천이점을 형성하고 있어서 흡습된 증류수는 천이점의 위치에 거의 영향을 미치지않음을 알 수 있다. 반면 흡습량이 증가할수록 일정 ΔK 에서 da/dN 값

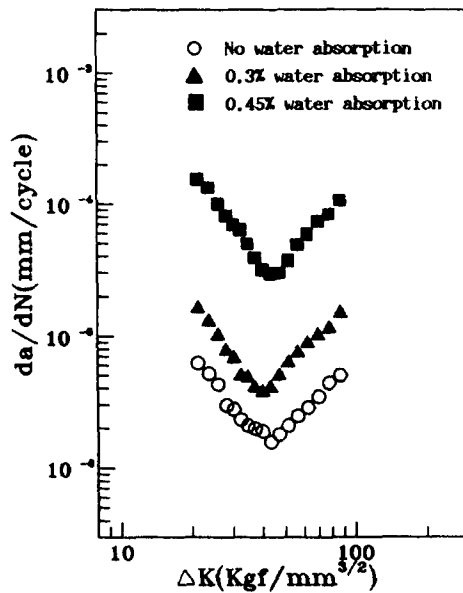


Fig. 13. Relation between crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) as $\sigma_b = 3.0Kgf/mm^2$

이 커지고 있어서 증류수가 피로균열성장속도에 영향을 미치고 있음을 보여주는데 이는 Fig 7에서 알 수 있는 바와 같이 증류수의 흡습으로 인한 수지의 경화화, 섬유와 수지사이의 계면약화에 기인한다.

한편 Paris는 안정균열성장구간에서 피로균열성장속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK) 사이에 $da/dN=C(\Delta K)^n$ 의 관계가 있는 것으로 보고하고 있는데¹⁶⁾, 각 시험조건에 대한 Paris식을 구하면 표 2와 같다. Paris지수 n 값은 건조재, 0.3% 흡습재, 0.45% 흡습재의 순서로 I 영역에서는 약 -1.10, -1.33, -1.39, II 영역에서는 1.04, 1.08, 1.17로 변화하고 있어서 균열성장의 둔화와 가속에 증류수의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

이것은 균열성장방향에 수직인 축 방향에서의 debonding과 delamination의 정도에 의존하게 되는데 Fig 9와 같은 축 균열을 건조재와 흡습재에 대해 조사해보면 Fig 14와 같다. 사진에서 알 수 있는 바와 같이 대부분의 축 균열은 섬유층과 수지층사이의 층간에서 발생하고 있는데 흡습량이 증가할수록 층간박리의 정도가 심해지는 것을 알 수 있다.

또한 섬유층에서의 debonding의 양상도 Fig 15에서와 같이 흡습량이 증가할수록 현저해지는 것을 볼 수 있다.

결국 이러한 이유로 흡습량이 증가할수록 균열성장은 더욱 억제되어 I 영역에서의 균열성장둔화가 빠르게 일어나며, 천이점 이후에는 이미 현저하게 성장한 피로균열로 인해 축 균열의 영향이 매우 작아지는 반면 수지자체

Table 2. paris' equation from $da/dN-\Delta K$ relation for each condition.

(a)No water absorption

Maximum stress	$da/dN = C(\Delta K)^n$	
	Region I	Region II
3.0Kgf/mm ²	$9.22 \times 10^{-5}(\Delta K)^{-1.06}$	$4.57 \times 10^{-8}(\Delta K)^{1.00}$
4.0Kgf/mm ²	$3.55 \times 10^{-4}(\Delta K)^{-1.04}$	$1.00 \times 10^{-7}(\Delta K)^{1.00}$
5.0Kgf/mm ²	$2.01 \times 10^{-3}(\Delta K)^{-1.14}$	$1.00 \times 10^{-7}(\Delta K)^{1.05}$
6.0Kgf/mm ²	$4.92 \times 10^{-3}(\Delta K)^{-1.15}$	$1.00 \times 10^{-7}(\Delta K)^{1.09}$
Average	$n = -1.10$	$n = 1.04$

(b)0.3% water absorption

Maximum stress	$da/dN = C(\Delta K)^n$	
	Region I	Region II
3.0Kgf/mm ²	$1.03 \times 10^{-3}(\Delta K)^{-1.35}$	$1.00 \times 10^{-7}(\Delta K)^{1.04}$
4.0Kgf/mm ²	$2.39 \times 10^{-3}(\Delta K)^{-1.33}$	$1.00 \times 10^{-7}(\Delta K)^{1.04}$
5.0Kgf/mm ²	$1.04 \times 10^{-2}(\Delta K)^{-1.30}$	$3.00 \times 10^{-7}(\Delta K)^{1.13}$
6.0Kgf/mm ²	$1.14 \times 10^{-1}(\Delta K)^{-1.32}$	$1.30 \times 10^{-6}(\Delta K)^{1.12}$
Average	$n = -1.33$	$n = 1.08$

(c) 0.45% water absorption

Maximum stress	$da/dN = C(\Delta K)^n$	
	Region I	Region II
3.0Kgf/mm ²	$8.63 \times 10^{-3} (\Delta K)^{-1.37}$	$3.00 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.15}$
4.0Kgf/mm ²	$2.46 \times 10^{-2} (\Delta K)^{-1.40}$	$1.10 \times 10^{-6} (\Delta K)^{1.19}$
5.0Kgf/mm ²	$7.43 \times 10^{-2} (\Delta K)^{-1.39}$	$1.30 \times 10^{-6} (\Delta K)^{1.20}$
6.0Kgf/mm ²	$3.89 \times 10^{-1} (\Delta K)^{-1.38}$	$1.90 \times 10^{-6} (\Delta K)^{1.13}$
Average	$n = -1.39$	$n = 1.17$

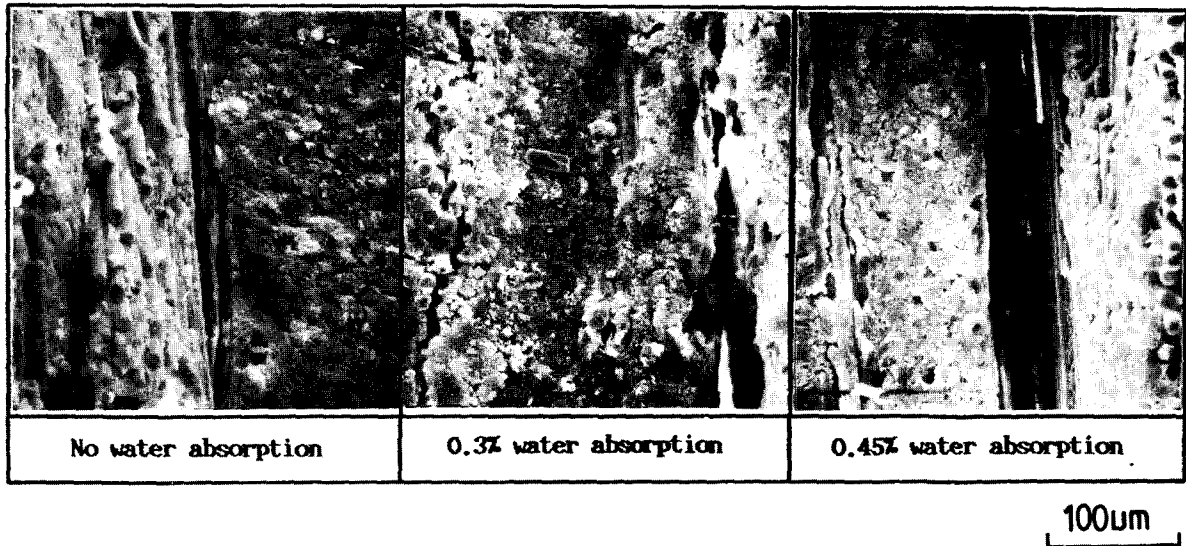


Fig. 14. Axial cracking along the fiber-matrix interface at load direction in each specimens.(X300)

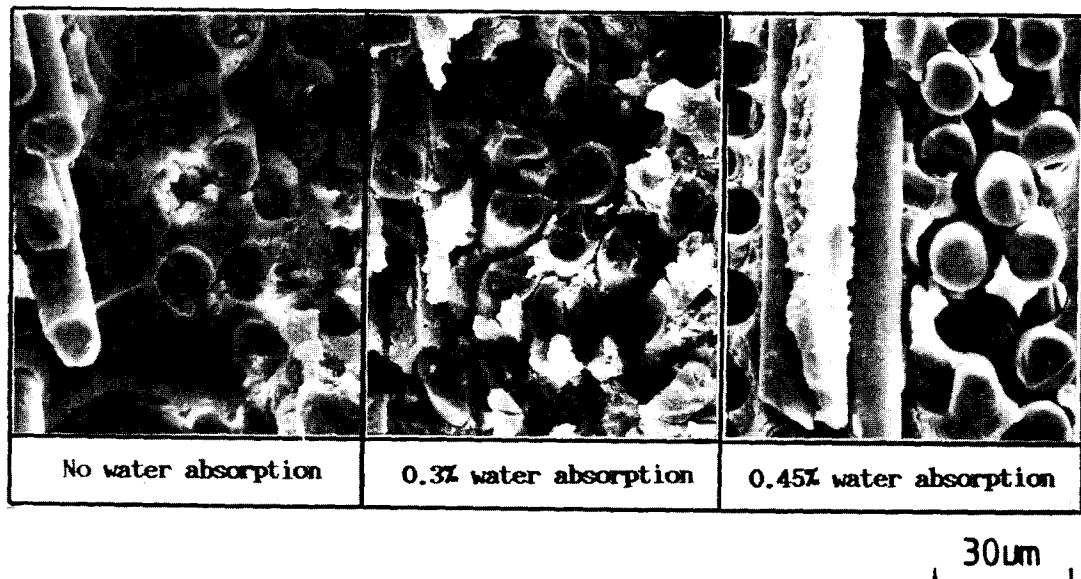


Fig. 15. Debonding at load direction in each specimens.(X1000)

의 경화와 피로균열 성장방향에서의 debonding 또는 delamination의 영향이 상대적으로 커지기 때문에 II 영역에서의 피로균열성장은 더욱 가속되는 것으로 생각된다.

4. 결 론

chopped strand glass mat 강화 polyester 복합재료에 일정량(0.3%, 0.45%)의 증류수를 주입시킨 흡습재와 건조재를 대상으로 피로시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 증류수의 흡습은 섬유와 수지사이의 결합력을 저하시키며 그로 인해 균열진행방향에 수직인 섬유들의 pull-out이 증가되고 균열진행방향에 놓인 섬유속에서의 debonding이 심화되므로 피로강도 저하의 원인이 된다.
- 2) R = -1인 피로하중하에서, GFRP의 피로균열은 건조재와 흡습재 모두 cycle 초기에 발생하며 그 후 균열진전이 점진적으로 둔화되는 영역과 증가하는 영역으로 구분된다.
- 3) 피로균열성장이 둔화된 후 다시 가속되는 천이점의 위치는 작용하중이 증가함에 따라 높은 ΔK 값으로 이동하지만 일정하중하에서 건조재와 흡습재의 차이는 없었다.
- 4) 증류수의 흡습은 균열성장방향에 수직인 축 방향에서의 debonding과 delamination을 심화시키므로 I 영역에서의 피로균열성장의 둔화를 빠르게하며, II 영역에서는 수지의 경화와 균열성장방향에서의 debonding 및 delamination이 쉽게 일어나므로 피로균열성장을 더욱 가속시킨다.

참 고 문 헌

- 1) C. S. Smith, "Structural Problems in the Design of GRP Ships", Sympos. on GRP Ship Construction, the Royal Inst. Nav. Archit., pp.33.(1972)
- 2) A. K. Green, W. H. Bowyer, "The Development of Improved Attachment Methods for Stiffening Frames on Large GRP panels", Composites, Vol.12 No.1, pp.49.(1981)
- 3) 森田 幹朗, 金原 勳, 福田 博, 複合材料, 日刊工業新聞社, pp.244.(1988)
- 4) 駒井 謙治郎, 城下 莊平, 木下 定, J. Grenestedt, "アラミド/エポキシ斜交積層複合材料の引張り と疲労強度に及ぼす水の影響", 材料, Vol.38, No.434, pp.1329-1335.(1989)
- 5) N. Fried, "Degradation of Composite Materials: The Effect of Water on Glass Reinforced Plastic", Mechanics of Composite Materials, Proc. 5th Symp. Naval Structural Mechanics, Pergamon, New York, pp.813-937.(1970)
- 6) J. V. Gauchel, I. Steg, J. E. Cowling, "Reducing the Effect of Water on the Fatigue Properties of S-glass Epoxy Composites", Fatigue of Composite Materials, ASTM STP 569, pp.45-52.(1975)
- 7) J. B. Romans, A. G. Sands, J. E. Cowling, Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development, Vol. 11 pp.3.(1972)
- 8) 日本複合材料學會, 複合材料ハンドブック, 日刊工業社, pp.578-581.(1989)
- 9) "硬質プラスチック平板の平面曲げ疲れ試験方法", JIS K 7119.
- 10) "Standard Test Method for Water Absorption of Plastics", ASTM D 570.
- 11) S. C. Kunz, P. W. R. Beaumont, "Microcrack Growth in Graphite Fiber-Epoxy Resin Systems During Compressive Fatigue", Fatigue of Composite Materials, ASTM STP 569, pp.71-91.(1975)
- 12) S. C. Kunz, "Microcrack Growth During Compressive Fatigue in Graphite Fiber-Epoxy Resin Systems", M. S. thesis in Engineering, Materials Department, California Univ., Los Angeles.(1974)
- 13) G. R. Irwin, Encyclopedia of Physics, Springer, Heidelberg, Germany, Vol.6. (1958)
- 14) 日本材料學會, 疲労き裂傳ば抵抗テータ集, pp.32.

- 15) P. C. Paris, F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol.85, No.4, pp. 528.(1963)