

〈論 文〉

인공해수중 GFRP의 피로특성에 관한 연구

김연직* · 임재규**

(1992년 10월 22일 접수)

A Study on Fatigue Properties of GFRP in Synthetic Sea Water

Yon Jig Kim and Jae Kyoo Lim

Key Words: Glass Fiber Reinforced Plastic(유리섬유강화 플라스틱), Degradation(열화), Stress Corrosion(응력부식), Hand Lay Up(수적법), Chopped Strand Mat(단 섬유포), Surface Mat(표면 섬유포), Matrix(모재, 기지재료), Linear Elastic Fracture Mechanics(선형탄성 파괴역학), Fiber Pull Out(섬유인발), Interfacial Strength(계면강도), Axial Cracking(축균열), Bond Strength(결합강도, 결합력)

Abstract

The fatigue behavior of GFRP composites is affected by environmental parameters. Therefore, we have to study on effect of sea water on fatigue behavior of GFRP composites as to maintain the safety and confidence in design of ocean structure of GFRP. In this paper, we investigated the fatigue properties of chopped strand glass mat/polyester composite in synthetic sea water. (pH 8.2) In case of the glass fiber(CSM type) reinforced polyester composite materials, the fatigue crack in the both dry and wet specimens tested in air or synthetic sea water occurred 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 transition point occurred during the crack propagation shifted to high ΔK value as load increase but its point is not changed regardless of immersion or test environment under a constant load. The synthetic sea water degrades the bond strength between fiber and matrix, thereby the tendency of rapid deceleration and acceleration of the crack growth was appeared.

1. 서 론

유리섬유강화 플라스틱(glass fiber reinforced plastic: GFRP)은 화학 공정산업 및 각종 공해방지시설 등에 주로 사용되어 왔으며 최근에는 우주항공, 해양공학분야의 구조재료로까지 사용영역이 확대되고 있다. 이러한 추세는 복합재료의 일반적인 장

점인 비강도(σ/ρ)가 우수하다는 사실과 이방성재료로서 필요한 방향에 필요한 특성을 부여할 수 있고, 또 단일재료로는 생각할 수 없는 몇가지 기능을 동시에 갖는 기능성재료로의 활용이 가능하다는 점에 기인한다.

그러나 복합재료를 이들분야에 적용시킬 때 복합재료자체의 특수한 구조적 성질로 인해 설계에 어려움을 겪고 있는데 기본적으로는 복합재료의 파괴기구가 명확하지 않고 더구나 각종 사용환경에 따른 파괴기구의 해석은 대단히 복잡해지기 때문이다.

*정회원, 전북대학교 기계공학과 대학원

**정회원, 전북대학교 기계설계학과

복합재료가 어떤 환경에 노출될때는 응력부식(stress corrosion)기구에 의한 강화섬유의 강도손실, 섬유와 모재사이의 계면 결합강도의 저하, 수분과 같은 인자의 침투로 인한 모재의 기계적성질 저하, 온도와 습기의 복합작용으로 인한 열화의 가속등이 일어날 수 있는 것으로 알려져 있으며^(1~2) 駒井謙治郎 등은 물이 epoxy수지의 소성화를 일으켜 섬유와 수지사이의 계면강도와 적층재의 층간강도를 떨어뜨리므로 피로특성이 저하함을 보였다.⁽³⁾

이상과 같은 몇몇 연구자들의 보고는 복합재료 구조물의 설계에 있어서 환경의 영향이 대단히 중요하다는 점을 강조하고 있다. 결국 오토나 기뢰제거함등의 선체재료와 기타 해양구조물의 부재등으로 사용되는 GFRP의 파괴는 사용하중과 해수환경의 지속적인 복합작용으로 발생하게 될 것으로 생각되는데, Romans 등은 물과 동적하중이 조합될 때 GFRP의 피로손상은 보통 정적응력에 대한 손상의 10~100배까지 가속되고 있음을 보였다.⁽⁴⁾ 그러나 그동안의 복합재료에 대한 환경영향평가는 물, 습기, 화학약품, 각종연료, 개스등의 분위기에 집중되어있기 때문에 GFRP 해양구조물의 설계에 있어서 안전성과 신뢰성을 확보하는데 많은 문제점을 안고 있다.

따라서 본 연구에서는 수적법(hand lay up : HLU)⁽⁵⁾을 이용하여 단 섬유포(chopped strand mat : CSM)형태의 유리섬유를 불포화 폴리에스테르 수지에 강화시킨 복합 적층판을 대상으로 해수중에서 굽힘·피로시험을 실시하여 피로균열 성장거동을 관찰하고 파면관찰을 통하여 GFRP의 피로특성을 검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에서는 기지재료로서 기계적성질이 우수하며 내식성이 좋은 Vinylester type 액상 불포화 폴리에스테르 수지의 일종인 Vinylester type 에폭시아크릴레이트 액상수지(epoxy acrylate : Styrene monomer=55 : 45(vol.%))를 사용하였으며 강화섬유로는 표면에 실란(silane) 집속제를 처리한 CSM형 E-glass fiber를 이용하였다. 유리섬유의 평균직경은 약 11 μm 였으며 그 조성과 기계적성질을 Table 1⁽⁶⁾에 나타내었다.

GFRP의 제작은 수적법을 이용하여 CSM형 유리섬유포 4장과 폴리에스테르 수지를 교대로 적층하였으며 상하면에 표면섬유포(surface mat)를 각 1장씩 적층하였다. (Fig.1) 한편 수지의 경화시약은 3액형으로 MEKPO(methyl ethyl ketone peroxide), Co-octoate(8%) 및 DMA(di-methyl aniline)(5% in Xylene)를 사용하였다. 이상과 같이 적층한 GFRP판재를 약 3.25 kPa의 압력하에서 24 시간동안 상온경화 시킨 후 대기압하에서 120°C의 온도로 2시간 동안 후 경화시켜 두께 3.2 mm의 판재를 얻었다. 이때 유리섬유의 함유량은 30-35 wt.%였다.

실험에 제공된 피로시험편은 제작된 GFRP판재로부터 두께가 3.2 mm로 균일한 부분을 JIS K 7119⁽⁷⁾ 규격에 따라 CNC자동밀링으로 기계가공하였으며 두께 0.14 mm의 wheel cutter를 이용하여 깊이 3 mm의 double edge notch를 정밀가공 하였

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°C)

Filament tensile strength (kgf/mm ²)	Strand tensile strength (kgf/mm ²)	Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /°C)	Young's modulus (kgf/mm ²)
370	225	5	7700

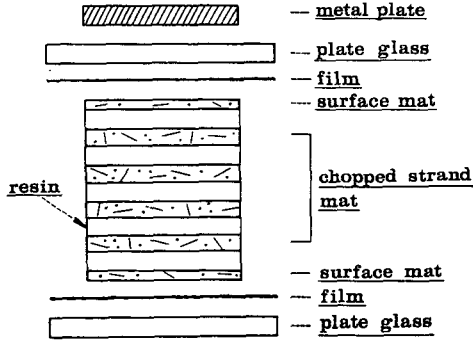


Fig. 1 Laminate construction

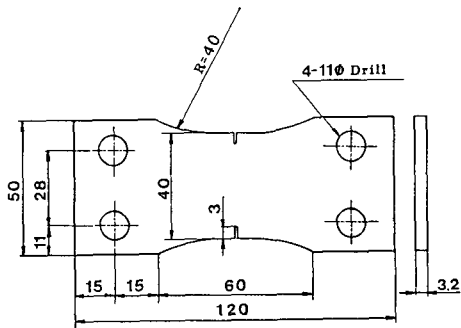


Fig. 2 Dimension of specimen for fatigue test

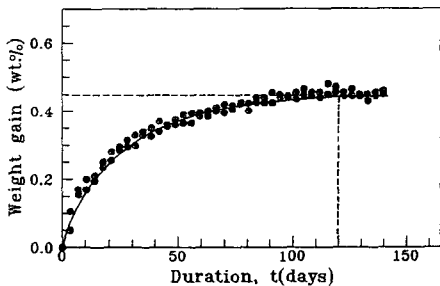


Fig. 3 Diffusion behavior of synthetic sea water into GFRP at room temperature ($20 \pm 3^\circ\text{C}$)

다. 피로시험편에 대한 상세도는 Fig.2에 나타낸다.

한편 침지시험편의 경우는 ASTM D 570⁽⁸⁾에 의해 Fig.3과 같은 해수중에서의 흡수율 곡선을 얻고 약 4개월동안 해수중에 침지시켜 포화흡수상태의 시험편을 사용하였다. 이때 20°C 의 해수중에서 4개월동안 침지시킨 피로시험편은 약 0.45%의 흡수율

을 기록하였다.

2.2 실험방법

GFRP재의 해수중에서 피로특성을 알아보기위해 용량 5 kgf · m인 반복 비틀림 · 굽힘 · 피로시험기 (Model : FTS-10-01)를 이용하여 반복속도 30 Hz, 응력비 $R = -1$ 인 양진 굽힘 · 피로시험을 행하였으며 해수중실험을 위해 시험기의 중앙에 수조를 설치하였다.

해수탱크는 대기개방상태로 두었으며 해수의 정체를 방지할 목적으로 20 ml/min의 일정속도로 순환시키고 온도는 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지시켰다.

해수는 ASTM D 1141⁽⁹⁾에 따라 제조한 인공해수 (pH 8.2)로 하였으며 그 성분을 Table 2에 나타낸다.

시험편은 건조재와 침지재의 두 종류이며 건조재는 대기 (Air-air : AA)와 해수 (seawater · air : SA), 침지재는 해수중시험 (seawater-seawater : SS)에 제공하였다. cycle이 진행됨에 따라 성장하는 균열 길이는 양쪽 notch에서 발생한 균열길이의 평균치로 하였으며, 일정 cycle간격마다 시험기를 정지시킨 후 균열선단에 잉크를 주입하는 dye injection penetrant 법을 이용하여 시험편표면에서의 균열 길이를 광학현미경을 통해 측정하였다.

또한 미시적 파피가 대기와 해수환경 (pH 8.2)에

Table 2 Chemical composition of synthetic sea water (pH 8.2)

(in 10 liter water)

Composition	Quantity (gf)
NaCl	245.34
MgCl ₂ · 6H ₂ O	111.11
Na ₂ SO ₄	40.94
CaCl ₂	11.58
KCl	6.95
NaHCO ₃	2.01
KBr	1.01
SrCl ₂ · 6H ₂ O	0.42
H ₃ BO ₃	0.27
NaF	0.03

서 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 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 Å 정도였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인공해수중 GFRP의 피로수명

Fig. 4는 AA, SA, SS재에 대한 S-N curve이다. 하중 cycle은 최대 10⁷회까지로 하였으며 시험편의

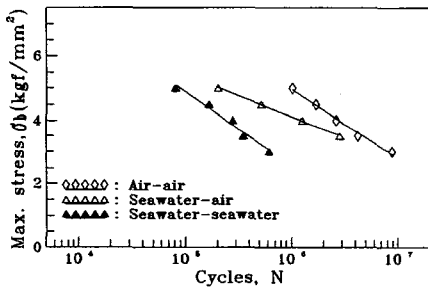


Fig. 4 S-N curves of dry and wet specimens tested in air or synthetic sea water (pH 8.2)

양쪽 notch로부터 발생하여 성장한 피로균열이 시험편 중앙부위에서 만났을때를 파괴 cycle로 결정하였다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 AA, SA, SS재 모두 N=10⁷회까지의 범위에서는 피로한도가 나타나지 않았으며 AA, SA, SS재의 순서로 피로강도가 저하하고 있다. 이는 駒井謙治郎 등⁽³⁾의 연구에

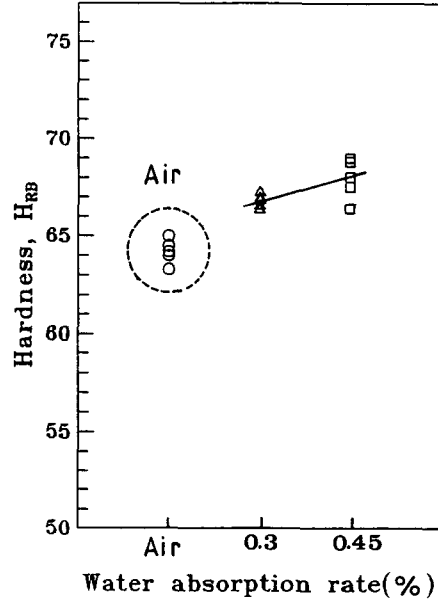
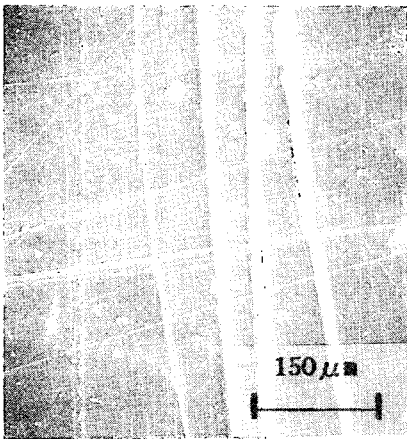
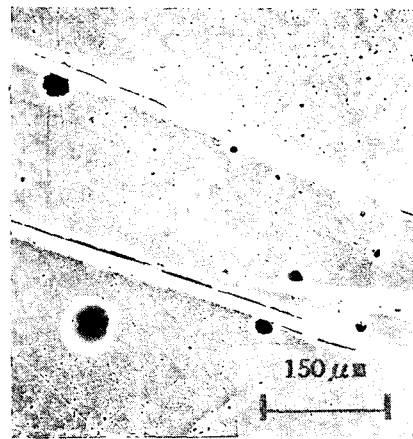


Fig. 5 Relation between hardness of resin and absorption rate of synthetic sea water (test load : 100kgf)



(a) Dry specimen



(b) Wet specimen in synthetic sea water for 4 months

Fig. 6 SEM photographs of dry and wet specimen surface of GFRP (X200)



(a) In air-air



(b) In seawater-air



(c) In seawater-seawater

Fig. 7 SEM photographs of outward appearance of single fiber pulled-out at various condition (X5000)

서와는 달리 본 실험에서 사용한 불포화 폴리에스테르 수지의 경우 해수중 흡수율이 증가할 수록 수지가 경화되기 때문인데 (Fig. 5) SA재의 경우 균열선단으로 침투한 해수가 피로균열의 성장을 가속시키며, SS재의 경우 장기간(4개월) 침지로 인해 수지의 경화정도가 다소 크고 또 섬유와 수지의 결합이 불완전한 부위를 통해 침투한 해수가 오랜시간 동안 그의 결합상태를 약화시켰기 때문이라고 생각된다.

Fig.6은 건조재와 해수침지재의 표면사진이다. 건조재의 경우 섬유의 수지사이의 결합이 비교적 좋지만 불완전한 부위도 약간 존재하며 해수에 침지시킬 경우 (b)에서와 같이 불완전한 결합부위와 제작결함으로 존재하는 기공을 통해 해수가 쉽게 침투하여 섬유와 수지의 결합상태를 더욱 떨어뜨리게 된다.

Fig.7은 AA, SA, SS재에서 pull-out된 섬유의 외면 사진이다. AA재의 경우에 비해 SA, SS재로 갈수록 섬유에 묻어있는 수지의 양이 적어지고 있어서 섬유와 수지사이의 결합력이 저하되고 있음을 알 수 있다.

3.2 피로균열 진전거동

Fig. 8은 $\sigma_b=4.0 \text{ kgf/mm}^2$ 일때 AA, SA, SS재에 대한 a-N curve를 나타낸 것이다. 피로균열은 AA, SA, SS재 모두 cycle초기부터 발생하여 피로수명 전체기간동안 성장해 가며, cycle초기에 균열이 발생하여 빠른속도로 성장하다가 점차 둔화되는 I 영역과 균열성장이 점차 가속되는 II 영역으로 나누어짐을 알 수 있다.

이러한 I, II 영역의 존재는 섬유강화 복합재료의 압축피로시험인 경우에 주로 나타나는 것으로

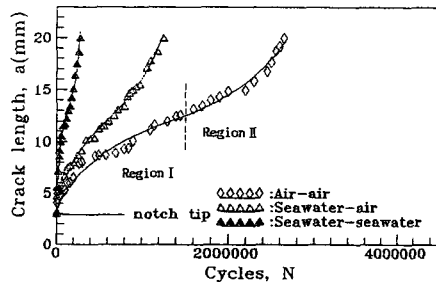


Fig. 8 Fatigue crack growth of dry and wet specimen tested in air or synthetic sea water ($\sigma_b=4.0 \text{ kgf/mm}^2$)

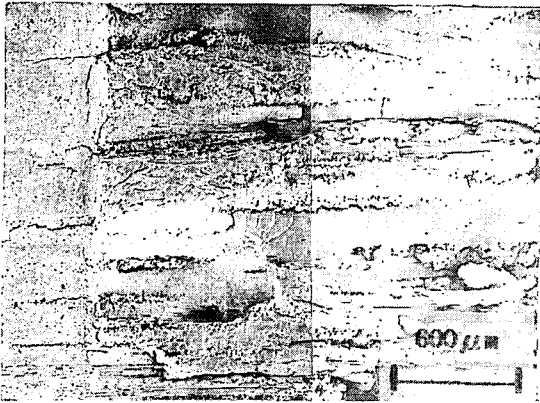


Fig. 9 Axial cracking along the fiber-matrix interface at load direction in air-air specimen

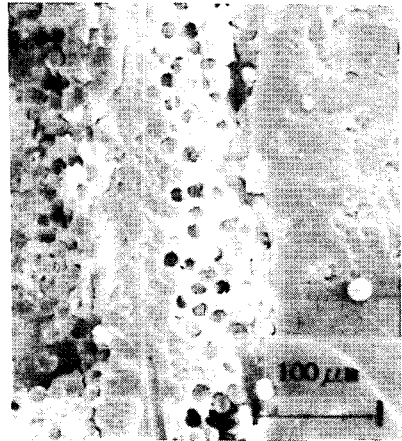
알려져있다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 $R = -1$ 인 양진 굽힘·피로시험을 행하였으므로 시험편 중앙단면의 상하부에 인장과 압축하중이 반복되며, 압축하중이 작용되는 동안 섬유층은 좌굴을 일으키게 된다. 따라서 섬유층과 수지층 사이에 Fig.9와 같은 하중방향 쪽으로의 축균열이 생기고 이 균열이 피로균열의 성장을 저지하기 때문에 영역 I 과 같은 균열성장둔화구간이 나타나게 된다. 또한 영역 II에서의 균열성장 가속은 이미 현저하게 성장한 피로균열로 인해 하중을 지지하는 시험편의 잔여면적이 작아져서 점차 불안정 균열성장을 하기 때문인 것으로 생각된다.

그러나 순수한 압축피로시험인 경우 대부분 균열 성장의 감속(I 영역)과 가속(II 영역)을 겪은 후 다시 감속하여 arrest되는 (III 영역) 3개의 영역으로 구분되지만⁽¹⁰⁾ 본 실험에서와 같이 $R = -1$ 인 경우, 인장과 압축이 반복되기 때문에 인장하중에 의해 III 영역은 존재하지 않고 II 영역에서 파괴에 이르게 된다.

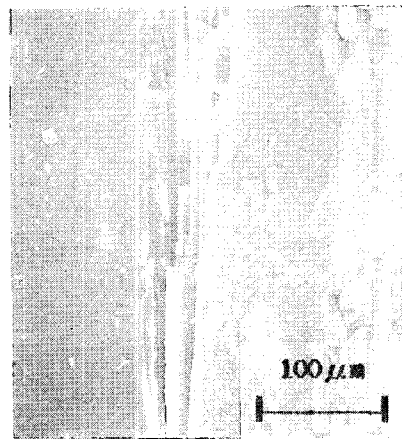
Fig.10은 AA, SA, SS재에서 발생한 축 균열의 확대사진이다. 축 균열은 모두 섬유와 수지사이의 층간에서 발생하고 있으며 SS재인 경우 층간박리의 정도가 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

한편 섬유강화 복합재료의 피로균열성장은 선형탄성파괴역학인자들의 향으로 평가될 수 있는데⁽¹¹⁾ 안정균열성장과 그다음의 불안정파괴는 응력확대계수K의 지배를 받는다.⁽¹²⁾

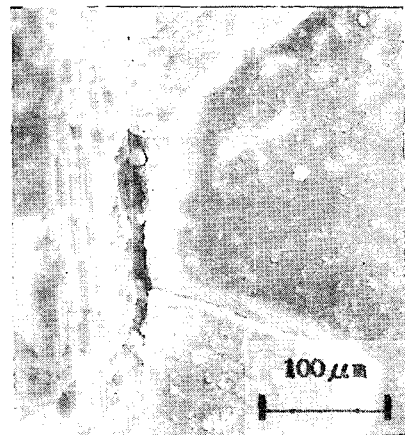
본 연구에서는 하중방식이 면외굽힘식이므로 edge notch재 이므로 일본재료학회에서 추천한 다음의



(a) In air-air



(b) In seawater-air



(c) In seawater-seawater

Fig. 10 Axial cracking along the fiber-matrix interface at load direction in each specimens (X300)

응력확대계수식⁽¹³⁾을 사용하였다.

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

$$f(a/w)=1.98+0.36(a/w)$$

$$-2.12(a/w)^2+3.42(a/w)^3$$

여기에서 σ_b 는 굽힘응력이며 a 는 균열길이, w 는 시험편의 폭이다. 또 본 실험의 경우 $R=-1$ 이다

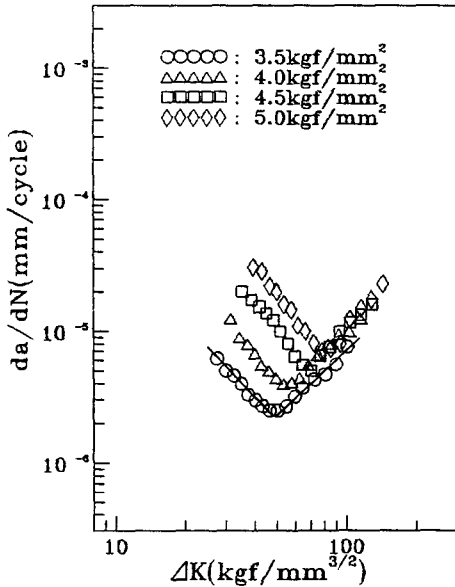


Fig. 11 Relation between crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) of dry specimens tested in air

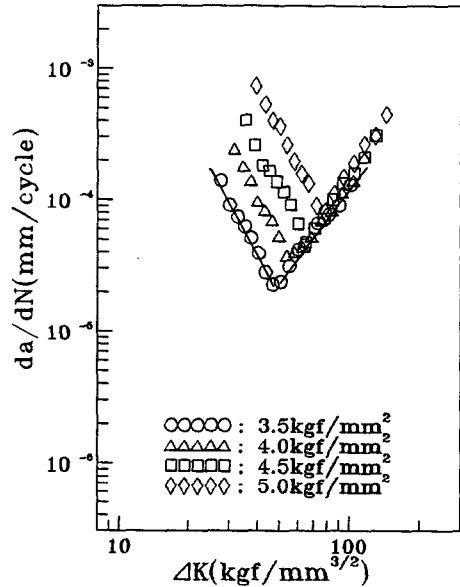


Fig. 13 Relation between crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) of wet specimens tested in synthetic sea water (pH 8.2)

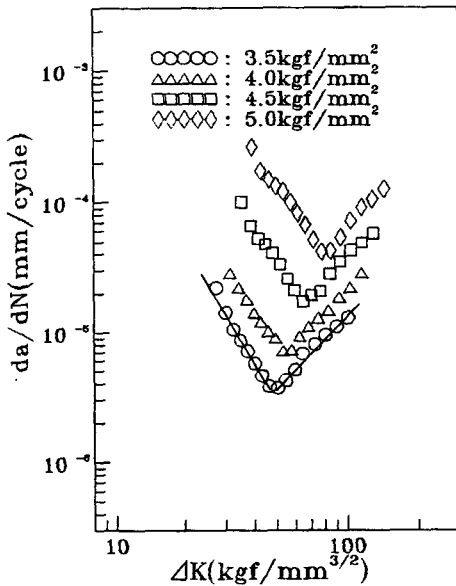


Fig. 12 Relation between crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) of dry specimens tested in synthetic sea water (pH. 8.2)

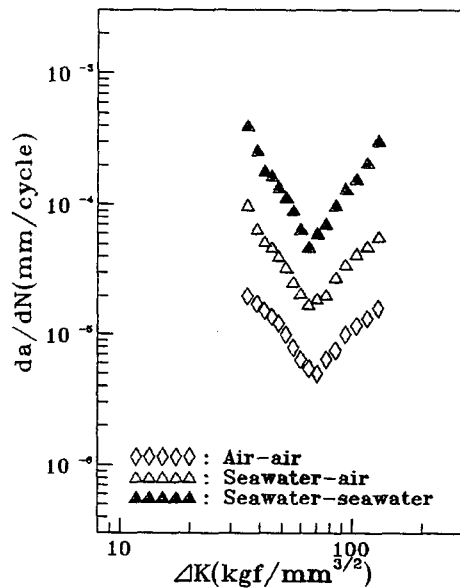


Fig. 14 Relation between crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) as $\sigma_b=4.5\text{kgf/mm}^2$ in various conditions

로 압축상태에서는 균열이 닫혀지게 되어 $K_{min} \approx 0$ 이 된다. 따라서 응력확대계수범위 (ΔK)는 $\Delta K = K_{max}$ 으로하여 정리하였다.

Fig.11, 12, 13은 각각 AA, SA, SS재에 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 II 영역으로 옮겨가는 천이점의 위치는 작용하중이 증가할 수록 높은 ΔK 값으로 이동하고 있어서 하중 의존성을 보여주는 반면 Fig. 14에서는 하중이 일정할때 AA, SA, SS재 모두 비슷한 ΔK 에서 천이점을 형성하고 있어서 건조재와 침지재 모두 해수로 인한 천이점의 위치변화는 나타나지 않고 있다.

Table 3 Paris equation from $da/dN-\Delta K$ relation for each condition
(a) In air-air

Maximum stress	$da/dN=C(\Delta K)^n$	
	Region I	Region II
3.5 kgf/mm ²	$1.42 \times 10^{-4} (\Delta K)^{-1.05}$	$7.53 \times 10^{-8} (\Delta K)^{1.00}$
4.0 kgf/mm ²	$3.55 \times 10^{-4} (\Delta K)^{-1.04}$	$1.00 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.00}$
4.5 kgf/mm ²	$2.40 \times 10^{-4} (\Delta K)^{-1.09}$	$1.00 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.03}$
5.0 kgf/mm ²	$2.01 \times 10^{-3} (\Delta K)^{-1.14}$	$1.00 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.05}$
Average	$n = -1.08$	$n = 1.02$

(b) In seawater-air (pH 8.2)

Maximum stress	$da/dN=C(\Delta K)^n$	
	Region I	Region II
3.5 kgf/mm ²	$1.93 \times 10^{-3} (\Delta K)^{-1.52}$	$8.97 \times 10^{-8} (\Delta K)^{1.07}$
4.0 kgf/mm ²	$5.01 \times 10^{-3} (\Delta K)^{-1.50}$	$1.00 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.08}$
4.5 kgf/mm ²	$1.17 \times 10^{-3} (\Delta K)^{-1.52}$	$3.00 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.07}$
5.0 kgf/mm ²	$5.47 \times 10^{-2} (\Delta K)^{-1.56}$	$2.00 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.23}$
Average	$n = -1.53$	$n = 1.11$

(c) In seawater-seawater (pH 8.2)

Maximum stress	$da/dN=C(\Delta K)^n$	
	Region I	Region II
3.5 kgf/mm ²	$5.43 \times 10^{-2} (\Delta K)^{-1.88}$	$1.50 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.32}$
4.0 kgf/mm ²	$1.06 \times 10^{-1} (\Delta K)^{-1.90}$	$2.61 \times 10^{-8} (\Delta K)^{1.34}$
4.5 kgf/mm ²	$2.34 \times 10^{-1} (\Delta K)^{-1.90}$	$2.00 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.41}$
5.0 kgf/mm ²	$8.86 \times 10^{-1} (\Delta K)^{-1.93}$	$3.00 \times 10^{-7} (\Delta K)^{1.45}$
Average	$n = -1.90$	$n = 1.38$

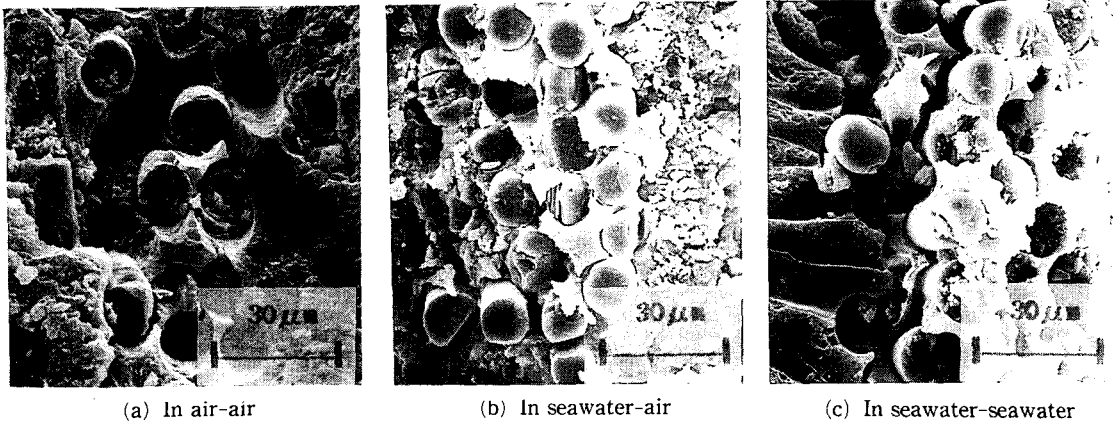


Fig. 15 SEM photographs of fracture surface of GFRP tested in various conditions. (X1000)

한편 각 시험조건에 대한 Paris식을 구하면 Table 3과 같다. Paris지수 n 값은 AA, SA, SS재의 순서로 I 영역에서는 각각 약 -1.08 , -1.53 , -1.90 , II 영역에서는 각각 1.02 , 1.11 , 1.38 로 크게 변화하고 있어서 균열성장의 둔화와 가속에 해수의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

이러한 사실은 SS, SA, AA재의 순으로 해수에 의한 섬유와 수지사이의 결합력 약화로 Fig.15와 같이 debonding의 발생이 용이하며 결국 하중방향에서의 축 균열이 손쉽게 일어나게 되어(Fig.10) I 영역에서의 균열성장둔화가 빠르게 되며, 천이점 이후에는 이미 현저하게 성장한 피로균열로 인해 축 균열의 영향이 매우 작아지는 반면 수지자체의 경화와 피로균열 성장방향에서의 debonding 또는 delamination의 영향이 상대적으로 커지기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

Chopped strand glass mat 강화 ployester복합재료의 건조재와 해수중 침지재를 대상으로 대기와 해수중에서 양진 굽힘피로시험($R=-1$)을 행한 결과는 다음과 같다.

(1) CSM형 유리섬유강화 ployester복합재료의 피로균열은 AA, SA, SS재 모두 cycle 초기에 발생하며 그후 점진적으로 균열성장이 둔화되는 영역과 균열성장이 가속되는 영역으로 구분된다.

(2) 피로균열성장이 둔화된 후 다시 가속되는 천이점의 위치는 작용하중이 증가함에 따라 높은 Δ

K값으로 이동하지만 일정하중하에서 AA, SA, SS재에 따른 차이는 없다.

(3) 해수는 섬유와 수지사이의 결합력을 저하시켜 축균열의 발생을 용이하게 하므로 I 영역에서의 균열성장의 둔화가 빠르게 일어나며, 천이점 이후에는 이미 현저하게 성장한 피로균열로 인해 축균열의 영향이 매우 작아지는 반면 수지자체의 경화와 피로균열 성장방향에서의 debonding 등의 영향이 상대적으로 커지기 때문에 II 영역에서의 균열성장은 더욱 가속된다.

참고문헌

- (1) Tsai, S.W. 1967, "Environmental Factors in the Design of Composite Materials," Mechanics of Composite Materials, Proc. 5th Symp. Naval Structural Mechanics, Pergamon, New York, pp. 749~767.
- (2) Whitney, J.M. and Ashton, J.E., 1971, "Effect of Enviroment on the Elastic Response of Layered Composite Plates," ALAA Journal, Sept., pp. 1708~1713.
- (3) 駒井謙治郎, 城下 莊平, 木下 定, J. Grenestedt, 1989, "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.
- (4) Romans, J. B., Sands, A.G. and Cowling, J.E., 1972, "Fatigue Behavior of Glass Filament-Wound Epoxy Composites in Water," Industrial

- and Engineering Chemistry Product Research and Development, Vol. 11, No.3, pp. 261~268.
- (5) 日本複合材料學會, 1989, 複合材料 핸드ブック, 日刊工業社, pp. 578~581.
- (6) Miller, D.M., 1987, "Glass Fibers," Composites, Engineered Materials Handbook, ASM International, Vol. 1, pp. 45~48.
- (7) "硬質プラスチック平板の平面曲げ疲れ試験方法," JIS K 7119.
- (8) "Standard Test Method for Water Absorption of Plastics," ASTM D 570.
- (9) "Standard Specification for Substitute Ocean Water", ASTM D 1141.
- (10) Kunz, S.C. and Beaumont, P.W.R., 1975, "Microcrack Growth in Graphite Fiber-Epoxy Resin Systems During Compressive Fatigue," Fatigue of Composite Materials, ASTM STP 559, pp. 71-91.
- (11) Kunz, S.C., 1974, "Microcrack Growth During Compressive Fatigue in Graphite Fiber-Epoxy Resin Systems," M.S. Thesis in Engineering, Materials Department, California Univ., Los Angeles.
- (12) Irwin, G.R. 1958, Encyclopedia of Physics, Springer, Heidelberg, Germany, Vol. 6.
- (13) 日本材料學會, 波勞き裂傳ば抵抗テータ集, p. 32.