

◎ 論 文

# 탄소섬유강화 복합재료의 피로강도에 미치는 모재의 영향

柳 勝 元\*

(1992년 2월 18일 접수)

## Effect of matrix on fatigue strength of carbon fiber composite materials

Seung-Won You

**Key Words :** CF/PEEK(Carbon Fiber/Polyetheretherketone)(탄소섬유와 PEEK가 혼합된 복합 재료) CF/EPOXY(Carbon Fiber/EPOXY)(탄소섬유와 EPOXY가 혼합된 복합재료) Fiber Breakage(섬유 파손) Matrix carcking(모재 균열) Delamination(층간 분리) Specific Modulus(비강성)

### Abstract

In this study, the variation of fatigue strength in CF/PEEK and CF/EPOXY, the matrix and interfacial strength of which differ from each other, has been studied from the viewpoint of microfracture behavior.

The results obtained are as follows :

According as the fatigue strength moves from the lower cycle range to the higher cycle range, that of CF/PEEK shows higher curve than that of CF/EPOXY does.

In the early stage of fatigue life, the characteristic of fatigue crack in CF/PEEK is mainly the fracture of longitudinal fiber, while that in CF/EPOXY is the fracture of transverse fiber.

The difference of fatigue strength in these materials can be explained by the fracture criteria of transverse fiber and longitudinal fiber.

### 1. 서 론

복합재료는 일반 금속재료에 비해 높은 비강성(specific modulus)과 비강도(specific strength)등

의 우수한 기계적 성질을 나타내므로, 최근 자동차, 선박, 항공우주산업등의 경량화가 요구되는 부분에 그 사용이 증가<sup>1)</sup>하고 있다.

그러나 이 재료의 역학적 특성 및 파괴거동은 금속재료와는 다른양상을 나타낸다. 즉 금속재료

\* 대림전문대학 공업재료과

의 피로수명의 대부분은 미시균열의 발생에 소요되며, 또한 이 동안의 기계적 성질은 거의 변화가 없음을 대하여 복합재료의 경우에는 피로부하시 하중반복수의 초기 단계에서 이미 강성의 저하, 층간박리 등의 현상이 나타난다.<sup>2,3)</sup> 따라서 복합재료의 사용에 있어서 이의 안정성 및 신뢰성을 향상시키기 위해서는 새로운 설계기준이 필요하며, 특히 피로거동의 파악은 중요하다고 할 수 있다.

피로부하시 나타나는 현상에 있어서 최근 많이 연구되고 있는 것은 피로손상,<sup>4,5)</sup> 그리고 피로균열 진전속도의 평가<sup>6,7,8,9)</sup>라고 할 수 있다. 일반적으로 피로손상은 다음의 특징을 나타내고 있다. 즉 (i) 피로과정에서 탄성율(강성율)의 저하가 나타나며, (ii) 하중반복수의 증가에 따라 파괴음이 발생하고, (iii) 따라서 재료의 잔류강도는 하중반복수의 증가에 따라 감소한다. 이러한 현상은 결국 미시적 파괴의 대표적 양상인 섬유 파손(fiber breakage), 모재의 균열(matrix cracking), 층간분리(delamination) 및 모재와 섬유간의 분리(decohesion) 등<sup>10,11)</sup>이라고 할 수 있다. 그러나, 이러한 손상에 의한 강성율 및 잔류강도와 피로손상 정도의 정량적 관계에 대해서는 불충분하다.

한편 피로균열 진전속도의 평가에 있어서는 피로부하시 섬유배열방향에 따른 이방성효과를 평가<sup>16,17)</sup>할 수 있는 기구가 확립되어 있지 못한 실정이

다. 현재 Wang<sup>14)</sup> 및 Kunz<sup>15)</sup> 등은 복합재료의 피로균열 진전속도를 Paris법칙과 같이 K(stress intensity factor)에 의해서 평가되고 있지만 이의 적용이 모든 복합재료에 대해서 타당하다고 볼 수 없다.

본 연구에서는 모재(matrix) 및 계면강도(interfacial strength)가 다른 탄소섬유강화 복합재료를 준비하고 이들 재료의 피로강도를 규명하기 위하여 하중반복수에 대한 미시적 파괴 양상을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 재료 및 시험편

본 시험에 사용된 복합재료는 탄소섬유강화 폴라스틱으로, 모재는 연성이 풍부한 PEEK(polyetheretherketone)와 그리고 EPOXY로서 이들 구성재료의 기계적 특성은 Table 1과 같다. 탄소섬유와 PEEK로서 이루어진 복합재료(이하에서는 CF/PEEK재라고 함) 및 EPOXY로서 이루어진 복합재료(이하에서는 CF/EPOXY재라고 함)에서는 두 재료 모두 탄소섬유의 체적함유량은 약 57%인 6층적층판(satin woven laminates)으로 시험재료의 두께는 약 2.3mm이다.

Table 1. Mechanical properties of fiber and matrix

Materials	Properties	Young's Modulus(GPa)	Tensile Strength(MPa)	Fracture Strain(%)
PEEK		2.8	92.1	142
EPOXY		2.9	51.8	2.8
CARBON		237	3100	1.2

### 2-2. 정적인장시험 및 피로시험

복합재료 즉 CF/PEEK재 및 CF/EPOXY재의 기계적 성질은 INSTRON사 만능시험기를 사용하여 ASTM D 638M-89 규격<sup>16)</sup>에 따라 가공한 3개의 시험편에 대하여 인장시험으로 평가하였으며, 이때 탄성계수 및 파단변형률은 각 시험재료의 응력-변형률곡선으로부터 구하였다. Fig. 1은 인장 및

피로시험편의 형상이다. Table 2는 이들 복합재료의 기계적 특성을 나타낸 것이다.

한편 피로시험은 10톤용 유압서어브식 피로시험기를 사용하였고, 하중반복속도는 5Hz에 정현파형으로 하중제어방식에 의하여 응력비 R=0의 상태로 3개의 시험편을 준비하여 상온에서 행하였다. 피로시험에서의 반복응력과 하중반복수와의 관계에서는 정적인장시험에서 얻어진 인장강도를 기본

Table 2. Mechanical properties of composite materials

Properties Materials	Young's Modulus(GPa)	Tensile Strength(MPa)	Fracture Strain(%)	Volume Fraction(%)
CF/PEEK*	65.8	655	78	57.1
CF/EPOXY*	69.2	690	0.83	57.5

\* 6th ply satin woven laminates.

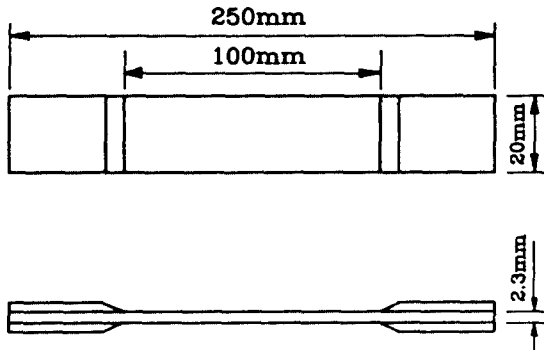


Fig. 1 Configuration of tension and fatigue specimen

으로 하여 구한 식(1)의 반복응력비  $R_s$ 에 의해 실험을 하였다.

$$R_s = \sigma_{\max} / \sigma_B$$

$\sigma_{\max}$  : 반복 하중시의 최대 응력

$\sigma_B$  : 정적인장 강도 ..... (1)

또한 미시균열의 진전양상은 임의의 하중반복수  $N$ 까지 실험한 시험편을 하중방향에 평행으로 절단한 두께방향의 종단면을 연마하여, 광학현미경에 의해 관찰하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3-1. 피로강도 및 손상거동

Fig. 2는 일정진폭하중하의 피로시험에 의해 얻어진  $R_s-N$  곡선으로 종축의  $R_s$ 는 식(1)에 의하여 정의한 값이다. 피로강도는 저사이클의 초기단계에서 고사이클 영역으로 이동함에 따라 CF/PEEK재가 CF/EPOXY재보다 높음을 알 수 있다. 小林<sup>17)</sup> 등은 CFRP적층판에 대한 연구에서 피로강도의 저하는 층간박리에 기인하며, 이의 저하정도는 유사

등방성 적층판의 경우가 크로스(cross)적층판보다 현저함을 보고하고 있다.

또한 이들 재료의 하중반복수에 대한 탄성계수의 손상정도는 Fig. 3과 같다. 종축의 탄성계수  $E_0$ 는 기본상태( $N=0$ )에서의 값이며,  $E$ 는 임의의 하중반복수  $N$ 을 가한후, 인장실험에 의하여 구한 것으로  $E/E_0$ 의 값이 낮아수록 비강성(specific modulus)의 손상이 크다고 할 수 있다. 이 그림에서  $N$ 에 대한  $E/E_0$ 의 기울기는 CF/EPOXY재의 것이 CF/PEEK재의 것보다 급격함을 나타내고 있으며, 또한 동일 손상정도에서의  $N$ 값은 CF/PEEK재의 것이 많음을 나타내고 있다.

따라서 CF/EPOXY재와 CF/PEEK재에 있어서 저사이클 영역 보다 고사이클 영역에서 피로강도에 현저한 차이가 생기는 것은  $E/E_0$ 의 손상정도에도 관계되는 미시균열발생 진전양상의 차이에 의한 것으로 생각된다.

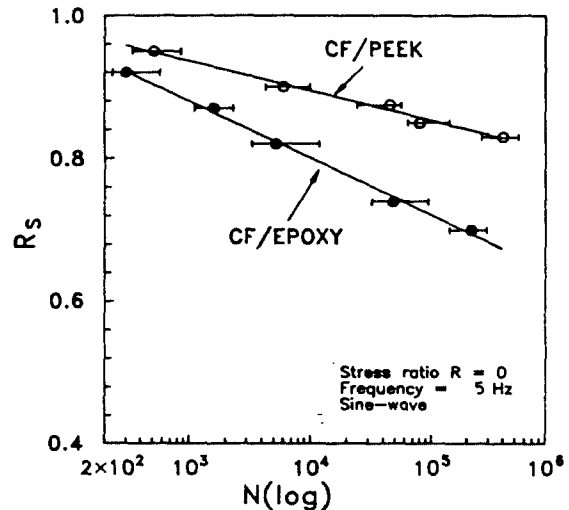


Fig. 2 Relation between repeated stress ratio( $R_s$ ) and number of cycles( $N$ ) under constant amplitude loading

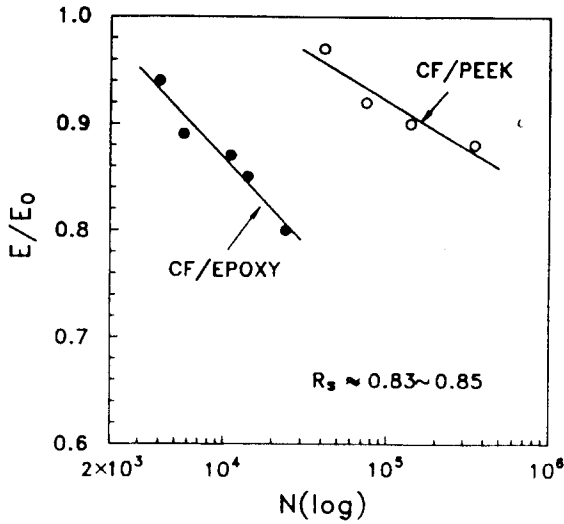


Fig. 3 Relation between degradation of elastic modulus and number of cycles(N)

3-2. 균열발생 및 진전거동

Fig. 4 및 Fig. 5는 거의 동일한 반복응력비(CF/PEEK재 :  $R_s \cong 0.85$ , CF/EPOXY재 :  $R_s \cong 0.83$ )에서 관찰한 피로균열의 양상을 나타낸 대표적인 것으로 CF/PEEK재에서는 파단하중반복수  $N_f$ 의 약 30%, 그리고 CF/EPOXY재에서는 파단하중반복수  $N_f$ 의 약 35% 반복수에서 관찰한 것이다.

하중반복수의 초기에서는, CF/EPOXY재는 횡방향의 섬유(90° 섬유)층 또는 섬유와 모재의 계면에서의 균열이 종방향의 섬유(0° 섬유)파단에 비하여 많이 발생하지만, CF/PEEK재에서는 이들에 의한 것보다는 오히려 종방향 섬유의 파단이 횡방향의 것보다 우선임을 나타내었다. 이들 재료의 균열양상은 더욱 파단수명의 50%정도에서 관찰해보면 Fig. 6 및 Fig. 7에서와 같이 현저히 다른 양상으로 진전함을 알 수 있다. 즉, CF/EPOXY재에서는 횡방향의 섬유층 또는 섬유와 모재의 계면에서 형성한 균열이 하중 반복수의 증가에 따라 결합하여 미시균열로서 성장하게 되며, 또한 이 균열은 종방향의 섬유다발에서 일시 멈추거나 또는 관통하게 된다.

한편 CF/PEEK재에서는 종방향의 섬유 파단이 하중반복수의 증가에 따라 연결 또는 성장하게 되

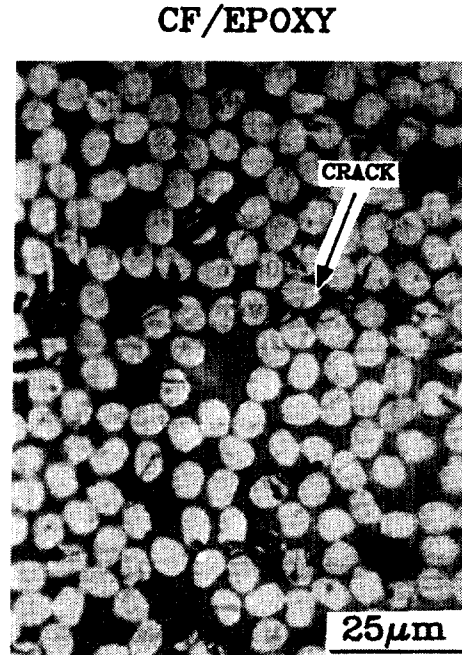


Fig. 4 Features of fatigue crack in 90° laminates (in transverse direction)

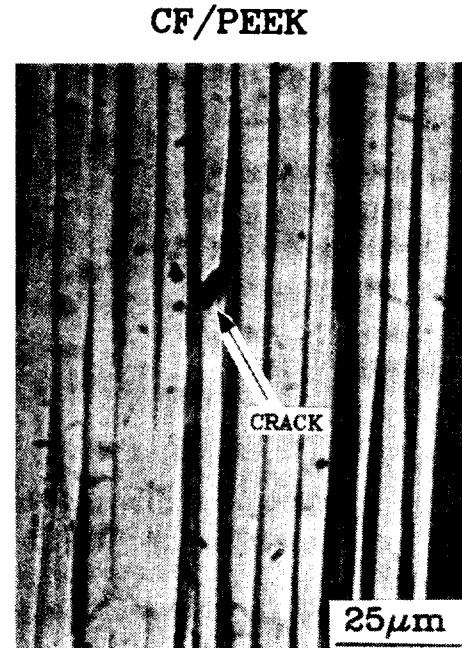


Fig. 5 Features of fatigue crack in 0° laminates (in longitudinal direction)

**CF/EPOXY**

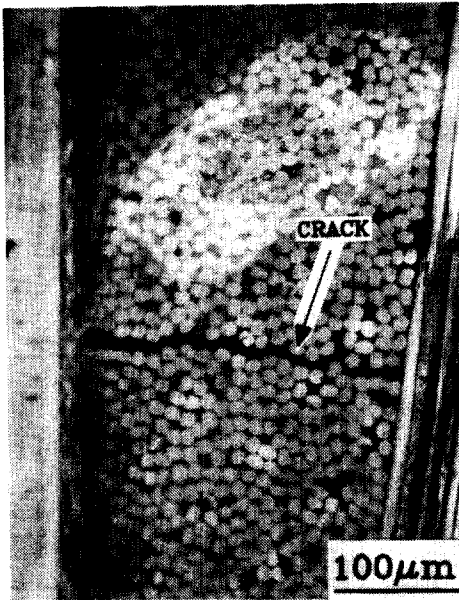


Fig. 6 Features of fatigue crack growth in 90° laminates(in transverse direction)

**CF/PEEK**

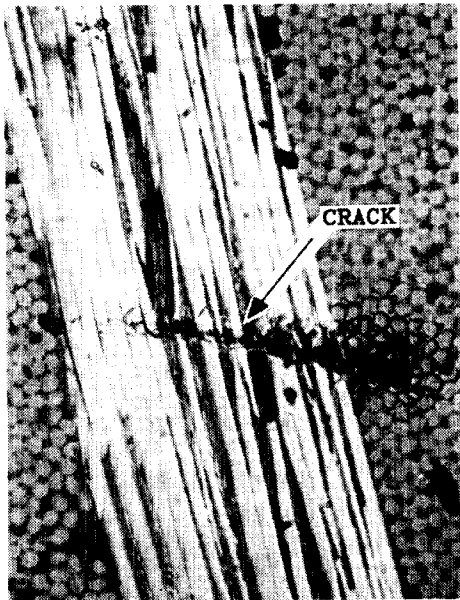


Fig. 7 Features of fatigue crack growth in 0° laminates(in longitudinal direction)

어 횡방향의 섬유 또는 모재로 진전하고 있음을 알 수 있다. 이러한 균열의 형성, 진전거동을 정량적으로 검토하기 위하여, 횡방향의 섬유와 모재에 형성된 균열 및 종방향의 섬유층에 형성된 균열을 하중반복수에 대하여 평가하였다.

먼저 Fig. 8은 횡방향의 적층판에 형성된 균열 길이  $a_t$ 의 합  $\Sigma a_t$ 를 관찰면적  $A_t(10\text{mm} \times 2.3\text{mm})$ 로

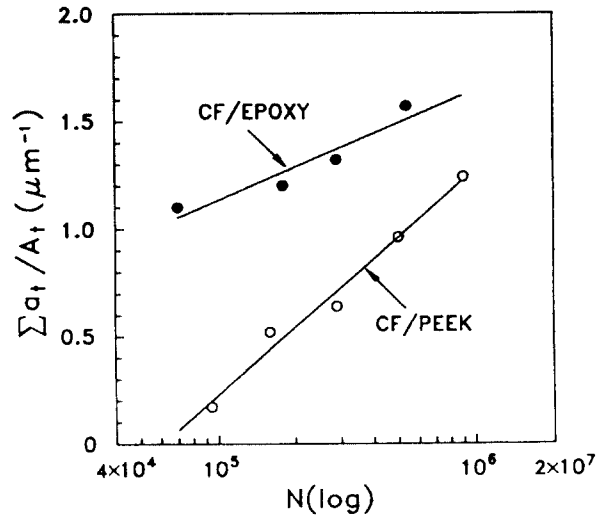


Fig. 8 Relation between  $\Sigma a_t / A_t$  and  $N$  in 90° laminates

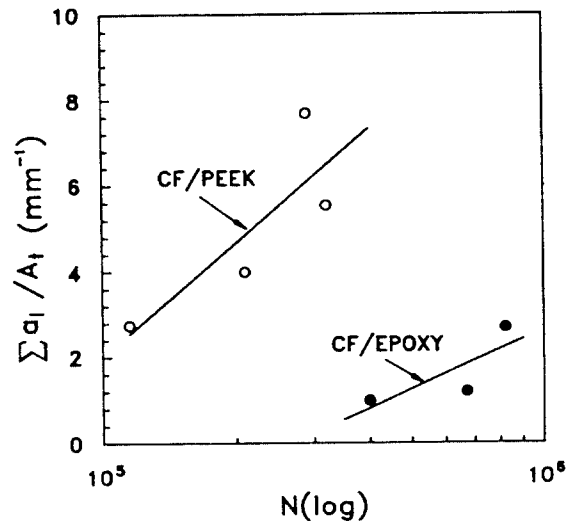


Fig. 9 Relation between  $\Sigma a_l / A_l$  and  $N$  in 0° laminates

서 나눈 값, 즉 90° 적층판의 균열 밀도,  $\Sigma a_i/A_i$ 와 하중반복수 N과의 관계이다. 이 그림에서 균열밀도는 N의 증가에 따라 상승하지만, CF/EPOXY재의 경우가 CF/PEEK재의 것에 비하여 횡방향, 즉 90° 적층판의 균열형성이 용이함을 알 수 있다.

한편 Fig. 9는 종방향, 즉 0° 적층판에 형성된 균열길이  $a_i$ 의 합  $\Sigma a_i$ 를 관찰면적  $A_i$ 로서 나눈 값,  $\Sigma a_i/A_i$ 와 N과의 관계이다. 이 경우에는 0° 적층

판에서 CF/PEEK재의 균열형성이 CF/EPOXY의 것보다 용이하다고 할 수 있다.

이상의 균열형성, 진전거동의 양상을 나타낸 모식도가 Fig. 10으로서, CF/EPOXY재의 피로강도는 0° 적층판의 파손보다는 90° 적층판에 형성된 균열에 의해 지배되지만, CF/PEEK재의 것은 0° 적층판의 파손에 의하여 피로강도가 지배된다고 할 수 있다.

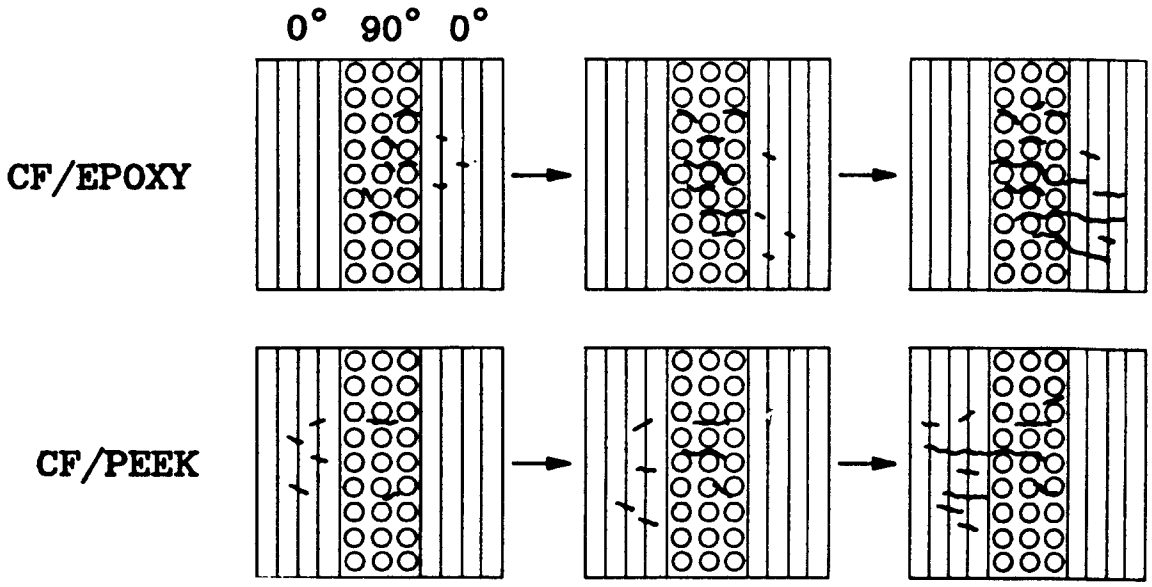


Fig. 10 Schematic diagram of crack formation and growth behavior

3-3. 적층판의 응력해석

Fig. 11은 CF/PEEK재 및 CF/EPOXY재의 적층판에 작용하는 응력을 해석하기 위하여 모델화한 것으로서, 외력에 의하여 작용하는 응력  $\sigma_a$ 는 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$\sigma_a = E \varepsilon = \sigma_1 V_1 + \sigma_t V_t$$

$$= \varepsilon (E_1 V_1 + E_t V_t) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 E,  $\varepsilon$ : 탄성계수 및 변형율

$\sigma_1, \sigma_t$ : 0° 및 90° 적층판에 작용하는 응력

$V_1, V_t$ : 0° 및 90° 적층판의 체적함유량

또한 응력비  $R=0$ 의 일정진폭응력하의 피로시

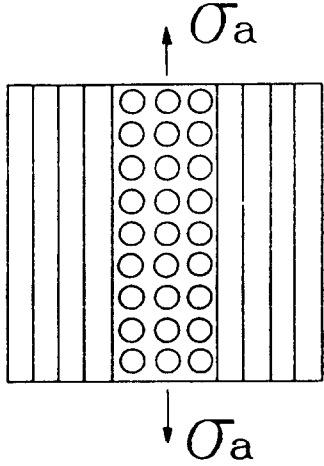


Fig. 11 Model of stress analysis in laminates

험에서는

$$\epsilon = \sigma_s/E = \sigma_{max}/E = R_s \sigma_B/E \dots\dots\dots (3)$$

으로 나타내어 진다.

(1) 90° 적층판의 응력해석

횡방향섬유를 가진 90° 적층판의 응력 $\sigma_t$ 는 식 (2), (3)으로 부터

$$\sigma_t = E_t \epsilon = E_t R_s \sigma_B/E \dots\dots\dots (4)$$

$$E_t = E_f E_m / (E_f(1 - V_f) + E_m V_f) \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $E_t$ ,  $E_f$ ,  $E_m$ 은 90° 적층판의 탄성계수, 90° 적층판 섬유 및 모재의 탄성계수,  $V_f$ 는 섬유의 체적함유량이다. Table1의 기계적 특성으로 부터  $E_f = 237\text{GPa}$ ,  $E_m = 2.8\text{GPa}$ (PEEK),  $2.9\text{GPa}$ (EPOXY) 그리고  $V_f = 0.57$ 을 식(5)에 대입하면 각 복합재료에서의 90° 적층판의 탄성계수  $E_t$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$E_t \cong 6.41\text{GPa} \text{ (CF/PEEK재)}$$

$$\cong 6.64\text{GPa} \text{ (CF/EPOXY재)}$$

또한 이들  $E_t$ 값과 각 재료의 인장강도  $\sigma_B$ (Table 2)를 식(4)에 대입하여  $\sigma_t$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_t \cong 63.8 R_s \text{ MPa} \text{ (CF/PEEK재)}$$

$$\cong 66.2 R_s \text{ MPa} \text{ (CF/EPOXY재)}$$

$R_s = 0.85$ (CF/PEEK재),  $0.82$ (CF/EPOXY재)의 피로시험에서는 90° 적층판에 작용하는 응력  $\sigma_t$ 는

$$\sigma_t \cong 54.2\text{MPa} \text{ (CF/PEEK재)}$$

$$\cong 64.3\text{MPa} \text{ (CF/EPOXY재)}$$

로 산출된다.

이상의 계산결과인  $\sigma_t$ 를 1방향(90°) 강화재의 파단강도  $\sigma_{tB}^{(90)}$ (CF/PEEK재 : 84MPa, CF/EPOXY재 : 49MPa)값과 비교하면 다음과 같다.

$$K_t = \sigma_t / \sigma_{tB} = 54.2/84$$

$$= 0.65 < 1 \text{ (CF/PEEK재)} \dots\dots\dots (6)$$

$$K_t = \sigma_t / \sigma_{tB} = 64.3/49$$

$$= 1.11 > 1 \text{ (CF/EPOXY재)} \dots\dots\dots (7)$$

식 (6) 및 (7)의 결과로 부터, CF/EPOXY재의

피로에서는 횡방향 섬유층, 즉 90° 적층판의 인장강도  $\sigma_{tB}$ 가 응력  $\sigma_t$ 보다 낮기 때문에 횡방향의 균열의 발생 및 성장이 용이하며, 이의 거동이 피로강도 및 피로수명을 지배한다고 할 수 있다. 이에 대하여 CF/PEEK재의 경우에는  $\sigma_t$ 보다  $\sigma_{tB}$ 가 높기 때문에 이 방향에서의 균열이 CF/EPOXY재의 것 보다 용이하지 않다고 할 수 있다.

(2) 0° 적층판의 응력해석

하중방향에 대하여 종방향의 섬유를 가진 0° 적층판에 생기는 응력  $\sigma_1$ 는 식 (2), (3)으로 부터

$$\sigma_1 = E_1 \epsilon = E_1 R_s \sigma_B/E \dots\dots\dots (8)$$

혼합법칙에 의하면

$$E_1 = E_f V_f + E_m(1 - V_f) \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $E_1$ ,  $E_f$ ,  $E_m$  : 0° 적층판의 탄성계수, 이의 섬유 및 모재의 탄성계수

$V_f$  : 섬유의 체적 함유량(0° 적층판)

식(9)에 Table 1의 기계적 특성을 대입하여  $E_1$ 을 산출하면 다음과 같다.

$$E_1 \cong 136.3\text{GPa} \text{ (CF/PEEK재, CF/EPOXY재)}$$

따라서  $R_s = 0.85$ (CF/PEEK재),  $0.82$ (CF/EPOXY재)의 일정진폭응력하의 피로에 있어서 0° 적층판에 작용하는 추정응력  $\sigma_1$ 은 다음과 같다.

$$\sigma_1 \cong 1153.3\text{MPa} \text{ (CF/PEEK재)}$$

$$\sigma_1 \cong 1114.4\text{MPa} \text{ (CF/EPOXY재)}$$

한편  $E_1$ ,  $E_t$  및 종방향섬유의 한계파단강도  $\sigma_{1B}$  그리고  $\sigma_1$ 와의 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$E = E_1 V_1 + E_t V_t \dots\dots\dots (10)$$

$$\sigma_B = \sigma_{1B} V_1 + \sigma_{tB} V_t \dots\dots\dots (11)$$

식 (10)으로 부터  $V_1 \cong 0.45$ ,  $V_t \cong 0.55$ 가 됨을 알 수 있고, 따라서 식(11)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{1B} = (\sigma_B - 0.55\sigma_{tB})/0.45 \dots\dots\dots (12)$$

따라서 각 재료에 있어서의  $\sigma_{1B}$ 는 다음과 같이

추정된다.

CF/PEEK재 :  $\sigma_{1B} \cong 1352.9 \text{ MPa}$

CF/EPOXY재 :  $\sigma_{1B} \cong 1473.4 \text{ MPa}$

이상의 결과로 부터, 종방향섬유의 응력 $\sigma_1$ 과 한계응력  $\sigma_{1B}$ 를 검토하면 다음과 같다.

CF/PEEK재 :  $K_I = \sigma_1 / \sigma_{1B} \cong 0.85 \dots\dots\dots (13)$

CF/EPOXY재 :  $K_I = \sigma_1 / \sigma_{1B} \cong 0.76 \dots\dots\dots (14)$

이들 관계로부터, CF/PEEK재가 CF/EPOXY재 보다 종방향 섬유의 파단이 용이하다고 할 수 있다.

지금까지 횡방향의 90° 적층판 및 종방향의 0° 적층판에 있어서 균열의 발생조건의 추정응력을 검토한 결과, 0° 적층판의 균열발생의 응력조건은 CF/PEEK재가 CF/EPOXY재에 비하여 약간 용이하다고 할 수 있으나, 90° 적층판에 있어서는 오히려 CF/EPOXY재 보다 훨씬 균열 발생이 용이하다고 하겠다.

이러한 관점에서 피로강도는 지금까지 설명한 횡방향섬유의 파단조건  $K_{II}$ (fracture criteria of transverse fiber) 및 종방향섬유의 파단조건  $K_I$ (fracture criteria of longitudinal fiber)의 2개의 parameter에 의해 어느정도 결정된다고 생각되며, 균열 발생, 성장 계수  $K_I$ 는 식 (15)와 같이 표현되며,  $K_I$ 가 증가할 수록 피로강도는 저하한다고 할 수 있다.

$K_I \propto \frac{K_{II}}{K_I} \dots\dots\dots (15)$

### 4. 결 론

Satin-woven carbon fiber에 PEEK 및 EPOXY를 혼합한 CF/PEEK 및 CF/EPOXY 복합재료의 피로강도의 변화를 미시적 파괴거동으로부터 검토하였다.

얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 고사이클 영역일수록 CF/PEEK재의 피로강도는 CF/EPOXY재의 것보다 커진다.

(2) 피로수명 초기에서는 CF/PEEK재는 종방향 섬유의 균열이, 그리고 CF/EPOXY재에서는 횡방

향의 균열발생이 지배적이다. 그러나, 수명 후반에서는 CF/PEEK재는 종방향섬유의 파단에 의해 횡방향섬유 또는 matrix로 진전하여 불안정파괴를 일으키지만, CF/EPOXY재의 경우는 횡방향의 균열이 종방향섬유층을 관통하여 최종파괴를 일으킨다.

(3) 피로강도의 대소조건인  $K_{II}$ 는 횡방향 및 종방향섬유의 파단조건  $K_{II}$  및  $K_I$ 에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$K_{II} \propto \frac{K_{II}}{K_I} \dots\dots\dots (15)$

후기 : 이 논문은 1989년도 학교법인 대림학원의 학술 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사의 뜻을 표하며, 특히 본 논문을 지도해 주신 한양대학교 김정규 교수님께 깊이 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- 1) M.F. Kanninen and C.H. Popelar, "Advanced Fracture Mechanics," Oxford University Press, PP. 329, 1985
- 2) 増田雄市郎, "ロ-ビングクロス FRPの疲勞破壊過程に關する研究", 日本機械學會論文集 (A), Vol. 47, No. 24, pp. 1266~1275, 1981
- 3) W.W. Stinchcomb, K.L. Reifsnider, P. Yeung and J. Masters, "Effect of Ply Constraint on Fatigue Damage Development in Composite Materials Laminate", ASTM STP 723, pp. 64~84, 1981
- 4) W.S. Carswell, "Damage Mechanics and Composite Behavior", Composite Structures, Vol. 10, pp. 335~342, 1988
- 5) 網島外3名, "片側き裂を有するFRP材の疲勞き裂進展過程に關する研究", Trans. JSME, Vol. 34, No. 378, pp. 286~292, 1985
- 6) M. Naeem, "Fatigue Damage-Compliance Relationship for GFRP", Composites, Vol. 19, No. 6, pp. 443~445, 1988
- 7) G. Frantziskonis, "Distributed Damage in Composites", Theory and Verification, Compo-



- site Structures, Vol. 10, pp. 165~184, 1988
- 8) G.L. Grimes, "Experimental Study of Compression-Compression Fatigue of Graphite Epoxy Composites", ASTM STP 734, pp. 281~337, 1981
  - 9) M.M. Ratwani and H.P. Kan, "Effect of Stacking Sequence on Damage Propagation and Failure Modes in Composite Laminate", ASTM STP 775, pp. 211~228, 1982
  - 10) A. Charewicz and I.M. Daniel, "Composite Materials: Fatigue and Fracture", ASTM STP 907, pp. 274~297, 1986
  - 11) W. Hwang and K.S. Han, "Statistical Study of Strength and Fatigue Life of Composite Materials", Composites, Vol. 18, No. 1, pp. 47~53, 1987
  - 12) J.E. Masters and K.L. Reifsneider, "An Investigation of Cumulative Damage Development in Quasi-Isotropic Graphite/Epoxy Laminates", ASTM STP 775, pp. 40~62, 1982
  - 13) Ming-Hwa R. Jen and J.M. Hsu, "Fatigue Degradation in Centrally Notched Quasi-Isotropic Laminates", Journal of Composite Materials, Vol. 24, pp. 823~837, 1990
  - 14) S.S. Wang, E.S.M. Chim and N.M. Zahlan, "Fatigue Crack Propagation in Random Short Fiber SMC Composite", Journal of Composite Materials, Vol. 17, pp. 250~266, 1983
  - 15) S.C. Kunz & P.W.R. Beaumont, "Microcrack Growth in Graphite Fiber-Epoxy Resin Systems Compressive Fatigue", ASTM STP 569, pp. 71~91, 1975
  - 16) ASTM D 638M-89, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," pp. 156~176, 1989
  - 17) 小林繁夫外4名, "CFRP積層板の疲労強度に及ぼす損傷の影響", 日本複合材料學會誌, Vol. 15, No. 3, pp. 122~131, 1989
  - 18) 中倉・南雲, "1988년도 日本複合材料學會 研究發表 論文集." pp. 9~10, 1988