

# 非規則 短纖維強化 SMC 複合材料의 疲勞龜裂 傳播舉動에 關한 研究

金在東·高性潤\*

韓國漁業技術訓練所, \*釜山水產大學校

(1990년 4월 16일 접수)

## A Study on Fatigue Crack Propagation Behavior in Random Short-Fiber SMC Composites

Jae-Dong, KIM and Sung-Wi KOH\*

Korean Fishing Training Center and

\*National Fisheries University of Pusan

(Received April 16, 1990)

The SMC composite, now being considered in certain structural applications, is anticipated to experience repeated loading during service. Thus, understanding of the fatigue behavior is essential in proper use of the composite material.

In this paper, using the SMC composite composed of E-glass chopped strand and unsaturated polyester resin three point bending fatigue tests are carried out to investigate the fatigue crack propagating behavior under various cyclic stresses and fatigue damage of various microcrack forms.

The following results are obtained from this study ;

- 1) Most of the total fatigue life of the SMC composite is consumed at the initial extension or the growth of the macroscopic crack.
- 2) A Paris' type power-law relationship between the crack propagation rate and stress intensity factor range is obtained, and the value of material constant m is much higher (m = 9~11) than that of other metals.
- 3) In case of high cyclic stress the fatigue damage show high microcrack density and short crack length, but in case of low cyclic stress does it vice versa.
- 4) Fatigue damage is characterized by microcrack density, crack length and distribution of crack orientation.

### Nomenclature

a	: Crack length(mm)	E	: Elastic modulus(kgf/mm <sup>2</sup> )
a <sub>1</sub>	: Initial notch length(mm)	I	: Moment of inertia(mm <sup>4</sup> )
Δa	: Crack growth(mm)	K <sub>1</sub>	: Stress intensity factor(kgf/mm <sup>3/2</sup> )
B	: Specimen thickness(mm)	ΔK <sub>1</sub>	: Stress intensity factor range(kgf/mm <sup>3/2</sup> )
		P	: Load(kg)
		R	: Stress ratio(σ <sub>min</sub> /σ <sub>max</sub> )

- S : Specimen span(mm)  
 W : Specimen width(mm)  
 Y : Crack ratio(a/W)  
 Z : Section modulus(mm<sup>3</sup>)  
 $\delta$  : Displacement(mm)  
 $\sigma$  : Stress(kgf/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_{max}$  : Maximum cyclic stress(kgf/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_{min}$  : Minimum cyclic stress(kgf/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_{UTS}$  : Tensile strength(kgf/mm<sup>2</sup>)

## 서 론

최근 에너지 절약 및 신소재 개발의 일환으로 재료의 강도, 경량성, 그의 제특성을 구비한 새로운 재료의 개발이 활발히 추진되고 있으며, 이러한 새로운 특성을 개발하는 면에서 복합재료는 그 경량성, 내식성, 절연성 등으로 인해 크게 각광을 받고 있다<sup>1)</sup>.

복합재료는 거시적으로 두가지 이상의 재료를 물리적으로 결합하여 구성된 것으로 소재 단독으로 가질 수 없는 성질을 발휘할 수 있는 재료를 말한다<sup>2)</sup>. 복합재료는 섬유(fiber)와 모재(matrix)로 구성되는데, 섬유는 하중을 지탱하는 것이 주 임무라면 모재는 섬유간의 결합 역할을 하며 하중의 전달을 원활히 하는데 있다<sup>3,4)</sup>.

섬유와 모재의 복합 방법은 개방 성형법과 폐쇄성형법으로 나누며, 개방성형법에는 짜맞추기법(hand lay up process), 분무법(spray up process), 진공백오토클레이브법(vacuum-bag autoclave process), 및 필라멘트 권선법(filament winding process) 등이 있고, 폐쇄성형법에는 박판성형화합물법(sheet molding compound)과 반응사출성형법(reaction injection molding) 및 연속펄트루전법(continuous pultrusion process) 등이 있다<sup>5)</sup>.

이 중 SMC법은 수지가 균일하게 분포된 두장의 폴리에틸렌 필름(polyethylene film) 사이에 잘려진 단섬유(chopped short fiber)를 깔고 밀착된 롤러로서 필름을 접착시켜 판상(sheet) 상태의 프레스 성형용 중간 재료를 얻는 최신 폐쇄성형법의 일종으로, 가공성, 고용적 섬유복합재

의 생산 가능성, 부품의 통일성, 낮은 공구비, 설계의 유연성 및 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있다는 점 등으로 하중을 받는 구조재료로의 이용이 유망한 재료이다.

한편 이러한 SMC 복합재료가 사용중 반복적인 하중을 받게될 때, 피로균열전파거동과 피로손상기구에 대한 올바른 이해는 이 재료의 올바른 사용과 구조재료의 강성 및 신뢰성을 보증하는 피로수명예측에 있어 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

연속섬유강화 복합재의 피로균열거동에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔지만, 단섬유(短纖維) 강화 SMC 복합재의 피로균열거동에 관한 연구는 SMC 복합재가 도입된 것이 최근이고 피로 파괴실험과 해석상의 여러가지 복잡성 때문에 그리 많지 않다. 더구나 비규칙 단섬유강화 SMC 복합재료에 대한 연구는 더욱 미비한 실정이다<sup>6)~8)</sup>.

비규칙 단섬유강화 SMC 복합재는 제작상 타고난 섬유, 모재, 충전재 등의 미시적인 이종성(異種性)에도 불구하고 이종재료의 평면상 비규칙 배열은 거시적으로 보면 통계적 평면상 균질로 볼 수 있다. 또한, 미시적인 평면상의 비규칙 배열은 두께방향을 통해서 보면 거시적으로 균질로 가정될 수 있다. 그러므로 비규칙 단섬유강화 SMC 복합재를 균질등방성으로 가정하여 선형탄성 파괴역학(LEFM: linear elastic fracture mechanics)에 적용하여 해석함이 가능하리라 본다.

그러나 복합재료는 평면변형을 파괴인성을 만족하는 실험조건이 없고 안정균열성장개시점이 불명확할 뿐 아니라, 균열은 동일 평면상에 진전하기 어려우므로 구조용 재료로서의 신뢰성을 높이기 위해서는 많은 연구가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 국산 비규칙 단섬유 SMC 복합재료의 피로파괴특성 및 피로손상에 대한 기초자료로서 피고균열의 전파특성을 나타내는데 파괴역학을 적용하여, 서로 다른 크기의 응력으로 3점굽힘피로실험을 행하여 피로균열전파특성과 미시피로손상기구(microscopic fatigue damage mechanism)를 파악하고자 한다.

## 재료 및 실험방법

### 1. 재료 및 시험편

Fig. 3은 피로실험에 사용된 3점굽힘피로시험편의 형상 및 치수이다. 스펠에 대한 판폭의 비( $S/W$ )는 4로 하였고, 최초균열에 대한 판폭의 비( $a_1/W$ )는 0.2이다. 여기에서  $a_1$ 은 초기 기계가공 노치길이,  $W$ 는 판폭이다. 초기 노치길이 0.6  $a_1$ 은 두께 1.2mm의 다이아몬드 커터로 가공한 후 노치길이 0.4 $a_1$ 은 두께 0.3mm의 얇은 금속톱(slitting metal saw)으로 주의하여 가공하였다.

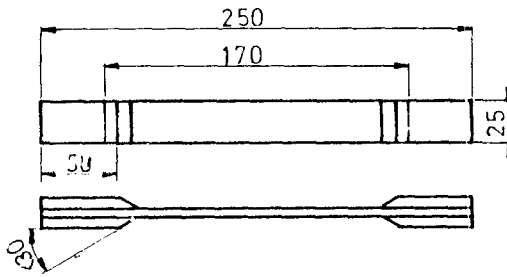


Fig. 1. Configuration of test specimen.

Table 1. Chemical composition of SMC-R30 composite

Constituents	Components/Classification	Quantity (wt%)
Glass mat	#450	29.4
Polyester Resin	MC.200	22.7
Low shrinkage agent 1	LP-80	15.2
Low shrinkage agent 2	LP-1	4.4
Filler	$C_2CO_3$	14.2
Pigment	34087	4.3
Mold releaser	S.T.Z <sub>n</sub>	1.2
Thickener	MgO	1.0
Others		2.6

Table 2. Mechanical properties of SMC-R30 composite

Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Compressive strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Flexural strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elastic modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Poisson's ratio
10.7	14.4	19.4	1040	1.7	0.11

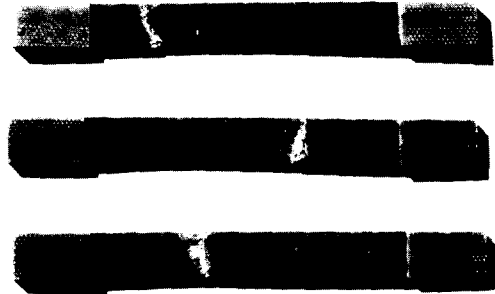


Fig. 2. Fracture shape of tensile test specimen.

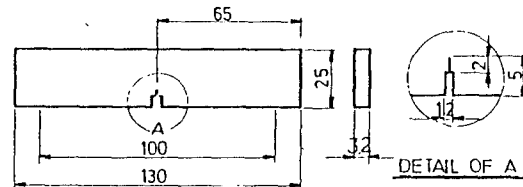


Fig. 3. Configuration of three point bending test specimen.

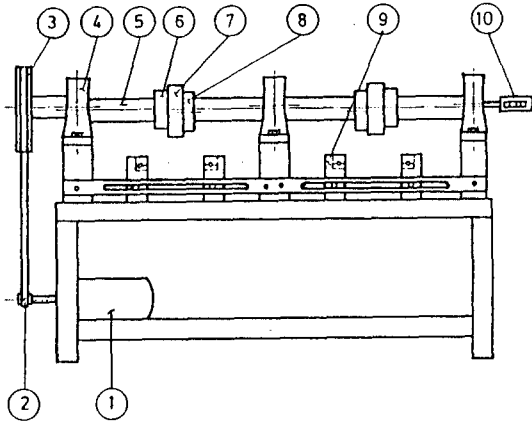
### 2. 실험장치

피로실험에서 사용된 3점굽힘피로시험기는 자작한 것으로 전체 계통도는 Fig. 4와 같고, Fig. 5는 실험장치의 사진이다.

굽힘 변위량은 부쉬(bush)를 회전시켜 조정 가능하게 하였다. 축의 회전 속도는 600 rpm이며, 동시에 두개의 시험편을 실험할 수 있고, 시험편대를 이동하고 집중하중용 핀을 조정하면 최대길이 280mm, 폭 35mm의 시험편까지 실험이 가능하다.

실험장치에서 편심량을 조정할 수 있는 원리를 설명하면 다음과 같다. 축은 폴리의 회전 중심에서 0.32mm 내려간 곳에 회전 중심을 갖는 편심축이다. 부쉬가 취부되지 않은 상태라면 이축은 0.64mm의 편심량을 갖는 편심축이다. 이때 이 편심축의 회전중심에서 다시 0.32mm 내려간 곳에 회전중심을 갖는 부쉬를 제작하여 편심축에 삽입했다. 부쉬를 편심축에서 회전시켜 편심량을 조정할 수 있게 제작하였으므로, 축 전체의 편심량은 최소 0mm에서 최대 1.28mm까지 조정 가능하다.

부쉬의 회전각에 대한 편심량과 편심량에 대한 부쉬의 회전각은 Fig. 6에서 설명할 수 있다.



- 1. Motor
- 2. V-Belt
- 3. Pulley
- 4. Unit bearing
- 5. Eccentric shaft
- 6. Nut
- 7. Ball bearing
- 8. Bush
- 9. Specimen bed
- 10. Counter meter

Fig. 4. Schematic drawing of test apparatus.

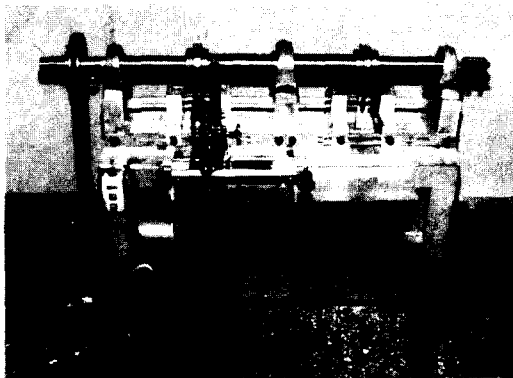


Fig. 5. Photograph of experimental apparatus.

Fig. 6에서 부쉬의 회전각( $\theta$ )에 대한 편심량(S)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C^2 = (a + a\cos\theta)^2 + (a\sin\theta)^2$$

$$= a^2(2 + 2\cos\theta) \dots\dots\dots (1)$$

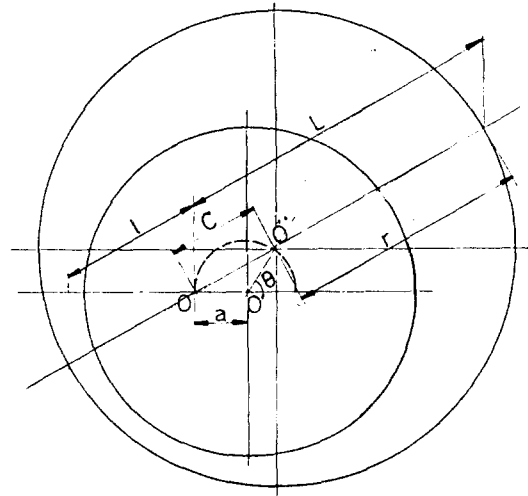
그런데

$$L = r + C, \quad l = r - C \dots\dots\dots (2)$$

이므로

$$S = L - l = 2C = 2a \sqrt{2 + 2\cos\theta} \dots\dots\dots (3)$$

따라서 편심량(S)에 대한 부쉬의 회전각 ( $\theta$ )



- O ; Center of shaft
- O' ; Center of eccentric shaft
- O'' ; Center of bush
- a ; Eccentric length  $\times 1/2$
- $\theta$  ; Rotating Angle of bush
- L ; Longest length from center of shaft to large circle
- l ; Shortest length from center of shaft to large circle

Fig. 6. Principle of variable eccentric shaft.

는 다음과 같다.

$$\theta = \cos^{-1}(S^2/8a^2 - 1) \dots\dots\dots (4)$$

### 3. 실험방법

피로균열전파거동을 파악하기 위한 시험편은 단일 편측노치를 갖는 Fig. 3과 같은 J점굽힘시험편을 사용하였고, 이때 노치선단에 걸리는 응력과 시험편 중앙에서의 변위량은 다음 식으로 계산하였다.

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{PS/4}{B(W-a_1)^2/6} = \frac{3PS}{2B(W-a_1)^2} \dots (5)$$

이므로

$$P = \frac{2B(W-a_1)^2\sigma}{3S} \dots\dots\dots (6)$$

$$\delta = \frac{PS^3}{48EI} \dots\dots\dots (7)$$

위의 식으로부터 최대반복응력이 재료의 최대

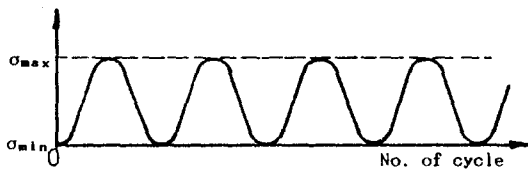
인장강도  $10.7\text{kgf/mm}^2$ 의 50%, 60% 및 70%에 해당하는 응력을 구하고, 이 응력에 해당하는 하중을 구한 후 변위량을 계산하였다. Table 3은 위의 식들을 이용하여 구한 각각의 응력, 하중, 변위량을 나타낸 것이다.

이렇게 구한 변위량으로 10Hz의 주파수로서 반복피로응력을 가하면서 피로실험을 행하였다. 이때 균열의 길이는 0.01mm까지 측정할 수 있는 이동현미경을 사용하여 측정하였다.

Fig. 7은 시험편에 가해지는 응력을 Cycle의 함수로 나타낸 것이며 시험편은 응력비 ( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ )가 0인 편진반복응력을 받는다.

**Table 3. Relationship between each maximum cyclic stress and displacement at notched specimen**

Load (%)	$\sigma_{max}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	P (kg)	$\delta$ (mm)
50	5.35	45.65	0.43
60	6.42	54.78	0.51
70	7.49	63.91	0.60



**Fig. 7. Model of fatigue stress.**

미시피로손상기구(microscopic fatigue damage mechanism)의 특성을 파악하기 위한 피로 시험편은 노치를 가공하지 않은 시험편으로 길이, 폭, 두께는 Fig. 3과 동일하다. 이 시험편에 걸리는 응력과 시험편 중앙에서의 변위량은 다음 식으로 계산하였다.

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{PS/4}{BW^2/6} = \frac{3PS}{2BW^2} \dots\dots\dots(8)$$

이므로

$$P = \frac{2BW^2\sigma}{3S} \dots\dots\dots(9)$$

$$\delta = \frac{PS^3}{48EI} \dots\dots\dots(10)$$

위의식으로 부터 최대반복응력이 재료의 최대 인장강도의 50%, 60% 및 70%에 해당하는 응력

을 구하고, 이 응력에 해당하는 변위량을 계산하였다.

Table 4는 위의 식들을 이용하여 구한 각각의 응력, 하중, 변위량을 나타낸 것이다. 이와 같은 변위량으로 반복피로응력을 가하면서 피로반복손상에 의한 여러 가지 형태의 미소균열과, 최대반복응력임 각각 다른 경우의 균열밀도 및 균열길이 등을 관찰하였다.

**Table 4. Relationship between each maximum cyclic stress and displacement at unnotched specimen**

Load (%)	$\sigma_{max}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	P (kg)	$\delta$ (mm)
50	5.35	71.33	0.34
60	6.42	85.60	0.41
70	7.49	99.87	0.48

## 결과 및 고찰

### 1. 피로균열전파거동

각각 세가지 반복응력하에서의 피로균열전파거동을 반복사이클의 함수로 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 복합재가 가지고 있는 피로수명의 대부분은 균열성장의 초기 단계에서 소모하며, 가해지는 피로응력이 높을수록 균열의 전파는 파괴가 일어나기 전까지 적게 진전하고, 파괴의 마지막 단계에서는 이전의 성장길이에 비해 짧은 사이클 동안에 균열이 빠른 성장을 하여 급격히 파단됨을 알 수 있다.

따라서 SMC 복합 재료의 미시적인 균열의 형성으로부터 거시적인 균열의 전파에 이르기까지 균열이 성장되는 양상을 3절의 실험과 종합하여 보면 다음과 같이 설명할 수 있다.

제작 특성상 비규칙 단섬유강화 SMC 복합재는 찢어진 섬유 말단부, 충전재, 섬유와 모재의 계면, 가공상의 결함과 같은 심한 응력집중부가 표면에 존재하고 있다.

이러한 응력 집중부는 반복피로를 받을 때 미소균열의 핵을 이루어 섬유 말단부의 균열, 섬유와 모재의 계면박리, 모재의 균열, 모재에서의 불순물의 분리와 같은 미소균열형태의 연속적인 손상을 발생시킨다.

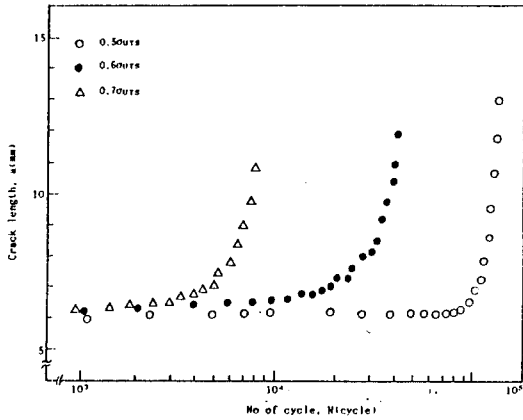


Fig. 8. Fatigue crack propagation under various cyclic stresses.

이러한 미소균열은 노치의 선단영역은 물론 원거리 영역에 이르기까지 재료 전체를 통해 발생되는데, 노치 선단의 영역은 이와 같은 여러 지역에서의 많은 미소균열로 인해 하중이 분산되어 주 균열의 성장은 지연된다.

이후 반복되는 피로에 의한 손상이 더욱 축적됨에 따라 미소균열은 점차적으로 강성이 저하된 재료속으로 전파되어지며 많은 미소균열이 합쳐되어 주 균열의 빠른 전파가 일어나며, 말기에는 급속한 균열전파율로 파단에 이른다.

Fig. 9는 균열의 전파거동과 균열전파를 둔화시키는 미소균열의 일예를 나타낸 것이다.

이와 같은 SMC 복합재의 균열 전파 특성은



Fig. 9. Photograph of fatigue crack growth and microcracks.

일반 금속의 균열전파와는 다르게 미소균열에 의해 균열선단에서 하중이 분산되어 균열전파가 지연되는 독특한 균열전파특성을 나타내고 있다.

## 2. 피로균열전파율

피로균열전파율  $da/dN$ 은 임의의 반복횟수  $\Delta N$  동안 전파한 피로균열길이  $\Delta a$ 로부터 구하였고, 응력강도계수  $K_I$ 은 (11)식을 이용하여 계산하였다<sup>9,10</sup>.

$$K_I = \frac{3PS}{2BW^2} \sqrt{\pi a} f(Y) \dots \dots \dots (11)$$

여기서

$$Y = a/W \dots \dots \dots (12)$$

$$f(Y) = 1.090 - 0.735Y + 8.20Y^2 - 14.18Y^3 + 14.57Y^4 \dots \dots \dots (13)$$

Fig. 10은 (11)식으로부터 구한 응력강도계수범

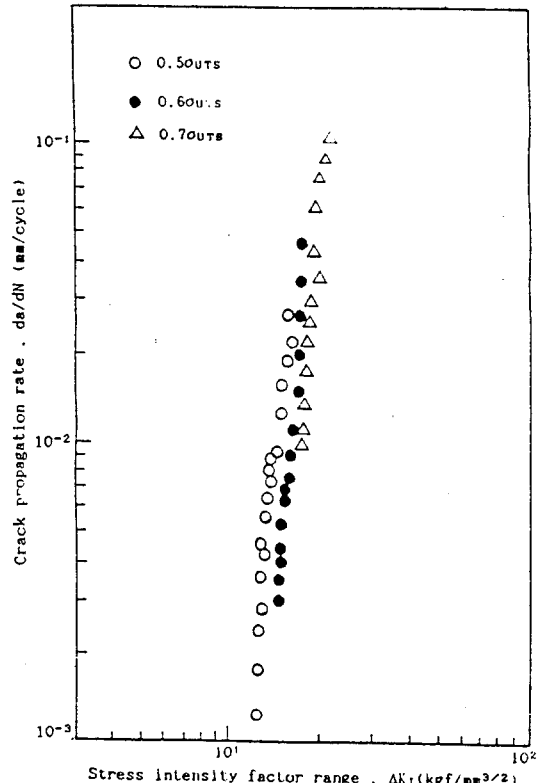


Fig. 10. Fatigue crack propagation rate versus stress intensity factor range under various cyclic stresses.

위  $\Delta K_I$ 과 균열의 전파율  $da/dN$ 간의 관계를 양대수선도에 나타낸 것이다. 각각의 그래프는 피로균열의 초기 생성 구간(영역 I)과 말기의 파단에 이르는 급격한 불안정파괴가 일어나는 구간(영역 III)을 제외한 나머지 영역을 나타낸 것이다.

그 결과 Paris에 의한 (14)식과 같은 지수법칙 관계식이<sup>16)</sup> 적용되는 구간(영역 II)이 존재하였다.

$$da/dN = C (\Delta K_I)^m \dots \dots \dots (14)$$

여기서 계수 C와 지수 m값은 재료상수로서 재료변수, 환경조건, 주파수, 응력의 상태 등의 함수이다<sup>12)</sup>.

Fig. 10의 결과를 이용하여 최소자승법으로 C, m 값을 구한 결과는 Table 5와 같다. 이와 같은 결과는 비연속 섬유강화 복합재 및 SMC-R50 복합재의 피로균열 전파거동에 관한 Thornton과 Wang등의 연구에서 보고된 높은 m 값( $m=9\sim 13$ )과 유사한 경향을 보이고 있다<sup>6)</sup>. 실험의 결과 m 값이 일반 금속에 비하여 매우 높은 값을 나타내었는데 그 이유는 1절에서 설명한 바와 같이 노치선단영역과 원거리 영역에서 연속적으로 일어나는 누적손상(Cummulative damage) 때문이라 생각된다. 그러므로 비규칙 단섬유강화 SMC 복합재는 반복되는 피로응력에 대하여 균열저항이 약하다고 말할 수 있다.

**Table 5. Material constants for crack propagation**

Specimen	C	m
$\sigma_{max} = 0.5\sigma_{UTS}$	$6.98 \times 10^{-14}$	9.53
$\sigma_{max} = 0.6\sigma_{UTS}$	$3.06 \times 10^{-14}$	9.37
$\sigma_{max} = 0.7\sigma_{UTS}$	$3.04 \times 10^{-16}$	10.97

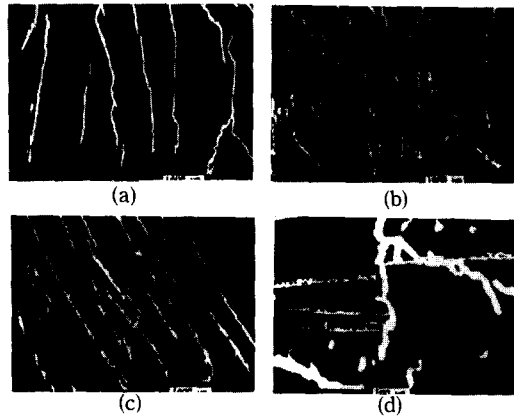
### 3. 미시피로손상기구

비규칙 단섬유강화 SMC 복합재는 무방향으로 분포된 잘려진 섬유(random short fiber)로 인하여 많은 응력집중부가 존재하며 이들 응력집중부는 여러 형태의 피로 손상은 야기하여 피로거동에 중요한 역할을 함을 이미 1절에서 밝힌 바 있다.

그러므로 이러한 응력집중부에서의 반복피로에 의한 피로손상을 주사전자현미경(SEM)으로 검

사하였다.

Fig. 11은 노치가 없는 3점 굽힘 시험편을 최대 반복응력이 최대인장강도의 60% 응력으로 피로 실험했을 때의 피로손상에 의한 여러가지 형태의 미소균열을 관찰한 것으로 (a)는 모재 우세지역에서 형성된 미소균열, (b)는 섬유 우세지역에서 형성된 미소균열, (c)는 섬유와 모재의 계면박리, (d)는 잘려진 유리섬유의 말단부를 나타낸 것이다.



(a) Microcrack in matrix-dominant area  
 (b) Microcrack in fiber-dominant area  
 (c) Fiber-matrix interface debonding  
 (d) Fiber-end crack

**Fig. 11. Fagigue damage in SMC-R30 composite at  $\sigma_{max} = 0.6\sigma_{UTS}$ .**

SMC 복합재료는 제작특성상 국부적으로 섬유 또는 모재가 많이 분포되는 섬유우세지역과 모재 우세지역이 존재한다. 이러한 섬유우세지역 및 모재우세지역에서의 미소균열의 형태는 매우 다른 양상으로 나타남을 Fig. 11에서 알 수 있다. 섬유가 드물게 분포되어 있는 모재우세지역(a)에서는 섬유우세지역에 비해 긴 미소균열을 나타내며 미소균열의 전파양상은 하중의 방향에 의해 크게 지배된다. 또한 섬유우세지역(b)에서는 미소균열이 주로 모재에서 발달되고 섬유간의 거리로 인해 짧은 길이로 제한됨을 볼 수 있다. 또한 (c)에서 미소균열은 일반적으로 섬유와 모재의 층간을 따라 성장함을 알 수 있다.

Fig. 12는 최대반복응력이 미소피로손상에 어떠한 영향을 주는가를 규명하기 위해서 각각 최대

인장강도의 50%와 70%의 응력으로 피로 실험한 시험편의 사진이다. 여기에서 보는 바와 같이 최대반복응력을 변화시킬 경우 미시피로손상의 기본 특성이 크게 변하였다. 즉, 최대 반복응력이 큰 경우( $\sigma_{max}=0.7\sigma_{UTS}$ ) 균열 밀도는 높으나 균열길이는 짧아지고(b), 반대로 최대반복응력이 작은 경우( $\sigma_{max}=0.5\sigma_{UTS}$ ) 균열길이는 길어지나 균열밀도는 낮아졌다(a). 이런 현상은 최대반복응력이 높으면 주어진 시간동안에 단위면적당 형성되는 균열이 더 많아지고, 피로수명이 짧기 때문에 이들 미소균열이 길게 성장할 충분한 시간이 없기 때문이다.

Fig. 13은 단일 편축 노치를 갖는 시험편에 있어서 정적파괴와 반복피로파괴와의 파괴거동을 비교한 것이다. 그림에서 반복피로에 의한 파괴의 경우 미시섬유의 인발(fiber pull out)이 적고, 균열성장경로를 따르는 섬유와 모재의 계면 박리도 적은 국부적인 파괴를 보였다.

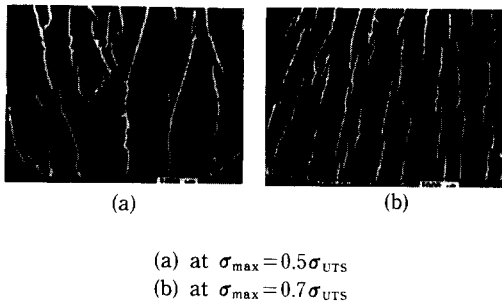


Fig. 12. Comparison of fatigue damage in SMC-R30.

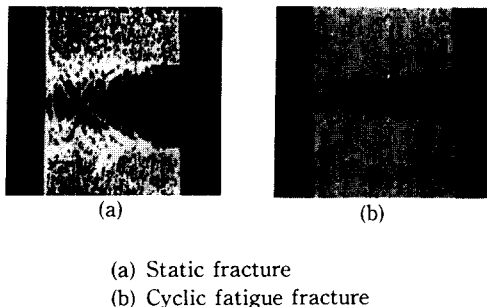


Fig. 13. Comparison of damage growth and fracture in SMC-R30.

## 결론

국산 비규칙 단섬유강화 SMC 복합재료 (random short - fiber SMC composite)를 서로 다른 크기의 반복 응력으로 3점 굽힘 피로실험을 행하여 피로 균열의 전파특성과 미시피로손상기구를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SMC 복합재의 전 피로수명의 대부분은 거시균열의 초기진전 또는 성장에 소비된다.
- 2) 피로균열전파는 Paris에 의한 지수법칙 관계식  $da/dN=C(\Delta K)^m$ 이 적용되는 영역이 존재 하였으며, 이때의 재료상수  $m$  값은 9~11로 일반 금속재 보다 훨씬 컸다.
- 3) 반복응력 이력은 미시피로손상기구에 큰 영향을 준다. 즉, 최대반복응력이 클 때 미소균열의 밀도는 높아지고 균열의 길이는 짧아지며, 최대반복응력이 작을 때는 미소균열의 밀도는 낮아지고 균열의 길이는 길어진다.
- 4) 피로손상은 미소균열밀도, 균열의 길이, 균열방향의 분포에 의해 특성화 되어지며, 이에 대한 많은 실험과 연구검토가 요망된다.

## 참고문헌

- 1) Hull, D. (1982): An Introduction to Composite Materials. Cambridge University Press.
- 2) 藤井太一·座古 勝 (1978): 複合材料の破壊と力學. 實教出版社.
- 3) 홍창선 (1981): 복합재료와 구조의 경량화. 대한기계학회지 21(4), 252-258.
- 4) Jones, R.M. (1975): Mechanics of composite materials. McGraw Hill.
- 5) Smith, W.F. (1986): Principle of material science and engineering. McGraw Hill.
- 6) Wang, S.S., E.S.M. Chim and N.M. Zahlan(1983): Fatigue crack propagation in random Short - Fiber SMC Composite. Journal of Composite Materials 17, 250-266.
- 7) Wand, S.S. and E.S.M. Chim(1983): Fatigue damage and degradation in random short-



- fiber SMC composite. Journal of Composite Materials 17, 114-134.
- 8) Wan<sup>σ</sup>, S.S., E.S.M. Chim, T.P. Yu and D.P. Goetz(1983): Fracture of random short-fiber SMC composite. Journal of Composite Materials 17, 299-315.
- 9) Hertzberg, R.W. (1976): Deformation & fracture mechanics of engineering Materials. John Wiley and Sons, 486.
- 10) Tada, H., P. Paris and G. Iwin.(1973): The stress analysis of crack handbook. Del Research Corporation, 2, 16-18.
- 11) Broek, D. (1986): Elementary engineering fracture mechanics. Martinus Nijhoff Publishers, 260-298.
- 12) Fuchs, H.O. and R.I. Stephens.(1980): Metal fatigue in engineering. John Wiley & Sons, 82-88.