

〈論 文〉

非規則性 短纖維強化 SMC複合材料의 疲勞龜裂進展에 관한 研究

김 광 수* · 김 상 태**

(1988년 8월 30일 접수)

A Study on Fatigue Crack Propagation of Random Short Fiber SMC Composite

Kwang-Soo Kim and Sang-Tae Kim

Key Words : Composite Material (복합재료), Fatigue Crack Propagation (피로균열진전), Stress Intensity Factor Range (응력확대계수범위), Crack Growth Rate (균열성장율), Matrix Rich Region (기지풍부지역), Fiber Rich Region (섬유풍부지역)

Abstract

The fatigue crack propagation of random short fiber SMC composite material was investigated. In macroscopic viewpoint, SMC composite material was treated as isotropic material and was analyzed in terms of conventional fracture mechanics. Experiments were conducted on mode I and mixed mode respectively and various loading level was applied to each mode. Fatigue crack growth can be explained in three steps and most of fatigue life is consumed in initial crack growth. In this experiments, power law, i.e. $da/dN = C(\Delta K)^m$, between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range, was valid and the value of the exponent m is about 10, which is much higher than that of other metals. Fracture mechanism was also investigated by SEM fractographic study.

1. 서 론

최근에 와서 높은 비강도, 우수한 비강성을 가지는 새로운 복합재료(composite material)가 개발되어 자동차, 항공기등 기계 구조물의 중량이 대폭 경감되고 점차적으로 실용화 되고 있다. 이러한 복합재료가 기계구조물로 사용됨에 따라 계속적인 하중을 받게되고 따라서 이러한 재료의 피로파괴(fatigue fracture) 특성에 대한 평가는 재료의 올바른 사용에 매우 중요한 문제중 하나이다. 또한 피로수명(fatigue life)을 예측하는데 있어서 피로

균열의 진전(fatigue crack propagation)은 아주 중요한 의미를 갖는다.

이제까지 연속적인 섬유강화 복합재료의 피로파괴특성에 대한 연구는 어느정도 진행되어 왔으나 짧은섬유강화 복합재료에 대해서는 미미한 상태이며, 특히 근래에 개발된 SMC 복합재료에 대해서는 더욱 미미한 실정이다⁽¹⁾.

SMC(sheet molding compound) 복합재료란 FRP(fiber reinforced plastic) 압축성형재료의 일종으로서 불포화 폴리에스트수지에 충전제, 촉매, 이형제등을 혼합한 원료를 잘게썰은 유리섬유(chopped glass strand)에 함침시킨뒤 화학적으로 점도를 높여 점착성이 없고 성형성이 뛰어난 성형 재료로서 현재 국내에서도 자동차의 구조물등으로

* 영남대학교 대학원

** 정회원, 영남대학교 공과대학 정밀기계과

사용되고 있다.

섬유강화복합재료의 파괴는 섬유의 파단(fiber breakage), 모재의 미세균열(matrix microcracking) 및 섬유와 모재의 분리(fiber-matrix debonding) 등 여러가지 메카니즘이 복합적으로 작용하여 발생한다. 이러한 메카니즘은 응력의 상태, 재료의 성분, 환경조건 등에 민감하게 작용한다⁽²⁾.

1971년 Thorton⁽³⁾ 등이 처음으로 기존파괴역학의 관점에서 예폭시수지에 비규칙적으로 A1섬유가 분포된 재료를 사용하여 피로균열의 진전에 대해 연구하여 균열전파율과 응력확대계수 간의 관계를 살펴 보았고, 그 이후 Owen⁽⁴⁾, Dibenedetto⁽⁵⁾ 등이 몇가지의 복합재료를 대상으로 피로균열의 진전 특성에 대해 연구하였다.

근래에 와서 Wang^(6,7) 등이 비규칙성 짧은 섬유를 섞은 SMC-R50을 사용하여 피로파괴 특성을 연구함으로써 짧은 섬유로 강화된 복합재료의 피로 파괴특성을 나타내는데 상당히 유용한 자료를 보이고 있다.

이방성재질(anisotropic material)에서 임계응력확대계수는 균열의 방향에 따라 달라지게 되지만 실제의 응용에 있어서는 균열성장예에 대한 저항도가 가장 작은 방향에서의 임계응력확대계수가 가장 큰 의미를 갖는다.

Wu⁽⁸⁾는 결합이 일정한 방향을 갖는 경우 K_{Ia} , 즉 응력확대계수는

$$\sigma_{ij} = \frac{K_{Ia}}{\sqrt{r}} \left[f_{ij}(\theta, Alm) \right]$$

와 같이 정의되고 임계응력확대계수를 재료상수로 사용할 수 있다고 하였으며 발사(balsa) 나무와 한 쪽 방향으로 보강된 유리섬유강화 플라스틱에 대한 실험을 통해 이를 확인하였다.

그러나 Wu의 실험에서도 만약에 균열이 섬유방향으로 배열되어 있지 않으면 균열이 평면의 형태로 성장하지 않게되므로 Griffith-Irwin의 파괴이론 기본가정을 충족시키지 못하게 된다.

Parhizgar⁽⁹⁾ 등은 재료가 직교이방성 재질일 경우에는 균열이 원래의 균열방향으로 성장하지 않으므로 선형탄성파괴역학(LEFM; linear elastic fracture mechanics)으로 설명되지 않는다고 언급하였다.

이와같이 LEFM을 복합재료에 적용시키는 데는 많은 어려운 점들이 있다. 그러나 LEFM에서 등방성재료를 대상으로 균열의 첨단부근에 국부적인

소성영역을 가정하고 적용하는것과 같이 SMC 복합재료에서도 균열의 첨단부근에 해당되는 이방성영역을 제외하고 나머지 부분을 재료자체의 특성인 비규칙적으로 분포된 짧은섬유 가닥의 뭉치임을 감안하여서 균질등방성으로 가정하여 LEFM을 적용시킬 수 있다.

이와같은 관점에서 본 연구에서는 국내산 비규칙성 짧은 섬유로 강화된 SMC 복합재료의 피로파괴 특성에 대한 기초자료로서 피로균열의 진전특성을 나타내는데 기존파괴역학의 적용여부를 살펴보고, 서로다른 피로모드 상태 하에서 하중크기의 상태에 따른 피로균열진전의 특성을 나타내었으며, 또한 주사형 전자현미경(scanning electron microscope)을 사용한 파단면 관찰을 통해 파괴 메카니즘을 살펴보았다.

2. 실험

2.1 재 료

실험에 사용된 시편의 재료는 (주)럭키에서 생산하는 비규칙성 짧은섬유로 강화된 SMC 복합재료로서 품번은 SW 2465이다. 이 SMC 복합재료를 KSM 3006의 규격에 준해서 인장실험을 한 결과와 기타재료의 물성치는 Table 1에 나타나 있다.

또한 재료의 자세한 성분조성은 Table 2에 나타난 바와 같다.

2.2 시편의 제작

1000mm×1000mm×3mm의 판에서 재료의 성형시 발생이 우려되는 불균질 부분을 피하기 위해 가

Table 1 Mechanical properties of random short fiber SMC composite

Flexural ST. (kg/mm ²)	Tensile ST. (kg/mm ²)	Comp. ST. (kg/mm ²)	Charpy Imp. ST. (kgcm/cm ²)
19.7	5.0	16	51

Table 2 Chemical composition of random short fiber SMC composite vol. (%)

UPE Resin	Filler (CaCO ₃)	G. fiber	Thickener	etc.
25.9	36.3	32	0.3	5.5

장자리 50mm씩을 제외한 부분을 택하여 기계원톱으로 절단해서 시험편을 채취하였다. 또한 절단시 발생하기 쉬운 기계적 손상부위를 제거하기 위해 에머리 연마지 #1200으로 절단면을 다듬질하였다. 시편에 가해진 노치는 0.2mm 두께의 저속도 다이아몬드 톱을 사용하여 단일편측 노치 및 45°의 경사각을 가진 편측노치로 각각 가공하였다.

이렇게 해서 완성된 시험편의 제원은 40mm×220mm×3mm로서 Fig. 1에 보인 바와 같다.

2.3 실험 방법

피로 실험은 Instron사의 전기유압식 피로시험기를 사용하였으며 균열의 성장 길이를 측정하기 위하여 0.01mm까지 측정할 수 있는 이동식 현미경을 사용하였다. 하중제어방식 하에서 2Hz의 주파수로서 반정현(haversine)형태의 인장-인장하중을 가했으며 하중의 최소값은 0을 유지시켰다. 이와같이 시편에 가해진 피로하중함수의 모양이 Fig. 2에 나타나 있다.

모드 I 실험에서는 단일편측노치를 가진 시편을, 혼합모드 실험에서는 경사각을 가진 편측노치 시편을 각각 사용하였으며, 각모드에 대해서 최대인장강도의 50%, 60% 및 65%의 하중으로 피로시험을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 피로균열의 성장거동

모드 I 실험에서 각각 세가지의 응력상태에 따른 피로균열의 성장상태를 나타내는 대표적인 곡선이 Fig. 3에 나타나 있다. 균열의 성장길이가 하중사이클의 함수로 나타나는 이 곡선에서 재료가 갖는 대부분의 피로수명이 균열의 초기 성장에 소비됨을 알 수 있다. 그리고 피로하중이 최대인장강도의 50%, 60%, 및 65%로 증가 됨에 따라 균열의 성장은 파단이 일어나기 전에 적게 진전됨을 볼 수 있다.

45°의 노치 각을 가지는 혼합모드 실험에서는 하중이 가해지고부터 초기에는 균열이 노치의 방향으로 불규칙하게 성장하였으며 그 이후 균열은 하중 방향에 대해 수직방향으로 성장하였다.

이것은 경사각을 가진 노치로 인한 ΔK_{II} 영향이 곧 사라진다고 볼 수 있다.

Fig. 4에서는 혼합모드일때 피로균열이 성장하는

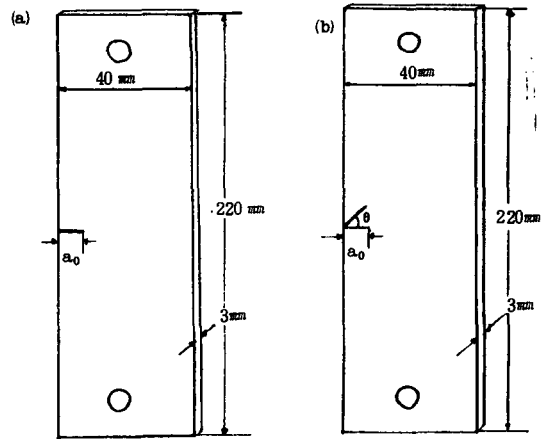


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimens
(a) Single edge notched specimen
(b) Slanted edge notched specimen

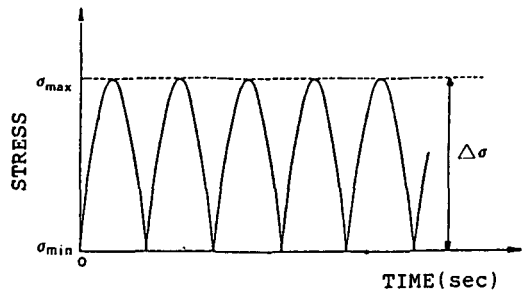


Fig. 2 Fatigue load function

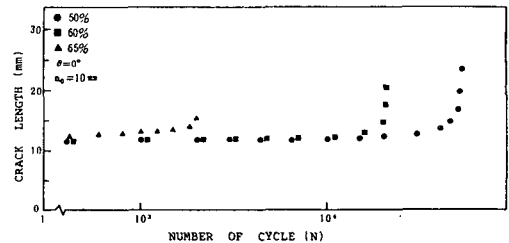


Fig. 3 Typical crack growth under various loading conditions (mode I)

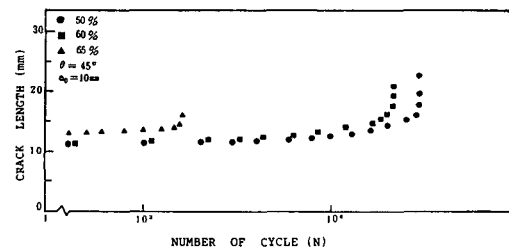


Fig. 4 Typical crack growth under various loading conditions (mixed mode)

대표적인 곡선을 나타내었으며 이때 나타난 양상은 전반적으로 모드 I 과 거의 유사하다.

이와같이 SMC 복합재료가 피로하중을 받을때 노치첨단으로부터 균열이 생성되어 성장하는 양상은 크게 다음 세단계로 구분해서 설명할 수 있다.

1단계 : 초기 500사이클 내외까지 노치첨단으로부터 균열의 빠른생성.

2단계 : 균열성장의 둔화 및 미세균열의 생성으로

인한 손상영역의 확대.

3단계 : 균열의 급성장

먼저 1단계에서 나타나는 균열의 빠른 생성은 노치가공시 발생하는 미세한 손상으로 인해 나타나는 현상이며 파단면사진을 통해서도 이를 확인할 수 있었다. 이렇게해서 생성된 균열은 성장을 하다가 1000사이클을 전후하여 성장이 둔화되는 현상이 나타나는데 이 시기가 2단계이다. 이는 균열이 성장하는 경로에 존재하는 섬유및 기지의 상태가 그 원인이다. 즉 많은 양의 섬유 혹은 섬유다발의 존재로 인해서 균열의 성장이 방해받을 것이다. 균열의 성장이 둔화되는 동안에도 하중이 균열의 첨단 주변및 시편전체에 계속적으로 전달되어 미세균열이 발생된다. 이 미세균열은 균열의 첨단주변은 물론, 멀리로는 20mm지점까지 불특정 다수지역에서 많은 양의 미세균열이 발생되며 이들이 또한 응력의 분산작용을 함으로서 균열의 진전은 더욱 지연되게 된다. 따라서 복합재료에서도 등방성재료에서의 소성영역과 같이 균열의 진전에 대해저항을 증가시키는 역할을 하는 손상영역의 개념을 도입할 수 있다.

3단계에서는 이들 다수의 미세균열, 즉 손상영역으로 인해 재료가 많이 약해져서 주균열(main crack)이 많은 미세균열과 쉽게 유착하여 균열의 빠른 성장이 일어나며 말기에 가서 급격히 파단된다.

이러한 세단계의 양상들이 균열의 성장 과정에서 2단계및 3단계가 반복해서 나타나면서 파단에 이른다. 이와같은 현상은 Fig. 5 및 Fig. 6에서 살펴볼 수 있다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 각각의 모드상태 하에서 균열

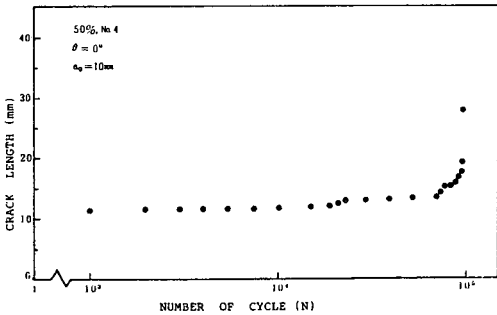


Fig. 5 Fatigue crack growth of SMC composite (mode I)

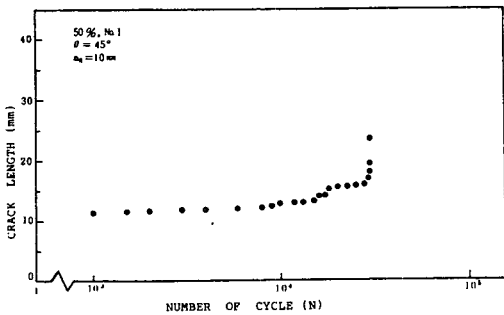


Fig. 6 Fatigue crack growth of SMC composite (mixed mode)

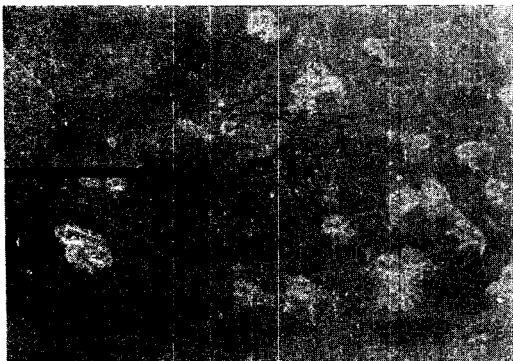


Fig. 7 Fatigue crack growth and microcracks (mode I)



Fig. 8 Fatigue crack growth and microcracks (mixed mode)

의 진전상태를 상세히 나타낸 그림인데 균열이 초기 1000사이클 정도까지는 빠른 성장을 하였으나 그 이후 성장이 둔화되어 10⁴사이클을 지나면서부터 이제까지의 성장길이에 비해 짧은 사이클중에 균열이 급성장함을 보이고 또한 이러한 현상들이 이후에도 반복되어 나타난다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 양모드에서 균열의 성장상태와 균열의 성장이 둔화될때 발생하는 미세균열을 보이고 있다.

3.1 피로 균열의 성장을

응력확대계수(stress intensity factor) K 는 시편의 형상에 따라 다른 값을 갖게되며 모드 I 실험에 사용된 단일편축노치를 가진 시편의 K_I 를 구하기 위해 방정식 (1)이 적용되었고 혼합모드 실험에 사용된 경사각을 가진 편축노치 시편의 K 는 방정식 (2)에서 (a) 및 (b)식의 합으로 나타난다⁽¹¹⁻¹³⁾.

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \quad (1)$$

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}\sin^2\theta \quad (a) \quad (2)$$

$$K_{II} = Y\sigma\sqrt{a}\sin\theta\cos\theta \quad (b)$$

$$\text{with } Y = 1.99 - 0.41\frac{a}{w} + 18.7\left(\frac{a}{w}\right)^2$$

$$- 38.48\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 53.85\left(\frac{a}{w}\right)^4$$

a =균열의 길이

w =시편의 폭

σ =가해진 응력

θ =균열의 경사각

이와 같이 구한 응력확대계수의 범위 ΔK 와 균열의 성장율간의 상호관계를 양대수 그래프에 나타낸 결과가 Fig. 9 및 Fig. 10에 있다.

각각의 그래프는 피로균열의 초기생성 영역과 말기에 이르러 파단시 발생하는 급격한 균열의 성장상태를 제외한 나머지 영역을 나타내었다. 그 결과 각모드의 그래프에서 각 응력의 상태를 나타내는 점들은 일정한 기울기를 가짐을 알 수 있고 (3)식과 같은 지수법칙의 관계식이 성립하였다⁽¹¹⁾.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

여기서 최소자승법을 이용하여 m 값과 C 값을 구

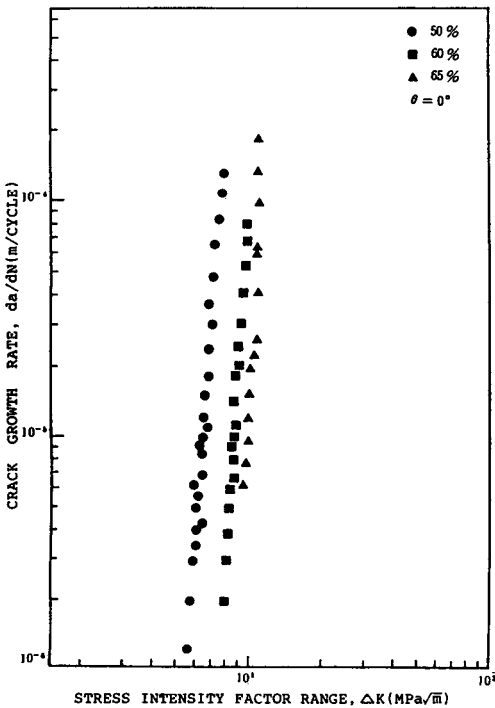


Fig. 9 Fatigue crack growth rate versus ΔK (mode I)

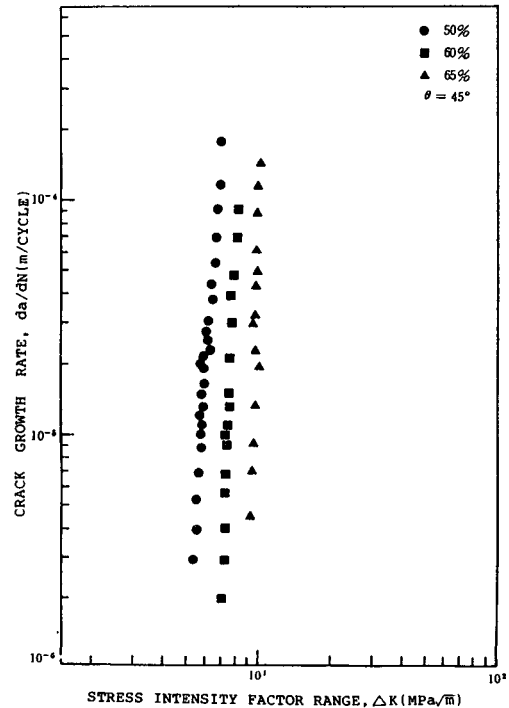


Fig. 10 Fatigue crack growth rate versus ΔK (mixed mode)

하였다. m 및 C 값은 재료상수로서 환경조건, 주파수, 응력의 상태 등의 함수이다. 모드 I 실험에서 얻은 여러가지 결과치를 평균값으로 나타내면 m 은 9.55, C 는 7.31×10^{-12} 으로 나타났고 혼합모드일 경우에는 m 은 11.08, C 는 4.38×10^{-14} 으로 나타났다. 각 실험조건에 따른 자세한 결과값은 Table 3 및 Table 4에 나타나 있다.

실험결과에 나타난 m 값이 일반금속과는 달리 매

우 높은 값을 나타내는데, 이는 일단의 균열이 노치첨단에서 생성되어 전파될때 가해지는 손상은 취약한 섬유/기지 계면에 가해져서 미세균열을 생성시키게 되고 또한 이 손상이 섬유/기지 계면을 따라 기지로 전파되는데, 이 기지에 함유된 많은 양의 CaCO_3 충전제가 미세균열을 유발시킨다. 즉 균열첨단 주위는 물론 그곳에서 멀리 떨어진 부위까지 동시에 손상이 전달되므로 재료의 약화를 초

Table 3 Test conditions and results for mode I

Mode I ($\theta=0^\circ$)					
Specimen		Applied load	Failure cycle	m	C
50%	1	222 kg	50060	8.46	7.33×10^{-11}
	2	225 kg	47530	10.17	9.47×10^{-12}
	3	225 kg	85680	9.44	6.37×10^{-12}
	4	222 kg	97980	11.35	4.99×10^{-14}
60%	1	265 kg	37490	7.73	8.94×10^{-10}
	2	270 kg	25190	9.81	1.46×10^{-13}
	3	256 kg	23570	12.04	4.21×10^{-16}
	4	270 kg	10020	9.43	5.87×10^{-12}
65%	1	288 kg	1460	10.03	7.51×10^{-12}
	2	285 kg	9506	9.18	2.47×10^{-12}
	3	288 kg	1569	9.49	6.52×10^{-12}
	4	288 kg	1271	7.52	7.33×10^{-10}

Table 4 Test conditions and results for mixed mode

Mixed mode ($\theta=45^\circ$)					
Specimen		Applied load	Failure cycle	m	C
50%	1	222 kg	29460	9.48	5.62×10^{-12}
	2	226 kg	15060	11.93	4.92×10^{-15}
	3	218 kg	20110	10.54	5.47×10^{-13}
	4	218 kg	9430	12.76	5.31×10^{-16}
60%	1	264 kg	21820	12.52	4.94×10^{-16}
	2	262 kg	25610	11.91	4.81×10^{-15}
	3	262 kg	41750	10.33	2.86×10^{-13}
	4	260 kg	16020	9.29	3.49×10^{-12}
65%	1	288 kg	4380	10.94	6.44×10^{-13}
	2	284 kg	1630	12.25	3.65×10^{-16}
	3	286 kg	1460	11.07	4.79×10^{-14}
	4	288 kg	6020	9.96	9.10×10^{-12}

래하고 이러한 이유로 인해 균열이 성장할때 빠른 성장을 하게 되므로 높은 m 값을 보이게 된다. 아울러서 이와같이 높은 m 값의 상태를 고려하면서 모드 I 과 혼합모드를 비교하여 보면 ΔK_{II} 의 영향이 그리 크게 작용하지 않는다고 볼 수 있다.

그러므로 이와같은 SMC복합재료는 반복되는 피로하중에 대한 저항력이 적다고 말할 수 있다.

3.3 파단면 관찰

균열의 생성 및 성장은 섬유유 양, 배열방향, 재료의 성분조성등에 큰 영향을 받는다. Fig. 11은 균열의 생성상태를 살펴보기 위하여 노치첨단 부위를 나타내었다. 그림의 아래쪽이 노치첨단이며 파단면은 섬유풍부지역과 기지풍부지역으로 구분되고 균열의 초기 생성은 다른 방향의 섬유가 끊어지고 기지로부터 분리되면서 일어난다. 또한 균열의 초기 생성 방향은 재료본래의 상태보다는 노치가공시 발생하는 기계적 손상에 따라 지배된다. Fig. 12는 균열이 진전되는 영역을 나타내는데 밝은 부위는 섬유다발이며 어두운 부분은 기지부분이다.

이와같이 섬유다발은 균열의 진전도중 둔화되는 현상이 나타나는 영역에서 발견되어진다. Fig. 13은 섬유풍부지역의 섬유다발을 고배율로 나타내었다.

Fig. 14는 기지풍부지역으로서 파단면이 대체로 매끈하나 섬유유 많은 부분에서는 파단면이 상당히 거칠다. 따라서 피로균열의 진전은 섬유유 양, 섬유유 배열방향에 큰 영향을 받는다. Fig. 15는 섬



Fig. 13 Fractography of fiber bundle ($\times 700$)

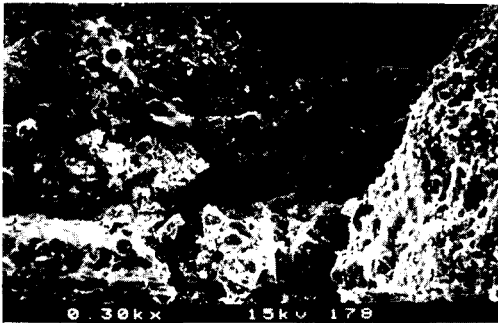


Fig. 11 Fractography of notch tip ($\times 300$)

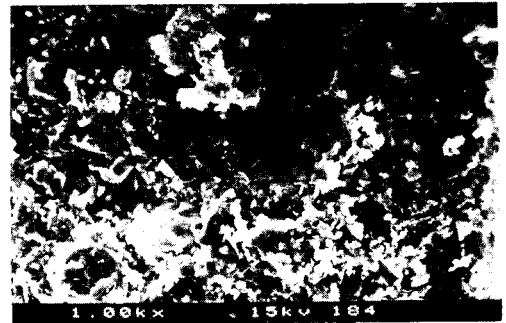


Fig. 14 Fractography of matrix rich region ($\times 100$)

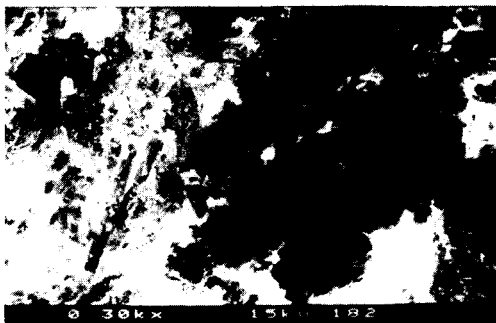


Fig. 12 Typical fractography in fatigue crack growth region ($\times 300$)



Fig. 15 Fractography of fiber debonding from matrix ($\times 3000$)

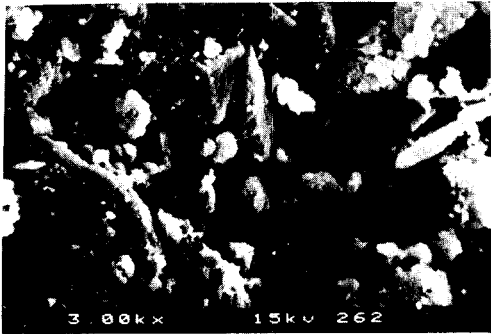


Fig. 16 Fractography of CaCO_3 separation in matrix rich region ($\times 3000$)

유의 파단상태와 기지레진으로부터 섬유들의 분리상태를 고배율로 나타내고 있다. 여기서 이들 섬유와 기지레진의 계면에 존재하며 흰알갱이로 보이는 CaCO_3 충전제가 계면분리에 큰 작용을 함을 알 수 있다. 또한 CaCO_3 충전제의 작용은 Fig. 16에서도 알 수 있는데, 그림은 기지수지로부터 CaCO_3 충전제가 분리된 상태를 나타내며 이들 충전제로 인하여 미세균열이 생성되고 또 전파됨으로서 응력 집중제 역할을 하며 재료전체에 계속적인 손상이 동시에 전파됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 현상의 관찰로서 앞절의 피로균열 성장거동에 대한 설명을 뒷받침하며 SMC 복합재료의 파괴 메카니즘은 이러한 여러가지 현상들이 복합적으로 결합되어 작용한다.

4. 결 론

국내산 비규척성 짧은섬유로 강화된 SMC 복합재료가 피로하중을 받을때 나타내는 피로균열의 진전특성을 검토한 결과로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 국내산 비규척성 짧은섬유로 강화된 SMC 복합재료의 피로균열진전을 특성화시키는데 파괴역학개념을 적용할 수 있으며 피로균열의 진전은 지수법칙

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

을 따르고, m 값은 일반금속보다 훨씬 큰 10정도의 값을 가진다.

(2) 피로균열의 진전양상은 크게 세단계로 구분되어지는데, 1단계로서 초기 500사이클 내외까지 노치첨단에서 균열의 빠른생성, 2단계로서 균열성장

의 둔화 및 미세균열의 생성으로 인한 손상영역의 확대이며, 3단계로서 균열의 급성장, 이상과 같다.

(3) 피로수명은 대부분 균열의 초기성장시기에 소비되며 ΔK_{II} 의 영향은 그리 크지 않다.

(4) 피로균열의 생성, 진전 및 진전방향은 섬유의 양, 섬유의 배열방향, CaCO_3 충전제에 큰 영향을 받는다.

참 고 문 헌

- (1) Stinchomb, W.W. and Reifsnider, K.L., 1979, "Fatigue Damage Mechanisms in Composite Materials: A Review", *Fatigue Mechanisms*, ASTM STP 675, pp. 762~787.
- (2) Smith, T.R., Owen, M.J., 1969, "Progressive Nature of Fatigue Damage in RP", *Morden Plastics*, pp. 128~133.
- (3) Thorton, R.A., 1972, "Fatigue Crack Propagation in a Discontinuous Composite", *Journal of Composite Material*, Vol. 6, pp. 147~151.
- (4) Dwen, M.J. and Bishop, P.T., 1974, "Crack-Growth Relationships for Glass-Reinforced Plastics and Their Application to Design", *Journal of Physics, D: Applied physics*, Vol. 7, pp. 214~224.
- (5) DiBenedetto, A.T. and Salee, G., 1979 "Fatigue Crack Propagation in Graphite Fiber Reinforced Nylon 66", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 19, No. 7, pp. 512~518.
- (6) Wang, S.S., Chim, E.S.M. and Zahlam, N.M., 1983, "Fatigue Crack Propagation in Random Short Fiber SMC Composite", *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 250~266.
- (7) Wang, S.S., Chim, E.S.M. and Goetz, D.P., 1983, "Fracture of Composite Materials, Vol. 17, pp. 299~315.
- (8) Wu, E.M., 1967, "Applications of Fracture Mechanics to Anisotropic plates", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 34, No. 4, pp. 967~974.
- (9) Parhizgar, Z., Zachary, L.W. and Sun, C.T., 1982, "Application of the Linear Fracture Mechanics to the Composite Materials", *Int. Journal of Fracture*, Vol. 20, pp. 3~5.
- (10) Dharn, C.K.H., 1978, "Fracture Mechanics of Composite Materials," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Trans. SAME, Vol. 100, pp. 233~247.
- (11) Hertzberg, R.W., 1976, "Deformation and Frac-

- ture Mechanics of Engineering Materials", John Wiley and Sons, New York, pp. 269~287.
- (12) Paris, P.C. and Sih, G.C., 1965, "Stress Analysis of Cracks", Fracture Toughness Testing and Its Applications, ASTM STP 381, pp. 30~83.
- (13) Kannineen, M.F. and Popelar, C.H., 1985, "Advanced Fracture Mechanics", Oxford Univ. Press, New York, pp. 411~411.