

## Fractography의 기초 및 기술-(4)

韓昌錫<sup>†</sup>

호서대학교 국방과학기술학과

### The basis and Technique of Fractography-(4)

Chang-Suk. HAN.<sup>†</sup>

Dept. of Defense Science & Technology, Hoseo University, 165 Sechul-Ri, Baebang-Myun,  
Asan City, Chungnam 336-795, Korea

#### 8. 복합재료 파면의 특징과 해석

##### 8.1 금속 base 복합재료

기계적 성질이 크게 다른 강화재와 모재(matrix)의 조합으로 구성된 선단복합재료의 파괴는 강화재, 강화재/matrix 계면, matrix의 여러 곳에서 발생하기 때문에 파괴기구는 매우 복잡하다. 또, 적층구조에서는 층간 박리 등의 내부손상이 표면으로부터 선행하는 경우가 많지만, 이와 같은 내부손상관찰에 대해서는 종래부터 이용되어 온 SEM 관찰 등의 표면관찰 방법과 함께 초음파현미경 등의 내부관찰 수단을 병용할 필요가 있다.

##### 8.1.1 단섬유강화재

금속 base 복합재료에서 단섬유강화재는 높은 비강도와 비강성을 및 내열성을 갖는 것과 동시에 복합화성형이 용이하며, 일반적인 금속재료와 같은 각종 성형가공법에 의하여 여러 가지 제품을 제작할 수 있는 점으로부터 주목받고 있다.

탄화규소 whisker 강화 Al 합금(SiCw/7075; 섬유 함유율  $V_f = 20\%$ )의 조직사진을 그림 36에 나타낸 것과 같이, 이 경우 분말 야금법으로 성형한 후 압출하여 주조되었기 때문에 whisker가 압출방향으로 거의 같은 모양으로 배향되어 있는 것을 알 수 있다. SiC whisker의 직경은 0.1~1  $\mu\text{m}$ , 평균 0.5  $\mu\text{m}$ 이며, 길이는 1~10  $\mu\text{m}$ , 평균 5  $\mu\text{m}$ 이다.

이 재료의 정적 인장파면(인장강도  $\sigma = 844 \text{MPa}$ )을 그림 37에 나타낸 것과 같이 whisker의 인발이

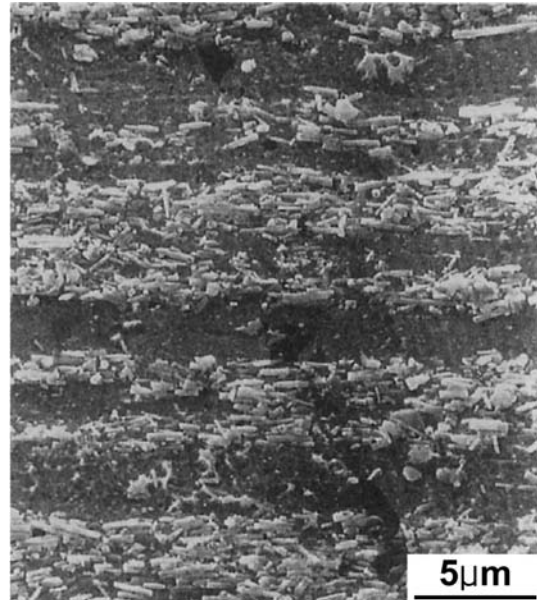


그림 36. SiC<sub>w</sub>/7075 조직사진.

상당히 많이 관찰된다. SiC whisker와 matrix의 계면강도는 충분히 크다고 보고 되어 있지만, 인장강도 부근의 과대한 응력이 작용한 경우에는 섬유파단 보다 먼저 섬유의 인발과 이것에 이어서 matrix의 dimple 파괴가 발생한다.

동일 강화재의 공기 중 피로파괴 시료에 대한 macro 사진을 그림 38에 나타내었다. 그림 38(a)는 표면으로부터 균열이 발생한 경우이며, 그림 38(b)는 내부로부터 균열이 발생한 경우이다. 각각의 시료에 대한 기점부 확대사진을 그림 39에 나타내었다. 피

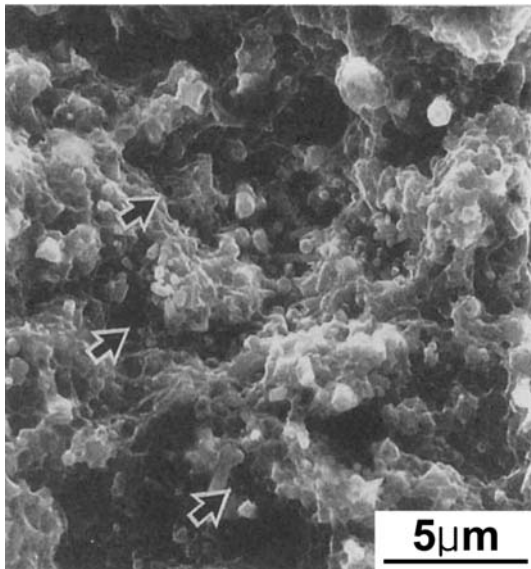


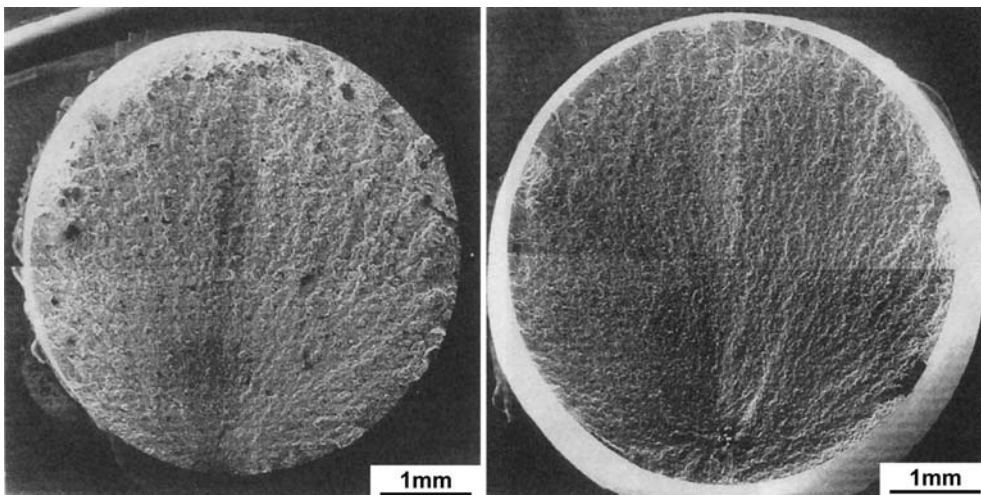
그림 37. SiC<sub>w</sub>/7075의 인장시험의 기점부.  
(화살표는 섬유를 뽑아낸 부분을 나타냄)

로균열이 표면을 기점으로 하는 경우[그림 39(a)], 일반적인 금속재료에서 볼 수 있는 전단형의 제 I단계 균열은 발생하지 않으며, 표면으로부터 바로 주응력에 직각으로 제 II단계 균열이 발생하여 있는 것을 알 수 있다. 이 경우, 기점부 근방의 피로파면은 다음에 나타내는 사진과 동일한 양상을 나타낸다는 것을 알았다. 피로균열이 내부를 기점으로 하는 경우

[그림 39(b)] 섬유밀집부가 파괴의 기점으로 된다. 섬유밀집부가 높은 cycle의 전단응력을 받는 것에 의하여 서서히 matrix와 분리되어 피로균열의 기점으로 된 것이다. 또, 섬유밀집부가 해리한 위치로부터 조금 떨어진 위치의 피로파면을 그림 40에 나타낸 것과 같이 요철이 심한 점과 섬유를 관찰할 수 없는 점은 섬유다발을 피하면서 피로균열이 진전한 것을 의미한다. 기점부 근방에서는 섬유를 관찰할 수 없지만, 기점부에서 멀어지면 섬유의 인발과 섬유파단을 관찰할 수 있는 점으로부터 균열전단의 응력확대계수가 작을 때는 섬유를 피해서 균열이 진전하지만, 응력확대계수가 커지면 섬유의 인발과 섬유파단이 발생하는 것을 알 수 있다.

8.1.2. 장섬유강화재

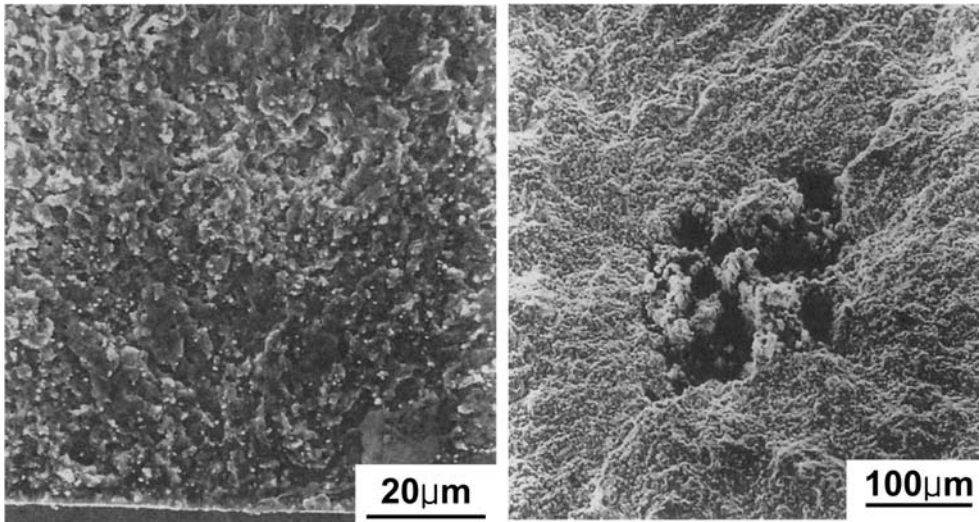
장섬유강화금속은 비강도의 높이가 특징이다. 여기에서는 용융침투법에 의해 제작한  $\gamma$  알루미늄 장섬유(Altex)강화 Al( $\gamma$  알루미늄/Al;  $V_f = 50 \pm 5\%$ )의 파면사진을 나타내었다. 동일한 재료의 단면사진을 그림 41에 나타낸 것과 같이, 섬유는 matrix인 Al 중에 거의 균일하게 분포하여 있다. 이 재료를 SEM 내에서 인장하였을 때의 in-suit 관찰사진을 그림 42에 나타내었다. [0<sub>z</sub>]1방향 강화재[그림 42(a)]에서는 섬유파단이 발생하지만, 섬유파단은 섬유밀집부에서 연속하여 전파하는 점, [90<sub>z</sub>] 강화재(섬유방향



(a) 표면 기점.

(b) 내부 기점.

그림 38. SiC<sub>w</sub>/7075의 공기 중 피로표면.



(a) 표면 기점부.

(b) 내부 기점부.

그림 39. SiC<sub>w</sub>/7075의 공기 피로균열의기점부.

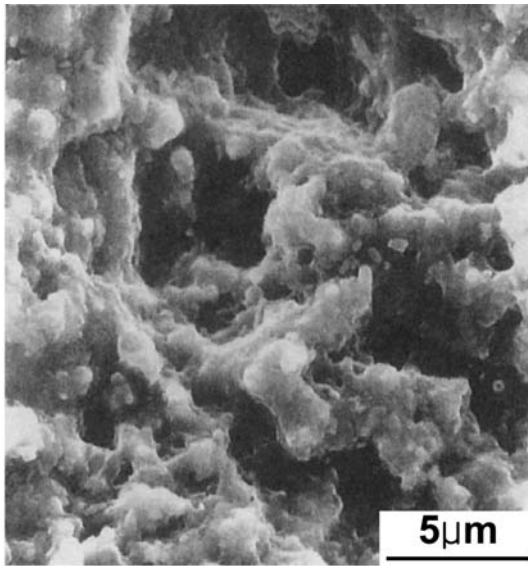


그림 40. SiC<sub>w</sub>/7075의 균열발생 기점 근방. (0.1 mm)의 피로파면

이 하중방향과 수직) [그림 42(b)]에서는 matrix 내에 하중방향과 45° 방향으로 slip과 균열이 발생하여 matrix의 전단에 의하여 최종파괴가 발생하는 것을 알 수 있다.

1방향 강화재의 실온에서 정적으로 인장하였을 때의 섬유 인발모양을 그림 43에 나타낸 것과 같이, 인발의 길이는 수 10~100 µm로 그 규모는 작고,

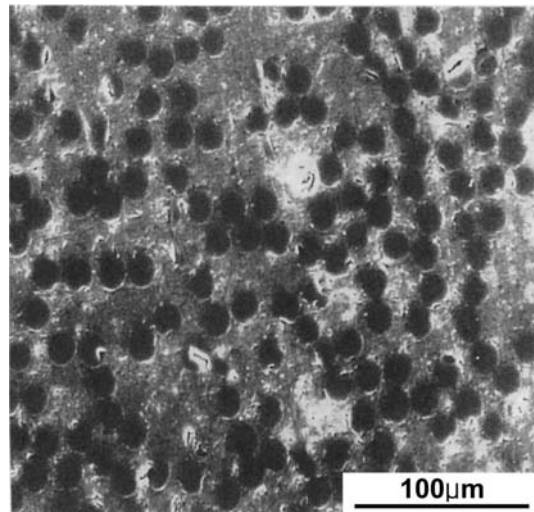
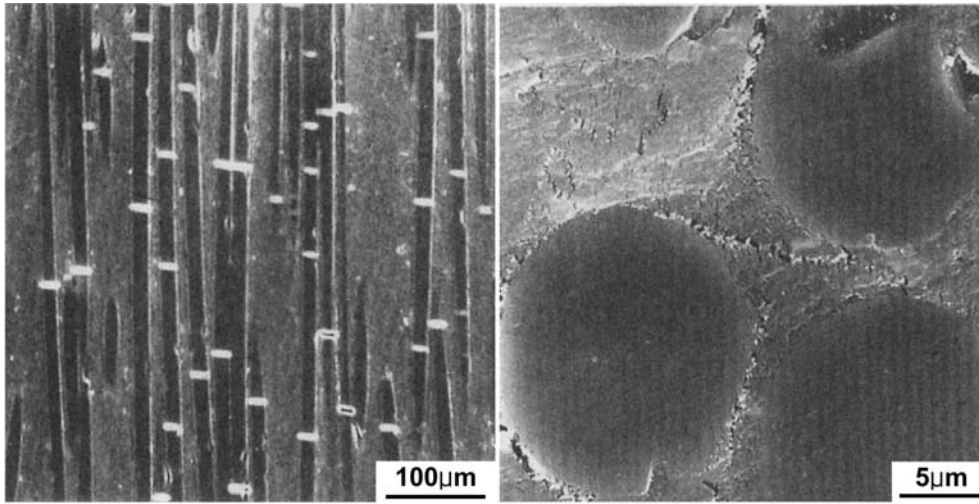


그림 41. γ알루미나/Al 1방향 강화재의 단면조직.

섬유표면에는 matrix가 잘 부착되어 있으며 matrix는 연성적으로 파괴된다. 알루미나 섬유표면을 그림 44에 나타낸 것과 같이 mirror, mist, hackle 등의 형상이 명료하게 관찰되며, 섬유는 취성적으로 파단하는 것을 알 수 있다.

1방향 강화재의 한쪽면 진동 인장피로응력 하에서의 파면을 그림 45(a)에 나타낸 것과 같이 섬유의 인장파단이 발생하며, 섬유의 파면에는 mirror, mist, hackle 등의 형상이 관찰되며, 섬유는 취성적으로 파



(a) 섬유방향 부하.

(b) 섬유와 직각방향으로 부하.

그림 42.  $\gamma$ 알루미늄/Al 1방향 강화재의 SEM내 인장 in-suit 관찰사진.

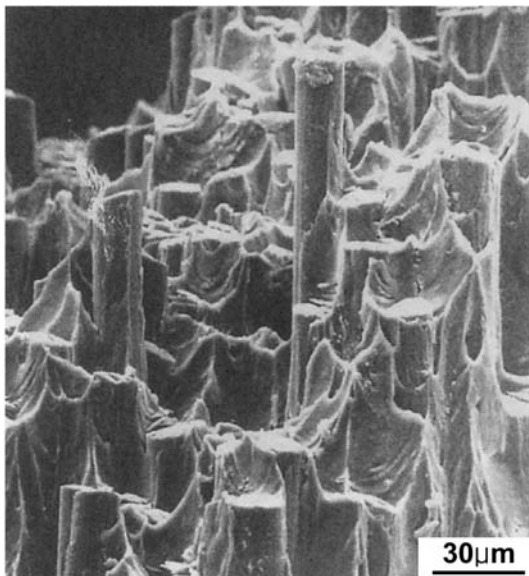


그림 43.  $\gamma$ 알루미늄 섬유의 인발 상황.

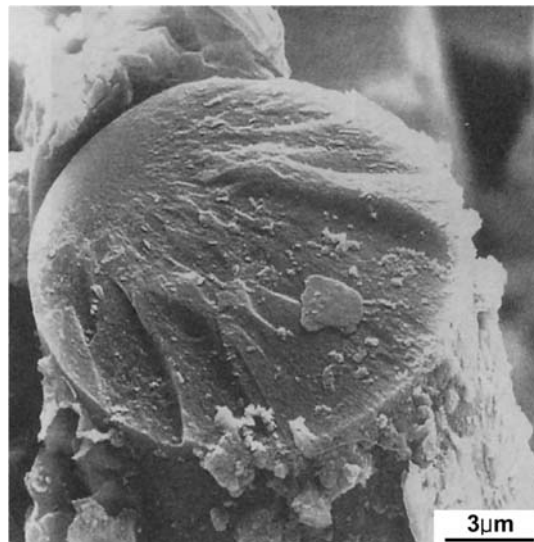


그림 44.  $\gamma$ 알루미늄 섬유의 파면.

파하는 것을 알 수 있다. 그러나, 양쪽면 진동 피로 응력 하에서는 그림 45(b)에 나타낸 것과 같이 matrix에 섬유방향균열이 일어나고 있는 점으로부터 모재에 의한 섬유의 구속이 약해지고, 압축응력 하에서 섬유의 micro buckling가 발생한 것을 알 수 있다. 또한, 그림 45(b)에서 알 수 있듯이 buckling축(섬유를 횡단하는 균열)이 명료하게 관찰되었다.

### 8.2 고분자 base 복합재료

고분자 base 복합재료는 수지를 matrix로 한 복합 재료이며, glass 섬유를 이용한 glass 섬유강화 플라스틱(GFRP)과 탄소섬유, aramide 섬유, boron 섬유 등의 고강도·고탄성을 섬유를 강화재로 한 선단 복합재료(ACM)로 크게 구분되지만, 여기에서는 후자인 ACM 파면에 대하여 기술하겠다.

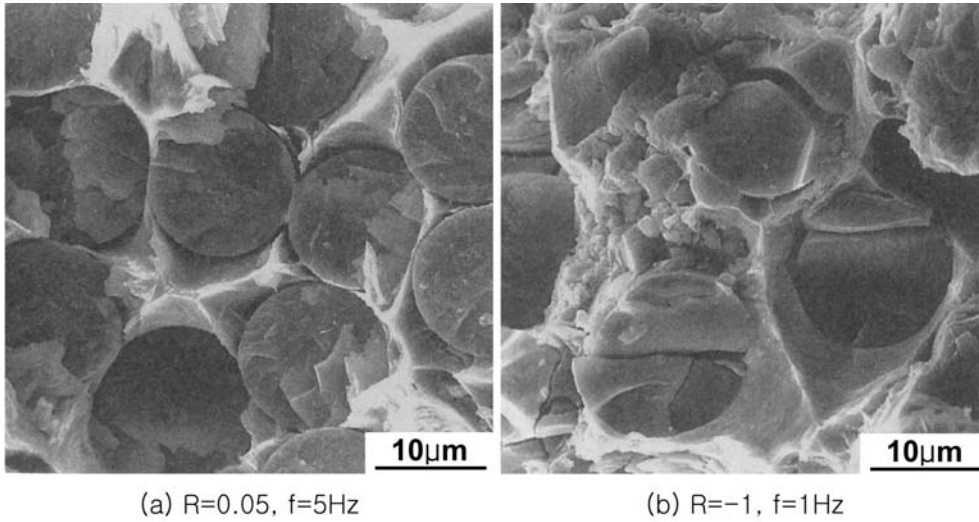


그림 45.  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  1방향 강화재의 파괴파면. (공기 중, 0° 방향부하).



그림 46. CFRP 1방향 강화재의 macro 파괴양상(T-1/347).

8.2.1. 탄소섬유강화 에폭시 수지(CFRP)

일반적인 중간온도 경화형(T-1/347;  $V_f = 60.4\%$ )과 항공기용의 고온경화형(MM-1/982X;  $V_f = 55.8\%$ )

에 대한 CFRP의 파면 양상은 다음과 같다.

(1) 1방향 강화재

1방향 강화시험편(T-1/347)에 대한 공기 중에서의 정적 인장에 의한 거시적 파괴양상을 그림 46에 나타낸 것과 같이, 최종파단은 몇 개의 섬유방향 균열에 의해서 발생한다. 그림 47에 CFRP의 파면을 나타내었다. 파괴는 주로 섬유/수지계면에서 발생하고

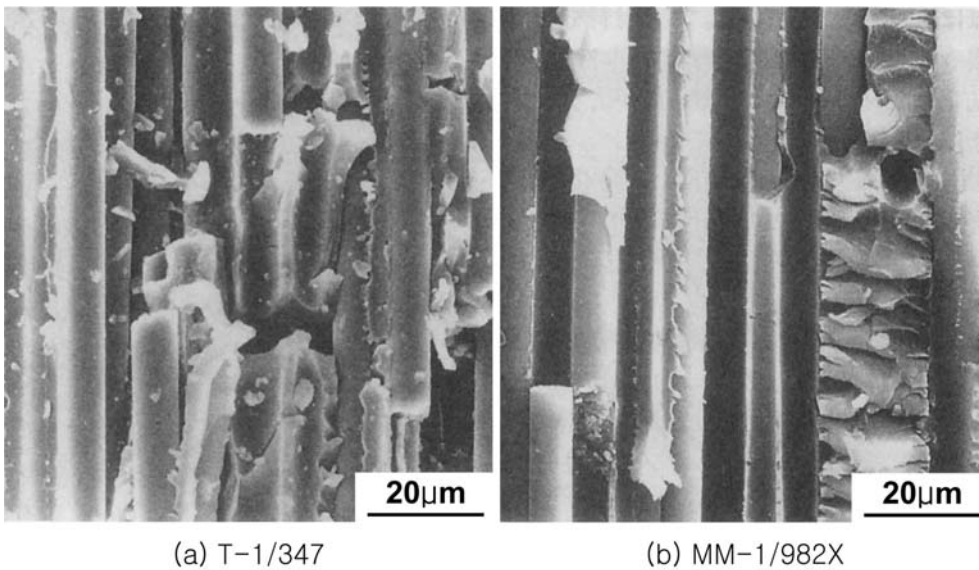
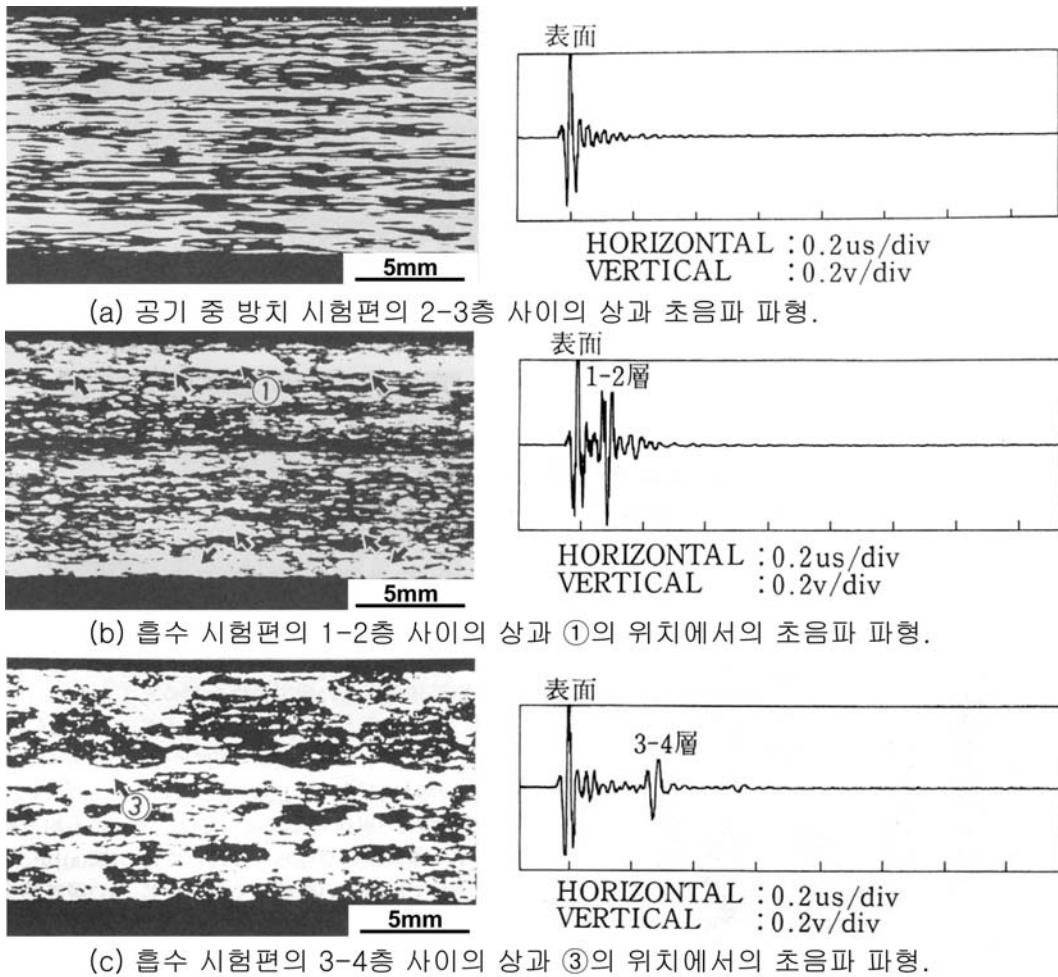


그림 47. CFRP 1방향 강화재의 공기 중 인장파면.



(a) 공기 중 방치 시험편의 2-3층 사이의 상과 초음파 파형.

(b) 흡수 시험편의 1-2층 사이의 상과 ①의 위치에서의 초음파 파형.

(c) 흡수 시험편의 3-4층 사이의 상과 ③의 위치에서의 초음파 파형.

그림 48. T-1/347 1방향 강화재의 SAM상과 초음파 파형 (화살표는 층간 박리를 나타냄).

있으며, 수지의 응집과괴는 적지만, 고온경화형에서는 수지가 매우 취성적으로 파괴한 것을 알 수 있다[그림 47(b)].

섬유강화수지의 피로강도를 시초로 하는 기계적성질에 대해서는 수분이 커다란 영향을 미치는 것은 잘 알려져 있다. 80°C의 이온교환수에 약 7개월간 침적시킨 1방향 강화재(T-1/347)의 SAM 사진을 그림 48에 나타내었다. 공기 중에 방치한 재료의 2-3층 사이의 상에 대해서는, 내부의 불균일조직에 기초하는 농담모양이 관찰되는 것[그림 48(a)]뿐이지만, 7개월간 침적시킨 침적제에서는 현저한 층간 박리가 발생하며, 1-2층 사이의 상, 3-4층 사이의 상을 각각 그림 48(b) 및 (c)에 나타내었다. 그림 48(b) 및

(c)에 나타난 것과 같이, 수신초음파파형과 함께 관찰하는 것으로부터 흡수에 의한 층간 박리영역을 층 사이마다 명료하게 얻을 수 있다. 한편, 고온경화형 MM-1/982X에서는 침적기간이 7개월을 넘으면 급격하게 흡수하기 시작하며, 12개월간 침적시킨 침적제의 단면사진을 그림 49에 나타낸 것과 같이, 섬유/수지계면박리, 층간박리가 현저하게 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 상태에 도달하게 되면 피로강도도 극단적으로 저하한다.

T-1/347 흡수재(흡수기간; 2개월)의 정적인장에 의한 파괴양상을 그림 50에 나타내었다. 공기 중에서 방치시킨 시료에서는 몇 개의 섬유방향균열이 발생한 것뿐이었지만, 흡수재에서는 다수의 매우 가는 섬유

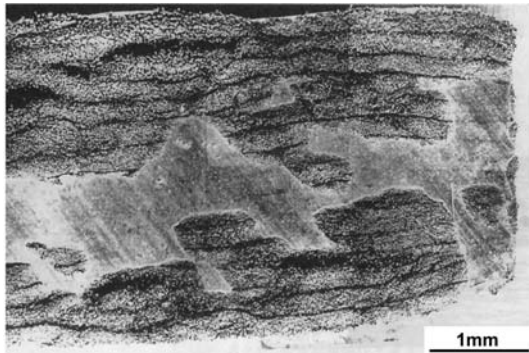
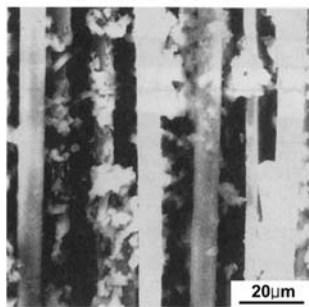


그림 49. 80°C 수중에 12개월간 침적시킨 MM-1/982X 1방향 강화흡수재의 단면 SEM사진.



(b) 파면

그림 50. T-1/347 1방향 강화흡수재의 인장파괴 양상.

다발이 분리하여 파괴되는 것[그림 50(a)], 파면 상에서는 수지의 흡수에 의한 열화가 매우 현저한 것[그림 50(b)]을 알 수 있다. 그림 51에 같은 T-1/347의 피로파면을 나타내었다. 공기 중에 방치시킨 시료의 공기 중 피로파면 상에는 수지의 작은 조각이 다수 관찰되었으며, 수지가 취성적으로 파괴하는 것을 나타내고 있지만[그림 51(a)], 흡수재의 수중피로에 대해서는 수지의 연성화, 섬유/수지계면박리가 현저한 것을 알 수 있다[그림 51(b)].

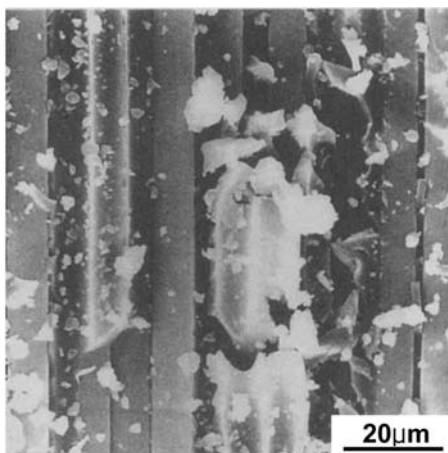
(2) [±45°] 강화재

T-1/347 강화재( $V_f = 59.6\%$ )의 정적인장에 의한 층 사이의 박리파면을 그림 52에 나타내었다. 공기 중에 방치시킨 시료에서는 섬유에 수지가 고착하며, 수지는 취성적으로 파괴하는 것을 알 수 있다[그림 52(a)]. 한편, 흡수재에서는 섬유와 수지 사이에 틈새가 보이며, 계면이 박리하는 것과 함께 공기 중에 방치시킨 시료와 비교하여 수지가 심한 소성변형 후 파괴하는 것을 알 수 있다[그림 52(b)].

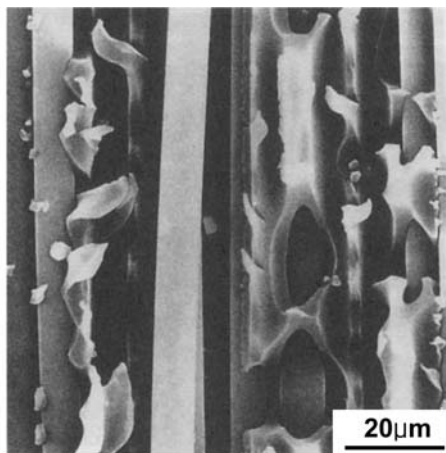
피로파괴 형태에 대해서는 피로파괴 특유의 파면은 관찰되지 않았으며, 정적인 파괴와 같은 양상인 파괴 형태를 나타내었다.

8.2.2 Aramide 섬유강화 에폭시 수지(ArFRP)

ACM용 강화섬유로서 탄소섬유 다음으로 위치를 점유하며, 급속하게 그 응용범위가 확대된 것이

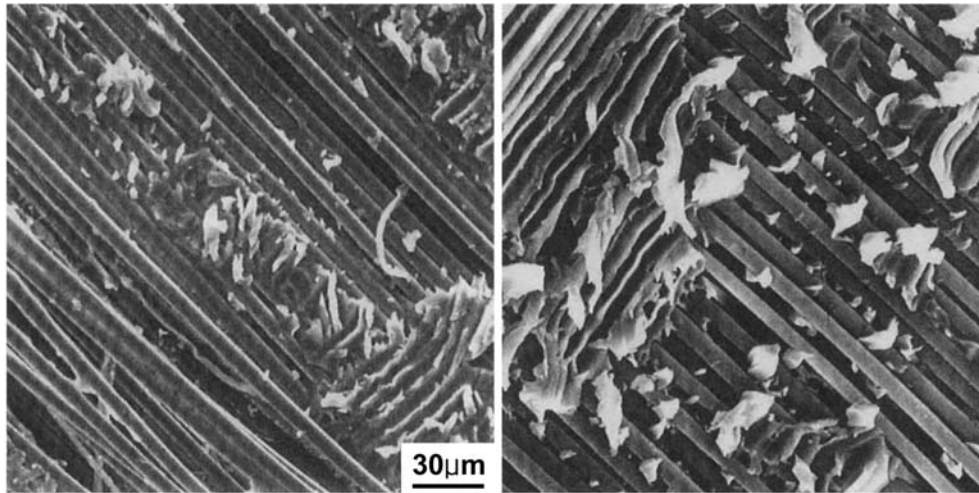


(a) 공기 중 방치



(b) 65°C 수중

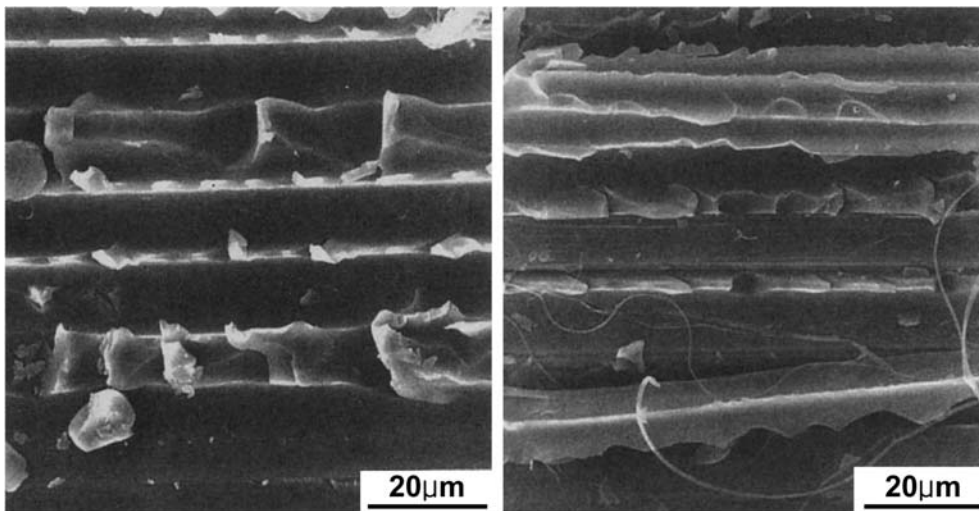
그림 51. T-1/347 1방향 강화흡수재의 피로 파면.



(a) 공기 중 방치재

(b) 흡수재

그림 52. T-1/347 [±45°] 강화재의 인장 파면.



(a) 공기 중 보존 후 실내 공기, RT

(b) 80°C 이온교환수 중에 3개월간 침적 후 실내 공기, RT

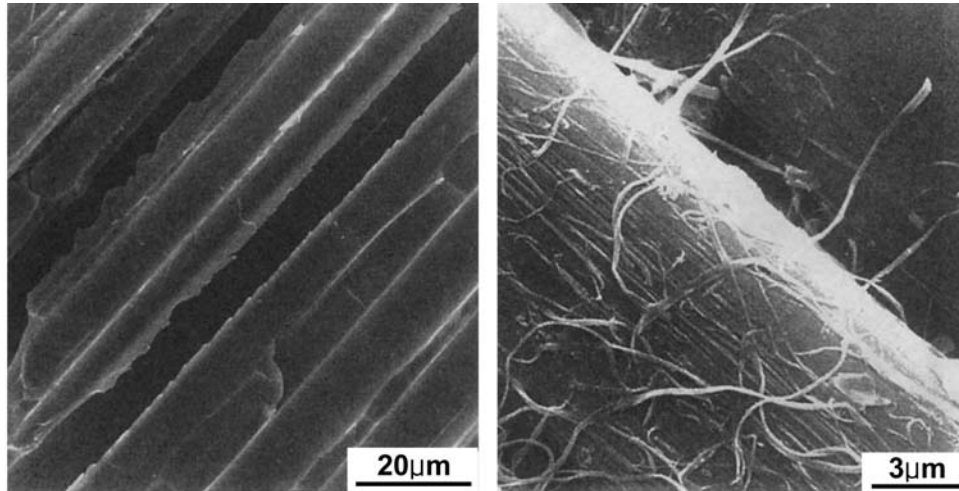
그림 53. 케블러49 1방향 강화재의 층간 박리면 (0° 방향부하, R = 0.1, f = 1Hz).

aramide 섬유이다. Aramide 섬유의 특징은 고강도 이면서 파단의 늘어남이 큰 점, 비중이 탄소섬유와 비교하여 작은 점 등이 있다. 그러나, aramide 섬유의 단점은 섬유의 중방향 깨짐(splitting)이 발생하는 점, 섬유 자체도 흡수하는 점 등을 들 수 있으며, ArFRP는 CFRP와는 다른 특유한 파면형태를 가진다. 여기에서는, 듀폰사 제품인 케블러 49와 이것과

분자식이 다른 테크놀러 강화재에 대한 파면에 대하여 기술하겠다. 테크놀러는 케블러 49와 비교하면, 탄성계수는 약 60% 정도 이지만, 인장강도는 약 10% 정도 크다.

케블러 49 1방향 강화재(섬유함유율  $V_f = 67 \sim 72\%$ )를 공기 중에서 보존한 후 실내공기 중에서 피로파괴 시킨 때의 파면(0° 방향 부하)을 그림 53(a)





(a) 케블러49 강화재, 80°C 이온교환수 중에 3개월간 침적 후 액체질소, 77K (b) 테크놀러 강화재 (공기 중 보존 후 액체질소, 77K)

그림 54.  $\pm 45^\circ$  강화재의 중간 박리면 ( $0^\circ$  방향부하,  $R = 0.1$ ,  $f = 1\text{Hz}$ ).

에 나타내었다. 섬유·수지계면이 깨끗하게 박리하여 층간박리면을 구성하고 있는 점, 수지는 커다란 hackle을 만들어 파괴되어 있는 것이 관찰되었다. 같은 재료를 80°C 이온교환수 중에 3개월간 침적 후, 실내공기 중에서 피로파괴 시킨 때의 파면을 그림 53(b)에 나타내었다. 그림 53(b)로부터 hackle과 함께 흡수에 의해 케블러 섬유가 피브릴을 생성하고 있는 것이 관찰되었다.

케블러 49  $\pm 45^\circ$  강화재(섬유함유율  $V_f = 70\%$ )를 80°C 이온교환수 중에 3개월간 침적 후 액체질소 중에서 피로파괴 시킨 때의 파면을 그림 54(a)에 나타낸 것과 같이, 섬유는 인발되어 있지만 흡수효과와 특징인 섬유 피브릴화는 극저온 하에서는 거의 발생하지 않는다. 한편, 테크놀러  $\pm 45^\circ$  강화재(섬유함유율  $V_f = 70\%$ )를 공기 중에 보존한 후 액체질소 중에서 피로파괴 시킨 때의 파면을 그림 54(b)에 나타내었

다. 그림 54(b)로부터 테크놀러 강화재(건조재)는 극저온 하에서도 피브릴이 발생하며, 섬유파면에 다수의 피브릴이 얽혀 있는 것을 명백하게 알 수 있다.

### 참고문헌

1. K. Komai, K. Minoshima and H. Ryoson : Tensile and Fatigue Fracture Behavior and Water Environment Effects in SiC Whisker/7075 Composite, Composites Science and Tech., **46** (2003) 59.
2. K. Komai, K. Minoshima and T. Hunado : Tensile and Tension-Tension Fatigue Fracture Behavior of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  Metal Matrix Composite, ASTM STP 1203 (1998) 145.
3. K. Komai, K. Minoshima and S. Shiroshita : Hydrothermal Degradation and Fracture Process of Advanced Fibre-Reinforced Plastics, Materials Sci. and Eng., **A143-1/2** (1991) 155.