

CFRP 복합재료의 층간파괴인성치에 미치는 수분의 영향⁺

김 형 진* · 김 중 훈** · 고 성 위** · 김 업 기***
(96년 10월 8일 접수)

Effect of Moisture on Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Composites

Hyung-Jin Kim* · Jong-Hoon Kim** · Sung-Wi Koh** · Am-Kee Kim***

Key Words : Interlaminar Fracture Toughness(층간파괴인성), Environmental Effect(환경효과), DCB Specimen(DCB 시험편), ENF Specimen(ENF 시험편), Critical Energy Release Rate(임계에너지 방출률), Fracture Mechanisms(파괴기구)

Abstract

Polymeric composites can be subjected to a wide variety of environmental conditions in practical use. One of most important conditions to be considered in the structural design using such materials is the moisture environment. Thus the moisture effect on interlaminar fracture toughness G_{IC} and G_{IIC} of CFRP(carbon fiber reinforced plastic) composed of carbon fibers and epoxy resin is studied in this paper. Specimens were first processed in 25, 50, 80°C fresh water and 25°C sea water for various periods of time. After that, the water absorption and fracture toughness tests were performed under laboratory atmosphere. As result, the specimen processed in 80°C fresh water indicates the highest moisture absorbing capability, the second in 50°C fresh water, the third in 25°C sea water, and the specimen in 25°C fresh water does the lowest. The interlaminar fracture toughness G_{IC} increases, approaches to the maximum, and decreases as the immersion time increases. In case of interlaminar G_{IIC} , the value of the specimen processed in 80°C fresh water turns out to be higher than others. In addition, the scanning electron micrographs(SEM) of fracture surfaces were also examined in order to explain the mechanism of fracture.

+ 이 논문은 1995년도 경상대학교 연구장학재단 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

* 경상대학교 기관공학과

** 부경대학교 제어기계공학과

*** 공주대학교 기계공학과

1. 서론

현재 실용화되고 있는 CFRP(carbon fiber reinforced plastic) 복합재료는 다양한 하중 환경조건에서 사용되고 있다. 실제 사용환경 중에서 재료의 열화에 영향을 미치는 인자로서는 온도, 습도, 자외선 그리고 산화성 가스 등의 화학적 노출 등이 있다. 습기는 대기 중에서 또는 사용재료가 장시간 수환경 속에서 노출되었을 때 흡수된다. CFRP 복합재료 역시 수분을 흡수하는 것으로 알려져 있고¹⁾, 이러한 수분이 이 재료의 열적, 기계적 성질에 큰 영향을 미친다고 보고되고 있다^{2),3)}.

적층형 복합재료의 수분 환경조건에서 재료의 기계적 성질 변화를 결정하는 파라미터로는 노출 조건, 재료의 화학성, 부하의 변형모드 등을 들 수 있으며, 그 결과는 이 세 가지 인자의 종합으로 나타나게 된다. 따라서 수분환경조건에 의한 파괴특성의 상호작용원리는 결론론적인 일반항으로 논의하는 것이 바람직하고, 화학적 물리적 반응 등과의 개별적 관계규명은 특수한 경우로 한정하는 것이 일반적이다.

즉, 복합재료의 수분함유는 기지재료(matrix)에 가수분해를 유발하여 재료인성의 열화를 초래할 가능성과 소성화 및 응력이완 등으로 인한 연성화로 재료인성을 증대시킬 가능성 등을 동시에 갖게 되는 것이다. 이같은 재료의 상반된 반응은 수중온도, 침투시간 등에도 영향을 받아 전체적인 결과를 나타내게 된다.

적층형 복합재료의 수분영향에 관한 지금까지의 연구는 수분흡수⁴⁾, 수분흡수에 따른 기계적 성질⁵⁾, 그리고 피로파괴^{6),7)}에 관한 것이 대부분으로 층간 파괴인성 연구⁸⁾는 미흡한 실정이며, 특히 국산 CFRP 재료에 대한 이에 관한 연구 결과는 보고된 적이 없다. 따라서 본 연구에서는 국산 CFRP 복합재료의 층간파괴인성치에 관한 연구^{9)~12)}의 일환으로 국내에서 생산하고 있는 탄소섬유 프리프레그(prepreg)를 적층성형한 탄소섬유강화 복합재료를 25°C, 50°C, 80°C의 담수와 25°C의 해수에 일정시간 침투시켜 침투시간에 따른 수분 흡수율을 조사하는 한편, 모드I과 모드II 층간 파괴인성실험을 수행하여 층간 임계에너지 방출률 G_{IC} 와 G_{IIC} 값에

대한 수분환경의 영향을 연구하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

실험에 사용한 복합재료는 일방향 carbon fiber/epoxy prepreg (한국화이버(주) HCU 100NS)를 실험실에서 24플라이(ply)로 일정한 섬유함유율과 제품치수의 변동을 억제하도록 제작한 금형 (250mm × 250mm)을 사용하여 성형하였다. 경화온도는 130°C 경화시간은 90분으로 하였으며, 적층시 알루미늄 포일 (Al foil : 두께 30 μ m)을 12플라이(ply)와 13 플라이 중간에 삽입하여 층간파괴인성 시험을 위한 노치를 형성시켰다. 실험재료 제작에 관한 자세한 설명은 참고문헌⁹⁾에 자세히 기술되어 있다.

성형이 끝난 적층판은 다이아몬드 커터를 사용하여 모드I 시험용 시험편으로 Fig. 1(a)와 같이 폭 20mm, 길이 100mm, 초기 노치길이 50mm인 DCB 시험편(double cantilever beam specimen)을 제작하고, 모드II 시험용으로는 Fig. 1(b)와 같이 폭 20mm, 길이 100mm, 초기노치길이 25mm의 ENF 시험편(end notched flexure specimen)을 가공하였다. 가공이 완료된 시험편들은 실리카겔(silica gel, SiO₂, nH₂O)이 담긴 오븐에서 1개월간 방치하여 수분이 완전히 제거되도록 하였다. 수분이 제거된 시험편들을 각각 25°C, 50°C, 80°C의 담수와 25°C의 해수에서 일정시간 경과시켜 흡수 처리한 후 꺼내어 부드러운 천으로 외부의 습기를 제거하여 시험에 사용하였다. 시험편에 흡수된 수분량은 정밀도가 1×10⁻³g인 전자저울로 무게를 측정하였다.

2.2 실험방법

모드I 실험의 경우 시험편 선단에 Fig. 1(a)에서와 같이 에폭시 접착제를 사용하여 균열개구변위의 변화에도 시험편 양단이 균일한 하중을 받고 시험편 축 방향의 전단력이 최소화되도록 장치(end tab)를 접착한 후 Instron 만능시험기(Instron Model 4204, 용량 5ton)를 사용하여 실험실 환경에서 하중점 변위율 2mm/min로 실험을 행하였다. 각 경우에 대하여 5개의 시험편에 대한 실험값의

평균을 취하였다. 균열길이 측정은 이동현미경을 사용하여 측정하였다. 이때 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 시험편 양면에 4mm마다 페인트로 눈금을 표시하여 측정에 기준점으로 삼았다. 균열선단이 초기노치에서 균열선단까지의 거리로 4mm의 배수가 되는 지점(즉 페인트 표시점)에 도달할 때마다 시험기의 부하와 제하를 반복적으로 하여 시험기 출력으로부터 하중-변위곡선을 얻었다. 모드I 임계에너지 방출률 G_{IC} 의 계산은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$G_{IC} = \frac{nP\delta}{2Ba} \quad (1)$$

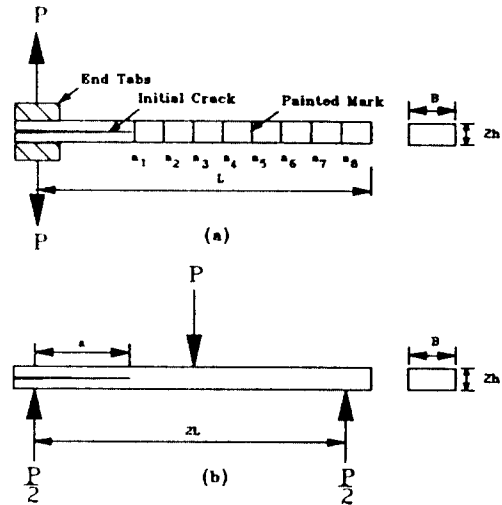
여기서 P 는 하중, δ 는 하중점의 초기위치로부터의 변위, B 는 시험편 폭 그리고 a 는 균열길이이다. 여기서 n 은 $C = Ka^n$ 의 관계로부터 얻어지는 a 의 멱수로서 컴플라이언스 C 와 균열길이 a 관계를 대수-대수 좌표로 나타내었을 때 나타나는 기울기이며 하중-변위 곡선으로부터 구한 겹보기 컴플라이언스를 수정하는 상수이다¹³⁾.

모드II 실험은 실험실 환경에서 모드II 균열이 발생하도록 Fig. 1(b)에서 보인 것과 같이 3점 굽힘하였다. 양단지지점 사이의 거리 $2L$ 은 100mm로 하였고, 스패의 1/2길이와 초기노치길이의 비, a_0/L 은 0.5가 되도록 하였으며 1mm/min의 하중점 변위속도를 유지하며 시험하였다. 모드II 실험의 경우 이동 현미경을 이용한 균열길이 측정이 균열의 불안정성장에 의하여 불가능하였다. 따라서 불안정 균열 발생 직후 즉시 제하하고 시험편을 절개하여 파단면에 나타난 불안정 균열 시작점에 해당하는 균열선(crack front)의 두께방향으로 4등분된 중앙부 세지점까지의 거리를 측정하여 평균한 균열길이를 사용하였다. 모드II 임계에너지 방출률 G_{IIC} 는 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$G_{IIC} = \frac{3 m a^2 P^2}{2B} \quad (2)$$

여기서 m 값은 모드I 실험에서와 유사한 컴플라이언스 수정 상수로서 Fig. 1(b)의 시험편과 동일한 형태로 길이가 길고($2L=140mm$) 다양한 균열길이($a=0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35$ mm)를 갖는 시

험편들을 제작하여 각각에 대한 컴플라이언스를 하중-변위곡선으로부터 측정하고 컴플라이언스와 균열길이의 관계를 회귀법¹⁴⁾으로 결정하는 상수이다. 이상의 모드I과 모드II 층간파괴인성시험 절차는 유럽파괴기구(European group of fracture)의 의정서¹⁵⁾를 따른 것이다.



(a) DCB specimen (Mode I)
(b) ENF specimen (Mode II)

Fig. 1 Geometries of Specimens

3. 결과 및 고찰

3.1 수분흡수에 미치는 환경의 영향

Fig. 2는 80°C, 50°C, 25°C의 담수와 25°C 해수에 침투처리한 시험편(길이 $L=100mm$, 폭 $B=20mm$, 두께 $t=2.6mm$)의 수중 침투시간에 따른 수분흡수량 $M(t)(\%)$ 의 변화를 나타낸 것이다. 측정된 수분흡수량은 건조상태의 재료와의 무게비 백분율로 다음 식을 이용하여 나타내었다.

$$M(t) = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3)$$

여기서 W_m 는 흡수후 수분이 포함된 시험편의 무게이고, W_d 는 건조상태의 시험편 무게이다. 수

분침투는 초기기간(처음 240 시간) 동안 빠르게 진행되다가 시간이 경과함에 따라 둔화되어 장시간 후 수분흡수는 포화상태에 도달하게 된다. 이러한 초기의 빠른 수분침투 현상은 시험편 표면과 시험편 내부의 초기 수분 농도구배가 크기 때문으로 설명되지만(Fick의 제 1 확산법칙) 시험편 표면에 존재하는 미소결함이나 내부에 존재하는 공간구조(계면영역과 같은 저밀도 지역)에도 영향을 받고 있다고 생각된다. 또한 최종 포화흡수량의 크기는 80°C, 50°C의 담수, 25°C 해수와 25°C의 담수 순으로 나타났으며 침투온도에 따른 포화흡수량의 최고와 최저의 차이가 7배에 달하였다. 따라서 침투온도조건이 흡수량에 영향을 미치는 중요한 요소인 것을 알 수 있다. 이것은 물분자의 확산계수가 절대온도에 지수적으로 비례한다는 사실로 설명될 수 있다. 또한 해수가 담수에 비하여 동일한 온도와 침투시간에 대하여 비교적 많은 흡수량을 보여 주고 있는 데 이것은 해수의 침투 활성화 에너지가 담수에 비하여 낮기 때문인 것으로 판단된다.

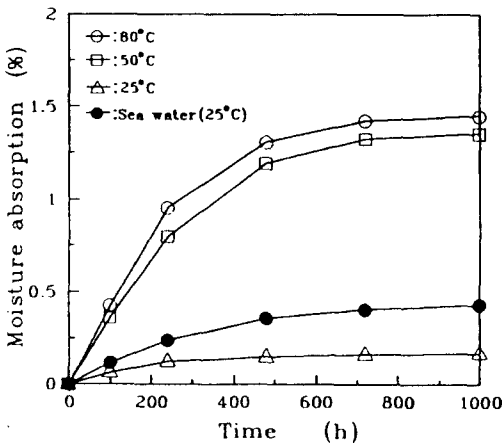


Fig. 2 Water absorption in CFRP composite as a function of immersion time for various environments

3.2. 하중-변위곡선

Fig. 3은 여러가지 환경조건 하에서 비교적 열화의 진행이 적을 것으로 예상되는 단기간(240시간) 수중 침투시킨 시험편을 택하여 모드I 층간파괴인

성시험을 수행해서 얻은 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 이 곡선들은 재료의 탄성 컴플라이언스가 침투온도 상승에 따라 증가되고 있음을 나타내고 있으며 초기 노치에서 갑작스런 국부적 불안정균열발생에 해당하는 “pop-in” 발생 후 대체로 준안정균열성장(quasi-static crack growth)이 지속되다 최종파단에 이르는 거동을 보이고 있다. 이는 참고문헌⁹⁾에서 보인 초기노치길이/리가먼트가 50/50인 시험편에서 나타나는 준안정균열성장 거동과 동일한 결과로서 준안정균열성장 성립이 시험편의 수분 흡수량과 무관하게 시험편 하중형상에 의하여 결정되고 있음을 나타내는 것이다. 또한 그림에서 수중 침투온도의 상승에 따라 최종파단점까지의 하중-변위곡선의 폐곡선(하중-변위곡선의 밀면적)이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 수중침투온도의 상승에 따라 재료의 층간파괴저항이 증가하고 있음을 나타내는 것으로 수분흡수량의 크기 순으로 파괴저항의 크기가 나타나고 있어 모드I 층간파괴저항과 수분흡수량과의 밀접한 상관관계를 예상할 수 있다.

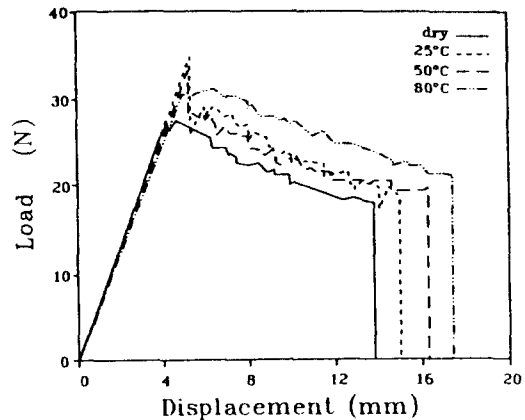


Fig. 3 The typical load-load point displacement curves for specimens processed under various environments

한편 Fig. 4는 일정 수중 침투온도(50°C)에서 모드I 층간파괴인성시험에서 나타나는 침투시간 경과에 따른 하중-변위 곡선의 변화를 나타낸 것이다. 침투시간이 증가함에 따라 점차적으로 폐곡선

면적이 커지는 것을 알 수 있고 장시간이 지나면 반대로 면적이 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 수분흡수가 단기적으로 복합재료의 기지재료를 연성화함으로 인성을 증가시키는 효과를 나타내지만 장시간에 이르면 포화상태에 도달하여 더 이상의 인성 증대효과 없이 재료내 섬유/기지 계면접촉상태의 열화진행으로 인하여 도리어 재료의 층간인성이 저하되고 있음을 의미한다. 따라서 연화에 의한 인성의 상승과 열화에 의한 감소의 상호작용 하에서 최고의 파괴인성을 나타내는 최적조건을 기대할 수 있다.

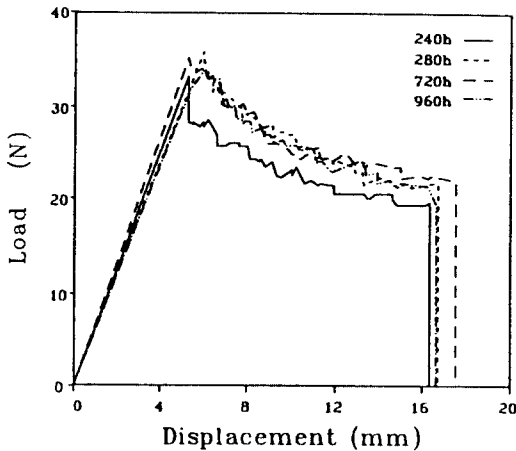


Fig. 4 The typical load-load point displacement curves for specimens processed for various immersion times

3.3 층간파괴인성

Fig. 5는 건조상태의 시험편과 50℃의 수중에서 240시간 침투시킨 시험편에 대한 모드I 층간파괴인성치 G_{IC} 를 균열증분에 따라 나타낸 파괴저항곡선(R곡선)이다. 그림에서 건조상태의 시험편은 균열발생 초기의 값이 낮은 값으로부터 출발하여 균열증분에 따라 상승하는 R곡선의 증가현상을 볼 수 있으나, 50℃ 수중에 침투되었던 시험편에서는 균열발생시의 파괴인성값이 상대적으로 높아 균열 증분에도 불구하고 파괴저항값이 일정한 직선 형태를 보이고 있다. 이러한 R-곡선 거동은 80℃ 수중침투 시험편의 경우를 제외한 시험편에서 온도

와 시간에 관계없이 공통적으로 나타내고 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 6 참조). 이같은 결과는 수분이 노치선단부에 침투하여 그 영역에 존재하는 레진(resin) 풍부지역을 소성화함으로써 균열선단부가 연성화되어 균열이 blunting 되고, 국부적 팽창에 의한 shielding 효과가 발생하여 초기 균열발생에 필요한 파괴저항을 상승시킨 결과로 생각된다.

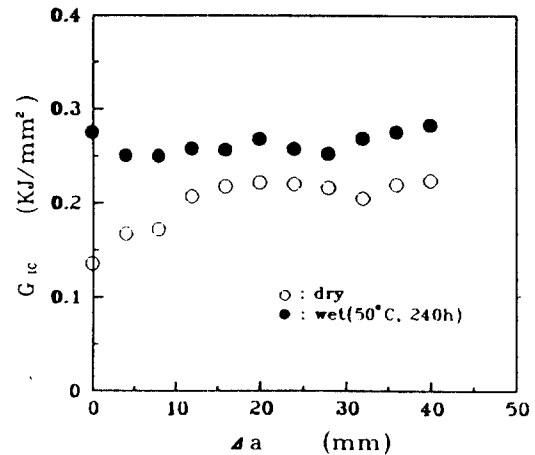
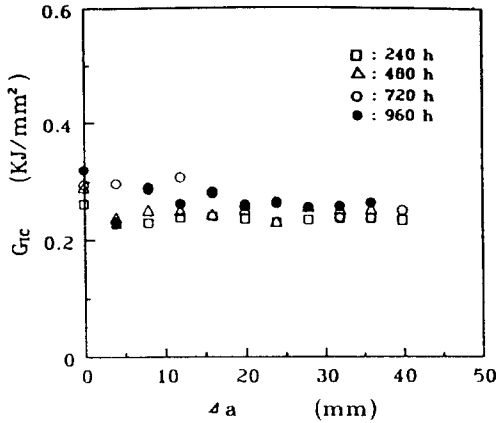
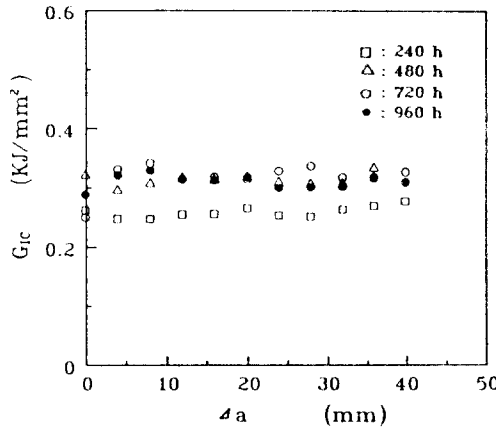


Fig. 5 R curves for dry and wet(50°C water, 240 h) specimens

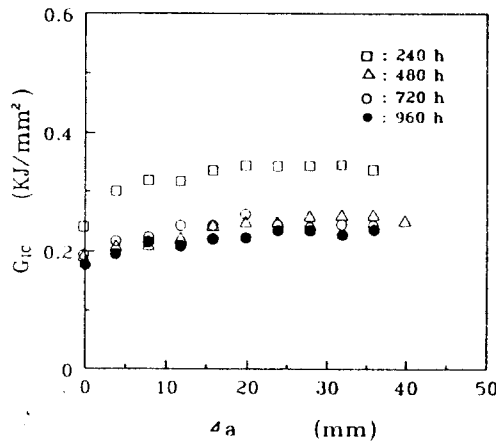
Fig. 6은 각각 25℃, 50℃, 80℃ 담수환경에서 240, 480, 720, 960시간 동안 침투시킨 시험편에서의 층간파괴저항곡선(R곡선)을 나타낸 것이다. 전반적으로 균열증분에 따른 R곡선의 양상이 Fig. 5의 50℃ 수중에서 240시간 침투시킨 시험편과 유사하나 침투온도에 따라 침투시간의 영향이 다르게 나타나고 있음 알 수 있다. 25℃의 담수에서는 수분 침투율이 비교적 느리므로 같은 시간동안 침투된 수분량이 Fig. 2에서 보인 바와 같이 상대적으로 적고 포화상태에 이르기까지 걸리는 시간이 상당한 기간을 소요하므로 침투시간에 따른 R곡선의 상승현상이 장기간 지속되나 그 변화량은 크지 않다. 50℃ 수중에서는 침투시간 증가에 따라 침투초기에 큰 R곡선의 상승을 보이고 곧 포화상태가 되어 변화가 작아진다. 반대로 80℃ 수중에서는 침투시간의 증가에 따라 초기부터 큰 R곡선의 하강을 나타내고 있다. 이는 단기간에 걸친 다량의 수분흡수에도 불구하고 고온에 의한 계면접착의



(a) 25°C water



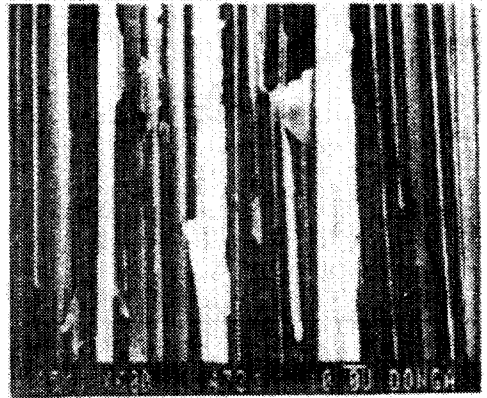
(b) 50°C water



(c) 80°C water

Fig. 6 G_{IC} as a function of crack length increment, Δa , for various immersion time

열화가 더 큰 영향을 주어 저하하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 고온의 수분 분위기에서 실용되는 CFRP 복합재료의 계면결합력 약화로 인한 층간파괴인성의 급격한 감소현상을 예상케 한다. Fig. 7은 모드 I 층간파괴인성시험후의 건조상태의 시험편과 80°C 수중에서 240시간 침투처리한 시험편의 파단면을 전자현미경(SEM)으로 관찰한 것이다. 수중침투 처리된 시험편의 경우 파단면에서 탄소섬유에 붙어 있는 기지재료(epoxy)의 양이 건조상태의 시험편에 비하여 적게 나타나고 파단면이 섬유와 기지재료의 경계를 따라 매끄럽게 형성되고 있다는 사실이 수중침투로 인한 계면 열화 사실을 뒷받침한다.



(a)



(b)

Fig. 7 SEM micrographs of fracture surfaces from Mode I specimens. (a) dry specimen, (b) wet specimen(80°C, 240h)

Fig. 8은 각기 다른 환경에서 수분침투한 시험편의 균열발생점(pop-in발생점)에 해당하는 모드I 층간파괴인성치 G_{IC} 를 침투시간에 따라 나타낸 것이다.

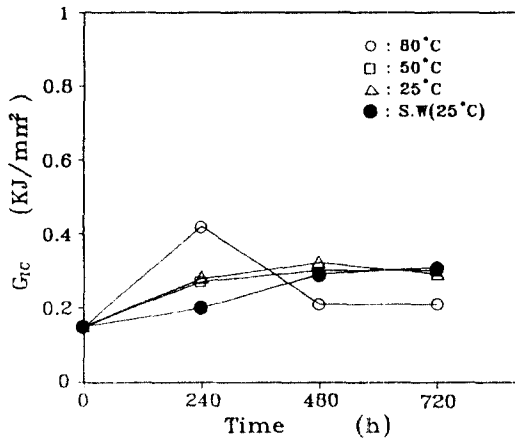


Fig. 8 G_{IC} as a function of immersion time for various environments

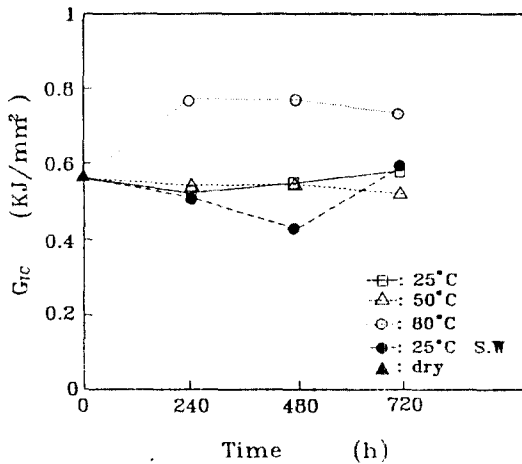
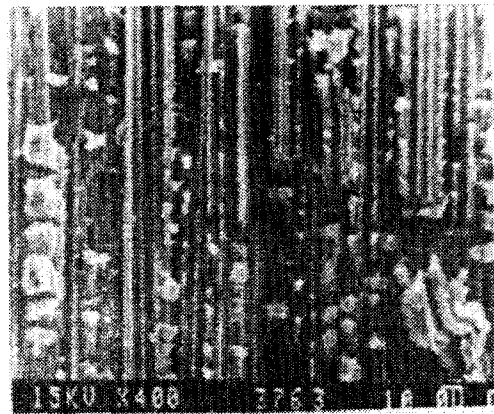


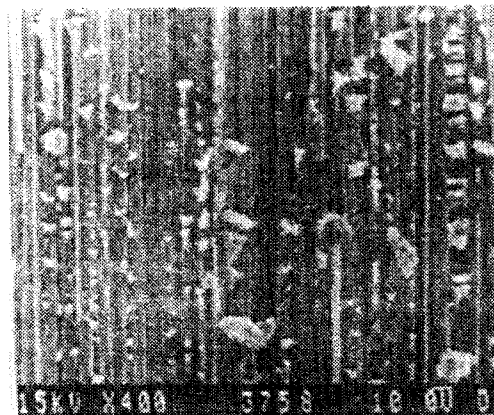
Fig. 9 G_{IC} as a function of immersion time for various environments

Fig. 9는 Fig. 8과 동일하게 처리한 시험편의 모드II 층간파괴인성치 G_{IIC} 를 침투시간에 따라 나타낸 것이다. 모드II 하중을 받는 ENF 시험편의 경우 이미 언급한 바와 같이 불안정균열성장이 발생

하므로 G_{IIC} 는 불안정균열 발생점에서 측정된 G_{IIC} 값을 나타낸 것이다. 모드II의 경우 층간파괴인성치 G_{IIC} 는 침투환경에 관계없이 단기간에 걸쳐 증가하며 침투시간이 장기화함에 따라 증가가 둔화되고 감소하는 경우도 발생하고 있다. 이에 반하여 모드II의 층간파괴인성치 G_{IIC} 는 80°C 수중침투와 같이 가혹 흡수환경에서 큰 층간파괴인성치 상승을 보인 점을 제외하면 그외의 수분환경에서는 침투시간에 따른 증가현상이 뚜렷하지 않았다. 특히 25°C 해수 침투조건에는 이례적으로 단기간에



(a)



(b)

Fig. 10 SEM photographs of fracture surfaces from Mode II specimens. (a) dry specimen, (b) wet specimen(80°C, 240h)

절친 감소현상을 보인다. 또한 모드II 층간파괴인성치 G_{IIC} 는 모드I 층간파괴인성치 G_{IC} 에 비하여 매우 큰(최소 1.5배 이상) 값을 나타내고 있다. Fig. 10은 건조상태의 시험편 및 수중 침투된 모드II 층간파괴시험편의 파단면 사진으로 건조상태의 시험편과 80℃수중에서 240시간 침투처리된 시험편의 파단면을 전자현미경(SEM)으로 관찰한 것이다. 건조상태의 시험편이 수중침투된 시험편에 비하여 섬유에 붙어 있는 기지재료의 양이 상대적으로 많은 점은 모드I의 경우와 같으나, Fig. 7에서 보인 모드I의 파단면과 각각 비교하면 모드II의 경우가 섬유에 붙어 있는 기지재료의 양에서 상대적으로 많음을 보이고 있다. 이것은 모드II 변형에 대한 CFRP 복합재료의 섬유와 기지 사이의 계면분리가 모드I 변형에 비하여 용이하지 않음을 나타내는 것으로서 두 모드간의 층간파괴인성치 차이의 한 원인을 나타내고 있다고 판단된다.

4. 결 론

CFRP의 모드I과 모드II 층간파괴인성치에 대한 25℃, 50℃, 80℃ 담수환경 및 25℃ 해수환경의 영향을 연구한 결과는 다음과 같다.

- 1) 수중 침투경과시간에 따른 수분 흡수량은 80℃의 담수인 경우가 가장 높았으며, 50℃의 담수, 25℃의 해수, 25℃의 담수의 순으로 나타났다.
- 2) 층간 임계에너지 방출률 G_{IC} 및 G_{IIC} 는 침투시간에 따라 단기적으로는 증가하고 있으며 장기적으로 증가가 둔화되거나 감소하였으며, G_{IIC} 값은 G_{IC} 값에 비하여 최소 1.5배 이상의 높은 값을 보였다.
- 3) 층간 임계에너지 방출률 G_{IC} 값은 단기적으로 80℃ 담수환경에서 최고값을 25℃ 해수환경에서 최소값을 보였으나 장기적으로는 25℃ 해수환경에서 최대값을 80℃ 담수환경에서 최소값을 나타내었다.
- 4) 층간 임계에너지 방출률 G_{IIC} 값은 단기적으로 80℃ 담수환경에서 최고값을 25℃ 해수환경에서 최소값을 보였으나 장기적으로는 80℃ 담수환경에서 최대값을 25℃ 담수환경에서 최소값을 나타내었다.

- 5) 수중에 침투된 CFRP 시험편의 층간파괴인성을 결정하는 주요 매카니즘은 수분함유에 의한 기지의 연성화, 균열선단부의 팽창, 층간분리 면적의 증가, 컴플라이언스의 증가 등으로 추측된다.

참고문헌

- 1) Tanaka, K., Hojo, M., Gustafson, C. and Hayashi, R., "Propagation of Delamination Fatigue Cracks in CFRP in Water", Trans. JSME(A) 54(499), pp.455~460, 1987
- 2) Qiuling Wang and George S. Springer, "Moisture Absorption and Fracture Toughness of PEEK Polymer and Graphite Fiber Reinforced PEEK", Journal of Composite Materials, 23, pp.434-447, 1989
- 3) Komai, K., Minoshima, K. and Shibusani, T., "The Influence of Water on the Mechanical and Fatigue Strength of Unidirectionally Reinforced Carbon/Epoxy Composites", Trans. JSME(A) 56(525), pp.1021-1028, 1990
- 4) Berry, J.P. "Effect of Moisture Absorption on the Dynamic Mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Nylon 6,6", Polymer Composites (15), pp.223-230, 1994
- 5) Yur, S. and Ma, C., "Environmental Effects on the Water Absorption and Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced PPS and PEEK Composites. Part II", Polymer Engineering and Science, Mid-January, pp.34-39, 1991
- 6) Kimura, Y. and Yagasaki, T., "Effects of Water Absorption upon Fatigue Carbon-Fiber-Reinforced Epoxy Resin Composites", Trans. JSME(A) 60(571), pp.599-605, 1994
- 7) Dickson, R.F., Jones, C.J., Harris, B., Leach, D.C. and Moore, D.R., "The Environmental Fatigue Behaviour of Carbon Fiber Reinforced Polyether Keton." J. of Mat. Sci.20, pp.60~69, 1985
- 8) Friedrich, K. and Selzer, R., "Influence of

- Water Up-take on Interlaminar Fracture Properties of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites", *J. of Mat. Sci.* 30, pp.334-338, 1995
- 9) 김형진, 엄윤성, 고성위, "CFRP 복합재료의 모드 I 층간파괴인성치에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 제7권, 제4호, pp.66~73, 1994
 - 10) 김형진, 엄윤성, 김엽기, 고성위, "CFRP 복합재료의 Mode II 층간 파괴인성치에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 제8권, 제4호, pp.78-82, 1995
 - 11) 이정규, 엄윤성, 김형진, 고성위, "층간파괴인성치에 대한 섬유방향에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제9권, 제2호, pp.89~97, 1995
 - 12) 정석곤, "성형조건에 따른 CFRP의 파괴거동에 관한 연구", 부산수산대학교 대학원 석사학위논문, 1995
 - 13) Davies, P., Moulin, C., Kaush, H.H. & Fischer, M., "Measurement of G_{IC} and G_{IIC} in Carbon/Epoxy Composites", *Comp. Sci. and Tech.* 39, pp.193~205, 1990
 - 14) Carlsson, L.A., Gillespie Jr, J.W. and Trethewey, B.R., "Mode II Interlaminar Fracture of Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK", *J. Reinf. Plast. & Comp.* 5, p.170, 1986
 - 15) Davies, P., "Polymers & Composites Task Group Round Robin Protocols for Mode I, Mode II and Mixed Mode Testing." *European Structural Integrity Society*, 1991