

적층형 탄소섬유 복합재료의 기계적 성질에 미치는 수분환경의 영향

김 원 근* · 문 창 권**
(99년 8월 2일 접수)

Effect of the Moisture Environment on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Laminates

Won-Keun Kim* · Chang-Kwon Moon**

Key Words : Moisture Environment(수분환경), Carbon Fiber Cross Laminates(직교 적층형 탄소섬유강화 복합재료), Unit Ply Thickness(단위 ply 두께), Weight Gain of Water(수분흡수율), Immersion Time(침지시간)

Abstract

This study has been investigated about the influence of moisture environment on the mechanical properties in the carbon fiber cross laminates. And it has been also investigated the effect of unit ply thickness of the carbon fiber cross laminates on the mechanical properties in distilled water of 80°C for a certain period of time.

As a results, it was found that the weight gain of water was increased with the immersion time and the bending strength and fracture toughness were decreased with the weight gain of water. And it was also shown that the bending strength and fracture toughness were decreased with the increasing of the unit ply thickness of carbon fiber cross laminates through the immersion time.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 경량, 고강도의 특징을 가지며, 탄소섬유강화 복합재료의 경우에는 내식성, 내열성, 전도성, 생체친화성 및 비탄성을 등이 매우 뛰어나 우주 항공산업 및 스포츠 오락 분야를

비롯한 금속재료의 대체 재료로서 이용분야가 확대되고 있는 추세이다. 특히 내식성이 우수하여 최근에는 선박 및 석유 시추를 위한 해양 구조물 등의 해양분야에서 적용이 활발히 진행되고 있다.

그러나 섬유강화 복합재료는 파괴 메카니즘이 매우 복잡하고, 지금까지 재료 물성에 대한 기초

* 부경대학교 공과대학 재료공학부

** 종신회원, 부경대학교 공과대학 재료공학부

자료 및 특수 환경에 대한 내구성 시험에 대한 자료도 충분하지 못하여 우주, 항공 등의 높은 신뢰성을 요구하는 구조용 재료에서의 사용에는 많은 제약을 받고 있다.

이와 같은 점에서 이방성 및 비균질성인 복합재료의 파괴특성과 재료 물성의 개선에 관한 연구^{1)~4)}가 많은 연구자들에 의해 실시되어 왔지만, 아직 미해명의 문제도 많다. 그 대표적인 예로서, 탄소섬유 복합재료는 전형적인 취성 재료임에도 불구하고, 그 파괴인성치는 일정하지 않고, 평활재의 파괴응력이나 파괴인성치는 크기 효과(size effect)를 보임에도 불구하고 이에 대한 연구가 실시되어 있지 않고 있으며, 이들의 특성을 고려한 구조 부재의 신뢰성 평가법이 아직 개발되어 있지 않다는 점이다.

탄소섬유와 에폭시로 성형된 prepreg로 제작되는 적층판형 복합재료에서의 기계적 성질에 미치는 중요한 인자로는 적층시의 섬유 방향^{5)~8)}, 적층판의 두께^{9),10)} 및 적층 순서^{8),11)}, 섬유와 매트릭스 수지간의 계면전단강도^{12)~17)} 등이 있으며, 이에 관해서는 많은 연구결과가 보고 되고 있다. 그러나, unit ply의 두께가 수분환경에서 적층판의 기계적 성질에 미치는 영향에 대한 연구보고는 거의 없는 실정이다.

그리고 유리 섬유강화 복합재료는 일반적으로 자외선 조사 또는 수분의 침투에 의한 기계적 물성의 저하는 비교적 심하게 발생한다. 이와 같이 유리섬유 강화 복합재료에서의 기계적 물성 저하는 강화섬유 자체의 물성의 저하, 섬유와 매트릭스 수지간의 계면열화 및 매트릭스 수지의 물성 저하가 동반해서 일어난다고 보고 되고 있다. 섬유강화 복합재료의 환경에 대한 내구성 시험에는 지금까지 해수 및 담수 등의 수분 환경에 대한 연구보고는 많이 있지만, 그것보다 더 열악한 환경으로 해수나 담수보다도 물분자들의 cluster가 작아서 침투력이 우수하여 보다 짧은 시간내에 복합재료의 물성을 저하시킬 수 있는 증류수의 환경, 더욱이 고온의 증류수 환경에서 연구한 결과의 보고는 거의 없다.

그래서 본 연구에서는 탄소섬유와 에폭시 수지로 성형된 일방향 prepreg를 사용하여 unit ply의 두께가 다른 세 종류의 cross 적층형 복합재료를 제작하여 80℃의 증류수에 일정시간 침지시킨 후,

수분 흡수가 복합재료의 기계적 성질에 미치는 영향에 대하여 비교 검토한다.

2. 실험 방법

적층판 성형

본 연구에 사용된 재료는 먼저 강화섬유로는 Torey(주) 제품의 T300 탄소섬유($\rho=1,800\text{kg/m}^3$)를 사용하였고 matrix로는 epoxy 수지를 사용하여 한국 화이바(주)에서 제작된 CU175NS prepreg를 사용하였다. 전술한 CU175NS에서 C는 Carbon fiber를, U는 unidirection, 175는 m^2 당 사용한 탄소섬유의 g수, NS는 No scrim을 뜻한다.

일방향 prepreg를 0/90 방향으로 같은 방향의 prepreg의 적층수를 다르게 하여 unit ply의 두께가 다른 세 종류의 적층판인 $[0_2/90_2]_{6S}$, $[0_2/90_2]_{3S}$ 및 $[0_2/90_2]_{2S}$ 를 성형했으며, coupling 효과를 없애기 위해 적층판의 중앙면에 대해 거울대칭이 되게 적층을 실시하였다. 여기서 coupling 효과라는 것은 단순 인장하중 하에서 전단 및 비틀림 변형이 생기는 것을 말한다.

적층판의 제작은 실험실에서 hand lay-up법으로 제작하였으며 다음과 같다. 먼저 prepreg를 한 장씩 등근 유리병으로 적당하게 압력을 가하면서 적층하여 silicon oil의 이형제(mold release agent)가 칠하여진 금형에 넣은 후, 진공상태로 30분간 유지시킨다. 그리고 열 프레스에서 130℃, 98kPa로 10분간 유지시킨 다음, 압력을 490kPa로 증가시켜 60분간 유지시킨 후 상온에서 50℃정도까지 충분히 공냉시켜 금형으로부터 적층판을 분리하여, 250×250mm 크기의 적층판을 제작하였다.

세 종류의 적층판의 unit ply 두께의 차이는 Fig. 15의 사진을 보면 명확하게 알 수 있으며, 성형 후의 세 종류의 적층판의 unit ply의 평균 두께는 $[0_2/90_2]_{6S}$ 는 0.145mm, $[0_2/90_2]_{3S}$ 는 0.289mm 및 $[0_2/90_2]_{2S}$ 는 0.437mm이었다.

섬유체적 함유율은 가스버너의 환원불꽃을 이용한 연소법을 사용하여 구했으며, 세 종류의 적층판으로부터 1g 정도의 시험편을 5개씩 채취하여 시험하였다. 그리고 각 종류의 시험편의 시험 결과를 평균하여 계산된 값은 $[0_2/90_2]_{6S}$ 는 60.0%, $[0_2/90_2]_{3S}$

는 60.3% 및 $[O_3/90_3]_{2S}$ 는 59.9%였다.

시험편 제작

제작된 적층판을 1mm 두께의 다이아몬드 휠을 가진 절단기를 이용하여 120mm×15.4mm 정도의 크기로 절단하고, 평면 연삭기에서 폭 15.0mm로 정밀하게 연삭하였다.

이렇게 가공된 시험편에 0.2mm 두께의 diamond cutter를 사용하여 노치를 가공하였으며, 노치 길이와 시험편의 폭 비(노치비:a/w)를 0, 0.1, 0.2 및 0.4가 되도록 노치 길이를 0, 1.5, 3 및 6mm로 가공하였다.

Fig. 1는 본 연구에서 사용된 3점 굽힘 시험편의 형상을 나타낸 것이다.

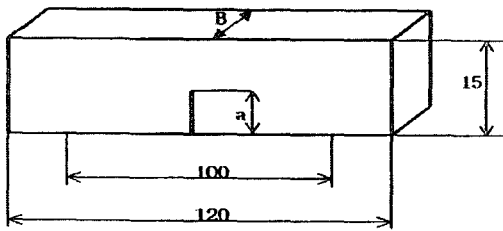


Fig. 1 Shape of bending test specimen

시험 및 방법

전술한 바와 같이 제작된 적층형 복합재료 시험편을 80℃의 증류수에 일정기간 침지시켜 수분흡수에 의한 기계적 성질의 변화를 침지 시간에 따라 측정하였으며, 수분흡수율은 각 조건 별로 3개씩의 기준 시험편을 정하여 일정 기간의 간격으로 시험편 표면의 수분을 제거한 후에 정밀 전자저울에서 수분 흡수량을 측정하였다. 수분 흡수율의 측정은 다음의 식(1)으로 산출하였다.

$$W(\%) = \frac{W_i - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

여기서, W는 수분 흡수율, W_i 는 수분 흡수 후의 시험편의 무게이며, W_d 는 수분 흡수 전의 시험편 무게로 시험전 80℃에서 3일간 건조시켜 측정된 값이다.

굽힘 시험은 인장시험기(Instron, 5ton)로 실시하였으며, 실온에서 span 길이를 100mm로 하였고, cross head speed는 2mm/min으로 일정하게 하였다. 굽힘강도 값은 Fig. 1와 같은 시험편을 각 조건당 5개씩 시험하여 평균하였다. 굽힘강도(최대굽힘응력)값은 다음 식(2)으로 계산하였다.

$$\sigma_{max} = \frac{3PL}{2Bh^2} \quad (2)$$

여기서, P는 최대하중, L은 span 길이, B는 시험편의 두께, h는 시험편의 높이를 나타낸다.

그리고, 파괴인성치의 계산은 굽힘시험 후에 notch가 있는 시험편의 시험결과로부터 ASTM E399-83¹⁸⁾에 준하여 다음과 같이 산출하였다.

먼저 다음 식(3)으로 응력확대계수 K_Q 를 계산한다.

$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3)$$

이때, $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 는 형상계수로 다음과 같이 나타내어진다.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3(a/W)^{1/4} [1.99 - (a/W)(1 - a/W)(2.15 - 3.93a/W + 2.7a^2/W^2)]}{2(1 + 2a/W)(1 - a/W)^{3/2}}$$

여기서, P_Q 는 하중(kgf), B는 판 두께(mm), S는 span 길이(mm), W는 폭(mm), a는 균열길이(mm)를 나타낸다.

위 식(3)에서 사용된 P_Q 는 하중-변위 곡선에서 최대 하중까지 선형 거동을 할 경우 최대하중을 사용하였고, 비선형일 경우에는 초기 기울기각 θ 에 대해 0.95θ 의 사선을 그어 그 사선과 만나는 곡선의 하중을 사용하였고, 두 경우 이외의 first pop-in이 있을 경우에는 그 때의 하중을 선택하였다.

여기서, 계산된 K_Q 가 $B, a \geq 2.5\left(\frac{K_Q}{\sigma_y}\right)^2$ 를 만족하는 경우에만 K_Q 를 파괴인성치(K_{Ic})로 인정하였다. 각

조건 당 5개의 시험편을 사용하였고, 5개의 값을 평균하여 파괴인성치(K_{1c})를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 노치가 없는 세 종류의 적층판 시험편을 80°C의 증류수에 침지시켜 침지시간의 경과에 따른 수분흡수율의 변화를 나타낸 것이다. 세 종류의 시험편에서 침지시간이 같을 때에 수분흡수율의 차이는 크게 없었으나, [0/90]_{6S}의 경우가 다른 두 종류의 시험편에 비해 조금 낮게 나타났고, [0₃/90₃]_{2S}가 [0₂/90₂]_{3S} 보다 조금 높은 경향을 보였다. 그리고 세 종류의 시험편이 모두 0~30일 사이에 급격한 흡수 현상을 보였고, 그 이후에는 비교적 완만한 증가를 보이고 있다. 그리고 세 종류의 시험편에서 노치 비(a/w)가 0.1, 0.2, 0.4로 다른 경우에도 Fig. 2와 비슷한 경향을 나타내었다.

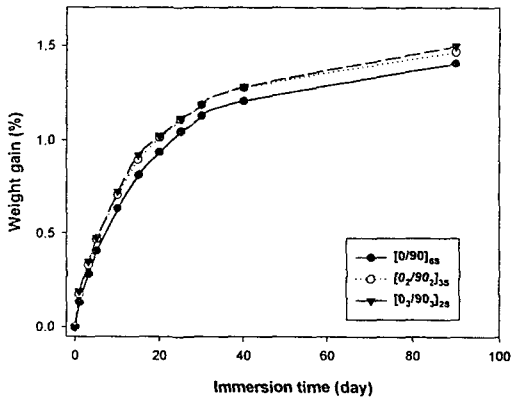


Fig. 2 Water absorption rate of each type laminates as a function of immersion time in distilled water at 80°C

Fig. 3은 노치 길이가 다른 [0/90]_{6S}의 시험편으로 80°C의 증류수에서 침지시간에 따른 수분흡수율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2와 마찬가지로 시험편을 침지시킨 후에 30일 전까지는 급격히 흡수가 일어났으나, 그 이후 둔화되는 것을 볼 수 있다. 그러나, Fig. 2와 Fig. 3에서 모든 시험편의 수분 흡수율은 90일까지도 완전한 포화 상태에 도달되지 않고 있음을 알 수가 있고, 그 이후에도 계속

수분의 흡수가 점점 증가할 것으로 예상할 수 있다. 그리고 노치가 있는 것이 없는 것보다 수분 흡수율은 다소 높게 나타나는 경향을 보였다. 이는 수분과 직접 접하는 표면적의 차이에 기인된 것으로 생각되어 진다. 이러한 경향은 [0₂/90₂]_{3S}와 [0₃/90₃]_{2S}인 경우에도 유사한 경향을 나타내었다.

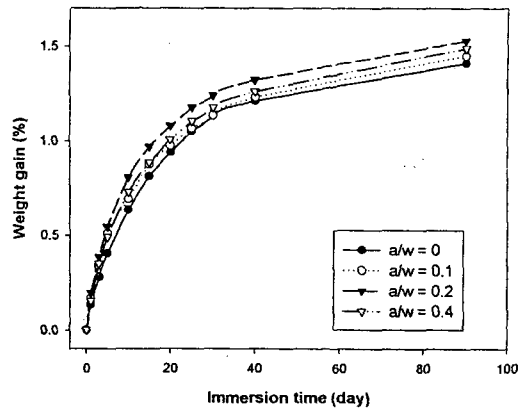


Fig. 3 Water absorption rate of [0/90]_{6S} laminates with various notch length as a function of immersion time in distilled water at 80°C

여기서, 탄소섬유 강화 에폭시 수지의 흡수에 관해 생각해 보면 보통 고강도 탄소섬유는 흡수를 거의 하지 않으므로 에폭시 수지가 주로 흡수한다고 생각되어 진다.

이러한 수분의 swelling 메카니즘²⁰⁾은 에폭시 수지의 macro, micro void와 같은 결함으로 수분의 침투에 의해서 분자쇄 사이의 free volume으로의 확산과 탄소 섬유와 매트릭스 수지 사이의 순수한 계면 및 층과 층사이의 층간계면에서 수분 침투로 인한 free volume으로의 확산 등이 동시에 일어나고, 이렇게 흡수된 수분은 macro, micro void나 free volume에 단순히 존재하거나 에폭시의 -OH기와 화학적 결합을 한 상태로 존재하고 있다고 생각되어 진다. 따라서, 본 연구에서 흡수 실험 결과 세 종류의 시험편에 있어서 수분 흡수율의 차이가 나타난 것은 계면 상태, 층간 상태 및 표면적의 차이로 인한 결과라고 생각되며, 차이가 작게 나타난 것은 각각의 시험편 표면적과 섬유함유율의 차이가 매우 작았기 때문이라고 생각되어 진다.

Fig. 4는 노치가 없는 세 종류 시험편의 흡습 전 굽힘 시험시의 하중-변위 곡선이다. $[0/90]_{6S}$ 의 경우가 다른 두 종류의 시험편에 비해 최대 굽힘 하중이 높게 나타났고, $[0_2/90_2]_{3S}$ 가 $[0_3/90_3]_{2S}$ 보다 큰 것을 알 수 있다. 본 실험에서 사용된 세 종류의 적층판의 섬유 함유율은 전술한 바와 같이 차례대로 60.0, 60.3 및 59.9vol.%로 거의 같은 값이므로 단순히 복합법칙 ($\sigma_c = \sigma_{fu} V_f + \sigma_m V_m$)으로만 비교하면 굽힘강도가 거의 같아야 된다. 그러나, 그림에서 cross 적층형 복합재료의 unit ply의 두께가 작을수록 굽힘강도가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이것은 unit ply의 두께가 클수록 일정 하중 하에서 발생하는 층간 전단응력¹⁹⁾이 크기 때문에 unit ply의 두께가 클수록 delamination이 일어나기 쉬워 굽힘강도가 작아졌다고 생각되어 진다.

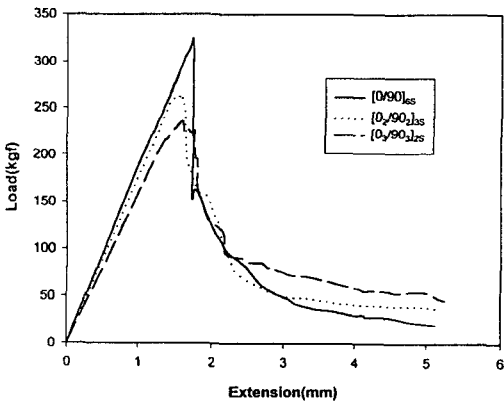


Fig. 4 Load-extension curves of each type specimen in the bending test.

Fig. 5는 노치가 없는 세 종류의 시험편의 침지 시간에 따른 굽힘강도의 변화를 나타낸 것이다. $[0/90]_{6S}$ 의 경우가 다른 두 종류의 시험편에 비해 침지시간 전 구간에 걸쳐 굽힘강도 값이 높게 나타났고, 세 종류의 시험편 모두 흡습 시간 30일 이전까지는 굽힘 강도가 급격히 감소하고, 그 이후에는 강도의 감소가 둔화되는 상태를 보이고 있으며 특히, $[0/90]_{6S}$ 의 경우 30일 이후에서 강도가 더욱 둔화되는 경향을 나타내고 있다. 여기서 흡습시간 30일 이후 강도의 감소가 둔화되는 것은 Fig. 2의 증

류수의 흡습 실험 결과에서 침지 후 30일까지는 흡습이 빠르게 증가하다가 그 이후부터 흡습의 증가는 거의 포화 상태로 가는 것과 같은 경향으로 설명되어 진다. 이러한 경향은 세 종류의 적층판에서 노치 비가 0.1, 0.2, 0.4일 경우도 유사하게 나타났다. 여기서, 침지시간의 경과에 따라 탄소섬유강화 복합재료에 있어서 굽힘강도의 감소가 크게 나타나지 않은 것은 수분환경에서 기계적 성질의 열화가 일어나는 주원인이 유리섬유강화 복합재료²⁰⁾와는 달리 수분 흡수에 의한 탄소섬유 자체의 열화가 아닌 계면 상태의 열화라고 생각된다.

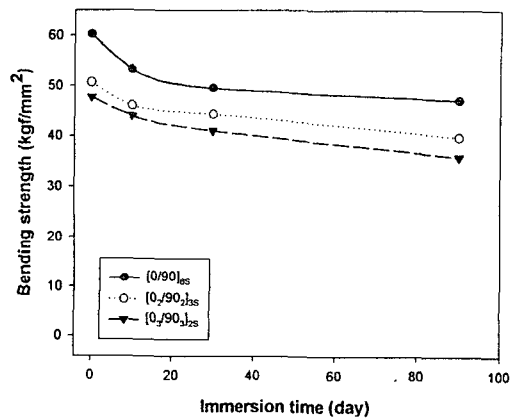


Fig. 5 Bending strength of each type laminates as a function of immersion time in distilled water at 80°C

Fig. 6은 노치 길이가 다른 $[0/90]_{6S}$ 의 적층판 시험편에서 수분 흡습 시간의 경과에 따른 굽힘강도의 변화를 나타낸 것이다. 침지시간 전 구간에 걸쳐 노치 길이가 길면 굽힘강도는 작게 나타났는데, 이는 노치 선단부의 응력 집중 현상이 노치 길이가 길수록 크게 나타난 결과라고 생각되어 진다. 흡습 시간에 따른 강도 값의 변화는 노치가 없는 경우에는 침지시킨 후 30일까지 급격히 감소했고, 그 후 거의 일정한 값을 유지했다. 노치 비가 0.1인 경우에도 30일까지 비교적 크게 감소하였고, 그 이후에는 거의 변화가 없었으나, 그 감소 폭은 노치가 없을 때보다는 작게 나타났다. 그러나, 노치 비가 0.2와 0.4인 경우에는 침지 시간의 경과에 따라 크게

변화를 보이지 않고 서서히 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 노치비가 0.2와 0.4와 같이 큰 경우에는 수분흡수의 영향을 크게 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 결국, 노치 비가 0.2, 0.4와 같이 큰 경우에는 수분 흡수에 의한 재료의 열화보다 노치 선단부의 응력 집중의 영향이 더 크기 때문이라고 생각되어 진다. 다른 두 종류의 시험편인 $[0_2/90_2]_{3S}$ 와 $[0_3/90_3]_{2S}$ 의 적층판에서도 비슷한 경향을 나타내었다.

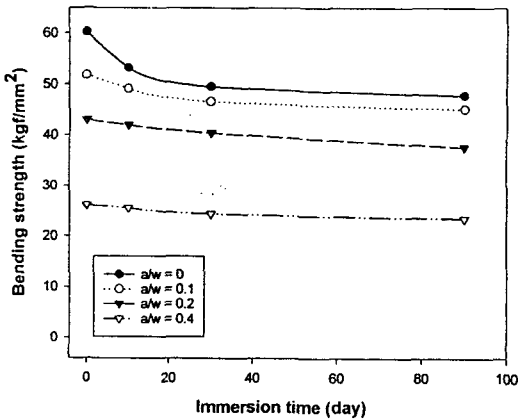


Fig. 6 Bending strength of $[0/90]_{6S}$ laminates with various notch ratio(a/w) as a function of immersion time in distilled water at $80^{\circ}C$

Fig. 7~Fig. 10은 각각 흡습 시간이 0일, 10일, 30일 및 90일인 경우 세 종류의 시험편의 노치 비에 따른 굽힘강도의 변화를 나타낸 그림이다. 모든 경우에서 노치 길이가 길어질수록 굽힘강도가 현저히 감소하였는데, 이는 앞서 논했듯이 노치 선단부에 나타나는 응력집중의 의한 것으로 생각되어 진다. 강도는 $[0/90]_{6S}$ 의 시험편이 가장 크게 나타났고 $[0_2/90_2]_{3S}$ 가 $[0_3/90_3]_{2S}$ 보다 크게 나타났다. 각각의 흡습 시간에서 노치 비에 따른 굽힘강도의 변화 폭은 $[0/90]_{6S}$ 인 경우 가장 크게 나타났지만, 침지시간의 경과에 따라 약간씩 감소하고 있다. 이는 $[0/90]_{6S}$ 인 경우 다른 두 종류의 시험편에 비해 노치 길이의 변화에 응력 집중 현상이 더 민감한 반응을 보인다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11는 세 종류의 적층판 시험편의 흡습 전의 노치 비가 0.4인 경우의 굽힘시험의 결과로 대표적인 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 최대하중 부근에서 여러 번의 load drop 현상으로부터 모든 시험편에서 최대 하중부근에서 크랙 전파에 대한 많은 저항을 하고 있는 것을 알 수 있었다.

이러한 저항은 $[0/90]_{6S}$ 인 경우 가장 크게 나타났고, 파괴 에너지도 $[0/90]_{6S}$ 가 가장 큰 것을 알 수 있다. 여기서, cross 적층형 복합재료에서 외력이 가해질 때 unit ply의 두께가 파괴인성치에도 크게

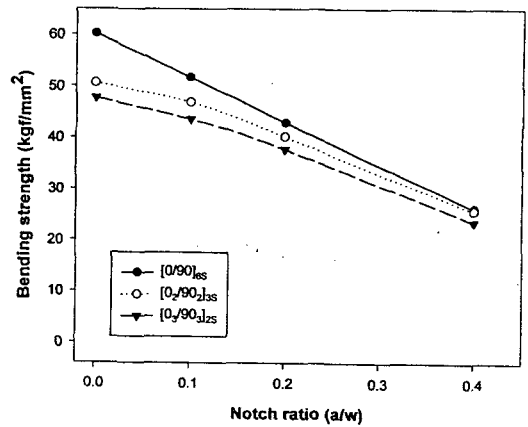


Fig. 7 Bending strength as a function of notch ratio(a/w) with each type laminates

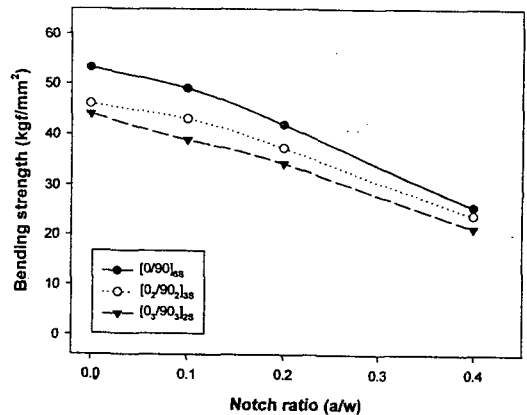


Fig. 8 Bending strength as a function of notch length ratio(a/w) with each type laminates which was immersed for 10days in distilled water at $80^{\circ}C$

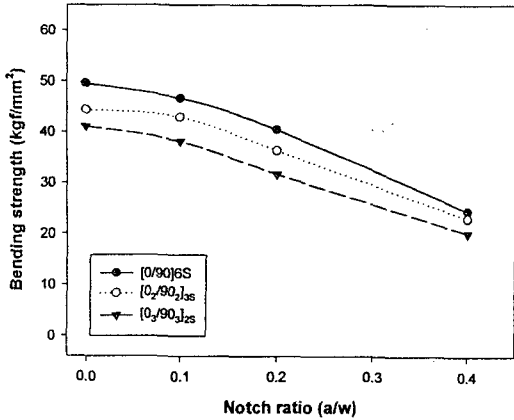


Fig. 9 Bending strength as a function of notch ratio(a/w) with each type laminates which was immersed for 30days in distilled water at 80°C

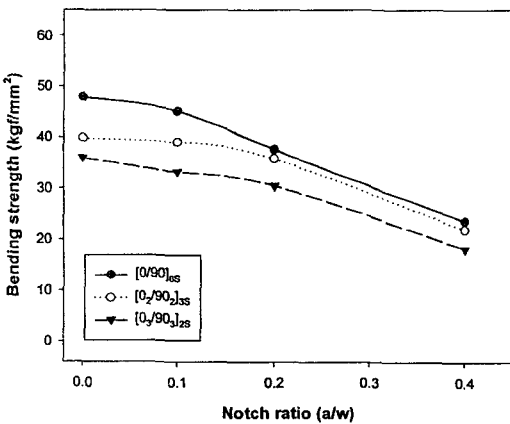


Fig. 10 Bending strength as a function of notch ratio(a/w) with each type laminates which was immersed for 90days in distilled water at 90°C

영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이것은 적층판에서 unit ply의 두께가 다르면 층간전단응력이 다르게 나타나는데 원인이 있다고 생각된다. 즉, 일정 하중 하에서 층간전단응력이 다르게 나타난 것은 층간전단강도의 차이를 유발한다. 결국, 층간 전단 강도가 다르면 적층형 복합재료의 기계적 물성에 영향을 미치므로 세 종류의 적층판의 파괴인성치가 다르게 나타난다고 생각된다.

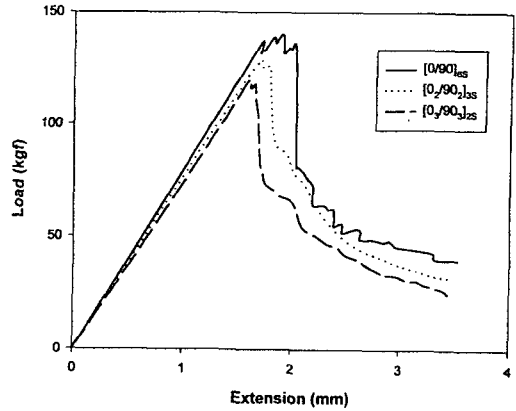


Fig. 11 Load-extension curves of each type specimens with notch ratio(a/w) of 0.4 in the bending test.

Fig. 12는 세 종류의 시험편의 침지 시간의 증가에 따른 파괴인성치의 변화를 나타내는 그림으로 노치 비가 0.4인 경우를 나타낸 것이다. 파괴인성치 또한 굽힘강도와 같이 [0/90]_{6S}인 경우가 침지전과 침지시간 전구간에 걸쳐서 가장 크게 나타났고 [0₂/90₂]_{3S}가 [0₃/90₃]_{2S} 보다 크게 나타났다. 침지시간 전구간에 걸쳐서 [0/90]_{6S}와 [0₂/90₂]_{3S}의 차이는 별로 없지만, [0₂/90₂]_{3S}와 [0₃/90₃]_{2S} 차이는 크게 나타나 있다. 모든 종류의 시험편에서 30일까지는 파괴인성치가 비교적 크게 감소하였으나, 그 이후에는 둔화되었고, 특히, [0₂/90₂]_{3S}인 경우는 거의 변화를 보이지 않았다. 이것 역시 Fig. 2의 침지시간에 따른 수분 흡수율의 경향과 비슷하다. 그러나, 흡수의 진행에 따른 파괴인성치의 전체 변화 폭은 [0/90]_{6S}인 경우 가장 작게 나타나고 있다. 여기서 수분의 흡수에 따른 계면의 열화에 의한 세 종류의 시험편 모두 흡수시간에 따라 다소 감소하고 있지만 큰 감소의 현상은 보이지 않고 있다. 결국, 탄소 섬유강화 에폭시 복합재료에서의 파괴인성치는 수분에 의하여 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 파괴인성치가 세 종류 시험편 중에서 가장 크게 나타난 [0/90]_{6S}인 경우의 각각 다른 노치 길이에서 침지 시간의 증가에 따른 파괴인성치의 변화를 나타낸 그림이다. 흡수의 진행에 따른

파괴인성치의 감소는 Fig. 12와 유사한 거동을 보였다. 그리고, 노치 비가 0.1인 경우 가장 낮은 파괴인성치를 나타냈고, 0.4인 경우 가장 높은 값을 나타냈지만 0.2인 경우와 그다지 큰 차이를 보이지는 않았다. 이러한 경향은 다른 두 종류의 적층판 시험편에서도 유사하게 관찰되었다. 여기서, 노치

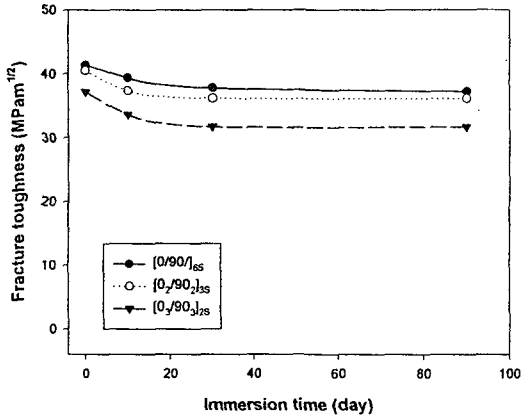


Fig. 12 Fracture toughness of each type laminates which was notch ratio(a/w) of 0.4 as a function of immersion time in distilled water at 80°C.

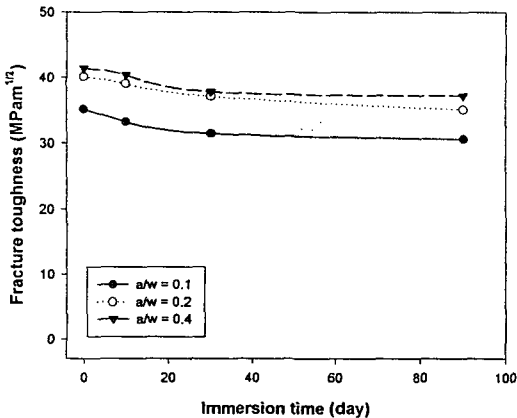


Fig. 13 Fracture toughness of [0/90]_{6S} laminates with various notch ratio(a/w) as a function of immersion time in distilled water at 80°C.

비가 클수록 파괴인성치는 크게 나타난 것을 알 수 있다. Fig. 12, Fig. 13에서 노치 길이에 관계없이 침지시간의 경과에 따라 90일까지도 파괴인성치가 크게 감소하지 않고 있는 사실은 탄소섬유강화 복합재료의 경우 수분의 영향을 크게 받지 않는다는 것을 나타내며, 이것은 탄소섬유 자체는 수분에 의해서 기계적 성질의 열화는 크지 않고 주로 계면상태의 열화에 기인한 결과라고 생각된다.

Fig. 14는 [0/90]_{6S} 시험편의 90일간 침지시킨 후의 횡단면 광학현미경 사진으로, 침투된 수분에 의한 층간 계면의 열화로 unit ply의 층간 박리 현상 (delamination)이 일어나 있음을 볼 수 있다. 이러한 장시간 수분 침투에 의해 발생한 층간박리 현상은 적층판의 기계적 성질을 저하시키는데 지대한 영향을 미친 것으로 생각되며, 침지시간의 경과에 따라 굽힘강도 및 파괴인성치가 감소하는 중요한 원인 중의 하나라고 생각된다.

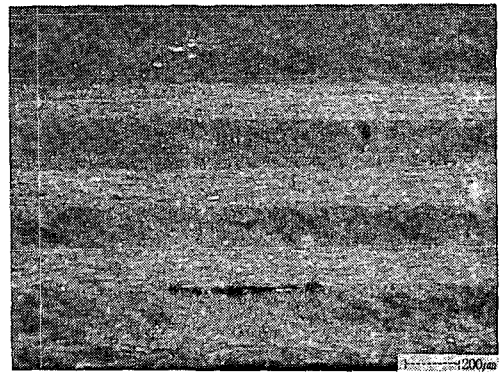


Fig. 14 Microphotographs of transverse section of [0/90]_{6S} laminates which was immersed for 90days in distilled water at 80°C.

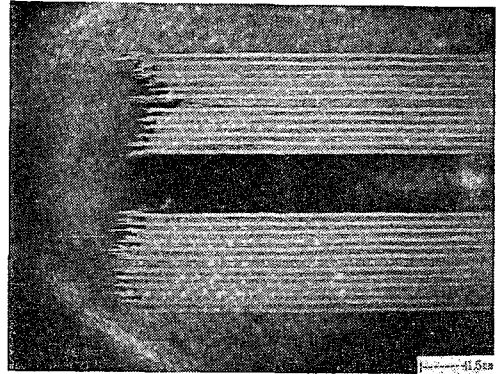
Fig. 15는 흡습 시험 전의 세 종류의 시험편에 대한 굽힘시험 후의 파단면을 거시적으로 나타낸 저배율 광학현미경 사진이다. 사진에서 층간박리 (delamination) 현상과 섬유 pull-out 및 ply의 pull-out 등으로 인해 균열이 직선적으로 발생하지 못하고 있음을 알 수 있다. Unit ply 두께가 가장 작은 [0/90]_{6S} 시험편의 파단면을 보면 다른 두 종

류의 시험편에 비해 층간박리 현상은 가장 작게 나타났음을 알 수 있다. 그리고 unit ply의 두께가 커질수록 즉, $[0_2/90_2]_{3S}$ 보다 $[0_3/90_3]_{2S}$ 에서 층간박리 현상은 더 크게 나타났고, 섬유 및 ply의 pull-out은 점점 많이 나타난 것을 볼 수 있다. 또한, $[0_2/90_2]_{3S}$ 와 $[0_3/90_3]_{2S}$ 에서는 transverse crack도 발생된 것을 볼 수 있다.

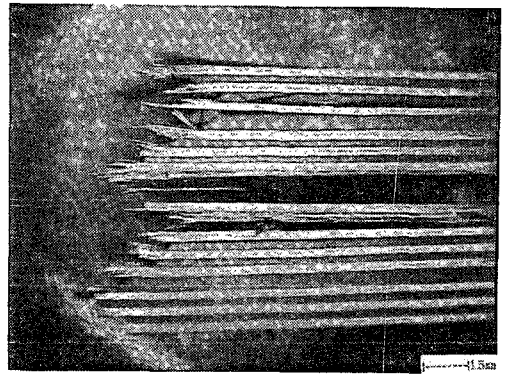
전술한 바와 같이 unit ply의 두께가 커질수록 일정 하중하에서 층간 전단응력이 크게 발생한다는 것은 층간 전단강도가 작아진다는 것을 의미하며 적층판에서 층간 전단강도가 작은 것은 delamination이 일어나기 쉬운 것이다. 여기서는 unit ply의 두께가 커질수록 층간전단강도가 작아진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 16은 30일간 흡습 시험한 시험편의 굽힘시험 후의 파단면 현미경사진이다. 세 종류 적층판 모두에서 층간 박리 현상을 볼 수 있으며, 적층판의 unit ply의 두께가 클수록 delamination이 더욱 심하게 일어난 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 15와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 층간 박리 현상 정도는 흡습 시험전과 비교해서 좀더 심한 것을 알 수 있다. 또한, 모든 시험편에서 transverse crack을 볼 수 있는데, 이것은 흡습에 비해서 매트릭스 수지가 수분 흡수에 의하여 많이 열화되어 나타나는 현상으로 생각된다.

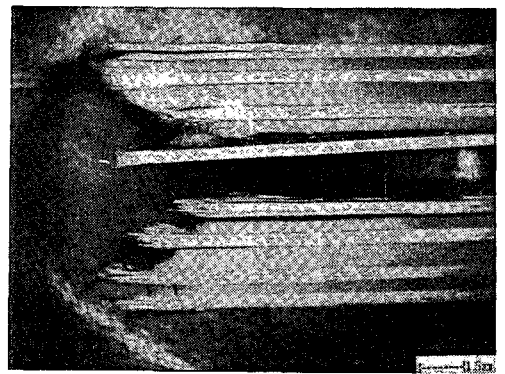
Fig. 17은 90일간 흡습 시험한 시험편의 굽힘시험 후의 파단면 현미경사진으로 층간 박리는 물론 unit ply 내부에서도 섬유와 매트릭스 수지 사이의 박리 현상(debonding)이 일어나 있고, transverse crack으로 인해 unit ply의 일부가 떨어져 나간 부분도 볼 수 있다. Fig. 16의 30일간의 흡습과 비교하면 더 많은 층간 박리 현상 및 transverse crack이 발생한 것을 알 수 있다. 이는 더 많은 수분 흡수로 인하여 계면 및 층간이 더 심하게 열화되었다는 것을 의미한다. 그리고, Fig. 15~Fig. 17까지의 사진들을 관찰해 보면 unit ply의 두께가 클수록 또한 침지 시간의 경과에 따라 섬유 및 ply의 pull-out 정도는 점점 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 여기서 섬유 및 ply의 pull-out정도가 증가하고 있다는 것은 계면전단강도 및 층간전단강도가 감소하고 있다는 것을 의미한다.



(a) $[0/90]_{6S}$ laminates

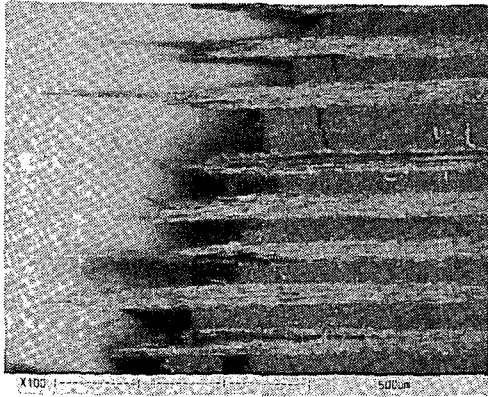


(b) $[0_2/90_2]_{3S}$ laminates

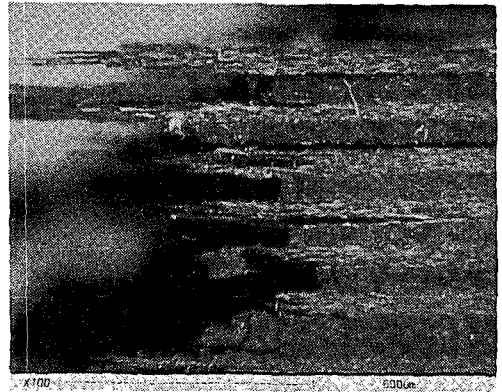


(c) $[0_3/90_3]_{2S}$ laminates

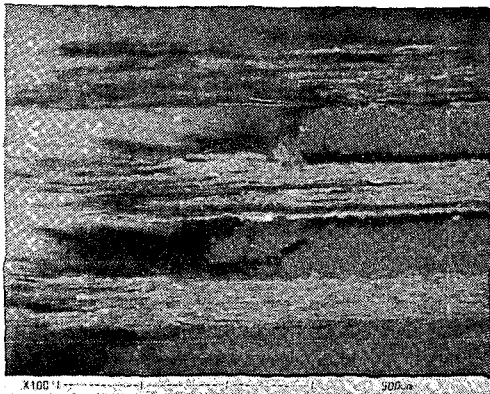
Fig. 15 Microphotographs of fractured transverse section of each type laminates after bending test.



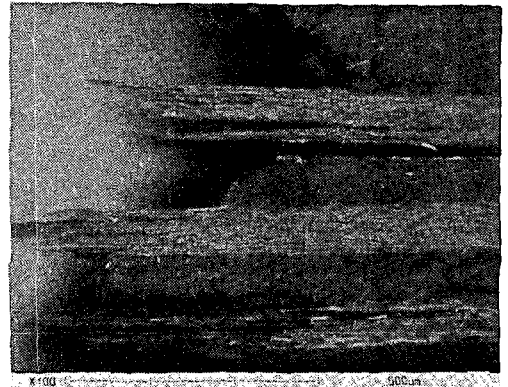
(a) $[0/90]_{6s}$ laminates



(a) $[0/90]_{6s}$ laminates



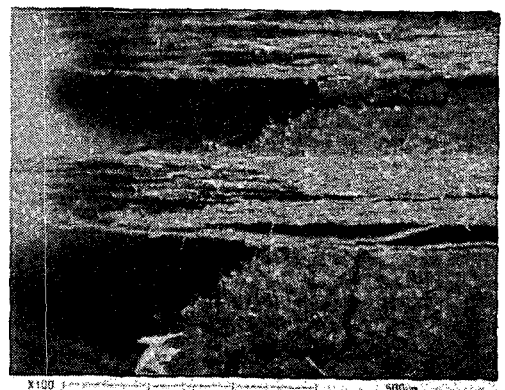
(b) $[0_z/90_z]_{3s}$ laminates



(b) $[0_z/90_z]_{3s}$ laminates



(c) $[0_z/90_z]_{2s}$ laminates



(c) $[0_z/90_z]_{2s}$ laminates

Fig. 16 Microphotographs of fractured transverse section of each type laminates which was immersed for 30days in distilled water at 80°C.

Fig. 17 Microphotographs of fractured transverse section of each type laminates which was immersed for 90days in distilled water at 80°C.

위의 결과에서 unit ply의 두께가 다른 세 종류의 시험편에서 unit ply의 두께가 커질수록, 그리고 침지 시간의 경과에 따라 굽힘강도가 작아지는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 unit ply의 두께가 크면 같은 외력에 대하여 unit ply의 두께가 작은 것과 비교하여 층간 전단응력이 크게 발생되는데, 이는 결국, unit ply의 두께가 크면 작은 것에 비해 층간 전단강도가 작게 되고¹⁹⁾, 이러한 현상은 수분 흡수에 의한 계면 열화로 더 크게 나타나게 된다. 따라서, 세 종류의 시험편 중 unit ply의 두께가 가장 작은 [0/90]_{6s}에서 가장 큰 굽힘강도가 나타나게 된 것이라고 생각되어 진다.

이상을 종합해서 검토해 보면 굽힘강도 및 파괴인성치는 침지시간의 경과에 따른 수분흡수량이 증가할수록 낮은 값을 보이고 있으며, unit ply의 두께가 작은 것이 큰 것 보다 침지시간의 전 구간에 걸쳐 큰 값을 나타내고 있다. 여기서 굽힘강도와 파괴인성치가 침지시간에 따라 낮아지는 것은 수분 흡수율이 침지시간에 따라 증가하여 수분에 의한 계면상태의 열화에 의한 것으로 Fig. 16과 Fig. 17에서 알 수 있다.

그리고, 적층판에서 unit ply의 두께는 같은 외력에 대해서 층간에 발생하는 전단응력의 크기를 변화시키고, 그것이 결국, 면내전단강도의 크기에 영향을 미치며, 이 층간전단강도의 크기에 의해 Fig. 15~Fig. 17에서와 같이 delamination 현상의 차이가 발생하여 적층형 복합재료의 굽힘강도, 파괴인성치 등에 영향을 크게 미치게 된다.

4. 결 론

탄소섬유와 에폭시 수지로 구성된 일방향 prepreg를 사용하여 unit ply의 두께가 다른 세 종류의 cross 적층형 복합재료를 성형하여 굽힘 시험편을 제작한 후, 80°C 증류수에서 일정시간 침지시켜 수분흡수가 적층형 복합재료의 기계적 성질에 미치는 영향에 대하여 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) Unit ply의 두께 및 노치의 유무에 관계없이 수분 흡수율은 30일까지는 급격히 증가했으며 그 이후 90일까지 점점 둔화되어 증가하였지만

포화 상태로는 도달하지 않았다. 그리고 unit ply의 두께 및 노치의 유무와 크기는 수분흡수율에 큰 영향을 미치지 못하였다.

- 2) 굽힘강도는 침지시간이 길어질수록 저하되었으며, unit ply의 두께가 클수록 침지시간의 전 구간에 걸쳐 크게 나타났다. 그리고 노치가 있는 경우도 침지시간에 따라 굽힘강도는 점점 작아지고 있으며, 침지시간 전 구간에 걸쳐 노치 비가 클수록 작게 나타났다.
- 3) 파괴인성은 침지시간이 30일까지는 저하하다가 그 이후에는 거의 포화 값에 도달한 것 같으며, unit ply 두께가 클수록 전 침지시간에 걸쳐 낮은 값을 나타냈다. 그리고 노치가 클수록 파괴인성치는 크게 나타났다.
- 4) 침지시간이 길어질수록 층간박리 현상 및 transverse crack이 많이 나타났으며 unit ply의 두께가 두꺼울수록 그 정도가 심하게 나타났다. 그리고 섬유 pull-out 및 ply의 pull-out은 침지시간이 길어질수록 unit ply가 두꺼울수록 많이 일어났는데 이것은 계면이 많이 열화된 것을 나타낸다.

감사의 글

“이 연구는 98년도 부경대학교의 기성회 연구비 지원으로 수행된 것으로, 이에 감사를 드립니다.”

참고문헌

- 1) Cooper, G.A., J. Mater.Sci., 5, 645, 1970
- 2) Slepetz, J.M. and L. Carlson, ASTM STP 503, 143, 1975
- 3) Roulin-Moloney, A.C. et al, Polymer Composites, 8, 324, 1987)
- 4) Pearson, R.A. and A.F. Yee, "Influence of Particle Size and Particle Size Distribution on Toughening Mechanisms in Rubber-Modified Epoxyes.", J. Mater. Sci., 26, 3828, 1991
- 5) Harris, B., S.E. Dorey and R.G. Cooke, Composites Sic., Tech., 31, 121, 1988
- 6) Lagace, P.A., "Nonlinear Stress-Strain

- Behavior of Graphite/epoxy Laminates.", AIAA Journal 23, 1583, 1985
- 7) Agrawal, D.C, Polymer Composites 6, 29, 1985
 - 8) Herakovich, C.T., J. Composite Mater., 16, 216, 1982
 - 9) Harris, C.E. and D.H. Morris ASTM STP 905, 124, 1986
 - 10) Harris, C.E. and D.H. Morris "Effect of Laminate Thickness and Specimen Configuration on the Fracture of Laminates Composites.", ASTM STP 893, 177, 1986
 - 11) Sensecky, G.P. M.D. Rickardson and J.E. Pappas ASTM STP 580, 528
 - 12) Harris, B., P.W.R. Beaumont and E. Moncunill de Ferran J. Mater. Sci., 6, 238, 1971
 - 13) Moon, C.K. et al, "A Solution Microbond Method for Determination of the Shear Strength of a Fiber/Thermoplastic Resin Interface.", J. Appl. Polymer. Sci., 45, 443, 1992
 - 14) Moon, C.K., "The Effect of Interfacial Microstructure on the Interfacial Strength of Glass Fiber/Polypropylene Resin Composites.", J. Appl. Polymer. Sci., 54, 73, 1994
 - 15) Tissington, B. and G. Poliard, J. Mater. Sci., 26, 82, 1981
 - 16) Kim, J.K. and Y.W. Mai. J. Mater. Sci., 26, 4702, 1982
 - 17) Chou, H.M., M.W. Barsoum and M.J. Koczak, "Effect of Temperature on Interfacial Shear Strengths of SiC-Glass Interfaces.", J. Mater. Sci., 26, 1216, 1991
 - 18) ASTM "Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.", E399-83
 - 19) Moon, C.K., Ph. D Thesis, "纖維複合材料の複合構造と破壊靱性に關する研究", Tokyo Institute Technology, Tokyo, 1989
 - 20) Kim, J.H., C.K. Moon, "Effect of Long-Term Water Absorption on the Interfacial Properties of E-Glass Fiber/Epoxy Resin." Polymer(Korea) 22, 3, 1998