

< 논문 >

사이잘 섬유 강화 복합재료의 기계적 특성에 미치는 표면처리와 흡습의 영향

김효진* · 서도원* · 박한주* · 전양배* · 임재규†
(2005년 11월 7일 접수, 2006년 4월 25일 심사완료)

Effects of Water Absorption and Surface Treatment on Mechanical Properties of Sisal Textile Reinforced Composites

Hyo Jin Kim, Do Won Seo, Han Ju Pak, Yang Bae Jeon and Jae Kyo Lim

Key Words: Woven Sisal Textile Fiber Reinforce Composites(사이잘 섬유강화 복합재료), Water Absorption Cycles(반복흡습), Mechanical Properties(기계적 특성)

Abstract

Woven sisal textile reinforced composites were manufactured to evaluate fracture toughness, and tensile test. All specimens were immersed in water five times. All specimens are immersed in pure water during 9 days at room temperature, and dried in 1 day at 50°C. Two kinds of polymer matrices such as epoxy and vinyl-ester were used. Fractured surface were investigated to study the failure mechanism and fiber/matrix interfacial adhesion. It is shown that it can be enhanced to improve their mechanical performance to reveal the relationship between fracture toughness and water absorption fatigue according to different polymer matrices. Water uptake of the epoxy composites was found to increase with cycle times. Mechanical properties are dramatically affected by the water absorption cycles. Water-absorbed samples observed poor mechanical properties such as lower values of maximum strength and extreme elongation. The K_{IC} values demonstrate a decrease in inclination with increasing cyclic times of wetting and drying for the epoxy and vinyl-ester.

1. 서 론

천연재료에서 얻어지는 섬유를 이용한 제품들은 인간 생활에서 빠짐없이 사용되어 왔다. 직물, 밧줄, 섬유, 천 등은 아마(flax), 황마(jute), 대마(hemp), 사이잘삼(sisal), 비단(silk) 등과 같이 식물 또는 동물에서 얻어지는 섬유들로 제조되었다. 이러한 섬유들은 고분자로 구성되어 있으며 인공섬유는 석유에서, 자연섬유는 식물이나 동물 또는

광물에서 카세인(casein), 셀룰로오스(cellulose), 프 로테인(protein) 등과 같은 고분자 재료를 얻을 수 있다. 이러한 자연 섬유를 이용한 제품의 상당수는 대부분 인공섬유보다 상대적으로 기계적인 강도면에서는 열등하지만, 저렴하고 쉽게 구할 수 있는 장점 때문에 현재까지도 사용되고 있으며, 근래에 와서는 환경 친화적이라는 측면에서 오히려 환영받고 있다. 최근 제품의 원가절감과 환경 보호에 맞물려 제품 재활용의 측면이 부각되었으며 이러한 추세는 앞으로도 계속될 것이다. 이러한 상황은 기계 산업에 대하여도 마찬가지이고 기계 부품의 설계나 제조단계에서 재활용의 요소를 고려하여야 한다.

이러한 대안으로는 기계 부품의 상당수를 차지하는 플라스틱 판재나 폼을 보강하는 재료로서 상대적으로 저렴하고 환경 친화적인 자연섬유를

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부, 공학연구원 공업기술연구센터

E-mail : jklim@chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2321 FAX : (063)270-2460

* 전북대학교 공과대학 기계설계학과

사용하여 제조하는 것도 하나의 방법이 될 것이다.⁽¹⁾

섬유강화 복합재료의 제조상 특징으로는 보강재의 형태가 복합재료의 제조방법을 결정하게 된다는 것이다. 전형적인 폴리머 매트릭스 복합재료를 제조하는 데는 양(yarn)이나 다발형태의 섬유를 이용하면 NFTP(natural fiber reinforced thermoplastic)가 되고, 매트릭스형태로 짜서 제조하면 NMT(natural fiber mat reinforced thermoplastic)가 된다. 이러한 제조 과정 중에 사용되는 매트릭스는 유리섬유나 탄소섬유보다는 자연섬유 쪽이 보다 쉽게 제조가 가능하고, 재료에 소모되는 기지재와 보강재의 비율을 쉽게 조절할 수 있으므로, 보다 사용조건에 맞는 다양한 제품의 생산이 가능하다. 또한 기지재보다 훨씬 저가의 자연섬유로 만들어진 매트릭스로 부피를 채우면 가격 면에서 이점을 얻을 수 있다.⁽²⁾

기지재가 되는 물질을 일반적인 엔지니어링 플라스틱(engineering plastics)이 아니라 녹말폴리머(starch modified polymers)등과 같은 천연 고분자 바인더(natural polymer binder)를 사용할 수 있으므로, 이러한 재료에 자연섬유로 강화하면, 상당히 자연친화적이고 인체에 무해한 재료가 되고, 이러한 재료는 비단 자동차 부품뿐만 아니라 다른 영역에서의 활용도 충분한 가능성이 있으리라 생각된다. 그러나 이러한 자연섬유 등으로 보강한 복합재료에 대해서는 국내에서는 아직 본격적으로 연구가 시작되지 않았으며, 제품의 실제 설계나

제조 등의 적용에 필요한 자료가 부족한 실정이다.⁽³⁾

급속도로 발전하는 산업화로 인해 산업 폐기물은 매년 급증하고 있으며, 특히 자동차 산업의 경우 국내 자동차 생산업체에서는 해마다 새로운 모델의 차량을 생산하고 있어 이로 인한 재활용이 문제시되고 있다. 이러한 환경적인 문제는 전 세계적인 관심거리이며, 각 나라마다 규제를 강화하고 있는 추세이다. 그러나 아직 국내의 경우 환경적인 문제보다는 매출, 효율, 이윤, 품질 등과 같은 생산 자체에 더 비중을 두고 있는 실정이다. 하지만 향후 몇 년 이내에 국내에서도 환경규제가 강화될 것이며, 기업의 전세계적 경쟁력을 감안한다면 자연 친화적인 제품의 개발뿐만 아니라 자연섬유 강화 복합재료의 기계적인 특성 평가와 자료 수집이 필요하다. 그리고 이를 실제 적용하기 위해 해결해야 할 문제에 대해 적극적으로 연구해야 할 필요가 있다.

그리고 사이잘삼 섬유를 강화재로 사용함에 있어서 가장 문제가 되는 부분은 친수성(親水性)을 가지고 있는 사이잘삼 섬유와 소수성(疏水性)을 가지고 있는 폴리머 매트릭스(matrix) 사이의 좋지 않은 계면 특성이다. 이를 해결하기 위해 흡습률에 따른 사이잘삼 섬유 강화 복합재료의 파괴인성에 대한 보다 나은 계면특성을 얻어내기 위해 필요하다.

따라서 본 연구에서는 경제적이고 자연친화적이며 많은 장점을 가지고 있는 사이잘삼 섬유 강

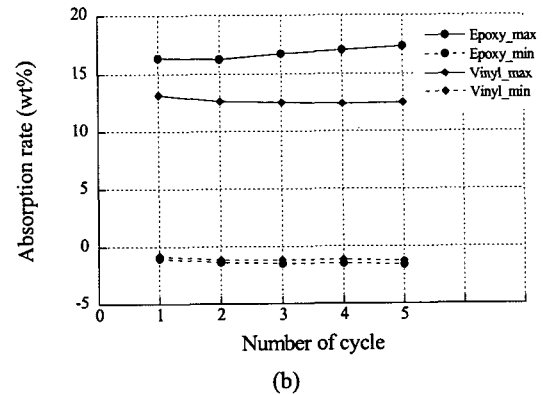
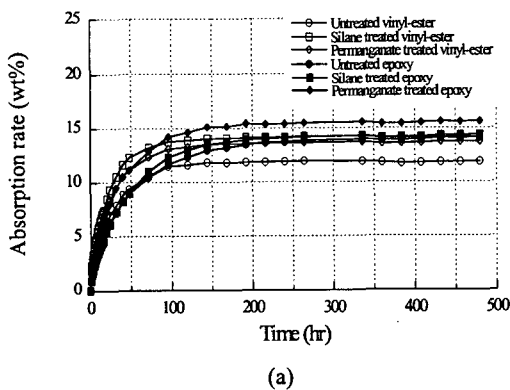


Fig. 1 Water absorption curves for sisal composites at 20°C. (a) aging curve; (b) curves of wetting and drying

화 복합재료의 vinyl-ester, epoxy 두 가지 모재에 대하여 세 가지 표면처리, 즉 untreated, silane treated, permanganate treated된 시험편으로 기계적 성질을 평가하고자 한다. 또한, 이 연구는 증류수에서 일정시간동안 침수영향과 건조와 건조가 반복된 사이잘 복합재료의 내구성을 연구하였다. 사이잘 복합재료의 내구성은 반복회수에 따른 강도 감소를 측정하였다.

2. 실험방법

사이잘 섬유는 중국 남부에 5년 이상 자란 사이잘 나무로부터 추출하여 실험에 사용하였다. 섬유의 직경은 100-250 μ m로 다양하게 분포하였다. 섬유의 평균 직경은 샘플의 표본으로부터 약 140 μ m로 측정되었다. 사이잘 섬유는 57%의 셀룰로우스, 16%의 헤미셀룰로우스, 11%의 리그닌과 이외의 물질로 구성되어 있다. 섬유의 인장강도, 탄성계수와 연신율은 400-700MPa, 9-20GPa 그리고 5-14%이었다. 사용된 레진의 양은 섬유의 부피의 약 60%이고, 두 가닥의 꼬여진 사이잘 섬유를 사용하였다. 시험편으로는 사이잘 섬유에 대하여 untreated된 vinyl-ester, silane 처리된 vinyl-ester, permanganate 처리된 vinyl-ester, untreated된 epoxy, silane 처리된 epoxy, permanganate 처리된 epoxy 복합재료가 사용되었다(이하 UV, SV, KV, UE, SE, KE로 칭한다.). 복합재료를 만드는 동안, epoxy(BS-745/AB, DR Enterprise Co.)와 vinyl-ester(R3791N/928CA, KK Chemical Co.)의 두 종류의 모재를 사용하였다. 실험에 사용된 복합재는 꼬여진 섬유(woven roving fiber)를 RTM(resin transfer molding)법으로 적층시켜 제작되었다. 사이잘 섬유를 몰드에 정렬하여 액형 수지를 몰드에 주입하였다. 주입된 수지는 2시간 동안 120 $^{\circ}$ C에서 경화되었다.

흡습률을 연구하기 위한 시험편은 ASTM D570에 따라 길이, 폭, 두께를 76.2mm \times 25.4mm \times 3.2mm로 제작되었다.⁽⁴⁾ 시험편은 약 20 \pm 1 $^{\circ}$ C의 증류수에 침수되었다. 시험편의 흡습 후 무게는 표면에 있는 증류수를 필터와이퍼로 닦아낸 뒤 0.1 mg의 정밀도를 가진 아날로그 정밀 저울(XT 320M, Precisa Inst. Ag, Swiss)로 측정하였다. 이 연구에서 시험편은 400일 이상 흡습한 시험편과 상온에서 한 cycle이 9일간 흡습 후 24시간동안 50 $^{\circ}$ C에서 건조시킨 시험

을 준비하였다. 400일동안 흡습한 시험편과 5 cycle 동안 흡습과 건조를 반복한 시험편은 인장강도 평가와 파괴 인성 평가를 하였으며, SEM(scanning electron microscope, JSM 6400, JEOL LTD., Japan)을 이용하여 파면을 관찰하였다. 위와 같은 시험편은 ASTM D 638-90과 D 5045-96을 따라 기계적 특성에 미치는 흡습 피로의 영향을 연구하였다.^(5,6) 32.0mm 폭을 가진 파괴 인성 시험편은 1/4T CT(compact tension) 시험편을 사용하였다. 인장 시험편은 25.0mm의 게이지 길이를 가진 표준 덤벨형 시험편을 사용하였으며, 시험수는 인장, 파괴인성 시험 동일조건당 5개의 시험편을 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 흡습의 영향

침수된 시험편과 흡습과 건조를 반복한 시험편은 각각 다른 샘플을 이용하여 흡습된 양을 측정하였다. Fig. 1은 각 샘플의 흡습된 양을 퍼센트로 환산하여 측정된 그래프이다. Epoxy와 vinyl-ester 복합재료를 Fig. 1(a)는 9600시간(약 400일)동안 흡습된 시험편이고, Fig. 1(b)는 216시간(9일)동안 흡습 후 24시간(1일)동안 건조를 그래프이며, 이와 같이 5번 반복하였다. 그래프에서 흡습된 시험편은 같은 거동을 보였고, 매우 빠르게 일정 값(epoxy는 0~260시간, vinyl-ester는 0~150시간)에 도달하였다. 일정 값에 도달한 흡습량은 더 이상 증가하지 않았다. 일반적인 합성섬유강화 복합재료의 흡습량은 약 1~3wt% 정도이나, 사이잘섬유강화 복합재

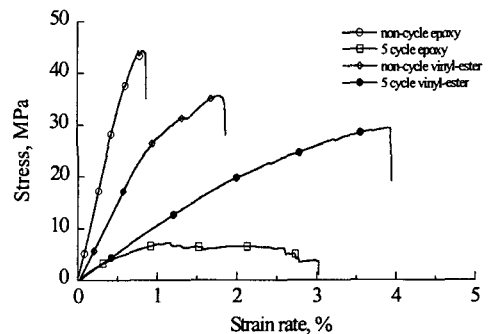


Fig. 2 Stress and strain behaviors of with dry condition and 5 cycle immersion sisal /epoxy and sisal/vinyl-ester composites

료의 흡습량은 약 13~15wt% 흡습률을 보였다. 그것은 섬유 속의 빈 공간이 흡습량을 증가시켰기 때문이라 판단된다. 또한 100시간 이전의 흡습률이 급격하게 증가하는데, 수분의 흡수는 복합재료의 체적으로 물분자의 확산, micro, macro void에서의 모세관 현상에 의한 침투와 시험편의 절단으로 인해 일부 섬유가 레진의 일차적인 차단 없이 외부의 수분에 직접 노출되어 사이잘 섬유의 증공 구조조적인 문제로 인해 초기에 수분이 급속도로 흡수된 것으로 판단된다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 사이잘 강화 복합재료는 epoxy와 vinyl-ester와 같은 순수 수지 복합재료처럼 흡습의 양에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 흡습과 건조 과정을 반복한 흡습 시편 또한 같은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. Fig. 1(b)는 반복되는 주기에서 사이잘 강화 복합재료의 흡습 거동을 보여주고 있다. Epoxy 복합재료에서는 흡습 과정을 1~5회 반복하는 동안 약 1.0wt%의 흡습량이 증가하였다. 그러나 vinyl-ester 복합재료의 경우에는 흡습비율이 거의 비슷하였다. 또한, 건조 과정을 1~5회 반복하는 동안 epoxy와 vinyl-ester 복합재료 모두 1.28wt%의 중량 감소를 보였다.

3.2 인장강도에 미치는 흡습의 영향

인장 실험은 흡습하지 않은 시편과 1~5회 반복 흡습한 시편을 수행하였다. Fig. 2는 인장실험의 결과를 보여주고 있다. 일반적으로 인장강도는 흡습 후 물분자의 침입에 의한 복합재료의 구조와 특성을 변화시킨 물분자의 영향으로 감소하는 경

향을 보였다. 복합재료에 침투한 물분자는 섬유를 부풀게 하는 경향이 있다. 그리고 많은 수분의 흡수는 섬유에 인장응력을 발생시켜 섬유와 수지 계면의 debonding 및 섬유파괴와 같은 영구손상(permanent damage)을 일으킬 수 있다.⁽⁷⁾ 복합재료의 매트릭스 구조 또한 chain reorientation과 shrinkage와 같은 과정을 흡습이 반복되는 동안 영향을 받았다는 것을 알 수 있었다. 또한 흡습과 건조를 반복하는 조건하에 시효는 가수분해 메커니즘에 의해 자연섬유의 특성을 저하하는 요인이 되었다. 흡습과 반복흡습의 결과는 섬유와 모재 사이의 내부적 접합력을 약화시켰고, 그 결과 인장강도를 저하시키는 요인이 되었다는 것을 알 수 있었다.

3.3 파괴인성에 미치는 흡습의 영향

Fig. 3은 침수시간과 흡습률에 따른 파괴인성 K_{IC} 값을 나타낸 그래프이다. Fig. 3(a)에서 vinyl-ester 기지재에서는 표면처리 하지 않은 시편과 permanganate 표면처리한 시편이 침수시간이 증가할수록 파괴인성 값이 감소하는 경향을 보였고, epoxy 기지재에서는 표면처리 하지 않은 시편만이 침수시간이 증가할수록 파괴인성 값이 감소하는 경향을 보였다. 다른 조건의 시편에서는 침수시간이 150시간이 되면서 오히려 파괴인성 값이 증가하는 경향을 보이고 있다. 흡습률 곡선을 통해 복합재료의 흡습률을 얻게 되었지만, 시편을 제작하는 과정 중에 섬유가 물에 접촉하는 면적이라든지, 복합재료의 불균질이 이렇게 일정한 경향을 보이지 못하는 이유로 판단된다.

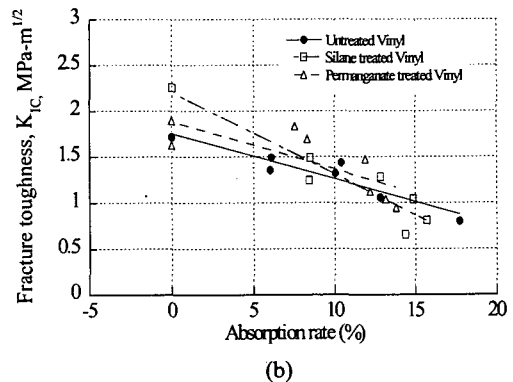
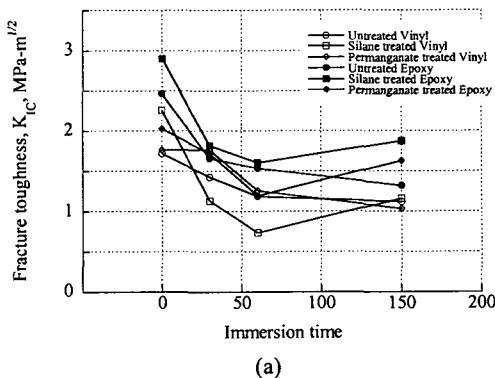


Fig. 3 Fracture toughness of sisal composites according to (a) immersion time and (b) absorption rate

Fig. 3(b)는 흡습률에 따른 파괴인성 값을 보여 주고 있다. Fig 3(b)에서 볼 수 있듯이 각 시편들의 흡습률이 증가할수록 파괴인성 값은 감소하는 것을 알 수 있다. Epoxy 기지재 또한 같은 경향의 파괴인성 값을 보였다.

3.4 파괴인성에 미치는 표면처리와 기지재의 영향

Fig. 4는 침수하지 않은 CT 시편의 기지재와 표면처리의 종류마다 평균 파괴인성 K_{IC} 값을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 silane 표면처리를 하였던 시편의 파괴인성이 가장 크게 나타난 것을 알 수 있다. Vinyl-ester 기지재 복합재료의 경우에는 표면처리 하지 않은 시편과 permanganate 표면처리한 시편의 파괴인성 값의 차이가 크게 나지 않았으며, epoxy 기지재 복합재료의 경우에는 표면처리 하지 않은 시편이 permanganate 표면처리 한 시편의 파괴인성 값보다 크게 나온 것을 알 수 있다.

또한 그래프에서 볼 수 있듯이 epoxy 기지재를 사용했던 복합재료가 vinyl-ester를 기지재로 사용했던 복합재료보다 파괴인성 값이 크게 나온 것을 알 수 있다. 특히 표면처리 하지 않은 시편과 silane 표면 처리한 시편은 vinyl-ester 기지재일 때 보다 epoxy 기지재일 때 파괴인성 값이 각각 43.7%, 28.5% 큰 것으로 나타났다. 그에 비해 permanganate 표면처리한 시편의 파괴인성 값은 15.0% 큰 것을 알 수 있다.

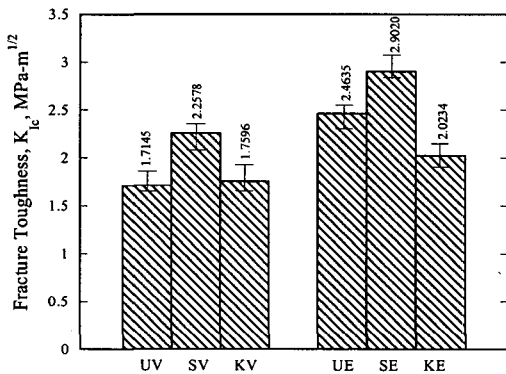


Fig. 4 Average K_{IC} values of dry specimens made of vinyl-ester and epoxy matrices

3.5 파괴인성에 미치는 흡습 cycle의 영향

K_{IC} 값은 모재 epoxy와 vinyl-ester 모두 흡습을 반복함에 따라 감소하는 것을 설명할 수 있다. Fig. 5는 흡습과 건조의 반복에 따른 K_{IC} 값의 감소를 보여주고 있다. Fig. 5에서 두 직선은 K_{IC} 값의 평균값을 보여주고 있으며, 흡습과 건조를 반복함에 따라 거의 평행하게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 45° 방향으로 노치를 낸 시편의 경우, K_{IC} 값은 epoxy와 vinyl-ester 모두 일정한 범위 안에 분포하는 것을 볼 수 있다. 400일 동안 침수 시킨 시편의 K_{IC} 값은 4이나 5번 반복 흡습한 시편과 유사한 분포를 보였다. 흡습을 반복한 시편에서 K_{IC} 값은 모재 epoxy에서 0.64~2.66 MPa·m^{1/2}를 보였고, vinyl-ester에서 0.22~1.75 MPa·m^{1/2}를 보였다.

3.6 흡습에 따른 파괴 메커니즘

SEM으로 찍은 사진은 표면처리와 반복 흡습에 의한 사이잘 섬유의 파괴형태를 보여준다. Fig 6.은 SEM사진의 촬영단면과 섬유강화 복합재료의 섬유와 수지의 흡습에 따른 변화를 보여준다. 흡습전의 섬유와 수지는 결합되어 있지만 섬유와 수지가 수분을 흡수하기 시작하면 섬유는 부풀어 오르게 된다. 그러나 흡습된 섬유강화 복합재료를 건조시키면서 섬유가 원래의 형태대로 복원되기 때문에 흡습으로 인한 섬유와 수지간의 간격이 생기게 된다. 따라서 반복 흡습된 섬유강화 복합재료는 흡습으로 인한 섬유와 수지간의 결합력을

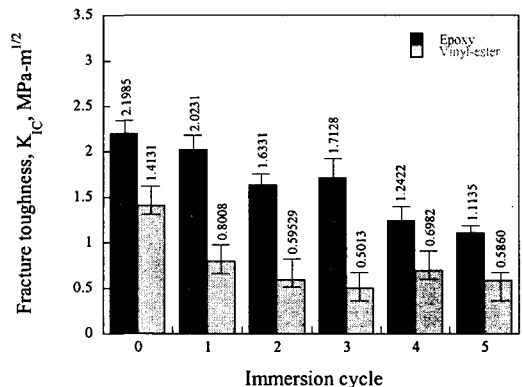


Fig. 5 Distribution of critical stress intensity as a function of immersed cyclic times

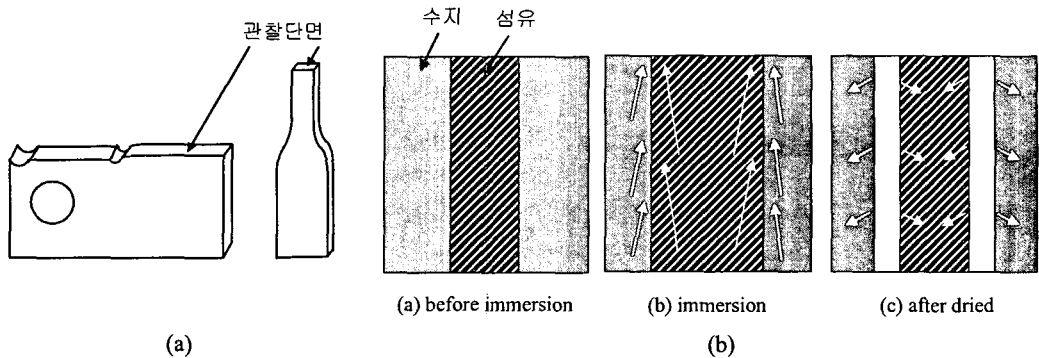


Fig. 6 Observation surface of SEM photographs (a) and mechanism of immersion on fiber reinforced composites (b)



Fig. 7 SEM photographs of fractured surface on epoxy matrix after (a) 0 and (b) 150 hours immersion

약화시키고, 간격을 생성하여 섬유의 pull-out, debonding 등을 유발하여 복합재료의 강도를 저하시키는 요인이 된다. Fig. 7은 표면처리한 시편에 대해 흡습 시간에 따른 각 시편의 파면부분을 SEM으로 찍은 사진이다. 표면처리에 따른 영향은 볼 수 없었지만, 흡습에 따른 섬유의 분리는 관찰되었다. 흡습을 하지 않은 시편에 대해 Fig. 7(a)에서는 섬유 자체가 끊어지는 형태를 확인할 수 있었으며, 150시간 동안 흡습을 실시한 시편에 대해 Fig. 7(b)와 같이 섬유의 직물조직자체가 뽑혀져 나오는 pull-out 현상을 확인할 수 있었다. 또한 vinyl-ester를 기지재로 한 시편도 epoxy와 같은 파

괴형태를 보였다.

Fig. 8은 흡습 전과 반복 흡습 후의 구조를 보여준다. 이 그림에서 사이잘 섬유와 모재 간에 접합력의 감소를 볼 수 있고, 접합력 감소에 의한 공극의 증가로 복합재료 특성이 변한 것을 볼 수 있다. microfibril과 수지 층간의 접합력 감소가 나타난 섬유를 분명하게 볼 수 있다.

사이잘 섬유의 균열 끝부분은 사이잘 섬유가 평평하게 뜯겨진 것을 볼 수 있다. 이것은 계면 접합력 약화에 따른 세포벽의 복합 균열의 형상이다. Fig. 8(a)에서, 섬유의 단면은 완전한 원형으로 이루어지지 않거나 규칙적이지도 않다. 섬유와

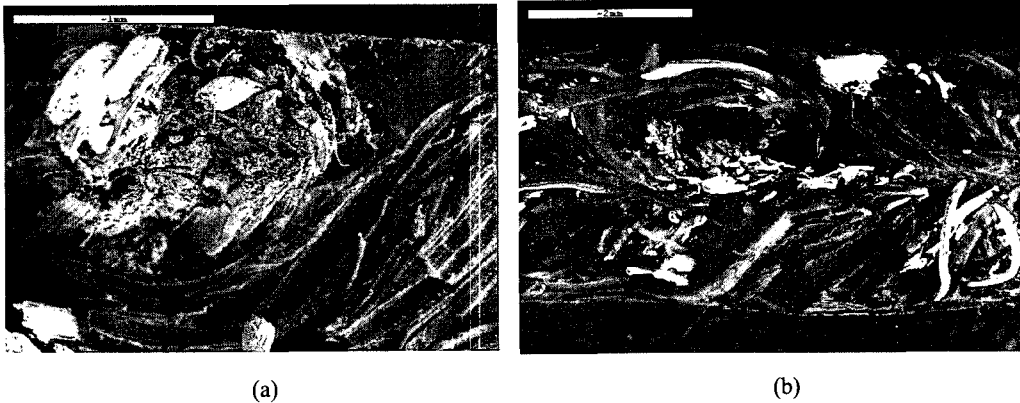


Fig. 8 SEM photographs for sisal composites before (a) and after (b) cycles of wetting and drying

수지 계면의 접합력은 사이잘 섬유의 윤곽에 따른 계면의 접합력 약화로 인해 약화된 것을 볼 수 있었다. 섬유의 벽은 약간의 두께를 가진 각피층으로 덮여있었다. 각피층은 매우 유연하며, 변형이 쉽기 때문에, 섬유 벽의 접합력은 약하다. 세포벽은 풀림, 분할, 비틀림 등에 의해 균열이 발생하였다. 풀림은 사이잘 섬유의 특징이다. 사실 세포벽 내부에는 수많은 미소 섬유가 존재한다. 그렇기 때문에, 세포벽은 셀룰로우스의 나선형 microfibrillar에 의해 강화된 lignocellulosic의 복합 구조로 되어있다. 이 SEM 사진에서, 특히 섬유와 수지 계면 근처에서, 길이방향으로 분할된 세포벽을 볼 수 있었다.

4. 결론

이 연구는 사이잘 섬유 강화 epoxy와 vinyl-ester 복합재료의 기계적 특성에 미치는 흡습과 건조의 영향에 대하여 보여주고 있다. 사이잘 복합재료의 흡습 특성은 반복 흡습과 침수 조건하에서 연구되었다.

epoxy 복합재의 흡습은 반복 횟수에 따라 증가하였다. 기계적 특성 또한 흡습 cycle의 영향을 받아 감소하였다. 침수된 시편은 최대 강도의 저하와 연신의 증가와 같은 기계적 특성이 약화되는 것을 보여주었다.

표면처리 방법 세 가지 중에서 silane 표면처리한 시편의 파괴인성 값이 가장 크게 측정되었다. 표면처리 하지 않은 시편과 permanganate 표면처

리한 시편의 경우는 기지재가 다를 때 서로 반대되는 양상을 보였다.

Vinyl-ester를 기지재로 한 시편의 파괴인성 값은 epoxy를 기지재로 한 시편의 값보다 작게 나타났다. epoxy를 기지재로 한 시편의 포화흡습량이 vinyl-ester를 기지재로 한 시편의 포화흡습량보다 크지만, 150시간 이내의 침수에서는 vinyl-ester의 흡습속도가 더 빠르기 때문에 파괴인성 값의 감소가 epoxy의 경우보다 더 심하게 일어났다.

K_{IC}의 값은 epoxy와 vinyl-ester 복합재 모두 반복 흡습이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 400일 동안 침수한 복합재의 K_{IC} 값은 4~5 cycle과 비슷한 분포를 보였다. 그리고 SEM 사진에서 보는 바와 같이 흡습의 영향에 의해 수지층과 microfibril 간에 접합력 약화가 분명하게 나타났다. 그에 따라 기계적 특성 또한 감소하는 경향을 보였다.

참고문헌

- (1) Cichocki Jr., F. R. and Thomason, J. L., 2002, "Thermoelastic Anisotropy of a Natural Fiber," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, No. 5, pp. 669~678.
- (2) Trimble, L. C., Waid, R. L. and Connolly, W. J., 1982, "Composite Cold Water Pipe for Ocean an Rhermal Energy Conversion(OTEC) Systmes," *37th Ann. Conf. Rein. Plas./Compos. Inst.*, The SPI, Inc. Sec. 26-B.

- (3) Li, Y., Mai, Y.W. and Ye, L., 2002, "Sisal Fiber and Its Composites: a Review of Recent Developments," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 11, pp. 2052~2053.
- (4) Annual books of ASTM standards, 1991, Plastics D570, Vol. 8, No. 1, pp. 139~141.
- (5) Annual books of ASTM standards, 1991, Plastics D638-89, Vol. 8, No. 1, pp. 169~178.
- (6) Annual books of ASTM standards, 1991, Plastics D5045-96, Vol. 8, No. 3, pp. 313~321.
- (7) Moon C. K. and Takaku A., 2005, "Polymer Matrix Composites," *Sigma Press*, pp. 351~364.