
복합재료의 수분에 의한 열화 및 회복 메커니즘에 관한 연구

김윤해⁺, 김국진^{**}, 한중원^{**}, 조영대^{*}, 배성열^{*}, 문경만^{*}

A Study on Degradation and Recovery Mechanisms of Composites under the Moisture Environment

Yun-Hae Kim^{*}, Kook-Jin Kim^{**}, Joong-Won Han^{**}, Young-Dae Jo^{*}, Sung-Youl Bae^{*},
and Kyoung-Man Moon^{*}

ABSTRACT

Decrease of strength in composite material is generally caused by water absorption. It makes fracture of material, and loss of money or human lives. The objective of this study is to investigate the causes of decrease in strength by water absorption. Mechanism of water absorption was supposed as three steps. This mechanism is consisted of absorption into resin, absorption between resin and surface treatment agent, and delamination between fiber and resin. Conditions of test were supplied differently; kinds of fiber and resin, immersion time etc. Both of reversible reaction and irreversible reaction occurred simultaneously. Most of decrease in strength was finished at 2.5% water absorption, and the strength was recovered. At 4% water absorption, most of decrease was caused by irreversible reaction, therefore, there was a tendency not to be recovered in strength.

초 록

섬유강화 복합재료는 수분에 의해 강도저하가 발생하며 이로 인하여 파괴가 발생하여 인적 물적 피해를 야기하고 있다. 본 논문에서는 흡수에 의한 강도저하의 원인을 규명하고자 하였다. 먼저 수분이 복합재료에 흡수되는 메커니즘을 가정하였다. 흡수 메커니즘은 step 1, step 2, 그리고 step 3로 구분하였다. 이 메커니즘을 증명하기 위하여 강화섬유 및 수지의 종류, 수분이 흡수되는 시간 등의 조건을 다르게 하여 시험을 하였으며 그 결과 건조에 의해 인장 강도가 회복되는 가역(reversible)반응과 건조로 인해 회복이 불가능한 비가역(irreversible)반응이 모두 작용함을 알 수 있었다. 강도저하는 흡수율 2.5% 에서 거의 완료되며, 흡수율이 4%에 이르면 비가역반응에 의한 강도저하가 많이 작용하여 강도회복이 적어지는 경향을 보였다.

Key Words: 복합재료(composites), 흡수(water absorption), 강도저하(degradation), 강도회복(recovery)

1. 서론

본 연구의 초점은 다양한 분야에서 사용되는 복합

재료 라미네이트 구조물에서 수분 혹은 습기에 의해 나타나는 성능저하에 대한 기구를 규명하는 것이다.

* 한국해양대학교 기계소재공학부

+ 한국해양대학교 기계소재공학부, 교신저자(E-mail:yunheak@hhu.ac.kr)

** 대한항공 우주항공사업부

복합재료가 다습한 공기 중이나 수 환경에 노출 되었을 때 고분자 기지 복합재료는 기지재를 통한 확산에 의하여 흡습 된다.¹⁾ 많은 수분의 흡수는 섬유에 인장응력을 발생시켜 섬유와 수지계면의 분리 및 섬유파괴와 같은 영구 손상을 일으킬 수 있다. 이에 침지시간과 온도가 복합재료에 미치는 영향 등이 행해졌다.²⁻⁵⁾ 이미 오랜 기간 혹은 짧은 기간의 수습 환경에서의 노출은 섬유강화복합재료의 화학적, 물리적 물성의 비가역적 (irreversible) 변화를 야기한다. Fig. 1에서 섬유강화 복합재료에서 수분 침투의 가능 경로를 도식하였다. 수지 내에 흡수된 수분은 두 가지 형태로 존재할 수 있는데, 수지와의 화학적 결합을 하거나 자유체적에 확산되어 화학적으로 결합하지는 않고 건조 시 다시 빠져 나옴으로써 수지의 기계적 성질에는 변화를 주지 않는 수분으로 존재한다.

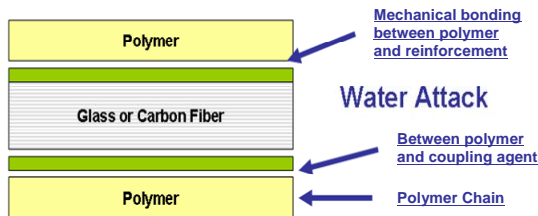


Fig. 1 Assumption of water absorption.

강성과 강도의 감소와 열역학적 거동의 변화는 때때로 흡수된 수분의 양과 직접적으로 연관될 수 있다. 흡수율과 확산계수에 직접적인 영향을 미치는 수지의 구조는 복합재료 라미네이트의 흡습을 논함에 있어서 매우 중요한 인자이며, 따라서 수지구조에 따라 중요한 물리적 특성차이를 보일 것이다. 본 연구에서는 유리섬유 및 탄소섬유 보강재를 사용한 복합재료와 126℃ 경화용 및 177℃ 경화용 프리프레그를 사용한 라미네이트를 시험함으로써 재료에 의한 영향을 고찰하였으며, 흡습 후의 시험과 해당 흡수 시점에서 건조시킨 후 강도 회복정도에 대한 시험 결과를 분석함으로써, 비가역적 특성에 대하여 알아보았다. 또한 각 파단면에 대하여 파단형상을 관찰하여 수지의 팽윤 및 건조에 의한 그 재료의 수축현상을 확인하고, 보강재와 수지와의 계면거동을 파악하였다. 마지막으로 실제 사용환경에서의 변화를 예측하기 위하여 해수 환경에서의 흡습 특성을 파악하였다. 이러한 연구를 통하여 라미네이트의 물성에 있어 수분의 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 시험재료

2.1 시험재료

시험에 사용된 에폭시 프리프레그(prepreg)는 사용된 수지와 분자구조에 따라 광범위한 기계적 강도를 얻을 수 있으며, 다양한 경화 조건이 사용된다. 따라서 특정 용도에 따라 고분자 수지의 성분 및 그 구성 비율이 다르게 설계되어 있다.⁶⁾ 본 연구에서는 크게 유리섬유 보강재와 탄소섬유 보강재로 구분하였으며, 수지망상구조에 있어 큰 차이를 보이는 125℃ 경화용 에폭시 프리프레그와 177℃ 경화용 에폭시 프리프레그를 사용하였으며 각각 미국 보잉사의 인증규격인 BMS 8-79, 8-139에 등재된 Cytec사의 유리섬유/에폭시 프리프레그와 8-168 및 8-276에 등재된 Toray사의 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 사용하였다. Table 1에서 각 시편의 종류를 보여주고 있다.

Table 1 Designations of the specimens

Specimen ID	Reinforcement (Matrix: Epoxy)	Curing Temp.	Resin content
CE/PW/125℃	Carbon fiber	125	36
GE/7781/125℃	Glass fiber 7781	125	36
GE/220/125℃	Glass fiber 220	125	42
GE7781/177℃	Glass fiber 7781	177	36
GE220/177℃	Glass fiber 220	177	42
CE/PW/177℃	Carbon fiber	177	36
CE/PW/177℃	Carbon fiber	177	42

2.2 시험방법

본 실험에서는 시험편을 각각의 조건에서 침지하여 100일 이상 유지하였으며, 흡습율을 주기적으로 관찰하였다. 시험은 100일 이상 노출시키면서 표준시편이 일정 흡수율이 되는 시점에 시험을 하였다. 각 시편별로 ASTM D570을 근거로 제작된 흡습모니터링 시편이 사용되었으며, 이 시편은 표준시험편으로 시점의 판단 근거로만 사용을 하였다. 인장강도 및 탄성율은 ASTM D638, 전단강도는 ASTM D2344를 참고하였고, 시험에 적용된 cross head speed는 1.27mm/min였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 시편별 수분흡수거동

Fig. 2에 7가지 시편들에 대한 침지 시간별 흡수율 거동을 나타내었다. 그 거동을 고찰한 결과, 모든 시편에서 침지 한 후 약 10일까지는 급격한 수분흡수율의 증가, 10일 이후에는 완만한 증가를 확인할 수 있었다. 이를 통하여 이 결과는 이론적 배경에서 설명하였던 Fick의 확산 법칙을 잘 따르고 있으며, 그 포화수분흡수율은 전 시험편에 대해 큰 차이를 보이고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 이유를 분석하기 위하여 시험재료에서 나타내었던 각 시험편의 특징 중 수지함유량과의 연관성을 고찰하였고, 그 결과 수지함유량이 큰 시편에서의 수분의 침투/확산 정도는 그 재료를 구성하고 있는 수지의 양과 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있다. 서론에서 언급된 바와 같이 우선 예상 가능한 흡수 거동을 가정하였으며, 이를 증명하기 위해 다양한 조건의 시편들을 설계하였다. 이러한 시편으로서 관찰된 특성들의 결과를 분석하여 흡수거동과 물성변화 등에 대한 자세한 내용을 나타내고자 한다.

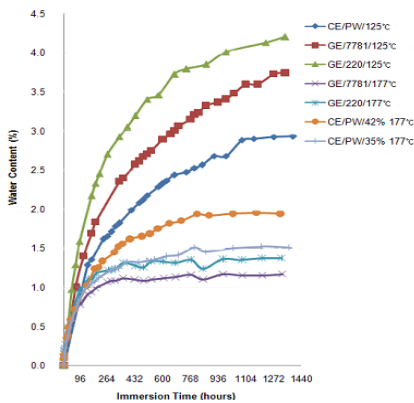


Fig. 2 Water absorption behaviors of specimens

3.2 흡수에 의한 인장강도 특성

복합재료 라미네이트의 흡수 시, 물 분자는 고분자 수지의 유리전이온도(T_g)를 낮추며 강도를 하락시킬 수 있다. 고분자 수지는 긴 사슬로 얽힌 네트워크 구조를 가지고 있으며, 고분자사슬(polymer chain)간에 분자간의 인력, 즉 반데르발스 힘(Van Der Waals Force)이나 극성적인 힘이 작용하고 있다. 이런 가운데 물분자는 고분자 사슬과 사슬 사이에 확산에 의해 침투되어 들어가게 된다. 이 저분자의 영성한 형태가 고분자 사슬 사이에 약간의 3차원적인 공간을 만들고 이 공간에서 같은 환경에서

단일 결합의 자유회전에 의한 운동성을 증가시키게 된다. 이 운동성이 고분자 수지에 유연성을 부여하게 되고, 분자간의 결합에 영향을 미치게 됨으로서 유리전이온도가 낮아지고, 강도가 떨어지는 원인으로 작용한다. 복합재료에서 강화섬유와 기지재의 계면은 수분의 침투로 인한 화학적 손상 뿐만 아니라 이로 인한 계면에서의 미소균열 등이 발생되어 그 계면 영역 전체의 손상으로 발전한다.^{8,9)}

본 연구에서는 섬유강화복합재료 라미네이트에서 수분에 의한 물성저하의 매커니즘을 3가지 step으로 구분하여 가정하였다. 먼저, step 1은 복합재료 수분이 침투할 경우 가장 먼저 그 재료의 수지부에 수분이 침투되어 Fick's law에 의하여 확산되고 그 재료의 물성을 저하시키게 된다.¹⁰⁾ 그리고, step 2와 step 3는 확산에 의해 섬유강화 라미네이트 재료의 실란부와 강화제 사이의 계면에 침투한 물 분자가 각각 실란부와 강화제 계면 사이의 불균일한 계면에 침투하여 그 재료의 팽윤현상 및 물성저하를 야기한다. 이와 같이 설정된 3가지 매커니즘에 대한 그림을 Fig. 3에 나타내었다. 본연구에서 제시한 3가지 가정에 의한 물성저하 매커니즘을 밝히기 위해 보강재, 수지종류 및 경화온도, 수지함량 등이 각각 다른 다양한 시험편들을 제조하였고, 이들 시험편에 대하여 주기별로 수분에 의한 인장강도의 거동을 관찰하였다.

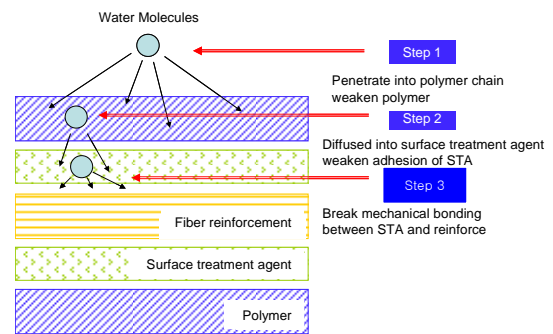


Fig. 3 The process of moisture absorption in the FRP.

Fig. 4에 7가지 종류의 시험편에 대해 200일간 증류수에 침지한 후, 주기별 인장강도를 관찰한 결과를 나타내었다. 모든 시험편에서 약 30일 동안 급격하게 인장강도가 저하됨을 관찰할 수 있었고, 그 이후 저하되는 정도가 점차 완만해짐을 확인할 수 있다. 이는 각 시험편의 수분흡수율이 30일 동안 급격한 증가를 보였던 수분흡수율 거동 결과에 의한 영향으로 설명할 수 있으며, 라미네이트 복합재료에

침투한 물 분자는 그 재료의 강도 저하에 직접적인 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

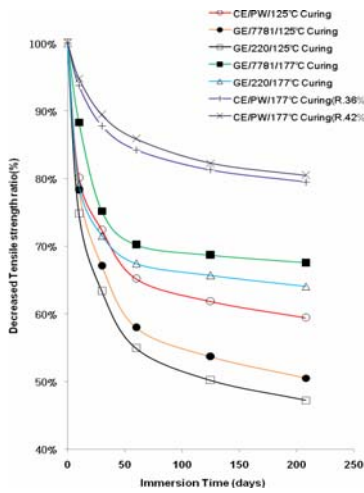


Fig. 4 Effect of immersion time on tensile strength.

Fig. 4를 통해서 복합재료의 제조 시 사용되는 에폭시의 종류 및 경화온도에 따라서 그 거동의 차이가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 강화재의 차이에 따라서 기지재와 강화재 간의 계면 결합력의 차이가 있으므로 그 차이에 의한 인장강도 거동의 차이 또한 고려할 필요가 있다고 판단되었다. Fig. 5에 에폭시의 종류에 따른 흡수기간별 인장 탄성율의 변화를 나타내었다.

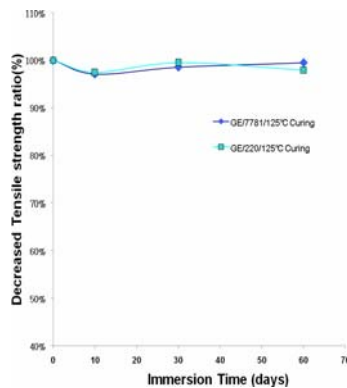


Fig. 5 Tensile strength behaviors of specimens by immersion time.

Fig. 5에서 인장탄성율은 침지시간에 따라 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 섬유강화 복합재료에서는 보강재의 영향이 아주 크다. 보강재 자체는 수분으로 인한 영향이 미미함을 가정할 때 인장탄성율에 대해서는 흡수가 큰 영향을 주는 요인은 아니라고 할 수 있으므로 본 논문에서는 탄성율에 대하여는 고려하지 않았다.

3.3 건조에 의한 인장강도 회복

본 장에서는 흡수에 의한 인장강도 저하와 건조에 의한 그 강도 회복 거동에 대해 분석해 보았다.

이를 위해서 비교적 흡수율이 높았던 시편인 CE/PW/125°C와 GE/PW/125°C를 흡수 및 건조에 의한 인장강도의 변화를 측정하여 Fig. 6, Fig. 7의 그래프로 나타내었다. 두 시험편 모두 그 재료의 수분 흡수율이 2.5% 시점 이전에 대부분의 인장강도 저하가 발생하고 그 이후에는 완만한 감소 경향을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 강도저하의 경우에 2.5% 시점에서의 완전건조(80°C의 건조기에서 1일간 건조를 통해 수분이 완전히 제거됨)를 통해 인장강도가 상당히 회복되었음을 알 수 있고, 4.0% 시점을 지나서는 건조를 통해서 인장강도의 회복이 매우 미미한 것을 알 수 있다. 이를 통해서 복합재료 라미네이트가 그 재료 내부의 수분의 양 혹은 노출 기간 등으로 관찰할 수 있는 어떤 비가역점을 넘게 되면 그 재료 내부에서는 팽윤현상을 지나, 수분으로 인한 계면 파괴가 일어나는 등의 이유로 그 재료의 물성의 회복이 어렵다는 것을 알 수 있다.

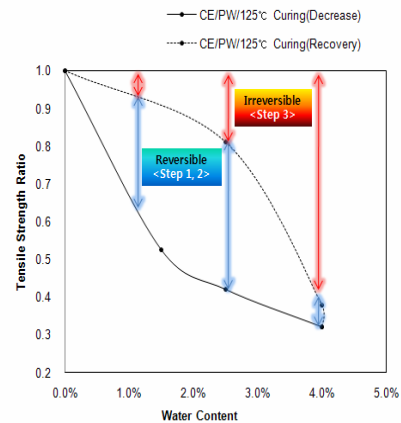


Fig. 6 The behaviors of tensile strength ratio by water absorption/dry(CE/PW/125°C)

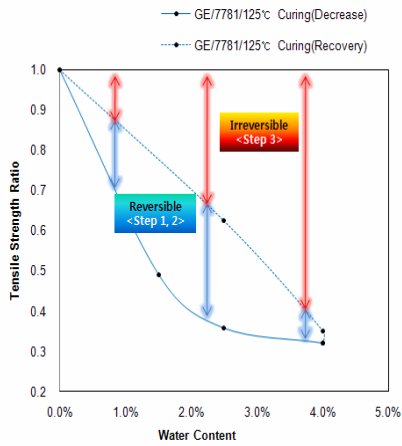


Fig. 7 The behaviors of tensile strength ratio by water absorption/dry(GE/7781/125°C)

강도회복의 관찰결과로서 초기의 대부분 강도하락과 강도회복은 팽윤현상에 의한 것으로 생각된다. 물분자가 복합재료 내부로 흡수되면 복합재료의 체적이 증가하는 팽윤현상이 발생하고 이로 인하여 기지재의 결합강도의 저하를 유발한다. 팽윤 후 표면처리제 사이의 수분침투를 거쳐 기계적 결합의 파괴로 이어지기는 하지만 구간별로 구분이 되어 진행되는 것은 아닐 것이며, 3가지 step중 어느 것이 보다 우세할 것인가로 설명되어야 할 것이다. 가역(reversible)구간은 흡수에 의한 인장강도의 저하거동과 건조에 의한 회복 거동을 관찰하여 물성이 회복되는 구간으로 설정하였다. 이 구간은 라미네이트 복합재료 내부의 수분을 제거 함으로서 회복이 가능한 영역이므로 본 연구의 물성저하 매커니즘 중 수분에 의해 물성이 어느 정도 회복 가능한 step 1과 step 2에 의한 물성저하 구간이라고 생각할 수 있다. 또한, 비가역(irreversible)구간은 건조에 의해 인장강도의 회복이 이루어지지 않은 구간으로 볼 수 있다. 본 연구에서 제시한 매커니즘의 step 3 거동인 보강재 섬유와 수지의 기계적 결합부분의 파괴로 수분의 건조가 되더라도 이미 파괴된 기계적 결합은 재결합이 불가능 한 것으로 생각되므로 불균일부와 실란부와의 계면부에서의 흡수에 의한 물성저하 구간이라고 할 수 있다.

3.4 수지 및 보강재에 의한 인장강도 저하

라미네이트 복합재료의 흡수 매커니즘의 step1에

해당하는 매트릭스 수지에 물 분자가 침투함에 따른 물성저하를 파악하기 위해 수지의 종류에 따른 물성저하의 차이를 관찰해보았다. 먼저 강화재의 종류에 따라 수지와 강화재 사이의 계면결합력을 강화시키기 위한 표면처리제의 종류 등의 재료적 특성이 많이 상이한 이유로 탄소섬유 그룹과 유리섬유 그룹으로 나누어서 수지 차이에 의한 인장강도 저하거동에 대하여 알아보았다. Fig. 8, Fig. 9에는 두가지 그룹에 대한 흡수 일별 인장강도의 거동을 나타내었다.

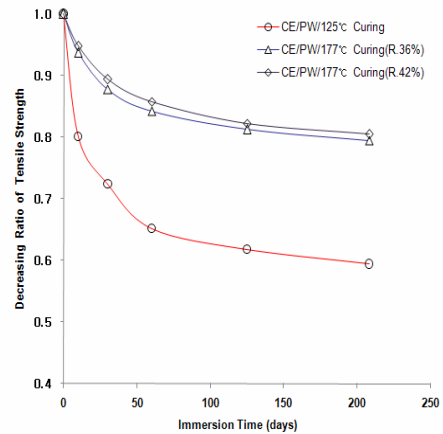


Fig. 8 Decrease ratio of tensile strength in carbon fiber group by immersion time.

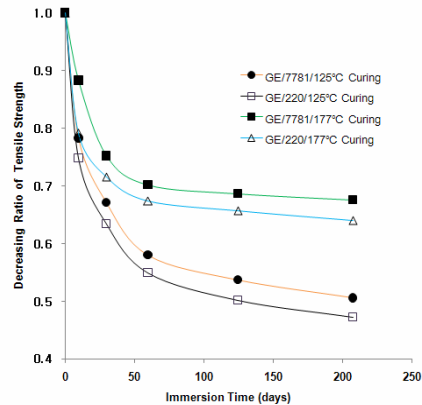


Fig. 9 Decrease ratio of tensile strength in glass fiber group by immersion time.

Fig. 8, Fig. 9에서 다관능기 에폭시로 구성된

177℃경화용 프리프레그에서 이관능기 에폭시로 구성된 125℃경화용 프리프레그보다 강도의 저하의 정도가 적게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 단순한 긴 사슬의 고분자를 생성하는 이관능기 에폭시 그룹이 사슬과 사슬이 네트워크로 연결된 보다 복잡한 형태의 구조를(cross linked structure) 가지는 다관능기 에폭시 그룹보다 수분의 침투에 용이하다는 것을 보여준다.

수분에 의한 물성저하 매커니즘인 step2, step 3에 의한 특성을 파악하기 위하여 보강재 이외의 조건은 모두 동일한 두 가지 시편(CE/PW/125℃, GE/PW/125℃)에 대해 수분흡수율에 따른 인장강도의 저하 거동과 건조 후의 강도회복 거동을 비교분석 하였다. Fig. 10에 수분의 흡습/건조에 의한 인장강도 저하율에 대해 관찰한 결과를 나타내었다

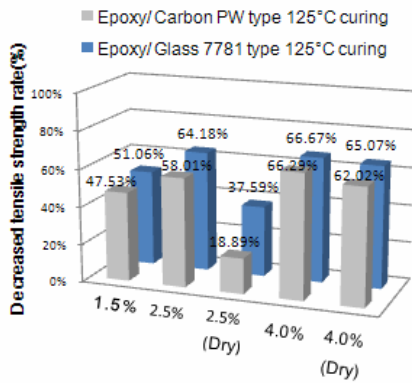


Fig. 10 Decrease rate of tensile strength of specimens.

이를 통해 두 가지 종류의 시험편에서는 각 수분 흡수율 시점별로 거의 유사한 인장강도 저하가 나타났다는 것을 알 수 있다. 그리고, 4% 흡습 시편의 건조 후 인장강도 감소율을 보면 건조를 통해 내부의 수분을 완전히 제거하였음에도 그 인장강도의 회복이 완전히 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 이는 step 1, step 2에 의한 강도저하는 건조에 의해 회복이 되지만 실란부와 섬유 사이 계면의 기계적 결합을 파괴하는 step 3의 경우 물 분자의 제거에 의해서 회복이 이루어지지 않기 때문인 것을 알 수 있다. 마지막으로 두 시험편에서의 2.5% 시점에서 건조 시 회복율은 상당히 차이가 나는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 두 시험편의 섬유와 수지간의 계면결합력 차이에 의한 것으로 생각된다. 흡습에 의해 라미네이트 복합재료에 침투한 물 분자는 그 재료를 팽윤 시키고, 그 결과 인장강도의 저하가 나타남을 알

수 있었다. 또한, 두 재료의 인장강도의 저하에 대하여 비교한 결과, 강화재 및 그 재료의 계면 특성에 의한 거동의 차이는 미미한 것을 알 수 있었다. 하지만 2.5% 시점에서 건조에 의한 회복 정도는 섬유와 수지간의 계면 결합력에 의해 크게 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 이는 탄소섬유강화복합재료가 유리섬유강화복합재료에 비해 높은 계면결합력을 가지는 재료이기 때문에 2.5% 흡습을 시점에서 상대적으로 step 3에 의한 계면 파괴가 적게 일어났기 때문이라 생각할 수 있다.

이러한 시험을 병합하면 흡습에 대하여 Fig. 11의 그래프와 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

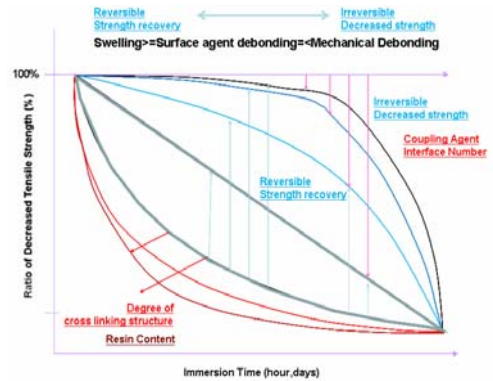


Fig. 11 Reversible-Irreversible recovery curve.

3.5 파면 및 횡단면 해석

수분흡수에 의한 라미네이트 시험편의 파단면의 형상을 알아보기 위하여 인장시험을 실시하였고, 그 파단면을 주사전자현미경으로 관찰하였다. Fig. 12, Fig. 13에 각각 CE/PW/125℃, GE/PW/125℃ 시험편에 대한 침지된 시간별 파단 양상을 보여주고 있다. 두 시험편에서 모두 노출된 시간이 증가할수록 파단된 섬유의 길이가 짧아진 것을 알 수 있다. 이는 수분환경에 노출되기 전의 라미네이트 시험편은 섬유를 지탱하여 주는 매트릭스 수지가 강화제인 섬유를 강하게 지탱하여 줌으로서 섬유강화복합재료의 고유한 파괴양상인 취성파괴를 하는 반면, 수분을 다량 흡수한 시험편의 경우는 그 재료에 침투한 다량의 물 분자로 인해 매트릭스 수지가 제 역할을 하지 못해 섬유의 뽑힘현상(pull-out)이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 수분 환경에서 장시간 노출되었던 재료를 건조시킬 경우 수지 내부에 침투해 있던 물 분자가 제거됨을 통해 수지의 성질이 어느 정도 회복되고, 이를 통하여 섬유의 뽑힘현상이 줄어드는

것을 알 수 있다.¹¹⁾

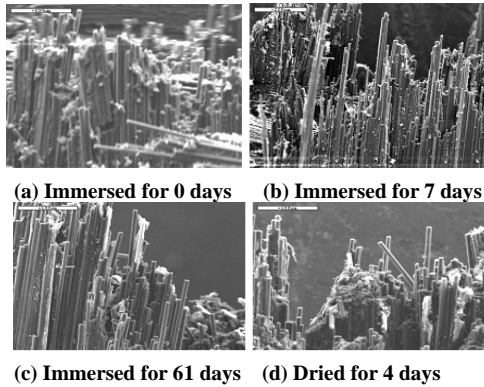


Fig. 12 SEM photos of fractured specimens.
(CE/PW /125 °C)

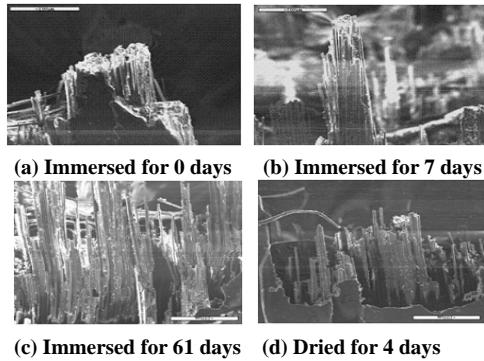


Fig. 13 SEM photos of fractured specimens.
(GE/PW /125 °C)

4. 결론

본 연구에서는 수지계와 섬유계를 달리한 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 확산에 의한 수지의 팽윤은 강도하락을 유도하나, 대체로 가역(reversible)반응으로 볼 수 있으며 수분의 건조로서 강도 회복의 대부분을 차지한다.
- (2) 표면처리제와 고분자간의 결합력은 수분에 의한 열화현상에 있어 중요한 인자로 보인다. 유리섬유의 경우 탄소섬유와 비교해서 초기 시점부터 강도 회복율이 낮았는데, 이는 수지와 표면처리제 간의 결합에 수분이 참여함으로써 결합력 약화와 수지와 섬유간의 기계적

결합력 사이에 수분침투가 경쟁적으로 일어나는 원인 때문으로 판단된다.

- (3) 탄소섬유의 경우 흡수율이 증가하더라도 강도회복율은 일정한 수준을 유지하나, 흡수기간의 어느 시점부터는 급격하게 강도회복율이 감소하게 된다. 기계적 접촉력이 파괴되기 시작 전까지는 팽윤현상에 의한 강도하락이므로 강도회복이 용이하나, 기계적 결합이 급격히 파괴되기 시작함으로써 강도 회복율은 감소하게 된다.
- (4) 수지팽윤에 영향을 미치는 주요인자로 고분자의 망상구조와 수지함유량을 들 수 있으며, 강도회복은 표면처리제, 표면처리제와의 기계적 결합력에 보다 크게 의존함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) 문창권, 복합재료, pp. 221, 270.
- 2) Judd, N. C. W., "Absorption of Water into Carbon Fibre Composites," *J. British Polymer*, Vol 3, 1977, pp. 36-40
- 3) Loos, A. C. and Springer, G. S., "Moisture Absorption of Graphite-Epoxy Composites Immersed in Liquids and in Humid Air," *J. of Composite Materials*, Vol. 13, 1979, pp. 131-147.
- 4) Brikstad, M. Sjoblom, P. O. and Johannesson, T. R., "Long-Term Moisture Absorption in Graphite/Epoxy Angle-Ply Laminates,," *J. of Composite Materials*, Vol. 18, 1983, pp. 32-46
- 5) 서상하, 이덕보, 문창권, 탄소섬유강화 복합재료의 수분에 의한 열화 및 회복에 관한 연구, 한국복합재료학회지, 제17권, 제3호, 2004, pp. 8
- 6) Anthony Kelly and Carl Zweben, *Polymer Matrix Composite*, Vol. 2, 2000, pp. 4-11.
- 7) W. R. Broughton and M. J. Lodeiro, *Technique for Monitoring Water Absorption in the Fibre Reinforced Polymer Composites*. 2000
- 8) 문창권, 복합재료, pp. 221.
- 9) 김효진, 서도원, 박한주, 전양배, 임재규, 대한기계학회논문집 A권, 제30권 제 7호, 2006, pp.779~786
- 10) J.R.M.d'Almeida, R.C.de Almeida and W.R.de Lima, Effect of water absorption of the mechanical behavior of fiberglass pipes used for offshore service waters, *Composite structures*, Vol. 83, 2008, pp. 221~225
- 11) 서상하, 이덕보, 문창권, 탄소섬유강화 복합재료의 수분에 의한 열화 및 회복에 관한 연구, 한국복합재료학회지, 제17권, 제3호, 2004, pp. 12