

論文

미세역학적 실험법과 젖음성을 이용한 CNT-에폭시 나노복합재료 경사형 시편의 계면특성

왕작가*, 공조엘*, 박종만*, 이우일**, 박종규***

Interfacial Properties of Gradient Specimen of CNT-Epoxy Nanocomposites using Micromechanical Technique and Wettability

Zuo-Jia Wang*, Joel GnidaKouong*, Joung-Man Park*+, Woo-Il Lee**, Jong-Gyu Park***

ABSTRACT

Interfacial evaluation of glass fiber reinforced carbon nanotube (CNT)-epoxy nanocomposite was investigated by micromechanical technique in combination with wettability test. The contact resistance of the CNT-epoxy nanocomposite was measured using a gradient specimen, containing electrical contacts with gradually-increasing spacing. The contact resistance of CNT-epoxy nanocomposites was evaluated by using the two-point method rather than the four-point method. Due to the presence of hydrophobic domains on the heterogeneous surface, the static contact angle of CNT-epoxy nanocomposite was about 120°, which was rather lower than that for super-hydrophobicity. For surface treated-glass fibers, the tensile strength decreased dramatically, whereas the tensile modulus exhibited little change despite the presence of flaws on the etched fiber surface. The interfacial shear strength (IFSS) between the etched glass fiber and the CNT-epoxy nanocomposites increased due to the enhanced surface energy and roughness. As the thermodynamic work of adhesion, W_a increased, both the mechanical IFSS and the apparent modulus increased, which indicated the consistency with each other.

초 록

유리섬유 강화 CNT-에폭시 나노복합재료의 계면특성은 미세역학적 시험법과 젖음성 측정을 통하여 평가하였다. CNT-에폭시 나노복합재료의 접촉저항은 전기적 접촉부가 일정하게 점차적으로 증가하는 경사형 (gradient) 시편으로 측정되었다. CNT-에폭시나노복합재료의 접촉저항은 2-점법 대신에 4-점법을 사용하여 평가하였다. 불균일한 표면에 존재하는 소수성 영역 때문에 CNT-에폭시 나노복합재료의 어떤 부분은 초소수성보다는 다소 낮은 접촉각인 120도를 가졌다. 표면처리된 유리섬유는 에칭된 섬유 표면의 흠이 있지만 인장 강성도는 약간의 변화가 나타나는 반면에, 인장강도는 현저하게 감소하였다. 에칭된 유리섬유와 CNT-에폭시 나노복합재료는 표면 에너지와 거친 정도가 증가함으로써, 계면전단강도가 증가되었다. 열역학적 에너지 일인 W_a 가 증가함에 따라, 기계적 계면전단강도와 겉보기 강성도 모두 상호일치하게 증가를 보여주었다.

Key Words : 경사형 나노복합재료 (gradient nanocomposites), 젖음성 (wettability), 비파괴적 평가 (nondestructive evaluation), 전기-미세역학 시험법 (electro-micromechanical technique)

1. 서론

섬유강화 플라스틱 (FRPs)은 가벼운 구조물이 요구되는 항

*+ 경상대학교 나노신소재공학부, 공학연구원, 교신저자(E-mail:jmpark@gnu.ac.kr)

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 국방과학연구소

공기 및 풍력터빈에 가장 활발하게 적용되고 있다. 섬유강화 플라스틱의 우수한 피로성능과 함께 높은 비강도와 비강도 때문에, 섬유강화플라스틱은 구조용 설계 재료로서 적용범위가 넓어지고 있다. 그 중, 유리섬유 강화 플라스틱 (GRPs)은 값이 싸기 때문에 복합재료 구조물에 가장 많이 사용되고 있다[1].

유리섬유 강화 복합재료는 가벼운 재료로 다양한 육상 및 해상용 구조물에 사용되지만, 탄소섬유와 다른 섬유들을 합침시킨 나노복합재료와 함께 항공소재 분야에서 보다 더 광범위하게 사용된다. 이러한 재료의 사용이 보다 더 급속히 증가하는 이유는 우수한 기계적 특성, 열 안정성 그리고 낮은 인화성 때문이다. 유리섬유가 보강된 라미네이트 점토/폴리아미드6 나노복합재료는 현저히 개선된 굴곡과 압축 강도를 나타내는 것으로 알려져 있다[2].

전기저항은 2-점 혹은 4-점법에 의해 측정될 수 있다. 2-점법은 일정한 전압이 유지되고 시편의 전도성은 2-점간에 작은 AC 또는 DC 전압을 적용함으로써 측정된다[3,4]. 통상적으로, 이 방법에 의해 얻어진 결과는 접촉저항 때문에 큰 오차를 포함하고 있다[5].

강하고 내구성 있는 계면접착력은 기저로부터 섬유로의 응력을 효율적으로 전달시켜서, 복합재료의 기계적인 특성 향상을 가져올 수 있다. 이 이유는 보강 섬유 표면의 하이드록실과 같은 극성기 또는 표면에 있는 카복실과 매트릭스 수지에 존재한 활성기 사이의 상호작용에 의한 계면적 화학적 결합에 의해 형성된 계면 접착성 때문이라고 여러 연구에서 밝혀졌다[6,7]. 전기-미세기계적 시험법은 경화특성, 계면특성과 비파괴적 거동을 모니터링하기 위한 경제적인 새로운 비파괴 평가 (NDE) 방법으로서 제안되어 연구되고 있다[8]. 이것은 전도성 섬유가 보강 섬유로의 역할뿐만 아니라 자체 센서 역할을 할 수 있기 때문에 특히 유용한 방법이다 [9,10].

본 연구에서는, 산 처리 또는 처리되지 않은 유리섬유 강화 CNT-에폭시 나노복합재료의 계면적 그리고 기계적인 특성을 젖음성 시험과 더불어 미세역학시험법을 이용하여 평가하였다. CNT-에폭시 나노복합재료의 접촉저항은 경사형 (gradient) 시편을 이용하여 측정되었다. 또한, CNT-에폭시 나노복합재료의 소수성은 정적 또는 동적 접촉각에 의해 조사하였으며, 접촉각과 재료의 기계적인 특성 사이의 관계를 확인하였다.

2. 실험

2.1 재료

강화섬유로는 유리섬유 (RS2200KT-111A, 오웬코닝사, 미국)

를 사용하였으며, 감지능 재료로는 다중-벽탄소나노튜브 (CNT, 일진나노텍, 한국)를 사용하였다. 기저재료로는 비스페놀-A의 디글리시딜 에테르를 기반으로 하는 에폭시 수지(YD-114, 국도화학)와 부수물을 기반으로 하는 경화제 (KBH-1089, 국도화학)를 사용하였다. 접촉각 측정에 사용된 네 가지 시험용액은 이차 중류수, 포름아미드 (준세이 화학(주), 일본), 디요오드메탄 (도쿄 카에서 코교(주), 일본)과, 그리고 에틸렌글리콜 (동양화학산업(주)) 이었다.

2.2 실험 방법

2.2.1. 전기 저항 측정

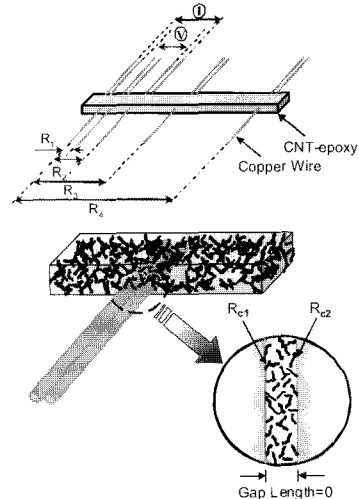


Fig. 1 Schematic diagram of gradient specimen of CNT-epoxy nanocomposites.

Fig. 1에 보인 경사형 시편은 접촉저항의 측정을 위해 사용되었다. 시편 구리선과의 간격차이는 각각 2, 7, 20, 그리고 40 mm 였다. 전기적 접촉은 Fig. 1에서 보인 바와 같이 점차 증가하는 구역에 구리선을 함침하여 사용하여 제조하였다. 계면에서의 접촉저항은 시편의 미세구조와 나노구조에 매우 민감하므로 2-점과 4-점법을 사용하여 측정하였다. 구리선과 0.3vol% CNT-에폭시 나노복합재료 사이의 접촉저항은 전기적 간격을 0으로 설정한 2-점법을 사용하여 결정하였다. 부피 전기저항도는 CNT-에폭시 나노복합재료 시편의 단면적(A_c)과 측정 시편의 전기적 접촉길이(L_{cv})를 이용하여 4-점법으로 측정하여 식 (1)에 의해 계산하였다. 부피저항도 ρ_v 와 전기저항 R_v 의 관계는 다음과 같다:

$$\rho_v = \left(\frac{A_c}{L_{cv}} \right) \times R_v \quad (1)$$

2.2.2. 산처리 공정

유리섬유는 중크롬산소듐 용액 [중크롬산소듐 ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), 황산(H_2SO_4), 및 증류수(H_2O)]의 혼합액을 사용하여 80°C 에서 1분동안 처리되었다. 열 가닥의 유리단섬유는 일정한 간격을 두고 스카치 테이프로 사각형의 금속프레임에 고정시켰다. 산 처리된 유리섬유는 pH가 중성이 될 때까지 증류수로 여러 번 세척한 후, 4 시간 동안 80°C 의 오븐에서 건조하였다. 비교 목적으로, 사이징된 유리섬유들도 산 처리된 유리섬유와 같은 과정으로 오븐에서 건조시켰다.

2.2.3. 단일 섬유 인장시험

산처리 및 미처리된 유리섬유들은 20mm 길이로 스카치 테이프를 사용하여 고정시켰다. 섬유의 끝부분은 에폭시 접착제로 종이에 접착시켰고 종이의 옆면은 단일 섬유 인장시험을 위해 면도날로 절단하였다. 단일섬유 인장시험은 시험속도 0.5mm/min으로 만능시험기를 사용하였다. 유리섬유의 인장강도의 통계적 분포는 대략 50개의 시편을 사용하였으며, 단일모드와 이중모드의 와이블 분포에 의해 분석하였으며 통계적인 값을 얻었다 [11]. 누적된 두개의 와이블 분포함수는 다음과 같이 표시된다:

$$F(t) = 1 - \left\{ p \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} \right] + q \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \right] \right\} \quad (2)$$

여기서, p 와 q 는 응력의 작고 큰 강도분포의 비율을 나타내며, β_1 , α_1 , β_2 그리고 α_2 는 작고 큰 강도 부분의 각각의 형태와 크기 변수들이다.

2.2.4. 계면전단강도 측정

섬유와 기지간의 계면결합력을 비교적 간편하게 측정하는 방법으로 널리 알려진, 마이크로드롭 시험의 주된 장점은 디본딩 되는 순간에서의 힘을 측정할 수 있다는 것이다. 전단강도를 측정하기 위해 특별히 디자인된 마이크로바이스가 장착된 마이크로미터로 시편을 고정시켰다. 계면전단강도는 당겨지는 힘, F , 값을 측정하여 다음과 같이 계산된다:

$$\tau = \frac{F}{\pi D_f L} \quad (3)$$

여기서, D_f 와 L 은 섬유의 직경과 기지에 함침된섬유의 길이를 나타낸다.

유리섬유/CNT-에폭시 나노복합재료의 계면전단강도는 마이크로드롭 풀-아웃(microdroplet pull-out) 실험으로 측정하였

다 [12]. 금속틀에 유리섬유를 고정시키고CNT-에폭시 나노복합재료의 마이크로드롭은 핀을 이용하여 규칙적인 간격으로 나누어서 생성시킨 후 120°C 의 오븐 안에서 경화시켰다.

2.2.5. 젖음성 측정

CNT-에폭시 나노복합재료에 물방울을 떨어뜨린 정적인 접촉각은 광학현미경을 이용하여 측정하였다. 유리섬유와 CNT-에폭시 나노복합재료의 동적 접촉각을 측정할 때는 Wilhelmy plate 시험법 (Sigma 70, KSV Co., 핀란드) 을 사용하였다. 네 가지의 증류수, 포름아미드, 에틸렌글리콜, 디아이도메탄을 측정 용매로 사용하였다. CNT-에폭시 나노복합재료와 다른 표면인 유리섬유의 자유분산에너지와 극성에 대한 도너와 억셉터의 표면에너지 사이의 동적 접촉각을 측정하였다. Wilhelmy plate의 기본적인 식은 다음과 같다:

$$F = mg + P\gamma_{LV} \cos \theta - F_b \quad (4)$$

여기서 F 는 전체 힘이며, m 은 시편의 무게, g 는 중력가속도, F_b 는 부력, P 는 섬유둘레길이, γ_{LV} 는 액체의 표면장력이다. 전체 표면장력(γ^T)은 Lifshitz-van der Waals 조성, γ^{LW} 과 산-염기 조성, γ^{AB} 의 합이다. 산-염기 조성 (혹은 수소 결합)은 전자받기, γ^+ 와 전자주기, γ^- 조성을 포함한다.

위 식의 구성성분을 각각 계산하면 접촉일(W_o)을 나타내는 변형된Young Dupre식은 다음과 같이 나타낸다:

$$W_o = \gamma_L (1 + \cos \theta) = 2 \left(\gamma_s^{LW} \gamma_s^{LW} \right)^{\frac{1}{2}} + 2 \left[\left(\gamma_s^- \gamma_L^+ \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\gamma_s^+ \gamma_L^- \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5)$$

고체의 γ_s^{LW} 값은 도너와 억셉터가 없는 무극성 용액의 접촉각으로부터 구해진다. 극성과 분산표면에너지를 구하기 위해, Owens-Wendt 식 [6] 은 다음과 같이 표시된다.

$$W_o = \gamma_L (1 + \cos \theta) = 2 \left(\gamma_s^d \gamma_L^d \right)^{\frac{1}{2}} + 2 \left(\gamma_s^p \gamma_L^p \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

아래의 식(7)을 이용하여 유리섬유 (F) 와 기지 (M)의 계면에서의 접촉일(W_o)을 계산할 수 있다.

$$W_o = 2 \left[\left(\gamma_F^{LW} \gamma_M^{LW} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\gamma_F^- \gamma_M^+ \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\gamma_F^+ \gamma_M^- \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (7)$$

3.1 CNT-에폭시 나노복합재료의 전기적 계면 특성

에폭시 기지에 CNT가 분산되어있기 때문에 구리선과 CNT-

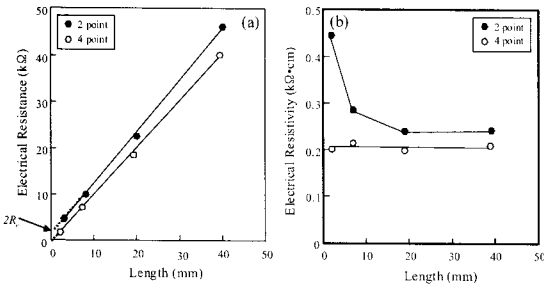


Fig. 2 The resistance and resistivity results of electrical measurement.

에폭시 나노복합재료 사이의 접촉저항을 측정하기가 쉽지 않다. Fig. 2(a)는 2-점과 4-점법을 사용하여 전기저항을 측정된 결과를 보여준다. 접촉저항은 2-점법으로 측정된 선형 결과로부터 외삽된 Y 절편의 값인 $2R_c$ 이며, $1.7k\Omega$ 였다. 그러나, 4-점법은 접촉저항을 포함하지 않기 때문에 거의 원점을 통과하게 된다.

Fig. 2(b)는 위 두 방법으로 구해진 전기저항도의 결과를 나타낸다. 4-점법으로 측정된 전기저항도는 거의 간격에 무관하게 일정하지만, 2-점법의 경우는 간격이 줄어들어 따라 크게 증가함을 보여 주었다. 이는 전체 저항에서 접촉저항이 차지하는 비율이 크기 때문이다. 이 결과는 경사형 시편이 접촉 저항 측정이 유용하다는 것을 나타낸다.

3.2 산 처리 유리섬유의 통계적 인장 물성

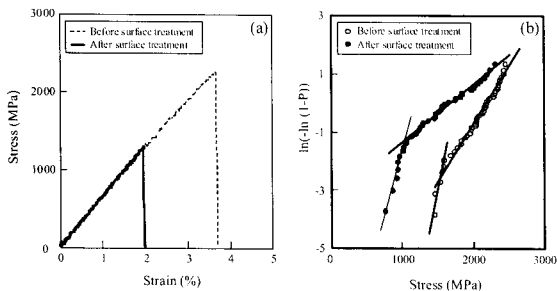


Fig. 3 Single glass fiber tensile test: (a) stress-strain curve (b) cumulative strength distribution.

산으로 처리 하면, 사이징된 유리섬유의 코팅부분이 제거 된다. Fig. 3은 유리섬유의 산처리 여부에 따른 기계적 물성 차이를 보여준다. Fig. 3(a)는 두 가지 표면조건에 대한 유리섬유의 전형적인 응력-변형률을 보여준다. 산 처리 후 유리섬유의 인장강도와 파괴 변형률은 모두 큰 감소를 보여주었다. 이것은 사이징을 제거하는 과정에서 표면에 에칭으로 인한 흠에 응력이 집중하여 인장강도가 감소되는 것으로 생각 된다. 그러나, 유리섬유의 고유 물성에 의존하는 인장강성도는 거의 변하지 않음을 볼 수 있다.

Fig. 3(b)는 서로 다른 표면 상태에 대해 20 mm길이의 단일 유리 섬유들의 누적강도 분포를 보여준다. 산처리 후의 유리섬유 인장 변형률은 미처리한 유리섬유의 경우보다 낮으며, 또한 두 섬유의 경우, 단모드 (unimodal)가 아닌 두 가지 이중모드 (bimodal) 응력분포를 보여주었다. 이것은 산처리와 미처리 모두에서 고유한 강도분포와 외적인 손상으로 인한 다른 강도분포가 동시에 존재한다는 것을 의미한다.

3.3 겉보기 강성도와 계면전단강도에 대한 산 처리 영향

Fig. 4는 CNT-에폭시 나노복합재료와 순수 에폭시에 서로 다른 표면상태를 가지는 유리섬유 자체의 겉보기 응력-변형률을 보여준다. CNT-에폭시 나노복합재료는 순수 에폭시 복합재료에 비해 높은 겉보기 탄성률을 가진다. CNT-에폭시 나노복합재료와 산처리를 한 유리섬유의 순수 에폭시 복합재료가 미처리한 유리섬유 복합재료보다 높은 겉보기 탄성률을 가진다. 이는, CNT-에폭시 복합재료가 높은 응력전달과 CNT-에폭시 기지 자체의 강화 효과로 인해 순수 에폭시 복합재료의 경우 보다 높은 겉보기 강성도를 나타내었다.

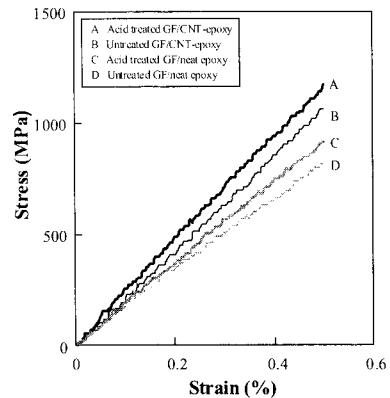


Fig. 4 Stress-strain curves for CNT-epoxy nanocomposite and neat epoxy with acid-cleaned and uncleaned neat glass fibers.

Fig. 5는 유리섬유와 에폭시 기지간의 함침된 면적에 대한 풀아웃 힘을 비교한 것이다. Fig. 5(a)는 산 처리한 전후의 사이징된 유리섬유와 순수 에폭시간의 마이크로드롭에 대한 풀아웃 힘을 나타낸다. Fig. 5(b)는 사이징된 유리섬유를 산처리하기 전후의 CNT-에폭시 나노복합재료의 마이크로드롭에 대한 풀아웃 시험을 보여준다.

산 처리를 했을 경우, 높은 표면 에너지로 인해 더 강한 계면접착력을 가졌다. 또한, 미처리한 물질의 표면에 사이징을 포함하는 물질이 약한 경계층으로 작용할 것으로 판단된다. 또한

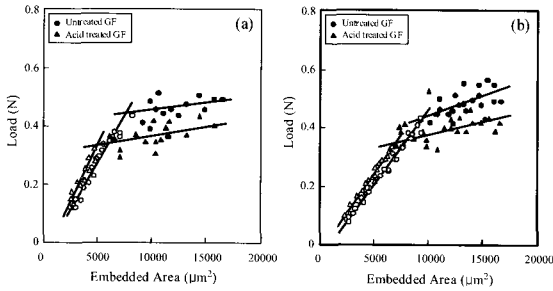


Fig. 5 Plots of the pullout force versus embedded area between glass fiber and: (a) neat epoxy and (b) CNT-epoxy nanocomposite.

표면에 대한 산처리는 미세단위에 표면을 거칠게 하는 경향이 있다. 이런 관찰에 근거하여, Fig. 5에 보여준 거동이 설명될 수 있을 것이다. 이 그림의 첫번째 구역은 풀아웃힘이 함침된 면적에 상대적으로 강한 의존성을 보여준다. 이것은 이 지역에서 풀아웃 힘은 크게 계면 접착력에 의해 조절되기 때문에 판단된다. 계면 접착력은 이 구역에서 산 처리된 유리섬유에서 더 크기 때문에, 미처리 유리섬유보다 더 큰 풀아웃 힘을 보여주었다. Fig. 5의 네 가지 경우 모두 파괴 힘이 함침되는 면적에 훨씬 영향을 받지 않는 급격한 경계구역이 존재한다. 이 임계점부터는, 섬유가 뽑히는 경우보다 섬유가 부서지는 경우를 나타낸다. 그리고 앞에서 지적한대로 산처리는 섬유자체의 인장 강도를 감소시키기 때문에, 이 지역에서의 파손 강도는 산처리의 경우보다도 사이징된 유리섬유의 경우가 더 크게 나타났다.

3.4 계면전단강도와 결보기 강성도에 따른 젖음성과 표면 에너지와의 상관관계

섬유와 기지간의 기계적 계면전단강도와 열역학적 표면에너지와의 상관관계는 나노복합재료의 계면 특성연구에 매우 중요하다. 액체와 고체 표면간의 젖음성은 대략적으로 평평한 고체 표면과 열역학적인 평형 상태에 있는 액체 방울과의 접촉각으로 측정된다. 정적 접촉각은 고체 표면이 정지중일 때 구해진다. 전진(advancing) 각은 액체가 시편에 잠긴 직후에 측정되며, 후퇴(receding)각은 시편이 액체 표면에서 나올 때 측정된다. 에폭시와 CNT-에폭시 나노복합재료의 점도는 계면접착력에 영향을 준다.

Fig. 6은 유리섬유에 함침된 서로 다른 마이크로드롭에 대한 사진이다. Fig. 6(a)는 순수 에폭시를 나타내며, Fig. 6(b)는 CNT-에폭시 나노복합재료이다. CNT-에폭시 나노복합재료의 접촉각은 순수 에폭시 보다 다소 큰 접촉각을 가진다. 이는 순수 에폭시의 경우 친수성을 가지나 CNT-에폭시 나노복합재 같은 경우 함유된 CNT로 인한 소수성의 특성을 많이 함유하기 때문이다.

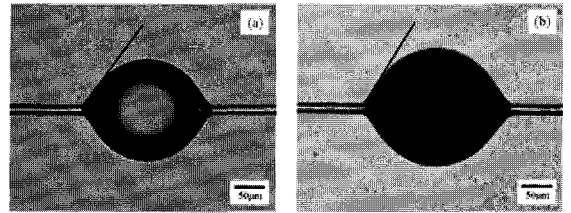


Fig. 6 The photos of microdroplet on glass fiber surface: (a) neat epoxy droplet (b) 0.3vol% CNT-epoxy nanocomposite droplet.

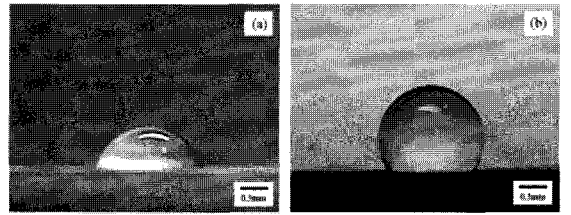


Fig. 7 The photos of static contact angle: (a) water droplet on neat epoxy plate (b) water droplet on CNT-epoxy nanocomposite plate

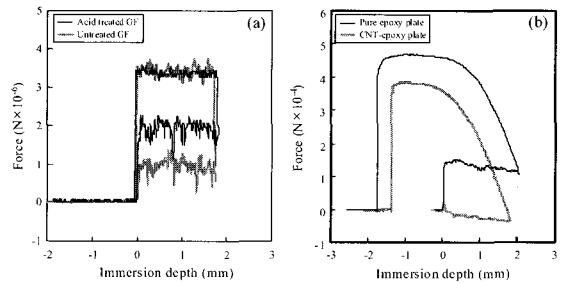


Fig. 8 Dynamic contact angle test in water: (a) glass fiber before and after surface treatment (b) neat epoxy and CNT-epoxy nanocomposite.

Fig. 7은 CNT 0.3vol% 에폭시 나노복합재료와 순수 에폭시 표면에서의 물방울에 대한 정적 접촉각을 보여 준다. CNT-에폭시 나노복합재료는 소수성을 가지며, 정적 접촉각은 약 120도 이다. CNT-에폭시 나노복합재료와 비교하면 순수 에폭시의 정적 접촉각은 상당히 낮은 각을 보여 준다. 이것은 CNT를 함유하는 에폭시의 미세 나노 구조와 증가된 점도에 의한 다른 표면에너지를 가진다는 것을 의미한다. 접촉각의 증가는 에폭시에서의 CNT의 나노구조의 불균일한 배열에 기인하여 소수성을 보여주는 것으로 생각된다.

Fig. 8(a)는 미처리와 산처리된 유리섬유의 점진각 및 후퇴각을 보여 준다. 젖음성은 깨끗한 표면 때문에 표면 처리 후에 분명한 감소를 보여 주었다. Fig. 8(b)는 각각 순수 에폭시 시편과 CNT-에폭시 나노복합재료 시편의 동적 접촉각의 관련성을 보여 준다. 동적 접촉각은 정적 접촉각과 경향이 상호 일치함을 알 수 있다. 접촉각의 계산된 값으로 볼 때, 산처리된 유리 섬유와

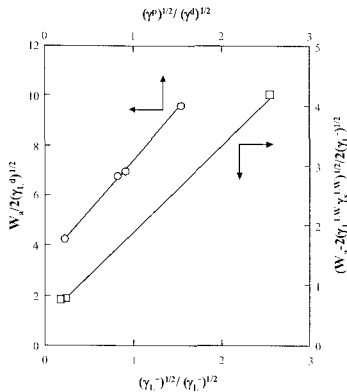


Fig. 9 Plots of polar and dispersive free energy terms and donor and acceptor components.

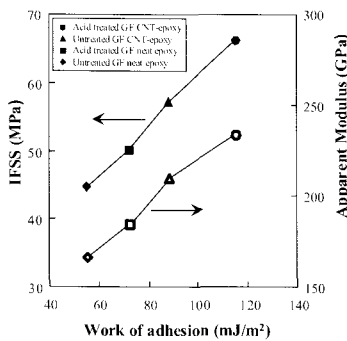


Fig. 10 Plots of IFSS (interfacial shear strength) and apparent modulus versus work of adhesion showing correlation.

CNT-에폭시 나노복합재료의 접착일이 미처리 유리섬유의 경우보다 더 크게 나타났으며, 이는 이 계면에서 더 안정하다는 것을 의미한다.

Fig. 9는 네 가지 용매를 사용하여 앞의 식 (5)와 (6)을 이용하여 계산된 도너와 엑셉터로부터, 구성요소, 극성과 분산 자유에너지 항들을 구하는 중간 과정을 보여준다. 실험식으로부터 구한 값들을 위 수식들의 연립방정식을 통하여 구하게 된다. CNT-에폭시 나노복합재료는 표면에 존재하는 CNT 미세구조 때문에 더 높은 표면에너지를 가지는 것으로 판단된다.

겉보기 강성도는 계면전단강도가 증가함에 따라 증가하였으며, 이는 유리섬유와 CNT-에폭시 나노복합재료간의 계면접착력이 유리섬유와 순수 에폭시간의 계면접착력보다 더 크다는 것을 나타낸다.

또한 유리섬유의 경우, 계면접착성은 산 처리 후에 증가되었다. 계면접착력의 결과는 열역학적 접착일 (W_a)과 일반적으로 일치하였다.

산 처리한 유리섬유와 CNT-에폭시 나노복합재료간의 접착일은 미처리 유리섬유와의 접착일보다 더 높았으며, 이는 계면에서의 더 안정된 기계적 접착을 나타낸다. Fig. 10은 계면전단강도, 겉보기 강성도와 접착 일 사이의 상관 관계를 보여준다. 계면전단강도와 겉보기 강성도 모두가 접착일이 증가함에 따라 증가하며, 이는 효과적인 응력전달 벡터나 층이 이 계면에서 작용한다는 것을 나타낸다.

4. 결론

단일 유리섬유로 강화된 CNT-에폭시 나노복합재료의 계면 특성을 전기-미세역학적 시험법과 젖음성 시험으로 평가하였다. CNT-에폭시 나노복합재료의 전기적 특성은 2-점법과 4-점법으로 측정·비교하였다. 경사형 시편은 함침거리를 달리한 구리선을 이용하여 CNT-에폭시 나노복합재료의 전기적 접촉저항을 평가하기 위해 효과적으로 사용되었다. 유리섬유의 인장강도는 사이징의 제거로 인한 부분적인 에칭 표면의 노출 때문에 산-처리 후 현저히 감소되었다. 그러나, 산 처리 이후 유리섬유의 인장 강성도는 물질의 고유특성이므로 특별한 변화가 없었다. 단일 유리섬유/CNT-에폭시 나노복합재료는 CNT 강화의 응력전달효과 때문에 순수 에폭시보다 높은 겉보기 강성도를 나타내었다. 산처리한 유리섬유와 CNT-에폭시 나노복합재료간의 증가된 계면 접착력은 증가된 표면에너지와 사이징된 소재의 약한 경계 층 때문에, 미처리된 유리섬유와 CNT-에폭시 나노복합재료보다 더 높았다. CNT-에폭시 나노복합재료는 순수 에폭시보다 더 큰 표면에너지를 나타내며, 산처리된 유리섬유와 CNT-에폭시 나노복합재료의 접착일은 사이징된 미처리 유리섬유 나노복합재료보다 높았다. 이는 에폭시 기지에서 불균일하게 배열되어 있는 CNT 나노복합구조로 소수성과 큰 표면에너지에 기여할 수 있다고 생각된다. CNT-에폭시 나노복합재료와 유리섬유간의 계면 접착력과 겉보기 강성도 모두 상승된 열역학적 접착일과의 상호일치를 보여 주었다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소(ADD) 하의 계약 UD070009AD의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 연구자 중 왕작가는 2단계 BK21의 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) B. G. Lars, H.G. Malte, Wichmann, O. M. Leif, and S. Karl, "Load and health monitoring in glass fibre reinforced composites with an electrically conductive nanocomposite epoxy matrix," *Compos Sci Technol*, Vol. 68, 2008, pp. 1886-1894.
- 2) Z. Q. Shen, S. Bateman, D. Y. Wu, P. McMahon, M. Dellolio, and J. Gotama, "The effects of carbon nanotubes on mechanical and thermal properties of woven glass fibre reinforced polyamide-6 nanocomposite," *Compos Sci Technol*, Vol. 69, 2009, pp. 239-244.
- 3) D. Wei, P. Espindola, T. Lindfors, and C. Kvarnstrom, J. Heinze, A. Ivaska, "In situ conductance and in situ ATR-FTIR study of poly(N-methylaniline) in aqueous solution," *J Electroanal Chem.*, Vol. 602, 2007, pp. 203-209.
- 4) M. Pagels, J. Heinze, B. Geschke, V. Rang, "A new approach to the mechanism of polymerization of oligovinylthiophene," *Electrochim Acta*, Vol. 46, 2001, pp. 3943-3954.
- 5) H. Klauk, G. Schmid, W. Radlik, W. Weber, L. Zhou, C. D. Sheraw, J. A. Nichols, and T. N. Jackson, "Contract resistance in organic thin film transistors," *Solid State Electron*, Vol. 47, 2003, pp. 297-301.
- 6) S. J. Park, and Y. S. Jang, "Interfacial characteristics and fracture toughness of electrolytically Ni-plated carbon fiber-reinforced phenolic resin matrix composites," *J Coll Interf Sci*, Vol. 237, 2001, pp. 91-97.
- 7) L. Jin, F. Qun, W. H. Chen, K. B. Huang, C. Y. Ling, "Effect of electro-polymer sizing of carbon fiber on mechanical properties of phenolic resin composites," *Trans Nonferrous Met Soc*, Vol. 16, 2006, pp. 457-461.
- 8) 김평기, 장정훈, 김성주, 박종만, 황병선 "미세역학적시험법과 음향방출을 이용한 Jute 및 Hemp 섬유/폴리프로필렌 복합재료의 내구성 및 계면 평가", 한국복합재료학회지, Vol. 20, No. 3, 2007, pp. 55-62.
- 9) X. Wang, D. D. L. Chung, "Improving the bond strength between carbon fiber and cement by fiber surface treatment and polymer addition to cement mix," *Cem Conc Res*, Vol. 26, 1996, pp. 1007-1012.
- 10) J. M. Park, S. I. Lee, K. W. Kim, and D. J. Yoon, "Interfacial properties of electrodeposited carbon fibers/epoxy composites using electro-micromechanical technique and nondestructive evaluation," *J Colloid Interf Sci*, Vol. 237, 2001, pp. 80-90.
- 11) T. H. Jung, R. V. Subramanian, and V. S. Manoranjan, "Prediction of fibre strength at the critical length: a simulation theory and experimental verification for bimodally distributed carbon fibre strengths," *J Mater Sci*, Vol. 28, 1993, pp. 4489-4496.
- 12) 박주언, 최낙삼, "복합재료의 계면전단강도를 평가하기 위한 새로운 반구형 미소접합 시험편," 한국복합재료학회지, Vol. 21, No. 2, 2008, pp. 25-30.