

젖음성 시험과 전기-미세역학 시험법과 통한 단 카본섬유/산처리된 CNT-에폭시 나노복합재료의 분산과 자체-감지능

장정훈¹ · 왕작가¹ · 공조엘¹ · 구가영¹ · 박종만^{1†} · 이우일² · 박종규³

¹경상대학교 나노·신소재공학부/고분자공학전공, ²서울대학교 기계·항공공학부, ³국방과학연구소, 제4연구개발본부
(2009년 5월 21일 접수, 2009년 6월 20일 수정, 2009년 6월 26일 채택)

Single Carbon Fiber/Acid-Treated CNT-Epoxy Composites by Electro-Micromechanical Technique and Wettability Test for Dispersion and Self-Sensing

Jung-Hoon Jang¹, Zuo-Jia Wang¹, Joel GnidaKouong¹, Ga-Young Gu¹, Jung-Man Park^{1†}, Woo-Il Lee²,
and Jong-Kyoo Park³

¹School of Materials Science and Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

²School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

³Agency for Defense Development, 4-R&D Center, Daejeon 305-600, Korea

(Received May 21, 2009; Revised June 20, 2009; Accepted June 26, 2009)

요약: 세 가지의 다른 산처리를 한 단일 탄소섬유로 함침된 CNT-에폭시 나노복합재료는 전기-미세역학적 기술과 젖음성 시험법을 사용하여 분산과 자체-감지능을 조사하였다. 자체-감지능은 접촉 저항의 노이즈가 산 처리되지 않은 CNT보다, 산 처리된 단일 탄소섬유 CNT-에폭시 나노복합재료가 다소 더 크게 나타났다. 반면에, 결보기 강성도는 산 처리를 한 경우가 응력전달이 더 잘되어, 산 처리 하지 않은 경우보다 더 컸다. 탄소섬유와 CNT-에폭시간의 계면전단강도는 CNT 첨가로 인하여 점도가 증가하기 때문에 탄소섬유와 순수 에폭시간의 경우보다 낮게 나타났다. CNT-에폭시 나노복합재료는 순수 에폭시보다 더 큰 소수성을 보여 주었다. 열역학적인 접촉일은 계면전단강도와 대략 비례적인 관계를 보여주지만, 결보기 강성도는 접촉일과는 반비례를 나타내었다. 요구되는 물성에 따라서, 최대조건 대신에 최적의 산처리 조건이 필요로 할 것이다.

Abstract: Dispersion and self-sensing evaluation for single-carbon fiber reinforced in three different acid-treated CNT-epoxy nanocomposites were investigated by electro-micromechanical techniques and wettability tests. Self-sensing based on contact resistivity exhibited more noise for single carbon fiber/acid-treated CNT-epoxy composites than it did for untreated CNT. However, the apparent modulus was higher the acid treated case than the untreated case which is attributed to better stress transfer. The interfacial shear strength (IFSS) between carbon fibers and the CNT-epoxy was lower than that between carbon fiber and neat epoxy due to the increased viscosity associated with the addition of the CNT. The CNT-epoxy nanocomposite exhibited more hydrophobicity than did neat epoxy. Change in the thermodynamic work of adhesion was consistent with changes in the IFSS but disproportional to that of the apparent modulus. The optimum condition of acid treatment on the need can be obtained instead of the maximum condition.

Keywords: nanocomposites, wettability, electro-micromechanical technique, work of adhesion

[†]Corresponding author: Jung-Man Park (jmpark@gnu.ac.kr)

1. 서 론

탄소 나노튜브(CNT)의 독특한 특성은 보강제가 함침된 나노복합재료로서 사용될 수 있도록 한다. CNT 바탕인 나노복합재료는 다양한 고분자 재료로 심도있게 연구되며, 항공 응용, 운송과 다른 산업으로서의 큰 가능성을 보여준다[1-3]. CNT 나노복합재료는 최근에 크게 부각되며, 상당히 독특한 기계적 및 다기능 특성 때문에 크게 관심을 끌며, 나노-크기의 미세구조와 극한의 많은 계면 지역에서부터 나온 매트릭스와 강한 상호작용을 가진다[4]. CNT는 전형적으로 화학적 반응을 받기 쉬우며, 다양한 화학적 반응기 도입은 그들의 분산 및 매트릭스와 호환성을 향상시키며, 가공 능력과 특성을 강화시킨다. 예를 들면, CNT의 화학적 변형은 다양한 용매에서의 분산이 향상됨으로써 증명된다[5-7].

탄소나노재료(CNM)는 높은 비표면적을 가지며 쉽게 응집 된다. CNM의 작용기가 도입된 표면은 그들의 여러 가지 미디어에서 분산에 의해서 생성되는 독특한 특질과 특성을 가진 새로운 작용기가 증가하는 효과적인 방법이다[8,9]. 작용기가 도입된 CNM는 산 또는 다른 화학물질로 표면 처리가 요구된다. 질산 또는 황산의 CNM 처리는 그 표면의 그래핀 시트 범위 내에서 카르복실과 카르복실 그룹과 같은 산화그룹을 형성한다[10,11]. 일반적으로 변형된 CNM의 표면 작용기는 FT-IR이나 라만 분광법으로 분석된다. 이것은 정량적인 정보를 얻기는 어렵지만 CNM의 산화된 표면 안의 단일층 또는 약간의 층에 존재하는 화학적 성분을 분석한다.

최근 여러 연구팀들은 실제고분자 복합재료에서, 특히 거시적인 고분자 복합재료의 섬유-매트릭스 계면에 CNT 사용은 그들의 강도와 강성도를 증가시키기 위해 연구를 해 오고 있다. 거시적 고분자 복합재료에서 섬유파괴 혹은 계면 결합이 끊어지는 동안에 계면에서의 CNT는 크랙을 연결해 주는 역할을 한다. 이것은 거시적 복합재료의 계면 강도와 강성도를 향상시킨다[12].

전기-미세역학기술은 효과적인 비파괴평가(NDE) 방법과 미세-손상감지, 계면특성을 평가하고 비파괴적인 거동을 연구한다. 이 기술은 전도성 섬유를 함침하여 강화시킨 행위로 자체-감지능과 강화섬유의 두 기능을 모두 수행한다[13,14]. 본 연구는 세가지의 산처리를 한 CNT-에폭시 나노복합재료를 전기저항측정과 젖음성 시험법을 이용하여 강화 효과와 자체-감지능에 대한 최적조건을 연구하였다. 또한, CNT 나노복합재료에서 전기적 및 특성을 여러 가지 종류의 산처리와 상호연관하였다.

2. 실험

2.1. 재료

다중-벽 탄소나노튜브(CNT, 일진나노테크, 한국)는 복합재료의 강화제로 사용되었다. 평균직경이 약 8 μm 이고 탄소섬유(T700S, 한국, 토레이, 일본)를 강화뿐만 아니라 자체-감지능용으로 사용하였다. 비스페놀에 희석된 디글리시딜 에테르를 기반으로 한 에폭시 수지(YD-114, 국도화학)는 내면 기지로 사용되었으며, 산무수물(KBH-1089, 국도화학)은 경화제로 사용되었다. 아세톤(대정화학)과 이차 증류수는 CNT의 분산을 위해 사용되었다. 세 개의 산인 H_2SO_4 (삼천화학), HNO_3 (대정화학), $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (대정화학)은 CNT의 산처리를 위해 사용되었다. 접촉각 측정을 위해 사용된 네 개의 시험액은 이차 증류수와 포름아미드, 디아이오도 메탄과 에틸렌글리콜이다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 산 처리와 분산 과정

Figure 1은 (a) 산처리 공정과 (b) CNT-에폭시 나노복합재료의 분산공정을 도식적으로 보여준다. Figure 1(a)에서의 CNT는 세 개의 산, HNO_3 , H_2SO_4 , $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$ 로 각각 처리되었다. 산이 물에 30 wt% 농도로 첨가되었으며, 산 처리 시간은 50°C 오븐에서 10 min 간이다. 이 CNT는 산 처리 후 증류수를 사용해 50°C 의 오븐에서 3일간 산 처리 후 잘 세척하였다.

Figure 1(b)에 요약된 대로, CNT는 즉, 아세톤 또는 물에 2 h 동안 초음파를 사용하여 각 분산용매에서 분산되었다. 그 다음, 에폭시 수지를 CNT 용액에 부었다. CNT와 에폭시 혼합물의 초음파 분산은 같이 담겨진 비이커로 12 h 동안 추가로 행하였다. CNT가 함침된 에폭시 용액은 봉인된 비커에서 6 h 동안 분산되었다. 그 다음, 에폭시 용액에 분산된 CNT용매는 35°C에서 3일간 초음파 분산하에서 증발시켜 제거하였다. 잔류 용매는 추가로 3일 동안 진공상태의 50°C 오븐에서 제거하였다. 분산된 CNT의 에폭시 시편 준비과정의 마지막 단계에서 경화제를 첨가하였다.

2.2.2. 전기저항 측정

Figure 2는 4 probes법에 의한 부피 전기저항의 측정을 위해 사용된 시편을 보여준다. 전기접촉 점들은 구리선과 실버페스트를 사용하여 규칙적인 간격으로 설치하였다. 부피전기저항, ρ_v 는 측정된 부피전기저항 R_v , CNT-에폭시 나노복합재료의 단면적 A_v , 그리고 전기접촉길이, 시험 표본 길이 L_{cc} 로부터 다음의 식으로 계산하였다.

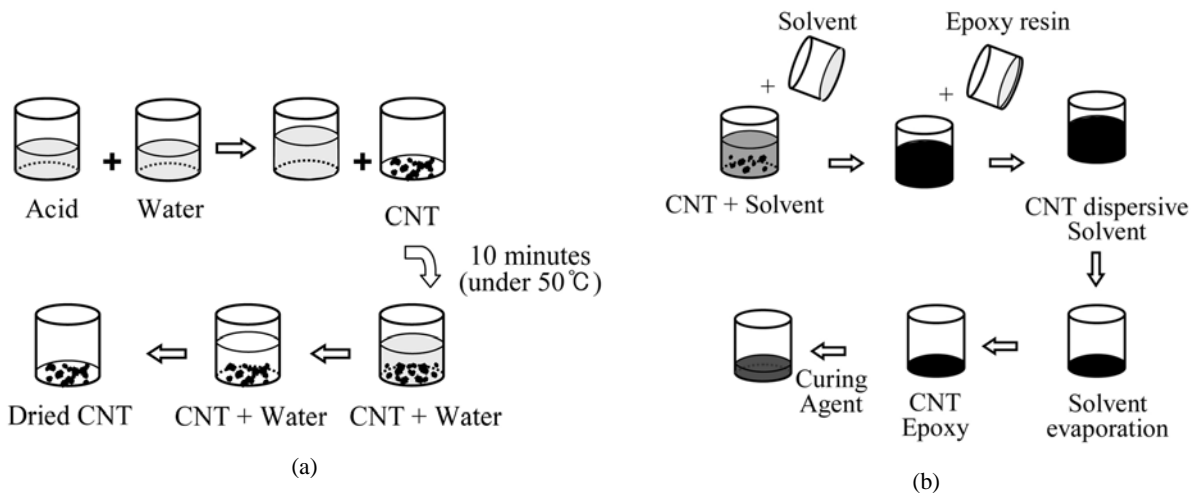


Figure 1. Schematic for the process for acid treatment and dispersion of CNT: (a) acid treatment; and (b) dispersion.

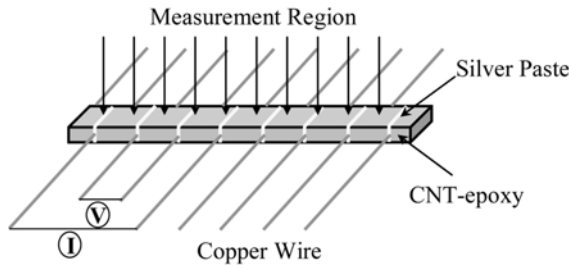


Figure 2. Layout of the experimental specimen for measuring volumetric electrical resistivity using a four-point method.

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

2.2.3. 반복 하중하에서 전기적 접촉저항과 결보기 강성도 측정

반복하중하에서의 탄소섬유/CNT-에폭시 나노복합재료의 자체-감지능은 전기-pullout시험으로 측정하였다. Figure 3은 (a) 결보기 강성도와 (b) 접촉저항 측정의 실험시편을 간략하게 보여준다. 이러한 반복 하중과 접촉저항 시험은 멀티미터기(HP34401A)가 부착된 소형-만능시험기(H1KS, Hounsfield Equipment Ltd., 영국)를 사용한 0.5 mm/min에서 100 N의 로드셀을 사용하였다. 시편을 소형-만능시험기의 지그에 위치시키고 멀티미터기는 가는 구리선으로 나노복합재료에 전기적으로 연결하였다. 강화 효과는 균일한 반복 하중의 결보기 강성도 시험에 의해 간접적으로 결정하였다. 섬유 인장하에서의 저항 변화는 ΔR , 전기적-pullout 시험하는 동안, 전도성의 기지재료인 CNT-에폭시 나노복합재료를 통해 측정되었다. 두 개의 전기접촉이 탄소섬유에 형성되었고 다른 두 개의 전기 접촉은 CNT-

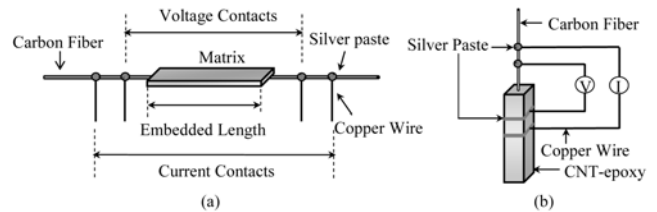


Figure 3. Experimental specimens for measurement of apparent modulus and contact resistivity during uniform cyclic loading tests: (a) apparent modulus; and (b) contact resistivity.

에폭시 나노복합재료의 경계 주위에 형성된다. 두 접촉전압간의 전기 저항은 탄소섬유의 부피 전기 저항의 합과 탄소섬유 그리고 CNT-에폭시 복합재료간의 전기 접촉저항 R_c 로 일치되어 측정 된다. 그러므로, 전기적 pullout 시스템의 전체 전기저항 R_T 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_T = R_v^{fiber} + R_c + R_v^{nanocomposites} \quad (2)$$

2.2.4. Microdroplet 시편제조와 계면전단강도(IFSS) 측정

탄소섬유와 CNT-에폭시 계면간의 계면전단강도는 microdroplet시험으로 측정되었다. 탄소섬유는 강철 프레임에 규칙적으로 분리된 간격으로 고정시켰다. CNT-에폭시 나노복합재료의 microdroplet는 각 탄소섬유를 핀 끝을 사용하여 만들어, 120°C 오븐에서 2 h동안 경화시켰다. 이들 microdroplet 시편들은 특별히 고안된 마이크로미터를 사용한 마이크로바이스에 고정되었다. microdroplet시편의 pullout시험은 만능 시험기를 사용하여 수행되었다. 계면전단강도는 측정된 pullout힘, F 와 주어진 상수로부터 다음의 식을 사용하여 계산하였다.

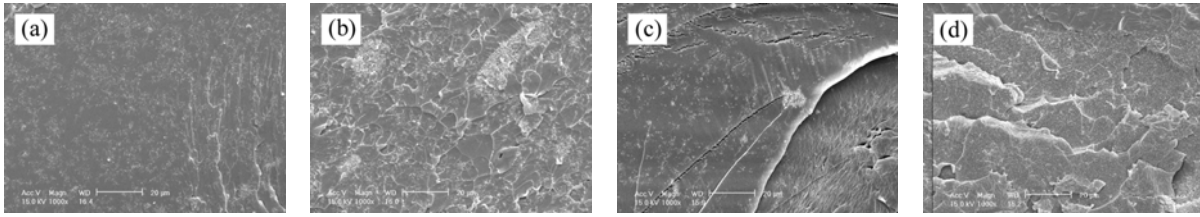


Figure 4. FE-SEM photographs of fractured surfaces for 0.5 vol% CNT-epoxy nanocomposites with different treatments, with acetone solvent: (a) untreated; (b) H₂SO₄; (c) HNO₃; and (d) Na₂Cr₂O₇+H₂SO₄.

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

여기서, D_f 와 L 은 각각 매트릭스 안의 섬유직경과 섬유의 함침 길이이다.

2.2.5. 젖음성 측정

동적 접촉각[15]은 기존의 정적 접촉각과 더불어 젖음성과 표면에너지 평가를 위해 Wilhelmy plate 방법(시그마 70, KSV, 핀란드)으로 측정했다. 산성처리된 CNT-에폭시 나노복합재료와 에폭시의 탄소미세섬유의 동적 접촉각을 측정하였다. 4가지 함침용매는 2차 증류수, 포름아미드, 에틸렌글리콜, 디아이오도메탄이 사용되었다. 도너와 엑셉트의 구성 요소와, 극성과 분산 자유에너지 항들을 동적 접촉 각도 값으로부터 계산하였다. Wilhelmy plate 시험에 대한 기본 방정식은

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

여기서, F 는 전체 힘, m 은 plate 질량, g 는 중력가속도, F_b 는 부력, P 는 섬유 경계선이며, γ_{LV} 는 액체의 표면 장력, 그리고 측정된 힘은 $F-mg$ 차이와 동일하다. 위의 구성 요소들의 계산은 변형된 접촉일의 수식화된 Young-Dupre식을 이끌게 된다. W_a 는 식 (5)로 주어진다.

$$W_a = \gamma_L(1 + \cos \theta) = 2(\gamma_L^L \gamma_S^L)^{\frac{1}{2}} + 2\left[(\gamma_S^- \gamma_L^+)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_S^+ \gamma_L^-)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (5)$$

고체의 γ_S^{LW} 의 값은 도너와 엑셉트의 구성요소 가 없는 비극성 액체의 접촉각으로부터 평가되었다. W_a 는 계면에서의 유리섬유(F)와 매트릭스(M) 간의 관계를 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$W_a = 2\left[(\gamma_F^{LW} \gamma_M^{LW})^{\frac{1}{2}} + (\gamma_F^- \gamma_M^+)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_F^+ \gamma_M^-)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (6)$$

3. 결과 및 토의

3.1. 분산 용액에 따른 CNT 분산정도 비교

Figure 4는 아세톤 용액과 다른 용액을 사용하여 CNT 처리에 따른 0.5 vol% CNT 에폭시 나노복합재료의 표면 균열에 대한 FE-SEM 사진이다. 즉, (a) 미처리; (b) H₂SO₄; (c) HNO₃; (d) Na₂Cr₂O₇+ H₂SO₄. 부서진 표면의 CNT-에폭시 나노복합재료의 형태는 상대적으로 다른 CNT 산처리에 대한 다른 분산 정도를 나타낸다. 일반적으로, 분산이 잘 될수록 표면 파괴는 균일하게 일어났다는 것을 알 수 있다.

Figure 5(a)는 두 가지 다른 용매 사용에 따른 CNT의 전기부피저항을 보여준다. CNT-에폭시 나노복합재료의 분산 정도는 분산용액과 산 처리 방법에 모두가 영향을 준다. 일반적으로 낮은 부피저항은 전기접촉의 형태의 개발에 더 많은 기회를 준다. CNT분산을 위해 아세톤을 사용한 CNT-에폭시 나노복합재료의 분산 정도는 물에서 보다 분산이 더 잘 되었다. 산처리한 CNT의 부피저항은 대체로 처리하지 않은 에폭시 매트릭스에 미처리 CNT의 경우보다 높은 저항을 가졌다. 산처리한 CNT 나노복합재료는 낮은 전도성을 보여 주었다. 이러한 이유는 결합력은 증가하지만, CNT 표면에 고분자기로 기능화되어 전도성이 떨어지기 때문이다. Na₂Cr₂O₇+H₂SO₄ 처리한 물질은 매우 높은 부피 저항을 보여 주는데, 이것은 아주 낮은 분산도와 이로 인한 낮은 전도성을 가진다.

Figure 5(b)는 3가지 다른 산 처리에 따른 CNT-에폭시 나노복합재료의 부피저항의 표준편차이다. 이 표준편차는 상대적인 분산도의 정도와 밀접하게 관련이 있으며, 이것은 균일한 전기적 접촉의 확률과도 관계가 있다. 산 처리 한 물질의 표준편차는 산 처리 하지 않은 것에 비해 다소 큰 값을 가진다. 이 이유는 고분자의 기능화로 인해 CNT가 표면에 엉겨 붙기 때문이다. 비록 산 처리는 전기전도성에는 큰 영향을 주지는 않지만, 일반적으로 계면 접촉력 향상이 기계적 물성은 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

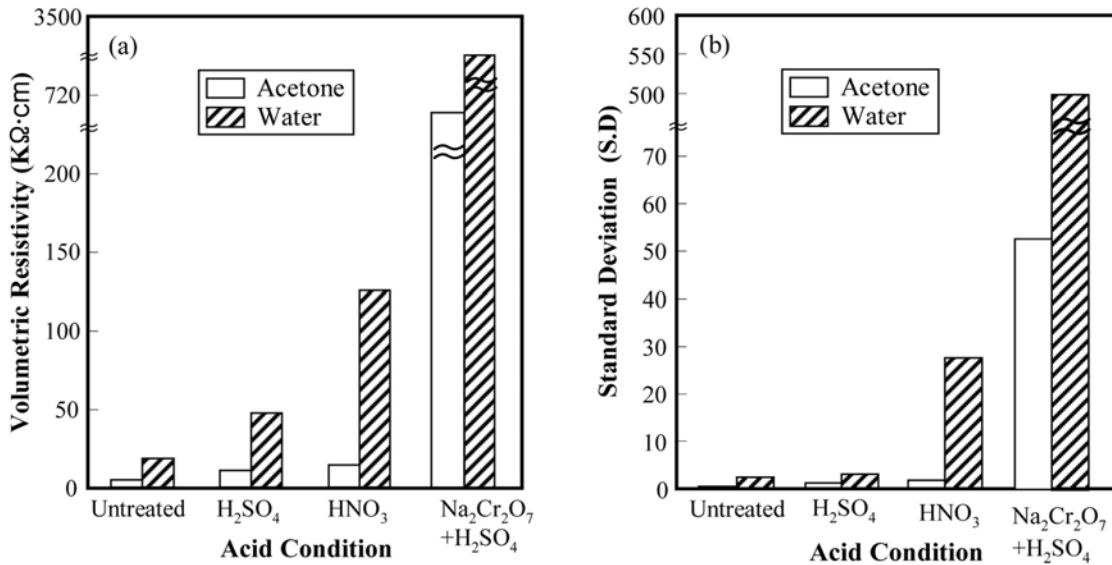


Figure 5. Volumetric resistivity of CNT-epoxy nanocomposites with three acids-treated CNT and two solvents: (a) volumetric resistivity; (b) SD of the volumetric resistivity.

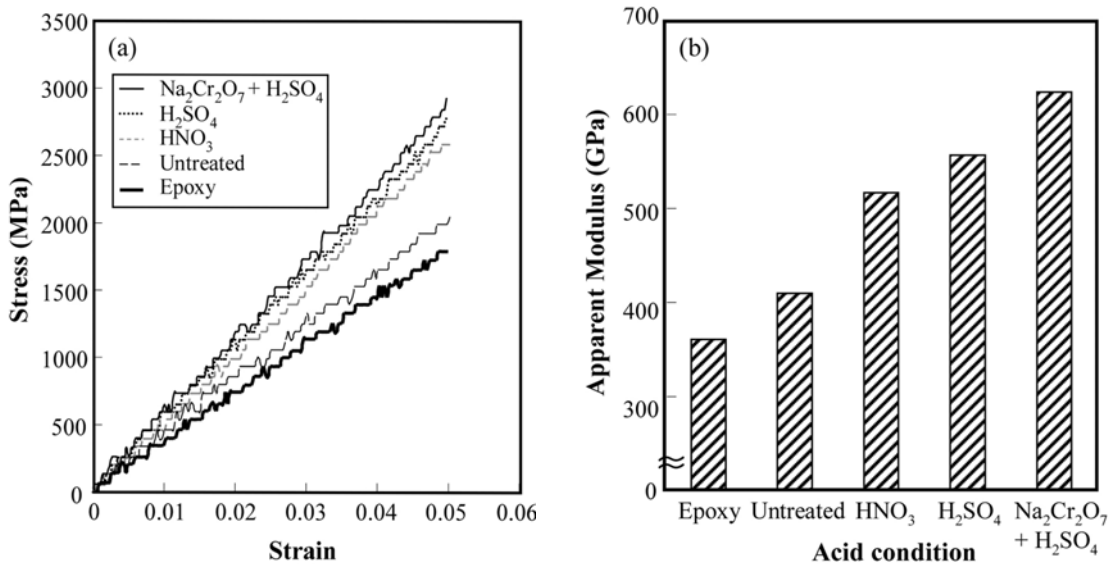


Figure 6. Apparent stress and apparent modulus of 0.5 vol% CNT-epoxy composites for untreated and the acid treatment conditions: (a) stress-strain; and (b) apparent modulus.

3.2. 탄소섬유와 산처리된 CNT-에폭시 나노복합재료의 하중 감지능

Figure 6은 (a) 결보기 응력-변형율에 대한 결과이며 (b)는 단일 섬유와 CNT-에폭시 나노복합재료의 결보기 강성도를 3가지의 다른 산처리와 미처리, 그리고 섬유만에 대한 결과를 나타내었다. 이 결보기 응력과 강성도는 반복하중으로 측정하였다. 3가지의 산처리된 CNT-에폭시 나노복합재료의 응력은 에폭시와 미처리된 CNT-에폭시 나노복합재료 보다 높은 값을 가진다.

또한, 3가지의 산처리를 통한 결보기 강성도의 경우들도 CNT를 처리하지 않은 경우보다 큰 값을 보여 주었다. 이 결보기 강성도의 증대는 계면접착력이 향상된 결과로써 산처리를 통해 응력 전달 효과가 증가한 것임을 알 수 있다.

Figure 7은 반복하중 시험 동안, 3가지의 산처리와 미처리 물질의 따른 CNT-에폭시 나노복합재료의 전기 접촉저항을 보여주었다. 산 처리한 CNT 나노복합재료의 전기접촉 저항은 미처리 CNT보다 낮은 자체-감지

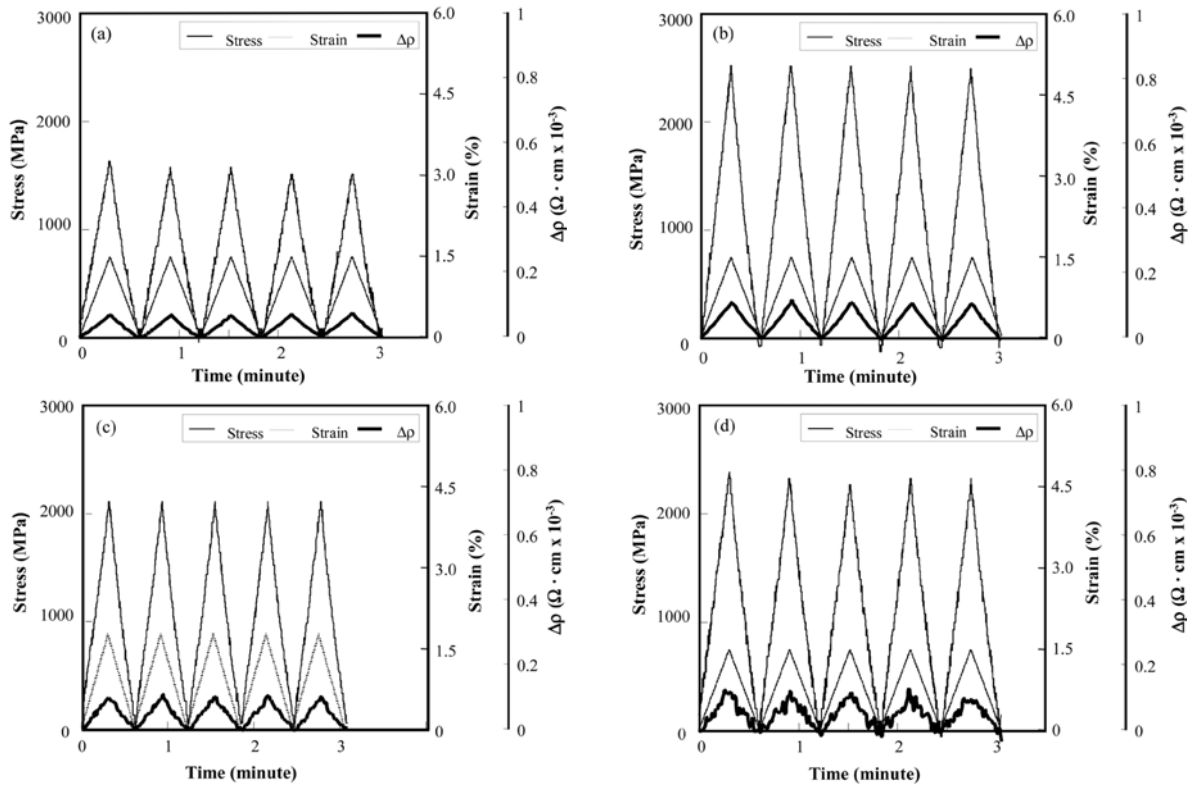


Figure 7. Electrical contact resistivity of 0.5 vol% CNT/epoxy composites with acetone solvent under cyclic loading: (a) untreated; (b) H₂SO₄; (c) HNO₃; and (d) Na₂Cr₂O₇+H₂SO₄.

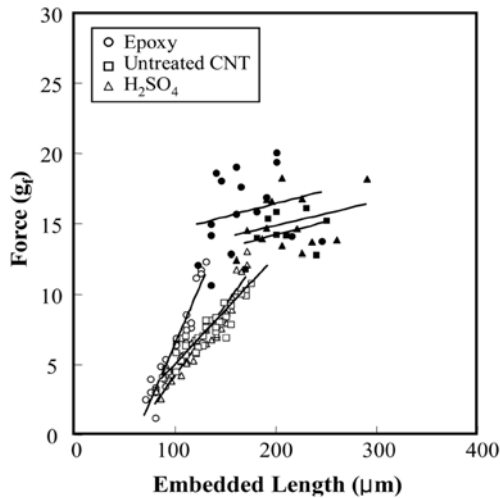


Figure 8. Comparison of pull-out behavior for neat epoxy and CNT-epoxy nanocomposites in the microdroplet test.

능을 가졌다, 이는 노이즈 발생으로 확인될 수 있으며, 그 반면에 최대 응력은 증가하였다. 분산을 위해 아세톤을 사용한 CNT경우는, 반복하중시험 동안의 자체-감지능은 좋은 분산의 결과로 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다. 단일 탄소섬유가 반복하중을 감지하

는 원리는, 나노복합재료의 전도성이 있는 CNT와 탄소섬유 사이의 계면 접촉저항이 좋기 때문이다. 산처리한 물질 중에 가장 자체-감지능이 떨어지는 경우는 Na₂Cr₂O₇+H₂SO₄이다.

3.3. 탄소섬유/에폭시와 CNT-에폭시 나노복합재료의 microdroplet 실험

Figure 8은 단일 탄소섬유에 일정한 간격으로 순수 에폭시와 미처리한 CNT-에폭시 나노복합재료 및 황산으로 처리한 CNT-에폭시 나노복합재료의 함침된 길이 대 pull-out 힘을 측정된 microdroplet 시험 결과의 비교이다. 이 pull-out 힘은 단일 섬유에 순수 에폭시의 결합이 단일 섬유와 미처리 CNT 에폭시 및 황산 처리를 한 CNT-에폭시 나노복합재료보다 큰 값을 가졌다. CNT-에폭시 나노복합재료의 분명한 점도 증가에 따른 계면전단강도의 감소로 인하여 탄소섬유에 대한 낮은 젖음성을 가지게 된다. 단일 탄소섬유와 황산 처리를 한 CNT-에폭시 나노복합재료는 계면전단강도가 확실히 증가하여 미처리 CNT 소재보다 큰 값을 가진다.

3.4. CNT-에폭시 나노복합재료의 표면 에너지와 접촉각

Figure 9는 순수 에폭시와 황산을 이용한 산 처리

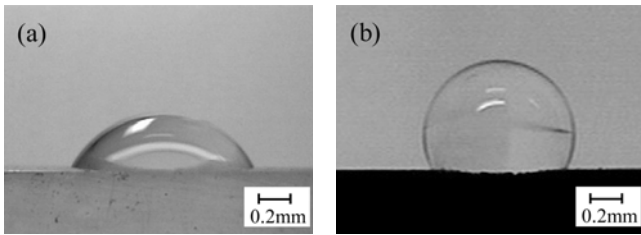


Figure 9. Static contact angle with water for: (a) neat epoxy and (b) acid treated CNT-epoxy nanocomposites with water.

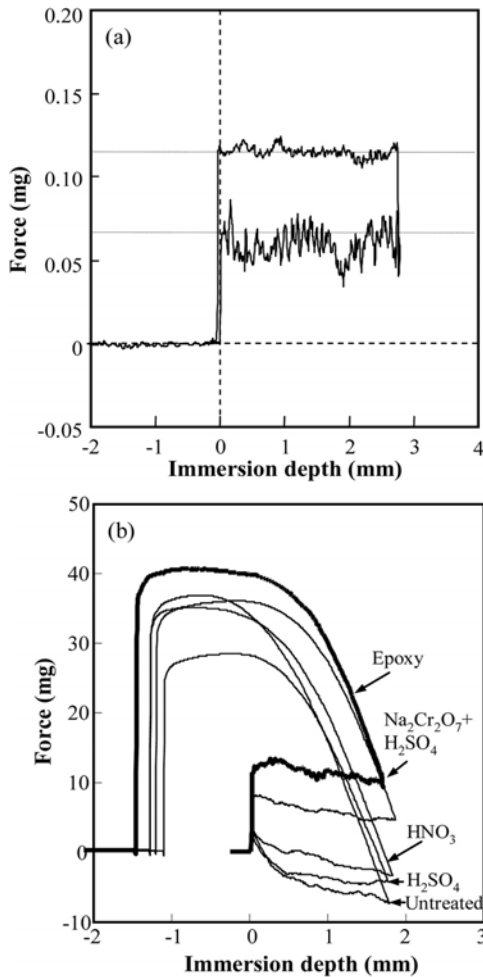


Figure 10. Dynamic contact angle for (a) carbon fiber; and (b) neat epoxy and three acids treated CNT-epoxy composites.

CNT-에폭시 나노복합재료에 작은 물방울을 통한 정적 접촉각에 대한 결과이다. 황산으로 산처리를 한 CNT-에폭시 나노복합재료는 상대적으로 큰 소수성을 가지고 그에 비하여, 순수 에폭시는 친수성을 보여주었다.

Figure 10은 물에서의 탄소섬유와 순수 에폭시 및 다른 3가지 방법의 산 처리를 이용한 CNT-에폭시 나노

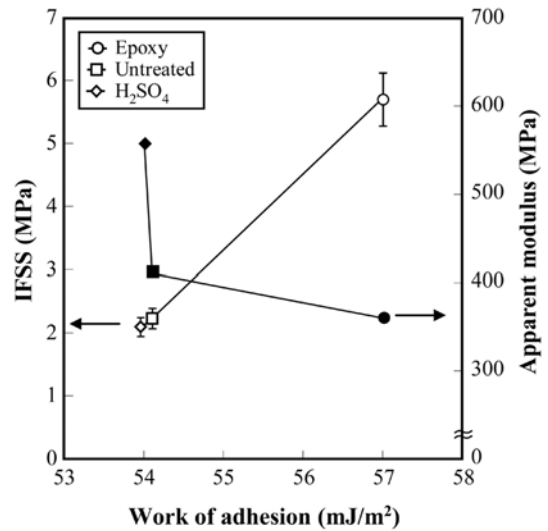


Figure 11. Relationship between work of adhesion, apparent modulus, and IFSS.

복합재료의 동적 접촉각을 보여준다. 다시 말해서, CNT-에폭시 나노복합재료는 순수 에폭시보다 큰 소수성을 가지고, 접촉각은 산처리를 했을 경우 증가되는 결과를 보여 주었다. 이는, 동적 접촉각이 대체로 정적 접촉각의 측정 결과와 비슷한 결과를 보여주었으며, 부분적으로 산처리한 CNT-에폭시 나노복합재료의 분산이 잘 될수록 접촉각이 증가하였다.

Figure 11은 계면전단강도와 겔보기 강성도간의 상관관계를 보여준다. 계면전단강도와 겔보기 강성도는 산처리 후에 증가되는 결과를 보여주었다. 접착력 W_a 는 황산 처리된 CNT-에폭시 나노복합재료가 미처리한 CNT-에폭시 나노복합재료와 비슷한 결과를 나타내었다. 황산 처리된 CNT-에폭시 나노복합재료의 겔보기 강성도 역시 미처리 CNT-에폭시 나노복합재료에 비해 큰 값을 보여 주었다. 이 결과는 증대된 계면접착력 및 응력전달 효과를 나타낸다. 계면전단강도와 접착일이 대략적으로 비례적인 관계를 보여주며, 이 반면에 겔보기 강성도와 접착일의 상관관계는 반비례의 관계를 나타내었다.

4. 결 론

3가지 다른 산처리를 통한 CNT-에폭시 나노복합재료의 분산과 자체-감지능을 전기저항 측정 및 그 표준편차를 이용하여 상호비교하여 평가하였다. 3가지의 다른 산처리 후 달라진 부피저항도의 변화는 약간에서부터 심도있게 변하는데, 이는 고분자 반응성기의 도입으로부터 발생하는 전기 접촉의 감소에 기인 할 것이다. 그러나, 산 처리 후 CNT-에폭시 복합재의 겔

보기 강성도는 미처리한 CNT보다 높은 결과를 얻었으며, 이는 향상된 계면접착력의 증가로 인한 응력전달 효과가 증대하기 때문이다. 아세톤 분산용매를 이용한 황산 처리된 CNT는 기계적 물성과 전기적 물성적인 관점에서 나노복합재료 제조의 최적조건을 얻었다.

산 처리로 인한 CNT나노복합재료의 전기 접촉 저항은 미처리된 CNT나노복합재료보다 감지중에 다소 더 많은 노이즈를 나타내었다. 탄소섬유와 CNT-에폭시 시간의 계면전단강도는 순수 에폭시와 탄소섬유간의 계면전단강도보다 낮은 값을 얻었다. 이는 CNT 첨가로 인한 높아진 점도로 인해 젖음성이 감소했기 때문일 것이다. 열역학적 계면 접촉일은 겉보기 강성도가 감소하는 동안에 증가 되는 경향을 보여 주었다. CNT-에폭시 나노복합재료의 산 처리가, 특수한 용도를 위해 요구되는 전기적, 기계적 물성을 상호 조정해 주는 기능을 할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. D. Qian, E. C. Dickey, R. Andrews, and T. Rantell, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2868 (2000).
2. J. Sandlera, M. S. P. Shaffera, T. Prasseb, W. Bauhoferb, K. Schultea, and A. H. Windle, *Polymer*, **40**, 5967 (1999).
3. C. L. Xu, B. Q. Wei, R. Z. Ma, J. Liang, X. K. Ma, and D. H. Wu, *Carbon*, **37**, 855 (1999).
4. S. C. Chowdhury and T. Okabe, *Comp. Part. A*, **38**, 747 (2007).
5. D. D. L. Chung, *Carbon*, **39**, 1119 (2001).
6. J. Chen, A. M. Rao, S. Lyuksyutov, M. E. Itkis, M. A. Hamon, H. Hu, R. W. Cohn, P. C. Eklund, D. T. Colbert, R. E. Smalley, and R. C. Haddon, *J. Phys. Chem. B*, **105**, 2525 (2001).
7. Z. Wei, C. Song, and P. E. Pehrsson, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 18 (2002).
8. J. Zhu, J. D. Kim, H. Peng, and J. L. Margrave, *Nano. Lett.*, **3**, 1107 (2003).
9. G. Zhang, S. Sun, D. Yang, J. P. Dodelet, and E. Sacher, *Carbon*, **46**, 196 (2008).
10. M. A. Hamom, H. Hui, P. Bhowmik, S. Nitogi, B. Zhao, H. M. E. Itkis, and R. O. Haddon, *Chem. Phys. Lett.*, **347**, 8 (2001).
11. H. Nishikiori, N. Tanaka, T. Tanigaki, M. Endo, and T. Fujii, *J. Photochem. Photobiol. A*, **193**, 161 (2008).
12. P. M. Ajayan, L. S. Schadler, S. C. Giannaris, and A. Rubio, *Adv. Mater.*, **12**, 750-753 (2000).
13. J. M. Park, D. S. Kim, S. J. Kim, P. G. Kim, D. J. Yoon, and K. L. DeVries, *Comp. Part B*, **38**, 847 (2007).
14. J. M. Park, S. I. Lee, and K. L. DeVries, *Comp. Part B*, **13**, 612 (2006).
15. J. M. Park, D. S. Kim, and S. R. Kim, *Compos. Sci. Technol.*, **64**, 847 (2004).