

탄소나노튜브 표면 관능기가 탄소나노튜브/고분자 복합재료의 기계적 및 열적 특성에 미치는 영향

함은광*** · 최웅기* · 김영근*** · 서민강*[†]

*한국탄소융합기술원, **전주대학교 탄소융합공학과, *** (주)원앤원
(2015년 5월 29일 접수, 2015년 7월 2일 수정, 2015년 7월 22일 채택)

Influence of Functional Groups on the Surface of Carbon Nanotube on Mechanical and Thermal Properties of Carbon Nanotube/Polymer Composites

Eun-Kwang Ham***, Woong-Ki Choi*, Young-Keun Kim***, and Min-Kang Seo*[†]

*Korea Institute of Carbon Convergence Technology, Jeonju 561-844, Korea

**Department of Carbon Fusion Engineering, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

***Win&Win Archery, Anseong 465-931, Korea

(Received May 29, 2015; Revised July 2, 2015; Accepted July 22, 2015)

초록: 본 연구에서는 탄소나노튜브 관능기의 형태가 탄소나노튜브/고분자 복합재료의 기계적 및 열적 특성에 미치는 영향에 관하여 알아보았다. 탄소나노튜브의 관능기를 정량적으로 분석하기 위해 X-선 광전자 분광법을 사용하였다. 복합재료는 에폭시 수지와 비닐 에스터 수지에 산처리된 탄소나노튜브를 0.7 wt%를 첨가하여 제작하였다. 실험 결과, 탄소나노튜브/에폭시 복합재료는 8 M 질산으로 처리된 탄소나노튜브를 첨가하였을 때 가장 높은 기계적 특성을 나타내었으며, 탄소나노튜브/비닐 에스터 복합재료는 황산/질산 혼합액으로 처리된 탄소나노튜브를 첨가하였을 때 기계적 특성이 향상됨을 알 수 있었다. 열전도도는 에폭시와 비닐 에스터에 8 M 질산으로 처리된 탄소나노튜브가 첨가되었을 때 향상되었다. 이는 탄소나노튜브에 카보닐기(C=O)의 도입으로 탄소나노튜브/에폭시 복합재료의 계면접착력이 개선되었으며, 카복시기(O-C=O)의 증가는 탄소나노튜브/비닐 에스터 복합재료의 기계적 물성 향상에 기여하였다. 또한 탄소나노튜브/에폭시 복합재료와 탄소나노튜브/비닐 에스터 복합재료의 열전도도는 탄소나노튜브의 표면구조와 길이에 영향을 받는다고 판단된다.

Abstract: The influence of carbon nanotube (CNT) functional groups on mechanical and thermal properties of CNT/polymer composites was investigated. The functional groups of the CNT were quantitatively analyzed using X-ray photoelectron spectroscopy. The composites were prepared by adding the 0.7 wt% acid-treated CNT in the epoxy resins and vinyl ester resins, respectively. As a result, the CNT/epoxy composites showed the highest tensile and flexural properties upon adding the 8 M HNO₃-treated CNT. Tensile and thermal properties of the CNT/vinyl ester composites were improved by adding H₂SO₄/HNO₃-treated CNT. Thermal conductivities of CNT/epoxy composites and CNT/vinyl ester composites were improved in 8 M HNO₃-treated CNT. The introduction of carbonyl group (C=O) on CNT led to improvement of interfacial bonding in CNT/epoxy composites. The increase in the content of carboxyl group (O-C=O) on CNT contributed to increase in mechanical properties of CNT/vinyl ester composites. Also, the thermal conductivity of CNT/epoxy composites and CNT/vinyl ester composites were probably influenced by the structure and length of the CNT.

Keywords: carbon nanotubes, functional groups, mechanical properties, thermal properties, CNT/polymer composites.

서 론

최근 산업의 발달과 에너지 소비량의 증가로 에너지 고갈 문제와 환경문제가 대두됨에 따라 에너지 절감과 친환경에

대한 관심이 높아지면서 소재 경량화에 이목이 집중되고 있다. 이에 따라서 자동차, 우주항공, 조선 등의 업계에서는 관련 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 또한 골프채, 테니스 라켓, 자전거 프레임 등의 스포츠 용품 · 레저산업의 시장규모가 확장되고 경량소재에 대한 소비자의 요구가 늘어나면서 경량소재의 활용도가 높아지고 있다.¹⁻⁴

이와 같이 다양한 산업분야에서 소재 경량화를 달성하기

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: seomk721@kctech.re.kr

©2015 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

위해 알루미늄, 마그네슘, 티타늄 등의 비강도가 높은 경량금속을 이용한 합금이 주로 사용되었으나, 가격이 비싸고 성형이 어렵다는 문제가 있어 가볍고 산업 활용도가 다양한 에폭시 수지나 불포화 폴리에스테르계 수지 등의 고분자 소재로 대체되어 사용되고 있는 추세이다. 순수 고분자 소재는 금속에 비해 기계적 물성과 내열성이 못 미치기 때문에 이를 보완하기 위해 고분자에 세라믹, 실리카, 탄소소재 등과 같은 강화재를 첨가한 고분자 복합재료를 제작하여 사용하고 있다.⁴⁻⁷

탄소소재는 금속보다 가볍고 기계적, 화학적, 전기적 특성이 우수하여 기술적 한계를 뛰어넘는 21세기 신소재로 급부상하고 있으며, 특히 고분자 복합재료의 강화재로 널리 사용되고 있다. 강화재로 사용되는 탄소소재는 탄소섬유, 카본블랙, 탄소나노튜브 등이 일반적이며, 그 중에서 전기적, 화학적, 기계적 특성이 뛰어난 탄소나노튜브가 다양한 산업분야에서 활용되고 있다.

탄소나노튜브는 sp^2 결합의 육각형 벌집무늬를 이루는 흑연격자가 원통 모양으로 말린 구조를 이루고 있으며 말린 구조에 따라 반도체 성질을 가지고 있는 zig-zag형과 도체성질을 가지고 있는 armchair형의 두 가지 형태로 구분된다. 또한 말려있는 흑연격자 벽의 개수에 따라서 단일벽 탄소나노튜브, 이중벽 탄소나노튜브, 다중벽 탄소나노튜브로 분류된다. 이러한 탄소나노튜브의 특이한 구조 때문에 고분자 복합재료의 강화재로 사용되었을 때 높은 기계적 강도, 열전도도, 전기전도도 등과 같은 특성을 향상시켜 다양한 산업분야에 적용되어 사용되고 있다.^{1,2,4}

탄소나노튜브가 고분자 복합재료에서 강화재로서의 역할을 최대한 발휘하기 위해서는 고분자 매트릭스 내에서 분산과 최적화된 계면특성이 매우 중요하다. 하지만, 탄소나노튜브의 외벽은 불활성 C-H 결합에 의해 소수성을 띠고 있으며 반데르발스 힘 때문에 응집하려는 경향이 있어 수지 내에서 분산이 어렵고 탄소나노튜브와 고분자 수지 사이의 낮은 결합력이 하중전달의 효율성에 영향을 미친다.⁵⁻⁷ 이러한 문제를 해

결하기 위해 기계적 분산방법으로 3축-롤-밀(three-roll-mill), 초음파 분산, 플라즈마, 오존처리가 활용되고 화학적 개질방법으로는 계면활성제, 산/염기 처리 등이 일반적으로 사용된다.^{2,8-12} 탄소나노튜브 산처리에는 탄소나노튜브 표면에 카복시기, 하이드록시기와 같은 산소 관능기를 도입하여 계면결합력을 향상시키며 분산을 촉진하고 극성매체에 대한 용해성을 증가시켜 복합재료의 물성을 결정하는 기지와 보강재의 계면결합력을 향상시킨다.^{5,8,10}

따라서 본 연구에서는 탄소나노튜브를 산처리하여 탄소나노튜브와 고분자 수지 사이의 계면결합력 향상에 기인하는 산소 관능기의 형태를 정량적으로 측정하였고 탄소나노튜브의 산처리 조건에 따른 관능기 형태가 탄소나노튜브/고분자 복합재료의 물성에 미치는 영향을 인장강도, 굴곡강도, 열전도도를 통해서 고찰하였다.

실 험

재료. 본 연구에 사용된 탄소나노튜브는 catalytic carbon vapour deposition(CCVD) 공법으로 합성된 다중벽 탄소나노튜브(TMC100-10, Nano Solution Co., Korea)로 순도 90% 이상이고 길이는 10~20 μm 이며 직경은 10 nm이다.

복합재료의 기지로 에폭시 수지(DGEBA, diglycidyl ether of bisphenol A, YD-128, Kukdo Chemical Co., Korea, E.E.W=186.8 g/eq)와 비닐 에스테르 수지는 비닐 에스테르계 비닐 에스테르(RF-1001MV, CCP Composites, Korea)를 사용하였으며, 에폭시와 비닐 에스테르의 구조식을 Figure 1에 나타내었다. 에폭시 경화제는 아민계 액상경화제인 KFH-150(Kukdo Chemical Co., Korea)를 사용하였으며, 비닐 에스테르 경화제는 methyl ethyl ketone peroxide(MEKPO)를 사용하였다.

탄소나노튜브 산처리. 탄소나노튜브의 산처리는 8 M 질산, 12 M 질산, 황산/질산(v/v, 3/1)을 이용하여 각각의 수용액에 탄소나노튜브를 첨가하고 교반기를 이용하여 교반속도 200 rpm

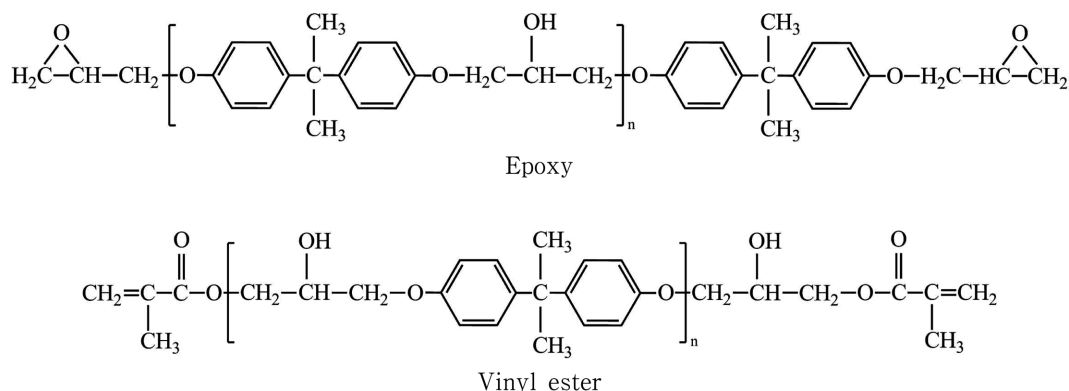


Figure 1. Chemical structures of epoxy and vinyl ester.

으로 10시간 동안 교반한 후 PTFE 멤브레인 필터에 여과하여 증류수로 시료의 pH가 중성이 될 때까지 수세한 다음 진공오븐 90 °C에서 12시간 동안 건조하였다.

표면특성. 산처리된 탄소나노튜브의 관능기 생성여부 확인을 위해 적외선 분광법(FTIR, Fourier transform infrared spectroscopy, Nicolet is10, USA)의 KBr 방법으로 4000~800 cm^{-1} 파장범위에서 분석하였고, 산처리된 탄소나노튜브 표면에 생성된 관능기의 정량분석과 원소함량을 확인하기 위해 X-선 광전자분광법(XPS, X-ray photoelectron spectroscopy, K-Alpha, Thermo, USA)을 사용하였다. 표면처리의 조건에 따른 탄소나노튜브의 표면변화를 관찰하기 위하여 전계 방출 주사전자현미경(FE-SEM, field emission scanning electron microscopy, S-4800, Hitachi, Japan)을 사용하였다.

시편제조. 탄소나노튜브/에폭시 복합재료는 에폭시 수지에 산처리 농도에 따라 처리된 탄소나노튜브 0.7 wt%와 액상경화제 KFH-150을 당량비 1:1로 혼합하였고, 성형몰드에 채워 80 °C에서 30분 동안 반경화시킨 후 가열 압착기(hot-press)를 이용하여 150 °C에서 2시간 동안 경화하였다. 탄소나노튜브/비닐 에스터 복합재료는 비닐 에스터 수지에 에폭시 복합재료에 첨가되었던 동일 양의 탄소나노튜브와 경화제 methyl ethyl ketone peroxide(MEKPO)를 비닐 에스터 중량의 1%를 첨가하여 혼합하였다. 고분자 수지 내에 탄소나노튜브의 균일한 분산을 위하여 3축-롤-밀에서 5회 분산하였다. 얻어진 혼합물은 성형몰드에 채워 150 °C에서 2시간 동안 오븐에서 경화하였다. 탄소나노튜브/고분자 복합재료의 시편명칭은 Table 1에 표기하였다.

기계적 물성 및 열적 특성. 탄소나노튜브/고분자 복합재료

의 기계적 물성은 인장강도와 굴곡강도를 통하여 알아보았다. 굴곡강도는 만능시험기(universal testing machine, LR5K, Lloyd, England)를 사용하여 ASTM D790 방법에 따라 측정하였으며, span-to-depth의 비는 16:1, 크로스헤드 속도는 1 mm/min로 실시하였다. 인장강도는 ASTM D638에 준하여 아령 형태의 시편을 제작하였고 만능재료 시험기(universal testing machine, 3380 series, Instron, England)를 사용하여 크로스헤드 속도는 1 mm/min로 측정하였다.

탄소나노튜브/고분자 복합재료의 열전도도를 알아보기 위하여 열전도율 측정기(ThermoCom Tester M100, Metrotech Co. Ltd., Korea)를 사용하여 측정하였다.

결과 및 토론

탄소나노튜브의 표면특성. 관능기 형태분석: 탄소나노튜브의 산처리에 따른 관능기 형태를 알아 보기 위해 적외선 분광법을 통해 관찰한 결과를 Figure 2에 나타내었다. 표면처리 후에 피크는 3400, 1720, 1150 cm^{-1} 에서 각각 하이드록시기(O-H), 카복시기에스터(C=O), 하이드록시기에터(C-O)의 특성피크가 나타났으며 처리하지 않은 탄소나노튜브에 비해 표면처리된 탄소나노튜브가 전체적으로 피크 강도가 증가하였다.^{10,12,13,14} 표면처리에 사용된 산처리 농도가 짙어질수록 특성피크가 뚜렷하게 나타났음을 확인하였다. 이러한 결과는 산처리 농도의 증가가 탄소나노튜브의 표면에 산소관능기를 형성하는데 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

탄소나노튜브 표면형태: 산처리 전후의 탄소나노튜브 표면 형태를 측정한 결과를 Figure 3에 나타내었다. 미처리 탄소나노튜브의 경우 반데르발스 힘에 의한 강한 결합력으로 응집되어있는 것을 관찰하였으며 그에 비해 산처리된 탄소나노튜브

Table 1. Descriptions of the Samples

Samples	Descriptions
EP	Pure epoxy
VE	Pure vinyl ester
EP/ARC	Epoxy filled with as-received carbon nanotubes
EP/NC8	Epoxy filled with 8 M HNO ₃ -treated carbon nanotubes
EP/NC12	Epoxy filled with 12 M HNO ₃ -treated carbon nanotubes
EP/SNC	Epoxy filled with H ₂ SO ₄ /HNO ₃ -treated carbon nanotubes
VE/ARC	Vinyl ester filled with as-received carbon nanotubes
VE/NC8	Vinyl ester filled with 8 M HNO ₃ -treated carbon nanotubes
VE/NC12	Vinyl ester filled with 12 M HNO ₃ -treated carbon nanotubes
VE/SNC	Vinyl ester filled with H ₂ SO ₄ /HNO ₃ -treated carbon nanotubes

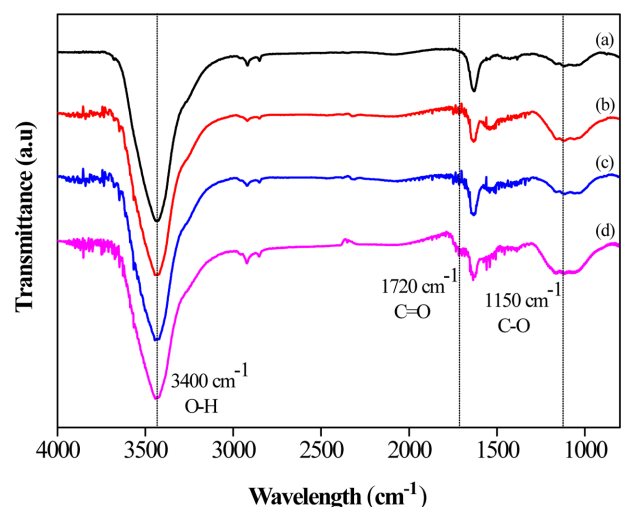


Figure 2. FTIR spectra of acid-treated carbon nanotubes: (a) as-received; (b) 8 M HNO₃; (c) 12 M HNO₃; (d) H₂SO₄/HNO₃ (3/1).

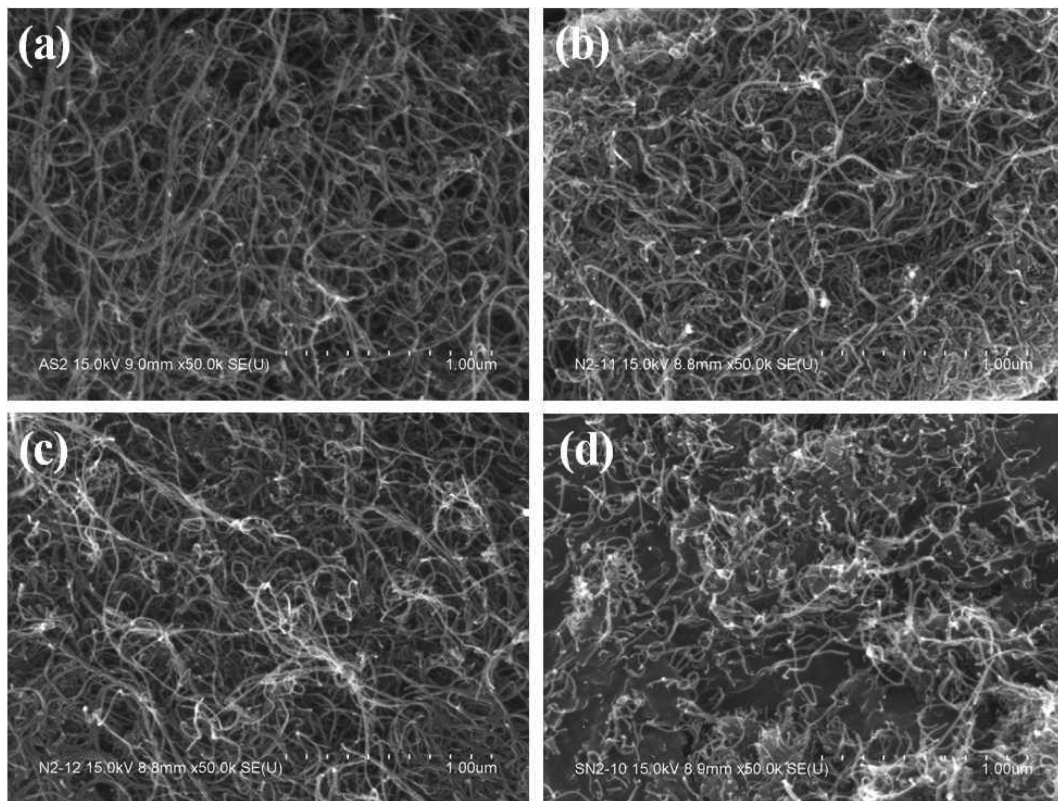


Figure 3. SEM images of acid-treated carbon nanotubes: (a) as-received; (b) 8 M HNO₃; (c) 12 M HNO₃; (d) H₂SO₄/HNO₃ (3/1).

브는 표면이 거칠어지고 길이가 짧아진 것이 관찰되었다. 산처리 농도가 짙어질수록 탄소나노튜브 표면의 거칠기가 거칠어짐을 확인할 수 있었으며, 질산으로 처리했을 때보다 황산/질산 혼합액으로 처리하였을 때 탄소나노튜브 표면에 더 많은 손상을 주어 길이가 짧아진 것을 확인하였다. 이러한 결과는 강산으로 처리하였을 때 탄소나노튜브의 표면에 산소관능기가 도입된 결과라고 판단된다.

관능기 정량적 분석: 산처리 농도에 따라 처리된 탄소나노튜브의 표면성분, 화학적 결합상태 및 에너지 준위를 알아보기 위해 XPS 분석을 실시하였다. 산처리에 따른 탄소나노튜브 표면의 C_{1s}와 O_{1s}의 결합형태 변화를 관찰하기 위해 고해상도 피크를 Figure 4에 나타내었고 C_{1s}와 O_{1s}의 원소함량과 결합형태를 정량적으로 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 관찰 결과 C_{1s}의 결합형태는 sp²(BE=284.7 eV), sp³ 또는 결합(BE=285.2 eV), C-OH(BE=286.2 eV), C=O(BE=287.5 eV), O-C=O(BE=288.9 eV), π-π 결합(BE=291.0 eV)을 확인하였고, O_{1s}의 결합형태는 C=O(BE=531.5 eV), C-OH(BE=532.7 eV), O-C=O(BE=534.0 eV)가 관찰되었으며,^{2,12,14,15-22} 미처리 탄소나노튜브에 비해 산처리된 탄소나노튜브에서 결합에너지 증가를 확인하였다. 이러한 결과는 탄소나노튜브의 산처리 농도가 증가할수록 탄소나노튜브 표면의 그래파이트

(graphite) 구조의 일부가 손상되어 산소관능기와 결합함으로써 하이드록시기(C-OH), 카보닐기(C=O), 카복시기(O-C=O)의 형태로 탄소나노튜브 표면이 산성화 되었다고 판단된다.

기계적 특성. 탄소나노튜브/고분자 복합재료에서 기계적 특성 및 내구성은 기지와 필러간의 계면 결합력에 큰 영향을 받으며 우수한 기계적 특성 및 내구성을 실현하기 위해서는 이들 구성요소들 사이의 물리적 계면결합력이 필요하다.^{3,23-26}

탄소나노튜브 산처리 농도에 따라 변화되는 관능기의 함량이 탄소나노튜브/고분자 복합재료의 기계적 물성에 미치는 영향을 인장강도와 굴곡강도를 통해서 확인하였고 이에 대한 상관관계 그래프를 Figure 5와 Figure 6에 각각 나타내었다. Figure 5(a)와 Figure 6(a)에서 확인할 수 있듯이 8 M과 12 M 질산으로 표면처리된 탄소나노튜브를 첨가한 에폭시 복합재료는 전반적으로 순수 에폭시에 비해 물성이 증가한 것으로 확인하였다. 8 M 질산으로 처리된 탄소나노튜브를 첨가한 에폭시 복합재료의 인장강도는 60 MPa로 순수 에폭시에 비해 8.7% 증가하였으며, 굴곡강도는 112 MPa를 나타내면서 10.6% 증가하였다. 8 M 질산으로 처리된 탄소나노튜브의 카보닐기(C=O)의 함량이 미처리 탄소나노튜브의 함량 4.6%에서 7.0%로 가장 크게 증가된 결과로 보았을 때 탄소나노튜브의 C=O의 증가가 탄소나노튜브 에폭시 복합재료의 계면결합력의 향

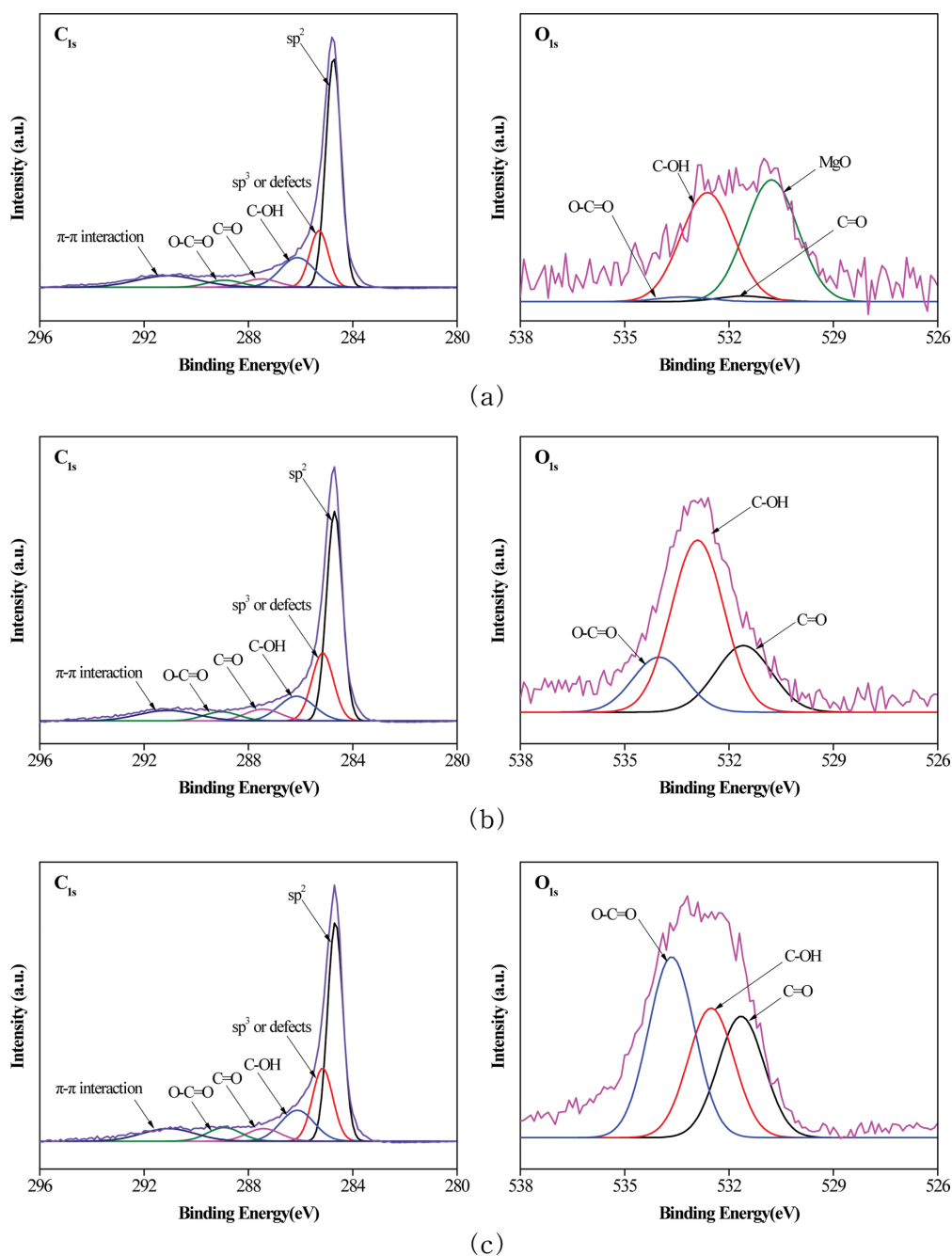


Figure 4. XPS spectra of C_{1s} peak and O_{1s} peak of the carbon nanotubes: (a) as-received; (b) 8 M HNO_3 ; (c) H_2SO_4/HNO_3 (3/1).

Table 2. Relative Percentages of the Components of Carbon Atoms in Acid-treated Carbon Nanotube

Samples	Element Composition					C_{1s} (%)			O_{1s} (%)		
	C(%)	O(%)	O/C	sp^2	sp^3	C-OH	C=O	O-C=O	C-OH	C=O	O-C=O
As-received	98.96	1.04	0.0105	57.9	17.2	16.4	4.6	3.9	91	5	4
HNO_3 8 M	97.77	2.23	0.0228	52.4	22.1	13.9	7.0	4.6	58	25	17
HNO_3 12 M	98.77	1.23	0.0125	53.2	23.4	12.7	6.5	4.2	46	24	30
H_2SO_4/HNO_3 (3/1)	93.87	6.13	0.0653	49.9	22.0	15.2	6.2	6.7	30	28	42

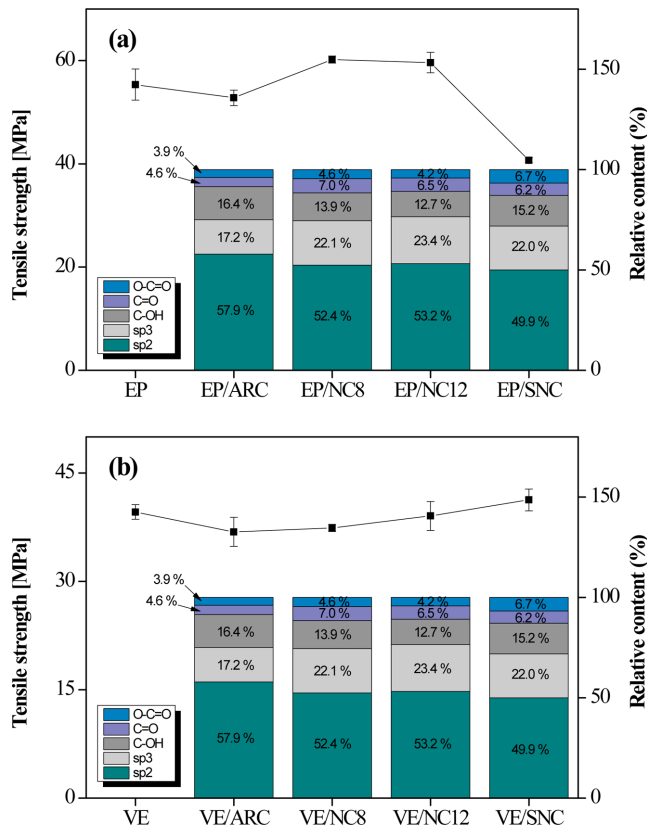


Figure 5. Tensile strength of the composites: (a) carbon nanotubes/epoxy composites; (b) carbon nanotubes/vinyl ester composites.

상에 기여한 것으로 판단된다. 하지만, 미처리 탄소나노튜브를 첨가한 에폭시 복합재료와 황산/질산 처리된 탄소나노튜브를 첨가한 에폭시 복합재료에서 순수 에폭시보다 기계적 물성이 감소한 것을 확인하였다. 이는 미처리된 탄소나노튜브를 첨가한 에폭시 복합재료의 경우 탄소나노튜브가 기능화되지 않았고 응집으로 인해 복합재 내에 분산이 잘되지 않은 결과라고 생각되며, 황산/질산 혼합액으로 처리된 탄소나노튜브가 첨가된 에폭시 복합재료의 물성 감소는 탄소나노튜브에 과도한 산처리로 인해 기지와 보강재 사이에 계면결합력을 약화시킨 것으로 판단된다. 탄소나노튜브/비닐 에스터 복합재료의 인장강도는 Figure 5(b)에서 확인할 수 있듯이 미처리된 탄소나노튜브를 첨가한 비닐 에스터 복합재료와 질산으로 처리된 탄소나노튜브를 첨가한 비닐 에스터 복합재료에서 낮은 물성이 측정된 반면 황산/질산으로 처리된 탄소나노튜브를 첨가한 비닐 에스터 복합재료의 인장강도는 41 MPa로 순수 비닐 에스터에 비해 4% 증가를 확인하였다. 또한 굴곡강도는 152 MPa로 순수 비닐 에스터에 비해 39.5% 증가된 것을 Figure 6(b)에서 확인하였다. 이는 황산/질산 혼합액으로 처리된 탄소나노튜브 표면의 카복시기(O-C=O) 함량이 미처리 탄소나노튜브의 함량인 3.9% 대비하여 황산/질산으로

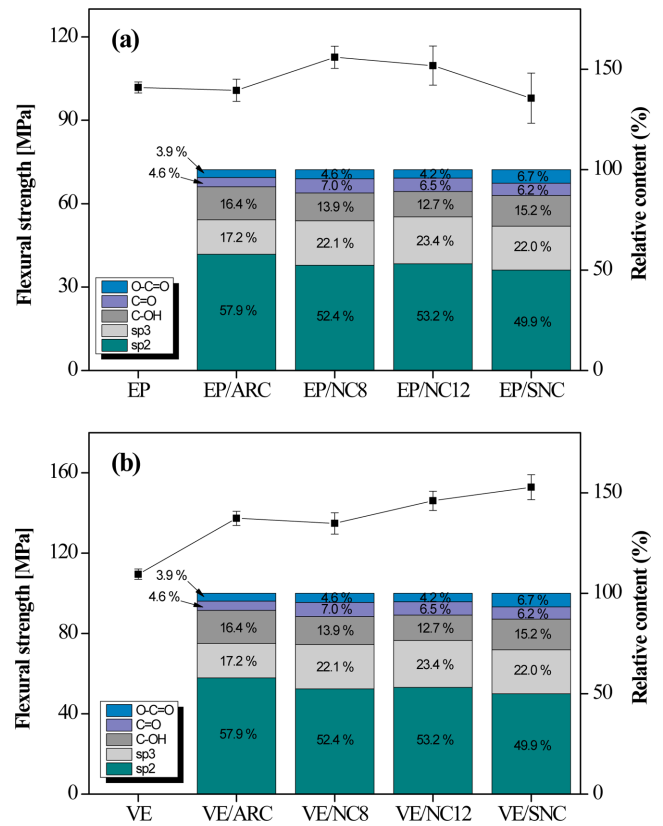


Figure 6. Flexural strength of the composites: (a) carbon nanotubes/epoxy composites; (b) carbon nanotubes/vinyl ester composites.

처리된 탄소나노튜브가 6.7%로 가장 크게 증가된 결과로 O-C=O의 증가가 탄소나노튜브/비닐 에스터 복합재료의 계면결합력에 영향을 미친 것으로 판단된다.

열적 특성. 탄소나노튜브/고분자 복합재료의 열적 특성은 탄소나노튜브의 함량, 직경비, 고분자 매트릭스 내에 분산, 계면결합력 등에 영향을 받는다.^{27,28} 산처리 농도에 따른 탄소나노튜브/고분자 복합재료의 열적 특성을 열전도도를 통해 고찰하였고 이에 대한 결과는 Figure 7에 나타내었다. 탄소나노튜브/에폭시 복합재료와 탄소나노튜브/비닐 에스터 복합재료에서 모두 8 M 질산에서 처리된 탄소나노튜브를 첨가하였을 때 높은 열전도도 값이 측정되었고 그에 반해 질산 12 M, 황산/질산 혼합액으로 처리하였을 때 열전도도가 감소된 것을 관찰하였다. 이는 8 M 질산으로 표면처리하였을 때 탄소나노튜브 표면과 길이에 손상을 많이 주지 않으면서 극성관능기 도입에 따른 분산성 향상으로 복합재료의 열적 특성을 결정하는 요소가 부합된 결과라고 판단되며, 강산에 의한 산처리는 탄소나노튜브의 표면 손상과 길이가 짧아지게 되어 직경비가 감소하게 된 결과로 열전도 특성이 저하된 것이라고 판단된다.

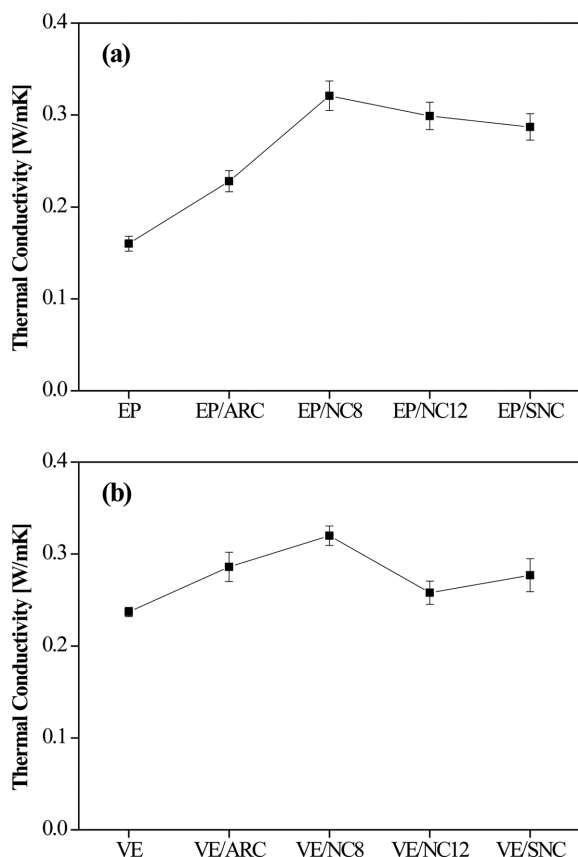


Figure 7. Thermal conductivity of the composites: (a) carbon nanotubes/epoxy composites; (b) carbon nanotubes/vinyl ester composites.

결론

본 연구에서는 탄소나노튜브의 산처리 조건에 따른 관능기의 변화가 탄소나노튜브/고분자 복합재료의 기계적 및 열적 특성에 미치는 영향에 대해서 알아보았다. 그 결과로서, 탄소나노튜브의 산처리 조건에 따른 산소관능기의 화학적 조성의 변화를 XPS를 통한 정량적으로 분석하여 질산 8 M에서 카보닐기($C=O$)의 증가와 황산/질산 혼합액에서 카복시기($O-C=O$)의 증가를 확인하였다. 8 M 질산으로 처리된 탄소나노튜브가 첨가된 에폭시 복합재료의 기계적 물성 측정결과 인장강도는 미처리 시편 대비 8.7%, 굴곡강도는 10.6% 증가하였다. 또한 황산/질산 혼합액으로 처리된 탄소나노튜브가 첨가된 비닐 에스터 복합재료의 인장강도는 4%, 굴곡강도는 39.5% 증가하였다. 열전도도는 탄소나노튜브/에폭시 복합재료와 탄소나노튜브/비닐 에스터 복합재료에서 모두 8 M 질산으로 처리된 탄소나노튜브를 첨가하였을 때 증가하였음을 확인하였다.

따라서 탄소나노튜브 표면에 카보닐기($C=O$)의 증가는 탄소나노튜브/에폭시 복합재료의 기계적 물성 향상에 영향을 주

었고, 카복시기($O-C=O$)의 증가는 탄소나노튜브와 비닐 에스터 복합재료의 기계적 물성 향상에 기인한 것으로 판단되며, 탄소나노튜브와 고분자 기지와의 계면결합력을 향상시키기 위해서 적절한 관능기를 도입하는 탄소나노튜브의 표면개질이 필요하다. 또한 복합재료의 열전도도는 탄소나노튜브의 극성요소의 도입과 길이에 영향을 받는다고 판단되며, 탄소나노튜브에 적절한 산처리가 손상을 적게 주면서 분산성을 향상시켜 탄소나노튜브/고분자 복합재료의 열전도도의 향상을 도모할 것으로 판단된다.

감사의 글: 본 연구는 광역경제권거점기관지원 탄소밸리구축 사업(수직 인발 공정 이용과 나노 카본이 함유된 탄소섬유 기반 Compound 화살 개발: R0002640)의 지원에 의하여 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. C. R. Choe, *Compos. Res.*, **26**, 147 (2013).
2. J. A. Kim, D. G. Seong, T. J. Kang, and J. R. Youn, *Carbon*, **44**, 1898 (2006).
3. M. K. Seo and S. J. Park, *Korean Chem. Eng. Res.*, **43**, 401 (2006).
4. J. J. Vilatela and D. Eder, *Chem. Sus. Chem.*, **5**, 2 (2012).
5. M. Theodore, M. Hosur, J. Thomas, and S. Jeelani, *Mater. Sci. Eng. A*, **528**, 1192 (2011).
6. M. Nadler, J. Werner, T. Mahrholz, U. Riedel, and W. Hufenbach, *Compos. Part A*, **40**, 932 (2009).
7. J. W. Kim, H. G. Im, and J. H. Kim, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 266 (2011).
8. K. A. Wepasnick, B. A. Smith, K. E. Schrote, H. K. Wilson, S. R. Diegelmann, and D. H. Fairbrother, *Carbon*, **49**, 24 (2011).
9. Y. R. Shin, I. Y. Jeon, and J. B. Baek, *Carbon*, **50**, 1465 (2012).
10. I. D. Rosca, F. Watari, M. Uo, and T. Akasaka, *Carbon*, **43**, 3124 (2005).
11. Y. Shirazi, M. A. Tofighy, T. Mohammadi, and A. Pak, *Appl. Surf. Sci.*, **257**, 7359 (2011).
12. B. Zhao, L. Zhang, X. Wang, and J. Yang, *Carbon*, **50**, 2710 (2012).
13. A. Nasiri, M. S. Niasar, A. M. Rashidi, and R. Khodafarin, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **55**, 1529 (2012).
14. F. Aviles, J. V. C. Rodriguez, L. M. Tah, A. M. Pat, and R. V. Coronado, *Carbon*, **47**, 2970 (2009).
15. X. Ling, Y. Wei, L. Zou, and S. Xu, *Appl. Surf. Sci.*, **276**, 159 (2013).
16. C. Pirlot, I. Willems, A. Fonseca, J. B. Nagy, and J. Delhalle, *Adv. Eng. Mater.*, **4**, 109 (2002).
17. W. H. Lee, S. J. Kim, W. J. Lee, J. G. Lee, R. C. Haddon, and P. J. Reucroft, *Appl. Surf. Sci.*, **181**, 121 (2001).
18. V. Datsyuk, M. Kalyva, K. Papagelis, J. Parthenios, D. Tasis, A. Siokou, I. Kallitsis, and C. Galiotis, *Carbon*, **46**, 833 (2008).

19. B. Vigolo, C. Herold, J. F. Mareche, J. Ghanbaja, M. Gulas, F. L. Normand, R. Almairac, L. Alvarez, and J. L. Bantignies, *Carbon*, **48**, 949 (2010).
20. H. P. Boehm, *Carbon*, **40**, 145 (2002).
21. A. F. Szczypka, E. Dlugon, A. W. Birczynska, M. Nocun, and M. Blazewicz, *J. Mol. Struct.*, **1040**, 238 (2013).
22. A. P. Terzyk, *Colloid Surf. A*, **177**, 23 (2001).
23. Y. Geng, M. Y. Liu, J. Li, X. M. Shi, and J. K. Kim, *Compos. Part A*, **39**, 1876 (2008).
24. T. Tsuda, T. Ogasawara, S. Y. Moon, K. Nakamoto, N. Takeda, Y. Shimamura, and Y. Inoue, *Compos. Part A*, **65**, 1 (2014).
25. S. H. Liao, M. C. Hsiao, C. Y. Yen, C. C. M. Ma, S. J. Lee, A. Su, M. C. Tsai, M. Y. Yen, and P. L. Liu, *J. Power Sources*, **195**, 7808 (2010).
26. E. T. Thostenson, S. Ziaee, and T. W. Chou, *Compos. Sci. Technol.*, **69**, 801 (2009).
27. M. R. Zakaria, H. M. Akil, M. H. A. Kudus, and S. S. M. Saleh, *Compos. Part A*, **66**, 109 (2014).
28. P. C. Ma, N. A. Siddiqui, G. Marom, and J. K. Kim, *Compos. Part A*, **41**, 1345 (2010).