

탄소나노튜브 첨가 고분자 나노복합재료의 정량적 분산도 평가

이상복 · 정보화 · 이진우 · 이원오 · 엄문광[†]

한국기계연구원 부설 재료연구소 복합재료연구그룹

(2010년 9월 1일 접수, 2010년 10월 18일 수정, 2010년 10월 19일 채택)

Quantitative Dispersion Evaluation of Carbon Nanotubes Reinforced Polymer Nano-composites

Sang-Bok Lee, Bo-Hwa Jeong, Jin-Woo Yi, Wonoh Lee, and Moon-Kwang Um[†]

Composite Materials Research Group,

Korea Institute of Materials Science, Changwon 641–831, Korea

(Received September 1, 2010; Revised October 18, 2010; Accepted October 19, 2010)

초록: 고분자 나노복합재의 성능을 극대화 하기 위해서는 나노입자 분산도의 향상과 더불어 분산상태가 물성 변화에 미치는 영향을 정확히 이해하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 탄소나노튜브 첨가 고분자 복합재의 분산상태를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 자외선-가시광선 분광광도법을 이용하여 탄소나노튜브의 분산상태에 따른 투과도를 측정하였으며, 동일 농도에서 분산상태가 향상됨에 따라 투과도가 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 기존의 Beer-Lambert 투과도 법칙에 분산상태의 변화를 포함할 수 있는 새로운 분산도 평가인자 인 유효 농도 인자를 제시하였다. 이를 통해 탄소나노튜브의 분산상태의 변화와 함께 다양한 탄소나노튜브의 농도 및 시편 두께에 따른 투과도 결과를 분석함으로써 제시한 분산도 평가방법과 유효 농도 인자의 유효성을 확인하였다.

Abstract: In order to maximize the performance of polymer nano-composites, it is essential to understand an effect of a dispersion state on material properties as well as to achieve highly dispersed composites. In this work, a simple quantitative approach to evaluate the degree of dispersion was suggested for carbon nanotube (CNT) embedded polymer nano-composites. Through UV-visible spectroscopy analysis, the transmittance of nano-composites was measured at various dispersion states and it was found that the transmittance reduced as the dispersion state of CNT improved. Based on the results, an effective concentration factor for quantitative evaluation of dispersion state was introduced into the Beer-Lambert transmittance law. The proposed method and parameter to evaluate the degree of dispersion were verified by analyzing the transmittances at different dispersion states of CNT, concentrations of CNT and sample thicknesses.

Keywords: carbon nanotube, dispersion, transmittance, UV-visible spectroscopy, Beer-Lambert law.

서 론

최근 고분자 복합재의 물성적 한계를 극복하기 위하여 기존의 고분자 수지재료에 나노크기의 다양한 입자를 첨가함으로써 구조적/기능적 특성을 향상하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 탄소나노튜브(CNT)¹ 및 그래핀(graphene)² 등 나노크기의 탄소소재는 최근 복합재 연구에서 가장 주목받는 물질로 부각되고 있다.

특히 CNT의 경우 기존 재료에서 찾아 볼 수 없었던 뛰어난 기계적 물성, 높은 전도성을 보유하고 있지만, 분자간 힘인 반데르발스 힘에 따른 응집현상으로 인해 낮은 분산성, 재응집성, 높은 점도로 인해 균일 복합재 제조에 큰 걸림돌이 되고 있다. 이로 인해 균일 분산의 중

요성이 증가하고 있으며 또한 분산성을 제어하는 기술이 요구되고 있다. 이를 위해 탄소나노소재 표면의 기능화나, 강력한 전단력을 가지는 기계적 교반방법 등을 통해 CNT 분산성을 향상하려는 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 분산상태가 복합재 물성에 영향을 미친다고 보고되고 있다.³⁻⁶ 따라서 분산성 향상에 관한 연구와 함께 각각의 분산상태를 정의하여 분산상태에 따른 물성의 변화를 예측할 수 있는 방법의 개발은 CNT 나노복합재료 연구에 있어 중요한 부분이다.

CNT 분산도 평가에 있어 가장 널리 사용하는 방법으로 TEM 및 SEM의 전자현미경 이미지 분석이 있으며, 이들은 시각적으로 CNT 분산을 확인할 수 있다는 장점이 있다. 또한 전기전도도, 입도분포, AFM 등 다양한 방법으로 분산상태를 평가하고 있다.⁷⁻¹³ 하지만 이런 분산 평가 방법은 국부적 영역에 대한 정성적인 결과를 보여주는 한계를 지니고 있으며, CNT 분산상태에 대해 정량적인 평가방법을 제시한

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: umk1693@kims.re.kr

연구는 현재까지 매우 미흡한 실정이다. Zhou 등은¹⁴ photo micro-graphic method에 의해 두 cleavage간의 거리를 측정하여 통계 분석 방법을 통해 CNT 분산을 평가한 바 있으며, Kim 등은¹⁵ 주사열량 분석법(DSC)을 이용해 경화반응 시 발생하는 발열량 차이를 분석하여 이와 CNT 분산도의 관계를 제시한 바 있다.

본 연구에서는 응집된 CNT의 분산도가 향상될수록 투과도 값이 낮아진다는 점을 이용하여 CNT 분산상태를 평가하고, 새로운 개념의 정량적 분산상태 평가인자를 도입하고자 하였다. 고분자 복합재 내의 자외선-가시광선(UV-vis) 분광광도계를 이용해 300~800 nm 범위의 자외선 및 가시광선 영역에서 CNT 입자가 포함된 고분자 복합재료의 투과도 및 흡광도와 같은 광학적 특성을 측정하였으며, CNT의 농도, 시편의 두께, 분산횟수에 따른 분산도를 평가뿐만 아니라 Beer-Lambert 법칙을 응용하여 CNT 분산에 대한 정량적 평가 방법을 제시하고자 하였다.

실 험

재료 및 CNT-에폭시 수지 혼합물 제조. 에폭시 수지와 경화제는 국도화학의 YD128과 KBH 1089를 사용하였다. CNT는 CM95(한화나노텍)를 사용하였으며, 직경 10~15 nm, 길이 10~20 μm의 크기를 가진다. 에폭시 수지와 경화제를 10:9의 무게 비율로 혼합 후, CNT를 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 wt%를 각각 첨가하여 복합재를 제조하였다. 특히 세 가지의 다른 분산방법을 순차적으로 사용하여 동일한 CNT 첨가량에서도 분산상태에 다른 시편을 제작하였다. 분산 장비로 homomixer와 three-roll mill을 사용하였다. 1차 분산은 homomixer를 이용하여 임펠러 회전속도 3000 rpm, 혼합물 온도 25 °C의 조건하에서 10분 동안 분산 처리하였다. 후에, 좀 더 CNT가 균일하게 분산된 CNT/에폭시 수지 혼합물을 얻기 위해 강력한 분산 및 혼합장치인 three-roll mill의 gap-mode(roll 간극 조정) 및 force-mode(roll 간극 0의 조건에서 roll간의 압력 조정)를 이용해 2차, 3차 분산을 진행하였다.

Three-roll mill(EXAKT 80E, Germany)은 Figure 1과 같이 혼합 및 분산 효과를 동시에 얻을 수 있는 효과적인 분산 장비로, 2가

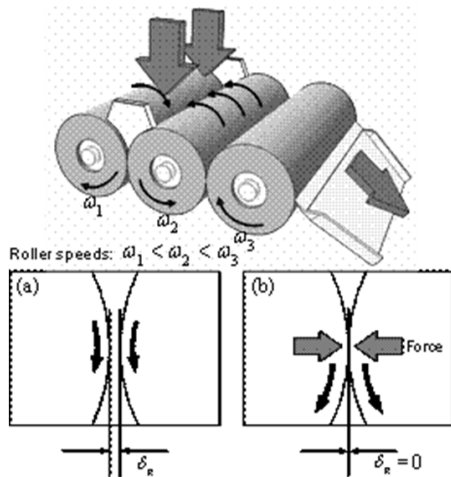


Figure 1. Schematic diagram of three roll mill and operation modes of three roll mill (a) in gap-mode; (b) in force-mode.

지 분산 mode를 가지고 있다. 2차 분산으로 사용한 gap-mode는 Figure 1(a)와 같이 롤간에 마이크로 단위의 미세 간극을 주어 혼합물을 흘려 보내는 방식이며, 3차 분산인 force-mode는 보다 강력한 분산 방법으로 Figure 1(b)와 같이 일정한 힘(4.5 N/mm)하에서 롤간의 간격을 최소화하여 혼합물을 분산하는 방식이다.

본 연구에서는 최대 분산된 CNT/에폭시 수지 혼합물을 제조하기 위해 동일한 1차, 2차 분산 과정을 거친 후 3차 분산과정인 force-mode로 최대 30사이클까지 횟수를 조절한 분산 과정을 거쳐 혼합물을 제조하였다.

분광분석 시편 제작 및 측정. 투과도 시편은 다양한 CNT 농도, 분산과정을 통해 얻어진 CNT/에폭시 혼합물을 두 개의 슬라이드 글라스 사이에 떨어뜨린 후, 간극 게이지(0.05, 0.1, 0.15 mm)를 이용하여 각각 0.05, 0.1, 0.15 mm의 일정 두께의 시편을 제작하였다. 이후, 120 °C에서 2시간 경화 과정을 거친 후, 자외선-가시광선 분광광도계(VARIAN CARY 5000, USA)를 이용해 300~800 nm 범위의 자외선 및 가시광선 영역에서 CNT 입자가 포함된 고분자 복합재료의 투과도 및 흡광도를 측정하였다. 분광광도계의 측정범위인 빔의 크기는 직경 7 mm 이상의 타원형이다.

나노입자 분산도와 투과도 관계

Beer-Lambert 법칙. 분광광도법을 분석화학에 응용함에 있어 가장 핵심적인 법칙인 Beer-Lambert 식을 이용해서 유기 및 무기 화학종의 정성 또는 정량 분석이 가능하다.

Figure 2와 같이 투과도(T)는 초기 빛의 강도인 I_0 에 대한 시료를 통과한 빛의 세기 I , 즉 $T=I/I_0$ 이며, 흡광도(A)는 시료의 농도(c), 시료층의 두께(t)에 비례하며 투과도와는 식 (1)의 관계를 가진다.¹⁶

$$A = \epsilon \cdot t \cdot c = -\log(T) \text{ or } T = e^{-\epsilon \cdot t \cdot c} \quad (1)$$

여기서, ϵ 는 몰흡광 계수, t 는 시료층의 두께, c 는 농도를 나타낸다. 또한, n 개의 화학종이 존재하는 혼합물의 경우에는 식 (2)로 표현 가능하며, 본 실험에서는 CNT-에폭시 두 종의 혼합물이므로 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$A_n = \sum_{k=1}^n \epsilon_k \cdot t \cdot c_k \quad (2)$$

$$A = \epsilon_e \cdot t \cdot c_e + \epsilon_c \cdot t \cdot c_c \quad (3)$$

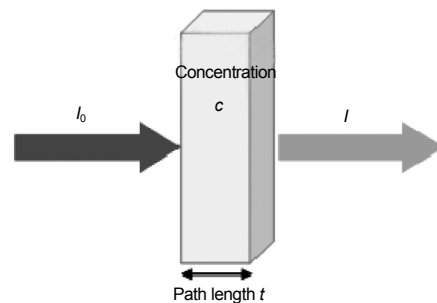


Figure 2. Schematic diagram of Beer-Lambert absorption of a beam of light.

Beer-Lambert 법칙의 응용. Beer-Lambert 법칙은 물질 고유의 특성파크가 특정 파장에서 나타난다는 것을 이용하며, 주로 용매 내에서 낮은 농도의 용질 즉, 첨가제가 완전히 용해된 용액 내에서의 첨가제의 성분과 이의 정량적인 분석에 주로 적용되었다. 그러나 CNT/에폭시 혼합물과 같이 고분자 수지 내에서 완전히 용해된 용액상태가 아닌, 단순 혼합물 상태로 CNT가 섞여 있는 경우에 기존의 Beer-Lambert 법칙을 그대로 적용하기는 어려우며 이에 대한 수정이 불가피하다. CNT가 수지 내에 혼합상태로 분산이 되면, CNT 분산상태에 따라 광원으로부터 수평으로 입사하는 빔을 투과도 투과시키지 않고 반사, 산란 및 흡수를 일으키는 CNT의 유효 단면적이 달라지게 된다. 즉 CNT의 분산도가 향상됨에 따라 흡수 및 산란을 일으키는 유효 단면적이 커져, 입사 빔의 투과도가 낮아지게 된다.

Figure 3은 CNT 첨가량에서 3가지 다른 분산방법의 순차적인 분산 과정을 통해 제조된 CNT/에폭시 복합재의 광학현미경 이미지와 함께 각각의 CNT 분산상태에 대한 모식도를 보여준다. Figure 3(a)와 같이 분산도가 낮아 응집현상이 일어난 경우에는 상대적으로 높은 투과도 값을 가진다. 그러나 Figure 3(b)-(c)와 같이 three-roll mill의 강한 전단력을 이용하여 분산도를 향상하게 되면, CNT 응집체들이 풀어지면서 유효 단면적이 커져 투과도 값을 낮추게 된다.

본 연구에서는 기존 2종 혼합물의 단순한 CNT 농도인자만 고려한 Beer-Lambert 법칙의 식 (4)를 분산상태에 따른 유효 단면적을 반영한 유효 농도 인자(β)를 도입하여 식 (5)와 같이 새로운 개념의 유효 농도(c^*)를 제시하였으며, 이를 식 (4)에 대입하여 정리하면 식 (6)과 식(7)의 흡광도와 유효 농도 인자와의 관계를 얻을 수 있다.

$$A = \epsilon_e \cdot t \cdot c_e^* + \epsilon_c \cdot t \cdot c_c^* \tag{4}$$

$$c^* = \beta \cdot c \tag{5}$$

$$A = (a + b \cdot \beta \cdot c_{cnt}) \cdot t \tag{6}$$

$$\beta = \frac{A/t - a}{b \cdot c_{cnt}} \tag{7}$$

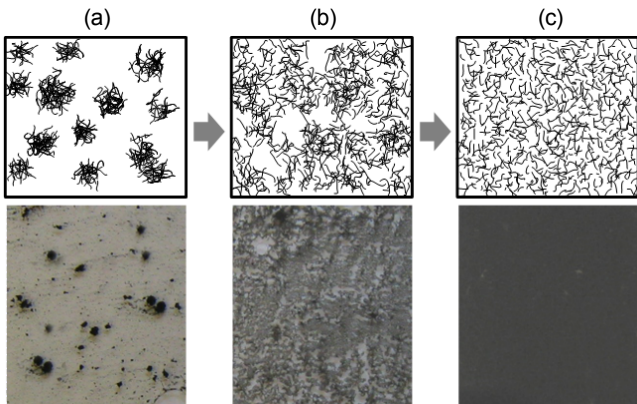


Figure 3. Schematic diagram of CNT dispersion states and optical micrographs of UV-vis specimens added 0.5 wt% CNT fabricated using (a) homomixer; (b) three-roll mill: gap mode; (c) three-roll mill: force mode.

식 (6)의 a 는 $\epsilon_e \cdot c_e^*$ 로써 에폭시 수지의 몰흡광 계수와 유효 농도의 곱으로 용매로 사용된 에폭시 수지의 유효 농도의 값은 일정하다고 가정하여 상수값을 가진다. 또한 $\epsilon_c \cdot c_c^*$ 은 CNT의 몰흡광 계수 및 CNT의 농도의 값이 일정하므로 상수 b 를 가진다. 유효 농도 인자 β 값은 CNT의 분산도에 따라 0에서 1사이의 값을 가지며, 완전 분산상태의 경우, β 값은 1이다. 즉, β 값은 완전 분산에서의 유효 단면적을 1라 고려하였을 때, 각각의 분산과정에서의 상대적인 유효 단면적으로 정의된다.

결과 및 토론

시편 두께에 따른 투과도. Figure 4는 CNT 0.1 wt%에서 homomixer 및 three-roll mill의 force-mode 사이클 횟수에 변화에 대한 투과도 결과를 보여준다. CNT를 첨가하지 않은 순수한 에폭시의 경우, 투과도가 전체의 파장영역에서 가장 높은 값을 가지며, CNT 첨가 후 분산횟수가 증가함에 따라 각각의 파장에 대해 투과도는 감소하다가 일정하므로 수렴하는 경향을 보인다. 단순히 같은 농도의 CNT/에폭시 수지 혼합물에 다양한 분산 방법을 이용해 분산도가 서로 다른 시편을 제작하였으므로 각기 다른 투과도 값을 가지게 되며, 분산도가 향상됨에 따라 CNT의 유효 농도값이 증가하여 투과도 값에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한, 유효 단면적 인자 β 를 통해 분산을 정량적으로 평가하기 위해서는 특정파장의 투과도 및 흡광도의 값의 설정이 필요하다. 본 연구에서는 480 nm 파장을 선정하여 투과도 및 흡광도 값을 이용하였다. 이는 그림에서 보듯이 400 nm 이상의 파장의 범위에서는 CNT 및 에폭시 수지 자체의 특성파크가 보이지 않고 단순히 CNT 분산상태에 의해 안정된 변화를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Figure 5는 CNT 농도 0.1 wt% 및 0.5 wt%에서 0.05 mm, 0.10 mm, 0.15 mm 세가지 두께의 시편에 대한 UV-vis 분광광도계로 측정된 투과도와 앞장에서 제시된 식을 통해 계산된 투과도의 결과를 함께 나타내고 있다. 여기서 0 cycle은 CNT에 아무런 분산처리가

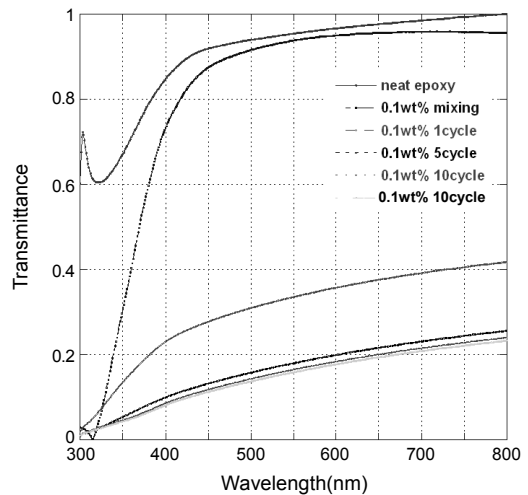


Figure 4. Transmittance spectra of 0.1 wt% CNT embedded epoxy composites in the wavelength of 300~800 nm as a different dispersion state.

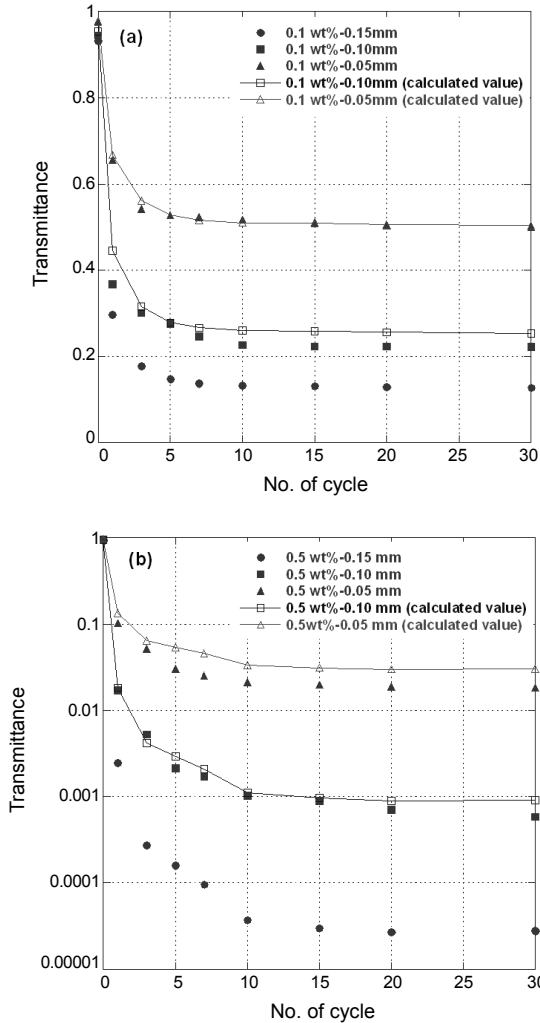


Figure 5. Experimental and calculated transmittance data of (a) 0.1 wt%; (b) 0.5 wt% CNT-epoxy composites for various thicknesses of 0.05, 0.10, and 0.15 mm at wavelength of 480 nm.

행해지지 않은 상태로 각각의 CNT 첨가량에 대해 상황의 구현이 어려우므로, CNT를 첨가하지 않은 순수한 에폭시의 상태를 0의 분산상태로 가정하여 그때의 투과도 값을 나타내었다. 공통적으로 동일한 CNT 농도 하에서 시편의 두께가 얇을수록 투과도가 증가하는 경향을 나타내며, 강력한 분산 장치인 three-roll mill을 이용해 force mode의 횡수를 증가함에 따라 초반부에 큰 폭으로 투과도 값이 감소하다가 30회까지 반복된 분산공정을 통해 투과도 값이 큰 변화없이 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 즉, 더 이상의 큰 투과도 감소가 일어나지 않는 것은 CNT가 에폭시 수지 내에 최대도로 분산되어 더 이상의 유효 단면적의 증가를 야기하지 않기 때문으로 판단할 수 있다.

Figure 5의 0.05 mm, 0.1 mm 두께에서의 계산된 투과도는 0.15 mm 두께의 시편의 측정된 투과도 시험 결과로부터 도출된 상수 a , b 와 분산횟수에 따른 유효 농도 인자 β 값을 바탕으로 얻어진 것이다. 실험과정에서의 오차를 줄이기 위해 동일한 분산공정을 거친 CNT/에폭시 혼합물을 사용하여 두께만 다른 시편을 제작하였으므로 분산상태를 정의하는 인자인 β 값은 측정 시편의 두께가 변하여도 동일한 분

Table 1. Calculated Values of a , b , and β Using Experimental Data of Transmittance at Thickness of 0.15 mm in Figure 5

	a	b	β								
			0	1	3	5	7	10	15	20	30
CNT 0.1 (wt%)	0.21	57.55	0.000	0.575	0.835	0.928	0.964	0.980	0.985	0.993	1.000
CNT 0.5 (wt%)	0.21	60.39	0.000	0.570	0.780	0.833	0.880	0.972	0.992	1.000	1.000

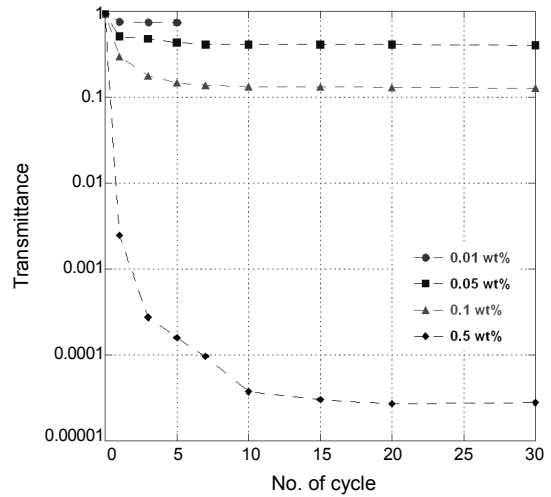


Figure 6. Experimental transmittance data of CNT-epoxy composites for various CNT concentrations (0.01, 0.05, 0.1, and 0.5 wt%) at wavelength of 480 nm.

산 방법에 대해서는 동일하다고 할 수 있다. Table 1은 0.15 mm 두께의 시편의 측정된 투과도 값을 바탕으로 도출된 상수 a , b 및 유효 단면적 인자 β 를 나타낸다. 전체적으로 동일한 시편 두께에서 도출된 상수 a , b 및 유효 단면적 인자 β 를 이용하여 계산된 투과도가 실험을 통한 측정값과 큰 차이 없이 잘 일치하는 경향을 볼 수 있다. 이는 본 연구를 통해 도출한 접근법이 투과도 및 분산 평가에 있어 적절함을 보여주는 결과이다. 또한 투과도의 정량적인 평가 인자인 β 의 경우, 5 회 이하의 낮은 분산횟수에서는 큰 값의 변화를 보이지만, 10회 이상의 분산횟수에서는 큰 변화없이 1에 가까운 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

CNT 함량에 따른 투과도. Figure 6은 다양한 CNT 농도(0.01, 0.05, 0.1, 0.5 wt%)를 포함한 CNT-에폭시 수지 혼합물의 force mode 사이클 횡수에 대한 투과도 결과이며, 모든 샘플의 두께는 0.15 mm로 고정하여 측정하였다. 0 cycle은 앞서 얘기했듯이, CNT를 첨가하지 않은 neat epoxy의 투과도를 나타낸다. 각각의 CNT 농도에서 three-roll mill의 분산횟수가 증가함에 따라 CNT의 분산 정도가 향상되어 투과도가 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 CNT 0.01 wt%의 경우, three-roll mill의 force mode에서의 높은 전단력으로 인해 1 사이클과 5 사이클의 투과도 값이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아, 5 사이클의 분산만으로도 투과도 값이 수렴하는 최대의 분산상태를 얻을 수 있었다. 또한 CNT의 농도가 증가함에 따라 최대 분산상태에 수렴하는 투과도를 위한 사이클 횡수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 앞서 설명하였듯이 최대 분산 시에 CNT가 완전 분산되었다고

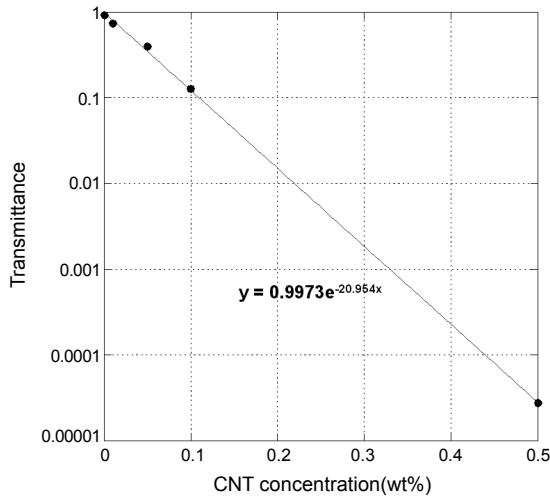


Figure 7. Log plot of transmittance spectra of CNT-epoxy composites at the maximum dispersion state for various CNT concentration (0.01, 0.05, 0.1, and 0.5 wt%).

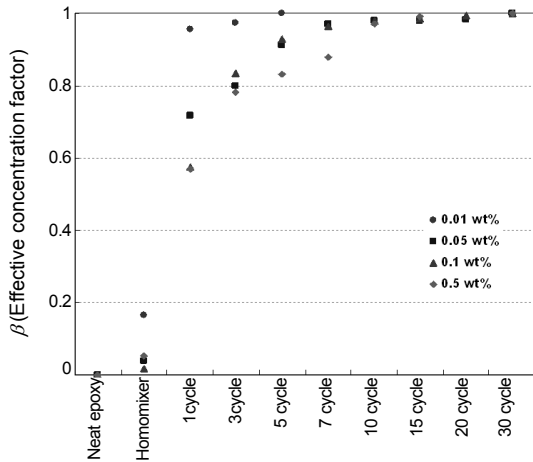


Figure 8. Effective concentration factors (β) value of each CNT dispersion process using homomixer and three-roll mill for various CNT concentrations.

가정할 수 있으며, 이때의 유효 농도 인자(β)는 1이 된다.

Figure 7은 각각의 농도에서 최대 분산상태, 즉 유효 농도 인자 β 의 값이 1에서의 투과도의 결과를 CNT 농도의 함수로 나타내고 있다. 투과도의 경우, 식 (1)과 같이 CNT 농도가 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 그림에서 보듯이 농도가 증가함에 따라 투과도의 값이 식 (1)과 잘 일치하는 경향을 보여준다. 이는 분산도의 정량적인 평가인자로서 유효 농도 인자 β 의 유효성을 잘 보여주는 결과이다. 또한 농도와 투과도의 관계식을 그림에서와 같이 도출할 수 있으며, 이를 앞의 식에 대입하여 공통의 상수 a, b 를 얻을 수 있으며, 도출된 a, b 의 값은 각각 0.008, 60.7이었다.

Figure 8은 다양한 CNT 농도에서 homomixer를 통한 분산, three-roll mill의 분산횟수에 따른 투과도 측정값과 식 (5) 바탕으로 계산된 유효 농도 인자 β 의 결과를 나타내고 있으며, Figure 9는 CNT 0.5 wt%를 포함한 에폭시 복합체의 대표적인 분산상태에

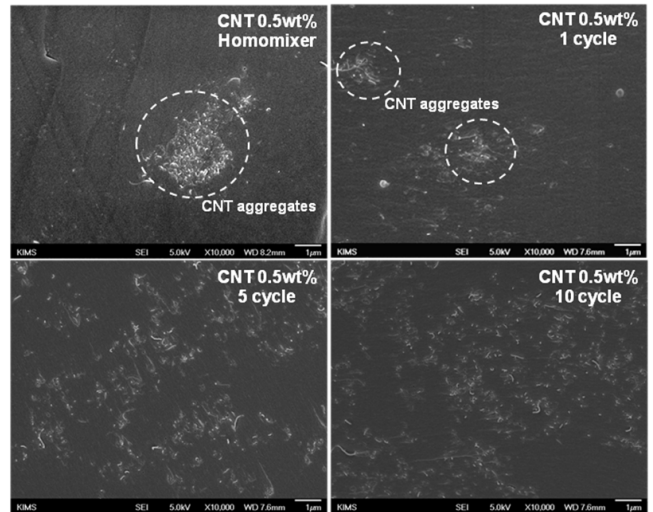


Figure 9. SEM images of 0.5 wt% CNT embedded epoxy composites for each dispersion process using homomixer and three-roll mill.

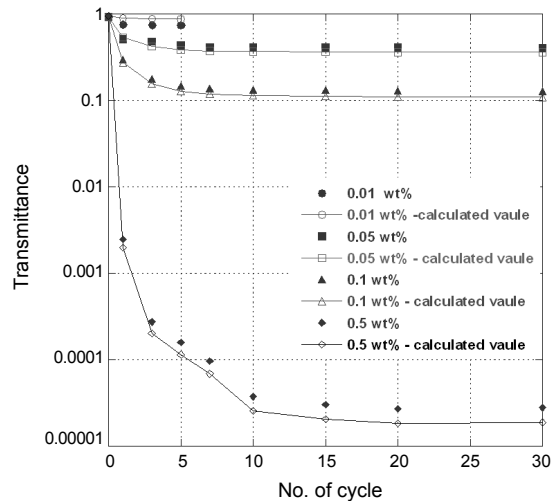


Figure 10. Comparison between experimental and calculated transmittance data of CNT-epoxy composites with various CNT concentration at wavelength of 480 nm.

따른 SEM 단면이미지를 보여준다.

Homomixer만을 이용하여 분산한 경우, β 값이 0.2 이하로 낮은 분산도를 나타내며, 대부분의 CNT가 응집되어 있는 것을 SEM 이미지로부터 확인할 수 있다. 그리고 단 1회의 three-roll mill의 분산으로 β 값이 크게 증가하며 거대한 CNT의 응집체가 풀어지고 분산상태가 향상된 것을 확인할 수 있는데, 이는 CNT의 균일 분산을 위해서는 three-roll mill과 같은 강력한 전단력을 이용한 분산방법이 효과적임을 입증해 주는 결과이다. Three-roll mill의 분산횟수가 증가함에 따라 β 값 또한 증가하다가 1의 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. SEM 이미지에서 보듯이, 분산횟수가 5회, 10회로 증가함에 따라 CNT의 분산상태는 더욱 향상되어 고분자 지지 내에 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 10은 도출된 상수 a, b 및 유효 농도 인자 β 를 이용하여 다

양한 CNT 농도(0.01, 0.05, 0.1, 0.5 wt%)에 대해 제안된 식으로 계산된 투과도 결과와 실험값을 비교하여 보여준다. 모든 CNT 농도에서 실제 투과도 실험값과 계산값이 잘 일치되는 것을 확인할 수 있다. 이는 분광광도법을 통해 투과도 또는 흡광도를 측정된 후 제안된 모델을 이용하여 분산도를 평가하는 방법이 CNT의 분산상태의 정량적 평가에 있어 적절함을 보여주는 결과이다. 또한 이를 활용하면, CNT의 분산상태에 따른 물성의 상관관계 도출이 가능하며, CNT 복합재료의 응용분야의 확대를 가능하게 할 것이다.

결 론

본 연구에서는 분광광도법(UV-vis spectroscopy)을 이용해 CNT 입자가 첨가된 고분자 복합재료의 분산도를 평가하고자 하였다. CNT의 농도와 두께가 커질수록 투과도의 값은 낮아지는 것으로 CNT 복합재료에 기존 Beer-Lambert 법칙의 적용이 가능한 것을 확인하였다. 또한 Beer-Lambert 법칙을 응용하여 CNT 입자의 분산상태 변화에 따라 투과도의 변화를 예측할 수 있는 모델과 함께 정량적 분산도 평가 인자를 제시하였다. CNT 분산상태가 높아짐에 따라 분광광도법에서의 UV-vis에 의해 흡수되는 유효 단면적이 증가하게 되는데, 유효 농도 인자(β)라는 새로운 분산도 평가 인자를 도입하여 각각의 CNT 함량, 시편두께, 분산상태에서의 분산도를 정량적으로 평가하였으며, 투과도 측정값과 함께 SEM 조직관찰을 통해 제안모델의 적절성을 확인하였다.

감사의 글: 본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소의 일반사업과 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. Iijima, *Nature*, **354**, 56 (1991).
2. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science*, **306**, 666 (2004).
3. J. Sandler, M. S. P. Shaffer, T. Prasse, W. Bauhofer, K. Schulte, and A. H. Windle, *Polymer*, **40**, 5967 (1999).
4. H. Im, H. Kim, and J. Kim, *Polymer(Korea)*, **32**, 340 (2008).
5. S. H. Song, H. K. Jeong, and K. Y. Gu, *Polymer(Korea)*, **34**, 108 (2010).
6. J. Zhu, J. Kim, H. Peng, J. Margrave, V. Khabashesku, and E. Barrera, *Nano Letters*, **3**, 1107 (2003).
7. C. E. Corcione, M. G. Manera, and R. Rella, *Mater. Sci. Eng. C*, **29**, 1798 (2009).
8. H. Yang and D.-H. Park, *The KIEE*, p.185-186 (2008).
9. J. Li, P. C. Ma, W. S. Chow, C. K. To, B. Z. Tang, and J. K. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, **17**, 3207 (2007).
10. N. A. Siddiqui, E. L. Li, M. L. Sham, B. Z. Tang, S. L. Gao, E. Mader, and J. K. Kim, *Composite: Part A*, **41**, 539 (2010).
11. Z. K. Chen, J. P. Yang, Q. Q. Ni, S. Y. Fu, and Y. G. Huang, *Polymer*, **50**, 4753 (2009).
12. C. Chen and A. B. Morgan, *Polymer*, **50**, 6265 (2009).
13. P. Ciselli, R. Zhang, Z. Wang, C. T. Reynolds, M. Baxendale, and T. Peijs, *Eur. Polym. J.*, **45**, 2741 (2009).
14. Y. Zhou, M. I. Jeelani, and S. Jeelani, *Mater. Sci. Eng. A*, **506**, 39 (2009).
15. S. H. Kim, W. I. Lee, and J. M. Park, *Carbon*, **47**, 2699 (2009).
16. J. D. J. Ingle and S. R. Crouch, *Spectrochemical Analysis*, Prentice Hall, New Jersey, 1988.