

## CNT와 Graphite 나노/마이크로 입자 배열에 의한 나노복합재의 제작과 기계적 강성 및 방사능 차폐 특성 평가

조희근<sup>†</sup>

### Nano-Composite's Mechanical and Radioactive Barrier Characteristics by Nano Size CNT & Graphite Particles Alignment

Hee-Keun Cho<sup>†</sup>

**ABSTRACT:** Carbon particle based nanocomposites have been studied. Nanocomposites containing CNT and graphite particles were manipulated by aligning the micro/nano-size particles with electric field. Electric field is applied to the suspension of epoxy matrix and particulate inclusions in order to align them along the direction of the electric field. Particles aligned in a uniform direction act as a fiber in a CFRP composite. The mechanical strength and physical characteristics highly depend on particles' distribution pattern and amount. In this study, the characteristics of radioactive barrier are emphasized, which has been rarely discussed in the literature. A number of sample coupons were tested to verify their performance. The procedure of manufacturing nanocomposites by means of extremely small size particle alignment is presented in sequence. Several physical and structural performances of composites containing aligned and randomly distributed particles were compared. The results show particle alignment is very effective to enhance directional strength and radioactive barrier performance.

**초 록:** 복합재료 중 가장 많이 사용되는 탄소계 나노복합재의 성능 향상에 대한 연구가 수행되었다. 나노 사이즈의 탄소나노튜브(CNT)와 마이크로 사이즈의 그래파이트(Graphite) 입자를 일정한 형태로 배열하여 나노복합재를 제작하였다. 입자를 배열하기 위하여 전기장을 활용하였다. 일정한 방향 혹은 형태로 배열된 입자는 에폭시 기지 속에서 섬유강화 복합재 처럼 일정한 방향으로 강성의 향상을 나타낸다. 복합재의 구조적 강성이나 물리적 특성은 강화 입자의 배열상태에 따라 매우 달라지게 된다. 본 연구에서는 특히 탄소나노튜브와 그래파이트 강화입자의 전기장 배열에 의해서 만들어진 나노복합재의 강성 및 방사능 차폐특성을 규명하였다. 전기장에 의한 입자의 배열로 만들어진 탄소계 복합재는 구조적 성능뿐만 아니라 물리적인 방사능 차폐에서도 훌륭한 특성을 나타내었다.

**Key Words:** 섬유강화 복합재(fiber reinforced composite), 나노복합재(nanocomposite), 배열(alignment)

## 1. 서 론

기술의 발달과 더불어 최신의 엔지니어링 응용 재료의 구성 및 제조는 더욱 복잡해 졌다. 새로운 재료는 비강성, 비강도 뿐만 아니라 매우 가벼우면서 다양한 성능을 구현하는 방향으로 개발되고 있다. 최근 수 십년 동안 폴리머 복

합재는 이러한 요구에 따라 개발이 이루어졌다. 에폭시 계열의 기지재료가 강화재료를 포함하고 있어서 강성 뿐만 아니라 무게 면에서도 기타 응용 복합재에 비해서 매우 훌륭한 특성을 가지고 있다. 최근에는 복합재의 특성을 부여하는 방식으로, 강화입자의 방향을 제어하는 기술에 관심이 높아지고 있다. 이러한 입자단위의 배열 기술은 기존 복

Received 12 July 2013, received in revised form 10 December 2013, accepted 22 December 2013

<sup>†</sup>안동대학교 기계교육과, Corresponding author (E-mail: [hkcho@anu.ac.kr](mailto:hkcho@anu.ac.kr))

합재의 제조 및 성능 개념을 한단계 업그레이드 시키는 기술로써, 국부적으로 강성 및 물리적 성질을 변화 시킴으로써 다양한 성능 혹은 기능을 가지는 다기능복합재, 스마트 복합재 등을 제조하는 핵심 기초기술이다. 본 연구에서는 탄소나노튜브(CNT)와 그래파이트(Graphite)를 대상으로 하여 연구가 진행되었다. CNT는 지금까지 꿈의 신소재라고 알려질 정도로 그 이론적 혹은 실험적 결과들이 매우 훌륭하다. 이론적 혹은 실험적으로 알려진 물성치 들로는, 장단비가 1000 이상, 탄성계수가 1 TPa, 강성 약 200 GPa, 고 열전달 및 전기전도 특성, 길이 방향의 안정성, 미세 전기전도 구조, 및 빠른 열전달 경로 등이 있다. 지금까지 CNT는 다양한 구조적, 전기적, 물리적, 화학적 응용분야에서 많이 적용 되었으며 미래 더 많은 응용분야 및 고성능 재료로서 주목 받을 것이다.

본 연구에서는 이러한 기술의 발달 및 현시점에서 개발 가능한 기술 중에서 가장 최신의 기술 중 하나인 전기장에 의한 입자배열기술(FAiMTa: Field Aided Micro Tailor)을 적용한다[1-4]. 전기장에 의해서 예폭시 현탁액 속에 포함된 강화 입자를 일정한 위치에 자리잡게 하거나 혹은 일정한 방향으로 배열 함으로써 국부적으로 혹은 전체 적으로 강성의 변화 및 물리적 성질의 변화를 구현한다[5-7]. ER(electrorheological) 혹은 MR(magnetorheological) 유체의 운동 및 역학적 이론 등을 기반으로 형성된 FAiMTa 기술은 1880년도 J. C. Maxwell의 전기 및 자기 효과에 의한 거동을 기술한 4가지 전자기 운동법칙에서 시초를 찾을 수 있다[8]. 이후 수많은 논문들이 발표 되었으며 대표적으로 Jones[9], Stratton[10], Landau and Lifshitz[11], Levich[12], 등의 연구자에 의해서 그 이론적 기반이 완성되었다. 특히 Sauer와 Schlogl[13]은 Maxwell 응력텐서를 사용하여 전자기장 속에 놓여 있는 타원형 마이크로 입자의 운동 힘 및 회전 토크를 이론적으로 계산하였다[8].

이러한 이론적 기반으로 발전된 전자기장 활용 입자배열 기술이 나노복합재 제작에 활용된 것은 최근의 일이며 아직 기술개발 초기 단계에 있다. 본 연구에서는 이 기술을 활용하여 나노복합재를 제작하고, 제작된 나노복합재의 강성 및 방사능 차폐 성능을 실험을 통하여 결과를 제시함으로써 기술의 효과성을 입증한다.

## 2. 전기장속의 입자 운동

균일한 전기장 속에 놓여있는 입자는 불균일 전기장을 만든다. 이러한 불균일 전기장은 분명히 입자와 입자 주변 물질의 유전율(Dielectric constant)의 차이에 의해서 발생한다. 대전되지 않은 입자가 불균일 전기장 속에서 극성효과에 의해서 이동하는 것을 유전영동(Dielectrophoresis)이라 하며, 이것은 주변입자 상호간의 전기장의 왜곡이 발생할 때 나타난다. 유전영동의 효과는 전자기장의 Maxwell 식에

의해서 지배된다. 전기장 속에 놓여있는 입자에 작용하는 전기력은 전기장의 변화량과 입자의 극성에 의해서 결정되며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F = (\mu \cdot \nabla)E \quad (1)$$

여기서  $\mu$ 는 쌍극자모멘트이며,  $E$ 는 전기장을 나타낸다. 부도체의 예폭시속에 포함된 입자의 운동을 설명하기 위해서는 유전율의 값이 매우 큰 영향을 미친다. 즉 부도체에 임의의 방향으로 분포된 양극과 음극의 모멘트 성분은 외부에서 걸린 전자계의 교류변화에 맞추어 정렬된다. 즉 모멘트 성분들이 전자계의 변화 방향에 맞추어 변함으로써, 부도체이면서도 건너편의 내부에 전자기파의 진행을 가능하게 한다. 이러한 유전율( $\epsilon$ )은 전속밀도( $D$ )와 전기장( $E$ )으로 다음과 같다.

$$D = \epsilon E \quad (2)$$

전기변위장은 전기장을 만드는 데만 관계하는 양이기 때문에 일정한 전하량이 있을 경우 유전율이 높을수록 작아진다. 단위당 유전 분극( $P$ )은 다음과 같다.

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (3)$$

여기서  $\chi$ 는 전기감수율(electric susceptibility)이다.

### 2.1 전기장속의 입자[14-16]

마이크로 혹은 나노복합재 속에 포함된 입자는 일반적으로 다양한 형태를 가진다. 구, 디스크, 실린더, 타원형 등 다양한 형태를 가진다. 본 연구에서는 나노사이즈의 CNT와 마이크로 사이즈의 graphite로 연구를 진행하였다. CNT는 (주)카본나노텍사의 다중벽나노튜브(MWNT)를 사용하였고 graphite는 (주)티씨케이사의 것을 사용하였다. CNT의 입자는 외형상 실린더의 형상을 가지고 있으므로 Fig. 1과 같은 형상에 대한 전기장의 영향을 분석한다.

임의의 방향으로 놓여진 실린더형 파이프 입자의 표면에 작용하는 전기장은 수평(∥) 성분과 수직(⊥) 성분이 동시에 작용한다.

$$E_{fiber} = E_{(∥)} + E_{(⊥)} \quad (4)$$

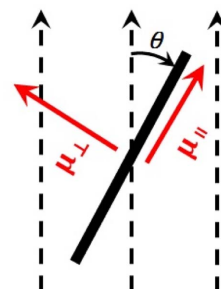


Fig. 1. An arbitrary cylinder in an applied electric field

극성모멘트( $\mu$ ) 또한 식 (2)와 마찬가지로 수평과 수직성분으로 각각 작용하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_{fiber} = \mu_{(||)} + \mu_{(\perp)} \quad (5)$$

전기장 속에 놓여진 입자의 내부에 작용하는 내부전기장은  $E^{(i)}$  입자표면에 작용하는 수평성분과 수직성분의 중첩에 의해 계산 될 수 있으며, 입자와 입자 주변 물질의 유전율을 각각  $\epsilon_p$ ,  $\epsilon_c$  진공 속에서의 유전율을  $\epsilon_0$ , 입자의 체적을  $V$ 라 하면 수평성분과 수직성분의 극성 모멘트를 계산하면 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \mu_{(||)} &= \epsilon_0(\epsilon_p - \epsilon_c)E_{||}^{(i)}V = V\epsilon_0(\epsilon_p - \epsilon_c)E_{||}^{(e)} \\ \mu_{(\perp)} &= \epsilon_0(\epsilon_p - \epsilon_c)E_{\perp}^{(i)}V = V\epsilon_0(\epsilon_p - \epsilon_c)\left(\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_p - \epsilon_c}\right)E_{\perp}^{(e)} \end{aligned} \quad (6)$$

재료의 경계면에 존재하는 전하가 영구적으로 수직방향과 수평방향으로 분리된다면 안정적인 극성 모멘트가 존재한다. 유전입자가 외부의 전기장에 노출되면 전기장의 영향에 의해 발생하는 극성 모멘트가 발생한다. 이러한 극성모멘트는 입자의 형태가 구(Sphere), 디스크(Plate), 실린더(Cylinder) 각각의 형태에 따라서 상이하게 표현된다. 식 (6), (7)과 같이 나타나는 극성 모멘트는 입자의 형태에 따라 틀려지게 되므로 일반적인 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_{(||)} &= V\epsilon_0\epsilon_c\beta_{||}^F E_{||}^{(e)} \\ \mu_{(\perp)} &= V\epsilon_0\epsilon_c\beta_{\perp}^F E_{\perp}^{(e)} \end{aligned} \quad (7)$$

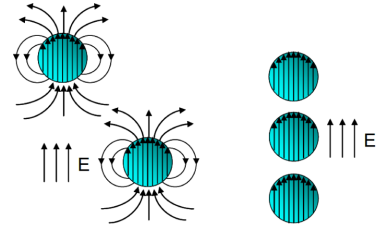
여기서  $\beta^F$ 의 값은 포함된 입자의 형상에 따라 각각 틀려지게 되며 그 값을 Table 1에 나타내었다.

## 2.2 전기장에 의한 입자의 회전력

등방성 구 입자에 대한 쌍극자 모멘트( $\mu = \alpha E$ )는 작용하는 전기장에 평행하며 전기장에 의한 회전력이 발생하지 않는다. 그러나 매질 속에 포함된 입자가 비등방성의 결정질 이거나 일정한 구 형상이 아니면, 쌍극자 모멘트는 전기장의 방향과 평행할 필요가 없다. 이때 전기장 속에 놓여있는 분극화된 입자에 작용하는 회전력은 다음과 같이 계산될 수 있다[11,16].

**Table 1.** Representation for cylinder, disk and sphere [16]

Parameter	Cylinder	Disk	Sphere
$\beta_{\perp}^F$	$(\epsilon_p - \epsilon_c)\left(\frac{2}{\epsilon_c + \epsilon_p}\right)$	$\frac{(\epsilon_p - \epsilon_c)}{\epsilon_p}$	$3\left(\frac{\epsilon_p - \epsilon_c}{2\epsilon_c + \epsilon_p}\right)$
$\beta_{  }^F$	$\frac{(\epsilon_p - \epsilon_c)}{\epsilon_c}$	$\frac{(\epsilon_p - \epsilon_c)}{\epsilon_c}$	



**Fig. 2.** Two polarized particles in an electric field (left) and particle alignments caused by interaction with one another

**Table 2.** The value of for cylinder disk and sphere

Parameter	Cylinder	Disk	Sphere
$\beta^F$	$\frac{(\epsilon_p - \epsilon_c)^2}{\epsilon_p}$	$\frac{(\epsilon_p - \epsilon_c)^2}{\epsilon_c + \epsilon_p}$	0

$$T^{(e)} = \mu \times E \quad (8)$$

대부분의 입자가 정형화된 완전한 구 형태를 가지는 것은 아니지만, 근사적으로 구 형태를 가정하고 이론적으로 계산을 한다.

Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 두 개의 인접하는 구 입자는 국부적인 극성 전기장의 형성을 방해하기 때문에 결국 전기장의 방향으로 정렬 하려고 하는 회전력이 발생하게 된다. 이러한 회전력은 식 (9)와 같다.

$$T = \mu_{||} \times E_{\perp} - \mu_{\perp} \times E_{||} \quad (9)$$

여기서  $E_{||} = E^{(e)} \cos\theta$  이고  $E_{\perp} = E^{(e)} \sin\theta$  이다. 이것을 식 (7)에 대입하면 디스크, 실린더 혹은 구 형태의 입자에 대한 회전력을 얻을 수 있는 식이 다음과 같다.

$$T = \frac{V}{2}\epsilon_0\beta^T(E^{(e)})^2 \sin 2\theta \quad (10)$$

여기서  $\beta^T$ 는 입자의 형태에 따라 다양하게 나타낼 수 있으며 Table 2와 같이 나타낼 수 있다[16].

## 2.3 국부 물성 변화 재료의 구성방정식

국부적으로 입자의 배열상태 혹은 밀도가 틀려지면 그 재료의 구성방정식 또한 틀려지게 된다. 국부적 변화재료의 구성방정식은 Hook의 법칙을 따르며 기본적인 물성치로 다음과 같이 나타난다.

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left( e_{ik} + \frac{\nu}{1-2\nu} e_{ll} \delta_{ik} \right) \quad (11)$$

여기서  $\sigma_{ij}$ 는 응력텐서,  $e_{ik}$ 는 변형율 텐서이다. 입자가 일정한 방향으로 배열하여 형성되는 재료는 섬유강화복합재의 물성치 처럼 변하게 되며, 2차원 평면에서 파이버의 각도

에 따른 주 방향의 물성치는 Jones[9]에 의하여 다음과 같이 계산되었다.

$$\begin{aligned}\frac{1}{E_{xx}} &= \frac{m^4}{E_{11}} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) m^2 n^2 + \frac{n^4}{E_{22}} \\ \frac{1}{E_{yy}} &= \frac{n^4}{E_{11}} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) m^2 n^2 + \frac{m^4}{E_{22}}\end{aligned}\quad (12)$$

여기서  $m = \cos\theta$ ,  $n = \sin\theta$  이다. 보다 일반화된 형태의 표현으로는 Lees[17] 등에 의해서 제시되었는데 강화섬유의 방향 변화에 따라서 강성이 규칙적으로 변화하는 관계를 나타내었다.

$$E(\theta) = \frac{E_{11}E_{22}G_{12}}{G_{12}E_{11}\sin^4\theta + E_{22}G_{12}\cos^4\theta + (E_{11}E_{22} - 2\nu_{21}E_{22}G_{12})\cos^2\theta\sin^2\theta}\quad (13)$$

식 (13)은 임의의 방향으로 향하고 있는 강화재가 함유된 복합재의 영률 값을 수직과 수평방향의 영률 값을 활용하여 구하는데 사용된다.

## 2.4 입자의 배열운동

불균일 전기장에 의해서 발생하는 힘과 회전력은 전기장 속에 포함된 입자를 재배열 시킨다. 이러한 현상은 원심력 및 중력에 의한 입자의 운동과 비슷한 경향을 가진다. 복합재의 경우처럼 에폭시 기지 속에 포함된 강화 입자의 운동은 크게 두 가지 현상을 가지고 있다. 즉 3차원 적인 공간에서의 병진운동과 섬유 강화 입자가 2차원적인 공간상에서 전기장의 회전력에 의한 회전 운동이다. 복합재와 같이 에폭시 점성유체 속에 포함된 강화 입자의 운동은 전기장에 의한 힘( $F^{(e)}$ )과 입자에 작용하는 점성력( $F^{(v)}$ )의 평형에 의해서 해석될 수 있다. 반경  $r$ 인 구 입자가 이웃하는 입자와의 중심거리  $l$ 만큼 떨어져 있다고 가정하면 입자의 운동을 결정하는 운동 지배방정식은 다음과 같다[18].

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\mu^2}{4\pi^2 l^4 \epsilon_0 \epsilon_c \eta K^v r}\quad (14)$$

여기서  $\eta$ 는 점성이며,  $K$ 는 입자의 형상과 관련된 계수이다. 또한 입자의 형상이 구의 형태가 아닌 실린더 혹은 디스크의 형태이면 회전력이 발생하는데 이러한 회전력에 의한 입자의 운동은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\epsilon_0 \beta^T E_0^2}{12\eta K^T} \sin 2\theta\quad (15)$$

전기장속에 놓인 입자는 유전영동에 의해 회전을 하게 된다. 이때 회전에 필요한 시간은 이론적으로 다음과 같은 식이 사용된다. 식 (16)에서와 같이 회전 및 배열에 걸리는 시간에는 점성, 전기장의세기 등이 영향을 미친다. 식 (16)

의 이론적인 식은 입자의 형상에 따라 많은 차이를 나타낸다. 따라서 입자형상의 종횡비, 판형, 구형 혹은 불규칙 형상의 입자 모양에 따라 회전에 걸리는 시간은 많은 편차를 나타낸다.

$$t \approx 10\eta/\epsilon_0 E^2\quad (16)$$

## 3. 나노복합재 제조

### 3.1 나노복합재 제조 실험장치

전기영동 및 유전영동에 의한 입자의 회전 및 병진운동을 유도하기 위해서는 여러 가지 부속장치가 필요하다. 기본적으로 에폭시 기지 속에 강화입자가 포함된 액체에 일정한 전기장을 가할 수 있는 장치가 필요하다. 입자의 운동을 유발 할 수 있는 전기장의 세기는 입자의 종류 및 사이즈, 기지의 유전율 및 점성, 입자와 기지의 유전율의 차이 등 다양한 인자에 의해서 결정된다. 본 연구에서는 입자 운동을 위한 최적의 조건을 시행착오 법을 통하여 찾았다. 일반적으로 대략 0.5~10 kv/mm 정도 세기의 전기장을 활용하여 본 실험을 수행하였다. 1~2000 Hz 사인파 교류(AC)를 시험에 적용하였으나, 대략 5~10 Hz 근방에서 입자의 배열이 가장 빠른 시간에 잘 나타났다. 수십 kv/mm의 전기장을 만들기 위해서는 고전압 증폭기(High voltage amplifier)가 필요하며 본 실험에서는 TREK사의 610E 모델을 사용하였다. 일정한 주파수의 사인파를 만들기 위한 신호발생기는 NOVATEST사의 33521A 모델을, 전압 신호의 파형확인을 위해서는 Tektronix사의 오실로스코프 TBS1000 모델을 사용하였다. 디지털 전자 현미경인 SOMETECH VISION사의 I-Megascope(200M-fixel)을 활용하여 실시간으로 입자의 운동을 관찰하였다.

Fig. 3은 실험장치의 모델을 나타낸다. 신호발생기에서 발생한 수 Hz의 사인파형을 전압증폭기를 통하여 전압을 수 kv/mm의 단계까지 상승 시킨다. 오실로스코프는 이러한 전압의 수준 및 파형을 실시간으로 모니터링을 하며, 디지털 현미경으로 입자의 운동을 실시간으로 관찰한다.

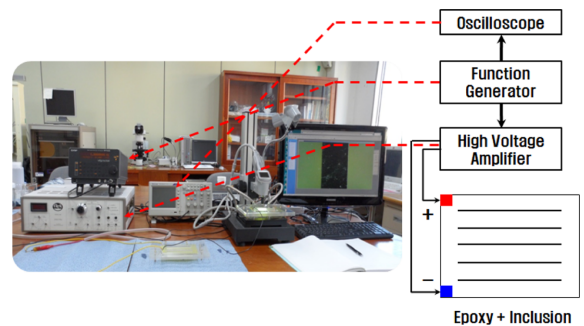


Fig. 3. Experimental setup for nano-composites using electric field



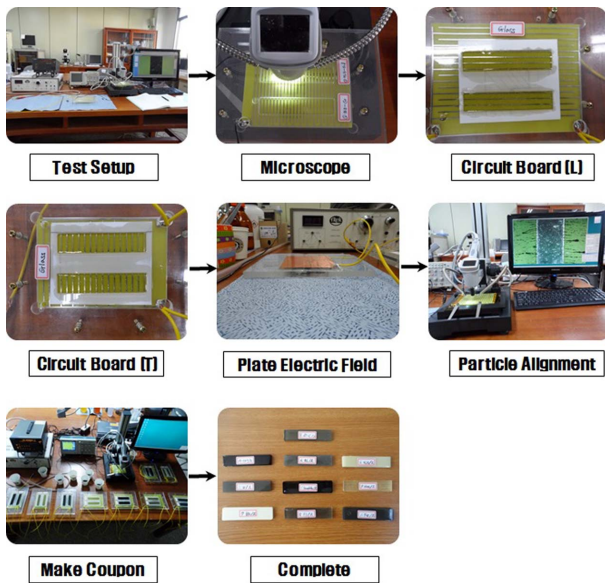


Fig. 4. Experimental setup for nano-composites using electric field

### 3.2 나노복합재 제작

첨단 복합재의 소재로 가장 많이 활용되는 소재는 탄소 계열의 graphite나 CNT이다[19,20]. 본 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브(Multiwalled carbon nanotube)를 사용하였다. CNT는 일반적으로 강철의 약 10배 정도의 강성을 가지고 있으며 전도성과 열전달률 또한 매우 높다. Graphite 역시 첨단복합재의 소재로 많이 사용되고 있으며 섬유의 형태로 제작되어 복합재의 강화재로 활용되고 있다. CNT는 MWCNT10nm, graphite는 입자의 사이즈가 약 10~20  $\mu\text{m}$ 의 제품을 사용하였다. 나노복합재 기지로서는 상온경화가 가능한 (주) 제일하이텍의 HTC-665C를 사용하였고 점도는 약 30.0 Pa.s이며 유전율은 약 5 정도이다.

Fig. 4는 본 논문에서 제시한 전기장에 의한 입자의 배열에 의해서 나노복합재를 제조하는 과정을 나타낸 것이다. 일정한 방향의 전기장을 만들기 위하여 Fig. 4, 5에 나타낸 것과 같은 기판 회로를 제작하였다. 기판 회로의 간격이 너무 근접하면 고전압을 인가하였을 때 직접적으로 전류 스파크가 발생하므로 일정한 간격을 유지하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 회로선 사이의 간격을 5 mm로 유지하면서 실험을 하였다.

에폭시 기지 속에 포함된 CNT 및 graphite 입자들은 앞 절에서 설명한 유전영동에 의한 회전 및 병진운동에 의하여 Fig. 5와 같이 전기장의 형태에 따라서 배열하게 된다. 입자의 배열 정도는 다양한 변수에 의해서 결정된다. 그 중 핵심사항은 전기장의세기, 유전율, 입자의 형상 조건, 기지의 점도 등이다. 이러한 조건하에서 전기장을 활용한 CNT 및 graphite 입자의 배열에 의해서 20 mm  $\times$  90 mm  $\times$  4 mm의 시편을 만들었다. 입자의 재배열에 소모되는 시간은

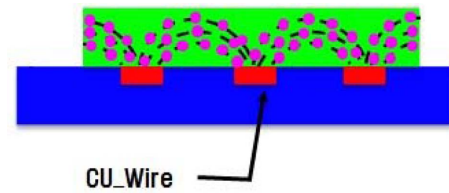


Fig. 5. Particle alignment by dielectrophoresis



Fig. 6. CNT inclusions alignment in a uniform electric field (5Hz, 4.5 kV/mm,  $\times 1200$  magnification)

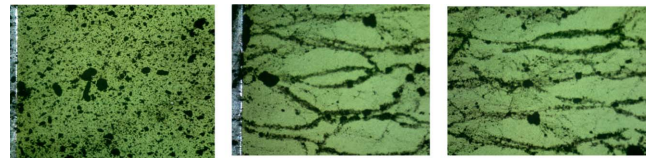


Fig. 7. Graphite inclusions alignment in a uniform electric field (5 Hz, 4.5 kV/mm,  $\times 1200$  magnification)

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ,  $E = 4.5 \text{ kV/mm}$ , 그리고 에폭시의 점성이 약 30 Pa.s 정도이기 때문에 식 (16)으로 이론적으로 계산을 하면 약 1.7초 걸린다. 실제 실험에서도 약 1초~3초 사이에 입자들의 배열이 완료되었다. 입자배열이 완료되는 정확한 시점을 정의하는 것은 매우 어렵기 때문에 정확하게 입자배열 시간을 제시 할 수 없으며 다만 이론치에 매우 근접한 결과를 얻었다고 제시 할 수 있다. 시편을 제작하기 위해서 전기장을 가하기 전 CNT입자를 에폭시에 분산하기 위해 10~15분 가량 기계적으로 휘저어서 분산을 하였다.

Fig. 6, 7은 각각 CNT와 graphite의 입자가 에폭시 속에 랜덤하게 분포하고 있는 재료에 전기장을 가하여 일정한 방향으로 입자를 정렬시킨 것이다. 입자들이 전기장의 방향에 따라 횡방향으로 잘 배열된 것을 나타낸다. 이러한 배열을 비교적 수초의 짧은 시간에 이루어지며 이러한 상태에서 경화가 되면 입자의 배열 상태에 따라서 강성 및 기타 여러 가지 물성이 틀려지게 된다.

Fig. 6과 7은 모두 1200배의 배율로 디지털 현미경으로 이미지를 얻은 것이다. CNT입자는 입자의 사이즈가 상대적으로 작고 Graphite보다 균일하게 배열되었다. Graphite 입자는 방향성을 가지면서 재배열 되는 경향을 확실하게 나타내지만, 입자끼리 서로 일정한 덩어리를 형성하면서 일정한 방향으로 배열되는 것으로 나타났다. 입자의 배열수준을 보면 두 가지 모두 아주 잘 배열하고 있다.

## 4. 시험결과 및 검토

### 4.1 강성시험

섬유강화 복합재료의 경우 섬유의 배열방향에 따라 직교 이방성 복합재의 강성이 전적으로 좌우된다. 본 연구에서는 마이크로/나노 사이즈의 입자를 일정한 형태로 변화 시킴으로써 강성의 변화를 관찰하였다. CNT의 경우 입자의 전체 성분비에 따라서 강성이 변하니 대체적으로 약 5~20% 정도의 배합비율에서 강성의 변화가 가장 확연하게 나타나는 것으로 예측이 된다.

Graphite의 경우는 이보다 조금 더 많은 비율에 의해서 결정되는 것으로 선행 시험에서 관측이 되었다. 그러나 이러한 값은 모든 다양한 조건이 일관성 있게 정해진 다음 예측되는 값이기 때문에 본 연구에서 대략적인 경향성을 확인하였다.

Fig. 8에 나타난 것과 같이 제작된 시편의 강성시험을 위해서 DMA(dynamic mechanical analyzer)를 사용하였다. 측정된 CNT와 graphite의 방향성을 나타내는 영률(Young's modulus) 값은 다음과 같다.

CNT가 Graphite보다 약간 높은 강성을 보이고 입자의 배열에 따라 종방향의 강성이 횡방향의 강성보다 높게 나타났다. 이러한 현상은 일반적인 복합재의 강성이론의 예측과 잘 일치한다.

### 4.2 방사능 차폐시험

CNT 및 탄소계 복합재는 우주구조물의 설계에 많이 적용된다. 위성 및 우주구조체는 내부의 전자부품 등을 보호하기 위해서 방사선 차폐 기능을 가지고 있어야 한다. 우주 방사선의 종류도 다양하고 복합하나 위성의 설계에 있어서 지상 시험용으로 가장 많이 사용하는 양성자 입자(proton)

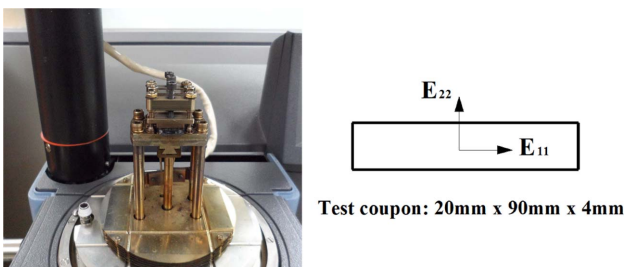


Fig. 8. DMA for stiffness test and coupons of CNT & graphite

Table 3. Measured stiffness of CNT and graphite coupon

Volume Fraction (0.2)	Particle Aligned Direction	
	Longitudinal (E11) (MPa)	Transverse (E22) (MPa)
CNT/E	2,064	1,257
Gr/E	1,843	1,422

의 투과량을 측정하는 총이온화 선량(TID: total ionizing dose) 시험을 수행하였다[21]. 본 연구에서 제시한 입자배열 방법에 의해서 제작된 입자가 길이방향으로 일정하게 배열된 시편과, 입자가 랜덤하게 분포된 시편의, 두 가지 종류의 시편에 대하여 방사선 차폐 시험을 수행하였다.

시험은 원자력병원(KIRAMS: Korea Institute of Radiological and Medical Sciences)에서 수행하였다. Fig. 10은 TID 시험을 위한 시험장치를 나타낸다. 입자가 랜덤하게 분포하는 시편과 길이 방향으로 일정하게 배열된 시편에 대하여 상대적인 방사선 차폐효과를 측정하는 시험이며, 이때 입자의 파괴비율은 30%이다. 45 MeV의 에너지를 가지는 빔이 진공에서 발생되어서 외부의 알루미늄 차폐막을 통과하여 최종적으로 시편을 투과하게 된다. 두 가지 종류의 시편(입자가 랜덤하게 분포된 것 과 균일한 방향으로 배열된 것)을 나란히 옆에 붙여놓고 동시에 시험을 수행하여 그 상대적인 투과량의 차이를 비교하였다. 즉 방사선 감응필름을 시편의 뒷면에 붙여서 투과한 양성자 입자의 에너지 수준을 필름을 통하여 확인하였다. 방사선 감응 필름에 양성자가 투과하면 필름에 명암으로 나타나게 되며 이 필름을 방사선 밀도 측정기(VICTOREEN/37-443)로 밀도를 측정하였다.

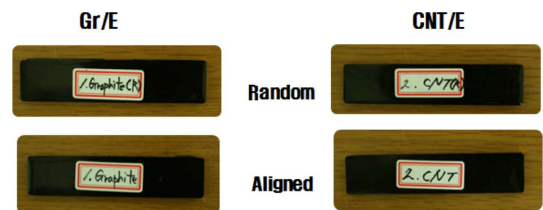


Fig. 9. CNT/E and Gr/E coupons for TID test



Fig. 10. Cyclotron apparatus (up) and configuration of the proton beam path in the experiment (down)

Fig. 10은 실제 실험에 사용된 사이클로트론의 형상과, 사이클로트론에서 발생된 양성자 빔의 진행 경로를 나타낸다. 빔의 에너지를 감소시켜서 시편에 투과하기 위하여 그림에서 보는 것과 같이 AL 차단막을 사용하였다. 시편을 통과한 빔은 시편의 후면에 부착된 방사능 감응필름을 통과하게 되며 이때 감응필름은 통과하는 방사능의 에너지 준위에 따라 감도가 변하게 된다. 즉 빔의 에너지 준위가 높으면 방사능 감응 밀도수치는 낮아지며, 반대로 에너지 준위가 낮으면 방사능 밀도 수치가 높아지게 된다. 이것은 빔이 시편을 통과하면서 에너지를 얼마나 소모하느냐의 차이를 측정하며, 이 수치를 활용하여 시편의 방사능 차폐능력을 정량적으로 측정한다.

Fig. 11은 CNT와 graphite의 시편으로 방사선 투과 시험한 필름의 방사선 밀도를 측정한 것이다. 이 결과를 Table 4에 정리하였다. 입자가 랜덤하게 분포하는 Gr/E 시편을 기준으로 하여 나머지 상대적인 값을 백분율로 나타내었다. Table에서 CNT의 시편이 Gr의 시편보다 방사선 차폐 성능이 우수하며, 또한 입자들이 랜덤하게 분포하는 것 보다는 일정한 방향에 따라 규칙적으로 배열된 시편이 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있다. CNT 시편의 경우 입자의 배열 상태에 따라 약 12.4% 정도의 성능이 향상된 것을 알 수 있다.

나노 사이즈 CNT 구조체는 일반 탄소 입자 보다 매우 강하기 때문에 방사선 입자가 충돌할 때 반발력 내지는 저항력이 훨씬 증가할 것이라고 예상된다. 이러한 점이 더 높은 성능을 나타내는 일차적인 원인이라고 판단된다. 또한 균일하게 입자가 배열된 시편에서 랜덤으로 배열된 시편보다 차폐능력이 좋은 것은 다음과 같은 이유 때문이라고 추

측된다. 즉 랜덤 배열인 경우 어떤 부분은 조밀하게 입자들이 모여 있고, 또한 어떤 부분에서는 입자가 없는 공간 부분이 많다. 이러한 경우 입자의 분포가 아주 적은 부분에서 상대적으로 많은 방사선 입자들이 매우 잘 통과하기 때문이라고 판단된다. 그러나 이러한 것을 명확하게 밝히기 위해서는 추가적인 상세한 다음 단계의 연구가 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 전기장을 이용하여 에폭시 속에 포함된 마이크로 혹은 나노 사이즈의 강화 입자들(CNT, graphite)을 배열하는 기술을 제시하였다. 이론적 배경을 기반으로 하여 그 결과를 실험을 통하여 확인하였다. Graphite와 CNT 입자들이 전기장에 의해 잘 배열 하였고 이러한 입자의 배열에 따른 물성치의 변화를 측정하였다. 강성과 방사능 차폐 특성을 측정하여 결과를 제시하였다. 입자의 배열에 상태에 따라 직교이방성의 특성을 나타내는 강성의 변화가 나타났으며 또한 이것은 방사능 차폐에 효과가 있음을 증명하였다. 유전영동 현상을 나노복합재 제작에 응용하여 그 적용가능성을 제시하였으며 차후 기능성 혹은 지능형 나노복합재 제작에 활용 할 수 있는 가능성을 입증하였다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 안동대학교 특별연구지원사업에 의하여 연구되었으며 지원에 대해 진심으로 감사 드립니다.

## 참고문헌

- Shkel, Y.M., and Klingenberg, D.J., "A Continuum Approach to Electrorheology," *Journal of Rheology*, Vol. 43, 1999, pp. 1307-1322.
- Kim, G.H., and Shkel, Y.M., "Sensing Shear Strains with Electrostriction Effect in Solid Electrorheological Composites," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, 2002, pp. 479-483.
- Shkel, Y.M., and Ferrier, N.J., "Electrostriction Enhancement of Solid-state Capacitance Sensing," *IEEE-ASME T Mech*, Vol. 8, No. 3, 2003, pp. 318-325.
- Klingenberg, D.J., and Zukoski, C.F., *Studies on the Steady-Shear Behavior of Electrorheological Suspensions*, Langmuir, 1990.
- Arp, P.A., Foister, R.T., and Mason, S.G., "Some Electrohydrodynamic Effects in Fluid Dispersions," *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 12, 1980, pp. 295-356.
- Martin, J.E., and Anderson, R.A., "Chain Model of Electrorheology," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 104, 1996, pp. 4814-4827.
- Park, C., and Robertson, R.E., "Alignment of Particles by an Electric Field," *Journal of Material Science and Engineering: A-*

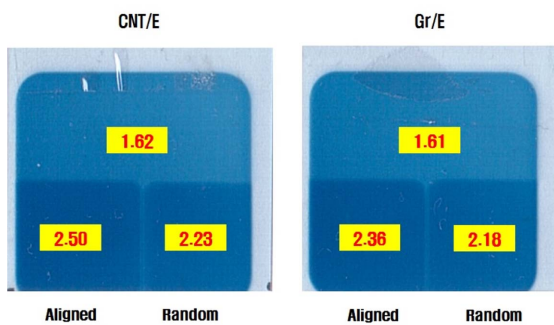


Fig. 11. Configuration of the proton beam used in the experiment

Table 4. Measured stiffness of CNT and graphite coupon

		Radiation Density of Film	Relative Effective Ratio (%)
Gr/E	Random	2.18	100.0
	Aligned	2.36	108.3
CNT/E	Random	2.23	102.3
	Aligned	2.50	114.7



- Structure, Vol. 2, 1998, pp. 295-311.
8. Maxwell, J.C., *Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, London, 1904.
  9. Jones, T.B., "Dielectrophoretic Force Calculation," *Journal of Electrostatics*, Vol. 6, 1979, pp. 69-82.
  10. Stratton, J.A., *Electromagnetic theory*, McGraw-Hill, New York, 1941.
  11. Landau, L.D., and Lifshitz, E.M., *Electrodynamics of Continuous Media*, Pergamon, New York, 1984.
  12. Levich, V.G., *Physico-Chemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, N.J., 1962.
  13. Sauer, F.A., and Schlögl, R.W., *Torques Exerted on Cylinders and Spheres by External Electromagnetic Fields*, Plenum, New York, 1985.
  14. Martin, J.E., and Anderson, R.A., "Electrostriction in Field-Structured Composites: Basis for a Fast Artificial Muscle," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 111, No. 9, 1999, pp. 4273-4280.
  15. Norman, D.A., and Robertson, R.E., "Rigid-Particle Toughening of Glassy Polymers," *Polymer*, Vol. 44, 2003, pp. 2351-2362.
  16. Pohl, H.A., "Dielectrophoresis," Cambridge University Press, Cambridge, 1978.
  17. Lees, J.K., "A Study of the Tensile Modulus of Short Fiber Reinforced Plastics," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 8, No. 3, 1968, pp. 195-201.
  18. Bonnecaze, R.T., and Brady, J.F., "Dynamic Simulation of an Electrorheological Fluid," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 96, 1992, pp. 2183-2202.
  19. Wang, Z.J., Kwon, D.J., Gu, G.Y., and Park, J.M., "Interfacial Properties of Gradient Specimen of CNT-Epoxy Nanocomposites using Micromechanical Technique and Wettability," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 45-50.
  20. Lee, W.J., Lee, S.E., and Kim, C.G., "A Study on Mechanical Properties of MWNT/PMMA Nanocomposites Fabricated by Injection Molding," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 4, 2004, pp. 47-52.
  21. Ryu, K.S., Shin, G.H., Kim, H.M., and Kim, H.J., "Single Event Upset Measurements of Memory Chips for the Langmuir Probe on STSAT-2," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 52, No. 3, 2008, pp. 853-857.