論文

Field-Aided Micro-Tailoring에 의한 기능성 나노복합재 제조

조희근*, 이주훈**+, 심은섭**

Manufacturing Functional Nano-Composites by Using Field-Aided Micro-Tailoring Manipulation

Hee-Keun Cho*, Juhun Rhee**+, Eun-Sup Sim**

ABSTRACT

One of a unique technique in manipulating a multifunctional composite is demonstrated in this study. An electric field is applied to a liquid suspension in order to align the inclusions along with the direction electric field. This is called FAiMTa(Field Aided Micro Tailoring). It makes orthotropic polymer composites by arranging the micro and/or nano size particle inclusions in chain-line formation. Several kinds of particles such as Al_2O_3 , graphite, CNT(Carbon Nano Tube), W(Tungsten) are tested to verify the effectiveness of the FAiMTa. The particles redistributed in an epoxy suspension and their coupons show that mechanical and thermal properties of orthotropic and random composites containing those particles depend on the trend of particles' alignment. The micro-images of the functional composite from FAiMTa have been captures and their physical properties demonstrate their wide-range and state-of-the-art application for advanced multifunctional composites.

초 록

본 연구에서는 기능성 나노복합재를 제작하는 방법이 제시되었다. 미소 입자들을 포함하고 있는 점성을 가진 유체에 전기장을 가하여 유체속에 포함된 입자들을 전기장의 방향에 따라 규칙적으로 배열을 하였다. FAiMTa 기술이라고 불리는 이 방법은 마이크로 혹은 나노 사이즈의 입자들을 체인의 형태로 배열하여 직교이방성 폴리머 나노복합재의 제작을 가능하게 하였다. 알루미늄(Al_2O_3), 탄소나노튜브(CNT), 탄소(Graphite), 텅스텐(W) 등의 마이크로 혹은 나노 사이즈 입자 분말을 사용하여 FAiMTa기술의 유효성을 확인하는 시험을 수행하였다. 이러한 입자들을 전기장을 사용하여 일정한 방향으로 배열하여 직교이방성 폴리머 복합재를 만들었고, 시험시편의 물리적 특성 즉 기계적 열적 특성을 측정하여 방향성을 확인하였다. 이렇게 제작된 첨단 나노복합재는 각종 산업분야에서 큰 효과가 기대된다.

Key Words : 다기능복합재(multifunctional composite), 전기장(electric field), 폴리머(polymer), 직교이방성(orthotropic)

1. 서론

미소 사이즈의 입자(particle)나 섬유(fiber)들은 종종 복합재의 기지에 적용되어 복합재의 물리적 특성을 크게 향상시

킨다. 섬유강화 복합재는 기지에 복합재의 섬유가 강화된 구조이며 이러한 복합재의 성능은 포함된 입자나 섬유의 방향성 및 체적비에 크게 의존한다. 본 연구에서는 폴리머 복합재속에 포함된 강화 입자들의 밀도 및 분포형태를 국부적으

접수: 2012년 8월 24일, 수정: 2012년 12월 11일, 게재승인: 2012년 12월 18일

* 안동대학교 기계교육과

**+ 항공우주연구원, Corresponding author(E-mail:jrhee@kari.re.kr)

로 변화시키기 위하여 전기장을 사용하였다. 이러한 기술을 전기장을 이용한다는 의미에서 Field-Aided Micro-Tailoring이라한다. 이러한 방법은 2000년 초반 Shkel, Klingenberg, Kim, Ferrier 등에 의해 본격적으로 제시되었다[1-4]. 입자의 사이즈는 대략 수십 나노 사이즈부터 수십 마이크로 사이즈까지 다양하며 그 형상은 대략 구, 원판, 원통형(단섬유) 등으로 구분 된다. 이 입자들을 체인의 형태나 아아치의 형태로 구성 함으로써 미소구조의 변화를 야기한다. 최종적인 고체 구조는 입자의 위치가 정렬된 상태에서 경화 함으로써 얻을 수 있다. 외부에서 가해진 전기장의 방향은 복합재의 방향성과 일치하며 전기장의 세기와 적용시간은 폴리머 복합재의 이방성의 정도에 영향을 미친다. 기능성 복합재의 제작에 응용되는 전기장은 입자들이 일정한 방향으로 정렬된 복합재의 제작이나, 제작된 복합재의 표면의 특성 변화를 주고자 할 때 혹은 일정한 국부적 영역의 물리적 특성을 변형 하고자 할 때 적용될 수 있다[5-8].

직류와 교류 전기장 모두 적용이 가능하며 기지재료의 유전율과 유기 혹은 무기물의 입자 유전율이 차이가 클수록 그 현상은 더욱 뚜렷하다[9]. 매우 복잡한 형태의 구조에 대해서도 전기장의 적용이 가능하다. 필드장 적용기술을 활용하여 고체 전기유동 (ER: electro-rheological) 혹은 자기유동(MR: magneto-rheological) 재료를 제작 할 수 있다.

이 연구의 궁극적인 목적은 에폭시 기지에 알루미늄(Al_2O_3), 탄소나노튜브(CNT), 탄소(Graphite), 텅스텐(W) 등의 입자들로 구성된 폴리머 복합재의 미소구조를 전기장을 이용해서 변형시켜서 복합재의 기계적 열적 특성을 향상시키는 기술의 타당성을 검증하는 것이다. 전기장변형(electrostriction)은 필드장에 의해서 발생하는 응력의 결과이며 재료의 변수들에 의해서 표현될 수 있다. 이러한 재료의 변수들은 재료의 유전물성치의 변화에 기인하는 변형현상을 설명 할 수 있다. 나노복합재의 특성은 기존의 일반 섬유강화 복합재에 비하여 더 많은 에너지를 흡수할 수 있을 뿐만 아니라 입자들의 분포상태 및 형태에 따라서 다양한 기능을 가지도록 할 수가 있다. 이러한 장점 때문에 최근 나노복합재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 신소재, 바이오, 나노기술 등의 영역에서 주목을 받고 있다. 방사선 차폐의 경우 균일한 평판의 경우보다 길이가 긴 일자형태의 원통형 입자가 더 효과적이며 방사선 차폐에 더욱 좋은 기능을 가지고 있는 것이 확인되었다. 따라서 앞으로의 연구방향은 이러한 예측 가능한 결과를 바탕으로 하여 연구가 진행될 것이다.

2. Field-Aided Micro-Tailoring의 이론 배경

2.1 전기장에 의한 힘[10-13]

유전유체 속에 놓여있는 입자에 전기장(E)을 가하면 쌍극자모멘트(dipole moment) μ 가 발생하며 이것은 주변 연속체의 극성을 증가한다.

$$\mu = \epsilon_0 \epsilon_c \beta_F V E \quad (1)$$

입자의 극성모멘트 μ 는 입자의 체적 V , 주변 연속체의 유전율(dielectric constant) ϵ_c , 자유공간의 유전율(permittivity) $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} F/m$ (Farads per meter) 에 비례한다. 식 (1)의 무차원 계수 β_F 는 입자의 주변 연속체 보다 높은 극성효과와 입자의 형상 효과에 의한 소극(depolarization) 현상을 결합한 값이다. 어떠한 형태의 입자에 대해서도, 주변 기지와 입자의 상대적인 유전율(ϵ_c , ϵ_p), 전도율(σ_c , σ_p) 및 무차원 계수 β_F 의 계산이 가능하다.

Table 1 β_F values for diverse disks, cylinders and spheres[13].

	Disk	Cylinder	Sphere
Dielectrics	$\beta_{F,or} = \frac{(\epsilon_p - \epsilon_c)}{\epsilon_p}$	$\beta_{F,or} = \frac{2(\epsilon_p - \epsilon_c)}{(\epsilon_c + \epsilon_p)}$	$\beta_F = 3 \left(\frac{\epsilon_p - \epsilon_c}{\epsilon_p + 2\epsilon_c} \right)$
	$\beta_{F,pr} = \frac{(\epsilon_p - \epsilon_c)}{\epsilon_c}$	$\beta_{F,pr} = \frac{(\epsilon_p - \epsilon_c)}{\epsilon_c}$	
Conductor	$\beta_{F,or} = \frac{(\sigma_p - \sigma_c)}{\sigma_p}$	$\beta_{F,or} = \frac{2(\sigma_p - \sigma_c)}{(\sigma_p + \sigma_c)}$	$\beta_F = 3 \left(\frac{\sigma_p - \sigma_c}{\sigma_p + 2\sigma_c} \right)$
	$\beta_{F,pr} = \frac{(\sigma_p - \sigma_c)}{\sigma_c}$	$\beta_{F,pr} = \frac{(\sigma_p - \sigma_c)}{\sigma_c}$	

or: represents the field perpendicular to the field axis; pr: stands for parallel to the longest axis

대부분의 폴리머 복합재의 경우 주변 에폭시 기지와 입자의 유전율 및 전도율이 광범위한 전기장의 주파수 영역에서 흡사한 경우는 매우 드물다. 따라서 일정한 전기장의 주파수를 결정하면 두 재질간의 유전율 및 전도율 차이의 값을 극대화하여 β_F 의 값을 최대화 할 수 있다. Table 1에 각 입자의 형태에 따른 β_F 값을 계산하는 식을 제시하였다. β_F 는 대략 0.1~3 정도의 값을 가지며 불균일 전기장 $\nabla E \neq 0$ 속에 놓여 있는 유전체 입자가 받는 전기장적인 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$F = (\mu \cdot \nabla) E \quad (2)$$

대전되지 않은 입자가 불균일 전기장 속에서 극성효과에 의해서 이동하는 것을 유전영동(dielectrophoresis)이라 한다. 유전영동의 중요한 현상중의 하나가 쌍극자간 상호작용(dipole-dipole interaction)이다. 이 현상은 균일한 전기장이 인가된 현탁액 유체속에서도 일어난다. 이 경우 포함된 임의의 입자의 분극된 전기장이 주변의 다른 첨가 입자들의 중앙에서 그 전기장을 방해하는 역할을 하며 입자들 간의 인력이나 반발력을 만든다. 두 구의 쌍극자간 상호 작용력은 Landau와 Lifshitz[5]에 의해서 다음 식과 같이 주어진다.

Fig. 1 A schematic diagram of a field induced dipole moments, μ , inclusions. Deformation affects relative positions of inclusions and the local electric field.

$$F^{(e)} = \mu \cdot \nabla \left(3 \frac{(\mu \cdot r)r}{r^5} - \frac{\mu}{r^3} \right) \quad (3)$$

여기서 r 은 두 구의 중량을 연결하는 벡터이며 r 의 쌍극자 간 인력은 구의 분극화, μ 의 제곱에 비례하고, 구의 유전율이 주변 기지의 유전율 보다 크거나 작은 것에 상관없이 독립적이다. Fig. 1은 두 개의 구형태의 입자가 쌍극자 상호작용을 하며 상대적인 위치와 변위에 영향을 미치는 것을 나타낸다.

2.2 전기장에 의한 토오크

등방성 구 입자의 쌍극자 모멘트 $\mu = \alpha E$ 는 작용된 전기장에 평행하며 이 전기장에 의해서 토오크는 발생하지 않는다. 그러나 입자의 결정질이 이방성 이거나 혹은 비구형 형상이라면 쌍극자 모멘트 μ 는 전기장 E 에 평행하게 되어야 한다. 이때 전기장 속의 분극된 입자에 작용하는 토오크는 다음과 같이 계산되어 진다[10, 13].

$$T^{(e)} = \mu \times E \quad (4)$$

두 개의 이웃하는 구형 입자는 국부적 극성장을 교란할 것이다. 이것은 결과적으로 전기장의 방향과 평행하게 정렬하도록 하는 회전 모멘트를 발생시킨다. 비슷한 개념으로 실린더 형상의 파이버는 그 형상 때문에 그 축을 따라서 대부분 분극 된다. 이 현상은 전체 토오크로 계산되며 아래의 수식에 의해서 계산될 수 있다.

$$T = \mu_{pr} \times E_{or} - \mu_{or} \times E_{pr} \quad (5)$$

여기서 $E_{pr} = E^{(e)} \sin \theta$ 이다. 이것을 식 (5)에 대입하면 디스크, 실린더, 구에 각각 작용하는 토오크를 얻을 수 있다.

$$T = \frac{V}{2} \epsilon_0 \beta^T (E^{(e)})^2 \sin 2\theta \quad (6)$$

여기서 β^T 는 디스크와 실린더 형상의 경우 각각 $\beta^T = (\epsilon_p - \epsilon_c)^2 / \epsilon_p$, $\beta^T = (\epsilon_p - \epsilon_c)^2 / (\epsilon_c + \epsilon_p)$ 이다. 그러나 구형상의 경우는 0이 된다. 유사하게 점성 기지에 놓여있는 작은 입자에 작용하는 점성 토오크는 Happel과 Brenner 등에 의해 다음과 같이 제시되었다.

$$T^{(v)} = 6\eta K^T V \left(\frac{1}{2} \text{curl}(v_\infty) - \Omega \right) \quad (7)$$

여기서 v_∞ 는 주변의 교란되지 않은 유체의 속도, Ω 는 입자의 각속도, K^T 는 입자의 형상에 관계된 수치해석적 계수이다.

2.3 전기장에서의 구조체 형성

불균일 전기장 내에서의 입자들의 재배열(redistribution)은 두 가지 영향에 의해서 이루어지며, 유전영동(dielectrophoresis)과 토오크 때문이다. 점성 유체기지 속에 포함된 입자의 동적특성은 전기장에 의해 유기된 힘 $F^{(e)}$ 와 점성드래그(viscous drag) $F^{(v)}$ 의 균형 $F^{(e)} + F^{(v)} = 0$ 에 의해서 결정된다[14]. 반경 r 의 구형입자가 작용된 필드의 방향과 같은 방향에 놓여있고, 함유 입자들의 중간점 간의 거리를 l 이라고 가정하면, 그 운동방정식은 매우 단순한 형태로 표현된다.

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\mu^2}{4\pi^2 l^4 \epsilon_0 \epsilon_c \eta K^v r} \quad (8)$$

만약 식 (8)이 포함된 입자의 임의의 주어진 형상에 대하여, 전기장 내의 각각의 입자들이 그 지름과 같은 거리를 이동한다고 가정함으로써 해석적으로 혹은 수치적으로 계산되어질 수 있다면, 이러한 입자들이 움직여서 형성하는 체인형태로 만드는데 걸리는 시간을 알 수 있다. 식 (8)로부터 위치변화에 걸리는 시간은 유체의 점성(η (Pas))과 전기장 E (V/m)에 비례한다.

$$t \approx 10 \frac{\eta}{\epsilon_0 E^2} \quad (9)$$

식 (9)는 어떤 주어진 시스템에 대해서도 지지에 포함된 입자들이 체인을 형성하는데 걸리는 시간을 예측하는데 사용될 수 있다.

유체속에 함유된 섬유 및 박편에 작용하는 토오크는 필드에 의한 토오크 $T^{(e)}$ 와 유체에 의한 반대방향의 점성 드래그 $T^{(v)}$ 이다. 전기장과 점성 토오크의 상대적 균형으로부터 유도장에 의해서 섬유를 회전시키기 위한 시간을 예측할 수 있다.

$$T^{(e)} + T^{(v)} = 0 \quad (10)$$

Fig. 2 Electronic and microscope for nanocomposite.

Fig. 3 Experimental setup for making nanocomposite using FAiMTa technology.

식 (7)을 활용하여 관성력을 무시한 미분형 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\epsilon_0 \beta^T}{12\eta K^T} \left(E^{(e)} \right)^2 \sin 2\theta + \frac{1}{2} |curl(v_\infty)|_\theta \quad (11)$$

이 수식은 어떠한 주어진 입자의 형상이나 모양에 대해서도 해석적으로나 수식적으로 풀릴 수 있다. 그러나 함유 입자를 회전시키기 위해서 필요한 시간예측이 정확하게 이루어져야 된다. 먼저 섬유 형태의 입자를 생각해 보면, 평균적인 회전각도는 $\pi/4$ 라디안 정도 수준이다. 그러면 미분방정식의 해는 대략적으로 다음과 같이 근사화 된다.

$$t \approx 10^2 \frac{\eta}{\epsilon_0 E^2} \quad (12)$$

비슷한 방법으로 박판 입자(flake-like)에 대해서도 회전시키는데 필요한 시간을 예측 할 수 있다.

$$t \approx \frac{10^3}{\lambda} \frac{\eta}{\epsilon_0 E^2} \quad (13)$$

여기서 λ 는 박편의 두께와 직경의 비 이다.

Fig. 4 Electro circuit for applying electric field for FAiMTa.

3. 전기장에 의한 나노복합재 제조 실험

3.1 실험장치

FAiMTa를 적용한 나노복합재의 제조를 위해서는 먼저 전기영동 및 유전영동에 의한 입자의 회전을 가능하게 하기 위하여 고전압을 가해주는 장치가 필요하다. 이것을 위해서 고전압 증폭기(high voltage amplifier: TREK 610E), 신호발생기(function generator: Novatest 33521A) 및 오실로스코프가 필요하다. 입자의 크기, 기지의 점도, 전기장의세기 및 주파수 등이 입자의 운동에 직접적으로 영향을 미치는 변수들이다. Fig. 2에 디지털 현미경, 오실로스코프, 고전압증폭기, 신호발생기를 나타내었다. 디지털 현미경은 제작된 시편의 조직을 검사하기 위한 것이며 대략 수십 나노 사이즈까지의 크기를 측정할 수 있다.

실험장치의 레이아웃은 Fig. 3과 같다. 신호발생기에서 1V, 5Hz의 사인파를 발생시키고 고전압증폭기에서 고전압을 발생시킨다. 입자에 전기장을 가하기 위한 회로는 Fig. 4와 같다. 이 전기회로에 4kv/mm의 전기장 세기가 되도록 전기장을 만들어 주었다

3.2 기능성 마이크로/나노 복합재 제작

FAiMTa 기술의 유효성을 검증하고 새로운 효과를 입증하기 위하여 네 가지 종류의 시험시편을 제작하였다. 세라믹계통 및 금속계통의 입자를 검증하였고 입자의 상태에 따라서 마이크로 혹은 나노사이즈의 입자를 사용하였다. 사용한 네 가지 종류의 입자 및 각각의 간단한 물리적 성질을 요약하였다.

마이크로/나노입자의 특성

- Al_2O_3 : 고온내열성, 내마모성, 내화학적
- W: 고강도, 내열, 내마모, 내식, 내방사성
- Graphite: 내열성, 고강도, 전도성
- CNT: 초고강도, 전도성

기능성 및 나노복합재의 제작은 국내외적으로 많은 연구가 진행되었다[17-19]. 본 연구에서 나노복합재의 기지로서는 상온경화가 가능한 에폭시인 ㈜제일하이텍의 HTC-665C를

Fig. 5 The process for nanocomposite manufacturing.

Fig. 6 Particle location comparison between initial random(left) and aligned by electric field (right) with Al₂O₃, Graphite, CNT, Tungsten.

사용하였다. 에폭시의 점도는 3.0Pa·s이며 유전율은 약 5정도 된다. 각 입자의 사이즈는 다음과 같다. Al₂O₃는 10 μ m, CNT는

10nm, W는 40~60 μ m, Graphite는 10~20 μ m이다. 마이크로 및 나노사이즈의 미소입자들은 사용하는데 상당한 주의를 요한다. 따라서 모든 작업은 글로브박스에서 이루어졌으며 혼합비율은 부피비율로 약 5~20% 정도 되도록 하였다. 또한 전기장에 의한 미소입자의 이동에 의한 사진과 입자의 전기장을 가하지 않은 입자의 상태를 서로 비교하여 그 효과성을 검토하였다.

전기장에 의한 입자의 재배열로 마이크로/나노 복합재 시험시편의 제작과정을 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 글로브박스 안에서 미소분말입자와 에폭시 레진을 혼합한다. 분말입자가 아주 작은 사이즈이면 실험실의 공기를 오염시킬 우려가 있으므로 글로브박스 안에서 작업을 한다. 입자들이 균일하게 잘 분포할 수 있도록 충분히 저어서 혼합을 한다. 다음 단계로 혼합액 속에 있는 가스를 제거하기 위하여 진공용기 속에 집어넣어서 가스를 제거한다. 가스를 제거한 다음 진공발생기, 전압증폭기, 오실로스코프 등을 활용하여 전기장을 가한 다음 상온에서 경화시킨다. 이러한 일련의 과정들을 Fig. 5에 나타내었다. 이러한 이론적 원리를 적용한 기능성 복합재의 연구가 몇몇 연구자에 의해 수행되었다[15-17].

Fig. 6는 전기장을 이용하여 입자들을 재배열한 결과를 나타낸다. 입자의 형태, 크기, 유전율, 에폭시의 점도, 상태, 전기장의세기 등 다양한 실험조건에 의하여 입자의 배열정도는 크게 영향을 받는다. 따라서 최적의 조건을 찾기 위해서는 수많은 시행착오가 필요하며 본 연구에서는 무수히 많은 시행착오를 통하여 입자들을 재배열 하였다. W, CNT, Graphite는 입자의 배열이 매우 원활하게 진행되었으며 Al₂O₃는 입자의 사이즈, 기지재료 및 기타 여러 요인에 의하여 상대적으로 배열의 정도가 낮게 나타났다.

이러한 입자의 배열 정도는 수초에서 수십초 사이에 급격히 진행되며 특히 에폭시의 점도가 낮을수록 빨리 재배열된다. CNT의 경우 매우 미세한 입자들이 아주 규칙적으로 잘 배열되었으며, Graphite의 경우 입자들이 덩어리의 형태로 형성하면서 배열되었다. Fig. 6은 전기장에 의한 입자 배열의 이론적 근거를 실험을 통하여 증명한 결과이며 앞으로 더욱 많은 연구가 진행될 것이다.

4. 시험결과 및 검토

제작된 시편의 강성 및 조직검사를 수행하였다. 강성시험을 위해서는 DMA(dynamic mechanical analyzer)를 사용하여 수행을 하였고 마이크로 및 나노사이즈의 입자배열은 SEM(scanning electron microscope) 사진 촬영을 통하여 확인하였다. 복합재 시편의 경우 강성시험을 위해서는 단순인장 시험에 의한 결과는 큰 의미가 없다. 따라서 DMA에 의한 영률 시험결과를 대부분 사용하고 있으며 본 연구에서는 DMA 시험에 의해서 영률 시험을 수행하였다.

Fig. 7 DMA test of the composite coupon.

Table 2 Young's moduli of the individual composite coupon

Volume Fraction(0.15)	Young's Modulus (MPa) Oriented (Random)
Al ₂ O ₃ /E	2300 (2120)
Gr/E	1580 (1260)
W/E	1100 (820)
CNT/E	1670 (1330)

Table 2에 각 시험편의 강성을 나타내었다. 강성은 예측한 바와 같이 세라믹 계열인 Al₂O₃가 가장 높았고 텅스텐 입자를 함유한 에폭시가 가장 낮았다. 이것은 텅스텐 입자 복합재의 경우 기지인 에폭시의 영향이 크게 작용한 것으로 예측된다.

본 연구에서 가장 핵심적으로 다루고 있는 나노복합재 제작의 FAiMTa 기술 구현성을 확인하기 위하여 미소 입자의 배열을 사진을 통하여 확인하였다. SEM 사진 촬영을 위해서는 일정한 사이즈의 시편을 준비하여야 하며 또한 Gold 코팅을 하여야 입자의 명확한 상태를 확인 할 수 있다. SEM 사진의 경우는 전자 입자의 반사에 의해서 사진을 촬영하는 것이기 때문에 기지인 레진의 경우는 전자 입자가 투과를 하여서 사진 촬영이 불가능하다. 이러한 이유 때문에 Gold 코팅한다.

Fig. 8 Coupon preparation for SEM image scanning.

Fig. 8은 SEM 사진 촬영을 위해서 준비한 시편의 사이즈 및 사진 촬영을 위한 Gold 코팅을 나타낸다. SEM 이미지 촬영을 위해서는 JEOL 사의 SEM을 사용하였다.

Fig. 10은 산화알루미늄(Al₂O₃)입자의 재배열을 촬영한 사진이다. 1.2kV/mm 세기로 5Hz의 주파수의 정현파 속에서 수행되었다. 그림에서 보는 바와 같이 입자들이 가해진 전기장을 따라서 재배치 된 것을 알 수 있다.

Fig. 9 JEOL JSM-6300 electron microscope.

Fig. 10 Al₂O₃ particle alignment along with electric field.

Fig. 11 Graphite powder inclusions aligned by electric field in epoxy suspension.

Fig. 12 CNT particle inclusions aligned by electric field in epoxy suspension.

Fig. 11과 12은 Graphite와 CNT 입자가 가해진 전기장의 방향을 따라서 재배치 된 것을 나타낸다. 이와 같이 유전체의 미소입자들에 전기장을 가하여서 일정한 방향으로 배열하는 FAiMTa 기술의 유효성을 입증하였고 이것을 활용하여 나노 복합재의 물성치의 변화를 제어할 수 있는 기반 기술을 확보 하였다. 전기적, 열적, 기계적 특성을 가지고 있는 입자들이 일정한 방향을 따라서 배열한다는 것은 그 구조체의 물성치 즉 전기전도성, 열전도성, 기계적 강도 및 기타 물리, 화학적 물성치의 방향성을 가지게 할 수 있다는 것을 의미한다.

고온 고강도용 등 기계적 성질이 우수한 합금에 주로 사용되는 텅스텐은 3410℃의 높은 용점과 높은 열 및 전기 전도성을 가지고 있다. Fig. 13는 바닥면에 깔린 구리(Cu) 와이어에서

Fig. 13 Tungsten particle redistribution depending on electric field.

발생하는 전기장의 영향에 의해서 에폭시 속에 포함된 텅스텐 입자들이 전기장에 의해 한쪽으로 쏠린 것을 알 수 있다. 이와 같이 특수한 성질을 가진 금속, 혹은 세라믹 등 비금속 물질의 입자들이 기지속에 포함되어 나노복합재의 구조를 구성할 때 이러한 입자들의 분포, 배열, 밀도 등을 외부에서 가해지는 전기장의 영향에 의해서 제어 할 수 있음이 확인 되었다. 텅스텐 입자들의 분포 밀도가 높은쪽은 열전도, 전기전도성이 탁월한 성능을 나타낼 것이고 반대쪽은 그 역효과를 나타낼 것이다. 이러한 일련의 특성 및 기술이 FAiMTa 기술의 기반이며 나노 복합재 제작 및 물성치 제어의 중요한 한 부분일 차지한다[20].

5. 결 론

기존의 전통적인 복합재 제작기술의 범위에서 벗어나서 전기장에 의한 마이크로 혹은 나노사이즈의 입자를 제어함으로써 방향성이 있는 일정한 특징적인 물성치를 갖게 하는 FAiMTa 기술의 적용 유효성을 검증하였다. 본 연구에서는 Al_2O_3 , Tungsten, Graphite, CNT등의 네 가지 물질에 대하여 시험을 수행하였고 Fig. 6에 나타난 바와 같이 입자들이 전기장에 의해서 재배열 하는 현상을 명확하게 규명하였다. 입자들의 배열 상태에 따라서 다양한 구조체 특징을 나타내며 대표적인 것이 강성이다.

본 연구는 FAiMTa기술에 의한 1차적인 목적인 입자의 재배열 가능성을 증명하였고 또한 이러한 결과에 따른 강성에 차이가 있음을 확인하였다. 나노복합재는 기지인 에폭시에 포함된 특징성을 가지는 입자들의 배열 상태에 따라서 열전도, 전기전도, 강성 등의 물리적 특성이 달라지게 된다. 차후 이러한 다양한 물리적화학적 특성 규명에 대해서 더 많은 연구가 필요하며, 이 결과를 바탕으로 다양한 성능을 가진 나노복합재의 제작이 가능하다.

참고문헌

- Shkel, Y.M., and Klingenberg, D.J., "A continuum approach to electrorheology," *Journal of Rheology*, Vol. 43, No. 5, 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.
- Landau, L.D., and Lifshitz, E.M., *Electrodynamics of Continuous Media*, Pergamon, New York, 1984.
- ARP, P.A., Foister, R.T., and Mason, S.G., "Some electrohydrodynamic effects in fluid dispersions," *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 12, No. 4, 1980, pp. 295-356.
- Martin, J.E., and Anderson, R.A., "Chain model of electrorheology," *Journal of Chemical Physics*, Vol.104, No. 12, 1996, pp. 4814-4827.
- Park, C., and Robertson, R.E., "Alignment of particles by an electric field," *Journal of Material Science and Engineering: A-Structure*, Vol. 257, No. 2, 1998, pp. 295-311.
- Sauer, F.A., *Forces on suspended particles in the electromagnetic field, in coherent excitations in biological systems*, Springer-Verlag: Berlin, 1983.
- Landau, L.D., and Lifshitz, E.M., *Electrodynamics of continuous media*, 1984, New York: Pergamon.
- 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.
- Norman, D.A., and Robertson, R.E., "Rigid-particle toughening of glassy polymers," *Polymer*, Vol. 44, No. 8, 2003, pp. 2351-2362.
- Pohl, H.A., *Dielectrophoresis*, Cambridge University Press, Cambridge, 1978.
- Bonnecaze, R.T., and Brady, J.F., "Dynamic simulation of an electrorheological fluid," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 96, No. 3, 1992, pp. 2183-2202.
- Gandhi, M., and Thompson, B., *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, London, 1992, pp. 136-274.
- Wegner, G., "Functional polymers," *Acta Materi-alla*, Vol. 48, No. 1, 2000, pp. 253-262.
- Pitakthapanaphong, S., and Busso, E.P., "Self-consistent elastoplastic stress solutions for functionally graded material systems subjected to thermal transients," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 50, No. 4, 2002,

- pp. 695-716.
- 18) Wang, Z.J., Kwon, K.J., Gu, G.Y., and Park, J.M., "Interfacial Control of Multi-functional CNT and ITO/PET Nanocomposites having Self-Sensing and Transparency," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 45-50.
- 19) Wang, Z.J., GnidaKouong, J., Park, J.M., Lee, W.I, and Park, J.K., "Interfacial properties of gradient specimen of CNT-epoxy nanocomposites using micromechanical technique and wettability," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 5, 2009, pp. 8-14.
- 20) Jared, A.R., *Manufacturing and characterization of micro-tailored composites*, M.S thesis, University of Wisconsin-Madison, 2006.