

論文

자체 감지능 및 작동기용 다기능 하이브리드 나노복합재료의 계면 특성 및 소수성 표면 연구

왕작가*, 공조엘*, 장정훈**, 김명수*, 박종만**

Interfacial Evaluation and Hydrophobicity of Multifunctional Hybrid Nanocomposites for Self-sensing and Actuation

Zuo-Jia Wang*, Joel GnidaKouong*, Jung-Hoon Jang**, Myung-Soo Kim*, Joung-Man Park**

ABSTRACT

Interfacial evaluation and hydrophobicity of Ni-nanopowder/epoxy composites were investigated for self-sensing and actuation. Contact resistance and resistivity were measured using gradient micro-specimens. The actuation of the composites in the electromagnetic field was studied with three wave functions, i.e., sine, triangle and square functions. Due to the presence of hydrophobic domains on the heterogeneous surface, the static contact angle of Ni-nanopowder/epoxy nanocomposite was about 110° , which was rather lower than that for super-hydrophobicity. The dynamic contact angle showed the similar trend of static contact angle. Ni-nanopowder/epoxy composite was responded well for both self-sensing and actuation in electromagnetic field due to the intrinsic metal property of Ni-nanopowder. Displacement of the actuator of Ni-nanopowder/epoxy composite was evaluated to obtain the maximum and the optimum performance using laser displacement sensor as functions of the wave type, frequency, and voltage. Actuation of Ni-nanopowder/epoxy composites also increased as functions of applied frequency and voltage. Actuated strain increased more rapidly at sine wave with increasing voltage compared to those of triangle or rectangular waves.

초 록

니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 계면 특성과 소수성을 자체-감지능과 작동기 측정을 위해 평가하였다. 경사형 시편을 사용하여 접촉 저항 및 저항도를 측정하였다. 자기장에서 복합재료의 작동성을 세가지 파형들, 즉, 싸인, 삼각, 그리고 사각파를 사용하여 평가하였다. 균일하지 않은 표면에 존재하는 소수성 영역 때문에 Ni-에폭시 나노복합재료의 어떤 부분은 초소수성보다는 다소 낮은 접촉각인 110° 를 가졌다. 동적 접촉각은 정적 접촉각과 경향이 상호 일치함을 보였다. 니켈-나노분말의 고유의 금속성질 때문에 자체 감지를 확인하였으며, 또한 전자기장에 작동 반응을 잘 하였다. 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 최대 및 최적의 성능을 얻기 위해서, 레이저 변위 센서를 사용하여, 파형, 주파수, 그리고 전압의 함수로 작동기의 변위를 평가하였다. 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 작동은 적용된 주파수와 전압의 함수로써 증가하였다. 작동된 복합재료들의 변형률은 전압의 증가에 따라 삼각 혹은 사각파보다 싸인파에서 더욱 빨리 증가하였다.

Key Words : 자체-감지(self-sensing), 작동기(actuation), 다기능성(multi-functional), 소수성(hydrophobicity), 젖음성(wettability)

*+ 경상대학교 나노·신소재공학부, 공학연구원, 교신저자(E-mail:jmpark@gnu.ac.kr)

** 한국재료연구소 복합재료그룹

1. 서론

복합재료에서 계면접착력은 복합재료 고유의 물성치를 높이는 데 중요한 역할을 한다. 강하고 내구성 있는 계면접착력은 기지로부터 강화재의 응력을 효율적으로 전달시켜서, 복합재료의 기계적인 특성 향상을 가져 올 수 있다 [1, 2]. 전기-미세역학시험법은 경화특성, 계면특성과 비파괴적 거동을 감지하기 위하여 효율적이고 새로운 비파괴 평가 (NDE) 방법으로 연구되고 있다 [3]. 이는 전도성 섬유가 보강 섬유로서의 역할뿐만 아니라 자체 센서 역할도 함께 할 수 있기 때문에 특히 유용한 방법이다[4, 5].

계면 접착력은 강화재와 기지재 물질 간의 계면에 존재하는, 산-염기 결합에 기여하는 많은 반응기들에 의존한다. 섬유 표면에 대한 산-염기 결합은 주어진 기지재 물질이 함유한 계면접착강도를 조절하기 위한 중요한 요인이다. 그러므로, 기지재가 가진 산-염기 결합을 사전에 알게 된다면 강화재와 기지재간의 최적 조합을 가능하게 할 수 있다. 산-염기 결합 조성의 평가는 동적 접촉각 측정을 통해 가능하다. 그리고, 짧은 범위의 수소 결합은 접착에 중요한 개념으로 적용된다는 Fowkes의 제한에 따른다 [6, 7]. 한편, 접촉각 실험을 통하여 나노 물질이 강화된 고분자 표면의 계면특성을 연구할 수 있다.

현재까지 고분자 복합재료를 바탕으로 한 여러가지 작동기에 관한 연구들이 보고 되었다. 복합재료의 작동과 감지 특성은 고유의 전도성과 절연성에 강하게 의존한다 [8]. 셀룰로오스는 잘 알려진 천연 고분자이며, 압전능을 가지고 있기 때문에 센서와 작동기 재료로 사용될 수 있는 스마트 재료로 연구되고 있다 [9]. 그것은 전기-작동 종이(Electro-Active Paper, EAPap)로 명명되었으며, 기본적으로 셀룰로오스 필름으로 만들어졌다 [10-12]. 한편, 이온-교환 금속-고분자 복합재료 (ionic polymer-metal composite, IPMC)는 전기장에서 표면층에서 전압이 걸리면 굽혀지는 전자-활성 고분자이다. 전형적인 IPMC는 양쪽에 금속으로 덮혀 있는 이온 교환 고분자 층이다.

탄소 나노섬유 혼합 작동기가 또한 강도와 강성도를 개선함과 함께 우수한 전기화학 작동기로 사용되기 위해 개발되었다. 하지만, 그 물성치들이 각각의 나노섬유의 물성치에 비해 아직도 현저히 낮다 [13, 14].

본 연구에서는, 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 계면적 특성을 젖음성 시험을 이용하여 평가하였고 소수성은 정적 또는 동적 접촉각에 의해 조사하였으며, 접착일과 재료의 기계적인 특성 사이의 관계를 확인하였다. 또한, 니켈-나노분말과 에폭시 수지로 만들어진 작동기가 스마트 소재로서의 성능을 평가하기 위해 연구되었다. 나노재료가 강화된 고분자 복합재료의 작동능은 여러가지 파형의 전기장 아래서의 작동기 성능을 향상시키기 위해 평가하였다. 또한, 작동된 변위를 측정함으로써 작동기의 특성의 최적 조건을 찾기 위해 수행하였다.

2. 실험

2.1 재료

니켈-나노분말 (나노 테크놀로지사, 한국)이 전기-마그네틱 작동기를 제작하는데 사용되었다. 모재로 에폭시 (YD-128, 국도화학(주))가 사용되었으며 경화제로는, 메틸 테트라히드로 프탈린 무수물 (Methyl tetrahydrophthalic anhydride, MTHPA, KBH-1089, 국도화학(주))이 에폭시와 무게비로 1:1 비율로 사용하였다. 니켈-나노분말의 밀도는 8.902 g/cm^3 이며, 에폭시와 경화제의 밀도는 1.2 g/cm^3 를 사용하였다.

2.2 니켈-나노분말/에폭시 복합재료 시편제조

Fig. 1은 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 제조공정을 보여준다. 니켈-나노분말은 덮혀진 비이커에서 2시간 동안 초음파 처리 (sonication)에 의해 아세톤에 분산되었다. 에폭시 용액상태로 분산되어 있는 니켈-나노분말은 추가적인 2시간 동안 초음파 처리하에서 용매를 증발시켰다. 잔류 용매는 12 시간동안 50°C 에서 진공오븐을 사용하여 제거하였다. 센서 시편으로는 1 Vol %로 제작되었으며, 작동기 시편으로는 10 Vol %로 각각 제작되었다.

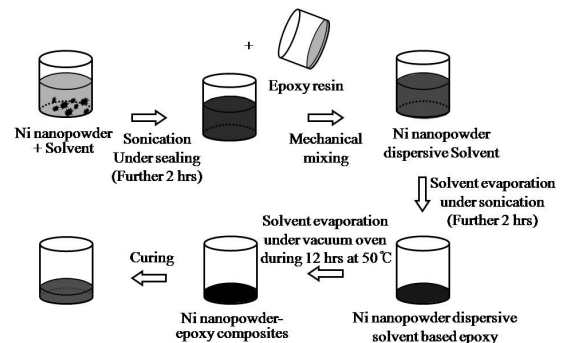


Fig. 1 Preparing of Ni-nanopowder/epoxy composites.

2.3 실험 방법

2.3.1. 경사형 시편의 전기저항 측정

Fig. 2는 니켈-나노분말/에폭시와 구리선과의 접촉저항을 측정하기 위한 경사형 시편을 나타낸다. 경사형 시편에 대한 간격은 각각 2, 5, 10 및 20 mm이다. 계면에서의 접촉저항은 미세 및 나노구조에 매우 민감하다. 2점 또는 4점법에 의한 전기적 특성을 측정하는데, 구리와의 이온과 니켈-나노분말/에폭시간의 접촉저항은 전기접촉 간격이 0으로 외삽하는 2점법에 의해 결정되었다. 또한, 단(single) 탄소섬유가 함침된 에폭시 또는 니켈-나노분말/에폭시 복합재료를 이용하여 결로 강성도를 측정하였다.

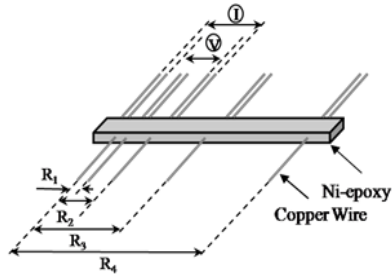


Fig. 2 Gradient specimen of Ni-nanopowder/epoxy composite.

2.3.2 젖음성 측정

니켈-나노분말/에폭시 나노복합재료에 물방울을 떨어뜨린 정적인 접촉각은 광학현미경을 이용하여 측정하였다. 나노복합재료의 동적 접촉각을 측정할 때는 Wilhelmy plate 시험법 (Sigma 70, KSV Co., 핀란드)을 사용하였다. 측정 용매로 이온이 제거된 증류수를 사용하였다. Wilhelmy plate의 기본적인 식은 다음과 같다:

$$F = mg + P\gamma_{LV} \cos \theta - F_b \quad (1)$$

여기서 F 는 전체 힘이며, m 은 시편의 무게, g 는 중력 가속도, F_b 는 부력, P 는 섬유둘레길이, γ_{LV} 는 액체의 표면장력이다. 전체 표면장력(γ^T)은 Lifshitz-van der Waals 조성, γ^{LW} 과 산-염기 조성, γ^{AB} 의 합이다. 산-염기 조성 (혹은 수소 결합)은 전자받기, γ^+ 와 전자주기, γ^- 조성을 포함한다.

위 식의 구성성분을 각각 계산하면 접착일, W_a 을 나타내는 변형된 Young Dupre식[15]은 다음과 같이 나타낸다:

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

고체의 γ_S^{LW} 값은 전자받기와 전자주기가 없는 무극성 용액의 접촉각으로부터 구해진다. 극성과 분산표면에너지를 구하기 위해, Owens-Wendt 식 [6]은 다음과 같이 표시된다.

$$W_a = \gamma_L (1 + \cos \theta) = 2(\gamma_S^d \gamma_L^d)^{\frac{1}{2}} + 2(\gamma_S^p \gamma_L^p)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

2.3.3 전자기장에서의 작동기 실험

자기 홀더 (holder) (EE-40, DC 24V, 0.24A) 주변의 자장은 자기 홀더 코일에 흐르는 전류에 의해서 형성된다. Fig. 3은 자기장 속의 작동기의 전체 실험 장치를 보여주고 Fig. 4는 자기 홀더 주변의 작동기의 작동 개념도를 보여준다. 전기-자기장에서의 작동기의 실험시스템은 공기중에서의 작동기의

작동과 비슷하다. 전기-자기장은 DC 24 V 그리고 0.24 A 용량의 20 mm 반경을 가진 전기-자기실린더를 사용하여 형성되었고, 발생된 작동 크기는 오실로스코프를 사용하여 측정하였다. 작동된 연신율은 시편의 변위를 측정함으로써 계산되었다.



(a)



(b)

Fig. 3 Experimental photos of actuator in magnetic field: (a) full set; and (b) jig area

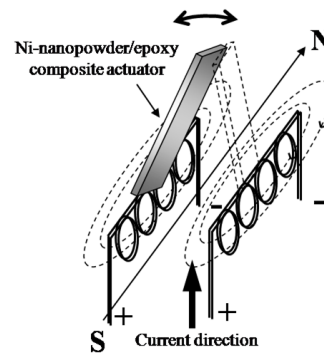


Fig. 4 Scheme of actuator processing in magnetic field.

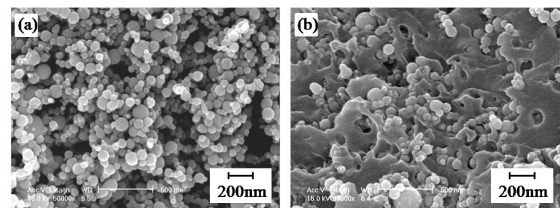


Fig. 5 FE-SEM photos: (a) Ni-nanopowder; (b) Ni-nanopowder/epoxy composites.

3. 결과 및 토론

3.1 FE-SEM 및 겉보기 강성도

Fig. 5는 순수 니켈-나노분말과 에폭시 수지에 있는 니켈-나노분말의 분산상태의 사진이다. 대체로 니켈-나노분말은 에폭시에 균일하게 분포되어 있으므로, 전기적, 기계적 물성에 기여할 것이다.

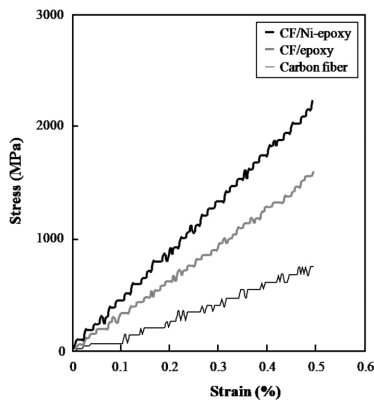


Fig. 6 Apparent modulus of carbon fiber with Ni- nanopowder/epoxy composites.

Fig. 6은 단일 탄소섬유와 단일 탄소섬유강화된 에폭시, 혹은 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 응력-변형율을 보여준다. 기지재의 강화효과는 기지재에 함침되어 있는 단일탄소섬유의 강성도인 겉보기 강성도에 의하여 간접적으로 측정된다. 예상대로, 탄소섬유 함침된 기지의 겉보기 강성도는 단순 탄소섬유보다 컸다. 니켈-나노분말/에폭시 복합재료는 탄소섬유/에폭시 복합재료보다도 크게 나타났으며, 이는 니켈-나노분말의 강화효과로 인한 보다 나은 응력-전달효과에 기인한다고 생각된다.

3.2 게이지 간격에 따른 접촉저항 및 저항도

Fig. 7은 2-점 또는 4-점법을 사용한 전기저항 측정을 보여준다. Fig. 7(a)는 두 방법을 사용하는 전기저항을 보여준다. 2-점법의 곡선의 경우는 간격길이에 대한 선형 외삽을 하여 y-절편으로부터 접촉저항, $2R_c$ 를 구할 수 있다. 그러나, 4-점법의 경우는 외삽된 선이 거의 원점을 지나간다. 이 결과는 왜 4-점법이 접촉저항들에 의해 영향을 받지 않고 효과적으로 전기저항치를 측정하는데 사용되는가를 보여준다.

Fig. 7(b)는 위 두 방법을 사용하여 구한 전기저항도의 결과를 보여준다. 4-점법을 사용하여 구한 전기저항도는 간격에 상관없이 일정함을 보여 주었으나, 2-점법의 경우는 간격에 따라 크게 달라짐을 보여주었다. 이는, 간격이 줄어들수록 접촉저항이 계산과정에서 전체 저항에 영향을 크게 주기 때문이다.

Fig. 8은 반복하중하에서의 니켈-나노분말/에폭시 나노복합재료의 접촉저항도를 나타낸다. 비교적 작은 양인 1 vol%에서, 다수의 잡음과 함께 감지능을 보여준 점은, 니켈-나노분말의 형상이 구형이라 전기적 percolation이 좋지 않기 때문이다. 이는, 분상의 최적 공정뿐만이 아니라, 전도성 나노입자의 형상비도 매우 중요한 변수임을 의미한다.

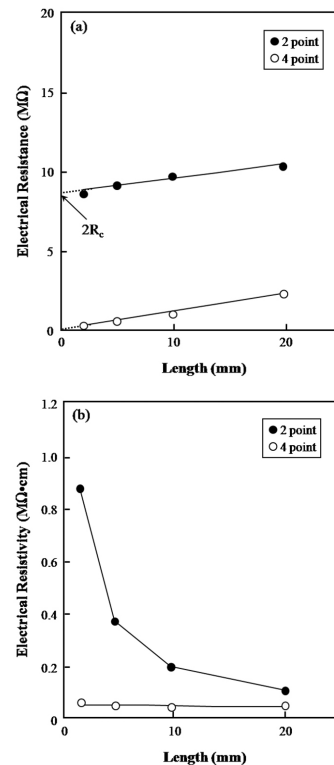


Fig. 7 Electrical measurement of gradient specimen: (a) electrical resistance; and (b) electrical resistivity.

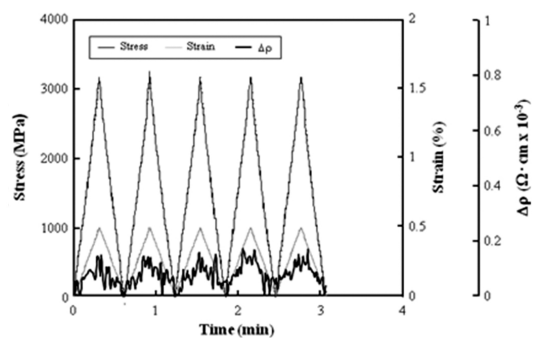


Fig. 8 Electrical contact resistivity measurements of Ni-nanopowder/epoxy nanocomposites.

3.3 젖음성과 표면 에너지와의 상관관계

Fig. 9는 순수 에폭시와 니켈-나노분말/에폭시 나노복합재료 표면에서의 물방울에 대한 정적 접촉각을 보여 준다. 니켈-나노분말/에폭시 나노복합재료의 정적 접촉각은 약 110 도이다. 이는 초 소수성은 아니지만 그래도 상당히 큰 소수성을 가진다. 니켈-나노분말/에폭시 나노복합재료와 비교하면 순수 에폭시의 정적 접촉각은 상당히 낮은 각, 68 도를 보여 준다.

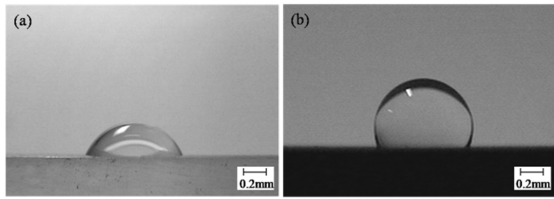


Fig. 9 The photos of static contact angle: (a) water droplet on neat epoxy plate; (b) water droplet on Ni-nanopowder/epoxy nanocomposite plate.

이것은 니켈-나노분말을 함유하는 에폭시의 미세 나노 구조와 더불어 증가된 점도로 인한 상이한 표면에너지를 가진다는 것을 의미한다. 접촉각의 증가는 또한, 에폭시에서의 니켈-나노분말의 불균일한 배열에 기인하여 소수성을 보여주는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 각각 순수 에폭시 시편과 니켈-나노분말/에폭시 나노복합재료 시편의 동적 접촉각을 보여준다. 동적 접촉각은 정적 접촉각과 동일한 경향임을 알 수 있다.

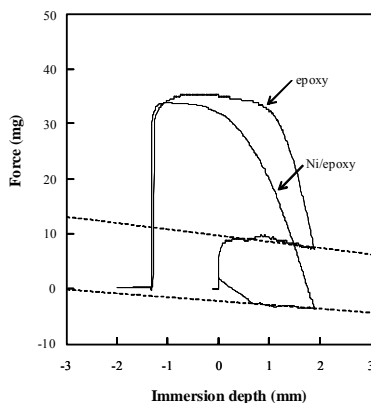


Fig. 10 Dynamic contact angle of neat epoxy and Ni-nanopowder/epoxy composites in water.

Fig. 11은 네 가지 용매를 사용하여 앞의 식 (5)와 (6)을 이용하여 계산된 전자주기와 전자받기로 부터, 구성조성, 극성과 분산 자유에너지 항들을 구하는 중간 과정을 보여준다. 실험식으로부터 구한 값들을 위 수식들의 연립방정식을 통하여 구하게 된다. 니켈-나노분말/에폭시 나노복합재료는 표면에 존재하는 니켈-나노분말 미세구조 때문에 더 높은 표면에

너지를 가지는 것으로 판단된다.

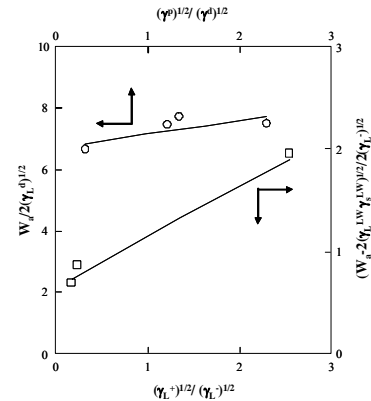


Fig. 11 Plots of polar and dispersive free energy terms and donor and acceptor components.

Table 1 Acid-base and polar-dispersion surface energy component (mJ/m²)

Type	γ^{LW}	γ^+	γ^+	γ^d	γ^p	γ_s^T	$W_a^{(1)}$
Carbon fiber	17.9	4.2	0.1	10.3	9.6	19.3	-
Epoxy	21.0	2.4	0.4	29.4	21.1	23.0	42.3
Ni-Epoxy	33.5	0.2	1.1	45.1	0.44	34.4	53.6

¹⁾ Work of adhesion with carbon fiber

Table 1은 탄소섬유, 순수 에폭시와 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 산-염기 상호작용과 극성-분산 표면에너지 조성들을 나타내었다. 탄소섬유와 니켈-나노분말/에폭시 복합재료 간의 접착일은 카본과 순수 에폭시간의 접착일 보다 큰 값을 보여주었다. 이는 증대된 점도와 증대된-산-염기 상호작용에 따른 표면장력 때문으로 기인한다.

3.4 자기장에서 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 전자기 작동

Fig. 12는 세가지 파의 함수, (a) 사인, (b) 삼각, 그리고 (c) 사각 형태함수를 사용한 0.5 Hz 와 10 V의 자기장 속에서 10 vol% 니켈-나노분말/에폭시 작동기의 운동을 보여준다. 다른 두파는 약간 증가된 운동을 보여주었지만 사각파는 큰 작동 연신율을 보여주었다. 작동기의 운동은 파 함수의 변화와 더불어 두가지 다른 형태를 보여준다. 파형은 각 주 파수에서 비슷하다.

Fig. 13은 파형 함수와 전압의 변화에 따른 니켈-나노분말/에폭시 작동기의 변위를 보여준다. 사각파에서 작동기의 변위는 다른 두 파함수보다 높았다. 사인과 삼각파에서의 작동기의 변위는 15 V까지 약간 증가하였다. 선택한 파형종류와 작동 연신율과의 관계에서 사각파가 작동 연신율을 크게 나타나는 이유는, 순간적으로 적용되는 사각파의 전류 세기가 점차적으로 증대되는 싸인 또는 삼각파보다 크기 때문이 좀 더 큰

작동력을 유발시키기 때문인 것으로 사료된다.

니켈-나노분말은 니켈-나노와이어와 비교하여 크게 다른 형상비를 제외하고는 자기장에서 작동 성능은 서로 비슷하다. 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 작동은 교류인 자기 방향을 따라 움직였다.

Fig. 14는 자기장에서 작동기의 움직임을 보여준다. 작동 운동은 굽혀지지 않고 일직선의 움직임을 나타내었다. 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 운동은 전류변화를 통해 변화하였다.

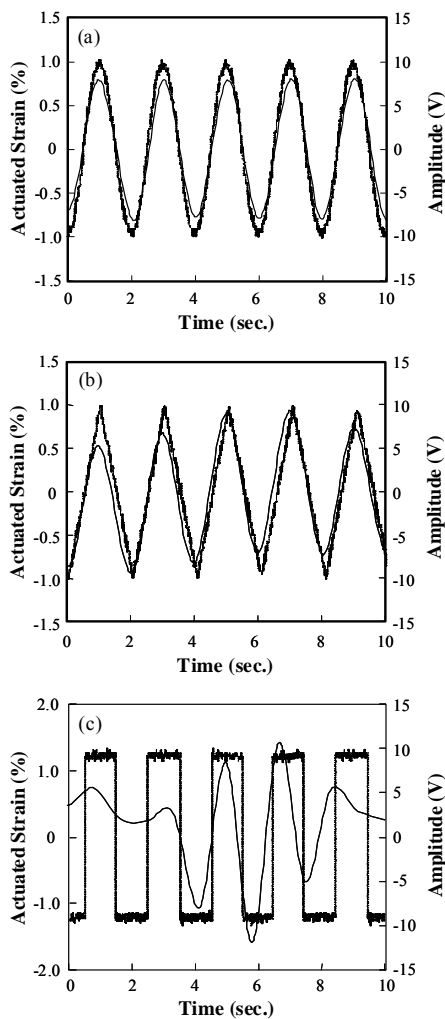


Fig. 12 Movement of actuator of 10 vol% Ni-nanopowder/epoxy at 0.5 Hz and 10 V in air field with wave function: (a) sine; (b) triangle; and (c) square.

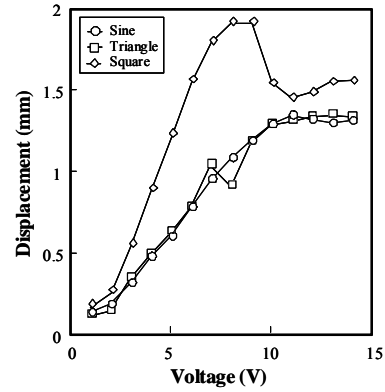


Fig. 13 Displacement of actuator of Ni-nanopowder/epoxy composites with wave function and voltage.

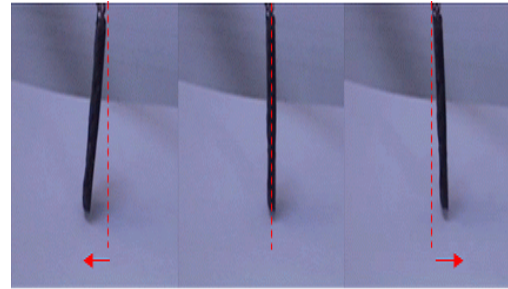


Fig. 14 Photos of actuator movement under magnetic field.

4. 결 론

니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 계면 특성, 초소수성, 자체감지능 그리고 자기장에서 작동기로서의 사용가능성을 위한 여러 가지의 예비성능들을 평가하였다. 경사형 시편을 사용하여 접촉 저항 및 저항도를 측정하였다. 균일하지 않은 표면에 존재하는 소수성 영역 때문에 니켈-나노분말/에폭시 복합재료의 어떤 부분은 초소수성보다는 다소 낮은 소수성 접촉각을 보였다. 동적 접촉각은 정적 접촉각과 유사한 경향을 보였다.

니켈-나노분말 복합재료는 자체-감지능을 보여 주었을 뿐만 아니라, 작동기로서 자기장 하에서 잘 반응하였다. 사각파 함수에서 작동된 연신율은 자기장에서 전압의 증가와 더불어 다른 두 파함수 보다 컸다. 자기장에서 다른 파형에서는 비슷한 변위를 보이는 반면 니켈-나노분말 복합재료의 변위는 10 V까지는 급격히 증가된다. 0.5 Hz 이상에서는 작동된 연신율이 보이지 않았고 세가지의 다른 파함수의 변위는 11 V 이상에서는 비슷한 변위를 보였다.

감사의 글

이 연구는 2008년 한국학술진흥재단 기본연구 이공분야 기초연구과제 지원사업(단독연구) (KRF-2008-313-D00493)의 지원을 받아 수행했습니다. 본 연구자 중 왕작가는 2단계 BK21의 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) S. J. Park, and Y. S. Jang, "Interfacial characteristics and fracture toughness of electrolytically Ni-plated carbon fiber-reinforced phenolic resin matrix composites," *J. Coll. Interf. Sci.*, Vol. 237, 2001, pp. 91-97.
- 2) L. Jin, F. Qun, W. H. Chen, K. B. Huang, C. Y. Ling, "Effect of electro-polymer sizing of carbon fiber on mechanical properties of phenolic resin composites," *Trans. Nonferrous Met Soc*, Vol. 16, 2006, pp. 457-461.
- 3) 김평기, 장정훈, 김성주, 박종만, 황병선, "미세역학적 시험법과 음향방출을 이용한 Jute 및 Hemp 섬유/폴리프로필렌 복합 재료의 내구성 및 계면 평가," *한국복합재료학회지*, Vol. 20, No. 3, 2007, pp. 55-62.
- 4) X. Wang, D. D. L. Chung, "Improving the bond strength between carbon fiber and cement by fiber surface treatment and polymer addition to cement mix," *Cem. Conc. Res.*, Vol. 26, 1996, pp. 1007-1012.
- 5) J. M. Park, S. I. Lee, K. W. Kim, and D. J. Yoon, "Interfacial properties of electrodeposited carbon fibers/epoxy composites using micromechanical technique and nondestructive evaluation," *J. Coll. Int. Sci.*, Vol. 237, 2001, pp. 80-90.
- 6) N. Dilsiz and J. P. Wightman, "Effect of acid-base properties of unsized and size carbon fibers on fiber/epoxy matrix adhesion," *Colloids and surfaces A*, 164, 2000, pp. 325-336.
- 7) J. M. Park, T. Q. Son, J. G. Jung, and B. S. Hwang, "Interfacial evaluation of single Ramie and Kenaf fiber/epoxy resin composites using micromechanical test and nondestructive acoustic emission," *Composite Interfaces*, 13(2-3), 2006, pp. 105.
- 8) L. Yang, K. Setyowati, A. Li, S. Gong, and J. Chen, "Reversible Infrared Actuation of Carbon Nanotube-Liquid Crystalline Elastomer Nanocomposites", *Adv. Mater.*, 9999, 2008, pp. 1-5.
- 9) G. R. Filho, "Application of the cuprammonium process (process for the production of regenerated cellulose membranes for hemodialysis) to sugar-cane bagasse", *J. Memb. Sci.* 82(1-2), 1993, pp. 43-49.
- 10) J. H. Kim, and S. R. Yun, "Discovery of Cellulose as a Smart Material", *Macromolecules*, Vol. 39, 2006, pp. 4202-4206.
- 11) G. Y. Yun, H. S. Kim, J. H. Kim, K. S. Kim, and C. H. Yang, "Effect of aligned cellulose film to the performance of electro-active paper actuator," *Sens. Act. A*, 141, 2008, pp. 530-535.
- 12) J. H. Kim, and S. R. Yun, "Discovery of Cellulose as a Smart Material", *Macromolecules*, 39, 2006, pp. 4202-4206.
- 13) B. Claudia, F. Luigi, G. Pietro, and G. Salvatore, "A method to characterize the deformation of an IPMC sensing membrane", *Sens. Act. A*, 123-124, 2005, pp. 146-154.
- 14) J. H. Lee, J. H. Lee, J. D. Nam, H. R. Choi, K. M. Jung, J. W. Jeon, Y. K. Lee, K. J. Kim, and Y. S. Tak, "Water uptake and migration effects of electroactive ion-exchange polymer metal composite (IPMC) actuator", *Sens. Act. A*, 118, 2006, pp. 98 - 106.
- 15) A. W. Adamson, *Physical and Chemistry of Surfaces*, 5th ed., Wiley Interscience, New York (1990).