

전기저항측정법 및 젖음성을 이용한 나노복합재료의 미세파손 감지능 및 계면물성 평가

박종만*[†] · 권동준** · 신평수* · 김종현* · 백영민* · 박하승*

Interfacial Evaluation and Microfailure Sensing of Nanocomposites by Electrical Resistance Measurements and Wettability

Joung-Man Park*[†], Dong-Jun Kwon**, Pyeong-Su Shin*, Jong-Hyun Kim*,
Yeong-Min Baek*, Ha-Seung Park*

ABSTRACT: Damage sensing of polymer composite films consisting of poly(dicyclopentadiene) p-DCPD and carbon nanotube (CNT) was studied experimentally. Only up to 1st ring-opening polymerization occurred with the addition of CNT, which made the modified film electrically conductive, while interfering with polymerization. The interfacial adhesion of composite films with varying CNT concentration was evaluated by measuring the wettability using the static contact angle method. 0.5 wt% CNT/p-DCPD was determined to be the optimal condition via electrical dispersion method and tensile test. Dynamic fatigue test was conducted to evaluate the durability of the films by measuring the change in electrical resistance. For the initial three cycles, the change in electrical resistance pattern was similar to the tensile stress-strain curve. The CNT/p-DCPD film was attached to an epoxy matrix to demonstrate its utilization as a sensor for fracture behavior. At the onset of epoxy fracture, electrical resistance showed a drastic increase, which indicated adhesive fracture between sensor and matrix. It leads to prediction of crack and fracture of matrix.

초 록: 탄소나노튜브(CNT)를 이용하여 신율이 뛰어난 p-DCPD를 지로 사용하여 손상감지용 고분자 필름 센서를 연구하였다. CNT를 수지에 혼합시킬 경우 중합을 방해하여 1차 개환만 진행되었다. CNT 농도에 따른 정적접촉각을 측정하여 계면의 젖음성을 측정하였다. 높은 신율을 가지는 p-DCPD에 CNT를 혼합시킴으로써 전도성을 확보하였고, CNT 농도에 따른 인장강도 및 전기저항 분산도 평가를 실시하였을 경우 0.5 wt% CNT/p-DCPD 조건이 최적의 조건임을 확인하였다. CNT/p-DCPD 센서의 내구성을 평가하기 위해 동적 피로 실험을 실시하여 인장응력에 따른 전기저항 변화를 평가하였다. 초기 3회 사이클 동안은 전기저항 변화도와 응력간의 결과가 유사한 경향을 나타내었다. CNT/p-DCPD 센서의 활용을 위해 에폭시 기지 표면에 센서를 붙이고 기지 재료의 파괴거동을 확인하였다. 기지 파괴가 발생되기 전에 CNT/p-DCPD 센서의 전기저항 점핑 신호를 관찰할 수 있었다. 이는 기지재료에 발생된 균열에 의해 CNT/p-DCPD 센서와 기지간의 접촉 파괴로 발생된 신호이며, 이러한 신호를 이용하여 기지재료의 균열 및 파괴를 예측해 볼 수 있었다.

Key Words: 탄소나노튜브(CNT), 폴리디사이클로펜타디엔(p-DCPD), 손상감지(Damage sensing), 센서(Sensor)

Received 2 March 2017, received in revised form 21 April 2017, accepted 26 April 2017

*Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Center for Creative Human Resource & Convergence Materials, Gyeongsang National University

*[†]Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Center for Creative Human Resource & Convergence Materials, Research Institute for Green Energy Convergence Technology, Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: jmpark@gnu.ac.kr)

**Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Research Institute for Green Energy Convergence Technology, Gyeongsang National University

1. 서 론

p-DCPD 소재는 DCPD와 촉매간의 개환반응을 통해 중합이 진행되는 내충격성이 우수한 고분자수지이다[1]. 주로 텅스텐이나 몰리브덴, 루테튬과 같은 촉매를 사용하여 p-DCPD로 경화가 이루어지며, 경화시키는 조건이 주로 질소조건에서 이루어져야 하는 단점이 있다[2]. 텅스텐이나 몰리브덴의 경우 촉매의 활성 때문에 질소가 반드시 필요한 조건이지만, 루테튬 촉매를 이용할 경우 대기 조건에서도 개환반응을 통해 중합이 가능한 장점이 있다[3]. 1차 개환반응이 이루어질 경우 DCPD 단분자 간에 선형 결합이 이루어지며, 열가소성 고분자의 특성을 나타낸다. 하지만 2차 개환반응이 이뤄질 경우 고분자 내 가교가 많이 발생되어 고분자의 기계적, 열적 특성이 높아진다[4].

나노입자에 대한 연구는 2000년도부터 크게 진행되었고 현재도 나노입자를 이용한 강화 고분자 복합재료에 대한 연구는 많이 나오고 있다[5]. 나노입자는 직경이 수십 나노미터이며 길이가 마이크로 수준인 나노와이어들이 많이 사용되며, 나노 파티클의 형태도 사용된다. 나노와이어의 형태를 많이 사용하는 이유는 강화재의 형상비 효과로 인한 고분자 기지의 강화효과를 얻기 위함이다[6]. 대표적으로 CNT와 같은 입자가 많이 사용되었다. 탄소계 입자들 중 CNT는 선형에 형상비가 수백에서 수천 단위를 가지기 때문에 강화효과가 뛰어나며, 화학적 구조에 의해 C-C 결합이 주를 이뤄, 전기적 특성이 우수한 편이다[7]. 하지만 분산도 문제가 있고 1차원적인 선형 나노입자이기 때문에 넓은 면적에 사용되기에는 해결해야한 연구 내용이 많은 편이다[8].

탄소계 나노입자의 경우 비교적 금속계 나노입자에 비해 가격이 저렴하고 높은 열적 특성과 전기전도성을 가지기 때문에 많이 연구되고 있다[9]. 소형 센서, 얇은 투명전극과 같은 경우 탄소계 나노입자가 금속계 소재를 대체하기 위한 연구가 실시되고 있다. 근래 연구에서는 복합재료에 대한 강도 개선에 대한 연구 내용 보다는 복합재료의 기능성 강화를 목적으로 사용되고 있다[10]. 기능성 부여가 목적이기에 소량의 탄소계 나노입자만으로도 특성을 나타낼 수 있고, 비교적 분산도 문제를 해소하여 균질한 탄소계 나노입자 강화 고분자 복합재료가 개발되고 있는 추세이다[11].

본 연구에서는 CNT/p-DCPD 필름을 제조하여 손상감지능 센서로 활용하는 연구를 하였다. p-DCPD를 1차 개환중합을 시키기 위해 텅스텐계 촉매를 사용하여 대기 조건에서 반응을 보냈다. 1차 개환중합을 시키는 중에 CNT를 함량에 따라 분산시켜 CNT/p-DCPD 필름을 제조하였다. 손상에 대한 감지능을 확인하기 위해 응력전달에 따른 전기저항 변화를 관찰하였다. 또한 CNT 함량에 따른 차이를 확인하기 위해 부피저항 측정법으로 분산도를 평가하였고, 정적접촉각 방법을 이용하여 젖음성을 평가하였다. 손상감지용 CNT/p-DCPD의 내구성을 평가하기 위해 동적피로 실험

을 실시하였다. 궁극적으로 에폭시 기지재료에 CNT/p-DCPD 필름을 붙여 기지재료의 균열 및 파손에 대한 감지능을 확인하였다.

2. 실 험

2.1 CNT/p-DCPD 필름 제작

0.1, 0.5, 1, 3 wt%의 CNT/p-DCPD 필름을 제작하기 위해 삼각플라스크에 텅스텐계 DCPD 수지 A액(T-50, 동성TCS)과 CNT를 넣어 초음파 분쇄기를 이용한 분산과정을 가졌다. 초음파 분산조건은 앰프리튜드를 50%로 사이클 시간을 0.5 s로 하여 1시간 동안 처리를 시켰다. Fig. 1(a)와 같이 초음파 처리를 다 시킨 CNT/DCPD 용액을 비커에 담고 텅스텐계 DCPD 수지 B액을 1:1 비율로 혼합시키기 위한 교반과정을 가진다. Fig. 1(b)와 같이 샬렛에 혼합시킨 CNT/DCPD 수지를 담고 하루 동안 건조과정을 가진다. Fig. 1(c)와 같은 형상으로 필름을 얻을 수 있으며, 필름의 두께는 0.1 mm에 표면저항이 174~223 kΩ로 나타나는 필름을 확보할 수 있었다. 1차 개환반응이 진행된 p-DCPD와 2차 개환반응이 진행된 p-DCPD의 차이를 분석하기 위해 FT-IR을 이용하였다.

2.2 CNT/p-DCPD 필름의 기계적/내구성 및 균열에 따른 전기저항 손상 감지능 평가

필름 상태로 만들어지는 CNT/p-DCPD의 인장 특성을 평가하기 위해 ASTM D882 기준을 사용하였다. CNT 농도에 따른 차이가 CNT/p-DCPD 필름의 인장특성에 미치는 영향을 확인하였다. CNT/p-DCPD의 필름이 인장응력에 따라 변화되는 전기저항 변화도의 결과를 멀티미터로 확인하였다. CNT/p-DCPD 필름의 내구성을 평가하기 위해 65회의 동적 피로 조건을 주었으며, 필름의 표면에 4 프루브 전극을 형성시켜 응력 전달에 따른 시편의 전기저항 변화 결과를 정리하였다. 사이클 횟수 증가에 따른 전기저항 변화의 신호를 정리하여 CNT/p-DCPD의 내구성을 평가하였다. 동적 피로를 진행하는 실험 속도는 1 mm/min이며 0.9 MPa 응력에 도달하는 것을 1회 사이클 조건으로 설정

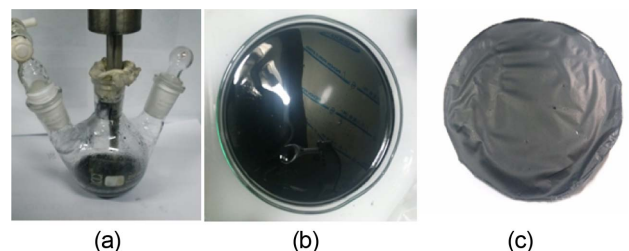


Fig. 1. (a) Photo of setting for CNT dispersion in DCPD resin; (b) dry condition for CNT/p-DCPD film; and (c) CNT/p-DCPD film

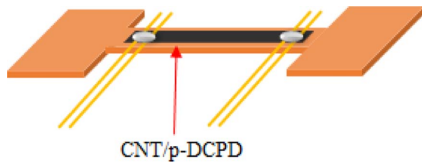


Fig. 2. Damage sensing of specimens model using electrical resistance measurement

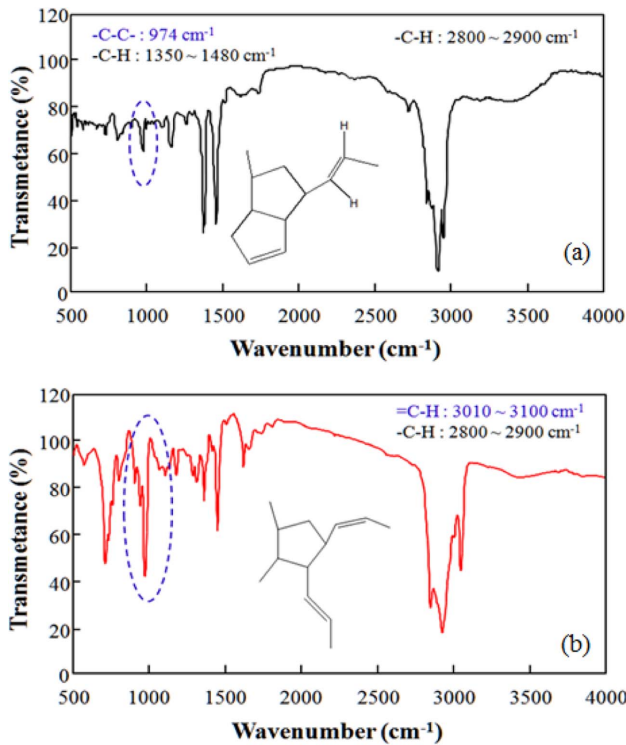


Fig. 3. FT-IR of p-DCPD with different polymerization step: (a) 1st ring open mechanism polymerization (ROMP) of p-DCPD; and 2nd ROMP of p-DCPD

하여 실험을 진행하였다.

Fig. 2는 기지 재료인 에폭시(YD-128:KBH1089=1:1, 국도 화학(주))의 인장 파괴 시 발생하는 균열을 감지하기 위해 CNT/p-DCPD 필름을 에폭시 기지 표면에 붙이고 4 프루브 전극을 형성시켜 인장응력에 따른 CNT/p-DCPD의 전기저항 변화도를 분석하였다. 기지재료에 인장 파괴실험을 진행하기 위해 1 mm/min의 속도로 인장을 하였고, 에폭시 기지 재료의 형상은 폭이 5 mm, 길이가 40 mm, 두께가 3 mm 이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CNT/p-DCPD 필름의 중합 특성 분석 및 CNT 농도에 따른 인장강도 변화 분석

Fig. 3은 중합되는 단계에 따른 p-DCPD의 FT-IR 결과를 정리한 결과이다. Fig. 3(a)와 같이 1차 중합이 진행될 경우 DCPD 내 노보넨 구간이 개환되면서 중합이 진행되었다. 따라서 DCPD 구조의 아래에 존재하는 헥센 구조에 존재하는 이중결합이 개환되지 않았다. 따라서 FT-IR 피크에서 관찰할 수 있듯이, 974 cm⁻¹ 구간에서 C-C 구조의 신호가 적음을 확인할 수 있었다. 하지만 2차 개환반응이 진행될 경우 C-C 구조가 많아지며, Fig. 3(b)의 결과와 같이 C-C 피크의 크기가 증가된 결과를 확인할 수 있었다. 또한 이중결합을 가지는 작용기가 존재하게 됨으로써 3100 cm⁻¹ 구간에서 확인되는 =C-H 피크가 형성됨을 확인할 수 있었다. 실제로 Fig. 3(a)의 시편은 고무상의 고분자 중합체가 발생되었으나, Fig. 3(b)의 시편은 강직한 고분자가 결과물로 확보되었다. 본 연구에서는 Fig. 3(a)의 단계의 p-DCPD를 활용하였다.

Fig. 4는 CNT 농도에 따른 정적접촉각 변화를 나타낸 결

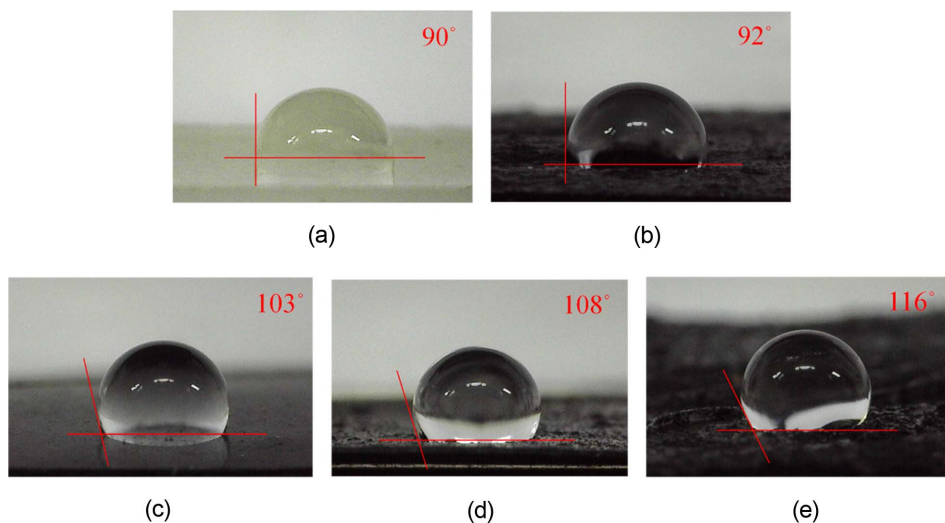


Fig. 4. Static contact angle of CNT/p-DCPD film: (a) neat; (b) 0.1 wt%; (c) 0.5 wt%; (d) 1 wt% and (e) 3 wt%

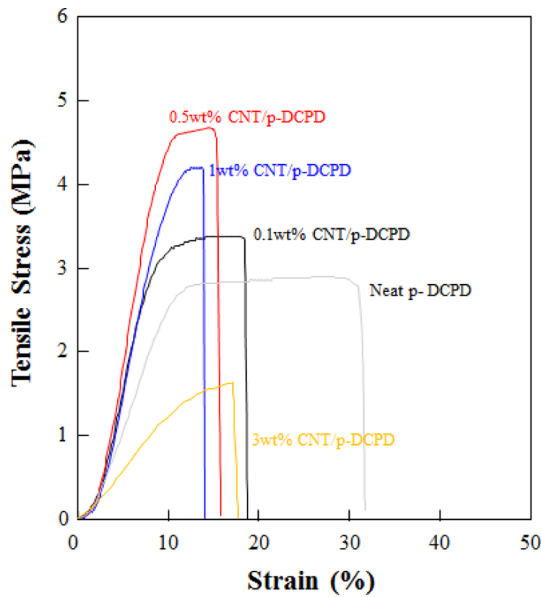


Fig. 5. Tensile strength of CNT/p-DCPD composites with different CNT concentration

과이다. CNT를 첨가하지 않은 DCPD의 경우 90도 인데 반해, CNT/DCPD 필름에서 CNT 농도가 증가할수록 정적접촉각이 증가하는 것을 확인하였다. 이는, CNT 농도 증가에 따라 나노복합재료 필름 표면에 존재하는 CNT의 양이 증가하는 경향과 상호관련이 있다고 생각된다.

Fig. 5의 결과를 통해 확인해보면 p-DCPD의 특성이 신율이 우수한 소재임을 확인할 수 있었다. CNT를 함유함에 따라 신율은 줄어들고 인장강도가 크게 증가되는 결과를 확인하였다. 특히 0.5 wt% CNT/p-DCPD의 조건에서 일반 p-DCPD 조건에 비해 1.5배의 인장강도 결과를 나타내었다. 하지만 1 wt% CNT 조건이나 3 wt% CNT 조건에서는 물성저하가 발생되었다. 이러한 이유에 대해서는 CNT 분산도가 문제가 될 수 있다. p-DCPD는 중합이 빠르기 때문에 CNT가 분산되어진 상태에서 액상에서 고상으로 변화될 때 수지 내에서 CNT의 배치가 달라진다. CNT의 농도가 높을 경우 CNT간의 응집이 크게 발생되며, p-DCPD 수지의 점도가 높기 때문에 CNT 응집이 초음파 분쇄기에 의해 분쇄되기 어려운 조건임을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 전기저항 분산도 평가방법을 이용하여 확인한 CNT 농도에 따른 전기저항 측정 결과를 정리했다. CNT 농도가 높아짐에 따라 전기저항은 전체적으로 낮아졌다가 높아지는 결과를 나타내었다. 0.5 wt% CNT 조건에서 가장 낮은 전기저항 결과를 나타내었으며, 1 wt%, 3 wt%로 증가될 경우 전기저항 결과는 높게 증가되는 결과를 나타내었다. 이러한 이유는 접촉각 결과 및 인장강도의 결과와 같이 CNT 농도의 증가로 인한 나노입자의 응집이 발생되었기 때문이라고 생각할 수 있다. 0.5 wt% CNT 조건이 가장 최적의 조성임을 확인할 수 있었다.

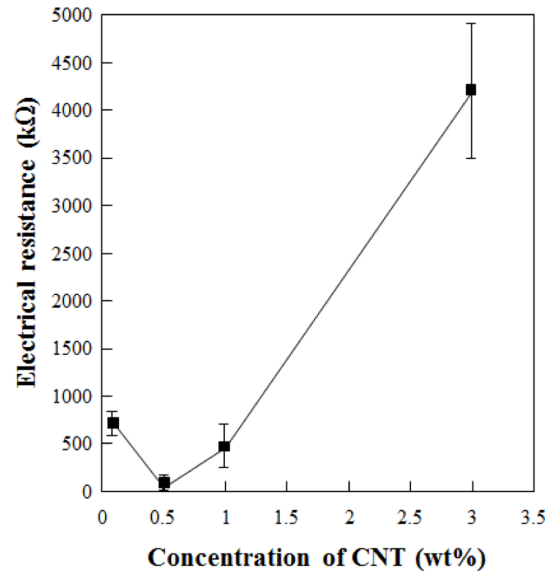


Fig. 6. Electrical resistance measurement of CNT/p-DCPD composites for CNT dispersion with different CNT concentration

3.2 CNT/p-DCPD 복합재료의 손상감지능 평가 및 기지 재료의 균열 감지 평가

Fig. 7은 CNT/p-DCPD의 인장 실험 시에 전기저항 측정법을 이용하여 확인한 응력 대비 전기저항 변화도의 결과를 CNT 농도에 따라 정리한 것이다. 응력 감지용 센서로 활용하기 위해서는 응력에 비례하여 전기저항 변화도가 증가되어야 한다. 하지만 p-DCPD는 고무상이기 때문에 신율이 높은 소재이고 이에 따라 넥킹 현상이 발생된다.

Fig. 8과 같이 CNT/p-DCPD의 내부 변화 상태를 예측해 볼 수 있다. 일반적으로 에폭시와 같은 강직한 고분자 기지일 경우 CNT가 분산되어 있고 인장 응력에 의해 재료가 연신될 경우 내부에 CNT 입자와 기지재료는 동시에 인장응력에 의해 배치가 변화되게 된다. 하지만 고무상의 고분자 재료는 기지의 변화가 크게 발생되기 때문에 인장 응력에 의해 고분자 기지 내의 CNT의 배치가 배열되게 된다. 따라서 인장응력에 따라 전기저항은 증가되지만, CNT/p-DCPD 내부에 CNT의 배열이 형성되어 전기저항이 소폭 증가된 결과를 확인했다. 하지만 고분자 수지의 넥킹이 최대화되고 고분자 기지가 끊어지려고 할 경우 CNT 배열에 대해서 일부분이 접촉을 하지 못하게 된다. 이러한 상태에 의해 인장 응력에 따른 전기저항 증가 변화도는 크게 변화되는 것이다[12]. 따라서 Fig. 7의 결과와 같이 2차 곡선과 같은 전기저항 변화도 그래프를 확인하게 되는 것이다. CNT 농도에 따라서 전기저항 변화도의 정도에 차이가 존재하였으며, CNT의 농도가 높을 경우 CNT의 분산도 문제로 인하여 응력에 대한 전기저항 변화도 감지능이 다른 변수에 비해 떨어지는 결과를 나타내었다. 최적의 조건은 0.5 wt% 조건이었으며, 인장응력과 비례하여 증가되는 전기저항 변화도

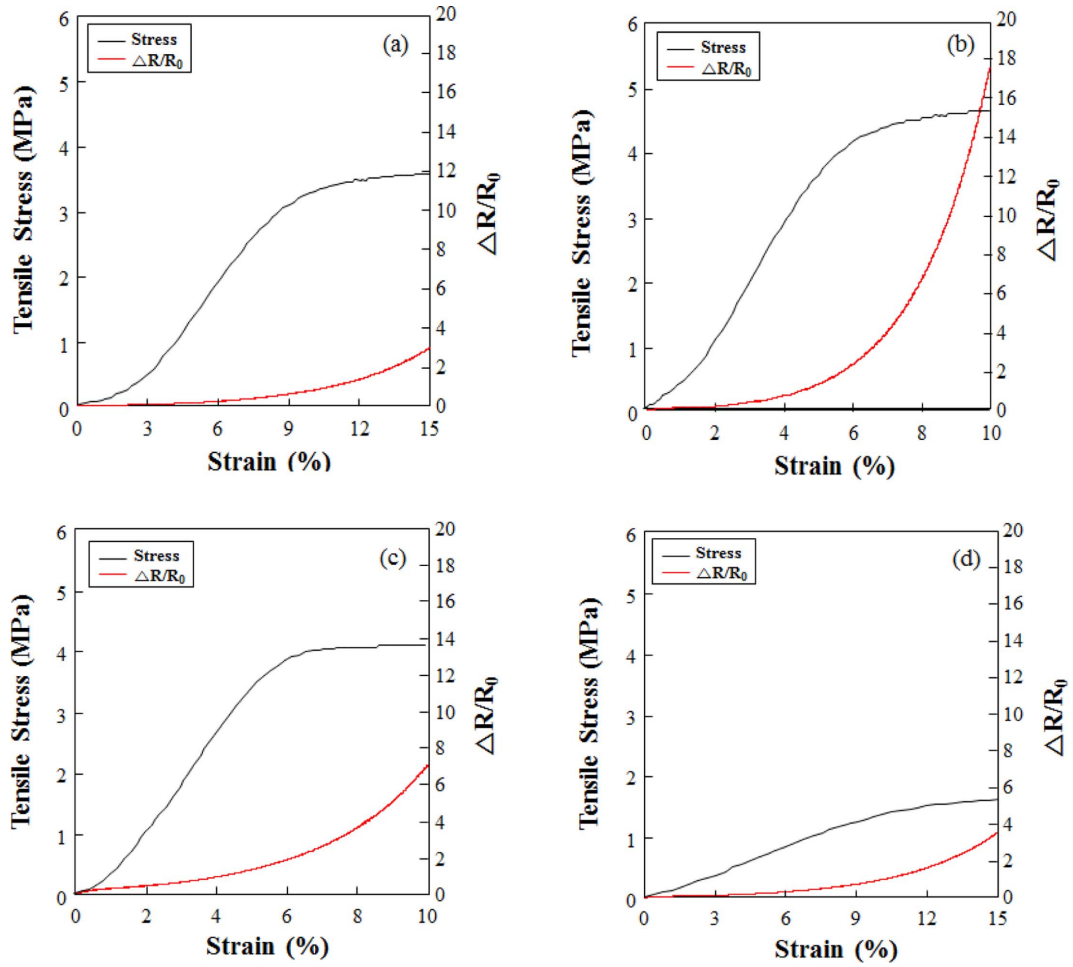


Fig. 7. Tensile property of CNT/p-DCPD with different CNT concentration using electrical resistance measurement under tensile loading: (a) 0.1 wt% CNT; (b) 0.5 wt% CNT; (c) 1 wt% CNT; and (d) 3 wt% CNT

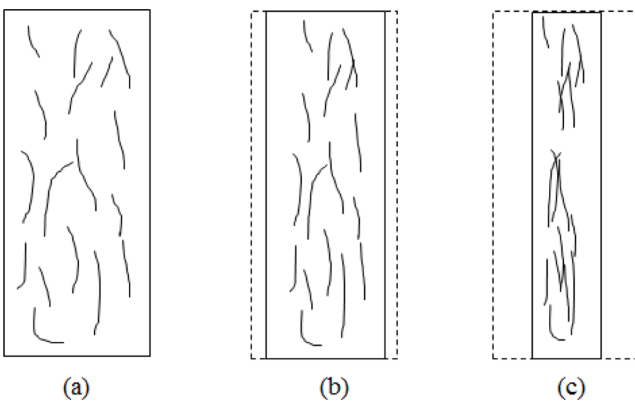


Fig. 8. Model of CNT/p-DCPD composites under tensile load

결과를 확인하였다.

Fig. 9는 동적 인장 사이클에 따른 CNT/p-DCPD의 인장 응력 대비 전기저항 변화도에 대한 경향을 정리한 것이다. 본 실험은 CNT/p-DCPD의 손상감지능이 동적 사이클에 따라 내구성이 어떻게 변화되는지를 확인하기 위해 실험하였다. 비교적 동적 사이클 증가에 따른 CNT/p-DCPD

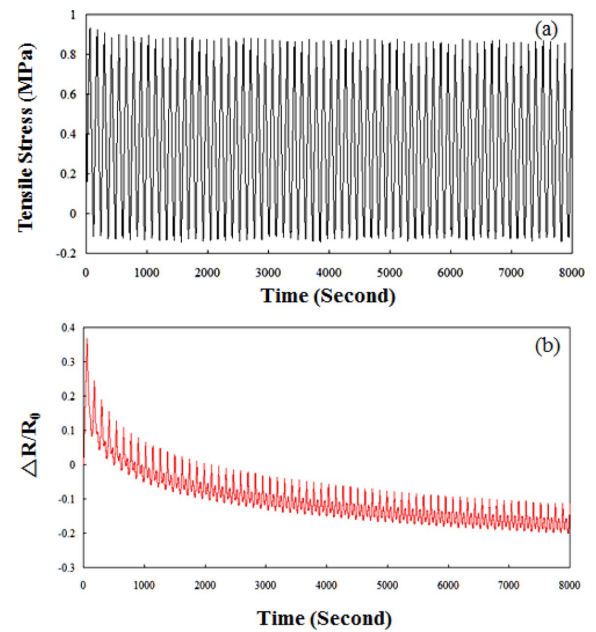


Fig. 9. Dynamic cyclic tensile test of 0.5 wt% CNT/p-DCPD: (a) tensile stress; (b) $\Delta R/R_0$

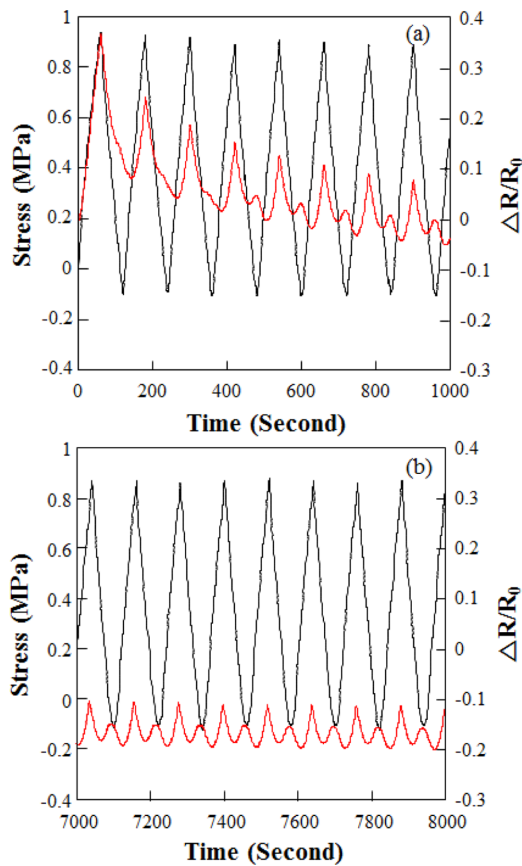


Fig. 10. Dynamic cyclic tensile test of 0.5 wt% CNT/p-DCPD with different cyclic time: (a) from 0 to 1000 s; and (b) from 7000 to 8000

의 응력 변화는 적었다. 하지만 동적 피로 실험에 따라 전기저항 변화도의 결과는 매우 큰 변화를 나타냈다. 사이클이 증가됨에 따라 전기저항은 낮아졌으며, 이는 연신율이 높은 고분자의 특성상 초기 상태로 돌아오는 회복력이 떨어졌기 때문에 나타나는 결과였다.

Fig. 10은 동적 인장 사이클 실험에 따른 결과를 구간별로 나누어 정리한 결과이다. 초기에 전기저항 변화도는 응력대비 비교적 동일한 형상을 나타내었다. 하지만 사이클 횟수가 3회 이상 될 경우 시편이 인장되고 복원되는 과정에서 전기저항 변화도가 증가되는 경향이 확인되었다. 즉 동적 피로에 의해 CNT/p-DCPD 필름은 특성이 변화된다는 것은 의미하였으며, 비교적 손상감지 평가용 센서로 활용하기에는 3회 정도의 재사용이 한계라 예상할 수 있었다.

Fig. 11은 에폭시 기지재료에 대한 인장 실험에 따라 기지재료의 균열을 감지하기 위해 CNT/p-DCPD 센서를 붙여 손상감지능 평가를 실시한 결과이다. 시편이 파괴될 때 발생하는 미세 균열에 대해서 CNT/p-DCPD 시편은 감지가 가능하였다. 미세 균열이 기지재료에 발생됨에 따라 CNT/p-DCPD 센서를 붙였던 접착부분에서 균열이 확장되었고, 에폭시의 인장 신율이 6% 정도 되었을 경우 CNT/p-DCPD

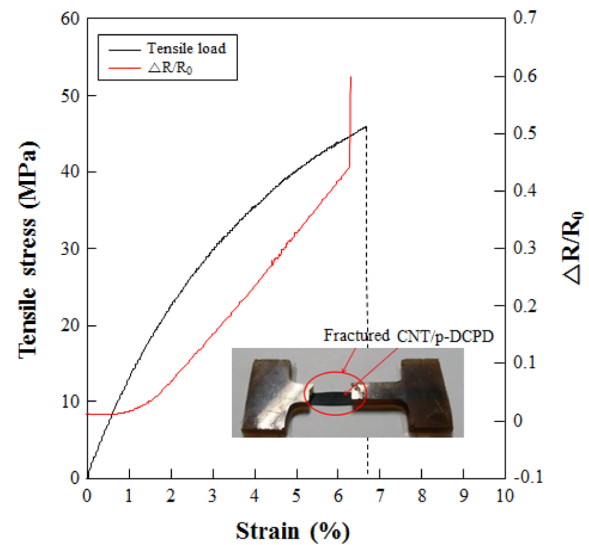


Fig. 11. Fracture tensile test of 0.5 wt% CNT/p-DCPD attached epoxy using ER measurement

센서에서 전기저항 점핑 구간을 확인할 수 있었다. 이 신호의 발생 후 기지재료는 파단을 발생시켰으며, 사진과 같이 일부분이 떨어져 나가는 파단 결과를 발생시켰다. 즉 전기저항 측정법을 이용하여 CNT/p-DCPD 센서의 응력 감지능을 활용하여 기지재료의 파단 전에 발생하는 미세 균열에 대한 예측이 가능하였다. 이를 이용하여 손상감지용 센서로 활용이 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 1차 개환중합 시킨 p-DCPD의 높은 신율을 이용한 CNT/p-DCPD 손상감지용 센서에 대한 내용이다. CNT/p-DCPD의 특성을 최적화하기 위해 CNT 농도에 따라 달라지는 CNT/p-DCPD의 인장강도 특성과 응력에 따른 전기저항 변화도를 관찰하였고, 연신율이 높은 p-DCPD에 의해 CNT/p-DCPD는 응력대비 2차 곡선의 형태로 전기저항 변화도가 감지됨을 확인하였다. 최적의 조건은 0.5 wt% 조건이었으며, 동적 인장 사이클 실험을 통해 내구성을 평가해보았을 경우 비교적 3회 정도는 재사용이 가능하지만 그 이상 손상감지용 센서로 활용하기에는 무리가 있음을 확인하였다. 궁극적으로 에폭시 기지재료의 미세균열 발생에 대한 감지능 평가를 실시하였으며, 파단이 발생되기 전에 발생하는 미세 균열에 대해 CNT/p-DCPD의 전기저항 점핑 결과를 바탕으로 감지가 가능함을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2016년도 경상대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Hu, Y., Lang, A.W., Li, X., and Nutt, S.R., "Hygrothermal Aging Effects on Fatigue of Glass Fiber/polydicyclopentadiene Composites," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 110, 2014, pp. 464-472.
2. Lyapkov, A.A., Gvozdkow, E.L., Tarakanovskaya, A.N., Tarnovskaya, O.D., and Yakovleva, Y.S., "Oxidation and Structuring of Polydicyclopentadiene Thin Layers," *Procedia Chemistry*, Vol. 10, 2014, pp. 223-228.
3. Abadie, M.J., Dimonie, M., Couve, C., and Dragutan, V., "New Catalysts for Linear Polydicyclopentadiene Synthesis," *European Polymer Journal*, Vol. 36, 2000, pp. 1213-1219.
4. Shi, Y., Qi, M., Chen, Y., and Shi, P., "MAO-DCPD Composite Coating on Mg Alloy for Degradable Implant Applications," *Materials Letters*, Vol. 65, 2011, pp. 2201-2204.
5. Jia, X., Li, G., Liu, B., Luo, Y., Yang, G., and Yang, X., "Multi-scale Reinforcement and Interfacial Strengthening on Epoxy-based Composites by Silica Nanoparticle-multiwalled Carbon Nanotube Complex," *Composites Part A*, Vol. 48, 2013, pp. 101-109.
6. Kwon, D.J., Shin, P.S., Kim, J.H., Lee, H.I., Park, J.K., and Park, J.M., "Effects of Solvent-Based Dilution Condition on CNT Dispersion in CNT/Epoxy Composites," *Composites Research*, Vol. 29, 2016, pp. 125-131.
7. Lee, S.H., and Oh, I.K., "Hybrid Carbon Nanomaterials for Electromagnetic Interference Shielding," *Composites Research*, Vol. 29, 2016, pp. 138-144.
8. Wang, Z.J., Kong, J., Lee, W.I., Park, J.G., 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. 22, 2009, pp. 8-14.
9. Xia, S., Jong, K.L., and Michael, R.K., "Effects of Silane Functionalization on the Properties of Carbon Nanotube/epoxy Nanocomposites," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 2965-2972.
10. Thostenson, E.T., and Chou, T.W., "Processing Structure Multi Functional Property Relationship in Carbon Nanotube/epoxy Composites," *Carbon*, Vol. 44, 2006, pp. 3022-3029.
11. Jang, J.H., Yi, J.W., Lee, W.O., Lee, H.G., Um, M.K., Kim, J.B., and Byun, J.H., "Dispersion and Property Evaluation of Nanocomposites by Aspect Ratio of MWCNT," *Composites Research*, Vol. 23, 2010, pp. 58-63.
12. Na, W.J., Byun, J.H., Lee, M.G., and Yu, W.R., "In-situ Damage Sensing of Woven Composites Using Carbon Nanotube Conductive Networks," *Composites Part A*, Vol. 77, 2015, pp. 229-236.