

손상감지용 CNT 나노복합재료의 손상 감지능 및 보강효과 연구

권동준* · 왕작가* · 최진영* · 신평수* · 박종만*[†]

A Study of Damage Sensing and Repairing Effect of CNT Nanocomposites

Dong-Jun Kwon*, Zuo-Jia Wang*, Jin-Young Choi*, Pyeong-Su Shin*, Joung-Man Park*[†]

ABSTRACT: Nanocomposites manufacture has been developed rapidly, because of reinforcing effects of CNT in terms of mechanical, electrical and thermal properties. In this study, 10 wt% CNT paste was fabricated with good dispersion state and easy processability. Damage sensing and reinforcing effect of CNT paste were investigated in nanocomposites. 10 wt% CNT paste exhibited better tensile and flexural properties than those of general 1 wt% CNT nanocomposites. To observe the healing effect of CNT paste, a crack was made artificially with 30wt% CF30wt%/PP composites, and the CNT paste was filled inside the crack. The damage sensing of CNT paste in CF30wt%/PP composites was investigated by electrical resistance measurement and mechanical tests. CNT paste exhibited good reinforcing effect in mechanical properties of CF30wt%/PP composites, and this reinforcing effect was getting better with larger cracks. The reason was because CNT paste had good interfacial adhesion with CF30wt%/PP composites to resist crack propagation. In electrical resistance measurement, there was a jump in electrical resistance signal at the adhesion interface. The jumping signal could be used to predict fracture of CF/PP composites. CNT nanocomposites for damage sensing had crack reducing effect and damage detection using electrical resistance method.

초 록: 탄소나노튜브(CNT)의 물성은 고분자재료의 기계적, 전도성, 열적 물성을 향상시켜주기 때문에 많은 분야에서 소재개발을 진행 중이다. 본 연구에서는 사전에 CNT 10 wt% 페이스트를 제조하여 나노입자에 대한 분산도와 나노복합재료 생산성을 높일 수 있는 기초 재료를 제조하였다. 제조된 CNT 10 wt% 페이스트를 이용하여 손상감지용 CNT 나노복합재료를 제조하여 균열에 대한 손상감지능과 균열 보강효과에 대한 영향을 연구하였다. CNT 10 wt% 페이스트를 이용하여 제조된 CNT 1 wt% 나노복합재는 일반 CNT 파우더를 이용하여 CNT 1 wt% 나노복합재료를 제조하였을 경우보다 인장과 굴곡물성이 높음을 확인하였다. CF30wt%/PP에 인위적인 균열을 제조하고, 균열부위에 CNT 나노복합재료를 보강하여 균열 및 파괴 발생 감지능을 균열크기에 따라 전기저항 측정법과 인장물성평가를 통해 분석하였다. CNT 나노복합재료를 균열 부위에 보강하여 CF30wt%/PP의 인장물성을 분석하였을 경우, 균열보강효과가 있었다. 균열크기가 증가함에 따라 CNT 나노복합재료의 보강효과의 증가되었다. 이는 CNT 나노복합재료와 CF30wt%/PP간의 접착면 증가로 균열전파를 지연하기 때문이다. CNT 나노복합재료의 손상감지능에 대해서는 전기저항 평가법으로 분석하였으며, 접착면에서의 분리로 인해 CNT 나노복합재료에 충격이 가해져 높은 전기저항 증가구간을 확인하였다. 손상감지용 CNT 나노복합재료의 균열방지효과와 손상감지에 대한 전기저항 평가법의 가능성을 확인하였다.

Key Words: 페이스트(paste), 탄소나노튜브(carbon nanotube), 손상감지(damage sensing), 계면(Interface), 나노복합재료(nanocomposites)

Received 24 September 2014, received in revised form 10 November 2014, accepted 11 November 2014

*Department of Materials Science and Convergence Technology, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

*[†]Department of Materials Science and Convergence Technology, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

Corresponding author (E-mail: jmpark@gnu.ac.kr)

1. 서 론

CNT의 활용분야는 CNT의 기계적 물성, 전기전도성, 내열성, 내화학성이 우수하기 때문에 고분자기지의 강화재로 적용 연구가 다양하다[1-3]. 나노입자의 종류는 형상에 따라 1차원, 2차원, 3차원의 강화재가 이용된다. 그래핀과 CNT는 많은 분야에서 연구되고 있으며, 그래핀은 전기적 물성 분야에, CNT는 기계적 물성 분야에 향상에 대하여 많은 연구가 진행 중이다[4-6]. 나노입자에 대한 강화재 활용에 있어서 문제는 분산이다[7,8]. 산업에 적용하고자 대용량으로 제품을 제조하는 경우, 나노입자의 분산을 대용량으로 진행하기 위해 고가의 장비가 필요하며, 기대 이상의 결과를 얻지 못하고 있기 때문에 제품화가 지연되고 있다[9]. 나노입자가 고분산 상태로 제조된 수지의 제조가 용이할 경우, 산업분야에서 높은 기계적 물성을 지닌 고분자 나노복합재료의 상용화가 이루어질 가능성이 높을 것으로 예상된다[10].

CNT가 함유된 고분자 수지의 활용은 고강도 복합재료 제조를 위해 사용될 수 있으나, 고분자수지에 CNT를 활용함으로써 전기전도성이 발생되기 때문에 특수한 용도로 CNT 강화 고분자수지를 이용할 수 있다. 대표적으로 손상감지 분야의 적용이다[11]. 일반적으로 손상감지 분야에서는 비파괴평가 장비를 이용하거나 고가의 손상감지용 센서를 필요로 한다. 예를 들어 AE와 같은 장비가 있으며, 내부 구조물에 균열을 분석하기 위해 PZT 센서가 필요하다[12]. 재료 파괴에 따른 탄성파를 분석하여야 한다. 비파괴평가의 문제점은 전문기술인력과 고가의 장비가 필요하다는 점이다. 이러한 점을 보완하기 위해 간단한 전기저항 측정방법을 이용하여 구조물의 변형에 대한 손상 발생 정도를 분석하는 연구가 진행되고 있다. 예전에는 탄소섬유 강화 복합재료에 탄소섬유가 존재하기 때문에 탄소섬유가 외부 응력에 의한 전기저항 변화도를 측정하여 외부응력 대비 손상해석을 시도하였다[13]. 근래에는 나노입자를 고분자수지에 분산시켜 나노입자의 전기전도성을 이용하여 손상감지분야에 적용 연구 중이다. 특정 부위에 나노입자 강화 고분자수지를 페인트와 같이 표면에 도포하고, 수지를 경화시켜 위치에 따른 균열과 파괴를 분석하는 연구도 진행되고 있다[14].

본 연구에서는 나노복합재료 제조방법에 대한 개선을 시도하기 위해 페이스트를 이용하는 연구를 진행하였으며 손상감지용 CNT 나노복합재료를 이용하여 노치에 대한 보강효과와 균열에 대한 감지능을 분석하였다. CNT 10 wt% 페이스트를 교반과 소니케이션 작업으로 진행시켜 고농도의 반죽 상태로 제조한다. CNT 10 wt% 페이스트를 CNT 파우더 대신 사용하여 CNT 1 wt% 나노복합재료를 제조하여, CNT 10 wt% 페이스트를 이용하여 CNT 1 wt% 나노복합재료를 제조하였을 경우와 일반 CNT 파우더를 1 wt%로 에폭시에 혼합시켜 CNT 1 wt% 나노복합재료를 제조한 경우에

대한 인장 강도와 굴곡강도, 전기저항 분산도 평가하였다. CF 30 wt%/PP 소재는 균열이 쉽게 발생된다. 따라서 CF 30 wt%/PP 소재에 인위적인 노치를 2 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm로 제조하였다. 노치크기에 따라 CNT 나노복합재료의 손상감지능을 분석하였다. 노치 내부를 CNT 나노복합재료를 보강하여, 균열에 대한 보강효과를 인장평가 단계에 전기저항 측정법을 이용하여 분석하였다. 재료 내에 파 단단계를 예측하는 실험을 통해 CNT 나노복합재료의 손상감지능을 분석하고 노치부위의 충진에 따른 균열방지효과에 대해 확인하였다.

2. 실 험

2.1 CNT 10 wt% 페이스트 제조

Fig. 1은 CNT 10 wt% 페이스트를 제조하는 방법에 대한 모식도이다. CNT(MR90, 카본나노텍㈜, 한국)를 아세톤(대정화학, 한국)과 비스페놀 A계 에폭시(YD128, 국도화학㈜, 한국) 혼합 용액에 삽입하여 분산과정을 가진다. 분산과정은 45도 휘어진 교반 조건을 주어 용액의 교반에 유동에 변화를 Fig. 1과 같이 주었다. 교반과 동시에 용액의 윗부분에 소니케이션처리(UP200s, hielscher, 독일)를 0.5sec 초음파 처리 주기로 50% 앰플리튜드 강도로 1시간동안 분산을 시도하였다. 3 wt%까지는 용매의 첨가가 필요 없었으나 혼합용액의 점도가 급격히 증가되었다. 10 wt%까지 혼합된 CNT 페이스트를 제조하기 위해 90°C 조건의 온도 승온과 추가적인 아세톤용매 투입이 필요하였다. 용액상태의 CNT 10 wt% 페이스트는 교반을 마치고 건조과정을 80°C에서 진공건조 과정을 하루동안 가졌다. 건조과정에 따른 용매의 제거가 무게비로 계산하여 90%까지 제거되었을때 반죽 상태의 CNT 10 wt% 페이스트를 제조하게 되었다.

2.2 손상감지용 CNT 1 wt% 나노복합재료의 기계적, 나노입자 분산도 평가

CNT 10 wt% 페이스트를 이용하여 제조한 CNT 1 wt% 나노복합재료와 CNT 파우더를 에폭시 수지에 투여하여 제조한 CNT 나노복합재료에 대한 기계적 물성평가를 진행하였다. CNT 나노복합재료를 제조하기 위한 강화재 혼합 방법으로는 교반기를 이용하였다. 300 rpm 조건으로 2시간



Fig. 1. Manufacturing process of 10 wt% CNT paste

동안 분산과정을 가졌다. 제조 방법이 다른 CNT 나노복합재료에 대한 기계적 물성 평가를 위해 인장(ASTM D638), 굴곡(ASTM D790) 평가기준에 맞게 시편을 제조하여 기계적 물성 평가하였다.

CNT 1 wt% 나노복합재료의 내부 나노입자 분산도를 분석하기 위해 부피저항 분산도 평가방법을 활용하였다. 4 단자법을 이용하여 저항을 측정하였다. 2 mm × 5 mm × 40 mm의 직육면체 시편 내에 총 7구간에 8개의 구리선을 삽입하여 측정구간에 대한 전기저항 측정결과를 정리하여 평균과 표준편차로 정리하였다. 평균이 낮고 구간별 전기저항의 결과 편차가 낮은 경우일 경우 CNT 입자의 분산도가 균일한 상태를 예측할 수 있는 평가방법이다.

2.3 손상감지용 CNT 1 wt% 나노복합재료의 손상감지능 및 보강효과 평가

손상감지용 CNT 1 wt% 나노복합재료에 대한 조성은 CNT 10 wt% 페이스트와 비스페놀 A 에폭시 무게비율을 1:9로 혼합하고 아마이드계 경화제(T-403, 국도화학(주), 한국)와 1:2 비율로 제조하였다. 노치에 대한 보강효과 및 손상감지능을 분석하기 위해 10 mm × 3 mm × 100 mm 사이즈의 CF 30%/PP 복합재료(CF30LFP, 현대이피, 한국)에 인위적인 노치 길이를 시편의 길이 방향으로 2 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 노치의 깊이는 시편의 폭 방향으로 3 mm를 내어 노치부위에 손상감지용 CNT 1 wt% 나노복합재료를 보강하였다.

인위적 노치크기에 따른 CF 30%/PP 복합재료의 물성변화를 분석하고, 균열부위에 손상감지용 CNT 나노복합재료를 보강하고 인장실험을 진행하여 손상에 대한 CNT 나노복합재료의 보강효과를 확인하였다. 인장하중에 의해 노치부위에 충전된 CNT 나노복합재료의 전기저항 변화도를 분석하였다. CNT 나노복합재료를 이용할 경우 CF30wt%/PP의 파괴발생 감지능을 확인하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 손상감지용 CNT 1 wt% 나노복합재료의 분산도 평가 및 기계적 물성 평가 결과

Fig. 2는 CNT 10 wt% 페이스트를 이용하여 손상감지용 CNT 나노복합재료를 제조한 경우와 일반 CNT 파우더를 이용하여 제조한 나노복합재료간 전기저항 측정법을 이용하여 분산도를 분석한 결과이다. 나노입자의 분산상태는 CNT 10 wt% 페이스트를 이용하여 나노복합재료를 제조하는 것이 더 낮은 평균 전기저항과 표준편차 결과를 확인할 수 있었다. 교반에 의해 나노입자 분산을 시킬 경우 물리적인 분산의 한계가 있다. CNT 페이스트의 경우 사전에 초음파에 의한 나노입자 분쇄단계를 가짐으로써 단순 교반에 의한 분산이 진행될 수 있으나, CNT 파우더 형태는 응집된

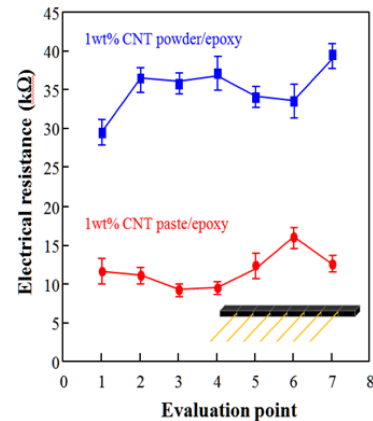


Fig. 2. Comparison of dispersion evaluations of CNT paste and general CNT nanocomposites

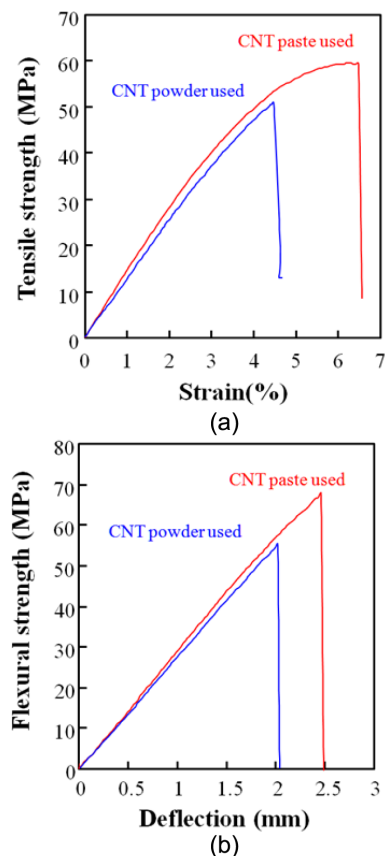


Fig. 3. Mechanical tests of 1 wt% CNT nanocomposites: (a) tensile test; and (b) flexural test

CNT간의 분쇄 과정이 부족하기 때문에 분산도가 균일하지 못하다고 생각된다.

Fig. 3은 CNT 나노복합재료의 제조 방법이 다른 두시편에 대한 인장과 굴곡 물성을 평가한 결과이다. CNT 10 wt% 페이스트를 이용하여 CNT 나노복합재료를 제조한 경우가 CNT 파우더를 이용한 경우에 비해 기계적 물성이 15 MPa 향상된 결과를 확인하였다. 기계적 물성에 대한 편차도 CNT

페이스트를 이용한 경우가 더 낮게 나타났다. 이를 통해 나노복합재료의 분산도를 높이는 방법으로 고농도의 CNT 페이스트를 사전에 제조하고 고분자 수지에 혼합하는 것이 일반 CNT 파우더를 이용하는 것보다 높은 분산도와 기계적 물성을 얻을 수 있음을 확인하였다.

3.2 손상감지용 CNT 1 wt% 나노복합재료의 손상감지능 및 보강효과 평가 결과

Fig. 4는 인위적 노치 크기에 의해 CF 30% PP의 인장강도의 변화와 CNT 나노복합재료를 노치부위에 보강한 CF 30 wt%/PP 복합재료의 인장물성을 비교한 결과이다. 노치 크기에 의해 신율과 인장 강도는 크게 저하되는 결과를 확인하였다. 하지만 CNT 나노복합재료를 노치부위에 보강할 경우 인장강도 및 신율의 저하정도가 낮아지는 결과를 확인하였다. 일반적으로 CF 30 wt%/PP는 인장강도가 40 MPa 정도이다. 표준편차는 2 MPa 정도이다. 노치 2 mm 일 경우 37 MPa, 5 mm의 노치에는 33 MPa, 10 mm 노치에는 30 MPa, 20 mm 노치에는 24 MPa 였다. 하지만 CNT 나노복합재료의 보강에 의해 38, 35, 33, 28 MPa로 인위적 노치에 의한 인장강도 저하 정도가 줄어드는 경향을 확인하였다. CNT 나노복합재료의 보강효과와 노치크기의 증가될 수록 보강효과가 증가되는 이유를 확인해보면 다음과 같다.

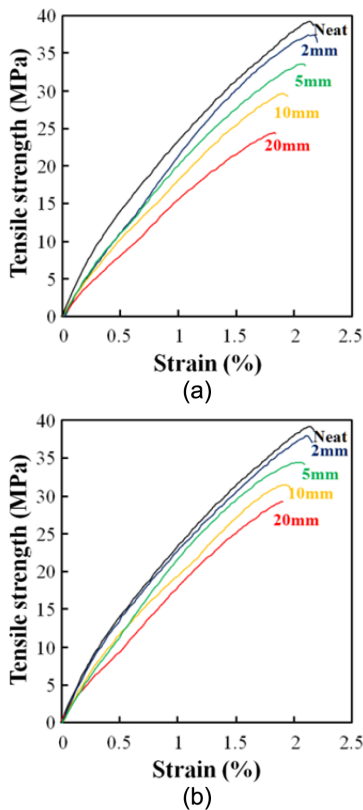


Fig. 4. Tensile test results of CF 30%/PP composites with different crack size: (a) neat CF/PP composites; and (b) CNT paste filled CF 30%/PP composites

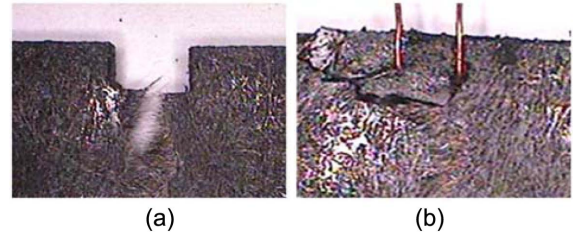


Fig. 5. Specimens of damage sensing tests: (a) CF/pp composites with artificial crack; and (b) CNT paste reinforced CF/PP composites

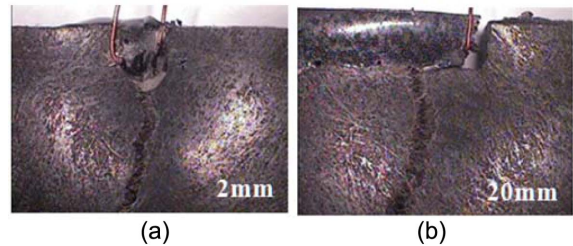


Fig. 6. Specimen fractures of CF/PP composites with different notch size: (a) 5 mm crack; and (b) 20 mm notch

Fig. 5는 중앙에 인위적인 노치를 폭 5 mm, 깊이 3 mm로 제조한 CF30%/PP 시편의 인장실험에 의한 파괴결과와 노치에 CNT 나노복합재료를 보강한 시편의 인장 실험결과이다. CNT 나노복합재료의 보강차이에 의해 인위적 노치의 파단전파의 차이를 분석할 수 있었다. 일반적으로 균열의 전파는 인위적인 균열의 중앙부분에서 시편의 파괴 발생이 진행된다. 하지만 CNT 나노복합재료를 보강할 경우 균열의 발생이 균열의 중앙이 아닌 CNT 나노복합재료와 CF30%/PP가 접착된 면에서의 계면 분리가 발생되면서 균열이 확장되는 경향을 확인하였다. 즉 CNT 나노복합재료를 균열부위에 보강할 경우 CF30wt%/PP와 접착되는 면에서의 접착력에 의해 균열에 의한 보강효과가 증가된다고 예측할 수 있다.

Fig. 6은 CNT 나노복합재료를 이용하여 노치부위에 보강하고 인장실험에 의해 시편이 파괴 될 때의 상태를 반사 현미경으로 촬영한 결과이다. 인장실험에 대한 영향으로 시편에 노치구간에서 받는 CNT 나노복합재료의 전기저항 신호를 받기 위해 구리선을 삽입하였다. 노치 부위가 좁을 경우 재료에 CF30%/PP의 파단에 CNT 나노복합재료와 CF30%/PP 간 접착면이 작기 때문에 큰 보강효과가 적었다. 하지만 노치크기가 20 mm 일 경우 CNT 나노복합재료와 CF30wt%/PP간 접착면이 증가된다. 균열 부위를 보면 길게 접착된 부분에서는 균열이 발생되지 않고 구리선을 심어 둔 부분에서 균열이 성장하여 파단된 결과를 확인할 수 있다. 즉 CNT 나노복합재료와 CF30wt%/PP간 접착면이 증가될수록 접착력에 의하여 보강효과가 증가된다.

Fig. 7은 CF30wt%/PP 복합재료의 인위적 노치에 CNT 나

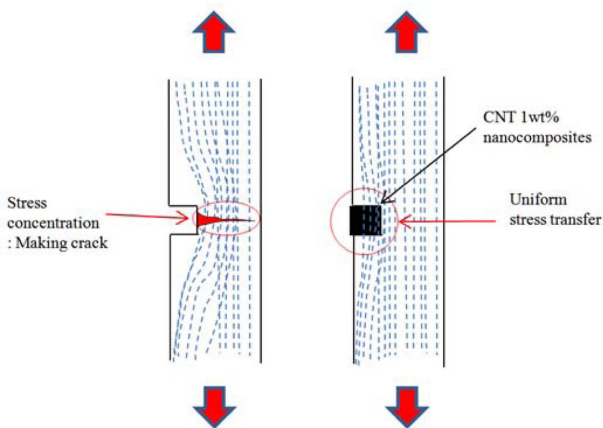


Fig. 7. Model of stress transfer of CNT paste reinforced CF30wt%/PP composites

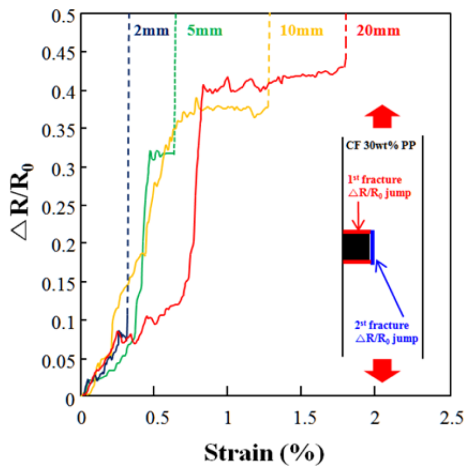


Fig. 8. Damage sensing tests of CNT paste reinforced CF30wt%/PP composites

노복합재료 보강 유무에 따른 응력전달 차이를 모델화한 그림이다. 일반적으로 CF30wt%/PP는 인위적 노치에 의해 파괴가 시작된다. 응력 전달을 의미하는 하늘색 점선과 같이 인장응력이 노치의 중앙에 집중되는 결과를 예상할 수 있다[15]. 하지만 균열 부위에 CNT 나노복합재료를 보강할 경우 응력전달의 차이가 감소되는 경향을 예상할 수 있다. 인위적으로 노치를 발생시킨 부분에서 파괴가 시작되는 차이는 변함없지만, 균열부위에 CNT 나노복합재료를 보강함에 따라 균열이 확장되는 것을 CNT 나노복합재료 자체의 영향과 CNT 나노복합재료와 CF30wt%/PP간 계면에서의 접착력에 의하여 방해할 수 있다. 이러한 이유로 CNT 나노복합재료를 이용할 경우 균열에 대한 보강 효과가 존재한다고 생각해 볼 수 있다.

Fig. 8은 인위적 노치부위에 CNT 나노복합재료를보강한 CF30wt%/PP 재료를 인장하면서 CNT 나노복합재료에 대한 전기저항 변화도를 분석한 결과이다. 일반적으로 도체

는 구조의 변화에 따라 인장응력에 의한 전기저항 변화도가 증가하는 결과를 얻는다[16,17]. 이론을 바탕으로 Fig. 8을 분석해 볼 경우 시편의 초기 0.3%의 신율변화에 CNT 나노복합재료에 인장응력이 전달되어 전기저항이 선형으로 증가되는 경향을 확인할 수 있었다. 균열크기에 따른 전기저항 변화도의 차이는 거의 존재하지 않았다. 하지만 신율이 0.3% 이후에는 전기저항변화도의 경향이 달라졌다. 균열크기가 작을수록 낮은 신율 단계에서 전기저항 변화도의 급격한 증가 결과를 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 CF30wt%/PP 표면에서 접촉되어 있던 CNT 나노복합재료가 분리될 때의 충격으로 전기저항 변화도가 증가하게 된다. 일반적으로 인위적 노치크기가 증가될 수록 급격한 전기저항 변화도 증가구간 이후 전기저항 안정화 단계를 확인할 수 있었다. 전기저항 변화도가 증가하는 구간은 Fig. 8 그래프 내에 시편 모식도와 같이 빨간색의 접착면이 파괴될 때 발생하는 신호이다. 그리고 전기저항 변화도가 안정화되는 구간은 파란색으로 표현된 접착면에서의 균열이 진행되는 단계를 나타낸다. 인위적 노치크기가 증가됨에 따라 전기저항 변화도에서 급격한 전기저항 증가 단계 발생이 지연되고, 전기저항 안정화 구간이 길게 지속됨을 확인할 수 있었다. 즉 CNT 나노복합재료와 CF30wt%/PP 간의 접착면의 증가의 영향으로 보강효과가 존재한다고 예상할 수 있다. 또한 전기저항 측정법을 이용하여 재료에 대한 손상 및 파괴에 대한 예측이 가능함을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구는 손상감지용 CNT 나노복합재료에 대한 손상 감지능과 균열부위 충전에 따른 보강효과에 대해 분석하였다. 나노입자의 분산도와 제조시간을 단축하기 위해 소니케이션과 교반을 동시에 활용하여 CNT 10 wt% 페이스트를 제조하였다. CNT 파우더를 이용하여 나노복합재료를 제조하는 방법에 비해 CNT 10 wt% 페이스트를 활용한 나노복합재료의 물성이 낮은 전기저항 결과와 높은 기계적 강도를 나타내었다. 고농도의 CNT 페이스트를 사전에 제조하여 나노복합재료를 제조하는 것이 분산도를 향상시키는 방법임을 규명하였다. 손상감지용 CNT 나노복합재료로 사용하기 위해 CF30wt% PP에 인위적 노치를 제조하여 균열에 따른 크기에 CNT 나노복합재료 충전에 따른 보강효과를 분석하였다. 인위적 노치크기에 의해 CF30wt%/PP와 CNT 나노복합재료간의 접착면의 차이가 증가될 수록 CNT 나노복합재료의 보강효과가 높게 확인되었다. 전기저항 측정에 따른 손상감지능 평가 결과는 CF30wt%/PP와 CNT 나노복합재료간의 접착면의 파단이 발생될 때 확인되는 전기저항 변화도 점핑 구간을 이용하여 구조물의 파괴를 사전에 예측할 수 있는 방법임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 일반연구자 지원사업의 연구 과제(2013R1A1A2058093)로 진행된 연구 결과입니다. 한국연구재단의 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Wans, Z.J., Kwon, D.J., Park, J.K., Lee, W.I., and Park, J.M., "Microstructure and Ablation Performance of CNT-phenolic Nanocomposites," *Composites Research*, Vol. 36, No. 5, 2013, pp. 309-314.
2. Gu, G.Y., Wang, Z.J., Kwon, D.J., and Park, J.M., "Mechanical and Electrical Properties of Electrospun CNT/PVDF Nanofiber for Micro-Actuator," *Composites Research*, Vol. 26, No. 1, 2013, pp. 14-20.
3. Kwon, D.J., Wang, Z.J., Gu, G.Y., and Park, J.M., "Surface Control and Durability Evaluation of CNT and ITO Coated PET Transparent Electrode with Different Dry Conditions," *Composites Research*, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 17-22.
4. Gu, G.Y., Wang, Z.J., Kwon, D.J., and Park, J.M., "Interfacial Durability and Acoustic Properties of Transparent xGnP/PVDF/xGnP Graphite Composites Film for Acoustic Actuator," *Composites Research*, Vol. 25, No. 3, 2012, pp. 70-75.
5. Hwang, S.H., Lee, D.W., Beak, J.B., Shin, H.S., and Park, Y.B., "Effect of Graphene Oxide on the Properties of Its Composite Fibers with PMMA and Nylon 6,6," *Composites Research*, Vol. 24, No. 4, 2011, pp. 1-4.
6. Kim, H.S., Kwon, D.J., Wans, Z.J., Gu, G.Y., Kim, D.S., Lee, C.S., and Park, J.M., "Electrical Resistance Measurement in Characterizing the Internal Damage of Carbon Nanotube/Polypropylene Nanocomposites," *Composites Research*, Vol. 26, No. 3, 2013, pp. 201-206.
7. Hong, J.S., Lee, J.H., and Nam, Y.W., "Dispersion of Solvent-wet Carbon Nanotubes for Electrical CNT/polydimethylsiloxane Composite," *Carbon*, Vol. 61, 2013, pp.577-584.
8. Varela, R.H., Bittolo, B.R., Rodriguez, P.I., Valentini, L., and Martin, G.I., "Development of Photo Micro-graph Method to Characterize Dispersion of CNT in Epoxy," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 506, 2009, pp. 39-44.
9. Paul, M., and John, V., "Complete CNT Disentanglement-dispersion-functionalization in a Pulsating Micro-structured Reactor," *Chemical Engineering Science*, Vol. 90, 2013, pp. 10-16.
10. Paulo, E.L., Ferrie, V.H., Pereira, C.M.C., Paulo, J.R.O.N., Stefan, F., Felicitas, H., and Laurent, P., "High CNT Content Composites with CNT Buckypaper and Epoxy Resin Matrix: Impregnation Behaviour Composite Production and Characterization," *Composite Structures*, Vol. 92, 2010, pp. 1291-1298.
11. Lai, Y.T., Chen, Y.M., Liu, T., and Yang, Y.J., "A Tactile Sensing Array with Tunable Sensing Ranges Using Liquid Crystal and Carbon Nanotubes Composites," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 177, 2012, pp. 48-53.
12. Huang, H., and Wu, Z.S., "Static and Dynamic Measurement of Low-level Strains with Carbon Fibers," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 183, 2012, pp.140-147.
13. Kwon, D.J., Wang, Z.J., Gu, G.Y., Um, M.K., and Park, J.M., "Inherent and Interfacial Evaluation of Fibers/Epoxy Composites by Micromechanical Tests at Cryogenic Temperature," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 4, 2011, pp. 11-16.
14. Li, W., Dichiaro, A., and Bai, J., "Carbon Nanotube-graphene Nanoplatelet Hybrids as High-performance Multifunctional Reinforcements in Epoxy Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 74, 2013, pp. 221-227.
15. Johnson, A.C., Zhao, F.M., Hayes, S.A., and Jones, F.R., "Influence of a Matrix Crack on Stress Transfer to an Alumina Fibre in Epoxy Resin Using FEA and Photoelasticity," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, 2006, pp. 2023-2029.
16. Bauhofer, W., and Kovacs, J.Z., "A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, 2009, pp. 1486-1498.
17. Li, L., Ma, P.C., Xu, M., Khan, S.U., and Kim, J.K., "Strain-sensitive Raman Spectroscopy and Electrical Resistance of Carbon Nanotube-coated Glass Fibre Sensors," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, 2012, pp. 1548-1555.