

형상이 다른 나노입자 스프레이 코팅에 따른 탄소계 강화 유리섬유와 에폭시 수지간 계면강도 관찰

권동준* · 왕작가* · 최진영* · 신평수* · 이은선** · 박종만*†

Investigation of Interfacial Adhesion of Different Shapes of Nano Carbon Fillers Reinforced Glass Fiber/Epoxy Composites by Spray Coating

Dong-Jun Kwon*, Zuo-Jia Wang*, Jin-Young Choi*, Pyeong-Su Shin*, En-Seon Lee**, Joung-Man Park*†

ABSTRACT: Manufacture of nanocomposites has simple process for developing nanocomposites due to the increasing applications using nanofillers. This work studied nanofiller coated glass fiber for reinforcing material with good wetting and conductivity and the morphology of nanofiller coated glass fiber was analyzed by FE-SEM. The durability of reinforced glass fiber was investigated with different shapes of nanofillers using sonication rinsing method. Fatigue test was performed to evaluate the adhesion of reinforcing interface and stability of nanofiller coating layer for single fiber reinforced composites. Apparent modulus and conductivity of nanofiller coating layer were evaluated to realize multifunctional of nanocomposites. Fiber type of nanofiller was better than plate type due to better cohesion between fiber and nanofillers. At last, the stability of fiber type nanofiller of coating layer has better durability and conductivity than plate type case.

초 록: 나노입자에 대한 복합재료 수요가 증가되면서 효과적인 나노입자 보강재를 이용한 나노복합재료 제조공정 단순화를 추구하고 있다. 본 연구에서는 나노입자를 활용하여 전도성과 계면 강도를 향상시킨 나노입자 강화 유리섬유 소재에 대한 연구를 진행하였다. 탄소계 나노입자의 형상에 따른 유리섬유 표면에 흡착된 나노입자 상태를 FE-SEM으로 분석하였다. 나노입자 코팅층의 내구성을 평가하기 위한 방법으로 초음파 세척과정에 따른 나노입자의 세척 정도를 분석하여 탄소계 나노입자의 형상에 따른 나노입자 코팅층의 내구성을 분석하였다. 동적피로 실험을 통하여 나노입자 강화 유리섬유/에폭시의 계면강도를 나노입자 형상에 따른 차이에 따라 비교하였다. 나노입자 코팅층의 내구성은 단섬유 강화 복합재료시편을 이용하여 분석하였다. 겉보기 강성도 결과와 나노입자 코팅층의 전도성 변화를 분석하여 코팅층의 다기능성을 분석할 수 있었다. 판상형의 나노입자 보다는 섬유 형태의 나노입자가 유리섬유 표면에 흡착성이 용이하였다. 계면 내구성 및 안정성에 효과가 있음을 확인하였다.

Key Words: 유리섬유(Glass fiber), 탄소나노튜브(Carbon nanotube), 그래핀 플레이트(Graphene platelet), 계면(Interface), 복합재료(Composite materials)

Received 24 February 2014, received in revised form 23 June 2014, accepted 24 June 2014

*경상대학교 나노신소재융합공학과, 공학연구원

*†경상대학교 나노신소재융합공학과, Corresponding author (E-mail: jmpark@gnu.ac.kr)

**한국복합소재 주식회사

1. 서 론

탄소계 나노입자를 활용한 복합재료의 활용처가 증가되고 있다[1]. 탄소계 나노입자라고 하면 대표적으로 흑연, 탄소나노섬유(CNF) 탄소나노튜브(CNT), 그래핀 플레이트릿(GnP), 그래핀과 같은 다양한 종류와 형상들이 존재한다[2-4]. 제품 물성 향상에 대한 결과 즉, 터프니스의 증가 정도 및 강도의 향상과 같은 강화재로의 효과뿐만 아니라, 전기 전도성, 열전도성 등과 같은 다기능성을 요구하는 분야에 활용되기 위한 나노입자의 강화재 활용 방법과 나노복합재료 제조 방법에 대한 기술은 급진적으로 개발되고 있다[5-8].

CNF의 경우 저렴한 방법 기대하는 물성치가 기대한 만큼 나오지 못하며, 또한 재료간의 응집력이 크기 때문에 발생하는 문제로 분산성 개발에 문제가 있다[9]. CNT는 CNF에 비하여 전도성과 내열성 및 기계적 강도 향상에 대한 강점은 있으나, 역시 섬유 형상이기 때문에 수지 내부에 분산성을 향상시키기 위한 방법을 필요로 한다[10]. GnP와 같은 판상 나노입자는 입자에 대한 두께가 두꺼울수록 밀도가 높아지며, 판상 형태이기 때문에 시트 형상의 시편이 아니라면 입자와 입자간 접촉에 문제가 있을 경우가 발생된다[11].

이처럼 나노입자를 이용하는데 있어서 적정 조건에 맞는 나노입자 선정이 중요하며, 나노입자에 대한 고분자 수지간의 계면 및 분산성 개선에 대한 추가적인 연구 결과가 필요하다[12,13]. 분산성 개발에 대해서는 많은 연구진들의 연구결과가 이미 논문화 특허화되어 있다. 나노입자의 표면에 화학적 작용기를 부착하여 재료에 대한 용매와의 극성 및 반발력 작용에 대한 개선을 시도하고, 특정 나노입자와 나노입자간 거리 조절을 시도하기도 한다. 전기적 효과를 이용하여 나노입자의 분산상태를 배열시키기도 하며, 나노입자를 화학증착법으로 성장시켜 완벽하게 배열된 나노복합재료를 제조하는 방법에 대한 개발을 하고 있다[14,15].

본 연구에서는 나노입자를 강화재로 활용한 나노복합재료를 제조하기 위해서 섬유 표면에 나노입자가 코팅되어 있을 경우에 대한 복합재료의 계면 및 전도성 부여 효과와를 확인하고자 하였다. 나노입자에 대한 코팅액을 초음파 처리를 통하여 제조하고 이를 이용하여 유리섬유 표면에 나노입자를 스프레이 코팅시켜 안정화된 나노입자 코팅층을 유리섬유 표면에 제조하였다. 코팅층에 대한 내구성을 세척 과정에 따른 나노입자 제거 정도를 통하여 FE-SEM으로 분석하였으며, CNT와 GnP와 같은 형상이 다른 나노입자의 따른 코팅층의 차이를 분석하였다. 또한 유리섬유 표면에 코팅된 나노입자의 보강효과 복합재료 내부에서 존재하는지 분석하기 위해 단섬유 강화 복합재료 시편을 제조하여 동적 피로 실험을 진행하였다[16,17]. 동적 피로 실험에 따른 계면에서의 나노입자 코팅층 안정성을 전기저항 분석법으로 분석하고, 동적 피로 실험에 따른 계면에서의

안정성을 평가하였다.

2. 실 험

2.1 재료

나노입자의 형상에 따른 유리섬유 표면에서의 나노코팅층의 제조를 시도하였다. 나노입자는 섬유 형상의 CNT(MR90, 카본나노텍(주), 한국)과 판상 형상의 나노입자인 GnP(xGnP-M-5, XG사이언스, 미국) 제품을 사용하여 나노입자 형상에 따른 나노코팅층의 상태를 분석하였다. 나노입자가 분산된 코팅액을 제조하기 위해 아세톤(대정화학, 한국)을 사용하였으며, 초음파 처리(UP200s, hielscher, 독일)를 0.5 s 초음파 처리 주기로 50% 앰플리튜드 강도로 분산을 시도하였다. 점도가 낮은 용매에 장시간 분산과정을 가지며, 나노입자의 파괴가 발생할 수 있기 때문에 2시간 동안의 분산 용액 제조 과정을 가졌다. 전도성이 없는 유리섬유(오웬스코닝, 미국)를 이용하여 나노입자가 코팅된 유리섬유를 제조하여 본 연구에 기본이 되는 재료로 활용하였다.

Fig. 2는 나노입자가 코팅된 유리섬유를 제조하는 조건을 나타낸 모식도이다. 나노입자의 코팅층은 스프레이 코팅의 시간과 비례하였으며, 본 연구에서는 10~30 nm 정도의 코팅층을 얻기 위해 나노입자가 1 wt% 분산된 용액을 이용한 30초간 코팅으로 시편 제조 과정을 가졌다.

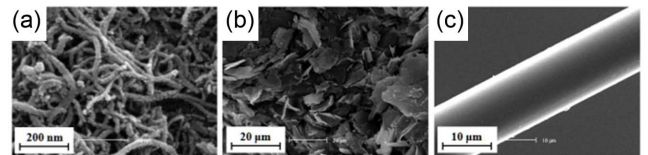


Fig. 1. Raw materials of nanofillers and reinforcing fiber: (a) MWNT, (b) GnP, and (c) GF

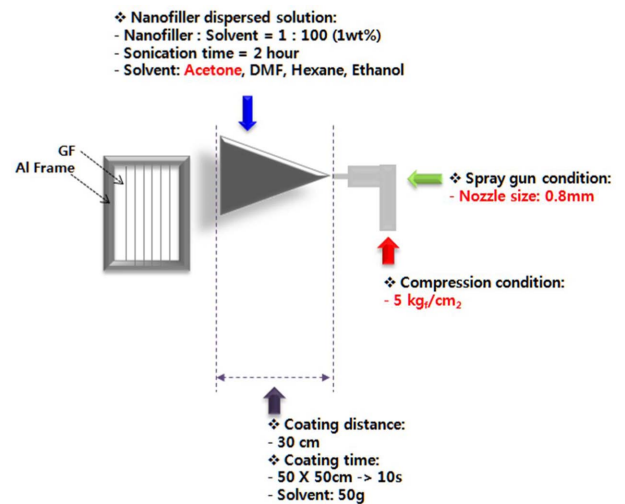


Fig. 2. Fabrication system of nanoparticles coating on fiber

2.2 나노코팅층에 대한 내구성 평가 및 계면 강도 강화도 평가

일반적인 세척 방법과 물리적 물성 평가 방법을 이용하여 나노입자 코팅층에 대한 내구성을 평가하였다. 일반적인 세척방법은 베스형 소니케이션 장비(P230DE, powersonic, 미국)를 이용하여 세척과정을 가졌다. 세척 조건은 30% 앰프리튜드 조건에서 나노입자가 코팅된 섬유 시편을 물에 담귀 1분 동안의 세척 과정을 거쳤다. 세척과정에 따른 나노입자 코팅층의 벗겨짐 발생 정도를 FE-SEM으로 분석하여 나노입자의 코팅 내구성을 평가하였다.

동적 피로 실험을 진행하기 위한 단일섬유 강화 복합재료 제조를 위하여 에폭시(YD-128/KBH-1089, 국도화학(주), 한국)기지를 사용하였다. 나노입자가 코팅된 섬유의 가운데 위치에 길이 2 cm와 폭 5 mm의 직사각형 모양으로 에폭시 수지를 경화시켜 시편 제조를 완료하여 동적 피로 실험에 따른 계면 강성도 변화와 코팅층의 내구성을 분석하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 나노입자가 코팅된 유리섬유의 상태 분석

Fig. 3은 나노입자에 대한 형상학적 차이에 따른 유리섬유에서의 코팅 정도를 FE-SEM으로 분석한 결과이다. 나노입자에 대한 형상학적 차이가 굴곡진 표면에서의 나노입자 코팅에 큰 영향을 가지는 것을 확인하였다. CNT와 같은 섬유 형태의 나노입자는 유리섬유 표면에 코팅되는 조건에 대해서 비교적 안정적인 코팅 상태를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 GnP를 이용한 코팅 조건의 경우 매우 거친 표면을 가지는 코팅 표면과 나노입자의 유리섬유 표면에 함침성이 용이하지 못하는 상태를 분석할 수 있었다. 형상학적으로 나노입자의 조건에 의하여 굴곡진 유리섬유 표면에 제한적이었다. 판상에 비해 일차원적 선형 나노입자가 코팅에 용이성을 띄었다.

3.2 나노입자 코팅층에 대한 내구성 평가

Fig. 4는 단섬유 인장 시편을 종이프레임에 제조하여 나노입자가 코팅된 유리섬유의 나노입자 코팅층의 계면 내구성을 동적 하중 실험을 통하여 분석한 결과이다[17]. 동적 피로 실험 조건은 1 mm의 신율 조건을 0.5 mm/min의 속도로 1000회 진행한 결과이다.

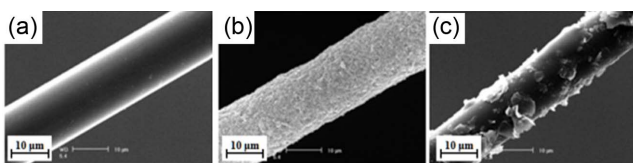


Fig. 3. SEM photos of nanoparticle coated glass fiber: (a) neat GF, (b) MWNT/GF, and (c) GnP/GF

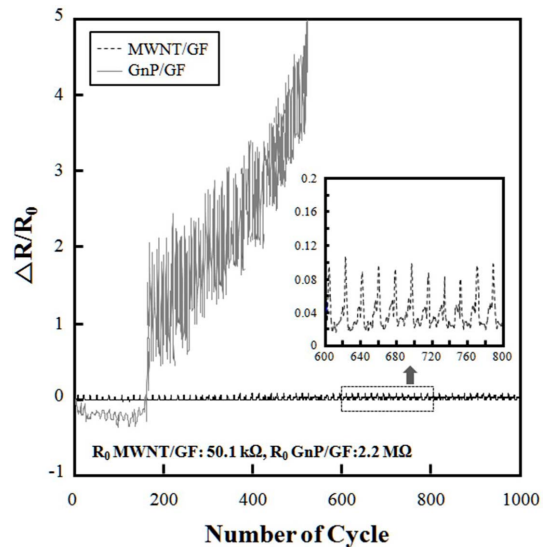


Fig. 4. Electrical resistivity of nanoparticle coated GF for fatigue test

나노입자가 코팅된 섬유의 동적 피로 상태에 따른 전기저항 측정으로 코팅 표면의 내구성을 평가한 결과이다. 나노입자가 코팅된 표면에서는 나노입자가 이룬 코팅층에 대한 거동이 섬유에 가해진 응력 전달 효과에 의하여 미세하게 반응하는 결과를 전기저항 변화도로 감지할 수 있었다. 하지만 GnP와 CNT 코팅층에 대한 차이는 매우 컸다. CNT 코팅층의 경우 Fig. 3의 결과와 같이 전기저항의 변화가 동적 피로 조건에 의하여 비교적 안정적으로 나타내는 거동을 볼 수 있었다. 하지만 GnP 코팅층은 동적 거동에 의하여 매우 불안정한 전기저항 변화 신호를 분석할 수 있었으며, 전기저항의 신호가 약 600 사이클 단계에서 오버로드 걸리는 상태를 확인할 수 있었다. 즉 나노입자의 내구성에 대해서 GnP 코팅층은 매우 불안정한 코팅상태임을 볼 수 있었으며, 스프레이 코팅에 따른 단순 흡착만으로 이루어진 상태임을 예측할 수 있었다.

동적 거동에 따라 전기저항 신호가 일정하게 변화된다는 결과는 나노입자의 코팅층에 가해지는 응력에 대한 문제도 있지만, 미세 움직임에 대한 나노입자와 입자간 접촉점의 증가와 감소적인 상태로도 분석할 수 있다. 이러한 점을 분석해 볼 경우 CNT가 코팅된 경우는 동적 거동에 대한 문제가 단순한 나노입자와 입자간의 밀립과 원상복구의 현상으로 비교적 안정적인 코팅 상태임을 확인할 수 있으며, GnP의 경우는 나노입자의 코팅층이 동적 거동에 의하여 입자가 유리섬유에서 떨어지거나, 기존에 존재하고 있던 나노입자간 접촉점의 파괴 발생되었기 때문에 발생한 문제임을 예상할 수 있었다.

Fig. 5는 베스형 소니케이션을 이용하여 코팅된 섬유를 세척하고 난 다음의 상태를 나타낸 결과이다. CNT의 경우 GnP를 코팅시킨 유리섬유에 비하여 변화의 정도가 작아

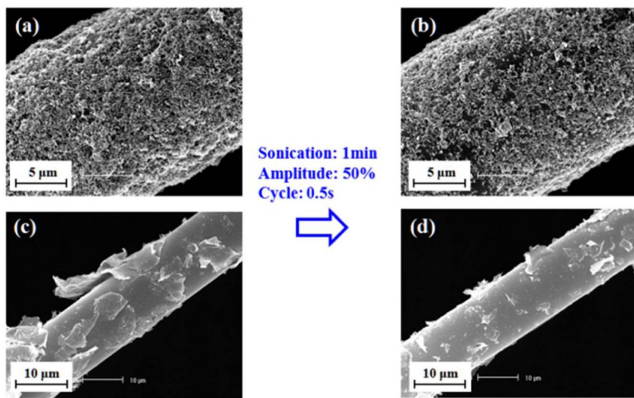


Fig. 5. SEM photos of durability of nanoparticle coating on GF: (a) Neat MWNT/GF, (b) Rinsed MWNT/GF, (c) Neat GnP/GF, and (d) Rinsed GnP/GF

서 2배 확대시킨 상태에서 세척에 따른 나노입자 코팅층이 떨어져 나간 상태를 분석할 수 있었다. Fig. 5(c)와 같이 GnP가 코팅된 유리섬유 표면에 나노입자 코팅층은 초기 상태에 매우 나노입자가 불균일하게 흡착된 상태를 관찰할 수 있다. 하지만 Fig. 5(d)와 같이 세척 이후의 단계에서는 대부분의 큰 형상의 나노입자들이 떨어져 나가는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5(a)와 (b)의 결과는 GnP가 코팅된 표면과 다르게 나노입자의 코팅 정도가 비교적 안정적이었다. 일부부분의 구간에서 초기 스프레이 코팅에 따라 나노입자가 응집된 결과를 분석할 수 있었다. 이러한 결과는 나노입자를 유리섬유에 코팅시킬 때 나노입자의 분산 용액의 쌓임이 불균일하게 발생되었기 때문이라고 예상된다. 비교적 이런 구간에서는 나노입자와 입자간의 응집이 크게 이루어진 상태이기 때문에 유리섬유와 CNT 입자간 흡착 상태가 안정적이지 못한 상태이다. 세척을 통하여 비교적 유리섬유와 안정적인 코팅 상태를 가지고 있는 나노입자 코팅층을 분석할 수 있었고, 판상형 GnP 나노입자에 비하여 CNT의 나노입자 코팅층의 내구성이 높음을 관찰하였다.

3.3 단섬유 강화 복합재료를 이용한 나노입자가 코팅된 유리섬유와 에폭시 기지간 계면 강도 및 나노입자 코팅층 변화 거동 분석

나노입자가 코팅된 유리섬유에 대한 활용에 대해 복합재료화 하였을 경우 에폭시 기지와 계면 강도 변화 조건을 분석하기 위해 단섬유 강화 복합재료 시편을 제조하여 Fig. 6과 같은 결과를 확보하였다. 동적 하중 실험법으로 참조문헌과 같은 방법을 실험을 진행하였다[18].

나노입자가 코팅된 유리섬유와 에폭시간의 친화도를 분석한 결과를 비교한다면, 우선 동적 피로에 따른 전기저항 변화의 거동을 분석해 볼 수 있다. 전기저항 변화도의 결과는 유리섬유 표면에 존재하는 나노입자의 코팅의 상태를

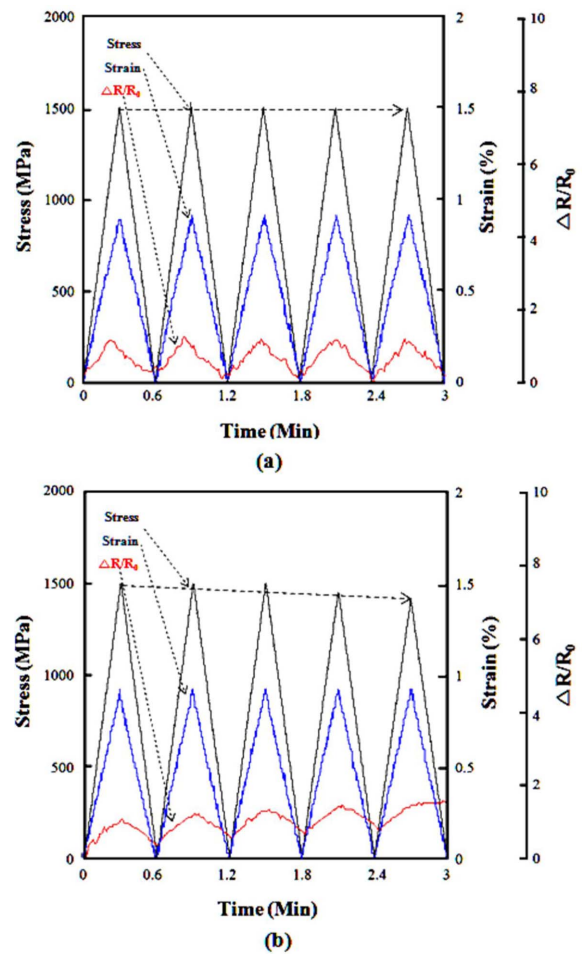


Fig. 6. Cyclic loading test of nanoparticle coated GF: (a) MWNT/GF and (b) GnP/GF

비파괴 평가적으로 접근하여 나노입자 코팅층의 파괴 거동을 분석해 볼 수 있다. CNT가 코팅된 유리섬유의 경우 나노입자 코팅층의 변화가 거의 존재하지 않음을 확인할 수 있었다. 5회의 동적 피로 조건에 대하여 불균일한 전기저항 신호를 확보하였으나, 동적 피로에 따른 응력을 유리섬유를 통하여 받아 전기저항의 거동이 변화되는 추세를 관찰할 수 있었다. 응력이 가해지고 응응력 풀렸을 때 전기적 신호는 다시 원상 복구되는 점을 통하여 CNT 나노입자의 코팅층이 유리섬유에 적절히 흡착되어 안정적인 계면 상태를 이루고 있음을 예측할 수 있었다. 그에 반대로 GnP가 코팅된 유리섬유에 에폭시가 함침된 시편의 경우 재료에 대한 내구성에 대한 변화가 CNT 나노입자 코팅된 유리섬유 시편에 비해 큰 차이를 확인하였다. 동적 피로에 의하여 전기저항 신호는 지속적으로 증가되는 경향을 확인하였다. 5회의 동적 피로 조건에 의하여 나노입자간 접촉점의 파괴로 원래의 전기저항 변화도 상태로 복구하지 못하고 증가되어 실험을 마무리한 결과를 확인하였다.

계면 강도 향상에 대한 나노입자 코팅에 따른 영향을 분

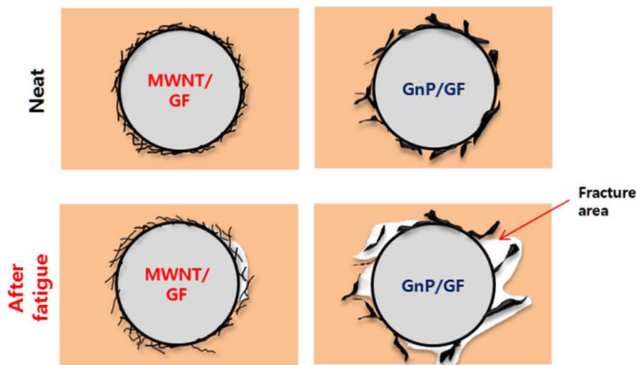


Fig. 7. Model of different nanoparticle coating after cyclic loading

석하여 보았다. 5회의 동적 피로 거동에 의하여 섬유에 가해지는 응력의 정도 변화에 차이가 있었다. CNT가 코팅된 유리섬유의 경우 지속적인 인장 하중에 따른 응력 결과를 확보하는 반면, GnP가 코팅된 유리섬유의 인장 하중 변화 추세는 점점 떨어지는 결과를 분석할 수 있었다. 일반적으로 섬유에 가해지는 인장 하중이 변화되는 이유는 섬유와 수지간의 계면에서 초기에 주어지고 있던 계면 강도의 영향이 감소되었기 때문에 발생된 문제라고 예측할 수 있다.

Fig. 7은 나노입자가 코팅된 유리섬유와 에폭시 기지간의 계면 상태 단면을 동적 피로 하중 실험 이후의 상태를 모델화한 그림이다. 이와 같은 이유로 나노입자가 코팅된 표면의 상태 변화를 예측할 수 있다. CNT가 코팅된 유리섬유를 이용할 경우 나노입자의 코팅층에 대한 안정성이 높고, 나노입자와 나노입자간의 접촉점의 변화가 적었기 때문에 에폭시 수지와 생성하는 계면에서의 동적 피로에 따른 변화 및 파괴의 현상이 적게 발생하는 것이라 예측할 수 있다. 또한 Fig. 6의 실험 결과를 바탕으로 볼 때 CNT 나노입자 코팅층의 동적 피로 실험에 따른 전기저항 변화도의 변화추이가 적음을 바탕으로 나노입자가 이루고 있는 코팅층간의 나노입자간 접촉점은 지속적으로 유지하고 있을 것으로 예상된다.

그에 반대로 GnP가 코팅된 유리섬유의 경우 전기저항 변화도의 증가가 동적 피로 하중의 전달 횟수 증가에 따라 지속적으로 증가된 결과를 확보하였다. 이는 나노입자와 입자간 계면 층의 파괴가 일차적으로 이루어졌다. 동적 피로 실험을 위한 단섬유 강화 복합재료의 시편 전체의 응력 결과의 변화가 감소한 결과를 바탕으로 나노입자가 코팅된 유리섬유와 에폭시 기지간의 계면에서 파괴가 발생되었음을 예측할 수 있다.

궁극적으로 CNT가 코팅된 유리섬유의 상태가 GnP가 코팅된 유리섬유의 상태보다 안정적인 코팅층 내구성과 복합재료화에 따른 계면 강도 향상 및 계면 내구성 강화에 영향이 있음을 확인하였다.

6. 결론

본 연구는 나노입자를 고분자 기지 내부에 혼합시키기 보다는 섬유의 표면에 도포하여 나노복합재료를 제조할 경우 나노입자의 형상에 따른 영향을 분석하고, 나노입자 코팅층을 가진 유리섬유의 물성 강화 효과를 분석한 내용이다. 나노입자의 형상은 섬유 타입의 CNT와 판상 형상의 GnP를 이용하여 유리섬유의 표면에 도포하여 보았으나, 섬유 타입의 CNT가 굴곡진 유리섬유의 표면에 흡착이 용이하여, GnP에 비해 안정적인 나노입자 코팅층을 유리섬유 표면에 확보할 수 있었다. 계면 내구성 평가에 따른 결과 역시 소니케이션 세척 평가 및 동적 피로 실험에 따른 전기저항 변화도 추이를 관찰하여 나노입자 코팅층의 내구성이 CNT 재료를 이용할 경우 더 높은 효과를 가진다는 점을 확인하였다. 에폭시 수지를 기지재로 활용할 경우 나노입자가 코팅된 유리섬유와의 계면 강도 변화 추이와 나노입자가 이루고 있는 계면 층에 대한 내구성을 분석해 보았으며, CNT가 코팅된 유리섬유와 에폭시 기지간의 계면 상태가 GnP를 코팅한 유리섬유의 경우보다 계면 안정성이 높음을 전기저항 변화도 분석 결과로 확인할 수 있었다. 나노입자를 유리섬유와 같은 강화제에 도포하여 강화제를 제조할 경우 강화효과 및 계면 안정성에 대한 효과가 있음을 분석할 수 있었고, 굴곡진 표면에 대한 나노입자 코팅은 섬유 형상의 나노입자를 이용하는 것이 용이한 재료 강도 및 계면 강도를 확보하는 사실을 확인할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

1. Nabarun, R., Rajatendu, S., and Anil, K.B., "Modifications of Carbon for Polymer Composites and Nanocomposites," *Progress in Polymer Science*, Vol. 37, No. 6, 2012, pp. 781-819.
2. Sarita, K., Susheel, K., Annamaria, C., James, N., Youssef, H., and Rajesh, K., "Surface Modification of Inorganic Nanoparticles for Development of Organic-inorganic Nanocomposites - A Review," *Progress in Polymer Science*, Vol. 38, No. 8, 2013, pp. 1232-1261.
3. Zhidong, H., and Alberto, F., "Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes and Their Polymer Nanocomposites: A Review," *Progress in Polymer Science*, Vol. 36, No. 7, 2011, pp. 914-944.
4. Petar, D.P., and Georgi, L.G., "Fabrication of Super-macroporous Nanocomposites by Deposition of Carbon Nanotubes onto Polymer Cryogels," *European Polymer Journal*, Vol. 48, No.

- 8, 2012, pp. 1366-1373.
5. Merlin, T., Mahesh, H., Jonathan, T., and Shaik, J., "Influence of Functionalization on Properties of MWCNT-epoxy Nanocomposites," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, 2011, pp. 1192-1200.
6. Charles, D.W., Marc, J.P., Karl, W.P., Gregory, H., Rick, B., and Catherine, B., "Nanoscale Structure and Local Mechanical Properties of Fiber-reinforced Composites Containing MWCNT-grafted Hybrid Glass fibers," *Composites Science and Technology*, Vol. 72, 2012, pp. 1705-1710.
7. Donghai, Z., Lin, Y., Dong, W., Youhong, T., Samir, M., and Yunfa, C., "Assessment of Transverse Impact Damage in GF/EP Laminates of Conductive Nanoparticles Using Electrical Resistivity Tomography," *Composites: Part A*, Vol. 43, 2012, pp. 1587-1598.
8. Kim, M.G., Moon, J.B., and Kim, C.G., "Effect of CNT Functionalization on Crack Resistance of a Carbon/epoxy Composite at a Cryogenic Temperature," *Composites: Part A*, Vol. 43, 2012, pp. 1620-1627.
9. Varela, R.H., Bittolo, B.R., Rodriguez, P.I., Valentini, L., and Martin, G.I., "Processing and Functionalization Effect in CNF/PMMA Nanocomposites," *Composites Part A*, Vol. 43, No. 4, 2012, pp. 711-721.
10. Wang, Z.J., Kwon, D.J., Gu, G.Y., Kim, H.S., Kim, D.S., Lee, C.S., and Park, J.M., "Evaluation of Mechanical Properties and Damage Sensing of CNT-Polypropylene Composites by Electro-Micromechanical Techniques," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 26, No. 1, 2013, pp. 1-6.
11. 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," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 25, No. 3, 2012, pp. 70-75.
12. 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," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 3, 2010, pp. 58-63.
13. Kwon, D.J., Wang, Z.J., Kim, J.J., Jang, K.W., and Park, J.M., "Prediction Method of Dispersion Condition for Reinforced Epoxy in Nano SiC Particles Using Capacitance Measurement," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 26, No. 6, 2013, pp. 337-342.
14. Choi, O., Lee, W.O., Lee, S.B., Yi, J.W., Kim, J.B., Choe, H.S., and Byun, J.H., "CNT and CNF Reinforced Carbon Fiber Hybrid Composites by Electrophoresis Deposition," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 3, 2010, pp. 7-12.
15. Park, J.M., Kim, D.S., Kong, J.W., Kim, M.Y., Kim, W.O., and Park, I.S., "Evaluation of Interfacial Properties on the Electrodeposited Carbon Fiber Reinforced Polyetherimide Toughened Epoxy Composites using Micromechanical Test," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 15, No. 3, 2002, pp. 34-44.
16. Park, J.E., and Choi, N.S., "A Novel Hemispherical Microbond Specimen for Evaluating the Interfacial Shear Strength of Single Fiber Composite," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 21, No. 2, 2008, pp. 25-30.
17. Park, J.M., Lee, S.L., Kim, J.W., and Yoon, D.J., "Nondestructive Evaluation and Microfailure Mechanisms of Single Fibers/Brittle Cement Matrix Composites using Electro-Micromechanical Technique and Acoustic Emission," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 14, No. 3, 2001, pp. 18-31.
18. 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.