

## 전기저항 평가법을 이용한 CNT 함유 에폭시의 탄소섬유내 젖음성 및 계면특성 예측 연구

권동준\* · 최진영\* · 신평수\* · 이형익\*\* · 이민경\*\* · 박종규\*\* · 박종만\*†

### Prediction of Wetting and Interfacial Property of CNT Reinforced Epoxy on CF Tow Using Electrical Resistance Method

Dong-Jun Kwon\*, Jin-Yeong Choi\*, Pyeong-Su Shin\*, Hyung-Ik Lee\*\*, Min-Gyeong Lee\*\*,  
Jong-Kyoo Park\*\*, Jung-Man Park\*†

**ABSTRACT:** As a new method to predict the degree of dispersion in carbon nanocomposites, the electrical resistance (ER) method has been evaluated. After CNT epoxy resin was dropped on CF tow, the change in electrical resistance of carbon fiber tow was measured to evaluate dispersion condition in CNT epoxy resin. Good dispersion of CNTs in carbon nanocomposite exhibited low change in ER due to wetted resin penetrated on CF tow. However, because CNT network was formed among CFs, non-uniform dispersion occurred due to nanoparticle filtering effect by CF tow. The change in ER for poor dispersion exhibited large ER signal change. The change in ER was used for the dispersion evaluation of CNT epoxy resin. Correlation between interlaminar shear strength (ILSS) and dispersion condition by ER method was established. Good CNT dispersion in nanocomposites led to good interfacial properties of fiber-reinforced nanocomposites.

**초 록:** 본 연구에서는 탄소 나노복합재료 수지의 분산도를 평가하기 위해 전기저항 측정방법을 활용한 평가 예측 연구를 시도하였다. 탄소 나노복합재료 수지를 탄소섬유 토우에 떨어뜨려 탄소섬유의 배열 변화에 따른 전기저항 변화도를 이용하여 분산도를 평가하였다. 분산도가 균일한 탄소 나노복합재료 수지의 상태는 섬유 토우의 배열을 변화시키더라도, 섬유들 사이에 CNT의 영향으로 전기적 접촉면을 생성시켜 비교적 낮은 전기저항 변화도를 나타낸다. 그러나 불균일한 나노입자 분산상태의 수지는 탄소섬유 토우의 필터링 현상에 나노입자와 에폭시가 분리되었다. 탄소섬유의 전기저항 변화도는 크게 변화되며, 이러한 전기저항 변화도의 크기차이를 이용하여 분산도를 분석할 수 있었다. 나노복합재료 수지 적용 섬유강화 복합재료의 ILSS 측정 결과와 전기저항 측정법을 이용한 분산도 평가 결과간의 상관관계를 비교하였다. 균일한 분산도 상태의 나노복합수지를 이용한 경우가 섬유강화 복합재료화 하였을 경우 우수한 계면 특성을 확인하였다.

**Key Words:** 전기저항 평가방법(Electrical resistance method), 탄소나노튜브(Carbon nanotube), 분산도(Dispersion), 탄소섬유 토우(Carbon fiber tow)

Received 29 June 2015, received in revised form 27 August 2015, accepted 27 August 2015

\*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](mailto:jmpark@gnu.ac.kr))

\*\*Agency for Defense Development

## 1. 서 론

나노입자는 탄소나노튜브(CNT), 그래핀 등과 같은 탄소계 나노입자를 대표적으로 사용하여 복합재료 소재 분야에서 강화제로 활용하는 연구가 다량 발간되었다[1,2]. 나노입자를 이용한 나노복합재료는 기계적 강도의 향상과 충격특성 개선, 내열성 강화, 전도성 발생 등의 장점이 존재한다[3-5]. 기계적 강도와 충격, 파괴인성 특성이 향상되는 이유로는 응력 완화를 시켜줄 수 있는 네트워크를 기지재료 내에서 형성하기 때문이다[6]. 균열이 발생되어도 균열을 지연시키는 효과를 나타낸다. 특히 섬유 형태의 CNT의 경우 형상비가 크기 때문에 CNT와 기지재료간의 계면전단력에 따라 기지재료에서 CNT가 풀아웃 될 때 균열 확장을 막아주는 crack pinning 효과를 나타낸다[7,8]. 내열성 강화의 특색은 탄소계 나노입자의 경우 열전도도가 높은 소재이기 때문에, 열에너지를 나노복합재료가 직접적으로 받을 경우 균일하게 분산된 나노복합재료 내 나노입자가 열을 외부로 쉽게 빠지게 해줌으로써 내부의 열에너지 응축이 안되도록 막아준다[9,10]. 이러한 현상에 의해 기지재료는 열에너지 응축에 의한 고분자 사슬의 파괴를 막아주기 때문에 내열성이 향상되는 것이다. 전도성 부여의 특성도 나노입자의 높은 전기전도도에 의해 발생된다[11,12]. 나노입자와 나노입자간의 접촉이 복합재료 기지 내에서 발생되고, 접촉에 의해 전기가 흐를 수 있는 네트워크가 복합재료 내에 형성된다. 나노입자간의 네트워크가 복합재료의 전도성 특성에 영향을 주게 된다.

기계적 물성 및 내열성, 전도성에 대한 대부분의 나노복합재료 특성은 위에서 설명되었듯이 나노복합재료 내부에 존재하는 나노입자와 나노입자의 접촉, 즉 나노입자의 네트워크 구성이 균일하게 발생되어야 한다[13,14]. 나노입자의 분산도 안정화가 나노입자 활용 나노복합재료의 물성 개선에 중요한 인자이다. 나노입자의 분산도 개선은 어려운 부분이다. 나노입자와 나노입자간의 응집력 문제와 나노입자 특히 CNT와 같은 형상비가 있는 입자의 경우 소재에 대한 얽힘이 새로운 변수로 작용되기 때문에 문제이다. 이러한 얽힘을 배제시키기 위한 연구가 필요하다[16,17]. 분산도 개선을 위해서 물리적인 처리방법이 가장 크게 발생되었다. 나노복합재료 제조에 대해 초기 단계 연구에서는 초음파 분쇄기를 이용하여 나노입자의 응집을 풀어주는 분산단계를 가졌다. 하지만 현재는 나노입자에 전단력을 물리적으로 주어 나노입자의 응집을 파쇄하고 조금 더 빠르게 제조공정이 발생되도록 3 롤밀이나, 균질기 같은 것이 개선되었다. 화학적으로 나노입자의 분산도 개선을 위해서는 나노입자의 표면을 개질하는 연구와 복합재료를 이물 고분자 기지 소재의 개질을 시도하는 연구가 진행되고 있다. 화학적으로 접근하여 나노입자와 나노입자가 간의 거리를 조절하기 위해 알킬체인을 이용한다거나, 쌍극자모멘

트 효과를 응용하여 분산도 개선을 시도한다. Silane을 이용하는 경우가 대부분이며 성형 및 성화에 대해서 재현성이 떨어지는 것은 사실이다. 이처럼 나노입자를 활용할 경우 재료의 특성을 높일 수 있는 장점에 의하여 나노복합재료를 제조하려고 시도는 많이 하지만 나노복합재료에 대한 분산도 개선에 대해서 실질적인 결과가 필요하다. 또한 향상된 나노입자의 복합재료 내 분산도 상태를 규명하기 위한 평가방법도 개선되어야 한다. 기존에 FE-SEM이나 TEM을 이용하는 경우가 대부분이지만, 쉽고 빠르게 나노입자의 분산도를 규명할 수 있는 조건이 필요하다.

본 연구에서는 나노입자의 분산도 평가를 위해 전기저항 측정법을 이용하여 새로운 방법을 고안하였다. 섬유 토우를 이용하여 나노입자가 함유된 에폭시 수지 1g이 섬유 토우에 함침 될 때 발생하는 탄소섬유 토우의 전기저항 변화도를 감지하였다. 나노입자가 함유된 에폭시 수지는 중력 및 섬유 토우와 친화도 정도에 따라 토우 내로 스며들게 된다. 나노입자의 분산도가 균일하지 못한 조건에서는 나노입자의 응집된 응어리가 필터링 되는 현상이 발생된다. 이러한 필터링 현상의 상태를 전기저항 신호로 감지가 가능하기 때문에 분산도 평가로 전기저항 측정 결과를 응용할 수 있었다. CNT 농도에 따른 에폭시 수지를 제조하고, 나노입자 분산 상태에 대한 변수를 주어 고안한 분산도 평가방법의 검증을 진행하였다. 최종적으로 확인한 젖음성 전기저항 분산도 평가방법의 결과를 기계적 강도 및 파괴인성 결과와 분석하여 분산도 평가방법에 대한 타당성을 평가하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 재료

CNT(MR90, 카본나노텍(주), 한국)를 비스페놀 A계 에폭시 수지(YD-128, 국도화학(주), 한국)에 혼합하는 과정을 가진다. 혼합시키는 CNT의 농도는 0.5 wt%, 1 wt%, 2 wt%, 3 wt%, 5 wt%의 변수를 주어 농도에 따른 분산상태를 분석하였다. 나노입자의 혼합을 용이하게 하기 위해서 아세톤(대정화학, 한국)을 이용하여 에폭시 희석과정을 가졌다. 초음파 분쇄기(UP200s, Hielscher, 독일)를 이용하여 0.5 sec 초음파 처리 주기로 50% 앰플리튜드 강도로 3시간 동안 CNT 분산과정을 진행하였다. 분산과정이 끝나고 잔존 용매를 제거하기 위해 건조과정을 80°C 조건에서 하루 진행하였다. CNT 농도별 나노복합수지에 대한 제조를 완료하고 기계적 물성 평가 시편 및 젖음성 전기저항 분산도 측정법에 사용하여 실험 결과를 도출하였다.

### 2.2 젖음성 전기저항 분산도 측정방법

Fig. 1은 젖음성 전기저항 분산도 측정 방법에 대한 모식도와 측정 결과에 대한 모식도를 나타낸 결과이다. 평가방

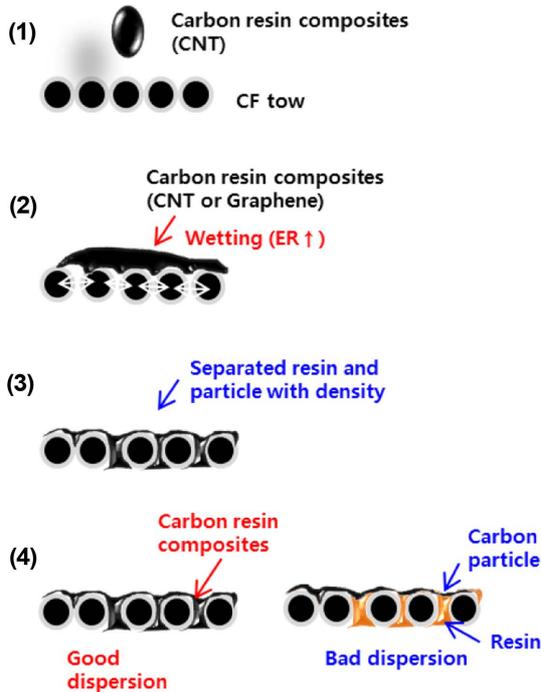


Fig. 1. Theory of wetting electrical resistance method for dispersion condition in nanocomposites: (a) good dispersion condition; and (b) poor dispersion condition

법은 Fig. 1의 순서와 같이 진행된다. 섬유 토우(T700SC 12k, Toray Co., 일본)의 상태는 5 cm 길이로 유리플레이트 위에 고정시키며, 양끝에 구리선을 접촉시켜 탄소섬유에 대한 전기저항을 감지 할 수 있도록 시편을 제조한다. 나노입자가 혼합된 에폭시 수지 1 g을 섬유 토우 위에 떨어뜨린다. 수지가 퍼지는 단계를 Fig. 1(2) 과정으로 표현할 수 있으며, 이 과정에서 수지 함침에 따른 섬유 배열의 변경이 발생된다. 또한 섬유 배열의 변경에 의해 탄소섬유에 대한 전기저항이 변화되게 된다. Fig. 1(3) 단계와 같이 통상으로 20분의 시간이 지나면 수는 섬유 토우 내 및 토우 아래로 내려가게 되며, Fig. 1(4) 단계와 같이 나노입자의 분산도에 의해 조건이 달라진다. 일반적으로 나노입자가 존재함으로써 섬유 토우 표면 위에 CNT 입자가 필터링 되는 현상이 발생된다. 나노입자의 분산도가 균일하지 않을 경우 나노입자의 응집이 많이 발생되기 때문에 필터링 되는 정도가 높아지며, 에폭시 수지만 아래로 침전되는 현상이 발생된다. 나노입자가 함유된 에폭시 수지가 섬유 토우 내로 균일하게 함침될 경우 섬유의 배열은 달라지더라도 섬유와 섬유 사이에 CNT 입자가 새로운 전기적 네트워크를 형성시키기 때문에 전기저항 변화도가 적다. 하지만 분산도가 균일하지 못한 경우 나노입자가 함침된 에폭시 수지에서 나노입자는 필터링 되며 에폭시 수지만 섬유 토우 내로 내려가기 때문에 탄소섬유 토우의 현상 변화는 크게 발생되고 섬유와 섬유간 접촉이 적어지기 때문에 지속적인 전

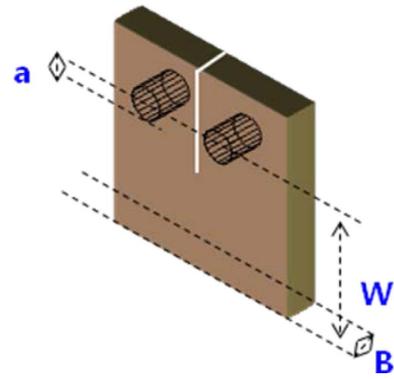


Fig. 2. Method of compact tension test (ASTM D5095-99)

기저항 변화도가 관찰된다.

### 2.3 CNT가 함유된 나노복합재료의 농도에 따른 층간 전단강도 및 파괴인성 평가

Fig. 2는 ASTM D5095-99 방법으로 에폭시 수지에 나노입자가 함유될 경우 발생하는 파괴인성의 차이를 분석하기 위해 제조한 시편 모식도이다. 파괴인성을 평가하기 위해 사용한 수식은 아래와 같다.

$$K_{IC} = \frac{P}{B\sqrt{W}} \left( 2 + \frac{a}{W} \right) \left( \frac{0.886 + 4.64 \left( \frac{a}{W} \right) - 13.32 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left( \frac{a}{W} \right)^3 - 5.6 \left( \frac{a}{W} \right)^4}{1 - \left( \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \right) \quad (1)$$

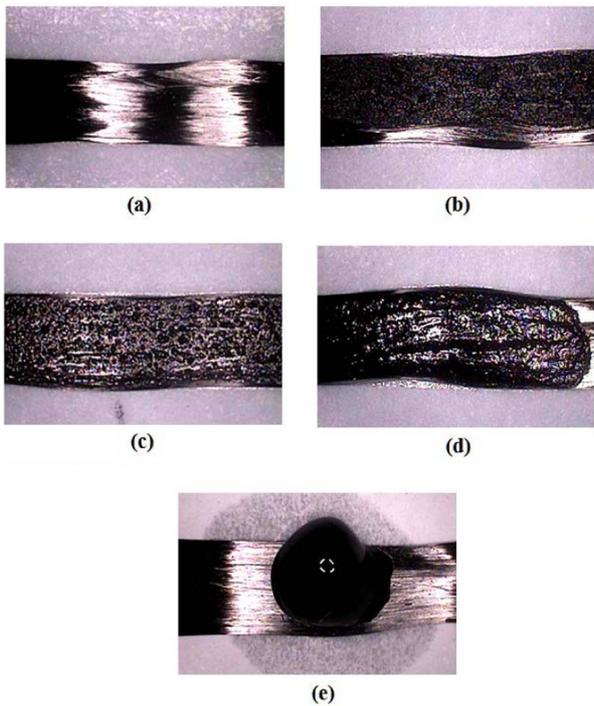
$K_{IC}$ 는 파괴인성을 나타내며,  $B$ 는 시편의 폭,  $W$ 는 컴팩트 인장 실험을 위해 제조한 홀의 중심에서 아래 구간까지의 길이를 나타낸다. 마지막으로  $a$ 는 홀의 반지름을 나타낸다. 파괴인성 측정을 통해 CNT 농도에 따른 에폭시 수지 자체의 변화 물성을 측정하고 CNT의 분산도가 미치는 영향을 파악하기 위해 실험을 진행하였다.

젖음성 전기저항 분산도 평가방법으로 확인한 분산도 평가 결과와 기계적 물성 평가 결과를 통해 고안한 평가방법의 결과의 타당성을 확인하기 위해 ILSS 측정을 시도하였다. ILSS 측정은 ASTM D2344 규격에 맞게 시편을 제조하여 CNT가 함유된 탄소섬유 에폭시 복합재료의 층간전단강도를 분석하였다.

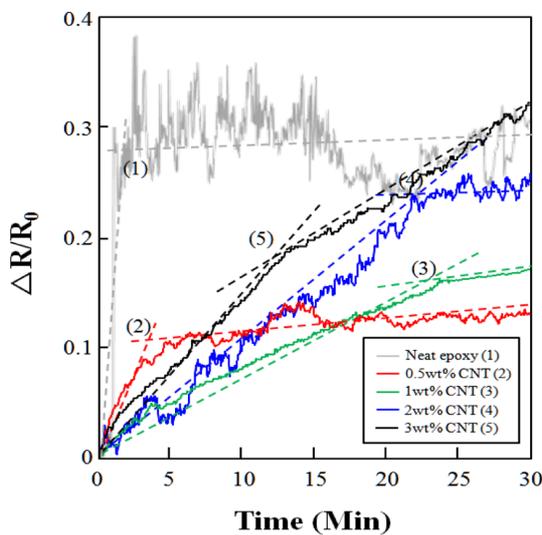
## 3. 결과 및 논의

### 3.1 CNT 농도에 따른 젖음성 전기저항 측정방법에 따른 전기저항 변화도 분석

Fig. 3은 젖음성 전기저항 분산도 평가방법을 통해 확인한 시편의 상태이다. CNT 농도에 따라 섬유 토우 내로 함침되는 정도가 달라짐을 명확히 확인할 수 있었다. CNT 농



**Fig. 3.** Photograph of wetting condition of carbon nanocomposites on CF tow: (a) neat epoxy; (b) 0.5 wt% CNT/epoxy; (c) 1 wt% CNT/epoxy; (d) 2 wt% CNT/epoxy; and (e) 3 wt% CNT/epoxy



**Fig. 4.** ER wetting results of CF tow with different CNT concentrations

도가 높아짐에 따라 수지가 섬유 표면에 존재하는 양이 증가되었다. 즉 CNT가 함유된 에폭시 수지가 섬유 토우 내로 함침되지 못하는 결과를 나타낸다.

Fig. 4는 CNT 농도에 따라 에폭시 수지의 함침이 달라지기 때문에 발생하는 탄소섬유 토우의 전기저항 변화도를 분석한 결과이다. 일반적으로 에폭시 수지는 섬유 토우에

1g을 떨어뜨리는 즉시 빠른 속도로 함침이 발생됨을 확인할 수 있다. 전기저항 변화도의 기울기를 확인하면 평가할 수 있다. 젖음성 전기저항 분산도 평가방법을 통해 확인되는 전기저항 변화도의 그래프는 2가지 형태로 나타난다. 섬유 토우에 수지가 초기에 접촉할 때 발생하는 영향으로 섬유의 배열은 1차적으로 변형된다. 이때 수지의 함침성에 따라 전기저항 기울기가 달라진다. 기울기가 가파를수록 빠르게 섬유 토우 내로 수지가 함침 됨을 의미하며, 기울기가 낮을 경우 수지가 섬유 내로 함침이 떨어짐을 의미한다. 2차 전기저항 변화도 경향은 섬유 내로 일부분 함침이 진행되고 난 다음 발생된다. 비교적 이 단계에서는 전기저항 변화도의 경향이 선형적인 경향을 나타낸다. 에폭시 수지의 함침으로 탄소섬유의 배열이 달라지는 경향이 2차 전기저항 변화도 상황에서는 적게 발생되기 때문에 비교적 평행한 전기저항 변화의 결과를 나타낸다. 또한 전기저항 변화도 곡선이 지속적으로 증가의 결과를 나타낸다면, 수지가 섬유 토우에 함침성이 떨어진다고 설명할 수 있다.

위 실험 결과를 해석해보면, 일반 에폭시 수지의 경우는 매우 빠르게 섬유 토우 내로 함침 된다는 점을 알 수 있었고, CNT 농도가 증가됨에 따라 섬유 토우 내로 수지가 제대로 함침 되기 어려운 조건임을 확인하였다. 0.5 wt% CNT 에폭시 수지의 경우가 비교적 안정적인 섬유 토우 내로의 젖음성 결과를 나타냈으며, CNT 농도가 증가함에 따라 2차 전기저항 변화도 안정화 구간이 높아짐을 확인할 수 있었다. 3 wt% CNT의 경우 소재에 대한 안정성이 매우 떨어져 나노복합수지가 섬유 토우 내로 제대로 함침되지 못하는 결과를 나타낸다고 설명할 수 있었다. 실제 이러한 결과는 Fig. 3의 사진을 보충하여 설명이 가능하다. CNT 농도가 증가됨에 따라 나노복합수지가 섬유 토우 위에 잔존하게 되어 수지 부분이 변들거리는 결과를 나타내었다. 전기저항 평가방법을 이용하여 수지의 젖음성 상태를 예측 가능함을 확인할 수 있었고, 나노입자의 분산도를 평가하는 결과로는 2차 전기저항 변화도 안정화 구간의 전기저항 변화도 결과로 설명할 수 있다. 0.5 wt% CNT 조건에서는 0.11 수준의 전기저항 변화도 결과를 나타내었고, 2 wt% CNT 조건에서는 0.25 수준의 전기저항 변화도 상태에서 전기저항 안정화 구간이 확인되었다. 안정화 구간이 확인되지 않는 경우는 분산이 좋다고 설명하기 어렵다. 따라서 3 wt% 이상의 CNT 조건에서는 안정화 전기저항 변화도 구간이 없었기 때문에 분산이 용이하지 못한 조건이라고 설명이 가능하다. 섬유 토우에서 발생하는 필터링 현상에 나노입자의 응집이 크게 형성되기 때문에 섬유와 섬유 사이에 미세 공간을 지나가지 못하기 때문에 전반적인 3 wt% CNT 에폭시 수지에 대한 분산도는 불균일하다고 설명이 가능하다. 비교적 안정적 전기저항 변화도 구간이 확인되는 0.5 wt% CNT 조건 즉 낮은 농도의 CNT 조건에서 나노입자의 분산도가 균일상을 나타낼 가능성이 높다는 것을 의미하며, 고

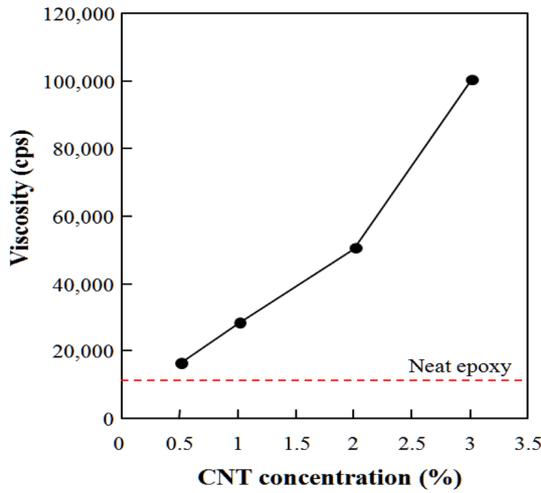


Fig. 5. Viscosity of CNT nanocomposites with different CNT concentrations

농도로 갈수록 초음파 처리가 아닌 다른 분산과정을 가져야 함을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 CNT 농도에 따라 나노복합수지의 점도 변화를 나타낸 결과이다. 에폭시 수지에 비해 CNT를 함유시킴에 따라 전체 점도가 향상되는 결과를 나타내었다. 나노입자를 강화재로 함유시킬 경우 효과적인 기계적 특성을 높이는 점은 장점이지만, 위 결과와 같은 점도 증가가 문제가 된다. 특히 나노입자의 농도 증가에 따라 점도가 2배 이상 증가되는 문제는 나노복합재료를 응용하는데 문제가 된다. 고농도 CNT 조건에서는 나노복합재료의 점도가 높기 때문에 분산도를 균일하게 확보하는 것에는 문제가 된다고 설명할 수 있다.

### 3.2 CNT 농도에 따른 나노복합재료의 파괴인성 및 ILSS 결과 분석

Fig. 6과 Fig. 7은 CNT 농도에 따라 파괴인성을 평가한 결과를 나타내었다. 파괴인성 결과를 정리하면 0.5 wt% CNT 조건이 1.4 MPa M<sup>1/2</sup>, 1 wt% CNT 조건은 1.6 MPa M<sup>1/2</sup>, 2 wt% CNT 조건이 2.0 MPa M<sup>1/2</sup>, 3 wt% CNT 조건이 1.4 MPa M<sup>1/2</sup>를 나타내었다. CNT를 함유시킴으로써 전반적인 파괴인성은 증가되었다. 파단면의 형상은 매우 다양하게 확인되었다. 일반 비스페놀 A 에폭시 수지의 경우 균열이 진행되다가 균열에 대한 확장을 막지 못하고 쉽게 끝부분 균열이 진행되었음을 파단면 결과로 확인할 수 있다. 시편이 완벽히 파괴되기 직전의 파단면은 거칠기가 낮으나 균열이 시작되는 구간의 거칠기는 매우 높았기 때문이다. CNT 함유에 따라 균열 확장을 지연하고자 시편에서 진행되었던 형상이 파단면으로 확인 가능하였다. 또한 CNT 농도가 증가함에 따라 균열을 지연하려고 하는 정도는 줄어들고, CNT 입자의 응집 구간이 파단면에서 확인되었다. 이는 고농도의 CNT 강화 나노복합재료의 경우 분산도 문제

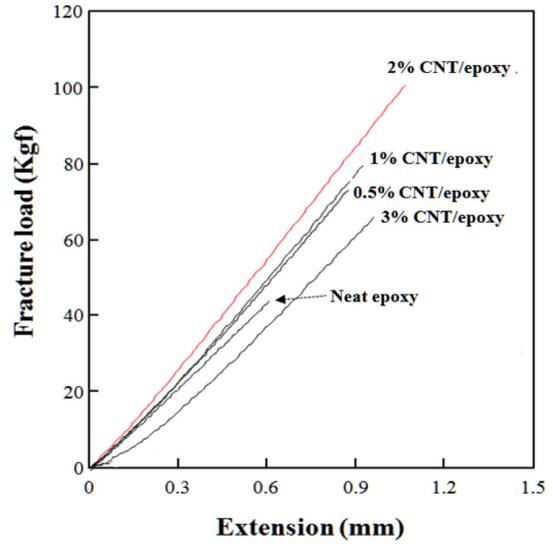


Fig. 6. Contact tension test of CNT nanocomposites with different CNT concentrations

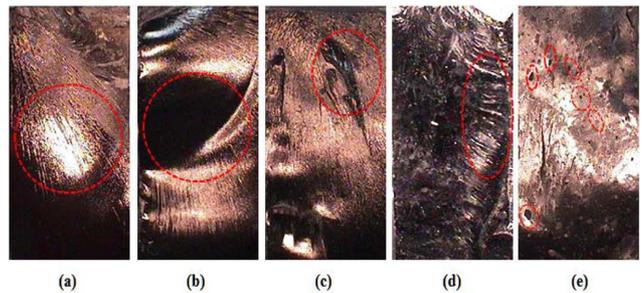


Fig. 7. Fracture surface of contact tension test specimen of CNT nanocomposites with different CNT concentration: (a) neat epoxy; (b) 0.5 wt% CNT/epoxy; (c) 1 wt% CNT/epoxy; (d) 2 wt% CNT/epoxy; and (e) 3 wt% CNT/epoxy

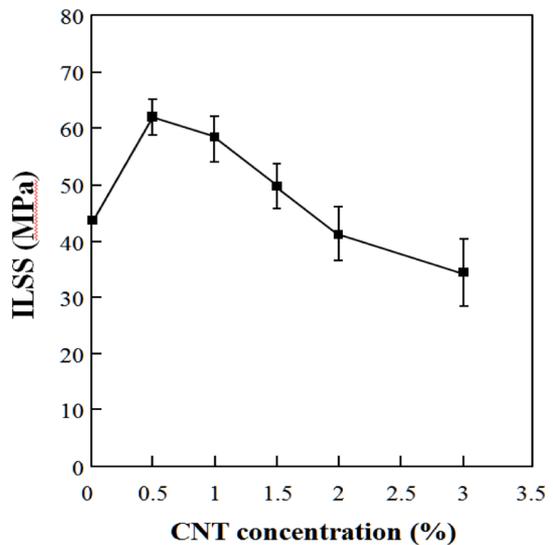


Fig. 8. ILSS of CNT nanocomposites with different CNT concentrations

로 강도가 전반적으로 확보하기 어려운 결과임을 의미한다. 파괴인성 결과로 확인해 볼 때 2 wt% CNT 조건이 가장 안정적인 강화조건임을 확인할 수 있었다. 나노복합재료에 대한 파괴인성 결과와 젖음성 전기저항 분산도 측정방법의 결과는 조금의 차이를 보였다. 전기저항 평가방법으로 확인한 0.5 wt% CNT 조건이 최적이라는 결과와 차이가 있었다.

Fig. 8은 CNT 농도에 따라 나노복합재료 수지를 제조한 뒤 핸드 레이 업 방법으로 UD 탄소섬유 복합재료를 제조하여 층간전단강도(ILSS)를 평가한 결과이다. 층간전단강도 결과는 섬유와 나노복합재료 수지간의 친화도를 분석하는 결과로 응용할 수 있다. 가장 높은 ILSS 결과를 나타내는 조건이 0.5 wt% 상태임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과에 대해서 이유를 생각하면, Fig. 3과 4의 결과를 인용할 수 있다. 젖음성 전기저항 분산도 측정법을 이용하여 나노입자의 응집 정도와 필터링 현상에 대해서 CNT 농도에 따라 나노복합수지의 분산도를 평가한 결과가 존재한다. 저농도 조건에서 CNT의 응집이 적게 발생되고 나노입자의 응집이 적었기 때문에 섬유 토우 사이로 필터링 현상이 적게 발생되며 비교적 안정적인 전기저항 변화도 곡선을 나타내었다. 즉 젖음성이 우수할수록 섬유와 수지간 계면이 안정적이기 때문에 0.5 wt% CNT 조건에서 최고의 층간전단강도를 나타내었다.

수지 자체의 강도 증가를 위한 CNT 활용에 있어서는 2 wt% 조건까지 CNT를 함유시켜도 문제가 되지 않는데, 섬유와 나노복합수지가 혼합될 경우에는 나노 응집의 영향이 복합재료 계면에 큰 영향을 미치기 때문에 ILSS 결과에서는 0.5 wt% 조건이 최적으로 확인되었다.

ILSS 결과와 젖음성 전기저항 분산도 평가결과와 유사한 결과를 나타낸다는 점에서 젖음성 전기저항 분산도 측정방법으로 젖음성과 분산도, 섬유와 수지간의 계면 상태를 예측할 수 있는 방법임을 확인하였다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 CNT 함유 나노복합재료의 수지 내부에서의 CNT 분산도 평가 방법으로 전기저항 측정법을 활용한 평가방법에 대한 개선 연구를 진행하였다. 탄소섬유 토우를 이용하며, 섬유가 섬유 토우에 함침 될 때 변화되는 전기저항 변화도를 이용하여 수지 내부의 나노입자 분산도와 수지의 함침성을 평가하였다. 실험을 통해 전기저항 변화도 결과는 2가지 구간으로 나타나며 초기에 수지가 섬유에 접촉하고 함침이 빠르게 진행되는 1차 구간과 섬유 내로 수지가 함침되어 안정화를 이루는 2차 구간으로 나뉘어 분석할 수 있다. 젖음성이 우수한 조건에서는 1차 구간의 전기저항 변화도 기울기가 빠르게 변화되며, CNT 함유에 따라 수지의 점도 향상에 따라 섬유와 수지간 함침성이 떨

어지는 경향을 나타내었다. 2차 구간의 전기저항 변화도 결과로 나노복합수지에 대한 나노입자 분산도 상태를 평가할 수 있었다. 2차 구간에서 안정화 단계가 발생되며, 낮은 전기저항 변화도 결과가 확인되는 단계에서 섬유의 배열을 수지가 변형시킨다고 하여도, 균일한 나노입자와 섬유간의 접촉이 발생되어 균일한 분산조건임을 확인할 수 있었다. CNT 농도가 낮을수록 섬유 토우에 나노복합수지의 필터링 현상이 적게 발생되었으며, 섬유강화 복합재료를 제조할 경우에 높은 층간전단강도가 확인되었다. 젖음성 전기저항 분산도 측정방법을 이용하여 나노복합재료의 분산도 및 섬유와의 계면 강도를 분석할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사 드립니다.

## REFERENCES

1. Yu, X., Rajamni, R., Stelson, K.A., and Cui, T., "Carbon Nanotube-based Transparent Thin Film Acoustic Actuators and Sensor," *Sensor and Actuators*, Vol. 132, 2006, pp. 626-631.
2. Enrique, J.G., Braian, L.W., and Hart, A.J., "Joining Prepreg Composites Interfaces with Aligned Carbon Nanotubes," *Composites: Part A*, Vol. 39, 2008, pp. 1065-1070.
3. Thostenson, E.T., and Chou, T.W., "Carbon Nanotube-based Health Monitoring of Mechanically Fastened Composites Joints," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, 2008, pp. 2557-2561.
4. Oh, J., Kozlow, M.E., Kim, B.G., Kim, H.K., Baughman, R.H., and Hwang, Y.H., "Preparation and Electrochemical Characterization of Porous SWNT-PPy Nanocomposite Sheets for Supercapacitor Applications," *Synthetic Metals*, Vol. 158, 2008, pp. 638-641.
5. Kang, G.H., Seong, K.W., Kim, M.S., Kim, I.G., Bang, I.C., Park, H.W., and Park, Y.B., "Thermoelectric Composites Based on Carbon Nanotubes and Micro Glass Bubbles," *Composites Research*, Vol. 28, 2015, pp. 70-74.
6. Ren, L. and Wang, S., "Tailoring Optical and Electrical Properties of Carbon nanotube Networks for Photovoltaic Applications," *Carbon*, Vol. 48, 2010, pp. 4397-4402.
7. Ma, P.C., Tang, B.Z., and Kim, J.K., "Effect of CNT Decoration with Silver Nanoparticles on Electrical conductivity of CNT-Polymer Composites," *Carbon*, Vol. 46, 2008, pp. 1497-1505.
8. Cho, J., Daniel, I.M., and Dikin, D.A., "Effect of Block Copolymer Dispersant and Nanotube Length on Reinforcement of Carbon/Epoxy Composites" *Composites: Part A*, Vol. 39, 2008, pp. 1844-1850.
9. Multiwalled Carbon Nanotubes and Sepiolite Nanoclays as Flame Retardants for Polylactide and its Natural Fibre Reinforced Composites," *Composites: Part A*, Vol. 41, 2010, pp. 954-963.

10. Wang, 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. 26, 2013, pp. 309-314.
11. Carbon Nanotube Grafted Silica Fibres: Characterising The Interface at The Single Fibre Level", *Composites Science and Technology*, Vol. 70, 2010, pp. 393-399.
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", *Composites Research*, Vol. 23, 2010, pp. 58-63.
13. Ma, P.C., Siddiqui, N.A., Marom, G., and Kim, J.K., "Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotube for Polymer-based Nanocomposites: A Review", *Composites: Part A*, Vol. 41, 2010, pp. 1345-1367.
14. Lachman, N. and Wagner, H.D., "Correlation between Interfacial Molecular Structure and Mechanics in CNT/epoxy Nanocomposites", *Composites: Part A*, Vol. 41, 2010, pp. 1093-1098.