

論文

음향 방출과 이중 기지 기술을 이용한 탄소나노튜브의 플라즈마 처리 효과에 따른 탄소나노튜브-페놀 복합재료의 계면특성 평가

왕작가*, 권동준*, 구가영*, 이우일**, 박종규***, 박종만*+

Plasma Treatment of Carbon Nanotubes and Interfacial Evaluation of CNT-Phenolic Composites by Acoustic Emission and Dual Matrix Techniques

Zuo-Jia Wang*, Dong-Jun Kwon*, Ga-Young Gu*, Woo-Il Lee**, Jong-Kyoo Park***, and Joung-Man Park*+

ABSTRACT

Atmospheric pressure plasma treatment on carbon nanotube (CNT) surfaces was performed to modify reinforcement effect and interfacial adhesion of carbon fiber reinforced CNT-phenolic composites. The surface changes occurring on CNT treated with plasma were analyzed by using Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The significant improvement of wettability on CNT was confirmed by static contact angle test after plasma treatment. Such plasma treatment resulted in a decrease in the advancing contact angle from 118° to 60°. The interfacial adhesion between carbon fiber and CNT-phenolic composites increased by plasma treatment based on apparent modulus test results during quasi-static tensile strength. Furthermore, the proposed database offers valuable knowledge for evaluating interfacial shear strength (IFSS).

초 록

대기압 플라즈마 처리를 통해 탄소나노튜브(CNT) 표면은 개질되며 개질된 입자의 표면과 탄소섬유 강화 CNT 페놀 복합재료 간에 계면접착력에 변화를 확인하였다. CNT 표면에 플라즈마 처리에 따라 표면 변화가 발생되고 표면 개질의 결과를 확인하기 위해 FT-IR을 사용하였다. 또한, 정적 접촉각 실험법을 통해 플라즈마 처리에 따른 CNT의 젖음성을 비교 평가하였다. 순수 CNT 입자의 접촉각은 118° 였으나, 플라즈마 처리를 할 경우 60°도로 표면 개질을 통해 젖음성이 향상됨을 확인하였다. 탄소섬유와 CNT-페놀복합재료 간 계면접착력은 플라즈마 처리에 따라 겉보기 강성도가 증가되는 결과를 확인하였으며, 음향방출 실험법과 전기저항 측정법을 병행한 이중기지평가법을 통해 계면전단강도 (IFSS)를 계산하여 계면접착력 향상을 확인하였다.

Key Words : 탄소섬유(carbon fiber), 접촉각(contact angle), 음향 방출(acoustic emission), 이중 기지(dual matrix)

1. 서 론

탄소나노튜브(CNT)는 보기 드문 구조로 다양한 물성을 가지고 있는 재료이기 때문에 흥미로운 재료이다[1]. CNT의

뛰어난 기계적 물성으로 복합재료 분야의 강화재료의 활용이 상당히 많다. 하지만, CNT를 복합재료에 응용할 경우 몇 가지 단점이 존재한다. CNT의 탄소구조에 의해 기계적, 전기적, 열적 물성이 우수하지만 입자간 반데르발스 힘에 의해

접수: 2012년 2월 27일, 수정: 2012년 4월 20일, 게재승인: 2012년 4월 20일

* 경상대학교 나노·신소재공학부 대학원

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

** 서울대학교 기계·항공공학부

*** 국방과학연구소, 제4연구부

영킴이 발생된다. 입자간 영킴이 없어야 CNT의 표면과 기지간에 강한 계면접착력이 발생된다. 입자와 고분자 기지간의 최적의 계면 접착력을 보유하기 위해서는 CNT 표면 개질 및 분산 문제에 대한 해결이 중요하다. 게다가 표면의 조성을 여러 작용기의 혼합될 경우 CNT 표면의 개질에 따라 기지와 반응성이 높아져 계면 특성이 향상된다[2]. 현재 CNT 표면개질에 대한 연구로 플라즈마 처리 및 용액법을 이용한 처리 방법이 많이 연구되고 있다. 플라즈마 처리와 같은 표면개질에 의해 입자의 표면 조성이 변화되어 기존과 다른 계면 상태를 나타내기 때문에 표면 개질에 대한 연구는 매우 중요하다.

다양한 응용 분야에서 페놀복합재료의 특성을 이용한다. 특히, 기계적 물성 응용분야에 대한 연구가 많다. CNT 입자를 활용함으로써 페놀 기지 내부에 CNT에 의한 응력분산효과로 고강도의 CNT-페놀복합재료를 제조할 수 있다[3]. CNT의 강화 효과로 인해 재료자체의 피로 파괴에 대한 내구성이 증가되고, 다양한 산업적 기능을 재료가 가짐으로써 항공 우주 분야나 운송 군수 재료에 대한 활용 범위가 넓어진다. 섬유와 기지간의 응력전달이 원활하게 이루어지기 위해서는 내구성이 높은 계면 상태일 경우에 발생된다. 강한 계면접착력을 가질 때 기계적 복합재료의 물성은 향상된다. 이러한 이유로 복합재료에서는 계면물성이 중요하다[4,5].

몇몇 비파괴 평가방법을 이용할 경우 재료에 대한 의미 있는 평가 결과를 얻을 수 있다. 특히 복합재료에서는 재료 외관에서 보이지 않는 재료 내부의 특성을 평가해야 할 경우가 많고, 이 경우 비파괴 평가방법을 사용하여 평가할 수 있다. 섬유강화복합재료의 경우 섬유 자체가 강한 응력을 전달받기 때문에 미세 구조상에서 응력에 따른 평가가 필요하다.

본 연구에서는 대기압 조건인 플라즈마 처리를 이용하여 CNT 표면 개질을 진행하였고, 그에 따른 CNT 표면의 화학적 조성 변화를 확인하였다. 표면 개질된 CNT 입자의 표면 물성을 확인하고자 유리 기판 위에 CNT 코팅층을 제조하고 물방울에 대한 젖음성을 평가하여 표면개질의 유무를 확인하였다. 마지막으로 비파괴 평가방법으로 음향방출방법과 이중기지 실험법을 이용하여 CNT의 표면처리에 따른 기지와 섬유간의 계면 물성 변화를 계면전단강도 (IFSS) 값으로 비교 평가하였다.

2. 실험

2.1 재료

직경이 약 8 μm인 탄소 섬유 (토레이, 일본)가 감지용 강화 섬유로 사용되었으며, 직경이 10-25 nm 다중벽 탄소나노튜브 (CNT) (MW-CNT, 일진나노텍, 한국)을 자체-센서 소재 및 강화제로 사용하였다. 레졸 (Resol)에 근거한 페놀수지 (SC-1008, 몬산토 화학(주), 미국)를 기지재료로 사용하였다. 아세톤 (대정화학, 한국)은 탄소나노튜브의 분산 용매로 사용되었다.

2.2 방법

2.2.1. CNT 플라즈마 처리

CNT의 표면처리를 위해 대기압 플라즈마 장치 (RPS50, UION Co., Ltd., 한국)를 사용하였다. 대기압 하에서 20 kHz 진동수로 플라즈마 처리가 진행되었다. 전력은 400 W로 설정하여 전기에너지를 장비에 공급하였다. Fig. 1은 CNT 표면처리를 하는 과정을 요약한 그림이다. 그림과 같은 순서로 CNT 표면처리를 진행하였다. CNT를 물에 2시간동안 분산시킨 CNT 용액을 1분 동안 플라즈마 처리를 진행하였다. 플라즈마 처리된 CNT 용액은 오븐에서 용매를 증발하여 플라즈마 처리된 CNT를 제조하였다.

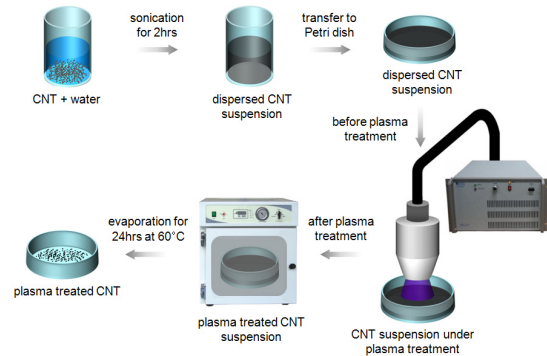


Fig. 1 Schematic diagrams of the plasma treatment of CNT.

CNT 표면은 대기압 플라즈마 처리에 따라 표면 조성이 달라진다. 플라즈마 처리에 의해 화학적 변화가 발생되고 이때 CNT 표면 조성을 FT-IR로 평가하였다. 플라즈마 처리된 CNT 표면을 평가하기 위해 정적 접촉각 평가법을 이용하여 플라즈마 처리 시간에 따른 CNT 표면의 변화를 확인하였다.

2.2.2. CNT-페놀복합재료의 제조 공정

Fig. 2는 손상 감지 실험의 시편 모식도 이다. 이 시편은 단섬유를 경직한 내부 기지에 함침 시키고 (CNT-phenolic composite) 단섬유가 함침된 내부 기지 바깥에 내부 기지 보다 유연한 에폭시 재료를 이용하여 이중 기지 시편을 제조한다. 이중기지 평가법은 내부 기지 (CNT-phenolic) 안에 함침된 단섬유의 인장 응력에 따른 미세 파괴 부분의 감지를 진행한다. 탄소섬유가 함침된 CNT-페놀복합재료를 제조하기 위해선 첫 번째로 아세톤을 이용한 페놀 수지의 희석 과정 후, 0.3 vol%의 조성으로 CNT-페놀복합재료를 제조하였다. CNT를 희석시킨 페놀 용액에 첨가하여 초음파를 이용하여 CNT 영킴을 풀어주고, 수지 내에 고른 분산을 위해 8시간 동안 분산 과정을 진행하였다. 베스 형태의 초음파 분산 장비를 이용하여 12시간 동안 용매를 제거시키면서 분산 과정을 진행하였다.

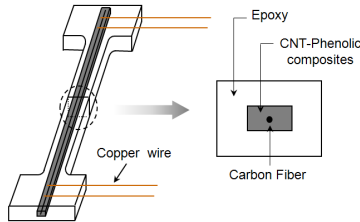


Fig. 2 Schematic sketch of the dual matrix specimen.

2.2.3 계면 접착 측정법

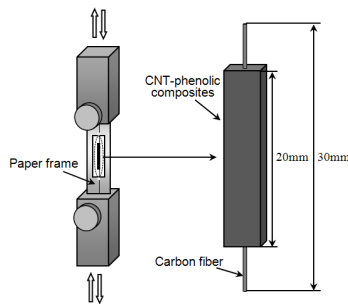


Fig. 3 Schematic sketch of apparent modulus test specimen.

탄소섬유가 함침된 CNT 페놀 복합재료의 강화 효과를 확인하기 위해 겉보기 강성도 평가법을 이용하였다. 겉보기 강성도는 시편의 Young's 강성도와 비교하여 강화된 복합재료의 계면 물성을 평가한다. Fig. 3이 겉보기 강성도를 평가하는 시편과 반복하중 실험일 경우의 시편의 모습을 나타내는 모식도이다. 실험되는 탄소섬유의 길이는 3 cm이며, 탄소섬유에 CNT-페놀복합재료가 함침된 구간은 2 cm이다. 미니 UTM (HIKS, 하운스필드사, 영국) 이용하여 겉보기 강성도 평가 실험을 진행하였다. 100 N의 로드셀을 사용하고, 실험 속도는 0.5 mm/분의 속도로 반복하중 실험을 진행하였다. 겉보기 강성도와 인장강도를 비교 평가하여 섬유와 기지간의 계면 물성을 평가하였다.

2.2.4 이중 지지 인장시험과 음향방출 평가법

Fragmentation 실험 방법은 계면 물성을 평가하는 연구에서 광범위하게 인용되고 있다. 섬유의 인장 결과를 통해 Weibull 통계적 분석을 할 수 있다[6]. 두 개의 Weibull 통계법을 이용하여 섬유에 대한 평가인자로 활용이 가능하다:

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

위 수식 (1)에서 $F(\sigma)$ 는 섬유가 파괴될 때의 응력을 나타내며, α 는 크기인자, β 는 형상인자를 나타낸다. 섬유가 인장 응력에 의해 파단 될 경우, 더 이상의 파단이 일어나지 않을

때의 섬유들의 길이, 임계파단길이 (critical fragment length)를 이용한다[7]. 임계파단길이일 때의 인장 강도는 다음 (2) 수식을 통해 확인 할 수 있다:

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_0} = \left(\frac{L_0}{\bar{L}}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

(2) 식에서 σ_0 는 L_0 길이일 때의 섬유의 인장강도를 나타내며, \bar{L} 는 인장에 따라 평균 파단된 섬유의 길이를 나타낸다. Kelly-Tyson는 임계파단길이를 먼저 설명하였다 [8]. 계면전단강도 (IFSS) σ_c 는 (3) 식을 사용한다.

$$\tau = \frac{\sigma_f d}{2L_c} \quad (3)$$

(3) 식의 σ_f 는 임계파단길이를 나타낼 때의 섬유 인장 응력을 나타낸다. d 는 섬유의 직경을 의미하며, L_c 는 섬유의 파괴된 길이를 이용한 임계파단길이를 나타낸다. 임계파단길이는 응력 분산에 의해 섬유파괴에 의해 짧게 섬유가 파괴된 것을 확인한다. 임계파단길이를 계산하는 수식은 식 (4)와 같다.

$$L_c = \frac{4}{3} \times \bar{L} \quad (4)$$

AE 장비 (Wide band, WD 모델, Physical Acoustics사, 미국)는 신호 55 Ref. V/(m/s) [62.5 Ref. V/mbar] 조건으로 확인하고 125 [650] kHz 진동수의 센서를 이용하여 재료를 통해 배출되는 감도를 확인하였다. 40 dB 정도로 진폭 증폭기를 이용하여 재료자체의 물성을 평가하였고, 100-1000 kHz 진동수로 조절하는 필터를 이용하여 실험하였다. 이중지지 시편의 재료 중앙에 PZT 센서를 고정시키고 실험하여 파괴에 대한 음향을 평가하였다. 미세 파괴에 따른 탄성 음파에 대한 신호를 PZT 센서로 전기적 신호를 받아 AE 장비를 이용한 음향 해석을 진행하였다. 그리고 음파 형상에 대한 진동수를 푸리에 변환 (FFT)으로 평가하였고, 특정 진동수에 대한 특성을 평가하여 재료자체의 파괴를 평가하는 인자로 사용하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 CNT의 IR 분석법과 젖음성 평가

CNT 표면의 화학적 조성 변화를 확인하기 위해, 일반 CNT 입자와 플라즈마 처리한 CNT 입자를 FT-IR로 비교 평가하였다. 적외선의 범위는 4000-500 cm^{-1} 로 하여 실험하였다. 실험 결과가 Fig. 4와 같다. 플라즈마 실험 결과 일반 CNT에 비해 피크가 더 크게 나타남을 확인 하였다. 피크에 대해서 확인해 보면 신축진동의 결과 O-H 작용기는 3590 cm^{-1} 구간에서 발생되며, C-O 작용기는 1300 cm^{-1} 에서 발생된다. 그리고, C=O는 1750 cm^{-1} 에서 발생됨을 확인할 수 있다.

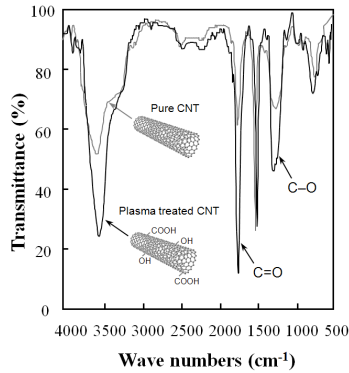


Fig. 4 FTIR-spectra of CNT before and after plasma treatment.

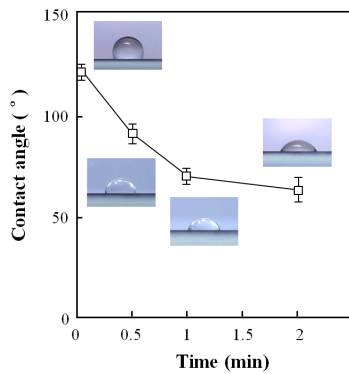


Fig. 5 Static contact angle measurement on plasma treated CNT.

이러한 결과는 플라즈마 처리에 의해 표면이 산화되고 표면이 에칭되는 결과에 의해 화학적 조성이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 영향으로 섬유 및 기지와의 계면 접착력 향상 효과를 예측할 수 있다.

Fig. 5는 플라즈마 처리를 한 CNT 표면에 대한 물성을 평가하기 위해 유리 기판 위에 플라즈마 처리 시간에 따른 CNT 입자를 코팅하여 코팅층 위에서의 물방울에 대한 접촉각 변화를 확인하였다. 일반 CNT의 코팅층 일 경우 접촉각이 120°로 소수성 표면을 띄는 상태임을 확인하였다. 하지만 플라즈마 처리 시간에 따라 접촉각이 감소하는 결과를 확인하였다. 플라즈마 처리 조건을 1분 이상 했을 때에는 소수성이 크게 감소하여 친수성의 상태를 나타내는 결과를 확인하였다. 젖음성 평가를 통해 최적의 플라즈마 처리 시간을 설정하였다. 약 1분 이후 부터는 젖음성의 감소가 최소화되기 때문에 1분을 플라즈마 처리 시간으로 설정하여 실험하였다.

3.2 탄소 섬유/CNT-페놀복합재료의 결보기 강성도

Fig. 6은 단일 탄소섬유 강화 CNT-페놀복합재료의 결보기 강성도를 평가한 결과이다. 플라즈마 처리와 미처리의 차이를

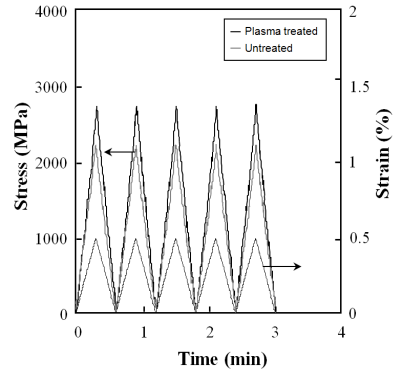


Fig. 6 Cyclic stress-strain curves for single carbon fiber reinforced CNT-phenolic composites.

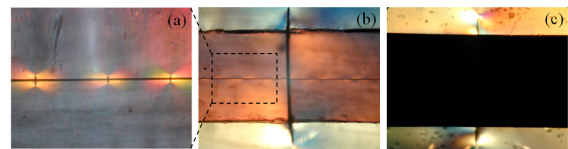


Fig. 7 Polarized light-micrograph of fiber breaks and matrix cracking: (a) carbon fiber breaks; (b) phenolic matrix crack; (c) CNT-phenolic matrix crack.

두고 탄소섬유에 작용되는 응력을 비교 평가하였다. 아래의 데이터에서 확인할 수 있듯이, 플라즈마 처리를 할 경우 탄소섬유에 접착된 CNT-페놀복합재료의 계면접착력에 의한 영향으로 응력이 일반 CNT를 사용했을 경우 보다 더 크게 확인되었다. 플라즈마 처리방법을 이용하여 CNT 표면처리를 함으로써 CNT-페놀복합재료와 탄소섬유간의 계면접착력이 증가되는 결과를 확인할 수 있었다. 이는 CNT의 표면개질에 따른 CNT-페놀복합재료의 활성 작용기가 더 많이 생성됨으로써 탄소섬유와 접착된 부분에서의 계면접착력이 증가된 결과라 할 수 있다.

3.3 CNT-페놀복합재료의 음향방출 손상감지

탄소섬유 CNT-페놀복합재료의 계면 물성을 평가하기 위해 이중기지 시편을 이용한 fragmentation 실험법을 이용하였다. Fig. 7은 fragmentation 실험법의 결과를 나타내었다. 탄소섬유 페놀복합재료는 투명도가 있기 때문에 Fig. 7(b)와 같이 섬유와 내부기지의 파단을 관찰할 수 있었다. Fig. 7(a)는 내부기지 내 탄소섬유의 파단된 부분에 대한 확대 결과이다. 섬유가 파단되었기 때문에 편광에 의해 파단부분이 명확하게 확인하였다. 그림과 같이 섬유의 파단된 길이가 짧기 때문에 계면접착력이 높아짐을 예측할 수 있다. Fig. 7(c)는 CNT-페놀복합재료를 이용하여 섬유파단의 실험 결과를 시각적으로 얻고자 하였지만 불투명하기 때문에 확인하기 어렵다. 그래서 최종적으로 섬유의 파단 결과를 예측하기 위해 이중기지에 외부 에폭시 기지가 파단 되는 결과를 통해 CNT-페놀기지 내 탄소섬유의 섬유파단이

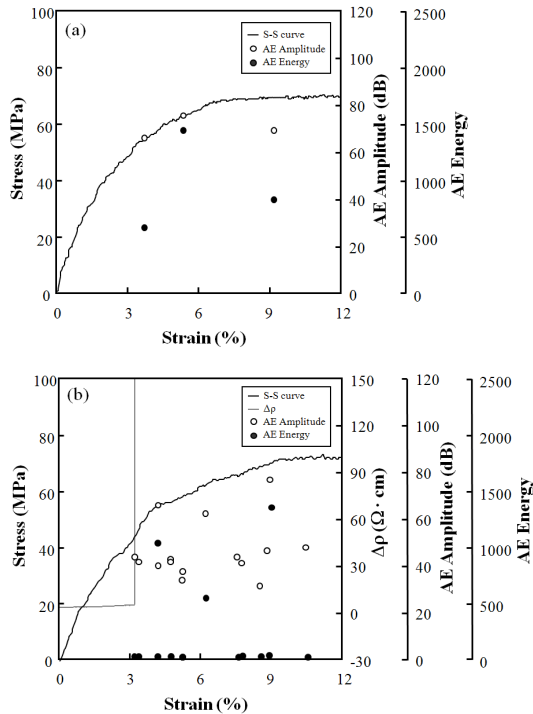


Fig. 8 Damage sensing for phenolic DMC: (a) without a carbon fiber; (b) with a carbon fiber.

더 이상 발생되지 않는다는 것을 예측하였다. 하지만 더 정확하게 섬유에 파단을 확인하고 계면상태를 알아보기 위해 AE 실험을 통해 재료 내 탄소섬유의 파단을 평가하였다.

Fig. 8은 이중기지 시편을 이용하여 단일 페놀수지의 인장 실험과 탄소섬유가 함침된 페놀수지의 인장실험을 이 AE 평가로 확인한 결과이다. Fig. 8에 데이터는 실험에 따른 응력과 AE 진폭, AE 에너지 그리고 전기저항 변화를 신율에 따라 정리한 결과이다. Fig. 8(a)는 단일 페놀수지이기 때문에 전기저항변화가 없다. 하지만 Fig. 8(b)는 탄소섬유가 함침 되어있기 때문에 전기저항변화를 확인 할 수 있다. 이럴 경우 탄소섬유의 초기 파괴단계에서 섬유의 파단을 확인 할 수 있다. 이는 탄소섬유가 파단 될 경우 전기저항이 측정되지 않기 때문이다. 그림에서 비교되듯이 AE 신호에 대한 결과가 큰 차이를 보인다. 탄소섬유의 파단결과를 데이터를 통해 확인 해 볼 경우 AE 에너지가 낮게 발생하는 결과를 확인 할 수 있고, AE 진폭도 기지의 파괴에 비해 탄소섬유의 파괴가 낮은 단계에서 발생하는 결과를 확인하였다.

탄소섬유의 함침 유무에 따른 플라즈마 처리한 CNT 이용 CNT-페놀복합재료의 파괴 감지 실험 결과가 Fig. 9 이다. 전기저항 측정에 따른 CNT-페놀복합재료의 손상 부분을 감지 할 수 있다. 나노복합재료의 미세 크랙이 발생될 경우 Fig. 9(a)는 실험 결과이며 전기저항데이터를 통해 기지의 손상에

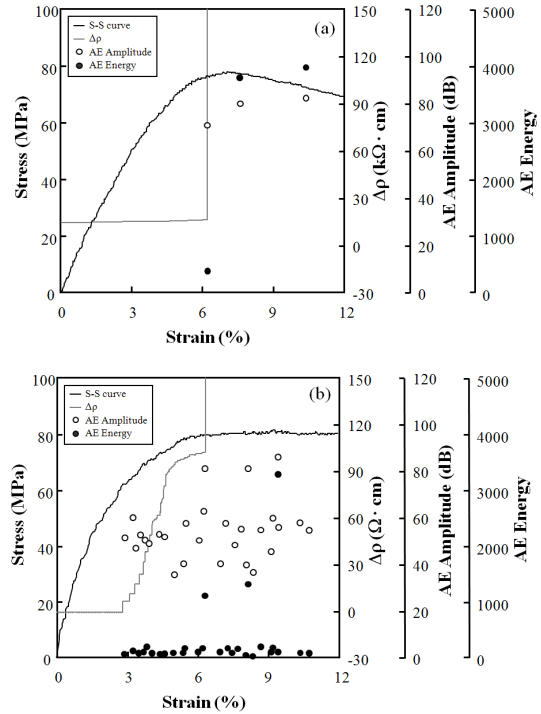


Fig. 9 Damage sensing for CNT-phenolic DMC: (a) without a carbon fiber; (b) with a carbon fiber.

의해 탄소섬유가 파단된 결과를 확인 할 수 있다. CNT-페놀복합재료의 크랙발생에 의해 AE 신호가 발생됨을 확인 할 수 있었다. Fig. 9(b)는 탄소섬유 함침된 CNT-페놀복합재료의 이중기지 시편의 결과이다. 이는 CNT-페놀복합재료의 발생하기 전까지 탄소섬유의 파단에 의해 계단식으로 전기저항이 증가되는 결과를 확인 할 수 있다. 또한, 탄소섬유의 파단 결과를 AE 신호로 더 확연히 확인 할 수 있었다. Fig. 8(a)와 (b)를 비교해 볼 경우 (b)가 더 많은 신호가 발생됨을 확인 하였다. 이는 CNT-페놀복합재료와 탄소섬유간의 계면물성이 일반 페놀에 비해 더 강하기 때문에 인장 실험 결과로 더 많은 탄소섬유가 파단된 결과를 확인하였다. 이는 플라즈마 처리에 따른 CNT의 강화 효과에 의한 결과이다.

3.4 계면전단강도 비교

탄소섬유 함침 페놀 이중기지 시편을 이용한 인장실험에 따른 결과를 AE 에너지와 진폭으로 평가하였다. 섬유의 파단된 결과를 통해 섬유의 파단 수를 fig. 7(b)로 반사현미경을 이용해 확인하였다. 실험 결과를 토대로 앞서 설명한 수식을 이용하여 계면전단강도를 계산하였다. 이중 기지 시편을 인장하여 실험 결과를 비교했으며, 이때 발생하는 임계파단길이를 확인하여 계면전단강도를 비교한 결과를 정리한 것이 Table 1 이다. 탄소섬유의 파단된 수가 일반 페놀수지를 이용할 경우보다

Table 1 Apparent IFSS of CF/phenolic composites and CF/plasma treated CNT-phenolic composites

Fiber	Matrix	CF Break numbers	Average fragment length (mm)	Apparent IFSS (MPa)
Carbon fiber	Phenolic	12	1.92	4.4
	CNT-phenolic	25	0.96	9.7

CNT-페놀복합재료를 이용할 경우 약 2배 차이가 발생되었으며, 이에 따라 임계파단길이가 2배 정도 짧아진 결과를 확인하였다. 이에 따라 겉보기 계면전단강도의 값에 큰 차이가 발생됨을 확인하였다. 이는 CNT 입자의 효과도 있으며, 플라즈마 표면처리에 따른 영향으로 계면접착력이 향상되는 결과를 얻었다.

4. 결론

본 연구는 대기압 조건하에 플라즈마 처리에 따른 CNT 나노입자의 표면 개질 효과를 평가하였다. 플라즈마 처리는 쉽고 빠르며 효과적인 개질 효과를 얻을 수 있으므로 장점이 있다. 본 연구방법에 따라 표면개질 된 CNT의 화학적 특성을 FT-IR 분석을 통해 확인하였으며 수산화기가 CNT 표면에 존재함을 확인하였다. 또한 정적 접촉각 실험을 통해 CNT 입자의 표면개질 결과를 확인하였으며, 1 분 동안의 플라즈마 처리가 최적의 CNT 표면개질 시간조건임을 확인하였다. 이를 복합재료에 응용할 경우 CNT-페놀복합재료와 탄소섬유간의 계면접착력의 변화를 확인하였다. 이중기지 시편을 이용하여 CNT-페놀복합재료와 탄소섬유간의 계면물성을 평가하였으며, AE와 전기저항 평가법을 이용한 미세역학실험법을 이용하여 계면물성이 증가됨을 예측하였다. 또한 fragmentation 실험법에 따른 계면전단강도 실험 결과를 토대로 미처리 CNT에 비해 플라즈마 처리된 CNT의 효과로 계면접착력이 약 2배가 증가되는 결과를 확인하였다. 따라서, 플라즈마 CNT의 표면개질이 섬유와 기지간의 계면접착력이 향상됨을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 국방과학연구소 (UD070009AD) 의 후원을 받아

연구를 수행하였습니다. 본 연구자 중 왕작가는 2단계 BK21의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Iijima, S., "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, Vol. 354, 1991, pp. 56-58.
- 2) Tasis, D., Tagmatarchis, N., Bianco, A., and Prato, M., "Chemistry of carbon nanotubes," *Chemical Reviews*, Vol. 106, 2006, pp. 1105-1136.
- 3) Pegoretti, A., and Ricco, T., "Crack growth in discontinuous glass fibre reinforced polypropylene under dynamic and static loading conditions," *Composites: Part A*, Vol. 33, 2002, pp. 1539-1547.
- 4) 왕작가, 공조엘, 박종만, 이우일, 박종규, "미세역학적 실험법과 젖음성을 이용한 CNT-에폭시 나노복합재료 경사형 시편의 계면특성," *한국복합재료학회지*, 제 22권, 제5호, 2009, pp. 8-14.
- 5) Park, J.M., Kim, J.W., and Yoon, D.J., "Interfacial evaluation and microfailure mechanisms of single carbon fiber/bismaleimide (BMI) composites by tensile and compressive fragmentation tests and acoustic emission," *Composites Science and Technology*, Vol. 62(6), 2002, pp. 743-756.
- 6) Jung, T.H., Subramanian, R.V., and Manoranjan, V.S., "Prediction of fibre strength at the critical length: a simulation theory and experimental verification for bimodally distributed carbon fibre strengths," *Journal of Materials Science*, Vol. 28, 1993, pp. 4489-4496.
- 7) Drzal, L.T., Rich, M.J., Koeing, M.F., and Lloyd, P.F., "Adhesion of graphite fibers to epoxy matrices: II. The effect of fiber finish," *The Journal of Adhesion*, Vol. 16, 1983, pp. 133-152.
- 8) Kelly, A., and Tyson, W.R., "Tensile properties of fibre-reinforced metals: copper/tungsten and copper/molybdenum," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 13, No. 6, 1965, pp. 329-338.