

Fabrication of carbon nano tube reinforced grass fiber composite and investigation of fracture surface of reinforced composites

Hyeongtae Kim*, Do-Hyeon Lee**, Woo-Jin An***, Chang-Hwan Oh**, Yeonjin Je*, Dong-Park Lee*, Kyuchul Cho**** and Jun Hong Park*,**,*†

*School of Materials Science and Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

**Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

***School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

****Hangooprop Corporation, Jinju 52851, Korea

(Received July 29, 2021)

(Revised August 6, 2021)

(Accepted August 6, 2021)

Abstract The fiber composites have been investigated as lightweight structure material platforms for aerospace applications because their strength can be enhanced by adding reinforcement without a significant increase in weight. In this study, the fabrication and characterization of carbon nanotube (CNT) reinforced glass fiber composites are demonstrated to enhance the tensile strength of longitudinal direction along the glass fibers. Due to the reinforcement of CNT in epoxy layers, the yield strength of fiber/epoxy composites is enhanced by about 10%. Furthermore, using scanning electron microscopy, analysis of fracture surfaces shows that mixed CNT in epoxy layers acts as necking agents between fractured surfaces of fiber/epoxy; thereby, initiation and evolution of crack across fiber composite can be suppressed by CNT necking between fractured surfaces.

Key words CNT, Glass fiber composite, Tensile strength, Epoxy, Necking

CNT 첨가에 따른 유리섬유/섬유 복합재 제작 및 특성 평가

김형태*, 이도현**, 안우진***, 오창환**, 제연진*, 이동박*, 조규철****, 박준홍*,**,*†

*경상대학교 나노신소재공학부, 진주, 52828

**경상대학교 나노신소재융합공학과, 진주, 52828

***경상대학교 기계공학부, 진주, 52828

****주식회사 한국프롭, 진주, 52851

(2021년 7월 29일 접수)

(2021년 8월 6일 심사완료)

(2021년 8월 6일 게재확정)

요약 본 연구에서는 CNT 첨가에 따른 유리섬유/에폭시의 강도 변화를 관찰하기 위해서 에폭시 기지 상에 CNT를 분산 시켜 유리섬유 표면에 도포하였다. 제작된 유리섬유/에폭시/CNT 복합재의 특성을 강도 측정기를 이용해 평가하고, 파괴 메커니즘을 분석하기 위해서, 원자힘현미경과 전자현미경을 활용하여 분석하였다. 원자힘현미경 이미지들을 기반으로 line trace 분석을 통해 CNT 소재의 굵기 및 길이를 분석한 결과, 대부분의 CNT는 약 10 μm 이상의 길이와 평균적으로 $47.72 \pm 4.0 \text{ nm}$ 의 두께를 가진 것으로 확인되었다. 3 wt%로 혼합한 유리섬유/에폭시/CNT 복합재의 경우 대조 시편인 유리섬유/에폭시와 비교 시, $740.17 \pm 111.05 \text{ N/mm}^2$ 에서 $816.56 \pm 200.26 \text{ N/mm}^2$ 로 약 10% 이상의 인장 강도 향상이 관측되었다. 전자 현미경을 이용한 파단면 분석 결과, 에폭시 기지 층에 분산된 CNT가 복합재의 길이 방향으로 배열되어 있음이 관찰되었으며, 유리섬유/에폭시/CNT에 하중 인가 시, 에폭시 층에서 생성된 크랙들의 성장을 에폭시 수지상에 분산된 CNT들이 넥킹 역할을 하면서, 복합재의 인장 강도 향상이 되었다고 판단된다.

†Corresponding author
E-mail: yakte@gnu.ac.kr

1. 서 론

항공기 및 자동차 등 수송 기기의 성능 향상과 운영의 효율성 향상을 위해, 무게 절감과 연료 효율성 향상을 위해 복합재료의 사용량이 급격히 늘어나고 있으며[1,2], 기존에 핵심 구조체를 구성하고 있던 금속 재료를 경량의 복합 소재로 대체해 나가고 있다[3,4]. 예시로 최신의 항공기인 보잉사의 B787과 에어버스의 A350 에는 탄소 섬유 복합재료를 총 중량의 50 % 이상 사용되었다.

대표적인 복합재로서, 수십 마이크로미터의 무기 소재 기반의 섬유로 된 직물에 수지 기반의 기지재료를 적층한 섬유 강화 복합 재료가 있으며, 높은 강도와 강성을 가지는 특성이 있다. 섬유 기반 폴리머-무기 섬유 복합재는 이처럼 높은 강도와 가벼운 무게의 특성으로 인해 최신의 항공기 및 자동차에 적용 부위가 확대되고 있다[5-7]. 또한 섬유와 기지재료 간 이종의 재료를 적층하면서 서로 다른 재료 간 조합 또는 폴리머/수지 기지 층에 첨가물을 추가하면서 본래 하중을 지지하는 성능의 향상이 가능하다.

복합재료는 하중을 지지하는 구조체의 기능뿐만 아니라 전자파 흡수 기능같이 다른 기능을 동시에 수행하는 다기능 재료로서의 가능성을 가지고 있다. 기지 재료인 에폭시 레진에 나노 입자를 첨가하거나[8,9], 표면에 전도성 고분자를 사용하여 전자파 필터 특성을 추가하게 되면 구조적 기능과 더불어 전자파 흡수 기능을 더한 다기능 복합재료의 구현이 가능하게 되어[10,11], 전자파, 열 등 고에너지의 흡수체로서 기능성을 구현할 수 있어 다기능 재료로서 활용성이 매우 크다[12-15].

탄소나노튜브(carbon nano tube: CNT)는 한 층 또는 다층의 흑연 면이 원형으로 말려 있는 튜브 형태의 나노 소재이며, 구조 및 전자파 제어 응용 분야에서 대표적인 복합재 첨가제로서 연구가 되어왔다[16-18]. CNT는 장대비가 크며, 길이 방향에서의 기계적 특성이 우수하여 기지 소재의 Grain Boundary 및 계면에서 necking 형성 시 재료의 파단을 억제해주는 역할로서 연구가 진행되었으며, 탄성계수 또한 SiC 나노선보다 평균 2배 이상 높은 것으로 보고되었다[19-21]. 또한 CNT는 전자파를 반사하지 않고 흡수함으로써, 40.4~60.3 dB의 차폐 효율을 보유하고 있어서 민간에서 전자파 제어의 응용 분야에 적용이 가능할 것으로 예상될 수 있다.

이처럼 선형 CNT의 우수한 특성을 활용하여 유리섬유 기반 복합재의 기계적 성능을 향상할 수 있기 때문에, 기계적 강도는 향상하면서 동시에 무게 증가의 역제가 필수적인 항공기용 복합재에 적용 가능성을 탐색하고자 한다. 따라서, 본 연구에서는 항공기 프로펠러에 적용이 가능한 구조체를 제작하기 위해, 기지 재료인 에폭시 수지상에 탄소나노튜브(CNT)를 분산시킨 후 유리섬유에

도포하여 제작된 복합재의 특성을 평가하고 파단면을 분석하여 CNT의 분포 특성을 관찰하였다.

2. 실험 방법

Ethanol과 CNT를 혼합한 솔루션을 POWERSONIC 505(화신테크) 기기를 사용하여 초음파 파쇄를 진행한 후, 스포이트로 Acetone과 Ethanol로 세척한 Si Wafer에 CNT를 전사한 뒤 약 2시간 동안 진공 오븐에서 약 50°C의 온도에서 건조를 진행하였다. 그리고, AFM(XE 100, PSIA)을 사용하여 선형 CNT 다발을 관측하였다. 이후, Epoxy와 경화제를 10:3 비율로 혼합한 용액을 도포한 유리섬유/에폭시 복합재와 CNT를 3 wt%로 혼합한 유리섬유/에폭시/CNT 복합재 시편을 제작하여 섬유의 기계적 물성을 평가하기 위해, Static Load Testing Machine(instron 5582) 강도 측정기기를 사용하여, 복합재의 인장 강도를 측정하였다. 그리고 각각의 파단면을 주사전자현미경(SEM, JFM-7900F)을 통해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험에 적용된 CNT 소재의 정성적인 특성 분석을 하였다. Figure 1(a)와 같이 미량의 CNT를 에탄올에 희석하여, 20분간 초음파 진동을 가해, CNT/에탄올 혼합액을 제작한 뒤, Si 기판 위에 CNT 희석 용액을 전사시킨 후, 분산된 CNT의 특성을 광학 현미경으로 관측하였다. 같은 샘플을 AFM을 통해 개별 CNT 분석을 하여 Fig. 1(b)과 같이 관찰하였다. AFM 이미지에서, $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 면적에서 Si 기판 위에 분산된 CNT가 관측된다.

AFM 이미지들을 기반으로 line trace 분석을 통해 CNT 소재의 굵기 및 길이를 분석하였다. Figure 2와 같이, 각각의 CNT는 약 $10\ \mu\text{m}$ 이상의 길이를 가지며, AFM 이미지의 line trace에서 약 20개의 CNT 폭을 관찰한 결과 평균 $47.72 \pm 4.0\ \text{nm}$ 의 폭이 관측 되었으며, 최대 $80\ \text{nm}$ 굵기의 CNT 다발도 확인이 되었다.

에폭시 수지상에서 CNT의 분산 정도를 분석하기 위해, 주사현미경을 이용해 파단면을 분석하였다. 3 wt%의 CNT와 수지를 혼합 후 경화시킨 후, 힘을 가해 파단시킨 뒤, 그 파단면을 Fig. 3과 같이 관측하였다. 관측된 SEM 이미지 Fig. 3(a)을 통해 파단면에 균질하게 분산된 CNT가 약 11.32~18.56 %의 coverage를 차지하고 있다. 분산된 CNT는 Fig. 3(b)과 같이 균질한 굵기와 길이를 가지고 있다. 유리섬유/에폭시 복합재 내에 균일하게 분포된 CNT는 유리섬유/에폭시 복합재 계면의 결합력을 향상할 수 있다[22-24].

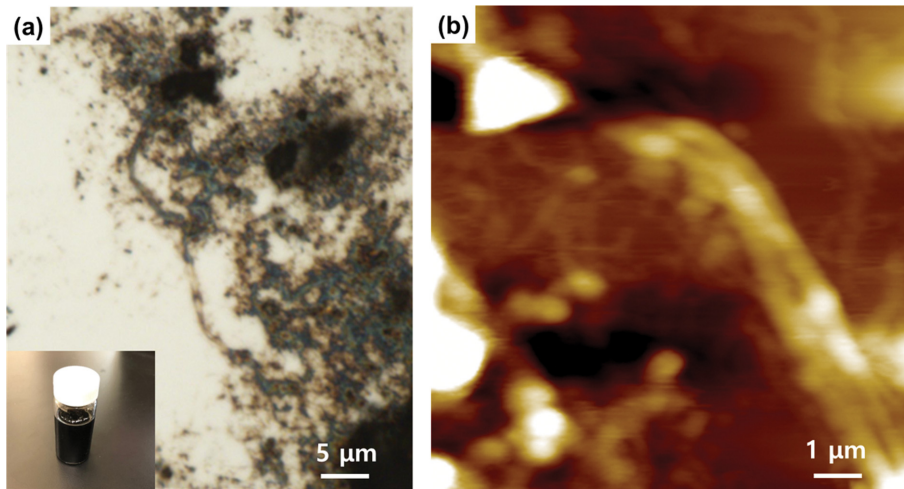


Fig. 1. Diluted CNT solution in Ethanol. (a) Optical image of CNT on the Si substrate. Inset shows diluted CNT solution in ethanol. (b) AFM image of dispersed CNT on Si wafer.

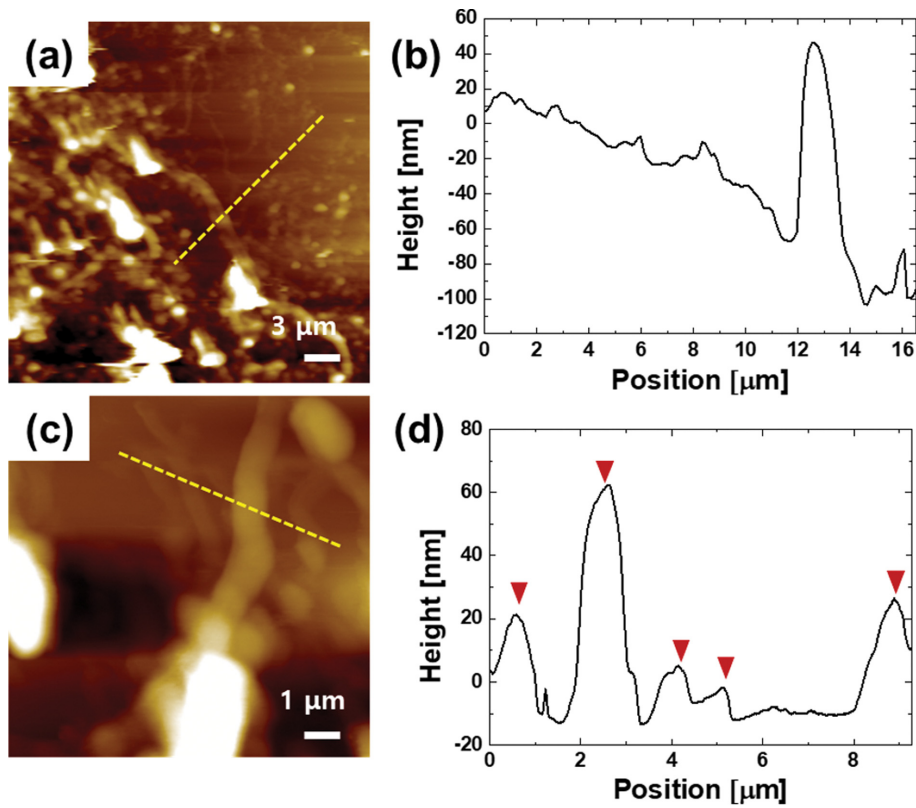


Fig. 2. Characterization of CNT on Si wafer, using atomic force microscopy (AFM). (a) AFM image of CNT on Si substrate for 30 μm scan size. (b) Line trace analysis to use AFM of (a). (c) AFM Image of CNT on Si substrate for 10 μm scan size. (d) Line trace analysis to use AFM of (c). Red marks indicate the position of CNT.

CNT 첨가에 따른 유리섬유/에폭시 복합체의 인장 강도 변화를 관찰하기 위해 CNT를 3 wt%로 혼합하여 7 cm 길이의 유리섬유/에폭시/CNT 복합 섬유를 제작하여 강도를 측정하였다. Figure 4(a)와 같이 복합체 섬유 인장 강도의 결과의 신뢰도를 높이기 위하여, 유리섬유/에폭시 시편과 CNT가 첨가된 유리섬유/에폭시 시편의 인

장강도 측정을 각각 3회씩 진행하였다. Epoxy와 경화제를 10:3 비율로 혼합한 용액을 도포한 유리섬유/에폭시 복합체와 CNT를 3 wt%로 혼합한 유리섬유/에폭시/CNT 복합체 시편의 항복 강도 측정 결과를 Fig. 4(b)에 보이고 있다. 각각 3개의 시편을 측정한 결과, 대조 시편인 유리섬유/에폭시 복합체 시편의 경우, $740.17 \pm 111.05 \text{ N/}$

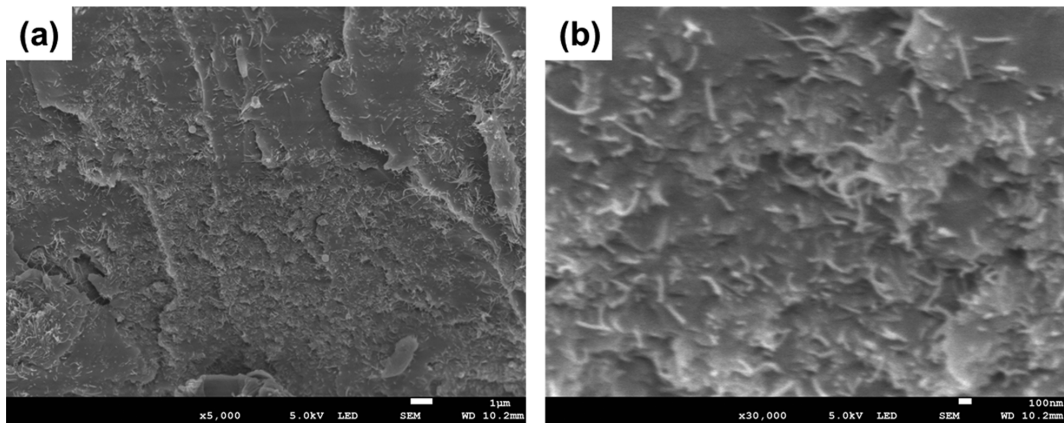


Fig. 3. Analysis of the fracture surfaces in the CNT/epoxy matrix. (a) SEM image shown the fracture surfaces of CNT/epoxy. (b) Zoomed SEM image shown the fracture surfaces.

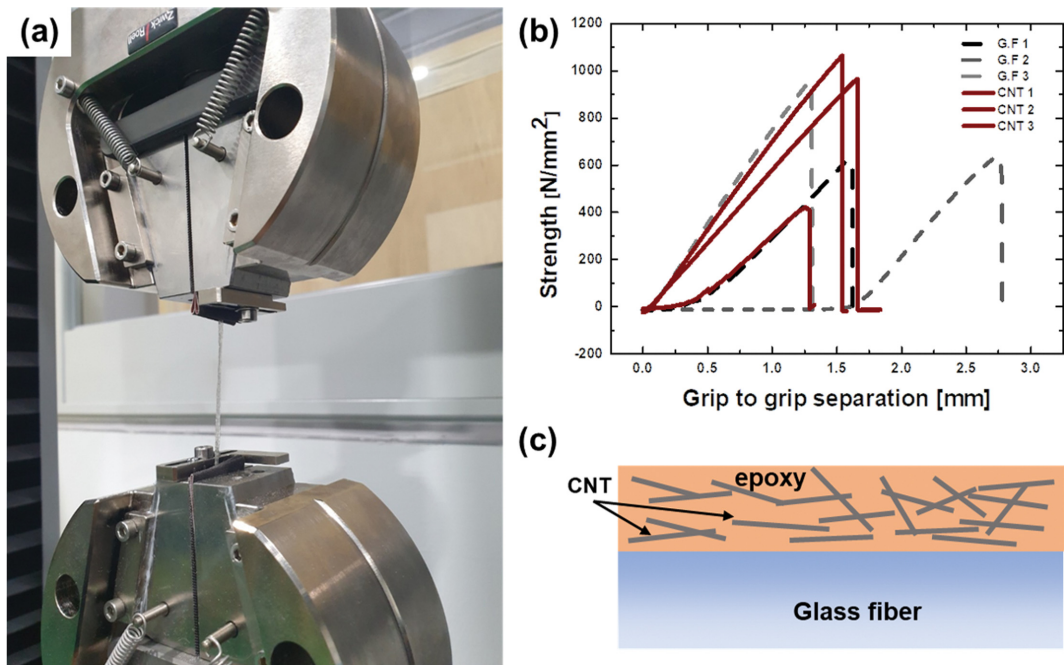


Fig. 4. Measurement of tensile strength with glass fiber composite samples. (a) Fiber composite sample mounted in the testing machine. (b) Stress-strain curve of glass fiber/epoxy composites. (c) Schematic Diagram of CNT-reinforced glass fiber/epoxy composites.

mm²의 평균 항복 강도가 측정되었고, CNT를 3 wt%로 첨가한 유리섬유/에폭시/CNT 복합재 시편의 경우, 816.56 ± 200.26 N/mm²의 평균 항복 강도가 측정되었다. 따라서, 대조 시편보다, CNT를 코팅한 복합재 시편의 인장 강도가 약 10% 정도 향상되었다고 결론 내릴 수 있다.

CNT가 첨가됨에 따라 길이 방향으로 가해진 힘에 의해 파단이 진행 시, 유리섬유와 에폭시 복합재에 CNT의 추가적인 보강재 역할이 부여됨에 따라 인장 강도가 향상되었다. Figure 4(c)의 모식도는 CNT를 에폭시에 혼합함에 따라, 유리섬유와 에폭시 사이에 CNT가 위치함에 따라 인장 강도가 향상되는 메커니즘을 보여 주기 위한 유리섬유/CNT/에폭시 단면을 보여주고 있다. CNT-

에폭시 혼합액이 유리섬유 표면 도포 후, 에폭시의 계면 근처에 CNT가 복합 층을 구성하는 CNT가 유리섬유 표면에 흡착되어, 시편을 길이 방향으로 잡아당겨 지며 크랙이 생성 및 발전되면 시편의 파괴가 진행이 된다. 하지만 수직상에서 CNT가 유리섬유 표면에 흡착이 되면서 크게 두 가지 효과로 인해 크랙 발전 및 파괴의 진행이 둔화할 수 있다[25,26]. 먼저 수직상에 유리 섬유의 길이 방향으로 CNT가 배열됨에 따라, 길이 방향으로 힘이 가해질 때 유리섬유/수지 복합 층의 파괴를 다발의 CNT가 추가로 막아주는 역할을 기대할 수 있다. 또한, 유리섬유의 크랙이 생성되어 그 크기가 커질 때 유리섬유 표면에 흡착된 CNT가 크랙 성장을 완화해 줄 수 있다.

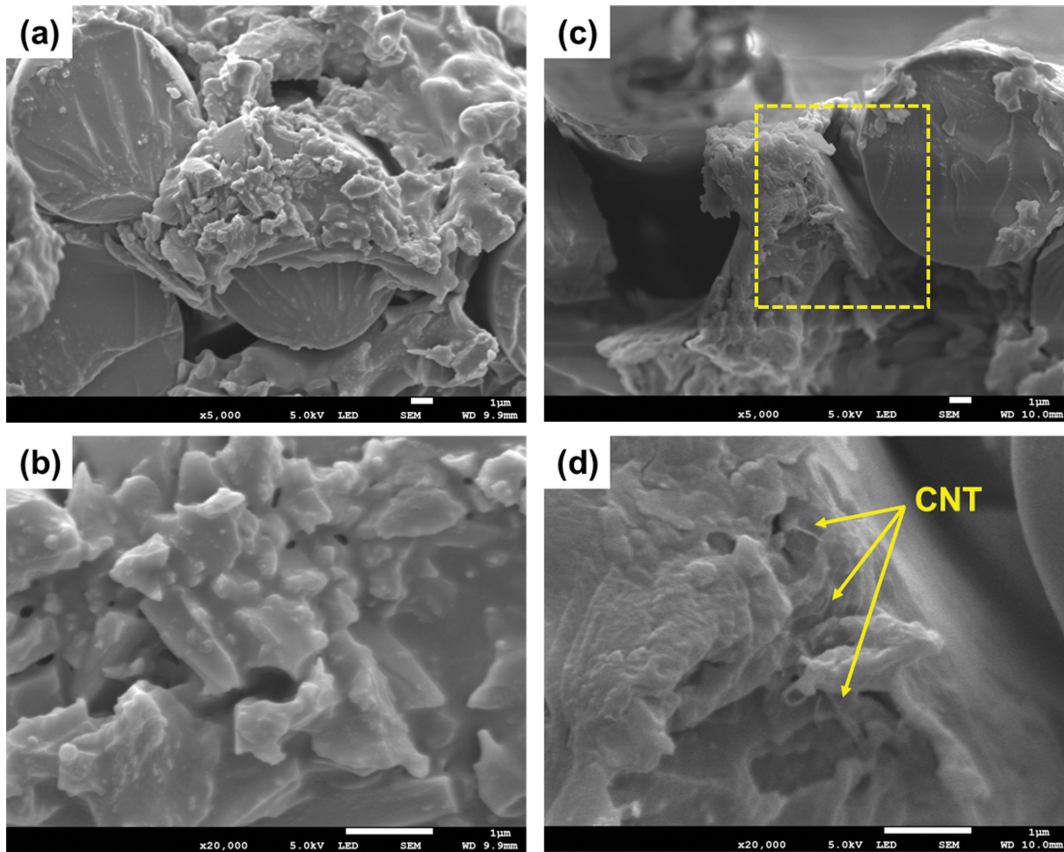


Fig. 5. SEM images shown the fracture surface of glass fiber composites. (a) The fracture surface of fiber/epoxy reference sample, (b) Zoomed image shown fracture surface of the reference sample. (c) The fracture surface of 3 wt% CNT-reinforced composite. (d) Zoomed SEM image shown the yellow box in (c).

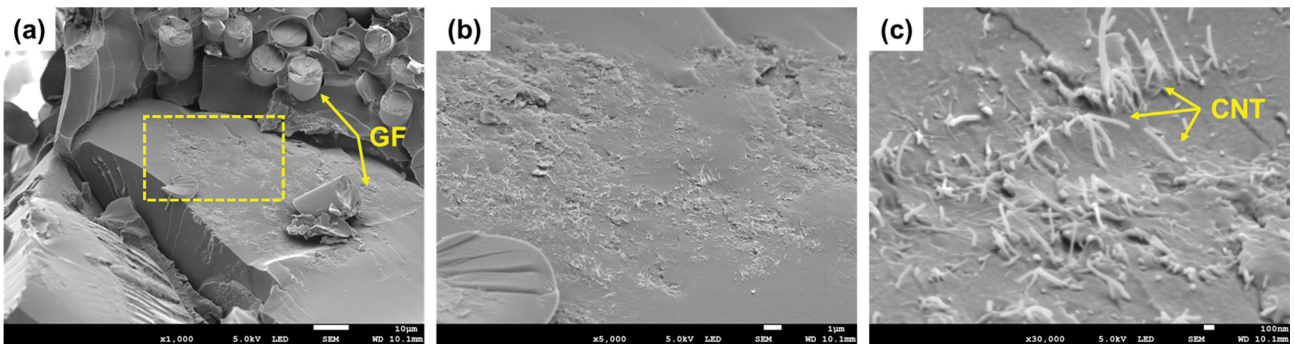


Fig. 6. SEM images shown fracture surface of CNT reinforced fiber/epoxy composites. (a) SEM image shown glass fibers and CNT/epoxy. (b) Zoomed SEM image shown the yellow box in (a). (c) Additional zoomed SEM image shows the CNTs dispersed in the epoxy.

상기에서 설명된 복합재에서의 CNT 역할을 확인하기 위해, 주사전자현미경을 통해, CNT가 코팅된, 유리섬유/에폭시 복합재의 항복 강도 측정 후 파단면을 분석하였다. Figure 5(a)는 유리섬유/에폭시 대조군 복합재 시편의 파단면을 보여주고 있다. Figure 5(b)와 같이 대조 샘플 파단면의 확대한 부분을 확대한 결과, 에폭시의 파단면이 불규칙적으로 나타나 있는 것을 확인 가능하며, 이는 에폭시의 취성 파괴가 발생했다는 것을 확인할 수

있다. 반면, Fig. 5(c)와 (d)의 CNT 3%가 첨가된 섬유 파단면을 관찰한 결과, 유리섬유 계면에 적층된 에폭시의 파단면에 선형 CNT 다발이 확인되었다.

복합재 파단면에 분포된 CNT 다발에 의해 하중 인가 시 재료의 파괴에 대한 추가적인 저항을 주어 CNT를 혼합한 유리섬유/에폭시의 항복 강도가, 더 상승했다고 결론 내려질 수 있다[27,28]. 추가적인 유리섬유/CNT/에폭시 파단면 분석을 Fig. 6과 같이 SEM 관측을 통해서

수행하였다. Figure 6(a)의 유리섬유 사이의 에폭시 파단면을 확대한 결과 Fig. 6(b)와 (c)의 SEM 이미지와 같이 유리섬유의 길이 방향으로 분산된 CNT들이 관찰된다. 제조된 복합재 길이 방향으로 하중이 인가됨에 따라, 유리섬유/CNT/에폭시의 파괴가 발생할 시 상대적으로 강도가 약한 에폭시가 먼저 파단이 된다. 하지만 파단면에 위치한 하중 방향으로 분산된 CNT 다발의 넥킹으로, 에폭시 층에 생성된 파단면의 발전 및 확대를 억제하며, 파단면의 유리섬유까지 진행되기 위해 필요한 하중을 증가시켜, 복합재의 전체적인 인장 강도를 증가시킨 것으로 판단된다. 따라서, Fig. 5와 6의 복합재 파단면의 전자현미경 분석 결과, 에폭시 수지상에 유리섬유의 길이 방향으로 배열된 CNT들이 추가적인 강도를 복합재에 부여할 수 있다고 결론 내릴 수 있다.

4. 결 론

항공기 외피에 적용 가능한 경량 복합소재 개발을 위하여, CNT를 유리섬유/에폭시 계면에 도포한 복합재 섬유를 제조하고 그 강도 특성을 평가하였다. 3 wt%의 CNT가 첨가된 유리섬유/에폭시/CNT 복합재 시편의 경우, $816.56 \pm 200.26 \text{ N/mm}^2$ 의 항복 강도가 측정되었으며, $740.17 \pm 111.05 \text{ N/mm}^2$ 의 항복 강도가 측정된 유리섬유/에폭시 대조 샘플과 비교해 약 10.1%의 인장 강도 향상이 관찰되었다. 이는 길이 방향의 하중 인가 시 수지상에서 유리섬유 표면에 도포된 CNT로 인해 크랙 발전 및 파괴의 진행이 둔화할 것이라 예측되며 이는 파단면 분석을 통해 확인된다. 복합재 파단면을 SEM으로 관측한 결과 유리섬유의 길이 방향으로 분산되어 에폭시 층에 존재하는 CNT들이 발견되었으며, 이러한 CNT들이 복합재의 추가적인 항복 강도 향상을 부여하였다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- [1] G.C. Jacob, J.F. Fellers, S. Simunovic and J.M. Starbuck, "Energy absorption in polymer composites for automotive crashworthiness", *Journal of Composite Materials* 36 (2002) 813.
- [2] S. Endo, M. Sato, Y. Bu and T. Mizuno, "Improving transmission efficiency with magnetic coating technology for lightweight wireless power transfer coil using aluminum plate", *Journal of the Magnetics Society of Japan* 43 (2019) 125.
- [3] M. Juraeva, K.J. Ryu, S.H. Noh and D.J. Song, "Lightweight material for the speed reducer housing of a car chassis", *J. Mech. Sci. Technol.* 131 (2017) 3219.
- [4] A.A. Adebisi, M.A. Maleque and Q.H. Shah, "Performance assessment of aluminium composite material for automotive brake rotor", *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing* 9 (2014) 207.
- [5] Y.T. Du, C.P. Song, J. Xiong and L.Z. Wu, "Fabrication and mechanical behaviors of carbon fiber reinforced composite foldcore based on curved-crease origami", *Composites Science and Technology* 74 (2019) 94.
- [6] G.C. Jacob, J.F. Fellers, J.M. Starbuck and S. Simunovic, "Crashworthiness of automotive composite material systems", *Journal of Applied Polymer Science* 92 (2004) 3218.
- [7] E. Yousefi, A. Sheidaei, M. Mahdavi, M. Baniassadi, M. Baghani and G. Faraji, "Effect of nanofiller geometry on the energy absorption capability of coiled carbon nanotube composite material", *Composites Science and Technology* 153 (2017) 222.
- [8] P. Rosso, L. Ye, K. Friedrich and S. Sprenger, "A toughened epoxy resin by silica nanoparticle reinforcement", *Journal of Applied Polymer Science* 100 (2006) 1849.
- [9] A. Omrani, L.C. Simon and A.A. Rostami, "The effects of alumina nanoparticle on the properties of an epoxy resin system", *Materials Chemistry and Physics* 114 (2009) 145.
- [10] J. Liu, T. Ma, H. Tong, W. Luo and M. Yan, "Electromagnetic wave absorption properties of flaky Fe-Ti-Si-Al nanocrystalline composites", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322 (2010) 940.
- [11] J. Huo, L. Wang and H. Yu, "Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption", *Journal of Materials Science* 44 (2009) 3917.
- [12] Z. Gao, J. Zhang, D. Lei, Z. Guo, S. Zhang, Y. Song, J. Wang and K. Kou, "Ferrocene decorative phenolic epoxy resin as lightweight thermal-stable dielectric relaxor for electromagnetic wave absorption", *Composites Communications* 22 (2020) 100472.
- [13] P.K. Roy, A.V. Ullas, S. Chaudhary, V. Mangla, P. Sharma, D. Kumar and C. Rajagopal, "Effect of SBA-15 on the energy absorption characteristics of epoxy resin for blast mitigation applications", *Iranian Polymer Journal* 22 (2013) 709.
- [14] H. Luo, D. Zhang, C. Jiang, X. Yuan, C. Chen and K. Zhou, "Improved dielectric properties and energy storage density of poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) nanocomposite with hydantoin epoxy resin coated BaTiO₃", *ACS Applied Materials & Interfaces* 7 (2015) 8061.
- [15] M. Shariati, G. Farzi and A. Dadrasi, "Mechanical properties and energy absorption capability of thin-walled square columns of silica/epoxy nanocomposite", *Constr Build Mater* 78 (2015) 362.
- [16] B. Hornbostel, U. Leute, P. Potschke, J. Kotz, D. Kornfeld, P.W. Chiu and S. Roth, "Attenuation of electromag-

- netic waves by carbon nanotube composites”, *Physica E* 40 (2008) 2425.
- [17] Z.P. Wu, M.M. Li, Y.Y. Hu, Y.S. Li, Z.X. Wang, Y.H. Yin, Y.S. Chen and X.A. Zhou, “Electromagnetic interference shielding of carbon nanotube macrofilms”, *Scripta Mater* 64 (2011) 809.
- [18] M.A. Seo, J.H. Yim, Y.H. Ahn, F. Rotermund, D.S. Kim, S. Lee and H. Lim, “Terahertz electromagnetic interference shielding using single-walled carbon nanotube flexible films”, *Applied Physics Letters* 93 (2008) 231905.
- [19] M.C. Weisenberger, E.A. Grulke, D. Jacques, A.T. Rantell and R. Andrews, “Enhanced mechanical properties of polyacrylonitrile/multiwall carbon nanotube composite fibers”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 3 (2003) 535.
- [20] B. Yazdani, Y.D. Xia, I. Ahmad and Y.Q. Zhu, “Graphene and carbon nanotube (GNT)-reinforced alumina nanocomposites”, *J. Eur. Ceram. Soc.* 35 (2015) 179.
- [21] J.P. Salvétat, J.M. Bonard, N.H. Thomson, A.J. Kulik, L. Forró, W. Benoit and L. Zuppiroli, “Mechanical properties of carbon nanotubes”, *Applied Physics A* 69 (1999) 255.
- [22] J. Zhu, A. Imam, R. Crane, K. Lozano, V.N. Khabashe-sku and E.V. Barrera, “Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength”, *Composites Science and Technology* 67 (2007) 1509.
- [23] Y. Hua, F. Li, Y. Liu, G.W. Huang, H.M. Xiao, Y.Q. Li, N. Hu and S.Y. Fu, “Positive synergistic effect of graphene oxide/carbon nanotube hybrid coating on glass fiber/epoxy interfacial normal bond strength”, *Composites Science and Technology* 149 (2017) 294.
- [24] V. Lordi and N. Yao, “Molecular mechanics of binding in carbon-nanotube-polymer composites”, *Journal of Materials Research* 15 (2000) 2770.
- [25] C.S. Grimmer and C.K.H. Dharan, “Enhancement of delamination fatigue resistance in carbon nanotube reinforced glass fiber/polymer composites”, *Composites Science and Technology* 70 (2010) 901.
- [26] P.F. Wang, X. Zhang, G.H. Lim, H.S. Neo, A.A. Malcolm, Y. Xiang, G.X. Lu and J.L. Yang, “Improvement of impact-resistant property of glass fiber-reinforced composites by carbon nanotube-modified epoxy and pre-stretched fiber fabrics”, *Journal of Materials Science* 50 (2015) 5978.
- [27] L.M. Gao, T.W. Chou, E.T. Thostenson, Z.G. Zhang and M. Coulaud, “In situ sensing of impact damage in epoxy/glass fiber composites using percolating carbon nanotube networks”, *Carbon* 49 (2011) 3382.
- [28] A.O. Fulmali, B. Sen, B.C. Ray and R.K. Prusty, “Effects of carbon nanotube/polymer interfacial bonding on the long-term creep performance of nanophased glass fiber/epoxy composites”, *Polym Composite* 41 (2020) 478.