

풍력 블레이드를 위한 CNT 코팅 유리섬유의 적용성에 대한 비교 연구

장홍규*[†], 김영철*

A Comparative Study on the Applicability of CNT-coated Glass Fiber for Wind Blades

Hong-Kyu Jang*[†], Young-Chul Kim*

ABSTRACT: This paper conducted the study on the electromagnetic and mechanical applicability of CNT-coated glass fiber for wind blades. Large-size wind blade has the serious pending problems to meet the target, such as interfering radar signals, increasing weights, and increasing repair costs. In this paper, we are suggesting the CNT-coated glass fiber in order to overcome these problems. First, the CNTs were strongly coated on the surfaces of glass fiber by suggested coating process, and the CNT-coated glass fiber/epoxy composites were fabricated by Va-RTM process. We designed and fabricated a radar absorbing structure using the CNT-coated glass fiber, which showed over 90% radar absorbing performance between 8.3 and 12.1 GHz frequency. In addition, we confirmed the improvement of mechanical properties on the strength and modulus of tensile, compressive, and in-plane shear.

초 록: 본 논문에서는 복합재 풍력 블레이드를 위한 CNT 코팅 유리섬유의 전자기적/기계적 적용성에 대한 연구를 수행하였다. MW급 이상의 대형 복합재 블레이드는 민수용/군수용 레이더와의 신호간섭 문제로 인한 발전단지 위치선정 제약과 무게 증가에 따른 발전효율 저해, 구조적 건전성 부족에 따른 수리비용 증가의 당면과제를 안고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위한 방안으로 CNT 코팅 유리섬유를 제안하였다. 먼저 제안된 CNT 코팅 공정을 통해 유리섬유 표면에 CNT를 강력히 코팅하고, Va-RTM을 통해 CNT 코팅/유리섬유 에폭시 복합재를 제작하여 전자기적/기계적 물성을 평가하였다. 또한 전자파 흡수체 설계/제작 및 시험/평가를 통해 X-band의 8.3~12.1 GHz에서 90% 이상 전자파 흡수성능을 가짐을 검증하였다. 이와 더불어 기계적 물성 시험/평가를 통해서 인장, 압축, 면내전단 강도/강성의 모든 기계적 물성이 향상됨을 확인하였다.

Key Words: 탄소 나노튜브(Carbon nanotube), 유리섬유 복합재(Glass fiber composites), 기계적 물성(Mechanical properties), 전자기적 물성(Electromagnetic properties), 풍력 블레이드(Wind blades)

1. 서 론

재생에너지(renewable energy) 분야 중 풍력발전(wind power)은 가장 빠르게 성장하고 있는 분야로 2010년 이후 연평균 17%의 높은 성장률을 보이고 있으며, 2015년 기준

433 GW의 전력을 생산하고 있다. 또한 더 많은 전력생산을 위해 미국이나 중국, 독일 등의 풍력발전 선진국을 중심으로 발전용량 5 MW급 이상으로 대형화되고(블레이드 직경 100미터 이상), 발전시설 또한 대규모로 단지화되는 추세이다[1].

Received 31 October 2016, received in revised form 15 December 2016, accepted 22 December 2016

*Composite Structures & System Department, Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science

*[†]Composite Structures & System Department, Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Corresponding author (E-mail: hongkyu@kims.re.kr)

풍력 블레이드가 대형화, 단지화 됨에 따라서 민수용/군수용 레이더 시스템(주로 X-band를 사용)과의 신호간섭과 신호왜곡(signal interference and distortion) 문제가 주요 이슈로 부각되고 있다. 고속으로 회전하는 대형 블레이드는 큰 레이더 반사면적(radar cross section)과 다양한 선속도를 갖기에 Clutter와 Shadowing, Ghost Target 등의 레이더 시스템 장애를 발생시킨다[2].

풍력 블레이드는 무게를 줄여 발전효율을 높이고, 구조적 안전성을 확보하기 위해서 섬유강화 복합재료와 폼코어(foam core) 등의 가벼운 구조재료를 이용하여 제작된다[3]. 하지만 최근 블레이드가 대형화 됨에 따라서 무게를 줄이기 위한 설계를 목표로 구조 건전성에 문제가 발생하여 설계수명(design lifetime) 이전에 블레이드가 파손되는 사례가 계속 증가하고 있다[4].

이처럼 블레이드가 대형화 됨에 따라 발생하는 문제들을 보완하기 위한 다양한 연구들이 수행되었다. Kim[5]과 Jang[6]은 복합재 블레이드 표면에 전자파 흡수특성을 갖도록 DLS(dielectric lossy sheet)나 PPS(periodic pattern surface)를 적용한 스텔스(stealth) 블레이드를 보고하였다. 또한 Loos[7], Qian[8], Gojny[9]은 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)를 이용하여 복합재의 구조적 성능향상 연구를 수행하였다. 하지만 이러한 연구들은 무게 증가나 나노입자 분산 영향[10,11]의 문제로, 실제 풍력 블레이드에 적용하기에 한계를 갖는다.

이에 본 논문에서는 대형 풍력 블레이드가 갖는 신호간섭/신호왜곡, 무게 증가, 구조 건전성 등의 문제를 보완하기 위한 방안으로 CNT 코팅 유리섬유 복합재를 제안하였다. 이를 위해 CNT 코팅 유리섬유 복합재 제조공정을 제안하고, CNT 코팅 유리섬유 복합재의 전자기적/기계적 물성 시험/평가를 통해 적용성을 검증하였다.

2. 재료 및 실험

2.1 CNT 코팅 유리섬유 복합재

유리섬유/에폭시 복합재의 전자기적 물성 구현 및 기계적 물성 향상을 위해서 유리섬유 표면에 CNT를 직접 코팅하였다. 이를 위해 유리섬유와 CNT의 소수성 상호작용(hydrophobic interaction)과 강력한 이온 결합(ionic bond)을 이용한 Dipping 방법을 활용하였다[12]. 본 연구에서 적용된 코팅 공정은 CNT 1.0 wt% + SDS 분산액과 PEI(polyethyleneimine) 용액에 순차적으로 순수 유리섬유를 각 10초간 담가 표면에 강력한 CNT 코팅을 형성하고, 이후 세척 및 건조(80°C 오븐, 48시간) 과정을 통해 CNT가 코팅된 유리섬유를 제작하였다[13]. 본 연구에서는 코팅 과정을 1, 3, 5회 반복적으로 수행하여 3종류의 CNT 코팅 유리섬유를 제작하였다. 코팅 표면 상태를 확인하기 위해서 CNT가 코팅된 유리섬유를 주사전자현미경(scanning electron

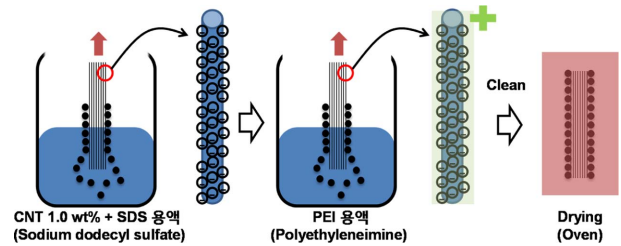


Fig. 1. Schematic diagram for CNT coating process

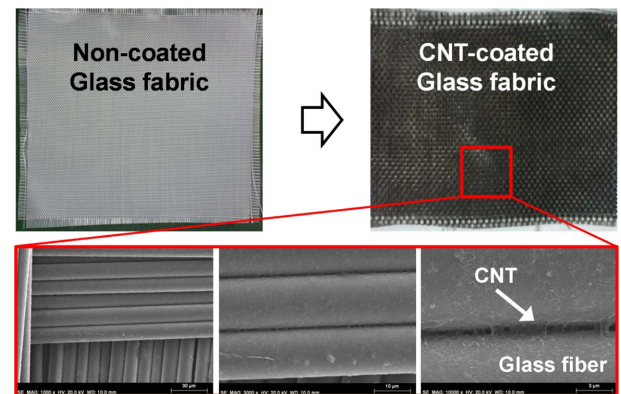


Fig. 2. SEM images for CNT-coated glass fiber fabric (GF)

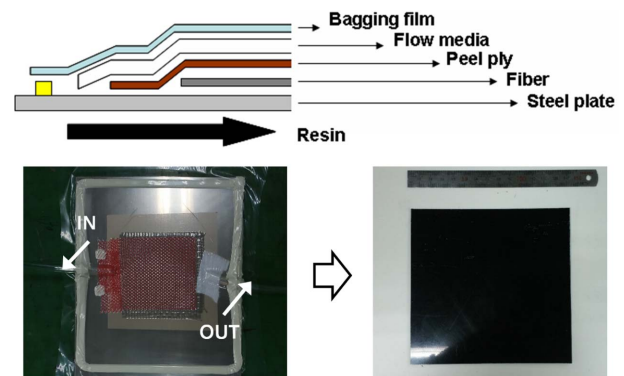


Fig. 3. Schematic diagram for manufacturing process (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)

microscope, SEM)을 통해 분석하였으며, Fig. 2와 같이 유리섬유 표면에 CNT가 균일하게 코팅이 된 것을 확인하였다.

전자기적/기계적 물성 평가를 위한 CNT 코팅 유리섬유/에폭시 복합재 평판을 제작하기 위해 복합재 풍력 블레이드 제조방법과 동일한 Va-RTM(vacuum assisted resin transfer molding) 성형공정을 활용하였다. 특히 복합재 평판 제작시 CNT 코팅 유리섬유의 수지 주입성, 섬유 함침성, 성형성 등의 공정성을 함께 검토하였다. 본 논문에서 제안된 CNT 코팅 유리섬유를 통해서 기존 RTM 공정을 이용해 제작하기 어려웠던 CNT 보강 유리섬유/에폭시 복합재를 성공적으로 제작하였다. 특히 기존 RTM 성형공정에서 문제시 되던 수지의 점도 증가에 따른 수지 미주입/미함침 문제와 나

Table 1. Materials for CNT-coated glass fiber/epoxy composites

Materials	Model No.	Manufacturer
Carbon nanotube	95RD (95%) D: 5~15 nm, AR: >500	CNT Solution
Glass fiber fabric	#K126	Hankuk Fiber
Epoxy/Hardner	KFR-121/ KFH-141	Kukdo Chem.

노입자의 여과(filtering) 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. Fig. 3은 제작공정 개략도 및 최종 제작된 복합재 평판이다.

2.2 전자파 흡수구조 설계

흡수층과 반사층으로 구성된 단층형 전자파 흡수구조(single-layer absorber)의 반사계수(R)은 전송선 이론(transmission line theory)에 따라 식 (1)과 같이 특성 임피던스(η)와 전파상수(γ), 전파가 흘러가는 매질의 두께(d)로 표현된다[14,15].

$$R = \eta \tanh(\gamma d) - 1 / \eta \tanh(\gamma d) + 1 \quad (1)$$

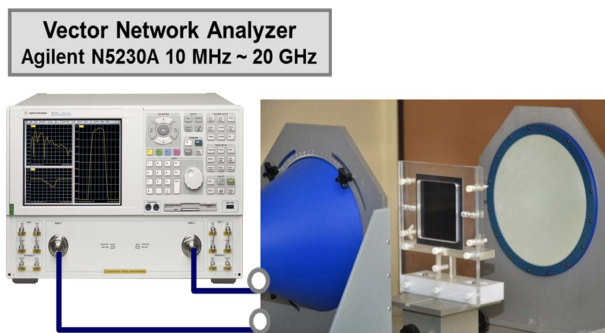
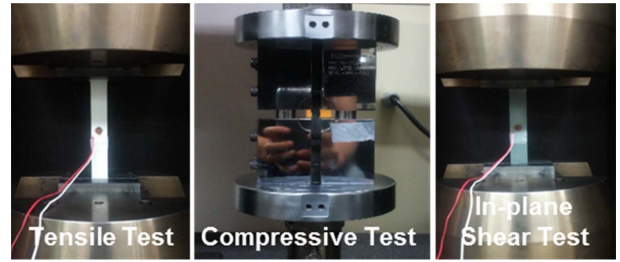
여기서 흡수층이 탄소나노튜브와 같은 전도성 소재를 이용한 유전 흡수체의 경우 복소 투자율(μ_r)의 값은 1이므로, 특성 임피던스와 전파상수는 복소 유전율(ϵ_r)과 주파수(f), 빛의 속도(c)로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \sqrt{1/\epsilon_r}, \quad \gamma = j2\pi f \sqrt{\epsilon_r}/c \quad (2)$$

만약 단층형 전자파 흡수구조가 입사하는 전파를 모두 흡수하여 반사파가 전혀 없는 이상적인 구조라면, 반사계수 $R=0$ 의 무반사 조건을 만족한다. 따라서 식 (1)에서 분자 = 0가 되며, 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\tanh(j2\pi f d \sqrt{\epsilon_r}/c) = \sqrt{\epsilon_r} \quad (3)$$

결과적으로 식 (3)의 방정식을 만족하는 해, 즉 주파수(f)와 두께(d), 복소 유전율(ϵ_r)의 조합을 통해 단층형 전자파 흡수구조를 설계할 수 있다.

**Fig. 4.** Measuring system for electromagnetic properties (Free-space Measurement System)**Fig. 5.** Testing system & fixtures for mechanical properties (Instron 5882 System)

2.3 전자기적 물성 시험

CNT가 코팅된 유리섬유/에폭시 복합재의 전자기적 물성 측정 및 전자파 흡수성능을 평가하기 위해서 네트워크 분석기와 두 개의 Horn 안테나, 시편 거치대로 구성된 자유공간측정 시스템(free-space measurement system)을 활용하여 신뢰도 높은 시험을 수행하였다. 특히 전자파 흡수구조 설계에 필수적인 복합재 복소 유전율(complex permittivity)의 경우 CNT가 1, 3, 5회 코팅된 시편에 대해 물성 측정을 수행하였다.

2.4 기계적 물성 시험

유리섬유/에폭시 복합재의 기계적 물성을 평가하기 위해서 ASTM 규격을 참고하여 인장, 압축, 면내전단 시험을 수행하였다. 특히 복합재의 기계적 특성 향상을 검증하기 위해서 CNT가 코팅되지 않은 순수한 유리섬유/에폭시 복합재 시편과 CNT가 5회 코팅된 유리섬유/에폭시 복합재 시편을 준비하여 비교시험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 복소 유전율 및 Cole-Cole 선도

유리섬유/에폭시 복합재의 복소 유전율을 자유공간측정 장비를 활용해 측정하였다. 측정을 위한 시편은 순수 유리섬유와 CNT 1.0 wt% 분산액에 1, 3, 5회씩 코팅된 유리섬유를 이용하여, Va-RTM 성형공정을 통해 제작하였다. 측정된 복소 유전율 실수부와 허수부를 각각 Fig. 6의 그래프에 CNT 코팅 횟수에 따라 정리하였다.

시험 결과에 따르면 CNT 코팅 횟수가 증가함에 따라서 복소 유전율의 실수부와 허수부가 모두 증가하는 경향을 갖는다. 특히 전자파 흡수성능과 밀접한 허수부의 경우 CNT 코팅 1회는 순수 유리섬유/에폭시 복합재와 큰 차이를 보이지 않지만, 3회부터 허수부가 큰 폭으로 증가함을 보인다. 전자파 흡수구조 설계 주파수인 10 GHz에서 각 시편에 대한 측정된 복소 유전율값을 정리하며, CNT 코팅 0, 1, 3, 5회에 따라 각 4.67-j0.02, 5.32-j1.00, 6.42-j3.13, 7.40-j4.88의 값을 갖는다.

앞선 2.2절 단층형 전자파 흡수체의 설계에서, 목표 주파

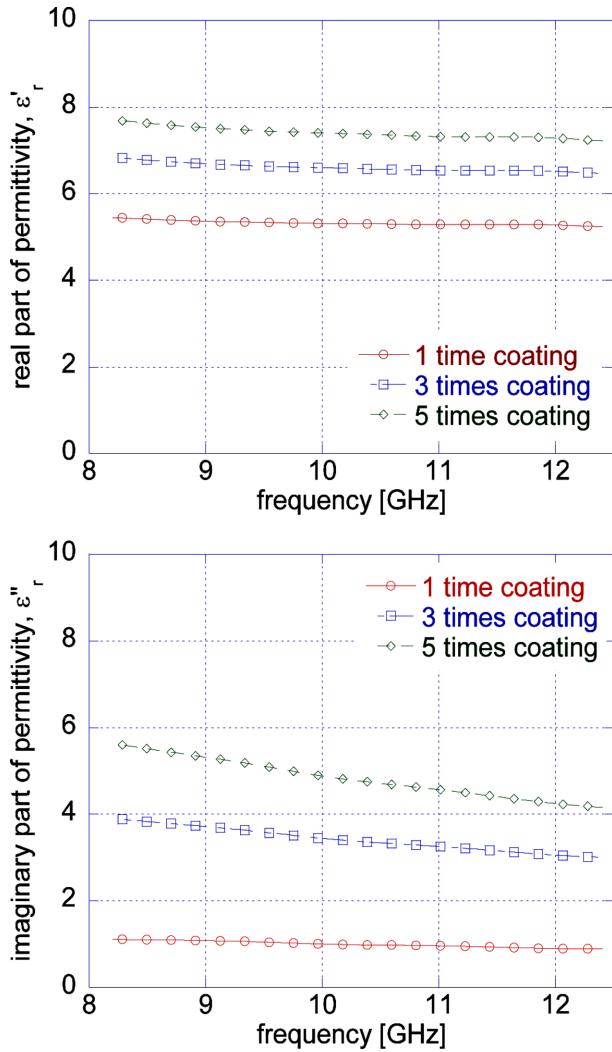


Fig. 6. Complex permittivity of CNT-coated glass fiber/epoxy composites by coating times

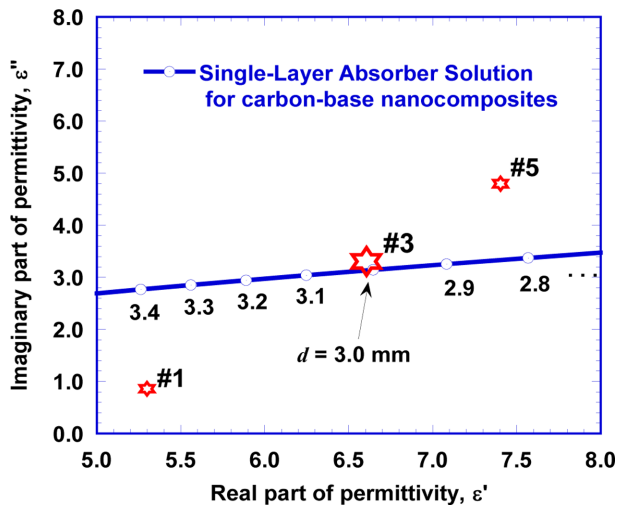


Fig. 7. Combination of complex permittivity and thickness for single-layer absorber

수(f)에 대한 무반사 조건($R = 0$)을 만족하는 두께(d)의 변화에 따른 복소 유전율($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$) 해를 구할 수 있다. Fig. 7은 10 GHz의 주파수에서 두께의 변화에 따라서 식 (3)의 조건식으로부터 계산된 복소 유전율 해 곡선(무반사 곡선)과 실험을 통해서 측정된 CNT 1, 3, 5회 코팅 유리섬유/에폭시 복합재의 복소 유전율 값을 Cole-Cole 선도에 함께 나타낸 결과이다. Fig. 7의 그래프에 대해 좀더 자세히 설명하면 무반사 곡선은 입사파에 대한 반사파가 없는 이상적인 경우를 의미하며, 전자파 흡수체의 최적 두께와 최적 복소 유전율을 결정하는데 사용될 수 있다.

제작된 CNT 코팅 유리섬유/에폭시 복합재의 경우 CNT 3회 코팅 시 두께 3.0 mm 부근에서 무반사 곡선에 가장 근접한 해를 가짐을 확인할 수 있다. 이에 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용한 In-house 코드[15]를 이용해서 복소 유전율 6.42-j3.13(CNT 3회 코팅)에서 최적의 흡수 성능을 갖는 전자파 흡수구조를 설계하였으며, 두께는 2.99 mm로 반사손실은 -27.0 dB(99% 이상 전자파 흡수)를 갖는다.

3.2 전자파 흡수 특성 평가

전자파 흡수구조의 설계 결과를 바탕으로 제작된 CNT가 3회 코팅된 유리섬유/에폭시 전자파 흡수구조의 성능 시험/평가를 수행하고, 그 결과를 Fig. 8과 Table 2에 정리하였다. 시험 결과에 따르면 전자파 흡수구조는 설계 목표 주파수인 X-band(8.2~12.4 GHz)의 10 GHz에서 최대 흡수 성능인 -24 dB(99% 이상 전자파 흡수)를 나타내며, X-band내 8.3~12.1 GHz에서 90% 이상(-10 dB)의 전자파 흡수대역을 가짐을 알 수 있다. 특히 Fig. 8의 그래프에서 설계값과 측정값 주파수 및 반사손실이 약간의 차이를 보이는 것은 제작 시 발생하는 흡수체의 두께 조절과 복소 유전율의 미미한 차이로 인한 것으로, 전체 전자파 흡수성능에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

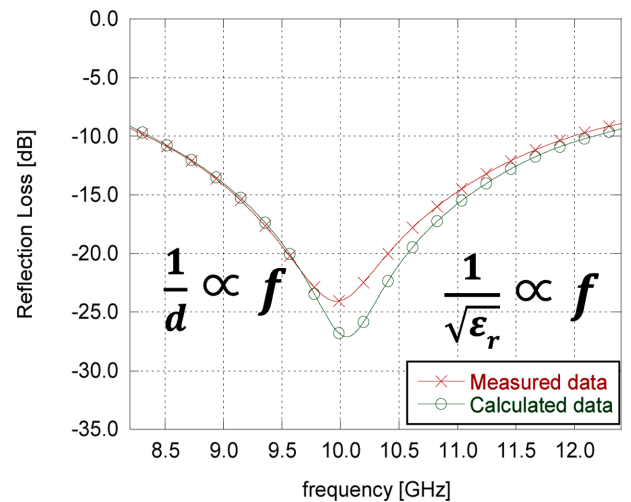


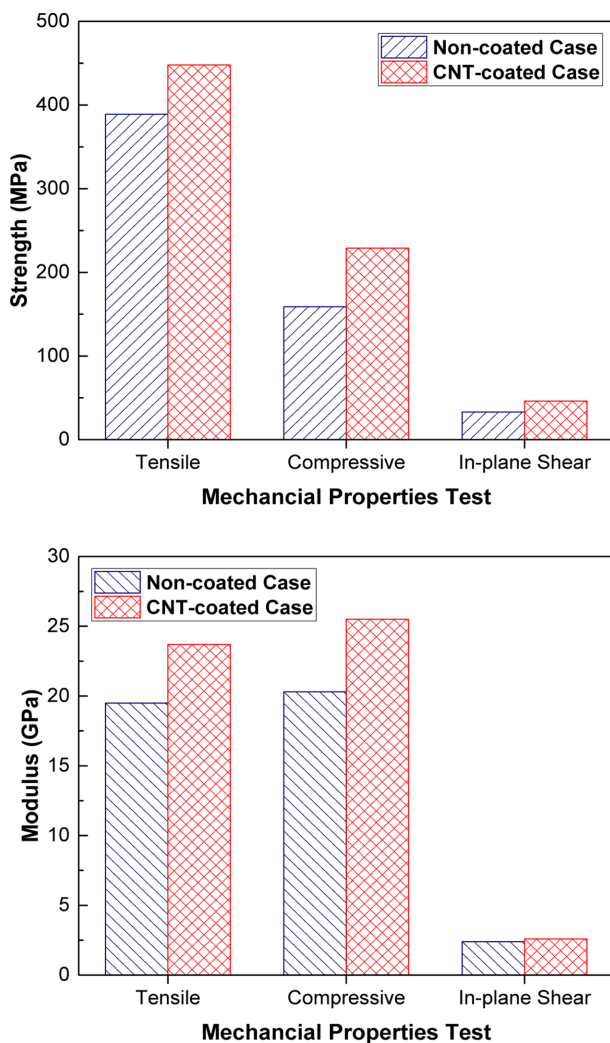
Fig. 8. Reflection loss of CNT-coated glass fiber/epoxy composites (EM waves absorbing performance)

Table 2. Design and measured values of radar absorbing structures (CNT-coated glass fiber/epoxy composites)

Test Method	Design Value	Measured Value
Thickness	2.99 mm	3.06 mm
Reflection Loss	-27.0 dB	-24.0 dB

3.3 기계적 특성 평가

CNT 코팅 유리섬유/에폭시 복합재의 인장, 압축, 면내전단 시험 결과와 기계적 물성 향상도를 계산하여 Fig. 9와 Table 3에 정리하였다. 기계적 물성 시험 결과, CNT가 코팅되지 않은 시편에 비해서 CNT가 코팅된 시편의 경우 인장, 압축, 면내전단 강도/강성(strength/modulus) 측면에서 모든 항목의 기계적 물성이 향상됨을 확인 하였다. 특히 복합재 강도의 경우 CNT가 코팅된 유리섬유를 활용하여 시편을 제작하였을 때, 순수 유리섬유/에폭시 복합재 시편보다 작게는 15.2%에서 많게는 44.0%까지 기계적 물성이 향상됨

**Fig. 9.** Mechanical properties of CNT-coated glass fiber/epoxy composites**Table 3.** Improvement of mechanical properties in CNT-coated glass fiber/epoxy composites

Test Method	Strength Improvement	Modulus Improvement	ASTM
Tensile Test	15.2%	21.5%	D3039
Compressive Test	44.0%	25.6%	D6641
In-plane Shear Test	39.6%	8.3%	D3518

을 알 수 있다.

시험 결과에 따르면 코팅된 CNT가 복합재의 압축강도(44.0%)와 면내전단 강도(39.6%)의 증가에 크게 기여하는 것을 알 수 있는데, 이는 유리섬유 표면에 코팅된 CNT에 의한 섬유와 수지 사이의 계면 특성의 향상의 효과이다[8,9]. 즉 섬유강화 복합재의 계면 강도와 밀접한 관계인 Surface Area, Mechanical Interlocking, Local Stiffening 증가로 설명된다.

4. 결 론

본 논문에서는 풍력 블레이드를 위한 CNT 코팅 유리섬유의 적용성에 대한 연구를 수행하였다. 현재 MW급 이상의 대형 복합재 블레이드는 레이더와의 상호간섭 문제로 인한 발전위치 제약, 무게 증가에 따른 발전효율 저해, 구조적 건전성 부족에 따른 수리비용 증가의 당면과제를 안고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위한 방안으로 CNT 코팅 유리섬유를 제안하였다.

먼저 CNT 코팅 유리섬유를 활용하여 복합재 블레이드 제조방법과 동일한 Va-RTM 성형공정을 통해서 성공적으로 CNT 보강 유리섬유/에폭시 복합재를 제작하였다. 특히 기존 나노입자를 활용한 공정에서 문제시 되던 수지의 점도 증가에 따른 수지 미주입/미함침 문제와 나노입자의 여과현상은 CNT를 수지가 아닌 유리섬유 표면에 강력하게 코팅함으로써 해결할 수 있었다.

또한 CNT 코팅 유리섬유/에폭시 복합재의 전자기적 물성 시험/평가를 수행하였으며, 유리섬유의 CNT 코팅을 통해서 전자파 흡수체 설계를 위한 충분한 복소 유전율이 확보됨을 확인하였다. 또한 설계/제작된 전자파 흡수구조가 X-band 10 GHz에서 최대 흡수 성능인 -24 dB를 나타내며, 8.3~12.1 GHz에서 90% 이상 전자파 흡수성능을 가짐을 검증하였다.

마지막으로 CNT 코팅 유리섬유/에폭시 복합재의 기계적 물성 시험/평가를 수행하였으며, 인장강도와 강성은 15.2%와 21.5%, 압축강도와 강성은 44.0%와 25.6%, 면내전단 강도와 강성은 39.6%와 8.3% 향상되었다. 특히 섬유에 코팅된 CNT양은 유리섬유 무게의 0.63%로 매우 적은 CNT 첨가를 통해서 우수한 기계적 물성 향상의 결과를 보였다.

따라서 이러한 연구 결과를 바탕으로 CNT 코팅 유리섬

유를 이용하여 복합재 블레이드에 적용할 경우, 레이더 신호간섭 문제, 무게 증가 문제, 구조적 건전성 부족 문제를 보완할 수 있을 것이라 결론 내릴 수 있다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소의 연구비 지원으로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사 드립니다. 본 논문은 산업통상자원부 산업소재핵심기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(반응증합을 이용한 자동차용 열가소성 탄소섬유 복합소재/공정 및 이를 활용한 센터플로어 차체 구조의 전주기 개발, 10052724).

REFERENCES

1. Sawin, J.L., Seyboth, K., and Sverrisson, F., *Renewables 2016: Global Status Report*, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France, 2016.
2. Vega, D.D.L., Matthews, J.C.G., Norin, L., and Angulo, I., "Mitigation Techniques to Reduce the Impact of Wind Turbines on Radar Services," *Energies*, Vol. 6, 2013, pp. 2859-2873.
3. Brøndsted, P., Lilholt, H., and Lystrup, A., "Composite Materials for Wind Power Turbine Blades," *Annual Review of Materials Research*, Vol. 35, 2005, pp. 505-538.
4. Caithness Windfarm Information Forum, *Summary of Wind Turbine Accident Data to September 2016*, www.caithnesswindfarms.co.uk., 2016.
5. Kim, J., and Lim, D., "Reduction of Radar Interference – Stealth Wind Blade Structure with Carbon Nanocomposite Sheets," *Wind Energy*, Vol. 17, No. 3, 2014, pp. 451-460.
6. Jang, H.K., Choi, W.H., Kim, C.G., Kim, J.B., and Lim, D.W., "Manufacture and Characterization of Stealth Wind Turbine Blade with Periodic Patterns Surface for Reducing Radar Interference," *Composites: Part B*, Vol. 56, 2014, pp. 178-183.
7. Loos, M., Yang, J., Feke, D., and Manas-Zloczower, I., "Carbon Nanotube-reinforced Epoxy Composites for Wind Turbine Blades," *Society of Plastics Engineers*, Plastics Research Online, 2012.
8. Qian, H., Greenhalgh, E.S., Shaffer, M.S.P., and Bismarck, A., "Carbon Nanotube-based Hierarchical Composites: A Review," *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 20, 2010, pp. 4751-4762.
9. Gojny, F.H., Wichmann, M.H.G., Köpke, U., Fiedler, B., and Schulte, K., "Carbon Nanotube-reinforced Epoxy-composites: Enhanced Stiffness and Fracture Toughness at Low Nanotube Content," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, 2004, pp. 2363-2371.
10. Kwon, D.J., Shin, P.S., Kim, J.H., Lee, H.I., Park, J.K., and Park, J.M., "Effects of Solvents-based Dilution Condition on CNT Dispersion in CNT/Epoxy Composites," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 29, No. 4, 2016, pp. 125-131.
11. Shin, J.H., Jang, H.K., Choi, W.H., Song, T.H., Kim, C.G., and Lee, W.Y., "Numerical Analysis of the Complex Permittivity of MWNT added Epoxy Depending on Agglomeration Size," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 27, No. 5, 2014, pp. 190-195.
12. Jung, B.M., Yoon, S.H., Jang, H.K., and Kim, K.D., "Carbon Nanotube Coated Glass Fiber using Ionic Interaction and Their Thermoplastic Composites," *Proceeding of 18th International Conference on Composite Structures*, Lisbon, Portugal, Jun. 2015.
13. Yoon, S.H., Kim, K.D., Jang, H.K., and Jung, B.M., "An Investigation on Mechanical Properties Improvement and Manufacturing Process Technology Development of Thermoplastic Composite using the CNT," *Proceeding of Advances in Mechanics of Composite Materials and Structures*, Seoul, Korea, Oct. 2015.
14. Vinoy, K.J., *Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, USA, 1996.
15. Kim, J.B., Lee, S.K., and Kim, C.G., "A Study on Carbon Nano Materials as Conductive Fillers for Microwave Absorbers," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 19, No. 5, 2006, pp. 28-33.