



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

탄소나노튜브를 이용한 풍력발전기
블레이드 코팅제 제조 및 특성

濟州大學校 大學院

에너지 化學工學 專攻

金 恩 智

2019年 2月

탄소나노튜브를 이용한 풍력발전기 블레이드 코팅제 제조 및 특성

指導教授 睦 英 善

金 恩 智

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2018 年 12月

金恩智의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長	이 상 백	
委 員	황 기 식	
委 員	문 여 선	

濟州大學校 大學院

2018 年 12月



Fabrication and Characteristics of Wind Power Blade Coating Agent Using Carbon Nanotube

Eun Ji Kim

(Supervised by professor Young Sun Mok)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Master of Engineering

2018 . 12 .

This thesis has been examined and approved.

Young Sun Mok

Thesis director, Young Sun Mok, Prof. of Energy & Chemical Engineering

이 상 백

Professor Sang Back Lee of Energy & Chemical Engineering

Dr. Kyo Sik Hwang of Korea Institute of Energy Research

December 5th 2018

Date

Department of Energy & Chemical Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
SUMMARY	vi
I. 서 론	1
II. 연구동향	3
III. 이론적 배경	5
1. 표면 코팅	5
2. 풍력터빈 블레이드의 코팅	7
3. 탄소나노튜브	8
IV. 연구방법	13
1. 탄소나노튜브 코팅제 제조 및 코팅 방법	13
1.1 탄소나노입자의 선택	13
1.2 합성 접착제의 선택	13
1.3 탄소나노튜브 코팅제의 제조	14
1.4 시편 제작 방법	16
2. 표면 특성 분석 장비	17
2.1 접촉각 측정 장비	17
2.2 SEM 표면 분석 장비	19
2.3 표면 거칠기 특성 분석 장비	21
V. 실험결과 및 고찰	23

1. 접촉각 측정 결과	23
2. SEM 표면 측정 결과	32
3. 표면 거칠기 측정 결과	39
VI. 결론	45
참고문헌	47

LIST OF FIGURES

Fig. 1 (a) Armchair, (b) zigzag carbon nanotube	9
Fig. 2 Type and structure of carbon nanotube	10
Fig. 3 Carbon nanotube coating method	16
Fig. 4 Contact angle meter and measuring method	17
Fig. 5 Field-emission scanning electron microscope	19
Fig. 6 3D nano profiling system	21
Fig. 7 Contact angle measurement results of CNT coating surface based on pure water	24
Fig. 8 Contact angle of CNT coating surface based on pure water	25
Fig. 9 Contact angle measurement results of CNT coating surface based on PVA	27
Fig. 10 Contact angle of CNT coating surface based on PVA	28
Fig. 11 Contact angle measurement results of CNT coating surface based on epoxy resin	30
Fig. 12 Contact angle of CNT coating surface based on epoxy resin	31
Fig. 13 SEM measurement results of CNT coating surface based on pure water	33
Fig. 14 SEM measurement results of CNT coating surface based on PVA	35
Fig. 15 SEM measurement results of CNT coating surface based on epoxy resin	37
Fig. 16 SEM measurement results of non-coation and wear prevention film	38
Fig. 17 Roughness measurement results of CNT coating surface based on pure water	40
Fig. 18 Roughness measurement results of CNT coating surface based on PVA	

..... 42

Fig. 19 Roughness measurement results of CNT coating surface based on epoxy resin 44

LIST OF TABLES

Table 1. Coating recording to classification	5
Table 2. Types and characteristics of wind turbine blade coating film	8
Table 3. Properties of carbon nanotubes	11
Table 4. Types and characteristics of CNT	13
Table 5. Types and Characteristics of adhesive	13
Table 6. CNT Coating based on pure water	14
Table 7. CNT Coating based on PVA	15
Table 8. CNT Coating based on epoxy resin	15
Table 9. Specification of contact angle meter	18
Table 10. Specification of field-emission scanning electron microscope	20
Table 11. Specification of 3D nano profiling system	22
Table 12. Contact angle measurement results of CNT coating surface based on pure water	24
Table 13. Contact angle measurement results of CNT coating surface based on PVA	27
Table 14. Contact angle measurement results of CNT coating surface based on epoxy resin	30
Table 15. Roughness measurement results of CNT coating surface based on pure water	40
Table 16. Roughness measurement results of CNT coating surface based on PVA	41
Table 17. Roughness measurement results of CNT coating surface based on epoxy resin	43

Summary

Electrical energy is an important energy source in the present age. In the past, fossil fuels such as coal and petroleum were used, but recently, efforts are being made to increase the use of renewable energy such as wind power and solar power. Wind power is one of the fastest growing areas of renewable energy. As wind turbines become more diversified and larger, blades are also getting heavier and lengthening. Therefore, researches for solving the problem of the wind turbines due to the enlargement are continuing. Especially, surface characteristics such as surface roughness and surface condition of wind turbine blades have been studied on the amount of wind power generation and O&M(Operation & Maintenance) period.

Nano coating is a coating using nano material. It is used in many fields such as automobile, aerospace, medical and the like, because it has excellent hardness and abrasion resistance. Among various nano materials, carbon nanotubes have excellent electrical, thermal and mechanical properties, and research is ongoing to apply them.

Therefore, in this study, It investigated of the effects on the coating surface as the particle size of carbon nanotube, mixing ratio, type of adhesive. For compared and analyzed of carbon nanotube coating surface characteristics such as contact angle and roughness, three types of carbon nanotubes of different sizes were used. In order to confirm the effect of adhesive on the carbon nanotube coating and the coating surface, distilled water, PVA, and epoxy resin were used.

Contact angle, SEM, surface roughness measurement experimental result, the best coating was identified as an epoxy resin based on carbon nanotube coating. Therefore, it is considered that carbon nanotube coating based on on epoxy resin is most suitable for coating of wind turbine blades.

I. 서 론

전기에너지는 현 시대에서 없어서는 안 될 필수적이며 중요한 에너지원이다. 이와 같은 전기에너지를 안정적이고 지속적으로 생산하기 위해 이산화탄소의 발생량이 적고, 친환경적인 신재생에너지의 도입과 확대에 노력을 기울이고 있다.

신재생에너지 중에서 풍력은 빠르게 성장하고 있는 분야이다. 2017년 기준으로 발전기의 형태가 다양화되고 대형화 및 대단지화 됨에 따른 무게 증가, 발전 효율 감소, 구조적 안전성 부족에 따른 유지보수(O&M, Operation & Maintenance) 비용 증가 등의 문제를 발생하고 있으며, 풍력터빈의 블레이드 고장으로 인한 사고 발생이 가장 많다고 발표하였다[장 등, 2016; Caithness Windfarm Information Forum, 2016].

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 연구가 지속되고 있다. 풍력터빈 블레이드의 표면거칠기, 표면상태와 같은 표면 특성이 풍력발전량 및 O&M 기간 등에 미치는 연구가 이루어 졌다.[김 등, 2011] 최근에는 블레이드 유리섬유를 탄소나노튜브로 코팅하여 블레이드의 표면 특성을 강화하고, 발전량을 증가시키기 위한 전자기적, 기계적 적용성에 대하여 연구가 이루어졌다[장 등, 2016].

나노코팅이란 나노소재를 이용한 코팅으로 우수한 경도, 내마모성이 우수한 특성 때문에 자동차, 우주항공, 의료 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 현재의 시장규모는 약 65억 600만 달러 규모의 시장이 형성되었으며, 2020년에는 81억 7천만 달러로 시장이 증가할 전망이다. 다양한 나노물질 중에서도 탄소나노튜브(CNT, Carbon Nanotube)는 전기적, 열적, 기계적 특성이 아주 우수하여 이를 응용하기 위한 연구가 진행되고 있다[남, 2005; 화학소재정보은행, 2016].

따라서 본 연구에서는 풍력터빈 블레이드의 전연부 손상을 줄이고, 블레이드

표면특성 강화 및 유지보수의 용이성을 위하여 탄소나노튜브를 이용한 나노 코팅제를 제조하고, 분사코팅 방법으로 분사된 코팅 표면의 특성 분석 연구를 수행하였다.

탄소나노튜브 입자의 크기가 코팅 표면에 미치는 영향을 파악하기 위하여 입자의 크기가 서로 다른 3종류의 탄소나노튜브를 사용하였으며, 코팅제 제조에 사용되는 접착제 영향을 확인하기 위하여, 증류수, PVA, Epoxy resin 3종류의 접착제를 사용하였다.

입자의 크기가 다른 3종류의 탄소나노튜브는 1wt%, 2wt%, 3wt%의 혼합비율로 증류수, PVA, Epoxy resin과 각각 혼합하여 탄소나노튜브 코팅제를 제조하였으며, 이를 유리시편에 코팅한 후 코팅된 표면의 접촉각, 거칠기와 같은 표면 특성을 비교분석하여, 탄소나노튜브 입자의 크기, 혼합비율, 접착제의 종류가 코팅제와 코팅 표면에 미치는 영향을 파악하였다.

II. 연구동향

1. 연구동향

1.1 풍력터빈 블레이드 연구동향

풍력터빈의 대형화에 따라 블레이드의 길이가 길어지고 무게가 무거워지는 경향이 생기기 시작했다. 이에 따라 블레이드의 무게를 감소시켜 하중에 미치는 영향을 줄이기 위한 연구가 지속적으로 연구되고 있다.

장 등은 풍력터빈 블레이드의 기계적, 전자기적 성능 강화를 위해 CNT 코팅 및 유리섬유의 적용성에 대하여 연구하였다. MW급 이상의 대형 복합재 블레이드의 위치선정 제약과 무게 증가에 따른 발전 효율 저해, 수리비용 증가 등의 당면 과제를 극복하기 위하여 탄소나노튜브 코팅 유리섬유를 제안하였다[장 등, 2016].

1.2 나노코팅 연구동향

우수한 기계적 특성과 열적 특성을 갖고 있는 탄소나노튜브를 코팅에 이용하고자 하는 연구는 많이 이루어 졌다. 초기에는 열적특성을 증가시키기 위한 연구가 주를 이루었으나 최근에는 기계적 특성을 이용한 코팅제 연구가 주를 이루어 기계의 강도, 내열성, 전기적 특성 등을 증가시키기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다[Barber 등, 2011].

권 등은 나노입자를 섬유 표면에 도포하여 나노입자 형상에 따른 영향을 분석하였다. 유리섬유를 나노입자로 코팅 후 내구성 평가를 위하여 동적 피로 실험을 1mm의 신율조건으로 분당 0.5mm의 속도로 1,000회 수행한 결과, 탄소나노튜브

브를 이용한 나노입자 코팅층의 내구성이 훨씬 뛰어나다는 것을 확인하였다. CNT를 이용한 나노입자 코팅이 유리섬유의 표면 강도와 내구성 향상에 도움을 주는 것으로 보고하였다[권 등, 2014].

전 등은 열전달 효과를 향상시키기 위해 열전달 시스템에 탄소나노튜브를 코팅하여 열전달 계수변화와 TEOS, PVA, DBEBF 3가지 접착제 종류에 따른 표면 상태를 분석하였다. 연구결과, 열전달계수가 증가하여 나노코팅 된표면이 열전달 성능을 높일 수 있는 것을 확인하였다. 또한 접착제 도포 후 내구성 분석 결과 PVA 접착제가 가장 적합한 것으로 확인하였다. 이외에도 구 등은 탄소나노튜브로 강화된 에폭시 복합재료의 기계적 물성과 열팽창 계수 측정 결과, 탄소나노튜브가 적절히 분산되었음을 확인하고 강도와 영률 측정결과도 안정적인 것을 확인하였다[구 등, 2013; 전 등, 2017].

또한 탄소나노튜브(CNT)의 분산성 향상을 위해 최적의 분산 방법 및 첨가제를 개발하기 위한 연구가 지속되고 있다. 권 등은 용매를 이용한 희석 조건이 분산도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그 결과, 혼합 공정에 따라 분산도가 달라지는 것을 확인하였으며, 탄소나노튜브 에폭시 수지를 제조할 경우 희석시킨 후 분산하는 것이 분산도에 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인하였다[권 등, 2016]. 김 등은 CNT 합성 조건을 달리하여 하이브리드 코팅막을 제조하고 그 특성을 연구한 결과 탄소나노튜브가 첨가된 코팅막이 우수한 내오존성, 접착력 및 강한 표면경도를 나타낸 것을 확인하였다[김 등, 2014].

나노코팅에 사용되는 접착제의 종류로 실란계 바인더, PVA, 에폭시로 나눌 수 있으며 실란계 바인더에는 TEOS(Tetraethyl orthosilicate), MTMS(Methyltrimethoxysilane), VTMS(Vinyltrimethoxysilane), PTMS(Phenyltrimethoxysilane)가 있다. 실란계 바인더와 탄소나노튜브를 혼합한 용액을 스프레이 코팅법으로 코팅 한 후 도포된 시료를 비교 결과, 바인더에 의해 형성된 표면 기능화가 친수성 혹은 소수성의 영향을 받는 사실을 확인하였다. [김, 2010]

Ⅲ. 이론적 배경

1. 표면 코팅

1.1 코팅의 정의

코팅이란 일반적으로 물체 표면을 부식, 변질 등의 표면 유해 현상을 방지하여 제품의 수명연장 혹은 미장기능을 높여주기 위한 것이다. 코팅의 종류는 물체 표면을 보호하고자 하는 목적에 따라 항균코팅, UV 코팅, 발수코팅, 내마모 방지 코팅과 내부식 방지 코팅 등으로 나눌 수 있으며 코팅의 기능에 따라 종류를 구분할 수 있다. 아래 Tabel 1.에서는 코팅의 분류에 따른 코팅의 종류에 대하여 나열하였다[코팅기술의 현재와 미래, 2017].

최근에는 나노입자의 발달로 인하여 나노입자를 활용한 나노코팅에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 나노코팅이란 재료의 표면에 나노 두께의 얇은 막을 씌워 표면을 질을 향상시키는 것으로 표면의 강도 및 경도를 증가시킬 수 있으며 물체에 내식성, 내마모성, 내열성과 단열성 등의 기능을 추가할 수 있다[나노 융합산업협력기구, 2015; 박, 2018].

Tabel 1. Coating recording to classification

분야	분류	코팅 종류
기능성 코팅	친환경 코팅	UV코팅, NAD 코팅, 천연소재 배합코팅, VOC-free코팅, 분체코팅, 환경정화형 코팅, 저오염 중방식 코팅
	세라믹 코팅	내열코팅, 결로방지 코팅, 이형코팅, 부착방지 코팅, 세라믹 윤화로팅, 불연/난연 코팅, 오염방지 코팅
	광 및 열적기능 코팅	형광코팅, 측광코팅, 절연코팅, 전자파차폐 코팅, UV 경화코팅, 내열코팅, 방열코팅, 반사코팅, 대전방지 코팅, EMI/EMC 코팅
	물리화학 적 코팅	자기마모형(SPC)코팅, 하이솔리드코팅, 초후막코팅, 선저 방호 코팅, 고내후성코팅, 제진코팅, 자가 수복 코팅, 수중경화 코팅

[출처 : 중소기업 전략 기술 로드맵, 2015]

1.2 코팅방법

코팅 방식으로는 딥핑(Dipping), 스프레이(Spray), 플라즈마 공정 등이 있다 [박 등, 2015]. 딥핑 코팅은 액상 코팅제에 장치 및 부품을 담가서 끌어올림으로써 코팅하는 것으로 코팅제의 손실을 줄일 수 있지만 막의 두께나 형상을 제어하기 어렵다[전자용어사전, 1995]. 스프레이 코팅의 경우 스프레이건을 사용하여 압축공기 또는 압송에 의해 코팅제를 안개 상태로 분무하는 것이며 나노박막 코팅, 우레탄, 페인트 및 플라스틱 코팅 시 많이 사용된다. 붓을 사용하는 코팅 방법을 페인트 브러싱(Paint brushing)이라고 하며 요구되는 막 두께의 균일성을 요구하지 않는 곳에 주로 사용된다. 닥터 블레이드(Doctor blade) 코팅은 얇고 넓은 시트를 만들 때 사용하는 방법으로 스프레이 코팅보다 정밀한 두께의 막을 얻을 수 있지만 박막은 얻을 수 없고, 스프레이 코팅 장비보다 비싸다는 단점이 있다. 스핀 코팅(Spin coating)의 경우 회전하는 원판에 코팅하려는 물체를 고정하여 코팅제를 중앙에 떨어뜨려 원심력으로 코팅제가 퍼져나가며 막이 형성되는 방법이며 막의 두께는 코팅제의 점도와 회전판의 속도에 따라 상이하다[Arirang chemical].

1.3 코팅의 주요 특성

(1) 광학특성

광학 특성은 불투명도, 기질을 숨길 수 있는 능력, 색깔, 특정 파장을 반사하고 흡수하는 능력과 광택, 빛의 직접 반사하는 능력이 주요 특징이며 광학 성능은 주로 눈에 의해 감지된다.

(2) 열적/기계적 특성 및 접착력

코팅이 기계적 및 열적으로 반응하는 방식 응력은 코팅 필름 중요한 부분이며, 주로 고려되는 특성은 경도, 탄성 계수, 유리 전이 온도, 인성 및 내마모성이다. 기질에 대한 접착력은 유기 코팅에 특정한 특성이며 접착 메커니즘은 잘 이해되거나 특성이 없다.

(3) 외부내구성

내구성은 코팅의 특수 성능이며 화학 및 부식 방지의 여러 측면을 포함하지만 일반적으로 태양 복사에 대한 내성과 보호를 말한다. 천연 고분자 기재 및 합성 고분자는 손상을 입기 쉽고 지속적인 햇빛 노출에 분해되며 근자외선 및 청색 단부의 방사선은 많은 유형의 중합체 내에서 화학 결합을 파괴 할 수 있는 충분한 에너지를 함유하기 때문에 발생한다. 방사선에 의한 분해가 발생함에 따라, 코팅이 화학적 및 부식 방지를 제공하는 능력 또한 저하되고, 이러한 열화는 코팅 박리뿐만 아니라 코팅의 백킹(chalking)을 포함 할 수 있다. 자동차, 도로 표지판, 주택, 항공기 및 상업용 건물의 외부 표면은 햇빛에 의한 부식의 위험이 있기 때문에 코팅을 통해 태양 복사에 대한 내부 보호가 포함되어 있다 [ENCYCLOP/EDIA GRITANNICA].

2. 풍력터빈 블레이드의 코팅

풍력터빈 블레이드 코팅은 해외 제품 중 크게 3가지로 나눌 수 있다. 해당 제품에 대한 정보는 Table 2.에 나와 있다. 3M사의 경우 풍력터빈 블레이드에 사용되는 제품은 폴리우레탄 소재로 만들어진 필름이며 내마모성과 UV 차단 기능이 있다. 또한 Tesa에서 나온 제품은 PU 필름이며 견고성, 내마모성과 풍화방지 기능이 있으며, 투명 재질로 되어 있다. 이러한 코팅 필름들은 풍력터빈 블레이드 적용 시 블레이드의 두께가 두꺼워 지고 가격이 높다는 단점을 가지고 있어 국내 풍력터빈 블레이드에서는 코팅 필름을 사용하지 않는 경향이 있다.

Table 2. Types and characteristics of wind turbine blade coating film

종류	특성
3M사	<ul style="list-style-type: none"> • Material : 폴리우레탄 • Function : 내마모성, UV차단
Tesa 사	<ul style="list-style-type: none"> • Material : PU테이프 • Function : 견고성, 내마모성, 투명재질, 풍화 방지 기능
Parafix 사	<ul style="list-style-type: none"> • Material : 단일 코팅 필름 • Form width : 25mma±0.5mm • Thickness : PVC/Pu foam ± 10%(0.8mm:-15% to +20%)

[출처 : <http://parafix.com>, <http://tesa.com>, <http://www.3m.com>]

3. 탄소나노튜브

3.1 탄소나노튜브의 정의

1985년에 H.W. Kroto and R.E. Smalley가 탄소의 동소체(allotrope)의 하나인 풀러렌(fullerene : C₆₀)을 처음으로 발견한 이후, 1991년 새로운 물질을 연구하던 일본 NEC 부설연구소에 속한 Iijima 박사가 전기방전법(arc-discharge)을 사용하여 흑연 음극상에 형성 시킨 탄소덩어리를 투과전자현미경으로 (TEM, Transmission Electron Mricoscopy) 분석하는 과정에서 가늘고 긴 대롱 모양의 탄소나노튜브를 발견하여 Nature지에 처음으로 발표하였다. 이때 성장된 탄소나노튜브의 길이는 수십 nm ~ 수 μm이었고, 외경은 2.5 ~ 30 nm이었다. 탄소나노튜브에서 하나의 탄소원자는 3개의 다른 탄소원자와 SP² 결합의 육각형 벌집형태를 이루고 있다. 이 튜브의 직경이 대략 수nm 정도로 극히 작기 때문에 나노튜브라고 부르게 되었다[남, 2005].



(a) Armchair NT

(b) Zigzag NT

Fig. 1 (a) Armchair, (b) zigzag carbon nanotube.

3.2 탄소나노튜브의 구조

탄소나노튜브는 흑연면이 나노 크기의 직경으로 둥글게 말린 형태를 가지며, 탄소 원자로 구성된 육각형 모양의 SP^2 결합구조를 가진다. SP^2 결합구조를 가지고 오각형의 결합에 의해서 닫힌 구조를 가지는 튜브 모양의 탄소결합체로서 직경은 나노미터 단위이며 길이는 마이크로미터 단위로 매우 큰 면 비율을 가진다. 흑연면이 말리는 각도 및 구조에 따라 도체 및 반도체의 특성을 보인다.

탄소나노튜브는 결합수에 따라 직경이 0.5 ~ 3 nm인 단일벽 탄소나노튜브(SWCNT, Single Wall Carbon NanoTube)와 직경이 5 ~ 100 nm에 이르는 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT, Multi-Walled Carbon NanoTube), 다발형 탄소나노튜브(Rope Carbon NanoTube)로 분류된다[박, 2014].

단일벽 탄소나노튜브의 구조는 높은 비대칭성을 갖는 2가지 구조인 암체어(Arm-chair), 지그재그(Zig-zag)로 대칭구조가 가능하다. 그러나 대부분 대칭구조를 갖는 대신 벌집 모양의 육각형 튜브 축을 따라 나선형으로 배열된 키랄(Chiral)구조를 갖는다. 암체어 타입인 경우 도체의 성질을 가지고 있으며, 지그재그, 키랄 타입인 경우에는 반도체의 성질을 갖는다. 다중벽 탄소나노튜브는 모두 도체의 성질을 지니고 있으며, 다발 형태인 탄소나노튜브는 반도체의 성질을 지닌다. Fig. 4는 암체어와 지그재그 나노튜브의 구조이다[Krupke 등, 2003; 남, 2005; 이, 2005].

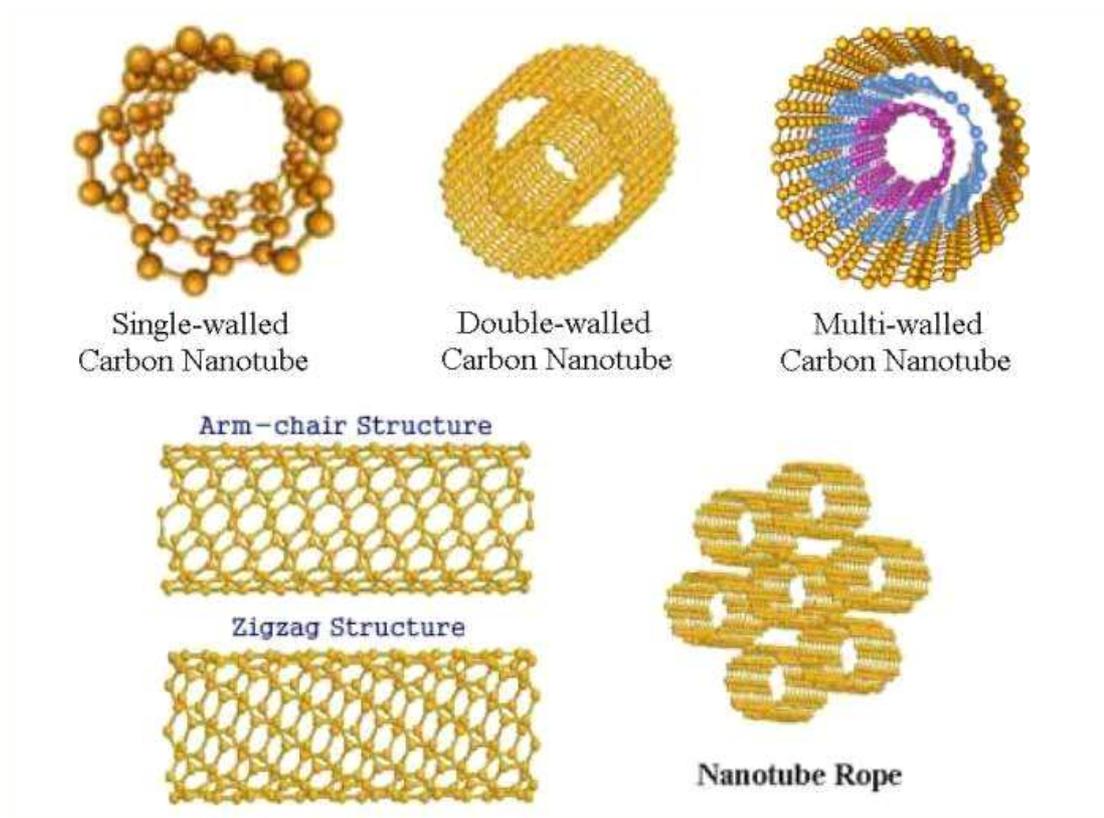


Fig. 2 Type and structure of carbon nanotube.

[출처 : 고려대학교 나노튜브 및 나노소자 연구실]

3.3 탄소나노튜브의 특성 및 물성

탄소나노튜브는 나노크기의 흑연면이 실린더 구조로 둥글게 말린 형태를 가지고 있으며, 크기나 형태에 따라 독특한 물리적 성질을 가지는 거대분자(Macromolecule)이다. 탄소나노튜브의 독특한 전기적 특성은 1차원적 구조와 흑연 고유의 전기적 구조에 기인하며 매우 낮은 전기적 저항 값을 나타낸다. 단일벽 탄소나노튜브의 경우 저항 값은 1/100에 불과하며 전류수송능력은 구리의 1,000배에 이른다. 기계적 물성 측면에서 탄소나노튜브는 구조적으로 탄소-탄소간의 강한 결합을 이루고 있음에 따라 매우 높은 강성과 강도를 나타낸다. 탄소나노튜브의 기계적 물성에 대한 다수의 연구결과, 탄소나노튜브의 영률은 5.5 TPa에 이르며

인장강도는 100 GPa에 이르는 것으로 보고되고 있다. 이는 고강도 합금의 영률이 200 GPa, 인장강도 1 ~ 2 GPa인 것과 비교하여 매우 높은 기계적 물성을 나타내는 것이다. 또한 탄소나노튜브의 열전도도는 지금까지 알려진 최고의 열전도체인 다이아몬드 보다 두 배나 큰 열전도도를 나타낸다. Table 3.에 SWCNT와 MWCNT의 특성을 비교하여 나타내었다[박, 2014].

Table 3. Properties of carbon nanotubes

Property	SWCNT	MWCNT
Diameter(nm)	0.5 ~ 3.0	5 ~ 100
Length(μm)	5 ~ 20	10 ~ 20
Tensile strength(GPa)	~ 100	< 50
Young's Modulus(TPa)	5.5	0.4 ~ 3.7
Bulk density(g/cc)	0.01 ~ 0.03	0.1
Tube density(g/cc)	1.33 ~ 1.4	1.4 ~ 2.6
Resistivity($\Omega \cdot \text{cm}$)	1.0×10^{-4}	$5.1 \times 10^{-4} \sim 5.86$
Current density(A/cm^2)	~ 10^9	-
Field emission, Turn-on Voltage($\text{V}/\mu\text{m}$)	0.7 ~ 2	1 ~ 5
Thermal conductivity($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	Max. 6000	Max. 3000

(1) 기계적 성질

탄소나노튜브의 기계적 성질은 보강재료로 이용할 때 중요하다. SWCNT는 강철보다 10~100배 견고하고 물리적인 충격이 강하다고 보고되어 있다. 나노튜브는 강하면서도 튜브 끝에 힘을 가하면 손상 없이 구부러지다 힘을 제거하면 원래상태로 돌아가는 연성이 크다. 이 현상을 이론 및 실험적으로 측정하려는 다양한 연구가 있었지만 정량화 하는 것은 아주 어려운 알려졌다.

(2) 열적 성질

탄소나노튜브의 열전도도는 온도와 phonon의 평균자유경로에 의존한다. Hone 등은 1999년 탄소나노튜브의 열전도도가 온도에 일차적인 관계식을 가짐을 발표했다. 7~25K의 온도범위에서는 직선관계이고, 25~40K의 범위에서는 직선의 기울기가 증가하였다. 이러한 선형적 열적특성은 탄소나노튜브가 다양한 분야에서 응용되는 밑받침이 되었다.

(3) 전기적 성질

탄소나노튜브의 특성 중 가장 큰 장점은 전도성을 갖고 있다는 것이다. Frank는 1998년 SPM(Scanning Probing Microscopy)을 이용하여 수은 액체상에서 전도성을 측정하였다. 여기에서 탄소나노튜브는 양자거동을 보이면서 획기적인 전도성을 가진다고 보고되었다. 이후에도 Scattering 기법을 이용하여 MWCNT의 전기 전도성이 측정되어 Frank의 주장이 재확인 되었다[남, 2005].

IV. 연구방법

1. 탄소나노튜브 코팅제 제조 및 코팅 방법

1.1 탄소나노튜브 입자의 선택

탄소나노튜브 입자 크기에 따른 코팅 표면 특성 분석과 코팅시 가장 높은 성능을 나타내는 최적의 탄소나노튜브 입자 선정을 위하여 길이(0.5~2 μ m)와 순도(95%)는 동일하지만 직경이 서로 다른 3종류의 다중벽 탄소나노튜브를 선별하였다. Table.4는 본 연구에 사용된 다중벽 탄소나노튜브의 주요 물성치를 나타낸 표이다.

Table 4. Types and characteristics of CNT

종 류	diameter	Length	Purity
다중벽 탄소나노튜브 MWCNT A	<8nm	0.5-2 μ m	95%
다중벽 탄소나노튜브 MWCNT B	10-20nm	0.5-2 μ m	95%
다중벽 탄소나노튜브 MWCNT C	20-30nm	0.5-2 μ m	95%

1.2 합성 접착제의 선택

탄소나노튜브 코팅 시 첨가되는 접착제의 종류에 따른 블레이드 표면 코팅의 특성 변화를 확인하기 위하여 2종류의 접착제를 선별하였으며, Table 5.에 본 연구에 사용 된 접착제의 특성을 나타내었다.

Table 5. Types and characteristics of adhesive

종 류	특 성
PVA(Poly Vinyl Alcohol)	Mw 146,000-186,000, 99+% hydrolyzed
Epoxy resin	viscosity 1000 centipoise (cp) at 72 F (22C).

1.3 탄소나노튜브 코팅제의 제조

풍력 발전기 블레이드 코팅에 사용하기 적합한 탄소나노튜브 코팅제를 확인하기 위하여 증류수, PVA, Epoxy resin을 기반으로 탄소나노튜브 입자크기에 따른 탄소나노튜브 코팅제를 총 27가지 제조하였다. 코팅제 제조 전 선행연구에서 탄소나노튜브 입자가 기본유체 내에서 분산성이 떨어지는 현상이 발생함을 확인하였으며, 이와 같은 탄소나노튜브 입자의 분산성이 떨어지는 현상을 감소시키기 위하여 제조되는 모든 탄소나노튜브 코팅제에 추가적으로 PVP(Poly Vinyl Pyrrolidone)를 혼합하여 제조하였다[서 등, 2010].

본 연구에서는 탄소나노튜브 코팅제 제조를 위해 직경이 다른 3종류의 탄소나노튜브를 혼합비율(1wt.%, 2wt.%, 3wt.%)과 2가지의 접착제에 따라 제조되었으며, 초음파 분산을 통하여 총 27 종류의 탄소나노튜브 코팅제를 제조하였다. Table 6, Table 7, Table 8,은 입자 크기별 탄소나노튜브와 혼합비율에 따라 코팅제를 제조한 방법이다.

Table 6. CNT Coating based on pure water

순번	혼합비율	MWCNT A (<8nm)	MWCNT B (10~20nm)	MWCNT C (20~30nm)
1	1wt%	증류수 500g + MWCNT A 5.05g + PVP 5.05g	증류수 500g + MWCNT A 10.20g + PVP 10.20g	증류수 500g + MWCNT A 15.46g + PVP 15.46g
2	2wt%	증류수 500g + MWCNT B 5.05g + PVP 5.05g	증류수 500g + MWCNT B 10.20g + PVP 10.20g	증류수 500g + MWCNT B 15.46g + PVP 15.46g
3	3wt%	증류수 500g + MWCNT C 5.05g + PVP 5.05g	증류수 500g + MWCNT C 10.20g + PVP 10.20g	증류수 500g + MWCNT C 15.46g + PVP 15.46g

Table 7. CNT Coating based on PVA

순번	혼합비율	MWCNT A (<8nm)	MWCNT B (10~20nm)	MWCNT C (20~30nm)
1	1wt%	증류수 500g + MWCNT A 5.05g + PVP 5.05g + PVA 10.20g	증류수 500g + MWCNT B 5.05g + PVP 5.05g + PVA 10.20g	증류수 500g + MWCNT C 5.05g + PVP 5.05g + PVA 10.20g
2	2wt%	증류수 500g + MWCNT A 10.20g + PVP 10.20g + PVA 10.20g	증류수 500g + MWCNT B 10.20g + PVP 10.20g + PVA 10.20g	증류수 500g + MWCNT C 10.20g + PVP 10.20g + PVA 10.20g
3	3wt%	증류수 500g + MWCNT A 15.46g + PVP 15.46g + PVA 10.20g	증류수 500g + MWCNT B 15.46g + PVP 15.46g + PVA 10.20g	증류수 500g + MWCNT C 15.46g + PVP 15.46g + PVA 10.20g

Table 8. CNT Coating based on Epoxy resin

순번	혼합비율	MWCNT A (<8nm)	MWCNT B (10~20nm)	MWCNT C (20~30nm)
1	1wt%	에폭시레진 500g + MWCNT A 5.05g + PVP 5.05g +	에폭시레진 500g + MWCNT B 5.05g + PVP 5.05g +	에폭시레진 500g + MWCNT C 5.05g + PVP 5.05g +
2	2wt%	에폭시레진 500g + MWCNT A 10.20g + PVP 10.20g +	에폭시레진 500g + MWCNT B 10.20g + PVP 10.20g +	에폭시레진 500g + MWCNT C 10.20g + PVP 10.20g +
3	3wt%	에폭시레진 500g + MWCNT A 15.46g + PVP 15.46g +	에폭시레진 500g + MWCNT B 15.46g + PVP 15.46g +	에폭시레진 500g + MWCNT C 15.46g + PVP 15.46g +

1.4 시편 제작 방법

유체초음파 분산으로 제조된 총 27개의 탄소나노튜브 코팅제를 유리시편에 고르게 분사하여 12시간동안 자연건조시켜 시편을 제작하였다. 충분히 건조된 Non Coating 유리시편과 Non-coating, 타사의 보호 필름이 코팅된 시편을 제작하여 각각의 접촉각, 거칠기를 비교 분석하였다. Fig. 3은 탄소나노튜브 코팅 방법을 나타내었다.

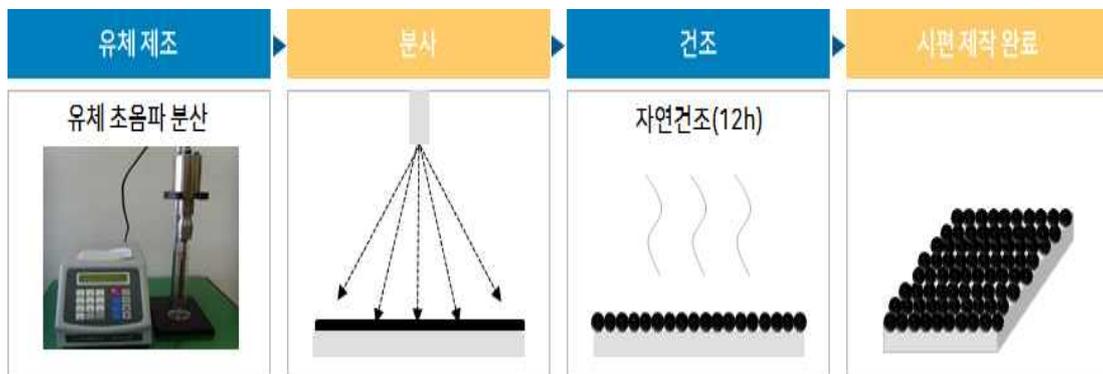


Fig. 3 Carbon nanotube coating method.

2. 표면 특성 분석 장비

2.1 접촉각 측정 장비

탄소나노튜브 코팅 표면의 접촉각 특성을 분석하기 위하여 접촉각 측정기 (Phoenix 300, SEO)를 이용하였다. 접촉각은 표면 젖음성을 나타내며, 낮은 접촉각은 높은 젖음성(친수성, hydrophilic)과 높은 표면에너지를 나타내고, 높은 접촉각은 낮은 젖음성(소수성, hydrophobic)과 낮은 표면에너지를 나타낸다.

탄소나노튜브 코팅 표면의 접촉각 측정은 접촉각 측정기를 이용하여 3 μ l의 물을 코팅 시편 표면에 떨어뜨려 물의 접합점에서 물방울의 끝점과 표면의 접촉점에서 측정하며, 정접촉각을 측정 하였다. 접촉각 측정 실험에서는 탄소나노튜브가 코팅된 총 27개의 시편과 Non-코팅 시편, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편의 표면 젖음성을 측정하고 비교분석하였으며, Fig.4은 본 연구에 사용된 접촉각 측정기와 접촉각 측정방법이며, 장비 사양은 Tabel.9에 나타내었다.

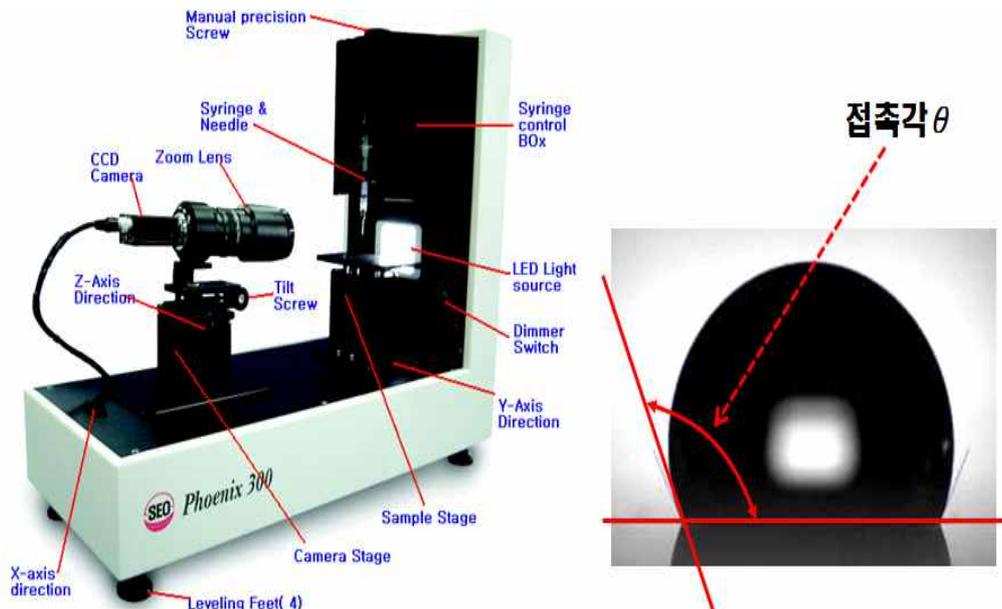


Fig. 4 Contact angle meter and measuring method.

Table 9. Specification of contact angle meter

번호	사양
1	샘플 사이즈 : 200(W) x 50 mm(H) x ∞(D)
2	수동/반자동/자동/터치 drop 컨트롤 시스템
3	자동 표면 터치
4	열평형의 3 상을 자동으로 캡처
5	위치 기억 기능
6	결과 데이터 비교 기능 / 곡선 표면 샘플 측정 기능 / 기준선 설정 기능
7	0.1 μ l 당 정확한 구동 물방울 볼륨 조절 (유리 주사기 구동을 이용)
8	진화된 on e drop 기능 (초소수성 재료에 사용)
9	Trigger 기능
10	12x Zoom 렌즈, USB 디지털 CCD 카메라
11	카메라 해상도 (640X480) up to (1328x1048:Optional)
12	Frame rate: 70 frame/sec Up to 600FPS (Optional)
13	광원 : 백색 LED 모듈
14	접촉각 측정 범위 : 0-180 degree, 오차범위 \pm 0.1
15	Surfaceware9 software, 정적, 동적 접촉각 & 표면에너지, pendent drop 방법을 이용한 표면 장력 측정, 시간 base로 한 자동 캡처 기능 엑셀로 데이터 내보내기
16	주사기(3ml:10ea), Needle (30G,27G,22G:5ea/each) / 참조 사진 (30, 60, 120 \pm 0.6 deg)

2.2 SEM 표면 분석 장비

장방출주사전자현미경은 세포, 금속, 반도체, 폴리머, 코팅 표면 등의 표면 구조를 관찰할 수 있어 코팅된 표면이 어떠한 구조를 이루고 있는지 관찰할 수 있다.

3가지 탄소나노튜브 코팅제로 코팅된 코팅 표면의 상태를 분석하기 위하여 장방출주사전자현미경(FESEM, Field Emission Scanning Electron Microscope)을 이용하여 탄소나노튜브가 코팅된 27개의 시편과 Non-코팅 시편, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편의 표면을 1000배 확대하여 촬영 및 관찰하고, 비교분석 하였다. Fig. 5은 본 연구에 사용된 장방출주사전자현미경이며, 기기 사양은 Tabel 10에 나타내었다.



Fig. 5 Field-emission scanning electron microscope.

Table 10. Specification of field-emission scanning electron microscope

번호	구분	사양
1	Resolution	1.0nm guaranteed at 15KV
2	Magnification	25 to 650,000X
3	Image mode	SEI
4	Accelerating voltage	0.5 to 30KV
5	Electron gun type	Field emission gun with cold cathode

2.3 표면 거칠기 특성 분석 장비

코팅 표면의 거칠기 특성을 분석하기 위하여 삼차원나노형상측정시스템 (Nanoview NV2000, Nanosystem Co.)을 이용하여 코팅 표면의 거칠기 특성을 분석하였다. 삼차원나노형상측정시스템은 비접촉/비파괴 3차원 형상 측정시스템으로 Nanometer unit의 미세한 표면형상을 측정할 수 있으며, 표면 거칠기, 높이 정보, 휘어짐 정도를 나노/마이크로 패턴의 형상을 측정하는데 이용된다.

본 기기로 측정할 수 있는 표면 거칠기 값은 산술 평균 거칠기 (Roughness Average, Ra)로 정의되며, 측정 길이 또는 영역에 있어서 대표 값으로 해석된다. 일반적으로 μm , mil 단위로 표시되며, ANSI B46.1 표준 규약에 의거하여 계산된다. Ra는 일반적으로 기계 가공편의 표면 거칠기를 표현하는데 사용되는데 이 값은 전체 표면에서 일반적인 높이 변화를 표현하는데 유용하며, 특히 일반 가공 프로세서의 가공 특성을 관찰하는데 이용된다. 본 연구에 사용된 삼차원나노형상 측정시스템은 Fig. 6이며, 사양은 Table 11과 같다.

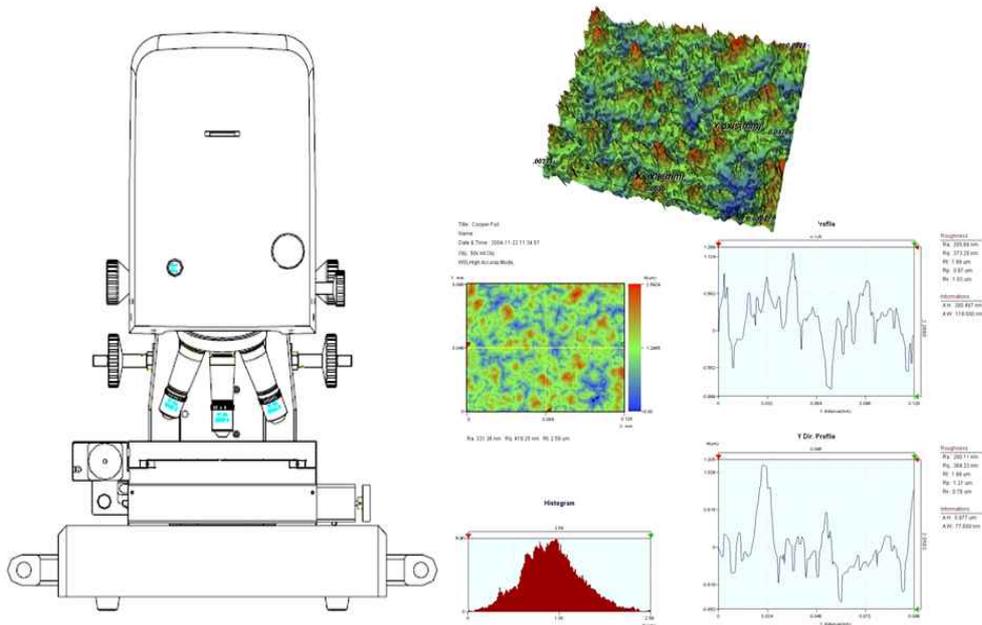


Fig. 6 3D nano profiling system.

Table 11. Specification of 3D nano profiling system

번호	구분	사양
1	Measurement Technology	Non-Contact White Light Scanning Interferometer System
2	Light Source	Stable Hight Power LED
3	Z resolution	< 0.1 nm with piezo-stage and capacity sensor
4	Z axis scan range	250um
5	Z repeatability	< 0.3 % (3sigma)
6	Step Height Repeatability	+/- 10nm with 1.8 standard sample
7	Z accuracy	< 0.75 %
8	Sample Stage	Motor stage 300x300mm/Motor Z 100 mm / auto tilt +/- 3°
9	X Y resolution	0.15 to 3.6 um
10	Measurement speed	50um / sec

V. 실험결과 및 고찰

1. 접촉각 측정 결과

1.1. 증류수 기반 탄소나노튜브 코팅 표면 젖음성 특성 분석

1wt.%, 2wt.%, 3wt.%의 탄소나노튜브가 혼합된 증류수 기반의 탄소나노튜브 코팅제로 코팅된 총 9가지 시편의 표면 젖음성을 측정하였다. 코팅된 시편의 표면 정접촉각을 측정하였으며, Non Coating 시편, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편과 표면 젖음성 특성을 비교분석하였다.

증류수 기반 탄소나노튜브 코팅 접촉각 분석 결과 코팅된 시편의 접촉각은 최소 23.42°에서 최대 68.22°로 확인되었고, 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가할수록 코팅된 시편의 접촉각이 감소하는 경향을 띄었다. 또한 증류수 기반 탄소나노튜브 코팅 값이 타사의 코팅 필름의 표면 접촉각 값보다 대부분 높음을 확인하였다. Table.12는 증류수 기반으로 코팅된 시편의 접촉각 결과를 표로 나타내었다.

Fig.7 은 증류수 기반 탄소나노튜브 코팅 표면 접촉각 특성 결과를 나타낸 그래프이며, 자세한 접촉각 측정 사진은 Fig.8에 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 탄소나노튜브가 코팅 된 9개의 시편 중 1wt.%의 MWCNT A, MWCNT B, 2wt.% MWCNT B로 코팅된 시편을 제외한 나머지 시편들의 접촉각은 타사의 코팅필름으로 코팅된 시편보다 낮은 값을 나타내고 있다. 접촉 표면의 접촉각이 낮을수록 친수성을 나타내며 높은 친수성은 표면에 많은 수분을 포함 할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 접촉각이 낮을 경우, 습하거나 비가 내렸을 시 수분에 의한 풍력터빈 블레이드의 하중이 증가할 수 있기 때문에 풍력터빈 블레이드 코팅제로는 부적합한 특성이라고 할 수 있다.

Table 12. Contact angle measurement results of CNT coating surface based on pure water

구 분	접촉각(°)
1wt.% MWCNT A + Pure Water	68.22
2wt.% MWCNT A + Pure Water	46.71
3wt.% MWCNT A + Pure Water	42.33
1wt.% MWCNT B + Pure Water	62.64
2wt.% MWCNT B + Pure Water	35.27
3wt.% MWCNT B + Pure Water	32.28
1wt.% MWCNT C + Pure Water	34.02
2wt.% MWCNT C + Pure Water	27.04
3wt.% MWCNT C + Pure Water	23.42
Non Coating	45.55
Wear Prevention Film	57.32

[지역주력산업육성사업(R&D) 기술개발보고서, 2017]

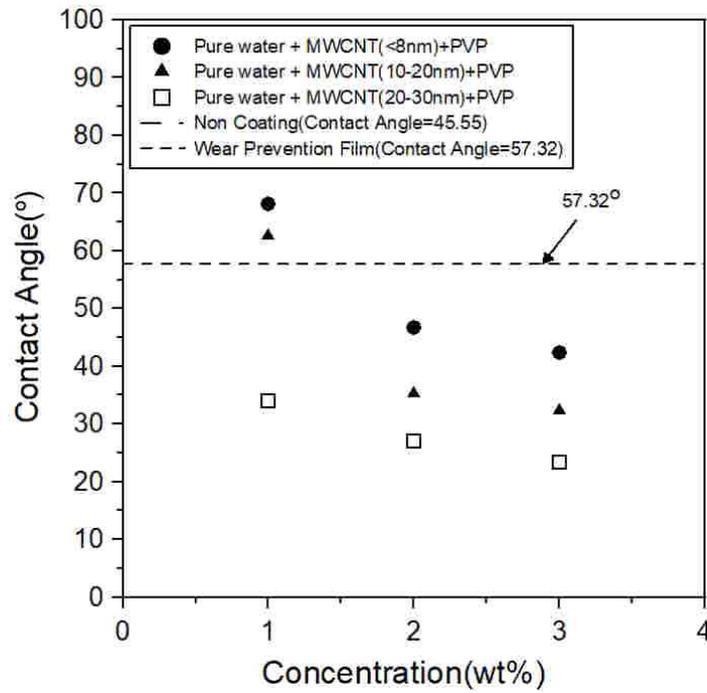


Fig. 7 Contact angle measurement results of CNT coating surface based pure on water.



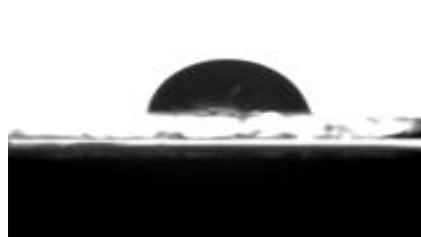
(a) 1wt.% MWCNT A + Pure Water



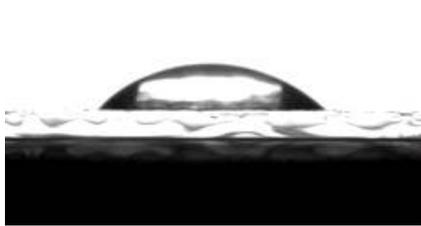
(b) 2wt.% MWCNT A + Pure Water



(c) 3wt.% MWCNT A + Pure Water



(d) 1wt.% MWCNT B + Pure Water



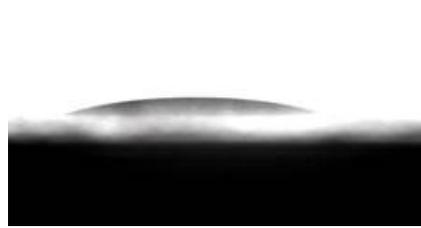
(e) 2wt.% MWCNT B + Pure Water



(f) 3wt.% MWCNT B + Pure Water



(g) 1wt.% MWCNT C + Pure Water



(h) 2wt.% MWCNT C + Pure Water



(i) 3wt.% MWCNT C + Pure Water

Fig. 8 Contact angle of CNT coating surface based on pure water(a~i).

1.2. PVA 기반 탄소나노튜브 코팅 표면 젖음성 특성 분석

1wt.%, 2wt.%, 3wt.%의 탄소나노튜브가 혼합된 PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅제로 코팅된 9가지 시편의 표면 젖음성을 측정하였다. 코팅된 시편의 표면 접촉각을 측정하였으며, Non Coating 시편, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편과 표면 젖음성 특성을 비교분석하였다.

PVA 기반 탄소나노튜브 코팅 접촉각 분석 결과 코팅된 9 종류의 시편 접촉각은 최소 20.69°에서 최대 58.76°로 나타났다. 증류수 기반 탄소나노튜브 코팅의 접촉각 특성에서 혼합비율이 증가할수록 접촉각이 감소한 경향과 같은 경향이 나타났다. 또한 코팅되지 않은 기본유리시편 보다 PVA 기반 탄소나노튜브를 코팅 했을 시에 표면 접촉각이 대부분 높으나, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편의 표면 접촉각 값보다는 낮음을 확인할 수 있다. Table 13은 PVA 기반으로 코팅된 시편의 접촉각 결과를 표로 나타내었다.

Fig. 9는 PVA 기반 탄소나노튜브 코팅 표면 접촉각 특성 결과를 나타낸 그래프이며, 자세한 접촉각 측정 사진은 Fig. 10에 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 탄소나노튜브가 코팅된 9개의 시편 중 1wt.%의 MWCNT A, MWCNT B로 코팅된 시편을 제외한 나머지 시편들의 접촉각은 타사의 코팅필름으로 코팅된 시편보다 낮은 값을 나타내고 있다. 1wt.% MWNCT, 2wt.%, 3wt.% MWNCT B, MWNCT C는 Non-coating 시편보다 낮은 접촉각을 나타내었다. 낮은 접촉각은 친수성을 나타내므로 공기 중의 수분이 블레이드에 붙어 풍력터빈 블레이드의 하중이 증가하여 발전기 효율을 감소시킬 수 있는 요인이 될 수 있어 블레이드 코팅제로는 적합하지 않은 특성이라고 할 수 있다.

Table 13. Contact angle measurement results of CNT coating surface based on PVA

구 분	접촉각(°)
1wt.% MWCNT A + PVA	58.76
2wt.% MWCNT A + PVA	55.20
3wt.% MWCNT A + PVA	36.69
1wt.% MWCNT B + PVA	55.46
2wt.% MWCNT B + PVA	51.09
3wt.% MWCNT B + PVA	50.40
1wt.% MWCNT C + PVA	56.08
2wt.% MWCNT C + PVA	51.63
3wt.% MWCNT C + PVA	20.69
Non Coating	45.55
Wear Prevention Film	57.32

[지역주력산업육성사업(R&D) 기술개발보고서, 2017]

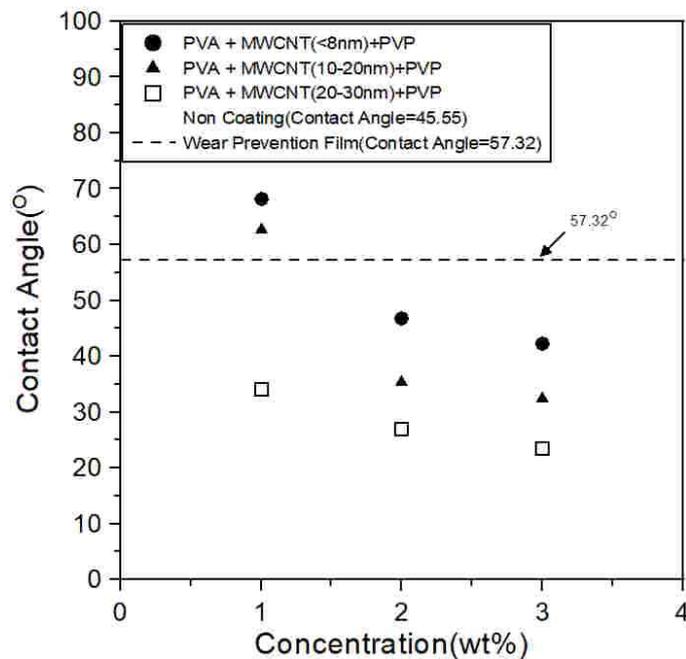


Fig. 9 Contact angle measurement results of CNT coating surface based on PVA.



(a) 1wt.% MWCNT A + PVA



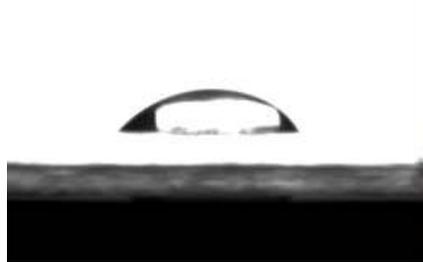
(b) 2wt.% MWCNT A + PVA



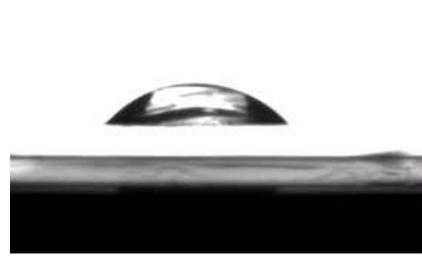
(c) 3wt.% MWCNT A + PVA



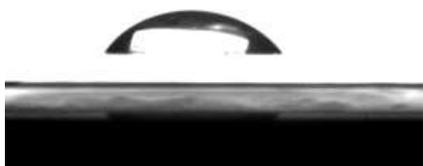
(d) 1wt.% MWCNT B + PVA



(e) 2wt.% MWCNT B + PVA



(f) 3wt.% MWCNT B + PVA



(g) 1wt.% MWCNT C + PVA



(h) 2wt.% MWCNT C + PVA



(i) 3wt.% MWCNT C + PVA

Fig. 10 Contact angle of CNT coating surface based on PVA(a~i).

1.3. Epoxy resin 기반 탄소나노튜브 코팅 표면 젖음성 특성 분석

Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브 코팅제로 코팅된 9가지 시편의 표면 접촉각을 측정하였다. 위와 동일하게 코팅된 시편의 표면 정접촉각을 측정하였으며, Non Coating 시편, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편과 표면 젖음성 특성을 비교 분석하였다.

Epoxy resin 기반 탄소나노튜브 코팅 거칠기 특성 분석 결과 코팅된 9 종류의 시편 접촉각은 2wt.% Epoxy resin과 8nm 이하의 탄소나노튜브의 혼합으로 제조된 나노코팅이었을 경우 최소 53.92°였고, 3wt.% Epoxy resin과 탄소나노튜브 C와의 혼합 유체가 도포된 시편일 때 최대 69.43°인 것으로 확인하였고, 증류수 기반과 PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅과는 상이하게 대부분의 시편들의 표면 접촉각이 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브 코팅의 경우 Non Coating 시편보다 모두 높은 접촉각을 나타내었으며, 대부분의 시편들이 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편의 표면 접촉각과는 큰 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 실험결과를 Table 14에 나타내었다.

Fig. 11는 Epoxy resin 기반 탄소나노튜브 코팅 표면 접촉각 특성 결과를 나타낸 그래프이며, 자세한 접촉각 측정 사진은 Fig. 12에 나타내었다. 그래프를 보면 알 수 있듯이 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가할수록 접촉각은 낮아지는 경향을 띄고 있지만 Epoxy resin 기반 탄소나노튜브 코팅의 경우 접촉각이 큰 차이를 보이지 않아 탄소나노튜브의 혼합비율이 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인하였다. 이와 같은 실험 결과는 Epoxy resin 기반 탄소나노튜브 코팅이 증류수 기반과 PVA 기반의 코팅보다 블레이드 코팅제로 사용하기에 적합한 것으로 판단된다.

Table 14. Contact angle measurement results of CNT coating surface based on Epoxy resin

구 분	접촉각(°)
1wt.% MWCNT A + Epoxy resin	59.56
2wt.% MWCNT A + Epoxy resin	53.92
3wt.% MWCNT A + Epoxy resin	61.42
1wt.% MWCNT B + Epoxy resin	60.83
2wt.% MWCNT B + Epoxy resin	55.49
3wt.% MWCNT B + Epoxy resin	55.94
1wt.% MWCNT C + Epoxy resin	54.78
2wt.% MWCNT C + Epoxy resin	64.61
3wt.% MWCNT C + Epoxy resin	69.43
Non Coating	45.55
Wear Prevention Film	57.32

[지역주력산업육성사업(R&D) 기술개발보고서, 2017]

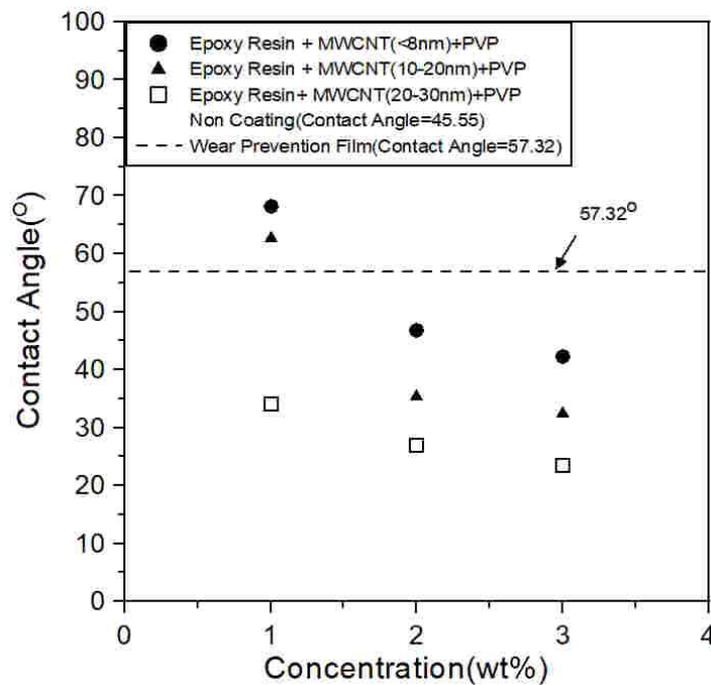


Fig. 11 Contact angle measurement results of CNT coating surface based on epoxy resin.



(a) 1wt.% MWCNT A + Epoxy resin



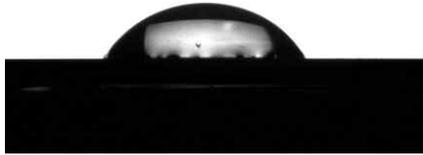
(b) 2wt.% MWCNT A + Epoxy resin



(c) 3wt.% MWCNT A + Epoxy resin



(d) 1wt.% MWCNT B + Epoxy resin



(e) 2wt.% MWCNT B + Epoxy resin



(f) 3wt.% MWCNT B + Epoxy resin



(g) 1wt.% MWCNT C + Epoxy resin



(h) 2wt.% MWCNT C + Epoxy resin



(i) 3wt.% MWCNT C + Epoxy resin

Fig. 12 Contact angle of CNT coating surface based on Epoxy resin(a~i).

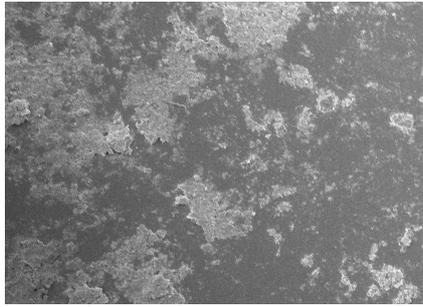
2. SEM 표면 측정 결과

본 실험에서는 증류수, PVA, Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브가 코팅된 27가지 코팅 시편의 표면 상태를 장방출주사전자현미경으로 1000배 확대하여 관찰하고, Non Coating 시편, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편과 비교분석하였다.

증류수 기반의 탄소나노튜브 코팅 표면의 경우 표면 탄소나노튜브 입자 분포 비율 상태가 고르지 못함을 확인하였다. 또한 1wt% 코팅제보다는 2wt%의 코팅제가 고르게 분사되었고, 2wt% 코팅제보다는 3wt%의 코팅제가 점차 고르게 분사되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가할수록 탄소나노튜브 입자의 분포비율이 점차 고르게 됨을 확인할 수 있다. Fig. 13은 증류수 기반의 탄소나노튜브 코팅제로 코팅된 입자 표면을 나타내었다.

PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅 표면도 증류수 기반의 탄소나노튜브 코팅 표면과 마찬가지로 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가할수록 탄소나노튜브 입자의 분포비율이 점차 고르게 됨을 확인할 수 있다. 또한 코팅 표면에 PVA입자가 탄소나노튜브 입자와 같이 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 해당 결과는 Fig. 14에 나타내었다.

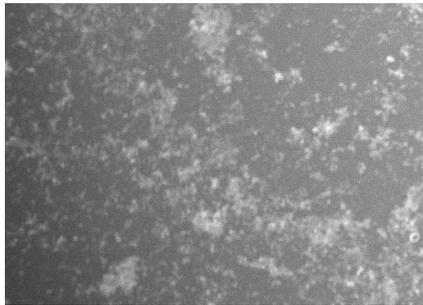
Fig. 15은 Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브 코팅의 SEM 측정 결과이다. Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브 코팅의 경우에는 증류수나 PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅 표면보다 표면 탄소나노튜브 입자 분포비율이 월등히 우수함을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 수행한 표면 접촉각 측정 실험의 결과와 동일한 결과임을 확인할 수 있다. Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브로 코팅된 대부분의 시편들은 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편과 유사하게 표면 상태가 깨끗함을 확인할 수 있다. Non-coating과 타사의 코팅 비교 사진을 Fig. 16에 나타내었다. 이와 같은 결과는 접착제 역할을 하는 Epoxy resin의 특성이 탄소나노튜브 혼합 시에도 없어지지 않고, 나타나고 있기 때문인 것으로 판단된다.



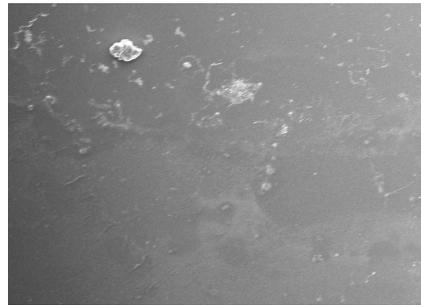
(a) 1wt% Pure Water + MWCNT A



(b) 2wt% Pure Water + MWCNT A



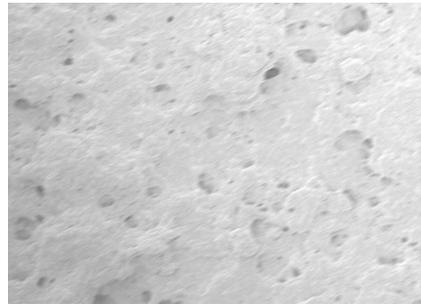
(c) 3wt% Pure Water + MWCNT A



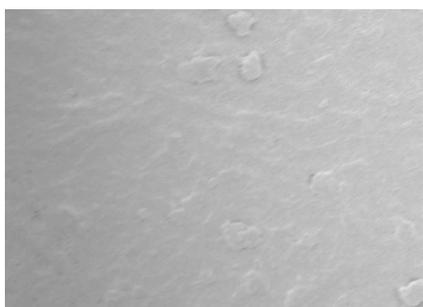
(d) 1wt% Pure Water + MWCNT B



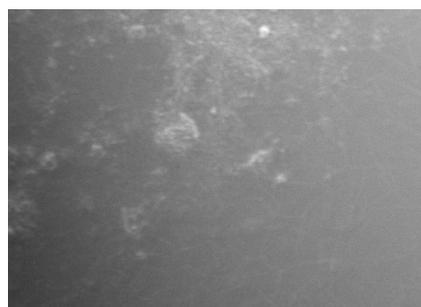
(e) 2wt% Pure Water + MWCNT B



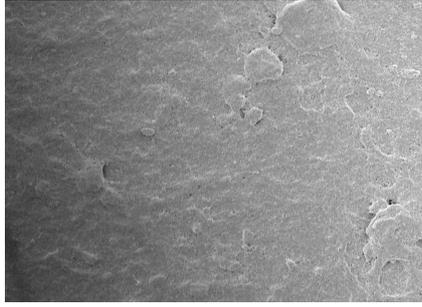
(f) Pure Water + 3wt% MWCNT B



(g) 1wt% Pure Water + MWCNT C

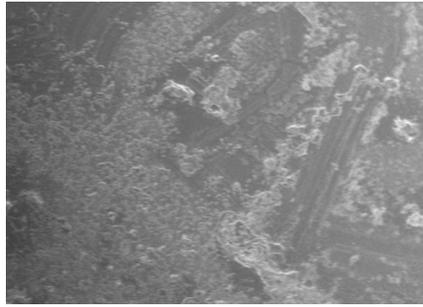


(h) 2wt% Pure Water + MWCNT C

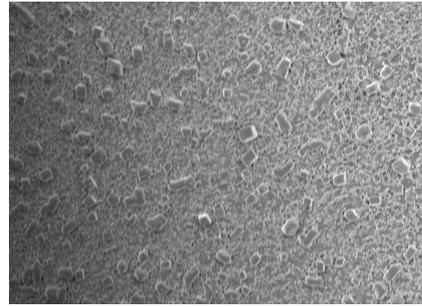


(i) 3wt% Pure Water + MWCNT C

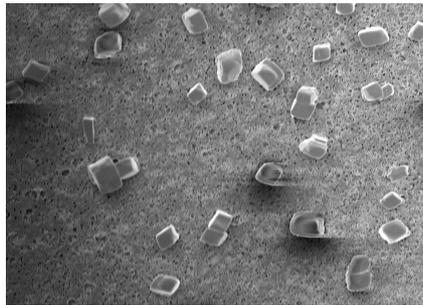
Fig. 13 SEM measurement results of CNT coating surface based on pure water(a~i).



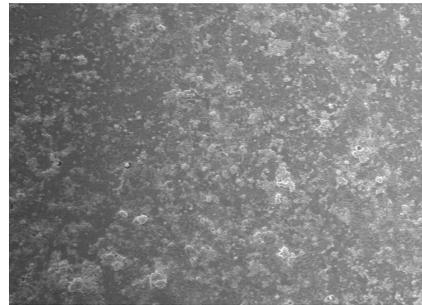
(a) 1wt% PVA + MWCNT A



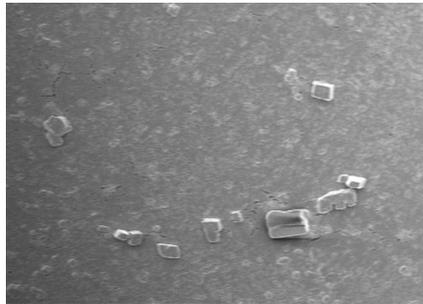
(b) 2wt% PVA + MWCNT A



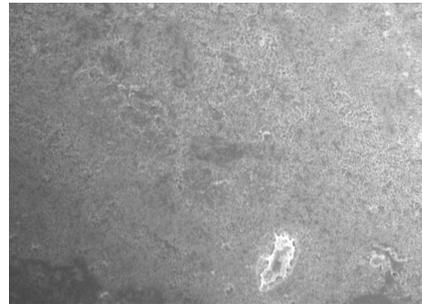
(c) 3wt% PVA + MWCNT A



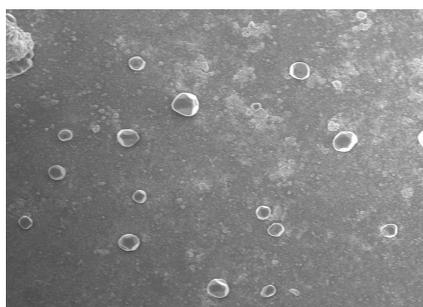
(d) 1wt% PVA + MWCNT B



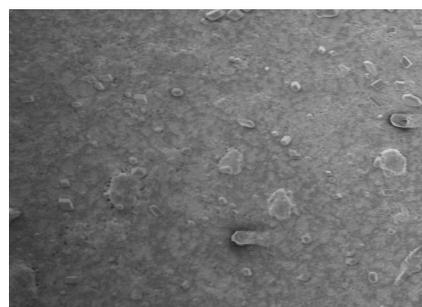
(e) 2wt% PVA + MWCNT B



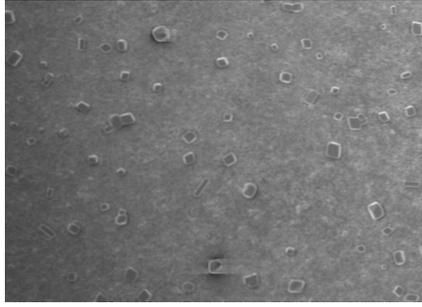
(f) 3wt% PVA + MWCNT B



(g) 1wt% PVA + MWCNT C

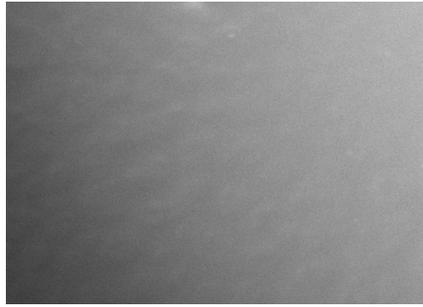


(h) 2wt% PVA + MWCNT C

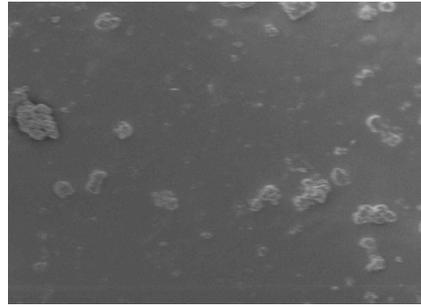


(i) 3wt% PVA + MWCNT C

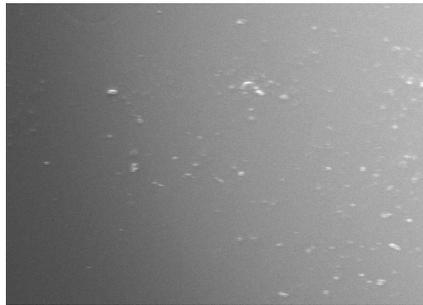
Fig. 14 SEM measurement results of CNT coating surface based on PVA(a~i).



(a) 1wt% Epoxy resin+MWCNT A



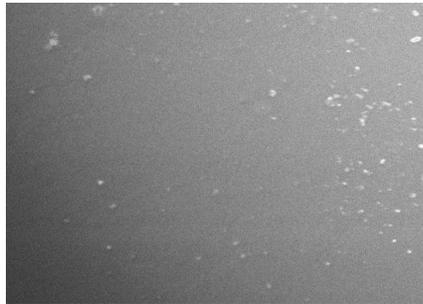
(b) 2wt% Epoxy resin+MWCNT A



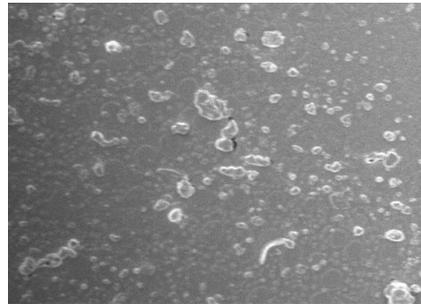
(c) 3wt% Epoxy resin+MWCNT A



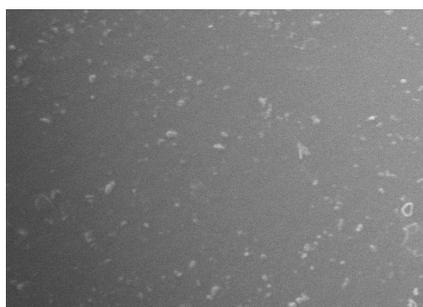
(d) 1wt% Epoxy resin+MWCNT B



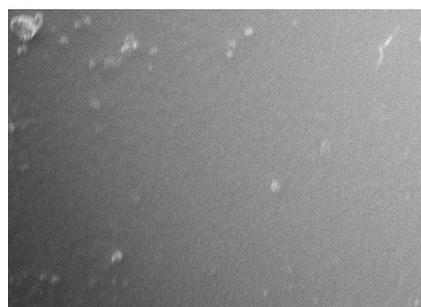
(e) 2wt% Epoxy resin+MWCNT B



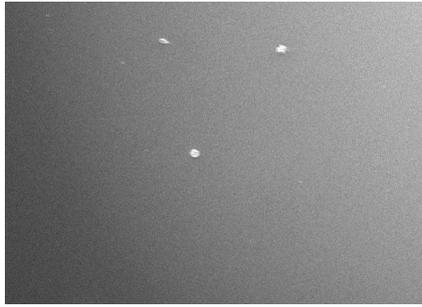
(f) 3wt% Epoxy resin+MWCNT B



(g) 1wt% Epoxy resin+MWCNT C



(h) 2wt% Epoxy resin+MWCNT C

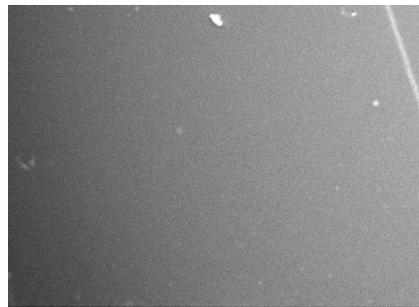


(i) 3wt% Epoxy resin+MWCNT C

Fig. 15 SEM measurement results of CNT coating surface based on epoxy resin(a~i).



(a) Non-coating



(b) Wear Prevention film

Fig. 16 SEM measurement results of non-coation and wear prevention film.

3. 거칠기 측정 결과

3.1. 증류수 기반 탄소나노튜브 코팅 거칠기 특성 분석

본 실험에서는 증류수 기반으로 제조된 탄소나노튜브 코팅제를 이용하여 코팅된 9가지 시편의 표면 거칠기 특성을 측정하였다. 탄소나노튜브가 코팅된 시편의 표면 산술 평균 거칠기인 Ra값을 측정하였으며, Non Coating 시편, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편과 표면 거칠기 특성을 비교분석하였다.

증류수 기반으로 탄소나노튜브 코팅 처리된 9종류의 시편의 거칠기 특성 분석 결과 Ra값은 $0.4169\mu\text{m}$ 에서 $1.9539\mu\text{m}$ 사이로 측정되었으며, 표면 젖음성 측정 결과와 마찬가지로 탄소나노튜브 입자의 혼합비율이 증가할수록 코팅된 시편의 Ra값이 증가하는 경향을 띄었다. 또한 Non Coating 시편보다 탄소나노튜브 코팅했을 때 표면 거칠기 값이 증가함을 확인할 수 있었다. 증류수 기반으로 탄소나노튜브 코팅 처리된 9종류의 시편의 거칠기 특성 분석 결과 Table 15로 나타내었다.

Fig. 17는 증류수 기반 탄소나노튜브 코팅 표면 거칠기 특성 결과를 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 알 수 있듯이 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가할수록 코팅 표면의 거칠기는 증가하는 경향을 띄고 있다. 거칠기 값이 낮을수록 성능이 우수한 것이지만 증류수 기반 탄소나노튜브 코팅이 Non coating과 타사의 코팅 필름과 비교했을 때 모두 표면 거칠기가 높게 나와 코팅제로는 적합하지 않은 것으로 나타났다.

Table 15. Roughness measurement results of CNT coating surface based on pure water

구 분	표면거칠기 (Ra, μm)
1wt.% MWCNT A + Pure Water	0.5321
2wt.% MWCNT A + Pure Water	0.8893
3wt.% MWCNT A + Pure Water	1.0319
1wt.% MWCNT B + Pure Water	0.4169
2wt.% MWCNT B + Pure Water	1.9539
3wt.% MWCNT B + Pure Water	1.4011
1wt.% MWCNT C + Pure Water	0.6210
2wt.% MWCNT C + Pure Water	1.2798
3wt.% MWCNT C + Pure Water	1.4251
Non Coating	0.0020
Wear Prevention Film	0.1176

[지역주력산업육성사업(R&D) 기술개발보고서, 2017]

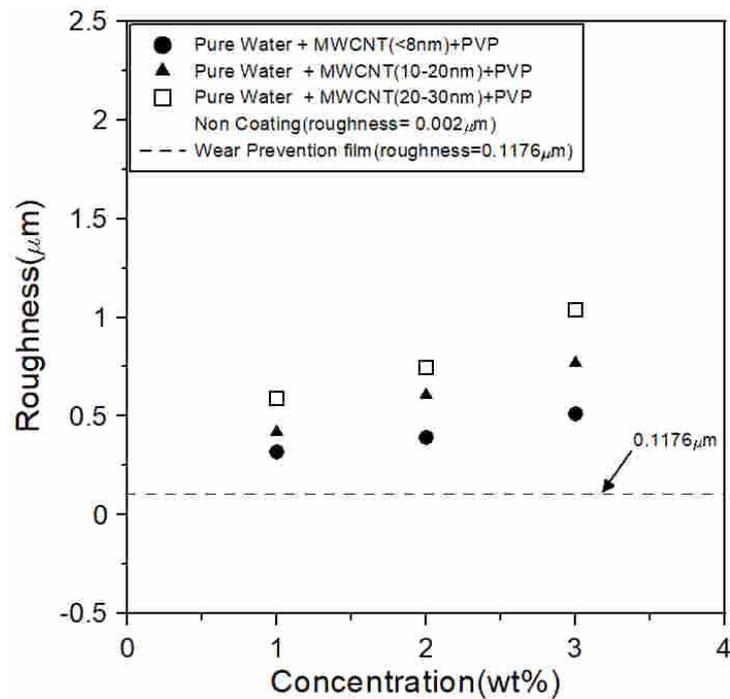


Fig. 17 Roughness measurement results of CNT coating surface based on pure water.

3.2. PVA 기반 탄소나노튜브 코팅 거칠기 특성 분석

PVA 기반으로 제조된 탄소나노튜브 코팅제로 코팅된 9가지 시편의 표면 거칠기 특성을 측정하였다. 탄소나노튜브가 코팅된 시편의 표면 산술 평균 거칠기인 Ra값을 측정하였으며, Non Coating 시편, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편과 표면 거칠기 특성을 비교분석하였다.

PVA 기반 탄소나노튜브 코팅제로 코팅된 9 종류 시편의 Ra값은 최소 0.3213 μm 에서 1.0405 μm 로 측정되었다. 증류수 기반 탄소나노튜브 코팅 시편보다는 표면 거칠기 값이 낮았지만 PVA 기반 탄소나노튜브 코팅 또한 탄소나노튜브의 혼합 비율이 증가할수록 코팅된 시편의 Ra값이 증가하는 경향을 띄고 있었다. 해당 실험 결과를 Table 16에 나타내었다.

Table 16. Roughness measurement results of CNT coating surface based on PVA

구 분	표면거칠기 (Ra, μm)
1wt% MWCNT A + PVA	0.3213
2wt% MWCNT A + PVA	0.3904
3wt% MWCNT A + PVA	0.5111
1wt% MWCNT B + PVA	0.4179
2wt% MWCNT B + PVA	0.6076
3wt% MWCNT B + PVA	0.7658
1wt% MWCNT C + PVA	0.5928
2wt% MWCNT C + PVA	0.7482
3wt% MWCNT C + PVA	1.0405
Non Coating	0.0020
Wear Prevention Film	0.1176

[지역주력산업육성사업(R&D) 기술개발보고서, 2017]

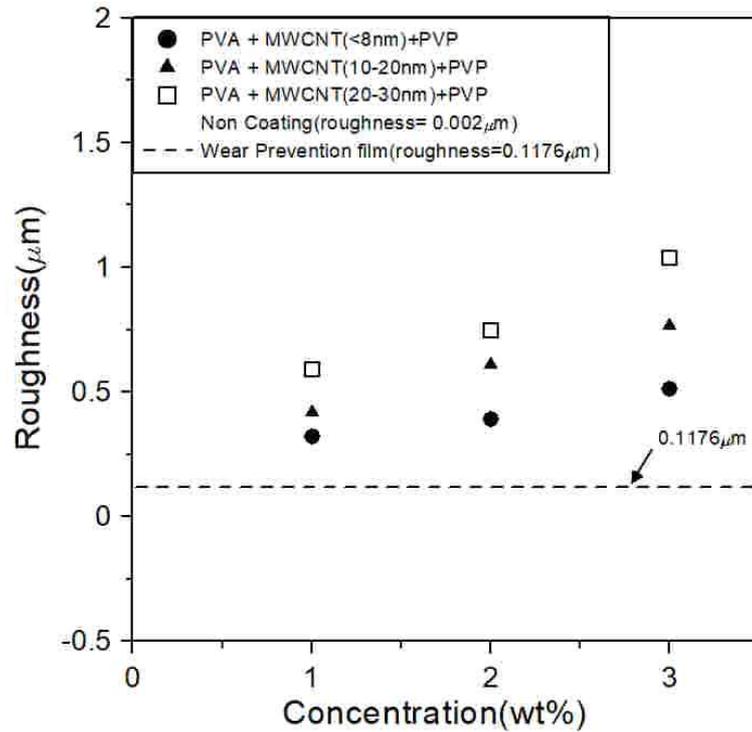


Fig. 18 Roughness measurement results of CNT coating surface based on PVA.

Fig. 18는 PVA 기반 탄소나노튜브 코팅 표면 거칠기 특성 결과를 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 탄소나노튜브가 코팅 된 9개의 시편의 거칠기 모두가 혼합비율이 증가할수록 Ra값이 증가하는 경향을 띄고 있다. 또한 타사의 코팅 필름으로 코팅된 시편과 Non coating 시편보다 높은 거칠기 값을 갖는 것을 확인하였다. 높은 거칠기 값은 풍력터빈 운전 시 블레이드의 하중을 증가시켜 발전 효율에 영향을 미치므로 풍력터빈 블레이드 코팅제로는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

3.2. Epoxy resin 기반 탄소나노튜브 코팅 거칠기 특성 분석

해당 실험은 Epoxy resin 기반으로 제조된 탄소나노튜브 코팅제를 이용하여 코팅된 9가지 시편의 표면 거칠기 특성을 측정하였다. 탄소나노튜브가 코팅된 시편의 표면 산술 평균 거칠기인 Ra값을 측정하였으며, Non-코팅된 시편, 타사의 코팅 필름이 코팅된 시편과 표면 거칠기 특성을 비교분석하였다.

Epoxy resin기반의 탄소나노튜브 코팅 시편 9종류의 거칠기 특성 분석 결과 Ra값은 $0.0680\mu\text{m} \sim 0.0993\mu\text{m}$ 사이로 측정되었으며, 평균 $0.0809 \mu\text{m}$ 의 Ra값을 Table 17에 나타내었다. Epoxy resin기반의 탄소나노튜브 코팅의 표면 거칠기 측정 결과를 증류수 기반과 PVA 기반의 코팅 표면과 같이 탄소나노튜브 입자의 혼합비율이 증가할수록 코팅 시편의 Ra값의 증가 경향을 나타냈다.

Table 17. Roughness measurement results of CNT coating surface based on epoxy resin

구 분	표면거칠기 (Ra, μm)
1wt% MWCNT A + Epoxy resin	0.0715
2wt% MWCNT A + Epoxy resin	0.0853
3wt% MWCNT A + Epoxy resin	0.0891
1wt% MWCNT B + Epoxy resin	0.0721
2wt% MWCNT B + Epoxy resin	0.0800
3wt% MWCNT B + Epoxy resin	0.0993
1wt% MWCNT C + Epoxy resin	0.0680
2wt% MWCNT C + Epoxy resin	0.0785
3wt% MWCNT C + Epoxy resin	0.0843
Non Coating	0.0020
Wear Prevention Film	0.1176

[지역주력산업육성사업(R&D) 기술개발보고서, 2017]

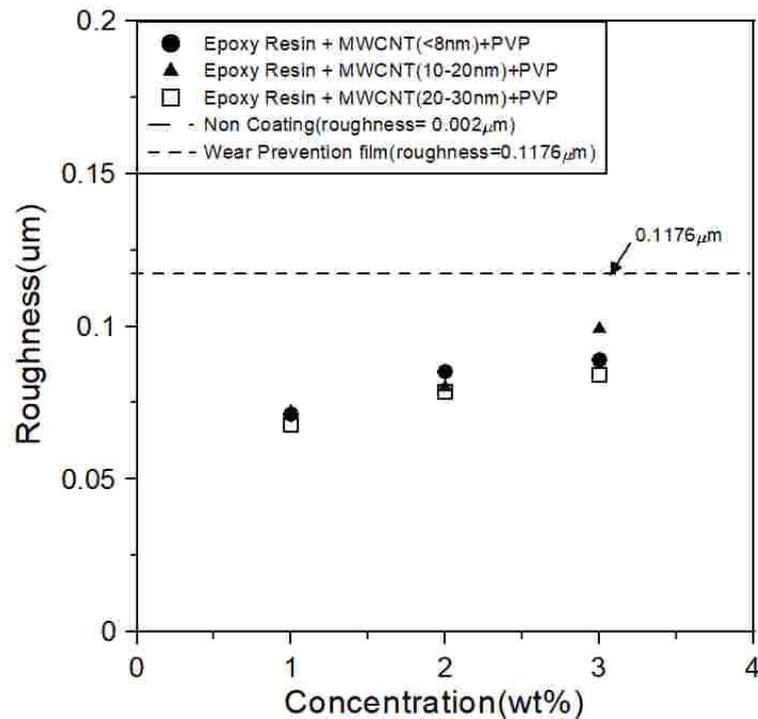


Fig. 19 Roughness measurement results of CNT coating surface based on epoxy resin.

Fig. 19는 Epoxy resin 기반 탄소나노튜브 코팅 표면 거칠기 특성 결과를 나타낸 그래프를 보면 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가할수록 Ra값이 증가하는 경향을 띄고 있다. 이는 증류수 기반과 PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅과 같은 경향을 나타낸다. 그러나 증가폭이 증류수 기반의 코팅 표면이나 PVA 기반의 코팅 표면보다 훨씬 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 Non Coating 시편보다는 표면 거칠기 값이 높고, 타사의 코팅 필름보다는 표면 거칠기 값이 낮은 것을 확인할 수 있어 풍력터빈 블레이드의 성능 향상에 도움을 주기 때문에 Epoxy resin 기반 탄소나노튜브 코팅이 풍력터빈 블레이드의 코팅제로 적합한 것으로 판단된다.

또한 Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브 코팅제와 Non coating, 3M사 보호 필름을 소형 블레이드에 코팅하여 이용하여 풍동실험 비교 분석 결과, Non coating 이 양항비가 가장 크고, Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브 코팅제, 3M사 보호 필름 순으로 성능이 좋은 것으로 확인하였다[지역주력산업육성(R&D) 기술개발보고서, 2017].

VI. 결론

본 연구에서는 풍력터빈 블레이드의 손상에 따른 효율 저하를 방지하고 경제성과 유지보수의 용이성을 위하여 탄소나노튜브의 입자 크기와 접착제 종류를 선별하여 탄소나노튜브의 입자 크기별, 혼합비율 그리고 접착제의 종류에 따른 표면특성을 연구하였다. 입자 크기가 다른 탄소나노튜브와 증류수, PVA, Epoxy resin을 혼합한 27종류의 나노유체를 제조하고, 분사 코팅하여 코팅된 표면을 비교 및 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 증류수 기반의 탄소나노튜브 코팅제의 경우 표면 접촉각 값이 $23.42^{\circ} \sim 68.22^{\circ}$ 로 확인되었으며, PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅제의 경우 $20.69^{\circ} \sim 58.76^{\circ}$ 로 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가할수록 접촉각이 감소하는 경향을 보였다. Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브 코팅제의 경우 $53.69^{\circ} \sim 69.43^{\circ}$ 로 확인되어 증류수 기반의 탄소나노튜브 코팅제와 PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅제와 마찬가지로 혼합비율이 증가할수록 접촉각이 낮아지는 경향을 띄었으나, 순수물과 PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅과는 다르게 접촉각이 큰 차이를 보이지 않아 탄소나노튜브의 혼합비율이 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단되어 증류수 기반의 나노유체와 PVA 기반의 나노유체보다 우수한 결과를 나타내었다.

(2) 증류수 기반의 탄소나노튜브 코팅제와 PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅제는 도포한 시편의 표면의 경우 탄소나노튜브 입자가 고르게 분포되어 않았고, 시편 모두 혼합비율이 증가할수록 코팅 표면의 나노입자 분포비율이 고르게 됨을 확인하여 혼합 비율이 증가할수록 코팅 표면의 구조가 나노 스케일의 구조를 나타내고 있음을 확인하였다. Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브 코팅제를 도포한 시편의 경우 혼합비율에 크게 영향을 받지 않는 것이 확인되었다.

(3) 증류수 기반의 탄소나노튜브 코팅제와 PVA 기반의 탄소나노튜브 코팅제의 경우 혼합비율이 증가할수록 높은 Ra값을 갖는 경향을 확인하였다. Epoxy resin 기반의 탄소나노튜브 코팅제 역시 Ra값이 증가하는 경향을 띄지만 증가폭

은 현저히 낮은 것을 확인하였다.

(4) 접촉각, SEM 측정결과와 표면 거칠기 값과 혼합비율 증가에 따른 경향을 종합하였을 때, 풍력터빈 블레이드 코팅 시 사용하기 적합한 탄소나노튜브 코팅제는 혼합비율에 영향을 받지 않으면서, 타사와 비교하였을 때 거칠기 값이 작은 Epoxy resin 기반으로 제조된 나노유체가 적합하다고 판단된다.

참고문헌

Arirang chemical, <http://heronkorea.co.kr>

Barber. J, Brutin. D, Tadrist. L, “A review on boiling heat transger enhancement with nanofluids”, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, 2011, pp. 1-16

Caithness Windfarm Information Forum, Summary of wind turbin accident data to septemver 2016, www.caithnesswind-farms.co.uk., 2016

Encyclopediia gritannica, www.britannica.com

Krupke. R, Hennrich. F, Weber. H. B., Beckmann. D, Hampe. O, Malik. S, Kappes. M. M, Löhneysen. H. v, “Contacting single bundles of carbon nanotubes with alternating electric fields”, 2003, pp. 397-400

Lee. Y.H, The Physical Property and Application of Carbon Nanotube, *Sae Mulli*, Vol. 51, 2005, pp. 84-144.

구민예, 김정현, 강희용, 이교우, “탄소나노튜브로 강화된 에폭시 복합재료의 기계적 물성과 열팽창 계수 측정”, *대한기계학회*, Vol. 37, 2013, pp. 657-664

과학나눔연구회, “코팅기술의 현재와 미래”, 일진사, 2017, pp. 9-27

김성래, 이상구, 양정민, 이종대, “탄소나노튜브를 이용한 하이브리드 내오존성 코팅막의 제조 및 특성”, *한국고분자학회*, Vol. 38, 2014, pp. 573-579

김수현, 신형기, 방형준, 장문석, “풍력발전기 블레이드의 표면 거칠기 변화가 하중에 미치는 영향에 대한 연구”, *한국신재생에너지학회*, 2011, pp. 33

김성진, “실란 바인더에 의한 탄소나노튜브 박막의 감습 특성 변화”, *J.KIEEME*, Vol. 23, 2010, pp. 782-787

권동준, 왕작가, 최진영, 신평수, 이은선, 박종만, “형상이 다른 나노입자 스프레이 코팅에 따른 탄소계 강화 유리섬유와 에폭시 수지간 계면강도 관찰”, *Composites Research*, Vol. 27, 2014, pp. 109-114

권동준, 신평수, 김종현, 이형익, 박종규, 박종만, “용매를 이용한 에폭시 희석 조건이 CNT 에폭시 복합재료 내 CNT 분산도에 미치는 영향”, *Composites Research*, Vol. 29, 2016, pp. 125-131

나노융합산업협력기구, “KC Report, 나노코팅소재”, 2015, pp. 1-14

남기석, “탄소나노튜브의 합성과 응용”, *NICE*, Vol. 23, 2005, pp. 54-59

박성식, “탄소나노튜브와 그래핀을 이용한 나노유체의 열전달 특성에 대한 실험적 연구”, 박사학위논문, 제주대학교, 2014, pp. 30-37

박성훈, “나노복합체, 기능성표면소재 기술”, 융합연구정책센터, Vol. 132, 2018, pp. 2-8

서향민, 박성식, 김남진, “PVP가 첨가된 탄소나노유체의 특성에 대한 연구”, *설비공학논문집*, Vol. 22, 2010, pp. 289-295

월간전자기술, 전자용어사전, 성안당, 2007

장홍규, 김영철, “풍력 블레이드를 위한 CNT 코팅 유리섬유의 적용성에 대한 비교 연구”, *Composites Research*, Vol. 29, 2016, pp. 336-341

전용한, 김영훈, 김남진, “비등 열전달 시스템의 안정성 향상을 위한 탄소나노튜브 코팅의 열전달 및 내구성에 대한 연구”, *대한안전경영과학지*, Vol. 19, 2017, pp. 211-217

지역특화주력산업육성사업R&D 기술개발보고서, “탄소나노코팅을 이용한 풍력 발전기 블레이드 전연부 MRO 시스템 개발”, 2017, pp. 22-59

화학소재정보은행, specialchem, 2016