

# 에폭시 복합재료의 강화에 사용된 탄소나노튜브의 분산 개선에 미친 전단혼합의 영향

구민예<sup>1</sup>, 이교우<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 기계설계공학부(친환경기계부품설계연구센터)

## Effects of Shear Mixing on the Dispersion Improvement of Carbon Nanotube Fillers in Epoxy Composites

Min Ye Ku<sup>1</sup> and Gyo Woo Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University

**요약** 본 연구는 전단혼합과 초음파 처리를 통해 충전재의 분산을 증대시켜 복합재료 시편을 만들고, 분산의 적정성을 판단하기 위해서 주사전자현미경 이미지를 이용하며, 인장실험을 통해 기계적 물성치를 측정하고 고찰하였다. 초음파 처리와 전단혼합 시간 증가를 통해서 개선된 공정으로 만들어진 시편의 경우, 충전재 분산에 대한 정성적인 평가인 SEM 이미지와 정량적인 평가인 인장시험 데이터의 상호 보완을 통해 충전재의 복합재료 수지 내에서의 적절한 분산 여부를 판단할 수 있었다. 인장강도의 측정 결과에서는 충전재가 함유된 모든 시편이 Pure Epoxy 시편 보다 높은 인장 강도를 보였는데, 충전재 0.6wt%에서 가장 높은 인장강도 값을 나타냈다. 0.9wt%와 1.2wt% 시편은 Pure Epoxy 시편보다는 인장강도가 증가하였지만 0.6wt% 시편보다 작은 값을 보였다. 인장강성 측정 결과는 충전재의 함유량이 높아질수록 증가하는 결과를 보였다.

**Abstract** In this article, the effects of shear mixing on the dispersion improvement of the carbon nanotube fillers in epoxy composites were studied. Through the scanning electron microscope images showing the quantitative results and the tensile tests giving the qualitative data, we can see the dispersion improvement of the fillers. The composite specimen containing 0.6 wt% fillers shows the biggest value of tensile strength. For the tensile stiffness, the specimens containing more filler have the larger values of tensile stiffness.

**Key Words** : Epoxy composite, Nano-fillers, Scanning electron microscope, Shear mixing, Mechanical properties

### 1. 서론

탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNTs)는 1991년 Iijima[1]에 의해 직경이 2-50nm이고 흑연면이 말린 형태로 최초로 발견되었다. 그 이후 전기방전법(arc-discharge) [2], 레이저 증착법(laser vaporization)[3], 플라즈마 화학 기상증착법(plasma enhanced chemical vapor deposition) [4], 열화학 기상증착법(thermochemical vapor deposition) [5] 등의 다양한 합성법이 개발되고 개선되어 대량생산이

가능해졌다.

CNTs의 종류는 벽의 수에 따라 단일벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotubes, SWNTs), 이중벽 탄소나노튜브(double-walled carbon nanotubes, DWMTs), 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotubes, MWNTs)등이 있다. 특히 MWNTs는 Yu 등[6]이 인장시험에서 인장강도(tensile strength)가 11-63GPa, 영률(Young's modulus)이 270-950GPa를 나타낸다는 것을 측정하여 높은 기계적 물성을 증명하였다. 한편, Kim 등[7]은 CNTs의 열전도도

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임  
(No. 2012-0002661)

\*Corresponding Author : Gyo Woo Lee

Tel: +82-10-9871-3670 email: gwlee@jbnu.ac.kr

접수일 12년 07월 03일

수정일 (1차 12년 08월 13일, 2차 12년 09월 11일)

게재확정일 12년 10월 11일

가 실험적으로 상온 상태에서 3,000W/mK 임을 측정하여 전기적으로도 좋은 물성을 가지고 있다는 것을 연구하였다.

이와 같은 탄소나노튜브의 기계적 및 전기적으로 우수한 물성으로 인해 충전재(filler)로써 에폭시(epoxy), 폴리스티렌(polystyrene), 폴리우레탄(polyurethane) 등의 폴리머(polymer)와 혼합하여 폴리머의 기계적, 전기적 특성을 향상시키려는 연구가 계속되고 있다.[8-10] 하지만 Van der Waals 힘에 의한 탄소나노튜브의 응집 현상(agglomeration)으로 인해 폴리머 내의 CNTs의 효과적인 분산이 어려워 이를 개선하기 위한 다양한 기계적, 화학적 방법이 연구되고 있다.[11-15]

CNTs를 분산시키기 위한 가장 일반적인 방법은 용매(solvent)에 CNTs를 투입하고 초음파(ultrasonication) 처리를 하는 것이다. 초음파 처리를 한 SWNTs는 초음파 처리를 하지 않은 SWNTs보다 길이가 더 짧아지고, 다발(bundle)이 더 얇아져서 보다 효과적인 분산이 가능해진다. 하지만 굽힘(bending), 좌굴(buckling) 현상 등이 증가하여 SWNTs에 손상을 입힌다. 이런 현상은 초음파 강도가 높아지거나 초음파 처리 시간이 길어질 때 더욱 증가한다.[11-12]

CNTs 표면에 산이나 아민 등을 기능화 하여 분산력을 높이는 방법도 연구되고 있다. Kim 등[13]은 MWNTs를 HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/NH<sub>4</sub>OH 용액에 침지하고, 농도, 온도, pH 등의 여러 가지 변수를 조절하여 기능화 된 MWNTs/에폭시 복합재료를 만들어 전기적 특성을 향상시켰다. 하지만 높은 온도나 긴 산화시간은 MWNTs에 손상을 일으켜 오히려 전기적 특성이 떨어지는 결과를 보고하고 있다.

Gong 등[14]은 1wt%의 MWNTs가 투입된 에폭시 복합재료에 계면활성제 C<sub>12</sub>EO<sub>8</sub>을 첨가하여 MWNTs의 분산력을 높였다. 그 결과, MWNTs를 넣지 않은 복합재료보다 유리전이온도(glass transition temperature)가 63℃에서 88℃로 증가하고, 탄성계수는 30% 증가하였다. 계면활성제를 첨가하지 않은 1wt%의 MWNTs/에폭시 복합재료도 MWNTs를 넣지 않은 에폭시와 비교해서 유리전이온도와 탄성계수가 증가하였지만, 계면활성제를 넣은 시편보다는 작은 값을 나타냈다.

또 다른 기계적 분산방법인 전단혼합방법은 좁은 관이나 상대적으로 높은 속도의 유동을 이용하여 전단력을 발생시켜 CNTs를 분산시키는 방법이다. 전단력을 발생시키기 위해 대부분 회전자(rotor)와 고정자(stator)가 사용되지만 Hilding 등[15]은 디젤 연료 인젝터(disel fuel injector)를 사용하여 전단력을 발생시켰다. 분사노즐로 분산제를 포함하고 있는 poly( $\alpha$ -olefin)에 CNTs를 분산시킨 후 CNTs 함유량에 따른 동점성계수(kinematic viscosity)를 측정한 결과, 점성 손실(viscosity loss)이 4

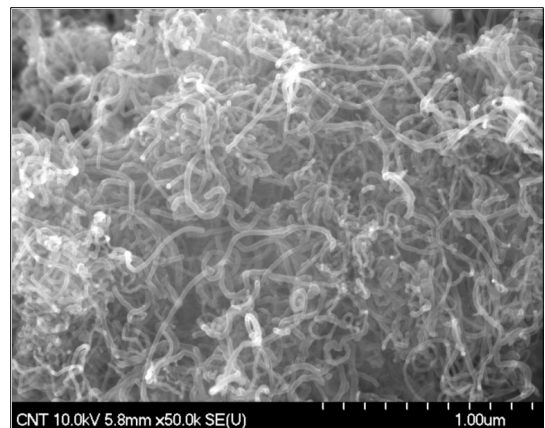
0℃에서는 50.8%, 100℃에서는 37.1%가 발생했다.

이상에서 살펴본 바와 같이 복합재료 수지 내에서 충전재의 분산을 증대시키기 위한 다양한 기존연구를 바탕으로, 본 연구에서는 전단혼합과 초음파 처리를 통해서 MWNTs의 분산력을 높여 MWNTs/에폭시 복합재료 시편을 만들고, 분산의 적정성을 판단하기 위해서 정성적인 방법으로 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 이미지를 이용하며, 정량적으로 판단하기 위하여 인장실험을 통해 기계적 물성치를 측정하고 고찰하였다.

## 2. 실험방법 및 내용

### 2.1 시편 재료

시편 제조에 사용한 에폭시와 경화제는 (주)국도화학의 Bisphenol-F형 YDF-161과 Huntsman의 아민계 D-230을 중량비 3:1로 혼합하여 시편을 제조하였다. 충전재로 사용한 MWNTs는 (주)카본나노텍에서 생산된, 순도가 90 wt% 이상인 CNT M90을 사용하였다. Fig. 1은 실험에서 사용한 MWNTs의 주사전자현미경(SEM)사진이다. 직경 10-50nm 정도로 다양한 크기의 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotubes, MWNTs)들이 존재함을 알 수 있으며, 매우 복잡하게 서로 엉켜있다. 복합재료의 강도나 강성을 증대시킬 목적으로 탄소나노튜브 등을 충전재로 사용하기 위해서는 수지 내에서의 고른 분포가 필수적으로 요구된다. 이를 위해서는 초음파 처리, 전단혼합 등 방법이 필요함이 잘 알려져 있다.



[그림 1] 실험에 사용된 다중벽 탄소나노튜브의 주사전자현미경 사진

[Fig. 1] A SEM image of used multi-walled carbon nanotubes

## 2.2 시험편 제작

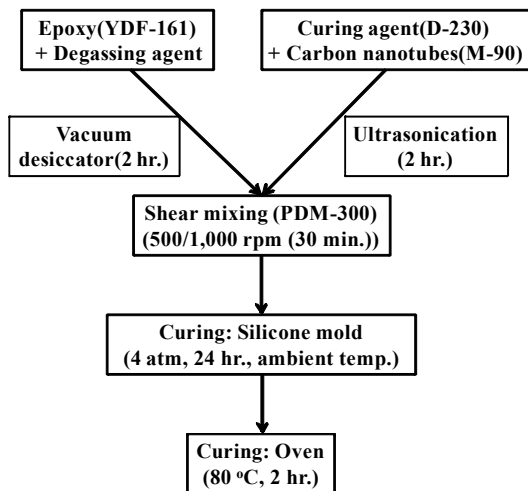
인장시험 등에 사용된 시편은 다음과 같은 공정에 따라 제작되었다. Fig. 2는 시편제조 공정순서를 나타낸다.

먼저 기포제거제(degassing agent, BYK-A 500, BYK Chemie)를 넣은 에폭시 수지를 진공 데시케이터에 넣고 수지 자체에 함유되어 있던 기포를 2시간 동안 제거한다. 한편, 경화제에는 시편 조건에 따른 MWNTs를 계량하여 투입하고 초음파 장비(WUC-A03H, Daihan, 100W 40kHz)를 이용하여 2시간 동안 처리한다. 기포를 제거한 에폭시 수지에 MWNTs가 포함된 경화제를 넣고 전단혼합기(PDM-300 Paste mixer, Daewha Tech. IND.)로 500rpm (revolutions per minute), 1000rpm으로 각각 순차적으로 30분씩 전단혼합 한다. 다시 진공 데시케이터에서 30분 동안 기포를 제거한 후 도그본(dog-bone) 모양의 실리콘 몰드에 정량하여 부어넣고, 상온 4기압 상태의 가압 용기에서 24시간 상온경화 한다. 마지막으로 2시간 동안 80°C 오븐에서 경화시켜 시편을 제조하였다.

그림 Fig.3은 완성된 도그본 모양의 시편이다. 인장시편은 ASTM D638-10[16] Type 4의 규격에 맞추어 제작되었는데, 전체길이(overall length)는 115 mm, 시험부(narrow section)의 폭은 6 mm이며, 두께는 4 mm 이다.

## 3. 결과 및 고찰

에폭시 수지 내에서 충전재인 MWNTs의 분산 정도를 알기위한 정성적인 방법으로 시편의 파단면에 대해 SEM



[그림 2] 시편 제조공정을 보여주는 순서도  
[Fig. 2] A flowchart of manufacturing process for the specimen

이미지 분석을 시도하였으며, 기계적 물성 측정 및 평가로는 정량적인 방법인 인장강도(tensile strength)와 인장강성(tensile stiffness)을 만능재료시험기(universal material testing machine, Instron 4206)로 측정하였다.

### 3.1 충전재 분산에 대한 정성적 평가

수지와 충전재가 적절히 혼합되지 못하여 충전재의 수지 내 분산이 균일하지 못하면, 충전재의 사용을 통해서 기대했던 복합재료의 기계적 물성 향상은 달성할 수 없다. Fig. 4는 적절한 분산을 이루지 못한 경우를 보여주기 위하여, Fig. 2에서 제시한 공정과는 달리 초음파 공정이 없으며 전단혼합을 500과 1,000 rpm에 대하여 각각 3분씩 실시한 경우에 제작된 시편의 파단면에 대한 SEM 이미지를 보여주고 있다. MWNTs를 에폭시와 경화제를 합한 중량 대비 0.6 wt% 투입한 경우이다. 육안으로 볼 때는 Fig. 2의 기본 공정으로 제작한 경우와 다른 점을 찾을 수는 없었지만, 전자현미경을 통해서 보면 Fig. 4에서 보듯이 적절한 분산이 이루어지지 못했음을 알 수 있다. 위쪽 이미지에서 하얀색 원으로 나타난 부분들은 미처 분산되지 못한 MWNTs가 응집한 상태로 자리하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 4 아래의 100배 더 확대된 이미지에서 보면 부분적으로 적절한 혼합처럼 보이지만, 이러한 미시적인 관점의 이미지는 분산 정도를 크게 왜곡할 수 있다. 때문에 정성적인 SEM 이미지만으로는 충전재의 적절한 분산을 결론내기가 쉽지 않다.

이에 반해서, Fig. 5는 동일한 충전재 투입량이지만 전단혼합 시간의 증대와 초음파 장치의 사용을 통해서 보다 나은 분산을 얻은 결과를 보여주고 있다. Fig. 5의 시편은 Fig. 2에 나타난 기본 공정에 의해서 제작된 경우이



[그림 3] 에폭시만으로 만든 경우와 탄소나노튜브 강화된 도그본 형태의 시편  
[Fig. 3] Dog-bone shaped specimens for a pure epoxy and a MWNTs-reinforced

다. 우선 위에 있는 저배율의 이미지를 보면 Fig. 4의 경우와 비교하여 월등히 개선된 분산 결과를 보임을 알 수 있다. 개별적으로 표시해서 나타낼 수 없을 정도로 많은 군집의 분포형태를 보이고 있으며, 군집의 크기는 Fig. 4에 비해서 현저히 작게 해체되고 분산되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5의 아래에 있는 고배율 이미지를 보아도, Fig. 4의 경우에 비해 다소 개선된 분산의 상태임을 정성적으로 알 수 있다.

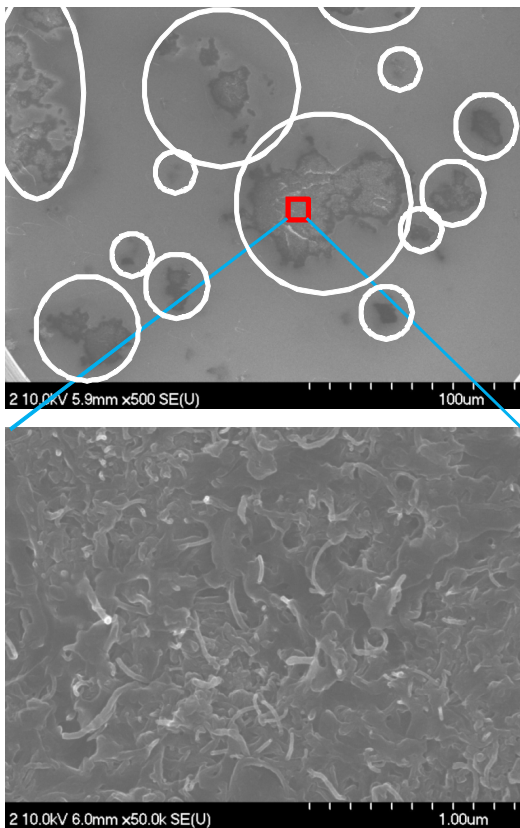
Fig.4와 5를 통해서 저배율과 고배율의 이미지를 이용하여 각각 거시적 및 미시적인 충전재 분산의 적절성을 정성적으로 평가할 수 있음을 알 수 있었다.

한편, 본 연구에서는 Fig. 2에 제시된 기본 공정으로 충전재의 농도가 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 wt%에 해당하는 시편이 각각 제작되었다. Fig. 6은 충전재 양의 적절성을 보기 위하여 1.2 wt%의 경우를 나타내어 Fig. 5의 경우와 비교하고자 하였다. 우선 눈에 띄는 것은 저배율의 위쪽

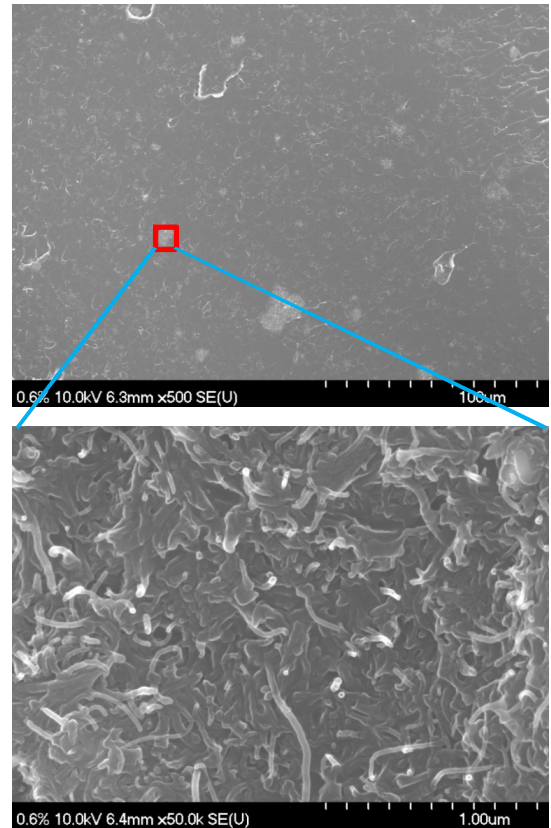
이미지를 보면 분산이 나뉘던 Fig. 4의 경우보다는 좋아 보이지만 Fig. 5와 비교해서는 거시적인 분산의 정도가 좋지 못하거나 별 차이가 없다는 것이다. 고배율의 이미지로 확인해 보면, 0.6 wt%인 Fig. 6의 결과에 비해 나노튜브가 분산이 덜된 응집 형태로 보임을 알 수 있다. 이는 주어진 기본 공정에 의한 시편 제작이 충전재 1.2 wt%에는 최적이지 않음을 의미하거나, 혹은 1.2 wt%의 MWNT의 양은 다소 과함을 의미한다. 이에 관한 정량적인 평가는 뒤에 나오는 기계적 물성 측정평가에서 다시 논의될 것이다.

### 3.2 기계적 물성 측정 및 평가

Fig.7과 8은 Fig. 2에 제시된 기본 공정에 의해 만들어진 시편의 인장강도(tensile strength)와 인장강성(tensile stiffness) 결과이다. 다섯 경우 모두 5개의 시편에 대한 결과를 나타내고 있으며, 그래프의 데이터 레이블을 통해



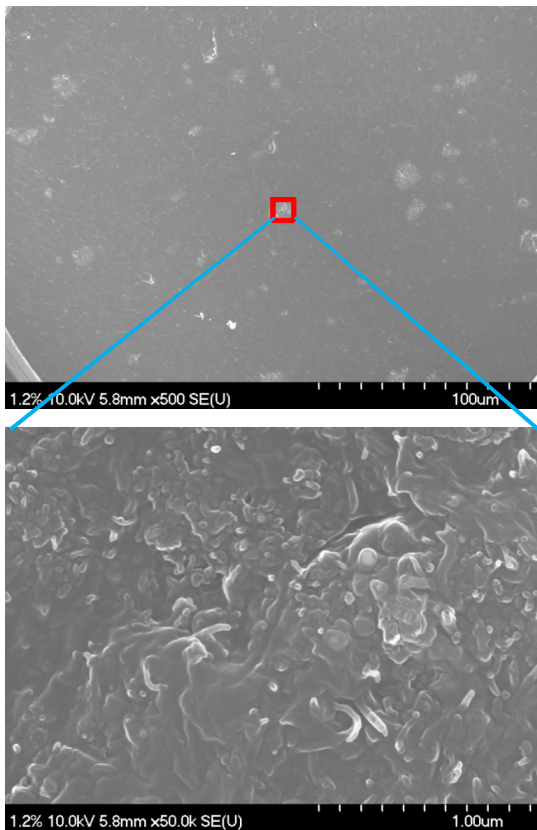
[그림 4] 분산 상태가 좋지 못한 탄소나노튜브 강화 복합재료 파단면의 SEM 사진 (0.6 wt% 탄소나노튜브)  
 [Fig. 4] SEM images for a fracture surface of MWNTs-reinforced composites showing poor dispersion (0.6 wt% CNTs)



[그림 5] 분산 상태가 개선된 탄소나노튜브 강화 복합재료 파단면의 SEM 사진 (0.6 wt% 탄소나노튜브)  
 [Fig. 5] SEM images for a fracture surface of MWNTs-reinforced composites showing much better dispersion (0.6 wt% CNTs)

서 강도와 강성 값을 보여주고 있으며, 괄호 안의 값은 기준 값(baseline)에 해당하는 Pure Epoxy의 결과에 대한 증가 백분율을 나타내고 있다. 또한 막대그래프 상단에 표시된 표준편차를 통해서 각 경우의 데이터의 신뢰도를 볼 수 있다.

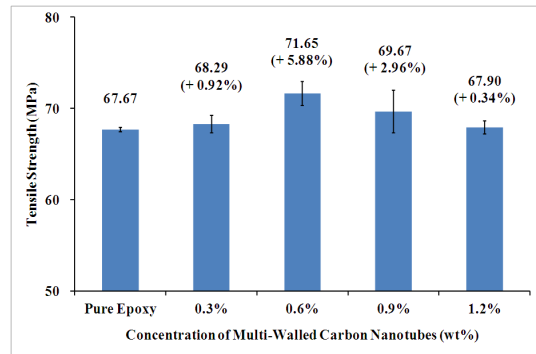
먼저 Fig. 7의 인장강도는 충전재 없이 에폭시만으로 만든 시편에서 67.67 MPa의 값이 측정되었으며, 충전재 함량 0.6wt%에서 72.65 MPa로 최고값이 측정되었으며, 0.6과 0.9wt%에서는 표준편차 값이 다소 증가되어 나타남을 보여주고 있다. Pure Epoxy보다 MWNTs를 포함한 시편 모두 인장강도가 증가함을 보였다. 0.3wt%는 0.92%, 0.6wt%는 5.88%, 0.9wt%는 2.96%, 1.2wt%는 0.34%의 증가를 보였다. Fig. 5 및 6의 SEM 이미지와 Fig. 7의 결과로 유추해 보면, 본 연구에서 제시된 시편 제조 공정의 경우에는 다중벽 탄소나노튜브 충전재 함량 0.6 wt%를 전후로 인장 물성이 가장 좋은 지점이 있음을



[그림 6] 분산 상태가 개선된 탄소나노튜브 강화 복합재료 파단면의 SEM 사진 (1.2 wt% 탄소나노튜브)  
 [Fig. 6] SEM images for a fracture surface of MWNTs-reinforced composites showing much better dispersion (1.2 wt% CNTs)

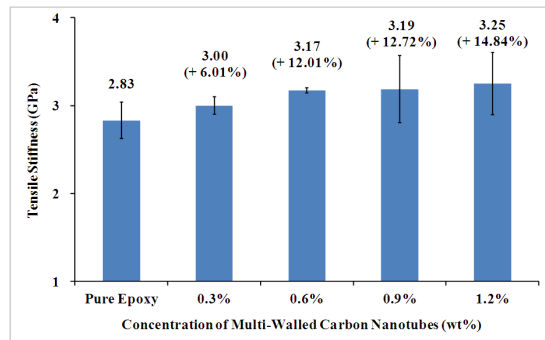
알 수 있다. 이러한 결과는 유사한 국내외의 연구사례 [17]를 통해서 간접적으로 타당함을 알 수 있다. 또한, 표준편차는 Pure Epoxy부터 1.2wt% CNTs 경우까지 각각의 경우에 대하여 0.23, 0.97, 1.33, 2.34, 0.71 MPa의 값을 보이고 있다.

Fig. 8은 인장시험의 원 데이터에서 응력과 변형률의 기울기를 통해서 얻게 되는 강성을 나타내고 있다. 에폭시 복합재료 자체의 강성에 비해서 탄소나노튜브 자체의 강성이 매우 큰 값이기 때문에, 충전재로 탄소나노튜브가 추가될수록 강화된 복합재료의 강성은 증가할 것임을 예측할 수 있다. Fig. 8을 보면, 충전재가 없는 Pure Epoxy의 경우 2.83 GPa, 1.2wt% MWNTs 인 경우에는 3.25 GPa의 강성 값을 나타내고 있다. Fig. 7의 인장강도의 경우와 마찬가지로, Pure Epoxy보다 MWNTs를 포함한 시편 모두 인장강성 증가함을 보였는데, 실험했던 범위 내에서는 충전재 양이 증가될수록 지속적으로 강성이 증가



[그림 7] 충전재 농도에 따른 복합재료 시편의 인장강도 및 증가율

[Fig. 7] Tensile strength of the composite specimens with concentrations of MWNTs



[그림 8] 충전재 농도에 따른 복합재료 시편의 인장강성 및 증가율

[Fig. 8] Tensile stiffness of the composite specimens with concentrations of MWNTs



되었다. Pure Epoxy에 대비하여 충전재 양이 0.3wt%인 경우는 6.01%, 0.6wt%는 12.01%, 0.9wt%는 12.72%, 1.2wt%는 14.84%의 강성 증가를 보였다. 즉, 인장강성의 경우에는 MWNTs의 투입량 증가에 따라 점점 증가함을 보이고 있으며, 1.2wt%에서 가장 높은 증가량을 보였고, 0.6wt%에서 가장 높은 증가폭을 나타냈다. 또한, 표준편차는 Pure Epoxy부터 1.2wt% CNTs 경우까지 각각의 경우에 대하여 0.21, 0.10, 0.03, 0.38, 0.35 GPa의 값을 보이고 있다.

### 3.3 고찰

초음파 처리를 하지 않고 짧은 전단혼합 시간만을 이용하여 만든 시편은 충전재 분산에 대한 SEM 이미지를 통한 정성적인 평가와 기계적 물성 측정에 의한 정량적 평가 모두에서 결과가 좋지 못했다. 때문에 수지 내에서 충전재의 분산을 증가시키기 위해 초음파 처리와 전단혼합 시간 증대를 통해 개선된 공정을 통해서 시편을 만들었다.

초음파와 전단혼합을 이용하여 개선된 기본 공정에 의해 만든 시편의 경우, SEM 이미지를 보면 복합재료 수지 내에서 MWNTs가 비교적 분산이 잘 된 모습이었으며, 인장실험에서도 데이터 간의 편차가 작고 인장강도나 강성의 결과가 기존 연구결과에 부합되는 경향으로 매우 합리적으로 나타났기 때문에 신뢰성 있는 결과를 얻었다고 판단된다.

또한, 에폭시 수지 내에 과도한 MWNTs를 함유한 0.9wt%, 1.2wt%시편은 SEM 이미지에서 작은 덩어리로 분산된 MWNT들이 서로 응집되어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이로 인해 인장강도가 0.6wt% 시편 보다 낮은 결과를 나타내었다.

## 4. 결론

초음파 처리와 전단혼합 시간 증대를 통해서 개선된 공정으로 만들어진 시편의 경우, 충전재 분산에 대한 정성적인 평가인 SEM 이미지와 정량적인 평가인 인장시험 데이터의 상호 보완을 통해 충전재 MWNTs의 복합재료 수지 내에서의 적절한 분산 여부를 판단할 수 있었다.

인장강도의 측정 결과에서는 충전재 MWNTs가 함유된 모든 시편이 Pure Epoxy 시편 보다 높은 인장 강도를 보였는데, MWNTs 0.6wt%에서 가장 높은 인장강도 값을 나타냈다. 0.9wt%와 1.2wt% 시편은 Pure Epoxy 시편보다 높은 인장 강도가 증가하였지만 0.6wt% 시편보다 낮은

값을 보였는데, 이는 다소 과도한 충전재 함량이 분산을 방해한 것으로 판단된다. 인장 강성의 측정 결과는 MWNT의 함유량이 높아질수록 증가하는 결과를 보였다.

## References

- [1] Iijima, S., "Helical Microtubules of Graphitic Carbon", *Nature*, Vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [2] Iijima, S., Ichihashi, T., "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter", *Nature*, Vol. 363, pp. 603-605, 1993.
- [3] A. Thess et al., "Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes", *Science*, Vol. 273, pp. 483-487, 1996.
- [4] Z. F. Ren et al., 1998, "Synthesis of Large Arrays of Well-Aligned Carbon Nanotubes on Glass", *Science*, Vol. 282, pp. 1105-1107.
- [5] C. J. Lee et al., "Synthesis of Aligned Carbon Nanotubes using Thermal Chemical Vapor Deposition", *Chemical Physics Letters*, Vol. 312, pp. 461-468, 1999.
- [6] M. F. Yu et al., "Strength and Breaking Mechanism of Multi-walled Carbon Nanotubes Under Tensile Load", *Science*, Vol. 277, pp. 637-640, 2000.
- [7] P. Kim et al., "Thermal Transport Measurements of Individual Multiwalled Nanotubes", *Physical Review Letters*, Vol. 87, No. 21, 215502(1)-(4), 2001.
- [8] F.H. Gojny et al., "Carbon Nanotube-Reinforced Epoxy-Composites: Enhanced Stiffness and Fracture Toughness at Low Nanotube Content", *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 15, pp. 2363-2371, 2004.
- [9] T.-E. Chang et al., "Conductivity and Mechanical Properties of Well-Dispersed Single-Wall Carbon Nanotube/Polystyrene Composite", *Polymer*, Vol. 47, No. 22, pp. 7740-7746, 2006.
- [10] J. Xiong et al., "The Thermal and Mechanical Properties of a Polyurethane/Multi-Walled Carbon Nanotube Composite", *Carbon*, Vol. 44, No. 13, pp. 2701-2707, 2006.
- [11] K. B. Shelimov et al., "Purification of Single-Wall Carbon Nanotubes by Ultrasonically Assisted Filtration", *Chemical Physics Letters*, Vol. 282, No. 5-6, pp. 429-434, 1998.
- [12] K. L. Lu et al., "Mechanical Damage of Carbon Nanotubes by Ultrasound", *Carbon*, Vol. 34, No. 6, pp. 814-816, 1996.
- [13] Y. J. Kim et al., "Electrical Conductivity of Chemically Modified Multiwalled Carbon Nanotube/Epoxy

- Composites”, Carbon, Vol. 43, No. 1, pp. 23-30, 2005.
- [14] X. Gong et al., “Surfactant-Assisted Processing of Carbon Nanotube/Polymer Composites”, Chemistry of Materials, Vol. 12, No. 4, pp. 1049-1052, 2000.
- [15] J. Hilding et al., "Dispersion of Carbon Nanotubes in Liquids", Journal of Dispersion Science and Technology, Vol. 24, No. 1, pp. 1-41, 2003.
- [16] ASTM D638-10, "Standard test method for tensile properties of plastics," ASTM.
- [17] S.-E. Lee et al., "A study on Tensile Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube/Epoxy Composites", Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol. 17, No. 6, pp. 1-7, December, 2004.
- 

**구 민 예**(Min Ye Ku)

[준회원]



- 2012년 2월 : 전북대학교 기계시스템공학부 (기계공학 학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학부 (석사과정)

<관심분야>

나노복합재료 제조 및 물성측정

---

**이 교 우**(Gyo Woo Lee)

[정회원]



- 1994년 2월 : KAIST 항공우주공학과 (항공우주공학 석사)
- 2004년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (기계공학 박사)
- 1994년 3월 ~ 2005년 2월 : KIST 연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학부 부교수

<관심분야>

나노물질 합성 및 응용, 연소공학