

용매를 이용한 에폭시 희석 조건이 CNT 에폭시 복합재료 내 CNT 분산도에 미치는 영향

권동준* · 신평수* · 김종현* · 이형익** · 박종규** · 박종만*†

Effects of Solvent-Based Dilution Condition on CNT Dispersion in CNT/Epoxy Composites

Dong-Jun Kwon*, Pyeong-Su Shin*, Jong-Hyun Kim*, Hyung-Ik Lee**,
Jong-Kyoo Park**, Joung-Man Park*†

ABSTRACT: In case of CNT mixing with epoxy, epoxy matrix needs to be diluted. This work studied the effect of the dilution condition of epoxy on CNT dispersion. The optimum solvent condition using acetone and DMF was found via mechanical and solubility methods which affects, the epoxy performance. The dispersion using acetone was better than the DMF and thus higher mechanical properties. Four mixing types of CNT particle were performed. To verify the effects of each step between dilution and dispersion, the dispersion between epoxy and CNT was evaluated via the electrical resistance and optical methods. The optimum dispersion was obtained via mechanical test and thermal analysis by DSC. Among four types, the best was to disperse CNT after epoxy and hardeners were diluted respectively.

초 록: 탄소나노튜브(CNT)에 에폭시를 혼합시킬 경우, 에폭시를 희석시키게 된다. 본 연구에서는 에폭시 희석 조건이 CNT 분산도에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 사용된 아세톤, DMF에 대한 희석방법이 에폭시 수지에 미치는 영향을, 기계적 강도 및 용해도로 확인하여 최적의 용매 조건을 선정하였다. 아세톤의 경우가 DMF보다 용해도 분산결과가 우수하였고, 기계적 강도가 높은 에폭시 수지 경화상태를 확인했다. CNT 입자를 혼합시키는 과정을 총 4가지 조건으로 실시하였다. 희석 및 분산 순서에 따른 영향을 확인하기 위해 전기저항 측정법과 빛 투과 분산도 평가방법으로 CNT 에폭시의 분산상태를 조사하였다. 기계적 물성 평가와 DSC를 이용한 열분석 방법으로 최적의 분산 조건을 구하였다. CNT를 분산시킨 4가지 중에서, 에폭시와 경화제를 각각 희석시킨 후 나노입자를 분산시키는 경우가 우수한 분산 결과를 나타내었다.

Key Words: 탄소나노튜브(Carbon nanotube), 희석(Dilution), 분산도(Dispersion), 에폭시(Epoxy)

1. 서 론

CNT 입자는 내열성, 강인성 강화, 전기적 특성, 열적 특

성에 대한 강화 효과가 높아 금속, 고분자, 세라믹 기지에 강화재로 많이 연구되고 있다[1]. CNT 입자에 대한 소재적 강화효과는 높지만 공정 단계에서 발생하는 문제가 많은

Received 12 July 2016, received in revised form 18 August 2016, accepted 19 August 2016

*Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Research Institute for Green Energy Convergence Technology, Center for Creative Human Resource & Convergence Materials, Gyeongsang National University

*†Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Research Institute for Green Energy Convergence Technology, Center for Creative Human Resource & Convergence Materials, Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: jmpark@gnu.ac.kr)

**Agency of Defense Development

편이다. 일단 입자의 크기가 나노입자이기 때문에 분산문제가 가장 크다[2]. CNT는 C-C 결합으로 이루어진 공유결합체이기 때문에 반데르발스로 인한 입자가 응집이 크게 일어날 수 있다[3]. 매우 큰 소수성을 띄기 때문에 낮은 소수성 특성을 가지는 기지재료와의 표면, 계면에 대한 친화도가 떨어져 분산도의 문제가 발생한다. CNT 입자에 대한 두 번째 문제는 경제적 문제이다. 현재 저가형 CNT가 판매되고 있기는 하지만 소재의 순도 문제나 기능성에 대한 부족함이 있기에 지속적으로 개선되어야 할 부분이다.

CNT를 이용한 복합재료는 대부분 에폭시 수지에 CNT를 혼합시키는 연구가 많다. 고상 또는 액상 에폭시 기지에 CNT를 이용할 경우 다양한 용매를 이용하여 에폭시 수지를 희석시킨 뒤 나노입자를 분산시킨다[4]. 용매를 이용해야 하기 때문에 잔존 용매를 완벽히 제거하기 위한 기술적 노하우가 소재 제조 및 특성에 미치는 영향이 큰 상황이다. 열가소성 수지에 CNT를 혼합하는 연구도 있지만, 대용량으로 실험을 하기 때문에 기계적 특성 이외의 전도성이나 열적 특성 등에 대해 개선을 요구할 때 CNT를 사용하고 있다[5].

본 연구에서는 CNT를 에폭시 수지에 혼합시키는 방법의 차이가 수지 및 CNT 에폭시 소재에 미치는 영향을 분석하였다. 우선 고체 에폭시를 사용할 경우 사용하는 용매에 따라 에폭시 수지의 특성 변화를 관찰하였다. CNT를 에폭시 기지에 분산시킬 경우 CNT 에폭시를 제조하는 공정에서 나노입자를 혼합시키는 과정의 차이가 수지의 특성에 미치는 영향을 기계적, 열적, 전기적 평가방법으로 확인하였다. 궁극적으로 에폭시 수지의 희석 조건 및 순서에 따라 CNT 에폭시 수지의 특성 변화에 대한 관찰을 시도하였다.

2. 실험

2.1 에폭시 희석을 위한 용매에 따른 에폭시 수지의 변화 관찰

본 연구를 위해 고체 에폭시(MY720, Huntmans, 미국)를 기지로 사용하였으며, 경화제(DDS, Huntmans, 미국)는 4관능기 조건으로 높은 가교 특성을 가질 수 있는 에폭시 조합을 사용하였다. 수지와 경화제의 비율은 65:35의 무게비로 혼합을 시도하였다. 용매에 따른 에폭시 수지의 희석 조건 차이를 관찰하기 위해 가장 많이 사용하는 아세톤 희석 조건과 DMF 희석 조건, 2가지에 대해서 에폭시 수지의 상태 변화를 만능재료시험기(LP5K, Lloyd Co., Ltd., 미국)으로 기계적 평가(인장: ASTM D638, 굴곡: ASTM D790, 압축: 브로트만 압축시험법 충격: ASTM D256)를 실시하였다[6,7]. 용매 희석 조건에 따른 에폭시 수지의 T_g 변화를 관찰하기 위해 DSC(Q20, TA instrument, 미국)을 이용하여 조건에 따른 결과를 비교하여 수지의 열적 특성 변화를 관찰하였다. 에폭시 희석을 위해 사용되는 용매의 차이를 분석하기 위해 용

해도분석을 해볼 수 있다[8]. 용매와 비정질 고분자의 경우 전체 결합에너지는 분산력 뿐만 아니라 극성 그룹과 수소결합력에 의한 상호작용을 받게 된다. 용해도 매개변수에 대해 전체 결합에너지를 계산할 수 있으며 이는 식 (1)과 같다.

$$E_{coh} = E_d + E_p + E_h \quad (1)$$

여기서 E_d 는 contribution of dispersion forced를 의미하며, E_h 는 contribution of hydrogen bonding이다.

전체 용해도 매개변수(δ)는 각각의 결합에너지에 대응되는 세 가지의 부분적인 용해도 매개변수로 구성되어 있다.

$$\delta = \sqrt{\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2} \quad (2)$$

δ_d 는 분산력에 대한, δ_p 는 극성에 대한, δ_h 는 수소결합에 의한 용해도 인자이다. δ_p 와 δ_d 는 상관관계가 크기 때문에 δ_v (부피의존인자)로 나타낼 수 있다.

$$\delta_v = \sqrt{\delta_d^2 + \delta_p^2} \quad (3)$$

δ_v 를 이용하여 식 (2)와 혼합하면, 식 (4)를 유도해 낼 수 있다.

$$\delta = \sqrt{\delta_v^2 + \delta_h^2} \quad (4)$$

많은 용매에 대한 용질의 용해 능력을 $\delta_h - \delta_v$ 조건으로 확인할 수 있으며, 용질과 용매사이의 $\delta_h - \delta_v$ 차이가 적을수록 용질의 용매에 대한 용해도가 증가된다. 이런 값은 $\Delta\delta$ 로 표현이 될 수 있으며, 식 (5)로 나타낸다.

$$\Delta\delta_{i,j} = \sqrt{(\delta_{v,i} - \delta_{v,j})^2 + (\delta_{h,i} - \delta_{h,j})^2} \quad (5)$$

위 식에서 i 는 용매, j 는 용질을 의미하고 $\Delta\delta$ 결과 값이 작을 경우 용질이 용매에 잘 용해됨을 설명한다.

δ 값을 구하기 위해 Hofyzer-Van Krevelen의 방법을 이용하여 구할 수 있다[9].

$$\delta_d = \frac{(\sum F_d)}{V} \quad (6)$$

$$\delta_p = \frac{\sqrt{(\sum F_p^2)}}{V} \quad (7)$$

$$\delta_h = \frac{\sqrt{\sum E_h}}{V} \quad (8)$$

여기서 F_d 는 dispersion group molar attraction contribution [$J^{1/2}cm^{3/2}/mol$]이고, F_p 는 polar group molar attraction contribution [$J^{1/2}cm^{3/2}/mol$]이다. E_h 는 hydrogen bonding parameter group contribution [J/mol]이다. 본 연구에서 사용한 에폭시, 경화제에 대한 구조식에 대한 F_d , F_p , E_h 는 참조

문헌을 이용하여 계산이 가능하다[9].

2.2 CNT 혼합 방법에 따른 차이가 CNT 분산도에 미치는 영향 분석

CNT 입자를 혼합시키는 조건에 대해서 4가지 경우를 Fig. 1과 같이 나타내었다. 에폭시 수지만 아세톤에 희석시켜 경화제와 CNT를 혼합시키는 과정, 파우더 타입의 경화제를 아세톤에 희석시켜 CNT와 에폭시 수지를 혼합시키는 과정, 아세톤 용매에 에폭시, 경화제, CNT를 모두 넣어 혼합시키는 과정, 마지막으로 에폭시와 경화제를 각각 희석시키고 CNT를 넣어 CNT 에폭시 수지를 제조하는 총 4가지의 조건을 설정하였다. 아세톤에 경화제나 에폭시 수지를 혼합시키는 과정은 40도 조건에서 용질을 넣고 500 rpm으로 1시간 교반시켜 희석액을 제조하였다. CNT를 용매에 넣어 분산시킬 경우 초음파분쇄기를 이용하여 50%의 앰프리튜드 조건에 0.5초 주기로 초음파 분쇄과정을 1시간 가지고 실험을 진행하였다. CNT의 농도는 1 wt%로 동일하게 제조하였다.

CNT 에폭시 수지의 분산도를 평가하기 위해 경화를 시키기 전에 CNT 에폭시 수지를 PET 필름에 0.5 g 덜어 Fig. 2와 같이 투과현미경을 이용하여 혼합조건이 다른 4가지 조건에 대해 시편의 투과도를 분석하여 CNT 응집 정도를 확인하였다.

또한 200도 2시간 경화 조건으로 오토클레이브에서 5 kgf/cm²로 CNT 에폭시 수지를 제조하였다. 이를 이용하여 인장강도 평가와 부피저항 측정법, 유리전이온도 측정을 이용하여 CNT 혼합방법에 따른 CNT 에폭시의 분산 정도를 확인하였다. 부피저항을 이용한 분산도 평가 방법은 Fig. 3과 같다. Fig. 3과 같이 CNT 에폭시의 CNT 분산도 평가를

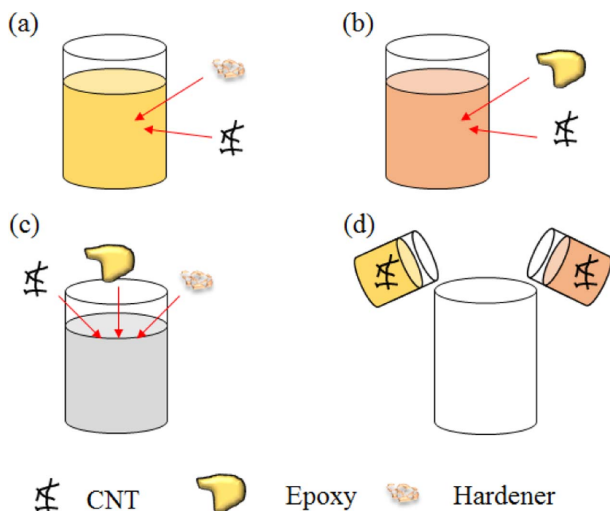


Fig. 1. Schematic of different mixing method to make the CNT epoxy composites: (a) diluted epoxy; (b) diluted hardener; (c) bulk mixing; and (d) diluted CNT epoxy and diluted CNT hardener

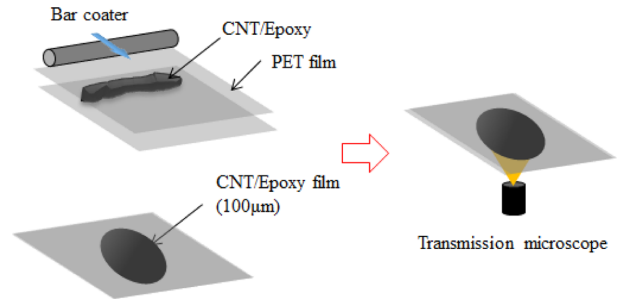


Fig. 2. Modeling of evaluation process of CNT epoxy composites for CNT dispersion condition

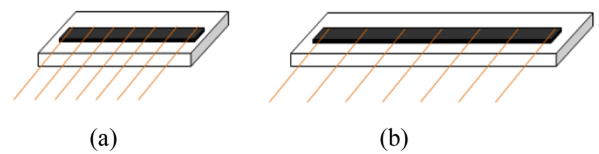


Fig. 3. Modeling of CNT epoxy composites for dispersion condition using electrical resistance method: (a) short type; and (b) long type

위해서 두께 1 mm, 폭 2 mm, 길이 26 mm의 직육면체 시편을 제조하고, 구리선을 4 mm 간격으로 설정하여 총 6구간의 부피저항 측정한다. 또한 시편의 사이즈를 두께 1 mm, 폭 2 mm, 길이 50 mm으로 확대시켜 2가지 시편 종류에 따른 전기저항 분산도 평가 결과를 이용하여 CNT 에폭시 희석 방법의 차이에 따른 결과를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용매에 따른 에폭시 수지 희석액의 차이 및 경화된 에폭시의 특성 변화 결과

Fig. 4는 희석액(아세톤, 디메틸포름아마이드(DMF))의 차이에 따른 희석액 제조의 차이와 가열 후 에폭시 수지의 대기조건에서의 경화 상태를 분석하였다. Fig. 4(a)와 같이 희석단계를 가지기 위해 MY720 고체 에폭시 조건과 파우더 타입의 DDS 시료를 각각의 용매에 넣고 500 rpm 조건에서 교반시켰을 때 30분이 지나도 DMF 용매 조건에서는 DDS 덩어리를 관찰할 수 있었지만, 아세톤에서는 DDS 경화제의 응집이 적게 되는 상태였다. 또한 희석 교반 단계를 1시간 이상 진행시켰을 경우 아세톤 희석 조건에서는 비교적 고상의 경화제와 수지가 희석되어 133 cp의 결과를 나타내었지만, DMF 조건에서는 1743 cp의 점도가 측정되었고, DDS의 응집이 풀리지 않았다.

Fig. 4(b)의 결과는 희석된 에폭시/경화제 용액에 대해서 160도 조건에서 상온 경화를 시켰을 때의 사진 결과이다. 아세톤으로 희석시켰을 경우 버블의 발생이 크게 일어났으며, DMF 용매 조건에서는 비교적 용매의 휘발이 크게 일어나지 않았다. 수지가 경화될 때 아세톤 희석액의 경우 미

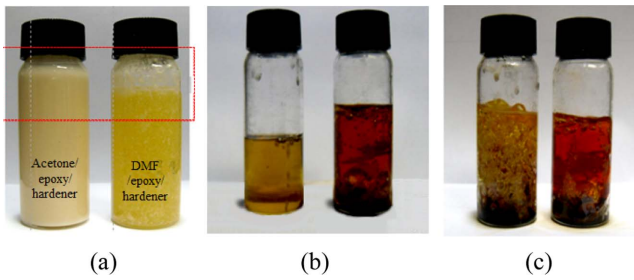


Fig. 4. Photos of each diluted epoxy/hardener/solvent condition with different solvent type: (a) mixing condition; (b) boiling condition; and (c) cured condition

Table 1. Solubility parameter of epoxy, hardener and solvent

	δ_d	δ_p	δ_h	δ_v	δ
Acetone	13	9.8	11	16.3	19.7
DMF	17.4	13.7	11.3	22.2	24.8
Water	12.2	22.8	40.4	25.9	48
DDS	14.9	2.4	9.6	15.1	17.9
MY720	7.4	4.3	4.9	8.6	9.9

세기공이 많이 발생되었으나 DMF 희석액의 경우 기공발생이 적었다. 즉 용매의 휘발 정도를 볼 때 아세톤이 DMF에 비해 유리하였으며, 향후 복합재료를 제조할 경우 고압의 진공처리 없이 가열 공정으로 수지 내 용매의 제거를 최소화 시킬 수 있는 용매가 아세톤임을 확인할 수 있었다.

Table 1과 같이 용해도파라미터를 이용하여 소재에 대한 용해도 인자 결과를 정리해 보았다. 이를 이용하여 식 (5)를 이용해서 에폭시와 용매, 경화제와 용매에 대해서 분석해보면, DDS/아세톤 조건이 $31.5 \text{ MPa}^{1/2}$ 결과로 가장 낮은 용해도 조건임을 확인해 볼 수 있었다(DDS/DMF: 37.31, DDS/물: 51.3). 에폭시 수지의 경우 MY720/아세톤 조건이 $26.1 \text{ MPa}^{1/2}$ 결과로 가장 낮았다(MY720/DMF: 31.4, MY720/Water: 49.5). 용해도파라미터의 결과가 낮은 결과일수록 희석이 잘된다는 말이며, DMF와 아세톤을 비교해 본다면 아세톤을 이용하는 경우가 비교적 고상의 에폭시 희석에 도움이 된다는 설명을 할 수 있다.

Fig. 5는 경화된 수지에 대해서 DSC를 이용한 T_g 분석을 한 결과이다. 그림과 같이 아세톤을 이용한 에폭시 수지는 T_g 가 200도를 넘어가지만, DMF를 이용해 희석시킨 에폭시 수지는 T_g 가 120도 부근으로 매우 큰 차이를 나타내었다. 이러한 결과는 Fig. 4(b)의 결과를 통해 확인할 수 있듯이 용매의 제거 정도가 미치는 에폭시 수지의 구조적 차이라고 설명할 수 있다.

Fig. 6과 같이 용매에 따라 수지의 구조적 차이가 발생할 수도 있다. 용매의 제거가 단순히 온도 가열에 따라 쉽게 용매가 휘발되면서 제거가 되는 아세톤의 경우 고분자 구조적으로 경화가 발생되어도 수지의 특성에 영향을 미치지

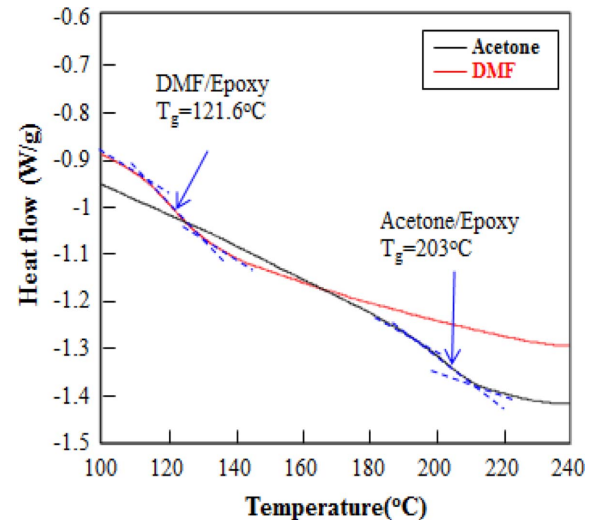


Fig. 5. DSC test of epoxy resins using different solvent type

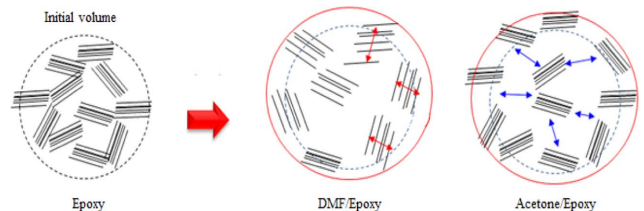


Fig. 6. Modeling of epoxy conformation with different solvent

않는다. 하지만 DMF와 같이 용매 제거가 어려운 경우 수지의 경화를 일으킨다 했을 때 고분자의 구조를 변경시키기 때문에 문제가 되며, 이러한 차이에 의해 아세톤이 DMF에 비해 희석으로써의 역할이 우수하였다.

Fig. 7은 에폭시 희석 용매의 차이에 따른 수지 경화 후 기계적 강도를 측정한 결과이다. 인장, 압축, 굴곡, 충격 모든 평가에서 아세톤으로 희석시킨 에폭시의 특성이 우수한 결과를 나타내었다. 용매에 따라 기지재료의 특성이 매우 크게 변화된다는 점은 향후 복합재료 성형에서도 고려를 해야 할 부분이며, 오토클레이브를 이용하고 고열의 200도 경화 단계에서 희석 용매가 쉽게 제거되어야 공정 단순화를 이룰 수 있기 때문에 아세톤을 이용한 희석 조건이 최적의 조건임을 예상해 볼 수 있었다.

3.2 CNT 분산 공정의 차이에 따른 CNT 에폭시의 특성 및 분산도 상태 평가 결과

Table 2는 CNT의 분산도 평가를 위해 실시한 부피저항측정법을 이용하여 CNT 에폭시 제조 방법에 따른 차이를 정리한 결과이다. 희석시킨 에폭시 조건에 CNT를 혼합시키는 것이 희석시킨 경화제 조건에 혼합시키는 경우보다 낮은 전기저항 결과를 나타냈다. 또한 아세톤 용매에 고체 에폭시와 파우더 경화제, CNT를 동시에 혼합시키는 것은 비교적 분산 결과가 불안정한 것으로 확인되었다. 결과가 안

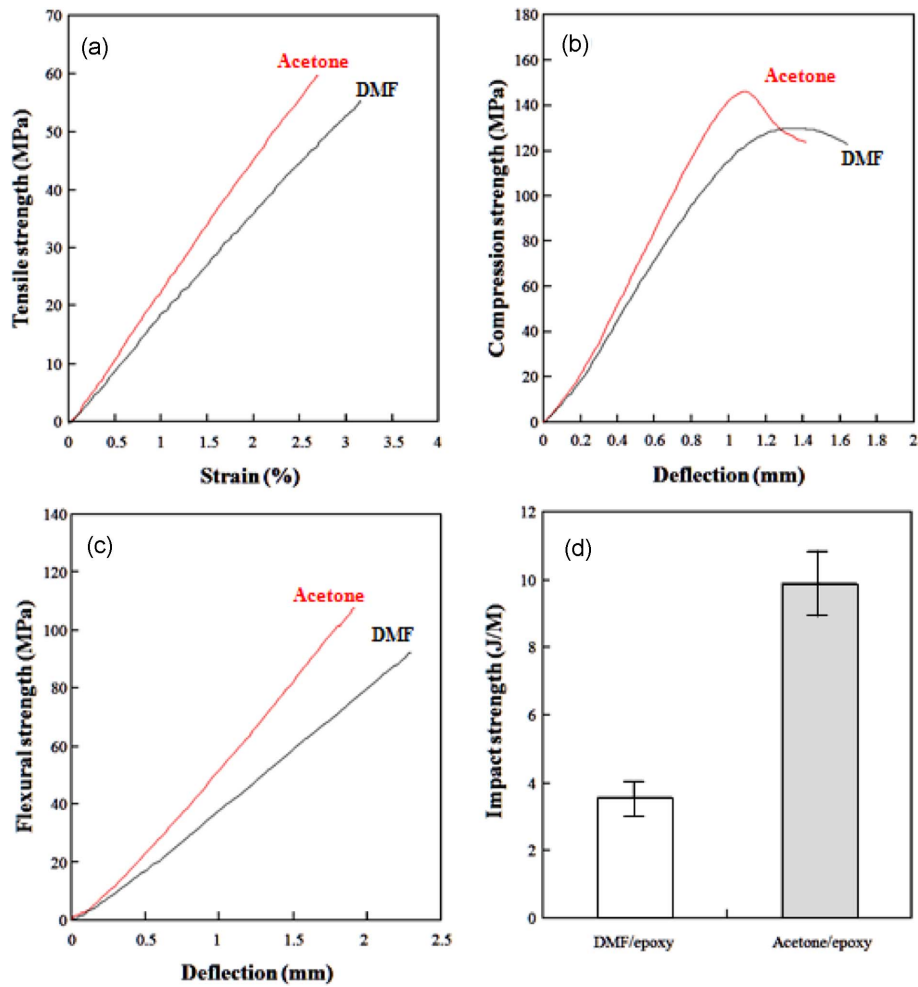


Fig. 7. Mechanical property of epoxy at different solvent: (a) tensile test; (b) compressive test; (c) flexural test; and (d) Izod impact test

Table 2. Dispersion condition of CNT epoxy with different mixing method using ER measurement

Test type	4 mm (kΩ/mm)	8 mm (kΩ/mm)
Diluted epoxy	61 (15)*	66 (11)
Diluted hardener	50 (14)	79 (21)
Bulk mixing	87 (27)	88 (28)
Diluted epoxy + diluted hardener	42 (12)	55 (8)

(*)*: Standard deviation

정적이지 못하였다.

Table 3은 각 조건별로 CNT를 분산시키고 그에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 결과이다. 동시에 에폭시, 경화제, CNT를 아세톤에 넣는 방법 (3)과 같은 경우 CNT의 분산도가 안정적이지 못하기 때문에 기계적 강도가 다른 경우에 비해 떨어지는 경향을 나타내었다.

반면 에폭시를 희석시키거나 경화제를 희석시킨 경우는 비교적 64 MPa 수준의 인장강도를 나타내었다. 가장 최적

Table 3. Tensile property of CNT epoxy with different mixing method

Test type	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Tensile Modulus (GPa)
Diluted epoxy	66 (4)*	4.4 (1)	1.5
Diluted hardener	64 (6)	4.4 (1.2)	1.4
Bulk mixing	58 (6)	4.2 (1)	1.3
Diluted epoxy + diluted hardener	71 (3)	4.3 (0.8)	1.7

(*)*: Standard deviation

의 조건은 에폭시를 따로 희석시키고 경화제를 따로 희석시킨 경우였으며, 인장강도와 인장강성도가 높은 결과를 나타내었다. 이는 CNT에 의한 보강효과가 나타났기 때문이라고 예상할 수 있으며, CNT를 분산시키는 방법에 따라 소재의 특성이 변화되는 것이었다.

Fig. 8은 DSC를 이용하여 CNT 에폭시를 제조하는 조건

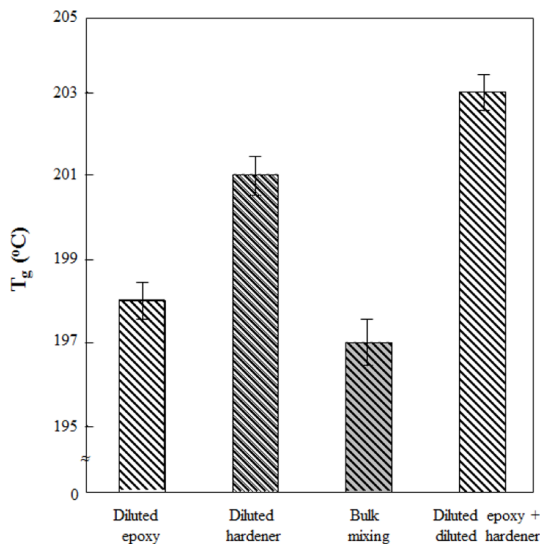


Fig. 8. DSC test of CNT epoxy composites with different mixing method

에 따른 T_g 결과를 비교한 결과이다. 2회의 분석 사이클을 진행하여 나타나는 T_g 결과를 정리한 결과이며, T_g 분석 결과에서도 에폭시 희석과 경화제 희석을 각각 진행시키고 CNT를 분산시킨 경우에 T_g 가 가장 높게 나타났다. 분산 처리 방법을 다르게 하였을 경우 CNT의 분산이 비교적 안정적으로 나타났다. 이럴 경우 소재에 대한 CNT의 내열성 강화 역할로 T_g 가 증가되었다고 설명할 수 있다. Fig. 9는 투과 현미경을 이용하여 PET 필름에 CNT 에폭시 수지를 0.5 g 넣고 바코터로 밀어 100 μm 의 CNT 에폭시 필름에 대한 투과 현미경 촬영 결과를 정리한 것이다.

Fig. 9는 투과현미경을 이용하여 200배 확대하여 CNT 에폭시 필름의 상태를 분석한 결과이다. 이 결과를 바탕으로 확인할 수 있는 것은 CNT 에폭시 필름 내부에 존재하는 CNT 입자의 응집 정도를 확인할 수 있다는 점이다. 실제로 강도와 전기저항 분산도 평가에서 우수한 분산도 결과를 나타내었던 에폭시 희석 및 경화제 희석한 용액에 CNT를 분산시켰던 방법에서 비교적 작은 CNT 응집 크기를 확인할 수 있었다. Fig. 9(d)의 결과와 같이 CNT 분산이 용이할 경우 전체적으로 빛이 투과되지 못하기 때문에 불투명한 사진을 확보할 수 있었다. 즉 빛이 투과를 잘 못한다는 점은 CNT의 분산 상태가 비교적 우수함을 의한다. Fig. 9(c)의 결과는 매우 큰 CNT 응집 결과를 확인할 수 있었고 내부에 빛이 투과되는 정도도 비교적 다른 분산 조건에 따른 결과와 다르게 빛 투과성이 높았다. 즉 CNT 분산이 제대로 이루어지지 않고 CNT간의 응집이 크게 발생되어 있음을 의미하였다.

4. 결 론

본 연구에는 CNT를 혼합시킨 에폭시 수지에 대한 희석 용매에 따른 수지의 물성 변화와 CNT 에폭시 수지를 제조할 때 혼합 공정의 차이에 따른 분산도 차이를 분석하였다. 에폭시 수지를 희석하기 위해 아세톤을 이용하는 경우 DMF를 이용하는 경우에 대해 희석시킨 에폭시의 경화 후 기계적 물성과 점도, 경화 후의 용매 제거 정도를 관찰해볼 때 아세톤을 이용하는 경우가 가장 최적이었다. CNT 에폭시 수지를 제조할 경우는 희석시켜서 분산시키는 과정이 CNT의 분산도에 미치는 영향이 존재함을 확인할 수 있었다. 전기저항 분산도 평가방법과 투과현미경을 이용한 분

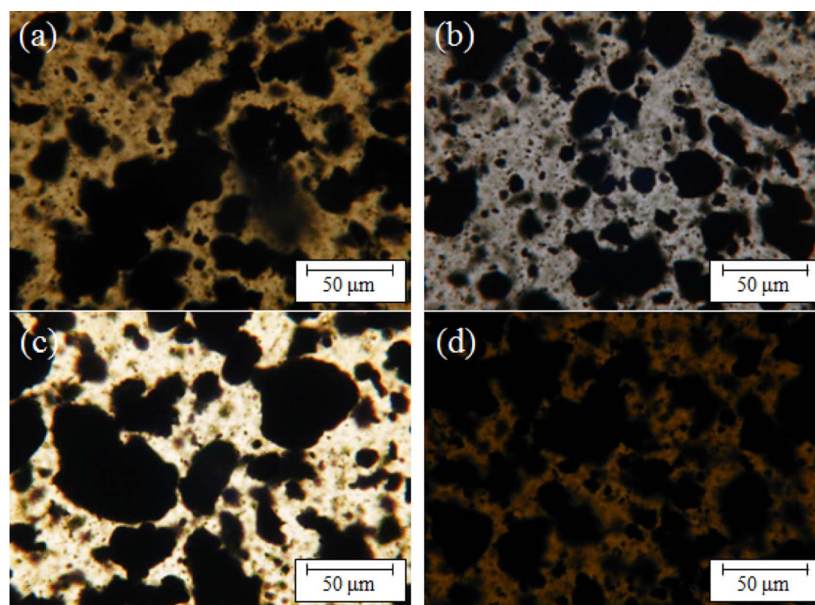


Fig. 9. Photos of CNT epoxy composites as different mixing method through the transmission microscope: (a) diluted epoxy; (b) diluted hardener; (c) bulk mixing; and (d) diluted epoxy and diluted hardener

산도 평가방법 결과에서 에폭시와 경화제가 희석된 상태에서 CNT를 분산시키는 과정을 가지는 것이 최적임을 확인할 수 있었다. 즉 CNT 에폭시를 제조할 경우 혼합 방법에 따라 기지의 T_g 및 기계적 특성이 변화되기 때문에 최적의 희석 조건을 구축하는 것이 CNT 분산도 개선에 도움이 됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초영역과제 지원을 받아 수행했습니다. 저자 중 신평수, 김중현은 BK-21 플러스지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Xia, S., Jong, K.L., and Michael, R.K., "Influence of MWCNTs on Fracture Toughness of MWCNTs/Nickel-Pitch Fiber/Epoxy Composites," *Composites Research*, Vol. 28, 2015, pp. 361-365.
2. Lee, B.N., Kim, C.H., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Evaluation of Dispersivity and Resistance of the Adhesive Joint According to Dispersion Methods of CNT," *Composites Research*, Vol. 28, 2015, pp. 348-355.
3. Jang, J.H., Yi, J.W., Lee, W.O., Lee, H.G., Um, M.K., Kim, J.B., and Byun, J.H., "Dispersion and Property Evaluation of Nanocomposites by Aspect Ratio of MWCNT," *Composites Research*, Vol. 23, 2010, pp. 58-63.
4. Kwon, D.J., Wang, Z.J., Gu, G.Y., and Park, J.M., "Surface Control and Durability Evaluation of CNT and ITO Coated PET Transparent Electrode with Different Dry Conditions," *Composites Research*, Vol. 24, 2011, pp. 17-22.
5. Kim, H.S., Kwon, D.J., Gu, G.Y., Kim, D.S., Lee, C.S., and Park, J.M., "Electrical Resistance Measurement in Characterizing the Internal Damage of Carbon Nanotube/Polypropylene Nanocomposites," *Composites Research*, Vol. 26, 2013, pp. 201-206.
6. Yoon, S.J., Kim, M.S., and Jang, S.Y., "Effects of Microcapsules on Mechanical Properties and Thermal Stability of Microcapsule Embedded Polymeric Resins," *Composites Research*, Vol. 28, 2015, pp. 316-321.
7. Lee, G.H., Roh, J.U., and Lee, W.I., "Processing and Flexural Properties of Chopped Jute Fiber Reinforced PLA Sandwich Composites," *Composites Research*, Vol. 27, 2014, pp. 96-102.
8. Kang, J.H., Chung, S.T., and Row, K.H., "Estimation of Solubility of the Useful Components in Some Natural Products," *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol. 39, 2001, pp. 390-396.
9. Barton, A.F.M., "CRC Handbook of Solubility Parameters and other Cohesion Parameter," CRC Press, Boca Raton, Fla, 1983, pp. 85.