

論文

다중벽 탄소나노튜브/에폭시 복합재료의 인장 물성에 관한 연구

이상의*, 이원준*, 김천곤**

A Study on Tensile Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube/Epoxy Composites

Sang-Eui Lee*, Won-Jun Lee*, Chun-Gon Kim**

ABSTRACT

The studies of particulate reinforced composites have been conducted for many years. The nanocomposites to be studied vigorously in recent years are one of them. We fabricated and studied multi-walled carbon nanotube(MWNT)/epoxy composites which may be useful as matrix for continuous fiber-reinforced composites. We investigated tensile properties of MWNT/epoxy composites as a function of MWNT concentration, which were prepared by the fabrication method established in this study. Tensile stiffness and strength increased 19% at 0.5 wt% and 12% at 0.2 wt%, respectively. We observed the reaggregation phenomenon of MWNTs during curing, which should be controlled to obtain higher tensile properties.

초 록

입자강화복합재료에 관한 연구는 오래 전부터 수행되어왔다. 최근 활발한 연구가 이루어지고 있는 나노복합재료도 역시 입자강화복합재료의 한 종류라 할 수 있다. 본 연구에서는 섬유강화 복합재료의 모재로서 사용되어질 수 있는 다중벽탄소나노튜브/에폭시 복합재료를 제작하고 그 물성을 고찰하였다. 본 연구에서 정립한 제작 공정을 사용하여 제작된 다중벽 탄소나노튜브/에폭시 복합재료의 인장 물성을 MWNT의 첨가량에 따라 고찰하였다. 0.5wt%의 MWNT를 첨가하였을 때, 인장강성은 19%, 인장강도에서는 12%의 증가를 보였다. 또한 경화시 발생하는 재응집 현상을 관찰하고, 기계적 물성을 더 높이 향상시키기 위해서는 이 현상을 억제해야 함을 확인하였다.

Key Words: 다중벽탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube, MWNT), 다중벽탄소나노튜브/에폭시 복합재료(MWNT/epoxy composite), 인장물성(tensile properties), 재응집 현상(re-aggregation phenomenon)

1. 서 론

입자강화복합재료(particulate reinforced composite)에 관한 연구는 오래 전부터 복합재료 연구자들의 관심이 되어왔으며, 최근 활발히 연구가 이루어지고 있는 나노복합재료 역시 이 입자강화복합재료의 종류라 할 수 있다. 모재의 기계적·전자기적 물성을 향상시키기 위해 사용된 기존의 필러(filler)로는 탄소단섬유(short carbon fiber), 탄소필라멘트

(carbon filament), 카본 블랙(carbon black) 등이 있으며, 최근에는 신소재로서 매우 뛰어난 잠재성을 가지고 있는 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)가 1991년 Iijima[1]에 의해 발견되어 복합재료의 물성 향상을 위해 이를 사용하고자 하는 많은 연구가 수행되고 있다. 탄소나노튜브는 구조상으로 크게 단일벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube, SWNT)와 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube, MWNT)로 나뉘어지며, 그 자체로 뛰어난 기계적·전자기적

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

성질을 갖고 있을 뿐만 아니라 높은 종횡비(aspect ratio)를 가지고 있어, 복합재료의 필러로서 가치가 매우 높다[2,3]. 물론, 현재는 나노 수준의 매우 작은 크기로 인하여 취급 및 조작이 어렵고 높은 제작 비용으로 인해 가격 경쟁력이 떨어진다는 단점이 있지만, 대량생산을 위한 지속적인 공정개발과 취급 및 조작에 대한 새로운 기술개발을 통해 생산비용을 절감하고 있는 추세이다.

보강재로서 탄소나노튜브를 사용하여, 다양한 폴리머의 물성을 향상시키고자 하는 연구가 이루어져 오고 있으며, 폴리머 내에 분산도의 향상과 탄소나노튜브와 폴리머 사이의 하중전달 기구에 초점을 맞추어 연구가 수행되어져 왔다. 분산도를 향상시키기 위한 대부분의 연구에서는 CNT를 폴리머 내에 분산시킬 때 제일 문제가 되는 것이 폴리머의 점도라고 판단하여, 에탄올(ethanol), DMF(dimethylformamide), 클로로포름(chloroform) 등과 같은 용매를 폴리머와 혼합하여 점도를 낮추어 CNT를 분산시킨 후에 용매를 기화시키는 방법으로 복합재료를 제작하였다[4-12]. 에폭시의 경우는 에폭시 레진과 경화제로 되어 있으므로, 위의 공정을 레진에만 적용시키고 이후 탄소나노튜브와 레진으로만 구성된 혼합물을 얻은 후 경화제를 추가하여 혼합하는 방법으로 복합재료를 제작하였다[4-8]. 또한 분산도를 좀 더 향상시키기 위해 계면활성제를 사용하기도 하였다[8].

기존의 연구결과에 따르면 물성이 오히려 저하되는 연구도 있었으나, 대부분의 연구에서 기계적 물성이 20~50% 정도 향상되었다. 물성 향상과 하중전달 기구를 연계시킨 연구들은 기계적인 압입, 화학적 결합, 반데르발스 인력 등이 CNT와 폴리머 사이에 강한 결합을 유지하게 하는 요인으로 판단하였으며, 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)을 통해 이런 강한 결합이 크랙 전진을 지연시키는 효과가 있음을 관찰하였다[9-12].

본 연구에서는 CNT/에폭시 나노복합재료를 모재로 한 섬유강화 복합재료의 물성을 좀 더 깊이 이해하고자, CNT/에폭시 나노복합재료의 기계적 물성 연구를 수행하였다. 기존의 연구들과 유사한 공정을 통하여 복합재료를 제작하되, 공정변수에 따른 물성의 변화를 고찰하여 최적의 제작공정을 정립하였다. 또한 기존의 연구에서 언급하지 않은 CNT들의 재응집 현상을 관찰하고, 이 현상을 억제할 수 있는 방안을 살펴보고, 그 방법에 따른 기계적 물성의 변화를 고찰하였다.

2. MWNT/에폭시 복합재료의 제작 방법

2.1 재료의 선정

본 연구에서 사용된 MWNT는 화학기상증착법(chemical vapor deposition, CVD)에 의해 일진나토텍에서 제조된 것이다. Fig. 1은 MWNT의 투과전자현미경 사진이다. 이를

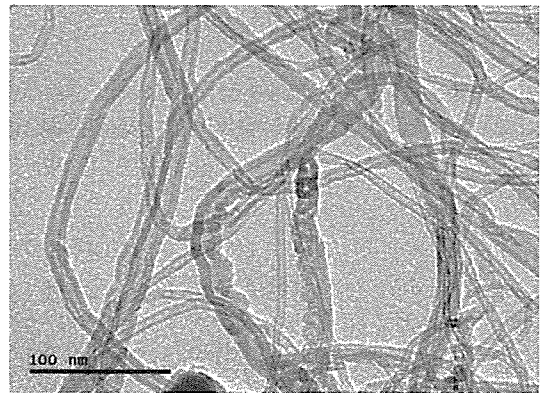


Fig. 1 Transmission electron microscopy of used MWNT.

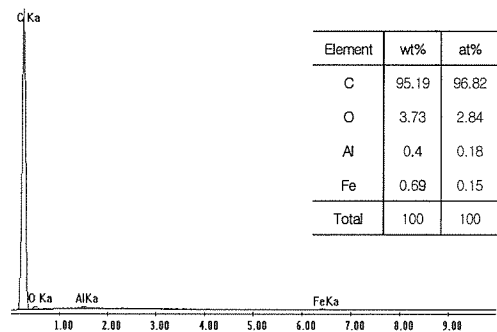


Fig. 2 Energy dispersive spectroscopy of used MWNT.

통해 다중벽으로 구성되어 있으며, 직경이 10~20 nm, 종횡비는 1000 이상임을 확인하였다. 또한 Fig. 2에 보여지는 EDS(energy dispersive spectroscopy) 분석을 통하여 탄소원소 함량이 95 wt% 이상임을 확인할 수 있었고, 제조사에서 제공받은 TGA(thermal gravimetric analysis) 결과로부터도 무정질(amorphous) 카본은 거의 없는 것으로 보여 MWNT 자체의 함량은 높은 것으로 판단된다. EDS 분석에서 나타난 미량의 Al 및 Fe는 MWNT를 제작하기 위해 사용된 금속 촉매의 잔류량이며, wt%는 무게 백분율(weight percent)을, at%는 원자 백분율(atomic percent)을 나타낸다. 에폭시와 경화제는 국도화학에서 구매한 YD-128과 TH-431을 사용하였으며, 섬유강화 복합재료의 모재로 사용되거나 코팅에 사용되는 것이다.

2.2 제작 방법

먼저 MWNT를 40 kHz의 초음파를 이용하여 용매인 아세톤에 2시간동안 분산시킨 후, 이 용액과 에폭시를 혼합하여 2시간동안 교반하였다. 교반 속도는 2000 rpm으로 하

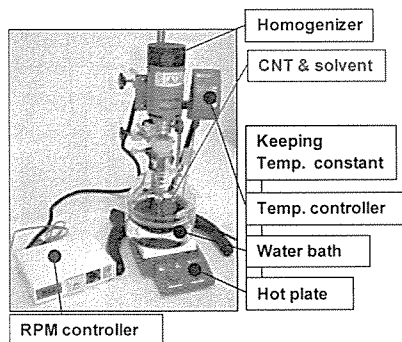


Fig. 3 A homogenizer and temperature controlling system.

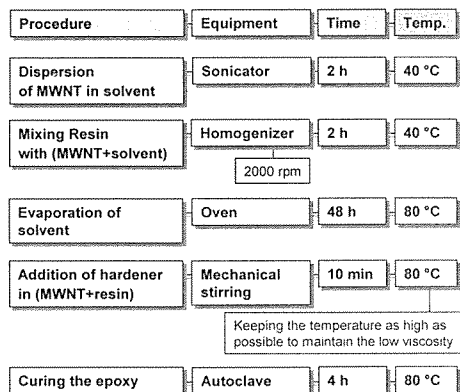


Fig. 4 Fabrication procedure of MWNT/epoxy composites.

었다. 이 과정까지는 가능하면 아세톤의 급격한 기화를 막으면서 용액의 점성을 낮게 유지하기 위해 40 °C로 유지하였다. Fig. 3은 교반기(homogenizer)와 온도를 유지하기 위한 장치를 보여준다. 이 용액을 상온에서 12시간, 80 °C에서 36시간 동안 오븐에 넣어 용매를 제거하고 MWNT와 에폭시 레진으로만 이루어진 혼합물을 얻었다. 그 후에 이 혼합물을 경화제와 혼합하여, autoclave에서 7기압에서 80 °C로 4시간 동안 경화시켜 복합재료를 제작하였다. 용매를 제거한 후에도 지속적으로 온도를 80 °C로 유지하였다. 이 과정에서 온도가 내려갈 경우, 점성이 증가한 상태에서 경화가 계속 일어남에 따라, 온도를 80 °C로 유지하여 제작한 시편에 비해 상대적으로 많은 기공이 존재하였다. 제작 과정을 개요화하여 Fig. 4에 나타내었다. 이는 공정변수의 변화에 따른 물성의 변화를 고찰한 후 정립한 것이다.

Fig. 5는 1.0 wt%의 MWNT가 첨가된 에폭시 복합재료의 파단면의 주사 전자 현미경(scanning electron microscopy, SEM) 사진이다. 흰색의 점들로 나타난 부분은 MWNT이며, 흰색의 타원과 원으로 표시된 부분은 MWNT가 부분적으로 응집된 대표적인 부분이다. MWNT가 부분적으로 응집

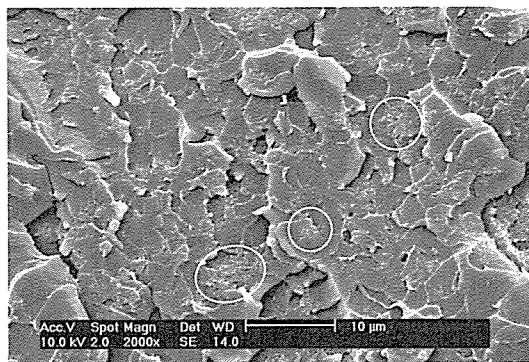


Fig. 5 A SEM image of a fractured surface of 1.0 wt% MWNT/epoxy composites.

되어져 있는 것을 확인할 수 있으나, 응집된 사이로 에폭시가 잘 분포되어 있음을 확인하였으며, 대체적으로 μm 단위로 잘 분산되어 있음을 알 수 있었다.

3. MWNT/에폭시 복합재료의 인장 물성

기계적 물성 중 인장 강성과 인장 강도에 대해 MWNT의 첨가량에 따른 물성의 변화를 고찰하였으며, 이에 앞서 공정변수의 변화에 따른 물성의 변화를 살펴보고, 제작 공정을 정립하였다. 시편의 제작과 실험은 ASTM D638에 맞추어 수행하였으며, 각 실험 당 6개의 시편이 사용되었다.

3.1 공정변수에 따른 인장 물성의 변화

분산도와 물성이 우수한 복합재료를 제작하기 위해, 공정변수에 따른 물성의 변화를 고찰하였다. 엄밀하게는 MWNT의 첨가량에 따라 경화 전 복합재료의 점도가 상당한 차이를 보이므로, MWNT 첨가량에 따라 각각의 제작 공정이 확립되어야 하나, 본 연구에서는 제작 가능한 제일 높은 첨가량에서 공정을 확립하고, 그 보다 낮은 MWNT 첨가량을 가지는 복합재료에는 그렇게 확립된 공정을 그대로 적용하였다. 본 연구에서는 MWNT가 1.0 wt%까지 첨가된 복합재료를 제작할 수 있었다. 2.0 wt%, 3.0 wt%의 MWNT가 첨가된 복합재료를 제작하여 보았으나, 점성의 급격한 증가로 인해 기포들이 발생하게 되어 온전한 복합재료를 제작할 수 없었다.

제작공정에서 고려되어야 할 수 있는 공정변수는 MWNT의 첨가량, 초음파 분산 시간, 에폭시 레진과 아세톤의 배합비, 교반기의 회전속도 등이 있다. 초음파 분산 시간이 길수록 MWNT 자체에 결함이 초래될 수 있기 때문에, 본 연구에서는 초음파 분산 시간을 2시간으로 정하고 공정변수에서 제외하였다[10]. MWNT와 아세톤의 혼합물과 에폭시 레진의 교반 시간 또한 2시간으로 충분하다고 판단하여 공정변수에서 제외하였다.

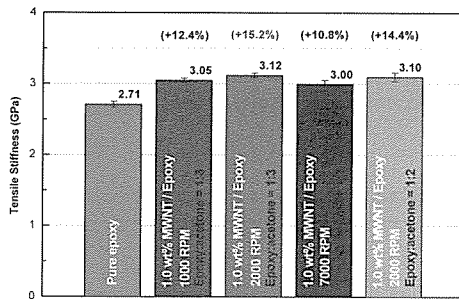


Fig. 6 Tensile stiffness with changes of the mixing ratio of epoxy resin and solvent and homogenizing speed.

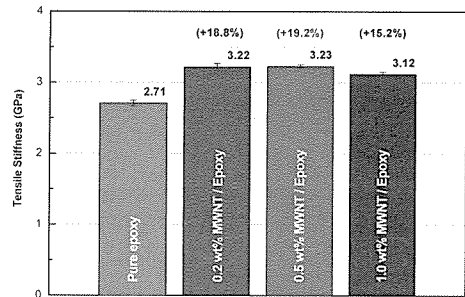


Fig. 8 Tensile stiffness with changes of MWNT concentrations.

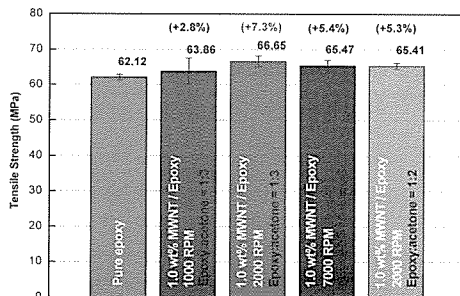


Fig. 7 Tensile strength with changes of the mixing ratio of epoxy resin and solvent and homogenizing speed.

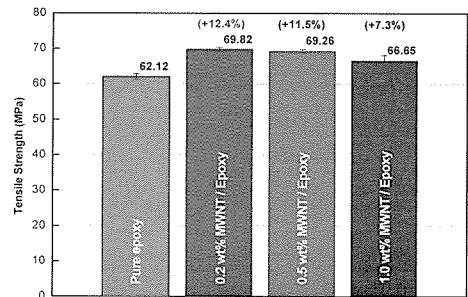


Fig. 9 Tensile strength with changes of MWNT concentrations.

3.1.1 에폭시 레진과 아세톤의 비와 교반기의 속도

먼저 교반기의 회전 속도가 1000, 2000, 7000 rpm으로 변화될 때와 에폭시 레진과 아세톤의 질량비가 1:2와 1:3으로 변할 때의 인장 물성의 변화를 고찰하였다.

Fig. 6과 Fig. 7에 보여지는 것과 같이 에폭시 레진과 아세톤의 비가 1:3인 경우, 오차범위 이내로 큰 영향은 주지 못한 것으로 판단되나, 미소하나 교반기의 속도가 2000 rpm일 때가 1000, 7000 rpm일 때보다 높은 인장 강성 및 인장 강도를 보여주었다. 그러나 일반적으로 교반기의 속도가 너무 낮거나 높은 경우 에폭시 레진 내의 MWNT의 분산도가 떨어지게 된다. 이는 속도가 너무 낮은 경우는 충분히 MWNT를 분산시킬 만한 힘이 없기 때문이며, 속도가 너무 높은 경우는 각각의 재료들이 원심 분리 현상을 경험하기 때문이다.

에폭시 레진과 아세톤의 배합비 또한 공정 상에 점도에 큰 영향을 미치나, 본 연구에서 고려한 혼합비에서는 큰 차이를 보이지는 않았다.

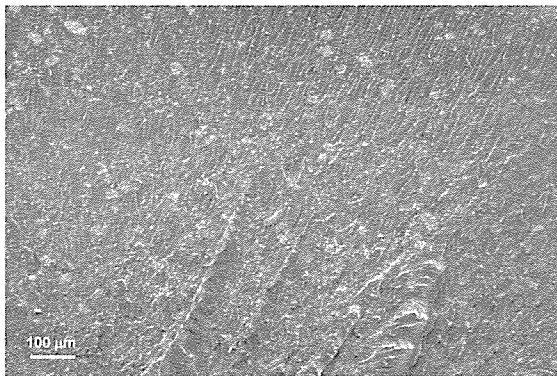
3.1.2 MWNT의 첨가량

Fig. 8과 Fig. 9는 몇 가지 MWNT 첨가량에 대한 인장 물성의 변화를 보여준다.

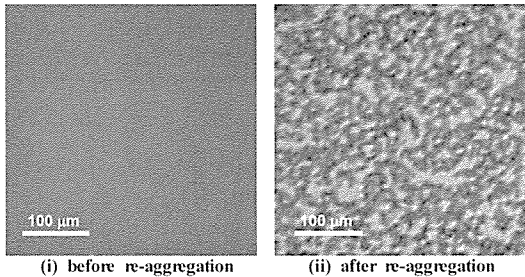
1.0 wt%까지 인장 강성과 인장 강도는 증가하였으며, 인장강성은 0.2 wt%에서와 거의 유사하나 0.5 wt%에서 19%로 가장 많은 증가를 보였으며, 인장강도 또한 0.5 wt%와 오차범위 내에 있으나 0.2 wt%에서 12%로 가장 많은 증가를 보여주었다.

3.2 경화 중 MWNT의 재응집 현상

복합재료를 제작하는 데 있어, 고온에서나 MWNT의 첨가량이 낮은 경우는 에폭시의 점도가 낮아 MWNT가 에폭시 내에 균일하게 분산되더라도, 경화되는 도중에 MWNT끼리 재응집 현상이 발생하였다. 이 현상은 MWNT 끼리의 반데르발스 인력과 경화 도중 국부적인 대류 현상에 의해 발생하는 것으로 보인다. Fig. 10(a)는 이런 재응집 현상으로 인해 성형 후에 응집된 MWNT들을 보여준다. 흰색반점으로 보이는 것이 응집된 MWNT들이다. 본 연구에서는 유리판의 표면 장력의 영향으로 얇게 제작된 시편과 두껍게 제작된 시편의 재응집 정도가 어느 정도 차이를 보일 수 있을 것으로 판단하였으나, 재응집 현상을 좀 더 명확하게 관찰하기 위해, 유리판에 경화전 상태인 혼합물을 몇 방울 떨어뜨린 후, 다른 유리판으로 덮는 방식으로 얇은 형태의 복합재료를 제작하였다. Fig. 10(b)는 이렇게 제작된 복합재료에 대한



(a) SEM image of a thickly fabricated composite



(b) microscope image of a thinly fabricated composite

Fig. 10 Re-aggregation phenomenon during curing.

재응집이 일어나기 전과 일어난 후의 모습을 보여준다. 이 그림에서는 검은 부분이 MWNT를 나타낸다. 혼합이 끝난 직후에는 Fig. 10(b)의 (i)와 같이 MWNT가 잘 분산되어 있으나, 경화 후에는 Fig. 10(b)의 (ii)와 같이 MWNT가 재응집됨을 명확히 확인할 수 있었다. 이런 재응집 현상은 복합재료 내에 응력 분포의 불균일성을 초래하여 기계적 물성을 저해하는 요인이 될 수 있으므로, 가능한 한 경화전의 우수한 분산도를 유지하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 가능한 한 경화전의 분산 상태를 유지하기 위한 방안으로 두 가지를 고려하였다. 첫 번째 방법은 MWNT와 에폭시 레진의 혼합물과 경화제를 섞을 때, 기계적인 혼합과 동시에 초음파를 가하여 경화 전 분산도를 증가시키는 방법이고 두 번째 방법은 MWNT와 레진 혼합물과 경화제 간의 혼합 시간을 증가시키는 방법이다.

3.2.1 에폭시 레진과 경화제의 혼합 방법에 따른 물성변화

MWNT와 에폭시 레진의 혼합물과 경화제를 혼합할 때 앞서 Fig. 4에 나타낸 방법과 기계적 혼합과 초음파를 함께 사용하는 방법을 비교하여 보았다. 초음파를 함께 사용하는 것이 MWNT를 분산시키는 데 좀 더 효과적이라고 판단하였기 때문이다. 혼합시간은 10분으로 유지하였다. 제작된

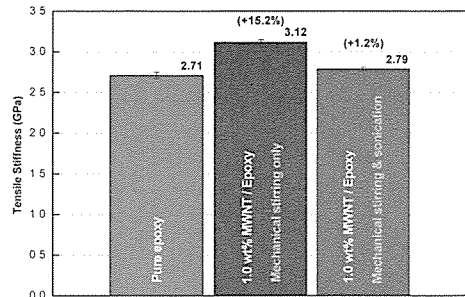


Fig. 11 Tensile stiffness according to mixing method.

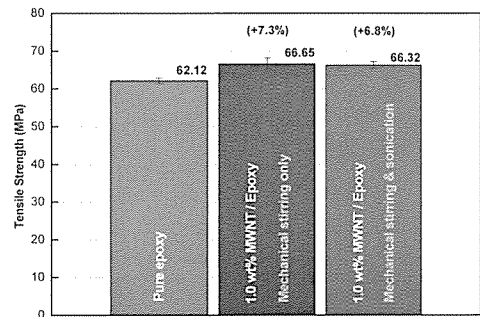


Fig. 12 Tensile strength according to mixing method.

복합재료의 인장 물성은 Fig. 11 및 Fig. 12와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 기계적 혼합만을 수행하였을 때와 기계적 혼합과 초음파를 이용한 혼합을 동시에 수행한 경우를 비교하면, 두 가지 방법을 동시에 사용한 경우가 인장 강성은 오히려 감소하는 경향을 보였으며, 인장 강도는 크게 변화하지 않았다. 초음파에 의해 발생한 기포(cavitation)가 이런 현상의 원인으로 보인다. MWNT를 포함한 수지 내에 초음파를 전파시키면 미소 기포가 발생되며, 이러한 기포가 압력 차에 의하여 터지는 순간 국부적으로 큰 속도를 갖는 제트를 발생시키면서 압력 구배가 생기게 된다. 이러한 현상으로 인하여 반데르발스 인력으로 결합된 MWNT들을 분리·분산시키게 된다. 용매 내에 MWNT를 초음파 분산시킬 때 생성된 미소 기포들은 경화 전까지 충분한 시간을 거치므로 제거될 수 있으나, 에폭시 레진과 경화제를 혼합하는 과정에서 초음파로 인해 발생한 미소 기포는 경화가 진행되면서 점도가 높아져 빠져 나오기가 어려웠던 것으로 판단된다.

제작된 복합재료 또한 주사전자현미경 사진을 통해 살펴 보았으나, Fig. 10(a)와 유사하게 재응집 현상이 관찰되어, 위의 방법은 재응집 현상을 억제하는 데는 부적합한 것으로 보인다.

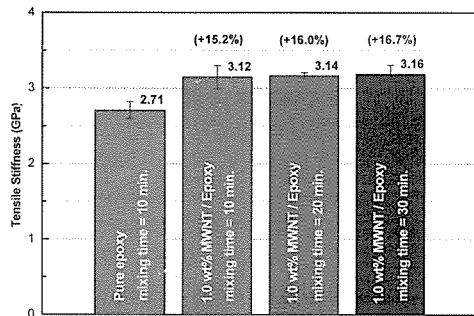


Fig. 13 Tensile stiffness according to mixing time of (MWNT + epoxy resin) and hardener.

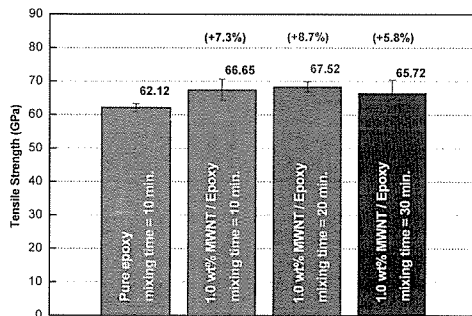


Fig. 14 Tensile stiffness according to mixing time of (MWNT + epoxy resin) and hardener.

3.2.2 에폭시 레진과 경화제의 교반시간의 따른 물성변화

재응집 현상을 억제하기 위한 두 번째 방안으로 본 연구에서는 MWNT와 에폭시로 이루어진 용액과 경화제를 혼합하는 시간을 증가시켜 보았다. 혼합시의 온도는 경화 온도인 80 °C와 동일하게 유지하였다. 경화온도에서 완전경화에 필요한 시간은 정해져 있고, 혼합 중에도 경화가 계속적으로 일어나므로, 혼합시간의 증가는 재응집 시간의 감소로 이어지기 때문이다. 본 연구에서는 혼합시간을 10분, 20분, 30분으로 증가시키면서 기계적 물성의 변화를 고찰하였다. 인장강성의 경우는 Fig. 13에 보여지는 바와 같이 혼합시간이 증가함에 따라 조금씩 증가하였다. Fig. 14의 인장강도의 경우는 20분까지는 증가하는 경향을 보였으나, 30분에는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 물성의 증가/감소 경향이 보이나 그 값이 크지 않아, 혼합시간에 따른 강성과 강도의 변화 추이를 끌어낼 수는 없었다. 또한 SEM 이미지나 현미경 관찰을 통해서도 분산정도의 차이를 구분할 수 없었다. 혼합시간이 30분인 경우, 6개의 시편 중 4개는 혼합시간이 20분일 때와 비슷한 물성치를 나타냈으나, 나머지 시편 2개는 매우 낮은 물성을 보여 전체적인 평균값이 낮고, 표준편차는 크게 나타났다.

30분 정도까지의 혼합시간의 변화로는 물성의 변화추이를 관찰하기가 어려웠다. 본 연구에서는 이런 현상의 원인을 알아보기 위해, autoclave가 아닌 오븐에서 동일한 작업을 수행하여 혼합시간의 증가에 따른 재응집 현상을 살펴보았다. 각 혼합시간에 따라 혼합이 끝난 후 10분 정도 내에서 재응집 현상이 거의 다 진행됨을 확인할 수 있었다. 만약 재응집이 일어나지 않을 만큼 점도가 높아질 때까지, 즉, 혼합시간을 30분보다도 더 증가시켜 충분히 혼합을 수행할 경우에는 혼합 시에 발생하는 기포들이 높은 점도로 인해 외부로 빠져나오기 힘든 상태가 된다. 이 경우 재응집은 약화시킬 수 있을 지언정 빠져나오지 못한 기포로 인해 물성이 더 감소할 수 있다. 따라서, 에폭시와 같은 열경화 수지에서는 경화 중에 발생하는 재응집 현상을 막기가 어려운 것으로 사료된다.

후 기

이 연구(논문)은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(스마트무인기기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

5. 결 론

본 연구에서는 MWNT/에폭시 나노복합재료의 기계적 물성 연구를 수행하였다. CNT를 에폭시 내에 분산시키기 위해서 용매를 사용하여 에폭시의 점도를 낮추어 주어 초음파와 교반기를 이용하였고, 공정변수에 따른 물성의 변화를 고찰하고 제작공정을 정립하였다. 대표적으로 인장강성은 0.5wt%에서 19%의 증가를 보였으며, 인장강도는 0.2wt%에서 12% 증가를 보여주었다.

또한 에폭시에 CNT를 잘 분산시키더라도 경화 중에 일어나는 CNT들의 재응집 현상으로 인해, 그 분산 상태가 경화 후까지 지속되기가 어렵다는 것을 광학현미경과 기계적 물성의 변화를 고찰함으로써 알 수 있었다. 또한 이 재응집 현상을 저지하고자 에폭시와 경화제를 혼합하는 방법과 혼합시간을 변화시켜 보았으나, 그 재응집을 저지할 수는 없었으며, 10분 내에서 수 마이크로미터 단위로 재응집이 거의 완료됨을 확인하였다.

에폭시뿐만 아니라 일반적인 열경화성 수지에 CNT를 분산시키는 경우에는 이런 경화 중에 발생하는 재응집 현상을 완벽하게 억제하는 것은 어려운 것으로 보인다. MWNT와 레진의 혼합물과 경화제의 혼합시간을 증가시키더라도 재응집을 감소시키는 것은 어려웠으며, 경화가 일어남에 따라 점성이 높아지므로 발생한 재응집을 제거하기 위해 재교반을 해줄 경우 이때 발생한 기포가 오히려 복합재료 내에서 빠져나오기 어렵기 때문이다. 따라서 열경화성 수지에 CNT를 사용하는 것보다는

고상에서 액상으로 혹은 액상에서 고상으로의 상변화 속도를 상대적으로 조절하기 쉬운 열가소성 수지에 사용하는 것이 더 적합할 것으로 판단된다.

- 12) O. Lourie and H. D. Wagner, "Transmission Electron Microscopy Observations of Fracture of Single-Wall Carbon Nanotubes under Axial Tension," *Applied Physics Letters*, Vol. 73, No. 24, 1998, pp. 3527-3529.

참고문헌

- 1) S. Iijima, "Helical Microtubules of Graphitic Carbon," *Nature*, Vol. 354, No. 6348, 1991, pp. 56-58.
- 2) S. Roche, "Carbon Nanotubes : Exceptional Mechanical and Electrical Properties," *Ann. Chim. Sci. Mat.*, Vol. 25, 2000, pp. 529-532.
- 3) C. Goze, L. Vaccarini, L. Henrard, P. Bernier, E. Hernandez, and A. Rubio, "Elastic and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes," *Synthetic Metals*, Vol. 103, 1999, pp. 2500-2501.
- 4) J. Sandler, M. S. P. Shaffer, et al., "Development of a Dispersion Process for Carbon Nanotubes in an Epoxy Matrix and Resulting Electrical Properties," *Polymer*, Vol. 40, 1999, pp. 5967-5971.
- 5) A. Allaoui, S. Bai, H. M. Cheng, and J. B. Bai, "Mechanical and Electrical Properties of a MWNT/Epoxy Composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, 2002, pp. 1995-1998.
- 6) X. Xu, M. Thwe, C. Shearwood and K. Liao, "Mechanical Properties and Interfacial Characteristics of Carbon-Nanotube-Reinforced Epoxy Thin Films," *Applied Physics Letters*, Vol. 81, 2002, pp. 2833-2835.
- 7) L.S. Schadler, S.C. Giannaris, and P.M. Ajayan, "Load Transfer in Carbon Nanotube Epoxy Composites," *Applied Physics Letters*, Vol. 73, No. 26, 1998, pp. 3842-3844.
- 8) X. Gong, J. Liu, S. Baskaran, R. D. Voise, and J. S. Young, "Surfactant-Assisted Processing of Carbon Nanotube/Polymer Composites," *Chemical Materials*, Vol. 12, 2000, pp. 1049-1052.
- 9) C. Park, Z. Ounaies, K. A. Watson, R. E. Crooks, et al., "Dispersion of Single Wall Carbon Nanotubes by in situ Polymerization under Sonication," *Chemical Physics Letters*, Vol. 364, 2002, pp. 303-308.
- 10) D. Qian, E.C. Dickey, R. Andrews, and T. Rantell, "Load Transfer and Deformation Mechanisms in Carbon Nanotube-Polystyrene Composites," *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 20, 2000, pp. 2868-2870.
- 11) D. Qian and C. Dickey, "In-situ Transmission Electron Microscopy Studies of Polymer-Carbon Nanotube Composite Deformation," *Journal of Microscopy*, Vol. 204, 2001, pp. 39-45.