

다중벽탄소나노튜브 복합재료의 계면 및 열전도도에 표면처리 방법이 미치는 영향

유기문¹ · 이성구² · 김성룡^{1†}

¹충주대학교 공과대학 나노고분자공학과, ²한국화학연구원 정보전자폴리머 연구센터
(2010년 12월 13일 접수, 2010년 12월 21일 수정, 2010년 12월 22일 채택)

Effect of Multi-wall Carbon Nanotube Surface Treatment on the Interface and Thermal Conductivity of Carbon Nanotube-based Composites

Gi-Moon Yoo¹, Sung-Goo Lee², and Sung-Ryong Kim^{1†}

¹Department of Polymer Science and Engineering, Chungju National University, Chungju 380-702, Korea

²Information & Electronics Polymer Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 305-600, Korea

(Received December 13, 2010; Revised December 21, 2010; Accepted December 22, 2010)

요약: 다중벽탄소나노튜브를 표면처리하여 polymethylmethacrylate (PMMA) 기체에 첨가하여 제조한 고분자 복합재료에서 탄소나노튜브의 표면처리가 계면 및 열전도도에 미치는 효과를 고찰하였다. Coagulation 방법과 atomic transfer radical polymerization (ATRP) 방법을 사용하여 탄소나노튜브를 표면처리 하여 사용하였으며, ATRP 방법을 적용하여 제조한 복합재료는 coagulation 방법을 사용하여 제조한 복합재료보다 높은 열전도도와 투과도를 가졌다. 순수 PMMA의 열전도도가 0.21 W/mK인데 비하여 ATRP 방법으로 처리한 1 wt%의 탄소나노튜브를 첨가하였을 경우 0.38 W/mK로 열전도도가 향상되었다. 탄소나노튜브와 PMMA기체의 계면을 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과 탄소나노튜브의 표면처리에 의해 기체 내에 분산이 향상되고 고분자기체-탄소나노튜브 계면에서의 접촉이 용이해져 포논산란이 감소되어 광 투과성을 가지면서 열전도도가 향상된 것으로 보인다.

Abstract: The effect of carbon nanotube surface treatment on the interface and thermal conductivity of carbon nanotube-based poly(methylmethacrylate) (PMMA) composites was investigated. Coagulation and atomic-transfer radical polymerization (ATRP) was applied to modify the surface of multi-wall carbon nano-tube. The composite of ATRP method used carbon nanotube showed the higher transparency and thermal conductivities than that of the coagulation method used. In comparison to the thermal conductivity of pure PMMA, 0.21 W/mK, the ATRP carbon nanotube used PMMA/MWNT composite showed a thermal conductivity of 0.38 W/mK. The interface between carbon nanotube and PMMA was observed by scanning electron microscope and uniform dispersion of carbon nanotube was observed without any void in the PMMA matrix. It may be beneficial to transport the phonon without any scattering and it may result in a higher thermal conductivity.

Keywords: thermal conductivity, carbon nanotube, thermally conductive composites, surface treatment

1. 서 론

급속한 전자산업의 발전은 많은 협소한 공간에서 많은 열을 방출하는 소형 전자부품에 사용될 수 있는 높은 열전도도의 고분자 재료를 요구하고 있다[1]. 예를 들어 높은 열전도도를 가지는 복합재료는 히트싱크, 인쇄회로기판, 커넥터, 컴퓨터 중앙처리장치의 계면물

질로 적용될 수 있다. 전자기기의 수명은 온도에 지수 함수적으로 감소하며, 온도가 10°C 올라가면 전자디바이스의 수명이 반으로 줄어드는 것으로 보고되어 있다 [2,3]. 따라서 전자부품으로부터 효과적으로 빨리 열을 방출시켜 작동온도를 낮추는 것은 전자 디바이스 성능 향상 및 사용수명 연장에 매우 중요하다. 하지만 일반적인 열가소성 고분자는 ~0.2 W/mK의 낮은 열전도도를 가지고 있기 때문에 열전도도를 높이기 위하여 열전도도가 높은 금속이나 세라믹 필러들을 첨가하는

[†]Corresponding author: Sung-Ryong Kim (srkim@cjnu.ac.kr)

연구가 오래전부터 진행되어 왔다[4-7]. 주로 silicon carbide (SiC), aluminum nitride (AlN), boron nitride (BN) 등과 같은 세라믹 필러를 사용하였다.

고분자 재료에서의 열전도는 포논(phonon)의 진동에 의해 이루어지고, 결정 속의 어떤 격자점을 중심으로 하여 발생하는 원자의 진동은 원자 간의 상호작용에 의하여 일어나며, 한 원자에 머무르지 않고 파로서 재료 내부를 이동하는 것으로 알려져 있다[5,7]. 이때 재료내부에서 열전달을 방해하는 주요한 인자로는 포논-포논 산란, 경계면 산란, 고분자와 필러 사이의 계면결합에 의한 산란 등이기 때문에 열전도도를 높이기 위해서는 포논 산란을 최소화해야 한다[5,8]. 고분자 내부에서 포논이 쉽게 이동되기 위해서는 열전달 경로가 중요한 데 필러의 부피비, 정렬형태, 입자크기, 중형비 등이 중요한 인자로 알려져 있다[5,8-10].

탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 1991년 Iijima 에 의해 발견되어 다양한 분야에서 연구되어 왔고, 특히 고분자 나노복합재료의 필러로서 사용되어 왔다 [11]. 탄소나노튜브는 우수한 유연성과, 낮은 벌크밀도, 큰 중형비(300~1,000)를 가지고 있고 높은 전기전도도와 열전도도를 가지고 있다. 탄소나노튜브는 1차원적인 구조를 가지고 있어 긴 포논자유경로를 가지고 있기 때문에 단일벽나노튜브의 경우 약 6,000 W/mK 이상의 높은 열전도도를 가지는 것으로 알려져 있다[12]. 이런 이유로 탄소나노튜브는 기존의 열전도도 필러들을 대체할 수 있는 후보물질로 여겨져 왔으며, 한 가닥의 탄소나노튜브로 존재할 때의 매우 높은 열전도 성질을 이용하여 열전도성이 우수한 고분자복합재료를 개발하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다[13-15]. 하지만 고립된 한 가닥의 다중벽탄소나노튜브(Multi-wall carbon nanotube, MWNT)가 매우 높은 약 3,000 W/mK의 높은 열전도도를 가지는데 비해 영겨져 있는 상태의 탄소나노튜브를 복합재료에 투입시에는 대부분의 경우 혼합법칙에 의한 예상값 보다 훨씬 낮은 약간의 열전도도 증가를 보이는 결과들이 보고되어 있으며, 이는 고분자 기재와 나노튜브 계면과 나노튜브-나노튜브 계면에서의 높은 열저항에 의한 효과로 설명되어 왔다[11].

고분자 기재안에 탄소나노튜브가 첨가되어 있는 시스템에서 포논은 주로 기재를 통해서 전달하는 것으로 알려져 있으며, 탄소나노튜브와 고분자 사이의 열전도도의 차이는 10,000배 정도 나기 때문에 나노튜브와 고분자 계면사이의 열전달 효과가 중요하다.

높은 계면의 열저항을 낮추기 위한 방법으로 탄소나노튜브와 기재 사이에 공유결합을 도입하는 연구가 진행되어 왔다[16]. 하지만 이러한 결합은 나노튜브의 고유한 열전도도를 산란센터로 작용하기 때문에 열전도

Table 1. Properties of poly(methylmethacrylate) (PMMA)

Properties	Poly(methyl methacrylate)
Structure	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \left[\text{CH}_2 - \text{C} \right]_n \\ \\ \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{OCH}_3 \end{array}$
Sample type	Pellet
Density (g/cm ³)	1.189
Heat capacity (J/g · K)	1.420
Thermal conductivity (W/mK)	0.193
Glass transition temp. (°C)	103

도를 감소시키는 것으로 알려졌다. Liu 등은 2 wt%의 카복실산 처리된 MWNT를 polydimethylsiloxane 수지 안에 도입하였을 경우 급격하게 열전도도가 증가하는 것을 확인하였다[17].

열가소성 기재뿐만 아니라 열경화성 에폭시 수지를 사용한 많은 연구가 진행되어 왔다[18,19]. Choi 등은 3 wt%의 SWNT를 epoxy 수지에 투입하여 복합재료의 열전도도를 3배 이상 증가시켰다[19].

지금까지 탄소나노튜브를 적용한 대부분의 연구는 탄소나노튜브를 열경화성이나 열가소성에 투입하여 전기전도도 향상에 목적을 둔 연구가 많았고, 열전도도 향상에 대한 연구는 많지 않았으며, 상당수가 탄소나노튜브를 열경화성 기재에 첨가하여 열전도도에 미치는 영향에 대한 연구들이었다.

본 연구에서는 coagulation방법과 Atomic Transfer Radical Polymerization (ATRP)방법으로 처리한 다중벽탄소나노튜브(MWNT)를 투명한 열가소성 수지인 PMMA에 첨가하여 복합재료를 제조하여, 탄소나노튜브의 표면처리가 복합재료의 열전도도, 투명도, 계면형성, 유리전이온도에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험

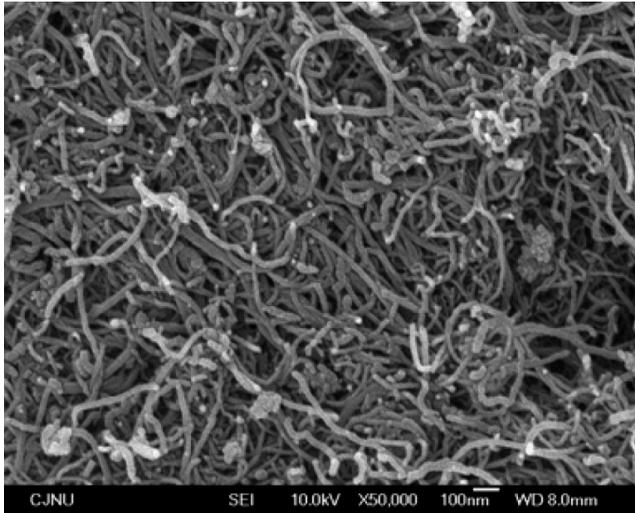
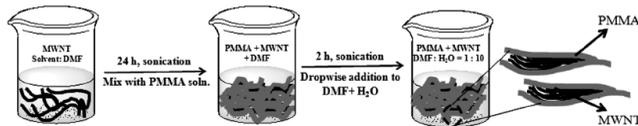
2.1. 실험 재료

본 실험에서는 투명성과 내후성이 우수한 광학용 Parapet[®] poly(methylmethacrylate) (PMMA) (Grade: GH, Kuraray Co., Japan)를 고분자 기재로 사용하였으며 자세한 정보는 Table 1에 나타나 있다. PMMA는 광학용 도광판이나 필름용으로 많이 사용되고 있으나 열전도도가 0.21 W/mK로 낮아 높은 열방출을 필요로 하는 응용분야에는 적용하기 힘든 문제가 있다.

필러로 사용된 탄소나노튜브는 다중벽나노튜브(Grade : CM 95, Hanwha Nanotech Co.)를 사용하였으며, 10~15 nm의 직경을 가졌으며, 중형비(aspect ratio)는 1,000 정

Table 2. Properties of multi-wall carbon nanotube

Properties	Values
Diameter	10 ~ 15 nm
Filler shape	Nanotube
Aspect ratio	300 ~ 1,000
Density (g/cm ³)	1.3 ~ 1.8
Thermal conductivity (W/mK)	3,000

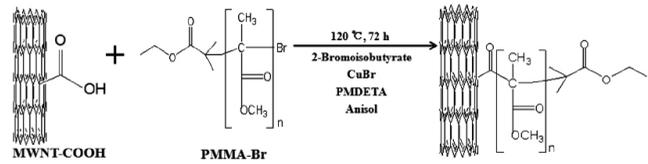
**Figure 1.** SEM images of MWNT.**Scheme 1.** Fabrication of PMMA/MWNT nanocomposites by coagulation method.

도였다(Table 2). Figure 1은 본 연구에서 사용한 MWNT의 주사현미경 사진이다. 고립된 한 가닥의 다중벽나노튜브의 경우에는 열전도도가 3,000 W/mK 정도의 높은 값을 가지는 것으로 알려져 있다.

2.2. 탄소나노튜브 표면처리 및 시료준비

탄소나노튜브의 분산성과 탄소나노튜브 복합재료의 열전도성을 향상시키기 위해 제조사로부터 입수한 MWNT를 표면처리 하였다. 제조사로부터 입수한 탄소나노튜브는 Figure 1과 같이 서로 엉켜져 있는 구조를 가지는 데 이를 고분자 기재에 적용할 때 분산시키기 어려운 문제점이 있다.

본 연구에서는 coagulation방법과 ATRP방법을 사용하여 탄소나노튜브를 처리 하였다. Coagulation방법에서는 scheme 1과 같이 dimethylformamide (DMF)에 MWNT

**Scheme 2.** Preparation of PMMA-grafted MWNTs by ATRP method.

를 넣고 초음파로 분산시킨 후 DMF에 녹아있는 PMMA와 혼합시키고 이를 침전과 여과방법으로 나노복합재료를 제조하는 방법이다[11].

ATRP 방법(scheme 2)에서는 brominated PMMA를 카복실산으로 표면처리된 MWNT와 120°C에서 72 h 이상 화학반응을 시켰으며, 이를 필터링을 한 후 80°C 진공오븐에서 24 h 동안 건조시키고 DMF에 재분산 시키며, 이를 DMF에 녹아 있는 PMMA와 혼합하여 메탄올에 침전시키고 필터링 하여 PMMA/MWNT 파우더를 얻었다[16].

Coagulation방법과 ATRP방법으로 얻은 PMMA/MWNT 파우더는 PMMA와 혼합한 후 핫프레스를 사용하여 열확산도 측정용 디스크 샘플을 제조하였으며, 열확산도 시편제작에 대한 자세한 사항은 본 연구자의 이전 논문에서 찾을 수 있다[20].

2.3. Morphology 관찰

나노복합재료에서 기재인 PMMA와 필러인 탄소나노튜브의 계면에서 포논의 산란과 이에 따른 열전도도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전계형 주사방사현미경(FESEM, JEOL Co., Model : JSM 6007-F)을 사용하였다. 고분자는 부도체이기 때문에 표면의 전하대전으로 인한 샘플 손상을 방지하기 위하여 샘플의 표면과 과단면은 스퍼터 코터(Cressington sputter coater)를 이용하여 수십 nm의 Pt 전처리 코팅을 한 후 관찰하였다.

2.4. 밀도 및 광투과도 측정

복합재료의 열확산도를 측정하기 위해 제작한 지름 10 mm, 두께 1 mm의 디스크의 밀도를 각 조건에 대하여 시편 5개를 준비하여 측정하였다. 복합재료의 밀도는 Electronic Densimeter (Model : MD-300S, ALFA Mirage Co.)를 이용하여 측정하였다. Neat PMMA와 복합재료 시편의 광투과도를 측정하기 위하여 UV-Vis Spectrophotometer (Optizen 2120UV, Scinco Co.)를 사용하였다.

2.5. 열확산도 및 열전도도 측정

열확산도는 열이 재료를 통과하는 속도를 측정하는 것으로서 열전도도에 가장 크게 영향을 미치는 요소이다. 본 연구에서 사용한 열확산도 측정 장비는 레이저

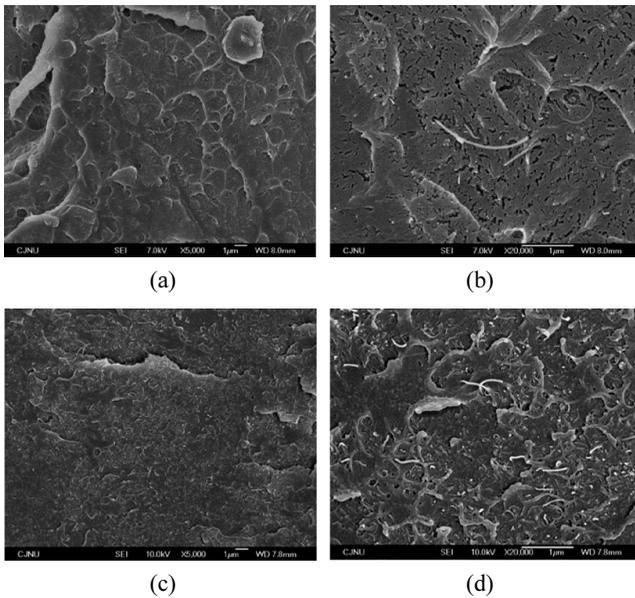


Figure 2. Cross-sectional FE-SEM images of PMMA/MWNT composites at 1 wt% of MWNT loading. (a) PMMA/MWNT (coagulation, $\times 5,000$), (b) PMMA/MWNT (coagulation, $\times 20,000$), (c) PMMA/MWNT (ATRP, $\times 5,000$), and (d) PMMA/MWNT (ATRP $\times 20,000$).

섬광법(laser flash method)을 이용한 Thermal Constant Analyzer (Model : TC-7000, ULVAC Co.)였으며, 30°C에서 레이저 섬광을 직경이 10 mm인 디스크 형태의 시료 전면에 조사하여 흡수된 열이 두께방향으로 이동되어져 뒷면의 온도를 상승시키는데 뒷면의 온도가 최대가 되는 시간의 half-time을 측정하여 열확산도를 구하고 여기에 샘플의 밀도와 비열을 곱하여 열전도도를 구하였다. 비열은 Differential Scanning Calorimeter (Model : 2010, TA Co.)를 이용하여 측정하였으며, 장비의 오차를 보정하기 위해 표준시료인 사파이어를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 파단면 관찰

복합재료 내부에서의 포논의 전달은 기포나 표면결함 등에 크게 영향을 받기 때문에 기체인 고분자와 필러계면의 물리적 접촉은 매우 중요하다[21]. 공기의 열전도도가 0.0024 W/mK로 낮기 때문에 계면에 존재하는 기공이나 불완전 접촉은 낮은 열전도도뿐만 아니라 포논산란의 중심으로 작용하여 복합재료의 열전도도를 낮출 수 있다. Figure 2는 coagulation방법과 ATRP방법으로 처리한 MWNT를 1 wt% 첨가한 샘플의 파단면 사진이다. ATRP 방법으로 처리한 MWNT 포함 복합재료 파단면의 경우 탄소나노튜브가 고르게 분산되어 있고 작은 면적으로 이루어진 거친 고분자 파단면을 관

Table 3. Density of PMMA/MWNT composites

Sample	Density (g/cm^3)	
	Coagulation Method	ATRP Method
Neat PMMA	1.19	
PMMA/MWNT (0.1 wt%)	1.19	1.17
PMMA/MWNT (0.5 wt%)	1.18	1.17
PMMA/MWNT (1.0 wt%)	1.19	1.18

찰할 수 있어 고분자 기체와 탄소나노튜브 사이에 강한 계면 결합을 가진 것을 추측할 수 있다. Coagulation 방법에 의한 탄소나노튜브의 경우에는 MWNT가 고르게 분산되어 있으나 고분자 파단면이 비교적 평평하고 넓게 구성되어진 것을 볼 수 있다. 두 방법 모두 계면이나 PMMA 기체 내부에 기공이 존재하고 없고 MWNT와 PMMA 기체가 잘 밀착되어 있는 것을 볼 수 있다. Coagulation 방법의 경우 파단면에서 MWNT가 뿔뿔한 구조보다는 잘려진 구조를 하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 질산을 이용하여 금속촉매를 제거해 주는 과정과 26 h 이상의 초음파 처리에 의하여 MWNT가 손상되어 강도가 저하되고, 탄소나노튜브의 손상은 포논의 전달을 저하시키는 것으로 보고된 바 있다[22]. Coagulation 방법으로 처리한 MWNT의 경우 MWNT의 분산이 양호하고 MWNT주위에 PMMA 기체가 잘 밀착된 계면구조를 보이는 것을 알 수 있다. 일반적으로 초음파 처리는 고분자 기체안에 존재하는 nanotube들의 nano-scale 분산 목적보다는 micro-scale 분산 목적으로 사용하는 것으로 알려져 있으며 본 연구에서도 초음파 처리를 하였지만, nano-scale 분산에 의해 탄소나노튜브와 탄소나노튜브가 연속적으로 서로 접촉되어 있는 것은 관찰할 수 없었다.

3.2. 밀도

탄소나노튜브의 함량을 변화시키면서 ATRP방법과 coagulation방법으로 제조한 고분자 복합재료의 밀도 측정 결과를 Table 3에 표시하였다. MWNT의 밀도는 1.5 g/cm^3 정도로 PMMA 기체 보다는 다소 높으나 1 wt% 미만을 PMMA에 첨가하여 복합재료를 제조하였기 때문에 순수 PMMA와 유사한 밀도를 나타내었다. ATRP 방법으로 처리한 탄소나노튜브를 사용하여 복합재료를 준비한 경우에는 밀도가 순수한 PMMA의 밀도인 1.19 g/cm^3 보다 약간 낮아지는 경향을 보였는데 이는 일부 열확산도 측정용 시편 제조시에 미세 기포가 포함되었기 때문으로 보인다.

3.3. UV-vis Spectra

MWNT 함량과 표면처리 방법에 따라 PMMA/MWNT

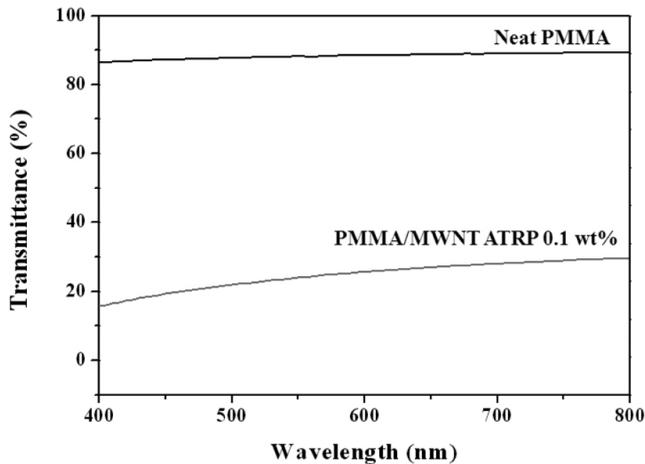


Figure 3. UV-vis spectra of neat PMMA and PMMA/MWNT (0.1 wt%), ATRP method was used to prepare the MWNT in PMMA matrix.

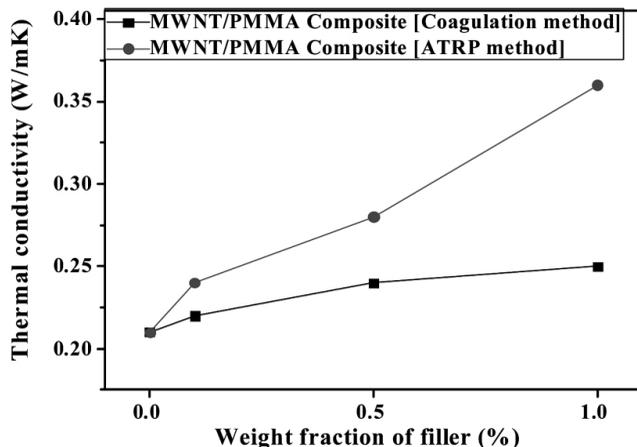


Figure 4. Thermal conductivity of PMMA/MWNT composites as a function of MWNT content.

복합재료의 광투과도에 미치는 영향을 UV-vis spectra를 이용하여 관찰하였다. Figure 3에서 보는 바와 같이 Neat PMMA와 ATRP 표면처리 방법으로 처리한 0.1 wt%의 MWNT를 포함하는 복합재료의 경우에 550 nm의 파장에서 21%의 광투과도를 나타냈다. 하지만 coagulation방법과 ATRP 방법으로 0.5 wt%와 1 wt%의 MWNT를 포함하는 경우에는 1% 미만의 광투과도를 보였다. Coagulation방법으로 처리한 시편은 앞절에서 언급하였듯이 분산정도가 상대적으로 좋지 않아 동일한 0.1 wt% MWNT 함량에서 광투과도가 거의 0에 가까운 값을 가지는 것으로 보인다.

3.4. 열전도도

Figure 4는 coagulation방법과 ATRP방법을 사용하여 처리한 MWNT를 포함하는 PMMA의 복합재료의 열전

도도 변화를 보여주고 있다. ATRP나 coagulation 방법에 관계없이 탄소나노튜브의 함량이 증가함에 열전도도 값이 증가하였다. 1 wt%의 MWNT를 ATRP방법으로 표면처리하여 사용한 복합재료의 경우 열전도도는 0.37 W/mK로 순수 PMMA가 0.21 W/mK를 가지는 것과 비교할 때 71%의 열전도도 향상을 보였다. Coagulation 방법에 비하여 ATRP방법이 같은 함량의 나노튜브에서 보다 높은 열전도도 증가를 보여주었다. 이러한 결과는 전기전도도의 경우에는 1 wt% 미만의 특정 탄소나노튜브 함량에서도 전기전도도가 급격하게 증가하는 percolation threshold가 발생하지만 일반적으로 열전도도에서는 percolation현상이 나타나지 않는 것과 일치한다 [23].

Coagulation 방법은 금속촉매를 제거하기 위하여 질산 산처리 후 24 h 동안 초음파 분산을 시키는 물리적인 분산방법이기 때문에 MWNT의 분산정도가 양호하지 못하고 일부 탄소나노튜브가 뭉쳐진 부분이 존재하여 고분자 기재 내에서도 MWNT의 분산이 제한되어 낮은 열전도도를 나타내는 것으로 볼 수 있다. 또한, 24 h 이상의 장기적인 초음파 분산은 MWNT의 손상을 초래하여 MWNT의 길이를 짧게 만들거나, 포논 산란을 유발시키는 탄소나노튜브 구조를 가져 열전도도의 향상이 미미한 것으로 추정된다. ATRP 방법으로 처리한 경우에는 탄소나노튜브 표면에 도입된 -COOH기가 Brominated PMMA와 72 h 동안 반응을 하여 MWNT 표면에 PMMA를 결합시키고, 이를 별도로 준비한 PMMA 기재와 혼합하게 되어, PMMA 기재와의 상용성이 좋아지고 효과적인 분산이 이루어져 열전도도 향상 효과가 뛰어난 것으로 볼 수 있다. 즉, ATRP 방법은 분자 레벨에서 고분자와 탄소나노튜브가 공유결합을 이루기 때문에 PMMA 기재 내에서 분산정도가 우수하고 탄소나노튜브의 손상을 적게 주어 열전도도가 순수 PMMA보다 71% 향상된 결과를 보여주는 것으로 보인다.

MWNT를 사용한 본 연구의 결과는 단일벽탄소나노튜브를 사용하여 epoxy에 적용한 이전의 연구결과와 차이를 보이는 데, epoxy수지에 0.09 wt%의 단일벽탄소나노튜브를 첨가한 경우에 열전도도가 350% 증가하였다[19]. 본 연구에서 얻은 결과보다 훨씬 큰 열전도도 증가를 보이는 이유는 열가소성 수지에 비해 젖음성이 우수한 액체상태의 epoxy수지로 복합재료를 제조한 점과 필러로 사용한 다중벽탄소나노튜브와 단일벽탄소나노튜브의 고유 열전도도 차이, 탄소나노튜브의 순도 등에 기인한 것으로 보인다.

3.5. 유리전이온도

Figure 5는 탄소나노튜브가 첨가됨에 복합재료의 유리전이온도 변화를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용

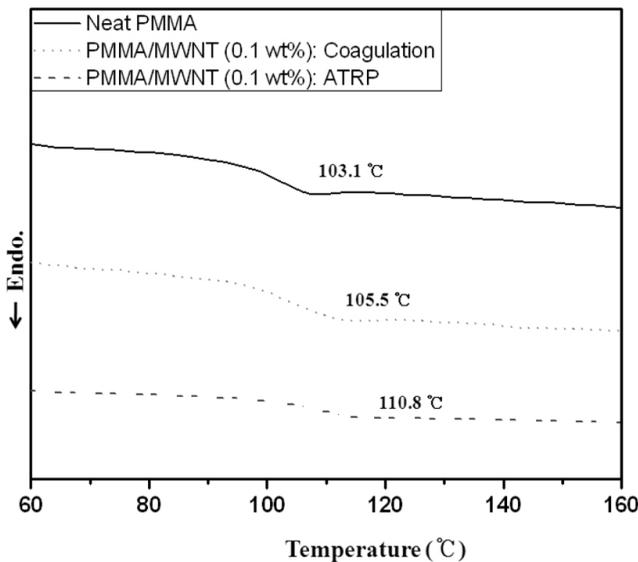


Figure 5. Tg changes with different surface treatment methods.

한 순수한 PMMA의 유리전이온도는 103°C인데 비하여 0.1 wt% 탄소나노튜브를 첨가한 경우 coagulation 방법은 105.5°C였고, ATRP방법의 경우에는 110.8°C로 증가하였다. 탄소나노튜브와 PMMA를 분자레벨에서 결합시키는 ATRP방법으로 처리한 경우에 SEM에서 관찰한 바와 같이 보다 양호한 분산을 가지며, 탄소나노튜브가 효과적으로 PMMA의 사슬운동을 저하시켜 동일 탄소나노튜브 함량에서 높은 유리전이온도를 가지는 것으로 판단된다. 고분자 기체에 나노필러 도입을 하였을 때 유리전이온도가 상승하는 현상은 epoxy와 같은 열경화성 기체에 소량의 탄소나노튜브를 첨가하였을 경우에 보고된 바 있다[19].

4. 결 론

열전도도를 향상시키기 위하여 다중벽탄소나노튜브를 coagulation 방법과 ATRP 방법으로 처리하여 PMMA/MWNT 복합재료를 제조하였다. 두 방법 모두 탄소나노튜브 양을 0.1 wt%에서 1.0 wt%로 증가 시킴에 따라 열전도도가 증가하였다. 같은 함량의 다중벽탄소나노튜브를 포함하였을 경우, ATRP방법이 coagulation방법보다 효과적인 분산을 가지고 탄소나노튜브-PMMA 화학결합을 가져 상대적으로 높은 광투과도와 열전도도를 보여주었으며, 뚜렷한 유리전이온도 상승효과를 나타내었다. 주사전자현미경을 사용하여 복합재료의 파단면을 분석한 결과 coagulation방법은 양호한 분산도를 가졌으나 24 h 이상의 긴 초음파 처리에 의한 탄소나노튜브의 표면손상 및 끊어짐 현상이 발생하여 열전달에 중요한 효과적인 포논전달을 하지 못하는 것으로 추정

되었다.

주사전자현미경으로 관찰한 결과 고분자 기재내부나 탄소나노튜브와 고분자 기재의 계면사이에 기공이 존재하지 않았고, 소량의 탄소나노튜브를 첨가하였기 때문에 복합재료의 밀도는 순수 PMMA와 유사한 값을 가졌다. ATRP 방법으로 처리한 탄소나노튜브를 첨가한 경우 뚜렷한 유리전이온도의 상승을 보여주었으며, 1.0 wt%의 탄소나노튜브를 첨가 하였을 경우에 열전도도가 순수한 PMMA의 열전도도가 0.21 W/mK인 것에 비하여 71% 증가한 0.38 W/mK을 가졌다.

본 연구의 결과는 열의 효율적인 방출이 필요한 고분자를 기체로 한 히트싱크, 교환기, 전자디바이스의 하우징, 투명 디스플레이 부품 등에 응용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 또한, 본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. A. S. Luyt, J. A. Molefi, and H. Krump, *Polym. Degrad. Stab.*, **91**, 1629 (2006).
2. I. Krupta, I. Novak, and I. Chodak, *Synthe. Met.*, **145**, 245 (2004).
3. L. C. Sim, S. L. Ramanan, and H. Ismail, *Thermochim. Acta*, **430**, 155 (2005).
4. W. Zhou, S. Qi, Q. An, H. Zhao, and N. Liu, *Materials Research Bulletin*, **14**, 1863 (2007).
5. Y. Xu, D. D. L. Chung, and C. Mroz, *Composites. Part A*, **32**, 1749 (2001).
6. D. H. Kim, M. H. Kim, J. H. Lee, J. H. Lim, B. C. Lee, K. M. Kim, J. M. Park, and S. R. Kim, *Materials Science Forum*, **544**, 483 (2007).
7. W. Zhou, S. Qi, H. Li, and S. Shao, *Thermochimica Acta*, **452**, 36 (2007).
8. P. Dashora and G. Gupta, *Polymer*, **37**, 231 (1996).
9. D. M. Bigg, *Metal-filled polymers*, Marcel Dekker, New York, USA (1986).
10. G. W. Lee, M. Park, J. K. Kim, J. J. I. Lee, and J. H. G. Yoon, *Composites : Part A*, **37**, 727 (2005).
11. F. Du, J. E. Fischer, and K. I. Winey, *J. Polym. Sci. B, Polym. Phys.*, **41**, 3333 (2003).
12. S. Berber, Y. K. Kwon, and D. Tomanek, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 4613 (2000).

13. M. J. Biercuk, M. C. Liaguno, M. Radosavljevic, J. K. Hun, A. T. Johnson, and J. E. Fischer, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2767 (2002).
14. S. L. Shinde and J. S. Goela, *High Thermal Conductivity Materials*, Springer Science+Business Media, Inc., New York (2006).
15. E. T. Thostenson and T. W. Chou, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **35**, 77 (2002).
16. H. Kong, C. Gao, and D. Yan, *J. Amer. Chem. Soc.*, **126**, 413 (2004)
17. C. H. Lim and S. S. Fan, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 123106 (2005).
18. A. Yu, M. E. Itkis, E. Bekyarova, and R. C. Haddon, *Applied Physics Letters*, **89**, 133102 (2006).
19. E. S. Choi, J. S. Brook, D. L. Eaton, M. S. Haik, and K. Dahmen, *J. Appl. Phys.*, **94**, 6034 (2003).
20. 김성룡, 임승원, 김대훈, 이상협, 박종만, 접착 및 계면, **9**, 7 (2008).
21. W. Zhou, D. Yu, C. Min, Y. Fu, and Z. Guo, *J. Applied Polymer Sci.*, **112**, 1695 (2009).
22. S. Shenogrin, A. Bodapati, L. Xue, R. Ozisik, and P. Keblinski, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2229 (2004).
23. R. Strumpler and J. Glaz-Reichenbach, *J. Electroceramics*, **3**, 329 (1999).