

## 분산성 향상을 위한 탄소나노튜브의 개질과 폴리우레탄과의 분산 특성

박경순 · 김승진<sup>†</sup> · 김정현 · 박준형 · 권오경<sup>1</sup>

영남대학교 섬유패션학부, <sup>1</sup>(주)비에스지

### Modification of Carbon Nanotube for the Improvement of Dispersion and the Dispersion Characteristics of Carbon Nanotube in Polyurethane

Kyung Soon Park, Seung Jin Kim<sup>†</sup>, Jeong Hyun Kim, Jun Hyeong Park and Oh Kyung Kwon<sup>1</sup>

School of Textiles, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

<sup>1</sup>B.S.G. Ltd., Daegu, Korea

(Received: December 22, 2009/Revised: January 25, 2010/Accepted: February 8, 2010)

**Abstract**— The thermal treatment for carbon nanotube was applied to remove the water, metal catalyst and other impurities in carbon nanotube. The surface of carbon nanotube was changed into open structure with acid treatment by mixed solution of HNO<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. The dispersion property of the functionalized and modified carbon nanotube was assessed with naked eyes by dispersing it in DMF. Carbon nanotube mixed polyurethane film was made to estimate the dispersion property by reflectance of the film with UV-Vis spectrometer. Also the internal structure of carbon nanotube was observed with SEM and TEM and thermal pyrolysis property of the carbon nanotube was measured by TGA and DSC. The surface modification of carbon nanotube by thermal and acid treatments improved the dispersion property of carbon nanotube/polyurethane mixed materials.

**Keywords:** carbon nanotube, polyurethane, functionalization, DMF, dispersion

## 1. 서 론

탄소나노튜브는 나노소재로서 많은 분야에서 연구의 대상이 되고 있으며 완벽한 구조와 기계적, 물리적, 전기적 및 열적 특성을 갖고 있어 섬유, 전기전자, 정보통신, 에너지, 바이오, 우주항공 등 폭넓은 분야에서 응용가능성이 제시되고 있다. 탄소나노튜브는 튜브형상을 이루는 벽의 수에 따라 단일벽(Single-walled, SWNT), 이중벽(Double-walled, DWNT), 다중벽(Multi-walled, MWNT)으로 구분할 수 있다. SWNT의 경우 직경이 1nm 수준에 불과하여 단독으로 존재하지 못하고 van der waals 인력에 의한 응집현상이 발생하여 수십-수백 nm의 번들 형상으로 존재한다. MWNT의 경우 상대적으로 직경이 커서 응집현상보다는 고분자 사슬의 엉킴현상과 유사한 특성을 보여준다. DWNT의 경우 직경이 작은 일부는 SWNT와 유사한 특성을, 직경이

큰 일부는 MWNT와 유사한 특성을 보여준다.

이러한 탄소나노튜브를 전도성 구형 소재로 응용하기 위해서는 번들형상 또는 엉킴 현상 등의 응집 특성을 반드시 해결해야 한다. 나노튜브의 응집현상은 물리, 화학적으로 다루기에 매우 어려운 상황이며 나노튜브 응용에 있어 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 나노튜브 응용에 있어 분산기술은 반드시 극복해야 할 요소 기술이라고 할 수 있다.

탄소나노튜브는 높은 aspect ratio, 강도, 높은 탄성계수, 우수한 전기전도도 등의 장점으로 복합재료에 이용될 경우 아주 소량에 의해서도 우수한 특성을 나타낼 수 있다. 그러나 탄소나노튜브 입자의 nm~ $\mu$ m 수준에서의 응집현상 때문에 이 응집체를 물리적 힘에만 의존하여 분산하는 것은 대단히 어렵다. 균일한 품질의 탄소나노튜브 복합체를 제조하는 것은 기술적으로 매우 어렵지만, 상업적 활용을 위해서는

<sup>†</sup>Corresponding author. Tel.: +82-53-810-3890; Fax.: +82-53-812-5702; e-mail: sjkim@ynu.ac.kr

분산은 반드시 해결해야 될 문제이다. 이러한 탄소나노튜브의 분산정도는 유변학적 성질의 변화로 측정이 어느 정도 가능하다.

단일벽 탄소나노튜브는 직경 1nm 정도로 다중벽 탄소나노튜브에 비해 훨씬 가늘지만 표면적이 거대하여 Van der waals 힘에 의해서 나란히 뭉쳐 다발형태로 존재한다. 따라서 이 다발을 개개로 분리시키기가 매우 어려우며 분리되지 않는 다발은 다중벽 탄소나노튜브와 직경이 유사하다<sup>1)</sup>. 또한 단일벽 탄소나노튜브의 경우가 가격이 고가이고 수급이 용이하지 않기 때문에 실용성 고분자 수지 복합체 연구에는 거의 대부분이 다중벽 탄소나노튜브가 사용되고 있다. 탄소나노튜브의 기능성을 발현시키기 위해 고분자 매트릭스와 복합화 할 때 가장 문제가 되는 부분은 고분자 복합체에 탄소나노튜브를 균일하게 분산시키는 것이다. 고분자 매트릭스에 나노튜브가 완벽히 분산되지 않을 경우 나노튜브의 성능발현이 충분하지 못하게 되기 때문에 최근 탄소나노튜브의 분산방법이 학계를 중심으로 많이 제시되고 있으며, 분산방법을 기초수준에서 실제공정수준에 이르기까지 이를 해결하고자 하는 기술개발이 많이 진행되고 있다. 초음파처리에 의해 탄소나노튜브의 절단, 산처리 된 탄소나노튜브의 외부 표면에 기능화를 통한 정전기적 분산, 각종 용매, 계면활성제, 폴리머 물질을 이용한 분산 등 많은 방법이 보고되고 있다<sup>2)</sup>. 기계적 분산에는 초음파 처리, 볼 밀링에 의한 분산, 연마와 마찰, 높은 전단력에 의한 분산 등이 있다. 이중 가장 많이 사용되는 방법은 알콜류와 같은 용매에 탄소나노튜브를 넣고 초음파 처리(Ultrasonication)하여 분산시키는 것이 가장 단순하면서도 일반적인 방법이다.

용매와 분산제를 이용한 분산방법에 관한 많은 방법도 보고되고 있다. 탄소나노튜브를 적용하기 위해서는 용액 상에서 다루는 것이 유용하다. 현재까지 탄소나노튜브를 분산시키는 최적의 용매는 아미드 계열이며, 특히, N,N-dimethylformamide (DMF), N-methylpyrrolidone (NMP) 등이 있다<sup>3,4)</sup>. 그러나 이러한 용매에 의한 분산은 용매에 의한 메커니즘으로 설명될 수 있기 때문에 시간이 지날수록 불안정한 특성을 가지고 있다. Ausman 등은 다양한 용매를 이용하여 상온에서 SWNT의 용해도를 관찰하였으며, 비수소결합을 가지면서 루이스 염기특성을 가진

용매가 가장 우수한 용해도를 보인다고 보고하고 있다<sup>5)</sup>. 그러나 이들은 고유의 탄소나노튜브를 단지 특정 용매상에서 용매에 의한 분산을 시도하였기 때문에 실제공정에 사용되는 다양한 용매에 대한 실험결과는 없다. 계면활성제를 이용하여 탄소나노튜브가 용액상에서 용해될 수 있다<sup>6)</sup>. 계면활성제의 역할은 탄소나노튜브 표면에 효과적으로 코팅되어 정전기적 반발력이나 steric 반발력을 유도하여 분자간 힘인 van der waals 인력을 극복하는 것이다<sup>7,8)</sup>. 그러나 계면활성제 사용은 탄소나노튜브의 고유특성을 유지시킬 수 있는 장점을 제공하나, 추후 공정에서 계면활성제의 제거가 큰 문제가 될 수 있으며 최대 분산농도도 약 1% 수준에 불과하다. 탄소나노튜브를 고분자 복합체내에서 분산화하는 방법에는 위에서 서술한 여러 가지 방법들이 있으나 아직 분산기술이 완전히 확립되어 있지는 못한 실정이다.

고분자/탄소나노튜브 복합에 있어서 탄소나노튜브의 분산정도는 공정과 최종 물성에 결정적 영향을 미치므로 고분자/탄소나노튜브계의 유변학적 성질의 고찰에 많은 연구가 진행되어 왔다. Schaffer 등은 탄소나노튜브 분산액 중에서 탄소나노튜브가 임계함량 이상이 되면 점탄성 젤이 형성되면서 분산액의 점도가 급격하게 상승한다고 보고하였으며<sup>9)</sup>, 또한 브롬화 처리를 통하여 탄소나노튜브가 물속에서 분산성이 향상되어 콜로이드 상태를 유지할 수 있다고 보고하였다<sup>10)</sup>. Porschke 등<sup>11)</sup>은 폴리카보네이트/탄소나노튜브 복합체의 유변학적 거동을 조사하여 탄소나노튜브 함량이 2wt% 정도에서 percolation이 일어난다고 보고하였다. 김 등<sup>12)</sup>은 수용성 고분자인 폴리비닐알코올 수용액에 탄소나노튜브를 분산시킬 때 계면활성제, 초음파 처리, 탄소나노튜브의 종류가 복합용액의 유변학적 성질에 미치는 효과에 대하여 고찰하였다. 그러나 대부분의 탄소나노튜브/고분자 복합재료에서 나노튜브와 고분자간의 분산성은 계면접착력이 문제가 되고 있다. 최근 탄소나노튜브와 고분자와의 계면문제를 해결하기 위한 다양한 방법들이 보고되고 있는데, 고에너지 초음파 처리, 계면활성제, 고분자에 의한 wrapping 방법, 산에 의한 화학적 개질, 불소처리 등이 있다<sup>13-17)</sup>.

산에 의한 화학적 개질 방법은 나노튜브의

표면에 -COOH 그룹을 생성해줌으로써 나노튜브의 기능화를 증진시켜 탄소나노튜브가 좀 더 화학적으로 반응성이 있고 다른 고분자와 친화력을 가져 분산이 용이하도록 해준다. 그러나 이에 기능화 된 탄소나노튜브와 폴리우레탄과의 복합재료 생성에 대한 구체적인 실험 결과가 없기 때문에 본 연구에서는 탄소나노튜브/폴리우레탄 복합재료 생성시 탄소나노튜브에 산을 이용하여 화학적으로 개질해 나노튜브의 표면에 -COOH 그룹을 생성해줌으로써 고분자간의 친화력을 높이고 분산성이 향상된 탄소나노튜브/폴리우레탄 복합 필름을 제조함과 동시에 MWNT를 기능화 하는 방법과 폴리우레탄과의 분산성에 대해서도 고찰한다. 탄소나노튜브의 기능화는 FT-IR spectroscopy로 확인하였으며, 탄소나노튜브의 분산성은 분산용액의 시간에 대한 MWNT의 침전 유·무로 확인하였으며, 폴리우레탄과의 분산성은 필름을 제조한 후 가시광선/근적외선/분광광도계(UV/VIS/NIR Spectrometer)를 이용한 반사율로 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료

본 연구에서 사용한 탄소나노튜브는 다중벽탄소나노튜브(MWNT, 한화나노텍)로서 CVD 방법으로 제조한 순도 95%, 길이 10~20 $\mu$ m, 직경 10~15nm의 나노튜브이다. 탄소나노튜브 분산용매로는 DMF(dimethylformamide)를 사용하였고, 탄소나노튜브/폴리우레탄 필름 제조를 위한 고분자 매트릭스는 폴리우레탄(PU, No. 972DF, 1액형, Cytec. Industries Inc.)을 사용하였다.

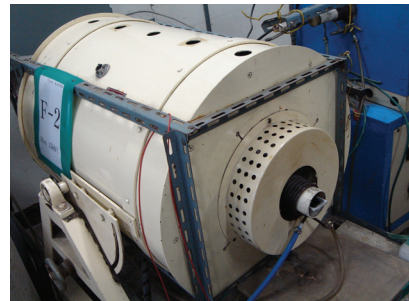
### 2.2 탄소나노튜브의 건열처리

건열처리 공정은 탄소나노튜브의 정제과정 중 수분, 유기물질, 촉매 및 기타 불순물 등을 건열처리하여 분산시 분산효율을 높이기 위한 공정이다. 따라서 탄소나노튜브의 정제를 위하여 450 $^{\circ}$ C의 대기 중에서 80분간 건열처리를 하였다. Fig. 1에 건열대기로와 건열처리할 탄소나노튜브가 담겨진 보트, 그리고 대기 온도 승온 그래프를 나타낸다.

### 2.3 탄소나노튜브의 화학적 개질

본 연구에서 사용한 탄소나노튜브는 95%의

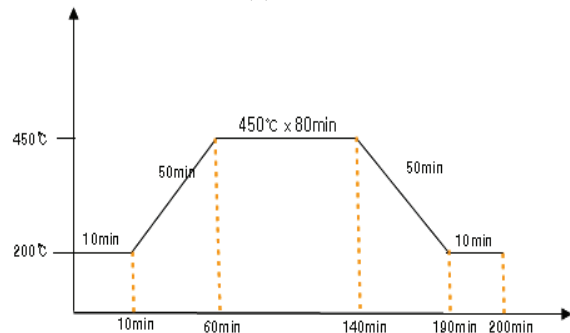
순도를 가지며, 탄소나노튜브 내의 포함된 금속 촉매와 같은 불순물을 제거하고 순도를 높이기 위해 산 용액을 이용하였다. 고분자 복합체 제조시 계면접착력을 향상시키기 위하여 나노튜브의 표면을 질산(HNO<sub>3</sub>)과 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)의 무게비를 3:1로 혼합용액을 만들어 상온에서 60분간 bath 타입의 초음파 분산기(Branson Ultrasonics Corporation, USA)에서 50~60 Hz에 17 VOLTS, 3.0 AMPS의 조건으로 처리하였다. 산에 의해 화학적 개질된 탄소나노튜브는 표면에 잔존하는 불순물을 제거하기 위해서 증류수를 이용하여 pH 7이 될 때까지 5회 이상 수세한 후 pH 측정 페이퍼로 중성화를 확인하였다. 세척한 탄소나노튜브는 약 60 $^{\circ}$ C의 진공건조기에서 12시간 이상 건조하여 사용하였다.



(a) dry heater at atmosphere



(b) boat



(c) dry heater processing profile

Fig. 1. The Dry treatment processing of carbon nanotube.



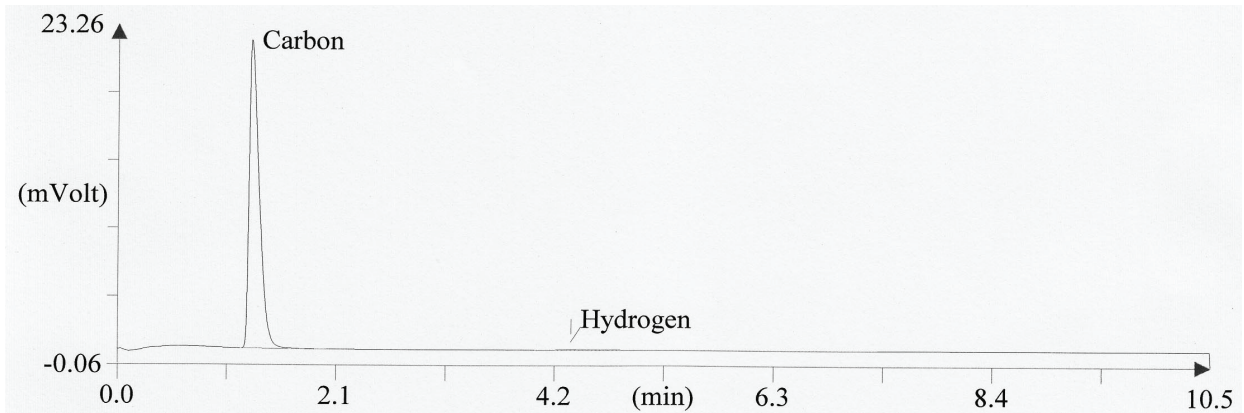


Fig. 2. Analysis on the element of carbon nanotube.

### 2.4 분산용액 제조

고분자 복합체를 만들기 위한 탄소나노튜브는 분산용매로 DMF를 사용하여 분산용액을 제조하였다. 화학적 개질 전후의 탄소나노튜브의 분산성을 비교하기 위하여 탄소나노튜브 함유량을 DMF 함량대비 0.5wt%로 하여 분산시간 120분으로 초음파 분산기(Sonics & Materials Inc., USA)를 이용하였고, 분산작업 조건은 분당 55초 진동 후 5초간 무진동이며, 750 watt/ 20KHz에 25% 출력조건으로 작업하여 분산용액을 제조하였다.

### 2.5 필름 제조

2.4에서 제조한 분산용액은 필름을 제조하기 위해 고분자 매트릭스인 폴리우레탄과 무게비 1:3의 양으로 혼합하여 상온, 500rpm 교반 속도 조건하에서 1시간 동안 충분히 교반한 후 필름을 제조하였다. 화학적 개질 전후 제조한 탄소나노튜브/폴리우레탄 교반액 2종은 코팅지 위에 일정량 도포 한 후 필름제조기 Baker Applicator (YBA-4형)를 이용하여 200 $\mu$ m 두께로 캐스팅하여 150 $^{\circ}$ C에서 60초 동안 건조하여 필름을 제조하였다.

### 2.6 특성 분석

탄소나노튜브는 주사전자현미경(SEM, JEOLS-4200 : HITACHI, Japan) 및 투과전자현미경(TEM, TECNAI G2 F20S-TWIN : Philips, Netherland)을 이용하여 내부구조를 관찰하였으며 TG-DTA (SDTQ600 : TA Instruments, USA)로 TGA와 DSC를 측정하여 탄소나노튜브의 열분해 특성을 측정하였다. 제조된 필름의 표면은 SV-550 (SOMETECH,

대한민국) 영상현미경 시스템으로 관찰하였고, 필름의 분산성을 평가하기 위해 UV/VIS/NIR 분광광도계를 이용하여 전면반사율을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 탄소나노튜브 성분분석

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 탄소나노튜브(다중벽탄소나노튜브, MWNT, 한화나노텍)를 원소분석기(Elemental Analyzer)로 성분을 분석한 결과를 나타낸다. 원소분석 결과 탄소나노튜브는 순도 95.8944%이고, 0.0369%는 수분임을 알았다. 나머지 4.06%는 탄소나노튜브 제조공정시 금속촉매로 사용되는 철(Fe), 알루미늄(Al), 코발트(Co)가 포함되어 있음을 MWNT 공급처인 한화나노텍에서 공급한 성분분석표에 근거하여 확인할 수 있었으며, 금속촉매의 모습은 SEM과 TEM 측정결과로 확인할 수 있다.

Fig. 3은 탄소나노튜브의 SEM 측정 결과로 수마이크론이 큰 다발 형태로 엉켜져 있는 것을 확인할 수 있고, Fig. 4는 TEM 측정결과로 탄소나노튜브의 벽 형태와 탄소나노튜브 내에 존재하는 촉매 및 불순물을 확인할 수 있다. 이러한 촉매 및 불순물들은 나노튜브 복합체 형성을 위

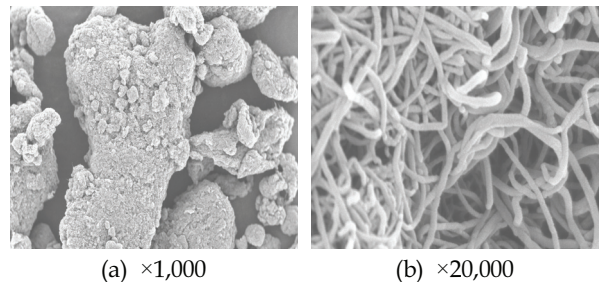
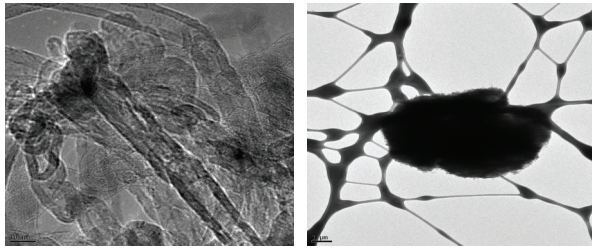


Fig. 3. SEM images of the carbon nanotube.



(a) metal catalyst impurities (b) impurities included in carbon nanotube

Fig. 4. TEM images of the carbon nanotube.

한 분산시 균일한 분산을 방해하며 엉김과 응집 현상을 나타내기 위해 제거할 필요가 있다.

### 3.2 탄소나노튜브의 건열처리와 열분해 특성

본 연구에서는 사용된 탄소나노튜브의 건열처리 온도를 설정하기 위해 TG-DTA로 DSC와 TGA를 측정하여 열분석을 행하였다. 열분석은 승온속도를 10°C/min으로 하여 0~900°C 범위에서 공기 분위기 하에서 이루어졌다.

Fig. 5에 DSC-TGA 결과를 나타낸다. 측정결과 0°C~200°C 부근에서 수분이 날아가 무게가 조금씩 감소하는 현상을 보이며 200°C~450°C 부근에서는 촉매와 유기화합물질이 날아가며 450°C~550°C 부근에서 유기화합물질과 탄소나노튜브가 일부 산소와 만나 산화되어 550°C~650°C 부근에서 산화되는 것을 볼 수 있다. 그리고 650°C에서 산화최대치를 보이며 650°C 이상에서 산화 및 잔유물이 산화되면서 800°C 부근에서 반응이 마무리 되는 것을 볼 수 있다. 탄소나노튜브의 열분석 측정결과 무게의 급격한 감소를 보이는 450°C가 탄소나노튜브의 적정 건열처리온도인 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6에 TGA 측정에 의한 건열처리 전후 탄소나노튜브의 열분해 특성을 나타낸다.

TGA 곡선을 통하여 건열처리 전후 탄소나노튜브는 2% 정도의 중량이 감소된 것을 확인할 수 있으며, 이때 수분과 함께 유기화합물질 등도 함께 연소되었음을 알 수 있다. 따라서 건열처리가 탄소나노튜브의 정제에 상당한 기여를 하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.3 탄소나노튜브의 화학적 표면 개질에 따른 폴리우레탄과의 분산특성

Fig. 7은 화학적 표면개질 전후의 DMF상의 탄소나노튜브의 분산용액을 나타낸다.

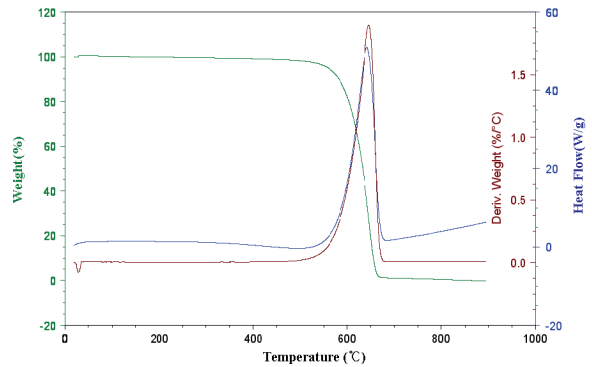


Fig. 5. DSC-TGA graph of the carbon nanotube.

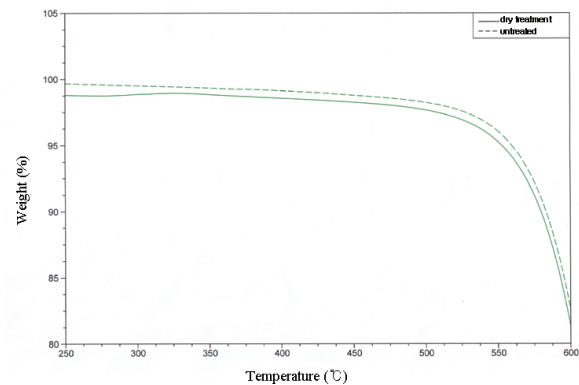


Fig. 6. TGA graph of the carbon nanotube.

Fig. 7은 화학적 표면개질 전후의 DMF상의 탄소나노튜브의 분산용액을 나타낸다. Fig. 7의 (a)에서 보면 화학적으로 표면처리 전 분산용액의 경우 탄소나노튜브와 DMF 간이 층분리가 일어난 것을 육안으로 확인할 수 있다. 이는 정제된 탄소나노튜브에 포함된 금속촉매나 불순물 등이 탄소나노튜브의 분산성을 저하시키는 결과 나노튜브가 DMF 분산용액 내에서 분산되지 않고 응집되어 엉켜있는 결과 이런 현상을 나타낸다. Fig. 7의 (b)의 경우 화학적으로 표면개질된 탄소나노튜브를 사용하여 DMF상에 분산용액을 제조한 결과 일정 시간 경과후에도 분리층이 형성되지 않고 잘 분산되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 FT-IR로 측정된 산처리에 의해 기능화된 탄소나노튜브의 구조변화를 나타낸다. 탄소나노튜브의 기능화 부여는 나노튜브에 산처리를 함으로써 얻어진다. 산처리에 의해 탄소나노튜브의 C=C 결합이 파괴되면서 -COOH 그룹을 형성하는데, FT-IR로 그 구조변화를 살펴본 결과 3446cm<sup>-1</sup> 부근에서 -OH stretching과 1652cm<sup>-1</sup> 부근에서 C=O stretching 피크<sup>15)</sup>를 나타내어 탄

소나노튜브에 -COOH 그룹이 도입된 것을 확인하여 기능화 됨을 알 수 있다. Fig. 9는 화학적 표면개질 전후의 분산용액으로 제조한 탄소나노튜브/폴리우레탄 필름의 표면사진을 나타낸다. (a)의 표면개질 전 제조된 필름에 비해 (b)의 표면개질 후 제조된 필름이 분산성이 고른 것을 표면사진 측정결과 확인할 수 있다. Fig. 10은 화학적 개질 전후의 탄소나노튜브/폴리우레탄 필름의 반사율을 측정된 결과를 나타낸다. 화학적으로 표면처리 전 필름에 비해 표면처리 한 필름이 탄소나노튜브가 잘 분산되어 있는 결과 낮은 반사율을 보이는 것으로 확인되었다. 표면처리 전 탄소나노튜브의 경우 나노튜브가 분산이 되지 않고 응집이 되어 있는 결과 반사율이 약 0.5% 정도 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

산에 의한 탄소나노튜브의 개질은 나노튜브의 표면에 균일하게 잘 형성되어 있는 탄소 그룹의 파괴로 인하여 규칙적으로 그물구조로 이루어져 있는 탄소 그룹의 배열에 손상을 가져와 탄소나노튜브의 표면 열림을 유발시킨다. 따라서 산에 의한 탄소나노튜브의 표면 개질은 탄소나노튜브와 DMF 상의 분산용액 제조시 분산성의 향상을 가져오는 것을 확인할 수 있다.

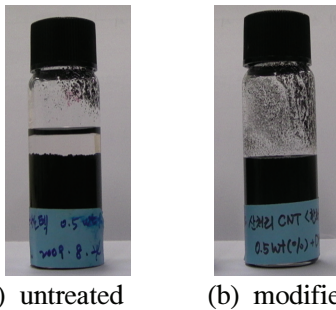


Fig. 7. Photo image of the solutions carbon nanotube dispersion containing DMF.

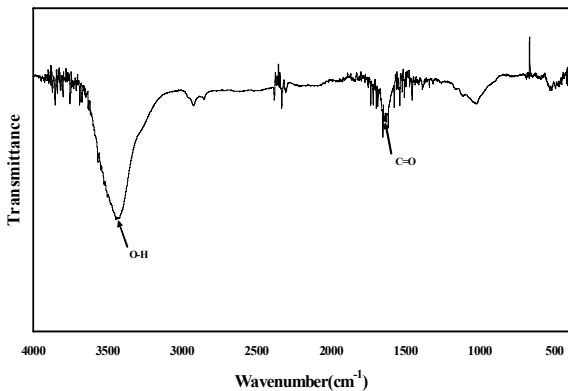


Fig. 8. FT-IR spectra of modified carbon nanotube.

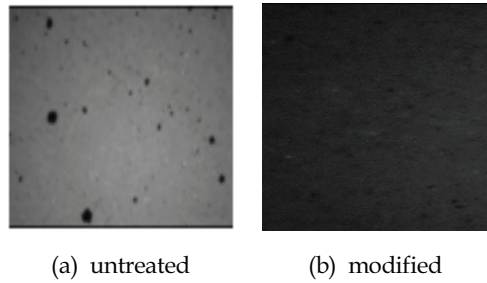


Fig. 9. Surface image of the carbon nanotube /poly-urethane film.

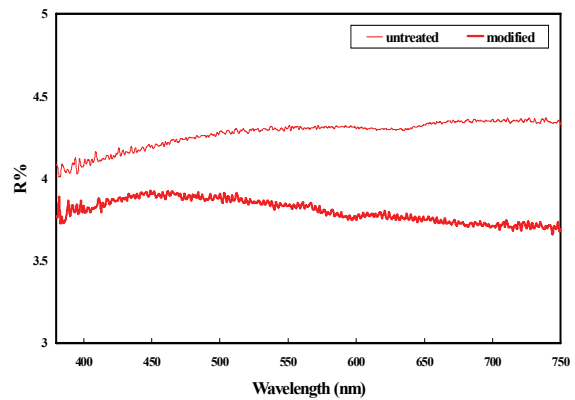


Fig. 10. Reflectance of the carbon nanotube/ poly-urethane films.

#### 4. 결 론

본 연구에서 탄소나노튜브/고분자 복합재료 생성시 탄소나노튜브와 고분자간의 친화력을 높이고 분산성을 향상시키기 위해 탄소나노튜브 기능화 방법을 알아보고 폴리우레탄과의 분산성을 고찰해 본 결과는 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 사용한 탄소나노튜브는 100% 정제되지 않은 나노튜브로 탄소나노튜브의 분산성 향상을 위해 TGA로 열분석한 결과 450°C에서 무게의 급격한 감소를 보여 450°C가 적정 건열처리 온도인 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 450°C 대기 상에서 80분간 건열처리한 결과 2% 정도의 중량 감소를 확인하였고 이때 나노튜브 내에 포함된 수분과 함께 금속촉매 및 불순물이 제거된 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 고분자 복합재료 형성시 분산성을 향상시키기 위해 질산과 황산의 혼합용액으로 탄소나노튜브의 표면을 개질하여 기능화 한 것을 FT-IR로 구조변화를 확인한 결과 나노튜브 표면에 -COOH 그룹이 형성되어 열린



- 구조로 개질되었음을 확인하였다. 표면 개질된 탄소나노튜브는 분산용액 제조시 분산성의 향상을 가져오는 것으로 확인되었다.
- 4) 분산용매인 DMF에 분산한 결과, 표면 개질된 탄소나노튜브는 일정 시간 경과후에도 분리층이 형성되지 않고 잘 분산된 것을 확인할 수 있었다. 폴리우레탄과 고분자 매트릭스 형성 결과, 표면 개질된 탄소나노튜브가 필름 형성시 고른 분산성을 보였다.
  - 5) 표면 개질된 탄소나노튜브로 탄소나노튜브/폴리우레탄 필름을 제조하여 반사율을 측정한 결과, 표면 개질된 필름이 탄소나노튜브가 잘 분산되어 있어 낮은 반사율을 가지는 것으로 확인되었다.
  - 6) 열처리와 산처리에 의한 탄소나노튜브의 표면 개질은 탄소나노튜브/고분자 복합재료 생성시 분산성의 향상을 가져오는 것을 확인할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과로 관계기관에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. B. G. Min, Carbon Nanotubes and Fibers, *Fiber Technol. Ind.*, **11**, 224-233(2007).
2. Dispersion of Carbon Nanotube, KISTI, 2005.
3. P. J. Boul, J. Liu, E. T. Mickelson, C. B. Huffman, L. M. Ericson, I. W. Chiang, K. A. Smith, D. T. Colbert, R. H. Hauge, J. L. Margrave, and R. E. Smalley, Reversible Sidewall Functionalization of Bucky Tubes, *Chem. Phys. Lett.*, **310**, 367-372(1999).
4. J. Liu, M. J. Casavant, M. Cox, D. A. Walters, P. Boul, W. Lu, A. J. Rimberg, K. A. Smith, D. T. Colbert, and R. E. Smalley, Controlled Deposition of Individual Single-walled Carbon Nanotubes on Chemically Functionalized Templates, *Chem. Phys. Lett.*, **303**, 125-129(1999).
5. K. D. Ausman, R. Piner, O. Lourie and R. S. Ruoff, Organic Solvent Dispersions of Single-walled Carbon Nanotubes : Toward Solutions of Pristine Nanotubes, *J. Phys. Chem. B.*, **104**, 8911-8915(2000).
6. J. Liu, A. G. Rinzler, H. J. Dai, J. H. Hafner, R. K. Bradley, P. J. Boul, A. Lu, T. Iverson, K. Shelimov, C. B. Huffman, F. RodriguezMacias, Y. S. Shon, T. R. Lee, D. T. Colbert, and R. E. Smalley, Fullerene Pipes, *Science*, **280**, 1253-1256(1998).
7. V. Krstic, G. S. Duesberg, J. Muster, M. Burghard, and S. Roth, Langmuir-Blodgett Films of Matrix-diluted Single-walled Carbon Nanotubes, *Chem. Mater.*, **10**, 2338-2340(1998).
8. G. S. Duesberg, J. Muster, V. Krstic, M. Burghard, and S. Roth, Chromatographic Size Separation of Single-wall Carbon Nanotubes, *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process*, **A67**, 117-119(1998).
9. M. S. P. Shaffer, X. Fan, and A. H. Windle, Dispersion and Packing of Carbon Nanotubes, *Carbon*, **36**, 1603-1612(1998).
10. M. S. P. Shaffer, X. Fan, and A. H. Windle, Analogies between Polymer Solutions and Carbon Nanotube Dispersions, *Macromolecules*, **32**, 6864-6866(1999).
11. P. Potschke, T. G. D. Fomes, and D. R. Paul, Rheological Behavior of Multiwalled Carbon Nanotube/polycarbonate Composite, *Polymer*, **43**, 3247-3255(2002).
12. S. H. Kim, X. Wang, S. C. Lee, and B. G. Min, Rheological Properties and Electrospinning of PVA/CNT Aqueous Solution, *J. Korean Fiber Soc.*, **43**, 251-256(2006).
13. T. Saito, K. Matsushige, and K. Tanaka, Chemical Treatment and Modification of Multi-Walled Carbon Nanotubes, *Physica B*, **323**, 280-283(2002).
14. A. Chatterjee and B. L. Deopura, Carbon Nanotubes and Nanofiber: An Overview, *Fibers and Polymers*, **3**, 134-139(2002).
15. Y. Qin, J. Shi. Wu, X. Li, Z. X. Guo, and D. Zhu, Concise Route to Functionalized Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. B*, **107**, 12899-12901(2002).
16. A. Hirsch, Functionalization of Singled-Walled Carbon Nanotubes, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **41**, 11-18(2002).

17. I. W. Chiang, B. E. Brinson, R. E. Smalley, J. L. Margrave, and R. H. Hauge, Purification and Characterization of Single-Wall Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. B*, **105**, 1157-1161(2001).