

# PET/Nylon66/Clay 나노복합재료의 열적물성 및 표면특성

이민호 · 구자훈 · 민병훈 · 김정호<sup>†</sup>

수원대학교 화학공학과

(2011년 7월 19일 접수, 2011년 8월 16일 심사, 2011년 8월 31일 채택)

## Thermal and Surface Properties of PET/Nylon66/Clay Nanocomposites

Minho Lee, Jahun Ku, Byung Hun Min, and Jeong Ho Kim<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, University of Suwon, Gyeonggi-do 445-743, Korea

(Received July 19, 2011; Revised August 16, 2011; Accepted August 31, 2011)

본 연구에서는 PET와 Nylon66의 블렌드에 몬모릴로나이트(PM) 또는 유기화제로 개질된 clay (Cloisite 25A 또는 15A)를 첨가하여 PET/Nylon66/clay 나노복합재료를 제조하였다. 나노복합재료는 용융삽입법을 이용하여 제조하였고 DSC 측정을 이용하여 분석한 결과 clay의 첨가로 인해 PET/Nylon66 블렌드의 결정화특성이 변화되는 것을 확인하였다. 특히 C25A가 PET/Nylon66 블렌드와의 상호작용이 가장 커서 결정화온도를 가장 크게 변화시키는 것으로 나타났다. 나노복합재료의 표면을 AFM으로 관찰한 결과에서도 C25A를 이용한 나노복합재료가 가장 표면의 굴곡이 적어서 상대적으로 표면이 균일한 것으로 나타났고 기계적 물성측정에서도 전반적으로 C25A를 이용한 나노복합재료가 우수한 물성을 나타내는 것으로 관찰되었다. 각 나노복합재료의 표면 극성도를 조사하기 위하여 접촉각 측정을 하였는데 유기화 정도가 클수록 표면의 접촉각이 커져서 극성이 낮아지는 것을 확인하였다.

Nanocomposites of blends of polyethyleneterephthalate (PET) and polyamide66 (Nylon66) containing natural and organically modified montmorillonite clays (PM, Cloisite<sup>®</sup> 25A and 15A) were prepared by melt mixing. DSC results showed that the addition of clay changed the crystallization behavior of PET/Nylon66 nanocomposites. Clay C25A was observed to most significantly change the crystallization temperature than other clays in blends of PET and Nylon66, which may be caused by the difference in interaction with matrix polymers. AFM results also showed that the lowest value of surface roughness was observed for nanocomposites containing C25A indicating the smooth and relatively homogenous surface. Mechanical properties measurement showed the similar results. Contact angle was measured to study the difference in hydrophobicity. An increase in contact angle was observed for nanocomposites with C25A or C15A due to the increased hydrophobicity.

**Keywords:** nanocomposite, PET, Nylon66, blend, AFM

### 1. 서 론

최근 들어 나노복합재료(nanocomposite)의 여러 가지 우수한 물성이 보고되면서 고분자/clay 나노복합재료에서 clay의 silicate 층과 고분자의 계면 현상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5]. 나노복합재료는 1987년 나일론으로부터 시작하여 열가소성 및 열경화성 플라스틱에 광범위하게 적용되고 있다[6-8]. 이 고분자/clay 나노복합재료는 고분자에 clay를 미세하게 분산시켜 고분자의 열적, 기계적 물성, 가스 및 액체 차단성, 난연성 및 내마모성 등을 개선할 수 있는 여러 장점을 가지고 있어 구조재, 코팅재 등의 분야에서 매우 유망한 신소재로 기대되고 있다[9,10].

대표적으로 자연 상태에서 층상 구조의 점토 광물인 montmorillonite (MMT)는 강한 친수성을 띠고 있다. 나노복합재료로 만들어졌을 때 clay가 matrix 고분자에 nano scale로 균일하게 분산되어 우수한

물성을 나타내도록 clay의 표면을 유기적으로 개질한 OLS (organically-modified layered silicate)에 관한 연구가 최근 많이 보고되고 있다. 분산상의 크기가 수 mm 또는 수백  $\mu\text{m}$ 에 달하는 기존의 복합 재료에서는 얻기 힘들었던 물리적인 특성을 소량의 clay 첨가로 가능하게 한 고분자/clay 나노복합재료는 고성능 신소재로서 커다란 잠재력을 가지고 있다. 고분자/clay 나노복합재료는 clay의 분산 형태에 따라 완전히 분산된 박리형 나노복합재료, 층간에 고분자가 삽입된 삽입형 나노복합재료 및 micro scale의 입자로 존재하는 상분리형 나노복합재료로 나눌 수 있다[11,12].

고분자/clay 나노복합재료는 제조 조건과 고분자와 clay의 친화성에 따라 현저한 구조적인 차이가 생기게 된다. 즉, clay가 분산되지 못하고 뭉쳐 있으면 상분리구조가 되며, 단량체 또는 고분자가 clay의 층간층으로 확산되어 삽입이 이루어져 층간의 벌어진 정도가 2~3 nm 이면서 층들이 규칙적으로 배열되면 삽입형구조(intercalated structure)가 된다. 한편, clay의 규칙적인 층상 구조가 완전히 와해되어 층간 거리가 수십~수백 nm에 이르러 매우 임의적으로 고르게 분산되어

<sup>†</sup> 교신저자(e-mail: jhkim@suwon.ac.kr)

박리형구조(exfoliated structure)를 형성하기도 하는데, 이 세 종류의 구조 중에서 물리적인 특성 측면에서 선호되는 경우는 박리형구조이다[13,14].

나노복합재료의 제조 방법은 용융 상태의 고분자를 기계적으로 혼합하여 clay 층간에 고분자를 삽입시키는 용융삽입법, 유기 용매에 clay를 분산시키면서 고분자 사슬의 층간 침투를 유도하는 용액법, clay의 층간에 중합이 가능한 단량체를 삽입시킨 후 중합하여 clay의 박리를 유도하는 *in-situ* 중합법 등이 있다. 나노복합재료는 그 제조방법에 따라 물성이 달라질 수 있는 것으로 보고되고 있다[15,16].

일반적으로 고분자/clay 나노복합재료용 무기입자로는 몬모릴로나이트(montmorillonite, MMT)가 많이 사용되고 있으며, 유기화제로 개질 할 경우는 실리케이트 층간거리 확대로 인하여 고분자 삽입을 용이하게 하기 위한 것이다. 예를 들어서 폴리이미드/clay 나노복합재료에서 알킬암모늄으로 치환된 MMT를 이용하여 clay 나노복합재료를 제조 할 경우는 삽입형 clay 나노복합재료가 제조되나, 디아민으로 MMT를 치환시켰을 경우에는 박리형 폴리이미드/clay 나노복합재료가 제조되어 기계적 성질과 열적 특성이 크게 향상되는 연구가 보고된 바 있다[17].

단일 고분자에 clay를 첨가한 나노복합재료에 대한 연구는 많이 이루어졌으나 clay를 포함하는 고분자 블렌드에 대한 나노복합재료에 관한 연구는 많이 보고되지 않았다[18,19]. 나노복합재료의 여러 가지 물성과 연관지어 볼 때 고분자 내에서의 clay의 분산 상태는 고분자와 clay의 상호작용(interaction) 거동과 관계가 있다. 고분자 블렌드의 나노복합재료는 단일 고분자의 나노복합재료보다 더 많은 계면을 가지고 있어 더 어렵고 흥미로운 연구라고 판단된다.

PET (polyethyleneterephthalate)는 가장 많이 사용되고 있는 고분자로서 낮은 가격과 높은 성능으로 인해 섬유나 필름 그리고 병 등의 많은 곳에 적용이 가능하다. 그러나 결정성과 열변형온도 그리고 탄성율이 낮기 때문에 엔지니어링 플라스틱으로서 사용이 제한되고 있다. 그에 따라 PET의 물성을 향상 시키기 위하여 PET/clay를 많이 연구해 왔다[20,21].

Nylon (polyamide)은 일반적으로 결정성이 높고 기계적 강도와 열안정성, 내마모성 그리고 마찰 특성이 좋기 때문에 기계재료로의 적용이 꾸준히 증가 되고 있다. 이전 연구에 따르면 Nylon6/clay 나노복합재료는 Nylon6와 비교하여 인장강도, 인장탄성율, 열변형온도, 난연성과 기계투과성이 점차 향상 되어진다고 밝혀져 있고[22], Nylon66/clay 나노복합재료에서도 비슷한 연구 결과가 보고된 바 있다[23].

따라서 본 연구에서는 PET와 Nylon66의 블렌드에 종류별 clay를 첨가함에 따른 영향에 대해 연구하였다. 이를 위하여 자연상태 그대로의 몬모릴로나이트와 유기화제로 개질한 Cloisite 25A 및 Cloisite 15A를 사용하여 용융삽입법을 통한 PET/Nylon66/clay 나노복합재료를 제조하여 DSC, AFM, contact angle test 그리고 기계적 물성을 확인하였다. 이를 통하여 clay가 PET/Nylon66 블렌드에 어떤 영향을 주는가 알아보도록 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험 재료

본 연구에서 사용된 PET는 SK 케미칼의 제품으로 SKY PET BB8055를 사용하였고, Nylon66는 Dupont사의 Zytel 101F를 사용하였다.

Clay는 Southern Clay Product의 몬모릴로나이트로 이온교환능(cation exchange capacity, CEC)이 92.6 meq/100g인 자연 그대로의 pristine

montmorillonite (PM)과 개질을 통하여 극성을 조절한 Cloisite 25A (C25A, CEC : 95 meq/100 g)와 Cloisite 15A (C15A, CEC : 125 meq/100 g)를 사용하였다. C25A와 C15A는 dimethyl, hydrogenated tallow, 2-ethylhexyl quaternary ammonium ion과 dimethyl, dehydrogenated tallow quaternary ammonium ion으로 각각 개질된 clay이다. PM이 가장 큰 극성을 지니고, C15A가 가장 소수성이 큰 반면 C25A는 두 clay의 중간 정도의 극성을 띠고 있었다[19].

### 2.2. 나노복합재료의 제조 방법

PET/Nylon66/clay 나노복합재료 제조 전 PET와 Nylon66는 100 °C에서 12 h 동안 열풍 건조하였고 clay는 80 °C에서 4 h 동안 진공 건조하여 사용하였다. 나노복합재료 조성은 PET/Nylon66의 50/50의 중량비를 기준으로 하였고 clay의 함량은 고분자 중량의 5 wt%가 되도록 첨가하였다. 용융 삽입법으로 제조하기 위해 twin screw extruder (L/D = 40/1)를 사용하였고, 온도범위는 250~275 °C에서 제조하였다. 제조된 PET/Nylon66/clay 나노복합재료 시편은 제작 전 100 °C에서 24 h 건조 후 dumbbell, bar형태로 제작하여 물성측정에 사용하였다.

### 2.3. 분석 방법

제조된 PET/Nylon66/clay 나노복합재료는 DSC (Differential Scanning Calorimeter, TA Instrument DSC2010)를 이용하여 질소 퍼지 상태에서 상온에서부터 승온 속도 20 °C/min로 하여 320 °C까지 승온한 뒤 20 °C/min의 속도로 온도를 낮추며 나노복합재료의 용융온도 및 결정화온도의 변화를 측정하였다.

Clay의 첨가에 의한 PET/Nylon66의 morphology를 관찰하기 위하여 내충격 강도 측정 후의 샘플의 파단면을 AFM (Atomic Force Microscope, Shimadzu SPM-9500J3)을 통하여 샘플의 표면굴곡 정도를 조사하였다. 그리고 유기화 정도가 다른 clay를 이용함에 따른 표면물성의 변화를 측정하기 위해 시편의 접촉각 측정장치(Kruss, DSA100)를 사용하였고 측정 조건은 상온에서 물 3 μL의 조건으로 측정하였다.

Clay의 첨가에 따른 기계적 물성의 변화를 UTM (Universal test machine, Lloyd LR10K)을 이용하여 측정하였다. 시편은 mini injection molder를 사용하여 275 °C에서 제작하였다. 인장 물성은 ASTM D638의 규격에 근거하여 dumbbell 형태의 시편을 50 mm/min의 시험속도로 측정하였다. 굴곡 물성 측정은 ASTM D790에 의하여 20 mm/min의 시험속도로 하여 측정하였다. 아이조드 충격강도는 ASTM D256의 방법에 의거하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. PET/Nylon66/clay 나노복합재료의 열적 물성

용융삽입법으로 제조된 나노복합재료에 대해 DSC를 이용하여 용융상태에서 온도를 내리며 결정화온도  $T_c$ 를 측정하였다. PET/Nylon66의 경우와 여기에 PM, C25A 그리고 C15A를 첨가한 나노복합재료의 DSC thermogram을 Figure 1에 나타내었다. 순수한 PET가 Nylon66보다 낮은 온도에서 용융점이 나타난다. 또한 순수한 PET 또는 Nylon66의 결정화온도를 측정해 보면 PET가 Nylon66보다 낮은 온도에서 결정화온도가 측정되므로 Figure 1에서 낮은 온도영역 대에 나타나는 피크( $T_{c1}$ )는 PET의 결정화온도이고, 그보다 높은 온도에서 나오는 피크( $T_{c2}$ )는 Nylon66의 결정화온도이다.

Table 1에  $T_{c1}$  및  $T_{c2}$ 의 측정값과 두 결정화온도의 차이인  $\Delta T_c$ 를 나타내었다. Figure 1 및 Table 1에서 볼 수 있듯이 clay를 첨가한 나

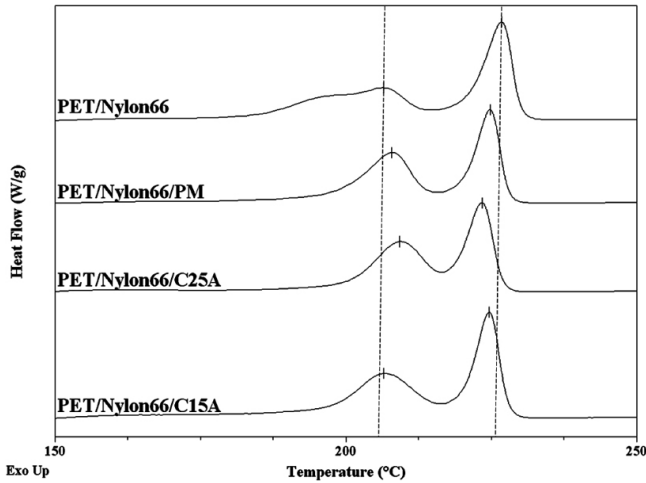


Figure 1. DSC thermograms of PET/Nylon66/clay nanocomposites.

Table 1. Crystallization Temperature of PET/Nylon66/clay Nanocomposites

Nanocomposites	Crystallization temperature (T <sub>c</sub> )		ΔT <sub>c</sub>
	PET phase (T <sub>c1</sub> )	Nylon66 phase (T <sub>c2</sub> )	
PET/Nylon66	206.4	226.8	20.4
PET/Nylon66/PM	207.9	224.8	16.9
PET/Nylon66/C25A	209.2	223.4	14.2
PET/Nylon66/C15A	206.4	224.6	18.2

ΔT<sub>c</sub> : T<sub>c1</sub>-T<sub>c2</sub>

노복합재료의 경우는 첨가하지 않은 경우와 비교해서 T<sub>c1</sub>은 증가하였고 T<sub>c2</sub>는 감소한 것으로 나타났다. 즉 clay 첨가에 의해서 두 결정화온도가 서로 근접하게 되는 것으로 나타났다. Table 1에서 볼 수 있듯이 clay를 첨가한 경우의 ΔT<sub>c</sub>가 clay를 첨가하지 않은 PET/Nylon66 경우보다 전반적으로 더 작게 나타났다. 이는 clay의 첨가에 의해 PET와 Nylon66의 상용성이 부분적으로 증가되어 두 고분자의 결정화 거동이 미세하지만 서로 근접하기 때문인 것으로 생각되었다. 특히 C25A를 첨가한 경우가 PM 또는 C15A의 경우와 비교해서 ΔT<sub>c</sub>가 14.2 °C로 가장 작은 차이를 나타내었고 따라서 C25A가 PET와 Nylon66의 친화성을 가장 잘 증진시키는 것으로 판단되었다.

고분자/clay 나노복합재료에서 clay를 첨가했을 때 amide나 imide 등과 같이 극성기를 가진 고분자는 clay 표면의 hydroxyl (OH)기 등과 interaction이 커진다고 연구된 바 있다[24,25]. 또 다른 연구에서는 고분자에 clay가 첨가되었을 때 clay가 핵제로 작용한다고 보고된 바도 있다[26]. 본 연구에서 PET 또는 Nylon66의 T<sub>c</sub>가 서로 접근한 결과는 PET 또는 Nylon66과 clay가 상호작용을 일으켜서 두 성분간의 친화성에 변화를 일으켰기 때문으로 생각된다. 결과로 PET와 Nylon66사이의 상용성이 부분적으로 향상되어 T<sub>c</sub>가 서로 접근한 결과가 나타난 것으로 보여진다.

C25A가 가장 좋은 결과를 나타낸 것은 PM의 경우에는 clay 표면에 노출된 OH기가 많더라도 clay 층간의 박리가 충분하지 않기 때문에 PET 또는 Nylon66과 충분한 접촉이 어려워서 고분자와 상호작용을 충분히 일으키지 못한 것으로 생각된다. 반면에 C25A는 적절한 층간 분리가 일어나서 PET 또는 Nylon66와의 접촉도 충분히 이루어졌고 또한 clay 표면 전체가 유기화제로 덮여있지는 않기 때문에 OH기와

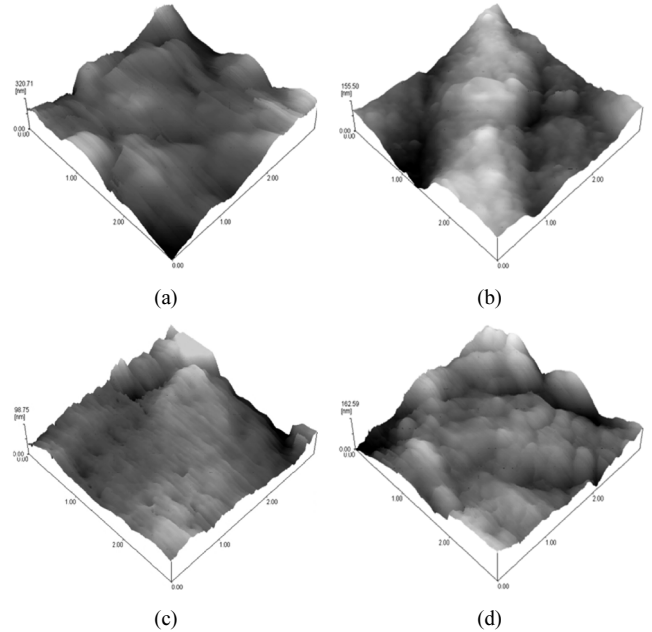


Figure 2. AFM image of PET/Nylon66 containing (a) none, (b) PM, (c) C25A, and (d) C15A.

Table 2. Roughness of PET/Nylon66/clay Nanocomposites

Clay	Average roughness value (nm)	Root mean square roughness value (nm)
None	36.5	47.0
PM	27.8	32.3
C25A	14.0	18.6
C15A	20.2	26.4

적절한 interaction을 일으킨 것으로 판단된다. C15A는 유기화제가 많아서 층상박리는 어느 정도 이루어지겠지만 clay 표면이 유기화제로 거의 완전히 덮여있어서 충분한 정도의 상호작용이 어려웠을 것으로 추측된다. 이 결과로 유기화 정도가 작은 PM과 유기화 정도가 큰 C15A의 중간에 있는 C25A가 PET/Nylon66에서 계면간의 interaction을 가장 크게 증가시켜 결정화온도에 가장 큰 영향을 끼친 것으로 생각된다.

### 3.2. AFM 결과

PET/Nylon66에 clay를 첨가함에 따라 나노복합재료의 표면의 굴곡 또는 거칠기가 어떻게 변화하는가를 AFM을 이용하여 관찰하였다. 그 결과를 Figure 2에 나타내었는데 Figure 2의 (a)는 Clay를 첨가하지 않은 PET/Nylon66의 AFM 결과이고 (b), (c) 그리고 (d)는 각각 PM, C25A 그리고 C15A를 5 wt% 첨가하였을 때의 AFM 결과이다. Figure 2(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 clay를 첨가하지 않은 나노복합재료 또는 PM을 첨가한 경우는 표면의 굴곡이 심하고 거칠다는 것을 관찰할 수 있었다. 상대적으로 Figure 2(c)의 C25A를 첨가한 나노복합재료는 표면의 굴곡이 심하지 않고 비교적 평평한 모양을 관찰할 수 있었다. C15A를 첨가한 경우는 PM과 C25A를 첨가한 경우의 중간 정도의 굴곡을 나타내었다. Table 2에 각 샘플들의 표면 거칠기의 평균값을 나타내었다. C25A가 첨가된 나노복합재료의 평균 거칠기는 약 14 nm로 다른 샘플들에 비해 약 6~22 nm정도가 작은 것으로 나타났다.

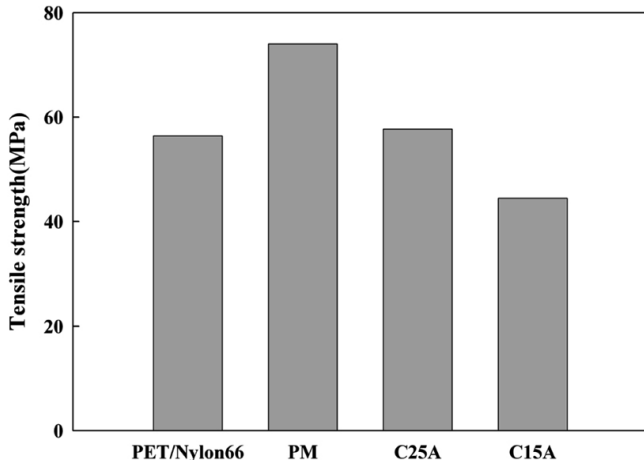


Figure 3. Tensile strength of PET/Nylon66/clay nanocomposites.

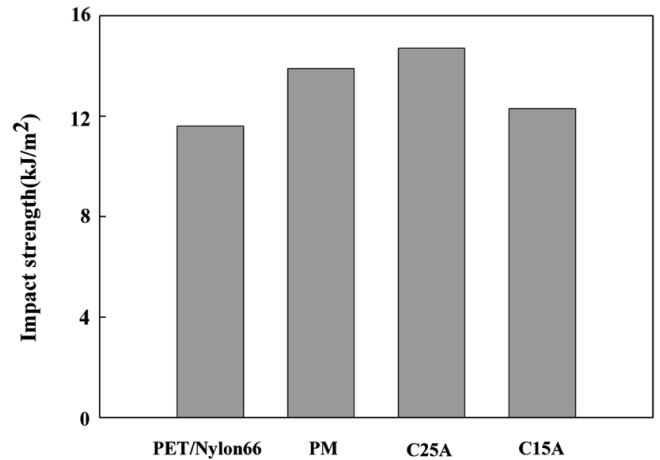


Figure 5. Notched Izod impact strength of PET/Nylon66/clay nanocomposites.

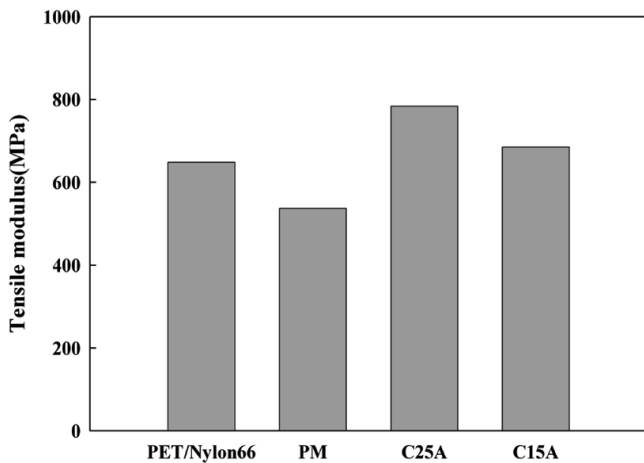


Figure 4. Tensile modulus of PET/Nylon66/clay nanocomposites.

이는 앞의 DSC분석에서 다른 clay들에 비해 C25A의 첨가의 경우 PET/Nylon66 나노복합재료의 균일성이 가장 효과적으로 증진된 것으로 관찰된 결과와 일치하는 것이라고 할 수 있다.

### 3.3. 기계적 강도 결과

Clay의 종류별 첨가에 따른 기계적 물성의 변화를 확인하기 위해 인장강도, 인장탄성율, 아이조드 충격강도를 측정하였다. 인장강도와 인장탄성율의 결과를 Figures 3과 4에 나타내었다. Figures 3과 4에서 볼 수 있듯이 인장강도는 PM을 첨가하였을 때 74 MPa로 가장 높게 나타났고 인장탄성율은 C25A를 첨가했을 때 780 MPa로 가장 높게 측정되었다. 인장강도가 PM 첨가시 가장 높게 나타난 것은 조금 의외의 결과이었는데 이는 PM의 OH기가 Nylon66 또는 PET와 상호작용을 한 결과로 생각된다. 아이조드 충격강도에서는 다시 C25A를 첨가한 경우가 15 kJ/m<sup>2</sup>으로 가장 높은 측정 결과를 보여주었다. 아이조드 충격강도가 특히 블렌드에서 블렌드 성분간의 상용성 또는 분리상간의 계면접착성의 영향을 가장 많이 받는 것으로 생각되므로 이 결과는 앞의 DSC 또는 AFM결과와 일치한다고 할 수 있겠다.

### 3.4. 접촉각 측정 결과

제조된 나노복합재료의 표면의 극성을 조사하기 위하여 시편에 물

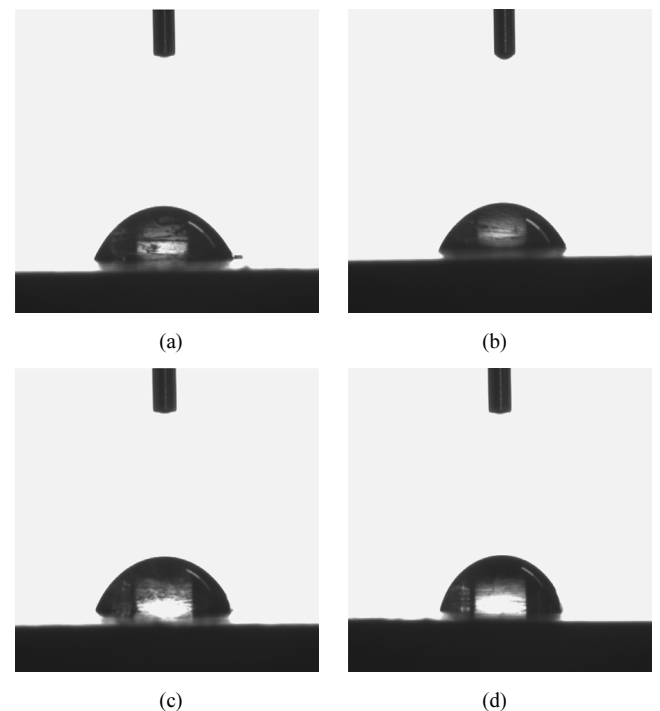


Figure 6. Contact angle measurements of PET/Nylon66 containing (a) none, (b) PM, (c) C25A, and (d) C15A.

을 접촉시켜서 접촉각을 측정하여 보았다. Clay를 첨가하지 않은 PET/Nylon66와 PM, C25A 그리고 C15A를 각각 5 wt% 첨가한 나노복합재료의 접촉각 측정 결과 사진을 Figure 6(a), (b), (c) 그리고 (d)에 나타내었다. 그림과 같이 C25A와 C15A를 첨가하였을 때 접촉각이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 C25A와 C15A가 비극성이 PM보다 크므로 예상할 수 있는 결과이었다. 또한 이 결과로부터 나노복합재료의 표면에도 clay가 충분히 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. Clay 종류에 따른 접촉각 측정결과는 Table 3에 나타내었다. PET/Nylon66 블렌드의 접촉각은 순수한 PET와 Nylon66의 접촉각 중에서 Nylon66와 비슷한 결과를 나타내었다. 이로부터 표면에는 Nylon66가 상대적으로 많이 분포하는 것으로 생각되었다. Table 3에

**Table 3. Results of Contact Angle Measurements of Neat Polymers and Nanocomposites**

	PET	Nylon66	PET/Nylon66	PM	C25A	C15A
Contact angle (°)	73.2	66.9	67.6	60.1	71.1	74.0

서 볼 수 있듯이 극성이 높은 PM의 경우가 접촉각이 약 60°로 가장 낮게 측정되었고 C25A와 C15A의 순서로 접촉각이 71° 및 74°로 점차 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 이들의 극성으로 볼 때 예상되는 결과이고 다시 한 번 이들의 표면에서의 존재를 확인하는 결과라고 할 수 있겠다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 PET와 Nylon66의 블렌드에 몬모릴로나이트(PM) 또는 이것의 유기화제로 개질된 clay를 첨가한 PET/Nylon66/clay 나노복합재료에서 clay가 블렌드의 물성에 주는 영향에 대해 연구하였다. 결과 clay의 첨가로 인해 PET/Nylon66 블렌드의 결정화특성이 변화되는 것을 확인하였다. 첨가된 clay 중에서 C25A가 PET/Nylon66 블렌드와의 상호작용이 가장 커서 PET와 Nylon66의 결정화온도를 가장 크게 근접시키는 것으로 나타났다. 나노복합재료의 표면을 AFM으로 관찰한 결과에서도 C25A를 이용한 나노복합재료가 가장 표면이 균일한 것으로 나타났다. 기계적 물성측정에서도 전반적으로 C25A를 이용한 나노복합재료가 우수한 물성을 나타내는 것으로 관찰되어서 C25A에 대한 결정화온도 분석과 유사한 결론을 얻을 수 있었다. 접촉각 측정결과에서도 복합재료의 표면 극성도는 clay의 유기화 정도가 클수록 극성이 낮아지는 것을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. P. B. Messersmith and E. P. Giannelis, *Chem. Mater.*, **6**, 1719 (1994).
2. Y. Kojima, A. Usuki, M. Kawasumi, A. Okada, A. Fujushima, T. Kurauchi, and O. Kamigaito, *J. Mater. Res.*, **8**, 1185 (1993).
3. Jr F. M. Mirabella, Dekker Encyclopedia of Nanoscience and

- Nanotechnology, *Marcel Dekker, Inc.*, 3015 (2004).
4. B. Noval, *Adv. Mater.*, **5**, 422 (1993).
5. S. D. Burnside and E. P. Giannelis, *Chem. Mater.*, **7**, 1597 (1995).
6. R. A. Vaia and E. P. Giannelis, *Macromolecules*, **30**, 8000 (1997).
7. J. Park and S. C. Jana, *Macromolecules*, **36**, 2758 (2003).
8. J. Park and S. C. Jana, *Macromolecules*, **36**, 8391 (2003).
9. J. Park and S. C. Jana, *Polymer*, **45**, 7673 (2004).
10. S. Mehat, F. M. Mirabella, K. Rufener, and A. Bafna, *J. Appl. Polym. Sci.*, **92**, 928 (2004).
11. X. Huang, S. Lewis, W. J. Brittain, and R. A. Vaia, *Macromolecules*, **33**, 2000 (2000).
12. K. M. Lee and C. D. Han, *Macromolecules*, **36**, 7165 (2003).
13. S. Choi, K. M. Lee, and C. D. Han, *Macromolecules*, **37**, 7649 (2004).
14. D. C. Lee and L. W. Jang, *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 1117 (1996).
15. G. Chen, X. Chen, Z. Lin, and K. J. Yao, *J. Mater. Sci. Lett.*, **18**, 1761 (1999).
16. M. Okamoto, S. Morita, H. Taguchi, Y. H. Kim, T. Kotaka, and H. Tateyama, *Polymer*, **41**, 3887 (2000).
17. T. Agag, T. Koga, and T. Takeichi, *Polymer*, **42**, 3399 (2001).
18. J. H. Park and S. C. Jana, *Polymer*, **44**, 2091 (2003).
19. S. Wang, Y. Hu, Z. Wang, T. Yong, Z. Chen, and W. Fan, *Polym. Degrad. Stab.*, **80**, 157 (2003).
20. Y. Ke, C. Long, and Z. Qi, *J. Appl. Polym. Sci.*, **71**, 1139 (1998).
21. C. H. Davis, L. J. Mathias, J. W. Gilman, D. A. Schiraldi, J. R. Shields, P. Trulove, T. E. Sutto, and H. C. Delong, *J. Appl. Polym. Sci.*, **40**, 2661 (2002).
22. L. Shen, I. Y. Phang, L. Chen, T. Liu, and K. Zeng, *Polymer*, **45**, 3341 (2004).
23. Z. Z. Yu, C. Yan, M. Yang, and Y. W. Mai, *Polym. Int.*, **53**, 1093 (2004).
24. C. I. W. Calcagno, C. M. Mariani, S. R. Teixeira, and R. S. Mauler, *Polymer*, **48**, 966 (2007).
25. I. Goitisoló, J. I. Eguiazabal, and J. Nazabal, *Compos. Sci. Technol.*, **70**, 873 (2010).
26. W. Xiao, H. Yu, K. Han, and M. Yu, *J. Appl. Polym. Sci.*, **96**, 2247 (2005).