

개질된 벤토나이트가 혼입된 폴리비닐알코올/벤토나이트 나노복합 필름의 제조 및 특성분석

Preparation and Characterization of Poly(vinyl alcohol)/bentonite Nanocomposites Films with Modified Bentonites

*Corresponding author

Jeong Hyun Yeum
(jhyeum@knu.ac.kr)

지병철, 양성백¹, 이정언¹, 박재민¹, 한명동², 김의주², 염정현^{1*}
경북대학교 섬유시스템공학과, ¹경북대학교 바이오섬유소재학과, ²(주)한스인테크

Byung Chul Ji, Seong Baek Yang¹, Jungeon Lee¹, Jae Min Park¹, Myung-Dong Han²,
Ui Ju Kim², and Jeong Hyun Yeum^{1*}

Department of Textile System Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

¹Department of Biofibers and Biomaterials Science, Kyungpook National University, Daegu, Korea

²HANS InTech Co., Ltd., Daegu, Korea

Received_September 03, 2021

Revised_September 13, 2021

Accepted_September 23, 2021

Textile Coloration and Finishing

TCF 33-3/2021-09/161-167

© 2021 The Korean Society of
Dyers and Finishers

Abstract Polymer nanocomposite is considered a great alternative to solve the limitations that exist in a simple combination material, as well as to produce multifunctional and high-performance results. In this research, PVA/bentonite nanocomposite films were prepared based on the presence or absence of modification of nano-clay(bentonite) a SUPERGEL[®] product, modification conditions and content, and the structural variation of the prepared PVA/bentonite nanocomposite films were examined. The effect of variations in the internal structure of the nanocomposite on mechanical and thermal properties was investigated. As a result of evaluating the thermal characteristics of the PVA/bentonite nanocomposite film based on the concentration of the modified bentonite, it was verified that the thermal characteristics and stability were improved because of interaction between the polymer and the modified nano-clay.

Keywords bentonite, nano-clay, modification, poly(vinyl alcohol), solution casting

1. 서 론

고분자 나노복합재료는 고분자 재료에 나노 사이즈의 입자를 박리, 분산시킴으로써 내충격성, 인장강도 및 강성도 등 특성을 개선시킨 복합재료이다. 고분자 나노복합재료는 다양한 형태로 나노필러(nanosized filler)를 고분자 매트릭스에 분산시켜 자동차, 전자정보, 건축토목, 접착제 등에 응용되는 신소재이다. 이는 단일소재나 이종소재를 단순히 조합한 재료가 갖는 물성의 한계를 극복하고, 다기능, 고성능 효과를 도출하기 위하여 복합화된 소재이며, 시너지 효과를 도출하기 위해서는 나노필러의 분산과 관련된 연구가 필요로 한다.

폴리비닐알코올(PVA)은 폴리비닐에스터계 고분자의 가수분해

반응(saponification)에 의하여 합성되는 증류수에 용해되는 대표적인 친수성(hydrophilic) 고분자이다¹⁾. 생체적합성, 내화학적성, 인체친화성, 접착성 및 우수한 기계적 특성이 발현되는 PVA 구조체(필름, 입자, 섬유 및 나노섬유)는 산업 전반적으로 다양한 용도로 적용되고 있다²⁻⁴⁾.

점토 층간 간격을 중심으로 복합체 구조를 분류하면 고분자-점토 나노복합체 구조는 삽입형 구조(intercalated structure)와 박리형 구조(exfoliated structure)로 구분할 수 있다⁵⁾. 나노복합체 내부의 점토 층간 간격에 따른 구조변화에 따라 고분자/nano-clay 나노복합체의 기계적 물성, 열적 특성 등이 변화될 수 있다^{6,7)}.

(주)동해화학의 SUPERGEL[®]은 bentonite에 유기첨가제를 첨가하여 점결성 및 일반적인 물성을 향상시킨 제품으로써, 스펀

기매립장, 토목용, 시추용, 농약용 및 비료 증량제 등 고점도로 사용되는 smectite 계열의 nano-clay이다. Smectite 계열의 nano-clay는 단위 구조 내 치환된 수가 많고, 얇은 조각형태이기 때문에 표면 전하가 높고 양이온 교환능력이 크고 표면적이 넓은 특성을 가지고 있어, 용매에 의해 층간 간격이 확장되어 구조적인 변화를 야기시킨다⁸⁾.

일반적으로 nano-clay는 판상구조를 가지기 때문에 수분 흡수력과 관련된 팽창 및 수축작용이 가능하며, 특히 증류수에 분산될 경우 판상구조의 변화로 성능을 극대화시킬 수 있는 장점이 있다. PVA와 nano-clay를 복합화하여 구조체를 제조한 연구는 많은 연구자들에 의하여 보고된 바 있으나⁹⁻¹¹⁾, 개질 시 첨가되는 계면활성제의 비에 따라 층간 삽입 및 일부 박리되는 특이한 형태의 구조적 변화에 대한 연구는 드물다.

본 연구에서는 (주)동해화학의 제품(SUPERGEL[®])인 nano-clay(bentonite)의 개질 유무, 개질 조건 및 함량비에 따른 PVA/bentonite 나노복합필름을 제조하였고, 제조된 PVA/bentonite 나노복합필름의 구조적 변화에 대한 분석을 진행한 후 나노복합체 내부구조 변화가 기계적 물성 및 열적 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구에서는 (주)동해화학에서 시판된 bentonite인 SUPERGEL[®]과 양이온성 계면활성제인 브로민화 세트리모늄(CTAB, A15235, Alfa Aesar, Korea)을 사용하여 개질된 것을 사용하였다. Nano-clay 개질에 사용된 용매로는 증류수를 사용하였다. 나노복합필름 제조에 사용된 PVA(341584, Aldrich, USA)는 수평균중합도(P_n)가 ~2,000이고, 비누화도가 99% 이상인 것이 사용되었다. 그 외 시약은 추가적인 정제없이 사용되었다.

2.2 Bentonite의 개질 및 PVA/bentonite 나노복합필름의 제조

증류수 1,000mL에 CTAB를 각각 0.36g(0.5 ratio), 1.45g(2 ratio) 용해시킨 뒤, 10g의 nano-clay를 80°C에서 24시간동안 교반하였다. 개질용액을 제조하기 위하여 추가된 계면활성제의 양은 함량비에 따라 달라질 수 있는데, 식(1)에 의하여 계산된 양만큼 투입하여 개질용액을 제조하였다.

$$W_s(g) = \frac{R \times CEC \times W_c \times M_w}{1000} \quad (1)$$

where,

W_s : Weight of the added surfactant(g)

R : Ratio of the surfactant and CEC

W_c : Weight of nano-clay(g)

M_w : 364.45(g/mol)

잔류 bromide anions를 제거하기 위하여 증류수에 개질된 bentonite를 투입한 후 80°C에서 24시간동안 교반하고, 여과과정을 3회 거쳐 세척하였다. 나노복합필름을 제조하기 전에 PVA와 개질된 bentonite는 진공오븐에서 50°C에서 24시간 동안 건조시킨 후 사용되었으며, 증류수에 7wt.%의 농도로 용해시킨 PVA에 개질된 bentonite와 미개질 bentonite를 각각 고분자 중량대비 1wt.%와 3wt.%로 혼합하여 나노복합필름을 제조하기 위한 분산액을 제조한 후 초음파 분산기(750W probe sonicator, Vibra-Cell Sonics, USA)를 이용하여 30분동안 초음파 분산을 진행하였다. 1시간동안 안정화 과정을 거친 후 분산액을 테프론 접시에 부어 상온에서 24시간 건조시켜 나노복합필름을 제조하였다.

2.3 PVA/bentonite 나노복합필름의 특성분석

전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM, SU8220, Hitachi, Japan)를 이용하여 미개질 bentonite와 개질된 bentonite의 형태학적 분석을 진행하였다. 제조된 필름은 X-ray 회절분석기(XRD, D/Max-2500, Rigaku, Cu-K α , Japan)를 이용하여, 1.5° - 50°(2 θ)까지 측정 후 Bragg 식(2)에 따라서 결정구조에 대한 고찰을 진행하였다.

$$n\lambda = 2d \times \sin\theta \quad (2)$$

where,

d : The interlayer distance between nano-clays

개질 유무에 따른 PVA/bentonite 나노복합필름의 역학적 특성을 분석하기 위하여, 표준상태에서 24시간동안 컨디셔닝시킨 다음 ASTM 시험법(ASTM D882-88, 1989)에 의해 측정하였다. 평균두께 0.15mm의 시료를 2.54cm(W) X 10cm(L)의 스트립형태로 준비하였으며, 인장시험기(QM100TM, QMESYS Co., Korea)를 사용하여 75mm/min의 속도로 측정하였다. 시차주사열량계(DSC, Q2000, TA instruments, USA)를 이용하여 제조된 필름의 용점과 결정화 온도를 측정하였다. 열중량분석기(TGA, Q500, TA instruments, USA)를 이용하여 질소분위기 하에서 10°C/min 속도로 500°C까지 승온시켜 제조된 필름의 무게 감소율을 측정하여 열적 안정성을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 형태학적 분석

일반적으로 CTAB의 농도 변화에 따라 점토입자의 흡착 및 입자 크기에 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다¹²⁾. 미개질 bentonite와 개질된 bentonite의 건조상태의 형상을 주사전자현미경 사진을 통하여 관찰한 결과(Figure 1), 큰 입자상태(bulk)는 개질된 형태에서 더 많이 관찰할 수 있었다. 특히 함량비(계면활성제의 양과 양이온교환용량의 비율)가 0.5일 때 2보다 더 작게 나타났는데, 이는 bentonite 입자들끼리 흡착에

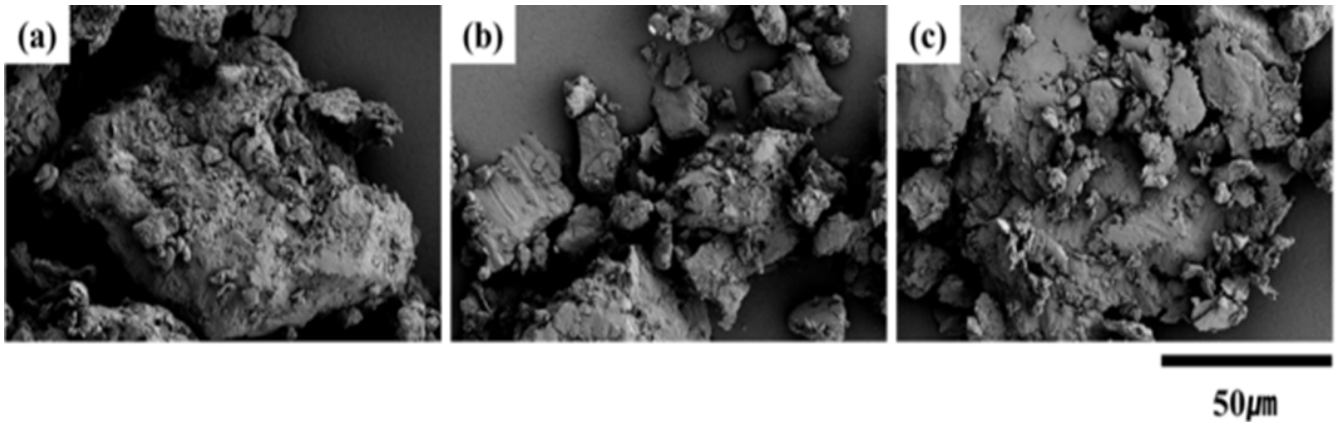


Figure 1. FE-SEM images of (a) unmodified bentonite, (b) 0.5 ratio modified bentonite and (c) 2 ratio modified bentonite.

의해 발생되는 현상이라고 볼 수 있다.

3.2 구조 분석

Montmorillonite와 같은 nano-clay를 개질하여 고분자 나노복합체를 제조하여 그 특성을 분석하였을 때 물성이 향상된다는 결과는 많은 연구자들에 의해 보고되었다¹³⁾.

개질되지 않은 bentonite가 혼입된 PVA/bentonite 나노복합필름과 계면활성제의 함량에 따라 개질된 bentonite의 X선 회절결과를 Figure 2에 제시하였다. 일반적으로 나노복합체를 제조하는 방법 중 solution intercalation법은 사용되는 용매량이 많기 때문에, 특정 용매에 대한 나노필러의 분산성과 기재고분자의 용해성이 중요한 인자로 작용한다.

본 연구에서 사용된 나노필러인 bentonite는 개질되지 않은 상태에서 증류수에 분산될 경우, 층간이 박리됨(exfoliated structure)을 확인할 수 있는데, 용매인 증류수에 대한 PVA의 용해성과 bentonite의 분산성을 모두 충족하기 때문이다

(Figure 2(a))¹⁴⁾.

CTAB가 0.5인 비율로 개질하였을 경우에는 2인 비율로 개질하였을 때보다 층간 간격이 좀 더 확대됨을 2θ 가 10° 이하에서 피크가 이동됨(shifted)에 따라 확인할 수 있었는데, 유기 변성된 점토의 구조가 praffin-type monolayer가 아닌 lateral layer로 판단된다¹⁵⁾.

이는 Bragg's 식(2)에 의하여 측정된 interlayer spacing이 함량비가 0.5인 경우에는 19.48\AA , 2인 경우에는 14.33\AA 으로 확인할 수 있었고, 이는 미개질 bentonite의 12.35\AA 보다 크기 때문에 alkylammonium의 치환량이 증가되어 bentonite 층간에 alkyl 그룹이 뺏뺏하게 배열되었다고 볼 수 있다(Figure 2(b)). 이에 가장 개질이 잘 된 것이라고 판단되는 0.5함량비 조건으로 개질된 bentonite를 PVA에 혼입시켜 나노복합필름을 제조하였다.

개질된 bentonite의 함량을 1wt.%와 3wt.%로 달리하여 PVA/bentonite 나노복합필름을 제조하여 X-선 회절 분석한

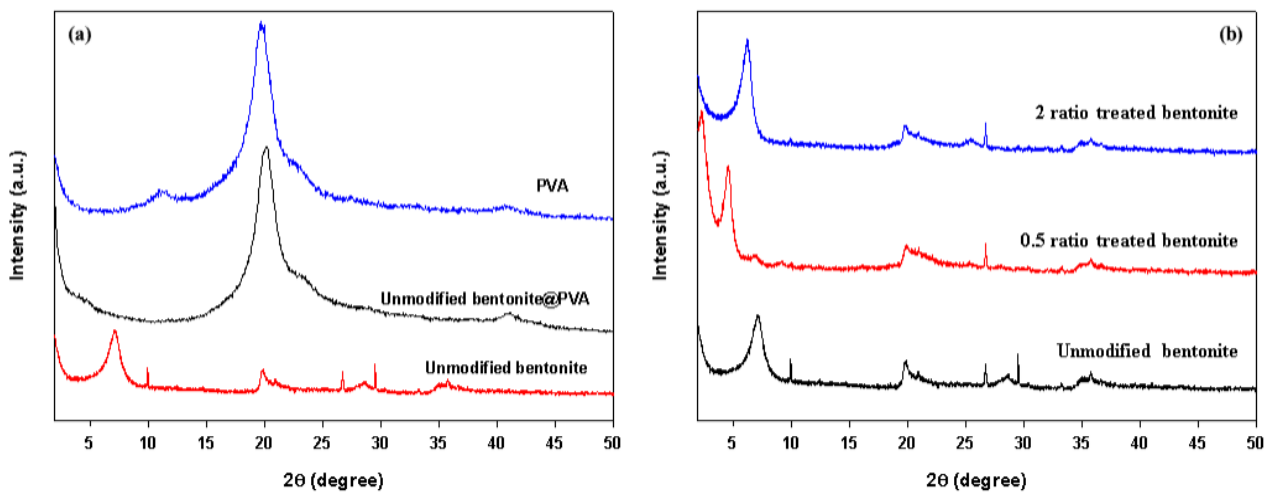


Figure 2. XRD patterns of (a) PVA, unmodified bentonite@PVA, and unmodified bentonite, and (b) unmodified bentonite and modified bentonite with various ratios.

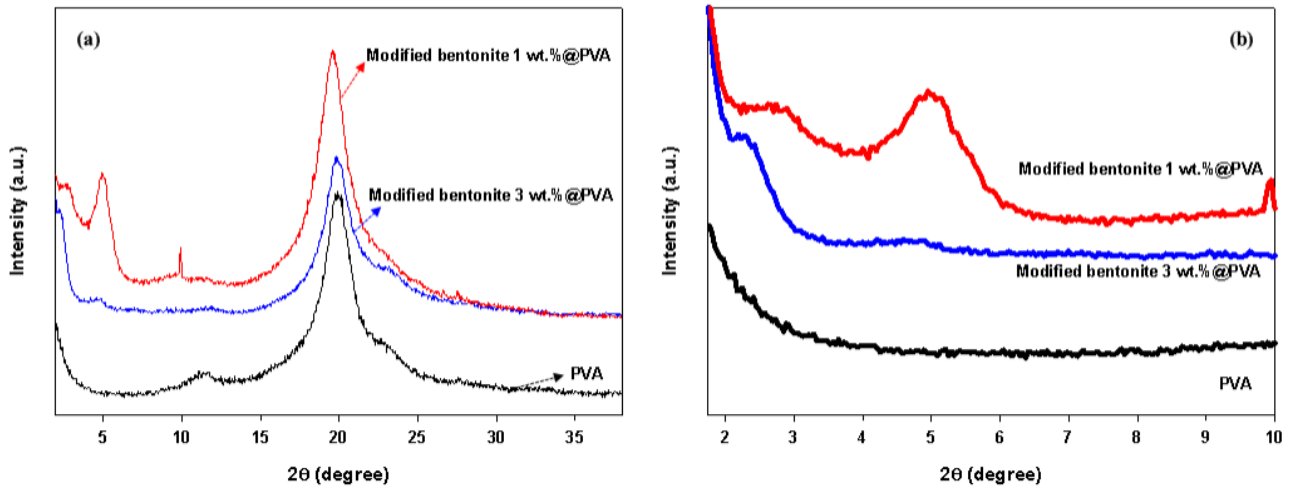


Figure 3. XRD patterns of (a) PVA film and PVA/modified bentonite(1wt.% and 3wt.%) nanocomposite films and (b) its enlargement(range: $2\theta=1.5^{\circ}\text{-}10^{\circ}$).

결과를 Figure 3에 제시하였다.

Figure 4(a)에서는 계면활성제의 함량비에 따른 개질 형태를 모식도로 제시하였다. Figure 2(b)의 X-선 회절 분석결과에서 확인된 nano-clay의 구조는 Figure 4(a)에서 제시한 바와 같이 lateral layer 형태로 예상된다.

Bentonite의 함량에 따라 피크가 감소하는 것을 Figure 2(a)의 미개질 bentonite가 혼입된 PVA/bentonite 나노복합필름의 피크와 비교하여 개질 유무에 따른 bentonite의 층간삽입의 정도를 확인할 수 있고, 개질됨에 따라 2θ 가 $2\sim 3^{\circ}$ 인 피크가

비교적 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 montmorillonite 함량에 따른 XRD 결과에 대한 분석 결과와도 유사하다⁶⁾. 개질된 bentonite의 함량이 1wt.%와 3wt.%인 경우에 피크의 형태와 세기가 다소 차이를 보이는데, 1wt.%가 혼입된 경우에는 3° 와 5° 에서 피크가 나타나고, 이는 PVA 분자와 bentonite가 층간삽입된 형태(intercalated structure)로 볼 수 있다(Figure 4(b))¹⁶⁾. 3wt.%가 혼입된 경우에는 2.5° , 5° 및 12° 에서 피크가 확인되는데, 특히 저각($2\sim 3^{\circ}$)에서 날카로운 패턴의 피크가 발견된다.

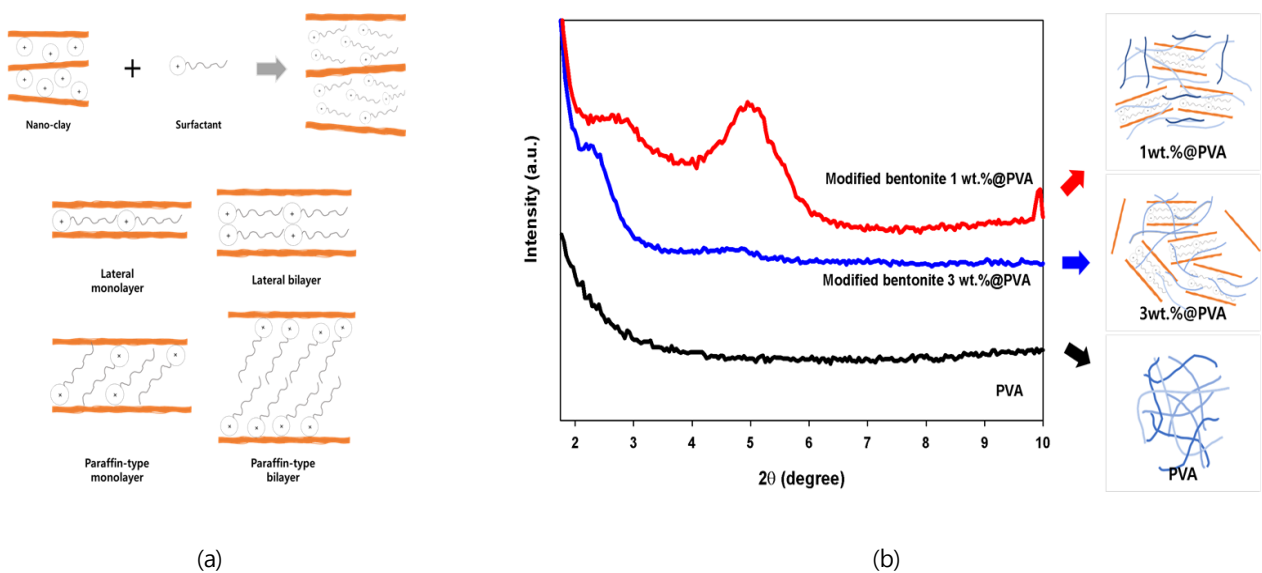


Figure 4. (a) Schematic illustration of the typical modification structures in the basal spacing of clays by surfactant¹⁷⁾ and (b) XRD patterns and schematic structures of PVA film and PVA/bentonite(1wt.% and 3wt.%) nanocomposites films.

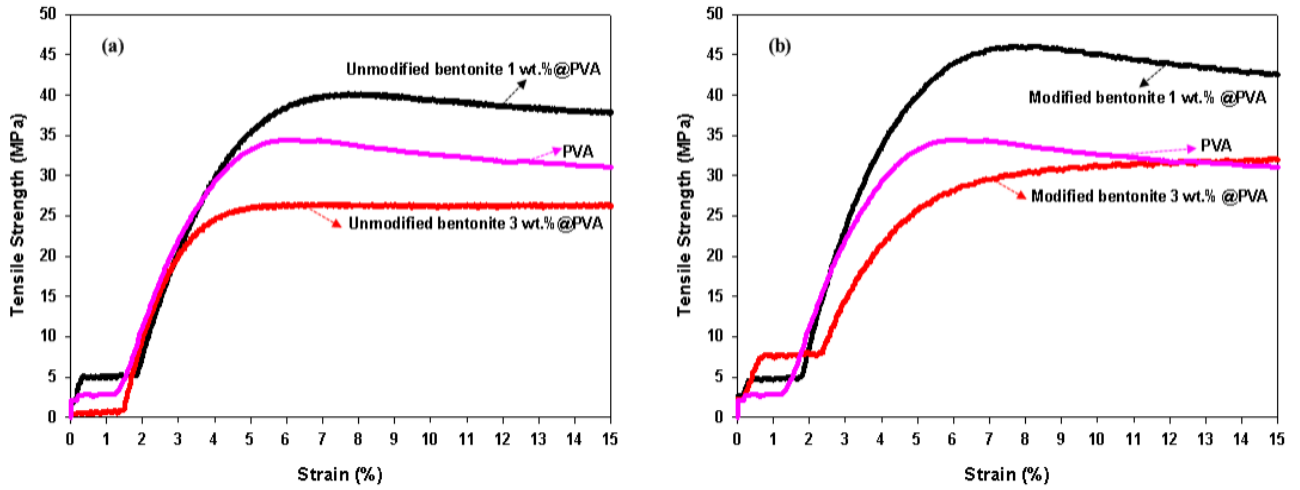


Figure 5. Stress-strain curves of (a) PVA film and PVA/unmodified bentonite(1wt.% and 3wt.%) nanocomposite films and (b) PVA film and PVA/modified bentonite(1wt.% and 3wt.%) nanocomposite films.

Figure 2(a)의 미개질 bentonite가 혼입된 PVA/bentonite 나노복합필름이 완전박리되었다고 볼 때, 3wt.%가 혼입된 경우에는 완전박리되었다고 볼 수 없고, 일부 개질된 bentonite는 PVA 복합필름 내에서 일부 박리되었으나 일부는 층간삽입된 형태가 존재한다는 것을 의미한다(Figure 4(b)).

3.3 기계적 물성 평가

개질 유무에 따른 PVA/bentonite 나노복합필름의 응력-변형률 곡선을 분석한 결과(Figure 5), 개질 전에 비하여 개질 후의 탄성계수 및 항복응력이 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 개질된 bentonite가 혼입된 PVA/bentonite 나노복합필름의

인장응력이 미개질 bentonite가 혼입된 PVA/bentonite 나노복합필름보다 다소 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

그런데 미개질 bentonite가 3wt.% 혼입된 PVA/bentonite 나노복합필름의 경우, 1wt.% 혼입된 나노복합필름 뿐만 아니라 순수 PVA 필름보다도 기계적 특성이 감소하는 경향을 보이는 데, 이는 분산성이 감소한 것에 기인한 것으로 볼 수 있다. 한편 bentonite가 1wt.% 혼입되었을 경우, 개질유무와 관계없이 탄성계수에는 큰 변화가 없지만, 최대응력이 증가함을 확인할 수 있었고, 개질된 bentonite가 3wt.% 혼입되었을 경우 미개질 bentonite가 혼입되었을 때보다 최대응력과 탄성계수 모두 증가하며, 개질된 bentonite가 1wt.% 혼입될 때와 비교하면 초기탄성계수가 더 크고 최대응력은 더 작게 나타났다. 응력

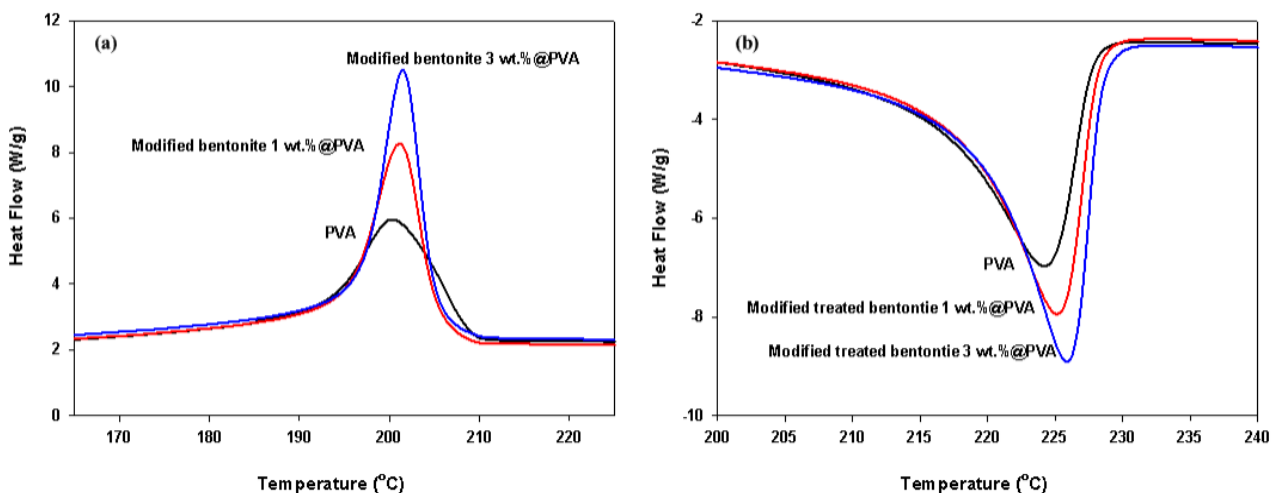


Figure 6. DSC curves for the PVA and PVA/modified bentonite(1wt.% and 3wt.%) nanocomposite films; (a) cold crystallization temperature and (b) melting temperature.

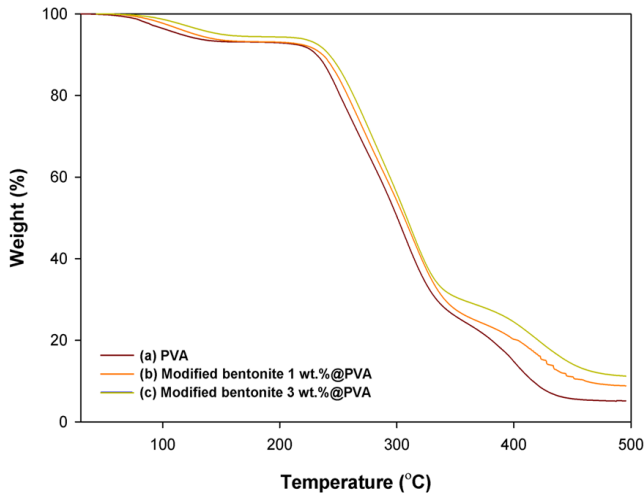


Figure 7. TGA data of (a) PVA film, (b) PVA/modified bentonite 1wt.% nanocomposite film, and (c) PVA/modified bentonite 3 wt.% nanocomposite film.

측면에서 볼 때 완전박리된 형태보다는 층간삽입된 형태에서 우수한 성능이 발휘되었고, 탄성계수 측면에서는 완전박리되었을 경우 우수한 성능이 발휘되었다. 이는 nano-clay와 PVA 매트릭스 사이의 계면에서 강한 상호작용으로 인하여 PVA가 강화되었음을 나타낸다¹⁸⁾.

3.4 열적 특성

개질된 bentonite의 함량에 따른 PVA/bentonite 나노복합 필름의 열적특성 변화를 확인하기 위하여 DSC(Figure 6)와 TGA(Figure 7)분석을 진행한 결과, bentonite의 함량이 증가함에 따라 열적특성 및 열적안정성이 향상되는 경향을 보였다. 고분자와 nano-clay 사이의 상호작용(intercalation이나 exfoliation)으로 고분자 사슬의 높은 조밀성이 발현된 결과로 볼 수 있다^{9,11)}.

순수 PVA 필름의 결정화 온도 및 용융온도는 각각 201.4°C와 224.8°C로 나타났다. PVA/bentonite 나노복합필름의 경우 개질된 bentonite의 함량이 1wt.% 및 3wt.%로 증가할 때 결정화 온도는 201.8°C, 202.4°C로 다소 증가하였고, 용융온도는 225.7°C, 226.2°C로 증가하였다. 결정화 온도는 약 0.5°C이상 상승효과를 나타내었고, 용융온도의 경우 약 2°C이상 상승효과를 나타내었다. 이는 개질된 bentonite가 고분자의 미소 분자 운동을 제어하여 일어나는 현상으로 보인다.

열분해에 미치는 영향에 대한 분석을 보면, 순수 PVA 필름과 개질된 bentonite가 혼입된 PVA/bentonite 나노복합필름의 열적 분해거동은 bentonite의 함량이 증가할수록 열분해가 지연되어 열적안정성이 증가한 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 PVA/bentonite 나노복합필름의 열분해가 상대적으로 적은 것은 PVA 내부에 박리된 bentonite가 PVA를 보호하고 열분해될 때 발생하는 휘발성 물질들의 방출을 지연시키므로 나

노복합필름의 열적 안정성을 향상시킨 것으로 보인다¹⁹⁾.

4. 결론

본 연구에서는 (주)동해화학의 bentonite 제품인 SUPERGEL[®]을 양이온 계면활성제인 CTAB로 개질하여, PVA/bentonite 나노복합필름을 제조하고, 제조된 나노복합필름의 구조적 특성, 기계적 물성 및 열적 특성에 대하여 분석하였다. CTAB의 함량, 개질 유무에 따른 PVA/bentonite 나노복합필름의 사슬구조 변화와 그에 따른 기계적 물성 변화에 대하여 고찰하였고, 개질된 bentonite가 혼입된 PVA/bentonite 나노복합필름의 경우 혼입량에 따른 열적 특성 분석을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. SUPERGEL[®]의 경우 계면활성제의 투입비가 0.5 조건으로 개질되었을 경우, 나노복합필름을 제조함에 있어서 최적의 조건이었고, 함량에 따라 층간삽입, 일부 완전박리구조와 같은 구조변화를 확인할 수 있었다.
2. Bentonite의 개질 유무에 따른 PVA/bentonite 나노복합필름의 기계적 특성을 분석한 결과, 개질 정도 및 함량에 따라 구조적 변화에 의하여 개질된 bentonite가 혼입되었을 경우 기계적 특성이 다소 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.
3. 개질된 bentonite의 함량에 따른 PVA/bentonite 나노복합필름의 열적특성 분석 결과, 고분자와 nano-clay 사이의 상호작용으로 열적 특성 및 안정성이 향상되는 효과를 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 과학기술정보통신부의 대구특구 기술사업화 역량 강화사업(2021-DG-RD-0045)에 의하여 연구되었음.

References

1. J. Chen, Y. Li, Y. Zhang, and Y. Zhu, Preparation and Characterization of Graphene Oxide Reinforced PVA Film with Boric Acid as Crosslinker, *J. Appl. Polym. Sci.*, **132**(22), 42000(2015).
2. T. Wang, M. Turhan, and S. Gunasekaran, Selected Properties of Ph-Sensitive, Biodegradable Chitosan-Poly(Vinyl Alcohol) Hydrogel, *Polym. Int.*, **53**(7), 911(2004).
3. Y. Li, T. Yang, T. Yu, L. Zheng, and K. Liao, Synergistic Effect of Hybrid Carbon Nanotube-Graphene Oxide as a Nanofiller in Enhancing the Mechanical Properties of PVA Composites, *J. Mater. Chem.*, **21**(29), 10844(2011).
4. P. Cinelli, E. Chiellini, J. W. Lawton, and S. H. Imam, Properties of Injection Molded Composites Containing Corn

- Fiber and Poly(vinyl alcohol), *J. Polym. Res.*, **13**(2), 107 (2006).
5. M. Zagho and M. Khader, The Impact of Clay Loading on the Relative Intercalation of Poly(Vinyl Alcohol)-Clay Composites, *J. of Materials Science and Chemical Engineering*, **4**(10), 20(2016).
 6. K. Yano, A. Usuki, A. Okada, T. Kurauchi, and O. Kamigaito, Synthesis and Properties of Polyimide-Clay Hybrid, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, **31**(10), 2493 (1993).
 7. J. Ma, P. Xiang, Y. W. Mai, and L. Q. Zhang, A Novel Approach to High Performance Elastomer by Using Clay, *Macromol. Rapid Commun.*, **25**(19), 1692(2004).
 8. R. A. Schoonheydt, Smectite-type Clay Minerals as Nanomaterials, *Clays and Clay Minerals*, **50**(4), 411(2002).
 9. S. B. Yang, S. M. Park, D. J. Kwon, J. C. Shin, Y. Sabina, and J. H. Yeum, Novel Poly(vinyl alcohol)/Clay Nanocomposite Film Prepared by the Heterogeneous Saponification of Poly(vinyl acetate)/Clay Nanocomposite Film, *Sci. Adv. Mater.*, **12**(3), 319(2020).
 10. M. Kokabi, M. Sirousazar, and Z. M. Hassan, PVA-clay Nanocomposite Hydrogels for Wound Dressing, *Eur. Polym. J.*, **43**(3), 773(2007).
 11. J. H. Chang, T. G. Jang, K. J. Ihn, W. K. Lee, and G. S. Sur, Poly(vinyl alcohol) Nanocomposites with Different Clays: Pristine Clays and Organoclays, *J. Appl. Polym. Sci.*, **90**(12), 3208(2003).
 12. S. B. Ogunlaja and R. Pal, Effects of Bentonite Nanoclay and Cetyltrimethyl Ammonium Bromide Modified Bentonite Nanoclay on Phase Inversion of Water-in-Oil Emulsions, *Colloids Interfaces*, **4**(1), 2(2020).
 13. C. C. Yang, Y. J. Lee, and J. M. Yang, Direct Methanol Fuel Cell(DMFC) based on PVA/MMT Composite Polymer Membranes, *J. Power Sources*, **188**(1), 30(2009).
 14. A. Gautam and P. Komal, Synthesis of Montmorillonite Clay/poly(vinyl alcohol) Nanocomposites and their Mechanical Properties, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **19**(12), 8071(2019).
 15. T. Okada, Y. Seki, and M. Ogawa, Designed Nanostructures of Clay for Controlled Adsorption of Organic Compounds, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **14**(3), 2121(2014).
 16. D. Mondal, M. M. R. Mollick, B. Bhowmick, D. Maity, M. K. Bain, D. Rana, A. Mukhopadhyay, K. Dana, and D. Chattopadhyay, Effect of Poly(vinyl pyrrolidone) on the Morphology and Physical Properties of Poly(vinyl alcohol)/sodium Montmorillonite Nanocomposite Films, *Prog. Nat. Sci.*, **23**(6), 579(2013).
 17. R. A. Vaia, R. K. Teukolsky, and E. P. Giannelis, Interlayer Structure and Molecular Environment of Alkylammonium Layered Silicates, *Chem. Mater.*, **6**(7), 1017(1994).
 18. B. Paliwal, W. B. Lawrimore, M. Q. Chandler, and M. F. Horstemeyer, Nanomechanical Modeling of Interfaces of Polyvinyl Alcohol(PVA)/clay Nanocomposite, *Philos. Mag*, **97**(15), 1179(2017).
 19. H. Qin, S. Zhang, C. Zhao, M. Feng, M. Yang, Z. Shu, and S. Yang, Thermal Stability and Flammability of Polypropylene /montmorillonite Composites, *Polym. Degrad. Stab*, **85**(2), 807(2004).

Authors

- 지병철** 경북대학교 섬유시스템공학과 교수
양성백 경북대학교 바이오섬유소재학과 박사후 연구원
이정언 경북대학교 바이오섬유소재학과 박사과정 학생
박재민 경북대학교 바이오섬유소재학과 석사과정 학생
한명동 (주)한스인텍 대표이사
김의주 (주)한스인텍 연구원
염정현 경북대학교 바이오섬유소재학과 교수