Composites Research

Vol. 32, No. 6, 335-341 (2019)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2019.32.6.335
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

# 전자선 조사를 이용한 아크릴산이 그라프트된 폴리프로필렌의 제조 및 중금속 이온 흡착 특성

천자영* · 전준표*†

# Preparation of Acrylic Acid Grafted Polypropylene by Electron Beam Irradiation and Heavy Metal Ion Adsorption Property

Ja young Cheon*, Joon-pyo Jeun*†

**ABSTRACT:** In this study, an acrylic acid (AAc) was grafted on a polypropylene (PP) nonwoven fabric using electron beam irradiation. Electron beam grafting was carried out under various conditions to produce AAc grafted PP (PP-*g*-AAc) nonwoven fabric having a grafting yield of about 50% at radiation dose of 100 kGy and a monomer concentration of 60%. The physical and chemical properties of PP-*g*-AAc nonwoven fabric were evaluated by SEM, ATR-FTIR, thermal analysis and tensile strength. The morphology of PP and PP-*g*-AAc nonwoven fabric confirmed by SEM showed no significant change, and it was judged that AAc was introduced into PP nonwoven fabric from ATR-FTIR. PP-*g*-AAc nonwoven fabric showed an increase in tensile strength and a decrease in tensile strain compared to PP nonwoven fabric. However, since change of value is not significant, it is considered that there is no significant influence on the physical characterization. Adsorption experiments of PP-*g*-AAc nonwoven fabric on various ions showed selective adsorption behavior for lead ion. In conclusion, the electron beam radiation-induced PP-*g*-AAc nonwoven fabric is expected to be applied as an effective adsorbent for the adsorption of lead ions.

**초 록:** 본 연구는 전자선 조사를 이용하여 폴리프로필렌(polypropylene, PP) 부직포에 아크릴산(acrylic acid, AAc)을 그라프트 한 후 납 이온에 대한 흡착성능을 평가하였다. 다양한 조건에서 그라프트를 실시하여 조사량 100 kGy, 단량체 농도 60%에서 약 50%의 그라프트율을 갖는 아크릴산이 그라프트 된 폴리프로필렌(PP-*g*-AAc) 부직포를 제조하였다. 제조된 PP-*g*-AAc 부직포의 물리/화학적 특성을 SEM, ATRIR, 열분석, 인장강도 등의 분석을 통해 평가하였다. SEM으로 확인한 PP와 PP-*g*-AAc 부직포의 형태에는 큰 변화가 없었으며, ATR-FTIR 결과로부터 PP 부직포에 AAc가 도입되었다고 판단하였다. PP-*g*-AAc 부직포는 PP 부직포와 비교하여 인장강도는 증가하고 인장변형률은 감소하였다. 하지만 그 변화의 값이 크지 않아 물리적 특성에 큰 영향력은 없을 것이라 판단된다. 다양한 이온들에 대한 PP-*g*-AAc 부직포의 흡착특성을 평가한 결과 납에 대해 선택적 흡착 거동을 보였다. 결론적으로, 본 연구에서 제조된 PP-*g*-AAc는 납 이온 흡착을 위한 흡착제로서 응용이 기대된다.

**Key Words:** 폴리프로필렌(Polypropylene), 아크릴산(Acrylic acid), 전자선(Electron beam), 그라프트 중합(Graft polymerization), 흡착(Adsorption)

Received 1 August 2019, received in revised form 26 November 2019, accepted 27 November 2019

*Industru and Environemnt Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute
*†Industru and Environemnt Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Corresponding author (E-mail: jpjeun@kaeri.re.kr)

## 1. 서 론

대기, 토양 및 수중에서의 중금속 오염은 심각한 문제이며, 인류와 환경에 대한 위협이 되고 있다. 중금속 오염원의 출처에는 천연가스, 제지, 플라스틱, 광업, 금속가공, 제혁, 제약 및 농업의 산업폐수가 포함된다. 이러한 산업에서 배출되는 유해 중금속에는 납, 구리, 수은, 카드뮴, 니켈 및 아연이 포함된다[1,2]. 이 중 납 성분은 가솔린 첨가제, 안료, 전지 저장 배터리, 건설, 탄환 및 파이프 등과 같은 광범위한 영역에 사용되어 왔다[2,3]. 납에 대한 낮은 수준의 노출도 신경계, 생식기, 심혈 관계 및 발달 장애, 기억 상실, 빈혈, 신장 손상 및 근육 마비와 같은 주요 질병을 유발할 수 있다[3]. 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 음용수의 납 이온에 대한 최대허용치를 10 mg·$L^{-1}$가 되도록 권고하였으며[4], 환경보호기관(Environmental Protection Agencies, EPA)의 음용수의 허용 기준은 5 mg·$L^{-1}$이다[5].

수용액으로부터 중금속을 제거하기 위해 전기화학적 방법, 촉매분해, 침전, 이온교환과 흡착과 같은 방법들이 이전부터 많이 사용해왔다[6]. 이 중에서도 흡착은 가장 간단하고 일반적인 방법으로 상대적으로 낮은 비용, 높은 흡착효율, 취급 용이성 및 다양한 흡착성 물질의 이용 가능성 때문에 중금속 제거 분야에서 큰 관심을 받고 있다[1,2,7].

가장 널리 사용되는 합성섬유 중 하나인 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)은 물/폐수에서 금속이온을 제거하기 위한 주목 받는 유기중합체 중 하나로 섬유 및 필터산업에 널리 사용된다. 좋은 기계적 강도, 낮은 밀도, 열안정성, 내화학성, 유연성 및 저렴한 비용 등의 장점을 가지고 있지만 소수성 및 화학적 비활성은 PP를 흡착제로 적용하는데 있어서 제한이 되는 단점이다[1,2,8]. 따라서 PP의 표면 특성을 개질 할 필요성이 있다.

그라프트 중합은 합성 및 천연 고분자 재료의 활용을 확대하는데 널리 사용된다[9]. 그라프트 중합은 고에너지(감마선, 전자선) 조사, 플라즈마 처리, UV, 화학적 개시제 및 고분자의 산화와 같은 다양한 방법에 의해 개시된다. 이 방법들 중 고에너지 조사 공정은 여러 종류의 중합체에서 활성점을 쉽게 만들 수 있고, 중합체 및 적당한 반응 조건에서 고분자에 효과적으로 침투하기 때문에 산업적으로 가장 편리하고 효과적이다[10]. 또한 화학적 개시제를 사용하지 않아 잔류물을 남기지 않는 다는 점에서 환경적인 측면을 고려할 수 있다[11].

본 연구에서는 PP 부직포에 전자선 조사를 통해 아크릴산(Acrylic acid, AAc)을 그라프트 하였다. 이렇게 제조된 아크릴산이 그라프트 된 폴리프로필렌(PP-*g*-AAc)의 특성 분석 및 다양한 이온에 대한 흡착 특성을 평가하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 재료

PP 부직포는 ㈜앱스필로부터 제공받아 기저 고분자로 사용하였다. 단량체인 AAc와 용매로 사용한 에탄올은 각각 알드리치와 삼전화학에서 구입하였다. 흡착실험에 사용된 KCl은 SHOWA에서 NaCl과 LiCl은 삼전화학에서 구입하였으며, CsCl과 $CoCl_2$는 시그마 알드리치, $NiCl_2$, CdCl, $Cucl_2$, $PbCl_2$는 알드리치에서 각각 구입하였다. 본 실험에서 사용한 시약은 추가적인 정제과정 없이 사용하였다.

### 2.2 전자선 조사를 통한 그라프트 반응

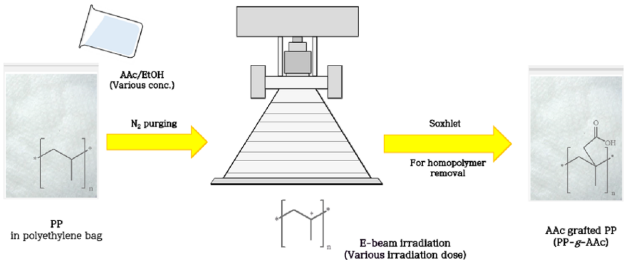
PP 부직포는 210 mm × 290 mm 크기로 자른 후, 오븐을 이용하여 완전 건조시킨다. 준비된 PP 부직포의 무게를 측정한 뒤 지퍼백에 넣는다.

AAc 단량체를 에탄올에 용해하여 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 그리고 90 wt% 농도의 AAc 용액을 제조하였다. PP 부직포가 들어있는 지퍼백에 준비한 다양한 농도의 AAc 용액을 30 ml씩 각각 넣어준 뒤, 산소를 제거하기 위해 질소 퍼징(purging)을 3분씩 실시하였다.

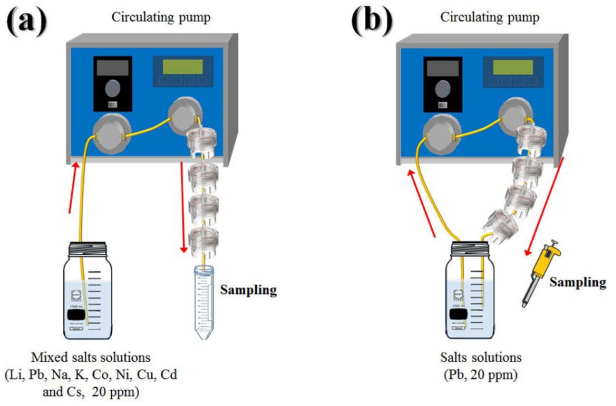
준비 된 AAc 용액에 침지된 PP 부직포를 선형전자선 가속기(ELV-8 type, EBtech Co., Korea)를 사용하여, 2.5 MeV, 17.7 mA의 조건에서 8 m/min의 컨베이어 이동속도로 25 kGy/scan으로 선량을 유지한 후 25, 50, 100, 150, 200 및 250 kGy의 선량으로 전자선 조사를 진행하였다. 전자선 조사 이후 PP 부직포를 지퍼백에서 분리하여 속슬렛 추출기에 넣고, 에탄올을 이용하여 단일고분자 제거를 위해 12시간 동안 반응 시킨 후 오븐에서 완전히 건조하였다. 전자선 조사를 통한 그라프트 반응 모식도 및 화학구조를 Scheme 1에 나타내었다[12,13].

PP-*g*-AAc 부직포의 그라프트율은 식 (1)로 계산하였다[14]. $W_g$는 그라프트된 PP 부직포의 건조 후 무게이며, $W_0$는 그라프트 전 PP 부직포의 무게이다.

$$\text{Grafting yield (\%)} = [W_g - W_0/W_0] \times 100 \quad (1)$$




**Scheme 1.** Schematic illustration of graft reaction using electron beam




**Scheme 2.** Schematic illustration of adsorption experiment using circulating pump: (a) single pass and (b) multi pass methods

### 2.3 흡착능 평가

제조된 PP-*g*-AAc 부직포를 적당한 크기로 잘라 멤브레인 필터 홀더(Whatman®)에 넣고, 이 필터 홀더를 순환 펌프에 연결시킨다. 10 ml/min의 유속으로 순환하는 20 ppm의 이온이 녹아있는 수용액(1 L)을 필터 홀더로 통과시킨다. 흡착이 진행됨에 따라 필터 홀더를 통과하여 나온 용액을 일정 시간 간격으로 채취하였다.

제조된 흡착제의 이온 선택성을 확인하기 위해 single pass 방법으로 $Li^+$, $Pb^{2+}$, $Na^+$, $K^+$, $Co^{2+}$, $Ni^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Cd^+$ 및 $Cs^+$ 이온이 혼합된 수용액에 대한 흡착 특성을 확인하였다. 또한 multi pass 방법으로 $Pb^{2+}$ 이온에 대한 흡착특성을 추가로 확인하였다. Scheme 2에 흡착실험의 두 가지 방법에 대한 모식도를 나타내었다.

또한, 제조된 흡착제로부터 흡착 가능한 납 이온의 흡착용량(q)은 아래 식 (2)로 계산하였다[15]. $C_0$와 $C_e$는 각각 중금속 이온 수용액의 초기와 평형 농도(mg/L)이다. V는 실험 용액(L)의 부피이며 M은 PP-*g*-AAc 부직포 흡착제의 중량(g)이다.

$$\text{Adsorption capacity (mg/g)} = (C_0 - C_e)V/M \quad (2)$$

### 2.4 특성 평가

PP 부직포 및 PP-*g*-AAc 부직포의 화학구조 변화를 감쇠전반사적외선(Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared, ATR-FTIR)(Tensor 37, Shimadzu, Japan)을 통해 분석하였다. 그라프트에 따른 섬유 형태 및 섬유 직경을 고분해능 주사전자현미경(High Resolution Scanning Electron Microscope, HR-SEM)(SU8230, Hitachi, Japan)을 이용하여 확인하였으며, 열적 특성을 열중량 분석기(Thermogravimetric Analysis, TGA)(STAR® system, Mettler-Toledo, Germany)를 통해 분석하였다. 전자선 조사에 따른 물리적 특성의 변화를 확인하기 위해 물성분석기(Texture Analyzer, EZ-SX, Shimadzu, Japan)를 통해 인장강도를 측정하였으며, 이 때 시험편은 폭 10 mm, 파지거리 100 mm, 인장속도 1 mm/sec 조건으로 실시하였다. 흡착능 평가는 유도결합 플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-MS)(7500, Agilent, USA)를 이용하여 이온 농도의 변화로 확인하였다. 추가적으로 에너지 분산 X선 분석(Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)을 이용하여 흡착제에 부착된 이온을 확인하였다.

## 3. 결 과

전자선 조사를 통해 제조된 AAc가 그라프트 된 PP 부직포의 그라프트율을 계산한 결과 단량체의 농도와 전자선 조사량이 증가함에 따라 그 값이 증가하는 것을 확인하였다(Fig. 1). 특히, 단량체 농도 70% 이상과 150 kGy 이상의 조사량에서 그라프트율이 급격히 증가하였다. 하지만 이 시료들의 경우 겔 형태의 단일중합체의 과량 생성으로 건조 후 PP 부직포의 유연한 특성이 사라졌다.

섬유의 형태를 확인한 SEM 이미지(Fig. 2)에서 평균 직경 3.04 ± 0.93 μm를 갖는 PP 부직포는 AAc 그라프트 이후

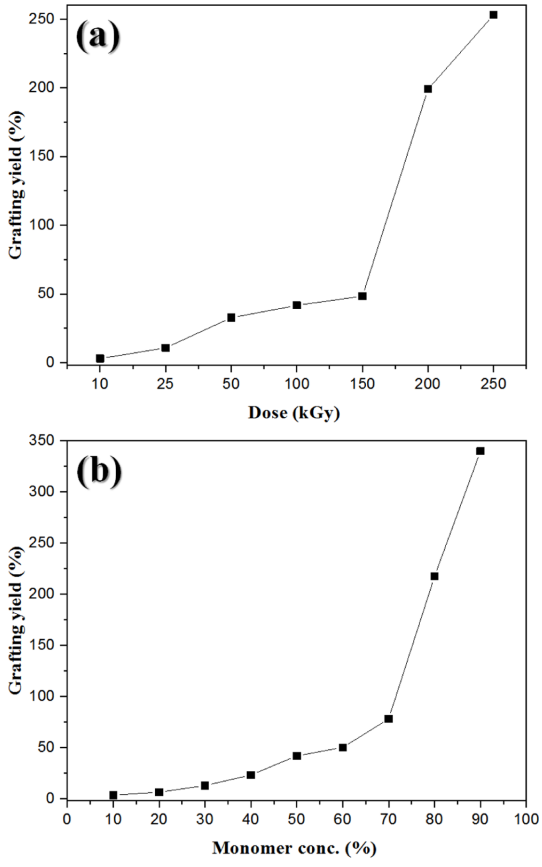



**Fig. 1.** Grafting yield according to condition: (a) irradiation dose (monomer concentration 50%) and (b) monomer concentration (absorbed dose 100 kGy)

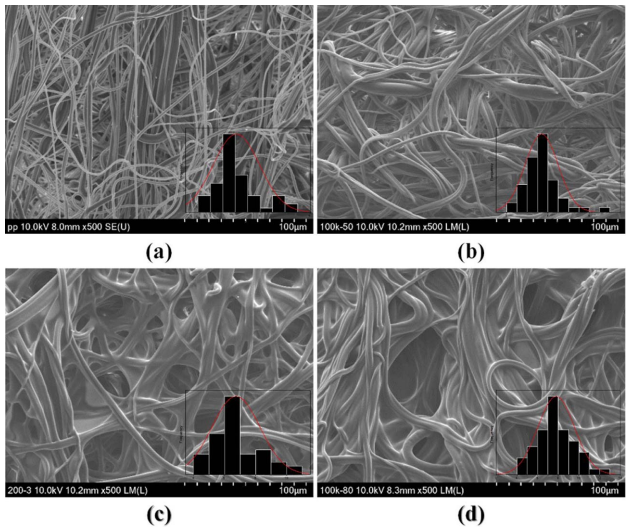



**Fig. 2.** SEM images of (a) PP nonwoven fabric and PP-*g*-AAc nonwoven fabrics prepared with (b) 60%, 100 kGy, (c) 50%, 200 kGy, and (d) 80%, 100 kGy

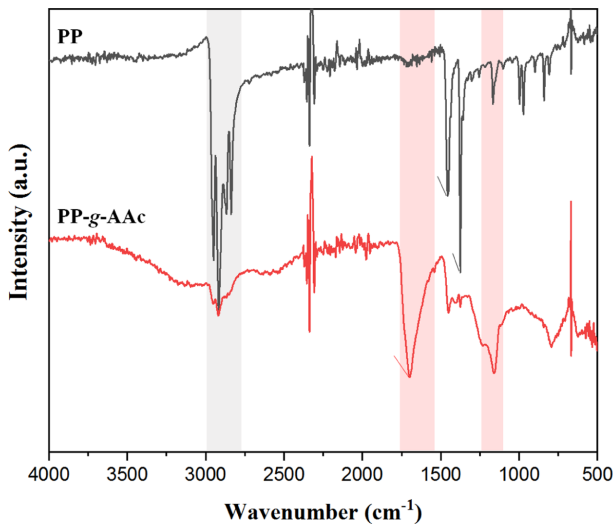



**Fig. 3.** ATR-FTIR spectra of PP (up, black line) and PP-*g*-AAc (60%, 100 kGy) (bottom, red line) nonwoven fabric

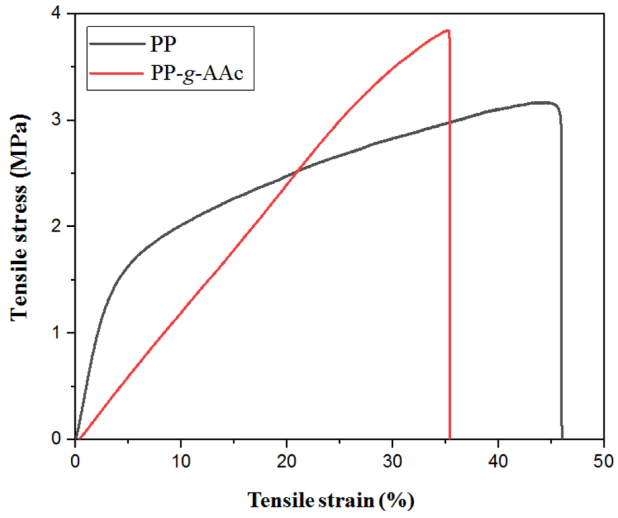



**Fig. 4.** Mechanical properties of PP and PP-*g*-AAc (60%, 100 kGy) nonwoven fabric

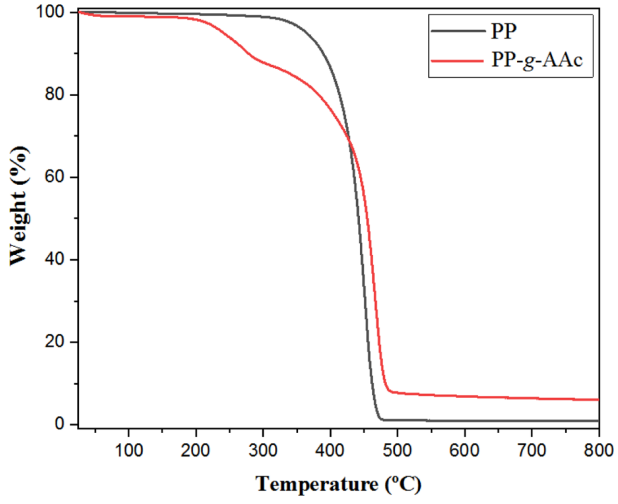



**Fig. 5.** TGA curves of PP and PP-*g*-AAc (60%, 100 kGy) nonwoven fabric

3.93 ± 1.18 μm로 약간의 증가를 보였으나, 섬유형태를 유지하고 있으며 기공이 존재하는 것을 확인하였다.

하지만 Fig. 2(c)와 2(d) 같이 조사량이 증가하거나 단량체의 농도가 적정 이상으로 증가하는 경우, 평균 직경 또한 6.74 ± 1.55 μm과 7.80 ± 1.77 μm로 증가하였으며 과량으로 형성된 단일중합체가 필름의 형태로 부직포의 기공을 막은 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 위에 언급한 것과 같이 PP 부직포의 유연한 특성이 단일중합체 특성에 의해 사라지게 되는 것이다. 따라서 추가 분석들은 60%의 단량체 농도를 100 kGy의 조사량으로 조사한, 50.21%의 그라프트율을 갖는 PP-*g*-AAc를 사용하여 진행하였다.

Fig. 3은 PP 부직포와 PP-*g*-AAc 부직포의 ATR-FTIR 그래프이다. 2700 $cm^{-1}$와 3000 $cm^{-1}$ 사이에 나타나는 밴드는 PP 부직포의 -CH 그룹의 -CH stretching에 기인한 피크이다. 또한 1450 $cm^{-1}$와 1380 $cm^{-1}$는 각각 $CH_2$와 $CH_3$ deformation에 해당하는 피크이다[16]. AAc가 그라프트 된 PP 부직포는 1700 $cm^{-1}$에서 AAc의 카르복실산의 C=O 그룹의 stretching에 따른 강한 피크와 1100-1250 $cm^{-1}$에서 C-O 밴드에 의한 피크가 관찰되었다[16-18]. 이러한 결과로 전자선 조사에 의한 PP 부직포에 AAc의 그라프트를 확인하였다.

PP와 PP-*g*-AAc 부직포의 기계적 특성을 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. PP 부직포와 PP-*g*-AAc 부직포의 인장변형률은 약 46%에서 35%로 감소하고 인장강도는 3.34 ± 0.57 MPa에서 3.83 ± 0.55 MPa로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그 변화의 정도가 적어 전자선 조사를 통한 그라프

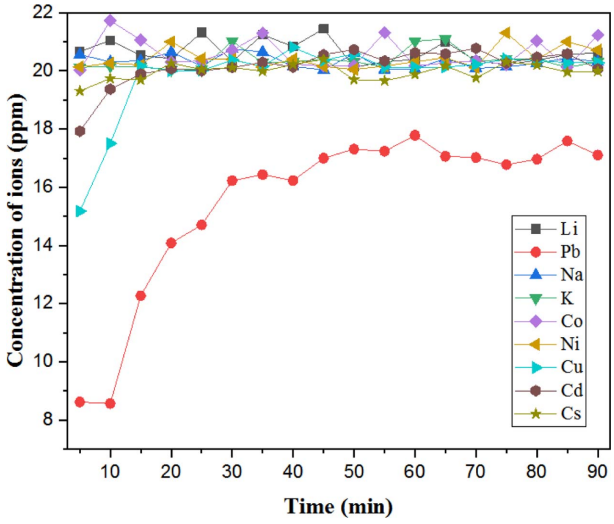



**Fig. 6.** Concentration change of ions by selectivity adsorption of PP-*g*-AAc (60%, 100 kGy) nonwoven fabric according to adsorption time

트 반응 이후에도 물리적 특성에 큰 변화가 없다고 판단하였다.

Fig. 5는 PP 부직포와 PP-*g*-AAc 부직포의 TGA 곡선이다. PP 부직포는 단일 단계 분해와 최대 350°C에서 열 안정성을 보인다[17]. PP 부직포의 완전한 분해는 540°C 부근에서 발생한다. 반면에 PP-*g*-AAc 부직포는 세 단계에 걸쳐 질량 손실이 일어난다. 첫 번째 단계는 30-200°C까지로 이것은 친수성 매트릭스로부터 탈수 과정을 통한 수분 제거에 기인 할 수 있다. 200-400°C 사이의 두 번째 단계는 탈카르복실화 과정에 의한 PP 부직포에서 카르복실기의 분해에 해당한다. 마지막으로 세 번째는 400°C 이상에서의 PP 부직포 주쇄의 광범위한 분해로 인한 가장 큰 질량 손실 단계가 해당된다[16]. 이렇게 AAc 그라프트에 의해 초기 분해 온도에 차이를 보이지만, 주쇄의 분해는 PP 부직포와 유사한 열 안정성을 보이는 것을 확인하였다.

Fig. 6은 다양한 이온들이 혼합 된 용액의 single pass 흡착이 후 시간에 따른 각 이온들의 농도를 측정한 결과이다. 그래프를 보면 알 수 있듯이 초기 납 이온의 농도가 8.6 ppm으로 다른 이온들에 비해 높은 흡착경쟁력을 보이며 일정 시간 이후에도 흡착이 되는 것을 확인 할 수 있다. 구리와 카드뮴 이온 또한 적은 양의 흡착을 보이지만 15분 이상에서는 더 이상의 흡착을 보이지 않았다. 또한 리튬, 나트륨, 칼륨 등의 일반적인 수돗물에 존재하는 1족 원소들의 흡착이 발생하지 않은 것을 확인하였다. 이처럼 제조된 PP-*g*-AAc 부직포에 의한 흡착은 1족 원소보다 2족 원소에서 특히, 납에 대해 높은 선택적 흡착을 보였다. 이러한 2족 원소에 대한 흡착은 아세트산에 존재하는 카복실 그룹에 의한 것으로 본 연구에서 보여진 흡착경쟁력인 납>>>구리>카드뮴의 흡착거동은 일반적으로 알려진 각 원소의 이온반경 및 전기음성도와 비례적인 관계를 보이지 않지만 각 원소의

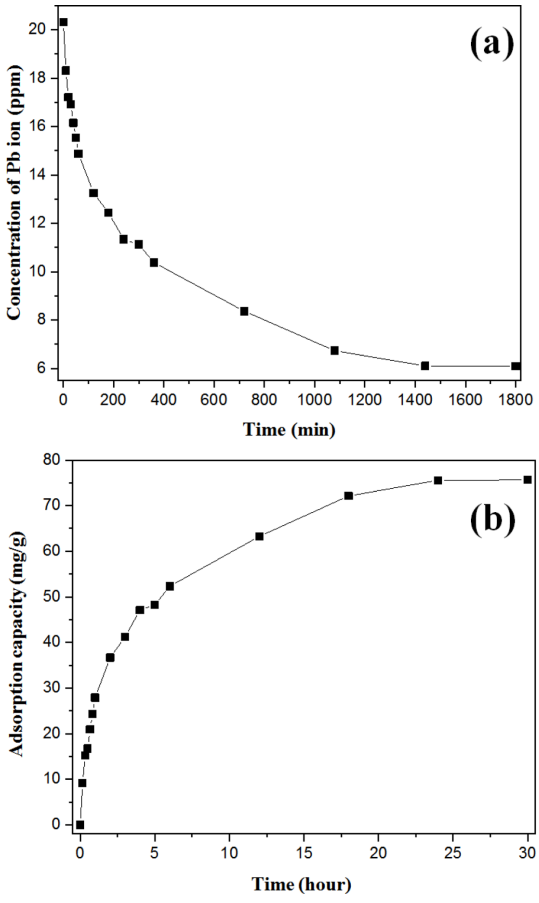



**Fig. 7.** Adsorption behavior of $Pb^{2+}$ ion on the PP-*g*-AAc (60%, 100 kGy) nonwoven fabric depending on time: (a) ion concentration and (b) the adsorbed amount of ion

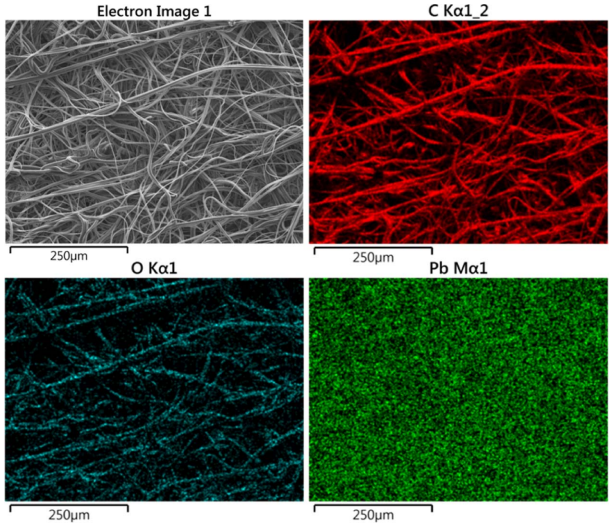



**Fig. 8.** EDS mapping images of PP-*g*-AAc (60%, 100 kGy) nonwoven fabric after single pass adsorption experiment

이온포텐셜과 반비례적 관계를 보이는 것이 특징적이다[19-21].

납 이온에 대한 multi pass 흡착을 추가적으로 진행한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에 납 이온의 농도가 초기 3시간 동안 납 이온 농도의 빠른 감소를 보였으며, 시간이 지남에 따라 납 이온 농도의 감소 폭이 낮아지다 24시간 이후 흡착제의 포화점에 이르는 것을 볼 수 있으며, 이 때 6.09 ppm으로 측정되었다. 또한 납 이온의 흡착용량을 계산한 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었으며, 흡착평형이 나타난 30시간에서의 흡착용량은 75.63 mg/g으로 계산되었다.

Single pass 흡착 실험 이후 PP-*g*-AAc의 EDS 맵핑 이미지를 Fig. 8에 나타내었으며 흡착제로 사용한 부직포의 전 영역에 납 이온이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 다양한 조건에서 전자선을 이용한 그라프트 반응을 실시하여 조사량 100 kGy, 단량체 농도 60%에서 50.21%의 그라프트율을 갖는 PP-*g*-AAc를 제조하였다. ATR-FTIR을 이용한 구조분석에서 AAc가 그라프트 된 PP에서 AAc의 카르복실산의 C=O 그룹의 stretching에 따른 강한 피크와 C-O 밴드에 의한 피크가 각각 1700 $cm^{-1}$와 1100-1250 $cm^{-1}$에서 나타나는 것으로 AAc의 그라프트가 성공적으로 이루어진 것을 확인하였다. 또한 기계적 특성과 열적 특성 평가를 통해 PP부직포와 PP-*g*-AAc 부직포의 특성에 큰 차이가 발생하지 않음 또한 확인할 수 있었다. 이렇게 제조된 PP-*g*-AAc를 중금속 흡착을 위한 흡착제로 이용하였다. Single pass 흡착 실험을 통해서 다른 이온들과 비교하여 납 이온에 대해 월등히 높은 선택적 흡착거동을 확인하였다. 추가적으로 multi pass 흡착 실험을 통해 흡착평형에 이르렀을 때의 제조된 PP-*g*-AAc 부직포 흡착제의 납 이온 흡착용량은 75.63 mg/g으로 측정되었다. 이러한 결과들을 통하여 전자선 조사로 유도된 PP-*g*-AAc 부직포가 수용액상에서 납 이온에 대한 효과적인 흡착제로 사용될 수 있을 것이라 기대한다.

## 후 기

본 연구는 과학기술정보통신부에서 지원하는 기관고유사업의 일환으로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Hassan, M.I., Taimur, S., and Yasin, T., "Upcucling of Polypropylene Waste by Surface Modification using Radiation-induced Grafting," *Applied Surface Science*, Vol. 422, 2017, pp. 720-730.
2. Moja, T.N., Bunekar, N., Mojaki, S., Mishra, S.B., Tsai, T.Y., Hwang, S.S., and Mishra, A.K., "Polypropylene-Polypropylene-Grafted-Maleic Anhydride-Montmorillonite Clay Nanocomposites for Pb(II) Removal," *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, Vol. 28, 2018, pp. 2799-2811.
3. Cheon, J.Y., and Park, W.H., "Green Synthesis of Silver Nanoparticles Stabilized with Mussel-Inspired Protein and Colorimetric Sensing of Lead(II) and Copper(II) Ions," *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 17, 2016, pp. 1-10.
4. Kumar, V.V., and Anthony, S.P., "Silver Nanoparticles Based Selective Colorimetric Sensor for $Cd^{2+}$, $Hg^{2+}$ and $Pb^{2+}$ Ions: Tuning Sensitivity and Selectivity using Co-stabilizing Agents," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 191, 2014, pp. 31–36.
5. EPA, United State Environmetal Protection Agency. http://www.epa.gov/ttnatwol/hlthef/lead(II), 2010.
6. Pourjavadi, A., Tehrani, Z.M., Salimi, H., Babazadeh, A., and Abedini, N., "Hydrogel Nanocomposite Based on Chitosan-*g*-Acrylic Acid and Modified Nanosilica with High Adsorption capacity for Heavy Metal Ion Removal," *Iran Polymer Journal*, Vol. 24, 2015, pp. 725-734.
7. Zhou, G., Luo, J., Liu, C., Chu, L., and Crittenden, J., "Efficient Heavy Metal Removal from Industrial Melting Effluent using Fixed-Bed Process Based on Porous Hydrogel Adsorbent," *Water Research*, Vol. 131, 2018, pp. 246-254.
8. Liu, Z., Hu, J., Sun, Q., Chen, L., Feng, X., and Zhao, Y., "Mussel-inspired Multifunctional Coating for Enhancing the UV-resistant Property of Polypropylene Fibers," *Macromolecular Research*, Vol. 25, No. 5, 2017, pp. 431-438.
9. Madrid, J.F., Ueki, Y., and Seko, N., "Abaca/Polyester Nonwoven Fabric Functionalization for Metal Ion Adsorbent Synthesis via Electron Beam-Induced Emulsion Grafting," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 90, 2013, pp. 104-110.
10. Choi, S., and Nho, Y.C., "Radiation-Induced Graft Copolymerization of Binary Monomer Mixture Containing Acrylonitrile onto Polyethylene Film," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 58, 2000, pp. 157-168.
11. Madrid, J.F., Lopez, G.E.P., and Abad, L.V., "Application of Full-factorial Design in The Synthesis of Polypropylene-g-Poly(glycidyl methacrylate) Functional Material for Metal Ion Adsorption," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 136, 2017, pp. 54-63.
12. Lee, J.Y., Jeun, J., and Kang, P., "Effect of Storage Conditions on Graft of Polypropylene Non-woven Fabric Induced by Electron Beam," *Journal of Radiation Industry*, Vol. 9, 2015, pp. 57-62.
13. Liu, M., Tao, Z. Wang, H. Zhao, F., and Sun, Q., "Preparation and Characterization of a Series of Porous Anion-Exchanger Chelating Fibers and Their Adsorption Behavior with Respect to Removal of Cadmium," *RCS Advances*, Vol. 6, 2016, pp. 115222-115237.
14. Jeun, J., Hua, Z.J., Kang, P., and Nho, Y., "Electron-Beam-Radiation-Induced Grafting of Acrylonitrile onto Polypropylene Fibers: Influence of the Synthesis Condition," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 115, 2010, pp.222-228.
15. Lee, S.H., Jeong, Y.G., Yoon, Y.I., and Park, W.H., "Hydrolysis of Oxidized Polyacrylonitrile Nanofibrous Web and Selective Adsorption of Harmful Heavy Metal Ions," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 143, 2017, pp. 207-213.

16. Mandal, D.K., Bhunia, H., Bajpai, P.K., Kushwaha, J.P., Chaudhari, C.V., Dubey, K.A., and Varshney, L, "Optimizatio of Acrylic Acid Grafting onto Polypropylene using Response Surface Methodology and Its Biodegradability," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 132, 2017, pp. 71-81.
17. Mandal, D.K., Bhunia, H., Bajpai, P.K., Chaudhari, C.V., Dubey, K.A., and Varshney, L, "Radiation-induced Grafting of Acrylic Acid onto Polypropylene Film and Its Biodegradability," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 123, 2016, pp. 37-45.
18. Guo, M., Chen, H., Luo, Z., Lian, Z., and Wei W., "Selective Removal of Pb(II) Ions from Aqueous Solutions by Acrylic Acid/Acrylamide Comonomer Grafted Polypropylene Fibers," *Fibers and Polymers*, Vol. 18, No. 8, 2017, pp. 1459-1467.
19. Na, C.K., Park, H.J., and Chung, I.H., "Heavy Metal Adsorption Property of Acryl Acid Grafting Polypropylene Non-woven Fabric Synthesized by Photo-Induced Polymerization," *Journal of the Korea Society for Environmental Technology*, Vol. 3, No. 1, 2002, pp. 53-62.
20. Naseem, K., Farooqi, Z.H., Rehman, M.Z.U., Rehman, M.A.U., and Ghufran, M., "Microgels as Efficient Adsorbents for the Removal of Pollutants from Aqueous Medium," *Review in Chemical Engineering*, Vol. 35, 2019, pp. 285-309.
21. Zhou, T., Xia, F., Deng, Y., and Zhao, Y., "Removal of Pb(II) from Aqueous Solution using Waste Textiles/Poly(acrylic acid) Composite Synthesized by Radical Polymerization Technique," *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 67, 2018, pp. 368-377.