

Research Article



CrossMark

Open Access

## 수중에서 미세플라스틱인 Polypropylene의 Cd 흡착특성 평가

엄주현<sup>1</sup>, 박종환<sup>2</sup>, 김성현<sup>3</sup>, 김영진<sup>4</sup>, 류성기<sup>5</sup>, 서동철<sup>1,2,5\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 농화학식품공학과, <sup>2</sup>경상대학교 응용생명과학부(Bk21 농생명산업 글로벌 인재 육성 사업단) & 농업생명과학원,  
<sup>3</sup>농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과, <sup>4</sup>안전성평가연구소 환경독성연구센터, <sup>5</sup>경상대학교 농화학과

### Evaluation of Cd Adsorption Characteristic by Microplastic Polypropylene in Aqueous Solution

Ju-Hyun Eom<sup>1</sup>, Jong-Hwan Park<sup>2</sup>, Seong-Heon Kim<sup>3</sup>, Yeong-Jin Kim<sup>4</sup>, Sung-Ki Ryu<sup>5</sup> and Dong-Cheol Seo<sup>1,2,5\*</sup>  
 (<sup>1</sup>Department of Agricultural Chemistry and Food Science & Technology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea, <sup>2</sup>Division of Applied Life Science (BK21 plus) & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea, <sup>3</sup>Soil and Fertilizer division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea, <sup>4</sup>Environmental Toxicology Research Center, Korea Institute of Toxicology, Jinju 52834, Korea, <sup>5</sup>Department of Agricultural Chemistry, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea)

Received: 19 June 2019/ Revised: 24 June 2019/ Accepted: 26 June 2019

Copyright © 2019 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ORCID**

Ju-Hyun Eom

<https://orcid.org/0000-0001-6016-0266>

Dong-Cheol Seo

<https://orcid.org/0000-0001-8515-0670>

**Abstract**

**BACKGROUND:** In recent years, studies on microplastics have focused on their decomposition in the ocean. However, no studies have been reported on the interaction between microplastics and metal ions in aqueous solutions. Therefore, this study was conducted to evaluate the adsorption capacity of cadmium(Cd) by polypropylene (PP) in aqueous solution.

**METHODS AND RESULTS:** Cadmium adsorption characteristics of PP in aqueous solution were evaluated through various conditions including initial Cd concentration(1.25-25 mg/L), contact time(0.5-24 h), initial pH(2-6) and temperature(20-50°C). Cadmium adsorption fit on PP was well described by Freundlich isotherm model with adsorption capacity(*K*) of 0.028. The adsorption amount of Cd by PP increased with increasing contact time, indicating that adsorption of PP by Cd was dominantly influenced by contact time. Especially, the

removal efficiency of Cd by PP was highest at high temperature. However, the surface functional groups of PP before and after adsorption of Cd were similar, suggesting that adsorption of Cd by PP is not related to surface functional groups.

**CONCLUSION:** Our study suggests that PP affects the behavior of Cd in aqueous solution. However, in order to clarify the specific relationship between microplastics and metal ions, mechanism research should be carried out.

**Key words:** Cadmium, Microplastic, Polypropylene, Aqueous solution, Freundlich isotherm

**서론**

플라스틱은 안정성, 단열성, 편리성 등의 소재특성으로 인하여 섬유, 생활용품, 포장재, 건축 및 컴퓨터 등 다양한 산업 분야에서 많이 활용되고 있을 뿐만 아니라 인간의 생활과도 밀접하게 연관되어 있다(Browne *et al.*, 2011). 하지만 플라스틱의 과도한 사용으로 인하여 연간 많은 양의 플라스틱 폐기물이 배출되고 있는 실정이며, 1950년부터 2015년까지 전 세계적으로 누적된 플라스틱 생산량은 6,300만톤에 달하며, 이중 1,400만톤은 재활용 또는 소각되는 반면에 4,900만톤은

\*Corresponding author: Dong-Cheol Seo  
 Phone: +82-55-772-1963; Fax: +82-55-772-1969;  
 E-mail: dcseo@gnu.ac.kr

어떠한 처리과정 없이 폐기되어 매립지나 자연환경에 축적되고 있는 실정이다(Roland et al., 2017). 그래서 이들의 동향과 처리는 전세계 연구자들로부터 첨예의 관심사가 되고 있다.

최근 플라스틱의 제조기술 개발로 인하여 세안제, 치약 및 각질제거제 등에 마이크로 비드 형태의 플라스틱이 사용되고 있으며, 이들은 사용 후 인근 수계로 배출되어 전 세계 해양에 떠돌아 다니는 것으로 보고되어 지고 있다(Ashton et al., 2010). 자연상태에서 플라스틱의 풍화 및 광분해 등으로 인해 분해된 나노 입자 크기의 플라스틱과 마이크로 비드 형태의 플라스틱을 총칭하여 미세플라스틱으로 불리며 지고 있는데, 이들은 해양 생물들에게 쉽게 노출되면서 포식자의 먹이로 오인하여 섭취하게 되고 생물축적과정을 통한 해양생태계 파괴와 인체의 미세플라스틱 섭취에 대한 우려가 점차 확대되고 있는 실정이다(Auta et al., 2017; Ferreira et al., 2016). 이에 해양 및 담수상태의 수환경 및 생태계 보호를 위해서 미세플라스틱의 제거와 관련된 연구뿐만 아니라 이들이 수생태계에 미치는 영향에 대한 연구가 절실히 필요한 실정이다.

그러나 현재 미세플라스틱과 관련된 연구들은 대부분 해양에서 분해특성과 어류에 대한 독성에 대해서만 주로 보고되어 왔으며(Ashton et al., 2010; Holmes et al., 2012), 담수상태에서 미세플라스틱과 중금속을 포함한 오염물질 사이의 상관관계에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다. 중금속은 금속광산뿐만 아니라 산업 발달로 인하여 다양한 산업분야에서 인근 수계 및 토양으로 배출되고 있으며, 특히 Cd는 잠재적 독성원소로서 장기간 노출 시 골격, 신장, 심혈관, 중추 신경계 및 호흡기 계통에 독성을 유발하게 되어 인체 건강에 악영향을 미칠 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Rahimzadeh et al., 2017).

따라서 본 연구는 담수상태에서 Cd가 흡착된 미세플라스틱이 포식자의 먹이로 위장하게 된다면 먹이사슬을 통해 최종적으로 인간에게까지 미세플라스틱과 중금속이 동시에 노출될 수 있으므로 이를 입증하기 위한 기초연구로서 수중에서 다양한 Cd 흡착조건에 따른 미세플라스틱중 polypropylene(PP)의 Cd흡착특성을 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 등온흡착모델에 의한 microplastic인 PP의 Cd 흡착실험

Polypropylene는 전체 플라스틱의 생산량 중 19%를 차지하고 있다. 특히 PP는 전체 폐기물 발생량 중 18%으로 차지하고 있으며, 대부분이 어떠한 처리나 재활용 과정 없이 폐기되고 있는 실정이다(Roland et al., 2017). 이에 본 실험에서는 많은 플라스틱 중 PP를 우선적으로 선정하여 실험을 수행하였다. PP는 Sigma-Aldrich에서 구입하여 흡착실험에 이용하였다. 실험에 앞서 입자상 PP는 분쇄기를 이용하여 일정크기로 분쇄한 후 0.5 mm체를 이용하여 입자의 크기를 균질화하였다.

Polypropylene에 의한 Cd의 최대흡착특성 조사는 Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O를 이용하여 표준원액 1000 mg/L 제조한 후 초기 농도를 1.25-25 mg/L 수준으로 단계적으로 희석하여 표

준용액으로 제조한 후 사용하였으며, 각 용액의 초기 pH는 0.1 M HCl과 NaOH를 이용하여 5로 조절하였다. 실험에 사용된 PP 시료는 100 mL의 삼각플라스크에 각각 2 g씩 주입하고 일정 농도로 희석된 표준용액을 각각 50 mL씩 주입한 후 shaking incubator (KASI KSI-200L, Korea)에서 175 rpm으로 24 hr 동안 교반하였다. 교반된 시료는 여과지(Whatman No. 6 filter)를 이용하여 여과시킨 뒤, PP의 단위 g당 흡착된 Cd의 양과 평형상태에서 용액 내에 잔류된 Cd의 양을 Inductively Coupled Plasma (ICP, Perkin Elmer Optima 4300 DV, USA)를 이용하여 측정하였으며, 그 결과는 Freundlich (Eq. 1) 및 Langmuir (Eq. 2) 등온흡착 모델에 적용하였다.

$$q = KCe^{1/n} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$q = \frac{abCe}{1 + bCe} \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서  $q$ 는 PP 단위 g당 Cd의 흡착량(mg)이고,  $Ce$ 는 평형상태에서 용액중에 남아있는 Cd의 농도이며, 그리고  $K$ 와  $1/n$ 은 Freundlich 상수로서  $K$ 는 Cd의 흡착능을 나타내고  $1/n$ 은 흡착강도를 나타낸다. 그리고  $a$ 와  $b$ 는 각각 최대 흡착능 및 흡착결합력을 나타낸다(Seo et al., 2008).

### 다양한 환경변이에서 microplastic인 PP에 의한 Cd의 흡착실험

일반적으로 흡착제에 의한 중금속의 흡착은 반응시간, pH 및 온도와 같은 주변환경 변이에 대하여 지배적인 영향을 받는 것으로 보고되었다(Park et al., 2019). 그래서 본 연구에서는 반응시간(0.5-24h), 초기 pH (2-6) 및 온도(20-50°C)가 PP의 Cd 흡착특성에 미치는 영향에 대하여 평가하였다. 준비된 PP를 2 g씩 삼각플라스크에 주입하고 10 mg/L로 조절된 표준용액을 50 mL 삼각플라스크에 주입한 후 상기 언급된 각 실험조건을 달리하여 흡착실험을 수행하였으며, 이후 모든 실험방법 및 분석방법은 앞서 언급된 초기 Cd농도 실험과 동일하게 수행되었다.

### 카드뮴 흡착 전 후 microplastic인 PP의 functional group의 비교

카드뮴 흡착 전 후 PP의 functional group 비교실험은 초기 Cd의 농도가 10 mg/L(pH 5) 일 때 흡착된 시료(흡착된 Cd: 0.062 mg/g)를 사용하였으며, 모든 시료는 수분을 충분히 제거한 후 Fourier transform infrared spectrometer (FTIR; Perkin Elmer, USA)을 이용하여 분석되었다.

## 결과 및 고찰

### 등온흡착모델에 의한 microplastic인 PP의 Cd 흡착특성

초기 Cd 농도에 따른 PP의 Cd 흡착경향은 Fig. 1A에 나타내었다. Polypropylene에 의한 Cd의 흡착량은 초기 Cd

의 농도가 2.5 mg/L 까지는 비교적 낮았으나 Cd의 농도가 증가할수록 점진적으로 증가되었는데, 이는 PP에 의한 Cd의 흡착이 초기 Cd 농도에 지배적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 초기 Cd 농도에 따른 흡착결과는 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착 모델에 의해 도식화 되었으며, 그 결과는 Fig. 1B 및 1C에서 보는 것과 같고, 두 등온흡착식으로부터 도출된 흡착상수들은 Table 1에 나타내었다. Freundlich 등온흡착식을 이용한 PP의 Cd에 대한 흡착능( $K$ ) 및 흡착강도( $1/n$ )는 각각 0.0277 및 0.4777이었다. Park 등(2017)은  $1/n$ 의 값이  $0.1 < 1/n < 0.5$  이라면 오염물질 처리를 위한 흡착제로 활용이 가능하다고 보고하였는데, PP는 Cd 제거를 위한 흡착제로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

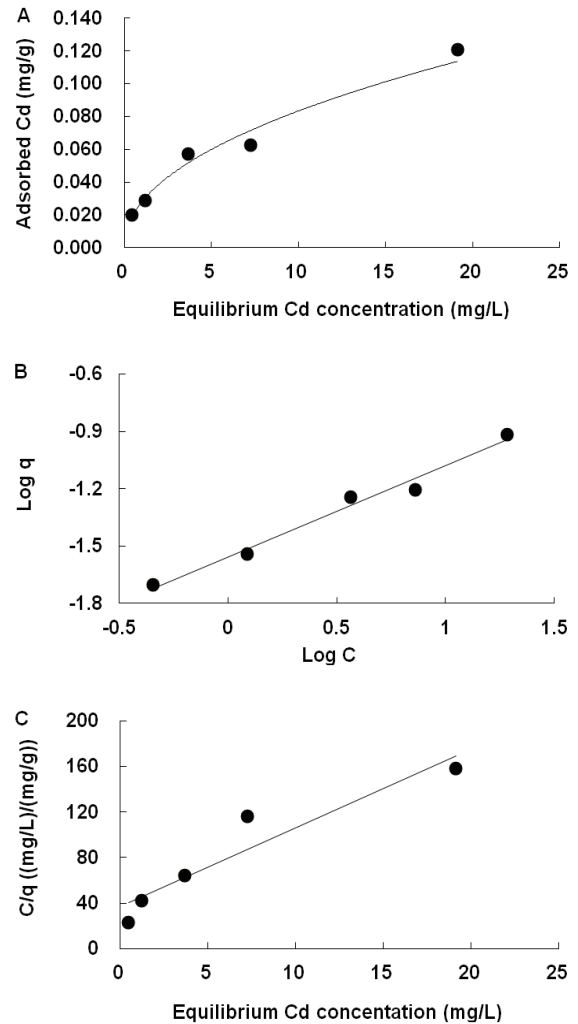
Langmuir 등온흡착식을 이용한 PP에 대한 Cd의 최대흡착능( $a$ ) 및 결합세기( $b$ )는 각각 0.1451 mg/g 및 0.1855이었다. Langmuir 등온 흡착식에서  $b$ 값은 흡착친화도를 나타내며, 이 값이 클수록 흡착친화도가 크다는 것을 의미한다.

본 실험에 사용된 두 등온흡착식으로 흡착제의 흡착특성을 고려할 때, Freundlich 모델의 경우 흡착제의 표면에 존재하는 이종(heterogeneous) 이상의 활성화 사이트에 의해 오염물질이 흡착되는 반면에 Langmuir 모델은 흡착 에너지가 일정한 균질 표면 위에 단일층(homogeneous)에 의한 흡착이라고 보고되어졌다(Li *et al.*, 2017). 또한 Boparai 등(2011)의 연구결과에 따르면, Freundlich 등온흡착모델은 흡착제와 흡착질간의 물리적 흡착(physisorption)에 의해 이루어지는 반면에 Langmuir 흡착모델은 화학적 흡착(chemisorption)에 의해 지배적인 영향을 받는다고 보고된 바 있다. 본 연구결과에서 PP에 의한 Cd의 흡착량은 Freundlich 등온흡착식( $R^2=0.9814$ )이 Langmuir 등온흡착식( $R^2=0.8961$ )에 비해 더 유의성이 있었는데, 이는 PP에 의한 Cd의 흡착이 PP표면에 존재하는 이종 이상의 복합 활성화 사이트 및 물리적인 흡착기작에 의해 흡착되는 것을 나타낸다. 그러나 PP의 구조적인 특성을 고려할 때, Cd의 흡착이 이종 이상의 표면활성사이트에 의한 흡착보다는 물리적인 흡착에 의해 대부분 흡착되는 것으로 판단된다.

**다양한 환경변이에서 microplastic인 PP에 의한 Cd의 흡착특성**

반응시간에 따른 microplastic인 Polypropylene의 Cd 흡착특성은 Fig. 2에 나타내었다. Polypropylene에 의한 Cd의 흡착량은 반응 초기 1시간 까지 낮았으나, 1시간 이후부터는 시간에 의존적으로 증가하는 경향이였다. 그러나 반응 20시간 이후부터는 PP에 의한 Cd의 흡착 증가율이 감소하

였는데, 이는 PP에 의한 Cd의 흡착이 포화되어 가고 있다는 것을 나타낸다. 일반적으로 반응초기의 높은 흡착율은 흡착제 표면에 존재하는 다양한 활성사이트들이 비어 있기 때문에 오염물질의 흡착이 쉽게 일어나는 반면에, 일정시간 후 흡착율이 낮아지는 것은 표면에 오염물질을 흡착할 수 있는 활성사이트가 점점 포화되어 가고 있다는 것을 나타낸다(Boutsika *et al.*, 2014; Tan *et al.*, 2016). 하지만 반응초기 흡착율이 낮았고 장시간 동안 흡착이 일어난다는 것은 등온흡착결과에서 언급한 것과 같이 PP에 의한 Cd의 흡착이 대부분 물리적인 흡착에 의해 이루어지기 때문인 것으로 판단된다.



**Fig. 1. Cadmium adsorption isotherm by polypropylene (A: Amounts of Cd adsorbed, B: Freundlich isotherm model, C: Langmuir isotherm model).**

**Table 1. Parameters for Cd adsorption isotherms of polypropylene**

	Freundlich isotherm			Langmuir isotherm		
	$K$	$1/n$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
Polypropylene	0.0277	0.4777	0.9814	0.1451	0.1855	0.8961

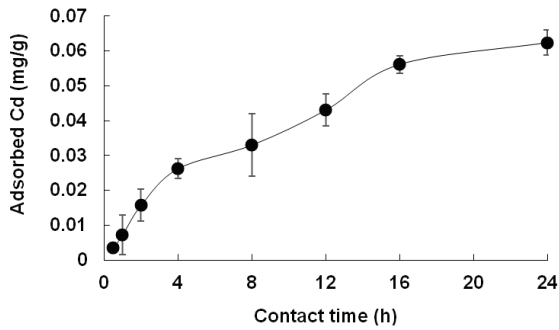


Fig. 2. Effect of contact time on Cd adsorption by polypropylene.

Microplastic인 PP에 의한 Cd에 반응온도가 미치는 영향에 대한 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 반응온도가 20 및 30°C에서 PP에 의한 Cd의 흡착량은 각각 0.062 및 0.065 mg/g으로 별 다른 차이 없이 유사하였으나, 반응온도가 40°C부터는 점진적으로 증가하였으며, 최종 50°C에서 PP에 의한 Cd의 흡착량은 0.138 mg/g으로 20°C에서 보다 2.2배 높았다. 일반적으로 반응온도의 증가는 흡착제와 흡착질간의 충돌횟수를 증가시켜 흡착반응을 가속화 시키기 때문에 PP에 의한 Cd의 흡착량이 증가한 것으로 판단된다. Hadi 등 (2015)의 연구결과에 따르면, 반응온도가 증가함에 따라 중금속의 흡착능이 증가하는 것은 반응 온도가 증가할수록 깁스 자유에너지(Gibbs free energy,  $\Delta G$ )는 감소하고 엔탈피(enthalpy,  $\Delta H$ )가 상승되기 때문이며, 이 과정을 전형적인 흡열반응(endothermic reaction)의 결과라고 보고하였다.

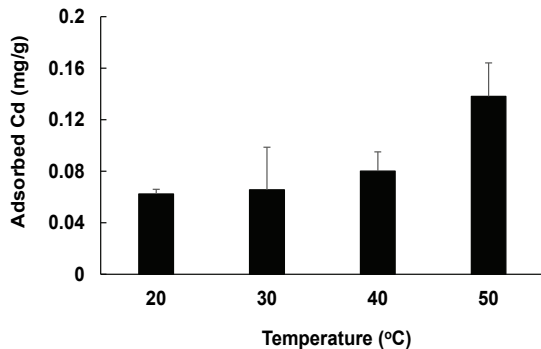


Fig. 3. Effect of temperature on Cd adsorption by polypropylene.

초기 pH에 따른 microplastic인 PP의 Cd 흡착특성은 Fig. 4에 나타내었다. 초기 pH 2에서 6까지 PP에 의한 Cd의 흡착량은 0.062-0.067 mg/g의 범위로 별 다른 차이 없이 유사하였다. 초기 pH 2에서부터 6까지 Cd의 존재형태는 대부분  $Cd^{2+}$ 으로 존재하며(Park *et al.*, 2019), PP의 zeta potential을 통한 등전점(isoelectric point)의 pH는 약 4이다(Lameiras *et al.*, 2008). 이는 초기 pH 4이하에서 PP의 표면전하는 양전하를 나타내며, 4이상에서는 음전하를 나타내는데, 그럼에도 불구하고 pH변화에 따라 PP에 의한  $Cd^{2+}$ 의 흡착량이 변하지 않는

것은 PP에 의한 Cd의 흡착이 대부분 물리적인 흡착에 의해 일어난다는 것을 증명한다.

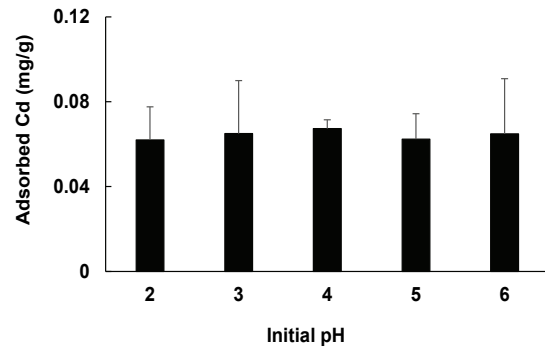


Fig. 4. Effect of initial pH on Cd adsorption by polypropylene.

#### 카드뮴 흡착 전 후 microplastic인 PP의 functional group 비교

카드뮴 흡착에 PP의 작용기가 미치는 영향을 조사하기 위하여 FTIR에 의한 Cd 흡착 전 후 microplastic인 PP의 작용기를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 5에서 보는 것과 같다. 흡착 전 후 시료에서 관찰된  $3020\text{ cm}^{-1}$ 에서부터  $3100\text{ cm}^{-1}$ 에 해당하는 피크는  $=C-H$  및  $=C-H_2$ 를 나타내며,  $1456\text{ cm}^{-1}$ 와  $1376\text{ cm}^{-1}$ 에 할당된 피크는 각각  $CH_2$  deformation 및 symmetric  $CH_3$  deformation을 나타낸다. 또한  $1400\text{ cm}^{-1}$ 에서  $850\text{ cm}^{-1}$ 에 해당하는 피크들은 Isotactic polypropylene bands를 나타내는데(Sclavons *et al.*, 2005; Lefakane *et al.*, 2015), 이들은 전형적인 PP의 구조적인 특징이다. 하지만 이들 피크는 Cd 흡착 전후에 별 다른 차이 없이 유사하였으며, 이는 microplastic인 PP의 표면작용기는 Cd의 흡착에 큰 상관관계가 없는 것으로 판단된다.

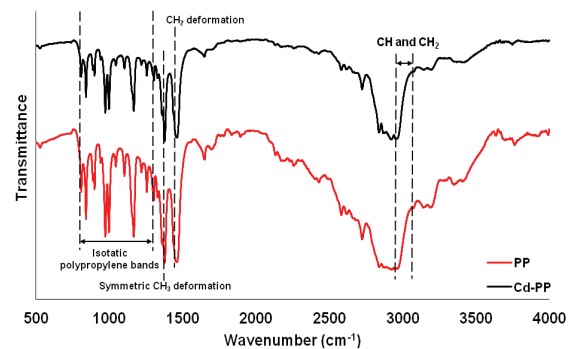


Fig. 5. Functional group change of polypropylene before and after Cd adsorption through FTIR.

#### 요 약

본 연구는 미세플라스틱 주요물질 중의 하나인 PP와 담수

상태에서 중금속 사이의 상관관계를 평가하기 위해 등온흡착 모델과 다양한 흡착조건하에서 microplastic인 PP에 의한 Cd의 흡착특성을 평가하였다. Microplastic인 PP에 의한 Cd의 흡착경향은 Freundlich 흡착식에 적합하였으며, 주요한 흡착메커니즘은 물리적인 흡착으로 판단된다. 특히, PP에 의한 Cd의 흡착량은 반응시간과 반응온도에 지배적인 영향을 받았으며, 반응시간과 반응온도가 증가할수록 흡착량은 증가하였다. 초기 pH에 따른 흡착결과 PP에 의한 Cd의 흡착은 표면전하와 큰 상관관계가 없었고, FTIR분석을 통한 Cd 흡착 전과 후의 PP작용기에 별 다른 차이가 없어 PP에 의한 Cd의 흡착은 대부분 물리적 흡착으로 판단되었다. 결론적으로 담수상태에서 미세플라스틱인 PP는 Cd과 같은 중금속을 흡착한 후 생물체내로 이동시킬 수 있는 가능성을 확인할 수 있었고, 향후 미세플라스틱에 의한 중금속과 같은 독성물질 이동과 전이매개체의 역할과 메커니즘을 규명하기 위한 체계적인 후속연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### Note

The authors declare no conflict of interest.

### Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (MSIP), [NRF-2017R1A2B4004635; NRF-2019R1C1C1004572].

### References

- Ashton, K., Holmes, L., & Turner, A. (2010). Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), 2050-2055.
- Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment; a review of the source, fate, effects, and potential solutions. *Environment international*, 102, 165-176.
- Boparai, H. K., Joseph, M., & O'Carroll, D. M. (2011). Kinetic and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nano zerovalent iron particles. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 458-465.
- Boutsika, L. G., Karapanagioti, H. K., & Manariotis, I. D. (2014). Aqueous mercury sorption by biochar from malt spent rootlets. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(1), 1805.
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks. *Environmental Science and Technology*, 45(21), 9178-9179.
- Ferreira, P., Fonte, E., Soares, M. E., Carvalho, F., & Guilhermini, L. (2016). Effects of multi-stressors on juveniles of the marine fish *Pomatoschistus microps*: Gold nanoparticles, microplastics and temperature. *Aquatic Toxicology*, 170, 89-103.
- Hadi, P., To, M. H., Hui, C. W., Lin, C. S. K., & McKay, G. (2015). Aqueous mercury adsorption by activated carbons. *Water Research*, 73, 37-55.
- Holmes, L. A., Turner, A., & Thompson, R. C. (2012). Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment. *Environmental Pollution*, 160, 42-48.
- Lameiras, F. S., de Souza, A. L., de Melo, V. A. R., Nunes, E. H. M., & Braga, I. D. (2008). Measurement of the zeta potential of planar surfaces with a rotating disk. *Materials Research*, 11(2), 217-219.
- Lefakane, T. E., Ndibewu, P. P., & Netshiozwi, T. E. (2015). Characterization, chemical phase, identification, and performance evaluation of omnipotent polymers used in the manufacturing of personal protective garments. *Polymers Research Journal*, 9(4), 408-425.
- Li, Y., Wang, Z., Xie, X., Zhu, J., Li, R., & Qin, T. (2017). Removal of Norfloxacin from aqueous solution by clay-biochar composite prepared from potato stem and natural attapulgite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect*, 514, 126-136.
- Park, J. H., Wang, J. J., Kim, S. H., Cho, J. S., Kang, S. W., Delaune, R. D., Han, K. J., & Seo, D. C. (2017). Recycling of rice straw through pyrolysis and its adsorption behaviors for Cu and Zn ions in aqueous solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect*, 533, 330-337.
- Park, J. H., Wang, J. J., Kim, S. H., Kang, S. W., Jeong, C. Y., Jeon, J. R., Park, K. H., Cho, J. S., Delaune, R. D., & Seo, D. C. (2019). Cadmium adsorption characteristics of biochars derived using various pine tree residues and pyrolysis temperatures. *Journal of Colloid and Interface Science*, 533, 298-307.
- Rahimzadeh, M. R., Rahimzadeh, M. R., Kazemi, S., & Moghadamnia, A. (2017). Cadmium toxicity and treatment: An update. *Caspian Journal of Internal Medicine*, 8(3), 135-145.
- Roland, G., Jerna, R. J., & Kara, L. L. (2017). Production use and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 1-5.
- Sclavons, M., Laurent, M., Devaux, J., & Carlier, V.

- (2005). Maleic anhydride-grafted polypropylene: FTIR study of a model polymer grafted by ene-reaction. *Polymer*, 46(19), 8062-8067.
- Seo, D. C., Yu, K., & Delaune, R. D. (2008). Comparison of monometal and multimetal adsorption in Mississippi river alluvial wetland sediment: Batch and column experiment. *Chemosphere*, 73(11), 1757-1764.
- Tan, G., Sun, W., Xu, Y., Wang, H., & Xu, N. (2016). Sorption of mercury (II) and atrazine by biochar, modified biochars and biochar based activated carbon in aqueous solution. *Bioresource Technology*, 211, 727-735.