

ORIGINAL ARTICLE

음식물류 폐기물 활성탄의 제조 및 중금속 흡착특성

이준희* · 이승철 · 주민¹⁾ · 김지혜²⁾ · 이돈길³⁾

동아대학교 환경공학과, ¹⁾한국건설기술연구원, ²⁾웨엠스, ³⁾한독이엔지

Heavy Metal Adsorption Characteristics and Produced of Food Waste Activated Carbon

Jun-Hee Lee*, Seung-Chul Lee, Min Ju¹⁾, Ji-Hye Kim²⁾, Don-Gil Lee³⁾

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

¹⁾Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

²⁾Wem, Busan 609-816, Korea

³⁾Han-Dok ENG CO., LTD, Yangsan 626-110, Korea

Abstract

This study evaluates heavy metal(Cu and Cr) adsorption characteristics produced from food waste charcoal extracted in an optimal operation condition after analyzing activated charcoal of iodine adsorption and heavy metals that derived from an activation process of carbide by the developed by-products of food waste treatment facility using the methods from previous studies. As experiment apparatus, this study used a tube-shaped high temp furnace. The mixing ratio of by-products of food waste treatment facility, carbide, and activation component(ZnCl₂) was 1:1. The experiment was proceeded as adjusting the activation temperature from 400 to 800 °C and activation time from 30 to 120 minutes. The optimal activation condition for iodine adsorption was 90 minutes at 700 °C and by using the produced food waste charcoal, this study conducted an experiment on absorption of heavy metals (Cu and Cr) as changing pH of artificial wastewater and stirring time. As a result, pH 7 showed the highest heavy metal decontamination ratio and in terms of stirring time, it revealed balance adsorption after 10 minutes. This result can be particularly applied as basic data for recyclability of high concentration organic waste, by-products of food waste treatment facility, as an food waste charcoal.

Key words : Carbide, Activation, Food waste charcoal, Heavy metal adsorption, Balance adsorption

1. 서론

우리나라는 에너지 원료 및 자원이 부족하기 때문에 국외에서 대량의 화석연료를 수입하고 있다. 또한 화석 연료의 사용은 대기 중의 온실가스 농도 증가에 의한 지구온난화 문제와 더불어 환경, 생태계 문제 및 원자력에

너지의 안정성 등의 문제가 대두되고 있으며, 국제유가 변동에 기인한 에너지 확보 문제를 해결하기 위해 재생 에너지 및 신에너지에 대한 관심은 지속적으로 증가하고 있다. 이와 함께 유기성 폐기물을 이용한 재생에너지를 생산시키는 다양한 기술의 연구가 진행되고 있다(Jee and Choi, 2013).

Received 18 August, 2015; Revised 10 December, 2015;

Accepted 11 December, 2015

*Corresponding author : Jun-Hee Lee, Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea
Phone: +82-51-200-5575
E-mail: loan24@nate.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

유기성 폐기물의 국내 발생량은 2011년도 기준 114,712천 ton/year이고, 이중에서 하수슬러지 58.5%, 가축분뇨 37.2% 및 음식물류 폐기물 4.3%로 구성되어 있으며, 매년 증가하는 추세이다. 이렇게 증가하는 유기성 폐기물의 재활용 및 에너지화는 수입에만 의존하는 화석연료를 대체하고 온실가스 발생을 줄일 수 있는 효과적인 수단인 동시에 유기성 폐기물을 적정 처리할 수 있는 방안이 된다(Kim, 2014; Han et al., 2014).

유기성 폐기물의 기존에 처리방법이었던 소각, 매립, 해양배출, 시멘트 원료, 퇴비화, 탄화, 복토제 및 고형화 등의 방법 중 대표적인 매립과 해양배출이 각각 2005년, 2012년부터 금지됨에 따라 나머지 육상처리 및 재활용 방법에 대한 연구가 더욱 활발하게 진행되고 있는 실정이다(Kim, 2014; Kim and Ju, 2014).

생활폐기물 중에서 대표적인 유기성 폐기물은 음식물류 폐기물이다(Lee and Lee, 2013).

음식물류 폐기물은 농수산물 유통과정에서 버려지는 쓰레기와 가정과 음식점 등에서 조리과정 중 식품을 다듬고 버리는 식품쓰레기, 먹고 남긴 음식물 찌꺼기 및 보관했다가 그냥 버려지는 폐기물을 말한다(Yoo et al., 2012).

국내 음식물류 폐기물 발생량은 15,000 ton/year으로 1일 1인당 약 300 g 정도 발생되며, 그 처리비용은 8,000억 원으로 경제적 가치로 환산 시 20조 원이 낭비되고 있다(Jo, 2012). 이러한 음식물류 폐기물 또한 유기성 폐기

물과 마찬가지로 직매립 및 해양 배출이 전면 금지됨에 따라 그 처리 및 에너지화 방안에 대한 관심이 증대되고 있다.(Kim et al., 2009).

음식물류 폐기물의 대표적인 육상처리 방법 역시 앞서 기술한 바와 같이 유기성 폐기물과 거의 유사하나, 그 대표적인 방법인 소각의 경우 수분 함량이 높고 발열량이 낮은 단점이 있으며, 사료화 및 퇴비화의 경우는 높은 염도 및 영양분의 불균형 등의 문제점이 지적되고 있다(Lee and Park, 2010). 이러한 문제점 해결을 위해 국내에서는 많은 연구가 진행되고 있으며, 본 연구실 또한 그에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다.

따라서 본 연구에서는 사전 예비실험에 의한 음식물류 폐기물의 탄화물을 이용한 활성화 공정을 통해 요오드흡착성능평가 및 중금속 분석으로 최적 활성화 조건 도출하고 제조된 활성탄을 이용한 중금속(Cu 및 Cr) 흡착특성 평가로 고농도 유기성 폐기물인 음식물류 폐기물의 효과적인 재활용의 기초자료로서 사용하는데 그 목적이 있다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에서는 음식물류 폐기물을 활성탄 제조 공정의 원료로 사용하였다. 음식물류 폐기물 은 B시 F사의 음식물류 폐기물 처리시설에서 발생된 부산물을 사용하



(a) Drying by-products food waste treatment facility



(b) Food wastewater treatment facility carbide

Fig. 1. Photographs of experimental material.

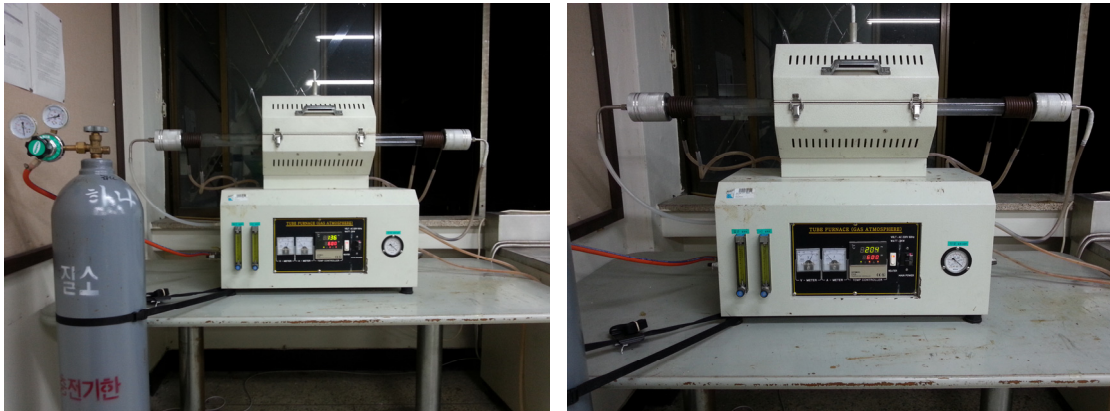


Fig. 2. Photograph of activation devices.

였으며, 사료화 및 비료화 공정 중 발생된 음폐수를 응집 및 2회의 탈수과정을 거쳐 고액분리를 한다. 그리고 인근 하수처리장과 연계처리하고 있는데, 본 연구에서는 음폐수를 고액분리 하는 과정에서 발생된 부산물을 재료로 사용하였다.

활성탄 제조를 위한 탄화 및 활성화 공정시 음식물류 폐기물에 함유된 다량의 수분은 탄화물의 경도 저하의 원인이 되므로 부산물을 105 ~ 110℃로 온도유지가 가능한 dry oven을 이용하여 함수율이 10% 이하가 되도록 건조시키고, 건조된 부산물은 미분쇄한 후 KS 표준체를 이용하여 100 mesh 이하로 입도분리 후 실험재료로 사용하였다. 건조 및 분쇄된 음식물류 폐기물과 사전 예비실험에 의해 제조된 탄화물의 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 활성화 공정을 위해 관형태의 고온전기로 장치를 사용하였으며, 장치사진을 Fig. 2에 나타내었다.

고온전기로의 구성은 크게 활성화 반응로, 온도측정 장치 및 질소가스공급 장치로 구성되어 있다. 활성화 반응로는 원형관으로 내경 46 mm, 두께 2 mm 및 길이 1,200 mm인 석영관을 사용하였으며, 반응로 내의 온도는 최대 1,200℃까지 유지가 가능하다. 질소가스가 유입 및 유출되는 반응로 입구와 출구는 내경 50 mm, 두께 15 mm 및 길이 100 mm의 알루미늄 합금 재질의 캡을 부

착하여 질소가스의 유입과 발생가스의 배출을 원활하게 하였다.

온도측정 장치는 반응로 중앙에 장착되어 온도를 연속적으로 모니터링 할 수 있도록 하였으며, 질소가스공급 장치는 고압질소 봄베, 압력조절장치 및 유량계로 구성되어 있다.

활성화 반응로 내부는 고순도 질소가스를 지속적으로 일정량 주입하여 활성화 공정이 진행되는 동안 환원성 분위기를 유지해 주었다.

본 연구에서의 활성화 공정은 사전 예비실험을 통해 제조된 음식물류 폐기물 탄화물(이하 탄화물)을 이용하여 활성화 공정을 진행하였으며, Ju(2014) 및 Lee(2014)의 문헌연구를 통해 결정된 최적탄화조건은 400℃ 90 min이었다. 활성화 공정은 최적탄화조건에 의해 제조된 탄화물을 이용하여 활성화 온도 및 시간변화에 따른 연구를 진행하였다.

활성화 온도는 Ju(2014) 및 Lee(2014)의 문헌연구를 통한 음식물류 폐기물의 TGA 열중량 분석을 통하여 결정하였으며, 활성화제로는 염화아연($ZnCl_2$)을 사용하였다.

활성화 공정은 최적운전조건 결정을 위해서 활성화 시간을 30 ~ 120 min, 활성화 온도 400 ~ 800℃로 변화시킨 뒤 요오드흡착성능평가 및 중금속 분석을 통하여 최적 활성화 조건을 결정하였다. 음식물류 폐기물의 활성화 공정 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Operating conditions for activation

Parameters	Unit	Conditions
N ₂ flow	mL/min	100
Heating rate	℃	20
Temperature	℃	400, 500, 600, 700, 800
Time	min	30, 60, 90, 120
Mixing ratio	-	1 : 1

음식물류 폐기물을 이용한 활성탄 제조 공정에서 최적 활성화 조건을 도출하여 제조한 활성탄으로 중금속 (Cu 및 Cr) 흡착실험을 실시하였다.

중금속 표준용액은 순도 98% 이상의 CuSO₄·5H₂O 및 K₂Cr₂O₇ 약품을 이용하여 제조하였으며, 인공폐수의 중금속 농도는 각각 5, 10 및 25 mg/L가 되도록 제조하였다. 이때 인공폐수의 pH는 7로 하였다.

제조한 각 농도의 인공폐수 100 mL에 음식물류 폐기물 활성탄 1 g을 혼합한 다음 상온에서 교반시간 10 min 및 교반속도 200 rpm을 기준으로 pH 5, 7 및 9로 변화시켜 pH에 따른 중금속 흡착특성을 파악하였으며, 이 때 인공폐수의 pH 조절은 0.1N NaOH와 0.1N HCl을 사용하였다.

또한, 앞선 실험으로 결정된 최적 pH 및 교반속도 200 rpm을 기준으로 흡착시간을 2, 5, 10, 30, 60 및 90 min으로 변화시켜 흡착평형에 도달하는 반응시간을 알아보았다.

흡착실험이 끝난 인공폐수는 상등액을 분취하여 여과한 뒤 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass

Spectrometer)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 음식물류 폐기물 활성탄의 요오드흡착성능평가

음식물류 폐기물 활성탄 제조시 활성화 온도 및 시간에 따른 요오드 흡착성능 변화를 Fig. 3 및 Fig. 4에 각각 나타내었다.

탄화물 시료 10 g을 활성화 공정의 최적 운전조건 결정을 위하여 활성화 시간 60 min을 기준으로 활성화 온도를 400, 500, 600, 700 및 800℃로 변화시킨 후 요오드흡착성능평가를 통하여 최적 활성화 온도를 도출하였다.

활성화 온도 400, 500, 600, 700 및 800℃로 60 min의 활성화 시간으로 활성화한 음식물류 폐기물 활성탄의 요오드흡착성능은 각각 808.72 mg/g, 823.84 mg/g, 893.28 mg/g, 975.10 mg/g 및 887.60 mg/g으로 최적 활성화 온도는 700℃로 나타났다.

또한, 앞선 실험을 통해 결정된 최적 활성화 온도 700℃를 기준으로 활성화 시간을 30, 60, 90, 및 120 min

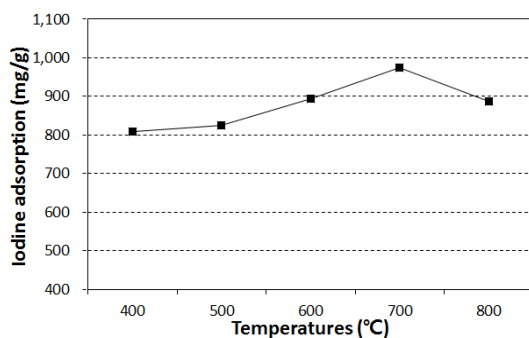


Fig. 3. Iodine adsorption of activation temperatures.

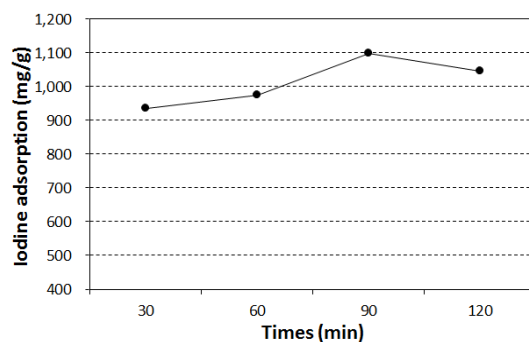


Fig. 4. Iodine adsorption variations of activation times.

Table 2. Heavy metal contents of activated material from food waste treatment facility in various activation temperatures

Temperature (°C)	Unit	As	Zn	Cd	Pb
Food waste	mg/kg	N.D	74.40	N.D	N.D
400	mg/kg	N.D	46.96	N.D	N.D
500	mg/kg	N.D	42.10	N.D	N.D
600	mg/kg	N.D	41.02	N.D	N.D
700	mg/kg	N.D	39.19	N.D	N.D
800	mg/kg	N.D	39.01	N.D	N.D

Note) N.D : Not detected.

으로 변화시킨 후 요오드흡착성능은 각각 936.00 mg/g, 975.10 mg/g, 1,099.80 mg/g 및 1,045.66 mg/g으로 90 min일 때 가장 높게 나타났다.

따라서, 음식물 탄화물의 요오드흡착성능 평가를 통한 최적 활성화 조건은 700°C 90 min으로 나타났다.

3.2. 음식물류 폐기물 활성탄의 중금속분석

Table 2는 음식물 탄화물의 활성화 시간 60 min을 기준으로 활성화 온도를 400, 500, 600, 700 및 800°C로 변화시켰을 때의 음식물류 폐기물 활성탄의 중금속 함량 변화를 나타낸 것이다. As, Cd 및 Pb은 검출되지 않았으

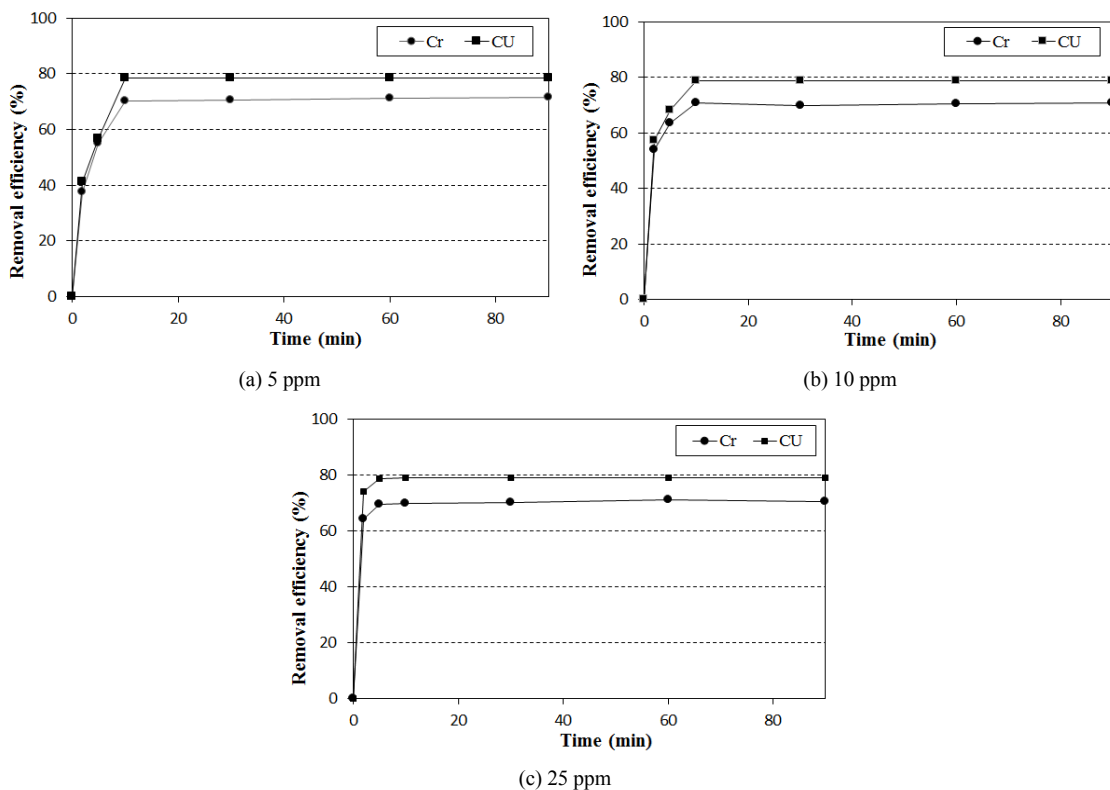


Fig. 5. Changes in times for Cu and Cr adsorption on different concentration.

Table 3. The parameters of Freundlich adsorption isotherm for heavy metals

Heavy metals	1/n	k	R ² values
Cu	0.48	1.39	0.9468
Cr	0.64	0.97	0.9954

며, 활성화 온도가 증가할수록 Zn의 함량은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 음식물류 폐기물의 특성상 중금속 함량이 낮고 유기물의 함량이 높기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 음식물류 폐기물 활성탄의 교반시간 변화에 따른 중금속 흡착특성

교반시간 변화에 따른 인공폐수의 중금속(Cu 및 Cr) 제거효율은 Fig. 5에 나타내었다.

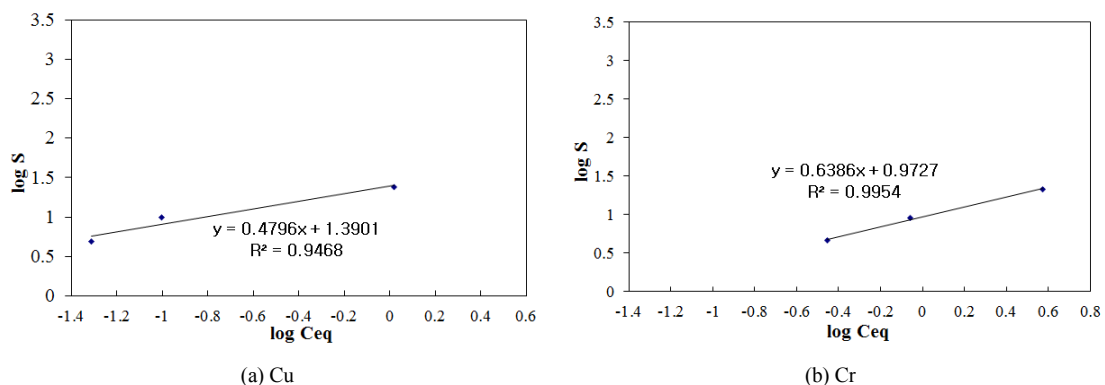
사전 예비실험에 의해 인공폐수의 pH 7을 기준으로 교반시간을 2, 5, 10, 30, 60 및 90 min으로 변화하여 중금속(Cu 및 Cr) 제거효율을 도출하였다.

인공폐수 농도 5 ppm의 중금속(Cu 및 Cr) 용액에 제조한 음식물류 폐기물 활성탄을 각각 1 g/L씩 투입하여 200 rpm으로 교반한 후 Cu 제거효율은 42.6, 57.1, 82.0, 82.3, 82.3 및 82.3%, Cr 제거효율은 44.3, 62.8, 76.1, 76.2, 77.5 및 77.8%로 나타났고, 10 ppm 중금속(Cu 및 Cr)용액의 Cu 제거효율은 62.3, 73.1, 82.7, 82.7, 82.7 및 82.7%, Cr 제거효율은 61.2, 70.8, 76.2, 75.8, 76.3 및 76.7%로 나타났으며, 25 ppm 중금속(Cu 및 Cr)용액의 Cu 제거효율은 78.8, 82.9, 82.9, 82.9, 82.9 및 82.9%, Cr 제거효율은 71.2, 75.0, 75.8, 76.6,

77.5 및 76.6%로 나타났다. 음식물류 폐기물 활성탄의 교반시간 변화에 따른 중금속(Cu 및 Cr)의 제거효율은 초기시간부터 10 min까지 급격하게 감소하였으나 10분부터 평형흡착을 이루었으며, Cr보다는 Cu제거에 효과가 좋은 것으로 나타났다. 교반시간 변화에 따른 인공폐수의 중금속(Cu 및 Cr) 제거효율은 Fig. 5에 나타내었다.

3.4. 음식물류 폐기물 활성탄의 흡착등온식 적용

본 실험에서는 Freundlich 식을 적용하여 Cu 및 Cr 각각의 Parameter값이 1/n과 k 및 R²을 Table 3에 정리하여 나타내었다. 실험결과에 Freundlich 등은 흡착식을 적용한 결과, 결정계수 값과 흡착능, 흡착지수가 높게 나타났으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Freundlich식에서 k값은 흡착능과 관련된 함수로서 단위 흡착제당 흡착용량을 나타내며, 1/n은 입자와 오염물질간의 흡착강도의 함수를 의미한다. 일반적으로 n은 1보다 크다. 1/n은 보통 0.2 ~ 1.0 사이에 있다. 그러나 1/n이 0.1 ~ 0.5 사이에 존재하면 피 흡착제는 흡착이 용이하고 2이상이면 흡착제의 양을 증가시켜도 피흡착제의 농도가 별로 줄어들지 않아 흡착효율이 더 이상 증가하지 않는다고 나타내고 있다. 또한 흡착상수 k 값이 크면 클수록 흡착제의 흡착능이 증가하는 것으로 알려져 있다(Bedient et

**Fig. 6.** Freundlich adsorption isotherms for heavy metals.

al., 1994).

Freundlich식에 의한 결과를 보면 Cu 및 Cr의 $1/n$ 값이 0.48 및 0.64로 나타나 Cu의 경우 0.1 ~ 0.5 사이에 존재하고 Cr의 경우 조금 높게 나타나지만 음식물류 폐기물 활성화탄의 흡착은 용이할 것으로 판단되며, 단위 흡착제당 흡착용량을 나타내주는 K값은 Cu 1.39, Cr 0.97로 나타나 Cu가 높게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 음식물류 폐기물에 대한 사전 예비실험의 탄화물을 이용하여 요오드흡착성능평가를 통한 최적 활성화 조건을 도출한 뒤, 음식물류 폐기물 활성화탄을 제조하여 중금속 흡착특성 등을 연구한 결과는 다음과 같다.

음식물류 폐기물로 제조한 활성화탄은 높은 요오드흡착성능을 나타내어 공극구조 형성과 더불어 세공구조 발달이 일부 진행된 것으로 판단된다. 문헌연구를 통한 음식물류 폐기물의 특성상 유기물 함량이 높고 상대적으로 경도가 약해 세공구조의 파괴 또한 일부 이루어졌을 것으로 판단된다(Ju, 2014; Lee, 2014). 따라서 음식물류 폐기물의 경우 탄화와 활성화 공정을 동시에 진행하는 것이 세공구조의 형성과 발달에 더 높은 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

음식물류 폐기물 활성화탄 중금속분석의 경우 As, Cd, Pb 및 Zn의 항목을 평가하였으며, 분석 항목 중 As, Cd 및 Pb는 원 시료인 음식물류 폐기물 및 활성화탄 모두에서 불검출 되었으며, Zn의 경우 활성화 온도가 증가할수록 중금속 함량이 감소하는 경향으로 나타났다. 이는 음식물류 폐기물의 자체적인 중금속 함량이 낮기 때문에 중금속 함량이 불검출 되거나 낮게 나타난 것으로 판단된다.

요오드흡착성능평가를 통해서 최적의 활성화 운전조건을 도출하여 제조한 음식물류 폐기물 활성화탄으로 중금속(Cu 및 Cr) 흡착 실험결과 초기시간부터 10 min 까지는 제거효율이 급격하게 증가하였으나 10 min 이후부터 평형흡착을 이루었다. 또한 Cr 보다는 Cu제거 효율이 더 높게 나타났다.

음식물류 폐기물 활성화탄 제조는 고농도 유기성 폐기물인 음식물류 폐기물을 재이용할 가능성과 기존 활성화탄

제조 원료를 대신할 수 있는 연구의 기초자료로서 활용 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Jee, S. H., Choi, B. Y., 2013, Biogas production of organic waste by anaerobic bacteria and treatment of digested wastewater, *Journal of Korean Society of Water Quality*, 2013, 518-519
- Kim, G. H., 2014, Recycling of organic wastes as new-renewable energy resource, *Journal of Daegu University*, 21(1)
- Han, S. W., Jo, J. H., Lee, H. S., Kim, Y. J., Kim, C. H., 2014, TA Study on establishing management system for efficient organic waste-to-energy, *Journal of Korea Environment Institute*, 2013, 1201-1397.
- Kim, S. H., Ju, H. J., 2013, Feasibility of co-digestion of sewage sludge, swine waste, and food waste leachate, *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association*, 20(1), 61-70.
- Lee, B. H., Lee, J. S., 2013, Preliminary evaluation of leachate recirculation anaerobic digestion system to treat source separated food waste, *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association*, 21(4), 48-59.
- Yoo, S. S., Kim, Y. D., Lee, J. Y., Cha, Y. S., Kim, E. S., Jeon, J. S., Sun, W. Y., Eom, S. W., Chae, Y. Z., 2012, The characteristic and management of odor emitted from foodwaste treatment facility, *Journal of Korea Environmental Impact Assessment*, 21(3), 353-365.
- Jo, S. J., 2012, A study about three components analysis according to generation and character of food waste, *Journal of Daejeon University*, 160, 85-94.
- Kim, J. O, Cho, K. H., Lee, C. H., 2009, A study on food waste pretreatment for anaerobic digestion, *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association*, 11(3), 60-66.
- Lee, C. Y., Park, I. G., 2010, Effect of heat treatment on biohydrogen production from food waste, *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association*, 18(1), 81-88.
- Ju, M., 2014, A study on carbonization and activation of food wastewater sludge and sewage sludge for recycling, *Donga University*, Busan, Korea.

Lee, J. H., 2014, Carbide characteristics and recyclability assessment of food carbonization wastewater sludge, Donga University, Busan, Korea.

Bedient, P. B., Rifai, H. S., Neece, C. J., 1994, Ground-water contamination transport and remediation, PTR Prentice Hall, 541.