

산소 플라즈마 처리된 활성탄소의 세슘 이온 흡착

하성민* · 곽철환** · 임채훈* · 김석진* · 이영석*,**,†

*충남대학교 응용화학공학과, **충남대학교 탄소융복합기술연구소
(2021년 11월 5일 접수, 2021년 12월 8일 수정, 2021년 12월 24일 채택)

Cesium Ions Adsorption of Activated Carbon Treated by Oxygen Plasma

Seongmin Ha*, Cheol Hwan Kwak**, Chahun Lim*, Seokjin Kim* and Young-Seak Lee*,**,†

*Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

**Institute of Carbon Fusion Technology (InCFT), Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

(Received November 5, 2021; Revised December 8, 2021; Accepted December 24, 2021)

초 록

산소 플라즈마 처리에 따른 활성탄소의 산소 관능기 도입이 세슘 이온 흡착 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 산소 플라즈마 처리 시 주파수, 전력 및 산소 가스 유량은 각각 100 kHz, 80 W 및 60 sccm으로 고정하였으며, 반응시간을 변수로 수행하였다. 본 실험조건에서는 산소 가스와의 반응시간이 10분일 때 C-O-C 및 O=C-O 결합 내 산소 기능기 함량이 증가함에 따라 세슘 이온 흡착량이 증가하였다. 그러나 반응 시간이 15분일 때 산소 관능기 함량이 감소하게 되어 세슘 이온 흡착량이 오히려 감소되었다. 한편, 표면 처리된 활성탄소의 산소 함량과는 달리 그 비표면적 및 기공 특성은 산소 플라즈마 반응 시간에 따라 거의 영향을 받지 않았다. 결과적으로 산소 플라즈마 처리된 활성탄소는 미처리 활성탄소에 비하여 세슘 이온 제거율이 최대 97.3%까지 향상되었다. 이는 산소 플라즈마 처리로 활성탄소 표면에 도입된 C-O-C 및 O=C-O 결합 내 산소 기능기의 함량에 기인한 것으로 판단된다.

Abstract

The effect of introducing oxygen functional groups by oxygen plasma treatment of activated carbon on adsorption properties of cesium ions was investigated. During the oxygen plasma treatment, the frequency, power, and oxygen gas flow rates were fixed at 100 kHz, 80 W, and 60 sccm, respectively, while the reaction time was varied. Under the experimental conditions, the amount of cesium ion adsorption increased as the content of oxygen groups on C-O-C and O=C-O bonds increased when the reaction time with oxygen gas was 10 minutes. However, when the reaction time increased to 15 minutes, the oxygen functional group content decreased resulting in the decrease of the adsorbed cesium ion amount. On the other hand, unlike the oxygen content of the surface-treated activated carbon, the specific surface area and pore properties were hardly affected by the oxygen plasma reaction time. As a result, the oxygen plasma-treated activated carbon improved the cesium ion removal rate by up to 97.3% compared to that of the untreated activated carbon. This is considered to be due to the content of oxygen groups on C-O-C and O=C-O bonds introduced on the surface of the activated carbon through oxygen plasma treatment.

Keywords: Activated carbon (AC), Oxygen plasma, Oxygen functional group, Cesium ion removal

1. 서 론

최근 지진과 쓰나미로 인하여 원자력 발전소에서 사고가 발생하면서 많은 양의 방사능이 누출됨에 따라 세계 많은 국가에서 방사능 누출에 따른 환경 문제가 이슈가 되고 있다[1]. 원자력 발전소에서 사용되는 주요 핵연료인 우라늄 및 플루토늄이 중성자를 흡수하여 분열되

면 분자량이 작은 여러 방사성원자들이 생성된다. 특히, 원자력 발전소 사고에 의하여 발생된 방사성원소는 핵분열 생성물 중의 하나인 Cs-137과 관련된 것으로, 이는 장시간 주변 환경에 큰 위험을 끼치며 긴 반감기 및 감마선 방사체로 주목받고 있어, 고준위 방사성폐기물에서 열과 방사선의 주요 원인인 것으로 알려져 있다[2,3].

세슘은 높은 수용성으로 인해 인체에 쉽게 침투하여 암과 같은 위험을 유발하며, 나트륨 및 칼륨과 화학적 특성이 유사하기 때문에 토양 및 수질 생물에 쉽게 통합될 수 있는 잠재적인 독성 오염물질이다. 사용후 핵연료의 냉각을 위하여 해수를 사용하는 후쿠시마 원전의 경우, 원전사고 시 Cs-137 농도가 높은 대량의 해수 폐액이 발생하여 이로부터 주변 지하수, 토양 등 생태계가 오염되고 있다[4-9,10]. 이렇게 오염된 수계를 정화하는 연구에 대한 관심도가 점점 높아짐에 따라

† Corresponding Author: Chungnam National University
Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Daejeon 34134, Republic of Korea
Tel: +82-42-821-7007 e-mail: youngslee@cnu.ac.kr

핵분열 생성물을 제거하기 위하여 침전, 막분리, 용매추출, 이온교환, 물리/화학적 분리, 및 흡착 등의 다양한 분야에서 세슘 제거 방법이 연구되고 있다[11-19]. 또한 다양한 저가 흡착제를 이용하여 미량의 Cs를 효율적으로 제거하기 위한 연구가 진행되고 있다[20-22]. 이러한 흡착제 중 비표면적이 크고 다공성이 발달된 활성탄소(activated carbon, AC)는 저렴하고 효과적인 흡착제로서, 비교적 간단한 방법으로 방사성 폐수 용액에서 방사성 핵종 제거 연구에 사용되고 있다[23-24].

이러한 활성탄소는 기공 구조에 의한 물리적 흡착뿐만 아니라, 화학적 흡착 능력을 부여하여 피흡착질의 제거 성능을 높이고자 다양한 표면처리 기술이 연구되어 오고 있다[25-33]. 이러한 방법은 대표적으로 습식법과 건식법으로 나누어진다. 습식법은 간단한 화학적 처리 방법으로부터 액상 오존처리[25,26] 및 양극산화[27,28] 등의 방법이 있으며, 건식법으로는 전기도금[29,30], 불소처리[31,32], 플라즈마 처리[31,33] 등의 방법이 있다. 습식법은 처리 후 세척 공정에서 2차 오염이 발생하여 연속공정에 어려움이 있어 최근에는 건식법이 주로 연구되고 있는 실정이다. 건식법 중 플라즈마 처리는 상온, 상압에서 재료의 표면에 화학적 활성 부위를 생성시켜 표면에너지를 증가시키는 방법으로, 공정이 간단하고 연속 공정이 가능하여 비교적 경제적인 방법으로 알려져 있다. 또한, 이 플라즈마 처리는 주입 가스에 따라 다양한 관능기를 도입할 수 있다는 장점도 가지고 있다[34].

따라서, 본 연구에서는 활성탄소의 세슘 이온 흡착성능을 향상시키기 위하여 활성탄소에 산소 플라즈마 처리를 통하여 산소 관능기를 도입하고자 하였다. 이에 산소 플라즈마 처리에 따른 그 표면 및 기공 특성을 고찰하였으며, 이러한 변화가 활성탄소의 세슘 이온 흡착 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료

세슘 이온 흡착을 위하여 폐놀계 다공성 활성탄소(MSP-20X, Kansai Coke and Chemicals Co., Ltd., Japan)를 사용하였다. 다공성 활성탄소의 산소 플라즈마 처리는 고순도 산소 가스(99.999%, Deokyang Co., Korea)를 이용하였으며, 잔여 배기를 위하여 질소 가스(99.999%, Deokyang Co., Korea)를 이용하였다. 세슘 이온 흡착 실험은 Cesium chloride(Sigma-Aldrich, purity 99%, USA)를 사용하였다.

2.2. 활성탄소의 산소 플라즈마 처리

활성탄소 표면에 산소 관능기 도입을 위한 플라즈마 처리는 활성탄

소를 진공 플라즈마 장비(CUTE-MPR/ Dual Mode, Femto Science Inc., Korea, 주파수 100 kHz, 전력 80 W)에 넣고, 감압 펌프를 이용하여 반응기 내부를 진공 상태로 감압 후, 고순도 산소 가스를 60 sccm을 주입하였다. 산소 플라즈마 처리 시간을 각각 5, 10, 및 15 분 동안 반응시킨 후, 반응기 내 미반응 된 산소 플라즈마 입자들을 제거하기 위하여 반응기 내부를 질소 가스를 이용하여 배기하였다. 이렇게 제조된 샘플명은 플라즈마 처리가 되지 않은 활성탄소를 AC_{Raw}, 산소 플라즈마 처리된 활성탄소는 반응 시간에 따라 AC_{OP-5}, AC_{OP-10}, AC_{OP-15}라고 각각 명명하였다.

2.3. 흡착실험

흡착실험은 염화세슘(cesium chloride)으로 1 ppm의 모의 용액을 제조하여 상온에서 수행하였다. 세슘 용액 10 mL에 흡착제를 각각 0.1 g씩 투입하였으며, 원활한 반응을 위하여 진탕기(SK-300, JEIO Co., Ltd, Korea)를 170 rpm의 속도로 교반하여 흡착실험을 수행하였다.

2.4. 분석

미처리 및 플라즈마 처리된 활성탄소의 표면 화학 특성 변화를 조사하기 위하여 전계방사 전자현미경 (FE-SEM, Hitachi, S-5500, Japan)과 X선 광전자 분광기(XPS, Thermo Electron Corp., MultiLab 2000, England)를 이용하였다. 기공 특성 변화를 조사하기 위하여 물리흡착 분석기(Micromeritics Ins. Corp., 3-Flex, USA)를 이용하여 77 K에서 질소기체의 흡·탈착을 통하여 분석하였다. 이 때 비표면적, 미세기공부피 및 기공분포도는 각각 Brunauer-Emmett-Teller (BET), t-plot, Density-functional theory (DFT) 방법을 이용하여 계산하였다. 또한, 산소 플라즈마 처리된 활성탄소의 세슘 이온의 흡착성능을 평가하기 위하여 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, ELAN DRC II, Perkin-Elmer Co., USA)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 플라즈마 처리된 활성탄소의 표면 특성 변화

미처리 및 플라즈마 처리된 활성탄소의 표면 형상 및 표면 화학 조성 변화를 알아보기 위하여 FE-SEM/EDS 분석을 수행하였으며 그 결과를 Figure 1에 나타내었다. Figure 1에서 알 수 있듯이, 각 샘플에 대한 SEM/EDS를 비교하였을 때, 미처리 및 처리된 활성탄소의 입자 크기 및 그 형상 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다. 또한 EDS결과, 활성탄소 표면에 산소 원소 함량이 국부적으로 증가하는 것을 확인할

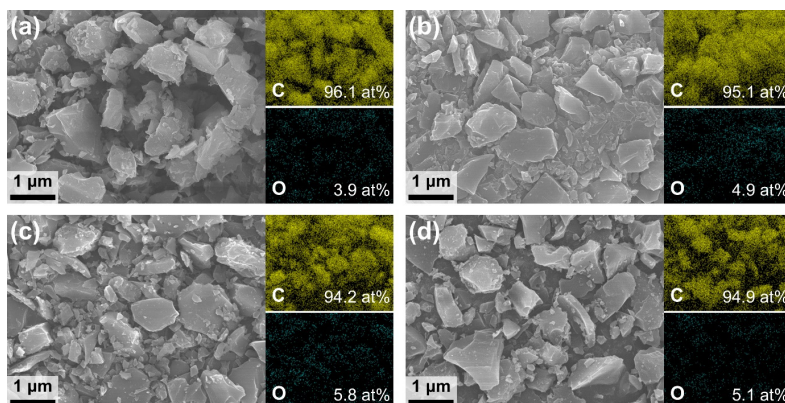


Figure 1. SEM images and EDS analysis of oxygen plasma-treated and untreated samples (a) AC_{Raw}, (b) AC_{OP-5}, (c) AC_{OP-10}, (d) AC_{OP-15}.

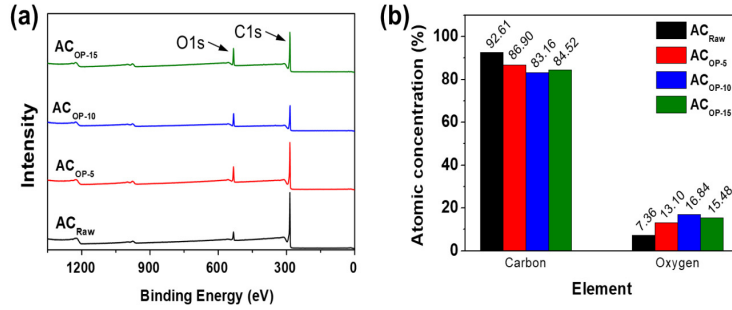


Figure 2. (a) XPS wide scan spectra and (b) atomic ratio of carbon and oxygen on the surface of the untreated and oxygen plasma-treated ACs.

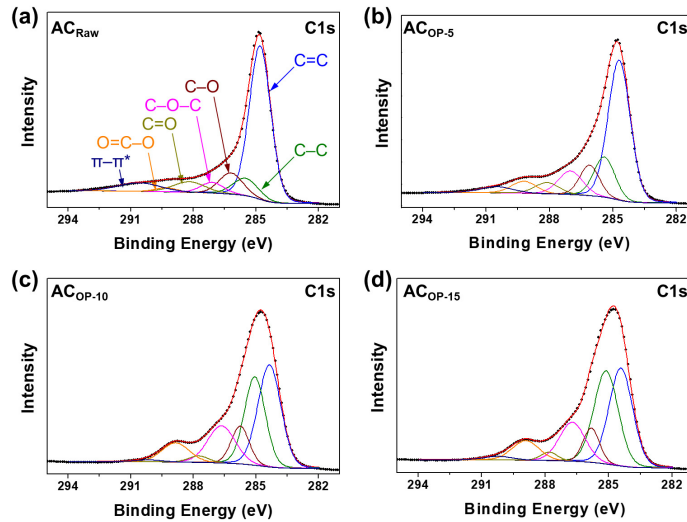


Figure 3. XPS C1s spectra of (a) AC_R, (b) AC_{OP-5}, (c) AC_{OP-10}, and (d) AC_{OP-15}.

수 있는데, 이는 산소 플라즈마 표면 처리 시 안정적으로 산소 관능기가 표면에 도입된 현상으로 사료된다.

산소 관능기가 도입된 활성탄소의 표면화학적 특성 변화를 조사하기 위하여 XPS 분석을 수행하였으며, 이를 Figure 2에 나타내었다. Figure 2(a)에서 알 수 있듯이, 미처리 및 산소 플라즈마 처리된 활성탄소에서 결합에너지 284.5 eV 및 532.0 eV 부근의 탄소 및 산소 피크가 각각 나타남을 확인하였다[35]. 또한, 활성탄소의 표면화학 조성 결과를 나타낸 Figure 2(b)에서 확인할 수 있듯이, 산소 플라즈마 처리된 활성탄소는 주입되는 산소 가스와 반응하는 시간이 증가함에 따라 반응시간 10분까지 표면에 도입되는 산소 함량이 증가하였다가 15분에는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 본 실험 조건에서의 최대 반응시간인 15분(AC_{OP-15})에서 플라즈마 반응기 내부에 생성되는 O 라디칼과 산소 관능기를 가진 결합들 간 반응에 의하여 CO₂로 분해되어 산소 함량이 줄어든 것으로 사료된다. 또한, 미처리 활성탄소(AC_{Raw})의 경우 표면 산소함량은 7.4 at%, 산소 플라즈마 처리에 의한 AC_{OP-5}, AC_{OP-10}, 및 AC_{OP-15}는 각각 13.1 at%, 16.8 at%, 및 15.5 at% 이었다. 산소 플라즈마 처리된 AC_{OP-10}의 표면 산소함량은 미처리 활성탄소인 AC_{Raw}의 비하여 약 2.3배 증가되었음을 확인하였다. 이러한 현상은 산소 플라즈마 처리 시 산소 원자가 표면에 존재하는 탄소와 반응하여 흡착제 표면에 존재하는 탄소 단일 결합 및 이중 결합을 해리하여 다양한 산소 관능기가 표면에 생성되어 그 산소 함량이 증가된 것으로 판단된다[24,34].

Table 1. Peak Parameters for C1s Component of the Untreated and Oxygen Plasma-treated ACs

Component	Peak position (eV)	Concentration (%)			
		AC _{Raw}	AC _{OP-5}	AC _{OP-10}	AC _{OP-15}
C-C (sp ²)	284.6	61.9	52.4	35.4	33.4
C-C (sp ³)	285.3	8.5	14.3	27.9	32.6
C-O	286.0	9.6	10.1	10.3	8.2
C-O-C	286.9	4.8	9.8	15.6	14.6
C=O	288.0	6.6	4.7	2	2.1
O=C-O	289.1	1.7	5.1	8.1	7.7
$\pi-\pi^*$	290.4	6.9	3.5	0.8	1.5

산소 플라즈마 처리에 따른 활성탄소의 표면화학 결합구조의 변화를 상세하게 알아보기 위하여, XPS C1s의 코어레벨 주사 스펙트럼 피크를 Figure 3에 도시하였고, 그 함량을 Table 1에 나타내었다. 미처리 및 산소 플라즈마 처리된 활성탄소의 C1s 피크의 표면 결합형태는 284.6, 285.3, 286.0, 286.9, 288.0, 289.1, 및 290.4 eV 부근에서 확인되었다. 이 피크들은 각각 C-C(sp²), C-C(sp³), C-O, C-O-C, C=O, O=C-O 및 $\pi-\pi^*$ 결합을 나타낸다[37-39]. 또한, Table 1에 나타낸 것처럼 미처리 활성탄소(AC_{Raw})에 대비하여 산소 플라즈마 처리된 샘플들은 탄소 이중결합이 줄고 탄소 단일 결합이 늘어나는 것을 확인

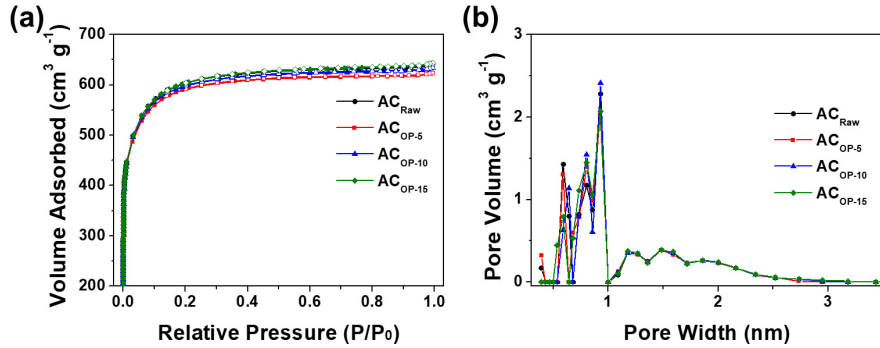


Figure 4. (a) Nitrogen isotherms and (b) pore-size distribution of the untreated and oxygen plasma-treated ACs.

하였다. 이는 표면처리 시 발생하는 산소 라디칼과 탄소재료 사이에 표면 화학반응이 일어나, 활성탄소 내 존재하는 탄소 간 결합이 깨져 탄소-탄소 이중결합의 함량이 감소된 것으로 사료된다[25]. 또한, 산소 관능기는 플라즈마 반응 시간 10분 처리(AC_{OP-10}) 시 가장 많은 함량이 활성탄소 표면에 도입되었다. 본 실험에서는 플라즈마 반응 시에 산소 가스와 반응 시간을 조절하여 활성탄소 표면에 도입되는 관능기의 종류 및 함량을 제어할 수 있었다.

3.2. 산소 플라즈마 처리된 활성탄소의 기공특성 변화

산소 플라즈마 처리된 활성탄소의 기공 특성 변화를 77 K 질소 흡착분석법으로 조사하였다. Figure 4에 본 실험에서 사용한 미처리 및 산소 플라즈마 처리 활성탄소에 대한 흡착등온선과 기공분포도를 나타내었다. Figure 4에서 알 수 있듯이, 흡착등온선은 type I의 형태를 보여주고 있으며, 이력현상이 없는 전형적인 다공성 흡착제의 흡착등온선을 나타내고 있다. 본 실험조건에서는 산소 플라즈마 처리가 활성탄소의 비표면적 및 기공특성에 그다지 크게 영향을 끼치지 않음을 확인하였다[33].

Table 2에 나타난 것처럼, 산소 플라즈마 처리된 모든 샘플의 비표면적, Micro pore volume, Total pore volume 및 pore diameter가 미처리된 활성탄소와 큰 변화 없이 유사한 것으로 확인하였다. 따라서, 본 실험 조건에서 수행한 산소 플라즈마 처리는 활성탄소의 기공특성에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다.

3.3. 산소 플라즈마 표면처리에 따른 활성탄소의 세슘 이온 흡착 특성

미처리 및 산소 플라즈마 처리된 활성탄소의 세슘 이온 흡착 특성에 대한 결과를 Figure 5에 나타내었다. 미처리 활성탄소(AC_{Raw})의 경우, 교반 30분이 지났을 때 61.4%의 제거율을 보였다. 또한, AC_{OP-05}는 87.9%, AC_{OP-10}는 97.9%, AC_{OP-15}는 92.7%의 제거율을 보였다. 표면에 산소 함량이 16.8 at%로 가장 높은 AC_{OP-10}과 AC_{Raw}의 세슘 이온 제거율을 비교하였을 때, 35.9% 증가가 되었음을 확인하였다. 본 실험에서 AC_{OP-10}의 경우 가장 높은 C-O-C, O=C-O 결합 함량을 나타내었으며, 또한 세슘 이온 제거 효율 또한 가장 높게 나타났다. 이는 J. Kiener, M. Uchimiya 등이 활성탄소 및 탄소재료 표면에 산소 관능기를 많이 함유할수록 금속 양이온을 결합시키는 데 효과적이라고 언급한 것과 일치하는 결과이다[39,40]. 상기 실험 결과를 바탕으로 Figure 6에 본 실험에서 세슘 이온과 산소 관능기 간 정전기적 인력 상호작용에 의한 흡착한 메커니즘을 나타내었다.

한편, AC_{OP-15}는 AC_{OP-10}와 비교하여 보면 비표면적 및 기공 크기는 유사하지만, 표면에 C-O-C, O=C-O 결합 함량이 적게 도입되어

Table 2. Specific Surface Area and Pore Volume of Ac according to Oxygen Plasma Treatment

Sample	¹⁾ S _B (m ² /g)	²⁾ V _m (cm ³ /g)	³⁾ V _t (cm ³ /g)	⁴⁾ D _A (nm)
AC _{Raw}	2,283	0.6	1.0	1.7
AC _{OP-5}	2,223	0.6	1.0	1.7
AC _{OP-10}	2,247	0.6	1.0	1.8
AC _{OP-15}	2,265	0.6	1.0	1.8

¹⁾S_B: Specific surface area, ²⁾V_m: Micro pore volume, ³⁾V_t: Total pore volume, ⁴⁾D_A: Pore Diameter

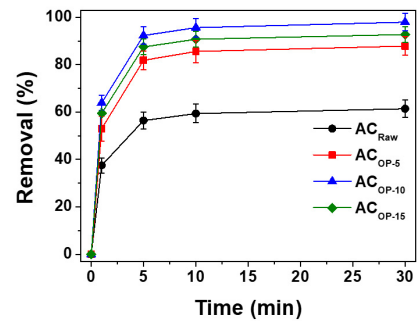


Figure 5. Removal for cesium ion of AC according to oxygen plasma treatment.

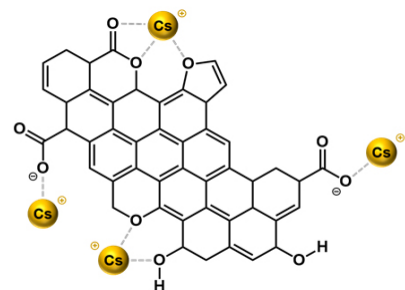


Figure 6. Electrostatic attraction mechanism between cesium ion atom and oxygen atom (a) Epoxy group (b) carboxyl group.

AC_{OP-10}보다 세슘 이온 제거 효율이 감소하는 것으로 여겨진다. 따라서, 산소 플라즈마 처리된 흡착제의 활성탄소의 세슘 이온 흡착은 표면에 도입된 산소 관능기의 함량이 중요한 요소로 작용하고, 이 중에

서도 특히 C-O-C, O=C-O 결합이 세슘 이온 흡착 성능에 크게 영향을 미치는 것으로 사료된다.

4. 결 론

활성탄소 표면에 산소 관능기를 도입하여 세슘 이온 흡착능력을 향상시키고자 산소 플라즈마 처리를 실시하고, 산소 플라즈마 처리 시 주입되는 산소 가스와의 반응 시간에 따른 활성탄소의 세슘 이온 흡착 성능을 평가하였다. 본 실험조건에서는 산소 가스와의 반응시간이 10분일 때 C-O-C, O=C-O 결합 함량이 증가함에 따라 세슘 이온과 산소 관능기의 정전기적 상호작용이 증가하여 흡착이 용이해진 것으로 판단된다. 그러나 반응 시간이 15분일 때 산소 관능기 함량이 오히려 감소하게 되어 세슘 이온과의 상호작용이 적어 흡착량이 감소하였다. 또한 산소 플라즈마 처리 후에도 활성탄소의 비표면적 및 기공특성의 변화가 거의 없었다. 산소 플라즈마 처리된 활성탄소는 미처리 활성탄소에 비하여 세슘 이온 제거율이 최대 97.3%까지 향상되었다. 산소 플라즈마 처리된 흡착제의 활성탄소의 세슘 이온 흡착은 표면에 도입된 산소 관능기의 함량이 중요한 요소이고, 이중에서도 특히 C-O-C, O=C-O 결합이 세슘 이온 흡착 성능에 크게 영향을 미치는 것으로 사료된다.

감 사

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('20012763').

References

1. J. G. Kim, M. N. Kim, R. Malsawmdawngzela, C. S. An, and S. M. Lee, Adsorption Removal of Cesium from Aqueous Solution using Activated Bentonite, *KSWST J. Water Treat.*, **27**, 77-87 (2019).
2. G. Y. Kim, S.-C. Jang, Y. H. Song, C.-S. Lee, Y. S. Huh, and C. Roh, Screening and Identification of a Cesium-tolerant Strain of Bacteria for Cesium Biosorption, *Korean J. Environ. Biol.*, **31**, 304-313 (2016).
3. J. P. Ahn and M. H. Lee, Sorption Efficiency of the Bamboo Charcoal to Remove the Cesium in the Contaminated Water System, *Econ. Environ. Geol.*, **51**, 87-97 (2018).
4. S. R. H. Vanderheyden, R. Van Ammel, K. Sobiech-Matura, K. Vanreppelen, S. Schreurs, W. Schroyers, J. Yperman, and R. Carleer, Adsorption of cesium on different types of activated carbon, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **310**, 301-310 (2016).
5. E. Dialynas and E. Diamadopoulos, Integration of a membrane bioreactor coupled with reverse osmosis for advanced treatment of municipal wastewater, *Desalination*, **238**, 302-311 (2009)
6. H. Bessbousse, T. Rhlalou, JF. Verchere, and L. Lebrun, Removal of heavy metal ions from aqueous solutions by filtration with a novel complexing membrane containing poly (ethyleneimine) in a poly (vinyl alcohol) matrix, *J. Membr. Sci.*, **307**, 249-259 (2008).
7. B. Pakzadeh and J. R. Batista, Chromium removal from ion-exchange waste brines with calcium polysulfide, *Water Res.*, **45**, 3055-3064 (2011).
8. M. Kobya, Removal of Cr (VI) from aqueous solutions by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: kinetic and equilibrium studies, *Bioresour. Technol.*, **91**, 317-321 (2004).
9. Lalmunsiam, J. G. Kim, S. S. Choi, and S. M. Lee, Recent Advances in Adsorption Removal of Cesium from Aquatic Environment, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 127-137 (2018).
10. H. Nishita, D. Dixon, and K. H. Larson, Accumulation of Cs and K and growth of bean plants in nutrient solution and soil., *Plant Soil.*, **17**, 221-242 (1962).
11. A. Iwanade, N. Kasai, H. Hoshina, Y. Ueki, S. Saiki, and N. Seko, Hybrid grafted ion exchanger for decontamination of radioactive cesium in Fukushima Prefecture and other contaminated areas, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **293**, 703-709 (2012).
12. H. Deng, Y. Li, Y. Huang, X. Ma, L. Wu, and T. Cheng, An efficient composite ion exchanger of silica matrix impregnated with ammonium molybdophosphate for cesium uptake from aqueous solution, *Chem. Eng. J.*, **286**, 25-35 (2016).
13. H. A. Alamudy and K. Cho, Selective adsorption of cesium from an aqueous solution by a montmorillonite eprussian blue hybrid, *Chem. Eng. J.*, **349**, 595-602 (2018).
14. S. Ding, L. Zhang, Y. Li, and L. Hou, Fabrication of a novel polyvinylidene fluoride membrane via binding SiO₂ nanoparticles and a copper ferrocyanide layer onto a membrane surface for selective removal of cesium, *J. Hazard. Mater.*, **368**, 292-299 (2019).
15. Q. Tao, X. Zhang, K. Prabakaran, and Y. Dai, Separation of cesium from wastewater with copper hexacyanoferrate film in an electrochemical system driven by microbial fuel cells, *Bioresour. Technol.*, **278**, 456-459 (2019).
16. J. Wang and S. Zhuang, Cesium separation from radioactive waste by extraction and adsorption based on crown ethers and calixarenes, *Nucl. Eng. Technol.*, **52**, 328-336 (2020).
17. N. Talreja, D. Kumar, and N. Verma, Removal of hexavalent chromium from water using Fe-grown carbon nanofibers containing porous carbon microbeads, *J. Water Process Eng.*, **3**, 34-45 (2014).
18. H. Yang, H. Li, J. Zhai, L. Sun, Y. Zhao, and H. Yu, Magnetic prussian blue/graphene oxide nanocomposites caged in calcium alginate microbeads for elimination of cesium ions from water and soil, *Chem. Eng. J.*, **246**, 10-19 (2014).
19. A. Nilchi, H. Atashi, A. H. Javid, and R. Saberi, Preparations of PAN-based adsorbents for separation of cesium and cobalt from radioactive wastes, *Appl. Radiat. Isot.*, **65**, 482-487 (2007).
20. D. Mohan and C. U. Pittman Jr, Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water, *J. Hazard. Mater.*, **137**, 762-811 (2006).
21. M. Montaña, A. Camacho, I. Serrano, R. Devesa, L. Matia and I. Vallés, Removal of radionuclides in drinking water by membrane treatment using ultrafiltration, reverse osmosis and electro dialysis reversal, *J. Environ. Radioact.*, **125**, 86-92 (2013).
22. H. Marsh and F. Rodriguez-Reinonso, *Activated carbon*, 89-100, Elsevier Science & Technology Books, Amsterdam, NL (2006).
23. S. X. Liu, X. Chen, X. Y. Chen, Z. F. Liu, and H. L. Wan, Activated carbon with excellent chromium (VI) adsorption performance prepared by acid-base surface modification, *J. Hazard. Mater.*, **141**, 315-319 (2007).
24. E. J. Song, M. J. Kim, J. I. Han, Y. J. Choi, and Y.-S. Lee, Gas Adsorption Characteristics of by Interaction between oxygen functional groups introduced on activated carbon fibers and acetic acid molecules, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 160-166 (2019).
25. B. H. Yang, C. G. Kim, J. D. Kim, and S. K. Ryu, The Study of

- Surface-Chemical Characteristics of Ozone treated Activated Carbon fibers, *Theories and Application of Chem. Eng.*, **4**, 2677-2680 (1998).
26. J. H. Kim, S. H. Kim, G. B. Lee, H. Kim, and B. U. Hong, Characterization of Gas Production and Development of specific surface areas during the Chemical Activation on Activated Carbons Treated with Ozone, *Energy Environ.*, **14**, 113-124 (2019).
27. S. J. Park, J. S. Shin, and J. Kawasaki, Ammonia Removal of Activated Carbons Treated by Anodic Oxidation, *Appl. Chem. Eng.*, **14**, 418-422 (2003).
28. S. J. Park and K. D. Kim, Influence of anodic surface treatment of activated carbon on adsorption and ion exchange properties, *J. Colloid Interface Sci.*, **218**, 331-334 (1999).
29. S. J. Park and J. S. Shin, Influence of copper content on NO removal of the activated carbon fibers produced by electroplating, *J. Colloid Interface Sci.*, **264**, 39-42 (2003).
30. C. L. Mangun, J. A. De Barr, and J. Economy, Adsorption of sulfur dioxide on ammonia-treated activated carbon fibers, *Carbon*, **39**, 1689-1696 (2001).
31. R. E. Lee, C. H. Lim, M. J. Kim, and Y.-S. Lee, Acetic Acid Gas Adsorption Characteristics of Activated Carbon Fiber by Plasma and Direct Gas Fluorination., *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 55-60 (2021).
32. J. W. Lim, E. G. Jeong, M. J. Jung, S. L. Lee, and Y.-S. Lee, Preparation and Electrochemical Characterization of Activated Carbon Electrode by Amino-fluorination, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 405-410 (2011).
33. K. Okajima, K. Ohta, and M. Sudoh, Capacitance behavior of activated carbon fibers with oxygen-plasma treatment, *Electrochim. Acta*, **50**, 2227-2231 (2005).
34. B. C. Bai, H. U. Lee, C. W. Lee, Y.-S. Lee, and J. S. Im, N₂ plasma treatment on activated carbon fibers for toxic gas removal: Mechanism study by electrochemical investigation, *Chem. Eng. J.*, **306**, 260-268 (2016).
35. M. J. Jung, Y. Ko, K. H. Kim, and Y.-S. Lee, Oxyfluorination of pitch-based activated carbon fibers for high power electric double layer capacitor, *Appl. Chem. Eng.*, **28**, 638-644 (2017).
36. M. J. Jung, M. S. Park, S. Lee, and Y.-S. Lee, Effect of E-beam radiation with acid drenching on surface properties of pitch-based carbon fibers, *Appl. Chem. Eng.*, **27**, 319-324 (2016).
37. S. H. Park and S. D. Kim, Oxygen plasma surface modification of polymer powder in a fluidized bed reactor-functionalization of HDPE powder surface, *Korean J. Chem. Eng.*, **35**, 243-248 (1997).
38. A. Morais, J. P. C. Alves, F. A. S. Lima, M. Lira-Cantu, and A. F. Nogueira., Enhanced photovoltaic performance of inverted hybrid bulk heterojunction solar cells using TiO₂/ reduced graphene oxide films as electron transport layers, *J. Photonics Energy*, **5**, 057408 (2015).
39. M. Uchimiya, S. Chang, and T. Klasson, Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional groups, *J. Hazard. Mater.*, **190**, 432-441 (2011).
40. J. Kiener, L. Limousy, M. Jeguirim, J. M. Le Meins, S. Hajjar-Garreau, G. Bigoin, and C. M. Ghimbeu, Activated Carbon/Transition Metal (Ni, In, Cu) Hexacyanoferrate Nanocomposites for Cesium Adsorption, *Materials*, **12**, 1253 (2019).

Authors

Seongmin Ha; M.Sc., PhD candidate, Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; haseongmin93@cnu.ac.kr
Cheol Hwan Kwak; Ph.D., Postdoc, Institute of Carbon Fusion Technology (InCFT), Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; kwakch@cnu.ac.kr
Chaehun Lim; B.Sc., Master Course, Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; 201502629@o.cnu.ac.kr
Seokjin Kim; B.Sc., Master Course, Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; ksj12096@o.cnu.ac.kr
Young-Seak Lee; Ph.D., Professor, Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; youngslee@cnu.ac.kr