

우슬 줄기 부산물을 이용한 아연과 철 이온의 제거효율 향상

최석순^{*,**,†} · 최태령^{**} · 하정협^{***}

*세명대학교 바이오환경공학과, **세명대학교 환경안전시스템공학과,
***평택대학교 환경융합시스템학과
(2021년 12월 30일 접수, 2022년 1월 14일 수정, 2022년 1월 17일 채택)

Enhanced Removal Efficiency of Zinc and Iron Ions Using By-Product of *Achyranthes Japonica* Stem

Suk Soon Choi^{*,**,†}, Tay Ryeong Choi^{**} and Jeong Hyub Ha^{***}

^{*}Department of Biological and Environmental Engineering, Semyung University, Jecheon 27136, Korea

^{**}Department of Environmental Safety System Engineering, Semyung University, Jecheon 27136, Korea

^{***}Department of Integrated Environmental Systems, Pyeongtaek University, Pyeongtaek 17869, Korea

(Received December 30, 2021; Revised January 14, 2022; Accepted January 17, 2022)

초 록

본 연구에서는 한약재 부산물로서 우슬 줄기를 사용하여 바이오차를 제조하였다. 제조된 바이오차를 수처리 공정에 적용하기 위하여, 수중에 용해된 아연과 철 이온의 흡착 특성을 고찰하였다. 70과 100 mg/L 아연 이온을 제거하고자 2 h 실험이 이루어졌을 때, 각각 32.3과 31.0 mg/g 흡착량을 구할 수 있었다. 위의 실험 결과, 아연 이온의 제거공정에서 우슬 줄기 바이오차는 활성탄소 보다 3배 이상의 흡착량을 나타내었다. 또한, 70과 100 mg/L 철 이온을 처리하고자 2 h 실험이 수행되었을 때, 각각 50.1과 54.3 mg/g의 높은 흡착량을 얻었다. 그리고, 아연과 철 이온의 제거효율을 향상시키고자, 우슬 줄기 바이오차에 수증기 활성화 공정이 이루어졌다. 그 결과, 70과 100 mg/L 아연 이온의 제거효율이 각각 80과 60%로 증가되었다. 또한, 70과 100 mg/L 철 이온의 제거효율은 각각 100과 82%로 향상되었다. 그리고 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차는 미처리된 우슬 줄기 바이오차와 비교하였을 때, 비표면적이 37.3배 증가되었으며 총 기공부피와 대세공 기공부피가 각각 28.4, 136배 향상되었다. 따라서 이러한 실험 결과들은 수중에 함유된 아연과 철 이온을 경제적이고 실용적으로 흡착 처리하는 기술에 사용될 수 있을 것이다.

Abstract

In the present work, biochar was prepared using *Achyranthes japonica* stem as a by-product of herbal medicine. In order to apply the prepared biochar to water treatment process, the adsorption characteristics of zinc and iron ions dissolved in water were investigated. When the experiments were performed for 2 h to remove 70 and 100 mg/L of zinc ions, the adsorption amounts of 32.3 and 31.0 mg/g were obtained, respectively. It was also found that the adsorption amount of *Achyranthes japonica* stem biochar for the removal process of zinc ion was three times higher than that of the activated carbon. In addition, when the experiments were performed for 2 h to treat 70 and 100 mg/L of iron ions, high adsorption amounts of 50.1 and 54.3 mg/g were achieved, respectively. In order to further enhance the removal efficiency of zinc and iron ions, a steam activation process was performed on the biochar of *Achyranthes japonica* stem. As a result, the removal efficiencies of 70 and 100 mg/L of zinc ions increased to 80 and 60%, respectively. Also, the removal efficiencies of 70 and 100 mg/L of iron ions were improved to 100 and 82%, respectively. In addition, when the biochar of *Achyranthes japonica* stem with a steam activation was compared with the untreated biochar of *Achyranthes japonica* stem, the specific surface area increased 37.3 times, and the total and macroporous pore volumes were improved by 28.4 and 136 times, respectively. Therefore, the results can be used for economically and practically adsorbing zinc and iron ions contained in water.

Keywords: *Achyranthes japonica* Stem, Removal of Zinc and Iron, Biosorption

† Corresponding Author: Semyung University,
Department of Biological and Environmental Engineering, Jecheon 27136, Korea
Tel: +82-43-649-1337 e-mail: sschoi@semyung.ac.kr

1. 서 론

수중에서 허용치 이상 중금속 이온의 존재는 환경과 공중 보건에 심각한 위협을 준다고 알려졌으며[1], 이러한 중금속은 생물학적으로 분해가 되지 않고, 먹이 사슬에 의하여 축적되기 때문에 인간 건강이나 생태계의 위험요인으로 밝혀졌다[2]. 또한, 체내에 들어온 중금속은 쉽게 배설되지 않으며, 생물학적으로 매우 긴 반감기 때문에 중금속 축적량은 증가하게 된다[3]. 특히, 중금속 중에서 아연은 광산, 금속 코팅, 전지 생산, 도료, 나무, 섬유, 약물 등의 다양한 산업 활동에서 배출된다[4,5]. 또한, 음용수에서 과도한 아연 섭취는 구토, 경련, 피부염증, 위장장애를 일으킨다고 알려졌다[6]. 그리고 아연은 미국 Environmental Protection Agency (EPA)에서 높은 등급의 오염물질로 지정하였으며, 그 결과 지난 수십 년 동안 연구자들은 아연에 오염된 물 처리에 많은 노력과 대규모 처리의 방법들이 개발되었다[7,8]. 그리고, 지표수에서 철의 주요 발생원은 철강 산업, 광물, 금속 부식으로부터 오염된다고 밝혀졌으며[9], 암석과 광물의 침출수로 인하여 지하수에서도 철이 발생된다고 보고되었다[10]. 특히, 철이 인체에 과도하게 유입되어 치료하지 않을 경우 혈소증을 일으키며, 그 결과 인체의 다른 기관들을 손상시킨다고 알려졌다[11-13]. 또한, 특정 조직과 세포에서의 과도한 양의 철 이온은 감염, 중앙, 심근병증, 관절병증과 다양한 내분비 및 신경퇴행성 장애를 촉진시킨다고 보고되었다[14,15]. 그리고, 물에서 특정한 농도 이상의 철 이온은 식품과 음료의 변색, 금속성 맛, 냄새, 탁도, 세탁물 착색 등과 같은 심미적 고려사항에 의하여 물을 사용할 수 없게 된다[16,17].

수중에 함유된 아연과 철과 같은 중금속을 처리하는 방법들에는 화학적인 침전, 역삼투압, 이온교환, 전기화학적 처리, 흡착 등이 알려졌으나[6,18,19], 이러한 방법들은 처리 공정에서 복잡한 과정 및 높은 에너지 소비와 고가의 설치비와 운전비가 요구된다고 보고되었다[19,20]. 따라서 이러한 문제점들을 극복하기 위한 대안의 중금속 처리 기술들이 필요하게 되었다.

최근 수용액에서 오염물질을 제거하고자, 바이오차 적용에 대한 많은 관심이 이루어지고 있다. 바이오차는 원료의 폭넓은 이용성과 저렴한 비용과 물리적/화학적 표면 특성을 고려할 때 물에 함유된 오염물질 제거에 큰 잠재력을 나타낸다고 보고되었다[21]. 이러한 바이오차 생산의 원료들은 농업에서 바이오매스와 고품폐기물로부터 얻을 수 있기에 풍부하고 저비용의 장점들을 가지고 있다고 알려졌다[22-25]. 최근까지 바이오차를 활용한 연구들은 주로 옥수수 짚, 쌀 껍질 등의 농업부산물을 이용하여 구리, 알루미늄, 납 등의 흡착에 관한 연구가 발표되었지만[26,27], 한약재 부산물인 우슬 줄기를 이용하여 바이오차를 제조하고, 이를 사용하여 수중에 용해된 아연과 철 제거에 관한 연구는 아직까지 이루어지지 않았다. 또한, 우슬은 진통작용, 혈압강하, 항산화, 루마티스 및 관절통에 효과적인 한약재로 알려졌다[28], 우슬 뿌리만 사용되고 있으며, 우슬 줄기는 특별히 수요처가 없는 부산물이다. 따라서 이러한 한약재 부산물을 효과적으로 사용하기 위하여 우슬 줄기 바이오차를 제조하였으며, 활성탄소와 비교하여 수중에 고농도로 용해된 아연과 철의 제거효율을 향상시키고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료 및 실험방법

본 연구에서는 충북 지역의 한약재 부산물로서 발생하는 우슬 줄기를 실험 재료로 사용하였다. 이 우슬 줄기는 600 °C 온도에서 750

mL/min 질소 공급 속도에 의한 열처리 공정을 수행하여 우슬 줄기 바이오차를 제조하였다. 또한, 600 °C 온도에서 탄화 공정으로부터 제조된 우슬 줄기 바이오차를 800 °C까지 온도를 향상시키고, 200 mL/min로 질소를 유입하면서 2 h 동안 등온을 유지하였다. 그리고 800 °C에서 제조된 우슬 줄기 바이오차의 수증기 활성화를 위하여, 증류수 유량이 2.0 mL/g-char · hr로 조절하여 운전하였다. 또한 800 °C로 활성화된 우슬 줄기 바이오차는 200 mL/min의 질소 공급에 의한 냉각 공정이 수행되었다. 이 냉각 공정 완료 후, 새로운 형태의 우슬 줄기 바이오차를 제조하였다. 그리고 제조된 우슬 줄기 바이오차는 체진동기 (Analysette 3, Fritsch Co., Germany)를 사용하여 30 min 동안 45-63 μm 입자 크기로 분리하였다. 여기서 분리된 바이오차는 건조기 (J-DSA1, Jisico Co., Korea)를 사용하여 45 °C에서 건조 공정을 이루어진 후, 흡착 실험에 사용되었다.

아연 수용액을 제조하기 위하여, ZnSO₄ · 7H₂O (Junsei Chemical Co., Japan)를 이용하였다. 이때 아연 수용액은 농도별로 제조하여 흡착 실험에 사용하였다. 그리고 철 수용액은 FeSO₄ · 7H₂O (Junsei Chemical Co., Japan)를 이용하였으며, 이를 증류수로 용해시키고 농도별로 희석하였다. 또한 일정한 농도로 우슬 줄기 바이오차를 250 mL 삼각플라스크에 주입하였으며, 25 °C와 150 rpm 교반 속도가 이루어지는 shaking incubator (IS-971R, Jeitech Co. Korea)를 사용하였다. 이 shaking incubator를 이용하여 수중에 함유된 아연과 철 이온의 흡착 실험이 이루어졌다. 또한, 위 실험과 동일한 조건에 의하여 분리와 건조 공정이 수행된 900 m²/g 비표면적의 활성탄소(Handa Carbon Co. Korea)와 우슬 줄기 바이오차를 사용하여 수중에 함유된 아연과 철 이온의 제거 효율에 관한 비교 실험이 수행되었다.

그리고, 활성탄소와 우슬 줄기 바이오차를 사용하여, 수중에 함유된 아연과 철 이온의 제거효율은 아래 식 (1)로부터 산출하였다[29].

$$(Zn \text{ or } Fe) \text{ Removal efficiency (\%)} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, C₀는 초기 아연 또는 철 이온 농도(mg/L), C는 흡착이 이루어진 일정한 시간 경과 후 수용액에 용해된 아연 또는 철 이온 농도(mg/L)이다.

또한, 이 실험에서 우슬 줄기 바이오차에 흡착된 아연 또는 철 이온의 흡착량은 아래와 같은 식 (2)으로부터 계산하였다[30].

$$Q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{M} \quad (2)$$

여기서, Q_t는 시간 t에서 우슬 줄기 바이오차 또는 활성탄소의 단위 질량에서 아연 또는 철 이온의 흡착량(mg/g), C₀는 초기 아연 또는 철 이온 농도(mg/L), C_t는 흡착 반응이 이루어진 일정한 시간에서 수용액에 존재한 아연 또는 철 이온의 농도(mg/L), V는 실험에 사용된 수용액 부피(L)이며, M은 우슬 줄기 바이오차 또는 활성탄소의 질량(g)이다.

2.2. 분석방법

본 연구에서는 진탕반응기를 사용하였으며, 이 반응기에 의하여 흡착 반응이 이루어졌다. 그리고 일정한 흡착 시간을 조절하여 시료를 채취하였고, 채취된 시료는 원심분리기(Micro-12 Hanil, Korea)를 사용하여 4000 rpm에서 20 min 동안 흡착제와 수용액을 분리하였다. 그

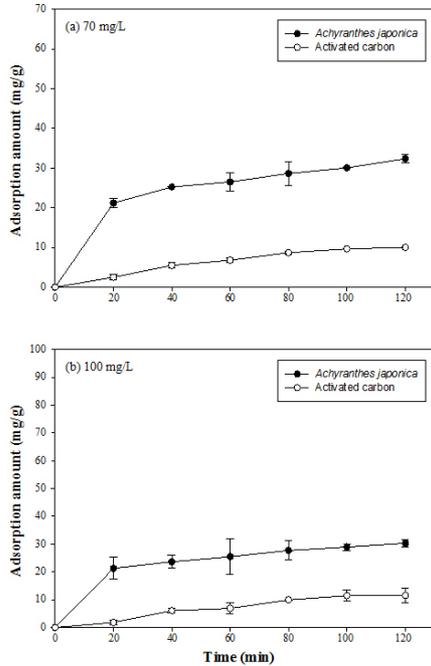


Figure 1. Comparisons of zinc adsorption amount using the *Achyranthes japonica*-stem biochar and activated carbon.

리고 분리 공정에서 얻어진 상등액은 0.45 μm micro filter (MFS, Japan)를 사용하여 여과하였으며, 여과액은 시료 분석에 사용하였다. 또한, Atomic Absorption Spectrometer (AAS-6200, Shimadzu, Japan)를 이용하여 시료에 함유된 아연과 철 이온의 농도는 각각 213.9, 248.3 nm 파장에서 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험 연구에서는 충북 지역에서 한약재 부산물로 생산되는 우슬 줄기를 사용하여 수중에 함유된 아연과 철 이온을 제거하는 생물 흡착제를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 우슬 줄기 바이오차를 제조하였으며, 제조된 우슬 줄기 바이오차와 일반적으로 수처리 공정에 사용되는 활성탄소를 이용하여 수중에 함유된 아연과 철 이온의 흡착량을 비교 분석하였다. 또한, 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차를 사용하여 수중에 용해된 아연과 철 이온의 제거 효율 향상에 대하여 고찰하였다.

수중에 함유된 70과 100 mg/L 아연 이온을 제거하고자 우슬 줄기 바이오차와 활성탄소를 흡착제로 사용하여 아연 이온의 흡착량을 살펴보았다. Figure 1(a)에 보여진 것과 같이, 우슬 줄기 바이오차는 흡착 시간이 경과할수록 아연 이온 흡착량이 점차 증가함을 알 수 있었다. 그 결과 반응 120 min에 도달하였을 때 32.3 mg/g의 최대 아연 이온의 흡착량을 도출하였으며, 활성탄소와 비교하여 아연 이온의 흡착량이 3.3배 증가하였다. 또한 100 mg/L 아연 이온의 흡착량을 파악하기 위하여 우슬 줄기 바이오차를 이용하여 흡착시킨 결과, 반응 120 min에서 가장 높은 흡착량을 나타내었으며, 활성탄소와 비교하여 아연 이온 흡착량이 2.7배 향상된 31.0 mg/g를 도출하였다. 위의 실험 결과로부터 수중에 용해된 70과 100 mg/L 아연 이온을 흡착 공정에 의하여 처리하고자 할 경우, 우슬 줄기 바이오차가 활성탄소 보다는 높은 흡착량을 나타내었다. 그러나, 우슬 줄기 바이오차를 사용하여 70과 100 mg/L 아연 이온을 처리하고자 120 min 흡착이 이루어졌을

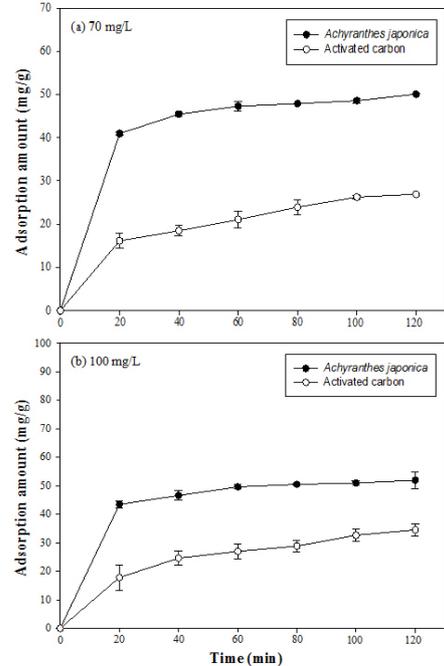


Figure 2. Comparisons of iron adsorption amount using the *Achyranthes japonica*-stem biochar and activated carbon.

때, 각각 46.4, 31.0%의 낮은 아연 이온의 제거 효율을 도출하였다. 따라서 70과 100 mg/L 고농도 아연 이온의 제거 효율을 향상시키는 실험이 필요함을 알 수 있었다.

그리고 Figure 2(a)에 나타낸 것과 같이 수중에 용해된 70 mg/L 철 이온을 처리하고자 우슬 줄기 바이오차를 흡착제로 사용하였을 때 반응 시간이 증가함에 따라서 철 이온의 흡착량은 점차적으로 높아졌으며, 반응 120 min에서는 활성탄소와 비교하여 철 이온의 흡착량이 1.8배 향상된 50.1 mg/g를 얻을 수 있었다. 또한 우슬 줄기 바이오차와 활성탄소를 이용하여 120 min 동안 흡착 반응 후, 철 이온의 제거 효율이 각각 71.2, 38.3%로 산출되었다. 그리고 100 mg/L 철 이온의 흡착량을 도출하고자 우슬 줄기 바이오차를 이용하여 120 min 동안 흡착시킨 결과, 철 이온의 흡착량은 54.3 mg/g를 나타내었으며, 활성탄소와 비교하여 철 이온의 흡착량은 1.5배 증가됨을 알 수 있었다. 결과적으로 수중에 함유된 고농도의 70과 100 mg/L 철 이온을 처리하고자 할 경우, 우슬 줄기 바이오차가 활성탄소보다는 높은 흡착량과 제거효율을 도출하였다. 그러나 수중에 용해된 70과 100 mg/L 철 이온의 흡착 능력과 제거 효율의 향상을 위하여, 생물 흡착제인 우슬 줄기 바이오차의 화학적 개질 처리 또는 물리적 처리에 의한 철 이온의 제거효율 향상에 대하여 보완적인 실험이 요구되었다.

위의 실험 결과로부터 수중에 용해된 아연 이온의 제거효율을 향상시키기 위하여, 우슬 줄기 바이오차에 물리적 처리로서 수증기 활성화 공정을 수행하였다. 그 결과, Figure 3(a)에 나타낸 것과 같이, 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차는 반응 시간이 경과할수록 70 mg/L 아연 이온의 제거 효율과 흡착 능력이 증가하였으며, 반응 120 min에 도달하였을 때 80.0%의 최대 아연 이온의 제거효율을 얻을 수 있었다. 또한 이때 56.3 mg/g 아연 이온의 흡착량을 구하였고, 미처리된 우슬 줄기 바이오차와 비교하여 아연 이온의 흡착능력이 1.8배 향상됨을 알 수 있었다. 그리고 100 mg/L 아연 이온을 효과적으로 처리하고자 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차를 사용하였을 때, 70

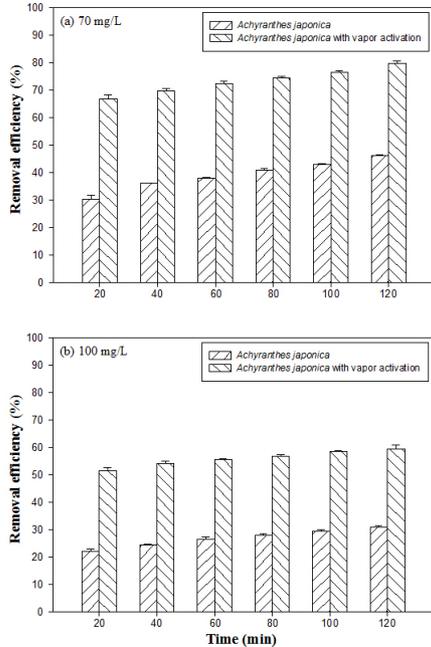


Figure 3. Removal of zinc utilizing *Achyranthes japonica*-stem biochar and *Achyranthes japonica*-stem biochar with vapor activation.

mg/L 아연 이온의 제거 효율과 유사한 경향을 나타내었다. 이 실험에서도 흡착 시간이 증가할수록 아연이온의 제거 효율이 향상되었으며, 흡착 시간 100 min에서 흡착 평형에 도달하였다. 또한, 이때 59.8%의 제거 효율을 도출하였으며 미처리된 우슬 줄기 바이오차와 비교하였을 때 아연 이온의 제거 효율이 2배 향상됨을 나타내었다. 위의 실험 결과에서 도출된 것과 같이, 수중에 함유된 70과 100 mg/L 아연 이온을 처리할 경우, 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차가 높은 제거 효율과 흡착능력을 갖는 수처리제로 적합하다고 판단되었다.

그리고, 수중에 함유된 70과 100 mg/L 철 이온의 제거능력을 높이고자, 흡착제인 우슬 줄기 바이오차에 수증기 활성화 공정을 수행하였다. 그 결과, Figure 4(a)에 보여진 것과 같이, 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차를 사용하였을 경우 70 mg/L 철 이온은 반응 초기 단계인 20 min에서 흡착 평형에 도달하면서 100% 제거 효율을 도출하였다. 그러나 미처리된 우슬 줄기 바이오차를 이용하여 실험하였을 때, 반응 20 min에서 58.4%의 낮은 철 이온의 제거 효율을 도출하였다. 또한 100 mg/L 철 이온을 흡착 처리하고자 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차를 사용하였을 때, 흡착 시간이 경과할수록 철 이온의 제거 효율이 향상되었으며, 반응 80 min에서 흡착 평형에 도달하였다. 또한, 이때 80.1%의 제거 효율을 도출하였으며 미처리된 우슬 줄기 바이오차와 비교하였을 때 철 이온의 제거 효율이 1.6배 증가함을 알 수 있었다. 따라서 수중에 용해된 70과 100 mg/L 철 이온을 효과적으로 제거하고자 할 때, 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차가 우수한 흡착제임을 알 수 있었다. 이러한 실험 결과들은 우슬 줄기 바이오차 표면에 산소 또는 카르복실기 및 카르보닐기와 같은 관능기 존재에 의하여, 아연과 철 이온과 같은 중금속 제거 능력이 향상된다는 기존의 연구 결과로 설명할 수 있다[31,32].

또한, 수중에 함유된 철 이온들은 우슬줄기 바이오차에 흡착과 공침 현상에 의하여 아연과 비교하여 높은 제거효율을 도출하였다고 판단되었다.

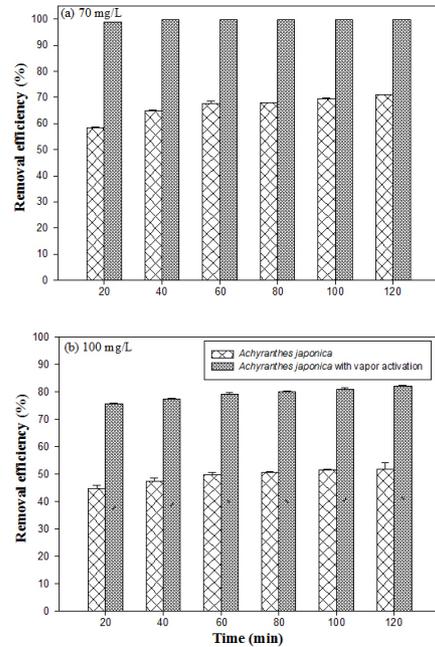


Figure 4. Removal of iron utilizing *Achyranthes japonica*-stem biochar and *Achyranthes japonica*-stem biochar with vapor activation.

Table 1. Physical Properties *A. japonica* Stem Biochar and *A. japonica* Stem Biochar with Vapor Activation

Sample	Specific surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Macroporous volume (cm ³ /g)
<i>A.japonica</i> stem biochar	12.56	0.0073	0.0014
<i>A.japonica</i> stem biochar with vapor activation	468.9	0.2075	0.1903

Table 1에 나타낸 것과 같이, 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차와 미처리된 우슬 줄기의 물리적인 특성을 비교 고찰하였다. 그 결과, 수증기로 활성화된 바이오차의 비표면적은 미처리된 우슬 줄기와 비교하여 37.3배 증가된 468.9 m²/g를 나타내었다. 또한 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차는 미처리된 우슬 줄기 바이오차와 비교하여 총 기공 부피와 대세 기공 부피가 각각 28.4, 135.9배 향상됨을 알 수 있었다. 따라서, 수증기를 이용하여 활성화된 우슬 줄기 바이오차가 미처리된 우슬 줄기와 비교하여 수중에 함유된 아연 이온(70, 100 mg/L)과 철 이온(70, 100 mg/L)의 제거효율 및 흡착 능력을 향상시킨 것으로 판단되었다.

그리고 수중에 용해된 아연 이온의 제거효율을 증가시키기 위하여, 수증기로 활성화된 흡착제 농도 변화(0.1, 0.2, 0.4, 0.6 g/100mL)에 따른 실험 결과들을 Figure 5에 나타내었다. 흡착제 농도가 높아질수록 아연 이온의 흡착 능력과 제거효율이 향상됨을 알 수 있었다. 70 mg/L 아연 이온을 제거 효율을 향상시키고자 수증기 활성화된 흡착제 농도를 0.2 g/100mL로 조절하였을 경우, 반응 60 min에서 흡착 평형에 도달하면서 100% 제거 효율을 도출하였다. 또한, 100 mg/L 아연 이온을 제거 능력을 증가시키기 위하여, 흡착제 농도를 0.4 g/100mL로 운전하였을 때, 반응 20 min에 흡착 평형에 도달하면서 100% 제거

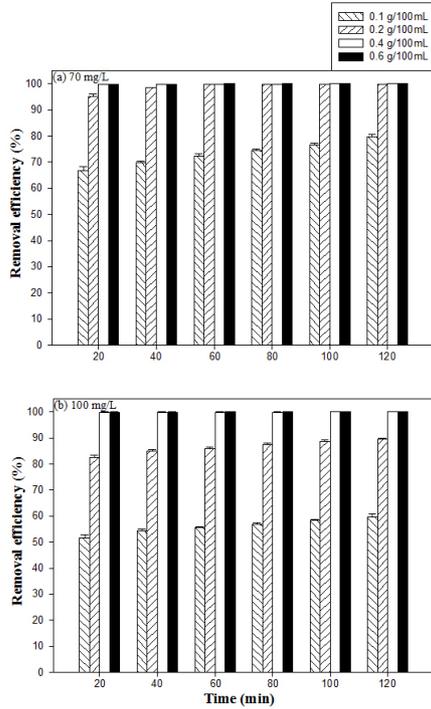


Figure 5. Effect of biosorbent concentration on zinc removal efficiency by using the *Achyranthes japonica*-stem biochar with vapor activation.

효율을 나타내었다.

본 연구의 실험 결과들은 한약재 부산물인 우슬 줄기를 수증에 함유된 오염 물질을 효과적으로 처리하는 흡착 기술로 응용 및 발전시킬 수 있으며, 특히 수증에 용해된 농도의 아연과 철 이온을 경제적이고 친환경적으로 처리할 수 있는 중금속 기술로 사용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 실험 연구에서는 한약재 부산물인 우슬 줄기를 수처리제로 활용하고자 우슬 줄기 바이오차를 제조하였다. 이 바이오차를 이용하여, 수증에 함유된 아연과 철 이온의 제거 효율 향상에 대하여 고찰하였다. 70과 100 mg/L 아연 이온을 제거하고자 2 h 흡착이 이루어졌을 때, 각각 32.3과 31.0 mg/g 흡착량을 도출하였다. 이 실험 결과에서 우슬줄기 바이오차는 활성탄소과 비교하여 3배 이상의 우수한 흡착량을 나타내었다. 또한, 70과 100 mg/L 철 이온을 제거하기 위하여 2 h의 흡착이 수행되었을 때, 각각 50.1과 54.3 mg/g의 높은 흡착량을 얻을 수 있었다. 또한, 아연과 철 이온의 제거효율을 향상시키고자, 우슬 줄기 바이오차를 사용하여 수증기 활성화 공정을 수행하였다. 그 결과, 70과 100 mg/L 아연 이온의 제거효율은 각각 80과 60%로 증가되었다. 또한, 70과 100 mg/L 철 이온의 제거효율은 각각 100과 82%로 향상되었다. 그리고 수증기로 활성화된 우슬 줄기 바이오차는 미처리 우슬 줄기 바이오차와 비교하여, 비표면적이 37.3배 증가되었으며, 총기공부피와 대체 기공부피가 각각 28.4, 136배 향상되었다. 따라서, 이러한 실험 결과들은 수증에 용해된 아연과 철 이온을 경제적이고 친환경적으로 처리하는 데 실용적인 수처리 기술에 적용될 수 있을 것이다.

감 사

이 논문은 2020학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

References

1. A. Bhatnagar and A. K. Minocha, Biosorption optimization of nickel removal from water using *Punica granatum* peel waste, *Colloids Surf. B Biointerfaces*, **76**, 544-548 (2010).
2. K.-H. Kim, N.-H. Lee, I.-K. Paik, J.-H. Park, and J.-K. Yang, Characteristics of heavy metal removal from aqueous solution using leather industry by-products, *J. Kor. Soi. Environ. Eng.*, **32**(5), 417-426 (2010).
3. M.-J. Kim, J. H. Choi, T. R. Choi, S. S. Choi, J. H. Ha, and Y.-S. Lee, Enhancement of manganese removal ability from water phase using biochar of *Purinus densiflora* bark, *Appl. Chem. Eng.*, **31**(5), 526-531 (2020).
4. E. Kstsou, S. Malamis, and K. Haralambous, Examination of zinc uptake in a combined system using sludge, minerals and ultra-filtration membranes, *J. Hazard. Mater.*, **182**, 27-38 (2010).
5. A. Dimirkou, Uptake of Zn^{2+} ions by a fully iron-exchanged clinoptilolite, Case study of heavily contaminated drinking water samples, *Water Res.*, **41**, 2763-2773 (2007).
6. F. Fu and Q. Wang, Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review, *J. Environ. Manage.*, **92**, 407-418 (2011).
7. K. Y. Shin, J. Y. Hong, and J. Jang, Heavy metal ion adsorption behavior in nitrogen-doped magnetic carbon nanoparticles: isotherms and kinetic study, *J. Hazard. Mater.* **190**, 36-44 (2011).
8. S. Ali, I. A. Shah, A. Ahmad, J. Nawab, and H. Huang, Ar/O_2 plasma treatment of carbon nanotube membranes for enhanced removal of zinc from water and wastewater: A dynamic sorption-filtration process, *Sci. Total Environ.*, **655**, 1270-1278 (2019).
9. A. B. Jusoh, W. H. Cheng, W. M. Low, and A. Nora'aini, Study on the removal of iron and manganese in groundwater by granular activated carbon, *Desalination*, **182**, 347-353 (2005).
10. A. G. Tekerlekopoulou, S. Pavlou, and D. V. Vayenas, Removal of ammonium, iron and manganese from potable water in biofiltration units: a review, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **88**, 751-773 (2013).
11. N. Khatri, S. Tyagi, and D. Rawtani, Recent strategies for the removal of iron from water: A review, *J. Water Process Eng.*, **19**, 291-306 (2017).
12. Y. Y. Jang and S. J. Sharkis, A low level of reactive oxygen species selects for primitive hematopoietic stem cells that may reside in the low-oxygenic niche, *Blood*, **110**, 3056-3063 (2007).
13. L. shao, H. Li, S. K. Pazhanisamy, A. Meng, Y. Wang, and D. Zhou, Reactive oxygen species and hematopoietic stem cell senescence, *Int. J. Hematol.*, **94**, 24-32 (2011).
14. P. Sarin, V. L. Snoeyink, J. Bebee, K. K. Jim, M. A. Beckett, W. M. Kriven, and J. A. Clement, Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems, *Water Res.*, **38**, 1259-1269 (2004).
15. A. Al-A. Mohammed, Removal of high-level Fe^{3+} from aqueous solution using natural inorganic materials: bentonite (NB) and quartz (NQ), *Desalination*, **250**, 885-891 (2010).
16. M. Loan, O. M. G. Newman, R. M. G. Cooper, J. B. Farrow, and

- G. M. Parkinson, Defining the paragoethite process for iron removal in zinc hydrometallurgy, *Hydrometallurgy*, **81**, 104-129 (2006).
17. B. Das, P. Hazarika, G. Saikia, H. Kalita, D. C. Goswami, H. B. Das, S. N. Dube, and R. K. Dutta, Removal of iron from groundwater by ash: A systematic study of a traditional method, *J. Hazard. Mater.*, **141**, 834-841 (2007).
 18. H.-S. Shin, C.-H. Lee, Y.-S. Lee, and K.-H. Kang, Removal of heavy metal from aqueous solution by a column packed with peat-humin, *J. Kor. Soi. Environ. Eng.*, **27**(5), 535-541 (2005).
 19. S. E. Bailey, T. J. Olin, R. M. Bricka, and D. D. Adrian, A review of potentially low-cost sorbent for heavy metals, *Water Res.*, **33**(11), 2469-2479 (1999).
 20. S. S. Choi, Biosorption of copper ions by cycling of *Castanea crenata*, *Appl. Chem. Eng.*, **25**(3), 307-311 (2014).
 21. X. Tan, Y. Liu, G. Zeng, X. Wang, X. Hu, Y. Gu, and Z. Yang, Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions, *Chemosphere*, **125**, 70-85 (2015).
 22. X. Xu, X. Cao, and L. Zhao, Comparison of rice husk and dairy manure-derived biochars for simultaneously removing heavy metals from aqueous solutions: Role of mineral components in biochars, *Chemosphere*, **92**, 955-961 (2013).
 23. H. Lu, W. Zhang, Y. Yang, X. Huang, S. Wang, and R. Qiu, Relative distribution of Pb^{2+} sorption mechanism by sludge-derived biochar, *Water Res.*, **46**, 854-862 (2012).
 24. L. Qian and B. Chen, Dual role of biochars as adsorbents for aluminum: The effects of oxygen-containing organic components and the scattering of silicate particles, *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 8759-8768 (2013).
 25. D. Mohan, A. Sarswat, Y. S. Ok, and C. U. J. Pittman, Organic and inorganic contaminants from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review, *Bioresour. Technol.*, **160**, 191-202 (2014).
 26. X. Chen, G. Chen, L. Chen, Y. Chen, J. Lehmann, M. B. McBride, and A. G. Hay, Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution, *Bioresour. Technol.*, **102**, 8877-8884 (2011).
 27. Z. Liu and F.-S. Zhang, Removal of lead from water using bichars from hydrothermal liquefaction of biomass, *J. Hazard. Mater.*, **167**, 933-939 (2009).
 28. H.-S. Cho, S.-W. Kang, J.-H. Kim, M.-J. Choi, H.-W. Yu, E. Park, and H. S. Chun, Antioxidant and antimicrobial activities of combined extracts of *Galla rhois*, *Achyranthes Japonica* Nakai, *Terminalia Chebula* Retz and *Glycyrrhiza uralensis*, *J. Kor. Soi. Biotech. and Bioeng.*, **29**(1), 29-35 (2014).
 29. T.-N. Kwon and C. Jeon, Adsorption characteristics of sericite for nickel ions from industrial waste water, *J. Ind. Eng. Chem.*, **19**, 68-72 (2013).
 30. Y. H. Kim, J. Y. Park, Y. J. Yoo, and J. W. Kwak, Removal of lead using xanthated marine brown alga, *Undaria pinnatifida*, *Process Biochem.*, **34**, 647-652 (1999).
 31. M. Uchimiya, S. Chang, and K. T. Klasson, Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional group, *J. Hazard. Mater.*, **190**, 432-441 (2011).
 32. H. Li, X. Dong, E. B. D. Silva, L. M. D. Oliveira, Y. Chen, and L. Q. Ma, Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications, *Chemosphere*, **178**, 466-478 (2017).

Authors

- Suk Soon Choi; Ph.D., Professor, Department of Biological and Environmental Engineering, Semyung University, Jecheon 27136, Korea; sschoi@semyung.ac.kr
- Tay Ryeong Choi; B.Sc., Master Course, Department of Environmental Safety System Engineering, Semyung University, Jecheon 27136, Korea; xofud218@naver.com
- Jeong Hyub Ha; Ph.D., Professor, Department of Integrated Environmental Systems, Pyeongtaek University, Pyeongtaek 17869, Korea; jhha@ptu.ac.kr