Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 31(2), pp.63-71 (2023)
ISSN 1225-6498 eISSN 2508-3015 https://doi.org/10.17137/korrae.2023.31.2.63

Original Paper

수단그라스 Biochar를 적용한 수중 암모니아성 질소(NH_4-N) 흡착 특성

류도윤[a], 김도용[b], 김대기[c,d†]

The characteristics of aqueous ammonium-adsorption of biochar produced from Sudangrass

Doyoon Ryu[a], Do-Yong Kim[b], Daegi Kim[c,d†]

(Received: Jun. 9, 2023 / Revised: Jun. 14, 2023 / Accepted: Jun. 14, 2023)

ABSTRACT: Increased nitrogen in the water system has become an important environmental problem around the world, as it causes eutrophication, algae bloom, and red tide, destroys the water system, and undermines water's self-purification. The most common form of nitrogen in the water system is ammonium ion (NH_4^+), and the largest portion of ammonium ions comes from wastewater. NH_4^+ is a major contributor to eutrophication, which calls for appropriate treatment and measures for ammonium removal. This study produced biochar by applying Sorghum × drummondii, a type of biomass with a great growth profile, analyzed the adsorption capacity of Sorghum × drummondii biochar produced from the changing carbonization temperature condition of 200 to 400℃ in the ammonium ion range of 10 to 100 ppm, and used the results to evaluate its potential as an adsorbent. Carbonization decomposed the chemical structure of Sorghum × drummondii and increased the content of carbon and fixed carbon in the biochar. The biochar's pH and electrical conductivity showed high adsorption potential for cations due to electrical conductivity as its pH and electrical conductivity increased along with higher carbonization temperature. Based on the results of an adsorption experiment, the biochar showed 54.5% and 17.4% in the maximum and minimum NH_4-N removal efficiency as the concentration of NH_4-N increased, and higher carbonization temperature facilitated the adsorption of pollutants due to the biochar's increased pores and specific surface area and subsequently improved NH_4-N removal efficiency. FT-IR analysis showed that the overall surface functional groups decreased due to high temperature from carbonization.

Keywords: Biochar, Adsorption, Ammonium, Sudangrass, Biomass

초 록: 수계 내 질소의 증가는 부영양화나 녹조 및 적조현상을 유발하여 수계의 파괴 및 물의 자정능력을 저하시켜 전세계적으로 중요한 환경문제가 되었다. 수계 내 질소의 가장 일반적인 형태는 암모늄(NH_4^+)이온의 형태로 폐수로부터 유입되는 가장 많은 부분을 차지하고 있으며 부영양화의 주요 원인이 되고 있어 암모늄 제거에 있어 적절한 처리 및 방안이 필요하다. 본 연구에서는 생장력이 좋은 바이오매스 중 하나인 수단그라스를 적용하여 바이오차를 생산하였으며, 200℃-400℃ 탄화 온도 조건 변화에 따른 과정에서 생성된 수단그라스 바이오차를 활용하여 암모늄 이온, 10~100ppm 농도 변화에 따른 흡착능력 분석하였으며, 이 결과를 통해 흡착제로써 활용 가능성을 평가하고자

[a] 대구대학교 대학원 환경・화학융합공학과 박사과정(Ph.D. student, Department of Environmental and Chemical Convergence Engineering, Daegu University)
[b] 목포대학교 환경공학과 교수(Professor, Department of Environmental Engineering, Mokpo National University)
[c] 대구대학교 대학원 환경・화학융합공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Environmental and Chemical Convergence Engineering, Daegu University)
[d] 대구대학교 환경기술공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Environmental & Technology Engineering, Daegu University)
† Corresponding author(e-mail: daegi.kim81@daegu.ac.kr)

하였다. 탄화반응으로 인해 수단그라스의 화학구조가 분해되면서 바이오차의 탄소 및 고정 탄소함량이 증가하였다. 바이오차의 pH는 탄화 온도가 높을수록 pH와 전기전도도가 높아지면서 전기전도도로 인해 양이온에 대해 높은 흡착 가능성을 보였다. 흡착실험 결과를 바탕으로 NH_4-N의 농도가 높아지면서 최대 54.5%, 최저 17.4%의 제거효율을 보였으며, 탄화 온도가 높을수록 바이오차의 기공 및 비표면적 증가로 인해 오염물질의 흡착이 용이해져 NH_4-N의 제거효율이 높아졌다. FT-IR 분석 결과, 탄화반응의 고온으로 인해 전체적인 표면 작용기의 감소가 나타났다.

주제어: 바이오차, 흡착, 암모니아성 질소, 수단그라스, 바이오매스

1. 서 론

최근 고도 처리되지 않은 하수 및 산업폐수의 무분별한 방류와 질소비료의 남용으로 인해 수중 질소 농도가 크게 증가하고 있으며 적절한 처리를 거치지 않고 하천이나 바다로 유입되고 있다[1,2]. 수계 내 질소의 증가는 부영양화나 녹조 및 적조현상을 유발하여 수계의 파괴 및 물의 자정능력을 저하시켜 전세계적으로 중요한 환경문제가 되었다[3,4,5]. 수계 내 질소의 가장 일반적인 형태는 암모늄(NH_4^+)이온의 형태로 폐수로부터 유입되는 가장 많은 부분을 차지하고 있으며 부영양화의 주요 원인이 되고 있어 암모늄 제거에 있어 적절한 처리 및 방안이 필요하다.

일반적으로 수중 암모늄 이온을 제거 하기위한 방법으로는 A2/O공법, SBR공법 등과 같은 생물학적 처리[6]와 흡착법, 이온교환법, 막 분리법 등과 같은 물리·화학적 방법이 대표적으로 적용되고 있다[7]. 이 중 흡착법의 경우 공정이 단순하고 온도나 농도 등에 큰 영향을 받지 않기 때문에 처리효율이 다른 방법에 비해 비교적 안정적이고 2차 오염물질이 발생될 위험성이 적어 그 활용 범위가 점차 확대되고 있는 추세이다[8,9]. 최근에는 제올라이트, 이온교환수지 등 다양한 흡착제가 폐수 중 오염물질을 제거하는데 사용되고 있다[10,11,12]. 그러나 기존 흡착제는 높은 에너지 소비에 비해 낮은 흡착효율을 보이기 때문에 경제적이고 효율적인 대체 흡착제에 대한 연구들이 진행되고 있다.

바이오차(biochar)는 바이오매스를 이용하여 산소가 제한된 조건에서 발생하는 열분해 부산물 중 하나로[13] 바이오차의 넓은 표면적, 다공질 구조(porous structure)와 하이드록실기(-OH), 카르복실기 (-COOH)와 같은 다양한 표면 작용기(surface functional group)의 특징을 나타내고 있어 중금속이나 이온성 오염물질을 흡착하는 능력이 뛰어나다고 평가되고 있다[14]. 또한 바이오차의 원료로 축산분뇨, 슬러지, 농업부산물 등 다양한 유기성 폐기물 등 다양한 바이오매스를 원료로 활용할 수 있어 경제적, 환경친화적인 면에서 유기성 폐기물의 처리와 동시에 흡착제, 토양개량제 등 다양한 활용이 이루어지고 있으며[15], 바이오매스의 종류에 따라 특성이 다르기 때문에 목표로 하는 물질에 따라 바이오매스를 선택하여 흡착할 수 있다[16,17,18].

최근 국내에서 발생되는 다양한 농업부산물인 바이오매스의 에너지화 및 자원 재활용에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 국내의 경우는 동남아시아 지역의 기후와 달리 연간 대량 바이오매스 생산에 어려움이 있어 국내에서 확보 가능한 농업 산업의 부산물에 대한 연구는 지속적으로 필요한 실정이다[19]. 최근 국내에서 사료 용도로 재배하고 있는 수단그라스(Sorghum sudanense, sudangrass)는 교잡종으로 1년 다발형 남방형 상번초 화본과 사료작물으로, 옥수수와 함께 여름을 대표하는 작물 중 하나이다. 이러한 수단그라스는 기온이 높고 건조한 지방에서 잘 자라며, 옥수수에 비해 가뭄에 강하고 낮은 pH에서도 생장력이 좋고 요구되는 수분량이 적어 재배의 안정성이 높고 관리와 이용이 쉬워 널리 재배되고 있다[20,21]. 수단그라스는 빠른 성장속도를 보이며, 이러한 빠른 성장속도는 바이오차의 생산에 있어 성장 기간이 상대적으로 긴 목질계 바이오매스에 비해 바이오매스 확보에 효과적이다.

따라서 본 연구에서는 생장력이 좋은 바이오매스 중 하나인 수단그라스를 적용하여 바이오차를 생산하였으며, 200℃-400℃의 탄화 온도 조건 변화에 따

른 과정에서 생상된 수단그라스 바이오차를 활용하여 암모늄 이온 10-100ppm 농도 변화에 따른 흡착 능력을 분석하였으며, 이 결과를 통해 흡착제로써 활용 가능성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 바이오차 생산을 위한 적용 바이오매스

본 연구에서 본 연구에서 바이오차 제조를 위해 사용된 바이오매스는 교내 부지 내 재배되고 있는 수단그라스(Sudangrass, SG)를 채취하여 사용하였다. 수단그라스는 일반적으로 6주에서 12주 사이에 수확이 가능하며, 다른 작물과 비교했을 때 빠른 성장 속도를 보여주어 많은 양의 바이오매스를 회수할 수 있기 때문에 바이오차 제조에 있어 적절한 바이오매스로 판단되며, 수단그라스 원 시료의 특성은 Table 1에 나타내었다. 수단그라스의 수분함량은 77.7%이고 pH 및 EC는 각각 5.4, 1,462.7㎲/㎝이며, 42.6%의 탄소, 5.6% 수소, 46.6%의 산소, 1.4%의 질소로 구성되어 있다. 또한 고정탄소 함량이 19.1%, 휘발분 함량이 77.1%, 회분 함량이 3.8%로 분석되었다.

2.2. 탄화 장치 및 실험

채취한 수단그라스는 건조 오븐(drying oven, LDO-100E, LabTech, Korea)을 통해 105±5℃에서 24시간 동안 건조하여 수분을 제거한 뒤 분쇄기로 1cm 미만 크기로 분쇄하여 사용하였다. 바이오차를 제조하기 위해 수단그라스 시료를 도가니에 5g을 담은 후 튜브형 전기로(muffle furnace, DTF-803, LAB house, Korea)에 넣고 반응온도를 200℃, 300℃, 400℃로 설정한 뒤 승온온도는 10℃/min으로하여 목표 온도 도달 후 반응시간은 30분으로 하여 탄화 반응을 하였다. 탄화 후 생성된 고체 생성물은 회수하여 밀폐용기에 보관한 뒤 실험에 사용하였다.

Table 1. Characteristics of Sudangrass as Biomass

Sudangrass	
Ultimate analysis(wt.%, on dry basis)	
Carbon	42.6±0.5
Hydrogen	5.6±0.1
Oxygen	46.6±0.4
Nitrogen	1.4±0.1
Proximate analysis(wt.%, on dry basis)	
Fixed carbon	19.1±0.6
Volatile matter	77.1±0.2
Ash	3.8±0.5
pH	5.4
EC(㎲/㎝)	1462.7
Moisture content(%)	77.7

2.3. 바이오차의 물리・화학적 특성 분석

수단그라스 바이오차의 화학적 특성 변화를 확인하기 위하여 원소분석기(elemental analyzer, Flash 2000, Thermo Fisher Scientific, USA)를 이용하여 시료 내 탄소(Carbon, C), 수소(Hydrogen, H), 산소(Oxygen, O), 질소(Nitrogen, N), 황(Sulfer, S) 함량을 각 원소의 무게비에 따라 정량분석 하였다. 공업분석을 수행하기 위해 전기로를 통해 휘발분, 고정 탄소 및 회분 함량을 무게 차이를 통해 측정하였다. 휘발분은 무산소 조건 하에 950℃의 온도에서 휘발되고 고정 탄소는 ASTM 방법에 따라 회분을 남기고 공기 중으로 연소하게 된다.

바이오차의 고체 생성 수율은 시료의 탄화 전・후의 무게 차이를 이용하여 산출하였다. 아래의 Eq. 1을 이용하여 계산하였으며, 온도별 생성 효율을 분석하였다.

$$\mathrm{Pro}\,duct\,yield(wt.\%) = \frac{dried\ biochar\ weight}{dried\ SG\ weight} \times 100\,(\%) \quad \text{(Eq. 1)}$$

pH 및 전기전도도(electrical conductivity)는 바이오차와 증류수를 1:5의 무게비로 혼합한 후 항온 진탕기(shaking incubator, LSI-3016R, LabTech, Korea)를 이용하여 150rpm으로 1시간 동안 진탕하고 No. 2 여과지를 통해 여과한 뒤 여과된 수용액을 pH/EC 미터기(pH/EC meter, Orion 4 star, Thermo Scientific, USA)로 각각 측정하였다. 바이오차의 표면 특성 변화를 파악하기 위하여 SEM(scanning electron microscope,

PicoEye 100K, MODULESCI, Korea)를 이용하여 탄화 온도별 표면 변화를 확인하였으며, 탄화 온도에 따른 표면 작용기의 변화를 확인하기 위해 FT-IR(fourier transform infrared spectrometer, 7890-B, Agilent, USA) 분석을 수행하였다.

2.4. NH_4-N 농도 변화에 따른 바이오차 흡착 실험

NH_4-N의 농도변화에 따른 바이오차의 NH_4-N 흡착능력을 확인하기 위하여 바이오차를 일정량(0.1g)으로 고정시키고 NH_4-N의 농도 범위를 10~100mg/L로 하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 NH_4-N 용액은 NH_4Cl으로 각 농도에 맞게 제조하여 사용하였다. 코니컬 튜브(conical tube)에 바이오차 0.1g을 넣은 후 각 농도에 맞게 제조된 NH_4-N 용액을 10mL 주입하고 항온 진탕기를 이용하여 상온(25℃) 조건에서 150rpm으로 24시간 동안 진탕하였다[5]. 진탕 후 No. 2 여과지를 통해 고체와 액체를 분리하였으며, 분리된 액체는 HACH(DR6000, HACH, USA)를 통해 액체 내 NH_4-N의 농도를 측정하였다. 측정된 NH_4-N의 농도를 바탕으로 암모늄 이온의 흡착량 및 제거효율은 아래 식의 Eq. 2과 Eq. 3를 적용하여 나타내었다.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$R_e(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad \text{(Eq. 3)}$$

Eq. 2과 Eq. 3에서 q_e는 평형상태에서 바이오차의 단위 중량당 흡착된 NH_4-N의 양(mg/g), C_0는 NH_4-N의 초기 농도(mg/L), C_e는 흡착 후 NH_4-N의 평형 농도(mg/L), V는 암모늄 용액의 부피(L), W는 바이오차의 질량(g), R_e는 NH_4-N의 제거효율(%)을 나타낸다.

2.5. Langmuir 흡착 등온식

Langmuir 흡착등온식은 일반적으로 일정 온도에서 흡착질과 흡착제가 평형조건이 이루어지고 흡착질이 흡착제 표면에 단층으로 흡착하는 경우 사용하며, Eq. 2을 이용하여 계산된 NH_4-N의 흡착량(q_e)을 이용하여 Langmuir 흡착등온식에 적용하였다(Eq. 4).

$$\frac{q_e}{q_m} = \frac{bC_e}{1 + bC_e} \quad \text{(Eq. 4)}$$

여기서, q_e는 평형상태에서 바이오차의 단위 중량당 흡착된 NH_4-N의 양(mg/g), q_m은 바이오차의 최대 단분자층의 흡착량(mg/g), b는 결합 세기(L/mg), C_e는 흡착 후 NH_4-N의 평형 농도(mg/L)를 나타내며, q_e과 b값을 산출하기 위하여 Eq. 4을 선형화하여 Eq. 5를 얻었다.

$$\frac{1}{C_e} = bq_m\frac{1}{q_e} - b \quad \text{(Eq. 5)}$$

Eq. 4에서 $1/C_e$와 $1/q_e$를 그래프에 적용하여 얻은 직선의 기울기와 절편을 통해 q_e와 b값을 얻을 수 있었다. 여기서 q_e의 값이 클수록 최대 단분자층의 흡착량이 크다는 것을 의미하며, 의 b값이 클수록 흡착에 대한 친화도가 높다는 것을 의미한다[22]. 위 Eq. 1~Eq. 4를 통해 다음과 같이 Langmuir 흡착등온식(Eq. 6)을 유도하였으며, 무차원 상수인 R_L은 분리계수 또는 평형계수이다.

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad \text{(Eq. 6)}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 바이오차의 물리・화학적 특성 변화

탄화 후 바이오차의 원소분석 및 공업분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 원소분석 결과, 탄화온도가 증가함에 따라 탄소 함량이 46.0%에서 59.6%로 증가하는 것으로 나타났다. 반면 수소 및 산소의 함량은 각각 5.3%와 43.1%에서 3.7%와 20.2%로 감소하였다. 공업분석 결과, 원시료에 비해 바이오차의 고정탄소 및 회분함량의 증가, 휘발분 함량의 감소되었다. 탄화 온도가 증가함에 따라 고정탄소 및 회

Table 2. The Chemical Properties of Biochars

Carbonization temperature	200℃	300℃	400℃
Ultimate analysis(wt.%, on dry basis)			
Carbon	46.0±0.3	55.9±0.5	59.6±0.4
Hydrogen	5.3±0.1	4.8±0.1	3.7±0.0
Oxygen	43.1±0.4	29.0±0.4	20.2±0.3
Nitrogen	0.7±0.1	1.7±0.2	2.2±0.1
Proximate analysis(wt.%, on dry basis)			
Fixed carbon	22.5±0.5	38.1±1.0	60.9±1.3
Volatile matter	72.5±0.3	53.3±0.5	24.7±0.3
Ash	5.0±0.2	8.6±0.5	14.3±1.0

분의 함량은 각각 22.5%에서 60.9%, 5.0%에서 14.3%까지 증가하였고 휘발분 함량은 72.5%에서 24.7%로 감소하였다.

탄화 후 바이오차의 생성 수율은 Fig. 1에 나타내었다. 탄화 온도가 증가함에 따라 가스상 및 액상으로 분해에 의해 바이오차 생성율은 62.2%에서 34.6%까지 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

pH 및 전기전도도 분석 결과(Fig. 2), pH 및 전기전도도 모두 탄화 온도가 증가함에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 300℃ 이상의 탄화온도에서 생성 된 바이오차의 pH는 알칼리성을 나타내었다. 이는 바이오차 내부에 부착되어 있던 염기성 물질의 용출에 의한 것으로 높은 온도로 탄화가 진행됨에 따라 비점이 높아지고 분자량이 큰 유기물질이 산화되면서 무기물질 상태로 존재하게 되면서 더 높은 pH를 나타낸 것으로 판단된다[23]. 전기전도도(EC)는 전류가 흐르기 쉬운 상태를 값으로 나타낸 것으로 도체가 가지고 있는 전기저항값의 역수를 나타낸다. 온도 평형상태에서 수중의 해리되어있는 이온의 양을 측정할 수 있어 흡착에서 좋은 지표로 사용된다[24,25]. 전기전도도의 값이 클수록 수중 많은 양의 양이온이 해리되었다는 것을 의미하며, 이는 중금속 및 유기오염물질에 높은 흡착율을 가질 수 있다는 것을 나타낸다. 전기전도도가 클수록 이온들의 이동이 활발해지고 흡착제의 표면 이온과의 전기적인 상호작용에 의해 표면 특성, 흡착용량 등 이온의 흡착에 큰 영향을 미친다. 수단그라스를 바이오차로 제조 시 EC값은 증가하였다. 이는 바이오차 표면에 부착되어 있던 양이온이 탄화에 의해 더 쉽게 용출되는 형태로 바뀌면서 수중에 양이온이 증가한 것으로 판단되며, 탄화 온도가 높아질수록 양이온 용출에 더 용이한 것으로 보인다.

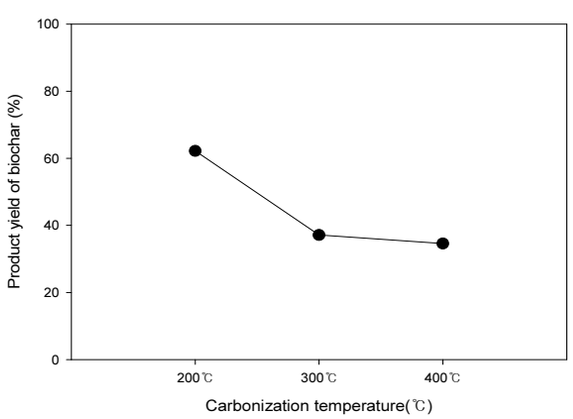

Fig. 1. Product yield of biochars through carbonization reaction temperatures.

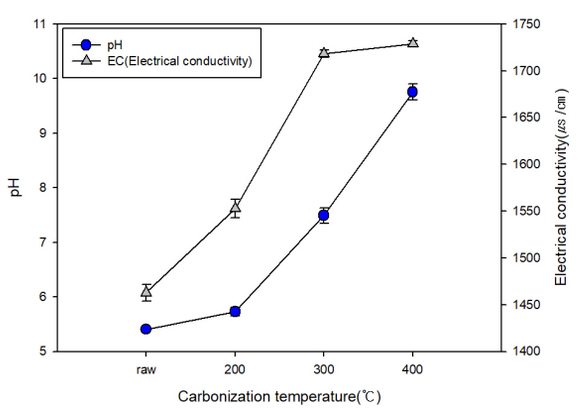

Fig. 2. pH and EC of biochars by the carbonization reaction temperatures.

3.2. 바이오차의 표면 특성 변화

탄화온도에 따른 바이오차의 표면 변화를 확인하기 위하여 SEM 및 FT-IR 분석을 수행하였다. SEM 분석결과(Fig. 3), 탄화온도가 높아질수록 원시료에 비해 바이오차 표면의 기공이 생성되는 것을 확인하였다. 바이오차의 표면에 기공이 생성되고 열에 의해 시료가 잘게 분해됨에 따라 비표면적이 넓어지면서 NH_4-N의 흡착이 더 잘 이루어진 것으로 확인된다[26].

FT-IR은 적외선 스펙트럼을 통해 바이오차 표면 작용기를 구분할 수 있는 방법이다. 탄화 온도에 따른 수단그라스 및 수단그라스 바이오차의 FT-IR 스펙트럼은 Fig. 4에 나타내었다. 3,200-3,400cm^{-1}의 피크는 하이드록실기(-OH)를 나타내며, 이는 바이오매스 내부의 수분에 의해 나타난 것으로 탄화 온도가 증가할수록 고온에 의해 바이오매스 내부 탈수반응으로 인해 하이드록실기의 피크가 감소되는 것으로 보여진다. -CH(2,920cm^{-1})와 C=O(1,608cm^{-1})는 방향족 작용기를 나타낸다. 1,033cm^{-1}에서 1,250cm^{-1}의 피크 또한 감소되었으며, 이는 탄화에 의한 탈카르복실화 반응으로 인해 C-O 밴드의 피크가 끊어졌기 때문으로 보인다[27].

3.3. 바이오차의 NH_4-N 흡착량 및 제거효율

NH_4-N 농도에 따른 바이오차의 NH_4-N 흡착량과 제거효율은 각각 Fig. 5과 Fig. 6에 나타내었다. 바이

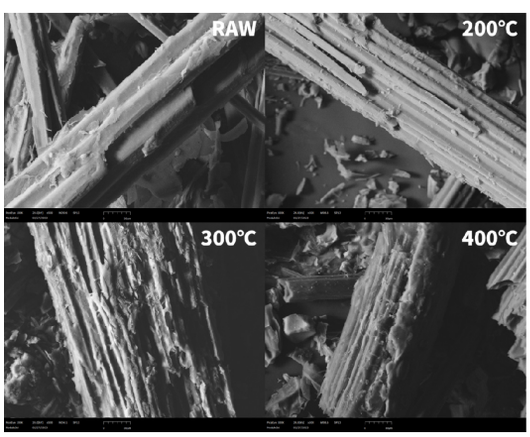

Fig. 3. SEM results of biochars by the carbonization reaction temperatures.

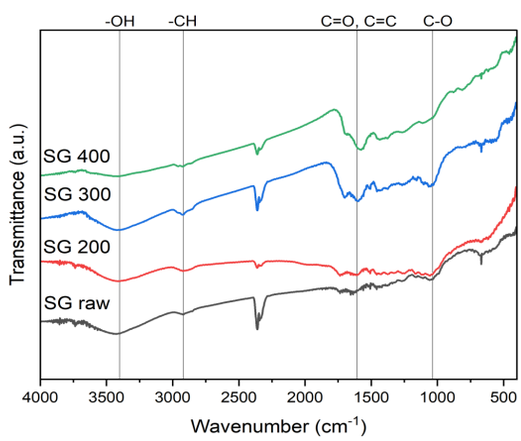

Fig. 4. FT-IR analysis results of biochars by the carbonization reaction temperatures.

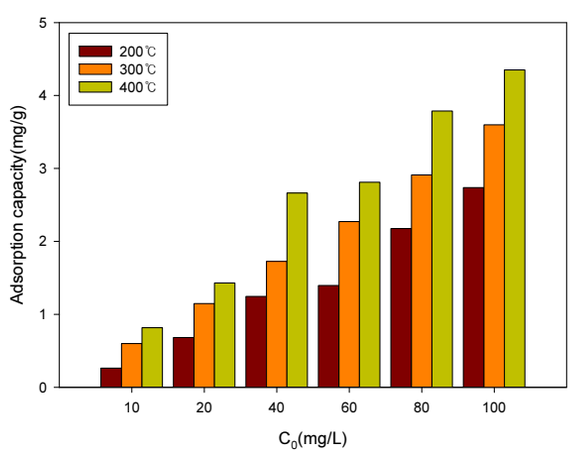

Fig. 5. NH_4-N adsorption amounts of Sudangrass biochars according to NH_4-N concentration.

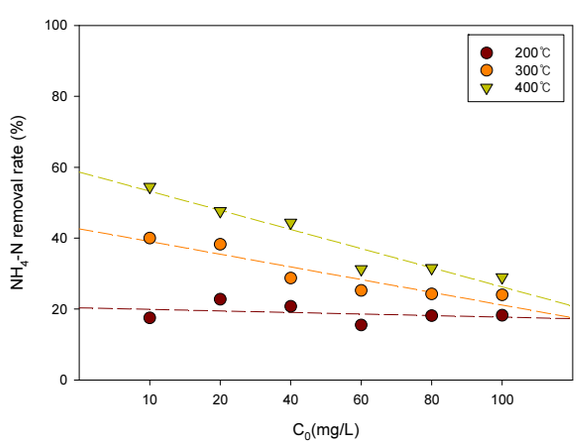

Fig. 6. NH_4-N removal efficiency of Sudangrass biochars according to NH_4-N concentration.

오차의 양을 0.1g으로 고정시키고 NH_4-N 용액농도를 10~100mg/L로 나누어 실험한 결과, 모든 탄화 온도에서 NH_4-N 용액의 농도가 높을수록 더 많은 양의 NH_4-N이 흡착되는 것을 확인할 수 있었다. 반면 NH_4-N의 제거효율은 NH_4-N의 농도가 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보였으며, NH_4-N 용액 농도 10mg/L 기준 바이오차의 탄화온도가 400℃일 때 54.5%로 가장 높은 제거효율을 보였으며, 탄화온도가 낮아질수록 그 효율이 낮아져 17.5%로 나타났다.

3.4. 바이오차의 NH_4-N 흡착능력 평가

바이오차의 NH_4-N의 흡착능력을 평가하기 위해 Langmuir 흡착등온식을 적용하였으며, 탄화 온도별 도출된 직선식은 Fig. 7에 함께 나타내었다. 도출된 직선식을 Eq. 5에 적용하여 q_m과 b값을 구하고 Eq. 6에 적용하여 NH_4-N 농도별 R_L을 구하여 Table 3에 함께 정리하였다. 최대 단분자층 흡착량(q_m)은 탄화온도 200℃, 300℃, 400℃에서 각각 9.14mg/g, 4.77mg/g, 5.25mg/g을 나타내었으며, 흡착 친화도(b)는 0.004L/mg, 0.024L/mg, 0.040L/mg로 400℃에서 더 높은 흡착 친화도가 나타난 것으로 확인되었다. 탄화온도 200℃-400℃ 모두 r^2값이 0.97-0.99로 높은 상관관계를 나타내는 것으로 확인되었다. 무차원 상수(R_L)는 0.20-0.97로 모든 탄화온도에서 생성 된 바이오차의 경우, NH_4-N 농도에서 0과 1 사이의 범위에 포함되어 흡착에 효과적으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄화를 통해 수단그라스를 활용한 바이오차를 생산하였으며, 생성된 바이오차를 이용하여 흡착제로써 활용 가능성을 평가하고자 하였다. 탄화반응으로 인해 수단그라스의 화학구조가 분해

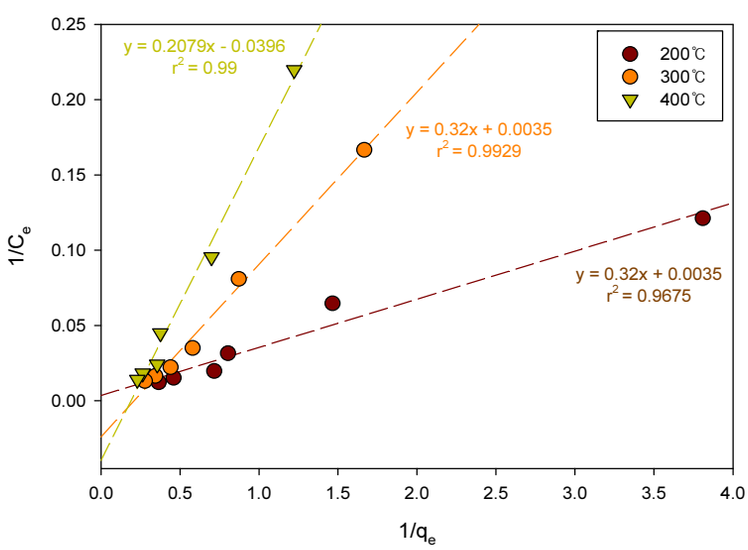

Fig. 7. Langmuir isotherms of $1/C_e$ vs. $1/q_e$ for NH_4-N.

Table 3. Langmuir Isotherm Parameters according to NH_4-N Concentration

Temp.	q_m (mg/g)	b (L/mg)	r^2	R_L					
				NH_4-N concentration					
				10	20	40	60	80	100
200℃	9.14	0.004	0.97	0.97	0.93	0.88	0.83	0.78	0.74
300℃	4.77	0.024	0.99	0.81	0.68	0.51	0.41	0.34	0.29
400℃	5.25	0.040	0.99	0.72	0.56	0.39	0.30	0.24	0.20

되면서 바이오차의 탄소 및 고정 탄소함량이 증가하였다. 바이오차의 pH는 탄화 온도가 높을수록 pH와 전기전도도가 높아지면서 전기전도도로 인해 양이온에 대해 높은 흡착 가능성을 보였다. 흡착실험 결과를 바탕으로 NH_4-N의 농도가 높아지면서 최대 54.5%, 최저 17.4%의 제거효율을 보였으며, 탄화 온도가 높을수록 바이오차의 기공 및 비표면적 증가로 인해 오염물질의 흡착이 용이해져 NH_4-N의 제거효율이 높아졌다. FT-IR 분석 결과, 탄화반응의 고온으로 인해 전체적인 표면 작용기의 감소가 나타났다.

재배의 안정성이 높고 빠른 생장률을 보이는 수단그라스와 같은 유기성 부산물을 탄화반응을 거쳐 활용한다면 방치되어있는 폐기물을 처리함과 동시에 기존 수처리 공정에서 흡착제로 활용되고 있는 활성탄의 대체 흡착제로써 활용한다면 활성탄에 비해 유해물질에 대한 흡착능력이 떨어질 수는 있으나 폐기물의 고부가가치를 생산한다는 점에서 경제적이고 친환경적인 흡착소재로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 결과물은 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜다부처패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(421037-03). 본 연구는 환경부의 폐자원에너지화 재활용 전문인력 양성사업으로부터 지원을 받았음(YL-WE-22-001).

References

1. Mainstone, C. P. and Parr, W., “Phosphorus in river-ecology and management”, Sci. Total Environ., 282, pp. 25~27. (2002).
2. Park, S. J., Shin, J. S. and Kawasaki, J., “Ammonia removal of activated carbons treated by anodic oxidation”, J. Korea Ind. Eng. Chem., 14(4), pp. 418~422. (2003).
3. Takaya, C. A., Fletcher, L. A., Singh, S., Anyikude, K. U. and Ross, A. B., “Phosphate and ammonium sorption capacity of biochar and hydrochar from different wastes”, Chemosphere, 145, pp. 518~527. (2016).
4. Tang, Y., Alam, M. S., Konhauser, K. O., Alessi, D. S., Xu, S., Tian, W. and Liu, Y., “Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater”, J. Clean. Prod., 209, pp. 927~936. (2019).
5. Hu, X., Zhang, X., Ngo, H. H., Guo, W., Wen, H., Li, C., Zhang, Y. and Ma, C., “Comparison study on the ammonium adsorption of the biochars derived from different kinds of fruit peel”, Sci. Total Environ., 707, p. 135544. (2020).
6. He, Q., Zhou, J., Song, Q., Zhang, W., Wang, H. and Liu, L., “Elucidation of microbial characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal at varying carbon to phosphorus ratios”, Bioresour. Technol., 241, pp. 127~133. (2017).
7. Yang, Q., Wang, X., Luo, W., Sun, J., Xu, Q., Chen, F., Zhao, J., Wang, S., Yao, F., Wang, D., Li, X. and Zeng, G., “Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived fom waste activated sludge”, Bioresour. Technol., 247, pp. 537~544. (2018).
8. Luo, L., Wang, G., Shi, G., Zhang, M., Zhang, J., He, J., Xiao, Y., Tian, D., Zhang, Y., Deng, S., Zhou, W., Lan, T. and Deng, O., “The characterization of biochars derived from rice straw and swine manure, and their potential and risk in N and P removal from water”, J. Environ. Manage., 245, pp. 1~7. (2019).
9. Vu, T. M., Trinh, V. T., Doan, D. P., Van, H. T., Nguyen, T. V., Vigneswaran, S. and Ngo, H. H., “Removing ammonium from waste water using

modified corncob-biochar", Sci. Total Environ., 579, pp. 612~619. (2017).
10. He, W., Gong, H., Fang, K., Peng, F. and Wang, K., "Revealing the effect of preparation parameters on zeolite adsorption performance for low and medium concentrations of ammonium", J. Envrion. Sci., 85, pp. 177~188. (2019).
11. Muhammad, A., Soares, A. and Jefferson, B., "The impact of background wastewater constituents on the selectivity and capacity of a hybrid ion exchange resin for phosphorus removal from wastewater", Chemosphere, 224, pp. 494~501. (2019).
12. Mochizuki, T., Kubota, M., Matsuda, H. and Camacho, L. F. D., "Adsorption behaviors of ammonia and hydrogen sulfide on activated carbon prepared from petroleum coke by KOH chemical activation", Fuel Process. Technol., 144, pp. 164~169. (2016).
13. Woo, S. H., "Biochar for soil carbon sequestration", J. Clean Technol., 19(3), pp. 201~211. (2013).
14. Li, H., Dong, X., da Silva, E. B., de Oliveira, L. M., Chen, T. and Ma, L. Q., "Mechanisms of metal sorption by biochas: biochar characteristics and modifications", Chemosphere, 178, pp. 466~478. (2017).
15. Lim, J. E., Lee, S. S. and Ok, Y. S., "Efficiency of poultry manure biochar for stabilization of metals in contaminated soil", J. Appl. Biol. Chem., 58(1), pp. 39~50. (2015).
16. Luo, Z., Yao, B., Yang, X., Wang, L., Xu, Z., Yan, X., Lin, T., Zhou, H. and Zhou, Y., "Novel insights into the adsorption of organic contaminants by biochar: A review", Chemosphere, 287, p. 132113. (2022).
17. Jiang, T. Y., Jiang, J., Xu, R. K. and Li, Z., "Adsorption of Pb(II) on variable charge soils amended with rice-straw derived biochar", Chemosphere, 89(3), pp. 249~256. (2012).
18. Wang, Z., Shen, D., Shen, F. and Li, T., "Phosphate adsorption on lanthanum loaded biochar", Chemosphere, 150, pp. 1~7. (2016).
19. Choi, Y. H., Moon, Y. H., Ahn, S. H., Yoon, Y. M., Cha, Y. L., Koo, B. C., Park, K. G., Han, H. S. and Kim, W. S., "Characteristics of sweet sorghum germplasm for bioethanol production in reclaimed soil", Korean J. Crop Sci., 57(4), pp. 384~388. (2012).
20. Mass, E. V., Poss, J. A. and Hoffman, G. J., "Salinity sensitivity of sorghum at three growth stages", Irrig. Sci., 7, pp. 1~11. (1986).
21. Jadia, C. D. and Fulekar, M. H., "Phytotoxicity and remediation of heavy metals by fibrous root grass (Sorghum)", J. Appl. Biosci., 10(1), pp. 491~499. (2008).
22. Choi, I. W., Kim, S. U., Seo, D. C., Kang, B. H., Sohn, B. K., Rim, Y. S., Heo, J. S. and Cho, J. S., "Biosorption of heavy metals by biomass of seaweeds, Laminaria species, Ecklonia stolonifera, Gelidium amansii and undaria pinnatifida", Korean, J. Environ. Agri., 24(4), pp. 370~378. (2005).
23. [김태준, 김선화, 김해진, "우리나라 전통 숯의 물리・화학적 특성", 대학위생학회지] Kim, J. T., Kim, S. H., Kim, H. J., "Charateristics of Physical and Adsorption of Korean Traditional Charcoal", Korean J. Sanitation., 21(4), pp. 77~86. (2006).
24. Henry, J. G., Heinke, G. W. and Burton, I., Environmental science and engineering, NJ: Prentice Hall, 445(452), pp. 456~457. (1996).
25. Miller, G. T. and Spoolman, S., Environmental science, Cengage Learning, (2012).
26. Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhou, Y. and Yang, L., "Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties", Chem. Eng. J., 240, pp. 574~578. (2014).
27. Ryu, D. Y., Lee, J. K., Kim, D. Y., Jang, K. H., Lee, J. W. and Kim, D. G., "Enhancement of the Biofuel Characteristics of Empty Fruit Bunches through Hydrothermal Carbonization by Decreasing the Inorganic Matters", Energies, 15(21), p. 8154. (2022).