

FOOD&CHEMISTRY

Adsorption characteristics of NH₄-N by biochar derived from pine needles

Yun-Gu Kang¹, Jun-Young Lee¹, Jin-Hyuk Chun¹, Jae-Han Lee¹, Yeo-Uk Yun^{2*}, Taek-Keun Oh^{1*}

¹Department of Bio-Environmental Chemistry, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

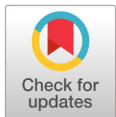
²Chungnam Agricultural Research and Extension Services, Yesan 32418, Korea

*Corresponding author: aoggi61@korea.kr, ok5382@cnu.ac.kr

Abstract

Nitrogen applied to soil is highly prone to leaching and volatilization leading to gaseous emissions of nitrous oxide (N₂O) and ammonia (NH₃) which are of great environmental concern. Usage of biochar to reduce the discharge of nitrogen to the environment has attracted much interest in the recent past. Biochar is produced by pyrolyzing various biomasses under oxygen-limited conditions. Biochar is a carbonized material with high adsorptive powers for not only plant nutrients but also heavy metals. The objective of this study was to investigate the adsorption characteristics of NH₄-N onto biochar made from pine needles. The biochar was produced at various pyrolysis temperatures including 300, 400 and 500°C and holding times of 30 and 120 minutes. The Langmuir isotherm was used to evaluate the adsorption test results. The chemical properties of the biochar varied with the pyrolysis conditions. In particular, the pH, EC and total carbon content increased with the increasing pyrolysis conditions. The rate of adsorption of NH₄-N by the biochar decreased with the increasing pyrolysis conditions. Of these conditions, biochar that was pyrolyzed at 300°C for 30 minutes showed the highest adsorption rate of approximately 0.071 mg·g⁻¹. Thus, the use of biochar pyrolyzed at low temperatures with a short holding time can most efficiently reduce ammonia emissions from agricultural land.

Keyword: adsorption, biochar, NH₄-N, Langmuir isotherm



OPEN ACCESS

Citation: Kang YG, Lee JY, Chun JH, Lee JH, Yun YU, Oh TK. Adsorption characteristics of NH₄-N by biochar derived from pine needles. Korean Journal of Agricultural Science 48:589-596. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20210049>

Received: June 18, 2021

Revised: July 25, 2021

Accepted: August 18, 2021

Copyright: © 2021 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

질소(N)는 토양 내에서 이동성이 큰 물질로 무기화, 미생물에 의한 고정, 휘산 등 다양한 순환 경로를 통해 토양 내에서 순환한다(Scolow, 1999; Cho et al., 2006). 토양 내 질소는 크게 유기태질소와 무기태질소로 나뉘며, 대부분 유기태질소의 형태로 존재한다. 식물이 이용할 수 있는 질소의 형태는 대부분 무기태질소인 암모늄태질소(NH₄⁺-N)와 질산태질소(NO₃⁻-N)이며, 무기태질소의 함량은 토양 내 총 질소 함량의 약 2% 미만으로 알려져 있다(Li et al., 2013). 그러나 작물의 생육 증진을 목적으로 시비한 화학비료 중 질소질비료는 작물 흡수에 의한 회수율이 일반적으로 60% 이하이다. 남은 질소질비료의 성분은 유기태질소의 형태로

전환되어 존재하거나, 탈질 과정을 통해 아산화질소(N_2O) 혹은 암모니아(NH_3) 등의 가스 형태로 전환되어 유실된다(Allison, 1966; Kundler, 1970). 환경으로 유실된 아산화질소는 성층권을 파괴하는 온실가스이며, 암모니아는 2차 미세먼지 전구 물질로 인체 내 유입 시 호흡기 및 심혈관계 질환을 일으킨다(Hong et al., 2019a). 암모니아는 대부분 인위적인 활동에 의해 발생하며, 주로 화학비료나 가축분퇴구비의 사용 등에 의해 많은 양이 배출되고 있다(Bouwman et al., 1997; Hong et al., 2019b). 그로 인해 최근에는 인위적인 투입에 따른 암모니아 배출량 평가와 이를 저감시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Park et al., 2014; Kim et al., 2020; Park et al., 2020a).

바이오차(biochar)는 아마존의 *terra preta*에서 유래되어 농업 생산성 증가와 탄소 격리에 있어서 중요한 역할을 수행한다고 알려져 있다. 바이오차는 산소가 제한된 환경에서 왕겨, 볏짚, 과수 전정 가지 등 바이오매스를 비교적 높은 온도에서 열 분해하여 제조한다(Oh et al., 2017; Park et al., 2020b). 바이오차의 화학적 특성은 열 분해 온도 및 시간 등의 제조 조건과 바이오매스의 종류에 따라 변화된다(Woo, 2013; Lee et al., 2019). 바이오차는 높은 탄소 함량으로 인한 탄소 격리, 다공성 육각 구조, 표면의 미세공극을 이용한 중금속(Pb, Cu, Zn, Cd) 흡착, 토양의 pH 조절, 질소와 인 등의 영양분 손실 방지, 이온교환 능력의 증가, 작물 생육 증진, 기후변화 완화 등의 효과를 가진다(Lehmann et al., 2003; Cao et al., 2009; Woo, 2013; Kim and Kim, 2014; Lee et al., 2018).

따라서 본 연구는 농경지에서 발생하는 2차 미세먼지의 전구 물질인 암모니아의 배출량 저감을 위해 솔잎으로 제조한 바이오차의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 흡착 특성을 규명하고자 하였다.

Materials and Methods

공시 재료

바이오차의 원료로 사용된 솔잎은 충남대학교 내에서 채취하였으며, dry oven (Natural Convection Oven, Jeio tech, Seoul, Korea)을 이용하여 80°C 에서 48시간 건조 후 실험에 사용하였다. 건조가 끝난 솔잎은 furnace (1100°C Box Furnace, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)를 이용하여 열 분해 온도($300, 400, 500^\circ\text{C}$) 및 시간(30, 120 min)에 따라 제조하였다.

솔잎 바이오차의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 흡착 평가

솔잎 바이오차의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 흡착 평가는 NH_4Cl (Extra pure, Samchun Chemical, Seoul, Korea)를 이용하여 바이오차의 투입량($0.2 - 10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)에 따라 실시하였다. 각각의 바이오차를 투입 후 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 조정된 $\text{NH}_4\text{-N}$ 용액 40 mL를 첨가하여 25°C 에서 160 rpm으로 24시간 진탕하였다. 진탕이 끝난 시료는 여과하여 바이오차의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 흡착량을 산출하기 위해 Indophenol blue법을 이용하여 평형 상태의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 잔류 농도를 UV/Vis-spectrophotometer (GENESYS 50 UV-Visible spectrometer, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)로 분석하였다(Searl, 1984). 열 분해 조건이 다른 바이오차의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 흡착 효율을 평가하기 위해 Langmuir 흡착등온식에 적용하였다. Langmuir 흡착등온식은 식(1)과 같이 표현된다(Langmuir, 1918).

$$Q_e/Q_m = b \cdot C_e / (1 + b \cdot C_e) \quad (1)$$

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{W} \quad (2)$$

식(2)는 식(1)을 계산하기 전 필요한 Q_e 값을 구하는 식이며, Q_e 는 바이오차의 단위 g당 흡착된 NH₄-N의 양(mg·g⁻¹)이다. 식(2)의 C_e 는 잔류 용액 중 NH₄-N의 농도(mg·L⁻¹), C_0 는 NH₄-N의 초기 농도(mg·L⁻¹), V 는 용액의 부피(L), W 는 바이오차의 투입량(g)을 나타낸다. 식(1)의 Q_m 은 바이오차의 최대 단분자층 흡착량(mg·g⁻¹), b 는 바이오차와 NH₄-N의 결합 세기(L·mg⁻¹)를 나타낸다. 식(2)는 식(3) - 식(5)와 같은 형태의 직선식으로 표현할 수 있다.

$$1/Q_e = 1/b \cdot Q_m \cdot 1/C_e + 1/Q_m \quad (3)$$

$$C_e/Q_e = 1/Q_m \cdot C_e + 1/Q_m \cdot b \quad (4)$$

$$1/C_e = b \cdot Q_m \cdot 1/Q_e + b \quad (5)$$

식(3) - 식(5)에 C_e 와 Q_e 를 대입하여 Q_m 과 b 를 구할 수 있다. Na et al. (2011)에 따르면 Langmuir 흡착등온식에 대해 다양한 형태의 직선식이 제안되어 있으며, 그 중 식(3)과 식(4)와 같은 형태가 가장 많이 사용된다고 보고하였다(Weber, 1972; Stum and Morgan, 1981). 또한 흡착 실험의 결과를 흡착등온식에 적용했을 때 가장 높은 R²값을 보이는 직선식의 결과값이 실험 결과를 가장 잘 표현한 것이라고 보고하였다. 따라서 본 실험에서도 가장 높은 R²값을 보이는 식(5) 형태의 직선식을 이용하여 바이오차의 NH₄-N 흡착 특성을 평가하였다. 또한 직선식에 대입하여 얻은 b 값과 초기 농도(C_0)를 통해 평형 계수 혹은 분리 계수인 R_L 값을 구할 수 있으며, R_L 값에 따른 흡착등온식 분류 체계는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Data information used in study.

Value of * R_L	Type of Langmuir isotherm
$R_L > 1$	Unfavorable
$R_L = 1$	Linear
$0 < R_L < 1$	Favorable
$R_L = 0$	Irreversible

* R_L , equilibrium coefficient of Langmuir isotherm.

바이오차의 화학적 특성 분석

바이오차의 pH와 EC는 바이오차와 증류수를 1 : 20 (w·w⁻¹)의 비율로 혼합하여 만든 혼합액을 pH & EC meter (ORION™ Versa Star Pro™, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)로 측정하였다. 총 탄소 함량(T-C, total carbon)과 총 질소 함량(T-N, total nitrogen), 총 수소 함량(T-H, total hydrogen)은 CN Analyzer (TruSpec Micro, Leco, Michigan, USA)를 이용하여 분석하였다.

Results and Discussion

바이오차의 화학적 특성

열 분해 조건에 따른 솔잎 바이오차의 화학적 특성 변화는 Table 2에 나타내었다. 바이오차의 회수율은 열분해 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 300°C에서의 회수율은 58.33%이었으며, 열 분해 시간이 30분에서 120분으로 증가하면서 약 16.5%가 감소하였다. 그에 비해 400°C와 500°C에서는 열 분해 시간이 증가해도 바이오차의 회수율은 큰 차이를 나타내지 않았다. 바이오차의 pH는 origin (pH 4.43)에 비해 열 분해 온도(300, 400, 500°C)가 증가함에 따라 30분간 열 분해 시 pH 5.26, 7.09, 9.36으로 증가하였고, 120분 동안 열 분해 시 pH 7.49, 9.55, 10.24로 증가하였다. 바이오차의 EC는 300°C와 400°C에서 origin (20.96 dS·m⁻¹)에 비해 감소하는 경향을 나타내었고, 500°C에서는 origin보다 증가하는 경향을 나타내었다. 열 분해 온도에 따른 바이오차의 화학성을 분석한 Cantrell et al. (2012)에 의하면 500°C 이상의 고온에서 열 분해 시 바이오매스 내의 휘발성 물질이 손실되어 다양한 염들이 농축되면서 EC가 증가할 수 있다고 하였다. 바이오차의 총 탄소 함량은 열 분해 온도 및 시간이 증가함에 따라 증가하였다. 바이오차의 총 질소 함량의 경우 대부분의 선행연구에서 열 분해 온도가 증가할수록 감소한다고 보고하였다(Hossain et al., 2011; Figueiredo et al., 2018). 본 연구에서는 300°C에 비해 400°C에서 총 질소 함량은 약 17% 증가하였고, 500°C에서부터 300°C와 비슷한 수준으로 감소하였다. 바이오차의 총 수소 함량은 열분해 조건이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 바이오차의 H : C (hydrogen : carbon) 비율을 통해 구조의 안정성을 파악할 수 있었으며, 국제 바이오차협회(IBC, International Biochar Initiative)에서는 H : C 비율이 0.7 이하일 때 구조적 안정성이 유지된다고 하였다(McLaughlin et al., 2009; Lee et al., 2020). 본 연구에 사용된 바이오차 중 IBC 기준에 부합하는 바이오차 제조 조건은 400°C에서 30분, 500°C에서 30분과 500°C에서 120분이며, 이와 같은 조건으로 제조한 바이오차는 토양 내 장기간 저장이 가능할 것으로 사료된다.

Table 2. Manufacturing conditions and chemical properties of biochar used in this experiment.

Feedstock	Temp. (□)	Time (min)	Yield (%)	pH (1 : 20, D.H ₂ O)	EC (dS·m ⁻¹)	T-C	T-N (%)	T-H	H : C ratio
Pine needles	Origin		-	4.43±0.01	20.96±0.02	49.53±0.12	1.28±0.33	6.64±0.07	1.60±0.01
	300	30	58.33±1.90	5.26±0.01	4.76±0.07	62.17±0.25	1.91±0.26	5.96±0.03	1.14±0.00
		120	39.57±0.81	7.49±0.04	3.31±0.05	66.50±0.00	1.83±0.00	4.82±0.01	0.84±0.00
	400	30	37.93±1.10	7.09±0.05	3.04±0.02	67.00±0.10	2.09±0.20	4.70±0.02	0.40±0.00
		120	37.93±1.10	9.55±0.02	13.29±0.27	68.93±0.06	2.06±0.02	3.66±0.02	0.86±0.00
	500	30	26.47±0.15	9.36±0.01	28.26±0.21	71.50±0.00	1.97±0.02	2.56±0.00	0.63±0.00
120		25.67±0.85	10.24±0.00	26.45±0.36	72.50±0.10	1.83±0.00	2.46±0.03	0.43±0.00	

Temp., pyrolysis temperature; D.H₂O, distilled water; EC, electrical conductivity; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; T-H, total hydrogen; H : C ratio, hydrogen to carbon ratio.

바이오차의 NH₄-N 흡착 효율

솔잎 바이오차 투입량 변화에 따른 NH₄-N의 흡착 비율 및 바이오차의 무게(g)에 따른 NH₄-N의 흡착량은 Fig. 1에 나타내었다. 바이오차의 투입량이 0.2 g L⁻¹에서 10 g L⁻¹로 증가할수록 바이오차의 NH₄-N 흡착 비율은 증가하였지만 바이오차의 무게(g)에 따른 흡착량은 감소하는 경향을 나타내었다. Kizito et al. (2015)에 의하면 바이오차의 투입량이 증가하면서 흡착 부위의 중첩 현상으로 인해 바이오차의 흡착이 원활하게 이루어지지 못한다고 보고하였다. 본 실험에서도 이와 유사한 현상으로 인해 솔잎 바이오차의 흡착 효율이 감소하였다고 판단하였다.

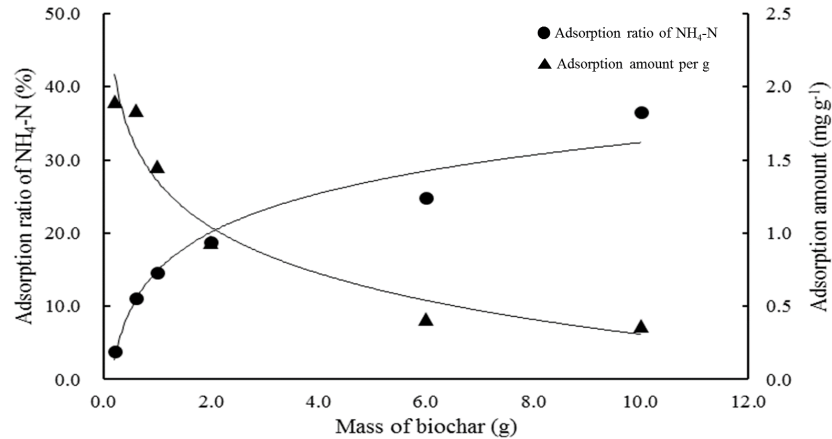


Fig. 1. Adsorption ratio of NH₄-N and adsorption amount by mass of biochar.

바이오차의 NH₄-N 흡착 효율 평가를 위해 실험결과를 Langmuir 흡착등온식에 적용하였다(Fig. 2). 바이오차의 단위 g당 최대 단분자층 흡착량(Q_m)과 흡착 친화도(b), 평형 계수(R_L)을 산출하였다(Table 3). 열 분해 온도(300, 400, 500°C)에 따른 솔잎 바이오차의 단위 g당 최대 단분자층 흡착량(Q_m)은 30분간 열 분해 시 0.071, 0.033, 0.008 mg·g⁻¹이었으며, 120분 동안 열 분해 시 0.017, 0.011, 0.003 mg·g⁻¹으로 열 분해 온도 및 시간이 증가함에 따라 바이오차의 단위 g당 최대 단분자층 흡착량(Q_m)은 감소하는 경향을 나타내었다. 바이오차의 흡착 친화도(b)는 30분 동안 열 분해 시 0.089 - 0.099 L·mg⁻¹, 120분간 열 분해 시 0.100 - 0.107 L·mg⁻¹으로 흡착 친화도는 열 분해 시간이 증가함에 따라 증가하였다. Kim et al. (2008)의 연구 결과에 따르면 바이오차 제조 시 열 분해 시간이 증가하면 바이오차의 구조 중 액상 흡착을 담당하는 중간 세공(mesopore)이 오랜 열 분해 시간으로 인해 감소한다고 보고하였다. 본 연구에서도 열 분해 시간이 30분에서 120분으로 증가함에 따라 NH₄-N 용액을 흡착하는 중간 세공이 감소하여 바이오차의 흡착 친화도(b)는 증가하였지만 단위 g당 최대 단분자층 흡착량(Q_m)은 감소한 것으로 판단된다. 바이오차의 평형 계수(R_L)은 0.48 - 0.53으로 Langmuir 흡착등온식을 이용하여 계산한 R_L값이 0과 1 사이에 포함되므로, Langmuir 흡착등온식에 부합되는 것으로 판단된다.

Table 3. Parameters calculated from Langmuir isotherm formula.

Feedstock	Temp. (□)	Time (min)	Qm ^x (mg·g ⁻¹)	b ^y (L·mg ⁻¹)	R ²	R _L ^z
Pine needles	300	30	0.071	0.089	0.93	0.53
		120	0.017	0.100	0.95	0.50
	400	30	0.033	0.098	0.54	0.51
		120	0.011	0.107	0.64	0.48
	500	30	0.008	0.099	0.73	0.50
		120	0.003	0.107	0.86	0.48

Temp., pyrolysis temperature.

^x Maximum monolayer adsorption amount of biochar.

^y Strength of binding between biochar and NH₄-N.

^z Equilibrium coefficient of Langmuir isotherm.

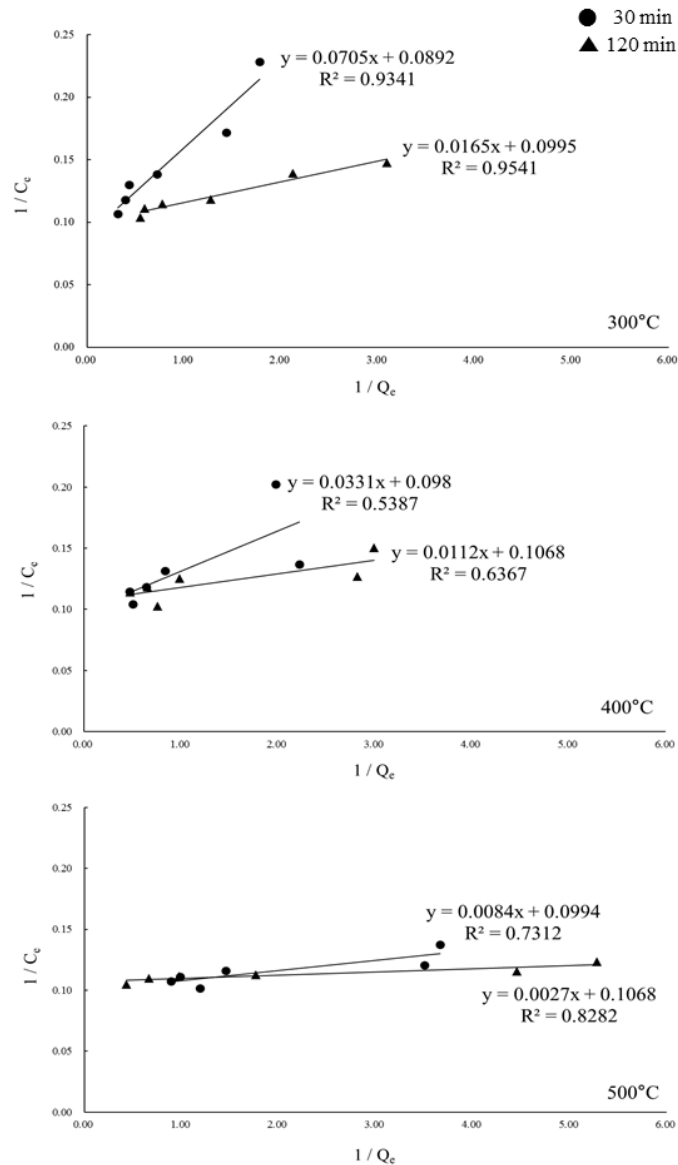


Fig. 2. Langmuir isotherm formula of NH₄-N on pine needles biochar by pyrolysis temperature. C_e, concentration of NH₄-N in residual solution; Q_e, amount of adsorbed NH₄-N per g of biochar.

Conclusion

솔잎 바이오차를 이용해 2차 미세먼지의 전구 물질인 암모니아를 저감하기 위해 바이오차의 NH₄-N 흡착 특성을 규명하고자 하였다. 화학비료를 시비하는 농경지에서 배출되는 암모니아 배출량 저감을 목적으로 수행되었기에 NH₄-N 용액의 농도를 비교적 낮은 농도로 고정한 상태에서 바이오차의 투입량을 변화시켜 수행하였다. 바이오차는 제조 과정 중 열 분해 온도 및 시간에 따라 화학적 특성이 변화하였으며, 특히 열 분해 온도가 시간에 비해 회수율을 비롯한 바이오차의 화학적 특성에도 많은 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 열 분해 온도 및 시간이 증가할수록 바이오차의 화학적 특성(pH, T-C)은 증가하였고, NH₄-N 흡착 효율은 감소하였다. 따라서 농경지 토양에서 발생하는 암모니아 저감을 위해서는 낮은 온도에서 짧은 시간 동안 열 분해한 바이오차를 처리 시 토양 내 NH₄-N을 가장 효율적으로 흡착하여 농경지 토양에 안정된 상태로 탄소를 고정하며, 발생하는 암모니아의 배출량을 저감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgements

본 논문은 농촌진흥청(Rural Development Administration of Korea)의 연구사업(세부과제번호: PJ01425302)의 지원에 의해 수행되었습니다.

Authors Information

Yun-gu Kang, <https://orcid.org/0000-0001-5368-5910>

Jun-young Lee, Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam university, Undergraduate student

Jin-hyuk Chun, <https://orcid.org/0000-0002-3802-6834>

Jae-han Lee, <https://orcid.org/0000-0001-5761-2006>

Yeo-Uk Yun, Chungnam Agricultural Research and Extension Service, Agricultural researcher

Teak-keun Oh, <https://orcid.org/0000-0003-0215-0427>

References

- Allison FE. 1966. The fate of nitrogen applied to soils. *Advances in Agronomy* 18:219-258.
- Bouwman AF, Lee DS, Asman WAH, Dentener FJ, van der Hoek KW, Olivier JGJ. 1997. A global high-resolution emission inventory for ammonia. *Global Biogeochemical Cycles* 11:561-587.
- Cantrell KB, Hunt PG, Uchimiya M, Novak JM, Ro KS. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresour Technology* 107:419-28.
- Cao XD, Ma LN, Cao B, Harris W. 2009. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine. *Environmental Science and Technology* 43:3285-3291.
- Cho JY, Koo JW, Sohn JK. 2006. Chemical properties in the soils of reclaimed and natural tidelands of southwest coastal area of Korea (III): Distribution of nitrogens fractions. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48:3-8. [in Korean]
- Figueiredo C, Lopes H, Coser T, Vale A, Busato J, Aguiar N, Canellas L. 2018. Influence of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of biochar from sewage sludge. *Archives of Agronomy and Soil Science* 64:881-889.
- Hong SC, Jang ES, Yu SY, Lee GH, Kim KS, Song SN. 2019a. Comparison of the effect of peat moss and zeolite on ammonia volatilization as a source of fine particulate matter (PM 2.5) from upland soil. *Korean Society for Environmental Agriculture* 46:907-914. [in Korean]
- Hong SC, Jang ES, Yu SY, Lee GH, Kim KS, Song SN. 2019b. Ammonia emission inventory in agriculture. *Climate Change & Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju, Korea.* [in Korean]
- Hossain MK, Strezov V, Chan KY, Ziolkowski A, Nelson PF. 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management* 92:223-228.
- Kim JM, Chung CK, Min BH. 2008. A study on the optimal condition of producing charcoals to develop activated carbons from a discarded timber. *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling* 17:66-75. [in Korean]
- Kim MS, Koo N, Kim JG. 2020. A comparative study on ammonia emission inventory in livestock manure compost application through a foreign case study. *Korean Journal of Environmental Biology* 38:71-81. [in Korean]
- Kim MY, Kim GH. 2014. Analysis of environmental impacts for the biochar production and soil application. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 36:461-468. [in Korean]
- Kizito S, Wu S, Kirui WK, Lei M, Lu Q, Bah H, Dong R. 2015. Evaluation of slow pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggery manure anaerobic digestate slurry. *Science of the Total Environment* 505:102-112.

- Kundler P. 1970. Utilization, fixation, and loss of fertiliser nitrogen. *Albrecht-Thaer-Architecture* 14:191-210.
- Langmuir I. 1918. The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum. *Journal of American Chemistry Society* 40:1361-1403.
- Lee JH, Luyima D, Ahn JY, Park SY, Choi BS, Oh TK, Lee CH. 2019. Effect of different biochar formulations on the growth of cherry tomatoes. *Korean Journal of Agricultural Science* 46:931-939. [in Korean]
- Lee JH, Seong CJ, Kang SS, Lee HC, Kim SH, Lim JS, Kim JH, Yoo JH, Park JH, Oh TK. 2018. Effect of different types of biochar on the growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*). *Korean Journal of Agricultural Science* 45:197-203. [in Korean]
- Lee SI, Kim GY, Choi EJ, Lee JS, Gwon HS, Shin JD. 2020. Effect of biochar application on nitrous oxide emission in the soil with different types of nitrogen fertilizer during corn (*Zea mays*) cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 39:297-304. [in Korean]
- Lehmann J, da Silva JP, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant Soil* 249:343-357.
- Li SX, Wang ZH, Stewart BA. 2013. Responses of crop plants to ammonium and nitrate N. *Advances in Agronomy* 118:205-397.
- McLaughlin H, Anderson PS, Shields FE, Reed TB. 2009. All biochars are not created equal, and how to tell them apart. pp. 1-36. In *Proceedings, North American Biochar Conference*.
- Na CK, Han MY, Park HJ. 2011. Applicability of theoretical adsorption models for studies on adsorption properties of adsorbents [I], *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 33:606-616. [in Korean]
- Oh TK, Lee JH, Kim SH, Lee HC. 2017. Effect of biochar application on growth of Chinese cabbage (*Brassica Chinensis*). *Korean Journal of Agricultural Science* 7: 359-365. [in Korean]
- Park JH, Park SJ, Seo YJ, Kwon OH, Choi SY, Park SD, Kim JE. 2014. Effect of mixed treatment of urea fertilizer and zeolite on nitrous oxide and ammonia emission in upland soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 47:368-373. [in Korean]
- Park JS, Jeong HN, Hong SW. 2020a. Estimation of particulate matter and ammonia emission factors for mechanically-ventilated pig houses. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62:33-42. [in Korean]
- Park SY, Choi HY, Kang YG, Park SJ, Luyima D, Lee JH, Oh TK. 2020b. Evaluation of ammonia (NH₃) emissions from soil amended with rice hull biochar. *Korean Journal of Agricultural Science* 47:1049-1056. [in Korean]
- Scolow RW. 1999. Nitrogen management and the future of food: Lessons from management of energy and carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96:6001-6008.
- Searle PL. 1984. The Berthelot or indophenol reaction and its use in the analytical chemistry of nitrogen.
- Stum W, Morgan JJ. 1981. *Aquatic chemistry*, 2nd ed. Wiley inter science, New York, USA.
- Weber JJ. 1972. *Adsorption in physicochemical processes for water quality control*. Wiley Inter science, New York, USA.
- Woo SH. 2013. Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technology* 19:201-211. [in Korean]