



## 참나무 바이오차의 인산염 인( $PO_4-P$ ) 흡착특성

최용수, 홍승길, 김성철\*, 신중두<sup>†</sup>

국립농업과학원 농업환경부, 충남대학교 농업생명과학대학 생물환경화학과\*

(2015년 8월 26일 접수, 2015년 9월 4일 수정, 2015년 9월 7일 채택)

## Adsorption Characteristics of Aqueous Phosphate Using Biochar Derived from Oak Tree

Yong-Su Choi, Seung-Gil Hong, Sung-Chul Kim\*, Joung-Du Shin<sup>†</sup>

Department of Agricultural Environment, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Bio Environmental Chemistry, College of Agriculture & Life sciences, Chungnam National University\*

### ABSTRACT

Objective of this study was to investigate adsorption characteristics of  $PO_4-P$  to biochar produced from oak tree in respective to reduce eutrophication from runoff water in the cropland. For adsorption experiment, input amount of biochar was varied from 4 to 20 g/L with 30 mg/L  $PO_4-P$  solution. Adsorption amounts and removal rates of  $PO_4-P$  was increased at 3 times in 4~14 g/L, and increased at 28.6% in 4~16 g/L, respectively. The maximum adsorption amount ( $q_m$ ) and binding strength constant( $b$ ) were calculated as 0.10 mg/g and 0.06 L/mg, respectively. The sorption of  $PO_4-P$  to biochar was fitted well by Langmuir model because it was observed that dimensionless constant( $R_L$ ) was 0.37. It was indicated that biochar is favorably adsorbed  $PO_4-P$  because this value lie within  $0 < R_L < 1$ . Therefore, biochar produced from oak tree could be used as adsorbent for reduce eutrophication from runoff water in the cropland.

Keywords : Cropland, Eutrophication, Nutrients, Langmuir isotherm

### 초 록

본 연구의 목적은 농경지에서 유출되는 유거수로부터 부영양화를 감소시키기 위하여 참나무를 원료로 제조한 바이오차의 인산염 인( $PO_4-P$ ) 흡착특성을 구명하는 것이었다. 30 mg/L  $PO_4-P$  용액에 참

<sup>†</sup>Corresponding author(jdshin1@korea.kr)

나무 바이오차 투입량을 4~20 g/L로 변화시키는 조건으로 실험을 수행하였다.  $PO_4-P$ 의 흡착량은 4~14 g/L 범위에서 3배 증가하였고, 제거율은 4~16 g/L 범위에서 28.6% 증가하였다. 최대 단분자층 흡착능( $q_m$ )과 결합세기( $b$ )는 각각 0.10 mg/g, 0.06 L/mg으로 산출되었다. 또한 Langmuir 흡착등온식의 특징인 무차원상수( $R_L$ )는 0과 1사이로 나타나 Langmuir 흡착등온식을 잘 표현하여 흡착에 용이함을 알 수 있었다. 따라서, 참나무를 원료로 제조한 바이오차는 농경지 유거수로부터 부영양화를 감소시키기 위한  $PO_4-P$  흡착제로 용이하다고 판단된다.

주제어 : 농경지, 부영양화, Langmuir 흡착등온식, 영양물질

## 1. 서론

최근 부영양화(eutrophication)는 세계적인 환경문제가 되고 있으며, 수계(water system)로 유입되는 과도한 영양물질이 주요 원인이 되고 있다<sup>1)</sup>. 호수, 하구퇴적지 및 해안 등으로 유입되는 영양물질은 인간의 활동으로 크게 증가하였고<sup>2)</sup>, 특히 질소(Nitrogen)와 인(Phosphorus)과 같은 영양물질이 유입되어 부영양화가 일어난다. 질소와 인은 조류(algae)의 분자식( $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ )에서 가장 작은 비율을 차지하고 있으며, 특히 인은 물속에서 조류(alga)의 성장을 조절하는 주요한 제한적 영양물질(limiting nutrient)으로써 작용한다<sup>3)</sup>. 부영양화가 발생한 호수와 저수지의 80%는 인과 관련 있고, 10%는 질소, 나머지 10%는 다른 요소와 관련 있다고 보고된 바 있다<sup>4)</sup>.

인은 각종 폐수, 농경지, 건설지역 및 도시지역으로부터 유입되며, 인을 많이 함유한 토양이 호수에 유입되면 토양 내 존재하는 인이 용해되어 식물성 플랑크톤(phytoplankton)과 수생식물의 성장을 촉진시키며<sup>5)</sup>, 이로 인하여 부영양화가 발생한다. 농업은 부영양화를 지속해서 유발시키는 원인 중 하나로<sup>6)</sup>, 농경지나 도시지역과 같은 비점오염원(non-point source)은 점오염원(point source)으로 대체되고 있고<sup>7)</sup>, 비료나 퇴비의 과도한 사용은 인이 토양에 축적되는 원인이 되고 있다<sup>8)</sup>. 인을 제거하기 위한 방법으로 주로 육생 및 수생 식물을 활용하는데<sup>9)</sup>, Seo *et al.*(2010)은 세 종류의 버들(*Salix species*)을 이용하여 부

영양화된 수생환경에서 질소와 인의 제거 가능성을 연구한 결과, 왕버들(giant pussy willow)는 질소를 58.9% 제거하였고, 갯버들(rosegold pussy willow)는 20.2%로 가장 많은 인을 제거하였다고 보고하였다<sup>10)</sup>. 하지만 식물을 이용하여 인을 제거하는데는 한계가 있고, 식물이 분해되는 과정에서 식물이 흡수한 영양물질들이 다시 배출되는 현상이 일어난다<sup>11)</sup>.

바이오차는 인을 제거하기 위하여 식물을 이용하는 방법보다 효율적이고 시간과 비용이 적게 드는 흡착제로써, 산소가 제한된 환경에서 바이오매스를 열분해(pyrolysis)하여 얻을 수 있는 탄소 함량이 높은 고체 물질이며, 바이오차를 토양개량제로써 토양에 첨가하면 탄소를 격리시켜 이산화탄소( $CO_2$ ), 메탄( $CH_4$ ) 뿐만 아니라 아산화질소( $N_2O$ )의 배출을 완화하며, 토양 pH 및 보수력 증가, 이온교환능력의 증가 등과 같은 특성에 의해 농업생산성을 향상시킬 수 있다<sup>12)</sup>. 또한, 중금속이나 다른 오염물질의 제거를 위한 흡착제로써의 바이오차 연구도 많이 수행되었다<sup>13)</sup>. Shin *et al.*(2014)은 옥수수 재배 시 왕겨를 원료로 제조한 바이오차를 사용하여 약 20~80%의 탄소가 격리되었다고 보고하였다<sup>14)</sup>. 또한, Choi *et al.*(2013)은 참깨 부산물을 원료로 제조한 바이오차는 Pb, Cu, Cd 및 Zn 중 특히 Pb를 제거에 효율이 좋다고 보고하였으며<sup>15)</sup>, Inyang *et al.*(2012)은 가축분뇨 폐수와 사탕무를 소재로 제조한 바이오차는 Ni과 Cd를 제거하는데 효율이 좋다고 보고한 바 있고<sup>16)</sup>, Choi *et al.*(2015)은 왕겨를 소재로 제조한 바이오차의

$\text{NH}_4\text{-N}$  제거율과 흡착량은 각각 20.2%, 0.5 mg/g로 보고하였다<sup>17)</sup>.

또한, 바이오차와 같은 흡착제는 흡착평형을 기반으로 하는 흡착등온식을 이용하여 평가하고 있으며, 흡착등온식은 일정한 온도에 흡착질의 평형농도와 흡착제의 단위 그램당 평형흡착량의 관계를 나타내는 것으로써<sup>18)</sup>, 중금속, 유기오염물질 및 영양물질 등과 흡착제간의 상호작용을 설명하는데 유용하고, 흡착제를 적합하게 활용하는데 중요한 역할을 하고 있다<sup>19)</sup>. 흡착등온식은 Langmuir, Freundlich, Elovich, Sips, Temkin 흡착등온식 등이 있으며, Langmuir와 Freundlich 흡착등온식을 주로 사용하고 있다. 이를 이용하여 기후변화 대응 탄소 격리를 위한 바이오차를 농경지에 시용할 경우 영양물질 제거 특히, 인의 제거를 위한 바이오차에 관한 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

따라서, 본 연구의 목적은 농경지 유거수로부터 발생하는 부영양화 현상을 일으키는 인이 강이나 호수와 같은 수계(water system)로 유입되는 것을 감소시키기 위한 방법으로 참나무를 원료로 제조한 바이오차의 활용가능성을 평가하기 위해 흡착등온식을 이용하여  $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 흡착 특성을 구명하는 것이었다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료 및 분석방법

실험재료로 사용한 바이오차는 황성군에서 참나무를 원료로 하여 만든 제품을 구매하여 이용하였다. 바이오차의 입자크기는 체(sieve)를 이용하여 1 mm 이하로 걸러 사용하였으며, 참나

무 바이오차의 화학적 특성은 [Table 1]에 나타내었다.

pH와 EC(electrical conductivity)는 참나무 바이오차 5 g을 플라스틱 병에 넣은 후 증류수 100 mL(1:20)를 가하여 왕복식 항온 진탕기(JP/NTS-3000, Eyela, Japan)에서 140 rpm으로 30분간 진탕한 후 pH/EC meter(Orion 4 star, Thermo scientific, USA)로 측정하였다. TC(Total carbon), TOC(Total organic carbon) 및 TIC(Total inorganic carbon)는 950°C에서  $\text{WO}_3$ 를 촉매로 사용하는 유기탄소분석기(Vario EL II, Elementar, Germany)를 이용하여 분석하였다. TOC 분석은 2M HCl을 이용하여 inorganic carbon을 완전히 제거하고 건조 시킨 후 유기탄소분석기(Vario EL II, Elementar, Germany)를 이용하여 측정하였다.  $\text{PO}_4\text{-P}$  용액은  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (Guaranteed Reagent, Junsei)로 제조하였고,  $\text{PO}_4\text{-P}$  분석은 425 D. Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method<sup>20)</sup>에 따라 UV spectrophotometer 측정용 키트(ST-Ammonium, C-Mac, Korea)로 420 nm에서 측정하였다.

### 2.2 바이오차 투입량 변화에 따른 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 흡착량 및 제거율 산정

참나무 바이오차의  $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 흡착량과 제거율을 산정하기 위하여  $\text{PO}_4\text{-P}$  농도를 30 mg/L로 고정시키고, 바이오차를 4~20 g/L의 범위로 변화시키는 조건으로 실험을 수행하였다. 각각의 플라스틱 병에 바이오차 투입량을 넣고 30 mg/L  $\text{PO}_4\text{-P}$  용액을 주입한 후 왕복식 항온 진탕기(JP/NTS-3000, Eyela, Japan)를 이용하여 2

[Table 1] Characteristics of Biochar From oak tree Used in this Study

pH	EC <sup>1)</sup>	TC <sup>2)</sup>	TOC <sup>3)</sup>	TIC <sup>4)</sup>	TN <sup>5)</sup>
(1:20)	(dS/m)	----- (%) -----			
10.3	7.0	88.2	77.3	10.9	0.2

<sup>1)</sup>EC; Electrical conductivity, <sup>2)</sup>TC; Total carbon, <sup>3)</sup>TOC; Total organic carbon, <sup>4)</sup>TIC; Total inorganic carbon, and <sup>5)</sup>TN; Total nitrogen

5°C에서 140 rpm으로 24시간 동안 교반 하였다. 교반이 완료된 후 Whatman No.2로 여과한 후 다시 Whatman 0.2 μm Nyl w/GMF를 이용하여 여과하였다. 이 여과액의 PO<sub>4</sub>-P 농도를 분석하여 참나무 바이오차의 PO<sub>4</sub>-P의 흡착량 및 제거율을 식(1)과 (2)를 이용하여 산정하였다.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{W} \dots\dots\dots (1)$$

$$Removal\ rate(\%) = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \dots (2)$$

식(1)과 (2)에서 q<sub>e</sub>는 바이오차에 흡착된 PO<sub>4</sub>-P의 양(mg/g), C<sub>0</sub>는 PO<sub>4</sub>-P 용액의 초기 농도(mg/L), C<sub>e</sub>는 흡착 후 PO<sub>4</sub>-P 용액의 평형 농도(mg/L), V는 용액의 부피(L), W는 바이오차 투입량(g)으로 나타내었다.

**2.3 PO<sub>4</sub>-P의 Langmuir 흡착등온식 적용**

Langmuir 흡착등온식은 PO<sub>4</sub>-P 흡착량(q<sub>e</sub>)과 흡착 후 PO<sub>4</sub>-P용액의 평형농도(C<sub>e</sub>)를 이용하여 Langmuir 흡착등온식을 적용하였다. Langmuir 흡착등온식은 일반적으로 흡착제의 흡착사이트에 대해 용매와 흡착질간의 경쟁이 강하지 않고 흡착질이 흡착제의 표면에 단층(monolayer)으로 흡착하는 경우에 나타나는 것<sup>18)</sup>으로, 식(3)에 나타내었다.

$$\frac{q_e}{C_e} = -bq_e + bq_m \dots\dots\dots (3)$$

식(3)에서 q<sub>e</sub>는 PO<sub>4</sub>-P 흡착량(mg/g), C<sub>e</sub>는 PO<sub>4</sub>-P 용액에 잔류하는 PO<sub>4</sub>-P 농도(mg/L), q<sub>m</sub>은 바이오차의 최대 단분자층 흡착량(mg/g), b는 결합 세기(L/mg)를 나타낸다. 식(3)에서 q<sub>e</sub>/C<sub>e</sub> 대 q<sub>e</sub>를 그래프에 도시하여 얻은 직선식의 기울기와 절편을 이용해 q<sub>m</sub>과 b값을 얻을 수 있다. q<sub>m</sub>값은 값이 클수록 최대 단분자층 흡착량

이 크다는 것을 나타내고, b값은 그 값이 클수록 흡착 친화도가 크다는 것을 나타낸다<sup>21)</sup>.

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \dots\dots\dots (5)$$

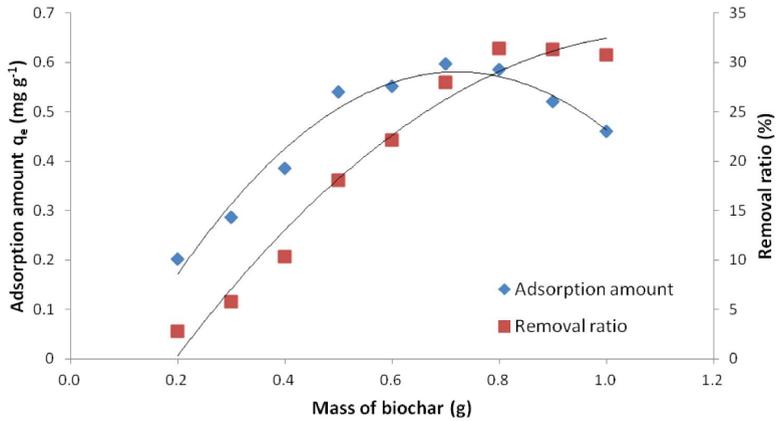
Langmuir 흡착등온식의 특징으로 무차원 상수 R<sub>L</sub>가 있으며, 식(5)로 정의된다<sup>22)</sup>. 무차원 상수 R<sub>L</sub> 값이 0과 1사이에 있으면 Langmuir 흡착등온식을 잘 표현하여 흡착에 용이함을 나타낸다<sup>23)</sup>.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 PO<sub>4</sub>-P의 흡착량 및 제거율**

경사지 밭 토양으로부터 유출되는 유거수의 TP(total phosphate) 농도는 강우 강도와 경사도에 따라 편차가 크지만, Shin *et al.*(2005)<sup>24)</sup>은 장마철에 가장 강수량이 많은 6월 26일의 옥수수 포장으로부터 유출되는 유거수의 TP농도가 평균 6 mg/L이었으므로, 약 5배 높은 농도인 30 mg/L를 기점으로 초기 농도를 정하여 흡착율과 제거율을 산정하였다. 참나무 바이오차 투입량에 따른 PO<sub>4</sub>-P의 흡착량 및 제거율을 조사한 결과는 [Fig. 1]과 같다. 30 mg/L PO<sub>4</sub>-P 용액에 바이오차를 4~20 g/L 수준으로 나누어 실험한 결과, PO<sub>4</sub>-P 흡착량은 4~14 g/L의 범위에서는 0.2~0.6 mg/g로 증가하였지만, 14 g/L 이후부터는 감소하는 경향을 보였다.

반면에, 참나무 바이오차의 PO<sub>4</sub>-P 제거율은 4~16 g/L의 범위에서는 2.7~31.3%로 증가하였다. 그러나 바이오차 투입량 16 g/L 이상부터는 제거율이 더 이상 증가하지 않고 포화되는 형태를 보여 전체적으로 로그 함수의 그래프를 보였다. 결과적으로 바이오차 투입량이 증가함에 따라 용액 내 PO<sub>4</sub>-P가 바이오차에 흡착할 수 있는 흡착 표면적이 증가하여 흡착량과 제거율이 증가하였다. 그러나 일정 수준 이상의 바이오차가 투입되면서 흡착층의 중첩현상으로 인하여 바이오차의 활성 부위를 보호하는 현상이 일어났기 때문에<sup>19)</sup> 제거율이 더 이상 증가하지 않았다.



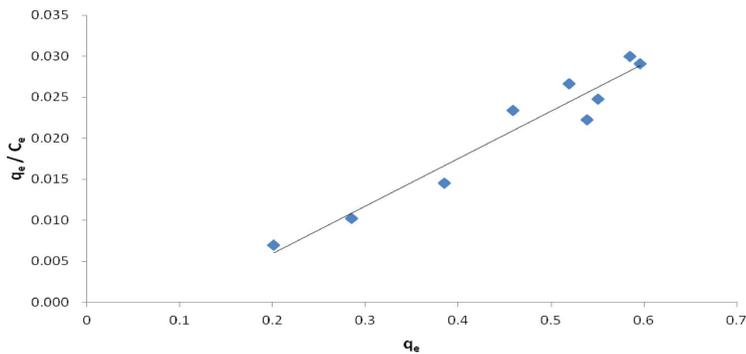
[Fig. 1] Variation in adsorption amount and removal ratio of  $PO_4-P$  on different mass of biochar from oak tree.

### 3.2 $PO_4-P$ 흡착능력

참나무 바이오차의  $PO_4-P$  흡착능력을 조사하기 위해 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식에 적용한 결과, Freundlich 흡착등온식에서는 그래프가 선형이 아닌 곡선형의 그래프로 나타나 Freundlich 흡착등온식에는 맞지 않는 것으로 나타났으며, Langmuir 흡착등온식에 적용한 결과는 [Fig. 2]에 나타내었다. Langmuir 흡착등온식에서 도출된 직선식은  $y=0.058x-0.0057$ 으로 식(3)에 대입하여 기울기와 절편으로부터  $q_m$ 과

$b$ 값을 구하였다. [Table 2]에  $r^2$ 와 무차원상수  $R_L$ 도 함께 표시하였다.

최대 단분자층 흡착량을 나타내는  $q_m$  값은 0.10 mg/g으로 산출되었으며, 흡착 친화도를 나타내는  $b$ 값은 0.06 L/mg로 산출되었다.  $r^2$  값은 0.94\*\*로 고도의 유의성이 있는 것으로 나타났다. 무차원 상수  $R_L$  값은 0.37로 0~1사이에 포함되므로 Langmuir 흡착등온식에 잘 맞는 것으로 나타나 흡착에 용이함을 알 수 있었다([Table 2]).



[Fig. 2] Langmuir isotherm plot of  $q_e/C_e$  vs.  $q_e$  on  $PO_4-P$  ( $q_e$  is adsorption amount of  $PO_4-P$  to the biochar(mg/g), and  $C_e$  is concentration of  $PO_4-P$  in solution at equilibrium(mg/L)).

[Table 2] Parameters Calculated from Langmuir Isotherm Model

$q_m$ <sup>1)</sup> (mg/g)	$b$ <sup>2)</sup> (L/mg)	$r^2$	$R_L$ <sup>3)</sup>
0.10	0.06	0.94**	0.37

<sup>1)</sup>  $q_m$  : maximum adsorption capacities of  $PO_4-P$ .

<sup>2)</sup>  $b$  : binding strength constant of  $PO_4-P$ .

<sup>3)</sup>  $R_L$  : dimensionless constant of Langmuir isotherm.

(\*\* denote significance at 1.0% levels.)

다른 소재를 이용하여 제조한 바이오차로 수행된 연구를 보면, Zeng *et al.*(2013)은 식물환경복원(phytoremediation)에 사용되는 식물인 물칸나(*Thalia. dealbata*)를 원료로 제조한 바이오차(500~700℃, 2시간)를  $PO_4-P$  용액에 첨가하여 최대 흡착량을 산출한 결과 2.54~4.96 mg/g로 바이오차 생성온도가 증가할수록 최대 흡착량이 증가하였다고 보고하였다<sup>13)</sup>. 또한, Xu *et al.*(2014)은 밀짚을 이용하여 제조한 바이오차(350~550℃)를 pH가 다른 갈색토(brown soil, BWS), 흑색토(black soil, BAS), 조토(fluvio-aquic soil, FAS)와 혼합하여  $PO_4-P$  용액에 첨가하여 최대 흡착량을 산출한 결과 갈색토와 흑색토 처리구에서는 0.4~0.8 mg/g, 0.5~0.7 mg/g로 바이오차 투입량이 증가할수록 흡착량이 증가하였으며, 반면에 조토는 0.7~0.6 mg/g로 최대 흡착량이 감소하였다고 하였다<sup>25)</sup>. 본 연구 결과와 비교하였을 때 식물환경복원용 식물과 밀짚을 이용하여 제조한 바이오차의 최대 흡착량이 각각 25.4~49.6배, 4~7배 높게 나타났다. 이는 바이오차의 원료가 다르고, 바이오차를 생성하기 위한 온도와 시간, 그리고 점토를 혼용하였기 때문에 이와 같은 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

농경지 유거수로부터 부영양화의 원인이 되는 인을 제거하기 위한 참나무 바이오차의  $PO_4-P$ 의 흡착제로써의 가능성을 연구하기 위해

$PO_4-P$  용액을 이용하여 바이오차의 흡착 특성을 조사하였다.  $PO_4-P$  흡착량과 제거율은 바이오차를 많이 첨가할수록 증가하였지만, 일정 수준 이상의 바이오차가 투입되면 감소하는 경향을 보였다. 바이오차를 이용한 흡착 실험 결과를 Langmuir 흡착등온식에 적용하여 최대 단분자층 흡착량( $q_m$ ), 흡착 친화도( $b$ ), 무차원 상수 ( $R_L$ )를 산출하였다. 그 결과 무차원 상수  $R_L$  값이 0~1 사이에 있어 Langmuir 흡착등온식에 적합하였다. 따라서 참나무를 소재로 제조한 바이오차는  $PO_4-P$  흡착에 용이한 것으로 나타났다. 향후 이를 바탕으로 농경지에서 유출되는 유거수로부터 부영양화를 감소하기 위해 참나무를 원료로 한 바이오차를 토양에 시용하였을 시  $PO_4-P$  흡착 특성에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

#### 사사

This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ010920)", National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

#### References

1. Yang, X. E., Wu, X., Hao, H. L. and He, Z. L., "Mechanisms and assessment of water eutrophication". J. Zhejiang Univ.-Sci. B,

- 9(3), pp. 197~209. (2008).
2. Bishop, M. J., Powers, S. P., Porter, H. J. and Peterson, C. H., "Benthic biological effects of seasonal hypoxia in a eutrophic estuary predate rapid coastal development". *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 70(3), pp. 415~422. (2006).
  3. Mainstone, C. P. and Parr, W., "Phosphorus in rivers—ecology and management". *Sci. Total Environ.*, 282, pp. 25~47. (2002).
  4. Zhao, S. C., "Mechanisms of Lake Eutrophication and technologies for controlling in China". *Adv. Earth Sci.*, 19(1), pp. 138~140. (2004).
  5. Carpenter, S. R., "Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus". in *Proceedings of Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 102(29), pp. 10002~10005. (2005).
  6. Withers, P. J. A., Neal, C., Jarvie, H. P. and Doody, D. G., "Agriculture and eutrophication: Where do we go from here?". *Sustainability*, 6(9), pp. 5853~5875. (2014).
  7. Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N. and Smith, V. H., "Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen". *Ecol. Applic.*, 8(3), pp. 559~568. (1998).
  8. Bennett, E. M., Carpenter, S. R. and Caraco, N. F., "Human impact on erodible phosphorus and eutrophication: a global perspective increasing accumulation of phosphorus in soil threatens rivers, lakes, and coastal oceans with eutrophication". *BioScience*, 51(3), pp. 227~234. (2001).
  9. Abe, K. and Ozaki, Y., "Comparison of useful terrestrial and aquatic plant species for removal of nitrogen and phosphorus from domestic wastewater". *Soil Sci. Plant Nutr.*, 44(4), pp. 599~607. (1998).
  10. Seo, B. S., Park, C. M., Song, U. and Park, W. J., "Nitrate and phosphate removal potentials of three willow species and a bald cypress from eutrophic aquatic environment". *Landscape Ecol. Eng.*, 6(2), pp. 211~217. (2010).
  11. Lu, Q., He, Z. L., Graetz, D. A., Stoffella, P. J. and Yang, X., "Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.)". *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 17(1), pp. 84~96. (2010).
  12. Woo, S. H., "Biochar for soil carbon sequestration", *Clean techn.*, 3, pp. 201~211. (2013).
  13. Zeng, Z., Zhang S. D., Li, T. Q., Zhao, F. L., He, Z. L., Zhao, H. P., Yang, X. E., Wang, H. L., Zhao, J. and Rafiq, M. T., "Sorption of ammonium and phosphate from aqueous solution by biochar derived from phytoremediation plants". *Zhejiang Univ.—Sci. B*, 14(12), pp. 1152~1161. (2013).
  14. Shin, J. D., Lee, S. I., Park, W. K., Choi, Y. S., Hong, S. G. and Park, S. W., "Carbon Sequestration in Soil Cooperated with Organic Composts and Bio-Char during Corn (*Zea mays*) Cultivation". *J. Agri. Chem. Environ.*, 3(4), pp. 151~155. (2014).
  15. Choi, I. W., Seo, D. C., Kang, S. W., Lee, S. G., Seo, Y. J., Lim, B. J., Heo, J. S. and Cho, J. S., "Adsorption characteristics of heavy metals using sesame waste biochar", *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 46(1), pp. 8~15. (2013).
  16. Inyang, M., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Zimmerman, A. R., Pullammanappallil, P. and Cao, X. "Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass". *Bioresour. Technol.*, 110, pp. 50~56. (2012).
  17. Choi, Y. S., Shin, J. D., Lee, S. I. and Kim, S. C., "Adsorption Characteristics of Aqueous

- Ammonium Using Rice hull-Derived Biochar”, Korean J. Environ. Agri., 34(3), pp. 1~6. (2015)
18. Na, C. K., Jeong, J. H. and Park, H. J., “Applicability of Theoretical Adsorption Models for Studies on Adsorption Properties of Adsorbents(I)”, J. Korea Soc. Environ. Eng., 34(4), pp. 260~269. (2011).
  19. Kizito, S., Wu, S., Kirui, W. K., Lei, M., Lu, Q., Bah, H. and Dong, R., “Evaluation of slow pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggery manure anaerobic digestate slurry”. Sci. Total Environ., 505, pp. 102~112. (2015).
  20. APHA-AWWA-WPCF, “Standard methods for the examination of water and wastewater”, 14th ed., pp. 476~478. (1975)
  21. 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).
  22. Lee, J. J., “Study on equilibrium, kinetic and thermodynamic for adsorption of quinoline yellow by granular activated carbon”, clean techn., 20(1), pp. 35~41. (2014)
  23. Hamid, S. B. A., Chowdhury, Z. Z. and Zain, S. M., “Base Catalytic Approach: A Promising Technique for the Activation of Biochar for Equilibrium Sorption Studies of Copper, Cu (II) Ions in Single Solute System”. Materials, 7(4), pp. 2815~2832. (2014).
  24. Shin, J. D., Lee, J. S., Kim, W. I., Jung, G. B., So, K. H., Lee, J. T. and Lee, M. S., “Run-off impact assessment of the steeped cornfield to small stream”, Korea J. Environ. Agri., 24(4), pp. 334~340. (2005)
  25. Xu, G., Sun, J., Shao, H. and Chang, S. X., “Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity”. Ecol. Eng., 62, pp. 54~60. (2014).

