

Polyallylamine hydrochloride로 처리한 수피를 이용한 수용액상의 인 제거

Removal of phosphorus from solution using bark with polyallylamine hydrochloride

양 경 민* 김 하 나* 김 영 관**
Yang, Kyung-Min Kim, Ha-Na Kim, Yeong-Kwan

요약문

본 연구는 목재로서 활용가치가 적은 수피(bark)를 활용하여 수질오염물질을 제거할 수 있는 여과 시스템에 대한 기초연구로서 소나무의 일종인 loblolly pine(*Pinus taeda* L.) 수피의 인($\text{PO}_4\text{-P}$) 흡착특성을 연구하였다. 실험에 사용된 수피는 입상형태로서 polyallylamine hydrochloride로 전처리하여 회분식 등은 흡착실험을 수행하였다. 회분식 등은 흡착실험은 수용액 pH 3~pH 8범위에서, 인의 농도별(10, 20, 30, 40 mg/L)로 수행하였다. pH 5에서 가장 높은 인 제거 효율을 나타냈으며, 수용액의 pH는 실험 후 pH 3으로 감소하였다. 이러한 감소는 수피에 의한 phosphate의 흡착이 Lewis acid-base 반응으로서 이 과정에서 H^+ 의 방출로 인하여 나타난 현상인 것으로 여겨지며, 주된 반응 메카니즘은 더 연구할 필요성이 있다. 인 흡착은 초기에 빠른 속도로 진행되었으며 대략 200분 이후에 평형에 도달하였고, 시간이 지날수록 흡착량이 증가하는 경향을 보였다. 인의 흡착특성결과는 Langmuir 등온흡착식과 Freundlich 등온흡착식으로 설명될 수 있으며, 등온흡착식 적용결과, 흡착제에 대한 최대 흡착능은 7.14 mg/g이며 다른 흡착제와 비교하여 더 높았다. 실험결과와 모델에 의한 흡착능을 비교하고자 pseudo second-order model을 적용하여 흡착 동역학 상수를 구하였다. 또한 EDXA분석으로 회분식 흡착실험 후 수피와 인이 결합되어있는 것을 확인할 수 있었다.

키워드 : polyallylamine hydrochloride, 인, 수피, 등온흡착식

Key words : polyallylamine hydrochloride, phosphate, bark, isotherms

1. 서론

일반적으로 인(phosphate) 제거를 위해서 석회, 알루미늄 및 철염과 같은 응집제를 이용한 화학적

침전 공정이 적용된다[1]. 그러나 인의 제거율과 비례하여 고가의 약품비용소요와 다량의 폐슬러지가 발생하는 문제점이 있다. 따라서 유기물 및 영양염류 제거를 목적으로 한 BNR 공정이 이용되고 있지만, 이 역시 질소와 인의 제거원리의 상이함으로 인하여 운전의 어려움이 있기 때문에 비점오염원으로 발생하는 방류수중의 인의 제거에 알맞은

* 강원대학교 환경공학과 석사과정

** 강원대학교 환경공학과 교수, 공학박사

방법은 아니다. 우리나라에서는 2003년 1월 1일부터 총질소, 총인의 배출허용기준을 적용하고 있으며, 전국적으로 확대 시행되고 있다. 점진적으로 강화되는 방류수 수질기준을 만족하고, 부영양화를 방지하기 위해서는 하·폐수로부터 질소·인 등과 같은 영양소를 제거할 고도처리 공정이 필요하다. 인의 경우 기존 BNR(Biological Nutrient Removal) 공정은 유기물과 질소에 비해 제거효율이 저조한 것으로 알려져 있으며 활성슬러지 공정의 경우 인의 제거는 기대하기 어려운 실정이다. 기존의 다양한 인 제거 기술외의 자연친화적이며 경제성을 띄는 흡착제의 개발이 새로운 관심을 얻고 있는데, 이러한 형태의 흡착제 개발에 목질자원을 이용하고자한다. 목질 자원으로는 칩·활엽수 수피와 잎 및 목질부 등이 이용되고 있고, 소나무나 참나무는 이온교환 및 흡착능력이 우수한 것으로 알려지고 있다. 특히, 수피는 목재의 약 9~15 % 정도로서 목질부와 비교하여 이용할 수 있는 셀룰로오스가 상대적으로 적고, 리그닌 추출성분 및 회분이 많아 목재 자원으로서의 이용이 어려울 뿐만 아니라 그 처리가 사회적 문제로 대두되고 있다. 이와 같이 경제성이 없는 수피를 이용하여 폐수 속에 존재하는 인의 농도를 감소시킨다면 수피의 활용뿐만 아니라 수계의 부영양화를 줄일 수 있다.

현재 우리나라에 널리 분포되어 있고 목재로서의 가치가 적은 비경제성목재를 수처리 분야에 활용하고자 하는 연구가 진행 중이며, 목재섬유(wood fiber)는 재생 가능한 열가소성 물질로서 다른 무기섬유보다 저렴하고 철, 구리, 납 등과 같은 중금속 이온에 대한 흡착능이 우수한 것으로 알려져 있다. 특히 리그닌과 다당류, 폴리페놀의 hydroxy 그룹은 음이온교환특성에 도움이 되는 alkoxyamine 리간드를 부착시키기 위해 사용되며[2], 지금까지 목재를 이용한 수처리 분야에서 처리대상 오염물질이 주로 중금속에 한정되어 이루어져 왔으나 환경소재로서 목재의 활용도를 높이기 위해서는 다양한 오염물질의 처리효과에 대한 연구가 요구되어진다.

본 연구에서는 loblolly pine (*Pinus taeda* L.)으로부터 준비한 입상형태의 수피를 epichlorohydrin(ECH)과 polyallylamine hydrochloride(PAA-HCl)로 전처리하여 수피 표면을 양이온화 한 후, 수중의 인 제거에 이용하였으며, 회분식 등온흡착실험을 통해 수용액으로부터 수피의 기본적인 인 흡착 특성을 알아보고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 수피와 시료

실험에 사용한 수피는 loblolly pine (*Pinus taeda* L.)으로서 60-80 mesh (200-250 μ m) 크기의 수피를 전처리하였다. 생분해성이 크고 회수가 용이한 유기용매인 1-methyl-2-pyrrolidinone (NMP) (1+9) 300 mL를 수피표면의 개질과 활성화를 위한 추출에 사용하였다. 추출과정에서 반응성이 강한 시약과 쉽게 결합하기 때문에 수피의 표면에너지가 증가된다. 수피 10 g을 Soxhlet 장치에 넣고 Round bottom flask에 단단하게 연결한다. 추출된 시료는 밤새 실온에 방치한 후 6시간동안 105 $^{\circ}$ C 오븐에 건조시키고 무게를 달아 1% 수용액 형태의 PAA-HCl(고액비=1:10)을 넣는다. 그 후, 수피 100 g당 2.5 g NaCl pellet을 첨가한 후 완전 교반한다. 부유하는 수피 100 g당 20 mL ECH(epichlorohydrin)를 첨가하여 완전교반(실온에서 1h)한다. Tray에 담아 72 hr 동안 건조하고, 공기건조 생성물을 몇 차례 증류수로 행구고, 여과 한 후 65 $^{\circ}$ C에서 다시 건조하였다. 수피의 화학적 특성을 변화시키기 위하여 PAA-HCl (polyallylamine hydrochloride) 용액으로 처리하였으며 수피는 USDA Forest Products Laboratory(Madison,WI)에서 공급받았다. 실험에 사용된 PAA-HCl 처리한 수피(PAA HCl Treated Bark, PAH-TB)와 처리하지 않은 수피(Untreated Bark, UB)의 인 제거효율을 비교하였다. 또한 실험 data에 표기한 약자는 Table 1과 같다.

Table 1. Abbreviation of the bark sample and PO₄ solution

처리방법	Data에 표기한 약자
Untreated Bark	UB
PAA HCl Treated Bark	PAH-TB
Initial PO ₄ -P solution(=Control Solution)	CS

인 용액은 KH₂PO₄를 이용하여 PO₄-P stock solution을 제조하였고, 시료중의 PO₄-P의 농도를 30mg/L가 되도록 증류수로 희석하여 사용하였다.

2.2 회분식 등온흡착실험

등온흡착실험은 회분식으로 진행되었으며, 인 용액의 농도에 따른 제거율, 인 용액의 초기 pH의 영향, 반응시간에 따른 인 제거율을 알아보았다. 초기 pH에 따른 인의 흡착정도를 알아보기 위해 1000 mg/L인 stock solution을 제조한 후 이를 증류수로 희석하여 각각의 용액의 농도가 10 mg/L, 20 mg/L가 되도록 제조한 후 150 mL씩 취하여 0.01N NaOH와 0.01N HCl로 pH 3, 4, 5, 6, 7, 8로 조정하여 제조한 시료를 50 mL씩 100 mL

Polyallylamine hydrochloride로 처리한 수피를 이용한 수용액상의 인 제거

Erlenmeyer flask에 담고 수피 0.1 g씩을 첨가하였다. 그리고 반응조건은 20°C, 100 rpm으로 유지시킨 진탕배양기에서 24 hr 동안 수행하였다. 반응 후 시료를 0.45 μm membrane filters(Millipore)로 여과하여 시료 내 PO₄-P 농도와 pH 변화를 분석하였다. 수피를 이용한 인 흡착에서 평형에 도달하는 각 농도(10, 20, 30, 40 mg/L)별 반응시간을 알아보기 위한 실험을 수행하였다.

이를 위하여 PO₄-P 농도가 1000 mg/L인 stock solution을 10, 20, 30, 40 mg/L로 각각 희석한 용액 150 mL을 취하여 0.01N HCl으로 pH 5로 조정된 후 제조한 시료를 50mL씩 100mL Erlenmeyer flask에 담고 수피 0.1 g씩을 첨가하였다. 그 후에 20°C의 진탕배양기에서 100rpm, 24시간 교반 후 각각의 flask내 시료에 잔류하는 PO₄-P 농도를 분석하였다. PO₄-P 농도는 0.45μm membrane filters(Millipore)로 시료를 여과한 후 Ascorbic acid method[3]와 Ion Chromatography(Dionex ICS-90)를 이용하여 분석하였다.

2.3 수피의 EDXA 분석

수피표면에서 인 흡착 실험 전후에 화학적 변화의 발생여부를 조사하기 위하여 PAA-HCl 용액으로 처리된 수피를 대상으로 분석하였다. 회분식 흡착실험에 사용된 수피를 건조시킨 후 EDXA(Energy dispersive x-ray analysis, JEOL JSM-5410)로 성분들을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 PAA-HCl 용액으로 처리된 수피(PAH-TB)와 처리하지 않은 수피(UB)의 인 제거율을 비교한 결과이다. PAA-HCl로 처리된 수피(PAH-TB)는 처리하지 않은 수피(UB)에 비해서 상대적으로 높은 제거효율(60~91%)을 나타냈다. PAH-TB의 경우 초기 농도 2 mg/L에서는 91.2 %, 30 mg/L에서는 59.6 %의 제거효율을 보이며, 초기 인 용액의 반응농도가 증가할수록 제거율이 점차적으로 감소하는 경향을 보인다.

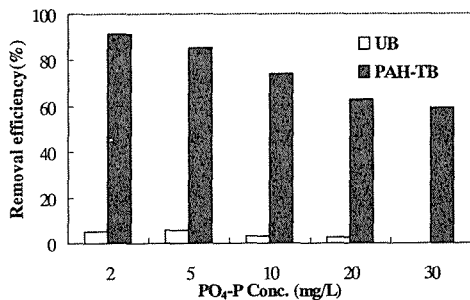


Fig. 1 Improvement of phosphate removal efficiency by treatment

실험후의 pH를 측정된 결과 Fig. 2와 같이

수피를 첨가하지 않은 수용액(Control Solution, CS)에 비해, 수피를 첨가하면 pH가 감소하는 경향을 보인다.

Control solution(CS)은 초기 인 용액을 각각의 농도에 맞게 제조하여서 24시간 동안 수피를 첨가하지 않은 상태에서 반응시킨 것이며 용액자체의 시간에 따른 pH변화를 나타낸다. 즉, PAH-TB와 UB는 CS의 자체적인 시간에 따른 pH 변화정도를 감안하여 그 변화 정도를 순수한 UB와 PAH-TB에 의한 영향이라고 할 수 있다.

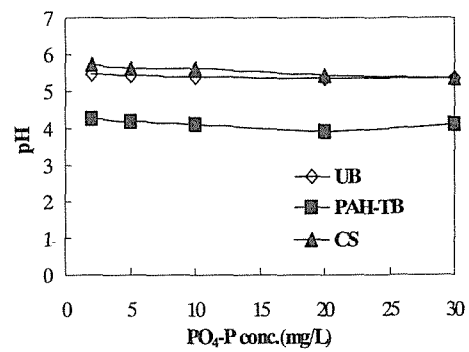


Fig. 2 Change of pH for the UB(Untreated Bark) and PAH-TB(PAA-HCl Treated Bark)

인 용액의 초기 pH값에 따른 인 제거효율은 Fig. 3과 같으며, PAH-TB(PAA-HCl Treated Bark)에 의한 제거효율은 초기 인 농도에 관계없이 비슷한 효율을 나타내었다. 그리고 주어진 pH에서 두드러진 차이를 나타내지는 않았다.

수중에서 인의 pH 변화에 따른 주요한 형태를 보면 pH 5에서 인은 H₂PO₄⁻의 형태로 존재하고 이는 Fig. 3에서 pH 5에서 제거율이 상대적으로 높게 나타나는 것이 이온교환에 의한 인의 제거 가능성을 보여주고 있다.

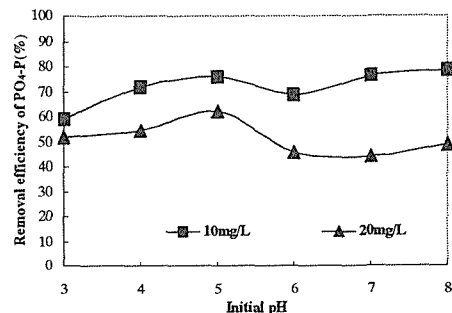


Fig. 3 Removal efficiencies at the different initial pH.

Table 2 Release of chloride ion and the reduction of phosphate ion upon 24 hr adsorption reaction for different initial phosphate concentrations

P		Cl	
Initial conc. (mg/L)	Final conc. (mg/L)	Initial conc. (mg/L)	Final conc. (mg/L)
10	2.43	0.41	58.25
20	7.58	0.21	69.79

pH_{zpc} (point of zero charge)는 surface charge가 0이 되는 pH이며, PAH-TB의 pH_{zpc} 는 대략 pH 7.9이며[5], pH_{zpc} 값을 기준으로 한다.

$pH < pH_{zpc}$ 영역은, quaternary 암모늄이온 그룹의 존재 때문에 PAH-TB 표면이 positive charge를 띠며, positive charge에서는 특정한 화학적인 흡착과 관련하여 정전기적 인력이 HPO_4^{2-} 와 $H_2PO_4^-$ 의 음이온과 PAH-TB 사이에 급속히 일어날 가능성이 있다[4].

$pH > pH_{zpc}$ 영역에서는 negative charge를 띠게 된다. Negative charge는 $\sim RNH_3^+$ 에서 $\sim RNH_2$ 표면에 중화의 결과로 전개되며, phenolate 음이온에 표면 phenolic groups의 이온화에 의해 동시에 일어난다[4].

그리고 PAH-TB 표면에서의 반응으로 negative charge로 변화시키는데, 그 이유는 OH^- 의 흡착 반응과 $\sim NH_3^+$ 의 기능적 그룹의 양성자를 빼앗는 반응을 위함이다[5]. 다른 무기인 흡착제의 pH_{zpc} 값을 보면, SiO_2 2.5, SnO_2 4.5, Kaolinite 4.6, ZrO_2 6.7, goethite 6.7, La silica gel 6.7 로서, PAH-TB는 더 넓은 범위의 pH에서 인을 제거할 수 있는 흡착제로 평가된다[4].

Fig. 4는 인 농도별 반응시간 경과에 따른 인 제거효율을 나타낸 결과로서 평형에 도달하는 시간이 느린 것으로 나타났다. 24시간 반응이후의 각 농도에 대한 대략적인 수피(g)당 제거되는 인의 양을 비교해보면, 10 mg/L는 4.2(mg/g), 20 mg/L는 6.1(mg/g), 30 mg/L는 6.5(mg/g), 40 mg/L는 6.7(mg/g)로 나타나며, 농도가 40 mg/L 이상에서는 인의 제거가 이루어지지 않을 것으로 예상된다. 이러한 실험결과를 가지고 인의 제거 기작에 대해서 생각해 볼 수 있다.

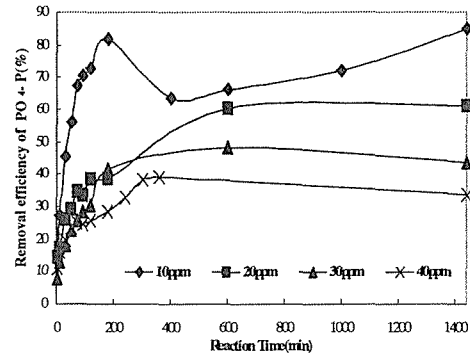
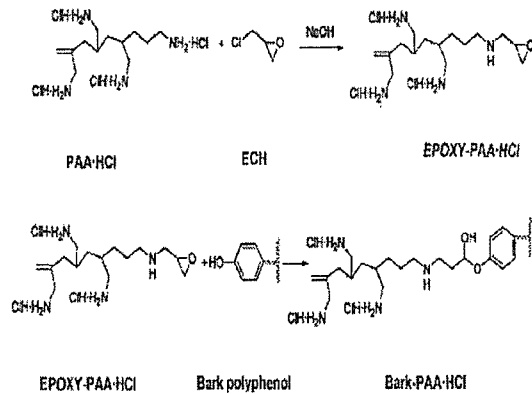


Fig. 4 Variation of removal efficiency with varying reaction time.

Fig. 5는 수피에 PAA-HCl이 부착되는 제안된 반응경로이며, PAA-HCl은 PAA-HCl의 epoxy 유도로부터 NaOH의 존재 하에 ECH(epichlorohydrin)와 반응하며 반응 부산물로 생성된 H_2O 와 NaCl은 나타내지 않았다[4]. 그리고 아래의 그림에서 기능을 가지는 결합그룹은 $\sim NH_2 \cdot HCl$ 이며 $\sim NH_3^+Cl^-$ 의 형태와 같다. 반응은 Cl^- 자리에 PO_4^{3-} 가 위치하며 NH_2H 와의 화학적 결합에 따른다[4].



Note: The functional group $\sim NH_2 \cdot HCl$ is equivalent to $\sim NH_3^+ Cl^-$

Fig. 5 Proposed reaction pathway for attachment of polyallylamine hydrochloride(PAA-HCl) to bark substrate[4].

위에서 언급한 염소이온의 인산염이온과의 이온교환에 의한 인의 제거기작을 고려할 때, EDXA 결과에 대해서 반응 전 후의 PAH-TB의 성분변화를 염소이온을 중심으로 살펴볼 필요가 있다. Table 2에서와 같이 수피시료를 첨가하지

많은 경우, 24시간 반응 후에 측정된 Cl의 농도는 0~1 mg/L 이었던 반면 수피시료를 첨가한 반응에서는 Cl 농도가 58~70 mg/L범위로 크게 증가하여 Cl와 P의 상관관계를 보여준다. 따라서 PAH-TB에 의한 인 제거작용은 Cl과 P의 이온교환임을 확인할 수 있었다. 참고로 반응전후의 수피 표면의 EDXA 결과는 Fig. 6과 같으며, 반응 후에 수피에 인이 흡착되어있음을 알 수 있다.

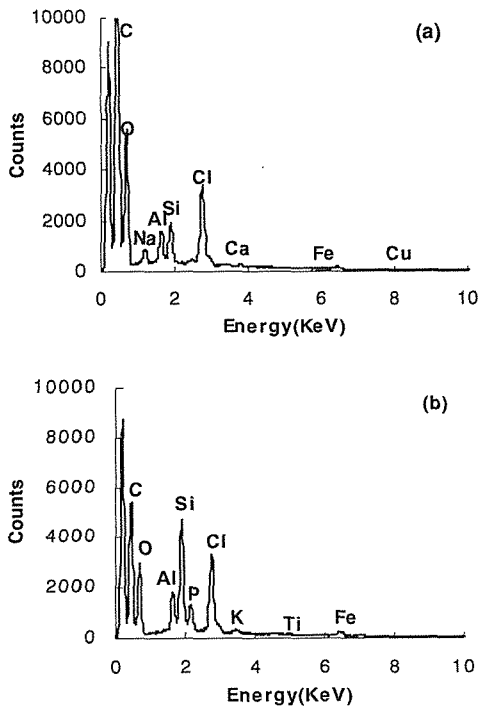


Fig. 6 EDXA spectra of the PAH-TB(PAA-HCl Treated bark) before(a) and after(b) adsorption

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 흡착평형이 24hr에서 이루어지는 것으로 가정하여 실험 Data를 Langmuir isotherm과 Freundlich isotherm에 적용했다.

Langmuir isotherm은 흡착질이 표면에 단층(monolayer)으로 흡착되어지고 흡착된 분자 간에는 상호작용이 없다는 가정에서 비롯되었으며, 다음과 같은 선형식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q^0 b} + \frac{1}{Q^0} C_e \quad (1)$$

여기서, q_e = mg of adsorbate per g of adsorbent at the equilibrium concen-

tration of adsorbate
 C_e = the concentration of adsorbate in solution (mg/L)
 Q^0 = the maximum adsorption capacity (mg adsorbate/g adsorbent)
 b = the Langmuir constant related to energy of adsorption (L adsorbent/ mg adsorbate)

Freundlich isotherm은 불균일 표면에서의 흡착현상을 이론적으로 설명하고자 할 때 이용되는 경험식으로서 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\log q_e = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

여기서, k_F = Freundlich constant
 n = Freundlich intensity constant

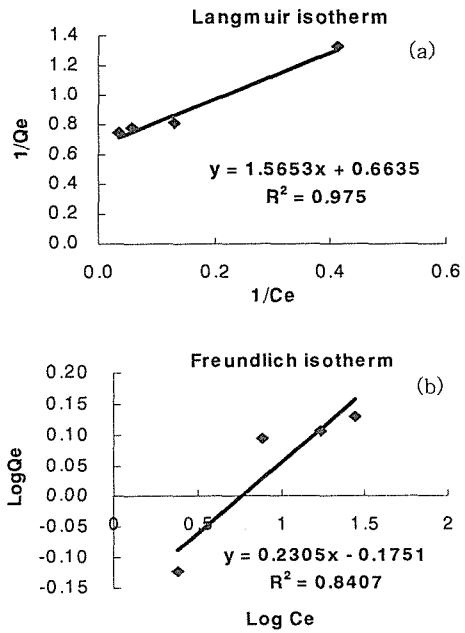


Fig. 7 (a)Langmuir, (b)Freundlich isotherm plots for the adsorption of PO_4 -P onto PAH-TB(PAA-HCl Treated bark)

Fig. 7은 등온흡착식을 적용한 결과를 보여주는 것으로 PAH-TB를 이용한 수중의 PO_4 -P의 제어에는 Freundlich 보다는 Langmuir isotherm으로 조금 더 잘 설명될 수 있었으며 각 등온흡착식의 상수 값들을 아래 Table 3에 제시하였다.

Table 3 Isotherm constants for phosphate adsorption of PAH-TB(PAA-HCl Treated Bark)

Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
Q ⁰ (mg/g)	b(L/mg)	R ²	K _F	n	R ²
7.14	0.85	0.98	0.67	4.34	0.84

Table 4는 인 제거를 위하여 사용된 흡착제의 성능을 나타낸 것으로서, PAH-TB는 다른 흡착제에 비하여 Q⁰(mg/g) 7.14 정도로 상대적으로 높게 나타났다. 이는 PAH-TB의 인 제거 성능이 상대적으로 우수하다는 것을 의미한다. 또한 Freundlich 상수인 K_F값이 커지면 흡착능력이 증가하고 n의 값이 1에서 10사이로 나타날 때 흡착제의 흡착질에 대한 흡착능력이 효과적이며, 실험결과는 효과적인 것으로 평가된다.

Table 4 Phosphorus sorption capacity of diverse filter media[5]

Sorbent	Type	Q ⁰ (mg/g)
Kandiustalf	Kaolinite, Fe oxides	0.39
Matapeake	Chlorite, Kaolinite, Fe oxides	0.47
Iron and aluminum oxide coated sand	Fe, Al oxides	0.011~0.033
Iron and aluminum oxide coated olivine	Fe, Al oxides	0.015~0.035
Geothite	Fe oxides	1.3 ^a
C-70	α Al oxides	1.0 ^a

^aCalculated on basis of results reported in the literature

PAH-TB에 의한 흡착반응의 동역학적인 분석을 위하여 pseudo second-order model을 적용하여 흡착 동역학 상수를 구하였다. 이 동역학 모델식은 아래와 같다[6].

$$q_t = \frac{t}{(1/kq_e^2 + t/q_e)} \quad (3)$$

여기서, q_t와 q_e는 각각 시간 t와 평형상태에서의 단위 흡착제의 양 당 흡착된 용질의 양을 나타내며, k는 평형상태에서의 속도상수(g/mg-min)이다. 위 식을 선형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$q_t = t / (1/kq_e^2 + t/q_e) \quad (4)$$

$$h = kq_e^2 \quad (5)$$

식 (5)는 초기 흡착속도로서, 식 (4)를 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e}t \quad (6)$$

식 (4)의 상수는 t/q_t와 t를 plotting하여 구할 수 있으며 인 농도별 plotting 결과는 Fig. 8과 같으며 model 상수를 Table 5에 정리하였다. 비록 반응시간, pH, 온도, 흡착제의 농도 그리고 용질의 특성과 농도 등과 같이 흡착에 영향을 주는 많은 요인들이 존재할 수 있지만 동역학 모델은 단지 반응 속도 전체에 걸쳐 주목할 만한 요인들의 영향만을 고려하고 있다.

Fig. 8에 pseudo second-order model을 적용 결과를 나타냈으며, 그에 따른 상수 값을 Table 5에 나타냈다. 반응시간을 바탕으로 상수 값을 유도하여 이론적으로 얻어질 수 있는 평형상태에서의 단위 흡착제의 양 당 흡착된 용질의 양은 반응농도가 증가 할수록 그 값도 증가하는 경향을 보이며, 평형상태에서의 속도상수인 k값은 농도에 상관없이 비슷한 경향을 띄었다. 또한 초기흡착속도인 h값은 반응농도가 증가할수록 초기에 흡착되는 속도가 더 빠르다는 것을 보여준다.

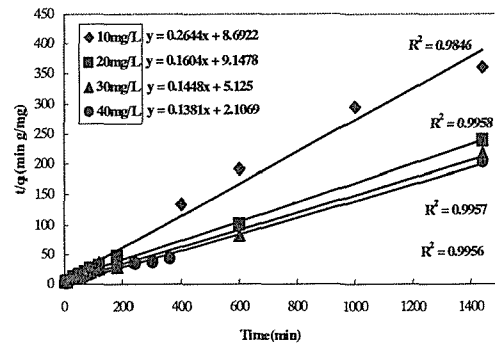


Fig. 8 Pseudo second-order model plots for the adsorption of phosphate onto PAH-TB(PAA-HCl Treated Bark)

Table 5 Pseudo second-order model constants

C_0 (mg/L)	q_e (mg/g)	k (g/mg min)	h (mg/g min)	R^2
10	3.78	0.008	0.12	0.9846
20	6.23	0.003	0.11	0.9958
30	6.91	0.004	0.20	0.9957
40	7.24	0.009	0.47	0.9956

4. 결론

본 연구는 목재로서 활용가치가 적은 수피(bark)를 활용하여 수질오염물질을 제거할 수 있는 여과 시스템에 대한 기초연구로서 소나무의 일종인 loblolly pine(Pinus taeda L.) 수피의 인(PO_4 -P) 흡착특성을 연구하였다.

1) Langmuir isotherm 적용결과, 흡착제에 대한 최대 흡착능은 7.14 mg/g, 다른 자연적인 여과 물질과 비교하여 더 높게 나왔으므로, 앞으로의 추가적인 연구를 통해서 비경제적인 목재수피를 이용한 수처리 분야에 적용가능성이 확대될 수 있다. 흡착에너지인 b 는 0.85, 흡착능인 K_F 값은 0.67, 흡착강도인 n 값은 4.34이다. 또한 Q^0 (최대 흡착능)은 다른 문헌 데이터 값보다 높게 나타나며, 이를 근거로 PAH-TB가 인 흡착제로서 우수하다고 판단된다.

2) 반응속도 전체에 걸친 영향을 고려한 Pseudo second-order model의 적용결과, 시료의 농도가 20 mg/L에서 상관성이 가장 높게 나타나며, 이때의 q_e 값은 6.23(mg/g)이다.

3) 수피와 반응하는 성분에 대한 분석을 위해 EDXA 측정을 하였으며, 수피표면에 인이 흡착되어있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 IC(ion chromatography) 측정에서 회분식 흡착반응 후에 시료 내에 인 이외에 Cl^- 의 양이 PO_4^- 가 제거되는 양과 비례하여 나타났다. 이는 Cl^- 과 PO_4^- 의 이온교환에 따른 인 제거 가능성을 제시하였다.

4) 수피를 이용한 수용액 상의 중금속이나 인의 제어에서는 초기 인 용액의 pH에 따른 영향이 매우 크게 작용하며, 제거효율이 초기 pH 5, pH 7, pH 8에서 효율이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 pH_{zpc} 가 PAH-TB의 경우에는 pH 7.9에 해당하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 실험결과를 비점오염원에서의 처리가 어려운 인의 제거에 이용이 가능하며, PAH-TB는 환경상의 pH 적용범위가 넓어서 이용에 효율성이 있다.

참 고 문 헌

- [1] Lee, S. H., Vigneswaran, S. and Ahn, K. H. "Phosphorus removal using steel industry by-products: effects of agitation and foreign material", Korean Society of Water Quality, 13(4), pp.353-36, 1997
- [2] Karthikeyan. K.G., Tshabalala, M.A, Grad. D., "Use of Lignocellulose Materials as Sorption Media for Phosphorus Removal", ASAE, 2002
- [3] APHA, AWWA, and WEF. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 20th ed., Washington. DC., 1998
- [4] Tshabalala, M.A., Karthikeyan, K.G., Wang, D., "Cationized Milled Pine Bark as an Adsorbent for Orthophosphate Anions", Journal of Applied Polymer Science, Vol.93, 1577-1583, 2004
- [5] James S. Han, Soo-Hong Min, Yeong-Kwan Kim, "Removal of phosphorus using AMD-treated lignocellulosic material", Forest Products Journal, 55, 11, pg.48, 2005
- [6] Ho, Y.S. and Mckay, G., "The kinetic of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat", Water Res., 34(3), 735-742, 2000