한국환경농학회지 제26권 제2호 (2007)
Korean Journal of Environmental Agriculture Vol. 26, No. 2, pp. 124-130

연구보문

제지슬러지에 대한 alum 처리 및 퇴비화에 따른 인 흡착능 변화

이인복* · 장기운[1] · 박진면

농촌진흥청 원예연구소 원예토양관리팀, [1]충남대학교 농업생명과학대학

(2007년 5월 31일 접수, 2007년 6월 21일 수리)

Estimation of Phosphorus Adsorption Capacity of Alum-amended and Composted Paper Mill Sludge

In Bog Lee*, Ki Woon Chang[1], and Jin Myeon Park (Hort. Soil Management Team, National Horticultural Research Institute, RDA, Suwon 441-440, Korea, [1]Dept. of Bio Environment Chemistry, Chungnam Nat'l Univ., Kungdong, Taejon 305-764)

ABSTRACT: Excess application of paper mill sludge (PMS) in field can limit phosphorus uptake by crops because aluminum presented in the sludge can fix or adsorb available phosphorus which is necessary for crop growth. To investigate phosphorus (P) adsorption characteristics of PMS, we examined P adsorption maximum (X_m) using Langmuir isotherm and P adsorption energy constant (K_f) using Freundlich isotherm for PMS without alum, PMS with alum, and composted PMS with alum through a laboratory incubation test. The maximum P adsorption capacities were 800 μg g^{-1} in soil, 47 mg g^{-1} in PMS without alum and 61 mg g^{-1} in PMS with alum. P adsorption capacity with alum treatment for PMS increased by 30%. That of PMS compost was 68 mg g^{-1} and showed that composting increases 11% of P adsorption. Freundlich constant K_f was 22 in check soil, while K_f values in PMS without alum and in PMS with alum were 398 and 426, respectively. After composting, K_f value of PMS compost significantly increased as 1,819. In conclusions, P adsorption capacity for PMS were increased by alum treatment or composting and therefore excess or continuous land application of alum-amended or composted PMS can limit P uptake for crops by reducing available P in soil.

Key Words: Phosphorus adsorption, Alum, Aluminum sulfate, Paper mill sludge

서 론

제지슬러지는 일반적으로 유기물 함량이 높고, 일부 판지 슬러지의 경우 도시하수슬러지에 비해 중금속과 미량원소의 함량이 낮아 수목과 작물의 생육 증진에 긍정적인 효과가 있으며[9,10,11,17,31], 토양 시용시 유기물, 양이온치환용량 및 유효수분을 증가 시키는 것으로 알려져 있다[15,16,28,33]. 그러나 슬러지 침전과정에서 사용하는 alum($Al_2(SO_4)_3$)의 영향으로 인해 제지슬러지는 많은 알루미늄을 함유하고, 이러한 알루미늄은 인에 대하여 높은 친화도를 가지고 있어[1] 종종 작물의 인 흡수를 제한하는 원인이 된다[22,36].

*연락저자:
Tel: +82-31-290-6223 Fax: +82-31-290-6259
E-mail: inboglee@rda.go.kr

인의 흡착능은 인의 농도, 철과 알루미늄의 형태 및 함량, 토양 pH, 유기탄소, 점토 및 carbonate 함량, 반응시간, 그리고 온도 등에 의존적인 것으로 알려져 있다[2,25,27,32]. 특히 인은 음이온의 흡착특성으로 분류하여 볼 때 특정 흡착(specific adsorption) 특성을 가지고 있어 토양 내 유입되는 다른 음이온에 의한 치환 정도는 매우 낮은 것으로 알려져 있다[19,24]. 또한 토양 내에서 토양입자의 영구전하와 pH 의존형 전하의 두 가지 전하의 차이에 따라 흡착 정도가 달라지며, 일반적으로 pH가 낮아질수록 흡착량은 증가한다. 그 때문에 토양의 pH가 인의 유동상 및 고정상의 형태를 결정하는데 중요한 역할을 하고 있다[3].

한편 Brown(1993)[7]은 농업적 이용을 전제로 하지 않더라도 모든 유기성 폐자원은 퇴비화 할 필요성이 있다고 주장하였다. 이는 유기성 폐자원 시용으로 인해 토양에 그 어떠한 악영향도 없어야 하기 때문이다. 그러나 퇴비화 과정 중 발생

하는 유기물 분해로 인하여 보다 높은 양의 알루미늄은 퇴비 내에 농축될 것이고, 퇴비화과정 중 증가한 유기물-Al 복합체의 Al-OH 또는 Al-O-Al 등은 인 흡착특성에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

본 연구는 Langmuir 등온흡착식을 이용하여 인 최대흡착량(X_m)을 구하고, Freundlich 등온흡착식으로부터 흡착에너지 상수값(K_f)을 산정하여 인 흡착특성에 미치는 alum 첨가효과 및 퇴비화 효과를 조사하기 위하여 실시하였으며, 그 결과를 보고하고자 한다.

재료 및 방법

시험재료

실험에 사용된 토양은 충남 연기군 대평리에 소재하는 밭토양으로서 점토, 미사, 모래의 비율이 각각 8, 28, 66%인 사양토 이었으며, 제지슬러지(paper mill sludge, PMS)는 H사의 kraft지슬러지를 alum의 처리 전과 후에 각각 채취하여 사용하였다. 제지슬러지 퇴비(paper mill sludge compost, PMSC)는 alum 처리한 PMS를 약 $3m^3$ 규모의 정체식 퇴비화 시설에 넣고 90일간 안정화 시켜 제조하였다. 시험에 사용된 토양 및 제지슬러지의 특성은 Table 1과 같다. 시료 중 pH는 1:5법[18], 총탄소는 강열감량법[20], 양이온치환용량은 NH_4OAc법[14], 토성은 토양비중계법[12]으로 측정하였고, 추출성 양이온 함량은 Melich-III 시약으로 추출한 다음[34] ICP/AES로 정량하였다. Alum 처리 전 PMS 중 추출성 Al 함량은 약 2,015 mg kg^{-1}으로서 alum을 처리하지 않았음에도 다소 높은 경향이었다. 이는 종이의 잉크 번짐 현상을 막기 위해 제조공정 중에 사용되는 백토 및 황산알루미늄과 같은 충전제들의 영향으로 판단된다. 또한 퇴비화 이후에는 PMSC의 추출성 인산이 크게 감소하였다. 이러한 인산감소는 퇴비화 과정 동안의 높은 부숙온도가 Al-P 고정화과정을 촉진시켰거나 혹은 퇴비화 이후 증가한 Al에 의해 인의 고정량이 증가하였던 때문으로 추정된다.

시간 및 pH 의존적인 인 흡착 특성

시간 및 pH 의존적인 인 흡착량 조사는 토양과 제지슬러지퇴비(PMSC) 간 비교하였다. 시간 의존적인 인 흡착량 조사를 위한 실험조건은 Table 2에 요약한 바와 같다. 인과 시료의 접촉시간에 따른 흡착량의 변이를 보기 위하여 30분부터 2,880분까지 5단계로 구분하여 진탕시킨 각 시료들은 5,000 r.p.m.에서 30분간 원심분리 한 다음, UV/Vis 분광광도계(HP 8452A Diode array spectrophotometer, USA)를 이용하여 상등액의 인 농도를 몰리브덴청법[26]으로 비색정량하고, 초기 인 용액의 농도와 평형 후 인 용액의 농도차로부터 인 흡착량을 구하였다.

pH 의존적인 인 흡착량을 조사하기 위하여 Table 3과 같이 토양은 3.6~7.1 범위, 그리고 PMSC는 pH 2.6~6.4 범위에서 각각 5단계로 나누어 24시간 진탕한 다음 인 흡착량을 조

Table 1. Physico-chemical properties of soil, PMS and PMSC

Materials	pH (H_2O)	T-C (%)	Extractable elements (mg kg^{-1})					CEC ($cmol_c$ kg^{-1})
			P	Ca	Mg	Al	Fe	
Soil	4.9	1.5	200	529	73	388	340	10.5
PMS without alum	7.1	33.4	123	7955	1142	2015	227	22.6
PMS with alum	7.5	31.2	117	7077	1011	5425	254	17.8
PMS compost	7.5	25.5	42	8021	1402	5885	213	21.7

Table 2. Experimental condition to determine the time effect on phosphorus adsorption capacity of soil and PMSC (paper mill sludge compost)

Materials	Sample wt. (g)	Initial P solution conc. (μg $mℓ^{-1}$)	Solution vol. (mℓ)	Time (min.)
Soil	2	40	40	30, 60, 720, 1440, 2880
PMSC	1	600	40	30, 60, 720, 1440, 2880

Table 3. Experimental condition to determine the pH effect on phosphorus adsorption capacity of soil and PMSC (paper mill sludge compost)

Materials	Sample wt. (g)	Initial P solution conc. (μg $mℓ^{-1}$)	Solution used (mℓ)	pH range
Soil	2	50, 100, 200	40	3.6~7.0
PMSC	1	500, 1000, 5000, 10000	40	2.6~6.4

사하였고, 인 비색정량은 시간의존적인 인 흡착량 조사와 동일하게 실시하였다. 각 시료의 산성화를 위하여 사용한 산은 H_2SO_4이고, 알칼리화를 위하여 사용한 염기는 $Ca(OH)_2$이었다.

인 최대 흡착량 조사

최대 인 흡착량(X_m)에 미치는 alum 처리 및 퇴비화 효과를 조사하기 위하여 alum 처리 전과 후에 각각 채취한 PMS와 alum-PMS를 퇴비화 한 PMSC는 Table 4와 같은 조건하에서 실험을 실시하였다. 등온흡착곡선에 이용된 인 용액의 농도는 모든 시료에 대하여 10~15,000 $\mu g\ m\ell^{-1}$의 농도 범위에서 인 흡착량을 조사하였다. 그러나 토양의 경우 800 $\mu g\ m\ell^{-1}$ 이상의 인 용액 농도에서는 인 흡착량이 평형에 도달하였고, PMS 시료들의 경우 200 $\mu g\ m\ell^{-1}$의 이하의 농도 범위는 급격한 인 흡착특성을 보이는 단계이므로 자료 삽입을 생략하였다. 결과적으로 토양은 10~800 $\mu g\ m\ell^{-1}$범위, 그리고 PMS 시료들에 대해서는 200~15,000 $\mu g\ m\ell^{-1}$의 범위까지 9단계로 나누어 24시간 진탕한 다음 인을 비색정량 함으로써 인 흡착량을 조사하였고, 시료의 평형 pH는 H_2SO_4과 $Ca(OH)_2$를 이용하여 7.0~7.1 범위로 조정하였다.

Casey(1997)[8]의 방법에 따라 인의 최대 흡착량(X_m)은 Langmuir 등온식을 이용하여 구하였으며(식 1), Freundlich 등온식으로부터 인 결합에너지상수 K_f와 n을 구하였다(식 2).

$$Q_e = X_m K C_e/(1 + KC_e) \quad (1)$$

여기서 C_e = 실험용액의 평형 인 농도($\mu g\ \ell^{-1}$)
Q_e = 시료의 인 흡착량($\mu g\ g^{-1}$)
K = 상수
X_m = 최대 인 흡착량($\mu g\ g^{-1}$)

위의 식 (1)을 재배열하여 C_e에 대응하는 C_e/Q_e 간의 관계식으로부터 직선의 선형식을 구하고, 선형식의 기울기와 절편으로부터 Langmuir 상수 X_m을 구하였다.

$$Q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (2)$$

여기서 C_e = 실험용액의 평형 인 농도($\mu g\ \ell^{-1}$)
Q_e = 시료의 인 흡착량($\mu g\ g^{-1}$)
K_f, n = 상수

식 (2)의 양변에 대수를 취하여 $\ln Q_e$에 대응하는 $\ln C_e$의 선형식을 구하고, 그 선형식으로부터 결합에너지상수 K_f(인 흡착에너지)와 n을 결정하였다.

결과 및 고찰

인 흡착의 시간 효과

토양과 PMSC 시료에 대한 인의 초기흡착은 y축과 평행한 상태로 급격히 증가하였으며, 이후의 증가속도는 초기의 값에 비해 급격히 감소되는 상태로 시료의 최고 흡착치에 도달하였다(Fig. 1). 이는 Barrow 등(1981)[4]과 Parfitt(1977)[24]에 의해 보고 되었던 것과 유사한 경향으로서 Time=0에서 1시간까지는 1단계로서 흡착부위에 대한 즉각반응단계(instantaneous), 1~12시간 사이는 속도제한적(rate-limited)단계, 그리고 그 이후는 3단계인 지연단계로 구분되어 본 시험에 이용된 토양과 PMSC의 시간의존적인 인 흡착양상은 상호간 유사하였으며, 토양 및 PMSC의 인 흡착은 24~48시간 사이에서 평형에 도달하였다.

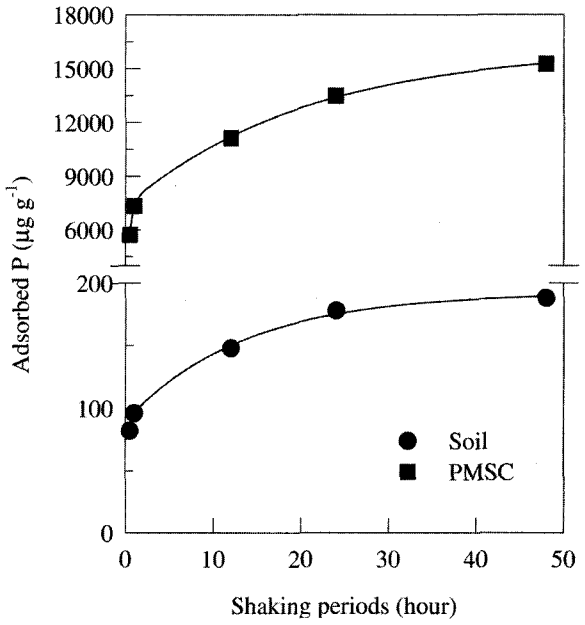

Fig. 1. Effect of shaking time on the phosphorus adsorption by soil and PMS compost.

Table 4. Experimental condition to determine maximum phosphorus adsorption capacity (X_m) and adsorption energy (K_f) of soil and PMSC (paper mill sludge compost)

Materials	Sample wt. (g)	Solution vol. (mℓ)	P conc. treated (μg mℓ$^{-1}$)
Soil	2	40	10, 20, 40, 80, 150, 300, 450, 600, 800
PMS without alum	1	40	200, 1000, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000, 15000
PMS with alum	1	40	200, 1000, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000, 15000
PMS compost	1	40	200, 1000, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000, 15000

인 흡착의 pH 효과

토양과 PMSC에 대하여 각각 다른 pH 평형 하에서 인 흡착량을 조사하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다. 조사한 토양은 pH 5 부근에서 가장 낮은 인 흡착량을 보인 반면, pH 5를 기준으로 산과 염기의 첨가시 인 흡착량이 급격히 증가하는 경향이었다. 한편 PMSC는 보다 높은 인 용액 처리구인 5 mg $m\ell^{-1}$와 10 mg $m\ell^{-1}$에서는 토양과 유사하게 산성영역에서 인의 흡착량이 현저하게 증가하였으나, 알칼리 영역에서의 인 흡착량은 비교적 완만한 증가를 나타내었다. 반면에 낮은 농도 처리구인 0.5 mg $m\ell^{-1}$와 1 mg $m\ell^{-1}$에서는 토양과는 상반된 경향으로서 약 pH 4를 기준으로 산성과 알칼리 영역에서 인의 흡착량이 다소 감소하였다. 낮은 pH 영역에서의 급격한 인 흡착량 증가는 시료 표면상의 양하전 증가에 기인하며, 이러한 조건하에서 인 용액의 평형은 수 시간내에 도달하는 것으로 알려져 있다[24]. 반면에 Bloom(1981)[5]은 Al-peat complex를 이용한 연구에서 알루미늄의 함량에 대한 hydroxyl기의 비율이 증가할수록 인 흡착능은 증가한다고 보고했다. 이는 pH 증가에 따라 양하전을 보유하는 새로운 Al hydroxide 침전물이 생성되고, 이 생성물은 인을 흡착할 수 있기 때문이다[13]. 이때의 Al hydroxide는 인과 신속히 반응하는 것으로 알려져 있다[35]. 토양의 oxide 표면에 대한 인 흡착은 용액중 존재하는 양이온종과 그들의 농도에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 $Na^+<K^+<Mg^{2+}<Ca^{2+}$순으로 인의 흡착을 촉진시킨다[23,29]. 이러한 연구결과는 자료를 제시 하지는 않았으나 조사된 본 토양에서 인 흡착량이 급격하게 증가하였던 pH 4 이하의 산성영역과 pH 6 이상의 중성영역에서 토양 용액 중 Ca의 농도가 크게 증가하였던 현상과 일치한다. 이상의 결과들을 살펴볼 때, 토양중 알루미늄은 pH 증가에 따라 Al hydroxide로 쉽게 침전할 수 있는 형태인 반면, 제지슬러지의 알루미늄은 유기물과 강한 복합체를 형성하고 있는 것으로 보인다.

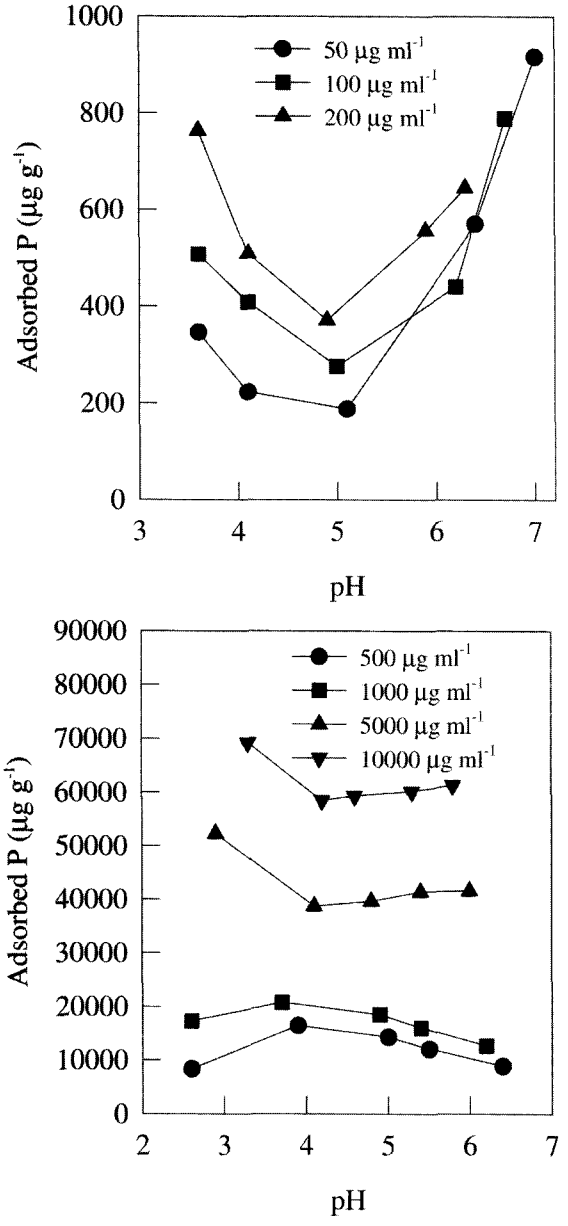

Fig. 2. Effect of initial phosphorus concentration and pH on the phosphorus adsorption by soil (left) and PMS compost (right).

최대 인 흡착량 비교

용액 중 인 농도에 의존적인 토양, PMS 원료 및 PMSC의 인 흡착량 변화는 Fig. 3과 같고, 식 1과 2를 변형한 선형식으로부터 Langmuir 상수 X_m(최대 인흡착량)과 Freundlich 상수 K_f(흡착에너지)를 구한 결과들은 표 5와 같다. 선형으로 변형된 Langmuir와 Freundlich 등온흡착식의 결정계수(r^2)는 모든 시료에서 0.9 이상의 높은 직선 회귀식을 보였으며 (Table 5), 이는 두 가지 등온흡착식 모두 실험에 사용된 시료

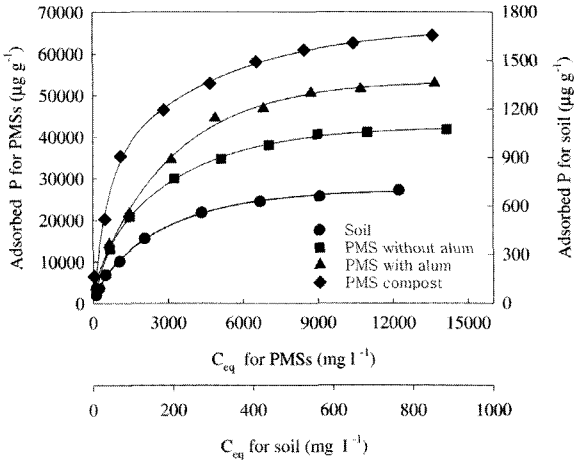

Fig. 3. Phosphorus adsorption curves in different equilibrium concentrations of phosphorus solutions for soil, PMS without alum, PMS with alum, and PMS compost with alum.

Table 5. Linear regression data for Langmuir and Freundlich isotherms for soil, PMS without alum, PMS with alum and PMS compost

Materials	Langmuir data			Freundlich data			
	Linear equation	r^2	X_m ($\mu g\ g^{-1}$)	Linear equation	r^2	K_f	n
Soil	y = 1.244x + 148.8	0.998	804	y = 0.56x + 1.34	0.966	22	1.82
PMS without alum	y = 0.021x + 36.6	0.998	47366	y = 0.51x + 2.60	0.952	398	1.96
PMS with alum	y = 0.016x + 33.7	0.993	61350	y = 0.53x + 2.63	0.956	426	1.89
PMSC compost	y = 0.015x + 14.8	0.996	68027	y = 0.39x + 3.26	0.974	1898	2.56

* For Langmuir data $x=C_e$ and $y=C_e/Q_e$; for Freundlich data $x=\ln C_e$ and $y=\ln Q_e$

들의 인산흡착특성을 잘 설명할 수 있음을 의미한다.

실험에 사용된 토양의 최대 인 흡착량은 804 μg g^{-1}이었다. 그러나 alum을 투입하지 않은 PMS 원료의 최대 인 흡착량은 47 ㎎ g^{-1}으로서 토양에 비해 50배 이상의 높은 인 흡착량을 나타내었다. 이러한 두 시료간의 현저한 인 흡착량의 차이는 monomeric 알루미늄과 유기물 함량의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 반면에 alum으로 침전된 원료 슬러지는 최대 인 흡착량이 61 ㎎ g^{-1}으로서, alum의 투입에 따라 약 14 ㎎ g^{-1}의 인 흡착량이 증가하였다. 이처럼 alum으로 침전시킨 제지슬러지 원료에서 보다 높은 인 흡착능을 보이는 것은 알루미늄의 함량이 상대적으로 높기 때문이다. 알루미늄의 인 흡착량은 비교적 지속적으로 그 흡착량이 증가하는데, 이는 인의 흡착과정 중 새로운 결합부위가 지속적으로 생성되기 때문이다[24]. 한편 PMSC의 최대 인 흡착량은 68 ㎎ g^{-1}으로서, 퇴비화한 후 약 6.5 ㎎ g^{-1} 이상의 인 흡착량이 증가되었는데, 이는 원료에 비해 PMSC가 상대적으로 높은 알루미늄 함량을 보유하고 있기 때문으로 생각된다.

Langmuir 등식은 표면전하에 대한 설명이 어렵다[6]. 반면에 Freundlich 상수 K_f는 인 흡착을 위한 양이온화 된 부위의 수[21] 또는 결합에너지를 설명할 수 있다[30]. Table 5에 제시한 바와 같이 토양의 K_f값은 22로서 alum을 함유하지 않은 PMS의 398과 alum을 함유하는 PMS의 426보다 현저히 낮은 반면, alum 처리의 유무가 인 흡착에너지에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단되었다. 그러나 PMSC의 K_f는 1,819로서, PMS는 퇴비화이후 인 흡착이 가능한 양이온화 된 흡착부위 또는 인 흡착량 증가에 관여하는 다른 요인이 크게 활성화되는 것으로 나타났다. 결과적으로 PMSC의 높은 X_m과 K_f을 고려할 때, 과량 또는 장기간의 PMSC 시용은 토양내 인 고정량을 증가시켜 작물에 대한 인 흡수를 제한할 수 있음을 암시한다.

요 약

제지슬러지(PMS)는 침전과정에서 alum을 사용함으로 인해 다량의 알루미늄을 함유하며, 그 결과 토양 시용시 종종 작물에 대한 인의 흡수를 제한하는 요인으로 작용한다. 본 연구는 그러한 제지슬러지의 인 흡착 특성을 조사하기 위하여 토양을 대조로 하여 alum을 처리하기 전과 후에 채취한 제지슬러지 및 제지슬러지 퇴비(PMSC)를 대상으로 인 최대 흡착량(X_m)과 흡착에너지 상수 K_f를 조사하였다. 토양의 인 최대흡착량은 800 μg g^{-1}인 반면, alum 처리 전 PMS는 47 ㎎ g^{-1}, alum 처리 후 PMS는 61 ㎎ g^{-1}으로서 대조 토양에 비해 PMS의 인 흡착량은 현저하게 높고, alum 처리 후 인 흡착능은 약 30% 증가하였다. 또한 퇴비화 후 PMS 퇴비의 최대 인 흡착능은 68 ㎎ g^{-1}으로서 퇴비화로 인하여 약 11%의 인 흡착능이 증가하였다. 인 흡착 계수인 K_f는 alum 처리 유무 간 큰 차이가 없었으나 퇴비화후에는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 인 최대 흡착량(X_m)과 흡착에너지 상수 K_f를 고려한 이러한 결과들은 제지슬러지의 퇴비의 장기 혹은 과량시용이 작물에 대한 인의 흡수를 제한하는 요인으로 작용할 수 있음을 암시한다.

참고문헌

1. Alvarado, A. and Buol, S. W. (1985) Field estimation of phosphate retention by Andepts, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 911-914.
2. Ballard, R. and Fiskell, J. G. A. (1974) Phosphorus retention in coastal plain forest soil: Ⅰ. Relationship to soil properties, *Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38*, 250-255.
3. Barrow, N. J. (1983) A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil, *J. of Soil Sci.* 34, 733-750.
4. Barrow, N. J., Madrid, L. and Posner,A. M. (1981) A partial model for the rate of adsorption and desorption of phosphate by goethite, *J. of Soil Sci.* 32, 399-407.
5. Bloom, P. R. (1981) Phosphorus adsorption by an aluminum-peat complex, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 267-272.
6. Bowden, J. W., Posner, A. M. and Quirk, J. P. (1974) A model for ion adsorption on variable charge surface, *Int. Congr. Soil Sci., Trans.* 10th (Mos-

cow). 11, 29-36.
7. Brown, K. W. (1993) Municipal solid waste (MSW) disposal, past, present, and future, *Hazardous Waste & Hazardous Materials*. 10, 105-106.
8. Casey, J. T. (1997) Unit Treatment Processes in Water and Wastewater Engineering, John Wiley and Sons Ltd, England, pp. 113-114.
9. Chaney, R.L. (1980) Agents of health significance: Toxic metals, *In* G. Bitton, B.L. Damron, G., T. Edds, and J. M. Davidson (eds.). Sludge: Health risks of land application. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan.
10. 장기운, 김상덕, 최우영, 이규승. (1992) 제지스럿지 퇴비의 농업적 이용연구. I. 강낭콩에 대한 시용효과, 한국토양비료학회지. 25, 149-154.
11. 장기운, 김상덕, 최우영, 이규승. (1992) 제지스럿지 퇴비의 농업적 이용연구. II. 당근에 대한 시용효과, 한국토양비료학회지. 25, 155-159.
12. Day, P. R. (1965) Particle fractions and particle-size analysis, *In* C. A. Black (ed.). Methods of Soil Analysis. Agronomy No. 9, Part 1. American Society of Agronomy, Madison, WI, p. 547-567.
13. Haynes, R. J. (1984) Lime and Phosphate in the soil-plant system, *Adv. in Agron.* 37, 249-315.
14. Hendershot, W. H., Lalande, H. and Carter, M. R. (1993) Ion exchange and exchangeable cation, *In* M. R. Carter (ed.). Soil Sampling and Methods of Analysis, Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers. p. 167-176.
15. 허종수, 김광식. (1985) 제지슬러지 시용이 논토양의 화학성과 수도생육에 미치는 영향. I. 슬러지시용이 토양중 질소형태 및 무기성분 변화에 미치는 영향, 한국환경농학회지. 4, 78-87.
16. 허종수, 김광식. (1986) 제지슬러지 시용이 논토양의 화학성과 수도생육에 미치는 영향, II. 토양중 부식형태에 미치는 슬러지의 영향, 한국환경농학회지. 5, 1-10.
17. 허종수, 김광식, 하호성. (1988) 제지슬러지 시용이 논토양의 화학성과 수도생육에 미치는 영향, III. 슬러지시용이 수도생육에 미치는 영향. 한국환경농학회지. 7, 26-42.
18. Jackson, M. L. (1958) Soil chemical analysis, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.
19. Kamprath, E. J. and Foy, C. D. (1985) *In* O. P. Engelstad (ed.). Fertilizer technology and use, 3nd ed., Soil Science Society of America, Madison, WI, p. 91-151.
20. Karam, A. (1993) Chemical properties of organic soils, *In* M. R. Carter (ed.). Soil sampling and methods of analysis, Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers. p. 459-471.
21. Karthikeyan, K. G., Tshablala, M. A., Wang D. and Kalbasi, M. (2004) Solution chemistry effects on orthophosphate adsorption by cationized solid wood residues, Environ. Sci. Technol. 38, 904-911.
22. Lee, I. B., Lim, J. S. and Chang, K. W. (2006) Effect of water treatment sludge on growth of rice seedling, *Kor. J of Environ. Agric.* 25, 382-385.
23. Lehr, J. J. and Von Wesemael, J. C. (1952) [cited by Haynes, R. J. 1984. Lime and phosphate in the soil-plant system. *Adv. in Agron.* 37, 249-315].
24. Parfitt, R. L. (1977) Phosphate adsorption on an oxisol, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 1064-1067.
25. Ping, C. L. and Michaelson, G. J. (1986) Phosphorus sorption by major agricultural soils of Alaska, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17, 299-320.
26. Rural Development Administration (RDA). (1988) Soil Chemical Analysis, RDA.
27. Saunders, W. M. H. (1965) Phosphate retention by New Zealand soil and its relationship to free sesquioxide organic matter and other soil properties, *N.Z. J. Agric. Res.* 8, 30-57.
28. Simpson, G. G., King, L. D., Carlile, B. L. and Blickensderfer, P. S. (1983) Paper mill sludges, coal fly ash, and surplus lime mud as soil amendments in crop production, *TAPPIJ.* 66, 71-74.
29. Singh, B. and Tabatabai, M. A. (1976) [cited by Haynes, R. J. 1984. Lime and phosphate in the soil-plant system, *Adv. in Agron.* 37, 249-315].
30. Singh, B. and Gilkes, R. J. (1991) Phosphorus sorption in relation to soil properties for the major soil types of south-western Australia, *Aust. J. Soil Res.* 29, 603-618.
31. Sommers, L. E. (1977) Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers, *J. Environ. Qual.* 6, 225-232.
32. Syers, J. K., Evans, T. D., Williams, J. D. H. and Murdock, J. T. (1971) Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande Do Sul, Brazil, *Soil Sci.* 112, 267-275.
33. Thiel, D. A. (1984) Sweet corn grown on land treated with combined primary/secondary sludge, *In* Proceedings, 1984 TAPPI Environmental Conference. TAPPI Press, Atlanta, Georgia. p. 93-102.
34. Tran, T. S. and Simard, R. R. (1993) Melich III-extractable elements, *In* M. R. Carter (ed.). Soil

Sampling and Methods of Analysis, Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers. p. 43-49.
35. Van Riemsdijk, W. H., Beek, J. and De Haan, F. A. M. (1979) Phosphates in soils treated with sewage water: Ⅳ. Bonding of phosphate from sewage water in sand columns containing aluminum hydroxide, *J. Environ. Qual.* 8, 207-210.
36. Yoshida, S. and Kitou, M. (1992) A simple manufacturing method of plant culture soil by combination of weed and sludges produced from water purification process, *Jpn. J. Alternative Resource and Environ.* 28, 215-219.