

Comparison of Livestock Manure Compost and Chemical Fertilizer Application in Distribution of P Fractions at Reclaimed Land Soils

Tae-II Moon¹ and Young-Man Yoon*

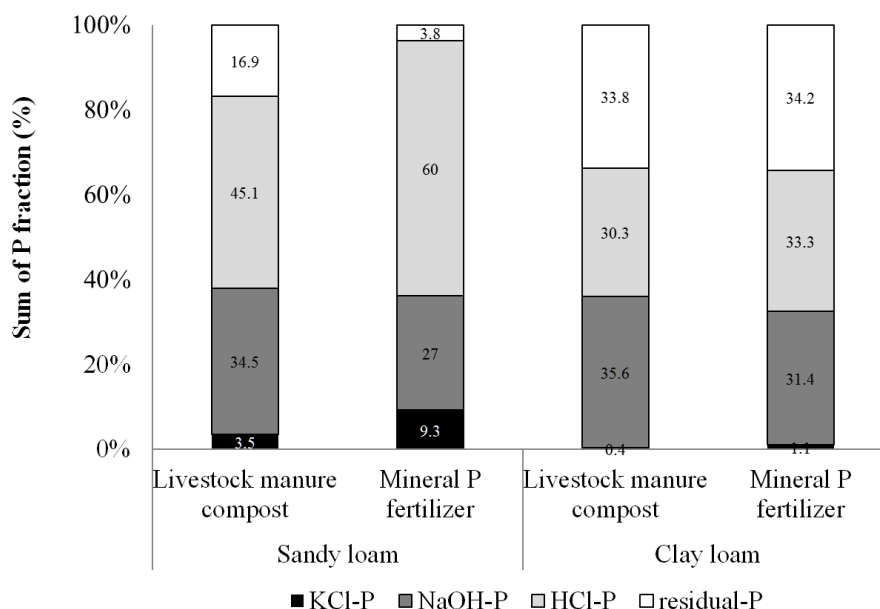
Biogas Research Center, Han-Kyong National University, 327 Chungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do 17579, Republic of Korea

¹Dept. Plant Life and Environmental Sciences, Han-Kyong National University, 327 Chungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do 17579, Republic of Korea

(Received: April 26 2016, Revised: June 30 2016, Accepted: August 16 2016)

In order to compare phosphorus (P) behavior of livestock manure compost (LMC) and chemical fertilizer (CF) applied to the sea-reclaimed land soils, incubation experiments were conducted for five weeks. Four soils differing textural classes, sandy loam and clay loam, and electric conductivity (EC) value, high and low, were applied with CF and LMC. LMC was applied at the level of 0, 1, 2, and 3% on the soil weight basis and CF was applied at the same levels of P as LMC. The results showed that increase of P application rate of CF and LMC led to linearly increase available P_2O_5 and 0.01M $CaCl_2$ extractable P contents regardless of soil texture and EC. However, 0.01M $CaCl_2$ extractable P from soil applied with CF was significantly higher than with LMC. Correlation analysis between 0.01M- $CaCl_2$ extractable P and fractionated P by different extraction methods showed that 0.01M- $CaCl_2$ extractable P positively correlated with KCl-P (soluble and exchangeable P) and HCl-P (Ca and Mg bound P). However, NaOH-P (Fe and Al bound P and organic P) and residual P was adverse. The amount of NaOH-P significantly influenced to the amount of 0.01M $CaCl_2$ extractable P of CF and LMC in the soils. The application of LMC at sandy loam soil could be carried out in the consideration of nutrient leaching and crop uptake.

Key words: Livestock manure compost, Phosphorus, P fractionation, Reclaimed land



Phosphorus (P) fractions of livestock manure compost (LMC) were similar as well as mineral P fertilizer (CF) application in clay loam, but LMC and CF was different in P fractions in sandy loam.

Introduction

국내 양돈 업계가 점차 대규모, 산업화 되어가며 양돈 사육 두 수가 2013년 기준 1,018만 마리로 크게 늘어났고 (KOSIS, 2013), 이로 인한 가축분뇨의 발생량도 크게 증가하였다. 그러나 2012년부터 시행된 가축분뇨 해양 배출 전면금지 조치에 따라, 적절한 가축분뇨의 육상처리 방안 마련이 시급한 상황이다. 이러한 가축분뇨의 육상처리 방안의 마련과 함께 간척지 농경지에 유기물 투입의 필요성이 요구되면서, 간척지 농경지에 가축분뇨 퇴비 이용에 대한 관심이 증가하고 있다. 가축분뇨 퇴비는 간척지 토양의 물리성, 화학성, 미생물상을 효과적으로 개선시키면서, 무기질 비료의 사용을 대체할 수 있는 유용한 자원으로 인식되고 있다 (Lee et al., 2011; Jo et al., 2010; Park et al., 2008). 그러나 가축분뇨 퇴비를 토양에 사용하면 작물의 일반적 양분요구량을 기준으로 할 때 질소함량에 비하여 인산함량의 비율이 지나치게 높고 농경지에 과잉 투입된 인산은 강우 및 표토 유출과 함께 수계로 유입될 경우 비점오염원으로 작용하여 부영양화 등 각종 수질환경 문제의 원인이 된다 (Haider et al., 1965).

토양에서 인산은 유기태와 무기태 형태로 존재한다. 토양 중 유기태 인산은 핵산 (Nucleic acids), 인지질 (Phospholipids), 당인산 (Sugar phosphates)과 같은 이분해성 인산화합물과 인산이노시톨 (Inositol phosphates) 또는 피틴 (Phytin)과 같이 난분해성 인산화합물 형태로 존재하며, 무기태 인산은 대부분 알루미늄 (Al), 철 (Fe), 칼슘 (Ca), 마그네슘 (Mg)과 결합한 형태로 존재한다. 토양 중 인산의 존재 형태는 크게 4가지로 나타나며, 일반적으로 토양 용액 및 치환성 인산 (Extractable and exchangeable P), 철 또는 알루미늄과 결합된 인산 (Fe and Al bound P, Fe/Al-P), 칼슘 또는 마그네슘과 결합된 인산 (Ca and Mg bound P, Ca/Mg-P), 잔류성 무기태 인산 (Residual nonreactive inorganic P, Residual-P)으로 구분한다. 토양에 존재하는 대부분의 무기태 인산은 Ca/Mg-P와 Fe/Al-P이다. 일반적으로 토양에서 인산은 80~90% 정도가 불용태로 존재하기 때문에 유효도는 매우 낮다. 염기성 토양에서 인산의 유효도는 칼슘화합물의 용해도에 따라 결정되며, 산성토양에서의 인산 유효도는 Fe 및 Al 화합물의 용해도에 따라 결정된다. 따라서 토양 중 인산의 유효도를 측정하기 위하여 침출액 종류를 달리하여 토양 중 인산을 화학적으로 분별정량하는 방법이 연구되어 왔다 (Havlin et al., 2004). KCl, NaCl, NH₄Cl, NaHCO₃와 같이 중성염으로 추출되는 인산은 작물이 쉽게 이용할 수 있는 토양 용액 및 교환성 인산으로 파악하고 있으며, HCl은 Ca와 결합된 형태의 인산을 침출시키고, NaOH는 Fe, Al 산화물 또는 유기물에 결합된 형태의 인산을 침출시킨다. Ca와 Mg 또는 Fe와 Al과 결합된 형태의 인산은 화학적으로 침전되어 광물화된 인산으로 토양의 pH 및 산화환원전위에 따

라 서서히 유효화 된다 (Reddy and DeLaune, 2008).

간척지 토양은 일반적인 경작지와 비교하여 작물생산성이 낮은 조건 불리지역으로서 토양 pH, 치환성 나트륨, 염농도 및 지하수위가 높고 토양 유기물 함량이 매우 낮아서 토양 물리·화학성이 양호하지 못하여 작물 생육에 지장을 초래한다 (Jung and Yoo, 2007). 간척지 토양과 같은 염류-나트륨성 토양 (Saline-sodic soil)에 인산 비료를 시비하면 작물의 수량은 증가한다. 그렇지만, 토양에 시용된 인산은 토양 광물의 특성 및 형태, 유기물 함량, 점토 함량, 토양 산도 및 산화환원전위와 유의적인 상관을 보였으며 (Brady and Weil, 2002), 특히, 토성, 나트륨 농도, 비료종류, 인산 시비량은 인산 유효도에 영향을 미친다고 하였다 (Paliwal and Gandhi, 1976). 특히 간척지 토양에서 높은 pH (pH>8)는 인산의 유효도를 다소 증가시키지만, 규소, 칼슘 화합물과 결합하여 침전물 형태로 존재하면서 인산의 유효도를 감소시킨다고 보고되고 있으며 (Fontana and Zanetti, 1959), 또한 토양 전기전도도 (EC)의 증가는 인산의 유효도를 점차 감소시킨다고 보고도 있다 (Paliwal and Gandhi, 1976). 간척지 농업에서 토양의 비옥도 증진을 위해서는 가축분뇨 퇴비 등 유기물의 투입은 필수적이다. 따라서 다량의 가축분뇨 퇴비가 간척지 농경지에 이용되고 있으나 지금까지 가축분뇨 퇴비의 양분 불균형으로 인한 인산 성분의 과다 투입에 대한 문제는 간과되어 왔다. 또한 지금까지 토양에서 인산의 거동에 대한 연구는 대부분 일반 경작지에서 무기질 인산 비료를 대상으로 연구되어 왔으며, 간척지 농경지에서 가축분뇨 퇴비를 사용하는 경우 토양 중 인산의 거동과 환경영향에 대한 연구는 매우 미흡한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 간척지 토양에 가축분뇨 퇴비를 사용하는데 있어 가축분뇨 유래 인산 성분의 토양 내 유효도 특성을 파악하고자 하였으며, 무기질 비료 시비에 따른 토양 내 인산 유효도를 비교하였다. 이를 위하여 토성과 전기전도도가 상이한 간척지 토양에서 가축분뇨 퇴비와 무기질 인산 비료 시용에 따른 유효인산 함량과 가용성 인산 함량을 분석하고, 토양 중 인산을 분획별로 분별 정량하여 토양 내 인산의 분포 특성을 분석하였다.

Materials and Methods

공시토양 및 재료 특성 새만금과 영산강 간척지에서 토성 (soil texture)과 전기전도도 (EC)가 상이한 4곳에서 표토를 채취하여 실험에 사용하였다 (Table 1). 새만금 간척지는 모래와 미사의 비중이 높은 사양토이었으며, 영산강 간척지는 점토와 미사의 비중이 높은 식양토를 사용하였다. pH는 모든 토양이 8부근으로 나타났으며, EC는 낮은 수준이 3~5 dS m⁻¹이었으며 높은 수준은 12~14 dS m⁻¹로 EC 수준 간에 큰 차이를 보였다. 새만금 간척지 토양의 유효인

Table 1. Soil physico-chemical properties used in this experiment.

Soil sampling Site	Soil texture	pH	EC	Inorganic-N		Av. P ₂ O ₅	O.M	Ex. cations				CEC [†]	ESP [‡]	Al _{ox} [§]	Fe _{ox} [¶]
				NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N			K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺				
		(1:5)	(dS m ⁻¹)	----- (mg kg ⁻¹)		-----	(g kg ⁻¹)	----- (cmol(+) kg ⁻¹)				-----	-----	(%)	-----
SRL [§]	Sandy loam	8.3	14.0	3.6	6.1	44	0.02	1.0	3.7	2.1	10.2	13.6	74.5	0.016	0.049
		7.9	5.0	2.2	1.8	66	0.02	0.8	1.8	2.7	3.2	6.2	51.9	0.022	0.091
YRL [¶]	Clay loam	7.9	12.6	2.0	1.2	86	0.08	2.0	2.6	7.1	11.2	20.0	22.0	0.090	0.248
		7.9	3.4	3.5	1.1	89	0.2	1.2	6.5	5.8	2.7	13.8	19.2	0.080	0.278

[†]Cation exchange capacity, [‡]Exchangeable sodium percentage, [§]Amorphous Al mineral extracted by oxalate solution (pH 3.0), [¶]Amorphous Fe mineral extracted by oxalate solution (pH 3.0), [§]Saemangeum reclaimed land, [¶]Yeongsangang reclaimed land.

Table 2. Chemical Properties of livestock manure compost used in this experiment.

pH	EC	T-C	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
(1:5)	(dS m ⁻¹)	----- (%)						
6.4	6.0	39.4	2.1	4.2	1.7	7.1	1.4	0.5

산은 고수준 EC 토양과 저수준 EC 토양에서 각각 44와 66 mg kg⁻¹을 나타냈으며, 영산강 간척지 토양의 유효인산은 고수준 EC 토양과 저수준 EC 토양에서 86과 89 mg kg⁻¹으로 나타났다. 교환성 양이온은 전체적으로 고수준 EC 토양에서 높게 나타났으나, Ca²⁺는 식양토-저수준 EC 토양에서 가장 높은 값을 보였다. 교환성나트륨퍼센트 (ESP, Exchangeable sodium percentage)는 사양토에서 식양토의 2배 이상으로 높은 값을 보였다. 공시토양을 염해지 토양 분류법에 따라 분류해보면 사양토-고수준 EC 토양과 식양토-고수준 EC 토양은 염류나트륨성 토양 (Saline-sodic soil)으로 분류되었고, 사양토-저수준 EC 토양과 식양토-저수준 EC 토양은 나트륨성 토양 (Sodic soil)으로 분류되었다.

공시 가축분 퇴비는 원료로 돈분 30%, 계분 19%, 톱밥 25%, 도축잔재물 12%, 농작물잔사 7%, 폐사료 7%를 사용하여 부숙시킨 부산물비료이며, 화학적 특성은 Table 2와 같다. 이 비료를 건조기에서 105°C로 건조시켜 수분을 제거 한 뒤, 막자사발로 분쇄하여 시료를 균질화한 뒤 실험에 사용하였다. 무기질 인산비료로는 용성인비를 사용하였다.

실내 향온 배양실험 가축분 퇴비와 무기질 비료 시비가 유효인산과 0.01M CaCl₂ 가용인산 함량 변화에 미치는 영향을 비교하기 위하여 실내 향온 배양실험으로 수행하였다. 토성과 EC가 상이한 4개의 공시토양에 축분 퇴비를 건조 토양에 대한 무게 비율로 0, 1, 2, 3% 수준으로 처리하였고, 무기질비료는 축분 퇴비 처리 시 투입되는 인산의 양과 동량의 인산이 투입되도록 하였다. 수준별 시료를 polyethylene 용기에 넣고, 토양의 수분함량은 토성에 따른 유효수분량을 고려하여 사양토는 포장용수량의 70%, 식양토는 포장용수량의 50%에 맞추었다. 그 후 시료의 수분상태를 유지하며 25°C로 온도가 유지되는 암조건의 향온배양기에서 향온배

양실험을 진행하였으며, 처리별 각 3반복으로 실험하였다. 본 실험 전, 예비 실내 향온실험에서 가축분 퇴비 및 무기질 인산비료가 토양 인산의 무기화에 미치는 영향을 5주 동안 검토하였다. 배양 기간 종료 후 토양 시료를 채취하여 유효 인산과 0.01M CaCl₂ 가용인산을 분석하였다.

인산의 분별정량 실내 향온 배양실험이 끝난 토양 중에서 고수준 EC로서 토성이 다른 2개의 토양에 인산1%의 가축분 퇴비와 무기질 비료에 3반복으로 처리한 토양들 총 12개 (2토성X2인산공급원X3반복)에 대하여 인산 분별정량을 실시하였다. 시료 중 무기태 인산의 분별정량을 위해 연속추출과정 (Silveira et al., 2006)을 이용하였다. 50 ml polyethylene 원심분리관에 토양시료와 1M KCl을 1:20의 비율로 혼합하여 2시간 동안 진탕한 뒤, 5분간 원심분리 하여 상등액을 분리하고 여과하였다. 상등액을 분리하고 남은 시료에 0.1M NaOH를 1:20의 비율로 처리한 후 17시간 진탕한 뒤, 이 역시 5분간 원심분리하여 상등액을 분리하고 여과하였다. 상등액이 제거된 시료에 다시 앞의 과정과 동일한 과정을 거쳐 0.5M HCl을 가하고 24시간 진탕한 후, 이전과 동일한 과정을 수행하였다. 그 후, 각각의 과정에서 얻어낸 상등액에 함유된 인산을 Ascorbic acid에 의한 몰리브덴 침법을 이용하여 정량하였다 (NIAST, 2000). 그로부터 KCl-P (soluble and exchangeable P), NaOH-P (Al and Fe bound P and organic P(P_o)), HCl-P (Ca and Mg bound P)를 구하였고, 모든 추출과정을 마친 잔여 시료의 T-P를 분석하여 Residual-P (잔여인산)를 정량하였다 (Murphy and Rilet, 1962).

통계 분석 각 결과에 대한 통계분석은 SAS 통계 프로그램 (SAS ver. 9.1.3)을 이용하여 분석하였다. 인산분획별

함량은 이월이차 분산분석을 통해 0.05% 유의수준에서 최소유의차 (LSD)검정으로 비교하였고 분획별 상관은 피어슨 상관분석 (Pearson's correlation analysis) 으로 분석하였다. 분별정량한 각각의 분획물이 0.01M CaCl₂ 가용인산에 영향을 주는 기여도를 평가하기 위하여 다중회귀 분석 (Multiple linear regression)을 실시하였다.

Results and Discussion

가축분 퇴비와 무기질 비료 시용에 따른 유효인산 함량 변화의 차이 가축분 퇴비와 무기질 인산비료가 토성과 전기전도도 (EC)가 상이한 간척지 토양에 시용될 때, 토양 유효인산 함량이 어떻게 달라지는지 실내하온실험을 통하여 살펴보았다. 토성과 EC 조건 및 인산 투입원 종류와

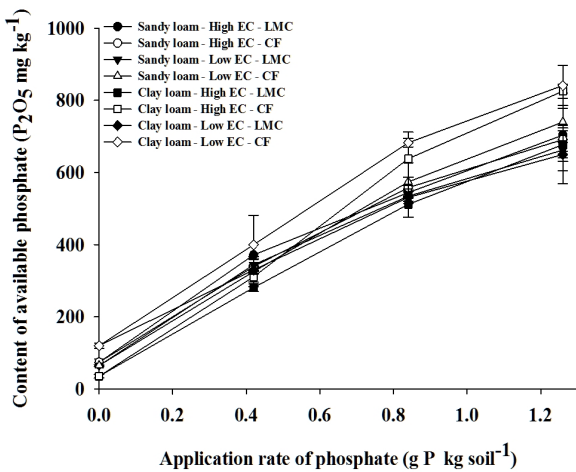


Fig. 1. Relationship between P application rates and contents of available P in the soils with different texture and EC, as applied with livestock manure compost (LMC) and chemical fertilizer (CM).

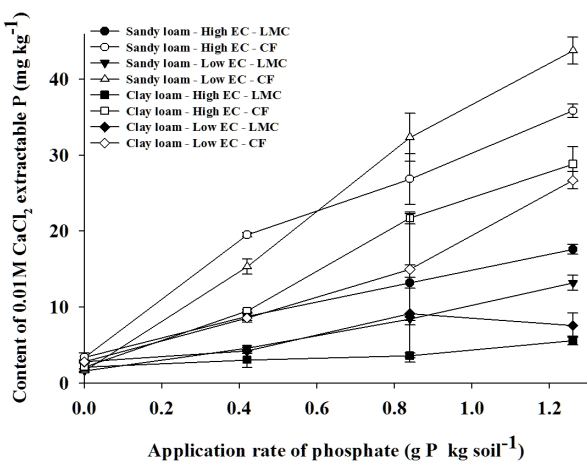


Fig. 2. Relationship between P application rates and contents of 0.01M CaCl₂ extractable P in the soils with different texture and EC, as applied with livestock manure compost (LMC) and chemical fertilizer (CM).

무관하게 인산 투입량이 늘어남에 따라 토양 유효인산 함량은 직선적으로 증가하였다 (Fig. 1). 가축분 퇴비에 함유된 인산의 85%는 퇴비화 과정 중에 무기태 인산으로 변하는 것으로 보고 되었다 (Halvin et al., 2004). 또한, 가축분 퇴비의 인산은 무기태 인산이 90%정도로 높아서 작물이 쉽게 흡수할 수 있다고 보고되었다 (Sharpley and Moyer, 2000). 한편 Kang et al. (2011)은 밭토양에서 가축분 퇴비와 무기질 인산비료의 상추에 대한 인산시비 반응을 비교한 결과, 가축분 퇴비 중의 총인산 (T-P)는 무기질 인산비료의 구연산 가용성 인산과 동등한 효과를 보였다고 보고하였다. 인산 투입원 종류별로는 토성과 EC에 관계없이 총인 (T-P)을 기준으로 하여 동량을 투여하였을 때, 무기질 인산비료가 가축분 퇴비보다 더 높은 유효인산 함량을 나타내었다. 동량의 인산처리 시 무기질 인산비료가 가축분 퇴비보다 유효인산 함량을 더 많이 증가시킨 이유는 가축분 퇴비 중 인산의 일부는 유효화되지 않는 유기태 인산으로 존재하기 때문으로 판단되었다.

가축분 퇴비와 무기질 비료 처리가 토양의 0.01M CaCl₂ 가용인산 함량 변화에 미치는 영향 인산 투입량이 증가함에 따라 0.01M CaCl₂ 가용인산 역시 증가하였다 (Fig. 2). 토양유효인산 함량의 증가 경향과 마찬가지로, 가축분 퇴비 처리에 비해 무기질 인산비료를 처리한 경우 0.01M CaCl₂가용인산의 함량이 높게 나타났으며, 인산 투입량이 높아질수록 그 농도는 증가하였다.

가축분 퇴비와 무기질 인산비료의 처리량 증가에 따라 유효인산이 증가되면 0.01M CaCl₂ 가용인산도 증가되는 정의 상관관계를 보였다 (Fig. 3). 그러나 특이하게도 두 인산

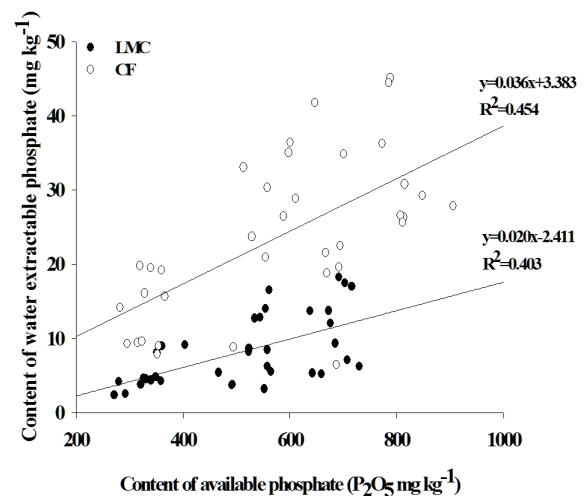


Fig. 3. Comparison of livestock manure compost with chemical fertilizer for the relationship between available P and 0.01M CaCl₂ extractable P. LMC and CF on upper-left side of the graphs is the abbreviation of livestock manure compost and chemical fertilizer, respectively.

비료중 중 무기질 인산비료 처리가 가축분 퇴비 처리보다 동일 유효인산 함량에서 더 높은 0.01M CaCl₂ 가용인산 함량을 나타내었다. 이는 가축분 퇴비와 무기질 인산비료가 포함하고 있는 인산의 양 자체는 동일하여도 토양의 무기태 인산 분획, 가축분 퇴비와 무기질 인산비료 그 자체의 특성 차이 등에 기인하는 것으로 생각된다 (Chung et al., 2008).

한편 위의 결과를 미루어 생각할 때, 동량의 인산을 사용하여도 그 투입원이 무기질 인산비료일 경우 가축분 퇴비를 사용한 경우에 비하여, 수용성 인산이 수계로 유출되어 비점오염원이 될 가능성이 더 클 것으로 판단된다.

인산의 분별정량 무기질 인산비료 처리가 가축분 퇴비 처리보다 동일 유효인산 함량에서 더 높은 0.01M CaCl₂ 가용인산 함량을 나타낸 이유를 밝히기 위하여, 토양의 인산분별 정량을 실시하였다, 사양토의 경우 분획별 인산 함량이 HCl-P > NaOH-P > Residual-P > KCl-P 순으로 차이가 크게 나타났다. 반면에 식양토의 경우에는 KCl-P만 매우 작게 나타났고 나머지 형태의 인산 분획들은 대략 전체량의 1/3씩 유사한 양을 보였다 (Fig. 4). 사양토에서 HCl-P가 월등히 높았던 이유는 토양의 pH가 8근처의 알칼리성 토양으로 Ca와 Mg 광물과의 침전에 따른 것으로 판단된다. pH 7 이상의 알칼리 토양에서는 Ca와 Mg 광물과 침전이 일어나기 때문에 토양 인산의 유효도가 떨어지는 원인이 되는 것으로 알려져 있다 (Brady and Weil, 2002). 식양토에서는 사양토와 달리 HCl-P와 NaOH-P, Residual-P가 거의 같은 비율로 존재하고 있었는데, 식양토도 사양토와 마찬가지로 pH 8 부근의 알칼리성 토양이어서 Ca와 Mg광물의 침전이

예상되었다. 그러나 식양토에서는 Al_{ox}와 Fe_{ox}의 함량과 점토함량이 높아서 Al와 Fe 및 유기물 흡착 인산 분획으로 알려진 NaOH-P 분획과 잔류되는 인산 분획인 Residual-P 분획이 증가되었기 때문에 HCl-P가 상대적으로 감소한 것으로 생각된다 (Reddy and DeLaune, 2008).

가축분 퇴비와 무기질 인산비료의 인산공급원 차이가 인산 분획들의 분포에 미치는 영향을 비교하였다. 사양토의 경우 가축분 퇴비 처리가 무기질 인산비료 처리보다 KCl-P와 HCl-P는 낮았던 반면 NaOH-P와 Residual-P는 높았다 (Fig. 4). 가축분 퇴비 처리구의 0.01M CaCl₂ 가용인산 함량은 무기질 인산비료 처리구에서 보다 낮았으며 KCl-P와 정의 상관관계를 보였다. 가축분 퇴비 처리구에서 KCl-P (soluble and exchangeable P) 분획 함량은 무기질 인산비료 처리구에서 보다 낮게 나타났다. 동량의 인산이 토양에 투입됐을 때, 가축분 퇴비는 유기물을 같이 사용하게 되며 유기물의 증가는 NaOH-P와 Residual-P의 분획 함량이 증가시키는 결과를 초래했다. 이는 생 가축분이 가축분 퇴비로 호기적 분해가 되는 과정에서 전체 인산 함량 중 약 85%를 차지할 정도로 무기태 인산함량이 크게 증가하는 것으로 보고된 바 있으며 (Havlin et al., 2004), 퇴비화 과정에서 무기화 되지 않은 나머지 15%의 인산이 토양에 매우 강하게 흡착되어 있거나 또는 난분해성 유기물 형태로 존재하여 연속적인 인산 분별정량 과정에서도 추출되지 않는 유기물 형태의 인산으로 존재하는 것으로 생각된다 (Sharpley and Moyer, 2000; Iyamulemye and Dick, 1996). 반면, 식양토의 경우 가축분 퇴비의 인산 분획별 함량은 무기질 인산비료의 분획 함량과 비슷한 경향이였다. 인산이 토양에 시비되면 무기태 인산은

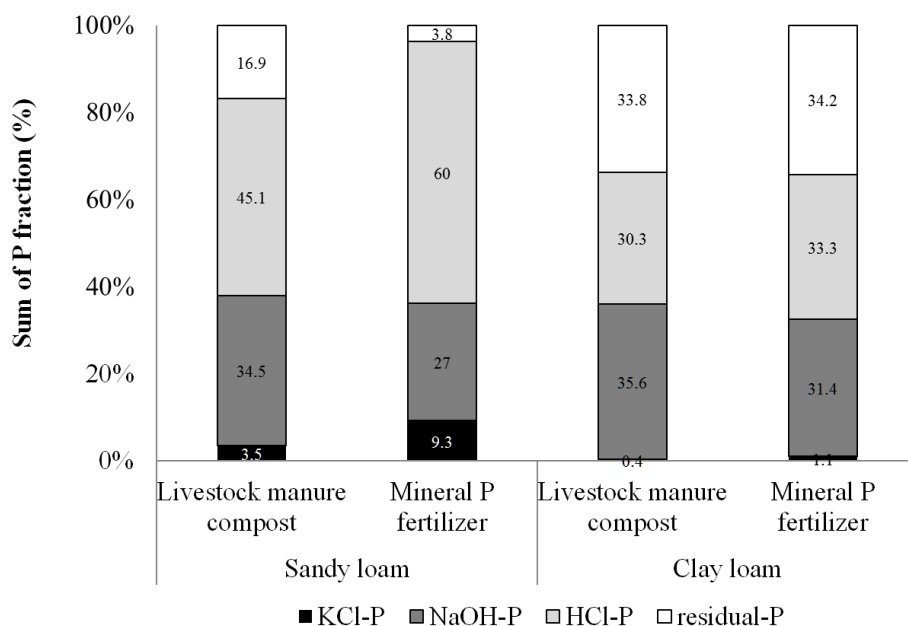


Fig. 4. Effect of kind of phosphorus source, livestock manure compost and chemical fertilizer, on P fraction in soils with different soil texture.

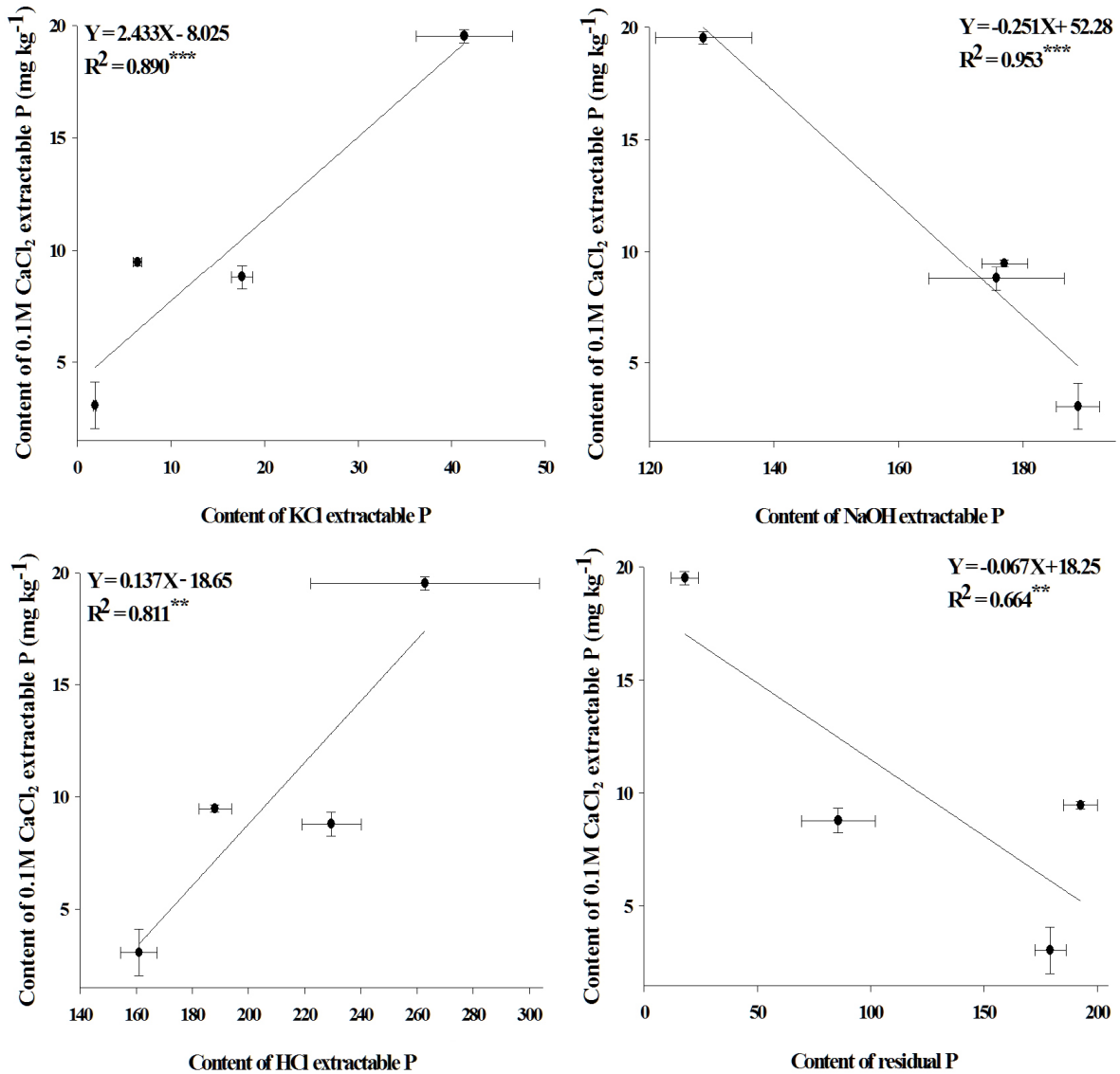


Fig. 5. Relationship between 0.01M CaCl₂ extractable P and each sequentially extracted P fraction.

흡착 및 탈착, 음이온 교환, 배위결합, 고정, 침전 및 해리 등 점토광물과 토양 용액 사이의 화학반응에 따라 형태 및 함량이 달라진다고 잘 알려져 있으며, 특히 토양의 점토함량이 인산의 분획별 함량에 큰 영향을 미친다고 보고 되었다 (Reddy and DeLaune, 2008).

인산 분획 형태별 함량과 0.01M CaCl₂ 가용인산 함량과의 상관 분석결과 0.01M CaCl₂ 가용인산이 KCl-P와 HCl-P와는 고도의 유의성이 있는 정의 상관관계를 보였고, NaOH-P와 Residual-P와는 고도의 유의성이 있는 부의 상관관계를 보였다 (Fig. 5). KCl-P는 용해성 및 교환성 인산 분획이기 때문에 0.01M CaCl₂ 가용인산과 정의 상관관계를 가지는 것은 당연한 결과이다. 한편, HCl-P는 Ca 및 Mg와 인산과의 침전 광물 분획으로, 침전광물과 0.01M CaCl₂ 가용인산과는 평형관계에서 정의 상관관계를 가지는 것으로 보는 것이 타당하다. 반면에 NaOH-P와 Residual-P는 토양에 흡착

되거나, 연속적 무기태 인산 분별 정량 과정에서 추출되지 않는 분획물이므로 이들의 양이 늘어나면 0.01M CaCl₂ 가용인산의 양은 감소할 수밖에 없기 때문에 부의 상관관계를 가지는 것이 타당한 것으로 생각된다. 가축분 퇴비의 경우 무기질 인산비료에 비하여 0.01M CaCl₂ 가용인산에 대해 정의 상관을 보이는 KCl-P와 HCl-P는 함량이 적은 반면, 부의 상관을 보이는 NaOH-P와 Residual-P의 함량은 높았다. 따라서 동량의 인산을 처리하여도 무기질 인산비료는 가축분 퇴비에 비하여 0.01M CaCl₂ 가용인산의 함량을 증가시킨 것으로 판단된다. 이러한 차이가 나타나는 원인은 가축분 퇴비와 무기질 인산비료에 존재하는 인산의 형태적 특성 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

분별정량한 각각의 분획물이 0.01M CaCl₂ 가용인산에 영향을 끼치는 기여도를 평가하기 위하여 다중회귀 분석 (multiple linear regression)을 실시하였다. 이때 각 분획물

Table 3. Multiple linear regression equation by standardized data for the relationship between sequentially extracted P fractions and 0.01M CaCl₂ extractable P.

Parameter	Regression equation	R ²
0.01M CaCl ₂ extractable P	$y = 0.274x_1 - 0.151x_2 + 0.015x_3 + 0.037x_4 + 23.297^{\dagger}$	0.9575***

[†]x₁: NaOH-P; x₂: KCl-P; x₃: residual-P; x₄: HCl-P

Table 4. Influencing factors among sequentially extracted P fractions on the 0.01M CaCl₂ extractable P in multiple linear regression equation by standardized stepwise model.

Parameter	F value	R ^{2†}	P value
NaOH-P	104.95	0.9130	<.0001
HCl-P	3.35	0.0236	0.1006

[†]Partial R-square (stepwise model)

실험결과를 표준화 시킨 후 stepwise model을 이용하여 분석하였다. 그 결과 0.01M CaCl₂ 가용인산에 가장 큰 영향을 주는 것은 NaOH-P이었으며, 1% 수준에서 고도의 유의성이 있었다. HCl-P가 NaOH-P 다음으로 기여도가 높은 것으로 나타났으나, 5% 유의수준에는 미치지 못하였다. KCl-P와 Residual-P는 통계적으로 유의성이 전혀 없는 것으로 분석되어 표에 표시하지 않았다 (Table 3 and 4). 이 결과는 NaOH로 추출되는 Fe-P와 Al-P 및 유기태-P가 0.01M CaCl₂ 가용인산과 부의 상관 관계를 가졌고, Fe와 Al산화물은 점토의 구성성분이므로 점토함량이 적은 토양일수록 사용된 인산이 수용성이 되는 부분이 커져서 수질환경 오염을 증가시킬 수 있다는 것으로 유추할 수 있다.

Conclusions

본 연구는 토양 전기전도도 (EC)와 토성이 상이한 간척지 토양에서 가축분 퇴비와 무기질 인산비료 사용에 따른 유효 인산 함량변화와 분획별 인산함량을 비교하기 위하여 수행되었다. 토양의 유효인산과 0.01M CaCl₂ 가용인산 함량은 토성과 토양 EC조건 및 인산 투입원 종류와 무관하게 인산 투입량이 늘어남에 따라 직선적으로 증가하였다. 그러나 가축분 퇴비와 무기질 인산비료가 함유한 총인 (T-P)을 기준으로 동량을 시비할 때, 토양의 0.01M CaCl₂ 가용인산은 무기질 인산비료 처리 시에 더 높게 나타났다. 0.01M CaCl₂ 가용인산과 인산 분획에 의한 존재 형태별 인산을 상관분석한 결과 KCl-P (soluble and exchangeable P)와 HCl-P (Ca and Mg bound P)는 정의 상관관, NaOH-P (Fe and Al bound P and organic P)와 Residual P는 부의 상관관을 나타내었다. 인산 분획 중 0.01M CaCl₂ 가용인산에 가장 기여도가 큰 것은 표준화 다중회귀 분석결과 NaOH-P (Fe and Al bound P and organic P)로 나타났다.

References

- Brady, N.C. and R.R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall.
- Chung, K.Y., K.T. Baek., S.H. Ko., J.G. Noh., K.H. Lee., and S.H. Woo. 2008. Information on movement of the phosphorus (P) fertilizers in the turfgrass soils of golf course. J. Korea Contents Assoc. 8:285-292.
- Fontana, P. and B. Zanetti. 1959. The effect of soluble salts on the energy of adsorption of phosphate ion in soil. Ann. Fac. Agr. S. Cuore, 76:141-150.
- Haider, K., L.R. Frederick, and W. Flaig. 1965. Reactions between amino acid compounds and phenols during oxidation. Plant Soil. 22(1):49-61.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, and W.L. Nelson. 2004. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 7th edition, Prentice Hall.
- Iyamulemye, F. and R.P. Dick. 1996. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. Adv. Agron. 56:139-185.
- Jo, N.C., J.S. Shin., S.H. Kim., S.H. Yoon., B.S. Hwang., M.W. Jung., K.D. Lee., W.H. Kim., S. Seo., J.G. Kim., C.E. Song., and K.C. Choi. 2010. Study on summer forage crop cultivation using SCB (Slurry composting-biofiltration) liquid fertilizer on reclaimed land, Korean J. Grassl. Forage Sci. 30(2):121-126.
- Jung, Y.S. and C.H. Yoo. 2011. Soil problems and agricultural water management of the reclaimed land in Korea, Korean J. Soil Sci. Fert. 40(4):330-348.
- Kang, C.H., A.S. Roh, S.K. Kim, and K.Y. Park. 2011. Effects of the application of livestock manure compost on reducing the chemical fertilizer use for the lettuce cultivation in green house. Korean J. Soil Sci. Fert. 44(3):457-464.
- KOSIS (Korea Statistical Information Service). 2013. Number of livestock and cattle farms by city and province (<http://kosis.kr/eng/statisticsList>).
- Lee, S.B., K.M. Cho., N.H. Baik, J.J. Lee., Y.J. Oh., T.I. Park., and K.J. Kim. 2011. Effects of application method of pig compost and liquid pig manure on yield of whole crop barley

- (*Hordeum vulgare* L.) and chemical properties of soil in Gyehwa reclaimed land. Korean J. Soil Sci. Fert. 44(3):353-360.
- Murphy, J. and J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta. 27:31-36.
- NIAS (National Institute Agricultural Science & Technology). 2000. The methods of soil and plant analysis. National Institute Agricultural Science and Technology. Suwon, Korea. p.103-146.
- Paliwal, K.V. and A.P. Gandhi. 1976. Effect of salts on the availability of soil phosphorus fertilized with super phosphate and di ammonium phosphate. Proc. Indian natn. Sci. Acad. 42(2&3):135-141.
- Park, J.H., J.K. Yeo., Y.B. Koo., W.W. Lee., H.C. Kim., and C.H. Park. 2008. Effects of slurry composting and biofiltration liquid fertilizer on growth characteristics of poplar clones in a reclaimed land mounding soil, Korean J. Soil Sci. Fert. 41(5):318-323.
- Reddy, K. R. and R. D. DeLaune. 2008. Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications. CRC Press.
- Sharpley, A. and B. Moyer. 2000. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. J. Environ. Qual. 29:1462-1469
- Silveira, M. L., M. K. Miyittah and G. A. O'Connor. 2006. Phosphorus release from a manure impacted spodosol: Effects of a water treatment residual. J. Environ. Qual. 35:529-541.