

변곡점을 이용한 영농형태별 토양 인산 유출 잠재력 평가

이슬비^{1†} · 이창훈^{2†} · 홍창오³ · 이용복⁴ · 김필주^{4,5*}

¹농촌진흥청 국립농업과학원, ²University of Illinois, ³South Dakota State Univeristy, ⁴경상대학교 농업생명과학원,
⁵경상대학교 대학원 (BK 21 Program) 응용생명화학과

Evaluation of Phosphorus Release Potential in Arable land with Different Landuse by Phosphorus Threshold

Seul Bi Lee^{1†}, Chang Hoon Lee^{2†}, Chang Oh Hong³, Yong Bok Lee⁴ and Pil Joo Kim^{4,5*} (¹National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, ²Department of Crop Sciences, University of Illlionis, 1102 S. Goodwin Avenue, Urbana, IL 61801, USA, ³Plant Science Department, South Dakota State University, 1110 Rotunda Lane North, Brookings, SD 57007, USA, ⁴Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, South Korea, ⁵Division of Applied Life Science, Graduate School (Brain Korea 21 Program), Gyeongsang National University Jinju, 660-701, South Korea)

Received: 1 December 2010 / Accepted: 21 December 2010
© The Korean Society of Environmental Agriculture

Abstract: Heavy application of fertilizer and manure in excess from the optimum requirement for crop growth can increase phosphorus (P) accumulation and P release potential in soils. In this study, the relationship between soil test P and 0.01M CaCl₂ extractable P was analysed to evaluate the P release potential of agricultural soils under different land-use. The paddy, upland, plastic film house(PFH) soils were sampled from Tongyoung and Changnyeong, and Daegok areas in Gyeongnam province, respectively. With respect to the P accumulation, available P contents in upland and PFH soils were 619 and 796 mg P₂O₅/kg, respectively indicating that different land-use types can greatly impact soil P accumulation. As soil available P was increased in the paddy soil, the content of 0.01M CaCl₂ extractable P also linearly increased without change point. Comparatively, P threshold were detected at 520 mg P₂O₅/kg in both upland and PFH soils, indicating that P release potential were higher in these land-use systems. For reducing P release from agricultural soils, management of optimum P content is needed in soils

possessing high P release potential. Further, the change point value, if it is to be used as an environmental indicator, requires more detailed investigation to cover a wide range of soil characteristics.

Key Words: Phosphorus accumulation, Phosphorus release, Threshold

서 론

우리나라는 1970년대 이후 화학비료와 가축분뇨의 사용량 증가에 따라 농경지 인산집적이 심화되고 있는 실정이다 (Kim, 1996). 특히, 밭과 시설재배지 토양의 평균 유효인산 함량은 1970년대 각각 201 mg P₂O₅/kg, 811 mg P₂O₅/kg에서 2000년대 584 mg P₂O₅/kg, 1,072 mg P₂O₅/kg 로 크게 증가하였다 (NIAST, 2006). 농경지에 집적된 인산은 표면유거, 지하용탈 및 침식과 같은 경로를 통해 유출되어 수계에 유입되며 (Pautler *et al.*, 2000), 수계에서 부영양화를 일으키는 dissolved P 농도는 0.01 mg P/L 으로 알려져 있다 (Sharpley *et al.*, 1997).

농경지 인산유출량은 인산의 집적량과 고도의 정의 상관관계가 있으며 (McDowell *et al.*, 2000), 특히 유거수내 인산(dissolved reactive P, DRP)의 농도와 토양 유효인산 분석방법 (soil test phosphorus, STP)에 따른 함량과의 상

*교신저자(Corresponding author): P. J. Kim
Tel: +82-55-751-5466 Fax: +82-55-757-0178
E-mail: pjkim@gnu.ac.kr
[†]공동 제1저자

관관계는 일정한 경향을 가지고 있었다. Pote *et al.*(1996)는 표면 유기수내 DRP농도와 Mehlich-3 ($r^2=0.72$), Bray-I ($r^2=0.75$), Olsen ($r^2=0.72$), distilled water ($r^2=0.82$), iron oxide paper ($r^2=0.82$), ammonium oxalate ($r^2=0.85$), P sorption saturation ($r^2=0.77$) 사이에는 직선 관계식이 있다고 하였다. 그러나, Sibbesen *et al.* (1997)는 넓은 분포 범위의 STP 농도에 따른 인산유출량을 분석하면, STP 농도가 높은 경우 토양의 인산 고정 자리가 포화되기 때문에 STP 농도와 인산유출량은 곡선형(culvilinear) 관계를 나타낸다고 하였다. 즉, 일반적으로 인산은 토양에 강하게 흡착되지만 토양의 흡착용량을 초과하면 인산의 유출량이 급격하게 증가하는데, 이때의 STP 농도를 변곡점 (threshold)이라고 한다 (Addiscott and Thomas, 2000). 따라서 STP의 변곡점 값은 토양의 인산 유출 잠재력을 빠르고 쉽게 평가할 수 있는 지표로 활용할 수 있다.

지금까지 우리나라의 농경지 인산관리 방안에 관한 연구는 작물의 수량과 품질향상 측면에 집중되어 있다. 특히, 작물별 적정 유효인산 함량 기준은 지속적 농업생산을 위한 화학비료 및 가축분 퇴비 시용량 결정에 널리 활용되고 있다. 하지만, 수계 오염에 가장 큰 영향을 미치는 농경지로부터 유출되는 인산에 관한 연구는 아직까지 활발히 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 우리나라 농경지 인산의 합리적인 관리를 위한 인산유출 잠재력 평가의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구는 논, 밭 및 시설재배지의 인산유출 변곡점을 구명하여 농경지로부터 인산유출 잠재력 평가와 합리적인 농경지 인산관리를 위한 기준설정에 필요한 기초자료로 활용하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구를 위한 토양 시료는 2008년 3월 ~ 6월까지 경남 통영과 창녕으로부터 논 100 곳, 밭 100 곳과 경남 진주의 시설재배지 75 곳에서 채취하여 농경지 이용형태에 따른 토양 화학성 분석에 사용하였다. 토양 시료를 채취한 논의 주 재배작물은 벼이며, 밭은 양파, 고구마, 옥수수, 참깨, 콩, 그리고 시설재배지는 토마토, 고추, 호박, 수박이었다.

토양 pH와 EC, 유기물함량, 치환성 양이온 (K, Ca, Mg) 함량을 농업과학기술원 토양화학분석법(NIAST, 2000)에 준하여 조사하였다. 토양의 유효인산 함량은 Lancaster 법으로 분석하였으며 간략히 요약하면 다음과 같다. 실온에서 건토 5g에 Lancaster 침출액 (pH 4.25)을 20ml 가한 후 10분간 교반하여 침출 여과하여 몰리브덴 청법으로 비색정량 하였다 (NIAST, 2000). 그리고 0.01M CaCl₂ 가용성 인산은 토양과 침출액의 비율을 1:5로 하여 실온에서 30분간 침출하여 침출액내 인산의 함량은 몰리브덴 청법으로 비색 정량하였다 (Murphy *et al.*, 1962).

농경지 이용형태에 따른 유효인산 (Lancaster) 함량과 0.01M CaCl₂ 인산함량 사이의 변곡점은 변곡점보다 큰 부분과 작은 부분을 구분하여 구하였다 (McDowell *et al.*, 2001).

변곡점 아래: $CaCl_2-P = m_1(STP) + c$

변곡점 위: $CaCl_2-P = m_1(STP) + m_2(STP-CP) + c$

여기서, c: 절편, CP: 변곡점, m_1 : 변곡점 보다 낮은 직선의 기울기, m_2 : m_1 과 변곡점 다음 직선 기울기간의 차이를 나타낸다.

결과 및 고찰

농경지 이용형태에 따른 토양의 이화학적 특성

조사지역 평균 토양 pH는 논, 밭, 시설재배지에서 각각 5.74, 6.18, 6.71 이었으며 (Table 1), 조사지역의 논의 평균 pH는 2000년대 우리나라 논 토양 평균 값과 비슷하며, 밭과 시설재배지의 평균 값인 5.9와 6.3보다는 다소 높았다 (NIAST, 2006). 그리고 토양 중 염류집적 정도를 나타내는 EC 값은 시설재배지, 밭, 논 순으로 나타났으며, 특히 시설재배지 EC 값은 1.81 dS/m로 논의 0.34 dS/m에 비해 약 5배가 높은 것으로 확인되었다. 조사지역의 평균 유효인산 함량은 논, 밭, 시설재배지에서 각각 86.4, 619, 796 mg P₂O₅/kg 이었다. 논은 벼 재배를 위한 적정 인산함량 80-120 mg P₂O₅/kg 범위에 포함되어 과도한 인산 집적현상은 나타나지 않았다. 그러나 밭과 시설재배지는 작물재배를 위한 적정 유효인산함량 200~300 mg P₂O₅/kg 과 500

Table 1. Chemical characteristics of soils used

Land use		pH (1:5)	EC (dS/m)	O.M (g/kg)	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)	CaCl ₂ -P (mg/kg)	Ex. Cation (cmol ⁺ /kg)		
							K	Ca	Mg
Paddy (n=100)	Mean	5.74	0.34	24.7	86.4	0.75	0.14	8.2	2.8
	Range	5.0-7.0	0.1-1.1	13.0-37.0	13-299	0.05-12.17	0.02-0.38	1.5-15.0	1.0-5.6
Upland (n=100)	Mean	6.18	0.63	19.6	619	4.86	0.88	10.0	1.8
	Range	4.70-7.50	0.1-2.5	5.0-42.0	106-1378	0.13-31.5	0.24-2.10	0.70-25.5	0.3-6.3
PFH (n=75)	Mean	6.71	1.81	27.7	796	28.9	1.24	7.8	2.0
	Range	5.1-7.8	0.5-9.9	9.3-54.6	201-1534	0.83-76.9	0.22-3.84	23.9-12.8	0.83-3.94

Note) PFH., plastic film house; O.M, organic matter; Av. P₂O₅, available P₂O₅; Ex.K, exchangeable K; Ex.Ca, exchangeable Ca; Ex.Mg, exchangeable Mg

mg P₂O₅/kg 를 크게 초과하는 것으로 나타났다. 이와 같이 밭과 시설재배지의 인산이 심하게 집적되어 있는 것은 가축 분 퇴비 속에 포함된 인산 함량을 고려하지 않은 가축분 퇴비와 화학비료 시비에 의한 것으로 설명 된다 (Koopmans, 2007).

농경지 이용형태에 따른 유효인산함량의 분포 패턴은 Figure 1에서 보는 바와 같다. 논, 밭의 경우 조사 농가의 약 38%가 유효인산함량 50 mg P₂O₅/kg 이하로 벼 재배를 위한 적정함량 보다 낮은 것으로 나타났다. 그러나 밭과 시설재배지 토양의 유효인산 함량은 각각 90, 70%가 작물재배를 위한 적정함량 보다 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 농경지 토양 유효인산 함량의 차이는 화학비료와 가축분 퇴비 사용량에 크게 영향을 받는다. 조사지역의 실제 농가에서 시비하는 인산투입량을 조사하기는 어렵지만, 작물별 표준시비량 (NIAST, 2006)을 통해 투입되는 양분의 양을 간접적으로 예측할 수 있다. 벼의 경우 표준 시비량은 11-3-3 kg/ 10a (N-P₂O₅-K₂O)인데 비해 밭의 주작목인 양파의 경우 24-7.7-15.4-2000 (N-P₂O₅-K₂O-가축분퇴비) kg/ 10a 이고, 시설재배지의 주요 작목인 고추, 수박, 호박의 표준시비량은 각각 22.5-6.4-10.1-2000 kg/10a, 13.8-4.9-8.7-1500 kg/10a, 20-8.4-9.9-1500 kg/ 10a 이다. 이를 통해 논에 비해 밭과 시설재배지에 많은 양의 인산질 비료 및 퇴구비가 투입되어 토양 인산 축적에 영향을 준 것으로 판단된다. 그리고 논에서

밭이나 시설재배지보다 인산함량이 크게 낮은 또 다른 이유는 토양이 담수 되어 ferric (Fe³⁺) phosphate가 ferrous (Fe²⁺) phosphate로 환원되어 불용성 인산의 용해도가 증가 되기 때문이다 (Lindsay *et al.*, 2001).

농경지 이용 형태별 토양 0.01M CaCl₂ 가용성 인산과 토양 이화학적 사이의 상관관계를 분석한 결과는 Table 2와 같다. 논, 밭 및 시설재배지에서 0.01M CaCl₂ 가용성 인산은 유효인산함량과 고도의 정의 상관관계를 나타냈다. 이러한 결과는 Yoon *et al.* (1998)의 40개 밭토양에서 유효인산 함량과 0.01M CaCl₂ 가용성 인산 농도 변화 시험결과와 일치하였다. 그리고 토양내 유기물 함량과 0.01M CaCl₂ 가용성 인산함량과도 고도의 정의 상관관계를 나타내었으며, 상관계수 값은 시설재배지, 밭, 논 순으로 높았다. Choi *et al.*(2010)은 충남지역의 딸기 시설재배지의 토양 화학성 조사에서 가축분 퇴비의 사용량과 토양 유효인산 함량이 고도의 정의 상관을 보인다고 하였다. 따라서 논 보다 밭과 시설재배지에서 유기물함량과 0.01M CaCl₂ 가용성 인산함량과의 상관계수 값이 높은 것은 가축분 퇴비 사용에 의한 인산 집적량이 높았기 때문인 것으로 생각된다.

농경지 이용형태에 따른 인산유출 변곡점

Hesketh *et al.* (2000)는 라이시메타의 배출수 중 인산과 토양 중 CaCl₂ 가용성 인산함량과 유사성이 높기 때문에

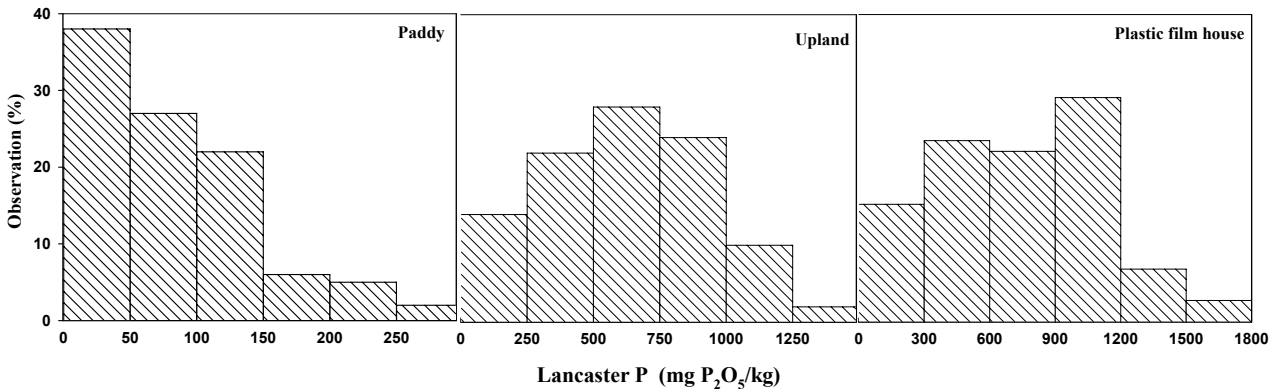


Fig. 1. Accumulation patterns of available phosphorus in paddy, upland and plastic film house soils in Gyeongnam province.

Table 2. Relationship between CaCl₂ extractable P and chemical properties in soils with different land use based on linear regression

Land use	pH	OM	Available P ₂ O ₅	Ex. K	Ex. Ca	Ex. Mg
Paddy (n=100)	0.197*	0.224*	0.390**	0.111	0.215*	0.053
Upland (n=100)	0.141	0.401**	0.697**	0.408**	0.065	0.112
PFH (n=75)	-0.113	0.750**	0.818**	0.210*	0.416**	0.225*

Note) PFH., plastic film house; OM, organic matter; Ex. K, exchangeable K;

Ex. Ca, exchangeable Ca; Ex. Mg, exchangeable Mg

* and ** denote significance at 5.0% and 1.0%, respectively.

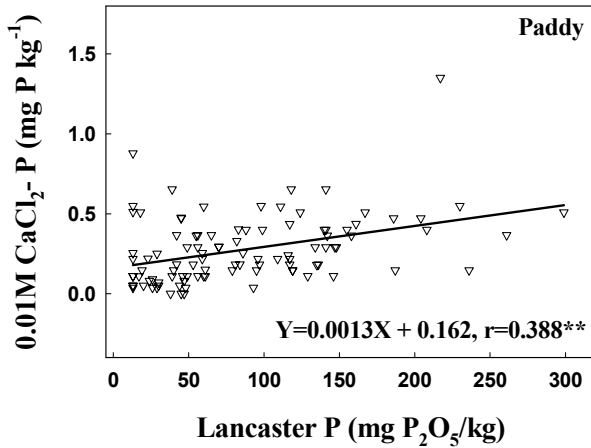


Fig. 2. The relationship between Lancaster P and CaCl_2 extractable P in paddy soils.

0.01M CaCl_2 가용성 인산함량을 유출 가능한 인산의 값으로 사용할 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서 농경지 이용형태별 인산 유출량은 CaCl_2 가용성 인산함량으로 표현하였다. 논 토양에서 인산유출량은 유효인산의 함량이 증가할수록 증가하였으며, 이들 사이에는 고도의 정의 상관관계를 나타내었다 (Fig. 2). 그러나 토양 중 인산의 함량이 인산 흡착능력 이상 집적되어 인산의 유출량이 급격히 증가되는 변곡점은 나타나지 않았다. 이러한 이유는 논 토양은 일반적으로 150일 이상의 담수조건에서 벼 재배가 이루어지는데 이때 산화철의 환원, 음이온의 치환, 인산화합물의 가수분해 생성 등에 따른 인산의 유효화가 증가되어 인산이 식물에 흡수되거나 유실되어 토양의 인산 포화도가 낮아진 것이 주원인으로 해석 된다 (Ponnamperuma, 1972).

밭과 시설재배지에서 인산유출 변곡점은 유효인산 함량 520 mg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$ 에서 나타났다 (Fig. 3). McDowell *et al.* (2001)은 미국, 영국, 뉴질랜드의 토양조사 결과에서 Olsen P 나 Mehlich-3 P 가 증가함에 따라 CaCl_2 가용성 인산함량이 증가하며, Olsen P의 경우 20-112 mg P/kg에서, Mehlich-3 P의 경우 120-190 mg P/kg에서 변곡점이 나타났다고 하였다. 외국의 인산 변곡점 결과는 주로 토양의 유효 인산의 함량을 Olsen P나 Mehlich-3 P로 조사하여 Lancaster P로 조사한 본 연구 결과와 직접 비교하기는 어려울 것으로 판단되지만, 토양내 유효인산의 함량과 CaCl_2 가용성 인산의 함량과의 관계는 같은 경향으로 나타났다.

본 시험결과로 볼 때 밭과 시설재배지의 토양 중 유효인산의 함량은 520 mg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$ 이상 일 때 그 유출량이 급격히 증가 한다는 것을 의미한다. 따라서 밭과 시설재배지에서 주변 수계의 부영양화에 최소 영향을 미치는 적정 유효인산 함량 관리범위는 520 mg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$ 이하로 판단된다. 그리고 우리나라는 국립농업과학원에서 토양검정사업을 통해 전국 대부분 농경지에 대한 토양의 이화학적 특성이 조사되어 있기 때문에 인산유출 변곡점을 활용하여 인산유출 잠재력이 높은 지역을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

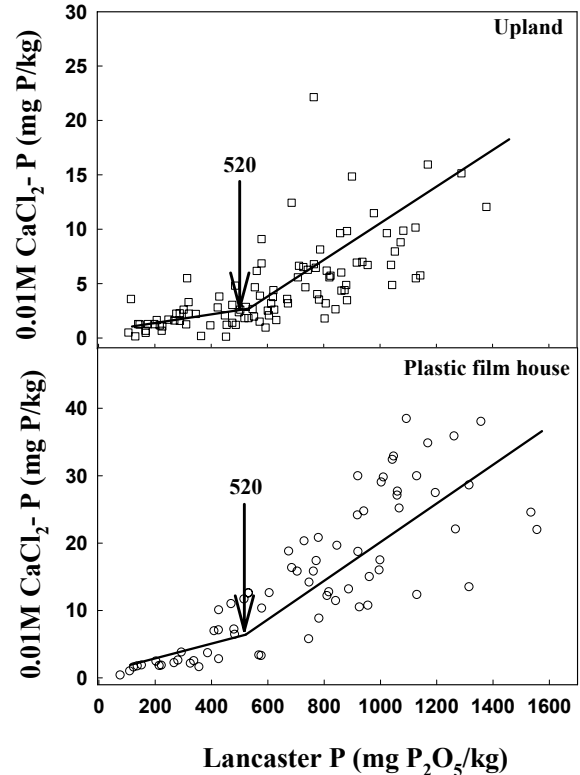


Fig. 3. The relationship between Lancaster P and CaCl_2 extractable P in soils from upland and plastic film house.

요 약

우리나라 농경지 이용형태에 따라서 인산유출 잠재력과 합리적인 농경지 인산관리 기준을 설정하기 위해서 경남 통영시, 창원시 및 진주시의 논, 밭, 시설재배지 토양을 각각 100, 100, 75 곳에서 채취하여 인산유출 변곡점을 분석하였다. 조사지역의 논, 밭, 시설재배지의 평균 유효인산 함량은 각각 86, 619, 796 mg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$ 로 농경지 이용형태에 따라 토양의 인산함량은 큰 차이를 보였다. 논 토양에서는 유효인산함량이 증가함에 따라 0.01M CaCl_2 함량도 직선적으로 증가하여 변곡점이 나타나지 않았다. 반면 밭과 시설재배지에서는 토양 유효 인산 함량이 약 520 mg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$ 에서 0.01M CaCl_2 가용성 인산 함량이 급격하게 증가하는 변곡점이 확인되었다. 따라서 밭과 시설재배지에서 주변 수계로 인산 유출량을 저감하기 위해서는 농경지 유효인산 함량을 520 mg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$ 이하로 관리하는 것이 바람직하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 어젠다프로그램 (PJ007816) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Addiscott, T. M., Thomas, D. 2000. Tillage, mineralization and leaching: phosphate. *Soil & Tillage Res.* 53, 255-273.
- Choi, M. T., Lee, J. I., Yun, Y. U., Lee, J. E., Lee, B. C., Yang, E. S., Lee, Y. H., 2010. Relationship between fertilizer application level and soil chemical properties for strawberry cultivation under greenhouse in Chungnam province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(2), 153-159.
- Hesketh, N., Brookes, P.C. 2000. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *J. Environ. Qual.* 29, 105-110.
- Kim, Y. W., 1996. Impacts of fertilizer on agricultural environment and its countermeasure. pp. 57-81. '96 Symposium on Agricultural environment. The Korean Society of Environmental Agriculture.
- Koopmans, G. F., Chardon, W.J., McDowell, R.W., 2007. Phosphorus movement and speciation in a sandy soil profile after long-term animal manure applications. *J. Environ. Qual.* 36, 305-315.
- Lindsay, J. S., Qualls, G. Q., 2001. Stability of phosphorus within a wetland soil following ferric chloride treatment to control eutrophication. *Environ. Sci. Technol.* 35, 4126-4131.
- McDowell, R. W., Trudgill, S. T., 2000. Variation of phosphorus loss from a small catchment in south Devon, U.K. *Agric. Ecosys. Environ.* 79, 143-157.
- McDowell, R., Sharpley, A. N., 2001. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. *J. Environ. Qual.* 30, 508-520.
- Murphy, J., Riley, J. R., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta.* 27, 31-36.
- Pautler, M. C., Sims, J. T., 2000. Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus, and phosphorus saturation in Delaware soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 765-773.
- Ponnamperna, F. N., 1972. Chemistry of waterlogged soils. *Adv. Agron.* 24, 29-96.
- Pote, D. H., Daniel, T. C., Sharpley, A. N., Moore, P. A., Edwards, D. R., Nichols, D. J., 1996. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *J. Environ. Qual.* 60, 855-859.
- Sharpley, A. N., Rekolainen, 1997. Phosphorus in agriculture and its environmental implications. In: Phosphorus loss from soil to water, eds H Tunney OT Carton PC Brookes & AE Johnston. CAB International, Wallingford, pp. 1-54.
- Sibbesen, E., Sharpley, A. N., 1997. Setting and justifying upper critical limits for phosphorus in soils. pp. 151-176. In H. Tunney *et al.* (ed.) P loss from soil to water. CAB Int. Press, Oxon, England.
- Yoon, J. H., Jung, B. G., Kim, Y. H., 1998. Dependence of 0.01M CaCl₂ soluble phosphorus on extractable P and P sorptivity in upland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31(3), 266-270.