

## Effects of Organic Acids on Availability of Phosphate and Growth of Corn in Phosphate and Salts Accumulated Soil

Myung-Sook Kim\*, Seong-Jin Park, Chang-Hoon Lee, Sun-Gang Yun, Byong-Gu Ko, and Jae E. Yang

*Soil & Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Science, Wanju 55365, Rep of Korea*

(Received: May 4 2016, Revised: June 20 2016, Accepted: June 21 2016)

Accumulated Phosphate can be released by ligand exchange reaction of organic acids. The objective of this study was to evaluate effects of the organic acids on the availability of phosphate and the growth of crop in phosphate and salts accumulated soil. Soil samples were collected from farmer's plastic film house. Available phosphate and electrical conductivity of soil were 3,005 mg kg<sup>-1</sup> and 16.63 dS m<sup>-1</sup> which were 6 and 8 times higher than the optimum range of soil for crop growth, respectively. Corns were cultivated in pots for 2 months. Treatments were no treatment (control), phosphate fertilizer (P), citric acid (CA) 1, 5, 10 mM, and oxalic acid (OA) 1, 5, 10 mM. Water soluble phosphorus, available phosphate, corn growth and uptake were determined after cultivation. Results showed that organic acids increased water soluble phosphorus and available phosphate. For the level of 10 mM, the order of effectiveness of organic acids for water soluble P was citric acid (44%) > oxalic acid (32%). Height and dry weight of corns were increased significantly by the treatment of citric acid 1 and 5 mM. Also, corn absorbed more phosphorus, nitrogen, potassium, calcium and magnesium in the treatment of citric acid 1 mM than these of other treatments. Even though phosphate availability of soil was enhanced by addition of citric acid 10 mM, the growth of corns decreased because high concentration of citric acid caused salt damage by increase of electrical conductivity. Thus, the citric acid of 1 mM has the potential to improve the availability of phosphate and the healthy growth of corns.

**Key words:** Phosphate and salts accumulation, Organic acid, Phosphate availability, Corn growth

### Height and dry weight of corns cultivated in soil applied with the organic acids.

Treatment	Height cm	Dry weight	
		Top	Root
		g plant <sup>-1</sup>	
Control	61.3 bc	3.2 de	1.2 cd
P	82.7 ab	7.7 bc	1.9 bcd
CA 1 mM	96.2 a	13.0 a	4.2 a
CA 5 mM	90.7 a	11.1 ab	2.7 b
CA 10 mM	67.7 bc	5.2 cde	1.3 cd
OA 1 mM	55.7 c	2.1 e	0.4 d
OA 5 mM	79.0 ab	5.1 cde	1.7 bcd
OA 10 mM	80.7 ab	8.2 bc	1.7 bcd

\* Different letters represent significant differences ( $P < 0.05$ ) between treatments by LSD. P: phosphate fertilizer, CA: citric acid, OA: oxalic acid.

\*Corresponding author: Phone: +82632382454, Fax: +82632383822, E-mail: msk74@korea.kr

§Acknowledgement: this study was conducted by support of NAS research and development project (project number: PJ0101202016).

## Introduction

유기산은 식물 또는 동물 잔재물의 분해, 미생물의 신진대사, 근권 작용으로 생성되며 (Huang and Violante, 1986; Mo, 1986; Stevenson, 1967) 한개 또는 여러 개의 carboxyl groups으로 킬레이트 기능을 한다 (Jones, 1998). 토양에서 유기산은 자연적인 화학반응에 관여하는 물질로서, 이러한 화학반응의 대표적인 예로 식물의 뿌리에서 배출된 유기산이 토양의 결합된 인을 용해하고 식물이 양분으로 흡수하는 것이다 (Hue 1991; Bolan et al., 1994; Iyamuremye and Dick, 1996; Jones, 1998; Yang et al., 2000; Haynes and Mokolobate, 2001; Hu et al., 2001; Palomo et al., 2006; Wang et al., 2008).

유기산은 토양에서 지속적으로 생성되지만 저농도 ( $10\sim100 \mu\text{mol L}^{-1}$ )로 존재하며 미생물의 분해로 잔류시간이 짧은 단점이 있다 (Jones, 1998). 이러한 점을 보완하고자 인위적으로 고농도의 유기산을 투입하여 토양 중 인산의 유효도를 향상시킬 수 있다 (Stanford and Pierre, 1953). 이러한 연구는 국외에서 유기산의 종류와 처리농도에 따른 인산의 가용성, 존재 형태의 변화 (Earl et al., 1979; Lopez-Hernandez et al., 1986; Jones and Darrach, 1994; Lan et al., 1995; Yang et al., 2000; Hu et al., 2001; Palomo et al., 2006), 그리고 유기산과 인산질비료의 투입 순서에 따른 인산의 유효도 증대 (Scheffe and Tymms, 2013) 등에 대하여 주로 연구되었다. 국내에서는 포트 규모에서 인산 집적지 토양에 유기산을 처리한 후 작물의 생육 증진 효과를 연구한 결과가 있다 (Lee, 2003).

우리나라 농경지의 유효인산 함량에 있어서 논 (2011년), 밭 (2009년), 시설재배지 (2012년)의 평균 함량은 각각  $131 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $628 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $1,049 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 농촌진흥청 (NAAS, 2010)에서 추천하는 작물 생육을 위한 유효인산 적정 범위 (논:  $80\sim120 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 밭:  $150\sim250 \text{ mg kg}^{-1}$ ; 시설재배지:  $450\sim550 \text{ mg kg}^{-1}$ )보다 1.4~2.0배 정도 초과되었고, 특히 시설재배지 토양은 다른 농경지보다 인산 집적이 심각하며 대부분 인산과 염류가 동시에 집적된 토양의 비율이 55%를 차지하고 있다 (RDA, 2013). 채소류 소비가 증가하면서 시설재배지는 속성 재배와 다수확을 목적으로 연중 작물을 재배하게 되었고, 무기질 비료와 가축분 퇴비의 과잉 투입으로 인산과 염류집적의 문제를 가져왔다. 그 증거로 농경지에 투입되는 인산질 비료의 단위 면적당 잠재사용

량은 2010년에  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  (Yun et al., 2013)이었고, 이것은 농촌진흥청 (NAAS, 2010)에서 추천하는 시설재배지의 비료 표준 사용량 ( $30\sim106 \text{ kg ha}^{-1}$ )보다 1.1~4.0배 정도 과잉으로 투입된 양에 해당한다.

농경지로 과잉 투입된 인산질 비료는 토양 입자에 1차적으로 특이 흡착하고, 토양 입자가 인산으로 포화된 이후에 작물이 이용할 수 없는 불용성의 형태로 고정 또는 침전되는 특성이 있다 (Hsu, 1964). 이로 인해 인산과 염류의 집적은 토양 양분의 불균형을 유발하여 작물 생육이 저해되고, 토양 중 인산 성분이 수계로 유출할 경우 환경 오염의 2차적 문제를 일으킬 수 있어 (Sharpley, 1995) 농경지 내에서 집적 인산을 효율적으로 활용하는 연구가 필요하다.

따라서 인산과 염류가 동시에 집적된 토양에 유기산을 투입하여 토양의 화학성 변화와 작물 생육에 미치는 영향을 평가하였고, 건전한 작물 생육을 위한 최적의 유기산의 종류와 농도를 설정하고자 하였다.

## Materials and Methods

**공시 토양 특성 및 작물 재배** 토양은 시설재배 농가 포장에서 채취하였고, 토양의 유효인산 함량과 전기전도도는 각각  $3,005 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $16.63 \text{ dS m}^{-1}$ 로 옥수수 정상 생육을 위한 토양의 적정범위 (유효인산  $150\sim250 \text{ mg kg}^{-1}$ , 전기전도도  $2 \text{ dSm}^{-1}$  이하)보다 각각 15.0배, 7.5배 정도 많았다 (Table 1). 공시 작물은 흡비력이 좋은 사료용 옥수수로 선정하였고, 포트 (1/2000a)에 토양을  $12 \text{ kg}$  충전하였으며, 시험구 배치와 반복수는 완전임의배치 3반복으로 하였다. 처리 내용은 control, 표준비료사용량 (NAAS, 2010)을 투입한 인산질비료 처리구 ( $\text{P: P}_2\text{O}_5 = 30 \text{ kg ha}^{-1}$ ), 유기산으로 citirc acid (CA), oxalic acid (OA)을 이용하여 1, 5, 10 mM 농도로 처리하였고, 유기물 함량과 치환성 칼륨 함량이 적정 범위 내 또는 이보다 높기 때문에 무기질 비료로 인산만을 처리하였다. '13년 9월 4일에 화학비료와 유기산을 토양과 혼합하였고, 1주일 이 지난 후 (9월 11일)에 토양을 채취한 후 옥수수를 파종하였으며, 10월 15일에 생육조사를 한 후 옥수수를 수확하였다.

**토양 및 식물체 분석** 토양시료는 유기산을 처리한 후

**Table 1. Chemical properties of the experimental soils.**

Division	pH	EC	OM	Av. $\text{P}_2\text{O}_5$	Ex. cation		
					Ca	K	Mg
	1:5H <sub>2</sub> O	( $\text{dS m}^{-1}$ )	( $\text{g kg}^{-1}$ )	( $\text{mg kg}^{-1}$ )	cmolc $\text{kg}^{-1}$		
Soil	$6.6 \pm 0.1$	$16.63 \pm 2.30$	$63 \pm 1$	$3,005 \pm 130$	$23.2 \pm 0.9$	$8.01 \pm 0.44$	$12.6 \pm 0.7$
Optimum range for corn growth <sup>†</sup>	6.0 ~ 6.5	$\leq 2.00$	20 ~ 30	150 ~ 250	5.0 ~ 6.0	0.45 ~ 0.55	1.5 ~ 2.0

<sup>†</sup> NAAS, 2010.

작물 정식전에 채취하고 풍건하여 분석시료로 사용하였다. pH와 EC는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 pH와 EC meter로 측정하였고, 토양유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 720 nm에서 비색계 (U-3000, Hitachi)로 측정하였다. 치환성 양이온은 1 M NH<sub>4</sub>OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 유도결합 플라즈마 발광광도계 (ICP-OES, GBC)로 분석하였다. 식물체의 건조중은 채취하여 건조기에 건조한 후 무게를 측정하였고, 식물체의 무기성분 함량은 건조 후 분쇄한 시료를 0.5 g 칭량하고 conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10 mL와 50% HClO<sub>4</sub> 10 mL를 가하여 분해한 후 여과하여 총질소 (T-N)는 킬달증류방법으로 분석하였고, P, K, Ca, Mg 등은 ICP-OES로 측정 후 농도를 계산하였다 (NIASI, 2000).

통계분석 모든 데이터는 SAS 프로그램 (v. 9.2)으로 통계 분석을 하였다. 킬레이트제 사용 효과를 검정하고자 ANOVA 분석을 실시하였고, 옥수수의 생육량과 무기성분 흡수량 비교는 최소유의차 검정 (LSD)을 적용하여 분석하였다.

## Results and Discussion

**토양 화학성** 유기산 처리 후 토양 화학성 변화를 비교한 것은 Table 2와 같다. 토양 pH는 모든 구에서 처리간 차이가 없었으나, 유기산의 농도가 높아짐에 따라 control보다 약간 증가하는 경향이였다. 일반적으로 유기산을 고농도로 처리하면 pH가 감소한다고 알려져 있으나, 본 공시토양은 염류집적지로서 축적된 양이온이 추출됨에 따라 pH가 약간 상승한 것으로 생각된다. 전기전도도에 있어서 P 처리구, 유기산 (CA, OA) 1 mM 처리구는 control과 차이가 없었으나, 유기산 (CA, OA) 5, 10 mM 처리구는 차이가 있었다. 즉 유기산 농도가 5 mM 이상으로 높아지면 인산과 다른 양이온의 추출력이 높아져 전기전도도의 상승을 가져온 것으로 판단된다. 치환성 칼슘과 마그네슘은 처리간 차이가 없었고 치

환성 칼륨은 control과 OA 처리구에서 차이를 보였다.

유효인산 함량은 citric acid를 처리할 경우 CA 1 mM, 5 mM, 10 mM 처리구에서 각각 3,093, 3,034, 3,155 mg kg<sup>-1</sup>으로 약간 감소했다가 증가하는 경향이였고, control (3,005 mg kg<sup>-1</sup>)보다 1~5% (29~150 mg kg<sup>-1</sup>)정도 증가한 것으로 나타났다. 그리고 oxalic acid를 처리할 경우 OA 1 mM, 5 mM, 10 mM 처리구에서 각각 3,015, 3,107, 3,201 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리농도가 증가할수록 증가하는 경향이였고, control 보다 0.3~7% (10~196 mg kg<sup>-1</sup>)정도 증가하여 oxalic acid 처리구도 citric acid 처리구와 마찬가지로 유사한 경향을 나타냈다.

수용성 인산 (P)의 함량은 citric acid를 처리할 경우 CA 1 mM, 5 mM, 10 mM 처리구에서 각각 41.6, 42.0, 52.0 mg kg<sup>-1</sup>으로 처리농도가 높아질수록 증가하였고, control (36.1 mg kg<sup>-1</sup>)보다 15~44% (5.5~15.9 mg kg<sup>-1</sup>) 정도 증가하였으며, oxalic acid를 처리할 경우 OA 1, 5, 10 mM의 처리구에서 각각 39.5, 44.7, 47.8 mg kg<sup>-1</sup>으로, control 보다 9~32% (3.4~11.7 mg kg<sup>-1</sup>) 정도 증가하였다.

토양에서 자연적으로 생성되는 유기산은 10~100 μmol L<sup>-1</sup>의 낮은 농도로 존재하지만 인위적으로 고농도를 투입할 경우 토양의 인산 공급력을 향상시킬 수 있고, 이 때 적절한 유기산의 투입 농도는 10 mM이라고 하였다 (Jones and Darrah, 1994; van Hees et al., 2003). 본 실험에서 농경지 집적인산의 가용화율은 유기산의 농도가 높은 10 mM에서 가장 증대하였고, 유기산 중 citric acid의 인산가용화가 oxalic acid 보다 더 높았다 (Wang et al., 2008).

**작물 생육 특성** 수확기 옥수수의 생육량을 비교한 것은 Table 3과 같다. 우선, 인산질비료 (P) 처리구에서 초장이 82.7 cm를 기준으로 다른 처리구와 비교해 보았을 때 CA 1 mM은 96.2 cm, CA 5 mM은 90.7 cm로 citric acid

**Table 2. Changes in pH, EC, Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, water soluble P, Ex. Ca, Ex. K, and Ex. Mg of soil by the addition of organic acids.**

Treatment	pH (1:5H <sub>2</sub> O)	EC dS m <sup>-1</sup>	Ex. cation			Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg kg <sup>-1</sup>	Water soluble P mg kg <sup>-1</sup>
			Ca	K	Mg		
			-----	cmolc kg <sup>-1</sup>	-----		
Control	6.6 ab	16.63 c	23.2a	8.04 a	12.6a	3,005 b	40.0 d
P	6.6 ab	16.92 bc	22.5a	8.00 ab	12.0a	3,019 ab	41.8 cd
CA 1 mM	6.6 ab	15.47 c	22.8a	7.39 ab	10.9a	3,093 ab	41.6 cd
CA 5 mM	6.6 ab	18.55 ab	22.9a	7.68 ab	11.5a	3,034 ab	42.0 cd
CA 10 mM	6.7 a	19.63 a	25.0a	7.86 ab	12.7a	3,155 ab	52.0 a
OA 1 mM	6.5 ab	15.44 c	24.5a	7.61 ab	12.2a	3,015 ab	39.5 d
OA 5 mM	6.5 ab	16.82 bc	22.8a	7.27 ab	10.9a	3,107 ab	44.6 bc
OA 10 mM	6.6 ab	20.35 a	23.5a	6.77 b	11.4a	3,201 a	47.8 ab

\* Different letters represent significant differences (P < 0.05) between treatments by LSD test. P: phosphate fertilizer, CA: citric acid, OA: oxalic acid.

**Table 3. Height and dry weight of corns cultivated in soil applied the organic acids. P, CA, and OA mean phosphate fertilizer, citric acid, and oxalic acid.**

Treatment	Height cm	Dry weight	
		Top	Root
		g plant <sup>-1</sup>	
Control	61.3 bc	3.2 de	1.2 cd
P	82.7 ab	7.7 bc	1.9 bcd
CA 1 mM	96.2 a	13.0 a	4.2 a
CA 5 mM	90.7 a	11.1 ab	2.7 b
CA 10 mM	67.7 bc	5.2 cde	1.3 cd
OA 1 mM	55.7 c	2.1 e	0.4 d
OA 5 mM	79.0 ab	5.1 cde	1.7 bcd
OA 10 mM	80.7 ab	8.2 bc	1.7 bcd

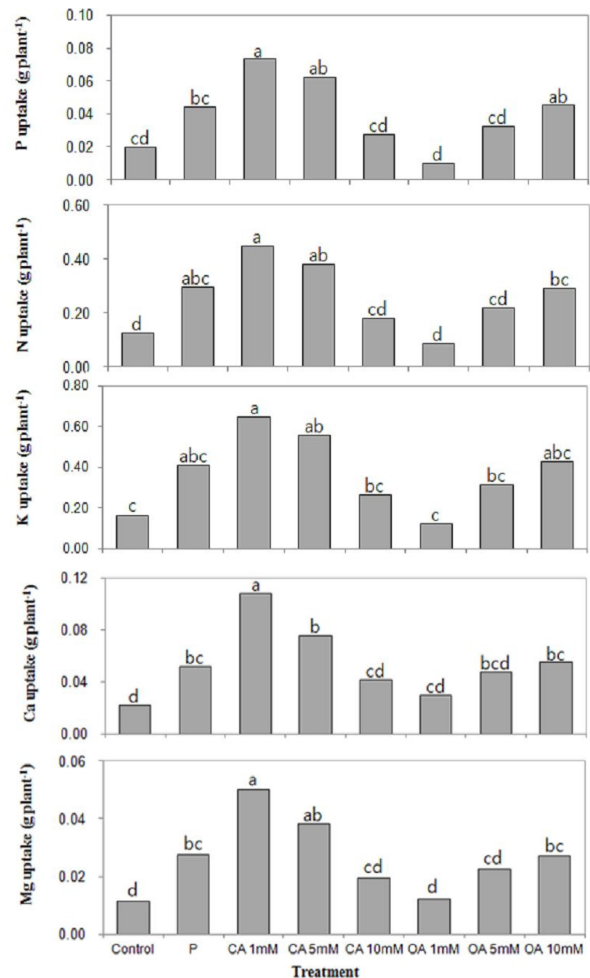
\* Different letters represent significant differences ( $P < 0.05$ ) between treatments by LSD test. P: phosphate fertilizer, CA: citric acid, OA: oxalic acid.

1~5 mM 처리한 구에서만 증가하였고, OA 처리구 중 생육이 가장 좋은 OA 10 mM 처리구와 차이는 없었다.

옥수수 of 건중량에 있어서 P 처리구의 건중량을 100으로 보았을 때 지상부 건중량은 CA 1 mM 처리구에서 69%, CA 5 mM 처리구에서 44%, OA 10 mM 처리구에서 6% 증수되는 경향이었지만, CA 10 mM과 OA 1 mM, OA 5 mM에서 염류장애로 인해 감소하는 경향을 보였다. 지하부 건중량은 CA 1 mM와 CA 5 mM 처리구에서 114%, CA 5 mM 처리구에서 39% 증가하는 경향이었고, 다른 처리구에서는 증가하지 않았다. 고농도 인산 및 염류지에서 citric acid 처리로 생육이 좋아진 이유는 양분 불균형과 염류로 작물생육 장애가 발생한 토양에 citric acid를 처리할 경우 ligand exchange 반응으로 양분을 용해하여 작물로의 양분공급이 균형적으로 이루어졌기 때문으로 생각된다. Lee (2003)에 따르면 유효인산 함량이 1,051 mg kg<sup>-1</sup>이고 염류농도가 3.77 dS m<sup>-1</sup>인 토양에서 작물을 재배하였을 때 생육 증진 효과는 시금치와 배추를 CA 1 mM로 처리 시 각각 17%, 26%, OA 1 mM로 처리시 51%, 103%로 증수하였다고 보고하였다. 본 연구와 Lee (2003)의 연구에서 citric acid 1 mM에 증수 효과가 있다는 점은 유사하나, oxalic acid 1 mM 처리 시 증수효과가 없다는 것이 달랐으며, 토양 염류농도가 큰 원인이라 추정하지만, 작용기작에 대한 구체적인 원인은 추후 연구가 필요한 부분이라 생각된다.

따라서, 고농도 인산 및 염류집적지에서 citric acid 1 mM과 5 mM 처리 시 생육증진 효과가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 1은 수확기 옥수수 지상부의 무기성분 흡수량을 나타낸 것으로 유기산 처리 농도별 유의성 있는 차이를 나타냈다. CA 1 mM 처리구에서 인 함량은 0.07 g plant<sup>-1</sup> 질소 함량은 0.45 g plant<sup>-1</sup>, 칼륨 함량은 0.65 g plant<sup>-1</sup>, 칼슘 함량은 0.11 g plant<sup>-1</sup>, 마그네슘 함량은 0.05 g plant<sup>-1</sup>로 가



**Fig. 1. P, N, K, Ca, and Mg uptake of corn by organic acids treatment. P, CA, and OA mean phosphate fertilizer, citric acid, and oxalic acid.**

\* Different letters represent significant differences ( $P < 0.05$ ) between treatments by LSD test. CA: citric acid, OA: oxalic acid.

장 높았고, 그 다음으로 CA 5 mM 처리구에서 인 함량은  $0.06 \text{ g plant}^{-1}$ , 질소 함량은  $0.38 \text{ g plant}^{-1}$ , 칼륨 함량은  $0.56 \text{ g plant}^{-1}$ , 칼슘 함량은  $0.08 \text{ g plant}^{-1}$ , 마그네슘 함량은  $0.04 \text{ g plant}^{-1}$ 로 높았다. 앞서 설명한 옥수수 지상부의 건중량 (Table 2)이 CA 1 mM과 5 mM 처리구에서 높은 것과 유사하며, 건중량이 높은 처리구가 무기성분 흡수량도 높은 것으로 나타났다.

CA 1 mM 처리구에서 무기성분 흡수량은 Ca (109%) > Mg (82%) > P (66%) > K (58%) > N (9%)의 순서로 증가되었으며, 2가 양이온인 Ca와 Mg의 공급효과가 가장 컸고, 1가 양이온인 K의 공급효과가 상대적으로 적었다. 이것은 토양 중 양이온에 대한 킬레이트제의 안정화 상수 (stability constant)의 크기 (Lindsay, 1979) 와 일치하는 것으로 안정화 상수가 큰 성분이 작물의 양분공급력이 높았다 (Kim et al., 2015).

이로부터 고농도의 인산 및 염류집적지에서 토양 인산의 수용성 농도 증가와 작물의 건전한 생육과 무기성분 흡수량의 증진효과를 고려해 볼 때 citric acid 1mM로 처리하는 것이 적절하다고 판단된다.

## Conclusion

고농도 인산 (Av.  $\text{P}_2\text{O}_5$   $3,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 및 염류 ( $16.63 \text{ dS m}^{-1}$ ) 집적지 토양에 유기산을 투입하여 토양 인산의 가용화 정도와 작물의 생육 반응을 평가하였다. Citric acid와 oxalic acid를 1, 5, 10 mM 농도로 투입했을 때 유기산 농도가 높아질수록 토양 유효인산 함량은 증가하는 경향이었고, 수용성 인산 (P)의 농도는 15~44% 정도 증가하였다. 그러나, 옥수수의 생육 증진 효과는 citric acid 1 mM과 5 mM로 처리하였을 때 가장 높았고, 이보다 높은 농도에서 작물의 생육은 저해되었다. 따라서, 염류집적지 토양에서 집적된 인산의 가용성이 증대되더라도 염류 농도의 동반 상승으로 작물생육이 저해되므로 토양 인산의 활용과 건전한 작물생육, 그리고 투입농자재의 경제성을 고려해 볼 때 1 mM 농도의 citric acid를 투입이 적절하다고 판단한다.

## References

Bolan, N.S., R. Naidu, S. Mahimairaja, and S. Baskaran. 1994. Influence of low-molecular-weight organic acids on the solubilisation of phosphates. *Biol. Fertil. Soils* 180:311-319.

Earl, K.D., J.K. Syers, and J.R. McLaughlin. 1979. Origin of citrate, tartrate, and acetate on phosphate sorption by soils and synthetic gels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:674-678.

Haynes, R.J. and M.S. Mokolobate. 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 59:47-63.

Hsu, T.C. 1964. Mammalian Chromosomes in vitro. 18. DNA replication in the Chinese hamster. *J. Cell Biol.* 25:53-62.

Hu, H.Q., J.Z. He, X.Y. Li, and F. Liu. 2001. Effect of several organic acids on phosphate adsorption by variable charge soils of central China. *Environ. Inter.* 26:353-358.

Huang, P.M. and Violante, A. 1986. Influence of organic acids on crystallization and surface properties of precipitation products of aluminum: in *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*, P. M. Huang and M. Schnitzer, eds., SSSA Special Publication No.17, Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, pp.159-221.

Hue, N.V. 1991. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. *Soil Sci.* 152:463-471.

Iyamuremye, F. and R.P. Dick. 1996. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. *Adv. Agron.* 56:139-185.

Jones, D.L. 1998. Organic acids in the rhizosphere: A critical review. *Plant Soil.* 205:25-44.

Jones, D.L. and P.R. Darrah. 1994. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. *Plant Soil.* 166:247-257.

Kim, M.S., Y.H. Kim, C.H. Lee, S.J. Park, B.G. Ko, S.G. Yoon, and B.K. Hyun. 2015. Effects of DTPA application on growth of red pepper and chemical properties of nutrient accumulated soil in plastic film house. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48(4): 312-317.

Lan, M., N.B. Comerford, and T.R. Fox. 1995. Organic anions effect on phosphorus release from spodic horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1745-1749.

Lee, S.H. 2003. Release of soil residual phosphate into soil solution by organic acids. M.S.(Thesis) Kangwon National University.

Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons, New York, pp.238-266.

Lopez-Hernandez, D., G. Siegert, and J.V. Rodriguez. 1986. Competitive adsorption of phosphate with malate and oxalate by tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1460-1462.

Mo, S.X. 1986. Production and transformation of soil organic acids and their significance on soil fertility. (In chinese.) *Adv. Soil Sci.* 4:9-11.

NAAS. 2010. *Fertilizer Recommendation for crops (revision)*. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.

NIAS. 2000. *Methods of soil and plant analysis*. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea

Palomo, L., N. Claassen, and D.L. Jones. 2006. Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate. *Soil Biol. Biochem.* 38:683-692.

RDA. 2013. *Soil management technology for agricultural land*. RDA., Suwon, Korea.

- Scheffe, C.R. and K. Tymms. 2013. Phased addition of organic and phenolic acids with phosphate fertiliser increases P availability in an acid soil. *Soil Res.* 51:437-446.
- Sharpley, A.N. 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *J. Environ. Qual.* 24:920-926.
- Stanford, G., and W.H. Pierre. 1953. Soil management practices in relation to phosphorus availability and use. Cited in soil and fertilizer phosphorus in crop nutrition. Academic Press, New York.
- Stevenson, F.J. 1967. Organic acid in soil: in *Soil Biochemistry*, Vol.L, A. D. McLaren and G. H. Peterson, eds., Marcel Dekker, New York, pp.119-146.
- Van Hees P.A.W., S.I. Vinogradoff, A.C. Edwards, D.L. Godbold and D.L. Jones. 2003. Low molecular weight organic acid adsorption in forest soils: effects on soil solution concentrations and biodegradation rates. *Soil Biol. Biochem.* 35, pp.1015-1026.
- Wang, Y., Y. He, H. Zhang, J. Schroder, C. Li, and D. Zhou. 2008. Phosphate mobilization by citric, tartaric, and oxalic acids in a clay loam Ultisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1263-1268.
- Yang, J.E., S.H. Lee, C.J. Park, J.J. Kim, and K.B. Lee. 2000. Utilization of residual phosphate in the plastic film house soils. *J. Agr. Sci.* 11:120-128.
- Yun, H.B., Y.J. Lee, M.S. Kim, J.K. Sung, Y.S. Zhang, S. M. Lee, S.C. Kim, and Y.B. Lee. 2013. Changes of potential NPK input by chemical fertilizers and livestock manure from 1990 to 2011 in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(6):593-598.