Growth and Phosphorous Absorption Rate of Red Pepper as Affected by Top Dressing Applications of Phosphorus Fertilizer in Different Cropping System

Hyo-Jung Choi^{1*}, Byung-Koo Ahn¹, Do-Young Ko¹, Hyo-Jin Kim¹, Hyong-Gwon Chon², Ye-Jin Lee³, and Seok-In Yun⁴

¹Researcher, Division of Agricultural Environment, JBARES, Iksan 54591, Korea

²Senior Researcher, Division of Agricultural Environment, JBARES, Iksan 54591, Korea

³Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

⁴Associate Professor, Department of Bio-Environmental Chemistry and Institute of Life Science and Natural Resources, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

*Corresponding author: soilchoi80@korea.kr

ABSTRACT

Received: August 10, 2020

Revised: August 23, 2020

Accepted: August 25, 2020

An experiment was conducted to study the effect of top dressing application of Phosphorus (P) fertilizer on the growth and P absorption rate of red pepper in different cropping systems of the upland. P fertilizer was applied with no treatment as control (CON), basal dressing application (BDA), 2 times-split of top dressing applications (2-TDA) and 3 times-split of top dressing applications (3-TDA). Red peppers were grown for 110 days and soil characteristics and crop growth were investigated every 20 days. Dry matter yield of red pepper significantly increased at the 2-TDA and 3-TDA but decreased at the CON and BDA due probably to the decrease or increase in available P. In particular, at 3-TDA there was an increase in growth and P absorption rate of red pepper. The fruit dry matter weight of red pepper receiving 3-TDA was 961.7 kg 10a⁻¹, which was significantly higher than those receiving CON and BDA in Rainproof cultivation. In case of the Rainproof cultivation, we found out both P fertilization use effect and top dressing applications effect because there was low available P content of soil used in the experiment in comparison other cultivation type. Therefore, considering the dual goal of optimum crop growth and maximum P distribution instead of immobilization with soil, this study suggests that a testing of a site-specific proper application method of P including top dressing applications is prerequisite to achieving optimum agricultural productivity while minimizing nutrition quality misuse.

Keywords: Absorption rate, Phosphorus, Red pepper, Temperature, Top dressing applications

Uptake of P by red pepper plants after 110 days of cultivation.

Cultivation type	Treatment	P uptake
		110DAT [†] (kg 10a ⁻¹)
Protected cultivation	CON [#]	1.19ab [†]
	BDA	1.01b
	2-TDA	1.14ab
	3-TDA	1.51a
Rainproof cultivation	CON [#]	0.82b
	BDA	1.18b
	2-TDA	1.36b
	3-TDA	1.91a
Open field cultivation	CON [#]	0.77b
	BDA	1.08a
	2-TDA	0.60bc
	3-TDA	0.55c

110DAT[†] means day after red pepper plants cultivation

CON[#]: no fertilization as control, BDA: application with P at 1.3 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 0.65, 0.33, 0.33 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 0.65, 0.22, 0.22, 0.22 kg 10a⁻¹ in Protected cultivation

CON[#]: no fertilization as control, BDA: application with P at 3.7 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 1.85, 0.93, 0.93 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 1.85, 0.62, 0.62, 0.62 kg 10a⁻¹ in Rainproof cultivation

CON[#]: no fertilization as control, BDA: application with P at 3.8 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 1.9, 0.95, 0.95 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 1.9, 0.63, 0.63, 0.63 kg 10a⁻¹ in Open field cultivation

[†]Mean values(n=3), with different lowercase letters indicating significant difference at p=0.05 by Duncan's multiple range test.

Introduction

우리나라 논토양과 밭토양의 유효인산 함량변화를 살펴보면 논토양은 1960년대 60 mg kg^{-1} 에서 2000년대 130 mg kg^{-1} (Hyun, 2012)로 220% 이상 증가하였고, 밭토양에서도 1960년대 115 mg kg^{-1} 에서 2000년대 585 mg kg^{-1} 로 현재 적정 함량인 $300 - 550 \text{ mg kg}^{-1}$ 수준을 상회하여 (NAAS, 2008) 500% 이상 매우 큰 증가폭을 보이고 있다. 이러한 현상은 작물재배 시 비료 고투입에 따른 양분집적에 기인한다.

최근 Kim et al. (2017)은 벼수량을 안정적으로 생산하기 위한 논토양의 유효인산 적정함량은 120 mg kg^{-1} 이며, 이보다 높은 함량으로 인산질 비료를 논토양에 사용해도 벼의 수량증대 효과는 크지 않았으며 오히려 유효인산 함량은 증가하지 않는 경향을 보인다고 하였다. 한편, Cope Jr (1981)은 인산질 비료를 $14 - 18 \text{ kg ha}^{-1}$ 을 투입한 경우보다 $27 - 30 \text{ kg ha}^{-1}$ 으로 다량 투입할 때가 토양의 유효인산 함량이 급격하게 증가한다고 보고한 바 있다. 따라서 인산의 증가 또는 감소 정도는 사용량과 더불어 작물 재배 방식에 따라 다양하게 나타난다고 판단되며, 인산질 비료가 투입되는 정도와 방식에 따라 토양에 흡착되는 양이 증가 또는 감소할 수 있고, 또한 잔류성-P이 유효인산 형태로 변환되어 작물 이용도가 높아질 수도 있다.

현재 우리나라 인산질 비료의 시비 방법은 관행적으로 재배 유형에 관계없이 전량 밑거름 시비를 원칙으로 하고 있다. 예전에는 토양 내 인산 함량이 낮아서 전량 밑거름으로 투입하는 것이 선호하는 방법이었지만 현재는 토양 내 인산 함량이 증가된 상황에서 전량밑거름 방식의 비료사용으로 인해 염류 및 양분 집적과 양분 유출문제를 야기시킬 수 있기 때문에 재배 형태별 인산질 비료 사용량과 시비 방법이 검토 되어져야 한다.

인산의 시비 형태를 재배유형별로 살펴보면, 논토양에서는 인산 전량 밑거름 살포가 이뤄지고 있으며, 이는 인이 초기 작물 생장에서 필요한 성분이기 때문이다. 질소 및 칼리는 과다 사용 시 작물 생장 억제기능으로 작용하지만 인은 핵산의 구성성분으로 세포분열과 생장에 필수적이어서 작물의 초기 생장에 큰 영향을 끼칠 수 있다 (Bennett, 1993; Marschner, 1995). 논토양에서 인산질 비료는 담수 상태에서 도복방지를 위해 벼의 생육 초기 뿌리 발생을 촉진시키고, 이차적으로 작물의 뿌리가 양분흡수를 왕성하게 할 수 있게 한다. 또한 담수 상태에서는 시간이 지남에 따라 잔류성-P이 용출되어 작물이 흡수할 수 있는 잠재적 비료원이 될 수 있는 장점도 있다. 그러나 논토양에 과다하게 사용되는 인산질 비료는 관개수를 따라 수계로 유출될 경우 부영양화의 중요한 오염원이 될 수 있고, 비료 자원의 불필요한 낭비를 가져올 수 있다 (Sharpley, 1995).

한편, 밭토양에서 인산 전량 밑거름 살포는 인산 이온이 알루미늄, 철을 포함하는 토양입자와 특이 흡착 반응으로 단단히 결합하여 고정화되고 불용화된다. 토양에서 인산은 무기태와 유기태로 존재하는데 60 - 80%의 대부분이 무기태 형태이며, 토양의 총인함량 중에 50%의 비율이 잔류성-P의 형태로 존재한다고 알려진다 (Kim et al., 2000). 잔류성-P의 형태가 증가하면 상대적으로 작물이 흡수할 수 있는 유효인산 형태가 줄어들게 되어, 인산질비료 이용성 측면에서 불리할 수 밖에 없다. 잔류성-P이 잠재적 인산질 비료로 사용될 수 있는 담수상태 논토양과 비교하여 밭토양에서는 잔류성-P과 유효태 인산의 함량비가 작물 생육에 중요한 인자가 될 수 있다.

또한 인산의 전량 밑거름 다량 시비는 밭작물 대상 특히 시설에서는 염류의 집적 등에 의해 작물생육에 해로울 수 있다. Kim et al. (2009)는 시설에서 인산 무시비구부터 1.25 mM 까지 인산 시비농도가 증가할수록 생육량이 증가하였으나 5 mM 이상의 고농도 인산 무시비구에서 생육이 저조하여 통계적인 차이가 인정되었다고 하였다. 그러므로 현재 설정된 인산질 비료의 시비방법 개선이 필요하고, 적정 시비량과 시비 방법을 설정하여 이용하는 것이 중요하다. 결과적으로 인산의 시비방법은 작물의 생육을 고려하면서 환경부하를 최소화하는 방향으로 활용되어야 한다.

다시 말해 토양에 투입된 인산질 비료는 시간이 경과되면 작물로 흡수되지 않은 부분이 잔류성-P의 형태로 변환할 수 있기 때문에, 전량밀거름 사용으로 토양의 흡착용량을 초과하여 한계이상의 유효인산을 만드는 것도 중요하지만, 잔류성 형태가 아닌 유효인산 형태(가용태 형태)로 활용되기 위해 인산질 비료의 분시 횟수 및 분시량의 결정이 더욱 중요하다고 판단된다. 작물이 흡수할 수 있는 양보다 많은 양의 인산질 비료를 계속적으로 사용하면, 잔류성-P의 증가를 야기시켜 불용화 되는 인산의 양이 증가되고, 과다시비에 의한 농경지의 인산 집적을 유발시킬 수 있기 때문이다. 그러므로 토양의 유효인산 함량과 작물로의 인산흡수 특성을 고려하여 작물 재배에 필요한 적정 유효인산 함량의 추정과 인산질 비료의 효용성을 높이기 위한 시비 방법에 대한 고찰이 마련된다면 토양 인산의 유실 가능성 등을 예측하고, 비료 자원의 경제적 낭비를 줄이는 데 활용될 수 있을 것이다.

기존 인산 연구 결과를 보면, 노지 밭작물의 질소 비료사용과 토양 유기물 함량에 따른 질소 무기화량 관계에서 질소는 변화가 뚜렷하여 시비효과가 극명하게 보였지만 인산은 시비효과 일정하지 않았다 (Park et al., 2009). 또한 Kim et al. (2001)은 유효인산 함량이 낮은 제주화산회 토양 지역에서 돈분액비 (0.150 kg/ha)와 인산비료 (0.150 kg/ha)의 시비 수준을 달리하여 그 생산성 및 인의 흡수량 등을 조사하여 그 사용 가능량을 연구한 바 있다.

그러나 지금까지의 연구는 인산의 전량 밀거름 방식으로, 작물생육에 적절한 인산 사용량 설정 연구에 집중되었고, 인산의 시비 방법 등이 작물환경에 미치는 영향에 대해서는 일반적으로 연구가 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 인산 시비 방법에 따른 토양에서의 인산 유효도와 작물로의 인산흡수량을 구명하고자 온도 조건이 다른 3가지 다른 재배 형태별 조건에서 고추를 재배하는 실험을 수행하였다. 다시 말해, 시설과 노지의 온도 차이를 지구온난화에 따른 온도변화로 설정하여, 그에 따른 고추의 생장상 변화를 알아보고, 고추의 표준재배법 재설정 및 시비 관리기술의 최적화 방안을 구축하기 위해 인산 가용화율을 기반으로 고추 작물생육에 맞는 인산비료 추천 모델을 설정하고자 한다.

Materials and Methods

시험포장 본 시험은 2018년도 전라북도 남원에 위치한 허브산채 시험장 포장시험 단지 내 조성된 시설재배, 비가림재배, 노지재배에서 수행하였다.

시험에 사용된 토양은 사양토이며, 토양 산도는 시설 7.1, 비가림 6.9, 노지 7.2이었고, 토양 중 유효 인산함량 적정 범위는 시설과 노지는 $300 - 550 \text{ mg kg}^{-1}$ 이나, 시험토양은 시설, 비가림, 노지가 각각 749, 467, 546 mg kg^{-1} 이었으며, 이는 비가림 및 노지는 적정범위에 포함되었고, 시설 인산함량은 적정범위를 상회하는 수준이었다. 유기물함량은 시설은 $25 - 35 \text{ g kg}^{-1}$, 노지는 $20 - 30 \text{ g kg}^{-1}$ 이 적정 범위인데, 시험토양은 시설, 비가림, 노지가 각각 31, 29, 28 g kg^{-1} 으로 모두 적정범위 안에 들었다 (Table 1).

시험 품종 및 경증개요 시험에 사용된 고추 (*Capsicum annuum*)는 ‘큰사랑’으로 포트육묘를 5월 상순에 정식하여 9월 상순에 수확을 종료하였다. 각 시험구 면적은 시설과 비가림이 237.8 m^2 ($5.8 \times 41 \text{ m}$), 노지가 150 m^2 ($7.5 \times 20 \text{ m}$)이었고, 재식거리는 이랑 50 cm, 포기사이 50 cm로 각 시험구당 33주를 재배하였다.

처리내용 시험처리는 무처리구 (CON), 전량밀거름 처리구 (BDA), 2회분시 처리구 (2-TDA), 3회분시 처리구 (3-TDA) 등 4처리 난괴법 3반복으로 배치하였다. 무기질 질소비료는 요소, 칼리는 염화칼륨, 인산은 밀거름은 용성인

Table 1. Selected chemical and physical properties of soils in the experiment plots.

Cultivation type	Bulk density	Particle size distribution			Soil texture	Solid phase	Liquid phase	Gas phase
		Sand	Silt	Clay				
	(Mg m ⁻³)	-----	(%)	-----		-----	(%)	-----
Protected cultivation	1.07	58	28	14	Sandy loam	40	26	34
Rainproof cultivation	1.11	57	28	15	Sandy loam	42	27	31
Open field cultivation	1.19	60	21	19	Sandy loam	45	29	26

Cultivation type	pH _(1:5)	EC	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. cation		
					K	Ca	Mg
		(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	-----	(cmol _c kg ⁻¹)	-----
Protected cultivation	7.1	1.3	31	749	0.5	6.0	2.0
Rainproof cultivation	6.9	0.2	29	467	0.5	6.0	1.2
Open field cultivation	7.2	0.2	28	546	0.5	5.3	1.0

비를 웃거름은 제일인산칼륨을 사용하였다. 화학비료 시비량은 작물별 비료사용처방 기준을 참고하여 사용하였고, 볏짚퇴비 2,000 kg 10a⁻¹를 시설, 비가림, 노지 각 시험구에 고추 정식 전에 처리하였다. 시비방법은 토양검정에 의한 비료사용량을 계산하여 밑거름과 웃거름으로 구분하였으며, 검정시비량 기준으로 질소와 칼리의 분시 비율은 밑거름을 전체 사용량의 55%를 주고, 웃거름은 정식 후 25일 간격으로 나머지를 2회 나누어 주었다. 인산은 밑거름으로 50% 처리하고, 나머지 50%를 2회, 3회 분시 처리하였으며 2회 분시처리구 (2-TDA)는 정식후 30, 50일에 3회 분시처리구 (3-TDA)는 정식후 30, 50, 70일에 분시 하였다. 또한 인산을 100% 기비로 사용한 전량 밑거름처리구 (BAD)와 인산을 처리하지 않은 시험구를 무처리구 (CON)로 두었다.

각 처리구에서의 인산 처리량은 고추의 표준사용량 11.2 kg 10a⁻¹을 기준으로해서 시설과 비가림, 노지 등 재배형태 별로 다르며, 그 양은 고추의 재배경작지별 토양검정사용량을 적용하였다. 시험에 사용된 용성인비는 시설재배에서 전량 밑거름 처리구 15 kg 10a⁻¹이었고, 비가림재배 42 kg 10a⁻¹, 노지재배 43 kg 10a⁻¹에 해당하고 인으로 환산된 사용량은 시설재배, 비가림재배, 노지재배 전량 밑거름 처리구에서 각각 1.3, 3.7, 3.8 kg 10a⁻¹에 해당하였다. 2회분시 처리구에서는 전량밑거름 처리구에서와 동일한 양을 밑거름과 2번의 웃거름으로 분시 하였고, 3회분시 처리구에서는 전량밑거름 처리구에서와 동일한 양을 밑거름과 3번의 웃거름으로 분시하였다.

재배기간 중 대기 온도를 측정하기 위해 화학비료 처리 전 포장 내 자동화측정센서 (DEKAGON 5TE, METER Group, Inc. USA)를 설치하여 재배 기간동안 1시간 간격으로 실험포장 내 대기의 평균온도를 측정하였다.

시료 채취 및 분석 식물체는 고추 모를 포장에 정식한 후 20일 간격으로 30일, 50일, 70일, 90일, 110일에 5회에 걸쳐 지상부 (줄기, 잎, 열매)와 지하부 (뿌리)를 모두 수확하였다. 이를 60°C에서 열풍건조 후 건물중을 측정하였고, 건중량은 지하부와 지상부를 고려하여 구분하였고, 지하부는 뿌리를 지상부는 줄기와 잎을 합산한 값을 나타내었으며 고추 과실은 정식 후 50일부터 20일 간격으로 건중량을 각각 측정하였다. 각 처리구에서 수확한 작물은 하나로 묶어서 3개의 시료를 만든 후 3반복으로 분석에 이용하였다.

토양시료 채취는 고추 모를 포장에 정식한 후 30일, 50일, 70일, 90일, 110일 5회에 걸쳐 고추를 수확한 후 작물을 제거하고 정지작업을 한 후 토양 오거를 이용하여 15 cm 깊이로 처리구의 중앙에서 5 - 10지점을 채취하여 혼합하여

하나로 섞은 후 한 시험구 당 반복 3개의 시료를 만들었다.

생육조사는 식물체 및 토양의 분석값과 비교하기 위하여 정식 후 30일, 50일, 70일, 90일, 110일에 초장, 절간길이, 분지수 및 건물중을 측정하였고, 과실은 정식 후 50일, 70일, 90일, 110일에 수확하였고, 수확 후 즉시 각 처리별로 구분하여 무게를 측정하고 생산량을 산출하였다.

식물체 및 토양 분석은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (RDA, 2000)과 토양화학분석법 (RDA, 2010)에 준하여 수행하였다.

건조한 식물체 시료는 부위별로 매우 고운 분말 형태로 같은 후, 인 분석에 이용하였다. 식물체의 총인 함량은 $H_2SO_4-H_2O_2$ 로 식물체를 완전 분해 후 ammonium paramolybdate-vanadate 발색법으로 비색계 (UV/VIS spectrophotometer, Cary 60, Agilent Technologies, USA)를 사용하여 정량하였다.

채취한 토양은 풍건한 후 2 mm체로 자갈을 분리한 후 걸러 나온 것을 토성, pH, EC, 유기물함량, 토양 유효인산의 분석에 이용하였다. 토성은 비중계법으로 입자밀도를 조사하고, 판정은 미국농무부 분류기준에 준하였다 (Gee and Bauder, 1986). 토양의 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 하여 침출한 후 pH 미터 (Orion3 star, Thermo Scientific, Singapore)를 이용하여 측정하였다. 토양 혼탁액은 pH를 측정 후 거름종이를 이용하여 거른 후 EC 미터 (PW 9509/20, Philips, GT Britain)를 이용하여 EC를 측정하였다. 토양유기물은 Tyurin법, 토양의 유효인산 함량은 Lancaster 법, 교환성 양이온은 1M NH_4OAc (pH7.0) 완충용액으로 침출하여 AAS (Atomic absorption spectrophotometer, Avanta PM, GBC Scientific Equipment Pty Ltd., Victoria, Australia)로 분석하였다.

통계분석 재배유형별 고추의 생산량과 인 흡수율, 토양에서의 인 유효도에 관해 각 처리구 사이의 유의적인 차이를 비교하기 위하여 R프로그램 (R i368 4.0.0 <The R Foundation, Vienna, Austria>)을 이용하여 통계분석하였다. 처리간 차이에 대한 유의성은 5%의 유의수준에서 최소유의차 (least significant difference, LSD)검정법을 이용하여 분석하였고, Duncan의 다중검정 (Duncan's multiple range test)을 통해 유의성을 검정하였다.

Results and Discussion

작물 건중량 및 작물생육 줄기와 잎의 건중량은 생육시기에 따라 증가하였고, 인산처리의 효과는 재배 유형에 따라 다르게 나타났다. 시설재배와 노지재배에서는 대조구와 비교하여 작물 재배 기간 동안에 인산처리 효과가 나타나지 않았고, 최종 수확일인 정식 후 110일 (110 DAT)에 건중량은 처리간 유의적인 차이가 없었다 (Table 2). 그러나 비가림재배에서 줄기와 잎의 건중량은 대조구에 비해 인산처리구가 생육이 좋았고, 인산을 3번 분시한 3-TDA의 줄기와 잎 건중량이 유의적으로 ($p < 0.05$) 가장 높았다. 인산질 비료 사용 및 분시효과는 시설 및 노지재배에서는 나타나지 않았다. 이는 작물 정식 전 시설 및 노지재배 토양의 유효인산 함량이 높아 인산시비 효과가 나타나지 않았다고 판단된다. 반면에 인산질 비료 사용 및 분시효과가 비가림재배에서 나타난 것은 시험 전 유효인산 함량이 가장 낮았던 시험토양에서 그 효과를 볼 수 있었던 것이라 판단된다. Shin et al. (1988)은 비옥도가 낮은 토양에서 발작물에 대한 인산 및 칼륨의 비효가 현저하다고 보고하였다. 다시 말해 인산이 충분히 축적된 토양에서 인산질 비료 효과를 보기 위해서는 더 많은 인산처리가 필요하며 인산축적 토양에서는 인산질 비료 및 인산 분시효과를 보기 어렵다고 생각된다.

뿌리 건중량은 처리별로 유의적인 차이가 없었고, 재배형태별로 비교해 보면 30 DAT에 유의적인 차이가 있었다 (Table 2). 30 DAT에 뿌리 건중량이 시설재배에서 평균 $9.7 \text{ kg } 10a^{-1}$ 으로 가장 높았고, 노지재배 ($8.6 \text{ kg } 10a^{-1}$), 비가

림재배 ($7.6 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$) 순으로 나타났다. 이는 시설재배와 노지재배의 온도차이가 평균 2°C 정도 되었고 (Fig. 1), 그밖에도 EC, 유기물함량, 유효인산, 무기양분 함량 등이 영향을 주어 시설재배에서 생육이 좋았으며, 용적밀도도 시설재배에서 가장 높아 생육을 좋게 하였다고 판단된다. 30 DAT 이후 50 DAT까지 뿌리 건중량은 크게 증가하였고 그 후 $30 - 40 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 수준으로 일정하게 유지되었다. 특히 온도의 경우는 고온 조건에서 인산 가용화율을 높여 작물 생육에 영향을 줄 수도 있다. 그러나 작물 전체 생육은 재배형태별 온도 및 토양환경 등의 영향을 받았고, 초기 뿌리 발달은 토양 내 초기 유효인산의 함량에 따라 영향을 더 많이 받았다고 판단된다. 초기 뿌리발달 정도가 후기 작물생육에 영향을 줄 수 있기 때문에 작물 뿌리생장은 초기 발달이 중요하다고 생각된다. 그러나 본 시험에서는 뿌리 건중량은 고추작물 특성상 천근성이고 잔뿌리가 많아 정확한 샘플링이 어려웠고, 결과값 자체가 유효숫자가 작고 처리별 결과값 차이가 크지 않아 정확한 데이터 해석을 할 수 없었다. 그러므로 추후 초기 뿌리 생육발달 정도가 작물의 후기 생육과 재배작물 생산량에 어떻게 영향을 주는지에 대한 데이터 축적이 필요하다고 판단된다.

고추과실의 경우 시설 및 비가림 재배에서는 정식 후 70 DAT 또는 90 DAT까지 과실 생육이 증가하다 그 이후로 감소하였고, 노지재배에서는 더 늦은 시기인 90 DAT 또는 110 DAT까지 증가하는 경향을 보였다. 열린 공간과 닫힌 공간에서 대기 온습도 등 재배환경에 따른 병해충 정도도 영향을 주었을 것으로 보여진다. 실제로 노지에 비해 비가림 및 시설재배지의 평균온도가 1°C 높았고 (Fig. 1), 병해충 발생도 높았다. 작물 재배기간 동안 진딧물, 흰가루병, 탄저병, 총채벌레, 담배나방 등 고추과실에 여러 병해충 피해가 있었고 영양생장은 증가했지만 생식생장은 감소하여 실건 중량으로 측정된 과실수의 양이 감소했기 때문이라고 판단된다.

Table 2. Mean values of root dry weight, stem and leaf dry weight and fruit dry weight of red pepper plants during the different cultivation periods.

Cultivation type	Treatment	Root dry weight					Stem + Leaf dry weight					Fruit dry weight			
		30DAT [†]	50DAT	70DAT	90DAT	110DAT	30DAT	50DAT	70DAT	90DAT	110DAT	50DAT	70DAT	90DAT	110DAT
		(kg 10a^{-1})													
Protected cultivation	CON	9.6a [‡]	34.4a	36.0a	38.6b	41.7a	28.3a	110.0a	178.8a	206.8a	272.9a	65.7a	290.1a	244.9a	236.0a
	BDA	9.8a	36.8a	36.7a	39.7ab	42.0a	25.7a	121.1a	225.2a	215.6a	272.4a	66.6a	358.8a	265.8a	228.3a
	2-TDA	9.4a	35.0a	36.2a	42.3a	40.8a	27.4a	116.6a	164.4a	227.1a	275.4a	66.2a	252.1a	274.7a	239.0a
	3-TDA	9.9a	35.2a	37.7a	39.5ab	40.2a	27.2a	118.8a	174.5a	211.3a	269.0a	57.8a	237.3a	251.5a	217.4a
Rainproof cultivation	CON	7.3b	38.7a	36.4a	40.0a	38.2a	20.2a	105.7a	161.7a	212.1a	198.7b	63.4a	330.2a	248.4a	157.2a
	BDA	7.7ab	40.5a	36.5a	40.0a	39.8a	20.5a	108.3a	169.6a	226.3a	252.8ab	65.9a	325.2a	302.6a	211.2a
	2-TDA	7.6ab	37.6a	36.1a	41.7a	39.1a	21.8a	106.7a	174.3a	203.9a	250.3ab	68.5a	375.5a	240.1a	211.9a
	3-TDA	7.9a	43.1a	36.4a	41.2a	40.6a	22.9a	115.7a	190.7a	213.7a	271.4a	66.8a	405.0a	251.1a	238.8a
Open field cultivation	CON	8.8a	35.0a	35.1a	35.2a	38.9a	19.9a	83.0a	122.8a	143.6a	206.6a	45.3a	132.2a	165.9a	183.0a
	BDA	8.5a	36.5a	33.9a	35.5a	37.1a	20.4a	92.9a	124.2a	150.8a	190.9a	49.5a	136.1a	181.4a	178.0a
	2-TDA	8.5a	37.5a	35.9a	35.5a	38.1a	19.4a	94.3a	120.8a	148.6a	191.8a	50.5a	119.6a	178.8a	180.3a
	3-TDA	8.6a	35.9a	36.1a	35.2a	39.8a	20.9a	85.1a	134.8a	150.0a	226.2a	47.9a	134.9a	199.5a	160.8a

[†]DAT: Days after transplanting.

[‡]Mean values(n=3), with different lowercase letters indicating significant difference at $p=0.05$ by Duncan's multiple range test.

Fig. 1. Changes in mean values of daily air temperature during the cultivation period of red pepper plants.

최종 수확시 고추과실의 건중량의 처리별 차이는 재배유형에 따라 다르게 나타났다. 시설재배와 노지재배에서 고추과실의 건중량은 처리별로 유의적 차이가 없었다. 비가림재배에서는 무처리에 비해 인산 처리구에서 과실생육이 더 높았고, 특히 3-TDA에서 가장 좋았다. 줄기와 잎에서 나타난 결과처럼 고추과실에서도 비가림재배 시험토양에서 유효인산의 함량이 낮아서 인산질 비료의 효과가 더 잘 나타났다고 판단된다. 또한 인산 분시에 의해 과실생육을 증가시킬 수 있는 가능성을 보여주었다. 관행 인산 전량밀거름 처리방법이 과실을 한번 수확하는 작물에서는 적합할 수 있지만, 여러 번 열매과실 수확을 하고 생육기간이 긴 고추와 같은 열매채소 작물에서는 밀거름으로만 시비할 경우 영양소 불균형으로 후기 생육이 좋지 않을 수 있으므로 시비 방법을 달리해서 시비 횟수를 조절하는 것이 작물생산량 관점에서 볼 때 타당하다고 판단된다. 또한 본 실험에서 밀거름과 웃거름의 사용비율을 밀거름 50%로 설정하였는데 비율을 달리하여 웃거름 비율을 높이는 연구도 뒷받침 되어야 한다.

생육조사 정식 110일 (110 DAT) 후 초장과 분지수의 인산처리 효과는 재배유형에 관계없이 동일한 양상을 보였다 (Table 3). 대조구에 비해 인산 처리구에서 초장 및 분지수가 증가하였고 전량밀거름 처리구와 비교하여 인산의 분시효과는 없었다. 그러나 줄기직경은 인산처리 효과가 재배유형에 따라 다르게 나타났다. 시설재배와 노지재배에서는 대조구와 비교하여 처리간 유의적인 차이가 나타나지 않았고 비가림재배에서 대조구에 비해 인산 처리구가 값이 높게 나타나 인산질 비료 사용효과를 볼 수 있었다. 또한 줄기직경에 대한 분시효과는 나타나지 않았다. 무처리구보다 인산 처리구에서 더 좋은 생육을 보인 것은 인산이 작물생육에 필수 요소이기 때문에 인산처리 유무에 따른 생육 차이로 판단된다. 그러나 비가림재배 과실 건중량 결과값을 제외하고 모든 생육조사 결과에서 전량밀거름 처리구와 비교하여 초장, 경경, 분지수 관찰값에서 분시 횟수에 따른 분시 효과에 대한 일관된 설명을 하지 못했다. 작물생육 전 과정 중 영양생장기에 요구되는 인산의 최적 요구량이 있고, 토양내 축적된 잔류형태 인산 및 유효인산 함량이 중요하며, 그 적정농도 내에서는 전량 밀거름 처리가 작물 생육에 이로울 수 있는 경우도 있기 때문에 인산의 사용방법을 변경하기 위해서는 재배작물에 따른 인산의 밀거름 적정농도의 설정에 대한 연구가 뒷받침되어야 한다고 판단된다.

Table 3. Values of selected growth parameters for red pepper plants at 110 days after transplanting as affected by different P treatments in the plots.

Cultivation type	Treatment	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	No. of stem (EA plant ⁻¹)
Protected cultivation	CON [#]	136.3a [†]	18.5a	240b
	BDA	139.0a	18.6a	286a
	2-TDA	138.0a	18.5a	317a
	3-TDA	135.0a	18.4a	323a
Rainproof cultivation	CON ^{##}	134.7a	18.0b	213b
	BDA	138.7a	19.5a	263a
	2-TDA	138.7a	19.0ab	255a
	3-TDA	139.3a	19.3a	270a
Open field cultivation	CON ^{###}	100.3a	15.0a	173a
	BDA	105.5a	15.4a	202a
	2-TDA	102.7a	15.5a	195a
	3-TDA	106.0a	15.7a	186a

CON[#]: no fertilization as control, BDA: application with P at 1.3 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 0.65, 0.33, 0.33 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 0.65, 0.22, 0.22, 0.22 kg 10a⁻¹ in Protected cultivation

CON^{##}: no fertilization as control, BDA: application with P at 3.7 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 1.85, 0.93, 0.93 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 1.85, 0.62, 0.62, 0.62 kg 10a⁻¹ in Rainproof cultivation

CON^{###}: no fertilization as control, BDA: application with P at 3.8 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 1.9, 0.95, 0.95 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 1.9, 0.63, 0.63, 0.63 kg 10a⁻¹ in Open field cultivation

[†] Mean values(n=3), with different lowercase letters indicating significant difference at $p=0.05$ by Duncan's multiple range test.

작물 인 흡수량 정식 110일 (110 DAT) 후 작물의 전체 인 흡수량은 재배유형별 다른 양상을 보였다 (Table 4). 식물체내 인의 실제 변화량을 계산하기 위해 처리별 측정된 농도에 10a 당 식물체 건중량을 곱하여 실제 변화량을 나타내었다. 시설재배에서는 인산 무처리구, 전량밀거름 처리구, 2회분시 처리구에서 인 흡수량의 차이가 나타나지 않았고, 3회분시 처리구에서 다소 인 흡수량이 증가하였다. 인산 무처리구와 전량밀거름 처리구에서 유의성이 나타나지 않아 인산질 비료의 효과를 설명할 수 없었고, 2회분시 처리와 3회분시 처리에서 인 흡수량의 일관된 증가 경향을 보이지 않아 인산분시 효과도 설명할 수 없었다.

비가림재배에서는 인산처리효과와 분시효과가 나타났다. 무처리구에서 인 흡수량이 가장 적었고 전량밀거름 처리, 2회분시 처리, 3회분시 처리 순으로 값이 증가했다. 고추작물 전체 인 흡수량은 3-TDA 처리구에서 1.91 kg 10a⁻¹ 이었고, 밀거름전량 처리구와 비교하여 1.6배 높은 인 흡수량을 보였다. 이는 고추생육에 알맞은 온도 및 유기물함량, EC, 용적밀도 등 토양환경과 병해충, 강수량 등의 재배환경 차이로 인해 작물이 영향을 받았고, 결과적으로 작물 인 흡수량에 반영된 결과라고 판단된다. Shin et al. (1988)은 유효인산 함량이 같은 토양일지라도 인산의 흡수능에 관여하는 요인이 다양하며 그에 따른 흡수능이 달라질 수 있다고 보고하여 환경요인의 중요성에 대해 언급한 바 있다. 또한 무처리구와 인산처리구를 비교하여 인산질 비료의 작물흡수 효과를 볼 수 있었고, 전량밀거름과 분시 처리들간의 인 흡수량을 비교하여 분시횟수에 따른 인의 흡수 효과를 설명할 수 있었다.

노지재배에서 작물의 인 흡수량은 다른 재배 형태에 비해 적었다 (Table 4). 노지재배에서는 자연강우로 인해 인의 유출이 일어날 수 있기 때문에 투입한 인에 대한 토양으로의 흡착이나 작물로의 이동이 일관되지 않을 수 있다. 반면

Table 4. Uptake of P by red pepper plants after 110 days of cultivation.

Cultivation type	Treatment	P uptake
		110DAT ^f (kg 10a ⁻¹)
Protected cultivation	CON [#]	1.19ab [†]
	BDA	1.01b
	2-TDA	1.14ab
	3-TDA	1.51a
Rainproof cultivation	CON ^{##}	0.82b
	BDA	1.18b
	2-TDA	1.36b
	3-TDA	1.91a
Open field cultivation	CON ^{###}	0.77b
	BDA	1.08a
	2-TDA	0.60bc
	3-TDA	0.55c

110DAT^f means day after red pepper plants cultivation

CON[#]: no fertilization as control, BDA: application with P at 1.3 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 0.65, 0.33, 0.33 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 0.65, 0.22, 0.22, 0.22 kg 10a⁻¹ in Protected cultivation

CON^{##}: no fertilization as control, BDA: application with P at 3.7 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 1.85, 0.93, 0.93 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 1.85, 0.62, 0.62, 0.62 kg 10a⁻¹ in Rainproof cultivation

CON^{###}: no fertilization as control, BDA: application with P at 3.8 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 1.9, 0.95, 0.95 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 1.9, 0.63, 0.63, 0.63 kg 10a⁻¹ in Open field cultivation

[†]Mean values(n=3), with different lowercase letters indicating significant difference at $p=0.05$ by Duncan's multiple range test.

비가림재배나 시설재배는 노지재배에 비해 외부로의 인의 유출 가능성이 높지 않기 때문에 토양과 작물에서 인이 유효화 될 수 있는 양이 증가할 수 있다. 또한 시설재배는 지온과 기온이 상대적으로 높아 온도에 영향을 받는 인 성분의 유효도를 극대화시킬 수 있다.

노지재배에서는 대조구에 비해 인산 처리구에서 작물의 인 흡수량이 증가하였고 전량밀거름 처리구와 비교하여 인산의 분시효과는 없었다. 노지재배 시 분시처리에서 작물의 인 흡수량이 감소한 것은 노지가 시설에 비해 열린 환경 이어서 강우에 의해 인 유출이 증가할 수 있고, 외부로부터 유기물 유입 등으로 인해 유기물과 인산의 흡착이 일어날 수 있다. Change and Jackson (1957)은 인이 pH가 낮은 토양에서는 Fe, Al과 결합하고 pH가 높은 토양에서는 Ca과 결합하려는 특성이 있기 때문에 pH와 인의 토양부동화, 작물흡수와의 상호작용에 관한 연구의 필요성에 대해 언급했다. 본 연구에서는 강우와 유기산 등으로 인해 pH가 감소하고 그로 인한 토양 내 Al, Fe 성분 등과 결합으로 인산의 토양 내 부동화가 증가했을 수 있지만, 본 토양은 중성 토양으로 pH 감소의 영향은 적을 것으로 판단된다. 노지재배에서는 무처리구에 비해 전량밀거름 처리구에서 1.4배 인 흡수량이 증가했고, 이는 노지재배에서는 전량밀거름 사용방법이 유리할 수도 있음을 시사한다. 노지에서 밀거름전량시비 방법을 분시방법으로 변경하기 위해서는 인산비료의 밀거름 사용비율 및 분시 사용비율에 대한 검토가 이뤄져야 한다고 판단된다.

토양내 유효인산 함량변화 토양 유효인산 함량 변화는 시간이 지남에 따라 증가하다 감소하였다 (Table 5). 일반적으로 비료 시비 후 작물생육이 진행됨에 따라 식물체로 양분이 흡수되기 때문에 유효인산 농도가 감소하는 것은

Table 5. Changes in available soil P contents during the cultivation periods of red pepper plants.

Cultivation type	Treatment	Available P				
		30DAT [†]	50DAT	70DAT	90DAT	110DAT
		----- (mg kg ⁻¹) -----				
Protected cultivation	CON [#]	417c [‡]	814a	924a	792a	692a
	BDA	510b	783a	884a	824a	704a
	2-TDA	583a	814a	873a	779a	658a
	3-TDA	600a	821a	963a	860a	763a
Rainproof cultivation	CON ^{###}	293b	489a	591a	539a	455a
	BDA	359ab	518a	585a	556a	492a
	2-TDA	383ab	531a	562a	531a	487a
	3-TDA	420a	556a	612a	582a	505b
Open field cultivation	CON ^{###}	434ab	711a	667a	647a	556a
	BDA	498a	707a	750a	649a	516a
	2-TDA	391b	675a	650a	634a	559a
	3-TDA	466ab	678a	638a	606a	524a

[†]DAT: Days after transplantingCON[#]: no fertilization as control, BDA: application with P at 1.3 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 0.65, 0.33, 0.33 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 0.65, 0.22, 0.22, 0.22 kg 10a⁻¹ in Protected cultivationCON^{##}: no fertilization as control, BDA: application with P at 3.7 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 1.85, 0.93, 0.93 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 1.85, 0.62, 0.62, 0.62 kg 10a⁻¹ in Rainproof cultivationCON^{###}: no fertilization as control, BDA: application with P at 3.8 kg 10a⁻¹, 2-TDA: application with P at 1.9, 0.95, 0.95 kg 10a⁻¹, 3-TDA: application with P at 1.9, 0.63, 0.63, 0.63 kg 10a⁻¹ in Open field cultivation[‡]Mean values(n=3), with different lowercase letters indicating significant difference at $p=0.05$ by Duncan's multiple range test.

로 알려져 있지만, 작물 정식 후 30일부터 70일까지 토양 내 유효인산 함량은 증가하였다. 이는 정식 전 처리한 유기물 등 토양 내 양분이 무기화되고 토양 내 고정되어 있던 양분이 유효화 되면서 유효인산 함량이 증가하였다고 판단된다.

또한 토양 내 유효인산 함량은 인산처리에 따른 유의적인 차이가 없었다. 보통 비료를 사용하거나 시비량을 증가시키면 함량이 증가하는데 본 연구에서는 시비 효과가 나타나지 않았다. 대조구인 무처리구에서도 유효인산 함량이 높았고 검정시비량으로 처리한 인산의 양이 상대적으로 적어 인의 시비효과가 나타나지 않았다고 판단된다.

토양 내 인산질 비료 처리의 효과는 재배 유형에 따라 다르게 나타났다. Jeong et al. (2000)은 시설재배에서 인산 시비농도 따른 작물생산량을 인산처리 농도별 비교하였으며, 농도가 증가할수록 작물생산량이 증가함을 확인하였고, Lee (2011)는 노지재배에서 인산 시비량을 달리하여 잔디생산량을 인산 처리농도별 비교하였으며, 잔디 생장에 대한 인산의 일관적인 영향은 발견되지 않았다고 보고하였다.

본 연구에서는 시설재배와 노지재배에서는 대조구와 비교하여 작물 재배 기간 동안에 인산처리 효과가 나타나지 않았고, 최종 수확일인 110 DAT에 토양 내 유효인산 농도는 처리 간 유의적인 차이가 없었다. 그러나 비가림재배에서 유효인산 농도는 대조구에 비해 인산처리구가 증가했고, 인산을 3번 분시한 3-TDA의 농도가 유의적으로 ($p < 0.05$) 가장 높았다. 인산질 비료 사용 및 분시효과는 시설 및 노지재배에서는 나타나지 않았다. 인산질 비료 사용 및 분시효과가 비가림재배에서 나타난 것은 시험 전 유효인산 함량이 가장 낮았던 시험토양에서 그 효과를 볼 수 있었던 것이라 판단된다.

Conclusions

노지에 비해 시설이나 비가림재배에서 인산의 웃거름 시비량이 고추 생산량 및 인산의 이용률에 미치는 영향을 구명하기 위해 포장실험을 수행하였다. 질소와 칼륨은 토양검정시비량 기준으로 사용하였고, 인산은 토양검정 시비량을 기준으로 밑거름 처리량을 50% 처리하고 나머지 50%를 2회, 3회 나누어 분시처리 하였다. 작물은 표준 영농 교본 및 농가관행 재배법에 따라 재배 관리하였고 정식 후 30일, 50일, 70일, 100일, 110일에 고추 생육조사 및 토양시료를 채취하여 토양 화학성을 관찰하였다. 비가림재배에서 인산 웃거름 시비방법에 의해 고추의 건중량은 증가하였고 분시 3회를 했을 경우 가장 크게 증가하였다. 이는 작물 재배환경 및 토양환경 조건이 인산의 유효도를 높였고, 정식 전 토양 내 유효인산 함량이 적을 때 인산 시비효과 및 분시효과를 볼 수 있음을 시사한다. 고추와 같은 열매를 여러 번 수확하는 작물은 생장 기간이 길기 때문에 긴 시간 동안 여러 번의 양분을 흡수할 수 있어야 하고, 특히 인산과 같이 토양 흡착성이 높은 양분은 한번에 많은 양을 주는 것 보다는 여러 번 나눠서 줘야 작물로의 유효도가 높아질 것이다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ0128372020)”, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Bennett, W.F. 1993. Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. AS Press. St. Paul. Minn.
- Chang, S.C. and M.L. Jackson. 1957. Fractionation of soil phosphorus. Korean J. Soil Sci. Fert. 4:133-144.
- Cope Jr, J.T. 1981. Effects of 50 years of fertilization with phosphorus and potassium on soil test levels and yields at six locations. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:342-347.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. In Klute A. (Second ed.). Methods of soil analysis. Part I. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison. Wisconsin, USA. p.383-411.
- Hyun, H.N. 2012. Changes in Korean fertilizer policy. Korea Rural Economic Research Institute (KREI). 4:22-23
- Jeong, S.K., J.M. Choi, K.H. Cha, H.J. Chung, and K.S. Seo. 2000. Deficiency symptom, growth characteristics, and nutrient uptake of ‘Nyoho’ strawberry as affected by controlled phosphorus concentrations in fertilizer solution. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 41:345-349.
- Kim, J.M., J. Kim, H.G. Chon, E.S. Park, J.S. Jeong, and J.M. Choi. 2009. Influence of phosphorus concentrations in fertilizer solution on the growth and tissue nutrient contents of egg plant. Korea J. Agric. Sci. 36:135-145.
- Kim, M.C., D.J. Choi, and S.T. Song. 2001. Effects of swine liquid manure and phosphorus fertilizer application level on dry matter yield and N and P uptake of Italian Ryegrass. Korean J. Anim. Sci. Technol. 43:973-980.
- Kim, M.S., S.C. Kim, S.G. Yun, S.J. Park, and C.H. Lee. 2017. Change in available phosphate by application of phosphate fertilizer in long-term fertilization experiment for paddy soil. Korean J. Environ. Agric. 36:141-146.
- Kim, P.J., S.M. Lee, H.B. Yoon, Y.H. Park, and S.C. Kim. 2000. Characteristic of phosphorus accumulation in organic farming fields. Korean J. Soil Sci. Fert. 33:234-241.
- Lee, S.K. 2011. Phosphorus and nitrogen rate effects to a newly seeded kentucky bluegrass. Korean J. Turfgrass Sci.

25:217-222.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second ed. Academic Press Inc, San Diego, USA.

NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2008. Monitoring project on agri-environment quality in Korea. RDA, Suwon, Korea.

Park, J.M., I.B. Lee, Y.I. Kang, and K.S. Hwang. 2009. Effects of mineral and organic fertilizations on yield of hot pepper and changes in chemical properties of upland soil. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 27:24-29.

RDA (Rural Development Administration). 2000. Methods of soil and plant analysis. RDA, National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.

RDA (Rural Development Administration). 2010. Method of soil chemical analysis. RDA, National Academy of Agricultural Science, Suwon, Korea.

Sharpley, A.N. 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. J. Environ. Qual. 24:920-926.

Shin, C.W., J.J. Kim, J.H. Yoon, and Y.H. Park. 1988. Studies on the characteristics of phosphorus in the upland soil, 1. composition of accumulated phosphorus forms and available phosphorus. Korean J. Soil Sci. Fert. 21:21-29.