

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2021.54.2.141>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

## Influences of Phosphogypsum Application on Soil Property and Yield and Quality of Onion (*Allium cepa* L.)

Young-Nam Kim<sup>1†</sup>, Ju Young Cho<sup>2†</sup>, Young-Eun Yoon<sup>2</sup>, Hyoen Ji Choe<sup>2</sup>, Mi Sun Cheong<sup>1</sup>, Mina Lee<sup>3</sup>, Kwon-Rae Kim<sup>4</sup>, and Yong Bok Lee<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Research Professor, Institute of Agriculture and Life Science (IALS), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

<sup>2</sup>Student, Division of Applied Life Science (BK4), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

<sup>3</sup>Research Professor, Department of Smart Agro-Industry, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

<sup>4</sup>Professor, Department of Smart Agro-Industry, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

<sup>5</sup>Professor, Institute of Agriculture and Life Science (IALS), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

\*Corresponding author: [yblee@gnu.ac.kr](mailto:yblee@gnu.ac.kr)

†These authors contributed equally to this work.

### ABSTRACT

**Received:** February 15, 2021

**Revised:** February 26, 2021

**Accepted:** March 5, 2021

### ORCID

Young-Nam Kim

<https://orcid.org/0000-0002-9745-6551>

Young-Eun Yoon

<https://orcid.org/0000-0001-5423-9402>

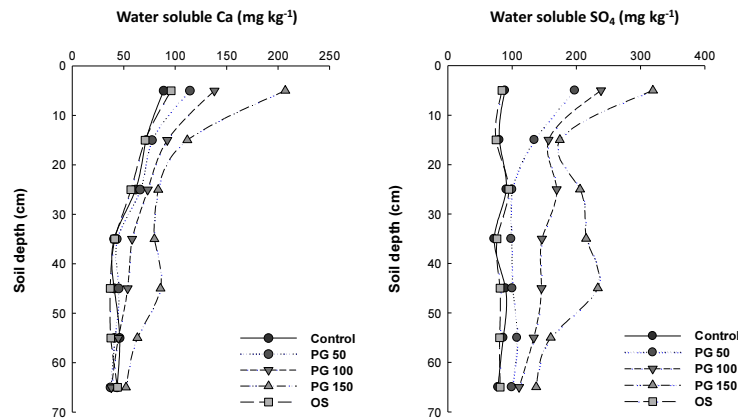
Yong Bok Lee

<https://orcid.org/0000-0002-7651-4556>

Phosphogypsum (PG) is a by-product obtained in the process of manufacturing phosphoric acid ( $H_3PO_4$ ). In general, PG is characterized mainly by gypsum, phosphate, sulphate, fluoride etc. Considering the nutritional composition, PG has been globally used as soil fertilizer or amendment in agriculture for decades. This study aimed to investigate effects of PG application on soil properties and yield and quality of onion (*Allium cepa* L.) and to seek proper rate of PG application in a field. We applied PG into a field with four different levels: 0% (control), 50% (PG50, 104 kg 10a<sup>-1</sup>), 100% (PG100, 208 kg 10a<sup>-1</sup>), and 150% (PG150, 312 kg 10a<sup>-1</sup>). Also, oyster shell (OS) included as a comparable and chemical fertilizer (N-P-K = 8.4-37.9-8.0 kg 10a<sup>-1</sup>) was supplied into soil of all treatments. Following onion cultivation for 7 months, there was a significant change in soil pH. Indeed, PG application was more likely to lower pH relative to control. With increase in PG application rate, soil EC increased and the maximum value (1.93 dS m<sup>-1</sup>) was found in soil of PG150. In PG100 and PG150, concentration of exchangeable Ca (Ex. Ca) increased by 5% and 10%, respectively, whilst other treatments representing reduction in the Ex. Ca concentration. In addition, PG application affected concentration of water soluble Ca across the soil profile (up to 70 cm depth) and, in particular, the higher the PG application rate the higher the concentration of water soluble Ca. Similarly, water soluble S had same trend with water soluble Ca in the present study. With increase of PG application rate, yield of onion increased but decreased in PG150 which is the highest rate of PG application. Also, the plant's uptake for N, P, Ca, K, and S affecting yield, resistance to pathogen and pest, and quality of the crop increased in PG50 and PG100. Moreover, concentrations of total amino acids, cysteine and methionine in onion bulbs that are strongly associated to S uptake increased by PG applications. The increased concentrations of amino acids with PG applications might improve yield, quality, and favor of onions. These results suggest that PG supply could have a potential to enhance soil fertility, contributing to improvement of yield and quality of onions. Further studies are needed to maximize efficiency of PG supply in agricultural lands.

**Keywords:** Calcium, Onion production, Phosphogypsum, Soil fertility, Sulphur





Vertical movement of Ca and SO<sub>4</sub> across the soil profile following phosphogypsum application.

## Introduction

석고 (gypsum)는 황산칼슘의 이수화물 (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O)로 이루어진 석회질 광물로 비료생산 등 다양한 산업의 원료로 활용되고 있다. 석고는 생성원인에 따라 천연석고와 부산물 석고로 분류된다. 천연석고는 국내에서 전혀 생산이 되지 않아 대부분 수입되고 있다. 반면에 인산 제조와 황산화물 포집 등의 공정과정에서 발생하는 부산물 석고 (by-product)는 국내에서 매년 400만 톤 이상 생산되고 있으며 이 중 일부만 재활용되고 있다 (ME, 2010). 인산비료 제조시 발생하는 부산물석고는 인광석 (Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>)에 물 (H<sub>2</sub>O)과 황산 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 첨가하여 반응시키는 습식공정 (wet process)을 통해 생성되는 부산물로서 인산석고 (phosphogypsum, PG)라 부른다.  $Ca_3F(PO_4)_3 + 5H_2SO_4 + 10H_2O \rightarrow 3H_3PO_4 + 5CaSO_4 \cdot 2H_2O + HF$ . 지금까지 부산물석고의 대부분은 슬러리 상태로 야적 (stacks; stockpiles)에 방치되고 있으며, 전 세계적으로 약 50여개의 대규모 야적장 (e.g., 미국 Florida, 스페인 Huelva)이 존재한다 (IAEA, 2008). 우리나라의 경우 남해화학 부지에 약 2천만 톤 (2009년 기준)이 적치되어 있으며, 매년 200 - 450만 톤의 부산물석고가 지속적으로 발생 중이다.

부산물석고는 농업, 건축, 도로건설 및 매립지 관리 등 다양한 산업분야에 재활용되고 있다. 특히, 부산물석고에는 식물 영양 공급원인 칼슘, 인, 황 등이 포함되어 있어 비료로서의 농업적 활용가치가 있다 (Hentati et al., 2015; Saadaoui et al., 2017). 지난 수십 년간 해외에서는 다양한 연구를 통해 부산물석고 시용에 따른 작물 생산량 증진 (Liu et al., 2010; Blum et al., 2013; Li et al., 2015), 산성토양 개선 및 알루미늄 독성 완화 (Carvalho and van Raij, 1997; Garrido et al., 2003) 및 염 토양 정화 (Tang et al., 2006; Nayak et al., 2013; Gharaibeh et al., 2014) 등의 긍정적 효과가 많이 보고 있다. 반면 국내에서는 주로 간척지 및 산성심토 개량을 위해 부산물석고 활용 가능성에 대한 연구만 진행되어 왔지만, 2003년 이후부터 부산물석고가 비료로서 인정을 받음으로써 현재까지 농가에 판매되고 있다 (Park, 2004). 하지만 부산물석고 중 자연 방사성 물질 (e.g. <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th) 및 중금속 (e.g. As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se, Sr, Zn, V, Y, Zr)과 같은 유해성분이 검출되어, 농업적 재활용에 있어 안정성에 대한 우려가 있었다 (Tayibi et al., 2009; Saadaoui et al., 2017). 이러한 우려와는 달리 국내에서 발생한 부산물석고에서는 아주 소량의 자연 방사성 물질과 중금속이 검출되어 (RDA, 2018), 비료 및 토양 개량제로서의 부산물석고 활용에 문제가 없는 것으로 판단된다.

하지만, 국내에서는 부산물석고 시비에 의한 농업토양의 질 및 작물 생산성 변화에 대한 과학적 연구결과 또는 근거 자료가 매우 부족한 실정이다. 만약 야적장에 방치되어 있는 수많은 양의 부산물석고가 재활용된다면, 기업의 경제적

손실뿐만 아니라 주변 환경문제를 해결하고 더 나아가 우리나라 비료산업의 경쟁력을 향상시킬 것으로 판단된다. 따라서 다양한 연구를 통해 부산석고를 범용적 토양개량제로서 활용하기 위한 과학적인 근거를 마련하는 것이 시급하다고 사료된다. 본 연구에서는 부산석고 처리가 밭 토양 이화학적 특성과 양파 생산성 및 품질에 미치는 영향을 알아보고, 부산석고의 적정 시비수준을 찾기 위해 수행하였다.

## Materials and Methods

**현장 재배시험** 본 연구에서는 양파를 대상작물로 선정하였으며 이치방 품종을 재배하였다. 시험 포장지는 경남 산청군 도평면에 위치한 약 1,900 m<sup>2</sup>의 밭을 선정하였다. 정식 2주 전, 무기질 비료, 부산석고 및 패화석 (oyster shell, OS)을 토양에 처리한 후 로타리 작업을 수행하였다. 양파 묘는 20 cm × 12 cm 간격으로 2019년 11월 7일에 정식하였다. 이후 7개월 동안 재배한 후, 2020년 6월 1일에 작물을 수확하였다.

부산석고 처리수준은 다음과 같이 총 네 가지로 구성하였다: PG0 (대조구), PG50, PG100 및 PG150. 부산석고 처리는 대상 농경지 토양의 칼슘 포화도 65%를 기준으로 하여, 이의 50% (PG50; 104 kg 10a<sup>-1</sup>), 100% (PG100; 208 kg 10a<sup>-1</sup>), 150% (PG150; 312 kg 10a<sup>-1</sup>)에 해당되는 양을 산출하여 수행하였다. 또 다른 석회질 비료로서 이용되고 있는 패화석 (OS) 처리구를 본 연구에 포함시켰으며, 200 kg 10a<sup>-1</sup> 수준으로 토양에 처리하였다. 모든 처리구 토양에 비료 3요소 (N-P-K = 8.4-37.9-8.0 kg 10a<sup>-1</sup>)를 균일하게 시비하였다. 무기질 비료 처리량은 시험포장 농경지 토양 특성 분석결과 값 (Table 1)을 휴토람의 비료사용처방 프로그램에 적용하여 산출하였다.

**Table 1.** Physicochemical properties of soil in a field used in this study.

pH <sub>1:5W</sub>	EC (dS m <sup>-1</sup> )	OM (g kg <sup>-1</sup> )	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	CEC	K	Ca	Mg	Sand	Silt	Clay
7.0	0.14	29	48.9	14.1	0.8	8.4	2.3	66.0	24.5	9.5

**토양 특성 분석** 토양 분석을 위해 각 처리구의 표토 (10 cm)를 부산석고 및 패화석 시용 전과 작물 수확 후 채취하여, 토양 중 pH, EC, 유기물 (OM), 유효인산 (Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 교환성 K, Ca, Mg 농도를 분석하였다. 경시적 토양 pH와 EC 농도의 변화를 조사하기 위해 인산석고 처리 후 8, 12, 16, 20, 24, 28주 차의 토양을 채취하여 분석하였다. 또한, 부산석고 시용에 의한 Ca 및 SO<sub>4</sub>의 깊이별 분포를 조사하기 위해 토양 단면 (soil profile)을 따라 10 cm 간격으로 70 cm 깊이까지 토양을 채취하여 두 이온의 농도를 분석하였다.

토양 이화학적 특성 분석은 풍건한 토양 시료를 이용하였다. 토양 pH와 EC (electrical conductivity)는 토양과 증류수를 1:5 비율로 진탕하여 각각 pH meter (Orion Star 2-Star, Thermo Scientific, USA)와 EC meter (Orion 3-Star, Thermo Scientific, USA)로 측정하였다. 토양 유기물은 Tyurin법 (Nelson and Sommers, 1996)으로 정량하였고, 유효인산은 Lancaster법 (NIAS, 2000)으로 침출하여 720 nm에서 UV/Vis 분광광도계 (Varian CARY 50 CONC, USA) 이용하여 측정하였다. 양이온 교환용량 (cation exchange capacity, CEC) 및 교환성 양이온 (K, Ca, Mg)은 1N NH<sub>4</sub>OAc (pH 7.0) 용액으로 침출하여 (NIAS, 2000), 각각 Kjeldahl (K-355, BÜCHI, Switzerland)과 ICP-OES (OPTIMA 5300DV, PerkinElmer, USA)으로 분석하였다. 수용성 Ca과 SO<sub>4</sub>은 증류수 (1:5 = w/v)로 침출하여 각각 ICP-OES (OPTIMA 5300DV, PerkinElmer, USA)와 IC (DIONEX AQUION, Thermo Scientific, USA)으로 분석하였다.

**토양 특성 분석** 수확한 양파의 수량은 농촌진흥청 표준분석법에 준하여 구중을 생체중으로 측정하였다. 양파 중 영양분 함량을 분석하기 위해, 먼저 식물체 가식부를 분리하여 60°C에서 건조한 후, 분쇄하여 HNO<sub>3</sub> 습식분해 (wet digestion)를 하였다. 습식분해 된 용액을 이용하여 식물체 중 질소와 인산함량을 각각 Kjeldahl법과 Vanadate법으로 분석하였다. 식물체 중 S, K, Ca, Mg 함량은 ICP-OES (OPTIMA 5300DV, PerkinElmer, USA)으로 분석하였다.

양파 가식부의 유리 아미노산 (free amino acids) 농도는 Yoon et al. (2017)의 방법에 따라 분석하였다. 시료 (0.1 g)를 100 mL의 3% sulfosalicylic acid에 넣고 1시간 동안 진탕한 후, 4°C 조건에서 3,500 rpm 속도로 1시간 동안 원심분리를 하였다. 이와 같은 추출과정을 세 번 반복한 후, 모든 추출액을 모아 0.45 µm syringe filter로 필터링하였다. 추출시료 10 µL를 inhydrin method에 따라 Ionex Ostion LCP5020 cation exchange column (22 × 0.37 cm)이 장착된 L-8900 high-speed amino acid analyzer (Hitachi High-Tech. Corp., Japan)에 주입하여 유기 아미노산을 정성 및 정량 분석하였다. 본 연구에서는 식물체내 아미노산 중 황 흡수와 밀접하게 관련된 cysteine과 methionine 농도를 분석하였고, 총 아미노산 함량은 34가지 아미노산 (phosphoserine, taurine, phosphoethanolamine, urea, proline, aspartic acid, serine, glutamic acid, sarcosine, α-amino adipic acid, glycine, alanine, citrulline, α-aminobutyric acid, cystathionine, tyrosine, β-alanine, β-aminoisobutyric acid, γ-aminobutyric acid, 2-aminoethanol, hydroxyproline, ornithine, 1-methylhistidine, anserine, carnosine, arginine, threonine, valine, methionine, isoleucine, leucine, phenylalanine, lysine, histidine)을 합산하여 구하였다. Proline은 570 nm, 나머지 아미노산은 440 nm 파장에서는 측정하여 정량을 하였다.

**통계 분석** 본 연구의 분석자료는 Minitab16 (Minitab Inc., USA)을 이용하여 통계 분석하였다. 재배 전후 토양 이화학적 특성과 부산석고 시용에 따른 토양 및 식물체 특성의 유의적 차이를 평가하기 위해서 일원분산분석 (One-way ANOVA) 및 사후분석 (Fisher's LSD)을 실시하였다.

## Results and Discussion

**부산석고 시용에 따른 토양 이화학적 특성 변화** 재배 시험 전후 토양 이화학적 특성을 비교 분석해 본 결과에 따르면 (Table 2 cf. Table 1), 다양한 토양 인자에서 큰 차이를 보였다. 가장 큰 변화를 보인 토양 인자는 pH로 수확 전 7.0에서 6.2로 감소하였다. 또한 부산석고 처리 유무에 따른 처리구간 토양 pH의 차이가 보였지만 통계적인 유의성은 없었다 ( $p < 0.05$ ). 모든 처리구에서 심토의 pH는 표토에 비해 높았으며, 대조구보다 부산석고 처리구의 pH가 더 낮았다. 부산석고 처리에 의한 토양 산성도 증가는 여러 연구에서 보고된 바 있다 (e.g. Lee et al., 2009; Al-Enazy et al., 2018). 그 원인은 부산석고에서 용해된 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 직접적인 영향뿐만 아니라 토양 입자에 흡착된 H<sup>+</sup>과 용해된 Ca<sup>2+</sup>간의 치환작용으로 인한 토양 용액 중 수소이온 활성 증가에 따른 것으로 사료된다 (Smaoui-Jardak et al., 2017). 양파의 재배 적정 토양 산도가 pH 6.3 - 7.3인 것을 감안할 때, 본 연구에서는 재배기간 동안 부산석고 공급에 의한 토양 산성화 피해는 없었던 것으로 판단된다.

토양 전기전도도 (EC)의 경우, 재배 전 0.14 dS m<sup>-1</sup>에서 재배 후 1.0 dS m<sup>-1</sup> 이상으로 모든 처리구에서 상당히 증가하였다 ( $p < 0.05$ ). 특히, 표토 및 심토 모두 부산석고 처리 수준이 증가함에 따라 EC 값이 증가하였으며 (Table 2), PG150 처리구에서 EC의 최대값 (1.93 dS m<sup>-1</sup>)이 측정되었다. 이와 같은 부산석고 시용에 따른 토양 EC 증가는 강우-석고 반응 작용에 의해 토양 용액 중으로 유입된 부산석고의 구성성분 (Ca, SO<sub>4</sub>, F, Na, Cl etc.)과 연관된 것으로 사료

된다 (Amor and Gueddari, 2016; Saadaoui et al., 2017). 본 연구와 유사하게도, Elloumi et al. (2015)의 연구결과에 따르면, 부산석고 2.5%와 5%를 처리한 해바라기 재배 토양의 EC 값은 재배 전  $0.15 \text{ dS m}^{-1}$ 에서 수확 후 각각  $2.39 \text{ dS m}^{-1}$ 와  $2.53 \text{ dS m}^{-1}$ 로 증가하였다.

전반적으로 재배 후 토양 중 유기물 함량과 유효인산 농도는 증가하였으며, 두 토양인자 모두 대조구 (PG0)와 OS 처리구에서 가장 높은 농도를 보였다 (Table 2). 이와 반대로, 교환성 Mg 농도는 재배 후 상당히 감소하였다 ( $p < 0.05$ ).

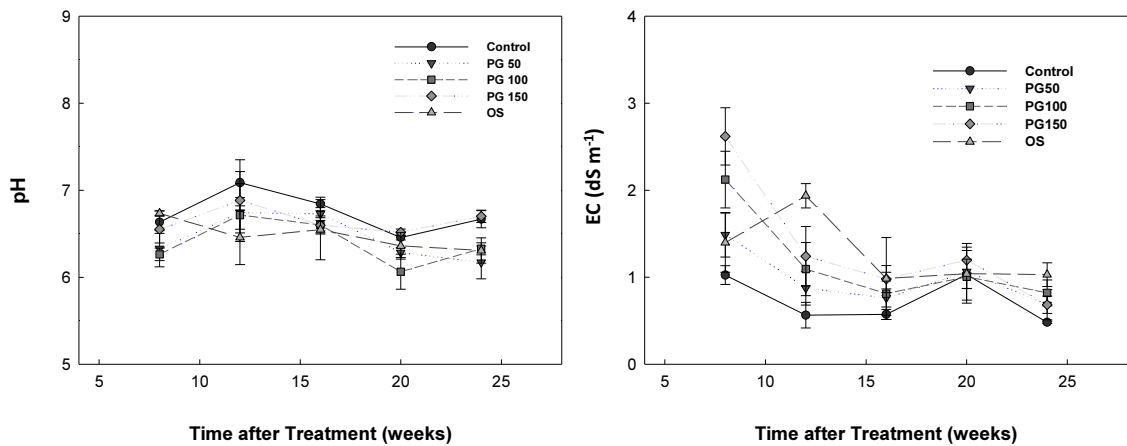
교환성 Ca 농도의 경우, 재배 후 PG0, PG50 및 OS 처리구에서 농도가 감소한 반면, PG100과 PG150 처리구에서는 각각 5%와 10%씩 증가하였다. 이처럼 본 연구에서는 부산석고 처리 수준이 PG100 이상일 때 토양 중 칼슘 농도 증가 효과를 보여주었다. 양파 성장 단계에서 칼슘은 아주 중요한 영양소로서 칼슘 시비는 초기 생육 증진뿐만 아니라 구근 수량, 질 및 저장성 향상을 위해 매우 중요하다 (Batal et al., 1994; Ghoname et al., 2007). 게다가, 표토보다 심토에서의 더 높은 Ca 농도가 발견되었으며, 이것은 부산석고에서 유출된 Ca 이온이 토양 단면을 따라 수직적 이동에 의한 것으로 판단된다. 이러한 부산석고 시용 효과는 특히 산성토양 중 심토의 산성도를 개선하기 위해 널리 적용되고 있다 (Toma and Saigusa, 1997). Carvalho and van Raij (1997)과 Saadaoui et al. (2017)의 연구에 따르면, 부산석고 공급에 의해 산성토양의 Al 독성을 완화시킬 뿐만 아니라 뿌리성장 촉진 및 식물의 수분과 Ca 흡수를 향상시켰다.

**Table 2.** Properties of top- and sub-soil in a field following onion cultivation.

Treatment	pH <sub>1.5w</sub>	EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )	OM ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Av. $\text{P}_2\text{O}_5$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Ex. cation ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )			
					K	Ca	Mg	
Topsoil	Control	6.2	1.01	41.0	54.6	0.88	7.62	0.38
	PG50	6.1	1.05	31.8	53.9	0.77	8.14	0.32
	PG100	6.1	1.18	29.9	48.9	0.86	8.81	0.24
	PG150	6.2	1.93	34.5	50.4	0.73	9.33	0.26
	OS	6.3	0.97	37.1	57.4	0.85	8.10	0.32
Subsoil	Control	6.5	1.16	44.7	53.5	0.83	10.35	0.37
	PG50	6.3	1.00	29.5	54.2	0.93	9.99	0.28
	PG100	6.2	1.39	34.4	50.8	0.88	10.38	0.26
	PG150	6.3	1.58	34.3	52.4	0.88	10.73	0.28
	OS	6.5	0.98	32.4	59.2	0.83	9.69	0.32

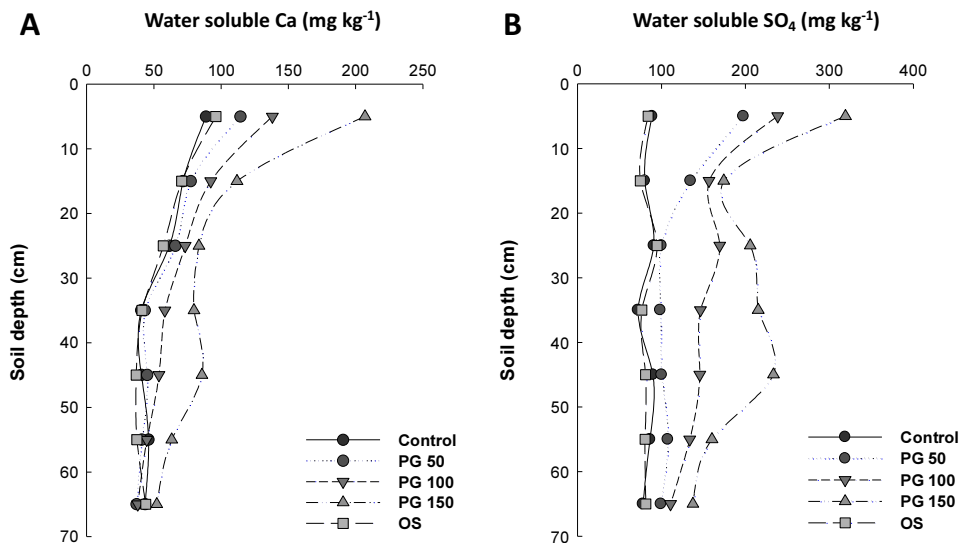
**토양 pH 및 EC의 경시적 변화** 부산석고 시용에 따른 양파 재배 기간 중 토양 pH의 변화는 패화석 처리구 (OS)를 제외한 모든 처리구에서 유사한 경향을 보였다 (Fig. 1). 패화석을 처리한 토양의 pH는 시간이 지남에 따라 점차 감소한 반면 부산석고를 처리한 토양 pH는 처리 후 감소하였다가 16주차 때 급격히 증가한 후 다시 점차 감소하였다. 이 시기에 인산석고 처리구에서의 pH 값 상승은 인산석고 시용 후 1, 2월에 증가된 강우에 의해 용해되어진 Ca 이온의 영향으로 사료된다. 토양 EC의 경우, 인산석고 시용 후 8주차 때 최대값을 보였으며 점차 감소하였다. 특히, PG150 처리구의 EC가  $2.0 \text{ dS m}^{-1}$  이상으로 밭토양 적정 값 이상이였다. 그러나 수확기 토양 EC 값은  $1.0 \text{ dS m}^{-1}$  이하로 감소하였다. 따라서 농경지에서의 부산석고 활용은 토양 염 조건에 따라 안정화 기간을 가지는 등 공급 시기 및 방법에 있어 조절이 필요할 것으로 판단된다.





**Fig. 1.** Temporal change in pH and EC of soil with different soil amendments during 7 months. Data indicate mean  $\pm$  standard deviations (n = 3).

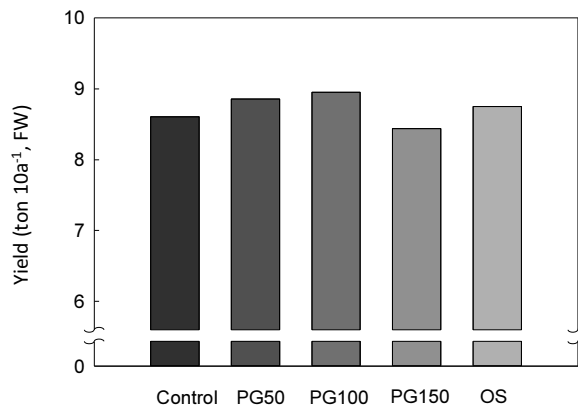
**수용성 칼슘과 황의 하층 이동** 전반적으로 토양 단면을 따라 깊이별 수용성 칼슘 농도는 차이가 있었다 (Fig. 2). 또한 부산석고 시용에 의해 수용성 칼슘 농도는 증가하였으며, 처리수준이 높을수록 그 증가율은 높았다. 반면 수용성 황 농도의 경우, 대조구와 OS 처리구에서는 토양 단면에 따라 차이가 없었지만 수용성 칼슘 농도와 동일하게 부산석고 처리 수준에 따라 차이를 보였다 (Fig. 2). 일반적으로 수용성 이온의 수직 이동은 이온의 용해도, 토성과 관련된 배수등급, 그리고 강우량에 큰 영향을 받는다. 본 연구결과에 따르면, 부산석고 시용에 의해 칼슘과 황이 약 70 cm 깊이까지 수직이동을 하였으며, 재배기간 동안 비닐 멀칭을 하였음에도 불구하고 상당히 높은 수직 이동율을 보여준다. 이와 같이 수용성 Ca과 SO<sub>4</sub>의 빠른 수직 이동율은 부산석고가 심토 개량에 한계가 있는 석회보다 심토를 개량할 목적으로 적극 활용될 수 있음을 시사한다 (Blum et al., 2013). 그러나 본 연구에서 이용된 또 다른 토양 개량제인 패화석 (OS)의 경우, 이러한 심토 개량 효과를 보이지 않았다.



**Fig. 2.** Concentrations of water soluble Ca (A) and SO<sub>4</sub> (B) across the soil profile following onion cultivation.

**부산석고 처리가 작물 수량에 미치는 영향** 부산석고 시용에 따른 양파 생산량은 Fig. 3과 같다. 본 시험지 토양의 석회 포화도는 약 61%로 석회가 크게 부족한 토양이 아니었다. 그리고 패화석 처리에 의한 양파의 수량 증수 효과는 없었다. 부산석고 처리구 (PG0, PG50, PG100)에서는 처리수준이 높을수록 양파수량이 증가되었지만, 최대 처리수준인 PG150에서는 오히려 수량이 감소하였다 (Fig. 3). 본 연구에서는 처리구간 통계적으로 유의적 차이는 없었다 ( $p < 0.05$ ). Smaoui-Jardak et al. (2017)의 연구결과에 따르면, PG 처리농도가 0 - 10% 수준에서는 처리농도가 높을수록 토마토의 성장 및 생산량이 비례적으로 증가하였지만, 20% 이상의 PG 처리농도에서는 생육이 억제되고 생산량이 크게 감소되었다. 이는 고농도의 PG 처리가 토양 염 농도를 증가시키고 부산석고에 포함되어 있는 유해물질 (e.g. 중금속 등)의 토양 용액 중 용해도를 높임으로써 작물의 생육과 수량에 악영향을 미친 것으로 보인다 (Smaoui-Jardak et al., 2017). 본 연구에서도 특히 고농도의 부산석고 시용 후, 급격히 증가한 EC농도 ( $>2.5 \text{ dS m}^{-1}$ ; Fig. 1B)로 인해 양파 초기생육 단계에서 염 피해가 발생하여 이후 수확 시 양파의 생산량에 악영향을 미친 것으로 판단된다.

2020년 기준으로 국내 양파 생산 단수는  $7.9 \text{ ton } 10\text{a}^{-1}$ 이며, 경남지역의 단수는  $8.7 \text{ ton } 10\text{a}^{-1}$  (KOSTAT, 2020)이다. 본 연구에서 석회 포화도 65%를 충족시킨 PG50과 PG100 처리구의 생산 수량은  $8.8 \text{ ton } 10\text{a}^{-1}$  이상으로 국내 및 경남 지역 평균 단수 값보다 더 높았다. 따라서 양파 생산성 증진 측면에서 볼 때, 본 경작지 토양에서 가장 적절한 부산석고 시용량은 석회포화도 100%로 조절한  $208 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$  (PG100)인 것으로 사료된다.



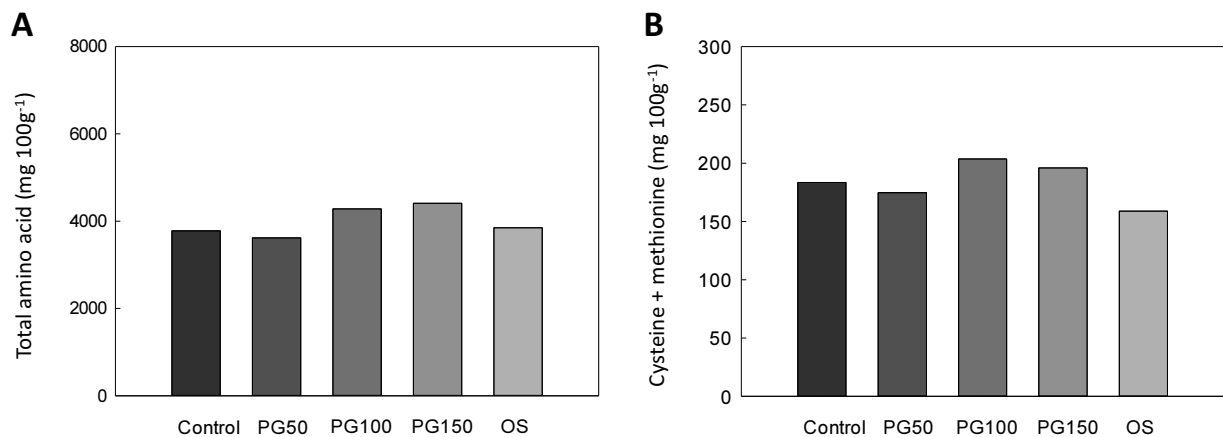
**Fig. 3.** Yield of onion in a field soil treated with different soil amendments. Data indicate mean of three replicates.

**부산석고 처리가 작물 품질에 미치는 영향** 부산석고 시용에 따른 양파 가식부위의 양분함량은 Table 3에서 보는 바와 같다. 대조구와 비교하였을 때, PG50과 PG100 처리구에서는 양파의 질소 및 인 이용률이 증가한 반면, PG150 처리구에서는 감소하였다. 양파 중 칼륨과 황 함량은 부산석고 처리수준이 증가함에 따라 증가하였다 (Table 3). 칼륨은 광합성 등 식물의 대사 작용과 병해충에 대한 저항성 발현에 있어서 중요한 역할을 한다 (El-Morsy et al., 2016). 양파의 경우, 칼륨 시비는 수량 증가와 결구의 색상 및 광택 등 품질 향상에 도움이 된다 (Shafeek et al., 2013; Behairy et al., 2015). 본 연구에서 부산석고에 의한 양파의 칼륨 이용률 증가는 보였지만, 토양 중 교환성 칼륨 농도에는 영향이 없었다. 또한 Smaoui-Jardak et al. (2017)은 고농도 부산석고 처리가 식물의 칼륨흡수를 억제한다고 보고하였지만, 본 연구의 PG150 처리구의 양파에서는 오히려 가장 높은 칼륨 함량이 나타났다.

**Table 3.** Nutrient content in eatable part of onion treated with different amendments. Data indicate mean of three replicates. Same letters in each column represent no significant difference among treatments (LSD,  $p < 0.05$ ).

Treatment	Nutrient content (g kg <sup>-1</sup> )					
	N	P	S	K	Ca	Mg
Control	25.0 c	9.1 a	3.64 d	24.6 b	18.3 b	3.3 a
PG50	27.8 a	9.3 a	3.87 b	25.3 b	18.9 b	3.2 a
PG100	28.4 a	9.9 a	3.82 b	28.6 a	20.5 a	3.1 a
PG150	24.1 c	9.0 a	4.24 a	29.0 a	19.1 ab	2.7 b
OS	26.6 b	8.5 b	3.75 c	25.5 b	19.1 ab	3.2 a

칼륨시비의 효과와 유사하게, 황 시비는 결구의 수량 및 병해충 저항성을 증가시킬 뿐만 아니라 양파의 맛을 향상시킨다 (Mishu et al., 2013; de Souza et al., 2015). 특히, 황은 식물체 내에서 시스테인과 메치오닌 아미노산의 구성 성분으로 이들 아미노산은 식물체 내의 필수 단백질 형성에 있어 중요한 역할을 한다 (Nayak et al., 2016). 최근 세계적으로 황 결핍에 대한 보고가 점점 증가하고 있으며, 농경지 토양 중 황 부족에 대한 황 시비의 중요성이 증가하고 있는 실정이다. 본 연구 결과에서는 부산석고 시용에 의한 식물체 내 황 함량 증가로 아미노산 합성이 증가되어 전 아미노산 함량이 높아진 것으로 나타났으며, 부산석고 처리수준이 높을수록 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 4). 특히 황을 함유하고 있는 시스테인과 메치오닌 함량은 부산석고 처리수준이 208 kg 10a<sup>-1</sup>인 PG100 처리구에서 가장 높았다 (Fig. 4). 따라서 부산석고는 작물생육에 있어서 중요한 황 공급원이 될 것이라 판단된다.

**Fig. 4.** Contents of total amino acid (A) and S-related amino acids including cysteine and methionine (B) in eatable part of onion cultivated in soil treated with different soil amendments. Data indicate mean of three replicates.

## Conclusions

본 재배시험 연구결과를 통해 부산석고가 양파 재배에 있어서 토양 개량제 또는 비료로서 높은 잠재력이 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 부산석고 시용에 의해 증가된 토양 중 칼슘과 황 농도 그리고 양파의 양분 (N, P, S, K, Ca) 흡수율 및 식물 대사물질 (amino acids) 함량은 부산석고가 농업 토양의 질과 작물 품질 및 수량 향상에 큰 장점이 있음을 시사하였다. 하지만, 본 연구의 PG150 처리구처럼 높은 수준의 부산석고 공급은 오히려 토양 염류농도를 증가시키고,



작물의 수량 및 양분 이용율을 저하시켰다. 따라서 농업분야에서 부산석고를 효율적으로 재활용하기 위해서는 경작지 토양 및 대상 작물의 특성 등을 종합적으로 고려하여 최적의 부산석고 활용방안을 모색할 필요가 있다. 이를 위해, 앞으로 부산석고에 대한 장기적인 연구를 통해 통합적인 토양 개량효과를 지속적으로 평가함으로써 현장에서의 부산석고 활용가치를 극대화할 필요가 있다.

## Acknowledgement

This work was supported by the Namhae Chemical Corporation.

## References

- Al-Enazy, A.A., F. Al-Barakah, S. Al- Oud, and A. Usman. 2018. Effect of phosphogypsum application and bacteria co-inoculation on biochemical properties and nutrient availability to maize plants in a saline soil. Arch. Agron. Soil Sci. 64:1394-1406.
- Amor, R.B. and M. Gueddari. 2016. Major ion geochemistry of Ghannouch-Gabes coastline (at Southeast Tunisia, Mediterranean Sea): study of the impact of phosphogypsum discharges by geochemical modeling and statistical analysis. Environ. Earth Sci. 75(10):851.
- Batal, K.M., K. Bondari, D.M. Granberry, and B.G. Mullinix. 1994. Effects of source, rate, and frequency of N application on yield, marketable grades and rot incidence of sweet onion (*Allium cepa* L. cv. Granex-33). J. Hortic. Sci. 69(6):1043-1051.
- Behairy, A.G., R.M. Asmaa, M.R. Shafik, H.A. Aisha, and M.H. Magda. 2015. Growth, yield and bulb quality of onion plants (*Allium cepa* L.) as affected by foliar and soil application of potassium. Middle East J. Agric. Res. 4(1):60-66.
- Blum, S.C., E.F. Caires, and L.R.F. Alleoni. 2013. Lime and phosphogypsum application and sulfate retention in subtropical soils under no-till system. J. Soil Sci. Plant Nutr. 13(2):279-300.
- Carvalho, M.C.S. and B. van Raij. 1997. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. Plant Soil 192(1):37-48.
- de Souza, G.L.F., A.B.C. Filho, F.A. de Túlio, and R.H.D. Nowaki. 2015. Effect of sulphur dose on the productivity and quality of onions. Aust. J. Crop. Sci. 9(8):728-733.
- Elloumi, N., M. Zouari, L. Chaari, F.B. Abdallah, S. Woodward, and M. Kallel. 2015. Effect of phosphogypsum on growth, physiology, and the antioxidative defense system in sunflower seedlings. Environ. Sci. Pollut. Res. 22(19):14829-14840.
- El-Morsy, A.E., A.I. El-Kasas, and A.M. El-Tantawy. 2016. Onion plant growth and yield as affected by nitrogen, potassium and sulphur combinations under el-arish region conditions. Sinai J. Appl. Sci. 5(3):345-362.
- Garrido, F., V. Illera, C. Vizcayno, and M.T. García-González. 2003. Evaluation of industrial by-products as soil acidity amendments: chemical and mineralogical implications. Eur. J. Soil Sci. 54(2):411-422.
- Gharaibeh, M.A., M.J. Rusan, N.I. Eltaif, and O.F. Shunnar. 2014. Reclamation of highly calcareous saline-sodic soil using low quality water and phosphogypsum. Appl. Water Sci. 4:223-230.
- Ghonomie, A., Z.F. Fawzy, A.M. El-Bassiony, G.S. Riadand, and M.M.H. Abd El-Baky. 2007. Reducing onion bulbs flaking and increasing bulb yield and quality by potassium and calcium application. Aust. J. Basic Appl. Sci. 1(4):610-618.
- Hentati, O., N. Abrantes, A.L. Caetano, S. Bouguerra, F. Gonçalves, J. Römbke, and R. Pereira. 2015. Phosphogypsum

- as a soil fertilizer: Ecotoxicity of amended soil and elutriates to bacteria, invertebrates, algae and plants. *J. Hazard. Mater.* 294:80-89.
- IAEA. 2008. Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V). Proceedings of an International Symposium. Seville, Spain, 19-22 March 2007. Vienna, Austria.
- KOSTAT. 2020. Results of the 2020 barley, garlic and onion production survey.
- Lee, C.H., B.Y. Ha, Y.B. Lee, and P.J. Kim. 2009. Effect of alkalized phosphogypsum on soil chemical and biological properties. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 40:2072-2086.
- Li, J., H.S. Wu, Z.Q. Gao, X.X. Shang, P.H. Zheng, J. Yin, D. Kakpa, Q.Q. Ren, O.K. Faustin, S.Y. Chen, Y. Xu, T.Y. Yao, W. Ji, J.S. Qian, and S.J. Ma. 2015. Impact of phosphogypsum wastes on the wheat growth and CO<sub>2</sub> emissions and evaluation of economic-environmental benefit. *Huan Jing Ke Xue.* 36(8):3099-3105.
- Liu, M., Z. Liang, H. Ma, L. Huang, and M. Wang. 2010. Responses of rice (*Oryza sativa* L.) growth and yield to phosphogypsum amendment in saline-sodic soils of North-East China. *J. Food Agric. Environ.* 8(2):827-833.
- ME. 2010. A study on the explanation of quality certification standards for waste gypsum recycled intermediate products.
- Mishu, M.H., F. Ahmed, M.Y. Rafi, F. Golam, and M.A. Latif. 2013. Effect of sulphur on growth, yield and yield attributes in onion (*Allium cepa* L.). *Aust. J. Crop. Sci.* 7(9):1416-1422.
- Nayak, A.K., V.K. Mishra, D.K. Sharma, S.K. Jha, C.S. Singh, M. Shahabuddin, and M. Shahid. 2013. Efficiency of phosphogypsum and mined gypsum in reclamation and productivity of rice-wheat cropping system in sodic soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 44:909-921.
- Nayak, B.R., P.K. Samanta, N. Panigrahy, S. Mohapatra, A.K. Mohanty, A.K. Dash, B. Jena, N. Panda, B. Sahoo, and P. Mishra. 2016. Response of different sources and doses of sulphur on growth, yield and uptake of onion (*Allium cepa* L.). *Int. J. Bio-resource Stress Manag.* 7(1), 66-69.
- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. Soil Society of America Book Series No. 5, p. 961-1010.
- NIAST. 2000. Methods of analysis of soil and plant. RDA, Suwon, Korea.
- Park, B.K. 2004. Agricultural use of phosphogypsum fertilizer. *Soil Fert.* 19:18-27.
- RDA. 2018. Basic survey on agricultural use of phosphogypsum. p. 91.
- Saadaoui, E., N. Ghazel, C.B. Romdhane, and N. Massoudi. 2017. Phosphogypsum: potential uses and problems - a review. *Int. J. Environ. Stud.* 74(4):558-567.
- Shafeek, M.R., M.K. Nagwa, S. Hassan, M. Singer, and N.H.M. El-Greadly. 2013. Effect of potassium fertilizer and foliar spraying with Etherel on plant development, yield and bulb quality of onion plants (*Allium cepa* L.). *J. Appl. Sci. Res.* 9 (2):1140-1146.
- Smaoui-Jardak, M., W. Kriaa, M. Maalej, M. Zouari, L. Kamoun, W. Trabelsi, F.B. Abdallah, and N. Elloumi. 2017. Effect of the phosphogypsum amendment of saline and agricultural soils on growth, productivity and antioxidant enzyme activities of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Ecotoxicology* 26(8):1089-1104.
- Tang, Z., T. Lei, J. Yu, I. Shainberg, A.I. Mamedov, M. Ben-Hur, and G.J. Levy. 2006. Runoff and interrill erosion in sodic soils treated with dry PAM and phosphogypsum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:679-690.
- Tayibi, H., M. Choura, F.A. López, F.J. Alguacil, and A. López-Delgado. 2009. Environmental impact and management of phosphogypsum. *J. Environ. Manage.* 90(8):2377-2386.
- Toma, M. and M. Saigusa. 1997. Effects of Phosphogypsum on amelioration of strongly acid nonallophanic Andosols. *Plant Soil* 192:49-55.
- Yoon, Y.E., S. Kuppusamy, K.M. Cho, P.J. Kim, Y.B. Kwack, and Y.B. Lee. 2017. Influence of cold stress on contents of soluble sugars, vitamin C and free amino acids including gamma-aminobutyric acid (GABA) in spinach (*Spinacia oleracea*). *Food Chem.* 215:185-192.