

퇴비혼합 시용에 따른 논밭 전환지 토양의 깊이별 유효인산 함량 차이

허관용¹, 조주영¹, 권현우¹, 고다게다라 고다알라게다라 라크미니¹, 이금아², 김영남^{2*}, 이용복^{1,2**}

Difference in Available Phosphorus by Soil Depth In Drained Paddy Fields with Combined Application of Mineral and Compost Fertilizers

Gwanyong Heo ¹, Ju Young Cho ¹, Hyunwoo Kwon ¹, Lakmini Godayalagedara Godagedara ¹, Keum-Ah Lee ², Young-Nam Kim ^{2*} and Yong Bok Lee ^{1,2**}

¹경상국립대학교 응용생명과학부(BK21 Four), ²경상국립대학교 농업생명과학연구원(IALS)

¹Division of Applied Life Science (BK21 Four), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea,

²Institute of Agriculture and Life Science (IALS), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

* Correspondence: youngnam.a.kim@gmail.com

** Correspondence: yblee@gnu.ac.kr

Abstract: For higher self-sufficiency in soybean production, conversion of paddy to upland fields is recommended in Korea. This study aimed to investigate the effect of mineral (NPK) and compost fertilizers on the P availability in soils of drained paddy fields (DPF). Soils of paddy fields (PF) and DPF were collected by depths, and the properties, including pH, electrical conductivity, organic matter (OM), available P, etc., were measured. Soil OM in the topsoil of two fields treated with combined fertilizers was higher than in control and NPK-alone treatments. As soil depth increased, OM content gradually decreased, especially more in DPF. Available P showed a similar trend, which represented the highly-dependent P state across the soil profile, more in DPF. Moreover, the higher available P in the topsoil of DPF than PF, indicating that the effect of compost additive was greater in DPF, which appears to be due to less P loss than in PF. Co-application of mineral and compost fertilizers would be a good practice to effectively manage soil productivity in DPF, but is still a need to improve nutrient retention, especially for P. Thus, appropriate soil management approaches should be established to achieve sustainable agriculture in DPF.

Keywords: Drained paddy field, Organic fertilizer, P availability, Soybean, Soybean productivity

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.41>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 421-425

Received: November 29, 2024

Revised: December 16, 2024

Accepted: December 19, 2024

Published: December 22, 2024

Online ISSN: 1233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

우리나라 식량자급률은 2022년 기준 46%이며, 이중 쌀(*Oryza sativa* L.)은 약 105%로 국내 수요량 이상으로 과잉생산되고 있다. 게다가 1980년대 이후 식습관 변화 등으로 쌀 소비량이 점차 감소하였으며, 이로 인해 잉여미 관리 및 쌀값 불안정 등 문제가 발생하고 있다. 쌀과 더불어 대표적인 식량작물 중 하나인 콩(*Glycine max* (L.) Merr.)의 자급률은 2022년 기준 28.6%에 불과하며, 이에 농림축산식품부

는 2027년까지 콩 자급률을 43.5%로 높이고자 증산계획을 수립하였다. 이처럼, 정부에서는 과잉 생산되는 쌀 생산을 조절하기 위해 논을 밭으로 전환하여 콩을 재배하도록 장려하고 있다.

일반적으로 답작과 전작은 식재되는 작물의 특성상 요구되는 토양조건이 다르다. 답의 경우 답수상태에서 수도가 재배되어 배수가 불량하고 유기물 및 양분 함량이 낮은 반면 전작물은 호기 상태에서 작물이 재배되며 수도작에 비해 재배기간이 짧고 많은 시비량을 요구된다. 이에 답전 전환지에서 작물 재배 시 비배관리가 매우 중요하다. 농촌진흥청의 조사에 따르면 논에서 유효인산 함량은 평균 131 mg/kg로 밭콩재배지의 적정함량(150-250 mg/kg)보다 낮은 것으로 나타났다. 따라서 논에 식재하는 논콩의 생육 및 생산량에 적합한 시비량을 설정하는 것이 필요하다. 특히, 논은 일반적으로 밭보다 저지대에 위치하고 하천과 가까워 밭콩과 동일하게 시비할 경우, 강우 등의 기상조건에 의해 토양 중 양분이 주변 수계에 유입되어 환경적 부하가 유발될 수 있다. 그러므로 환경부하를 줄이고 최적의 생산량을 이끌 수 있는 토양관리 방안 마련이 필요하다[1,2]. 본 연구에서는 무기질 비료와 가축용퇴비 혼합시용이 논밭 전환지의 유효인산 함량에 미치는 영향을 알아보고자 토양 깊이별로 분석하였으며, 또한 논 경작지와 비교분석을 통해 논밭 전환지의 토양관리 방안연구의 초석을 다지고자 하였다.

재료 및 방법

재료 및 포장시험

본 연구에서는 국립식량과학원 남부작물부의 논(paddy field, PF)과 논밭 전환지(drained paddy field, DPF)를 선정하여 각각 새누리 벼(*O. sativa* L. cv. Saenuri)와 선풍 콩(*G. max* L. cv. Sunpung)을 5년간 재배하였다. 두 작물의 종자는 국립식량과학원으로부터 공여받아 사용하였다.

두 포장지는 무처리구(CON), 무기질 비료 처리구(NPK) 및 무기질비료·퇴비 혼합처리구(NPK+Com)로 구성하였고, 각 처리구 면적은 논 108 m², 논밭 전환지 138 m²였고, 분할구배치법(3반복)으로 처리구를 배치하였다. 또한, 벼와 논콩 재배의 재식거리는 각각 30 × 15와 70 × 20 cm로 하였다.

무기질비료 시용량은 논과 논밭 전환지에 각각 90-45-57과 30-30-34 (N-P₂O₅-K₂O) kg/ha 수준으로 처리하였고, 퇴비혼합처리구는 논과 논밭 전환지 모두 동일한 양의 퇴비(1,200 kg/ha)를 시비하였다. 유기물 함량이 30% 이상인 가축분 퇴비(고령이퇴비)를 고성퇴비영농조합법인으로부터 구입하여 사용하였으며, 계분 40%, 우분 10%, 돈분 10%, 수피 15%, 톱밥 10%, 미강 2%, 왕겨 2% 및 석회고토 1%로 구성되었다. 그리고 정식, 시비관리, 병해충 및 잡초방제 등 작물 재배는 농촌진흥청 작물재배 매뉴얼에 따라 지난 5년간 수행하였다.

토양 시료 채취 및 분석

논과 논밭 전환지의 토양시료는 오거(auger)를 이용하여 채취하였다. 채취한 토양은 풍건하여 2 mm 체거름 후 토양의 화학적 특성인 pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC), 유기물(organic matter, OM), 유효인산(available phosphate, Av. P₂O₅), 양이온교환용량(cation exchangeable capacity, CEC) 및 교환성 양이온(Ex. K, Ca, Mg) 분석에 이용하였다.

토양의 pH와 EC는 토양과 증류수(1:5 w/v)를 진탕한 후 각각 pH meter (Orion Star 2-Star, Thermo Scientific, USA)와 EC meter (Orion 3-Star, Thermo Scientific, USA)로 측정하였다. 유기물은 Tyurin법으로 분석하였고, 유효인산은 Lancaster법을 따라 침출한 후 720 nm 파장에서 UV visible 분광광도계(CARY 50 CONC, Varian, USA)로 분석하였다. 양이온 교환용량과 교환성 양이온은 1M NH₄OAc (pH 7.0) 용액으로 침출한 후, 각각 Kjeldahl (K-355, BÜCHI, Switzerland)과 ICP-OES (OPTIMA 5300DV, Perkin Elmer, USA)로 분석하였다. 토양특성 중 유효인산과 유기물 함량은 깊이별(0-20, 20-40, 40-60 cm)로 분석을 수행하였다.

통계분석

모든 분석 결과는 Minitab16 (Minitab Inc., USA)을 이용하여 통계분석을 수행하였다. 본 연구에서는 논과 논밭 전환지 토양의 처리 내 화학적 특성을 비교하기 위해 일원분산분석(One-way ANOVA) 후 사후분석(Tukey's HSD, $p < 0.05$)을 수행하였다. 또한 논과 논밭 전환지 간 토양특성 차이를 비교하기 위해 t-test 분석을 수행하였다.

결과 및 고찰

토양의 이화학적 특성 변화

논과 논밭 전환지 토양의 화학적 특성을 비교한 결과(Table 1), 두 농경지 모두 퇴비혼합 처리구에서 가장 높은 EC 및 CEC 함량이 관찰되었으나 처리구 간 통계적 유의성은 없었다($p>0.05$). 반면 T-N의 경우 논밭 전환지에서 퇴비혼합 처리에 의해 유의미하게 증가된 것이 관찰되었다($p<0.05$). 이러한 경향은 교환성 양이온 K 및 Mg 함량에서도 나타났다($p<0.05$). 게다가 퇴비혼합 처리구의 교환성 K 및 Mg 함량은 논보다 논밭 전환지에서 유의미하게 높은 것이 관찰되었으며($p<0.05$), 이는 퇴비 사용이 담수 조건인 논 토양보다 배수조건의 논밭 전환지 토양에 비옥도 증진 측면에서 더 긍정적 효과를 주는 것을 보여준다.

Table 1. Soil chemical properties of paddy field (PF) and drained paddy field (DPF) treated with different fertilization: control (CON), mineral fertilizer (NPK), and combination of NPK and compost (NPK+Com)

| Treatment | pH | EC | T-N | CEC | Exchangeable Cations | | | |
|-----------|---------|-------|-------|-----------------------|----------------------|--------|--------|--------|
| | | | | | K | Ca | Mg | |
| | 1:5w | dS/m | % | cmol _e /kg | | | | |
| PF | CON | 7.11a | 0.35a | 0.15a | 10.5a | 0.45a | 6.71a | 1.18a |
| | NPK | 6.79b | 0.40a | 0.15a | 10.9a | 0.12b | 4.12b | 0.55b |
| | NPK+Com | 6.72b | 0.42a | 0.17a | 12.8a | 0.30ab | 5.89ab | 0.87ab |
| DPF | CON | 6.96a | 0.20a | 0.15b | 10.9a | 0.12b | 4.45b | 0.79b |
| | NPK | 6.71a | 0.21a | 0.15b | 11.5a | 0.18b | 6.07ab | 1.34a |
| | NPK+Com | 6.70a | 0.28a | 0.18a | 12.2a | 0.63a | 7.34a | 1.73a |

Data are mean of earth treatment (n=3). Different letters in each land use type indicate significant differences among the treatments (Tukey's HSD, $p<0.05$).

두 경작지의 표토층(0-20 cm)의 유기물 함량은 NPK+Com > NPK > CON 순으로 높았고, NPK+Com 처리구 중 PF와 DPF의 유기물 함량은 각각 25.0과 26.7 g/kg이었다. 또한 토심이 깊어질수록 유기물 함량은 감소하였고, 심토층(40-60cm)에서는 DPF보다 PF에서 유기물 함량이 증대되었다(Fig. 1). 이는 산화 조건인 밭 토양에 비해 담수상태에 따른 논의 환원 조건에서 유기물 분해가 느린 것으로부터 기인된 것으로 보인다[3].

퇴비혼합 사용효과 차이가 가장 두드러지게 나타난 화학적 특성은 유효인산으로, 특히 두 경작지 간 표토 내 함량 차이가

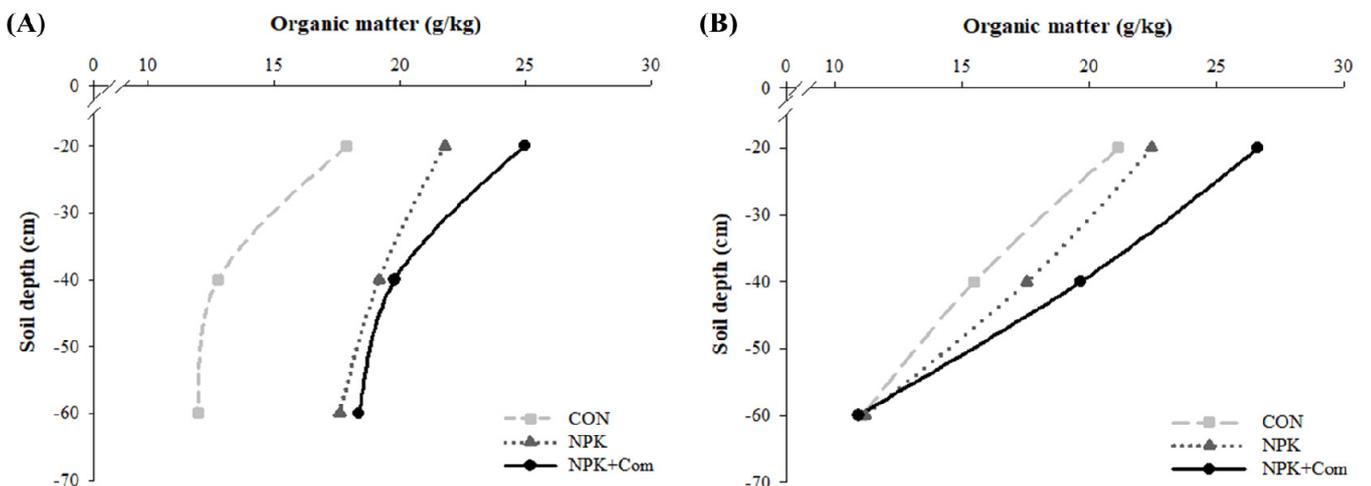


Fig. 1. Changes in soil organic matter content (g/kg) in soils of paddy fields (A) and drained paddy fields treated (B) with different fertilizers across the soil profile: control (CON), mineral fertilizer (NPK), and combination of NPK and manure compost (NPK+Com).

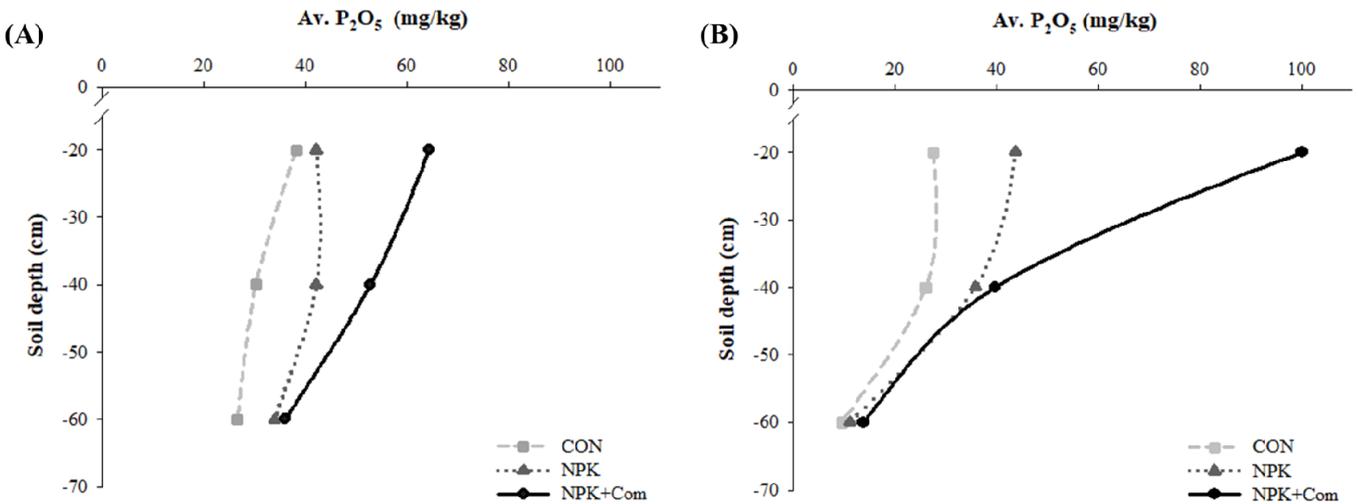


Fig. 2. Changes in available phosphate content (Av. P₂O₅, mg/kg) in soils of paddy fields (A) and drained paddy fields (B) treated with different fertilizers across the soil profile: control (CON), mineral fertilizer (NPK), and combination of NPK and manure compost (NPK+Com).

매우 크게 나타났다(PF: 64.4 mg/kg, DPF: 100.2 mg/kg). 이는 동일한 퇴비 사용량 처리에도 불구하고 논밭 전환지 표토 내 인의 함량이 높은 것은 DPF 토양이 담수와 배수조건이 반복되는 PF 토양보다 인의 유출이 적기 때문이다.

한편 토양깊이에 따른 유효인산의 변화는 동일하게 감소하였으나, 그 감소 폭은 경작지 유형 간 큰 차이를 보였다(Fig. 2). 즉, 논 토양보다 논밭 전환지 토양에서 깊이에 따른 유효인산의 큰 감소 경향이 확인되었으며, 특히 퇴비혼합 처리구에서 가장 뚜렷하였다: 0-20 cm (100 mg/kg), 20-40 cm (39.7 mg/kg) 및 40-60 cm (13.7 mg/kg). 이는 논밭 전환지 표토에 집적된 인의 수직 이동은 논에 비해 원활하지 않음을 의미하며, 두 포장지의 토양 및 물관리와 재배되는 작물 중 차이로부터 기인한 것으로 판단된다. 우선 논밭 전환지보다 깊은 심경을 통해 논 중 인의 수직이동이 더 크게 일어났을 것으로 생각된다. 그리고 비록 논 토양의 물관리 과정에서 수용성 인이 유출되기도 하지만 용탈 및 물대기 작용에 의해 심토층으로 이동하기도 한다. 또한 벼의 유효토심은 60 cm 이하로 유효토심이 35 cm인 콩보다 뿌리로 인한 하층으로의 인 이동에 큰 영향을 준 것으로 판단된다[4,5].

우리나라 논 토양의 유효인산 평균 함량은 131 mg/kg인 반면 밭 토양은 이보다 상당히 높은 615 mg/kg이다[6,7]. 또한 콩 재배시 유효인산의 적정범위를 감안할 때, 본 연구의 논밭 전환지 NPK 및 퇴비혼합 처리구의 토양은 여전히 더 많은 양의 인산 시비가 요구된다. 하지만 일반적으로 퇴비의 N/P ratio가 무기질 비료보다 현저히 낮기 때문에 가축분 퇴비의 장기적 사용은 토양 내 인산의 축적을 유발할 수 있다. 게다가 인산 함량이 낮은 토양은 높은 토양에 비해 가축분 퇴비시비 영향에 대한 민감성이 크며[8], 장기간 가축분 퇴비투입 시 인산이 과다하게 축적되어 작물의 생육저해 및 주변 환경의 오염(e.g., 부영양화)을 야기할 수 있다[9]. 따라서 지속가능한 논콩 생산을 보장하기 위해서는 논밭 전환지 활용 초기 작물재배를 위한 인의 적정시비량 설정방안이 강구되어야 할 것이다.

결론

논밭 전환지 활용은 콩을 포함한 우리나라 식량자급률 증진 측면에서 중요한 대안 중 하나로 평가된다. 하지만, 논 토양의 특성상 밭전환 후 작물을 생산함에 있어 많은 제한점이 따른다. 특히, 논밭 전환지 토양 내 P 등의 낮은 양분보유력은 밭작물을 재배함에 있어 해결되어야 할 주요사안이다. 본 연구를 통해 3요소 단독 시비보다 가축분 퇴비와의 혼합 시비가 논밭 전환지의 인산과 유기물 함량을 증가시키는데 효과적인 것을 확인하였다. 하지만 본 논밭 전환지에서 5년 이상 적정시비량을 기준으로 퇴비혼합 사용을 수행하였음에도 불구하고 밭토양 유효인산 적정농도(150-250 mg/kg)보다 40-66% 낮은 유효태 인산 농도가 검출되었다. 이러한 점을 고려할 때, 논밭 전환지의 비옥도(i.e., 유효인산)와 작물 생산성을 향상시킬 수 있도록 논콩 재배지의 적정시비량 재설정과 토양관리 방안 마련이 필요하다고 판단된다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: Heo GY: Data curation, Formal analysis, Writing-Original draft, Cho JY: Data curation, Formal analysis, Godagedara LT: Data curation, Formal analysis, Lee KA: Conceptualization, Formal analysis, Validation, Visualization, Kim YN: Conceptualization, Formal analysis, Data curation, Supervision, Validation, Investigation, Methodology, Writing-review & editing, Lee YB: Conceptualization, Supervision, Funding acquisition, Methodology, Writing-review & editing.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (RS-2024-00398135)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.41>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Yong Bok Lee and Young-Nam Kim.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

1. Sharpley AN, McDowell RW, Kleinman PJ (2001) Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. *Plant and Soil*, 237, 287-307. <https://doi.org/10.1023/A:1013335814593>.
2. Eghball B (2003) Leaching of phosphorus fractions following manure or compost application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(19-20), 2803-2815. <https://doi.org/10.1081/CSS-120025207>.
3. Wei L, Ge T, Zhu Z, Luo Y, Yang Y, Xiao M, Yan Z, Li Y, Wu J, et al. (2021) Comparing carbon and nitrogen stocks in paddy and upland soils: Accumulation, stabilization mechanisms, and environmental drivers. *Geoderma*, 398, 115121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115121>.
4. Jung KY, Yun EY, Park CY, Hwang JB, Choi YD, Jeon SH, Lee HA (2012) Effect of soil compaction levels and textures on soybean (*Glycine max* L.) root elongation and yield. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45(3), 332-338. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.3.332>.
5. Fan JB, Zhang YL, Turner D, Duan YH, Wang DS, Shen QR (2010) Root physiological and morphological characteristics of two rice cultivars with different nitrogen-use efficiency. *Pedosphere*, 20(4), 446-455. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60034-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60034-3).
6. Kim MS, Kim SC, Yun SG, Park SJ, Lee CH (2017) Change in available phosphate by application of phosphate fertilizer in long-term fertilization experiment for paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 36(3), 141-146. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.3.27>.
7. Kim YH, Kong MS, Lee EJ, Lee TG, Jung GB (2019) Status and changes in chemical properties of upland soil from 2001 to 2017 in Korea. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 38(3), 213-218. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2019.38.3.28>.
8. Rinasoa S, Rakotoson T, Rabeharisoa L, Tsujimoto Y, Nishigaki T (2023) Farmyard manure application increases lowland rice yield in phosphorus-deficient soils, but not in soils with high pH and phosphorus-fixing capacity. *Field Crops Research*, 296, 108906. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108906>.
9. Ma Q, Wen Y, Ma J, Macdonald A, Hill PW, Chadwick DR, Wu L, Jones DL (2020) Long-term farmyard manure application affects soil organic phosphorus cycling: a combined metagenomic and 33P/14C labelling study. *Soil Biology and Biochemistry*, 149, 107959. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107959>.