Nutrient Characteristics and Redox Potential Changes as Affected by Water Management in Rice Paddy Weighing Lysimeter

Myung-Suk Kong, Tae-Gu Lee, Seong-Soo Kang¹, Eun-Jin Lee, Goo-Bok Jung, Yoo-Hak Kim, and Ha-il Jung*

Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Korea

¹R&D Coordination Division, RDA, Jeonju 54875, Korea

*Corresponding author: hj255@korea.kr

ABSTRACT

Received: November 14, 2019

Revised: November 26, 2019

Accepted: November 27, 2019

This study was designed to assess the nutrients characteristics and redox potential changes as affected by water management condition in rice paddy weighing lysimeter. Rice was grown from June to October 2015, and the water management was consisted of two methods: continuously flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD). Under the CF condition, the redox potential (Eh) of 5 cm topsoil began to decrease rapidly and maintained around -260 to -200 mV. The AWD showed the oxidation condition. The changes of soil pH in CF and AWD ranged from 6.0 to 7.0 and 5.7 to 7.1, respectively. Soil pH in the AWD condition indicated up and down patterns by irrigation. In changes in nutrient contents of the soil solutions, nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) was initially 12.2 to 26.6 mg L^{-1} at the highest concentration, and the concentration of ammonia nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) and phosphate (PO_4^{3-}) appeared to be lower than 1 mg L^{-1} during rice cultivation. The grain yield of rice was significantly higher in the CF than in the AWD. Nitrogen and magnesium content in both rice grain and straw were not significantly different between the water management conditions. Phosphorous, potassium, and calcium content in the rice grain were not statistically different between CF and AWD conditions. However, the nutrient contents in rice straw were higher in the CF, compared with that in the AWD. Although the iron content in rice straw was higher in the CF than in the AWD, the manganese content showed an opposite tendency. Interestingly, soil maximum temperature at the daytime was significantly higher in the AWD than in the CF, whereas the soil minimum temperature at the night time was 0.5-0.9°C lower in the AWD, compared with that of the CF. Therefore, these results suggest that the decrease in rice yield in AWD condition can be linked to the inhibition of phosphate absorption into rice plants under oxidized-soil condition and/or high temperature difference between day and night in the soil.

Keywords: Redox potential (Eh), Nutrient, Paddy, Rice, Water management, Weighing lysimeter

Changes in the redox potential (Eh) of (A) 5, (B) 10, and (C) 15 cm soil depth under water management conditions of the continuously flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD).

Introduction

벼는 옥수수, 밀과 더불어 세계 3대 식량작물 중의 하나로써, 우리나라를 비롯한 중국, 일본, 인도 등 아시아 국가들의 가장 중요한 주곡작물일 뿐만 아니라 세계적으로 생산량과 소비량이 가장 많은 식량작물이다 (FAOSTAT, 2017). 벼는 오랜기간의 진화과정을 거치는 동안 생리수 및 환경수로써 물 요구도가 매우 높은 작물로 적응해 왔고, 재배 기간중 총 관개수의 약 40%를 사용할 정도로 많은 양의 물을 요구한다 (Bouman et al., 2007). 또한 전세계적으로 인위적인 관개에 의한 벼 재배면적은 총면적대비 50% 이상이며, 관개재배를 통한 생산량은 벼 총생산량의 76%를 차지하고 있다 (Maclean et al., 2002). 벼 재배 기간동안에는 관개용수가 지속적으로 필요하고, 이로 인해 용해된 질소와 인 등의 비료성분은 유거수 또는 지하침출수와 함께 수평 또는 수직이동을 하여 하천생태계의 부영양화를 가속화시킬 뿐만 아니라 지하수를 오염시킴으로써 인간의 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있다 (Nakasone et al., 2004; Van Chinh et al., 2008; Jung et al., 2016).

작물재배시 작물별 표준비료사용처방 기준이 설정되어 있음에도 불구하고, 다비사용이 생산량을 크게 증가시킬 것이라는 인식이 일부 농업생산자들 사이에 만연되어 있는 실정이다. 또한 고생산성을 기대한 과도한 비료사용으로 인하여 농업생태계에서의 비점오염이 사회적 이슈로 대두되고 있다 (Brus et al., 2008; Sun et al., 2013). 이러한 사회적 요구와 건전한 농업생태계의 보전을 위하여 관개수와 양분 관리 기술의 개선을 통한 작물의 양수분 이용효율을 증대시키는 것이 요구된다 (NRC, 1993). 벼 재배에서 널리 사용되는 물 절약 기술은 간단관개 방법으로 벼 재배기간 중 간단관개 처리는 물 절약뿐만 아니라, 토양 중 질소와 인 등 양분의 특성을 변화시키고 양분의 수평적 및 수직적 유출을 감소시킨다 (Pirmoradian et al., 2004; Tan et al., 2013).

라이시미터는 투입된 질소와 인 등의 토양 중 물질의 이동 및 분포를 평가하는데 활용되어 왔다 (Shan et al., 2005; Zotarelli et al., 2007; Jia et al., 2014). 특히 자연적인 토양구조 그대로 교란되지 않은 라이시미터는 토양을 통한 물과 용질의 이동 및 상태변화를 정밀하게 직접 측정할 수 있어, 토양 내의 중금속 및 농약 등의 동태파악 및 양분과의 상호관계해석 등 다방면의 연구들에 활용되고 있으며 (Meissner and Seyfarth, 2004; Meißner et al., 2010), 외부의 라이시미터 시설은 자연조건 상태에서 연구가 진행되기 때문에, 그 결과는 토양시스템에서의 변화를 실질적으로 예측하는데 활용될 수 있다 (Matteson et al., 2014).

논토양 라이시미터를 활용한 벼 연구는 중국을 중심으로 관개 및 시비방법에 따른 질소와 인의 유출에 관한 연구가 이루어지고 있으며 (Peng et al., 2014; Wang et al., 2018), Cho et al. (2002)는 우리나라 전북의 벼 재배지에서 양분 유출 특성을 보고하였다. 또한, Husson (2013)은 작물생육이 토양 내의 양분공급력에 크게 의존하며, 이는 토양 pH, 산화환원전위 (Eh) 등 토양조건과 토양 중 양분함량에 따라 달라진다는 결과를 보고하였다. 따라서, 본 연구는 우리나라에서 최초로 구축된 비교란 논토양 라이시미터를 활용하여 물관리 방법인 상시담수와 간단관개 간의 벼 근권부에서의 토양 pH, 산화환원전위 등 토양조건의 변화를 비교하고자 하였으며, 그에 따른 양분공급에 영향을 미치는 토양 층위별 양분해리 특성 및 작물로의 양분흡수량을 평가하고자 수행하였다.

Materials and Methods

중량식 라이시미터 및 연구토양 특성 본 연구는 전라북도 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원 토양수분 이동실험동의 논토양 비교란 중량식 라이시미터 시설을 이용하여 진행하였다. 본 연구에 활용된 비교란 라이시미터

Fig. 1. Rice paddy weighable-lysimeter vertical view. It has suction probes every five layers (10, 30, 55, 85, and 125 cm depths) for sampling soil solution (Seo et al., 2016).

Table 1. Chemical properties of the soil in paddy weighing lysimeters.

Soil series (Texture)	Horizon	Soil depth (cm)	pH (1:5)	OM (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex. cations (cmol _c kg ⁻¹)			Av. SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	Bulk density (Mg m ⁻³)
						K	Ca	Mg		
Gangseo (Loam)	Ap	0 - 20	5.4	19	328	0.19	3.1	0.8	62	1.20
	BAg	20 - 40	6.1	10	164	0.13	4.9	1.1	74	1.47
	Bw1	40 - 67	6.8	4	8	0.10	5.4	0.9	102	1.41
	Bw2	67 - 89	7.0	4	10	0.07	5.0	0.7	102	1.41
	C1	89 - 114	7.0	3	6	0.07	3.1	0.4	74	1.28
	C2	114 - 150	7.0	ND	4	0.06	2.3	0.4	65	1.25

Av. P₂O₅, available P₂O₅; Av. SiO₂, available SiO₂; Ex. cations, exchangeable cations; ND, not detected

(Weighing lysimeter, UGT, Germany)의 주요 특징은 Seo et al. (2016)와 Lee et al. (2017)의 라이시미터와 동일하며, 스테인레스강 재질의 표면적 1 m², 깊이 1.5 m인 원통형에 층위별 (10, 30, 55, 85, 125 cm)로 토양용액 채취 (Suction probe system, UGT, Germany) 및 지온, 수분함량 측정 (UMP-1, UGT, Germany)이 가능하도록 구성되어 있다. (Fig. 1). 라이시미터 토양은 2013년 전라북도 완주군 인근의 논토양에서 자연상태의 토양구조 그대로 채취해 물과 양분의 이동을 직접 측정할 수 있다. 연구토양은 표토의 토성이 양토이고, 토양 채취 시의 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다.

연구작물 및 처리내용 본 연구의 대상작물은 벼이고, 품종은 보람찬이다. 재식거리는 30 × 15 cm이며, 하나의 라이시미터 구당 총 19주를 이앙 재배하였다. 2015년 6월 11일 정식하여, 10월 13일 수확하였으며, 물관리 방법은 상시담수와 간단관개 2가지 방법을 사용하였다. 최대 담수심은 3 cm이었고, 간단관개의 관개 시점은 토심 10 cm에서

Table 2. Fertilizer recommendation for rice cultivation in 2015.(Unit : kg 10a⁻¹)

Soil series (Texture)	Nitrogen			Phosphorus	Potassium		Compost	Silicon
	Basal	Tillering	Panicle initiation	Basal	Basal	Panicle initiation		
Gangseo (Loam)	5.1	2.0	3.1	3.0	3.5	1.5	1,600	300

토양수분장력 -10 kPa에서 관개를 실시하였다. 단, 활착기 및 출수기에는 모두 상시담수를 실시하였다. 벼 재배 전 표토의 토양화학적성을 바탕으로 농촌진흥청의 작물별 비료사용처방기준 (NAAS, 2010)에 따라 토양검정에 의한 비료, 볏짚퇴비 및 규산질비료 추천량을 사용하였다 (Table 2). 본 실험은 국립농업과학원 토양수분이동실험동 내에 설치된 라이시미터에서 2반복으로 연구를 진행하였다.

토양, 토양용액 및 식물체 분석 방법 라이시미터 층위별 토양의 이화학적 특성은 2013년 토양단면 채취 시에 분석하였다. 용적밀도는 코어법 (Blake and Hartge, 1986)을 이용하였으며, 토성의 분류기준은 USDA-NRCS의 기준 (Schoeneberger et al., 2012)을 따랐다. 토양화학적성은 항목별로 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사분석기준 (RDA, 2012)에 준하여 분석하였다. 토양 pH와 EC는 토양과 증류수를 1:5의 비율로 진탕한 후 각각 pH, EC meter를 사용하여 측정하였고, 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 분석하였다. 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등의 양이온은 1 M NH₄OAc (pH7.0)로 침출하여, 유도결합플라즈마 분광광도계 (ICP-OES, GBC, Australia)로 분석하였고, 유효규산은 1M NaOAc (pH 4.0)로 침출하여 비색계 (U-3900H, Hitachi, Japan)를 사용하였다. 층위별 토양의 산화환원전위 (Eh)는 백금전극법으로 담수토양에 산화환원전위전극을 꽂은 상태에서 측정하였으며, 토양 pH는 전극을 토양에 꽂은 상태에서 측정하였다. 토양용액은 수질오염공정시험기준 (MOE, 2017)에 준하여 분석하였다. 질산태질소, 암모늄태질소는 이온 자동분석기 (QuAatro, Seal analytical, USA)로 측정하였으며, 인산염인은 염화제일주석환원법으로 비색 정량하였으며, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등 양이온과 철, 망간은 유도결합플라즈마 분광광도계로 측정하였다. 식물체는 건조 후 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (NIAS, 1988)에 따라 분석하였다.

Results and Discussion

토양의 산화환원전위 (Eh) 및 pH 변화 벼 재배기간 물관리 방법에 따른 토양의 산화환원전위 (Eh) 평균 변화는 Fig. 2와 같다. 논토양은 벼 재배기간 동안 상시담수 (CF)의 환원조건이 지속되기 때문에 토양 내 산소가 부족할 뿐만 아니라, 표토층 아래에서는 다양한 미생물에 의해 유기물이 분해됨에 따라 급격히 산소 고갈이 야기되고, 이로 인하여 표토층하부 토양은 극심한 혐기상태가 조성된다 (Kim et al., 2006). 상시담수조건에서 담수층과 가장 가까이 면하고 있는 표토 5 cm의 산화환원전위는 이앙 후 2주차부터 급속히 낮아지기 시작하여 생육진전에 따라 -260 ~ -200 mV 정도까지 낮아진 후 일정하게 유지되었던 반면, 간단관개 (AWD)에서는 이앙 후 3주차까지는 낮아지는 경향을 나타냈지만, 이앙 후 4주차부터는 간단관개처리에 의해 급격히 산화환원전위가 높아짐을 확인할 수 있었다. 심지어 간단관개처리에 따라 이앙 후 8주차 (최고분얼기)와 14주차 (수확기)의 산화환원전위가 각각 508과 164 mV까지 증가하는 산화상태를 나타냈다 (Fig. 2A). 토양의 산화환원제에 영향을 끼치는 주요한 토양특성은 배수성과 통기성이다. 간단관개 기간에 표토 10 cm에서 토양의 수분함량 변화는 상시담수에선 37 - 41%를 유지하였고, 간단관개에선

Fig. 2. Changes in the redox potential (Eh) of (A) 5, (B) 10, and (C) 15 cm soil depth under water management conditions of the continuously flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD).

29 - 43%를 나타냈다. 간단관개에 의해 토양이 건조되게 되면, 토양수분이 증발 또는 지하배수되어 사라지고, 그 빈 공간에 산소가 채워지게 됨으로써 산화상태를 조장 또는 유지하는 것으로 판단된다.

토양층위별 산화환원전위의 변화는 표토 10 cm의 상시담수조건에서는 표토 5 cm에서와 비슷한 경향을 나타냈으며, 간단관개처리에 의한 산화환원전위는 상시담수조건보다 다소 높게 유지되었지만, -140 ~ -36 mV값으로 약한 환원상태임을 확인할 수 있었다 (Fig. 2B). 그렇지만, 표토 15 cm에서는 물관리 방법별로 유의적인 차이가 없었다 (Fig. 2C). Flessa and Fischer (1992)은 표토층에서 토양미생물의 활발한 유기물분해로 인하여 산소 소모가 급격히 증가함으로써 산화환원전위가 낮게 유지된다는 연구결과를 제시하였으며, Rupp et al. (2007)은 토양층위별 산화환원전위의 변화에서 표토 20 cm 깊이에서는 음 (-)의 값을 나타냈지만, 토양이 50 그리고 120 cm로 점진적으로 깊어짐에 따라 산화환원전위는 오히려 높아진다는 연구결과를 보고하였다. 이전에 보고된 연구결과와 비슷한 경향으로, 표토 5 - 10 cm 깊이까지는 간단관개가 상시담수보다 산화환원전위를 높게 유지했던 반면, 표토 15 cm 깊이는 물관리조건에 관계없이 모든 처리에서 일정한 환원상태를 나타냈으며, 생육진전에 따라 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다 (Fig. 2).

벼 재배기간 동안 평균 토양 pH 변화에 있어, 상시담수는 6.0 - 7.0 범위를 나타냈고, 간단관개는 5.7 - 7.1 범위를 유지하였다. 상시담수가 간단관개에 비해 pH가 다소 높게 나타났지만, 벼의 전생육기간 동안의 pH 변화 경향은 거의 비슷함을 확인할 수 있었다 (Fig. 3). 논토양에서 관개수 공급에 의한 담수조건은 토양의 환원상태를 조장함으로써, 건조토양에 비해 토양 pH가 상승하는 현상을 보인다 (Lindsay, 1979; Kim et al., 2006). 본 연구결과에서도 토양이 담수

Fig. 3. Changes in the pH of 5 cm soil depth under water management conditions of the continuously flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD).

됨에 따라 pH는 증가하였고, 간단관개로 토양이 건조되면 pH가 다시 낮아짐을 관찰할 수 있었다. 그러나 간단관개에 의한 pH 변화는 토양이 건조되어가는 진행단계에 따라 서서히 일어남을 확인할 수 있었다.

층위별 토양용액 중의 양분함량 변화 벼 재배기간 동안 토양 층위별 토양용액 중의 양분의 함량 변화는 Table 3과 같다. 표토 10 - 30 cm 깊이에서 질산태질소($\text{NO}_3\text{-N}$)의 농도는 이앙 초기에 $12.16 - 26.58 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 생육후기로 갈수록 토양용액 중에 거의 존재하지 않았다. 암모니아태질소($\text{NH}_4\text{-N}$)의 농도는 벼 재배기간 동안 1 mg L^{-1} 이하로 나타났으며, 질산태질소와 암모니아태질소의 농도는 물관리 방법별로 처리 간에 유의적인 차이가 없었다. 토양용액 중 인산(PO_4^{3-})의 농도도 1 mg L^{-1} 이하로 낮게 나타났다. Buresh et al., (2008)은 질소(N)가 산화조 건에선 주로 질산태로 존재한 반면, 환원조건에서는 암모니아태로 존재한다고 보고하였다.

Oh et al. (1964)과 Lee et al. (1984)은 우리나라 논토양에 존재하는 인산형태를 조사하여 보고하였다. 이들의 분석 결과에 의하면, 인산의 대부분이 철(Fe)과 결합된 인산-철 복합체로 토양 내에 다량 존재하고 있으며, 담수에 의한 환원상태에서 철의 해리가 가속화됨에 따라 인산의 해리 또한 증가하여 토양 중 수용성 인산함량이 증대된다고 보고하였다 (Oh et al., 1964; Lee et al., 1984). 표토층에서의 암모니아태질소와 인산함량이 낮게 나타난 이유는 벼 생육과 밀접한 연관이 있을 것으로 판단된다. 이는 벼의 생육진전에 따라 양분요구도가 점진적으로 증가되고, 이에 따라 토양 내 가용태인 수용성 양분들의 흡수 이용이 증대됨으로써, 암모니아태질소 및 인산함량이 감소되었을 것으로 생각된다 (Table 3).

비료의 3요소 중의 하나인 질소는 작물생장 및 발육에 가장 민감하게 적용되는 생육제한인자인 동시에, 지하유출로 인한 지하수의 수질저하와 더불어 비점오염원으로 여겨질 수 있는 양분이기도 하다 (Rivett et al., 2008; Long and Sun, 2012). 이러한 사회적 이슈로 인하여, 유럽 등 선진국에서는 음용수와 지하수의 질산태질소 수질기준을 10 mg L^{-1} 로 정하고 있으며, 우리나라도 농업용 지하수의 질산태질소 기준을 20 mg L^{-1} 로 정하고 있다 (Monteny, 2001; MOE, 2019). 토양 125 cm 깊이에서의 질산태질소의 함량이 $0.10 - 4.83 \text{ mg L}^{-1}$ 로 기준 이하를 나타냈으므로, 우리나라에서 벼 재배시 질산태질소의 지하유출은 환경 및 사회적으로 문제의 여지가 없을 것으로 판단된다.

토양의 산화환원전위에 영향이 적은 양이온인 칼륨(K), 칼슘(Ca) 그리고 마그네슘(Mg) 농도는 물관리 방법별로 처리 간에 큰 차이가 없었다 (Table 3). 토양에서 토양용액 중으로 해리되는 칼륨의 농도는 $\text{Soil-K} \rightleftharpoons \text{K}^+$, $\log K =$

Table 3. Changes in nutrient contents of the solutions extracted from different soil depths under water management conditions of the continuously flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD).

Soil depth (cm)	Treatment	WAT	Nutrient content (mg L ⁻¹)							
			NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ ³⁻	K	Ca	Mg	Fe	Mn
10	CF	1	20.74a	0.16a	-	4.61a	71.73ab	13.99cde	0.01c	0.23f
		3	0.15b	0.42a	ND	3.75a	29.70bc	6.90def	8.32bc	5.34d
		5	0.65b	ND	0.46a	0.86a	52.91abc	14.69bcd	20.95abc	9.77c
		7	0.89b	0.10a	0.08a	0.91a	74.08ab	20.68abc	30.16ab	13.18bc
		9	0.38b	0.11a	0.18a	0.32a	86.80a	25.86ab	38.09a	15.21ab
		11	0.18b	ND	ND	0.32a	92.69a	27.24a	38.02a	16.58a
		14	0.12b	ND	ND	0.08a	81.31a	23.23abc	24.49abc	13.30b
	AWD	1	22.19a	0.24a	-	12.65a	84.24a	18.61abc	0.01c	0.51ef
		3	0.24b	0.25a	0.29a	2.34a	14.25c	3.28ef	0.40c	2.12def
		5	0.83b	ND	0.09a	3.08a	9.75c	2.13f	0.64c	0.98ef
		7	1.27b	0.12a	ND	32.30a	33.77bc	6.77def	0.03c	0.62ef
		9	1.13b	0.10a	0.11a	5.45a	18.34c	4.06def	0.09c	1.08def
		11	0.22b	ND	0.34a	2.60a	23.62c	5.39def	6.86bc	3.93de
		14	ND	ND	0.17a	2.29a	19.86c	4.14def	0.05c	2.80def
30	CF	1	26.58a	0.11b	-	0.77a	59.31bcd	12.45bcd	ND	ND
		3	0.23b	0.05b	0.80a	1.78a	54.68cd	10.90cd	0.06c	0.25e
		5	ND	ND	0.67ab	1.80a	58.65bcd	12.08bcd	0.16c	1.34e
		7	0.45b	0.14b	0.41bc	1.58a	67.66abcd	13.51bcd	0.20c	2.78de
		9	0.11b	0.41a	0.28c	1.23a	80.28abc	16.31abc	0.94abc	5.43bcd
		11	0.17b	ND	0.19c	1.65a	93.67a	19.20a	1.08abc	8.63ab
		14	ND	ND	ND	0.93a	93.09a	19.42a	0.31bc	7.99abc
	AWD	1	12.16ab	ND	-	0.96a	57.30bcd	12.22bcd	ND	ND
		3	0.44b	0.06b	0.81a	0.79a	53.11cd	10.68cd	0.02c	0.11e
		5	ND	ND	0.45abc	1.10a	48.48d	10.27d	0.04c	0.82e
		7	0.45b	0.12b	0.11c	1.92a	58.64bcd	12.02bcd	0.10c	3.19de
		9	0.11b	0.12b	0.06c	0.76a	63.87bcd	13.36bcd	0.63abc	5.13cd
		11	0.32b	ND	0.08c	0.61a	78.90abc	16.25abc	1.49a	9.72a
		14	ND	ND	ND	0.78a	84.27ab	17.89ab	1.28ab	10.87a
55	CF	1	13.46a	1.36a	-	1.42a	31.90a	5.24a	ND	ND
		3	5.65a	0.06b	0.10ab	2.46a	54.23a	8.55a	0.04a	0.03c
		5	0.14a	0.05b	ND	2.44a	50.78a	8.27a	0.01a	0.04bc
		7	0.45a	0.14b	0.07ab	2.46a	52.36a	8.29a	0.02a	0.17abc
		9	0.10a	0.14b	0.09ab	2.21a	57.18a	9.39a	0.02a	0.47abc
		11	0.25a	ND	0.18a	2.77a	61.85a	10.35a	0.02a	0.90ab
		14	ND	ND	ND	2.15a	61.92a	10.73a	0.01a	0.97a
	AWD	1	14.12a	ND	-	2.17a	56.53a	9.44a	ND	ND
		3	0.84a	ND	ND	1.88a	54.58a	8.90a	0.02a	0.01c
		5	ND	ND	ND	2.93a	51.84a	8.65a	0.01a	0.04bc
		7	0.46a	0.15b	0.09ab	3.00a	51.37a	8.38a	0.01a	0.20abc
		9	0.28a	0.10b	0.08ab	2.34a	53.85a	9.01a	0.04a	0.34abc
		11	1.30a	ND	0.06b	2.20a	55.77a	9.33a	0.04a	0.46abc
		14	0.12a	ND	ND	2.38a	54.33a	9.16a	0.04a	0.46abc
125	CF	1	3.33ab	0.09a	-	0.35c	66.69a	8.19a	ND	ND
		3	3.00ab	ND	ND	1.11bc	87.25a	10.22a	0.02a	ND
		5	0.10b	0.09a	ND	1.96ab	83.02a	10.35a	0.01a	ND
		7	0.47b	0.18a	ND	2.47a	80.51a	9.73a	0.03a	0.03bc
		9	0.11b	0.15a	ND	1.04bc	82.14a	9.87a	0.01a	0.01e
		11	0.21b	ND	ND	0.77c	85.45a	10.15a	0.01a	0.01de
		14	4.83a	ND	ND	0.78c	79.70a	9.77a	0.01a	0.02de
	AWD	1	1.13ab	0.18a	-	0.38c	89.06a	11.24a	ND	ND
		3	1.64ab	ND	0.06a	0.70c	92.02a	11.08a	0.02a	ND
		5	1.30ab	ND	ND	0.53c	85.63a	10.55a	0.01a	ND
		7	0.94ab	0.16a	0.06a	1.36bc	81.52a	9.85a	0.01a	0.01de
		9	0.42b	0.14a	ND	1.01bc	83.27a	10.22a	0.01a	0.02cd
		11	0.15b	0.07a	ND	1.09bc	85.95a	10.42a	0.01a	0.03ab
		14	0.75b	ND	ND	0.34c	81.37a	9.92a	0.01a	0.05a

Means within a column followed by the same letters are not significantly different at the 5% level according to Duncan's multiple range tests. WAT, weeks after transplanting.

-3.00 식에 의해 39 mg L^{-1} 정도인데 (Lindsay, 1979), 생육기간 동안 표토 10 cm 깊이에서 농도가 대부분 5 mg L^{-1} 이하로 분석되어 벼가 토양용액 중으로 해리되는 칼륨의 대부분을 흡수하여 이용하는 것으로 판단된다. 필수 금속이온인 철 (Fe)과 망간 (Mn)은 토양의 산화환원전위에 크게 영향하는 인자이다. 철과 망간의 수용성함량은 토양의 환원에 따라 표토에서 10 - 30 cm 깊이까지는 증대되었을 뿐만 아니라, 생육후기로 갈수록 농도가 증가됨을 관찰할 수 있었다 (Table 3).

간단관개처리에 따라 산화상태를 나타낸 표토 10 cm 깊이에서는 간단관개보다 상시담수가 철과 망간의 농도를 유의적으로 높게 유지할 수 있었던 반면, 표토 30 cm 깊이에서는 물관리방법 간에 통계적인 차이가 없었다 (Table 3). 논 토양에서 표토하층부는 쉽게 산소가 고갈되고, 유기물분해에 의해 생성된 전자의 수용체로 질소가 더불어 철과 망간이 이용됨으로써, 우선적으로 질산태질소가 소멸되지만 환원된 철과 망간의 농도는 증가하게 된다 (Sposito, 2008). 그렇지만, 토층 55 - 125 cm 깊이에서는 토양용액 중에 철과 망간의 농도가 거의 존재하지 않았으며, 이러한 결과는 작토층 하부로 토심이 깊어질수록 다시 산화상태를 유지하는 것으로 판단된다.

벼 수량 및 양분흡수 특성 물관리 방법에 따른 벼짚의 생체량 및 벼 정조 수량은 Fig. 4와 같다. 벼짚의 생체량은 상시담수와 간단관개 처리에서 각각 $6,062$ 와 $5,205 \text{ kg ha}^{-1}$ 로 상시담수조건에서 다소 높게 보였지만, 처리구 간에

Fig. 4. Comparison on the rice straw weight and grain yield under water management conditions of the continuously flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD) after harvesting rice plants. * $p < 0.05$. ns, not significant. Statistical significance was determined by t-test.

Table 4. Comparison on the macro-element content of rice straw and grain under water management conditions of the continuously flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD) after harvesting rice plants.

Rice organ	Treatment	Nutrient content (g kg^{-1})				
		N	P	K	Ca	Mg
Rice straw	CF	4.41	1.21	18.14	4.08	1.33
	AWD	4.44	0.74	16.28	3.46	1.26
	P-value	0.958 ^{ns}	0.012*	0.026*	0.013*	0.301 ^{ns}
Grain	CF	8.90	2.42	3.29	0.46	1.12
	AWD	8.33	2.27	3.15	0.40	1.02
	P-value	0.095 ^{ns}	0.352 ^{ns}	0.473 ^{ns}	0.200 ^{ns}	0.279 ^{ns}

* $p < 0.05$. ns, not significant. Statistical significance was determined by t-test.

유의적인 차이는 없었다. 그렇지만, 벼 정조는 상시담수에서 $7,966 \text{ kg ha}^{-1}$ 로 간단관개 $6,089 \text{ kg ha}^{-1}$ 보다 유의적으로 높은 수량을 나타냈다 (Fig. 4).

벼 식물체의 부위별 양분흡수량은 Table 4와 같다. 질소와 마그네슘의 흡수량은 벼짚 및 정조에서 상시담수와 간단관개 조건 간에 통계적인 차이가 없었다. 또한 인, 칼륨 및 칼슘의 흡수량은 정조에서는 물관리 처리 간에 차이가 없었던 반면, 벼짚에서는 간단관개보다 상시담수에서 유의적으로 높게 나타났다. 토양의 산화환원전위에 크게 영향을 미치는 철과 망간의 흡수량은 두 원소 상호 간에 상이한 반응을 나타냈다. 벼짚의 철함량은 간단관개보다 상시담수에서 약 1.47배가 높게 흡수되었던 반면, 망간함량은 오히려 상시담수보다 간단관개에서 약 1.13배가 높게 흡수됨을 확인할 수 있었다 (Fig. 5A). 그렇지만, 정조의 철과 망간함량은 물관리 조건별로 유의적인 차이가 없었다 (Fig. 5B). 이상의 결과에서 상시담수로 인한 토양환원이 토양용액 내 철의 해리도를 증진시킴으로써, 작물체 내로의 흡수량을 높였지만, 상보적 이온인 망간의 흡수는 길항하는 것으로 판단된다 (Alam, 1985; Tanaka and Navasero, 1966).

간단관개는 벼 재배기간 중의 물 절약 기술로 널리 사용되는 방법이다. Carrijo et al. (2017)는 이전 연구들을 종합적으로 비교한 결과에서 간단관개 처리가 상시담수에 비해 물 사용량을 평균 25.7% 줄일 수 있었지만, 벼 수량은 간단관개 처리에서 평균 5.4%의 수량 감소를 야기한다고 보고하였다. 또한 양분적인 측면에서, Seng et al. (1999)은 벼

Fig. 5. Comparison on the iron (Fe) and manganese (Mn) content of rice straw (A) and grain (B) under water management conditions of the continuously flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD) after harvesting rice plants. * $p < 0.05$. ns, not significant. Statistical significance was determined by t-test.

Fig. 6. Changes in the temperature of 10 cm soil depth under water management conditions of the continuously flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD).

재배기간 동안의 담수로 철의 해리가 용이해짐에 따라 철과 결합한 인산의 해리 또한 증가하여 토양 중 수용성 인산함량이 증대되지만, 토양이 다시 산화상태로 건조하게 되면 인산이 다시 고정되면서 인산의 흡수를 저해하여 벼 생육이 저해된다고 보고하였다. 본 연구에서도 인산의 흡수량이 상시담수에서 간단관개보다 높았고, 벼 수량도 높게 나타났다 (Fig. 4). 또한 Zhang et al. (2019)은 유수형성기의 낮은 토양온도는 벼 뿌리의 수분흡수를 저하시키고, 낮은 비료 이용효율과 벼 수량 감소를 나타낸다고 보고하였다. 벼 생육단계별 토양온도의 모니터링 결과에서 고온기인 유수형성기의 최고온도가 간단관개에서 상시담수보다 $0.3 - 0.7^{\circ}\text{C}$ 높았음에도 불구하고, 최저온도는 오히려 $0.5 - 0.9^{\circ}\text{C}$ 낮게 나타났다. 이상의 결과는 간단관개가 상시담수에 비해 토양의 온도변화에 민감하게 반응했다는 것을 제시함과 더불어, 지온 일교차가 벼 수량감소의 하나의 주요한 원인으로 작용할 수 있었을 것으로 판단된다 (Fig. 4, 6).

Conclusions

본 연구는 물관리 방법이 토양조건 변화 (Eh, pH) 및 양분해리 특성, 벼의 양분 흡수에 영향을 미치는지 평가하기 위하여, 비교관 중량식 라이시미터에서 2015년 6월부터 10월까지 벼를 재배한 결과를 제시하였다. 표토 5 cm의 산화환원전위는 상시담수조건에서 급속히 낮아지기 시작하여 $-260 \sim -200 \text{ mV}$ 정도에서 유지되었으며, 간단관개처리 (AWD)에서는 산화상태를 나타냈다. 표토 10 cm의 산화환원전위는 상시담수조건보다 간단관개처리에서 상대적으로 높은 수준을 나타냈지만, 환원상태는 유지되었다. 표토 15 cm에서는 물관리 방법별로 차이가 없었다. 토양 pH 변화는 상시담수는 6.0 - 7.0 범위를 나타냈고, 간단관개는 5.7 - 7.1 범위를 유지하였다. 토양용액 중의 양분의 함량 변화는 표토에서 질산태질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$)의 농도는 이앙초기에 가장 높았으며, 생육후기로 갈수록 토양용액 중에 거의 존재하지 않았다. 암모니아태질소 ($\text{NH}_4\text{-N}$)와 인산 (PO_4^{3-})의 농도는 벼 재배기간 동안 1 mg L^{-1} 이하로 낮게 나타났다. 철과 망간의 수용성함량은 토양의 환원에 따라 생육후기로 갈수록 농도가 증가하였다. 벼 정조 수량은 간단관개보다 상시담수조건에서 높게 나타났다. 벼 부위별 양분흡수량에서 질소와 마그네슘은 모든 부위 (벼짚 및 정조)에서 상시담수와 간단관개 조건 간에 차이가 없었다. 인, 칼륨 및 칼슘의 흡수량은 정조에서는 물관리 처리 간에 차이가 없었지만, 벼짚에서는 간단관개보다 상시담수에서 높게 나타났다. 철과 망간의 흡수량은 두 원소 상호 간에 상이한 반응을 나타냈다. 벼짚의 철함량은 간단관개보다 상시담수에서 높았으나, 망간함량은 오히려 상시담수보다 간단관개에서 높은 결과를 보였다. 그렇지만, 정조의 철과 망간함량은 물관리 조건별로 유의적인 차이가 없었다. 따라서, 간단관개 처리에 따른 작물체 내로의 인산흡수저해와 상시담수에 비해 상대적으로 높은 지온 일교차가 벼 수량감소의 주요한 원인으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No.PJ014262)”, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

Alam, S.M., 1985. Effects of iron and manganese on the growth of rice and on the contents of these elements in rice

- plants. *Agronomie*. 5(6):487-490.
- Blake, G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk density in methods of soil analysis, part 1. Klute, A. (ed.). Monograph No. 9, ASA, Madison, Wisconsin, USA.
- Bouman, B.A.M., R.M. Lampayan, and T.P. Tuong. 2007. Water management in irrigated rice: coping with water scarcity. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.
- Brus, D.J. and I.G.A.M. Noij. 2008. Designing sampling schemes for effect monitoring of nutrient leaching from agricultural soils. *Eur. J. Soil Sci.* 59:292-303.
- Buresh, R.J., K.R. Reddy, and C. van Kessel. 2008. Nitrogen transformations in submerged soils. p. 401-436. J.S. Schepers, W.R. Raun (Eds.), Nitrogen in agricultural systems, Agronomy monograph 49, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Carrijo, D.R., M.E. Lundy and B.A. Linquist. 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: a meta-analysis. *Field Crops Research*. 203:173-180.
- Cho, J.Y., K.W. Han, J.K. Choi, Y.J. Kim and K.S. Yoon. 2002. N and P losses from a paddy field plot in Central Korea. *Soil Sci. Plant Nutr.* 48(3):301-306.
- FAO. FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/> (accessed Oct 28, 2019).
- Flessa. H. and W. Fischer. 1992. Plant-induced changes in the redox potentials of rice rhizospheres. *Plant Soil*. 143:55-60.
- Husson, O. 2013. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant Soil*. 362:389-417.
- Jia, X., L. Shao, P. Liu, B. Zhao, L. Gu, S. Dong, S.H. Bing, J. Zhang, and B. Zhao. 2014. Effect of different nitrogen and irrigation treatments on yield and nitrate leaching of summer maize (*Zea mays* L.) under lysimeter conditions. *Agric Water Manage.* 137:92-103.
- Jung, G.B., S.C. Hong, M.K. Kim, M.H. Kim, S.K. Choi, and K.H. So. 2016. Input and output budgets for nitrogen of paddy field in South Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(1):60-65.
- Kim G.H., K.Y. Kim, J.G. Kim, D.M. Sa, J.S. Seo, B.G. Son, J.E. Yang, K.C. Eom, S.E. Lee, G.Y. Jeong, D.Y. Jeong, Y.T. Jeong, J.B. Jeong, and H.N. Hyun. 2006. Soil science. Hyangmunsa, Seoul, Korea.
- Lee, S.K., S.B. Ahn, and K.H. Park. 1984. Studies on the suitable paddy soil for application of rice straw. *Korean J. Soc. Soil Sci. Fert.* 17(2):101-107.
- Lee, Y.J., K.H. Han, S.B. Lee, J.K. Sung, Y.S. Song and D.B. Lee. 2017. Nutrient leaching and crop uptake in weighing lysimeter planted with soybean as affected by water management. *Korean J. Environ Agric.* 36(3):147-153.
- Lindsay, W.L. 1979. Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Long, G.Q. and B. Sun. 2012. Nitrogen leaching under corn cultivation stabilized after four years application of pig manure to red soil in subtropical China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 146:73-80.
- Maclean, J.L., D. Dawe, B. Hardy, G.P. Hettel. 2002. Rice almanac, 3th ed., CABI Publishing, Oxon OX10 8DE, UK.
- Matteson, A.R., D.J. Mahoney, T.W. Gannon, and M.L. Polizzotto. 2014. Integrated field lysimetry and porewater sampling for evaluation of chemical mobility in soils and established vegetation. *J. Vis. Exp.* (89), e51862.
- Meissner, R. and M. Seyfarth. 2004. Measuring water and solute balance with new lysimeter techniques. Paper presented at Super Soil, 3rd Australian and New Zealand Conference, University of Sydney.
- Meißner, R., M.N.V. Prasad, G. Du Laing, and J. Rinklebe. 2010. Lysimeter application for measuring the water and solute fluxes with high precision. *Curr. Sci. India.* 99(5):601-607.
- Ministry of Environment (MOE). 2017. Standard method for the examination of water pollution.
- Ministry of Environment (MOE). 2019. Regulation related to water quality conservation for groundwater.
- Monteny, G.J. 2001. The EU nitrate directive: a European approach to combat water pollution from agriculture. *The Scientific World*. 1(S2):927-935.

- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Fertilizer application recommendations for crop plants. RDA, Suwon, Korea.
- Nakasone, H., M.A. Abbas, and H. Kuroda, 2004. Nitrogen transport and transformation in packed soil columns from paddy fields. *Paddy Water Environ.* 2(3):115-124.
- National Research Council. 1993. Soil and water quality. National Academy Press, Washington, D.C., USA
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 1988. Methods of soil chemical analysis. RDA, Suwon, Korea.
- Oh, W.G. and S.H. Shin. 1964. RDA research report. RDA, 7-1 p. 25-30, Suwon, Korea.
- Peng, S.Z., Y. He, S. Yang, and J. Xu. 2014. Effect of controlled irrigation and drainage on nitrogen leaching losses from paddy fields. *Paddy Water Environ.* 13:303-312.
- Pirmoradian, N., A.R. Sepaskhah, and M. Maftoun. 2004. Effects of water-saving irrigation and nitrogen fertilization on yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Prod Sci.* 7(3):337-346.
- RDA (Rural Development Administration). 2012. Analysis standard for research in agricultural science and technology, RDA, Suwon, Korea.
- Rivett, M., S.R. Buss, P. Morgan, S.W. Smith, and C.D. Bermment. 2008. Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling process. *Water Res.* 42(16):4215-4232.
- Rupp, H., R. Meissner, P. Leinweber, B. Lennartz, and M. Seyfarth. 2007. Design and operability of a large weighable fen lysimeter. *Water Air Soil Pollut.* 186:323-335.
- Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocki, E.C. Benham, and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska, USA.
- Seng, V., R.W. Bell, I.R. Willett, and H.J. Nesbitt. 1999. Phosphorus nutrition of rice in relation to flooding and temporary loss of soil-water saturation in two lowland soils of Cambodia. *Plant and soil.* 207:121-132.
- Seo, M.J., K.H. Han, K.H. Jung, H.R. Cho, Y.S. Zhang, and S.Y. Choi. 2016. Effect of temperature and plow pan on water movement in monolithic weighable lysimeter with paddy sandy loam soil during winter season. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(4):300-309.
- Shan, Y.H., L.Z. Yang, T.M. Yan, and J.G. Wang. 2005. Downward movement of phosphorus in paddy soil installed in large-scale monolith lysimeters. *Agr Ecosyst Environ.* 111:270-278.
- Sposito, G., 2008. The chemistry of soil. 2nd ed., Oxford University Press, NY, USA.
- Sun, H.J., H.L. Zhang, Z.M. Yu. 2013. Combination system of full-scale constructed wetlands and wetland paddy fields to remove nitrogen and phosphorus from rural unregulated nonpoint sources, *Environ Geochem Hlth.* 35(6):801-809.
- Tan, X.Z., D.G. Shao, H.H. Liu, F.S. Yang, C. Xiao, and H.D. Yang. 2013. Effects of alternate wetting and drying irrigation on percolation and nitrogen leaching in paddy fields. *Paddy Water Environ.* 11:381-395.
- Tanaka, A. and S.A. Navasero. 1966. Interaction between iron and manganese in the rice plant. *Soil Sci Plant Nutr.* 12(5):29-33.
- Van Chinh, L., K. Hiramatsu, M. Harada, and M. Mori. 2008. Nitrogen and phosphorus runoff modeling in a flat low-lying paddy cultivated area. *Paddy and Water Environ.* 6(4):405-414.
- Wang, M., S. Yu, G. Shao, S. Gao, J. Wang, and Y. Zhang. 2018. Impact of alternate drought and flooding stress on water use, and nitrogen and phosphorus losses in a paddy field. *Pol. J. Environ. Stud.* 27(1):345-355.
- Zhang, J., P. Dong, H. Zhang, C. Meng, X. Zhang, J. Hou, and C. Wei. 2019. Low soil temperature reducing the yield of drip irrigated rice in arid area by influencing anther development and pollination. *J. Arid Land.* 11(3): 419-430.
- Zotarelli, L., J.M. Scholberg, M.D. Dukes, and R. Munoz-Carpena. 2007. Monitoring of nitrate leaching in sandy soils: comparison of three methods. *J. Environ. Qual.* 36:953-962.