

논에서 담수가 토양 산화·환원전위 변화와 인의 용출에 미치는 영향

Effect of Ponded Water on Variation of Redox Potential and Phosphorus Concentration in a Paddy Field

김영현* , 김진수** , 장훈***

Young Hyeon Kim , Jin Soo Kim , Hoon Jang

요 지

본 연구의 목적은 충북대학교 부속농장에서 2009년 영농기간을 중심으로 담수된 논에서의 산화환원전위(Eh)의 변화와 시비에 따라 영양물질인 인(P)의 농도변화 특성을 파악함으로써, 논으로부터의 인의 유출제어에 관한 기초 자료를 제공하는데 있다.

이 연구는 2009년 5월부터 11월까지 논에서 담수의 총인(T-P)과 인산염 인(PO_4 -P)의 농도변화와 토양의 산화환원전위(Eh)와의 관계 특성을 파악하였다.

관개기의 논에서 인은 분얼비 시기에 인성분이 시비되지 않았는데도 불구하고 T-P농도가 0.68 mg/L로 높게 나타났다. 이는 담수의 영향으로 논이 환원상태로 되어, 논바닥에 침전된 철이온에 흡착되어 있던 인이 철이온의 환원으로 함께 용출하기 때문이라고 생각된다.

높은 Eh는 산화경향을, 낮은 Eh는 환원경향을 나타낸다. 본 연구기간 동안의 Eh 값은 연속적으로 담수되었던 7월 중순까지는 74~112 mV 가량 나타났고, 그 이후에는 담수상태가 아닌 경우가 많아 179~636 mV로 높게 나타났다.

논 담수의 T-P와 PO_4 -P 농도는 분얼비 직후 1주일후까지 같이 상승하다가 T-P농도는 약 2주일까지 더 상승한 반면 PO_4 -P 농도는 하강하였는데 이는 논 토양이 환원상태로 되면서 바닥에 있던 입자성 인이 논 표면으로 떠올랐기 때문으로 사료된다. 그 후에는 담수가 끝나는 시점까지 인 농도는 낮아졌다.

관개초기에 인의 농도는 비교적 높게 나타났지만, 7월 이후로는 작물의 생장에 필요한 영양물질 섭취 등으로 인 농도가 낮게 나타났는데 이는 7월 이후의 논은 인의 유출을 억제하고 있는 것으로 추정된다. 또한 논 담수위의 증감에 따른 PO_4 -P 농도와 Eh 값을 회귀분석 한 결과 각각 정의 상관관계와 부의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 논 담수 및 시비에 따른 인의 유출부하 특성과 산화환원전위(Eh)의 변화 특성이 규명된다면, 향후 환경부하가 작은 물관리가 가능해 질 것으로 판단된다.

핵심용어 : 총인(TP), 인산성 인(PO_4), 산화환원전위(Eh), 논 담수, 분얼비

1. 서 론

* 정희원 · 충북대학교 지역건설공학과 석사과정 · E-mail : hyde292513@naver.com

** 정희원 · 충북대학교 지역건설공학과 교수 · E-mail : jskim@chungbuk.ac.kr

*** 정희원 · 충북대학교 지역건설공학과 석사과정 · E-mail : dgaia@chungbuk.ac.kr

호소수에는 여러 영양물질이 다양한 형태로 존재하는데 인은 호소의 부영양화를 제어할 수 있는 제한 인자로도 알려져 있다(Kim et al., 1994). 호수 퇴적물에서 인용출은 혐기성 상태가 호기성 상태보다 높다고 보고하였으며(Kim et al., 1994), 혐기성 상태에서 pH값이 높을 경우 호수 침전물로 부터 인의 용출이 증가한다고 한다(Istvanovics, 1994).

논은 관개와 낙수라는 특수한 물관리가 이루어지기 때문에 동일한 논이라도 시비량, 시비방법, 시비시기, 관개용수 및 강우의 양과 성분등의 인위적인 요소들이 영양물질 유출량에 크게 영향을 주고 있다(Yoon et al., 2002). 일본에서 Tabuchi et al. (1979)가 논에서의 질소, 인의 농도 및 그 유출입을 조사하였고, 한국에서는 Cho et al. (2006)가 관개기 시험구 논에서 오염물질의 농도 특성을 연구하였다. 논에서 분얼기에 인이 투여되지 않았음에도 불구하고 분얼비 직후 인의 농도가 증가하는 현상은 기존의 연구(Kim et al., 2001; Cho et al., 2006)에서 보고되었다.

습지에서 토양은 산화환원전위(Eh)가 낮은 환원상태이거나 pH가 높은 혐기성 상태일 경우 철이 온에 결합되어 있던 인이 수체로 이동한다고 보고하였다(Vepraskas and Faulkner, 2001).

이에 본 연구에서는 2009년 영농기간을 중심으로 논에서의 Eh 및 인(P) 농도 변화 특성을 파악함으로써, 토양의 산화 환원 변화에 따른 논에서의 인의 거동에 관한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 시험구의 개요

본 연구는 2009년 5월부터 11월까지 충북대학교 부속농장에 조성된 필지논(75 m × 30 m)을 대상으로 수행되었다. 용수는 부속농장 근처에 있는 소류지에서 공급되었는데, 소류지에는 부속농장을 포함한 유역으로부터의 유출수가 유입되고 있다. 필지논에는 원통형 증발산량계, 침투량계 및 감수심계를 설치하였다(Fig. 1).

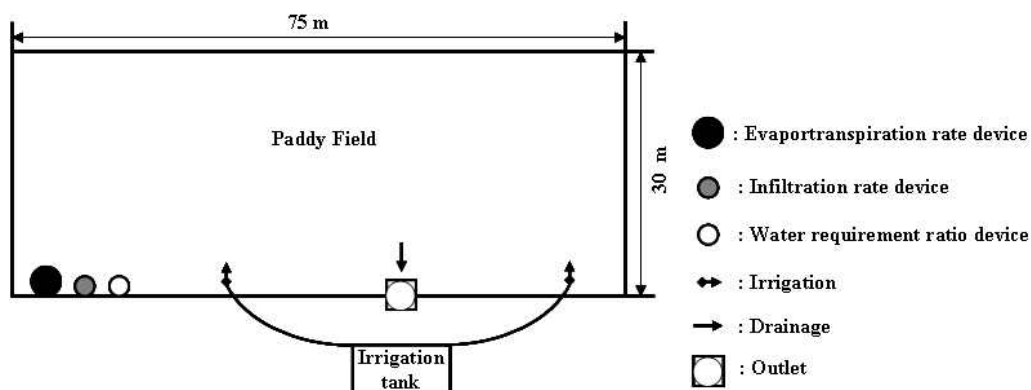


Fig. 1 Schematic of the experimental paddy field

2.2 영농활동 및 시비현황

필지논의 공시품종은 일품벼로 재식밀도 15 × 30 cm로 기계이앙하였으며, 1주(株)당 3~4본씩 식재하였다. 이앙은 5월 하순에, 추수는 10월 초순에 실시하였고, 시비는 기비, 분얼비 및 수비의 3단계로 실시되었으며, 시비시기는 각각 Table 1과 같이 시용(施用)되었다. 시비량은 표준시비량으

로 10a 당 N : P₂O₅ : K₂O = 11 : 4.5 : 5.7 kg으로 하였고, 질소는 기비, 분얼비, 수비를 각각 57.6, 24.7, 17.7%의 비율로 시비하였으며, 인은 전량 기비로 하였다(Table 1).

Table 1 Fertilizer application rates and timing in a paddy field in 2009

Fertilization	Date	Nitrogen (kg/10a)	Phosphorus (kg/10a)	Remark
Basal dressing	May 22	6.35	2.25	Transplanting : May 27 Harvest : Oct 9
Tillering fertilization	Jun 11	2.72	-	
Panicle fertilization	July 25	1.95	-	
Total		11.02	2.25	

2.3 측정 및 실험방법

강우량은 논에서 약 1km 거리에 있는 청주기상대의 2009년 5월~11월까지 데이터를 사용하였고, 증발산량은 원통형 증발산계, 증발산량과 심층침투량의 합으로 원통형 감수심계, 심층침투량은 원통형 침투량계를 이용하여 강우시를 제외하고 2~3일 간격으로 측정하였다. 산화환원전위(Eh)와 토양 온도는 지하 5 cm지점을 2~5일 간격으로 측정하였다. Eh는 산화환원전극(multi-parameter analyser 18.28, Eijkelkamp)을 이용하여 측정하였는데, 산화환원전극은 토양 온도의 영향을 받기 때문에 Eh는 산화환원전극의 측정값에 온도보정 값을 더하여 구하였다. 논 표면수의 담수위, 온도, pH, DO(용존산소)의 측정 및 채수는 농도변화가 심한 1개월간(5월 하순~6월 하순)은 2~3일 간격, 그 외의 기간에는 5~7일 간격으로 3곳에서 실시하여 그 평균값을 구하였다. 논 표면수의 수질항목은 총인(T-P)와 인산염 인(PO₄-P)를 대상으로 하였으며, 환경부 공정시험법(Ministry of Environment, 1997)에 의한 흡광광도법으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 논 담수의 인(P)의 농도변화

측정기간 동안 T-P와 PO₄-P의 산술평균농도는 각각 0.34와 0.04 mg/L로 PO₄-P는 T-P에 비하여 낮게 나타났다. T-P 농도는 기비 직후 0.76 mg/L, 분얼비 직후에 0.68 mg/L까지 상승하였다. T-P와 PO₄-P 농도는 기비 이후 증가하다가 이양 후에 감소하는 경향을 보였고, 분얼비 직후 1주일 후까지 다시 상승하다가 T-P 농도는 약 2주일까지 더 상승하여 0.68 mg/L 까지 상승한 반면에 PO₄-P 농도는 하강하는 경향을 보였다(Fig. 3). 그 후에 인 농도는 점점 담수가 끝나는 시점까지 농도가 낮아지는 경향을 보였는데 이는 질소와 마찬가지로 작물의 성장에 의한 영양물질 섭취로 인한 결과로 판단된다. 이와 비슷하게 분얼비 직후에 T-P 농도는 상승하여 충북대학교의 시험구 논(Cho et al., 2006)에서는 0.38~0.95, mg/L, 충북 청원군 소로지구의 논(Kim et al., 2001)에서는 0.45~0.60 mg/L의 값을 나타냈다.

3.2 총인에 대한 인산성 인의 비 (PO₄-P/TP)

논표면수에서의 평균 PO₄-P/TP 비는 0.12를 보였는데, 이는 TP의 대부분이 입자성인므로 존재하고 있음을 보여준다. 기비후 0.16의 값을 보인 후 0.10 전후의 값을 보이다가, 분얼비 직후 0.18

의 최대값을 보였다. TP 농도가 최대값을 나타낸 6월 하순경에서 0.07의 최소값을 나타냈는데, 이는 이 때 입자성인의 비율이 매우 높은 것을 의미한다. 7월 이후 PO₄-P/TP 비는 다시 상승하기 시작하여 0.10 이상의 값을 나타냈다(Fig. 4). PO₄-P/TP 비가 0.10 미만인 분얼비 시비 1주~2주일 사이인 6월 하순에는 입자성인이 용존성 인보다 월등히 많다는 것을 알 수 있다.

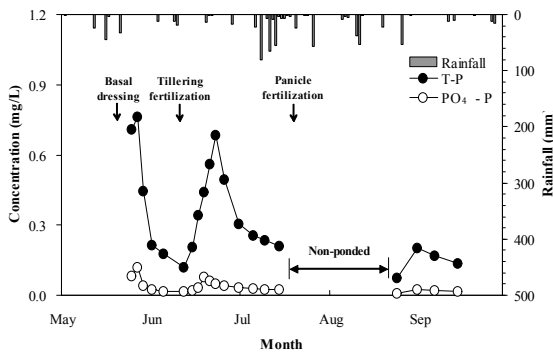


Fig. 3 Temporal variation of Phosphorous concentrations in ponded water

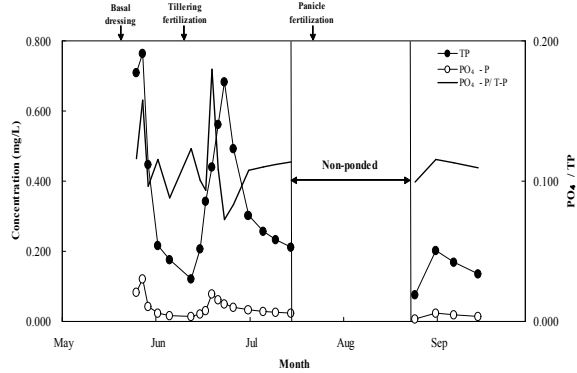


Fig. 4 Temporal variation of ratio of PO₄-P to T-P

3.3 Eh 및 PO₄-P 농도와 담수심과의 관계

Eh는 높아지면 산화경향을, 낮아지면 환원경향을 나타내는 것을 의미한다. 논에서의 Eh는 논 담수위의 변동에 따른 영향으로 일정한 값을 보이지는 않지만, 논 토양의 Eh와 담수위 관계를 회귀분석한 결과 신뢰도 99% 이상의 유의성을 가지며, 담수위가 높을 수록 Eh의 값은 낮은 환원의 경향을 보였다(Fig. 5). 그리고 담수위와 논 표면수의 PO₄-P농도 관계에서는 담수위가 높을 수록 PO₄-P의 농도가 높게 나타났다(Fig. 6). 이 결과로 보아 논에 담수를 실시하면 토양의 Eh는 낮아져 환원상태로 변하고, 수소이온(H⁺)이 감소하여 pH를 증가시킬 것으로 판단된다.

퇴적물에 존재하는 인은 혐기성 상태에서 pH가 높을 경우 철이나 알루미늄 등과 결합되어 있던 인이 환원되면서 인산염이 수체로 이동되어 인의 용출이 증가하여 호소의 부영양화를 유발하며 (Istvanovics, 1994), 인은 토양과 담수의 경계면이 혐기성 상태인 경우가 호기성 상태인 경우보다 약 1,000배 정도 빠르게 용출되는 것으로 보고한바 있다(Horne and Goldman, 1994).

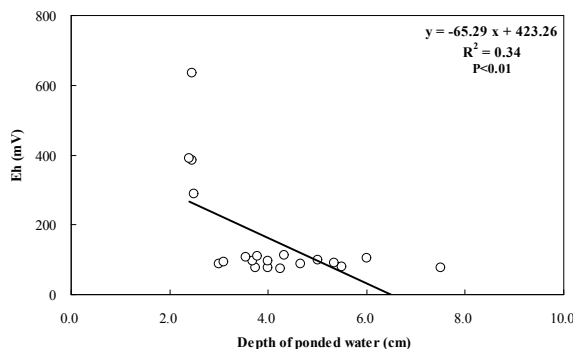


Fig. 5 Relationship between Redox Potential and Depth of ponded water

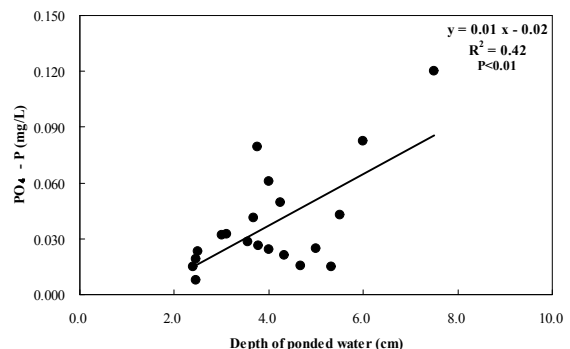


Fig. 6 Relationship between PO₄-P and Depth of ponded water

3.4 Eh와 T-P의 변화

관개기 논에서 분얼비 시기에 인성분이 시비되지 않았는데도 불구하고 농도가 상승하는 경향을 나타냈는데 이는 담수의 영향으로 논이 환원상태로 되어, 논 바닥에 침전된 철이온에 흡착되어 있던 인이 철이온의 환원으로 함께 용출하기 때문이라고 생각된다.

토양의 Eh 값은 연속적으로 담수되었던 7월 중순까지는 74~112 mV 가량 나타났고, 그 이후에는 담수상태가 아닌 경우가 많아 토양이 매우 건조해져 179~636 mV로 높은 값을 나타냈다(Fig. 7). 논은 관개가 시작되면서 논 토양이 환원경향을 띄기 때문에 Eh는 낮은 값(평균 91 mV)을 보였으며, 연속적인 담수가 끝나는 시점부터 다시 상승하여 측정이 끝날때까지 높은 값(평균 448 mV)을 유지하였다.

분얼비 약 2주일 후에 Eh 값은 74 mV로 가장 낮은 값을 나타냈고, 이때 T-P 농도는 0.68 mg/L의 높은 값을 보였다(Fig. 7). 이는 논 토양이 환원상태로 되면서 바닥에 있던 입자성 인이 논 표면으로 재부유했기 때문에 T-P의 농도가 높은 것으로 추정되며, 또한 물벼룩·조류 등 다른 유기물에 의한 영향도 있을 것으로 판단된다. 따라서 논에서 서식하는 유기물과 인 농도에 관한 메커니즘을 추후 실험을 통하여 규명할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 2009년 5월~11월까지 영농기간을 중심으로 논에서 담수의 인 농도와 토양의 산화환원전위의 변화 특성을 파악하였다.

1. 분얼비 시비 후인 6월 하순에 Eh는 100이하의 낮은 값을 나타냈고, T-P 농도는 0.68 mg/L의 높은 값을 보인 반면 PO₄-P 농도는 낮아지는 경향을 보였다. 이는 담수의 영향으로 논 토양이 환원상태로 되면서 논 바닥에 침전되어 있던 입자성 인이 논 표면으로 재부유했기 때문으로 사료되며, 또한 물벼룩·조류 등 다른 유기물에 의한 영향도 있을 것으로 생각된다. 따라서 논에서 서식하는 유기물과 인 농도에 관한 메커니즘을 추후 실험을 통하여 규명할 필요가 있다고 판단된다.

2. 담수위가 높을 수록 토양의 Eh 값은 낮은 부의 상관관계를 나타냈고, PO₄-P 농도는 담수위가 높을 수록 증가하는 정의 상관관계를 보였다. 이 결과로 보아 논에 담수를 실시하면 토양의 Eh는 낮아져 환원상태로 변하고, 수소이온(H⁺)이 감소하여 pH를 증가시킬 것으로 추정되며, 또한 논 담수위의 증감이 인 용출에도 영향을 끼칠 것으로 판단된다.

3. 논에서 인은 분얼비 시기에 인성분이 시비되지 않았는데도 불구하고 분얼비 시비후 용출되는 경향을 보였으며, 이후 인은 담수가 끝나는 시점까지 농도가 낮아졌다. 이는 대부분 작물에 흡수되기 때문에 인 농도가 낮아지는 것이라 판단된다. 따라서, 논은 인의 유출을 억제하고 있는 것으로 사료되며, 이와같이 논 담수위 증감과 담수의 유무에 따른 논에서 산화환원전위의 변화와 인 형태 변화 및 유출부하 특성이 규명된다면, 향후 친환경적인 물관리가 가능해 질 것으로 생각된다.

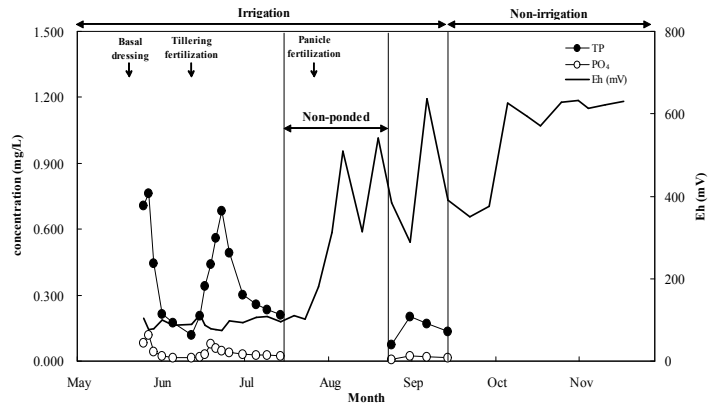


Fig. 7 The variation of Eh and T-P concentration in the ponded water

참 고 문 헌

1. 김범철, 박주현, 전상호(1994). 호수가두리양어장 퇴적물 및 어류배설물의 인 조성과 용출에 관한 연구, 한국하천호수학회 논문집, 제27권 제3호, pp. 275-283
2. Vera Istvanovics.(1994). Fractional composition, adsorption and release of sediment phosphorus in the Kis-Balaton reservoir, Water Research 28(3), pp. 717-726
3. 윤광식, 한국현, 조재영, 최창현, 손재권, 최진규(2002). 양수장지구 광역논으로부터 영농기간 영양물질수지의 유출 및 물질수지, 한국농촌계획학회지 제8권 제1호, pp. 15-25
4. Tabuchi, T., T. Takamura, H. Kubota, and S. Suzuki(1979). Concentrations of nitrogen and phosphorus in paddy field, Trans. Jpn. Soc. Irrig. Drain. Reclam. Engrg. 47(11), pp. 859-864
5. 조재원, 김진수, 오광영, 오승영(2006). 관개기 시험구 논에서의 오염물질의 농도특성, 한국농공학회논문집, 제48권 제3호, pp. 97-106
6. 김진수, 오승영, 김규성, 권순국(2001). 관개기 광역논에서의 오염물질의 농도특성, 한국농공학회지, 제43권 제6호, pp. 163-173.
7. Vepraskas, M. J., and S. P. Faulkner(2001). Redox chemistry of hydric soils, Ed. Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification, CRC Press LLC, pp. 85-105
8. Horne, A. J., and C. R. Goldman(1994) Limnology, McGraw-Hill, pp. 155~163