Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
Vol. 52, No. 5, pp. 47~52, September, 2010
DOI: 10.5389/KSAE.2010.52.5.047

영농기 필지논에서의 인 (P) 농도와 산화환원전위 (Eh)의 변화 특성

Variation of Phosphorus Concentration and Redox Potential in a Paddy Field Plot During Growing Season

김영현* · 김진수*,† · 장 훈*
Kim, Young Hyeon · Kim, Jin Soo · Jang, Hoon

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate characteristics of total phosphorus (TP) and phosphate phosphorous (PO_4-P) concentrations in ponded water and redox potential (Eh) in paddy soil during the growing season. The TP and PO_4-P concentrations showed twice peak values after basal dressing and tillering fertilization. The ratio of PO_4-P to TP showed low values (0.07～0.18), indicating that most of phosphorus is particlulate. The PO_4-P concentrations significantly decreased with dissolved oxygen (DO) concentrations. The Eh showed high values (179～636 mV) under non-ponded aerobic condition, but low values (74～112 mV) under ponded anaerobic condition The TP and PO_4-P concentrations in ponded water increased shortly after tillering fertilization even if phosphorus was not applied. This may be due to the release of dissolved phosphorus from the bottom sediment and its associated algal and water flea blooms under anaerobic condition. Therefore, proper water management should be needed shortly after tillering fertilization.

Keywords: Anaerobic condition; Dissolved oxygen; Tillering fertilization

I. 서 론

농경지에서 유출되는 인 (P)은 호소 부영양화의 제한인자로 작용하고 있어, 부영양화를 막기 위해서는 인의 제어가 매우 중요하다. 농지를 담수시켜 습지로 바꾸면 잔류된 인 (P)의 비료성분이 용해되어 표면수의 용존성 인 농도를 증가시킨다. 논은 관개배수가 이루어지고 있고, 동일한 논이라도 시비 (施肥, 거름주기)의 양과 시기, 용수량 등의 인위적인 요소들이 유출되는 인의 농도에 크게 영향을 주고 있다 (Yoon et al., 2002). 일본에서는 총인 (TP) 농도는 관개초기 기비의 영향으로 일시적으로 높은 값을 보인 후 낮아졌으나, 6월 초순 상승하는 것으로 보고되었다 (Feng et al, 2004). 우리나라에서는 대구획의 필지 논 (Kim et al., 2001)이나 관개기 시험구 논 (Cho et al., 2006)에서 영양물질의 농도를 조사하였는데, 분얼기 (새끼치기 시기)에 인 성분을 시용 (施用)하지 않았음에도 불구하고, 분얼비 후에 표면수에서 TP의 농도가 증가하는 현상이 보고되었다.

* 충북대학교 농업생명환경대학 지역건설공학과
† Corresponding author Tel.: +82-43-261-2573
Fax: +82-43-271-5922
E-mail: jskim@cbnu.ac.kr
2010년 6월 30일 투고
2010년 8월 19일 심사완료
2010년 8월 23일 게재확정

벼는 생육기간 중 상당기간 담수 상태에 있으므로 토양의 산화환원 조건이 변하며, 이러한 산화환원의 상태에 따라 표면수에 있던 인이 침전하거나 토양에 있는 인이 용출한다. 토양의 산화환원전위 (Eh)는 높을 경우 (300-600 mV) 산화 상태를, 낮을 경우 (300 mV 이하) 환원 상태를 나타낸다. 미국의 습지토양에서의 Eh는 비담수 조건하에서 600 mV 이상의 높은 값을 보였으나, 담수 조건하에서 100 mV 정도의 낮은 값을 나타냈으며, 토양의 Eh가 낮아질수록 토양의 pH가 높을수록 철 이온과 결합되어 있던 인이 분리되어 용해된다고 보고되었다 (Vepraskas and Faulkner, 2001). 논토양의 Eh는 담수의 영향을 크게 받아 시기별로 다르게 나타나는데, 이러한 Eh의 변화에 따른 논 표면수의 인 (P) 농도 변화 특성이 파악된다면 보다 친환경적인 논의 물관리가 가능해 질 수 있다.

이에 본 연구에서는 2009년 영농기간을 중심으로 필지 논에서의 Eh 및 인 (P) 농도 변화 특성을 파악함으로써, 토양의 산화환원의 변화에 따른 인의 거동을 파악하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 시험구의 개요

본 연구는 충북대학교 부속농장에 조성된 필지논 (75 m × 30 m)을 대상으로 수행되었다. 용수는 부속농장 근처에 있는

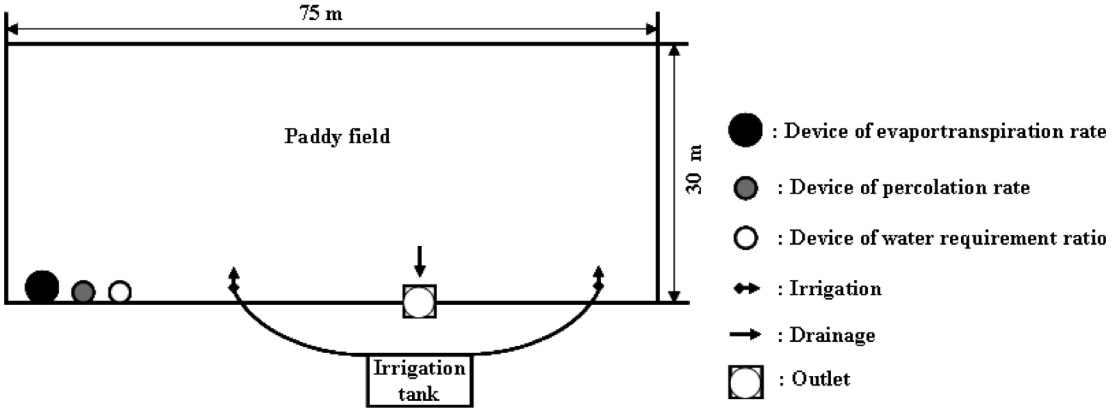

Fig. 1 Layout of the study paddy field

Table 1 Physical and chemical properties of the study paddy soil before irrigation season

Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	OM (%)	pH	TN (mg/kg)	TP (mg/kg)	CEC (cmol+/kg)	EC (coml+/kg)
79.4	14.1	6.5	0.78	5.3	432	301	35.2	100

소류지에서 공급되었는데, 소류지에는 부속농장을 포함한 유역으로부터의 유출수가 유입되고 있다. 필지논에는 원통형 증발산량계 (Ø 45 cm), 침투량계 및 감수심계 (Ø 30 cm)를 설치하였다 (Fig. 1). 필지 논토양은 입도분석 (KS 2302)에 의하여 모래 79.4 %, 실트 14.1 %, 점토 6.5 %로 나타나, 미국 농무성의 삼각좌표 분류법에 의해 사질양토 (loamy sand)로 판명되었다. 또한, 관개 전 논토양의 물리적 이화학적 특성은 Table 1과 같다.

2. 영농활동 및 시비현황

필지논의 공시품종은 일품벼로 재식밀도 15×30 cm로 기계 이앙하였으며, 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 표준시비량으로 10a 당 $N : P_2O_5 : K_2O = 11 : 4.5 : 5.7$ kg으로 하였고, 질소는 기비, 분얼비, 수비를 각각 57.6 %, 24.7 %, 17.7 %의 비율로 시비하였으며, 인은 전량 기비로 하였다 (Table 2).

3. 측정 및 실험방법

연구기간은 2009년 5월에서 11월까지이며, 5월에서 담수가 끝나는 9월 중순까지에서 표면수의 담수심, 온도, pH, DO (용존산소) 및 인의 농도는 농도변화가 심한 1개월간 (5월 하순～6월 하순)은 2～3일 간격, 그 외의 기간에는 5～7일 간격으로 3곳에서 측정하여 그 평균값을 구하였다. 정기적인 측정은 오전 11시 전후에 수행되었다. 증발산량은 원통형 증발산계를, 감수심은 원통형 감수심계를, 심층침투량은 원통형 침투량계를 이용하여 측정하였다. 강우량은 측정 논에서 약 1 km 거리에 있는 청주기상대의 자료를 사용하였다. pH와 DO는 휴대용 pH 측정기 (HM-14P, TOA)와 DO 측정기 (5100, YSI)를 사용하였다.

Table 2 Fertilizer application rates and timing in the study plot

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	

토양의 산화환원전위 (Eh)와 온도는 지하 5 cm 지점에서 2～5일 간격으로 측정하였다. 휴대용 Eh 측정기 (multi-parameter analyser 18.28 Eijkelkamp)를 토양에 삽입한 후 안정된 뒤의 전위 값을 읽었다. Eh는 측정기 측정값에 Ag/AgCl 기준전극의 보정값 (25 ℃ 기준으로 약+ 207 mV)을 더하여 구하였다. 표면수의 수질항목은 총인 (TP)과 인산성 인 (PO_4-P)을 대상으로 하였으며, 환경부 공정시험법 (Ministry of Environment, 1997)에 의한 흡광광도법으로 분석하였다.

두 변수간의 상관관계를 파악하기 회귀분석을 실시하였고, $p < 0.05$인 경우 회귀식이 유의한 것으로 판단하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우량, 증발산량 및 침투수량

써레질용수가 공급된 시점부터 벼 수확 전 낙수시까지의 강

우량은 770 mm로 나타났으며, 같은 기간 30년 동안의 평균 강우량 (912 mm)보다 약 140 mm 이상 낮게 나타났다. 측정 기간 동안의 월별 강우량은 7월에 346 mm로 가장 높았고, 9월에 50 mm로 가장 낮게 나타났다. 평균 증발산량은 3.7 mm/d 이며, 강우량이 가장 많은 7월에 2.2 mm/d로 가장 낮았다. 평균 심층침투량은 1.4 mm/d로 나타났다.

2. 표면수와 토양의 온도 변화

표면수 온도는 일반적으로 토양 온도보다 높게 나타났으며, 5월 하순에서 7월 초순의 작물의 생장이 작은 시기에는 30 ℃ 이상을 나타낸 경우가 많았고, 7월 중순 이후에는 장마 및 작물의 생장에 따른 그늘의 영향으로 하강하여 토양 온도와 큰 차이를 보이지 않았다 (Fig. 2). 표면수 온도는 6월 하순에 최댓값 36.1 ℃, 9월 중순에 최솟값 19.8 ℃로 나타났으며, 토양온도는 6월 하순에 최댓값 27.1 ℃, 최솟값은 9월 중순에 최솟값 19.3 ℃로 나타났다.

3. 표면수의 담수심 및 pH 변화

5월 하순에서 7월 중순까지는 연속 담수되었고, 8월 하순에 재담수된 후, 9월부터는 낙수가 시작되어 부분적으로 담수되었다 (Fig. 3). 담수심은 1.6～7.5 cm의 범위를 보였고, 담수심은 모내기 직후인 5월 하순에 가장 높았으며, 벼의 생장과 함께 점점 낮아져 재담수시에는 2 cm 이하를 나타냈다. 표면수의 pH는 6.9 ～9.4의 범위를 나타냈는 데, 담수 후 증가하여 6월에는 8 이상의 알카리성을 나타냈고, 7월 이후 이후 담수심의 저하와 함께 낮아지는 경향을 보였다.

4. 강우, 관개수 및 표면수의 인 (P) 평균농도

강우에서의 TP와 PO_4-P의 산술평균농도는 각각 0.02, 0.01 mg/L로 나타났고, 관개수의 각각의 값은 0.13, 0.02 mg/L로 TP 농도의 농업용수 수질기준 (0.1 mg/L)과 유사하게 나타났다 (Table 3). 표면수에서의 TP와 PO_4-P의 평균농도는 각각 0.34, 0.04 mg/L로 강우나 관개수에서의 각각의 값에 비하여 높게 나타났다. 관개수나 표면수의 평균 PO_4-P/TP 비는 각각 0.12, 0.15를 보여 TP의 대부분이 입자성인으로 존재하고 있는 것으로 나타났다 (Table 3).

5. 표면수 인 농도의 시간적 변화

TP와 PO_4-P 농도는 기비와 분얼비 직후에 2번의 피크값을 보였다. 기비 직후 TP와 PO_4-P 농도는 시비의 영향으로 각각

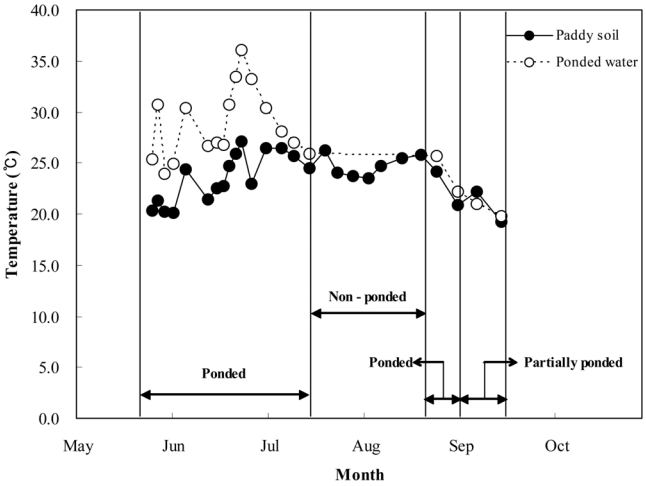

Fig. 2 Temporal variation of temperature of paddy soil and ponded water

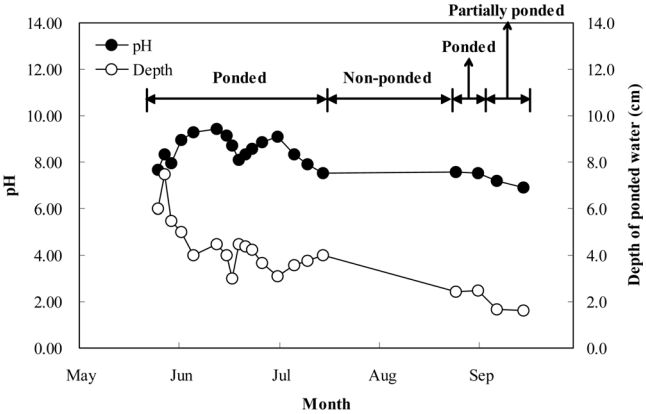

Fig. 3 Temporal variation of pH and depth of ponded water

Table 3 Mean concentrations of phosphorous in rainwater, irrigation water, and ponded water

Type	No. of samples	TP (mg/L)	PO_4-P (mg/L)
Rainwater	8	0.02 (0.01～0.02)[a]	0.01 (<0.01～0.01)
Irrigation water	8	0.13 (0.08～0.19)	0.02 (0.01～0.03)
Ponded water	19	0.34 (0.08～0.76)	0.04 (0.01～0.12)

[a] The value in parenthesis indicates range of concentrations

0.76, 0.12 mg/L의 최댓값 (첫번째의 피크값)을 보였고, 이앙 후에 감소하여 분얼비 시기인 6월 중순에 각각 0.12, 0.02 mg/L의 낮은 값을 나타냈다. 분얼비 후에는 인성분이 시용되지 않았음에도 불구하고 TP 농도는 분얼비 후 상승하여 약 2주일 후에 2번째의 피크값 (0.68 mg/L)을 보였고, PO_4-P 농도는 1주일 후에 2번째의 피크값 (0.08 mg/L)을 보였다 (Fig. 4). 그 후에 각각의 농도는 다시 하강하여 낮은 값을 보였는데 이는 작물의 성장에 따른 영양물질의 섭취 때문으로 생각된다. 이와

비슷하게, 분얼비 직후에 TP 농도는 상승하여 충북대학교의 시험구 논에서는 0.38～0.95 mg/L (Cho et al., 2006), 충북 청원군 소로지구의 대구획 논에서는 0.45～0.60 mg/L의 값을 나타냈다 (Kim et al., 2001).

표면수의 PO_4-P/TP 비는 0.07～0.18의 범위를 보였다. 기비후 0.16의 값을 보인 후 0.10 전후의 값을 보이다가, 분얼비 후에는 상승하여 PO_4-P의 농도가 2번째의 피크값을 보인 시기에 0.18의 최댓값을 보였다. TP 농도가 2번째의 피크값을 나타낸 6월 하순경에서 0.07의 최솟값을 보여, 이때의 입자성 인의 비율이 가장 높은 값을 나타냈다. 7월 이후 PO_4-P/TP 비는 다시 상승하기 시작하여 0.10 이상의 값을 나타냈다.

6. 표면수의 pH와 토양의 Eh의 관계

표면수의 pH는 6.9～9.4의 범위를 나타냈고, 담수와 함께 pH는 증가하였다. 표면수의 pH와 토양의 Eh 관계는 pH가 낮을수록 Eh는 유의하게 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 5). pH가 높은 경우 호소 퇴적물에서 철이나 알루미늄과 결합되어 있던 인은 환원되면서 내적 부하에 의하여 호소의 부영양화를 일으키는 것으로 보고되었다 (Istvanovics, 1994; Koski-Vahala and Hartikainen, 2001).

7. 표면수의 용존산소량 (DO) 농도와 PO_4-P 농도의 관계

표면수의 DO 농도는 7.3～11.4 mg/L의 범위를 보여 농업용수 수질기준 (5.0 mg/L 이상)을 만족하는 것으로 나타났다. 표면수의 DO 농도와 PO_4-P 농도는 부(負)의 상관관계를 보여, DO 농도가 낮을수록 PO_4-P 농도는 높아지는 것으로 나타났다 (Fig. 6). 이와 유사하게, 용존산소가 적을 경우 호소 퇴적물에서 인의 용출량은 증가한다는 것으로 나타났다 (Kim et al., 1994). 퇴적물에 존재하는 인은 혐기성 상태에서 인은 토

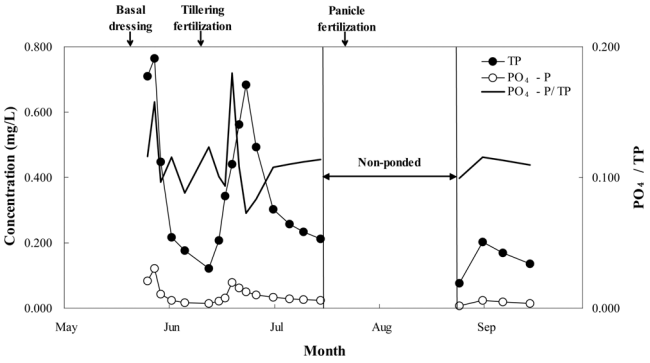

Fig. 4 Temporal variation of concentrations of TP and PO_4-P in ponded water

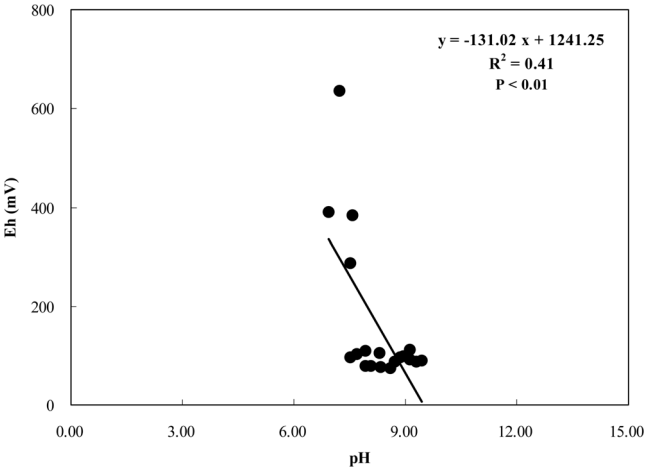

Fig. 5 Relationship between Eh of paddy soil and pH of ponded water

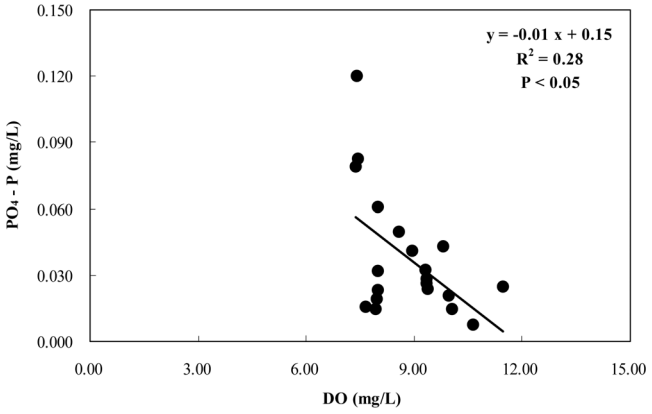

Fig. 6 Relationship between concentration of phosphate and DO in ponded water

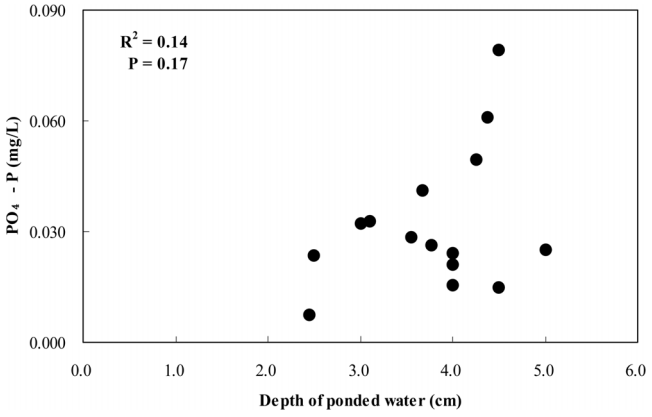

Fig. 7 Relationship between PO_4-P concentration and depth of ponded water

양과 담수의 경계면이 혐기성 상태인 경우가 호기성 상태인 경우보다 약 1,000배 정도 빠르게 용출되는 것으로 보고한 바 있다 (Horne and Goldman, 1994).

8. 표면수의 PO_4-P 농도와 담수위의 관계

인 시비의 영향을 받은 처음 3개(5월 말)의 자료와 부분 담수가 나타난 마지막 2개의 자료를 제외시킨 후 표면수의 PO_4-P 농도와 담수위와의 관계를 조사하였다. 표면수의 PO_4-P 농도와 담수위의 관계는 거의 유의성 ($P > 0.05$)이 없는 것으로 나타나 (Fig. 7), PO_4-P 농도는 담수위에 거의 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

9. 토양의 Eh와 표면수의 인 농도 변화

토양의 Eh 값은 담수 시에는 하강하였다가, 낙수 시에는 상승하는 경향을 보였다 (Fig. 7). Eh는 연속 담수기와 토양이 습윤 상태인 중간낙수 초기 (5월 하순에서 7월 하순)에서는 74 ~112 mV (평균 91 mV)의 낮은 값을 보여 토양은 환원 상태를 나타냈다. 한편, Eh는 토양이 건조 상태인 중간 낙수기, 부분적 담수기, 비담수기에는 전반적으로 상승하였으나, 강우의 여부에 따라 큰 변동을 보였고, 이때에는 Eh는 179~636 mV의 비교적 높은 값 (평균 501 mV)을 보여 토양은 많은 경우 산화상태를 나타냈다. Aomine (1949)는 건답에서 담수하에서의 Eh는 30 mV 이상을 나타낸다고 보고하였다. Yu et al. (2006)는 10 cm 깊이의 습지 (swamp) 토양에서의 평균 Eh는 건기에서 약 0 mV, 우기에서는 약 50 mV의 값을 보인다고 보고했다. 한편, Minamikawa와 Sakai (2005)는 논토양의 5 cm 깊이에서 환원시 -150 mV의 낮은 값을 보였다고 보고했으나, 이와 같이 환원시 같은 깊이에서의 Eh 값의 차이는 토성 및 투수성의 차이 때문으로 생각된다.

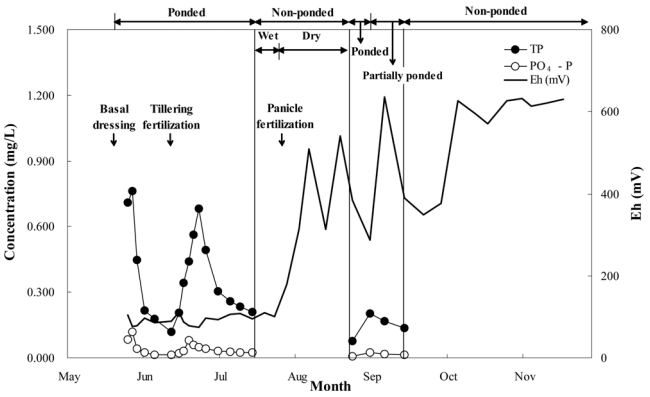

Fig. 8 The temporal variation of Eh in the paddy soil and concentrations of TP and PO_4-P in the ponded water

분얼비 약 1주일 후 PO_4-P 농도는 0.02 mg/L에서 0.08 mg/L까지 4배 상승하였고, 그 후 약 1주일 후에 TP 농도는 0.12 mg/L에서 0.68 mg/L까지 5배 상승하였는데, 이때의 Eh는 100 mV 이하의 낮은 값을 보였다. 분얼비 시기에 인성분이 시비되지 않았는데도 불구하고 인의 농도가 상승하는 경향을 나타냈는데 이는 초기에 시비된 인 성분은 대부분 논토양 내의 철성분과 결합하여 Fe^{3+}-P의 형태로 침전하는 데, 담수로 토양의 Eh가 150 mV 이하로 되면 Fe^{3+}이온이 Fe^{2+}이온으로 변하면서 인이 용출되기 때문으로 생각된다 (Vepraskas and Faulkner, 2001). 계절적으로 담수되는 토양에서 담수 60-90일 후에 표면수의 PO_4-P 농도는 초기 농도보다 최대 3.6배까지 증가하였고 (Young and Loss, 2001), 용존성 인 농도는 환원 조건일 경우 높게 나타났다 (Ann et al., 1999)

이 시기의 높은 TP 농도는 환원상태에서 용출된 용존성 인, 분얼비로 인해 높아진 용존성 질소, 표면수의 높은 수온(30 ℃ 이상) 등으로 많은 조류 (algae)와 물벼룩 (water flea)이 발생하여 입자성 성분이 증가했기 때문으로 추정된다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 2009년 영농기간을 중심으로 논토양의 산화환원전위 (Eh) 변화에 따른 논 표면수에서의 TP와 PO_4-P의 농도 변화 특성을 검토하였다.

1. 표면수의 TP와 PO_4-P 농도는 2번의 피크값을 보여, 기비 직후 각각, 0.76 0.12 mg/L의 최대값 (첫번째의 피크값)을 보였다가, 이앙 후에 감소하는 경향을 보였고, PO_4-P 농도는 분얼비 후 상승하여 1주일 후에 2번째의 피크값을 보인 반면, TP 농도는 2주일 후에 2번째의 피크값을 보였다.

2. 표면수의 PO_4-P/TP 비는 0.07-0.18을 보여 대부분 입자성 상태를 나타냈고, TP 농도가 2번째의 피크값을 보인 6월 하순경에서 0.07의 최솟값을 보여, 이 때 입자성 인의 비율이 가장 높은 것으로 나타났다.

3. 논 표면수의 PO_4-P 농도는 용존산소 농도가 낮아질수록 유의적으로 높은 값을 보여, 인은 혐기성 상태일수록 용출률이 높은 것으로 사료된다.

4. 분얼비 시비 후인 6월 중,하순에 토양은 환원상태 (Eh는 100 mV 이하)를 나타냈고, 표면수의 PO_4-P와 TP 농도는 인 성분을 시용하지 않았음에도 불구하고, 각각 4배, 5배 상승하여 0.12, 0.68 mg/L의 높은 값을 보였다. 이는 논토양이 환원상태로 되면서 용존성 인이 용출되었을 뿐만 아니라, 분얼비로 인해 높아진 용존성 질소, 표면수의 높은 온도 등의 영향으로 많은 조류와 물벼룩 등이 발생하여 입자성 인의 농도를 높였기 때문으로 생각된다.

5. 기비 후 뿐만 아니라 분얼비 후 PO_4-P와 TP 농도가 높아지는 시기에는 배수를 적극적으로 억제하여 논으로부터 인의 유출을 방지할 필요가 있을 것으로 생각된다.

이와 같은 시기별 인의 농도 변화와 그 원인의 규명은 친환경적인 논 물관리 기법을 확립하는 데에 기여할 것으로 판단된다. 앞으로 다양한 토양 깊이에서의 Eh 측정, 용존성 영양염류 농도와 조류 발생과의 관계는 추후 실험을 통하여 규명할 필요가 있다고 생각된다.

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Ann Y., K. R. Reddy, and J. J. Delfino, 1999, Influence of redox potential on phosphrous solubility in chemically amended wetland organic soils, *Ecolo. Engrg.* 14: 169-180.
2. Aomine, S., 1949. Tile drainage and soil-drying effect, *Kawade-shobo*. (In Japanese)
3. Cho, J. W., J. S. Kim, K. Y. Oh, and S. Y. Oh, 2006, Pollutant concentrations at experimental paddy plots during irrigation season, *J. KSAE* 48(3): 97-106. (in Korean)
4. Feng, Y. W., I. Yoshinaga, E. Shiratani, T. Hitomi, and H. Hasebe, 2004, Characteristics and behavior of nutrients in a paddy field area equipped with a recycling irrigation system, *Agric. Water Manage.* 68: 47-60.
5. Horne, A. J., and C. R. Goldman, 1994, *Limnology*, pp. 155-163, McGraw-Hill.
6. Istvanovics V. 1994, Fractional composition, adsorption and release of sediment phosphorus in the Kis-Balaton reservoir, *Water Res.* 28(3): 717-726
7. Kim, B. C., J. H. Park, and S. H. Jun, 1994, Phosphorus composition and release from lake sediment and fecal deposit of fish culture, *J. Kor. Soc. Limno.* 27(3): 275-283. (in Korean)
8. Kim, J. S., S. Y. Oh, K. S. Kim, and S. K. Kwun, 2001, Characteristics of pollutants concentrations at paddy fields area during irrigation periods, *J. KSAE* 43(6): 163-173. (in Korean)
9. Koski-Vahala, J., and H. Hartikainen, 2001, Assessment of the risk of phosphorous loading due to resuspended sediment, *J. Environ. Qual.* 30: 960-996.
10. Minamikawa, K., N. Sakai, 2005, The effect of water management based on soil redox potential on methane emission from two kinds of paddy field in Japan, *Agric. Ecosyst. Environ.* 107: 397-407.9.
11. Ministry of Environment, 1997, *Standard Methods for Water Quality*, pp. 199-209. (in Korean)
12. 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.
13. Yoon, K. S., K. H. Han, J. Y. Cho, C. H. Choi, J. G. Son, and J. K. Choi, 2002, Water and nutrient balance of paddy field irrigated from a pumping station during cropping period, *J. Kor. Soc. Rural Plan.* 8(1): 15-25. (in Korean)
14. Young E. O., D. S. Ross. 2001, Phosphate release from seasonally flooded soils, *J. Environ. Qual.* 30: 91-101
15. Yu, K., S. P. Faulkner, and W. H. Patrick, 2006, Redox potential characterization and soil green house gas concentration across a hydrological gradient in a Gulf cost forest. *Chemosphere* 62, 905-914