



하천관개지역 광역논에서의 영양물질의 물질수지

Nutrient Balance in the Paddy Fields Watershed with a Source of River Water

이정범* · 이재용* · 이사광* · 장정렬** · 장익근*** · 김진수*,†

Lee, Jeong Beom · Lee, Jae Yong · Li, Si Hong · Jang, Jeong Ryeol · Jang, Ik Geun · Kim, Jin Soo

Abstract

The objective of this research was to investigate concentration and load of nutrients such as total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO₃-N) total phosphorous (TP), and phosphate phosphorous (PO₄-P) in a 23.4-ha paddy fields watershed with river water source. Water samples for irrigation water, drainage water, ponded water and groundwater were collected, and irrigation and drainage water were measured at 5~10 day intervals during normal days and at 2~6 hours intervals during three storm events. The amount of irrigation water in the study area was over 2,000 mm, which is almost identical to that in the area irrigated from a large reservoir but much more than that in the area irrigated from a pumping station. Mean flow-weighted concentrations of TN and TP in irrigation water were 2.8 and 0.15 mg/L, respectively, higher than those in the area irrigated from a large reservoir or a pumping station. The ratios of irrigation load to total inflow load for TN and TP were 88 %, and the ratios of surface outflow load to total outflow load for TN and TP were over 90 %, indicating that total nutrient load may be greatly affected by water management. The nutrient loads per area in the study area were estimated as TN 21.1 kg/ha and TP 1.1 kg/ha. Especially, the TP load per area in the study area was smaller than that in the area irrigated from a large reservoir or a pumping station. This may be because outflow load is not high likely due to sedimentation of particulate P and irrigation water load is high due to high TP concentration in irrigation water and high amount of irrigation water.

Keywords: Mass balance; Paddy field watershed; Net outflow load; Unit load

1. 서 론

1960년대부터 선진국에서는 질소(N)와 인(P)과 같은 비점오염에 의한 수질오염이 발생하여 이에 대한 평가 및 대책이 이루어지고 있다. 우리나라에서는 논이 전체 농경지의 60% 이상을 차지하고 있어, 논 비점오염이 유역에 미치는 영향은 클 것으로 예상되는데, 논에서의 오염부하의 배출 특성이 강수, 수원의 종류, 시비량, 물관리 등의 조건에 따라 다르게 나타나고 있다.

일본에서 Takeda et al. (1991)은 광역논에서의 오염물질의 물질수지를 조사하였고, Feng et al., (2004)은 순환관개가 실시되고 있는 광역논에서의 영양물질의 거동을 조사하였다. 광역논에서 순환관개에서의 P 부하는 관행적 관개에서의 P 부하보다 적게 배출되는 것으로 보고되었다(Hama et al., 2013).

국내의 경우, Kim et al. (2001)은 관개기 2개의 광역논에서의 오염물질의 농도 특성에 대해 조사하였다. Oh et al. (2002)은 관개기 대구회 광역논으로부터 오염부하 원단위에 대해 조사하였는데, 원단위는 월별, 연별로 크게 변동하기 때문에 특성을 명확히 파악하기 위해서는 장기간의 모니터링이 필요하다고 보고하였다. Yoon et al. (2002b)는 양수장 지구 광역논에서의 영양물질의 물질수지를 조사하였고, Yoon et al. (2002a)은 지하수 관개지역 광역논을 대상으로 배출부하 특성을 조사하였다. Kim et al. (2006)은 광역논을 대상으로 여러 강우사상에 대한 총질소(TN)과 총인(TP)의 유출특성에 대해 조사하였는데, TN 부하는 시비량의 영향을 받으며, TP 부하는 담수의 영향을 받는다고 보고하였다. Song et al. (2013)은 저수지 관개 광역논에서의 영양물질의 물질수지를 분석하였는데, 강우량과 TN과 TP 부하량 사이에는 7, 8월에 유의적 상관성이 있다고 보고하였다. 이와 같이 논 비점오염의 유출 특성 및 관리에 관한 여러 연구가 진행되었으나, 논 비점오염에 관한 유출 메커니즘을 규명하기 위해서는 다양한 조건 하에서의 자료 축적이 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 2012년 하천 관개의 광역논을 대상으로 유량 및 수질 모니터링을 실시하여 N과 P의 농도 및 부하 특성을 파악하고 오염부하 원단위를 산정하여 유역 비점오염 관리의 기초자료를 제시하고 한다.

* Dept. of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

** Rural Research Institute, Korea Rural Community Cooperation

*** Hwaan Project Office, Korea Rural Community Cooperation

† Corresponding author

Tel.: +82-43-261-2573 FAX: +82-43-271-5922

E-mail: jskim@cbnu.ac.kr

Received: July 15, 2014

Revised: August 11, 2014

Accepted: August 13, 2014

II. 조사 지구 및 연구 방법

1. 조사지구

본 조사지구는 충청북도 청주시 옥산면 (E 127° 41', N 36° 68')에 위치하고 있는 대구획 광역논이다. 전체 면적은 23.4 ha이며, 논이 92%, 밭 8%를 차지하고 있다 (Fig. 1). 본 지구는 금강 수계 제 1지류인 미호천을 용수원으로 하여 보에서 취수하고 있는데, 가까운 상류에 저수용량 14백만 m³의 미호지가 있어 용수가 풍부하다. 본 지구는 표고 30-32 m의 저평지에 위치하고 있으며, 용·배수가 분리되어 있다.

용수로는 콘크리트 개수로 되어 있고, 배수로는 흙수로 되어 있다. 간선 용수로를 통해 흐르는 물은 지저 용수로 입구 2곳 (SC1, SC2)을 통해 공급된다. 이 용수 중 각 논에 관개를 하고 남은 양은 용수로 말단 (SC3, SC4)과 배수로 말단 (MD1)을 통해 배수되어 미호천으로 회귀하고 있다. 토양의 조성 비율은 모래 42.4%, 실트 44.6%, 점토 13.0%로, 이를 미국 농무성 (USDA)의 삼각좌표법으로 분류하면 토성은 양토 (Loam)에 속하는 것으로 나타났다.

2. 연구방법

유량 측정 및 수질 샘플링은 2012년 4월 중순부터 배수가 종료된 9월 하순까지 실시되었다. 유량은 용수로 시점 2곳, 용

수로 말단 2곳, 배수로 말단 1곳 총 5곳에서 측정되었으며, 수질 샘플링은 용수로 시점 2곳, 배수로 말단 1곳, 논 표면수 채수를 위한 필지는 1곳, 지하수 채수공 1곳 총 5곳에서 실시되었다. 유량 측정 및 수질 샘플링은 평상시에는 월 3회, 시비에 의해 농도 변화가 심한 시비기 (5월 중순~6월 중순)에는 월 6회 실시되었으며, 강우시에는 1~6시간 간격으로 손으로 실시되었다. 시비시기 및 시비량은 대상지구 내에서 영농하고 있는 27 농가를 대상으로 설문조사를 통한 평균값으로 하였다. 유속은 유속계 (Model 801, EM Flow Meter)를 이용하여, 시간별 수위는 용·배수로에 설치된 초음파 수위계 (USN-1000, Sondar)를 이용하여 측정되었다. 증발산량 및 침투량 투량은 조사지구 내에 설치된 증발산량 측정기 및 침투량계를 이용하여, 강우량은 tipping bucket 타입 데이터 로거형 강우량계 (103800D, CASELLA)를 이용하여 측정되었다.

수질 항목은 TN, 질산성 질소 (NO₃-N), TP 및 인산성 인 (PO₄-P)의 총 4개 항목이며, 수질 농도는 수질공정시험법에 따라 흡광광도분석법 (Ministry of Environment, 1997)으로 분석되었다.

두 변수간의 상관관계를 파악하기 위해서 회귀분석을 실시하였고, P < 0.05 인 경우 회귀식은 유의한 것으로 판단하였다.

III. 광역논 물수지와 물질수지

광역논에서의 유입량은 용수량과 강우량으로 구성되며, 유출량은 지표배출량, 증발산량 및 침투량으로 구성되는데, 지표배출량은 유말공 (용수로 말단)에서의 환원수량과 배수로에서의 배수량으로 구성된다. 용수로의 관개용수는 대상 구역의 필지와 외부 구역의 필지로 배분되므로 용수로 당 두 구역의 면적 비에 따라 대상 구역의 용수량을 산정하였다. 광역논에서의 물수지는 식 (1)과 같다.

$$\Delta S = (R + I) - (SO + ET + P) \quad (1)$$

여기서, R: 강수량 (mm), I: 용수량 (mm), SO: 지표배출량 (mm), ET: 증발산량 (mm), P: 침투량 (mm), S: 구역 저류량의 변화 (mm)이다.

물질수지에서 유입부하량은 용수부하량과 강우부하량으로 구성되고, 배출부하량은 지표배출부하량과 침투배출부하량으로 구성된다. 지표배출부하량은 평상시와 강우시 지표배출부하량으로 구성되는데, 강우시 지표배출부하량은 Oh et al. (2002)이 제시한 강우사상에 대한 유량과 지표배출부하량 관계식 (L-Q식)을 이용하여 산정되었다.

또한, 논에서의 순배출부하량 및 원단위 (Kunimatsu and

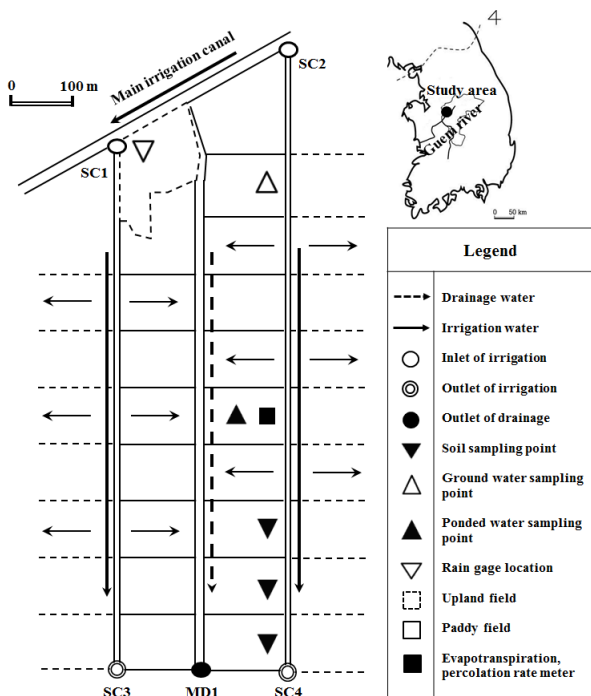


Fig. 1 Schematic representation of study area

Muraoka, 1989)는 각각 식 (2)와 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{순배출부하량} &= \text{지표배출부하량} + \text{침투배출부하량} \\ &\quad - (\text{용수부하량} + \text{강우부하량}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{원단위} &= \text{지표배출부하량} + \text{침투배출부하량} \\ &\quad - \text{용수부하량} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)에서 순배출부하량의 값이 양(+)이면 논은 배출형, 음(-)이면 정화형을 의미한다.

IV. 결과 및 고찰

1. 영농현황 및 시비량

이양은 5월 중순에, 수확은 10월 초순에 실시되었으며, 시비는 4월 하순, 6월 초순 및 7월 하순에 각각 기비, 분얼비 및 수비로 3회에 걸쳐 사용되었다 (Table 1). 시비량으로 질소는 97.0 N kg/ha로 나타났으며, 인은 23.8 P kg/ha로 나타났는데, 이는 표준시비량 (90.0 N kg/ha, 19.6 P kg/ha)보다 약간 높은 값에 해당된다.

2. 물수지

연구기간 동안 강우량은 1056.5 mm로 나타났으며, 이는 청주기상대에서 관측된 30년 평균 강우량 1013.9 mm와 비슷하였다. 최대 월강우량은 8월에 478.5 mm를 나타냈고, 이는 조사기간 강우량의 45 %를 차지하였다.

용수로 입구 (SC2)와 배수로 말단 (MD1)에서의 수위-유량 곡선식은 Fig. 2와 같다. 수위-유량곡선식은 유의적인 상관관계를 보였으며, 용수는 0.1 m³/s 이하의 값을 보인 반면

에, 배수는 논으로부터의 유출로 인해 용수보다 높은 값을 보였다.

조사지구 내의 강우량, 용수량 및 지표배출량의 시간적 변동은 Fig. 3과 같다. 지표배출수 중 유말공 (용수로 말단)의 환원수는 4월 중순부터 시작되었으나, 농지로부터의 배수는 5월 중순부터 시작되었다. 월별 유입량과 유출량은 Table 2와

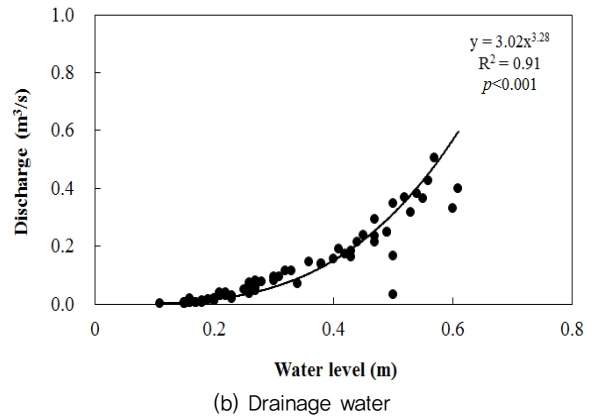
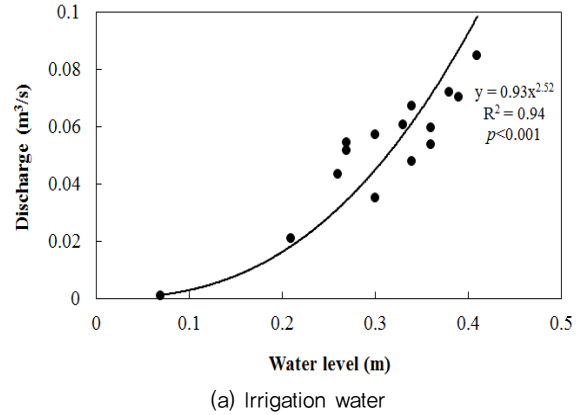


Fig. 2 Relationship between water level and discharge

Table 1 Farming and fertilization in the study area

Date	Farming and fertilization	Remark
Mid-April	Start of irrigation	
Late April	Basal dressing	63,1 N kg/ha, 17,0 P kg/ha
Mid-May	Transplanting	
Early June	Tillering fertilization	7,7 N kg/ha, 2,1 P kg/ha
Late July	Panicle fertilization	24,8 N kg/ha, 4,7 P kg/ha
Late August	Stopping of irrigation	
Early October	Harvest	

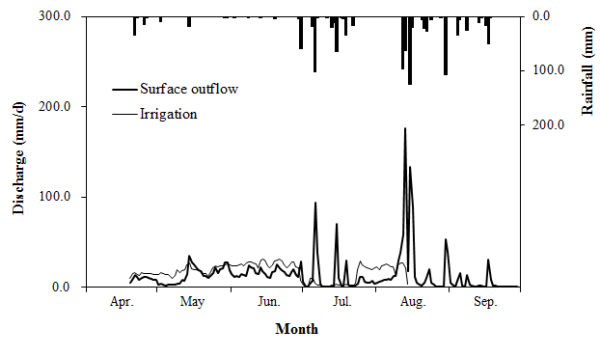


Fig. 3 Temporal variation of rainfall, irrigation water, and surface outflow

Table 2 Water balance in the study area

Month	Inflow (mm)			Outflow (mm)			
	Irrigation	Rainfall	Subtotal	Surface outflow	Percolation	Evapotran-spiration	Subtotal
Apr.	178.1	52.0	230.1	120.3	0.0	0.0	120.3
May	562.4	34.0	596.4	427.7	45.5	127.8	601.0
Jun.	758.6	72.5	831.1	509.9	36.6	150.0	696.5
Jul.	248.6	272.5	521.1	339.9	43.0	130.8	513.7
Aug.	308.7	478.5	787.2	771.9	38.9	124.7	935.5
Sept.	0.0	147.0	147.0	112.0	17.9	31.2	161.1
Total	2,056.4 (66 %)	1,056.5 (34 %)	3,112.9 (100 %)	2,281.7 (75 %)	181.9 (6 %)	564.5 (19 %)	3,028.1 (100 %)

같으며, 영농기간 중 유입량은 3,113 mm (용수량 2,056 mm, 강수량 1,057 mm), 유출량은 3,028 mm (지표배출량 2,282 mm, 침투량 182 mm, 증발산량 565 mm), 유역내 저류량은 85 mm로 나타났다. 용수량은 6월에 759 mm, 지표배출량은 8월에 772 mm로 가장 높게 나타났다. 일반적으로 6월까지의 유입량이 유출량보다 커서 논에 저류되는 반면에, 7월 이후에는 유출량이 유입량보다 커서 논으로부터 유출되는 경향을 보였다. 유입량 중 용수량이 차지하는 비율은 66 %, 유출량 중 지표배출량이 차지하는 비율은 75 %로 가장 큰 부분을 차지하였다. 이곳의 용수량은 2,056 mm로 큰 저수용량 (21백만 m³)의 이동 저수지를 수원으로 하는 광역논의 용수량 2,008-2,342 mm (Song et al., 2012)과 비슷하나, 간헐적으로 관개하는 양수장 지구 광역논의 용수량 1,185-1,340 mm (Yoon et al., 2002b)보다는 크게 나타났다.

3. 평상시 영양물질 농도 변화

가. 용·배수

평상시 용·배수에서의 영양물질의 농도 변화는 Fig. 4와 5와 같다. 용수는 4월 중순부터 시작되었으나, 6월 하순에서 7월 중순 사이에 공급이 중단된 후, 7월 하순에 재개되어 8월 초순에 종료되었다. 한편, 배수는 용수보다 한 달 늦은 5월 중순부터 시작되어 9월 하순에 종료되었다.

용수에서의 TN, TP 및 PO₄-P 농도는 각각 4.6, 0.23, 0.15 mg/L로 4월 하순에 최댓값을 보였으며, NO₃-N 농도는 3.1 mg/L로 5월 하순에 최댓값을 보였다. 배수에서의 TN과 NO₃-N 농도는 초기 배수가 나타나는 5월 중순에 시비의 영향으로 높게 나타났다가 하강한 후 용수의 공급이 중단되어 수량이 적은 7월 중하순이나 9월 하순에 최댓값을 보였다. 9월 하순의 높은 값은 토양이 건조해지면서 무기화반응을 일으켜 유출시 높게 나타난 것으로 사료된다. 질소는 토양 수분함량

이 적을수록 무기화 반응이 크게 나타나는 것으로 보고되었다 (Cassman and Munns, 1980). 한편, 배수에서의 TP와 PO₄-P 농도는 5월 중순에 시비의 영향으로 각각 0.42와 0.19 mg/L로 가장 높게 나타났으나, 점차 하강하여 대부분 각각 0.20와 0.10 mg/L 이하의 값을 나타냈다.

평균 NO₃-N/TN 비는 용수 69.0 %, 배수 88.0 %로, 용수보다 배수에서 더 높고, TN은 대부분 용존성 형태로 존재하는 것으로 나타났다. 평균 PO₄-P/TP 비는 용수 39 %와 배수 39.0 %로 같은 값을 보였고, TP는 입자성의 비율이 높게 나타났다. 이와 유사하게 일본 광역논 배수에서의 PO₄-P/TP 비는 약 30 %로 보고되었다 (Feng et al., 2004).

나. 논 표면수와 지하수

논 표면수와 지하수에서의 TN과 TP의 농도 변화는 Fig. 6과 같다. 6월 하순부터 8월 초순 사이에는 관개 중지 및 농민들의 배수 강화로 논 표면수를 채수할 수 없었다. 수질 농도의 변동폭은 논 표면수에서는 크게 나타났으나, 지하수에서는 논 표면수에 비해 작게 나타났다. 논 표면수에서의 TN과 TP의 농도는 분얼비의 영향으로 인해 6월 초순에 각각 9.0과 0.44 mg/L로 최댓값을 나타냈으나, 재 담수된 8월 이후에는 낮게 나타났다. 1999년에도 인근 지역 논 표면수에서의 TN과 TP의 농도는 기비의 영향을 받아 6월 초·중순에 각각 6.2와 0.44 mg/L의 최댓값을 보였다 (Kim et al., 2001). 한편, 지하수에서의 TN과 NO₃-N 농도는 각각 2.8과 2.5 mg/L로 6월 하순에 최댓값을 나타냈고, TP와 PO₄-P 농도는 각각 0.11과 0.07 mg/L로 9월 중순에 최댓값을 나타냈다 (Fig. 4).

논 표면수와 지하수에서의 평균 NO₃-N/TN 비는 각각 79와 70 %로 용존성 비가 높은 값을 나타냈고, 논 표면수에서의 평균 PO₄-P/TP 비는 25 %로 입자성의 비가 높게 나타났다. 이와 유사하게, 충북 청원군 낭성면 논 지하수에서의 NO₃-N/TN 비는 83 %로 보고되었다 (Jang et al., 2011).

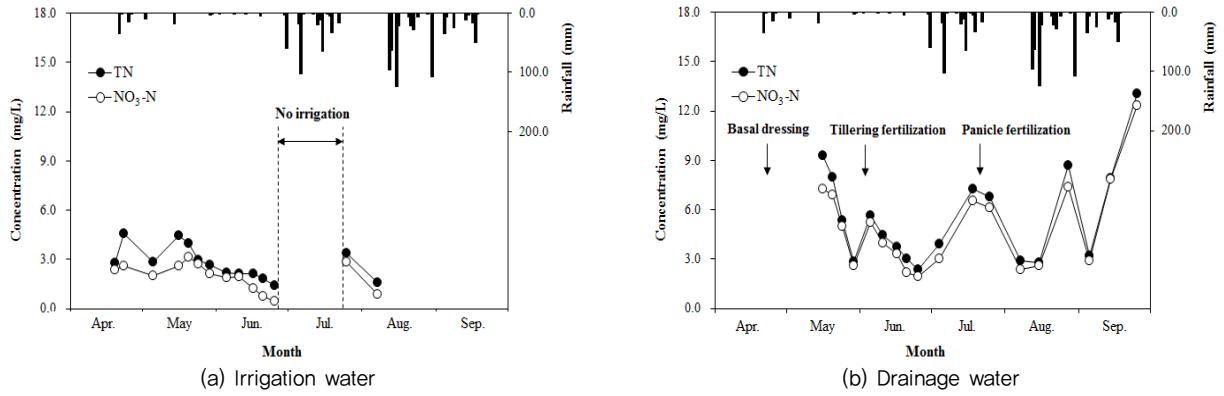


Fig. 4 Temporal variation of TN and NO₃-N concentrations in dry days

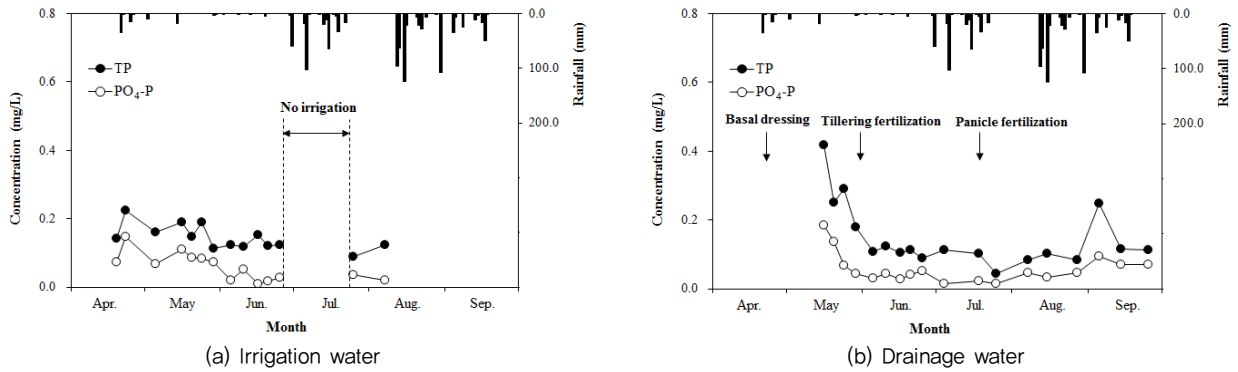


Fig. 5 Temporal variation of TP and PO₄-P concentrations in dry days

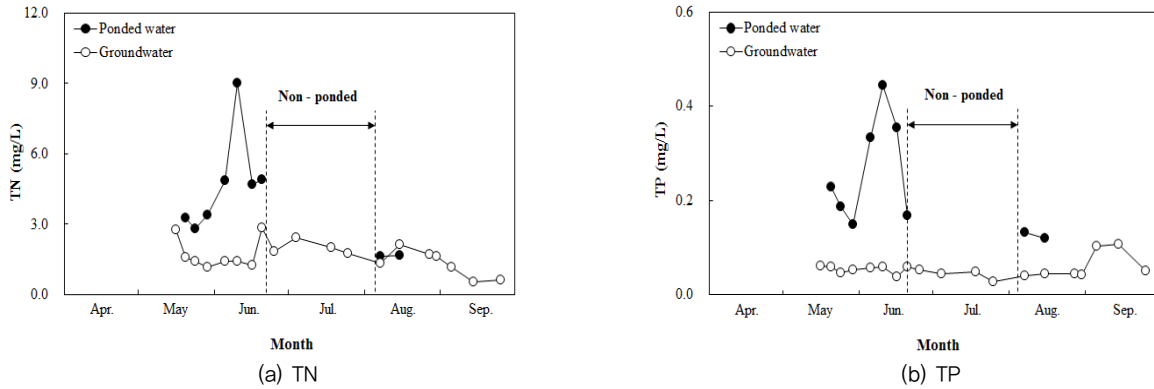


Fig. 6 Temporal variation of TN and TP concentrations in ponded water and groundwater during dry days

4. 강우시 영양물질의 농도 변화

가. 강우사상 개요

각 강우사상에 대한 개요는 Table 3과 같다. 각 강우사상에서의 총 강우량은 39.4~127.8 mm를 나타냈고, 유출률은 78.5~99.0%를 나타냈다. 여기서 논의 유출률이 높은 것은 농민은 강우시 담수된 물을 적극적으로 배수하기 때문으로

생각된다. 강우강도는 강우사상 3에서 16.0 mm/h로 최댓값을 나타냈다. 3일 선행강우는 강우사상 1과 2에서는 0.0 mm, 강우사상 3에서는 64.5 mm로 나타났다.

나. 시간별 N과 P 농도 변화

강우사상 3에서의 유량과 영양물질 농도의 시간적 변화는

Table 3 Summary of storm events

Event	Date	Amount of rainfall (mm)	Duration hours of rainfall (h)	Maximum rainfall intensity (mm/h)	Runoff (%)	Total 3-day antecedent rainfall (mm)
1	Jun. 29-Jul. 2, 2012	58.6	20.0	12.0	78.5	0.0
2	Jul. 5-9, 2012	127.8	32.0	14.6	95.7	0.0
3	Jul. 18-20, 2012	39.4	9.0	16.0	99.0	64.5

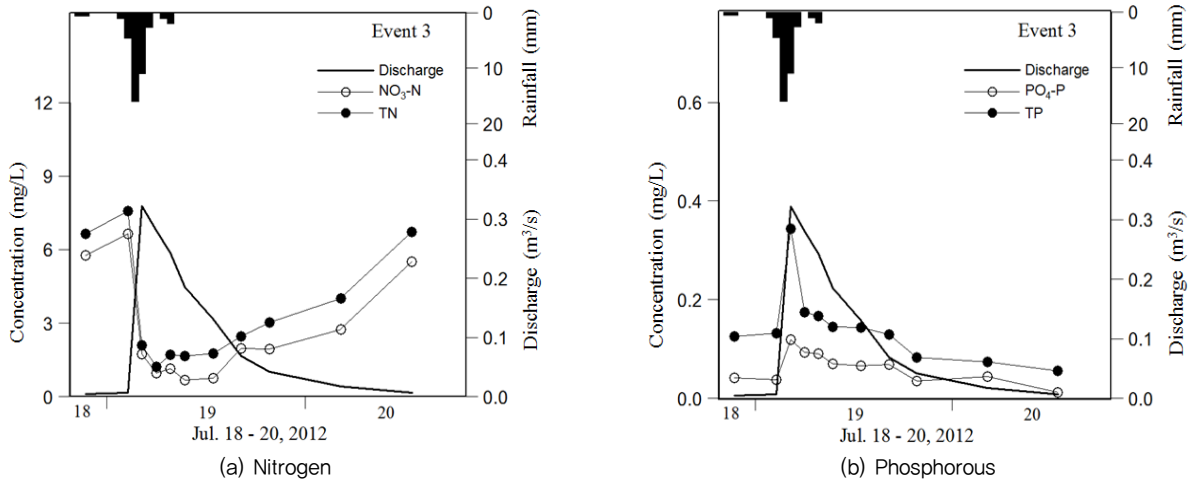


Fig. 7 Temporal variation of N and P concentrations and discharge in drainage water during Event 3

Fig. 7과 같다. N의 경우 초기에 농도가 높게 나타났으며, 유량이 증가하면 농도가 감소하고 강우 종료 후 유량이 감소하면 농도는 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 N은 대부분 용존성 상태로 존재하고 있어 희석효과로 인해 농도가 감소한 것으로 사료된다. 한편, P의 농도는 유량이 증가하면서 증가하고 유량이 감소하면 감소하는 경향을 보였다. 이는 P가 입자성의 형태로 많이 존재하고 있어 강우시 토립자와 함께 유출되기 때문에 농도가 높은 것으로 사료된다. 비슷한 경향은 기존의 연구 (Feng et al., 2004; Kim et al., 2006)에서도 보고되었다.

5. 영양물질의 평균농도

조사기간 동안 강우, 용수 및 배수에서의 영양물질의 평균 농도는 Table 4와 같다. 강우의 평균 농도는 TN 0.7 mg/L, TP 0.04 mg/L로 다른 항목에 비하여 가장 낮게 나타났다. 이를 조사지역을 포함한 광역지역에서의 측정값 TN 0.7 mg/L, TP 0.02 mg/L (Oh et al., 2002)과 비교하면 TN 농도는 같고, TP 농도는 다소 높은 것으로 나타났다.

용수에서의 평상시 TN과 TP의 유량가중 평균농도는 각각, 2.8, 0.15 mg/L를 보였는데, 이 값은 상수원 보호구역으로 관

리되고 있는 저수지 관개 광역논에서의 평균 농도 TN 1.7 mg/L, TP 0.07 mg/L (Song et al., 2013)나, 오염원이 적은 섬진강에서 양수장 관개를 실시하는 광역논에서의 평균 농도 TN 1.2-1.7 mg/L, TP 0.04-0.07 mg/L (Yoon et al., 2002b)보다 높은 값에 해당된다. 용수와 배수에서의 평상시 영양물질의 유량가중 평균농도를 보면, N 농도는 용수와 배수에서 차이를 보였으나, P 농도는 큰 차이를 보이지 않았다. 평상시 N 농도가 용수보다 배수에서 높은 것은 시비의 영향 때문으로 생각된다. 한편, 배수에서의 N 농도는 평상시보다 강우시에 낮게 나타났는데, 이것은 강우시 N은 희석되어 농도가 낮아지기 때문으로 생각된다. 이에 반하여, 산지가 대부분을 차지하는 농촌 소유역 (산지 81%, 논 8%, 밭 9%) 유출수에서의 TN과 TP의 평균농도는 평상시보다 강우시에 유의적으로 높게 나타났는데, 이는 산림과 밭의 표면이나 하상 퇴적물에 있던 영양염류가 강우시 유출되기 때문으로 보고되었다 (Oh et al., 2009).

논 표면수와 지하수에서의 영양물질의 산술평균농도는 Table 5와 같다. 이곳 지하수의 TN과 TP의 평균 농도를 청주시 낭성면에 있는 논에서의 값 TN 1.2 mg/L, TP <0.01 mg/L (Jang et al., 2011)과 비교하면 TN은 비슷하나 TP는 높게 나타났다. 모든 수질 항목의 농도는 지하수보다 논 표면수에서

Table 4 Mean concentrations of nutrient in irrigation and drainage water

	No. of samples	TN (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
Rainwater ^a	3	0.7 (0.5~1.0) ^c	0.1 (0.1~0.1)	0.04 (0.02~0.05)	0.01 (0.01~0.01)
Irrigation water ^b (Non-rainy day)	39	2.8 (1.4~4.8)	2.0 (0.4~3.1)	0.15 (0.08~0.23)	0.06 (0.02~0.15)
Drainage water ^b (Non-rainy day)	18	4.9 (2.4~13.0)	4.2 (1.9~12.3)	0.18 (0.04~0.42)	0.07 (0.01~0.19)
Drainage water ^b (Rainy day)	39	1.7 (1.1~7.6)	1.2 (0.8~6.6)	0.17 (0.04~0.34)	0.07 (0.01~0.12)

^aArithmetic mean

^bFlow weighted mean

^cValues in parenthesis indicate the range of nutrient concentration

Table 5 Arithmetic mean concentrations of nutrient in ponded water and groundwater

	No. of samples	TN (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
Ponded water	9	4.0 (1.6~9.0) ^a	3.3 (0.9~7.7)	0.24 (0.12~0.44)	0.05 (0.02~0.14)
Groundwater	19	1.4 (0.5~2.8)	1.0 (0.3~2.5)	0.05 (0.03~0.11)	0.02 (0.01~0.07)

^aValues in parenthesis indicate the range of nutrient concentration

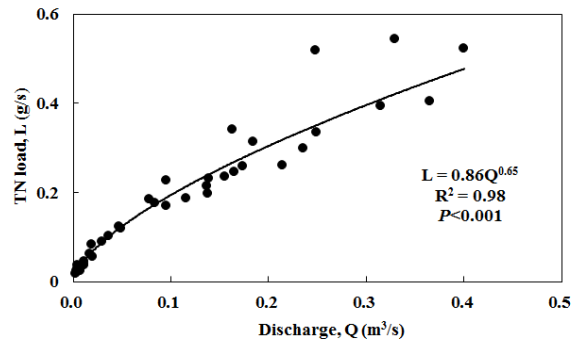
높게 나타나, 논 표면수의 수질관리가 보다 중요한 것으로 생각된다.

6. 물질수지

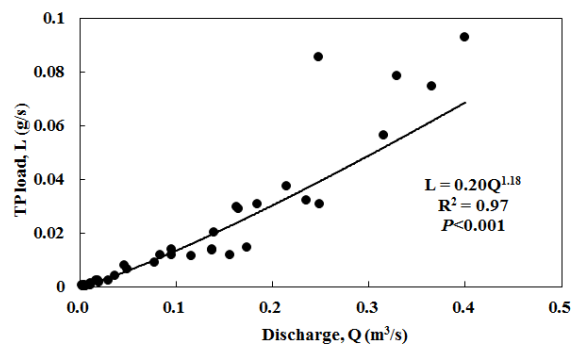
강우시 측정된 3개의 강우사상에 대한 TN과 TP의 지표배출량 (Q)과 지표배출부하량 (L)과의 관계는 Fig. 8과 같다. TN과 TP의 L-Q 관계식은 각각 $L = 0.86Q^{0.65}$, $L = 0.20Q^{1.18}$ 으로 TP의 지수는 1보다 크고, TN의 지수는 1보다 작게 나타났다.

영농기간 동안의 물질수지는 Table 6과 같다. 유입부하 중 용수부하가 차지하는 비율은 80.0 % 이상으로 높게 나타났고, 배출부하 중 지표배출부하가 차지하는 비율은 90.0 % 이상으로 높게 나타났다. 또한, TN과 TP의 강우시 지표배출부하는 각각 10.7과 1.4 kg/ha이며, 총 지표배출부하 중 강우시 지표배출부하가 차지하는 비율은 각각 15와 36 %로 낮게 나타났다. 이에 반하여 농촌 소유역 유출수에서 TN과 TP의 연부하량 중 강우시 부하량이 차지하는 비율 각각 73과 95 %로 높게 나타났다(Oh et al., 2006). 이와 같은 차이는 광역논에서는 용수 공급이 평상시에는 이루어지나, 강우시에는 중단되어 평상시 유출량이 많고, 강우시 TN 농도는 감소하고, TP 농도는 담수로 인하여 크게 증가하지 않기 때문으로 생각된다.

식 (2)에 의한 TN과 TP의 순배출부하량은 각각 13.7와 0.7 kg/ha로 높은 배출형으로 나타났다. 그러나, 이 값은 전북 남



(a) TN



(b) TP

Fig. 8 Relationship between discharge and nutrient load during the storm events

Table 6 Nutrient mass balance in study area

Constituent	Inflow load (kg/ha)			Outflow load (kg/ha)			Net outflow load (kg/ha)
	Irrigation	Rainfall	Subtotal	Surface outflow	Percolation	Subtotal	
TN	54.6 (88 %)	7.4 (12 %)	62.0	72.7 (96 %)	3.0 (4 %)	75.7	13.7
TP	2.9 (88 %)	0.4 (12 %)	3.3	3.8 (95 %)	0.2 (5 %)	4.0	0.7

Table 7 Nutrient load per unit area at paddy field watersheds in several studies

Region, Nation	Watershed area (ha)	Rainfall (mm)	Method of irrigation	TN (kg/ha)	TP (kg/ha)	References
Cheongju, Korea	23.4	1,057	Weir	21.1	1.1	This study
Cheongju, Korea	50.1	890-1,212	Weir	5.5-26.3 ^a	0.1-0.5 ^a	Oh et al. (2002)
Namwon, Korea	115.0	1,065-1,296	Pumping station	46.7-50.6	1.8-2.3	Yoon et al. (2002b)
Yongin, Korea	10.3	1,355-1,391	Reservoir	16.8-19.9	1.9-4.3	Song et al. (2013)
Korea				23.9	2.2	Ministry of Environment (1995)
Tsukuba, Japan	7.3	522	Recycling irrigation	-0.3	0.1	Feng et al. (2004)

^aMeasured from early May to late September

원시에 위치한 양수장 관개를 실시하고 있는 논 주체 (83 %) 유역을 대상으로 실시한 순배출부하량 TN 18.4-22.7 kg/ha 과 TP 1.5-1.9 kg/ha (Yoon et al., 2002b)보다 더 작은 값에 해당된다.

또한, 식 (3)에 의한 TN과 TP의 원단위는 각각 21.1과 1.1 kg/ha으로 나타났다(Table 7). 이 값은 본 연구지역을 포함한 광역논 지역에서 1999-2000년 측정된 값 TN 5.5-26.3 kg/ha 과는 비슷하나, TP 0.1-0.5 kg/ha보다는 크고 (Oh et al., 2002), 양수장 관개 광역논에서의 원단위 TN 46.7-50.6 kg/ha, TP 1.8-2.3 kg/ha (Yoon et al., 2002b)보다는 작게 나타났다. 또한, 본 연구에서의 원단위를 저수지 관개 광역논에서의 원단위 (Song et al., 2013)와 환경부 원단위 (Ministry of Environment, 1995)와 비교하면 TN은 비슷하나 TP는 작게 나타났다. 그러나 본 지역에서의 원단위는 일본 순환관개 논 지역에서의 원단위 TN -0.3 kg/ha, TP 0.1 kg/ha (Feng et al., 2004)보다는 큰 것으로 나타났다.

본 지역에서의 TP 원단위가 비교적 낮은 것은 입자성 P의 침강으로 배출부하가 크지 않고, 많은 용수량과 용수의 높은 TP 농도로 용수부하가 크기 때문으로 생각된다. N는 용존성이 강하여 용수와 함께 유입된 것이 대부분 유출되나, P는 입자성이 강하여 용수와 함께 유입된 상당량의 P가 논에 침강되어 농토양에 흡착되는 것으로 생각된다. 유사에 부착되어 있는 많은 양의 입자성 P는 유사와 함께 이동하여 논과 특성이 비슷한 습지에 침강되는 것으로 보고되었다 (Walbridge and Struthers, 1993).

V. 결 론

본 연구에서는 수원이 풍부한 하천관개지역 광역논을 대상으로 2012년 영농기 (4-9월) 동안 영양물질의 농도와 부하 특성에 관하여 조사하였고, 물질수지를 분석하였다.

조사지역의 용수량은 2,000 mm가 넘어 큰 저수용량의 저수지를 수원으로 하는 광역논의 용수량과 비슷하나, 간헐적인 관개를 하는 양수장 지구 광역논의 용수량보다는 크게 나타났다. 용수에서의 평상시 TN과 TP의 평균농도는 각각 2.8, 0.15 mg/L로 저수지 관개 광역논이나 양수장 관개 광역논에서의 값보다 높게 나타났다. TN과 NO₃-N의 유량기중 평균농도는 시비의 영향으로 평상시에는 용수보다 배수에서 높게 나타났으며, 배수의 경우 강우에 의한 희석으로 평상시보다 강우시에 낮게 나타났다.

TN과 TP의 유입부하 중 용수부하가 차지하는 비율은 각각 88 %로 나타났고, 배출부하 중 지표배출부하가 차지하는 비율은 90 % 이상으로 높게 나타나, 관개와 지표배수와 같은 물관리가 물질수지에 미치는 영향이 큰 것으로 사료된다. 조사지역에서의 TN과 TP의 원단위는 각각 21.1과 1.1 kg/ha을 나타났다. 특히 TP 값은 양수장 관개나 저수지 관개 광역논에서의 값에 비하여 작게 나타났는데, 이는 용수와 함께 유입되는 입자성 P의 침강으로 배출부하가 크지 않고, 많은 용수량과 높은 용수 농도로 용수부하가 높기 때문으로 생각된다.

논에서의 영양물질의 순배출부하 및 원단위는 용수농도, 시비량, 강수량, 물관리 등의 조건에 의해 다르게 나타날 수

있기 때문에 다양한 조건 하에서 장기적 모니터링의 자료의 축적이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌 연구원에서 지원되는 “새만금 유역 농업비점오염 저감기법 개발”의 일환으로 진행되었습니다.

REFERENCES

1. Cassman, K. G., and D. N. Munns, 1980. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature and depth, *Soil Science Society of America Journal* 44(6): 1233-1237.
2. 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, *Agricultural Water Management* 68(1): 47-60.
3. Hama, T., T. Aoki, K. Osuga, S. Sugiyama, and D. Iwasaki, 2013. Reducing the phosphorus effluent load from a paddy-field district through cyclic irrigation, *Ecological Engineering* 54: 107-115.
4. Jang, H., J. S. Kim, Y. H. Kim, and C. M. Song, 2011. Characteristics of nutrient concentrations in groundwater under paddy and upland fields, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(6): 67-74 (in Korean).
5. Kim, J. S., S. Y. Oh, K. S. Kim, and S. K. Kwun, 2001. Characteristics of pollutants concentrations at paddy field areas during irrigation periods, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(6): 163-173 (in Korean).
6. Kim, J. S., S. Y. Oh, and K. Y. Oh, 2006. Nutrient runoff from a Korean rice paddy watershed during multiple storm events in the growing season, *Journal of Hydrology* 327: 128-139.
7. Kunimatsu, T., and M. K. Muraoka, 1989. *Analysis of River Pollution Model*, Kibodo Press, pp.50-60 (in Japanese).
8. Ministry of Environment, 1995. *Report on Unit Load of Nonpoint Source Pollutants* (in Korean).
9. Ministry of Environment, 1997. *Standard Methods for Water Quality*, pp. 199-209 (in Korean).
10. Oh, S. Y., J. S. Kim, K. S. Kim, S. J. Kim, and C. G. Yoon, 2002. Unit loads of pollutants in a paddy fields area with large-scaled plots during irrigation seasons, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(2): 136-147 (in Korean).
11. Oh, K. Y., J. S. Kim, and S. Y. Oh, 2009. Behavior of nutrients in runoff water from a small rural watershed, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(2): 51-57 (in Korean).
12. Song, J. H., M. S. Kang, I. Song, S. H. Hwang, J. Park, S. M. Jun, K. U. Kim, and J. R. Jang, 2013. Analysis of nutrient load balance in the reservoir irrigated paddy bloc, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 165-175 (in Korean).
13. Takeda, I., T. Kunimatsu, S. Kobayashi, and T. Maruyama, 1991. Pollutants balance of a paddy field area and its loadings in the water system, *Trans. of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Land Reclamation* 153: 62-72 (in Japanese).
14. Walbridge, M. R. and J. P. Struthers, 1993. Phosphorous retention in non-tidal palustrine forested wetlands of the mid-Atlantic region, *Wetlands* 13(2): 84-94.
15. Yoon, C. G., B. H. Kim, J. J. Hong, and H. H. Sun, 2002a. Characteristics of pollutant loading from paddy field area with groundwater irrigation, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(5): 116-126 (in Korean).
16. Yoon, K. S., K. H. Han, J. Y. Cho, C. H. Choi, J. G. Son, and J. K. Choi, 2002b. Water and nutrient balance of paddy field irrigated from a pumping station during cropping period, *J. of the Korean Society of Rural Planning* 8(1): 15-25 (in Korean).