



저수지 관개 광역 논외 영양물질 수지 분석

Analysis of Nutrient Load Balance in the Reservoir Irrigated Paddy Block

송정현* · 강문성**† · 송인홍*** · 황순호* · 박지훈* · 전상민* · 김계웅* · 장정렬****

Song, Jung-Hun · Kang, Moon-Seong · Song, Inhong · Hwang, Soon-Ho ·

Park, Jihoon · Jun, Sang-Min · Kim, Kye-Ung · Jang, Jeong-Ryeol

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the nutrient load balance in the reservoir irrigated paddy block during growing seasons. Idong reservoir irrigation paddy block of 10.3 ha in size was selected to collect hydrologic and water quality data. Irrigation, canal flows, and paddy field drainage were measured using a water level gauge, while water samples were collected and analysed for water quality. The water balance analysis showed that 81 % and 75 % of total outflow were through paddy and irrigation canal drainage during 2011 and 2012, respectively. The water quality of paddy field drainage varied greatly depending on rice cultivation stage ranging from 0.05 to 24.55 mg/L and from 0.01 to 0.76 mg/L for T-N and T-P, correspondently. Paddy field drainage loads during May through June account for 64 % and 76 % in 2012 and 2013, while 82 % and 81 % for T-P in 2011 and 2012, respectively. The Pearson correlation analysis showed that rainfall was significantly correlated with nutrient loads during July through August due to runoff, and irrigation was related with nutrient loads of drainage during some period of July through September due to irrigation return flow. This study results showed characteristics of inflow and outflow nutrient loads from plentiful irrigated paddy block.

Keywords: Paddy; nutrient; water balance; water quality; mass balance

1. 서 론

농업비점오염원은 강우로 인해 지표유출수를 통해 배출되거나 물 및 시비 관리, 토양 관리 등의 영농방법에 따라 배출양상이 다양하며, 점오염원과는 달리 광범위한 지역을 통해 배출되기 때문에 오염물질의 수집 및 처리에 어려운 특징이 있다 (Choi et al., 2000; Kim et al., 2005; Kang, 2010). 이 중 질소 (N)와 인 (P)은 점오염원에 비해 저농도이지만 배출되는 수량이 막대하여 유역의 오염부하량에 큰 비중을 차지하고 있으며, 하천이나 호수의 부영양화에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다 (Yoon et al., 2002; Yoshinaga et al., 2007; Kang, 2010).

* 서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부

** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸무연구원

*** 서울대학교 농업생명과학연구원

**** 한국농어촌공사 농어촌연구원

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

2013년 11월 11일 투고

2013년 11월 18일 심사완료

2013년 11월 18일 게재확정

우리나라는 2007년 기준 총 이용량 중 하천유지용수를 제외한 수자원 이용량의 약 62 %인 159억톤을 농업용수로 이용하고 있으며, 이 중 약 80 %가 4월에서 9월까지 논 용수량으로 이용되고 있다 (MOLTM, 2011). 논 용수량은 2011년 기준 전체 논벼 면적 중 약 80 %가 수리시설물을 통해 공급받고 있으며 (MFAFF, 2012), 수리답 중 56.2 %가 저수지를 통해 공급받고 있다 (KRC, 2010). 선행연구에 의하면 우리나라의 논 관개용수 회귀율은 32 ~ 70 %로 보고되고 있으며 (Chung and Park, 2004; Kim et al., 2010), 수량이 풍부한 저수지의 경우 관개회귀수량에 의한 논 배출부하량은 상당할 것으로 사료된다.

광역 논외 배수량은 논 포장에서 배수되는 수량과 원활한 용수 배분 및 논 포장에서의 취수를 위하여 여분으로 공급되어 관개되지 않고 하천으로 유입되는 배수량으로 구분된다 (Kim et al., 2006; Song, 2013; Song et al., 2013). 따라서 광역논외의 배출부하량은 논 포장에서의 배출부하량뿐만 아니라 용수로에서 하천으로 흘러들어가는 배출부하량도 고려해야 한다.

우리나라에서의 논 비점오염 관련 선행연구를 살펴보면 Jeon et al. (2005)은 논에서의 관개용수가 풍부한 지역과 부족한 지역에 대해 영양물질 수지를 비교·분석하였다. Cho et al. (2006)

은 시비량이 다른 세 개의 시험구를 대상으로 T-N (Total Nitrogen), T-P (Total Phosphate), COD_{Cr}의 농도 변화 및 분얼비 후의 배출부하량을 파악하는 연구를 수행하였으며, Song et al. (2012)은 물꼬 높이, 시비량, 관개수 수질 시나리오를 구성하여 포장단위 수질모형을 이용하여 시나리오별 배출부하량을 평가하였다. 광역 논에서의 배출부하량 관련 국내 연구는 Yoon et al. (2002), Oh et al. (2002), Kim et al. (2005)에 의해 영양물질 수지가 분석된 바 있다. 이와 같이 많은 연구에도 불구하고, 대부분의 연구는 포장단위에서의 논 비점오염 배출 특성을 조사·분석한 것으로 용수로에서 관개되지 않고 하천으로 흘러들어가는 배출부하량은 고려되지 않았다. 또한, 광역 논에 관한 선행연구는 용수원이 하천수인 경우로, 저수지의 경우 관개수의 수량 및 수질이 하천수와는 다르기 때문에 이에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 이동저수지를 용수원으로 하는 광역 논을 대상으로 수문·수질 계측망을 구축하여 모니터링 자료를 측정하고, 수집한 자료를 이용하여 영양물질 수지를 분석하여 영양물질의 기작을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지구 및 계측망 구성

본 연구에서는 이동저수지를 주수원공으로 하는 면적 10.3 ha의 광역 논을 대상지구로 선정하였다. 용수로는 폭 60 cm의 콘크리트 수로이고 배수로는 2011년까지 흙 수로였으나 2012년부터

터 폭 90 cm의 콘크리트 수로로 되어있다.

Fig. 1은 대상지구의 위치 및 모니터링 설계 모식도를 보여주고 있다. 관개용수는 용수간선에서 분지되어 2개의 분수문으로부터 대상지구로 유입되어 용수로로 따라 포장으로 관개되거나 말단부에서 하천으로 배수된다. 대상지구의 포장 배수량은 포장에서 물꼬를 월류하여 1개의 배수로를 통해 하천으로 배수된다.

대상지구의 물수지 분석을 위해 기상인자, 관개량, 용수로 배수량, 논 포장 배수량 등을 측정하였다. 대상지구의 강우량과 기상자료 조사를 위하여 용남관개지구 내에 위치한 남사면 농가 옥상에 강우량계와 AWS (Automatic Weather Station)를 설치하였다. 관개량과 용수로 배수량을 측정하기 위하여 각 용수로의 시점부와 말단부에 초음파 수위계를 설치하여 수위를 10분 간격으로 측정하였다. 또한, 논 포장 배수량을 측정하기 위하여 배수로의 말단부에 초음파 수위계를 설치하여 10분 간격으로 수위를 관측하였다. 물질수지 분석을 위하여 자동 채수기를 배수로의 말단부에 설치하여 배수량 수질을 측정하였다.

2. 물수지 분석 방법

광역 논외의 물수지는 관개량, 강우량, 증발산량, 침투량, 광역 논 배수량 등으로 구성되며 식 (1)로부터 계산된다.

$$\Delta S = IR_t + RAIN_t - INF_t - ET_t - PDR_t \quad (1)$$

여기서, ΔS 는 광역 논에 담수된 수량 (mm), IR 은 관개량

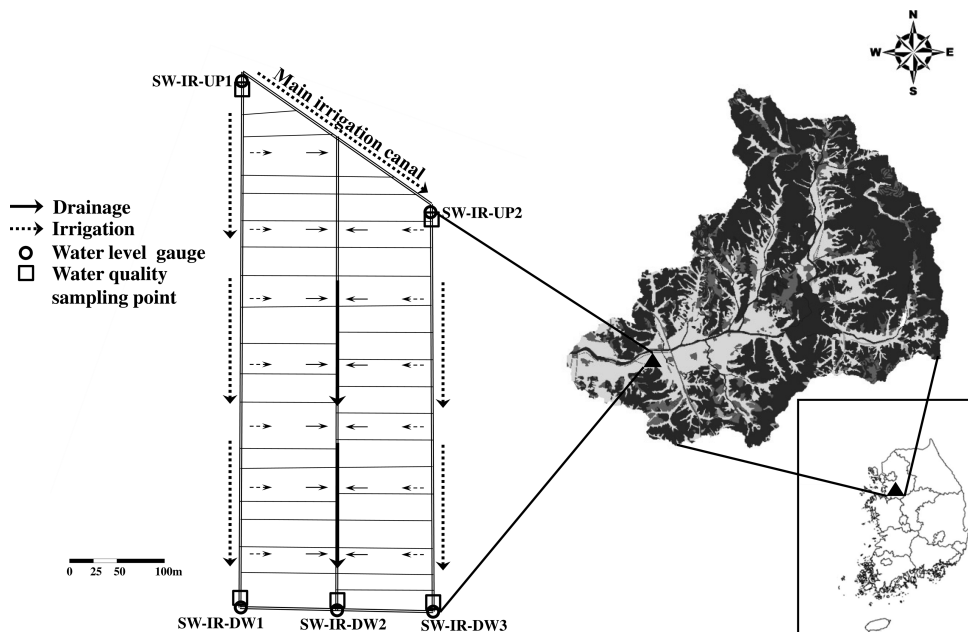


Fig. 1 Schematics of the monitoring systems for the study area

(mm), $RAIN$ 은 강우량 (mm), INF 는 침투량 (mm), ET 는 증발산량 (mm), PDR_t 은 광역 논 배수량 (mm)이다.

광역 논 배수량은 논 포장에서 물꼬 높이를 초과한 수량이 물꼬를 넘어 배수되는 논 포장 배수량과 수리시설물에서 공급된 용수량 중 관개되지 않고 하천으로 흘러들어가는 용수로 배수량으로 구성된다. 논 광역의 배수량은 식 (2)에 의해 계산된다 (Song, 2013; Song et al., 2013).

$$PDR_t = DR_t + ICD_t \quad (2)$$

여기서, PDR_t 는 총 배수량 (mm), DR_t 는 논 포장 배수량 (mm), ICD_t 는 용수로 배수량 (mm)이다.

수위를 유량으로 환산하기 위하여 영농기에 용·배수로 유속을 정기적으로 조사하였다. 용·배수로의 단면을 조사하여 유속을 유량으로 환산하였으며, 초음파 수위계의 수위와 유량을 통해 수위-유량 관계곡선을 작성하였다.

증발산량은 AWS에서 수집한 평균온도, 상대습도, 평균풍속, 일사량과 수원지방의 순별 작물계수 (Yoo et al., 2006)를 이용하여 Penman-Monteith 공식으로 산정하였다. 침투량은 시험포장 실측치와 결측기간에 대해 선행 연구 (Chung and Park, 2004; Kim et al., 2010)를 참고하여 이용하였다.

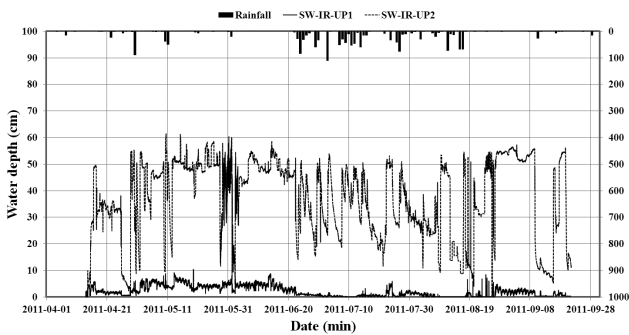
3. 물질수지 분석 방법

물질수지 분석을 위한 식은 다음 식 (3)과 같다.

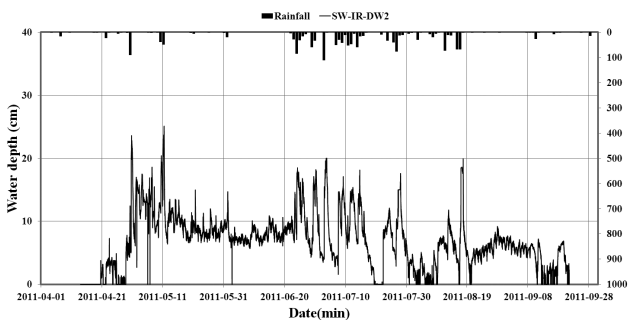
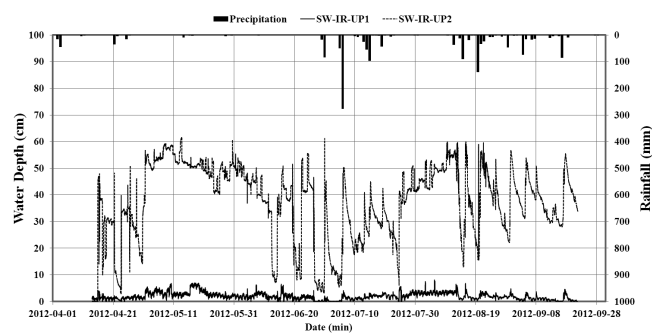
$$\Delta S = IR_m + PR_m + FER_m - INF_m - PU_m - PDR_m \quad (3)$$

여기서, IR_m 는 관개에 의한 부하량, PR_m 은 강우에 의한 부하량, FER_m 은 시비에 의한 부하량, INF_m 은 침투에 의한 부하량, PU_m 은 식물흡수에 의한 부하량, PDR_m 은 배수량에 의한 부하량이다.

물질수지 분석을 위하여 관개수 및 논물의 시료를 2주 1회 단위로 정기 채취하였고, 시비 후 논물 농도 변화를 파악하기 위해 기비 시비 후 논물을 12시간 간격으로 24회 집중 채취하였다. 또한, 강우 시 집중조사를 위하여 자동채수기를 강우계와 연계하여, 15분에 2.54 mm (0.1 inch) 이상의 강우 발생시 유출수를 채취하였다. 수질 시료의 분석은 서울대학교 농업과학공동기기센터 (National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)에 의뢰하였다. 관개, 강우 및 침투 부하량 산정방법은 Oh et al. (2002)에 상세히 서술되어 있으며, 배수에 의한 부하량은 강우시와 비강우시로 구분하여 산정하였다. 시비 및 작물흡수에 의한 부하량은 농가를 방문하고, 식물체의 T-N과 T-P를 분석하여 산정하였다.



(a) SW-IR-UP1&2 stations



(b) SW-IR-DW2 station

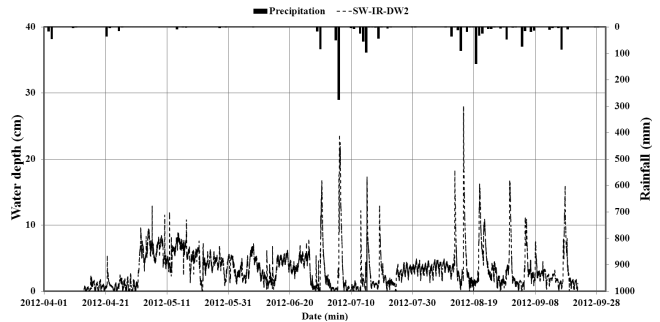


Fig. 2 Water stage at the monitoring stations (2011~2012)

III. 결과 및 고찰

1. 광역 논 물수지 분석

가. 수로 수위 모니터링

Fig. 2는 2011년과 2012년의 용수로 유입구인 SW-IR-UP1과 SW-IR-UP2 지점의 수위와 배수로 말단인 SW-IR-DW2 지점의 수위를 보여주고 있다. SW-IR-UP1과 SW-IR-UP2 지점은 영농초기와 비 강우시에 수위가 상대적으로 높게 유지되는 것으로 나타나, 이 시기에 관개가 집중되는 것으로 사료된다. SW-IR-DW2 지점은 영농초기에는 관개회귀수량에 의한 배수에 의해 수위가 올라가는 것으로 나타났고, 7, 8월에는 강우와 관개회귀수량이 동시에 영향을 미쳐 수위가 올라가는 것으로 사료된다. SW-IR-DW2지점의 수위는 2012년이 2011년에 비해 수위가 상대적으로 낮게 유지되는데, 이는 흠수로서 콘크리트 수로로 단면의 형태가 직사각형으로 변했기 때문으로 사료된다.

나. 수위-유량 관계곡선

Table 1은 대상지구 용·배수로의 수위-유량관계를 보여주고

Table 1 Stage-discharge relationships of the monitoring stations

Stations	Year	Stage-discharge curves	R ²
SW-IR-UP1	2011~2012	$Q = 279.88 \times h^{2.6992}$	0.77
SW-IR-UP2	2011~2012	$Q = 0.1972 \times h^{2.8576}$	0.93
SW-IR-DW1	2011~2012	$Q = 0.6445 \times h^{1.6672}$	0.98
SW-IR-DW2	2011	$Q = 4.8524 \times h^{2.2491}$	0.89
	2012	$Q = 5.8280 \times h^{2.0111}$	0.97
SW-IR-DW3	2011~2012	$Q = 0.0924 \times h^{2.1411}$	0.94

Q: Discharge (m³/s), h: Stage (m)

있다. SW-IR-DW2는 배수로의 말단으로 2012년 초에 흠 수로에서 콘크리트로 라이닝 수로로 변하여, 2011년과 2012년의 유량 특성이 서로 상이하므로, 2011년과 2012년에 각각 수위-유량 관계곡선을 작성하였다. SW-IR-DW2 지점의 수위-유량관계의 결정계수 (R²)는 2011년의 경우 0.89이고, 2012년의 경우 0.97으로 나타났다. SW-IR-UP2, SW-IR-DW1, SW-IR-DW3 지점은 0.93~0.98의 높은 결정계수를 보여 신뢰성있는 적용이 가능할 것으로 나타났다. SW-IR-UP1 지점의 결정계수는 0.77으로 다른 지점에 비해 그 값이 낮게 나타나는데, 이는 이 지점이 다른 지점에 비해 경사가 가파른 지점으로 수위는 낮고 유속이 빨라 유량측정의 정확도가 낮았기 때문으로 사료된다.

다. 물수지 분석

Table 2는 대상지구의 물수지 분석 결과를 보여주고 있다. 강우량은 2011년과 2012년에 각각 1391.2 mm, 1354.8 mm로 나타났다. 관개량 및 용수로배수량은 2011년의 경우 각각 2,324.1 mm, 630.0 mm로 관개량의 27.1%가 관개되지 않고 하천으로 유출되는 것으로 나타났으며, 2012년은 2,008.0 mm가 공급되어 11.9 %인 239.7 mm가 용수로 배수량으로 배수되었다. 관개량 중 용수로 배수량의 비율에 관한 선행연구를 살펴보면 Kim et al. (2005)은 용수로 배수량은 공급량의 11~49 %를 차지하고 있으며, 가뭄 시 공급량 대비 용수로 배수량이 감소하는 것으로 보고하고 있다.

총 배수량은 2011년의 경우 3,015.8 mm이었으며, 이 중 논 포장 배수량은 2,385.8 mm로 나타났으며, 2012년의 총 배수량은 2,505.3 mm이었으며 논 포장 배수량으로 2,265.6 mm가 흘러나가는 것으로 나타났다.

한편, 우리나라의 광역 논 물수지 모니터링 관련 선행연구를 살펴보면 Yoon et al. (2002)은 양수장 관개지구를 대상으로

Table 2 Water balance in a paddy block scale from the observed data (2011-2012) (Unit : mm)

Year	Date	Inflow			Outflow				
		Water supply	Rainfall	Subtotal	Irrigation canal drainage	Paddy field drainage	Infiltration	Evapotranspiration	Subtotal
2011	May	967.0	108.8	1075.8	245.4	879.7	50.1	52.8	1228.0
	Jun.	609.0	291.8	900.8	183.3	588.2	32.7	145.5	949.7
	Jul.	277.6	644.2	921.8	125.6	577.6	17.6	146.8	867.6
	Aug.	250.1	307.0	557.1	44.4	245.7	8.9	168.5	467.5
	Sep.	220.4	39.4	259.8	31.3	94.6	2.1	85.4	213.4
	Sum	2324.1	1391.2	3715.3	630.0	2385.8	111.4	599.0	3726.2
2012	May	734.8	16.5	751.3	56.0	720.5	50.1	63.1	889.7
	Jun.	333.7	100.8	434.5	62.3	374.1	32.7	182.2	651.3
	Jul.	262.2	572.3	834.5	61.3	410.0	22.5	168.4	662.2
	Aug.	527.9	426.2	954.1	50.2	452.2	15.1	212.6	730.1
	Sep.	149.4	239.0	388.4	9.9	308.8	8.0	73.3	400.0
	Sum	2008.0	1354.8	3362.8	239.7	2265.6	128.4	699.6	3333.3

1999년 경우 강우량 1,065 mm, 관개량 1,340 mm에 대해 배수량이 1,453 mm으로, 2000년의 경우 강우량 1,296 mm, 관개량 1,185 mm에 대해 배수량 1,421 mm으로 보고하였다. Oh et al. (2002)은 하천수 관개 광역 논에 대한 현장 조사 결과, 1999년의 경우 관개량 3,690.4 mm, 강우량 890.1 mm가 유입되어 배수량 4,055.2 mm가 흘러나가는 것으로 보고하였고, 2000년의 경우 관개량 3,159.6 mm, 강우량 1,212.2 mm가 유입되어, 배수량 3,731.2 mm가 흘러나가는 것으로 보고하였다. Kim et al. (2005)는 14.2 ha 크기의 하성평단지 광역 논에 대해 물수지를 분석하였으며, 그 결과 2002년의 경우 관개량 1,321 mm, 강우량 888 mm가 유입되어 배수량 677 mm이 흘러나가는 것으로 보고하였으며, 2003년의 경우 관개량 1,493 mm, 강우량 1,115 mm가 유입되어 배수량 865 mm가 흘러나가는 것으로 보고하였다. 이와 같이 연도별, 지역별로 연구결과가 상이하게 나타나는데, 이는 용수원의 종류에 따라 관개량이 다르고, 지역에 따라 침투량, 물관리 방식이 다르며, 기상조건에 따라 강우량, 증발산량이 다르기 때문이라 사료된다 (Kim et al., 2005; Choi et al., 2012).

2. 광역 논 물질수지 분석

가. 관개량 및 배수량 수질

Table 3은 2012년부터 2013년까지의 영농기동안의 관개량, 용수로 배수량, 비강우시 논 포장 배수량과 강우시 논 포장 배수량의 수질 모니터링 결과를 나타낸 것이다.

관개량의 수질은 관측기간에 대해 T-N의 범위는 0.33~2.90 mg/L이었으며, T-P의 범위는 0.01~0.16 mg/L으로 나타났다. T-N의 농도는 2011년의 경우 2012년에 비해 높게 나타나는데, 이는 2011년에 이동저수지 상류 유역의 농업비점오염과 미처리 하수 등의 유입이 2012년에 비해 영향이 더 크게 미쳤기 때문으로 사료된다 (p value < 0.01). 선행연구 결과 (Kim et al., 2005; Oh et al., 2002)에 따르면 하천수 관개지역의 경우 본 연구 결과보다 농도가 높게 나타나는데, 하천수의 경우 점오염원의 영향

을 받으며, 본 연구 대상지구의 용수원인 이동저수지의 경우 상수원 보호구역으로 지정되어 관리되고 있기 때문이다.

용수로 배수량의 농도는 관측기간에 대해 0.12~4.00 mg/L 범위로 나타났으며, T-N의 용수로 배수량 농도가 2011년이 2012년에 비해 높게 나타나는 것은 관개량의 수질 경향을 따르기 때문으로, 관개량과 용수로 배수량의 Pearson 상관분석 결과 T-N의 경우 99 % 신뢰수준에서 유의한 상관성이 있는 것으로 나타났다.

비강우시 포장배수량의 농도는 T-N의 경우 0.05~24.55 mg/L로, T-P의 경우 0.01~0.76의 범위로 나타났다. T-N의 농도는 기비 시비 후 최대 24.55 mg/L까지 증가하였다가 약 10일 후 1.50 mg/L 이하로 감소하는 것으로 나타났으며, 추비 시비 직후 최대 7.00 mg/L까지 증가하였다가 점차 감소하는 경향을 보였다. T-P의 농도는 기비 시비 직후 최대 0.76 mg/L까지 증가하는 것으로 나타났다. 추비의 성분에는 T-P 성분이 포함되어 있지 않아 기비를 시비하고 약 10일 후부터는 T-P의 농도가 0.01~0.16 mg/L의 범위에 포함되는 것으로 나타났다.

강우시 포장배수량의 농도는 T-N의 경우 0.13~4.00 mg/L, T-P의 경우 0.01~0.67으로 나타났으며, 연도별 평균은 2011년의 경우 T-N 1.03 mg/L, T-P 0.13 mg/L, 2012년의 경우 T-N 0.64 mg/L, T-P 0.06 mg/L으로 나타났다.

나. 물질수지 분석

영농기 동안 광역 논에 영양물질 배출특성을 파악하기 위하여 물질수지를 분석하였으며, 그 결과는 Table 4, 5와 같다. 관개에 의한 T-N 부하량은 2011년에 29.63 kg/ha에서 2012년에 17.22 kg/ha으로 약 42 %, T-P 부하량은 1.17 kg/ha에서 0.88 kg/ha로 약 25 % 감소하였는데, 이는 관개량이 감소하였을 뿐만 아니라 농도 또한 감소하였기 때문이다. Kim et al. (2005)의 연구결과에 의하면 관개량이 본 연구결과보다 낮았음에도 불구하고 부하량이 높게 나타났는데, 이는 Kim et al. (2005)의 연구대상지의 용수원인 하천수의 수질이 더 높았기 때문으로 사료된다.

Table 3 T-N and T-P concentration in the experimental area during the rice cultivation period in 2011~2012

Year	Sample	T-N			T-P		
		No. of samples	Range (mg/L)	Mean (mg/L)	No. of samples	Range (mg/L)	Mean (mg/L)
2011	Agricultural water supply	18	0.33~2.90	1.71	18	0.01~0.28	0.07
	Irrigation canal drainage	20	0.31~4.00	1.58	20	0.01~0.16	0.05
	Paddy field drainage (non-rainy day)	25	0.33~20.30	3.35	25	0.01~0.70	0.12
	Paddy field drainage (rainy day)	146	0.13~4.00	1.03	146	0.01~0.67	0.13
2012	Agricultural water supply	13	0.35~1.83	1.17	13	0.02~0.13	0.04
	Irrigation canal drainage	11	0.12~1.84	1.00	11	0.02~0.09	0.05
	Paddy field drainage (non-rainy day)	18	0.05~24.55	2.26	18	0.01~0.76	0.17
	Paddy field drainage (rainy day)	56	0.18~2.38	0.64	56	0.01~0.26	0.06

배수에 의한 T-N 부하량은 2011년은 44.43 kg/ha로 용수로 배수량에 의해 약 17 % 배출되는 것으로, 논 포장 배수량에 의해 약 83 % 배출되는 것으로 나타났으며, 2012년은 34.83 kg/ha로 용수로 배수량에 의해 약 5 % 배출되는 것으로, 논 포장 배수량에 의해 약 95 % 배출되는 것으로 나타났다. 배수에 의한 T-P 부하량은 2011년은 2.92 kg/ha로 용수로 배수량에 의해 약 13 % 배출되는 것으로, 논 포장 배수량에 의해 약 87 % 배출되는 것으로 나타났으며, 2012년은 4.90 kg/ha로 용수로 배수량에 의해 약 2 %, 논 포장 배수량에 의해 약 98 % 배출되는 것으로 나타났다. 특히, 5월과 6월에 T-N은 2011년의 경우 약 64 %, 2012년의 경우 약 76 %를 차지하는 것으로 나타났고, T-P는 2011년의 경우 약 82 %, 2012년의 경우 약 81 %를 차지하는 것으로

나타나 영양물질 부하량은 영농초기에 집중되어 배출되는 특징이 있는 것으로 사료된다. 영농초기는 경운과 씨레질에 의해 토양의 교란, 시비 활동 등에 의해 많은 양의 영양물질이 배출되는 것으로 보고되고 있으며, 물꼬 높이 상승, 적절한 담수심 관리 등의 물관리에 의해 배출부하량을 저감할 수 있을 것으로 사료된다 (Yoon et al., 2003; Kim et al., 2005; Kang, 2010).

T-N 부하량의 경우 2011년에 비해 2012년의 경우 감소하였으나 T-P 부하량은 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 시비량이 T-N은 2011년 181.00 kg/ha에서 2012년 153.00 kg/ha로 감소하였으나, T-P 부하량은 2011년 56.00 kg/ha에서 2012년 87.00 kg/ha로 증가하였기 때문으로 사료된다.

한편, 광역 논 영양물질 배출부하량에 관한 선행연구에 따르면,

Table 4 T-N load balance at the study area in 2011 and 2012

Date	T-N (kg/ha)									
	Inflow				Outflow					
	Rainfall	Water Supply	Fertilizer	Subtotal	Irrigation canal drainage	Paddy field drainage	Infiltration	Uptake	Subtotal	
2011	May	1.04	8.23	168.00	177.26	2.23	16.27	1.14		19.64
	Jun.	2.78	12.20		14.98	3.50	6.21	0.43		10.14
	Jul.	6.13	1.98	13.00	21.11	0.89	10.36	0.30		11.55
	Aug.	2.92	3.23		6.16	0.49	2.59	0.10		3.18
	Sep.	0.38	3.99		4.37	0.57	1.31	0.03	120.37	122.28
	Sum	13.24	29.63	181.00	223.88	7.68	36.74	1.99	120.37	166.79
2012	May	0.16	6.60	140.00	146.75	0.47	22.50	1.67		24.65
	Jun.	0.96	2.39		3.35	0.45	2.94	0.31		3.69
	Jul.	5.45	1.89	13.00	20.34	0.44	0.89	0.06		1.39
	Aug.	4.06	4.04		8.10	0.39	4.75	0.19		5.33
	Sep.	2.28	2.30		4.57	0.15	1.85	0.05	131.80	133.84
	Sum	12.90	17.22	153.00	183.12	1.90	32.93	2.28	131.80	168.90

Table 5 T-P load balance at the study area in 2011 and 2012

Date	T-P (kg/ha)									
	Inflow				Outflow					
	Rainfall	Water Supply	Fertilizer	Subtotal	Irrigation canal drainage	Paddy field drainage	Infiltration	Uptake	Subtotal	
2011	May	0.22	0.15	56.00	56.38	0.04	1.25	0.08		1.37
	Jun.	0.38	0.59		0.97	0.19	0.52	0.02		0.72
	Jul.	0.64	0.24		0.88	0.11	0.58	0.02		0.70
	Aug.	0.17	0.13		0.30	0.02	0.14	0.01		0.17
	Sep.	0.03	0.06		0.09	0.01	0.07	0.00	15.21	15.29
	Sum	1.44	1.17	56.00	58.62	0.37	2.55	0.12	15.21	18.25
2012	May	0.09	0.26	87.00	87.35	0.02	2.83	0.19		3.04
	Jun.	0.14	0.12		0.26	0.02	0.62	0.06		0.70
	Jul.	1.34	0.14		1.48	0.03	0.90	0.05		0.98
	Aug.	0.26	0.32		0.58	0.03	0.24	0.01		0.27
	Sep.	0.18	0.04		0.22	0.00	0.21	0.01	15.63	15.85
	Sum	2.01	0.88	87.00	89.88	0.11	4.79	0.31	15.63	20.84

Kim et al. (2005)은 2002년의 경우 T-N 22.1 kg/ha, T-P 3.6 kg/ha으로, 2003년의 경우 17.3 kg/ha, T-P 5.0 kg/ha으로 보고하였으며, 영양물질의 배출부하 특성은 T-N의 경우 관개와 시비에 의해 유입부하량이 많고 강우에 의해 비료 성분이 배출될 수 있으며, T-P는 특성상 논 토양 내 대부분 흡착될 수 있고 T-N과 달리 기비로 전량 시비되기 때문에 강우시 논에서의 토양유실을 제외한 배출경로가 적다고 하였다. Oh et al. (2002)은 하천수 관개 광역논에 대해 1999년의 경우 T-N 99.3 kg/ha, T-P 3.50 kg/ha으로 2000년의 경우 T-N 107.4 kg/ha, T-P 2.98 kg/ha으로, Yoon et al. (2002)는 양수장 지구 광역논에 대해 1999년은 T-N 57.8 kg/ha, T-P 2.33 kg/ha으로 2000년 T-N 54.7 kg/ha, T-P 1.96 kg/ha으로 보고하였다.

다. 강우량 및 관개량과 배출부하량의 상관분석

본 연구에서는 강우량과 배출부하량, 관개량과 배출부하량 사이의 상관성을 알아보기 위해 Pearson 이변량 상관분석을 2011년과 2012년에 대해 월별로 실시하였다. 유의성 검정은 95 % 및 99 % 신뢰수준에서 분석하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다.

강우량과 배출부하량 사이는 T-N과 T-P에 대해 7월과 8월에 95 % 이상의 신뢰수준에서 유의한 상관성을 나타내었다.

수량이 풍부한 저수지 광역 논외의 경우 영농초기의 많은 관개량에 의한 회귀수량으로 인해 배출부하량이 발생하여 관개량과 배출부하량 사이의 유의한 상관성이 나타날 것으로 예상하였으나 2012년 6월을 제외하고는 특별한 상관관계를 나타내지 않았다. 이는 영농초기의 관개량은 이앙 및 담수심 유지 등의 영농활동에 소모되며, 또한 이 시기에는 중간 낙수가 실시되는데 강우량 또

는 관개량의 공급이 이루어지지 않지만 낙수에 의한 배출부하량이 발생하기 때문에 사료된다. 7~9월의 일부 기간은 95 % 이상의 신뢰수준에서 관개량과 배출부하량의 유의한 상관성이 나타나기도 하는데, 담수심이 물꼬 높이 이상으로 유지되는 경우에도 용수가 공급되어 관개회귀수량으로 인한 배출부하량이 발생하였기 때문에 사료된다. 이는 수량이 풍부한 저수지 관개 광역 논외의 배출 특성으로 사료되며, 7~9월의 경우 강우를 통해 관개를 하고 농업용수 공급은 일정 담수심 이하로 내려간 경우에 대해 수행한다면 관개수량을 절약할 수 있고, 배출부하량을 저감할 수 있을 것이라 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 용남관개지구 이동저수지 하류에 위치한 10.3 ha의 관개 광역 논을 대상으로 계측망을 구성하여, 기상·수문·수질 모니터링을 수행하였고, 수집한 자료를 이용하여 영양물질 수지를 분석하여 영양물질의 유입 및 배출과정을 정량적으로 평가하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 배수로 말단부의 수위는 영농초기에는 관개회귀수량에 의한 배수에 의해 수위가 상승했으며, 7~8월에는 강우와 관개회귀수량이 복합적으로 작용하여 수위가 상승하는 것으로 나타났다.
2. 물수지 분석 결과 2011년의 경우 관개량은 2,324.1 mm, 용수로 배수량은 630.0 mm, 논 포장 배수량은 2,385.8 mm으로 나타났고, 2012년의 경우 관개량은 2,008.0 mm, 용수로 배수량은 239.7 mm, 논 포장 배수량은 2,265.6 mm으로 나타났다.
3. 관개량의 수질은 관측기간에 대해 T-N의 범위는 0.33~2.90 mg/L이었으며, T-P의 범위는 0.01~0.16 mg/L으로 나타났다. 논 포장 배수량의 농도는 T-N의 경우 0.05~24.55 mg/L로, T-P의 경우 0.01~0.76 mg/L의 범위로 나타났으며, T-N은 기비 및 추비 시비 후 농도가 상승하는 것으로 나타났고, T-P는 기비 시비 직후 농도가 증가하는 것으로 나타났다.
4. 물질수지 분석 결과 용수로 배수량 및 논 포장 배수량의 T-N 부하량은 2011년의 경우 각각 7.68, 36.74 kg/ha로 나타났으며, 2012년는 1.90, 32.93 kg/ha가 흡수되는 것으로 나타났다. 용수로 배수량 및 논 포장 배수량의 T-P 부하량은 2011년의 경우 각각 0.37, 2.55 kg/ha로 나타났고, 2012년의 경우 0.11, 4.79 kg/ha로 나타났다.
5. 강우량과 배출부하량 사이의 Pearson 이변량 상관분석 결과, 홍수기인 7월~8월에 95 % 이상의 신뢰수준에서 유의한 상관성을 나타내었다. 관개량과 배출부하량 사이의 상관분석 결과 7~9월의 일부 기간에 대해서 95 % 이상의 신뢰수준에서 유의

Table 6 Pearson correlation between pollutant loads and rainfall or pollutant loads and irrigation in the study area during 2011 and 2012

The factors of Pearson correlation analysis		Rainfall and T-N	Rainfall and T-P	Irrigation and T-N	Irrigation and T-P
2011	May	-0.046	0.606	-0.071	0.102
	Jun.	0.359	0.319	-0.017	-0.642**
	Jul.	0.455*	0.726**	0.549**	0.430*
	Aug.	0.524*	0.506*	0.172	0.15
	Sep.	0.185	0.187	0.799**	0.761**
2012	May	-	-	0.097	0.217
	Jun.	-	-	0.575**	0.298
	Jul.	0.785**	0.935**	0.707**	0.387*
	Aug.	0.681**	0.688**	0.388*	0.123
	Sep.	0.749**	0.798**	0.889**	0.924**

The symbols of * and ** represent statistical significance at the confidence levels of 0.95 and 0.99, respectively.
The symbols of - represents the number of rainfall data is insufficient.

한 상관성이 나타나기도 하는데, 이는 이 시기에 관개회귀수량으로 인한 배출부하량이 발생하였기 때문으로 수량이 풍부한 저수지 관개 광역 논외 배출 특성으로 사료된다.

본 연구의 결론으로 저수지 관개 광역 논외에서의 영양물질의 배출은 영농활동과 강우뿐만 아니라 과도한 관개에 의한 영향 또한 큰 것으로 나타나 적정량의 농업용수 공급 및 물꼬 관리를 통한 배출 저감 노력이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구결과는 논 비점 부하 원단위 산정을 위한 기초자료를 구축하고, 또한 논 비점오염 저감을 위한 영농방법 개선의 기초자료로 이용될 수 있을 것이라 기대된다.

본 연구는 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 지원되는 “농업비점오염 저감을 위한 영농방법 개선기법 개발”의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Cho, J. W., J. S. Kim, K. Y. Oh, and S. Y. Oh, 2006. Pollutant concentrations at experimental paddy plots during irrigation season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 48(3): 97-106 (in Korean).
2. Choi, C. H., K. W. Han, J. Y. Cho, J. C. Chun, and S. J. Kim, 2000. Pollutant loading and changes of water quality at the Namdae-cheon watershed in Keum river districts. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 19(1): 26-31 (in Korean).
3. Choi, J. K., J. G. Son, K. S. Yoon, H. J. Lee, and Y. J. Kim, 2012. Runoff Characteristics in Paddy Field using Cow Manure Compost Fertilizer. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 54(3): 29-36 (in Korean).
4. Chung, S. O., and K. J. Park, 2004. Irrigation return flow measurement and analysis in a small size paddy area. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(7): 517-526 (in Korean).
5. Jeon, J. H., C. G. Yoon, J. K. Choi, and K. S. Yoon, 2005. The comparison of water budget and nutrient loading from paddy field according to the irrigation methods. *Korean Journal of Limnology* 38(1): 118-127 (in Korean).
6. Kang, M. S., 2010. Development of improved farming methods to reduce agricultural non-point source pollution. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(4): 40-50 (in Korean).
7. 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.
8. Kim, J. S., S. Y. Oh, K. Y. Oh, and J. W. Cho, 2005. Delivery management water requirement for irrigation ditches associated with large-sized paddy plots in Korea. *Paddy Water Environment* 3: 57-62.
9. Kim, M. K., K. A. Roh, N. J. Lee, M. C. Seo, and M. H. Koh, 2005. Nutrient load balance in large-scale paddy fields during rice cultivation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 38(3): 164-171 (in Korean).
10. Kim, T. C., H. C. Lee, and J. P. Moon, 2010. Estimation of return flow rate of irrigation water in Daepyeong pumping district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 52(1): 41-49 (in Korean).
11. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2010. Statistical yearbook of land and water development for agriculture, Uiwang, Korea (in Korean).
12. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF), 2012. Food, agriculture, forestry and fisheries statistical yearbook, Gwacheon, Korea (in Korean).
13. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLTM), 2011. Long-term Korea National Water Resources Plan, Gwacheon, Korea (in Korean).
14. 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. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 44(2): 136-147 (in Korean).
15. Song, J. H., 2013. A daily surface drainage simulation model for irrigation districts consisting of paddy and protected cultivation. M.S. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
16. Song, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, and J. R. Jang, 2012. Comparing farming methods in pollutant runoff loads from paddy fields using the CREAMS-PADDY model. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 31(4): 318-327 (in Korean).
17. Song, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, S. H. Hwang, J. H. Park, and J. H. Ahn, 2013. Surface drainage simulation

- model for irrigation districts composed of paddy and protected cultivation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 55(3): 63-73 (in Korean).
18. Yoo, S. H., 2006. Estimating of paddy rice consumptive use using geographic information system. M.S. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
19. Yoon, C. G., H. S. Hwang, K. W. Jung, and J. H. Jeon, 2003. Effects of ponded-water depth and reclaimed wastewater irrigation on paddy rice culture. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 45(4): 55-65 (in Korean).
20. 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. *Journal of Korean Society of Rural Planning* 8(1): 3-14 (in Korean).
21. Yoshinaga, I., A. Miura, T. Hitomi, K. Hamada, and E. Shiratani, 2007. Runoff nitrogen from a large sized paddy field during a crop period. *Agricultural Water Management* 87: 217-222.