

논의 영양물질 배출부하 특성과 수질정화 기능 분석

Analysis of the Characteristics of Nutrients Loading and the Water Purification Function in the Paddy-fields

김 현 수* 김 진 수** 김 영 일*** 정 병 호****
Kim, Hyoon Soo · Kim, Jin Soo · Kim, Young Il · Cheong, Byeong Ho

Abstract

The objective of this study is to analyze the characteristics of the nutrients loading and the water purification function in the paddy-fields. This study was carried out based on the research data in the three case studies.

1. Irrigation requirement is most high at the diversion weir area, because the farmers can use water more easily there than at the reservoir and pumping station areas. Also, the drainage amount is significantly ($p < 0.05$) related with an irrigation amount.

2. T-N surface drainage loading is insignificantly correlated with amount of irrigation, rainfall and fertilization and T-P surface loading is significantly correlated with rainfall amount. The mean surface drainage loading of T-N and T-P in study areas during growth season were 46.8 kg/ha and 1.99 kg/ha, respectively.

3. The net outflow loadings of T-N in study areas ranged from -5.8 to 22.7 kg/ha and those of T-P ranged from -0.67 to 1.89 kg/ha, indicating that paddy fields can change from sources to sinks according to years and water sources.

1. 서 론

최근 들어 점원오염원 처리시설이 상당부분 정비되면서 비점오염원이 수환경에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있으나, 비점오염부하는 강우 및 기후 등의 자연조건에 의해 발생함에 따라 그 발생부하량을 예측하고 정량화 하는데

많은 어려움 있다. 그 처리에 있어서도 경제성과 효율성이 매우 낮아 비점오염부하 저감방안으로 발생원 관리의 중요성이 강조되고 있다.

1970년대 이후 지속적인 농업용수개발사업으로 용수공급이 용이해짐에 따라 우리나라 농업은 필요수량 이상의 용수가 공급되는 경향이 있으며, 그로 인하여 배수량이 많아져 영양물질

*농업기반공사 농어촌연구원(kimhs@karico.co.kr)

**충북대학교 농과대학(jskim@chungbuk.ac.kr)

***농업기반공사 농어촌연구원(asksoil@karico.co.kr)

****농업기반공사 농어촌연구원(bhcheong@karico.co.kr)

키워드 : 물 수지, 영양물질, 배출부하, 수질정화기능

배출부하량이 증가하여 하천과 호소의 수환경에 악영향을 미치고 있는 것으로 생각되며, 이는 환경부에서 제시한 농업지역의 비점오염원 발생을 억제하는 요령에서도 지적하고 있다.

환경부의 농업지역 비점오염원 발생 억제 방안으로는 비료·농약의 안전사용 준수와 토양에 포함된 영양염류의 활용 등 친환경농업 실천, 시비효율을 고려한 작물 최대 흡수시기의 시비, 윤작 및 순환경작 등의 영농방식과 함께 적절한 농업용수의 공급으로 영양물질이 포함된 농업배수의 하천방류량 최소화 등을 제시하고 있다⁵⁾.

따라서, 농업비점오염 저감과 농업용수 절약, 그리고 수환경 보전을 위한 방안으로 적정 용수 공급으로 농업배수량을 줄이고 영양물질 배출량을 최소화할 수 있는 환경친화형 물관리 기법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구는 벼를 재배하는 논에 영양물질(T-N과 T-P) 배출부하 특성과 수질정화기능을 정량적으로 분석하고, 환경친화형 물관리(관개배수)기법 개발에 필요한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 대상자료

본 연구에서는 벼를 재배하는 수원공 시설별 논에 영양물질(T-N, T-P) 배출부하 특성과

수질정화기능을 비교·분석하기 위하여 우리나라 수리답의 대부분을 차지하고 있는 저수지(reservoir), 양수장(pumping station), 보(diversion weir) 지구를 대상으로 하고 있는 3개의 선행연구 자료를 이용하였으며, Table 1은 대상 선행연구의 개황을 나타내고 있다.

2. 대상 선행연구의 개요

가. 선행연구 A (이하 “양수장 지구”)

선행연구 A는 양수장 지구의 광역 논으로부터 영농기(5월 초순 ~ 9월 하순) 오염부하량을 산정하기 위하여 전북 남원시 금풍지구(지구면적: 115ha)를 대상으로 2개년(1999~2000년) 물 수지조사와 수질모니터링을 실시하였다. 용수량과 배수량은 용수로와 배수로에 설치된 수위계로부터 수위-유량 관계식을 이용하여 산정 하였으며, 수질시료는 용수로와 배수로에서 채취하였다.

선행연구 A에서는 양수장지구로서 용수량이 풍부하여 상대적으로 배수량이 많았고, 이에 따른 영양물질 부하량이 크게 나타났으며, 이를 줄이기 위해서는 적절한 물관리가 필요하다고 강조하였다.

나. 선행연구 B (이하 “보 지구”)

선행연구 B는 미호천을 용수원으로 보 시설로 용수를 공급받는 충북 청원군 옥산면에 위치한

Table 1. The location on the case study

Case study	Location	Area (ha)	Period (year)	Irrigation water source
A ⁴⁾	Namwon, Jeonbuk	114.8	'99~'00	River (pumping station)
B ²⁾	Cheongwon, Chungbuk	41.9	'01~'02	River (diversion weir)
C ³⁾	Cheongwon, Chungbuk	0.3	'02~'03	Reservoir

소로지구(50.1ha)를 대상으로 3개년간(2000~2002년) 수행하였으며, 농지배수의 친환경적 관리 및 처리기법개발을 위하여 영농기(4월 중순~9월 하순) 광역단위 농지배수의 수량, 수질, 오염부하량을 분석하였으며, 유량 및 수질 자료는 용수로 시점 3곳, 용수로 말단 1곳, 배수로 1곳, 배수로 말단 1곳, 논 표면수 2곳, 침투수 2곳을 선정하여 측정하였다.

본 연구에서는 2001~2002년의 자료를 이용하였다.

다. 선행연구 C (이하 “저수지 지구”)

선행연구 C는 충북 청원군 문의면에 위치한 노현지구에서 관행영농지구와 환경농업지구의 영양물질 배출부하 특성을 비교·분석하기 위하여 2개년간(2002~2003년) 영농기(2002년 : 5월 하순~9월 중순, 2003년 : 4월 하순~9월 중순)를 대상으로 필지 단위(필지 면적 : 29.8a)의 물 수지와 물질수지를 조사하였다.

물 수지조사에는 급수물꼬와 배수물꼬에 유량계를 설치하여 용수량과 배수량을 측정하였고, 직경 65mm PVC관을 2m 깊이로 설치하여 침투량과 침투수 수질을 측정하였다.

본 연구에서는 관행영농지구의 자료를 이용하였다.

3. 대상지구의 물수지와 영양물질수지 :

가. 물 수 지

영양물질 흐름특성을 파악하기 위하여 물수지(water balance) 분석이 요구되는데, 논에서의 물수지 일반식은 식 (1)과 같다.

$$\Delta S = R + IR - (ET + G + DR) \quad (1)$$

여기서, R은 강우량, ET는 증발산량, IR은 용수량, DR은 지표배수량, G는 침투량, ΔS는 저류량의 변화이다.

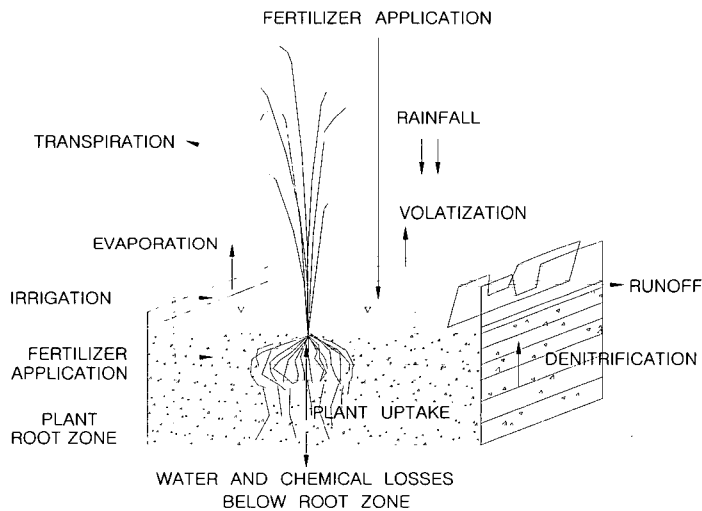


Fig. 1. Physical system of water and nutrients flow in paddy-fields

Table 2는 대상지구의 물 수지 현황을 나타내고 있으며, 용수량과 지표배출량은 3개의 대상 지구 중 보 지구에서 가장 많았으며, 강우량은 2003년 저수지 지구에서 가장 많았고, 2002년 보 지구에서 가장 적게 발생하였다.

또한, 지하침투량은 양수장 지구가 보와 저수지 지구보다 많았는데 이는 각 지구의 토양 특성의 차이로 판단된다.

나. 영양물질수지

1) 개요

담수재배를 하는 논은 영양물질은 시비와 관개용수 및 강우에 용해되어 유입되고, 비 재배관리에 따르는 (중간)낙수와 강우발생에 따른 지표배수 그리고 지하로의 침투에 의해 배출된다.

또한, 논 포장에서는 작물에 의해 영양물질은 흡수되고, 질소(nitrogen)는 토양층에서 탈질(denitrification) 작용에 의해 대기로 소멸되기도 하고, 녹조류(algae) 등에 의해 대기중의 질소를 고정(fixation)시키며, 대기 중으로 휘산(volatilization)되어 사라지는 등 영양물질 흐름은 생육기간 동안의 기상현상을 비롯한 자연현상과 밀접한 관련이 있다. Fig. 1은 영양물

질의 물리적 흐름체계를 나타내고 있다¹⁾.

일본에서는 논은 영양물질 흐름 특성과 수질정화, 홍수조절, 대기정화 등 다양한 공익적 기능의 정량적 분석과 관련한 연구결과 자료들이 발표되고 있으며, 영양물질 수지분석을 위한 여러 인자의 흐름 규명에 관한 연구결과가 발표되었으나^{6,7)}, 국내에서는 아직 영양물질 수지 분석에 필요한 각 인자에 대한 자료가 미흡한 실정이다. 토양특성과 시비량에 따른 작물흡수량 분야와 물수지에 근거를 둔 영양물질의 배출부하량에 대한 연구가 별도로 수행되어 종합적인 물질수지 분석에 많은 어려움이 있다.

즉, 농업비점오염원 저감과 농촌공간의 수환경개선을 위해서는 영양물질 흐름에 대한 분석과 다양한 영농관리기법의 개발이 요구되며, 특히 논은 다양한 공익적 기능에 대한 정량화된 자료 구축이 시급한 실정이다.

2) 영양물질수지(Nutrients Balance)

Table 3과 4는 각각 대상지구의 T-N과 T-P 수지 현황을 나타낸 것으로 영양물질 유입량 중 가장 큰 인자는 시비량으로 T-N은 지구별 연도별로 큰 차이를 나타내고 있다. T-N의 경우 저수지 지구의 2002년 시비량이 190.6kg/ha로 가장 많았으며, 양수장 지구의

Table 2. Water balance data on the case study

(unit: mm)

Case study	Year	Inlet			Outlet			
		Irr.	Rain.	Sum	Drain.	Perc.	Evap.	Sum
A	1999	1,340	1,065	2,405	1,453	459	444	2,356
	2000	1,185	1,296	2,481	1,421	580	448	2,449
B	2001	2,224	551	2,775	1,811	203	660	2,674
	2002	2,312	984	3,269	2,479	146	562	3,187
C	2002	588	666	1,254	598	254	576	1,428
	2003	607	1,472	2,079	1,529	188	382	2,099

1999년 시비량이 134.0kg/ha로 가장 적었고, T-P는 보 지구의 2001년 시비량이 22.1kg/ha로 가장 많았으며, 양수장 지구의 1999년 시비량이 12.6kg/ha로 가장 적었는데, 전반적으로는 전북 남원과 충북 청원지역의 관행적 사용량이 반영된 것으로 생각된다.

또한, 강우와 용수공급에 의한 유입부하량은 강우량과 용수량을 각각의 농도와 곱하여 계산된 것이다.

저수지 지구에서 수행된 2년 간의 연구에서는 작물의 영양물질 흡수량을 조사였는데, 2002년과 2003년에 T-N은 각각 162.1kg/ha, 111.1kg/ha, T-P는 각각 16.7kg/ha, 20.0kg/ha로 큰 차이를 나타냈다. 이는 시비량과 해당 연도의 강우에 의한 영양물질의 지표배출량과 온도, 바람 등 기상여건에 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

III. 결과 및 고찰

1. 물관리 특성

Table 2의 물수지 현황에서 나타난 것과 같이 논의 물 흐름은 지구별로 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 영농기 동안의 용수 공급량은 보, 양수장, 저수지 지구 순으로 많았다. 이러한 결과는 대상지구 중 양수장과 보 지구는 광역단위로, 저수지 지구는 필지 단위로 유량을 측정하는 이유도 있겠으나, 보 지구의 용수량이 다른 지구에 비해 훨씬 많은 것은 영농기 동안에는 계속하여 용수가 공급됨으로 인해 해당지구 농민들이 필요시 쉽게 용수를 공급할 수 있었기 때문으로 판단된다.

Table 3. T-N balance of each study

(unit: kg/ha)

Case study	Year	Inflow(a)				Outflow(b)				a-b
		Irri.	Rain.	Fert.	Sum	Drain.	Perc.	Uptake	Sum	
A	1999	21.8	32.2	134.0	188.0	57.8	14.6	N/A	72.4	115.6
	2000	20.8	24.0	140.0	184.8	54.7	12.8	N/A	67.5	117.3
B	2001	50.8	5.0	178.7	234.5	43.7	6.3	N/A	50.0	166.0
	2002	64.0	5.0	148.1	217.1	69.8	3.1	N/A	72.9	158.6
C	2002	17.7	7.9	190.6	216.2	13.5	4.3	162.1	179.9	36.3
	2003	15.5	11.1	141.8	168.4	41.6	3.8	111.1	156.5	11.9

N/A : Not Available

Table 4. T-P balance of each study

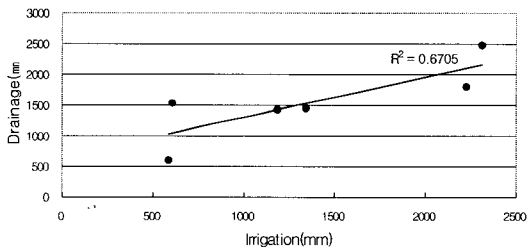
(unit: kg/ha)

Case study	Year	Inflow(a)				Outflow(b)				a-b
		Irri.	Rain.	Fert.	Sum	Drain.	Perc.	Uptake	Sum	
A	1999	0.13	0.38	12.60	13.11	2.33	0.07	N/A	2.40	10.78
	2000	0.22	0.35	13.50	14.07	1.96	0.07	N/A	2.03	16.03
B	2001	2.32	0.12	22.10	24.54	1.47	0.05	N/A	1.52	21.46
	2002	2.27	0.13	17.00	19.40	1.71	0.02	N/A	1.73	23.09
C	2002	1.51	0.25	17.60	19.36	1.75	0.03	16.70	18.48	0.88
	2003	1.00	0.24	20.50	21.74	2.72	0.05	20.00	22.77	-1.03

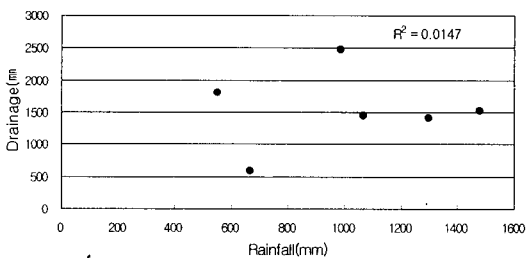
2. 용수량과 지표배수량

Fig. 2는 대상지구의 물 수지 주요인자의 상관도를 나타낸 것으로, 강우량과 용수량, 강우량과 배수량과의 관계는 유의성이 나타나지 않았으나, 용수량과 배수량과의 관계는 유의성 ($p < 0.05$)를 나타냈다. 따라서, 용수량이 클수록 배수량은 크게 나타나, 절수적인 관개용수의 공급이 요망된다.

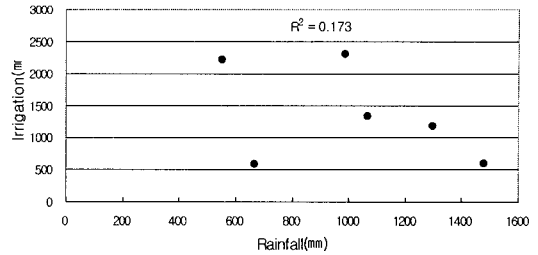
또한, 강우특성에 따라 차이는 있겠으나 지표 배수의 양적 변화는 강우량보다는 용수량의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.



a) Irrigation and drainage



b) Rainfall and drainage



c) Rainfall and irrigation

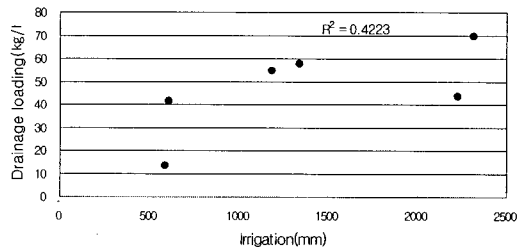
Fig. 2. Correlation graph of water balance factors

3. 영양물질 배출부하 특성

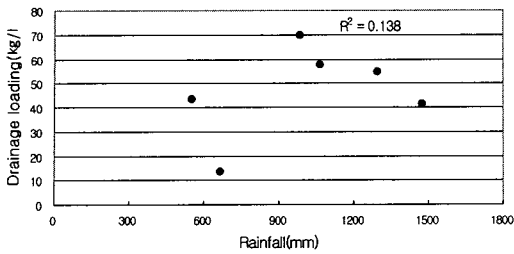
가. T-N

Fig. 3은 용수량, 강우량, 시비량과 T-N 지표배출 부하량과의 상관도를 나타내고 있으며, 이들 사이에는 유의적($p < 0.05$)인 상관관계를 보이지 않았다.

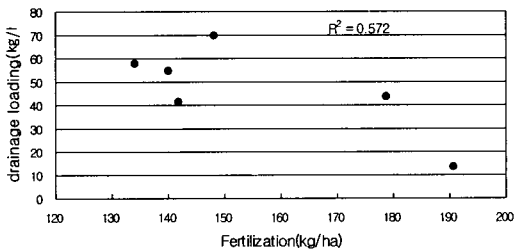
저수지 지구에서의 2002년 시비량은 190.6kg/ha로 가장 많았으나, 지표배출부하량이 13.5 kg/ha로 가장 적게 발생하였는데, 이는 지표배수량이 적었기 때문이다. 추후 이런 인자간의 명확한 상관관계를 파악하기 위해서는 보다 많은 지구에서의 데이터의 축적이 필요할 것으로 생각된다.



a) Irrigation and drainage loading



b) Rainfall and drainage loading



c) Fertilization and drainage loading

Fig. 3. Correlation graph of T-N

나. T-P

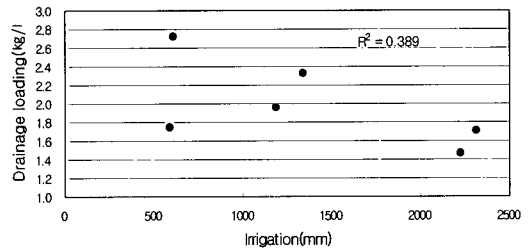
Fig. 4는 용수량, 강수량, 시비량과 T-P 지표배출부하량의 상관도를 나타낸 것으로, T-P의 지표배출부하량은 강수량과 유의적 ($p < 0.05$)인 상관관계를 나타냈다.

인(phosphorus)은 질소와는 달리 물에 잘 용해되지 않고 토양에의 흡착력이 강한 성질을 지니고 있어 인 성분의 흐름은 토양입자의 이동과 밀접한 관련이 있으며, 강우시에는 논 표토층의 침식으로 토양입자의 이동을 유발시키고 토양에 흡착된 인 성분으로 T-P 농도가 높아지는 것으로 판단된다.

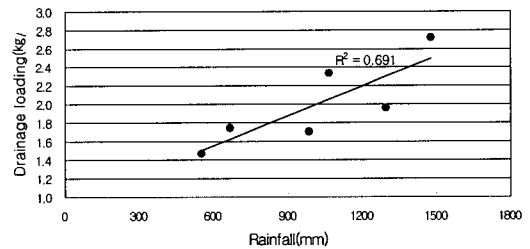
다. 영양물질 배출부하량

우리나라 수원공 시설의 수혜면적 비율은 저수지와 하천이 각각 56%, 33%로 대부분을 차지하고 있으며, 본 연구 3개 대상지구(양수장, 보, 저수지 지구) 논에서의 영농기간(4월

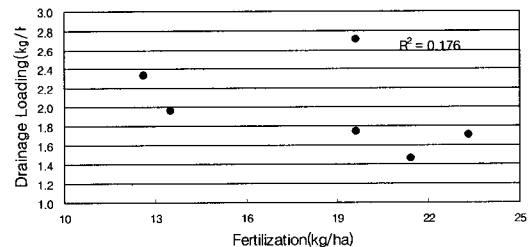
하순~9월 하순) 동안의 물수지 및 영양물질수지 인자들의 평균값은 용수량 1,376mm, 강수량 1,005mm, 소비수량(증발산량: 512mm, 침투량: 305mm) 817mm, 지하침투량 305mm, 지표배수량 1,531mm이며, 시비량의 평균값은 T-N 155.5 kg/ha, T-P 17.22kg/ha 이고, 수환경에 직접적인 영향을 미치는 T-N과 T-P 지표배출부하량의 평균값은 각각 46.8, 1.99kg/ha로 나타났다.



a) Irrigation and drainage loading



b) Rainfall and drainage loading



c) Fertilization and drainage loading

Fig. 4. Correlation graph of T-P

또한 이들 3개 대상지구 평균값과 탈질량 30.0kg/ha, 질소 고정량 20.0kg/ha(일본 관련 연구자료^{6,7)} 참고)를 적용하여 우리나라 논에서의 영양물질 흐름량을 정량적으로 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다.

라. 논 수질정화 정화기능

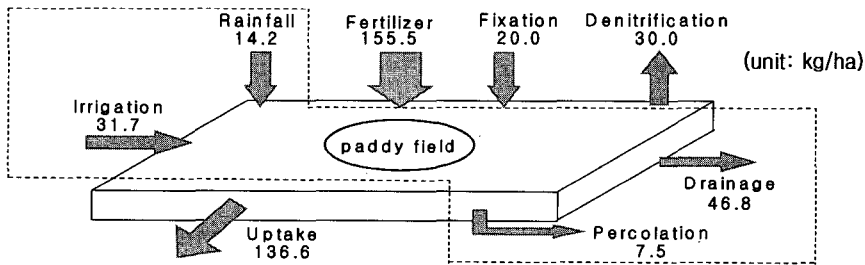
순배출부하량은 논 수질정화기능을 평가하는 지표로 사용되며 식(2)와 같이 나타낸다.

$$\text{순배출부하량} = \text{배출부하} - \text{유입부하} = (\text{지표배출부하} + \text{침투부하}) - (\text{용수부하} + \text{강수부하}) \quad (2)$$

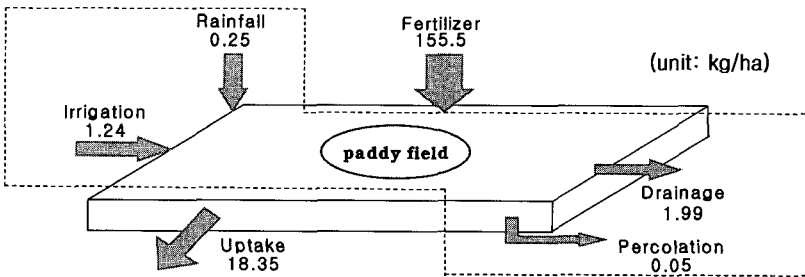
순배출부하량이 양(+)인 경우의 논은 배출형(오염원)으로 나타나고, 음(-)인 경우의 논은 흡수형(정화기능)으로 작용하고 있음을 나타낸다.

Table 5는 대상지구 논에서의 T-N과 T-P의 유입부하량, 배출부하량 및 순배출부하량을 정리한 것이다. 순배출부하량은 T-N-5.8~22.7kg/ha, T-P-0.67~1.89kg/ha로 크게 변동하여, 대상지구의 논은 수원과 연도에 따라 배출형이 되기도 하고, 흡수형이 되기도 하는 것으로 나타났다.

벼를 재배하는 논 수질정화기능을 높이기 위해서는 생육시기별 용수량조절을 위한 급·배수



a) T-N



b) T-P

Fig. 5 Nutrients flow diagram in the paddy-fields

Table 5. Mass balance in the paddy-fields

(unit: kg/ha)

Case study	Year	Inflow loading(a)				Outflow loading(b)				Net outflow loading (b-a)	
		Irrigation		Rainfall		Surface drainage		Percolation			
		T-N	T-P	T-N	T-P	T-N	T-P	T-N	T-P	T-N	T-P
A	1999	21.8	0.13	32.2	0.38	57.8	2.33	14.6	0.07	18.4	1.89
	2000	20.8	0.22	24.0	0.35	54.7	1.96	12.8	0.07	22.7	1.46
B	2001	50.8	2.32	5.0	0.12	43.7	1.47	6.3	0.05	-5.8	-0.93
	2002	64.0	2.27	5.0	0.13	69.8	1.71	3.1	0.02	3.9	-0.67
C	2002	17.7	1.51	7.9	0.25	13.5	1.75	4.3	0.03	-7.8	0.02
	2003	15.5	1.00	11.1	0.24	41.6	2.72	3.8	0.05	18.8	1.53

물꼬 관리기법, 일기예보의 정확도가 높아짐에 따른 유효강우 증대기법, 논둑 정비 등 지표배수량을 최소화하여 영양물질 지표배출부하량을 줄일 수 있는 환경친화형 물관리기법 개발이 요구되며, 또한 영양물질 지표배출부하량이 많은 양수장과 보 지구에서는 벼 생육시기별 용수급수요령에 대한 검토가 필요한 시점이라 판단된다.

IV. 결 론

벼를 재배하는 우리나라 논영양물질 흐름 특성과 수질정화기능에 대한 정량적 평가를 위해서는 지속적인 관련자료의 축적이 요구되며, 본 연구에서는 양수장, 보 및 저수지 지구에서 2개년 간 수행된 3개 선행 연구자료를 토대로 논영양물질 배출부하 특성과 수질정화 기능을 분석·평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 벼를 재배하는 논영양물질은 보 지구에서 가장 많았으며, 이는 저수지나 양수장지구보다 농민이 물을 쉽게 이용할 수 있었기 때문으로 사료된다. 또한, 지표배수량은 용수량의 영향을 받는 것으로 나타났다.

2. T-N의 지표배출부하량은 용수량, 배수량, 강수량과 유의적인 관계를 나타내지 않았으나, T-P의 지표배출부하량은 강우량의 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한, 양수장, 보, 저수지 지구의 자료를 근거로 한 우리나라 논영양물질 T-N, T-P 지표배출부하량은 각각 46.8kg/ha, 1.99

kg/ha로 나타났다.

3. 각 지구의 논영양물질 순배출부하량은 T-N -5.8~22.7kg/ha, T-P-0.67~1.89kg/ha로 크게 변동하여 수원과 연도에 따라 배출형이 되기도 하고, 흡수형이 되기도 하는 것으로 나타났다. 논영양물질의 오염부하량 및 이를 제어할 수 인자간의 상관관계를 파악하기 위해서는 추후 지속적인 논영양물질 관련자료 축적이 요망된다.

참고문헌

1. 김현수, 정상욱, 2002. 논영양물질 배출량 추정(I). 한국농공학회지 44(4) : pp.51-61.
2. 농림부, 2002. 농지배수의 친환경적 관리 및 처리기법 개발. pp.107-152.
3. 농업기반공사, 2003. 농업배수의 수질오염 저감을 위한 환경친화적 농업기반정비 방안. pp.9-85.
4. 윤광식, 한국현, 조재영, 최창현, 손재권, 최진규, 2002. 양수장지구 광역논으로부터 영농기간 영양물질의 유출 및 물질수지. 한국농촌계획학회 8(1) : pp.15-25.
5. 환경부, 2000. 비점오염원관리요령.
6. Takeda, I., T. Kunimatsu, S. Kobayashi, and T. Maruyama, 1991, Pollutants balance of a paddy field area and its loadings in the water system - Studies on pollution loadings from a paddy field area(II)-. Trans. of the JSIDRE 153: pp.63-72 (in Japanese).
7. Yuyama, Y., M. NAKAMURA, K. HATA and M. HIRAYAMA, 2003. Material Balance in Model Paddy Fields with Irrigation from Eutrophied Lake.