관개기 광역논에서의 오염물질의 수지

Mass Balance of Pollutants at a Paddy Field Area During Irrigation Period

오 승 영* · 김 진 수(충북대) · 김 규 성(농업기반공사)

Oh, Seung Young · Kim, Jin Soo · Kim, Kyu Sung

Abstract

Concentration of pollutants and discharge were monitored regularly at paddy field area during irrigation periods. The amounts of irrigation water during irrigation periods in 1999 were 3690mm. The concentration of pollutants in ponded water are high during fertilizer application period. The ratio of discharge of direct runoff Q_D to the total runoff is 9%. The ratios of the load of direct runoff L_D to the total load L_T are 6% for T-N, 16% for T-P and 16% for COD. It was found that the ratios of the concentration are 0.7 for T-N, 1.8 for T-P and 1.9 for COD. The unit load of T-N, T-P and COD during irrigation periods were 12.1kg/ha, 0.42kg/ha and 85.7kg/ha, respectively

Ⅰ. 서론

농경지로부터의 비점원오염(nonpoint source, NPS)은 강우로 인한 지표유출이나 농경지의 배수와 함께 유출되는 것이며, 그 발생원이 불분명하기 때문에 확산오염(diffusive pollution)이라고도 한다. 농업 비점원오염의 주요 물질은 농경지에 살포된 퇴비나 비료 등이다. 이들 물질은 농도는 적으나 수량이 많아서 강이나 호수, 저수지, 댐, 연안 등의 수체(water body)에 대한 수질오염의 주요 원인이 되기도 한다. 따라서 비점원 오염물질의 거동은 장래 유역의 수질관리에서 주요 관심사가 되고 있다. 우리나라에서 논의 오염부하 원단위에 대한 연구는 모니터링 자료[1]가 미흡하여 비점원 오염 관리에 충분한 자료를 제공하지 못하고 있는 실정에 있다.

이에 본 연구에서는 광역논을 대상으로 1999년도 관개기간 중의 오염물질의 물질수지(mass balance)를 파악하고 오염부하 원단위를 산정함으로써 비점원오염 관리에 필요한 자료를 제시하고자 한다.

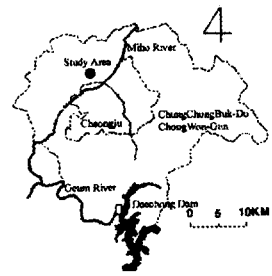
Ⅱ. 조사지구 및 조사방법

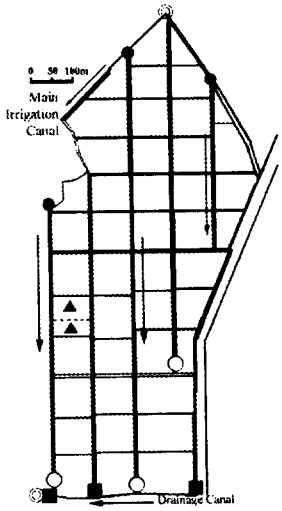
1. 조사지구

본 연구의 조사지구는 충청북도 청원군에 소로리에 위치한 광역논 지구(이하 '소로지구'라 함)로써 면적은 41.9ha이다. 이곳은 100×100m로 대구획화된 광역논지대이다.

2000년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (2000년 10월 14일)

이 지역은 충적 평야에 위치하고 있으며, 용·배수 분리된 곳으로써 용·배수 이외에는 외부로부터의 유출입이 없고, 이곳의 용수는 금강수계 제1지류인 미호천에서 취수하여 다시 미호천으로 배수하고 있다. 유량 및 수질의 측정점으로서는 Fig. 1과 같이 용수로 시점 3곳, 용수로 말단 3곳, 배수로 3곳, 논 표면수 2곳, 침투수 2곳을 선정하였다.





●: Sampling point of irrigation water at inlets
○: Sampling point of irrigation water at outlets
■: Sampling point of drainage water
▲: Sampling point of paddy ponded water and percolated water
◎: Water level recorder

Fig. 1. Investigated paddy field area

2. 조사방법

유량 측정은 Fig. 1과 같은 측정점에서 1999년 5월 1일부터 9월 23까지 146일 동안 실시하였다. 수질의 측정 간격은 시비기(5월 중순~6월 중순)에는 5일 간격, 그 이외에는 10일 간격으로 조사하였다. 용수와 배수의 유량은 Fig. 1과 같은 지점에 압력수위계를 설치하고 압력-유량관계로부터 유량을 산정하였다. 강우량은 조사 지구에서 약 5km 떨어진 청주 기상대 기상 자료를 이용하였으며, 강우 수질은 지구에서 약 6km 떨어진 충북대학교 농과대학에서 채수한 것을 사용하였다. 침투량은 침투량계를 이용하여 측정하였으며, 침투수는 PVC 유공관을 땅속에 박아 지하 0.5~1m 되는 지점에서 채수하였다.

채수한 시료는 가능한 빨리 실험실로 가지고 와서 T-N, T-P, 화학적산소요구량(COD)의 농도를 분석하였다. T-N과 T-P는 환경부 공정시험법에 의한 흡광광도법으로 분석하였으며, COD는 Standard Method에 의한 중크롬산칼륨을 이용하여 분석하였다.

소로지구의 시비시기 및 시비량은 조사지구의 35가구를 대상으로 설문 조사하여 이에 대한 자료를 얻었다.

Ⅲ. 광역논에서의 물수지와 물질수지의 개념

비점원 오염물질의 유입과 유출은 수문현상과 밀접한 관련을 맺고 있다. 광역논 지대에서의 물수지(water balance)와 물질수지(mass balance)는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 광역논 지대의 유입과 유출은 일반적으로 인위적인 요인과 자연적인 요인이 복합적으로 작용하고 있다. 광역논에서의 유입량은 용수와 강우로 이루어지며, 유출량은 지표배출, 침투배출, 증발산으로 이루어지며 관개기간중의 물수지는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

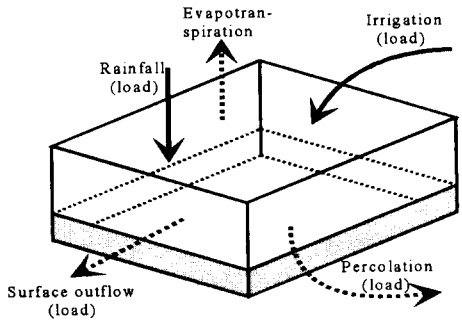


Fig. 2. Water balance and mass balance at paddy field area

여기서, ΔW : 저류량(貯留量)변화, R : 강우량, I : 용수량, SO : 지표배출량, P : 침투배출량, ET : 증발산량, 단위 : mm

광역논에서의 물질수지에는 유입부하량(inflow load)과 유출부하량(outflow load)이 있다. 유입부하량은 용수부하량과 강우부하량으로 구성되어 있고, 유출부하량은 지표배출부하량과 침투배출부하량으로 구성되어 있다. 유출부하량과 유입부하량의 차(差)를 순배출부하량(net outflow load)이라고 하며, 이것은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다..

순배출부하량 = 유출부하량 − 유입부하량 (2)

여기서, 순배출부하량이 양(+)의 논을 '배출형'의 논, 음(−)의 논을 '흡수형'의 논이라 한다[2]. 순배출부하량이 음(−)이라는 것은 유입부하량이 유출부하량보다 커서, 오염물질이 논을 통과하면서 흡수하기 때문에 논이 자연정화기능을 발휘하고 있는 것을 나타낸다.

Ⅳ. 결과 및 고찰

1. 시비량 조사

소로지구의 생육기간 중 평균시비량은 질소가 164kg/ha이고 인은 21.3kg/ha으로 나타났다. 질소는 일반적으로 기비(基肥), 분얼비(分蘖肥), 수비(穗肥) 3회에 걸쳐서 시비되고, 인은 기비만 시비되고 있다. 시기별 시비량을 보면 질소는 5월 중순에 최대 32.5kg/ha을 시비한 것으로 나타나고, 인은 5월 초순에 최대 10.4kg/ha을 시비한 것으로 나타났다.

2. 물수지

관개기간중의 물수지는 1999년 5월 1일부터 9월 23일까지의 자료를 사용하였다. 조사 지구로 유입되는 유입량은 용수량과 강우량의 합에 의해서 산정하였고, 이에 대한 월별 유입량은 Table. 1과 같고, 강우, 용수와 배수량의 일별 변동은 Fig. 3과 같다. 관개기간중 용수량은 3690mm를 나타냈다. 이때 용수량의 44%는 용수로 말단의 유말공(流末工)에서 배수로로 직접 무효방류되고 있는 것으로 나타났으며, 강우량은 890mm를 나타냈다.

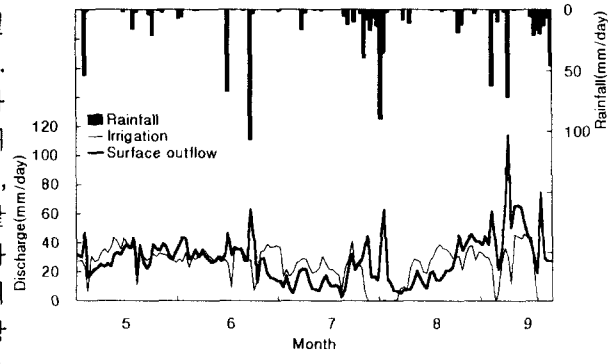


Fig. 3. Daily variation of rainfall, irrigation and surface outflow

Table 1. Inflow and outflow of water from the paddy field area(May 1, 1999~Sep. 23, 1999)

Month	Inflow			Outflow		
	Irrigation	Rainfall	Subtotal	Surface outflow	Percolated	Subtotal
5	959.6	102.4	1062.0	953.5	31.3	984.8
6	873.7	191.1	1064.8	958.9	58.5	1017.5
7	657.8	122.4	780.2	514.4	13.5	527.9
8	654.8	197.4	852.2	692.4	29.8	722.2
9	544.5	276.8	821.3	1090.8	14.2	1105.1
Total	3690.4	890.1	4580.5	4210.1	147.4	4357.5

(Unit) mm

유출량은 조사지구로부터 지표배출량과 침투배출량의 합에 의해서 산정하였다. 지표배출량과 침투배출량은 관개기간중에 실측한 자료이다. 지표배출량은 4210mm를 나타내었으며, 침투배출량은 147mm로써 일평균침투량은 1.0mm/day로 논토양으로서는 작은 침투량으로 나타났다.

3. 수 질

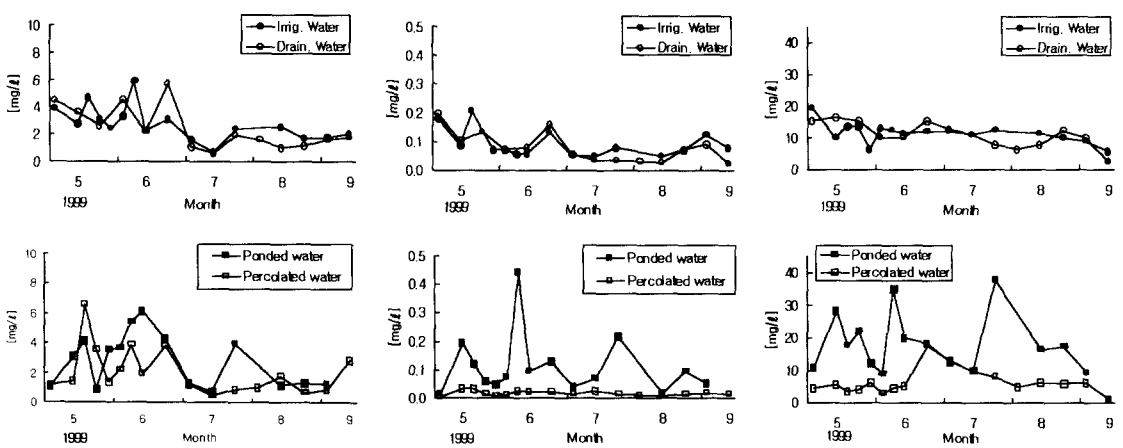
용수, 배수, 논표면수 및 침투수의 T-N, T-P 및 COD의 순별 농도 변화는 Fig. 4와 같다.

용수의 T-N농도는 6월 초순에 최대 5.9mg/ℓ을 나타냈으며, 이후로는 2~3mg/ℓ을 나타냈다. T-P는 5월 초순에 최대 0.20mg/ℓ을 나타냈으며 그 이후로는 0.10mg/ℓ이하로 거의 일정한 농도를 나타냈다.

배수의 T-N농도는 6월 하순에 최대 5.7mg/ℓ을 나타냈고, T-P농도는 5월 초순에 0.20mg/ℓ을 나타냈으며 6월 하순 이후로는 배수농도가 용수농도보다 낮게 나타났다. 배수농도가 시비기에 높게 나타내지 않은 이유는 관개에 사용되어지지 않고 유말공으로부터 배수로 말단으로 유출되는 용수량이 상당히 많아 이에 의한 희석효과 때문으로 사료된다.

논표면수는 시비기에 영향을 많이 받아 T-N, T-P의 농도가 높게 나타나고 있다. T-N의 경우, 기비기인 5월 중순에 4.2mg/ℓ, 분얼비기인 6월 중순에 최대 6.2mg/ℓ를 나타났으며, 수비기인 7월 말에 3.9mg/ℓ을 나타냈다. T-P의 경우 기비기인 5월 중순에 0.19mg/ℓ를 나타냈고, 6월 초순에 최대 0.44mg/ℓ를 나타냈다. COD는 시비기에 T-N, T-P와 함께 증가하는 경향을 보였다. 이는 시비에 의한 영향으로 논표면수에 유기물이 증가하는 것으로 생각된다. COD농도는 최소 8.9mg/ℓ을 나타냈으며, 7월 말에 최대 37.8mg/ℓ을 나타냈다.

침투수는 논표면수에 비하여 낮게 나타났다. T-N에 있어서, 논표면수와 함께 시비기에는 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타낸다. T-N농도는 5월 20일경에 최대 6.6mg/ℓ을 나타내고 있고, 최소 0.5mg/ℓ까지 감소하는 것으로 나타났다. T-P는 0.04mg/ℓ이하로 전체 관개기 동안 거의 일정한 값을 나타냈는데, 이는 인이 토양에 흡착됨으로써 토양에 의한 정화작용을 일으키는 것으로 사료된다. COD는 6월 말에 최대 16.3mg/ℓ을 나타냈고, 일반적으로 5~10mg/ℓ의 농도를 나타냈다.



(a) T-N (b) T-P (c) COD

Fig. 4. Seasonal variation in concentrations

4. 관개기간중의 기저유출과 직접유출

강우시 유출에 관한 분할은 압력수위계에 기록된 유출직전 즉, 상승부 시점에서 수평선을 그어 감수부에서 만나는 점까지 연장하여 그 수평선보다 위 부분을 직접유출(강우시유출), 그 이하를 기저유출(평상시유출)이라고 하였다. 또한, 이 때의 부하량을 각각 기저유출부하량과 직접유출부하량이라고 한다.

직접유출의 총유출량과 총유출부하량의 관계는 식(3)과 같이 표현된다.

$$L_D = a \cdot Q_D^b \quad (3)$$

여기서, L_D : 직접유출의 총유출부하량(kg/ha), Q_D : 직접유출의 총유출량(mm), a, b : 상수

또한, 식(4)에서와 같이 직접유출의 평균농도를 사용함으로써 직접유출의 총유출부하량을 얻을 수가 있다.

$$\overline{C} = \frac{\int c_D \cdot q_D \, dt}{\int q_D \, dt} \quad (4)$$

여기서, $\overline{C}$: 직접유출의 평균농도(㎎/ℓ), c_D : 직접유출의 농도(㎎/ℓ), q_D : 직접유출량(mm)

7회에 걸친 강우사상중, 시비기인 5월부터 6월 중순까지의 강우사상의 평균농도를 Table 2에 나타내었고, 시비기 이외의 강우사상에 대한 직접유출의 총유량과 총유출부하량과의 관계는 Table 3에 나타냈다.

Table 2. Mean concentration of storm runoff during fertilizer application period

	Mean Concentration($\overline{C}$)	
	T-N	T-P
5/F	9.4	0.51
5/M~5/L	1.2	
6/F~6/M	3.6	

(Unit) ㎎/ℓ

Table 3. Relationship between Q_D and L_D during non-fertilizer application period

	T-N		T-P		COD	
	a	b	a	b	a	b
Number of samples	5		6		6	
$L_D = a \cdot Q_D^b$	0.0028	1.3418	0.00026	1.3912	2.9881	0.2476

(Unit) L_D : kg/ha, Q_D : mm

기저유출부하량은 식(5)에 의하여 계산되었다.

$$\Sigma[\text{기저유출부하량}] = \Sigma\{[\text{5일 또는 10일별 평상시의 평균농도}] \times [\text{일별유출량}]\} \quad (5)$$

또한, 직접유출부하량은 시비기동안에는 Table 2의 평균농도를 사용하였고, 시비기 이외는 식(3)과 Table 3에서 얻은 상수를 사용해서 계산되었다.

Table 4는 기저유출과 직접유출의 총유출량과 총부하량을 나타낸 것이다. 총유출량은 4210mm로써, 총유출량에 대한 기저유출은 91%, 직접유출은 9%로 나타났다. 총유출부하량에 대한 직접유출부하량의 비는 COD(16%)≧T-P(16%)>T-N(6%)순으로 나타났다.

관개기 동안의 T-N의 평균농도는 기저유출이 2.6㎎/ℓ, 직접유출이 1.7㎎/ℓ이고, T-P의 평균농도는 기저유출이 0.08㎎/ℓ, 직접유출이 0.15㎎/ℓ이며, COD의 평균농도는 기저유출이 10.8㎎/ℓ, 직접유출이 20.2㎎/ℓ로 나타났다. 총유출의 평균농도는 T-N이 2.5㎎/ℓ, T-P가 0.09㎎/ℓ, COD가 11.5㎎/ℓ로 나타났다(Table 4).

Table 4. Load and concentration of surface outflow

	Load of surface outflow(kg/ha)						Mean concentration (C, mg/ ℓ)			
	①Base flow L_B		②Direct runoff L_D		①+② L_T	②/① f_D	③ C_B	④ C_D	③+④ C_T	④/③ f_C
Discharge*	3819.4	91%	390.7	9%	4210.1	0.10				
T-N	98.2	94%	6.6	6%	104.8	0.07	2.6	1.7	2.5	0.7
T-P	3.17	84%	0.58	16%	3.8	0.18	0.08	0.15	0.09	1.8
COD	412.7	84%	78.9	16%	491.6	0.19	10.8	20.2	11.7	1.9

Note : * is specific discharge during irrigation period (mm)

5. 광역논에서의 원단위

광역논에서의 원단위는 [지표배출부하량]+[침투배출부하량]-[용수부하량]으로 산정한다. 1999년도 광역논에서의 관개기동안에 나타난 원단위는 T-N이 12.1kg/ha, T-P가 0.42kg/ha, COD가 85.7kg/ha로 각각 나타났다(Table 5). T-N과 T-P의 원단위는 비교적 작게 나타났다.

Table 5. Unit load at paddy field area during irrigation period

	① Irrigation	② Surface outflow	③ Percolated	Unit load ②+③-①
T-N	95.8	104.8	3.1	12.1
T-P	3.36	3.75	0.03	0.42
COD	416.2	491.6	10.3	85.7

(Unit) kg/ha

V. 결론

본 논문에서는 1999년 5월 1일부터 9월 23일까지의 관개기동안, 충청북도 청원군 옥산면에 위치한 41.9ha의 광역논에서의 질소, 인 및 COD의 물질수지와 오염부하 원단위를 고찰하였다. 여기서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 관개기간중 용수량은 3690mm로 크게 나타났으며, 이중 논에서 이용되지 않고 유말공에서 직접 말단 배수로로 유출되는 무효방류의 양이 많은 것으로 나타났고, 총침투배출량은 147mm로서 일평균침투량은 약 1.0mm/day로 나타났다.

2. 배수의 농도는 시비기에도 그리 높게 나타나지 않았는데, 이것은 용수로에서 논으로 유입되지 않고 무효방류되는 양이 44%로 많아 용수에 의한 희석 효과가 일어났기 때문으로 사료된다.

3. 관개기간의 총유출량중 직접유출량이 차지하는 비는 9%로 나타났으며, 총유출부하량중 직접유출부하량이 차지하는 비는 COD(16%)≧T-P(16%)>T-N(6%)순으로 나타났다.

4. 관개기 동안의 광역논에서의 원단위가 산정되었는바, T-N이 12.1kg/ha, T-P가 0.42kg/ha, COD가 85.7kg/ha로 각각 나타났다.

VI. 참고 문헌

1. 김진수 · 오승영 · 김규성, 1999, 광역논에서의 질소 · 인의 농도와 오염부하량 특성, 농공학회 논문집 제41권 제4호, pp. 47~56
2. 農業土木學會, 1987, 農業土木技術者のための水質入門, pp. 63~69