

# 관개기 광역논에서의 오염부하 원단위

○김규성\* · 김진수\*\* · 오승영\*\*\*

## 1. 서론

미국 EPA가 1972년도에 설립된 후 환경에 영향을 미치는 여러 오염물질들이 확인되어 왔으며, 동시에 오염물질의 처리 기술도 많은 진전이 있었다. 산업체나 도시에서 배출되는 점원 오염물은 사후 처리기술에 의하여 상당량이 제거되나 농업에 의하여 배출된 오염물질은 처리기술에 의하여 제거될 수가 없다. 농업생산에서 가장 중요한 영양소는 질소와 인이며 이것은 모든 생명체의 근원이 되나 수계에 유입하면 수질오염에 많은 영향을 미치게 된다.

농경지로부터의 비점원오염(nonpoint source)은 주로 농경지에 뿌려진 비료나 유사에 의하여 발생되며, 이것은 강우로 인한 지표유출과 함께 유출된다. 이것은 농도는 적으나 수량이 많아서 호소의 총오염부하량에 차지하는 비중은 매우 크다. 따라서 비점원 오염의 거동은 유역의 수질관리에서 주요 관심사가 되고 있다. 미국, 일본 등의 선진국에서는 농업 비점원 오염에 관한 연구<sup>2),4)</sup>가 상당히 이루어지고 있다. 1984년 鈴木와 田淵<sup>1)</sup>는 농촌유역 소하천에서의 수질과 유출부하에 관해 고찰하였으며, 1991년 武田<sup>3)</sup>은 광역논에서 관개기 동안의 오염 부하 유출에 대해 고찰하였다. 반면에 우리나라에서 논외 오염부하 원단위는 모니터링 자료가 미흡하여 오염부하 원단위로서 충분한 자료를 제공하지 못하고 있는 실정에 있다.

이에 본 연구에서는 광역논을 대상으로 1999년과 2000년도 관개기간 중의 오염물질의 물질수지(mass balance)를 파악하고 오염부하 원단위를 산정함으로써 유역의 수질 관리에 필요한 기초 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 조사지구 및 조사방법

### 2.1 조사지구

본 연구의 조사지구는 충청북도 청원군에 옥산면 소로리에 위치한 광역논 지구(이하 '소로지구'라 함)로서 평상시의 농경지 면적은 41.9ha이나, 강우시의 유역면적은 농로, 수로 및 제방까지의 분수선까지 포함하여 50.1ha로 된다. 본 지구는 대구획화 된 곳으로서 금강수계 제 1지류인 미호천을 용수원으로 하여 충적평야에 위치하고 있으며, 1996년도에 대구획 경지정리 사업이 시행되어 단위구획 면적이 1ha(100m×100m)로서, 용·배수가 분리되어 있다. 용수로는 대부분 콘크리트 개수로로 되어 있다.

유량 및 수질의 측정점으로서 Fig. 1과 같이 용수로 시점 3곳, 용수로 말단 3곳, 배수로 3곳, 논 표면수 2곳, 침투수 2곳을 선정하였다.

---

\* 농업기반공사 충청북도 지사

\*\* 충북대학교 농과대학 농공학과 부교수

\*\*\* 충북대학교 대학원 농공학과 박사과정

## 2.2 조사방법

유량 및 수질측정은 Fig. 1과 같은 측정점에서 1999년은 5월 1일부터 9월 23까지, 2000년은 5월 1일부터 9월 26일까지의 관개기 동안 시비기(5월 중순~6월 중순)에는 5일 간격, 그 이외에는 10일 간격으로 조사하였다. 용수와 배수의 유량은 압력식수위계를 설치하고 압력-유량관계로부터 유량을 산정하였다. 강우량은 1999년도에는 조사 지구에서 약 5km 떨어진 청주 기상대 기상 자료를 이용하였으며, 2000년은 본 지구에 강우량 측정장치를 설치하여 자료를 얻었다. 강우 수질은 지구에서 약 6km 떨어진 충북대학교 농과대학에서 채수한 것을 사용하였다. 침투량은 침투량계를 이용하여 측정하였으며, 침투수는 PVC 유공관을 박아 논의 지하

0.5~1m 되는 지점에서 채수하였다. 증발산량은 감수심계를 설치하여 5~10일 간격으로 측정하였으며, 감수심에서 침투량을 감(減)함으로써 산정하였다.

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.

소리지구의 시비시기 및 시비량은 조사지구를 대상으로 설문 조사하여 이에 대한 자료를 얻었다.

## 3. 광역논에서의 물수지와 물질수지의 개념

비점원 오염물질의 유입과 유출은 강우등의 수문현상과 밀접한 관련을 맺고 있다. 광역논 지대에서의 물수지(water balance)와 물질수지(mass balance)는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 광역논에서의 물수지는 Fig. 2와 같다. 광역논에서의 유입량은 용수와 강우로 구성되고, 유출량은 지표배출, 침투배출, 증발산으로 구성된다. 관개 기간중의 물수지는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $\Delta W$ : 광역논 저류량(貯留量)변화,  $R$ : 강우량,  $I$ : 용수량,  $SO$ : 지표배출량,  $P$ : 침투배출량,  $ET$ : 증발산량이다.

광역논에서의 물질수지에는 유입부하량(inflow load)과 유출부하량(outflow load)이 있다. 유입부하량은 용수부하량과 강우부하량으로 구성되고, 유출부하량은 지표배출부하량과 침투배출부하량으로 구성된다. 유출부하량과 유입부하량의 차(差)를 순배출

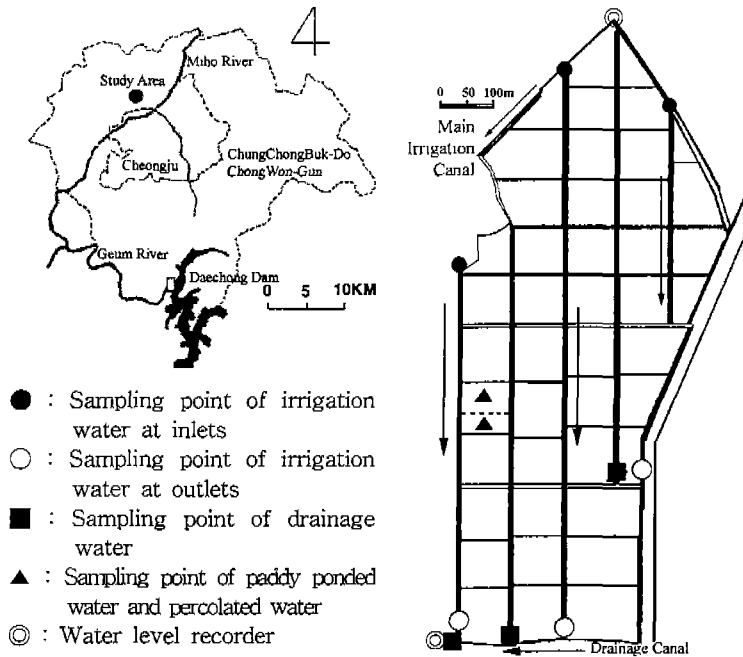


Fig. 1. Investigated paddy field area

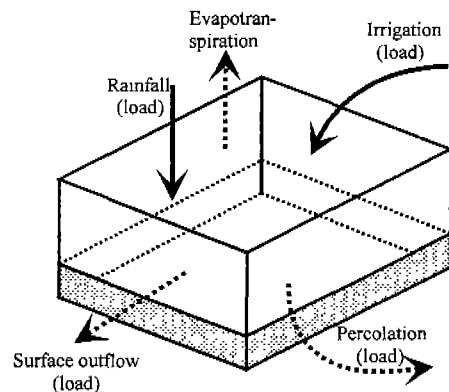


Fig. 2. Water balance and mass balance at paddy field area

부하량(net. outflow load)이라고 한다.

$$\text{순배출부하량} = \text{유출부하량} - \text{유입부하량} \quad (2)$$

여기서, 순배출부하량이 양(+ )인 논을 ‘배출형’의 논, 음(-)인 논을 ‘흡수형’ 혹은 ‘정화형’의 논이라 한다. 순배출부하량이 음(-)인 경우는 유입부하량이 유출부하량보다 커서, 오염물질이 논을 통과하면서 흡수하기 때문에 논이 자연정화기능을 발휘하고 있는 것을 나타낸다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 시비량 조사

농가를 대상으로 한 시비량 조사는 Table 1과 같다. 질소는 일반적으로 기비(基肥), 분얼비(分蘖肥), 수비(穗肥) 3회에 걸쳐서 시비되고, 인은 기비만 시비되고 있다. 소로지구의 관개기간 중 가구당 평균시비량은 질소가 1999년도에는 164.3kg/ha이었으나 2000년도에는 15.3kg/ha가 더 시비된 179.6kg/ha로 나타났으며, 인은 1999년도에는 21.4kg/ha, 2000년도에는 23.5kg/ha로 나타나 비슷한 값을 보였다.

Table 1. Nitrogen and phosphorus contents of the fertilizer application

	Nitrogen(kg/ha)		Phosphorus(kg/ha)	
	1999	2000	1999	2000
Basal dressing	64.1	71.3	21.4	23.3
Topdressing	69.7	71.6	0.0	0.0
Topdressing at panicle formation stage	30.5	36.7	0.0	0.2
Total	164.3	179.6	21.4	23.5

##### 4.2 물수지

관개기간중의 물수지는 1999년 5월 1일부터 9월 23일과 2000년 5월 1일부터 9월 26일까지의 자료를 사용하여 산정하였다. 조사 지구로 유입되는 유입량은 용수량과 강우량의 합에 의해서 산정하였다. 이에 대한 월별 총 유·출입량은 Table. 2와 같고, 강우, 용수와 배수량의 일별 변동은 Fig. 3과 같다. 관개기간중 강우량은 1999년도에 890mm, 2000년도에 1,212mm로 1999년보다 322mm의 강우가 더 있었다. 용수량은 1999년도에는 3,690mm, 2000년도에는 3,160mm를 나타냈는데, 이때 용수량의 44%(1999년도 기준)는 용수로 말단의 유말공(流末工)에서 배수로로 직접 방류되고 있는 것으로 나타났다.

유출량은 지표배출량과 침투배출량의 합에 의해서 산정하였다. 지표배출량은 1999년도에는 4,146mm, 2000년도에는 3,799mm를 나타냈고 침투배출량은 1999년도에는 147mm(1.0mm/day), 2000년도에는 196mm(1.3mm/day)로써 논토양으로서는 작은 침투량으로 나타났다. 증발산량은 2000년에만 측정을 하였는데, 관개기 동안의 총 증발산량은 663mm로써 일평균 증발산량은 4.4mm/day로 나타났다.

Table 2. Inflow and outflow of water from the paddy field area

Year	Inflow			Outflow			
	Irrigation	Rainfall	Subtotal	Surface outflow	Percolated	Evaptranspiration	Subtotal
1999	3690.4	890.1	4580.5	4145.8	147.4		4293.2
2000	3159.6	1212.2	4371.8	3798.8	196.4	663.4	4293.2

(Unit) mm

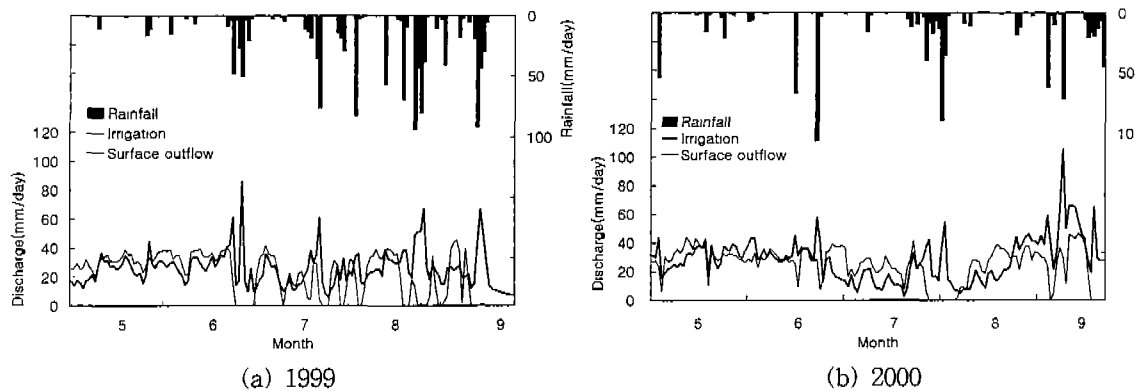


Fig. 3. Daily variation of rainfall, irrigation and surface outflow during irrigation periods

### 4.3 수질

1999년과 2000년도 관개기 동안의 용수, 지표배출, 논표면수, 침투수, 강우의 평균 수질을 Table 3에 나타냈다. 용수의 T-N과 T-P의 평균 농도는 1999년도와 2000년도가 거의 비슷한 값을 나타내었다. 지표배출의 T-N의 평균 농도는 1999년도에 2.5mg/l이었으나, 2000년도에는 0.4mg/l가 더 높은 2.9mg/l을 나타내었다. 이것은 2000년도의 질소 시비량이 1999년보다 15.3kg/ha가 더 시비되었기 때문으로 사료된다.

Table 3. Summary of water quality in paddy areas during irrigation period

Water quality content	Year	Irrigation*	Surface outflow*	Ponded**	Percolated*	Rainfall*
T-N	1999	2.3	2.5	2.8	2.2	0.8
	2000	2.4	2.9	3.8	3.0	0.6
T-P	1999	0.08	0.09	0.11	0.02	0.01
	2000	0.07	0.08	0.13	0.02	0.02
COD	1999	10.1	11.8	18.5	6.8	4.4
	2000	12.1	13.3	21.5	8.3	5.4

Note : \* is the weighted average (Unit) mg/l  
 \*\* is the arithmetic mean

### 4.4 유입부하량과 유출부하량

#### 4.4.1 T-N의 물질수지

1999년과 2000년 관개기 동안의 T-N의 월별 유입부하량과 유출부하량은 Table 4에 나타냈다. 관개기중 T-N의 총유입부하량은 1999년에는 104.4kg/ha, 2000년에는 94.4kg/ha로 나타냈으며, 총유출부하량은 1999년에는 106.8kg/ha, 2000년에는 116.0kg/ha로 나타냈다. 관개기 전체 중 5월과 6월에 차지하는 비율은, 1999년과 2000년 모두 유입부하량은 66%를 차지하였으며, 유출부하량은 1999년도에는 69%, 2000년도에는 53%를 차지하는 것으로 나타냈다. 총유출부하량에서 총유입부하량을 뺀 순배출부하량은, 1999년도에는 2.5kg/ha, 2000년

Table 4. Inflow and outflow of T-N at the paddy field area May 1, 1999~Sep. 23 (Unit) kg/ha

Year	Inflow			Outflow			Net outflow
	Rainfall	Irrigation	Subtotal	Percolated	Surface outflow	Subtotal	
1999							
May	1.8	33.9	35.7	0.8	34.0	34.8	-0.9
Jun.	3.1	30.0	33.1	1.8	37.0	38.7	5.6
Jul.	0.8	10.2	11.0	0.1	7.0	7.2	-3.9
Aug.	0.3	13.8	14.2	0.3	8.2	8.5	-5.7
Sep.	1.2	9.2	10.3	0.3	17.4	17.7	7.3
Total	7.2	97.1	104.4	3.3	103.5	106.8	2.5

May 1, 2000~Sep. 26

Year	Inflow			Outflow			Net outflow
	Rainfall	Irrigation	Subtotal	Percolated	Surface outflow	Subtotal	
2000							
May	0.6	29.7	30.3	0.6	29.3	29.9	-0.4
Jun.	1.7	30.3	32.0	2.2	29.0	31.2	-0.8
Jul.	1.0	12.5	13.5	2.5	15.8	18.4	4.9
Aug.	2.5	8.7	11.2	0.4	11.1	11.5	0.3
Sep.	1.5	6.0	7.5	0.2	24.9	25.1	17.6
Total	7.2	87.2	94.4	5.9	110.1	116.0	21.6

도는 21.6kg/ha로서 모두 배출형으로 나타났다. 9월에는 항상 배출형으로 나타났다. 특히, 2000년 9월의 순배출 부하량은 17.6kg/ha로 나타났는데, 이것은 9월의 농도 상승과 유량의 증가로 인해 다른 달보다 큰 순배출 부하량을 보였다.

#### 4.4.2 T-P

T-P의 월별 유입부하량과 유출부하량은 Table 5와 같다. 관개기중 T-P의 총유입부하량은 1999년은 3.59kg/ha, 2000년은 2.82kg/ha로 나타났으며, 총유출부하량은 1999년은 3.66kg/ha, 2000년은 3.27kg/ha로 나타났다. 관개기중 시비에 영향을 받은 5월과 6월의 유출부하량은 총유출부하량 중 1999년은 64%, 2000년은 51%로 5, 6월에 50%이상이 유출되는 것을 알 수 있다. 관개기 동안의 순배출부하량은 1999년에 0.07kg/ha, 2000년에 0.45kg/ha로서 배출형으로 나타났다. 두 해 연도 모두 T-P는 8, 9월은 배출형으로 나타났으며, 5월은 흡수형의 형태로 나타났다.

#### 4.4.3 COD

COD의 유입부하량과 유출부하량은 Table 6과 같다. 관개기중 COD의 총유입부하량은 1999년에 462.4kg/ha, 2000년에 500.8kg/ha가 유입되었으며, 총유출부하량은 1999년에 498.2kg/ha, 2000년에 520.4kg/ha가 유출되었다. 총유입부하량 중 5, 6월에 차지하는 유입부하량은 1999년에 249.4kg/ha로써 54%, 2000년에 293.2kg/ha로써 59%를 차지하고 있으며, 유출량은 1999년에 284.0kg/ha로써 57%, 2000년에 287kg/ha로써 55%를 차지하였다. 순배출부하량은 1999년에 35.8kg/ha, 2000년에 19.6kg/ha로서 배출형으로 나타났다. 두 해 연도 모두 COD는 6, 9월에는 배출형으로 나타났으며, 7월에는 흡수형으로 나타났다.

#### 4.5 광역논에서의 오염부하 원단위

논에서의 오염부하 원단위는 [지표배출부하량]+[침투배출부하량]-[용수부하량]으로 산정한다. 1999년과 2000년 관개기동안 조사된 원단위 평균값은 Table 7과 같다. T-N이 19.0kg/ha, T-P가

Table 5. Inflow and outflow of T-P at the paddy field area  
May 1, 1999~Sep. 23 (Unit) kg/ha

Year 1999	Inflow			Outflow			Net outflow
	Rainfall	Irrigation	Subtotal	Percolated	Surface outflow	Subtotal	
May	0.01	1.41	1.42	0.005	1.39	1.40	-0.02
Jun.	0.03	0.79	0.82	0.014	0.94	0.95	0.13
Jul.	0.01	0.39	0.40	0.002	0.22	0.22	-0.19
Aug.	0.02	0.41	0.43	0.003	0.44	0.45	0.01
Sep.	0.03	0.49	0.52	0.002	0.64	0.64	0.13
Total	0.10	3.49	3.59	0.027	3.63	3.66	0.07

May 1, 2000~Sep. 26

Year 2000	Inflow			Outflow			Net outflow
	Rainfall	Irrigation	Subtotal	Percolated	Surface outflow	Subtotal	
May	0.02	0.98	0.99	0.016	0.80	0.82	-0.17
Jun.	0.03	0.56	0.59	0.008	0.84	0.84	0.26
Jul.	0.11	0.42	0.52	0.006	0.52	0.53	0.01
Aug.	0.04	0.32	0.36	0.005	0.68	0.69	0.33
Sep.	0.09	0.27	0.36	0.008	0.38	0.39	0.03
Total	0.28	2.54	2.82	0.045	3.23	3.27	0.45

Table 6. Inflow and outflow of COD at the paddy field area  
May 1, 1999~Sep. 23 (Unit) kg/ha

Year 1999	Inflow			Outflow			Net outflow
	Rainfall	Irrigation	Subtotal	Percolated	Surface outflow	Subtotal	
May	4.8	136.7	141.5	1.5	161.8	163.3	21.8
Jun.	5.9	102.0	107.9	5.5	115.2	120.7	12.8
Jul.	12.0	78.7	90.6	1.0	59.3	60.3	-30.3
Aug.	12.1	69.8	81.9	1.8	74.8	76.5	-5.3
Sep.	4.8	35.6	40.5	0.4	77.1	77.5	37.0
Total	39.6	422.8	462.4	10.1	488.2	498.2	35.8

May 1, 2000~Sep. 26

Year 2000	Inflow			Outflow			Net outflow
	Rainfall	Irrigation	Subtotal	Percolated	Surface outflow	Subtotal	
May	4.4	158.6	163.0	1.5	127.2	128.6	-34.3
Jun.	5.8	124.4	130.2	2.9	155.5	158.4	28.3
Jul.	11.6	83.6	95.2	4.5	87.2	91.7	-3.5
Aug.	28.7	49.2	77.9	5.2	89.7	94.9	17.0
Sep.	14.5	20.1	34.6	2.3	44.5	46.7	12.1
Total	64.9	436.0	500.8	16.3	504.2	520.4	19.6

0.45kg/ha, COD가 80.0kg/ha로 나타났다. 1999년보다 2000년도의 원단위가 높게 산정되었는데, 이것은 용수에서 오는 부하량은 줄어들거나 약간 높게 산정되었지만, 지표배출 부분은 크게 늘어남으로써 높게 산정되었다. T-N의 경우, 1999년시비의 영향으로 19.7kg/ha가 더 산정되었고, T-P의 경우, 직접유출량이 1999년보다 약 219.4mm가 더 유출되어 T-P는 강우로 인해 농도가 상승함으로써 지표배출부하량이 크게 산정되어 원단위가 높게 산정되었다.

Table 7. Unit load of pollutants at paddy field area during irrigation period

	Year	① Irrigation	② Surface outflow	③ Percolated outflow	④ Pollutant unit load ②+③-①	Average of pollutant unit load (kosei)
T-N	1999	97.1	103.5	3.3	9.1	19.0(22.1)
	2000	87.2	110.1	5.9	28.8	
T-P	1999	3.49	3.63	0.03	0.17	0.45(7.48)
	2000	2.54	3.23	0.04	0.73	
COD	1999	422.8	488.2	10.1	75.5	80.0*(62.0)**
	2000	436.0	504.2	16.3	84.5	

Values of parentheses are for Kosei. (Unit) kg/ha  
 \* : The COD used  $K_2Cr_2O_7$   
 \*\* : The COD used  $KMnO_4$

1987년과 1988년에 걸쳐 조사한 일본 Kose이지구(면적은 11.6ha, 일평균 침투량은 14.3mm/day으로 침투량이 많은 광역논지대)에서의 관개기 동안의 원단위는 T-N이 21.1kg/ha, T-P가 7.48kg/ha,  $COD_{Mn}$ 이 62kg/ha로써 T-N은 거의 비슷한 것으로 나타났고, T-P는 약 16배가 높은 것으로 나타났다. 이것은 논에 시비되는 인의 양이 소리지구보다 Kosei 지구가 2배 이상 많이 시비함으로써 높은 양의 T-P원단위가 산정된 것으로 사료된다. COD는 수질분석 방법에 따라 값이 다르게 나타나지만 일본의 망간법으로 측정된 62kg/ha보다는 소리지구가 18kg/ha 높게 산정되었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 1999년 5월 1일부터 9월 23일, 2000년 5월 1일부터 9월 26일까지의 관개기 동안, 충청북도 청원군 옥산면에 위치한 41.9ha의 광역논에서의 질소, 인 및 COD의 물질수지와 오염부하 원단위를 고찰하였다. 여기서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 관개기간중 용수량은 1999년에 3,690mm, 2000년에 3,160mm로 크게 나타났으며, 이중 논에서 이용되지 않고 유말공에서 직접 말단 배수로로 유출되는 무효방류의 양이 많은 것으로 나타났고, 총침투배출량은 1999년에 147mm, 2000년에 196mm로서 2년 간의 일평균침투량은 약 1.2mm/day로 나타났다.
2. T-N, T-P, COD의 순배출부하량에 따라 논은 흡수형과 배출형으로 구분되는데, 시비성분의 유출과 지표배출의 수량에 의해서 논은 월별로 흡수형이 되기도하고, 배출형이 되기도 한다.
3. 관개기 동안의 광역논에서의 오염부하 원단위가 산정되었는바, T-N이 19.0kg/ha, T-P가 0.45kg/ha, COD가 80.0kg/ha로 각각 나타났다.

## 6. 참고 문헌

1. 鈴木誠治・田淵俊雄, 1984, 農業地域小河川における流出負荷量の季節變動と年間總量について, 農土論集 114, pp. 33~38
2. 田淵俊雄, 1991, 灌漑期の農業集水域からの流出水の水質と負荷特性, 農土論集 154, pp. 55~64
3. 武田育郎, 國松孝男, 小林慎太郎, 丸山利輔, 1991, 水系における水田群の汚濁物質の收支と流出負荷量, 農土論集 153, pp. 63~72
4. 宇土顯彦・竺文彦, 2000, 灌漑期の水田における水量收支と榮養塩收支, 水環境學會誌 第23巻 第5号, pp. 298~304