

강우시 광역논으로부터의 영양염류의 유출 특성

○김진수* · 오승영** · 김규성*** · 이종진** · 오광영**

1. 서론

오늘날 우리나라에서는 도시하수나 공장폐수 등의 점원에 막대한 재원을 투자함에도 불구하고, 호수나 공공 수역의 수질저하는 계속 진행되고 있는 실정이다. 이는 점원에 대한 시설투자로 점원에 의한 오염 부하는 줄어들고 있지만, 면적(面的)으로 발생하는 비점원 오염원에 의한 부하량은 계속 증가되어 왔기 때문이다. 비점원 오염은 농도는 낮지만 다량으로 유출되고 있어 오염부하에 있어서 차지하는 비율은 상당히 높다¹⁾. 우리나라에서 비점원 오염에서 큰 비중을 차지하고 있는 것은 농지로부터 유출하는 질소나 인이다. 특히 강우시 농지로부터의 질소나 인은 한꺼번에 다량으로 유출되어 평상시와는 전혀 다른 유출부하의 특성을 보인다. 강우시 논으로부터의 유출부하에 대한 연구는 일본에서 다케다(武田)²⁾등에 의해 이루어졌을 뿐, 국내에서는 이에 대한 연구는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 강우 등의 자연적 요인과 시비와 물관리 등의 인위적 요인이 복합적으로 작용하는 강우시 광역논으로부터의 오염부하량의 유출특성에 관해 규명하고자 한다.

2. 조사 지구 및 조사 방법

2.1 조사지구

본 연구의 조사 지구는 충청북도 청원군 옥산면 소로리와 남촌리에 위치한 광역논이다. 이 지구는 총척평야에 위치하고 있으며 용·배수 분리된 지구이며, 용배수로 이외에는 외부로부터 물의 유출입이 없다. 이곳의 용수는 금강의 제 1 지류인 미호천에서 취수하여, 다시 미호천으로 배수되고 있다. 이곳의 용·배수로는 콘크리트 라이닝 수로로서 연장 890m~1150m이다. 측정지점과 지구 개요도는 Fig. 1과 같다.

2.2 조사방법

(1) 수문데이터의 측정 방법

강우량은 조사 지구에서 약 5km 떨어진 청주 기상대의 시간별 강우량 자료를 이용하였다. 유역으로부터의 유량은 배수로 하단부에서 유속과 수위를 측정하여 계산하였다. 유량 측정은 강우로 인한 직접 유출이 일어나기 전에서 시작하여, 직접유출이 종료 할 때까지 계속하였다. 측정 간격은 약 2~6시간 간격으로 이루어졌다.

* 충북대학교 농과대학

** 충북대학교 대학원

*** 농업기반공사

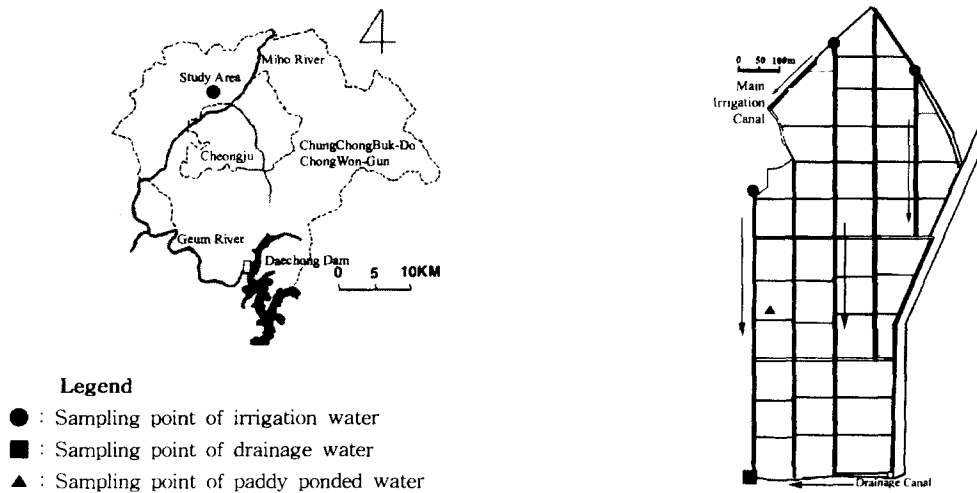


Fig. 1. Investigated paddy field area

(2) 수질의 측정 방법

수질 분석용의 샘플은 유량 측정점과 같은 조사 지구의 배수로 말단에서의 유심(流心)에서 채수하였다. 채수 간격은 유량 자료와 마찬가지로 2~6시간 간격으로 이루어졌다. 강우의 수질은 조사 지구에서 약 6km 정도 떨어진 충북대학교 농과대학에서 채수한 것을 사용하였다.

수질은 농업용수 수질 기준에서 가장 문제로 되고 있는 T-N(총질소), T-P(총인), COD의 3항목에 대해서 분석하였다(No.1은 COD농도 제외). T-N과 T-P 분석은 환경부의 환경오염공정시험법에 의한 흡광광도법으로 측정하였고 COD 분석은 $K_2Cr_2O_7$ 을 이용한 Standard Method의 방법으로 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우 사상 및 시비 조건의 개요

1998년과 1999년의 영농기 동안 6회에 걸친 조사 시기의 강우량은 17.2~194.5mm로서 강우 사상의 자세한 내역은 Table 1과 같다. No. 1은 용수의 공급이 끝난 비관개기에, No.2~6의 경우는

Table 1. Summary of storms

No. of storm	Storm runoff period	Area (ha)	Amount of rainfall (mm)	Maximum rainfall intensity (mm/h)	Previous rainless days (Antecedent precipitation)	Remarks
1	Sep. 29,1998~Oct. 2,1998	43.5	194.5	15.8	5(6.7mm)	Non-irrigation period
2	May 3,1999~May 5,1999	23.5	55.1	8.7	20(25.8mm)	Basal dressing
3	Jun.16,1999~Jun.18,1999	23.5	67.3	10.7	9(0.7mm)	Topdressing
4	Jul.22,1999~Jul.24,1999	41.9	17.2	5.1	7(0.9mm)	
5	Jul.27,1999~Jul.30,1999	41.9	50.6	6.7	2(9.7mm)	
6	Sep.19,1999~Sep.21,1999	41.9	41.0	10.3	1(26.7mm)	

관개기에 조사하였다. No. 2와 No. 3의 경우는 각각 기비기와 분얼비기에 측정하였다. 농가의 설문 조사에 의하면 No. 2의 시기에 질소는 32.2kg/ha, 인은 10.4kg/ha이 시비된 것으로 나타났고, No. 3 시기에는 질소만 8.83kg/ha가 시비된 것으로 나타났다.

No. 1 시기의 배수면적은 43.5ha로서 소하천 확장공사 시작 전이였고, No. 2와 3은 공사가 진행중인 상태에서 배수로 하나를 소하천으로 배수시키는 시기로서 면적은 23.5ha로 축소되었으며, No. 4~6은 공사가 완료된 시기로서 면적은 41.9ha로 되었다.

3.2 강우시 농도 변화

강우시 시간의 경과에 따른 광역논에서의 유량과 농도의 변화는 Fig. 2와 같다.

(1) T-N

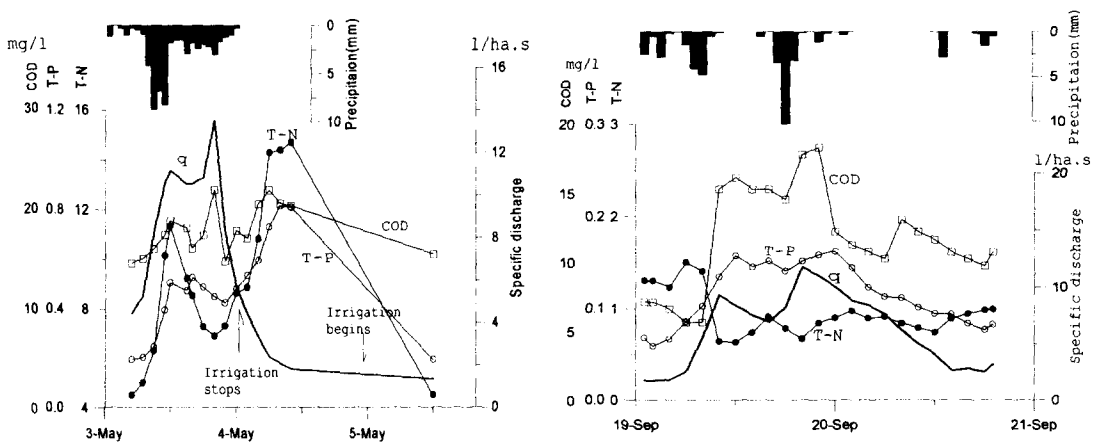
질소농도는 유량의 증가와 함께 증가하는 경우도 있고 감소하는 경우도 있다. 시비기인 No. 2의 농도는 초기 4.5 mg/l로 시작하여 유량이 증가하면서 점차 증가하다가 첨두 유량 근처에서 농도가 높게 나타난다. No. 2에서 관개 용수의 공급이 중단된 이후로는 유량이 급격히 감소하고 농도는 급격히 증가하는데, 이것은 용수의 차단으로 농도가 낮은 용수에 의한 희석 효과가 감소하기 때문으로 사료된다. 또한 하루 정도 지난 이후에는 용수의 공급 재개로 거의 초기 농도로 돌아오는 현상을 볼 수 있다. No.6의 경우와 같이 비시비기에는 유량이 점차 증가하면서 농도는 점차로 감소하다가 다시 유량이 감소하면서 농도는 증가한다. 질소는 용존의 형태로 많이 존재하고 있어 비시비기에는 강우에 의해 희석되는 특징을 보이고 있다.

(2) T-P

인은 일반적으로 Fig.2에서와 같이 유량의 증가와 함께 농도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 유량이 증가하면서 점차 증가하다가 첨두 유량 직전 혹은 같은 시간에 최대 농도를 나타낸다. 이것은 토양에 흡착되어 있던 인이 강우시 토양의 침식과 더불어 현탁상태로 유출되기 때문으로 사료된다.

(3) COD

COD의 농도변화는 강우 초기에 낮고 유량이 증가하면서 농도가 증가하다가 첨두 유량 근처에



(a) No. 2

(b) No. 6

Fig. 2. Relationship between concentration and discharge

서 최대 농도를 보이며 유량의 저하와 함께 농도가 감소하는 경향을 보이고 있으나, T-N이나 T-P에 비해 상대적으로 낮은 변동을 나타낸다.

이상과 같이 강우시의 농도 변화는 시비조건, 용수 조작 등에 따라 크게 좌우된다.

3.3 비유량과 비부하량의 관계

조사 기간 중 T-N, T-P와 COD에 대한, 강우시의 비유량과 비부하량과의 관계를 지수식 ($L = a \cdot Q^b$)으로 나타내면 Table 2와 같다. 비유량과 비부하량과의 결정계수(r^2)는 0.68~0.99로서 비교적 높은 상관 관계가 있다.

T-N의 회귀식은 전 사상에 있어 계수 b 는 0.74~0.99로 1보다 작은데, 이것은 유량이 증가하면서 농도는 감소하는 것을 나타낸다. 기비기에 해당되는 No. 2사상은 다른 사상에 비하여 같은 비유량에 대하여 높은 비부하량을 나타낸다.

T-P는 T-N과 달리 No. 2 이외에는 모두 b 계수가 1 이상으로서 유량이 증가하면서 농도는 증가하는 형태를 나타냈다. No. 2의 b 계수는 다른 강우 사상보다 상대적으로 낮은 것은 기비기로서 자연적인 요인보다는 인위적인 요인이 포함되어 관개용수의 수문 조작에 의해서 유량이 급감하면서 농도가 상승하기 때문으로 사료된다.

COD는 No. 6을 제외한 b 의 계수가 0.97~1.06값을 나타내 농도는 유량에 관계없이 거의 일정한 형태를 나타내고 있다. COD의 결정계수는 0.90~0.97로서 T-N이나 T-P보다 높은 상관관계를 나타낸다

Table 2. Specific load-specific discharge equations in storm events

No. of storms	T-N		T-P		COD	
	L-Q Equation	r^2	L-Q Equation	r^2	L-Q Equation	r^2
1.	$L = 3.58Q^{0.86}$	0.96	$L = 0.203Q^{1.343}$	0.92	-	-
2.	$L = 9.72Q^{0.91}$	0.76	$L = 0.473Q^{0.942}$	0.68	$L = 17.91Q^{0.99}$	0.97
3.	$L = 3.12Q^{0.99}$	0.84	$L = 0.050Q^{1.205}$	0.86	$L = 17.31Q^{0.97}$	0.90
4.	$L = 1.85Q^{0.99}$	0.80	$L = 0.042Q^{1.453}$	0.77	$L = 10.45Q^{1.04}$	0.87
5.	$L = 1.38Q^{0.92}$	0.90	$L = 0.031Q^{1.228}$	0.87	$L = 7.55Q^{1.06}$	0.94
6.	$L = 1.39Q^{0.74}$	0.88	$L = 0.050Q^{1.471}$	0.99	$L = 5.80Q^{1.40}$	0.94

(Units) L : mg/ha · s , Q : ℓ/ha · s

3.4 직접 유출의 부하량과 평균농도

(1) 직접유출부하량과 기저유출부하량과의 비교

Fig. 3과 같이 직접유출부하량 L_D 와 1일 기저유출부하량 L_{B1} 과의 비율을 E_L 이라 하고, 직접 유출량 Q_D 와 1일 기저유출량과 Q_{B1} 의 비를 E_Q 라고 하면 E_L , E_Q 는 각각 식(1), (2)과 같이 표현된다.

$$E_L = L_D / L_{B1} \quad (1)$$

$$E_Q = Q_D / Q_{B1} \quad (2)$$

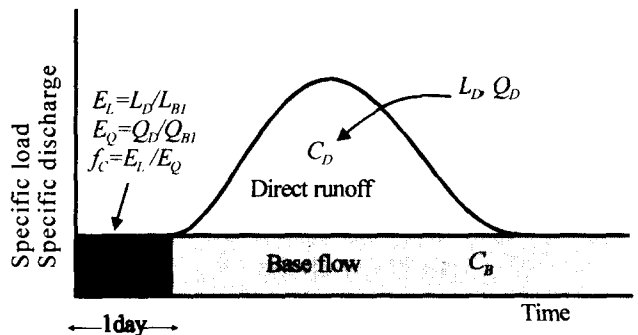


Fig. 3. Definition of direct runoff in paddy fields

유출량의 비인 E_Q 는 1.1~4.7의 값을 나타내며, 부하량의 비인 E_L 값은 T-N이 1.3~2.5, T-P가 2.1~10.8, COD가 1.3~10.1로, T-P가 가장 높은 값을 나타냈다.

또한 기저유출에 대한 직접유출 부하의 농도비는 f_c 라하면 식(3)과 같이 표현된다

$$f_c = \frac{E_L}{E_Q} = \frac{L_D/L_{BI}}{Q_D/Q_{BI}} = \frac{L_D/Q_D}{L_{BI}/Q_{BI}} = \frac{C_D}{C_B} \quad (3)$$

f_c 의 평균 값은 T-N이 0.8, T-P가 1.9, COD가 1.7로서 T-P가 가장 높게 나타났다. 이것은 일본 농촌 유역의 하천(5개의 하천에서 조사된 전체면적은 53km²이고, 전체 면적에서 논이 21.0%, 밭이 20.1%, 임야가 26.1%, 기타 32.8%로 구성)에서 측정된 T-N=2.4, T-P=5.3, COD=4.7보다 작게 나타나 강우시 광역논에서의 유출수 농도는 평상시의 농도에 비하여 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다.

(2) 직접유출의 평균농도(\bar{C})

직접유출의 평균농도는 식(4)와 같이 얻을 수가 있는데, 이것은 직접 유출량으로부터 직접 유출부하량을 추정하는데 사용될 수 있다.

$$\bar{C} = \frac{\int C_D \cdot q_D dt}{\int q_D dt} \quad (4)$$

여기서, C_D 는 직접유출의 농도, q_D 는 직접유출의 유량을 나타낸다.

\bar{C} 는 T-N이 0.7~8.5 mg/l, T-P가 0.07~0.51 mg/l, COD가 11.3~19.8 mg/l로서 강우 사상에 따라 큰 차이를 보였다. 기비기인 No. 2에서 T-N은 9.4 mg/l, T-P는 0.51 mg/l로서 가장 높은 값을 나타냈으며, T-N은 시비의 영향을 받지 않은 No. 6에서 0.7 mg/l T-P는 No. 5에서 0.07 mg/l로 가장 작은 값을 나타냈다.

(3) L_D-Q_D 식

광역논으로부터 직접유출의 L_D 와 Q_D 의 관계는 Fig. 5와 같다. 그림의 직선은 시비에 영향을 받지 않은 강우 사상에 대한 L_D 와 Q_D 의 관계를 나타낸 것이다.

또한, 소로지구와 일본의 Kosei 지구(면적은 11.6ha, 44필지에 해당하는 광역논 지구를 비교해본다면, 소로지구가 Kosei 지구보다 같은 비유량의

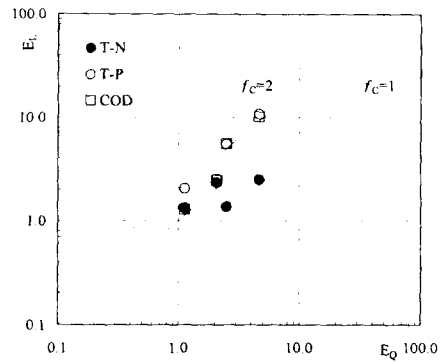
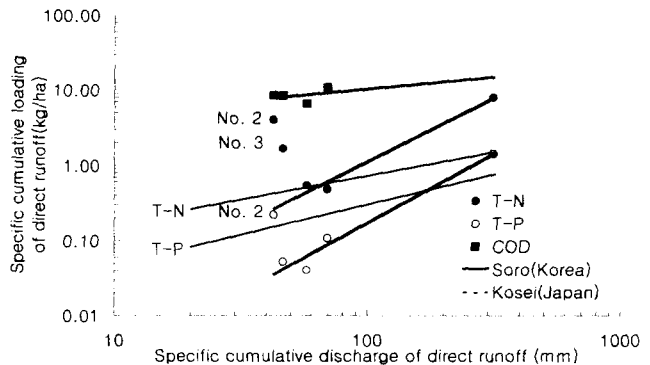


Fig. 4 Relationship between E_L and E_Q



$$T-N : L_D = 5 \times 10^{-4} Q_D^{1.69}$$

$$T-P : L_D = 4 \times 10^{-5} Q_D^{1.84}$$

Fig. 5. Relationship between L_D and Q_D

증가에 대한 비부하량의 증가가 큰 것으로 나타났다.

3.5 강우시 T-N/T-P비의 변화

조류의 성장에 있어서 T-N/T-P의 농도가 7.2보다 크면 인이 제한 인자가 되고 7.2보다 작으면 질소가 제한 인자가 되는 것으로 알려져 있다.

강우시 평균 T-N/T-P비와 초기 T-N/T-P비와의 관계는 Fig. 6과 같다. 직접유출의 평균 T-N/T-P비는 강우 초기의 19~49에서 6~39로 감소하고 있다. 시비기에는 T-N과 T-P의 농도가 증가함으로써 T-N/T-P비는 크게 저하하지 않는다. 그러나 비시비기에는 T-N은 감소하나 T-P는 증가하여 T-N/T-P비는 크게 감소하는 현상을 나타낸다. 따라서 장마기에 T-N/T-P비가 낮은 눈으로부터의 유출수는 장마 후 높은 수온과 함께 조류의 성장을 촉진시키는 하나의 인자로서 작용할 수 있을 것으로 사료된다.

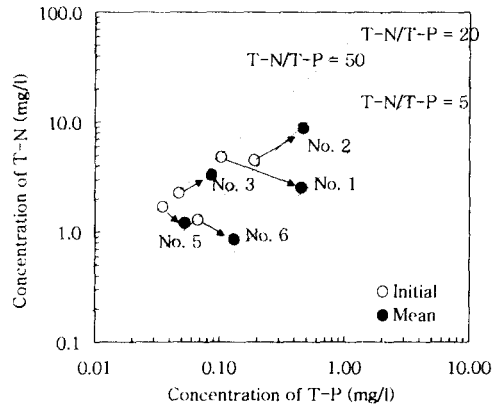


Fig. 6. Change in T-N/T-P ratio in stormwater

4. 결론

본 논문에서는 영농기의 강우를 대상으로 광역눈으로부터 유출부하 특성을 고찰하였는바, 여기서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 강우시의 수질농도는 유량이 증가하면서 T-N은 시비기에는 증가하고 비시비기에는 감소하며, T-P와 COD는 증가하는 현상을 나타내고 있다. 유량의 증가에 따른 T-P의 농도 증가는 토양에 흡착되어 있던 T-P가 토양의 침식과 더불어 현탁상태로 유출되기 때문으로 판단된다.

2. 기저유출에 대한 직접유출의 평균 농도비 f_c 는 T-N이 0.8 T-P가 1.9 COD가 1.7로서 농업유역의 하천에 비하면 작게 나타나, 광역눈에서의 강우시 농도 증가는 크지 않은 것을 알 수 있다.

3. 직접유출의 평균농도(\bar{C})는 T-N이 0.7~9.4 mg/l, T-P가 0.07~0.51 mg/l, COD가 11.3~19.8 mg/l로서 T-N과 T-P는 시비기에 높게 나타났다.

4. 강우시 T-N/T-P비는 일반적으로 저하한다. 특히, 비시비기에는 T-N은 감소, T-P는 증가함으로써 T-N/T-P비는 초기의 19~49로부터 6~12로 크게 저하하여 부영양화가 일어날 최적 조건(T-N/T-P = 5~20)으로 변화되고 있음을 알 수 있다.

이상의 연구 결과로부터 광역눈으로부터의 유출수는 오염물질의 종류, 시비조건, 용수조작 등에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

5. 참고 문헌

1. 農業土木學會, 1987, 農業土木技術者のための水質入門, pp. 31~45
2. 武田育郎 外 3人, 1990, 降雨時における水田群からの汚濁負荷流出, 農土論集 147, pp. 79~85