

강우시 광역논으로부터의 유출부하 특성

Characteristics of Storm Runoff Loadings from a Paddy Field Area

오승영* · 김진수 · 이종진 · 오광영(충북대)

Oh, Seung Young · Kim, Jin Soo · Lee, Jong Jin · Oh, Kwang Young

Abstract

Concentration and discharge have been intensively monitored at the drainage canal in a paddy field area during storm-periods. Among 4 storm runoffs, the No. 2 and No. 3 runoff was in the fertilizer application period. The specific load-specific discharge equation $L = aQ^b$ have different characteristics for the pollutants. The coefficient of b generally shows values of more than 1 for T-N, about 1 for COD_{cr} , and less than 1 for T-P. For same specific discharge, No. 2 runoff shows higher specific load than other runoffs. For the coefficient of determination of the L-Q equation, COD_{cr} is higher than T-N and T-P. The mean concentration of direct runoff, significantly depending on the storm events, is 0.6 to 8.3 mg/l for T-N, 0.05 to 0.51 mg/l for T-P, and 10.0 to 18.3 mg/l for COD_{cr} .

I. 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, 면적으로 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 크게 영향을 끼치는 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 강우등 자연적 요인과 시비와 물관리등의 인위적 요인이 복합적으로 작용하는 강우시 광역논으로부터의 오염부하량의 유출특성에 관해 규명하고자 한다.

II. 조사 지구 및 조사 방법

1. 조사지구

본 연구의 조사 지구는 충청북도 청원군 옥산면 소로리와 남촌리에 위치한 광역논이다. 지

구 면적은 1998년도에는 43.5ha이었으나 1999년도에는 소하천의 확장공사로 인해 1.6ha가 감소되어 41.9ha로 되었다. 이 지구는 용·배수 분리의 대규모화된 광역농지대로서 용배수로 이외에는 외부로부터 물의 유출입이 없다. 이곳의 용수는 금강 수계 제 1 지류인 미호천에서 취수하여, 다시 미호천으로 배수되고 있다. 이곳의 용·배수로는 콘크리트 라이닝 수로로서 연장 890m~1150m이고, 측정지점과 지구 개요도는 Fig. 1에 보여지고 있다.

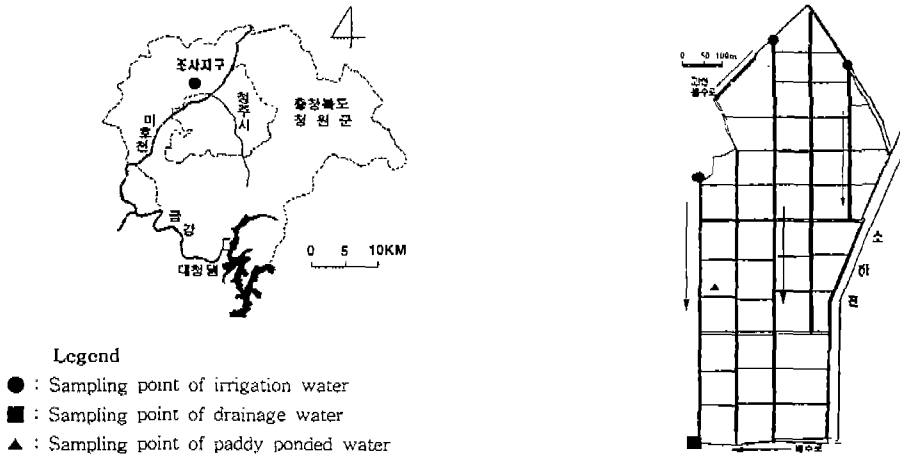


Fig. 1. Investigated paddy field area

2. 조사방법

(1) 수문데이터의 측정 방법 강우량은 조사 지구에서 약 5km 떨어진 청주 기상대의 기상 자료를 이용하였다. 유역내의 배출량은 배수로 하단부에 설치한 압력 수위계와 유속계를 이용하여 수위와 유량과의 관계식(H-Q식)을 사용하여 계산하였다. 측정 개시 시각은 강우로 인해 직접 유출이 일어나기 전에서 시작하였고, 측정 종료 시각은 강우로 인한 직접유출 부분이 끝난 후 시점을 기준으로 하였다. 측정 간격은 약 2~6시간 간격으로 이루어졌다.

(2) 샘플 및 수질의 측정 방법 수질 분석용의 샘플은 조사 유역의 배수로 하류단에서 관측자가 유심(流心)에서 채수하였다. 수질 자료는 유량 자료와 마찬가지로 2~6시간 간격으로 채수하였다. 강우의 수질은 조사 지구에서 약 6km 정도 떨어진 충북대학교 농과대학에서 채수한 것을 사용하였다. 수질의 측정항목은 농업용수 수질 기준에서 가장 문제로 되고 있는 T-N(총질소), T-P(총인), CODcr(이하 'COD'라 함)의 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.

III. 결과 및 고찰

1. 강우 사상의 개요

1998년과 1999년 2년 동안 4회에 걸친 조사 시기의 강우사상은 Table 1과 같다. No. 1은 용수의 공급이 없는 비관개기에, No.2~4의 경우는 관개기에 조사하였다. No. 2와 No. 3의 강우는 기비기와 분얼비기에 측정을 하였는데, 농가의 설문 조사에 의하면 No. 2의 시기에 질소는

32.5kg/ha, 인은 10.4kg/ha이 시비된 것으로 나타났고, No. 3 시기에는 질소만 6.85kg/ha가 시비된 것으로 나타났다.

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

Table 1. Storm events

No. of storm	Area (ha)	Storm runoff period	Amount of rainfall (mm)	Maximum rainfall intensity (mm/h)	Remarks
1	43.5	Sep. 9, 1998~Oct. 2, 1998	194.5	15.8	Non-irrigation period
2	23.5	May 3, 1999~May 5, 1999	55.1	8.7	Basal dressing
3	23.5	Jun. 16, 1999~Jun. 18, 1999	67.3	10.7	Topdressing
4	41.9	Jul. 27, 1999~Jul. 30, 1999	50.6	6.7	

2. 용수, 강우 및 배수의 수질

강우사상에 대한 용수, 강우, 배수의 수질 농도는 Table 2와 같다. 배수농도는 기비기 No. 2 사상에서 T-N은 8.83 mg/l, T-P는 0.467 mg/l, COD는 17.86 mg/l로서 가장 높은 농도를 나타냈다. 강우시 용수와 배수의 T-N과 T-P의 농도비교를 해보면, No. 2에서 배수농도가 용수 농도보다 더 큰 농도를 보이고 있으나, No. 3에서는 비슷한 정도의 농도를 나타내고 있고, No. 4에서는 용수 농도가 배수 농도 보다 더 큰 값을 보여주고 있다. 따라서 강우시에도 시비 여부에 따라 용수에 대한 배수의 농도 특성이 다르다는 것을 알 수가 있다.

Table 2. Concentrations of irrigation water, rainfall and drainage water in the runoff events

No. of storm	Constituent	Irrigation water (mg/ℓ)	Rainfall (mg/ℓ)	Drainage water (mg/ℓ)
1	T-N	-	0.23	2.54
	T-P	-	0.004	0.454
	COD	-	-	-
2	T-N	2.77	-	8.83
	T-P	0.185	0.039	0.467
	COD	12.03	6.40	17.86
3	T-N	3.32	0.88	3.32
	T-P	0.153	0.011	0.086
	COD	11.77	4.73	16.95
4	T-N	1.31	0.64	1.22
	T-P	0.153	0.009	0.077
	COD	6.53	6.68	9.53

3. 강우시 농도 변화 특성

강우시 각각의 사상에 대한 질소, 인, COD에 대한 평균, 최대값, 최소값, 표준편차, 변동계수의 결과를 요약하면 Table 3과 같다. 각 강우 사상에 대한 변동계수의 크기는 T-P>T-N>COD 순으로 나타났다.

(1) T-N

질소의 농도는 유량의 증가와 함께 농도가 증가하는 경우도 있고 감소하는 경우도 있다 (Fig. 2). No. 1과 No. 4의 경우에는 유량이 점차 증가하면서 농도는 점차로 감소하다가 다시 유량이 감소하면서 농도는 증가한다. 또한, 기비기인 No. 2와 분얼비기인 No. 3의 농도는 초기에는 낮게 시작하여 유량이 증가하면서 점차 증가하다가 유량 피크 이전에 농도가 높게 나타

나지만 유량 피크 이후로 유량의 증가와 함께 감소하거나, 거의 일정한 값을 보이다가 No. 2에 서처럼 하루 정도 지난 이후에는 거의 초기 농도로 돌아오는 현상을 볼 수 있다. 질소는 용존의 형태로 많이 유출되고 있어, 강우에 의해 희석되어 농도가 낮아지거나 증가가 크지 않은 특징을 보이고 있다.

(2) T-P

인은 일반적으로 유량의 증가와 함께 농도가 증가하는 것을 볼 수 있다. No. 1, No. 2, No. 3의 경우는 유량이 증가하면서 점차 증가하다가 침투 유량 직전에 높은 농도를 나타내고, No. 4의 경우에는 초기의 강우 강도가 적을 때는 거의 일정한 값을 보이고 있다가 강우강도가 심해지는 지점에서 농도가 최대치를 이루는 것을 볼 수가 있다. 이것은 토양에 흡착되어 있던 인이 표토의 침식과 더불어 강우시 입자상으로 유출되기 때문이다.

(3) COD

COD의 농도변화는 강우 초기에 낮고 유량이 증가하면서 높은 농도를 보이다가 유량 피크를 기점으로 농도가 낮아지고 다시 유량의 저하와 함께 농도는 증가하는 경향을 보이고 있으나, T-N이나 T-P에 비해 큰 변동폭은 나타나지 않는다.

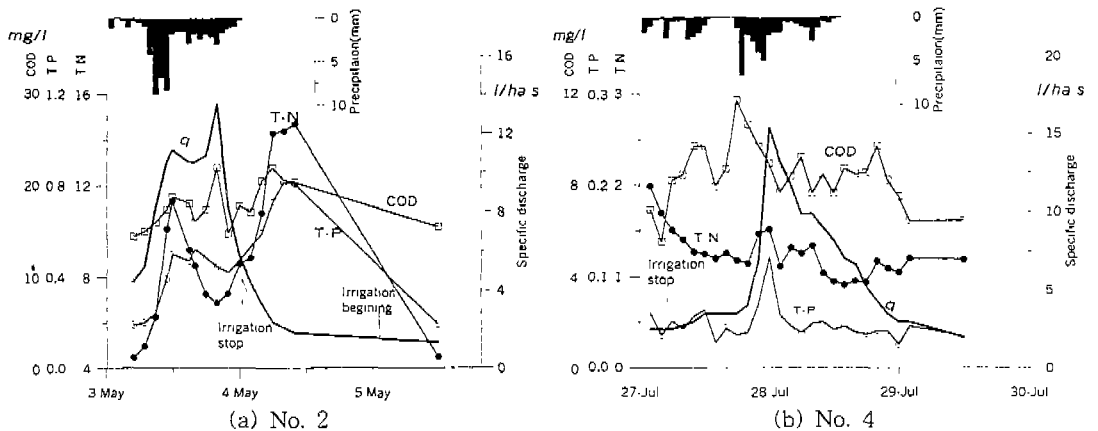


Fig. 2. Discharge and concentration of pollutants in storm events

Table 3. Summary of water quality in storm events

No. of storm	Number of samples	Statistical data	T-N	T-P	COD	No. of storm	Number of Samples	Statistical data	T-N	T-P	COD
1.	30	Mean(\bar{x} , mg/l)	2.54	0.454	-	3.	16	Mean(\bar{x} , mg/l)	3.32	0.086	16.95
		Min(mg/l)	1.42	0.096	-			Min(mg/l)	2.08	0.046	11.58
		Max(mg/l)	5.13	0.803	-			Max(mg/l)	4.34	0.129	19.90
		σ	0.39	0.11	-			σ	0.47	0.014	1.87
		σ/\bar{x} (%)	15.47	24.23	-			σ/\bar{x} (%)	14.27	16.72	11.04
2.	17	Mean(\bar{x} , mg/l)	8.83	0.467	18.23	4.	26	Mean(\bar{x} , mg/l)	1.22	0.077	9.53
		Min(mg/l)	4.50	0.190	14.75			Min(mg/l)	0.91	0.025	5.57
		Max(mg/l)	14.69	0.811	21.83			Max(mg/l)	1.99	0.122	11.69
		σ	2.01	0.115	3.18			σ	0.18	0.021	0.97
		σ/\bar{x} (%)	22.72	24.68	17.45			σ/\bar{x} (%)	14.90	39.73	11.515

4. 비유량과 비부하량의 관계

T-N, T-P과 COD에 대해서, 강우시의 비유량과 비부하량과의 관계는 Fig. 3과 같고, 이에 대한 지수형 회귀방정식($L = a \cdot Q^b$)은 Table 4에 나타났다. 비유량과 비부하량과의 결정계수

(r^2)는 0.68~0.97로서 비교적 높은 상관 관계가 있음을 알 수 있다.

T-N의 회귀식은 전 사상에 있어 계수 b 가 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. COD는 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.

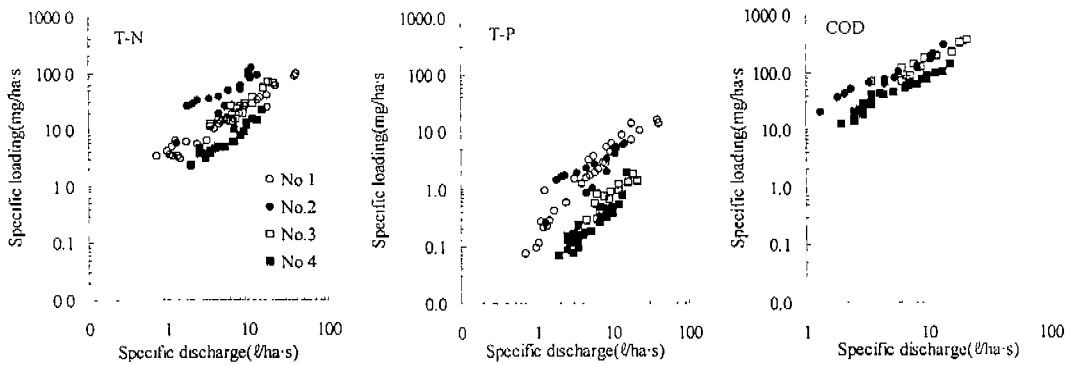


Fig. 4. Relationship between specific discharge and specific load

Table 4. Specific load-specific discharge equations in storm events

No. of storm	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.	$L = 1.38Q^{0.92}$	0.90	$L = 0.031Q^{1.228}$	0.87	$L = 7.55Q^{1.063}$	0.94

(Units) L : mg/ha · s, Q : ℓ/ha · s

5. 직접 유출의 부하량과 평균농도

(1) 직접유출부하량과 기저유출부하량과의 비교

직접유출부하량 l_D 와 1일 기저유출부하량 l_{B1} 과의 비를 e_l 이라 하고, 직접 유출량 q_D 와 1일 기저 유출량과 q_{B1} 의 비를 e_q 라고 하면 식(1), (2)와 같이 표현된다.

$$e_l = l_D / l_{B1} \dots\dots\dots(1)$$

$$e_q = q_D / q_{B1} \dots\dots\dots(2)$$

또한, 기저유출의 농도에 대한 직접유출의 농도의 비를 f_c 라고 하면 식(3)과 같이 표현된다.

$$f_c = \frac{e_l}{e_q} = \frac{l_D / l_{B1}}{q_D / q_{B1}} = \frac{l_D / q_D}{l_{B1} / q_{B1}} = \frac{C_D}{C_B} \dots\dots\dots(3)$$

유출량의 비인 e_q 는 1.1~2.7의 값을 나타내며, 부하량의 비인 e_l 값은 T-N이 0.3~2.1, T-P가 2.0~2.8, COD가 0.9~1.6으로서, T-P가 가장 높은 값을 나타냈다. 또한 f_c 의 값은 T-N이 0.3~1.2, T-P가 0.9~1.8, COD가 0.4~0.9로서 T-P가 가장 높게 나타났으며, COD의 경우는 1 이하로 나타났다.

(2) 직접유출의 평균농도(\bar{C})

직접유출 평균농도는 식(4)와 같이 얻을 수가 있는데, 이것은 직접 유출량으로부터 직접 유출부하량을 추정하는데 사용될 수 있다(Fig. 5).

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

여기서, C_D 는 직접유출의 농도, q_D 는 직접 비유출량을 나타낸다.

\bar{C} 는 T-N이 0.57~8.48 mg/l, T-P가 0.049~0.514 mg/l, COD가 9.97~18.34 mg/l로서 강우 사상에 따라 큰 차이를 나타냈는데, T-N과 T-P는 No. 2에 가장 높은 농도를 나타냈으며, 시비에 영향을 받지 않는 No. 4에 가장 작은 농도를 나타냈다.

IV. 결론

본 논문에서는 4개의 강우를 대상으로 강우시 광역논으로부터 유출부하 특성을 고찰하였는 바, 여기서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 강우시의 수질농도의 변화는 유량이 증가하면서 T-N은 약간 감소하고 COD는 거의 일정한 값을 보이며, T-P는 증가하는 현상을 나타내고 있다. T-P의 상당량은 토양에 흡착되어 있다가 표토의 침식과 더불어 입자상으로 유출되므로 유량에 비례하여 농도가 높아지는 것으로 판단된다.
2. 기비기의 강우사상인 No. 2의 경우는 다른 사상보다 같은 비유량에 대해서 가장 높은 비부하량을 나타냈다.
3. 기저유출량에 대한 직접유출량의 비 e_q 는 1.1~2.7로 나타났으며, 기저유출부하량에 대한 직접유출부하량의 비 e_l 은 T-N이 0.3~1.2, T-P가 0.9~1.8, COD가 0.4~0.9로서 T-P가 가장 높게 나타났다.
4. 직접유출의 평균농도는 T-N이 0.6~8.5 mg/l, T-P가 0.05~0.51 mg/l, COD가 10.0~18.3 mg/l로서 강우 사상에 따라 큰 차이를 나타냈다.

V. 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

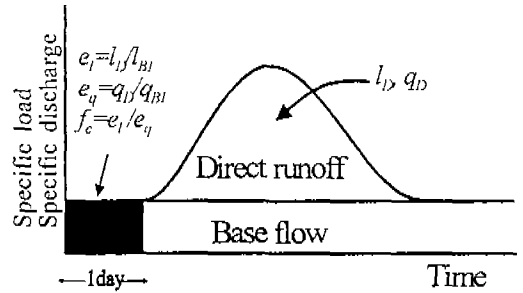


Fig. 5. Definition of direct runoff in paddy field