

농촌유역에서의 오염물질의 농도특성

○오광영* · 조재원** · 김진수***

I. 서론

유역의 수질보전을 위해서는 유역에 대한 유량 및 오염물질 농도의 기초적인 자료가 구축되어야 한다. 이를 위해 소유역의 농업지역에서 농경지와 농업활동에서 발생하는 비점원오염이 유역의 수질에 미치는 영향을 구명할 필요가 있다. 지역에 따라 배출양상이 다양한 농촌유역에서의 정확한 오염물질 유출특성을 파악하기 위해서는 토지이용 및 영농활동에 따른 체계적인 모니터링이 필요하고(최중대, 1999), 이를 위해서는 최소 20개(회) 이상의 측정자료가 필요하다고 보고되었다(신은성, 2001). 그러나 우리나라 농촌유역에서 조사된 오염유출부하량은 특정시기에 한정되어 있고 낮은 측정빈도로 인해 신뢰성이 낮다.

점원오염은 도시나 공장에서와 같이 오염된 물이 일정한 배출구를 통해 흘러 하천으로 유출되는 과정에서 쉽게 파악할 수 있으나, 비점원오염은 배출양상이 동시다발적이고 오염원이라고 단정지을 수 없는 광범위한 유출특성 때문에 그 실태파악이 어렵다. 또한, 점원과 비점원이 혼재하는 농촌유역에 대한 연구가 대부분 이어서 비점원오염의 유출특성을 파악하기 어려운 실정이다. 신은성 등(2001)은 우리나라의 농업 비점원오염 문제는 외국과 달리 대단위 침식물보다는 고밀도 경작에 따른 가축분뇨 및 비료사용 등에 의한 영양물질이 문제가 되고 있어 농업지역 비점오염물질의 기여정도를 파악하고 관리방안을 도출하기 위해서는 많은 유역에서 비점오염물질 유출특성에 관한 연구가 필요하다고 제시하였다.

이에 본 연구는 산림, 논, 밭 등의 비점원이 주체이고 점원이 거의 없는 농촌유역을 대상으로 오염물질(TN, TP, COD)에 대한 빈도 높은 수질 모니터링을 통하여 오염물질의 농도 특성을 파악하고자 한다.

II. 조사지구 개요 및 조사방법

1. 조사지구개요

본 연구에서는 우리나라의 전형적인 농촌을 대상으로 조사하기 위하여 가능한한 대규모 축산단지나 공장 등의 점오염원이 거의 없는 유역을 선정하였다. 조사유역은 충청북도 청원군 낭성면(동경 127° 35' ~ 127° 37', 북위 36° 37' ~ 36° 40')에 위치한 공장 등이 없는 전형적인 농촌유역이다. 본 유역은 면적이 6.5km², 주하천(인경천)의 길이가 5.42km, 형상계수가 0.22인 유로연장에 비하여 너비가 좁은 형상이다. 인경천은 남한강의 지류로서 유역에는 인경산(해발 582m)과 가래산(해발 540m)이 위치하고 있다. 토지이용을 보면, 임야가 79.8%, 밭이 10.2%, 논이 5.3%, 기타가 4.7%로 산림과 농지가 95% 이상을 차지하고 있다(그림 1).

산림의 식생은 침엽수림 53%, 활엽수림 31%, 혼효림 16%로 소나무와 낙엽송이 주류를 이루고, 주요 밭작물로는 고추, 배추, 인삼 등이 있다(청원군 2001).

토양의 특성을 알아보면 임야의 경우, 표토는 황적색의 자갈이 있는 미사질양토이고 심토 및 기층은 적색, 농갈색, 흑색의 자갈이 있는 미사질양토로서 소나무, 리기다소나무, 산오리나무, 싸리, 참나무 등의 임목에 적합한 토양이다. 전답의 경우, 표토는 농암회갈색의 자갈이 있는 미사질양토이고, 심토 및 기층은 농암회갈

* 충북대학교 농공학과 박사과정 수료
** 충북대학교 농공학과 석사과정 졸업
*** 충북대학교 농공학과 교수

색, 농암갈색의 자갈이 많은 미사질양토이다.

2. 조사방법

조사구역의 유출량은 구역의 말단에서 2002년 1월 17일부터 2003년 2월 28일까지의 평균 5일 간격으로 측정하였다. 또한, 1회의 강우사상에 대하여 수위가 상승하면서부터 강우 직전의 수위로 하강할 때까지 2~9시간 간격으로 측정하였다.

유출량은 평상시와 강우시를 구분하여 측정하였는데, 평상시는 하도를 3~4개의 단면으로 나누어 측정하였고, 강우시에는 3~7개의 단면으로 구분하여 측정하였다. 단면적 역시 평상시와 강우시를 구분하여 계산하였다. 강우시의 단면적은 강우 이전에 하천단면측량을 실시하여 얻은 횡단면도를 사용하였다.

구역 말단에는 압력식 수위계(WL-14 Water Level Logger)를 설치하여 1시간 간격으로 수위를 측정하였고, 측정된 압력과 5일 간격으로 측정된 유량과의 관계곡선을 이용하여 1시간 마다의 유량을 압력으로부터 추정하였다.

강우는 구역으로부터 약 1km거리에서 측정된 청원군 낭성면사무소에서 측정된 강우자료를 사용하였다.

수질분석을 위한 수질자료는 5일 간격으로 유량측정시에 채수하였으며, 1회의 강우사상에 대해서는 2~9시간 간격으로 채수하였다.

수질은 T-N(총 질소), T-P(총 인), COD의 3가지 항목에 대하여 분석하였다. T-N과 T-P분석은 환경부의 수질오염공정시험법(환경부, 1997)에 의한 흡광광도법으로 측정하였고, CODcr은 Standard Methods(American Public Health Association, 1995)에 의한 중크롬산칼륨을 이용하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우량 및 유출량

조사기간(2002. 1. 17~2003. 2. 28) 동안의 총강우량은 1,223.1mm, 총유출량은 562.2mm이며 유출률은 46.0%를 보였다. 평균비유량은 5일 간격으로 측정된 유출량을 유역면적으로 나누어 평균한 값으로서 $0.016\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ 으로 나타났고, 이것은 1.38mm/d의 일평균

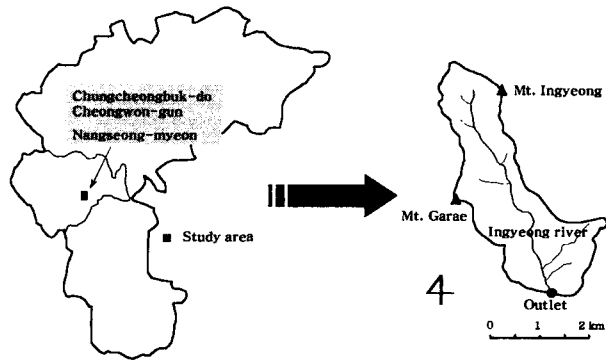


그림 1 조사구역의 개요

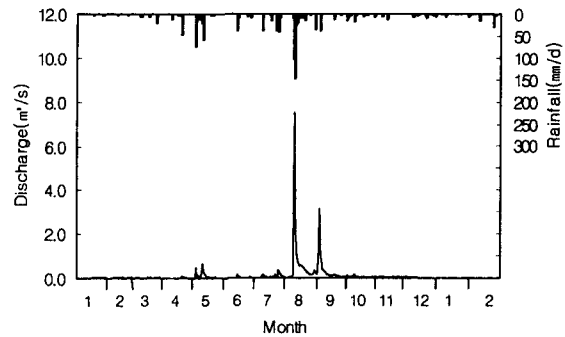


그림 2 조사구역에서의 강우와 유량의 변동

표 1 조사구역에서의 수질특성 [unit : mg/L]

Con.	Period	No. of samples	Mean (mg/L)	Max (mg/L)	Min (mg/L)	Standard deviation	
T-N	Dry	Non-irrigation	42	1.52b	3.67	0.33	0.60
		Irrigation	27	2.04b	3.74	0.22	0.98
	Rainy	22	3.58a	6.34	1.29	1.01	
T-P	Dry	Non-irrigation	42	0.017b	0.034	0.002	0.009
		Irrigation	27	0.049b	0.112	0.016	0.026
	Rainy	22	0.167a	0.464	0.022	0.132	
COD	Dry	Non-irrigation	42	3.51b	20.41	0.55	3.53
		Irrigation	27	3.52b	11.17	0.65	2.58
	Rainy	22	7.37a	15.12	1.85	3.98	

a>b, Duncan의 다중검정법의 적용결과, p=0.05

유출고에 상당한다. 강우량과 유출량의 변화는 그림 2와 같은데, 강우량은 8월 상순과 하순에 조사기간동안 총 강우량의 약 39%를 차지하였다.

유출량은 5일간격으로 측정된 유량과 압력의 상관식을 이용하여 조사기간동안의 유출량을 산출하였다.

2. 평상시 농도 특성

평상시 유출수의 농도는 비관개기(1~4월, 10~12월)와 관개기(5~9월)로 구분하였는데, 수질특성은 표 1과 같다. 비관개기 동안의 TN과 TP의 평균농도는 각각 1.52mg/L과 0.017mg/L으로 관개기 동안의 TN과 TP의

평균농도인 2.04mg/L, 0.049mg/L보다 낮게 나타났으나, COD는 비관개기와 관개기에서 거의 같게 나타났다. 각각의 TN과 TP농도는 산지계류수의 평상시의 각각의 농도(0.58mg/L, 0.017mg/L) 보다 높게 나타나, 농업활동에 의한 영향이 나타난 것으로 생각된다. 시비기의 평균농도는 관개기의 평균농도보다는 TN과 COD는 높게 나타났고, TP는 같게 나타나, TN은 시비에 의한 영향이 있는 것으로 나타났다.

Duncan 다중검정법을 적용한 결과, T-N, T-P 및 COD의 평균농도는 모두 비관개기(평상시)와 관개기(평상시) 사이에는 유의차가 인정되지 않았으나 강우시는 비관개기(평상시)나 관개기(평상시)보다 모두 높은 것으로 나타나, 하천수질은 강우시에 크게 변동하는 것으로 판단된다.

비관개기와 관개기에서 농도와 유량과 관계를 지수식으로 나타내면 표 2와 같다. 비관개기에는 COD만이 유의성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 관개기의 경우, T-N은 유량의 증가에 따라 농도가 상승하고($b > 0$), COD는 유량의 증가에 따라 농도가 하강하는 경향이 나타났다($b < 0$). 유량의 증가에 따른 COD농도의 상승은 저유량에서 유기물의 침전 및 미생물에 의한 분해가 계속되어 유량증가에 따른 희석효과가 나타나기 때문으로 생각된다. 평상시 전체의 C-Q식은 관개기와 같은 경향을 나타냈다.

3. 강우시 농도 특성

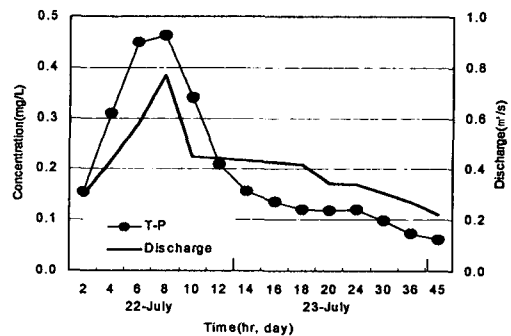
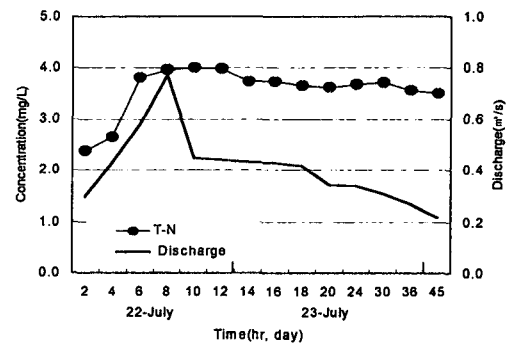
강우사상에 대한 측정은 7월 22일 14:00부터 7월 24일 09:00까지 2~9시간 간격으로 이루어졌다. 총 강우량은 48mm이었고, 최대강우강도는 11mm/hr로 나타났으며, 3일 전에 38mm의 선행강우가 기록되었다. 유량은 7월 22일 22시에 0.77m³/s(0.12m³/s·km²)의 최대값을 기록하였다.

강우시 TN의 농도는 유량의 증가와 함께 상승하여 침투유량 이후에 최대값이 나타났다. 그러나 유량이 감소함에 따라 농도는 크게 하강하지 않고 유량증가 이전보다 높은 농도를 유지하였다. 이것은 T-N농도가 얇은 토층을 통과한 후 발생하는 중간류에서 지하수보다 높은 농도를 나타내기 때문이다(그림 3(a)).

표 2 평상시 농도와 유량과의 관계 [Unit: C(mg/L), Q(m³/s)]

Period	Concentration	No. of samples	C-Q equation	r ²
Non-irrigation ①	T-N	42	$C=2.25Q^{0.20}$	0.09
	T-P		$C=0.016Q^{0.04}$	0.002
	COD		$C=1.06Q^{-0.36}$	0.11*
Irrigation ②	T-N	27	$C=5.32Q^{0.45}$	0.43**
	T-P		$C=0.050Q^{0.04}$	0.006
	COD		$C=1.20Q^{-0.42}$	0.48**
Total (Dry days) ①+②	T-N	69	$C=3.64Q^{0.34}$	0.25**
	T-P		$C=0.026Q^{0.03}$	0.002
	COD		$C=1.08Q^{-0.39}$	0.21**

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

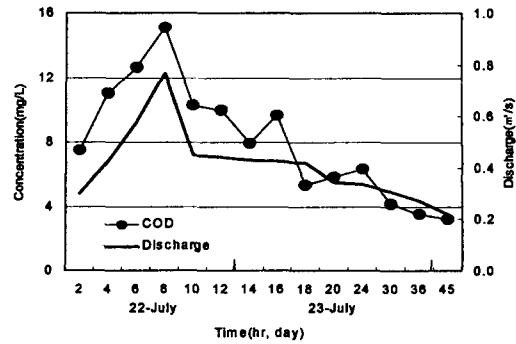


(b) T-P

T-P농도는 유량의 증가와 함께 상승하여 침투유량에서 최대값이 나타났고, 유량의 감소와 함께 농도도 하강하여 유량상승 전보다 낮은 농도를 나타냈다. 이것은 유량의 증가에 따라 하천 저질(底質)이나 유사에 흡착된 인이 유출되기 때문으로 사료된다(그림 3(b)).

COD농도는 T-P의 농도변화와 비슷하게 유량의 증가와 함께 상승하였다가 감소하는 경향을 나타냈다(그림 3(c)). TN의 최고농도는 4.0mg/L, TP의 최고농도는 0.46mg/L이고 COD의 최고농도는 15.1mg/L을 나타냈다.

강우시도 관개기 평상시와 같이 유량이 증가함에 따라 T-N과 COD농도가 상승하는 경향($b>0$)을 나타냈으나, T-P는 유의성이 없는 것으로 나타났다. 강우시 농촌유역에서의 소하천(鈴木 등, 1984)에서 부유물질(SS)의 증가에 따른 T-P농도의 증가는 COD농도의 증가보다 분산되어 나타난다고 보고한 바 있다. COD의 농도는 관개기 평상시와는 달리 유량의 증가에 따라 농도가 상승하는 경향을 보였는데, 이것은 평상시의 낮은 유량에서 하천의 바닥에 침강 퇴적된 유기물의 일부 혹은 전체가 유량의 급증에 따라 재부유하기 때문으로 생각된다.



(c) COD

그림 3 강우시 수질 변동

표 3 강우기동안의 농도와 유량과의 관계
[Unit: C(mg/L), Q(m³/s)]

Constituent	No. of samples	C-Q equation	r^2
T-N	22	$C=5.04Q^{0.47}$	0.27*
T-P		$C=0.237Q^{0.94}$	0.14
COD		$C=11.46Q^{0.21}$	0.21*

*: $p < 0.05$

본 연구는 2002년 1월부터 2003년 2월까지 비점원 주체인 농촌유역을 대상으로 오염물질(T-N, T-P, COD)의 농도변화 특성을 파악하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 관개기(평상시), 비관개기(평상시) 및 강우시에 대하여 분산분석(ANOVA)의 Duncan 다중검정법을 적용한 결과, 오염물질의 평균농도는 비관개기(평상시)와 관개기(평상시) 사이에는 유의차가 인정되지 않았으나, 강우시는 비관개기(평상시)나 관개기(평상시)보다 높은 것으로 나타났다.
2. T-N은 평상시와 강우시 모두 유량증가에 따라 농도가 증가하는 것으로 나타났다. T-P는 평상시 및 강우시 모두 유량과 농도가 유의적인 관계를 보이지 않았다.
3. COD는 유량증가에 따라 평상시에는 농도가 감소하나 강우시에는 증가하는 것으로 나타났는데, 이것은 평상시 바닥에 퇴적된 유기물이 강우시의 유량급증에 의하여 부유하기 때문으로 사료된다.

V. 참고문헌

1. 김선중, 2002, 산지계류수의 오염부하특성, 석사학위논문.
2. 박승우, 류순호, 강문성, 1997, 소유역의 토지이용에 따른 비점원오염 부하량, 한국농공학회지, 39(3), pp. 115~127.
3. 충청북도 청원군, 2001, 청원통계연보.
4. 신은성, 최지웅, 이동훈, 2001, 농업지역의 비점오염물질 유출특성에 관한 연구, 한국물환경학회지, 17(3), pp. 299~311.
5. 鈴木誠治, 田淵俊雄, 1984, 農業地域の小河川における降雨時の水質と流出負荷に関する研究, 農業土木學會論文集, 第114号, pp. 21~31.