

안성천 유역의 토지이용별 비점오염원 원단위 산정

황병기^{1*}

¹상명대학교 건설시스템공학과

Estimating Unit Load of Non-Point Source Pollutants for Landuse Types in Anseongchun Watershed

Byung-Gi Hwang^{1*}

¹Dept. of Civil Engineering, Sangmyung University

요약 본 연구에서는 안성천 유역을 대상으로 토지이용별로 산지, 농경지, 도시지역을 표본지역으로 선정하여 비점오염원 원단위를 산정하였다. 그리고 강우시 유출수의 유출특성을 가장 잘 반영하는 유량가중평균농도를 산정하고, 유출오염부하량을 산정하였다. 유출계수가 높게 나타났던 1차 강우시가 2차 강우시보다 오염물질의 유량가중평균농도가 높게 나타나는 경향을 보였으며, 토지이용별 산정결과, 농지와 산지 같은 비도시지역보다 도시 지역에서 강우 유출시 높은 농도의 오염물질이 발생하는 것으로 나타났다. BOD 유출부하량은 산지, 농지, 도시 지역에서 1차 강우시 각각 1,395kg/d, 1,623kg/d, 2,268kg/d로, 2차 강우시 각각 503kg/d, 512kg/d, 898kg/d로 산정되었다. 강우량 및 강우강도에 따라 토지이용별로 유출부하가 크게 다르게 나타났다. 토지이용별 원단위는 BOD 기준으로 도시지역이 72.7kg/ha/yr로 농경지(6.5kg/ha/yr)보다 12배 이상, 산지(9.5kg/ha/yr)보다 8배 이상 높게 나타나 도시지역이 비도시지역보다 단위면적당 비점오염부하가 매우 높은 것으로 나타났다.

Abstract In this study, we computed the unit load of nonpoint source for the forest, agricultural, and urban representative region in Anseongchun watershed. In addition, Flow-weighted mean concentration (FWMC) that well represents runoff characteristics of storm water during rainfall, was calculated, and runoff pollutants loading was also examined. FWMCs of 1st rainfall, which runoff coefficient was high, had a tendency higher than those of 2nd rainfall. Based on landuse results, pollutant concentration of the non-urban such as forest and agricultural regions was higher than that of urban region. In case of BOD, runoff pollutants loading was calculated as 1,395, 1,623, 2,268kg/d in 1st rainfall for forest, agricultural, and urban regions, respectively, while runoff loading of 2nd rainfall was 503kg/d in forest), 512kg/d in agricultural, and 898kg/d in urban. By landuses, unit load of the urban as 72.7kg/ha/yr was 12 times higher than that of the agricultural as 6.5kg/ha/yr, and 8 times higher than that of the forest as 9.5kg/ha/yr.

Key Words : unit load, FWMC, runoff coefficient, representative region

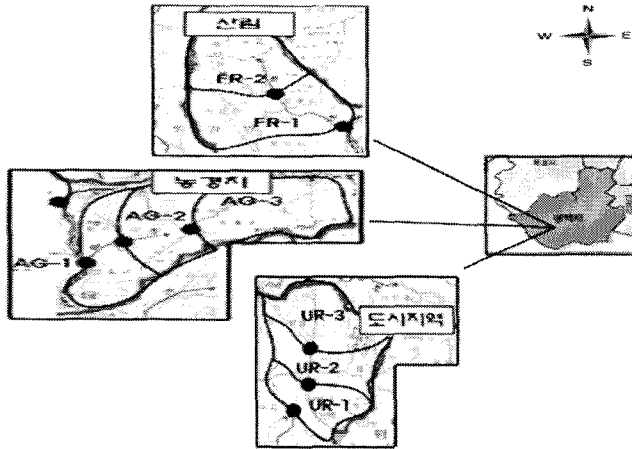
1. 서론

비점오염원은 먼로 분포하는 오염원으로서 대부분 강우시 유출되는 오염으로 우리나라에서는 1994년도에 처음으로 중앙정부차원[12]에서 비점오염원에 대한 토지 이용별 원단위 조사를 수행한 바 있다. 하수처리장을 증설하고, 처리율을 높이는 등 점오염원에 대한 관리를 철저하게 하여도 점오염원 이외의 오염원에서의 오염에 의

해 공공수역에서의 수질개선이 완전하게 해결되지 않는 것을 인식하면서부터 비점오염원에 대한 연구가 시작되었다[8,15].

일반적으로 비점오염원으로부터 발생하는 오염물질에 의한 수질에 미치는 영향을 정량화하여 평가할 수 있는 방법으로 비점오염원 원단위를 이용하고 있다. 원단위를

* 교신저자 : 황병기(bh4a@smu.ac.kr)



[그림 1] 대상유역 및 채수지점의 위치

이용하는 방법은 비점오염원에서 유출되는 부하량을 간편하게 산정할 수 있는 방법으로 국내외에서 보편적으로 이용하고 있다[5,8,167].

국내에서 대규모로 수행되어 진 비점오염원단위 조사 연구는 환경부[12]가 국내 4대강 유역을 대상으로 토지용도를 논, 밭, 목장, 산지, 도시로 5분류하고, 환경관리공단 [11]은 금강 수계에 대하여 논, 밭, 산지, 도시로 4분류하고, 한국건설기술연구원[6,10]은 팔당상수원 유역에 대하여 논/밭, 산림/리조트, 도시로 3분류하여 조사를 수행하여 원단위를 산정하였다. 그러나, 결과는 동일 토지이용도에 대하여도 조사마다 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 왜냐하면, 비점오염물질은 기후, 지형, 일시, 수문학적 인자에 따라 간헐적이고, 분산된 형태로 수체로 유입되며[3,13], 그 배출양상이 다양하기 때문이다. 원단위를 정확히 산정하기 위해서는 토지이용도에 따라 장기간에 걸친 연간 연속측정에 의한 실측자료를 바탕으로 하여야 신뢰성이 확보된다[1,5].

원단위 조사연구는 경제적 여건이나, 시간적 제약, 수문학적 조건 등에 따라 3분류에서 5분류로 하며, 가장 간단하게는 도시와 비도시로 분류하기도 한다. 최근에 수행한 원단위 연구는 김 등[3] 이 농촌유역을 대상으로, 노 등[4]은 산지와 논/밭이 혼재되어 있는 비도시 지역에 대하여, 도시지역에 대한 연구는 진 등[6], 최 등[9]에 의하여 수행한 바 있다.

본 연구에서는 평택호 수질에 영향을 미치는 안성천 상류 중에서 진위천 유역의 비점오염물질 발생량을 추정하기 위하여, 토지이용별로 농지, 산림, 도시 지역을 대표할 수 있는 하천을 선정하여 이들 하천 유역을 대상으로 원단위를 산정하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 대상유역 특성

경기도 평택시 및 충청남도 아산시에 걸쳐있는 평택호의 전체 유역은 황구지천, 오산천, 진위천, 안성천 및 평택호 주변 유역 등 5개의 유역으로 구분된다[14]. 비점오염원 조사지역 선정은 전체유역에 대한 대표적인 특성을 나타낼 수 있어야 하며, 이를 위해서는 현지조사와 인문사회, 수리-수문 등 충분한 관련 자료가 뒷받침 되어야 한다[12,16]. 특히, 세부적으로는 지역별 토지이용 현황, 기상 상황, 유출특성 등 많은 요소가 고려되어야 하므로 대상지역에 대한 세밀한 조사가 수행되어야 한다. 비점오염원 조사를 위한 대상지역의 선정은 토지이용에 따라 도시지역, 산림, 농경지 등 토지이용 특성을 대표할 수 있는 하천을 포함하는 유역을 표본지역으로 선정하였다. 표본지역의 산림, 농경지, 도시지역의 면적은 표 1과 같이 각각 16.22km², 17.08km², 15.32km² 이며 조사지역의 조사지점 및 현황을 그림 1에 나타내었다.

FR은 천천이 유하하고, 인근은 산지 또는 낮은 구릉지 형태로 되어 있으며, 전체 면적 중에서 산림이 54.5%를 차지하는 산지지역이다. AG는 장동천이 유하하는 전형적인 농촌지역이며, UR은 서정리천이 흐르고 송탄신도시가 인근에 있고 지하철 1호선이 통과하는 전형적인 도심지역이다.

[표 1] 토지이용도별 표본지역 현황

basin	area (ha)	area of landuse types (ha) & ratio(%)			
		agricultural	forest	urban	others
FR	1,602	579(35.7)	884(54.5)	-	159(9.8)
AG	1,708	1454(85.1)	125(7.3)	-	130(7.6)
UR	1,532	173(11.3)	461(30.1)	898(58.6)	-

2.2 시료채취 및 분석

유량 조사는 PCM3, SIGMA 950, 프로펠러 유속계, AEM 유속계를 이용하여 유속을 측정하였으며, 수질조사는 유량측정과 함께 건기시 3회, 강우시 2회, 합하여 총 5회 수행하였다.

비강우시는 2006년 9월 22일(1차), 10월 21일(2차), 2007년 1월 18일(3차) 조사를 수행하였으며, 강우시는 2006년 8월 26일 17시부터 27일 13시까지(1차), 10월 22일 10시부터 23일 6시까지(2차) 조사를 수행하였다.

비강우시에는 하천의 유량과 수질이 큰 차이가 없어 조사시기별 1회 채수하였고, 강우시에는 강우가 시작부터 강우강도에 따라 30 ~ 60분 간격으로 탄력적으로 채수하였다. 유속, 하상단면, 강우량, pH, DO 등은 현장에서 측정하였고, BOD, COD_{mn}, SS, T-N, T-P 등은 실험실에서 분석하였으며, 수질분석은 수질오염공정시험법에 준하여 실시하였다.

2.3 원단위 산정과 발생부하량 산정 방법

비점오염원단위 산정기준은 발생량기준, 유출량기준, 유달부하량기준의 세가지로 구분할 수 있으며[8], 본 연구에서는 강우시 비점오염원이 유출되는 양을 실측해서 산정하였기 때문에 비점오염원 유출부하원단위에 해당한다. 원단위는 단위시간당 단위토지면적에서 배출되는 오염물질량을 말하여, 단위는 (kg 또는 ton)/면적(ha 또는 km²)/시간(year 또는 day)으로 나타낸다.

일년 동안 계속해서 비점오염원을 실측조사하기 어렵기 때문에 시료 채취한 기간에 대해 계산한 값을 연간으로 환산하여 사용한다. 원단위를 연간으로 환산하는 방법은 강우횟수적용법, 유효강우량비법, 유출량비법, 유출량-가중농도법 등이 있으며[2,8,10], 본 연구에 사용한 유효강우량비법의 산정방식은 다음과 같다.

비도시지역의 원단위 산정은 식(1)과 같이, 유량가중평균농도와 유출량을 이용하였다.

$$U_{rural} = \sum C_i \times q_i \times f / A \quad (1)$$

여기서, C_i = i 번째 강우사상에 대한 유량가중평균 농도(mg/L)

q_i = i 번째 강우사상의 총유출량 (m^3/d)

f = 연간 원단위 환산인자 (년 총강우량/실측기간 강우량)

A = 유역면적(ha)

도시지역의 원단위 산정은 식(2)을 사용하였으며, 강우시 유역 내 하천의 상류 및 하류에서 측정된 유량과 수질 자료를 토대로 오염부하 차이를 이용하여 원단위를 산정하였다.

$$U_{urban} = [\sum (L_i^U - L_i^D) / A - L_o] \times f \quad (2)$$

여기서, L_i^U, L_i^D = 강우시 상류와 하류 조사지점의 오염물질부하량

L_o = 비강우시 상류와 하류 조사지점의 오염물질 부하량의 차

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우 분석

강우사상에 따른 유출부하특성을 파악하기 위해서 두 차례의 강우사상에 대하여 유량 및 수질조사를 실시하였으며, 강우사상별 수문학적 특성을 표 2에 정리하였다. 1차 강우는 2006년 8월 26일 17시부터 27일 13시까지 16시간 동안 50.9mm 내렸으며, 17시부터 20시까지 3시간 집중하여 내었고, 그 후 소강상태에 있다가 04시부터 06시까지 2시간 집중되는 경향을 보였다. 2차 강우는 10월 22일 10시부터 23일 6시까지 15시간 동안 20.1mm 내렸으며, 전 강우시간 동안 강우강도가 비교적 고르게 분포하였다.

선행 무강우일수 (antecedent dry days, ADD)가 1차, 2차 각각 27일, 46일로 오염물질 축적기간이 상당히 긴 것으로 조사되었다. ADD 산정시 1일 10mm이하의 강우량은 유출에 기여가 거의 없는 것으로 간주하고 산정시 제외하였다.

[표 2] 강우사상별 수문학적 조건

item	storm event	
	1st	2nd
Storm date (yy/mm/dd)	2006/8/26 ~ 8/27	2006/10/22 ~ 10/23
Dry period(day)	27	46
rainfall(mm)	50.9	20.1
intensity(mm/hr)	3.2	1.3
duration(hr)	16	15

단기간의 실측자료에서 얻어진 토지이용별 비점오염원 원단위를 진위천 수계의 토지이용별 연간 원단위로

환산하기 위하여 인접 기상관측소의 1995년부터 2005년까지 10년 강우량 자료를 토대로 강우량 분포 현황을 조사하여 강우범위별 평균강우량과 강우빈도를 분석하였다.

3.2. 유출계수 및 유량가중평균농도

강우 시 유출계수와 유출고를 산정하여 표 3에 나타내었다. 유출고는 유역 내 강우기간에 내린 강우에 의하여 발생한 총 유출량을 유역면적으로 나누어 구한다. 유출계수는 유역내 일정기간동안 내리는 강우량으로 인해 발생하여 그 유역의 출구를 통과하는 유출량을 총 강우량에 대한 비율로 나타내며, 유역에서의 강우-유출과의 관계를 보여주는 인자로서 해당지역의 토지용도와 식생계수, 그리고 강우강도와 강우량 등의 강우사상의 영향을 받는다.

[표 3] 강우시 유출고와 유출계수

Landuse	Area (km ²)	Storm event	1st	2nd
		rainfall(mm)	50.9	20.1
산림	16.22	유출고(mm)	11.8	1.3
		유출계수	0.23	0.06
농경지	17.08	유출고(mm)	13.1	2.0
		유출계수	0.26	0.10
도시	15.32	유출고(mm)	22.3	3.8
		유출계수	0.44	0.15

일반적으로 유출계수의 값이 클수록 비점오염원으로 부터 오염물질의 유출량도 증가한다. 높은 강우량과 강우강도를 보인 1차 강우시가 2차 강우시에 비해 상대적으로 각 지점 간 표본지역에서 강우에 따른 우수유출이 높아 유출계수도 2차에 비해 크게 나타났다.

강우량이 같을 경우 도시지역의 유출계수(0.15 ~ 0.44)가 농경지(0.1 ~ 0.26), 산지 (0.06 ~ 0.23)보다 상대적으로 높게 나타났으며, 이는 배수구역이 서정리역 인근으로 도심지가 형성되어 있어, 불투수층 면적 비율이 높아 강우의 상당부분이 표면으로 유출되고, 하천으로 유입되기 때문인 것으로 판단된다. 강우사상이나 수문학적 조건이 다르기 때문에 단순 비교는 무리가 있으나, 팔당상수원 비점오염원 조사사업[10]에서 산림/리조트, 논/밭 0.136과 0.128로 크게 차이가 없는 것으로 나타났으며, 도시지역의 경우 0.438로 나타나 산림/리조트 지역과 논/밭 지역보다 3.1 ~ 3.4배 더 높게 나타난 선행 연구결과[5]와 본 연구 결과가 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

평균농도를 산정하는 가장 간단한 방법인 산술평균 농도는 시간간격이 일정할 경우에는 타당한 평균 농도로서 제시될 수 있지만, 비점오염원 유출은 실시간으로 변화되는 유출량과 농도의 변화가 있을 뿐만 아니라 샘플채취가 일정간격으로 이루어지지 않아 산술평균에 의한 평균농도는 대표성을 갖지 못하는 단점이 있다[3,11].

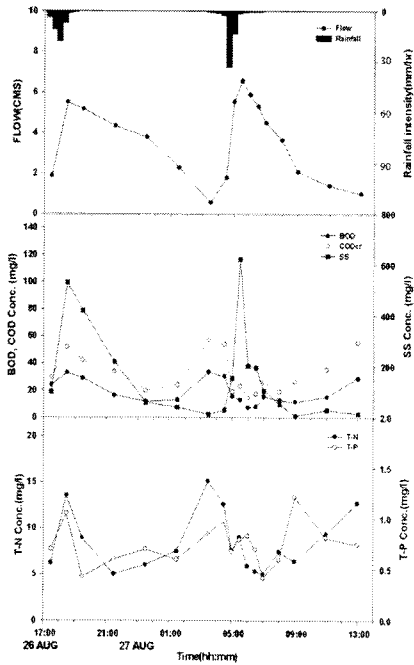
따라서, 강우시 발생하는 유출수의 오염농도는 유량에 따라 큰 차이를 보이고 있어 오염물질의 평균농도는 유량을 고려하여 비점오염원 유출수의 유출특성을 가장 잘 반영하는 것으로 알려진 유량가중평균농도(Flow-weighted mean concentration, FWMC)[3,18,19]를 이용하여 각 실측기간의 유출수 평균농도를 산정하였다. 유량가중평균농도는 총오염량을 총유출량으로 나눈 값이며, 토지이용별 유량가중평균농도를 산정하여 표 4에 나타내었다.

[표 4] 강우사상별 유량가중평균농도

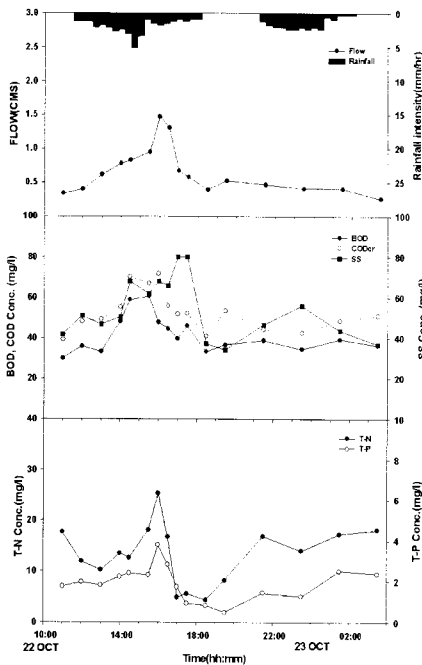
(단위 : mg/L)						
basin	storm event	BOD	COD	SS	T-N	T-P
FR	1st	15.8	25.7	45.6	8.9	0.83
	2nd	9.6	13.1	27.2	3.6	0.56
	Ave.	12.7	19.4	36.4	6.2	0.69
AG	1st	19.5	34.3	422.4	3.4	0.88
	2nd	12.8	16.8	29.5	2.1	0.59
	Ave.	16.1	25.5	226.0	2.8	0.73
UR	1st	44.5	56.6	58.6	14.6	2.19
	2nd	12.9	21.2	20.1	6.0	0.54
	Ave.	28.7	38.9	39.3	10.3	1.36

유량가중평균농도의 경우, 토지이용별로 유출계수가 높게 나타났던 1차 강우 (강우강도 3.2mm/hr)시가 2차 강우 (강우강도 1.3mm/hr)시 보다 높은 오염물질농도를 나타내는 경향을 보였다. 이는 강우시 유출량이 높을수록 유입되는 오염물질의 양도 상대적으로 높았기 때문으로 생각된다.

BOD의 경우 1차 강우에서 도시(44.5mg/L), 농경지 (16.1mg/L), 산지(15.8mg/L) 순으로 높게 나타나, 농경지와 산지 같은 비도시지역보다 도시 지역에서 강우 유출시 높은 농도의 오염물질이 발생하는 것으로 나타났다. COD, SS, TN, TP 등 도 BOD와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.



(a) 1차(2006년 8월 26일)



(b) 2차(2006년 10월 22일)

[그림 2] 강우시 유량 및 수질조사 결과(도시지역)

1차 강우시 도시지역의 유량 및 수질조사 결과를 그림 2(a)에 나타내었다. 총 강우량은 50.9mm 이며, 평균유량은 3.6m³/s, 최대유량은 6.6m³/s, 최소유량은 0.6m³/s로 조

사되었다. 강우지속시간은 16시간이나, 2006년 8월 26일 17시부터 20시까지 3시간 집중호우가 내렸다가 27일 04시부터 05시까지 1시간 동안 집중 호우가 내린 것을 반영하여 유량과 오염물질농도에서 2개의 피크를 보이고 있으며, 특히 부유사 농도(SS)는 이를 가장 뚜렷하게 반영하는 것으로 나타났다. BOD 농도는 9.3~ 33.4mg/L, COD는 14.4~57.3mg/L, SS는 8.0~622.0mg/L 농도로 분포하는 것으로 조사되었으며, T-N과 T-P는 각각 5.0~15.1mg/L, 0.42~1.22mg/L로 분포하는 것으로 분석되었다. 오염물질 농도는 강우 전 BOD 농도 13mg/L 이었으나, 강우 초기에 초기세척으로 표면에 축적되어 있던 오염물질이 일시에 유입되어 32mg/L로 높아 졌다가, 그 후 강우에 의한 희석효과로 9mg/L로 낮아졌으며, 27일 오전 4시경 집중호우가 내린 것을 반영하여 다시 38mg/L로 높아졌다가, 강우가 소강상태가 되면서 농도도 평형에 도달하는 모습을 보여주고 있다.

1차 강우와 달리 2차 강우는 전 강우 기간 내 집중호우 없이 비교적 균등한 강우강도로 분포하였다. 총 강우량은 20.1mm 이며, 유량은 0.27~3.99m³/s로 분포하며, 평균유량은 0.95m³/s로 1차 강우 시 3.6 m³/s 보다 상당히 적게 나타났다. 2차 강우보다 강우량이 약 3배 큰 1차 강우가 평균유량에서도 이를 반영하여 3배 이상 높은 것으로 조사되었다. BOD 농도는 30.0mg/L에서 60.8mg/L로, COD 농도는 39.2mg/L에서 71.9mg/L로, T-N은 4.4mg/L에서 25.4mg/L, T-P는 최저 0.49mg/L에서 3.79mg/L이며, SS는 34.3mg/L에서 80.0mg/L로 분포하였다.

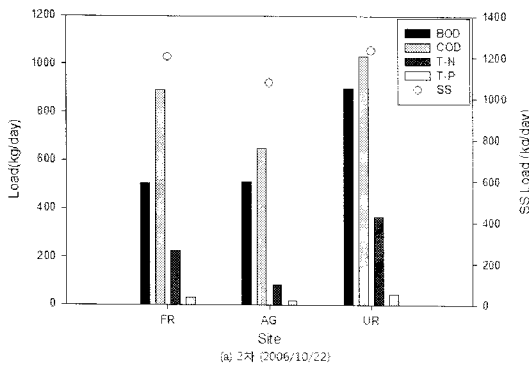
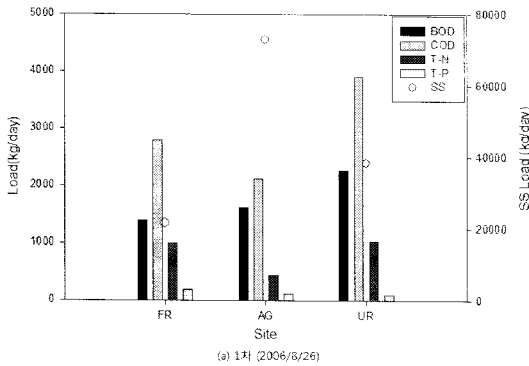
3.3. 비점오염 유출부하량

강우시 비점오염 유출부하량을 산정하기 위하여 실측한 유량과 오염물질농도를 곱하여 산정하였으며, 이는 기저부하량을 포함한다. 강우로 인한 순유출 부하량을 산정하기 위해 기저부하량을 제하여야 하는 데, 본 연구에서는 조사지점의 오염물질 부하는 강우 시작 전 12시간부터 채수를 시작하여 이를 평균하여 기저부하로 하였으며, 강우 후 본래의 부하로 되돌아가는 데 걸리는 시간을 고려하여 비강우시 부하량을 산정하였다. 강우 시 비점오염 원으로부터 유출된 순부하량은 총 유출부하량에서 기저부하량을 제한 부하량이 된다.

강우시 유출오염부하량을 산정하여 그림 4에 나타내었다. 강우사상별 오염유출특성을 보면,

BOD 부하량은 FR, AG, UR 지점에서 1차 강우시 각각 1,395kg/d, 1,623kg/d, 2,268kg/d로, 2차 강우시 각각 503kg/d, 512kg/d, 898kg/d로 산정되었다. 2차 강우보다 강우량이 많고, 강우강도가 높은 1차 강우에서 높은 부하

량을 보이는 것은 예상한 결과라 할 수 있다. 노 등(4)의 선행연구 결과에서 계천 (유역면적 38.84 km², 강우량 98.7mm, 선행무강우일수 29일)는 산지가 주이고 농경지가 혼재되어 있는 비도시 지역으로 유출부하량은 BOD 800kg/d, COD 3,200kg/d로 본 연구에서 1차 강우시 FR과 AG 지점을 합하면 면적(33.3 km²)이 선행연구에서 면적과 유사하나, 유출부하량은 BOD 3,018kg/d, COD 4,908 kg/d으로 본 연구결과가 2~3배 많은 유출부하를 보이는 것으로 나타났다.



[그림 4] 강우사상별 유출오염부하량 비교

수문학적 조건이 달라 단순 비교는 어렵지만, 선행 무강우일수는 본 연구와 선행 연구가 27일, 29일로 유사하다고 볼 수 있으나, 본 연구에서 강우강도가 선행연구보다 강하여 표면에 축적된 고농도의 오염물질을 일시에 씻어 내려 더 많은 유출부하량을 보이는 것으로 판단되며, 또한 본 연구 대상지는 산림이나 농경지라 하더라도 수도권 공장 및 산업단지 밀집지역에서 멀지 않은 거리에 위치하고 있어, 공장 등 오염원과 원거리에 있는 청정 지역의 산지, 농지의 유출부하보다 높게 나온 것으로 판단된다.

강우량 및 강우강도에 따라 유출부하가 크게 다르지만 1차, 2차 모두 다른 지역보다 도시지역(UR)에서 오염물질의 부하가 매우 큰 것으로 나타났으며, 농경지(AG), 산림(FR)은 비도시 지역으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.4. 비점오염 원단위 산정

비점오염원 원단위를 비도시지역과 도시지역으로 구분하여 산정하였다. 원단위 산정은 비도시지역에는 유량 가중평균농도와 유출계수를 이용하는 방법, 도시지역에는 조사지점에서의 오염부하량을 이용하는 방법 등을 이용하였다. 비강우시 및 강우시 실측조사가 일년동안 연속하여 실측하지 못하였으므로 단기간의 측정에서 나온 오염부하를 연간 원단위로 환산하기 위하여 유역 내 기상 관측소의 강우분석 결과를 토대로 연간 단위면적당 오염부하를 산정하였다.

표본지역 UR은 도시지역으로서 중하류는 서정리역을 중심으로 형성된 시가지이나, 상류는 산림/농지가 혼재되어 있어 강우시 이 지점(UR-3)에서 측정된 오염물질의 유량가중평균농도는 상류 비도시지역으로부터 유입되는 우수유출수의 영향을 받을 수 있으므로 도시지역의 유출부하를 정확히 산정하는 것이 어렵다고 판단되어 제외하고, 강우시 중하류에서 실측한 유량과 수질자료를 가지고 원단위를 산정하였다.

비점오염원 원단위를 산정하였으며, 이를 여러 선행연구 [10,11,12] 결과와 비교하여 표 5에 나타내었다. 환경부[12]는 4대강 유역의 부하량을 산술평균한 값으로 산지의 경우 BOD 부하량은 3.5kg/ha/yr로 표에 나타나 있으나, 범위는 1.4 ~ 5.0kg/ha/yr이며, 본 연구의 결과 (9.5 kg/ha/yr)와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 조사되었다.

농경지역의 경우, BOD 부하량은 6.5kg/ha/yr로 환경부[12] 결과(5.8~8.4kg/ha/yr)와 유사한 결과를 나타내었으며, 금강수계[11] 결과 (11.2~15.4kg/ha/yr), 팔당상수원[10]의 결과값(18.9 ~ 19.8kg/ha/yr) 보다 다소 낮은 값을 나타내는 경향을 보였다. 토지이용별 원단위는 BOD 기준으로 도시지역이 72.7kg/ha/yr로 농경지(6.5 kg/ha/yr)보다 12배이상, 산지(9.5kg/ha/yr)보다 8개 이상 높게 나타나 단위면적당 비점오염부하가 매우 높은 것으로 나타났다.

정확한 토지이용별 원단위를 산정하기 위해서는 해당 유역에서 동일한 토지이용 형태를 지닌 여러 지점에서 원단위조사가 이루어지고, 장기간에 걸친 자료의 축적을 통하여 산정하는 것이 필요하며, 단기간 실측자료를 이용하여 정확한 연간 원단위를 산정할 수 있는 방법에 관련된 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다[4,5,10].

[표 5] 비점오염원 원단위 산정 및 선행연구와 비교

Landuse	References	NPS unit load (kg/ha/yr)					
		BOD	COD	SS	T-N	T-P	
Forest	this study	9.5	14.3	27.1	4.7	0.52	
	금강수계(2004)	2.9	7.4	21.8	2.2	0.09	
	환경부(1995)	1.4-5.0	4.2-15.0	8.9-1,143.5	1.1-24.3	0.05-1.84	
	팔당상수원(2000)	3.2-3.7	6.7-7.6	325-342	1.1-1.4	0.10-0.11	
Paddy /Crops	this study	6.5	10.3	91.1	1.1	0.30	
	금강수계(2004)	11.2-15.4	22.1-31.8	231-412	3.8-8.0	0.71-0.72	
	환경부(1995)	논	2.6-17.7	7.2-45.5	17.9-167.9	12.6-40.6	1.50-2.99
		밭	2.9-9.8	7.4-27.6	23.0-722.6	19.4-58.6	0.31-1.49
	팔당상수원(2000)	18.9-19.8	33.7-35.4	18.9-19.8	6.6-7.0	0.52-0.54	
Urban	this study	72.7	104.5	1071.3	20.6	3.36	
	금강수계(2004)	69.7	77.9	343.5	15.7	2.48	
	환경부(1995)	313.6	388.7	929.0	49.9	7.66	
	팔당상수원(2000)	370.5	1,850.5	9,500.5	121.5	3.42	

기존의 조사 및 연구 결과도 연구자와 지역에 따라서 그 범위가 다양하며, 토지이용별로 원단위 값의 차이가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 강우사상의 차이, 산정방식 등 여러 복합적인 요소에 영향을 받기 때문으로 사료되며, 따라서 토지이용에 대한 정확한 원단위의 산정은 매우 어려운 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 평택호 유역의 수질보존을 위한 대책 수립을 위한 기초자료로 제공하기 위해 안성천 유역 내 토지이용별로 산지, 농경지, 도시지역 을 표본지역으로 선정하여 강우시 및 비강우시 비점오염원조사 및 연구를 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 유출계수 산정결과, 높은 강우강도를 보인 1차 강우시 가 2차 강우시에 비해 산지, 농지 및 도시지역 토지이용도에서 강우에 따른 우수유출이 높아 유출계수도 2 차에 비해 크게 나타났으며, 또한 도시지역의 유출계 수(0.15 ~ 0.44)가 농경지(0.1 ~ 0.26), 산지 (0.06 ~ 0.23)보다 상당히 높게 나타났으며, 이는 도시지역에서 불투수층 면적 비율이 높아 강우의 상당부분이 표 면으로 유출되어 하천으로 유입되기 때문인 것으로 판 단되었다.
- 2) 유량가중평균농도는 토지이용별로 유출계수가 높게 나타났던 1차 강우시 가 2차 강우시 보다 높게 나타 나는 경향을 보였으며, BOD의 경우 1차 강우에서 도 시(44.5mg/L), 농경지(16.1mg/L), 산지(15.8mg/L) 순 으로 높게 나타나, 농경지와 산지 같은 비도시지역보

다 도시 지역에서 강우 유출시 높은 농도의 오염물질 이 발생하는 것으로 나타났다.

- 3) BOD 유출부하량은 산지, 농지, 도시 지역에서 1차 강 우시 각각 1,395kg/d, 1,623kg/d, 2,268kg/d로, 2차 강 우시 각각 503kg/d, 512kg/d, 898kg/d로 산정되었다. 강우량 및 강우강도에 따라 유출부하가 크게 다르지 만 1차, 2차 모두 다른 지역보다 도시지역에서 오염물 질의 부하가 매우 큰 것으로 나타났으며, 농지와 산지 은 비도시 비역으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.
- 4) 토지이용별 원단위 산정결과, 농경은 BOD 기준으로 6.5 kg/ha/yr로 환경부(1995) 결과(5.8~8.4kg/ha/yr)와 유사한 결과를 나타내었으며, 토지이용별 원단위는 BOD 기준으로 도시지역이 72.7kg/ha/yr로 농경지(6.5 kg/ha/yr)보다 12배 이상, 산지(9.5kg/ha/yr)보다 8 배 이상 높게 나타나 단위면적당 비점오염부하가 매우 높은 것으로 나타났다.

정확한 토지이용별 원단위를 산정하기 위해서는 해당 유역에서 동일한 토지이용 형태를 지닌 여러 지점에서 원단위조사가 이루어지고, 장기간에 걸친 자료의 축적을 통하여 산정하는 것이 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- [1] 국립환경연구원, 비점오염원 유출부하량 조사방법, 1994.
- [2] 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진, “경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사”, 대한환경공학회지, 24(11), pp.2019-2027, 2002.
- [3] 김진호 외, “농촌유역의 강우사상별 농업 비점오염물질 유출특성”, 한국물환경학회지, 24(1), pp.69-77, 2008.
- [4] 노성덕 외, “횡성호 유역의 비강우시 및 강우시 오염물 질 유출특성”, 한국물환경학회지, 22(4), pp.695-705, 2006.
- [5] 이현동 외, “강우시 유출부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정”, 한국물환경학회지, 17(3), pp.313-326, 2001.
- [6] 이현동 외, “토지이용별 강우시 비점오염 물질의 유출특성”, 한국물환경학회지, 17(2), pp.147-156, 2006.
- [7] 진영훈, 박성천, “영산강 유역 도시지역의 비점오염물 질 배출추정에 관한 연구”, 한국물환경학회지, 22(4), pp.605-613, 2006.
- [8] 최지용, 신은성, “농업지역 비점오염원 관리방안 연구”, 한국환경정책평가연구원 연구보고서 KEI/1998/RE-09, 1998.
- [9] 최지용, 신은성, “도시지역 비점오염원 관리방안 dsurn”, 한국환경정책평가연구원 연구보고서 KEI/1998/RE-17, 1997.

- [10] 한국건설기술연구원, “팔당상수원 비점오염원 유출 특성과 최적관리방안”, 2000.
- [11] 환경관리공단, “금강수계 비점오염원관리방안 마련을 위한 조사사업 최종보고서”, 2004.
- [12] 환경부, 비점오염원 조사연구사업 보고서, 1995.
- [13] 황병기, 유세진, 차영기 “안양천 유역의 강우 시 비점오염원에 따른 유출부하 특성에 관한 연구”, 환경영향평가, 10(3), pp.223-234, 2001.
- [14] 한강수계관리위원회, “평택호 수질보존대책 수립을 위한 연구”, 2006.
- [15] CH2M HILL, Inc., "Nonpoint Source Impact Assessment", WPCF Research Foundation Report 90-5, 1990.
- [16] Novotny, Nonpoint Pollution and Urban Storm Water Management, Technomic Publishing Co. Inc., Vol. 9, 1995.

황 병 기(Byung-Gi Hwang)

[정회원]



- 1987년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (학사)
- 1990년 5월 : (미)Virginia Tech. (석사)
- 1995년 5월 : (미)U. of Virginia (박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 건설시스템공학과 (교수)

<관심분야>

수질관리모델링, 수질영향평가, 상수도(관부식모델링), 하수도(I/I 및 누수 분석)