

연구논문

강우시 도시지역 비점오염원 유출특성 분석

- 홍제천 상류 유역을 중심으로 -

황 병 기

상명대학교 토목환경공학부

(2005년 1월 7일 접수, 2005년 3월 11일 승인)

Analyzing Runoff Characteristics of Nonpoint Sources During Rainfall in Urban Area

-Focussing on upstream of Hongjechun watershed

Byung-Gi Hwang

Div. of Civil and Environmental Engineering, Sangmyung University

(Manuscript received 7 January 2005; accepted 11 March 2005)

Abstract

This study was performed to characterize stormwater runoff of pollution material from nonpoint sources during rainfall in drainage basins of Hongjechun watershed, and to suggest management methods to control the first flush of nonpoint sources. We conducted 4 times of field surveys including 3 times of wet period and 1 times of dry period for 5 stations, which consist of 3 stations in main stream of Hongjechun and 1 station in tributaries of Sinyoungchun and Gukichun, respectively. The variation of pollutant concentrations in terms of BOD, COD, SS and TP was large depending on the flow rate of stormwater, while a little change of TN concentration was investigated. Depending on the rainfall event, the difference of flowrates, and runoff loadings was large, while the difference of those for dry wether period was not noticeable for various sub-basins. In the results of unit load calculation, the range of 153-277 kg/ha/yr for BOD, 222-422 kg/ha/yr for COD, 264-432 kg/ha/yr for SS, 40-70kg/ha/yr for TN, and 13-25 kg/ha/yr for TP was obtained for Hongjechun, Sinyoungchun, and Gukichun sub-basins. Compared with the previous studies, the result of this study was founded to be acceptable.

Key words : urban runoff, nonpoint sources, unit load, first flush

I. 서론

비점오염원은 점오염원과 달리 정형성을 가지지 않으며, 집수구역 단위로 강우시 일시적으로 유출되어 하천 수질을 악화시키고 있으나 이를 제어하여 수질을 개선하는 것은 그리 간단한 일이 아니며, 유역 내 수 차례의 비강우시 및 강우시 조사를 통하여 하천에 대한 기여도나 영향을 정량적으로 파악할 수 있을 뿐이다.

비점오염원 중에서도 도시지역은 단위면적당 오염부하가 가장 크고, 일반오염물질 뿐만 아니라 각종 유독성 물질을 함유하고 있어 수질에 미치는 영향이 크다(최지용 등, 1999).

'95년에 환경부와 환경기술개발원에서 시행한 전국의 토지이용별 비점오염원부하조사에서 도시지역의 비점오염원이 수질오염에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 조사되었고, 효율적인 수질관리를 위해서는 도시지역 비점오염 부하량의 저감을 위한 합리적인 기술 및 정책개발이 필요하다고 보고하였다(최지용 등, 1999; 환경부, 1995).

비점오염원을 적절히 관리하기 위해서는 우선적으로 비점오염물질 유출특성을 파악하여야 하며, 유역별 또는 소수계별로 조사대상을 선정하여 장기간에 걸친 현장조사를 수행하여 자료를 확보하고 선행연구 자료와 병행하여 체계적으로 정리하는 것이 필요하다(이현동 등, 2001).

비점오염물질은 발생량 및 배출특성의 파악이 매우 어렵고, 발생량이 불규칙하여 많은 종류의 오염물질을 포함하고 있다. 또한, 시간에 따라 부하 변동 폭이 크며, 강우 초기에 오염물질의 농도가 매우 높다. 특히, 질소와 인 등의 영양물질이 많이 포함되어 있어 하천이나 호소의 부영양화를 일으키는 주범으로 알려져 있다(안재환, 2000; 김성수 등, 2002; Pergram et al., 1999).

본 연구에서는 홍제천 상류 종로구관내 생태하천정비 타당성 조사(종로구, 2004) 연구의 일환으로 홍제천 연구지역내 배수분구별 비점오염원 조

사를 통하여 도시지역의 비점오염물질 유출 특성을 파악하여 홍제천 유역 수질관리 방안에 도움이 되는 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 연구 내용 및 방법

1. 대상지역 현황

비점오염원 조사지역 선정은 전체유역에 대한 대표적인 특성을 나타낼 수 있어야 하며, 이를 위해서는 현지조사와 인문, 사회, 수리, 수문 등 충분한 관련 자료가 뒷받침 되어야 한다. 특히 세부적으로는 지역별 토지이용 현황, 기상현황, 유출 특성 등 많은 요소가 고려되어야 하므로 대상지역에 대한 세밀한 조사가 수행되어야 한다.

대상지역인 홍제천은 북한산의 문수봉·보현봉·형제봉에서 발원해 서울시 종로구, 서대문구, 마포구의 일부 또는 전지역을 포함해 3개 구 15개동에 걸쳐 흐르다가 한강의 하류로 흘러드는 지방 2급 하천이다. 홍제천 유로연장은 11.95km, 유역 면적은 20.05km²이며, 평균 너비는 50m이다. 1974년 지방 2급 하천으로 지정되었고, 1983년과 1988년에 각각 하천 정비 기본계획을 수립해 1999년까지 18.94km에 달하는 유역의 하천 개수가 완료되었다(서울시, 2002).

조사지역은 홍제천 상류 종로구관내 올림픽아 호텔에서 홍지문까지 이르는 구간으로 난지 처리구역 중 구기, 평창, 부암배수분구를 포함한다. 유역면적 11.14km², 유로연장 2.8km이며, 지류인 구기천과 신영천을 포함한다.

2. 현장 조사

비점오염 유출부하를 산정하기 위하여 표 1에 서와 같이 비강우시 1회, 강우시 3회 현장조사를 수행하였다. 조사 지점과 배수구역은 그림 1에 나타내었으며, 홍제천 본류에 4개, 지류인 구기천

<표 1> 지점별 강우사상 당 수문학적 조건

구 분	차 수	강우사상(년/월/일)	선행무강우일수(day)	강우량(mm)	평균강우강도(mm/hr)	강우지속시간(hr)
비강우시	-	2004/5/12	-	-	-	-
강우시	1차	2004/4/26	6	36.2	1.7	22
	2차	2004/5/2	4	10.1	1.0	9
	3차	2004/5/28	5	65.8	3.0	22

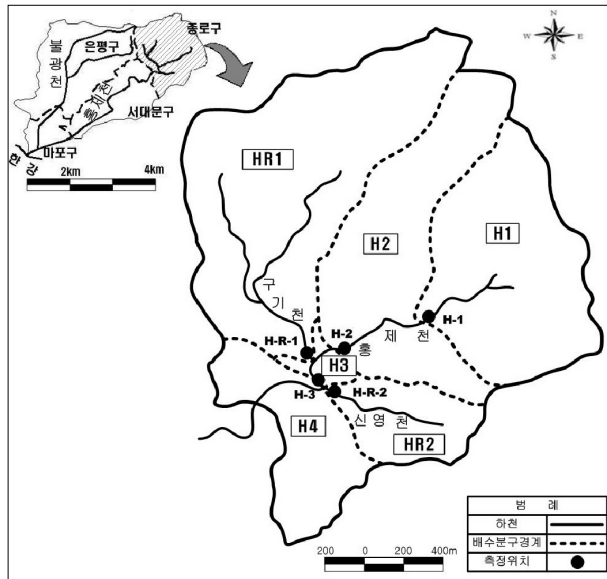


Fig. 1 홍제천 대상유역과 조사지점

및 신영천에 각각 1개하여 총 6개 배수구역으로 분할하여 각 배수구역 말단에서 채수하였다.

강우시 강우로 인한 비점오염 유출부하를 산정하기 위하여 비강우시 유출부하를 파악하여야 하기 때문에 강우시 현장조사는 기저 유출부하를 계산하기 위한 강우 시작 전 12시간이상의 비강우 조사 기간을 포함하여야 한다. 그러나, 본 연구에서는 강우시 강우 기록만 조사하였으므로 강우 시작 전 비강우 조사 기간이 없는 경우는 강우 종료 후 비강우시 조사를 별도로 수행하여 강우시 강우로 인한 비점오염 유출부하를 산정할 수 있도록 하였다.

비강우시는 2시간 간격으로 일정하게 채수하였으나, 강우시는 강우 시작부터 종료까지 10분~60

분 간격으로 강우 초기는 초기 유출부하를 파악할 수 있도록 짧은 시간간격으로 강우 증기 이후는 비교적 긴 시간간격으로 탄력적으로 채수를 하였다.

3. 유량가중평균농도

유량가중평균농도(FWMC)는 총오염량을 총유출량으로 나누어 산정하며(한국건설기술연구원, 2000; 환경부, 1995), 식(1)와 같다.

$$\text{유량가중평균농도} = L_k/Q_k = (\sum (C_i \cdot Q_i \cdot t_i)) / (\sum (Q_i \cdot t_i)) \quad (1)$$

여기서, LK = 총 오염량

QK = 총 유출량

Ci = i시간의 오염물질 농도

$Q_i = i$ 시간의 유출량

$t_i =$ 유출시간

평균농도를 산정하는 가장 간단한 방법인 산술 평균 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(김성수 등, 2002). 따라서, 본 연구에서는 강우시 비점오염원 유출수의 유출특성을 가장 잘 반영하는 것으로 알려진 유량가중평균농도를 이용하여 각 실측기간의 유출수 평균농도를 산정하였다.

4. 유출고 및 유출계수

유출계수는 유역에 일정기간동안 내리는 강우량으로 인해 발생하여 그 유역의 출구를 통과하는 유출량을 총강우량에 대한 비율로 나타낸 것으로 유출고를 총강우량으로 나누어 산정하며 식 (2)에 나타내었다. 유출고는 유역내 강우기간에 내린 강우에 의하여 발생한 총유출량을 유역면적으로 나누어 구한다. 유출계수는 유역에서의 강우-유출과의 관계를 보여주는 인자로서 해당지역의 토지이용도와 식생계수, 그리고 강우강도와 강우량 등의 강우사상의 영향을 받는다.

$$\text{유출계수} = C = V_d / \sum_{N=1}^M R_m \quad (2)$$

$V_d =$ 유출고(mm) = V_j / A_w

$$V_j = / \sum_{i=1}^M Q_{ji} \cdot \Delta t$$

$V_j = j$ 지점의 강우시 총수량(m^3)

$Q_{ji} = j$ 지점의 조사지점의 i 번째 유량(m^3/sec)

$\Delta t =$ 측정시간 간격(sec)

$A_w =$ 유역면적(ha)

$$\sum_{N=1}^M R_m = \text{총강우량(Total Rainfall, mm)}$$

5. 토지이용별(도시지역) 강우 - 하천수질과의 상관관계

강우시 하천에서의 부하량 유출특성은 유역의 강우조건에 따라 다르나 그 특성은 강우시의 부하량-유량곡선을 통해서 알 수 있다. 특히, 실측 유량과 이에 대응하는 부하량과의 관계식은 각각 다르지만 양자간에는 강한 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 누가유량과 누가부하량과의 관계 그래프를 작성하면 동일 하천에 대해서는 수질항목에 관계없이 거의 유사한 경향을 나타낸다. 누가부하량과 누가유량을 양대수지에 그리면 직선에 가까운 구간에 대하여 회귀식을 구할 수 있다.

$$\Sigma L = \alpha \cdot (\Sigma Q)^m \quad (3)$$

여기서, L : 누가 부하량(kg)

Q : 누가유량(m^3)

a, n : 정수

L과 Q를 유역면적으로 나눌 경우 하천의 유역면적규모 차를 배제한 관계식이 되어 하천간의 비교가 가능해진다(이현동 등, 2002; 안재환, 2000).

$$\Sigma L/A = b \cdot (\Sigma Q/A)^m \quad (4)$$

여기서, A : 하천의 유역면적(ha)

b, m : 정수

III. 결과 및 고찰

1. 강우사상별 유출계수

각 지점별 유출고와 유출계수를 표 2에 나타내었으며, 가장 많은 강우량(65.8mm)과 높은 강우강도를 보인 3차 강우시가 1차(36.2mm)와 2차(10.1mm) 강우시에 비해 상대적으로 각 지점간의 배수구역에서 강우에 따른 우수유출이 높아

<표 2> 강우시 홍제천 유역의 유출고와 유출계수

구 분		강우사상			
		1차	2차	3차	
총강우량(mm)		36.2	10.0	65.8	
H-3	유역면적(km ²)	유출고	7.5	1.1	16.3
	8.42	유출계수	0.21	0.11	0.25
H-2	유역면적(km ²)	유출고	8.5	1.5	25.7
	3.62	유출계수	0.23	0.15	0.39
H-R-1	유역면적(km ²)	유출고	6.9	1.0	13.8
	3.41	유출계수	0.19	0.1	0.21
H-R-2	유역면적(km ²)	유출고	6.7	1.0	14.9
	0.86	유출계수	0.18	0.1	0.23

유출계수도 1차와 2차에 비해 각각 약 1.2배와 2.3 배 이상 크게 나타났다.

지점별 유출계수는 H-R-1(구기천) 및 H-R-2(신영천) 지점에서 유출계수가 홍제천 본류 H-2 지점에서 보다 상대적으로 낮게 산정되었으며, 이는 구기천 및 신영천 유역에 투수층인 산지 지형이 넓게 분포되어 있어 주거지역이 상대적으로 많이 분포되어 불투수층의 면적이 넓고 투수층 면적이 좁아 유출계수가 낮게 나타난 것으로 추정된다. 홍제천 본류 H-3 지점은 상류가 상당 부분 임야로 되어 있어 투수층 면적이 넓은 H-R-1(구기천)지점과 비교적 주거지역이 많이 분포되어 투수층 면적이 좁은 H-2 지점의 영향을 모두 반영하여 H-2 지점보다는 낮고, H-R-1 지점 보다는 높은 값을 나타내는 것으로 조사되었다.

팔당 상수원을 대상으로 강우시 비점오염원 유출특성 (건기원, 2000) 연구 결과에 의하면, 산림/리조트, 논/밭 및 도시 지역의 유출계수가 각각 0.14, 0.12 및 0.44로 나타났으며, 경안천 유역을 대상으로 비점오염원 유출특성 연구 (김 등, 2002)에 의하면, 농촌, 산지 및 도시 지역의 유출계수가 각각 0.03~0.49, 0.01~0.88 및 0.05~0.90의 범위로 넓게 분포하였다. 강우사상별로 큰 차이가 나는 것으로 조사되었으며, 토지이용별로는 도시 지역에서 타 지역보다 유출계수가 높은 것으로 나타났다. 강우사상별, 토지이용별 편차가 크기 때문에

본 연구 결과를 타 연구와 단순 비교하는 것은 큰 의미가 없다. 본 연구 대상지는 도시지역이기는 하나, 유역 내 산지가 차지하는 면적이 반을 넘어 유출계수도 이를 반영하여 산지와 도시 지역의 중간적인 특성을 나타내는 것으로 조사되었다.

2. 유량가중평균농도 및 오염물질 유출 특성

1차~3차 강우시 조사지점별 유량, 유기물질 및 영양물질의 농도를 표 3에 나타내었으며, 항목별 평균과 최저 및 최고 범위를 괄호 안에 넣어 표시하였다. 유량은 산술평균한 값이며, 오염물질 수질농도는 유량의 변화를 고려한 유량가중평균 농도 값을 나타낸다.

유량은 각 조사 시기별 강우사상에 많은 영향을 받아 강우초기에 일시적으로 증가하였다가 강우가 종료되면서 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 3차 강우시 강우량이 가장 많았으며 유량변동폭은 H-1지점에서 610~6,000 m³/d, H-2 지점에서 720~6,750m³/d, H-3 지점에서 890~11,060m³/d로 1차 및 2차 강우시 보다 크게 나타났다. 따라서 3차 강우시 조사지점별 배수구역의 유출에 의한 유량 증가율은 H-1 지점 9.8배, H-2 지점 9.4배, H-3 지점 12.4배로 대부분의 지점에서 최저유량에 대한 최고유량의 비가 10배 안팎으로 조사되었다. 또한 1차 강우시 22시간동안 강우가 지속된 것에 비해 2차 강우시 강우지속시간이 9시간으로 단기간에 강우가 발생되어 1차 강우시 강우량이 2차 강우시에 비해 강우량이 많음에도 불구하고 최고 유량은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 조사되었다.

그림 2는 H-1 지점과 H-2지점의 유량, 강우량, 누적강우량 및 강우강도를 나타낸 것이다. 1차 강우시 비록 강우량은 높았으나, 강우강도가 낮아 유량변동폭이 크게 나타나지 않았으며, 2차 강우시 초기 강우량이 매우 적고 강우종료시점에서 높은 강우를 보이고 있어, 강우 종료시점에서 유

〈표 3〉 강우시 홍제천 유역의 유량 및 오염물질 농도

조사지점	시 기	유 량(CMD)	수질농도 (mg/L)				
			BOD	COD	SS	TN	TP
H-R-2 (신영천)	1차	213(124~362)	18.4(6.5~44.2)	29.1(14.9~58.4)	27.0(11.4~48.0)	6.2(3.77~12.1)	1.2(0.3~2.85)
	2차	330(123~483)	19.4(3.7~36.6)	27.2(8.2~45.3)	14.6(2.6~32.9)	5.6(2.2~9.5)	1.1(0.29~2.0)
	3차	1581(218~5,240)	28(5~70)	40(15~90)	58(15~122)	6(3~13)	3(1~5)
	평 균	625	19.9	29.6	30.3	5.9	1.8
H-R-1 (구기천)	1차	444(261~776)	17.3(5.1~46)	30.3(12.8~64.4)	28.5(14~55.8)	5.9(3.14~11.2)	1.1(0.35~2.6)
	2차	553(468~737)	22.9(4.7~43)	30.8(9.2~52)	21.4(4.2~39.5)	6.6(2.9~10.3)	5.5(4.6~7.3)
	3차	2,071(470~6,180)	28.1(8.2~76.4)	39.5(14.5~93.1)	49.2(18.2~84.6)	5.1(2.2~10.7)	2.6(0.4~6.7)
	평 균	879	19.7	30.1	32.6	5.7	2.7
H-1	1차	587(517~720)	14.8(8.44~30.7)	28.2(18.7~48)	13.8(4.7~25.8)	7.8(5.2~13.5)	0.5(0.4~1.1)
	2차	596(450~737)	27.9(2.6~79.4)	58.7(14~146.5)	42.6(4.7~102)	6.7(2.3~11.9)	0.8(0.29~1.6)
	3차	2,295(610~6,000)	24.9(7.8~58.4)	36.6(12.0~76.8)	32.5(8.4~84.3)	4.3(1.38~9.24)	2.2(0.58~6.25)
	평 균	1027	20.9	38.3	30.0	6.7	1.4
H-2	1차	612(544~753)	22.1(13.7~41.7)	40.2(26.3~64.9)	29.6(14.8~49.2)	10.4(3.9~18.7)	1.3(0.47~3.0)
	2차	613(500~740)	19.1(3.3~46)	32.2(8.8~68.4)	18.7(1.7~40.8)	5.8(2.5~9.0)	1.2(0.3~2.5)
	3차	2,606(720~6,750)	29.4(9.6~69)	41.2(15~83.4)	41.5(11.5~103.1)	5.0(1.7~10.8)	2.6(0.79~6.89)
	평 균	1,151	22.3	38.2	33.6	7	1.7
H-3	1차	1,257(871~2,092)	27.7(12.6~49.3)	39.9(25.6~68)	39.6(4.19~18.9)	9.3(4.19~18.9)	1.5(0.52~4.1)
	2차	1,119(816~1,396)	28.1(9.5~49.3)	39.2(16.3~63)	28.0(10.8~43.8)	7.8(4.1~10.8)	11.8(0.3~3.4)
	3차	4,036(890~11,060)	31.7(4.5~81)	44.4(18~94.3)	49.8(16.7~109.1)	5.3(1.7~11.5)	2.8(1.0~6.4)
	평 균	1938	25.8	36.7	34.5	7.4	4.6

량이 급격히 증가하였다가 감소하는 경향을 보이고 있다. 3차 강우시 9.4mm/hr의 높은 강우강도에 의해 유량이 매우 급속하게 증가하여 감소하는 것으로 나타났으며, 이것은 홍제천 유역의 H-1~H-2지점이 도시지역으로 대부분의 지표면이 포장되어 있어 불투수층의 비율이 다른 유역보다 높고, 강우강도가 높아 강우 초기 우수유출이 급격하게 일어나기 때문으로 사료된다.

그림 3은 H-R-1(구기천)지점의 3차 강우시 강우강도에 따른 유량 및 수질농도 변화를 나타내었다. H-R-1(구기천) 지점과 H-R-2(신영천) 지점에서 1차와 2차 강우시보다 3차 강우시의 BOD, COD 등의 유량가중평균농도가 대체로 높게 나타나 홍제천 본류로 유기물질 유입이 컸던 것으로 보여 진다. 또한, 강우 1차~3차 조사시기 동안 각 조사지점별 유량가중평균농도가 상류에서 하류로 유하할수록 농도의 변화가 일정하지

않은 것으로 나타났다. 이는 상가지역 또는 밀집 주거지역이기는 하나 각 배수구역별 경사 및 토지이용특성의 차이에 따라 우수유출수에 포함된 유기물질 유입에 영향을 주었을 것으로 사료된다. 하천 유량과 오염지표별 유출특성을 보면 유기물질의 실측 농도가 유량의 첨두 피크가 나타나기 전에 피크가 나타나거나(H-2), 첨두 피크가 최고를 보인 시기에 유기물질과 부유물질이 피크 농도를 보이는 경향을 나타냈다(H-3). 특히, 유기물질과 부유물질은 3차 강우시 초기 강우강도(2.4mm/hr)이었던 시기가 후기의 강우강도(18.6mm/hr)가 있었던 시기보다 H-R-1, H-R-2 및 H-1 지점보다 높게 나타났다. 이는 후기의 강우강도가 초기 강우강도보다 크에도 불구하고 초기강우 발생시 이미 상당량의 유기물질과 부유물질이 유입이 되었기 때문에 후기에 비록 강우강도가 높더라도 비점오염원의 유출이 감소하였던

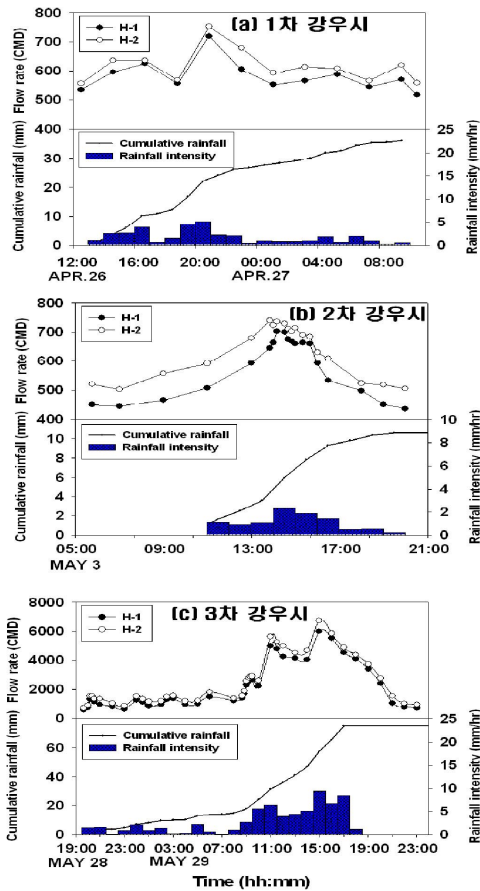


Fig. 2 강우시 유량변화와 누적 강수량

것으로 사료된다.

3. 강우시 비점오염원 유출특성 고찰

각 강우사상별 단위면적당 비점오염원 유출부하를 산정하여 표 4에 나타내었다. 강우량이 많고 강우강도가 높았던 3차 강우의 경우 1차와 2차 강우시 보다 비점오염원 부하가 높게 나타났으나, 강우량이 가장 적은 2차 강우시가 1차 강우시보다 단위면적당 비점오염원 유출부하가 더 높게 나타났다. 이는 1차 강우시의 강우지속시간이 22시간인 반면, 2차 강우시 9시간으로 2차 강우시보다 강우량은 적었으나, 단위시간당 강우량 즉, 강

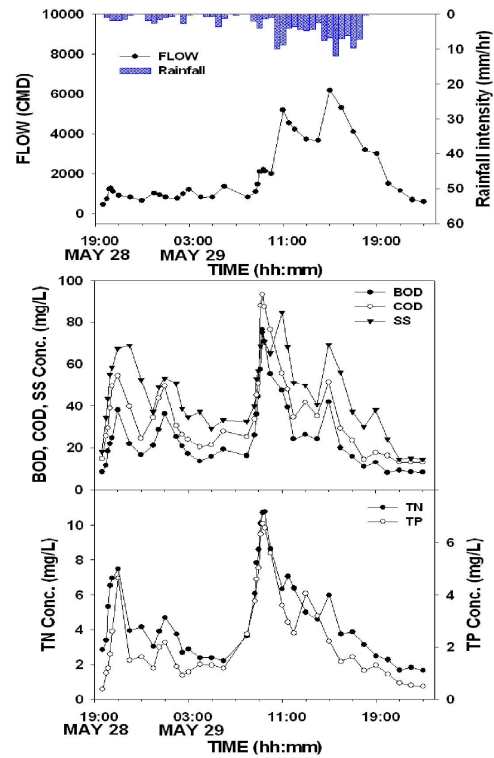


Fig. 3 강우시 H-R-1(구기천지점)의 유출 특성

우강도가 높아 단기간의 강우사상으로 인해 유출부하가 높게 나타난 것으로 생각된다. 따라서 비점오염원 유출부하는 강우량과 강우강도 이외에 강우지속시간에도 영향을 받는 것으로 사료된다.

이 등(2001)은 경안천 유역을 대상으로 도시지역에 대한 강우시 단위면적당 비점오염원 유출부하 연구에서 2.16 BOD kg/ha, 2.80 COD kg/ha, 8.67 SS kg/ha, 0.77 TN kg/ha, 0.005 TP kg/ha로 유출되는 것으로 보고하였으며, 최 등(1999)은 한강 유역을 대상으로 구의 배수구역에서 2.34~5.95 COD kg/ha, 1.68~14.6 SS kg/ha로 보고하였다. 선행연구 결과는 본 연구의 결과와 강우량, 강우강도가 차이가 있으므로 단순 비교가 어렵지만, 본 연구 결과는 선행연구 결과와 큰 차이가 없는 것으로 조사되었다.

2004년 5월 28일 강우사상에 대한 각 지점별

〈표 4〉 강우사상별 비점오염원 유출부하량 산정

조사지점 (면적)	구분 (mm)	총강우량	비점오염원 유출부하 (kg/ha)				
			BOD	COD	SS	TN	TP
H-2(397ha)	1차	36.2	0.34	0.63	0.50	0.17	0.02
	2차	10.0	0.15	0.26	0.16	0.05	0.01
	3차	65.8	8.09	11.34	11.52	1.40	0.73
H-R-1(341ha)	1차	36.2	0.23	0.40	0.40	0.08	0.02
	2차	10.0	0.17	0.22	0.16	0.05	0.01
	3차	65.8	7.32	10.27	12.83	1.34	0.68
H-R-2(89ha)	1차	36.2	0.66	1.03	1.05	0.23	0.05
	2차	10.0	0.30	0.42	0.23	0.09	0.02
	3차	65.8	22.85	32.92	47.93	5.35	2.34

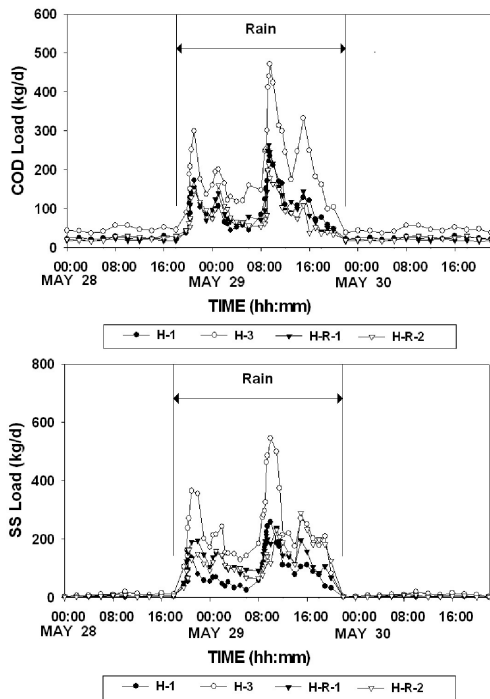


Fig. 4 비점오염 유입부하량 비교(2004년 5월 28일)

오염부하량을 비교하여 그림 4에 나타내었다. 강우시 COD 오염부하량의 경우 침투부하량이 비강우시의 부하량에 비해 H-1 지점 10배, H-3지점 7배, H-R-1 지점 7배, H-R-2 지점 9배가 증가하는 것으로 조사되었으며, 강우시 SS 오염부하량의 경우 H-1 지점 55배, H-3 지점 60배, H-R-1 지점

25배, H-R-2 지점 55배로 강우시 COD 오염부하량보다 크게 증가한 것으로 나타났다. 이는 비강우시 느린 유속으로 인해 침전되었던 부유물질이 강우시 빠른 유속으로 인해 재부유 되어 유출되기 때문인 것으로 판단된다.

4. 도시지역의 강우 - 하천수질과의 상관관계 분석

도시지역 하천의 강우시 유량에 따른 오염물질의 부하량과의 관계를 식(3)과 식(4)를 이용하여 구하였다. 표 5은 누가유량과 누적부하량과의 관계를 통해서 얻어진 회귀식을 강우사상별로 표시한 것이다.

도시지역인 H2 배수구역에서 SS 지수값이 대체적으로 다른 오염물질보다 상대적으로 높게 나타나 강우시 유량에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 평상시 점오염원으로부터 다른 지역에 비하여 고농도의 오염물질이 배출되고 일부가 하상에 침전되어 있다가 강우시 급격한 유량의 증가로 인해 부유되어 이동하기 때문으로 사료된다.

5. 비점오염원 원단위 산정

홍제천 유역의 비점오염원 원단위를 대안별로

<표 5> 홍제천 유량과 유출부하량과의 관계식

구 분	강우사상		
	1차	2차	3차
BOD	$y = 0.0196x^{1.1004}$	$y = 0.0182x^{1.2767}$	$y = 0.0837x^{0.9277}$
	$R^2 = 0.9384$	$R^2 = 0.9275$	$R^2 = 0.9503$
COD	$y = 0.0403x^{1.0065}$	$y = 0.0361x^{1.192}$	$y = 0.164x^{0.8632}$
	$R^2 = 0.9653$	$R^2 = 0.9599$	$R^2 = 0.9551$
SS	$y = 0.0289x^{1.0854}$	$y = 0.0036x^{1.785}$	$y = 0.1798x^{0.8736}$
	$R^2 = 0.9614$	$R^2 = 0.5689$	$R^2 = 0.9332$
T-N	$y = 0.0059x^{1.1526}$	$y = 0.0095x^{1.1192}$	$y = 0.0263x^{0.8236}$
	$R^2 = 0.9477$	$R^2 = 0.97$	$R^2 = 0.9427$
T-P	$y = 0.0015x^{1.0108}$	$y = 0.0018x^{1.1868}$	$y = 0.007x^{0.9496}$
	$R^2 = 0.9664$	$R^2 = 0.9543$	$R^2 = 0.9429$

<표 6> 도시지역의 대안별 원단위 산정 방법

구 분	원단위 산정방법	산정공식
대안 1	<ul style="list-style-type: none"> 비점오염부하산정 : 하천 상·하류의 유량과 수질자료를 이용한 유출 부하 차 적용 연간환산 : 실측기간 총강우량에 대한 연간 총강우량비 적용 	① 원단위(kg/ha/year) = $L_i \times f$
대안 2	<ul style="list-style-type: none"> 비점오염부하산정 : 하천 상·하류의 유량과 수질자료를 이용한 유출 부하 차를 이용하여 산출한 평균 값 적용 연간환산 : 실측기간 평균강우량에 대한 연간 강우사상별 평균강우량 비와 강우빈도 적용 	② 원단위(kg/ha/year) = $\sum L_i$ $L_i = L_{Avg} \cdot (R_i/R) \cdot n$

산정 공식 ① $L_i = \sum L_i, L_i = (L_{SIi} - L_{S2i})/A - L_{O0}$
 L_i = i 번째 강우시 유출부하량
 L_{SIi}, L_{S2i} = 강우시 상류와 하류의 조사지점에서의 오염물질 부하량
 L_{O0} = 비강우시 두 지점간 부하량의 차
 f = 년 총강우량/실측기간 강우량 (10mm 이상, 연간 원단위 환산인자)
 산정 공식 ② L_i = i 번째 강우사상에 대한 비점오염부하
 R_i = 연간 강우량에서 강우사상 i 의 평균강우량
 R = 실측기간의 평균강우량
 n = 강우사상별 평균 강우량에 대한 강우빈도

산정방법 및 결과를 표 6 및 표 7에 나타내었다. 대안 1은 하천의 최종유출지점에서 산정된 유량 가중평균농도와 유출계수를 적용하여 산정하였으며, 대안 2는 유출부하 평균 값에 실측기간 평균 강우량에 대한 연간 강우사상별 평균강우량 비와 강우빈도를 적용하여 산정하였다.

원단위는 연구자와 대상지역에 따라서 그 범위가 다양하며, 토지이용별로 원단위 값에 차이가 나는 것으로 조사되었다. 홍제천 유역의 원단위

<표 7> 비점오염원 원단위 산정 결과

조사지점	구 분	원단위 (kg/ha/year)				
		BOD	COD	SS	TN	TP
H-2	대안 1	277	395	393	52	25
	대안 2	274	422	352	70	22
H-R-1	대안 1	249	351	432	47	23
	대안 2	215	305	320	50	17
H-R-2	대안 1	171	246	353	41	17
	대안 2	153	222	264	40	13

산정결과를 선행연구 자료와 비교하기 위하여 도

시지역의 원단위 산정 연구자의 원단위 범위를 살펴보았다. BOD의 경우, Whipple et al.(1976), Wanielista et al.(1981), 임봉수(1984), 환경부(1995) 및 한국건설기술연구원(2000) 연구에서 원단위가 각각 40.2, 50.0, 319.7, 313.7 및 371.2kg/ha/yr로 조사되었다. 국외 자료는 원단위가 100kg/ha/yr로 국내 자료의 평균값인 330.0kg/ha/yr보다 상당히 낮은 것으로 나타났으며, 본 연구의 결과는 153~277kg/ha/yr로 국내 선행연구 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다. SS의 경우, Cemola et al.(1979), Sonzoni et al.(1980), Wanielista et al.(1981), 임봉수(1984), 환경부(1995) 및 한국건설기술연구원(2000) 연구에서 원단위가 각각 1,701, 1,460, 460, 831, 929 및 9450kg/ha/yr로 조사되어 대상지역 또는 연구 결과에 따라 10배이상 차이가 나는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 264~432kg/ha/yr로 국내 선행연구 결과와 유사한 값을 나타내고 있다. TN은 40~70kg/ha/yr로, TP는 13~25kg/ha/yr로 국내 선행연구 결과와 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.

동일한 토지이용현황을 갖는 유역이더라도 조사지점별로 우수유출량과 오염부하가 크게 차이가 나는 것으로 나타났다. 이는 조사유역에서의 유역환경인자인 경사도, 식생, 토양 등의 차이에 의한 것일 수도 있고, 소배수구역간 강우사상의 차이, 산정방식 등 여러 복합적인 요소에 영향을 받기 때문으로 사료된다. 본 연구에서 산정된 2개 대안은 모두 토지이용에 따른 소배수구역에 대한 원단위가 아니라 토지이용 특성(도시지역)을 대표할 수 있는 하천유역의 배수구역 전체를 하나의 대표 토지이용 현황으로 간주하여 산정한 것으로 이들 값들을 기존의 원단위와 상대적 비교를 하기는 어려우나 모든 항목에서 기존 원단위와 비교하여 대체로 범위 내에 포함되는 것으로 산정되었다.

IV. 결 론

1. 유출계수 분석 결과, 가장 많은 강우량과 높은 강우강도를 보인 3차 강우시가 1차와 2차 강우시에 비해 각각 약 1.2배와 2.3배 이상 크게 나타났으며, 동일 강우사상에 대하여 HR1(구기천) 및 HR2(신영천) 배수구역에서의 유출계수가 홍제천 본류 H2 배수구역보다 낮게 나타났으며 이는 신영천, 구기천의 상류가 임야로 되어 있어 토양의 투수성이 증가하여 유출계수가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

2. 강우시 유량은 강우사상에 많은 영향을 받아 크게 증가하였다가 감소하는 경향을 나타내며 최저유량에 대한 최고유량의 비가 10배 안팎으로 조사되었다. 강우 1차~3차 조사시기 동안 각 조사지점별 유량가중평균농도가 상류에서 하류로 유하할수록 농도의 변화가 일정하지 않은 것으로 나타났으며, 이는 각 배수구역별 경사 및 토지이용특성의 차이에 따라 우수유출수에 포함된 유기물질이 유입되어 영향을 주었을 것으로 판단된다.

3. 비점오염원의 유출 특성은 강우량과 강우강도에 지대한 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한 각 강우사상별 단위면적당 비점오염원 유출부하 산정결과 1차 강우시의 강우지속시간이 22시간인 반면, 2차 강우시 9시간으로 2차 강우시 강우량이 적은 반면, 단기간의 강우사상으로 인해 유출부하가 높게 나타나 비점오염원 유출부하는 강우량과 강우강도이외에 강우지속시간에도 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

4. 도시지역인 H2 배수구역에서 SS 지수 값이 대체적으로 다른 오염물질보다 상대적으로 높게 나타나 강우시 유량에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이는 평상시 다른 지역에 비하여 고농도의 오염물질이 배출되고 일부가 하상에 침전되어 있다가 강우시 급격한 유량의 증가로 인해 재부유 되어 수중으로 올라와 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

5. 배수구역별 원단위 산정결과, BOD의 경우 153~277kg/ha/yr, COD는 222~422kg/ha/yr, SS는 264~432kg/ha/yr, TN은 40~70kg/ha/yr, TP는 13~25kg/ha/yr로 산정되었다. 동일한 토지이용현황을 갖는 유역이더라도 조사지점별로 우수유출량과 오염부하가 크게 차이가 나는 것으로 나타났다. 이는 조사유역에서의 유역환경인자인 경사도, 식생, 토양 등의 차이에 의한 것일 수도 있고, 소매수구역간 강우사상의 차이, 산정방식 등 여러 복합적인 요소에 영향을 받기 때문인 것으로 조사되었다.

따라서 비점오염원 관리시 초기 유출수의 관리가 매우 중요한 것으로 판단되며, 유역의 토지이용 특성 및 강우사상에 따라 비점오염원의 유출특성이 달라지므로 체계적이고 지속적인 연구를 통해 효율적인 관리방안을 마련해야 할 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 상명대학교 2004년도 교내연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진, 2002, 경안천 유역의 강우사상별 비점 오염원 유출특성 및 원단위 조사, 대한환경공학회, 24(11), pp.2019-2027.

박연희, 박석순, 2004, 강우강도에 따른 토지이용별 비점오염원 부하량 산정함수 연구, 대한환경공학회지, 26(10), pp.1070-1078.

종로구, 2004, 홍제천 생태하천정비 타당성 조사 및 기본계획수립.

신은성, 최지용, 이동훈, 2001, 토지용도와 유역특성을 고려한 비점오염물질 원 단위 산정

에 관한 연구, 한국물환경학회지, 17(2), pp.137-146.

안재환, 2000, 비도시지역에서 강우사상에 따른 비점오염원 유출특성 연구, 건설 기술정보, 제12호.

오영택, 박제철, 김동섭, 류재근, 2004, 강우시 소옥천에서의 비점오염원 유출특성, 한국물환경학회지, 20(6), pp.657-663.

이현동, 안재환, 김운지, 배철호, 2001a, 토지이용별 강우시 비점오염 물질의 유출특성, 17(2), pp.147-156.

이현동, 안재환, 배철호, 김운지, 2001b, 강우시 유출부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정, 17(3), pp.313-326.

서울시 (2002), 하수도정비 기본계획(변경) 보고서.

최지용, 신은성, 1997, 도시지역 비점오염원관리방안 연구, 한국환경정책평가연구원, KEI/1997/RE-17 연구보고서.

최지용, 신은성, 이동훈, 1999, 서울 도시지역의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, 한국물환경학회지, 15(3), pp.315-323.

한국건설기술연구원, 2000, 팔당상수원 비점오염원 유출특성과 최적관리 방안.

환경부, 1995, 비점오염원 조사연구사업 보고서.

Pergram, G.C., G. Quibell, and M. Hirsch, 1999, The nonpoint source impacts of peri-urban settlements in South Africa: Implications for their management, Water Sci. Technol., 39(12), pp.283-290.

Wanielista, M. P. et al., 1981, Nonpoint source effects, Florida Technological University, Orlando, Florida.