

강우시 도시지역 강우 유출수 오염부하 기원평가

황병기^{1*}

Evaluating pollution origins of runoff in urban area by stormwater

Byung-Gi Hwang^{1*}

요약 홍제천 유역의 평창 배수분구를 대상으로 강우시 발생하수의 특성을 파악하기 위해 유량 및 수질 조사를 수행하였고, 강우유출수를 기저하수, 강우, 지붕유출수, 도로유출수, 관내 퇴적물 등 오염원별로 분석하여 기원별 오염기여도를 파악하였다. 강우시 발생초기의 오염물질의 농도는 초기세척현상에 의해 비강우시 농도의 3-10배 이상 높게 나타났으나, 강우 후반기에는 희석에 의해 비강우시 평균 농도 보다 오히려 낮은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 오염부하의 오염원별 기여도 분석에서 관거 퇴적물에 의한 오염도가 전체 오염도에서 COD의 경우 54.6%를, SS은 73.3%를 차지하여, 가장 높은 기여도를 보여 관거 내 퇴적물의 준설과 세정을 통하여 상당량의 오염부하를 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract In this study, we conducted water-quality analysis of wastewater and in-situ flow measurement using automatic flow rate measuring instrument to identify characteristics of wastewater in urban areas, and collected samples in gutter for storm water drain, rainfall bucket, and aqueduct of pipe from roof, and outfalls of basins to examine the contribution by pollution origins such as base wastewater, atmospheric washing, runoff by roof surface, runoff by road surface, erosion of sewer sediment. In the result, the concentration of pollutants reached peak in the beginning of rainfall due to first flush, was 3 to 10 times higher than average concentration of dry period, and was lower than that of dry period due to dilution of storm water. In the analysis of the contribution by pollution origins, the ratio of load by sewer sediment resuspension to the total pollution load was 54.6% for COD, and 73.3% for SS. Accordingly, we can reduce the total pollutant load by periodical dredging and washing of sewer sediment, and control the loadings by overflow of combined sewer overflows.

Key Words : pollution origins, storm water, sewer sediment, wastewater characteristics

1. 서론

초기 강우시 발생하는 지표유출수는 일정기간 지표면에 축적되었던 배수구역내 오염물질들을 관거로 이동시키게 되며, 다양한 오염물질이 포함되게 된다[1,4]. 특히, 합류식 하수관거에서 관거로 유입된 유량은 지표오염물질과 함께 관거내 유량 증가를 통해 관거내 퇴적물의 재부유를 유발하게 됨으로서 하수내 오염물질의 농도를 증가시키며, 증가된 유량은 차집관거 용량을 초과하게 되고, 우수토실을 통해 월류하여 방류유역으로 유출되게 된다. 이러한 월류하는 유량을 합류식 하수관거 월류수

(CSOs)라하며, 다량의 오염물질을 포함하게 되며[5,6], 하수관거 바닥의 퇴적물이 CSOs의 오염도에 큰 영향을 미친다는 다양한 연구가 발표된 바 있다[2,3,8].

강우시 발생하수에 의한 총 유출부하는 기저하수, 강우, 지붕유출수, 도로유출수, 관내 퇴적물 등 5가지 요소에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 이 등[2]은 서울시 성동구 모 배수구역을 대상으로 오염기원별 조사를 수행하고, 각 기원별 오염부하를 산정하고 기원별 기여도 평가를 수행한 바 있으며, 이[9]은 수원시 장안구 J 배수분구, 권선구 S 배수분구를 대상으로 도시지역의 하수발생 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 강우, 지붕, 도로유출수, 기저하수, 관내 퇴적물 등의 발생원별 강우 유출에 따른 오염기여도를 평가하여, 관내 퇴적물에 의한 영향이 가장 큰 것으로 보고하였다.

¹상명대학교 토목환경공학부

*교신저자: 황병기(bh4a@smu.ac.kr)

본 연구에서는 도시지역인 홍제천 유역의 합류식 하수 관거에서 강우시 발생하는 유량, 수질 및 오염부하 발생 특성 등을 조사하여 강우유출 오염부하의 기원(source)별 유출특성과 기여율을 분석하였다. 이러한 연구 결과는 도시지역에서 강우 시 유출 오염부하를 저감시키기 위한 관리 대안을 수립하고자 할 때 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

II. 연구내용 및 방법

2.1 대상지역 일반현황

홍제천 상류 종로구 관내 하수처리지역은 구기, 평창 및 부암 배수분구로 구분되어 있다. 강우시 지표 유출 유량 및 수질을 조사하기 위하여 서울시 종로구 홍제천 유역의 평창 배수분구를 선정하였으며 그림 1에 나타내었다.



그림 1. 대상유역 지도

대상지역은 난지 처리구역중 홍제 배수구역 내 평창 배수분구로서 기초 현황을 표 1에 나타내었으며, 면적이 506ha이며, 단독주택, 빌라 등이 밀집해 있는 전형적인 주거 지역 형태를 나타내고 있는 지역이다.

표 1. 평창 배수분구 기초 현황 자료

유역면적 (ha)	평균관경 (mm)	관거 연장 (km)	인구 (인)	상수도사용량 (m ³ /d)
506	403	7.24	17,555	7,794

2.2 조사 방법

배수유역의 특성이 도시지역이므로 유역의 말단 우수 토실에서 발생하는 오염부하에 영향을 미칠 수 있는 주요 오염기원으로서 다음과 같은 요소를 들 수 있으며, 강우시 관거 말단에서 발생하는 총 유출 오염부하 L_T 는 물질수지 식에 의하여 표현될 수 있다.

$$L_T = L_{bw} + L_{rn} + L_{rf} + L_{rd} + L_{sd}$$

여기서,

L_{bw} = 기저하수 (base wastewater)

L_{rn} = 강우 (rainfall, atmosphere washing)

L_{rf} = 지붕유출수 (roof surface-runoff)

L_{rd} = 도로유출수 (road surface-runoff)

L_{sd} = 관내퇴적물 (sewer sediment)

위 식에서 배수구역내에 투수지역이나 기타 다른 용도 지역에서 발생하는 오염부하는 배제하였고, 지붕유출수나 도로유출수의 경우 강우시 지표면 유하시간을 평균 30분으로 가정하였다[9]. 이 중 관내 퇴적물의 침식과 재부유에 의해 유발되는 관내 퇴적물은 직접 측정할 수 없어 유역말단에서 발생하는 총 유출 오염부하에서 측정가능한 각 오염기원별 부하를 제하는 방법으로 간접적으로 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 오염기원별 오염도분석

2004년 9월 11일부터 9월 12일까지 강우사상에 대한 실측조사를 토대로 위의 5가지 오염기원별 부하를 측정하였으며, 대상 강우의 특성을 표 2에 나타내었다.

표 2. 대상 강우 특성

측정일	총강우량 (mm)	강우 지속 시간 (hr)	선행무강우 일수 (day)	최대강우 강도 (mm/hr)
Sep. 11 ~ 12, 2004	57.5	18	3	15.0

강우는 유역 내에서 강우계를 설치하여 30분 간격으로 측정하였으며, 지붕 유출수는 배수구역내 건물의 우수 홈통에서 채취하였고, 도로 유출수는 도로 가장자리의 경계석에 설치된 우수받이에서 채취하였다.

각 오염기원별 수질분석 결과를 그림 2에 나타내었다. 유기물은 도로의 우수받이로 유입되는 지표유출수가 강우 초기에 급격하게 증가하는 것이 관찰되었으며, 강우시작 후 2시간이 지나면서 강우강도가 감소함에 따라 농도도 급격히 감소하는 것으로 나타났다. COD의 경우, 초기 농도는 도로 유출수가 135mg/L로 가장 높았으며, 지붕 유출수 62mg/L, 강우 35mg/L 순으로 초기 오염 농도가 낮은 것으로 조사되었다.

SS의 경우 COD와 발생경향이 유사하게 나타나고 있으며, 도로 유출수 82mg/L, 지붕유출수 31mg/L, 강우 21mg/L 순으로 낮은 것으로 관찰되었다.

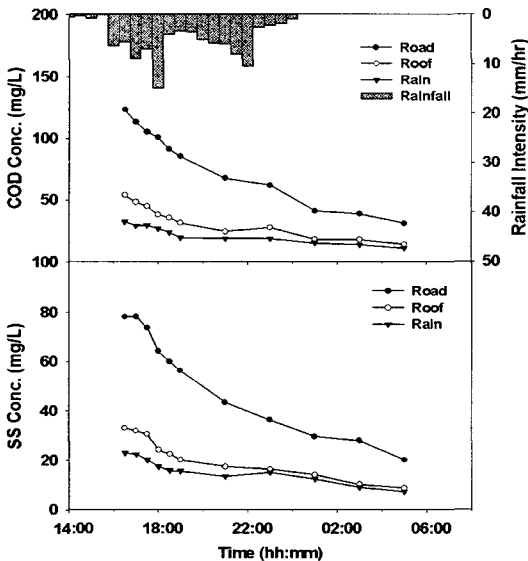


그림 2. 오염부하 기원별 농도 변화

각 오염원별로 발생가능한 유출오염부하를 산정하기 위하여 각 배수구역내 유출조건을 분석하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 대상지역의 토지이용도

구분	불투수 지역(ha)			투수 지역 (ha)
	주거	도로	계	
유역면적 ¹⁾	60.6	19.2	79.8	123.9
유출면적	48.5 ²⁾	31.3 ³⁾	79.8	123.9
유출계수	0.75	0.7~0.8 ⁴⁾	-	0.25

- ¹⁾ : 통계연보, 종로구 (2003)
- ²⁾ : 주거면적의 80%를 지붕유출수로 가정
- ³⁾ : 주거면적의 20%를 이면도로로 가정
- ⁴⁾ : 콘크리트 0.7, 아스팔트 0.8 적용

이[9] 연구를 근거로, 불투수지역 중에서 지붕유출이 발생하는 면적은 고밀도 주거지역 가운데 80%를 지붕면적으로 가정하였고, 20%는 주거지역 내 이면도로로 전환하여 도로면적에 포함시켰다. 유출계수의 경우, 지붕은 콘크리트 재료의 유출계수를 적용하였고, 도로는 콘크리트와 아스팔트로 구분하여 각각 0.7과 0.8를 적용하였다. 투수지역의 경우, 임야나 녹지로 되어 있어 유출계수를 0.25로 가정하였다.

3.2 오염기원별 기여도 평가

평창배수분구에서 건기 평균 오염부하와 대상강우에 의해 발생한 총 유출 오염부하를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 Dry weather load는 건기시 오염부하량을, Wet weather load는 강우시 유출 오염부하량을 나타낸다. 강우시 오후 8시경 발생한 침투 오염부하는 COD의 경우 건기 평균 오염부하 450kg/d의 30배가 넘는 것으로 조사되었다. SS의 경우 강우시 침투 오염부하가 건기에 비하여 40배 이상으로 나타났으며, 이는 강우시 지표면 세척 및 관거 내 퇴적물의 재부유에 의해 입자성 고형물의 유출이 크게 발생된 것으로 판단된다.

평창 배수분구에서의 오염기원별 오염도 분석 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 DRF(Dry Weather Flow)는 건기시 하수량을, Road는 도로 유출수, Roof는 지붕 유출수, Rain은 강우에 의한 세척을 의미한다. 관내 퇴적물에 의한 오염부하는 강우시 총 유출 부하량에서 각 오염기원별 부하를 제하여 간접적으로 산정 하였다. COD의 경우 강우가 발생하는 동일한 시간에 건기 평균 발생 하수에 의한 오염부하를 고려하는 경우에는 하수오염부하의 기여율이 47.8%로 나타났으며, 강우유출에 의한 오염부하는 52.2%로 분석되었다. 강우유출 오염부하 중 관거내 퇴적물에 의한 오염부하가 전체 유출부하의 35.8%로 가장 높게 나타나 건기시 느린 유속과 적은 유량으로 인해 관거내 침전되었던 유기물질이 강우시 빠른 유속과 많은 유량으로 재부유되어 나타나고 있음을 알 수 있으

며, 도로유출수, 지붕유출수, 강우의 순으로 오염부하가 높게 나타났다.

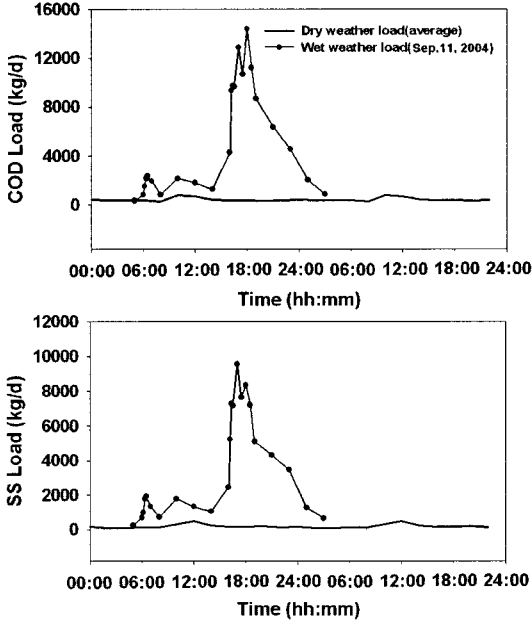


그림 3. 강우시와 비강우시 오염부하 비교 (평창배수분구)

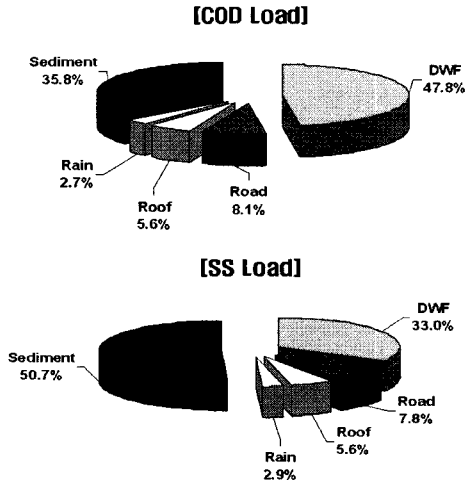


그림 4. 오염부하 기원별 공헌도

강우의 경우 대기 중에 함유된 미세 먼지에 의해 오염 부하가 유발되므로 발생농도는 낮았으나, 유역 전체에 걸쳐 나타나기 때문에 누적된 총량으로는 오염부하에 끼치는 영향이 무시할 수 없다고 판단된다[10].

SS의 경우 강우유출수에 포함된 오염부하가 건기하수에 비해 3배정도 높았으며, 관저 퇴적물이 50.7%로 오염

기여도가 가장 높게 나타났다. 건기시 퇴적되어 있는 고형물이 재부유하면서 유출부하에 크게 기여한 것으로 판단된다.

3.3 강우유출 오염부하량

강우유출에 의한 연간 강우유출 오염부하량은 유효강우일 및 강우량을 기초로 실측조사에서 도출한 강우량과 유출 오염부하의 상관관계식을 이용하여 산정하였다. 오염부하평가를 위해서 선행무강우 3일 이상의 강우를 유효강우로, 일누적 강우량 1인치(2.54mm), 평균 강우강도 0.254mm/day이상을 유출강우로 정의하였다. 평창 배수 분구에 대하여 산정한 강우량과 유출부하 관계곡선 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{COD Load} &: y = 0.0027x^2 + 1.9529x \quad (R^2 = 0.9958) \\ \text{SS Load} &: y = 0.0028x^2 + 0.7516x \quad (R^2 = 0.9964) \\ y &: \text{단위면적당 발생 오염부하 (kg/yr/ha)} \\ x &: \text{단일 강우사상의 총 강우량 (mm)} \end{aligned}$$

강우량과 유출 오염부하의 상관관계식을 이용하여 연간 유출 오염부하 및 단위면적당 연간 유출 오염부하를 산정하였다. 연간 유출 오염부하량은 평창배수분구(유역 면적 506ha) 경우, COD 60,822kg/yr, SS 25,013kg/yr로 산정되었다. 단위면적당 연간 유출 오염부하는 평창 배수 분구의 경우 COD 1,202kg/yr/ha, SS 494kg/yr/ha로 산정되어, 종로구 관내 구기 배수분구의 COD 245kg/yr/ha, SS 132kg/yr/ha보다[10] COD는 약 5배, SS는 약 4배 높은 것으로 나타났다. 이는 불투수 지역이 평창 배수분구가 구기배수분구 보다 2~3배정도 넓게 분포되어 있어 강우시 지하로 투수되는 양이 적게 되고 지표로 유출되는 유량이 많아져 단위면적당 유출 오염부하가 크게 나타난 것으로 사료된다.

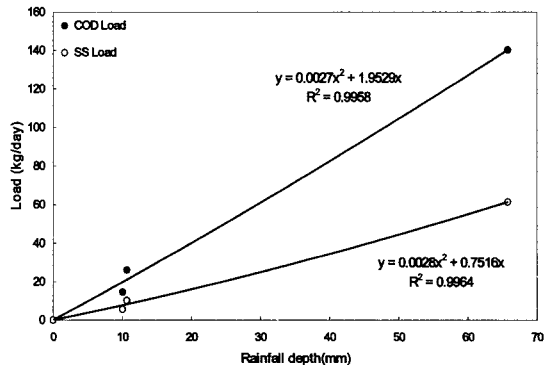


그림 5. 강우량과 유출부하 관계 곡선 (평창배수분구)

4. 결론

본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 강우 유출수의 오염기원 조사 결과, COD의 경우, 관내 퇴적물(35.8%), 기저하수(47.8%), 도로유출수(8.1%), 지붕유출수(5.6%), 강우(2.7%)로 나타났으며, 강우의 경우 농도는 낮았으나, 배수구역 전체의 영향을 미치므로 발생부하는 지붕유출수 보다 크게 나타났다. SS도 유사한 경향을 나타내는 것으로 조사되었다.
- 2) 강우시 발생오염원 중에서 관내 퇴적물에 의한 영향이 가장 크게 나타났으며, 이는 관내 퇴적물을 준설, 세정 등을 통하여 적절하게 제거함으로써 합류식 하수관거 월류수에서 상당한 오염부하를 저감시킬 수 있는 것으로 판단되었다.
- 3) 단위 면적당 연간 유출 오염부하를 산정하였으며, COD 1,202kg/yr/ha, SS 494kg/yr/ha로 산정되어, 인근 배수분구 보다 높게 나타났는데 이는 연구대상지인 평창 배수분구가 유역면적에서 불투수 지역이 차지하는 비중이 높았기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 박노연, 조창현, 최찬식, "합류식 하수관거 월류수(CSO) 처리시설의 현황", 상하수도학회지, 17(2), pp.204-210, 2003.
- [2] 이두진, 신응배, 윤현식, 선상운, 광수동, 분류식 우수 유출 오염부하 비교를 통한 CSOs 저감목표 설정 기초연구, 대한환경공학회, 25(11), pp.1420-1428, 2003.
- [3] 이현동, "침투-침입수(I/I)와 월류수(CSOs) 제어를 위한 하수관거내의 모니터링 시스템 개발", 학술기사, 49(8), pp.10-19, 2001

- [4] 이두진, 윤현식, 신응배, "도시지역 합류식 하수관거 월류수의 발생특성 및 오염기원 평가", 대한토목학회지, 23(6B), pp.597-606, 2003.
- [5] 신응배, 윤현식, "도심지 하수관거 월류수 오염물질 침강특성", 한국물환경학회지, 14(4), pp.425-432, 1998.
- [6] 조만재, 신응배, 김연권, 배우근, "합류식 하수관거내 퇴적물에 의한 오염물질 발생특성", 한국물환경학회지, 17(3), pp.407-415, 2001.
- [7] 김연권, 신응배, 이두진, 배요섭, 윤현식, "산업공단에서의 지표유출수 오염물질 특성", 대한환경공학회지, 22(4) pp.689-698, 2000.
- [8] 윤현식, "합류식 하수관거 월류수의 오염물질 특성과 처리", 한양대학교 박사학위 논문, 1998.
- [9] 이두진, "강우시 도시지역 하수도시스템의 통합운영 관리", 한양대학교 박사학위 논문, 2003.
- [10] 오경석, 호종광, 황병기, "홍제천 유역의 강우유출수 오염부하 기원평가", 한국산학기술학회, 2005년도 춘계학술발표대회, pp.288-291, 2004.

황 병 기(Byung-Gi Hwang)

[정회원]



- 1987년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (공학사)
- 1990년 5월 : (미) 버지니아 공과대학교 (공학석사)
- 1995년 5월 : (미) 버지니아 주립대학교 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 토목환경공학부 (부교수)

<관심분야>

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