

설마천과 안양천에서의 강우사상에 따른 오염물질 유출특성

○정규연¹⁾, 이동률²⁾, 정성원³⁾

1. 서론

지금까지 수계의 수질향상을 위하여 많은 노력을 해왔지만 만족할 만한 성과를 얻은 곳도 있지만, 수질향상의 결과를 가져오지 못한 수계도 있다. 이러한 결과는 수계를 오염시키는 오염원에 따라 다르다. 대부분의 오염원이 발생부하의 정량화가 가능한 점오염원일 경우에는 목표수질에 도달하기 쉽지만 정확한 유출경로를 확인하기 어렵고 오염물질의 유입이 비지속적이며, 주로 토지이용과 관련되어 발생하는 비점오염원인 경우에는 정량화와 저감에 많은 어려움이 있다.

비점오염이란 토지이용이나 오염된 대기 때문에 발생하는 지표수 및 지하수가 오염되는 것으로 어느 한 지점이 오염원을 배출하는 지점이라고 단정할 수 없는 넓은 지역에서 동시다발적으로 발생하는 오염을 말한다. 대표적인 비점원오염물질은 부유물질, 총질소, 총인과 COD, BOD와 같은 유기물질로 농업지역에서 주로 발생된다. 이러한 비점오염원은 강우시에 우수를 매개로 노면이나 토양 등에 축적되어 있던 오염물질이 일시에 배출되기 때문에 유입부하에 상당한 영향을 미치는 것으로 지적되고 있다. 따라서 비점오염원에 대한 중요성을 인식하여 정부에서도 1997년부터는 물관리종합대책에서 비점오염원 관리부분을 처음으로 채택하여 각종 수질개선 종합대책을 수립시 적용하고 있다.

이와 같은 이유로 비점오염원의 유출특성에 관한 연구는 많이 진행되고 있으나 비점오염원은 토지이용특성, 강우사상 등에 따라 다르므로 대상하천의 유역 특성을 고려한 연구가 이뤄져야 한다. 따라서 본 연구에서는 토지이용 특성에 따라 산지소하천인 설마천과 전형적인 도시하천인 안양천을 대상으로 하여 강우사상에 따른 수문곡선의 변화와 COD, DOC, TN, TP, Total Coliform, Eshcherchia Coli. 등 오염물질의 농도변화를 조사하여 유출특성을 분석하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 토지이용 특성에 따라 산지소하천인 설마천의 전적비교지점과 전형적인 도시하천인 안양천의 신정지점을 대상으로 하였다. 설마천은 경기도 파주시 적성면 설마천 중류부에 위치한 영국군 전적비교를 출구로 하는 유역면적 8.5km², 유로연장, 5.8km, 유로경사 2.3%인 전형적인 급경사 산지 사행하천이다. 하천 형태는 수지상에 직각상이 결합된 형태이며, 주 하천은 전형적인 곡류하천 형태이다. 설마천의 지질학적 형상은 작은 절리가 많이 발달되어 있고, 옆리의 절리로 작용하는 지질구조상 초기 강우시에는 하천의 수위에 큰 변화를 보이지 않다가 파쇄대를 채우고 난 이후에 하천의 수위가 급격히 증가하는 양상을 나타낸다. 안양천은 한강의 제1지류로서 유역면적 286.5km², 유로연장 34.7km에 달하며, 유역의 형상은 대체적으로 수지상의 형태를 이루고 있다. 안양천 본류의 상류역은 대부분 공업단지가 조성되어 있으며, 중류는 주거단지가 형성되어 있다. 신정지점은 저수로 부분과 양안 고수부지의 형태로 이루어져 있으며, 거의 직선하도의 형태를 나타내고 있다. 저수로와 고수부지 경계면 및 양안 제방은 콘크리트 블록으로 이루어져 있으며, 저수로 부분을 제외한 나머지 지역에는 많은 수의 초본류가 자생하고 있다. 저수로 부분은 주로 굵은 모래와 자갈로 하상이 이루어져 있으며, 주변 지역에서의 생활하수 유입으로 하천수의 오염도가 높은 편이다. 또한 한강 합류부에서 얼마 떨어지지 않은 곳에 위치한 관계로 고수위시 한강본류의 수위가 상승할 경우 배수효과가 발생하여 이로 인한 영향을 직접적으로 받는 지점이며, 하상이 주로 모래질로 구성되어 홍수전후의 하상변화가 다소

1) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원
2) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원
3) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

심하게 나타나는 지점이다.

그림 1에 나타낸 것과 같이 2002년 5월~10월까지 비강우기와 함께 4개의 강우사상에 대해 지점당 총 50 회 이상 시료를 채취하였으며, 유량은 비강우시에는 주1회, 강우시는 수위변화에 따라 적정횟수를 측정하였다. 수질은 강우시 유출수의 시료채취는 강우 개시전 유속측정과 함께 시료를 채취하였으며, 동시간 간격의 시료채취가 어려워 수위변화를 살피면서 수위가 증가하는 구간에서는 10~30분간격으로 시료를 채취하였으며, 반면 감소하는 구간에서는 시간간격을 충분히 두고 채취하였다. 분석항목은 pH, SS, T-COD, S-COD, DOC, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, Total Coliform, Esherchia Coli이며, Standard Methods, 수질오염공정시험법, KS M 0100에 따라 분석하였다. 강우자료는 설마천의 경우, 전적비교, 비룡포대, 설마리, 범룡사, 감악산 5개 우량관측소의 자료를 확보하여 시간축의 일치 여부, 계기 기상에 의한 무강우시 기록되는 이상치의 확인, 두 우량계 자료의 상호비교 등의 검토과정을 거쳐 최종 확정하였으며, 안양천은 선정지점과 가장 가까운 곳에 위치한 안양관측소의 우량자료를 받아 활용하였다.

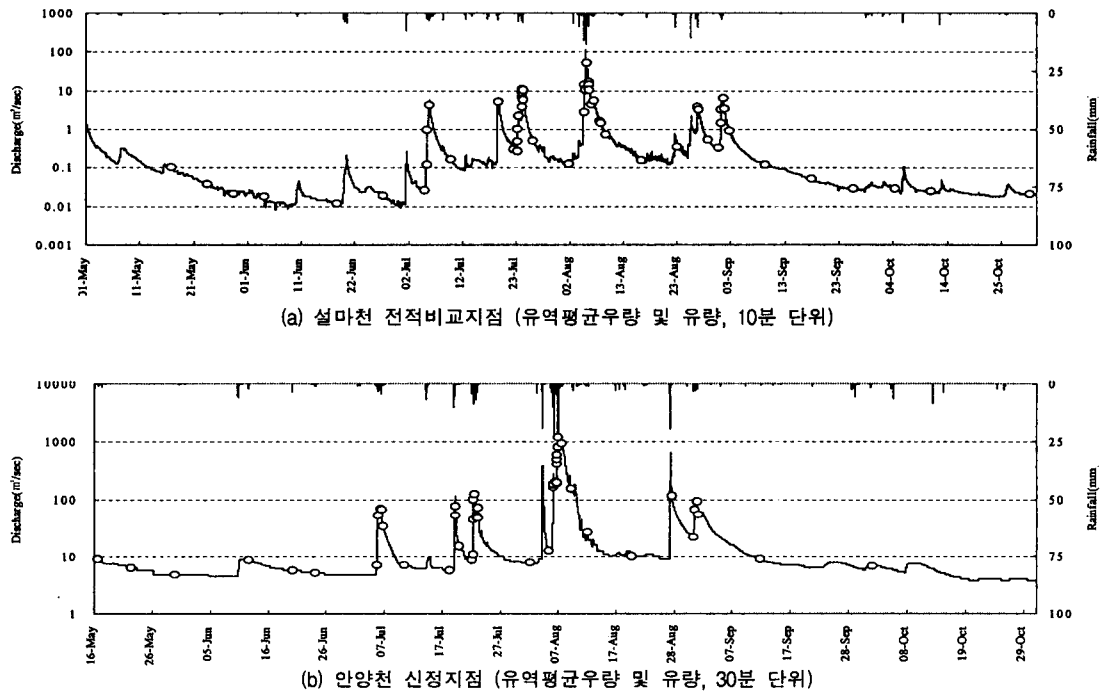


그림 1. 강우-유출현황 및 수질측정시기

댐이나 저수지에서 질소와 인과 같은 영양염류에 대해서 총부하량은 가장 중요한 수질영향 및 결정변수일 수밖에 없다. 이와 같은 이유로 강우사상에 대한 평균농도 또는 유량가중평균농도(EMC: Event Mean Concentration)는 강우 유출수와 함께 유출되는 오염물질을 평가하는데 가장 많이 이용되는 개념으로, 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$EMC = \frac{\text{총유출량중총오염물질중량}}{\text{총유출량}} = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i}$$

여기서, Q_i 관측시간 t 에서의 유출량(m^3/hr), C_i 는오염물질농도(mg/L), EMC는 강우사상에 대한 평균농도(mg/L)이다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 수위-유량 관계곡선

표 1은 대상유역의 수위-유량관계곡선식을 나타낸 것이다. 전적비교지점은 설마천 시험유역의 출구부에

해당되는 수위관측지점으로 단단면의 하천단면형태를 나타내고 있으며, 수위-유량관계는 저수위, 고수위로 나누어 작성되었다. 이 때 각 구간은 하천단면형태와 유량측정성과의 변동양상을 고려하여 결정하였으며, 이러한 기준에 의해 목자판 기준으로 0.654m에서 저수위와 고수위를 분리하였다. 하지만 2002년 8월 5일부터 7일까지 발생한 홍수로 인해 전적비교 지점의 하천단면이 크게 변화하여 저수위 및 고수위에서의 수위-유량 관계가 크게 변화하였다. 따라서 수위-유량관계는 이 때를 기준으로 홍수전후로 분리하여 작성하였으며, 홍수이후에는 저수위와 고수위의 분리기준이 목자판 기준으로 0.676m로 변화하였다[한국건설기술연구원, 2002].

신정지점은 안양천의 중하류부에 위치하고 있으며, 복단면의 하천단면을 나타내는 지점이다. 따라서, 하천 단면형태와 유량측정성과의 분포양상을 고려하여 저수위, 중간수위, 고수위에 대한 구간을 결정한 후 각 구간에 대하여 수위-유량관계식을 작성하였다. 각 구간을 구분한 결과 목자판 수위표를 기준으로 0.408m에서 저수위와 중간수위를 구분하였으며, 2.903m에서 고수위를 분리하였다. 홍수로 인한 단면변화가 그다지 크게 나타나지 않아 저수위에서의 유량측정성과의 일정한 분포양상을 보이고 있어 홍수 전후로 분리하여 수위-유량관계를 개발하지 않았으며, 저수위, 중간수위, 고수위에 대해 각 구간별로 수위-유량관계를 제시하였다.

표 1. 수위-유량관계곡선식

	적용 기간	경계 조건	수위-유량관계곡선식	비고
설마천	2001. 12. 1 ~2002. 8. 5	$H \leq 0.654m$ $0.654m < H \leq 1.450m$	$Q=9.120(H-0.150)^{3.225}$ $Q=35.039(H-0.300)^{3.424}$	8/5 홍수로 인한 단면변화 이전
	2002. 8. 5 ~2002. 11. 30	$H \leq 0.676m$ $0.676m < H \leq 1.450m$	$Q=7.053(H-0.309)^{2.149}$ $Q=32.212(H-0.300)^{3.755}$	8/5 홍수로 인한 단면변화 이후
안양천	2002. 3. 1 ~2002. 10. 2	$0.180m \leq h < 0.408m$	$Q=38.779(h+0.240)^{2.942}$	
		$0.408m \leq h < 2.903m$ $2.903m \leq h < 5.789m$	$Q=50.350(h-0.102)^{1.310}$ $Q=78.924(h-1.200)^{1.716}$	

3.2 오염물질 유출특성

표 2에는 하천별 강우사상으로부터 분석한 수질항목들에 대한 EMC값을 나타내었다. 정[2002]의 연구결과에서 제시한 SS, COD, TN, TP에 대한 EMC값과 비교한 결과, 도시하천인 안양천 신정지점은 SS를 제외한 나머지 항목들은 범위안에 포함되어 선행연구에서 제시한 범위에서는 전형적인 도시하천의 특성을 나타내었다. 하지만 산지소하천인 설마천 전적비교지점은 따로이 기준이 없는 관계로 농촌지역과 비교한 결과 대부분의 항목들이 모두 범위보다 낮은 값으로 나타났다.

표 2. 하천별 강우유출에 따른 EMC값

		Rainfall (mm)	DOC (mg/L)	T-COD (mg/L)	S-COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	T-P (mg/L)	TC (number /100mL)	EC (number /100mL)
S	2002.7.05~7.10	176.6	2.73	4.69		116	2.45	0.03	1.5	0.42		
	2002.7.22~7.24	214.8	0.92	3.81	2.5	38	1.33	0.2	1.19	0.85	3,819	705
	2002.8.03~8.09	414.5	2.72	5.96	5.51	220	2.1	1.16	0.74	0.91	6,192	562
	2002.8.23~9.02	145.4	0.98	2.08	1.92	9	0.92	0.11	0.41	0.45	12,366	136
	Average	237.8	1.84	4.14	3.31	96	1.7	0.38	0.96	0.66	7,459	468
A	2002.7.05~7.10	89.2	11.38	19.96		164	16.39	2.86	0.54	2.01		
	2002.7.18~7.23	161.1	5.52	12.62	8.71	236	11.62	0.48	2.29	2.47	482,934	85,794
	2002.8.05~8.12	430.9	4.41	8.41	8.21	126	5.94	0.72	2.77	1.33	30,236	2,960
	2002.8.27~9.01	153.8	5.46	8.39	8.06	1.3	6.59	1.45	2.42	1.7	59,874	3,674
	Average	208.8	6.69	12.35	8.33	164	10.14	1.38	2.01	1.88	191,015	30,809

S: Seolmastream, A: Anyangstream

그림 2는 하천에서의 EMC를 비교한 것이다. 설마천의 경우 SS의 최소값과 최대값의 차이가 매우 큰 것으로 나타났으며, 유기물의 경우 S-COD가 T-COD의 약80%를 차지하는 것으로 나타나 강우유출에 따른 유기물의 오염은 적은 것으로 판단되었다. 또한 T-N이 T-P보다 높게 나타나 질소성분은 비교적 쉽게 유출이 되나 인성분의 경우 유출이 비교적 잘 되지 않는 전형적인 양상을 보였다. 도시유역의 경우에는 주거지역, 상가지역, 도로지역, 공단지역 등의 토지이용특성이 강우유출수의 수질변화에 미치는 영향이 적다고 한다. 하지만 안양천의 경우는 SS, T-COD, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P뿐만 아니라 Total Coliform, Esherchia Coli의 결과도 강우유출에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

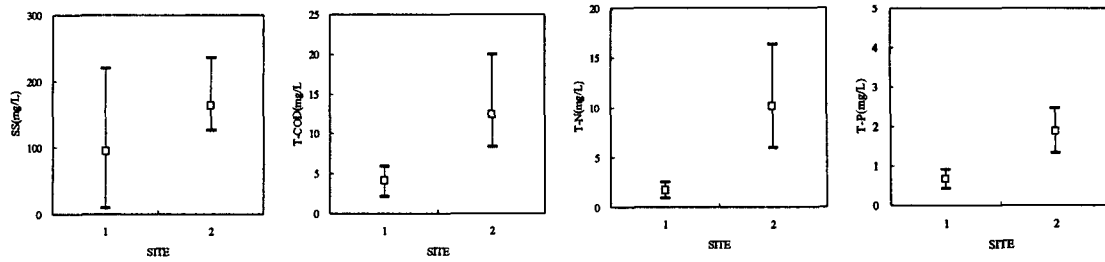


그림 2. 토지이용에 따른 EMC값의 비교(site 1: 산지하천, site 2: 도시하천)

Schillinger등[1985]에 의하면 오염물질이 강우유출시 부유물질에 흡착되어 유출되기 때문에 SS(부유물질)과 TCOD(화학적산소요구량), 미생물항목인 TC와 EC의 상관도가 높은 것으로 밝혔다. 이는 다른 기관의 연구결과와 유사하나, 본 연구에서는 전적비교의 경우, 유량과 상관도가 최소 95%이상의 유의수준에 속해 높은 상관도를 나타낸 항목이 T-COD, S-COD, SS, T-P였으나, 표 3에서 나타낸 오염물질별 EMC값 사이의 상관도에서는 SS와 상관성이 높게 나타난 물질이 없는 것으로 나타나 비강우기를 포함한 실제 농도값과 EMC값에 차이가 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 강우사상시 불규칙한 시료채취와 분석횟수가 부족하여 초래된 것으로 사료되며, 또한 비강우시 하천 하상에 침전된 물질들이 유량의 증가로 부상하여 강우유출시 상관도를 떨어뜨리는 것으로 판단된다.

표 3. 하천별 강우유출에 따른 EMC값

	DOC	TCOD	SCOD	SS	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	TP	TC	EC
DOC	1	0.975**	0.977**	0.513	0.954**	0.886**	0.057	0.751*	0.589	0.541
TCOD	0.975**	1	0.931**	0.583	0.984**	0.829*	0.065	0.825*	0.796	0.771
SCOD	0.977**	0.931**	1	0.754	0.866*	0.611	0.871*	0.853*	0.54	0.502
SS	0.513	0.583	0.754	1	0.551	0.416	0.272	0.654	0.596	0.592
TN	0.954**	0.984**	0.866*	0.551	1	0.752*	0.137	0.873**	0.867*	0.838*
NH ₃ -N	0.886**	0.829*	0.611	0.416	0.752*	1	-0.174	0.559	-0.117	-0.163
NO ₃ -N	0.057	0.065	0.871*	0.272	0.137	-0.174	1	0.421	0.403	0.363
TP	0.751*	0.825*	0.853*	0.654	0.873**	0.559	0.421	1	0.856*	0.827*
Total Coliform	0.589	0.796	0.54	0.596	0.867*	-0.117	0.403	0.856*	1	0.997**
Esherchia Coli	0.541	0.771	0.502	0.592	0.838*	-0.163	0.363	0.827*	0.997**	1

* significant at 0.05 level, ** significant at 0.01 level

4. 결론

토지이용 특성에 따라 산지소하천인 설마천과 전형적인 도시하천인 안양천을 대상으로 하여 강우사상에 따른 수문곡선의 변화와 오염물질의 유출특성을 분석한 결과, 선행연구에서 제시한 SS, COD, TN, TP의 EMC값의 범위로는 각각 산지하천과 도시하천의 특성을 나타냈으나 상관분석에 의해 나타난 결과가 다른 양상을 보이는 것은 불규칙한 시료채취와 분석횟수의 부족, 비강우시 하천 하상에 침전된 물질들이 유량의 증가로 부상하여 강우유출시 상관도에 영향을 주는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2002), 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구
2. 정하영 등(2002), 유역별 강우유출수의 수질분포 조사연구, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회논문집, P-54
3. Schillinger JE, Gannon JJ.(1985), Bacterial adsorption and suspended particles in urban stormwater, J. Water Pollution Control Federation, 57, p.384-389

- 감사의 글 -

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 #1-5-1)에 의해 수행되었습니다.