

연구논문

화성호 유입하천의 강우시 비점오염물질 유출특성

이상은* · 최이송** · 이인호*** · 홍대벽*** · 오종민**

경희대학교 대학원 환경응용과학과, * 경희대 환경학 및 환경공학과 · 환경연구센터, **

한국농어촌공사 농어촌연구원***

(2011년 6월 28일 접수, 2011년 9월 1일 승인)

The characteristics of discharged non-point pollutants on Hwa-sung lake inflow streams on precipitation

Lee, Sang Eun* · Choi, I Song** · Lee, In Ho*** · Hong, Dae Byuk*** · Oh, Jong min**

Environmental Application Science, Kyung Hee University, Young-In, Korea*

Department of Environmental Science and Environmental Research Center, Young-In, Korea**

Korea Rural Community Corporation, Rural Research Institute, An-San, Korea***

(Manuscript received 25 February 2010; accepted 20 April 2010)

Abstract

The purpose of this study is to estimate the characteristics and pollutant loadings of non-point pollutants that flowed in the streams on precipitation for pollutant loading reduction of Hwa-sung lake inflow streams. Although it has been made an effort to improve the water quality of Hwa-sung basin through the strategies for the preservation of water quality, it is shown that the water quality is not greatly improved. Because it has been industrialized and urbanized near Hwa-sung basin so that it is difficult to reduce the water pollution due to the increase in pollutant loadings of point and non-point sources. In this study, it is investigated the outflow characteristics of non-point pollutants that discharged with storm runoff and estimated the effect of runoff on Hwa-sung basin. The final goal of this study is to utilize the basic information for proper management and strategies of non-point sources on Hwa-sung basin. At the result of inflow streams, Ja-an stream that has the greatest pollutant loadings on precipitation is strongly influenced on the water quantity of Hwa-sung basin. On the other hand, it is shown that Nam-yang stream is strongly influenced on the SS concentration of Hwa-sung basin among them. Also, all streams; Nam-yang, Ja-ahn, Ah-eun stream; has the degree of slope more than or near 1 in the correlation results so that they have strong pollutant loading impact and the concentration of SS is the highest among other pollutants. So, specific studies on

initial rain phenomena are more necessary to manage the pollutants economically. Also, the proper control of SS concentration is required to manage the effluent pollutants effectively on precipitation. So, it is necessary to consider the strategies for non-point pollutants as well as point pollutants when the new management is imposed to reduce the pollutant load for improvement of Hwa-sung basin.

Keywords : non-point source, Hwa-sung lake, runoff characteristics, water quality, EMC(Events Mean Concentration)

1. 서론

우리나라는 하천수 및 다목적댐에서 조성되는 지표수를 주요 상수원으로 사용하고 있으나, 개발정책으로 인한 산업발전 및 활발한 경제활동으로 인해 공공수역인 호소나 하천 등에 오염물질 유입이 점차적으로 증가되어 왔다. 일반적으로 공공수역에 유입되는 오염물질은 발생원에 따라 생활오수나 공장폐수 등과 같은 점오염원과 농지에 살포된 비료 및 농약, 대기 오염물질의 강하물, 지표상 퇴적오염물질, 합류식 하수관거, 월류수 내 오염물질 등 주로 강우시 강우유출수와 함께 유출되는 비점오염원으로 구분할 수 있다(장성호·박진식, 2005; 경기도보건환경연구원, 2001). 비점오염원에 의한 수질에 미치는 영향은 팔당 상수원 유역의 전체 오염량 중 비점오염원의 기여율이 발생량 기준으로 19.6% 정도로 추정되고 있으며(한국건설기술연구원, 2000), 4대강 물관리 종합대책에 따르면 수계별 비점오염원이 차지하는 비중이 배출부하량 기준으로 22~37%로 나타나고 있다. 또한 2015년까지 대부분의 하천에서 비점오염원에 의한 오염기여율은 65% 이상으로 증가할 것으로 환경부에서 발표하였으며(환경부, 2004), 특히 최근에는 점오염원의 급격한 감소로 인해 비점오염원의 오염기여도는 오히려 보다 높아질 것으로 예측되는 실정이다(환경부, 2010). 그러나 비점오염원은 오염물질의 유출 및 배출경로가 명확하게 구분되지 않아 수집이 어렵고, 발생량 및 배출량이 강수량 등 기상조건에 크게 좌우되기 때문에 점오염원과 달리 체계적인 관리가 어렵다. 또한 시간에 따른 부하량의 변동폭이 크며,

강우초기에 오염물질의 농도가 매우 높다. 특히 질소와 인 등의 영양물질이 많이 포함되어 있어 하천이나 호소의 부영양화를 일으키는 원인으로 알려져 있다(김성수 등, 2002). 따라서 하천이나 호소의 수질개선을 위해 하천으로 유입되는 점오염물질 규제뿐만 아니라 비점오염물질에 대한 관리가 필요하다(오종민 등, 2003). 비점오염원은 강우에 의해 유출되는 오염원으로 다양한 토지이용에 따라 발생되며, 강우 및 유역의 특성에 따라 유출되는 오염물질의 종류와 양이 달라 불확실성이 큰 오염원이다. 외국의 경우, 다양한 비점오염원으로부터 유출되는 비점오염물질을 관리하기 위하여, 토지이용을 세부적으로 분류하여 유출특성을 파악하고 최적관리방안을 도출하여 관리하고 있다. 그러나 국내의 경우 모니터링 자료의 부족으로 인하여 비점오염물질의 관리에 어려움을 겪고 있는 실정이다(최지연 등, 2009). 이에 따라, 대상지역에 대한 개별적인 연구(김영철 등, 2002)뿐만 아니라 지속적인 모니터링을 통해 제대로 된 비점오염원 부하량을 산정하고, 오염총량제의 안전율을 감소시켜 경제적인 효과를 거둘 수가 있다(김정현 등, 2010).

따라서 본 연구에서는 강우시 화성호로 유입되는 주요 유입하천 유역의 유출수가 화성호 수질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 강우시 및 비강우시 수질 및 유량조사를 통해 오염물질의 유출특성을 파악하고, 수질분석 결과를 토대로 EMC 및 강우와 하천부하량과의 상관성을 파악하고자 하였다. 또한 이를 토대로 화성호의 수질악화 방지를 위한 보다 정확한 비점오염원의 적절한 관리방안 마련을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

II. 조사지점 및 분석방법

1. 대상유역현황

화성호 유역내 비점오염원 유출특성 조사를 위해 화성호 주요 유입하천인 남양천(Nam-Yang Stream, NYS), 자안천(Ja-Ahn Stream, JAS), 어은천(A-Eun Stream, AES)을 중심으로 각 하천의 하류부분을 선정하였으며 화성호 유역의 개황과 유입하천의 조사지점을 Figure 1에 나타내었다. 화성호 인근의 화옹지구는 농지의 대체개발과 수자원 확보를 위해 서신면 궁평리와 우정읍 매향리 사이의 방조제 및 기타시설물을 축조함으로써 6,212 ha의 매립지를 확보하기 위한 간척지 개발사업지이다(경기개발연구원, 2009). 화성호 유역은 해안에서 유역경계까지의 거리가 짧아 유량이 풍부한 하천은 없으며, 수리상 빈약한 남양천, 자안천, 어은천 등 3개의 준용하천이 있다. 이외에 농경배수로와 세천이 유역내 소재하는 물의 전부로 남양동을 비롯한 7개 읍면동의 생활오수, 산업 및 축산폐수가 유역내에 유입오염원 형태로 작용하여 수계의 수질에 영향을 미치고 있다(한국농어촌공사, 2009; 경기개발연구원, 2009). 남양천은 유역면적이 19.91 km²으로 연중유량은 매우 적으며 오염원이 밀집된 남양동 소재지를 관통하고 해역 유입부까지의 거리가

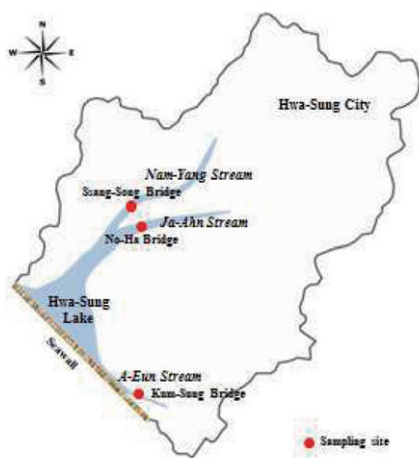


Figure 1. Map of sampling site at inflow streams of Hwa-Sung Lake

짧아 자정작용을 거칠 시간이 비교적 짧은 편으로 연중 수질오염도가 높은 상태로 화성호에 유입되고 있다. 또한 하천변을 정비하는 공사를 하여 하천폭이 넓어진 상태이며, 하류부에 설치된 보로 인하여 해수의 영향을 적게 받고 있다. 자안천은 유역면적이 52.63 km²로 가장 큰 유역면적을 차지하고 있으며, 상류유역에 주거지가 밀집해 있어 생활하수에 의한 영향을 많이 받으며, 중·하류는 대부분 농경지로 이루어져 있다. 농경지가 60% 이상, 산림이 20% 미만이며, 감조하천의 특성을 나타내어 대조기시 해수가 하천 유입부 상류 2.6 km까지 도달하고 하류부 하상은 개펄의 특성을 나타내고 있다. 이 두 개의 하천은 상류의 도시화로 인한 오염물질 배출이 늘어나고 비점오염물질 유출량도 증가하여 수질오염도가 급격히 증가하는 경향을 나타내고 있다(한국농어촌공사, 2010). 어은천의 유역면적은 23.50 km²이고, 대부분 농경지로 이루어져 있어 유역내 집중적인 생활하수 유입은 없으나 농경배수, 공장폐수, 축산폐수가 많이 유입되는 상태로 강우시기와 연도별로 유사한 수질 패턴을 나타내고 있다(한국농어촌공사, 2010).

2. 조사 지점 선정

본 연구에서 주요 조사하천은 화성호로 직접 유입되는 주요 유입하천인 남양천, 자안천, 어은천 총 3개 하천을 대상으로 하였다. 조사지점은 화성호로 유입되기 전 각 하천의 하류부근 중 시료를 용이하게 채취할 수 있으며, 바람이나 강우에 의해 유량 측정에 방해받지 않는 지점을 선정하여 시료 채취를 실시하였다.

3. 유입하천 유역 토지이용현황

Table 1은 조사대상인 화성호 유입하천 유역의 토지이용현황을 나타낸 것으로 도시는 도로, 대지, 학교용지, 주차장, 주유소 등을 포함하며, 농경지는 논과 밭으로 구성된다. 또한 산림지역은 숲이 우거진 임야를 나타내고, 기타는 과수원, 제방, 하천, 공원, 체육용지, 종교용지, 잡종지 등을 포함하여 나

Table 1. Land use of the watershed

Watershed	Area (km ²)	Land use(%)			
		Famland	Forest	Urban	Etc
Nam Yang	19.91	25.87	49.93	16.36	7.87
Ja Ahn	52.63	30.51	38.86	14.38	16.26
A Eun	23.50	47.55	30.14	11.26	10.18

타내었다. 토지이용현황 조사 결과 남양천 유역은 전체 유역의 16.36% 정도가 도시지역 특성을 나타내었으며, 세 유입하천 중에서 가장 도시화가 활발하게 진행 중인 지역이다. 또한 자안천은 농지 및 임야가 전체 유역 중에서 절반 이상을 차지하고 있으며, 농지와 임야가 거의 비슷한 비율로 분포하는 것으로 나타났다. 어은천은 농지와 임야의 점유율이 약 78%를 차지하고 있으며, 세 하천중 도시화가 가장 적게 진행된 지역으로 나타났다.

4. 조사시기 및 분석방법

화성호 주요 유입하천의 유량 및 수질조사를 위해 조사지점별로 강우시 조사를 하여 각 분석항목별로 측정을 실시하였다. 강우시 조사는 강우사상이 시작되기 직전부터 강우강도에 의해 하천 유량 변화가 현저히 발생할 때마다 채취하였으며, 강우사상이 끝난 후 하천 유량이 평수위로 도달하여 수위변동이 없을 때까지 조사를 실시하였다. 강우 조사시 선행무강우일수는 18일이었으며, 강우지속시간은 남양천 43시간, 자안천 43시간, 어은천 44시간 동안 강우가 지속되었다. 시료 채취시의 총강우량은 남양천 55 mm, 자안천 55 mm, 어은천 37 mm 이었다. 시료채취는 하천에서 직접 채취하는 것을 원칙으로 하였으며 18~22개의 시료를 채취하였다. 현장에서 유속, 수온, pH, EC, DO 측정을 실시하였고, 채취된 시료는 실험실로 운반하여 SS,

BOD, COD, T-N 및 T-P를 수질오염공정시험법에 준하여 수질분석을 실시하였다. Table 2는 조사기간 각 조사지점별로 강우시 조사회수와 조사일시, 강우량, 강우강도, 강우지속시간, 선행무강우일수, 유출고, 유출계수, 침투유출량 및 시료수를 나타낸 것이다.

III. 결과 및 고찰

1. 오염물질 유출경향

강우시 유출수 및 오염물질의 유출경향을 파악하기 위하여 모니터링을 수행하였으며, 그 결과를 Figure 2에 나타내었다. 일반적으로 비점오염물질은 강우에 의해 유출되며 강우유출수의 농도는 유출되는 유량과 밀접한 관계를 보이기 때문에 유출농도 그래프와 수문그래프는 동시에 표시하여 분석하고자 하였다.

강우시 조사에서 오염물질의 유출특성을 파악하기 위해서 화성시 남양동과 우정읍에 위치한 기상 관측소(기상청, 2010)에서 측정된 강우량의 변화, 오염물질 농도 및 유량 변화를 분석하였으며, 본 연구에서는 2010년 6월 11~13일에 발생한 강우사상에 대한 모니터링 결과를 나타내었다.

강우 조사시 최대유량 도달시간은 남양천 12.5hr, 자안천 13.5hr, 어은천 12.75hr으로 조사되었다. 농도곡선과 관련하여 항목별 오염물질 농도를 살펴보면, 유량과 SS는 강우와 비슷한 경향을 보였으며, 오염물질 중 SS가 높은 유출농도를 보이고 있어 오염물질 중 SS가 화성호에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 조사되었다. 남양천의 유량, SS, 유기물은 강우와 비슷한 경향을 보였으며, 강우강도

Table 2. Hydrologic description of runoff events in each site

Date	Area	Total rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/hr)	Duration (hrs)	ADD (Antecedent drydays)	Runoff depth (mm)	Runoff coefficient	Peak flowrate (CMS)	NO. of sample
Jun. 11~13	Nam Yang	55	6.5	44	18	0.016	0.287	5.844	22
	Ja Ahn	55	6.5	44	18	0.017	0.302	15.887	21
	A Eun	37	5.5	43	18	0.023	0.608	8.008	18

가 높아 유량이 많아진 시점에서 토사가 쓸려 내려와 농도가 높아진 것으로 판단된다. 또한 유기물은 강우와 함께 주변의 하수 및 도로유출수 유입으로 인해 농도가 높아진 것으로 판단된다. 영양염류의 경우 단시간에 뚜렷한 패턴이 나타나지는 않았다. 이는 강우시 도로 유출수나 농경지 및 축사의 오염물질이 흘러들어 오기는 하지만 특정한 많은 양이 유입되지 않는 한 유입정도가 불투명하기 때문에 뚜렷한 증감 패턴을 찾을 수는 없다고 판단된다. 하지만 대략적으로 영양염류의 농도가 다른 시점에 비해 갑자기 높아졌다고 판단되는 시점을 찾음으로써 외부로부터 오염원이 유입된 것을 유추할 수 있다.

자안천은 하천 폭이 상당히 넓고 수풀이 매우 많이 우거져 있기 때문에 하천에서 체류시간이 길어져 평상시 유량으로 되돌아가는데 다른 하천에 비해 시간이 오래 걸리는 것으로 나타났다. 또한 SS와 유기물은 남양천과 비슷한 경향을 나타내었다.

영양염류의 경우 강우패턴과 일정치 않은 경향을 보였는데 이는 하천 주변에 수초들이 많고 체류시간이 길기 때문인 것으로 판단된다.

어은천의 경우 다른 하천에 비해 유기물의 평균 농도가 높은 것으로 나타났는데, 이는 하천 상류의 주거에서 발생하는 하수 유입 및 하수처리장 방류수 유입에 의한 영향이 매우 큰 것으로 판단된다. 또한 영양염류의 경우 다른 하천에 비해 높은 것으로 나타났으며, 이는 주변에 농경지가 많이 분포되어 농경지로부터 비점오염 유출이 많이 발생되었기 때문으로 판단된다. 또한 평상시 흐르는 하폭이 작아서 강우 조사시 유량이 증가했다가 평상시로 되 돌아오는 시간이 다른 하천에 비하여 짧고, 체류시간이 짧기 때문에 오염물질이 자정작용을 거칠 시간이 적은 것으로 판단된다.

남양천, 자안천, 어은천의 강우 전 SS농도가 각각 13 mg/L, 8.5 mg/L, 35.5 mg/L로 하천 수질

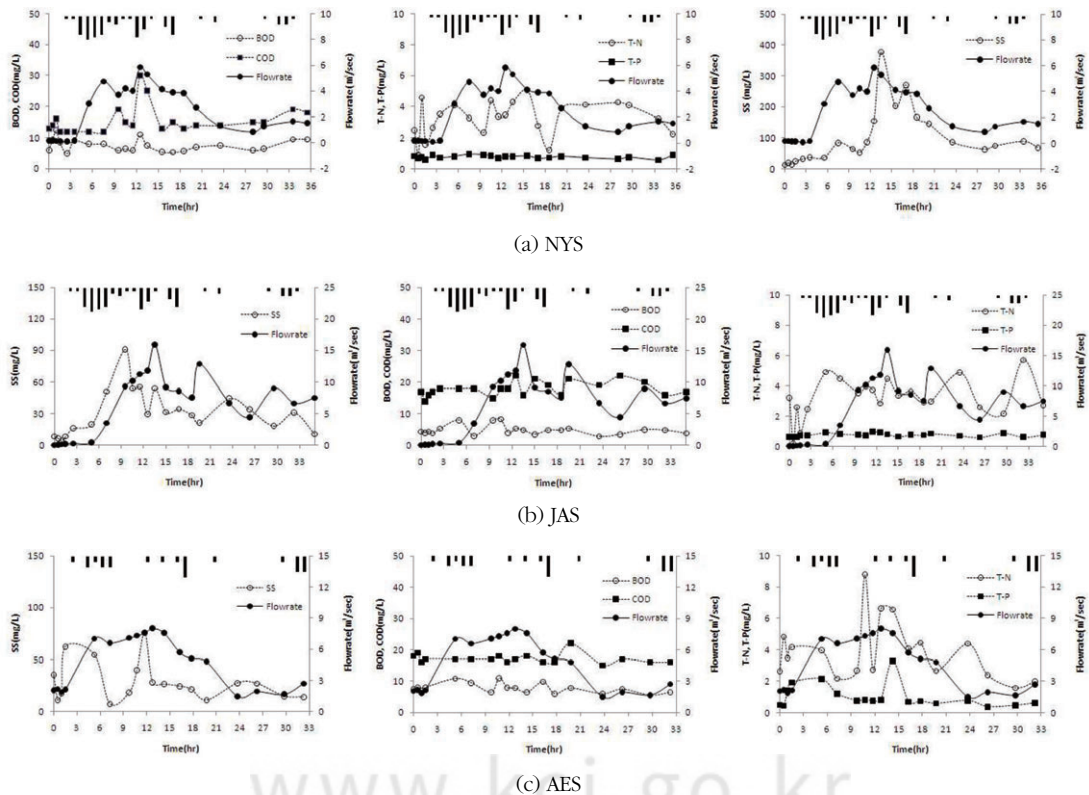


Figure 2. Pollutant concentration with rainfall duration

환경기준으로 농업용수(IV등급-100 mg/L 이하)에 적합한 농도를 보였으며, 강우시작 10hr 경과 후에 나타난 침투 SS농도가 강우 전 농도보다 각각 29배, 11배, 2배 정도 증가된 농도를 보였다. 또한 남양천의 경우 다른 하천에 비하여 조기에 강우 유출수에 의한 유량 변화 및 침투유량을 볼 수 있는 것은 유역의 토지이용형태가 불투수층의 도시지역을 다수 포함하고 있으며, 불투수 지표에 내린 강우 유출수가 토양이나 지하수로 흡수되지 않고 하천으로 유입되는 양이 농경지 보다 도시지역에서 상대적으로 많기 때문으로 판단된다(박재영 등, 2001).

2. 비점오염물질 농도의 통계학적 분석

화성호로 유입되는 오염물질의 정량적인 분포를 파악하기 위해 강우시 조사에서 측정된 남양천, 자안천, 어은천의 오염물질 농도를 대상으로 통계학적 분석을 통해 각 유입하천별 분석항목 배출농도 범위를 Table 3에 나타내었다. 각 유입하천의 SS농도는 남양천 13.0~377.5 mg/L, 자안천 4.5~91.0 mg/L, 어은천 7.5~76.0 mg/L의 범위를 보이고 있었으며, 최대값과 최소값의 농도차이를 보면 남양천 29배, 자안천 10배, 어은천 10배로 큰 차이를

볼 수 있었다. 최소값은 강우직전에 측정된 값으로 강우전후의 농도차이가 큰 것으로 보아 유역특성 및 강우강도, 강우량 등에 따른 강우특성에 의해 고농도 오염물질이 유출되는 것으로 판단된다. 또한 Median 보다 Mean 값의 농도가 크게 나타난 것으로 미뤄 유출농도의 급작스런 농도 변화가 있었으며, 표준편차(Standard Deviation) 값이 다른 오염항목에 비해 높은 것으로 나타났는데, 이는 비점오염원의 대표적인 특성으로, 유역면적, 유역의 토지이용형태, 지표퇴적물량, 강우량 및 강우강도 등에 따라 상당한 차이가 발생하기 때문에 편차가 크게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 95% 신뢰구간은 남양천의 경우 SS 61.7~135.7 mg/L, BOD 6.7~8.4 mg/L, COD 13.7~17.4 mg/L, T-N 2.8~3.7 mg/L, T-P 0.7~0.8 mg/L로 나타났으며, 자안천의 경우 SS 22.4~39.9 mg/L, BOD 4.2~5.5 mg/L, COD 17.1~18.9 mg/L, T-N 2.7~3.8 mg/L, T-P 0.7~0.8 mg/L로 나타났고, 또한 어은천의 경우 SS 21.1~36.4 mg/L, BOD 7.1~8.4 mg/L, COD 16.5~17.7 mg/L, T-N 3.1~4.7 mg/L, T-P 0.7~1.3 mg/L의 범위를 보였다. 각 분석항목별로 보았을 때 SS와 유기물

Table 3. Statistical summaries for washed-off concentrations

Site	Parameter	N of cases	Minimum	Maximum	Median	Mean	95% CI Upper	95% CI Lower	Standard Dev.
Nam Yang	SS	22	13.0	377.5	72.3	98.7	135.7	61.7	88.6
	BOD	22	5.0	12.5	7.3	7.6	8.4	6.7	1.9
	COD	22	12.0	30.0	14.0	15.5	17.4	13.7	4.4
	T-N	22	0.9	5.1	3.4	3.3	3.7	2.8	1.1
	T-P	22	0.6	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	0.1
Ja Ahn	SS	21	4.5	91	29.5	31.1	39.9	22.4	20.9
	BOD	21	2.8	8.3	4.8	4.8	5.5	4.2	1.5
	COD	21	14.0	22.0	18.0	18.0	18.9	17.1	2.2
	T-N	21	0.2	5.7	3.2	3.2	3.8	2.7	1.3
	T-P	21	0.6	1.0	0.7	0.8	0.8	0.7	0.1
A Eun	SS	18	7.5	76.0	25.5	28.8	36.4	21.1	18.3
	BOD	18	5.5	11.0	7.65	7.8	8.4	7.1	1.6
	COD	18	15.0	22.0	17.0	17.1	17.7	16.5	1.5
	T-N	18	1.6	8.8	3.7	3.9	4.7	3.1	1.8
	T-P	18	0.4	3.3	0.8	1.0	1.3	0.7	0.7

Table 4. Relationship between the rainfall and pollutants loading in each watershed

Site	SS	BOD	COD	T-N	T-P
Nam Yang	$y=1.162x+0.025$	$y=1.053x-0.008$	$y=1.024x+0.004$	$y=0.968x+0.008$	$y=1.017x-0.008$
	$R^2=0.885$	$R^2=0.954$	$R^2=0.952$	$R^2=0.828$	$R^2=0.988$
Ja Ahn	$y=1.178x-0.047$	$y=1.031x-0.012$	$y=0.981x+0.010$	$y=0.890x+0.020$	$y=1.023x-0.000$
	$R^2=0.903$	$R^2=0.922$	$R^2=0.990$	$R^2=0.657$	$R^2=0.988$
A Eun	$y=0.850x+0.013$	$y=1.089x-0.016$	$y=0.992x-0.000$	$y=1.129x-0.010$	$y=1.233x-0.022$
	$R^2=0.523$	$R^2=0.971$	$R^2=0.995$	$R^2=0.849$	$R^2=0.755$

(BOD, COD)의 경우 자안천, 어은천에 비해 남양천에서 가장 넓은 범위를 나타냈는데, 이는 도시화에 따른 불투수층의 증가로 인해 강우시 토사가 많이 유입되고, 주변 산업단지에서 오염물질 유입으로 인한 영향이 오염물질의 유출에 영향을 끼쳐서 나타난 현상으로 판단된다. 또한 영양염류(T-N, T-P)의 경우 남양천 및 자안천에 비해 어은천에서 넓은 범위를 보였는데, 이는 하천 주변 대부분이 농경지로 구성되어 있어 비료 및 제초제의 사용으로 인한 것으로 판단된다.

3. 우수유출수의 수질특성

강우시 오염물질의 유출특성을 파악하기 위하여 강우기간 중의 관측유량 $Q(t)$ 에 대한 누적유량 $\Sigma Q(t)$ 의 비 관측 오염부하량 $L(t)$ 에 대한 누적오염부하량 $\Sigma L(t)$ 의 비의 상호관계를 분석하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

$$\frac{Q(t)}{\Sigma Q(t)} = \frac{L(t)}{\Sigma L(t)}$$

- Q(t): 관측유량
- L(t): 오염부하량
- $\Sigma Q(t)$: 누적유량
- $\Sigma L(t)$: 누적오염유량

각 지점별 유량과 각 오염부하량간의 결정계수는 각각 남양천 0.988~0.828, 자안천 0.988~0.657, 어은천 0.955~0.523으로 나타나, 대체적으로 상관성이 높음을 알 수 있었다. 하지만 어은천의 SS, 자안천의 T-N이 상대적으로 낮게 나타났는데, 어은천의 경우 다른 하천에 비해 강우량 및 강우강도가 낮은 강우특성을 보여 강우특성에 민감하게 반응하는 SS가 다른 하천에 비해 낮게 나타난 것으로 판단

되며, 자안천 T-N의 경우 초기 농도 변동성이 크게 나타나 다른 하천에 비해 상관성을 떨어뜨린 것으로 판단된다. 또한 회귀식의 기울기가 1보다 크면 오염부하가 강한 것이며, 1보다 적은 경우 그 반대를 의미한다(장성호 · 박진식, 2005). 남양천에서는 SS, BOD, COD, T-P가 1보다 큰 기울기를 보였으며, 자안천에서는 SS, BOD, T-P가 1보다 큰 기울기를 보였다. 또한 자안천에서 BOD, T-N, T-P가 1보다 큰 기울기를 나타내 BOD, T-N, T-P가 오염부하가 강한 경향을 보였다. 전체적으로 기울기가 1보다 크거나 1에 거의 가까운 값을 나타내 남양천, 자안천, 어은천 모두 오염부하가 강한 것으로 나타났다.

4. 유량가중평균농도

강우사상 시 측정되는 농도는 하천의 유출량을 고려하지 않고 수체 내에 포함되어 있는 오염물질의 농도만을 파악하기 때문에 강우강도의 변화에 잘 대응하지 못하는 단점이 있다(경희대학교, 2010). 비점오염원은 점오염원과 다른 유출수의 농도 및 강우유출율을 가지고 있기 때문에 정확한 부하량 산정을 위해서는 강우시 많은 모니터링자료를 이용하여 유량가중평균농도(EMC)를 통해 평균 농도를 산정해야 한다(Irish *et al*, 1998; Marsalek, J. 1978). 따라서 본 연구에서는 강우시 비점오염원으로부터 유출수의 평균농도를 가장 잘 적용할 수 있는 것으로 알려진 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 산정하여 각 조사지점별 강우유출수의 비점오염물질 유출특성을 파악하고자 하였다. EMC는 강우시 발생한 총 오염물질량을 총유출량으로 나눈 유량가중평균값

으로 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t q(t)c(t)dt}{\int_0^t q(t)dt}$$

EMC: Event Mean Concentration

M: 유출된 오염물질 총량

V: 강우 유출량(L³)

tr: 강우 지속 시간

q(t): 강우 시작부터 강우종료 시간까지 강우 유출량(L³/T)

c(t): 강우 시작부터 강우종료 시간까지 오염물질 농도(ML³)

Table 5는 각 조사지점별 EMC 값을 나타내었다. 강우유출수에 포함된 EMC는 SS에서 가장 큰 농도차이를 보였으며, BOD, COD, T-N 농도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 T-P의 경우 다른 하천에 비해 어은천에서 약 1.4배 정도 높게 나타났다. 이는 Figure 2의 농도변화 그래프에서 강우시 BOD, COD, T-N의 큰 농도변화가 없었기 때문에 각 하천 EMC가 큰 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다. T-P농도는 다른 하천에 비해 변동성 큰 것으로 나타났지만, 갑자기 농도가 높아진 시점의 원인이 파악되지 않았기 때문에 추후 비점오염원 연구시 급작스럽게 높아진 농도 변화에 대한 연구가 좀 더 보완해야 할 부분이라고 판단된다. 세 하천의 항목별 농도 범위는 BOD 5~8 mg/L, COD 17~19 mg/L, T-N 3~4 mg/L, T-P 0.79~1.14 mg/L의 범위로 관측되었다. 각 유입하천의 SS농도를 비교하면, 남양천 145 mg/L, 자안천 40 mg/L, 어은천 31 mg/L로 유입하천별로 EMC 농도의 차이가 큰 것으로 나타났으며, 세 유입하천 중에서 남양천의 SS 농도가 가장 높게 관측되었다. 이는 강우유출수가 토지이용, 유역면적, 유역경사 등과 같

은 유역특성 이외에 건기일수, 강우지속시간, 강우량 및 강우강도 등의 강우특성에 영향을 받기 때문에 농도의 큰 차이가 있는 것으로 판단된다. 또한 SS농도가 강우직전 측정된 값보다 높게 나타나 강우에 민감하게 영향을 받는 것으로 보였는데, 이는 강우유출수에 의한 하천 및 호소의 생태계 교란과 화성호 퇴적물에 직접적인 악영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 SS는 유역특성 및 강우특성간의 연관성에 대한 연구뿐만 아니라, 화성호 퇴적물의 오염도 및 퇴적속도 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이와 더불어 강우유출수가 오염물질부하에 큰 영향을 미치는 요인인 지표면에 쌓인 퇴적물량은 선행강우에 의한 유출 후 지표면에 잔존해 있는 퇴적물과 선행강우 후 맑은 기간 동안에 새로이 발생하여 지표면에 퇴적된 양을 더한 값이 되며, 다음 강우에 의한 유출시의 초기조건이 된다. 따라서 Table 1의 자료를 이용하여 지표면에 퇴적된 양의 대소를 예측하기에는 어려움이 있으며, 강우 발생 후 유실되고 지표면에 잔존하는 퇴적물량과 맑은 날 매일 퇴적되는 양에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다(Sartor *et al.*, 1974; Ball *et al.*, 1998).

5. 유입하천별 오염기여율

Figure 3은 강우시 유출 오염부하량에 의한 조사지점별 오염기여율을 나타낸 것으로 화성호로 유입되는 각 하천의 항목별 오염부하량에 기저오염부하량을 제외하여 비점 오염부하량을 산정하였다. 화성호 유역 주요 유입하천이 차지하는 유역 면적 비율을 보면 자안천 55%, 어은천 24%, 남양천 21% 순으로 남양천이 가장 작았으며, 자안천이 차지하는 유역면적 비율이 가장 큰 것으로 나타났다. 이와 비교하여 화성호에 미치는 비점 오염부하량 비율을 산정한 결과 화성호에 미치는 세 유입하천의 기여율은 자안천(47%), 어은천(28%), 남양천(25%) 순으로 나타났다. 전체적으로 자안천의 오염부하량 기여율이 다른 두 하천에 비해 1.5배 이상 높은 것으로 나타났으며, 남양천이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 유입하천의 유역면적 비율과 같은 결과

Table 5. The summary of EMC in each site during rainfall events

Site	Nam Yang	Ja Ahn	A Eun	
EMC (mg/L)	SS	145	40	31
	BOD	7	5	8
	COD	17	19	17
	T-N	3	4	4
	T-P	0.79	0.79	1.14

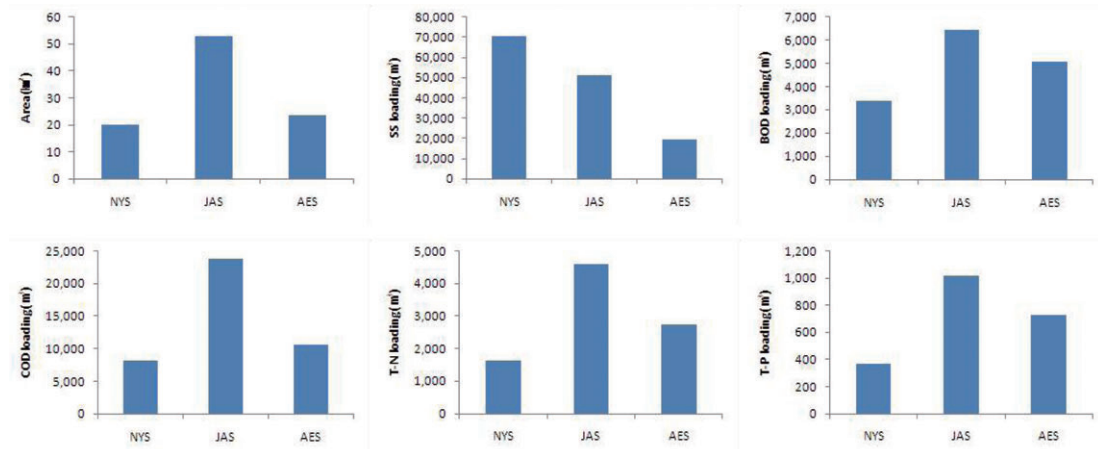


Figure 3. The area and pollutant loading according to each basin area

로 나타났는데, 자안천의 유역면적이 가장 넓고 유량이 크기 때문에 화성호로 유입되는 비점 오염부하량 비율이 가장 큰 것으로 판단되며, 남양천은 유역면적이 가장 적어 오염부하량 비율이 낮은 것으로 판단된다. 어은천은 하천 상류에 주거지가 밀집되어 있고, 중·하류에는 농경지로 구성되어 있어 유기물 및 영양물질의 오염농도는 높지만 하천 유량이 자안천보다 적기 때문에 총오염부하량에 있어 자안천보다 적은 것으로 나타났다. 오염물질 항목에 따른 결과를 보면, SS의 경우 남양천에서 가장 높게 나타났는데 남양천은 세 하천 중에서 가장 작지만 오염원이 밀집되어 있고 남양천 유역의 도시화에 따른 불투수층의 증가로 인해 불투수 지표에 내린 강우 유출수가 토양이나 지하수로 흡수되지 않고 하천으로 유입되는 양이 많아 강우시 많은 토사가 유입되면서 SS 비점 오염부하량이 높은 것으로 판단된다. 유기물 및 영양염류의 경우 자안천이 가장 높은 것으로 나타났는데 하천 주변 토지 이용특성에 따라 농경지에서 유입되는 유기물질 부하량이 높아 세 유입하천 중 화성호에 미치는 오염부하량이 가장 높은 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구는 화성호 유역의 수질보전을 위한 대책

수립에 기초자료를 제공하고자 비강우시 강우시 오염물질 유출특성을 파악하였다.

1. 강우시 오염물질별 유출특성을 분석한 결과, 유량과 SS는 강우와 비슷한 경향을 보였으며, 오염물질 중 SS가 높은 유출농도를 보였다. 또한 강우시 오염물질의 농도를 통계분석한 결과, SS농도는 남양천 13~377.5 mg/L, 자안천 4.5~91 mg/L, 어은천 7.5~76 mg/L의 범위를 보였으며, 최대값과 최소값의 농도차이를 보면 남양천 29배, 자안천 10배, 어은천 10배로 큰 차이를 보여 강우시 오염물질 중 SS가 화성호에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 조사되었다.

2. 유량과 오염부하량간의 상관성 분석결과 결정계수는 각각 남양천 0.988~0.828, 자안천 0.988~0.657, 어은천 0.955~0.523으로 대체적으로 상관성이 큰 것으로 나타났다. 또한 기울기가 1보다 크거나 1에 거의 가까운 값을 나타내 남양천, 자안천, 어은천 모두 오염부하 현상이 강한 것으로 평가되었다.

3. 산정된 EMC 농도는 SS 31~145 mg/L, BOD 5~8 mg/L, COD 17~19 mg/L, T-N 3~4 mg/L, T-P 0.79~1.14 mg/L의 범위를 나타내었다. 또한 유입하천별로 SS농도가 큰 차이를 보였으며, 세 유입하천중에서 남양천의 SS농도가 가장 높게 관측되었다.

4. 조사지점별 오염기여율을 산정한 결과, 화성호에 미치는 세 유입하천의 기여율은 자안천(47%), 어은천(28%), 남양천(25%) 순으로 나타났으며, 자안천의 오염부하량 기여율이 다른 두 하천에 비해 1.5배 이상 높은 것으로 나타났다.

이에 따라 강우시 화성호에 영향을 미치는 유입하천을 오염부하량 기여율로 산정한 결과 자안천이 높은 것으로 나타났으며, 농도의 영향을 크게 미치는 유입하천은 남양천으로 나타났기 때문에 이 두 하천을 중심으로 수질관리가 이뤄져야 할 것으로 판단된다. 또한 강우시 유출되는 오염물질의 유출 특성 및 통계학적 범위를 살펴본 결과 강우특성에 따라 강우시 고농도가 유출되는 현상을 파악할 수 있었다. 따라서 경제적으로 오염물질을 관리하기 위해 오염부하에 대한 더욱 구체적인 연구가 필요한 것으로 판단되며, 강우시 유출 오염물질의 효과적인 제어를 위해 유출오염물질 중 SS의 적절한 제거가 필요할 것이다. 또한 화성호 수질관리를 위한 관리기법을 도입할 때 점오염물질 뿐 만 아니라 강우시 발생하는 비점오염물질에 대한 관리대책이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 과제로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 경기개발연구원, 2009, 화성호와 탄도호의 담수화 타당성 검토 연구.
- 경기도보건환경연구원, 2001, 비점오염원 관리방안
- 경희대학교, 2010, 화성호 오염부하량 산정 및 수질 오염 영향 평가.
- 기상청, 2010, 화성·우정기상관측소, 2010년 6~8월 기상자료.
- 김성수, 김종석, 방기연, 권은지, 정육진, 2002, 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사, 대한환경공학회지, 24(11), 2019-2027.
- 김영철, 이재수, 2002, 강우시 유역특성에 따른 유출 오염물질 농도곡선의 향상, 대한환경공학회지, 24(4), 633-645.
- 김정현, 강희만, 고석오, 2010, 국내 고속도로 휴게소지역 비점오염원 유출특성 분석, 한국도로학회 논문집, 12(4), 131-137.
- 박재영, 오종민, 김영철, 2001, 삽교호 유입하천에서 강우시 주요 오염물질의 유출 특성, Korean J. Limnol., 34(1), 62-29.
- 오종민, 최이송, 박재영, 2003, 유역의 토지이용형태(도시, 농촌, 산림지역)에 따른 유출수의 특성, 대한상하수도학회·한국물환경학회, 2003 공동 추계학술발표회 논문집, 163-166.
- 장성호, 박진식, 2005, 도시지역 비점오염물질의 유출특성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 14(12), 11710-1176.
- 최지연, 이소영, 김이형, 2009, 산림지역의 비점오염물질 유출특성 및 EMC 산정, 한국방재학회논문집, 9(4), 129-134.
- 한국건설기술연구원, 2000, 팔당상수원 비점오염원 유출특성과 최적관리방안.
- 한국농어촌공사 농어촌연구원, 2009, 담수호 수질 관리 조사보고서.
- 한국농어촌공사 농어촌연구원, 2010, 담수호 수질 관리조사보고서.
- 환경부, 2010, 수질오염총량관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침.
- 환경부, 2004, 관계부처합동[물관리 종합대책]의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책.
- Ball, J.E., R. Jenks and D. Aubourg. 1998. An assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces. The Science of Total Environment 209: 243-254.

- Sansalone, J.J. and S.G. Buchberger, 1997, Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water, J. Envir. Eng., 123: 134-143.
- Sartor, J.D., G.B. Boyd and F.J. Agardy, 1974, Water pollutant aspects of street surface contaminants J. WPCF 46: 458-467.
- Smullen, J.T., A.L. Shallcross and K.A. Cave. 1999. Updating the U.S. nationwide urban runoff quality data base, Wat. Sci. Tech., 39: 9-16.
- Water Quality Management Library Vol. 9, 1995, Nonpoint Pollution and Urban Stormwater Management, 57-62.
- 최종원고채택 11. 09. 26