

## 강우시 시화호 농촌 및 공단유역의 비점오염물질 유출특성

김세원<sup>†</sup> · 최광순 · 김동섭 · 이미경

한국수자원공사 K-water연구원

### Characteristics of Non-point Source Pollutants Runoff from Agricultural and Industrial Areas in Lake Sihwa Watershed

Sea-won Kim<sup>†</sup> · Kwangsoon Choi · Dong-sup Kim · Mikyung Lee

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

(Received 23 July 2009, Revised 27 August 2009, Accepted 1 September 2009)

#### Abstract

The characteristics of stormwater runoff was examined on distinct types of agricultural and industrial area in Lake Sihwa watershed. During rainfall event, the peak concentrations of SS, COD<sub>Mn</sub>, and TP were observed after 6~11 hours of rainfall in agricultural areas. Whereas, the peak concentrations occurred within the first one hour after rainfall and then the highest concentration of NPS pollutants sharply decreased, showing strong first flush effect in industrial areas. The strong first flush effect of suspended solid was apparent in agricultural areas, while those of organic matters and nutrients were clear in industrial areas. The cumulative load curves for NPS pollutants showed above the 45° straight line, indicating that first flush effect occurred in industrial areas. The mean SS EMC values of agricultural areas ranged from 60~598 mg/L (Avg. 285 mg/L), it was higher value when compare to other areas. While the mean COD<sub>Mn</sub>, TN, and TP EMCs values of industrial areas were shown the highest values as 67.7 mg/L, 12.1 mg/L and 2.1 mg/L respectively.

**keywords** : Event mean concentration, First flush effect, Non-point source, Runoff, Stormwater

## 1. 서론

우리나라의 호소 및 하천 수질관리는 90년대 중반 이전까지는 주로 도시하수, 공장폐수 등 일정한 배출경로를 가지는 점오염원을 중심으로 이루어져 왔으나, 수질개선의 효과는 뚜렷이 나타나고 있지 않아 비점오염물질 관리의 필요성이 부각되고 있는 실정이다(환경부, 2004a). 비점오염물질이 수질오염에 미치는 영향은 유역에서 토지이용이 고도화되고, 도시화에 따른 아스팔트 포장 등으로 인한 불투수층이 증가되면서 점차적으로 증가하고 있다. 환경부(2004a) 조사 결과에 따르면 4대강 유역에서 비점오염원의 영향(BOD 기준)은 전체 오염물질 배출부하의 22~37% 이상으로 추정되는 것으로 조사되었다. 팔당상수원의 경우 전체 BOD 배출량의 44.5%가 비점오염원에서 배출되며, 2020년에는 54.3%까지 급증할 것으로 예측되고 있다. 비점오염원은 도시, 농경지, 임야, 도로 등 넓은 면적에 분포하는 오염원으로 강우에 영향으로 오염물질 유출이 희석 및 확산을 통해 넓은 지역으로 발생한다. 4대강 수계에서 토지이용별 비점오염물질 수계전체 배출량은 도시(대지)가 52.0%로 가장 많으며, 산림, 농경지 순으로 발생하는 것으로 조사되었다(환경부, 2004a).

비점오염물질은 지형, 토지이용현황, 수리·수문조건, 기상(계절, 강우강도, 강우시속시간) 등 인위적 조절이 어려운 다양한 환경요인에 의해 유출량의 변화가 크고 이동경로가 달라진다. 따라서, 발생량의 예측과 정량화뿐만 아니라 유출특성의 파악이 매우 어렵고, 많은 종류의 오염물질을 포함하고 있어, 강우초기에는 오염물질의 농도가 매우 높은 특성을 지니고 있다(이현동 등, 2001; Bedient et al., 1980; Ichiki and Yamada, 1999). 또한 수체에 대한 비점오염원의 영향은 유출량, 유출농도, 수용수체의 환경용량 등에 따라 달라지기 때문에 각 해당유역의 특성을 충분히 고려해야 하며, 동일한 유역특성을 갖는 지역일 경우에도 강우특성에 따라 오염물질의 유출특성 및 오염부하량이 달라지기도 한다(최중수, 2003). 이처럼 수질관리를 위한 유역 비점오염원 관리의 중요성이 확대되면서 다양한 토지이용에 따른 비점오염물질 관리 없이는 목표수질 개선을 기대할 수 없다는 것이 선진국들뿐만 아니라 국내 사례에서도 쉽게 찾을 수 있다(김이형과 이선하, 2005). 이에 다양한 토지이용 형태에 따른 비점오염물질 저감을 통한 수질개선을 위해 국내·외에서는 최근 비점오염물질 유출특성 연구, 초기세척효과(First flush effect) 분석 및 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)산정 연구 등 다양한 유역을 대상으로 활발한 연구가 진행되고 있다(이병수 등, 2008; Kato et al., 2009; Lee et al., 2008; Zhang et al., 2008).

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kimseaa@kwater.or.kr

본 연구의 조사대상지인 시화호는 과거 수질오염의 대명사로 불렸으나, 1996년 『1단계 시화호종합관리계획』에 의거한 수질개선대책사업 시행 이후 꾸준히 수질이 개선되어 최근에는 평균 COD가 4 mg/L 이하를 유지하고 있다(해양수산부, 2006). 그러나 당초 목표수질인 COD 2 mg/L까지는 달성되지 못한 상태이며, 목표수질 미달성의 주요 원인중 하나로 강우시 비점오염원에 의한 육상기인 오염물질의 지속적인 유입으로 파악되고 있다. 특히, 시화공단 간선수로와 반월공단 토구는 평상시 오염물질을 전량 차집한 후, 하수처리장으로 이송하여 처리하고 있으나 강우시에는 작은 강우에도 유입수량이 급격하게 증가하여 고농도 오염물질이 차집되지 못하고 하류 보를 월류하여 시화호로 유입되는 특성을 갖고 있어 집중적인 관리가 필요한 상황이다.

시화호 유역은 토지이용 형태에 따라 크게 농촌유역 및 공단유역으로 구분되어있다. 농촌유역의 경우 동일한 토지이용 특성을 보이지만 상류유역 유입하천의 수리·수문 및 지형학적 형태가 다양한 특성을 보이고 있다. 공단유역은 유역 면적은 작지만 강우시 다른 소유역 유입하천보다 고농도 오염물질이 유출되는 현상이 나타나고 있다(한국수자원공사, 2006). 따라서 본 연구에서는 농촌유역과 공단유역을 대상으로 각 소유역별 유입하천의 강우시 비점오염물질 유출특성 분석을 위해 시간별 연속조사, EMC 산정 및 초기세적 효과분석을 하였다.

2.1. 대상유역 현황

시화호 유역은 안산시, 시흥시, 화성시에 포함된 잘 발달된 간사지와 얇은 구릉지대로 지세가 비교적 완만하며, EL.100.0 m 미만이 75~99.2%로 대부분 낮은 평탄한 지형으로 되어있다. 시화호 유역 전체 면적은 약 483.76 km<sup>2</sup>이고, 이중 농촌유역이 차지하는 비율이 32.1%로 가장 넓은 유역면적을 차지하고 있으며, 공단유역은 13.2%로 나타났다. 2개 소유역외에 시화호 및 남측간석지 등이 나머지 유역 점유비율을 차지하는 것으로 나타났다(국토해양부, 2008). 시화호 유역은 대체적으로 평탄하여 큰 하천이 없는 반면, 소규모의 자연하천과 인공하천들이 많이 있다. 농촌유역에 포함되어있는 반월천(BW), 동화천(DH), 남전천(NJ), 문산천(MS)은 산림과 농경지가 약 81% 이상을 차지하는 전형적인 농촌유역 특성을 보이고 있고, 토지이용현황은 Table 1에 나타내었다. 공단유역은 국가에서 조성한 시화공단 및 반월공단이 시화호 북측에 위치하고 있다. 시화공단은 시화지구 배후주거단지에서 배출되는 생활하수와 시화공단내 미처리된 공장폐수가 시화공단을 거쳐 시화호로 유입되고 있는 시화공단 1~4간선수로(1GS~4GS)가 있다. 반월공단에는 반월공단내의 지역을 지하관로로 통과하는 우수토구 7개가 있으며, 설계 당시에는 우수토구를 통해 우수만 시화호로 직접 유입하도록 되어 있었으나, 우수관로에 하수관로가 오접되고, 일부 공장에서는 우수관로를 통해 오·폐수를 무단 방류하는 일도 있어 기름유출 및 공장폐수 유출 사고 등의 위험에 항상 노출되어 있으며 시화호 유입 하천 중 오염이 가장 심한 곳이다.

2. 연구방법

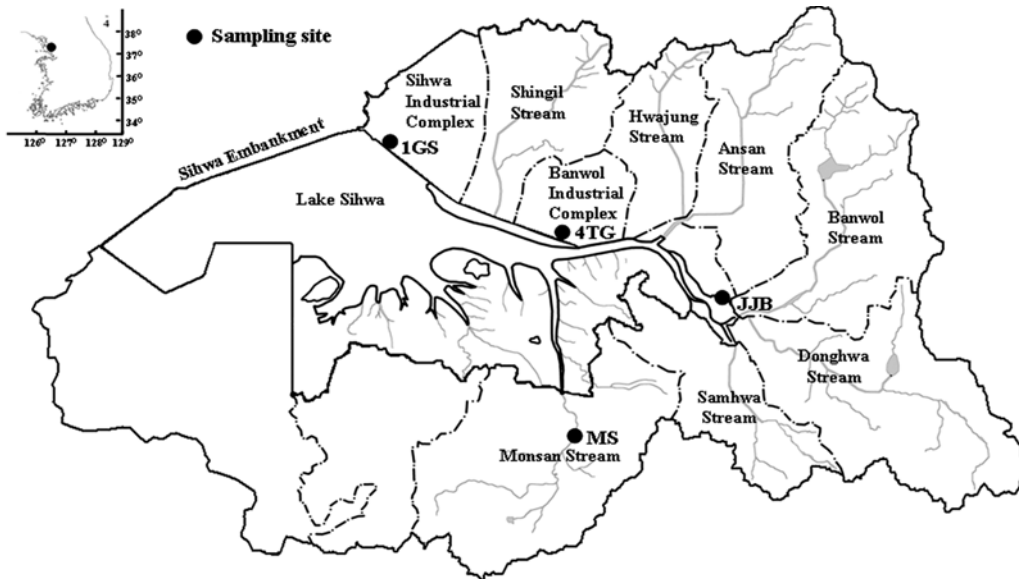


Fig. 1. Sampling sites in Lake Sihwa watershed.

Table 1. Land use conditions of in Lake Sihwa watershed

Site		Land use (%)					
		Dry paddy	Rice paddy	Forest field	Building site	Factory site	Others
Rural area	BW, DH, NJ	15.4	20.1	46.6	6.4	4.9	6.6
	MS	18.1	26.0	36.9	4.1	0.7	14.2

## 2.2. 조사 및 분석방법

본 연구에서는 시화호 소유역별 유역특성에 따른 강우시 유입하천수질조사를 위해 농촌유역에 위치한 반월·동화·남전천 합류지점인 장전보(JJB)와 문산천(MS), 공단유역에 위치한 시화 1간선수로(1GS)와 반월공단 4토구(4TG)에서 조사를 실시하였다. 조사지점 선정은 각 소유역 유역특성을 대표할 수 있는 환경적인 조건과 더불어 유량계, 수위계 및 자동채수기가 설치되어 있어 강우시 수질과 더불어 유량, 강우량, 수위 등 다양한 정보를 제공받을 수 있는 지점을 선정하였다. 시료채수는 직접 채수하는 것을 원칙으로 하였으며, 강우시 유량증가로 직접 채수가 어려운 지점은 자동채수기(RoboChem™ Auto sampler, PI-1224)를 이용하여 채수하였다. 강우시 채수방법은 각 소유역별 토지이용 현황 및 불투수율 등 유입하천 유역특성을 고려하여 채수 방법을 달리하여 채수하였다. JJB 및 MS는 20 mm 이하 강우사상에 대해서는 수질변화가 나타나지 않아 최소 20 mm 이상 강우시 시간별 연속조사를 실시하였고, 시료 채취도 초기강우 시작 후부터 1시간 간격으로 침두피크 후에는 2시간 간격으로 채수하여 수위가 평상시 수위로 될 때까지 조사하였다. 1GS 및 4TG는 10 mm 이하 강우에도 비점오염물질의 유출현상이 뚜렷하게 나타나고 침두유량도 달하기 이전에 침두피크가 나타나는 오염물질 농도곡선(pollutograph)을 보이는 특성이 있다. 이와 같은 유역특성을 고려하여 시료채취도 초기강우 시작 후, 10~30분 간격으로 조밀하게 조사하였고, 침두피크 후부터는 30~60분 간격으로 조사하였다. 유량측정은 유량계(Flo-Tote 3, Marsh Mcbirney)를 이용하였고, 수위측정은 초음파 수위계(SLM-1000, Sondar, CDMA 방식)를 이용하여 측정하였다. 강우시 유입하천 수질특성분석을 위해 SS, COD<sub>Mn</sub>, TN, TP는 Standard Method(APHA, 1998)와 수질오염공정시험방법(환경부, 2004b)에 준하여 분석하였다.

강우시 비점오염물질 유출특성 분석을 위해 각 소유역별 대표지점에서 강우사상에 따른 시간별 연속조사를 시행하였다. 강우에 의한 초기세척효과(First flush effect) 분석을 위해 무차원의 누적 유출량과 누적 부하량과의 비율에 의한 방법이 가장 많이 이용되고 있어, 본 연구에서도 이 방법을 이용하여 초기세척효과 분석을 하였고, 그 수학적 표현은 식 (1)과 같다.

$$M(V) = \frac{L(t)/\sum L(t)}{Q(t)/\sum Q(t)} \quad (1)$$

$$\frac{L(t)/\sum L(t)}{Q(t)/\sum Q(t)} > 1 : \text{Flushing} \quad (1-1)$$

$$\frac{L(t)/\sum L(t)}{Q(t)/\sum Q(t)} \leq 1 : \text{No flushing} \quad (1-2)$$

여기서, 강우기간 중 이산시간 동안의 유량 Q(t)에 대한 누

적유량  $\sum Q(t)$ 비인  $Q(t)/\sum Q(t)$ 를 x축으로 하고, 이산시간 동안의 유량 L(t)에 대한 누적유량  $\sum L(t)$ 비인  $L(t)/\sum L(t)$ 을 y축에 도시하였다. 누적유량-부하량비 곡선은 각 강우사상의 유출특성을 잘 보여주는데, 식 (1-1)과 같이 값이 1보다 큰 경우는 관측치가 이등분선(bisector) 위쪽에 위치하고, 초기세척효과가 나타나는 것을 의미한다. 식 (1-2)와 같이 그 반대의 경우에는 관측치가 이등분선 아래쪽에 위치하게 되며 초기세척효과가 없고 강우 후기에 오염물질 유출이 일어나는 것으로 해석하였다(Bedient et al., 1978; Gupta and Saul, 1996).

강우유출수의 수질농도는 강우사상 동안 변화폭이 매우 크기 때문에 오염부하량 산정을 위해서는 산술평균농도 이외에 유량을 고려한 농도의 개념이 필요하다. 따라서 강우사상별 오염물질 평균농도를 가장 잘 반영하는 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC) 및 지역평균농도(Site Mean Concentration, SMC)를 산정하였으며 그 수학적 표현은 식 (2)와 같고, SMC는 특정지역 EMC 값의 평균값으로 산정하였다.

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{t_r} C_t Q_t dt}{\int_0^{t_r} Q_t dt} \cong \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (2)$$

여기서, EMC : 유량가중평균농도(mg/L), M : 총유출오염부하량, V : 총유출부피, C<sub>t</sub> : 시간 t에서의 오염농도, Q<sub>t</sub> : 시간 t에서의 유출유량, Δt : 이산시간을 나타낸다(Charbeneau and Barretti, 1998; Sansalone and Buchberger, 1997).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 강우사상 특성분석

강우시 비점오염물질 유출특성 분석을 위한, 각 강우사상(Event)별 선행무강우일수(antecedent dry days, ADD), 유출계수(runoff coefficient), 강우강도(rainfall intensity) 등 강우특성을 Table 2에 나타내었다. 비점오염원 유출특성 분석시 주요인자인 유출계수는 해당유역에서 일정기간동안 내리는 강우량으로 인해 대상 유역의 출구를 통과하는 유출량에 대한 총강우량의 비율로서, 유출계수 값은 오염물질 유출량과 밀접한 관계를 가지고 있다(김진호 등, 2006). 조사기간 동안 강우사상(강우량은 자동채수기에 설치된 강우량계 자료 사용)에 따른 시화호 소유역별 유출계수 산정결과 JJB에서 0.38~1.23(Avg. 0.82)의 범위로 가장 높게 나타났다. 이는 대상유역이 농촌유역으로 불투수층 비율은 작지만, 유역면적이 넓고 상류유역에 2개 제수문이 있어 평상시 저장되어있던 물이 일정강우 이상시 제수문 개방으로 인해 일시적으로 유출되는 수문학적 특성에 따른 영향으로 사료된다. 반면, 토지피복 특성상 불투수율이 높은 지역인 1GS 및 4TG에서 유출계수가 각각 0.33~0.52(Avg. 0.42) 및 0.54~0.91(Avg. 0.70)의 범위로 유역면적 및 강우량 등을 고려할 때 높은 값을 나타냈다. 불투수성 포장비율이 높은

**Table 2.** Hydrologic description of runoff events in each site

Case	Site	Storm event	Event data (yy/mm/dd)	Total rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/hr)	Duration (hrs)	Antecedent dry days (ADD)	Runoff depth (mm)	Runoff coefficient
Rural area	JJB	Event 1	08/5/18	59	0.0~21.0(2.3)	26	17	22.3	0.38
		Event 2	08/6/2	40	0.0~17.0(2.1)	19	5	30.5	0.76
		Event 3	08/6/18	62	0.0~22.5(1.6)	38	9	55.0	0.89
		Event 4	08/7/19	180.5	0.0~20.0(4.1)	44	3	178.5	0.99
		Event 5	08/7/24	138.5	0.0~29.5(3.7)	38	4	171.5	1.23
		Event 6	08/8/12	45.3	0.0~28.5(1.4)	33	9	31.9	0.70
	MS	Event 1	08/5/18	63	0.0~39.0(3.3)	19	17	7.2	0.11
		Event 2	08/6/18	97	0.0~43.5(0.8)	23	9	14.1	0.15
		Event 3	08/7/13	14.5	0.0~7.5(0.8)	19	2	2.0	0.14
		Event 4	08/7/19	84.5	0.0~24.0(4.5)	19	3	13.9	0.16
		Event 5	08/7/24	128	0.0~39.0(6.7)	19	4	19.3	0.15
		Event 6	08/8/12	121.5	0.0~45.0(7.2)	17	9	17.1	0.14
Industrial area	1 GS	Event 1	08/3/29	10	0.0~3.0(1.3)	8	5	3.5	0.35
		Event 2	08/5/18	42.5	0.0~10.5(4.7)	9	4	13.9	0.33
		Event 3	08/5/28	24	0.0~9.5(2.0)	12	6	10.3	0.43
		Event 4	08/6/2	13	0.0~4.5(1.4)	9	4	6.7	0.52
		Event 5	08/7/16	33.5	0.0~15.5(3.7)	9	4	14.2	0.42
		Event 6	08/8/11	11.5	0.0~6.5(1.3)	9	8	5.5	0.48
	4 TG	Event 1	08/3/29	8.5	0.0~3.0(0.9)	10	5	7.7	0.91
		Event 2	08/4/9	9	0.0~3.0(1.0)	9	3	6.0	0.67
		Event 3	08/5/18	41	0.0~10.0(4.6)	9	17	22.1	0.54
		Event 4	08/5/28	24	0.0~8.5(2.7)	9	9	18.5	0.77
		Event 5	08/6/2	46.2	0.0~18.5(3.1)	15	5	27.5	0.59
		Event 6	08/8/15	13	0.0~7.5(1.4)	9	2	9.2	0.71

( ) is average value of rainfall intensity

지역은 유출계수가 크고 강우시 오염물질 유출량도 증가한다. 따라서 유출계수가 높게 나타난 JJB와 4TG에서 강우시 많은 양의 오염물질이 유출될 것으로 사료된다.

NOAA Costal Service Center에서는 비점오염에 의한 수질악화 유역 기준으로 불투수율 25%를 제시하고 있다 (NOAA, 2006). 농촌유역 대표지점인 JJB 상류유역 유입하천의 토지이용현황을 살펴보면 산림(46.6%)과 농경지(35.5%)가 대부분을 차지하는 전형적인 농촌유역의 특징을 보이고 있고, 불투수율도 약 21.1~27.4%로 NOAA에서 제시하는 기준치보다 낮게 나타났다. 반면, 공단유역 유입하천 불투수율은 약 62.6~65.6%로 NOAA에서 제시한 25%를 초과하는 수치로 해당 유역이 공단지역 토지이용에 의한 비점오염원 유발 가능성이 매우 높음을 알 수 있다.

### 3.2. 비점오염물질 유출특성

강우시 시간별 연속조사를 통해 강우사상 및 토지이용 특성에 따른 소유역별 유입하천의 비점오염물질 유출특성 조사결과를 Fig. 2~3에 나타내었다. JJB의 경우 초기강우 시작 시점으로부터 약 6 hr 후, 누적강우량이 70 mm인 시점에서 SS, COD<sub>Mn</sub>, TP가 첨두피크를 나타내는 것으로 조사되었다. 특히 SS가 814 mg/L까지 급격히 상승하고 탁도도 1,046 NTU까지 상승하는 유출특성을 보여 고탁도 입자성오염물질이 다량 시화호로 유입되는 현상을 보였다. 농촌유역 JJB에서 TN은 강우시 유출량 증가에 따른 농도 증가가 다른

오염물질과는 다르게 상관성을 보이지 않고 유출되는 것으로 조사되었다. SS, COD<sub>Mn</sub> 및 TP는 강우시 오염물질 농도 곡선(pollutograph)이 수문곡선(hydrograph) 형태와 유사한 경향을 보이고 있으나 오염물질 첨두피크가 수문곡선보다 선행하여 나타나는 특성을 보였다. MS의 경우는 초기강우 시작 후, 약 11시간이 경과한 시점에서 SS, COD<sub>Mn</sub> 및 TP가 첨두피크를 보여(누적강우량 76 mm) 강우영향에 따른 오염물질 유출시간 반응이 매우 늦게 나타났고, 수문곡선과 오염물질 농도곡선이 거의 유사한 형태를 보여 MS에서는 초기세척효과가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 같은 농촌유역 특성을 보이고 있는 하천이지만, 비점오염물질 유출특성에 차이가 나타나는 원인으로는 JJB 상류유역에서 유입되는 반월천 및 동화천 유입수가 시화호 인공습지로 유입될 수 있게 제수문이 상류유역에 조성되어 있어 강우시 일정수위 이상 될 경우 수문이 개방되며, 이시기에 제수문 침전지에 쌓여있던 오염물질이 유출되는 특성 때문으로 사료된다.

공단유역을 대표하는 1GS의 경우 SS, COD<sub>Mn</sub>, TN, TP 등 오염물질농도가 초기강우 시작 후 약 1 hr(누적강우량 11 mm) 안에 첨두피크를 보여 공단유역은 적은 강우시에도 오염물질 유출이 빠르게 나타나는 유출특성을 보였다. 초기강우 시작 후, 오염물질 농도는 급격히 상승하고 유량 증가로 인한 희석작용으로 인하여 빠르게 감소하는 경향을 보였다. 4TG의 경우 오염물질 유출특성은 시화공단 간선수로와 유사한 경향을 보였다. 4토구에서는 약 10 mm

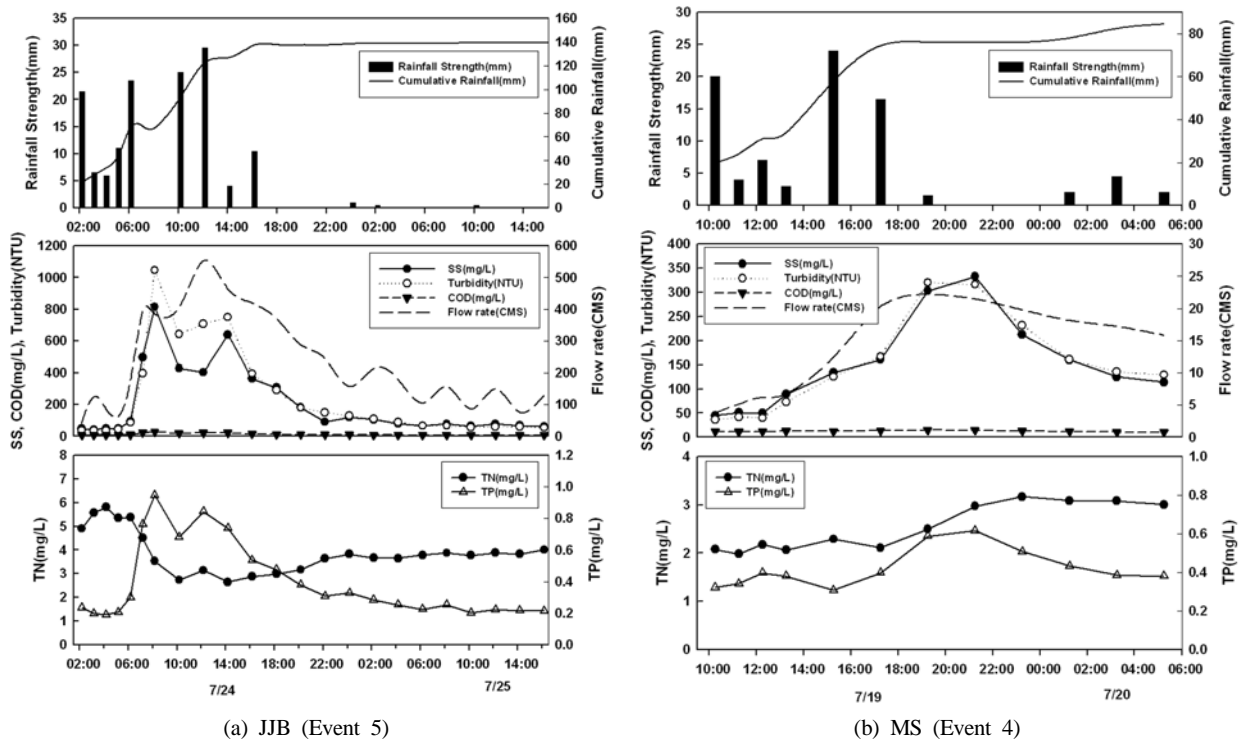


Fig. 2. Variation of pollutant concentration according to rainfall event (Rural area).

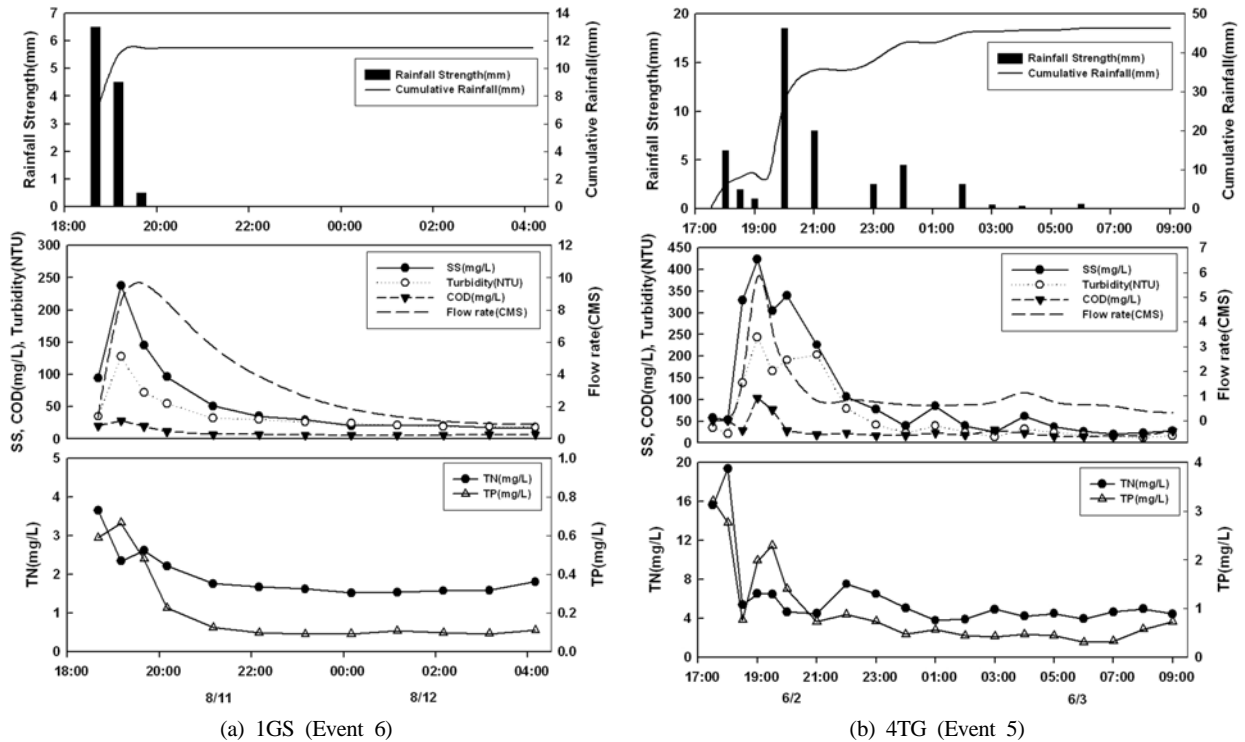


Fig. 3. Variation of pollutant concentration according to rainfall event (Industrial area).

내외의 적은 강우시에도 오염물질 유출이 초기강우 시작과 거의 동시에 나타났고, 토구 안에 축적된 오염물질과 공단유역에 적재되어있던 폐기물이 강우에 영향으로 유역으로 부터 강우 초기 일시적으로 유입되어 SS 423 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 103.6 mg/L, TN 19.3 mg/L, TP 3.21 mg/L로 다른 유역보다 고농도 오염물질이 유출되며 특히 유기물과 영

양염류가 농촌지역 보다 약 5배 이상 높은 농도로 유출되는 특성을 나타냈다.

### 3.3. 강우사상별 유량가중평균농도(EMC)

강우시 비점오염원 유출수의 유출특성을 가장 잘 반영하는 것으로 알려진 유량가중평균농도를 이용하여 농촌 및

**Table 3.** EMC and SMC in each sites during rainfall events

Case	Site	Storm event	SS (mg/L)	COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
Rural area	JJB	Event 1	137.2	15.4	5.90	0.41
		Event 2	366.5	20.8	4.24	0.45
		Event 3	230.4	16.2	3.43	0.45
		Event 4	598.4	23.6	3.55	0.58
		Event 5	316.4	14.8	3.58	0.52
		Event 6	60.4	9.1	3.36	0.29
	MS	SMC	284.9	16.7	4.01	0.45
		Event 1	60.6	25.7	2.93	0.26
		Event 2	67.3	16.5	2.47	0.38
		Event 3	48.6	17.8	3.62	0.74
		Event 4	184.2	12.6	2.69	0.45
		Event 5	210.0	11.6	2.66	0.38
Industrial area	1GS	Event 1	19.0	28.2	13.96	0.16
		Event 2	230.4	36.2	5.39	1.22
		Event 3	34.3	24.2	5.04	0.63
		Event 4	22.5	22.8	5.79	0.44
		Event 5	33.3	12.5	2.61	0.29
		Event 6	103.4	14.9	2.19	0.34
	4TG	SMC	73.8	23.1	5.83	0.51
		Event 1	96.0	55.9	11.23	0.35
		Event 2	164.7	58.5	26.64	3.69
		Event 3	278.1	72.9	8.15	2.92
		Event 4	326.5	137.8	15.54	3.69
		Event 5	246.2	52.8	5.68	1.33
		Event 6	87.3	28.3	5.39	0.80
		SMC	199.8	67.7	12.11	2.13

공단유역을 대표하는 각 하천별 비점오염물질 EMC 및 SMC 산정결과를 Table 3에 나타내었다. 각 소유역을 대표하는 4개 하천에서 EMC 산정결과, JJB에서 SS가 60~598 mg/L의 범위를 보여 조사대상 하천 중 가장 높게 나타났고, MS에서도 60~210 mg/L로 입자성오염물질 농도가 높게 산정되었다. 이는 농촌유역 토지이용 특성상 강우시 상류유역으로부터 입자성오염물질의 유입이 대량 발생하고, 유출량이 상대적으로 큰 결과에 따른 것으로 판단된다. 농촌유역 하천에서 강우특성 인자와 오염물질별 EMC와의 상관성을 살펴본 결과 SS, COD 및 TP는 강우량(rainfall) 및 강우강도(rainfall intensity)와 일정부분 상관성을 보이는 것으로 나타났으나, 선행무강우일수(ADD)와는 상관성을 보이지 않았다. 4TG에서 EMC 결과를 살펴보면 SS는 87~327 mg/L 범위, COD<sub>Mn</sub>는 28.3~137.8 mg/L 범위, TN 및 TP는 각각 5.4~26.6 mg/L 및 0.35~3.69 mg/L 범위를 나타내었다. 공단유역 하천에서는 강우시 공단유역으로부터 고농도의 오염물질 유출현상이 나타나 유기물 및 영양염류 EMC 산정결과가 높게 나타났다. 공단유역 하천 경우 강우량, 강우강도 및 선행무강우일수 등 강우특성 인자와 상관성이 크게 나타나지 않는 특성을 보였다. 이렇게 강우유출수내의 오염물질 농도가 강우량 및 선행무강우일수와 큰 상관성을

보이지 않는 것은 기존 연구에서도 보고된 바 있다(Charbeneau and Barrett, 1998; Gupta and Saul, 1996). 지역평균농도(SMC) 산정을 통한 오염물질 농도비교 결과, SS는 JJB>4TG>MS>1GS 순으로, COD<sub>Mn</sub>는 4TG>1GS>JJB>MS 순으로, TN 및 TP는 4TG>1GS>JJB>MS 순으로 나타났다. 본 결과를 통해서도 입자성오염물질은 농촌유역 하천을 통해, 유기물 및 영양염류는 공단유역 하천을 통해 강우시 높은 농도의 오염물질들이 유출되는 특성을 보여주고 있다.

### 3.4. 초기세척효과(First flush effect)

일반적으로 침투유출량 발생시점과 동일한 시점에 침투농도값이 발생하거나 유역 및 강우조건에 따라 침투유출량 발생시점 전·후에 침투농도치가 나타난다. 초기세척효과 발생유무는 유역면적, 강우강도, 강우지속시간, 불투수층면적, 선행무강우일수 등에 영향을 받으며 수질항목에 따라 다른 경향을 나타낸다(Deletic, 1998). 강우초기에 오염물질 농도가 급격하게 증가한 후 서서히 감소해 가는 초기세척효과를 평가하는 방법은 다양하다. 본 연구에서는 앞에서 언급했던 것처럼 누적유출량비에 대한 누적오염부하량비인 cumulative load curve ratio를 이용하여 평가하였고, Fig. 4~7에 결과를 나타내었다.

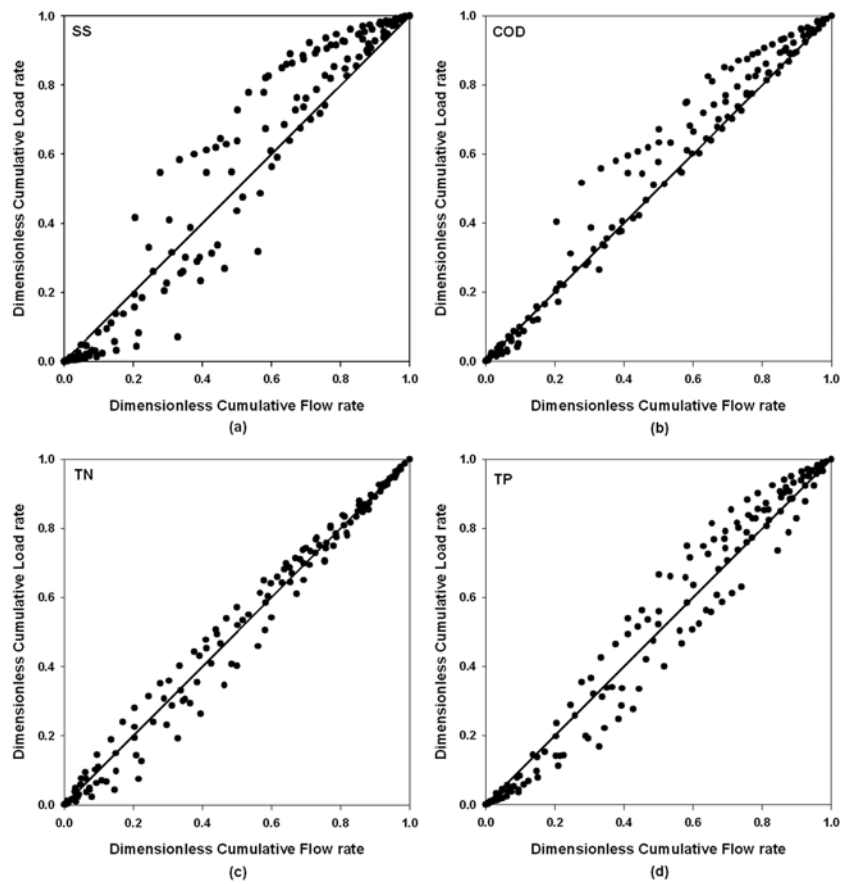


Fig. 4. Cumulative mass and volume curves for (a) SS, (b) COD, (c) TN and (d) TP in JJB (Rural area).

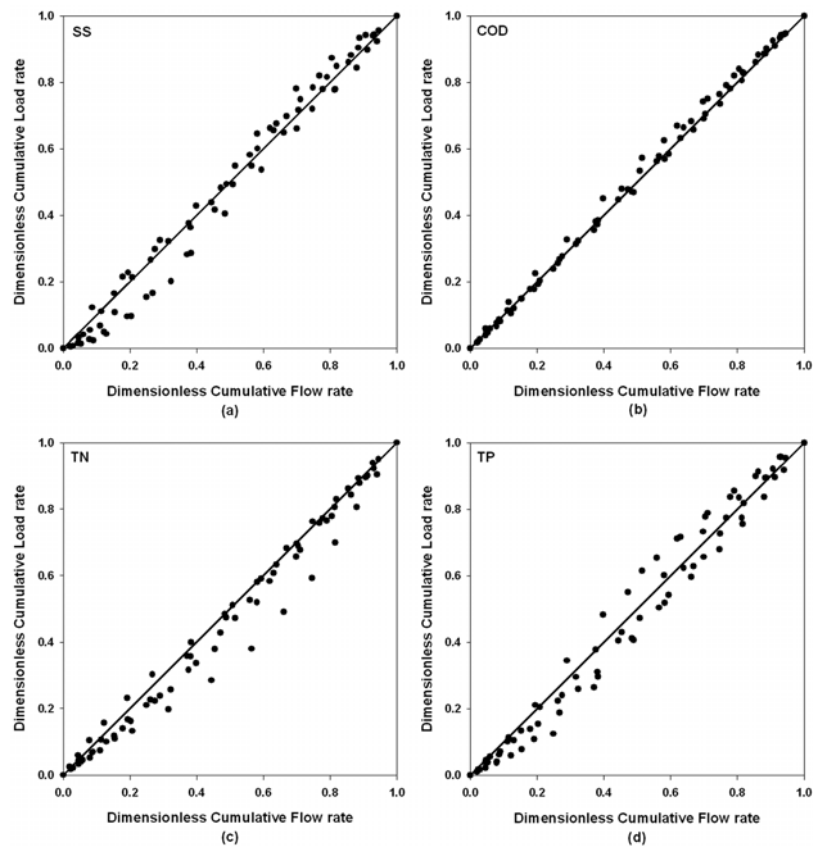


Fig. 5. Cumulative mass and volume curves for (a) SS, (b) COD, (c) TN and (d) TP in MS (Rural area).

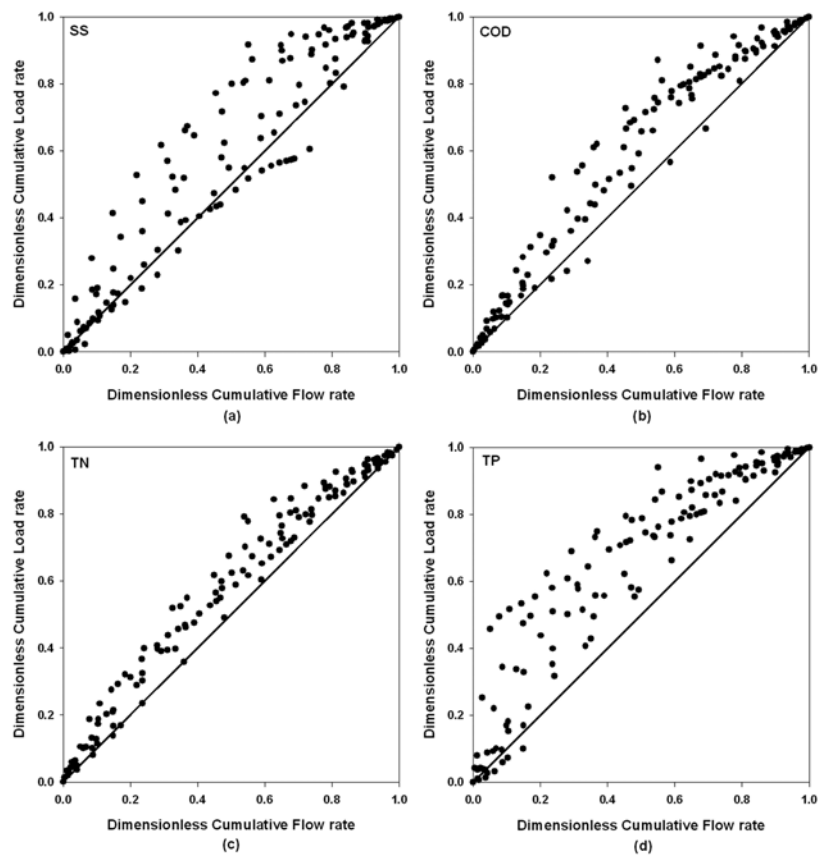


Fig. 6. Cumulative mass and volume curves for (a) SS, (b) COD, (c) TN and (d) TP in 1GS (Industrial area).

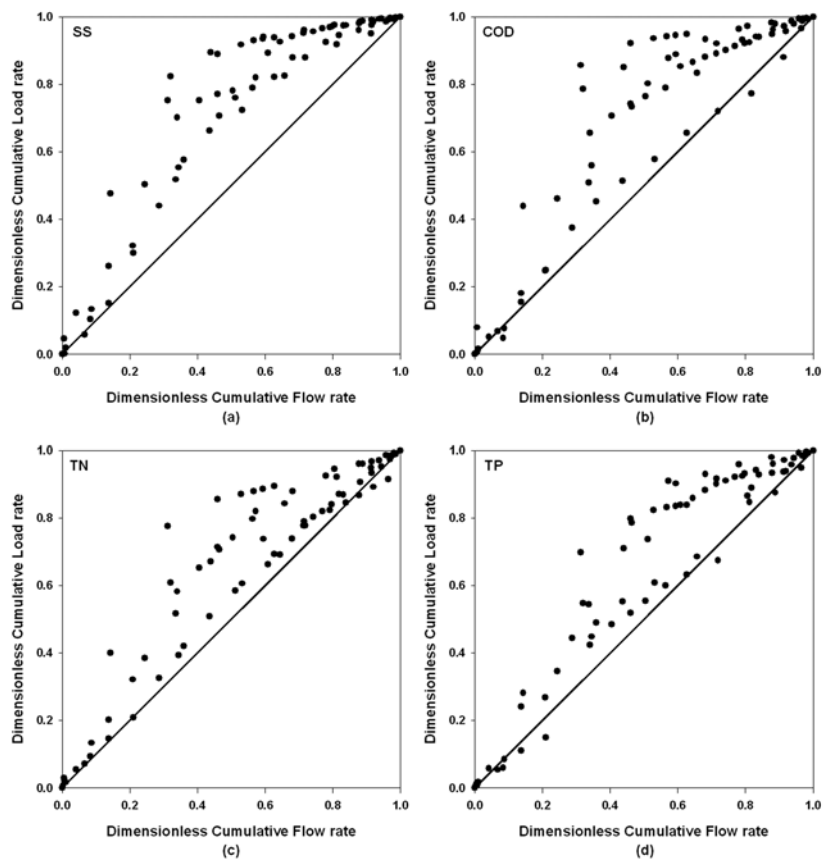


Fig. 7. Cumulative mass and volume curves for (a) SS, (b) COD, (c) TN and (d) TP in 4TG (Industrial area).



JJB는 상류유역 수문학적 특성상 SS, COD<sub>Mn</sub> 및 TP는 이등분선 위에 관측치가 많이 분포하는 특성을 보여 초기 세척효과가 나타나는 것으로 분석되었다. TN은 유출량 증가와 오염물질 유출과 상관성이 없어 초기유출 현상이 뚜렷하게 나타나지 않았다. MS의 경우 전형적인 농촌유역 특성을 갖고 있고 간석지에 위치해 있어 지세가 완만한 지형학적 특성을 보이고 있다. 대부분 관측치가 이등분선상에 또는 아래에 위치하는 것으로 나타나, 오염물질 유출이 수문곡선과 일치하는 특성과 후기 유출현상이 나타나는 것으로 나타났다.

공단유역 하천의 경우 유역 대부분이 콘크리트화되어 있어 불투수층 면적 비율이 높아 강우유달시간이 짧고, 표면 유출율이 큰 특성을 갖고 있다. 또한 유역면적이 작아 강우초기에 유량 및 비점오염물질이 일시적으로 다량 유출되는 초기세척효과가 강하게 나타나는 경향이 있다. IGS와 4TG에서는 SS, COD<sub>Mn</sub>, TN 및 TP 모두 초기세척효과 분석결과 관측치 대부분이 이등분선 위에 위치하고 또한 이 관측치가 이등분선과 상당히 떨어져 있는 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 오염물질 유출이 강우초기에 많이 일어나고 시간이 경과할수록 유출부하량은 감소함을 의미하며, 초기세척효과가 뚜렷하게 나타나고 있다고 평가할 수 있다. 특히 공단유역에서 발생하는 비점오염물질은 단위면적당 오염부하가 크고 각종 유독성 물질을 포함하고 있는 고농도 오염물질이기 때문에 시화호 수질에 큰 악영향을 미칠 수 있어 집중적인 관리가 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 시화호 소유역별 유역특성에 따른 각 유입하천의 강우사상별 비점오염물질 유출특성 분석을 위해 강우시 시간별 연속조사, EMC산정 및 First flush effect 분석 등을 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 농촌유역 특성을 대표하는 JJB와 MS의 경우 각 하천별 특성에 따라 강우시 비점오염물질 유출특성에 차이를 나타냈다. JJB의 경우 고농도 입자성오염물질 다량 유입 현상이 나타났고, SS, COD<sub>Mn</sub> 및 TP는 초기세척효과가 나타났으나, TN은 초기유출현상이 나타나지 않았다. MS는 첨두피크를 나타내는 시점이 약 11시간으로 강우 영향에 따른 오염물질 유출현상이 늦게 나타나, 초기유출현상을 나타나지 않았다.
- 2) 시화호 소유역별 유역특성에 따른 EMC 산정결과 유입 하천 유역특성에 따라 강우특성 인자와의 상관성 여부도 다르게 나타났고, 같은 유역특성을 갖고 있는 하천에서도 강우 특성에 따라 EMC 산정결과가 넓은 범위를 나타내는 결과를 보였다. EMC 산정결과, SS는 JJB에서 가장 높게 나타났고, COD<sub>Mn</sub>, TN 및 TP는 4TG에서 높게 나타났다.
- 3) 공단유역 특성을 대표하는 IGS 및 4TG에서는 10 mm 내외의 적은 강우시에도 빠른 시간 안에 유기물 및 영양염류 등 오염물질이 고농도로 유출되는 현상을 보였

다. 초기유출현상도 매우 강하게 나타나 강우초기 대부분의 오염물질이 유출되는 특성을 나타냈다.

#### 사 사

본 연구는 한국수자원공사 “시화호 유역 수질오염원 전수조사” 연구과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 국토해양부(2008). 시화호 해양환경 개선 사업 보고서.
- 김이형, 이선하(2005). 주차장 및 교량지역의 강우유출수내 비점오염물질의 특성 및 동적 EMCS. 수질보전 한국물환경학회지, 21(3), pp. 248-255.
- 김진호, 한국현, 이종식(2006). 농촌유역의 강우사상별 농업 비점원오염물질 유출특성. 수질보전 한국물환경학회지, 24(1), pp. 69-77.
- 이병수, 정용준, 박무중, 길경익(2008). 경안천 유역 농촌지역의 비점오염원 배출 특성에 관한 연구. 수질보전 한국물환경학회지, 24(2), pp. 169-173.
- 이현동, 안재환, 배철호, 김윤지(2001). 강우시 유출부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정. 수질보전 한국물환경학회지, 17(3), pp. 313-326.
- 최중수(2003). 도시지역의 비점오염원 유출특성과 적정 처리방안에 관한 연구. 박사학위논문, 강원대학교.
- 한국수자원공사(2006). 시화호 수질개선대책에 따른 수질회복 추이에 관한 연구 보고서.
- 해양수산부(2006). 시화호 해양환경개선 연구용역 보고서.
- 환경부(2004a). 관계부처합동 「물관리 종합대책」의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합 대책.
- 환경부(2004b). 수질오염공정시험방법.
- APHA (1998). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 20th edition, Washington D.C., USA.
- Bedient, P. B., Harned, D. A., and Characklis, W. G. (1978). Stormwater analysis and prediction in Houston. *Journal of the Environmental Engineering, ASCE*, 104(EE6), pp. 1087-1100.
- Bedient, P. B., Lambert, J. L., and Springer, N. K. (1980). Stormwater pollution load-runoff relationship. *J. WPCF*, 52(9), pp. 2396-2404.
- Charbeneau, R. J. and Barrett, M. E. (1998). Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads. *Water Environment Research*, 70(7), pp. 1295-1302.
- Deletic, A. (1998). The first flush load of urban surface runoff. *Water Research*, 32(8), pp. 2462-2470.
- Gupta, K. and Saul, A. J. (1996). Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. *Water Research*, 30(5), pp. 1244-1252.
- Ichiki, A. and Yamada, K. (1999). Study on characteristics of pollutant runoff into lake Biwa Jpan. *Water Sci. Technol.*, 39(12), pp. 17-25.
- Kato, T., Kuroda, H., and Nakasone, H. (2009). Runoff characteristics of nutrients from an agricultural watershed with intensive livestock production. *Journal of Hydrology*, 368, pp. 79-87.
- Lee, C. S., Seo, G. T., Lee, J. H., Yoon, Y. S., You, J. J., and Sin, C. K. (2008). Long term monitoring of storm surface runoff from urban pavement road in Korea. *Korean Society*

- of Environmental Engineers*, **13**(4), pp. 184-191.
- NOAA(2006). *National Coastal Management Measurement System*, NCMPS.
- Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G. (1997). Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, **123**(2), pp. 134-143.
- Zhang, Z., Fukushima, T., and Onda, Y. (2008). Characterisation of diffuse pollutions from forested watersheds in Japan during storm events-Its association with rainfall and watershed features. *Science of the Total Environment*, **390**, pp. 215-226.