

연구논문

## 산림 활엽수 지역의 강우유출수 유출특성 및 EMC 산정

강창국\* · 이소영\* · 조 안\* · 이재운\*\* · 김이형\*

공주대학교 건설환경공학부\*, 금강물환경연구소\*\*

(2009년 10월 17일 접수, 2009년 12월 07일 승인)

### Determination of EMC and Washoff Characteristics of Stormwater Runoff from Broad-Leaved Forest Areas

Kang, Chang Guk\* · Lee, Soyoung\* · Gorme, Joan Barniso\* ·  
Lee, Jea Un\*\* · Kim, Lee-Hyung\*

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan, Chunanamdo 331-717, Korea\*  
Geum River Environment Research Center, Chungnamdo, Korea\*\*

(Manuscript received 17 October 2009; accepted 7 December 2009)

### Abstract

The water of rivers and lakes are affecting by point and nonpoint source pollutions. The point source pollution can be controlled by establishing the treatment plants. However, nonpoint source pollution by various human activities is not easy to be controlled because it is difficult to determine the exits of the water flow and have many exit points. Due to contribution of nonpoint source pollution, the achievement ratio of water quality in rivers and lakes is not high. TMDL is the outstanding water quality control policy because all of the pollutant loadings from the watershed area are counting on the input loads. Our aqua-ecosystem has self-purification process by biological, physical and ecological processes. The self-purification process can remove the pollutant load from background concentrations. Usually forest area is main source of background concentrations. In Korea, about 70% of the national boundary area consists of mountains. This study is conducting as part of long-term monitoring to determine the Event Mean Concentration during a storm. The monitoring was performed on a broad-leaved tree area.

Keywords : Non-point source, Forest area, Background concentration, EMC

## 1. 서론

수생태계에 있어 수질오염을 야기하는 오염원은 크게 점오염원과 비점오염원으로 나눌 수 있다. 비점오염원은 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로서 불특정장소에서 불특정하게 수질오염물질을 배출하는 오염원을 말한다(환경부, 2006). 이러한 비점오염원으로부터 배출되는 비점오염물질은 건기 시에 토양이나 도로, 대기, 건물 외벽, 낮은 유속의 하수관거 등에 축적되어 있다가 강우 시에 강우 유출수와 함께 수계로 유입된다. 이렇게 수계로 유입되는 비점오염물질의 농도예측은 점오염원과는 다르게 불확실성 때문에 예측이 쉽지 않으며 유역의 형상, 토지이용, 강우특성 및 기타 환경적 요인과 연관성이 깊다(김이형 등, 2004).

최근 몇 년 전까지만 하더라도 우리나라의 수질 규제는 주로 점오염원에 중점을 두어 시행되어왔다. 이러한 정부의 노력으로 하천과 호소에 있어서 수질 개선은 어느 정도 이루어졌으나 더 이상의 진전이 이루어지지 않은 시점에서 비점오염원의 관리의 중요성이 대두되었다. 실제로 환경부가 비점오염원에 의한 수계의 영향을 파악한 결과 4대강 수계의 비점오염원 기여율이 1998년 기준으로 22~37% 정도의 범위를 차지하고 있으며, 향후 2015년에는 65~70%까지 높아질 것으로 예측하고 있다(환경부, 2004). 따라서 환경부는 점오염원과 더불어 비점오염원을 관리하기 위해 유역으로부터 유입되는 오염물질의 총량을 규제하는 오염총량관리제(Total Pollution Load Management System)를 도입하였다. 이러한 오염총량관리제의 성공적인 시행을 위하여 비점오염원은 필수적으로 연구 및 관리해야 할 사항이다. 그러나 현재 우리나라는 기초 자료 및 모니터링 결과의 부족으로 비점오염원 관리에 어려움이 겪고 있다(김이형 등, 2005).

특히 도시와 도로와 같은 포장지역의 경우 초기 강우에 고농도의 오염물질이 유출되기 때문에 이에 대한 연구는 어느 정도 진행되었지만 산림지역에 대한 연구는 미진한 상태이다. 산림 지역의 경우 도시 및 축산 지역에 비하여 강우유출수의 농도는 낮

지만 유량적인 측면에 보았을 때 전체 수계에 대한 부하량 기여도는 매우 높다고 볼 수 있다. 또한 우리나라 국토의 65% 이상이 산림으로 이루어져 있으며, 산림지역은 자연 상태 하천의 배경농도를 형성하기에 산림지역의 배출량과 패턴에 대한 연구가 중요하다(김건하 등, 2005). 따라서 본 연구는 장기 모니터링의 일환으로 산림지역에 대한 비점오염물질 유출 특성을 파악하기 위하여 모니터링을 실시하였으며, 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 산정하였고 강우특성과 오염물질간의 상관성을 분석하였다. 이러한 결과는 향후 산림지역의 비점오염원 관리를 위한 과학적 기반을 구축하고 부하량 및 월단위 산정에 기여될 것으로 사료된다.

## II. 연구방법

### 1. 모니터링

본 연구는 산림지역에 대한 유출특성 및 기초자료 수집을 위해 Fig. 1에 나타난 바와 같이 충남 공주시 반포면 도남리 공주산림박물관내에 위치한 활엽수림지역을 모니터링 지점으로 선정하였으며, 자세한 개황은 Table 1에 나타내었다. 모니터링 지점의 유역면적은 21.7 ha로 활엽수가 지배적이며, 3영급 천연림에 속한다. 유역의 표고는 40 m에서 310 m이며, 유역의 형상은 북서와 남동쪽으로 약간 긴듯한 모양이다. 경사는 5~36°의 분포로 북서쪽으로 낮고 완만한 지대와 동남쪽으로 높고 가파른 지대가 존재한다. 모니터링은 2008년 4월부터 8월까지 총 18회에 걸쳐 이루어졌으며, 현재에도 진행 중에 있다. 유량 측정은 현장에 설치되어 있는 자동유량계를 통하여 1분 단위로 측정하였으며, 시료 채취는 시료의 변질을 막기 위하여 냉장기능이 있는 자동채수기(ISCO 6712FR)를 이용하였다. 시료채취는 유출이 일어난 후 첫 번째 시료를 채취하였으며, 이후 2시간 동안은 15분 간격, 2시간 이후부터 12시간까지는 1시간 간격, 12시간 이후부터는 4시간 간격으로 하되, 강우지속시간 및 강우강도를 고

Table 1. Characteristics of monitoring site

임 상	면 적	표 고	경 사	모 암	토 성	방 수로	비 고
활엽수림	21.7ha	40~310 m	28° 이하 5~36°	화 강 편마암	사양토	90° V	3영급 천연림

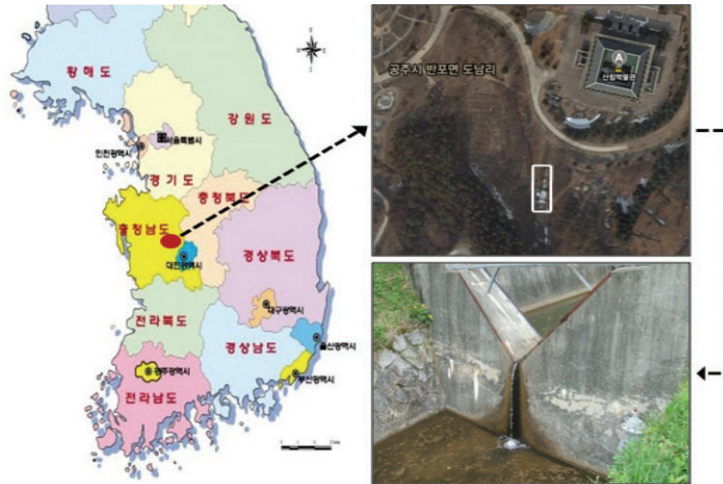


Fig. 1. Monitoring location

려하여 시료 채취 간격을 조정하였다.

## 2. 분석 방법 및 항목

자동채수기로부터 채취된 시료는 시료 채취가 종료된 직후 실험실로 이송되어 수질오염공정시험법(환경부, 2008)에 준하여 수질분석이 이루어졌다. 수질 분석 항목으로는 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, DOC, SS, TN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub>-P로 총 9가지 항목이며, 이와 더불어 강우전 건기일수(Antecedent Dry Day, ADD), 총강우량, 강우지속시간, 강우강도 및 유출률(flow rate) 등을 조사하였다.

## 3. EMC 산정

비점오염물질의 농도 산정에 있어서 단순히 산술 평균농도로 계산하는 경우 실제 농도와 큰 농도 차이를 보일 수 있기에 정확한 부하량 산정을 위해서는 유출유량을 고려한 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 산정하여야 한다(Ujevic *et al.*, 1998; Deletic and Mahsimivic, 1998). 따라서 산림지역으로부터 유출되는 강우유

출수의 유출특성을 파악하기 위하여 아래의 식 (1)을 이용하여 EMC를 산정하였으며, SYSTET 9.0을 통하여 통계분석을 실시하였다. 여기서 C(t)와 Q<sub>TRu</sub>(t)는 강우 지속시간 t에 대한 오염물질의 농도와 유출율을 의미한다.

$$EMC \text{ (mg/L)} = \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} \quad (1)$$

$$= \frac{\int_0^T C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt}$$

## III. 연구결과 및 고찰

### 1. 모니터링 결과

모니터링은 2008년 4월부터 8월까지 총 18회가 수행되었으며, Table 2는 강우사상에 대한 모니터링 결과를 나타낸 것이다. 강우 전 건기일수는 1~22일, 총강우량은 2.0~97.5 mm, 강우지속시간은 4~21 hr, 평균강우강도는 0.40~10.83 mm/hr의 범위로 나타났으며, 전체적으로 다양한 범위를 나타내는 것으로 분석되었다.

Table 2. Event table in monitoring site

입상	모니터링 일자	강우전 건기일수 (day)	총 강우량 (mm)	강우 지속시간 (hr)	강우 강도 (mm/hr)
활엽 수림	2008-04-09	2	21.2	21	1.01
	2008-04-22	11	9.0	13	0.69
	2008-05-18	4	42.7	4	10.68
	2008-06-28	9	5.9	6	0.98
	2008-08-13	1	14.4	6	2.40
	2008-09-01	8	7.3	4	1.83
	2008-10-22	22	9.2	21	0.44
	2009-03-12	6	22.0	14	1.57
	2009-04-24	8	2.0	5	0.40
	2009-05-02	8	6.0	6	1.00
	2009-05-11	9	23.5	11	2.14
	2009-05-21	4	33.0	20	1.65
	2009-06-09	6	11.0	8	1.38
	2009-06-20	10	24.5	16	1.53
	2009-06-29	7	7.5	6	1.25
	2009-07-18	1	14.0	6	2.33
2009-07-21	2	97.5	10	9.75	
2009-08-11	3	89.0	9	9.89	

## 2. 수리-수문 농도 곡선

Fig. 2는 모니터링 지점에 대한 수리-수문 농도 곡선으로서 시간에 따른 유출량 및 오염물질의 농도 변화를 나타낸 것이다. 여기서 수평축은 강우지속시간을 나타내며, 수직축은 강우유출수의 농도 및 유출량을 의미한다. 분석 결과, 2009년 5월 21일의 경우, 대부분의 오염물질 농도는 유출량이 증가함에 따라서 함께 증가하는 것으로 나타났다. 또한 2009년 7월 21일의 경우, NO<sub>3</sub>-N을 제외한 모든 수질 분석 항목에서 샘플링 시작 후 30분까지 유량이 증가함에 따라서 농도가 급격히 증가하였으며, 샘플링 시작 후 45분경 유량이 첨두유량에 도달함과 동시에 가장 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 높은 농도는 9.75 mm/hr에 달하는 높은 강우강도에 기인한 것으로 판단된다.

## 3. EMC 산정 및 통계 분석

산림지역으로부터 유출되는 강우유출수의 유출 특성을 파악하기 위하여 식 (1)을 적용하여 EMC를

산정 한 후 통계분석을 실시하였으며, Table 3에 정리하여 나타내었다. EMC 산정 결과, BOD<sub>5</sub>의 평균 EMCs는 1.53 mg/L, COD<sub>Mn</sub>은 3.86 mg/L, TN은 2.00 mg/L, TP는 0.202 mg/L로 나타났으며, SS의 평균 EMC는 31.7 mg/L로 비교적 높은 값을 나타내었다. 또한 BOD<sub>5</sub>의 95% 신뢰구간은 0.95~2.12 mg/L, COD은 2.28~5.43 mg/L, TN과 TP는 각각 1.57~2.44 mg/L, 0.083~0.322의 범위를 나타내었으며, SS는 1.0~62.5 mg/L로 농도 변화의 폭이 큰 것으로 나타났다. 이러한 농도범위는 여중현과 김건하(2005)의 연구결과와 비교해 보았을 때 SS를 제외한 모든 항목에서 비슷한 범위를 나타내는 것으로 분석되었다. 특정구역에서 발생하는 강우유출수는 토지이용, 구역면적, 구역경사 등과 같은 구역특성 이외에 건기일수, 강우지속시간, 강우량 및 강우강도 등의 강우특성의 영향을 받는다(여중현 등, 2005). 따라서 강우강도가 셀수록 토양의 오염물질을 이탈시켜 유출될 수 있게 하므로 순간강우강도가 높은 경우 다량의 토사가 유입될 수 있기에 SS의 농도가 크게 나타난 것으로 판단된다.

## 4. EMC 및 강우특성과의 상관성

산림지역으로부터 유출된 오염물질과 강우특성 간의 상관성을 파악하기 위해 오염물질별로 산정된 EMC와 각 강우사상의 모니터링 결과를 이용하여 상관성 분석을 실시하였다. Table 4는 Pearson correlation matrix를 나타낸 것으로 각각의 수질 오염 항목에 대하여 건기일수(ADD), 총강우량(RAINFALL), 강우지속시간(STDURATION), 평균강우강도(AVERAINTEN)와의 상관관계를 나타내고 있다. 대각선 아래는 상관계수(R. correlation coefficients)를 나타낸 것이고, 대각선 위는 유의수준(P value, confidence values)을 나타낸 것이다. 강우특성인자와 오염물질과의 상관성을 살펴보면 총강우량의 경우 BOD, COD, DOC와 상관성이 높은 것으로 나타났으며, 평균 강우강도는 BOD, COD, DOC, SS 및 TP와 상관성이 매우 높은 것

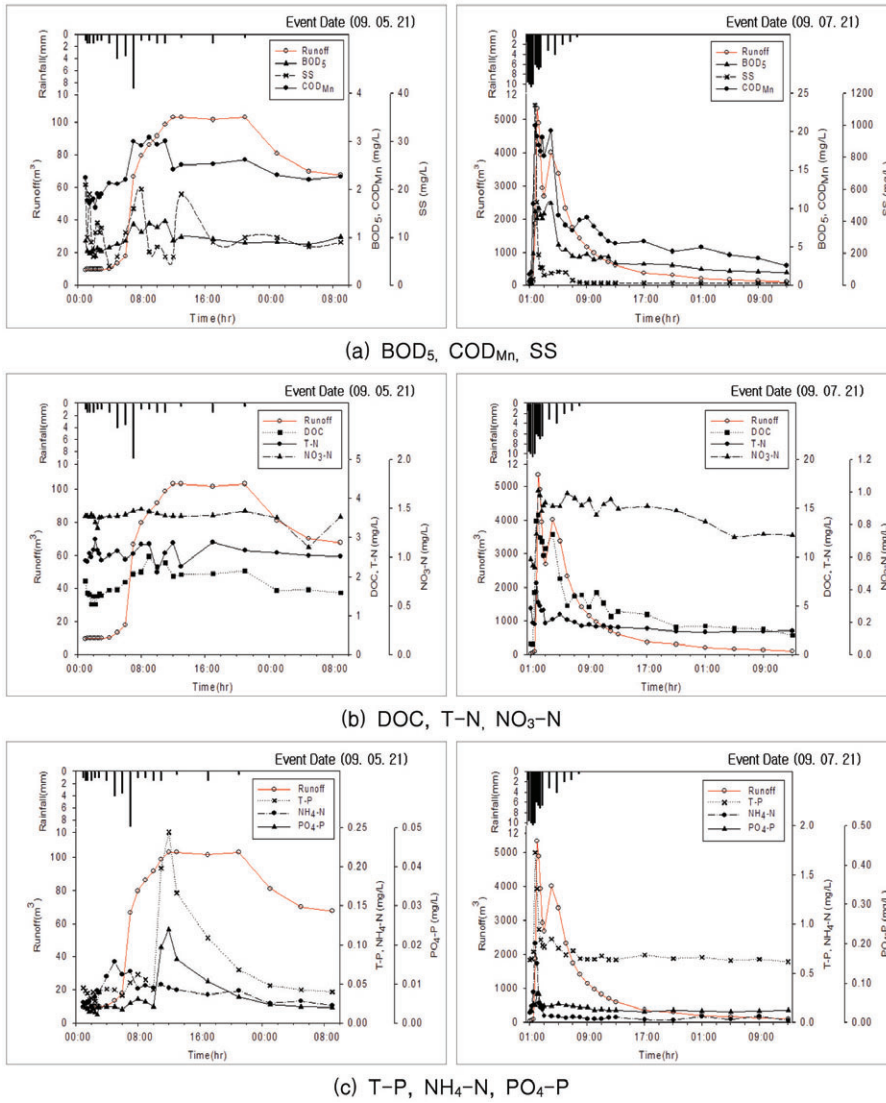


Fig. 2. Hydrograph and pollutograph of the selected rainfall events (09.05.21 and 09.07.21)

Table 3. Statistical summaries of EMCs

Parameters	No. of cases	Minimum	Maximum	Mean	95% CI Upper	95% CI Lower	S.D.
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	18	0.80	5.90	1.53	2.12	0.95	1.18
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	18	1.70	13.40	3.86	5.43	2.28	3.17
DOC (mg/L)	18	1.30	7.60	2.49	3.26	1.73	1.54
SS (mg/L)	18	3.10	291.80	31.70	62.50	1.00	66.50
TN (mg/L)	18	0.94	3.91	2.00	2.44	1.57	0.87
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	18	0.01	0.370	0.08	0.12	0.04	0.08
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	18	0.15	1.44	0.75	0.93	0.57	0.36
TP (mg/L)	18	0.01	0.78	0.20	0.32	0.08	0.24
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	18	0.00	0.08	0.02	0.04	0.01	0.03

주) CI= Confidence Interval, S.D.= Standard Deviation, BOD<sub>5</sub>= Biochemical Oxygen Demand, CODMn= Chemical Oxygen Demand with Mn, DOC= Dissolved Oxygen Demand, SS= Suspended Solids, TN= Total Nitrogen, TP= Total Phosphorus

Table 4. Relationships between affecting parameters of EMCs

	ADD	RAINFALL	STDURATION	AVERAINTEN	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Mn</sub>	DOC	SS	TN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	TP	PO <sub>4</sub> -P
ADD		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RAINFALL	-0.41		1.00	0.00	0.00	0.29	0.07	1.00	1.00	1.00	1.00	0.55	1.00
STDURATION	0.32	0.07		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AVERAINTEN	-0.44	0.89	-0.25		0.01	0.00	0.28	0.08	0.75	1.00	1.00	0.22	1.00
BOD <sub>5</sub>	-0.38	0.81	-0.08	0.78		0.02	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.13	1.00
COD <sub>Mn</sub>	-0.30	0.65	-0.18	0.86	0.77		0.53	0.00	0.02	0.03	1.00	1.00	1.00
DOC	-0.23	0.71	-0.06	0.65	0.84	0.61		1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00
SS	-0.24	0.36	-0.30	0.71	0.45	0.89	0.34		0.47	0.00	1.00	1.00	1.00
TN	-0.39	0.53	0.22	0.59	0.60	0.77	0.38	0.62		1.00	0.01	1.00	1.00
NH <sub>4</sub> -N	-0.08	0.17	-0.28	0.52	0.26	0.75	0.11	0.90	0.48		1.00	1.00	1.00
NO <sub>3</sub> -N	-0.55	0.39	0.17	0.44	0.33	0.50	0.17	0.47	0.78	0.40		1.00	1.00
TP	-0.38	0.61	-0.35	0.66	0.69	0.53	0.84	0.35	0.28	0.18	0.29		0.37
PO <sub>4</sub> -P	-0.37	0.31	-0.49	0.54	0.32	0.47	0.51	0.56	0.09	0.28	0.13	0.63	

로 분석되었다. 또한 오염물질간 상관성을 분석한 결과, BOD<sub>5</sub>와 DOC, COD<sub>Mn</sub>와 SS, DOC와 TP의 상관관계수 값이 0.8 이상으로 나타나 오염물질간의 상관성은 매우 높은 것으로 분석되었다. 또한 P value 값이 0.0~0.3의 범위를 보이며, 앞서 언급한 높은 상관관계가 유의수준을 충분히 만족하는 것으로 분석되었다.

#### IV. 결론

산림지역으로부터 유출되는 강우유출수는 도시 및 축산지역에 비해 농도가 낮아 수질관리에 대한 인식이 떨어지지만 지표수의 배경농도이기 때문에 중요하다. 따라서 본 연구는 강우시 산림지역(활엽수림)으로부터 발생하는 강우유출수의 유출특성과 각각의 오염물질에 대한 EMC 및 상관성을 분석하였다. 이러한 결과는 비점오염물질의 원단위 산정을 위한 기초자료로 활용될 것이며, 결론은 다음과 같다.

1. 모니터링 결과, 강우 전 건기일수는 1~22일, 총강우량은 2.0~97.5 mm, 강우지속시간은 4~21 hr, 평균 강우강도는 0.4~10.83 mm/hr의 범위로 나타났으며, 전체적으로 다양한 범위를 나타내었다.
2. 수리-수문 농도곡선을 분석한 결과, 활엽수림

지역의 강우유출수 농도는 대체적으로 유출량이 증가함에 따라 높아졌다가 점차적으로 감소하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

3. 산정된 EMC에 대한 통계분석을 실시한 결과, BOD<sub>5</sub>의 평균 EMC는 1.53 mg/L, CODMn은 3.86 mg/L, TN은 2.00 mg/L, TP는 0.202 mg/L, SS는 31.7 mg/L로 나타났다. 모든 오염물질의 EMC는 임야유역으로부터 배출되는 EMC와 비교시 SS를 제외한 모든 항목에서 비슷한 범위를 나타내는 것으로 분석되었다.
4. 강우특성 및 오염물질간의 상관성을 분석한 결과, 총강우량의 경우 BOD<sub>5</sub>, CODMn, DOC와 상관성이 높은 것으로 분석되었으며, 평균 강우강도는 BOD<sub>5</sub>, CODMn, DOC, SS, TP와 상관성이 높은 것으로 분석되었다. 또한 오염물질간 상관성을 분석한 결과 BOD<sub>5</sub>와 DOC, CODMn와 SS, DOC와 TP가 0.8 이상의 R 값을 나타내며 매우 높은 상관관계를 나타내었다.

#### 참고문헌

- 김건하, 권세혁, 2005, 농지-임야 유역의 비점원 발생 BOD 부하의 추정, 한국물환경학회지,

- 21(6), 617-623.
- 김이형, 강주현, 2004, 고속도로 강우 유출수내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정, 한국물환경학회지, 20(6), 631-644.
- 김이형, 이선하, 2005, 주차장 및 교량지역의 강우 유출수내 비점오염물질의 특성 비교 및 동적 EMCs, 한국물환경학회지, 21(3), 248-255.
- 여중현, 김건하, 2005, 도시, 농촌 및 임야유역으로부터 배출되는 비점원 오염부하의 특성비교, 한국물환경학회지, 21(2), 184-189.
- 환경부, 2004, 관계부처합동 물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책.
- 환경부, 2006, 비점오염원관리 업무편람.
- 환경부, 2008, 수질오염공정기준.
- Deletic, A. B. and Mahsimivic, C.T, 1998, Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas, J. of water Environmental Engineering, 124(9), 869-879.
- Ujevic, I., Odzak, N., and Baric, A, 2000, Trace metal accumulation in different grain size fraction of the sediments from a semi-enclosed bay heavily contaminated by urban and industrial wastwaters, Water Res, 34, 3055-3061.

최종원고채택 09. 12. 17