

도시, 농촌 및 임야유역으로부터 배출되는 비점원 오염부하의 특성비교

여중현 · 김건하**

한국 수자원공사 수자원연구원

*한남대학교 토목환경공학과

Comparison of Discharge Characteristics of NPS Pollutant Loads from Urban, Agricultural and Forestry Watersheds

Yur, Joonghyun · Kim, Geonha**

Korea Water Resources Corporation, Korea Institute of Water and Environmental

*Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

(Received 6 December 2004, Accepted 11 January 2005)

Abstract

Impacts of non-point source pollution on water quality are well known. In this paper, effects of land use, precipitation characteristics, discharge characteristics on non-point source pollutant loadings at urban, agricultural and forestry watersheds were discussed. Rainfall runoffs from fifteen rainfall events were sampled and analysed at two urban watersheds, one rural watershed, and one forestry watershed. EMCs (Event Mean Concentration) were calculated based on monitored flow rates and concentrations. Statistical analysis carried out with runoff loadings and affecting variables indicated that runoff loadings are weakly correlated with the rainfall intensity and the dry days before rainfall events while showed no correlations with rainfall depth nor runoff quantity. By comparing EMCs between study watersheds on log-normal cumulative probability scale, EMCs ranking were in the descending order of urban watershed>agricultural watershed>forestry watershed for SS, TCOD, TN, and TP.

keywords : Non-point source, Watershed, Loading, Statistical analysis, Water quality, Rainfall

1. 서론

수질개선을 위한 많은 노력과 투자에도 불구하고 획기적인 수질개선이 이루어지지 않고 있다. 이는 수질보전을 위한 주요 관리대상이었던 점오염원(Point source pollution)의 영향과 더불어 도시지역과 농촌임야지역에서 발생하는 비점오염원(Non-Point source pollution, Diffuse pollution)이 수질에 큰 영향을 미치고 있기 때문이다. 국내에서 진행된 비점오염에 관한 연구에 의하면 전체오염 중 비점오염이 차지하고 있는 비중은 약 20~50% 정도로 추정하고 있으나, 관리부실에서 오는 유사 비점오염원을 고려할 때 더욱 큰 비중을 차지하고 있을 것으로 추정하고 있다(권, 1998; 최, 1998).

도시유역에서 발생하는 비점오염물질의 특징은 단위면적당 오염부하가 크고 각종 유독성 물질을 포함하고 있기 때문에 수체에 큰 악영향을 미칠 수 있으며, 또한 농촌임야 유역에서 발생하는 비점오염물질도 도시지역에 비해 농도는 작지만, 넓은 면적을 차지하고 있기 때문에 도시지역에

서 발생하는 오염부하량과 더불어 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다(최, 1997, 1998).

강우시 유역으로부터 발생하는 오염물질의 유출특성은 침투농도, 산술평균농도, 침투부하량, 평균부하량, 총 부하량 등으로 나타낼 수 있다. 그러나 대부분의 경우 강우시 발생하는 총 부하량이 개개의 농도 또는 침투부하량 보다 중요성을 갖는데, 그 이유는 유출사상이 비교적 짧고, 강우 유출수가 유입되는 수체, 특히 저수지나 댐 내에서는 어느 정도 혼합 현상이 수반되므로 저수지내의 오염물질 농도는 강우로 인한 강우유출수의 농도변화 보다는 총 부하량에 의하여 결정되기 때문이다(김, 2003).

비점오염물질의 유출은 유출유량의 변화에 따라 매우 큰 농도 변화를 나타낸다. 그러므로 특정유역에서 강우사상에 의해 발생하는 비점오염물질의 평균농도를 나타내기 위해서는 유량의 이산을 고려한 유량가중평균농도(EMC: Event Mean Concentration)를 사용한다(Sansalone et al., 1997). EMC는 식 (1)과 같이 표현되는데,

$$EMC(mg/L) = \frac{\text{Pollutant mass}}{\text{Runoff volume}} = \frac{\sum Qi Ci}{\sum Qi} \quad (1)$$

* To whom correspondence should be addressed.
kimgh@mail.hannam.ac.kr

여기서, Q_t 는 관측시간 t 에서의 유출량(m^3/hr)이고, C_t 는 오염물질 농도(mg/L)이다. EMC는 일반적으로 산술평균농도 보다 높게 나타나는데, 이는 유량의 증가하는 부분에서 수질이 함께 증가하기 때문이다.

본 연구는 도시지역, 농촌임야혼합지역, 임야지역의 다른 토지이용특성을 가진 3개의 유역을 선정하여 해당 유역에서 여러 강우사상을 대상으로 모니터링을 실시하였고, 강우사상당 EMCs를 산정하였다. 그리고 측정된 EMCs에 대하여 각 유역에 대한 EMCs의 분포를 비교 분석하고, 각 유역을 대표할 수 있는 EMCs를 산출하였다.

2. 실험방법

연구유역의 선정은 유역의 접근성, 안전성, 이동성, 대표성 등을 고려하여 유역특성에 따라 도시지역, 임야지역, 농촌임야혼합지역의 특징을 가진 3개의 유역을 선정하였다. Fig. 1은 연구유역 형상의 개략이며, Table 1에 연구유역의 현황을 요약한 것이다.

농촌임야유역에서의 비점오염에 대하여 조사하는 방법으로는 일반적으로 대유역의 하단에서 오염도와 유출량을 실측하는 방법과, 소단위의 토지이용으로 나누어 각 토지이용별 유출량과 오염도를 조사하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자의 경우 주로 강우와 하천의 오염부하량간의 상관관계식을 도출할 경우에 사용되며, 후자의 경우는 토지이용별

직접유출량과 오염도를 조사하여 토지이용별 원단위를 결정하는데 이용된다(國松孝男 등, 1994). 본 연구에서는 앞서 말한 두 방법을 절충하여 점원이 존재하지 않는 유역을 선정하여 각 유역의 출구 지점에서 측정을 실시하였다. 도시지역의 경우는 합류식하수관거지역의 우수토실 지점에서 합류식하수관거 월류수(CSOs: Combined Sewer Overflows)에 대한 측정을 실시하였다.

측정은 각 유역별로 UC(Urban Combined sewer)지점 5회, F(Forestry area)지점 10회, AF(Agricultural-Forestry area)지점 10회로 총 15개의 다른 강우사상을 대상으로 하였다. Table 2는 측정된 강우사상에 대한 특성을 요약한 것이다. 유량측정과 시료채취는 강우가 시작되기 전에서부터 강우가 종료 된 후 수위가 충분히 하강할 때 까지 측정을 실시하였으며, 유량과 시료채취를 동시에 실시하였다. 유출 초기에는 유출 후기에 비하여 빠른 유량변화와 농도변화가 예상되므로 약 15~20분의 짧은 간격으로 측정을 실시하였고, 침투유량 이후 수위가 감소 할 때에는 약 30분~60분 간격으로 측정을 실시하였다. 한 강우사상당 10~20회의 측정을 실시하였고, 채취된 시료는 냉장보관(4℃) 후 실험실로 운반하여 분석을 실시하였다.

수질분석 항목으로는 BOD₅, COD_{cr}, SS, T-N, T-P, Total coliform(TC), *E.coli*(EC)로 총 7가지 항목에 대해 측정하였다. 수질분석은 Standard Methods(1992)와 수질오염 공정 시험법에 따라 분석을 실시하였으며, TC과 EC는 3M corp.

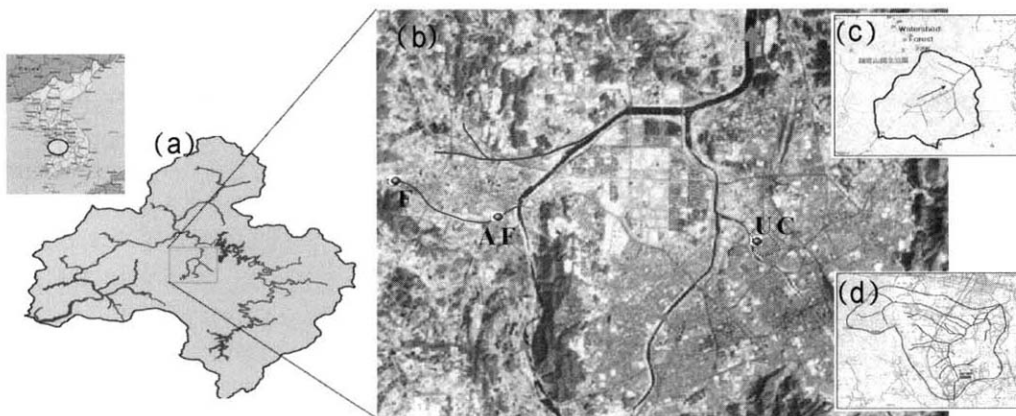


Fig. 1. Study watersheds; (a) The Geum River Basin; (b) Watershed "UC"; (c) Watershed "F"; (d) Watershed "AF".

Table 1. Description of the study watersheds

Code	Site	Comments	Area(ha)	Land use(%)
UC (Urban Combined Sewer)	Daejeon City, Ojung-dong, Daedukku	CSO	136.2	Residential (73.4), Commercial (5.5), Undeveloped (6.8), Road (14.2)
F (Forestry)	Daejeon City, Bokryong-dong	Forestry	338	Forest (99.5), Road (0.1), Others (0.4)
AF (Agriculture+Forestry)	Daejeon City, Sangdaedong, Yuseonggu	Agriculture, Forestry	2,737	Agricultural (35.9), Forest(44.8), Road (4.7) Residential (13.3), Others (1.3)

Table 2. Hydrological description of the study watersheds

		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
		6 th	7 th	8 th	9 th	10 th
UC	Precipitation depth (mm)	1.5	15	13	8.5	34
		-	-	-	-	-
	Rainfall intensity (mm/hr)	1	1.5	1.7	0.8	2.2
		-	-	-	-	-
	Dry day (day)	7	13	14	15	6
		-	-	-	-	-
F and AF	Precipitation depth (mm)	18.5	67.0	14.4	43.5	44.5
		259.8	35.0	4.5	37.0	135.0
	Rainfall intensity (mm/hr)	2.6	5.1	2.4	7.2	3.7
		21.7	3.9	0.8	7.4	13.5
	Dry day (day)	5	12	3	2	1
		11	1	4	3	2

의 Petrifilm™을 사용하여 측정을 하였다. Petrifilm™은 평판집락법을 이용한 것으로, 단위는 CFU(Colony Forming Unit)를 사용한다.

3. 결과 및 고찰

특정유역에서 발생하는 강우유출수는 강우량, 강우강도, 건기일수 등과 같은 강우특성과 토지이용, 유역면적, 유역경사 등과 같은 유역특성에 의해 영향을 받는다. 그러므로 본 연구유역에서 측정된 자료를 가지고 통계프로그램인 SPSS ver.10을 이용하여 강우특성에 따른 EMCs와의 상관성을 분석하였다. 분석 결과 측정된 수질인자 중 EMC_{SS}와 EMC_{TCOD}만이 강우강도와 약간 상관성을 보였을 뿐 전반적으로는 EMCs와 강우특성인자(강우량, 건기일수, 지속기간) 간에는 상관성이 매우 낮게 나타났다. 이와 같은 현상이 나타난 것은 유역에 따라 EMCs가 특정 크기까지의 강우에 대해서만 비례하여 증가하는 경향이 나타났기 때문이다. 본 연구유역의 UC지역의 경우 강우가 30 mm 이하로 내린 강우사상에서는 강우량의 크기에 따라 EMCs의 크기가 함께 증가하는 것으로 나타났으나, 30 mm 이상이 내린 5차 강우사상의 경우, EMCs는 오히려 낮게 나타났다. AF지점에서도 100 mm 이하의 강우사상에서는 강우량의 크기에 따라 EMCs가 함께 증가하는 경향을 보였으나, 100 mm 이상이 내린 10차와 6차 강우에서는 EMCs가 감소하였다. 이는 많은 양의 강우가 내릴 경우 오염물질 유출의 증가 보다는 후반부의 지속적인 유출유량에 의한 희석효과가 전체적인 유출에 큰 영향을 주기 때문으로 판단된다. Table 3은 각 연구유역에서 측정된 강우사상에 따른 EMCs를 나타낸 것이다.

EMCs와 강우특성과의 관계가 비교적 낮은 반면 유역에 따른 EMCs는 모든 오염물질 항목에서 토지이용특성에 따라 큰 차이를 나타내었다. 여러 강우사상에 따른 유역간의 EMCs를 비교하기 위하여 로그-정규 확률그래프를 이용한 분석을 실시하였다. Fig. 2와 Table 4는 이의 결과를 나타

낸 것으로 로그-정규 확률그래프를 이용한 강우유출수의 EMCs에 대한 분석은 빈도개념을 도입함으로써 강우에 따라 변화가 심한 EMCs의 크기를 간략하게 요약할 수 있고, 서로 다른 유역과 강우 사상에 대한 비교평가가 가능하다(김 등, 2003).

유역에 따른 EMCs의 크기는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 UC > AF > F로 나타났다. Table 4에 있는 각 유역에서의 발생확률 50%에 대한 EMCs의 크기를 비교한 결과 EMC_{TCOD}는 도시지역(UC)과 농촌임야지역(F, AF)간에 가장 큰 차이를 보였고, EMC_{TN}은 가장 작은 차이가 나타났다. 임야지역(F)과 농촌임야혼합지역(AF)과는 EMC_{SS}에서 70배의 큰 차이가 나타났는데, 이는 농촌임야지역에서 토양유실 등의 영향이 크게 나타난 것으로 판단된다.

본 연구에서 측정된 값의 적절성을 판단하기 위하여 국내에서 진행된 EMCs에 대한 연구자료(62개)에 대해서 유역특성에 따라 농촌임야혼합지역, 도시농촌혼합지역, 도시지역(CSOs)로 분류한 후 본 연구 결과와 비교하였다(농촌임야 혼합지역: karico, 1999b, 1999c; 김 등, 2002/ 도시농촌혼합지역: karico, 1999a; 김 등, 2002/ 도시지역: 김, 1992; 최, 2003; 강, 2003). Table 5는 전차연구의 자료를 가지고 분석한 결과를 나타낸 것이다. EMC_{TN}의 경우 도시지역과 농촌임야지역에서의 발생확률 50%에 대한 값이 각각 17.5 mg/L와 4.9 mg/L로 본 연구의 결과와 매우 유사한 크기가 나타났으며, EMC_{SS}도 비교적 유사한 값을 나타내고 있었다. 그러나 본 연구유역 중 도시지역에서의 EMC_{TCOD}와 EMC_{TP}는 전차연구자료에 대한 분석 값에 비하여 다소 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

본 연구결과와 전차 연구자료의 분석결과와 공통적인 특징으로 EMCs의 변동계수는 도시지역이 농촌임야지역에 비하여 작게 나타났다. 이는 농촌임야지역은 도시지역에 비하여 강우사상에 따라 오염물질 유입의 정도가 크게 변하는 것으로 강우에 따라 발생하는 오염물질의 유출특성이 유역특성에 따라 일정한 경향을 나타내고 있는 것으로 나타났다.

Table 3. EMCs discharged during each rainfall event

Site	Rainfall event	SS (mg/L)	TCOD (mg/L)	BOD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TC (cfu/100 mL)	EC (cfu/100 mL)	
Urban	UC	1 st	45.1	199	87	-	8.684	-	-
		2 nd	812.1	671	198	20.346	19.451	1,141,940	187,622
		3 rd	587.6	493	170	15.362	14.049	3,046,907	291,431
		4 th	212.5	373	132	14.218	14.088	7,104,282	752,833
		5 th	208.7	239	60	13.804	7.138	4,362,873	389,839
Agricultural-Forest	F	1 st	0.6	4.2	0.6	1.761	0.105	1,668	0
		2 nd	2.2	4.1	0.6	2.215	0.245	659	0.6
		3 rd	1.1	3.3	0.5	0.416	0.419	10,479	297
		4 th	0.5	3.9	0.6	1.164	0.203	6,633	170
		5 th	3.8	6.0	1.0	0.343	0.518	3,758	76
		6 th	37.0	11.5	2.1	0.324	0.427	7,375	318
		7 th	0.3	2.1	0.3	0.710	0.111	3,819	76
		8 th	0.1	3.1	0.5	1.114	0.224	1,471	42
		9 th	0.6	4.8	0.7	0.808	0.353	2,806	725
		10 th	3.7	16.5	3.0	1.425	0.242	608	51
	AF	1 st	51.6	18.0	3.4	5.478	1.457	21,033	1,580
		2 nd	703.2	39.7	7.6	4.164	2.213	17,684	4,006
		3 rd	13.8	5.4	0.9	2.008	1.122	23,712	4,705
		4 th	57.4	25.6	4.9	3.393	1.712	36,086	11,514
		5 th	840.9	36.9	7.1	3.258	2.256	16,664	4,842
		6 th	22.0	14.9	2.8	4.925	1.236	19,980	9,735
		7 th	34.7	6.0	1.0	5.596	0.879	56,239	21,465
		8 th	8.4	16.9	3.2	5.723	0.551	39,671	15,281
		9 th	1,335.6	223.2	44.0	10.620	3.376	104,046	51,829
10 th		99.1	23.9	4.5	4.002	1.140	34,089	15,497	

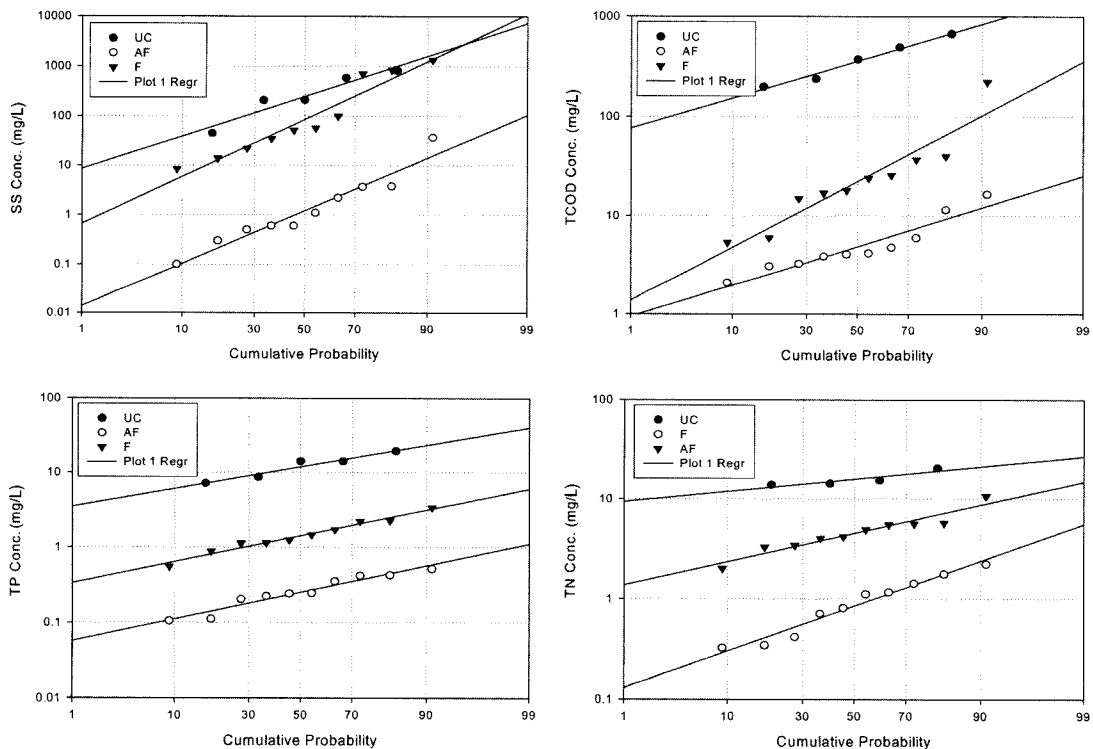


Fig. 2. Cumulative probability distribution of the EMCs in the study watersheds.

Table 4. Statistical evaluation of EMCs in the study watersheds

Constituent	Site	COV(%)	Range(Mean)	50%-value	95% Conf.
SS (mg/L)	UC	85	45-812(373)	250	392
	F	227	0.1-37(5)	1.3	8
	AF	149	8-1335(317)	90	337
TCOD (mg/L)	UC	49	199-671(395)	370	239
	F	76	2.1-16.5(6)	5	3.2
	AF	158	5-223(41)	23	46
TN (mg/L)	UC	18	13.8-20.3(15.9)	17.0	4.796
	F	61	0.3-2.2(1.03)	0.85	0.453
	AF	47	2.0-10.6(4.9)	4.5	1.667
TP (mg/L)	UC	38	7.1-19.4(12.7)	12.0	6.094
	F	48	0.1-0.5(0.28)	0.25	0.099
	AF	52	0.5-3.3(1.59)	1.5	0.393

Table 5. Statistical evaluation of EMCs in the study watersheds

Constituent	Site	COV(%)	Range(Mean)	50%-value	95% Conf.
SS (mg/L)	U*	82	61-861(352)	260	167.3
	A**+U	100	8-347(95)	55	61.0
	A+F***	105	5-498(114)	55	50.0
TCOD (mg/L)	U	61	87-515(190.8)	170	68.25
	A+U	85	6-47(16.5)	14	9.00
	A+F	57	6-34(13.8)	13	3.23
TN (mg/L)	U	37	8.1-31.0(18.229)	17.5	3.96
	A+U	22	4.4-9.0(6.275)	6.1	0.91
	A+F	32	3.0-9.0(5.175)	4.9	0.79
TP (mg/L)	U	35	0.8-3.2(2.226)	2.20	0.45
	A+U	44	0.4-2.1(1.225)	1.15	0.34
	A+F	54	0.3-2.4(1.135)	0.98	0.25

Note: *U(Urban watershed), **A(Agricultural watershed), ***F(Forestry watershed)

4. 결론

도시지역, 농촌임야혼합지역, 임야지역의 토지이용특성이 다른 3개의 유역에서 여러 강우사상에 대하여 EMCs를 산출하여 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 강우특성과 EMCs간의 상관관계를 분석한 결과 강우강도와 약간의 상관성을 나타냈을 뿐 다른 강우특성인자(강우량, 건기일수, 지속시간)와는 상관성이 없는 것으로 나타났다. 또한 각 유역에 따라 특정 크기 이상의 큰 강우가 발생할 경우 EMCs가 감소하는 것으로 나타났다.
2. 각 유역에서 측정된 EMCs를 가지고 로그-정규확률 그래프를 이용한 유역간 비교를 실시한 결과, EMCs의 분포는 UC > AF > F로 나타났으며, EMC_{TCOD}에서 도시지역(UC)과 농촌임야지역(F, AF)간에 가장 큰 차이를 보였고, EMC_{TN}은 가장 작은 차이가 나타났다.
3. 도시지역과 농촌임야지역에서의 발생확률 50%에 대한 EMC_{TN}의 크기는 각각 17.0 mg/L와 4.5 mg/L로 전차 연구자료를 이용한 분석결과와 매우 유사한 크기를 나타냈다. 그러므로 EMC_{TN}의 경우 도시지역, 농촌임야지역, 임야지역의 유역특성에 따른 대표적인 강우유출수의

EMC를 산정할 수 있을 것으로 생각된다.

그러나 EMC_{TCOD}와 EMC_{TP}는 도시지역에 따라 차이를 나타내고 있었고, 앞서 설명한 것처럼 EMCs는 큰 강우사상에서 감소하는 경향이 나타나기 때문에 홍수기의 큰 강우사상을 대상으로 한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

사 사

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

참고문헌

강금배, 도심지 합류식 하수관거 월류수 유출 및 오염부하 조사연구, 고려대학교 공학대학원 석사학위논문 (2003).
 권순국, 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안, *대한환경공학회지*, 20(11), pp. 1497-1510 (1998).
 김건하, 비점오염물질의 배출양상에 관한 연구, 고려대학교 일반대학원 석사학위논문 (1992).
 김건하, 통합물수지 분석기법의 도입을 위한 기초 수질기반

- 평가, 프론티어 21 연구과제 1차년도 보고서, 한국건설기술연구원 (2003).
- 김건하, 김영철, 이동률, 정하영, 여중현, 우리나라 농지-임야유역으로부터의 강우유출수 EMC 부하 분석 및 추정, *대한환경공학회지*, **25**(11), pp. 760-770 (2003).
- 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정육진, 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사, *대한환경공학회지*, **24**(11), pp. 2019-2027 (2002).
- 농어촌 진흥공사, 감돈지구 유입하천, 호소 퇴적물 조사 및 강우시 수질조사 (1999a).
- 농어촌 진흥공사, 만돈지구 유입하천, 호소 퇴적물 조사 및 강우시 수질조사 (1999b).
- 농어촌 진흥공사, 왕궁지구 유입하천, 호소 퇴적물 조사 및 강우시 수질조사 (1999c).
- 여중현, 도시지역과 농촌임야지역에서의 비점오염물질 유출 특성 연구, 한남대학교 일반대학원 석사학위논문 (2004).
- 최성현, 강우시 합류식 하수관거의 월류수 차집용량 산정을 위한 유출특성 분석, 강원대학교 공과대학원 석사학위논문 (2003).
- 최지용, 농업지역 비점오염원 관리방안 연구, KEI 기본과제 연구보고서 (1997).
- 최지용, 도시지역 비점오염원 관리방안 연구, KEI 기본과제 연구보고서 (1998).
- 國松孝男, 羅榮, 須戸幹, 武田育郎, 非作村其間の田からの汚染物質と無機イオンの表面流出, *農討論集*, 170, pp. 45-54 (1994).
- APHA, AWWA, WEF., *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 18th edition (1992).
- Sansalone, J. J. and Buchberger, S. G., Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water, *J. Environ. Eng. ASCE*, 123, pp. 134-143 (1997).