한국환경보건학회지, 제31권 제1호(2005)
Kor. J. Env. Hlth., Vol. 31, No. 1, pp 1~6(2005)

남천에서의 강우시 비점오염물질의 유출특성

장성호† · 박진식*
밀양대학교 환경공학과, *경운대학교 보건환경학과

Runoff Characteristics of Non-point Source According to Rainfall in Nam Watershed

Seong-Ho, Jang† · Jin-Sick Park*
Department of Environmental Engineering, Miryang National University, Miryang, Korea
**Department of Health & Environmental, Kyungwoon University, Gumi, Korea*
(Received December 10, 2004; Accepted February 13, 2005)

ABSTRACT

This study was conducted to identify the runoff characteristics of non-point source according to rainfall in Nam watershed. Land-uses of the Nam watershed were surveyed paddy field 4.5%, crop field 6.8%, mountainous 78.7%, urban 2.4%, and etc. 7.7%. Mean runoff coefficients in each area were observed I area 0.08, II area 0.08, and III area 0.05. In the relationship between the rainfall and peak-flow, correlation coefficients(r) were investigated I area –0.8609, II area 0.6035, and III area –0.4913. In the relationship between the antecedent dry period and first flow runoff, correlation coefficients(r) were investigated I area –0.9093, II area –0.1039, and III area –0.7317. The discharge of pollutant concentrations relates to the flow rate of storm-water. In the relationship between the rainfall and watershed loading, exponent values of BOD, COD, SS, and T-N were estimated to 1.2751, 1.2003, 1.3744, and 1.1262, respectively.

Keywords: non-point source, rainfall, nam watershed, peak-flow, antecedent dry period, runoff

I. 서 론

우리나라에서는 하천수 및 다목적댐에서 조성되는 지표수를 주요 상수원으로 사용하고 있으나 개발정책으로 인한 산업발전과 경제활동수준의 향상에 따른 호소나 하천수 등의 공공수역으로 오염물질의 유입은 점차적으로 가중되어 왔다. 일반적으로 공공수역에 유입되는 오염물질은 발생원에 따라 생활오수나 공장폐수 등과 같은 점오염원과 농지에 살포된 비료 및 농약, 대기오염물질의 강하물, 지표상 퇴적오염물질, 합류식 하수관거, 월류수내 오염물질 등의 주로 강우시 강우유출수와 함께 유출되는 비점오염원으로 구분할 수 있다.[1-3]

점오염원의 경우 발생원의 오염물질 부하량의 정량화가 가능하여 적정 수처리시설의 운영으로 오염물질의 저감이 가능하지만 비점오염원은 오염물질의 배출량 및 유입경로의 파악이 매우 어려울 뿐만 아니라 시간에 따른 부하의 변동이 심하기 때문에 정량화가 어렵고 강우초기에 오염물질의 농도가 높은 특징이 있다.[4] 특히 질소나 인 등의 영양물질을 많이 함유하고 있어 공공수역에 방류될 경우 하천이나 호소의 부영양화를 일으키는 원인이 되고 있으며, 점오염원에 비해 오염농도는 낮지만 부하량은 크기 때문에 수질환경의 개선을 위해서는 비점오염원의 적절한 관리가 요구된다.[6-8]

하지만 비점오염원은 토지이용현황, 강우사상, 지역별 우수 · 오수관리시스템 등 다양한 요인에 따라 유출특성이 다르므로 비점오염원을 적절히 관리하기 위해서는 유역별 및 지역별의 비점오염원에 대한 유출특성의 조사 · 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 상류권역인 남천을 대상으로 3개 배수구역으로 구분하여 토지이용현황, 강우사상에 따른 유량 및 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P 등의 오염물질에 대한 유출특성을 조사하여 비점오염원의 적절한 관리방안 마련을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

†Corresponding author : Department of Environmental Engineering, Miryang National University
Tel: 82-55-350-5435, Fax: 82-55-350-5437
E-mail : jangsh@mnu.ac.kr

II. 조사방법

1. 시료채취 및 분석

일반적으로 비점오염원 유출은 토지이용, 강우강도 및 지형·지질적인 특성에 따라 영향을 받기 때문에 강우시 비점오염물질의 유출특성이 충분히 나타날 수 있도록 상류, 중류, 하류지역으로 구분하여 현장조사시 Fig. 1과 같이 유출 수문특성이 나타날 수 있도록 5단계(A, B, C, D, E) 시료분석을 시행하였다. 한편, 비강우시는 일정한 시간간격(3~6시간)으로 2회 시료를 채취·분석하여 평균값으로 산정하였다.

또한 계절적인 특성을 고려하여 현장조사는 2002년 10월~2003년 7월까지 이루어졌다. 강우시 현장조사는 30 mm 이상일 때 수행하는 것이 비점오염원의 특성이 나타내지만 우리나라 강우특성상 10월에서 3월간에는 한 강우사상에서 30 mm 이상인 경우가 거의 없으며, 강우횟수도 적어 강우사상이 있는 경우 우선 현장조사를 실시하였다. 3월 이후부터 현장조사 때는 비점오염원의 유입이 예상되는 30 mm 이상의 강우가 예측될 때 현장조사를 시행토록 하였으나 하류지역에서 상류지역으로 순차적으로 현장조사를 실시하였다.

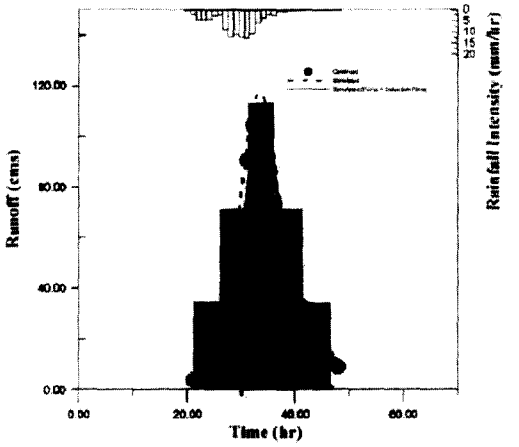

Fig. 1. Hydrology curve of rainfall-runoff.

현장조사시 유량(유속)은 현장에서 측정하였으며, BOD, COD, SS, T-N, NO_3-N, NH_3-N, T-P, TOC 등의 수질분석은 시료를 실험실로 운반한 다음 즉시 분석하거나 냉장보관 하면서 분석하였다. 그리고 즉시 분석을 실시하지 않은 경우는 수질오염공정시험법에 준하여 시료 전처리를 실시하여 시료의 변질을 방지하는 조치를 취한 다음 분석하였다. 다음 표는 각 항목별 분석방법을 나타낸 것으로 수질오염공정시험법[9]과 Standard Method[10]에 의해 분석하였다.

2. 유출계수

유출계수는 유역에 일정기간동안 내리는 강우량으로 인해 발생하여 그 유역의 출구를 통과하는 유출량의 총 강우량에 대한 비율을 뜻하며, 유역의 특성(토지이용, 지형 및 지질 등)이 주요한 영향 인자가 되며 다음과 같은 관계식으로 산출하였다.

$$C = \frac{\gamma_d}{\sum_{m=1}^{M} R_m}, \quad V_d = \sum_{i=1}^{N} Q_i \cdot \Delta t$$

C = 유출계수, V_d = 총유출량(m^3)

Q_i = i 번째 유출량(m^3/sec)

Δt = 측정시간 간격(sec)

r_d = 유출고(Depth of Runoff)

= Vd/유역면적

$\sum_{m=1}^{M} R_m$ = 총강우량(Total Rainfall)(mm)

III. 결과 및 고찰

1. 토지이용 현황

남천의 오염발생부하량은 4,657.3 kg/d로 조사되었으

Table 1. Land use of the watershed (units : $10^3 m^2$, %)

Area	Total	Paddy field	Crop field	Mountainous	Urban	Etc.
I area	18,470	867	1,433	13,811	656	1,703
	(100.0)	(4.7)	(7.8)	(74.8)	(3.6)	(9.2)
II area	55,376	2,349	3,987	44,151	1,035	3,854
	(100.0)	(4.2)	(7.2)	(79.7)	(1.9)	(7.0)
III area	89,329	4,129	5,658	70,398	2,159	6,984
	(100.0)	(4.6)	(6.3)	(78.8)	(2.4)	(7.8)
Total	163,174	7,345	11,078	128,360	3,850	12,542
	(100.0)	(4.5)	(6.8)	(78.7)	(2.4)	(7.7)

Table 2. Rainfall characteristics of the storm event in each site

Area	Storm event	Rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall duration time (hr)	Antecedent dry period (day)	Rnnoff height (mm)	Runoff coefficient
I Area	02. 10. 06(1st)	27	6.5	10	1	1.7	0.06
	03. 05. 07(4th)	29	6	35	6	2.5	0.08
	03. 06. 12(5th)	32	6.5	17	11	1.5	0.05
	03. 07. 18(6th)	45.5	12.5	19	4	0.8	0.02
II Area	02. 10. 06(1st)	27	6.5	10	1	1.6	0.06
	02. 12. 04(2nd)	18	3	13	26	1.5	0.08
	03. 03. 06(3rd)	15	1.5	24	3	2.1	0.14
	03. 05. 07(4th)	29	6	35	6.1	3.4	0.12
	03. 07. 18(6th)	45.5	12.5	19	4	1.1	0.02
III Area	02. 10. 06(1st)	27	6.5	10	1	2.0	0.07
	02. 12. 04(2nd)	18	3	13	26	1.3	0.07
	03. 03. 06(3rd)	15	1.5	24	3	2.5	0.17
	03. 05. 07(4th)	29	6	35	6	2.2	0.08
	03. 07. 18(6th)	45.5	12.5	19	4	0.7	0.01

며 이중 3,835.3 kg/d가 축산폐수에 의한 부하량이며, 축산폐수 규모가 큰 지역이 많아 강우시 오염물질 유출가능성이 매우 큰 것으로 나타났다.

남천은 소배수구역이 3개로 나누어지고 배수구역 전체는 크게 임야 78.7%, 전답 11.3% 순으로 구성되어 주요 토지이용은 임야지역이다. I 구역은 하류 남천본류를 소배수구역으로 하며, 임야 74.8%, 전 4.7%, 답 7.8%를 차지하며 주요 토지이용은 임야지역이다. II 구역은 상류서측 사창천이 유입되고 이를 소배수구역으로 하며, 임야 79.7%, 전 4.2%, 답 7.2%를 차지하며 주요 토지이용은 임야지역이다. III 구역은 상류동측 남천본류를 소배수구역으로 하며, 임야 78.8%, 전 4.6%, 답 6.3%를 차지하며 주요 토지이용은 임야지역이다.

2. 배수구역별 유출계수

강우사상에 따른 강우특성을 조사하기 위하여 현장조사시 배수구역을 상·중·하류로 구분하였으며, 현장조사 기간 중 각 배수구역별 강우특성을 Table 2에 나타내었다.

상류지역인 III 구역의 평균강우강도는 5.9 mm/hr, 평균 유출고는 1.7 mm, 평균 유출계수는 0.08로 나타났으며, 중류지역인 II 구역의 평균강우강도는 5.9 mm/hr, 평균 유출고는 1.9 mm, 평균 유출계수는 0.08로 그리고 하류지역인 I 구역의 평균강우강도는 7.9 mm/hr, 평균 유출고는 1.6 mm, 평균 유출계수는 0.05로 나타나 상류지역의 유출계수가 높은 것으로 조사되어 산림 및 농경지의 유출계수 0.01~0.20의 범위에는 포함되었으나,[11] 「낙동강수계 비점오염원 관리방안 마련을 위한 조사사업」에서 제시된 임야의 평균 유출계수 0.11보다는 다소 낮은 값을 보이는 것으로 조사되었다.[12]

3. 강우 및 유량 분석

일반적으로 비점오염원의 발생량은 강우강도, 선행무강우일수, 강우지속시간, 유출량, 유출강도 등 다양한 인자들에 의해서 복합적으로 영향을 받는다. 이중 강우강도, 선행무강우일수, 강우지속시간 등의 수문인자들은 우선적으로 단일강우사상에 의한 유출량, 유출강도에 영향을 미치고 궁극적으로는 비점오염원 부하에 영향을 미친다.

현장조사시 나타난 실측자료를 통해 강우와 유량과의 관계를 살펴보고자 첫째, 대표지점별 강우사상 당 강우량, 첨두유량의 현황 파악 및 지점별 강우량과 첨두유량의 상관관계를 분석하고, 둘째, 대표지점별 선행무강우일수, 초기유량유출의 현황 파악 및 지점별 선행무강우일수와 초기유량유출과의 상관관계를 분석하였다. 상관관계 분석은 두 변수간에 어느 정도의 관계가 존재하는가에 대한 수치적인 값을 제공하며 상관성이 높으면 높을수록 두 변수들은 더 많은 관계가 있음을 의미한다. 여기서 상관계수(correlation coefficient : $-1.0 \leq r \leq +1.0$) 값이 0.6 이상이면 변수들 간의 상관성이 높은 것으로, 0.4~0.6 범위이면 상관성이 보통인 것으로, 0.4 이하는 상관성이 없는 것으로 분석하였다. 그리고 상관계수의 부호가 (-)이면 반비례 관계를 나타낸다.

현장조사시 나타난 강우량과 첨두유량의 현황을 살펴

보면 전체 지점(I 구역, II 구역, III 구역)의 강우사상당 강우량은 15~45.5 mm 범위였으며, 첨두유량은 1.9236 ~6.6803 m^3/sec 범위이었다.

배수구역별 강우사상당 강우량과 첨두유량의 상관관계 분석에서 I 구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.8609, II 구역의 상관계수(r)는 0.6035, III 구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.4913을 나타내었다. 따라서 강우사상당 강우량에 비례하여 첨두유량도 증가하는 상관성은 II 구역에서 높게 나타났다.

선행무강일수와 초기유량유출의 현황을 살펴보면 전체 지점(I 구역, II 구역, III 구역)의 선행 무강우일수는 1~26일 범위였으며, 초기유량유출은 0.5691~3.4286 m^3/sec 범위이었다.

배수구역별 선행무강우일수와 초기유량유출과의 상관관계 분석에서 I 구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.9093, II 구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.1039, III 구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.7317을 나타내었다. 따라서 선행무강일수가 길어짐에 따라 반비례하여 초기유량유출이 낮게 나타나는 상관성은 I 구역 및 III 구역에서 높게 나타났다. Table 3과 Fig. 2 그리고 Fig. 3에 배수구역별 유량현황을 나타내었다.

4. 우수유출수의 수질특성

일반적으로 유출규모에 의한 오염유출의 차이는 각 오염지표별로 특징이 있다. 비점오염원의 유출특성중의 하나가 초기강우시 오염물질유출(first flush) 현상이며,

Table 3. Folw in each site

Area	Storm event	First flow runoff (CMS)	Peak flow (CMS)	Dry weather flow (CMS)
I	1st	3.4286	6.6803	0.5380
	4th	2.4395	6.2371	2.5849
	5th	2.2833	6.6524	1.9343
	6th	3.2114	5.7103	3.3508
II	1st	0.9318	2.3156	0.1503
	2nd	0.5691	1.9236	0.4943
	3rd	1.6532	2.1098	0.8326
	4th	0.9397	2.5563	0.9306
	6th	1.2136	2.3977	1.2333
III	1st	2.2312	4.2381	0.1998
	2nd	0.8635	2.8134	0.7529
	3rd	2.7725	3.3396	1.0680
	4th	1.1831	2.951	1.2421
	6th	1.558	2.753	1.5639

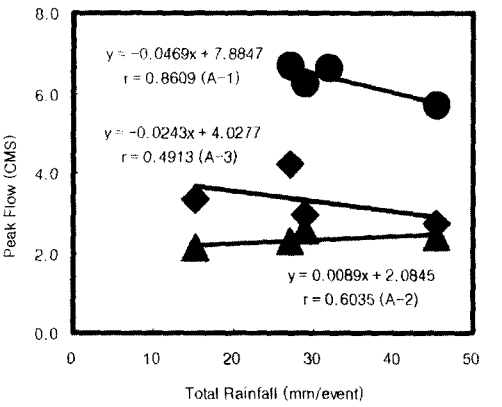

Fig. 2. Comparison of total rainfall and peak flow.

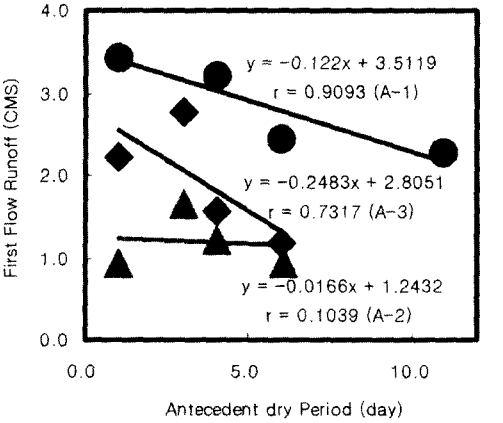

Fig. 3. Comparison of antecedent dry period and first flow runoff.

이 현상은 하도내의 종단면을 기준으로 보았을 때 상류에서 유출된 오염물질이 유하거리에 따라 차례로 도달하여 고농도 상태가 계속되는 것이다. 도달하기까지의 시간은 하도의 길이와 유하속도로 결정되고, 그 사이에 소류력이 증가하여 유수중의 오염물질농도가 높아지고 최고치를 기록하게 된다. 유출수 수질변동의 대부분은 입자성 물질에 의한 것으로 측정되고, 입자성 물질의 대부분은 점오염원에서 유입되는 것으로 알려져 있다.

대부분의 오염물질은 우수유출시 농도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 조사되었으며, 강우에 의한 오염물질 유출 특성을 파악하기 위해 누적오염 부하량 비를 이용하였다. 누적오염 부하량비를 표현하는 방법은 강우기간 중 이산시간 동안의 유량 Q(t)에 대한 누적유량 ΣQ(t)비인 Q(t)/ΣQ(t)를 x축으로 하고, 이산시간 동안의 오염부하량 L(t)에 대한 누적오염부하량 ΣL(t)비인 L(t)/

ΣL(t)를 y축에 도시하여 그래프의 기울기가 1보다 크면 초기유출 현상이 강한 것이며, 기울기가 1보다 작은 경우는 그 반대이다. 대개의 경우 입자상 물질의 경우 강우초기에 유출되는 정도가 커 기울기가 1보다 크며 용존성 물질은 강우지속시간 동안 일정하게 유출되는 경향이 있기 때문에 기울기가 1에 접근한다. 조사기간에 나타난 누적 우수유출량에 따른 누적 비점오염물질 유출특성을 도시한 Fig. 4에 의하면 BOD, COD, SS의 경우 3, 4차에서 강우초기에 다량의 오염물질이 유출되는 초기유출현상을 보였으며, 영양물질의 경우인 T-N, T-P는 1, 3, 4, 6차에서 비교적 균일한 유출특성을 나타내었다.

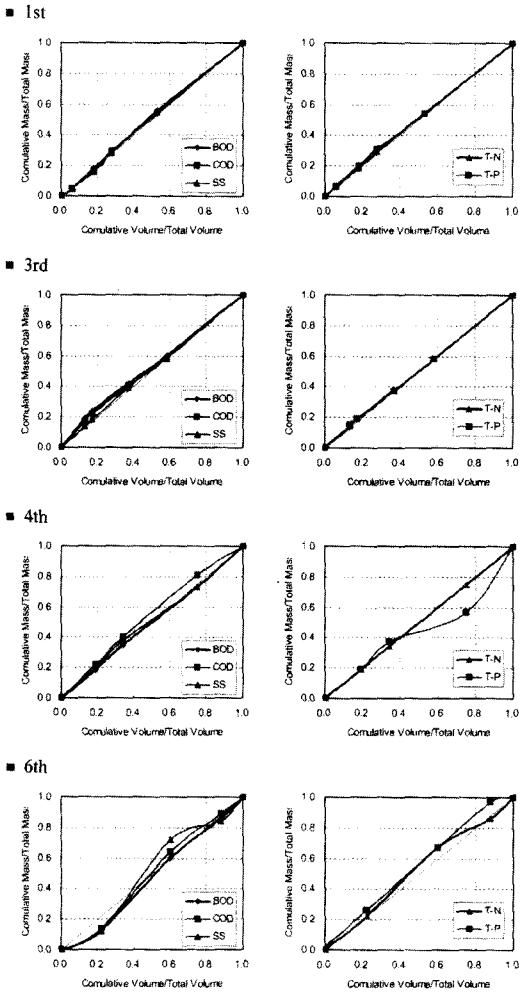

Fig. 4. Cumulative non-point pollutants variation with cumulative runoff flow.

5. 강우와 하천부하량의 상관관계

강우시 하천에서의 부하량 유출특성은 유역의 개발상황, 강우조건 등에 따라 다르나 그 특성은 강우시의 부하량-유량곡선을 통해서 알 수 있다. 일반적으로 누가유량과 누가 부하량과의 관계 그래프를 작성하면 동일하천에 대해서는 수질항목에 관계없이 거의 유사한 경향을 나타낸다. 누가 부하량과 누가 유량을 양대수지에 그리면 직선에 가까운 구간에 대하여 회귀식을 구할 수 있으며, ΣL과 ΣQ를 유역면적으로 나눌 경우 하천의 유역면적 규모 차를 배제한 관계식이 되어 하천간의 비교가 가능해진다.

$$\Sigma L = a \cdot (\Sigma n)^n$$
$$\Sigma L/A = b \cdot (\Sigma Q/A)^m$$

여기서, ΣL: 누가부하량(kg)
ΣQ: 누가유량(m^3)
A : 하천의 유역면적(ha)

상기 식을 이용하여 각 소수계별 강우시 누적유량과 오염물질 누적부하량의 관계를 그래프로 나타내었으며 그에 따른 회귀식을 산출하여 Table 4에 나타내었다. 이 회귀식은 강우횟수, 강우단계적용에 따라 변화가 예측되어진다. 회귀결과에 의하면 남천은 BOD, COD, SS, T-N, T-P 등 모든 항목에서 지수값이 1.1 이상으로 나타나 강우시 유출유량에 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 그 중에서 SS 항목이 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 남천을 대상으로 토지이용현황, 강우사상에 따른 유량 및 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P

Table 4. Relationship between the rainfall and watershed loading

Item	BOD	COD	SS	T-N	T-P
Nam watershed	$y = 0.0003x^{1.2751}$	$y = 0.0011x^{1.2003}$	$y = 0.0011x^{1.3744}$	$y = 0.0023x^{1.1262}$	$y = 7E\text{-}05x + 0.0175$
	$R^2 = 0.9415$	$R^2 = 0.9131$	$R^2 = 0.8434$	$R^2 = 0.9143$	$R^2 = 0.7121$

등의 오염물질에 대한 유출특성을 분석하기 위하여 강우시 수질조사 및 분석을 실시하였으며 그 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 남천의 토지이용현황은 임야 78.7%, 전답 11.3% 순으로 구성되어 주요 토지이용은 임야지역으로 조사되었다.

2. 배수구역별 평균 유출계수는 상류지역인 III 구역 0.08, 중류지역인 II 구역 0.08 그리고 하류지역인 I 구역의 평균 유출계수는 0.05로 나타나 상류지역의 유출계수가 높은 것으로 조사되었다.

3. 배수구역별 강우사상당 강우량과 첨두유량의 상관관계 분석에서 I 구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.8609, II 구역의 상관계수(r)는 0.6035, III 구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.4913로 나타났으며, 선행무강우일수와 초기유량유출과의 상관관계 분석에서 I구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.9093, II 구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.1039, III 구역의 상관계수(r)는 (-) 부호에 0.7317을 나타났다.

4. 우수유출수의 수질특성은 BOD, COD, SS의 경우 3, 4차에서 강우초기에 다량의 오염물질이 유출되는 초기유출현상을 보였으며, 영양물질의 경우인 T-N, T-P는 1, 3, 4, 6차에서 비교적 균일한 유출특성을 나타내었다.

5. 강우와 하천부하량과의 상관관계분석에서 BOD, COD, SS, T-N, T-P 등 모든 항목에서 지수값이 1.1 이상으로 나타나 강우시 유출유량에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 팔당상수원 비점오염원 유출특성과 최적관리방안. 15-30, 2000.
2. 환경부, 비점오염원 관리요령. 1-2, 2001.
3. 국립환경연구원, 비점오염원 유출부하량 조사지침. 3-10, 1992.
4. 환경부, 비점오염원 조사연구사업보고서. 21-30, 1995.
5. 환경부, 팔당상수원 비점오염원 최적관리사업 기본계획 및 타당성조사수립 보고서. 777-796, 2000.
6. Ichiki, A. and Yamada, K. : Study on characteristics of pollutant runoff into lake Biwa Japan. *Water Science and Technology*, **39**(12), 17-25, 1999.
7. Pegram, G. C., Quibell, G. and Hinsch, M. : The nonpoint source impacts of peri-urban settlements in South Africa : implications for their management. *Water Science and Technology*, **39**(12), 283-290, 1999.
8. 안재환 : 도시지역에서 강우사상에 따른 비점오염원 유출특성 연구, 건설기술정보, 통권205호, 18-23, 2000.
9. 환경부, 수질오염공정시험법. 1999.
10. APWA, AWWA and WEF, Standard methods for examination of water and wastewater, 18th Ed., 1992.
11. 최의소 : 상하수도공학, 청문각. 20, 2001.
12. 환경부, 낙동강수계 비점오염원 관리방안 마련을 위한 조사사업 보고서. 205, 2003.