

산림과 밭 지역 강우 유출수의 EMC 및 원단위 산정

원철희 · 최용훈* · 서지연* · 김기철* · 신민환** · 최중대*†

강원대학교 환경연구소
*강원대학교 지역기반공학과
**금강물환경연구소

Determination of EMC and Unit Loading of Rainfall Runoff from Forestry-Crops Field

Chul-hee Won · Yong-hun Choi* · Ji-yeon Seo* · Ki-cheol Kim* · Min-hwan Shin** · Joong-dae Choi*†

Institute of Environmental Research, Kangwon National University
**Department of Agricultural Engineering, Kangwon National University*
***Geum River Environment Research Center*

(Received 7 May 2009, Revised 1 July 2009, Accepted 2 July 2009)

Abstract

The research of the determination of event mean concentration (EMC) was focussed combined sewer overflows and highway runoff in Korea. But those of non-urban areas are few. In this study, EMC and unit loading on land use types in Nogok watershed were estimated by runoff loading of non-point source (NPS) on non-urban area. Two monitoring sites were equipped with an automatic velocity meter, flow meter, and water sampler. Monitoring was conducted at two monitoring sites during the rainy season. The results show that the EMC ranges in forest land use are 1.3~2.6 mg/L for BOD, 2.0~16.1 mg/L for SS, 0.1~2.1 mg/L for TN, and 0.12~0.49 mg/L for TP. The unit loading of NPS in this study was difficult to compare directly with that used conventionally because of the difference of field investigation. In near future, it needs to conduct more systematic and long-term research about NPS within the watershed. The results of this research can be used to estimate the total pollution load management system (TPLMS) program in Korea.

keywords : EMC, Landuse, NPS, Runoff coefficient, Unit loading

1. 서론

비점오염원은 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로의 불특정 장소에서 불특정하게 수질오염물질을 배출하는 배출원으로(환경부, 2007), 비점오염물의 배출량은 강우특성(강우강도와 강우지속시간), 토지이용형태, 지형, 그리고 농경지에서는 시비의 양에 따라서 달라질 수 있다. 비점오염물질은 강우시 합류식 관거에서의 월류(CSOs)나 농경지에서 빗물과 함께 하천으로 유입되어 수계의 수질 및 생태계에 영향을 미치기도 한다. 따라서 강우시 발생하는 비점오염원의 지속적인 모니터링과 부하량의 산정, 그리고 오염경로 파악을 통하여 저감방안을 마련하는 연구가 필요시 된다. 국내의 경우 비점오염 부하 저감에 대한 연구는 강우시 초기유출수(First flush)를 처리하기 위한 장치형 도시비점오염원 처리시설이나, 도로에서 발생하는 비점오염에 관한 내용을 중심으로 수행되고 있다(김이형 등, 2006). 그러나 수질오염총량제의 추진과 수질개선을 위한 현안문제로 중요성이 높고, 비점오염원에서 중요한 비중을 차지하는 탁

수를 비롯한 농업비점오염원을 저감시키기 위한 연구는 상대적으로 많이 수행되지 못하고 있다. 또한 수행된 연구도 유역모니터링 위주의 오염부하나 원단위 산정이 주가 되고 있으며(김건하 등, 2003; 여중현과 김건하, 2005), 개별 토지이용에서 발생하는 비점오염부하를 정량화하고 원단위를 산정하는 연구는 극히 제한적이다. 이에 정부는 2007년부터 4대강별로 주요 비점오염원의 장기모니터링 및 저감기법 연구 사업을 통하여 비점오염원 부하의 저감을 위한 전방위적인 노력을 수행하고 있다.

본 연구에서는 팔당호의 수질에 영향을 줄 수 있는 지역을 선정하여 그 지역의 강우 사상별 오염물질의 유출특성을 파악하고 원단위를 산정하여 비점오염 관리방안의 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 모니터링 지점 및 방법

비점오염물질의 배출 특성은 지형, 토성, 경사도, 강우량과 강우강도, 지표피복율 등에 영향을 받기 때문에 모니터링 지점의 선정은 연구의 성패를 가늠할 수 있는 중요한 부분이다. 조사 지점은 모니터링 시설과 측정 장비의 안전

† To whom correspondence should be addressed.
jdchoi@kangwon.ac.kr

관리에 유리한 곳을 선정하여야 하며, 이를 통하여 합리적이고 경제적인 모니터링이 수행될 수 있다.

모니터링 지점의 위치, 고저, 그리고 토지이용현황은 Fig. 1과 같다. Site 1은 산림지역의 유출수가 모이는 곳으로 산림과 초지로 구성되어 있으며, 면적은 각각 6.87 ha와 0.67 ha로서 총 면적은 7.54 ha이다. 유출수는 가운데 위치한 골로 유입되어 하류로 흘러내려간다. Site 2는 산림 우점 유역과 하류의 밭 우점지역을 포함하는 곳으로 총 면적은 10.57 ha이다. Site 1의 면적을 제외한 site 2의 순 면적은 3.03 ha이며, 초지(1.65 ha, 54.5%), 밭(0.75 ha, 24.7%), 산림(0.39 ha, 12.9%), 그리고 기타지역(0.24 ha, 7.9%)으로 구성되어 있으며, 이중 밭 지역만을 모니터링 하였다. 밭의 경사도는 3.2%이며 토성은 사질토이다. Site 2의 유출수는 site 1의 유출수와 합쳐져서 노곡천으로 방류된다. 모니터링 지점은 강우시에만 유출이 발생한다.

밭과 산림지역에서의 유출유량과 시료채취를 위하여 기존의 흙수로에 콘크리트로 구형 수로를 만든 후, 수위계(Thalimedes, Germany)와 유량계(ISCO 750 area velocity flow module, USA)를 설치하였다. 강우시 시료채취는 자동채수기(ISCO 6712 automatic water sampler)를 이용하여 오차를 줄였으며, 강우량은 동종의 강우량계(ISCO 674 rain gauges)를 이용하였다. 수위와 유량은 1분 단위로 측정하였다. 수위계를 이용한 유량의 산정은 수위와 이에 따른 유속과 단면적을 구하고 수위-유량곡선을 산정한 후, 강우시 수위에 따른 유량을 계산하였다. 수질분석을 위한 시료는 30분에서 1시간 간격으로 채취하였다. 채취된 시료는 아이스박스에 보관하였으며, 강우사상 종료 후 실험실로 이송하여 BOD, COD_{Mn}, TSS, TN, TP의 5개 항목에 대하여 분석하였다.

2.2. 유출계수와 EMC 및 원단위 산정

비점오염원은 유출오염으로서 강우시 유출량은 토지이용, 경사도, 강우강도 등에 따라 차이가 크다. 유출계수(C)는 강우사상시 일정기간 동안 단위 지역에 내린 총강우량에 대한 유출량의 비를 말하며, 지역의 토지이용, 지형, 지질에 의해 그 크기가 결정된다. 유출계수는 식 (1)과 같다.

$$C = r_d / \sum_{m=1}^M R_m \tag{1}$$

$$V_j = \sum_{i=1}^N Q_i \cdot \Delta t$$

r_d (유출고) = V /유역면적

V_j = j 지점의 총수량(m^3)

Q_{ji} = j 지점의 i번째 유량(m^3/sec), Δt = 측정간격(sec),

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

강우시 유출되는 오염물은 시간대별로 배출되는 부하가 다르다. 따라서 일정한 시간 간격으로 오염물질의 농도를 측정하고, 이를 산술평균 할 경우에는 타당한 농도의 의미를 가질 수 있다. 그러나 비점오염원은 유출과 농도가 실시간으로 변하기 때문에 산술평균으로 특정강우를 대표하는 것은 다소 무리가 따른다. 따라서 강우시 유출되는 오염물질의 부하량 산정시에는 유량가중평균농도(Event mean concentration, EMC)를 이용한다.

$$EMC = \frac{\int_0^T C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt} \tag{2}$$

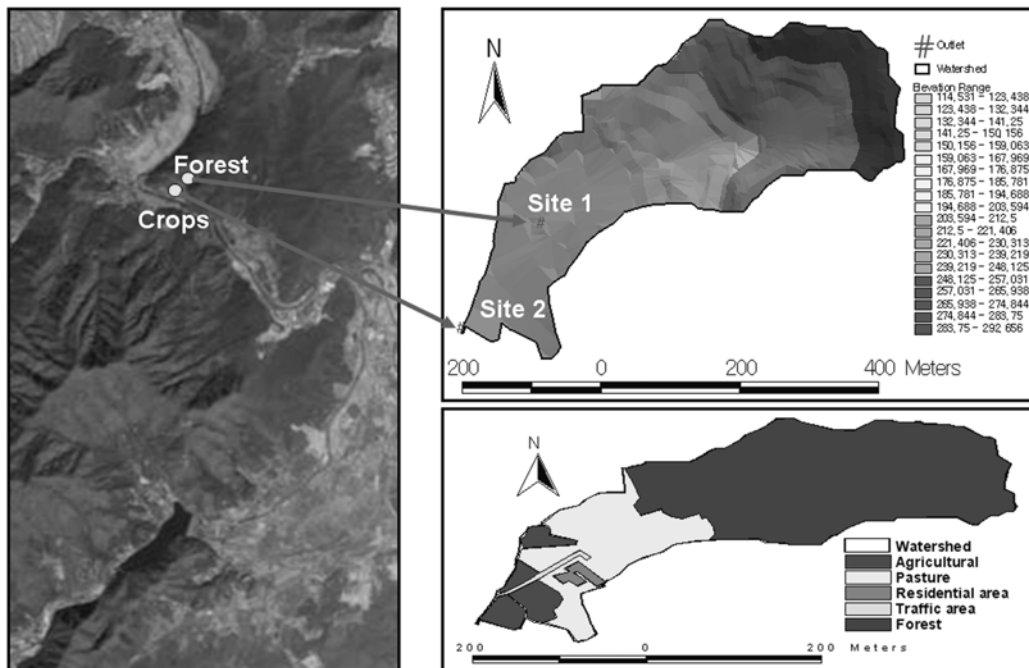


Fig. 1. Locations and land use of monitoring site.

식 (3)은 토지이용에 따른 단위 유역면적당 오염물질 부하량을 산정하는 식이다. 식 (2)에서 산정된 EMC와 전체 유출량, 그리고 유역의 면적을 이용하여 산정하였다. 한편 비점오염물질은 강우시에 발생하기 때문에 강우강도와 강우지속시간에 따라 크게 달라질 것이다. 특히 강우지속시간(Rainfall duration time, RDT)에 따라 발생된 비점오염물질이 인근 수계로 유입되거나 혹은 유입되지 않을 수 있다. 따라서 강우시 다양한 강우사상에 대한 수계의 영향을 파악하기 위해서는 식 (4)와 같이 강우지속시간에 대한 부하량의 산정이 필요하다(김이형 등, 2006).

$$Pollutant\ loading\ per\ watershed\ area(mg/m^2) = \frac{EMC(mg/L) \times Q(m^3)}{Area(m^2)} \quad (3)$$

$$Pollutant\ loading\ per\ RDT(mg/m^2 \cdot hr) = \frac{EMC(mg/L) \times Q(m^3)}{Area(m^2) \cdot RDT(hr)} \quad (4)$$

토지이용별 특성을 가진 원단위의 산정은 2가지 방법으로 수행될 수 있다. 하천 유역을 단일 토지이용으로 간주하여 원단위를 산정하는 방법과 실제 단일피복분류(세분류)에 따라 원단위를 산정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 단일피복분류에 따라, 식 (5)를 이용하여 원단위를 산정하였다. 여기서 EMC_i 는 i 번째 강우사상에 대한 유량가중평균 농도(mg/L)이며, q_i 는 i 번째 강우사상의 총 유출량(m^3/day) = $C \times I \times A \times 10$ [C : 토지이용별 유출계수, I : 강우량(mm), A: 면적(ha)], f : 연간 원단위 환산인자, 연평균강수량/실측기간 강우량(10 mm이상)

$$Unit\ loading(kg/ha/yr) = EMC_i \times q_i \times \frac{f}{A} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 수문분석

강우시 산정되는 원단위는 강우량에 따라 큰 차이가 날 수 있다. 따라서 대상지역의 강우량 분포를 분석하여 원단위 산정에 필요한 모니터링 자료를 충분히 확보해야 한다. 본 연구에서는 모니터링에 앞서 대상지역이 속한 G-city의 30년 일강우량 자료의 분포 현황을 10 mm 단위로 분석하였다(Table 1). G-city의 연평균 강우횟수는 103.68회로서 평균 3.52일에 1회의 강우가 있는 것으로 나타났으며, 원단위 산정에 큰 의미가 없는 일강우량 10 mm이하의 강우의 발생빈도는 60%였다. 반면에 연평균 1회 이상 내리는 최대 강우량 분포는 80~90 mm/day로 1.08회였으며, 차상위 분포인 90~100 mm/day는 연평균 0.77회 발생하였다. 이는 다음과 같은 의미를 가진다. 연간 강우가 100회 발생한다고 가정할 때, 연강우량의 60%까지를 비점오염부하 원단위 산정에 포함시키고 7개의 관측 자료를 필요로 한다면, 일 강우량 분포 90~100 mm의 비점오염부하 원단위를 산정하기 위해서는 최소 10년의 모니터링 기간이 필요하다. 본 연구에서 강우량 분포의 발생빈도별 강우사상을 확보하기는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 가능한 발생되는 모든 강우사상에 대하여 모니터링을 수행하고 이를 바탕으로 비점오염부하 원단위를 산정하고자 한다.

3.2. 강우특성 및 유출계수

본 연구는 2008년 5월부터 10월까지 6개월간 수행하였으며, 대상지역에는 총 35회의 강우가 발생하였다. 그러나 초기 2개월은 현장조사와 장비를 설치하는 관계로 모니터링을 수행하지 못하였다. 따라서 강우시 발생한 유출수가 어떠한 방향으로 진행되는지와 얼마의 비가 내렸을 경우 유출이 발생하는지를 조사하였다. 조사 결과 10 mm 이하의 강우시에는 유출이 발생하지 않았으며, 산림과 밭 지역에서 발생한 유출수는 배수로로 유입되어 노곡천으로 방류되고 있었다. 실질적인 모니터링은 7월 중순부터 시작되었으며, 총 20회의 강우사상이 발생하였다. 20회의 강우사상 중 10 mm 이하는 8회, 10~20 mm 2회, 20~30 mm 4회, 40~50 mm 1회, 50~60 mm 2회, 70~80 mm 1회, 그리고 200 mm 이상은 2회가 발생하였다. 모니터링은 유출이 발생하는 강

Table 1. Analysis of 10 mm rainfall frequency in G-city

Daily rainfall grade	Frequency (%)	Total rainfall (mm)	Yearly mean rainfall (mm)	Event rainfall (mm)	Cumulative rainfall (mm)	Rainfall percentage (%)	Cumulative percentage (%)
0~10 mm	60.62	4238.5	141.28	3.59	141.28	10.04	10.04
10~20 mm	15.79	4462.8	148.76	14.49	290.04	10.57	20.61
20~30 mm	6.05	2926.5	97.55	24.80	387.59	6.93	27.55
30~40 mm	4.62	3100.1	103.34	34.45	490.93	7.34	34.89
40~50 mm	3.23	2807.2	93.57	44.56	584.50	6.65	41.54
50~60 mm	2.41	2589.7	86.32	55.10	670.83	6.14	47.68
60~70 mm	1.08	1355.5	45.18	64.55	716.01	3.21	50.89
70~80 mm	1.13	1641.7	54.72	74.62	770.73	3.89	54.78
80~90 mm	1.08	1790.3	59.68	85.25	830.41	4.24	59.02
90~100 mm	0.77	1422	47.40	94.80	877.81	3.37	62.39
100~1090 mm	3.2	15,875.4	529.18	251.99	1,406.99	35.37	100

우사상에 대한 전수조사를 원칙으로 하였다. 20회의 강우사상 중 20 mm 이하는 강우강도와 선행건기일수(Antecedent dry day, ADD)에 관계없이 유출이 발생하지 않았다. 20~30 mm 사이의 강우사상에서는 4회 중 3회, 40~50 mm는 1회 중 1회, 50~60 mm는 2회 중 1회, 70 mm 이상에서는 3회 모두 유출이 발생하여, 총 20회의 강우사상 중 8개의 강우사상에서 유출이 발생하였다. 그러나 7월 30일에 발생한 29.0 mm의 강우사상은 2차 이벤트의 영향으로 강우시작 전부터 유출이 발생하고 있었으며, 8월 18일에 발생한 50.5 mm는 조사를 수행하지 못하였다. 따라서 실제로는 6개의 강우사상에 대하여 모니터링 및 분석을 하였다. 한편 9월 20일에 발생한 50.9 mm와 10월 22일에 발생한 24.0 mm의 강우사상에서는 유출이 발생하지 않았는데, 이는 가을로 접어드는 계절적 특성이 반영된 선행건기일수의 영향이 지배적으로 작용한 것으로 판단된다. 두 강우사상의 건기일수는 각각 17일과 26일로서 토양이 충분히 건조해져서 빗물의 토양침투능이 최대가 되어 유출이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

Table 2에는 본 연구에서 모니터링 한 6개 강우사상에 대한 강우특성을 요약하여 제시하였으며, Fig. 2에는 연구기간 동안의 site 1의 강우량과 유출량을 나타내었다. 선행건기일수는 2.4~9.0일, 총 강우량은 23.0~245.5 mm의 범위로서 200 mm가 넘는 폭우가 2회 연속 발생하였다. 강우시 유출 지속시간은 산림 지역의 경우 1차 이벤트는 2차 이벤트의 시작까지 2차 이벤트는 3차 이벤트의 시작까지 유출이 지속되었다. 특히 4차 이벤트는 강우량과 평균 강우강도가 작음에도 불구하고 유출이 120시간까지 지속되었는데, 이는 3차 이벤트의 영향으로 판단된다(Fig. 2). 5차 이벤트와 6차 이벤트의 유출지속시간은 각각 160시간과 167시간으로서 4차 이벤트와 유사한 경향을 보였다. 반면 발지역은 강우종료와 동시에 유출이 멈추는 것으로 나타났다.

Site 1의 유출계수는 0.28~0.85의 범위로서 이현동 등(2001)이 연구한 산림/리조트 지역의 0.136과 비교시에는 약 2~6배 정도 높은 값을 나타냈으며, site 2의 유출계수는 0.30으로 논/밭 지역의 평균유출계수 0.128보다는 2.3배 정도 높은 값을 보였다. 이처럼 높은 유출계수는 지리적 특성과 강우 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 Site 1 지점의 급경사이며 유하거리가 짧은 지리적 특성과 강우가 연속적으로 발생하여 이전 강우의 유출수량이 다음 강우의

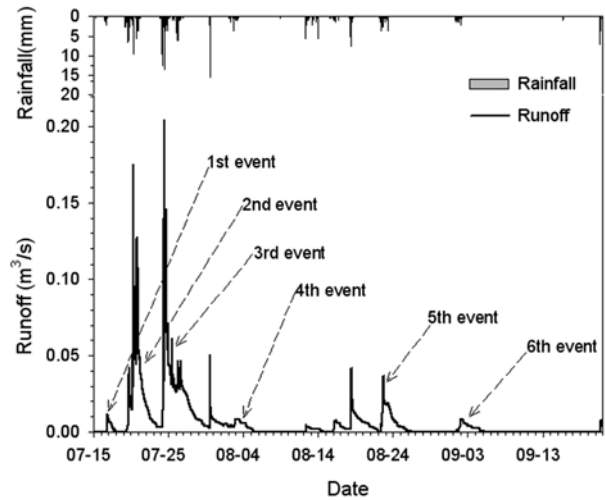


Fig. 2. Profiles of rainfall and runoff (site 1).

기저유출량에 포함되는 강우 특성 때문에 유출계수가 상대적으로 크게 나타난 것으로 사료된다(Fig. 2). 또한 잦은 비로 인한 토양의 포화와 짧은 선행건기일수도 강우시 유출을 증가시킨 것으로 판단된다. 따라서 단일피복분류의 토지이용에 대한 유출계수를 산정하고 이를 통한 해당구역의 대표 유출계수와 원단위를 산정하기 위해서는 다년간의 현장조사와 모니터링이 필요할 것으로 사료된다. 또한 구역내의 발을 경사도에 따라 평지, 완경사, 급경사 등으로 세분한 연구도 필요할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 수행되지 않았지만 지하수량과 이들이 강우유출수량에 미치는 영향의 파악도 중요한 항목으로서 요구된다.

3.3. 오염물질의 유출특성

Fig. 3에는 강우시 모니터링하고 분석된 유량과 오염물질의 수리수문 및 농도곡선의 예를 나타내었다. 강우가 시작된 후, 모니터링 지점에서 시간의 경과에 따른 강우 유출수의 농도는 초기에는 증가였다가 시간의 경과와 함께 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 강우시 도심지역의 도로나 합류식관거에서 나타나는 초기세척효과와 유사한 형태로 본 연구에서도 이를 확인하고자 하였다. 초기세척 효과의 판단은 강우기간 중 이산시간동안의 유량에 대한 누적 유량비와 이산시간동안의 오염부하량에 대한 누적오염부하량 비를 이용한다. 강우기간 중 이산시간 동안의 유량 Q(t)

Table 2. Descriptions of storm event at monitoring site

Event number	ADD (days)	Total rainfall (mm)	Average rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall duration (hr)	Runoff duration (hr)	Total runoff (m ³)	Runoff depth (mm)	Runoff coefficient
Forest / Crops field								
E-1	3.2	23.0	3.1	7.5	next event/-	474.0/-	6.9/-	0.30/-
E-2	2.4	216.5	4.4	49.3	next event/-	9,219.5/-	134.2/-	0.62/-
E-3	2.5	245.5	3.3	74.8	next event/-	12,984.3/-	189.0/-	0.77/-
E-4	2.5	21.5	0.7	30.0	120/-	1,257.2/-	18.3/-	0.85/-
E-5	3.5	72.5	2.8	26.2	160/21	2,590/163.5	37.7/21.8	0.52/0.30
E-6	9.0	49.5	2.3	21.2	167/16	954.9/111.8	13.9/14.9	0.28/0.30

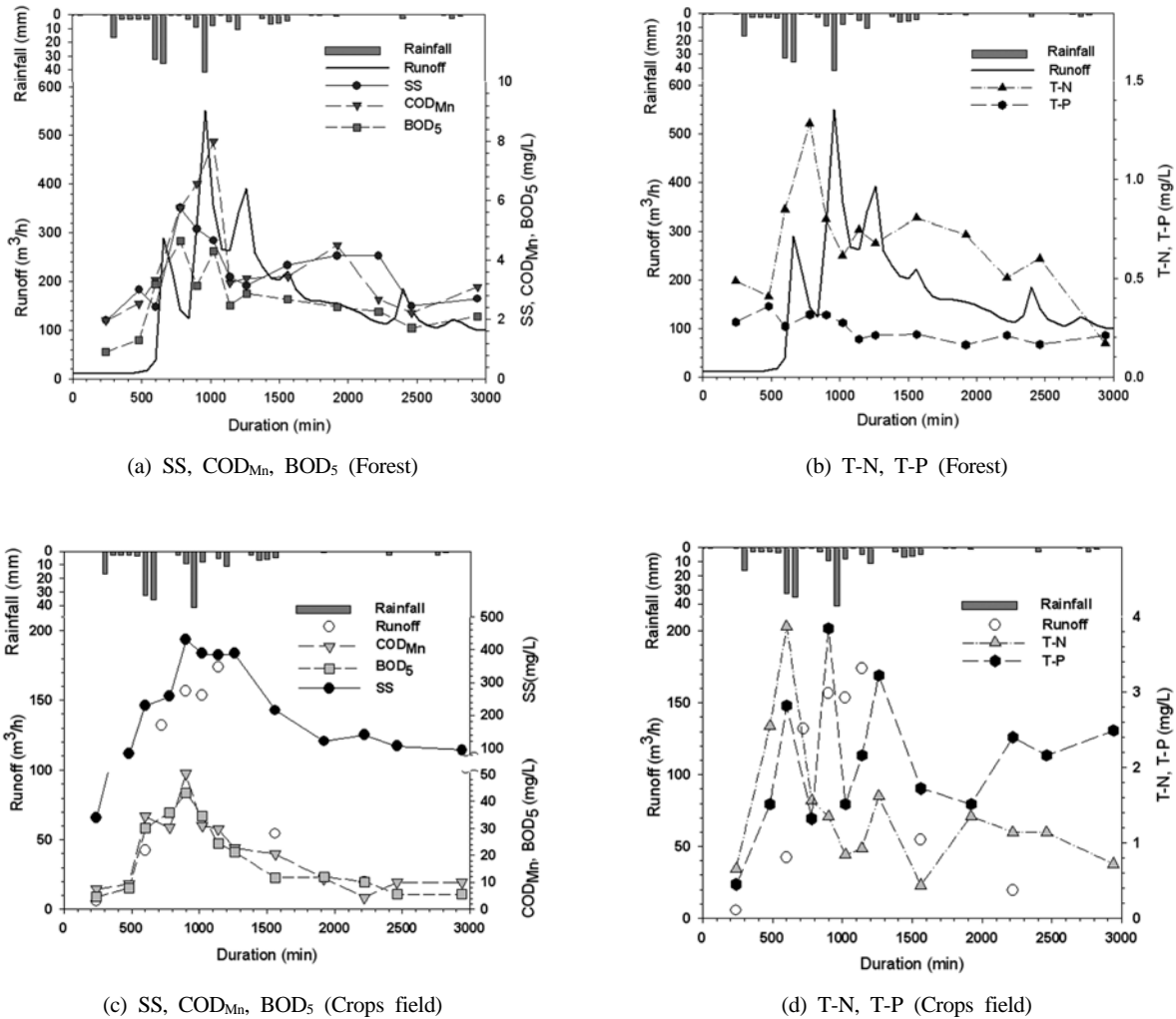


Fig. 3. Variation of pollutant concentration according to rainfall (Event 3).

에 대한 누적 $\sum Q(t)$ 비인 $Q(t)/\sum Q(t)$ 를 x축으로 하고, 이산 시간 동안의 오염부하량 $L(t)$ 에 대한 누적오염부하량 $\sum L(t)$ 비인 $L(t)/\sum L(t)$ 을 y축에 도식화한다. 이때 기울기 값이 1보다 큰 경우에는 초기세척효과가 발생한 것을 의미하며, 반대의 경우에는 초기세척효과가 없는 것으로 해석할 수 있는데(Gupta and Saul, 1996), 많은 연구자들이 도시지역에서 이를 확인하였다(신창민 등, 2004; Bedient et al., 1978; Bertrad-Krajewski et al., 1998).

Fig. 4는 산림과 밭 지역에서 모니터링 한 자료를 바탕으로 산정한 누적오염부하량비와 누적강우유출량비의 곡선을 이용하여 초기세척효과를 분석한 결과이다. Geiger(1987)에 의하면 누적부하곡선과 누적오염물질곡선을 그려서 초기 경향이 양분선(45° 선)을 넘었을 경우 양분선과 최대한 떨어진 부분의 시간까지에서 초기세척효과가 발생한다고 하였다. 본 연구에서 산림 지역의 SS 항목은 6회중 4회에서 초기세척효과가 관측되었으나, 1회만이 최대 이격점(Fig. 4(a)의 화살표 부분)을 보였다. 이외에 BOD, COD, TN, TP도 유사한 경향을 보였으나, Geiger(1987)가 제시한 최대 이격점은 명확히 구분되지 않았다. 즉 초기세척이 발생하였다고 볼 수도 있으나, 현저한 초기세척은 아닌 것으로 판단된다.

밭 지역의 경우 SS는 뚜렷한 초기세척효과를 보이지 않았으나, 이외의 항목은 Fig. 4의 (b)에서 보는 바와 같이 누적오염부하량비 약 2.8 부분에서 최대로 이격되는 모습을 관찰할 수 있었다. 즉 이 부분에서 초기세척효과가 현저하게 발생한 것으로 판단된다.

정성민 등(2009)은 고령지 농업지역에서 TP와 SS는 뚜렷한 초기세척 현상을 보인 반면, TN과 DOC는 뚜렷한 경향을 보이지 않는다고 하였다. 그러나 이병수 등(2008)은 일부 강우에서는 초기세척현상을 보이나, 대부분의 강우 이벤트에서는 초기현상이 발생하지 않아, 농촌지역의 경우 초기세척현상의 접근방법은 적절치 않다고 하였다. 이처럼 농촌 지역에서 강우시 초기세척효과에 관한 연구는 연구자에 따라 차이를 보이는데, 이는 포장지역인 도시와 달리 농촌지역은 대부분이 투수지역으로서 토양의 성질 및 상태, 강우 강도, 지형 등이 상이하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 또한 시료를 채취하는 방법(수동, 자동)의 차이도 직·간접적으로 영향을 주는 것으로 생각된다.

3.4. EMC 산정

산림과 밭 지역에서 강우시 유출되는 오염물질의 농도는

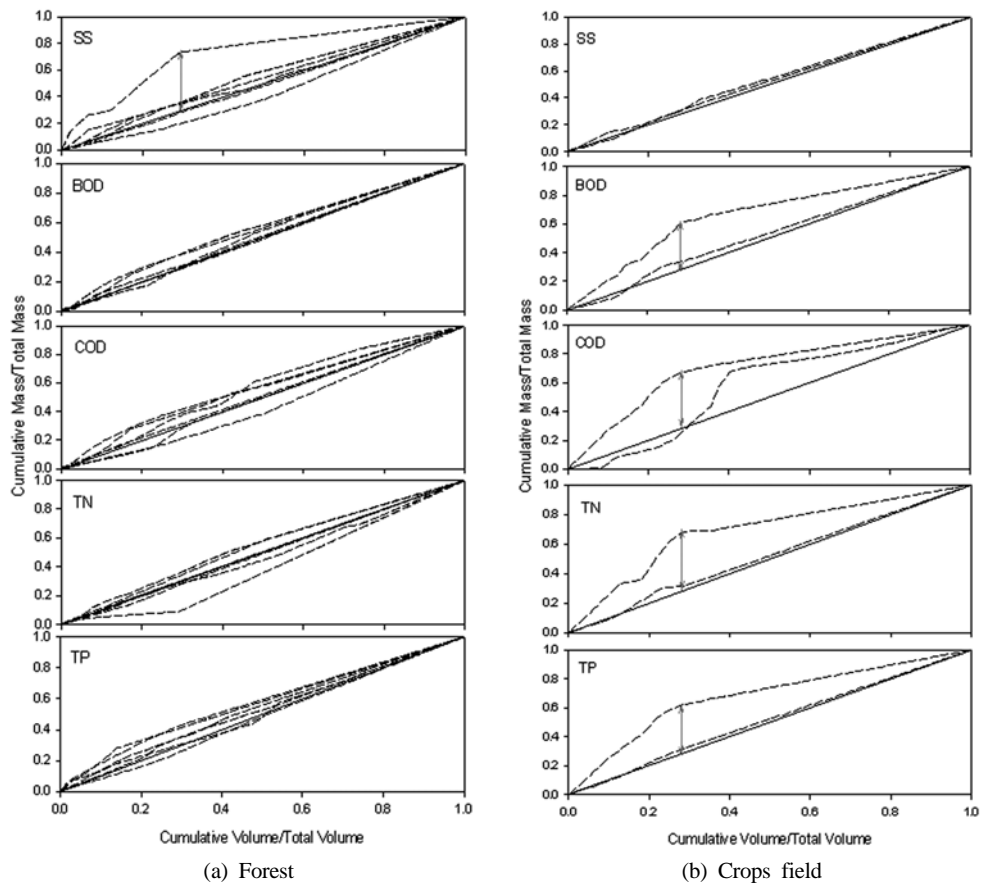


Fig. 4. Plot of cumulative load fractions as a function of cumulative runoff volume.

강우지속시간과 유량 등에 영향을 받는다. 따라서 오염물질 부하량의 산정시에는 유량가중평균농도인 EMC로 산정해야 보다 정밀한 값을 얻을 수 있다(김이형 등, 2006).

Site 1 지역의 유출수내 BOD의 EMC는 1.3~2.6 mg/L의 범위를 보였으며, COD_{Mn}은 1.8~4.7 mg/L, TN은 0.1~2.1 mg/L, TP는 0.12~0.49 mg/L, SS는 2.0~16.1 mg/L의 EMC 범위로서, 김건하 등(2003)이 제시한 임야에서 발생하는 비점오염물질의 EMC와 유사한 경향을 보였다(BOD 0.3~3.0 mg/L, TN 0.324~2.215 mg/L, TP 0.111~0.518 mg/L). Site 2의 경우 총 6회를 모니터링 하였으나, 4번째 이벤트까지는 하천수의 역류와 기기의 고장으로 인하여 정확한 유량이 측정되지 못하였다. 따라서 EMC는 5차와 6차 이벤트에만 산정하였다. BOD의 EMC는 6.4~22.7 mg/L, COD_{Mn}은 8.8~28.9 mg/L의 분포를 보였다. 영양염류인 TN은 1.5~1.7 mg/L, TP는 0.40~0.98 mg/L의 범위로서 이병수 등(2008)의 경안천 유역 농촌지역으로부터 발생하는 비점오염물질의 EMC_{TN} 2.4~4.5 mg/L, EMC_{TP} 0.2~0.5 mg/L와 비교적 유사한 것으로 나타났다. 전체적으로 site 1보다 높은 EMC를 보였다.

Fig. 5는 site 1(산림)에서 산정된 EMC의 통계 분석결과다. Box 그래프의 최하단은 백분의 25% 값, median은 중앙값, 최상단은 백분의 75% 값을 의미한다. EMC_{BOD}의 중앙값과 평균값은 2.1 mg/L로 동일한 값은 보였으며, EMC_{COD}는 각각 2.6 mg/L와 2.9 mg/L로 비교적 유사하였다. 또한

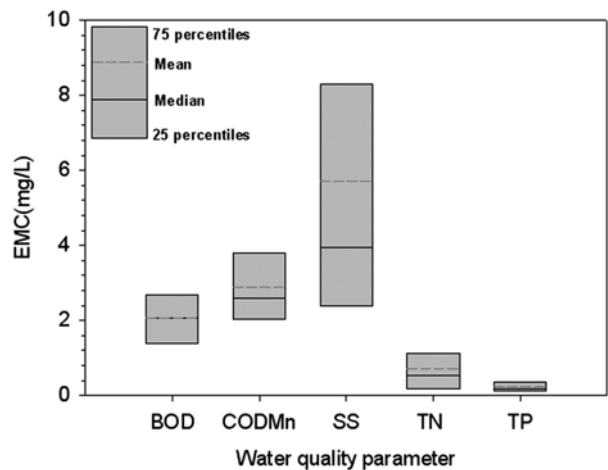


Fig. 5. Statistical summaries of EMC of site 1.

영양염류인 EMC_{TN}의 중앙값과 평균값은 각각 0.55 mg/L와 0.72 mg/L로 조사되었으며, EMC_{TP}는 각각 0.18 mg/L와 0.24 mg/L로서 큰 차이를 보이지는 않았다. 반면 EMC_{SS}는 가장 넓은 분포를 보였으며, 중앙값(4.0 mg/L)과 평균값(5.7 mg/L)의 차이도 비교적 크게 나타났다.

3.5. 부하량 및 원단위 산정

Fig. 6에는 토지이용별 단위부하량을 수질항목별로 나타내었다. 각 수질인자에 따라 비교하였을 때 TN과 TP 항목

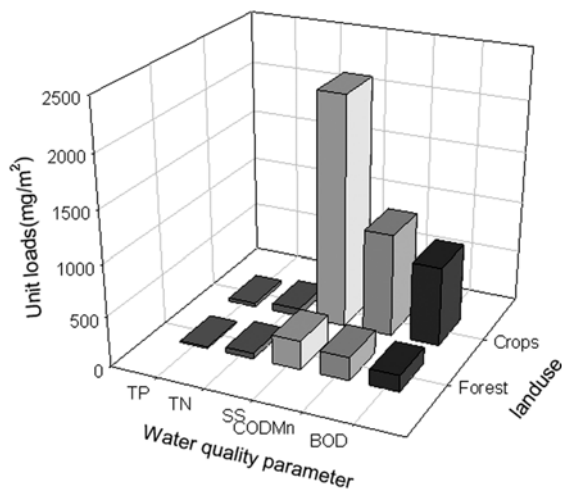


Fig. 6. Pollutant mass loading per watershed area.

은 밭 우점 지역(site 2)과 산림 우점 지역(site 1)에서 유사한 값을 보였으나, BOD와 COD_{Mn}은 밭 우점 지역의 단위 부하량이 월등히 높게 나타났다. 특히 SS와 관련하여 밭 지역은 강우가 집중될 경우 토양의 유실이 동시에 발생하기 때문에 SS의 단위부하량이 2,245 mg/m²으로 높은 값을 보인 반면, 산림 지역은 대부분이 산림과 초지로 구성되어 있기 때문에 토양의 유실로 인한 SS 성분의 증가보다는 나뭇잎, 풀 등의 이물질에 의한 SS 성분이 관측되고, 그 양이 적기 때문에 부하량 면에서는 매우 낮은 282 mg/m²의 값을 보인 것으로 판단된다.

Table 3에는 강우지속시간에 따른 비점오염물질의 부하량 산정 결과를 요약하여 나타내었다. Site 1의 BOD는 4.6 mg/m²/hr, TN은 1.6 mg/m²/hr, TP는 0.4 mg/m²/hr로 조사되었으며, site 2의 BOD는 32.9 mg/m²/hr, SS는 95.5 mg/m²/hr, TN은 3.2 mg/m²/hr, 그리고 TP는 1.5 mg/m²/hr로서, 동일한 지역의 동일 강우강도, 그리고 동일한 강우지속시간 하에서 유출되는 비점오염 부하는 밭 지역이 산림 지역보다 항목에 따라 1.5~9.6배 정도 높게 나타났다.

Table 4는 식 (5)를 이용하여 산정한 원단위와 선행된 연

Table 3. Pollutant mass loadings per rainfall duration time (Unit : mg/m²/hr)

Water quality parameter Land use	BOD	COD _{Mn}	SS	TN	TP
Forest	4.6	6.5	8.1	1.6	0.4
Crops field	32.9	42.5	95.5	3.2	1.5

구에서 제시된 원단위를 비교·제시하였다. 원단위 환산인자를 계산하기 위한 연 평균 강수량은 Table 1의 자료에서 10 mm 이하의 강수량은 제외한 1,265.71 mm를 이용하였다. 강우사상에 따른 산림 지역의 원단위는 약 3배에서 11배까지 차이가 났다(Table 4). 이는 연간 원단위 환산인자에 사용되는 강우 이벤트별 강수량의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 산림지역의 BOD 평균 원단위는 13.5 kg/ha/year로서 이현동 등(2001)과 김성수 등(2002)이 산정한 3.2~3.7 kg/ha/year과 2.2 kg/ha/year보다는 3.7~6.1배 정도 높게 나타났으나, 선행 연구 범위(2.6~13.9 kg/ha/year)에 포함되었다. 영양염류인 TN의 평균 원단위는 4.3 kg/ha/year로서 이현동 등(2001)이 제시한 1.1~1.3 kg/ha/year보다는 약 3~4배 정도 높았으며, 김성수 등(2002)의 26.4 kg/ha/year보다는 낮게 산정되었다. TP의 평균 원단위는 1.6 kg/ha/year로서 TN과 유사한 경향을 보였다.

밭 지역의 BOD 원단위는 225.1 kg/ha/year로 조사되었으며, TN은 24.7 kg/ha/year, TP는 10.7 kg/ha/year로서 기존 문헌상의 값보다 높게 산정되었다. 원단위의 평균값은 기존의 연구 결과와 차이를 보였는데, 이는 연구방법의 차이에 기인하는 것으로 본 연구에서는 토지를 중분류(23종)에 기준하여 산정한 반면 기존의 연구는 소배수구역이나 하천유역을 하나의 토지이용으로 가정하여 하천에서 산정되었기 때문이다. 또한 기존의 연구결과도 연구자와 지역에 따라 많은 차이를 보였으며, 김성수 등(2002)의 연구에서는 농업 지역보다 산림지역의 TN과 TP의 원단위가 높은 것이 특이하였다. 향후 비점오염 원단위의 산정은 토지의 중분류 구분과 장기간에 걸친 조사가 필요할 것으로 판단되며, 신동석(2007)은 기존 원단위는 대분류 지목에 대한 결과로서

Table 4. Comparison of unit loading on land-use type

Land use	BOD	COD	SS	TN	TP	References
Farm	11.0~2,047.0	16.8~7,201.0	11.8~1,149.3	1.5~850.5	0.26~315.4	Lee et al. (2001)
Forest	2.6~13.9	9.8~13.9	4.0~1,143.5	0.95~16.1	0.04~0.91	
Rice	2.8~41.6	7.2~135.0	16.1~167.9	19.3~82.5	0.37~16.4	
Crops	2.9~25.9	12.2~91.0	23~4,800.0	1.3~36.9	0.18~3.98	
Urban	29.2~816.1	113~1,226.4	460~4,792.0	1.1~157.0	0.40~31.0	
Forest/Resort	3.2~3.7	6.7~7.6	325.4~342.0	1.1~1.3	0.096~0.104	Lee et al. (2001)
Crops	18.9~19.8	33.7~35.4	348.4~364.0	6.6~7.0	0.516~0.542	
Urban	363.2~379.2	1,807.9~1,887.7	9,273.5~9,682.5	118.6~123.9	3.373~3.522	
Forest	2.2	43.6	798.5	26.4	10.5	Kim et al. (2002)
Agricultural	7.6	26.8	1,066.5	7.7	4.8	
Urban	19.1	200	2,923.5	37.1	17.7	
Forest (Avg.)	6.5~20.3 (13.5)	6.5~27.4 (19.4)	13.3~57.9 (31.9)	0.8~8.6 (4.3)	0.5~2.6 (1.6)	This study
Crops (Avg.)	(225.1)	(291.6)	(662.8)	(24.7)	(10.7)	

유역모델을 이용한 비점유출해석을 지원하기 위해서는 전 자지도의 중분류에 해당하는 23종에 대한 오염물질 유출농도의 조사도 필요하다고 하였다.

밭 지역은 2회만이 측정되어 타 연구자와 비교·검토가 어려웠다. 그러나 본 연구의 결과만을 기초할 때, 밭 지역의 원단위는 산림지역의 원단위보다 BOD를 기준하면 약 17배, TN은 6배, TP는 약 7배 정도 높은 원단위로 산정되었으며, 이는 비료의 사용으로 인한 영향으로 판단된다.

3.6. 상관성 분석

Table 5에는 오염물질간의 상관관계를 분석하여 제시하였다. 상관계수는 -1에서 +1까지의 값을 갖는데, 보통 상관계수의 절대값이 0.6 이상일 경우 상관관계가 높다고 말하며, 0.3 이하는 상관관계가 낮다고 할 수 있다. 또한 인자간의 상관관계가 없을 시에는 0으로 표시한다. 분석결과에 따르면 산림 지역은 많은 항목이 유의수준 1%에서 음의 상관성을 나타내었다. 반면 Runoff-COD_{Mn}, Runoff-BOD, SS-TN, BOD-COD_{Mn}의 상관관계는 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, BOD와 COD_{Mn}의 상관계수는 0.73으로 가장 높게 나타났다.

밭 지역은 몇몇 항목을 제외한 모든 항목이 유의수준 1%에서 양의 상관성을 나타내었는데, 이는 비점오염원의 오염물질별 배출특성이 서로 관련이 있다는 것을 의미한다. 특히 SS-BOD, SS-TP, COD_{Mn}-BOD, COD_{Mn}-TP, BOD-TP의 상관관계는 99%의 신뢰수준에서 통계학적으로 유의하였다. 농경활동으로 배출되는 영양염류 중 TP는 다른 항목들과 높은 상관성을 보였으나, TN은 낮은 상관성을 보였다. 이는 농경지에서 질소와 인의 배출특성에 기인하는 것으로 판단된다. 강우시 토양내의 질소는 지표면으로의 직접 유출보다는 지하로 침투하여 기저유출의 형태로 지하수나 하천수로 이동하기 때문에 다른 오염물질과 낮은 상관성을 설명할 수 있다(최중대 등, 1999). 반면 강우시 토양내의 인은 토립자에 흡착되어 토양유실과 함께 직접유출수로 유출되기 때문에 타 오염물질과 높은 상관성을 보인 것으로 판단된다(김현수 등, 2004). 이러한 상황을 반영하듯 TP와 TN의 상관계수는 0.08로서 가장 낮게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 강우시 노곡천 유역의 산림과 밭 지역의 비점오염물질의 유출특성을 모니터링 하였다. 연구결과는 다음과 같다. 강우시 유출되는 비점오염물은 강우초기에 오염물질의 농도가 높았으며, 유출이 지속됨에 따라 그 농도가 감소되는 현상을 보였다. 이는 합류식 하수관거 등에서 발생하는 초기강우의 현상과 유사한 형태로서 본 연구에서의 EMC는 유출수량이 고려된 유량가중평균농도로 산정하였다. 산정된 EMC를 살펴보면, 농업 지역 중 산림지역의 EMC는 BOD는 1.3~2.6 mg/L의 범위를 보였으며, COD_{Mn}은 1.8~4.7 mg/L, TN은 0.1~2.1 mg/L, TP는 0.12~0.49 mg/L, SS는 2.0~16.1 mg/L의 EMC 범위로 산정되었다. 한편 국내의 경우 하수관거나 고속도로 등의 불투수 지역의 EMC 산정에 관한 연구는 많이 수행되고 있으나, 투수지역인 농업지역의 유역이 아닌 세부 지목에 대한 연구는 미미하다. 따라서 본 연구에서 산정된 EMC와 중분류별로 산정된 원단위는 오염총량제와 관련한 비점오염물질을 산정하는데 중요한 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 원단위는 산정방법의 차이로 인하여 기존의 문헌과 직접적인 구분은 어려웠다. 향후에는 본 연구처럼 토지를 중분류로 구분한 연구가 장기적이고 체계적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김건하, 김영철, 이동률, 정하영, 여중현(2003). 우리나라 농지-임야유역으로부터의 강우유출수 EMC 부하 분석 및 추정. *대한환경공학회지*, **25**(6), pp. 760-770.
- 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진(2002). 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사. *대한환경공학회지*, **24**(11), pp. 2019-2027.
- 김이형, 고석오, 이병식, 김성길(2006). 국내 고속도로 강우 유출수의 EMCs 및 유출부하량 산정. *대한토목학회논문집*, **26**(2B), pp. 225-231.

Table 5. Person correlation coefficients

Water quality parameter		Runoff	SS	COD _{Mn}	BOD	TN	TP
Item							
Site 1 (Forest)	Runoff	1	-0.15	0.35**	0.28	-0.07	-0.19
	SS		1	-0.07	0.06	0.35**	0.10
	COD _{Mn}			1	0.73**	-0.08	-0.01
	BOD				1	-0.03	0.03
	TN					1	0.07
	TP						1
Site 2 (Crops)	Runoff	-	-	-	-	-	-
	SS		1	0.31	0.49**	0.09	0.61**
	COD _{Mn}			1	0.83**	0.28	0.49**
	BOD				1	0.32	0.36**
	TN					1	0.08
	TP						1

** p<0.01, * p<0.05

- 김현수, 김진수, 김영일, 정병호(2004). 논외 영양물질 배출 부하 특성과 수질정화 기능분석. *한국관개배수학회*, **11**(1), pp. 36-44.
- 신동석(2007). 비점오염원 원단위 개정을 위한 조사연구 방향. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 429-433.
- 신창민, 최지용, 박철휘(2004). 도시지역에서의 토지이용별 비점오염물질 유출특성. *대한환경공학학회지*, **26**(7), pp. 729-735.
- 여중현, 김건하(2005). 도시, 농촌 및 임야유역으로부터 배출되는 비점원 오염부하의 특성비교. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(2), pp. 184-189.
- 이병수, 정용준, 박무중, 길경익(2008). 경안천 유역 농촌지역의 비점오염원 배출 특성에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(2), pp. 169-173.
- 이현동, 안재환, 배철호, 김운지(2001). 강우시 유출부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정. *수질보전 한국물환경학회지*, **17**(3), pp. 313-326.
- 정성민, 장창원, 김재구, 김범철(2009). 한강상류 고령지 농업지역에서의 강우시 비점오염 유출 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(1), pp. 101-111.
- 최중대, 이찬만, 최예환(1999). 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향. *한국수자원학회지*, **32**(4), pp. 501-510.
- 환경부(2007). *수질 및 수생태계 보전에 관한 법률*.
- Bedient, P. B., Harned, D. A., and Characklis, W. G. (1978). Stormwater analysis and prediction in Houston. *J. Environ. Eng. Div. ASCE*, **104**(EE6), pp. 1087-1100.
- Bertrand-Krajewski, J. L., Chebbo, G., and Saget, A. (1998). Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharge and the first flush phenomenon. *Water Res.*, **32**(8), pp. 2341-2356.
- Geiger, W. (1987). Flushing effects in combined sewer systems. *Proceedings of the 4th Int. conf. on urban drainage*, pp. 40-46.
- Gupta, K. and Saul, A. J. (1996). Specific relationship for the first flush load in combined sewer systems. *Water Res.*, **30**(5), pp. 1244-1252.