

## 강우시 밭의 비점오염물질 유출 특성

원철희 · 최용훈 · 신민환 · 신동석\* · 강동구\*\* · 최중대†

강원대학교 지역기반공학과

\*국립환경과학원

\*\*강원대학교 환경공학과

## Runoff Characteristics of NPS Pollution on Field in Rainy Season

Chul-hee Won · Yong-hun Choi · Min-hwan Shin · Dong-suk Shin\* · Dong-Gu Kang\*\* · Joong-dae Choi†

Department of Agricultural Engineering, Kangwon National University

\*National Institute of Environmental Research

\*\*Department of Environmental Engineering, Kangwon National University

(Received 12 January 2011, Revised 22 July 2011, Accepted 27 July 2011)

### Abstract

We have examined the runoff characteristics of nonpoint source (NPS) in fields. Two monitoring sites were equipped with an automatic velocity meter and water sampler. Monitoring was conducted at fields 1 and field 2 during the rainfall event. Ten rainfall-runoff events were monitored and analyzed during the study period. The results show that runoff occurred if daily rainfall and intensity were higher than 40 mm and 1.6 mm/hr except a few extreme rainfall events with very high intensity. Runoff of field 1 was approximately twice of that of field 2. Event mean concentrations (EMC) and pollution load of analyzed water quality indices were also higher in field 2 than in field 1. Especially, TN load from field 2 was 75.4 mg/m<sup>2</sup> and was about 5 times higher than that from field 1. Analysis of Pearson correlation coefficient of water quality parameter indicates that besides of TN all items in fields 1 have tight relationship respectively ( $p < 0.01$ ). But those of fields 2 have a significant ( $p < 0.05$ ). Estimating units loading of NPS, we suggested that variable such as soil texture, rainfall amount and intensity and slope were needed to be considered from agricultural landuses. The results of this study can be used as a basic data in the development and implementation of total maximum daily loads (TMDL) in Korea.

**keywords** : Event mean concentrations (EMC), Pearson correlation coefficient, Pollution load, Total maximum daily loads (TMDL), Unit loading

## 1. 서론

비점오염원은 불특정 장소에서 불특정하게 오염물질을 배출하는 배출원으로(환경부, 2007), 강우시 배출되는 비점오염물질은 강우특성(강우강도와 강우지속시간), 토지이용 형태, 지형 그리고 농경지에서는 시비의 양에 따라서 달라질 수 있으며(라석관과 김기성, 1996; 원철희 등, 2009; Sartor et al., 1974), 일간, 계절간 배출량의 변화가 크기 때문에 점오염물질과는 달리 예측과 정량화 및 인위적 조절이 어려운 단점이 있다. 또한 비점오염원에 의한 유출오염 부하는 하수처리장에 의한 것보다 매우 높은 것으로 보고되고 있으며(김석구 등, 2006), 환경부(2006)에 의하면 우리나라의 비점오염원은 점차 증가하여 2015년에는 전체 수질오염물질의 65~70%까지 증가할 것으로 예상되기 때문에 이에 대한 적절한 대비책이 요구되고 있다. 또한 개발에 따른 불투수층 면적의 증가로 강우 유달 시간이 짧아지고

유출률이 커져서 강우초기 유출에 의해 오염물질이 다량 유출되는 현상도 발생한다(방기웅 등, 1997; Field and O'shea, 1993). 따라서 다양한 배출특성을 가지고 있는 비점오염원의 효과적인 관리를 위해서는 오염부하량의 정량화와 이동경로의 파악이 필수적이며(최지용과 신은성, 1997), 수계의 비점오염원 관리는 토지이용에 따른 원단위의 산정을 통하여 통합적으로 수행할 필요가 있다. 특히 비점오염원 중 농촌지역에서 발생하는 비점오염원은 영양물질 뿐만 아니라 탁수를 동반하기 때문에 더욱더 문제시되고 있다. 미국의 경우 1990년대 이후 EPA (Environmental Protection Agency)의 주도하에 비점오염문제 해결을 위하여, 비점오염원에 관한 모니터링 및 모델링 연구에 매진하고 있으며, 비점오염물질의 수계유입을 관리하기 위하여 장기적인 모니터링과 모델링을 수행하여 최적관리방안(Best Management Practices: BMPs)의 수립을 추진하고 있다(김이형과 강주현, 2004).

국내의 농촌 비점오염원에 대한 연구는 1980년대 후반부터 유역단위에서 실시되어 왔으며(김건하 등, 2003), 1990년도에는 밭(이인선, 1990; 이창기, 1990; 최의소 등, 1991),

† To whom correspondence should be addressed.

jdchoi@kangwon.ac.kr

논(신동석과 권순국, 1990), 산림(이인선, 1990)으로 세분한 원단위 연구가 실시되었다. 2000년도 중반부터는 토지 이용 상 중분류에 따른 비점오염원의 유출 모니터링 연구가 4대강 물환경연구소를 중심으로 활발히 수행되어 오고 있다. 이와 관련하여 원철희 등(2009)은 산림과 밭 지역의 강우시 비점오염물질 배출특성을 조사하였으며, 서지연 등(2010)과 최용훈 등(2010)은 광산지역에 대한 비점오염물질의 배출특성을 규명하고자 하였다. 또한 산림의 임상 형태에 따른 배출특성도 보고된 바 있다(신민환 등, 2010a). 그러나 아직까지 토지의 이용 형태에 따른 연구는 초기 수준으로서 지속적인 모니터링 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히 토지 지목 중 단일 토지(밭)에서 발생하는 비점오염원에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이며, 일부 인공강우 조건에서 밭을 모의한 실내 연구만이 진행 중에 있다(신민환 등, 2009, 2010b).

이에 본 연구에서는 환경부 토지피복분류 중 중분류에 포함되는 밭의 강우시 비점오염물질의 배출 특성을 비교·분석하고 제시함으로써 비점오염물질의 원단위 산정에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 시험포 조성 및 장비 설치

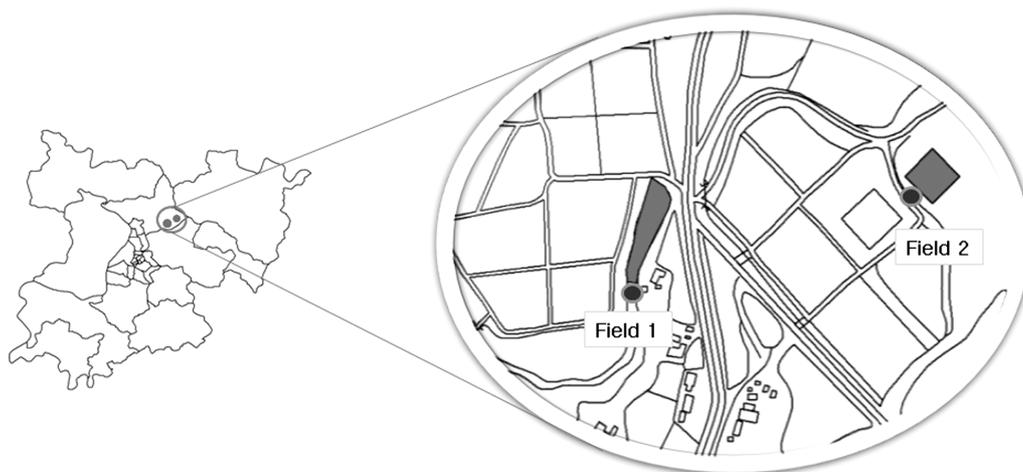
본 연구에서는 밭의 여러 형태 중 평지에서 흔히 볼 수 있는 밭 1과 고랭지를 대표할 수 있는 밭 2를 대상으로 강우시 비점오염물질의 유출특성을 조사하였다. 밭 1(북위 37° 55' 59", 동경 127° 47' 08")은 한강 상류 평야부의 특성을 대표하도록 경사도를 3.2%로 조성하였으며, 면적은 1,276.6 m<sup>2</sup>로서 밭의 길이는 90 m, 최장 폭은 17 m이다. 밭 1은 영양 성분이 거의 없는 사질토(마사토) 토양을 객

토하여 조성하였으며, 상하경으로 경운하여 가능한 많은 유출수가 발생하도록 유도하였다. 강우시 밭에서 발생한 유출수는 H-flume을 통하여 유출이 되게 하였으며, 시료의 채수는 자동채수기(ISCO 3700 automatic water sampler, USA)를 이용하였다. 한편 밭 1은 경사가 완만하고 사질토이기 때문에 강우량이 작을 경우 유출이 발생하지 않고 강우강도가 매우 높을 때만 일시적으로 유출이 발생할 것으로 예상되었다. 따라서 자동채수기 흡입호스의 위치를 조정하여 작은 유출에도 수질시료를 채취할 수 있게 하였으며, 채수 간격도 짧게 하여 강우유출발생시 충분한 숫자의 시료가 가능하게 하였다.

밭 2는 담수호 상류의 고랭지 농업지역내의 밭을 대표할 수 있도록 경사도는 27.5%, 경사장 30 m 그리고 폭이 약 30 m가 되게 조성하였다. 밭 2의 면적은 860.5 m<sup>2</sup>이며, 토성은 양질사토이다. 밭 2는 강원대학교 농장내에 위치(북위 37° 55' 59", 동경 127° 47' 08")한 산을 개간하여 조성하였으며, 밭 1과는 다르게 등고선에 평행하게 경운을 하였다. 시험포의 하단에는 침사지 역할을 하는 저류지를 조성한 후 부직포로 덮었다. 저류지는 강우시 발생하는 토사를 포집함으로써 수위 측정시 발생할 수 있는 오차를 줄이고자 설치하였다. 강우시 발생하는 유출수는 Drop box로 유입된 후, 부자식 자동수위계가 설치된 집수정으로 유입되게 하여 수위를 측정하고 유량으로 환산하였다. Drop box를 통하여 유출하는 유출량은 수위를 측정하여 환산하였다. 수위의 측정과 시료채취에 사용한 자동채수기는 밭 1과 동일한 제품을 이용하였다.

### 2.2. 작물 재배 및 비료 시비

모니터링 지점의 밭에는 콩을 표준재배방법인 이랑나비 60 cm에 포기사이 10 cm로 파종하여 재배하였으며, 시비는 콩 전용 복합비료(8-13-12)를 표준시비량에 근거하여 실



	Longitude/latitude	Area	Slope	Soil texture
Field 1	N 37° 55' 59" / E 127° 47' 08"	1,276.6 m <sup>2</sup>	3.2 %	Sand
Field 2	N 37° 55' 59" / E 127° 47' 08"	860.5 m <sup>2</sup>	27.5 %	Loamy sand

Fig. 1. Descriptions of monitoring sites in Chuncheon.

시하였다. 그러나 고랭지 지역을 모의한 밭 2는 화학비료 외에 관행적으로 사용하는 축분이나 퇴비 등을 시비하지는 않았다. 따라서 밭 2는 실제 고랭지 지역의 일반적 특징과는 일부 차이가 날 수 있다. 밭의 잡초제거는 알라유제와 식물전면제초제를 이용하였다.

### 2.3. 분석방법

밭 1과 밭 2는 2007년도에 조성한 후, 사전 예비 조사를 하였으며, 2008년에 본격적으로 모니터링을 하였다. 모니터링은 콩의 파종과 측정 장비의 설치가 완료된 5월부터 10월말까지 전수조사를 원칙으로 실시하였다. 수위계를 항상 작동시켜 농음으로서 유출이 발생하는 모든 강우사상의 모니터링이 가능케 하였다. 수질시료는 강우시 밭에서 직접적인 유출이 발생하기 시작할때부터 유출이 종료될 때까지 30분에서 1시간 간격으로 채취하였으며, 즉시 실험실로 이송하여 BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS, TN, TP, DOC의 6개 항목에 대하여 분석하였다. 그러나 제조작업에 사용된 농약의 성분은 분석하지 않았다. 또한 수질분석 항목 상호간의 상관성을 분석하기 위하여 SPSS Ver. 12를 이용하여 항목들 간의 Pearson 상관관계 분석을 실시하였다.

### 2.4. 강우사상 평균농도 (Event Mean Concentration; EMC) 산정

본 연구에서는 경사도가 다른 두 개의 밭 지역에서 발생하는 강우유출수 내의 오염물질을 비교하기 위해 EMC를 이용하였다. EMC는 강우 유출수와 함께 유출되는 오염물질을 평가하는데 가장 적절한 인자로 인식되며, 가장 널리 이용되고 있다(Novotny and Olem, 1993; U. S. EPA, 1983).

강우사상에 따라서 관측된 유량자료와 이에 해당하는 수질 자료를 이용한 강우사상별 EMC는 다음의 식에 의해 계산하였다(김건하 등, 2003).

$$EMC = \frac{\text{총 유출량 중 총 오염물질 중량}}{\text{총 유출량}} = \frac{\sum(Q_i \cdot C_i)}{\sum Q_i} \quad (1)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 일강우량 분석

모니터링 지점이 위치한 춘천시의 38년간 일강우량 자료의 분포현황을 10 mm 강우계급 단위로 분석하였다. 춘천 지방의 연평균 강우횟수는 103.68회로 나타나 평균 3.52일에 1회의 강우가 있는 것으로 나타났다(Table 1). 강우횟수의 70%는 일강우량 10 mm 이하의 작은 강우사상이었다. 연평균 1회 이상 내리는 최대강우계급은 50~60 mm/day로 1.94회이었으며, 차상위 계급인 60~70 mm/day는 연평균 0.84회 발생하였다. 연강우량의 80% 이상은 일강우량 90 mm 이하에서 발생하였다. 도시지역의 경우 강우시 10 mm 이하의 강우에서도 유출이 발생한다. 그러나 사질 및 양질 사토 농경지에서는 10 mm 이하의 강우에서는 유출이 발생하지 않으며, 순간강우강도가 매우 크지 않는 한 30 mm의 강우에서도 유출이 발생하지 않는다. 따라서 비점오염부하에 기초한 연간 오염부하 산정시에는 이러한 특성을 고려하여야 할 필요가 있다. 또한 일강우량이 많으면 많을수록 순간강우강도의 차이가 크기 때문에 이를 보완하기 위해서는 충분한 모니터링 자료의 확보가 필요할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 1년간의 모니터링 자료로서 강우 유출 특성 및 원단위를 산정하였다.

### 3.2. 강우 유출 특성

밭 1과 밭 2는 직선거리로 300 m 정도 떨어져 있기 때문에 강우량, 강우지속시간, 선행건기일수는 동일하다고 가정하였다. 연구기간동안 모니터링 지점에는 92일 동안의 강우로 19일에 걸쳐 13회의 유출이 발생하였다. 이중 예측이 어려웠거나 심야에 짧고 강한 강우로 발생한 유출을 제외하고 10회의 강우유출 사상을 모니터링 하였다. 유출이 발생한 10회의 수문 모니터링 결과를 밭 1과 밭 2로 구분하여 Table 2에 제시하였다. 유출이 발생한 강우시의 선행건기일수는 1.9~8.7일, 총 강우량은 40.0~239.4 mm의 범위로서 100 mm를 넘는 강우가 2회 발생하였는데, 7월 24~25일에는 200 mm가 넘는 폭우가 발생하였다. 강우지속

**Table 1.** Daily rainfall frequency analysis with respect to 10 mm classification in Chuncheon city region

Daily rainfall calss (mm)	Frequency (%)	Yearly total rainfall (mm)	Event mean rainfall (mm)	Cumulative rainfall (mm)	Class proportion (%)	Cumulative proportion (%)
0~10	72.42	198.95	2.75	198.95	15.32	15.32
10~20	12.81	184.92	14.44	383.87	14.24	29.56
20~30	5.97	146.69	24.58	530.56	11.3	40.85
30~40	4.03	139.92	34.70	670.48	10.77	51.63
40~50	2.35	103.31	43.87	773.79	7.95	59.58
50~60	1.94	105.93	54.73	879.72	8.16	67.74
60~70	0.84	53.86	64.22	933.58	4.15	71.89
70~80	0.73	55.08	75.11	988.66	4.24	76.13
80~90	0.71	57.12	80.48	1,045.78	4.40	80.53
90~100	0.39	37.71	96.00	1,083.49	2.90	83.43
110~310	1.49	215.20	165.67	1,298.69	16.58	100.00

시간은 3.5~49.5 시간의 범위를 보였다. 총 강우량을 기준할 때, 40 mm 이상의 강우에서 유출이 발생하였으며, 강우강도를 기준했을 때는 평균강우강도 1.6 mm/hr 이상에서 유출이 발생하였다. 그러나 수질시료를 채취하지 못한 8월 9일의 강우사상에서는 10.2 mm(강우지속시간 20 분)의 적은 강우량에서도 유출이 발생하였는데, 이를 강우강도로 환산하면 30.6 mm/hr에 해당한다. 즉 강우시 농경지에서의 유출은 강우량뿐 만아니라 강우강도에도 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

강우사상에 따른 밭 2의 유출수량은 2.25~126.22 m<sup>3</sup>의 범위로서 밭 1의 0.28~103.5 m<sup>3</sup>과 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 단위 면적당 유출량으로 환산시 밭 2의 유출량은 26.1~1,466.8 m<sup>3</sup>/ha로서 밭 1의 유출량인 2.2~810.7 m<sup>3</sup>/ha보다 크게 나타났다. 또한 이에 따른 밭 2의 유출계수는 0.043~0.645의 범위로서 밭 1의 유출계수 0.003~0.333과 비교시 2배 정도 높은 값을 보였다. 동일한 지역 밭에서의 유출수량과 이에 따른 유출계수는 선행무강우일수, 토성, 경사도, 토양의 함수량, 강우량, 강우강도 그리고 경운방법 등에 따라 영향을 받는다. 또한 강우시 유출수량은 이랑과 두둑의 조성방식(상하경, 평행경)에 따라 차이가 날 수 있다. 본 연구에서 밭 1은 이랑 및 두둑을 상하경으로 그리고 밭 2는 평행경으로 조성하였다. 따라서 상하경으로 조성한 밭 1보다 평행경으로 조성한 밭 2의 유출수량이 상대적으로 작을 수 있다. 그러나 이는 강우 초기의 일시적인 현상일 뿐이며, 강우가 지속되거나 호우가 발생할 경우에는 두둑이 붕괴되면서 고랑에 고여 있던 물이 일시에 유출될 수 있다. 이때에는 유출수에 의해 큰 결리(협곡 침식)를 형성할 수 있으며, 결리를 통하여 토양유실량이 크게 증가할 수 있다. 즉 밭 2의 이랑과 두둑을 상하경으로 조성하였을 경우 유출계수는 0.043~0.645보다 훨씬 커질 것으로 예상되며, 밭 2와 밭 1의 유출계수는 2배 이상 차이가 날 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 밭 2의 유출계수가 밭 1보다 높은 이유는 경사도와 토성(밭 1 사질토, 밭 2 양질사토)의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 밭 2의 경우 평행경으로 경운을 하였으나, 밭 1보다 침투능이 작은 양질사토이고 경사도가 약 9배 이상 높기 때

문에 유출계수가 크게 나타난 것으로 사료된다.

### 3.3. EMC

강우시 유출되는 오염물질의 농도는 일정하지 않고, 강우량과 강우지속시간에 영향을 받으며, 특히 유량에 크게 의존하게 된다. 따라서 비점오염물질의 농도 특성을 이용한 오염부하의 산정시에는 산술평균농도가 아닌 강우사상 평균농도(EMC)로 산정해야 해야, 강우특성에 적합한 값을 얻을 수 있다(김이형 등, 2006). 밭 2 TN의 EMC는 0.36~9.44 mg/L의 범위로서 밭 1보다 약 3배 정도 높게 나타났으나, TP의 EMC는 각각 1.54~3.61 mg/L와 0.27~3.72 mg/L의 범위로서 큰 차이를 보이지 않았다. 한편 밭 1 TP의 EMC는 원철희 등(2009)이 경사도 3.2%의 밭을 모니터링 한 TP의 EMC(0.40~0.98 mg/L)보다 4배 정도 높은 값을 보였는데, 강우 유출수내에 포함된 SS의 농도 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 밭 1의 경사도는 3.2%로 동일하나, SS의 평균 EMC는 895.6 mg/L로서 원철희 등(2009)이 보고한 값보다 30배 이상 높은 값을 보였다. 김현수 등(2004)에 의하면 토립자에 흡착된 인은 토양유실과 함께 유출되기 때문에 SS와 TP의 상관성이 높다고 하였다. 이러한 이유로 TP의 EMC가 차이가 난 것으로 판단된다. 한편 밭 2의 강우 유출수내 SS의 평균 EMC는 4,422.6 mg/L의 범위로서 밭 1의 SS의 EMC보다 약 5배 정도 높게 나타났다. 이는 밭 2의 토성이 양질사토로서 밭 1에 비하여 세립자의 함량이 높고 경사가 급하여 토양유실과 함께 기타 비점오염물질의 유실이 사질토인 밭 1보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

Table 3에는 밭 1과 밭 2의 오염물질 항목별 변동계수를 나타내었다. 밭 1에서 SS와 TN을 제외한 항목의 변동계수는 25.6~39.2%의 범위였으며, SS가 82.2%로서 가장 큰 변동폭을 보였다. 밭 2에서는 BOD와 DOC를 제외한 대부분의 항목에서 변동폭이 크게 나타났다. 특히 SS는 121.2%로서 가장 높게 나타났는데, EMC 분석 항목들 중에서 SS의 변화의 폭이 크다는 김길홍 등(2002)의 연구와 일부 일치하는 것으로 조사되었다.

Fig. 2는 밭 1과 밭 2에서 산정된 EMC의 통계분석결과

**Table 2.** Comparison of rainfall and runoff coefficient at the 2 fields

Rainfall date	ADD* (days)	Rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/hr)	Field 1		Field 2	
				Runoff (m <sup>3</sup> )	Runoff coefficient	Runoff (m <sup>3</sup> )	Runoff coefficient
2008/06/18	5.3	84.4	5.2	5.44	0.049	7.54	0.109
2008/07/02~03	2.9	45.6	1.6	4.10	0.069	5.37	0.144
2008/07/12~13	6.5	64.2	2.8	1.57	0.018	2.25	0.043
2008/07/19~21	2.6	131.4	2.7	11.12	0.065	18.35	0.171
2008/07/24~25	2.7	239.4	6.5	103.5	0.333	126.22	0.645
2008/07/30	2.9	40.4	11.5	6.78	0.129	8.36	0.253
2008/08/02~03	2.5	69.2	3.3	15.19	0.169	15.07	0.266
2008/08/18	1.9	59.2	4.6	6.88	0.094	9.49	0.198
2008/08/22~23	3.3	86.0	3.0	6.25	0.056	7.39	0.105
2008/09/01~02	8.7	59.8	2.1	0.28	0.003	8.90	0.182

\*ADD : Antecedent dry days

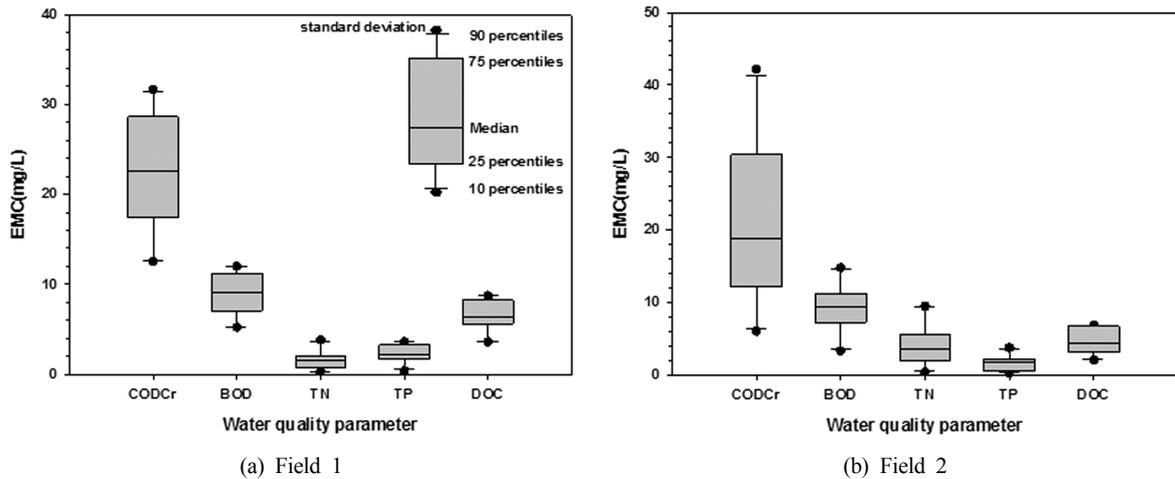


Fig. 2. Comparison of EMC between field 1 and field 2.

Table 3. Coefficient of variation of the analyzed water quality indices (Unit : %)

Item	COD <sub>Cr</sub>	BOD	SS	TN	TP	DOC
Field 1	27.3	25.9	82.2	63.3	39.2	25.6
Field 2	54.2	35.8	121.2	74.0	67.6	37.9

를 나타낸 것이다. Box 그래프의 최하단부터 백분의 10% 값, 25% 값, 중앙값(median), 백분의 75%값, 그리고 최상단은 백분의 90% 값을 의미한다. 밭 1과 밭 2의 COD의 EMC 중앙값은 각각 22.9 mg/L와 21.1 mg/L로 분석되었으며, BOD의 EMC의 중앙값은 각각 9.62 mg/L와 9.12 mg/L로서 유사한 값을 보였다. 영양염류인 TN의 EMC 중앙값은 각각 1.58 mg/L와 3.97 mg/L로 조사되었으며, TP의 EMC 중앙값은 각각 2.25 mg/L와 1.54 mg/L로서 조사되었다.

3.4. 오염 부하량 산정

Fig. 3에는 밭 1과 밭 2에서 측정된 단위면적당 오염부하량을 나타내었다. 모든 수질인자에서 밭 2의 단위면적당 오염부하량이 크게 나타났다. COD<sub>Cr</sub>과 BOD 그리고 TN의 단위면적당 오염부하량은 큰 차이를 보였는데, 특히 밭 2

TN의 오염부하량은 75.4 mg/m<sup>2</sup>로서 밭 1보다 5배 정도 높은 값을 보였다. 한편 그림에는 제시되어 있지 않지만 밭 2의 SS 오염부하량은 129,696 mg/m<sup>2</sup>으로서 밭 1의 19,193 mg/m<sup>2</sup>와 비교시 약 6.8배가 높게 나타났다. 이는 밭 2의 경사도(27.5%)가 밭 1(3.2%)에 비해 크기 때문에 강우시 SS를 유발하는 미세립자의 유출이 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다.

3.5. 원단위 산정

Table 4에는 본 연구의 모니터링 자료에 기초하여 산정된 배출 원단위를 나타내었다. 본 연구의 밭 1과 밭 2는 환경부의 토지이용 분류상 단일피복분류로 구분될 수 있기 때문에 오염부하량은 식 (2)를 이용하여 산정하였다. 여기서 EMC<sub>i</sub>는 i 번째 강우사상에 대한 유량가중평균농도(mg/L)이며, q<sub>i</sub>는 i 번째 강우사상의 총 유출량(m<sup>3</sup>/day) = C×I×A×10 [C : 토지이용별 유출계수, I : 강우량(mm), A : 면적(ha)], f : 연간 원단위 환산인자, 연평균강수량/실측기간 강우량 (10 mm 이상).

$$Unit\ load(kg/ha/yr) = EMC_i \times q_i \times \frac{f}{A} \tag{2}$$

밭 2의 배출 원단위는 밭 1 대비 BOD는 2배, TN은 5배 그리고 TP는 1.2배 정도 높은 값을 보였다(Table 4). 이는 두 지점의 경사도 차이와 토성의 차이에 기인하는 것으로 밭 2 지점의 토성은 양질사토로서 밭 1의 사질토에 비하여 미세립자의 함량이 많기 때문에 유출량이 증가하고 이로 인하여 오염부하가 증가한 것으로 판단된다. 한편 밭 2의 원단위는 김성수 등(2002)의 연구와 유사한 값을 보였으며, 이현동 등(2001)과 비교시 BOD와 TN의 원단위는 유사하였으나, TP는 2~10배 정도의 차이를 보였다. 그러나 원철희 등(2009)의 연구와 비교시 BOD는 10배, TN과 TP는 3 배 이상 낮게 나타났으며, 밭 1의 원단위는 기존의 연구와 많은 차이를 보였다. 이는 토지의 분류 기준(대분류, 중분류)과 연구기간 그리고 연구방법에 따른 차이에 기인하는

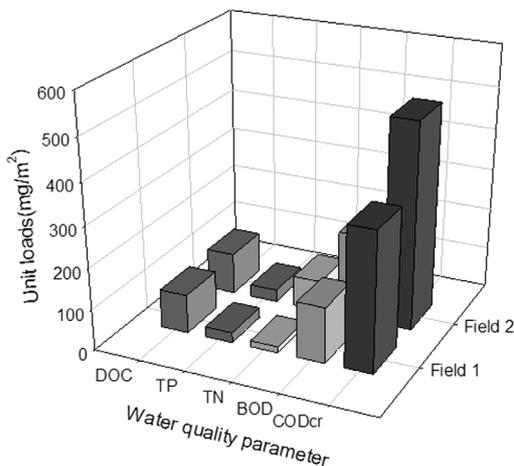


Fig. 3. Pollution load from the fields 1 and 2.

**Table 4.** Comparison of unit roading on crops field

(Unit : kg/ha/year)

Item	COD	BOD	SS	TN	TP	References
Crops	-	26.8	1,066.5	7.7	4.8	Kim et al. (2002)
Crops	-	18.9 ~ 19.8	348.4 ~ 364.0	6.6 ~ 7.0	0.516 ~ 0.542	Lee et al. (2001)
Crops	(291.6)	(225.1)	(662.8)	(24.7)	(10.7)	Won et al. (2009)
Field 1	0.5 ~ 105.2 (28.6)	0.2 ~ 44.7 (10.9)	0.3 ~ 6,938.9 (1,432.5)	0.0 ~ 3.5 (1.5)	0.0 ~ 6.1 (2.6)	This study
Field 2	10.4 ~ 122.6 (46.1)	3.9 ~ 52.9 (20.3)	62.7 ~ 44,043.6 (9,650.1)	0.4 ~ 15.5 (7.6)	0.3 ~ 7.2 (3.0)	This study

\* ( ) : Average

것으로 토지의 지목에 따른 비점오염 원단위를 산정하기 위해서는 강우유출수 조사방법을 동일하게 적용한 장기간의 조사가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.6. 원단위 보정

비점오염원은 유출오염원이기 때문에 유출이 발생하지 않을 경우 오염물질이 배출되지 않는다. 따라서 상기 식 (2)를 모든 지역에 적용할 경우 무리가 따를 수 있다. 불투수층의 도로 노면에서는 10 mm 이하의 적은 강우량에서도 유출이 발생할 수 있으나(김이형 등, 2006), 임야나 토지 등에서는 유출이 발생하지 않을 수도 있다. 특히 밭 지역에서의 유출은 토성에 큰 영향을 받으며, 평균 강우강도, 순간 강우강도, 경사도 그리고 재배작물의 종류에 따라라도 유출이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구처럼 토지이용을 세분류로 구분하여 오염부하량을 산정할 때는 유출이 발생하지 않는 강우사상은 배제하여야 한다. 임하땀 상류와 같이 점토질의 토성에서는 작은 강우량에서도 쉽게 유출이 발생하나, 사질토의 토성인 밭에서는 유출이 쉽게 발생하지 않는다. 본 연구에서 모니터링 한 밭 1과 밭 2의 토성은 사질토와 양질사토로서 강우강도가 큰 경우(2008년 8월 9일, 20분간 10.2 mm로 강우강도는 30.6 mm/hr로서 순간적인 호우로 유량만 측정이 되었으며, 수질은 측정할 수 없었던 강우사상임)를 제외하고는 40 mm 이하의 강우사상에서는 유출이 발생하지 않았다. 이에 본 연구에서는 연간 단위면적당 오염부하량을 산정할 때, 환산인자로 사용하는 f 값의 계산시 연평균 강수량에서 30 mm 이하의 강우사상을 제외하고 오염부하량을 산정하여 식 (2)로 산정된 오염부하량과 비교하였다. 연간 오염부하량의 산정은 강우계급별로 충분한 자료가 누적되어야 신뢰성이 높아질 것으로 판단된다. 그러나 본 연구는 1년간의 모니터링 자료에 기초하였다. 따라서 원단위 산정에 필요한 f 값 산정시 필요한 연간 강수량의 경우, 본 연구에서는 40 mm 이하의 강우량에서는 유출이 발생하지 않았지만, 산정된 값의 안정성을 고려하여 30 mm 까지 만을 제외하였다.

수정된 계산식에 의하여 산정된 밭 1과 밭 2 BOD의 원단위는 각각 7.4와 13.5 kg/ha/yr로 조사되었다. TN은 각각 1.0과 4.2 kg/ha/yr, TP는 각각 1.8과 2.0 kg/ha/yr로 조사되어 수정된 계산식을 이용할 경우 약 33%의 오염물질이 감소되는 것으로 조사되었다. 연구 결과는 본 연구 대상 지역의 밭에 한정되어야 하며, 보다 다양한 토성 및 경사도

에 대한 지속적이고 광범위한 연구 조사가 필요할 것으로 판단된다. 이를 통하여 보다 신뢰성 있는 원단위의 산정이 가능할 것으로 사료된다.

### 3.7. 상관분석

상관분석은 상관계수(R)과 유의수준(a), 그리고 p-값으로 표현할 수 있다. R은 표본집단에 대한 상관계수를 나타내며, p-값이 유의수준 1%내에 있으면 고도의 상관관계가 있다는 것을 의미하고, 유의수준 5%내에 있으며, 보통의 상관관계를, 그리고 5%보다 클 경우는 상관관계가 크지 않다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 모니터링 자료에 기초하여 Pearson 상관계수를 분석하였으며, 이를 Table 5에 제시하였다. 밭 1은 수문학적으로 외부의 영향을 거의 받지 않는 독립된 강우-유출현상을 보이는 밭으로 사질토의 토성과 긴 장방향으로 경운되었다. 밭 1의 TN과 다른 항목 사이에는 상관관계가 매우 적은 것으로 나타났으며, SS는 TN을 제외한 모든 항목에서 매우 높은 상관관계를 보였다. BOD와 DOC는 유의수준 0.01에서 0.866의 높은 상관관계를 보였다. 유량은 TN과 TP 항목을 제외한 모든 항목에서 유의수준 0.01에서 높은 상관관계를 보였다. 또한 BOD의 경우 TN의 수질항목을 제외하고 다른 모든 수질항목과 상관관계가 매우 높게 나타났다. 밭에서 강우시 배출되는 SS와 TP는 하천과 호수의 탁수나 부영양화를 유발할 수 있기 때문에 수질관리상 매우 중요하다. 밭 1에서 SS와 TP는 유의수준 0.01에서 유의성이 있는 것으로 나타났다. 이는 강우시 인은 토립자에 흡착되어 토양유실과 함께 유출되기 때문에 SS와 TP의 상관성이 높은 것으로 판단된다(김현수 등, 2004). 따라서 강우시 밭에서의 SS 발생량을 저감할 경우 더불어 TP의 오염부하량도 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 밭 2의 경우 TP와 SS의 상관계수는 0.233으로서 유의수준 0.05에서도 유의성이 낮았으나, TP는 SS를 제외한 오염물질 항목에서는 유의수준 0.05에서 유의성이 있는 것으로 조사되었다. 한편 밭 1과 밭 2의 오염물질 항목 간 상관관계는 차이를 보였는데, 이는 강우량과 강우강도가 동일할지라도 토성, 경운방법 그리고 경사도 등이 다르기 때문에 강우유출이 독립된 특성을 보이고, 또한 모니터링 자료의 부족도 상관관계를 분석하는데 충분치 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 2년 이상의 지속적인 모니터링을 통하여 자료를 축적하고 이에 근거하여 오염물질 항목간의 상관관계 분석이 필요할 것으로 판단된다.

**Table 5.** Pearson correlation coefficients among the variables

	Flow	SS	COD <sub>Cr</sub>	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	DOC	
Field 1	Flow	1	<b>0.643**</b>	<b>0.431**</b>	<b>0.397**</b>	-0.145	-0.020	<b>0.329**</b>
	SS		1	<b>0.623**</b>	0.314*	-0.002	<b>0.355**</b>	0.300*
	COD <sub>Cr</sub>			1	<b>0.439**</b>	0.032	0.119	<b>0.387**</b>
	BOD <sub>5</sub>				1	0.048	0.057	<b>0.866**</b>
	T-N					1	<b>0.416**</b>	0.109
	T-P						1	0.024
	DOC							1
Field 2	Flow	1	<b>0.460**</b>	<b>0.513**</b>	<b>0.376**</b>	0.066	<b>0.325**</b>	0.258*
	SS		1	<b>0.363**</b>	<b>0.384**</b>	-0.055	0.233	<b>0.350**</b>
	COD <sub>Cr</sub>			1	<b>0.789**</b>	0.205	0.265*	<b>0.694**</b>
	BOD <sub>5</sub>				1	0.138	0.238*	<b>0.812**</b>
	T-N					1	<b>0.338**</b>	0.042
	T-P						1	0.263*
	DOC							1

\*\* p<0.01, \* p<0.05

### 4. 결론

본 연구에서는 평지를 대표할 수 있는 밭 1과 고랭지 농업지역을 대표할 수 있는 밭 2의 강우시 비점오염물질의 유출특성을 조사·분석하였다. 오염물질의 농도는 유출수량이 고려된 EMC로 산정하였다. 밭 2의 TN과 SS의 EMC는 밭 1보다 높게 나타났으며, 이외의 항목에서는 유사한 경향을 보였다. 유출은 40 mm 이상의 강우에서 발생하였으며, 강우강도를 기준했을 때는 평균강우강도 1.6 mm/hr 이상에서 유출이 발생하였다. 유출계수는 밭 2에서 약 2배 이상 높게 나타났으며, 두 지역 모두 선행무강우일수나 강우강도와도 큰 연관성을 찾을 수 없었다. 단위면적당 오염부하량(mg/m<sup>2</sup>)은 밭 2에서 높게 나타났으며, 특히 TN의 오염부하량은 밭 1보다 5배 이상 높은 75.4 mg/m<sup>2</sup>으로 조사되었다. 이는 토성 및 경사의 차이에서 발생하는 것으로 판단되며, 화학비료만 시비한 밭 2의 경우, 실제 고랭지 농업지역처럼 유기물 및 질소의 농도가 높은 축분이나 퇴비 등을 이용할 경우 오염부하량의 차이는 더욱 커질 것으로 판단된다. 연간 원단위(kg/ha/yr)는 수질오염총량제상의 공식을 일률적으로 적용하기에는 많은 무리가 따를 것으로 판단되며, 본 연구에서 유출이 발생한 강우량을 고려했을 때, 밭 1과 밭 2의 BOD의 원단위는 각각 7.4와 13.5 kg/ha/yr로서 기존의 공식대비 33%가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 원단위를 산정하고 적용할 경우에는 토성, 강우량, 강우강도, 경사도 등이 고려된 공식의 개발이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

### 사 사

본 연구의 일부는 환경기초조사사업(과제명 : 주요 비점오염원 유출 장기 모니터링)과 Eco-star(과제번호 II-7-6) 과제 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

김건하, 김영철, 이동률, 정하영, 여중현(2003). 우리나라 농지·임야 유역으로부터의 강우 유출수 EMC 부하 분석 및 추정. *대한환경공학회지*, **25**(6), pp. 760-770.

김길홍, 정하영, 김건하, 김영철, 이동률(2002). 강우 유출수 EMC 농도의 통계학적 분석 및 평가. *공동춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 105-108.

김석구, 김영임, 강성원, 윤상린, 김소정(2006). 강우에 의한 도로 비점오염원 유출특성. *대한환경공학회지*, pp. 104-110.

김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진(2002). 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사. *대한환경공학회지*, **24**(11), pp. 2019-2027.

김이형, 강주현(2004). 고속도로 강우 유출수 내 오염물질의 EMC 및 부하량 원단위 산정. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 631-640.

김이형, 고석오, 이병식, 김성길(2006). 국내 고속도로 강우 유출수의 EMCs 및 유출 부하량 산정. *대한토목학회 논문집*, **26**(2B), pp. 225-231.

김현수, 김진수, 김영일, 정병호(2004). 논외 영양물질 배출 부하 특성과 수질정화 기능분석. *한국관개배수학회지*, **11**(1), pp. 36-44.

라석관, 김기성(1996). 수질에 미치는 비점오염원의 영향. *공업기술연구소 논문집*, **10**(10), pp. 139-149.

방기용, 이준호, 유명진(1997). 도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **13**(1), pp. 79-99.

서지연, 신민환, 원철희, 최용훈, 정명숙, 임경재, 최중대(2010). 가행광산 지역의 비점오염물질 유출특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(3), pp. 474-481.

신동석, 권순국(1990). 논에서의 질소 및 인의 농도와 유출입. *한국환경농학회지*, **9**(2), pp. 133-142.

신민환, 신동석, 이재운, 최재완, 원철희, 서지연, 최용훈, 최중대(2010a). 활엽수림, 침엽수림 및 혼효림 지역의 강우시 비점오염물질 유출특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(3), pp. 507-517.

신민환, 원철희, 최용훈, 서지연, 이재운, 임경재, 최중대(2009). 인공강우기에 의한 시험포장 토양유실량 모의 -

- 강우강도, 지표면 및 경사조건 변화-. 수질보전 한국물환경학회지, **25**(5), pp. 785-791.
- 신민환, 원철희, 최용훈, 서지연, 최종대(2010b). 인공강우기에 의한 밭에서의 영양물질 배출특성 모의 -시비량 및 경사도 변화-. 한국농공학회지, **52**(3), pp. 31-38.
- 원철희, 최용훈, 서지연, 김기철, 신민환, 최종대(2009). 산림과 밭 지역 강우 유출수의 EMC 및 원단위 산정. 수질보전 한국물환경학회지, **25**(4), pp. 615-623.
- 이인선(1990). 수질환경기준 최적화 방안에 관한 연구(II). 국립환경과학원.
- 이창기(1990). 폐하수중 영양성분의 생물학적 제거기술에 관한 연구. 국립환경과학원.
- 이현동, 안재환, 배철호, 김운지(2001). 강우시 유출부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정. 수질보전 한국물환경학회지, **17**(3), pp. 313-326.
- 최용훈, 원철희, 서지연, 신민환, 양희정, 최종대(2010). 유사광산 지역의 강우시 비점오염원의 유출분석. 수질보전 한국물환경학회지, **26**(3), pp. 413-419.
- 최의소, 박후원, 김태형(1991). 영양염류 원단위 산정에 관한 연구. 한국환경과학연구협의회.
- 최지용, 신은성(1997). 도시지역 비점오염원 관리방안 연구. 한국환경정책·평가연구원.
- 환경부(2006). 물환경관리 기본계획.
- 환경부(2007). 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률.
- Field, R. and O'Shea, M. L. (1993). *Integrated Storm water Management*, Lewis pub Ann Arbor.
- Novotny, V. and Olem, H. (1993). *Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution*. Van Nostrand-Reinhold Publishing, New York, NY, reprinted by John Wiley & Sons, Hoboken, NJ 1997.
- Sartor, J. D., Boyd, G. D., and Agardy, F. J. (1974). Water Pollution aspects of street surface contaminants. *Journal of WPCF*, **46**(3), pp. 458-467.
- U. S. EPA (1983). *Result of the National Wide Urban Runoff Program*, Water Planning Division. vol 1 Final Report.