



도라지와 감자 재배가 유출과 비점오염부하에 미치는 영향

Effect of Balloonflower and Potato Cultivation on Runoff and NPS Pollution Loads

신재영* · 신민환* · 최용훈* · 강현우* · 원철희* · 황문영** · 양희정** · 임경재* · 최중대***

Shin, Jae Young · Shin, Min Hwan · Choi, Yong Hoon · Kang Hyun Woo · Won, Chul Hee

Hwang, Moon Young · Yang, Hee Jung · Lim, Kyoung Jae · Choi, Joong Dae

ABSTRACT

An upland monitoring was conducted for about 4 years with respect to the water and quality of rainfall-runoff. The objective was to characterize of runoff and nonpoint source (NPS) pollution from a sandy field with 4.5 % in slope under balloonflower (2008-2010) and potato (2011) cultivation. Balloonflower was cultivated without any surface cover but potato was grown under plastic mulching. Runoff rate, EMCs and NPS pollution loads were estimated. The first flush effect was evaluated, and the correlation coefficient among the selected water quality indices were analyzed. Average rainfall size was higher by 2.3 mm when balloonflower was cultivated but average runoff rate was higher by 0.02 when potato was cultivated due to the plastic mulching. EMCs monitored from balloonflower field were higher than potato field except SS and TN, but all NPS pollution loads of potato field were 2.1~22.9 times greater than balloonflower field because of larger runoff volume. As a result of first flush effects, balloonflower and potato field were more influenced by increasing of accumulated rainfall and rainfall intensity rather than first flush. In the result of correlation analysis, there were no evident correlations between runoff and water quality indices. However, there were obvious correlations between SS and the other indices except TN. As a result of this study, it was thought that perennial balloonflower crop could help reduce runoff and NPS pollution loads but annual crop with plastic mulching increase them.

Keywords: Monitoring, runoff rate, EMC, NPS pollution load, first flush effect

1. 서 론

비점오염원은 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등과 같은 불특정 장소에서 오염물질을 배출하는 배출원을 말한다 (MOE, 2007). 이러한 비점오염원은 강우특성, 토지이용 형태, 지형 등에 따라 유출특성이 달라질 수 있으며 농경지에서는 시비 양에 따라서 달라질 수 있다 (Won et al., 2011). MOE (2006)에 의하면 우리나라의 비점오염원은 점차 증가하여 2015년에는 전체 수질 오염물질의 65~70 %까지 증가할 것으로 예상하고 있다. 이에 따라 환경부는 효율적인 비점오염원 관리를 위해 “4대강 비점오염원 관리 종합 대책”을 수립하였다. 2007년에는 소양호, 도암호, 임하호, 광주광역시를 비점오염원 (탁수) 관리지역으로 지정하고

관리대책을 수립하여 탁수 (흙탕물) 관리를 위한 제도를 마련하는 등 (MOE, 2007)의 노력을 하고 있다. 이러한 비점오염원은 발생지역에 따라 크게 도시지역과 농업지역으로 나눌 수 있다. 도시지역에서 발생하는 비점오염의 경우 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔으며 장치형 처리시설, 분류식 하수관거 등을 도입하여 효율적으로 강우유출수를 관리하기 위한 노력을 하고 있다. 이에 반해 농경지에서 발생하는 비점오염은 별도의 처리시설 없이 강우에 의해 하천으로 유입하게 되고, 화학비료와 퇴비의 사용으로 인해 하천의 영양염류 농도가 높아져 부영양화를 일으키기도 한다 (Chung et al., 1999). 또한 농경지 비점오염원은 탁수 원인물질을 동반하기 때문에 더욱더 문제시 되고 있다. 국내의 농촌 비점오염원에 대한 연구는 1980년대 후반부터 유역단위에서 실시되어 왔으며 (Kim et al., 2003), 2000년대 중반부터 정부의 토지피복 분류기준 중 세분류 단위의 모니터링 연구가 진행되고 있다. 이에 따라 Won et al., (2009)은 산림과 밭 지역에서 발생하는 비점오염원의 유출특성을 비교하였고, Shin et al., (2009)은 골프장에서 발생하는 비점오염원 유출특성에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Seo et al., (2010)은 가형 광산

* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

** 국립환경과학원 한강물환경연구소

† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6464

Fax: +82-33-251-1518

E-mail: jdchoi@kangwon.ac.kr

2012년 9월 24일 투고

2012년 10월 31일 심사완료

2012년 11월 6일 게재확정

에서 발생하는 비점오염물질 유출특성에 관한 연구를 수행하였으며, Choi et al., (2009)은 평지밭과 고랭지 밭에서 발생하는 비점오염물질의 유출특성 차이를 비교하는 연구를 수행하였다. 최근에는 단일 유역이 아닌 산림 및 농경지 복합 유역으로부터의 강우사상별 EMC를 산정하는 연구도 수행되었다 (Song et al., 2012). 하지만 대부분의 비점오염원에 대한 연구는 단기간의 모니터링 자료를 이용하여 유출특성을 파악하였으며 유출과 관련된 영향인자에 대한 분석은 수행되고 있지 않다. 특히 밭 지역의 경우 강우조건, 토성, 재배 작물, 시비량 및 시비시기, 지표의 피복상태 등에 따라 유출특성이 달라질 수 있지만 현재 밭 지역에서 수행되고 있는 대부분의 연구는 강우조건에 의한 분석이 대부분이며, 단기적인 모니터링 연구와 인공강우 시설에 의한 시험포장에서의 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 비점오염물질은 유역 또는 토지이용의 특성과 수문조건에 따라 유출특성이 크게 달라지기 때문에 장기적인 모니터링 자료의 축적이 선행된 후 비점오염물질의 유출특성에 대한 분석이 이루어질 필요가 있다. 또한, 밭의 경우 농민들이 매년 기후와 작물의 수익성 그리고 토양의 지력저하 등의 이유로 재배작물을 변경하기 때문에 밭에서 발생하는 비점오염물질의 유출특성을 파악하기 위해서는 실제 농민들이 경작하고 있는 밭에서 장기적인 모니터링이 선행된 후 축적된 자료를 통한 다각적인 분석이 이루어져야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 환경부 토지피복분류 중 세분류에 해당되

는 밭에서 2008년부터 2011년까지 약 4년간의 모니터링을 통해 재배 작물의 변화에 따른 강우유출수의 EMC와 단위면적당 오염부하를 산정하여 작물변화에 따른 비점오염물질 유출특성을 분석하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구지점 및 재배작물

2008~2011년 사이 약 4년 동안 밭의 강우유출 모니터링을 수행하였다. 모니터링 대상의 밭은 북위 (N) 37° 57' 17", 동경 (E) 127° 46' 05"으로 강원도 춘천시 신북읍 유포리에 위치하고 있다 (Fig. 1). 밭의 면적은 12,476.5 m²이며, 평균 경사는 1.9 %, 토성은 사질토이다. 밭은 자연적으로 두둑 혹은 도로로 구분되어 강우시 외부유출수의 유입이 거의 없었다.

밭의 작물은 농민이 임의로 선정하였으며 본 연구에서는 강우유출과 수질 모니터링을 수행하였다. 그리고 작물의 재배관리 및 시비량 등은 농민에게서 습득하여 자료의 분석에 사용하였다. 2008년부터 2010년까지 도라지를, 2011년에는 감자를 재배하였다. 도라지의 경우 지표가 피복되지 않은 나지 상태에서 작물을 재배하였으며 (이하 도라지 밭), 감자는 두둑에 비닐멀칭을 하여 작물을 재배하였다 (이하 감자밭). 도라지 밭에서는 질소 180 kg (144.3 kg/ha), 인산 320 kg (256.5 kg/ha), 칼륨 160 kg

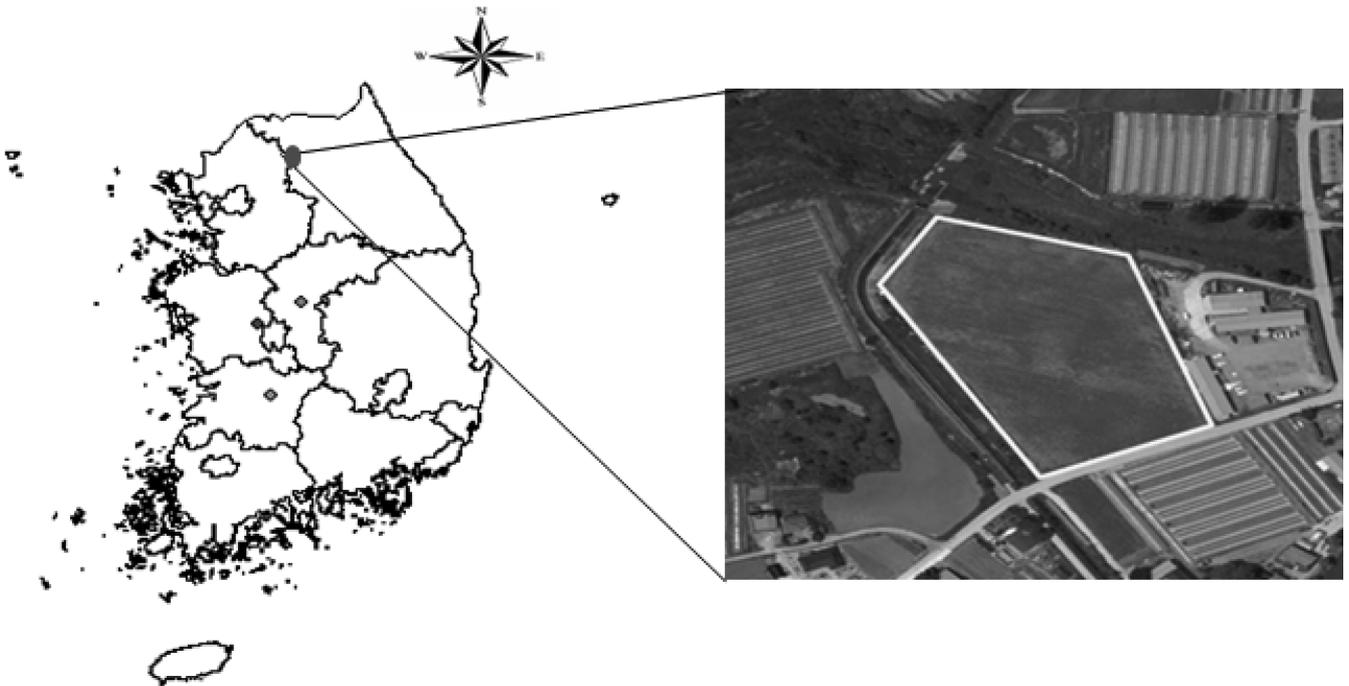


Fig. 1 Location and drainage area of the study field

(128.2 kg/ha)에 해당되는 발효퇴비 500포 (1포: 20 kg, 총: 10,000 kg)를 사용하였다. 또한 2년차에는 별도의 퇴비와 화학비료를 사용하지 않고 김매기를 위한 제초제를 밭의 둘레에 살포하였으며 숙음질을 하여 관리해 주었다. 3년차에는 유기질비료 1,600 kg을 시비하였다. 이는 질소 64 kg (51.2 kg/ha), 인산 27 kg (21.8 kg/ha) 그리고 칼륨 21 kg (16.7 kg/ha)에 해당한다. 감자는 두둑에 비닐 멀칭을 하고 재배하였다. 감자밭에는 유기질비료 6000 kg을 도라지 밭과 동일한 면적에 사용하였으며 이는 질소 240 kg (192.4 kg/ha), 인산 102 kg (81.8 kg/ha) 그리고 칼륨 78 kg (62.5 kg/ha)에 해당한다. 또한 감자 전용 복합비료 100포 (각20 kg, 합계: 2,000kg)를 동일한 면적에 사용하였으며 이는 질소 30 kg (24.0 kg/ha), 인산 36 kg (28.9 kg/ha), 칼륨 24 kg (19.2 kg/ha)에 해당되는 양이다. 그리고 감자가 싹이 올라온 후부터 종합 살균제인 다이센엠45 (500 g, 유효성분 Mancozed 75 %)를 물과 희석 (2 g 당 1 L)하여 사용하였다.

2. 모니터링 시설 및 방법

밭의 유출수는 H-flume과 부자식 수위계를 사용하여 측정하였다. 수위 측정은 5분 간격으로 하였으며, 수위-유량곡선식을 이용하여 유량으로 환산하였다. 이때 유출수의 수질농도를 분석하기 위해 자동채수기를 설치하여 시료를 채취하였다. 시료채취는 강우가 시작되면 강우유출수의 발생여부를 확인하고 유출이 시작된 시점부터 종료될 때까지 15분에서 2시간 간격으로 채취하였다. 채취된 수질시료는 수질오염 공정시험법에 준하여 SS, COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅, TN, TP, DOC를 분석하였다 (MOE, 2007). 또한 연구지점의 강우분석을 위하여 자기유량계를 설치하여 강우량을 측정하였다. 측정된 강우량은 기상청의 강우량과 비교하여 기기의 오작동 여부를 판단하였으며, 일강우량과 강우사상의 강우량, 평균강우강도, 최대강우강도, 강우지속시간, 선행건기일수 등을 산정하였다. 강우사상의 연속되는 강우의 선행건기일수는 Huff의 4분위법을 근거로 하여 6시간을 기준으로 구분하였다 (Lee et al., 2006).

3. EMC 및 단위면적당 오염부하량

강우시 유출되는 오염물질이 일정한 시간간격으로 변화 될 경우 산술평균을 이용한 산정방법이 타당한 결과를 도출할 수 있다. 하지만 밭에서 발생하는 오염물질은 유출량과 농도가 강우량과 강우강도에 따라 급격하게 변화하기 때문에 산술평균으로 특정 강우를 대표하는 것은 무리가 따른다. 따라서 강우시 유출되는

오염물질의 부하량 산정시에는 유량가중평균농도 (Event mean concentration, EMC)를 이용하여야 한다 (Won et al., 2009). 본 연구에서 이용한 EMC 산정방법은 식 (1)과 같다.

$$EMC (mg/L) = \frac{\sum_{t=1}^T C(t) q(t)}{\sum_{t=1}^T q(t)} \quad (1)$$

여기서, C (t)는 시간 t에서의 오염물질의 유출농도 (mg/L) 나타내며, q (t)는 시간 t에서 단위 시간당 배수구역 유출구로 유출되는 강우량 (mm), T는 강우지속시간 (hr)이다.

총오염부하량의 경우 면적, 강우량, 유출량 등에 따라 차이를 나타내기 때문에 단위면적당 오염부하량 값이 효율적인 기초자료로 활용될 수 있다. 단위면적당 오염부하량은 식 (2)와 같이 각 강우사상의 EMC와 유출량을 곱하여 유역면적으로 나누어 산정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Pollutant loading per watershed area (kg/ha)} \quad (2) \\ & = \frac{EMC_x (mg/L) \times Q (m^3)}{Area (m^2)} \times f \end{aligned}$$

여기서, Q (m³)은 각 강우사상의 유출량이며, Area (m²)는 유역면적 그리고 f는 단위환산이다.

4. 초기세척효과 및 상관관계 분석

초기세척효과의 판단은 강우기간 중 유출이 발생한 시간동안의 유량에 대한 누적 유량비와 오염부하량에 대한 누적오염부하량 비를 이용하였다. 유량Q (t)에 대한 누적 $\sum Q (t)$ 비인 Q (t)/ $\sum Q (t)$ 를 x축으로 하고 오염부하량 L (t)에 대한 누적오염부하량 $\sum L (t)$ 비인 L (t)/ $\sum L (t)$ 를 y축에 도식화 하였다 (Gupta and Saul, 1996).

또한 Pearson 상관분석을 이용하여 유출량과 수질 인자간의 상관성을 분석하였다. Pearson 상관분석은 상관계수 (R), 유의수준 (α), 그리고 p-값으로 표현한다. 여기서 R은 표본 집단에 대한 상관계수를 의미하며, p-값이 유의수준 1 %내에 있으면 고도의 상관관계, 유의수준 5 %내에 있으면 보통의 상관관계, 그리고 5 %보다 클 경우 상관성이 크지 않다는 것을 의미한다. 또한 상관계수 (R)의 절대값이 0.6 이상일 경우 상관관계가 높다고 말하며, 0.3~0.6은 보통의 상관관계, 0.3 이하는 상관관계가 낮다고 할 수 있다 (Won et al., 2009).

III. 결과 및 고찰

1. 강우량 및 유출량 조사결과

강우시 발생하는 비점오염물질의 유출특성은 강우조건에 따라 차이가 날 수 있다. 따라서 비점오염물질의 유출특성을 분석하기 위해서는 대상지역의 강우량 분포를 분석하고 모니터링 자료를 충분히 확보해야만 한다. 본 연구에서는 2008년부터 2011년까지 발생한 강우에 대하여 MOE (2009)에서 제시한 강우유출수 조사 방법을 기준으로 10 mm 이하, 10~30 mm, 30~50 mm, 50 mm 이상의 강우계급으로 나누어 계급별 발생횟수, 발생빈도 (%), 평균 강우량 (mm), 총강우량 (mm), 강우량비 (%)에 대하여 분석하였다 (Table 1). 연구기간 동안 총 394회의 강우가 발생하였고 총 강우량은 6,262.5 mm로 나타났다. 각 계급

별 평균 강우량은 2.6, 19.5, 35.8, 107.7 mm로 나타났다. 강우계급별 발생빈도는 10 mm 이하, 10~30, 그리고 30~50 mm 강우계급에서 각각 271회, 66회, 26회로 총강우빈도의 92.7 %이었으나 이들 강우계급의 강우량은 총강우량의 46.6 %이었다. 그

Table 1 Analysis of rainfall frequency of the study field between 2008 and 2011

Rainfall Class	Occurrence number (day)	Occurrence Frequency (%)	Average Rainfall (mm)	Total Rainfall (mm)	Rainfall Percentage (%)
Below 10 mm	271	68.8	2.6	706.1	11.3
10~30 mm	66	16.8	19.5	1,286.6	20.5
30~50 mm	26	6.6	35.8	931.0	14.9
Above 50 mm	31	7.9	107.7	3,338.8	53.3
Sum	287	100	-	6,262.5	100

Table 2 Analysis of rainfall runoff events of the study field between 2008 and 2011

Crop	Event	Date	Rainfall (mm)	Antecedent dry day (day)	Rainfall intensity (mm/hr)		Duration (hr)	Runoff ratio
					Ave.	Max.		
Balloon flower field	1st	'08.07.24~25	239.4	2.7	5.7	41.0	42.0	0.21
	2nd	'08.07.26~27	57.0	0.4	3.4	15.2	22.5	0.13
	3rd	'08.07.30	40.4	2.9	11.5	24.4	3.5	0.15
	4th	'08.08.02~03	69.2	2.5	3.3	23.8	27.8	0.19
	5th	'08.08.18	59.2	1.9	2.9	20.6	20.6	0.25
	6th	'08.08.22~23	86.0	3.3	3.0	11.4	28.7	0.18
	7th	'08.09.01~02	59.8	8.7	2.1	5.6	28.3	0.05
	8th	'09.07.09	202.0	1.4	10.5	36.2	19.3	0.14
	9th	'09.07.14	204.4	0.9	9.4	31.0	21.8	0.22
	10th	'09.07.17~18	42.8	3.5	1.5	11.2	27.8	0.03
	11th	'09.08.11~12	196.6	2.4	7.1	10.0	27.8	0.08
	12th	'10.09.10~11	279.0	2.0	7.0	82.0	46.0	0.04
	Average		128.0	2.7	5.8	26.0	26	0.14
Potato field	13th	'11.04.30	64.5	0.3	3.8	10.0	17.0	0.05
	14th	'11.05.09~10	110.5	2.2	4.1	29.0	27.0	0.29
	15th	'11.06.23	85.5	0.4	3.8	17.0	22.7	0.15
	16th	'11.06.25~26	91.0	0.3	2.7	11.0	33.4	0.16
	17th	'11.06.29	136.0	2.2	8.8	25.5	15.4	0.18
	18th	'11.07.03	72.0	2.7	3.9	12.5	18.5	0.14
	19th	'11.07.07	32.0	3.7	2.1	11.1	15.3	0.004
	20th	'11.07.08~09	47.0	0.8	2.5	13.0	18.5	0.01
	21st	'11.07.12~13	27.3	1.2	1.5	12.5	18.5	0.003
	22nd	'11.07.14	80.9	0.5	3.0	17.7	27.0	0.17
	23rd	'11.07.15~16	44.2	0.3	1.2	9.1	38.6	0.09
	24th	'11.07.26~29	503.5	1.3	8.3	51.1	61.0	0.49
	25th	'11.08.16~17	28.7	0.9	1.4	6.8	20.0	0.01
	Average		97.7	1.3	3.6	16.5	25	0.16
All Event			110.9	1.9	4.6	21.1	25	0.15

리고 50 mm 이상 강우계급의 발생빈도는 31회 (7.3 %), 평균 강우량은 107.7 mm, 강우량은 총강우량의 53.4 %로 매우 높게 나타났다. 연구기간 동안 6월부터 9월 사이의 강우량은 총강우량의 82.6 %로 매우 높았으며 또한 비점오염부하도 이 시기에 집중적으로 발생하는 것으로 생각되었다.

Table 2는 작물의 변화에 따라 도라지 밭과 감자밭으로 구분하여 각 강우사상의 강우량과 강우강도, 선행건기일수, 강우지속시간 그리고 유출률을 나타냈다. 도라지 밭에서 발생한 강우사상의 선행건기일수는 0.4~8.7일, 강우량은 40.4~279.0 mm, 유출률은 0.03~0.25의 범위로 나타났다. 또한 유출이 발생한 평균 강우강도와 최대 강우강도는 1.5~11.5 mm/hr와 5.6~82.0 mm/hr의 범위로 나타났다. 감자밭은 선행건기일수가 0.3~3.7일, 강우량 24.5~503.5 mm, 유출률은 0.003~0.49의 범위로 나타났으며 평균 강우강도와 최대 강우강도는 1.2~8.8 mm/hr, 6.8~51.1 mm/hr의 범위를 나타냈다. 연구기간 동안 총 25회의 모니터링을 수행하였으며, 2회를 제외한 23회는 6~9월 장마철 기간에 집중하였다. 여기서 25회는 강우에 의해 강우유출수가 발생한 횟수를 기술한 것이며, 실제 강우가 발생하였으나 유출이 발생하지 않은 강우사상에 대해서는 횟수에 포함하지 않았다. 25회의 강우사상 중 50 mm 이상의 강우가 발생한 강우사상은 18회로 나타났다.

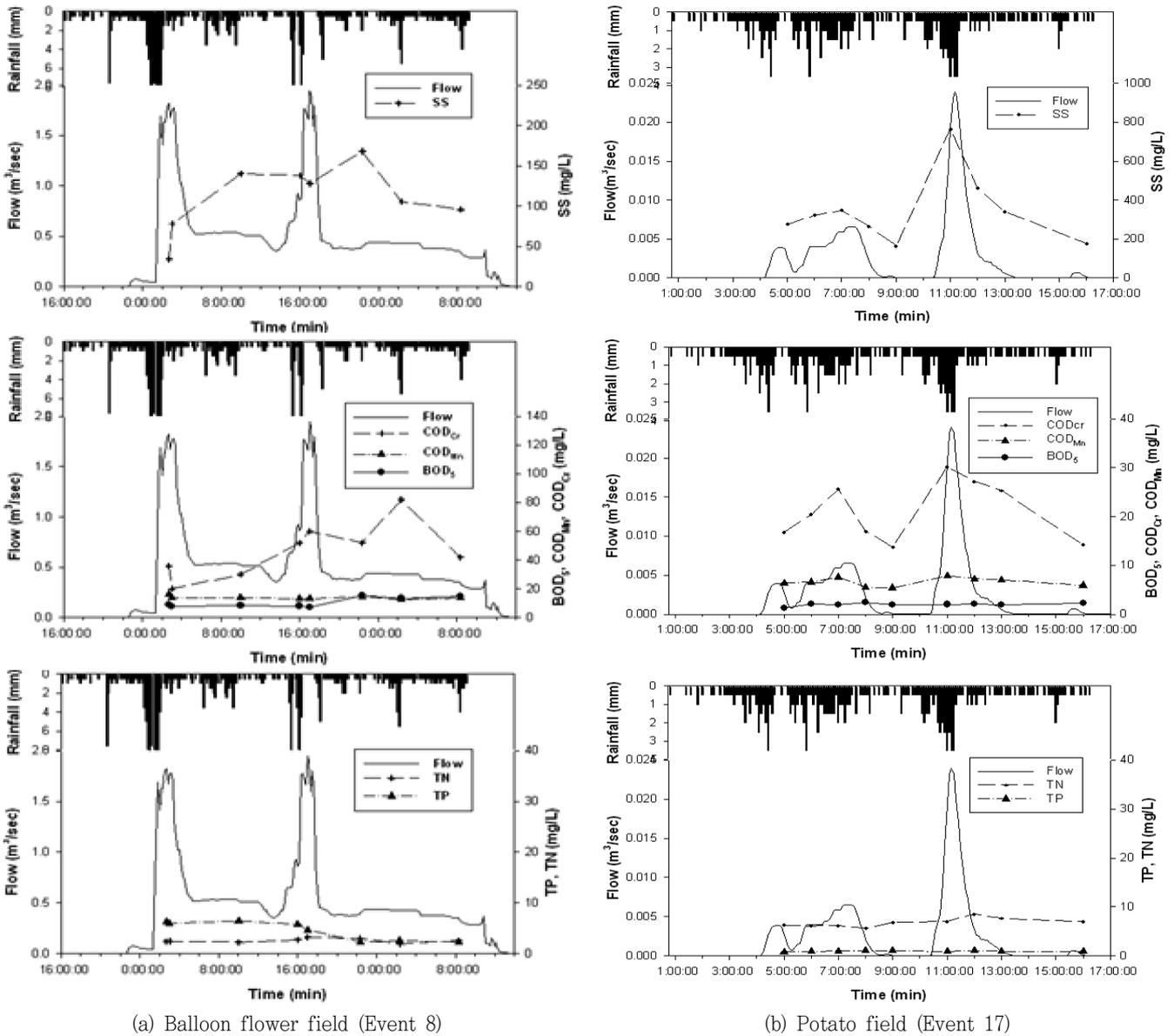
도라지 밭은 3번째 강우사상에서 강우량을 기준으로 40.4 mm 이상의 강우에서 유출이 발생하였으며 이때 평균 강우강도는 11.5 mm/hr, 최대 강우강도는 24.4 mm/hr로 나타났다. 선행건기일수는 2.9일이었으며 강우지속시간은 3.5시간으로 짧은 시간에 높은 강우강도를 보였다. 감자밭에서는 21번째 강우사상에서 강우량을 기준으로 27.3 mm, 평균 강우강도와 최대 강우강도는 1.5 mm/hr, 12.5mm/hr로 나타났다. 선행건기일수는 1.2일로 짧았고 강우가 집중되었던 시간에 유출이 발생하였으며 유출률은 0.003으로 연구 기간 동안 가장 작은 유출률을 나타냈다.

본 연구는 4년간 동일한 지점에서 연구를 진행하였으나 강우조건이 매년 다르기 때문에 작물 변화에 따른 유출특성을 비교하는데 동일한 강우조건을 적용할 수 없었다. 연구 기간 동안 50 mm 이하의 강우발생 빈도는 전체 강우 중 92.7 %를 차지하였지만 50 mm 이하의 강우에서 유출이 발생한 강우사상은 총 25회 중 도라지 밭2회, 감자밭 5회로 강우 발생빈도 대비 유출 발생확률이 낮아 두 작물에 대한 강우유출의 특성을 비교하기가 어렵다. 또한 연구결과와 같이 경사도가 낮은 밭에서는 일강우 10 mm 이하에서 유출이 발생하지 않고 강우계급 10~30 mm와 30~50 mm의 강우사상시에는 평균 0.04의 낮은 유출률로 나타났다. 이는 50 mm 이하의 강우에서는 유출이 발생하여도 유출량이 작기 때문에 배출되는 오염물질의 양이 작아 수계환경

에 미치는 영향이 작을 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 두 작물에 대해 모두 강우유출수가 발생한 50 mm 이상의 강우계급에 대하여 유출특성을 비교하였다. 도라지 밭에서 50 mm 이상의 강우량 평균은 145.3 mm이며 평균 유출률은 0.14, 선행건기일수의 평균은 2.6일로 나타났다. 감자밭에서는 50 mm 이상의 강우량 평균이 143.0 mm, 평균 유출률은 0.16, 선행건기일수의 평균은 4.8일로 분석되었다. 평균 강우량은 도라지 밭에서 2.3 mm 많았지만 선행건기일수의 평균은 감자밭에서 2.2일 더 높게 분석되었다. 그러나 도라지 밭과 감자밭에서 나타난 유출률의 평균은 0.14와 0.16으로 감자밭에서 발생한 평균 강우량이 더 적었지만 유출률은 감자밭에서 0.02 높게 나타났다. 도라지는 다년생 작물로 경운 등으로 토양이 매년 교란되지 않고 도라지의 뿌리가 성장하며 토양의 물리성이 개선되어 투수능이 커지기 때문에 강우시 토양으로 침투하는 양이 많아지기 때문인 것으로 판단된다. 반면 감자밭은 비닐로 멀칭을 하여 감자를 재배하였기 때문에 고랑에 물고임 현상이 도라지 밭보다 빠르게 나타났고 강우가 지속되면서 고랑에 고여 있던 물이 유출되어 도라지 밭보다 유출률이 높게 산정된 것으로 판단된다. 또한 50 mm 이상의 강우계급을 비교하였을 때 유출률은 강우량과 강우강도 그리고 선행건기일수의 차이뿐만 아니라 작물을 재배하기 위해 사용된 피복재 (비닐)의 유무, 작물의 성장에 따른 Canopy 현상 등의 차이에 따라 변화하는 것을 알 수 있었다. 따라서 밭에서 발생하는 비점오염원의 유출특성을 분석하기 위해서는 강우와 토성을 비롯하여 작물에 의한 영향도 고려해야 한다.

2. 유량가중평균농도 (EMC)

Fig. 2에는 강우시 모니터링으로 분석된 유량과 오염물질의 수리·수문 및 농도곡선의 예를 나타내었다. Fig 2에서 밭 지역의 경우 강우에 의한 유출량의 변화가 큰 것을 알 수 있으며, SS 농도의 경우 유출량과 비슷한 패턴으로 나타났다. 하지만 TN과 TP의 경우에는 유출량의 증감과 상관없이 농도 변화의 폭이 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 Table 3은 재배작물의 변화에 따른 밭의 EMC를 산정한 결과이다. Table 3에서와 같이 SS와 TN을 제외한 모든 항목이 도라지 밭에서 높은 것으로 나타났다. 감자밭의 SS는 126.6~2,485.6 mg/L 범위로 도라지 밭에 비해 약 1.3배 정도 높았으며, TN은 3.404~27.473 mg/L로 약 3배 높게 나타났다. 그러나 BOD₅, COD_{Cr}, COD_{Mn}, DOC는 경우 도라지 밭이 약 2.3~8.2배 높은 것으로 나타났으며, TP 또한 약 2.3~7.1배 높게 나타났다. 하지만 도라지 밭의 경우 2차 년도부터 별도의 화학비료를 사용하지 않았기 때문에 모든 항목의 오염물질 농도가 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 도라지가 성장하며 유출이 감소하여 도라지 밭의 SS 농도는 감자



(a) Balloon flower field (Event 8)

(b) Potato field (Event 17)

Fig. 2 Hydrograph and Polluto graph of runoff events 8 and 17

밭보다 낮아진 것으로 판단된다. 도라지 밭의 TP 농도가 감자 밭보다 높은 것은 발효퇴비에 의한 영향으로 판단된다. TN의 경우는 도라지 밭의 투수성이 증가함에 따라 지표로 유출되는 양이 적어지고 지하로 침투하여 중간유출 형태로 배출되는 양이 많아질 것으로 생각되었다. 반면에 감자밭은 비닐 멀칭을 하여 토양으로의 침투량이 적어지고 유출량이 증가하기 때문에 SS와 TN 농도가 도라지 밭보다 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 50 mm를 기준으로 경사도 5% 이하의 사질토에서 발생하는 강우유출수의 수질 농도를 비교하였다. 모든 수질 항목에서 50 mm 이상의 강우계급에서 1.3~2.6배 높은 값으

로 나타났다. 가장 큰 차이를 보인 항목은 BOD₅로 2.6배의 차이를 보였으며, 가장 낮은 항목은 TN으로 1.3배의 차이로 나타났다.

3. 강우사상별 단위면적당 오염부하 산정

Table 4는 도라지 밭과 감자밭에서 산정된 단위면적당 오염부하를 나타내었다. 도라지 밭에서 발생한 오염부하량의 평균은 SS 21.1 kg/ha, COD_{Cr} 3.5 kg/ha, COD_{Mn} 1.4 kg/ha, BOD₅ 1.0 kg/ha, TN 0.253 kg/ha, TP 0.203 kg/ha, DOC 0.5 kg/ha

Table 3 EMC of rainfall-runoff events of the study field (Unit: mg/L)

Landuse	Event	SS	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD ₅	TN	TP	DOC
Balloon flower field	1st	1,926.6	215.3	130.1	92.7	1.368	6.271	44.1
	2nd	1,180.1	165.4	104.8	75.2	1.681	4.925	36.8
	3rd	574.1	147.5	75.5	37.8	3.535	7.310	23.8
	4th	1,151.8	165.2	79.5	54.9	5.678	7.010	23.6
	5th	708.8	77.7	50.0	34.3	3.692	6.661	13.2
	6th	203.8	55.0	33.0	20.9	1.874	3.843	9.3
	7th	462.9	91.5	36.0	21.0	5.312	5.720	11.6
	8th	155.8	24.9	8.5	7.6	3.351	2.220	3.4
	9th	107.8	26.6	5.1	4.5	2.435	1.366	1.5
	10th	279.1	36.5	10.4	8.3	8.464	1.655	3.4
	11th	357.9	70.2	23.8	6.3	21.755	2.599	2.3
	12th	110.7	44.9	13.9	10.0	2.605	4.819	5.1
Potato field	13th	357.2	70.5	23.8	6.3	21.859	2.609	2.2
	14th	1,309.0	50.4	29.2	9.0	27.473	2.859	4.3
	15th	982.6	55.5	15.7	6.2	21.792	1.369	2.2
	16th	1,139.2	58.2	5.4	2.9	20.012	0.755	1.6
	17th	508.7	25.5	7.3	2.0	6.870	0.972	1.3
	18th	694.3	25.7	7.6	2.1	17.682	0.758	1.4
	19th	126.6	6.8	1.5	0.6	3.404	0.193	0.3
	20th	386.1	14.4	4.3	2.3	9.528	0.420	1.3
	21st	507.8	28.1	4.9	2.4	9.543	0.448	1.5
	22nd	449.8	28.0	6.5	4.5	11.528	0.665	1.9
	23rd	477.6	22.9	4.5	2.8	14.581	1.314	2.1
	24th	2,485.6	93.8	19.9	10.1	23.101	3.174	2.6
	25th	172.2	12.9	4.8	1.9	11.019	1.308	0.9
Below 50 mm	360.5	38.4	15.1	8.0	8.582	1.807	4.8	
Above 50 mm	794.0	74.7	33.3	20.6	11.115	3.255	9.4	

로 나타났다. 감자밭은 SS 483.6 kg/ha, COD_{Cr} 18.9 kg/ha, COD_{Mn} 4.5 kg/ha, BOD₅ 2.1 kg/ha, TN 5.080 kg/ha, TP 0.650 kg/ha, DOC 0.6 kg/ha로 나타났다. 도라지 밭과 감자밭에서 발생한 오염부하량을 비교했을 때 SS 22.9배, COD_{Cr} 5.4배, COD_{Mn} 3.2배, BOD₅ 2.1배 TN 20.1배, TP 3.2배로 감자밭에서의 단위면적당 오염부하량 값이 높게 나타났다. 항목별로는 가장 큰 차이를 보인 수질인자는 SS로 도라지 밭에서 21.1 kg/ha으로 산정된 반면 감자밭에서는 483.6 kg/ha로 약 22.9배 높은 오염부하량을 나타내었다. 이는 감자를 재배한 2011년의 경우 총 강우량이 2,029.3 mm로 도라지를 재배한 기간의 강우량 보다 약 500~600 mm 많이 발생하였기 때문에 오염물질의 배출량이 많아진 것으로 판단된다. 또한 감자밭의 경우 두둑을 비닐로 멀칭 하여 불투수 면적이 증가함에 따라 강우시 지하로 흡수되는 양이 적어지고 지표로 유출되는 양이 많아졌기 때

Table 4 Pollutant load of rainfall-runoff events of the study field (Unit: kg/ha)

Landuse	Event	SS	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD ₅	TN	TP	DOC
Balloon flower field	1st	98.8	11.0	6.7	4.8	0.070	0.322	2.3
	2nd	9.0	1.3	0.8	0.6	0.013	0.037	0.3
	3rd	3.4	0.9	0.5	0.2	0.021	0.044	0.1
	4th	15.2	2.2	1.1	0.7	0.075	0.093	0.3
	5th	10.5	1.2	0.7	0.5	0.055	0.098	0.2
	6th	3.1	0.8	0.5	0.3	0.029	0.058	0.1
	7th	1.4	0.3	0.1	0.1	0.016	0.018	0.04
	8th	44.0	7.0	2.4	2.2	0.946	0.627	1.0
	9th	48.1	11.9	2.3	2.0	1.087	0.610	0.7
	10th	3.2	0.4	0.1	0.1	0.096	0.019	0.04
	11th	6.1	1.2	0.4	0.1	0.369	0.044	0.1
	12th	10.8	4.4	1.4	1.0	0.254	0.47	0.5
Average	21.1	3.5	1.4	1.1	0.253	0.203	0.5	
Potato field	13th	11.8	2.3	0.8	0.2	0.723	0.086	0.1
	14th	419.1	16.2	9.3	2.9	8.796	0.915	0.7
	15th	6.3	0.4	0.1	0.04	0.140	0.009	0.03
	16th	13.8	0.7	0.1	0.03	0.242	0.009	0.02
	17th	52.0	2.6	0.7	0.2	0.703	0.099	0.1
	18th	13.9	0.5	0.2	0.04	0.356	0.015	0.03
	19th	0.2	0.01	0.003	0.001	0.006	0.0004	0.001
	20th	1.6	0.1	0.02	0.01	0.039	0.002	0.005
	21st	2.2	0.1	0.02	0.01	0.040	0.002	0.006
	22nd	63.3	3.9	0.9	0.6	1.624	0.094	0.3
	23rd	3.6	0.2	0.03	0.02	0.111	0.010	0.02
	24th	6,078.6	229.3	48.6	24.6	56.495	7.761	6.3
	25th	0.4	0.03	0.01	0.005	0.028	0.003	0.002
Average	512.8	19.7	4.7	2.2	5.3	0.7	0.6	
Below 50 mm	1.8	0.2	0.1	0.05	0.043	0.010	0.03	
Above 50 mm	383.7	16.5	4.3	2.3	4.000	0.631	0.7	

문에 유출수 내에 SS를 유발하는 미세입자의 양이 많아진 것으로 판단된다. 또한 50 mm를 기준으로 단위면적당 오염부하량을 비교한 결과 모든 수질항목이 50 mm 이상에서 약 27.7~209.5배 높은 값으로 나타났다. 가장 작은 차이를 보인 항목은 DOC로 50 mm 이하에서는 0.03 kg/ha, 50 mm 이상에서는 0.7 kg/ha로 나타났다. 가장 큰 차이를 보인 항목은 SS로 50 mm 이하에서 1.8 kg/ha이며 50 mm 이상에서는 283.7 kg/ha로 나타났다. 밭에서 발생하는 단위면적당 오염부하량의 경우 50 mm 이하의 강우사상에서는 유출률이 작기 때문에 발생하는 오염물질의 양도 적은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구지점과 같은 경사도 5% 이하의 사질토 밭에서는 50 mm 이하의 강우계급에서의 강우유출수는 환경에 미치는 영향이 적을 것으로 판단된다.

4. 초기세척효과 분석

Fig. 3은 연구지점에서 조사된 자료를 바탕으로 산정한 누적 오염부하량비와 누적강우유출량비의 곡선을 이용하여 초기세척 효과를 분석한 그림이다. Geiger (1987)에 의하면 누적부피곡선과 누적오염물질곡선을 그려서 초기 경향이 양분선 (45 % 선)을 넘었을 경우 양분선과 최대한 떨어진 부분의 시간까지에서 초기 세척효과가 발생한다고 하였다. 초기세척효과를 분석한 결과 모든 수질 인자에서 뚜렷한 초기세척효과 경향을 나타내지 않았다. 대부분의 강우사상에서는 유출 초기 보다 중반부터 농도가 높아

지는 것으로 나타났다. 초기세척효과에 대한 선행연구를 살펴보면 Jung et al. (2009)은 고랭지 농업지역에서 TP와 SS는 뚜렷한 초기세척 현상을 보인 반면, TN과 DOC는 뚜렷한 경향을 보이지 않는다고 하였다. 또한 Lee et al. (2008)은 일부 강우에서는 초기세척현상이 나타나지만 대부분의 강우 이벤트에서는 초기현상이 발생하지 않아 농촌지역의 경우 초기세척현상의 접근방법은 적절하지 않다고 하였다. 그러나 Yoon et al. (2011)은 포도밭에서 모니터링을 수행한 결과 대부분의 오염물질들이 초기세척현상을 나타냈으며 SS의 경우 가장 강한 강도로 초기세척 현상을 나타내었고 COD > T-N > TOC 순으로 초기세척현상이

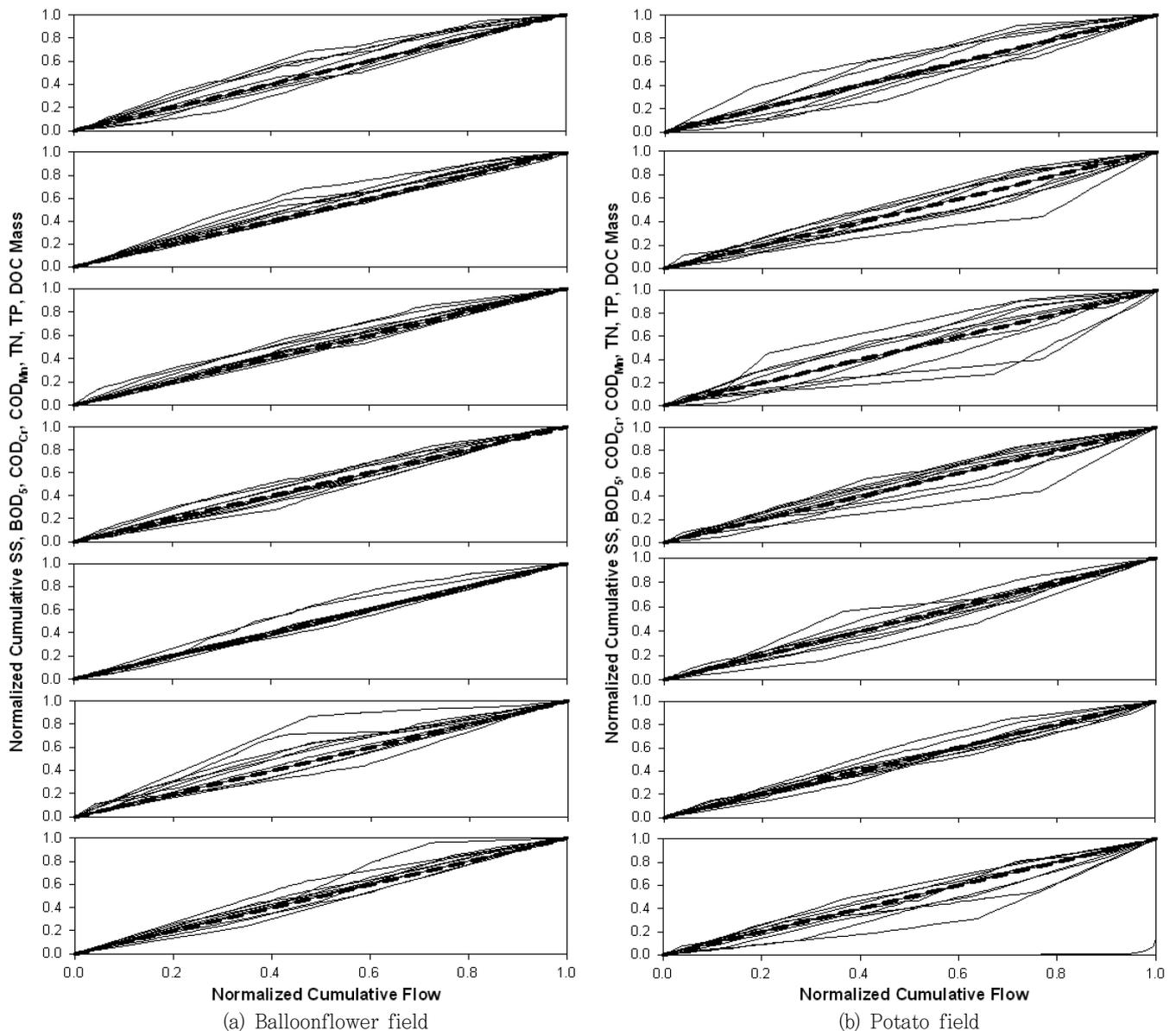


Fig. 3 Plot of cumulative load fractions as a function of cumulative runoff volume

Table 5 Pearson correlation coefficients

Water quality parameter		runoff	SS	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD ₅	TN	TP	DOC
Item									
Balloon Flower Field	Flow	1	-0.101	-0.062	-0.101	-0.099	-0.094	0.131	-0.086
	SS		1	0.897	0.902	0.898	-0.188	0.663	0.871
	COD _{Cr}			1	0.909	0.862	-0.097	0.704	0.854
	COD _{Mn}				1	0.959	-0.239	0.780	0.935
	BOD ₅					1	-0.250	0.715	0.926
	TN						1	-0.159	-0.250
	TP							1	0.741
	DOC								1
Potato Field	Flow	1	0.772	0.663	0.549	0.670	0.154	0.368	0.381
	SS		1	0.809	0.556	0.788	0.240	0.579	0.451
	COD _{Cr}			1	0.821	0.835	0.286	0.647	0.612
	COD _{Mn}				1	0.784	0.294	0.611	0.698
	BOD ₅					1	0.269	0.684	0.766
	TN						1	0.362	0.265
	TP							1	0.503
	DOC								1

* **Bold** values are statistically significant at $p < 0.01$, $p < 0.05$

나타났다고 하였다. 이처럼 농경 지역에서 초기세척효과에 관한 연구는 연구자에 따라 차이를 보인다. 이는 농경지역의 경우 대부분이 투수지역으로 토양의 성질 및 상태, 강우량, 강우강도, 작물의 특징, 퇴비와 비료의 성분과 양, 지표의 피복상태 등이 상이하기 때문에 유출특성이 다양하게 나타나기 때문이다. 따라서 농촌지역의 경우 초기세척효과에 관한 연구보다 EMC와 단위면적당 오염부하량의 산정, 비점오염물질의 제어, 강우시 밭에서 유출과 관련된 영향 인자들에 대한 규명 등에 대한 연구가 이루어져야 하고 장기적인 모니터링 자료를 축적하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

5. 상관성 분석

Table 4는 밭에서 발생한 25회의 분석결과를 나타내었다. 그 결과 도라지 밭에서는 유출량과 수질 인자의 상관성이 TP를 제외한 모든 항목에서 음의 상관성을 나타냈으며 통계적으로 유의성이 낮은 것으로 나타났다. 하지만 수질 인자 사이에는 TN을 제외한 모든 인자가 유의수준 내에서 높은 상관성을 나타내었다. 특히 BOD₅와 COD_{Mn}은 유의수준 1% 내에 상관계수 0.959로 가장 높은 상관성을 가지고 있는 것으로 나타났으며, SS는 TN을 제외한 모든 수질인자와 높은 상관성을 나타냈다. 감자밭에서는 TN을 제외한 모든 수질 인자가 유출량과 상관성이 있는 것으로 나타났다. 특히 유출량의 경우 SS와의 상관계수가 0.772로 가장 높은 상관성을 갖고 있으며 SS는 TN을 제외한 모든 수질

인자들과 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 비점오염물질의 유출이 서로 연관성을 가지고 있으며 발생원에서의 유출량 저감이 SS의 오염부하를 저감시킴과 동시에 비점오염물질을 제어할 수 있는 가장 효과적인 방법이라 판단된다. 두 지점의 상관성 분석 결과 공통적으로 TN은 상관성이 낮거나 음의 상관성을 나타냈다. 이는 농경지에서 질소의 배출특성에 기인하여 해석할 수 있다. Choi et al. (1999)에 의하면 TN의 경우 강우시 토양내의 질소가 지표면으로 발생하는 직접유출보다는 지하로 침투하여 기저유출의 형태로 지하수나 하천수로 이동하기 때문에 다른 오염물질과 낮은 상관성을 나타낼 수 있다는 연구결과를 보고한 바 있다. 또한 도라지 밭과 감자밭의 경우 유출량과 수질 인자 간의 상관성에 차이를 보였는데 이는 연구지점이 동일할지라도 강우량, 강우강도, 선행건기일수, 지표의 피복 상태, 작물의 종류, 영농방법 등 유출에 영향을 줄 수 있는 인자가 다르기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 밭의 경우 비점오염원 부하 사이의 일괄적인 상관성은 토성, 시비, 작물, 지표관거 등 많은 인자의 영향을 받기 때문에 특정한 공식으로 나타낼 수 있는 상관관계식의 정립은 어려울 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 2008년부터 2011년까지 4년간 영농인이 운영하는 밭에서 재배 작물을 변경함에 따라 영농방법이 달라졌을 경우 강우시 발생하는 비점오염물질의 유출특성을 알아보고자 하였다.

하지만 동일한 강우조건으로 연구를 수행할 수 없었기 때문에 밭에서 유출이 발생할 확률이 높은 50 mm 이상의 강우계급에 대한 자료를 비교하였다.

1. 유출은 도라지 밭에서 40.4 mm 이상의 강우에서 발생하였으며, 이 때 평균 강우강도는 11.5 mm/hr, 최대 강우강도는 24.4 mm/hr로 나타났다. 감자밭에서는 27.3 mm 이상의 강우에서 유출이 발생하였으며 평균 강우강도는 1.5 mm/hr, 최대강우강도는 12.5 mm/hr로 나타났다. 두 밭의 유출률은 감자밭에서 0.02 높게 나타났다. 감자를 재배한 2011년에는 연간 총 강우량이 2,029.3 mm로 연구기간 동안 가장 많은 강우량을 나타냈으며 비닐로 멀칭을 하여 지하로 침투하는 양이 적어져 유출률이 높아진 것으로 판단된다.

2. 오염물질의 농도는 유출량이 고려된 EMC로 산정하였으며 감자밭에서 SS와 TN의 EMC가 높게 나타났고 다른 수질 인자에서는 도라지 밭에서 높은 값을 보였다. 하지만 단위면적당 오염부하량 (kg/ha)은 모든 수질 인자에 대해 감자밭이 높은 것으로 나타났다. 이는 강우에 의한 영향으로 유출량이 증가하면서 유출수 내에 존재하는 오염물질의 양이 많아진 것으로 판단된다. 또한 비닐로 두둑을 피복하였기 때문에 불투수층 면적이 증가하면서 유출량이 증가하였으며 고랑에 존재하고 있던 오염물질들이 유출수에 포함되어 배출되는 오염물질의 양도 많아진 것으로 분석되었다.

3. 경사도 5 % 이하의 사질토 밭에서 강우량 50 mm를 기준으로 비교해 본 결과 50 mm 이하의 강우사상 평균 유출률은 0.04, 50 mm 이상의 강우사상 평균 유출률은 0.17로 나타났다. EMC의 경우 50 mm 이상의 강우에서 발생한 강우유출수의 농도가 50 mm 이하 보다 약 2배 정도 높은 결과로 나타났다. 또한 단위면적당 오염부하량은 최대 209배 높은 값으로 분석되었다. 이는 본 연구지점과 같은 밭에서 발생하는 강우유출수의 경우 50 mm 이하의 강우에서는 오염물질의 배출이 작기 때문에 50 mm 이상의 강우에 대한 연구가 계속적으로 진행되어야 하며 강우계급 분류시 50 mm 이하의 강우계급 보다 50 mm 이상에서의 세분화된 강우계급이 필요할 것으로 판단된다.

3. 초기유출효과를 분석한 결과 두 밭 모두 초기유출 현상을 나타내지는 않았다. 대부분의 강우사상에서는 유출 증반에 오염물질 농도가 높아진 것을 확인할 수 있었으며, 일부 강우사상은 유출 후반에 오염물질 농도가 높게 나타났다.

4. 상관성 분석결과 도라지 밭에서는 유출량과 수질농도 사이에는 뚜렷한 상관성은 없는 것으로 분석되었다. 이는 밭에서는 적은 양의 유출수에도 고농도의 오염물질이 포함될 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 감자밭에서는 유출량과 SS, COD_{Cr}, BOD₅의 경우 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 또한 두 밭 모두 TN을 제외한 모든 수질항목에서 상관성을 갖는 것으로 나타

났다. 따라서 비점오염물질은 서로 연관성을 가지고 있으며 발생원에서의 유출량 저감이 비점오염부하를 저감시킬 수 있다고 판단된다.

본 연구에서 유출계수, EMC, 단위면적당 오염부하량의 차이는 작물이 변경되면서 사용된 화학비료 및 퇴비, 지표의 피복상태, 작물의 성장에 따른 canopy 현상 및 투수층의 증가가 유출특성에 영향을 준 것이라 판단된다. 밭에서 발생하는 비점오염물질은 매우 다양한 인자의 영향을 받기 때문에 향후에는 본 연구처럼 단일 토지이용에서의 연구가 장기적이고 체계적으로 수행되어 비점오염원에 영향을 줄 수 있는 인자에 대한 자세한 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 산정된 EMC와 단위면적당 오염부하는 수질 오염총량제와 관련하여 원단위를 산정하고 비점오염물질 관리방안의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 한강수계관리위원회, 국립환경과학원 한강물환경연구소에서 시행한 환경기초조사사업의 연구의 지원으로 수행되었기에, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Choi, Y. H., C. H. Won, J. Y. Seo, M. H. Shin, H. J. Yang, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2009. Analysis and Comparison about NPS of Plane Field and Alpine Field. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(5): 682-688 (in Korean).
2. Chung, J. B., M. K. Kim, B. J. Kim, and W. C. Park, 1999. Nitrogen, Phosphorus, and Organic Carbon Discharges in the Imgo Small Agricultural Watershed Catchment. *Journal of Enviromental Agriculture* 18(1): 70-76 (in Korean).
3. Geiger, W. 1987. Flushing effects in combined sewer systems. Proceedings of the 4th Int. conf. on urban drainage, pp. 40-46
4. Gupta, K. A. J. Saul, 1996 Specific relationship for the first flush load in combined sewer systems. *Water Res* 30(5): 1244-1252.
5. Kim, G. H., Y. C. Kim, D. R. Lee, H. Y. Jung, and J. H. Yur, 2003. Analysis and Estimation of EMC Loads of Rainfall Runoff from Agricultural-Forestry in Korea. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*

- 25(6): 760-770 (in Korean).
6. Lee, J. K., H. J. Chu, 2006. Tine Distribution Characterisrics of an Annual Maximum Rainfall According to Rainfall Duration using Huff's Method. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* 26(5): 519-528 (in Korean).
 7. Lee, B. S., Y. J. Jung, M. J. Park, and K. I. Gil 2008. A Study on Discharge Characteristics of Non-Point Pollutant Source in the Agricultural Area of the Kyongan Watershed.
 8. Ministry of Environment, 2007. Goranengi Management Plan of Soyanggagdaem Watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(2): 169-173 (in Korean).
 9. MOE, 2007. Official test methods for water pollution.
 10. MOE, 2009. Method of Runoff Investigation.
 11. Seo, J. Y., M. H. Shin, C. H. Won, Y. H. Choi, M. S. Jung, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2010. Characteristics of NPS Pollution from a Coal Mining. *Journal of Korean Society on Water Quality* 26(3): 474-481 (in Korean).
 12. Shin, M. H., J. W. Choi, Y. H. Choi, W. J. Park, C. H. Won, D. S. Shin, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2011. Runoff Characteristics of Non-point Source Pollutant Loads Generated on Golf Course. *Journal of Korean Society on Water Quality* 27(6): 784-793 (in Korean).
 13. Song, I. H., S.H. Hwang, J.H. Somg, and M.S. Kang, 2012. Characteristics and EMCs of NPS Pollutants Runoff from a Forest-Paddy Composite Watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(4): 9-17 (in Korean)
 14. Won, C. H., Y. H. Choi, J. Y. Seo, K. C. Kim, M. H. Shin, and J. D. Choi, 2009. Determination of EMC and Unit Loading of Rainfall Runoff from Forestry-Crops Field. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(4): 615-623 (in Korean).
 15. Won, C. H., Y. H. Choi, M. H. Shin, D. S. Shin, D. K. Kang, and J. D. Choi, 2011. Runoff Characteristics of NPS Pollution on Field in Rainy Season. *Journal of Korean Society on Water Quality* 27(5): 573-579 (in Korean).