

도암호 유역 송천에서의 강우유출수 분석을 통한 EMC와 초기세척비율 (MFFn) 산정

Determination of EMC and MFFn Rainfall Runoff in Songcheon, Doam Lake Watershed

권혁준^a · 김종건^b · 임경재^c · 김동진^d · 홍은미^{e,†}

Kwon Hyeokjoon · Kim Jonggun · Lim Kyoungjae · Kim Dongjin · Hong Eunmi

ABSTRACT

The Doam Lake watershed has a significant impact on the downstream water system due to nutrients and sediment outflow during rainfall caused by steep slopes, soil losses, and fertilization. These non-point sources are unclear in the discharge area and are affected by land use patterns, soil characteristics, and topographical features of the watershed. Therefore, this study conducted rainfall monitoring from July to October 2019 in Songcheon upstream of the Doam Lake watershed, one of the non-point pollution source management areas. Then, after analyzing rainfall runoff, Event Mean Concentration (EMC) and Mass First Flush ratio (MFFn) were calculated to compare and analyze the characteristics of rainfall and the non-point pollutant discharge. As a result of the analysis, it showed various non-point pollutant emission characteristics for each rainfall event. In addition, the concentration of EMC and the MFFn were affected by the average rainfall intensity and the maximum rainfall intensity, and were not significantly affected by the number of antecedent drying days. In the future, it is expected that effective non-point source reduction measures and management measures according to rainfall intensity through continuous monitoring and analysis will be needed.

Keywords: Alpine field; Event Mean Concentration (EMC); Mass First Flush ratio (MFFn); Non-Point Source (NPS); rainfall event

1. 서론

비점오염원은 도시, 농업지역, 도로, 산지 등 불특정지역에서 강우 시 강우 유출수와 함께 유출되는 오염물질을 의미한다. 일정한 배출경로를 가지는 점오염원에 비해 비점오염원은 배출지역이 불명확하며 유역의 토지이용 형태, 토양 특성, 지형적 특징 등에 영향을 받는다. 뿐만 아니라 강우 특성(강우 지속시간, 강우량, 강우 강도)에 따라 비점오염원 배출 요인이 복합적으로 작용하여 계절적인 변동이 심하며 차집이 어렵고 관리가 어려운 특징이 있다 (Yoon et al., 2007; Jung

et al., 2012; Kal et al., 2017). 특히 농지에 살포된 비료나 농약 등 농업지역에서 배출되는 비점오염물질은 배출경로 및 배출량의 정확한 분석이 어려우며, 강우 시 토양 유실과 함께 다량의 영양염류 및 유해물질이 유출되면서 하천 수질과 수생태 환경에 악영향을 미치고 있는 실정이다 (Joo et al., 2007; Yoon et al., 2007; Jung et al., 2012; Lee et al., 2017).

또한, 우리나라의 강우의 약 50-60%는 여름철에 편중되어 있어, 장마와 태풍으로 인한 여름철 집중호우는 영농기간 농경지의 토사 유출과 농약, 비료 등 영농활동에 의한 비점오염물질 발생을 고조시키고 있다. 하지만, 이러한 농경지에서 강우 시 유출과 함께 발생하는 비점오염물질을 처리할 적절한 시설이 부족하기 때문에 수생태계 오염을 가중시키고 있다 (Choi et al., 2009).

환경부에서는 2007년 8월부터 비점오염원에서 유출되는 강우유출수로 인하여 하천 및 호소 등의 이용목적, 주민의 건강, 재산이나 자연생태계에 중대한 위해가 발생하거나 발생할 우려가 있는 지역을 비점오염원 관리지역으로 지정하고 있으며 (MOE, 2011a), 2020년 기준 현재 14개의 비점오염원 관리지역을 고시하여 관리하고 있다. 이 중 도암호 유역은 상류 지역에서 배출된 비점오염물질을 포함한 고탁수가 도암댐으로 방류되어 민원이 발생하였으며, 이로 인해 현재까지 발

^a Master Course Student, Department of Environment Sciences, Kangwon National University

^b Assistant Professor, Department of Rural Construction Engineering, Kangwon National University

^c Professor, Department of Rural Construction Engineering, Kangwon National University

^d Researcher, Wonju Regional Environmental Management Office

^e Assistant Professor, School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University

† Corresponding author

Tel.: +82-33-250-8571 Fax: +82-33-259-5563

E-mail: eunmi.hong@kangwon.ac.kr

Received: May 12, 2020

Revised: June 16, 2020

Accepted: June 17, 2020

전 방류가 중단되고 있다 (Kwak et al., 2012). 게다가 도암호 호소 내 SS (Suspended Solids)의 농도가 수질 환경기준 II등급을 초과하는 등 수질이 악화되어 2007년 14개의 비점오염원 관리지역 중 하나로 지정되었으며 2017년까지 10년간 모니터링이 수행되었다 (MOE, 2017).

도암호 유역은 대표적인 고랭지채소 재배 지역 중 하나로, 급한 경사와 빈번한 객토, 시비로 인해 강우 시 강우량에 비례하여 비점오염물질이 유출되며, 유출된 부유 토사와 영양염류는 하류 수계의 수환경을 악화시키는 원인이 되고 있다 (MOE, 2011b; Kwak et al., 2012). 환경부에서 고시한 비점오염원 관리지역 중 도암호 유역은 목표 수질기준 (3년 평균 연속 2회 SS 5 mg/L)에 도달하지 못하였으며, 상류 송천의 수질 악화 우려로 인해 비점오염원관리지역으로 재지정되었다.

국내 고랭지 밭에서의 비점오염원 발생에 관한 연구에서 Park et al. (2011b)은 소양호에서 발생하는 비점오염물질 유출의 특성에 대해 분석하였으며, Joo et al. (2007)은 낙동강 고랭지 농업지역에서 발생한 유출수가 하천의 수질에 미치는 영향에 대해 분석하였다. Jung et al. (2017)은 만대천에서의 연구로 비점오염물질을 저감하기 위해서는 발생원에 대한 관리를 통해 유출량을 저감 해야 한다고 하였다. 도암호가 위치한 대관령지역에서도 비점오염원 발생원 관리를 위한 연구의 경우 Park et al. (2011a)은 대관령지역 고랭지 밭에서 수질과 토양 특성의 모니터링으로 재배지별 오염물질의 유출특성에 대한 연구를 수행하였으며, Won et al. (2014)은 도암호 유역 고랭지 밭에서 토양개량제 (PAM-Polyacrylamide, Gypsum) 사용 시 오염부하량 저감되고 작물 생산량이 증가할 수 있다

고 하였다. 또한, Park et al. (2012)은 대관령지역 주요 하천과 도암호에서 연구를 통해 농경지에서 발생된 토양 유실과 영양염류의 유입 및 오염원의 퇴적을 저감시키는 작물 재배 등 관리방안에 대한 연구가 필요하다고 하였다. 국내에서 고랭지 밭에서의 비점오염원 저감 및 저감 기법 처리효율 평가에 관한 연구가 이루어지고 있음에도 불구하고 비점오염원 유출에 의한 수생태계 오염에 대한 논의는 진행 중이다. 또한, 다양한 지역에서 연구된 비점오염물질 저감방안을 지리적, 토양조건, 기후적 특성 등이 다른 지역에 직접 대입하기에는 어려움 있기 때문에, 기초연구로서 기상특성을 고려한 비점오염원 유출특성에 대한 분석이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 고랭지 밭이 우점한 지역에서의 강우 시 비점오염물질 유출특성을 평가하기 위하여, 도암호 유역 송천에서의 유량 변화를 모니터링을 하고, 강우유출수를 채취하여 수질분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 EMC (Event Mean Concentration, 유량가중평균농도)와 MFFn (Mass First Flush ratio, 초기세척비율)을 산정하여, 그 결과를 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역

본 연구는 강원도 평창군 대관령면 수하리에 위치한 도암호 상류 유역 송천에서 수행하였다. 송천은 4개의 지류 하천인 삼양천, 차항천, 횡계천, 용평천에서 유입되는 오염원이 집수되어 도암호 수질에 가장 직접적으로 영향을 미치는 도

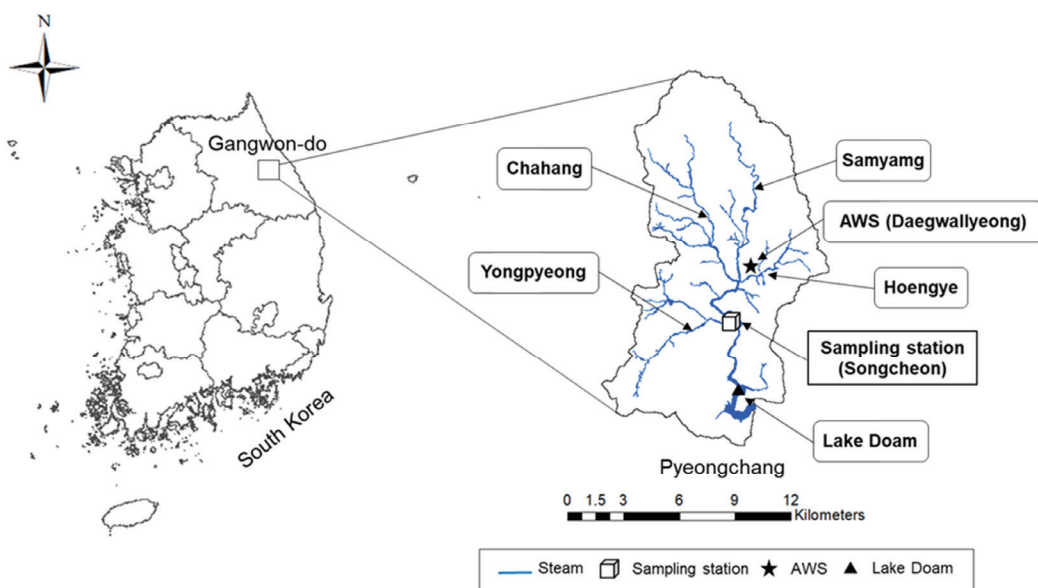


Fig. 1 Location of the study watershed and water sampling site

암호 유입 전 가장 말단에 위치한 하천이다 (Fig. 1). 도암호 상류 유역면적은 148.73 km²이며, 이 중 산림 115.92 km² (77.9%)과 밭 12.30 km² (8.3%)이 차지하는 비중이 높다. 특히, 도암호 상류 유역의 대부분의 밭은 고랭지 밭으로 경사도 7-15° 밭이 43.3%, 15-30°의 밭이 22.2%로 경사도가 크며 경사장도 길고, 고도 600-800 m 밭은 65.2%, 800-1000 m 밭이 34.7%로 거의 모든 경작지가 고원에 위치하고 있다 (MOE, 2009; Kwak et al., 2012; Kwak et al., 2018). 연구대상지역과 가장 인접한 대관령 기상관측소 기상특성을 살펴보면 최근 10년 (2009-2018년) 연평균기온 7.4°C로 전국 평균 13.0°C 보다 5°C 이상 낮은 반면, 연평균강수량은 1,288.4 mm로 전국 평균 1,266.4 mm와 유사하였다. 본 연구가 수행된 2019년의 경우 연평균기온은 8.2°C로 과거 10년 연평균 기온보다 높은 반면, 연강수량은 1,198.5 mm로 최근 10년 연평균강수량보다 낮았다. 최근 10년 동안 연 강수량의 약 55%가 여름철 (7-9월)에 집중되었으며 (KMA, 2020), 강우발생 횟수와 총강수량은 점차 감소하는 경향을 보인 반면, 50 mm 이상 강수는 증가하는 경향을 보였다.

2. 강우유출수 모니터링 및 수질분석

본 연구는 강우 유출에 의한 비점오염물질 유출 특성을 파악하고자 도암호 상류 유역 송천 말단 지점 (37° 39' 03.4" N, 128° 42' 26.5" E)에서 여름철을 포함한 고랭지 채소 영농 기간인 2019년 7월부터 10월까지 수행하였다. 모니터링은 총 6회 (E1: 7월 10-12일, E2: 7월 26일, E3: 8월 7일, E4: 9월 11일, E5: 9월 22-23일, E6: 10월 2-4일) 실시하였으며 20 mm/event 이상 강우시 ISCO 3700 자동채수기를 이용하여 강우강도에 따라 2-8시간 간격으로 강우유출수를 채수하였다. 이후 수질 분석을 위해 무균 폴리에틸렌 용기를 이용하여 시료를 채취하였으며 아이스박스 보관하여 단시간 내 실험실로 운반한 후 SS, 탁도, TP (Total Phosphorus), PO₄-P (Phosphate Phosphorus), TN (Total Nitrogen), TOC (Total Organic Carbon) 항목에 대해 수질오염 공정시험기준 방법 (2019)으로 분석하였다.

SS는 여과장치에 GF/C 유리섬유여과지를 이용하여 시료를 여과한 후의 무게와 여과 전 무게의 차이를 계산하였다. 탁도는 시료를 실험실로 운반 후 텡스텐필라멘트를 사용하는 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) 탁도계로 측정하였다. TP는 자외선/가시선분광법을 이용하여 분석, PO₄-P는 자외선/가시선분광법-아스코빈산환원법으로 분석하였다. TN은 자외선/가시선분광법-산화법을 이용하여 분석하였으며, TOC는 고온연소산화법으로 분석하였다.

본 연구에서는 강우시 유출량 산정을 위하여 비강우시 16

회를 포함한 총 58회 하천 단면의 수위와 유속을 측정하여 수위-유량 관계식을 도출하였다. 비강우시는 전자유속계 (Mf-pro)를 이용하여 하폭을 일정 간격으로 나눈 후에 유속과 수심을 측정하여 유속면적법으로 유량을 산정하였으며, 강우시는 오렌지법으로 부자유속계를 이용하여 표면유속을 측정한 후 유량을 산정하였다. 하천의 수위는 부자식 수위계를 설치하여 5분 간격으로 기록하였으며, 환산된 수위-유량 곡선을 활용하여 모니터링 지점에서의 유출량을 도출하였다.

3. 강우시 비점오염원 유출 특성 분석

강우시 유출량은 강우량, 선행무강우일수, 강우강도 등에 따라 차이가 나기 때문에 특정시간의 유출량을 강우사상의 대표 유출량으로 가정할 수 없다. 강우시 유출되는 비점오염원 농도는 일정한 시간 간격으로 변화하지 않고 강우 특성에 따라 다르게 배출되므로 농도의 산술평균으로 특정 강우사상의 강우유출수 농도를 대표하는 것도 한계가 있다 (Park et al., 2011b; Lee et al., 2017). 본 연구에서는 강우시 유출되는 오염물질의 농도를 산정하기 위해 유량가중평균농도 (EMC)를 이용하였다. EMC는 강우시 유출된 누적 오염물질의 양을 전체 누적 유출량으로 나누어 계산할 수 있으며, 계산과정은 식 (1)과 같다 (Gil et al., 2008).

$$EMC = \frac{\sum Q_i \times C_i}{\sum Q_i} \quad (1)$$

여기서, Q_i 는 i 번째의 구간별 유량 (m³), C_i 는 i 번째 분석된 수질항목의 농도 (mg/L), i 는 특정시간에 채취한 시료의 번호이다.

초기세척효과는 유역 내 오염물질이 강우발생 초기에 강우유출수에 다량으로 함유되어 유출되는 것을 의미한다 (Ahn et al., 2012; Lee et al., 2017). 본 연구에서는 강우유출수의 초기세척효과를 분석하기 위하여 강우초기에 유출되는 오염물질의 농도를 산정하기 위해 초기세척비율 (MFFn)을 산정하였다. MFFn이란 특정 구간까지 유출된 누적 유량 (V_i)에 대한 특정 구간까지 유출된 누적 오염부하량 (M_i)의 비를 나타낸 것으로 강우 시작부터 끝까지의 세척비율을 알 수 있다. MFFn의 값이 1보다 클 때 초기세척효과가 나타났다고 볼 수 있으며 MFFn 값이 1보다 작을 때는 오염원의 농도가 희석되었다고 가정할 수 있다. 또한 MFFn 값이 1일 때 유량에 포함된 오염원의 농도가 일정하게 유지됨을 의미한다. MFFn의 계산과정은 식 (2)-(4)와 같다 (Bertrand-Krajewski et al., 1998; Barco et al., 2008).

$$M_i = \frac{\sum_{i=1}^j C_i Q_i \Delta t}{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t} \quad (2)$$

$$V_i = \frac{\sum_{i=1}^j Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta t_i} \quad (3)$$

$$MFF_n = \frac{M_i}{V_i} \quad (4)$$

여기서, M_i 는 j 번째 시료 채취까지 유출된 누적 오염부하량, V_i 는 j 번째 시료 채취까지 유출된 누적 유량, j 는 시료 첫 채취시부터 j 번째 시료 채취시까지의 번호, N 은 모니터링 시 마지막 채수 번호, Δt_i 는 모니터링 사이 시간 증가량, C_i 는 수질항목의 농도 (mg/L), Q_i 는 유출량 (m^3/s), n 은 0-100까지의 백분위 (%) 이다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우사상별 강우특성 분석

강우유출수의 비점오염물질 유출특성은 강우조건에 따라 차이가 날 수 있으므로 연구대상지의 비점오염물질의 유출특성을 분석하기 위해서는 강우사상에 대한 충분한 분석이 필요하다 (Shin et al., 2012; Lee et al., 2017). 본 연구에서는 도암호 상류 유역 송천 모니터링 지점과 가장 근접한 대관령 측후소 기상데이터를 활용하여 강우특성을 분석하였다 (Table 1). 이후 강우사상에 의한 유량의 변화와 유출률을 분석하였다 (Table 2). 2019년 7월부터 10월까지 6번의 모니터링 기간 동안 강우량은 30.3-159.8 mm/event로 나타났으며, 50 mm/event 이상 강우를 보인 강우사상은 E1, E3, E5, E6 로 나타났다. 선행무강우일수는 0 mm 이상 강우가 발생한 시간과 이전 강우발생시간의 차이를 나타내며 0.08-8.96일이었다. 5 mm/day 이하는 무강우로 가정하고 선행무강우일수를 산정한 결과, 일강우 5 mm 이상으로 발생한 강우 사이의 차이는 1-9일이었다. 이 중 E1, E2, E4 강우사상에서는 5 mm/day 이상 선행무강우일수가 7일 미만이었다. 각 강우사상별 최대 강

Table 1 Characteristics of each rainfall event in the study area

Date		ADDs ^a (days)		RD ^c (hr)	TR ^d (mm/event)	RI ^e (mm/hr)	
		(DP ^b ≤ 0)	(DP ≤ 5)			Maximum	Average
E1	19.07.10 - 07.12	0.63	1	40	95.7	10.6	2.39
E2	19.07.26	0.08	4	18	30.9	16.7	1.72
E3	19.08.07	3.25	9	22	105.2	39.9	4.78
E4	19.09.11	0.67	5	22	30.5	6.4	1.39
E5	19.09.22 - 23	6.00	6	44	128.2	9.0	2.91
E6	19.10.02 - 04	8.96	8	34	159.8	21.4	4.70

^a: Antecedent dry days

^b: Daily precipitation(mm/day)

^c: Rainfall duration

^d: Total rainfall

^e: Rainfall intensity

Table 2 Characteristics of each hydrological storm event in the study area

Event	Runoff volume (m^3/s)					Runoff rate (-)
	Average	Median	Maximum	Minimum	Stdev. ^a	
E1	11.7 (12.1) ^b	11.6 (12.0)	24.2 (25.0)	1.0 (1.0)	6.4 (6.6)	0.13
E2	6.7 (3.3)	7.3 (3.6)	13.7 (6.7)	2.8 (1.4)	3.1 (1.5)	0.11
E3	17.4 (10.3)	17.1 (10.1)	33.7 (19.9)	1.1 (0.6)	8.7 (5.1)	0.10
E4	6.0 (3.5)	6.7 (4.0)	13.3 (7.8)	1.8 (1.1)	2.6 (1.5)	0.12
E5	17.7 (20.0)	18.0 (20.4)	28.5 (32.2)	5.4 (6.1)	6.5 (7.3)	0.16
E6	20.3 (18.0)	20.7 (18.3)	42.1 (37.3)	3.4 (3.0)	11.1 (9.8)	0.11

^a: Standard deviation

^b: Runoff depth(mm)

우강도는 9.0-39.9 mm/hr이었으며 평균 강우강도는 1.39-4.78 mm/hr 이었다. 특히, E3과 E6 강우사상의 총 강우량 100 mm/event 이상으로 높게 나타났으며, 평균 강우강도 (E3: 4.78 mm/hr, E6: 4.70 mm/hr)와 최대 강우강도 (E3: 39.9 mm/hr, E6: 21.4 mm/hr)는 6번의 강우사상중에 가장 높았다. 5 mm/day 이상 선행무강우일수 또한 각각 9일 (E3), 8일 (E6)로 강우사상 중에 가장 길었다. 각 강우사상의 평균유량 값은 6.0 ± 2.6 - 20.3 ± 11.1 m³/s이었다. 50 mm/event 이상 강우가 내렸던 E1, E3, E5, E6에서 평균 10 m³/s 이상, 최대 20 m³/s 이상의 유출이 발생했다. 유출률은 각 강우사상별 0.10-0.16을 나타내었다. 50 mm/event 이하의 강우량을 보였던 E2, E4 강우사상에서는 각각 0.11, 0.12로 낮은 강우량에 비해 높은 유출률을 보였다.

2. 강우사상별 강우유출수 수질 특성 분석

강우시 발생하는 유출량은 강우의 특성에 따라 달라질 수 있으며 특정시간의 유출량으로 강우사상을 대표할 수 없다. 또한 발생된 오염물질은 일정한 시간 간격으로 증가하거나 감소하지 않으므로 특정강우의 농도를 대표하는 것이 어렵기 때문에 연속된 유량과 EMC를 이용해 산정해야한다 (Lee et al., 2017). 각 강우사상의 EMC와 오염원별 농도의 통계학적 분석결과를 Table 3과 같다.

전체 강우사상에서 탁도와 SS의 EMC는 270.2-782.7 NTU, 282.8-1,221.8 mg/L 이었으며, 평균 농도는 191.0-889.6 NTU, 198.1-1,220.6 mg/L로 나타났다. 강우사상 E6는 전체 강우사상 중 탁도와 SS의 EMC가 가장 높았다. E2의 경우 30.9 mm의 낮은 강우량에 비해 상대적으로 높은 탁도와 SS의 농도를 보였는데 이것은 짧은 강우지속시간과 강우량의 절반 이상의 높은 최대 강우강도 (16.7 mm/hr)로 인한 고농도 탁수 유출로 인한 것으로 판단된다. 강우유출수의 SS EMC와 평균농도는 전 강우사상에서 하천수 생활환경기준 약간나쁨 (100 mg/L 이하) 등급 이상으로서 농업용수로 적합하지 않을 것으로 판단된다.

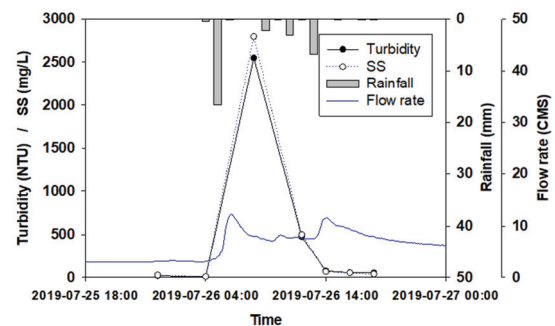
TP, PO₄-P의 EMC는 0.07-0.60, 0.03-0.29 mg/L, 평균농도 0.09-0.50, 0.03-0.29 mg/L로 나타났다. 전체 강우사상에서 TP의 최대농도는 하천수 생활환경기준 매우나쁨 (0.5 mg/L 초과) 이상으로 나타났다. 장기간 인의 함량이 높은 탁수가 유출되어 유역말단 도암호로 유입되면 부영양화를 초래할 수 있으며 이로 인한 조류경보제가 발생할 것으로 판단된다.

TN의 EMC는 4.78-9.09 mg/L, 강우유출수의 평균농도는 4.17-8.34 mg/L로 나타났다. 전체 강우사상에서 TN의 최대농도는 E5를 제외하고 음용수 수질기준에 미치지 못하는 10 mg/L 이상으로 나타났다. 분석된 높은 질소의 농도는 질소의

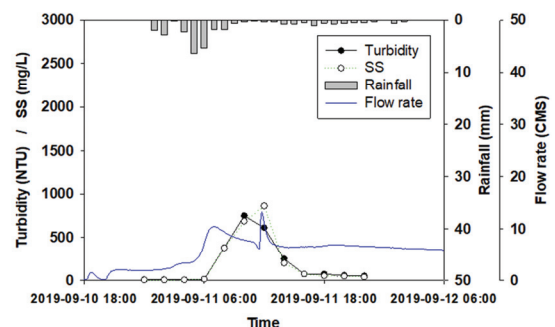
함량이 높은 비료의 영향이 있을 수 있다.

TOC의 EMC는 5.94-15.75 mg/L, 강우유출수의 평균농도는 5.38-15.05 mg/L로 나타났다. 강우사상 E2, E4, E6에서 EMC 10 mg/L 이상으로 분석되었으며, 강우유출수의 최대농도는 15 mg/L 이상으로 하천수 생활환경기준 매우나쁨 (8 mg/L 초과) 등급으로 나타났다.

본 연구에서는 각 강우사상에서 시간의 변화에 따른 강우유출수의 오염원 농도변화를 알아보았다. 이후 강우특성이 비슷한 사상끼리 비교를 하였다. 강우특성과 수문학적 특성이 비슷한 강우사상 E2, E4 (Fig. 2), 그리고 50 mm/event 이상의 강우량을 보인 E1, E3, E5, E6의 탁도, SS, TP 농도를 비교하였다 (Fig. 3). E2 강우사상에서 최대 탁도는 2,550.0 NTU로 753.0 NTU를 나타낸 E4 보다 약 3.4배 높았다. SS의 경우 E2에서 최대농도 2,796 mg/L, E4에서 866.0 mg/L로 E2에서 약 3.2배 높게 분석되었다. TP, PO₄-P의 최대농도는 E2에서 1.56, 0.18 mg/L, E4에서 0.95, 0.27 mg/L로 분석되었다. TP의 농도는 E2에서 약 1.6배 높았으며, PO₄-P 경우 E4에서 1.5배 더 높게 분석되었다. 이러한 분석결과를 보인 이유로 Table 1과 같이 강우발생 초기 E2에서 총 강우량 (30.9 mm)의 절반 이상인 최대 강우강도 (16.7 mm/hr)가 내렸으며 전체적으로 짧은 강우지속시간을 보였다. 이에 반해 E4의 경우 최대 강우



(a) E2



(b) E4

Fig. 2 The variation of flow rate and pollutant (turbidity, SS) wash off process in 2nd and 4th rainfall event

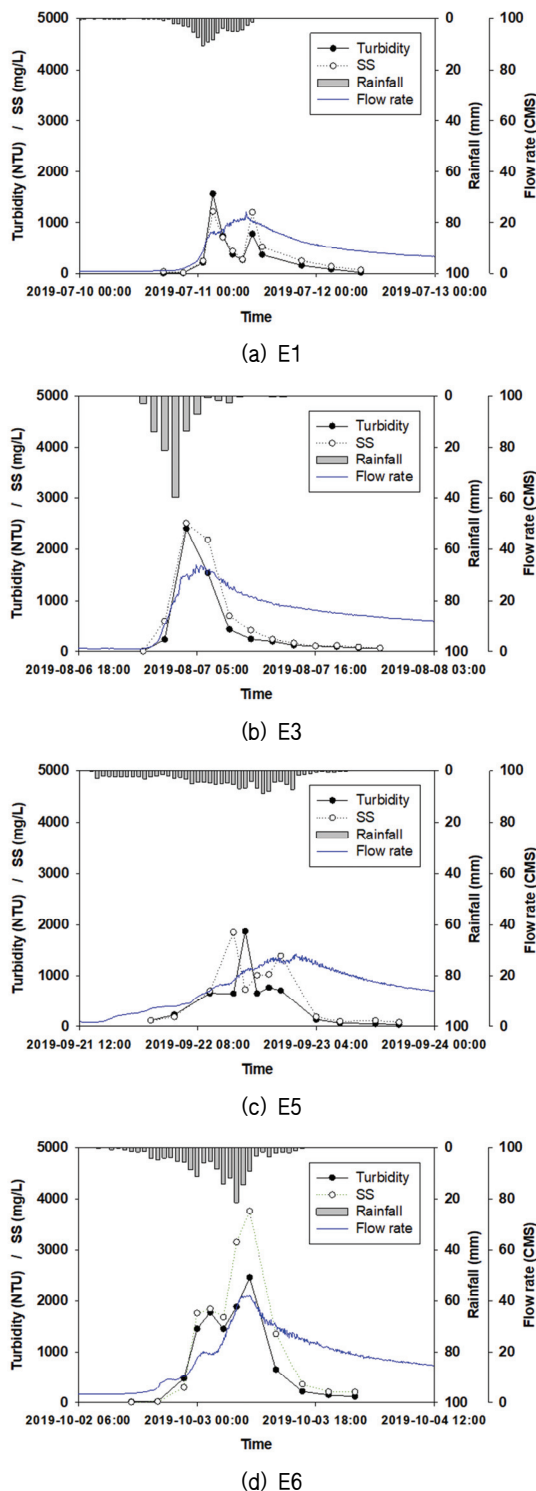


Fig. 3 The variation of flow rate and pollutant (turbidity, SS) wash off process in 1st, 3rd, 5th, and 6th rainfall event

강도가 6.4 mm/hr로 낮았으며 긴 시간 동안 적은 강우가 지속되었다.

50 mm/event의 강우를 보인 E1, E3, E5, E6 중 가장 긴 선행 무강우일수와 가장 많은 총 강우량, 평균유량을 보인 강우사상은 E6로 나타났다. 평균강우량은 강우지속시간이 22시간으로 비교적 단시간에 많은 강우가 내린 E3에서 4.78 mm/hr로 가장 높게 분석되었다 (Table 1, Fig. 2-3). 탁도와 SS의 최대농도는 가장 강우량이 많았던 E6에서 높게 분석되었다. E3의 경우 최대 강우강도가 39.9 mm/hr로 매우 높았으며 탁도와 SS의 최대농도 2,400 NTU, 2,505 mg/L로 E5와 비슷한 농도값을 보였다. TP의 최대농도는 E3에서 침투유량구간과 집중강우를 보였을 때 1.54 mg/L로 나타났다. PO₄-P의 최대농도는 0.27 mg/L로 일정한 강우가 지속되었던 E5에서 가장 높았으며 비교적 큰 변화폭을 보이지 않았다.

3. 강우사상별 유출 오염부하와 초기세척효과 분석

본 연구에서는 강우사상별 누적오염원의 농도와 누적유량의 비를 나타내어 각 강우사상 중 특정 시기까지의 유출 오염부하량과 초기세척효과를 분석하였다. 전체 강우사상에서 초기세척효과는 각 강우사상에서 평균 강우강도 이상인 구간과 최대 강우강도를 나타낸 구간에서 상대적으로 높게 나타났다. 50 mm/event 이상의 강우사상 E1, E3, E5, E6에서는 누적 유출량 50% 이전에 전체 배출량 절반 이상의 오염부하가 유출되었다 (Fig. 4). 50 mm/event 이하의 강우사상 중 E2에서는 집중강우가 발생한 누적 유량 20%를 기점으로 유출 오염부하가 큰 폭으로 증가하였다. E4 강우사상에서는 누적 유량 40% 구간이 지난 이후 초기세척효과가 발생하였다 (Fig. 4).

누적 유량 30, 50% 구간에서의 오염부하량은 Table 4, 초기세척효과는 Table 5와 같다. 누적 유량 30% 구간에서는 최대 강우강도가 가장 높았던 E3 강우사상에서 탁도와 SS는 각각 2.63, 2.54로 가장 높은 세척효과를 보였으며, TN과 TOC 또한 다른 강우사상의 비해 상대적으로 높은 초기세척효과를 보였다. SS와 탁도의 경우 누적 유량 30% 구간에서 E4를 제외한 전 강우사상에서 1.2 이상의 초기세척효과를 보였다. 누적 유량 50% 구간에서 탁도, SS의 세척효과는 전체 강우사상에서 1.5 이상으로 나타났다. 총 강우량과 평균유량이 비슷하였던 E2, E4 강우사상을 비교하였을 때 최대 강우강도가 더 높았던 E2 강우사상의 누적 유량 30% 구간에서 탁도와 SS의 세척효과는 각각 1.93, 1.96으로 나타났으며 전체 오염부하의 각각 58%, 59%가 유출되었다. 이러한 이유로 E2에서는 강우시작 1시간 후 총 강우량의 절반 이상 (16.7 mm/hr)의 강우가 내려 초기세척효과가 높았으며, 또한 초기 오염부하 유출량이 많았던 것으로 판단된다. 그에 비해 E4 강우사상에서는 누적 유량 30% 구간에서 탁도와 SS의 누적 오염부하는 각각 23%, 21%의 비율을 보였으며, 초기세척효과는 각각 0.76, 0.72로

Table 3 EMC and basic statistics of water quality parameter during each rainfall events

Event	Statistics	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	TN (mg/L)	TOC (mg/L)
E1	EMC	344.1	315.3	0.07	0.03	5.85	8.04
	Average	381.3	426.0	0.15	0.04	6.99	9.43
	Maximum	1,564.0	1,217.0	0.71	0.08	13.61	31.00
	Minimum	9.3	17.4	0.01	0.01	4.43	1.70
	Stdev. ^a	434.3	400.7	0.18	0.03	2.62	8.03
E2	EMC	728.5	774.4	0.56	0.08	4.78	10.11
	Average	463.7	499.6	0.41	0.08	5.78	7.73
	Maximum	2,550.0	2,796.0	1.56	0.18	11.10	32.80
	Minimum	11.5	12.0	0.05	0.01	2.97	1.80
	Stdev.	865.1	951.0	0.52	0.05	2.55	10.42
E3	EMC	621.6	803.1	0.60	0.07	9.09	7.38
	Average	459.6	599.8	0.48	0.06	8.34	5.48
	Maximum	2,400.0	2,505.0	1.54	0.20	22.07	22.20
	Minimum	12.6	8.3	0.03	0.03	4.90	0.90
	Stdev.	704.3	808.8	0.46	0.04	4.68	7.27
E4	EMC	270.2	282.8	0.43	0.29	6.58	10.00
	Average	191.0	198.1	0.31	0.14	4.17	5.38
	Maximum	753.0	866.0	0.95	0.27	7.00	10.30
	Minimum	6.5	4.0	0.02	0.03	2.81	2.60
	Stdev.	247.6	281.8	0.32	0.08	1.16	2.58
E5	EMC	521.0	374.0	0.30	0.12	4.92	5.94
	Average	491.6	620.4	0.50	0.14	5.38	7.09
	Maximum	1,866.0	1,846.0	1.48	0.27	8.12	15.40
	Minimum	34.9	81.7	0.04	0.03	2.87	1.80
	Stdev.	500.0	567.0	0.48	0.08	1.66	4.37
E6	EMC	782.7	1,221.8	-	-	6.32	15.75
	Average	889.6	1,220.6	-	-	6.64	15.05
	Maximum	2,460.0	3,758.0	-	-	12.95	54.90
	Minimum	16.4	8.3	-	-	2.38	1.30
	Stdev.	825.5	1,210.2	-	-	2.98	14.47

^a: Standard deviation**Table 4** Percentage of runoff pollutant load at runoff volume 30, 50

Event	Runoff volume 30%						Runoff volume 50%					
	Turb. ^a	SS	TP	PO ₄ -P	TN	TOC	Turb.	SS	TP	PO ₄ -P	TN	TOC
	(%)											
E1	54	41	72	50	32	32	84	79	78	58	60	74
E2	58	59	44	32	38	51	91	92	78	61	59	82
E3	79	76	62	56	54	75	90	91	82	71	70	84
E4	23	21	20	39	26	26	75	77	64	70	53	52
E5	62	55	61	51	40	50	90	88	90	81	62	77
E6	44	38	-	-	36	31	84	80	-	-	67	77

Turb.^a: turbidity

상대적으로 낮은 세척효과를 보였다. 하지만 두 강우사상에 서 누적 유량 50% 구간을 확인하였을 때 탁도와 SS의 누적 오염부하는 75% 이상으로 분석되었다 (Table 4). 두 강우사상 모두 누적유량 50% 구간 이전에 총 강우량의 50% 이상의 강우가 내려 이와 같은 결과를 보인 것으로 판단된다.

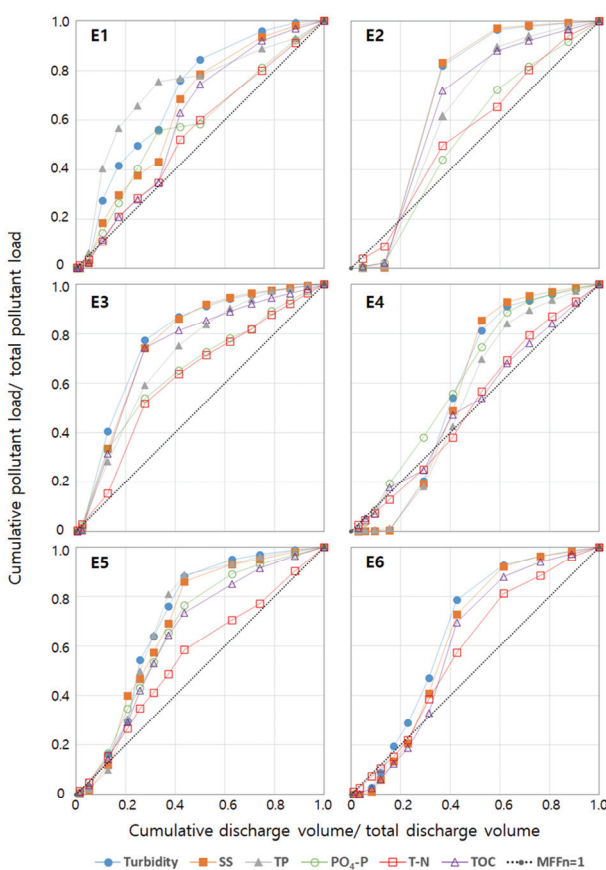
IV. 결론

본 연구는 도암호유역 송천지점에서 강우시 비점오염물질의 유출특성에 대해 알아보기 위해 2019년 7월부터 10월까지 6회 모니터링을 실시하였으며, 강우유출수를 분석하여 오염

Table 5 First flush effect of pollutants at 30, 50 of the total runoff volume

Event	MFF ₃₀						MFF ₅₀					
	Turb.	SS	TP	PO ₄ -P	TN	TOC	Turb.	SS	TP	PO ₄ -P	TN	TOC
E1	1.79	1.37	2.39	1.66	1.08	1.07	1.69	1.57	1.56	1.17	1.20	1.49
E2	1.93	1.96	1.46	1.06	1.26	1.71	1.81	1.83	1.56	1.22	1.18	1.63
E3	2.63	2.54	2.06	1.86	1.79	2.51	1.80	1.81	1.64	1.42	1.39	1.69
E4	0.76	0.72	0.66	1.31	0.87	0.88	1.51	1.55	1.27	1.41	1.05	1.05
E5	2.05	1.83	2.04	1.70	1.32	1.68	1.81	1.77	1.80	1.61	1.25	1.54
E6	1.47	1.25	-	-	1.20	1.02	1.68	1.61	-	-	1.33	1.53

Turb.: turbidity


Fig. 4 Ratio of cumulative pollutants included in the cumulative runoff volume in each section in rainfall events

원의 농도 (탁도, SS, TP, PO₄-P, TN, TOC)를 산정하였다. 또한 유량가중농도와 초기세척효과를 분석하여 강우의 특성과 비점오염물질 유출 특성을 비교분석하였다.

도암호 유역 송천에서 여섯 번의 모니터링 기간 동안 총 강우량은 30.3-159.8 mm로 나타났다. 50 mm/event 이상 강우를 보인 강우사상은 E1, E3, E5, E6, 50 mm/event 이하의 강우

를 보인 강우사상은 E2, E4로 나타났다. 선행무강우일수는 0.08-8.96일, 5 mm/day 이상 선행무강우일수는 1-9일로 계산되었다. 강우지속시간은 강우사상별 각각 18-44시간 이었다. 각 강우사상별 최대 강우강도는 9.0-39.9 mm/hr, 평균 강우강도는 1.39-4.78 mm로 분석되었다. 각 강우사상에서 평균유량은 6.0-20.3 m³/s, 유출률은 0.10-0.16으로 나타났다.

50 mm/day 이상의 강우사상 중 E3, E6는 총 강우량 100 mm/event 이상으로 높은 강우량을 보였으며, 평균 강우강도, 최대 강우강도는 여섯 번의 강우사상 중에 가장 높았다. 50 mm/event 이하의 강우사상 E2, E4는 낮은 강우량에 비해 높은 유출률을 보였는데, 이것은 낮은 강우량과 길게 지속된 채취 시간으로 인한 것으로 판단된다.

전체 강우사상 중 탁도와 SS의 EMC는 E6에서 가장 높았다. SS의 EMC와 강우유출수의 평균농도는 전체 강우사상에서 하천수 생활환경기준 약간나쁨 (100 mg/L 이하) 등급 이상으로 나타났으며, 농업용수로서 적합하지 않았다. 전체 강우사상에서 강우유출수의 TP의 최대농도는 하천수 생활환경기준 매우나쁨 (0.5 mg/L 초과) 등급으로 나타났다. TN의 강우유출수 최대농도는 E5를 제외하고 음용수 수질기준에 미치지 못하는 10 mg/L 이상으로 나타났다. TOC의 EMC는 E2, E4, E6에서 10 mg/L 이상으로 분석되었으며, 강우유출수의 최대농도는 15 mg/L 이상으로 하천수 생활환경기준 매우나쁨 (8 mg/L 초과) 등급으로 나타났다.

전체 강우사상에서 초기세척비율은 평균 강우강도 이상인 구간과 최대 강우강도를 나타낸 구간에서 상대적으로 높게 나타났다. 50 mm/event 이상의 강우사상 E1, E3, E5, E6의 누적유출량 30% 구간에서 탁도와 SS의 초기세척효과는 1.2 이상으로 나타났다. 누적 유출량 50% 이전에 전체 수질항목 강우유출수 농도는 배출량 절반 이상의 오염부하가 유출되었다. 50 mm/event 이하의 강우사상 중 E2에서는 집중강우가 발생한 누적 유량 20%를 기점으로 유출부하가 큰 폭으로 증가하였으며 탁도와 SS의 초기세척효과는 1.93, 1.96으로 높게 나

타났다. E4 강우사상에서는 누적 유량 40% 구간이 지난 이후 유출 부하의 증가와 초기세척효과가 발생하였으며 누적 유량 50% 구간에서 탁도와 SS의 유출 오염부하는 각각 68%로 나타났다.

본 연구결과 도암호유역 송천에서 강우유출수와 유량가중 평균농도, 초기세척효과에 가장 큰 영향을 미친 강우요인은 선행무강우일수보다 최대 강우강도와 평균 강우강도의 영향이 더 크게 작용한 것으로 분석되었다. 향후 장기 모니터링을 통한 강우유출수 분석과 함께 고령지 밭 재배 면적, 특성, 작물, 영농시기, 주변 경사도 등 유역 특성과의 추가적인 연구를 통한 탁수 유출 원인 규명이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 원주지방환경청의 2019 비점오염원관리지역(만대, 가야, 자운지구, 도암호유역) 모니터링 및 평가 연구용역 및 2019년도 강원대학교 대학회계 학술연구구성비의 지원을 받아 연구되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, T. W., T. H. Kim, and J. M. Oh, 2012. Analysis of first flushing effects and EMCs of non-point pollutants from impervious area during rainfall. *Korean Journal of Ecology and Environment* 45(4): 459-473 (in Korean). doi:10.11614/KSL.2012.45.4.459.
- Barco, J., S. Papiri, and M. K. Stenstrom, 2008. First flush in a combined sewer system. *Chemosphere* 71(5): 827-833. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.11.049.
- Bertrand-Krajewski, J. L., G. Chebbo, and A. Saget, 1998. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Research* 32(8): 2341-2356. doi:10.1016/S0043-1354(97)00420-X.
- Choi, Y. H., C. H. Won, J. Y. Seo, M. H. Shin, H. J. Yang, and K. J. Lim, 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).
- Gil, K. I., W. S. Kyung, and M. J. Park, 2008. Determination of pollutant EMCs and loadings of runoff in paved areas. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 8(4): 119-122 (in Korean).
- Joo, J. H., Y. S. Jung, J. E. Yang, Y. S. Ok, S. E. Oh, K. Y. Yoo, and S. C. Yang, 2007. Assessment of pollutant loads from alpine agricultural practices in Nakdong River basin. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 26(3): 233-238 (in Korean). doi:10.5338/KJEA.2007.26.3.233.
- Jung, S. M., J. S. Eum, C. W. Jang, Y. S. Choi, and B. C. Kim, 2012. Characteristics of nonpoint source pollution and relationship between land use and nutrient concentrations in the Han River watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment* 28(2): 255-268 (in Korean).
- Jung, W. G., I. R. Heo, G. H. Yi, S. H. Kim, C. M. Bae, U. J. Park, S. B. Choi, and C. C. Kim, 2017. Analysis of water quality improvement effects in a muddy water occurrence stream during rainfall. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis* 20(1): 49-57 (in Korean).
- Kal, B. S., J. B. Park, H. G. Kwon, T. H. Im, and J. H. Lee, 2017. A study on the management of non-point source using peak water quality concentration. *Journal of Wetlands Research* 19(3): 287-295 (in Korean). doi:10.17663/JWR.2017.19.3.287.
- KMA, Climate data. https://www.weather.go.kr/weather/climate/average_regional01.jsp#a8. Accessed 27 May. 2020.
- Kwak, S. J., B. D. Bhattarai, E. J. Kim, C. K. Lee, H. J. Lee, and W. M. Heo, 2012. Characteristics of non-point pollution discharge on stormwater runoff from Lake Doam watershed. *Korean Journal of Ecology and Environment* 45(1): 62-71 (in Korean).
- Kwak, S. J., B. D. Bhattarai, G. Y. Gim, P. G. Kang, and W. M. Heo, 2018. Characteristics of runoff load from nonpoint source pollutants in the Lake Doam watershed. *Journal of the Korean Society of Limnology* 51(1): 135-147 (in Korean). doi:10.11614/KSL.2018.51.1.135.
- Lee, S. I., J. Y. Shin, M. H. Shin, S. H. Joo, J. Y. Seo, W. J. Park, J. Y. Lee, and J. D. Choi, 2017. Characteristics of non-point pollutant runoff in highland field fields through long-term monitoring. *Journal of the Korean Society of Agricultural* 59(4): 85-96 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2017.59.4.085.
- MOE, 2009. Lake Doam non-point pollution source management area monitoring and evaluation program.
- MOE, 2011a. Non-point pollution source management area designation system.
- MOE, 2011b. Doam dam non-point pollution source management area monitoring and evaluation program.
- MOE, 2017. Non-point pollution source management area monitoring and evaluation program.

18. Park, K. H., B. S. Kim, H. J. Yun, K. Y. Ryu, J. C. Yun, J. Y. Choi, K. D. Kim, and Y. I. Jin, 2012. Characteristics of water quality at main streams and Lake Doam in Daegwallyeong area. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45(6): 882-889 (in Korean). doi:10.7745/KJSSF.2012.45.6.882.
19. Park, K. H., H. J. Yun, K. Y. Ryu, J. C. Yun, J. J. Lee, H. A. Hwang, K. D. Kim, and Y. I. Jin, 2011a. The monitoring of agricultural environment in Daegwallyeong area. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44(6): 1027-1034 (in Korean). doi:10.7745/KJSSF.2011.44.6.1027.
20. Park, S. J., K. W. Baek, Y. B. Kang, and H. K. Choi, 2011b. Estimation of delivery pollution load by the runoff characteristics of Soyang Lake basin. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 11(6): 317-324 (in Korean).
21. Shin, J. Y., M. H. Shin, Y. H. Choi, H. W. Kang, C. H. Won, M. Y. Hwang, H. J. Yang, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2012. Effect of balloonflower and potato cultivation on runoff and NPS pollution loads. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 89-99 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2012.54.6.089.
22. Won, C. H., M. H. Shin, S. I. Lee, D. H. Kum, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2014. Effects of surface cover and soil amendments on the NPS load reduction from alpine fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(3): 47-53 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2014.56.3.047.
23. Yoon, C. G., S. B. Lee, K. W. Jung, and J. Y. Han, 2007. Analysis of relationship between water quality parameters in agricultural irrigation reservoirs and land uses of associated watersheds. *Korean Journal of Ecology and Environment* 40(1): 31-39 (in Korean).