

도암호 유역에서 비점오염물질의 유출부하 특성

곽성진 · 발데브 · 김기영 · 강필구¹ · 허우명*

강원대학교 지구환경시스템공학과, ¹국립환경과학원

Characteristics of Runoff Load from Nonpoint Source Pollutants in the Lake Doam Watershed. Kwak, Sungjin (0000-0003-0843-034X), Bal Dev Bhattarai (0000-0003-3457-1955), Giyoung Gim (0000-0002-4551-415), Phil-Goo Kang¹ (0000-0002-2693-6697) and Woomyung Heo* (0000-0001-9994-4658) (Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Samchok 25913, Republic of Korea; ¹National Institute of Environmental Research, Hwangyong-ro 42, Seogu, Incheon 22689, Republic of Korea)

Abstract In order to investigate the runoff characteristics of nonpoint source pollutants in the Lake Doam watershed, water quality and flow rate were monitored for 38-rainfall events from 2009 to 2016. The EMC values of SS, COD, TN and TP were in the range of 33~2,169, 3.5~56.9, 0.09~7.65 and 0.06~2.21 mg L⁻¹, respectively. As a result of analyzing the effect of rainfall factor on the nonpoint source pollutant load, EMCs of SS, COD and TP showed a statistically significant correlation with rainfall (RA) ($p < 0.01$) and SS showed highly significant correlation with maximum rainfall intensity (MRI, $R = 0.48$). The load ranges of SS, COD, TN and TP were 10.4~11,984.6, 1.1~724.4, 0.6~51.6 and 0.03~22.85 ton event⁻¹, respectively, showing large variation depending on the characteristics of rainfall events. The effect of rainfall on the load was analyzed. SS, COD and TP showed a positive correlation, but TN did not show any significant correlation. The annual load of SS was the highest with 88,645 tons year⁻¹ in 2011 when rainfall was the highest with 1,669 mm. The result of impact analysis of nonpoint source pollution reduction project and land-use change on runoff load showed that pollutant load significantly reduced from 2009 to 2014 but SS and TP loads were increased from 2014 to 2016 due to increase in construction area. Therefore, we suggested that nonpoint source pollution abatement plan should be continued to reduce the soil loss and pollutants during rainfall, and countermeasures to reduce nonpoint source pollution due to construction need to be established.

Key words: Lake Doam, non-point source, pollutant load, runoff, precipitation

서 론

농업지역에서 비점오염물질(nonpoint sources; NPS) 유출은 하천과 호수를 오염시키는 주요한 원인이며(U.S. EPA, 1986; Carpenter *et al.*, 1998; Ichiki *et al.*, 1999; Pegram *et*

al., 1999; Lee *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2011), 수질 및 수생태계 관리에 매우 중요하게 인식되어 왔다(Ongley *et al.*, 2010). 일반적으로 비점오염물질 유출은 오염물질 발생량 및 배출특성의 파악이 쉽지 않으며, 발생량이 매우 불규칙하고, 시간에 따른 오염부하량 변동폭이 크며, 토양유형, 토지이용 및 관리 관행과 같은 유역환경특성 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Bedient *et al.*, 1980; Leon *et al.*, 2001; Hassen *et al.*, 2004; Roh, *et al.*, 2006; Kang and Mitchell, 2013). 또한 강수량과 강수량의 특성(강우강

Manuscript received 7 December 2017, revised 8 February 2018,
revision accepted 27 February 2018

* Corresponding author: Tel: +82-33-570-6573, Fax: +82-33-570-6579,
E-mail: woo@kangwon.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

도, 강우지속시간, 선행강우 등) 및 유역의 지형 형태 등에 의해 영향을 많이 받는다(Bae *et al.*, 2010; Mishra and Kar, 2012; Song *et al.*, 2012; Ding *et al.*, 2017). 강우 시 비점오염물질의 유출은 하천 내에서 최대유출량이 발생하기 전에 매우 높고 최대유출량 발생 이후에 점점 낮아지는 특성을 보이며(Choi *et al.*, 1999), 기후, 지형 및 수문학적 조건에 따라 간헐적이고 분산된 형태로 수계에 유입되는 다양한 유출특성을 보인다(Bedient *et al.*, 1980). 따라서, 비점오염물질이 정확하게 어떠한 형태로 수계의 수질오염에 영향을 미치는지를 정량적으로 분석, 평가하는 데는 한계가 있다.

도암호는 송천의 중·상류 지역에 위치하고 있으며 유역면적은 151.2km²으로 강원도 평창군 대관령면의 4개 리를 포함하고 있으며, 전체 유역의 경사도별 밭 면적은 7~15°의 밭이 43.3%, 15~30°의 밭이 22.2%로 대부분의 밭이 경사도가 크고, 밭의 경사장도 긴 편이다(Kwak *et al.*, 2012). 고도별 밭 면적비는 600~800 m가 65.2%, 800~1,000 m가 34.7%로 거의 모든 경작지가 600 m 이상의 고원에 위치한다(Wonju Regional Environmental office, 2009). 연평균 강수량은 1,260 mm (2007~2015년 평균 기준)로 연간 139회의 강우가 발생하며 30 mm 이하가 약 130회이다(Wonju Regional Environmental office, 2016). 따라서 도암호 유역은 서늘하고 습한 기후 때문에 1970년대 이후 대규모 목축과 고랭지 농업이 성행하여 왔으나 최근 목축업은 위축되고, 배추 등 고랭지 농업이 꾸준히 증가하고 있다(Shin, 2004). 특히 임의 경작지 증가 등 고랭지 밭의 증가로 인하여 강우 시 송천으로 유출되는 비점오염물질이 증가하였으며, 이로 인해 도암댐의 발전이 중단되는 등 지역 주민들의 갈등이 심화되어 왔다(Cho, 1999; Yoon *et al.*, 1999; Wonju Regional Environmental office, 2009).

경작지내의 무분별한 객토, 비료 및 퇴비 과다 사용이 큰 문제로 지적되고 있다(Park *et al.*, 2004, 2006; Lee *et al.*, 2006). Gao *et al.*(2005)은 강우 시 경작지와 비료 등에 의한 농업유출을 줄이는 것이 농업비점오염을 완화하는 효과적인 방법이라 하였다. 특히, 고랭지 밭은 경사도가 크기 때문에 비점오염원 유출을 가중시키는 주요 원인이 되고 있다(Kwak *et al.*, 2012). 중국 남부에 위치한 소규모 농업지역의 경우도 비점오염원으로부터의 오염부하량이 전체 부하량의 80% 이상을 차지하는 것으로 보고된 바 있다(Hu and Huang, 2014).

강원도는 도암호의 수질문제를 해결하기 위해서 2005년 7월에 공동연구를 수행하고 고랭지 밭 관리방안을 제시하였다(Gangwon-do, 2005). 환경부에서는 2008년에

도암호 유역을 비점오염원관리지역으로 지정하고 도암호 말단지점의 수질을 SS 5 mg L⁻¹ 이하로 유지하기 위하여 비점오염 저감사업을 추진하여 왔다(Wonju Regional Environmental office, 2009). 반면, 강원도와 평창군에서는 2018 평창동계올림픽 관련하여 많은 토목사업(하천정비, 도로 개·보수 및 올림픽시설 등)을 대관령면 지역에서 시행하고 있어 비점오염저감사업에 대한 효과가 저평가될 수 있다(Wonju Regional Environmental office, 2016). Moon *et al.*(2012)의 비점오염관리지역 목표수질 달성도 평가에 의하면 도암호 유역의 목표수질은 달성되지 못하고 있으며 지속적으로 비점오염원 관리대책의 이행이 필요하다고 하였다.

따라서 본 연구는 도암호 유역내에서 수행하고 있는 비점오염저감사업의 효과를 분석하고 각종 개발사업(면적)과의 상관성을 파악하기 위하여 2009년부터 2016까지 8년에 걸쳐 38회의 강우사상에 대하여 비점오염물질 유출특성을 조사·분석하였다. 또한 유역관리를 위한 기초자료를 제공하고자 연도별 부하량을 산정하였으며 이들 자료의 연도별 경향성과 비점오염저감사업 및 개발면적과의 관계를 분석하였다.

재료 및 방법

1. 조사 및 분석

도암호 유역은 주 유입하천인 송천(삼양천)을 중심으로 3개의 지류 소하천(차향천, 대관령천, 용평천)으로 구성되어 있으며, 본 조사는 송천의 본류수계인 삼양천과 3개의 지류 소하천이 합류한 이후 도암호로 유입되기 직전의 지점을 선정하여 실시하였다(Fig. 1). 조사대상 유역의 면적은 123.26 km²로 이 중 77.5%가 산림이고, 고랭지 밭이 9.3%로 구성되어 있다(Table 1). 도암호 유역의 강수량은 대관령 기상대 자료를 그리고 개발면적(공사 등)과 비점오염저감사업의 내역은 각각 평창군과 강원도의 자료를 이용하였다(Table 2, Fig. 2). 조사기간 동안 도암호 유역의 평균 강수량은 1,253.0 mm로 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 도암호 유역에서의 비점오염저감사업은 빗물우회수로(RRC), 식생수로(VC), 석축옹벽(SRW), 배수로 배수관(DDP), 자연석 쌓기(NRP), 비점저감웁스(NPF), 경사면보호(IPP), 침사지(SP), 식생대(VB), 집수정(CW) 및 돌쌓기(SM)와 같은 11 종류로 전 유역에 걸쳐 분산 설치되었으며, 투입된 예산은 2014년까지 총 316억으로 나타났다(Table 2, Fig. 2). 도암호 유역내 개발(공사 등) 면적은 2018 평창동계올림픽과 관련하여 2009년에 9.1 ha이던 것

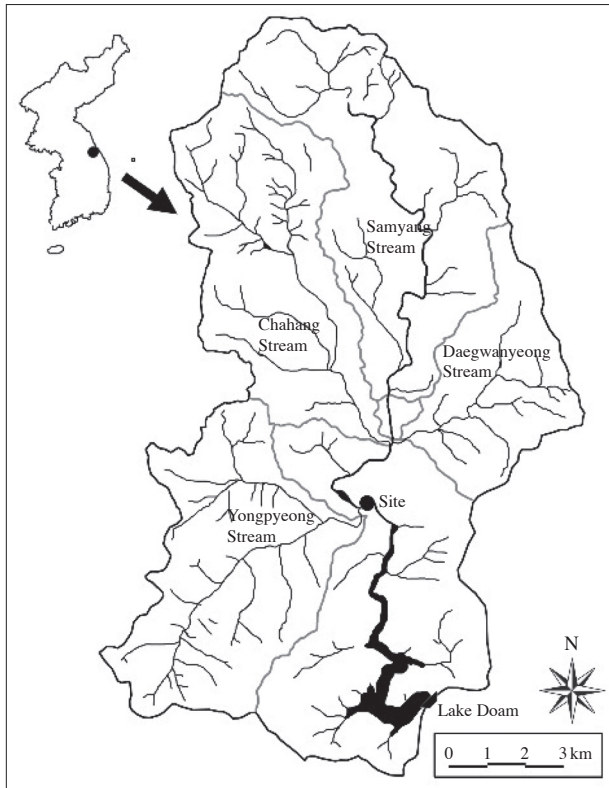


Fig. 1. Map showing the watershed area and sampling site.

이 2014년 이후 매년 급격하게 증가하였으며 2016년에는 150.1 ha이었다(Fig. 2).

시료채수 및 유량조사는 2009년부터 2016년까지 8년 동안 38회의 강우사상을 대상으로 수행되었다. 각 강우사상별 시료는 강우초기에는 1~2시간 간격으로 침투유량 이후에는 2~3시간 간격으로 강우량에 따라 5회에서 14회까지 채수하였다(Table 3). 유량조사 시 수위는 각 조사지점에 설치한 수위계로부터 얻었으며, 유속은 전자식유속계(Flo-Mate 2000)를 이용하여 실측하였고, 유량은 평균단면법을 이용하여 계산하였다. 수위별로 실측된 유량을 이용하여 수위-유량 관계식을 만들고, 수위계로 측정된 수위를 이용하여 유량을 산정하였다.

채수된 시료는 최대한 빠른 시간 안에 실험실로 운반하여 전처리를 걸친 후 수질분석을 실시하였다. 부유물질(SS)은 시료를 미리 태운 유리섬유여과지(GF/F, Whatman)로 여과하여 105°C에서 1시간 동안 건조 후 무게의 차이를 이용하여 측정하였다. 화학적산소요구량(COD)은 과망간산칼륨법(산성)으로 분석하였다. 총인(TP)은 시료를 persulfate 분해 후에 ascorbic acid법으로 측정하였고, 총질소(TN)는 시료를 alkaline persulfate 분해 후 cadmium reduction법으로 분석하였다(APHA *et al.*, 1995).

대관령면의 공사면적은 평창군청의 개발행위허가내역

Table 1. Land use and area ratio in the watershed of Lake Doam.

Watershed	Area (km ²)	Total watershed area (%)				
		Crops	Rice paddy	Forest	Residential	Others
Samyang Stream	37.29	9.8%	0.1%	79.6%	0.9%	9.7%
Chahang Stream	29.69	8.8%	0.1%	76.8%	0.7%	13.6%
Daegwaneong Stream	16.33	9.7%	0.0%	79.5%	0.9%	9.7%
Yongpyeong Stream	30.48	9.4%	0.1%	73.9%	4.4%	12.1%
Song Stream	123.26	9.3%	0.1%	77.5%	1.7%	11.3%

Table 2. Non-point source pollution reduction facilities in Daegwaneong-myeon (from Wonju Regional Environmental office, 2016).

Year	Project period	RRC ¹	VC ²	SRW ³	DDP ⁴	NRP ⁵	NPF ⁶	IPP ⁷	SP ⁸	VB ⁹	CW ¹⁰	SM ¹¹	EA ¹²
2003	Sep. 2003~Dec. 2004	348	-	400	-	505	-	15,406	-	-	2	-	502
2004	Nov. 2004~May 2006	1,279	690	242	-	546	-	9,612	-	-	15	-	605
2008	Feb. 2008~Jun. 2009	-	8,692	-	20,004	350	-	-	-	-	-	-	3,000
2009	Nov. 2008~Dec. 2009	-	4,883	-	41,301	1,455	-	-	12	-	10	-	3,000
2010	Jan. 2010~Dec. 2010	1,898	1,155	667	17,913	-	410	-	15	-	-	-	1,600
2011	Oct. 2010~Dec. 2011	199	410	150	1,753	-	-	-	3	-	2	-	1,600
2012	Jan. 2012~May 2014	6,460	-	435	-	-	-	-	7	1,734	25	-	2,600
2013	Jan. 2013~Dec. 2015	10,273	13,605	-	-	-	-	13,209	-	2,146	-	100	7,400
2014	Jan. 2014~Dec. 2016	-	-	-	7,766	-	2,983	-	3	-	-	2,278	11,300
Sum		20,457	29,435	1,894	88,737	2,856	3,393	38,227	40	3,880	54	2,378	31,607

¹RRC: Rainwater roundabout channel, ²VC: Vegetation channel, ³SRW: Stone retaining wall, ⁴DDP: Drain drainage pipe, ⁵NRP: Natural rock piles, ⁶NPF: Non-point fence, ⁷IPP: Inclined plane protection, ⁸SP: Settling pond, ⁹VB: Vegetation belt, ¹⁰CW: Collecting well, ¹¹SM: Stone masonry, ¹²EA: Execution Amount, Unit: m (RRC, VC, SM), m² (RBW, DDP, NRP, NPF, IPP, VB), ea (SP, CW), ₩ (EA, million won)

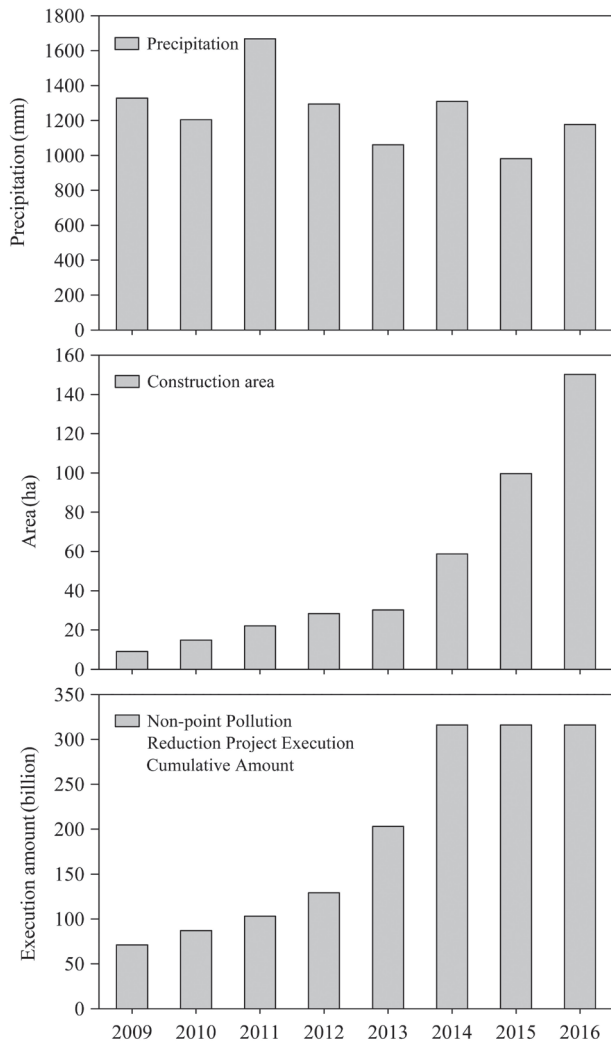


Fig. 2. Environmental Change of Lake Doam.

을 기초자료로 하여 각 공사의 전체 면적이 해당 공사의 기간 동안 동일하게 영향을 줄 것으로 가정하여 연도별로 공사면적의 합을 산출하였다.

2. 부하량 산정 및 통계처리

강우사상별 유량가중평균농도(EMC, Event mean concentration)는 일반적으로 강우사상에서 농도를 나타내는 지표로 사용된다. 이는 강우유출수의 경우 강우강도와 지속시간에 따라 시간대별로 급격히 변화하기 때문이다(Charbeneau et al., 1998). 강우사상별 EMCs는 조사 시기의 유량(Q_i)과 오염물질 농도(C_i)로부터 부하량($Q_i C_i$)을 계산하고 이를 누적하여 강우사상별 총오염물질발생량($\sum Q_i C_i$)을 산출한 후 강우사상의 총유출량($\sum Q_i$)으로 나누어 산정하였다(식 1).

Table 3. Rainfall characteristics of sampled events in Lake Doam.

Year	Periods	RA ¹	RCH ²	MRI ³	ARI ⁴	ADD ⁵
2009	8-Jul	129	11	35.5	11.7	2
	15-Jul	53	8	12.5	6.6	1
	31-Oct	33.5	14	8.5	2.4	11
2010	18-May	17.5	7	4.5	2.5	6
	22-May	81	22	7	3.7	3
	10-Aug	19	8	6.5	2.4	1
	2-Sep	18.5	4	7.5	4.6	1
	10-Sep	68.5	15	19.5	4.6	3
2011	23-Jun	133	32	18.5	4.2	20
	29-Jun	69	20	11	3.5	2
	7-Jul	61	12	15	5.1	3
	27-Jul	58.3	15	17.5	3.9	0
2012	2-Apr	63.7	21	7.5	3	9
	30-Jun	16.8	10	3.5	1.7	3
	19-Jul	35.5	7	10.5	5.1	3
	12-Aug	70.3	15	18.5	4.7	23
	15-Aug	17.5	6	6	2.9	2
	28-Aug	35.1		11		4
	30-Aug	91.5	21	17.5	4.4	1
16-Sep	98.5	32	8.5	3.1	7	
2013	27-May	26.2	10	4	2.6	7
	11-Jul	13.5		4.5		0
	15-Jul	122	16	27.5	7.5	0
	23-Jul	16		4.8		0
2014	28-Sep	25	16	5.5	1.6	3
	23-Jul	22.5		7.5		4.5
	25-Jul	11		6		0
	7-Aug	38	10	10.5	4.3	19
	9-Aug	57	22	5	2.6	1
2015	11-Aug	58.5	10	18.5	6.1	1
	26-Jun	60.5	28	6	2.2	6
	23-Jul	41.4		12.5		0
	24-Aug	275.5	40	20	6.8	10
2016	2-Jul	75.8	12	18.4	6.3	6
	5-Jul	128.3	21	13.3	6.1	1
	26-Aug	39.6	12	7.8	3.3	18
	28-Aug	178.5	27	26.3	6.6	1
	3-Oct	5.9	2	4.6	3	12
Mean	62.2	16	11.8	4.3	5	
Max.	275.5	40	35.5	11.7	23	
Min.	5.9	2	3.5	1.6	0	

¹RA: rainfall amount (mm), ²RCH: rainfall continuous hour (hr), ³MRI: maximum rainfall intensity (mm hr⁻¹), ⁴ARI: Average rainfall intensity (mm hr⁻¹), ⁵ADD: antecedent dry day (day, below 10 mm)

$$EMC = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} \tag{1}$$

여기서, Q_i 는 강우사상에서 i 번째 유량, C_i 는 강우사상에서 i 번째 오염물질 농도이다.

강우사상별 부하량은 오염물질의 농도와 유량을 NI (numeric integration) 방법으로 계산하였다(식 2).

$$\text{Pollutant load (ton event}^{-1}) = k \times \sum_{i=1}^N Q_i C_i \quad (2)$$

여기서, k 는 단위환산계수이다.

도암호 유역의 환경변화(개발면적 증가 등)에 따른 비점오염물질 유출량의 변화를 분석하기 위해서 각 연도별로 연간부하량을 산정하였다. 연간부하량(Annual pollutant load)은 2009년부터 2016년까지 각 연도별로 연간강우량을 계산하여, 이를 계측된 강우사상의 총 강우량으로 나누고, 여기에 계측된 강우사상의 총 부하량을 곱하여 산정하였다(식 3).

$$\text{Annual pollutant load (ton year}^{-1}) = \frac{\text{AR}}{\text{MER}} \times \text{MEL} \quad (3)$$

여기서, AR (annual precipitation)은 연도별 강우량, MER (measured event precipitation)은 계측된 강우사상의 총 강우량 그리고 MEL (measured event load)은 계측된 강우사상의 총 부하량이다.

본 연구에서는 수문기상자료, 유역 환경변화(개발면적 등) 및 수질변수들간의 경향분석에 Mann-Kendall test 및 Sen's Slope estimator을 이용하였다. Mann-Kendall Test는 비모수 통계방법(Non-parametric Statistical Method)의 하나로 장기적인 시계열 자료의 경향성을 분석하는 데 이용되며, 자료 값(data values) 자체보다는 샘플 자료(sample data)의 상대적인 크기를 비교한다(Gilbert, 1987). 이 분석은 표본자료의 특성에 민감하지 않고 결측치나 분석한계를 벗어나는 자료에 대해서도 적용이 가능하다는 장점이 있다(Jaagus, 2006). Sen's Slope estimator는 Sen (1968)에 의해서 제안된 방법으로, 특이 값에 영향을 받지 않으며 자료의 누락이나 오류가 있는 경우에도 분석이 가능하다.

결과 및 고찰

1. 강우 시 수질현황

도암호 유역에서 강우 시 비점오염물질의 유출특성을 분석하기 위하여 2009년부터 2016까지 8년에 걸쳐 38회의 강우사상에 대하여 수질 및 유량조사를 실시하였다. 총 38회 강우사상별 강우량(RA), 최대강우강도(MRI), 유량 및 유량가중평균농도(EMCs) 등의 분석결과는 Tables 3~4와 같다.

강수량(RA), 최대강우강도(MRI), 평균강우강도(ARI) 및

선행무강우일수(ADD)는 각각 5.9~275.5 mm, 3.5~35.5 mm hr⁻¹, 1.6~11.7 mm hr⁻¹ 및 0~23 day의 범위를 보였다(Table 3). 강우사상별 유량은 누적양으로 155~19,317 m³ sec⁻¹의 범위로 평균 4,330 m³ sec⁻¹이었다(Table 4). 하천의 유량은 강우량에 직접적으로 영향을 받으므로 각각의 강우 사상에 따라 큰 차이를 보였다. 각 강우사상별로 5회에서 14회까지 조사한 SS, COD, TN 및 TP의 38회 평균은 각각 448, 16.7, 3.43 및 0.50 mg L⁻¹이었으며, 최대값은 각각 5,317, 174.4, 12.72 및 6.65 mg L⁻¹으로 나타났다(Fig. 3)

2. 유량가중평균농도

강우사상별 SS, COD, TN 및 TP의 EMCs는 각각 33~2,169, 3.5~56.9, 0.09~7.65 및 0.06~2.21 mg L⁻¹의 범위로 산정되었으며 38회 평균은 각각 487, 17.4, 3.15 및 0.52 mg L⁻¹이었다(Table 4). Eum (2015)은 도암호 유역과 유사한 고랭지 농업 지역인 만대천(소양호) 유역의 연구에서 SS, COD, TN 및 TP의 EMCs가 각각 116~2,616, 3.5~15.1, 1.8~5.3 및 0.12~2.19 mg L⁻¹의 범위라고 하였다. 이는 COD를 제외하고는 본 연구결과와 유사한 것으로 사료된다. 강우인자가 비점오염유출에 미치는 영향을 분석한 결과 SS, COD 및 TP의 EMCs가 강우량(RA)과 통계학적으로 유의한 상관관계를 보였으며(p<0.01), SS의 EMC는 최대강우강도(MRI, R=0.480), 강우량(RA, R=0.416) 및 평균강우강도(ARI, R=0.358)의 순으로 높은 상관성을 보였다(Table 5). 또한 SS의 EMC는 COD, TN 및 TP의 EMC와도 유의한 양의 상관을 보여, 도암호 유역에서 SS 유출을 줄이는 것이 매우 중요하다는 것을 암시한다. Kang *et al.* (2010)은 안동시에 있는 소규모(plot unit) 고구마 밭 농업지역 연구에서 SS 부하가 유기물(BOD & COD) 및 영양염류와 유의한 상관을 보여 유출수내의 SS를 제거하는 것이 수계를 보호하는 데 매우 유용한 요소라고 한 바 있다. Hu and Huang (2014)는 중국남부에 위치한 작은 농업 지역인 Siheshui 유역에서 강우 유출에 따른 비점오염물질의 특성을 조사 분석한 결과 COD, TP 및 SS의 EMCs가 강우 유출과 유의적인 상관관계를 보였다고 하였다. 만대천 유역에서는 SS의 EMC가 평균강우강도, 강우량 및 최대강우강도 순으로 높은 상관성을 보여 도암호 유역과는 다소 상이하였다(Eum, 2015). 이는 도암호와 만대천 유역의 토성(양토와 사양토의 비율)과 재배작물의 차이로 판단된다. 도암호와 만대천 유역의 토성(양토%, 사양토%)은 각각 43%, 33% 및 68%, 30%으로 만대천의 양토비율이 높았다. 또한 도암호 유역은 감자, 무 및 배추 등의 일년생 작물의 경작이 주로 이루어진 반면, 만대천 유역은 인삼

Table 4. Stream flow, concentration and EMC (event mean concentration) of sampled events in Lake Doam.

Year	Periods	NO ¹	Flow ²	Concentrations ³				EMCs			
				SS	COD	TN	TP	SS	COD	TN	TP
2009	8-Jul	12	7,986(3.8±172.5)	578(9±2,008)	28.1(6.3±95.2)	6.30(2.28±9.94)	0.71(0.04±1.90)	827	27.0	4.73	0.64
	15-Jul	10	8,622(50.9±269.6)	751(41±2,881)	33.1(5.6±130)	5.98(5.70±6.44)	0.57(0.06±1.49)	881	41.5	5.99	0.60
	31-Oct	10	155(1.5±2.8)	161(6±585)	7.3(3.2±12.4)	5.55(3.38±8.70)	0.53(0.08±1.38)	213	7.3	5.96	0.53
2010	18-May	7	239(2.9±5.6)	46(9±83)	9.0(6.8±11.0)	3.31(2.35±5.14)	0.18(0.04±0.38)	44	8.8	3.29	0.18
	22-May	11	2,484(2.2±34.0)	217(10±702)	10.7(8.4±13.6)	2.68(1.48±4.23)	0.45(0.08±1.26)	251	11.2	0.09	0.54
	10-Aug	8	424(3.4±5.6)	37(4±140)	9.1(4.8±21.2)	3.32(2.54±4.01)	0.28(0.12±0.63)	42	9.8	0.13	0.30
2011	2-Sep	8	532(3.0±13.0)	355(11±768)	6.4(3.6±10.2)	4.80(3.12±8.30)	0.66(0.16±2.07)	418	7.0	0.13	0.87
	10-Sep	8	3,292(15.9±136.3)	608(135±2,553)	7.7(2.2±10.8)	3.85(2.49±7.73)	1.41(0.19±6.65)	1,029	6.7	0.23	2.21
	23-Jun	13	3,544(3.2±71.0)	1,472(73±4,483)	40.8(5.4±174.4)	6.29(3.8±12.72)	0.30(0.07±0.97)	2,169	56.9	7.65	0.41
2012	29-Jun	8	2,303(10.7±55.0)	1,644(71±3,471)	39.2(3.0±85.2)	4.79(3.17±6.49)	0.45(0.03±1.03)	1,957	47.1	4.70	0.51
	7-Jul	8	2,429(18.3±65.4)	1,977(122±5,317)	64.2(5.0±158.4)	4.90(2.41±7.91)	0.53(0.11±1.58)	2,156	55.6	4.55	0.41
	27-Jul	9	3,492(14.7±55.0)	438(49±1,167)	15.5(3.2±29.1)	2.84(2.05±4.23)	0.31(0.08±0.63)	441	17.9	2.62	0.31
2013	2-Apr	8	3,312(5.3±30.7)	428(16±1,872)	11.7(1.3±27.9)	3.39(2.58±3.99)	0.48(0.05±1.22)	218	9.6	3.44	0.45
	30-Jun	11	775(5.7±25.6)	65(10±154)	8.8(7.0±14.6)	3.30(2.73±4.31)	0.11(0.05±0.20)	72	8.3	3.20	0.12
	19-Jul	8	1,408(6.6±36.6)	316(13±676)	13.6(3.3±27.6)	3.57(2.50±6.95)	0.55(0.05±1.86)	135	11.4	2.85	0.39
2014	12-Aug	9	1,775(13.6±40.1)	444(14±1,508)	15.3(3.6±34.4)	4.18(2.69±8.16)	0.59(0.12±2.22)	627	19.3	4.58	0.78
	15-Aug	6	1,181(11.2±28.3)	55(15±153)	10.7(2.5±27.0)	3.71(1.92±7.12)	0.37(0.11±0.95)	63	12.9	2.88	0.26
	28-Aug	9	2,185(13.3±48.0)	123(23±462)	10.9(2.8±30.0)	2.47(1.82±3.38)	0.31(0.14±0.78)	179	14.6	2.45	0.39
2015	30-Aug	9	9,914(6.0±172.9)	333(13±1,075)	14.1(2.9±34.0)	2.43(1.58±4.18)	0.22(0.09±0.43)	247	11.8	1.77	0.15
	16-Sep	12	9,904(4.5±190.8)	204(5±493)	14.9(4.4±30.6)	2.37(1.17±4.59)	0.40(0.04±1.07)	243	19.1	1.62	0.41
	27-May	8	590(3.6±10.2)	26(9±77)	4.9(3.0±7.2)	3.45(2.94±3.75)	0.06(0.04±0.09)	33	5.5	3.41	0.06
2016	11-Jul	8	457(3.2±49)	231(13±835)	11.1(5.0±24.5)	3.45(0.13±5.02)	0.47(0.06±1.77)	181	9.5	4.16	0.35
	15-Jul	13	10,448(57.8±201.1)	567(38±1,575)	11.2(2.2±42.1)	0.37(0.02±3.19)	0.77(0.05±3.50)	626	12.4	3.96	0.87
	23-Jul	7	3,341(6.6±67.7)	96(1±287)	8.6(3.2±19.6)	3.16(2.69±4.12)	0.09(0.05±0.20)	101	9.1	3.01	0.09
2017	28-Sep	8	737(4.1±13.7)	37(1±97)	4.8(2.8±7.8)	3.51(2.64±4.23)	0.10(0.06±0.18)	38	4.8	3.51	0.10
	23-Jul	8	799(3.9±11.4)	119(23±221)	6.2(3.9±8.8)	3.12(2.77±3.91)	0.16(0.05±0.40)	103	5.2	3.27	0.12
	25-Jul	6	228(2.5±9.0)	66(13±115)	5.9(4.6±7.5)	3.16(2.71±4.36)	0.13(0.08±0.24)	65	5.9	2.83	0.11
2018	7-Aug	5	1,187(14.1±29.3)	298(78±712)	10.9(7.6±14.3)	5.12(4.11±6.60)	0.25(0.16±0.43)	325	11.2	4.90	0.26
	9-Aug	8	4,080(28.7±112.4)	338(30±764)	22.3(6.2±36.6)	2.96(2.09±4.22)	0.34(0.14±0.66)	412	25.4	2.73	0.35
	11-Aug	6	8,260(67.3±226.8)	154(39±479)	17.3(4.8±50.4)	1.98(1.59±2.41)	0.15(0.05±0.38)	174	24.3	1.90	0.20

Table 4. Continued.

Year	Periods	NO ¹	Flow ²	Concentrations ³					EMCs				
				SS	COD	TN	TP	SS	COD	TN	TP		
2015	26-Jun	11	5,934 (12.3 ± 85.8)	123 (5 ± 316)	10.6 (4.8 ± 19.0)	2.84 (1.68 ± 4.59)	0.16 (0.08 ± 0.39)	137	12.0	2.29	0.15		
	23-Jul	11	5,492 (18.1 ± 79.0)	323 (48 ± 1,032)	18.3 (3.4 ± 36.4)	3.37 (2.36 ± 5.02)	0.41 (0.22 ± 0.59)	357	20.2	3.50	0.43		
	24-Aug	14	19,317 (30.8 ± 247.9)	589 (48 ± 2,538)	34.7 (5.5 ± 168.4)	0.09 (0.03 ± 0.14)	0.88 (0.12 ± 2.54)	634	48.7	2.78	0.96		
2016	2-Jul	9	4,979 (13.5 ± 86.8)	1,189 (20 ± 4,786)	14.2 (6.4 ± 35.0)	3.89 (2.70 ± 4.88)	1.55 (0.08 ± 4.17)	1,332	14.9	3.93	1.83		
	5-Jul	10	13,109 (32.9 ± 161.0)	708 (28 ± 1,946)	19.2 (5.1 ± 30.0)	3.31 (2.08 ± 4.61)	1.38 (0.06 ± 3.74)	871	21.4	2.96	1.73		
	26-Aug	8	2,771 (22.3 ± 47.7)	111 (14 ± 271)	6.9 (2.9 ± 10.9)	2.90 (1.44 ± 4.48)	0.29 (0.11 ± 0.58)	152	7.6	2.88	0.36		
	28-Aug	10	14,810 (46.1 ± 167.9)	643 (20 ± 3,361)	16.9 (3.3 ± 75.2)	2.23 (1.14 ± 4.62)	1.10 (0.04 ± 5.36)	662	16.9	1.89	1.14		
	3-Oct	5	2,105 (26.9 ± 40.2)	65 (8 ± 122)	3.0 (2.0 ± 6.0)	3.15 (1.99 ± 3.95)	0.16 (0.04 ± 0.31)	76	3.5	3.00	0.17		
Mean		8.9	4,330	448	16.7	3.43	0.50	487	17.4	3.15	0.52		
Max.		14.0	19,317	5,317	174.4	12.72	6.65	2,169	56.9	7.65	2.21		
Min.		5.0	155	1	1.3	0.02	0.03	33	3.5	0.09	0.06		

¹NO: Number of monitoring, ²Flow: total flow of rainfall events, ³Concentration: Measured water quality, Units: m³ event⁻¹ (Flow., m³ sec⁻¹), mg L⁻¹ (SS, COD, TN, TP)

및 과실수 등 다년생 작물이 대부분을 차지하였다(Wonju Regional Environmental office 2015, 2016). 일반적으로 밭에서 강우량에 따른 침식 및 유출수량은 토성에서 양토가 사양토에 비해 비교적 많으며(Park *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2007; Yoo *et al.*, 2007), 재배작물은 감자 및 무 등에 비해서 더덕과 과실수 재배시에 토양유실량이 적다(Kim *et al.*, 2011). 강우량에 따른 유출수 및 침식토성의 차이는 양토가 사양토에 유출수 및 침식경사지 밭 토양의 물 유출에 대한 연구에서 토성과 재배작물에 따라 양토는 빗물에 의해 침식율이 적은 특성이 있어(Rural Development Administration, 2008), 양토의 비율이 높은 만대천 유역이 최대강우강도보다는 평균강우강도에 더 민감한 것으로 사료된다.

3. 비점오염물질 부하량

강우사상별 SS 및 COD 부하량은 각각 10.4~11,984.6 및 1.1~724.4 ton event⁻¹의 범위로 강우사상의 특성에 따라 큰 변이를 보였으며, 38회 평균은 각각 2,632.5 및 94.6 ton event⁻¹이었다(Table 6). 강우사상별 SS 및 COD 부하량은 강수량이 275.5 mm로 가장 많았던 2015년 8월 24일에 11,984.6 및 724.4 ton event⁻¹으로 가장 컸다. 일반적으로 강우사상에 따른 SS 및 COD 부하량은 강수량 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다(Jung *et al.*, 2012; Kwak *et al.*, 2012).

강우사상별 TN 부하량은 0.6~51.6 ton event⁻¹ 범위로서 강우사상의 특성에 따라 변이를 보였으며 38회 평균은 13.6 ton event⁻¹이었고 2009년 7월 15일의 강우사상에서 51.6 ton event⁻¹으로 가장 컸다. 이는 SS와는 다르게 강수량의 증가에 따라 증가하지 않는 것으로 나타났다. Kwak 등(2013)은 도암댐 유역의 선행 연구에서도 SS는 강수량의 증가와 함께 증가하는 반면 TN은 큰 변이를 보이지 않았다고 하였다. 일반적으로 TN은 강우 및 유량의 변화와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않으며(Cho *et al.*, 2004), 강수량과 유량이 증가하는 시기에 감소하는 것으로 판단된다(Jeong *et al.*, 2000, Park *et al.*, 2015).

강우사상별 TP 부하량은 0.03~22.85 ton event⁻¹ 범위로서 강우사상의 특성에 따라 비교적 큰 변이를 보였으며 평균은 3.14 ton event⁻¹이었고 2016년 7월 5일의 강우사상에서 22.85 ton event⁻¹으로 가장 컸다. 강우사상별 TP 부하량은 TN과는 다르게 SS와 마찬가지로 강수량 및 유량의 변화와 유사한 변화를 보였다. 이는 또한 Chang *et al.* (2008) 이 대만의 산림지역 연구에서 유량에 따른 SS 및 TP의 부하량이 양의 상관관계를 보였다고 보고한 것과 일치하는

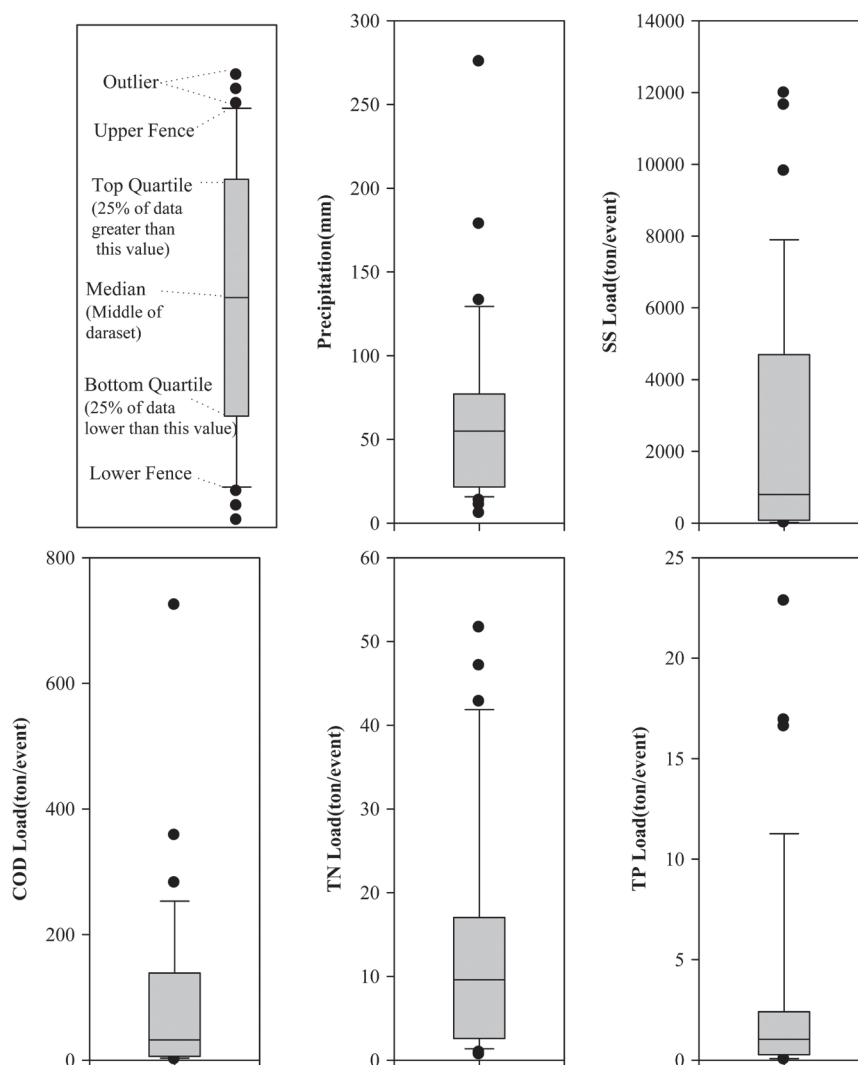


Fig. 3. Box-plot results of nonpoint source pollutant loads of all 38 rainfall events of Lake Doam from 2009 to 2016 (n=38).

Table 5. Results of pearson correlation coefficient analysis using meteorological and water quality parameters.

Variables	RCH	MRI	ARI	ADD	SS	COD	TN	TP
RA	0.734**	0.693**	0.563**	0.107	0.416**	0.552**	0.062	0.467**
RCH	-	0.230	0.059	0.127	0.254	0.416**	0.027	0.158
MRI		-	0.843**	-0.008	0.480**	0.404*	0.167	0.501**
ARI			-	-0.163	0.358*	0.356*	0.167	0.443**
ADD				-	0.126	0.103	0.418**	-0.036
SS					-	0.805**	0.453**	0.439**
COD						-	0.473**	0.116
TN							-	-0.139

*: p-value <0.05, **: p-value <0.01

결과이다.

도암호 유역에서 SS, COD, TN 및 TP의 연간부하량은 Table 7로 정리하였다. SS의 연간부하량은 2011년에

88,645 ton year⁻¹으로 가장 많았는데 이는 이 시기에 강수량이 1,668 mm (Fig. 2 참조; 조사기간 연평균 1,253 mm)으로 가장 많았기 때문으로 사료된다. COD 및 TN의 연간부

Table 6. Pollutant loads of sampled events in Lake Doam.

Year	Periods	Pollutant loads (ton event ⁻¹)			
		SS	COD	TN	TP
2009	8-Jul	6,605	215.6	42.80	5.08
	15-Jul	7,593	357.8	51.63	5.18
	31-Oct	33	1.1	0.92	0.08
2010	18-May	10	2.1	0.79	0.04
	22-May	624	27.7	6.88	1.34
	10-Aug	19	4.2	1.41	0.13
	2-Sep	191	3.5	2.14	0.42
	10-Sep	3,408	22.5	14.41	7.48
2011	23-Jun	7,685	201.6	27.10	1.45
	29-Jun	4,520	108.5	10.83	1.19
	7-Jul	5,219	134.8	11.04	0.99
	27-Jul	1,539	62.4	9.13	1.08
2012	2-Apr	967	31.9	11.33	1.54
	30-Jun	56	6.5	2.48	0.10
	19-Jul	520	23.5	4.79	0.85
	12-Aug	1,011	32.3	7.85	1.29
	15-Aug	73	15.3	3.43	0.31
	28-Aug	431	34.0	5.44	0.90
	30-Aug	2,466	116.2	17.53	1.49
2013	16-Sep	2,491	188.8	16.87	4.38
	27-May	19	3.2	2.01	0.04
	11-Jul	83	4.4	1.90	0.16
	15-Jul	7,636	150.6	41.75	10.67
2014	23-Jul	337	30.5	10.06	0.31
	28-Sep	28	3.5	2.58	0.08
	23-Jul	82	4.2	2.62	0.09
	25-Jul	15	1.3	0.64	0.03
	7-Aug	385	13.3	5.82	0.31
2015	9-Aug	1,682	103.5	11.13	1.42
	11-Aug	1,435	200.4	15.72	1.63
	26-Jun	574	56.5	10.90	0.71
2016	23-Jul	1,556	74.9	13.81	1.76
	24-Aug	11,985	724.4	47.10	16.59
	2-Jul	6,724	74.3	19.59	9.26
	5-Jul	11,651	282.0	40.43	22.85
	26-Aug	412	20.6	7.80	0.98
2016	28-Aug	9,809	250.1	28.05	16.92
	3-Oct	161	7.4	6.31	0.37
	Mean	2,632	94.6	13.6	3.14
Min.	10	1.1	0.6	0.03	
Max.	11,985	724.4	51.6	22.85	

하량은 각각 2009년에 2,923 및 485 ton year⁻¹으로 가장 많았으나 TP는 2016년에 115 ton year⁻¹으로 가장 많았다.

4. 통계분석

일반적으로 비점오염물질의 유출량은 강우량, 비점저감

Table 7. Annual pollutant load and construction area of Lake Doam (2009~2016).

Year	Rainfall	SS	COD	TN	TP	Cons. Area
2009	1,328	72,399	2,923	485	53	9.1
2010	1,204	19,345	273	117	43	14.9
2011	1,668	88,645	2,372	272	22	22.1
2012	1,294	19,667	1,101	171	27	28.3
2013	1,061	30,148	715	217	42	30.2
2014	1,310	20,837	1,869	208	20	58.7
2015	982	28,715	1,962	164	42	99.7
2016	1,177	65,897	1,454	234	115	150.1

Cons. Area: Construction area

Units: mm (Rainfall), ton year⁻¹ (SS, COD, TN, TP)

사업 및 유역의 토지이용 변화 등에 따라 매년 차이가 크게 나타날 수 있다(Bae *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2012). 도암호가 위치한 대관령면은 2018 평창동계올림픽으로 인해 2014년부터 올림픽관련 시설공사 등 유역의 토지이용 변화가 크게 증가하였으므로 이 시기를 기준으로 2009년부터 2014년까지와 2014년부터 2016년까지로 분리하여 통계 분석을 실시하였다. SS, COD, TN 및 TP의 연간부하량과 강우량, 공사면적 및 비점오염저감사업비와의 상관관계 분석결과는 Table 8과 9에 제시하였다.

2009년부터 2014년까지 조사연도에 따른 연간부하량과 강우량과는 음의 상관관계, 공사면적과 비점오염저감사업비와는 양의 상관관계를 보였다. 비점오염저감사업에 따른 연간오염부하량은 유의성은 낮으나 음의 상관관계를 보였다. 이는 비점오염저감사업으로 인해 강우 시 오염부하량이 감소하고 있는 것으로 볼 수도 있다. 본 결과가 통계학적으로 낮은 유의성(p>0.05)을 나타낸 것은 연간자료의 수(6년; 2009~2014년)가 적고 강수량이 같더라도 강우 패턴(강우강도, 강우지속시간 등)에 따른 변화가 크기 때문으로 사료된다. 2014년부터 2016년까지의 상관관계를 분석한 결과 공사면적에 따라 연간부하량(SS, TN, TP)은 양의 상관관계를 보였다. 2014년 이후 공사면적이 크게 증가하면서 SS와 TP부하량이 증가한 것으로 사료된다. 2009년부터 2014년까지의 분석보다 자료의 수(3년; 2014~2016년)가 적음에도 불구하고 통계학적으로 유의한 것은 공사로 인한 영향이 다른 환경변수에 의한 영향보다 컸기 때문으로 판단된다. 연간부하량은 2014년 이전까지는 SS, COD 및 TN과는 양의 상관관계, 2014년 이후부터는 음의 상관관계를 보였다. Chung *et al.*(1999)은 강수량이 증가할 때 유량과 오염부하량은 증가한다고 하였는데, 본 연구결과 2014년 이후 자료에서 역 상관관계를 보인 것은 공사면적이 증가하였기 때문으로 사료된다.

Table 8. Pearson correlation coefficient between water quality parameters and environmental change parameters (2009~2014).

Variables	SS	COD	TN	TP	Preci.	Cons. Area	Redu. Amount
Year	-0.513	-0.274	-0.493	-0.649	-0.238	0.924**	0.919**
SS	-	0.782	0.722	0.085	0.746	-0.464	-0.480
COD		-	0.856*	-0.048	0.654	-0.071	-0.102
TN			-	0.454	0.277	-0.380	-0.305
TP				-	-0.505	-0.702	-0.520
Preci.					-	-0.092	-0.263
Cons. Area						-	0.967**

Preci.: Precipitation

Cons. Area: Construction area

Redu. Amount: Non-point Pollution Reduction Project Execution Cumulative Amount

*: p-value <0.05, **: p-value <0.01

Table 9. Pearson correlation coefficient between water quality parameters and environmental change parameters (2014~2016).

Variables	SS	COD	TN	TP	Preci.	Cons. Area	Redu. Amount
Year	0.999*	-0.172	0.900	0.995	-0.403	0.998*	-
SS	-	-0.218	0.878	0.999*	-0.359	1.000**	-
COD		-	0.275	-0.266	-0.833	-0.230	-
TN			-	0.854	-0.762	0.872	-
TP				-	-0.313	0.999*	-
Preci.					-	-0.347	-
Cons. Area						-	-

Preci.: Precipitation

Cons. Area: Construction area

Redu. Amount: Non-point Pollution Reduction Project Execution Cumulative Amount

*: p-value <0.05, **: p-value <0.01

Table 10. Statistical analyses of Sen's Slope Test and Mann-Kendall Test in Lake Doam (2009~2016).

Parameter	2009~2014			2014~2016		
	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	p-value	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	p-value
SS	-0.367	-1.673	0.010	0.513	4.821	0.015
COD	-0.167	-0.024	0.256	0.231	0.086	0.306
TN	-0.233	-0.003	0.108	0.436	0.018	0.042
TP	-0.193	-0.001	0.186	0.641	0.008	0.002

오염부하량의 시간에 따른 경향을 분석하기 위해서 각 강우사상별로 강수량 대비 오염부하량을 계산하고, 2014년을 기준하여 두 시기로 분리한 후 Mann-Kendall's test와 Sen's slope의 방법으로 통계처리를 실시하였다. Mann-Kendall's Tau는 경향성의 유무를 파악하며, Sen's slope는 기울기를 분석한다. 통계분석 결과 2009년부터 2014년까지는 SS, COD, TN 및 TP의 기울기가 각각 -1.673, -0.024, -0.003 및 -0.001, Tau는 각각 -0.367, -0.167, -0.233 및 -0.193, p값은 각각 0.010, 0.256, 0.108 및 0.186로 SS는 통계학적으로 유의한 감소, COD, TN 및 TP는 미약한 감소를 보였다(Table 10). SS는 비점오염저감사업으로 인

하여 감소하였고 COD, TN 및 TP는 뚜렷한 변화가 없는 것으로 사료된다. 2014년부터 2016년까지는 SS, COD, TN 및 TP의 기울기가 각각 4.821, 0.086, 0.018 및 0.008, Tau는 각각 0.513, 0.231, 0.436 및 0.641, p값은 각각 0.015, 0.306, 0.042 및 0.002로 SS, TN 및 TP는 통계학적으로 유의한 증가, COD는 통계학적으로 유의하지는 않지만 증가 경향을 보였다. Tau는 상관계수로 공사면적의 증가로 인하여 TP, SS 및 TN 순으로 변화가 뚜렷하게 나타난 것으로 분석되었다. 이는 공사로 인하여 노출된 토양으로부터 강우 시 토사가 유출되었으며, 토양내의 인은 토립자에 흡착되어 토양유실과 함께 유출된 것으로 사료된다(Kim *et al.*,

2004). Hwang *et al.* (2013)은 낙동강에서 보 공사의 영향으로 SS 및 탁도 같은 부유물질이 증가하였다고 보고하였다. 상관관계분석과 경향분석을 실시한 결과 2009년부터 2014년까지는 비점오염저감사업 등의 영향으로 오염부하량이 감소한 것으로 나타났으나 2014년 이후부터는 공사의 영향으로 다시 증가하고 있는 것으로 보인다.

결 론

도암호 유역에서 비점오염물질의 유출특성을 파악하기 위하여 2009년부터 2016년까지 38회의 강우사상에 대하여 수질 및 유량을 모니터링 하였다. SS, COD, TN 및 TP의 EMCs는 각각 33~2,169, 3.5~56.9, 0.09~7.65 및 0.06~2.21 mg L⁻¹의 범위로 산정되어, 고랭지 농업지역인 만대천(소양호) 유역의 연구와 유사한 분포를 보였다. 비점오염유출에 강우인자가 미치는 영향을 분석한 결과 EMCs(SS, COD 및 TP)는 강우량(RA)과 통계학적으로 유의한 상관관계를 보였으며 ($p < 0.01$), SS의 EMC는 최대 강우강도(MRI, 0.480) 가장 높은 상관성을 보였다. 강우사상별 SS, COD, TN 및 TP 부하량은 각각 10.4~11,984.6, 1.1~724.4, 0.6~51.6 및 0.03~22.85 ton event⁻¹의 범위로 강우사상의 특성에 따라 큰 변이를 보였다. 강우량이 부하량에 미치는 영향의 분석에서 SS, COD 및 TP는 양의 상관관계로 나타났으며, TN은 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다. SS의 연간부하량은 강수량이 1,669 mm로 가장 많았던 2011년에 88,645 ton year⁻¹으로 가장 많았다. 비점오염물질의 유출량에 비점저감사업 및 토지이용 변화가 미치는 영향을 분석하였다. 도암호 유역에서 비점오염물질 유출량은 2014년까지 비점오염저감사업으로 인해 강우 시 오염부하량이 감소하고 있는 것으로 볼 수도 있었고, 2014년부터 2016년까지 분석결과에서 공사면적이 증가로 인하여 SS와 TP부하량이 증가한 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 “2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비 연구(관리번호-620160026)”의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. Washington, D.C., American Public Health Association.
- Bae, S.H., W.J. Kim, Y.H. Yoon, H.M. Lim, E.J. Kim and J.R. Park. 2010. Characterization of Runoff Properties of Non-point Pollutant at a Small Rural Area considering Landuse Types. *Journal of Korean Society on Water Quality* **26**: 654-663.
- Bedient, P.B., J.L. Lambert and N.K. Springer. 1980. Stormwater Pollutant Load-Runoff Relationships. *Journal of Water Pollution Control Federation* **52**: 2396-2404.
- Carpenter, S.R., N.F. Caraco, D.L. Correl, R.W. Howarth, A.N. Sharpley and V.H. Smith. 1998. Non-point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* **8**: 559-568.
- Chang, C.H., C.G. Wen, C.H. Huang, S.P. Chang and C.S. Lee. 2008. Nonpoint source pollution loading from an undistributed tropic forest area. *Environmental Monitoring and Assessment* **146**: 113-126.
- Charbeneau, R.J. and M.E. Barrett. 1998. Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads. *Water Environment Research* **70**: 1295-1302.
- Chen, X., Z. Yu, G. Cui, Q. Xu and W. Liu. 2011. Effects of extreme rainstorms on the export of diffuse pollution from an agricultural watershed in eastern China. *International Association of Hydrological Sciences* **348**: 38-44.
- Cho, B.W. 1999. Characterization of soil fertility and management practices of alpine soils under vegetable cultivations. PhD Thesis. Kangwon National University, Korea.
- Cho, H.Y., C.I. Kim and D.S. Lee. 2004. Water Quantity/Quality Analysis and Pollutants Load Estimation in Sillicheon River, Jumunjin, Gangneung. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* **16**: 196-205.
- Choi, J.D., C.M. Lee and Y.H. Choi. 1999. Effect of Land Use on the Water Quality of Small Agricultural Watersheds in Kangwon-do. *Journal of Korea Water Resources Association* **32**: 501-510.
- 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. *The Korean Society of Environmental Agriculture* **18**: 70-76.
- Ding, X., Y. Xue, M. Lin and Y. Liu. 2017. Effects of Precipitation and Topography on Total Phosphorus Loss from Purple Soil. *Water* **9**(5): 315-328.
- Eum, J.S. 2015. Runoff Characteristics of Non-point Source Pollution from Agricultural Watershed and Water Quality Simulations with Crop Change. PhD Thesis. Kangwon National University, Korea.
- Gangwon Province. 2005. Highland farm muddy water reduction medium term project.
- Gao, C., J.Y. Zhu, J.G. Zhu, Y. Hosen, J.J. Zhou, D.F. Wang, L.C. Wang and Y.J. Dou. 2005. Effects of extreme rainfall on

- the export of nutrients from agricultural land. *Acta Geographica Sinica* **60**(6): 991-997.
- Gilbert, R.O. 1987. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. Van Nostrand Reinhold Company, New York. 204-208.
- Hassen, M., Y. Fekadu and Z. Gate. 2004. Validation of agricultural non-point source (AGNPS) pollution model in Kori watershed, South Wollo, Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **6**: 97-109.
- Hu, H. and G. Huang. 2014. Monitoring of Non-Point Source Pollutions from an Agriculture Watershed in South China. *Water* **6**: 3828-3840.
- Hwang, S.J., H.K. Bae and H.Y. Kim. 2013. The effect of for major river project and Kumho river on Nakdong river's water quality-focused on Kangjung-Koryung Weir. *Journal of Environmental Science International* **22**: 695-703.
- Ichiki, A. and K. Yamada. 1999. Study on characteristics of pollutant runoff into Lake Biwa, Japan. *Water Science and Technology* **39**: 17-25.
- Jaagus, J. 2006. Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology* **83**: 77-88.
- Jeong, S.M., K.H. Lim and J.H. Choi. 2000. An Analysis on the Relationship between Discharge and Pollution Load on the Tributary Basin of Kum River. *Journal of Korea Water Resources Association* **33**: 527-536.
- 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. *Korean Society of Water Quality* **28**: 255-268.
- Kang, M.A., B.W. Choi and J.K. Lee. 2010. Correlation Analysis on the Runoff Pollutants from a Small Plot Unit in an Agricultural Area. *Environmental Engineering Research* **15**: 191-195.
- Kang, P. and M.J. Mitchell. 2013. Bioavailability and size-fraction of dissolved organic carbon, nitrogen, and sulfur at the Arbutus Lake watershed, Adirondack Mountains, NY. *Biogeochemistry* **115**: 213-234.
- Kim, H.S., J.S. Kim, Y.I. Kim and B.H. Cheong. 2004. Analysis of the Characteristics of Nutrients Loading and the Water Purification Function in the Paddy-fields. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage* **11**: 36-44.
- Kim, K.S., S.G. Heo, Y.S. Jung, J.M. Kim and K.J. Lim. 2005. Analysis of Soil Erosion Vulnerability at Alpine Agricultural Fields of HongCheon County. *Journal of Korean Society of Rural Planning* **11**: 51-57.
- Kim, W.J., B.S. Park, J.H. Lee, J.C. Ryu, C.H. Jang, Y.S. Kim, H.Y. Park and K.J. Lim. 2011. Analysis of soil loss on sloping land considering daily rainfall. *Journal of Agricultural Science* **38**: 739-745.
- Kwak, S.J., B.D. Bhattarai, C.K. Lee and W.M. Heo. 2013. Long-term Trends of Summer Season of Water Quality in Lake Doam. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 128-134.
- 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 Limnological Society* **45**: 62-71.
- Lee, H.D., J.H. Ahn, C.H. Bae and W.J. Kim. 2001. Estimation of the Unit Loading and Total Loading of Nonpoint Source in Paldang Watershed by Runoff Loading during the Rainfall. *Journal of Korean Society on Water Quality* **17**: 313-326.
- Lee, H.H., S.G. Ha, S.O. Hur, K.H. Jung, C.W. Park and K.H. Kim. 2007. Characteristics of Soil Water Runoff and Canopy Cover Subfactor in Sloped Land with Different Soil Texture. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* **40**(2): 131-135.
- Lee, J.T., G.J. Lee, Y.S. Zhang, S.W. Hwang, S.J. Im, C.B. Kim and Y.H. Mun. 2006. Status of Fertilizer Application and Soil Management for Major Vegetable Crops in Farmers' Fields of Alpine Area. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **39**: 357-365.
- Leon, L.F., E.D. Soulis, N. Kouwen and G.J. Farquhar. 2001. Nonpoint source pollution: A distributed water quality modeling approach. *Water Research* **35**: 997-1007.
- Mishra, A. and S. Kar. 2012. Modeling hydrologic processes and NPS pollution in a small watershed in subhumid subtropics using swat. *Journal of Hydrologic Engineering* **17**: 445-454.
- Moon, S.J., D.S. Shin, S.U. Cheon, M.J. Kang and J.W. Choi. 2012. Assessing the Action Plans in the Control Area of Non-point Source Pollution. *Korean Society of Water Quality* **2012**: 816-817.
- Ongley, E.D., X.L. Zhang and T. Yu. 2010. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China. *Environmental Pollution* **158**: 1159-1168.
- Park, D.S., T.H. Kim, S.S. Kim, S.M. Lee, S.M. Kim and J.H. Hur. 2004. Monitoring of pesticide residues at alpine and sloped-land in Gangwondo, Korea. *The Korean Journal of Pesticide Science* **8**: 189-197.
- Park, J.H., H.S. Woo, C.K. Pyun and K.I. Kim. 2000. A Study of Distribution of Rainfall Erosivity in USLE/RUSLE for Estimation of Soil Loss. *Journal of Korea Water Resources Association* **33**: 603-610.
- Park, M.H., H.L. Cho and B.K. Koo. 2015. An Evaluation of Climate Change Effects on Pollution Loads of the Hwangryong River Watershed in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* **48**: 185-196.
- Pegram, G.C., G. Quibell and M. Hinsch. 1999. The nonpoint source impacts of peri-urban settlements in South Africa: implications for their management. *Water Science and*

- Technology* **39**: 283-290.
- Roh, S.D., J.H. Kim, D.K. Lee, S.J. Kim, B.Y. Sohn and Y.K. Chun. 2006. Characteristics of Pollutants Discharge from Hoengseong Watershed during the Dry and Rainy Seasons. *Korean Society of Water Quality* **22**: 695-705.
- Rural Development Administration. 2008. Book II: Modern use of old agriculture book (Learn the old things and know the new ones).
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* **63**: 1379-1389.
- Shin, Y.K. 2004. Comparison of Water Quality between Forested and Agricultural Subcatchments in Daegwallyong Area. *Journal of the Korean Geographical Society* **39**: 544-561.
- Song, I.H., M.S. Kang, S.H. Hwang and J.H. Song. 2012. Characteristics and EMCs of NPS Pollutants Runoff from a Forest-Paddy Composite Watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **54**: 9-17.
- U.S. EPA. 1986. Quality Criteria for water. EPA 440:5-86-001.
- Wonju Regional Environmental Office. 2009. Lake Doam non-point pollution source management area monitoring and evaluation program.
- Wonju Regional Environmental office. 2015. Lake Soyang non-point pollution source management area monitoring and evaluation program.
- Wonju Regional Environmental office. 2016. Lake Doam non-point pollution source management area monitoring and evaluation program.
- Yoo, D.S., J.H. Ahn, J.S. Yoon, S.G. Heo, Y.S. Park, J.G. Kim, K.J. Lim and K.S. Kim. 2007. Analysis of Soil Erosion and Sediment Yields at the Doam-dam Watershed considering Soil Properties from the Soil Reconditioned Agricultural Fields using SATEEC System. *Journal of Korean Society on Water Quality* **23**: 518-526.
- Yoon, Y.Y., D.H. Kim and S.M. Lee. 1999. Accumulation of Pollutants in the Lower Course of the Namdae Stream and Effect of the Water Discharged from Kangnung Hydroelectric Power Station. *Korean Society of Environmental Engineers* **21**: 2221-2230.
- Zhang, K., S. Li, W. Peng and B. Yu. 2004. Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China. *Soil & Tillage Research* **76**: 157-165.