

도암호 유역의 강우시 비점오염물질 유출 특성

곽성진 · 발데브 · 김은정 · 이창근 · 이형진¹ · 허우명*

(강원대학교 환경공학과, ¹국립환경과학원 한강물환경연구소)

Characteristics of Non-point Pollution Discharge on Stormwater Runoff from Lake Doam Watershed. Kwak, Sungjin, Bal Dev Bhattra, Eunjung Kim, Changkeun Lee, Hyeongjin Lee¹ and Woomyung Heo* (Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Samchok 245-711, Korea; ¹NIER, Yangpyeong 746-823, Korea)

Lake Doam watershed was surveyed to evaluate non-point source discharge characteristics and discharge load including several water quality parameters in Song Stream from July 2009 to July 2011. Concentrations of water pollutants were high during the rainfall period, especially, SS, TP and COD showed increasing tendencies toward cumulative water discharge but TN did not show much difference. SS, TP and COD had an initial flush effect of over 50 mm rainfall event but there was no clear tendency for rainfalls below that level. Event mean concentration (EMC) regarding the rainy and dry period showed large differences. Especially rainy season EMC (SS, TP, COD) demonstrated an increasingly high tendency. EMCs of COD, SS, TN and TP measured for twelve rain events were as high as 26.1, 866.0, 4.68 and 0.605 mg L⁻¹, respectively. COD, SS, TN and TP loadings from the highland agricultural region of the Song Stream watershed were 34,263, 1,250,254, 2,673 and 933 kg yr⁻¹ km⁻², respectively, which were relatively higher than the results of other stream systems. Therefore, it is strongly recommended that long-term monitoring and non-point pollution reduction programs for the highland agricultural area to continue. Furthermore, this non-point source pollution loading research acquired from the highland agricultural area could be the base for reassessment.

Key words : EMC, unit area discharge load, nonpoint pollutant, Song Stream

서 론

수계에서 비점오염물질은 강우에 의해 유출되며 계절적, 지역적 편차가 크게 나타나기 때문에 오염물질의 발생량과 부하량의 관리가 쉽지 않고 오염원이 광범위하게 산재되어 있어 관리가 어렵다 (Ichiki and Yamada, 1999; Ritter and Shirmohammadi, 2001; Ra *et al.*, 2011). 특히

우리나라는 온대몬순 기후의 영향으로 여름철에 강우가 집중되며, 최근에는 국지성 호우로 인해 강도가 강해지는 경향을 보인다 (Kim *et al.*, 2003). 이러한 비점유출수는 토사 등 부유물질의 농도가 높으며, 인(P), 질소(N)의 다량 유출로 하류 하천이나 호수의 생태계 교란 및 부영양화를 유발한다 (Heo *et al.*, 1998). 비점오염원은 각 지역의 지형, 수리 수문 조건 및 토지이용현황, 강우특성 등 다양

* Corresponding author: Tel: 033) 570-6573, Fax: 033) 574-7262, E-mail: woo@kangwon.ac.kr

한 요인에 따라 배출특성이 매우 다양하여 대상지역에 대한 개별적인 연구가 요구된다(Kim *et al.*, 2002). 농촌 유역에서 비점오염원 유출은 하천과 호수를 오염시키는 주요한 원인으로 인식되었으며(U.S. EPA, 1986), 특히, 고랭지의 농경형태는 급경사도에 의해 비점오염원 유출을 가중시키는 주요 원인이 되고 있다. 이런 경우 경작지 내의 객토, 비료 및 퇴비 과다 사용이 가장 큰 문제로 지적되고 있다(Park *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2006; Park, 2006; Kim, 2008). 수질오염에 주원인이 되고 있는 인(인) 성분은 농경지에 투입되는 양의 10~20% 정도만이 작물 생산에 이용이 될 뿐 나머지는 토양에 축적이 되거나 강우시 하천으로 유출되는 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2005).

국내·외적으로 비점오염원의 유출평가와 관련한 연구는 널리 이루어져 왔다(Shim, 1998; Wang *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2005; Jung *et al.*, 2009; Won *et al.*, 2009; Won *et al.*, 2011). 특히 비점오염원의 유출평가는 강우시 여러 강우사상에 대해 집중적인 조사를 바탕으로 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 구하고 단위면적당유출부하량으로 계산한다. EMC는 유역내에서 서로 다른 토지이용형태에 따라 강우시 유출되는 특정오염물질의 농도를 의미한다. 따라서 비점오염원 유출수의 특성을 파악하기 위해서 유량을 고려한 EMC가 많이 사용된다(Kim *et al.*, 2002; Sa, 2004; Roh *et al.*, 2006; Lee, 2008; Jung *et al.*, 2009; Won *et al.*, 2009).

도암호 유역에는 고랭지 농업이 발달되어 있어 강우시

강우량에 비례하여 비점오염물질이 유출되며, 계절적 변동폭이 크고 강우시 유출된 부유토사 및 영양염류는 하류 수계의 수환경을 악화시키는 원인이 되고 있다(Kang *et al.*, 2009; Wonju Regional Environmental Office, 2011). 도암댐은 2001년 3월 도암댐 상류의 고랭지 채소밭 등에서 유출되는 흙탕물 등 비점오염물질의 유입 및 댐 체류 고탁수의 장기간 방류 문제 등으로 민원이 발생하여 현재까지 발전 방류가 중단된 상태다. 2005년 7월에는 도암댐 문제해결을 위한 공동연구가 수행되었고, “도암호 상류의 고랭지 밭 관리방안을 제시”하였다(Gangwon Province, 2005). 그러나 여전히 도암호의 경우 댐 상류 지역에 위치한 고랭지 밭 등으로부터 오염물질이 유입되어 호수내 부유물질이 수질환경기준 II등급을 초과하고 수질이 지속적으로 악화되고 있다.

따라서 본 연구는 집중강우시 대량의 탁수가 발생되고 있는 도암댐 상류 송천 수계에서 비점오염원의 유출특성을 조사하고 부하량을 정량적으로 산출하였다. 본 연구가 비점오염원저감사업 수행에 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것 기대한다.

재료 및 방법

본 조사지역인 도암호 상류는 유역면적이 119.1 km²로 이중 55.9%가 산림과 초지이며, 35.3%가 밭으로 구성되어 있다(Table 1). 또한 전체 유역면적 중 경사도가 20° 이상 지역이 32.25%이다(Table 2).

본 연구는 도암호로 유입하는 송천수계에서 4개의 소

Table 1. Land use in the watershed (km²). Parenthesis indicates proportion of total area (%).

Watershed	Forest	Rice paddy	Crops	Residential	Road	Stream	Sum	
Samyang Stream	32.7	0.1	3.7	5.2	0.1	0.3	42.1	
Chahang Stream	10.5	0.0	18.2	0.7	0.1	0.2	29.6	
Daekwanryeong Stream	10.4	0.0	4.0	2.3	0.1	0.1	16.8	
Yongpyeong Stream	13.1	0.4	16.2	0.8	0.1	0.0	30.6	
Song Stream	Watershed (km ²)	66.7	0.5	42.1	9.0	0.4	0.6	119.1
	Proportion (%)	55.9	0.4	35.3	7.6	0.3	0.5	100.0

Table 2. Geometric characteristic.

Watershed	Drainage area, A (km ²)	Stream length, L (km)	Average width, A/L (km)	Shape factor, A/L ²	Slope (≥ 20°, %)
Samyang Stream	42.1	15.67	2.69	0.17	28.14
Chahang Stream	29.6	10.45	2.84	0.27	31.16
Daekwanryeong Stream	16.8	17.34	0.97	0.06	22.61
Yongpyeong Stream	30.6	8.60	3.55	0.41	48.79
Song Stream	119.1	52.06	2.29	0.04	32.25

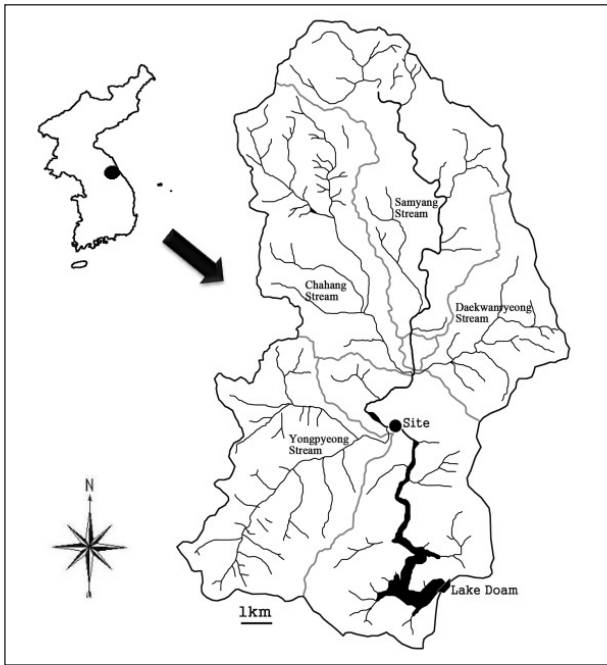


Fig. 1. Map showing the watershed area and sampling site in Lake Doam.

하천이 합쳐진 이후 지점을 선정하여 2009년 7월부터 2011년 7월까지 강우시와 비강우시로 나누어 조사하였다(Fig. 1). 강우시 조사는 총 12회의 강우사상에 대하여 실시하였으며 각 강우사상별로 강우초기는 1~2시간 간격으로 조사하고 침투유량 이후에는 2시간 이상으로 시간을 늘려 조사하였다. 비강우시 조사는 24회에 걸쳐 단일시료를 조사하였으며, 1회에 걸쳐 2~3시간 간격으로 8회를 조사하였다. 채수된 시료는 전처리를 걸친 후 수질 분석을 실시하였다.

총인(TP)은 시료를 persulfate 분해 후에 ascorbic acid 법으로 측정하였고, 용존무기인(DIP)은 여과한 시료를 ascorbic acid 법으로 측정하였다. 총질소(TN), 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 및 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$)는 수질자동분석기(AutoAnalyzer3, BRAN+LUEBBE)로 분석하였으며, 총질소(TN)는 원시료를 alkaline persulfate 분해 후에 측정하였다. 부유물질(SS)은 수질오염공정시험방법에 따라 측정하였으며, 화학적산소요구량(COD)도 수질오염공정시험법의 과망간산칼륨법(산성)으로 분석하였다. 전기전도도는 Multiprobe(YSI-556MPS)로 현장에서 측정하였다. 강우량은 기상청 대관령기상관측소의 자료를 이용하였다.

유량 산정은 조사지점에 수위계를 설치하고 채수를 할 때 측정하였으며, 수위-유량관계식을 산정한 후 관측된

유량과 그 지점의 하천수위와의 관계를 구하고 이를 이용하여 시간에 따라 변하는 수위에 대응하는 유량을 산정하였다. 유속은 비강우시에는 마그네틱 센서 유속계를 이용하여 직접 측정하고, 강우시에는 전자와 표면유속계를 이용하여 측정하였다.

초기세척효과(first flush effect)는 누적유량/총유량(V)과 누적부하량/총부하량(M)의 곡선을 이용하여 계산하였다(Geiger, 1987).

$$M=V^b \quad (1)$$

이 식에서 b가 1보다 작을수록 곡선의 형태가 위로 볼록한 형태가 되며, 강우초기에 유출현상이 큰 것을 나타낸다. B가 1보다 크면 곡선이 아래로 볼록한 형태가 되며, 강우후기에 유출이 많다는 것을 의미한다(Eum, 2004; 식(1)).

강우사상별 유량가중평균농도(EMC: Event mean concentration)는 강우사상에서 각 조사시기의 유량(Q_i)과 오염물질 농도(C_i)로 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(2)).

$$EMC = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} \quad (2)$$

여기서, Q_i 는 강우사상에서 i번째 유량, C_i 는 강우사상에서 i번째 오염물질 농도이다.

면적당 연간유출부하량은 조사기간인 2009년부터 2011년까지의 연평균강우량을 계산하여, 이를 조사된 강우사상의 총강우량으로 나누고, 여기에 조사된 강우사상의 총부하량을 곱하고, 조사대상 유역의 총면적으로 나누어 산정하였다(식(3)).

$$\begin{aligned} & \text{면적당 연간유출부하량 (kg yr}^{-1} \text{ km}^{-2}) \\ & = (\text{연평균강우량} / \text{조사된 강우사상의 총강우량} \\ & \quad \times \text{조사된 강우사상의 부하량}) / \text{유역면적} \end{aligned} \quad (3)$$

농경지의 면적당 연간유출부하량은 전체 부하량에서 산림과 도시화지역의 연간유출부하량을 뺀 뒤 농경지 면적으로 나누어 계산하였다. 산림과 도시화지역으로부터 유출되는 면적당 연간유출부하량은 남한강 유역의 원단위를 적용하였는데, 산림은 COD, SS, TN 및 TP가 각각 670, 32,540, 110 및 9.6 $\text{kg yr}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 이고, 도시화지역은 각각 180,790, 927,350, 11,860 및 337.3 $\text{kg yr}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 이었다(Lee et al., 2001).

결과 및 고찰

강우시와 비강우시의 수질조사결과 부유물질(SS) 등 일부 항목은 차이가 큰 것으로 나타났다(Table 3). SS의 경우 평균값(mean)과 중앙값(median)이 큰 차이를 보여 본 연구에서는 한 개의 특정 값에 의해 나타나는 영향을 최소화하기 위해 중앙값을 채택하였다. 비강우시 전 기전도도의 중앙값은 $144 \mu\text{S cm}^{-1}$ 이었지만 강우시에는 $102 \mu\text{S cm}^{-1}$ 로 다소 감소하였다. 이는 강우시 유량의 증가에 의해 희석되었기 때문으로 사료된다. SS, COD, TP 및 DIP는 비강우시의 중앙값이 각각 6.3, 2.6, 0.085 및 0.032 mg L^{-1} 이었지만 강우시에는 각각 291.0, 10.4, 0.325 및 0.102 mg L^{-1} 로 크게 증가하였다. 하지만 TN과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 중앙값은 비강우시에 각각 4.127 및 3.573 mg L^{-1} 에서 강우시에는 각각 4.060 및 2.550 mg L^{-1} 로 다소 감소하였다. 이 또한 전기전도도와 마찬가지로 강우시 유량증가에 의해 희석되었기 때문으로 사료된다. Kim *et al.* (1997)은 질소의 대부분이 용존형태의 질산성질소이기 때문에 입자성물질이 많이 유입되는 강우시에 영향을 덜 받는다고 하였다. 인북천과 도리천의 연구에서도 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 용존상태이기 때문에 유량이 증가함에 따라 농도가 희석되고, DIP는 토양입자에 전기적으로 흡착상태를 유지하고 있어 토양의 유출에 따라 농도가 증가한다고 하였다(Eum, 2004). 유량은 강우시와 비강우시의 중앙값이

각각 20.9 및 $3.3 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ 이었다.

강우시 시간에 따른 수질변화를 보면 SS, TP 및 COD는 증가하는 경향을 보였으나 TN은 큰 차이를 보이지 않았으며, 이러한 경향은 모든 강우사상에서 농도의 차이는 있었지만 유사하였다(Fig. 2). 이들 항목들이 대부분 강우초기에 급격히 증가하였으나 TN과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 큰 변화를 보이지 않았다. 이러한 연구결과는 자운천과 내린천의 결과와 일치하고 있다(Jung *et al.*, 2009).

강우에 의한 초기세척효과(first flush effect)는 일부 오염물질(SS, TP 등)이 강우 초기에 높은 농도를 보인 후 점차 낮아지는 것을 의미하는 것으로 누적유량/총유량(V)과 누적부하량/총부하량(M)의 곡선을 이용하여 SS, COD, TP, TN의 초기세척효과를 분석한 결과 12번의 강우사상 중 50 mm 이상의 강우사상에서 SS, COD 및 TP가 초기세척효과가 있었으나 적은 강우에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다(Fig. 3). 그러나 2011년 7월 27~28에는 58.3 mm의 강우가 내렸으나 바로 전날 21 mm의 선행강우에 의한 영향으로 초기세척효과가 매우 미미하였다. 이러한 초기세척효과는 조사구역의 크기 및 형태 등 다양한 변수에 의해 영향을 받는 것으로 판단되며 Jung *et al.* (2009)은 규모가 큰 내린천 유역보다는 작은 자운천 유역에서 더 강하게 나타났다고 하였다. Won *et al.* (2009)은 노곡 유역(팔당호)의 산림과 밭 지역에서 모니터링을 통해 초기세척효과를 분석하였으나 일부 강우사

Table 3. The range of water quality parameters on dry and rainy days in the Song Stream.

Season	Mean	1SD ^a	1SE ^b	Min	Median	Max	N	
Dry days	Flow ¹	3.6	2.0	0.4	1.1	3.3	8.7	24
	Cond. ²	149.5	32.8	6.7	91.0	144.0	202.0	24
	SS	12.2	14.4	2.9	1.2	6.3	57.9	24
	COD	3.5	2.1	0.4	1.4	2.6	9.2	24
	TN	4.436	1.375	0.281	2.389	4.127	7.817	24
	$\text{NO}_3\text{-N}$	3.544	0.819	0.167	1.915	3.573	4.960	24
	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.098	0.048	0.012	0.033	0.094	0.190	16
	TP	0.102	0.103	0.021	0.026	0.085	0.560	24
	DIP	0.038	0.022	0.005	0.015	0.032	0.100	24
	Rainy days	Flow ¹	41.2	50.1	4.8	1.5	20.9	269.6
Cond. ²		112.4	46.4	4.4	48.0	102.0	213.0	111
SS		709.5	1004.6	95.3	4.0	291.0	5317.0	111
COD		23.4	30.7	2.9	2.2	10.4	174.4	111
TN		4.685	2.101	0.199	1.480	4.060	12.722	111
$\text{NO}_3\text{-N}$		2.741	1.456	0.138	0.026	2.550	8.424	111
$\text{NH}_3\text{-N}$		0.182	0.094	0.011	0.042	0.157	0.452	74
TP		0.530	0.742	0.070	0.028	0.325	6.652	111
DIP		0.112	0.080	0.008	0.022	0.102	0.495	111

¹Flow: ($\text{m}^3 \text{ sec}^{-1}$), ²Cond.: conductivity, ^a1SD: standard deviation, ^b1SE: standard error ($1\text{SE}=1\text{SD N}^{-0.5}$), Units: $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Cond.), mg L^{-1} (SS, COD, TN, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP, DIP)

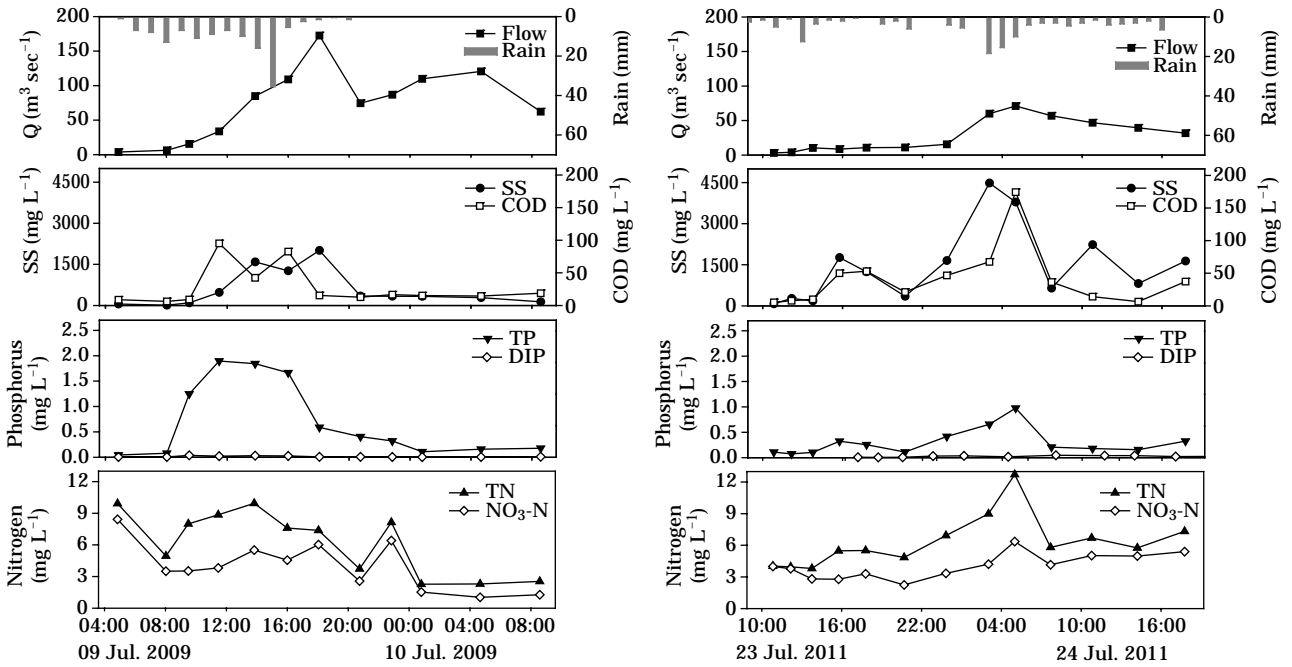


Fig. 2. Water quality variation in the Song Stream. The major rainfalls occurred (09 ~ 10 Jul. 2009, 23 ~ 24 Jun. 2011).

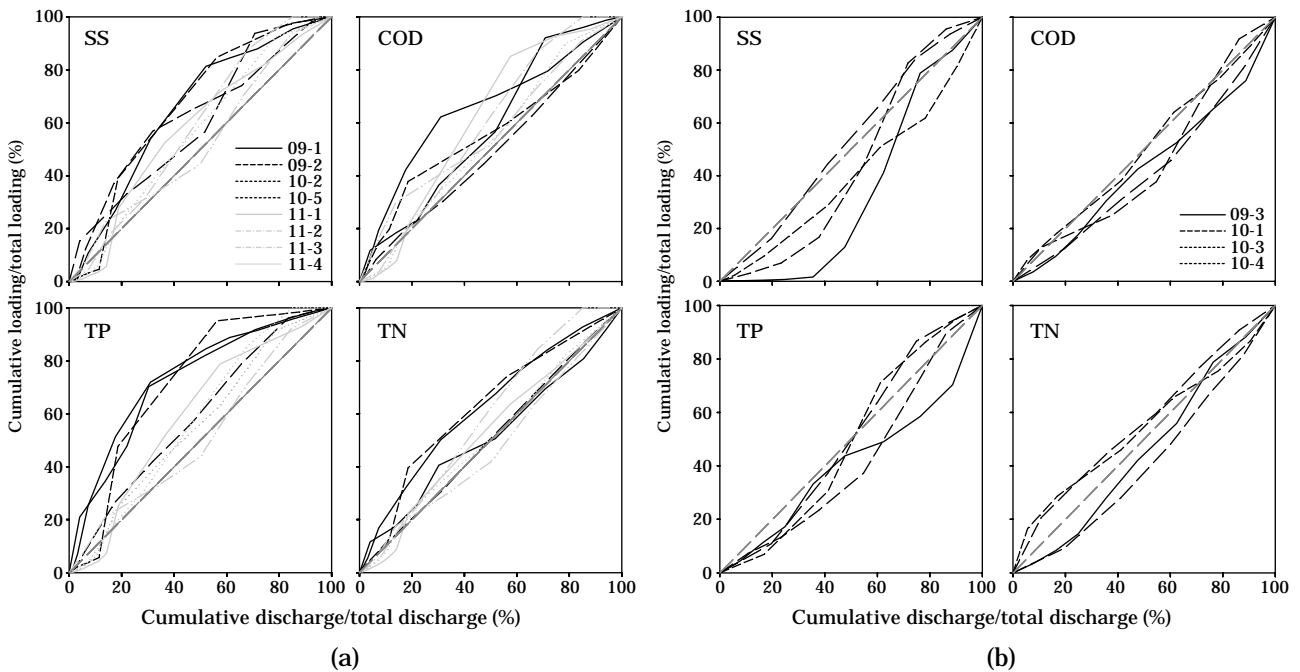


Fig. 3. Typical M-V curves showing the first flush effect of each water quality parameter during a rainy event in the Song Stream (a: 50 mm ↑; b: 50 mm ↓).

상에서는 초기세척효과 뚜렷하지 않았으며, 발의 경우 SS에 대해 특히 초기세척효과가 없었다고 하였다. 강우시 조사한 각 수질항목들의 EMC는 SS 43~2,169

mg L⁻¹, COD 6.7~56.9 mg L⁻¹, TN 2.62~7.65 mg L⁻¹ 및 TP 0.178~2.211 mg L⁻¹의 범위이었으며, 비강우시 연속 조사에서 각 수질항목들의 EMC는 SS, COD, TN 및 TP

Table 4. The EMCs of water quality parameters measured in several rainy events and dry day at the Song Stream (mg L⁻¹).

Season	Year	Periods	Rain ¹	RCH ²	MRI ³	ARI ⁴	ADD ⁵	SS	COD	TN	TP
Rainy days	2009	9~10 Jul.	129.0	11	35.5	11.7	2 (15)	827	27.0	4.73	0.636
		14~15 Jul.	53.0	8	12.5	6.6	1 (159)	881	41.5	5.99	0.601
		31 Oct.*	33.5	14	8.5	2.4	11 (11.5)	213	7.3	5.96	0.534
	2010	18~19 May	17.5	7	4.5	2.5	6 (11)	44	8.8	3.29	0.178
		22~24 May	81.0	22	7.0	3.7	3 (22)	251	11.2	2.77	0.539
		10~11 Aug.	19.0	8	6.5	2.4	1 (27.5)	43	9.9	3.34	0.306
		2 Sep.*	18.5	4	7.5	4.6	1 (13.5)	377	6.9	4.24	0.836
		10~11 Sep.*	68.5	15	19.5	4.6	3 (25)	1029	6.7	4.31	2.211
	2011	23~24 Jun.	133.0	32	18.5	4.2	20 (20)	2169	56.9	7.65	0.410
		29~30 Jun.	69.0	20	11.0	3.5	2 (79)	1957	47.1	4.70	0.515
		7~8 Jul.	61.0	12	15.0	5.1	3 (106.5)	2156	55.6	4.55	0.407
		27~28 Jul.	58.3	15	17.5	3.9	0 (21)	441	17.9	2.62	0.309
	Dry day	2009	25 Oct.				5	5	4.3	6.30	0.223

¹Rain: total rainfall of event (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), *after harvest of crops

Table 5. The yearly variations of rainfall and NRD during the research period.

Year	Total rainfall (mm)	Seasonal rainfall (May~Oct.) (mm)	NRD* (day)
2009	1332	992.2	23
2010	1166	873.9	24
2011	1794	1354.2	36

*NRD: Number of rainy days over 10 mm during May to October

가 각각 5, 4.3, 6.30 및 0.223 mg L⁻¹이었다 (Table 4). 특히 SS의 경우 2009년 10월 31일 (33.5 mm, 213 mg L⁻¹), 2010년 9월 2일 (18.5 mm, 377 mg L⁻¹) 및 2010년 9월 10~11일 (68.5 mm, 1,029 mg L⁻¹)의 자료는 수확 이후에 실시한 것으로 적은 강우에도 비교적 높은 농도를 보였다. 또한 2011년에는 SS의 경우 마지막 조사(7월 27~28일)를 제외하고는 2009년과 2010년과는 달리 전체적으로 높은 농도를 보였는데 이는 조사기간 동안의 강우량 차이에 의한 것으로 사료된다. 2009년, 2010년 및 2011년 5월부터 10월까지의 강우량은 각각 992.2, 873.9 및 1,354 mm로 2011년이 많았으며, 10 mm 이상의 강우 일수도 각각 23, 24 및 36일로 2011년에 많았다 (Table 5). 한편 2011년 7월 27일부터 28일까지 조사한 결과는 비교적 낮았는데, 이는 강우량은 많지 않았지만 (58.3 mm) 강우 지속시간이 15시간으로 비교적 길었고, 바로 전날 21 mm의 선행강우가 있었기 때문으로 사료된다. Kim *et al.* (2010)은 같은 양의 강우가 발생하였더라도 강우지속시간, 선행무강우일수에 따라 유출량은 차이가 발생한다고 하였다. 또한 작물 수확 이후에 조사한 자료 (31 Oct. 2009, 2 Sep. 2010, 10~11 Sep. 2010)를 보면 적은 강우에도

비교적 SS 농도가 크게 증가하였는데 이는 수확을 위한 차량진입 및 수확이후 대부분의 밭이 나대지 형태로 노출되기 때문으로 사료된다 (Wonju Regional Environmental Office, 2011). 도암호 상류 송천 수계의 평균 EMC는 COD, SS, TN 및 TP가 각각 26.1, 866.0, 4.68 및 0.605 mg L⁻¹로 기존 다른 연구자료들보다 밭 등 농경지의 면적을 고려하더라도 모든 항목에서 높았다 (Table 6). 하지만 이들 수질항목들의 EMC 자료는 단순 비교로 평가할 수 있는 것은 아니다. SS의 경우 측정 시 수질오염공정시험법을 따르는 경우와 1시간 침강 후 측정된 경우가 크게 차이를 보일 수 있어 각 연구자들이 분석한 분석항목의 측정법들도 비교 검토하는 것이 중요하다. 실제로 본 연구에서는 SS 측정 시 수질오염공정시험법을 따랐으나 Jung *et al.* (2009)은 내린천 및 자운천 연구에서 비침강성 측정법을 준수하여 분석하였기 때문에 서로 EMC 자료를 비교하는 데 어려움이 있다. EMC 자료에 영향을 주는 경우는 이런 분석법 이외에도 강우사상의 특성 (강우량, 강우강도, 지속시간, 조사횟수 등) 및 조사지역의 특성 (밭 경사도, 면적 등) 등에 의해 크게 차이를 보일 수 있다 (Kim, 2010).

Table 6. Comparisons of annual average EMCs of water quality parameters between this study and other reports (mg L^{-1}).

Watershed		COD	SS	TN	TP	References
Jawoon Stream	Agricultural area (9.6%), Forest (85.6%)	6.6	207	3.94	0.266	Jung <i>et al.</i> , 2009
Yurim Stream	Agricultural area (22.9%), Forest (59.2%)	31.7	219.5	4.2	1.3	Kim <i>et al.</i> , 2002
Youngmun Stream	Agricultural area (46.7%), Forest (40.7%)	17.0	260.8	4.2	2.3	
Imsil Upstream	N/A	6.85	75.8	2.71	0.19	Kwak <i>et al.</i> , 2008
Seomjin River Upstream	Forest area (> 70%)	5.13	45.5	2.31	0.13	
Oenam Stream	Crops	10.5	146.2	2.80	0.193	Park <i>et al.</i> , 2005
	Paddy	22.5	17.5	4.15	0.227	
	Forest	4.8	9.7	1.28	0.065	
Yudong Stream	N/A	2.5	6.3	1.67	0.033	Roh <i>et al.</i> , 2006
Gye Stream	N/A	3.0	15.4	1.41	0.035	
Gusa Stream	N/A	6.3	69.3	1.24	0.070	
Nogok Watershed	Forest area (100%)	2.9	5.7	0.72	0.24	Won <i>et al.</i> , 2009
Rokutanda, Japan	Agricultural area (53.0%)		29.9	1.16	0.316	Lee, 2008
Narara, Japan	Agricultural area (17.9%)		52.9	1.43	0.29	Sa, 2004
Akola, Japan	Cultivable land (85.8%)			1.07	0.20	Sargaonkar, 2006
Song Stream	Agricultural area (35.7%), Forest (55.9%)	26.1	866.0	4.68	0.605	This study (total 12 events)

EMC 값이 높다는 것은 강우시 유역내 농경지로부터 유출이 많다는 것을 의미하며, 송천유역 농경지의 면적당 유출부하량은 COD, SS, TN 및 TP가 각각 34,263, 1,250,254, 2,673 및 $933 \text{ kg yr}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 이었다 (Table 7). 이처럼 송천 유역에서 오염원의 유출부하량이 다른 지역보다 상대적으로 높은 것은 고랭지 경작지내 주기적인 객토와 시비(퇴비, 비료)의 사용량과 관련성이 높다 (Park, 2006). Park (2006)에 따르면 강원도 지역 고랭지 밭의 평균 객토 높이는 18.8 cm이고 객토량은 ha 당 1,000~3,000톤으로 1~3년 주기로 이루어지고 있다. 송천유역의 경우 객토 및 시비에 의한 유출부하량 증가 이외에도 토지이용도상 밭 면적이 다소 과소평가되어 있는 것으로 사료된다. 송천의 차항1리 유역은 지적도상의 밭 면적이 0.56 km^2 이나 현지답사에 의한 실측자료는 0.98 km^2 으로 약 42.9% 정도 넓다 (Wonju Regional Environmental Office, 2011). 이는 산림을 밭으로 무단 경작하여 사용하고 있기 때문으로 사료되며 송천유역 전체를 실측할 경우 밭 면적은 크게 증가할 것으로 판단된다. 따라서 송천유역 농경지의 면적당 유출부하량이 다른 수계의 연구결과들에 비해 비교적 큰 차이를 보였으나 (Lee *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2005; Kwak *et al.*, 2008) 일부 연구결과들은 오염물질 항목에 따라 다소 차이는 있으나 본 연

구결과와 유사하였다 (Won *et al.*, 2011).

강우사상별 오염물질의 EMC는 TP의 경우 평균 강우 강도에 영향을 받았으나 SS, COD 및 TN은 총강우량과 더 높은 상관성을 보였다 (Table 8). SS와 COD는 서로 높은 유의적인 상관성을 보였다. 본 연구에서 총강우량과 오염물질의 EMC 간에 비교적 유의적인 상관성을 보인 것은 지역의 특성상 강우초기에 초기세척효과가 크지 않았고 강우량 증가와 더불어 서서히 유출이 일어났기 때문으로 사료된다.

비강우시 하천의 수질등급은 SS가 5.0 mg L^{-1} 로 1등급을 보였으나 강우시에는 평균 865.7 mg L^{-1} 로 5등급 이상으로 수질이 크게 악화되는 것으로 나타났다. 이와 같이 토양유실과 같은 SS증가는 하천생태계의 하상기질을 크게 변화시키게 됨으로 다양한 생물군집의 변화에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 탁도 증가에 따른 빛 투과량 감소는 시력에 의존하는 어식성 어종의 섭식가능 반응거리 (reaction distance)를 감소시켜 섭식효율을 떨어뜨린다 (Vogel and Beauchamp, 1999). Griffiths and Walton (1978)에 따르면 부유토사에 대한 어류의 내성한계는 $80 \sim 100 \text{ mg L}^{-1}$, 저서생물은 $10 \sim 15 \text{ mg L}^{-1}$ 이하인 것으로 보고하고 있다. Kim *et al.* (2007)은 탁수는 어류의 개체나 개체군을 사면시킬 확률은 높지 않으나, 강한 스트

Table 7. The comparison of specific export coefficient from agricultural area measured in this study and other reports (kg yr⁻¹ km⁻²).

Watershed		COD	SS	TN	TP	References
Youngsan River			–	894	80	Cha <i>et al.</i> , 1999
Jawoon Stream		–	11,912	–	785	Jung <i>et al.</i> , 2009
Kyongan Watershed		2,680	106,650	770	480	Kim <i>et al.</i> , 2002
Imsil Upstream		1,148	13,284	441	56	Kwak <i>et al.</i> , 2008
Seomjin River Upstream		1,608	19,916	552	519	
Bangdong Reservoir		5,560	2,600	6,390	620	Moon <i>et al.</i> , 1999
North Han River		3,450	35,540	680	53	Lee <i>et al.</i> , 2001
South Han River		3,370	34,840	680	52	
Kyungan Stream		3,540	36,400	700	54	
Mandae Stream				1,228	419	Eum, 2004
Inbuk Stream				720	201	
Oenam Stream	Crops	2,953	52,989	880	30	Park <i>et al.</i> , 2005
	Paddy	6,440	1,246	1,636	75	
Nogok Watershed		29,160	66,280	2,470	1,070	Won <i>et al.</i> , 2009
Han River (Test bed)	Crops slope (3.2%)	2,860	143,250	150	260	Won <i>et al.</i> , 2011
	Crops slope (27.5%)	4,610	965,010	760	300	
Palmiri Stream (paddy field watershed)			–	2,920	292	Shim, 1998
Palmiri Stream (dry field watershed)			–	6,205	146	
Arahus River, Denmark			–		115	Kronvang, 1992
Lyngby-gaards river, Denmark			–		90	
Ohio, USA			–	1,100	93	Smith and Alexander, 2000
Upper Mississiooi, USA			–	1,300	110	
Guideline by Korean EPA				3,446	88	Shin, 2007
Song Stream		34,263	1,250,254	2,673	933	This study

Table 8. The correlation coefficients matrix among EMC based water quality parameters and rainfall intensity in the Song Stream.

	Rainfall ¹	MRI ²	ARI ³	SS	COD	TP	TN
Rainfall ¹	1	0.646*	0.339	0.691*	0.648*	0.049	0.613*
MRI ²		1	0.439	0.633*	0.470	0.45	0.358
ARI ³			1	0.191	0.016	0.730*	0.112
SS				1	0.900**	0.078	0.566
COD					1	–0.269	0.582
TP						1	0.046
TN							1

¹Rainfall: rainfall per event (mm), ²MRI: maximum rainfall intensity (mm hr⁻¹), ³ARI: average rainfall intensity (mm hr⁻¹), *p<0.05, **p< 0.01

레스 아래에서 어류근집은 충분히 변화할 수 있다고 하였다. 특히 도암호 유역은 경사가 비교적 가파른 지형이 많아 적은 양의 강우에도 쉽게 유출되어 하천생태계에 악영향을 줄 수 있다. 최근의 이상 기후는 향후 토양유실 등 비점오염물질의 유출을 더욱 가속화시킬 가능성이 크다. Jung *et al.* (2009)은 소양호 유역의 경우 지난 30년간

강우일수는 증가하지 않고 강수량이 매년 증가하고 있어 오염물질의 유출농도 및 부하량이 증가할 것이라 하였다. 따라서 고랭지 농업지역에 대한 장기적인 모니터링 및 비점오염물질저감사업을 지속적으로 추진하는 것이 바람직할 것이다.

결 론

본 연구는 남한강 상류 도암댐 유역 송천 수계에서 비점오염물질 유출특성 및 단위면적당 유출부하량을 조사하였다.

강우시 유량증가에 따른 수질오염물질의 변동이 매우 크게 나타났다. 특히 유량증가에 따라 SS, TP 및 COD는 크게 증가하는 경향을 보였으나 TN은 큰 차이를 보이지 않았으며, 50 mm 이상의 강우사상(Rainfall event)에서 SS, COD 및 TP가 초기세척효과(first flush effect)가 있었으나 적은 강우에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.

강우시와 비강우시의 EMC는 큰 차이를 보였다. 특히 강우시 EMC [SS, COD, TP]가 크게 증가하는 경향을 보였다.

송천유역 고랭지 농경지의 면적당 유출부하량은 COD, SS, TN 및 TP가 각각 34,263, 1,250,254, 2,673 및 933 kg yr⁻¹ km⁻²로서 다른 수계의 연구결과보다 높았다. 따라서 고랭지 농업지역에 대한 장기적인 모니터링 및 비점오염물질저감사업을 지속적으로 추진하는 것이 바람직할 것으로 사료되며, 본 연구는 고랭지 농경지의 비점오염부하량 원단위 재평가에 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 원주지방환경청의 '도암호 비점오염원 관리지역 모니터링 및 평가사업'의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

인 용 문 헌

- Eum, J.S. 2004. Runoff characteristics of agricultural non-point source pollution for the watershed of upper Soyang River. MS. Thesis. Kangwon National University, Korea.
- Gangwon Province. 2005. Highland farm muddy water reduction medium term project.
- Geiger, W. 1987. Flushing effects in combined sewer system. Proceeding of the 4th Int. Conf. on Urban Drainage: 44-46.
- Griffiths, W. and B. Walton. 1978. The effects of sedimentation on the aquatic biota. Alberta Oil Sands Environmental Research Program, Report # 35.
- Heo, W.M., B.C. Kim, Y.H. Kim and K.S. Choi. 1998. Storm runoff phosphorus from nonpoint sources into Lake Soyang and transportation of turbid water into the lake. *Korean Journal of Limnology* **31**(1): 1-8.
- Ichiki, A. and A. Yamada. 1999. Study on characteristics of pollutant runoff into Lake Biwa, Japan. *Water Science and Technology* **39**(12): 17-25.
- Jung, S.M., C.W. Jang, J.K. Kim and B.C. Kim. 2009. Characteristics of water quality by storm runoffs from intensive highland agriculture area in the upstream of Han River basin. *Journal of Korean Society on Water Quality* **25**(1): 102-111.
- Kang, M.A., S.H. Jo, B.W. Choi, Y.S. Yoon and J.K. Lee. 2010. Characteristics of non-point source pollutants by rainfall - Case study with cherry tree plot. *The Journal of Engineering Geology* **20**(4): 401-407.
- Kim, B.C. 2003. Problems of Lake water management in Korea. Korean Society of Environment and Ecology. *Journal of Conference* **2003**(2): 105-125.
- Kim, B.C., K.S. Choi, C.G. Choi, U.H. Lee and Y.H. Kim. 1997. Storm runoff characteristics of nonpoint sources from sub-basins of Soyang River. Korean Society of Water Quality. *Journal of Autumn Conference* **1997**(2): 41-44.
- Kim, B.C., W.M. Heo and G.S. Hwang. 1995. The Eutrophication of Lake Doam. *Korean Journal of Limnology* **28**(2): 223-240.
- Kim, J.H., K.H. Han and J.S. Lee. 2007. Characteristics of agricultural non-point source pollutants by rainfall events in rural watersheds. *Journal of Korean Society on Water Quality* **24**(1): 69-77.
- Kim, J.K., J.S. Choi, Y.S. Jang, K.Y. Lee and B.C. Kim. 2007. Effects of turbid water on fish community: case studies of the Daegi Stream and the Bong-san Stream. *Korean Journal of Limnology* **40**(3): 459-467.
- Kim, K.C. 2010. Non-point Source Pollution Discharge Characteristics between Sandy Flat and Sloping Fields in Gangwon Province. MS. Thesis. Kangwon National University, Korea.
- Kim, S.S., J.S. Kim, K.Y. Bang, E.M. Gwon and W.J. Chung. 2002. The estimation of the unit load and characteristics of non-point source discharge according to rainfall in Kyongan Watershed. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **24**(11): 2019-2027.
- Kronvang, B. 1992. The export of particulate matter, particulate phosphorus and dissolved phosphorus from two agricultural river basins: implications on estimating the non-point phosphorus load. *Water Research* **26**(10): 1347-1358.
- Kwak, D.H., S.J. Yoo, J.H. Kim, I.H. Lim, J.Y. Kwon and

- P.G. Chung. 2008. Characteristics of non-point pollutant discharge from upper watershed of Seomjin Dam during rainy season. *Journal of Korean Society on Water and Wastewater* **22**(1): 39-48.
- Lee, H. 2008. A study of Runoff Characteristics of Pollutants and Estimation of Annual Loading from Small Agricultural Watershed in Koyama Lake, MS. Thesis. University of Tottori, Japan.
- 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**(3): 313-326.
- 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**(6): 357-365.
- Moon, J.P., T.C. Kim and B.G. Ahn. 1999. Load factor of nonpoint source pollutant owing to land use in Bangdong reservoir watershed. *Journal of Agricultural Science, Chungnam National University* **26**(2): 61-69.
- Park, D.S., T.H. Kim, S.S. Kim, S.M. Lee, S.G. 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**(3): 189-197.
- Park, H.K. 2006. Environmental Damages and Control Measures By Highland Agriculture-Study on System Improvement. MS. Thesis. Kangwon National University, Korea.
- Park, S.C., C.R. Oh, Y.H. Jin and D.S. Kim. 2005. Study on runoff characteristics of non-point source in rural area of Seomjin watershed. *Journal of the Environmental Sciences* **14**(11): 1057-1062.
- Ra, K.T., K.T. Kim, J.K. Kim, J.H. Bang, J.M. Lee, S.K. Kim, E.S. Kim, M.S. Yun and S.R. Cho. 2011. Study on the characteristics and non-point source pollution loads in stormwater runoff of Shihwa Lake. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* **14**(1): 40-50.
- Rita, C., J. Srivastava and S. Jung. 2003. Agriculture Non-Point source pollution control good management practices Chesapeake Bay experience. The World Bank Washington, D.C.
- Ritter, W.F. and A. Shirmohammadi. 2001. Agricultural nonpoint source pollution (Watershed management and hydrology). Lewis Publishers.
- 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. *Journal of Korean Society on Water Quality* **22**(4): 695-705.
- Sa, S.H. 2004. Runoff Characteristics of Particulate Matter and Its Influence on Shallow Lake Water Quality. Ph.D. dissertation, University of Tottori, Japan.
- Sargaonkar, A. 2006. Estimation of land use specific runoff and pollutant concentration for Tapi River basin in India. *Environmental Monitoring and Assessment* **117**: 491-503.
- Shim, S.Y. 1998. Discharge of nitrogen and phosphorus from nonpoint sources of fertilizer and animal feed in Korea. MS. Thesis. Kangwon National University, Korea.
- Shin, D.S. 2007. Basic monitoring concept for revised unit-load on NPS. *Journal of Korean Society on Water Quality* **23**(4): 426-433.
- Shin, S.E., J.M. Cha and G.S. Cha. 1999. Non-point source pollutions of the Youngsan River basins I. *Environmental Impact Assessment* **8**(1): 41-49.
- Smith, R.A. and R.B. Alexander. 2000. Source of nutrients in the nation's watershed. HYDROLOGISTS, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- U.S. EPA. 1986. Quality Criteria for water. EPA. 440/5-86-001.
- Vogel, J.L. and D.A. Beauchamp. 1999. Effects of light, prey size, and turbidity on reaction distances of lake trout (*Salvelinus namaycush*) to salmonid prey. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **56**: 1293-1297.
- Wang, X., T. Li, A. Xu and W. He. 2001. Study of the distribution of non-point source pollution in the watershed of the Miyun Reservoir, Beijing, China. *Water Science and Technology* **44**(7): 35-40.
- 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.
- Won, C.H., Y.H. Choi, M.H. Shin, D.S. Shin, D.G. 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): 572-579.
- Wonju Regional Environmental Office. 2011. Doam dam non-point pollution source management area monitoring and evaluation program. *Ministry of Environment* 11-1480358-000051-01.

(Manuscript received 18 January 2012,
Revised 26 February 2012,
Revision accepted 28 February 2012)