

한강상류 고령지 농업지역에서의 강우시 비점오염 유출 특성

정성민 · 장창원 · 김재구 · 김범철[†]

강원대학교 자연과학대학 환경과학과

Characteristics of Water Quality by Storm Runoffs from Intensive Highland Agriculture Area in the Upstream of Han River Basin

Sungmin Jung · Changwon Jang · Jai-Ku Kim · Bomchul Kim[†]

Department Environmental Science, Kangwon National University

(Received 9 September 2008, Revised 24 November 2008, Accepted 19 December 2008)

Abstract

Turbid storm runoff from intensive highland agriculture area has emerged as the major problem of water quality deterioration in the upstream region of the Han River. High slope of the upland combined with high rate of fertilization and intensive plowing causes high rate of soil erosion, and subsequently high suspended sediment and phosphorus content in the runoff water. The variations of water quality during rain spells were surveyed for two years (2005 and 2006) in the Jawoon Stream that is one of hot spots of intensive horticulture discharging turbid storm runoff. SS and TP showed large increase according to the increase of flow rate, whereas TN and BOD showed less fluctuations. Mean EMCs of SS and TP measured for nine rain events were as high as 207 mgSS·L⁻¹ and 0.27 mgP·L⁻¹, respectively. The export coefficient of SS and TP per area of cultivated field were calculated as 11,912 kgSS·yr⁻¹·km⁻² and 785 kgP·yr⁻¹·km⁻², respectively, which are significantly higher than reports of other area. It can be concluded that SS and TP in the runoffs were high enough to impose major threat to aquatic habitats, and the highland agriculture should be the main target of water quality management or habitat conservation in the study area.

keywords : Event mean concentration (EMC), Export coefficient, High slope upland, Nonpoint pollutant

1. 서론

우리나라는 몬순기후의 영향으로 여름철에 강우가 집중이 되고 있으며, 최근 그 강도가 더욱 강해지고 있고 국지적인 형태를 띠고 있다(김범철 등, 2003). 이 시기에 유출된 비점오염원은 하천 및 호수의 생태계 교란, 부영양화(허우명 등, 1998) 등에 영향을 준다. 특히 강우의 집중화로 인해 청정하천으로 여겨지던 한강상류 유역은 탁수 발생으로 인해 수질이 악화되고 있으며(김범철과 정성민, 2007a, 2007b; 함광준 등, 2006), 하천과 호수로 유입이 되어 생태계에 심각한 영향을 주고 있다.

비점오염원은 점오염원과 달리 주로 강우에 의해 유출되고 비점오염원의 유출은 계절적, 지역적 편차가 크게 나타나기 때문에 오염물질의 발생량과 부하량의 관리가 힘들다(Ichiki and Yamada, 1999; Ritter and Shirmohammadi, 2001). 또한 비점오염원 유출은 지리적 조건과 토지이용형태에도 큰 영향을 받는다. 특히 농촌 유역에서 비점오염원 유출은 하천과 호수를 오염시키는 주요한 요인으로 인식되었으며(U.S. EPA, 1986), 최근 수질관리의 측면에서 환경기초시설의 확충 등으로 점오염원의 비중을 줄어들이고,

상대적으로 비점오염원에 대한 중요성이 높아지고 있다.

비점오염원의 유출 평가는 주로 강우시 집중적인 조사를 바탕으로 단위면적당유출부하량으로 계산된다(Jolankai et al., 1999; Wang et al., 2001). 국내 일부하천에서도 단위면적당유출부하량을 통하여 유역 내 상대적인 유출부하량을 비교하고 있고(심수용, 1998; 이현동 등, 2001; Kronvang, 1992; Rast and Lee, 1978; Reckhow et al., 1980), 최근에는 GIS를 이용한 비점오염원 유출모델에 의한 평가가 이루어지고 있다.

강우시 발생하는 유출수의 농도는 유량에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 조사 간격이 일정하지 않는 경우 비점오염원 유출수의 특성을 파악하기 위해선 단순 시간평균보다 유량을 고려한 유량가중 평균농도인 EMC(Event Mean Concentration)가 많이 쓰인다. 외국의 사례를 들면 Omernik(1977)는 미국 동부에 위치한 4개 지역에서 지역간의 TP와 TN의 EMC를 비교·분석하였고, Line 등(2002)은 미국 노스캐롤라이나주의 Neuse 강 상류유역에 위치한 6개의 소하천에서 토지이용에 따른 EMC를 제시하였다. Lee(2008)와 Sa(2004)는 일본 서부지역에 위치한 농촌의 소하천에서 강우시 비점오염 유출에 의한 EMC를 산정하였고, 인도의 Tapi강에 위치한 소유역에서도 유사한 연구가 이루어졌다(Sargaonkar, 2006). 국내에서도 비점오염원의 중요성으로 인해 최근 들어 많은 연구들이 수행되고 있다. 엄재성(2004)

[†] To whom correspondence should be addressed.

bkim@kangwon.ac.kr

은 북한강 상류하천인 인북천에서 강우 시 EMC에 따른 오염원의 농도변동을 제시한 바 있고, 섬진강과 금강 수계 소하천에서도 유사한 연구들이 이루어졌다(곽동희 등, 2008; 김진호 등, 2008; 박성천 등, 2005; Kim et al., 2007).

한강상류유역은 대부분 산림으로 이루어져 있어 점오염원의 발생은 적지만 매년 강우시 비점오염원 유출이 심하게 나타나고 있다. 특히 상류지역에 위치한 고령지 농경지에서 발생하는 토사유출이 심각한 오염원이 되고 있다. 홍천군 내면에 위치한 자운천은 북한강 상류의 대표적인 탁수하천으로 유역 내 고령지농경지의 영향으로 강우시 토양침식이 크게 일어나고 있는 지역으로 토양침식에 따른 수질 특성과 토양유실에 대한 양적인 평가가 일부 이루어졌으나(박철수 등, 2005; 함광준 등, 2006), 오염물 유출부하량에 대한 정량적 평가는 이루어지지 않았다. 향후 비점오염원에 대한 효율적인 관리대책을 세우기 위해서는 오염부하량의 원단위 평가 및 장래 토지이용변화에 따른 정량적 평가방법이 매우 중요하다. 본 연구에서는 소양강댐 상류지류 중 면적이 가장 큰 내린천 유역과 집중강우 시 대량의 탁수가 발생되고 있는 상류의 자운천 유역을 대상으로 비점오염원의 유출특성을 조사하고 부하량을 정량적으로 파악하였다.

2. 연구방법

2.1. 조사지역

북한강 상류에 위치한 내린천은 소양강댐으로 유입되는 가장 큰 지류하천이다(유로연장 92.4 km, 면적 1,075 km²). 내린천 유역의 90% 이상이 산림으로 이루어져 있고, 특별한 점오염원이 없다. 한편 탁수하천으로 분류되는 자운천은 내린천 상류에 위치한 지류하천으로 전체유역의 약 10%를 차지하고 있다(유로연장 21.14 km, 면적 134.1 km²; Fig. 1). 자운천유역은 대부분 산림으로 이루어져 있지만, 고령지 경작이 매우 활발한 곳이다. 본 연구에서의 조사는 내린천 본류는 유역의 하단부인 원대교에서 실시를 하였고, 자운천 유역은 고령지 농경지가 위치해 있는 지역에서 가장 가까운 지점인 창촌2교에서 실시하였다.



Fig. 1. Map showing the watershed of the Naerin Stream. Open circles indicate sampling sites.

2.2. 조사 및 분석방법

본 조사는 소양강댐 상류인 내린천 유역과 자운천을 대상으로 2005년 4월부터 2006년 10월까지 강우시와 비강우시로 나누어 조사를 실시하였다. 강우시 조사는 총 9개의 강우사상에 대해 조사를 하였으며 강우초기 1~2시간 간격으로 실시하다가 침투유량이 나타난 이후에는 시간을 늘려서 조사를 실시하였다. 또한 비강우조사는 강우시기(7~9월)를 피하여 강우 전·후에 걸쳐 실시를 하였고 6~10시간 간격으로 총 5회 조사를 하였다. 채취된 시료는 전처리한 후 가능한 빨리 수질분석을 실시하였다.

Total phosphorus(TP)와 Dissolved total phosphorus(DTP)는 시료를 persulfate 분해 후에 ascorbic acid법으로 측정하였고, Dissolved inorganic phosphorus(DIP)는 여과한 시료를 ascorbic acid법으로 측정하였다. Total nitrogen(TN)은 원시료를 alkaline persulfate 분해 후에 cadmium reduction법으로 측정하였고, Nitrate는 여과한 시료를 cadmium reduction법으로 측정하였다. Suspended solids(SS)는 비침강성 측정법으로 분석을 실시하였는데, 시료를 1시간 침강시키고 GF/F로 여과 후 105°C에서 건조하여 여과지의 무게차이로 측정하였다. Dissolved oxygen(DO)는 현장에서 고정하여 azide modification으로 측정하였고, Biological oxygen demand(BOD)는 20°C 배양기에서 5일간 배양 후 용존산소의 차이로 측정하였다. Chemical oxygen demand(COD)는 알칼리성 망간법으로 측정하였다. Dissolved oxygen carbon(DOC)는 GF/F filter로 여과한 시료를 TOC analyzer(TOC 5000A, Shimadzu)로 분석하였다.

조사시기의 강우량은 유역에 인접한 창촌 우량관측소와 인제 우량관측소의 자료를 이용하였으며, 유량 산정은 측정 지점에 수위표를 설치한 후 수위를 연속적으로 측정하여 수위-유량 관계곡선으로 유량을 산정하였다. 유속측정은 비강우시에는 회전식유속계, 강우시에는 전자표면유속계를 이용하였다.

Event mean concentration(EMC) 산정은 각각의 강우사상에서 조사된 유량과 오염물질의 곱으로 부하량을 산정한다음, 이를 다시 더하여 누적부하량을 산출 후 강우사상의 누적유량으로 나누어 산정하였다(식 (1)).

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

여기서 Q_i는 i번째 강우사상의 유량, C_i는 i번째 강우사상의 농도이다.

연평균 부하량은 조사한 기간 동안의 강우량을 모두 더하여 강우사상의 총강수량을 구하고, 연평균강수량을 조사된 강우사상의 총강수량으로 나누어 준 뒤 여기에 조사된 강우사상의 부하량을 곱하여 연간유출부하량을 산정하였다. 이를 유역면적으로 나누어 줌으로써 면적당 연간유출부하량을 산정하였다(식 (2)).

$$\text{면적당 연간유출부하량(kg} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}) = (\text{연평균강우량} /$$

조사된 강우사상의 총강우량) × 조사된 강우사상의 부하량 / 유역면적 (2)

농경지의 면적당 연간유출부하량은 전체 부하량에서 산림의 연간유출부하량을 뺀 뒤 농경지 면적으로 나누어 계산하였다. 산림으로부터 유출되는 면적당 연간유출 부하량은 유역전체가 산림으로 구성되어 있는 유역에서 조사된 자료를 적용하였는데, 춘천시 인근의 정족리 산림지역에서의 연간 부하량은 BOD 170 kg · yr⁻¹ · km⁻², TP 20 kgP · yr⁻¹ · km⁻² 인 것으로 보고되었으며, 산림의 SS 부하량은 평창군의 산림지역에 위치한 봉산천의 연간 SS 부하량 2,357 kgSS · yr⁻¹ · km⁻²를 적용하여 계산하였다(한강수계관리위원회, 2005).

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

Stream	Paddy field	Upland	Forest	Etc.	Total
Jawoon Stream	7.1 (9.1)	0.4 (0.5)	66.8 (85.6)	3.8 (4.8)	78.1 (100)
Naerin Stream	46.4 (4.4)	7.3 (0.7)	962.2 (91.2)	38.7 (3.7)	1054.6 (100)

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우시와 비강우시 수질변화

각 지점에서의 비강우시와 강우시 수질을 비교한 결과 일부항목들에서 매우 큰 차이를 보였다(Table 2). 비강우시

Table 2. The ranges of water quality parameters on dry and rainy days in the Jawoon Stream and the Naerin Stream

Sites	Parameter	Season	Minimum	Median	Maximum	SD	n
Naerin	BOD (mg · L ⁻¹)	dry	0.4	0.9	1.8	0.4	15
		rainy	0.1	1.3	5.2	1.1	102
	COD (mg · L ⁻¹)	dry	2.2	2.4	2.7	0.2	15
		rainy	1.2	4.1	10.4	2.1	102
	SS (mg · L ⁻¹)	dry	0.4	2.5	5.6	1.7	15
		rainy	0.2	9.2	391	85.5	102
	TN (mg · L ⁻¹)	dry	1.64	1.99	2.20	0.2	15
		rainy	3.89	2.07	1.04	0.6	102
	NO ₃ -N (mg · L ⁻¹)	dry	—	—	—	—	15
		rainy	0.91	1.87	3.45	0.6	102
	TP (μg · L ⁻¹)	dry	8.0	10.0	15.0	1.68	15
		rainy	1.0	29.0	542.0	112.3	102
	DTP (μg · L ⁻¹)	dry	—	—	—	—	15
		rainy	4.0	18.5	101.4	18.8	102
	PO ₄ -P (μg · L ⁻¹)	dry	—	—	—	—	15
		rainy	1.3	12.4	86.3	16.1	102
DOC (mg · L ⁻¹)	dry	0.90	1.02	1.21	0.1	15	
	rainy	0.76	1.69	5.7	0.8	102	
Jawoon	BOD (mg · L ⁻¹)	dry	0.6	1.2	1.8	0.3	15
		rainy	0.1	1.4	6.1	1.2	156
	COD (mg · L ⁻¹)	dry	1.9	2.5	3.9	0.7	15
		rainy	0.1	6.4	14.3	2.9	156
	SS (mg · L ⁻¹)	dry	6.0	2.8	1.6	1.5	15
		rainy	1.6	60.4	2180.0	323.0	156
	TN (mg · L ⁻¹)	dry	2.07	3.58	4.20	0.8	15
		rainy	1.26	4.00	8.73	1.4	156
	NO ₃ -N (mg · L ⁻¹)	dry	—	—	—	—	15
		rainy	1.02	3.51	6.08	1.0	156
	TP (μg · L ⁻¹)	dry	10.0	13.0	28.0	5.7	15
		rainy	6.0	124.0	1417.0	302.0	156
	DTP (μg · L ⁻¹)	dry	—	—	—	—	15
		rainy	12.1	53.4	304	65.7	156
	PO ₄ -P (μg · L ⁻¹)	dry	—	—	—	—	15
		rainy	8.6	48.3	584	80.4	156
DOC (mg · L ⁻¹)	dry	1.00	1.22	1.37	0.11	15	
	rainy	0.12	1.97	10.02	1.63	156	

(—: not measured)

내린천의 SS, TP의 중앙값은 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $10.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 이 었지만, 강우시에는 각각 $9.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $29.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 였다. 또한 자운천의 경우도 비강우시에는 SS, TP의 중앙값이 각 각 $2.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $13.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 였으며, 강우시에는 $60.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $124.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 크게 증가하였다. 반면 비강우시 BOD, TN 중앙값은 내린천에서 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $1.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 였지만 강우시에도 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $2.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 큰 차이 를 보이지 않았으며, 자운천의 경우에도 비강우시에는 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $3.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 강우시 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $4.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 으로 역시 유사한 농도를 보였다. 또한 DOC도 두지점 비 강우시에는 변화폭이 작았지만 강우시 자운천에서 강우시 변화의 폭이 컸다.

강우시 각 지점에서의 시간에 따른 수질변화가 크게 나 타났다. 유량이 증가함에 따라 SS, TP, COD는 증가하는 경향을 보였으며, 자운천에서 이러한 경향은 뚜렷했고 모 든 강우사상에서 공통적으로 나타났다(Fig. 2). 또한 이들 항목의 농도는 강우초기 급격히 증가하였다. 자운천에서 DOC는 큰 강우사상에만(2005년 6월 26~28일, 2006년 7월 12~20일) 시간에 따른 농도변화가 나타나는 특징을 보였

다(Fig. 2, Fig. 3). 그러나 BOD, TN, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 유량 증가 와 상관없이 큰 변화를 보이지 않았고, 비교적 일정한 농 도를 보였다. 내린천의 경우에서도 유량 증가함에 따라 대부分的 수질항목도 증가를 하였지만, 그 농도는 높지 않았으며 변화의 폭 또한 크지 않았다. 그러나 강우량이 많았던 2005년 6월 26~28일, 2006년 7월 11~14일 강우사 상에서는 다른 강우사상보다 큰 농도를 보였고(Fig. 4, Fig. 5), 자운천과 비교해 보면 그 농도는 낮았다. 그 외에 BOD, TN, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 강우에 따른 농도증가 경향이 뚜렷하 지 않았다.

강우에 의한 초기 오염물질의 농도는 매우 높다가 점차 낮아지는데 이를 초기세척효과(first flush effect)라 한다. 누 적유량/총유량(V)과 누적부하량/총부하량누적부하량(M)의 곡선을 이용하여 SS, TP, TN, BOD, COD, DOC의 초기세 척 효과를 분석한 결과 두 지점 모두 대부분 강우사상에서 TP와 SS가 초기세척효과가 크게 나타났고, 반면 BOD와 TN, DOC 등은 뚜렷한 경향을 보이지 않았다(Fig. 6, Fig. 7). 이러한 경향은 규모가 큰 내린천보다는 작은 자운천에서 더 강하게 나타났다.

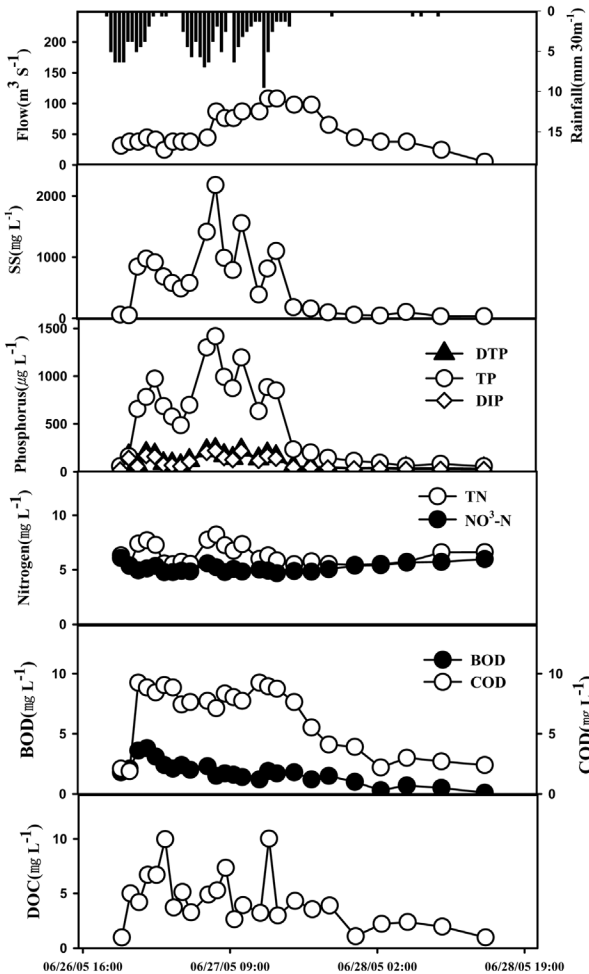


Fig. 2. A typical example of water quality variation in the Jawoon Stream during the rainy event (26, Jun. 2005~28, Jun. 2005).

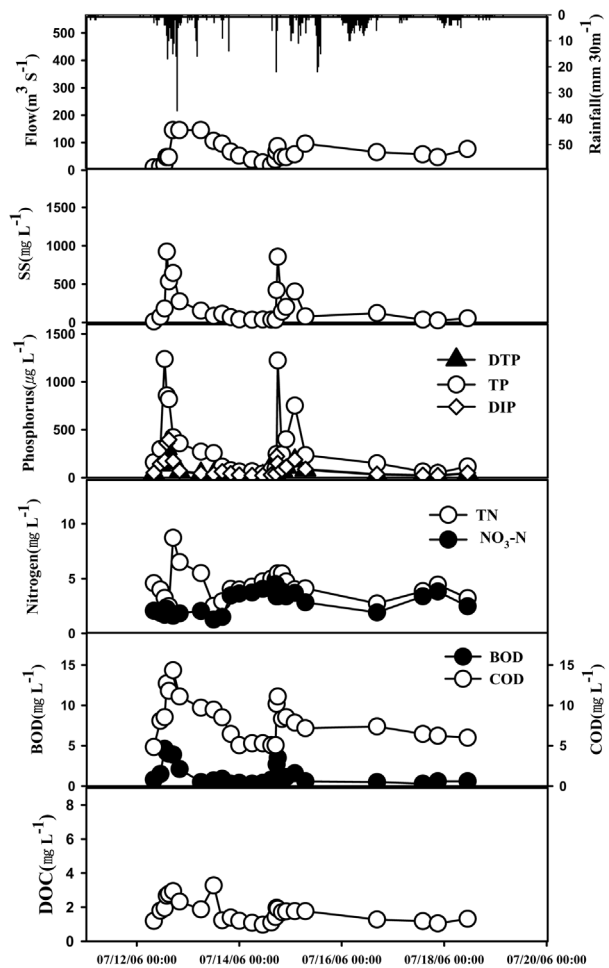


Fig. 3. A typical example of water quality variation in the Jawoon Stream during the rainy event (12, Jul. 2006~20, Jul. 2006).

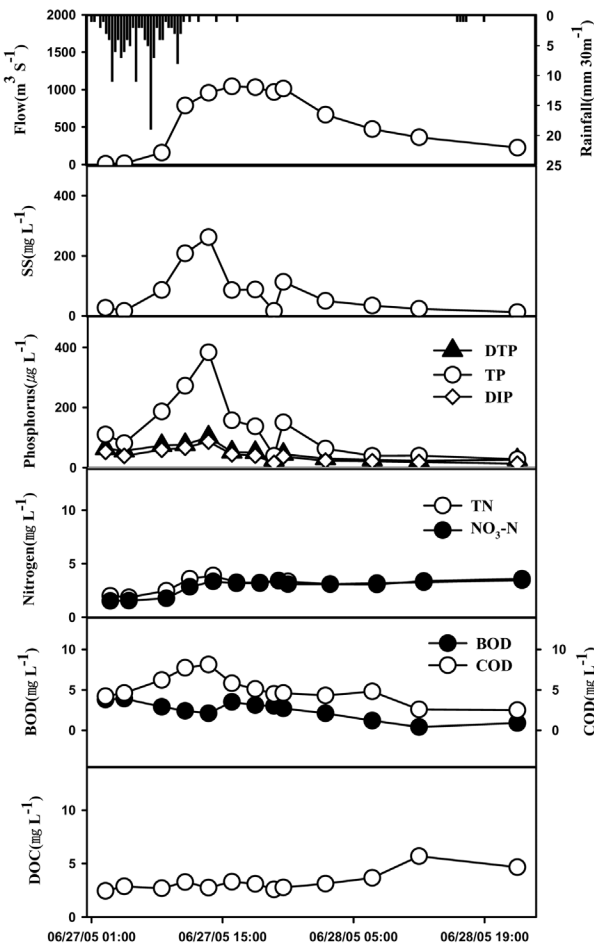


Fig. 4. A typical example of water quality variation in the Naerin Stream during the rainy event (26, Jun. 2005~28, Jun. 2005).

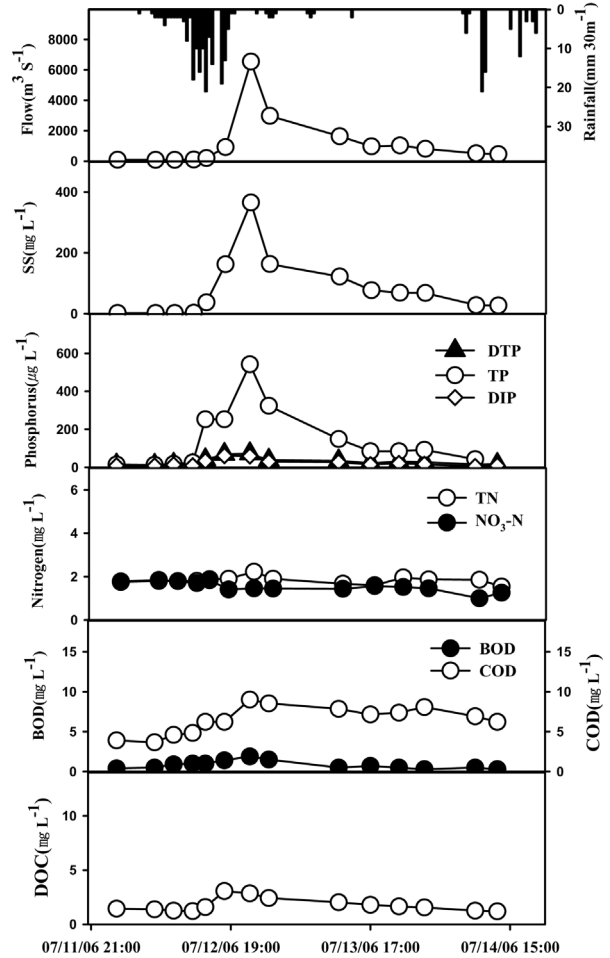


Fig. 5. A typical example of water quality variation in the Naerin Stream during the rainy event (12, Jul. 2006~14, Jul. 2006).

3.2. 각 조사지점에서의 강우사상별 EMC와 연간유출 부하량

내린천에서 비강우시 각 수질항목들의 EMC는 BOD 0.9~1.4 mg · L⁻¹, SS 2.0~5.43 mg · L⁻¹, COD 2.22~2.89 mg · L⁻¹, TN 1.66~2.62 mg · L⁻¹, TP 0.008~0.013 mg · L⁻¹의 범위를 보였고, 강우시에는 0.7~3.0 mg · L⁻¹, 5.5~211 mg · L⁻¹, 2.38~8.11 mg · L⁻¹, 1.19~3.36 mg · L⁻¹, 0.016~0.325 mg · L⁻¹였다(Table 3). 한편 자운천에서는 비강우시 수질항목들의 EMC는 BOD 0.8~1.4 mg · L⁻¹, SS 2.0~5.8 mg · L⁻¹, COD 2.04~3.59 mg · L⁻¹, TN 2.2~4.1 mg · L⁻¹, TP 0.0012~0.026 mg · L⁻¹의 범위를 보였으며 강우시에는 BOD 0.9~3.3 mg · L⁻¹, SS 41~713 mg · L⁻¹, COD 5.30~8.87 mg · L⁻¹, TN 2.73~6.36 mg · L⁻¹, TP 0.087~0.365 mg · L⁻¹로 나타났다(Table 4).

두 지점 모두에서 비강우시와 강우시 SS, COD, TP에 대한 EMC는 큰 차이를 나타냈다. 특히 자운천의 경우 내린천보다 차이가 컸고, 강우량이 작은 강우사상에서도 SS, COD, TP의 EMC가 높은 특징이 나타났다. 반면 BOD, TN은 큰 차이를 보이지 않았다. 자운천의 평균 EMC는 BOD 1.8 mg · L⁻¹, SS 207 mg · L⁻¹, TN 3.94 mg · L⁻¹, TP

0.266 mg · L⁻¹로서, 다른 문헌과 비교해 보았을 때 농경지 면적이 상대적으로 적음에도 불구하고 SS나 TP가 매우 높았다(Table 5). 이는 강우시 유역내 농경지로 부터의 유출이 많다는 것을 의미한다. 자운천 농경지에서의 면적당 연간유출부하량은 BOD 3,344 kg · yr⁻¹ · km², SS 11,912 kg · yr⁻¹ · km², TP 785 kg · yr⁻¹ · km²로 조사되었다(Table 6). 자운천 유역에서 오염원의 유출부하량이 다른 지역보다 상대적으로 높은 것은 고령지 경작지내 주기적인 객토와 퇴비나 비료의 사용량과 관련성이 높다. 경작지내 작물생장에 좋은 토양을 공급하기 위해 객토를 자주하므로 토양이 침식되기 쉬운 상태로 유지되므로 토양침식이 많이 일어날 수 있는 조건을 가지고 있다. 또한 퇴비나 비료에 포함된 인과 유기물이 탁수와 함께 유출되어 강우시 인의 농도가 매우 높게 나타나고 있다. 이는 고령지 농업의 환경오염특성을 반영하고 있는 것으로 볼 수 있다.

현재 비점오염원 부하량산정은 환경부의 원단위가 주로 이용되고 있으며, 특히 밭에서 발생하는 오염원들의 원단위는 BOD 580 kg · yr⁻¹ · km², TP 88 kg · yr⁻¹ · km²로 제시되어 있다. 그러나 이 값은 본 연구에서 계산된 결과와 비교할 때 BOD는 6배 이상, TP는 약 10배 낮았다. 또한 다

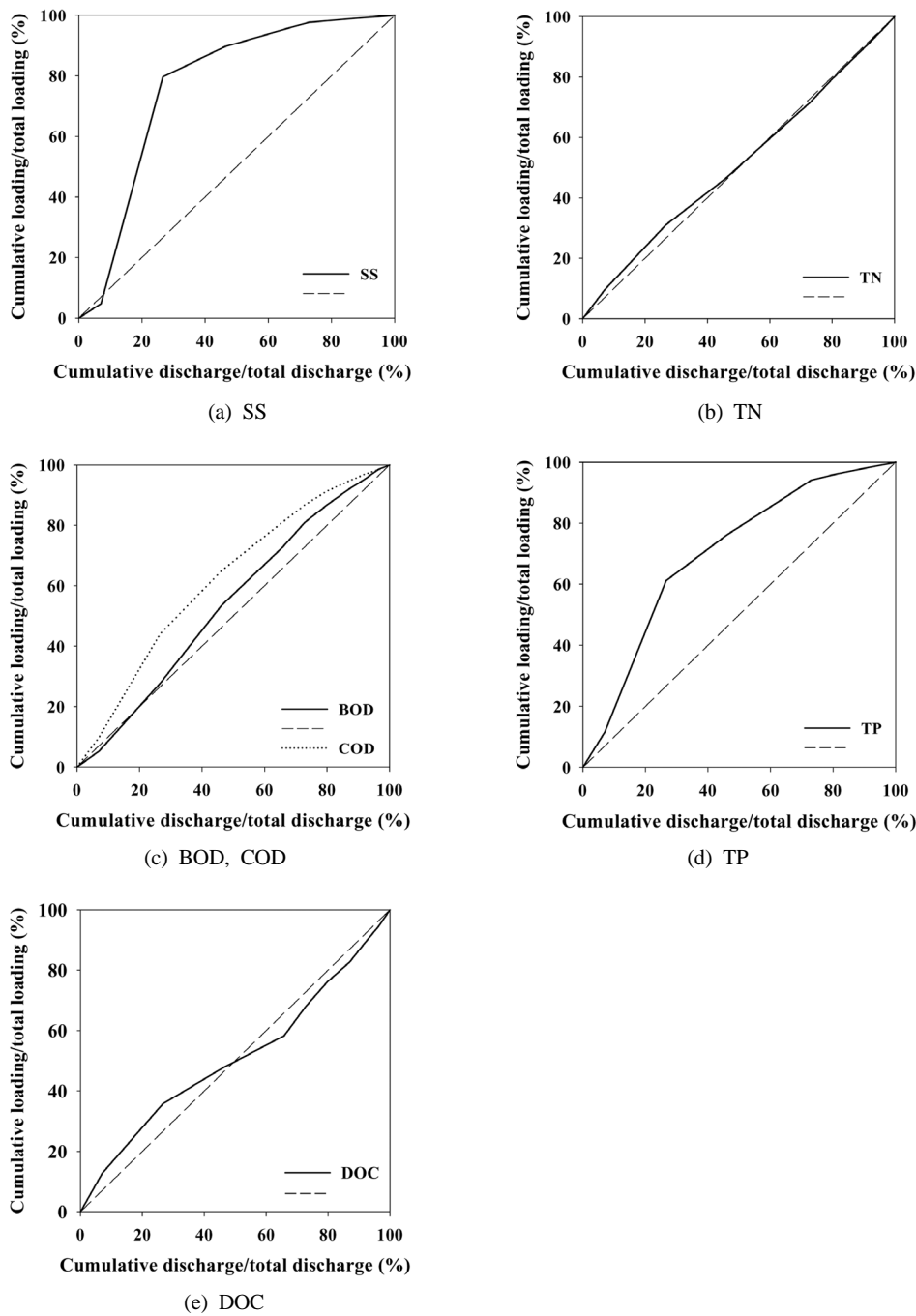


Fig. 6. Typical M-V curves showing the first flush effect of each water quality parameter during a rainy event in the Jawoon Stream (18, Aug. 2005~20, Aug. 2005).

른 수계를 대상으로 연구된 결과에서도 기존의 발생 원단 위와는 많은 차이가 있는 것으로 보고되고 있다(곽동희 등, 2008; 박성천 등, 2005). 따라서 비점오염원 원단위에 대한 재설정이 필요하다(신동석, 2007). 특히 오염총량제가 실시 되고 있거나 실시 예정인 유역에서도 오염부하량 산정 시 원단위를 사용하고 있기 때문에 기존의 자료를 그대로 쓰는 경우 부하량 산정시 상당량이 과소평가가 될 수 있어 이에 대한 재검토가 반드시 필요하다.

강우사상별 오염물질의 EMC는 총강우량보다는 강우강도와 더 높은 상관관계를 보였다(Table 7). 특히 강우량의 증

가에 따라 BOD는 음의 상관성을 보였으며, COD를 제외하고 SS, TP, TN과는 유의적인 상관성을 보이지 않았다. 반면 강우강도에 따라서는 유기오염물인 BOD와 COD는 상관성이 낮았으나 SS, TN, TP 등과 같은 영양염류와는 유의적인 상관성을 보였다. 총 강우량과 오염물질의 EMC간에 낮은 상관성은 강우초기 초기세척효과에 따라 오염물질의 유출농도가 급격히 높아진 이후 강우량 증가에 따라 농도가 희석되어 EMC가 낮아지기 때문으로 판단된다.

강우시와 비강우시 하천의 수질등급이 서로 다르게 나타났다. 비강우시 자운천에서 SS는 $3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로서 1등급

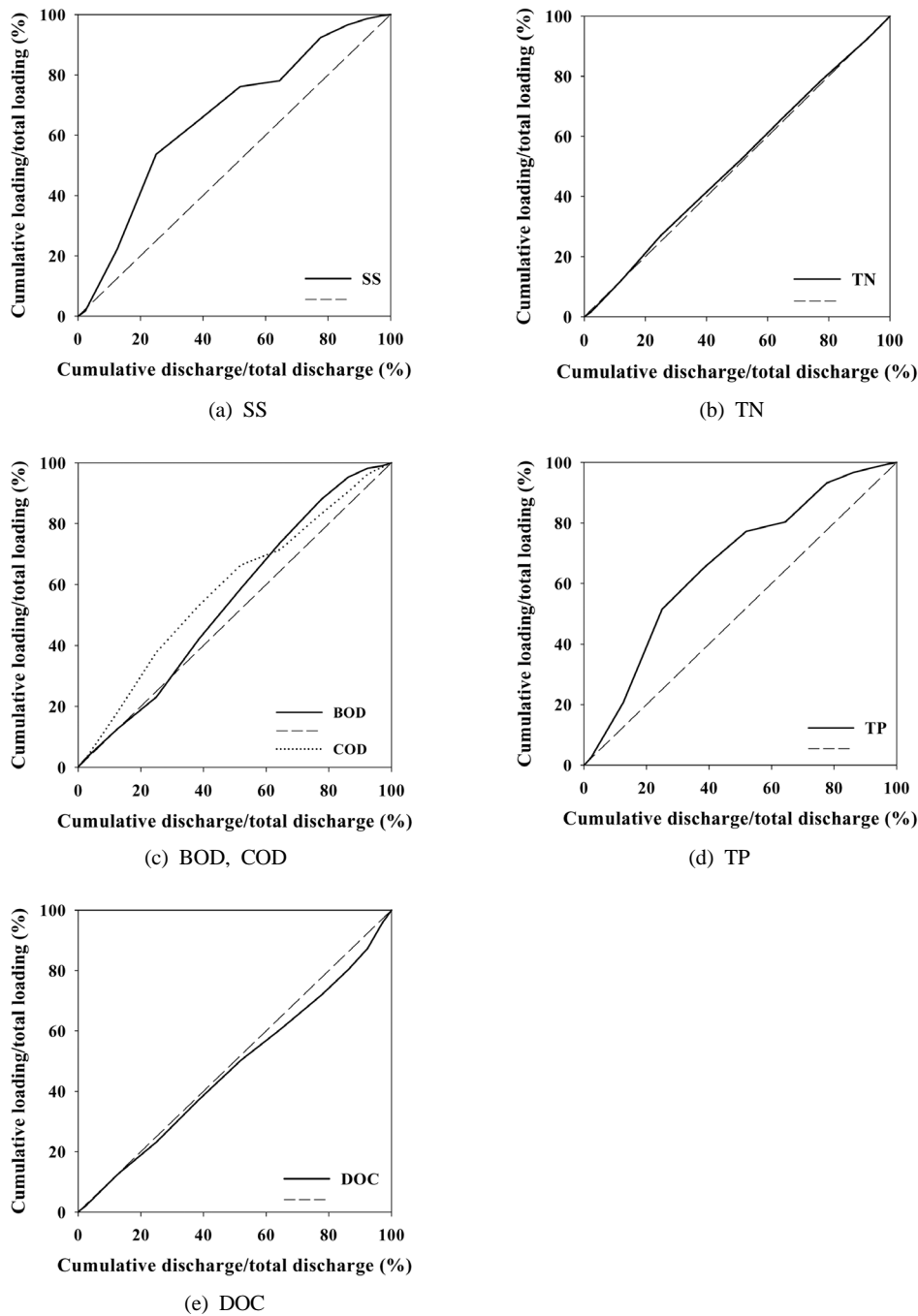


Fig. 7. Typical M-V curves showing the first flush effect of each water quality parameter during a rainy event in the Naerin Stream (26, Jun. 2005~28, Jun. 2005).

의 수질을 보였으나 강우시에는 $207 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로서 5등급 이하로 판정되었다. 강우시와 비강우시기 간의 수질등급의 현격한 차이는 수생태계에 서식하는 다양한 생물군집 변화에 직접적으로 영향을 줄 수 있다. 김재구 등(2007)은 유역 내 고령지 농경지의 영향으로 인한 탁수하천인 자운천과 대조하천으로 계방천의 어류 군집을 비교한 결과 두 하천 모두 동일수계이며 최상류의 하천임에도 불구하고 군집내 우점어종이 서로 다르고 생체량도 크게 차이를 보이고 있어 탁수에 의한 영향으로 인해 어류의 군집 변화가 나타날 수 있다고 보고한 바 있다.

고령지 농경지의 농경형태는 비점오염원 유출을 가중시키는 주요 원인이 되고 있다. 특히 경작지내 비료 및 퇴비를 과다 사용이 가장 큰 문제로 지적되고 있다. 수질오염에 주원인이 되고 있는 인 성분은 농경지에 투입되는 양의 10~20% 정도만이 작물 생산에 이용이 될 뿐 나머지는 토양에 축적이 되거나 강우시 하천으로 유출이 된다(박문희와 전희중, 2005). 또한 무분별한 객토도 토양침식에 따른 SS가 증가의 주원인이 되고 있다. 그 외 농경지의 위치도 비점오염원 유출에 영향을 주는데 하천변의 수변완충대는 오염물질유출을 저감하는데 중요한 역할을 하게 된다. 그러

Table 3. The EMCs of water quality parameters measured in several rainy events and dry days at the Naerin Stream ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Season	Year	Periods	Rainfall (mm)	BOD	SS	COD	TN	TP
Rainy days	2005	17 May.-19 May.	35	1.1	5.5	2.38	2.27	0.016
		26 Jun.-28 Jun.	141	2.0	103	5.13	3.36	0.154
		27 Jul.-29 Jul.	76	1.8	6.8	3.00	1.92	0.028
		18 Aug.-20 Aug.	53	0.8	7.4	3.08	1.95	0.020
		14 Sep.-15 Sep.	56	0.7	10.3	3.04	1.19	0.028
	2006	06 May.-08 May.	42	2.3	9.5	5.72	2.32	0.027
		11 Jul.-15 Jul.	228	1.3	211.0	8.11	1.98	0.325
		26 Jul.-28 Jul.	151	3.0	199.0	7.84	1.60	0.174
Dry days	2005	09 Jun.		0.7	4.2	2.49	2.09	0.012
		17 Oct.		0.9	5.4	2.22	2.03	0.008
		12 Nov.		1.3	2.3	2.33	1.66	0.009
	2006	21 Jun.		1.4	2.0	3.59	2.62	0.012
		17 Oct.		1.0	2.6	2.89	2.23	0.013

Table 4. The EMCs of water quality parameters measured in rainy events and dry days at the Jawoon Stream ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Season	Year	Periods	Rainfall (mm)	BOD	SS	COD	TN	TP
Rainy days	2005	17 May.-19 May.	33	2.5	198.3	6.87	3.43	0.276
		26 Jun.-28 Jun.	240	1.7	713.6	7.04	6.36	0.655
		11 Jul.-12 Jul.	33	0.9	40.2	4.76	4.01	0.087
		27 Jul.-29 Jul.	77	1.6	142.7	5.30	3.83	0.365
		18 Aug.-20 Aug.	60	2.3	126.4	5.56	4.12	0.283
	2006	14 Sep.-15 Sep.	55	1.2	121.4	4.99	2.95	0.182
		06 May.-08 May.	56	3.3	56.2	8.03	3.69	0.107
		12 Jul.-20 Jul.	725	1.5	249.1	8.87	4.34	0.326
		26 Jul.-28 Jul.	232	1.4	198.9	7.70	2.73	0.116
Dry days	2005	09 Jun.		1.3	3.4	2.38	3.98	0.026
		17 Oct.		1.3	5.8	2.04	4.10	0.012
		12 Nov.		0.8	2.6	2.91	3.81	0.015
	2006	21 Jun.		1.4	2.0	3.59	3.71	0.012
		17 Oct.		1.0	2.7	2.90	2.20	0.012

Table 5. Comparisons of annual average EMCs of water quality parameters between this study and other reports ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Watershed	BOD	SS	TN	TP	References	
Imsil Stream, Korea	N/A	2.7	75.8	2.71	0.19	Kwak et al., 2008
Seomjin River, Korea	Forest area > 70%	2.6	45.5	2.31	0.13	Kwak et al., 2008
Oenam Stream, Korea	Paddy field	10.6	17.4	4.15	0.227	Park et al., 2005
Daegok Stream, Korea	Agricultural area 14.8%	-	227	2.08	0.62	Kim et al., 2007
Rokutanda, Japan	Agricultural area 53.0%	-	29.9	1.16	0.316	Lee, 2008
Nagara, Japan	Agricultural area 17.9%	-	52.9	1.43	0.29	Sa, 2004
Akola, India	Cultivable land 85.8%	7.65	-	1.07	0.20	Sargaonkar, 2006
Jawoon Stream, Korea	Agricultural area 9.6% Forest 85.6%	1.8	207	3.94	0.266	This study (total 9 events)

나 자운천의 고령지 농경지는 하천과 인접해 있어 오염원 유출에 매우 취약하다(함광준 등, 2006).

지난 30년간 기후 변화를 분석한 결과 소양강 유역의 경우 매년 0.04°C 증가하여 1975년 이후 1.2°C 증가하였고, 여름철 강우량은 연간 $10 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 의 속도로 증가하고 있는 것으로 나타났다(배덕효와 정일원, 2004; 양해근 2007;

이승호와 권원태, 2004). 이는 강우일수는 증가하지 않고 있는데 강우량이 매년 증가함으로써 강우강도는 증가하고 있음을 의미하며(Fig. 8), 강우강도의 증가에 따라 오염물질의 유출농도와 부화량이 크게 증가할 것으로 보인다. 따라서 장기적 관점에서 기후변화는 농경지 비점오염 부하량의 증가를 초래하여 수질관리와 하천 및 호수 생태계의 보호

Table 6. The comparison of specific export coefficient from agricultural area measured in this study and other reports ($\text{kg} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)

Watershed	BOD	SS	TN	TP	References
North Han River	1,930	-	680	53	
South Han River	1,890	-	680	52	Lee et al., 2001
Kyungan Stream	1,980	-	700	54	
Palmiri Stream (paddy field watershed)	-	-	2,920	292	Shim, 1998
Palmiri Stream (dry field watershed)	-	-	6,205	146	
Youngsan River	2,592	-	894	80	Cha et al., 1999
Arahus River, Denmark	-	-	-	115	Kronvang, 1992
Lyngby-gaards river, Denmark	-	-	-	90	
Ohio, USA	-	-	1,100	93	Smith and Alexander, 2000
Upper Mississippi, USA	-	-	1,300	110	
EPA, USA	-	-	1,650	113	Reckhow et al., 1980
Eastern, USA.	-	-	500	50	Rast and Lee, 1978
Western, USA	-	-	200		
Guideline by Korean EPA	580	-	3,446	88	Shin, 2007
Jawoon Stream	3,344	11,912	-	785	This study

Table 7. The correlation coefficients matrix among EMCs based water quality parameters and rainfall intensity in the Jawoon Stream

	Rainfall per event	Rainfall intensity	BOD	SS	COD	TN	TP
Rainfall per event	1.00						
Rainfall intensity	0.42	1.00					
BOD	-0.23	0.12	1.00				
SS	0.35	0.75*	-0.10	1.00			
COD	0.70*	0.46	0.40	0.29	1.00		
TN	0.26	0.72*	0.01	0.80**	0.13	1.00	
TP	0.28	0.68*	-0.03	0.88***	0.11	0.83**	1.00

(* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.005)

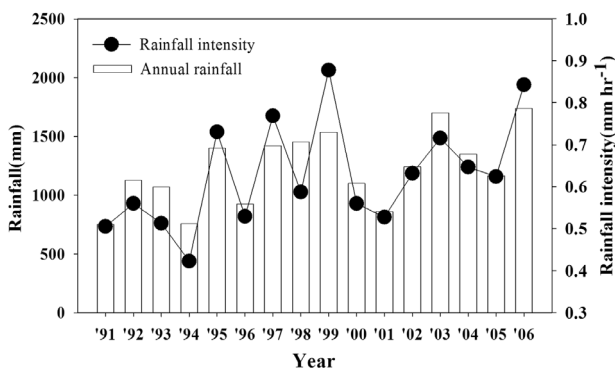


Fig. 8. The long term variations of annual precipitation and rainfall intensity in the study area. Total amount of rainfall is gradually increased compared to past years and rainfall intensity is highly varied.

에 큰 장애를 줄 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구는 한강 상류 고령지 경작지의 비율이 높은 북한강 상류 내린천과 자운천의 하류지점에서 비점오염원유출 특성 및 단위면적당 유출부하량을 조사하였다.

강우 시 유량에 따른 수질변동이 매우 크게 나타났다. 두 지점 모두 유량이 증가하면 SS, TP, COD가 크게 증가하는 경향을 보였으며, 특히 TP와 SS의 경우 초기세척효과가 크게 나타났다. 반면에 BOD, TN, NO₃-N은 유량 증가와 상관 없이 큰 변동을 보이지 않았고, 비교적 일정한 농도를 보였다.

강우시와 비강우시 EMC는 큰 차이를 보였다. 내린천 보다는 자운천에서의 차이가 더 크게 나타났고 특히 강우시 EMC[SS, TP, COD]가 크게 증가하는 경향을 보였다.

자운천 유역의 고령지 농경지에서 배출되는 면적당 연간 유출부하량은 BOD 3,344 $\text{kg} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, SS 11,912 $\text{kg} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, TP 785 $\text{kg} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ 로서 다른 지역에서 조사된 것보다 높았다. 특히 인부하량은 5배 이상 높게 나타났다. 높은 오염물질의 유출은 수질 및 수생태계를 위협하는 주요인이 될 수 있다. 따라서 고령지 농경지의 오염원 유출 저감대책 수립이 수질 및 생태계 관리정책에 핵심이 되어야 할 것으로 사료되며, 본 연구는 농경지의 비점오염부하량 원단위 재평가에 활용할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문의 저자 중 정성민은 「2008년도 2단계 BK21사업」의 지원금을 받았음

참고문헌

- 곽동희, 유승준, 김지훈, 임익현, 권지영, 정팔진(2008). 섬진강댐 상류 유역의 강우시 비점오염물질 유출 특성. *상하수도학회지*, **22**(1), pp. 39-48.
- 김범철, 전만식, 김윤희(2003). 아시아 몬순지역에서의 수질 관리 방안. *춘천 물포럼 발표집논문집*, pp. 59-77.
- 김범철, 정성민(2007a). 우리 나라 농촌지역 하천과 호수의 탁수발생실태. *자연보존*, **139**, pp. 1-7.
- 김범철, 정성민(2007b). 소양호 탁수발생실태와 환경학적 영향. *대한환경공학회지*, **29**(11), pp. 1185-1190.
- 김재구, 최재석, 장영식, 이광열, 김범철(2007). 탁수가 어류 군집에 미치는 영향: 대기천 및 봉산천의 사례연구. *한국육수학회지*, **40**(3), pp. 459-467.
- 김진호, 한국현, 이종식(2008). 농촌유역의 강우사상별 농업 비점오염물질 유출 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(1), pp. 69-77.
- 박문희, 전희중(2005). 시비관리기술. *토양과 비료*, **21**, pp. 3-66.
- 박성천, 오창열, 진영훈, 김동수(2005). 섬진강유역 농촌지역의 비점오염원 배출특성에 관한연구. *한국환경과학회지*, **14**(11), pp. 1057-1062.
- 박철수, 정영상, 주진도, 양재의(2005). 고령지 석비레 성토밭의 토양유실저감을 위한 최적영농관리방안. *한국토양비료학회지*, **38**(3), pp. 119-126.
- 배덕효, 정일원(2004). 기후변화와 수자원의 대응. *제2차 기후변화 학술발표회 발표논문집*, 기상청, pp. 5-14.
- 신동석(2007). 비점오염원 원단위 개정을 위한 조사연구 방향. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 429-433.
- 심수용(1998). 우리나라의 비료와 사료에 기인하는 비점오염원의 질소, 인 배출량. 석사학위논문, 강원대학교.
- 양해근(2007). 기후변화에 따른 유역의 물수지 변화. *대한지리학회지*, **42**(3), pp. 405-420.
- 엄제성(2004). 소양강 상류 농업지역의 비점오염물질의 유출특성. 석사학위논문, 강원대학교.
- 이승호, 권원태(2004). 한국의 여름철 강수량 변동. *대한지리학회지*, **39**(6), pp. 819-832.
- 이현동, 안재환, 배철효, 길윤지(2001). 강우시 유출부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정. *수질보전 한국물환경학회지*, **7**(3), pp. 313-326.
- 한강수계관리위원회(2005). *탁수로 인한 수중생태계 영향조사 및 저감대책제시(II)*.
- 함광준, 배선학, 김준현, 박성빈, 김성석(2006). 자운천 유역내 환경특성과 탁류발생의 관계성에 대한 기초연구. *환경영향평가*, **15**(4), pp. 259-270.
- 허우명, 김범철, 김윤희, 최광순(1998). 소양호 유역에서 비점오염원 유출과 오염수괴의 호수내 이동. *한국육수학회지*, **31**, pp. 1-8.
- Cha, J., Shin, S., and Cha, G. (1999). Non-point source pollution of the Youngsan River basin—the method of land-use types and rainfall-. *Environmental Impact Assessment*, **8**(1), pp. 41-49.
- Ichiki, A. and Yamada, A. (1999). Study on characteristics of pollutant runoff into lake Biwa Japan. *Wat. Sci. Tech.*, **39**(12), pp. 17-25.
- Jolankai, G., Panuska, J., and Rast, W. (1999). Modelling of nonpoint source pollutant loads. In *Assessment and Control of Nonpoint Source Pollution of Aquatic Ecosystems, A Practical Approach*, J. A. Thornton, W. Rast, M. M. Holland, G. Jolankai, and S. O. Ryding (eds.), *Man and the Biosphere Series*, **23**, pp. 291-338.
- Kim, G., Chung, S., and Lee, C. (2007). Water quality of runoff from agricultural-forestry watersheds in the Geum River Basin, Korea. *Environ Monit Assess.*, **134**(1-3), pp. 441-452.
- 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. *Wat. Res.*, **26**(10), pp. 1347-1358.
- 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. Tottori. Japan
- Line, D. E., White, N. M., Osmond, D. L., Jennings, G. D., and Mojonner, C. B. (2002). Pollutant export from various land uses in the Upper Neuse River Basin. *Wat. Env. Res.*, **74**(1), pp. 100-108.
- Omernik, J. M. (1977). *Nonpoint source-stream nutrient level relationships : a nationwide study*. U.S. EPA Report No. EPA-600/3-77-105, U.S. Environmental protection Agency, Corvallis, Oregon.
- Rast, W. and Lee, G. F. (1978). *Summary analysis of the North American (U.S. portion) OECD eutrophication project: nutrient loading - lake response relationship and trophic status indices*. U.S. EPA Report No. EPA/3-78-008, Ecological Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, OR.
- Reckhow, K. H., Beaulac, M. N., and Simpson, J. T. (1980). *Modeling phosphorus loading and lake response under uncertainty: A manual and compilation of export coefficients*. U.S. EPA Report No. EPA-440/5-80-011, Office of Water Regulations, Criteria and Standards Division, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Ritter, W. F. and Shirmohammadi, A. (2001). *Agricultural nonpoint source pollution*, Lewis Publishers.
- Sa, S. H. (2004). Runoff Characteristics of Particulate Matter and Its Influence on Shallow Lake Water Quality. Ph. D. dissertation, University of Tottori, Tottori, Japan
- Sargaonkar, A. (2006). Estimation of land use specific runoff and pollutant concentration for Tapi river basin in india. *Environ. Monit. Assess.*, **117**, pp. 491-503.
- Smith, R. A. and Alexander, R. B. (2000). *Source of nutrients in the nation's watershed*. proceedings from the natural resource, agriculture, and engineering service conference for nutrient management consultants, March 28-30, 2000, Camp Hill, Pennsylvania.
- U.S.EPA (1986). *Quality criteria for water*. EPA/440/5-86-001.
- Wang, X., Li, T., Xu, Q., and He, W. (2001). Study of distribution of nonpoint source pollution in the watershed of the Miyun reservoir, Beijing, China. *Water Sci Technol.*, **44**(7), pp. 35-40.