

농업용 저수지 상류유역의 비점원오염 유출부하량 산정 - 고성저수지를 대상으로 -

김진호[†] · 한국현 · 류종수 · 정구복 · 권순국^{*}

농촌진흥청 농업과학기술원 환경생태과

^{*}서울대학교 조경·지역시스템공학부

Discharge Loads of Nonpoint Source Pollutant in the Upper Watershed of Irrigation Reservoir - Case Study of the Goseong Reservoir -

Jin-Ho Kim[†] · Kuk-Heon Han · Jong-Soo Ryu · Goo-Bok Jung · Soon-Kuk Kwun^{*}

Div. of Enviro. & Eco., Nat'l Inst. of Agri. Sci. & Tech., Rural Development Administration

Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

(Received 23 January 2007, Accepted 15 March 2007)

Abstract

This study was conducted to evaluate the influence of pollutant loads on the water quality in the Goseong reservoir from May 2005 to October 2006. Annual total runoff at the Goseong-cheon watershed was 968.0 mm in 2005, 382.6 mm in 2006, respectively. The mean concentration of BOD, COD and SS in the stream were 2.28, 6.03, 46.97 mg/L in rainy seasons and 0.95, 2.14, 6.05 mg/L in dry seasons at SWT C sub-watershed. Total-N concentrations ranged from 2.60 to 3.18 mg/L at SWT C sub-watershed, which was generally higher than the quality standard of agricultural water (1.0 mg/L). Total-P concentrations ranged from 0.044 to 0.130 mg/L at SWT C sub-watershed. Measured pollutant loads in the SWT C sub-watershed were 36.7 kg/day of BOD, 72.3 kg/day of T-N and 2.3 kg/day of T-P in 2005 at SWT C sub-watershed, 63.9 kg/day of BOD, 82.8 kg/day of T-N and 1.1 kg/day of T-P in 2006 at SWT C sub-watershed, respectively. In the analysis of the effluent characteristics for NPS pollutants, it appeared that the loading rates of effluent from SWT C watershed were, respectively, BOD 62.3%, T-N 69.6%, T-P 71.1%, SS 70.1% during the rainy season in 2006. The calculated T-N daily pollutant loadings by the unit loading factor method from each sub-watershed were much greater than observed, but the calculated T-P daily pollutant loadings much lesser than observed.

keywords : Agricultural watershed, Nonpoint source pollution, Runoff, Unit pollutant load, Water quality

1. 서론

2000년 이전 우리나라의 수질정책은 하수종말처리장 등 환경기초시설에서 처리하여 배출시키는 농도규제 중심의 정책이 이루어져 왔다. 그러나 하천의 허용오염부하량을 고려하지 않는 배출허용기준 중심의 농도 규제만으로는 오폐수의 양적팽창에 따른 오염부하의 증가를 통제할 수 없으며, 이에 따라 수체의 환경기준 달성에 근본적인 한계를 안고 있으므로 오염총량관리제도 병행의 필요성이 대두되게 된다. 또한 기존의 농도규제에서의 수질관리 및 수처리 기술은 배출허용기준을 만족하기 위한 배출시설 관리에 제한되지만, 오염총량관리제에서는 이를 포함하여 유역의 환경정보조사, 오염물질 유출에 대한 분석, 예측 및 저감기술은 물론 유량확보 등 총체적인 수질관리 수단이 유도되고

적용될 수 있다(Yoo et al., 2004).

오염물질의 배출은 오염원의 형태뿐만 아니라 개별 오염원의 발생형태 및 제거시설의 처리현황에 따라 수역으로 유입되는 물질량이 달라지며, 강우의 영향에 의한 시기별 배출량의 변화가 크다. 특히 강우시 유역에서 배출되는 오염물질량은 농경지 배출수 및 도시지역 비점원 물질, 합류식 하수관거 월류수 등에 의해 건기에 비해 그 부하특성이 매우 다르게 나타난다. 강우시에는 다량의 유출수와 함께 유역 내에 분포되어 있던 오염물질량이 대부분 수역으로 유입되게 되므로, 하류의 하천 및 호소 등의 수질에 미치는 영향이 매우 크다(엄 등, 2003). 첨진강댐 저수지 유역을 대상으로 한 연구에서 강우기, 비강우기로 나누어 오염부하량을 추정된 결과 T-N, T-P의 연간 총부하량의 50%, SS의 연간 총부하량의 73%가 강우기에 유출되는 것으로 조사되었다(국립환경연구원, 2002).

최근 세계적으로 농업비점원오염으로 인한 수질오염문제를 해결하기 위한 연구개발이 활발하게 이루어지고 있으나

[†] To whom correspondence should be addressed.

water@rda.go.kr

우리나라의 경우 농업비점원에 대한 체계적인 연구가 미진한 상태이다(최 등, 2000). 농업유역에 대한 수질 모니터링 결과 전라북도 지역의 경우 농업용수를 공급하기 위한 농업용 저수지의 상당수가 농업용수 수질기준을 초과하고 있는 것으로 조사되었으며, 보령 담수호 유역도 전반적으로 농업용수 수질기준을 초과하는 등 농업유역에서의 수질환경은 개선이 필요한 것으로 조사되었다(최 등, 1996; 최 등, 2000).

농업유역에서 발생하는 수질오염의 원인과 현황을 정량적으로 규명하고 수질오염을 저감하기 위한 최적관리방안을 마련하기 위해서는 대상 유역에 대한 광범위한 수문 및 수질 모니터링이 필요하다. 최근 농업유역, 댐저수지 유역 등을 대상으로 시험유역의 운영을 통해 얻어진 수문 및 수질 모니터링 자료로부터 유역단위 오염부하량을 측정하고 그 특성을 분석하는 연구결과가 발표되고 있다(권 등, 2002; 최 등, 2002; 김 등, 2005; 최 등, 2005). 한편, 국내의 경우 환경부에서 제시한 오염발생원단위를 적용하여 오염부하량을 산정하는 방법이 일반적으로 활용하고 있으나, 이 방법은 원단위 값이 연간 일정하다는 가정 하에 오염부하량을 산정하기 때문에 시기별 오염부하량 변화를 파악하기에는 어려운 단점이 있다(양 등, 2001).

따라서, 본 연구에서는 농가를 제외한 점원오염이 거의 없는 농업용 저수지 상류유역을 대상으로 기상, 수문 및 수질 모니터링을 통해 비점원오염 유출부하량을 산정하고, 그 결과를 원단위 추정치와 비교하여 원단위를 이용한 오염부하 추정의 적정성을 고찰하여, 오염총량제 도입에 따른 농촌유역의 비점원오염물질 유출특성조사에 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험유역의 개요

농업유역의 기상, 수문, 수질 모니터링을 위한 시험유역은 금강수계의 중류부에 위치한 정안천 유역내 고성저수지 상류유역을 선정하였다. 시험유역은 행정구역이 공주시 정안면 고성리이며, 유역내에는 안숙골천이 흐르고 있고 유역

의 말단부에는 고성저수지가 위치하고 있다. 시험유역에서 2005년부터 수문 및 수질 모니터링을 실시해오고 있으며, 유역경계와 수문, 수질계측망은 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 시험유역은 소유역별로 다양한 토지이용형태를 보이고 있으며, 경지정리지구 및 개발보전지를 포함하고 있는 특징을 보이고 있다. 본 시험유역은 세 개의 소유역(SWT, Sub-Watershed Terminal)으로 구분할 수 있는데, 농촌마을 유출 특성을 보이는 SWT A유역, 배경유역으로 산림유역의 특성을 가지고 있는 SWT B유역, 그리고 마지막으로 유역 말단 부분으로 고성저수지 상류유역 전체 배출부하량을 알아보기 위한 SWT C유역으로 구분할 수 있다(Fig. 1).

2.2. 유역특성인자

2.2.1. 수문학적 특성인자

유역의 수문학적 특성인자를 조사하기 위해 1/5,000, 1/25,000 NGIS 수치지도와 국립지리원의 1:25,000 지형도를 바탕으로 현장 방문을 통해 수문학적 특성인자를 분석하였다. 시험유역의 강우-유출 특성 분석과 오염원의 정량적 해석을 위한 기초자료로 각 소유역별로 유역면적, 형상계수, 유로장, 최대기복량, 기복량비, 평균하천경사 등의 수문학적 특성인자를 조사하였다. 수문, 수질 특성에 영향을 주는 유역경계 및 지상인자는 1/5,000 NGIS 수치지도와 AutoCAD와 ArcView 3.3을 이용하여 추출하였으며, 1/25,000 지형도와 현장답사를 통해 보완하였다. 유역지상인자 및 하천 특성은 각 소유역별로 유역면적, 형상계수, 유로장, 최대기복량, 기복량비, 그리고 평균하천경사 등을 구하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

유역 형상계수는 SWT B유역이 2.095로 가장 크고, SWT C 유역이 0.814로 가장 작았으며, SWT A유역의 경우는 1.988로 조사되었는데, SWT A유역과 B유역의 경우 형상계수가 1.0 이상의 값을 나타내고 있어, 유역의 폭이 길이보다 큰 형상을 보이고 있다. 유역의 최대 기복량은 SWT A유역의 경우 425 m이며, SWT B유역 322 m로 가장 낮은 값을 나타내었으며, SWT C유역은 440 m로 가장 큰 값을 보였는데, 이것으로 보아 본 고성저수지 상류유역은 경

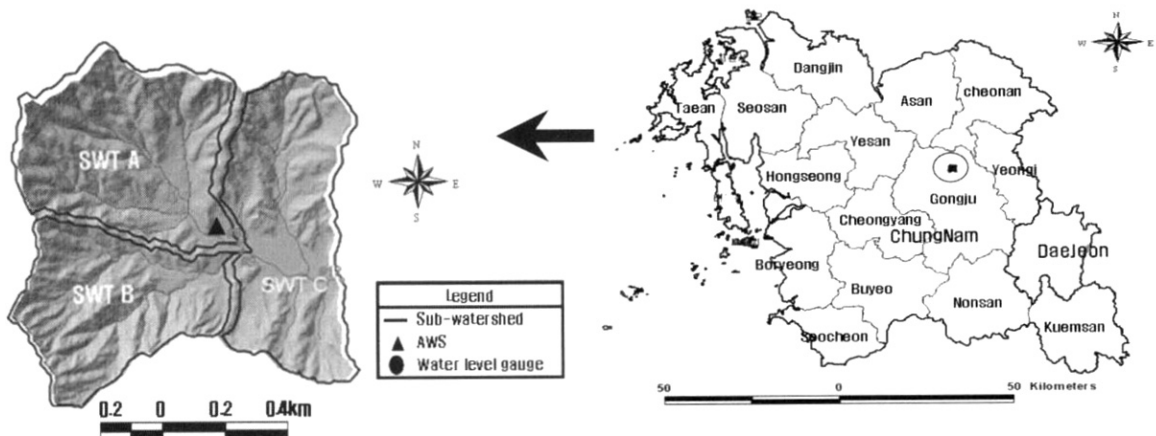


Fig. 1. Monitoring sites of study watershed.

Table 1. Hydrologic characteristics of study watershed

Sub-watershed	Area (ha)	Shape factor	Stream length (km)	Maximum relief (m)	Relief ratio	Average stream slope (m/m)
SWT A	188.8	1.988	1.19	425	0.3571	0.194
SWT B	145.4	2.095	0.97	322	0.3320	0.141
SWT C	514.1	0.814	2.46	440	0.1789	0.102

사가 심한 것을 알 수 있다.

2.2.2. 토양특성 및 토지이용

유역의 토양특성은 농업과학기술원의 1/25,000 정밀토양도를 이용하여 소유역별로 토양을 분류하였으며, 그 배수특성의 속성에 따라 수문학적 토양군으로 분류하였다. 소유역별 토양군은 Table 2에 나타낸 바와 같이 SWT A 유역의 경우는 A군이 32.1%이며, B와 C군이 각각 35.7%, 32.2%로 수문학적 토양군이 고루 분포한 반면, SWT B유역의 경우는 전체의 90.3%가 B군에 속하는 것으로 조사되었다. SWT C유역의 경우 A군이 1.3%이며, B와 C군이 각각 81.9%, 16.9%로 대부분 B군의 비중이 높았다.

시험유역의 토지이용현황은 국립지리원의 1:25,000 지형도 및 토지이용도를 바탕으로 현장 방문을 통해 토지이용현황을 조사하였다. SWT A유역의 경우 농경지가 12.3%, 산림 78.8%, 주거지역이 2.3%로 구성되어 있으며, SWT B 유역의 경우는 다른 토지이용에 비해 산림이 전체유역의 85.8%를 차지하고 있어 산림유역의 특성을 잘 반영할 것으로 판단되며, SWT C유역은 고성저수지 전체유역으로 농경지 16.3%, 산림 73.3%, 주거지 2.4%로 구성되어 있다(Table 2).

2.2.3. 인구 및 가축사육현황

유역에서의 오염원인을 분석하고, 원단위 오염부하량을 추정하기 위해 소유역별 인구 및 가축사육현황을 조사하였다. 인구 및 가축사육현황은 군별 통계자료, 그리고 읍·면 담당자를 통한 면담 등에 기초하여 현장방문을 통해 조사하였는데 그 결과는 Table 3과 같다. 대상 유역의 총 인구는 186명이며, 전체 가구 수는 79가구로 그 중 농업에 종사하는 농가 수는 36농가 153명으로 조사되었다. 가축사육두수는 돼지 4,827두, 한우 19두, 가금 166수, 사슴 19마리 등을 사육하고 있다(Table 3).

2.3. 수문 및 수질 모니터링

시험유역의 기상자료는 유역 중간에 위치한 마을회관 옥상에 영국 CASELLA CEL사의 Automatic Weather System 2000(AWS 2000)을 설치하여 대기온도, 상대습도, 풍속, 풍향, 태양 복사열, 기압 등을 5분 간격으로 측정하였고, 강수량은 CASELLA CEL사의 벤키팅 방식을 이용하여 AWS에 연결하여 5분 간격으로 데이터를 수집하였으며, 그 외의 기상자료는 대전지방기상청의 측정자료를 이용하였다. 수위관측은 시험유역의 주요 수위계측점에 Orphimedes와 Thalimedes 수위데이터 로거(logger)를 설치하여 5분 간격으로 연속 수위자료를 측정하였고, 수위-유량관계 분석을 위한 유속측정은 미국 SonTek Corp.의 도플러방식 유속계인 FlowTracker를 사용하여 현장조사를 실시하였으며, 강우시에는 독일 OTT Corp.의 대용량 유속계인 프로펠라형 C31을 사용하여 고수위일 때의 유속을 측정하였다.

수질시료채취는 각 소유역 말단을 대상으로 2005년 5월~2006년 10월까지 2개년 동안 실시하였다. 정기조사는 비강우시 2주 간격으로 수질분석 시료를 채취하였으며, 강우시에는 강우사상별 1시간 간격으로 일주기 수질시료를 채취하였다. 시료분석은 수질오염공정시험방법(환경부, 2002)에 준하여 BOD, COD, T-N, T-P, SS 등의 항목을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수문 모니터링 결과

3.1.1 강수량

연구기간인 2005년부터 2006년까지 2개년 동안 시험유역에 내린 강수량을 조사한 결과, 2005년 총 강수량은 1,620.3 mm로 대전지방기상청 30년 평균치인 1,353.8 mm보다 많은 편이었으며, 6월부터 9월까지 강수량은 1,346.8

Table 2. Land use and hydrological soil conditions of study watershed

Sub-watershed	Hydrological soil condition (%)				Land use (%)				
	A	B	C	D	Paddy	Upland	Forest	Residential	Other
SWT A	32.1	35.7	32.2	0.0	6.7	5.6	78.8	2.3	6.6
SWT B	0.8	90.3	8.9	0.0	5.6	0.9	85.8	2.1	5.6
SWT C	1.3	81.9	16.9	0.0	11.8	4.5	73.3	2.4	8.0

Table 3. Status of population and livestock

Sub-watershed	Population (persons)	Livestock (head)				
		Korean cattle	Pig	Deer	Poultry	Goat
SWT A	102	12	0	19	100	2
SWT B	15	0	4,827	0	0	0
SWT C	186	19	4,827	19	166	2

Source : Statistical yearbook of Jeongan (2006)

mm로 연간 총 강수량의 83.1%를 차지하고 있다. 강수일수는 약 133일 정도로 상당히 많은 편이지만 이중 10 mm 이하 강수일수는 93일로 강우일수 전체의 69.9%를 차지하고 있다. 100 mm 이상의 강우량은 7월 11일 131.2 mm, 9월 21일 146.6 mm 2일뿐이다. 2006년의 경우 10월 31일까지의 총강수량은 960.0 mm로 30년 평균치 1,272.0 mm의 75.5%로 상당히 적은 편이었으며, 연구기간동안인 4월 27일부터 10월 31일까지 강수량은 790.0 mm로 년간 총 강수량의 82.3%를 차지하고 있다. 강수일수는 약 70일 정도로 2005년의 약 1/2정도이며, 이중 10 mm 이하 강수일수는 45일로 강우일수 전체의 63.8%로 2005년의 경우와 비슷한 경향을 보였으며, 100 mm 이상의 강우량은 7월 16일 138.0 mm 1일뿐이다. 월별 강수량을 대전지방기상청의 평년값과 비교하여 보면, 2005년의 경우 1월부터 5월까지의 평년값에 비해 상당히 낮은 강수량 값을 보여 봄 가뭄의 영향을 받았으며, 2006년은 평년값과 비슷한 강수량을 보였으며 4월의 경우는 평년값의 1.2배 정도의 강수량을 나타내었다. 우리나라의 집중강우시기인 6월부터 9월까지는 2005년의 경우 1,346.8 mm로 평년값 904.5 mm의 1.5배에 달하는 높은 값을 나타내었는데 8월을 제외하고는 평년값보다 많은 강수량을 보였으며, 특히 9월의 경우 평년값의 3.3배에 달하는 많은 강수량을 기록하였다. 그러나 2006년의 경우는 675.0 mm로 평년값의 3/4정도의 강수량을 보였으며, 이는 8월의 경우 평년값의 1/4, 9월의 경우 평년값의 1/10정도의 강수에 기인한 것으로 사료되며, 7월의 경우는 464.0 mm로 평년값의 1.6배로 상당히 많은 강수량을 기록하였다(Fig. 2).

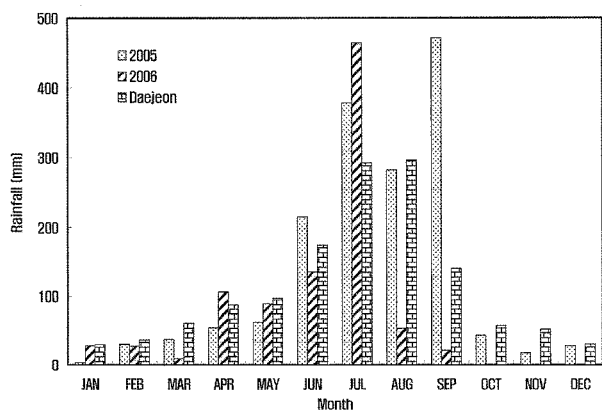


Fig. 2. Monthly rainfall of the study area.

3.1.2. 유출량

각 소유역별 유출량은 SWT A유역과 SWT B유역의 경우는 연구기간 동안 수위계 데이터 로거의 파손에 의해 2005년 5월 25일~10월 31일까지의 자료와 2006년 4월 27일~2006년 10월 31일까지의 자료를 정리하였으며, SWT C 유역의 경우는 연구기간 전체 자료를 정리하였다. 2005년 유출량의 경우 SWT A유역의 유역면적은 188.8 ha로 총 유출량은 1,662.2천 m³, 유출고는 882.5 mm이며, 유출율은 63.5%이다. 산림유역인 SWT B유역의 유역면적은 145.4 ha로 총 유출량은 1,279.6천 m³이었으며 유출고는 880.1 mm, 유출율은 63.3%로 SWT A유역과 비교하여 유출율이 별 차이가 없는 것으로 조사되었다. 유역 말단부분인 SWT C유역의 유역면적은 514.1 ha로 총 유출량은 4,972.7천 m³이었으며 유출고는 968.0 mm이고, 연구기간동안의 강수량 1,434.8 mm에 대해 유출율은 67.5%로 조사되었다. 2006년의 경우 SWT A유역의 총 유출량은 661.4천 m³, 유출고는 350.3 mm이며, 이는 연구기간 강수량 790.0 mm에 대해 유출율이 44.3%이다. 산림유역인 SWT B유역의 총 유출량은 603.6천 m³으로 유출고는 415.1 mm, 유출율은 52.6%로 SWT A유역과 비교하면 산림유역의 유출율이 더 높은 것으로 조사되었는데, 이는 산림유역에서 발생하는 기저유출량의 영향으로 사료된다. 유역 말단부분인 SWT C유역은 총 유출량이 1,966.7천 m³으로 유출고는 382.7 mm이고, 유출율은 48.6%로 나타났으며, 2006년의 경우 2005년에 비해 상당히 낮은 유출율을 보이고 있는데, 이는 7월 20일~10월 31일까지의 강우량이 100.0 mm로 2005년 강수량 796.2 mm의 1/8수준으로, 강우 특성이 유출량과도 밀접한 경향이 있었음을 알 수 있었다(Table 4).

본 연구에서 2005년 각 소유역별 유출율은 63.3~67.5%, 2006년의 경우 44.3~52.6%로 나타났는데 최(2004)의 연구에 의하면 유출율이 58.2~73.6%로 본 연구지역이 다소 낮게 나타나는 경향을 보였다. 김 등(2003)이 말안저수지 유역을 대상으로 1996~2000년까지 수문조사를 실시한 결과 유역형상 및 년도에 따라 상이한 결과를 제시한 바 있으며, 우리나라 주요 하천의 평균 유출율인 55.0%보다 본 시험유역의 경우 2005년은 약간 큰 유출경향을 보였으나, 2006년의 경우는 낮은 유출경향을 보였다. 본 연구결과와 같이 농촌유역에서의 모니터링 결과 년도별로 유출율의 차이를 보였는데 이는 년도별 강수량의 차이가 심해 유출율의 변화 폭이 상대적으로 큰 것으로 판단되는데, 앞으로 농촌유역의 비점원오염물질 유출특성 연구에 있어 5~10년간의

Table 4. Runoff for sub-watersheds

Sub-watershed	Year	Area (ha)	Discharge		Rainfall (mm)	Runoff ratio (%)
			(10 ³ m ³)	mm		
SWT A	2005	188.8	1,662.2	882.5	1,389.6	63.5
	2006		661.4	350.3	790.0	44.3
SWT B	2005	145.4	1,279.6	880.1	1,389.6	63.3
	2006		603.6	415.1	790.0	52.6
SWT C	2005	514.0	4,972.7	968.0	1,434.8	67.5
	2006		1,966.7	382.6	790.0	48.6

장기적인 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

3.2. 수질 모니터링 결과

비강우(정기조사)시 소유역별 수질의 평균농도는 SWT A 유역의 경우 BOD 1.15 mg/L, COD 2.4 mg/L, T-N 3.0 mg/L, T-P 0.047 mg/L, SS는 5.0 mg/L로 조사되었으며, SWT B유역의 경우는 BOD 1.0 mg/L, COD 2.1 mg/L, T-N 3.4 mg/L, T-P 0.048 mg/L, SS 5.0 mg/L이며, SWT C유역의 경우는 BOD 1.0 mg/L, COD 2.1 mg/L, T-N 2.6 mg/L, T-P 0.044 mg/L, SS 6.1 mg/L로 SS를 제외하고는 정기조사시 전체적으로 SWT C유역의 평균농도가 낮은 것으로 조사되었다. 이는 상대적으로 농도가 높은 마을배수지역인 SWT A유역과 농도가 비교적 낮은 산림유역인 SWT B유역이 합류되어 혼합에 의해 농도가 낮아질 뿐만 아니라 하류로 갈수록 보의 자유낙하에 의한 폭기 및 갈대 등 수생식물에 의한 정화작용이 활발히 이루어져 다른 소유역에 비해 상대적으로 농도가 낮은 것으로 사료된다.

강우기조사시 소유역별 평균농도는 SWT A유역의 경우 BOD 2.9 mg/L로 정기조사보다 약 3배정도 더 큰 값을 보였으며, T-N 농도는 3.7 mg/L로 다소 높은 값을 나타내었다. T-P 농도는 0.159 mg/L로 정기조사보다 약 3배정도 더 큰 값을 나타내었다. 부유물질인 SS의 농도는 126.4 mg/L로 정기조사보다 약 60배정도 더 큰 값을 나타내었다. SWT B유역은 BOD 2.1 mg/L, T-N 3.6 mg/L, T-P 0.135 mg/L, SS 36.4 mg/L로 정기조사와 비교하면 T-N과 SS를 제외하고는 2~3배정도 높은 값을 나타내었다. SWT C유역은 BOD 2.3 mg/L, COD 6.0 mg/L, T-N 3.2 mg/L, T-P 0.130 mg/L, SS 47.0 mg/L로 영양물질인 T-N, T-P의 경우 SWT A유역과 SWT B유역에 비해 낮은 값을 나타내었으며, 정기조사와 비교하면 T-N과 SS를 제외하고는 2~3배정도 높은 값을 나타내었다(Table 5).

정 등(2006)이 자안천 및 어은천 유역을 대상으로 수질분석을 실시한 결과 BOD의 범위가 자안천 0.7~21.6 mg/L, 어은천 0.2~65.7 mg/L로 조사하였으며, 권 등(2002)은 대청호 상류유역을 대상으로 실시한 결과 0.5~2.5 mg/L, 이 등(2004)의 조사에 따르면 BOD 평균 농도가 만경강 5.4 mg/L, 동진강 2.8 mg/L, 익산천 하류의 경우 13.6 mg/L로 조사하였다. COD의 경우 권 등(2002)은 대청호 상류유역에 대해 1.5~4.5 mg/L의 범위를 보인다고 하였으며, 정 등(2006)은 자안천 3.0~65.6 mg/L, 어은천 2.3~96.1 mg/L로 본 연구 결과보다는 다소 높은 값을 보이고 있다. 김(2000)은 임고천 유역을 대상으로 실시한 결과 0.5~8.0 mg/L, 유 등(2000)의 조사에서는 유량이 상승하면 COD 농

도도 상승하는 것으로 나타났는데 본 연구에서도 유량이 많은 2005년이 2006년보다 각 소유역에서 COD 농도가 높게 나타났으며, 평야지 유역의 경우 CDT C 유역이 다른 소유역에 비해 높은 값을 보이고 있다. 최 등(2002)이 추령천 유역을 대상으로 조사한 결과 T-N 농도가 0.89~5.19 mg/L의 범위로 평균 2.92 mg/L로 조사하였고, 최(2002)가 양화천 유역에서 2.50~3.40 mg/L의 범위를 보인다고 하였다. 최(2004)가 도통천 소유역을 대상으로 조사한 결과 T-N 농도가 0.96~3.78 mg/L로 평균 1.71 mg/L을 나타낸다고 하였는데 본 연구 결과보다는 다소 낮은 값을 나타내었고, 김(2000)이 농업지대 소하천을 대상으로 연구한 결과 T-N 함량이 0.56~97.25 mg/L로 본 연구보다는 다소 높은 값을 나타내었다.

최 등(2002)은 추령천 유역을 대상으로 T-P 농도를 조사한 결과 0.0004~0.031 mg/L의 범위로 평균 0.0078 mg/L로 나타난다고 하였고, 최(2004)는 도통천 소유역에서 총인의 함량변화가 불검출~0.110 mg/L의 범위로 평균 0.0247 mg/L를 나타내었다고 하였으며, 전체 조사기간 동안에 0.12 mg/L 이하를 유지한다고 하였는데, 본 조사결과와는 상당한 범위의 차이를 보이고 있었으며, 최(2002)는 양화천 유역의 T-P 평균농도가 0.05~0.2 mg/L의 범위가 보인다고 하였는데, 본 조사결과와 같은 경향을 보이고 있다. 최(2002)는 양화천 유역의 SS 평균농도가 5.18~9.40 mg/L로 본 연구결과인 34.84~120.09 mg/L에 비해 상당히 낮은 농도를 나타내었다.

3.3. 유출부하량

3.3.1. 소유역별 유출부하량

각 소유역별 유출부하량은 2005년의 경우 연구기간인 5월 25일~10월 31일(160일)까지의 유출부하량으로 SWT A 유역은 BOD 20.8 kg/day, T-N 32.2 kg/day, T-P 1.1 kg/day, SS는 578.9 kg/day이며, SWT B유역은 BOD 13.5 kg/day, T-N 23.8 kg/day, T-P 0.8 kg/day, SS 307.0 kg/day로 마을배수 유역(SWT A)이 산림유역(SWT B)보다는 높게 나타나는 경향을 보이고 있는데, 이는 SWT B유역이 산림유역으로서 유출량이 상대적으로 적고, 농도가 낮은 것에 기인한 것으로 사료된다. 유역전체인 SWT C유역의 유출부하량은 BOD 36.7 kg/day, T-N 72.3 kg/day, T-P 2.3 kg/day, SS 877.5 kg/day로 조사되었다. 2006년 연구기간인 4월 27일~10월 31일(189일)까지의 유출부하량은 SWT A 유역은 BOD 7.1 kg/day, T-N 10.0 kg/day, T-P 0.2 kg/day, SS 413.1 kg/day, SWT B유역은 BOD 5.1 kg/day, T-N 12.9 kg/day, T-P 0.4 kg/day, SS 29.3 kg/day로 마을배수유

Table 5. Seasonal average water quality by small watersheds

(Unit : mg/L)

Sub-watershed	Dry season						Rainy season					
	No. of samples	BOD	COD	T-N	T-P	SS	No. of samples	BOD	COD	T-N	T-P	SS
SWT A	25	1.2	2.4	3.0	0.047	5.0	255	2.9	7.3	3.7	0.159	126.4
SWT B	25	1.0	2.1	3.4	0.048	5.0	253	2.1	4.9	3.6	0.135	36.4
SWT C	25	1.0	2.1	2.6	0.044	6.0	414	2.2	6.0	3.1	0.130	47.0

역인 SWT A유역과 비교하면 SS는 상대적으로 매우 작은데 이는 산림전체에 밤재배를 하고 있어 토지피복에 의한 토사유출이 상대적으로 적은 것에 기인한 것으로 보이며, T-N과 T-P는 산림유역이 상대적으로 마을배수유역보다 높는데 이는 밤재배를 하기 위해 밤나무에 주는 시비의 영향으로 사료된다. 유역전체인 SWT C유역은 유출부하량은 BOD 63.9 kg/day, T-N 82.8 kg/day, T-P 1.1 kg/day, SS 486.8 kg/day로 조사되었다(Table 6).

2005년과 2006년의 유출부하량을 비교하여 보면, SWT A유역과 SWT B유역의 경우는 2006년에 유출량이 적어 상대적으로 2005년에 비해 낮았지만, SWT C유역의 경우는 유출량이 작은데도 불구하고 유출부하량이 크게 나타났는데, 이는 2005년에 비해 집중강우시 농도가 높고, 비강우시 논에서 배출되는 유출부하량이 강우와의 희석없이 하천으로 유입되어 하천수의 농도 증가에 의해 부하량이 높은 것으로 사료된다.

3.3.2. 평상시와 강우시 유출부하량

시험유역의 시기별 유출부하량을 산정하기 위해 평상시 및 강우기로 분리하였는데, 2005년 강우기를 장마시작일인 6월 25일~9월 30일, 2006년은 6월 28일~9월 30일로 선정하였으며, 그 외 기간을 평상시로 보고 유출부하량을 산정하였는데, 이는 각 년도별로 장마시작시기가 다르기 때문이다.

2005년의 경우 SWT A유역의 경우 수질항목별로 강우기 부하량이 전체 부하량의 88.5~95.8%로 대부분이 강우기에 유출되는 것으로 조사되었으며, SWT B유역의 경우는 81.7~97.4%로 SWT A유역에 비해 시기별 비율로 보면 SS를

제외하고 다른 수질항목에서는 낮은 유출 양상을 보였다. SWT C유역의 경우는 76.0~89.9%가 강우기에 유출되는 것으로 조사되었는데, SWT A유역, SWT B유역의 경우와 같이 연구기간을 10월 31일까지 하면 SWT C유역의 경우 역시 강우기 부하량이 전체 부하량의 91.1~97.1%로 타 소유역에 비해 높은 것으로 나타났다. 2006년의 경우 강우기 강수량이 566.0 mm로 2005년 1,243.2 mm에 비해 45.5% 정도 밖에 되지 않아 상대적으로 강우기에 낮은 유출부하량 양상을 보일거라 생각했지만 SWT A유역의 경우 강우기 유출비율이 88.6~99.5%로 상당히 높게 나타났다. SWT B유역의 경우는 강우기 유출비율이 60.2~80.6%로 SS 80.6%를 제외하고는 2005년에 비해 수질항목별로 상당히 낮은 값을 나타내었으며, SWT C유역의 경우는 62.3~71.1%가 강우기에 유출되는 것으로 조사되었다. 신 등(2005)이 북한강 유역인 강원도 춘천시 동면 월곡리 소하천 341 ha를 대상으로 오염부하특성을 연구한 결과, 7월 한달동안에 BOD, SS 및 T-N은 각각 연부하량의 48%, 17%, 51%가 배출되었으며, T-P의 경우는 32%가 배출된다고 하였으며, 오 등(2004)은 소옥천 유역을 대상으로 강우시 비점원오염 유출 특성을 연구한 결과, T-N의 63%, T-P의 87%가 강우시에 유입된다고 보고한 바 있다. 이와 같이 비점원오염 연구 특성상 강우량에 가장 큰 영향을 받으므로 비점원오염 유출의 신뢰성 있는 자료를 얻기 위해서는 장기간의 모니터링이 필요한 것으로 사료된다(Table 7).

3.3.3. 원단위를 이용한 오염부하량 추정

환경부에서 유역에서 배출되는 오염부하량을 인구, 가축,

Table 6. Pollutant loads for sub-watersheds

Sub-watershed	Year	Runoff (10 ³ m ³)	Loads (kg/day)				
			BOD	COD	T-N	T-P	SS
SWT A	2005	1,666.2	20.8	70.1	32.2	1.1	578.9
	2006	661.4	7.1	16.2	10.0	0.3	413.1
SWT B	2005	1,279.6	13.5	44.4	23.8	0.8	307.0
	2006	603.6	5.1	11.4	12.9	0.4	29.3
SWT C	2005	4,972.7	36.7	121.7	72.3	2.3	877.5
	2006	1,966.7	63.9	119.7	82.8	1.1	486.8

Table 7. Discharge loads between the dry and rainy seasons in the study area

Sub-watershed	Year	Dry season (10 ³ kg, (%))					Rainy season (10 ³ kg, (%))				
		BOD	COD	T-N	T-P	SS	BOD	COD	T-N	T-P	SS
SWT A	2005	60.3 (9.8)	0.8 (7.1)	0.6 (11.5)	0.02 (9.4)	3.9 (4.2)	3.0 (90.2)	10.4 (92.9)	4.6 (88.5)	0.17 (90.6)	28.7 (95.8)
	2006	0.2 (11.4)	0.2 (7.8)	0.2 (8.7)	0.00 (6.0)	0.7 (0.5)	1.2 (88.6)	2.8 (92.2)	1.7 (91.4)	0.04 (94.0)	148.4 (99.5)
SWT B	2005	0.3 (12.6)	0.6 (8.2)	0.7 (18.3)	0.02 (15.6)	1.3 (2.6)	1.9 (87.4)	6.5 (91.8)	3.1 (81.7)	0.10 (84.4)	47.9 (97.4)
	2006	0.3 (35.1)	0.7 (30.3)	1.0 (39.8)	0.02 (37.7)	1.1 (19.4)	0.6 (64.9)	1.5 (69.7)	1.5 (60.2)	0.04 (62.3)	4.5 (80.6)
SWT C	2005	1.2 (19.3)	3.5 (17.1)	3.0 (24.0)	0.07 (18.7)	14.4 (10.1)	5.0 (80.7)	16.8 (82.9)	9.5 (76.0)	0.31 (81.3)	128.2 (89.9)
	2006	4.6 (37.7)	7.1 (31.5)	4.8 (30.4)	0.06 (28.9)	27.5 (29.9)	7.5 (62.3)	15.5 (68.5)	10.9 (69.6)	0.2 (71.1)	64.5 (70.1)

토지이용 등에 따라 원단위를 적용하여 발표하였으며, Table 8은 인구, 토지이용 그리고 축산에 의한 원단위 발생 부하량을 보여주고 있다(국립환경연구원, 2002). 환경부에서 제시한 원단위 추정방법을 이용하여 시험유역에서의 오염부하량을 추정하고 모니터링을 통해 얻어진 실측 오염부하량과 비교한 결과 Fig. 3과 같은 결과를 보였다. Fig. 3에서 보면 T-N의 경우 각 소유역별로 2006년 SWT A유역을 제외하고는 2005년과 2006년 모두 실측치에 비해 원단위로 계산한 값이 작게 나타났는데, 이는 저수지 상류유역으로 축산에 의한 오염물질이 전량 수거되어 유역외로 방출되어 발생원단위에서 제외하였으며, 본 시험유역은 임야에 밤나무를 많이 재배하고 있어 다른 유역에 비해 임야에서 유출되는 유출부하량이 크게 작용하여 원단위로 계산한 값보다 실측치에 의한 유출부하량이 큰 것으로 사료된다. T-P의 경우 각 소유역별로 2005년 SWT B유역을 제외하고는 2005년과 2006년 모두 실측치에 비해 원단위로 계산한 값이 크게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 농업용 저수지 상류유역의 비점원오염물질 유출부하량을 산정하기 위해 충남 공주시 정안면 고성저수지 상류유역을 대상으로 2005~2006년까지 수문·수질 모니터링을 실시하였으며, 이를 이용해 연도별, 소유역별 수문·수질 특성을 분석하였다. 또한, 환경부에서 제시한 원단위 오염부하량 추정방법을 이용하여 추정한 결과와 실측 오염부하량을 비교, 분석하였다.

본 연구기간 동안 시험유역에 내린 강우패턴은 확연히 다르게 나타났는데, 2005년의 경우는 9월의 경우가 평년에 비해 많은 강우가 내린 반면에 2006년의 경우는 7월의 경우가 평년에 비해 많은 강우가 내렸다. 그리고 8월과 9월의 경우는 평년의 약 1/10정도의 강우가 내려 연도별 비교는 어려움이 있었다. 각 소유역별 유출율은 2005년의 경우 63.3~67.5%, 2006년의 경우 44.3~52.6%로 우리나라 주요 하천의 평균 유출율인 55.0%보다는 2005년 경우는 약간 큰 유출경향을 보였으나, 2006년의 경우는 다소 낮은 유출경향을 보였다. 농업용 저수지 상류유역의 농도분석결과 전체적으로 마을배수 지역인 SWT A유역의 농도가 타 소유역에 비해 높았으며, T-N의 경우 저수지 상류유역이나 농업활동이 이루어지고 있어 농업용수 수질기준(1.0 mg/L)을 초과하고 있어, 저수지의 부영양화의 우려가 있다. 2005년과 2006년의 유출부하량을 비교하여 보면, SWT A유역과 SWT B유역의 경우는 2006년에 유출량이 적어 상대적으로 2005년에 비해 낮았지만, SWT C유역의 경우는 유출량이 작은데도 불구하고 유출부하량이 크게 나타났다. 각 소유역에 대한 강우기 부하량은 수질항목별로 SWT A유역의 경우 88.5~95.8%, SWT B유역의 경우는 81.7~97.4%, SWT C유역의 경우는 76.0~89.9%가 강우기에 유출되는 것으로 조사되었다. 2006년의 경우는 강우기 강수량이 2005년에 비해 45.5% 정도 밖에 되지 않아 상대적으로 강우기에 낮은 유출부하량 양상을 보일거라 생각했지만 SWT A유역의 경우는 강우기 유출비율이 88.6~99.5%로 상당히 높게 나타났다. 그러나, SWT B유역은 60.2~80.6%로 SS를 제외하고는 2005년에 비해 수질항목별로 상당히 낮은

Table 8. Unit pollutant load for population, livestock and land use

Type	Item	Unit loading factor			Type	Item	Unit loading factor		
		BOD	T-N	T-P			BOD	T-N	T-P
Population (g/capita/day)	Urban	50.7	10.6	1.24	Livestock (g/capita/day)	Dairy cattle	556.0	161.8	56.7
	Rural	48.6	13.0	1.45		Korean cattle	528.0	116.8	36.1
Land use (kg/km ² · day)	Paddy	2.30	6.56	0.61		Horse	259.0	77.6	24.0
	Upland	1.59	9.44	0.24		Pig	109.0	27.7	12.2
	Forest	0.93	2.20	0.14		Sheep · deer	10.0	5.8	0.9
	Bare	85.9	13.69	2.10		Dog	18.0	8.4	1.6
	Other	0.96	0.759	0.027		Poultry	5.2	1.1	0.4

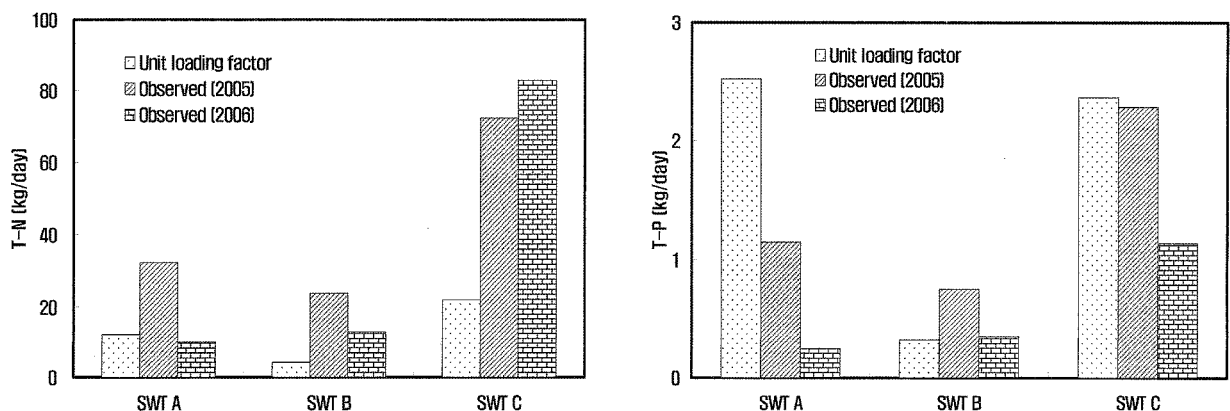


Fig. 3. Comparison between measured daily T-N, T-P load and estimated T-N, T-P load by the unit pollutant load.

값을 나타내었으며, SWT C유역의 경우는 62.3~71.1%가 강우기에 유출되는 것으로 조사되었다.

현장 실측을 통해 얻어진 소유역별 일평균부하량과 원단위를 적용해 계산된 값을 비교한 결과, T-N의 경우는 실측치가 크게 나타났지만, T-P의 경우는 원단위에 의해 계산된 값이 상대적으로 크게 나타났다. 이로 보아 유출부하량은 유출량 및 농도, 그리고 강우양상과 밀접한 관계가 있으므로, 비점원오염 연구에 있어 신뢰성 있는 자료를 얻기 위해서는 장기적인 계획을 세워 꾸준한 모니터링을 실시해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 국립환경연구원, 수계 오염총량관리 기술 지침 (2002).
- 권영호, 한선임, 이준배, 대청호 유역 오염부하량 산정, *상수도학회지*, **16**(5), pp. 581-595 (2002).
- 김민경, 농업지대 소하천에 대한 질소와 인의 부하량 평가와 농업비점오염 모형을 이용한 오염 예측, 영남대학교 박사학위논문 (2000).
- 김상민, 강문성, 박승우, 수질 모니터링과 원단위법을 이용한 농업소유역의 오염부하량 추정, *한국농공학회지*, **45**(3), pp. 94-102 (2003).
- 김진호, 이종식, 류종수, 이경도, 정구복, 김원일, 이정택, 권순국, 영농기 농촌 소유역의 비점오염물질 유출 특성, *한국환경농학회지*, **24**(2), pp. 77-82 (2005).
- 신용철, 최중대, 임경재, 심혁호, 류창원, 양재의, 유정열, 북한강 중류 산간농업 소하천에서의 오염부하특성분석, *한국농공학회지*, **47**(6), pp. 83-92 (2005).
- 양홍모, 김혁, 발생부하원단위와 수치표고모형을 이용한 하천유역 오염부하량 산정, *한국조경학회지*, **29**(1), pp. 22-31 (2001).
- 임명철, 이광야, 권순국, 만경강 유역의 오염부하 유출특성에 관한 연구, *2003년도 한국농공학회 학술발표논문집*, pp. 607-610 (2003).
- 오영택, 박계철, 김동섭, 류재근, 강우시 소옥천에서의 비점오염원 유출 특성, *수질보전*, **20**(6), pp. 657-663 (2004).
- 유명진, 홍대백, 조용균, 권은미, 구윤희, 새만금 유역의 강우시 오염물질 유출특성, *대한환경공학회지*, **22**(9), pp. 1609-1616 (2000).
- 이종식, 정구복, 김진호, 윤순강, 김원일, 신중도, 만경강 및 동진강 수계의 BOD에 의한 수질 평가, *한국환경농학회지*, **23**(2), pp. 81-84 (2004).
- 정광욱, 윤준경, 장재호, 김형철, 유역의 토지이용과 오염원 현황이 수질특성에 미치는 영향 분석, *한국육수학회지*, **39**(1), pp. 41-51 (2006).
- 최명수, 팔당호유역 소하천 비점오염부하량 산정에 관한 연구, 전남대학교 석사학위논문 (2002).
- 최옥현, 도통천 소유역의 수질 및 오염부하, 전북대학교 석사학위논문 (2004).
- 최진규, 손재권, 구자용, 전북도내 농업용저수지의 수질조사 연구, *한국농공학회지*, **38**(2), pp. 65-74 (1996).
- 최진규, 손재권, 구자용, 윤광식, 김영주, 섬진강 수계 추평천 유역의 총질소 및 총인의 유출부하 특성, *한국관계배수*, **9**(2), pp. 43-50 (2002).
- 최진규, 한강완, 구자용, 손재권, 조재영, 김영주, 보령 담수호 유역의 하천토사 및 수질특성, *한국농공학회지*, **42**(2), pp. 84-93 (2000).
- 최한규, 박수진, 김진수, 소양호 상류유역의 비점오염원 유출특성에 의한 원단위 산정, *산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집)*, **25**(b), pp. 37-46 (2005).
- 환경부, 수질오염공정시험방법 (2002).
- Yoo, K. H. and Kang, M. S., Agricultural nonpoint source pollution and best management practices in the unites states, International symposium on management strategies for agricultural and rural nonpoint source pollution, NIAST, pp. 37-50 (2004).