

소양호 지류하천의 비점오염원 유출특성에 관한 연구

A Study on the Out Flow Characteristics of Non-Point Source Pollution in the Branch River of So-yang Lake

최 한 규* 최 창 호** 박 수 진***
Choi, Han-Kuy Choi, Chang-Ho Park, Soo-Jin

Abstract

This study selected Naerin Stream, Inbuk Stream and Buk Stream, branch rivers of Soyang Dam, also area of highland agriculture as test sites and measured flow and water quality, particularly eutrophication factors (BOD, COD, T-N, and T-P) in precipitation season and non precipitation season for a year, 2008. Based on the result, the study examined the change in water quality in relation to flow, and created flow discharged - pollution loads regression line by estimating pollution loads flowed from each branch river. And the study calculated annual pollution discharge loads for unit area and proposed regression equation on it by using regression analysis.

키워드 : 소양호 지류하천, 회귀분석, 오염부하량, 유출량

Keywords : *branch river of So-yang Lake, regression analysis, pollution loads, run off*

1. 서론

본 연구에서는 소양호 상류유역을 대상으로 유역의 형태가 대부분 농업경작지와 산림지역인 소양호로 유입되는 지류하천을 선정하여 강우사상 및 유출량에 따른 수질인자가 변화하는 양상을 파악하여 비점오염물질의 유출특성을 파악하였다. 또한 지류하천별 면적대비 오염부하량을 추정하였으며, 끝으로 면적대비 유출량에 따른 오염부하량의 회귀식을 개발하였다.

본 연구를 위하여 연구지점에 대하여 2008년 1년 동안 유량과 수질을 측정하였으며, 측정 시기는 연

중 초기에 비점오염물질이 유출되는 점을 고려하여 5월부터 조사를 실시하였다. 조사 시 유량과 수질측정을 병행하여 조사하여 유량 및 강우량에 따른 수질인자가 변화하는 양상을 고찰하였다. 또한, 각 유역으로부터 배출되는 오염부하량을 추정하여 연간 단위면적당 오염원의 유출부하량을 산정하여 제시 하였으며, 끝으로 회귀분석을 통하여 면적대비 유출량에 따른 오염 부하량의 회귀식을 개발하였다.

2. 대상유역선정 및 연구방법

2.1 대상유역 선정

정확한 오염원을 조사하기 위해서는 소단위의 토지이용도를 나누어 각 토지 이용별로 조사, 하천

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 산업대학원 토목공학과 공학석사

*** 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

탁도 발생을 명확히 규명하여 탁도의 발생 변화를 파악하여야 한다. 그러나 이 연구방법은 많은 조사시간, 인력, 예산이 필요하기 때문에 개연성이 떨어지는 단점이 있다.

비점오염 조사는 대유역의 하단에서 오염도와 유출량을 실측하는 방법과 소단위의 토지이용으로 나누어 각 토지이용별 유출량과 오염도를 모니터링 하는 두 가지 방법이 있다.

전자는 유역 하류의 한 지점에서 하천수의 수량과 수질을 조사하여 강우와 하천 오염부하량 간의 상관 관계식을 도출하는데 주로 사용되며, 후자는 토지이용별 발생원단위를 결정하는데 이용된다.

본 연구는 소양호 상류유역의 지류하천을 대상으로 유역의 형태가 대부분 산지를 이루고 있으며, 농업활동을 위하여 대량의 객토로 인한 강우시 다량의 비점오염원이 유출되는 내린천, 인북천, 북천 유역을 선정하여 본 연구를 수행하였다. 그림 1은 연구지점도를 나타내었다.

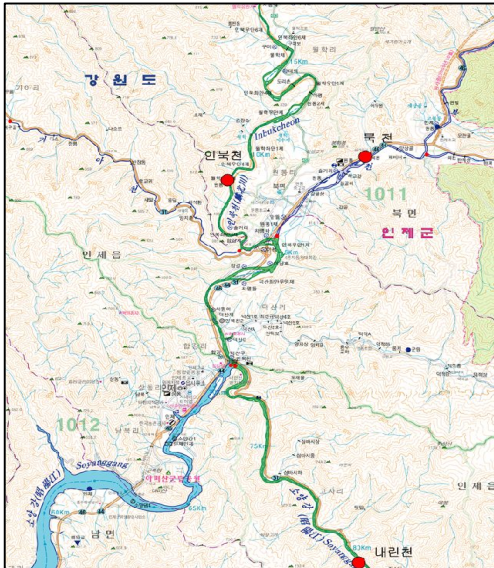


그림 1. 연구지점도

2.2 연구방법

1) 수질조사

비점오염원의 유출은 강우시 지표 유출수에 의해 영향을 크게 받으므로, 유출의 특성을 충분히 파악할 수 있도록 유출시간, 강우의 상태, 강우의 지속시간이 충분히 고려되어야 한다. 본 연구에서는 소양호 상류유역의 내린천 유역의 원대교 지점, 북천 유역의 어두원교 지점, 인북천의 도리촌교 지점을 선정하여 2008년 1개년 동안 지점 당 약 18회에 걸쳐 유량과 수질을 측정하였다. 조사 항목으로는 BOD, COD, SS, T-N, T-P, DO, pH

등 7개 항목에 대해서 수질을 측정하였다. 본 연구에서 조사한 수질항목 및 분석방법은 표 1에 나타내었다.

표 1. 수질분석 항목 및 분석방법

조사항목	분석방법
수온	수온온도계로 현장측정
DO	azide modification
BOD	20℃ 암실 5일간 배양 후 용존산소 농도차로 계산
T-N	전처리 persulfate digestion법/ 측정 cadmium reduction법
T-P	전처리 persulfate digestion법으로 전처리 하고 ascorbic acid 법으로 측정
SS	GF/F로 여과 후 105℃에서 건조하여, 건조하기 전·후 무게차로 계산
탁도 (NTU)	검수를 강하게 흔들어 섞고 공기방울이 없어질 때 까지 가만히 둔 후, 일정량을 취하여 측정할 셀에 넣고 보정된 탁도계를 이용하여 탁도측정

2) 유량측정

본 연구는 홍수시에는 전자과 표면유속계를 이용하여 유량측정을 실시하였으며, 평·갈수기 기간에는 일반적으로 사용하는 프로펠러식 유속계(MCM-2)를 사용하여 측정하였다. 유량계산은 평균단면법을 사용하여 유량을 계산하였으며, 유량계산 모식도는 그림 2에 나타내었다.

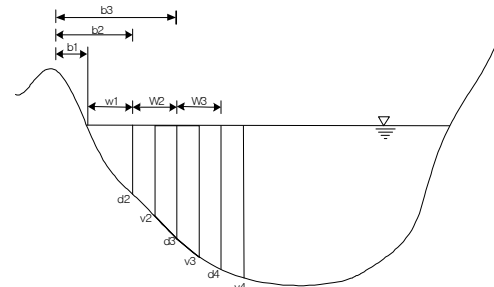


그림 2. 유량계산 모식도

3) 강우량 산정

비점오염원은 대부분 강우기간 동안 지표유출수와 함께 유출되기 때문에 그 유역의 강우량 및 강우특성에 상당한 밀접한 관계를 가지게 된다. 따라서 본 연구지점의 강우량을 산정하기 위하여 각 연구지점에 영향을 주는 우량관측소를 선정하여 연구기간 동안의 강우량을 산정하였다. 내린천 유

역의 경우 현리, 창촌, 인제, 군량, 상남, 귀둔, 방동의 관측소, 인북천의 경우 서화, 원통 관측소, 북천의 경우 원통, 백담사, 용대, 원통 관측소의 강우량 자료에 thissen 가중치를 적용하여 본 연구기간 동안의 강우량을 산정하였다.

표 2. 연구지점 유역의 강우량 관측소

유역명	소양강댐 전체유역	인북천 유역	내린천 유역	북천 유역	
유역면적(km ²)	2703	499.7	1075	-	
면적비(%)	100	18	40	-	
T H I S S E N 가 중 비	서화	0.1804	0.89310	-	
	원통	0.05836	0.1069	-	
	현리	0.05043	-	0.12756	
	창촌	0.09498	-	0.24042	
	인제	0.07858	-	0.02558	
	용대	0.10561	-	-	
	군량	0.05436	-	0.08111	
	상남	0.12031	-	0.17889	
	귀둔	0.05873	-	0.14414	
	방동	0.07991	-	0.20230	
	추양	0.10561	-	-	
	신흥	0.04081	-	-	
	백담사	0.0483	-	-	0.454
	용대	0.07832	-	-	0.538
원통	0.0561	-	-	0.065	

4) 유량가중평균 농도 산정

평균 농도를 도입하는 방법 중 가장 간단한 방법은 산술 평균에 의한 평균 농도를 제시 할 수 있지만 이 방법은 측정시간이 일정한 경우나 오염물질의 농도가 크게 변화 하지 않을때 이용할 수 있는 방법이다. 강우시 비점오염 물질은 실시간 유출에 따라 농도가 급격히 변화가 이루어지고 일정한 시간 간격으로 수질 측정이 이루어지지 않아 산술평균에 의한 농도를 제시하기에는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 강우시 비점오염원 유출수의 유출특성을 잘 나타내는 유량가중 평균 농도를 선정하여 제시하였다. 식 1은 유량가중 평균 농도 산정방법을 나타내었다.

FWMC (Flow-weighted mean concentration)

$$= \frac{\sum QiCi}{\sum Qi} \quad (1)$$

$\sum QiCi$: i번째 강우사상의 누적오염 부하량

$\sum Qi$: i 번째 강우사상의 누적 유출량

5) 연간오염유출 부하량 산정

본 연구지점의 연간 유출 오염 부하량을 산정하기 위하여 연구지점의 직접 유출량비를 이용하여 산정하였다. 산정방법으로는 각 연구기간 동안의 부하량을 누적시킨 다음 조사기간의 유출량을 모두 합하여 연구기간 동안의 유출량을 산정한 뒤 여기에 연간 총 유출량을 나눈 비를 이용하여 산정하였다. 각 연구방법별 소개된 연간 오염 유출부하량을 산정방법은 표 3에 나타내었다.

표 3. 연간유출부하량 산정방법

환 산 방 법	계 산 식
• 직접강우횟수 적용법	$L = I_c$
• 유효우량비법	$L = I_a(P_a p_a)$
• 유출량비법	$L = I_m(Q_m q_m)$
• 유출량 - 가중농도법	$L = N(I_a(Q_a/q_a))$

범례) L : 연간 부하량

N : 연간 유출이 일어난 횟수

I_a : 출수당 평균부하량

P_a : 연평균 강우량

p_a : 조사기간 동안 강우량

Q_m : 연간 유출량

q_m : 조사기간 유출량

I_m : 실측기간에서의 유량가중평균 농도

Q_a : 모집단에서 일출수당 평균유출량

3. 분석 및 고찰

3.1 유량에 따른 수질농도 분석

1) 유출량과 수질농도 상관분석

유량에 따른 수질농도의 변화를 살펴보기 위하여 유량에 따른 수질농도의 상관분석을 하였으며, 분석결과 BOD의 경우 0.39~0.53, COD 0.35~0.54, SS 0.48~0.74, T-N 0.20~0.68, T-P 0.60~0.80의 상관계수를 나타내었다. 수질인자 중 SS와 T-P가 유량에 따른 수질농도가 가장 높은 설명력을 보이는 것을 알 수 있었으며, 다른 연구지점에 비해서 북천의 경우 SS가 48%로 낮은 비중을 보였다.

전체적으로 연구지점 모두 비강우시 기간에는 하

천수질등급 1~2등급의 양호한 상태의 수질을 보였으나, 강우시 기간에는 3급 이하의 수질등급을 보여 강우시 기간에 수질이 악화되는 것을 알 수 있었다. 특히 연구지점 모두 SS의 경우 강우시 기간에는 5등급 이하의 수질등급을 보여 강우시 기간에 다른 오염물질 인자에 비하여 부유물질이 크게 유출되는 것을 알 수 있다. 이는 연구지점 유역의 농업경작을 위한 대량의 객토로 인하여 강우유출수와 함께 토사가 유출되어 수질이 크게 악화되

는 것으로 사료된다. 아래 그림 3에서 보는 바와 같이 수질농도는 강우시에 높게 나타나는 것을 알 수 있으며, 특히 초기 강우시에 높게 나타났다. 또한 유출이 지속적으로 발생하면서 강우에 의한 초기 세척효과로 인하여 오염물질이 지속적으로 작게 유출되는 것을 알 수 있다. 오염물질은 대부분 홍수기 전과 홍수기 기간에 오염물질의 유출이 크게 발생하였으며, 홍수기 기간 이후에는 오염물질이 작게 유출되는 것을 확인하였다.

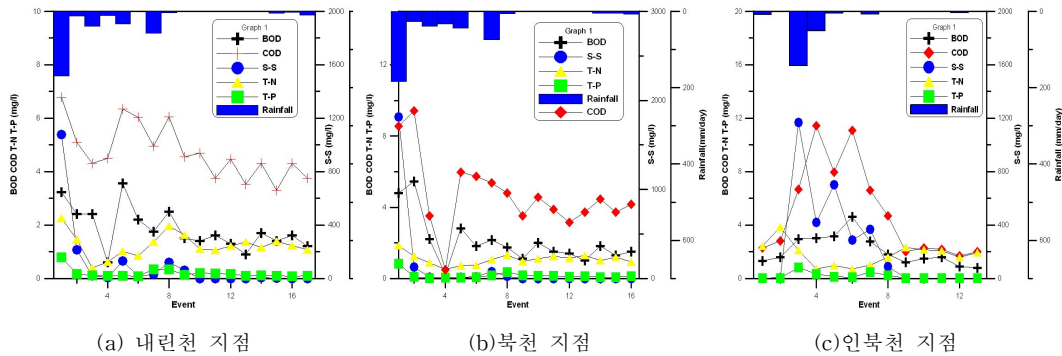


그림 3. 연구지점별 유량가중평균농도

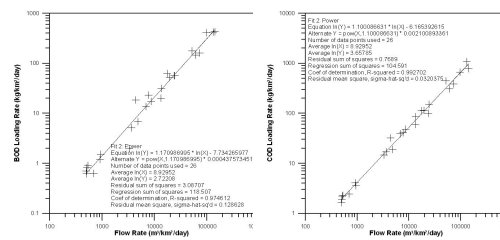
3.2 오염유출부하량 산정

강우시와 홍수기 기간의 오염물질의 유출발생이 상당히 크다는 것을 알고, 산정된 유량가중평균농도를 이용하여 조사기간 동안의 유출부하량을 산정하였으며, 산정방법은 유량가중평균농도에 유출량을 곱하여 산정하였다. 조사기간 동안의 가장 큰 오염 유출부하량을 살펴보면 내린천 지점의 경우 7월 24일 강우량 170mm가 발생하여 BOD 319.9 kg/day/km², COD 671.2kg/day/km², SS 106.694 kg/day/km², T-N 222.8kg/day/km², T-P 79.6 kg/day/km²가 유출되었으며, 북천 지점의 경우 7월 24일 강우량 184mm가 발생하여 BOD 686.3 kg/day/km², COD 1,222.6kg/day/km², SS 259,473 kg/day/km², T-N 262.1kg/day/km², T-P 118.6 kg/day/km²로 가장 크게 유출되었다. 인북천 지점은 강우량 142mm가 발생하여 BOD 176.1kg/day/km², COD 398.3kg/day/km², SS 69,694kg/day/km², T-N 125.6kg/day/km², T-P 48.7kg/day/km²가 유출되었다.

3.3 면적대비 유출량과 오염부하량 회귀식

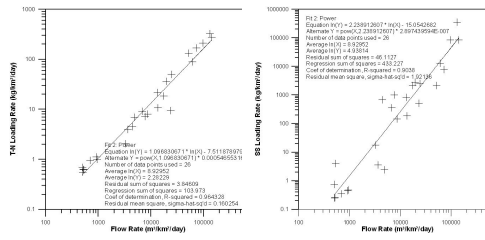
본 절에서는 연구지점별 면적대비 유출량에 따른 오염부하량의 회귀분석을 하였다. 아래 그림 4~4.6은 각 연구지점의 유출량과 오염부하량의 상관

도를 나타내었다. 회귀분석 결과, 연구지점의 회귀식 모두 결정계수가 0.85이상으로 회귀식이 유의한 것을 알 수 있었으며, SS 부하량의 회귀선 기울기 값이 2 이상으로 유출량에 대해 부하량이 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다. 아래 표 4는 면적대비 유출량에 따른 오염부하량의 회귀식을 나타내었다.

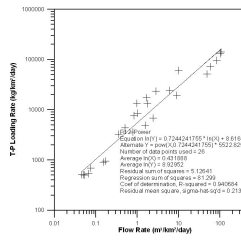


(a) BOD Loading

(b) COD Loading

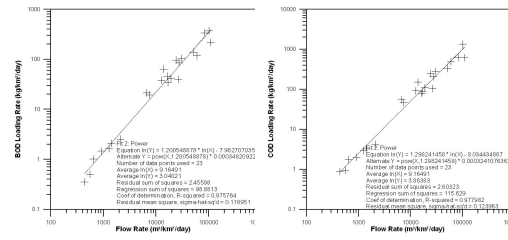


(c) SS Loading (d) T-N Loading

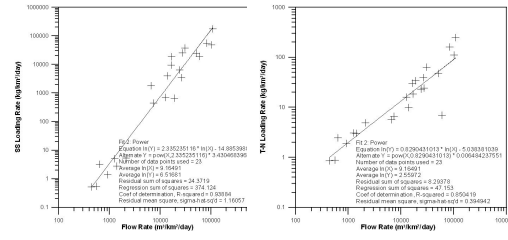


(e) T-P Loading

그림 4. 내린천 지점의 유출량과 오염부하량 상관도

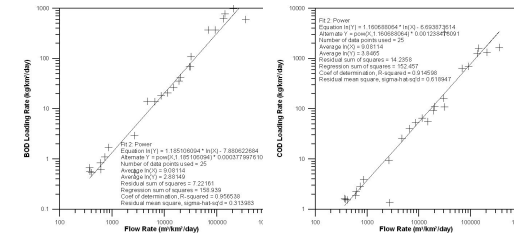


(a) BOD Loading (b) COD Loading

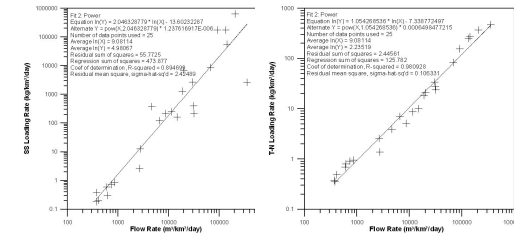


(c) SS Loading (d) T-N Loading

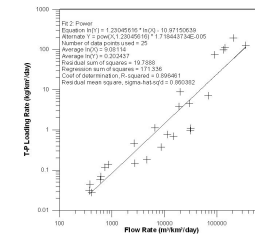
그림 5. 내린천 지점의 유출량과 오염부하량 상관도



(a) BOD Loading (b) COD Loading

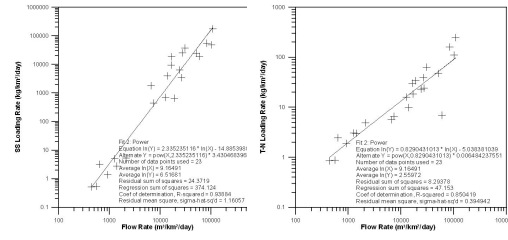


(c) SS Loading (d) T-N Loading



(e) T-P Loading

그림 5. 북천 지점의 유출량과 오염부하량 상관도



(c) SS Loading (d) T-N Loading

그림 6. 인북천 지점의 유출량과 오염부하량 상관도

표 4. 연간유출부하량 산정방법

연구 지점	수질항목	회귀식 (Regression Equation)	R ²
내 린 천	BOD Loading	$L = (4.376E-4) * Q^{1.171}$	0.97
	COD Loading	$L = (2.101E-3) * Q^{1.1001}$	0.99
	SS Loading	$L = (2.897E-7) * Q^{2.239}$	0.90
	T-N Loading	$L = (5.465E-4) * Q^{1.0968}$	0.96
	T-P Loading	$L = 5522.829 * Q^{0.7244}$	0.94

표 4. 계속

연구지점	수질항목	회귀식 (Regression Equation)	R ²
북천	BOD Loading	$L = (4.065E-4) * Q^{1.191}$	0.98
	COD Loading	$L = (1.662E-3) * Q^{1.1281}$	0.98
	SS Loading	$L = (4.826E-7) * Q^{2.157}$	0.94
	T-N Loading	$L = (8.0146E-4) * Q^{1.032}$	0.98
	T-P Loading	$L = (2.792E-5) * Q^{1.172}$	0.87
인북천	BOD Loading	$L = (3.482E-4) * Q^{1.201}$	0.97
	COD Loading	$L = (3.241E-4) * Q^{1.2982}$	0.98
	SS Loading	$L = (3.4304E-7) * Q^{2.335}$	0.94
	T-N Loading	$L = (6.4842E-3) * Q^{0.8290}$	0.85
	T-P Loading	$L = (1.867E-7) * Q^{1.717}$	0.95

3.4 연간오염 유출부하량 산정

1) 연구지점의 연간유출량 산정

본 절에서는 연구지점의 연간 유출부하량을 산정하기 위하여 연구지점의 연간 유출량을 산정하였다. 산정방법은 “한국수문조사연보(2006년, 건설교통부)” 보고서에서 제시된 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 연간 유출량을 산정하였다. 아래 표 5은 본 연구에서 이용된 연구지점의 수위-유량 관계곡선식을 나타내었으며, 연간 유출량은 그림 7~9에 그래프로 표시하였다.

표 5. 연구지점의 수위-유량 곡선식

지점명	수위-유량 관계곡선식	범위
내린천	$Q = 0.346H^{4.404}$	$1.970 \leq H \leq 4.820$
	$Q = 1.900H^{4.714}$	$4.820 \leq H \leq 8.670$
북천	$Q = 15.275H^{4.220}$	$0.590 \leq H \leq 1.941$
	$Q = 53.911(H - 0.074)^{2.468}$	$1.941 \leq H \leq 4.430$
인북천	$Q = 91.997(H - 0.300)^{2.000}$	$0.400 \leq H \leq 1.601$
	$Q = 89.211(H - 0.178)^{1.579}$	$1.601 \leq H \leq 5.530$

본 절에서는 2003년부터 2007년까지 5개년동안 연구대상지점 유역에 대하여 유수량 실측자료와 수리량 실측자료를 이용하여 직접방법에 의한 총유수량을 추정하였다.

추정방법은 실측된 부유사 농도에 유량을 곱하여 총유수량을 추정하였으며, 추정된 유수량은 아래 표 5에 나타내었다.

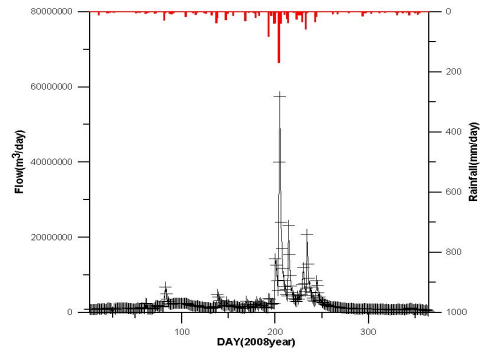


그림 7. 내린천 지점의 연간 강우-유출량

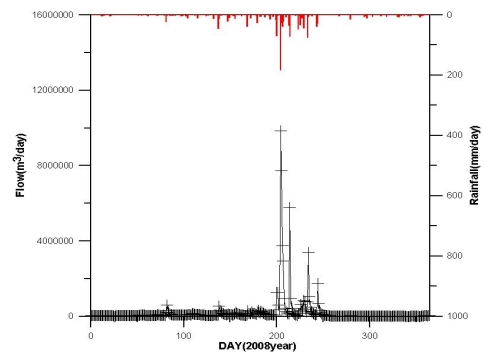


그림 8. 북천 지점의 연간 강우-유출량

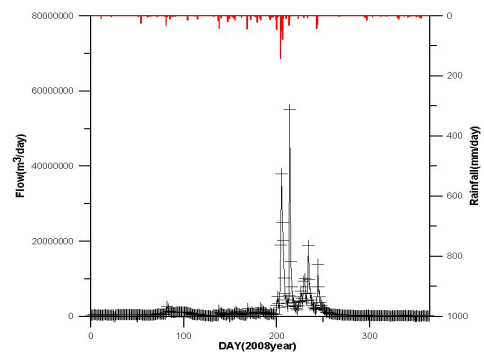


그림 9. 인북천 지점의 연간 강우-유출량

2) 연간 오염유출 부하량 산정

앞 절에서는 설명한 연간유출량비를 이용하여 연구지점의 유역면적대비 오염유출부하량을 산정하였으며, 산정 값은 아래 표 6에 나타내었다.

표 6. 연구지점의 면적대비 연간오염부하량 산정(kg/year/km²)

지점	BOD Loading	COD Loading	SS Loading	T-N Loading	T-P Loading
내린천	3,211	6,987	591,138	2,003	507
인북천	3,576	10,317	712,510	1,568	520
북천	4,141	10,421	732,459	1,771	532

4. 결론

본 연구는 유역의 형태가 산림 및 농경지로 형성되어 대량의 비점오염원이 유출되는 소양호 유역의 지류하천을 대상으로 2008년 1년간 유량과 수질을 조사하여 비점오염원의 유출특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 유량가중평균 농도를 이용하여 강우시와 비강우시의 수질농도를 비교한 결과, 연구지점 모두 비강우시 기간에는 1~2급수의 양호한 수질상태를 보이다가 강우시 기간에는 3급수 이하로 수질상태가 나빠지는 것을 확인하였으며, 특히 SS의 경우 강우시 기간에는 5급수 이하의 수질을 나타내었다. 따라서 상류유역의 비점오염물질 저감 시설에 대한 방안이 시급한 것을 알 수 있다.

2) 오염물질의 유출은 강우량에 지배적인 영향을 받으며 초기 강우시에 오염물질의 유출이 크게 발생하며, 유량이 증가하면서 강우에 의한 희석효과로 오염물질의 유출이 작게 지속적으로 일어났다. 기간별로는 홍수기 전과 홍수기 기간에 오염물질이 크게 유출되는 것을 확인하였다.

3) 유역면적대비 유출량에 따른 오염부하량의 상관분석결과 수질항목모두 85%이상의 높은 상관성을 보였으며, SS의 경우 회귀선의 기울기가 2 이상으로 유출량에 의해 부하량이 민감하게 반항하는 것을 확인하였다.

4) 연구지점별로 유역면적대비 유출량에 따른 오염부하량의 회귀분석을 통하여 수질항목별 오염부하량의 회귀식을 제안 할 수 있었다.

5) 각 연구지점별 연간 유역면적대비 유출부하량을 산정한 결과, 내린천 지점의 경우 BOD 3,211 kg/year/km², COD 6,987 kg/year/km², SS 591,138 kg/year/km², T-N 2,003 kg/year/km², T-P 507 kg/year/km²가 유출되었으며, 인북천 지점의 경우 BOD 3,576 kg/year/km², COD 10,317 kg/year/km², SS 712,510 kg/year/km², T-N 1,568 kg/year/km², T-P 520 kg/year/km²이 유출되었다. 북천지점은 BOD 4,141 kg/year/km², COD 10,421 kg/year/km², SS 732,459 kg/year/km², T-N 1,771 kg/year/km², T-P 532 kg/year/km²가 유출되었다.

참 고 문 헌

- [1] 최순규, “소양호 상류유역의 부유물질 유출특성에 의한 원단위 산정에 관한 연구”, 강원대학교 산업대학원, 2006. 8.
- [2] 김종욱, “자운천 유역의 강우특성에 의한 하천탁도 발생에 관한 연구”, 강원대학교 산업대학원, 2007. 8.
- [3] 2007년도 다목적댐 일원 수자원·환경 기초조사, 한국수자원공사, 2007. 7.
- [4] 박수진, “소양호 상류유역의 비점오염원 유출특성에 의한 원단위 산정”, 강원대학교 대학원, 2005. 8.
- [5] 최한규, 백경원, 오기호, 최용득, “유량변동에 따른 소양강 유역 수질의 통계학적 해석”, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제2-13호, pp. 117~124, 2001.
- [6] 안재환, 비점오염원 유출부하 기여율, 한국건설기술정보, 2001. 6.
- [7] 최지용, 비점오염원 제도적 관리방안 연구, 한국환경·정책평가 연구원, 1998.
- [8] 소양강댐 상류(내린천 유역)비점오염물질 유입특성 및 저감방안 연구(2차년도), 한국수자원공사, 2006.