소양호 유역의 유출특성에 의한 유달오염부하량 산정

Estimation of Delivery Pollution Load by the Runoff Characteristics of Soyang Lake Basin

박수진* · 백경원** · 강영복*** · 최한규****

Park, Soo Jin · Baek, Kyung Won · Kang, Young Bok · Choi, Han Kuy

Abstract

This study selected the upstream of Soyang Lake and investigated the flow and water quality during rainfall and non-rainfall periods in 2008 and 2009 and inquired into the changing conditions of concentration of water quality depending on runoff capacity. Water quality grades were compared, using FWMC and as a result, it was confirmed that the first and second grades during the non-rainfall period and the water condition aggravated below the third grade during the rainfall period. And as the flow gained due to a great increase in the discharge of contaminated substances during the early rainfall period, small amounts of contaminated substances occurred continuously. Also, this study suggested regression equation of pollution load depending on the flow in each drainage area through regression analysis and computed annual delivery pollution load in drainage areas, using annual rate of runoff capacity.

Key words : Flow weight mean concentration, Drainage area, Delivery pollution load

요 지

본 연구는 소양호 상류유역을 선정하여 2008년, 2009년 2년 동안 강우시와 비강우시 유량과 수질을 조사하여 유출량에 따른 수질농도가 변화하는 양상을 고찰하였다. 유량기중평균농도를 이용하여 수질등급을 비교한 결과, 비강우시 기간에 1~2등급의 수질등급을 보이다가 강우시 기간에는 3급수 이하로 수질상태가 악화되는 것을 확인하였으며, 초기 강우시에 오염물질의 유출이 크게 발생하며 유량이 증가하면서 강우에 의한 희석효과로 오염물질 배출이 작게 지속적으로 발생하였다. 또한 회귀분석을 통하여 배수구역별 유출량에 따른 오염부하량의 회귀식을 제안하였으며, 연간 유출량비를 이용하여 배수구역의 연간 유달오염부하량을 산정하였다.

핵심용어 : 유량기중평균농도, 배수구역, 유달오염부하량

1. 서 론

본 논문은 북한강 유역의 최대 다목적댐인 소양호를 대상으로 연구를 수행하였으며, 소양호의 수질은 상수원수 1, 2급 이내에 해당하는 양호한 수질등급을 보였다. 그러나 생활수준의 향상과 인구증가로 인한 생활하수의 증가 및 공장폐수, 강우시 비점오염물질의 유출로 인하여 수질오염문제가 우려되고 있다. 이에 수질관리 대책의 일환으로 유역별 수질관리 방식인 오염총량제를 도입하여 시행을 앞두고 있으나 현재 강우기간 동안의 배수구역별 실측 자료를 이용한 오염부하량 산정에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 소양호로 유입되는 지류하천의 유출량에 따른 수질인자가 변

화하는 양상을 고찰하여 오염물질의 유출특성을 파악하였다. 다음으로 배수구역별 유출량에 따른 유달오염부하량의 관계식을 작성하였으며, 배수구역별 유달부하량을 산정하였다. 끝으로 강우시 기간의 유달부하량을 산정하여 비점오염원에 의한 오염물질의 배출비율을 관찰하였다. 본 연구를 통하여 소양호의 효율적인 수질관리 및 오염총량관리를 위한 기초자료로 활용 될 수 있을 것이다.

2. 대상유역 선정 및 연구방법

2.1 대상유역 선정

본 연구는 소양호 유역의 지류하천을 대상으로 하였으며,

*정회원 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 연구원(E-mail : parksj@kangwon.ac.kr, 교신저자)

**정회원 · 한림성심대학 토목과 교수

***강원대학교 공과대학 토목공학과 박사과정수료

****정회원 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수

그림 1. 연구지점도

유역의 형태가 대부분 산지 및 농경지 형태를 이루고 있어 농업활동을 위한 대량의 객토로 인하여 강우시 대량의 비점 오염물질이 유출되는 특성을 가지고 있는 내린천, 인북천, 북천 유역을 선정하여 본 연구를 수행하였다. 연구지점의 유역도는 그림 1과 같다.

2.2 자료조사

2.2.1 수질조사

오염부하량은 토지이용, 강우량, 강우강도 등 수문특성에 따라 다르게 배출된다. 오염물질은 강우시 지표 유출수에 의해 크게 영향을 받으므로 본 연구에서는 강우시와 비강우시를 구분하여 수질자료를 조사하였다. 강우시 기준은 유출이 발생할 수 있는 20 mm/day 이상을 강우시로 구분하여 조사하였으며, 2008년과 2009년 2개년 동안 지점별 50회에 걸쳐 유량과 수질을 조사하였다. 본 연구에서의 수질조사 항목 및 분석방법은 표 1과 같다.

2.2.2 유량조사

본 연구에서의 유량계산방법은 평균단면법에 의하여 산정하였으며, 유량측정은 강우시 기간에는 전자과 표면유속계를 비강우시에는 프로펠러 유속계를 사용하여 유량을 측정하였다. 평균단면법에 의한 유량계산은 단면을 n 개로 구분하여 구

표 1. 수질분석 항목 및 분석방법

Item	Analysis Method
BOD	20°C 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°C에서 건조하여, 건조하기 전·후 무게차로 계산

표 2. 프로펠러 유속계 제원

MODEL	Producing Company	Measuring range	Measurement precision	Average Time
MCM-2	MTprecision	3~350cm/sec	±3cm/sec	10,20, 40,60 sec

그림 2. 유량계산 모식도

분단면 x 와 $x+1$ 사이의 단면적 a_x 와 유량 q_x 의 산정을 통하여 수행한다. 프로펠러 유속계의 제원은 표 2와 같다.

$$a_x = \frac{d_x - d_{x+1}}{2} (b_{x+1} - b_x)$$

$$q_x = V_x \frac{d_x - d_{x+1}}{2} (b_{x+1} - b_x)$$

여기서 q_x 는 구분단면에서의 유량, V_x 는 x 지점에서의 유속, V_{x+1} 는 $x+1$ 지점에서의 유속, b_x 는 초기지점에서 x 지점까지의 거리, b_{x+1} 는 초기지점에서 $x+1$ 지점까지의 거리, d_x 는 x 지점에서의 수심, d_{x+1} 는 $x+1$ 지점에서의 수심이다.

2.3 유량가중평균농도 산정(Flow weight mean concentration)

비점오염물질은 토지이용 및 강우량, 강우강도 등에 따라 다르게 배출되기 때문에 이에 대한 적절한 평균농도를 도입하여 특정 강우시에 대한 오염물질의 평균농도를 대입할 필요가 있다. 평균농도를 대입하는 방법으로는 산술평균에 의한 평균농도를 제시하는 방법과 유량가중평균농도를 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 강우시 오염물질의 유출 특성을 잘 나타내어주는 유량가중평균농도를 이용하여 연구를 수행하였으며, 비강우시 기간은 오염물질의 농도가 크게 변하지 않으므로 산술평균에 의한 방법을 이용하였다. 유량가중평균농도를 산정하는 방법은 식 (1)과 같다.

FWMC (Flow-weighted mean concentration)

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

여기서 $\sum Q_i C_i$ 는 i 번째 강우 사상의 누적 오염부하량이며, $\sum Q_i$ 는 i 번째 강우사상의 누적 유출량이다.

2.4 연간 유달 오염부하량 산정

연간 오염부하량을 산정하기 위해서는 연중 장기간 동안 비점오염물질을 실측하여 산정하여야 하지만 이 방법은 어려

음이 있으므로 연간 강우량비나 유출량비 등을 이용하여 산정한다. 본 연구에서는 연간 총유출량 비를 이용하여 산정하였으며, 산정방법은 식 (2)와 같다.

연간 오염부하량 (kg/year)

$$= I_m \frac{Q_m}{q_m} \quad (2)$$

여기서 I_m 은 조사기간 동안의 오염부하량이며, Q_m 은 연간 유출량, q_m 은 조사기간 동안의 유출량이다.

3. 분석 및 고찰

3.1 유량에 따른 수질농도 상관분석

본 연구에서는 유량에 따른 수질농도의 변화를 관찰하기 위하여 유량에 따른 수질농도의 상관분석을 하였다. 분석결과, 지점모두에서 SS항목의 상관계수가 0.60이상으로 다른 항목에 비하여 높은 상관성을 보였으며, 다른 항목에서는 상관성이 낮아지는 것으로 관찰되었다. SS항목에서 높은 상관성을 보인 이유는 연구지점의 경우 유역 형태가 대부분 산지 및 농경지를 이루고 있어 강우시 지표유출수에 의한 토사유출로 인하여 높은 상관성으로 보이는 것으로 판단된다.

유출량과 수질농도의 통계학적 특성값은 표 3과 같으며, 오염물질 항목들 중 SS와 T-P항목이 유출량 변화에 따라 가장 큰 수질변화를 보이고 있다. 특히 인북천 유역에서 가장 큰 수질농도 변화를 보였으며, 전체적으로 인북천 유역에서 오염

표 4. 유량 - 수질농도 상관계수

Location	Item	Correlation Coefficient(R)
Buk-Cheon	BOD	0.36
	SS	0.61
	T-N	0.24
	T-P	0.48
Inbuk-Cheon	BOD	0.07
	SS	0.61
	T-N	-0.16
	T-P	0.17
Naelin-Cheon	BOD	0.36
	SS	0.61
	T-N	0.24
	T-P	0.48

물질이 크게 유출되는 것으로 관찰되었다. 연구지점별 유량에 따른 수질농도의 상관계수는 표 4와 같다.

3.2 유량가중평균농도 산정

배수구역별 강우시 기간의 대표 수질농도를 산정하였으며, 산정방법은 각 호우사상의 수질을 조사하여 유량가중 평균농도 법을 적용 조사기간의 대표수질을 산정하였다. 지점별 유량가중평균 농도의 범위는 그림 3과 같으며, 그림에서 보듯이 전체적으로 비강우시기간에는 1급수의 양호한 수질등급을 보이다가 강우시 기간에 2등급 이하의 수질등급을 보이는 것

표 3. 유량과 수질농도의 통계학적 특성치

Diagnosis		FLOW (cms)	BOD (mg/l)	SS (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)
Buk-Cheon	N	52	52	52	52	52
	Range	1.3~1227.4	0.2~4.75	0.4~193.9	0.51~2.45	0.004~0.18
	Average	96.60	1.40	20.09	1.34	0.07
	standard deviation	272.43	0.78	46.33	0.41	0.04
	Variance	7.42E+04	0.61	2146.46	0.17	1.96E-03
	Skewness	4.29	2.22	2.94	1.00	0.53
Inbuk-Cheon	N	49	49	49	49	49
	Range	2.22~808.7	0.2~2.40	0.3~866.03	0.56~3.85	0.003~0.13
	Average	125.41	1.25	150.53	1.51	0.06
	standard deviation	208.10	0.62	270.67	0.65	0.04
	Variance	4.33E+04	0.38	7.33E+04	0.42	1.24E-03
	Skewness	2.16	-2.70E-03	1.88	2.15	0.08
Naelin-Cheon	N	36	36	36	36	36
	Range	1.3~1227.4	0.2~3.55	0.5~214	0.5~2.8	0.004~0.09
	Average	139.47	1.40	31.73	1.40	0.04
	standard deviation	271.29	0.74	60.07	0.50	0.03
	Variance	0.55	3608.74	0.25	8.04E-04	7.36E+04
	Skewness	0.99	1.98	1.02	0.53	2.90

그림 3. 연구지점별 유량가중평균 농도

으로 관찰되었다. 특히 SS와 T-P항목의 경우 강우시 기간에 5등급 이하의 수질등급을 보이고 있어 수질이 급격히 악화되는 것을 알 수 있다. 이는 유역 내 대량의 객토로 인하여 강우유출수와 함께 토사가 크게 유출되어 수질이 크게 악화되는 것으로 판단된다. 다음으로 계절적 변화를 살펴보면 봄과 여름 기간의 초기강우에서 오염물질의 농도가 높게 나타났으며, 유출이 지속적으로 발생하면서 강우에 의한 초기세척 효과로 인하여 농도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 홍수기 이후 기간인 9월과 11월 기간에는 홍수기전에 비하여 수질이 크게 개선되는 것으로 관찰되었으며, 연구기간인 2008년에 오염물질이 크게 유출되었다.

3.3 유출량에 따른 유달오염부하량의 권계식

본 연구에서는 각 연구지점의 유출량과 유달오염부하량의 회귀분석을 통하여 회귀식을 작성하였으며, 작성방법은 식 (4)와 같다.

$$\log L = a_l \times \log Q + b_l' \quad (4.a)$$

$$L = e^{b_l'} \times Q^{a_l} \quad (4.b)$$

여기서 $e^{b_l'}$ 를 b_l 라고 표현하면, 유출량과 오염부하량의 관계

식은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$L = b_l \times Q^{a_l} \quad (5)$$

여기서 L 은 유달오염부하량(kg/day)이고, Q 는 유출량(m^3/sec)이며, a_l 과 b_l 은 유달오염부하량의 회귀계수이다. 유출량에 따른 유달오염부하량의 회귀분석 결과는 표 5에 정리하였으며, 상관도는 그림 4부터 그림 6과 같다.

표 5에서 보면 알 수 있듯이 전체적으로 결정계수가 0.83 이상으로 회귀식이 유의한 것을 알 수 있다. 식 5에서 a_l 은

표 5. 유출량과 유달오염부하량의 회귀분석 결과

Diagnosis		BOD	SS	T-N	T-P
Naelin-Cheon	R-Squared	0.92	0.88	0.96	0.84
	Coefficient of Regression				
	a_l	1.142	2.13	1.024	1.339
	b_l	65.011	0.007	104.764	2.184
Inbuk-Cheon	R-Squared	0.94	0.93	0.97	0.88
	Coefficient of Regression				
	a_l	1.194	2.183	0.945	1.453
	b_l	56.834	0.035	143.956	1.061
Buk-Cheon	R-Squared	0.93	0.90	0.95	0.83
	Coefficient of Regression				
	a_l	1.142	2.011	1.007	1.251
	b_l	81.483	0.030	102.784	2.742

(a) BOD

(b) SS

(c) T-N

(d) T-P

그림 4. 내린천 지점의 유출량에 따른 유달오염부하량 상관도

(a) BOD

(b) SS

(c) T-N

(d) T-P

그림 5. 인북천 지점의 유출량에 따른 유달오염부하량 상관도

그림 6. 복천 지점의 유출량에 따른 유달오염부하량 상관도

회귀선의 기울기를 나타낸 것으로 SS항목이 2이상을 보이고 있어 다른 오염물질 항목에 비하여 유출량에 따른 오염부하량이 민감하게 반응하는 것을 알 수 있으며, 다음으로는 T-P 항목에서 민감하게 반응하였다. 배수구역별로는 인북천과 내린천 유역에서 높은 반응을 보였다.

3.4 연간 유달오염부하량 산정

3.4.1 연간 유출량 산정

본 논문에서는 연구지점의 연간 유달오염부하량을 산정하기 위하여 각 배수구역의 연간 유출량을 산정하였다. 유출량 산정은 각 배수구역내 한국수자원공사의 T/M 수위관측소가 운영되고 있어, 각 지점에서 개발하여 고시한 “한국수문조사 연보”의 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 일평균 유출량을 산정하였다. 연구기간의 유출량 변화는 그림 7과 같다.

그림 7에서 연구지점의 유출량 변화를 살펴보면 전체적으로 2009년 6월과 7월에 큰 유출량을 보였으며 평균적으로 복천은 $9.1 \text{ m}^3/\text{sec}$, 인북천은 $13.7 \text{ m}^3/\text{sec}$, 내린천은 $35.9 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 유출량을 보였다.

3.4.2 배수구역별 유달오염부하량 산정

본 논문에서 소개된 방법을 이용하여 연구지점의 각 배수구역별 연간 유달오염부하량을 산정하였다. 표 6의 유달오염부하량 산정 결과를 살펴보면 평균적으로 BOD의 경우 복천

1,516 kg/day, 인북천 2,185 kg/day, 내린천 4,404 kg/day가 유출되었으며, SS는 복천 70 ton/day, 인북천 687 ton/day, 내린천 3058 ton/day가 유출되었다. 다음으로 T-N은 복천 1,048 kg/day, 인북천 1,5908 kg/day, 내린천 3.597 kg/day가 유출되었으며, T-P는 복천이 46.7 kg/day, 인북천 101.9 kg/day, 내린천 167.2 kg/day가 유출되었다.

전체적으로 내린천 유역에서 오염부하량이 크게 유출되었으며, 이는 유역내 점오염원이 넓게 분포하여 다른 유역에 비하여 오염물질이 크게 유출되었기 때문으로 판단된다. 다음으로 SS와 T-P의 경우 유역면적대비 인북천 유역에서 크게 유출되었으며, 이는 유역내 고령지 채소재배단지가 형성되어 있어 강우시 지표유출수와 함께 비점오염물질이 크게 유출되기 때문으로 판단된다.

3.4.3 비점오염원의 유달오염부하량 산정

오염원중 비점오염원에 의한 오염물질 배출을 관찰하기 위하여 강우시기간의 유달오염부하량을 산정하여 연간 유달부하량과 비교하였다. 강우시와 비강우시 기간의 유달오염부하량 산정결과는 표 7과 같다.

표 7에서 보면 오염물질항목들 중 내린천과 인북천 유역에서 SS와 T-P가 강우시 기간에 평균적으로 99.6%와 81.7%의 높은 배출비율을 보이고 있어 비점오염원의 주요 배출오염물질 인 것을 알 수 있으며, T-N은 강우시와 비강우시

그림 7. 연구지점 유역의 유출량 변화(2008년~2009년)

표 6. 배수구역별 유달오염부하량

Location	Year	BOD Loading (kg/day)	SS Loading (ton/day)	T-N Loading (kg/day)	T-P Loading (kg/day)
Buk-Cheon	2008년	1963.0	47.1	1143.3	35.6
	2009년	1070.2	93.3	954.2	57.8
	Average	1516.6	70.2	1048.8	46.7
Inbuk-Cheon	2008년	2653.0	839.9	1793.7	96.9
	2009년	1718.4	533.8	1388.0	106.8
	Average	2185.7	686.9	1590.9	101.9
Naelin-Cheon	2008년	5390.3	285.4	3469.9	135.2
	2009년	3418.0	325.5	3724.6	199.2
	Average	4404.1	305.4	3597.2	167.2

표 7. 강우시와 비강우시 기간의 유달오염부하량 산정

Location	Diagnosis	BOD Loading (kg/day)	SS Loading (ton/day)	T-N Loading (kg/day)	T-P Loading (kg/day)
Buk-Cheon	Dry Seasons	442.0	0.5	452.7	23.4
	Rainy Seasons	1,074.6	69.7	596.1	23.3
Inbuk-Cheon	Dry Seasons	446.4	1.6	869.8	15.7
	Rainy Seasons	1,739.3	685.3	721.1	86.2
Naelin-Cheon	Dry Seasons	1,393.6	1.7	1,540.6	35.1
	Rainy Seasons	3,010.5	303.7	2,056.6	132.1

53%정도의 비슷한 배출비율을 보이고 있는 것으로 나타났다. 배수구역별로는 인북천 유역에서 SS와 T-P가 99.8%와 84.6%의 비율을 내린천은 99.4%와 79%를 보이고 있어 소양호 유역들 중 비점오염물질의 유출이 가장 큰 유역인 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 유역의 형태가 산림 및 농경지로 형성되어 대량의 오염물질이 유출되는 소양호 유역을 대상으로 2년간 유량과 수질을 조사하여 오염물질의 유출특성을 파악하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 오염물질 항목들 중 유출량 변화에 따른 가장 큰 수질 농도 변화를 보인 것은 SS와 T-P로 관찰되었으며, 특히 배수구역중 인북천 유역에서 전체적으로 오염물질이 크게 유출되는 것으로 관찰되었다. T-N과 T-P의 경우 호소수 부영양화 조절을 위한 제한 영양염소임을 고려할 때 본 유역에 대한 오염원의 집중적인 관리가 필요한 것을 알 수 있다.
- 2) 유량기중평균 농도를 이용하여 강우시와 비강우시 수질 농도를 비교한 결과, 비강우시에는 12급수의 양호한 수질상태를 보이다가 강우시에는 3급수 이하로 수질상태가 악화되는 것을 확인하였다. 특히 SS의 경우 5급수 이하의 수질등급을 보이고 있어 이 유역에 대한 강우기간의 토사유출 관리에 노력하여야 할 것이다.
- 3) 소양호 유역의 배수구역별 유출량비를 이용하여 연간 유달오염부하량을 산정하였다. 산정결과, 전체적으로 내린천 유역에서 오염부하량이 크게 산정되었으며, 이는 넓은 유역으로 유역내 오염원이 넓게 분포되어 크게 산정된 것으로 판단된다. 다음으로 SS와 T-P의 경우 유역면적대비 인북천 유역에서 크게 산정되었으며, 이는 유역내 고랭지 채소재배단지가 넓게 분포하여 비점오염물질이 크게 유출되는 것을 알 수 있다.
- 4) 인북천 유역의 SS와 T-P가 강우시 기간에 99.8%와

84.6%의 비율을 내린천은 99.4%와 79%의 배출비율을 보이고 있어 이 유역에 대한 비점오염원 관리가 시급한 것을 알 수 있다. T-N은 평균적으로 53%의 배출비율을 보이고 있어 오수 관리를 통한 소양호의 수질개선에 노력하여야 할 것이다.

본 연구에서 알 수 있듯이 인북천 유역에서 SS와 T-P가 높은 유달부하량을 보여 소양호의 탁수 관리 및 부영양화 조절을 위한 오염물질의 저감시설 설치 및 비점오염원의 관리가 시급한 것을 알 수 있다. 끝으로 이를 이용하여 소양호의 오염총량관리를 위한 기초자료로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김종옥 (2007.8) **자운천 유역의 강우특성에 의한 하천탁도발생에 관한연구**, 석사학위논문, 강원대학교.
- 박수진 (2011.2) **소양호 유역을 대상으로 한 오염부하량 유달특성 해석 및 수질예측**, 박사학위논문, 강원대학교 대학원.
- 박수진 (2005.8) **소양호 상류유역의 비점오염원 유출특성에 의한 원단위 산정**, 석사학위논문, 강원대학교.
- 박종봉 (2001) **유달오염부하량과 유량 관계식을 이용한 소목천의 유달오염부하량 산정**, 석사학위논문, 충남대학교 대학원.
- 이상진 (2003) **오염총량관리를 위한 수질오염물질 유달특성에 관한 연구**, 박사학위논문, 대전대학교 대학원.
- 안재환 (2001.6) **비점오염원 유출부하 기여율**, 건설기술정보.
- 최지용, 신창민 (2002.12) **비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안**, 연구보고서, 한국환경정책연구원.
- 최순규 (2006.8) **소양호 상류유역의 부유물질 유출특성에 의한 원단위 산정**, 석사학위논문, 강원대학교.
- 최한규, 백경원, 오기호, 최용목 (2001) **유량변동에 따른 소양강 유역 수질의 통계학적 특성치**, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제2-13호, pp. 117-124.
- 한국수자원공사 (2008, 2009) **다목적댐 일원 수자원환경기초조사 결과 보고서**, 연구보고서, 한국수자원공사 소양강댐관리단.

◎ 논문접수일 : 11년 06월 21일
◎ 심사의뢰일 : 11년 06월 24일
◎ 심사완료일 : 11년 11월 28일