

만대천 유역의 강우량에 의한 비점오염물질
유출특성에 관한 연구

A Study on Runoff Characteristics of Non-Point
Source Pollution with Rainfall in
Mandae-cheon Watershed

최 한 규* 이 진 태** 박 수 진***
Choi, Han-Guy Lee, Jin-Tae Park, Soo-Jin

Abstract

Non-point source pollution, which is found in soil, urban area, and agricultural area, is difficult to have its amount to be estimated. Moreover, it is hard to come up with a counterplan to cope with this pollutant.

Hence, the watershed of Mandae-cheon located at the upstream of Soyang Lake was chosen as our site of study. We analyzed the relationship between precipitation level of each month and pollution load in the watershed by using statistical methods: measuring BOD, T-N and T-P - which are the causes of eutrophication - in the water; and analyzing the changes in water quality caused by precipitation level of nth.

키워드 : 비점오염원, 수질, 오염부하량

Keywords : non-point source pollution, water quality, pollution load

1. 서론

우리나라는 21세기 초에 물 부족국가로 전락할 것이라는 UN의 보고도 있는만큼 수량의 확보 못지 않게 수질의 관리가 중요한 관심사로 부각되고 있다. 따라서 이제 우리는 하천, 호소, 하구에서 음용수 이용, 낚시, 수영 등 물의 기초적인 이용이 가능한 수질로 보전하기 위해서 특단의 조치가 필요한 시점이다.

수질을 오염시키는 오염원을 크게 분류하면 점오염과 비점오염원으로 구분할 수 있다. 점오염이란 산업 시설, 공공 시설, 분뇨 처리 시설, 하수 처리 시설, 가정 등과 같이 고정된 형태로 있으면서 폐수를 배출하는 시설이다. 점오염원에서 배출되는 폐수는 배출지점이나 배출량 및 성분을 쉽게 조사할 수 있으므로 처리 대책을 세우기 용이하며, 하수처리기준 강화 및 하수처리시설 설비 등으로 인하여 점오염의 오염물질유출은 감소하는 추세이다. 지금까지는 주로 공장건축물 등 점오염원(point source) 위주의 수질관리정책이 추진됐으나, 앞으로는 도로, 도시, 농경지 등에서 빗물과 함

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 산업대학원 토목공학과 석사과정

*** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

계 배출되는 비점오염물질을 줄이기 위한 대책 및 수질관리정책의 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

따라서 하천 및 호소 수질 관리에서 중요성이 크게 부각되고 있는 비점 오염물질의 유출에 영향을 주는 강우량을 대상으로 상호 연관성을 분석하고 이에 대한 상관성을 추정하여 비점오염원에 의한 하천수질오염을 개선하기 위한 것이 본 연구의 목적이다.

위와 같은 비점오염물질의 유출에 영향을 미치는 강우량을 대상으로 상호 연관성을 알아보기 위하여 아래와 같은 연구를 수행하였다.

우선 본 연구를 위하여 소양강 수계 중 상류 지점인 만대천 물골교 지점을 선정하여 하천 및 호소 부영양화에 가장 큰 영향을 미치는 BOD, T-N, T-P 수질 인자를 대상으로 강우량 - 부하량에 대해 통계학적 검정 방법인 상관성 분석을 실시하였으며, 또한 월별로 강우시 수질변동 경향을 분석하였다. 끝으로 강우량 - 오염부하량의 회귀식을 개발하여 제시하였다.

2. 연구지점 현황

본 연구지점인 만대천은 양구군 해안면에 위치한 북한강 상류 지천으로서 제4땅굴이 발원지인 성황천과 합류하여 만대천을 본류로 동쪽으로 서화천으로 유하하여, 소양호 상류에 위치한 인북천으로 흐르게 된다. 하천의 경계는 인제군 서화면과 경계하고 있는 지점이다.

대부분의 유역은 산림이 58%를 차지하고 42%가 농경지와 시가지로 형성되어 있다. 해안면의 유역모양은 과일모양 형태로 유역전체가 1,000m를 넘는 고지들로 형성 되어 있으며, 유역 대부분의 중간에는 완만한 경사를 이루고 있어 고랭지 채소의 재배가 활성화 되고 있어 농작지의 비료 및 농약사용으로 인하여 강우시 오염물질의 유출이 심각한 실정이다.

또한 행정자료에 파악되지 않은 불법경작지를 감안 한다면, 오염원 부하량의 유출이 더욱더 심각할 것으로 사료된다.

수질조사 지점은 만대천유역의 하류인 물골교 지점으로 인제군 서화면의 경계지점에 위치하며, 대부분의 유출수는 이 지점을 통과하게 된다.



그림 1 연구지점인 만대천 유역

3. 유역의 오염원 현황

3.1 유역현황

오염원의 조사를 위하여 만대천 유역의 하류인 물골교 지점을 배수구역으로 선정하였으며, 배수구역 선정지점은 아래 표와 같다.

표 1 배수구역 현황

하천명	행정구역 면적(km ²)	유역면적 (km ²)
만대천	61.52	52.7

3.2 오염원 현황

1) 인구현황(점오염원)

본 연구지점인 해안면은 506 가구 수로 1499인이 거주하는 것으로 조사되었다.

표 2 인구현황

구분	행정구역		가구수 (호)	인구수(인)		
	면	리		계	남	여
해안면	해안	현1,2,3 오유1,2 만대	506	1,499	818	684

2) 가축현황(점오염원)

표 3 가축현황

구분	한우 (마리)	젓소 (마리)	돼지 (마리)	가금 (마리)	산양 (마리)	사슴 (마리)	개 (마리)
해안면	199	-	5	153	315	15	395

3) 토지이용현황(비점오염원)

표 4 지목별 토지이용현황

구분	계	밭	논	산림	도로	대지	하천	기타
해안면	62	5.9	17	36	1	0.4	0.7	1.1
면적 (km ²)								
구성비 (%)	100	8.6	27.7	58.6	1.6	0.6	1.2	1.8

4. 오염원 조사

4.1 오염부하량 산정

1) 발생오염부하량

(1) 발생부하량 원단위

현재 본 유역에 대해서는 유출원단위 연구가 이루어지지 않은 이유로 환경부에서 고시한 원단위를 이용하여 발생 부하량을 산정하였다.

① 인구에 의한 발생원단위

표 5 인구에 의한 발생원단위

(단위 : g/인/day)

구분	BOD	T-N	T-P
시가화	50.7	10.6	1.24
비시가화	48.6	13	1.45

② 축산에 의한 발생원단위

표 6 축산분뇨 발생원단위

(단위: g/마리/day)

구분	BOD	T-N	T-P
한우	528	116.8	36.1
젓소	556	161.8	56.6
말	256	77.6	24.0
돼지	109	27.7	12.2
양	10	5.8	0.9
사슴	10	5.8	0.9
가금	5.2	1.1	0.4

③ 토지에 의한 발생원단위

표 7 토지이용에 의한 발생원단위

(단위: kg/km²/day)

구분	BOD	T-N	T-P
논	2.3	6.56	0.61
밭	1.6	9.44	0.24
임야	0.93	2.20	0.14
대지	85.9	13.69	2.10
목장	35.1	5.37	1.72
골프장	1.0	3.56	2.76
기타	1.0	0.06	0.03

(2) 발생부하량 산정

발생부하량 산정은 유역의 오염원 현황에 각각의 발생원단위를 곱하여 각각의 발생부하량을 산정한 다음 전체 발생부하량을 합하여 산정 하였다.

표 8 발생 오염부하량

(단위 : kg/day)

구분	인구			가축			토지			전체		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
해안면	71	19	2	114	28	8	113	246	18	298	293	28

2) 배출 부하량 산정

(1) 배출부하량 원단위

본 유역의 연구 자료의 부재로 인해 환경부에서 제시한 방법을 이용하여 배출부하량을 산정하였다.

① 인구에 의한 배출 부하량

본 유역은 하수처리시설이 전무한 관계로 본 연구지점의 배출부하량 산정은 하수미처리구역의 방법을 이용하여 다음과 같이 산정하였다.

BOD, T-N, T-P : (미처리구역인구 × 발생원단위 × 분뇨부하비 × (1 - 기준처리율 / 100)) + (미처리구역인구 × 발생원단위 × (1 - 분뇨부하비))

표 9 인구에 의한 배출부하량기준

구분	BOD	T-N	T-P
기준처리율 (%)	65	10	10
분뇨부하량	0.36	0.6	0.6

② 가축분뇨에 의한 배출부하량

본 연구지점에는 대단위로 가축을 사육하는 곳이 없어 본 연구는 규제대상 이하로 하여 배출부하량을 산정하였다.

배출부하량 : 축종별사육두수 × 발생원단위 × 농지유출비

표 10 축산분뇨 농지배출계수(규제대상이하)

구분	BOD	T-N	T-P
농지유출비	0.25	0.5	0.15

③ 농지에의한 배출부하량

비점오염원으로서 토지에 의해 발생된 발생부하량에 배출부하계수를 곱하여 산정한다. 배출부하량 산정 방법은 아래와 같다.

배출부하량(비점오염원) = 0.25 × 발생부하량

(2) 배출부하량 산정

각 오염원 발생부하량에 배출원단위를 곱하여 배출부하량을 산정하였다.

표 11 배출부하량

(단위: kg/day)

구분	인구			가축			토지			전체		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
해안면	34	22	2	28	14	1	28	61	4	91	97	8

4.2 수질조사 기간

오염원 수질 조사는 우기기간인 2004년 5월28일 ~ 8월19일까지 총 5차에 걸쳐 조사를 하였다.

표 12 강우시 조사 기간 및 강우량

강우사상	조사 기간	강우량(mm)
1	5월 28일 ~ 5월 29일	48
2	6월 19일 ~ 6월 22일	74
3	7월 3일 ~ 7월 6일	83
4	7월 12일 ~ 7월 14일	153
5	8월 16일 ~ 8월 19일	207
총 계		565
연평균 강우량		1,121

4.3 수질조사항목 및 분석방법

수온(Temperature), 수소이온농도(pH), 탁도(turbidity), 전기전도도(conductivity)는 현장에서 즉시 측정하였으며, 용존산소(DO)는 현장에서 고정된 뒤 azide modification법으로 실험실에서 분석하였다.

조사지점에서 채취한 시료는 최대한 빠른 시간 내에 실험실로 운반하여 냉장보관 후에 분석하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 자료선별

본 연구수행을 위하여 조사지점에서 실측한 수질자료 중 하천의 부영양화를 일으키는 오염물질인 BOD, T-N, T-P를 선별하여 분석하였다. 또한 오염물질은 강우 초기에 발생하여 하천에 유입되므로 실측자료의 모든 데이터를 이용하기에는 분석값의 신뢰도를 저해하는 요인이 되므로 초기강우에서 유출수문곡선의 상승부를 기점으로 잡아 측정된 자료를 분류하였다.

표 13 측정자료

구분	측정일시		수위 (m)	유량 (CM S)	BO D (mg /ℓ)	T-N (mg /ℓ)	T-P (mg /ℓ)	강우량 (mm)
	날짜	시간						
1차	5월28일	0:30	0.9	20.3	3.5	4.46	0.23 2	0.5
	5월28일	1:30	0.9	20.3	4.1	4.99	0.28 4	1
	5월28일	4:00	1.1	28.5	4.2	4.26	0.22 4	2
	5월28일	6:00	1.1	28.5	3.5	4.06	0.31 1	0.5
	5월28일	9:00	1.1	28.5	3.7	4.08	0.36 3	0.5
	5월28일	12:00	1.1	31.6	3.8	3.93	0.13 9	3.5
	5월28일	13:00	1.1	31.6	4.0	3.47	0.29 7	4.5
	5월28일	14:00	1.2	34.9	4.5	3.51	0.46	2.5
	5월28일	15:00	1.2	34.9	5.0	3.64	0.48 3	6
	5월28일	16:00	1.2	34.9	4.0	4.16	0.77 3	5
	5월28일	17:00	1.2	38.3	5.4	5.05	0.87	9
	5월28일	18:00	1.3	45.7	3.3	5.12	0.94 5	2.5
	5월28일	19:00	1.4	53.8	4.6	4.99	0.86	1.5
	2차	6월19일	11:30	0.9	20.3	1.0	4.10	0.07 4
6월19일		13:30	1.1	28.5	2.7	3.71	0.05 5	0
6월19일		18:00	1.1	28.5	2.1	3.77	0.05 0	0
6월19일		20:00	1.0	25.6	2.0	3.82	0.04 9	2
6월20일		0:30	1.1	31.6	4.2	3.76	0.72 4	4
6월20일		2:00	1.2	34.9	2.8	3.83	0.63 3	2
6월20일		3:00	1.2	34.9	3.6	3.47	0.56 0	0
7월3일		23:00	1.1	30.9	1.1	3.03	0.09 8	1
3차	7월4일	2:00	1.1	28.7	1.6	3.20	0.28 9	3
	7월4일	6:00	1.1	28.7	7.0	3.34	0.35 0	3

표 13 계속

구분	측정일시		수위 (m)	유량 (CM S)	BO D (mg /ℓ)	T-N (mg /ℓ)	T-P (mg /ℓ)	강우량 (mm)	
	날짜	시간							
3차	7월4일	9:00	1.1	28.7	7.6	4.12	0.74 7	2.5	
	7월4일	10:00	1.1	28.7	6.5	3.36	0.44 9	1	
	7월4일	11:00	1.2	34.9	3.6	3.30	0.27 1	1	
	7월4일	12:00	1.2	36.2	1.8	3.13	0.40 4	1	
	7월4일	14:00	1.3	41.9	1.7	3.01	0.32 2	1	
	7월4일	15:00	1.3	45.7	5.8	3.52	0.82 6	4	
	7월4일	16:00	1.4	53.8	4.4	4.59	0.78 8	6	
	7월4일	17:00	1.5	63.6	6.5	4.28	0.89 5	6	
	7월4일	18:00	1.6	70.3	6.6	4.21	0.96 3	5	
	7월4일	20:00	1.7	86.2	4.6	3.09	0.56 8	1	
	7월4일	22:00	2.2	146.2	5.0	2.90	0.48 5	0.5	
	4차	7월12일	1:00	1.2	38.3	1.5	3.69	0.13 1	2.5
		7월12일	3:00	1.3	45.7	2.3	4.25	0.83 8	10
		7월12일	4:00	1.6	72.3	8.0	4.96	1.04 2	13.5
7월12일		5:00	1.8	93.8	6.0	5.38	1.88 0	15	
7월12일		6:00	2.0	118.4	7.5	6.29	1.72 2	20.5	
7월12일		7:00	2.2	146.2	6.0	4.52	0.93 2	9	
7월12일		9:00	2.1	131.9	5.0	4.00	0.39 2	1.5	
7월12일		11:00	2.2	146.2	3.3	3.48	0.85 4	8.5	
7월12일		12:00	2.0	118.4	5.1	3.50	0.86 2	5	
7월12일		13:00	2.0	118.4	1.2	2.39	0.52 4	4	
7월12일	15:00	2.0	118.4	0.8	3.05	0.73 4	2.5		

표 13 계속

구분	측정일시		수위 (m)	유량 (CM S)	BOD (mg / ℓ)	T-N (mg / ℓ)	T-P (mg / ℓ)	강우량 (mm)
	날짜	시간						
5차	8월18일	11:30	1.7	93.8	0.90	2.81	0.555	0.5
	8월18일	14:00	1.7	93.8	1.10	2.26	0.275	0
	8월18일	16:00	1.7	93.8	0.80	2.05	0.249	0.5
	8월18일	17:00	1.7	105.7	0.70	2.09	0.199	0.5
	8월18일	18:00	1.7	93.8	1.40	2.28	0.297	6
	8월18일	20:00	1.7	82.7	1.20	2.91	0.341	3
	8월18일	21:00	1.7	82.7	1.10	2.63	0.397	5.5
	8월18일	22:00	1.8	93.8	1.50	2.72	0.650	9
	8월18일	23:00	1.9	105.7	1.10	3.05	0.739	5
	8월19일	0:00	1.8	93.8	1.90	2.49	0.349	0
	8월19일	1:30	1.8	105.7	1.10	2.19	0.207	2
	8월19일	3:00	1.8	131.9	1.00	2.29	0.275	4.5
	8월19일	4:00	2.0	139.0	0.80	2.46	0.679	7
	8월19일	5:00	2.0	146.2	1.00	2.45	0.546	1

5.2 상관분석

1) 오염유출부하량과 강우량의 상관관계

(1) 강우사상별 오염유출부하량

표 14 강우사상별 오염유출부하량

구분	BOD (kg/event)	T-N (kg/event)	T-P (kg/event)
1차	8,842	9,383	1,029
2차	4,286	2,762	358
3차	24,980	17,970	2,634
4차	24,779	24,031	5,057
5차	8,114	18,065	3,075
총부하량	71,001	72,211	12,153

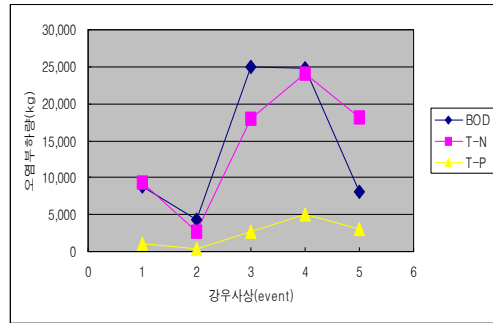


그림 2 강우사상별 오염부하량

(2) 강우량 -오염부하량 상관계수

강우량에 따른 오염 부하량은 상관계수가 BOD, T-N, T-P 모두 0.9 이상으로 나타났으며, 강우량 - 수질에서 상관성이 현저하게 떨어진 T-N에서도 0.95로, 강우량 - 오염부하량은 상당한 상관성을 나타냈다.

표 15 강우량 - 오염 부하량 상관계수

	BOD	T-N	T-P
상관계수(R)	0.93	0.95	0.92

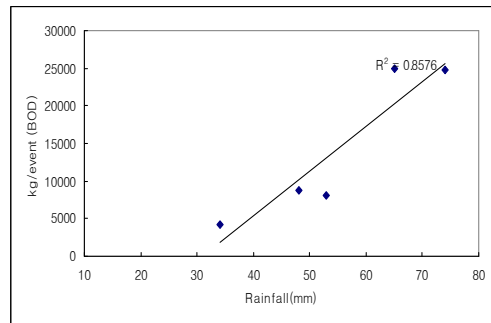


그림 3 강우량 - 부하량(BOD) 상관도

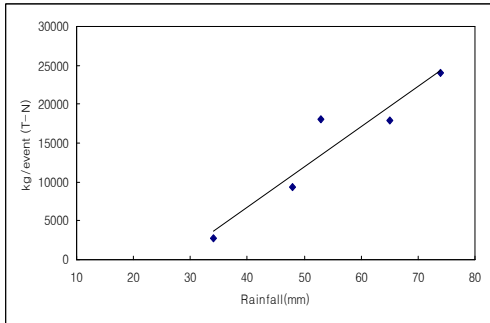


그림 4 강우량 - 부하량(T-N) 상관도

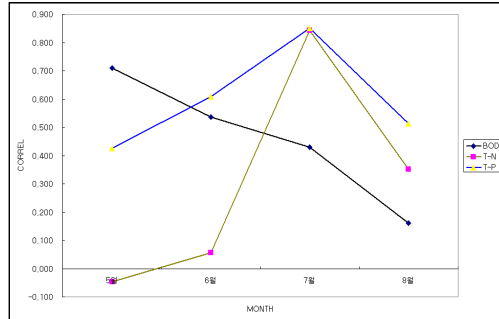


그림 6 월별상관관계 그래프

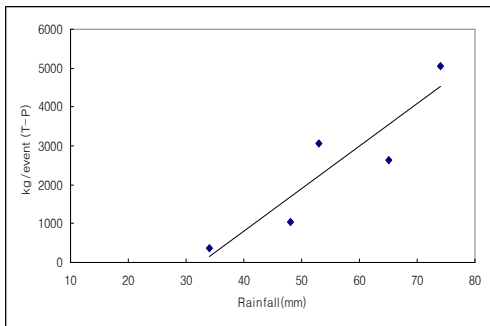


그림 5 강우량 - 부하량(T-P) 상관도

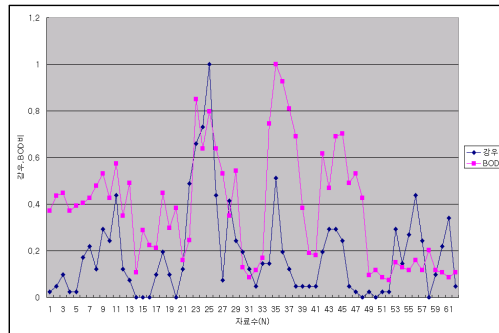


그림 7 자료별 강우 - BOD비 그래프

2) 오염물질 월별 변동분석

오염물질의 유출은 토지이용형태, 식생상태 등에 따라 다르게 나타나기 때문에 자료를 월별로 선별하여 시강우에 따라 오염물질의 변동을 분석하였다.

표 16 월별 상관계수

구분	5월	6월	7월	8월
BOD	0.71	0.54	0.43	0.16
T-N	-0.04	0.05	0.84	0.35
T-P	0.43	0.61	0.85	0.51

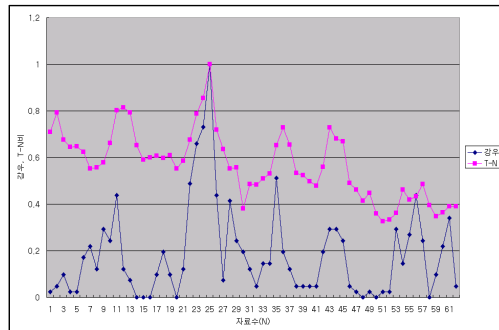


그림 8 자료별 강우 - T-N비 그래프

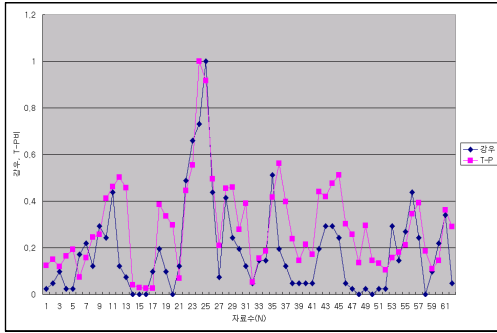


그림 9 자료별 강우 - T-N비 그래프

5.3 회귀분석

본 연구에서는 상관계수가 높은 월별에 대하여 강우강도에 따른 수질농도를 추정할 수 있는 상관식을 개발하였으며, 또한 강우량-오염부하량의 상관식을 개발하였다.

표 17 강우강도- 수질농도 상관식

구분	월 별	회귀식	상관계수
BOD (mg/l)	5월	$0.1712 \cdot I + 0.5029$	0.71
T-N (mg/l)	7월	$0.1474 \cdot I + 3.0316$	0.84
T-P (mg/l)	7월	$0.712 \cdot I + 0.3325$	0.85

표 18 강우량 - 오염부하량 상관식

구분	회귀식	상관계수
BOD (kg/event)	$593.51 \cdot R - 18324$	0.92
T-N (kg/event)	$514.15 \cdot R - 13733$	0.95
T-P (kg/event)	$108.92 \cdot R - 3538$	0.91

6. 결론

본 연구 대상 유역은 대부분 산림과 농경지로 구성 되어있으며, 대부분 고랭지 채소 재배지역으로 유역의 경사가 심하여 강우시에 많은 오염물질이 유출되는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 강우에 따른 오염물질의 유출에 대해서 경향분석을 하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 강우에 따른 오염물질의 월별 상관성을 분석한 결과 BOD는 5월에 상관계수가 0.71로 가장 높게 나타났으며, T-N, T-P는 강우량이 가장 많은 7월에서 상관계수가 0.84, 0.85로 강우에 따른 오염물질의 상관성이 높은 것을 알 수 있었다.

2) 강우에 따른 오염물질의 월별변동을 분석한 결과 BOD는 홍수기 전인 초기강우에서 크게 발생하며 강우가 지속 될수록 오염물질이 작게 지속적으로 발생하였다. 또한 T-N, T-P의 경우 강우량이 큰 홍수기에 크게 발생하였다.

3) 강우량에 따른 오염부하량은 BOD, T-N, T-P 모두 상관계수가 0.9이상으로 강우량이 크게 발생 할수록 오염 부하량도 증가하는 것을 알 수 있었다.

4) 강우강도에 따른 오염물질의 회귀분석을 한 결과 오염물질 유출이 민감한 월별에 대하여 다음과 같은 상관식을 개발하였다.

$$BOD(mg/l) = 0.1712 \cdot I - 0.5029$$

$$T-N(mg/l) = 0.1474 \cdot I + 3.0316$$

$$T-P(mg/l) = 0.712 \cdot I + 0.3325$$

5) 강우량 - 오염부하량의 상관식은 다음과 같다.

$$BOD(kg/event) = 593.51 \cdot R - 18324$$

$$T-N(kg/event) = 514.15 \cdot R - 13733$$

$$T-P(kg/event) = 108.92 \cdot R - 3538$$

참 고 문 헌

- [1] 환경부, “비점오염원 관리요령”, 2001.
- [2] 안재환, “비도시지역에서 강우사상에 따른 비점 오염원 유출특성 연구”, 건설기술정보, 2000.
- [3] 이수길, “농촌지역에서의 비점원 오염물질이 하천수질에 미치는 영향에 관한 연구”, 서울대학교 대학원, 1991.
- [4] 이윤상, “USLE모형을 이용한 농촌지역의 비점오염원 규모와 특성에 관한 연구”, 서울대학교 대학원, 1992.
- [5] 김한태, “농촌지역에서의 수질오염 특성에 관한 연구”, 서울대학교 대학원, 1993.
- [6] 신현석, 윤용남, “소도시유역에서의 유출과 비점원오염물 배출간의 상관관계 수립에 의

- 한 NPS 오염물 배출량의 산정”, *한국수문학 회지* 12 : 85-95, 1993.
- [7] 홍성구, “농경지로 부터의 오염물질 유출부하 특성”, 서울대학교 대학원, 1989.
- [8] Kim, Y. H., “A study on the transport of turbid storm runoff and its effect in Lake Soyang” M. S. Thesis. Kang. Nat. Univ, 1998.
- [9] William F. and R. Adel, *cited in Agricultural nonpoint source pollution*, 2001.
- [10] Krenkel, P. A., and Valdmir Novotny. *Water Quality Management*. pp.229, 1980.
- [11] Nakamura, Y., Yoshiaki, H., Yoshihiro, T., and Toshio, S., “Return flow of agricultural water and water quality conservation in the Ootoshifurutone river basin”, *A Soci. of Jap. Agri. Civil Engi.*, 62:1085-1090, 1994.
- [12] L.W.Harding, Jr., E.C. Itsweire, and W.E. Esaias, “Algorithm Development for Recovering Chlorophyll Concentrations in the Chesapeake Bay Using Aircraft Remote Sensing”, *PE & RS*, Vol.61, No.2, pp.177-185, 1995.
- [13] Wanielista M. P. *Stormwater management quantity and quality*. Ann Arbor Science, Mich, pp.187-220, 1978.
- [14] Colston, N, V. Characterization and treatment of urban land runoff. U.S. EPA-670/2-74-096, 1974.