

강우시 농지-임야지역으로부터 발생하는 오염부하량 분석

Analysis of Pollutant Loads of Rainfall Runoff From Agricultural-Forestry

여중현*, 김건하**, 서정무***¹⁾

Joong Hyun Yur, Geon Ha Kim, Jung Moo Seo

요 지

농지, 임야지역에서의 강우유출수 수질의 파악은 수자원 수질관리에 있어서 바탕수질(Background water quality)이기 때문에 물관리에 있어 매우 중요하다. 본 연구는 농지와 임야가 혼합된 도시외곽지역에서 강우시에 발생하는 강우유출수의 수질 및 오염부하량에 대하여 유역특성이 다른 두 지역에서 분석을 실시하였다. 연구 대상 유역은 임야와 농경지가 주를 이루는 지역으로 농지의 비율이 각각 0.4%와 35.9%인 유역이다. 측정은 건기에서부터 강우기 때까지 각 유역 당 10개의 강우 사상에 대하여 실시하였다. 측정 대상 항목으로는 pH, SS, TCOD, SCOD, BOD, TP, TN, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P, Total coliform, Escherchia Coli를 측정하였고, pollutograph, loadgraph을 작성 하였다. 분석 결과 농지의 비율이 큰 유역에서 발생하는 오염부하량이 모든 수질 항목에서 높게 나타났으며, SS, 유기물, 미생물 항목에서 초기강우세척현상(first flush)을 보이고 있었다. 또한 측정 자료에 대한 통계분석결과 SS항목과 유기물 항목은 높은 상관관계를 나타내고 있었으며, 강우에 따른 오염부하량은 누승함수, 2차함수의 형태로 증가하였다.

핵심용어 : 강우유출수, first flush, 오염부하량

1. 연구배경

강우는 지표면유출과 기저유출과정을 거치며 유출수질이 변하게 되는데 이에 영향을 주는 인자는 매우 다양하다. 강우유출수의 수질에 영향을 주는 인자는 강우전 청천기간, 강우강도, 강우량등과 같은 강우인자와 토지이용의 형태, 강우 유출률, 유역 경사도등과 같은 유역인자들에 의해 복잡한 자연현상이 모두 영향을 미치므로 단순 인자를 통한 추측이 매우 어렵다. 근래에 들어 강우유출수의 수질에 대한 관심은 매우 높아지고 있는데 수질 관리 측면과 더불어 강우시 발생하는 비점오염원에 대한 관리 필요가 대두되고 있기 때문이다. 실제로 점원오염원의 관리만으로는 효율적인 지표수의 수질관리는 매우 어렵고 비점오염원의 처리 등의 적극적인 관리가 절실이 요구된다.

국토의 대부분을 차지하고 있는 농지, 임야지역에서의 강우유출수 수질의 파악은 물관리에 있어서 매우 중요한데 이는 수자원 수질관리에 있어서 바탕수질(Background water quality)이기 때문이다. 대부분의 경우 강우시 발생하는 총부하량이 측정 항목의 농도 또는 침투 부하량 보다 더욱 중요한데 그 이유는 유출사상이 비교적 짧고, 강우유출수가 유입되는 수체, 특히 저수지나 댐 내에서 어느 정도 혼합 현상이 수반되므로 저수지내의 오염물질 농도는 강우로 인한 유출수내 개개의 농도변화 보다는 총 부하량의 변화이기 때문이다.

1) 정희원 · 한남대학교 토목환경공학과 대학원 · E-mail : jh-yur@hanmail.net
** 정희원 · 한남대학교 토목환경공학과 교수 · E-mail : kimgh@hannam.ac.kr
*** 정희원 · 한남대학교 토목환경공학과 대학원 · E-mail : sjmfire@hanmail.net

본 연구에서는 임야 유역과 농지와 임야가 혼합된 유역에서 강우유출수를 여러 강우사상에 대한 hydrograph, pollutograph, loadgraph 를 작성하여 각 수질 인자에 따른 특성을 파악하고, 강우의 특성과 부하량의 관계에 대한 수질인자별 관계식을 도출하였다.

2. 시료채취 및 조사지점의 개황

본 연구에서는 임야와 농촌의 혼합유역을 대상으로 하였다. Table 1은 본 연구에서 대상으로 하고 있는 두개의 유역을 나타내고 있다. 유역 1은 대부분이 임야이고 유역 2는 농지가 35.9%를 차지하고 있다. 유역 2는 면적이 2,737ha로 넓은 지역을 대상으로 하고 있다.

Table 1. Description of the watersheds

Site	Location	Description	Area(ha)	Land use (%)
1	Daejeon city Chungnam province	Creek	338	Forest 99.5, Road 0.1, Others 0.4
2	Daejeon city Chungnam province	Regional II class River	2,737	Rice paddy 35.9, Forest 44.8, Residential 13.3,Road 4.7,Others 1.3

각 유역에서 4월~9월까지 각 10개의 강우사상씩 총 20개 강우사상의 강우유출수를 측정하였다. 강우시 유량측정은 초기강우부터 시작하여 강우 종료 후 하천수위가 충분히 내려갈 때까지 측정하였다. 강우 지속시간이 길어지면 앞에서 채취한 시료를 가급적 등시간 간격이 이루어지도록 조절하여 채취하였으며 한사상당 채취 시료 개수는 13~18개 되도록 조정하였다. Table 2는 본 연구에서 측정 대상으로 한 20개의 강우사상의 강우량, 강우시간, 청천일수를 정리한 것이다.

Table 2. Hydrological description of the study watersheds

E-vent	1			2		
	RAIN ^a	T ^b	DRY DAY ^c	RAIN ^a	T ^b	DRY DAY ^c
1	18.5	67.5	5	18.5	23.6	5
2	67.0	60.7	12	66.5	64.5	1
3	14.4	26.5	3	14.4	35.9	3
4	43.5	36.0	2	43.5	25.9	2
5	44.5	47.6	1	44.5	42.3	1
6	259.8	123.8	11	259.8	123.8	11
7	35.0	41.3	1	35.0	41.2	1
8	4.5	22.3	4	4.5	22.5	4
9	37.0	30.0	3	37.0	26.0	3
10	135.0	60.0	2	135.0	60.0	2

^a precipitation depth(mm), ^b rainfall duration time(hr), ^c dry days since last rainfall event(day)

분석항목으로는 pH, TSS, VSS, TCOD, SCOD, TN, NH₃-N, NO₃-N, TP, PO₄-P, Total Coliform, Escherchia Coli 이며 수질오염공정 시험법과 Standard Method 에 의거해 분석하였다.

농지 임야지역에서의 비점오염의 발생은 강우사상에 따라 각기 다른 특성을 나타낸다. Table 3은

Table 3. Effective rainfall Analysis in study basin (2001~2003년)

구 분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	계	년평균
강우사상(개)	-	2.3	3	2.7	2.7	2.3	3.3	3.3	2	2.7	2	-	26	2.6
강우일	-	3.3	4	6.3	5	6	10	11	6	4.7	2.7	-	59	5.9
평균강우강도 (mm/day)	-	10.7	6.4	17.0	16.2	23.4	24.0	22.3	14.5	11.8	6.7	-	-	15.3
월평균 강우량(mm)		13.4	7.4	23.8	19.5	26.0	28.2	25.9	17.0	12.4	6.9		-	18.1
평균건기일	-	6.6	6.9	6	7.1	5.9	3.13	3.5	8.0	6.4	6.6	-	-	6.0

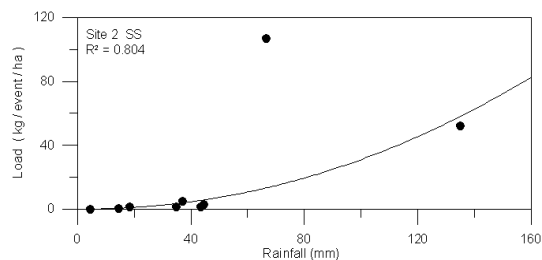
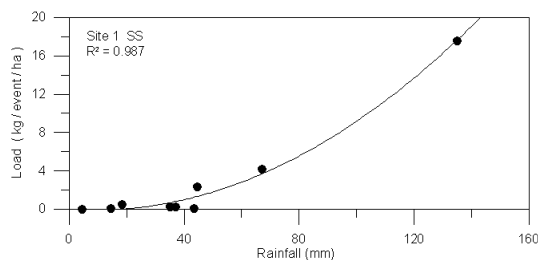
WEF(Water Environment Federation)에서 정한 일누적 강우량 0.1 inch, 평균 강우강도 0.01 inch/day 이상 이고 선행건기일이 3일 이상인 유효강우사상에 대하여 최근 3년간의 자료의 평균을 정리한 것이다.

3. 결과 및 고찰

유역에서 강우가 발생하였을 경우 유출의 시간적 변화를 나타내는 hydrograph의 모양은 유역의 면적, 형상, 기울기 및 방향성, 유역의 토지이용 상태, 토양의 종류, 토양의 침투능, 하도특성에 따라 다양하게 변화한다. pollutograph도 대체로 수문곡선에 영향을 미치는 인자들에 의해 그 형태가 결정되는 것으로 알려져 있다. 각 수질 인자들에 대한 pollutograph와 hydrograph에 대한 분석 결과 SS, COD, TP, total coliform은 두 지점에서 모두 hydrograph와 pollutograph와 유사한 변화를 보이고 있거나 유량의 침투점 보다 빠른 농도침투점을 보이는 first flush현상을 보이고 있었다. 그러나 TN항목은 다른 항목들에 비하여 유량의 변화와는 다소 차이가 있는 random한 유출형태를 보였다. COD의 경우 임야지역인 1지점이 초기에 강한 농도유출을 보이는 반면 농지-임야 혼합지역인 2지점은 유량의 침투점 이후에도 지속적인 유출을 보이고 있었다.

강우특성 인자와 EMC의 크기에 미치는 영향을 알아보기 위하여 SPSS ver 10.0를 이용하여 통계분석을 실시하였다. SS는 청천일수와 강우강도의 영향을 받으며, SCOD, TP, PO₄-P, TP, NH₃-N은 청천일수의 영향을 받는 것으로 나타났으며, SS, TCOD, NO₃-N은 총 유출유량의 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났다.

측정된 유역당 10개의 강우 사상을 이용하여 오염부하량과의 상관관계분석을 실시하였다. 분석 결과 2차 함수와 지수함수, 누승함수의 형태에서 가장 적합한 형태를 보이고 있으며 소유역인 임야지역과 대유역인 농지임야 혼합지역에서 오염부하량이 강우량이 40mm 이하의 강우 발생시 부하량은 미미한 증가를 보이다가 40mm 이상의 강우발생시 급격한 증가 추세를 보이고 있다. 이는 도시지역과는 다르게 작은 강우가 발생할 경우 침투 및 저류 현상 등의 영향으로 오염물의 수체내로 유출되는 현상의 차이가 생기는 것으로 사료된다



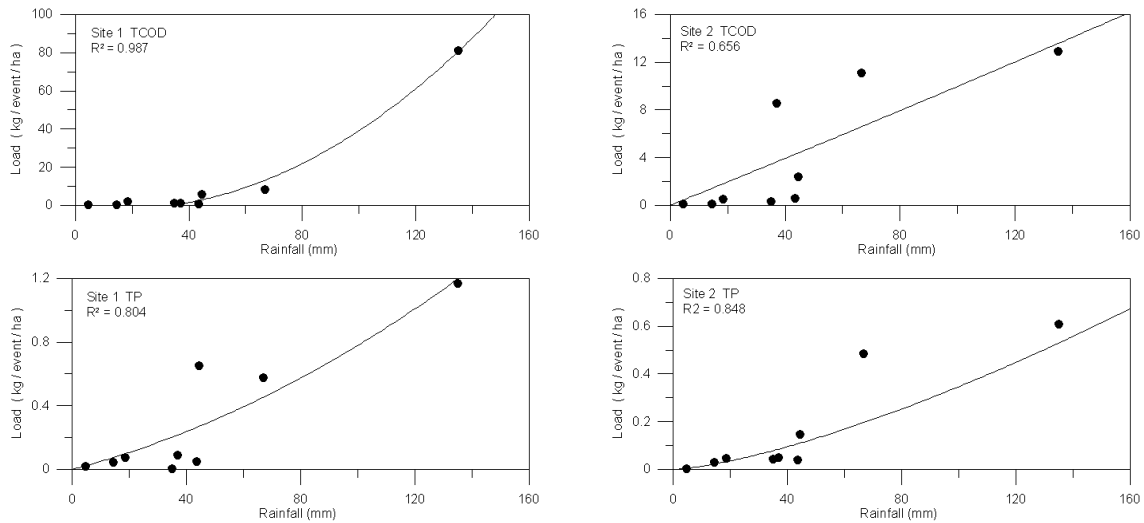


Fig. 1. Correlation Analysis between Rainfall and loadings

Table 4는 강우사상과 오염부하량과 상관관계의 결과 값이다. 대부분이 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있다.

Table 4. Correlation Analysis between Rainfall and loadings (kg/event/ha)

Parameters	n	Best-fit Linear Equations (R ²)	
		site 1	site 2
SS	10	$y = 0.0011x^2 - 0.0202x$ (0.98)	$y = 0.0021x^{2.086}$ (0.80)
TCOD	10	$y = 0.0059x^2 - 0.1977x$ (0.99)	$y = 2E-05x^2 + 0.0972x$ (0.65)
SCOD	10	$y = 0.0031x^2 - 0.1011x$ (0.99)	$y = 0.0887e^{0.0316x}$ (0.59)
TN	10	$y = 0.0002x^2 + 0.0191x$ (0.78)	$y = 6E-05x^2 + 0.0085x$ (0.86)
TP	10	$y = 3E-05x^2 + 0.0047x$ (0.80)	$y = 0.0005x^{1.4134}$ (0.84)
NH ₃ -N	10	$y = 8E-06x^2 + 0.0004x$ (0.95)	$y = 0.0034x^{0.8225}$ (0.57)
NO ₃ -N	10	$y = 0.0004x^2 - 0.0086x$ (0.98)	$y = 0.0001x^2 - 0.0025x$ (0.97)
PO ₄ -P	10	$y = 9E-06x^2 + 0.001x$ (0.85)	$y = 0.0001x^{1.6059}$ (0.59)
BOD	10	$y = 0.0011x^2 - 0.0393x$ (0.98)	$y = 0.0007x^{1.6717}$ (0.69)
TC*	10	$y = 6E+06x^{1.8406}$ (0.36)	$y = 7E+06x^2 + 3E+08x$ (0.94)
EC**	10	$y = 99338x^2 + 4E+06x$ (0.81)	$y = 4E+06x^2 + 2E+07x$ (0.89)

n=number of samples, R²-coefficient of determination

* TC-total coliform, ** EC-Escherchia Coli

Table 4의 상관관계식을 이용하여 Table 3에서 정리된 연구 유역에서 일년동안 발생하는 강우 자료를 가지고 연간 단위 면적당 오염부하발생량을 산출하였다. 두 지역에서 발생하는 단위면적당 오염부하발생량을 비교하면 SS 및 TCOD의 경우 단위면적당 오염부하량은 농지-임야 혼합지역이 임야지역 보다 1.3배로 거의 유사한 크기를 나타내고 있으며, TN과 TP의 경우는 오히려 임야지역이 농지-임야혼합지역에서 보다 크게 나타났다. Total coliform과 Escherchia Coli의 미생물 항목은 각각 5.7배, 17.3배로 농지-임야지역이 임야지역에서 보다 가장 큰 차이를 보이고 있었다. 유역크기에 따른 비점오염원의 유출 특성상 소유역인 임야지역이 대유역인 농지-임야혼합지역에서 보다 상대적으로 큰 결과를 나타내고는 있으나 다른 항목들에 비하여 TN, TP가 임야지역에도 크게 발생되고 있음을 알 수 있다.

Table 5. Discharge load caused by rainfall during the year (kg/ha/year)

	SS	TCOD	TN	TP	NH ₃ -N
Site1	21.56	34.16	11.47	2.62	0.28
Site2	29.18	47.80	4.80	0.86	0.98
	NO ₃ -N	PO ₄ -P	BOD	TC	EC
Site1	0.04	0.59	7.56	3.87E+ 10	3.01E+ 9
Site2	0.16	0.31	2.67	2.21E+ 11	5.22E+ 10

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호# 1-5-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 권순국, 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안, 대한환경공학회지, 20(11), 1998
2. APHA, AWWA, WEF. (1998). *Standard Methods 20th ed.* Washington.
3. Vladimir Novotny, Water Quality Prevntion, Identification and Management of Diffuse Pollution, 1993