

# 농촌지역에서 유출시간에 따른 비점오염물질의 유출평가

이치타오 · 허진휴\* · 김영철†

한서대학교 환경공학과

\*전북대학교 화학교육과

## Dynamic Runoff of Non-point Sources Pollutants from Agricultural Areas

Qitao Yi · Chinyhu Hur\* · Youngchul Kim†

Department of Environmental Engineering, Hanseo University

\*Department of Chemistry Education, Chonbuk National University

(Received 17 September 2008, Revised 20 October 2008, Accepted 21 October 2008)

### Abstract

In this paper, data collected from 22 different rural watersheds during stormflow conditions were analyzed. Those watersheds consisted of forest and cultivated land. EMC data analysis indicates that as agricultural land use increases, EMC values of TSS, COD and TN clearly tends to increase, but TP does not show a significant increase. Pattern of the pollutographs mostly has a similarity in hydrograph shape except nitrogen which inherently shows a variability and complication. The fraction of soluble reactive-P to TP increases as cultivated land use increases while mobile-nitrogen portion was higher in the runoff from forested watersheds than agricultural areas. During stormflow, pollutograph of the nitrogen was determined mainly by change in Particle-TKN as other pollutants but its effect is thought to be masked by decrease of dissolved form of nitrogen due to the dilution.

**keywords** : EMC, Mobile nitrogen, Pollutographs, Rural watersheds, Soluble reactive-P

## 1. 서론

우리나라의 강우특성은 60~70%가 하절기에 집중되어 있고, 이를 이용한 농업활동이 집중되는 시기이므로, 비점오염물질(non-point sources pollutants, 이하 NPS) 역시 장마기에 대량 유출되고 있다. 특히, 저수지 상류지역에 산재해 있는 논과 밭, 원예단지, 축산시설, 도시화 지역, 도로, 농공단지, 산림지역으로부터 강우시 강우유출수와 함께 유출되는 오염물질(광의적으로 해석하면 쓰레기, 수박, 참외 등의 과실류 포함)로 인하여, 일부 농업용 저수지인 경우에는 심각한 녹조현상 및 수질악화 문제에 직면해 있다.

미국의 EPA에 의한 미국내 하천 및 호소 평가 조사결과에 따르면 광범위하기 분포하는 농업관련 비점오염이 수체의 가장 큰 오염원으로 보고하고 있다(US EPA, 2003). 보고서에 따르면 수질이 악화된 하천과 호소의 48%와 41%가 농업 비점오염과 관련이 있는 것으로 보고 있다.

특정 유역에 강우가 내렸을 경우 유역출구지점에서 유출의 시간적 변화를 나타내는 수문곡선의 모양은 유역의 면적, 형상, 기울기 및 방향성, 유역의 토지이용 상태, 토양의 종류, 토양의 침투능, 하도특성에 따라 다양하게 변화한다. 이와 함께 유역출구에서의 오염물질의 시간적 농도분포를

보여주는 오염물질 농도곡선(pollutograph)도 대체로 수문곡선에 영향을 미치는 인자들에 의해 그 형태가 결정되는 것으로 알려지고 있다(Bras, 1990; Viessman et al., 1997; Wanielista et al., 1997).

오염물질 농도곡선의 형태 및 각종 오염물질의 구성특성을 파악하는 것은 비점오염의 관리와 저감시설을 설계할 때 대단히 중요하다. 예를 들어 포장지역으로 구성된 도시지역에서 발생하는 비점오염물질은 강우가 진행됨에 따라 수문곡선에서 유량이 첨두유량에 도달하기 이전에 오염물질의 농도가 빠른 속도로 감소하는 초기세척효과(first flush effect)가 일어난다. 도시지역에서 관측되는 초기강우효과를 적절히 활용하게 되면 각종 비점오염 저감시설의 처리용량을 효율적으로 설계할 수 있다.

그러나 도시지역 강우 유출수와 달리 투수지역으로 구성된 농촌유역으로부터 발생하는 오염물질 농도곡선의 형태는 인위적인 시비활동과 각종 강우특성인자가 자연현상과 결합하여 복합적으로 작용하여 복잡하게 전개되므로 재현성을 기대하기 어렵다. 또한 오염물질의 구성특성 측면에서 도시지역 강우 유출수에 함유된 대부분의 오염물질은 입상 오염물질(TSS)과 결합-흡착된 상태로 유출되므로 TSS의 변화와 밀접한 상관관계가 존재한다. 이와 반면에 농촌지역에서 발생하는 비점오염 오염물질은 공급요소, 식생과 작물요소, 토양요소 등 헤아릴 수 없는 수많은 변수에 의해 영향을 받는다. 특히 질소와 같은 영양소는 생물화학적 반응

† To whom correspondence should be addressed.  
ykim@hanseo.ac.kr

에 의해 그 형태가 시간에 따라 동적으로 변화하므로 유출 특성을 정량화하는 것은 대단히 어렵다.

1990년대 중반 이후 우리나라의 농촌유역에서 수많은 비점오염물질 유출에 관한 조사가 수행되었다. 이와 같은 조사연구 결과 농촌지역에서 발생하는 비점오염물질의 유출 수준을 어느 정도 파악하는 성과를 얻게 되었으나 동력학적 발생 기작이나 형태, 토지이용에 따른 발생특성, 영양소의 구성형태 등에 관한 연구는 아직 미미한 형편이다.

본 논문에서는 1997년 이후 저자에 의해 수행된 22개 농촌유역에서 135개 강우사상으로부터 얻은 강우 유출수 수질자료를 정리하는 과정에서 발견한 토지이용에 따른 유출 특성, 오염물질 농도곡선의 형태, 영양소의 구성 등 흥미로운 관찰내용을 제시하고 있다.

## 2. 연구방법

Table 1에는 본 연구를 위하여 이용된 자료의 출처 즉 농촌유역의 인식기호, 유역이 위치하고 있는 지명, 자료출처, 그리고 유역면적과 각종 토지이용 비율을 정리하여 나타내었다. 자료는 과학기술부 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(프론티어 연구개발사업, Frontier Research Program), 한국농촌공사(KRC)에서 과거 실시된 농업용 저수지 수질개선 사업, 그리고 최근에 환경부에서 실시하고 있는 비점오염 저감시설 모니터링 사업을 통하여 수집된 것이다.

Table 2에는 각 유역의 강우사상과 관련된 자료 즉 강우

량(RAIN), 강우지속시간(T), 선행건기일수(ADD)를 정리하여 제시하였다. 총 연구대상 유역은 22개소이었고 이들 유역에서 1997~2008년 사이에 총 135개 강우사상이 조사되었다.

조사대상 농촌유역은 대부분 1개의 지방하천 1급을 제외하고 지방하천 2급이나 무명 지류하천이었다. 토지이용은 대부분의 유역이 산림지역이거나 산림과 농경지 혼합지로 구성되어 있다. 일부 유역에서 강우량은 현장에서 측정되었으나 대부분의 지역에서 기상관측자료는 조사대상 유역 인근에 위치하고 있는 국가기상 관측망 자료를 활용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 토지이용에 따른 주요 오염물질 유출특성

Table 3~4에는 22개의 농촌유역에서 135개 강우사상에서 얻은 TSS, COD, Total-N, Total-P의 자료의 평균치, 표준편차(SD), 최대값(Max), 최소값(Min)을 제시하였다.

Fig. 1에는 전체 유역에서 농경지가 차지하는 비율에 따라 임야, 혼합, 농업지역으로 분류한 후 TSS, COD, Total-N, Total-P의 EMC (유량가중평균농도)를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 전체 유역면적에서 농경지가 차지하는 비율에 따라 forest 임야지역(<10%), hybrid 혼합지역(<15%), agricultural 농업지역(>40%)으로 분류하였다. 이와 같은 분류는 자료가 수집된 유역을 토지이용에 따라 분류하는 과정에서 설정된 수치로 과학적인 의미는 없다.

**Table 1.** Watersheds and stormwater data sources used for this study

NO.	Site	Data source	A (km <sup>2</sup> )	Land use (%)						
				Rice paddy	Crop land	Forest	Paved area	Road	Orchard	Others
Rural 1	Seosan City	Frontier(2001)	2.85	0.7	1.8	94.2	0.7	-	-	2.6
Rural 2	Seosan City	Frontie(2001)	4.97	6.4	8.4	82.3	1.5	-	-	1.4
Rural 3	Daejeon City	Frontier(2001)	3.38	-	-	99.5	-	0.1	-	0.4
Rural 4	Daejeon City	Frontier(2001)	27.37	-	35.9	44.8	13.3	4.7	-	1.3
Rural 5	Iksan City	KRC(1998a)	2.28	8.2	12.3	-	-	1.2	-	78.3
Rural 6	Iksan City	KRC(1998a)	1.19	9.2	27.5	63.3	-	-	-	-
Rural 7	Yeasan County	KRC(1998b)	5.87	7.0	3.7	89.3	-	-	-	-
Rural 8	Yeasan County	KRC(1998b)	5.05	38.2		61.8	-	-	-	-
Rural 9	Andong City	KRC(1998c)	8.33	20.9		79.1	-	-	-	-
Rural 10	Seosan City	KRC(2005-2006)	2.67	16.8	165	61.1	5.2	-	-	0.4
Rural 11	Seosan City	KRC(2005-2006)	1.93	4.0	7.6	86.1	2.3	-	-	-
Rural 12	Seosan City	KRC(2005-2006)	99.4	26.9	13.6	47.2	3.1	-	-	10.2
Rural 13	Seosan City	KRC(2005-2006)	25.1	44.1	15.6	20.7	16.4	-	-	3.2
Rural 14	Seosan City	KRC(2005-2006)	10.66	15.0	43.2	28.2	13.1	-	0.53	-
Rural 15	Seosan City	KRC(2005-2006)	4.07	12.5	17.5	64.5	5.2	-	0.35	-
Rural 16	Seosan City	KRC(2005-2006)	1.88	30.3	38.0	23.5	8.3	-	-	-
Rural 17	Yongin City	MOE(2006-2007)	27.66	10.7	47.1	23.1	19.1	-	-	-
Rural 18	Yoongin City	MOE2006-2007)	6.52	-	66.9	-	-	7.0	-	26.1
Rural 19	Icheon City	MOE2006-2007)	7.42	25.0	19.8	39.2	2.8	-	-	13.7
Rural 20	Yongin City	MOE2006-2007)	3.6	26.1	70.3	-	-	-	-	-
Rural 21	Yongin City	MOE2006-2007)	7.03	59.5	5.5	-	35.0	-	-	-
Rural 22	Yongin City	MOE2006-2007)	8.37	-	48.1	36.6	9.8	5.5	-	-

Table 2. Event rainfall information

Event No.	Rural 1			Rural 2			Rural 3			Rural 4		
	RAIN <sup>a</sup>	T <sup>b</sup>	ADD <sup>c</sup>	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD
1	1.0	3	3	1.0	2	3	18.5	7	7	185	7	7
2	16.5	5	6	16.5	5	6	67.0	12	13	66.5	12	13
3	44.2	15	9	22.0	13	14	14.4	5	3	14.4	5	3
4	129.5	13	2	129.0	13	2	43.5	6	2	43.5	6	2
5	24.0	12	7	24.0	12	7	44.5	12	1	44.5	12	1
6	0.1	1	1	0.1	1	1	259.8	6	2	259.8	6	2
7	19.5	20	7	19.5	20	7	35.0	9	2	35.0	9	2
8	89.5	34	2	89.5	34	2	4.5	6	5	4.5	6	5
9	12.0	8	7	12.0	8	7	37.0	5	5	135.0	10	1
10	118.0	12	2	-	-	-	135.0	10	1	-	-	--

Event No.	Rural 5			Rural 6			Rural 7			Rural 8		
	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD
1	3.0	1	9	15.7	4	2	49.0	6	1	28.0	7	1
2	15.7	6	1	33.8	3	2	32.5	5	7	36.0	12	5
3	33.8	3	2	38.5	2	1	47.7	6	18	-	-	-

Event No.	Rural 9			Rural 10			Rural 11			Rural 12		
	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD
1	29.0	7	1	42.0	8.0	2	42.0	8.3	2	35.0	8	6
2	80.0	13	1	38.0	11.3	5	38.0	12.4	5	97.0	24	13
3	36.0	12	5	82.5	29.5	2	82.5	32.2	2	21.0	22	16
4	-	-	-	16.0	12.0	3	16.0	12.0	3	-	-	-

Event No.	Rural 13			Rural 14			Rural 15			Rural 16		
	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD
1	35.0	8	6	111	11	1	57.5	8	1	30.5	4	18
2	97.0	24	13	30.5	5	18	30.5	2	18	24.5	4	9
3	21.0	22	16	24.5	4	9	24.5	3	9	-	-	-
4	117.5	11	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	142.5	59	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Event No.	Rural 17			Rural 18			Rural 19			Rural 20		
	RAIN <sup>a</sup>	T <sup>b</sup>	ADD <sup>c</sup>	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD	RAIN	T	ADD
1	14.5	10	3	11.5	5	1.4	17.0	9	3	13.5	8.5	2
2	12.0	13	2	94.5	15	3.6	26.5	14	2	6.5	4.3	19
3	24.0	24	3	13.0	4	3.1	29.0	22	5	22.0	14.9	45
4	1.5	7	10	4.0	4.5	44.5	31.5	4	20	7.0	3.3	13
5	14.0	3	3	26.0	12	16.1	1.5	12	10	34.0	11.3	1.2
6	27.0	17	6	12.0	12	2.9	25.0	21	27	60.5	10.8	3
7	30.5	16	3	7.5	7.5	4.2	17.0	17	3	48.0	10.3	4
8	82.0	22	1	17.5	17.5	1.3	54.5	17	1	10.2	14.7	3
9	4.5	2	11	5.0	5	1.6	18.0	17	2	72.3	8.1	2
10	17.5	18	2	6.1	6.1	3.9	37.5	24	1	120	18.0	7
11	5.5	11	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Event No.	Rural 21			Rural 22		
	RAIN <sup>a</sup>	T <sup>b</sup>	ADD <sup>c</sup>	RAIN	T	ADD
1	62	8.0	3.04	8	4	5
2	12	5.0	2.63	15	5	2
3	6.5	1.5	33.5	11	4	6
4	13	9.6	4.89	20	8	34
5	17	9.0	1.71	16	5	2
6	60.5	8.8	3.7	9	5	12
7	4.5	2.4	2.9	6	4.5	2
8	5.0	0.8	2.4	6	5	2
9	58.5	5.5	5.3	28.5	13	6
10	6	2.0	15.1	3	1	2

분석결과에 따르면 우선 임야지역에서 발생하는 오염물질 EMC의 변동 폭은 혼합지역이나 농업지역에서 보다 작은 것으로 나타났다. 혼합구역과 농업지역에서 높은 농도의 TSS, COD, Total-N, Total-P의 EMC가 관측되었다. 혼합지역과 농업지역에서는 변동 폭에는 큰 차이가 있었지만 평균값은 비슷하였으나 TN의 EMC 값은 다른 오염물질과 비교하여 농경지의 비율이 증가함에 따라 뚜렷한 차이와 함께 월등하게 높은 수치를 보였는데 이와 같은 결과는 1982년 미국 Maryland, Ohio, Wisconsin, Minnesota 주의 40여개 하천수질 조

a: event rainfall depth (mm), b: duration (hr), c: advanced dry days

**Table 3.** Statistics of TSS and COD EMC values

Site	n	TSS				COD			
		Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
Rural 1	10	62.2	67.4	3.1	195.4	7.2	2.8	3.2	10.9
Rural 2	9	122.5	174.8	5.6	523.5	16.6	14.4	2.8	49.8
Rural 3	10	5.1	11.3	0.5	37.0	6.9	4.7	2.8	16.6
Rural 4	9	110.0	208.8	8.4	662.0	20.7	11.0	6.0	37.5
Rural 5	3	35.7	26.9	5.0	55.0	16.0	6.1	9.0	20.0
Rural 6	3	177.3	131.1	30	281.0	17.3	5.5	11.0	21.0
Rural 7	3	78.0	68.2	25	155.0	15.0	11.5	6.0	28.0
Rural 8	2	52.0	32.5	29	75.0	6.5	0.7	6.0	7.0
Rural 9	3	98.0	135.5	10.0	254.0	8.7	2.9	7.0	12.0
Rural 10	4	161.5	141.0	36.8	364	26.1	5.6	20.4	32.8
Rural 11	4	44.4	44.5	10.4	109.7	14.6	6.1	0.1	23.7
Rural 12	3	205.7	198.3	39	425	10.2	3.9	6.3	14.1
Rural 13	5	183.4	81.1	71	297	23.3	12.2	10.7	41
Rural 14	3	487.3	114.9	419	620	14.2	5.9	7.7	19.1
Rural 15	3	179.7	151.2	258	349	15.4	9.0	8.5	25.6
Rural 16	2	129.0	149.2	58.0	200.0	9.9	9.9	8.5	11.2
Rural 17	9	65.2	81.8	10.3	259.7	16.4	18.0	3.05	52.06
Rural 18	10	22.3	15.59	4.2	56	15.7	13.1	4.2	44.9
Rural 19	10	401	577.4	2.6	1937	36.5	33.1	2.98	104.8
Rural 20	10	126.7	106.5	21	329.7	12.44	11.5	4.7	44.6
Rural 21	10	146.5	112.7	24.5	406	15.63	5.60	7.6	24.3
Rural 22	10	90.9	59	17.2	176.9	27.8	26.1	7.7	92.5

**Table 4.** Statistics of Total-N and Total-P EMC values

Site	n	TN (mg/L)				TP (mg/L)			
		Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
Rural 1	10	0.9	0.2	0.7	2.3	0.16	0.07	0.03	0.28
Rural 2	9	2.1	0.5	1.3	2.6	0.62	0.52	0.09	1.77
Rural 3	10	0.9	0.7	0.1	2.2	0.29	0.13	0.10	0.52
Rural 4	9	4.8	2.4	1.9	10.6	1.34	0.53	0.88	2.29
Rural 5	3	6.0	2.6	4.0	9.0	0.67	0.46	0.40	1.20
Rural 6	3	4.7	2.1	3.0	7.0	0.70	0.26	0.40	0.90
Rural 7	3	6.7	2.1	5.0	9.0	0.67	0.29	0.50	1.00
Rural 8	2	5.0	0.0	5.0	5.0	1.15	0.07	1.10	1.20
Rural 9	3	8.3	0.0	8.3	8.3	1.20	0.26	1.00	1.50
Rural 10	4	7.1	1.1	6.2	8.6	0.90	0.61	0.50	1.80
Rural 11	4	2.6	1.7	0.9	4.9	0.50	0.38	0.10	0.90
Rural 12	3	5.6	2.7	4.0	8.7	0.44	0.20	0.20	0.61
Rural 13	5	7.4	3.6	4.5	12.5	0.79	0.42	0.40	1.50
Rural 14	3	5.8	1.6	4	7	1.02	0.26	0.73	1.21
Rural 15	3	5.9	0.7	5.4	6.7	0.81	0.01	0.8	0.82
Rural 16	2	6.0	2.9	5.3	6.7	1.1	0.5	0.8	1.3
Rural 17	9	7.5	3.0	4.2	13.8	0.53	0.19	0.23	0.77
Rural 18	10	3.0	3.3	0.6	11.9	0.65	0.74	0.16	2.64
Rural 19	10	8.9	5.2	2	17.9	1.36	1.90	0.09	6.20
Rural 20	10	3.5	1.5	2.2	6.9	0.35	6.25	0.10	0.81
Rural 21	10	7.3	2.5	4.2	11.7	0.54	1.15	0.03	3.80
Rural 22	10	7.9	6.5	2.6	21.9	1.24	2.00	0.02	6.12

사결과와도 뚜렷하게 일치하고 있다(Beaulic and Reckhow, 1982).

**3.2 토지이용에 따른 오염물질 농도곡선의 형태**

특정 유역에 강우가 내렸을 경우 유역출구지점에서 유출

의 시간적 변화를 나타내는 수문곡선의 모양은 유역의 면적, 형상, 기울기 및 방향성, 유역의 토지이용 상태, 토양의 종류, 토양의 침투능, 하도특성에 따라 다양하게 변화한다. 수문곡선의 형태는 유역의 형상과 강우의 이동성에 의해 결정된다.

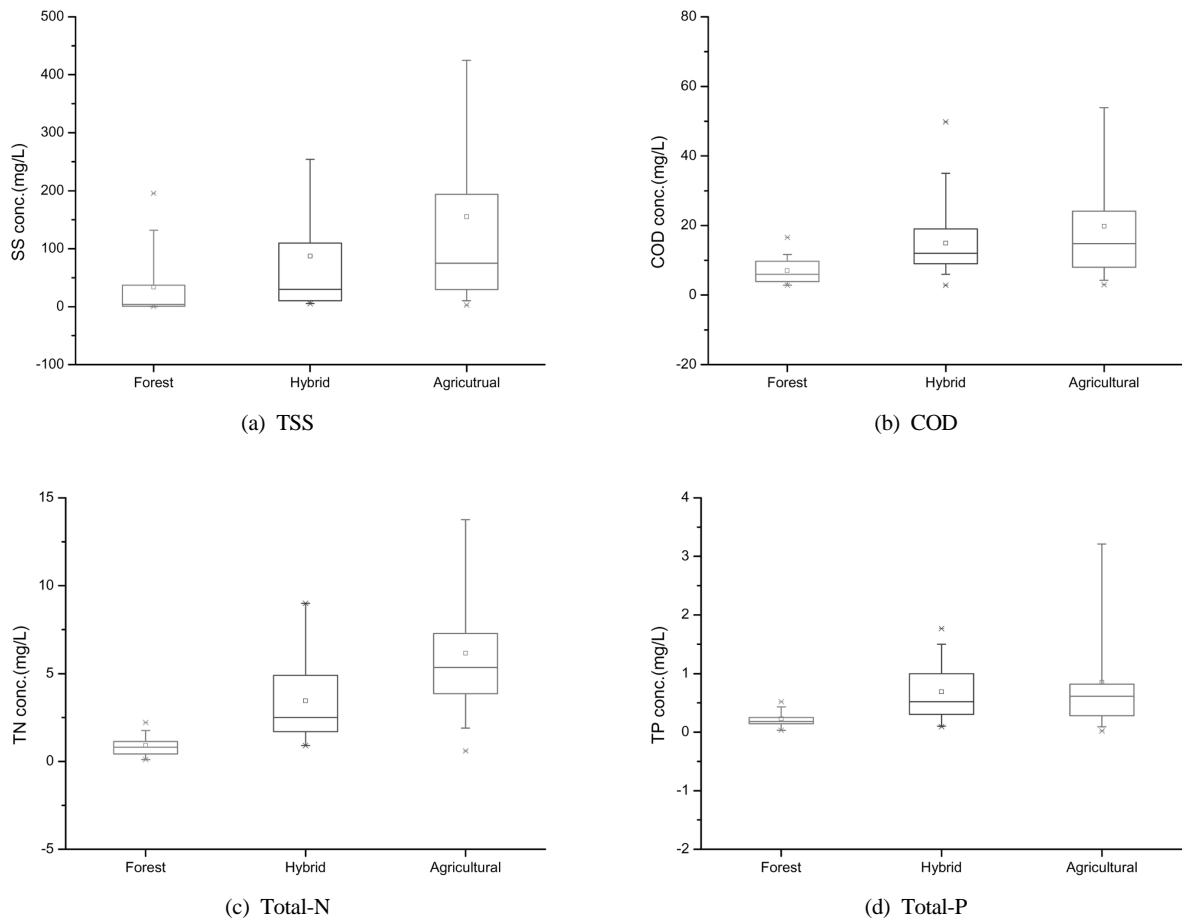


Fig. 1. Land use versus EMC range of (a) TSS, (b) COD, (c) Total-N, and (d) Total-P.

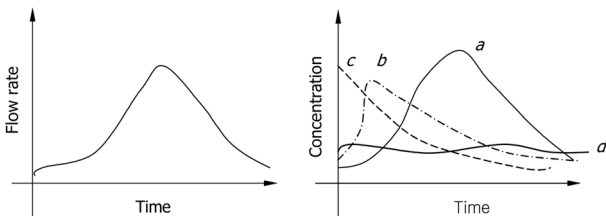


Fig. 2. Shape of pollutograph during the period of stormflow.

이와 함께 유역출구에서의 오염물질의 시간적 농도분포를 보여주는 오염물질 농도곡선(pollutograph)도 대체로 수문곡선에 영향을 미치는 인자들에 의해 그 형태가 결정되는 것으로 알려지고 있다. 먼저, 강우시 유역의 출구에서 관측될 수 있는 오염물질 농도곡선의 형태는 크게 Fig. 2에 서처럼 4가지 형태로 분류할 수 있다.

그림에서 a 형태의 농도분포 곡선은 정확히 수문곡선의 형태를 반영하는 오염물질 농도곡선이며, b 형태는 수문곡선과 형태는 같으나 첨두값에 있어 수문곡선보다 선행하여 진행되며, 이를 초기강우 효과(first flush effect)라고 부른다. 이와 반면에 c처럼 강우 유출의 개시와 함께 희석작용으로 인하여 감소하는 성향을 보이며, 이와 같은 형태의 오염물질 농도 곡선은 평상시 기저유량의 성분농도보다 강우 유출수의 성분농도가 낮은 경우에 발생된다. 한편, d 곡선의 형태는 성분이 유량에 관계없이 유출시간 동안에 Random

하게 유출된다.

전술하였듯이 오염물질 농도곡선의 동적인 변화를 파악하는 것은 비점 오염물질 저감시설을 구상하고 설계할 때 대단히 중요하다. Table 5에는 농촌유역에 따라 오염물질 항목별로 농도곡선의 형태를 분석하여 제시하였다.

Fig. 3에는 오염물질 농도곡선의 형태별 점유율을 오염물질 항목에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 먼저 TSS와 COD, TP는 강우시 수문곡선의 형태와 유사한 변화를 보이는 Type a, b 형태가 주종을 이루는 것으로 조사되었는데 그 이유는 유기물질과 토사 등과 같은 물질과 결합성이 강한 인 등은 강우시 지표면 유출을 통하여 배출되는 TSS(토사 등)와 결합하여 유출되기 때문이다.

한편 용존성  $PO_4^{3-}$ 도 유량증가와 함께 증가하는 Type a, b 농도곡선 패턴을 보이고 있는 점이 특이한데 그 이유는 명확하지 않다. 다만 식물의 성장에 필요한 이상의 과잉  $PO_4^{3-}$ 는 일시적으로 토양이나 수변구역에 저장되어 있다가 강우유출과 함께 일시에 배출되거나 강우에 따른 Flooding으로 용존성 인의 용출이 촉진되는 무산소 조건이 형성되기 때문으로 판단된다. 질소성분은 다른 거동을 보였는데 특히 이동성 질소 성분인  $NO_3^-$ 는 유량변화와 무관하게 대부분 Random하게 유출되는 특성(Type d)을 보였으며 부분적으로 유량변화와 관련이 있는 것으로 밝혀졌다.  $NO_3^-$ 에 대한 동력학적 거동은 추후에 다시 논의하기로 하겠다.

**Table 5.** Shape of pollutograph (Rural 1-4)

Parameters	Type c: Wash-out (Number of event)				Type a, b: Increase (Number of event)				Type d: Random (Number of event)				Sum
	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	
TSS			1		8	10	8	9		2	1	1	40
TCOD			4		10	9	6	7		1		3	40
SCOD	1	2	3	1	8	6	6	8	1	2	1	1	40
TN		1	2	2	3	3	5	8	7	6	3	0	40
TP		1			7	6	5	7	3	3	5	3	40
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	3	2	2	5	3	4	7	2	4	4	1	3	40
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		1	1	2	5	2	8	3	5	7	1	5	40
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1	1	3	2	5	4	5	6	4	5	2	2	40
Coliform bacteria	5	8	6	2	4			1	6	2	4	2	40

**Table 5.** Shape of pollutograph (Rural 10-11) (continued)

Parameters	Type c: Wash-out (Number of event)				Type a, b: Increase (Number of event)				Type d: Random (Number of event)				Sum
	R10	R11	R1a	R2a	R 10	R 11	R1a	R2a	R10	R 11	R1a	R2a	
TSS					4	4	4	4					16
TDS	4	3	2	1		1		3			2		16
TCOD					4	4	4	4					16
SCOD					4	4	4	4					16
TN	1	2			3	2	4	4					16
TP					4	4	4	4					16
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>					4	4	4	4					16
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>					3		4	3	1	4		1	16
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>					4	4	4	4					16
Coliform bacteria					4	4	4	4					16

**Table 5.** Shape of pollutograph (Rural 12-16) (continued)

Parameters	Type c: Wash-out (Number of event)					Type a, b: Increase (Number of event)					Type d: Random (Number of event)					Sum
	R12	R13	R14	R15	R16	R12	R13	R14	R15	R16	R12	R13	R14	R15	R16	
TSS						3	5	3	3	2						16
TCOD		1				3	4	3	3	2						16
TN		2	1			3	2	2	3	2		1				16
TP						3	5	3	3	2						16
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>						3	3	2	2	1		2	1	1	1	16
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		1					1	2		2	3	3	1	3		16
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>						3	5	3	3	2						16

**Table 5.** Shape of pollutograph (Rural 17-22) (continued)

Parameters	Type c: Wash-out (Number of event)						Type a, b: Increase (Number of event)						Type d: Random (Number of event)						Sum
	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R17	R18	R19	R20	R21	R22	
TSS							11	10	11	10	10	6							58
TCOD							10	10	11	10	10	6	1						58
TN	2	4	4				3	5	6	2	7	2	3	4	5	5	3	8	58
TP	1						4	9	10	11	10		2	1					58
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1							1	4	1	3			9	7	10	7		43
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1							8	10	11	10	10		2					52

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>보다 용존성이 약한 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 초기강우효과와 함께 수문곡선과 연동하여 변화를 나타내었으나 Random한 패턴도 약 30%에 이르렀다. 이러한 특징은 질산성 질소가 암모니

아 질소보다 용존성과 이동성이 훨씬 강하기 때문인 것으로 사료된다. 총질소 TN은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 패턴을 반영한 중간정도의 유출형태를 나타내는 것으로 분석되었다.

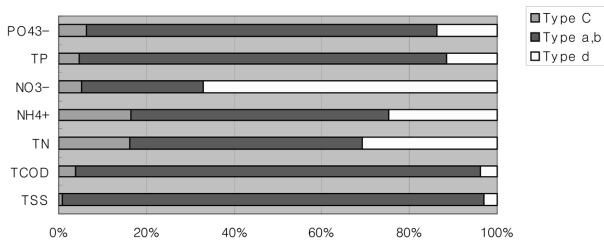


Fig. 3. Fraction occupied by each NPS pollutograph type.

3.3. 토지이용에 따른 용존 반응성 인의 유출비율

Fig. 4에는 강우시 총인 TP에 대한 반응성 인  $PO_4^{3-}$  (soluble reactive-P)의 비율을 대표지역을 선정하여 그림으로 나타낸 것이다. 그림에 따르면 임야지역(SRP = 10~20%)과 비교하여 임야 + 농경지로 이루어진 혼합유역과 농경지유역(SRP ≈ 40%)에서 이 비율이 높은 것으로 분석되었는데 그 이유는 SRP가 작물에 필요한 이상으로 과잉 공급될 때 토양에 저장되어 있다가 강우시 일시적으로 배출되기 때문인 것으로 사료된다.

또한 용존성 인은 토양에 함유된 P 함량과 관련이 있는데 일반적으로 토양 P 함량과 SRP 사이에는 선형관계가 있는 것으로 알려져 있다(Daniel et al., 1998; Pote et al., 1999; Schoumans and Groenedijk, 2000). 즉 농경지에서는 오랜 시간동안에 걸쳐 이루어진 시비활동 때문에 인이 흡착·축적되어 있으므로 산림지역과 비교하여 높은 비율의 SRP가 유출되는 것은 당연하다.

3.4. 토지이용에 따른 이동성 질소의 유출비율

Fig. 5에는 농촌유역에서 강우시 토지이용에 따른 총질소 TN에 대한 TKN의 비율을 나타낸 것이다. 그림에 나타난

것처럼 임야지역에서는 TKN 비율이 작고(다시 말하면  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ 와 같은 용존 이동성 질소의 배출비율이 크며) 이와 반면에 농경지나 혼합지역에서는 유기질소와 암모니아 질소와 같은 TKN 비율이 높은 것으로 조사되었다.

임야로 구성된 유역에서 총질소 TN에 대한 TKN의 비율이 낮다는 것은 상대적으로 임야에서 질산화 반응이 활발하다는 반증이다. 일반적으로 임야지역에서 나뭇잎 등 각종 부산물의 부패로 기인된  $NH_4^+$ 가 매우 빠른 속도로 나무와 식물에 의해 섭취되므로 질산화 속도는 매우 낮은 것으로 보고되고 있다(Bormann et al., 1974; Bormann and Likens, 1994). 또한 이러한 영양소는 세포내부에서 순환되는 것으로 알려져 있다. 예를 들어 가을철 낙엽에 축적된 영양소는 회수되어 동면기간 동안 세포에 저장되며 봄철에 성장 에너지로 다시 사용되며(Kozlowski and Pallardy, 1997) 나머지 영양소는 토양 박테리아나 곰팡이에 의해 소비되거나 고정된다.

이와 반면에 Creed and Band(1998)은 임야로 구성된 유역의 지형적인 특징에 따라 차이가 있다고 주장하고 있는데 그의 연구에 따르면 지형적 특성에 따라 유역내부에 오염원의 확장과 수축이 있을 수 있다고 보고하고 있다. 한편 동절기 건조한 기간 동안에  $NO_3^-$ 는 토양 속에 축적되어 있다가 강우가 시작되어 포화대가 상승하여 토층과의 접촉이 일어나면 지표수와 함께 일시에 배출되며 포화대의 확장 상승은 질산성 질소의 이동을 가속화시키게 되며 이러한 현상은 일시적이거나 간헐적 또는 년 단위로 일어날 수 있다고 한다. 포화대와 접촉이 일어날 수 있는 지형적인 특징으로 오목하거나 평면 또는 불룩한 형태의 유역, 그리고 유역의 경사도, 계곡 등을 들고 있다.

한편 실트질이나 실트질-진흙, 또는 부식토와 유기물질을

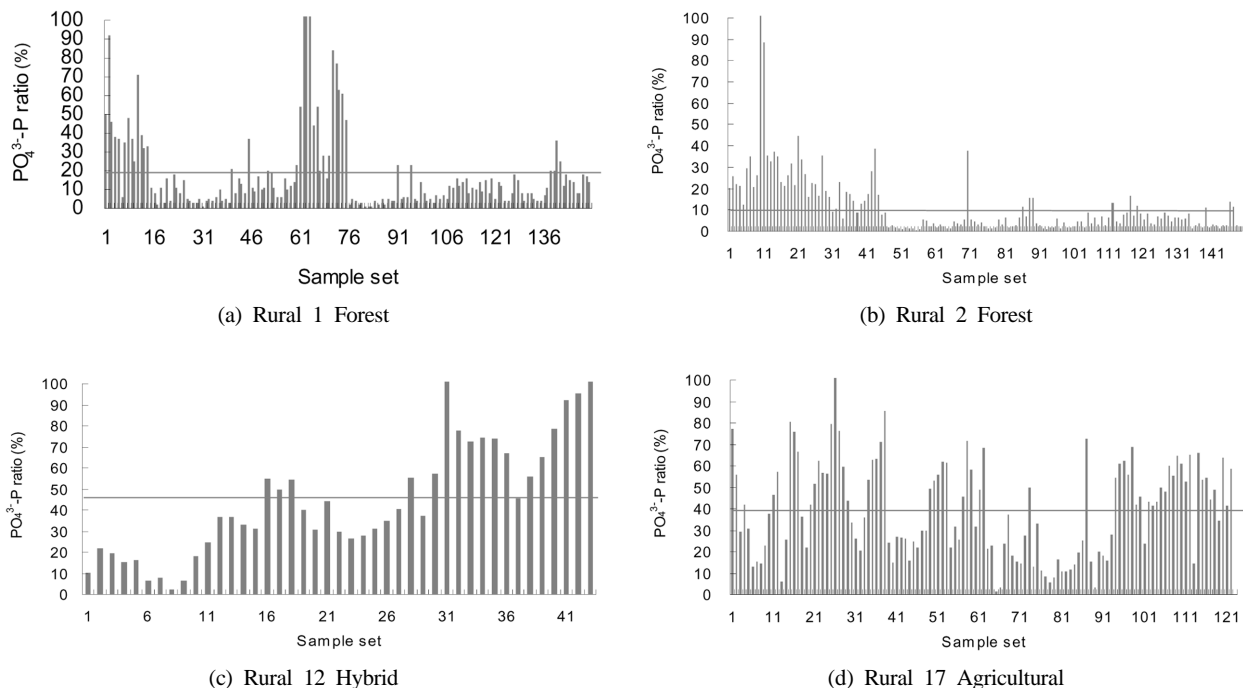


Fig. 4. Percent reactive-P ratio (Horizontal line-mean value).

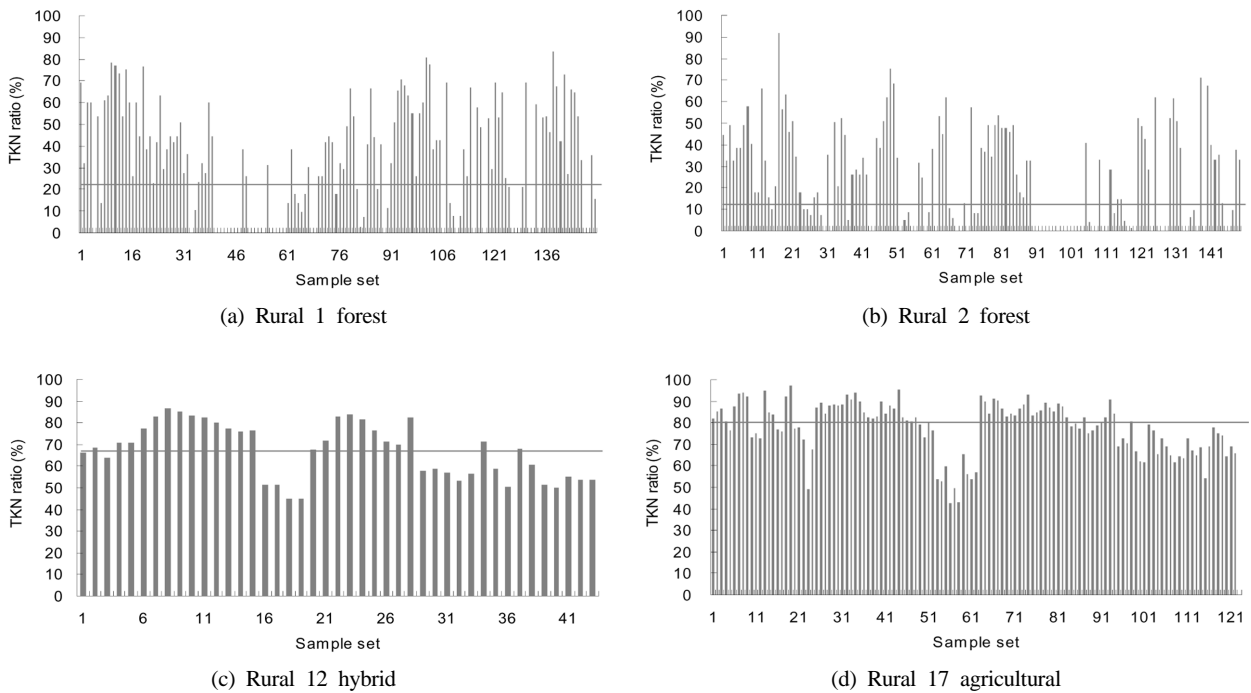


Fig. 5. Percent TKN ratio (horizontal line - mean vealue).

많이 함유하는 토양과 같이 양이온 교환능력이 큰 토양일 수록  $NH_4^+$ 를 억류하는 경향이 크므로 질산화에 의한 이동성 질소로 전환될 가능성이 작다(Barns et al., 1998). 또한 임야에서 질소에 대한 탄소의 상대적인 비율을 나타내는 C:N 비 역시 이동성 질소 유출에 지대한 영향을 미치는 인자로 인식되고 있다. C/N 비가 클 때에는 미생물은 대부분  $NH_4^+$ 와  $NO_3^-$ 와 같은 형태의 질소를 소비하여 미생물 세포로 고정되므로 유출되는 이동성 질소의 양은 작다 (Gunderson et al., 1998). Gunderson 등(1998)은 유럽과 스칸디나비아 지역의 산림지역에서 얻은 자료에 근거하여 질산성 질소의 배출관점에서  $C/N > 30 = \text{low risk}$ ,  $25 < C/N < 30 = \text{moderate}$ ,  $C/N < 25 = \text{high risk}$ 로 판정하는 가이드라인을 제시하고 있다.

Fig. 6에는 산림지역, 혼합지역, 농경지 유역에서 얻은 EMC 자료를 이용하여 각각의 유역에 대한 C/N 비를 보여 주고 있다. 먼저 임야지역에서의 C/N 비는 평균 3.2 정도 이고 범위는 최저 1에서 최대 14 정도였다. Gunderson 등 (1998)이 제시한 기준과 비교하면 질산성 질소유출 위험이 매우 큰 것으로 드러났다.

산림지역과 반대로 혼합지역이나 농경지에서 낮은 C/N 비에도 불구하고 TKN에 대한 이동성 질소의 유출 분율이 낮게 나타났는데(Fig. 5) 그 이유는 농경지에 살포되는 대부분의 질소는 유기물질의 형태, 토양유기물질(humus), 토양입자에 흡착된 형태로 저장되며 아주 느린 속도로 식물체에 이용 가능한  $NH_4^+$ 와  $NO_3^-$ 로 전환되며 이 중 일부는 작물의 성장에 즉각적으로 이용되거나 농경지에 국부적으로 존재하는 무산소 지역에서 탈질과정을 통하여 제거되었기 때문에 사료된다.

질소의 배출형태는 또한 임야를 구성하는 수종과 수령이

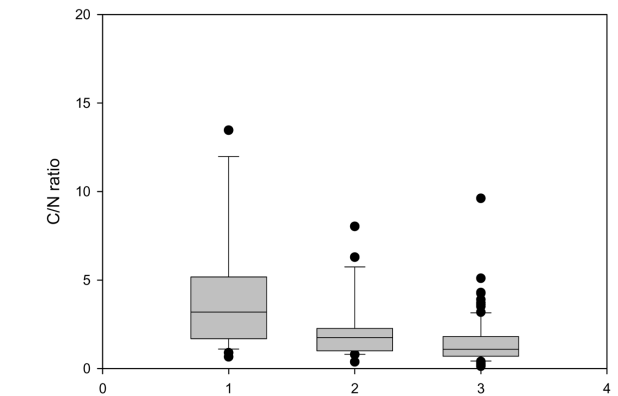


Fig. 6. Carbon and nitrogen ratio in different land use.

주요 변수라는 주장도 있다. 연구결과에 따르면 참나무 군락(red oak tree)으로 구성된 지역보다 단풍나무(sugar maple)로 구성된 임야지역에서 훨씬 높은 질산화 속도와 토양에 함유된 질산성 질소의 양이 많았다고 보고하고 있다(Lovett and Rueth, 1999; Lovett et al., 2002). Pardo 등 (1995)은 속성수림이나 초기 천이단계에 있는 임야지역에서는 식생섭취속도가 매우 빠르므로 침출되는 질산성 질소의 양도 적은 반면에 천이단계를 거쳐 성숙단계에 접어들게 되면 질소 보유정도가 감소하여 배출되는 질산성 질소의 양이 증가하는 것으로 보고하고 있다.

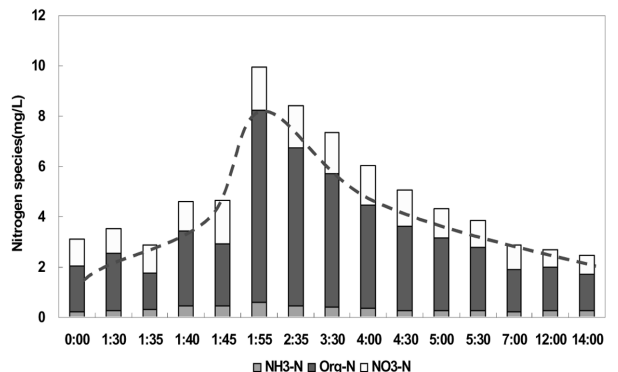
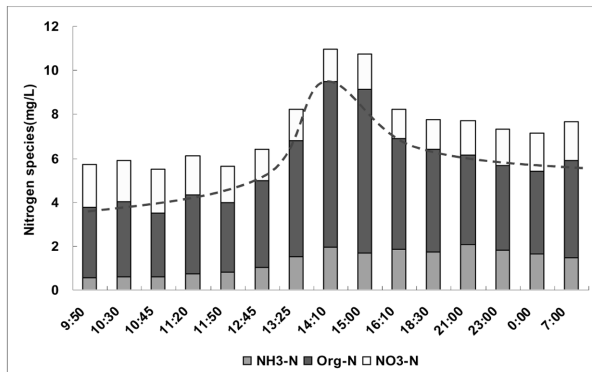
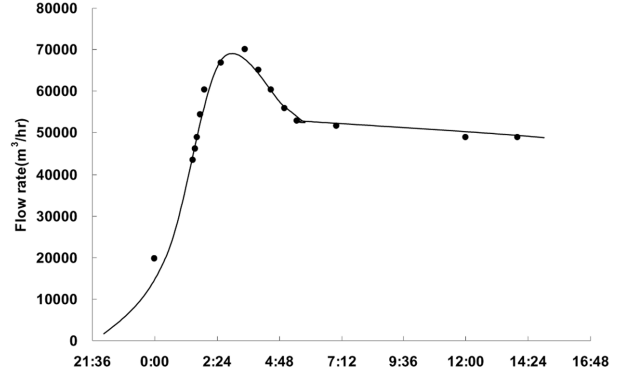
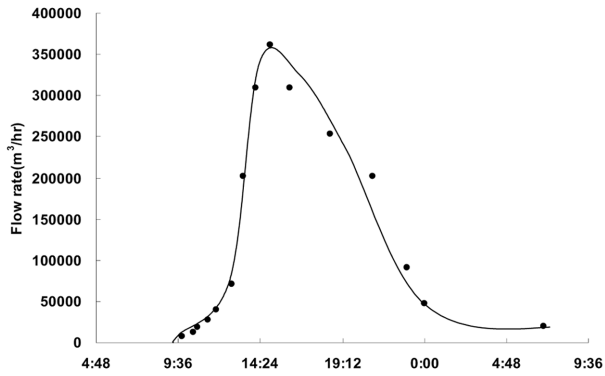
미국의 Harvard Forest 시험림에서 수행된 인위적인 비료살포 시험 연구결과에 따르면 수종에 따라 질산성 질소의 배출정도가 다른 것으로 조사되었는데 참나무보다 소나무로 구성된 임야에서 훨씬 높은 농도로 질산성 질소가 배출된다고 보고하고 있다(Aber et al., 1998; Magill et al., 1997, 2000). 우리나라의 임야지역과 같이 대부분



소나무와 같은 침엽수가 주종을 이루고 있다고 보면 임야지역에서 질산성 질소가 높은 이유를 부분적으로 설명될 수 있다.

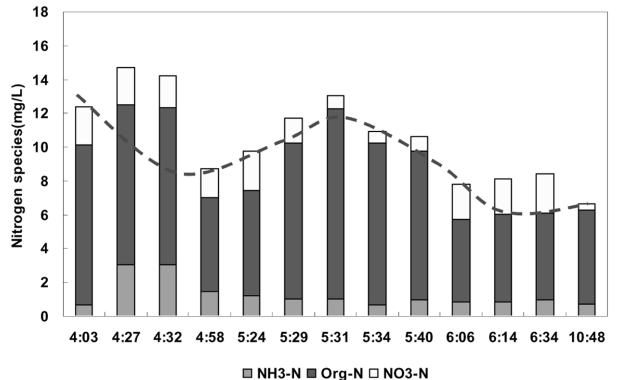
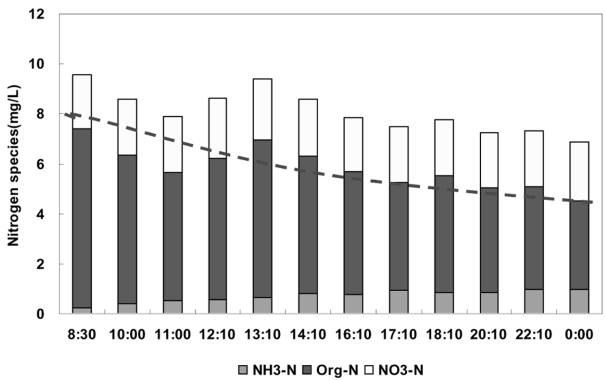
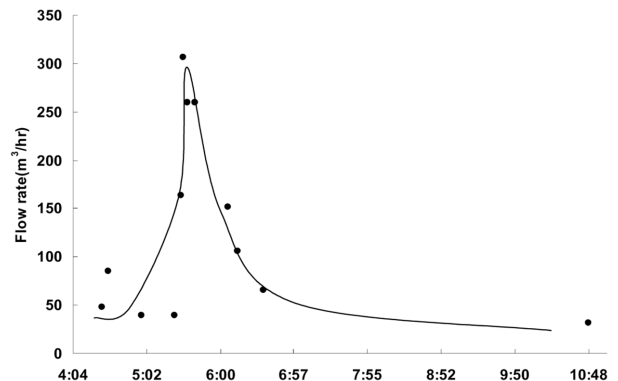
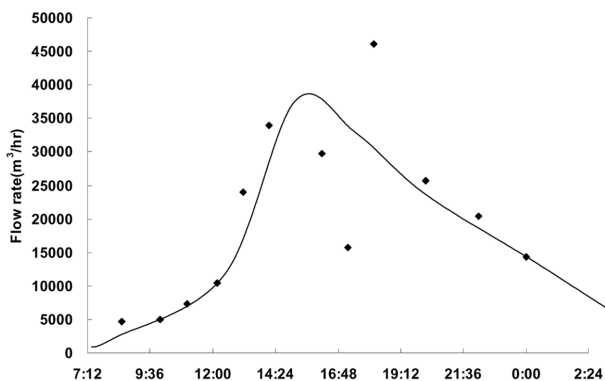
### 3.5. 강우시 질소의 동력학적 발생특성

Fig. 7에는 강우유출시 시간에 따른 TKN(Org-N + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 변화를 4개의 농경지 구역에서 얻은 농도곡선과



(a) Rural 12

(b) Rural 14



(c) Rural 14

(d) Rural 19

Fig. 7. Dynamic change of nitrogen components during stormflow.

가지고 제시하였다.

이동성 질소인 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우에는 강우시작 후 종료 시까지 거의 일정하거나 강우 직전과 강우 후에 증가하는 경향을 보였다. 미국 지질조사국 자료에 따르면 밭의 경우 질산성 질소의 경우 대부분 지표면 유출보다는 기저유량의 유출에 의해 기인하므로 강우시작 후 유량이 증가함에 따라 그 농도가 감소하다가 침투 유량에서 최소치를 보이고 유량감소와 함께 증가하는 패턴이 일반적인 것으로 보고하고 있으나(Watt, 2000) 우리나라와 같이 농경지의 대부분을 차지하는 수경 논이 존재하는 경우 전혀 다르게 나타날 수 있는 것으로 드러났다.

TKN의 경우에는 유역과 시간에 따라 유량증가와 함께 증가하거나 감소하는 경향을 보였다. 일부 유역에서 유량증가와 함께 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도도 함께 증가하는 경우도 있었다. 유역에서 질소가 갖는 다양한 공급 및 소비요인, 물리·화학·생물학적 반응을 놓고 볼 때 강우가 진행되는 동안 질소의 오염물질 농도곡선의 변화패턴을 일반화하는 것은 불가능한 것으로 판단된다. 그러나 한 가지 확실한 것은 농촌유역에서 총질소(TN)의 오염물질 농도곡선의 형태는 TKN의 변화에 의해 지배되는 것으로 판단된다.

강우시 질소의 물리적인 구성성분의 변화에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 제시된 자료는 경기도 지방의 농경지 유역(Rural 19)에서 얻은 결과이다. 대체로 비강우시에는 Dissolved-TN(DTN)이 주종을 이루는 반면에 강우가 진행되는 동안에는 DTN의 농도는 강우에 희석되면서

그 농도가 낮아지고 지표면 유출과 함께 입자상 물질의 배출이 증가함에 따라 입자에 의한 Particle-TN(PTN)이 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 강우시 농촌유역에서 질소 농도의 변동은 COD와 TP 등 다른 오염물질과 마찬가지로 토사입자의 유출과 분명하게 관련이 있으나 그 효과가 강우에 의한 DTN(Dissolved Org.-N + Dissolved NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 희석감소와 강우특성인자와 결합되면서 복잡한 양상을 나타내는 것으로 사료된다.

### 4. 결론

본 논문에서는 우리나라의 22개 농촌유역에서 수행된 강우조사 자료를 유출특성의 관점에서 분석하였다. 농촌유역에서 관측된 각종 오염물질의 EMC 값을 농경지 비율에 따라 분류하여 분석한 결과 각 유역에서 농경지의 비율이 증가함에 따라 SS, COD, TN의 증가가 뚜렷하게 나타났으나 TP의 경우 농경지의 영향이 크게 작용하지 않는 것으로 밝혀졌다. 오염물질 농도곡선의 형태를 분석한 결과 대부분의 항목이 수문곡선의 형태와 상사성을 보였거나 감소하는 패턴을 나타내었으나 질소의 경우 다양하고 복잡한 유출곡선의 형태를 나타내었다.

토지이용에 따라 총인에 대한 반응성 인과 총질소에 대한 TKN의 비율을 분석한 결과 논인 경우에는 농경지의 비율이 증가함에 따라 반응성 인의 비율이 증가하는 것으로 밝혀졌다. 그러나 질소의 경우 농경지보다 산림지역에서 이동성 질소의 비율이 높은 것으로 분석되었다.

강우시 질소농도 곡선의 형태는 입자상 물질의 TKN 변화에 의해 결정되며 강우에 의한 DTN의 희석작용, 강우특성인자 등과 결합하여 복잡한 유출형태를 띠는 것으로 밝혀졌다.

### 사 사

본 연구는 환경부 Eco Star Project (수생태 복원 사업단)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

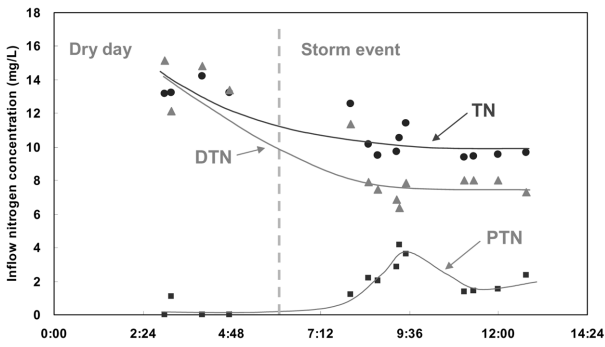
Aber, J. D., McDowell, W., Nadelhoffer, K., and Magill, A. (1998). Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *BioScience*, **48**, pp. 921-934.

Barns, B. V., Zak, D. R., Denton, S. R., and Spurr, S. H. (1998). *Forest Ecology*, John Wiley & Sons, New York.

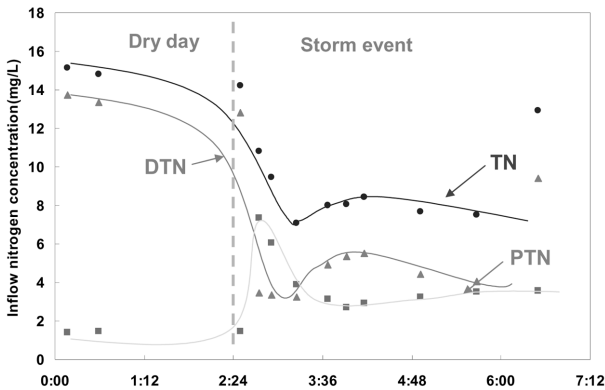
Beaulic, M. N. and Reckhow, K. H. (1982). An examination of landuse - nutrient export relationship, *Water Resources Bull.*, **18**, pp. 1013-1024.

Bormann, F. H. and Likens, G. E. (1994). *Pattern and Process in a Forested Ecosystem*, Springer and Verlag, New York.

Bormann, F. H., Likens, G. E., Siccama, T. E., Pierce, R. S., and Eaton, J. S. (1974). The export of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation at Hubbard Brook. *Ecol. Monogr.*, **44**, pp. 255-277.



(a) One type of nitrogen pollutograph



(b) Another type of nitrogen pollutograph

Fig. 8. Change of nitrogen form during dry and wet day (Rural 19).

- Bras, R. L. (1990). *Hydrology : An Introduction to Hydrologic Science*, Addison-Wesley.
- Creed, I. F. and Band, L. E. (1998). Exploring functional similarity in the export of nitrate-N from forested catchments: a mechanistic modeling approach. *Water Resource Res.*, **34**, pp. 3079-3093.
- Daniel, T. C., Sharpley, A. N., and Lemunyon, J. L. (1998), Agricultural phosphorus and eutrophication: a symposium overview. *J. Environ. Qual.*, **27**, pp. 251-257.
- Frontier Research Program, Sustainable Water Resources Research Center (2001). Evaluation of Stream Water Quality for Application of Integrated Water Budget Analysis, Sustainable Water Resources Research Center, Ilsan, Korea.
- Gunderson, P., Callesen, I., and de Vries, W. (1998). Nitrate leaching in forest ecosystem is related to C/N ratios. *Environ. Pollut.*, **102**, pp. 403-407.
- Korea Ministry of Environment (2007). Monitoring Report on Han River's Non-Point Pollution Reduction Facilities, KME.
- Kozlowski, T. T. and Palldardy, S. G. (1997). *Physiology of Woody Plants*, 2nd ed., Academic Press, Sandiego.
- KRC (1998a). A Report on Non-point Pollution Monitoring at the Wanggung and Gamdon Reservoir Watershed and Sediment Analysis. Korea Rural Community and Agricultural Corporation, Rural Research Institute, Ansan, Korea.
- KRC (1998b). A Report on Non-point Pollution Monitoring at the Sapgyo Stream Watershed and Sediment Analysis. Korea Rural Community and Agricultural Corporation, Rural Research Institute, Ansan, Korea.
- KRC (1998c). A Report on Non-point Pollution Monitoring at the Andong Area and Sediment Analysis. Korea Rural Community and Agricultural Corporation. Rural Research Institute, Ansan, Korea.
- KRC (2006). A Report on Non-point Pollution Monitoring at the Seosan A and B Region and SWAT Application, Korea Rural Community and Agricultural Corporation, Rural Research Institute, Ansan, Korea.
- Lovett, G. M. and Rueth, H. (1999). Soil nitrogen transformation in beech and maple stands along a nitrogen deposition gradient. *Ecol. Applic.*, **9**, pp. 1330-1344.
- Lovett, G. M., Weather, K. C., and Arther, M. A. (2002). Control of nitrogen loss from forested watersheds by soil carbon: nitrogen ratio and tree composition. *Ecosystems*, **5**, pp. 712-718.
- Magill, A. H., Aber, J. D., Bernston, G. M., McDowell, W. H., Nadelhoffer, K. J., and Melillo, J. M. (2000), Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests, *Ecosystems*, **3**, pp. 238-253.
- Magill, A. H., Aber, J. D., Hendricks, J. J., Bowden, R. D., Melillo, J. M., and Steudler, P. A. (1997). Biochemical response of forest ecosystems to simulate chronic nitrogen deposition. *Ecol. Applic.*, **7**, pp. 402-415.
- Pardo, L. H., Dennis, R. L., and Likens, G. E. (1995). Patterns of nitrate losses from a chloronosequence of clear-cut watersheds. *Water Air Soil Pollut.*, **85**, pp. 1659-1664.
- Pote, D. H., Daniel, T. C., Nicholas, D. J., Sharpley, A. N., Moore, P. A., Edwards, D. R., Miller, D. M., and Edwards, D. R. (1999). Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentration in runoff. *J. Environ. Qual.*, **28**, pp. 170-175.
- Schoumans, O. F. and Groenendijk, P. (2000). Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural lands in the Netherlands. *J. Environ. Qual.*, **29**, pp. 111-116.
- US EPA (2003). National Management Measures for the Control of Non-point Pollution from Agriculture, Washington D.C. 20460.
- Viessman, W. Jr., Knapp, J. W., Lewis, G. L., and Harbaugh, T. E. (1977). *Introduction to Hydrology*, 2nd ed. New York, Harper & Row.
- Wanielista, M., Kerstern, R., and Eaglin, R. (1997). *Hydrology : Water Quantity and Quality Control*, John Wiley & Sons, Inc.
- Watt, M. K. (2000). *A hydrologic primer for New Jersey watershed management*. Water Resources Investigations Report 00-4140, U.S. Geological Survey, Reston, VA.