

산지계류수의 오염부하특성

Characteristics of Pollutants Loading in a Mountain Stream

김진수* / 김선종** / 오광영** / 김재수*
 Kim, Jin Soo / Kim, Sun Jong / Oh, Kwang Young / Kim, Je Su

I. 서론

산지 계류수는 평상시나 작은 강우 이하에서는 맑은 상태를 유지하여 하류수의 수질을 개선시키나, 여름의 집중 호우시에는 산지 사면에서 침식된 토사가 계류수에 유입되어 높은 수질농도를 나타낼 수 있다(박재현, 1995). 또한, 산림토양으로부터 유기물 등이 계류수에 유입되는 경우, 수질 오염의 요인이 되기도 한다(Thurman, 1985). 이와 같이 계류수의 복잡한 오염부하의 유출특성은 하류수의 수질에 큰 영향을 미치고 있다. 그러나, 우리나라에서는 산림 유역에서의 관측자료가 미흡하여 질소, 인, COD와 같은 오염물질의 수질 특성이 잘 파악되어 있지 않으며, 이에 대한 오염부하 원단위도 제시하지 못하고 있는 실정이다. 또한, 산림이 수질정화 기능을 가지고 있다는 것은 알려져 있지만 이에 대한 정량적인 수치를 제시하지 못하고 있는 실정이다.

이에 본 연구는 산림 소유역을 대상으로 오염물질(질소·인·COD)의 수질 모니터링을 수행함으로써, 산림 소유역에서의 오염물질 유출 특성을 파악하고 산림의 수질정화기능을 정량적으로 평가하고자 한다.

II. 시험유역 및 방법

1. 시험유역

본 연구의 시험유역은 충청북도 청원군 미원면 미원리(동경 127° 37'~북위 36° 37')에 위치한 충북 산림환경연구소 내의 미동산(해발 558m) 산림유역이다(Fig. 1). 시험유역은 면적이 92.5ha이고, 350~558m의 표고에 위치하고 있으며, 내부에 인가나 농경지와 같은 인위적인 오염원이 없고 임도 등이 일부 존재하고 있고, 계류는 콘크리트로 정비되어 있다. 유역말단에는 폭 5m의 사다리꼴 웨어가 설치되어 있다(Table 1).

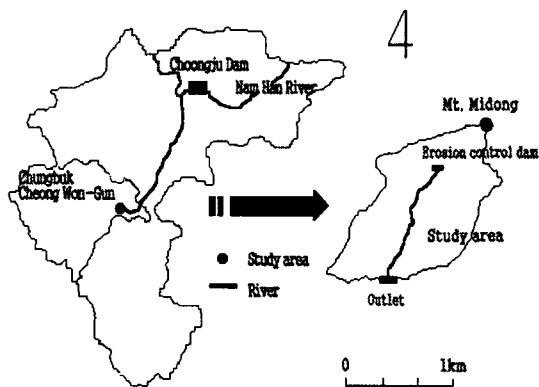


Fig. 1 Layout of study area

* 충북대학교 농과대학 교수
 ** 충북대학교 대학원

Table 1 Characteristics of study area

Forest type	Watershed area (ha)	Elevation (m)	River length (m)	River width at a outlet (m)	Bed rock	Soil type
Mixed forest (59.2%) <i>Pinus rigida</i> (30.1%)	92.5	350 ~ 558	1073	5	Granite gneiss	Loamy sand

2. 실험방법

(1) 수문 데이터의 측정

계류수의 유출량 측정은 Fig. 1과 같이 시험구역의 말단에 설치된 사다리꼴형 웨어에서 2000년 9월부터 2001년 8월까지 10일 간격으로 실시하였고, 1회의 강우사상에 대하여 측정하였다. 수위는 압력식 수위계를 웨어 근처에 설치하여 1시간 간격으로 측정하고, 압력수위와 실측수위의 관계식과 실측수위와 유량과의 관계를 작성하였다. 이러한 두 관계식을 이용하여 압력수위계에 기록된 수위를 실제 유량으로 환산하였다.

강수량은 조사 지구 내에 설치된 자기 강수량계를 이용하여 측정하였다.

(2) 계류수의 채취 및 수질분석

수질 분석용의 샘플은 유량측정과 동시에 평상시는 10일의 간격으로 채수하였고 강우시에는 1회의 강우사상에 대하여 2~6시간 간격으로 채수하였다. 또한, 수질분석용 강우는 현지에서 채수한 것을 사용하였다. 수질의 분석은 T-N(총질소), T-P(총인), COD의 3항목에 대해서 수행하였다. T-N과 T-P분석은 환경부의 환경오염공정시험법에 의한 흡광광도법으로 측정하였고, COD_{cr} 분석은 Standard Methods에 의한 중크롬산칼륨 (K₂Cr₂O₇)을 이용하여 수행하였다.

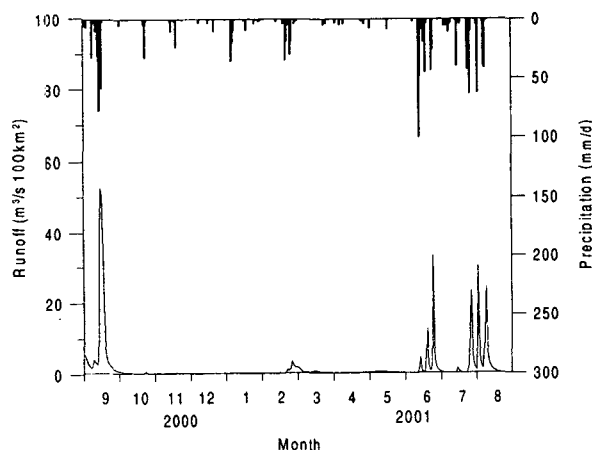


Fig. 2 Seasonal variation of precipitation and runoff discharge in study area

III. 결과 및 고찰

1. 강수량 및 유출량

조사기간(2000년 9월부터 2001년 8월)동안의 강수량은 1,301mm로서 월 강수량은 2000년 9~10월과 2001년 6~8월에 많았다. 조사기간 동안의 강수량과 유출량은 Fig. 2와 같으며, 연평균 유출률은 44%로 나타났다. 조사기간동안 시험구역의 평균비유량은 1.8m³/s · 100km²를 나타냈는데, 이것은 1.55mm/d의 일 평균 유출고에 상당한다.

2. 계류수의 수질

(1) 평균농도

측정된 수질의 평균농도는 Table 2와 같다. 평상시 계류수의 평균농도를 살펴보면 T-N은 0.58 mg/L, T-P는 0.017 mg/L, COD_{Cr}는 2.26 mg/L로서 이것을 강우농도와 비교하면 T-N은 비슷하고, T-P와 COD는 낮은 값을 나타냈다. 이것은 일본의 Aburahi유역(國松과 須戸, 1993)의 계류수 농도 (T-N : 0.53 mg/L, T-P : 0.012 mg/L, COD_{Mn} : 1.8 mg/L)와 비교하여, T-N과 T-P는 높으나 COD는 낮게 나타났다. 여기서 망간법으로 측정된 COD의 값을 크롬법으로 환산하면 1.5배인 2.7 mg/L에 해당된다.

Table 2 Summary of streamwater quality

Item		Constituent	No. of samples	Mean* (mg/L) ①	Max (mg/L)	Min (mg/L)	Standard Deviation ②	Coefficient of variation (%) ②/①×100
Stream flow	Dry days	T-N	34	0.58	1.57	0.06	0.38	65.5
		T-P	34	0.017	0.044	0.001	0.009	52.9
		COD	32	2.26	6.55	0.05	1.54	68.1
	Rainy days	T-N	18	1.24	1.84	0.49	0.40	32.3
		T-P	18	0.030	0.086	0.016	0.017	56.7
		COD	18	4.97	7.89	2.63	1.59	32.0
Rainfall	T-N	5	0.59	0.81	0.34	0.05	8.5	
	T-P	5	0.027	0.042	0.017	0.001	3.7	
	COD	5	5.36	7.39	2.74	1.63	30.4	

* : flow-weighted average

강우시의 평균농도는 T-N이 1.24 mg/L, T-P가 0.03 mg/L, COD가 4.97 mg/L로서 평상시에 비하여 T-N이 2.1배, T-P가 1.8배, COD가 2.2배정도 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 강우에 의한 토사유출로 토양내의 질소와 인, 그리고 계류에 축적되어 있는 유기물이 계류수에 유입되었기 때문으로 생각된다.

3. 계류수의 유량과 오염부하량의 관계식

T-N, T-P 및 COD의 비유량과 비부하량과의 관계를 지수식($l = aq^b$)으로 나타내면 Table 3과 같다. 관계식의 결정계수(r^2)를 보면 T-N, T-P 및 COD 모두 유의성 검정 결과, 고도의 유의성이 인정되는 것으로 나타났다.

비유량과 비부하량과의 결정계수(r^2)는 평상시에는 T-N이나 COD가 T-P보다 높은 값을 나타냈으며, 강우시가 평상시보다 높은 값을 나타냈다. 지수식을 보면 평상시의 경우 T-N과 COD는 $b > 1$ 로서 유량의 증가에 따라 농도가 증가하는 경향을 보이거나, T-P는 $b < 1$ 로서 유량의 증가에 따라 농도가 감소하는 경향을 보였다.

한편, 강우시는 T-N, T-P, COD 모두가 $b > 1$ 로서, 유량의 증가에 따라 농도가 증가하는 경향을 보였다. 특히 T-P 농도는 평상시는 유량의 증가에 따라 저하하다가 강우시에는 증가하는 경향을 나타냈는데, 이것은 강우시 유량의 증가에 따른 토사의 유출로 토사에 흡착된 인이 다량으로 유출되었기 때문으로 사료된다.

Table 3 Relationship of specific load and discharge($l=a \cdot q^b$) for dry and rainy days

	Dry Days			Rainy Days		
	T-N	T-P	COD	T-N	T-P	COD
No. of samples	34	34	32	18	18	18
l - q Equation	$l=0.43q^{1.10}$	$l=0.013q^{0.73}$	$l=1.78q^{1.33}$	$l=0.48q^{1.30}$	$l=0.017q^{1.19}$	$l=3.78q^{1.09}$
r^2	0.48**	0.34**	0.46**	0.99**	0.92**	0.89**

** : $p < 0.01$

4. 강우시와 평상시의 유출부하량의 비교

(1) 유입부하량과 유출부하량의 산정

산림 유역의 유입부하로서는 강수부하가 있는데, 조사기간동안의 유입부하량과 유출부하량은 식 (1)과 (2)에 의해 계산하였다.

$$\text{유입부하량} = \sum \{ [\text{연평균 강우농도}] \times [\text{일별강수량}] \} \quad (1)$$

$$\text{유출부하량} = \sum \{ [\text{평상시 유출부하량}] + [\text{강우시 유출부하량}] \} \quad (2)$$

여기서 평상시 유출부하량은 $\sum \{ [10\text{일간의 평균농도}] \times [\text{시간별 유량}] \}$ 으로 산정하였고, 강우시 유출부하량은 유량과 부하량의 관계식 ($L-Q$ 식)을 이용하여 산정하였다.

(2) 강우시와 평상시의 유출부하량

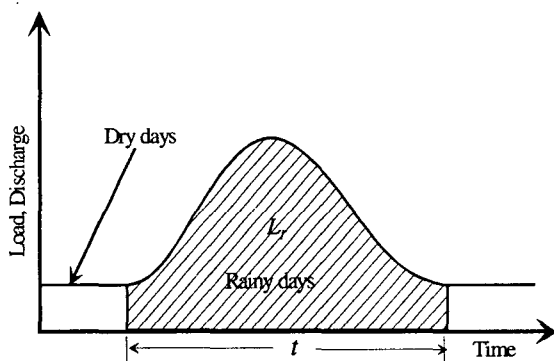


Fig. 3 Definition of load in rainy days

산림으로부터의 유출부하량은 Fig. 3과 같이 평상시와 강우시의 유출부하량으로 구분되는데, 평상시와 강우시의 유출부하량 간에는 특성의 차이가 있다. 본 논문에서는 강우로 인해 유출곡선이 상승한 후 다시 하강하여 상승전의 유량으로 된 시점까지의 유출을 강우시 유출(Fig. 3에서 빗금친 부분)이라고 했다.

총유출량에 대한 강우시의 유출량의 비는 70%, 총유출부하량에 대한 T-N, T-P 및 COD의 부하량의 비는 각각 87, 83, 87%로 높게 나타났다.

Table 4 Monthly unit loads of pollutants

Year/Month	Specific discharge (m ³ /s · 100km ²)	Unit loads(kg/ha)			
		T-N	T-P	COD	
2000	9	9.01	2.85	0.0697	10.90
	10	0.45	0.06	0.0006	0.22
	11	0.26	0.03	0.0016	0.01
	12	0.25	0.03	0.0013	0.09
2001	1	0.21	0.05	0.0013	0.12
	2	0.51	0.13	0.0020	0.33
	3	0.96	0.25	0.0057	0.40
	4	0.40	0.06	0.0021	0.15
	5	0.55	0.06	0.0033	0.40
	6	2.48	0.70	0.0146	2.96
	7	0.99	0.13	0.0047	0.92
	8	5.57	1.60	0.0411	7.35
Total	-	5.91	0.1479	23.85	

5. 유출부하량의 산정

산림 유역에서의 유출부하량은 오염 부하 원단위에 해당되는데, 월별 유출부하량의 변동상황은 Table 4와 같다. T-N의 유출부하량은 최대값이 9월의 2.8 kg/ha이고, 최소값은 11월과 12월의 0.03 kg/ha이며, T-P의 유출부하량은 최대값이 9월의 0.07 kg/ha이고, 최소값이 10월의 0.001 kg/ha이며, COD의 유출부하량은 최대값이 9월의 10.9 kg/ha이고, 최소값은 11월의 0.013 kg/ha로 나타났다. 이와 같이 모든 오염물질의 유출부하는 유출량의 영향을 많이 받아 유출량이 많은 9월에 최대값을 나타냈다.

오염원단위로서 T-N이 5.9 kg/ha · yr, T-P가 0.15 kg/ha · yr, COD가 23.8 kg/ha · yr로 나타났으며, 이것은 국외에서 보고된 산림의 원단위(T-N : 2~7 kg/ha · yr, T-P : 0.019~0.22 kg/ha · yr, COD_{Mn} : 10~30kg/ha · yr)의 범위에 들어간다.

6. 산림의 정화기능 평가

(1) 오염물질 제거량

유입부하량은 T-N이 7.7 kg/ha · yr, T-P가 0.35 kg/ha · yr, COD가 69.7 kg/ha · yr로, 유출부하량은 T-N이 5.9 kg/ha · yr, T-P가 0.15 kg/ha · yr, COD가 23.9 kg/ha · yr로 산정되었다. 모든 수질항목에서 유출부하량이 유입부하량보다 작아 오염물질이 산림을 통과하면서 오염부하량이 감소함을 알 수 있다. 오염물질 제거량을 보면 T-N이 1.8 kg/ha · yr, T-P가 0.20 kg/ha · yr, COD가 45.8 kg/ha · yr로 나타났는데, 이것을 1일 오염물질 제거량으로 환산하면 T-N은 5.03×10^4 g/m² · d, T-P는 5.63×10^5 g/m² · d, COD는 1.26×10^2 g/m² · d가 된다. 산림에서 제거된 영양염류나 유기물은 식물생장의 영양소로서 이용되고 있는 것으로 사료된다.

(2) 오염물질 제거율

산림 내에서의 오염물질의 제거율을 보면, 유입 부하량이 유출 부하량보다 작은 경우 제거율은 음(-)으로 되는데, 이것은 산림이 오염물질을 배출하는 것(배출형)을 의미한다. 또한 유입 부하량이 유출 부하량보다 큰 경우 제거율은 양(+)으로 되는데 이것은 산림이 오염물질을 흡수하는 것(흡수형)을 의미한다.

Table 5는 오염물질의 월별 제거율을 나타내는데, T-N은 3월에 유입량보다 유출량이 많았기 때문에 오염물질을 배출하는 것으로 나타났고, 8월과 9월의 경우는 강우의 영향으로 인한 유량과 농도의 증가로 배출형으로 나타났다. 3, 8, 9월을 제외하고 전부 흡수형으로 나타났다. T-P의 경우도 T-N과 마찬가지로 3월에 배출의 형태로 나타났으며, 3월을 제외한 전 기간동안 흡수형으로 나

Table 5 Monthly removal efficiency of pollutants in study area

Month	T-N			T-P			COD		
	Output (kg/ha)	Input (kg/ha)	Removal efficiency (%)	Output (kg/ha)	Input (kg/ha)	Removal efficiency (%)	Output (kg/ha)	Input (kg/ha)	Removal efficiency (%)
9	2.85	1.46	-95	0.070	0.080	13	10.89	8.00	-36
10	0.06	0.23	75	0.001	0.013	95	0.22	1.25	82
11	30.03	0.21	84	0.002	0.012	87	0.01	1.17	99
12	0.03	0.09	65	0.001	0.005	73	0.09	0.50	83
1	0.05	0.54	91	0.001	0.023	94	0.12	5.53	98
2	0.13	0.73	83	0.002	0.031	94	0.33	7.43	96
3	0.24	0.09	-167	0.006	0.004	-47	0.40	0.94	57
4	0.06	0.09	33	0.002	0.004	47	0.15	0.95	84
5	0.06	0.13	54	0.003	0.006	42	0.40	1.36	71
6	0.70	1.88	63	0.015	0.080	82	2.96	19.22	85
7	0.13	0.86	85	0.005	0.037	87	0.92	8.84	90
8	1.57	1.42	-10	0.041	0.060	32	7.35	14.56	50
Total	5.91	7.74	24	0.148	0.353	57	23.90	69.74	66

산 시험구역의 계류수에 대한 오염물질(T-N, T-P 및 COD)의 농도와 부하량의 변화를 파악하고 산림의 수질정화기능을 평가하였다. 여기서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 평상시 산지 계류수의 오염물질의 평균농도는 T-N은 0.58mg/L, T-P는 0.017mg/L, COD는 2.26mg/L로 나타나 각각의 강우농도(T-N : 0.6mg/L ; T-P : 0.027mg/L ; COD: 5.36mg/L)에 비하여 T-N은 비슷하였으나, T-P와 COD는 낮게 나타났다. 또한, 강우시 계류수의 평균농도는 T-N이 1.24 mg/L, T-P가 0.03 mg/L, COD가 4.97 mg/L로서 평상시보다 1.8~2.2배정도 증가하는 것으로 나타났다.

2. 시험구역의 연간 오염부하 원단위가 T-N 5.9 kg/ha · yr, T-P 0.15 kg/ha · yr, COD 23.9 kg/ha · yr로 산정되다.

3. 시험구역의 T-N, T-P 및 COD의 제거량은 각각 1.8, 0.20, 45.8kg/ha · yr이고 제거율은 각각 24, 57, 66%로 나타났는데, 제거율을 일본의 Asahinomori 시험구역(각각 67, 54, 38%)과 비교하면 T-N은 낮고 T-P는 비슷하며, COD는 높게 나타났다.

참고 문헌

1. 박재현, 1995, 山林流域에 있어서 溪流水質의 評價基準 定立에 關한 考察(I), 자연보존 92, pp. 23~38.
2. Thurman, E. M., 1985, Organic geochemistry of natural waters
3. 國松孝男, 須戸 幹, 1993, 山地河川の窒素・リン・CODの濃度とその變動特性, 農土論集, 166, pp. 35~44.

타났다. COD는 9월을 제외하고는 흡수형으로 나타났다.

연간 오염물질 제거율은 T-N이 24%, T-P가 57%, COD가 66%로서 T-P와 COD가 T-N의 2배 이상으로 높게 나타났다.

V. 결론

본 연구는 2000년 9월부터 2001년 8월까지의 1년동안 충북 청원군 미동