韓國水資源學會論文集
第36卷 第5號 · 2003年 10月
pp. 787~797

산지 계류수에서의 총질소, 총인 및 COD의 유출부하

Outflow Loads of Total Nitrogen, Total Phosphorus, and COD in Mountain Stream Water

김 진 수* / 김 선 종** / 오 광 영*** / 오 승 영*** / 김 재 수**** / 정 용 호*****
Kim, Jin Soo / Kim, Sun Jong / Oh, Kwang Young
/ Oh, Seung Young/ Kim, Je Su /Jeong, Yong Ho

Abstract

The characteristics of concentrations and loads of Total Nitrogen(T-N), Total Phosphorus(T-P), and Chemical Oxygen Demand (COD) in mountain stream water were examined from September 2000 through August 2001. The 92.5-ha study watershed in Chungbuk Province consists of 59% mixed forest and 30% coniferous forest. Streamflow was measured and water samples were collected at about 10 day intervals for dry days and at 2-6 hour intervals for a storm event at the study watershed outlet. The mean concentration of COD in streamflow for rainy days was significantly ($p < 0.05$) higher than for dry days. The mean concentrations of T-N and T-P in vegetation growing season (May to October) were lower than those in vegetation dormant season (November to April). Low concentrations of pollutants during vegetation growing season are likely due to the heavy demand for nutrients by the vegetation and biological activity associated with a warming of soil. The ratios of pollutants loads during storm periods to annual pollutants loads were 87% for T-N, 83% for T-P, and 87% for COD. The unit loads of pollutants for study area were estimated at 5.9 kg/ha · yr for T-N, 0.15 kg/ha · yr for T-P, and 23.9 kg/ha · yr for COD. The removal efficiency of pollutants in study area were 24% for T-N, 58% for T-P and 66% for COD, indicating that a study area shows water purification function.

Keywords : mountain stream water, total nitrogen, total phosphorus, outflow load, water purification

* 충북대학교 농공학과 교수
Professor, Dept. of Agr. Engrg., Chungbuk National Univ. Cheongju, 361-763
(E-mail: jskim@cbnu.ac.kr)
** 충북대학교 농공학과 석사과정 졸업
Former graduate Student, Dept. of Agr. Engrg., Chungbuk National Univ. Cheongju, 361-763
*** 충북대학교 농공학과 박사과정 수료
Graduate student, Dept. of Agr. Engrg., Chungbuk National Univ. Cheongju, 361-763
**** 충북대학교 산림과학부 교수
Professor, Division of Forest Science, Chungbuk National Univ. Cheongju, 361-763
***** 임업연구원 산림수자원연구실장
Senior Researcher, Korea Forest Research Institute, Seoul, 130-712

요 지

산지계류수에서의 T-N(총질소), T-P(총인) 및 COD(화학적산소요구량)의 농도와 유출부하의 변화를 파악하고 산림의 수질정화기능을 평가하였다. 충청북도에 있는 시험유역은 면적이 92.5 ha이며 59%의 혼효림과 30%의 침엽수림으로 구성되어 있다. 시험유역의 말단에서 평상시는 10일 간격으로 또한, 1개의 강우사상에 대하여 2-6 시간 간격으로 계류수의 유량과 농도를 1년간 측정하였다. 강우시의 평균농도는 COD만이 유의적인 수준($p<0.05$)에서 평상시의 농도보다 높게 나타났다. T-N과 T-P의 평균농도는 식생생육기(5-10 월)가 식생 휴지기(11-4 월)보다 낮게 나타났는데, 이는 식물에 의한 영양염류 흡수와 토양의 온도상승에 따른 미생물의 활동이 증가하기 때문으로 생각된다. 연간유출부하에 대한 강수시 유출부하의 비는 T-N이 87%, T-P가 83%, COD가 87%로서 연간유출부하 중 강우시의 유출부하가 매우 높게 나타났다. 시험유역의 오염부하 원단위는 T-N이 5.9 kg/ha · yr, T-P가 0.15 kg/ha · yr, COD가 23.9 kg/ha · yr로 산정되었다. 또한, 시험유역에 의한 T-N, T-P 및 COD의 연간제거율은 각각 24, 58, 66%로 나타나, 산림유역이 수질정화기능을 발휘하고 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 산지계류수, 총질소, 총인, 유출부하, 수질정화기능

1. 서 론

산림은 2000년 현재 국토면적의 약 65%를 차지하여 산림으로부터 유출하는 계류수는 하류유역의 수질 및 생태계에 큰 영향을 미치고 있다. 산지는 비점오염원의 하나로서 오염원단위는 농지나 도시에 비하여 낮을 것으로 예상되나, 하천유역에 차지하는 면적이 넓어 유역에서의 오염부하는 무시할 수가 없는 수치이다. 따라서 산림으로부터의 오염부하의 유출특성은 유역수질관리에서 큰 관심이 되고 있다.

Likens 등(1977)은 벌채와 같은 인위적인 영향이 적은 산지 계류수의 질소와 인의 농도는 강수에 비하여 낮아진다고 보고하였다. 일본에서 黑田 등(1991)은 2.95 km^2 산림소유역에서 질소를 중심으로 계류수의 농도와 유출부하의 관계를 조사하였는데, NO_3-N(질산성 질소)과 T-N(총질소)은 유량의 증가에 따라 농도가 상승하는 경향을 보인다고 발표하였다. 國松과 須戶(1993)는 23.8 ha 산림유역 하천에서의 NO_3-N의 농도는 가을에서 초겨울에 걸쳐 저하하나, 그 밖의 시기의 농도변화는 복잡하며, T-P(총인)와 COD(화학적산소요구량)의 농도는 봄부터 서서히 상승하여, 가을부터 겨울에 걸쳐 저하된다고 보고하였다. 국내에서 계류수 수질에 대해서는 박재현(1996)은 산림내 계류수질 평가인자에 포함될 수 있는 것으로 양이온, 음이온, 토양특성인자 등에 관하여 보고하였다. 이헌호와 김재홍(1997)은 산지 물순환 각 과정별 유출수량과 pH, 전기전도도, 용존산소량, 및 용존원소와의 관계를 추적하여 산림의 수질정화기능에 대하여 평가하였고, 박재철과 이헌호(2000)은 유출량의 변화가 용존성 이온을 중심으로 하는 계류수의 수질에 미치는 영향을 조사하였다.

그러나, 국내에서 산림을 대상으로 한 수질 연구는 대부분 용존성 이온 성분에 관한 것으로, 유역수질에서 문제가 되고 있는 영양염류(T-N과 T-P)나 유기물(COD)에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 산림유역을 대상으로 T-N, T-P 및 COD의 수질 모니터링을 수행함으로써, 산지계류수에서의 오염물질의 유출부하특성을 파악하고 산림의 수질정화기능을 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 시험유역 및 방법

2.1 시험유역

본 연구의 시험유역은 충청북도 청원군 미원면 미원리(127°37' E, 36°37' N)에 위치한 충북 산림환경연구소 내의 미동산(해발 558 m) 산림유역이다(그림 1). 시험유역은 면적이 92.5 ha이고, 해발 350-558 m에 위치하고 있으며, 내부에는 인가나 농경지와 같은 인위적인 오염원이 없고 임도 등이 일부 존재하고 있다. 산림분포수종은 침엽수림과 활엽수림으로 구성된 혼효림(mixed forest)이 59.2%, 리기다소나무(Pinus rigida)를 주종으로하는 침엽수림이 30.1%를 차지하고 있다. 계류는 남한강의 지천인 달천으로 유입되고 있으며, 그 하류부는 콘크리트로 정비되어 있고, 유역말단에는 폭 5 m의 사다리꼴 웨어가 설치되어 있다. 시험유역의 특성은 표 1과 같다.

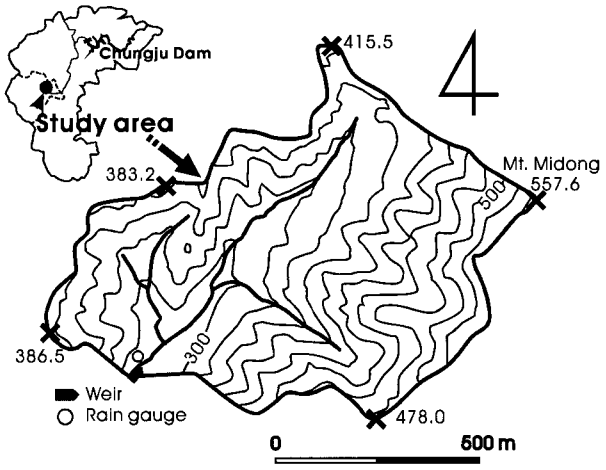


그림 1. 시험유역의 개요

표 1. 시험유역의 특성

Forest type	Watershed area(ha)	Elevation (m)	Stream length (m)	Stream width at an outlet(m)	Bed rock	Soil type
Mixed forest (59.2%) Coniferous forest (30.1%)	92.5	350-558	1073	5	Granite gneiss	Loamy sand

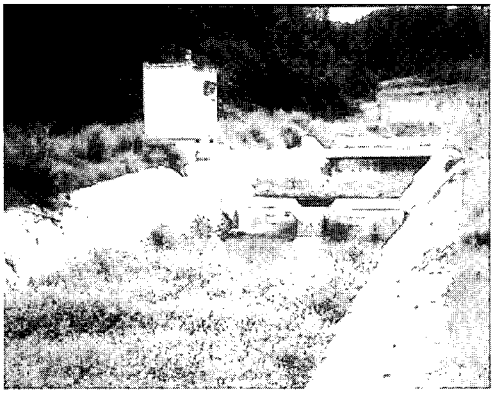


사진 1. 시험유역의 말단 전경

2.2 실험방법

(1) 수문 데이터의 측정

계류수의 유량 측정은 사진 1과 같이 시험유역의 말단에 설치된 사다리꼴형 웨어에서 1년간(2000년 9월부터 2001년 8월까지) 약 10일 간격으로 실시하였고, 1회의 강우사상(2001년 6월 29-30일의 총강수량 69mm)에 대하여 2~6 시간(15 개 시점)으로 실시하였다. 수위는 압력식 수위계를 웨어 근처에 설치하여 1시간 간격으로 측정하였고, 압력(p)과 실측 유량(Q)과의 관계식($Q=3.207p^{1.91}$, $R^2=0.99$)으로부터 압력수위계에 기록된 수위를 유량으로 환산하였다. 강수량은

조사 지구 내에 설치된 자기 강수량계를 이용하여 측정하였다.

(2) 계류수의 채수 및 수질분석

수질 분석용의 샘플은 유량측정과 동시에 10일 간격으로, 1회의 강우사상에 대하여 2~6시간 간격으로 수집하였다. 또한, 강우는 현지에서 채수한 것을 사용하였다. 수질분석은 T-N, T-P 및 COD의 3항목에 대해서 수행하였다. T-N과 T-P는 환경오염공정시험법(환경부, 1997)에 의한 흡광광도법으로 분석하였고, COD_{Cr}는 Standard Methods(American Public Health Association, 1995)에 의한 중크롬산칼륨($K_2Cr_2O_7$)을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강수량 및 유출량

조사기간(2000년 9월~2001년 8월)동안의 강수량은 1,301㎜로서 이는 우리나라의 연평균 강수량보다 약간 많은 값을 나타냈다. 조사기간 동안의 강수량과 유출량의 변화는 그림 2와 같으며, 연평균 유출률은 44%로 나타났다. 조사기간동안 시험유역의 평균비유량은 1.8 ㎥/s·100㎢를 나타냈는데, 이는 1.55 ㎜/d의 일 평균 유출고에 상당한다

3.2 계류수의 농도

3.2.1 평균농도

측정된 계류수와 강수의 평균농도는 표 2와 같은데, 여기서 계류수는 유량가중평균, 강수는 산술평균을 취

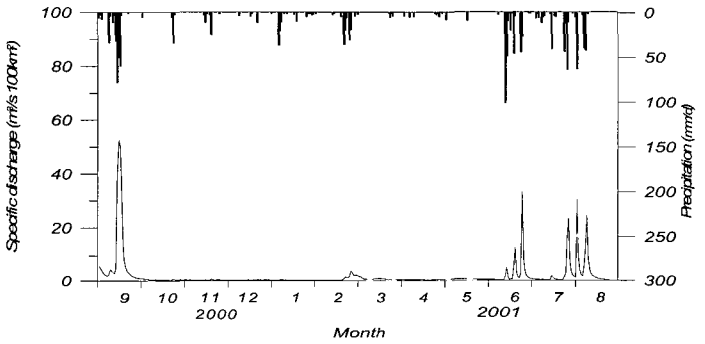


그림 2. 시험유역에서의 강수량 및 비유량의 시간적 변화

표 2. 계류수와 강수의 평균농도

Item		Constituent	No. of samples	Mean(Range) (mg/L)
Stream water	Dry days	T-N	33	0.57[a] (0.06-1.57)
		T-P	33	0.017[a] (0.001-0.044)
		COD	31	2.18[a*] (0.05-6.55)
	Rainy days	T-N	18	1.24[a] (0.49-1.84)
		T-P	18	0.030[a] (0.016-0.086)
		COD	18	4.97[a*] (2.63-7.89)
Rainwater		T-N	5	0.59 (0.34-0.81)
		T-P	5	0.027 (0.017-0.042)
		COD	5	5.36 (2.74-7.39)

a: flow-weighted mean

* : Significant at the 0.05 probability level

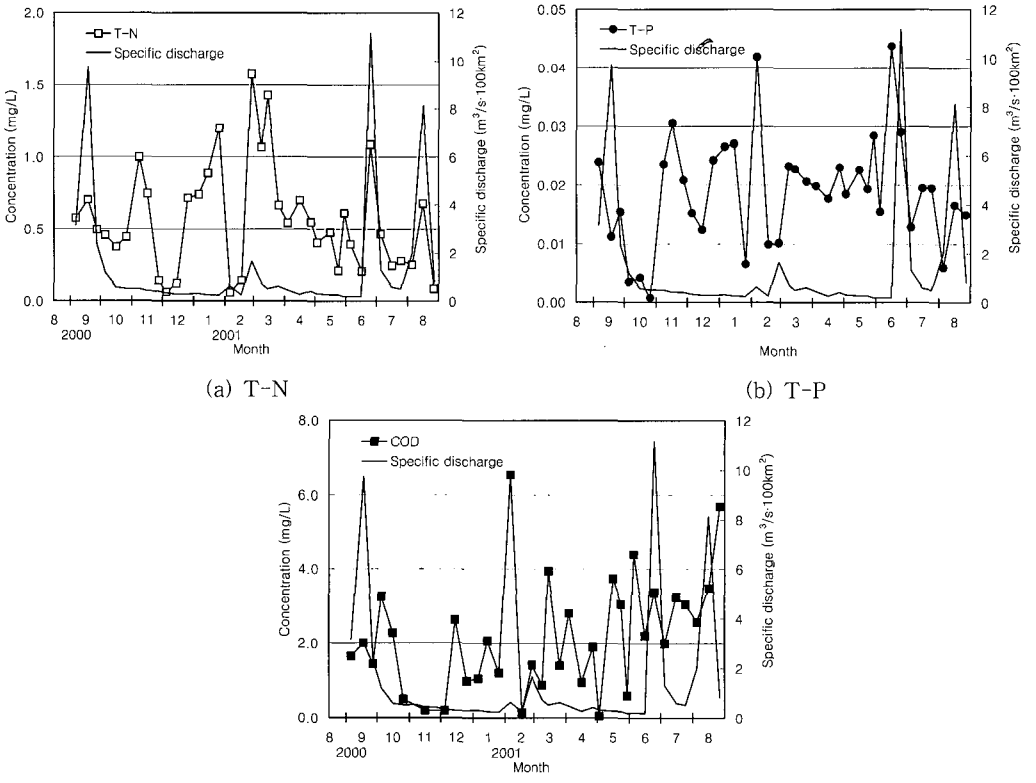
하였다. 평상시 계류수의 평균농도를 살펴보면 T-N은 0.57 mg/L, T-P는 0.017 mg/L, COD_{Cr}는 2.2 mg/L로서 이것을 강우농도와 비교하면 T-N은 비슷하고, T-P와 COD는 낮은 값을 나타냈다. 시험유역의 계류수의 농도를 침엽수가 주종을 이루는 일본의 Aburahi유역(國松과 須戶, 1993)의 값(T-N: 0.53 mg/L, T-P: 0.012 mg/L, COD_{Mn}: 1.8 mg/L)과 비교하면, 모든 수질 항목에서 비슷하게 나타났는데, 여기서 망간법으로 측정한 COD 농도는 크롬법으로 환산하면 약 1.5배인 2.7 mg/L에 해당된다. 또한 이 값은 광역논에서의 배수(排水)농도(김진수 등, 2001)(T-N: 2.3-3.1 mg/L, T-P: 0.09-0.11 mg/L, COD: 11.7-17.1 mg/L)보다 훨씬 낮다.

강우시의 평균농도는 T-N이 1.24 mg/L, T-P가 0.03 mg/L, COD가 4.97 mg/L로서 평상시의 농도보다 크게 나타났으나, t 검정결과 COD만이 유의적인 수준($p<0.05$)에서 농도 차가 인정되었다. 이는 강우에 의한 증수(增水)시에 평상시 계류에 축적되어 있던 유기물이 유출되었기 때문으로 생각된다.

3.2.2 농도의 순별 변화

그림 3은 조사기간 동안의 계류수의 T-N, T-P 및 COD의 순별 농도변화를 나타낸다. 여기서 대부분은 평상시의 농도이나, 3회(9월 중순, 6월 하순 및 8월 중순)의 강우시 농도를 포함하고 있다. 융설(融雪)은 2월 초순 및 2월 하순~3월 초순에 나타나고 있는데, 2월 초순에는 1월 중순의 -10℃ 이하의 혹한으로 동결된 토양의 해동(解凍)과 함께 비교적 작은 융설이 있었고, 2월 하순-3월 초순에는 보다 큰 융설이 있었다.

T-N은 1월 하순 및 2월 하순~3월 중순에서 1 mg/L 이상의 높은 농도를 나타났는데, 1월 하순에서는 낮은 온도에 의한 탈질작용의 감소로 농도가 증가했고, 2월 하순~3월 중순에는 하천변과 하상에 축적되어 있던 질소가 융설이 일어나면서 유출된 것으로 생각된다(그림 3(a)). 일본의 소하천에서도 융설기인 3-4월에



(a) T-N (b) T-P

(c) COD

그림 3. 오염물질 농도의 순별 변화

T-N의 약 70%을 점하는 NO_3-N의 농도가 상승하는 현상을 보였다(櫻井, 1970). 또한 T-N 농도는 강우가 거의 없었던 3월 초순에서 5월 사이에는 하강하는 경향을 보였고 6월과 8월의 강우에 의한 증수(增水)시에는 높은 값을 나타냈다.

T-P는 2월 초순에 0.4 mg/L 이상으로 높게 나타났는데, 이는 융설로 인해 증가된 유량과 함께 해동(解凍) 된 토양 속의 인이 다량 유출되었기 때문으로 생각된다(그림 3(b)). 강우가 거의 없었던 3~5월에는 0.02 mg/L 전후의 비교적 일정한 값을 나타냈다.

COD는 T-P과 같이 2월 초순의 융설시에 최대의 농도(6.55 mg/L)를 나타냈는데, 이는 지표면에 축적되어 있는 낙엽이나 토양 내 축적되어 있는 부식토로부터 발생되는 유기물이 융설수와 함께 유출되었기 때문으로 생각된다 (그림 3(c))

이와 같이 동결토양의 해동(解凍)과 융설이 있었던 2월 초순의 전후에는 농도의 심한 변동을 보였다. 그러나, 농도의 순별 변동에 대한 메카니즘을 정확히 파악하기 위해서는 다년간에 걸친 연구가 필요할 것으로 생각된다.

3.2.3 평상시의 식생 생육조건에 따른 농도차이

먼저 조사기간을 식생 생육조건에 따라 식생 생육기(5~10월)와 식생 휴지기(11~4월)로 구분하고, 두 시기에 대한 평상시 T-N, T-P 및 COD의 유량가중 평균농도를 비교하였다.

T-N의 경우 식생생육기(5~10월)의 평균농도는 0.41 mg/L로서 식생휴지기(11~4월)의 평균농도 0.83 mg/L보다 상당히 낮게 나타났다(그림 4). T-N농도가 식생생육기가 식생휴지기보다 낮아지는 것은 식물에 의한 영양염류 흡수와 토양의 온도상승에 따른 미생물의 활동이 증가되어 탈질작용이 촉진되기 때문으로 생각된다. 이러한 결과는 계류수의 질산성질소(NO_3-N) 농도는 10월 경에 최저값을 기록한 후 겨울에 상승하여 다음해 4월에 최대가 된다는 미국 New Hampshire주 Hubbard Brook 시험유역에서의 결과(Likens 등, 1977)와 유사하였다. T-P의 평균농도도 T-N과 마찬가지로 식생생육기(0.015 mg/L)가 식생휴지기(0.020 mg/L)보다 낮게 나타났으나 그 차이는 T-N보다 적게 나타났다.

그러나 COD는 T-N이나 T-P와는 달리 식생생육기의 농도(2.32 mg/L)가 식생휴지기의 농도(1.92 mg/L)보다 다소 높게 나타났는데, 이는 주로 식생의 잎이나 줄기의 섬유소(cellulose)나 리그닌(lignin)에서 생성된 유기물이 산림 토양의 표층(유기물층)이나 하상에 축적되어 있다가, 식생생육기에 상당량 유출되기 때문으로 생각된다. 國松과 須戶(1993)의 연구에서도 이와 같은 결과가 보고되었다.

이와 같이 T-N과 T-P의 농도는 식생생육기가 식생휴지기보다 낮게 나타난 반면, COD 농도는 식생생육기가 식생휴지기보다 높게 나타났다.

3.2.4 비유량과 농도의 관계

T-N, T-P 및 COD의 비유량(q)과 농도(C)와의 관계를 지수식($C = aq^b$)으로 나타내면 그림 5와 같다. 관계식에서 지수 b>0은 유량의 증가에 따른 농도의 증가를, b=0은 농도 변화가 없음을, b<0은 농도의 저하를 나타낸다. 평상시에는 어느 수질 항목도 비유량과 농도와의 사이에서 유의적인 상관관계가 인정되지

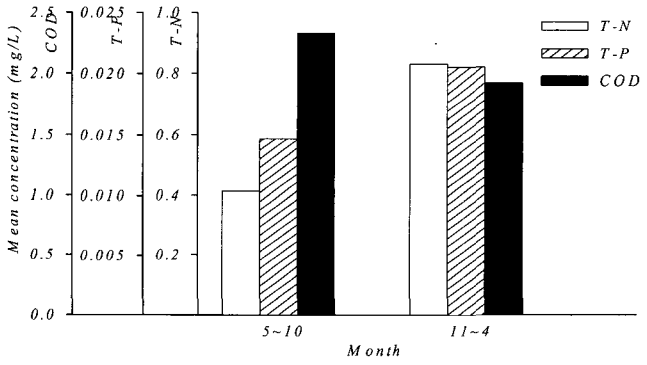
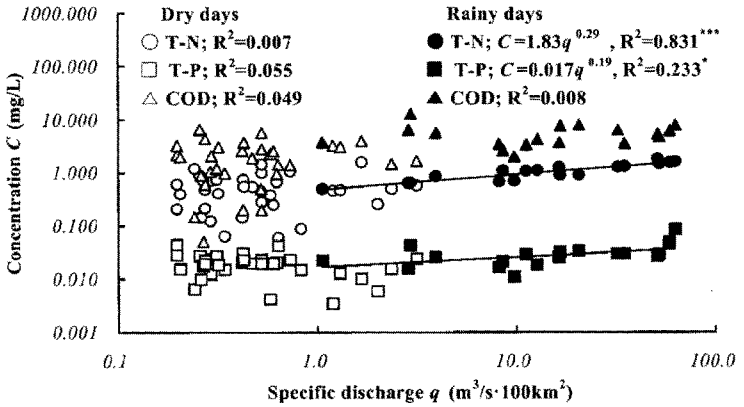


그림 4. 식생생육기(5-10월)와 식생휴지기(11-4월)의 오염물질의 평균농도



*: Significant at the 0.05 probability level
***: Significant at the 0.001 probability level

그림 5. 평상시와 강우시의 오염물질의 비유량과 농도와의 관계

않았으나, 강우시에는 T-N과 T-P의 $C-q$식이 유의성(각각 $p<0.001$과 $p<0.05$)이 인정되는 것으로 나타났다. 강우시의 T-N과 T-P는 관계식의 지수가 $b>0$로 유량의 증가에 따라 농도가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 강우시 유량의 증가에 따른 토사의 유출로 토사에 부착되어 있던 질소와 인이 다량으로 유출되었기 때문으로 생각된다. 岩坪과 堤(1968)와 Edwards (1973)는 NO_3-N의 농도는 유량증가와 함께 상승한다고 보고했고, 國松과 須戶(1993)의 연구에서도 강우시에 T-N, T-P 및 COD의 농도는 모두 상승하는 것으로 나타났다.

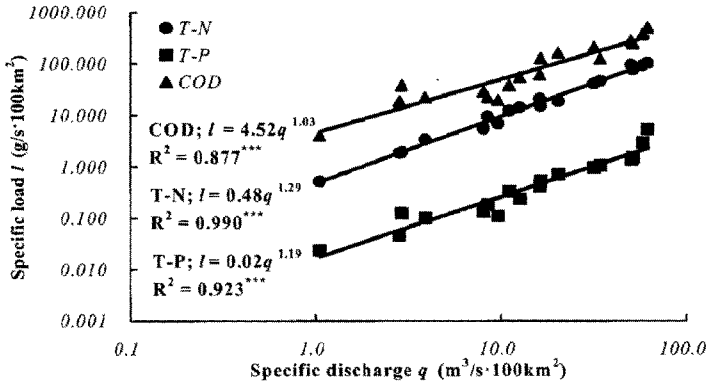
3.3 유출부하

산림 유역에는 유입부하으로서는 강수부하가 있고, 유역말단에는 유출부하가 있다. 산림유역의 유입부하와 유출부하는 각각 식(1)과 (2)에 의해 산정하였다.

$$\text{유입부하} = [\text{연평균 강수농도}] \times [\text{연강수량}] \quad (1)$$

$$\text{유출부하} = [\text{평상시 유출부하}] + [\text{강수시 유출부하}] \quad (2)$$

평상시 유출부하는 Σ{[10일간의 평균농도]×[10일간의 총유출량]}으로 산정하였고, 강수시 유출부하는 그림 6과 같은 강우시의 비부하와 비유량의 관계식($l-q$식)



***: Significant at the 0.001 probability level

그림 6. 강우시의 비부하와 비유량과의 관계

을 이용하여 비유량으로부터 산정하였다.

평상시(무강우시)에는 유량과 농도의 변동이 작으나, 강우시에는 유량의 변동이 크고 이에 따라 농도의 변동도 크게 된다. 산림으로부터의 유출부하는 평상시와 강우시(그림 7에서 빗금친 부분)의 유출부하으로 구분되는데(黑田 등, 1991), 평상시와 강우시의 유출부하 간에는 특성의 차이가 있다. 본 논문에서는 강우로 인해 유출곡선이 상승한 후 다시 하강하여 상승전의 유량으로 된 시점까지의 유출을 강우시 유출이라고 했다.

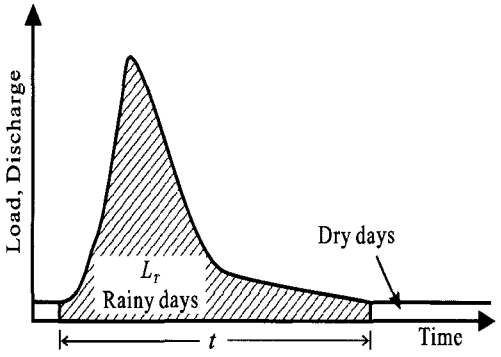


그림 7. 강우시의 유출부하의 정의

강우시 총유출부하는 식(3)과 같이 표현된다.

$$L_T = \int l_T \, dt \qquad (3)$$

여기서, L_T : 강우시 총유출부하(kg/ha),

l_T : 강우시 시간별 유출부하(kg/ha · hr)

조사 유역에서의 오염물질의 월별 및 연간 유출부하는 표 3과 같다. T-N의 유출부하는 최대값이 9월의 2.8 kg/ha이고, 최소값은 11월과 12월의 0.03 kg/ha이며, T-P의 유출부하는 최대값이 9월의 0.07 kg/ha이고, 최소값이 10월의 0.001 kg/ha이며, COD의 유출부하는 최대값이 9월의 10.9 kg/ha이고, 최소값은 11월의 0.01 kg/ha로 나타났다. 이와 같이 모든 오염물질의 유출부하는 유출량의 영향을 크게 받아 유출량이 많은 8-9월에 연간총부하의 75-77%값을 나타냈다.

산림 유역으로부터의 연간유출부하는 산림의 오염부하원단위(이하 원단위라고 함)에 해당되는데, 이 값은 T-N이 5.9 kg/ha · yr, T-P가 0.15 kg/ha · yr, COD_{Cr}가 23.9 kg/ha · yr로 나타났다. 조사지역의 원단위를 국내외에서 발표한 산림의 원단위(국무총리실수질개선기획단, 1998; 國松과 村岡, 1989)와 비교하면 보고된 값의 범위(T-N: 1.0~13.0 kg/ha · yr, T-P: 0.036~0.47 kg/ha · yr, COD: 10~30 kg/ha · yr)에 들어간다. 더욱, TP의 원단위는 미국 동부의 산림유역에서 보고된 값(0.30 kg/ha · yr) (Vaithiyanathan and Correll, 1992) 보다 다소 작게 나타났다.

또한, 연간유출량에 대한 강수시 유출량의 비는 70%이었고, 연간유출부하에 대한 T-N, T-P 및 COD의

표 3. 오염물질의 월별 유출부하

Year/Month		Specific discharge ($m^3/s \cdot 100km^2$)	Unit loads(kg/ha)		
			T-N	T-P	COD
2000	Sep.	9.01	2.846	0.0697	10.90
	Oct.	0.45	0.057	0.0006	0.22
	Nov.	0.26	0.034	0.0016	0.01
	Dec.	0.25	0.031	0.0013	0.09
2001	Jan.	0.21	0.048	0.0013	0.12
	Feb.	0.51	0.126	0.0020	0.33
	Mar.	0.96	0.245	0.0057	0.40
	Apr.	0.40	0.062	0.0021	0.15
	May	0.55	0.061	0.0033	0.40
	Jun.	2.48	0.696	0.0146	2.96
	Jul.	0.99	0.130	0.0047	0.92
	Aug.	5.57	1.571	0.0411	7.35
Total		-	5.908	0.1479	23.85

강우시 유출부하의 비는 각각 87, 83, 87%로 강수시의 유출부하가 높게 나타났다.

3.4 산림의 수질정화기능 평가

3.4.1 오염물질 제거량

산림유역에서의 오염물질의 제거량은 식(4)와 같이 산출된다.

$$\text{오염물질 제거량} = \text{유입부하} - \text{유출부하} \quad (4)$$

여기서 유입부하는 식(1)에 의하여 T-N이 7.7 kg/ha·yr, T-P가 0.35 kg/ha·yr, COD가 69.7 kg/ha·yr로 산정되었고, 유출부하는 식(2)에 의하여 T-N이 5.9 kg/ha·yr, T-P가 0.15 kg/ha·yr, COD가 23.9 kg/ha·yr로 산정되었다. 따라서, 식(4)에 의한 오염물질 제거량은 T-N이 1.8 kg/ha·yr, T-P가 0.20 kg/ha·yr, COD가 45.8 kg/ha·yr 로, 모든 수질항목에서 유출부하가 유입부하보다 작게 되어 강수에 의해 유입된 오염물질이 산림을 통과하면서 상당량 감소하는 것으로 나타났다. 이는 산림에서 제거된 영양염류나 유기물이 식물생장의 영양소로서 이용되고 있기 때문으로 생각된다. 연간 오염물질 제거량을 1일 제거량으로 환산하면 T-N은 5.03×10^{-4} g/㎡·d, T-P는 5.63×10^{-5} g/㎡·d, COD는 1.26×10^{-2} g/㎡·d가 되는데, 이 곳의 T-N 제거량은 일본의 Koise유역(침엽수가 대부분)에서 보고된 T-N 제거량인 2.0×10^{-3} g/㎡·d(黑田 등, 1991)의 25% 정도의 값을 나타냈는데, 이는 Koise 유역에 비하여 산림의 생육상태가 저조하기 때문으로 생각된다.

3.4.2 오염물질 제거율

산림에서의 오염물질의 제거율은 식(5)와 같이 산정된다.

$$\text{제거율} = \left(1 - \frac{\text{유출부하}}{\text{유입부하}}\right)\times 100(\%) \quad (5)$$

산림에서의 오염물질의 제거율을 보면, 유입부하가 유출부하보다 작은 경우 제거율은 음(-)으로 되는데, 이것은 산림이 오염물질을 배출하는 것(배출형)을 의미한다. 또한 유입부하가 유출부하보다 큰 경우에는 제거율은 양(+)으로 되는데 이것은 산림이 오염물질을 흡수하는 것(흡수형)을 의미한다.

표 4는 오염물질의 월별제거율을 나타내는데, T-N은 3월에는 융설(融雪)로, 8월과 9월에는 강우에 의한 유량과 농도의 증가로 배출형으로 나타났다. 3, 8, 9월을 제외하고 다른 기간동안에는 흡수형으로 나타났다. 또한, T-P는 3월, COD는 9월을 제외하고는 흡수형으로 나타났다.

표 4. 시험유역에서의 오염물질의 월별제거율

Month	T-N			T-P			COD		
	Input (kg/ha)	Output (kg/ha)	Removal efficiency (%)	Input (kg/ha)	Output (kg/ha)	Removal efficiency (%)	Input (kg/ha)	Output (kg/ha)	Removal efficiency (%)
Sep.	1.457	2.846	-95	0.0802	0.0697	13	8.00	10.89	-36
Oct.	0.228	0.057	75	0.0125	0.0006	95	1.25	0.22	82
Nov.	0.212	0.034	84	0.0117	0.0016	87	1.17	0.01	99
Dec.	0.091	0.031	65	0.0050	0.0013	73	0.50	0.09	83
Jan.	0.541	0.048	91	0.0229	0.0013	94	5.53	0.12	98
Feb.	0.727	0.126	83	0.0308	0.0020	94	7.43	0.33	96
Mar.	0.092	0.245	-167	0.0039	0.0057	-47	0.94	0.40	57
Apr.	0.093	0.062	33	0.0039	0.0021	47	0.95	0.15	84
May	0.133	0.061	54	0.0056	0.0033	42	1.36	0.40	71
Jun.	1.881	0.696	63	0.0797	0.0146	82	19.22	2.96	85
Jul.	0.865	0.130	85	0.0367	0.0047	87	8.84	0.92	90
Aug.	1.424	1.571	-10	0.0604	0.0411	32	14.56	7.35	50
Total	7.743	5.908	24	0.3534	0.1479	58	69.74	23.85	66

연간 오염물질 제거율을 보면 T-N이 24%, T-P가 58%, COD가 66%로서 T-P와 COD가 T-N의 2배 이상으로 높게 나타났다. 이를 대부분의 수종이 침엽수림인 일본 Asahinomori 유역(國松, 1994)에서의 제거율(T-N: 67%, T-P: 54%, COD_{Mn}: 38%)과 비교하면 T-N은 적고 T-P는 비슷하며, COD는 크게 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 2000년 9월부터 2001년 8월까지의 1년 동안 남한강 상류에 위치한 미동산 유역(혼효림 59%, 침엽수림 30%)을 대상으로 산지 계류수에 대한 오염물질(T-N, T-P 및 COD_{Cr})의 농도와 부하의 특성변화를 검토하고 산림의 수질정화기능을 평가하였다. 여기서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 평상시 산지 계류수의 오염물질의 평균농도는 T-N은 0.57 mg/L, T-P는 0.017 mg/L, COD는 2.18 mg/L로 나타나 각각의 강우농도(T-N: 0.59 mg/L; T-P: 0.027 mg/L; COD: 5.36 mg/L)에 비하여 T-N은 비슷하였으나, T-P와 COD는 낮게 나타났다. 또한, 강우시의 평균 COD 농도는 4.97 mg/L로서 평상시의 농도와 유의적인 수준에서 그 차가 인정되었다.
2. T-N과 T-P의 평균농도는 식생생육기(5~10월)가 식생 휴지기(11~4월)보다 낮게 나타났는데, 이는 식물에 의한 영양염류 흡수와 토양의 온도상승에 따른 미생물의 활동이 증가하기 때문으로 생각된다.
3. 총유출부하에 대한 강수시 유출부하의 비는 T-N이 87%, T-P가 83%, COD가 87%로서 총 유출부하 중 강우시의 유출부하가 매우 크게 나타났는데, 이는 강수시 계류수의 유량과 함께 농도가 증가하기 때문으로 생각된다.
4. 시험유역의 오염부하 원단위가 T-N 5.9 kg/ha·yr, T-P 0.15 kg/ha·yr, COD 23.9 kg/ha·yr로 산정되었다.
5. 시험유역의 T-N, T-P 및 COD의 연간제거량은 각각 1.8, 0.20, 45.8 kg/ha·yr이고 제거율은 각각 24, 58, 66%로 나타나, 산림유역의 수질정화 기능이 정량적으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 충북대학교 발전기금재단 2002년 연구년 교수 연구비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

국무총리수질개선기획단 (1988). **수질개선 지원기관 '97 연구보고서**

김진수, 오승영, 김규성, 권순국 (2001). "광역논에서의 오염물질의 농도와 오염부하량 특성", **한국농공학회지,** 43(6), pp. 163-173.

박재철, 이헌호 (2000). "유출량의 변화가 산지계류수의 수질변화에 미치는 영향", **한국임학회지,** 89(3), pp. 342-355.

박재현 (1996). "山林流域에 있어서 溪流水質의 評價基準 定立에 關한 考察(II)", **자연보존 92,** pp. 23-38.

이헌호, 김재홍 (1997). "山地 물循環 素過程에 있어서 水質變化의 追跡分析에 의한 山林의 環境的 淨化機能의 計量化 硏究", **한국임학회지,** 86(1), pp. 56-68.

환경부 (1997). **수질오염공정시험방법,** pp. 199-209.

American Public Health Association (1995). *Standard methods for the water and wastewater examination*, 19th ed., Washington, D. C.

Edwards, A. M. C. (1973). "The variation of dissolved constituents with discharge in some Norfolk Rivers", *J. Hydrol.* 18, pp. 219-242.

Likens, G. E., F. H. Bormann, R. S. Pierce, J. S. Eaton, and N. M. Johnson (1977). *Biogeochemistry of a forested ecosystem*, Springer-Verlag, New York, pp. 146-147.

Vaithiyanathan, P., and D. L. Correll (1992). "The Rhode River watershed: Phosphorus distribution and export in forest and agricultural soils", *J. Enviror. Qual.* 21, pp. 280-288.

國松孝男 (1994). "森林における自然淨化機能の强化策", 楠田哲也編著. **自然の淨化機構の强化と制御, 技報堂出版,** pp. 27-52.

國松孝男, 須戶 幹 (1993). "山地河川の窒素・リン・CODの濃度とその変動特性", **農業土木學會論文集,** 166, pp. 35-44.

國松孝男, 村岡浩爾 (1989). **河川汚濁のモデル解析,** 技報堂出版, pp. 118-124.

岩坪五郎 堤利夫 (1968). "流亡中の養分量について-森林內外の降水中の養分量について(III)"-, **京都演報,** 40, pp. 140-156.

櫻井善雄 (1970). "農地排水による河川及び地下水の汙

染", **農業土木學會誌,** 43(8), pp. 14-20.
黑田久雄, 田淵俊雄, 菊地英樹, 鈴木正道 (1991). "山林小流域における流出水の濃度と流出負荷", **農業土木學會論文集,** 154, pp. 25-35.

(논문번호:03-51/접수:2003.06.05/심사완료:2003.09.02)