韓國林學會誌 86(1) : 56-68. 1997
Jour. Korean For. Soc. 86(1) : 56-68. 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[1]*

李 憲 浩[2]

Estimations on the Water Purification of Forest by Analyzing Water Quality Variations in Forest Hydrological Processes[1]*

Heon-Ho Lee[2]

要 約

본 연구는 산지 물순환 과정별 수질변화를 추적하여 계류수질의 형성 과정 및 산림의 환경적 정화 기능을 평가하고자 실시하였다. 팔공, 용성 및 대동의 3개 조사지에서 한 단위강우에 대한 임외우, 수관통과우, 수간류, 낙엽층류 및 계류수, 그리고 장기 계류수를 대상으로 하여 각각의 유출수량과 pH, 전기전도도, 용존산소량 및 용존원소의 농도변화를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 계류수의 pH, 용존산소량은 유출수량의 증가에 따라 값이 상승하였으나, 전기전도도는 값이 낮아지는 것으로 나타났다.
2. 수간류 및 수관통과우의 pH는 임외우에 비해 경시적으로 낮은 값을 나타내며, EC는 강우초기에 높은 값, 그 이후는 강우시간의 경과와 함께 값이 낮아지는 경시적 변화를 보였다. 낙엽층류의 pH는 임외우에 비해 낮은 값, EC는 높은 값을 나타냈다. 계류수에 있어서 pH 동태는 강우초기에 높은 값을 나타내고 강우시간이 경과함에 따라 큰 폭으로 떨어지다가 강우종료 및 그 이후에는 초기 수준 또는 그 이상의 값으로 회복하였으나, EC는 거의 반대의 경향이 있었다. 낙엽층류 및 계류수의 DO는 강우시간의 경과에 따라 값이 점차 낮아졌으나, 임외우, 수간류 및 수관통과우에서는 경시적으로 뚜렷한 경향이 없었다.
3. 수간류 및 수관통과우에 있어서 pH는 소나무에 비해 상수리나무가 높았으나, EC는 낮은 값을 나타내었다. 양이온 총량은 상수리나무에 비해 소나무의 수간류에서 높은 값을 나타냈다.
4. 물순환의 각 과정에 있어서 pH는 낙엽층류<임내우(수간류+수관통과우)<임외우<계류수의 순으로, DO는 낙엽층류<임내우<임외강우<계류수, 그리고 EC는 임외우<계류수<임내우<낙엽층류의 크기 순으로 나타났다. 양이온 총량은 임외우<임내우<낙엽층<계류수의 크기 순으로 나타났다.
5. EC는 팔공조사지에 비해 용성조사지에서 전체적으로 높은 값을 나타내어 팔공계류수가 수질이 더 깨끗한 것으로 나타났다. 그리고 장기 계류수에 있어서 pH, DO, EC 및 양이온 총량은 월별로 각각 독특한 경시적 변화를 보였다.

ABSTRACT

This study was carried out to evaluate the capacity of environment purification of forest and to reveal formation processes of stream water quality by evaluating water quality variations in forest hydrological processes. Water quantity, pH, electric conductivity(EC), dissolved oxygen(DO), and dissolved matter concentrations were monitored in open rainfall, throughfall, stemflow, litter flow and short-term stream

[1] 接受 1996年 12月 26日 Received on December 26, 1996.
[2] 영남대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Youngnam University, Kyoungsan 712-749, Korea.
* 이 논문은 1995년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모(신진)과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음

flow for one unit storm, and also for those were monitored in long-term stream flow in Palgong, Yongsung, and Daedong catchments. The results were summarized as follows;

1. pH and DO values of stream flow were increased as the flux increased but EC values were decreased.
2. pH values of stemflow and throughfall were decreased with the lapse of rainfall time with lower values than open rainfall. And EC values were higher in initial rainfall period but lower gradually with the lapse of time than open rainfall. In litter flow, pH values were lower than open rainfall but EC values were higher. In stream flow, pH values of stream flow showed a high level in initial rainfall period and decreased remarkably with the lapse of time, but it recovered after the rainfall stopped. And however, the values of EC showed almost reverse tendency. DO values of litter flow and stream flow were decreased gradually with the lapse of time in litter flow and stream flow but there were no any tendency in open rainfall, stemflow and throughfall.
3. pH values of stemflow and throughfall in *Quercus acutissima* were higher than in *Pinus densiflora*, but EC values were lower. Total amount of cations in stemflow was higher in *Pinus densiflora* than in *Quercus acutissima*.
4. pH, DO, EC and total amount of cation values in hydrological processes were in the order of; litter flow < net rainfall(stemflow + throughfall) < total rainfall < stream flow, litter flow < net rainfall < total rainfall < stream flow, total rainfall < stream flow < net rainfall < litter flow, and total rainfall < net rainfall < litter flow < stream flow, respectively.
5. Water quality of stream flow was better in Palgong catchment than in Yongsung because of low EC values. And each of pH, DO, EC and total amount of cation values in long-term stream flow showed characteristic changes by month.

Key words : Water purification, Rainfall, Throughfall, Stemflow, Litter flow, Stream water, pH, EC, DO, Cation

緖 論

산지유역에서 수분이나 양분은 식물체를 매개로 하여 항상 순환하고 있으며(村岡浩爾와 平田健正, 1986), 산지에 강하한 오염물질은 임내강우와 함께 수관통과우나 수간류의 식생층을 거쳐 낙엽 및 토양층에 도달하고, 이어서 낙엽층류나 지중수유출에 의해 계류로 유출하는 이동경로를 가진다. 이러한 과정에서 식생층을 대상으로 임내와 임외, 또는 수관통과우 및 수간류에 있어서 용존물질농도나 이온수지의 비교(坂本康, 1993), 그리고 임외우가 산림지를 통과하여 계류로 집수되는 과정에서 유출수량에 포함되는 물질농도의 변화를 추적(大類清和 等, 1994)하여 산지 수질정화능의 평가를 시도하고 있다.

벌채(Hopmans 等, 1987 ; Tiedemann 等, 1988), 시비(Aubertin 等, 1973), 식생이나 林齡(Lelong 等, 1990), 그리고 유역 고유의 지형이나 토양(大類清和 等, 1994) 등의 입지 환경이 계류수질에 영향을 주며, 산림이 가진 수질정화능을 평가하기 위해서는 계류 수질의 형성 메카니즘을 파악하는 것이 중요하다. Likens 等(1967)은 개벌지역 산림유역에서 Ca, Mg, K, NO_3-N 등이 급격히 증가하여 계류 수질을 변화시키고, Brown (1979)는 NH_4-N와 NO_3-N 등을 계류수의 주요 오염원으로 보았으며, 廣瀨 顯 等(1988)은 산지 집수역에서 pH, Ca, Mg, Na, K, P, Cl, SO_4, NO_3-N, NH_4-N, 전기전도도 등의 11개 항목에 대해 수질을 분석한 결과 산지 계류수는 음용수 수질기준에 적합하다고 한 바 있다. 전기전도도와 수온은 유의한 상관관계가 있으며, 강수량과 계류수의 전기전도도는 정의 상관, 그리고 강수의 전기전도도와 강수량은 부의 상관관계(西尾敏 等, 1988)를 나타내는 등 전기전도도는 계류수질평가의 지표인자로 알려져 있다.

계류수 중의 수질성분은 그 발생과정 및 계류에 도달할 때까지의 유출과정에 따라서 양적·질적인 변화를 받기 때문에 그 농도 변화의 예측은 각 과정에 있어서 변화기구를 구명해야 한다. 그

러나 산지유역에서 수질성분의 농도변화는 수문조건과 밀접한 관련이 있고, 또한 계류수의 용존이온량은 모암과 토양에 존재하는 이온의 종류에 따라 달라진다. 따라서 산림의 수질정화능을 평가하기 위해서는 산림생태계 내의 수분과 물질이 강우로부터 계류에 도달할 때까지의 동태를 밝힐 필요가 있다. 즉 산림계 밖에서 유입되는 임외우, 순환계로서의 수관통과우, 수간류 및 낙엽층류, 그리고 산림계 내에서 산림계 밖으로 유출하는 지하수 및 계류수의 수량과 물질량을 장기간에 걸쳐서 관측할 필요가 있다.

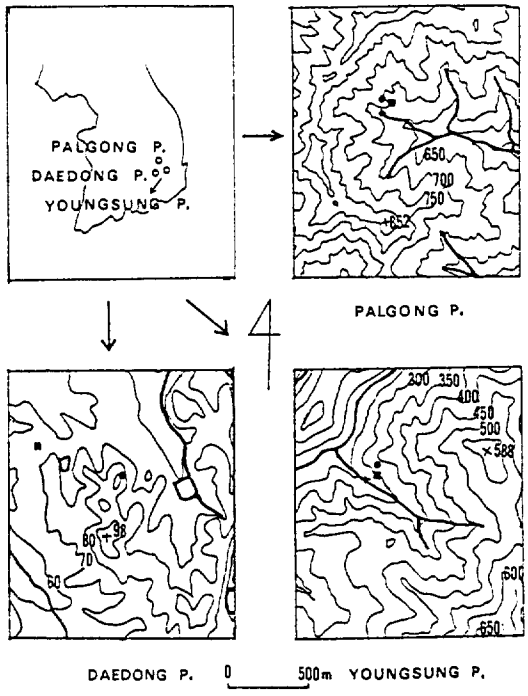
본 연구는 산지 물순환 과정에 있어서 특정 단위강우가 산림계 밖에서 임내를 통과하여 계류에 이를 때까지의 pH, 전기전도도, 용존산소량, 수온, 용존물질량 그리고 유출수량을 강우개시기부터 강우가 종료할 때까지의 경시적 변화를 분석하여, 소나무와 상수리나무의 두 수종간 및 각 물순환과정별로 산림지의 수질정화능을 평가하고자 하였다. 동시에 계류수의 장기 관측을 통해 계류수 수질의 형성과정을 추적하여 수질분석인자의 경시적 변화를 밝히고자 실시하였다.

材料 및 方法

1. 조사지 개황 및 연구재료

경상북도 경산시 소재의 팔공(동경 128° 44′ 30″, 북위 35° 59′ 30″) 및 용성(동경 128° 56′ 30″, 북위 35° 48′ 00″)지역에서 각 1개 산림소유역, 그리고 대동지역(동경 128° 45′ 30″, 북위 35° 49′ 00″)에 1개 산림소유역 등 총 3개의 조사지를 선정하였다(그림 1). 각 조사지의 개황은 표 1에 나타내었으며, 조사 기간은 1995년 9월 1일부터 1996년 8월 31일까지 1년간이며, 동계(12월-3월)는 계류수의 결빙으로 인해 수량 및 수질을 측정하지 않았다.

대상 강우는 조사기간 동안에 내린 단위 강우 중 강우 개시기부터 종료 때까지 일정한 시간 간격으로 수량 및 수질을 측정한 강우를 대상으로 하였다. 각 조사지에서 수집한 모든 단위 강우의 강우개시일, 강우지속시간, 강우량, 5일간의 선행강우량(API) 등을 표 2에 나타내었다. 대상 수목은 3개 조사지에서 소나무(*Pinus densiflora*)와 상수리나무(*Quercus acutissima*)를 각 두 개체씩 선정하였으며, 각 대상목의 수고, 흉고직경 및 수관폭을 조사하였다(표 3).



▲ : stream gauging and sampling site
■ : precipitation sampling site
● : stemflow and throughfall sampling site

Fig. 1. Location map of experimental sites

2. 측정항목 및 분석 방법

임외우는 선정된 3개 조사지의 계류수 측정 위치의 인접한 곳에 전도형 우량계와 보통우량계를 설치하고 단위강우의 경시적 변화를 측정하였으며, 수관통과우(throughfall)와 수간류(stemflow)도 임외우와 같은 시간간격으로 유출수량을 강우종료 후까지 연속적으로 측정하였다. 수관통과우 및 수간류의 측정방법은 문헌(李憲浩와 全宰弘, 1996)에 나타내었다. 낙엽층류는 낙엽층에 수분채취장치를 설치하여 각 단위강우가 종료할 때까지 수회 또는 종료시에 1회 측정하였다. 낙엽층류의 유출수량은 강우 개시기에는 거의 발생하지 않기 때문에 임외강우처럼 일정 시간 간격으로 측정하지 않았다. 계류의 유출수량은 팔공 및 용성의 2개 조사지 하류지역에서 계류의 유수단면적과 유속(유속계, Swoffer사 Model 2100)을 측정하여 산출하였다. 단위강우에 의한 계류 유출

Table 1. General descriptions of experimental sites

Factors	Site		
	PALGONG	YONGSUNG	DAEDONG
Altitude (m)	680	350	90
Soil type	sandy loam	sandy loam	sandy loam
A_0 laver (cm)	7.5	1.5	2.5
Soil hardness (kg/cm^2)	1.6	4.8	5
Slope (°)	29	37	17
Forest type	mixed	mixed	mixed

Table 2. Rainfall data used in analysis

NO	Site	Date	Precipitation (mm)	Elapsed time (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Antecedent precipitation (mm)
1	YONGSUNG	95. 09. 23	10.6	24.5	0.4	
*2	DAEDONG	96. 03. 14	27.2	7.6	3.6	
3	DAEDONG	96. 03. 16	25.4	18.2	1.4	25.6
4	DAEDONG	96. 03. 21	31.1	26.8	1.2	24.5
5	PALGONG	96. 03. 29	16.4	24.3	0.7	
6	YONGSUNG	96. 04. 29	16.4	56.4	0.3	
7	YONGSUNG	96. 05. 04	15.3	24.2	0.6	24.4
*8	YONGSUNG	96. 07. 04	24.0	37.2	0.7	7.1
*9	PALGONG	96. 07. 04	56.6	37.2	1.5	7.1
10	YONGSUNG	96. 08. 27	53.9	41.0	1.3	22.0
11	PALGONG	96. 08. 27	80.5	41.0	2.0	

* : Rainfall data analyzed change with the passage of time

Table 3. General descriptions of experimental sites

Site	PALGONG				YONGSUNG				DAEDONG			
Individual	Pinus I	Pinus II	Quercus I	Quercus II	Pinus I	Pinus II	Quercus I	Quercus II	Pinus I	Pinus II	Quercus I	Quercus II
Height (m)	13.5	7.6	15.9	17.4	7.4	7.2	11.9	10.3	9.1	9	9.5	10
DBH (cm)	19.6	14.5	21.5	22	11.8	13.7	16.8	14.5	26.5	18.8	17.3	23.5
CL (m)	3.2	3.3	6.7	6.6	3.7	3.5	5.1	4.7	6.4	5.4	6.3	7.5

* CL : Crown length

수량은 임외우와 같은 시간간격으로 측정하였으며, 장기 계류수는 동계를 제외하고 2주 간격으로 1년간 연속적으로 측정하였다.

수질 측정은 pH, 전기전도도(EC : Electric Conductivity), 용존산소량(DO : Dissolved Oxygen), 그리고 용존원소 K, Ca, Mg, Na, Fe 및 NH_4-N, NO_3-N를 대상으로 하였다. pH, EC 및 DO의 측정은 Mettler-Toledo사에서 제작한 check mate 90을 이용하였다. 이 기기는 측정기를 본체로 pH센서, EC센서, 그리고 DO센서 등을 부착하여 pH는 0~14, EC는 0.00~1999 μS/cm, DO는 0~20mg/l의 범위까지 측정할 수 있다. 이들의 측정은 임외우, 수관통과우, 수간류, 낙엽층류 및 계류수의 각 물순환 과정별로 매 단위강우마다 임외우와 같은 시간간격으로 수회 측정하였다. 계류 수질의 장기측정은 매 2주 간격으로 수량측정과 동시에 실시하였다. 용존원소 K, Ca, Mg, Na, Fe의 측정은 Automic Absorption Spectro-Photometer, 그리고 NH_4-N와 NO_3-N의 측정은 초자전극법을 이용하였다.

분석방법은, 먼저 물순환 과정별 수질변화의 특성을 파악하기 위해 임외우, 수간류, 수관통과우, 낙엽층류 및 계류수의 누적 수량 및 수질분석인자의 경시적 변화를 분석하였다. 강우량 및 유출수량과 수질분석인자와의 관계분석은 회귀식을 이용하였다. 수질분석인자 중 양이온과 음이온은 각각의 총량으로 분석하고 개별 이온에 대한 분석은 실시하지 않았다. 산림계 밖의 임외우가 산림지를 통과하여 계류에 도달할 때까지의 산지 물순환 각 과정에 있어서 수질정화능의 평

가는 각 과정에서 수질분석인자의 절대값을 비교하여 평가하고, 각 물순환 과정에서 수질변화의 특성은 수질분석인자의 경시적 변화에 의해 분석되었으며, 수종간의 수질정화능의 차이 및 계량화는 각 분석인자를 평균한 절대값으로 추정하였다. 계류수의 월별 및 계절별 수질 변화의 특성은 pH, EC, DO 및 양이온 총량의 경시적 변화를 구하여 분석하였다.

結果 및 考察

1. 임외우의 계절별 산도 및 용존물질량의 변화

임외우의 용존원소량은 산림생태계의 물질순환, 임지의 생산력 등을 결정하는데 큰 요인으로 작용하기 때문에, 산지 이용 및 수자원 관리면에서 중요하다. 임외우의 계절별 산도 변화를 파악하기 위하여 3개 조사지를 대상으로 1년간 측정한 모든 단위강우에 대해 월별 강우량과 pH를 그림 2에 나타냈다. 임외우의 pH는 8월에 가장 높은 값, 그리고 4월과 5월에 낮은 값이 나타났으며, 관측된 pH의 범위는 5.9-6.8 이었다. 임외우의 용존원소와 수질인자의 계절변화 및 각각의 평균값을 표 4에 나타내었다. EC는 7월과 8월, DO는 4월에 높은 값을 나타내었고, Ca, K

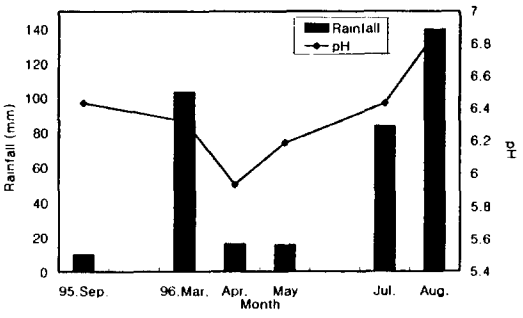


Fig. 2. Seasonal change of pH in total rainfall

및 Mg는 8월, Na는 4월, NH_4-N은 7월, 그리고 NO_3-N은 4월에 각각 상대적으로 높은 값이 나타났다.

2. 산지 물순환 과정별 수질 변화 및 수질 정화능의 평가

(1) 산지 물순환 과정별 수질의 경시적 변화

1) 단위강우의 물순환 과정별 경시적 변화

3개 조사지에서 임외우가 산림지를 통과하여 계류에 도달할 때까지의 각 과정에서 일어나는 수량의 시계열 변화는 다음 항목의 각 수질인자와의 관련을 밝히기 위해 누적량으로 표시하였으며(그림 3), 계류수의 경시적 변화는 그림 4에 나타냈다. 각 조사지에서 단위강우의 시계열 수량 배분은 수종에 따라 수간류와 수관통과우의 양적 배분에 다소 차이가 있었으며, 이는 각 수종의 엽면적지수와 수간의 수피상태의 차이에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

2) pH의 경시적 변화

임외우의 pH는 3개 조사지에서 강우개시기부터 강우가 종료할 때까지 큰 변화를 보이지 않으며, pH 변화폭은 6.35-7.57(그림 5)사이로, 이는 자연 강우는 환경에 따라 pH5~8까지의 넓은 범위의 값을 지닌다는 Whitehead 等(1988)의 보고와 일치하였다. 수간류 및 수관통과우 pH는 임외우에 비해 강우초기에 모두 값이 높았으나 강우시간의 경과와 함께 값이 떨어져 뚜렷한 경향이 없었으며 수간류에서 다소 변화가 큰 것으로 나타났다. 수간류의 pH는 수피의 부식에 기인하는 유기산이나 수피에 염기의 흡착으로 인해 임외우 및 수관통과우보다 낮게 나타나서 입목의 뿌리 부근의 토양에 대해서 강한 화학적 영향을 미칠 것으로 생각된다. 낙엽층류는 임외우에 비해 강우초기에 값이 낮아졌으나 시간의 경과에 따른 경시적 변화는 보이지 않았으나, 계류수는

Table 4. Seasonal variation of water quality in total rainfall

Month	Precipitation (mm)	EC (Us/cm)	DO (mg/l)	Fe^{2+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	NH_4^+-N	NO_3^--N
9	10.2	29.2	5.3	0.04	1.28	0.20	6.95	0.01		
3	103.4	16.4	4.7	0.05	0.89	0.26	1.43	1.17	0.66	0.59
4	16.5	26.5	7.4	0.05	0.97	0.20	0.62	2.18	0.14	1.85
5	15.7	14.5	–	0.04	0.49	0.14	0.51	0.62	0.97	1.29
7	83.6	69.4	6.1	0.04	0.63	0.09	0.26	0.63	4.42	1.12
8	139.7	87.3	5.6	0.02	2.06	0.37	3.47	1.20		
Average	61.5	40.6	5.9	0.04	1.05	0.21	2.21	0.97	1.55	1.21

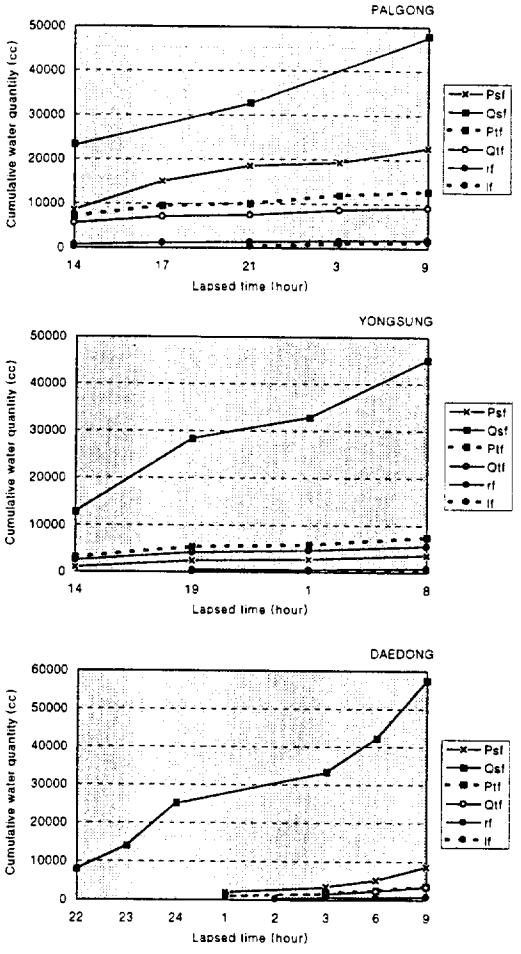


Fig. 3. Change of water quantity with the passage of time in hydrological processes
rf : rainfall, Psf : Pinus stemflow,
Qsf : Quercus stemflow,
Ptf : Pinus throughfall,
Qtf : Quercus throughfall, lf : litter flow

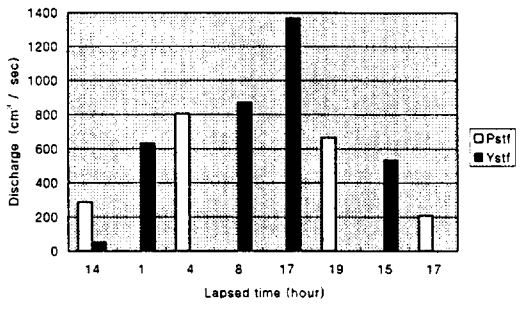


Fig. 4. Change of discharge with the passage of time in short-term stream flow
Pstf : Palgong stream flow,
Ystf : Yongsung stream flow

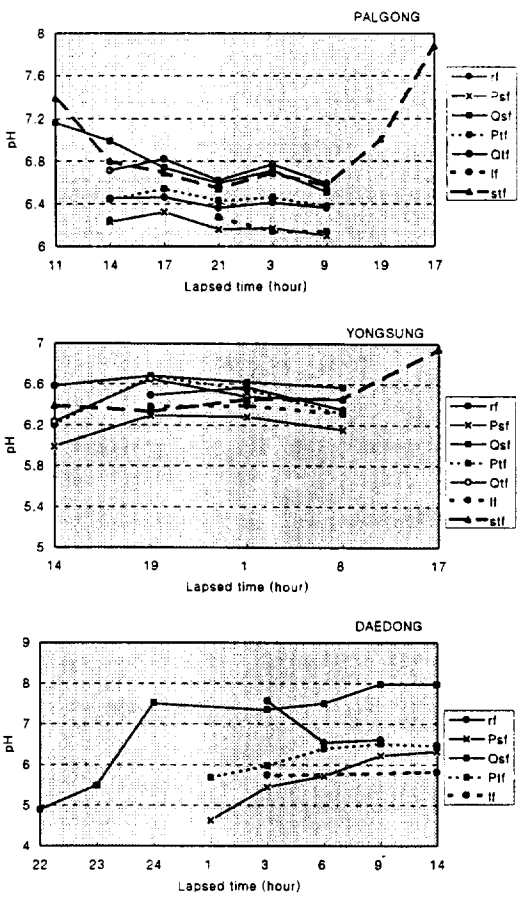


Fig. 5. Change of pH with the passage of time in hydrological processes
rf : rainfall, Psf : Pinus stemflow,
Qsf : Quercus stemflow,
Ptf : Pinus throughfall,
Qtf : Quercus throughfall,
lf : litter flow, stf : stream flow

강우초기에 높은 값을 나타내었으나 강우시간이 경과함에 따라 값이 큰 폭으로 떨어지다가 강우종료 및 그 이후에는 다시 초기수준으로 회복하는 것으로 나타났다.

3) EC의 경시적 변화

EC는 물에 용존되어 있는 이온 용해염의 농도를 종합적으로 표시해 주며 오염의 정도가 크면 클수록 용존이온농도값이 증가하여 EC가 높아지며 물이 깨끗할수록 EC가 낮아진다(Whitehead 等, 1988). 임외우의 EC는 3개 조사지에서 경시적으로 일정한 경향이 없었으나, 조사지 및 경시적인 변화폭은 큰 것으로 나타났다. 팔공조사지

를 제외한 두 조사지에서 수간류 및 수관통과우 EC는 강우초기에 높은 값을 나타내고 강우시간이 경과함에 따라 모두 값이 낮아지는 경시적 변화가 있었으며, 수간류가 수관통과우에 비해 EC가 높은 값을 유지하면서 감소폭은 큰 것으로 나타났는데, 이는 수관 및 수간에 부착된 乾性堆積物(dry deposition)이 초기 강우에 의해 세탈되는 정도의 차이 때문으로 생각된다. 낙엽층류 EC는 경시적으로 일정한 경향이 없었으나 EC의 절대값(평균 133.6 μS/cm)은 타 물순환 과정보다 상당히 높게 나타났다. 계류수의 EC는 강우초기에 낮은 값을 나타내었으나 강우시간이 경과함에 따라 값이 높아지다가 강우 종료 및 종료후에는 다시 낮아지는 것으로 나타났다(그림 6). 이는 홍수유출량의 증감에 따른 용존이온량의 차이 때문으로 판단되며, 팔공조사지의 결과는 志水俊夫等(1987)이 보고한 전기전도도는 유출수량이 증가할수록 낮아지고, 유량이 감소할수록 높은 값을 나타낸다는 결과와 일치하였으나, 용성조사지에서는 선행강우량 등의 영향으로 인해 뚜렷한

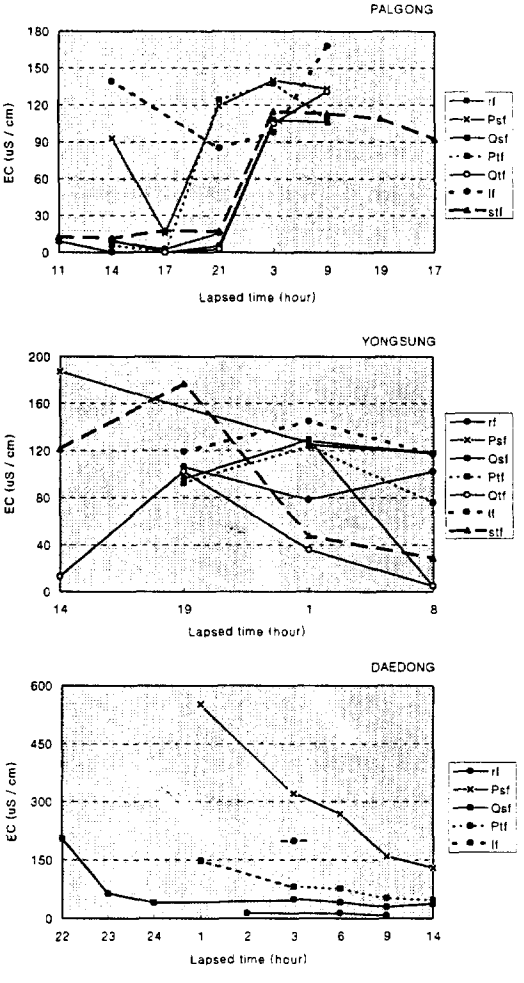


Fig. 6. Change of EC with the passage of time in hydrological processes
rf : rainfall, Psf : Pinus stemflow,
Qsf : Quercus stemflow,
Ptf : Pinus throughfall,
Qtf : Quercus throughfall,
lf : litter flow, stf : stream flow

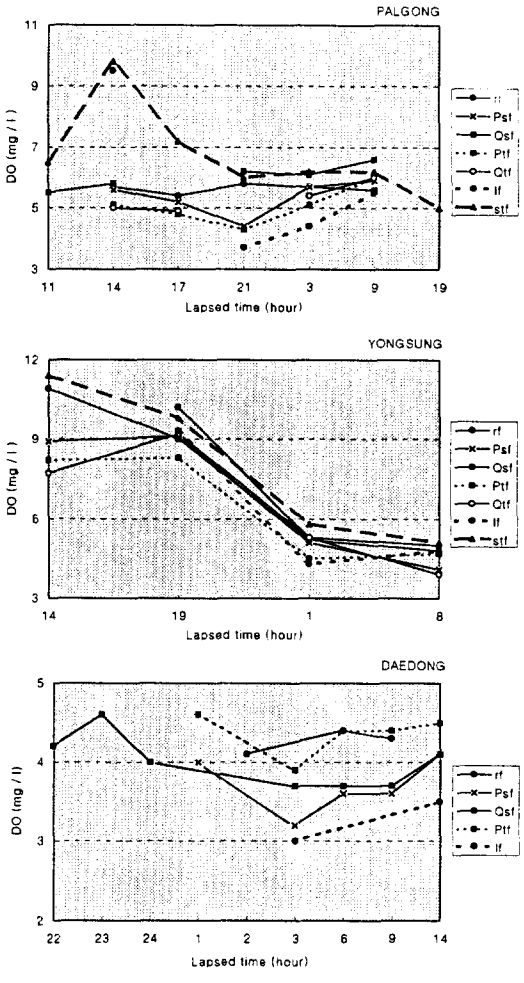


Fig. 7. Change of DO with the passage of time in hydrological processes
rf : rainfall, Psf : Pinus stemflow,
Qsf : Quercus stemflow,
Ptf : Pinus throughfall,
Qtf : Quercus throughfall,
lf : litter flow, stf : stream flow

경향이 나타나지 않았다.

4) DO의 경시적 변화

DO는 물에 용존되어 있는 유리산소량으로 표현되며 수중의 생물·화학적 반응을 추정하는 데 대단히 중요한 지표이다. 임외우 DO의 경시적 변화는 4.1-5.8mg/l의 범위에 있었으며 강우시간의 경과에 따른 증가 혹은 감소의 경향은 보이지 않았다(그림 7). 수간류 및 수관통과우의 DO는 3개조사지에서 임외강우와 비슷한 값을 나타내며, 강우시간이 경과함에 따라 DO가 약간 감소하는 조사지(용성)도 있으나 대부분의 경우는 일정한 경시적 변화를 인정할 수가 없었다. 낙엽층류의 DO는 강우시간의 경과와 함께 DO가 9.3-9.5mg/l에서 4.8-5.5mg/l의 범위로 점점 낮아지는 것으로 나타났다. 계류수의 DO도 강우개시기의 높은 값에서 강우종료 시점으로 갈수록 값이 9.8-11.4mg/l에서 5.0-5.1mg/l의 범위로 점점 낮아지는 것으로 나타났는데, 이는 Feller와 Kimmins(1979)가 유출량이 증가하면 DO도 증가한다는 보고와 상이한 결과로 유출수량의 변화폭이 작았던 점과 수온의 상승 때문으로 생각된다.

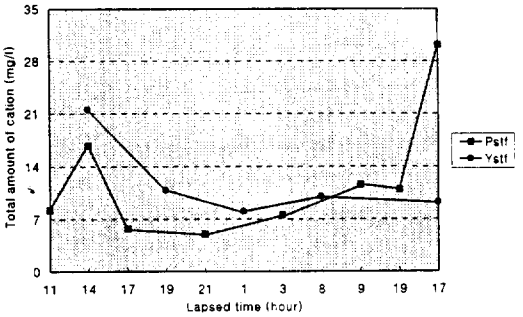


Fig. 8. Change of total amount of cation with the passage of time in short-term stream flow
Pstf : Palgong stream flow,
Ystf : Yongsung stream flow

5) 양이온 총량의 경시적 변화

임외우의 분석된 양이온총량의 경시적 변화는 없었고 값의 변화 범위는 1.23-6.69mg/l에 있었으며, 계류수의 양이온 총량은 강우초기에 높은 값을 나타내었으나, 강우시간이 경과함에 따라 값이 다소 떨어지다가 강우 종료 및 그 이후에는 유량의 감소와 함께 다시 상승(塚本良則, 1993)하는 것으로 나타났다(그림 8). 이는 NO_3-N의 규제를 받는 Ca나 Mg가 강우초기에 flushing

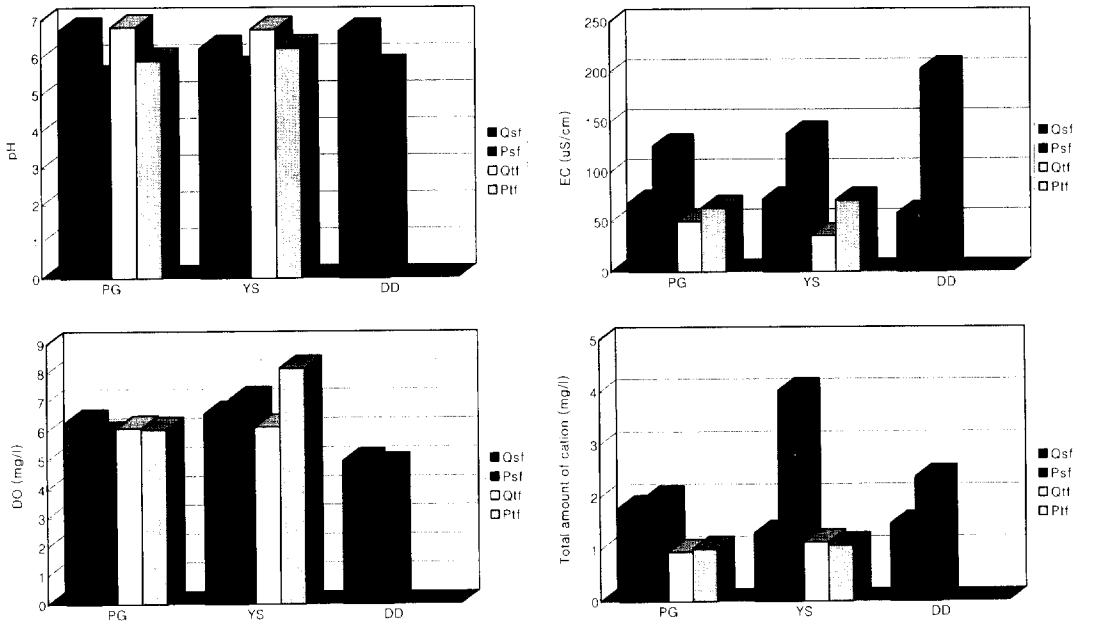


Fig. 9. Comparison of pH, DO, EC and total cation of Pinus densiflora and Quercus acutissima at the experimental sites
PG : Palgong, YS : Yongsung, DO : Daedong, Qsf : Quercus stemflow,
Psf : Pinus stemflow, Qtf : Quercus throughfall, Ptf : Pinus throughfall

effect로 불려지는 농도증가의 영향 등으로 용존 원소마다 서로 다른 유출특성을 가진 것이 종합적으로 나타난 것으로 생각된다.

(2) 소나무와 상수리나무의 수질정화능 평가

두 수종간의 수질정화능 평가를 위해 그림 9에 pH, EC, DO 및 양이온 총량을 나타내었다. 각 조사지에서 수관통과우와 수간류의 경우 소나무(tf ; 6.1, sf ; 5.6)에 비해 상수리나무(tf ; 6.8, sf ; 6.6)가 높은 pH를 나타내었다. 이는 Roda 等(1990)의 연구결과와 일치하는 것으로 소나무가 상수리나무에 비해 엽면적지수가 높고 수피가 거칠어서 건성퇴적이 많은 것에 기인하는 것으로 생각된다. EC는 수간류의 경우 상수리나무(sf ; 66.3 μS/cm, tf ; 43.2 μS/cm)에 비해 소나무(sf ; 155.2 μS/cm, tf ; 67.6 μS/cm)가 상당히 높은 값을 나타내었으나 수관통과우는 상대적으로 작은 차이를 나타내었다. DO는 4.8-8.2mg/l의 범위로 존재하고 두 수종간의 수간류 및 수관통과우에서 뚜렷한 차이가 나타나지 않아, DO의 측정만으로는 수종간의 유의성을 비교할 수 없는 것으로 생각된다. 분석된 양이온 총량은 상수리나무(sf ; 1.52mg/l, tf ; 1.04mg/l)에 비해 소나무(sf ; 2.79mg/l, tf ; 1.04mg/l)의 수간류에서 높은 값을 나타내었는데, 이는 수간에 흡착된 건성퇴적의 양과 함께 이온교환현상에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

(3) 산지 물순환 과정별 수질정화능의 평가

산림계 밖의 임외우가 산림지를 통과하여 계류에 도달할 때까지의 물순환 과정별(임외우, 임내우(수관통과우+수간류), 낙엽층류 및 계류수) 수질정화능을 평가하기 위하여 각 과정별 pH, EC, DO 및 양이온 총량의 평균값을 구하여 그림 10에 나타냈다.

pH 6.4의 임외우가 임내우(6.3)에서 낙엽층(5.8)으로 갈수록 pH값이 낮아지다가 계류(7.1)에 이르러서는 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 임내우에서 소나무의 수간(5.6) 및 수관(6.1)을 통과한 경우는 pH가 다소 낮아지는 반면에 상수리나무는 수간(6.6) 및 수관(6.8)을 통과했을 때 임외우보다 다소 높은 pH값을 나타내었다. 이는 수종의 특성 및 선행강우량의 영향으로 생각할 수 있고, 수관통과우보다 수간류의 pH가 낮은 것은 장기간 수피부분에 축척된 건성퇴적물이 강우와 함께 수간을 타고 내려오는 것과 수피부분이 풍화하면서 수소이온을 생성하기 때문으로 생각된다. 이는 수간류의 pH가 수관통과우보다 낮

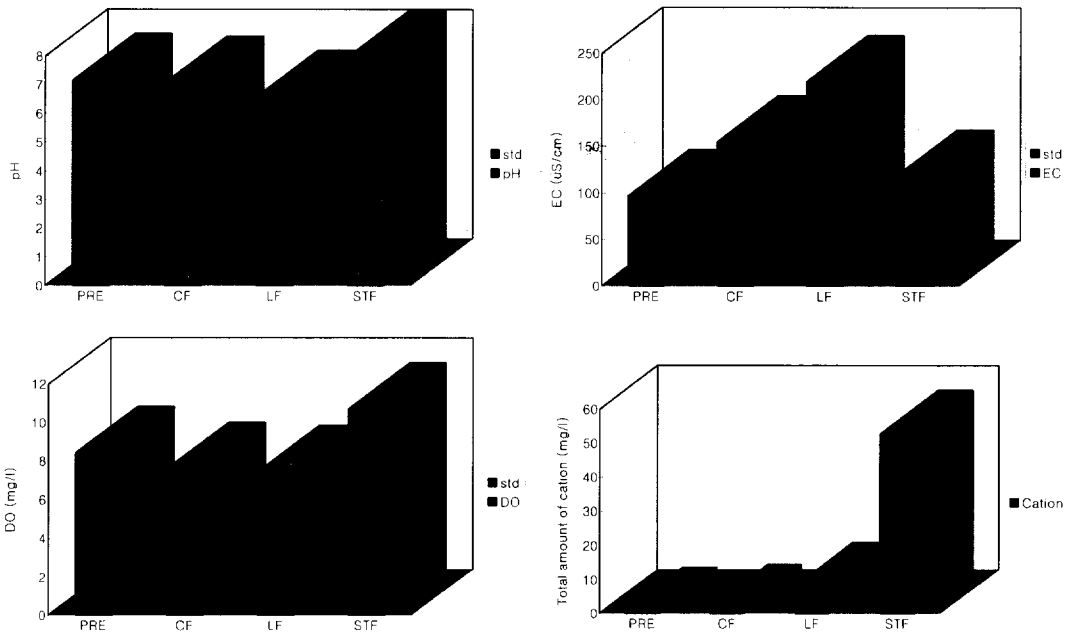


Fig. 10. Comparision of water quality in hydrological processes
PRE : precipitation, CF : close rainfall, LF : litter flow,
STF : stream flow, std : standard deviation

다는 Cape와 Brown(1986) 등의 보고와 일치하였다. DO 6.1mg/l인 임외우가 임내우(5.8)에서 낙엽층(5.2)으로 갈수록 값이 낮아지다가 계류에 이르러서는 8.2mg/l로 높게 나타났으며, 임내우에서 소나무의 수간(5.8) 및 수관(5.7), 상수리나무의 수간(5.5) 및 수관(6.2)을 통과하는 과정에서 값의 변화 폭이 다르게 나타났다. EC 44.0 μS/cm인 임외우가 임내우(85.6 μS/cm)에서 낙엽층(155.0 μS/cm)으로 갈수록 값이 높아지다가 계류(74.9 μS/cm)에 도달하면 값이 낮아지는 것으로 나타났으며, 임내우에서 특히 소나무의 수간(167.8 μS/cm) 및 수관(64.6 μS/cm), 상수리나무의 수간(67.8 μS/cm) 및 수관(42.0 μS/cm)을 통과할 때 수종간에 값의 변화가 큰 것으로 나타났다. 이는 각 물순환 과정에서 용존물질의 차이를 말해 주는 것으로 유출수량에 많은 물질이 용존되어 있으면 값이 올라가는 것을 알 수 있다.

분석한 양이온 총량은 임외우(0.9mg/l)에서 임내우(1.7mg/l) 및 낙엽층(15.6mg/l)으로 갈수록 값이 크게 높아져 계류(52.7mg/l)에 이르러서는 아주 높은 값을 가지는 것으로 나타났으며, 임내우에서 소나무의 수간(3.0mg/l) 및 수관(1.1mg/l), 상수리나무의 수간(1.6mg/l) 및 수관(1.0mg/l)을 통과할 때 수종간 차이가 있었다. 임외우에 비해 임내우에서 값이 높은 이유는 수관에 흡착한 건성침착물의 강우에 의한 洗脫(wash off), 樹體器官의 강우에 의한 溶脫(leaching), 엽면에 생식하는 미생물에 의한 흡착(adsorption), 엽에서의 흡수(absorption) 등에 의해 용존원소량이 변화하기 때문이며, 낙엽층류에서 높은 값으로 나타난 것은 표층토에서 미생물에 의한 무기화가 활발해서 무기태 N이나 치환성 Ca, Mg 량이 많기 때문으로 생각된다.

3. 계류수 월별 수질변화의 특성 및 평가

산림생태계의 유입으로서 임외강우의 용존원소는 수관이나 퇴적유기물층을 통과할 때에 양적으로 변화하면서 아래쪽의 광물질 토양층으로 이동한다. 이때 토양수의 용존원소량에 영향을 줌과 동시에 식물에 의한 흡수나 흡착·치환을 받으면서 하층으로 이동하여 계류수에 용존되어 산림계 밖으로 유출한다. 팔공산 및 용성 조사지의 계류수를 대상으로 1년간 pH, EC, DO, 수온, 양이온 합계값을 동계를 제외하고 매월 2회 측정한 결과를 그림 11에 나타냈다.

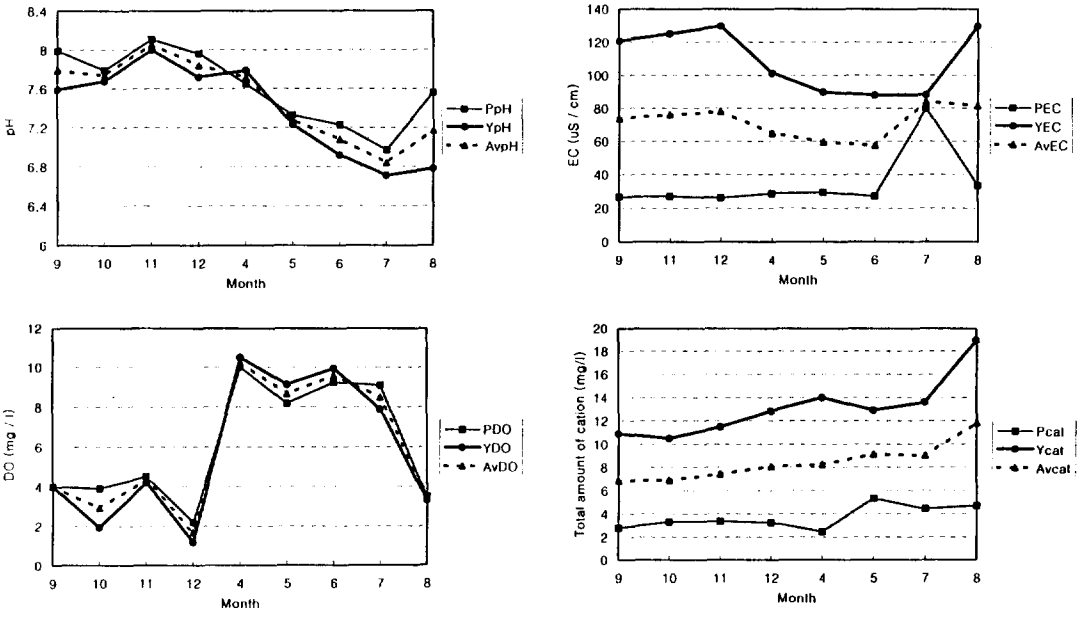


Fig. 11. Comparision of water quality in hydrological processes
PRE : precipitation, CF : close rainfall, LF : litter flow,
STF : stream flow, std : standard deviation

계류수의 pH 장기변화는 두 조사지에서 모두 9월(7.6-8.0)부터 12월(7.7-8.0)까지 높은 값을 유지하다가 이듬해 5월(7.2-7.3)부터 큰 폭으로 낮아져서 7월(6.7-7.0)에 최소값을 나타내었으나 8월(6.8-7.6)부터 다시 값이 상승하는 연주기 변화가 보였으며, 용성 및 팔공계류수의 연평균 pH가 각각 7.4, 7.6으로 팔공조사지에서 약간 높았다. pH의 연변화는 임외우의 산도 및 계절에 따른 식생의 이온흡수나 치환량 등의 차이에 의한 것으로 생각된다.

적당량의 DO는 어류와 다른 수중 생물체의 생존을 위해 산지 하천에서 필수적이며, 산지 계류의 전형적인 DO는 7~10mg/l 정도인데 하류의 정체된 하천에서는 더 낮은 값을 가진다(Whitehead 等, 1988). 용성 및 팔공조사지에서 4월(10.0-10.5mg/l)에서 7월(7.9-9.1mg/l)로 갈수록 DO 값이 점점 낮아지는 것으로 나타났으며, 연평균 DO는 각각 9.4mg/l, 9.2mg/l로 어류생태계 기준인 7.5mg/l를 모두 초과하고 있었다. 이 결과는 程龍鎬 等(1996)의 봄, 가을에 비해 여름철에 DO값이 낮아진다는 보고와 비슷한 경향을 보였다.

EC의 월별 변화는 팔공조사지(연평균 ; 35.1 μS/cm)에 비해 용성조사지(연평균 ; 106.3 μS/cm)에서 전체적으로 상당히 높은 값을 나타내어 팔공계류수가 용성계류수보다 수질이 깨끗한 것으로 나타났으며, 두 조사지에서 9월에서 12월까지는 월별 변화가 없이 일정한 값을 유지하다가 이듬해 4월에서 6월로 갈수록 EC값이 크게 낮아지고 7월부터 값이 다시 상승하는 월별 변화를 보였다. 특히 7월에서 8월에 걸쳐 값이 크게 상승한 것은 같은 시기에 DO값이 떨어지기 시작하는 것과는 대조적이다. 이는 계류수에 용존되는 월별 양이온 및 음이온의 차이 때문으로 생각된다. EC는 양이온 총량 및 NO_3-N이온과는 정의 상관(양이온 ; $y=0.091x+0.779$, $R^2=0.53$, NO_3-N이온 ; $y=0051x-0.699$, $R^2=0.41$)을 나타내어, 西尾 敏 等(1988)과 大手信人(1991)의 EC는 계류수에 용존되어 있는 이온총량 및 양이온의 함량에 비례한다는 보고와 일치하는 것으로 EC는 계류수에 용존되어 있는 이온량 및 수온에 직접 영향을 받는 것으로 판단된다.

계류수에서 분석된 양이온 총량의 월별 변화는 팔공조사지(연평균 ; 3.72mg/l)에 비해 용성조사지(연평균 ; 13.16mg/l)에서 전체적으로 높은 값을, 그리고 두 조사지 모두 가을철에 비해 봄·여름철에 높은 값을 나타내었는데, 이 결과는 수온에 따른 용존이온량의 차이 때문으로 생각된다.

結 論

팔공, 용성 및 대동조사지에서 한 단위강우에 대한 임외우 및 수관통과우, 수간류, 낙엽층류, 계류수, 그리고 장기 계류수를 대상으로 각각 유출수량과 산도, 전기전도도, 용존산소량 및 용존원소의 농도변화를 분석하여 산지의 수질 변화 특성 및 수질정화능을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 임외우의 월별 pH는 8월(6.8)에 가장 높은 값을, 그리고 4월(5.9)에 가장 낮은 값을 나타내었으며, 연간 평균 pH는 6.4이었다. 임외강우의 월별 수질변화 특성은 EC는 7,8월(69.4 μS/cm, 87.3 μS/cm), DO는 4월(7.4mg/l), 용존원소 Ca, Mg는 8월(2.06, 0.37), Na와 NO_3-N은 4월(2.18, 1.85), NH_4-N은 7월(4.42)에 각각 높은 값을 나타내었다.
2. 계류수의 pH 및 DO는 유출수량의 증가에 따라 값이 상승하였으나, EC는 값이 낮아졌다.
3. 임외우의 pH는 강우개시기보다 강우종료시점에서 다소 낮아지는 경향이 있었으며, 값의 범위는 pH6.4에서 7.5 사이에 있었다. 수간류, 수관통과우 그리고 낙엽층류의 pH는 임외우에 비해 강우초기에 모두 값이 낮아지고 그 이후는 큰 변화가 없었으나, EC는 낙엽층류를 제외하고는 강우초기에 높은 값을 나타내고 시간의 경과에 따라 값이 낮아졌고, pH와 EC 모두 수간류에서 변화폭이 큰 것으로 나타났다. 계류수의 pH는 강우초기에 높은 값을 나타내고 강우시간이 경과함에 따라 큰 폭으로 떨어지다가 강우종료 및 그 이후에는 다시 초기 수준 또는 그 이상의 값으로 회복하는 것으로 나타났으나, EC는 거의 반대의 경향이 있었다. 낙엽층류 및 계류수의 DO는 강우초기에서 강우종료시점으로 갈수록 값이 낮아졌으나, 임외우, 수간류 및 수관통과우에서는 경시적으로 뚜렷한 경향이 없었다.

4. 수관통과우 및 수간류에 있어서 pH는 소나무(5.6, 6.1)에 비해 상수리나무(6.8, 6.6)가 높았으며, EC는 상수리나무(43.2 μS/cm, 66.3 μS/cm)에 비해 소나무(67.6 μS/cm, 155.2 μS/cm)에서 높은 값을 나타냈다. 분석된 양이온 총량도 상수리나무(1.04mg/l, 1.52mg/l)에 비해 소나무(1.04mg/l, 2.79mg/l)의 수간류에서 높은 값이 나타났다.
5. 물순환의 각 과정에 있어서 pH는 낙엽층류(5.8)<임내우(6.3)<임외강우(6.4)<계류수(7.1)의 순으로, DO는 낙엽층류(5.2mg/l)<임내우(5.8mg/l)<임외우(6.1mg/l)<계류수(8.2mg/l), 그리고 EC는 임외우(44.0 μS/cm)<계류수(74.9 μS/cm)<임내우(85.6 μS/cm)<낙엽층류(155.0 μS/cm)의 크기 순으로 나타났다. 양이온 총량은 임외우(0.9mg/l)<임내우(1.7mg/l)<낙엽층(15.6mg/l)<계류수(52.7mg/l)의 크기 순으로 나타나 계류에서 이온양이 많았다.
6. 계류수의 pH 월별 변화는 두 조사지에서 9월(7.6-8.0)부터 12월(7.7-8.0)까지 높은 값을 유지하다가 이듬해 5월(7.2-7.3)부터 큰 폭으로 낮아져서 7월(6.7-7.0)에 최소값을 나타내었으나 8월(6.8-7.6)부터 다시 값이 높아졌다. DO는 4월(10.0-10.5mg/l)에서 7월(7.9-9.1mg/l)로 갈수록 낮아졌다. EC는 팔공조사지(연평균 ; 35.1 μS/cm)에 비해 용성조사지(연평균 ; 106.3 μS/cm)에서 전체적으로 높은 값을 나타내어 팔공계류수가 용성계류수보다 수질이 깨끗한 것으로 나타났으며, 두 조사지에서 9월에서 12월까지는 일정한 값을 유지하다가 이듬해 4월에서 7월로 갈수록 값이 크게 낮아지고 8월부터 다시 높아졌다. 양이온 총량은 팔공조사지(연평균 ; 3.72mg/l)에 비해 용성조사지(연평균 ; 13.16mg/l)에서 높은 값이 나타났고, 가을철에 비해 봄, 여름철에 높은 값이 있었다.

향후 본 연구에서 구체적으로 분석하지 않았던 각 용존원소의 물순환과정에 있어서 움직임과 유출수량을 이용한 수질모형개발, 그리고 산지 수질정화능과의 관련을 구명할 필요가 있을 것으로 생각된다.

引 用 文 獻

1. 西尾 敏・佐佐木重行・高木潤治. 1988. 降水及び溪流水の成分に關する研究(Ⅰ) - pHとEC -. 日本九支研論集 41 : 169-170.
2. 坂本 康. 1993. 樹冠通過雨および樹幹流の水量と水質の空間分布と時間變動. 水文水資源學會誌 6(4) : 326-335.
3. 志水俊夫・藤枝基久・吉野昭一. 1987. 融雪期における河川水質の變動特性. 日林論 98 : 561-564.
4. 大類淸和・生原喜久雄・相場芳憲. 1994. 森林小集水域における溪流水質に及ぼす諸要因の影響. 日林誌 76(5) : 383-392.
5. 村岡浩爾・平田健正. 1986. 溪流水質から見た森林の淨化機能に關する研究(第1報). 國立公害研究所研究報告 95 : 21-35.
6. 大手信人. 1991. 森林流域內の水移動に地中水・溪流水の伴う水質變化. 京都大學 演習林報告 63 : 69-81.
7. 李憲浩・全宰弘. 1996. 山地 물循環過程에 있어서 酸度, 電氣傳導度 및 溶存酸素量의 變化. 한국임학회지 85(4) : 1-13.
8. 程龍鎬・元亨圭・朴在鉉・李天龍・李鳳洙. 1996. 鬱陵島와 桂芳山에서 山林內 溪流水質의 理學的 特性. 山林科學論文集 53 : 173-185.
9. 塚本良則. 1993. 森林水文學, 文永堂出版 : 217-219.
10. 廣瀨 顯・岩坪五郎・堤利 夫. 1988. 森林流出水の水質についての廣域的考察(Ⅰ). 京都大學 演習林報告 60 : 162-173.
11. Aubertin, G.M., D.W. Smith and J.H. Patric. 1973. Quantity and quality of streamflow after urea fertilization on a forested watershed : first year results.(For.Fert.Symp. Proc.) USDA For.Serv.Gen.Tech.Rep. NE-3 : 88-100.
12. Brown, G.W. 1979. Forestry and Water Quality. Oregon State Univ. 74p.
13. Cape, J.N. and A.H.F. Brown. 1986. The effects of different tree species on the amount and chemical composition of precipitation passing through the canopy. Interim and Fi-

nal Reports to the Commission of the EC Contract ENN774UK(H). Commission of the EC, Brussels.

14. Feller, M.C. and J.P. Kimmins. 1979. Chemical characteristics of small streams near Haney in southwestern British Columbia. Water Resour. Res. 15(2) : 247-258.
15. Hopmans, P., D.W. Flinn and P.W. Farrell. 1987. Nutrient dynamics of forested catchments in southeastern Australia and changes in water quality and nutrient exports following clearing. For.Ecol.Manage.20 : 209-231.
16. Lelong, F., C. Dupraz, P. Durand and J.F. Lescot. 1990. Effects of vegetation type on the biogeochemistry of small catchments(Mont Lozere, France). J. of Hydrology 116 : 125-145.
17. Likens, G.E., F.H. Bormann., N.M. Johnson and R.S. Pierce. 1967. The calcium, magnesium, potassium, and sodium budgets for a small forested ecosystem. Ecology 48 : 772-785.
18. Roda, F., A. Anna and B. David. 1990. Precipitation, throughfall, soil solution and streamwater chemistry in a Holm-oak(Quercus ilex) forest. J. of Hydrology 116 : 167-183.
19. Tiedemann, A.R., T.M. Quigley and T.D. Anderson. 1988. Effects of timber harvest on stream chemistry and dissolved nutrient losses in northeast Oregon. For. Sci. 34 : 344-358.
20. Whitehead, P.G., S. Bird., M. Hornung., J. Cosby., C. Neal and P. Paricos. 1988. Stream acidification trends in the welsh uplands-a modelling study of the Llyn Brianne catchments. J. of Hydrology 101 : 191-212.