

산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향

안 광 국* · 신 인 철¹

(충남대학교 생명과학부, ¹충남보건환경연구원)

Influence of the Asian Monsoon on Seasonal Fluctuations of Water Quality in a Mountainous Stream. An, Kwang-Guk* and In-Chul Shin¹ (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764; ¹Chungnam Health and Environmental Research Institute, Daejeon 300-801)

The present study was to determine how seasonal rainfall intensity influences nutrient dynamics, ionic contents, oxygen demands, and suspended solids in a lotic ecosystem. Largest seasonal variabilities in most parameters occurred during the two months of July to August and these were closely associated with large spate of rainfall. Dissolved oxygen (DO) had an inverse function of water temperature ($r = -0.986$, $p < 0.001$). Minimum pH values of < 6.5 were observed in the late August when rainfall peaked in the study site, indicating an ionic dilution of stream water by precipitation. Electrical conductivity (EC) was greater during summer than any other seasons, so the overall conductivity values had direct correlation ($r = 0.527$, $p < 0.01$) with precipitation. Ionic dilution, however, was evident 4~5 days later in short or 1~2 weeks in long after the intense rain, indicating a time-lag phenomenon of conductivity. Daily COD values varied from 0.8 mg L^{-1} to 7.9 mg L^{-1} and their seasonal pattern was similar ($r = 0.548$, $p < 0.001$) to that of BOD. Total nitrogen (TN) varied little compared to total phosphorus (TP) and was minimum in the base flow of March. In contrast, major input of TP occurred during the period of summer monsoon and this pattern was similar to suspended solids, implying that TP is closely associated ($r = 0.890$, $p < 0.01$) with suspended inorganic solids. Mass ratios of TN : TP were determined by TP ($r = -0.509$, $p < 0.01$) rather than TN ($r = -0.209$, $p < 0.01$). The N : P ratios indicated that phosphorus was a potential primary limiting nutrient for the stream productivity. Overall data suggest that rainfall intensity was considered as a primary key component regulating water chemistry in the stream and maximum variation in water quality was attributed to the largest runoff spate during the summer monsoon.

Key words : ionic dilution, monsoon rain, nutrients, stream, water chemistry

서 론

최근 하천에서의 이화학적 역동성에 대한 국내·외 연구는 주로 질소 및 인의 영양염류에 의한 부영양화도 분

석 및 토지이용도에 따른 오염 부하량 추정, 수질변화에 따른 생태 지표종의 특성분석, 유기물 오염에 따른 트로픽 길드 구조변화, 하천 생태계 건강성평가, 물리적 서식지 변동성, 1차생산력을 제한하는 요인분석 등 폭넓은 연구가 이루어지고 있다 (Ostry, 1982; Grim and Fisher,

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

1986; Cameron, 1996; Collins and Jenkins, 1996; 안 등, 2001; An *et al.*, 2002; An and Kim, 2003; 신 등, 2003). 이러한 연구에 있어서 많은 특성변화는 일별 혹은 연별 강우 패턴에 의해 유도되며, 강우에 따른 유량변화는 하천생태계의 물리적 교란 뿐만 아니라 이화학적 변화의 주요 변수로 작용한다(강, 1998; 안 등, 2001).

북미 및 유럽의 하천 연구에서는 지역적 강우 패턴에 따른 이화학적 수질변화특성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어, 북미의 하천에서 Perkins and Jones (1994)는 하천으로 유입되는 인(P)과 질소(N)는 초봄에 집중된 강우와 밀접한 관계를 보인 바 있으며, 집중 강우시 비휘발성 현탁물(non-volatile suspended solids)의 급격한 증가 및 빗물에 의한 대규모 이온현상을 보고하여 수체내의 이화학적 계절특성이 주로 봄의 초기 강우에 의해 결정된다는 사실을 보고하고 있다. 초봄에 발생하는 인(P)과 같은 영양염류는 하절기에 정수 생태계에서 1차생산력을 예측할 수 있으며 이런 모델의 대표적인 예가 Dillon and Rigler (1974)의 수질모델이다. 즉, 강우의 특성은 수체내 수질 특성 변화에 가장 크게 기여하는 요소중의 하나이다. 우리나라에서 강우 분포특성은 북미 및 유럽에서의 계절 특성과 뚜렷한 차이를 보인다(An and Park, 2002). 우리나라 연평균 강수량은 1,274 mm로 세계 평균 973 mm의 1.3배이지만 강수량의 2/3 이상이 하절기 장마철에 집중되는 반면, 북미 및 유럽에서 강우는 주로 봄에 분포하고 강우 강도 면에서 우리나라의 여름보다 약한 특성을 가지고 있다.

우리나라의 중대형 수체(하천 및 호소) 연구에 따르면, 계절적 몬순강우가 이화학적 수질특성에 대한 직접적인 영향을 준다는 연구는 다양하게 보고되고 있다(An and Jones, 2000; 안 등, 2001; An and Kim, 2003; 김과 김, 2004). 하절기 집중적 강우는 유역으로부터의 급격한 유량증가를 가져오고 수체에 음적, 양적 변화를 가져오는 것으로 보고되고 있다. 특히, 하절기동안 비점오염원으로부터 각종 인과 질소 같은 영양염류의 유입이 보고되고 있으나, 현재 이런 연구들은 주로 호수들에 국한되어 왔고, 또한 하천에 대한 연구도 점원 및 비점원 오염원에 주로 영향을 받는 지역에서 주로 수행되어, 우리나라의 산림지역에 위치한 하천에서의 계절적 강우 특성변화에 따른 다각적 수질변동에 대한 평가가 시급한 실정에 있다.

본 연구는 금강 지류중의 하나인 유구천에서 하절기 집중강우가 하천의 부영양화도, 이온변화양상 및 유기물 유입에 따른 산소요구량에 어떤 영향을 미치는가에 대한 평가 및 수질 변수들 간의 다각적 상호관계를 이해하고

자 시도하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점의 위치 및 특성

유구천은 충남 공주시 유구읍 봉수산에서 발원하여 신평면에서 대룡천과 합수되고, 사곡면에서 마곡천과 합류되어 우성면을 동남진한 후 공주시에서 금강 본류에 합류되는 하천으로 유로연장이 45 km인 계류형 소형하천이다. 조사를 위해 상류로부터 40 km 지점에 위치한 지점을 선정하여 매일 이화학적 분석(일요일 제외)을 실시하였으며 조사지점은 Fig. 1과 같다. 조사지점의 하단부에는 농수로용 보가 설치되어 있고, 하상은 자갈과 굵은 모래로 구성되어 있으며, 수변식생은 빈약하고 수심은 계절별로 큰 변이를 보이나 평균수심은 1 m 내외이다.

2. 수계내 지질학적 특성

유구천은 차령산맥과 노령산맥 사이에 위치하며 지질학적 특성을 보면 계룡산 지역방면의 주요 모암은 화강암 및 화강 편마암과 반암 등이 모암이며, 유구천 서북쪽 방면의 약산, 북방산 및 북동쪽 대흥과 광정일대의 하천은 호상 편마암으로 이루어져 있다. 이들 대부분은 사장석(42%) 및 석영(30%)으로 이루어져 (한국지질도 1:50,000, 한국지질자원연구소), 이화학적 수질에는 큰 영향은 없을 것으로 사료되었다.

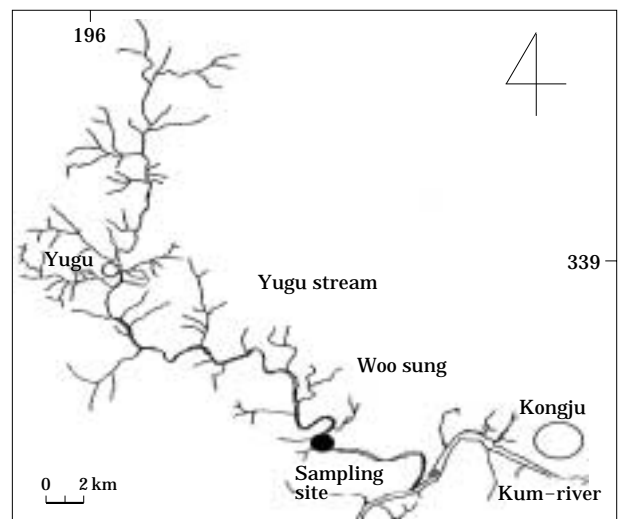


Fig. 1. Map showing the sampling site in Yugu stream.

3. 수계내 토지이용도 및 오염원 현황

유구천 주변에는 일부 농가(총인구 : 26,301명)가 분포하며, 축사가 산재되어 있다. 가축은 대부분 한우와 젓소(10,418 마리) 및 양돈(11,696마리)이 주류를 이루고 있으며, 일부 가금류(167,091마리)가 존재하며, 유수식 양식장(4개소, 면적 : 12,708 m²)이 산재해 있다. 토지이용 현황은 논 17.9 km², 밭 28.9 km², 임야 210.9 km², 대지 4.5 km², 목장 0.4 km², 기타 10.0 km²로 구성되어 있다. 결국, 임야가 총 토지이용의 77.3%, 밭 10.6%, 논 6.6%, 대지 1.6%, 목장 0.2%, 기타 3.7%로 나타나, 식생이 잘 발달된 유구천 수계는 수질보존에 호조건을 가지고 있다. 오염 발생원은 크게 생활용수(62%), 축산폐수(15%), 산업폐수(12%), 기타(11%) 등으로 구성되었다(금강환경관리청, 1999). 따라서 본 수계는 주로 산림 및 농업활동에서 유래되는 하·폐수가 수질에 영향을 미치는 주요 인자로 판단되었다.

4. 조사기간 및 시료채취

본 연구는 2000년 1월 4일부터 12월 30일까지 1년 기간 동안 하천 중심부의 표면수를 채수하였으며, 채수 빈도는 1년 동안 일요일을 제외하고 총 305회 실시하였다. 채수한 시료는 4 L 무균 채수병 용기에 넣어 Ice Box를 이용, 실험실로 운반한 후 즉시 분석하였다. 시료채취는 매일 아침 9시에서 11시 사이에 실시하였다.

5. 분석항목 및 분석방법

수온은 디지털온도계(Oregon Scientific), 수소이온농도(pH)는 pH 측정기(Hanna HI Model 92240), 전기전도도(Electric conductivity: EC, 20°C에서 보정)는 전도도계(Water quality Q checker)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 용존산소(dissolved oxygen: DO) 농도는 현장에서 시료를 고정화한 후 실험실로 운반하여 분석하였다. 생물화학적산소요구량(Biochemical oxygen demand : BOD)은 잉클러 아지드화나트륨법, 화학적산소요구량(Chemical oxygen demand: COD)는 산성 100°C에서 과망간산칼륨법을 이용하여 분석하였고, 총부유물질(total suspended solids: TSS)은 유리섬유 여지법을 이용하였다(APHA, 1985). 총질소(total nitrogen: TN)와 총인(total phosphorus: TP)은 자외선 흡광 광도법 및 아스코르빈산 환원법을 각각 이용하여 분석하였다. 월별 강수량은 본 하천 상류 4 km 지점에 설치된 자동 기상 관측실에서 측정된 기상청 자료(<http://www.kma.go.kr/index.jsp>)

를 활용하였다.

결과 및 고찰

조사기간 동안 유구천 주변 수계의 총 강수량은 1,640 mm로서, 이는 지난 30여년의 국내 연평균 강수량(1,200 mm)의 평균 37% 수준였다. 1~3월의 갈수기 동안에는 60.5 mm의 강수량을 보였으며, 집중호우 기간인 6~9월에는 1,378 mm의 강수량을 보여 연간 총강수량의 84%에 해당하였다(Fig. 1). 우리나라의 몬순 특성은 이런 계절별 강우 분포에 따라 이화학적 수질이 역동적으로 변화하는 것으로 보고하고 있다(An, 2000a, b; An and Jones, 2000; An and Kim, 2003). 유구천에서의 Pearson 상관지수 분석에 따르면, 강우분포는 특히 전기전도도

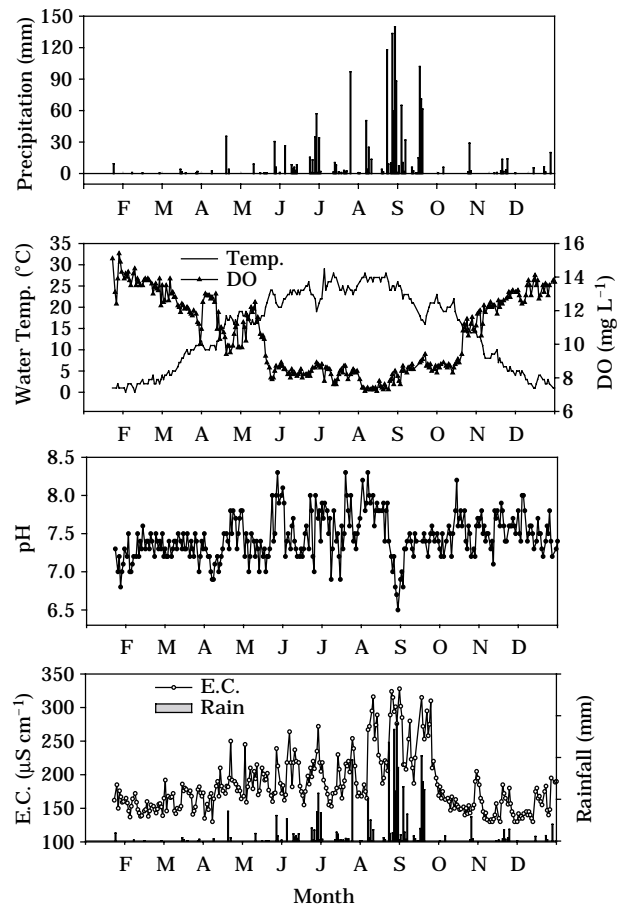


Fig. 2. Seasonal fluctuations of water temperature (°C), dissolved oxygen (DO, mg L⁻¹), pH and electric conductivity (E.C., μS cm⁻¹) with the distribution of seasonal precipitation (mm) in the stream.

Table 1. Pearson's correlation coefficients (*r*) and probability (*p*) values, based on the significance in the 2-tailed test, in the water quality parameters (N = total number of observation). In the table, E.C., Temp, TSS, and N : P ratios indicate electric conductivity, water temperature, total suspended solids, and mass ratio of TN : TP, respectively.

		Rain	Temp.	pH	COD	BOD	TN	TP	E.C.	DO	TSS	N : P
Rain	<i>r</i>	1.000										
	<i>p</i>											
	N	91										
Temp	<i>r</i>	0.217	1.000									
	<i>p</i>	0.062										
	N	75	290									
pH	<i>r</i>	0.256*	0.219**	1.000								
	<i>p</i>	0.027	0.00									
	N	75	290	290								
COD	<i>r</i>	0.471**	0.546**	0.052	1.000							
	<i>p</i>	0.000	0.000	0.378								
	N	75	290	290	290							
BOD	<i>r</i>	0.392**	0.685**	0.039	0.548**	1.000						
	<i>p</i>	0.001	0.000	0.514	0.000							
	N	74	287	287	287	287						
TN	<i>r</i>	0.393**	0.374**	0.130*	0.227**	0.241**	1.000					
	<i>p</i>	0.000	0.000	0.027	0.000	0.000						
	N	75	290	290	290	287	290					
TP	<i>r</i>	0.549**	0.619**	0.013	0.357**	0.476**	0.639**	1.000				
	<i>p</i>	0.000	0.000	0.829	0.000	0.000	0.000	0.000				
	N	74	286	286	286	283	286	286				
E.C.	<i>r</i>	0.527**	0.575**	-0.048	0.481**	0.515**	0.574**	0.803**	1.000			
	<i>p</i>	0.000	0.000	0.413	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
	N	75	290	290	290	287	290	286	290			
DO	<i>r</i>	-0.257*	-0.968**	-0.257**	-0.515**	-0.637**	-0.408**	-0.649**	-0.587**	1.000		
	<i>p</i>	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
	N	75	290	290	290	287	290	286	290	290		
TSS	<i>r</i>	0.567**	0.575**	-0.010	0.385**	0.484**	0.672**	0.890**	0.897**	-0.618**	1.000	
	<i>p</i>	0.000	0.000	0.859	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	75	289	289	289	286	289	285	289	289	289	
N : P ratio	<i>r</i>	-0.293*	-0.519**	-0.131*	-0.255**	-0.413**	-0.209**	-0.509**	-0.365**	0.517**	-0.402**	1.000
	<i>p</i>	0.011	0.000	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	74	286	286	286	283	286	286	286	286	285	286

*: Correlation is significant at the 0.05 level (two-tailed); **: Correlation is significant at the 0.01 level (two-tailed)

(EC), 총인 (TP), 총부유물 (TSS) 에 대하여 상관지수 값이 0.50 이상 ($p < 0.01$, $n = 299$)의 뚜렷한 상관성을 보였으며, 그 외에 6개 항목들에 대해서는 낮은 상관성을 보였으나, 유의 ($p < 0.01$, $r < 0.50$)한 것으로 나타나, 강우가 수질의 이화학적 변이에 중요한 요소임이 재차 확인되었다 (Table 1).

유구천에서 수질요인 별 연평균 값, 계절별 평균값 및 최대·최소값은 Table 2와 같다. 연평균 수온은 14°C로서 최소 0°C에서 최대 29°C까지의 전형적인 온대권 하

천의 특성을 보였다 (Table 2). 수소이온농도는 연평균 7.4로서 중성을 보였으며, 일부 하절기를 제외하고는 계절별로 차이를 보이지 않았다. BOD 및 COD의 연평균 농도는 각각 1.9 mg L⁻¹ 및 2.6 mg L⁻¹로서 (Table 2), 우리나라 현행하천 수질기준에 의거할 때 BOD는 2등급으로 평가되었다. 전기전도도의 경우 평균값은 183 μS cm⁻¹로서 4계절 중 하절기에 최대치(328 μS cm⁻¹)를 보였으며, 최소치(153 μS cm⁻¹) 또한 하절기에 나타나 동일계절에 이온농도에서 2배 이상의 차이를 보였다 (Table 2). 또한 하

Table 2. Mean \pm standard error (S.E.) and ranges of physical, and biological parameters in Yugu Stream during January–December 2000. In the table, DO, TN, TP, and TSS indicate dissolved oxygen, total nitrogen, total phosphorus, and total suspended solids, respectively.

Parameters	Total mean	Range of total mean	Seasons							
			Winter		Spring		Summer		Fall	
			Mean \pm S.E	Range	Mean \pm S.E	Range	Mean \pm S.E	Range	Mean \pm S.E	Range
Water temp. (°C)	14 \pm 1.3	0 ~ 29	2 \pm 0.1	0 ~ 5	14 \pm 1.0	3 ~ 24	25 \pm 0.5	19 ~ 29	14 \pm 0.7	4 ~ 23
pH	7.4 \pm 0.1	6.5 ~ 8.3	7.4 \pm 0.1	6.8 ~ 8.0	7.4 \pm 0.1	6.9 ~ 8.3	7.5 \pm 0.4	6.5 ~ 8.3	7.5 \pm 0.4	7.1 ~ 8.2
DO (mg L ⁻¹)	10.8 \pm 0.1	7.2 ~ 15.4	13.6 \pm 0.1	10.9 ~ 15.4	11.1 \pm 0.2	7.9 ~ 13.9	8.1 \pm 0.1	7.2 ~ 8.9	10.5 \pm 0.2	8.3 ~ 13.2
Electric conductivity (μ S cm ⁻¹)	183 \pm 2	130 ~ 328	159 \pm 2	130 ~ 195	178 \pm 3	130 ~ 250	217 \pm 3	153 ~ 328	177 \pm 5	130 ~ 315
BOD (mg L ⁻¹)	1.9 \pm 0.1	0.5 ~ 4.8	1.8 \pm 0.1	0.8 ~ 2.9	2.0 \pm 0.1	1.1 ~ 3.1	2.2 \pm 0.1	1.1 ~ 4.8	1.6 \pm 0.1	0.5 ~ 2.6
COD (mg L ⁻¹)	2.6 \pm 0.0	1.5 ~ 8.1	2.1 \pm 0.1	1.6 ~ 2.4	2.8 \pm 0.1	2.0 ~ 7.4	3.3 \pm 0.1	1.8 ~ 8.1	2.2 \pm 0.1	1.5 ~ 5.8
TN (mg L ⁻¹)	1.721 \pm 0.040	0.315 ~ 3.217	1.521 \pm 0.069	0.783 ~ 2.987	1.325 \pm 0.079	0.315 ~ 3.211	2.183 \pm 0.064	1.019 ~ 3.217	1.840 \pm 0.071	0.893 ~ 2.927
TP (μ g L ⁻¹)	27 \pm 2	2 ~ 105	9 \pm 1	2 ~ 31	15 \pm 2	2 ~ 43	50 \pm 3	9 ~ 105	32 \pm 3	6 ~ 95
TSS (mg L ⁻¹)	3.7 \pm 0.2	0.4 ~ 16.6	1.6 \pm 0.1	0.4 ~ 5.2	2.0 \pm 0.2	0.5 ~ 8.2	6.8 \pm 0.4	1.6 ~ 16.6	4.3 \pm 0.4	0.8 ~ 16.2

절기의 평균 생물학적산소요구량, 화학적산소요구량, 총질소, 총인 및 총부유물 농도는 타 계절들에 비해 적게는 22%에서 460%까지 증가하는 것으로 나타나, 수질의 계절별 변화가 큰 것으로 나타났다. 총질소 및 총인의 경우 하천내 연평균 농도는 각각 1.721 mg L⁻¹ 및 27 μ g L⁻¹로서 Doods *et al.* (1998)의 하천 영양상태 평가기준 (trophic state criteria)에 의하면 부영양상태 (eutrophy) 및 중영양상태 (mesotrophy)로 각각 판명되었다. 본 연구 대상 하천처럼 토지이용도면에서 70% 이상이 산림에 위치한 상태 하에서 1.0 mg L⁻¹ 이상의 높은 질소농도가 관측되는 것은 이전의 An and Kim (2003)과 김과 김 (2004) 등의 상류 하천 및 대형 인공호에서 얻은 결과와 유사하다. 이런 사실은 수계내에 위치한 점원 및 비점원 오염원에 의거한 영향이라기보다는 한반도의 지역적인 지질학적 특성 혹은 대기침적에 의거할 것으로 추측되나, 이에 대한 명확한 증거는 밝혀지지 않은 상태이다.

수질변수에 대한 일변화 특성은 온도 및 강우특성에 따라 민감하게 반응하는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 월평균 수온은 수온상승기 (2~6월: 2~23°C), 정점기 (7~8월: 25~26°C), 하강기 (21~3°C)로 대별되었다. 용존산소 (DO)의 농도 분포는 수온변화와 역 상관 관계 ($r = -0.97$; $p < 0.01$)를 보였다 (Fig. 2, Table 1). 이런 특성은 BOD 및 COD가 DO의 상관성지수 분석에서 절대값이 0.65 이하인 점을 감안한다면 (Table 1), 유기물 오염에 의한 미생물 분해에 따른 산소감소현상 혹은 부착조류의 광합성에

의한 산소증가 현상에 의한 변이는 상대적으로 계절별 수온보다 낮은 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 특히, 하절기중 7월 초 및 8월말의 두 차례 집중강우는 각각의 기간 동안 강우 전에 비해 7°C 이상까지 급격히 수온이 감소효과를 가져왔다 (Fig. 2). 따라서, 용존산소농도는 수온에 직접적인 영향을 주는 강우의 빈도분포에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.

강우에 따른 전기전도도 변이는 Table 1에서 보는 바와 같이 강우량과 전기전도도 사이에 상관지수는 0.527로서 $p < 0.01$ 에서 유의한 것으로 나타났다. 즉, 분석된 상관지수에 따르면, 강우증가가 전기전도도 상승을 가져온 것으로 보이나 실제로는 강우에 따른 이온농도의 시간 지연현상 (time-lag)에 의해 이온농도를 감소시키는 것으로 확인되었다. 전기전도도의 일별 모니터링 자료에 따르면, 집중강우 후 짧게는 4~5일 후 길게는 1~2주 후에 전기전도도 값이 급격히 감소하는 반응 지연효과인 time-lag 현상을 보였다. 예를 들면, 6월 26~29일간의 127 mm의 강우는 7월 1~7일까지 153 μ S cm⁻¹의 이온농도를 감소시켰고, 또한 강우이전 (8월 23일)에 315 μ S cm⁻¹의 전기전도도는 8월 24~27일 기간 동안에 421 mm의 집중강우에 의해 9월 1~2일까지 153 μ S cm⁻¹까지 감소하였고 (Fig. 2), 이와 동시에 pH의 경우도 최저점인 6.5까지 감소하여 (Fig. 2), 강우에 의한 이온농도의 급격한 감소현상은 분명했다. 이런 현상을 북미의 하천 방류량에 따른 전기전도 이온변화현상에 대한 연구 (Perkins and Jones,

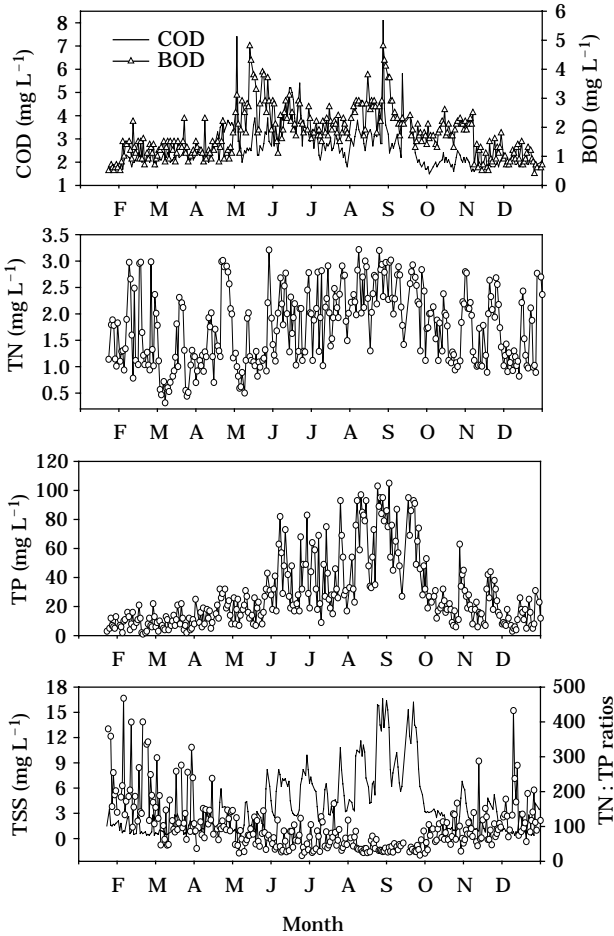


Fig. 3. Seasonal fluctuations of chemical oxygen demand (COD, mg L^{-1}), biological oxygen demand (BOD, mg L^{-1}), total nitrogen (TN, mg L^{-1}), total phosphorus (TP, $\mu\text{g L}^{-1}$), total suspended solids (TSS, mg L^{-1}) and mass ratio of TN : TP in the stream.

1994)와 비교해 볼 때 본 연구에서 좀 더 긴 반응지체현상을 보였는데 이는 수계 크기에서 기인된 현상으로 사료된다. 즉, 하천수계 크기가 작고 하천크기 (Stream order)가 작을 경우 집중강우가 하천에 유입되는 시기가 짧는데 비해, 반대로 하천의 수계가 크고 하천이 클수록 강우에 의한 희석시간이 더 오래 걸리는 것으로 사료된다.

연중 pH 변화는 6.5~8.3의 범위를 나타냈고 (Table 2), 월평균 pH는 7.2~7.6으로서 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 하절기 집중강우가 시작되기 전에 pH는 최고치인 8.3까지 상승하였으나, 장마가 끝난 후에는 급격히 감소했다가 9월 이후 pH도 7.2 부근에서 안정성을 유지하였다 (Fig. 2). 유구천 수계의 70% 이상이 식생

이 우거진 산림으로 뒤덮여 있고, 수계 대부분의 지질성분이 70% 이상의 사장석 및 석영으로 구성된 편마암으로 조성되어 있어 강우 시에도 큰 변화를 보이지 않았다. 외국의 하천 연구에 따르면, 농업 집약이 이루어지는 토지이용지역에서의 이온변화 및 영양염류의 농도 변동이 산림지역에 비해 크게 증가하는 것으로 나타났다 (Collins and Jenkins, 1996). 본 연구 기간 동안 pH에 있어서 6.5 이하의 최소값은 강수량이 최고조에 달한 8월 후반에 관찰되었는데, 이는 빗물의 일반적인 pH가 5.6인 점을 감안한다면 빗물에 의한 하천수 이온의 일시적인 산성화로써 빗물 희석효과로 판단된다. 반면, 총부유물질 농도는 연평균 3.7 mg L^{-1} 였고, 연간 농도범위는 $0.4 \sim 16.6 \text{ mg L}^{-1}$ 로서 장마기간 중의 평균농도 (7.1 mg L^{-1})가 하절기 장마 전 (1.8 mg L^{-1}) 및 장마후의 평균농도 (2.2 mg L^{-1})에 비해 약 2배 상회하였고, 장마기간을 제외한 기간에 비해서 약 4배 정도 높게 나타났다. 특히, 장마 집중기간인 8월말 총부유물질농도는 16 mg L^{-1} 이상을 상회하였는데 (Fig. 3), 이의 대부분은 유기성 부유물 (organic suspended solids, 예, 조류 등)이라기 보다는 비휘발성 무기물 (non-volatile suspended solids)의 증가로 사료되었다. 이런 무기성 물질의 증가는 Perkins and Jones (1994)의 북미 하천 연구에서 제시된 바와 같이 집중강우기인 봄철의 하천방류량과 일치하는 양상을 보여주었다. 따라서 이런 기간 동안 급격히 증가하는 무기성부유물은 하천에서 탁도의 급격한 증가를 가져오고, 이는 일부 수체내 산소요구량을 증가시키며 (8월 말: 5 mg L^{-1} 이상의 COD; Fig. 3), 1차생산자의 주요역할을 담당하는 부착조류 및 일부 식물성플랑크톤에 광 제한효과 (light limitation)를 가져올 수 있는 것으로 사료되어 (Dodds et al., 1998) 급격한 총인 (TP)의 증가에도 불구하고 하천 내에 1차생산력은 감소될 것으로 추론되었다.

유기물오염의 지표로 이용되는 화학적 산소요구량의 일변화는 생물학적 산소요구량 변화와 유사한 계절변화를 보였다. COD농도는 연평균 2.6 mg L^{-1} 로 장마기간에 최고치인 8.1 mg L^{-1} 의 농도를 나타냈고, 나머지 기간에는 평균 $2.2 \sim 2.8 \text{ mg L}^{-1}$ 농도범위를 나타내었다 (Fig. 3). 연중 유구천의 BOD농도 변화는 5월에 상승하기 시작하여 장마기간에 최고값을 보여 주변의 점오염원으로부터 기인하는 것으로 사료된다. 또한 BOD농도는 6~9월에 높은 피크를 나타낸 COD농도의 연중 변화 패턴과 유사하였다 (Fig. 3). 한편, 연중 COD분포는 $0.8 \sim 7.9 \text{ mg L}^{-1}$ 로 계절별 변화형태 (Fig. 3)가 BOD와 유사하였다 ($r=0.548$, $p<0.01$; Table 1). BOD 또한 장마가 시작되는 6월부터 COD 농도는 완만한 상승을 시작하여 최고 평균농도인

3.9 mg L⁻¹에 도달하였고, 9월 이후에는 하강하기 시작하여 11월에 월 최소 평균농도인 1.8 mg L⁻¹를 나타내었다 (Fig. 3). Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 BOD 및 COD는 5월 및 8월말에 최대치를 보였다 (Fig. 3). 유기물 오염도에 있어서 5월 최대치의 경우 계속되는 갈수기동안 뚜렷한 큰 강우가 없었고, 외부로부터의 하천 유입수량이 적은 것을 감안한다면, 외부로부터의 유기물 유입에 의한 외부기원 유기물 효과는 극히 미미했음이 분명하다. 한편, 동일기간 동안 유량감소 현상 및 동시에 수온상승 효과를 감안한다면, 산소요구량 증가는 하천 자체내 유기물오염도 증가로 사료된다. 한편, 8월 말의 산소요구량 최대치는 집중강우 시기와 일치한다는 것을 고려할 때 강우와 함께 인근 수계로부터 유입된 비점원 및 점원오염원으로부터의 유기물증가로 사료되어 외부기원유기물에 영향으로 사료되었다.

총질소(TN)는 연평균 1.721 mg L⁻¹을 나타냈고, 장마철에 최고값인 3.217 mg L⁻¹였으며 그 외의 기간에는 평균 1.521~1.840 mg L⁻¹로 비교적 변동 폭이 적은 것으로 나타났다. 특히, 본 연구기간 동안 중 0.700 mg L⁻¹ 이하의 질소의 최저값은 강우가 거의 없는 봄철에 발생하였는데 이는 최대값을 보이는 북미의 하천과는 반대의 양상을 보였다 (Perkins and Jones, 1994). 이런 최소값은 Meyer *et al.* (1988)이 제시한 바와 같이 우리나라의 갈수기동안 하천수량의 감소 및 지하수의 상대적 영향증가로 인한 영양염류감소 현상으로 사료되었다. 이런 현상은 봄기간 동안의 총인 농도에서도 분명하게 나타났다. 즉, 갈수기동안 총인농도는 30 µg L⁻¹ 이하의 값을 유지하며 계절 중 최저치를 유지하였다 (Fig. 3). 이런 결과는 하절기 질소의 증가는 주로 비점원 오염원에 의한 것으로 사료되었다.

본 수계의 연평균 총질소 농도를 Allan (1995)의 북미 및 유럽의 하천, 아마존 유역의 남미, 아프리카 등의 문헌 비교에 의하면, 본 수계는 높은 것으로 나타났으며, 이전의 우리나라의 유수생태계인 타 하천의 연구 및 우리나라 정수생태계인 호수의 연구 (An and Kim, 2003)에서도 이런 특성이 제시된 바 있다. 따라서, 이렇게 오염원이 거의 없는 계류형 수계에서 총질소의 농도가 왜 이렇게 높은가에 대한 이유는 좀 더 연구가 필요하다.

총인(TP)은 연중 변동 폭이 컸으며 연평균농도는 27 µg L⁻¹ 인데 비해 하절기의 장마철 평균농도는 50 µg L⁻¹로 연평균 농도보다 약 2배 정도 높았으며, 봄-겨울철 평균 농도 (10 µg L⁻¹) 및 가을철 평균농도 (32 µg L⁻¹)에 비해 높게 나타나 (Fig. 3) 수계내의 인(P) 유입은 주로 하절기에 발생하는 것으로 나타났다. 특히 총인의 농도변화

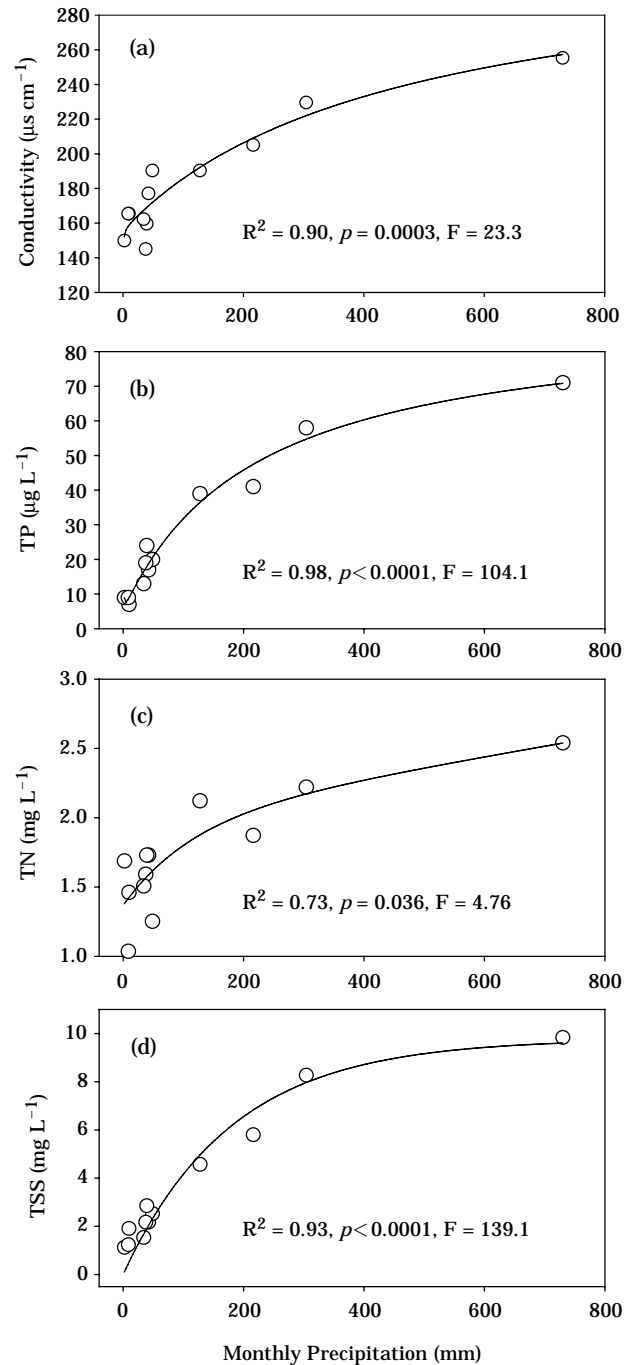


Fig. 4. Regression analyses of conductivity, total phosphorus (TP, µg L⁻¹), total nitrogen (TN, mg L⁻¹), and total suspended solids (TSS, mg L⁻¹) against the monthly precipitation.

는 강우의 시작과 함께 6월에 급격히 증가하여 8월에 최대값인 71 µg L⁻¹를 보였으며, 다시 강우의 감소에 따라 총인의 농도는 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 3).

한편, 총인농도는 총질소와 강우분포에 따른 변화 양상이 다르게 나타났다. 즉, 일별 강우에 대한 일변화 총질소 및 일변화 총인의 상관지수분석에 따르면, 각각 $r=0.37$ 및 $r=0.55$ 로서 총인의 변동이 총질소보다 강우와 더 밀접한 것으로 나타났다 (Table 1). 일별 총인의 변동은 일별 전기전도도와 높은 상관관계 ($r=0.80, p<0.01$)를 보였고, 일별 총부유물의 농도와도 높은 상관성 ($r=0.89, p<0.01$)을 보여 총인의 하절기 증가는 강우에 따른 부유물 증가에 따른 것으로 사료되었다 (Table 1). 한편, 동일 수질자료를 이용하여 월별 평균을 환산한 후 월 평균 강우에 대한 월평균 전기전도도, 총인, 총질소, 총 부유물에 대한 회귀분석 결과는 일부 다른 양상을 나타냈다. 즉, 강우 변이는 총인 및 총질소의 변이를 각각 98% ($R^2=0.98, p<0.0001, F=104.1$), 73% ($R^2=0.73, p<0.036, F=4.8$)까지 설명하는 것으로 나타나 일별 분석 자료에 비해 더 높은 상관성을 보였다. 또한, 강우에 대한 총부유물에 대한 회귀분석결과는 총인의 결과와 유사하게 $R^2=0.93$ 으로 높게 나타났다 (Fig. 4). Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 총인농도는 매월 총 강우가 200 mm 이하에서는 강우와 직접적인 1차함수적인 관계를 유지하였으나, 200 mm 이상에서 총인의 증가는 일부 점근선을 그리는 것으로 나타났다. 반면에 총질소의 경우는 월 강우가 50 mm 이하일 때 $1.100\sim 1.720\text{ mg L}^{-1}$ 범위에서 변했으며, 강우에 덜 민감한 것으로 나타났다. 또한, 총질소는 총인에 비해 강우 변동에 대한 기울기 (slope)값이 작아서 강우에 따른 총질소의 변동이 총인보다 낮은 것으로 나타났다 (Fig. 4). 이런 결과는 수질자료에 대한 해석 시 전체자료를 이용한 결과와 평균한 결과를 이용한 변수들 간의 상관성이 차이가 있을 수 있음을 시사하였다. 또한, 총인은 총인:총질소 비율 (N:P ratio)과 높은 역 상관관계 ($r=-0.51, p<0.01$)를 보였으나, 총질소와는 낮은 상관성 ($r=-0.21$)을 보여 TN:TP의 비가 총인의 변동 폭에 의해 주로 조절되는 것으로 나타났다 (Fig. 3). 이리하여 봄과 겨울의 경우 TN:TP 비는 150 이상을 상회하여 Grim and Fisher (1986)의 기준에 의거할 때, 인 (P)이 하천생태계의 1차생산력에 제한요인으로 작용할 수 있는 잠재성을 보였다. 이런 이유는 봄과 겨울의 경우 강우 및 하천유량의 감소현상으로 Flushing효과 혹은 광 제한현상 (light limitation)이 배제되기 때문으로 사료된다 (Allan, 1995; Dodds *et al.*, 1998). 따라서, 하절기 집중강우는 하천의 총인 농도 증가에 대부분을 기여하고, 유입된 총인은 하천에서 일정한 시간경과 후 1차생산력에 대한 제한요인으로 작용할 잠재성을 갖기 때문에 집중 호우시 많은 양의 인 유입부하를 최소화하기 위해서는 원천적으로 인

유입을 감소시키는 실트펜스 설치 혹은 유입 후 제거능을 보이는 천변 식생이식과 같은 대책마련이 요구된다.

적 요

본 연구는 하절기 집중강우가 하천의 부영양화도, 이온 변화, 산소요구량에 영향 평가로서 수질 변수들 간의 상호관계를 분석하였다. 용존산소 (DO) 농도는 수온과 역상관 관계 ($r=-0.99, p<0.001$)를 보였다. 대부분 수질 변이는 7~8월에 발생 하였으며, 이들의 대부분은 하절기 집중강우와 직접적인 연관성을 보였다. pH의 경우 6.5 이하의 최소값은 최대 강우를 보인 8월에 관측되었는데, 이는 강우에 의한 수소이온농도의 희석현상에 의한 것으로 사료되었다. 전기전도도 또한 강우분포를 반영하였다. 즉, EC 값은 다른 계절보다 하절기에 좀 더 높은 값을 보였으며, 강우와의 직접적 연관성을 보였다. 연구 결과에 따르면, 이온희석 현상은 강우 전의 하절기에는 높았지만, 집중강우 후 짧게는 4~5일 길게는 1~2주 후에 이온이 희석되는 것으로 나타나 강우와 하천수의 이온농도사이에 뚜렷한 반응시간의 지체현상을 보였다. COD의 계절적 변화 패턴은 BOD와 유사한 ($r=0.55, p<0.001$) 양상을 보였다. 총질소 (TN)는 총인 (TP)에 비해 변이 폭이 적었으며, 3월의 갈수기에 최소값을 보였다. 대조적으로, 총인 유입은 하절기 몬순동안에 주로 발생하였고, 총부유물 (TSS)과 유사한 계절 변화 양상을 보여 인 (P)의 증가가 수계에서 유발되는 무기성부유물과 밀접하게 연관성을 갖는 것으로 나타났다. 총인:총질소의 무게비는 질소 변이 ($r=-0.21, p<0.01$)보다는 총인 ($r=-0.51, p<0.01$)의 변이에 의해 결정되었으며, 총인이 제한 요인으로 작용할 것으로 사료되었다. 본 계류형 하천에서 수질을 조절하는 1차 요인은 강우시기 및 강도로 사료 되었으며, 최대 변이는 하절기의 침투강우와 일치하였다.

인 용 문 헌

- 강태호. 1998. 도시하천에서의 강우와 유출 및 수질 예측기법 개발에 관한 연구, 경기대학교 토목대학원 박사학위논문, p. 2-16.
- 금강환경관리청. 1999. 금강 중역권 수질오염원 현황. 62 pp.
- 김범철, 김윤희. 2004. 아시아 몬순지역의 대형댐 (소양호)에서의 인순환과 2차원모델의 적용. 한국육수학회지 37(2): 205-212.

- 신재기, 황순진, 조경제. 2003. 평택호와 주요 하천의 수환경 및 오염도평가. 한국육수학회지 **36**(1): 38-47.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001. 생물보전지수(Index of Biological Integrity) 및 서식지평가지수(Qualitative Habitat Evaluation Index)를 이용한 평창강의 수환경 평가. 한국육수학회지 **34**: 153-165.
- Allan, J.D. 1995. Stream ecology: structure and function of running waters. Chapman and Hall Pub. 1st Eds, pp. 388.
- An, K-G. 2000a. Dynamic changes of dissolved oxygen during summer monsoon. *Korean J. Limnol.* **33**: 213-221.
- An, K-G. 2000b. An influence of point-source and flow events on inorganic nitrogen fraction in a large artificial reservoir. *Korean J. Limnol.* **33**: 350-357.
- An, K-G. and D.S. Kim. 2003. Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake fishfarms. *Water, Air, and Soil Pollution* **149** (1-4): 27-49.
- An, K-G. and J.R. Jones. 2000. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **436**: 179-189.
- An, K-G. and S.S. Park. 2002. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: A case study. *Ecological Modelling* **152**(2-3): 191-203.
- An, K-G., J-Y. Shin and S-S Park. 2002. An evaluation of a river health using the Index of Biological Integrity along with relations to chemical and habitat conditions. *Environment International* **28**(5): 411-420.
- APHA. 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater. 16th ed. New York, American Public Health Association. 874pp.
- Cameron, E.M. 1996. Hydrogeochemistry of Fraser River, British Columbia: seasonal variation in major and minor components. *J. of Hydrology* **182**: 209-225.
- Collins, R. and A. Jenkins. 1996. The impact of agricultural land use on stream chemistry in the Middle Hills of the Himalayas. *J. of Hydrology* **185**: 71-86.
- Dillon, P.J. and F.H. Rigler. 1974. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* **19**: 767-781.
- Dodds, W.K, J.R. Jones and E.B. Welch. 1998. Suggested classification of stream trophic state: Distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Wat. Res.* **32**(5): 1455-1462.
- Grim, N.B. and S.G. Fisher. 1986. Nitrogen limitation in a Sonoran desert stream. *J. N. Am. Benthol. Soc.* **5**: 2-15.
- Meyer, J.L., W.H. McDowell, T.L. Bott, J.W. Elwood, C. Ishizaki, J.M. Melack and P.A. Rublee. 1988. Elemental dynamics in streams. *J. N. Benthol. Soc.* **7**: 410-432.
- Ostry, R.C. 1982. Relationship of water quality and pollutant to land uses in adjoining watershed. *Water Res. Bull.* **18**: 99-104.
- Perkins, B. and J.R. Jones. 1994. Temporal variability in a midwestern stream during spring. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **25**: 1471-1476.

(Manuscript received 5 January 2005,
Revision accepted 27 February 2005)