

생활하수가 유입된 산지하천(대천천)의 유기물 및 무기영양염의 동태

박정임, 김영균, 정미희, 송미영, 이상호¹, 전태수, 이근섭*

부산대학교 생물학과, ¹부경대학교 건축공학과

Dynamics of Organic Matter and Inorganic Nutrients in a Over-enriched Mountain Stream due to Anthropogenic Loading

Jung-Im Park, Young Kyun Kim, Mi Hee Chung, Mi-Young Song,
Sang Ho Lee¹, Tae-Soo Chon and Kun-Seop Lee*

Department of Biology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan 609-737, Korea

Abstract - Nutrient over-enrichment as a consequence of anthropogenic loading leads to eutrophication, which has the detrimental effects on river and stream ecosystems. To examine dynamics of factors causing cultural eutrophication in a over-riched mountain stream due to anthropogenic loading, physicochemical parameters were measured from 5 stations in the upper Daecheon stream, Busan, from January 2002 to May 2003. The five study sites were located along the stream gradient. DC1 is upper most clean site, and DC5 is located at the lowest area. Wastewater was released into the stream from just upstream of DC2 site. Water column ammonium and phosphate concentrations were higher during winter than other seasons, while water column nitrate+nitrite concentration did not show clear seasonal variation. Water column ammonium, nitrate+nitrite and phosphate concentrations were lowest at DC1 and highest at DC2 in which waste water loading occurred. TOC and DOC, conductivity, turbidity, and BOD in the water column were also increased drastically at DC2, and then decreased at DC5. Sediment pore water phosphate concentrations during winter and spring were higher than those in summer and fall, while sediment pore water ammonium and nitrate+nitrite concentrations showed no seasonal trend. Sediment pore water ammonium and phosphate concentration were also increased at DC2 and slightly decreased at DC5, while sediment pore water nitrate+nitrite concentration was highest at DC5. Organic matter and inorganic nutrients at up-stream of Daecheon stream significantly increased as a result of wastewater discharge, and the nutrient concentrations decreased at low-stream suggesting self-purification ability of the stream.

Key words : wastewater discharge, eutrophication, inorganic nutrient, TOC, DOC, mountain stream, water quality

* Corresponding author: Kun-Seop Lee, Tel. 051-510-2255,
E-mail. klee@pusan.ac.kr

서론

하천의 부영양화를 유발하는 주요원인은 하천으로 유입되는 생활하수, 농축산폐수 및 산업폐수에 포함되어 있는 인산, 질산 및 암모늄 형태의 영양염류이다. 이들 영양염류는 하천생태계로 다량 유입되어 식물플랑크톤을 포함한 조류의 대발생을 일으켜 용존산소의 결핍, 부영양화 등을 유발하여 하천의 수질을 악화시키는 요인이 되고 있다(서 등 1988; Wetzel 2001). 생활하수는 하천생태계에서 가장 일반적인 오염원이라 할 수 있으며(Paul and Meyer 2001), 상류에서 청정한 하천의 수질이 인구가 밀집한 도시를 통과하면서 생활하수 및 오폐수의 유입으로 인하여 하류에서 수질이 악화되는데, 최근에는 하천의 최상류인 산지하천에서도 이러한 현상이 발생하고 있다(임 등 2000). 이는 하수관리가 체계적으로 이루어지지 못하고, 하폐수 처리시설 부족으로 인하여 많은 오폐수가 제대로 처리되지 못한 채 하천으로 유입되고 있기 때문이다(신 1998). 하폭이 좁고 수심이 얇은 산지 하천에서의 영양염류 농도 변화는 산간 농지, 축산, 또는 산지에 퍼져있는 각종 편의시설에 의해 영향을 뚜렷이 받는다(Wallace *et al.* 1986; Paul and Meyer 2001). 이러한 산지 하천의 경우 강수량이 집중되는 여름철을 제외하고는 하천의 유량이 극히 부족하여 하천의 자정작용이 원활하지 못해 수질오염은 더욱 심각해지게 된다(신과 조 2000).

대천천은 부산시의 금정산의 최상류에서부터 여러 개의 지천이 유입되는 대표적인 산지하천의 형태를 가지고 있으며, 낙동강과 합류하여 남해로 흘러 들어가는 하천이다. 상류지역의 산 중턱에 위치한 식당과 마을로부터 유입되는 생활하수 및 오폐수로 인하여 상류에서부터 수질 악화 현상이 나타나고 있다. 이러한 현상은 최근 우리나라 산지하천에서 많이 나타나는 현상이나 오염원, 유기물 및 무기영양염류의 동태에 관한 조사는 거의 시도되지 않았다(하 등 1997). 우리나라에서 하천의 수질 연구는 주로 호수들이나 비교적 큰 강을 위주로 이루어져, 일차 하천이자 상수원의 근간이 될 수 있는 산지하천에서의 수질 변화에 대한 연구가 매우 미흡한 실정이다(안과 신 2005). 최근에 산지하천의 부착조류에 대한 연구는 일부 이루어졌으나(Wallace *et al.* 1986; 김 등 1997; 하 등 1997), 이들의 성장에 영향을 미치는 무기영양염류의 변동에 관해서는 거의 연구되지 않았다(하 등 1997; 장 등 1999).

따라서, 본 연구는 낙동강으로 유입되는 지천 중 하나이며 전형적인 산지하천인 대천천의 최상류에서 생활하

수가 유입되면서 변화되는 무기 영양염류, 수층의 용존 유기탄소 및 총유기탄소의 동태를 중심으로 시공간적인 수질의 변화를 파악하였다.

재료 및 방법

1. 조사지역

대천천은 동경 129°00', 북위 35°15'지점에 위치하며, 부산시 금정구 금성면과 북구 화명동을 흘러 낙동강으로 합류되는 하천이다. 조사지역은 최상류의 청정지역과 생활하수가 하천에 유입되는 오염지역 그리고 수질의 부분적인 자연정화가 이루어진 회복지역으로 크게 나눌 수 있으며 총 5개 지점에서 조사하였다. DC1은 대천천의 최상류 지역의 상수도 보호구역으로 민간인의 접근이 금지되어 오염원이 거의 없는 지점이며, DC2는 DC1로부터 약 1.5 km 아래에 위치한 지점으로 음식점이 집중되어 있어 오폐수의 유입이 시작되는 지점이다. DC3은 DC2로부터 500 m 아래에 위치하며, 식당과 여가시설이 산재되어 있어 오폐수의 추가적인 유입이 진행되는 지점이며, DC4는 DC3로부터 2.5 km 아래에 위치하며 민가가 위치한 마을에서 생활하수의 유입이 발생하는 지점이다. 가장 하류에 위치한 DC5는 DC4에서 약 2.5 km 아래에 위치하며, DC4와 DC5 사이에는 생활하수의 유입이 거의 없고, 유입되는 지천수로 인하여 오염물이 희석되고 일부 자연정화가 이루어진 지역이다(Fig. 1). 하천의 폭은 DC1, DC2, DC3이 평균 1~1.5 m 정도였고, DC4부터는 하폭이 넓어져 DC5까지의 평균 하폭이 4~5 m 정도였다.

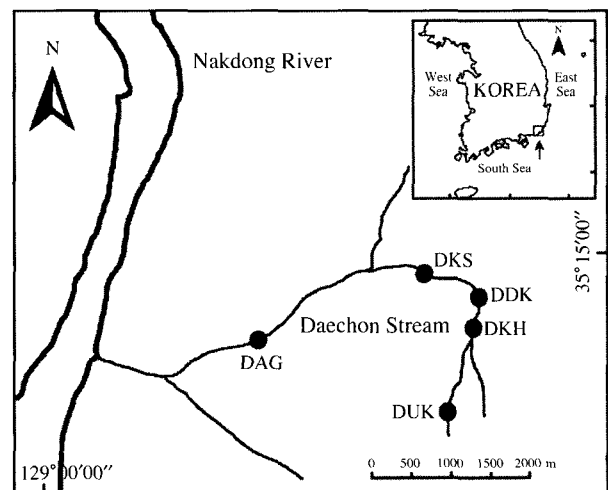


Fig. 1. Map of study stations in Daecheon Stream, Busan, Korea.

2. 조사방법

대천천의 상류에서 유기물 및 무기영양염류의 동태를 2002년 1월부터 2003년 5월까지 조사하였다. 최상류 지점에서의 유량, 수온, pH, 전기전도도, 생화학적 산소 요구량(BOD), 용존산소(DO), 수층의 무기 영양염류, 퇴적물 공극수내의 무기영양염류와 퇴적물의 유기물 함량은 매월 측정하였고, 수층의 총유기탄소(TOC)와 용존유기탄소(DOC)를 분기별로 측정하였다.

조사시기별 유량의 변화는 최상류 지점인 DC1에서 유량계(BMF 002 Wadding)를 이용하여 조사시기마다 측정하였다. 수온과 pH는 pH meter(Thermo Orion model 290), 전기전도도는 전기전도도계(Fisher Conductivity meter model 152), DO는 DO meter(YSI, 55/12 FT)를 이용하여 현장에서 측정하였고, BOD5는 Winkler acid modification 방법을 이용하여 측정하였다(환경부 1991).

하천수의 용존무기질소(DIN: NH_4^+ , $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$)와 용존무기인(SRP, PO_4^{3+})은 각 정점당 4개씩 시료를 채취하여 standard colorimetric techniques에 따라 분석하였고, $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ 의 농도는 카드뮴 구리 환원법으로 측정하였다(Rump and Christ 1988). N/P비는 용존무기질소와 용존무기인의 비율로 나타내었다(김과 황 2004). 총유기탄소(TOC)와 용존유기탄소(DOC)농도는 TOC분석기(TOC5000A, Shimadzu)를 사용하여 측정하였으며, DOC는 증류수 500 mL로 세척한 47 mm GF/C filter로 시료를 여과시킨 후 여액을 분석하였다.

퇴적물 공극수내의 무기영양염 농도는 13 cm길이의 syringe corer를 이용하여 4개씩 채취하여 15분간 원심분리 시킨 후(5,000 × g) 상등액을 채취한 후 회석하여(1 : 5, v/v) 수중 영양염 분석방법과 동일한 방법으로 분석하였다. 퇴적물의 유기물 함량은 550°C에서 2시간 회화시킨 후 강열감량을 계산하여 환산하였다(Davis 1974; Brower et al. 1997).

3. 자료분석

수층 및 퇴적물의 영양염 농도, 수층의 TOC, DOC 농도, 퇴적물의 유기물 함량의 조사 시기 및 장소에 따른 차이를 two-way ANOVA를 사용하여 검증하였고, 변수들 간에 유의한 차이가 나타나면 Tukey HSD(Honestly Significant Difference)로 평균값을 비교하였다(SAS 8.0). 수질 항목간의 상관성 분석은 Pearson's correlation analysis를 통해 분석하였고(SPSS 10.0), 측정치는 평균값으로 기록하였다.

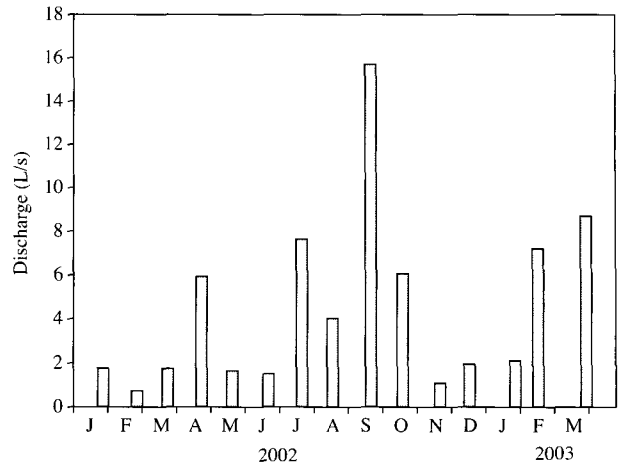


Fig. 2. Temporal changes in the amount of flowing water at DC1, which is located in the uppermost stream of Daechon Stream from January 2002 to March 2003.

결과 및 고찰

1. 하천수의 물리화학적 특성

하천 유량의 조사 시기별 변화를 살펴보면 DC1에서 측정한 유량은 겨울철에 낮고, 여름철에 높은 계절적 경향을 보였으며, 상류지점에서의 평균 유량은 4.0 L s^{-1} 였고 2002년 9월에 15.7 L s^{-1} 로 최대값을 2002년 2월에 0.7 L s^{-1} 로 최소값을 보였다(Fig. 2).

조사장소의 연평균 수온은 12.6°C 이었고, 계절적인 경향이 뚜렷하여 2003년 2월에 1.2°C 로 최저를 2002년 7월에 25.5°C 로 최고치를 나타내었다. 지점별로는 DC1가 비교적 낮아서 평균 10.5°C 로 2003년 2월에 최저 1.2°C , 2002년 8월에 최고 21.9°C 를 나타내었다. 최상류인 DC1보다 하류로 내려올수록 평균 약 3°C 높게 나타났는데, DC1에서는 울창한 나무로 덮혀 태양빛이 직접 하천에 도달하지 않아 수온이 낮았을 것으로 추측된다(하 등 1997)(Fig. 3A, Table 1).

전기전도도는 계절적인 경향은 없었으나, 조사지점별 차이는 뚜렷하였다. DC1에서는 가장 낮게 나타나 평균 $37.7 \mu\text{s cm}^{-1}$ 로 조사되었고, 하수가 유입되기 시작하는 DC2에서는 평균 $160.7 \mu\text{s cm}^{-1}$ 로 최대값을 보이다가 하류로 갈수록 다시 낮아지는 경향을 보였으며, 가장 하류에 위치한 DC5에서는 평균 $99.6 \mu\text{s cm}^{-1}$ 로 비교적 낮게 나타났다. DC1에서의 평균 전기전도도는 오염이 적은 정상남도 산지하천에서의 측정치($31 \sim 58 \mu\text{s cm}^{-1}$), 경기도 산지하천에서의 측정치($58 \pm 8 \mu\text{s cm}^{-1}$)와 유사하게 측정되었다(하 등 1997; 장 등 1999). DC2에서의 전기

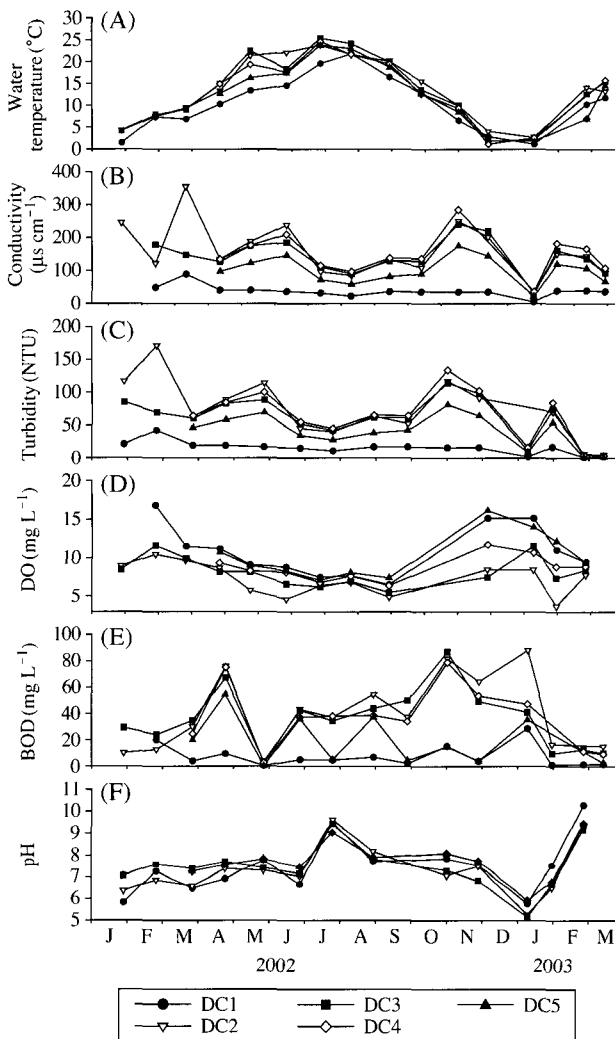


Fig. 3. Seasonal variation of physico-chemical factors in Daechon Stream from January 2002 to March 2003.

전도도는 인구가 밀집한 양재천에서의 측정치 ($412 \mu\text{s cm}^{-1}$)보다는 낮았으나(장 등 1999), 최상류에 위치한 DC1보다 4배나 높아졌다가 하류로 갈수록 서서히 감소하였다(Fig. 3B, Table 1).

탁도 또한 계절적인 경향은 없으나 조사장소에 따라 차이를 보여 DC1에서 평균 15.5 NTU 로 가장 낮게 나타났고, DC2에서 평균 74.5 NTU 로 높은 값을 보이다가 서서히 감소하여 DC5에서 평균 40.4 NTU 로 다시 낮아졌다(Fig. 3C, Table 1). 본 조사에서 측정된 탁도는 경기도 산지하천에서의 측정치(2.1 NTU)나 성환천 등의 부영양화된 하천에서 조사된 측정치($11.5 \sim 17.4 \text{ NTU}$)보다 전 지점에서 높은 값을 보였다(심 1998; 신과 황 2003; 신 등 2003).

DO는 계절적 경향이 뚜렷하여 수온과 반비례하여 겨

울철에는 비교적 높고, 여름철에는 낮게 나타났다. 장소에 따라서도 뚜렷한 차이를 보여 DC1에서 평균 10.8 mg L^{-1} 로 가장 높았고, 생활하수 유입지역인 DC2에서 평균 7.3 mg L^{-1} 로 가장 낮은 값을 나타내었으며, DC5에서는 평균 10.2 mg L^{-1} 로 다시 회복되는 경향을 나타내었다(Fig. 3D, Table 1). DC1에서는 경남도 산지하천에서의 측정치($10.5 \sim 12.2 \text{ mg L}^{-1}$), 경기도 산지하천에서의 측정치($11.1 \pm 2.3 \text{ mg L}^{-1}$)와 유사하였고 과포화되는 경향이 보였으며(하 등 1997; 장 등 1999), 하수가 유입되는 DC2, DC3, DC4지점에서는 부영양화된 호소 및 중소하천에서와 유사하게 측정되었다(신과 황 2003; 신 등 2003).

BOD는 계절적인 경향은 보이지 않았으나 뚜렷한 장소별 차이를 나타내었다. DC1에서 평균 7.5 mg L^{-1} 로 가장 낮게 조사되었고 DC2에서 평균 40.1 mg L^{-1} 로 DC1에 비해 약 5배 정도 증가하였으며, DC5에서 평균 19.5 mg L^{-1} 로 낮아졌다(Fig. 3E, Table 1). DC1은 낙동강 하류에서 조사된 측정치($2.6 \sim 10.0 \text{ mg L}^{-1}$)와 유사하였고, DC2, DC3, DC4는 광주천에서 갈수기의 측정치($15.4 \sim 20.2 \text{ mg L}^{-1}$)보다 높은 값을 나타내었다(박 등 1999; 오와 고 2003). pH는 계절적인 경향과 장소에 따른 변화는 보이지 않았고, 평균적으로 pH $7.3 \sim 7.6$ 을 나타내었다(Fig. 3F, Table 1).

2. 무기 영양염류 동태

수층의 NH_4^+ 농도는 조사 시기별 지점별로 유의한 차이를 보였으며($p < 0.001$), 겨울에 높고, 여름에 낮았다. 지점별로는 DC1 ($0.5 \mu\text{M}$)에서 가장 낮았고, DC2 ($75.0 \mu\text{M}$), DC3 ($54.9 \mu\text{M}$), DC4 ($71.6 \mu\text{M}$)에서 높았으며, DC5 ($1.5 \mu\text{M}$)에서 다시 낮아져 오염물 유입지역인 DC2 수역에 비해 DC5에서 약 98% 감소하였다. 유량과는 음의 상관관계를 보였는데(Table 2) 유량이 많은 시기에는 희석되어 농도가 낮아지고, 갈수기에는 증가하였다(박 등 1999; 신 등 2000; McKee *et al.* 2000; 오와 고 2003). 그러나 BOD, 전기전도도, 탁도와는 양의 상관관계를 나타내었는데(Table 2), DC2, DC3, DC4의 NH_4^+ 농도는 하수의 유입으로 인하여 급격히 증가되었고, DC5에서의 NH_4^+ 농도의 감소는 지천수의 유입으로 인한 희석과 부착조류의 영양염 흡수 등을 통한 자연정화 과정에 의한 것으로 추측할 수 있다(신과 황 2003). DC1에서의 NH_4^+ 농도는 경상남도 산지하천에서 조사된 측정치($26 \sim 87 \mu\text{g L}^{-1}$)보다 낮았으나(하 등 1997), 하수가 유입된 DC2, DC3, DC4 지점에서의 농도는 부영양화된 저수지에서의 측정치($0.4 \sim 1.9 \text{ mg L}^{-1}$)와 유사하였고(김과

Table 1. Mean values (mean ± standard error) of physicochemical factors of the study sites

Parameters (unit)	DC1	DC2	DC3	DC4	DC5
Water temperature (°C)	10.5±1.4	13.6±1.6	13.5±1.7	13.4±1.8	13.0±1.7
Conductivity (µs cm ⁻¹)	37.8±4.0	160.7±18.7	143.0±12.3	136.9±18.2	99.6±10.4
pH	7.5±0.3	7.3±0.3	7.4±0.3	7.7±0.3	7.7±0.3
Turbidity (NTU)	15.5±2.4	74.5±11.5	60.4±8.1	63.2±10.1	40.4±6.6
DO (mg L ⁻¹)	10.8±0.9	7.3±0.5	8.2±0.5	8.7±0.5	10.2±0.9
BOD (mg L ⁻¹)	7.5±2.0	40.8±7.1	36.0±5.5	37.6±6.4	19.5±5.1
Water column inorganic nutrients					
NH ₄ ⁺ -N (µM)	0.5±0.1	75.0±16.6	54.9±11.1	71.6±16.0	1.5±0.4
NO ₃ ⁻ -N (µM)	54.0±4.3	112.2±4.1	106.1±6.2	113.1±6.1	110.8±5.0
PO ₄ ³⁺ -P (µM)	0.1±0.0	3.7±0.6	2.6±0.4	5.5±0.6	1.6±0.1
Sediment pore water nutrients					
NH ₄ ⁺ -N (µM)	25.4±4.5	416.1±61.1	341.3±44.3	248.8±51.0	137.0±19.9
NO ₃ ⁻ -N (µM)	48.9±9.0	30.1±11.8	14.0±3.8	91.8±25.1	93.4±17.4
PO ₄ ³⁺ -P (µM)	2.0±0.5	32.8±11.8	6.9±2.4	2.3±0.5	7.8±3.0
TOC (mg L ⁻¹)	1.9±0.0	5.1±0.1	4.0±0.1	2.8±0.1	2.5±0.0
DOC (mg L ⁻¹)	1.7±0.0	4.4±0.1	3.2±0.3	2.5±0.0	2.3±0.0
Sediment organic content (%)	1.8±0.2	2.6±0.4	2.4±0.3	1.8±0.2	1.4±0.1

황 2004), 과영양화의 경향을 보이는 경안천에서의 측정치 (332 µg L⁻¹)보다는 낮게 (신 등 2000) 나타났다 (Fig. 4A, Table 1).

수층의 NO₃⁻+NO₂⁻의 농도는 조사 시기별 지점별 차이는 유의하게 나타났으나 (p<0.001), 뚜렷한 계절 변화는 보이지 않았다. DC1 (54.0 µM)에서 가장 낮았고, DC2 (112.2 µM), DC3 (106.1 µM), DC4 (113.1 µM), DC5 (110.8 µM)에서 높게 조사되었다. BOD, 전기전도도, 탁도, 수층의 NH₄⁺ 농도와 양의 상관관계를 나타냈다 (Table 2). 전체 조사지점에서 경상남도 산지하천에서의 측정치 (0.16~0.58 mg L⁻¹)보다 높았고 (하 등 1997), DC2, DC3, DC4와 DC5 지점은 과영양화된 경안천에서의 측정치 (122~545 µg L⁻¹)와 유사하였으며 (신 등 2000), 부영양화된 금강하구호에서의 측정치 (549.9~1366.3 µg L⁻¹)보다는 낮게 조사되었다 (신과 조 2000). 청정한 상류인 DC1에서도 상당히 높은 값이 나온 것은 전 등 (1998)이 조사한 부산지역 강우의 화학적 특성의 결과에서도 언급된 것처럼 대기오염으로 인한 빗물에 포함된 질소산화물의 농도가 높아진 데서 기인되었다고 (Ohte *et al.* 2001) 판단된다 (Fig. 4B, Table 1).

PO₄³⁻ 농도도 조사 시기별 지점별 차이는 유의하게 나타났으며 (p<0.001), 겨울 및 봄에 높은 경향을 보였다. DC1 (0.1 µM)에서 가장 낮았고, DC2 (3.70 µM), DC3 (2.6 µM), DC4 (5.5 µM)에서 높았으며, DC5 (1.6 µM)에서 다시 낮아졌다 (Fig. 4C, Table 1). NH₄⁺, BOD, 전기전도도, 탁도와 유의한 상관 관계를 보였으며 (Table 2), 하수의 유입으로 인해 증가되었고, DC5지점까지의 농도의 감소율은 NH₄⁺의 농도 감소율보다 낮았다.

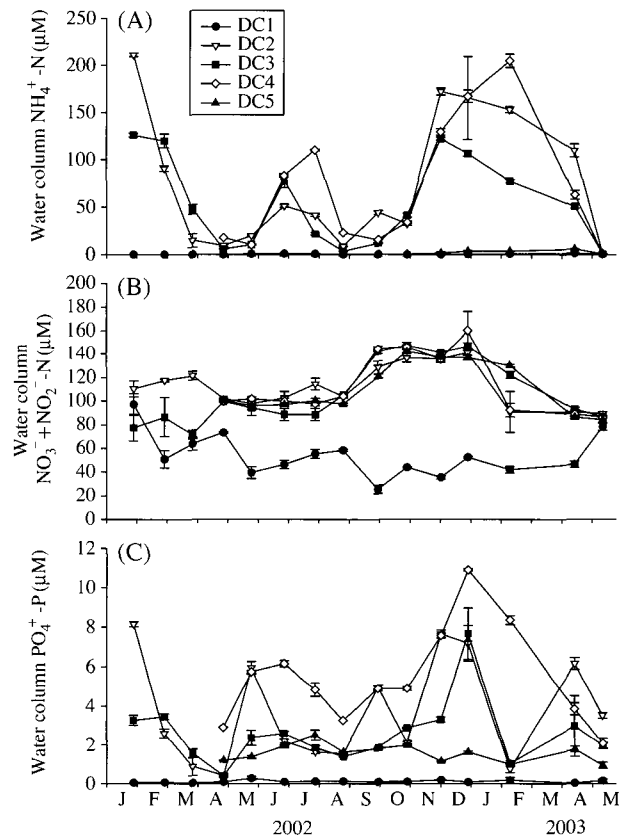


Fig. 4. Seasonal variation of water column ammonium (A), nitrate + nitrite (B) and phosphate (C) concentrations in Daechon Stream from January 2002 to May 2003.

일반적으로, 수중에서 무기 N·P의 유입량은 부영양화를 평가하는 기준이 될 수 있다. 수질이 악화될수록

Table 2. Correlation coefficients between physicochemical parameters in Daechon Stream. * P<0.05, ** P<0.01

	Discharge	Water temperature	Conductivity	pH	Turbidity	DO	BOD	Water NH ₄ ⁺	Water NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	Water PO ₄ ³⁺	Sediment NH ₄ ⁺	Sediment NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	Sediment PO ₄ ³⁺	TOC	DOC	Sediment organic content
Discharge																
Water temperature	.425**															
Conductivity	-.194	.043														
pH	.294*	.411**	.050													
Turbidity	-.332**	-.005	.815**	-.207												
DO	-.451**	-.743**	-.334*	-.295*	-.245											
BOD	-.093	-.014	.312*	-.226	.451**	-.181										
Water NH ₄ ⁺	-.264*	-.392**	.366**	-.205	.446**	-.039	.518**									
Water NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	0.055	-.392**	.501**	-.047	.586**	-.182	.503**	.362**								
Water PO ₄ ³⁺	-.083	-.145	.459**	.065	.469**	-.196	.534**	.757**	.559**							
Sediment NH ₄ ⁺	-.240	-.130	.504**	-.120	.543**	.033	.047	.189	.120	.106						
Sediment NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	.180	.223	-.174	.257	-.158	.026	-.160	-.337*	.112	-.145	-.240					
Sediment PO ₄ ³⁺	-.171	-.263*	.293*	-.062	.301*	.037	-.062	.444**	.096	.257*	.366**	-.161				
TOC	-.033	-.160	.626**	.295	-.054	-.341	.214	.657**	.125	.544**	.723**	-.413*	.605**			
DOC	.030	-.118	.670**	.355	-.083	-.333	.105	.624**	.125	.598**	.732**	-.385	.634**	.979**		
Sediment organic content	-.249	-.185	.115	-.259	.270*	.297*	-.103	.073	-.027	-.083	.461**	-.067	.390**	.189	.236	

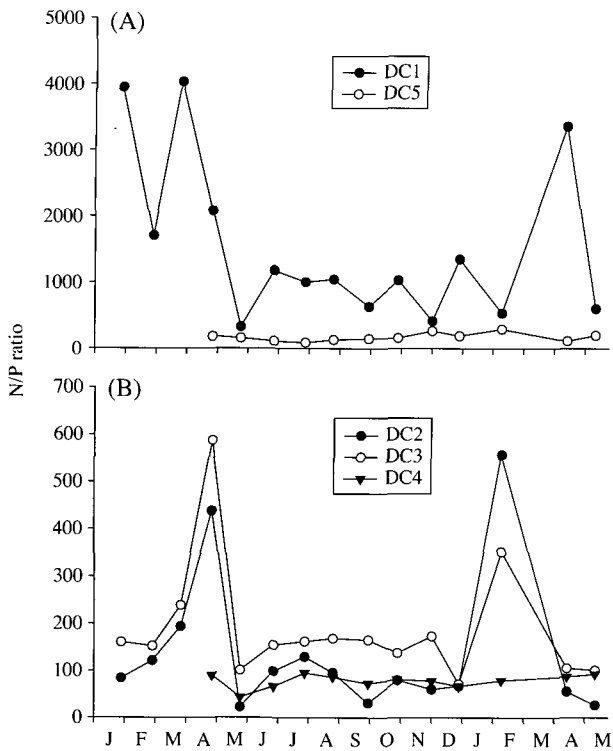


Fig. 5. Seasonal variation of N/P ratio (DIN/DIP) at DC1 (A) and at DC2, DC3, DC4 and DC5 (B) in Daechon Stream from January 2002 to May 2003.

N/P비는 비율이 감소하고 오염이 덜할수록 증가하는데 (조와 신 1997), 본 조사에서도 이러한 경향을 뚜렷하게 보여 주었다. N/P비율은 청정한 DC1 (1430)에서 가장 높았고, DC2 (130), DC3 (183), DC4 (83)에서 낮았으며, DC5 (167)에서 다시 증가하였다. 담수에서 N/P비율은 일반적으로 여름철에 낮고, 겨울철에 높아지는데 비해 (신과 조 2000), 본 조사장소에서는 봄철과 겨울철에 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 오염물의 근원이 주로 음식점으로 상시 발생하는 하수가 하천으로 유입되었기 때문이라 추측된다 (Fig. 5A, B).

퇴적물 공극수의 NH_4^+ 의 농도도 조사시기별 지점별 유의한 차이를 보였으나 ($p < 0.001$), 뚜렷한 계절 경향은 보이지 않았다. DC1 ($25.4 \mu M$)에서 가장 낮았고, DC2 ($416.1 \mu M$)에서 가장 높았으며, DC3 ($341.3 \mu M$), DC4 ($248.8 \mu M$)에서 서서히 감소하여 DC5 ($137.0 \mu M$)에서 낮게 나타나 수층의 NH_4^+ 의 농도의 변화와 비슷한 경향을 나타내었다. 공극수의 NH_4^+ 의 농도는 TOC, DOC, 전기전도도, 탁도와 높은 상관관계를 보였으며, 하수의 유입과 밀접하게 관련되어 있었음을 알 수 있었다 (Fig. 6A, Table 1, 2).

공극수의 $NO_3^- + NO_2^-$ 의 농도는 조사시기별 지점별

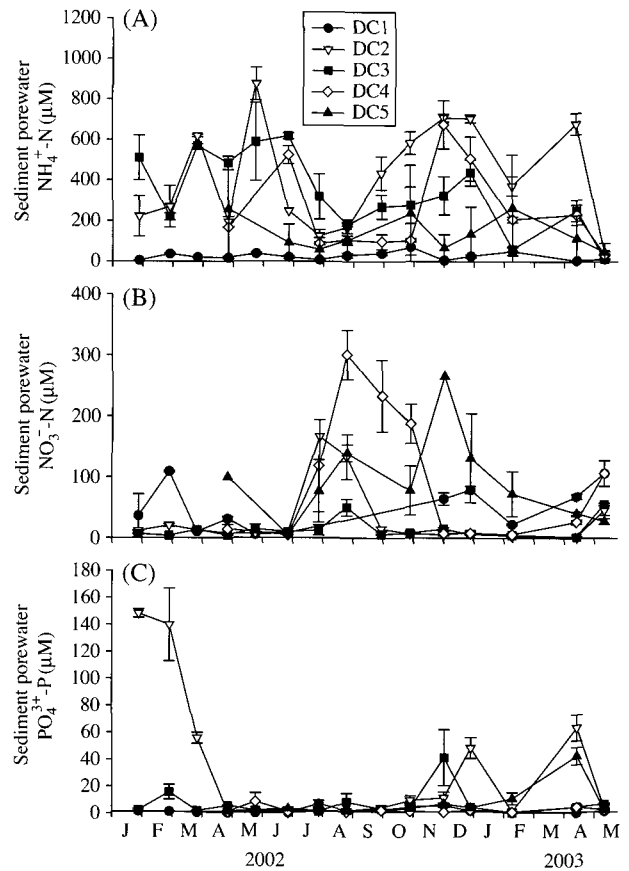


Fig. 6. Seasonal variation of sediment pore water ammonium (A), nitrate + nitrite (B) and phosphate (C) concentrations in Daechon Stream from January 2002 to May 2003.

차이는 유의하게 나타났으나 ($p < 0.001$), 뚜렷한 계절 경향은 보이지 않았다. DC1 ($48.9 \mu M$)에서 오히려 높게 나타났고, DC2 ($30.1 \mu M$), DC3 ($13.9 \mu M$)에서 감소하였으며, DC4 ($91.8 \mu M$), DC5 ($93.4 \mu M$)에서 다시 증가하였다 (Fig. 6B, Table 1). 즉, DC1에 비해 하수의 유입이 시작되는 DC2, DC3에서 감소하였다. DC5에서는 수층에서와 유사하게 DC3의 약 6배 정도로 농도가 증가하였는데 이는 용존산소가 풍부해져 퇴적층에서도 질산화가 일어나는 결과로 추측된다 (안과 신 2005). 공극수의 $NO_3^- + NO_2^-$ 의 농도는 수층의 NH_4^+ 의 농도, TOC와 음의 상관관계를 보였다 (Table 2). 하수의 유입이 있는 산지하천에서 수층이나 퇴적층의 $NO_3^- + NO_2^-$ 의 동태는 NH_4^+ 및 PO_4^{3-} 의 동태와 뚜렷한 차이를 보였는데, 이는 수심이 얇은 하천에서 흘러가는 과정에 대기 중의 산소가 용해 될 수 있는 기회가 많아 질산화가 활발히 일어날 수 있기 때문인 것으로 추측된다 (김 등 1998).

공극수의 PO_4^{3-} 농도는 조사 시기별 지점별 차이가 유의하게 나타났으며 ($p < 0.001$), 봄과 가을에 증가하는 경

향을 보였다. DC1 (2.0 μM)에서 가장 낮았고, DC2 (32.8 μM)에서 가장 높았으며, 수층의 NH_4^+ 농도, TOC, 전기 전도도, 탁도와 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 하수의 유입과 밀접하게 관련되었음을 알 수 있었다 (Fig. 6C, Table 1, 2).

3. 유기물 동태

수층의 TOC 농도는 조사 시기별 지점별 차이가 유의하게 나타났으며, 등산객이 증가하는 봄과 가을에 TOC의 농도가 유의하게 증가하였다 ($p < 0.001$). TOC는 DC1 (1.9 mg L^{-1})에서 가장 낮았고, DC2 (5.1 mg L^{-1})에서 가장 높다가 DC3 (4.0 mg L^{-1}), DC4 (2.8 mg L^{-1}), DC5 (2.5 mg L^{-1})로 갈수록 점차 감소하였다 (Fig. 7A, Table 1). DOC 농도도 TOC 농도와 유사한 계절적 경향 및 지점별 차이를 나타내었다 ($p < 0.001$). 최상류 지역인 DC1 (1.7 mg L^{-1})에서 가장 낮게 나타났고, DC2 (4.4 mg L^{-1}), DC3 (3.2 mg L^{-1}), DC4 (2.5 mg L^{-1}), DC5 (2.3 mg L^{-1})로 갈수록 감소하였다. DOC는 TOC와 높은 상관관계를 보였으며, TOC의 87%가 DOC로 나타나 TOC의 대부분이 DOC로 존재한다는 기존의 보고(김 등 1998)와 유사한 경향을 보였다 (Fig. 7B, Tables 1, 2). TOC 및 DOC 농도는 수층의 NH_4^+ , PO_4^{3-} , 전기전도도와 유의한 양의 상관관계를 나타내었다.

퇴적물의 유기물 함량은 조사시기별 지점별 차이는 유의하게 나타났으나 ($p < 0.001$), 뚜렷한 계절 경향은 보이지 않았다. DC1 (1.8%)에서 가장 낮았고, DC2 (2.6%)에서 가장 높았으며, DC3 (2.4%), DC4 (1.8%), DC5 (1.4%)로 갈수록 감소하였다. 퇴적물 공극수의 NH_4^+ 의 농도와 PO_4^{3-} 농도, 탁도와 유의한 양의 상관관계를 나타내었으며, 퇴적물의 유기물 함량도 유입된 하수에 의해 증가하였고, DC1은 하천을 덮고 있는 주변의 식생에 의해 유기물이 년 중 공급되고 있음을 알 수 있었다(김 등 1997; 하 등 1997) (Fig. 8, Tables 1, 2).

유역으로부터 유입되는 유기물 및 영양염류의 농도와 양은 유역의 형태, 기후, 인간활동 등의 영향을 받는다. 유역에 산재되어 있는 각종 오염원 중 질소와 인산의 배출원은 공장, 생활하수, 축산, 농지, 산림 등으로 구분할 수 있다(심 1998). 특히 하폭이 좁고 수심이 얇은 산지 하천은 인간 활동에 의해 쉽게 오염될 수 있는 특성을 지니고 있다. 강수가 많은 시기를 제외한 갈수기 때에는 주변에 산재해 있는 음식점을 비롯한 각종 편의시설 및 민가로부터 유입되는 생활하수 등으로 인하여 오염은 더욱 심각해지며, 이는 합류되는 대형 하천의 수질 악화를 가중시키는 현상을 나타내게 될 것이다. 따라서 낙동

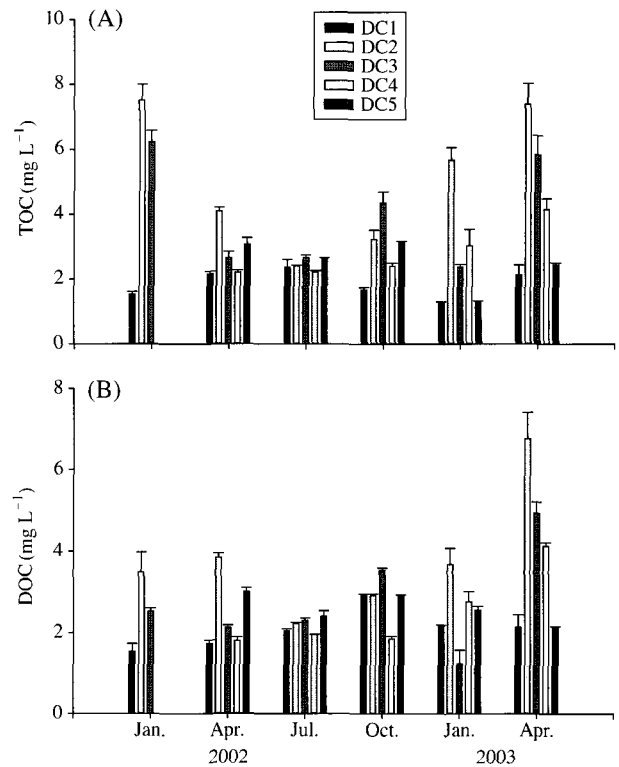


Fig. 7. Seasonal variation of water column TOC (A) and DOC (B) concentrations in Daechon Stream from January 2002 to April 2003.

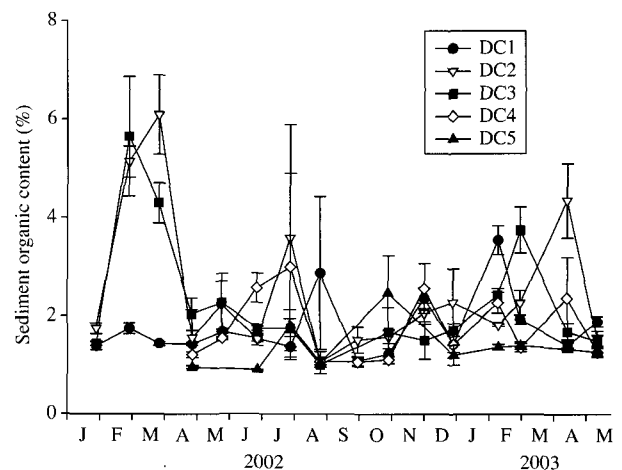


Fig. 8. Seasonal variation of sediment organic content in Daechon Stream from January 2002 to May 2003.

강과 같은 큰 강의 수질 관리를 위해서도 유량은 미흡하나 가장 1차적인 하천의 형태를 지닌 산지 하천의 수질을 파악하는 것이 매우 중요하다고 생각된다.

적 요

본 연구는 2002년 1월부터 2003년 5월까지 오염원이 비교적 단순한 산지하천에서의 무기 영양염 및 유기물 변동을 고찰하기 위해 낙동강 지류인 대천천의 상류에서 실시되었다. 조사지점은 인위적인 오염이 없는 DC1, 주위의 식당과 민가에서 생활하수가 유입되는 DC2, DC3, DC4 그리고 부분적으로 수질이 자연 정화된 DC5이다. 전기전도도, 탁도, BOD는 하수의 유입으로 인하여 DC2에서 급격히 증가하였다가 DC5에서 다시 낮아졌다. 수층의 NH₄⁺ 및 PO₄³⁻ 농도는 갈수기인 겨울에 증가하는 경향이 보였으며, DC2에서 DC1에 비해 각각 150배 및 37배가 증가하였다가 하류로 내려 갈수록 뚜렷하게 감소하였으며, NO₃⁻+NO₂⁻은 오염지역인 DC2, DC3, DC4와 DC5에서 청정지역인 DC1보다 약 2배 증가하였다. N/P 비율은 DC1에서 가장 높았고, 하수 유입지역에서 감소하여 이들 지역에는 부영양화가 진행되고 있음을 알 수 있었다. 퇴적물 공극수의 PO₄³⁻ 농도는 겨울과 봄에 증가하였으나, NH₄⁺와 NO₃⁻+NO₂⁻의 농도는 계절 경향이 보이지 않았다. 퇴적물 공극수의 NH₄⁺, PO₄³⁻ 농도와 퇴적물의 유기물 함유량도 하수가 유입되는 DC2, DC3, DC4에서 유의하게 증가하였고, DC5에서 다소 감소하였다. 퇴적물 공극수의 NO₃⁻+NO₂⁻의 농도는 DC2에서보다 용존산소가 풍부한 DC5에서 오히려 증가하였다. 수층의 TOC와 DOC 농도는 봄과 가을에 증가하였고, 하수가 유입되는 지역에서 높게 측정되었다. 조사지역이 산지하천의 상류에 위치하고 있으나 식당 및 민가에서 유입되는 생활하수는 하천의 상류를 부영양화시켰으며, 하류로 내려오면서 유기물 및 무기 영양염의 농도가 감소하여 하천수가 자연적으로 정화되는 것이 관찰되었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 과제 (R01-2001-000-00087-0)로 수행되었으며, 야외조사 및 시료분석에 많은 도움을 주신 김병혁, 박종표, 조현덕, 지창우, 박지은 님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김범철, 최광순, 김철구, 이유희, 김동섭, 박제철. 1998. 소양호

의 DOC와 POC의 분포. 한국육수학회지. 31:17-24.
 김호섭, 황순진. 2004. 부영양 저수지에서 식물플랑크톤 성장에 대한 제한 영양염과 질소/인 비의 영향. 한국육수학회지. 37:36-46.
 김현주, 윤혜순, 김진수, 김현우, 주기재. 1997. 산지하천에서 빛과 초식에 의한 부착조류의 생체량변화. 한국육수학회지. 30:385-392.
 박흥기, 정종문, 박재림, 홍용기. 1999. 낙동강 하류에서 식물플랑크톤 생산력과 수질 변화의 관계. 8:101-106.
 서인석, 김병근, 이상일. 1998. 간헐폭기활성슬러지공정에서 C/N비와 질소제거의 관계. 대한위생학회지. 13:57-65.
 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 박사학위 논문.
 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천-팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. 한국육수학회지. 33:387-394.
 신재기, 조경제. 2000. 금강하구호에서 수질의 계절변동과 오염도. 한국육수학회지. 33: 251-259.
 신재기, 황순진. 2003. 평택호와 유역하천에서 조류생장잠재력 추정. 한국육수학회지. 36:172-180.
 신재기, 황순진, 강창근, 김호섭. 2003. 하천형 저수지 팔당호의 육수학적 특성 : 수문과 수환경요인. 36:242-256.
 심수용. 1998. 우리나라 비료와 사료에 기인하는 비점오염원의 질소, 인 배출량. 강원대학교 이학석사논문.
 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 문순강우의 영향. 한국육수학회지. 38:54-62.
 오강호, 고영구. 2003. 광주광역시 하천수 수질 및 오염. 한국환경과학회지. 12: 287-297.
 이옥재, 이일규, 박희진, 안태영. 1995. 대청호에서의 질화작용. 한국육수학회지. 28: 11-18.
 임창수, 신재기, 조경제. 2000. 금강중하류에서 오염양상과 수질평가. 한국육수학회지. 33:51-60.
 장광현, 김현우, 최상호, 김중곤, 주기재. 1999. 도시하천(양재천) 및 산지하천(경기도 사기막천)에서 부착규조 군집의 동태. 한국육수학회지. 32:229-237.
 전은주, 양한섭, 옥 곤, 김영섭. 1998. 부산지역 강우의 화학적 특성. 한국환경과학회지. 5:707-716.
 조경제, 신재기. 1997. 낙동강 중·하류에서 무기 N·P 영양염변동. 한국육수학회지. 30:85-95.
 하 경, 박성배, 김현우, 김진수, 주기재. 1997. 부산·경상남도의 상류하천이 물리·화학적 특성과 부착조류 생체량의 분포. 한국육수학회지. 30:393-403.
 환경부. 1991. 수질오염공정시험방법. 동화기술. pp.57-60.
 Brower JE, JH Zar and von CN Ende. 1997. General Ecology. McGraw-Hill. pp.273.
 Davies BE. 1974. Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. Proc. Soil Sci. Soc. Am. 38:150-151.
 McKee L, E Brandley and H Shahadat. 2000. Intra- and inter-annual export of nitrogen and phosphorus in the subtropical Richmond River catchment, Australia. Hydrol. Proc. 14:1787-1809.

- Ohte N, N Tokuchi, H Shibata, M Tsujimura, T Tanaka and MJ Mitchell. 2001. Hydrobiogeochemistry of forest ecosystems in Japan: major themes and research issues. *Hydrol. Proc.* 15:1771-1789.
- Paul MJ and JL Meyer. 2001. Streams in the urban landscape. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 32:333-365.
- Rump HH and H Krist. 1988. Laboratory manual for the examination of water, wastewater and soil. VCH Verlagsgesellschaft. New York. pp.190.
- Wallace JB, DS Vogel and TF Cuffney. 1986. Recovery of a headwater stream from an insecticide-induced community disturbance. *J. Am. Benthol. Soc.* 5:115-126.
- Wetzel RG. 2001. *Limnology-Lake and River Ecosystems*. 3rd ed. Academic press. pp.1006.

Manuscript Received: February 7, 2006
Revision Accepted: July 29, 2006
Responsible Editor: Inn-Sil Kwak