

자갈하상 하천에서 부착미생물군집의 거동 Dynamics of Attached Microbial Community on the River with Gravel Riverbed

박재영* / 최이송** / 오종민***

Park, Jae Young / Choi, I Song / Oh, Jong Min

Abstract

This study was carried out in Osan river to quantitatively investigate behavior of attached microbial community (AMC) for enhancing self-purification process of river. We gained the results such as follows throughout long-term monitoring at in-situ river. The biomass of AMC had higher in the riffle than the almost stagnant pool and they were more developed in the riffle with high current velocity (HCV). Although the fast flowing current affects negatively to growth of the AMC during the early phase when the community gets attached to the benthic substrate, it was observed that it affected positively to their growth during the intermediate and later phase after the community is adapted to the substrate. When turbulence due to external pressure (storm or discharge of dam and reservoir) occurs, the degree of separation depends upon the flowing strength and the type of the external pressure. Since the community is not all separated, recovery is rather fast. Therefore, this study found that the degree of reduction of the pollutant by self-purification of the stream is depended upon the riverbed shape and the AMC contributes to self-purification positively or negatively in river. Therefore, the riverbed shape must be constructed in accordance with the characteristics of water quality in stream. Furthermore, the technique of installing the water channel structure appropriate for each section must be developed to maximize self-purification ability.

keywords : Attached Microbial Community, riffle and pool, benthic substrate, riverbed shape, self-purification

요 지

본 연구는 국가하천인 오산천에서 수행되었으며, 하천의 자정기능을 증대시키기 위해 부착미생물군집을 중심으로 하천에서 거동을 정량적으로 조사하였다. 하천현장에서 장기간에 걸친 모니터링을 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다. 부착미생물군집의 현존량은 소보다는 여울구간에서 더 높았으며, 여울구간에서도 흐름 유속이 상대적으로 빠른 급여울지역에서 더 많았다. 또한, 부착미생물군집이 하상기질에 부착하는 초기에는 빠른 유속이 부착미생물군집의 증식에 부정적으로 작용하지만, 부착미생물군집이 기질에 적응하여 증식하게 되는 중·후반기에는 유속이 오히려 증식을 돕는데 긍정적으로 작용하였다. 강우, 댐이나 저수지 방류와 같은 외부압력에 의해 교란이 발생하였을 때, 흐름의 세기와 외부압력의 형태에 따라 탈리되는 정도가 서로 다르고, 부착미생물군집 전량이 탈리되지 않기 때문에 회복속도는 비교적 빠른 것으로 관측되었다. 따라서 본 연구를 통해서 부착미생물군집은 하천의 자정작용에 부정적

* 경희대학교 환경연구센터 연구원
Senior Researcher, Center for Environmental Studies, KyungHee Univ., Yongin 449-701, Korea
(e-mail: jypark90@khu.ac.kr)

** 경희대학교 환경연구센터 연구원

*** 경희대학교 환경연구센터 및 환경·응용화학대학 교수(Corresponding author)

혹은 긍정적으로 작용하는 것을 알 수 있었다. 따라서 하천의 자정작용을 향상시키기 위해서는 그 하천의 수질특성에 적합한 하상형태가 적용되어야 하며, 각 구간에 적합한 하도구조물을 설치하여 각 구간별 정화작용을 극대화시킬 수 방법이 모색되어야 할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 부착미생물군집, 여울과 소, 하상기질, 하상형태, 자정기능

1. 서론

하천은 본래 유수와 함께 유역에 산재된 자연적, 인위적 발생원에서 하천으로 유입된 유·무기물질들의 이동 공간입과 동시에 부유물질의 침강, 질소화합물의 산화·환원, 미생물에 의한 유기물 분해, 수생생물에 의한 영양염(N, P) 섭취 등으로 하천수의 질적인 변화가 발생된다. 이와 같이 하천수 중에 포함된 오염물질이 유하과정 중에 농도가 감소하는 물리, 화학, 생물학적인 과정을 하천의 자정기능이라 한다. 특히, 수심이 얕고 하상이 자갈로 이루어진 계곡이나 경사가 급한 하천 상류에서는 생물학적인 작용이 우세하며, 이와 같은 생물학적 작용에 하상부착미생물군집이 중요한 역할을 담당하고 있는 것으로 알려져 있다(오종민 등, 1991; 신계기와 조경제, 1998; Bott, 1983; Lamberti, 1993).

하천에서 부착미생물군집(attached microbial community : AMC)은 생산자인 부착조류, 분해자인 세균류, 소비자인 원생동물류와 수서곤충 등 다양한 생물군집이 농축된 생태계로서 군집간 상호관계를 통해 높은 자연정화능을 가지며, 유기물 대사에서 매우 큰 비중을 차지한다(相崎守弘, 1980). 또한, Neckles 등(1994)에 의하면 주로 살아 있는 것을 포함하고, 노화되거나 죽어 있는 독립영양생물과 종속영양미생물(bacteria, fungi, protozoa and micrometazoa), 미세입자물질, 생물학적 기원의 다당류 물질이 합쳐진 복잡한 미소생물계(microcosm)라고 부착미생물군집을 정의하였다. 이와 같이 부착미생물군집은 여러 생물 종과 유기물질에 의해 조성된 하천 생태계이며, 부착미생물군집 중 주요 구성요소인 부착조류는 하천생태계의 주요 1차 생산자로서 하천의 영양상태와 먹이사슬을 이해하는 근간을 이룬다. 따라서 하천에서 부착미생물군집은 하천생태계에서 중요한 위치를 점유하며, 하천 수질변화에 밀접하게 관련되어 있음을 유추해 볼 수 있다.

실제 하천에서 부착미생물군집의 동태는 유역변화를 잘 반영해 주는 지표로서 지금까지 부착미생물군집에 관한 연구는 유럽, 미국 그리고 일본을 중심으로 활발히 진행되어 왔다. 그리고 국내에서는 1980년대 후반부터 부착조류에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 부착규조(diatom)를 이용한 수질평가에 관한 분야의 연

구가 많이 이루어진 반면, 부착미생물군집과 소비자, 생체량 및 분포에 미치는 환경요인과의 관계 등에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 또한, 부착미생물군집의 연구는 환경생태학 분야에서 주로 부착조류를 구성하는 종(species)을 정성적으로 분석하는 것을 위주로 진행되었으며, 하천수질과 관련하여 정량적으로 부착미생물군집을 파악하고 해석한 연구는 거의 드물다.

따라서 본 연구에서는 부착미생물군집을 정량화하기 위하여 실제 하천에서 하상재료로부터 부착면적을 산출하는 방법 중 오차를 줄일 수 있는 방안으로 Heron 공식을 응용한 면적 산출법을 제시하였다. 또한, 이전의 여러 문헌자료(Bott 등, 1985; Dudgeon와 Chan, 1992; Hill 등, 1997; Mosisch와 Bunn, 1997; Vis 등, 1998)를 통해 부착미생물군집을 정량적으로 가장 잘 표현하는 항목으로는 AFDW (Ash-Free Dry Weight, $g \cdot m^{-2}$)를 선정하였고, 부착조류를 정량적으로 나타낼 수 있는 항목은 Chl.a (Chlorophyll a, $g \cdot m^{-2}$)를 선정하여 본 논문에서 제시하였다.

본 연구는 하천의 자정작용을 향상시킬 수 있는 방안을 마련하는데 활용될 수 있는 자료를 산출하기 위하여 하상부착미생물군집의 하천에서의 거동을 세밀히 조사하였다. 따라서 하상부착미생물군집 증식에 가장 큰 영향인자인 흐름의 세기(유속)에 의한 영향을 중심으로 하상형태(여울과 소)에 따른 부착미생물군집의 현존량 분포에 의한 장기적인 분포 특성과 강우와 같은 외부 입력 발생 후에 나타나는 여울 내에서의 단기적인 분포 특성을 조사하였다. 또한, 유속에 따른 부착미생물군집의 증식 속도와 흐름이 거의 정체된 소(pool)에서 퇴적물의 퇴적속도 그리고 C, N, P를 중심으로 화학적인 조성을 하상형태별로 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사지점 선정

자연하천은 여울(riffle)이나 소(pool)를 가지고 사행을 이루며, 양안에 제방이 축조된 경우에도 제외지의 하도는 사행을 이룬다. 이러한 사행은 여울과 소의 구조를 만들며 교대로 발생한다. 본 연구대상 하천인 오산천의 경우, 여울과 소가 교대로 거의 1 km 마다 반복적으로

출현하고 있으며, 특히 흐름이 존재하는 구간은 다양한 유속에 의해 다양한 하상형태를 띄게 된다. 따라서 하상 부착미생물군집의 거동을 파악하기 위하여 연구대상지역의 조사지점을 크게 여울과 소로 구분하였다. 그리고 흐름 유속의 세기에 따라 형성되는 하상구조 사이에 차이가 발생함으로 여울에서는 흐름의 세기에 따라 흐름이 느린 지역(Low Current Velocity: LCV), 균일한 흐름을 보이는 보통 흐름 지역(Moderate Current Velocity: MCV), 급여울이 형성된 유속이 빠른 지역(High Current Velocity: HCV)으로 세분화 하였다. 따라서 조사 대상 하천인 오산천에서 총 4개(Pool, LCV, MCV, HCV)의 조사지점을 선정하였으며, 하상형태에 대한 특성은 Table 1과 같다. 다음 Fig. 1에는 조사대상 하천인 오산천과 그 유입지류의 전경을 보여준다.

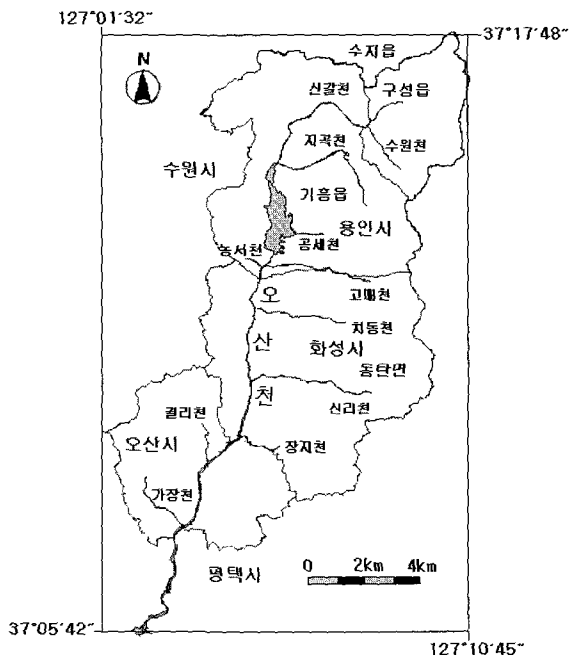


Figure 1. Map of Osan stream and inflowing tributaries

2.2 부착미생물군집 부착면적 산출방법

이전 연구자들에 의해 사용된 부착미생물군집의 부착면적 산출 방법은 보통 foil을 이용하여 하상재료에서 부착면의 윤곽을 그려 본(本)을 뜬 후 foil 면적과 foil 무게 사이의 비례식을 이용하여 부착면적을 산출하였다 (Bott 등, 1985; Hill 등, 1997; Mosisch와 Bunn, 1997; Hill 등, 2003). 그러나 이 방법을 하천현장에서 부착미생물군집을 정량적으로 모니터링을 수행할 때는 상당한 오차가 유발되는 문제점을 내포하는 것으로 나타났다. 첫째, 하천 내 분포하는 하상재료, 즉 자갈은 표면이 평평하지 않고 울퉁불퉁하며, 모양이 정해져 있지 않고 제각각의 형태를 유지하고 있다. 둘째, foil은 부드러운 재질로서 작은 압력에도 잘 구부러지기 때문에 실험자의 손이나 바람 등에 의해 쉽게 형태가 변형되어 부착면적이 초과 산정되는 경우가 발생할 수 있다. 셋째, 신속한 측정을 요하는 현장에서 foil을 이용한 방법은 고도의 집중력과 장시간에 따른 인내심을 요하기 때문에 상당한 오차를 필히 동반한다.

이와 같은 현장 조사에서 발생하는 부착미생물군집의 부착면적에 대한 측정오차를 줄이기 위하여 본 연구에서는 헤론(Heron) 공식을 응용한 면적산정법을 이용하였다. 먼저, 자갈에서 부착미생물군집을 채취할 때 brush을 이용하여 일직선으로 각이 있는 모양으로 절취하여 최종 절취된 모양이 다각형이 되도록 하였다. 면적산출을 위해 채취할 부분의 다각형에서 가상으로 삼각형이 되도록 윤곽을 그린 후 삼각형 세변의 길이를 측정하고 나머지 삼각형에 대해서도 동일하게 길이를 측정하였다. 삼각형 세변의 길이는 헤론 공식에 의해 면적이 계산되며, 각각의 삼각형 면적을 모두 더하면 부착미생물군집의 채취면적이 산출된다. 헤론의 공식은 다음과 같다. 삼각형의 세변의 길이를 a, b, c라고 할 때 삼각형의 넓이를 S 라 하면,

Table 1. Riverbed shapes and characteristics of sampling sites

Riverbed shape	Sampling site	Coordinates		Velocity ⁴⁾ (m · s ⁻¹)
		Longitude	Latitude	
Pool	Pool	127°05' 28.4"	37°12' 49.8"	N. M. ⁵⁾
Riffle	LCV ¹⁾	127°05' 23.3"	37°13' 04.4"	0.04~0.08
	MCV ²⁾	127°05' 13.9"	37°12' 00.5"	0.20~0.31
	HCV ³⁾	127°05' 13.8"	37°11' 59.2"	0.45~0.51

¹⁾Low Current Velocity, ²⁾Moderate Current Velocity, ³⁾High Current Velocity, ⁴⁾Dry Weather Period, ⁵⁾Not Measurement

$$S = \sqrt{(s(s-a)(s-b)(s-c))}$$

여기서, $s = \frac{1}{2}(a+b+c)$ 이다.

2.3 연구방법

하상형태(Pool, LCV, MCV, HCV)에 따른 부착미생물군집의 현존량 조사는 각 지점에서 비교적 평평한 자갈(직경 : 10~20 cm)들을 3배수로 선정하였다. 본 연구에서 제시한 하상특성에 따른 부착미생물군집 현존량 조사 자료는 3배수로 측정된 값들을 산술평균 하였다.

하상특성 중 본 연구지역내에 가장 큰 비율을 차지하는 MCV(평수시 평균 유속 0.20~0.31 m·s⁻¹)구간에서는 강우발생(강우지속시간-4시간, 평균강우강도-4.5 mm·hr⁻¹) 후 4일이 경과되었을 때 유속 분포에 따른 부착미생물군집 현존량 조사를 실시하였다. 각 부착미생물군집이 분포하는 곳의 유속은 전자유속계(2100-STDx, USA)를 이용하였으며, 선정된 각각의 하상재료에서 유속계에 의해 발생하는 선회류에 의한 난류의 영향을 최소화 할 수 있는 하상재료의 5 cm 상부지점에서 유속을 측정하였다. 각 하상재료마다 3~10회 유속을 측정하였으며, 본 논문에서는 이를 산술평균한 유속 값을 사용하였다.

하상형태에 따른 부착미생물군집 증식속도(g AFDW·m⁻²)와 소에서 퇴적물 퇴적속도(g DW·m⁻²)는 하상형태별(Pool, LCV, MCV, HCV)로 실시하였다. 실험에 사용된 하상재료는 실제 하천의 조사지점내에 존재하는 것을 이용하였으며, 선정된 자연하상재료에서 기존에 부착된 부착미생물군집은 brush를 이용하여 깨끗하게 제거하였다. 세척된 하상재료를 유사한 수심과 유속을 나타내는 지점에 10~20개씩 하상퇴적물이 부상되지 않도록 조심하면서 하상에 고착시켰으며, 1~5일 간격으로 부착미생물군집을 각각 채취하여 증식속도를 조사하였다.

2.4 시료채취 및 분석방법

하상재료에서 부착미생물군집의 채취는 먼저, 소류성 퇴적물을 제거하기 위하여 물속에서 가볍게 교란되었

고, 대기 중으로 나온 부착미생물군집은 증류수와 brush를 이용하여 하상재료에서 떼어졌다(Bott 등, 1985; Dudgeon와 Chan, 1992; Hill 등, 1997; Mosisch와 Bunn, 1997). 또한, brush와 하상재료에 남은 부착미생물군집은 증류수로 씻어내어 시료병에 첨가하였다.

부착미생물군집 분석에서는 건조중량(Dry Weight : DW), 회분제거건조중량(Ash-Free Dry Weight : AFDW), Chlorophyll a (Chl. a), TOC, T-N, T-P를 측정하였으며, 부착미생물군집량은 AFDW, 부착조류(attached algae) 생물량은 Chl. a로 나타내었다(Hill 등, 1997; Mosisch와 Bunn, 1997; Vis 등, 1998). 각 항목별 분석은 Standard method(APHA 등, 1985)의 부착미생물군집 조사편의 DW, AFDW의 분석방법으로 이루어졌고, Chl. a는 수질공정시험법(환경부, 2000) 수질 조사편을 참고하여 측정하였다.

부착미생물군집의 조성을 C, N, P 비로 나타내기 위하여 TOC (Total Organic Carbon), T-N (Total Nitrogen), T-P (Total phosphorus)를 수질공정시험법에 준하여 분석하였다. 균일한 시료채취를 위하여 원시료에서 30 mL를 취하여 Homogenizer (Model 60, Fisher Scientific, USA)를 10 W에서 10분 동안 처리 후 균일한 상태에서 분석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 하상형태에 따른 부착미생물군집 현존량 분포

하상형태에 따른 부착미생물군집의 현존량 조사결과, 하상형태별로 유의한 차이를 보인 조사항목은 DW (ANOVA, df=116, F=3.29, p<0.05), AFDW (ANOVA, df=116, F=5.17, p< 0.01)로 관측되었다. 따라서 하상형태별 부착미생물군집의 DW와 AFDW 사이의 관계식을 회귀분석을 통해 구하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 각 하상형태별로 부착미생물군집의 DW와 AFDW 사이에는 비교적 높은 관계(R²=0.85~0.91)가 있었으며, 모두 직선적으로 비례하였다. 이와 같은 현상은 모든 하상형태에서 동일하게 나타났으며, 이는 하상기질에 부착되거나 침강에 의한 퇴적물(부착미생물군집 포함)이 많을수록 부착미생물군집량(AFDW)이 다수 존재할

Table 2. Relationship of between DW and AFDW with riverbed shapes and current velocities

Sampling site	Regression equation	ANOVA
Pool	AFDW = 0.16×DW+11.78	R ² =0.87, df=30, F=198, p<0.001
LCV	AFDW = 0.94×DW- 8.99	R ² =0.90, df=11, F=100, p<0.001
MCV	AFDW = 0.32×DW+ 5.25	R ² =0.91, df=52, F=512, p<0.001
HCV	AFDW = 0.46×DW- 3.49	R ² =0.85, df=21, F=118, p<0.001

가능성이 높은 것을 예측할 수 있다. 이와 같은 결과를 통해 실제하천에서 부착미생물군집 모니터링을 실시할 때 하상기질에 부착된 부착물의 건조중량(DW)만 분석하여도 부착미생물군집(AFDW)을 신속하고 정확하게 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

부착미생물군집 현존량은 여울 조사구간 중 LCV, MCV, HCV지점에서 각각 28.0 ± 9.80 ($n=11$), 38.9 ± 32.5 ($n=53$), 58.3 ± 17.0 g AFDW $\cdot m^{-2}$ ($n=22$)로 상대적으로 유속이 가장 빠른 급여울(HCV)지점에서 가장 높았다(Fig. 2a). 그리고 비교적 큰 유속의 범위를 가지고 있으며, 흐름이 비교적 일정한 MCV지점에서 부착미생물군집이 광범위하게 분포하고 있는 것이 관찰되었다. 조사된 자료를 통해 하천에서 자연기질(자갈)에 부착하여 증식하는 부착미생물군집량은 유속이 빠를수록 더 많이 분포하는 것을 알 수 있다. 이전에 연구된 자료에서 자연하천이나 실험실하천(laboratory stream)의 $0 \sim 0.50$ $m \cdot s^{-1}$ 범위에서는 낮은 유속에서보다 높은 유속에서 부착미생물군집량 축적이 더 크다(Whitford와 Schumacher, 1964; McIntire, 1966, 1968; Rodgers와 Harvey, 1976; Horner 등, 1983; Welch 등, 1988)고 보고한 자료와 본 연구의 결과가 서로 일치하였다. 이와 같이 동일한 결과가 도출되는 것은 유속의 증가로 인해 부착미생물군집에 의해 섭취되는 영양염류(N, P)의 이용 속도를 증가시키기 때문으로 사료된다(Horner 등, 1983). 또한, 빠른 유속에 노출된 부착미생물군집은 아교질 덩어리 혹은 줄기로 기질에 단단히 둘러붙기 때문에 빠른 유속을 나타내는 HCV지점에서 부착미생물군집 현존량이 더 큰 것으로 사료된다(Patrick, 1948; Horner 등, 1990).

농업용수를 채수하기 위해 만든 보에 의해 형성된

흐름이 정체된 소와 약간의 흐름이 존재하는 LCV지점에서 부착미생물군집 현존량은 각각 33.4 ± 20.9 ($n=31$), 28.0 ± 9.80 g AFDW $\cdot m^{-2}$ ($n=11$)로 소(Pool)지점에서 더 높았다. 이는 소와 같이 흐름이 정지된 곳에서는 부착미생물군집과 같은 생물에 의한 부착과 증식보다 사멸한 생물체나 비생물성 유기물질에 의한 침전작용이 더 우세하게 일어나기 때문으로 판단된다.

부착미생물군집 중 많은 부분을 차지하는 부착조류(attached algae) 생물량 분포를 추정할 수 있는 Chl. a 양은 부착미생물군집 현존량(AFDW) 분포와는 다른 특징을 보였다(Fig. 2b). 흐름이 존재하는 여울에서 Chl. a 분포는 $HCV(0.18 \pm 0.10$ ($n=26$)) < $MCV(0.26 \pm 0.31$ ($n=27$)) < $LCV(0.29 \pm 0.13$ g Chl. a $\cdot m^{-2}$ ($n=6$)) 순이었으며, 이와 같은 현상이 관측된 것은 부착조류의 경우, 영양염류 농도와 유속에 대하여 선택성을 가지기 때문으로 사료된다(Ghosh와 Gaur, 1998). 즉, 하천에서 서로 다른 영양염류(N, P) 농도 및 유속 분포에 따라 부착조류 종에 따른 선호도가 서로 다르고, 종에 따라 증식 및 기질에 대한 특이성이 존재하여 하천에서 흐름의 세기에 관계 없이 다양하게 분포하는 것으로 사료된다.

3.2 여울(MCV)구간에서 유속분포에 따른 부착미생물군집량 분포

강우와 같은 외부압력에 의해 하상 부착미생물군집에 교란이 발생한 후 4일이 경과하였을 때 여울 중 MCV구간에서는 $0.11 \sim 0.12$ $m \cdot s^{-1}$ 을 기점(임계유속)으로 부착미생물군집량은 정반대의 분포형태가 관찰되었다(Fig. 3a). 일정한 유속($0 < velocity(m \cdot s^{-1}) \leq 0.11$)범위에서 부착미생물군집량 분포는 유속 증가에 양(+)의 직선적인 관계를 보인다($R^2=0.94$, $df=5$, $F=66.92$, $p<0.01$).

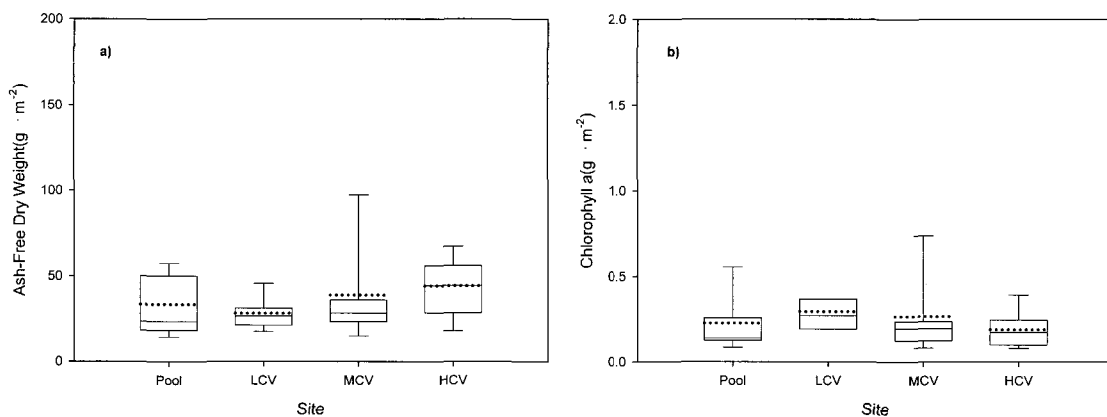


Figure 2. Biomass distribution of Attached Microbial Community (AMC) with riverbed shapes (solid line-percentile; dotted line-mean)

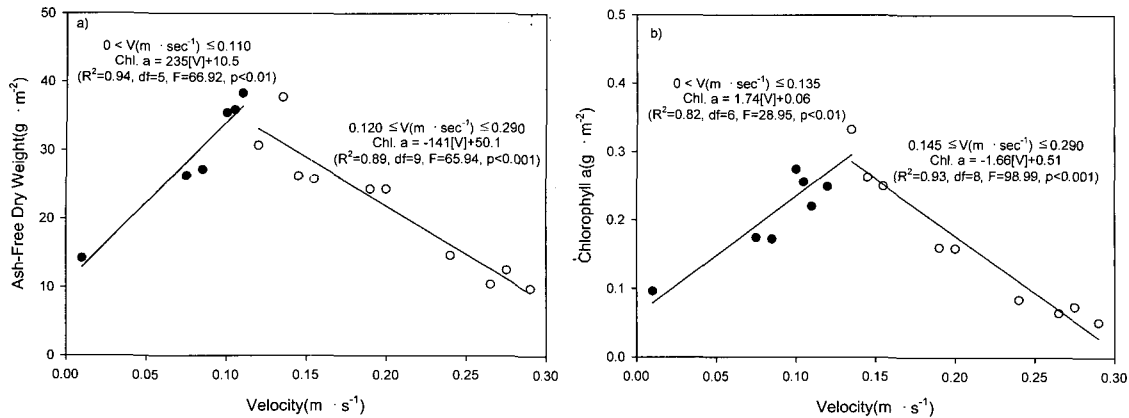


Figure 3. Biomass distribution of AMC with current velocities at MCV section

반면, $0.12 \leq \text{velocity}(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \leq 0.29$ 범위에서는 유속 증가에 음(-)의 직선적인 관계로 분포하였다($R^2=0.89$, $df=9$, $F=65.94$, $p<0.001$). 이와 같은 동일한 현상이 부착조류(Chl. a)의 생물량 분포에서도 나타났다(Fig. 3b).

Ameziane와 Capblancq(2001)에 따르면, 인공수로에서 임계유속을 $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 부근으로 보고하였으며, 본 실험이 하천 현장에서 이루어진 점을 고려하면, Ameziane과 Capblancq(2001) 결과와 거의 유사한 것으로 생각된다. 따라서 연구지역에서 유속은 주로 $0.12 \leq \text{velocity}(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \leq 0.29$ 범위 내에 존재하며, 이 유속 범위 중 흐름이 상대적으로 빠른 지역에 위치하는 부착미생물군집은 외부압력에 의해 상대적으로 높은 물의 전단력으로 탈리되는 양이 많아서 부착미생물군집량은 낮은 유속에 분포하는 부착미생물군집량보다 적게 분포하였다. 그러나 외부압력이 없이 장시간(약 20~30일)이 경과한 후 최종적인 부착미생물군집량은 낮은 유속에서 보다 높은 유속에 노출되어 있는 부착미생물군집에 더 많은 양이 축적될 것으로 추측되며, 이는 부착미생물군집 현존량 분포에서 확인할 수 있다(Horner와 Welth, 1981; Korte와 Blinn, 1983; Stevenson, 1983).

부착 및 침전을 동시에 나타내는 퇴적물량(DW)도 유속분포에 대하여 부착미생물군집량(AFDW)과 거의

유사한 분포 특성을 보이며, MCV구간에서 하상재료 위의 퇴적물량(DW) 중 부착미생물군집량(유기물량)은 51%를 차지하였다. 서로 다른 부착미생물군집량 분포 특성을 나타내는 유속의 범위($0 < \text{velocity}(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \leq 0.110$, $0.120 \leq \text{velocity}(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \leq 0.290$)에서 유기물량(AFDW)은 각각 $29.5 \pm 9.89 \text{ g AFDW} \cdot \text{m}^{-2}$ ($n=6$), $21.6 \pm 9.37 \text{ g AFDW} \cdot \text{m}^{-2}$ ($n=10$)로 낮은 유속범위에서 더 높게 검출되었다. 그러나 퇴적물(DW) 중 유기물(AFDW)의 비율은 각각 46.3%, 57.0%로 더 높은 유속($0.12 \leq \text{velocity}(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \leq 0.29$) 범위에서 더 높았다(Table 3). 따라서 부착미생물군집은 증식초기에는 낮은 유속 범위에서 적응이 빠르고 증식속도도 증가되며, 하상재료 위에 퇴적되는 무기물질의 침전 역시 낮은 유속에서 우세하게 일어나는 것으로 판단된다.

3.3 하상형태에 따른 부착미생물군집 증식속도

하천의 하상형태별 부착미생물군집 증식속도 조사는 하상재료를 각 하상형태에 침지시킨 후 5일이 경과된 이후 하상형태별로 서로 다른 부착특성이 관측되어 침지 후 5일까지($0 < t \leq 5 \text{ day}$)를 부착미생물군집의 초기증식 특성을 반영하는 것으로 설정하여 Table 4에 나타내었다. 부착미생물군집 초기증식기간($0 < t \leq 5 \text{ day}$)에 증식

Table 3. Mean biomass distribution with current velocities at MCV section

Item	Current velocity($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) range				Mean	
	$0 < V \leq 0.110$	n	$0.120 \leq V \leq 0.290$	n	$0 < V \leq 0.290$	n
DW ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	63.7 ± 28.8	6	37.6 ± 15.9	10	47.4 ± 24.5	16
AFDW ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	29.5 ± 9.89	6	21.6 ± 9.37	10	24.6 ± 9.75	16
Chl. a ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.22 ± 0.07	7	0.13 ± 0.08	9	0.18 ± 0.08	16

n : number of sample

Table 4. Accumulated rate of AMC with riverbed shapes and current velocities

Site	Accumulated rate(g AFDW · m ² · d ⁻¹)		
	0<t≤5day	t>5day	mean
Pool	1.26±0.34	1.40±0.15	1.34±0.25
LCV	2.16±0.33	1.48±0.21	1.71±0.41
MCV	2.47±0.79	1.69±0.41	1.91±0.63
HCV	1.39±0.35	1.88±0.29	1.70±0.38

속도는 Pool과 LCV지점에서 각각 1.26±0.34(n=4), 2.16±0.33 g AFDW · m² · d⁻¹(n=7)로 상대적으로 유속이 빠른 LCV지점에서 부착미생물군집 부착속도가 현저하게 빠른 것으로 관측되었다. 그러나 5일 이후(t>5day)에 부착속도는 각각 1.40±0.15(n=5), 1.48±0.21 g AFDW · m² · d⁻¹(n=14)로 Pool과 LCV지점에서 유사해지는 것으로 관측되었다. 이를 통해 부착미생물군집은 외부압력의 영향을 받지 않는 시간이 장시간(20~24일) 지속될 때, Pool과 LCV에서는 증식초기에 영양염류 이용속도 등에 의한 영향으로 유속이 존재하는 곳에서 증식속도가 빠르게 일어나지만, 시간이 장기화 되면서 그 차이는 미미해지는 것을 알 수 있다. 또한 Pool과 LCV에서 하상기질이 하천수에 침지된 후 부착미생물군집의 생물량이 크게 증가하여 박리가 발생하는 기간은 유속이 존재하는 곳에서 더 빠르게 나타나지만, 박리가 발생하는 부착미생물군집량은 거의 비슷하거나 오히려 유속이 느린 곳에서 더 많은 것으로 관찰되었다.

MCV지점과 HCV지점에서 부착미생물군집 증식속도는 증식초기(0<t≤5일)에는 유속이 상대적으로 느린 MCV지점에서 유속이 빠른 HCV지점 보다 부착속도가 빠른 것으로 관측된다. 그러나 부착미생물군집의 증식은 중·후반으로 진행될수록 HCV지점에서 부착속도가 빠른 것을 알 수 있다. 이는 이전 절에서 언급한 부착미생물군집 증식초기에 유속이 증가할수록 부착미생물군집량이 감소하지만, 이후 시간이 경과한 후 최종적인 부착미생물군집량은 낮은 유속에서보다 높은 유속에서 더 많다는 결과와 동일하다.

도출된 결과를 통해, 증식초기에 부착미생물군집은 빠른 유속에 적응하여 부착하는데 큰 에너지가 필요하여 상대적으로 부착미생물군집량이 적고, 이후 빠른 유속에 적응한 부착미생물군집은 아교질 덩어리나 혹은 줄기로 기질(하상재료)에 단단히 들러붙기 때문에 중·후반으로 갈수록 부착미생물군집량이 많아지는 것으로 생각된다(Patrick, 1948, Horner 등, 1990).

실제 하천현장에서 특히, 여름철에 발생하는 큰 외부압력(홍수)에 의한 세굴 등의 영향, 준설 등과 같은 하상재료의 이동과 새로운 하상기질 출현 등이 발생된 후

에는 초기 증식기간의 특징을 볼 수 있지만, 이와 같은 현상은 실제 하천에서 매우 드물게 발생된다. 따라서 하천에서 부착미생물군집의 증식 특성은 본 논문에서 타낸 5일 이후(t>5일)의 증식속도를 나타내는 경우가 대부분일 것으로 추측된다. 이는 Pool지점을 제외하고 3.1절 하상형태에 따른 부착미생물군집 현존량 분포에서 하상형태별 분포 특성(LCV<MCV<HCV)과 5일 이후(t>5일) 부착미생물군집의 증식속도와 일치되는 것이 이를 증명한다고 생각된다.

3.4 소(Pool)에서 퇴적물 퇴적속도

흐름이 거의 정지된 Pool지점의 경우, 하상형태를 고려한 부착미생물군집 증식속도 조사에서 다른 하상형태(LCV, MCV, HCV)와 서로 다른 부착특성을 가지고 있는 것으로 도출되었으며, 이는 흐름이 거의 정지된 곳에서는 부착미생물군집에 의한 증식보다는 무기물질(모래, 실트, 점토 등)에 의한 침전이 보다 우세하게 일어나기 때문으로 사료된다.

흐름이 거의 정지된 소에서 하상재료 위에 침전하는 퇴적물량은 시간의 경과에 따라 거의 직선으로 증가하였으며(Fig. 4a), 회귀분석을 통해 시간경과와 퇴적물량 사이에는 $DW = 6.00[Time] + 0.31$ (ANOVA, $R^2=0.96$, $df=9$, $F=191.48$, $p<0.001$)의 관계가 존재하였다. 또한, 유기물량과 경과시간 사이에는 $AFDW = 1.39[Time] - 0.05$ (ANOVA, $R^2=0.98$, $df=9$, $F=384.78$, $p<0.001$)의 선형관계식이 성립하였다. 따라서 퇴적물량(DW)과 경과시간의 관계식에 따르면, 시간의 경과에 따라 퇴적물량이 계속적으로 증가될 것으로 추정할 수 있으나, 하천 퇴적물은 외부압력에 의해 상류에서 하류로 이동하기 때문에 계속적으로 하상에 쌓이지 않는다. 또한, 보 등과 같은 하천구조물 근처에서는 퇴적속도가 빠르기 때문에 하상준설을 통해 하천수위를 조절하고 있다.

소에서 조사기간 동안 129±117 g DW · m²까지 퇴적된 다음, 그 이후 외부압력에 의해 퇴적물량은 감소되어지는 것으로 관찰되었다. 따라서 위에 도출된 관계식을 이용하여 최대 퇴적물량의 경과시간은 21.4일로 추정할 수 있다. 그리고 소에서 퇴적물의 퇴적속도는

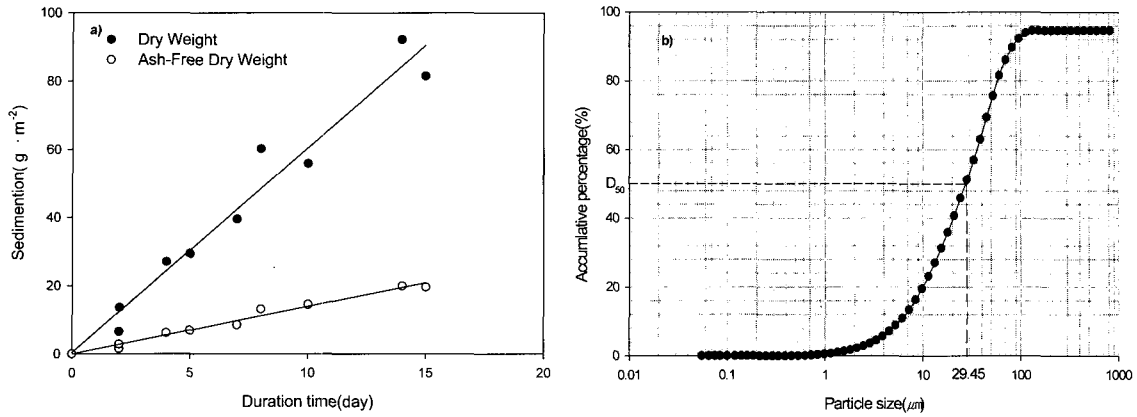


Figure 4. Accumulated rate and particle distribution at Pool section

5.93±1.22 g DW · m⁻² · d⁻¹(n=9)이며, 퇴적물량 중 유기물 함량은 약 22.8%를 차지하였다. 조흥제 등(2000)에 의하면, 도시하천 퇴적도에서 유기물 함량이 0.84~12.0%로 보고하였으며, 본 논문에서 유기물 함량이 더 높은 것은 입자가 큰 실트 및 모래가 시료채취과정에서 소류성 퇴적물을 제외시키기 위해서 혹은 부시료를 제조하는 과정에서 일부 제거되었기 때문으로 생각된다. 이 때 평균 입도분포(D₅₀)는 24.5~32.3 μm으로 관측되었다(Fig. 4b).

3.5 하상형태별 부착미생물군집의 조성

부유조류와 부착조류를 포함한 조류는 통상 C₅H₈O₂N으로 조성식이 알려져 있다. Redfield (1958)는 조류의 C, N, P원소 사이의 무게비를 41.1 : 7.2 : 1로 보고하였으며, 이를 Redfield ratio라고 하였다. Reynolds (1984)에 의하면, 담수조류의 C/N 무게비는 통상 5~13 사이의 값을 가지며, Barica (1990)에 의하면, 담수플랑크톤조류에서 N/P비가 20이상이면, P가 제한인자임을 의미한다고 제안하였다. 또한, Lindström (1996)은 산성호수의 0.5 m 수심에서 채취되어 동결 건조된 부착조류에서 C/N의 무게비(g/g)는 7~19라고 보고하였다.

본 논문에서는 하상형태별로 하상재료 위에 쌓인 퇴적물 중 부착미생물군집(AFDW)이 차지하는 비율은

LCV지점에서 63%로 가장 높았고, MCV와 HCV지점에서 각각 33%, 34%로 거의 유사하였다(Table 5). 또한, 흐름이 거의 정지된 Pool지점에서 19%를 차지하여 가장 낮은 비율을 차지하였다.

부착미생물군집에서 P를 기준으로 한 C, N, P 무게비는 29.5 : 4.6 : 1로 조사되었고(Table 5), C/N비는 6.3으로 이전에 조사된 조류(Redfield, 1958)의 C, N, P 무게비나 부착조류의 C/N비(Lindström, 1996)에 비해 낮은 범위에 위치하였다. 이는 토양입자에 의해 결합된 수종의 P가 침강하여 부착미생물군집에 포함되어 P 함량이 조류보다는 부착미생물군집에서 더 높기 때문으로 사료되며, 호수와 같은 비슷한 흐름을 보이는 LCV지점에서 C/N비는 9.22로 Lindström (1996)이 보고한 C/N비 내에 포함되는 것으로 나타났다.

4. 결론

우리나라는 강과 하천이 발달되어 있고, 갈수기와 홍수기가 뚜렷하여 갈수기에 대부분의 중·소하천은 건천이 되는 특성을 갖는다. 또한, 외부압력(홍수와 상류에 위치한 댐과 저수지에서 방류)에 의한 교란 후에도 하상부착미생물군집은 전량 탈리되지 않기 때문에 원상태로 회복되는 정도가 매우 빠르다. 그리고 경사가 급한 계곡이나 유속이 빠른 하천 상류부의 경우, 하천 하상은

Table 5. Composition of AMC with riverbed shapes and current velocities

Site	AFDW/DW ratio	Weight ratio(g · P · g ⁻¹)			C/N ratio
		C	N	P	
Pool	0.19	30.1	5.2	1	5.7
LCV	0.63	22.4	2.4	1	9.2
MCV	0.33	36.4	6.7	1	5.4
HCV	0.34	33.4	5.1	1	7.7
Mean	0.34	29.5	4.6	1	6.3

주로 자갈과 거석 등과 같은 큰 재료로 구성된다. 이와 같이 표면적이 넓은 하상재료의 경우, 부착미생물군집이 부착하여 증식하는데 유리한 환경을 제공하기 때문에 하천의 자정작용 중 생물학적작용에 있어 부착미생물군집의 역할은 매우 클 것으로 판단된다. 그러므로 계곡이나 하천상류부 등에서 하천의 수질변화를 해석하고, 수질개선 대책을 수립하기 위해서는 부착미생물군집의 정량화는 선행 기초연구 분야라 할 수 있다.

본 논문의 연구결과, 부착미생물군집은 하천수의 흐름에 민감하게 반응하는 것으로 관측되었으며, $0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하의 흐름에서는 유속의 증가에 따라 부착미생물군집량이 직선으로 증가하면서 분포하였다. 또한, 최대부착미생물군집량에 도달되는 시간은 하상형태(소, 여울)와 유속의 정도(LCV, MCV, HCV)에 따라 약간 다르지만, 박리가 발생하는 부착미생물군집량은 보통 $30 \sim 40 \text{ g AFDW} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 유사한 특징을 보인다. 하지만 급여울(HCV)과 같이 난류의 흐름과 때때로 $0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 유속이 발생하는 지역에서는 박리가 일어난 이후에도 지속적인 증식이 관찰되며, 박리 후 더욱 더 단단히 결합되어 최대 부착미생물군집량은 $58.3 \text{ g AFDW} \cdot \text{m}^{-2}$ 에 이르는 경우도 종종 관찰된다.

하천에서 부착미생물군집의 경우, 주간에는 광합성작용으로 수중의 용존산소를 증가시키고 질산화작용을 촉진하여 하천의 자정작용에 긍정적으로 작용함과 동시에 외부압력(강우나 댐과 저수지 방류에 의한 전단력)에 의한 탈리와 생물막 두께가 증가되어 발생하는 박리에 의해 수중의 SS를 증가시켜 햇빛의 투과를 감소시키고, 하상에 퇴적되어 수중의 용존산소를 감소시키는 등 자정작용에 부(-)의 영향을 나타낸다.

그러므로 하천의 자정기능을 향상시키기 위해서는 하천 하상에 부착미생물군집을 적정하게 유지할 수 있는 방안 마련과 함께 이들에게 다양한 하천환경(여울, 습지, 소)을 제공하여 강우나 댐 방류와 같은 외부압력에도 탄력적으로 대응할 수 있는 다양한 하천 환경을 조성해야 한다. 또한, 하천에 인공으로 설치된 구조물(특히, 보(weir))의 경우에도 하천의 기능에 부정적 혹은 긍정적인 요인으로 작용하기 때문에 유역 및 하천특성에 맞게 설계되어야 하며, 자연 친화적인 하천정비기법을 광범위하게 적용하여 다양한 하천생태계를 조성해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 한국 환경기술진흥원이 추진하는 기능을 상실한 보 철거를 통한 하천생태통로 복원 및

수질개선 효과(과제번호 : 050010015)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 신재기, 조경제 (1998). "대청천에서 부착조류의 1차 생산성." **한국육수학회지**, 제31권, 제4호, pp. 294-302.
- 오종민, 小川浩史, 小倉紀雄 (1991). "도시중소하천의 자정능력 측정과 평가법의 연구." **한국지구과학회지**, 제12권, 제3호, pp. 206-216.
- 조홍제, 이병호, 이근배 (2000). "도시하천 하상퇴적토의 특성에 관한 연구." **대한토목학회논문집**, 제20권, 제4-B호, pp. 607-618.
- 환경부 (2000). 수질오염공정시험방법, 환경부 고시 99-208호, pp. 315-316
- 相崎守弘 (1980). "富栄養河川における付着微生物群集の發達にともなう現存量および光合成量の變化." **日本陸水學會誌**, 第41卷, pp. 225-234.
- Ameziane, T. and Capblancq, J. (2001). "Interplay between turbulence and periphyton in rough open-channel flow." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 3, pp. 227-239.
- APHA, AWWA and WPCF (1985). *Standard method for the examination of water and wastewater Water*. 16th Ed. American Public Health Association, Washington, D., pp. 1083-1088.
- Barica J. (1990). "Seasonal variability on N:P ratios in eutrophic lakes." *Hydrobiol.*, Vol. 191, pp. 97-103.
- Bott T. L. (1983). "Primary productivity in streams." *Stream ecology*, Plenum, New York, pp. 29-53.
- Bott T. L., Brock J. T., Dunn C. S., Naiman R. J., Ovink R. W. and Petersen R. C. (1985). "Benthic community metabolism in four temperate stream systems: an inter-biome comparison and evaluation of the river continuum concept." *Hydrobiologia*, Vol. 123, pp. 3-45.
- Dudgeon D. and Chan I. K. K. (1992). "An experimental study of the influence of periphytic algae on invertebrate abundance in a Hong Kong stream." *Freshwater Biology*, Vol. 27, pp. 53-63.
- Ghosh M. and Gaur J. P. (1998). "Current velocity and the establishment of stream algal periphyton communities." *Aquatic Botany*, Vol. 60, pp. 1-10.
- Hill B. H., Lazorchak J. M., McCormick F. H. and

- Willingham W. T. (1997). "The effects of elevated metals on benthic community metabolism in a rocky mountain stream." *Environmental Pollution*, Vol. 95, No. 2, pp. 183-190.
- Horner R. R. and Welch E. B. (1981). "Stream periphyton development in relation to current velocity and nutrients." *Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences* Vol. 38, pp. 449-457.
- Horner R. R., Welch E. B. and Veenstra R. B. (1983). "Development of nuisance periphytic algae in laboratory streams in relation to enrichment and velocity." *Periphyton of Freshwater Ecosystems* (Ed. R. G. Wetzel), Dr W. Junk Publishers, The Hague, pp. 121-134.
- Horner R. R., Welch E. B., Seeley M. R. and Jacoby J. M. (1990). "Responses of periphyton to changes in current velocity, suspended sediment and phosphorus concentration." *Freshwater Biology*, Vol. 24, pp. 215-232.
- Korte V. L. and Blinn D. W. (1983). "Diatom colonization on artificial substrata in pool and riffle stones studied by light and scanning electron microscopy." *J. of Phycology*, Vol. 19, pp. 332-341.
- Lamberti G. B. (1993). "Grazing experiments in artificial streams." *J. N. Am. Benthol. Soc.*, Vol. 12, pp. 337-343.
- Lindström E. A. (1996). "The humic lake acidification experiment(HUMEX): Impacts of acid treatment on periphyton growth and nutrient availability in lake SKJERVATJERN, NORWAY." *Environment international*, Vol. 22, No. 5, pp. 629-642.
- McIntire C. D. (1966). "Some effects of current velocity on periphyton communities in laboratory streams." *Hydrobiologia*, Vol. 45, pp. 559-570.
- McIntire C. D. (1968). "Structural characteristics of benthic algal communities in laboratory streams." *Ecology*, Vol. 49, pp. 520-537.
- Mosich T. D. and Bunn S. E. (1997). "Temporal patterns of rainforest stream epilithic algae in relation to flow-related disturbance." *Aquatic Botany*, Vol. 58, pp. 181-193.
- Neckles H. A., Koepfler E. T., Haas L. W., Wetzel R. L., and Orth R. J. (1994). "Dynamics of epiphytic photoautotrophs and heterotrophs in *Zostera marina*(Eelgrass) microcosms : responses to nutrient enrichment and grazing." *Estuaries*, Vol. 17, No. 3, pp. 597-905.
- Patrick R. (1948). "Factors affecting the distribution of diatoms." *Botanical Reviews*, Vol. 14, pp. 473-524.
- Redfield, A. C. (1958). "The biological control of chemical factors in the environment." *Am. Scientist*, Vol. 46, pp. 205-221.
- Reynolds, C. S. (1984). *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 384.
- Rodgers J. H. and Harvey R. S. (1976). "The effect of periphytic productivity as determined using ¹⁴C." *Water Resources Bulletin*, Vol. 12, pp. 1109-1118.
- Rosemond, A. D. (1994). "Factors limit seasonal variation in periphyton in a forest stream." *J. N. Am. Benthol. Soc.*, Vol. 13, pp. 333-344.
- Stevenson R. J. (1983). "Effects of current and conditions simulating autogenically changing micro-habitats on benthic diatom immigration." *Ecology*, Vol. 64, pp. 1514-1524.
- Sumita, M. and Watanabe T. (1983). "New general estimation of river pollution using new diatom community index(NDCI) as biological indicators based on specific composition of epilithic diatoms communities." *Jpn. J. Limnol.*, Vol. 44, pp. 329-340.
- Vis C., Hudon C., Cattaneo A. and Pinel-Alloul B. (1998). "Periphyton as an indicator of water quality in the St Lawrence River(Quebec, Canada)." *Environmental Pollution*, Vol. 101, pp. 13-24.
- Welch E. B., Jacoby J. M., Horner, R. R. and Seeley M. R. (1988). "Nuisance biomass levels of periphytic algae in streams." *Hydrobiologia*, Vol. 157, pp. 161-168.
- Whitford L. A. and Schumacher G. H. (1964). "Effect of current on respiration and mineral uptake in *Spirogyra* and *Oedogonium*" *Ecology*, Vol. 45, pp. 168-170.

(논문번호:04-111/접수:2004.12.11/심사완료:2005.02.23)