

인북천에서 부착조류 현존량의 시·공간적 변동

이재용 · 자히둘 이슬람 · 신명선 · 정성민 · 김범철[†]

강원대학교 자연과학대학 환경학과

The Spatial and Temporal Variation of Periphyton in the Inbuk Stream

Jaeyong Lee · Jahidul Mohammad Islam · Myoungsun Shin · Sungmin Jung · Bomchul Kim[†]

Department of Environmental Science, Kangwon National University

(Received 24 September 2009, Revised 3 November 2009, Accepted 23 December 2009)

Abstract

Eutrophication is a well-known phenomenon in lentic habitats, however it is receiving increasing attention in shallow streams of Korea due to the increase of periphyton to a nuisance level. In this study temporal and spatial variation in periphyton standing crop and nutrient concentrations were surveyed in the upper reach of the Han River (the Inbuk Stream) that used to be a pristine rural stream until 1980s. Chlorophyll-a concentration per unit surface area of bottom substrate was examined monthly for one year period at nine sites along the Inbuk Stream together with environmental factors such as phosphorus, nitrogen, and water velocity. The standing crop of periphytic algae ranged from 4~242 mgChl.a/m² with a median of 55 mgChl.a/m², often exceeding the nuisance level criterion. Along the stream periphyton increased significantly from 39±48 mgChl.a/m² to 94±49 mgChl.a/m² after merging of a tributary in an intensive agricultural basin with high phosphorus concentrations. Seasonally periphyton biomass was highest in autumn (median 171±76 mgChl.a/m²) from October through December when water flow velocity was low (median 0.4±0.3 m/s), while it was higher in flood season (median 1.2±0.4 m/s) and freezing season (median 0.2±0.3 m/s) was lower. The result shows that this rural stream often shows characteristics of eutrophication according to periphyton standing crop and it may be regulated by phosphorus and water velocity.

keywords : Chlorophyll-a concentration, Eutrophication, Periphyton, Phosphorus, Stream, Water velocity

1. 서론

수계의 부영양화는 일반적으로 정체수역에서 발생하는 현상이지만 근래에 우리나라에서는 하천에서도 부착조류의 증식을 수반한 부영양화현상이 심화되고 있어 환경학적 관심의 대상이 되고 있다. 하상에 서식하는 부착생물(periphyton)은 조류를 기본으로 박테리아, 곰팡이류, 원생동물 등으로 구성되어 있으며 수중의 유기물이 풍부한 경우에는 다가영양생물인 박테리아가 많이 서식하며, 무기영양염류가 많으면 부착조류가 증식하게 된다. 부착조류는 수서곤충의 먹이가 되어 하천생태계의 에너지원의 근원으로서의 역할을 가지지만, 과잉번식하면 하천생태계의 서식처를 훼손하고 미관상 불쾌감을 주므로 부착조류 밀도가 100~200 mgChl.a/m² 이상이면 nuisance level로 분류된다(Dodds et al., 1997; Welch et al., 1988).

부착조류의 과잉번식은 하상의 sediment oxygen demand를 증가시켜 야간에 산소의 고갈을 가져 올 수 있다. 자갈 틈은 수서곤충의 서식처와 어류 산란처로서 중요성이 큰 공간으로 자갈 틈이 메워지면 산소의 공급이 감소하고 유

기물 분해효율로 산소소비가 증가하여 자갈 틈이 더 이상 동물의 서식과 산란에 이용될 수 없게 된다. 또한 성장하여 탈리된 부착조류는 하류하천 및 정체된 수역의 수질 및 생태계에 악영향을 미칠 수 있다(박구성 등, 2006). 부착조류는 고착생물이라는 점에서 그 유역의 상황과 수환경에 대한 누적된 정보를 제공한다는 장점도 가지므로 하천의 건강성을 평가하기 위한 생물학적지표로서 활용되고 있다(신명선 등, 2008; 최재신 등, 1998; 최철만 등, 2004; Hill et al., 2003).

부착조류의 밀도는 여러 가지 환경조건에 따라 큰 계절 변동을 보이는데 부착조류의 성장에 미치는 요인으로써 수온과 일사량(Munn et al., 1989), 유속(Biggs et al., 1998), 유량(Tett et al., 1978), 영양염류 농도(조경제, 1994), 탁도(Figueroa-Nieves et al., 2006) 등이 보고되어 있고, 생물학적인 상호작용에 따른 영향에 대해서도 연구되어 왔다(곽인실 등, 2004; Katano et al., 2007; Kjeldsen et al., 1998; Liboriussen et al., 2005).

우리나라 하천 부영양화의 요인은 인위적인 교란으로 인한 무기인산이온의 증가가 주요한 원인이다. 인의 주요 공급원으로는 미처리하수를 비롯하여 하수처리장 방류수, 농경지의 비료, 퇴비 등을 들 수 있는데, 농경지의 비점오염원은 주로 강우 시에 유출되므로 갈수기에는 하수가 주요

[†] To whom correspondence should be addressed.
bkim@kangwon.ac.kr

오염원이 된다. 정화조나 생물학적 하수처리는 인의 제거율이 낮으므로 영양염류를 하천에 직접 방류하는 효과로 인하여 토양에 의해 처리되는 재래식 자연배수로에 비하여 오히려 부영양화를 가중시킬 수 있으며, 도시화된 지역의 하수도와 정화조는 무기영양염류의 공급을 증가시켜 부착조류의 증가를 가져온다(Taylor et al., 2004).

본 연구의 대상인 인북천은 한강의 상류 하천 중의 하나로서 인구가 적어 과거에는 매우 청정한 수질을 보이던 지역이었으나 근래 탁수의 발생과 부영양화 및 어류대량폐사 등의 수질악화 징후가 나타나고 있다. 인북천의 유역에서는 농촌부락과 군부대에서 수세식화장설의 보급, 정화조 설치, 마을하수도 설치, 퇴비 사용증가 등의 변화가 일어나고 있으며 이에 따라 부영양화현상이 감지되고 있어 본 연구에서는 인북천을 대상으로 수질과 부착조류의 현존량 분포를 측정하여 부영양화의 실태를 파악하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 조사시기 및 정점

본 연구에서는 인북천의 상류에서 하류까지 총 9개 정점을 선정하여, 2007년 3월부터 2008년 2월까지 총 12회에 걸쳐 현장조사를 실시하였다(Fig. 1). 인북천은 강원도 인제군 서화면에서 발원하여 남류하다가 설악산에서 발원한 북천과 인제읍에서 합쳐진 후 홍천군 내면에서 발원한 내린천과 합류되어 소양호로 유입되는 하천이다.

상류구간(St.1~St.3)은 두 개의 지천인 만대천과 서화천의

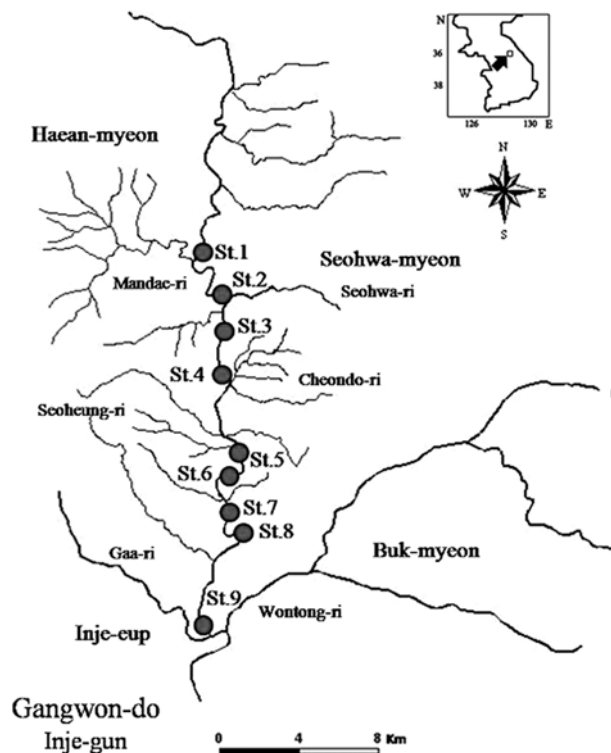


Fig. 1. Map showing the stations for periphyton sampling in the Inbuk stream.

유입의 영향을 받는다. St.1은 조사정점 중 가장 상류로 주변 지천의 영향이 없고 탁수나 오염원의 영향이 미미한 정점이다. St.2는 양구 해안면의 고랭지로부터 발생하는 탁수의 유입이 시작되는 정점으로 탁수는 인북천의 수체의 탁도를 높이고 하상을 모래와 clay로 잠식 및 교란시킨다. St.3은 상류에 어도가 설치되어 있고 연 중 탁수의 발생이 거의 없는 서화천의 유입이 있는 정점이다.

중류구간(St.4~St.6)은 농경지, 주거지 및 군부대가 하천을 따라 위치하고 있고 생활하수의 영향을 받는 정점들이다. 그리고 하류구간(St.7~St.9)은 농경지와 삼림이 분포하여 유역으로부터 하천으로 유입하는 직접적인 오염원이 적은 정점들이다(Fig. 1).

2.2. 조사방법

수온 및 전기전도도(YSI-85 Conductivity meter), 탁도(HACH 2100P)는 현장에서 측정하였다. 유속은 부착조류 시료를 얻은 지점에서 마그네틱 유속계(FLO-MATE MODEL 2000)를 이용하여 수심의 약 2/3 부근에서 측정하였다. 영양염류는 부착조류의 염록소 a 농도를 얻기 위해 채집한 정점의 표층수를 4L를 채수하였으며 채수한 시료는 실험실로 운반하여 분석에 이용하였다. 총인(TP), 용존무기인(DIP)은 Standard Methods에 따라 ascorbic acid법에 의한 흡광광도법으로 측정하였고 총질소(TN)은 persulfate 법으로 측정하였다(APHA, 1998). 강우량은 2007년 3월에서 2008년 3월까지의 기상청의 인제관측소자료를 이용하였다.

부착조류 시료는 여름에는 하천 폭이 증가하고 겨울에는 하천 폭의 감소하기 때문에 연중 물에 잠겨 있는 유폭을 삼등분하여 수심이 10~70 cm 정도인 정점에서 얻었다. 각 정점에서 부착조류 시료는 하천을 수직 또는 대각선 방향으로 횡단하여 잘 발달된 기질(장축 10~20 cm)을 3개 채취하였다. 선택한 기질은 현장에서 즉시 5 cm × 5 cm 면적을 현장에서 칫솔로 긁은 후 30~50 mL의 dimethyl formamide(DMF)를 가하여 염록소 a를 추출하였다(Lee et al., 2008). 추출된 시료는 냉장보관 후 일주일 이내에 원심분리하여 침전물을 제거하고 상등액을 채취하여 염록소 a를 흡광광도법으로 측정하였다. 농도의 계산에는 Standard Methods의 trichromatic method를 사용하였다(APHA, 1998).

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질의 시·공간적인 변화

2007년과 2008년의 인제 기상관측자료에 따르면 강우량은 조사기간 동안 년평균 7±14 mm로 최대 103 mm의 강우량을 보였고 강우의 54%가 8월과 9월에 집중되어 있어 몬순기후의 특징을 보였다(Fig. 2). 수온은 조사 기간 0~28°C의 범위를 보였는데, 6월 말에 가장 높게 나타났고 12월 이후에는 1°C 이하로 낮았다(Fig. 2).

영양염류 농도의 변동을 보면 총질소는 1.07~3.21 mgN/L의 범위로, 정점 별로 차이가 거의 없었다(Fig. 3). 총인은 4~54 µgP/L의 범위로 상류에서 하류로 갈수록 점차적으로

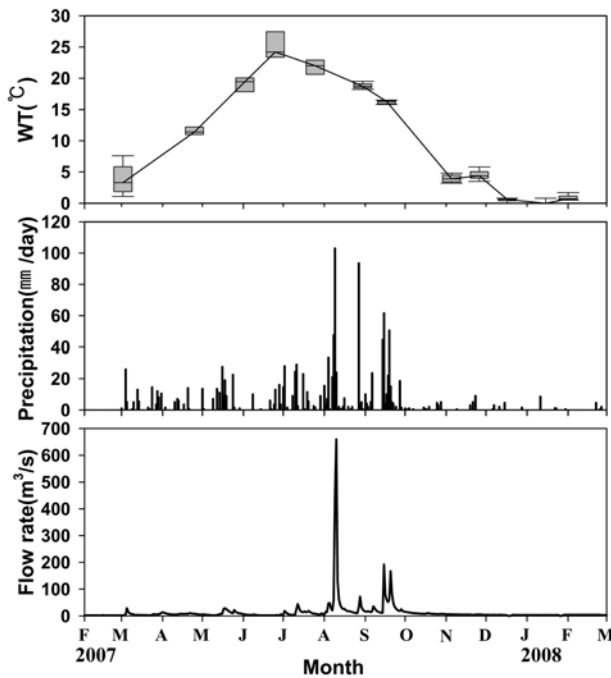


Fig. 2. The seasonal variations of precipitation, mean and range of water temperature (WT) and flow rate in Inbuk Stream.

증가하였다. 용존무기인(DIP)의 농도는 1~18 $\mu\text{gP/L}$ 의 범위로, St.1(median $6.0 \pm 1.9 \mu\text{gP/L}$)에서 가장 낮았던 반면에 주거지가 밀집하여 있는 St.4(median $10.0 \pm 4.7 \mu\text{gP/L}$)에서 가장 높았고 하류로 갈수록 감소하였다(Fig. 3). 유속은 0.1~1.8 m/s(median $0.6 \pm 0.4 \text{ m/s}$)의 범위로 구간 내 몇몇 정점에서 차이를 보였다. 탁도는 0.6~24.3 NTU(median $4.7 \pm 5.6 \text{ NTU}$)의 범위를 보였는데, 만대천이 유입하기 전인 St.1은 탁수의 영향을 받지 않아 낮은 탁도를 보인데 반하여 만대천이 합수한 후인 St.2에서부터 하류까지는 전반적으로 높은 탁도를 보였다(Fig. 3). 다만 St.6에서는 급격한 탁도의 감소가 있었는데, 이는 상류에 있는 제방이 부유물질의 침전을 초래하였기 때문이다.

계절에 따른 영양염류의 농도의 변동에서 총질소의 농도는 조사기간 동안에 점진적으로 감소하였다(Fig. 4). 총인은 시기적으로는 여름 사이에 높았고 겨울에는 다소 낮았다(Fig. 4). 계절에 따른 DIP의 농도는 봄과 가을 사이에는 큰 변동이 없었으나 유량이 감소한 12월 이후 겨울에 점진적으로 증가하였다(Fig. 4). 유속은 장마시기인 9월에 가장 빠른 유속(median $1.2 \pm 0.4 \text{ m/s}$)을 보였고 동절기(median $0.2 \pm 0.3 \text{ m/s}$)에는 여름에 비해 상대적으로 느렸다(Fig. 4). 탁도는 6월초와 9월 그리고 11월초에는 각각 중앙값으로 $13.3 \pm 4.9 \text{ NTU}$, $16.2 \pm 7.7 \text{ NTU}$ 그리고 $15.0 \pm 7.7 \text{ NTU}$ 를 보였다(Fig. 4). 11월말 이후부터 2월까지는 만대천에서 인북천으로의 탁수의 유입이 극감하여 탁도가 중앙값으로 $1.9 \pm 1.3 \text{ NTU}$ 를 보였다.

3.2. 지점에 따른 부착조류의 엽록소-a 농도의 변동

부착조류의 엽록소-a 농도는 4~242 mgChl.a/m^2 (median

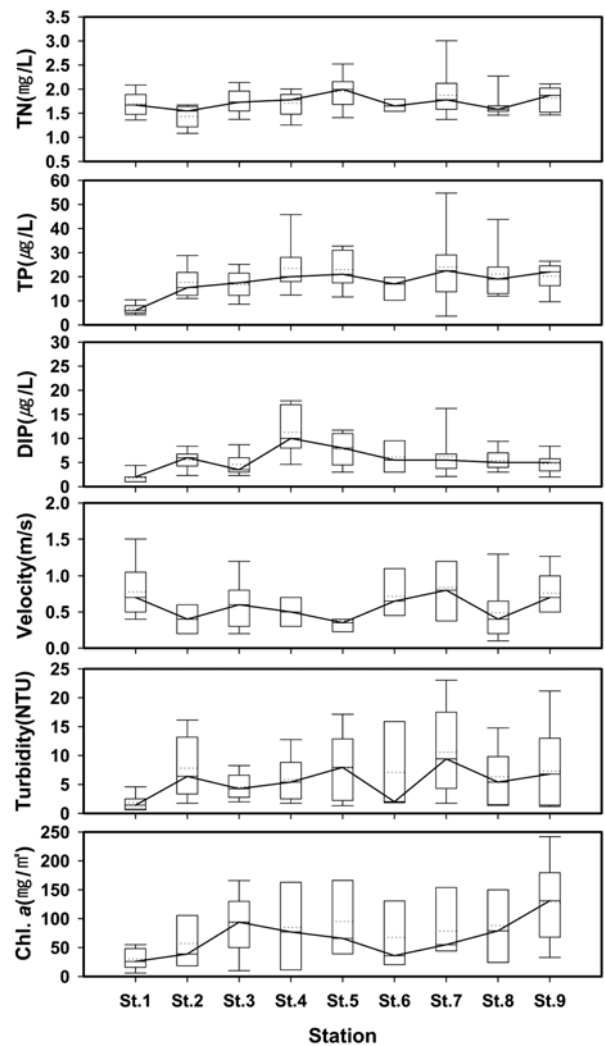


Fig. 3. Spatial fluctuations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), dissolved inorganic phosphorus (DIP) concentrations, velocity, turbidity and chlorophyll a concentrations of periphyton from March 2007 to February 2008. Solid line and dot line refer to median value and average value, respectively.

$55 \pm 62 \text{ mgChl.a/m}^2$)의 범위를 보였다(Fig. 3). 상류인 St.1과 St.2에서 낮은 농도(median $26 \pm 36 \text{ mgChl.a/m}^2$)를 보였고, 중류인 St.3의 높은 부착조류의 엽록소-a 농도는 하류로 가면서 점진적으로 감소하다가 하류구간인 St.7부터 다시 증가하였다.

부착조류의 엽록소-a 농도의 구간별 차이는 상류구간에 비해 하류구간에서 높았다($p < 0.05$). 상류구간에서 St.1은 낮은 탁도와 낮은 인의 농도 그리고 빠른 유속에 의해 부착조류의 성장이 제한된 것으로 보인다. 한편 St.2와 St.3은 모두 탁수의 영향을 받는 정점인데 St.2가 St.3에 비해 상대적으로 낮은 부착조류의 엽록소-a 농도를 보였다. 이는 두 정점이 뚜렷한 탁도의 차이를 보이고 하천 바닥의 조성에 차이를 보이기 때문으로 사료된다. St.2가 St.3에 비해 상대적으로 높은 탁도를 보였는데 이는 St.3으로 유입하는 지천(서화천)에 의한 희석효과 때문이다. 하상의 구조적인

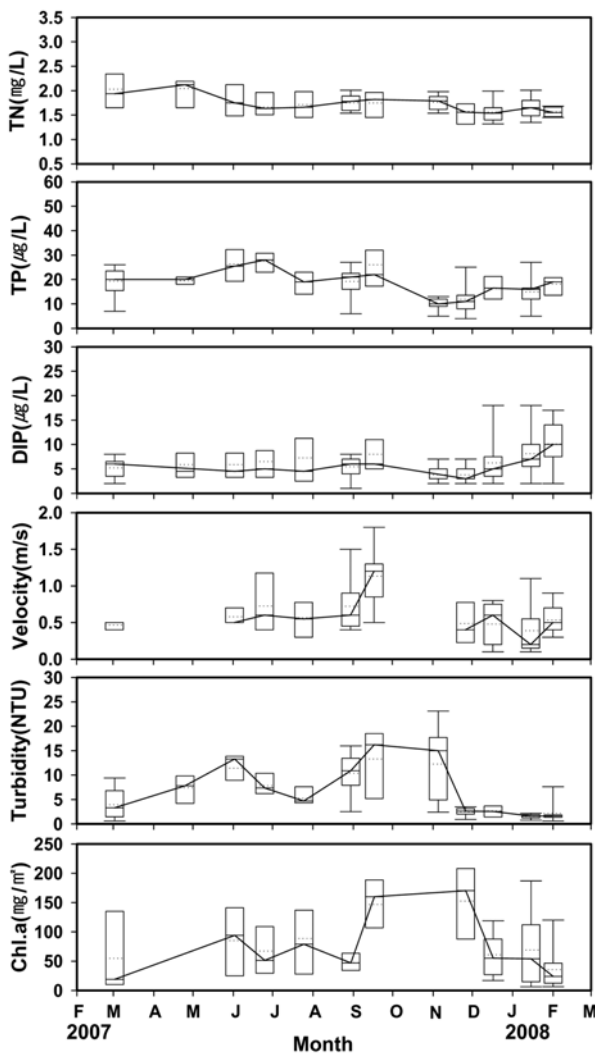


Fig. 4. Temporal fluctuations of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) concentrations, velocity, turbidity and chlorophyll a concentrations of periphyton from March 2007 to February 2008. Solid line and dot line refer to median value and average value, respectively. The range of data show all sampling dates.

차이에서는 St.2가 주로 모래 하상으로 곳곳에 cobble이 분포 하였고 St.3은 boulder와 cobble의 조성을 보였다. Francoeur 등(1998)은 부착조류의 엽록소-a 농도가 cobble(32~255 mm) 크기의 기질에 비해 boulder(>255 mm) 크기의 기질에서 더 높게 나타남을 보인 바 있다. St.3에 비해 St.2에서 부착조류의 엽록소-a 농도가 적은 이유는 탁수의 유입으로 인한 탁도의 증가와 하상바닥을 이동하는 토사의 영향(탈리 및 기질의 불안정 상태) 때문으로 사료된다(김지환 등, 2000; Francoeur and Biggs, 2006; Munn et al., 1989; Uehlinger et al., 2003).

중류구간(St.4~St.6)은 다른 구간에 비해 부착조류의 엽록소-a 농도가 감소하는 경향을 보였다. 총인과 부착조류의 엽록소-a 농도는 양의 상관을 갖는 것으로 알려져 있다 (Van Nieuwenhuysse and Jones, 1996). 중류구간은 생활하

수의 유입으로 인한 높은 DIP 농도의 영향을 받고 있는 구간이다. Figueroa-Nieves 등(2006)은 풍부한 영양염의 농도 (TP=0.09~0.122 mgP/L, NO₃-N=4.4~8.4 mgN/L)를 보이는 하천에서 부착조류의 엽록소-a 농도를 감소시키는 요인이 높은 탁도로 인한 수체의 빛 투과도의 감소가 원인임을 제시한 바가 있다. 영양염의 공급이 충분한 인북천의 중류구간에서 부착조류의 엽록소-a 농도가 낮은 이유가 탁수로 인한 수체의 빛투과도의 감소 때문으로 사료된다. 이 외에도 인북천의 중류구간에서 부착조류의 엽록소-a 농도를 감소시키는 다음과 같은 몇 가지 잠재적인 요인이 있을 수 있다. 첫 번째로 초식성 저서성대형무척추동물에 의한 섭식(김현주 등, 1997; Katano et al., 2007)이다. 저서성대형무척추동물에 의한 섭식은 부착조류의 엽록소-a 농도의 감소에 직접적인 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 특히 St.6은 낮은 탁도를 보임에도 불구하고 낮은 부착조류의 엽록소 a 농도를 보였다. 상류 지역에서 수중보로 인한 유속의 급격한 감소는 탁도 및 유사량을 감소시키는 역할을 하여 St.6는 상류로부터의 탁수의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 낮은 부착조류의 엽록소-a 농도는 포식자에 의한 섭식제거로 인한 영향으로 판단된다. Katano 등(2007)에 따르면 일년생이면서 이동성이 적은 날도래의 현존량의 증가는 부착조류의 현존량의 감소를 야기한다는 것을 보인 바 있다.

두 번째로 기질의 이동 및 토사의 이동은 부착조류를 제거시키는 물리적인 요인이 될 수 있다(김지환 등, 2000; Francoeur et al., 1998; Uehlinger et al., 2003). 그러나 하상의 조성에 있어서 뚜렷한 차이를 가지는 St.1(기반암과 boulder)과 St.2(모래와 cobble)에서는 부착조류의 엽록소-a 농도가 각각 26±18 mgChl.a/m²와 39±48 mgChl.a/m²로 큰 차이가 보이지 않았다. 하지만 유하기 쉬운 기질이 많은 하상의 특성을 보이는 중류구간에서는 부착조류의 엽록소-a 농도가 낮아질 수 있을 것으로 사료된다.

마지막으로 중류구간의 높은 DIP의 농도와 다른 구간에 비해 상대적으로 느린 유속 하에서 성장한 사상성부착조류는 유속과 같은 물리적인 영향으로 기질에서 탈리되기 쉽다. 빠른 유속은 부착조류가 성장하는데 제한적으로 작용할 수 있다(박구성 등, 2006).

하류구간(St.7~St.9)은 만대천으로부터의 탁수의 유입의 영향을 크게 받아 하상에 모래가 많이 있는 중류구간과는 달리 하상이 기반암과 boulder 그리고 cobble로 대부분 이루어져 있다. 따라서 기질의 이동에 의한 물리적인 영향을 거의 받지 않고 있다. 다만 탁도의 수준은 중류구간과 비슷하고 부착조류의 성장에 이용할 수 있는 영양염류를 중류구간으로부터 공급받고 있다. Burkholder and Coker(1991)는 실내 실험에서 clay에 의한 빛의 차단이 부착조류의 현존량의 감소를 가져올 수 있으나 인이 풍부한 clay에 노출시킨 부착조류의 현존량은 오히려 증가함을 보인 바 있다. 비록 DIP농도의 감소는 있으나 하류구간에서의 부착조류의 엽록소 a농도의 증가는 하상의 안정화와 중류구간으로부터의 영양염의 공급이 있기 때문으로 사료된다.

3.3. 계절에 따른 부착조류의 엽록소-a 농도의 변동

인북천에서 부착조류의 엽록소-a 농도의 계절변동은 11월 말에 최대값(median 197 ± 84 mgChl.a/m²)을 보였고 강우 이전에 작은 peak를 보인 반면에 8월의 강우기(median 47 ± 17 mgChl.a/m²)와 겨울에는 낮은 농도(median 44 ± 45 mgChl.a/m²)를 보였다(Fig. 4). 국외의 경우 주변식생이 발달하지 않은 하천에서 부착조류의 엽록소-a 농도는 수온이 높아지는 여름에 증가하고 수온이 낮은 겨울에 감소하는 계절적 변동을 가지는 것으로 보고된 바 있다(Munn et al., 1989). 국내의 경우 남부지역에서 주변식생의 영향을 받는 상류하천은 봄(6월)과 겨울(12월~1월)에 부착조류의 엽록소-a 농도가 높았는데, 이는 탁도가 낮고 하상으로 입사되는 빛의 양이 많기 때문이었다(김현주 등, 1997; 하경 등, 1997; Figueroa-Nieveys et al., 2006; Mosisch et al., 2001). 그리고 중북부 지역인 한탄강에서는 봄과 여름에 비해 가을과 겨울에 높은 부착조류의 엽록소-a 농도를 보인 바 있다(김용재, 2004). 따라서 국내 하천에서 부착조류의 엽록소-a 농도의 계절변동은 주변식생의 유무에 따라 계절적인 차이를 보이고 장마 시기에는 공통적으로 낮은 부착조류의 엽록소-a 농도를 보여, 몬순강우의 영향을 반영하였다.

한편, 황순진 등(2006)에 의하면 옥천천의 부착조류의 엽록소 a 농도의 계절변동에서 장마 이전보다 이후에 2.1배 높게 나타났는데, 이는 남조류와 녹조류의 증식으로 인한 영향이었다. 인북천 역시 장마 이전에 비해 장마 이후의 높은 부착조류의 엽록소 a 농도를 보였다.

인북천에서 8월에 100 mm 전후의 두 번의 집중 강우는 부착조류의 엽록소-a 농도의 급격한 감소를 야기하였다. 반면에 9월의 부착조류의 엽록소-a 농도는 급격한 증가를 보였는데, 다른 시기에 비해 유량의 증가, 빠른 유속 및 높은 탁도를 보였다. 빈번한 탁수의 유입은 하상의 기질 위에 토사를 침적시켜 부착조류가 안정적으로 기질에 부착하여 성장하는 것을 방해할 수 있다(Liboriussen et al., 2005). Barry 등(1999)은 기질에 쌓인 토사 위에 증식하는 부착조류는 기질에 직접 착상하는 부착조류에 비해 빠른 유속에 의해 쉽게 탈리될 수 있다고 하였다. 따라서 9월 중순의 부착조류의 엽록소-a 농도의 증가는 우선적으로 몬순강우로 인해 증가된 유속이 기질 위에 침적된 토사를 제거시켰을 것이고 이후 기질에 직접 착상하는 부착조류에 의한 성장의 영향으로 보인다(Barry et al., 1999; Francoeur and Biggs, 2006). Traaen and Lindström(1983)은 인공하천에서 부착조류의 현존량이 빠른 유속(0.8 m/s)에서도 감소되지 않는 것으로 보고한 바 있다. 더욱이 기질 위에 부착조류가 안정적으로 착상해 있을 경우 빠른 유속(1.37 m/s)에서 오히려 부착조류의 현존량은 최대가 된다고 한다(Abe et al., 2000). 이는 빠른 유속(median 1.2 ± 0.4 m/s)으로 부착조류가 영양염을 효과적으로 흡수할 수 있도록 표면적을 크게 해주기 때문이다(Welch et al., 1988). Horner 등 (1990)의 연구에 따르면 부착조류의 성장은 0.35 m/s 이상의 유속에서 더 빠르며 수체의 용존부기인의 농도가 약 15 µg/L 수준일 때 높은 흡수율을 보이는 것으로 보고한 바 있다.

인북천에서는 높은 수온을 보이는 6월과 7월에 부착조류의 성장이 예상되나 오히려 수온($4.5 \pm 0.7^\circ\text{C}$)이 낮은 11월 말에 부착조류의 엽록소-a 농도는 오히려 최대를 보였다. 이는 6월과 7월에는 저서성 대형무척추동물에 의한 섭식으로 부착조류의 엽록소-a 농도가 억제된 반면에 11월 말에는 저서성 대형무척추동물의 생체량의 감소로 인해 11월 말에 부착조류의 엽록소-a 농도의 증가가 있었을 것으로 사료된다. 광인실 등(2004)은 낮은 수온과 강우는 저서성 대형무척추동물의 생체량을 감소시키는 중요한 요인으로 제시한 바 있다. 또한 11월 말에는 원활한 영양염의 공급과 탁도(median 2.6 ± 0.8 NTU)의 감소로 인해 하상에 도달하는 빛의 입사량이 증가한 시기로 부착조류가 성장하기에 충분한 환경조건을 보였다.

12월 이후에는 하천의 수온의 감소에 따른 결빙현상과 이로 인한 하상으로 입사하는 빛의 차단 때문에 부착조류의 엽록소-a 농도는 급격히 감소하였다. 빛의 입사량의 감소와 더불어 수온의 감소는 부착조류의 증식을 억제하는 요인(Munn et al., 1989; Rosemond, 1994) 중 하나이다. 비록 인북천에서 12월 이후 영양염의 농도가 다른 시기에 비해 상당히 높게 나타났지만 낮은 수온($0.5 \pm 0.4^\circ\text{C}$) 상태는 부착조류의 세포 내 대사활성의 감소를 야기하였을 것으로 보인다(박구성 등, 2006).

인북천에서 지점 및 계절변동에 따른 부착조류의 엽록소-a 농도에 대한 연구결과에 따르면 상류하천에 위치하고 있으면서도 인위적인 교란의 영향(고령지 밭으로부터의 탁수 및 주거지로부터의 영양염의 유입)을 받고 있는 하천에서는 부착조류의 성장 때문에 미관상 좋지 않은 하천환경이 조성된다는 결과를 얻었다.

우리나라의 호수 및 하천은 거의 인이 제한영양소인 것으로 예측하고 있다(김범철 등 2007; An and Kim, 2003). An and Kim(2003)에 따르면, 유역으로부터 인에 비해 질소의 유입의 영향을 받는 하천에서의 N/P비는 16~86의 범위를 가지는 것으로 보고한 바 있다. 본 조사에서는 인북천의 N/P 원자비가 75~919(median=213)로 인 제한이었다. 특히 인북천의 상류정점인 가령천의 경우 393~919(median=552)의 범위를 보였다. 가령천을 제외한 정점들은 높은 N/P 원자비(median=200)를 보였다. 이는 인북천의 총질소 농도는 계절이나 구간에 상관없이 거의 일정하기 때문에 유역으로부터의 총인의 유입이 상대적으로 큰 영향을 미쳤다는 것을 시사한다. 부착조류의 성장 시기(3월~9월)에는 총인의 농도가 최대 54 µgP/L를 보이기도 했다.

국내 상류하천에서 부착조류의 엽록소-a 농도의 범위는 장전천에서 9.5 ± 3.0 mgChl.a/m²(김현주 등, 1997)와 부산과 경상남도의 경계지역 하천들에서 22.1 ± 11.5 mgChl.a/m²(하경 등, 1997)의 범위를 보임을 보고한 바 있다. 본 연구의 상류 지점으로 인위적인 영향이 거의 없는 가령천(St.1)의 경우 역시 26 ± 18 mgChl.a/m²를 보였다. 반면에 인북천에서 nuisance level을 초과하는 부착조류의 엽록소-a 농도의 지점 및 계절변동을 보면 중류구간과 하류구간에서 9월(median 160 ± 65 mgChl.a/m²)과 11월 말(median 197 ± 84 mgChl.a/m²)

이었다. 최근 국내 하천에서 nuisance level을 초과한 사례를 보면 신명선 등(2008)이 청계천(3~486 mgChl.a/m²)의 부착조류가 미관상 불쾌감을 줄 수 있는 부영양하천의 수준임을 보고하였으며, 김용재(2004)는 한탄강에서 최대 304 mgChl.a/m² 까지 보임을 보고한 바 있다. 이와 같은 결과는 국내 몇몇 하천에서 부착조류의 현존량이 nuisance level을 초과함을 암시하는 것이다.

4. 결론

인북천에서 부착조류의 엽록소-a 농도는 4~242 mgChl.a/m²(median 55±62 mgChl.a/m²)로 빈번하게 nuisance level를 보였다. 지점들 사이의 부착조류의 엽록소-a 농도의 비교에서 상류지점(St.1, St.2)는 중앙값으로 27±38 mgChl.a/m²의 범위로 다른 조사지점들에 비해 낮음을 알 수 있었다. 그리고 유역으로부터의 영양염류의 공급을 상대적으로 크게 받는 중류구간에서는 부착조류의 엽록소-a 농도가 높지 않았다. 부착조류의 엽록소-a 농도의 계절변동은 8월(median 47±17 mgChl.a/m²)에는 강우(90 mm 이상)로 인한 감소가 있었고 강우 이후 9월(median 160±65 mgChl.a/m²)과 11월 말(median 171±76 mgChl.a/m²)에는 뚜렷한 증가를 보였는데, 이들 시기에는 nuisance level을 초과하였다.

사 사

본 연구는 인제군의 지원에 의해 이루어졌으며, 이 논문 저자 중 이재용은 「2008년도 2단계 BK21사업」의 지원을 받았음.

참고문헌

곽인실, 송미영, 전태수(2004). 저서성 대형무척추동물의 자연적 교란에 대한 영향. *한국유수학회지*, **37**(1), pp. 87-95.
 김범철, 사승환, 김문숙, 이윤경, 김재구(2007). 국내 호수의 제한영양소와 하수처리장 방류수 인 기준 강화의 필요성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 512-517.
 김용재(2004). 한탄강의 돌 부착조류 군집의 시, 공간 동태. *Algae*, **19**(1), pp. 15-22.
 김지환, 이석준, 오희목(2000). 금강 부착조류 군집의 동태. *Algae*, **15**(4), pp. 287-297.
 김현주, 윤해순, 김진수, 김현우, 주기재(1997). 산지하천에서 빛과 초식에 의한 부착조류의 생체량 변화. *한국유수학회지*, **30**(4), pp. 385-392.
 박구성, 황순진, 김호섭, 공동수, 신재기(2006). 하수처리를 이용한 인공수로에서 사상성 부착조류의 성장에 영향을 미치는 요인들. *한국유수학회지*, **39**(1), pp. 100-109.
 신명선, 김범철, 김재구, 박미숙, 정성민, 장창원, 신윤근, 배연재(2008). 청계천의 수질과 부착조류의 계절적 변동. *한국하천호수학회지*, **41**(1), pp. 1-10.
 조경재(1994). 인공기질을 이용한 부착조류조사. *한국유수학회지*, **27**(1), pp. 47-57.
 최재신, 김한순, 강만도(1998). 신천의 부착 규조군집의 계

절적 동태. *한국유수학회지*, **31**(3), pp. 235-240.
 최철만, 박연규, 문성기(2004). 인공기질 부착조류에 의한 대천의 수질평가. *한국유수학회지*, **22**(1), pp. 242-245.
 하경, 박성배, 김현우, 김진수, 주기재(1997). 부산·경상남도의 상류하천의 물리·화학적 특성과 부착조류 생체량의 분포. *한국유수학회지*, **30**(4), pp. 393-403.
 황순진, 천세억, 이재안, 이흥수, 이해근, 신재기(2006). 하천 생태계에서 부착조류 군집의 시공간적 분포 비교. *공동추계학술발표회논문집*, 대한상수도학회·한국물환경학회, pp. 470-474.
 Abe, S. I., Nagumo, T., and Tanaka, J. (2000). Effects of current on the development of loosely and tightly attached layers in periphyton communities. *Phycological Research*, **48**, pp. 261-265.
 An, K. G. and Kim, D. S. (2003). Response of reservoir water quality to nutrient inputs from streams and in-lake fish farms. *Water, Air, and Soil Pollution*, **149**, pp. 27-49.
 APHA (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th eds. American Public Health Association, Washington, DC., USA.
 Barry, J. F. B., Biggs, A., Robert, A. S., and Maurice, J. D. (1999). Velocity and sediment disturbance of periphyton in headwater streams: biomass and metabolism. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, **18**, pp. 222-241.
 Biggs, B. J. F., Goring, D. G., and Nikora, V. I. (1998). Subsidy and stress responses of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form. *J. Phycol.*, **34**, pp. 598-607.
 Burkholder, J. M. and Cuker, B. E. (1991). Response of periphyton communities to cray and phosphate loading in a shallow reservoir. *J. Phycol.*, **27**, pp. 373-384.
 Dodds, W. K., Smith, V. H., and Zander, B. (1997). Developing nutrient targets to control benthic chlorophyll levels in streams: a case study of the Clark Fork River. *Water Res.*, **31**, pp. 1738-1750.
 Figueroa-Nieves, D., Royer, T. V., and David, M. B. (2006). Controls on chlorophyll-a in nutrient-rich agricultural streams in Illinois, USA. *Hydrobiologia*, **568**, pp. 287-298.
 Francoeur, S. N. and Biggs, B. J. F. (2006). Short-term effects of elevated velocity and sediment abrasion on benthic algal communities. *Hydrobiologia*, **561**, pp. 59-69.
 Francoeur, S. N., Biggs, B. J. F., and Lowe, R. L. (1998). Microform bed clusters as refugia for periphyton in a flood-prone headwater stream. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **32**, pp. 363-374.
 Hill, B. H., Herlihy, A. T., Kaufmann, P. R., DeCelles, S. J., and Vander Borgh, M. A. (2003). Assessment of streams of the eastern United States using a periphyton index of biotic integrity. *Ecological Indicators*, **2**, pp. 325-338.
 Horner, R. R., Welch, E. B., Seeley, M. R., and Jacoby, J. M. (1990). Responses of periphyton to changes in cuReent velocity, suspended sediment and phosphorus concentration. *Freshwater Biology*, **24**, pp. 215-232.
 Katano, I., Doi, H., Houki, A., and Isobel, Y. (2007). Changes in periphyton abundance and community structure with the dispersal of a caddisfly grazer, *Micrasema quadriloba*. *Limnology*, **8**, pp. 219-226.
 Kjeldsen, K., Iversen, T. M., Thorup, J., and Winding, T.

- (1998). Benthic algal biomass in an unshaded first-order lowland stream: distribution and regulation. *Hydrobiology*, **377**, pp. 107-122.
- Lee, Y. K., Shin, M. S., Jung, Y. K., Jang, C. W., and Kim, B. C. (2008). Comparison of phytoplankton chlorophyll-a extracted with different solvents. *Korean Journal of Limnology*, **41**(4), pp. 485-489.
- Liboriussen, L., Jeppesen, E., Bramm, M. E., and Lassen, M. F. (2005). Periphyton-macroinvertebrate interactions in light and fish manipulated enclosures in a clear and a turbid shallow lake. *Aquatic Ecology*, **39**, pp. 23-39.
- Mosisch, T. D., Bunn, S. E., and Davies, P. M. (2001). The relative importance of shading and nutrients on algal production in subtropical streams. *Freshwater Biology*, **46**, pp. 1269-1278.
- Munn, M. D., Osborne, L. L., and Wiley, M. J. (1989). Factors influencing periphyton growth in agricultural streams of Central Illinois. *Hydrobiologia*, **174**, pp. 89-97.
- Rosemond, A. D. (1994). Multiple factors limit seasonal variation in periphyton in a forest stream. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, **13**, pp. 333-344.
- Taylor, S. L., Roberts, S. C., Walsh, C. J., and Hatt, B. E. (2004). Catchment urbanization and increased benthic algal biomass in streams: linking mechanisms to management. *Freshwater Biology*, **49**, pp. 835-851.
- Tett, P., Gallegos, C., Kelly, M. G., Hornberger, G. M., and Cosby, B. J. (1978). Relationships among substrate, flow, and benthic microalgal pigment density in the Mechums River, Virginia. *Limnol. Oceanogr.*, **23**(4), pp. 785-797.
- Traaen, T. S. and Lindström, E. A. (1983). Influence of current velocity on periphyton distribution, In: Periphyton of Freshwater Ecosystems, R. G. Wetzel (ed.), *Developments in Hydrobiology*, **17**, pp. 97-99.
- Uehlinger, U., Kawecka, B., and Robinson, C. T. (2003). Effects of experimental floods on periphyton and stream metabolism below a high dam in the Swiss Alps (River Spöl). *Aquat. Sci.*, **65**, pp. 199-209.
- Van Nieuwenhuysse, E. E. and Jones, J. R. (1996). Phosphorus-chlorophyll relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area. *Can. J. Fish. Aquatic. Sci.*, **53**, pp. 99-105.
- Welch, E. B., Jacoby, J. M., Honer, R. R., and Seeley, M. R. (1988). Nuisance biomass levels of periphytic algae in streams. *Hydrobiologia*, **157**, pp. 161-168.