

유역토지이용에 따른 북한강 상류 수계 부착조류에 대한 연구

강 정 임* / 이 상 돈**†

Ecological Study of *Periphytons* Along the Buk-han River Due To the Influence of Land Use Patterns

Jung In Kang* / Sang-Don Lee**†

요약 : 본 연구는 소양호 상류 유역의 지류 하천을 대상으로 부착조류의 생물학적 지수의 수질 대표성을 검토하였으며 총체적인 수질환경평가를 시도하였다. 북한강 상류의 4개 수계에 대한 하천(북천-한계천, 내린천, 인북천, 소양강)에서 배수구역을 중심으로 총 9개 지점을 조사 지점으로 선정하여 현장조사를 하였다. 하천 주변의 토지 이용은 농경지중심과 임야 중심으로 뚜렷한 분포차이를 보였고, 소양강 상류 하천 유역은, 농경지 중심 지역에서는 오염된 수역의 대표종인 남조강이 높은 출현률을 보였고, 임야 중심 지역에서는 남조강, 녹조강, 규조강이 비교적 고르게 출현하였다. 따라서 오염원의 분포와 부착조류의 현존량 및 군집 분포는 밀접한 연관이 있으며, BOD, SS 그리고 종다양도, 균등도의 생물지수들은 조사지점 대부분에서 유사한 값을 보였으며, 국내 하천에서 소양강 상류 하천 조사 지점의 하천 수질에 대해 전체적으로 빈부수성이며 양호하다는 단편적인 결과를 나타내었다. 따라서 하천수질과 영양 상태에 대한 평가에 사용되는 기존 생물지수 및 하천등급판정기준은 수체 내 영양 염류에 민감하여 부영양화 판정에 효과적인 부착조류의 생지화학적 특성을 충분히 활용하지 못하였다.

핵심용어 : 소양강, 하천수질환경평가, 영양염류, 생물지수, 하천등급판정기준

Abstract : This study addresses the periphytons along the Bukhan river stream and examines the biological indices that represents the river and estimate water quality assessment. Bukhan river in 4 major watershed streams (Bukchon-Hangeychon, Narinchon, Inbukchon, and Soyang river) was selected in 9 points. Land use pattern along the streams showed marked differenced in agriculture areas and forest areas. Lower Soyang streams showed blue-green algae and green algae also appeared in evenly pattern. Thus, the pollution source, biomass and distribution are somewhat correlated, and BOD, SS, biodiversity, and evenness showed a similar pattern. This situation can lead to conclusion of oligotrophic lake with good condition. Therefore, current biological index and is not so desirable for stream degree standard water quality and nutrient level.

Keywords : So-yang river, Stream water-environmental assessment, nutrients, biological index, stream-water grade standard

1. 서 론

하천에서 부착조류의 생지화학적 특성은 오염원의 특성 및 수질의 상태를 반영하는 중요한 지표가 된다. 수환경 평가에 보편적으로 사용되는 BOD, T-N와 같은 이화학적 지수는 측정 시기에

의존하여 실제 환경 상태와 불일치하는 경우가 있으며, 생물지수는 특정 오염원에 대한 생물의 반응을 파악하는 데 한정되는 분석 방법으로 인해 광범위한 활용이 어렵다(이인규, 2001; Kelly, 2003). 부착조류는 하천의 물질 순환에 크게 관여하여 영양염의 이용도가 크다. 또한 뚜렷한 계

† Corresponding author : lsd@ewha.ac.kr

* 이화여자대학교 환경공학과(Dept of Environmental Sciences & Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University)

** 이화여자대학교 환경공학과(Dept of Environmental Sciences & Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University)

절적 분포 특성을 보이기 때문에 하천 수질 평가에 있어 그 활용도가 높다(Kelly and Whitton, 1995 ; 김백호와 한명수, 2005). 부착조류는 일반적으로 유속이 빠르고 상대적으로 청정한 하천의 상류 지역에 비해 유속이 느리고 오염원의 영향을 많이 받는 하천의 하류지역에서 더 많이 서식하는 경향을 보이나, 반면 조사 지점 가운데 상류 하천 유역인 인북천 본류와 내린천 상류 유역의 부착조류의 현존량은 상대적으로 높게 나타나 일반적인 경향과 다른 결과를 보였다. 이는 임야 중심으로 구성되는 일반적인 하천의 상류 유역 현황과 달리 고랭지 농업이 활발히 이루어지고 있는 소양호 상류하천인 인북천과 내린천 유역의 특성에 기인한 것으로 판단되며, 이에 따라 토지 이용 현황에 따라 부착조류의 현존량이 차이를 보인 것으로 예상된다(Salomoni et al. 2006).

김범철 외(1989)는 소양호의 부영양화에 따른 부착조류 군집 변동 연구를 통해 하천 및 호소의 부영양화가 심해질수록 부착조류 군집 가운데 남조강이 우점하는 경향을 보인다는 결과를 보였다. 일반적으로 물리·화학적 환경이 열악한 곳에서는 일부종이 우점하는 경향이 있다. 우점도 지수는 0-1의 값을 가지며(McNaughton and Wolf, 1970), 종 다양성은 우점도와 반대로 종 구성의 균일한 정도를 나타내는 지수로 부착조류의 우점도가 높으며 종 다양성 지수가 낮은 하천은 수질 및 수변 환경 상태가 상대적으로 양호하지 못하다고 추측할 수 있다(이인규, 2001).

국내의 부착조류를 활용한 수질 환경 연구는 부착조류의 계절적 변동(박명환 외, 2007), 부착조류 현존량의 시·공간적 변동(최재신 외, 1998; Welch et al. 1998), 유기오탁지수에 의한 수질평가(Kelly, 2003; 정준 외, 1992)와 같이 생물종과 현존량에 의존한 연구가 주를 이루었다. Kelly(2003)과 김범철(1997)은 이와 같은 결과의 신뢰도를 보완하기 위해 각각 5년(1993-1998)에서 10년(1984-1990) 이상 같은 지역에 대해 반복적인 실험을 시행하여 자료를 축적하여 신뢰도를 높였다. 장기적인 반복을 통한 자료 축적으로

부착조류 군집 특성 및 수치 변동 경향 분석은 정확성을 높일 수 있는 가장 단순한 방법이나 인력과 시간에 따른 비용 때문에 큰 강이나 호소를 중심으로 단편적으로 수행되고 있다(신명선 외, 2008). 반면 지류 하천들은 큰 강으로 유입하며 수질을 악화하고 있음에도 불구하고, 시간과 측정 비용에 따른 제한요소들로 인해 측정 대상으로 주목받지 못하고 있어(정준 외, 1992), 부영양화, 탁도 발생 등으로 위협받고 있다.

본 연구는 소양호 상류 유역의 지류 하천을 대상으로 부착조류의 생물학적 지수의 수질 대표성을 검토하였으며 총체적인 수질환경평가를 시도하였다. 북한강 상류의 4개 수계에 대한 하천(북천-한계천, 내린천, 인북천, 소양강)에서 배수구역을 중심으로 총 9개 지점을 조사 지점으로 선정하여 현장조사를 수행하고 지역별 부착조류의 종구성 및 수질환경평가 결과를 비교하고자 한다.

2. 연구 지역 및 방법

2.1. 연구지역

소양강 댐의 총 유역 면적은 269,43km²으로 2개의 중권역(소양강 중권역: 단위 면적-1763.13km², 인북천 중권역: 단위 면적-931.22km²)과 11개의 단위유역으로 구성되어 있다(환경부, 2008). 소양강은 북한강 제1의 지류로 인제군 서화면에서 발원한 인제천이 인북천이라는 이름으로 남류하다가 설악산에서 발원한 북천과 인제읍에서 합쳐진 후 홍천군 내면에서 발원한 내린천과 합류되어 인제군과 춘천시에 걸치는 소양호로 유입된다.

북천 및 한계천이 인북천과 합류는 인북천 하류이자 소양강 상류 유역은 인구가 희박한 북쪽 산간 지역에 위치한다. 배수지 면적은 약 2,700km²이며 소양호 유역의 토지이용 현황을 살펴보면,

임야(2,215.6km²) >밭(110.6km²) >논(28.1km²) >대지(27.0)km² >기타(133.0km²)

로 임야가 전체 유역의 88.2%, 밭이 4.4%를 차지하고 있다. 소양호 상류 유역에서 인북천 상류

지역과 내린천 상류 지역의 두 곳이 고랭지 농업을 중심으로 오염의 근원지로 주목받고 있다(최지용과 박연상, 2008).

서화천에서 내려오는 인북천의 경사는 상당히 높고 하상은 돌과 자갈로 덮여 있으며, 부착조류가 번무하는 전형적인 소하천이다. 인북천 상류 유역 면적은 478.5km² (건설교통부 2003)이며, 고랭지 채소밭이 밭 경지면적의 37%를 차지하는 가운데 유역의 161.8km²정도가 경작지로 이용되고 있다. 인북천 최상류 지역인 서화면 밭의 면적은 7.08km², 논 면적은 3.74km²이며, 하천 주변으로 많은 농경지가 발달해 있으나 주변에 유입을 차단하는 시설이 제대로 이루어 있지 않은 실정이다. 이로 인해 강우 시 하천으로 인, 질소 등과 같은 비료성분 뿐 만 아니라 부유토사가 인북천의 중류 지점으로 직접 유입되고 있는 실정이다(전만

식, 2008). 또한 경작 활동 외에도, 집경 지역의 특성상 많은 군부대가 상주해 있어, 이러한 군부대의 특성상 하수처리에 어려움이 있고 실제로 상당한 하수가 올바른 처리가 되지 못한 채 방류되고 있는 것으로 확인됐다(김범철, 1989).

내린천은 소양호의 주요 유입지천 가운데 하나로 인북천과 함께 소양강으로 흘러들어가며, 소양호 상류 유역 전체 면적의 72.9%를 차지하고 있다(환경부, 2008). 내린천 대부분 임야를 경작해 고랭지 채소밭으로 이용하고 있어 경작 지역으로부터 유출되는 토사가 하천에서 퇴적되거나 하류로 끊임없이 이동하여 결국 소양호로 유입될 수 있다는 문제점을 가지고 있다(전만식, 2008). 인북천과 북천, 내린천 그리고 소양호 유역 면적의 토지 이용 현황을 간략하게 표로 나타낸 것이다 (Table 1).

Table 1. 연구지역의 토지이용 패턴

	Forest	Streamside	Rice paddy	Field	Urban	Bare	Total(%)
Inbuk Stream	91.8	0.8	3.4	2.9	1.1	0.1	100
Buk Stream	91.6	0.0	0.4	7.1	0.8	0.1	100
Nerin Stream	94.2	0.0	0.1	5.6	0.2	0.0	100
Soyang River	90.7	0.2	1.3	6.8	1.0	0.1	100

* Source : survey project of environment of the Han-river water system, 2003

연구 대상 지역은 조사 지점은 9곳으로 인북천 본류 5지점, 인북천 하류에서 합쳐지는 북천의 두 지점과 소양강 한 지점, 그리고 내린천 한 지점으로 하였다. 이러한 농경 중심지 뿐 아니라 임야 중심지를 포함하고 있어, 토지 이용의 차이에 따른 수질 특성과 부착조류의 반응을 비교할 수 있다.

내린천과 인북천 유역에서 농경지의 집중 분포로 인한 오염원의 영향은 분명하지만, 실제 하천 수질 평가 시 일반적으로 반영되어 오던 BOD, SS 등의 하천수질환경기준에 따르면, 조사지역의 수질 특성은 1등급에 해당하여 기준치에 대해 아무런 문제를 갖지 않는 것으로 판단되어 왔다(국

립환경과학원, 2008). 조사 대상 지역은 지속적으로 증가하는 고랭지 농업 등의 개발 압력을 비롯한 경작지와 군부대 등으로 인해 수질 환경의 변화가 클 것으로 예상되는 지역으로 경작지의 급증으로 인한 수질 환경의 피해정도를 정확히 가늠하여 수생태계에 미칠 수 있는 부정적 영향을 줄이고, 미리 환경 사고를 예방할 수 있는 구체적인 방안이 마련되어야 할 것으로 보인다.

2.2. 연구 대상종

2.2.1. 부착조류의 특성

본 연구의 대상인 부착조류는 하천생태계에서

식물플랑크톤 및 수생식물과 더불어 중요한 유기물 생산자이다. 부착조류는 돌에 부착하여 서식하는 조류로써 형상 및 색상에 따라 크게 남조류(Cyanophyceae), 규조류(Bacillariophyceae), 녹조류(Chlorophyceae), 유글레나류(Euglenophyceae)로 나눌 수 있다. 또한 수심이 얇은 계류 또는 하천에서는 부유조류인 식물플랑크톤보다 돌부착조류(epolithic algae)의 생물량과 물질 생산성이 더 높아 하천의 물질대사 측면에서 기여도가 크다(Welch et al. 1998). 돌부착조류는 수중의 영양염 이용도가 클 뿐만 아니라 유기물의 중요성분으로 저서동물의 먹이가 되는 등 하천생태계의 물질대사 및 영양단계에서 차지하는 비중이 매우 크다(Watanabe et al. 1986). 부착조류는 돌표면에 장기간 부착함으로써 이동성이 없고 유기물 오염에도 민감하게 반응하며 어떠한 환경에서도 쉽게 관찰되기 때문에 생물조사에 매우 유리한 조건을 갖추고 있어서 전 세계적으로 그 생물량이나 종조성으로 수질을 평가하는 지표생물로 활용되고 있으며(환경부, 2009), 특히 본 연구 대상지역인 소양강 상류 지류하천과 같은 우리나라의 지류 하천의 바닥은 돌 또는 자갈로 이루어져 있어 부착조류가 풍부하기 때문에 그 활용 가능성이 매우 높다.

기존의 부착조류의 군집 분석은 특정 수질 특성(영양염류, pH, 염도 등)에 대한 평가에만 제한적으로 활용되어 왔지만(Salomoni et al. 2006), 본 연구에서 소양강 상류 하천 유역의 농경지 발달에 의한 외부 오염원 및 영양염류의 유입을 예측하기 위해 부착조류의 군집 특성을 관련지어 해석하는 것과 같은 총체적인 방식의 연구가 주목되고 있다. Leland and Porter(2000)는 부착조류의 분포 특성은 수질 특성보다 농경지의 분포 경향과 더 유의미한 관계를 가지고 있는 연구 결과를 발표하였고, Watanabe and Asai(1999) 또한 하천 상류 유역에서 농경지의 점유율이 규조류 군집 분포와 상당한 관련성을 보인다고 하였다. 비록 부착조류의 군집은 특정 수질 특성과 관련한 결과일 수 있지만, 위의 연구 결과들은 토지 이용 현황이라는 물리적인 환경 요소가 부착조류 군집 특성을

결정짓는 중요한 요소가 될 수 있다는 가능성을 제시하고 있다(Newall and Walsh, 2005).

이와 같이 부착조류는 고착생물이라는 점에서 그 유역의 상황과 수질 환경에 대한 누적된 정보를 제공한다는 장점을 가지므로 하천의 건강성을 평가하기 위한 생물학적 지표로서 활용되고 있다.

2.2.2. 부착조류 채집 및 생물지수 산출

부착조류는 물속의 돌이나 수생식물의 잎 등에 부착해서 사는 담수조류로 본 연구에서는 나무의 줄기나 잎, 암석, 돌 등에 생육하는 기초조류를 채집 대상으로 한다. 부착조류가 서식하는 기질은 하천의 수표면 가까이에서 채집을 하며, 물결이 40cm/s 속도로 잔잔한 곳에서 30cm 깊이에 있는 수표면과 평평한 돌을 선택하여, 평평한 부분에서 샘플을 채취한다. 지름 10cm 정도의 자갈을 주로 선택하여 현장에서 바로 칫솔로 부착조류를 부드럽게 긁어내어 일정한 면적(5x5cm)에 대응하는 필요량을 폴리에틸렌 Bottle에 담아서 정량분석을 위해서는 Lugol 용액(최종농도, 1%)으로 고정하고, 정성분석을 위해서는 중성 포르말린으로 고정하여 실험실로 운반한다. 정성분석은 고배율 현미경을 이용하여 규조, 남조 및 녹조류로 구별하였고, 정량분석은 Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 계수하였으며, 조사지점 별로 동일한 면적(5x5cm)당 환산계수를 이용하여 계산하였다(Watanabe and Asai, 1999).

종동정 및 계수 결과를 바탕으로 일반적으로 수질 평가에 사용되는 지수를 산출하여, 보편적인 부착조류 분포 특성을 바탕으로 조사 지역 수질에 대한 대략적인 평가를 할 수 있다. 각 생물 지수에 대한 산출식과 일반적인 해석은 다음과 같다. 부착조류의 우점종은 500세포 이상을 계수한 다음 상대빈도를 산출하고 평균 상대빈도를 상회하는 종 가운데 가장 높은 상대빈도를 나타내는 종으로 선정하였고, 이를 근거로 우점도 지수(Simson, 1949)와 다양도 지수(Weaver and Shannon, 1949), 균등도 지수(Pielou, 1966)를 산출하여 군집 구조를 분석하였다. 우점도는 중수

와 개체수 사이에서 종의 우점 정도를 나타내는 지수로, 식생 군집이 다양한 종에 의해 점유되면 어느 특정 종의 우점도는 낮아진다. 군집의 우점도 지수는 심슨 지수를 사용하는데, 식은 다음과 같다.

$$D' = \sum (P_i)^2 \quad (2.1)$$

P_i = i번째에 속하는 개체수의 비율(n_i/N)로 계산

균등도는 군집 내 종들의 개체수 분포를 나타내는 지수로, 종들이 얼마나 고르게 분포하는가를 나타내는 지표이며 군집 내 종 구성의 균일한 정도를 나타낸다. 결과적으로 균등도는 최대 다양성 지수에 대한 실제 다양성지수의 비율로 산출된다.

$$E' = D' / \log(S) \quad (2.2)$$

D': 우점도 지수, S: 총 종수

생물 군집 내 어떤 종을 무작위로 추출할 경우 한번 선택한 종이 다시 선택될 확률은, 종 다양성이 높을수록 희박해지며 선택의 불확실성이 증가한다. 종 다양도 지수는 이러한 가정에 근거하여 산출하는 것으로 식은 다음과 같다.

$$H' = -\sum P_i(\log P_i) \quad (2.3)$$

N: 군집 내의 전체 개체수, $P_i = (n_i/N)$: 각 종의 개체수

종 다양성은 군집 내 종의 수와 개체수 분포를 동시적으로 고려하는 생물지수로서 종 다양성이 높을수록 우점도는 낮아진다. 종 다양성과 수는 분명히 구분되는 것이며, 군집의 종구성은 단순히 숫자로 나타내지는 것이 아니라 얼마나 다양하고 고르게 존재하는가가 중요하다.

부착조류 전체 군집을 이용한 생물 지수 외에도, 빈부수성 수역에서 강부수성 수역 이르기까지

광범위한 유기 오염 수역에서 분포하는 경향을 갖는(Watanabe et al. 1986) 규조류 군집을 이용한 DAIPo지수(유기물 오타지수)와 TDI지수(영양염 지수)를 산출하였다. DAIPo지수는 규조류와 수환경의 일반적인 지표로 사용되어온 BOD COD 등의 값과의 상관관계를 조사해서 이들을 호오염성종(Saprophylic), 호청수성종(Saproxenous), 광적응종(Indifferent)으로 분류하였고, 이들 각 군의 상대빈도에 의해서 수질을 평가하는 군집 분석 평가 기준이 될 수 있다. 각 군의 상대빈도는 다음의 식에 적용되어 유기물 오타지수가 산출되게 된다.

$$DAIPo = 50 + 0.5 * (\sum X_i - \sum S_i) \quad (2.4)$$

$\sum X_i$: 민감종의 %상대 풍부도 합

$\sum S_i$: 내성종의 %상대 풍부도 합

다음으로 규조류 군집에 대한 영양지수(TDI)를 구하기 위해서는 동정 및 계수된 부착조류 종의 목록에 대해 Kelly and Whitton(1995)에 의해 제시된 부착조류의 민감도와 지표값에 근거하여, 밀도와 함께 다음의 식을 통해 계산한다. WMS는 가중평균민감도이며 이를 먼저 산정한 후에 최종 TDI를 구하게 된다.

$$TDI = (WMS * 25) - 25 \quad (2.5)$$

WMS: weighted mean sensibility

$$WMS = \sum A_j \cdot S_j \cdot V_j / \sum A_j \cdot V_j$$

A_j : 샘플 내 종의 상대 풍부도(%) 혹은 밀도 (cells/cm²)

V_j : 샘플 내 각 종의 지표값 ($1 < V_j < 3$)

S_j : 종의 오염 민감도 ($1 < S_j < 5$)

3. 연구 결과

3.1. 생물지수의 수질환경대표성 검토

생물지수를 구하기 위한 기초 자료로써 부착조류를 계수하였고, 군집별 분포를 살펴보았으며, 조사 지점 별로 자세한 속과 종 구성을 확인하였다. 본 연구에서 인북천 하류 지역을 대표적으로 설명하고자 선정된 한계천(HGC)과 북천(BUK), 소양호(SYR) 유역의 부착조류는 대체적으로 적은 현존량(평균=112,959cell/cm²)을 나타내었다(Table 2). 반면, 인북천 상류 지역을 대표하는 조사지점(IBC_{1,2,3,4,5})에서는 부착조류의 현존량이 상대적으로 높았다(평균=208,184cell/cm²). 상류하천에서는 수심이 얕고 바닥에 자갈이 깔려 있어서 부착조류가 많고, 하류에서는 갈수기에 유속이 느려져서 호수에서처럼 플랑크톤이 많이 증

식한다는 하천의 일반적인 특성을 보여주었다. 또한 내린천(NER) 지역의 높은 부착조류 현존량과 눈에 띄게 높은 남조강의 현존량(내린천의 전체 현존량 중 남조강의 비율=98%)은 내린천 유역의 유난히 높은 고랭지 농업과 유의미한 관계가 있는 것으로 판단된다. 도시화된 지역과 고랭지 점유율이 높은 곳의 하천에서 부착조류는 과잉 번식하여 서식처를 훼손하고 미관상 불쾌감을 주게 되며, 본 연구의 대상인 인북천 본류는 상류 하천에 위치하고 있으면서도 인위적인 오염(농경지 및 주거지로부터의 영양염의 유입)에 의해 부영양화와 같은 수질악화 현상이 나타나고 있어, 부착조류의 현존량 분포에 영향을 준다. 하천 유역에 농경지를 비롯한 오염원이 영향이 증가하면 부착조류의 현존량은 이와 비례 관계를 가지며, 일부 군집이나 조류종이 우점하는 경향이 큰 것으로 나타났다.

Table 2. 각 연구지역의 *Periphyton*의 생물중량

Stream	Standing crops							
	Bacillariophyceae		Chlorophyceae		Cyanophyceae		Euglenophyceae	
	cells/cm ²	%	cells/cm ²	%	cells/cm ²	%	cells/cm ²	%
HGC	23,438	51.9	12,626	23.1	13,688	25.0	0	0
BUK	43,700	41.6	47,400	45.1	14,000	13.3	0	0
SYR	61,372	34.3	89,512	50.0	28,140	15.7	0	0
NER	2,640	0.9	12,040	0.1	266,640	98.9	0	0
IBC-1	63,280	31.1	53,460	10.4	40,740	35.1	0	0
IBC-2	63,756	23.6	133,760	19.8	152,460	56.5	198	0
IBC-3	34,476	33.7	29,988	29.3	37,944	37.1	0	0
IBC-4	139,894	44.4	108,254	34.3	67,122	21.3	0	0
IBC-5	73,720	54.5	133,760	56.4	29,830	12.6	0	0
mean	506,276	35.1	620,800	29.8	650,564	35.1	198	0.0

(HGC-한계천, BUK-북천, IBC-인북천 본류, NER-내린천, SYR-소양강)

본 연구에서는 부착조류 전체 군집을 이용한 생물 지수 외에도, 빈부수성 수역에서 강부수성

수역 이르기까지 광범위한 유기 오염 수역에서 분포하는 경향을 갖는(Watanabe and Asai, 1999)

규조류 군집을 이용한 DAIPo지수(유기물 오탁지수)와 TDI지수(영양염 지수)를 산출하였다. 조사 지점을 대상으로 유기물 오염 지수(DAIPo)와 영양염 지수(TDI)를 산출한 결과 지역별 또는 수계별 뚜렷한 차이를 보이지 않았다(Table 3).

유기물 오염 지수의 범위는 0~100이며, 하천의 오염 상태가 양호할수록 100에 가까운 값을 보인다. TDI지수(영양염 지수)는 중의 민감도와 가중치를 이용하는 측면에서 유기물 오염 지수와 비슷하지만 영양염류의 영향을 반영한다는 차이를 갖는다. 또한 범위는 0~100로 유기물 오염 지수와 같지만 100은 수체의 부영양 정도가 심각한

것을 나타낸다(Kelly and Whitton, 1995). 이와 같은 생물 지수 결과와 조사된 이화학적 지수 수치를 바탕으로 하천의 수질 환경 상태를 등급으로 판단하기로 하며, 기준은 다음 두 가지 수질 오염도 판단 기준에 따른다. 유기물 오염 지수와 BOD의 상관성에 의한 부영양화 정도의 관계성 기준과 유기물 오염 지수와 영양염 지수의 상관성을 바탕으로 하천 환경 상태의 등급을 구분 짓는 기준(Kelly and Whitton, 1995)은 국외에서 부착 규조류를 활용해 하천 및 호소의 부영양화 진행 정도를 평가하기 위해 정립된 기준으로 국내에서도 활용되고 있다.

Table 3. 조사지점 별 규조류 군집 내에서의 호청수종(Saproxenous), 호오탁성종(Saprophilous), 광적응종(Indifferent)의 출현종수

Species \ Sites	HGC	BUK	SYR	NER	IBC				
					1	2	3	4	5
Saprophilous	7	7	5	6	6	5	5	6	6
Saproxenous	3	3	1	2	1	3	3	4	3
Indifferent	8	10	10	5	8	6	6	5	7
Sum	18	20	16	13	15	14	14	15	16

(HGC-한계천, BUK-북천, IBC-인북천 분류, NER-내린천, SYR-소양강)

3.2. 기존 하천수질환경지수에 따른 소양강 상류 하천 수질환경평가

3.2.1. 소양호 상류하천의 부착조류 군집 변동

소양호 상류하천에서 부착조류의 현존량은 인북천 상류 지역(인북천 분류: IBC1-5)과 인북천 하류 지역(HGC-한계천, BUK-북천) 간의 현저한 차이를 보였다. 내린천 상류(NER) 지역은 다른 지역들에 비해 현존량이 높았고, 눈에 띄게 높은 남조강의 현존량(내린천의 전체 현존량 중 남조강의 비율=98%)이 특징적으로 나타났다(Table 3).

조사 지점 별 우점군집과 우점종의 현황을 보면, 인북천 하류 지역(HGC, BUK, SYR)에 비해 인북천 상류 지역(IBC_{1,2,3,4,5})에서 30%가 넘는 특

정 종에 의한 높은 우점율을 보였다(Table 4). 또한 그 중 남세균에 속하는 종(*Oscillatoria* sp. *Oscillatoria tenuis*)의 50%를 넘는 우점 현상이 내린천 상류지역과 인북천 상류지역에서 나타났다. 특히 내린천에서는 *Oscillatoria* sp.가 85%를 웃도는 우점율을 보이면서 단연 우세하는 것을 볼 수 있었다. 반면 북천과 한계천에서는 우점현상에 미미하게 나타났으며, 뚜렷한 분포 특성을 보이는 군집이나 생물종은 나타나지 않았다. 소양강에서는 녹조류인 *Secnedesmus* sp. 의 우점률이 약간 높았지만, *Synedra ulna* 와 같은 호청수종으로 알려진 종이 함께 우점하여 다양한 지천이 합류되어 균형적인 환경 여건을 이룰 수 있는 소양강의 수질학적 특성에 기인하는 것으로 본다 (Fig 1).

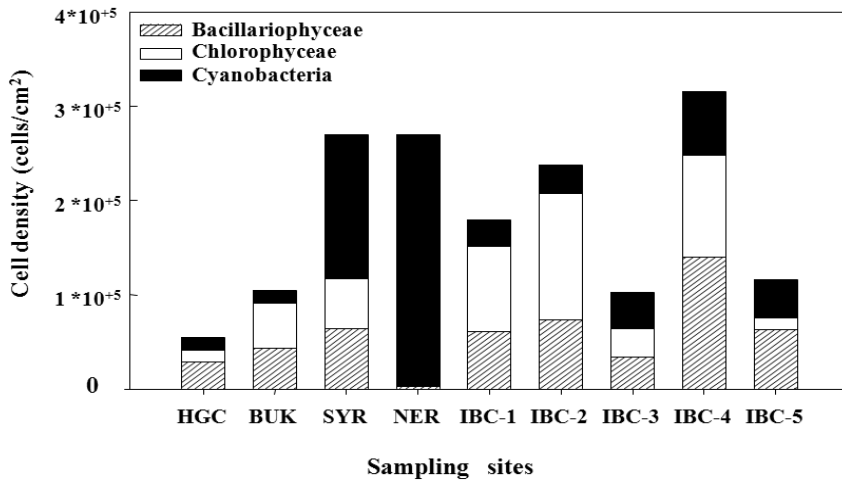


Fig. 1. 조사지점 별 부착조류 군집의 현존량 및 분포 양상 (Bacillariophyceae-규조강, Chlorophyceae-녹조강, Cyanophyceae-남조강) (HGC-한계천, BUK-북천, IBC-인북천 본류, NER-내린천, SYR-소양강)

Table 4. *Periphyton* 중 가장 우점하는 종과 차우점종

Site	class	Dominance			
		1st species		2nd species	
		name	%	name	%
HGC	규조강	<i>Spirogyra sp.</i>	19	<i>Oscillatoria sp.</i>	17
BUK	녹조강	<i>Nitzschia sp.</i>	18	<i>Synedra ulna</i>	16
SYR	녹조강	<i>Secnedesmus sp.</i>	34	<i>Navicula sp.</i>	12
NER	남조강	<i>Oscillatoria tenuis</i>	85	<i>Oscillatoria sp.</i>	14
IBC-1	남조강	<i>Secnedesmus sp.</i>	54	<i>Navicula sp.</i>	16
IBC-2	남조강	<i>Oscillatoria tenuis</i>	48	<i>Secnedesmus sp.</i>	11
IBC-3	남조강	<i>Oscillatoria tenuis</i>	18	<i>Secnedesmus sp.</i>	17
IBC-4	규조강	<i>Melosira varians</i>	29	<i>Secnedesmus sp.</i>	21
IBC-5	규조강	<i>Melosira varians</i>	23	<i>Merismopedia sp.</i>	14

(HGC-한계천, BUK-북천, IBC-인북천 본류, NER-내린천, SYR-소양강)

3.2.2. 소양호 상류하천의 부착조류 생물지수 및 수질평가등급

중동정 결과를 바탕으로 생물지수를 산출한 결과, 종 다양도 지수는 내린천 지역(최소값=0.48)을 제외하고는 조사지점 별 차이를 보이지 않았다 (Table 5). 오염원의 지역적인 특성과 수계별 수질 특성을 효율적으로 반영하지는 못했다. 대부분 군집이 다양함을 나타내며 생태적 상황이 안정되어 있다는 것을 나타낸다. 종 풍부도는 다양도 지

수 값이 클수록 종의 구성이 풍부하게 되므로 환경의 정도가 양호하다는 것을 전제로 하고 있으며, 이러한 생물학적 정의 및 기준(McNaughton and Wolf, 1970)에 의하면, 조사 유역은 내린천을 제외하고는 전체적으로 생태적 상황이 안정되어 있다는 결과를 보인다. 따라서 본 연구는 소양강 상류 하천 유역에 대한 단편적인 생물지수 결과를 안정동위원소비의 변동 및 토지 이용 현황 조사 결과로 보완하였다.

부착조류의 군집 가운데, 규조류와 물 환경 요 인간의 상호 관련성을 근거로 유기물 오염도나 부영양화를 평가하기 위한 유기물오염지수(DAIpo)와 영양염지수(TDI)의 결과 또한 조사지점 별 차이를 보이지 않았다(Table 6). 조사 전 지점의 유기물 오염지수는 약 60%로 100%를 가장 청정한 수역으로 판단할 때, 보통이나 양호한 수준의 유기물 오염 정도를 나타내었다. 영양염 지수는 약 60-70% 정도로 100%를 심각한 부영양화 상태로 판단할 때, 소양강 상류하천은 영양염류의 영향을 무시할 수 없는 수치를 보였으나 수계별 차이나 특성은 없었다.

소양호 상류 하천 유역에 대해 이화학적·생물

학적 지수들을 바탕으로 기존에 사용되던 하천수 질평가기준에 따라 수질등급을 판정하였다. BOD와 유기물오염지수(DAIpo)은 각각의 수치에 따라 Watanabe and Asai(1990) 기준에 의해 등급이 구별되었다(Table 6). 전체적으로 빈부수성을 나타내면서 수역 및 오염원에 따른 지점별 차이를 나타내는 결과는 보이지 않았다. 같은 조사지점의 부착조류의 군집을 대상으로 산출한 등급이지만, Watanabe and Asai(1990)의 기준에 의하면 조사 유역은 빈부수성으로 청정한 결과를 보이고, Kelly and Whitton(1996)의 기준에 의하면 약간의 부영양화를 의미하는 결과를 보이면서 판단의 차이를 보였다.

Table 5. 조사지점 별 부착조류 현존량을 바탕으로 산출한 종다양도지수, 균등도지수, 우점도 지수

Site	Species Diversity	Evenness	Dominance
HGC	2.46	0.75	0.12
BUK	2.53	0.73	0.13
SYR	2.22	0.67	0.17
NER	0.48	0.16	0.75
IBC-1	1.59	0.54	0.33
IBC-2	1.97	0.60	0.26
IBC-3	2.56	0.82	0.10
IBC-4	2.42	0.72	0.15
IBC-5	2.46	0.75	0.11

(HGC-한계천, BUK-북천, IBC-인북천 본류, NER-내린천, SYR-소양강)

Table 6. 조사지점 별 규조류 군집의 생물종들의 오염 내성도를 기준으로 산출한 유기물오염지수(DAIpo), 영양염지수(TDI), BOD, 하천수질등급 및 서술등급

	HGC	BUK	SYR	NER	IBC-1	IBC-2	IBC-3	IBC-4	IBC-5	Remarks
DAIpo	61.1	55.0	66.7	56.3	65.4	57.1	57.1	56.7	59.4	
TDI	66.0	74.7	77.1	61.3	75.4	64.1	63.6	70.6	75.7	
BOD	0.2	0.2	0.4	1.0	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	
water quality degree	β -빈부수성	β -빈부수성	β -빈부수성	α -빈부수성	β -빈부수성	β -빈부수성	β -빈부수성	β -빈부수성	β -빈부수성	Watanabe and Asai (1990)
	B~C	C	B~C	C	B~C	C	C	C	C	Kelly and Whitton (1995)
description	좋음~약간 나쁨	보통~약간 나쁨	좋음~약간 나쁨	보통~약간 나쁨	좋음~약간 나쁨	보통~약간 나쁨	보통~약간 나쁨	보통~약간 나쁨	보통~약간 나쁨	

(HGC-한계천, BUK-북천, IBC-인북천 본류, NER-내린천, SYR-소양강)

4. 고 찰

본 연구는 기존의 하천수질환경평가방법에서 나아가 부착조류의 안정동위원소분석을 적용하여 통합적인 하천 수질 환경 분석을 시도하였다. 연구 지역인 소양강 상류 하천유역은 소양강에 유입되는 주요 지천이 분포하는 소규모 유역으로 최근 부영양화 로 인한 어류 폐사 등의 환경 사고로 주목되는 지역이다(국립환경과학원, 2008). 따라서 부착조류의 안정동위원소가 실제 주변 오염원 및 부착조류 군집의 특성과 갖는 상호연관성을 분석하여 안정동위원소분석이 수질 평가에 활용될 수 있도록 기초 자료를 제공하고자 한다.

하천 유역에서 농경지의 증가는 수체 내 질소 농도를 증가시키고 부착조류의 군집 분포에 영향을 주게 된다. 그리고 하천 유역의 농경지와 임야의 점유율에 따라 질소 안정동위원소비는 다르게 변동한다. 따라서 소양호 상류 유역의 지역에 따른 뚜렷한 농경지 분포 차이는 부착조류의 군집 분포 및 수질에 있어 중요한 환경 요소가 될 수 있다. 본 연구는 조사지점으로부터 500m 내의 토지 이용 현황이 주변 환경 영향에 대해 충분한 설명력을 갖는다고 가정하였다. 이는 수계에서 500m 이내의 토지 및 오염원의 분포가 비점오염원의 영향권을 나타낸다는 기존의 연구 결과에 근거하였다(Mahendra Mahato, 2002). 그 결과 조사 지역에서 500m 내의 토지 이용률의 경우, 인북천 상류는 농경지 점유율이 평균 60% 이상으로 유역 전체의 농경지 특성을 대표하는 값을 보였다. 이와는 달리 북천 및 한계천 조사 지점은 농경지와 임야가 비슷한 현황(30%)을 보이면서, 임야 중심의 지리적 특성을 갖는 유역 특성을 뚜렷하게 나타내지는 못하였다. 실제 한계천은 유역 면적의 대부분이 설악산 국립공원에 속하여 대부분이 임야로 이루어져 있고, 환경부(2007)에 따른 유역의 임야 점유율은 90% 이상이다. 결과적으로 소양호 상류 유역에서는 시가지 규모가 작아 점오염원의 영향이 매우 작고, 농경지가 오염원의 주

된 근원지라고 할 수 있다.

본 연구에서 수행한 기존 수질환경평가방법은 3단계로 나뉘어 순차적으로 진행된다. 첫째로, 조사 유역의 이화학적 수질 특성을 수집하고, 부착조류 생물종을 동정 및 계수하였다. 둘째로, 동정 및 계수 결과를 통해 우점도, 다양도, 균등도를 계산하고, 규조류가 오염에 대해 갖는 내성을 이용해 수질의 영양 및 오염 정도를 판단하는 유기물오염지수(DAIpo), 영양염지수(TDI)를 계산한다. 각각의 생태학적 기준에 따라 결과 수치를 바탕으로 소양호 상류 하천 유역의 수질을 판단하도록 한다. 마지막으로 Watanabe and Asai(1999)와 Kelly and Whitton(1995)에 의해 정립된 기준에 따라 하천수질등급을 선정한다. 전자는 BOD와 유기물오염지수(DAIpo)를, 후자는 유기물오염지수(DAIpo)와 영양염지수(TDI)를 이용하여 하천수질 등급 기준을 정립하였다.

조사 지역에서 농경지 중심 지역인 내린천 상류와 인북천 상류에서는 현존량이 상대적으로 높았고, 이는 상류하천에서는 수심이 얕고 바닥에 자갈이 깔려 있어서 부착조류가 많이 증식한다는 하천의 일반적인 생태학적 환경과 일치하는 결과였다. 또한 조사지역 가운데 농경지 중심 지역(내린천 상류, 인북천 상류)에서는 오염 지역을 대표하는 남조강의 생물종들이(*Oscillatoria* sp. *Oscillatoria tenuis*) 높은 우점율을 보이면서 농경지 주변의 수질 및 수변 환경 상태가 상대적으로 양호하지 못한 것을 알 수 있었다. 특히 내린천 지역은 오염 지표종이자 하천 및 호소에 대량 증식하여 부영양화를 일으키는 *Oscillatoria tenuis* 가 85% 이상 우점하며 눈에 띄게 높은 현존량을 보이면서, 이는 농경지의 분포는 수체로의 질소의 유입을 증가시키며 부착조류의 군집에 영향을 주어 특정 종에 의한 우점현상을 일으킨다는 연구 결과(Peter and Christopher, 2005)에 부합하는 결과를 보였다. 수체 내 질소 영양염류는 부착조류의 성장을 조절하는 중요한 요인이며, 결과적으로 부착조류의 현존량과 비례하여 증가한다 (Dodds et al, 2002).

반면 기존 하천수질환경평가지수들은 위와 같은 부착조류 군집의 분포 특성을 비롯해 하천 수질 현황을 제대로 반영하지 못하였다. 조사 지역의 이화학적 지수들(BOD, SS, T-N)는 전반적으로 청정한 수질 기준에 해당하는 값을 나타냈으며, 인북천 하류 지역에서 상류 지역으로 올라갈수록 증가하는 경향을 보였지만 그 변화가 미미하여 수계별 오염원에 따른 수질을 판단하는데 다소 무리가 있었다. 이처럼 이화학적 수질 기준은 소규모 하천의 수질 특성을 반영하지 못하였으며, 생물학적 지수 또한 환경 변화에 민감하며, 다양한 생물종의 존재로 하천 생태에서 중요한 의미를 갖는 부착조류의 특성을 효율적으로 반영하지 못하고 있었다. 생물학적 지수 결과를 살펴보면, 내린천 지역은 다른 조사지역들에 비해 상대적으로 낮은 종다양도 지수($H'=0.48$)와 높은 우점도 지수($D'=0.33$)를 보였고 이는 내린천 상류 지역에 농경지가 집중 분포로 물리화학적 환경이 극심하게 편향되어 있는 곳에서 일부종이 우점하는 현상을 보인다는 일반적인 생태학에 의한 결과로 보인다. 하지만 내린천 지역을 제외한 소양호 상류 하천의 조사 지점의 우점도, 다양도, 균등도를 산출한 결과 대체적으로 유사한 값을 보였고, 결과적으로 조사 지역 하천은 전체적으로 안정된 부착조류 군집과 그에 따른 생태적 상황을 보인다는 결과였다. 또한 오염지수(DAI_{po})와 영양염지수(TDI)는 내린천 지역을 비롯한 전 지역에서 60%, 50% 주변 값을 보였다. 이는 오염원에 대한 내성을 바탕으로 규조류의 출현을 비교하였을 때, 전 지역에서 오수종과 청수종의 출현이 비슷하게 일어났음을 말해준다. 두 생물지수는 단순히 생물종의 출현 유무에 따라 이분법적으로 수치를 부여하기 때문에, 출현빈도의 차이를 고려하지 않는다. 출현종은 오염에 대한 내성이 각각 다르기 때문에, 1개체 출현종과 1,000개체 출현종이 환경에 미치는 영향을 같다고 가정하는 데엔 무리가 있다. 따라서 이러한 계산법에 의한 하천 수질 해석은 특히 소규모 하천을 대상으로 하였을 때 큰 오차를 범할 수 있다.

마지막으로 이화학·생물학적 지수를 이용하여 하천수질등급을 판정한 결과, 조사 유역은 전체적으로 빈부수성의 양호한 수질이라는 단편적인 결과를 얻었다. 실제 부착조류의 동정을 통해 분석한 군집 분포 특성은 오염원(농경지)과 높은 연관성을 보였지만 생물지수를 산출하는 과정에서 수치적 기준에 의해 과소평가되었다. 따라서 실질적인 하천 수질 상태와 주변 오염원의 영향을 정확하게 반영할 수 있는 생물지수의 보완이 필요하였다. 오염원과 수질에 따라 민감하게 반응하는 부착조류의 생지화학적 특성을 효율적으로 나타낼 수 있는 생물지수가 추가된다면 단순한 기존의 하천수질환경평가의 한계점을 보완할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구는 기존 부착조류의 안정동위원소 분석이 생물 지수로서 수질 대표성을 갖는지 검토하여 그 활용가치를 높일 수 있도록 하였다.

사 사

본 연구는 서울지역환경기술개발센터(2011) 및 Eco-Star 연구비(EW53-10-10) 지원에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사를 포함합니다.

5. 참고 문헌

- 건설교통부 서울지방국토관리청, 2003. 한강 하천 정비기본계획, 한국건설기술연구원.
- 국립환경과학원, 2008. www.nier.go.kr/
- 김백호, 한명수. 2005. 청계천 생태기능 복원의 가치와 부착조류에 의한 수질 및 생태계관리. 환경과학연구지. 13:37-42.
- 김범철, 조규송, 김동섭, 허우명. 1989. 소양호 부영양화의 연변화 추이. 한국육수학회지. 22(3):151-159.
- 김범철, 허우명, 최광순, 김윤희. 1997. 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동. 한국육수학회지. 31(1):1-8.
- 박명환, 황순진, 서미연, 김용재, 김백호. 2007. 조류성장잠재력 조사를 이용한 청계천 복원

- 이후 수질 평가. 한국하천호수학회.
- 신명선, 김범철, 김재구, 박미숙, 정성민, 장창원, 신윤근, 배연재. 2008. 청계천의 수질과 부착조류의 계절적 변동. 한국하천호수학회지. 41(1): 1-10.
- 이인규. 2001. 한국의 조류 생태와 응용. 아카데미 서적.
- 전만식. 2008. 육상오염물질의 해양유입 저감방안. 강원발전연구원.
- 정준, 최재신, 이정호. 1992. 부착규조군집의 유기오탁지수 (DAI_{po}) 에 의한 금호강의 수질평가. 한국하천호수학회. 25(4):304-304.
- 최재신, 김한순, 강만도. 1998. 신천의 부착조류군집의 계절적 동태. 한국육수학회지. 31(3): 235-240.
- 최지용, 2007. 수질환경기준 적용을 위한 팔당호의 수체 구분방안 연구. 경기논단. 71-91.
- 최지용, 박연상. 2008. 다목적댐 상류 소유역 관리 방안 연구. 한국환경정책평가연구원.
- 환경부 <http://www.me.go.kr>
- Dodds, W. K. Smith, V. H. and Lohman, K. 2002. Nitrogen and phosphorus relationships to benthic algal biomass in temperate streams. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science. 59: 865- 874.
- Duarte, C. M.. and Cebrih, J. 1996. The fate of marine autotrophic production. Limnology. 41(8):1758-1766.
- Groffman, P. M. Boulware, N. J. Zipperer, W. C. Pouyat, R. V. Band L. E. Colosimo M. F. 2002. Soil nitrogen cycle processes in urban riparian zones. Environment. Science. Technology. 36:4547-4552.
- Kelly, M. G. 2003. Short term dynamics of diatoms in an upland stream and implications for monitoring eutrophication. Environmental Pollution. 125(2):117-122.
- Kelly, M. G. Whitton, B. A. 1995. The trophic diatom index: A new index for monitoring eutrophication in rivers. Phycology. 7: 433-434.
- Leland, H. V. Porter, S. D. 2000. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. Freshwater Biology. 44:279-301.
- Mahato, M. Ji M. 2002. Using GIS to Evaluate the Effect of Land-use on the Health of the Upper Trinity River Watershed. GEOG 5520 - Intermediate GIS. 1-12.
- Marinelarena, A. J. and Giorgi, D. 2001. Nitrogen and phosphorus removal by periphyton from agricultural wastes in artificial streams, Freshwater Ecology. 16:347-353.
- McNaughton, S. J. Wolf, L. L. 1970. Dominance and the Niche in Ecological. Systems. Science. 167(3915):131-139.
- Newall, P. and Walsh, C, J. 2005. Response of epilithic diatom assemblages to urbanization influences. Hydrobiologia. 532: 53-67.
- Pielou, E.C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. J. Theor. Biol., 13, 131-144.
- Salomoni, S. E. Rocha, O. Callegaroand V. L. Lobo E. A.. 2006. Epilithic Diatoms as Indicators of Water Quality in the Gravata River, Rio Grande do Sul, Brazil. Hydrobiologia. 559(1):233-246.
- Simpson, E.H. 1949. Measurement of diversity. Nature, Lond. 163, 688.
- Stevenson, R. J. Bothwell, M. L. and Lowe, R. L. 1996. Algal Ecology. Academic Press, San Diego, CA: 753 pp.
- Watanabe, T. Asai, K. 1999. Statistic classification of epilithic diatom species into three ecological groups relating to organic water Pollution (2) Saprophilous and saproxenous taxa. Diatom. 10:35-47.

Watanabe, T. Asai K. and Houki, A. 1986. Numerical estimation to organic pollution of flowing water by using the epilithic diatom assemblage diatom assemblage index (DAIpo). Science of Total Environment. 55: 209-218.

Weaver, W. and C.E. Shannon. 1949. The Mathematical Theory of Communication. Urbana, Illinois: University of Illinois

Welch, E. B. J. M. Jacoby, J. M. Honer, R. R. and Seeley, M. R. 1998. Nuisance biomass levels of periphytic algae in streams. Hydrobiologia. 157: 161-168.

○ 논문접수일 : 2011년 09월 26일

○ 심사의뢰일 : 2011년 09월 27일

○ 심사완료일 : 2011년 12월 13일