

제주도내 하천의 부착규조 군집

정명화 · 조현진¹ · 윤정하¹ · 이학영*

전남대학교 자연과학대학 생물학과

¹전남대학교 생물과학 · 생명기술학과

Epilithic Diatom Communities in Streams of Jeju Island

Myoung Hwa Jung, Hyeon Jin Cho¹, Jung Ha Yun¹ and Hak Young Lee*

Department of Biological Science, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

¹School of Biological Sciences and Biotechnology, Chonnam National University,
Gwangju 500-757, Korea

Abstract - To identify distribution of epilithic diatom assemblages and the relationship between diatoms and water chemistry, samples were collected twice a year from 2008 to 2012, from at 6 streams in Jeju Island, South Korea. A total of 171 diatom taxa were identified, and *Achnanthes lanceolata*, *Gomphonema pumilum*, *Melosira varians*, *Navicula minima* and *Nitzschia palea* were dominantly observed. BOD ranged 0.0 ~ 1.6 mg L⁻¹, TN 0.230 ~ 13.240 mg L⁻¹ (average 4.432 mg L⁻¹), TP 0.020 ~ 0.316 mg L⁻¹ (average 0.092 mg L⁻¹), and N/P rate ranged 2.5 ~ 178.5. Average of epilithic algal chlorophyll-*a* and AFDM were 1.1 µg cm⁻² and 0.6 mg cm⁻², respectively. According to BOD standard, the water qualities of study area sites were at 'Good' level. However, the healthiness levels assessed from DAIPo and TDI were 'Fair' to 'Poor'.

Key words : Jeju, streams, diatoms, TDI, DAIPo

서 론

조류(algae)는 수서 생태계에서 광합성을 하는 중요한 일차 생산자이며 (Barnes 1991), 이들의 성장은 수서 생태계의 종류와 시간에 따라 다르게 나타난다 (Graham and Wilcox 2000). 때문에 조류군집 구조의 변화는 수서 생태계에 대한 인위적 영향의 판단에 좋은 지표로 이용되고 있다 (Kim *et al.* 2001; Potapova and Charles 2007; Chessman and Townsend 2010). 조류는 생활형에 따라 수중에서 기질에 부착하지 않고 떠다니는 부유성 조류

(planktonic algae)와 물에 잠긴 기질과 결합하는 부착성 조류(benthic algae)로 구분할 수 있는데, 강과 하천 등의 유수 생태계의 경우 부착성 조류가 더 우세하며 수환경의 영향을 잘 표현하므로 하천의 생산력이나 환경변화에 대한 지표로 널리 활용된다 (Barnes 1991; Graham and Wilcox 2000; Lavoie *et al.* 2004; Schneider and Lindstrøm 2009). 특히 부착 규조류를 이용한 생물학적 수질평가지수는 이미 많은 하천과 강에서 환경변화를 진단하는 생물학적 도구로 이용되고 있다 (Watanabe *et al.* 1990; Coste and Ayphassorho 1991; Kelly and Whitton 1995; Hwang 2006; Besse-Lototskaya *et al.* 2011).

제주도는 우리나라 최대의 화산섬으로, 섬 중앙의 한라산을 중심으로 남·북쪽의 급한 경사면에 비해 완만한 사면을 보이는 동·서쪽으로는 넓은 용암대지가 분

* Corresponding author: Hak Young Lee, Tel. 062-530-3401,
Fax. 062-530-3409, E-mail. haklee@chonnam.ac.kr

수량을 이루는 관계로 동·서쪽 사면에는 수계의 발달이 빈약하고 많은 하천들이 남류하거나 북류하는 특징을 갖는다 (Youn and Park 2000). 또한 제주도 대부분의 하천은 투수층과 주상절리의 지질학적 특성으로 인한 높은 투수성으로 집중호우 시 일시적으로 유출하는 간헐천의 특성을 갖는다. 제주도에서 상시 흐르는 하천으로는 광령천, 연외천, 동홍천, 강정천, 악근천, 예레천, 영천, 옹포천과 창고천이 있으나 (Jeju Special Self-Governing Province 2001), 이들 대부분은 지하수가 용출되는 용천수에 의해 하천이 유지되고 있어, 주변 토지이용에 따라 지하수로의 오염원 유입에 취약하다는 문제점을 갖는다. 최근 제주도에 대규모 과수원과 농경지의 개발, 인구밀집으로 인한 도시화 등에 따라 하천의 수생태계에 대한 교란이 예상되므로 생태계의 변화에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

제주도에 담수 조류에 대한 연구는 하천, 웅덩이 및 백록담을 포함한 지역의 제주도산 담수조류 (Chung *et al.* 1972a, b), 백록담과 정방폭포, 천제연 폭포와 천지연 폭포에서의 식물플랑크톤의 대한 연구 (Lee and Chang 1991), 백록담의 식물플랑크톤 연구가 있으며 (Lee 1987), 도십하천과 용천수에 대한 지질학적·수리학적 특성에 대한 연구 등이 수행되었으나 (Cho and Oh 1998; An *et al.* 2007; Jung *et al.* 2013), 하천의 수질 특성과 부착성 조류에 대한 연구는 거의 없다.

본 연구는 제주도에에서 상시 흐르는 6개의 하천을 선정하여 하천의 이화학적 요인, 부착 규조류 군집의 분포와 생물학적 지수를 적용한 하천의 수질 평가결과를 제시하여 제주도에 하천의 수생태 및 수질보존대책을 수립하기 위한 기반자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사대상지 개황

본 연구의 조사대상 하천은 제주북해중권역의 도근천과 광령천, 제주서해중권역의 옹포천, 제주남해중권역의 연외천, 동홍천과 영천 총 6개 하천으로 상시 유수가 흐르는 정점을 선택하여 2008년에서 2012년까지 연 2회 조사하였다 (Fig. 1).

제주북해중권역에 위치한 도근천은 한라산의 고지에서 발원하여 외도동 해안으로 유입되는 하천으로 유로연장 15.71 km, 유역면적 75.08 km²이며, 지류로 광령천이 있다. 광령천은 한라산 고지에서 발원하며, 수원지 시설에서 배출되는 지하수로 인하여 하천수가 흐르며 총 유로

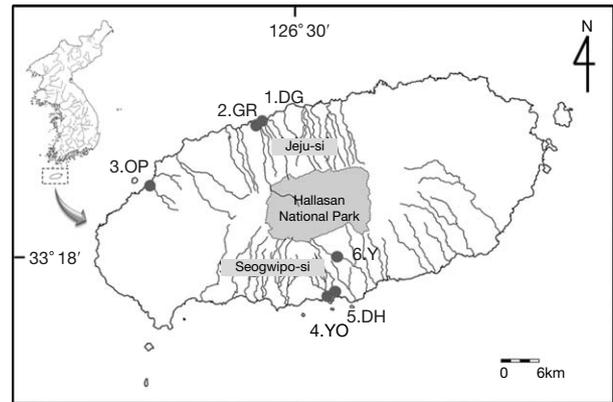


Fig. 1. Map showing the study sites in streams of Jeju Island. Do-gun-cheon (DG), Gwangryoung-cheon (GR), Ongpo-cheon (OP), Yeono-cheon (YO), Donghong-cheon (DH), Young-cheon (Y).

연장 21.30 km, 유역면적 43.25 km²이다 (Jeju Special Self-Governing Province 2001). 제주서해중권역에 위치하는 옹포천은 유로연장 10.45 km, 유역면적 23.29 km²인 하천으로 상류부는 산림과 목초지 등으로 구성, 중류나 하류부는 과수원과 농경지로 구성되어 있고 중류 및 하류지역의 일부는 취락지역을 포함하고 있다 (Jeju Special Self-Governing Province 2009). 제주남해중권역의 연외천은 한라산 정상 남측 사면에 위치한 시오름 (해발고도 760 m)과 미악산 (해발고도 550 m) 사이 계곡에서 발원하며 유로연장 12.00 km, 유역면적은 22.20 km²로 하상경사는 비교적 급경사를 이루고 있다. 상류는 유로전체에 표면수가 거의 흐르지 않는 건천이지만 용천수가 다수 존재하는 하류지역은 하천수가 흐르고 있다. 동홍천은 해발고도 1,743 m에서 발원하고 있으며, 상류 유역은 대부분 산지, 중류 유역은 감귤농장으로 구성되어 있고 하류 지역은 서귀포 시내를 관통하여 서귀포시 정방동 정방폭포에서 바다로 직접 유입한다. 동홍천의 전체 유로연장은 12.78 km, 유역면적은 10.41 km²이다. 영천의 유로연장은 9.00 km, 전체 유역면적은 21.24 km²로 인위적인 하천개수가 거의 이루어지지 않아 자연상태의 하천이 잘 유지되어 있다 (Jeju Special Self-Governing Province 2012a).

2. 채집 및 분석방법

이화학적 항목 중 수온, DO, pH, 전기전도도와 탁도는 현장에서 수질 다항목 측정기 (Hydrolab DS5)를 이용하여 측정하였으며, BOD, TN, NH₄-N, NO₃-N, TP, PO₄-P와 클로로필-*a* 분석을 위한 시료는 냉장 상태 (4°C 수온)로

유지하여 실험실로 운반하여 측정하였다(APHA 2001).

부착 조류 채집은 지름 10 cm 정도의 표면이 평평한 돌을 지점 당 3~5개를 채집하여, 기질의 일정 면적을 브러쉬로 긁어내어 정량 채집하였다. 부착 규조류 분석은 산(acid) 산화법을 이용하여 유기물 제거하고 강한 굴절률을 가진 액체 봉입제(나프락스)를 이용하여 표본을 제작한 후(Barbour *et al.* 1999), 400~1,000배의 현미경 배율 하에서 가능한 중 수준까지 동정하였다.

부착 조류를 이용한 생물평가는 유기물지수(DAIpo, Watanabe *et al.* 1990)와 영양염지수(TDI, Kelly and Whitton 1995)를 이용하였다. 부착 규조류 군집의 통계 분석은 이화학적 요인과 부착 규조류 생물지수 사이의 상관분석을 하였다(SPSS 18.0).

결과 및 고찰

1. 이화학적 환경요인

동아시아몬순기후대에 속하는 제주도의 강우량은 제주시와 서귀포시에서 각각 2000년 이후 연평균 1,544.6 mm, 1,954.9 mm로 내륙지역보다 높은 강우량(Korea Meteorological Administration)을 보였다(Fig. 2). 6개 하천의 정점에서 조사된 이화학적 환경요인 중 탁도는 0.0~0.7 NTU의 범위를 보였으며, BOD는 0.0~1.6 mg L⁻¹의 범위로 하천생활환경 기준(환경정책기본법 시행령 환경기준 제2조)에 따르면 ‘ 좋음(Ib)’ 이상의 수질상태를 나타냈다(Fig. 3).

TN은 0.230~13.240 mg L⁻¹(평균 4.432 mg L⁻¹)의 범위를 보였다(Fig. 3). 제주서해중권역에 위치한 옹포천이 평균 10.542 mg L⁻¹로 조사지점 중 가장 높았으며, 연외천(평균 4.210 mg L⁻¹), 도근천(평균 3.632 mg L⁻¹), 광령천(평균 3.023 mg L⁻¹), 동홍천(평균 2.875 mg L⁻¹), 영천(평균 0.698 mg L⁻¹)의 순으로 높은 농도를 나타냈다. NH₃-N은 0.001~0.264 mg L⁻¹(평균 0.069 mg L⁻¹)의 범위를 보였으며, 제주남해중권역에 위치한 동홍천이 평균 0.106 mg L⁻¹로 조사지점 중 가장 높은 것으로 나타났다. NO₃-N은 0.220~11.996 mg L⁻¹(평균 3.822 mg L⁻¹)의 범위로 옹포천에서 평균 9.250 mg L⁻¹으로 가장 높았으며, 연외천, 도근천, 광령천, 동홍천, 영천의 순으로 높은 농도를 나타냈다. TN에서 NO₃-N가 차지하는 비율은 평균적으로 87.5%으로 NO₃-N 형태가 가장 많이 기여하는 것으로 나타났다. TP는 0.020~0.316 mg L⁻¹의 범위로 평균 0.092 mg L⁻¹이었으며, 제주남해중권역에 위치한 연외

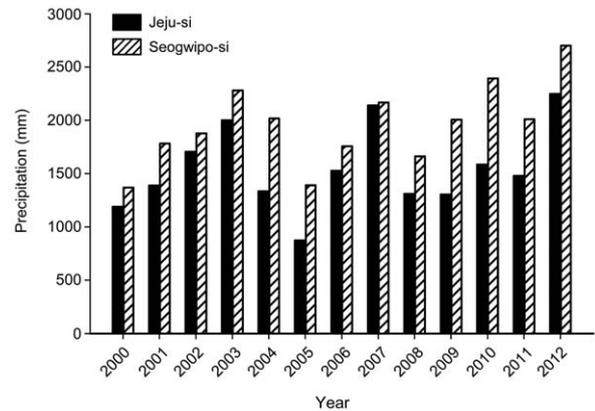


Fig. 2. Variations of annual total precipitation in Jeju Island.

천이 평균 0.125 mg L⁻¹로 조사지점 중 가장 높았으며, 광령천(평균 0.106 mg L⁻¹), 옹포천(평균 0.101 mg L⁻¹), 동홍천(평균 0.089 mg L⁻¹), 영천(평균 0.071 mg L⁻¹), 도근천(평균 0.067 mg L⁻¹)의 순으로 높은 농도를 나타냈다. 평균적으로 TP의 77.4%를 차지하는 PO₄-P는 0.002~0.209 mg L⁻¹(평균 0.071 mg L⁻¹)의 범위를 나타냈다. N/P 비율은 2.5~178.5의 범위로 옹포천이 평균 106.6으로 가장 높게 나타났으며, 도근천(평균 66.5), 연외천(평균 37.1), 광령천(평균 36.2), 동홍천(평균 33.3), 영천(평균 12.2)의 순으로 나타났다. 조류성장에 영향을 미치는 영양요소의 비율을 나타내는 Redfield ratio(Redfield 1958)에 따르면 영천을 제외한 다른 하천에서는 인(P)이 제한성 영양염류로 작용하는 것으로 나타났다.

하천차수가 1차 또는 2차 하천에 해당되는 제주도내 6개의 하천에서의 TN과 TP의 농도는 비슷한 규모의 국내 육지하천과 비교해 높은 농도를 나타냈다(Kim *et al.* 2000; Kim and Won 2011; Jung *et al.* 2012; Kim *et al.* 2012a). 제주도는 하천 수계가 제주시와 서귀포시에 해당하는 남부와 북부 지역에 집중적으로 분포하는 형태를 지닌다(Youn and Park 2000). 또한 대부분의 하천은 높은 강우량에도 불구하고 지질학적 특성에 의해 강우 직후에만 유수가 출현하는 건천의 형태를 나타낸다. 상시 흐르는 하천의 경우에도 지하수위의 고도가 낮아 비가 오지 않을 때는 용천수가 있는 해안 인근의 최하류에만 유수가 나타난다. 때문에 제주도의 인구밀도는 287.7명 km⁻²(2010년 기준)이지만 제주시에 전체 인구의 73.6%, 서귀포시에 26.4%가 살고 있어, 인구비중은 해안지역(해발 200 m 미만)에 98.5%가 밀집된 특징을 보이고 있다(Jeju Special Self-Governing Province 2012b; Statistics Korea 2013). 인구밀집으로 인한 도시화와 대규

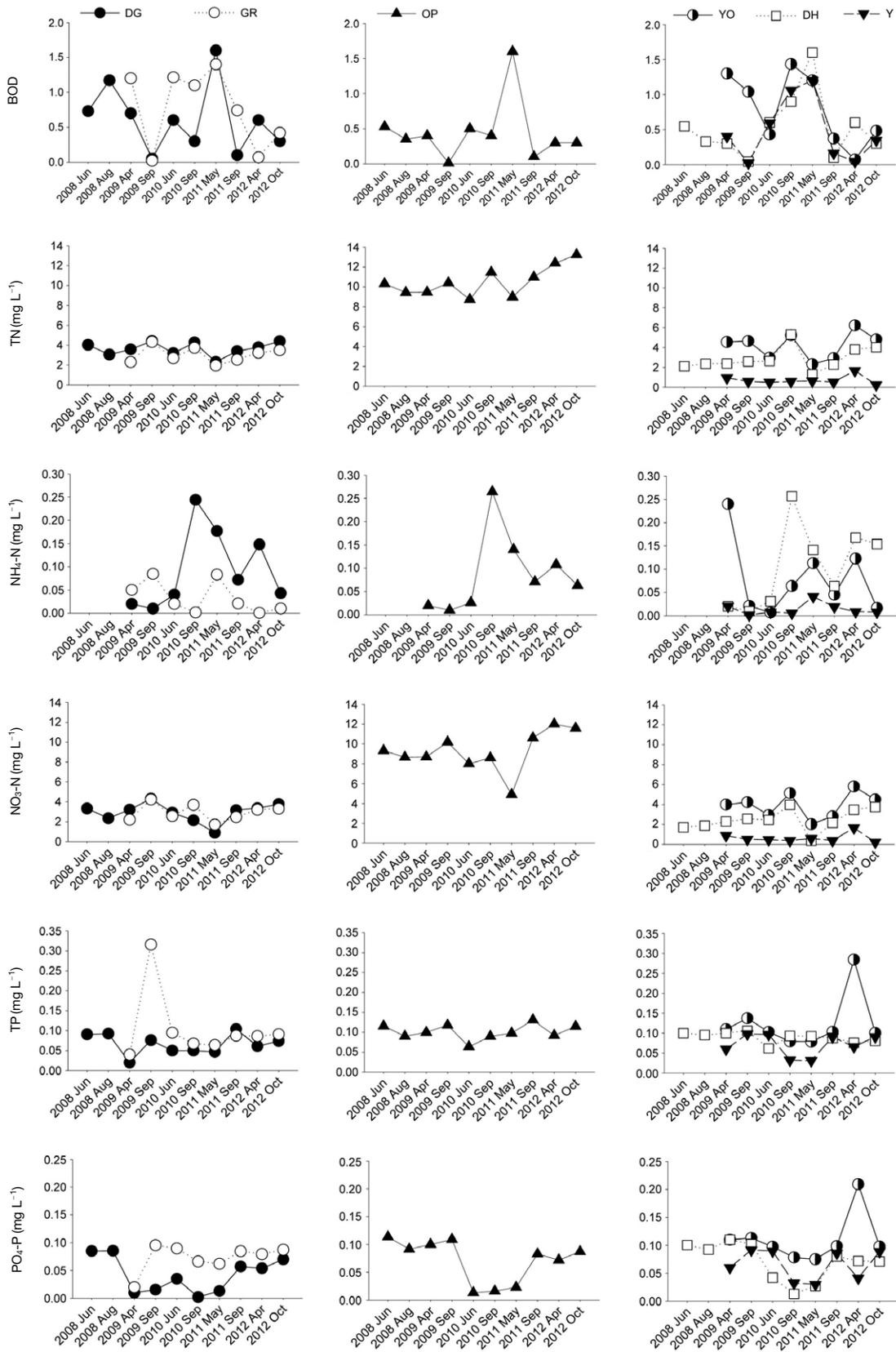


Fig. 3. Variations of BOD and nutrient concentrations in 6 streams of Jeju Island from 2008 to 2012.

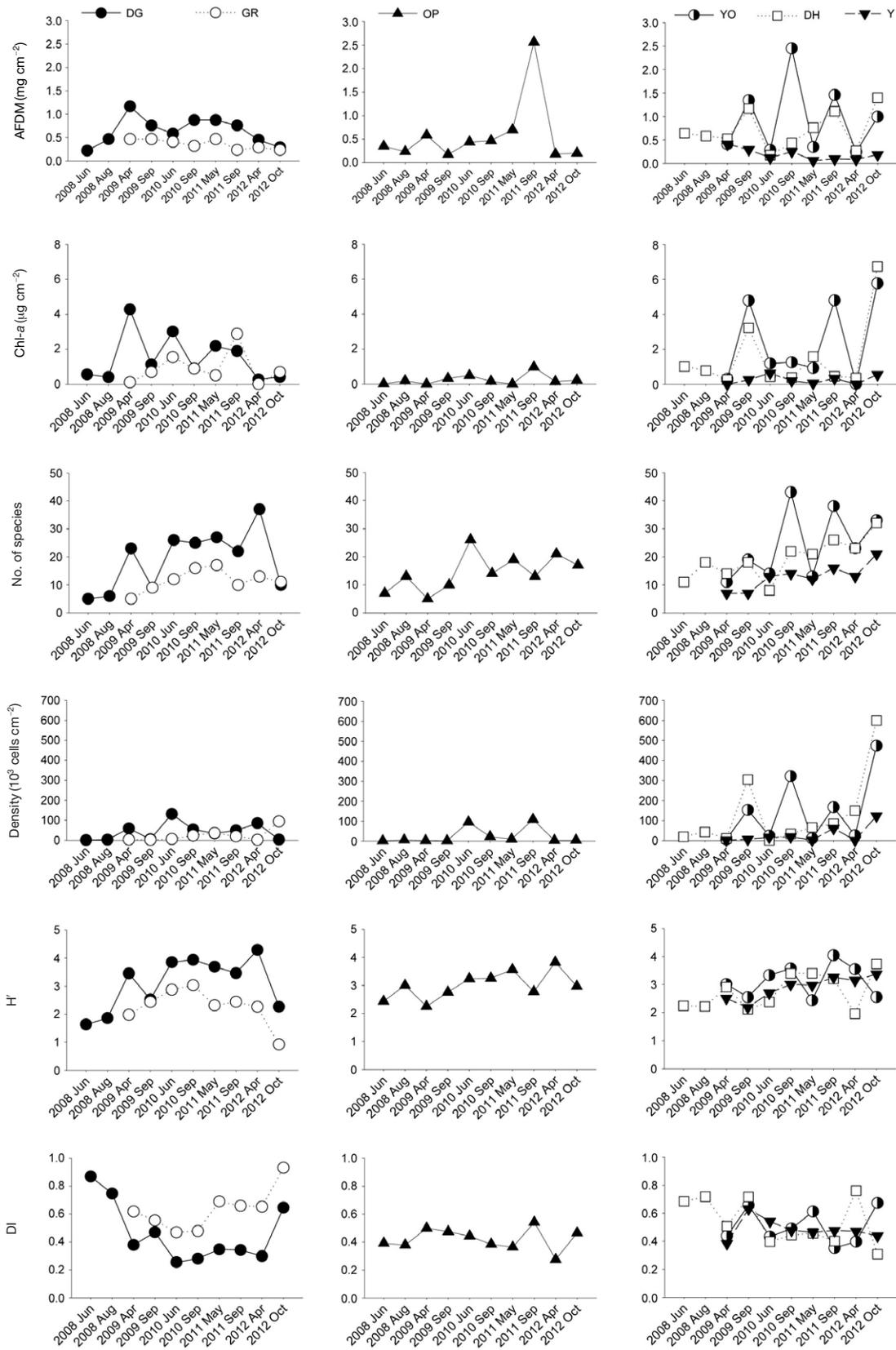


Fig. 4. Variations of biological factors in 6 streams of Jeju Island from 2008 to 2012.

모 농장 등의 토지이용은 지하수 오염에 영향을 주며, 특히 도시 근교지역의 지하수에서는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 높게 나타나는 것으로 알려져 있다(Fetter 2008). 또한 질화과정(Nitrification)에 따라 오염원으로부터 점진적으로 증가하여 하류구간에서 높은 농도의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 검출된다(Aller *et al.* 1987). Youn and Park (2000)에 의해 이뤄진 제주도 산간지역(해발 600 m 이상)에 분포하는 9개의 용천수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도(평균 $0.00\sim 0.43\text{ mg L}^{-1}$)와 본 연구는 이와 일치하는 결과를 보여준다. 6개 하천조사에서 나타난 높은 영양염의 농도는 제주도의 높은 강우량과 해안지역의 토지 이용에 따른 오염된 지표수(surface water)의 침투와 용출에 의한 영향으로 사료된다(Jung *et al.* 2010).

2. 생물량 및 유기물량

AFDM은 $0.1\sim 2.6\text{ mg cm}^{-2}$ 의 범위로 평균 0.6 mg cm^{-2} 이었다. 연외천이 평균 0.9 mg cm^{-2} 으로 가장 높은 생물량을 보였으며, 영천이 평균 0.2 mg cm^{-2} 로 가장 낮은 생물량을 보였다. 부유성 조류 클로로필-*a*는 $0.0\sim 6.0\text{ mg m}^{-3}$ 의 범위로 평균 1.5 mg m^{-3} 이었으며, 부착성 조류 클로로필-*a*는 $0.0\sim 6.7\text{ }\mu\text{g cm}^{-2}$ 의 범위로 평균 $1.1\text{ }\mu\text{g cm}^{-2}$ 이었다. 연외천이 평균 $2.4\text{ }\mu\text{g cm}^{-2}$ 으로 가장 높았으며 옹포천이 평균 $0.2\text{ }\mu\text{g cm}^{-2}$ 로 가장 낮은 생물량을 보였다(Fig. 4).

제주도의 하천은 하도가 압반으로 구성되어 있는 산지하천의 형태로(Jeju Special Self-Governing Province 2012b), 제주남해중권역에 위치한 연외천, 동홍천과 영천은 수관층이 잘 발달되어 있으며, 특히 연외천과 동홍천의 조사지점은 각각 천치연 폭포와 정방폭포 전의 구간으로 경사가 급한 산지하천의 전형적인 특징을 갖는다. 대부분 강의 상류구간에서 산지하천의 형태가 나타나는데, 산지하천의 경우 오염원의 유입이 낮아 빈영양상태를 나타내며, 낮은 수온, 빠른 유속과 수관층으로 인한 빛의 차단 등으로 인해 종이 단순하고 낮은 생산력을 나타낸다(Kalff 2002). 제주도내 6개의 하천의 낮은 탁도, $\text{BOD } 1.6\text{ mg L}^{-1}$ 이하의 수질과 낮은 생물량은 국내 육지 상류하천 보다 낮은 수준으로(Kim and Won 2011; Kim *et al.* 2012a; Kim *et al.* 2012b), 산지하천의 조건을 잘 보여주었다.

3. 부착 규조류

출현한 부착 규조류는 2목 4아목 10과 28속 150종 17변종 2품종 2아종으로 총 171종이 출현하였다. 2008년 6

월 도근천, 2009년 4월 광령천과 옹포천에서 5종으로 가장 적게 출현하였으며, 2010년 9월 연외천에서 43종으로 가장 다양하게 나타났다(Fig. 4). 부착 규조류의 개체군밀도는 $1,208\sim 599,654\text{ cells cm}^{-2}$ 의 범위로 제주남해중권역에 위치한 연외천과 동홍천이 각각 평균 $147,326\text{ cells cm}^{-2}$, $130,801\text{ cells cm}^{-2}$ 의 개체군밀도를 보였지만 이를 제외한 하천에서는 $50,000\text{ cells cm}^{-2}$ 이하의 개체군밀도를 보이며 전반적으로 낮은 생물량을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 4). 부착 규조류상과 개체군밀도는 육지의 상류하천 수준으로 낮게 나타났다(Kim *et al.* 2000; Kim and Won 2011; Kim *et al.* 2012a; Kim *et al.* 2012b).

Watanabe *et al.* (1990)이 제시한 부착 조류의 구분에 따라 출현종을 구분하면 호청수성종이 33종(19.3%), 호오탁성종이 17종(9.9%) 출현하였다. 지점별 호청수성종의 출현비율은 $22.5\sim 29.2\%$, 호오탁성종의 출현비율은 $7.1\sim 13.4\%$ 의 범위로 광적응성종이 주로 분포하는 것으로 나타났다. 주요 출현 속(Genus)은 *Achnanthes*, *Cymbella*, *Fragilaria*, *Gomphonema*, *Melosira*, *Navicula*, *Nitzschia* 등이었고, *Achnanthes lanceolata*, *Gomphonema pumilum*, *Melosira varians*, *Navicula minima*와 *Nitzschia palea* 등이 우점종으로 나타났다(Table 1).

제주도북해중권역의 도근천은 평균 출현종수와 평균 개체군밀도가 각각 19종, $42,873\text{ cells cm}^{-2}$ 였으며, 호청수성종 *Achnanthes convergens*, *Gomphonema clevei*, 광적응성종 *Fragilaria capucina*, *Navicula cryptocephala* 등이 우점하는 것으로 나타났다. 도근천의 지류인 광령천은 평균 12종, $23,799\text{ cells cm}^{-2}$ 으로 다른 5개의 하천보다 낮은 종 다양성과 개체군밀도를 보이는 것으로 나타났으며, 호오탁성종 *Navicula minima*, *Fragilaria construens f. venter*, 호청수성종 *Rhicosphenia abbreviata*, 광적응성종 *Melosira varians*, *Navicula cryptocephala* 등이 우점종으로 나타났다. 제주서해중권역의 옹포천은 평균 15종, $25,340\text{ cells cm}^{-2}$ 으로 나타났으며, 호청수성종인 *Cocconeis placentula var. euglypta*, *Gomphonema pumilum*, 호오탁성종인 *Nitzschia palea*, 광적응성종인 *Achnanthes lanceolata* 등이 우점하였다. 제주남해중권역의 연외천은 평균 24종, $147,326\text{ cells cm}^{-2}$ 으로 가장 다양하고 많은 개체군밀도를 보이는 것으로 나타났다. 호오탁성종 *Fragilaria construens f. venter*, 호청수성종 *Gomphonema pumilum*, 광적응성종 *Melosira varians*, *Achnanthes lanceolata*가 주로 우점하였다. 동홍천은 평균 19종, $130,801\text{ cells cm}^{-2}$ 으로 나타났으며, 호청수성종 *Cocconeis placentula var. lineata*, 광적응성종 *Melosira varians*, *Achnanthes lanceolata* 등이

Table 1. Saproxenous and saprophilous species and Genus in streams of Jeju Island ($\times 10^3$ cells mL⁻¹(%))

	DG	GR	OP	YO	DH	Y
Saproxenous	100.6(23.4)	24.6(12.9)	48.9(19.3)	149(12.6)	319(24.4)	64.4(28)
Saprophilous	39.1(9.1)	90.8(47.7)	62.5(24.6)	124(10.5)	199.1(15.2)	72.4(31.5)
1. <i>Aulacoseira</i>	0(0)	0(0)	0(0)	1.7(0.1)	0(0)	0(0)
2. <i>Cyclotella</i>	12.3(2.9)	0(0)	0(0)	1.8(0.1)	4.5(0.3)	0(0)
3. <i>Melosira</i>	28.6(6.7)	31.5(16.5)	6.9(2.7)	286.8(24.3)	351.5(26.9)	0.2(0)
4. <i>Achnanthes</i>	55.4(12.9)	16.3(8.5)	63.7(25.1)	394.1(33.4)	318.4(24.3)	79.3(34.5)
5. <i>Amphora</i>	1.2(0.3)	0.1(0)	2.5(1)	2.4(0.2)	4.3(0.3)	0.1(0)
6. <i>Bacillaria</i>	1.2(0.3)	0(0)	0(0)	0.2(0)	0(0)	0(0)
7. <i>Caloneis</i>	0(0)	0(0)	0(0)	0.1(0)	0(0)	0(0)
8. <i>Cocconeis</i>	3(0.7)	0.1(0)	29.4(11.6)	25(2.1)	37(2.8)	2.7(1.1)
9. <i>Cymbella</i>	63.6(14.8)	3.1(1.6)	3.7(1.4)	6.2(0.5)	14.1(1.1)	6.8(2.9)
10. <i>Diatoma</i>	0(0)	0(0)	0(0)	0.2(0)	0(0)	0.1(0)
11. <i>Epithemia</i>	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0.6(0.2)
12. <i>Eunotia</i>	0(0)	0(0)	0.1(0)	8.6(0.7)	0.8(0.1)	0.1(0)
13. <i>Fragilaria</i>	92.5(21.6)	23(12)	16.2(6.4)	95.6(8.1)	160.9(12.3)	14(6.1)
14. <i>Frustulia</i>	0(0)	0(0)	1.1(0.4)	5.3(0.4)	0.2(0)	0(0)
15. <i>Gomphonema</i>	53.8(12.5)	10.7(5.6)	6.8(2.7)	96.8(8.2)	68.5(5.2)	14.7(6.4)
16. <i>Hantzschia</i>	0.6(0.1)	0(0)	0(0)	0(0)	0.4(0)	0(0)
17. <i>Hydrosera</i>	0(0)	0.1(0)	0.3(0.1)	0.1(0)	0(0)	0(0)
18. <i>Meridion</i>	0(0)	0(0)	0(0)	0.2(0)	0(0)	0(0)
19. <i>Navicula</i>	64.1(14.9)	88.3(46.4)	60.9(24)	153.1(13)	252.6(19.3)	91.5(39.9)
20. <i>Neidium</i>	0(0)	0(0)	0(0)	0.2(0)	0(0)	0(0)
21. <i>Nitzschia</i>	49.9(11.6)	16.2(8.5)	58.1(22.9)	81.6(6.9)	83.1(6.4)	16.9(7.3)
22. <i>Pinnularia</i>	0.6(0.1)	0(0)	0.2(0.1)	4.8(0.4)	2.3(0.2)	0.6(0.2)
23. <i>Reimeria</i>	0(0)	0(0)	0.4(0.1)	0(0)	0(0)	2.7(1.2)
24. <i>Rhicosphenia</i>	1.2(0.3)	1.7(0.9)	1.7(0.7)	11.7(1)	0(0)	0(0)
25. <i>Rhopalodia</i>	0(0)	0(0)	0(0)	0.3(0)	0(0)	0(0)
26. <i>Stephanodiscus</i>	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	9.5(0.7)	0(0)
27. <i>Surirella</i>	0.3(0.1)	0(0)	2.3(0.9)	0.2(0)	0.1(0)	0(0)
28. <i>Synedra</i>	1.3(0.3)	0(0)	0(0)	2.8(0.2)	0.6(0)	0(0)

우점하였다. 영천은 평균 13종, 28,693 cells cm⁻²으로 나타났다으며, 호오탁성종 *Navicula minima*, 호청수성종 *Achnanthes convergens*, 광적응성종 *Achnanthes lanceolata*, *Navicula cryptocephala* 등이 우점하였다.

4. 생물학적 수질평가

유기물지수 (Diatom index for organic pollution, DAIPo)는 8.4(불량, D등급)~86.8(최적, A등급)의 범위로 평균 56.0(보통, C등급)을 나타냈다. 지점별로는 평균 48.2(보통, C등급)~58.5(보통, C등급)로 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 5). 영양염지수(Trophic diatom index, TDI)에 의한 평가는 38.4(최적, A등급)~96.4(불량, D등급)의 범위로 평균 70.4(불량, D등급)을 나타냈다. 지점별로는 도근천이 평균 66.3(보통, C등급)으로 가장 높은 건강성을 나타냈으며, 옹포천이 평균 74.3(불량, D등급)으로 가장 낮은 건강성을 나타냈다. 구조류를 이용한 생물학적 평가에서 전반적으로 보통(C등급) 이하로 낮게 나타나는 것은 낮은 저서구조류 다양성과 개체군밀도, 제주도의

높은 강우량과 지질학적 특성 및 산록부 부터의 토지이용에 따른 높은 영양염의 농도 등 독특한 제주 하천의 특성에 따른 결과로 사료된다. DAIPo와 TDI를 이용한 생물학적 수질평가에서 건강성의 등급은 오염의 부가가 증가하는 하류로 갈수록 낮은 것으로 나타나는데(Lee and Jung 1992; Kim *et al.* 2009), 본 조사에서 제주의 하천들이 전반적으로 낮은 건강성의 등급을 나타낸 것도 조사 정점들이 하천의 하류 구간에 위치했기 때문인 것으로 사료된다.

육지하천에서 낮은 차수의 하천은 대부분 강의 상류 지역에서 볼 수 있으며 낮은 BOD와 낮은 생물량으로 특징지어진다(Wetzel 2001). 그런데 본 조사 하천은 하천의 하류부에 해당됨에도 불구하고 1차 또는 2차 하천으로 낮은 하천차수를 갖는다. 본 연구에서 나타나는 낮은 BOD와 낮은 생물량은 상류지역에서 나타나는 특징과 일치하지만, 생물학적 건강성 평가에서 나타난 낮은 건강성은 주로 인구밀집지역이나 농경지가 분포하는 중·하류에서 나타나는 수질의 특성이다. 제주도내 하천에서 이같은 독특한 양상이 나타난 것은 하천의 길이가

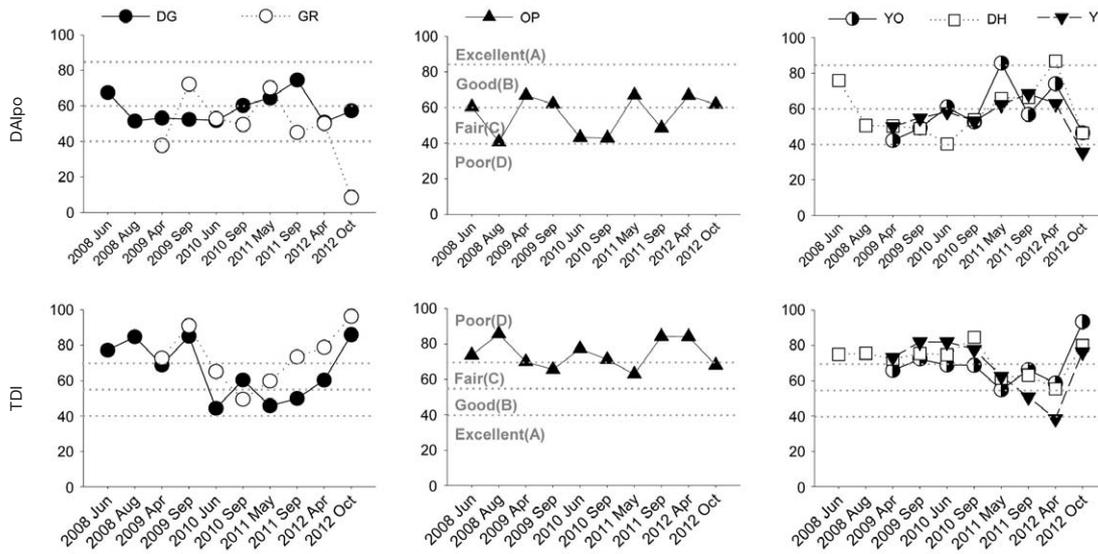


Fig. 5. Variations of DAIPo and TDI in 6 streams of Jeju Island from 2008 to 2012.

Table 2. Correlation coefficients (r) between physico-chemical factors and epilithic diatom indices in streams of Jeju Island (n=54)

	BOD	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	TP	PO ₄ -P	N/P	Chl- <i>a</i>
No. of sp.	0.089	0.004	0.287*	-0.012	-0.086	-0.106	0.138	-0.038
Den.	-0.061	-0.049	0.033	-0.02	-0.028	0.087	-0.029	-0.068
H	0.059	0.131	0.395**	0.083	-0.073	-0.248	0.247	0.019
DI	0.038	-0.236	-0.337*	-0.197	0.09	0.288*	-0.337*	0.027
TDI	-0.242	0.193	-0.166	0.231	0.211	0.161	0.081	-0.063
DAIPo	0.035	0.004	0.209	-0.018	0.231	0.104	-0.102	0.121

*: significant at the 0.05 level, **: significant at the 0.01 level

짧고 하상의 기울기가 크며, 침투와 용출이 반복되는 제주도 하천의 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

이화학적 요인과 생물학적 요인 사이의 상관분석결과 (Table 2)에서 출현종수와 다양도(H')는 NH₃-N과 유의한 양의 상관관계를 보였다. 우점도지수(DI)는 NH₃-N과 N/P 비율에서 유의한 음의 상관을 갖는 것으로 나타났으며, PO₄-P와는 유의한 양의 상관을 나타냈다. 그러나 TDI와 DAIPo와 이화학적 수질요인들과의 상관관계분석에서는 어느 것도 유의한 상관을 보이지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제주도내 하천들은 육안으로 확인되는 하천의 모습과 BOD에 의한 수질평가는 좋은 것으로 나타났으나, 부착 규조류를 통한 생물학적 수질평가는 낮은 하천 건강성을 나타냈다. 생물학적 수질평가 지수들과 이화학적 요인들과의 상관분석을 통해 뚜렷한 원인을 규명하기는 어려웠는데, 이는 산지형 하천의 지형적 특성과 하천의 하류부에서 나타나는 지리적 특성이 함께 나타나는 제주도내 하천의 독특한 특성에 의한 결과

로 사료된다. 제주도의 경우 대부분 용천에서 기원한 이러한 유수하천들이 중요한 수자원으로 활용되고 있기에 하천의 수생태건강성과 수질보존을 위해 보다 지속적이고 주기적인 연구와 관리가 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 제주도내 위치하는 상시 유수가 흐르는 6개의 하천을 선정하여 이화학적 요인과 부착 규조류 군집의 분포를, 2008년에서 2012년까지 연 2회 조사하였다. BOD는 0.0~1.6 mg L⁻¹의 범위로 높은 수질 상태를 나타냈으며, TN, NH₃-N, NO₃-N, TP와 PO₄-P는 각각 평균 4.432 mg L⁻¹, 0.069 mg L⁻¹, 3.822 mg L⁻¹, 0.092 mg L⁻¹, 0.071 mg L⁻¹으로 비교적 높은 영양염의 농도를 나타냈다. 조사기간 동안 출현한 부착 규조류는 총 171종으로 2목 4아목 10과 28속 150종 17변종 2품종 2아종으로 구성되어 있었으며, 주요 우점종은 광적응성종인 *Achnan-*

thes lanceolata, *Melosira varians*, 호청수성종인 *Gomphonema pumilum*, 호오탁성종인 *Navicula minima*, *Nitzschia palea* 등으로 나타났다. DAIPo와 TDI를 이용한 생물학적 수질 평가에서는 각각 평균 56.0 (보통, C등급), 70.4 (불량, D등급)으로 제주도내 하천의 수생태건강성은 낮은 것으로 나타났다.

REFERENCES

- Aller L, T Bennett, JH Lehr, RJ Petty and G Hackett. 1987. Drastic; A standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrogeologic setting. U. S. Environment Protection Agency. 455-475pp.
- An JG, CY Jung, HJ Park and TH Kim. 2007. Aquifers and seepage patterns of springwater in Seogwipo, Jeju Island. J. Korean Geomorphol. Assoc. 14:27-35.
- APHA. 2001. Standard methods for the examination of water and waste water. American Public Health Association, New York.
- Barbour MT, J Gerritsen, BD Snyder and JB Stribling. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates, and Fish. 2nd edition. Report number EPA 841-B-99-002. US EPA, Washington, 339p.
- Barnes RSK and KH Mann. 1991. Fundamentals of Aquatic Ecology. Black. Sci. 280pp.
- Besse-Lotoskaya A, PFM Verdonschot, M. Coste and B Van de Vijver. 2011. Evaluation of European diatom trophic indices. Ecol. Indic. 11:456-467.
- Chessman BC and SA Townsend. 2010. Differing effects of catchment land use on water chemistry explain contrasting behaviour of a diatom index in tropical northern and temperate southern Australia. Ecol. Indic. 10:620-626.
- Cho EL and YK Oh. 1998. The characteristics of water quality and the estimation of pollutant loadings from the flowing streams in Cheju Island. J. Kor. Environ. Sci. Soc. 7:845-851.
- Chung J, SD Kim and KS Lee. 1972a. Freshwater algae from Jae Ju Do Island (I). Korean J. Limnol. 5:13-24.
- Chung J, SD Kim and KS Lee. 1972b. Freshwater algae from Jae Ju Do Island (II). Korean J. Limnol. 5:15-32.
- Coste M and H Ayphassorho. 1991. Etude de la qualité des eaux du Bassin Artois-Picardie à l'aide des communautés de diatomées benthiques (application des indices diatomiques) Rapport Cemagref Bordeaux- Agence de l'Eau Artois-Picardie, Douai, 227pp.
- Fetter CW. 2008. Applied Hydrogeology. Prentice Hall, New Jersey. 598pp.
- Graham LC and LW Wilcox. 2000. Algae. Prentice Hall. Upper Saddle River. 640pp.
- Hwang SJ, NY Kim, DH Won, KK An, JK Lee and CS Kim. 2006. Biological assessment of water quality by using epilithic diatoms in major river systems (Geum, Youngsan, Seomjin River), Korea. J. Korean Soc. Water Qual. 22:784-795.
- Jeju Special Self-Governing Province. 2001. Master plan for local 2nd level rivers management. 655pp.
- Jeju Special Self-Governing Province. 2009. Master plan for 8 streams management including Geumsung stream. 298pp.
- Jeju Special Self-Governing Province. 2012a. Master plan for streams management in Seogwipo-si. 1110pp.
- Jeju Special Self-Governing Province. 2012b. The geography of Korea - Jeju. 373pp.
- Jung JW, BJ Lim, SH Cho, JH Choi, KD Song, DW Ha, HS Kim, SH Park, TH Hwang, SJ Jung, DJ Lee and KS Kim. 2012. The influence of land use on water quality in the tributary of the Yeongsan River basin. Korean J. Limnol. 45:412-419.
- Jung WY, SG Yang and JH Lee. 2013 Characteristics of runoff on urban watershed in Jeju island, Korea. J. Environ. Sci. Int. 22:555-562.
- Jung YY, DC Koh, BR Kang and KS KO. 2010. Groundwater vulnerability assessment in the Southern Jeju area using land use and lithology. KSEG Conference. 25-26pp.
- Kalff J. 2002. Limnology: inland water ecosystems. Prentice Hall. New Jersey. 592pp.
- Kelly M and BA Whitton. 1995. The trophic diatom index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. J. Appl. Ecol. 7:433-444.
- Kim BC, JH Park, GS Hwang, MS Jun and KS Choi. 2001. Eutrophication of reservoirs in South Korea. Limnology 2: 223-229.
- Kim HN, HK Park, SJ Park and OM Lee. 2012a. Biological water quality assessment of Joyang-river located at the upper region of North Han-river using DAIPo and TDI. Korean J. Limnol. 45:289-301.
- Kim JH, SJ Lee and HM Oh. 2000. Dynamics of epilithic algal community in the Geum river, Korea. Algae 15:287-297.
- Kim JW, Y Rhee and OM Lee. 2012b. The epilithic diatom community and water quality assessment in Pyengchang river and inflow streams of Gangwondo. J. Korean Soc. Water Environ. 28:531-537.
- Kim YJ and DH Won. 2011. Characteristics of epilithic diatom communities and physico-chemical habitats in the lake Imha basin (Banbyeon Stream, Kilan Stream and Nakdong River). Korean J. Environ. Biol. 29:180-194.

- Kim YJ, KA Shin and OM Lee. 2009. Water quality assessed by DAIPo and TDI of Bokha Stream and Dal Stream in South-Han River. *Korean J. Environ. Biol.* 27:414-424.
- Korea Meteorological Administration. www.kma.go.kr.
- Lavoie I, WF Vincent, R Pienitz and J Painchaud. 2004. Benthic algae as bioindicators of agricultural pollution in the streams and rivers of southern Québec Canada. *Aquat. Ecosyst. Health.* 7:43-58.
- Lee JH and J Jung. 1992. Station variation of epilithic diatoms according to pollution degree from the Kumho river. *Korean J. Limnol.* 25:31-40.
- Lee JH and M Chang. 1991. On the freshwater phytoplankton communities of Cheju Island. *Korean J. Limnol.* 24:77-83.
- Lee JH. 1987. A taxonomic study on phytoplankton in Backrodam Crater of Halla Mt. *Korean J. Limnol.* 20:101-112.
- Potapova M and DF Charles. 2007. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States. *Ecol. Indic.* 7:48-70.
- Redfield AC. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.* 46:205-255.
- Schneider S and EA Lindstrøm. 2009. Bioindication in Norwegian rivers using non-diatomaceous benthic algae: The acidification index periphyton (AIP). *Ecol. Indic.* 9:1206-1211.
- Statistics Korea. 2013. *Korea Statistical Yearbook*. 1074pp.
- Watanabe T, K Asai and A Houki. 1990. Numerical simulation of organic pollution in flowing waters. In *Encyclopedia of Environmental Control Technology, 4. Hazardous Waste Containment and Treatment*. pp. 251-281. Gulf publishing Company, Houston.
- Wetzel RG. 2001. *Limnology-Lake and River ecosystem*. 3rd ED. Academic Press. 1,006pp.
- Youn JS and SW Park. 2000. Hydrogeochemical characteristics of spring water in Halla mountain region, Cheju Island. *J. Kor. Ear. Sci. Soc.* 21:81-92.

Received: 27 November 2013

Revised: 18 December 2013

Revision accepted: 23 December 2013