

〈Original article〉

도시 기후 변화가 도시하천의 부착규조류 군집에 미치는 영향

이유정* · 김경선 · 조정구

부산광역시보건환경연구원

Distribution of Epilithic Diatom Assemblages in an Urban Stream in Busan: Effected of Urban Climatic Conditions

Youjung Lee*, Kyungsun Kim and Jeonggoo Cho

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment 120, Hambakbong-ro 140 Beon-gil, Buk-gu, Busan Metropolitan City, Republic of Korea

Abstract - This study illustrates changes in the epilithic diatom assemblages in response to urban climatic conditions. We further assess the impact of abnormal urban climate to the urban stream environment. Epilithic diatoms, water chemical and physical variables were sampled every quarter, and assessed at 3 Oncheon stream sites, for a period of two years (from 2013~2014). The variation of physiochemical properties such as BOD, COD, T-N and T-P, show that the water quality was strongly influenced with long periods of drought and flood disturbance. Epilithic diatom assemblages were separated along the stream sites; however, the physical disturbance from urban drought and stormwater changed the composition of diatom assemblages instead of decreasing the taxonomic richness. Thus, our results suggest that epilithic diatom assemblages are altered in response to urban climatic changes, resulting in variations of stream conditions. Hence, strategies of climate change adaptation are required when considering urban stream environments.

Key words : urban stream, epilithic diatom assemblage, drought, stormwater, nutrients

서 론

전 지구적으로 기후 변화가 진행되면서 우리나라는 지난 30년(1981~2010년)간 연평균 기온이 1.2°C 상승했으며 2100년에는 열대기후로 변화하여 폭염일수 증가, 심각한 가뭄과 폭우 등 기상이변이 있을 것으로 예상된다(IPCC 2007; Korea Meteorological Administration 2012). 이러한 현상은 지구적 물수지의 변화를 초래할 뿐 아니라 가뭄 및 국지성 호우에 따른 도시 기능의 마비, 하천의 건천화, 비점오염물질의 거동 변화에 따른 수질 악화 및 수생태계 파괴 등이 예

상되고 있다. 특히 인구의 80% 이상이 거주하며 인구 과밀화 및 산업화로 열악해진 도시 환경 하에서 도시 하천은 많은 내외부적 물리화학적 환경요인에 더욱 취약할 수밖에 없게 되었다(Sujay *et al.* 2008).

도시 하천은 도시를 관류하는 소규모 하천으로, 개발로 집약적인 점 및 비점오염물질에 쉽게 노출되고 일부 구간의 복개로 도로나 주차장으로 훼손되었으며 하천 건천화와 오염으로 수생태계의 기능이 상실될 가능성이 높았다(Grimm *et al.* 2000; Walsh *et al.* 2005). 1990년대부터 하천정비사업, 자연형하천 정비사업 등으로 수질관리와 수환경 생태계 복원에 중점을 두며 도시 하천의 자연성을 지속적으로 회복시키고자 하였으나(Kim and Ahn 2006; Lee 2007; Choi 2010)

* Corresponding author: Youjung Lee, Tel. 051-309-2935, Fax. 051-309-2939, E-mail. youjung202@korea.kr

불규칙적인 환경 변화에 노출된 하천 생태계에서 1차 생산자인 부착조류와 소비자 간의 상호 작용이 부정적 영향으로 나타나고 서식환경의 변화가 일어나기도 하였다 (Karr and Chu 1999; Ledger *et al.* 2008).

수생태계에서 기후 변화, 유무기물 오염, 영양물질의 유입 등 자연적 또는 인위적 교란에 대하여 부착조류, 저서성대형무척추동물 등 생물의 특이적 반응은 수체의 다양한 변화로 해석 및 평가되어지고 있다 (Watanabe *et al.* 1986; Fritz *et al.* 1991; Wang *et al.* 2005; McKinney 2008). 특히, 부착규조류는 다양한 기질에 부착하여 생물막을 형성하는 수중 생태계의 하위 영양단계에 속하는 유기물 생산자로 수심이 얇은 하천에서 영양물질의 이용도가 크고 하천의 물질대사 기여도도 큰 것으로 알려져 있으며 (Chessman *et al.* 2006) 수환경 변화에 민감하기 때문에 하천의 수질 및 생태계 변화를 평가하거나 이해하는 데 좋은 지표생물로 이용되어지고 있다 (Karin *et al.* 2007; Feio *et al.* 2009).

하천 생태계의 부착규조류는 주로 종조성과 현존량에 따른 생물학적 수질 평가 및 시공간적 동태, 부착규조류 군집과 물리화학 및 생물적 요인과의 관계에 대한 연구가 집중되어져 있으나 (Cho *et al.* 1998; Wang 2001; Kim 2004; Kim and Lee 2009; Jung *et al.* 2014) 집중호우 또는 갈수기에 의한 환경의 변화로 부착규조류 군집에 미치는 영향에 관한 연구는 미비한 편이다 (Ledger and Hildrew 2001; Park *et al.* 2012a; Barthès *et al.* 2015).

본 연구는 부산의 대표적인 도시하천인 온천천을 대상으로 갈수기 및 집중호우 등의 환경적 교란이 수질 및 부착규조류 군집에 미치는 영향을 파악하고 국지적인 환경 변화에 대응해야 하는 도시하천의 유지관리 방안을 찾고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점

온천천은 부산의 금정산 범어사 계곡에서 발원하여 연장 14.13 km, 유로연장 15.62 km, 유역면적 55.97 km²의 하천으로 주거지가 밀집한 금정구, 동래구, 연제구 등 3개 구를 거쳐 수영강으로 합류하고 있다. 과거 도시화와 산업화의 중심에 위치하여 수질오염의 대표적인 하천으로 인식되기도 하였으나 1995년 온천천 SOS운동을 시발점으로 환경친화적인 생태 복원을 하고 있으며 부족한 하천유지용수는 낙동강원수의 통수로 확보하고 있다.

본 연구에서 조사지점은 하천유지용수를 통수하는 낙동강원수의 영향을 받지 않으며 온천천의 상류에 속하는 청룡2

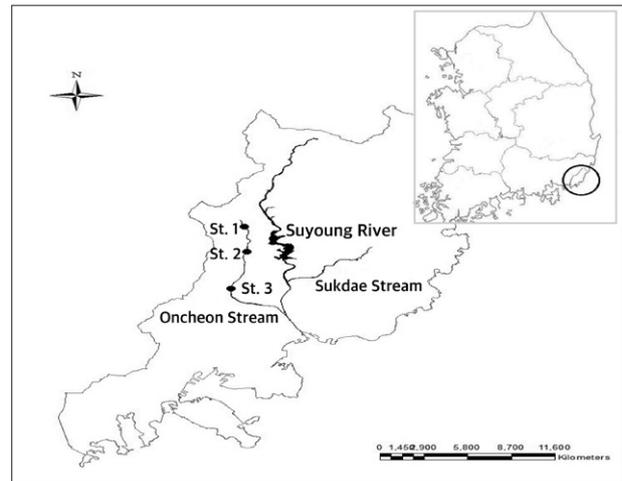


Fig. 1. Sampling sites at the Oncheon stream in Busan.

호교 부근 (St. 1), 하천유지용수로 낙동강원수가 통수되는 부곡교 (St. 2), 도심지를 관통하며 시민들의 접근성이 높은 세병교 (St. 3) 등 상류에서 하류로 이어지는 3개 지점으로 선정하였으며 자세한 위치는 Fig. 1과 같다.

2. 물리화학적 조사

모든 시료는 2013년~2014년 2년 동안 계절별 분기 1회 (2월, 5월, 8월, 11월)로 총 8회에 걸쳐 표층에서 채수하였다. 채취한 시료는 현장측정기 (YSI 556MPS, USA)를 이용하여 수온, 수소이온농도 (pH), 용존산소농도 (DO), 전기전도도 (EC)를 현장에서 측정하였고 4°C 이하의 냉장조건에 보관하여 실험실로 운반하였다. 수질오염공정시험기준 (2012), Limnological Analyses (3rd), Standard Method (APHA 2012)에 따라 생물화학적산소요구량 (BOD), 화학적산소요구량 (COD), 총질소 (T-N), 총인 (T-P), 부유물질 (SS)을 분석하였다. 강우량은 기상청에 게재된 운영정보 자료를 참고하였고 수로 폭과 수심은 자료 측정하였으며 유속은 마그네틱 유속계 (FLO-MATE model 2100)를 이용하여 조사지점을 횡단하며 0.2 m 간격으로 수심 약 2/3지점에서 측정 후 평균하였다. 각 조사지점의 유량은 (수로 폭 × 수심 × 평균 유속)의 결과로 도출하였다.

3. 부착규조류 조사

부착규조류 시료는 각 조사지점에서 약 100 cm² 면적의 단단한 기질들을 골라 표면을 솔로 긁어 채집 후 Lugol's solution으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 부착규조류의 군집 조성을 파악하기 위해 채집된 시료는 산 (질산 (HNO₃,

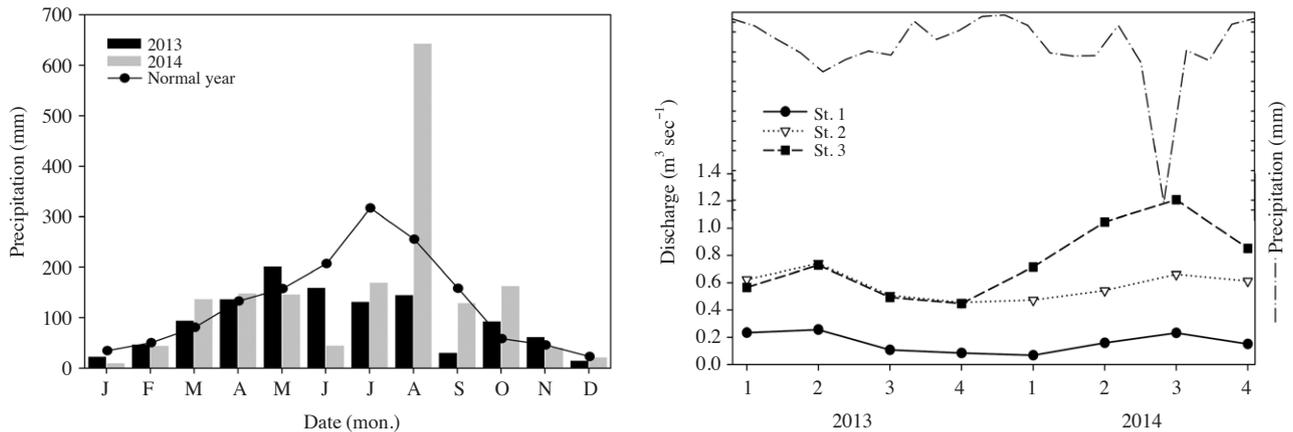


Fig. 2. Seasonal changes of precipitation and discharge in the Oncheon stream for 2 years (2013~2014).

Table 1. The result of physiochemical parameters of water quality at 3 sites of the Oncheon stream

	Stream width (m)	Current (cm s ⁻¹)	Discharge (m ³ sec ⁻¹)	Water temp. (°C)	pH	DO (mg L ⁻¹)
St. 1	2.0±0.8	0.25±0.15	0.16±0.07	15.4±7.0	7.7±0.5	10.6±2.3
St. 2	7.9±0.8	0.30±0.13	0.58±0.10	17.9±7.7	8.0±0.6	10.1±2.5
St. 3	16.0±1.1	0.18±0.15	0.76±0.27	18.2±6.9	7.7±0.6	9.0±3.0

65%) 처리 후 mount media로 영구 표본을 제작하였고 광학 현미경 (AXIO imager A2, ZEISS, Germany)으로 400~1000 배율 하에 가능한 모든 종을 Picture Book and Ecology of the Freshwater Diatom (2005), The Diatoms: Applications for the environmental and earth sciences (2nd) (2010), <http://westerndiatoms.colorado.edu> 등을 참고하여 동정하였다. 시료당 부착규조류의 피각 수를 최소 500개체 이상 계수한 후 종별 상대빈도(relative abundance)를 산출하여 우점종 및 우점율, 영양염지수(TDI) 등으로 정리하였다.

4. 분석 자료의 처리

조사된 결과들의 도표는 SigmaPlot (12.5 for Windows)을 이용하였고, 각 조사 항목 간의 상관관계 분석은 Pearson's correlation analysis로 통계적 유의성은 $P < 0.05$ 을 기준으로 평가하였다(SPSS 12.5).

결 과

1. 물리화학적 조사에 따른 환경요인 분석

조사기간 동안 온천천 유역 강수량과 유량은 Fig. 2와 Table 1과 같으며 연강수량은 2013년 1133.1 mm, 2014년

1693.1 mm로 평년(1981~2010년) 1519.1 mm에 비해 2013년은 386 mm 적게 내렸고 2014년은 174 mm 많이 내렸다. 2013년 동절기 1월, 2월, 12월과 하절기 6월~9월에 가뭄이 지속되었고 2014년 8월 한 달간의 집중호우가 연강수량의 38%로 편중되는 등 전반적으로 강수량의 감소로 갈수기가 지속되었으나 국지성 집중호우의 빈도와 수량은 증가하여 강수량의 편차가 크게 나타나는 이상기후의 영향을 보였다(Korea Meteorological Administration 2012). 온천천의 유량 변화는 St. 1과 St. 3에서 유량의 차이가 있지만 강수량의 변동과 유사한 패턴을 보였으나 St. 2에서는 일정한 유량을 유지함에 따라 강수보다 통수되는 하천수량에 더 많은 영향을 받을 수 있었다. 특히, St. 3의 유량은 2013년 0.45~0.73 m³ sec⁻¹에 비해 2014년 0.72~1.21 m³ sec⁻¹로 유량 변동이 크게 나타남으로 강수량 변동뿐만 아니라 주변 환경의 변화에도 영향을 받는 것으로 보였다. 수온은 5.4~32.1°C로 계절적 변동을 보였으나 도심지를 통과하는 St. 2와 St. 3에서 St. 1보다 높은 수온을 나타냈다. pH는 6.7~9.0으로 조사 지점들 사이의 차이를 구분할 수 없었으나 DO는 St. 1에서 7.5~14.6 mg L⁻¹, St. 2에서 6.9~15.0 mg L⁻¹로 비슷한 양상을 보였으나 St. 3에서 2.9~12.4 mg L⁻¹로 변화 폭이 컸으며 환경의 영향에 민감한 것으로 나타났다.

온천천의 이화학적 요인은 Fig. 3과 같으며 EC는 51~430 μS cm⁻¹, SS는 0.0~7.9 mg L⁻¹, BOD는 0.3~5.7 mg L⁻¹,

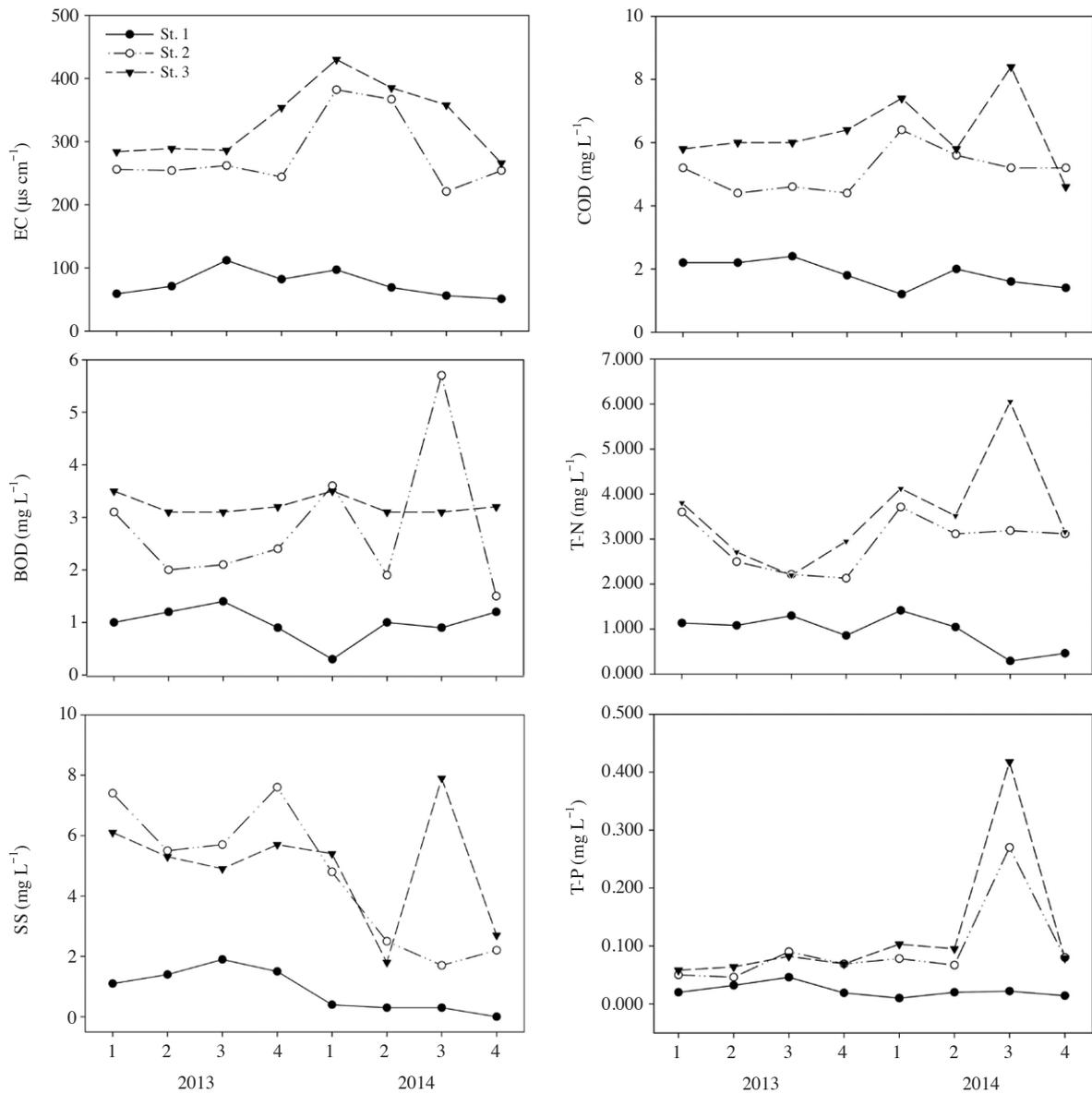


Fig. 3. Physiochemical factors and nutrients in the Oncheon stream, in the year 2013 and 2014.

COD는 1.2~8.4 mg L^{-1} 의 범위를 보였다. 갈수기가 길었던 2013년의 수질 변동은 크지 않았으나, St. 2의 SS는 다른 조사지점보다 높게 나타났다. 이는 갈수기로 인한 유량감소로 부유물질의 침강이 활발히 일어난다고 하나(Toy *et al.* 2002; Lee *et al.* 2007) 하천유지용수로 통수되는 유량과 유속으로 유실되는 하상 저니의 영향을 받은 것으로 판단되었다. 가뭄과 국지적 집중호우가 있었던 2014년의 수질 변화는 크게 나타났다. 긴 가뭄이 지난 후 집중 호우에 의한 환경변화에 따라 BOD, COD와 T-N 농도가 높게 나타나며 지점별로 유사한 패턴을 보였지만, EC는 가뭄이 지속되는 동안 높았으나 국지적 집중호우가 있었던 2014년 3분기에 낮은 값을 나

타냈고 다음 조사 시기에 2013년 동절기 수준으로 감소하였다. 이는 강우에 의해 유량이 증가하면서 희석효과로 EC에 영향을 주는 것으로 알 수 있었다. 또한, 강우 시 자연적이거나 인위적으로 하천 내 질소계 영양물질이 증가하나 가뭄이 계속되면 외부로부터의 유입이 줄어들어 하천 내 농도가 감소한다는 선행연구와 유사한 결과를 보였다(Showers *et al.* 1990; Dahm *et al.* 2003). 하지만, T-P 농도는 상류에서 갈수기 및 집중 강우에 의한 변화를 거의 보이지 않았으며 중·하류에서 2013년~2014년 상반기까지 변동이 거의 없었으나 집중호우에 급격한 농도 증가를 나타냈다. 이는 강우 시 도심을 관통하여 흐르는 하천의 주변 도심지에 축적되었던

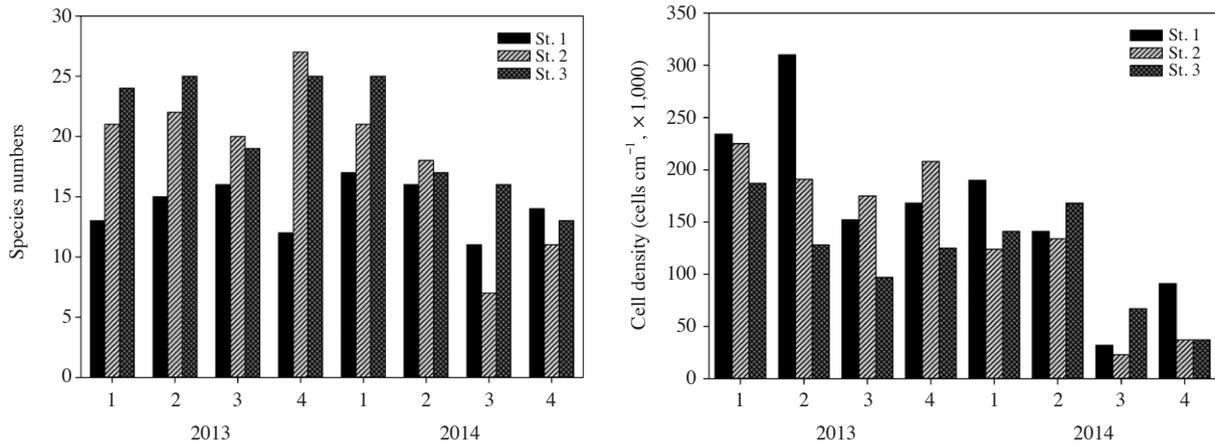


Fig. 4. Species number and cell density of epilithic diatoms at 3 sites in the Oncheon stream.

Table 2. Dominant species and subdominant species at 3 sites in the Oncheon stream

	1 st Dominant species	%	2 nd Dominant species	%	
St. 1	2013. 1	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i>	36.8	<i>Cocconeis placentula</i>	18.8
	2013. 2	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i>	19.7	<i>Cocconeis placentula</i>	19.4
	2013. 3	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i>	38.2	<i>Cocconeis placentula</i>	17.1
	2013. 4	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i>	37.5	<i>Cocconeis placentula</i>	22.6
	2014. 1	<i>Gomphonema clevei</i>	37.4	<i>Gomphonema quadripunctatum</i>	13.2
	2014. 2	<i>Gomphonema clevei</i>	26.2	<i>Achnanthes subhudsonis</i>	24.1
	2014. 3	<i>Fragilaria construens</i> f. <i>venter</i>	18.8	<i>Achnanthes minutissima</i>	15.6
	2014. 4	<i>Achnanthes subhudsonis</i>	28.6	<i>Achnanthes convergens</i>	15.4
St. 2	2013. 1	<i>Cocconeis placentula</i>	17.3	<i>Achnanthes convergens</i>	16.0
	2013. 2	<i>Cocconeis placentula</i>	20.4	<i>Achnanthes convergens</i>	15.7
	2013. 3	<i>Cocconeis placentula</i>	25.1	<i>Achnanthes convergens</i>	17.7
	2013. 4	<i>Achnanthes minutissima</i>	15.9	<i>Cocconeis placentula</i>	13.9
	2014. 1	<i>Cocconeis placentula</i>	14.5	<i>Gomphonema quadripunctatum</i>	10.5
	2014. 2	<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>vaucheriae</i>	25.4	<i>Cocconeis placentula</i>	14.2
	2014. 3	<i>Gomphonema parvulum</i>	39.1	<i>Gomphonema parvulum</i> var. <i>lagenula</i>	21.7
	2014. 4	<i>Achnanthes convergens</i>	21.6	<i>Achnanthes minutissima</i>	13.5
St. 3	2013. 1	<i>Nitzschia inconspicua</i>	16.0	<i>Gomphonema parvulum</i> var. <i>lagenula</i>	7.0
	2013. 2	<i>Nitzschia dissipata</i>	7.8	<i>Nitzschia palea</i>	7.8
	2013. 3	<i>Nitzschia inconspicua</i>	20.6	<i>Nitzschia dissipata</i>	10.3
	2013. 4	<i>Nitzschia inconspicua</i>	12.8	<i>Gomphonema abbreviata</i>	8.0
	2014. 1	<i>Navicula capitatoradiata</i>	24.1	<i>Achnanthes convergens</i>	12.1
	2014. 2	<i>Nitzschia inconspicua</i>	23.8	<i>Fragilaria construens</i> f. <i>venter</i>	14.3
	2014. 3	<i>Nitzschia amphibia</i>	26.9	<i>Cocconeis placentula</i>	16.4
	2014. 4	<i>Nitzschia amphibia</i>	35.1	<i>Melosira varians</i>	13.5

외부기원 비점오염물질의 유입에 따라 T-P 농도가 가장 많은 영향을 받았음을 알 수 있었다(Christopher *et al.* 2005).

2. 부착규조류 군집 분포

동정된 부착규조류는 총 80종으로 2목, 3아목, 7과, 17속 70 및 10변종으로 중심규조목 6종과 익상규조목 74종으로 조사되었다. 조사지점별 출현종수는 St. 1에서 11~17종, St.

2에서 7~27종과 St. 3에서 13~25종으로 출현하였다. 2014년 1분기에 각 지점별 종수가 가장 많았으나 2014년 3분기에 가장 적게 출현하였다. 평균 출현종수로 보면 St. 1의 부착규조류 종수가 가장 적었으며 St. 3에서 많이 출현하였다(Fig. 4). 조사지점별 밀도는(23~310)×1000 cells cm⁻¹의 범위를 보였으며 2013년 1분기에 밀도가 가장 높았고 2014년 3분기에 가장 낮았다. 2013년의 부착규조류 밀도가 2014년보다 평균적으로 높게 나타났으며 2013년과 2014년 1, 2분

기 동안 St. 1의 밀도가 다른 조사지점보다 높게 나타남으로 지속되는 가뭄에 의한 적은 유량과 유속이 부착규조류 번성에 영향을 미쳤음을 알 수 있었다(Park *et al.* 2012a)(Fig. 4). 온천천의 상류에서 하루까지의 부착규조류의 우점종 및 우점율은 Table 2와 같다. 온천천의 우점종은 우점종은 7.8~39.1%, 아우점종은 7.0~24.1%로 조사되었다. St. 1의 우점종은 호청수성종인 *Cocconeis placentula* var. *lineata*, *Gomphonema clevei*, *Fragilaria construens* f. *venter*, *Achnanthes subhudsonis*였고 아우점종은 호청수성종으로 *Cocconeis placentula*, *Achnanthes convergens* 및 광적응성종인 *Achnanthes minutissima*로 호청수성종들이 주로 분포하였다. St. 2 우점종은 호청수성종인 *C. placentula*, *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae*, *A. convergens* 및 광적응성종 *A. minutissima*, 호오탁성종 *Gomphonema parvulum*이었으며 아우점종은 호청수성종인 *A. convergens*, *Gomphonema quadripunctatum*, *C. placentula* 및 광적응성종인 *A. minutissima*, 호오탁성종 *Gomphonema parvulum* var. *lagenula*가 조사되어 호청수성종이 주로 분포하나 환경 변화에 따라 부착규조류 종이 다양하게 나타났음을 볼 수 있었다. St. 3의 우점종은 주로 호오탁성종인 *Nitzschia inconspicua*, *Nitzschia dissipata*, *Nitzschia amphibia*, *Navicula capitatoradiata*였고 아우점종 또한 호오탁성종 *G. parvulum* var. *lagenula*, *Nitzschia palea*, *Gomphonema abbreviata*가 조사되었으나 호청수성종인 *A. convergens*, *F. construens* f. *venter*, *C. placentula*도 나타났다.

3. 환경요인에 따른 부착규조류 동태 변화

2013년 하반기부터 2014년 봄철까지 지속된 갈수기 동안 부착규조류의 우점종 구성이 바뀌었고 2014년 하절기에 국지적인 집중호우로 일시적으로 증가된 유량과 유속으로 생물량은 급격하게 줄었다(Fig. 5). 2013년 3분기부터 2014년 상반기에 걸쳐 St. 1의 우점종은 *C. placentula* var. *lineata*에서 *G. clevei*로 바뀌었을 뿐만 아니라 주로 *Gomphonema*속이 주로 분포하면서 St. 1의 생물량 변화에 영향을 미쳤다. 이 시기 동안 일정 유량을 유지할 수 있는 St. 2의 주요 출현종들은 호청수성종과 광적응성종들이 골고루 나타났으나 St. 3의 주요 출현종은 호오탁성종 중 *Nitzschia*속에서 *Navicula*속으로 바뀌었다. *C. placentula*, *A. convergens* 등 빈영양/중영양성 물환경에 서식하는 호청수성종 St. 3에서 조사되었으나, 가뭄이 지속되고 유량이 줄어들면서 온천천 상류의 기질들이 공기 중으로 노출되고 표면에 부착되어 있던 부착규조류가 탈리되어 이동되었고 유속이 느려지는 하류의 기질에 부착한 것으로 판단되어 하류에 서식하는 부착

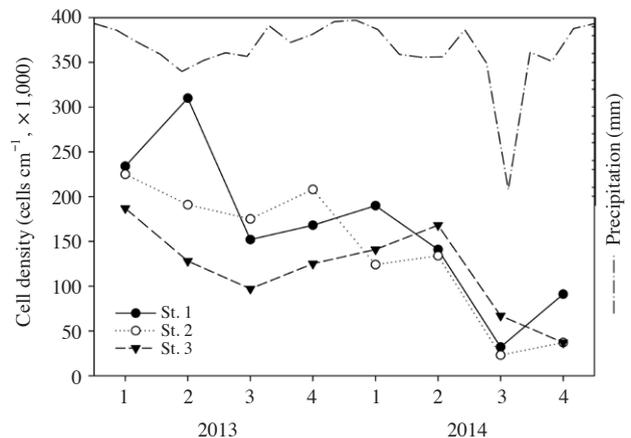


Fig. 5. Difference between Cell densities of epilithic diatoms affected by precipitation.

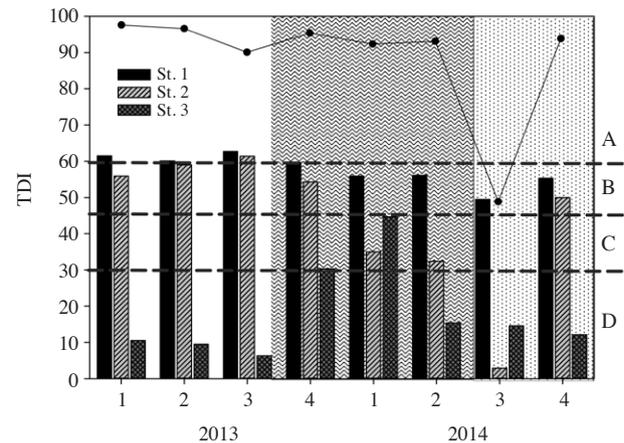


Fig. 6. TDI and Ecological integrity compared with the average total organic phosphorus concentrations (—) at each site in the Oncheon stream. Two areas show the affected periods from drought (▨) and monsoon (▧), respectively.

규조류로 보기는 어려웠다.

부착규조류를 통한 온천천의 생태적 건강성을 확인하기 위해 영양염지수(TDI)를 구하였다(Fig. 6). 온천천의 상류에서 하루까지 2013년과 2014년은 환경 변화에 대해 차이를 나타냈다. 2013년 동안 St. 1의 TDI는 61.0이었으며 생물등급 A로 '최적'의 환경상태로 조사되었다. 그러나, 2014년의 St. 1의 TDI는 54.2이었고 생물등급 B, 환경상태는 '양호'로 온천천 상류의 생태적 건강성에 다소 변동이 생겼다. St. 2의 TDI는 2013년 57.6과 2014년 30.1로 생물등급이 B에서 C로, 환경상태는 '양호'에서 '보통'으로 바뀌었다. 그러나, St. 3의 TDI는 14.2에서 21.7로 생물등급은 모두 D였고 환경상태는 '불량'이었다. 온천천의 생태적 건강성은 2013년 동안 상류부터 하류에 이르기까지 지점별 특성을 보였으나 2013

년 하반기부터 2014년 상반기까지 지속된 갈수기 후 국지적 호우로 2013년에 비해 악화된 환경상태를 보였다(Fig. 6). 또한, 온천천의 TDI 및 생물등급의 변화는 유역의 전 지점에 걸친 비점오염물질의 유입 정도에 따라 뚜렷한 변화를 보인 종인의 평균 농도 분포와 상반된 양상을 보여 온천천의 생태환경은 주변 환경 영향에 민감한 하천임을 보여주었다.

고 찰

온천천은 부산의 대표적인 하천으로 과거 산업화와 도시화로 수환경이 교란되어 악취가 심하고 경관이 저해된 하천이었으나 1990년대부터 하천을 살리고자 하는 민관의 노력으로 오염된 도시하천 수질 복원의 우수한 사례로 거론되고 있다(Park *et al.* 2012b). 본 연구 결과를 보면 도시화가 진행된 유역에서 가뭄 지속 기간 및 국지성 집중호우 등 환경 변화에 의한 하천 유출 특성과 도심지 비점오염물질 유입 정도에 따라 급격한 하천 수질 변화가 생겼음을 알 수 있었다. 2014년 긴 가뭄과 강한 집중 호우로 BOD, COD, T-N 농도와 T-P 농도는 강우 시 하천 주변 도심지에서 갈수기 동안 축적되었던 외부기원물질의 유입에 의해 짧은 시간 동안 급격한 영향을 받고 화학적 수질 특성이 변하였음을 보여주었다. 부착규조류는 상류에서 하류로 갈수록 유역 변화 및 수질오염에 따른 종조성의 변화로 군집이 환경스트레스에 적응함을 보여주었다(Stevenson 1997). 특히, 온천천 종류의 높은 종풍부도와 다양성은 개척종의 공존, 스트레스에 대한 내성과 오염이 진행되는 수역에 서식하는 종들이 방해요소의 중간 강도에서 높은 다양성을 보인다는 가설을 충족하였다(Connell 1978). 수질에 많은 영향을 미쳤던 국지적 환경 변화 측면에서 보면, Park *et al.*(2012a)은 갈수기 동안의 유량 감소는 부착규조류의 종조성 변화보다 생물량의 변화에 더 큰 영향을 미친다고 하였으나 도심지의 외부 오염이 덜한 온천천 상류의 부착규조류 종조성은 가뭄기간 동안 *Cocconeis placentula* var. *lineata*에서 *Gomphonema clevei*로 우점종이 바뀌고 *Gomphonema*속 등 주요 분포종으로 바뀌면서 종조성과 생물량에 변화가 생겼다. 이는 가뭄 기간이 길어질수록 유량이 감소하고 공기 중에 노출되는 기질 면적이 증가하며 가용 영양염류가 감소하는 등 서식환경 변화에 대응하여 부착규조류 군집은 종조성이 바뀌면서 환경에 적응하는 것으로 사료되었으나 Barthès *et al.*(2015)이 가뭄에 의한 부착규조류의 폐사율이 70~80%에 달한다고 한 점을 비교한 결과는 명확하게 도출할 수 없었다. 또한 갈수기 후 집중 강우에 의한 온천천의 유량과 유속이 증가하고 부착규

조류는 종조성 변화보다 기질로부터 탈리되어 생물량이 급격하게 감소되는 등 환경 변화가 도시하천 생태계에 직간접적으로 많은 영향을 끼치는 것으로 판단되었다(Barry and Robert 2002).

따라서, 도심 생태복원하천으로 알려진 온천천은 물리화학적 및 생태적 특성을 반영하려는 노력에도 불구하고 긴 가뭄과 국지적 집중 호우 등에 민감하여 부정적 교란이 일어날 수 있으므로 이에 대한 적극적인 대응관리가 필요한 것으로 판단된다. 따라서 기후친화적인 도시하천으로 유지관리하기 위하여 가뭄 지속기간, 유량의 감소 및 국지적 집중호우에 의한 하천환경 변화에 따른 부착규조류의 동태에 대한 모의실험과 현장조사가 장기간 연속적으로 수행될 필요가 있는 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 부산시의 대표적인 도시하천인 온천천에서 가뭄 및 집중호우 등 환경적 교란이 수질 및 부착규조류 군집에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2013년~2014년 2년간 연구를 수행하였다. 긴 갈수기였던 2013년 4분기~2014년 1분기와 2014년 3분기에 강한 집중 호우 사이에 급격한 하천 수질 변화를 보였다. 부착규조류는 비교적 짧은 유하거리에 비해 도심화 정도에 따라 상류에서 하류까지 뚜렷하게 군집 구조 변화를 보였으나 긴 가뭄기간 동안 감소된 유량은 종조성에 영향을 주어 *Cocconeis placentula* var. *lineata*에서 *Gomphonema clevei*이 우점종으로 바뀌고 *Gomphonema*속 등 주요 분포 종으로 조사되었다. 갈수기 이후 강한 강우로 부착규조류의 종조성보다 생물량이 급격하게 감소되었고 이는 국지적 기후 변화로 수생태계 구조와 기능에 많은 영향이 생김을 알 수 있었다. 따라서, 기후 변화에 의한 도시기후의 이상현상과 도시하천의 수질 및 부착규조류의 분포 특성 연구는 도시하천 생태계 특성과 변화 연구에 있어서 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대하며 국지적인 환경 변화에 대응하는 도시하천의 유지관리 방안을 찾는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원에 지원한 「환경분야 시험·검사의 국제적 적합성 기반 구축」 예산으로 수행된 연구임을 밝힙니다.

REFERENCES

- APHA-AWWA-WEF. 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater (22th ed.). APHA-AWWA-WEF, Washington D.C. USA
- Barthès A, Leflaive J, Coulon S, Peres F, Rols JL and Ten-hage L. 2015. Impact of drought on diatom communities and the consequences for the use of diatom index values in the river Maureillas (Pyrénées-Orientales, France). *River Res. Applic.* 31:993-1002.
- Barry JFB and Robert AS. 2002. Taxonomic richness of stream benthic algae: Effects of flood disturbance and nutrients. *Limnol. Oceanogr.* 47:1175-1186.
- Chessman BC, Bate N, Gell PA and Newall P. 2006. A diatom species index for bioassessment of Australian rivers. *Marine and Freshwater Res.* 58:542-557.
- Choi JK. 2010. A study on the ecological rehabilitation for urban stream - focused on Suam stream in Anyang city -. *J. Korean Env. Res. Tech.* 13:133-144.
- Cho HS, Kim DH and Boo SM. 1998. Water environment and flora of epilithic diatoms in Yudeungchon stream Daejeon. *Korean J. Environ. Bio.* 16:273-280.
- Christopher JW, Allison HR, Jack WF, Peter DC, Peter MG and Raymond PM. 2005. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 24:706-723.
- Connell JH. 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science* 199:1302-1310.
- Dahm CN, Baker MA, Moore DI and Thibault JR. 2003. Coupled biogeochemical and hydrological responses of streams and rivers to drought. *Freshwater Biol.* 48:1219-1231.
- Fritz SC, Juggins S, Battarbee RW and Engstrom DR. 1991. Reconstruction of past changes in salinity and climate using a diatom-based transfer function. *Nature* 352:706-708.
- Grimm NB, Grove JM, Pickett STA and Redman CL. 2000. Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems. *J. Biosciences.* 50:571-584.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. The physical science basis, IPCC contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC. Cambridge uni. press, UK and NY, USA.
- John PS and Eugene FS. 2010. The Diatoms: Applications for the environmental and earth sciences (2nd). Cambridge uni. press.
- Jung MH, Cho HJ, Yun JH and Lee HY. 2014. Epilithic diatom communities in streams of Jeju island. *Korean J. Environ. Biol.* 32:16-25.
- Karin CP, Donald FC and Thomas JB. 2007. Diatom-based TP and TN inference models and indices for monitoring nutrient enrichment of New Jersey streams. *Ecolo. Indi.* 7:79-93.
- Karr JR and Chu EW. 1999. Restoring life in running waters: Better biological monitoring. Island press. Washington, DC.
- Kim HB and Ahn KS. 2006. An assessment on vegetation and fish diversity in natural urban stream. *J. Korean Wet. Soci.* 8:53-64.
- Kim YJ. 2004. Temporal and spatial dynamics of an epilithic algal community in the Hantan river. *Algae* 19:15-22.
- Kim YJ and Lee OM. 2009. Assessment of water quality in the Sum-river and the Dal-stream using epilithic diatom-based indices. *J. Kor. Soc. on Water Quality* 25:606-614.
- Korea meteorological administration. 2012. Korea climate change outlook report.
- Ledger ME and Hildrew AG. 2001. Recolonization by the benthos of an acid stream following a drought. *Arch. Hydrobiol.* 152:1-17.
- Ledger ME, RML, Harris PD, Armitage and Milner AM. 2008. Disturbance frequency influences patch dynamics in stream benthic algal communities. *Oecologia* 155:809-819.
- Lee HJ, Kong DS, Kim SH, Shin KS, Park JHKim BI, Kim SM, Jang SH and Cheon SU. 2007. Investigation on water quality variation characteristics during dry season in Namhan river drainage basin. *J. Kor. Soc. on Water Quality* 23:889-896.
- Lee SS. 2007. A study on securing instream flow for restoring ecosystems and riverine aesthetics of a degraded urban stream-Applied to the Mugeo stream in the Ulsan metropolitan area-. *J. Environ. Sci.* 16:649-655.
- Maria JF, Salomé FPA, Sandra CC and António JC. 2009. A comparison between biotic indices and predictive models in stream water quality assessment based on benthic diatom communities. *Ecolo. Indi.* 9:497-507.
- McKinney M. 2008. Effects of urbanization on species richness: a review of plants and animals. *Urban Ecosystems* 11:161-176.
- National institute of Environmental Research. 2012. Korean standard methods for the examination of water and wastewater.
- Park HJ, Kim BH, Kong DS and Hwang SJ. 2012a. The effect of drought simulated by discharge control on water quality and benthic diatom community in the indoor experimental channel. *Korean J. Limnol.* 45:129-138.
- Park HK, Son JW and Choi JT. 2012b. Characteristics of water quality and biological changes in the Onchun stream-after the flowing of the Nakdong river-. *J. Life Scie.* 22:1041-1045.
- Showers WJ, Eisenstein DM, Paerl HW and Rudek J. 1990. Stable isotope tracers of nitrogen sources to the Neuse River, North Carolina. *Water Resources Research Institute*

- of Univ. of North Carolina. report No. 253.
- Sujay SK, Peter MG, Catherine PM, Raymond PM, Margaret AP, Kenneth TB, Christopher MS, Stuart EG and Gary TF. 2008. Interaction between urbanization and climate variability amplifies watershed nitrate export in Maryland. *Environ. Sci. Technol.* 42:5872-5878.
- Stevenson, RJ. 1997. Scale-dependent causal framework and the consequences of benthic algal heterogeneity. *J. of North Amer. Benthol. Soc.* 16:248-262.
- Toy TJ, Foster GR and Renard KG. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement and control. John Wiley & Sons. Inc.
- Walsh CJ, Roy AH, Feminella JW, Cottingham PD, Groffman PM and Morgan RP. 2005. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *J. of North Amer. Benthol. Soc.* 24:706-723.
- Wang YK, Stevenson RJ and Metzmeier L. 2005. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity for the Interior Plateau Ecoregion. *J. of North Amer. Benthol. Soc.* 24:990-1008.
- Wang X. 2001. Integrating water-quality management and land-use planning in a watershed context. *J. Environ. Mana.* 61:25-36.
- Watanabe T, K Asai, A Houki, S Tanaka and T Hizuka. 1986. Saprophylic and eury saprobic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index (DAIpo). *Diatom* 2:23-73.
- Wetzel and Likens. 2000. *Limnological Analyses* (3rd ed.). Springer.

Received: 17 April 2017

Revised: 18 May 2017

Revision accepted: 20 May 2017