

Bio-polymer 소재를 활용한 다층다공성 하상보호공 적용에 따른 수질 및 부착조류의 변화량: 김해시 대청천을 중심으로

Variation of Water Quality and Periphytic Algae in Multi-layer and Porous Structure for River-bed Protection using Bio-polymer materials: A Case Study of Daecheong-stream in Gimhae-Si

이상훈¹ · 안홍규² · 채수권^{3*}

¹한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구원, ²한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원,
³울지대학교 보건환경안전학과 교수

Sang-Hoon Lee¹, Hong-Kyu Ahn² and Soo-Kwon Che^{3*}

¹Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea
²Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea
³Professor, Department of Environmental Health and Safety, Eulji University, Seoungnam 13135, Korea

Received 14 November 2019, revised 25 November 2019, accepted 26 November 2019, published online 31 December 2019

ABSTRACT: This study monitored Daecheong 1-bo, Daecheong-stream, which carried out the project in 2014, from 2015 to 2016. The technology applied to the stream was evaluated using Periphytic Algae to check contamination indicators and ecological health of the area with an integral river-bed protection using non-toxic materials. The water quality of the monitoring section was confirmed to be above the river environment standard (II), and it was confirmed that the Saproxenic taxa of the river bed protection were higher than the upper and downstream sections. The TDI, which is an index of attachment algae, was shown in the average 51.03 and 52.15 for the pilot project sections in 2015 and 2016, confirming that the index is of the "normal" grade. This is the other sections in the upstream and downstream sections showed higher than "bad", which is thought to have a positive effect on the habitat of the river ecosystem components, especially the microbial population in river bed protection.

KEYWORDS: Ecological River Restoration, Non-toxic Material, Periphytic Algae, Trophic Diatom Index

요 약: 본 연구는 2014년도에 사업을 수행한 대청천 대청1보를 2015년부터 2016년도까지 모니터링 하였다. 하천에 적용된 기술은 무독성 소재를 이용한 일체형 하상 보호공으로 해당 구간의 오염지표 및 생태적 건강성을 확인하기 위하여 부착조류 (Periphytic Algae)를 이용하여 평가하였다. 모니터링 구간의 수질은 하천생활환경기준 (II)등급 이상으로 확인되었으며, 하상보호공 구간의 조류는 상, 하류 구간보다 호청수생 부착조류종이 높게 나타남을 확인하였다. 부착조류 지수인 TDI 지수는 2015년과 2016년의 경우 하상보호공 구간인 ST-2는 평균 51.03 및 52.15 나타내어 '보통' 등급인 것을 확인 하였다. 이는 상, 하류의 다른 정점이 '나쁨' 보다 하상보호공 구간이 높게 나타난 것으로 하천 생태계 구성요소의 서식, 특히 미소생물군의 서식에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

핵심어: 생태하천복원, 무독성소재, 부착조류, 부착규조지수

*Corresponding author: cskwen@eulji.ac.kr, ORCID 0000-0003-3068-8021

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 하천 관리의 패러다임 변화로 하천에서 환경 복원이 커다란 이슈로 대두되고 있다. 과거 추진되어 오던 이수 및 치수 위주의 관행적 하천 복원사업으로 인하여 하천 보 및 낙차공 등에 사용하는 하천 복원 소재는 기후변화에 강한 콘크리트 소재로 과다하게 사용되고 있다. 경제적으로 값싼 콘크리트 소재는 홍수와 같은 기후변화에는 강하며 안전하나, 하천 경관의 훼손 및 하천생태계에 악영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Hillier et al. 1999). 특히, 하천복원으로 사용되는 콘크리트를 활용한 기술은 콘크리트 소재인 석회석으로 인하여 물과 접촉 시 강알칼리 (pH 12 이상)를 약 10년 정도 지속적으로 수계로 방출하여 하천 생태계에 악영향을 미치는 것으로 보고되고 있다 (Ogunbileje et al. 2013, Park et al. 2015). 이처럼 콘크리트계 소재를 수환경 복원에 사용할 경우 하천생태계에 직접적으로 독성물질에 노출되어 급성독성 효과가 나타날 수 있다 (Winder and Carmody 2002, Park et al. 2015).

특히 폐쇄된 공간에서 콘크리트계 소재를 사용할 경우 하천생태계에 미치는 영향이 크기 때문에, 국내 하천복원사업에 있어 수리적으로 안전하고 하천 수 생태계에 건강한 기술을 개발하기 위하여 다양한 연구가 진행되었다 (Lim and Park 2016, Yoon et al. 2016, Ahn et al. 2017a, Tang et al. 2018). 그 중 콘크리트 소재를 대체할 기술로 식물 기반의 고분자 물질을 활용한 생태 하천 복원 기술에 대한 다양한 연구를 수행하였다 (Fowler 1999, Oh et al. 2015, Ahn et al. 2017b). 하지만 이러한 기술을 하천에 적용하기 위해선 기술개발과 더불어 생태적 안정성 및 물리, 화학 및 생물학적 모니터링에 대한 검증이 요구된다 (England et al. 2008, Kim and Koo 2010, Ahn et al. 2014, Choi et al. 2015). 이 중 생물학적 모니터링의 경우, 하천의 수질상태를 파악하기 위하여 환경요인 분석 외에 지표생물로서 부착조류를 사용하여 생물학적 오염관정을 판단하는 연구가 진행되어왔다 (Park et al. 2004, Choi et al. 2017, Choi et al. 2019). 하천에서 부착조류는 수생식물과 더불어 수중 생태계의 1차 생산자로서 생활환이 짧고, 주변 환경 변화에 대한 반응이 빠른 것으로 보고되고 있으며, 다양한 환경 요인들에 대해 생태적으로 민감한 종부터 내성종에 이르는 다양한 종으로 구성되어 있다 (Watanabe 1986, Van Dam et al. 1994, Peszek et al.

2015). 그리고 부착조류는 돌이나 바위와 같은 기질에 부착하여 성장함으로 이동성이 없어 선택한 지역의 수질상태를 반영할 수 있어, 많은 연구자들은 이들을 수질 오염의 지표 생물로 이용하고 있다 (Kelly and Whitton 1995, Hwang et al. 2006, Choi et al. 2019). 우리나라의 수생태계는 비점오염원 등으로 인하여 다양한 영양염류가 하천에 유입되어 부착조류의 성장과 우점종에 영향을 미치기 때문에 정확한 평가를 위해서 영양염을 기준으로 하는 부착조류영양염 지수인 TDI (Trophic Diatom Index)를 평가하고 있다 (Hwang et al. 2006, Choi et al. 2017, Choi et al. 2019).

본 연구에서는 김해시 대청천에 시공된 국내 최초로 개발된 무독성 소재 (식물성 폴리 우레탄)를 활용한 일체형 하상보호공 기술을 하천에 적용함에 있어, 수계 내 생물의 기본단위인 부착조류의 사전 기초조사와 기질의 적용에 의한 생태적 건강성 평가에 따라 그 안정성을 검증하였다.

2. 연구 방법

2.1 조사지역

무독성 소재로 하천복원 구간의 부착조류의 성장특성을 확인하기 위하여 김해시 대청천 일부구간의 대청 1보에서 모니터링 및 채집을 하였다. 조사지점은 경상북도 김해시의 대청천 대청 1보 (35°11'59.14"N, 128°49'18.31"E) 및 상류 (35°11'52.02"N, 128°49'00.57"E)와 하류 (35°11'53.61"N, 128°49'34.52"E)의 각각 1개 지점을 조사지로 선택하였다. 대청 1보는 기존 보를 무독성 소재를 이용하여 보 및 물받이공 (apron)의 하류단에서 유수에 의하여 하상침식이 발생하는 것을 방지하기 위한 하상보호공으로, 본 기술은 다공질 소재를 이용하여 설치를 하였다. 본 기술은 다층구조에 의하여 하상이 유수의 힘에 의하여 유출되지 않도록 억제할 뿐만 아니라, 하상 및 호안이 일체화되도록 함으로서 하상 및 호안의 세굴을 동시에 막아서 하천 횡단구조물의 보호 및 하상을 보호하는 역할을 하며, 다공성 구조로 골재 사이에 식생의 성장 및 유수에 의한 포말이 생성되어 하천에 용존산소 증가에 순영향을 미친다. 또한 하상보호공의 유실 및 이탈을 억제하며, 하상 및 호안이 일체화되도록 함으로써 하상 및 호안세굴을 동시에 막아 치수에 대한 안정성 향상시키는 기술이다. 모니터링

Table 1. Monitoring date for water quality and periphytic algae

	2015			2016			
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	4th
Monitoring date	2015-08-27	2015-10-01	2015-11-19	2016-08-25	2016-09-27	2017-01-24	2017-02-28

조사는 2015년 04월부터 2016년 11월까지 년 3 - 4회 실시하였다. 자세한 조사 시간은 Table 1과 같다.

2.2 시료 채집

해당 구간의 수질 측정은 수온, DO (용존산소), pH (수소이온지수)는 휴대용 측정기 (Orion Star A323, Thermo SCIENTIFIC, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, BOD (생물학적 산소요구량), TN (총질소), TP (총인) 분석을 위한 시료는 1 L 플라스틱 채수병에 채수한 후 냉암보관소에 보관 후 가능한 빨리 실험실로 옮긴 후 수질오염공정시험법 기준에 준하여 분석하였다.

부착조류는 수질 측정과 동일한 구간에서 채집하였으며, 시료는 최소 1주일 이상 수심 20 cm 이하에서 잡겨 있으며, 물 흐름과 일치되는 상부가 편평한 자연석을 선택하였다. 시료의 상부에 5 cm × 5 cm (25 cm²) 고무판을 부드럽게 올린 다음 힘을 가해 누르고 기질의 나머지 부분을 부드러운 솔(iron brush)로 현장수를 이용하여 깨끗하게 세척하여 채취하였다. 고무판과 세척된 기질을 입구가 넓은 바트(vat)로 옮겨 부드러운 솔과 최소한의 현장수를 이용하여 고무판과 가려진 기질 표면을 조심스럽게 긁어모아 정량 채집하였다.

2.3 시료 분석

채집한 시료는 채집한 시료는 부착조류의 군집분석, 엽록소 (Chl-a, Chlorophyll-a) 농도, 유기물량 (ash free dry matter, AFDM) 등을 측정하는데 이용하였으며, 엽록소a는 아세톤추출법에 따라 채집한 시료의 일정량을 GF/C (Whatman Inc., England)로 여과하여 90% Acetone으로 24시간 동안 4°C 암상태에서 추출한 다음 원심분리기(MF80 Hanil Science Inc., Korea)를 이용하여 20분간 원심분리하고 Spectrophotometer (SP-2700i Youngwoo Inc., Korea)를 이용하여 상등액의 흡광도를 측정하였다 (APHA 2001).

부착조류의 유기물량 (AFDM)은 채집된 시료의 일

정량을 GF/C로 여과한 후, 105°C의 Dry-Oven (C-Do, Chang Shin Scientific Co., South Korea)에서 24시간 동안 건조시킨 후 측정된 무게와 이를 다시 550°C Furnace (DF-3.5, Dae Heung Sci.)에서 1시간 강열감량 후의 무게의 차이를 이용하여 계산하였다 (APHA 2001).

부착조류의 동정은 광학현미경 (Nikon E600, Japan) 400 - 1000배 하에서 영구표본을 대상으로 실시 후 Patrick and Reimer (1966), Krammer and Lange-Bertalot (2007) 등을 참고하여 확인 하였다. 조사지점에서 채집된 기질내 부착조류의 개체수를 산정하기 위하여 각 표본에서 동정된 출현종의 상대빈도를 구하고, 산처리하지 않은 자연시료로부터 원형질이 포함된 세포 (lived diatoms)를 최소 500개 이상 계수하여 진행하였다. 출현종의 세포밀도는 앞에서 구한 총 개체수에 그들의 상대빈도를 곱하여 계산하였으며, 이때 산처리 과정에 함께 포함된 죽은 세포 (dead diatoms)는 무시하였다. 부착조류군집의 특성을 파악하기 위하여 지점별 부착조류 출현 종수 및 생물량을 근거로 우점종 및 우점도 지수를 산출하였다 (McNaughton 1967).

2.4 부착조류 건강성 평가

부착조류를 이용한 생태 건강성 평가는 Kelly and Whitton (1995)이 개발한 부착구조 지수 Trophic Diatom Index (TDI)를 이용하였다. TDI 지수는 조사기간 동안 출현한 모든 부착조류를 대상으로 각 종의 오염에 대한 민감도를 평가하여 일정한 가중치와 오염지표 값을 각각 부여하여 계산하여 산출하였다. TDI 지수의 범위는 0 - 100이며, 100에 가까울수록 수질이 청정한 상태이고 0에 근접할수록 오염된 상태를 의미한다. TDI 지수는 90이상에서 100까지는 매우 좋음, 70이상 90미만은 좋음, 50이상 70미만은 보통, 30이상 50미만은 나쁨 30미만은 매우 나쁨으로 표현된다. 계산식은 Eq. 1과 같으며, 수식에서 나타난 WMS는 가중평균민감도 (weighted mean sensitivity)를 나타낸 것이고, A_i는 각 종의 풍부도 (relative abundance of species in each sample, %)

이며, S_i 는 각 종에 대한 민감도 (pollution sensitivity of species)로 1 - 5의 범위를 갖으며, V_i 는 각 종에 대한 지표 값 (indicator value)으로 1 - 4의 범위를 갖는다. WMS의 계산 방법은 Eq. 2에 따른다.

$$TDI = 100 - \{(WMS \times 25) - 25\} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$WMS = \sum A_i \cdot S_i \cdot V_i / \sum A_i \cdot V_i \quad (\text{Eq. 2})$$

3. 결과 및 고찰

3.1 수질 특성

대청천 상류 (ST-1), 하상보호공 구간 (ST-2), 하류 (ST-3) 3개 정점에 대한 3차례 조사 결과 2015년, 2016년 수질데이터는 Table 2와 같이 나타났다. 상류의 경우 여름철의 DO의 농도는 평균보다 낮은 농도로 확인되었으나, 하상보호공 구간에서 DO의 농도는 증가되었으며 다시 하류구간에서 감소된 것으로 확인되었다.

이는 하상보호공 구간 부분인 다공성지역을 통과할 때, 하천수 내 공기중의 산소가 하천 내의 용존산소량의 농도를 높여 주는 것으로 판단된다. 총질소의 경우 2015년 평균값은 ST-1에서 0.418 ± 0.568 mg/L, ST-2는 0.335 ± 0.347 mg/L, ST-3은 0.418 ± 0.516 mg/L로 확인되었다. 총인의 경우 2015년 평균값은 ST-1에서 0.073 ± 0.051 mg/L, ST-2는 0.046 ± 0.025 mg/L, ST-3은 0.068 ± 0.045 mg/L로 확인되었다. 이는 계절별에 따른 차이가 높은 이유는 대청천 상류에 많이 존재하여 비료 등으로 인하여 수중에 총질소 및 총인의 농도가 높아진 것으로 판단된다.

3.2 부착조류 유기물량

대청천 상류 (ST-1), 중류 (ST-2), 하류 (ST-3) 3개 정점에 대한 2015 - 2016년 조사 결과를 Fig. 1에 표현하였다. 2015년 부착조류 AFDM (ash free dry matter)은 정점 1, 2, 3에서 각각 $0.35 - 0.64$ mg/cm², $0.99 - 1.20$ mg/cm², $0.41 - 1.17$ mg/cm²의 범위를 보여주었으며,

Table 2. Water quality in the monitoring section of Daecheong-stream in 2015 and 2016

Site	Monitoring date	DO (mg/L)	pH	BOD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
ST-1	2015-1st	2.27	5.75	0.7	0.159	0.033
	2015-2nd	5.94	7.29	1.8	0.3405	0.0264
	2015-3rd	6.81	8.88	1.0	0.0273	0.0745
	2016-1st	10.07	7.38	2.9	0.8	0.029
	2016-2nd	11.03	7.17	4.1	1.3	0.038
	2016-3rd	11.43	7.35	1.7	1.4	0.032
	2016-4th	7.24	7.83	1.5	1.4	0.023
ST-2	2015-1st	3.03	7.36	0.7	0.2290	0.0321
	2015-2nd	5.89	6.98	2.4	0.4096	0.0466
	2015-3rd	6.67	8.78	1.05	0.0305	0.0288
	2016-1st	11.02	6.91	2.7	0.6	0.034
	2016-2nd	14.57	7.88	3.1	1.0	0.014
	2016-3rd	11.72	7.57	2.0	0.8	0.029
	2016-4th	8.82	6.89	2.0	1.8	0.073
ST-3	2015-1st	2.43	7.11	0.4	0.2070	0.0350
	2015-2nd	5.47	7.12	1.7	0.4988	0.0256
	2015-3rd	5.23	8.43	1.5	0.0402	0.0362
	2016-1st	9.8	7.03	6.1	1.5	0.101
	2016-2nd	11.95	6.74	3.3	1.7	0.024
	2016-3rd	6.77	7.43	1.7	1.8	0.070
	2016-4th	5.61	6.13	1.8	0.6	0.098

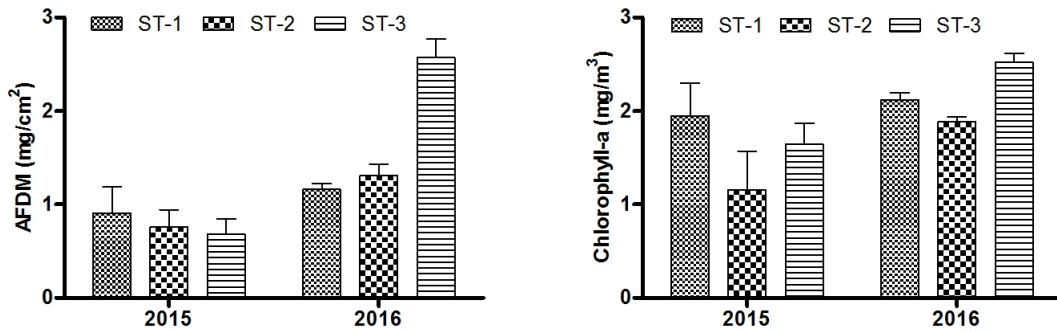


Fig. 1. Results of AFDM and Chlorophyll-a analysis for Periphytic Algae by section in Daecheong-stream.

전체적인 범위는 $0.78 \pm 0.32 \text{ mg/cm}^2$ 로 나타났다. 2016년은 각각 $1.05 - 1.34 \text{ mg/cm}^2$, $0.98 - 1.56 \text{ mg/cm}^2$, $2.24 - 3.02 \text{ mg/cm}^2$ 의 범위를 보여주었으며, 전체적인 범위는 $1.68 \pm 0.68 \text{ mg/cm}^2$ 로 나타났다. 동일한 정점에서 Chl-a (Chlorophyll-a)의 농도는 2015년도 정점 1, 2, 3에서 각각 $0.47 - 1.64 \text{ mg/m}^3$, $1.89 - 2.62 \text{ mg/m}^3$, $1.12 - 1.78 \text{ mg/m}^3$ 의 범위를 확인하였으며, 전체적인 범위는 $1.58 \pm 0.58 \text{ mg/m}^3$ 을 나타냈다. 2016년은 각각 $1.95 - 2.32 \text{ mg/m}^3$, $1.77 - 2.03 \text{ mg/m}^3$, $2.32 - 2.77 \text{ mg/m}^3$ 의 범위를 확인하였으며, 전체적인 범위는 $2.18 \pm 0.30 \text{ mg/m}^3$ 을 나타냈다. 하상보호공 구간인 ST 2의 평균 AFDM은 2015년 $1.07 \pm 0.09 \text{ mg/cm}^2$, 2016년 $1.31 \pm 0.22 \text{ mg/cm}^2$ 로 확인 되었다. 동일한 구간에서 평균 Chl-a는 2015년 $2.18 \pm 0.32 \text{ mg/cm}^2$, 2016년 $2.18 \pm 0.32 \text{ mg/cm}^2$ 로 확인 되었다. 모두 1차보다 2차 조사에서 AFDM 농도가 증가했으며, 이는 Table 2와 같이 수중 유입되는 총질소와 총인 농도가 증가됨으로 증가된 것으로 판단된다. Chl-a의 농도는 전체적으로 AFDM의 농도와 유사한 경향을 확인하였다. 2015년과 2016년도 분석결과를 비교해 보면, 대청천 각 정점의 부착조류 생물량은 2015년도에 하상 정비 하상보호공 구간인 ST-2의 생물량 (AFDM, Chl-a)이 다른 정점보다 높은 수준을 유지했으나, 2016년 모니터링 조사에서는 ST-3 구간의 68% 수준으로 분석되었다. 이는 2016년 8월에 하상보호공 구간 ST-2의 유량 부족과 건천화, 9월에 집중 강우에 의한 급속한 유량 증가가 발생하면서, 서식처의 이화학적 특성 변동에 따라 부착조류 서식에 부정적인 영향이 미친 것으로 판단된다. 돌말류와 같은 부착조류의 성장과 저해는 하천수 유량 확보에 따른 하천수 유속과 탁도, DO 등에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있는데, ST-2의 생물량 저하는 이 같은 경향이 반영

된 것으로 판단된다 (Liboriussen et al. 2005).

3.3 부착조류 군집특성

대청천 3개 정점에 대하여 군집특성을 Table 3과 Fig. 2에 표현하였다. 2015년 부착조류 군집 조사 결과, 출현한 부착조류는 2목 3아목 10과 20속 89종 28변종으로 총 117종이 나타났다. 이 중 호청수성종은 반달돌말속의 *Cymbella minuta*를 비롯하여 날알돌말속의 *Cocconeis placentula* var. *lineata* 등 30종 (25.64%), 호오탁성종은 등침돌말속의 *Nitzschia palea*, 단추돌말속의 *Cyclotella meneghiniana* 등 17종 (14.52%)이 출현하였다. 하상보호공 적용 구간인 정점 2는 출현한 부착조류 종수가 상대적으로 적지만, 호청수성종의 출현 비율이 36%로 다른 정점 (21 - 32%)보다 상대적으로 높아 부착조류 서식 환경이 양호한 것으로 나타났다. 2016년 부착조류의 출현한 군집은 2목 3아목 8과 15속 84종 22변종으로 총 106종이 나타났다. 누적 출현빈도가 높은 종은 호오탁성종인 단추돌말속 *Cyclotella meneghiniana*와 광적응성종 원통돌말속 *Melosira varians*로 총 8회씩 출현하였고, 전체의 2.4%의 비율을 확인하였으며, 2015년 조사와 매우 유사한 경향을 확인하였다. 5회 이상 출현한 분류군은 호청수성종인 *Cocconeis placentula* var. *lineata*와 호오탁성종인 *Achnanthes minutissima* var. *saprophila*를 비롯한 4종으로 분석되었다. 대청천 조사 정점에서 제1우점종 또는 제2우점종으로 출현한 부착조류 분류군은 총 10종이며, 이 중에서 누적 우점빈도가 높은 종은 4회 이상 출현한 땅콩돌말속 *Achnanthes minutissima* var. *saprophila*이며, *Cocconeis placentula* var. *euglypta*와 *Melosira varians*는 3회 출현하였다. 하상보호공 구

Table 3. Dominant species for Periphytic Algae of each places in Daecheong-strem

	Station	Sampling	1st dominant species	2nd dominant species
2015	ST-1	1st	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	<i>Nitzschia sublinearis</i>
		2nd	<i>Achnanthes minutissima var.saprophila</i>	<i>Nitzschia sublinearis</i>
		3rd	<i>Fragilaria construens f. binodis</i>	<i>Cocconeis placentula var. euglypta</i>
	ST-2	1st	<i>Cocconeis placentula var. euglypta</i>	<i>Cocconeis placentula var. lineata</i>
		2nd	<i>Achnanthes minutissima var.saprophila</i>	<i>Melosira varians</i>
		3rd	<i>Achnanthes convergens</i>	<i>Cocconeis placentula var. euglypta</i>
	ST-3	1st	<i>Melosira varians</i>	<i>Achnanthes minutissima var. saprophila</i>
		2nd	<i>Melosira varians</i>	<i>Achnanthes minutissima var. saprophila</i>
		3rd	<i>Gomphonema clevei</i>	<i>Fragilaria capucina var. rumpens</i>
2016	ST-1	1st	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	<i>Nitzschia palea</i>
		2nd	<i>Melosira varians</i>	<i>Cymbella tumida</i>
		3rd	<i>Achnanthes minutissima var. saprophila</i>	<i>Cyclotella meneghiniana</i>
		4th	<i>Melosira varians</i>	<i>Cyclotella meneghiniana</i>
	ST-2	1st	<i>Fragilaria capucina var. vaucheriae</i>	<i>Cocconeis placentula var. lineata</i>
		2nd	<i>Melosira varians</i>	<i>Cyclotella meneghiniana</i>
		3rd	<i>Fragilaria capucina var. vaucheriae</i>	<i>Cocconeis placentula var. lineata</i>
		4th	<i>Achnanthes convergens</i>	<i>Melosira varians</i>
	ST-3	1st	<i>Melosira varians</i>	<i>Cyclotella meneghiniana</i>
		2nd	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	<i>Melosira varians</i>
		3rd	<i>Melosira varians</i>	<i>Cymbella tumida</i>
		4th	<i>Nitzschia palea</i>	<i>Achnanthes minutissima var. saprophila</i>

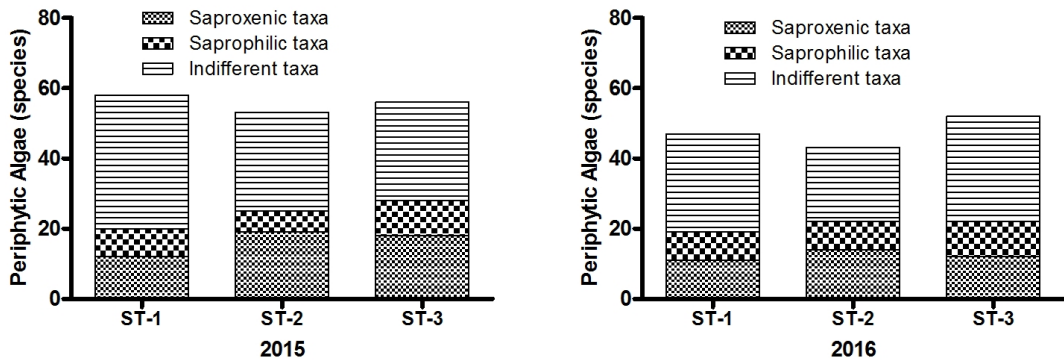


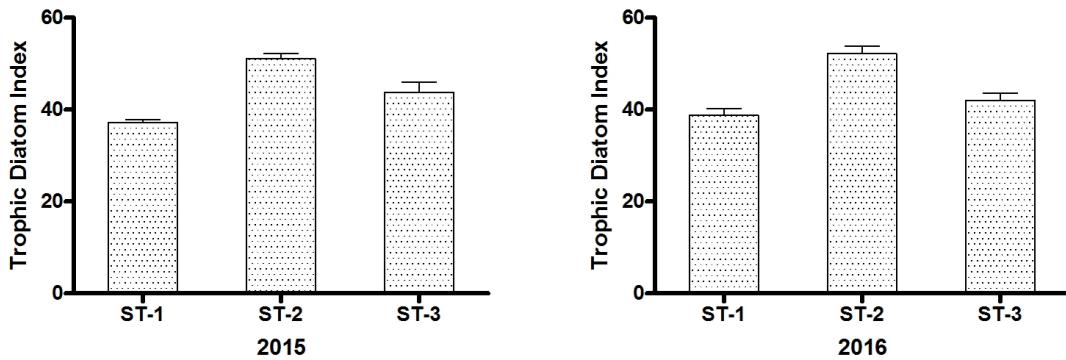
Fig. 2. Species of Periphytic Algae by section in Daecheong-stream.

간인 ST-2의 부착조류 우점종은 광적응성종인 *Melosira varians*와 *Cyclotella meneghiniana*가 조사기간 내내 출현하였으며, 호청수성종인 *Cocconeis placentula var. lineata*의 출현빈도가 높았다. 부착조류에 의한 오염 민감도 평가를 위해 오염지표를 호청수성, 호오탁성 및 광적응성종으로 구분하고 각 공간의 부착조류 분류군의 변화를 민감하게 감지하여, 오염의 악화 및 오염원의 유입 등을 모니터링하여 하천의 생태적 안전성을

모니터링한 결과, ST-1부터 ST-3구간을 확인하였을 때 2015년과 2016년 모두 하상보호공 구간에서 총 종수 별 가장 높은 호청수성 종이 나타남을 확인할 수 있었다 (Fig. 2). 2015년에는 19종이 확인되었으며, 이는 전체 부착조류 종의 35.8%로 상류 및 하류 구간의 20.7%와 32.1% 보다 높은 비율이며, 2016년은 14종으로 전체 부착조류 종의 32.6%로 상류 및 하류 구간의 23.4%와 23.1% 보다 높은 비율이다. 이러한 결과는 하

Table 4. Total species and biomass population for Periphytic Algae by section in Daecheong-stream

	Site	Number of species	Population (cells/cm ²)		
		Total species	Average	Maximum	Minimum
2015	ST-1	58	310,697	401,200	248,140
	ST-2	53	266,820	364,550	191,960
	ST-3	56	237,507	289,620	165,650
2016	ST-1	47	235,900	243,200	228,600
	ST-2	43	215,950	235,400	196,500
	ST-3	52	261,650	268,500	254,800

**Fig. 3.** Health Assessment by TDI for Periphytic Algae in Daecheong-stream.

상보호공간은 하상 정비기술 적용 이후에 저서성 부착조류의 생태적 건강성이 잘 유지되고 있는 것으로 판단되었다.

대청천 조사구간에 대한 부착조류의 종수와 생물량을 Table 4에 표시하였다. 각 정점별로 총 평균 종수는 2015년 55.6종이 확인되었으며, 각 정점별로 출현 종수의 차이는 거의 나타나지 않았다. 대청천 조사구간의 부착조류 평균 밀도는 271,675 cells/cm²로 정점3의 3차 조사에서 최저 165,650 cells/cm², 정점1의 1차 조사에서 310,697 cells/cm²로 최대 밀도를 나타냈다. 2016년은 47종이 확인되었으며, 2015년과 동일하게 정점 별 출현 종수는 차이가 거의 나지 않았다. 부착조류 평균 밀도는 237,833 cells/cm²로 정점2의 3차 조사에서 최저 196,500 cells/cm², 정점3의 2차 조사에서 268,500 cells/cm²로 최대 밀도를 확인하였다. 대체적으로 상류부에서 하류부로 내려갈수록 부착조류 밀도가 점차 감소하는 경향을 확인하였으며, 각 정점별로 부착조류 출현 종수와 개체수의 차이는 하상 조건보다는 영양염류의 농도 및 탁도의 정도 등에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다 (Liboriussen et al. 2005).

3.4 부착조류 TDI 지수에 의한 건강성 평가

대청천 조사정점에서 출현한 부착조류의 상대밀도, 오염민감도 및 분포에 따른 가중치를 산정하여 측정된 TDI 지수는 2015년 평균 44.01로 ‘나쁨’의 등급을 나타냈다. 정점 1은 3차례의 조사기간 동안 36.57 - 38.46의 범위로 평균 37.23을 나타내어 ‘나쁨’의 등급, 정점 3은 38.80 - 47.71의 범위로 평균 43.76을 나타내어 ‘나쁨’의 등급으로 확인되었다. 이와 반면에, 정점 2는 조사기간 동안 TDI 지수 48.70 - 52.70의 범위로 평균 51.03 값으로 건강성 등급은 ‘보통’의 등급을 나타내어 다른 두 정점과 경향 차이를 확인하였다.

2016년도에 측정된 TDI 지수는 평균 44.28로 ‘나쁨’의 등급을 확인하였으며, 2015년 동일 구간의 평균 TDI 지수 44.01와 거의 유사하게 나타났다. ST-1은 조사기간 동안 34.80 - 41.50로 평균 38.7으로 ‘나쁨’의 등급을 확인하였으며, ST-3은 39.20 - 46.01로 평균 42.00 ‘나쁨’의 등급으로 확인되었다. 하상보호공간인 ST-2는 49.00 - 56.70의 범위로 평균 52.15 값으로 건강성 등급은 ‘보통’의 등급을 확인하였으며, 2015년 조사에서도 동일한 ‘보통’의 등급을 보였다. 이는 수질

의 특성을 확인하였을 때, 해당 지역의 총질소와 총인 과 같은 유기물의 농도가 낮으며, 수중 DO가 증가됨으로 인해 양호로 나타난 것으로 판단된다. 또한 2015년과 2016년의 '보통' 등급은 해당 구간이 부착조류 서식 환경 변화가 상대적으로 적었을 것이라 판단된다. 이러한 연구결과는 수중 내 영양염류가 부착조류의 성장과 우점종에 영향을 미치고 있다는 기존 연구 결과와 유사한 것을 확인하였다 (Hwang et al. 2006, Choi et al. 2017, Choi et al. 2019).

4. 결론

본 연구에서 대청천의 수질환경 조사 결과, 하상보호공 구간의 수질은 평균 하천생활환경기준 (II)등급 이상으로 안정적으로 유지하고 있었으며, 이와 같은 현상은 적용된 공법이 용존산소 포화도를 증가시켜 호기성 상태로 조성하고 주변의 부착조류 및 수생식물로 인하여 오염물질이 제거되는 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 저서성 부착조류 군집 특성과 개별종의 오염 민감도를 반영한 하천 생태 건강성 평가(TDI) 결과, 하상보호공 구간은 '보통', 다른 구간은 '나쁨'의 결과를 확인하였으며, 특히 대청천 하상보호공 구간은 다른 구간에 비해 호청수성종 출현이 다른 구간에 비해 높은 비율로 출현하였다. 호청수성 부착조류는 하천의 유기오염에 민감하고 특히 높은 수준의 용존산소를 요구하는 서식특성이 있는 바, 대청천 하상보호공 구간의 DO 특성이 부착조류 서식환경에 투영된 결과로 인식할 수 있다. 전체적으로 대청천 일부 구간에 시범 적용된 하상보호공법은 공법 특성 상 하천 생태계 구성요소의 서식, 특히 미소생물군의 서식에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단되며, 이상과 같은 결과는 향후 하천생태계 건강성 유지를 위한 세부기술개발과 방안 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (12기술혁신C02) 및 국토교통부의 재원으로 중랑천 홍수방지 및 생태복원 종합계획 수립 용역 과제를 지원을 받아 연구 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, H.K., Lee, D.J. and Kim, S.N. 2014. The Classification of Instream Habitats for Ecological River Restoration. *Ecology and Resilient Infrastructure* 1: 82-93. (in Korean)
- Ahn, H.K., Lee, S.H. and Ji, M.K. 2017a. Development of Ecological Scour Protection Technique with Non-Toxic Materials and Examination of Field Application. *International Journal of Environmental Science and Development* 8: 164-167.
- Ahn, H.K., Lee, S.H. and Lee, I.T. 2017b. Biological Assessments on Bio-Polymer Coated with Non-Toxic Materials. *International Journal of Environmental Science and Development* 8: 724-727.
- APHA. 2001. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
- Choi, J.K., Choi, M.K. and Choi, C.B. 2015. Follow-up Monitoring & Adaptive Management after Ecological Restoration for the Stream -Focused the Hakui Stream in Anyang City-. *The Korea Society For Environmental Restoration And Revegetation Technology* 18: 85-95. (in Korean)
- Choi, J.S., Chae, H.S. and Kim, H.S. 2019. Assessment of Biological Water Quality Using Epilithic Diatoms in the Upper Region of Nakdong River. *Journal of Environmental Impact Assessment* 28: 169-182. (in Korean)
- Choi, J.S., Lee, J.H. and Kim, H.S. 2017. The Epilithic Diatom Community and Biological Water Quality Assessment of Naeseongcheon Located at the Upper Region of Nakdong River. *Korean Journal of Ecology and Environment* 50: 470-477. (in Korean)
- England, J., Skinner, K.S. and Carter, M.G. 2008. Monitoring, River Restoration and the Water Framework Directive. *Water and Environment Journal* 22: 227-234.
- Fowler, D.W. 1999. Polymers in Concrete: A Vision for the 21st Century. *Cement and concrete composites* 21: 449-452.
- Hillier, S.R., Sangha, C.M., Plunkett, B.A. and Walden, P.J. 1999. Long-Term Leaching of Toxic Trace Metals from Portland Cement Concrete. *Cement and Concrete Research* 29: 515-521.
- Hwang, S., Kim, N., Won, D., An, K., Lee, J. and Kim, C. 2006. Biological Assessment of Water Quality by Using Epilithic Diatoms in Major River Systems (Geum, Youngsan, Seomjin River). *Journal of Korean Society on Water Environment* 22: 784-795. (in Korean)
- Kelly, M.G. and Whitton, B.A. 1995. The Trophic Diatom Index: A New Index for Monitoring Eutrophication in Rivers. *Journal of Applied Phycology* 7: 433-444.
- Kim, H.G. and Koo, B.H. 2010. Floral Changes During Three Years after Cheonggyecheon Restoration. *Journal of the Korea Society of Environmental Res-*

- toration Technology 13: 107-115. (in Korean)
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. 2007. Süßwasserflora Von Mitteleuropa, Bd. 02/5: Bacillariophyceae. Elsevier Book Co., Germany.
- Liborius, 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: 23-39.
- Lim, H.M. and Park, J.R. 2016. Development of Natural Purification Technology Considering Material Cycle in River Reaches. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3: 213-214. (in Korean)
- McNaughton, S.J. 1967. Relationships among Functional Properties of Californian Grassland. *Nature* 216: 168-169.
- Ogunbileje, J., Sadagoparamanujam, V.-M., Anetor, J., Farombi, E., Akinosun, O. and Okorodudu, A. 2013. Lead, Mercury, Cadmium, Chromium, Nickel, Copper, Zinc, Calcium, Iron, Manganese and Chromium (VI) Levels in Nigeria and United States of America Cement Dust. *Chemosphere* 90: 2743-2749.
- Oh, J.O., Jun, S.M. and Park, J.H. 2015. Hydraulic Stability of a Non-Toxic Revetment Block. *Ecology and Resilient Infrastructure* 2: 161-166. (in Korean)
- Park, C.J., Ahn, H.K., Gye, M.C. and Lee, T.H. 2015. Effects of Concrete Materials for the Stream Restoration on *Bombina Orientalis* Embryos. *Ecology and Resilient Infrastructure* 2: 147-153. (in Korean)
- Park, J.W., Choi, J.S. and Kim, M.K. 2004. Variations of Epilithic Diatom Community and an Assessment of Water Quality by Dalpo in the Middle Reaches of the Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* 37: 70-77. (in Korean)
- Patrick, R. and Reimer, C.W. 1966. The Diatoms of the United States, Exclusive of Alaska and Hawaii: Fragilariaceae, Eunotiaceae, Achnantheaceae, Naviculaceae. Academy of Natural Sciences.
- Peszek, Ł., Noga, T., Stanek-Tarkowska, J., Pajaczek, A., Kochman-Kędziora, N. and Pieniżek, M. 2015. The Effect of Anthropogenic Change in the Structure of Diatoms and Water Quality of the Żołynianka and Jagielnia Streams. *Journal of ecological engineering* 16: 33-51.
- Tang, W., Mohseni, E. and Wang, Z. 2018. Development of Vegetation Concrete Technology for Slope Protection and Greening. *Construction and Building Materials* 179: 605-613.
- Van Dam, H., Mertens, A. and Sinkeldam, J. 1994. A Coded Checklist and Ecological Indicator Values of Freshwater Diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 28: 117-133.
- Watanabe, T. 1986. Saprophilous and Eurysaprobic Diatom Taxa to Organic Water Pollution and Diatom Assemblage Index (Daipo). *Diatom* 2: 23-73.
- Winder, C. and Carmody, M. 2002. The Dermal Toxicity of Cement. *Toxicology and industrial health* 18: 321-331.
- Yoon, Y., Lim, H.M., Kim, W.J., Jung, J.H. and Park, J.-R. 2016. Development and Application of Multi-Functional Floating Wetland Island for Improving Water Quality. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3: 221-230. (in Korean)