

Original article

삼천포천의 수생태계 건강성 향상 방안 연구

정길상* · 최한수¹

국립생태원 멸종위기종복원센터, ¹(주)에코이엔지

Study on Improvement Measure for Ecosystem Health of Samcheonpo Stream. Gilsang Jeong* (0000-0001-8297-3532) and Hansu Choi¹ (0000-0003-4513-6895) (Research Center for Endangered Species, National Institute of Ecology, Yeongyang 36531, Republic of Korea; ¹Institute of Ecological Engineering, Seongnam 36531, Republic of Korea)

Abstract Aquatic ecosystem is composed of various organic and inorganic matters. Its health is essential for sustaining its members such as vegetations, mammals, birds, fishes and invertebrates. Samcheonpo stream is one of candidate streams in Sacheon area of ecological restoration. For this reason, this study conducted to build up a data base for future comparison. The results shows that biodiversity of Epilithic Diatoms and Invertebrates is below average which means that human impacts such as artificial structures and activities have been negatively related to stream health. Consequently, we suggest several key factors when ecological restoration is performed in the stream.

Key words: epilithic diatoms, aquatic invertebrates, Trophic Diatom Index (TDI), Benthic Macroinvertebrate Index (BMI), ecosystem health

서 론

생태계(ecosystem)는 수량, 수질, 물리적 서식지 등 무생물학적 환경요소와 생물학적 요소로 구성되어 있으며, 시스템 내에서 이들 요소들의 상호작용의 결과는 생태계의 독특한 구조와 기능으로 나타난다(Odum, 1971).

특히 수생태계는 수목, 포유류, 조류, 어류뿐 아니라 무척추 동물이 상호작용하는 매우 복잡한 생태계의 하나이다. 이러한 수생태계는 인간활동에 의해 크게 변화되거나 훼손되어왔다. 건강한 수체는 생태학적으로 온전하거나 교란되지 않은 상태를 나타내며, 화학적, 물리적 및 생물학적

총체성을 모두 포함하는 생태학적 총체성으로 표현될 수 있다(Lake *et al.*, 2007; Palmer *et al.*, 2014). 따라서 건강한 수체에 대한 생물학적 평가는 교란된 수체의 현재 상태를 파악하고 건강성의 회복을 위한 판단의 근거를 제공하며, 생물학적 평가를 근거로 해당 수체의 회복과 복원을 위한 목표를 설정할 수 있을 것이다(Woo and Park, 2000).

수생태계 건강성 평가는 기본적으로 국가 혹은 지역 차원에서의 지속적인 생물모니터링 결과를 바탕으로 생물학적인 지표와 평가방법을 요구하며 그 지역 혹은 국가의 물환경에 부합하는 표준화된 조사·분석방법이 필요하다(Hwang, 2009). 그러나 우리나라에서는 중소기업 하구 및 하천에 대한 생물과 생태계 조사는 전무할 정도로 하구에 대한 이해가 부족했었다(Won *et al.*, 2022)

삼천포천은 사천시의 주요 하천이며, 생태적 복원 우선

Manuscript received 15 December 2023, revised 19 December 2023, revision accepted 20 December 2023
* Corresponding author: Tel: +82-54-680-7210, Fax: +82-54-680-7329
E-mail: gilsangj@nie.re.kr

후보지역이다. 본 연구는 사천시 관내 지방하천 전체를 대상으로 바람직한 하천관리방안의 도출을 통한 안전한 하천, 건강한 하천, 시민들에게 사랑받는 하천의 창출을 위해서 생태하천 복원에 대한 타당성을 분석을 위한 조사 결과를 바탕으로 그 건강성을 평가하였다. 이를 바탕으로 생태하천 복원사업을 가능하게 하여, 하천의 자정능력 증진, 하천의 종적 횡적 기능복원과 더불어 지역 주민에게 건강한 하천과 정서함양 공간을 통한 생태계 서비스의 기능을 강화하기 위함이다.

재료 및 방법

본 연구에 사용된 자료는 삼천포천의 생태적 복원을 위한 용역사업에서 조사된 부착돌말류 및 저서무척추동물상 결과를 바탕으로 지표화하였다(Reynoldson and Metcalfe-Smith, 1992; Kim, 2022). 본 연구는 2018년 5월 26일부터 28일까지, 그리고 10월 23일부터 24일 현지의 대상 하천 내 적합지역을 임의 선정하여 채집을 수행하였다.

1. 부착돌말류

1) 채집

부착돌말류의 채집은 다양한 기질(천연기질, 하천 내의 인공구조물, 매질 내에 장치된 인공기질, 수생식물 등)로부터 가능하나, 여러 가지가 동시에 존재할 경우 채집기질의 공통성, 경제성을 고려하여 가장 대표적인 것을 선정하여 수행하였다. 부착돌말류 기질은 하천 내에서 가능한 가장 안정되고 견고한 자연 상태의 기질(호박돌, 조약돌 등, 지름 10 cm 정도)로 상면이 편평한 돌을 선택하였다. 기질(돌)에서 채집할 부분을 일정면적의 방형구(quadrat)로 덮은 후 방형구(quadrat) 주변을 솔로 긁고 증류수로 씻어 제거한 다음, 방형구(quadrat)로 덮은 면적을 솔로 긁어 내어 메스실린더에 담아 증류수를 이용하여 100 mL로 총량을 맞췄다. 이 중에서 생물량(biomass)을 분석하기 위한 시료는 냉장 상태(4°C 수준)로 유지하여 실험실로 운반하고, 종조성 검정 및 세포밀도 관찰을 위한 시료는 현장에서 10% 중성 포르말린으로 고정해 영구표본을 제작한 후 한 개 표본(슬라이드)에서 돌말류 패각(frustule)을 최소한 200개 이상 계수하여 실제 현미경을 이용해 분류하였다(Choi *et al.*, 2019).

2) 부착돌말류평가지수(TDI, Trophic Diatom Index) 산정

부착돌말 영양지수는 각 구간에서 출현한 종의 상대밀도, 종의 오염민감도 및 지표값을 사용하여 산정하였다

Table 1. Grades of ecosystem health by epilithic diatoms.

Grade	Environmental conditions	TDI
A	Very good	≥90~≤100
B	Good	≥70~<90
C	Average	≥50~<70
D	Bad	≥30~<50
E	Very bad	≥0~<30

(Kelly and Whitton, 1995).

$$TDI = 100 - \{(WMS \times 25) - 25\}$$

WMS: 가중평균민감도(weighted mean sensitivity)

$$WMS = \frac{\sum A_i \cdot S_i \cdot V_i}{\sum A_i \cdot V_i}$$

A_i: 표본 내 종의 상대풍부도 (abundance (proportion) of *i*th species in sample, %)

S_i: 종의 오염 민감도 (pollution sensitivity of *i*th species, 1 ≤ S ≤ 5)

V_i: 종의 지표값 (indicator value of *i*th species, 1 ≤ V ≤ 3)

현장에서 채취한 시료를 이용하여 영구표본을 제작한 후 한 개 표본(슬라이드)에서 돌말류 패각(frustule)을 최소 200개 이상 계수하였으며, 현미경 계수한 결과(A)를 이용하여 각 분류군에 대한 부착돌말지수(TDI)의 민감도값(S: sensitivities value)과 지표값(V: indicator value)을 구분하여 추출하고, 동시에 수질오염에 대한 내성종과 그 계수한 값을 구분하여 표시하였다.

3) 부착돌말류의 건강성 평가

건강성 평가결과의 등급은 부착돌말류평가지수를 국가표준인 국립환경과학원의 수생태계 현황 조사 및 정도 관리 지침에 따라 5단계인 매우 좋음 “A”, 좋음 “B”, 보통 “C”, 나쁨 “D”, 매우 나쁨 “E” 등급화하여 평가하였다 (Table 1).

2. 저서성대형무척추동물

1) 채집

대표지점에서 하상 및 토양 속에 서식하고 있는 저서성대형무척추동물의 채집을 위해 대상하천의 3개 지점에서 수심 30 cm 이하에서는 망목 지름 0.5 mm의 Surber net (30×30 cm²; Surber, 1937)을 사용하여 주로 여울에서 약 10 cm 깊이로 3회씩 정량채집 (25 cm×25 cm, 50 cm×50

cm)한다(Park *et al.*, 2013). 수심이 깊은 지역은 D-프레임 넷, 수심이 얇은 지역은 핸드넷을 이용하여 채집하며, 채집된 샘플은 연구실로 운반하여 저서성대형무척추동물을 추출하였다.

2) 저서성대형무척추동물평가지수(BMI, Benthic Macroinvertebrate Index) 산정

저서성대형무척추동물을 이용한 생물평가기법인 저서동물지수(BMI)를 적용하여 산정하였다(Jun *et al.*, 2012). 저서동물지수(BMI)는 출현한 각 지표생물군의 유기물오염 평가값 및 지표가중치를 적용하여 산출하였다.

$$BMI = \left(4 - \frac{\sum_{i=1}^n s_i h_i g_i}{\sum_{i=1}^n h_i g_i} \right) \times 25$$

BMI 저서성대형무척추동물평가지수(Benthic Macroinvertebrate Index)

i: 지정된 지표생물종의 일련번호(number assigned to the species)

n: 출현한 지표생물종의 총수(number of species)

si: i 지표생물종의 오락치(saprobic value of the species i)

Table 2. Grades of ecosystem health by benthic macroinvertebrate.

Grade	Environmental conditions	BMI
A	Very good	≥ 80~≤ 100
B	Good	≥ 65~< 80
C	Average	≥ 50~< 65
D	Bad	≥ 35~< 50
E	Very bad	≥ 0~< 35

hi: i 지표생물종의 출현도(frequency of the species i)

gi: i 지표생물종의 지표가중치(indicator weight value of the species i)

3) 저서성대형무척추동물의 건강성 평가

국가표준인 국립환경과학원의 수생태계 현황 조사 및 정도관리 지침에 따라 저서동물평가지수를 5단계인 매우 좋음 “A”, 좋음 “B”, 보통 “C”, 나쁨 “D”, 매우 나쁨 “E” 등급으로 평가하였다(Table 2).

4) 지표생물의 출현도

지표생물종의 출현도는 모든 출현종에 대한 빈도를 척도 순으로 백분율로 환산 후 백분율의 범위에 따라 1~5의 값을 부여하였다(Table 3).

결과 및 고찰

1. 부착돌말류

부착돌말류는 3개 지점에서 2목 3아목 6과 13속 19종 2변종으로 총 21종이 출현하였으며, 중심규조목은 3종(14.3%), 익상규조목은 18종(85.7%)으로 구성되어 있었다. 출현종수는 P.4지점에서 17종, P.5지점에서 12종, P.6지점은 11종으로 지점 간 유의한 차이가 없었다(Table 4).

우점종은 지점 1에서 *Navicula pseudoacceptata*, 지점 2에서 *Rhicosphenia* sp., 지점 3에서 *Melosira vaians*로 나타났다. 아우점종은 지점 4와 지점 5에서 *Synedra ulna*, P.6 지점에서 *Ulva prolifera*로 확인되었다. 우점 및 아우점종은 모두 영양염 및 오염원에 적응력이 높은 종으로 조사되

Table 3. Classification table for the highest rank range of benthic macroinvertebrates.

Percentage order	≤ 20%	> 20%~≤ 40%	> 40%~≤ 60%	> 60%~≤ 80%	> 80%
Appearance	5	4	3	2	1

Table 4. Occupancy rate of epilithic diatoms and number of species appearing at each location.

Survey year	Order	No. species	Occupation rate (%)	No. species appeared		
				P.4	P.5	P.6
2019	Centrales	3	14.3	3	2	1
	Pennales	18	85.7	14	8	10
	Sum	20	100.0	15	10	11

Table 5. Dominant and subdominant species of epilithic diatoms.

Survey points	Dominant species	Dominant rate (%)	Sub-dominant species	Dominant rate (%)
P.4	<i>Navicula pseudoacceptata</i>	42.7	<i>Synedra</i> sp.	23.2
P.5	<i>Rhoicosphenia</i> sp.	43.2	<i>Synedra</i> sp.	25.5
P.6	<i>Melosira vaiana</i>	37.2	<i>Ulva prolifera</i>	13.2

Table 6. Aquatic ecosystem health assessment by TDI.

TDI	P.4	P.5	P.6	Mean
	83.2	85.6	58.1	75.3
TDI	B	B	C	B
	Good	Good	Average	Good

Table 7. Change of BMI at each location (1st survey).

Survey points	BMI	Grade (A~E)	Environmental conditions
St.1	67.3	B	Good
St.2	59.7	C	Average
St.3	61.9	C	Average
St.4	65.2	B	Good
St.5	64.7	C	Average
St.6	53.3	C	Average
St.7	62.1	C	Average

있으며, 지점 5, 6에서는 기수역에 서식하는 종들이 출현하였다(Table 5). 영양염지수인 TDI의 값은 각각 83.2, 85.6, 58.1로 B~C등급의 좋음~보통, 평균값은 75.3으로 B등급의 좋음으로 평가되었다(Table 6). 이와 같은 결과는 삼천포천이 인간활동에 의해 크게 훼손되었음을 반증하는 사례이다. 따라서 이 하천의 재자연화를 통한 수생태계의 건강성 회복을 위해 우선적으로 고려되어야 할 생물학적 요소이다.

2. 저서성대형무척추동물평가지수(BMI)

1차 조사에 대한 BMI 분석결과, 지점 1, 4는 환경상태가 ‘좋음(B)’의 등급으로 분석되었으며, 이를 제외한 지점 2, 3, 5, 6, 7은 환경상태가 ‘보통(C)’의 등급으로 분석되었으며, 7개 조사지점의 BMI 지수값의 편차는 미미한 것으로 나타났다(Table 7).

2차 조사에 대한 BMI 분석결과, 각각 St.1 지점은 환경

Table 8. Change of BMI at each location (2nd survey).

Survey points	BMI	Grade (A~E)	Environmental conditions
St.1	72.8	B	Good
St.2	63.6	C	Average
St.3	59.6	C	Average
St.4	60.1	C	Average
St.5	62.2	C	Average
St.6	60.3	C	Average
St.7	49.3	D	Bad

상태가 ‘좋음(B)’, 지점 2, 3, 4, 5, 6은 ‘보통(C)’, 지점 7은 ‘나쁨(D)’의 등급으로 분석되었고, 7개 조사지점의 BMI 지수값을 비교할 때, 지점 1에서 가장 높은 값을 보인 반면, 지점 7에서 가장 낮은 값을 보였으며, 그 외의 지점은 유사한 값을 보였다(Table 8). 저서성대형무척추동물은 환경변화에 매우 민감하여 환경지표종으로의 활용가치가 매우 높다. 이번 연구결과와 지수가 전반적으로 보통 또는 나쁨으로 나타난 것은 앞서 논의된 TDI의 결과와 더불어 이 하천의 생태계가 현재 상태를 대변한다고 볼 수 있다. 향후 하천의 생태적 기능회복을 위해서 반드시 개선되어야 할 것이다.

3. 지표생물종 출현도

현지조사시 저서성대형무척추동물은 총 32종이 조사되었으며, 1차 조사 시 총 28종, 2차 조사 시 총 28종이 조사되었다. 1차 및 2차 조사 결과를 종합하면 출현 종 중 개체수가 가장 많았던 종인 개똥하루살이의 개체수는 143개체로 순위는 1이며, 출현 종수 32에 대한 순위 백분율은 3.1%이고, 출현도는 5이며, 두 번째로 많이 출현한 다슬기는 97개체로 순위 백분율은 6.3%이고, 출현도는 5이다(Table 9). 이와 같은 결과로 미뤄볼 때는 삼천포천의 건강성 회복을 위해서는 여러 종이 서식할 수 있도록 미세서식지 다양성을 고려한 복원계획이 필요하다.

Table 9. Occurrence of benthic macroinvertebrates

Order	Species name	No. individuals	Appearance rate
1	<i>Baetis fuscatus</i> (Linnaeus)	143	3.1%
2	<i>Semisulcospira libertine</i> (Gould)	97	6.3%
3	Midge Spp.	95	9.4%
4	<i>Cloeon dipterum</i> Linnaeus	48	12.5%
5	<i>Lymnaea auricularia</i> (Linnaeus)	40	15.6%
6	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> Calpatede	37	18.8%
7	<i>Palaemon paucidens</i> De Haan	34	21.9%
8	<i>Asellus hilgendorfi</i> Bovalius	24	25.0%
9	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i> Iwata	20	28.1%
10	<i>Hydropsyche kozhantschikovi</i> Martynov	17	31.3%
11	<i>Assimineia japonica</i> v. Martens	16	34.4%
12	<i>Ecdyonurus levis</i> (Navás)	14	37.5%
13	<i>Tipula</i> KUa	12	40.6%
14	<i>Dugesia japonica</i> Ichikawa and Kawakatsu	11	43.8%
15	<i>Calopteryx japonica</i> (Selys)	11	46.9%
16	<i>Oreodytes natrix</i> Sharp	10	50.0%
17	<i>Hydropsyche</i> KUa	10	53.1%
18	<i>Physa acuta</i> Draparnaud	9	56.3%
18	<i>Ephemera orientalis</i> McLachlan	9	56.3%
18	<i>Ephemera strigata</i> Eaton	9	56.3%
18	<i>Orthetrum albistylum</i> (Selys)	9	56.3%
18	<i>Parachauliodes continentalis</i> van der Weele	9	56.3%
19	<i>Trigomphus citimus</i> Needham	8	59.4%
20	<i>Clithon retropictus</i> (von Martens)	4	62.5%
20	<i>Gyraulus convexiusculus</i> (Hutton)	4	62.5%
21	<i>Epeorus pellucidis</i> (Brodsky)	3	65.6%
21	<i>Lyriothemis pachygastra</i> (Selys)	3	65.6%
21	Simulium Spp.	3	65.6%
22	<i>Hemigrapsus penicillatus</i> (De Haan)	1	68.8%
22	<i>Orthetrum triangulare melania</i> (Selys)	1	68.8%
22	<i>Nemoura brevicercia</i> Zhiltzova	1	68.8%
22	<i>Antocha</i> KUa	1	68.8%

적 요

삼천포천은 제방을 따라 제내지에 인공구조물이 설치되어 있으며, 하상구조가 인간활동으로 교란되어 있다. 본 연구결과 부착조류와 저서성 무척추동물의 생물다양성이 여타 하천에 비해 낮은 것으로 나타났다. 따라서 생태하천 복원 시 제방의 제외지와 제내지를 동시에 친환경적으로 복원을 고려함으로써 생물다양성 증대를 도모하고 하상 복원 등을 통해 회유성 어류들이 하천생태계로 유입되어 생태계의 안정성 및 건강성을 회복해야 할 필요가 있다 (Palmer *et al.*, 2014). 이를 위해서는 생태하천 복원시 사용

되는 재료는 무생물적 재료를 지양하고 과거부터 주로 서식하는 자생식물 등을 주재료로 사용하고 하도 구조는 하상의 현재 유로형상 (flow channel pattern)을 유지하도록 유도해야 한다. 유로 연장이 필요한 경우 직강화 등에 의해 축소되어서는 안되며 축소된 유로는 복원을 권장한다. 분절된 지류는 본류와 연결시키고 연력이 곤란한 웅덩이는 대상하천에 맞게 소택형 습지를 형성하도록 유도한다. 또한 생태통로 (Eco-corridor) 확보 및 추이대 조성을 통해 생태환경 기능을 개선할 필요가 있으며 제내지의 폐천 부지는 하천구역으로 편입하여 생태습지 등으로 이용을 적극 고려해야 한다 (Choi and Lee, 2019). 생태적 복원을 위

해 주차장, 체육시설 및 공원 등은 배제해 자연성을 유지 하되 주민의 활용도를 고려하는 것도 중요하다. 이를 통하여 삼천포천의 자연성 회복을 통한 생물다양성 증진 및 주민에게 다양한 문화 휴식 공간 제공 등의 생태계 서비스 능력을 향상을 기대한다(Bennett *et al.*, 2009).

저자정보 정길상(국립생태원 멸종위기종복원센터 책임연구원), 최한수((주)에코이엔지 연구소장)

저자기여도 조사설계: 정길상, 조사수행: 정길상, 최한수, 분석: 정길상, 최한수, 과제관리: 최한수

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

사사 본 연구는 ‘사천시 삼천포천 생태하천복원사업 기본 및 실시설계용역’ 중 ‘생태특성 분석 및 평가 연구’의 일환으로 수행하였습니다.

REFERENCES

- Bennett, E.M., G.D. Peterson and L.J. Gordon. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters* **12**(12): 1394-1404.
- Choi, J.S., H.S. Chae and H.S. Kim. 2019. Biological water quality evaluation using adherent diatoms in the upper Nakdong River water system. *Journal of Environmental Impact Assessment* **28**(2): 169-182.
- Choi, J. and S. Lee. 2019. Application of habitat evaluation procedure with quantifying the eco-corridor in the process of environmental impact assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **16**(8): 1437.
- Hwang, S.J. 2009. The importance of small rivers in restoring river ecology. *Water for future* **42**(5): 38-49.
- Jun, Y.C., D.H. Won, S.H. Lee, D.S. Kong and S.J. Hwang. 2012. A multimetric benthic macroinvertebrate index for the assessment of stream biotic integrity in Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **9**(10): 3599-3628.
- Kelly, M.G. and B.A. Whitton. 1995. The trophic diatom index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology* **7**: 433-444.
- Kim, H.K. 2022. Biological Water Quality Assessment Using the Epilithic Diatoms in Korean Estuary (Doctoral dissertation, Hanyang University).
- Lake, P.S., N. Bond and P. Reich. 2007. Linking ecological theory with stream restoration. *Freshwater Biology* **52**(4): 597-615.
- Odum, E.P. 1971. *Fundamentals of Ecology* (third ed.). New York: Saunders. ISBN978-0-534-42066-6.
- Palmer, M.A., K.L. Hondula and B.J. Koch. 2014. Ecological restoration of streams and rivers: shifting strategies and shifting goals. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* **45**: 247-269.
- Park, Y.J., Y.R. Jeon, K.D. Kim, H.N. Yoon and S.H. Nam. 2013. Benthic macroinvertebrate community analysis and biological water quality evaluation in the Wangpicheon basin. *Korean Journal of Environment and Ecology* **27**(3): 327-343.
- Reynoldson, T.B. and J.L. Metcalfe-Smith 1992. An overview of the assessment of aquatic ecosystem health using benthic invertebrates. *Journal of Aquatic Ecosystem Health* **1**: 295-308.
- Surber, E.W. 1937. Rainbow trout and bottom fauna production in one mile of stream. *Transactions of the American Fisheries Society* **66**(1): 193-202.
- Won, D.H., S.H. Lim, J.H. Park, J.S. Moon and Y.H. Do. 2022. Research Trend of Estuarine Ecosystem Monitoring and Assessment. *Korean Journal of Ecology and Environment* **55**(1): 1-9.
- Woo, H.S. and J.R. Park. 2000. Understanding river restoration and domestic and international cases. *Water for Future* **33**(6): 15-28.