

ORIGINAL ARTICLE

원동습지의 저서성 대형무척추동물 군집 특성과 안정성

이승현 · 한현우 · 윤춘식 · 홍성진¹⁾ · 정선우*

창원대학교 생물학 · 화학융합학부, ¹⁾낙동강유역환경청

Community Characteristics and Stability of Benthic Macroinvertebrates in Wondong Wetland

Seung-Hyeon Lee, Hyeon-Woo Han, Chun-Sik Yoon, Sung-Jin Hong¹⁾, Seon-Woo Cheong*

Department of Biology & Chemistry, Changwon National University

¹⁾Nakdong River Basin Environmental Office

Abstract

This study analyzed the ecological changes in the community structure of benthic macroinvertebrates in the Wondong Wetland, South Korea, to provide baseline data for its conservation and management. Between 2022 and 2023, four classes, six orders, 20 families, 43 genera, 75 species, and 2,404 individuals were identified, with insects, particularly Odonata, being predominant. Pollution-tolerant species, such as *Cipangopaludina chinensis malleata* and chironomids, were dominant. Environmental disturbances caused fluctuations in species and individual numbers, with notable increases in species from Diptera, Systelommatophora, and Isopoda in 2023. Although the species richness remained stable, the diversity index decreased from 3.307 in 2022 to 3.223 in 2023. Site 1 had low diversity and evenness owing to the dominance of pollution-tolerant species. Biological water quality assessments showed that the biological monitoring working party and average score per taxon were more sensitive and suitable for monitoring of Wondong Wetland. Functional feeding groups were mainly predators and gathering collectors, with changes in their proportions depending on habitat and pollution level. Notably, Site 1 had more gathering collector species, whereas Site 2 was rich in predatory species. The species composition of the habitual dwelling group was dominated by climbers, whereas the abundance composition was dominated by sprawlers. Changes in habitual dwelling groups were minimal during the study period, although the abundances of burrowers and skaters increased in 2023. The community loss index showed greater instability in 2023, especially during summer, with increased community loss in autumn compared to that in 2011. Relative resistance and resilience were higher at Site 1, indicating ecosystem stability, whereas Sites 2 and 3 exhibited high resistance but low resilience. This study highlights the Wondong Wetland's high conservation value and calls for its designation as a protected area with systematic management.

Key words : Wondong wetland, Benthic macroinvertebrates, Community structure, Assessment of biological water quality, Community stability

Received 2 December, 2024; Revised 12 December, 2024;

Accepted 13 December, 2024

*Corresponding author : Seon-Woo Cheong, Department of Biology & Chemistry, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

Phone : +82-55-213-3454

E-mail : swcheong@changwon.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. 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. 서 론

습지는 일반적으로 영구적 또는 계절적으로 습윤상태를 유지하면서 육상생태계와 수생태계 사이의 전이대로(Tiner, 2017), 전 세계 육지 표면의 약 6.2~7.6%를 차지한다(Lehner and Döll, 2004). 생산성과 종다양도가 높은 생태계로 지구상에서 가장 영양물질이 풍부하며(Yang et al., 2001), 수많은 식물과 동물의 생존을 위해 수서생물의 서식처, 수질정화, 용수공급, 미기후의 조절 등 생태적, 경제적, 문화적으로 가치가 매우 높다(Lambert, 2003).

조사 지역인 원동습지는 경상남도 양산시 원동면 용당리 천태산의 남쪽 산록에서 발원하는 당곡천의 하류와 그 주변부이며, 낙동강의 범람으로 형성된 배후습지로 총연장 1.9 km, 면적 237,367 m²에 이른다(Yangsan-si, 2013). 원동습지는 멸종위기 야생생물 II급에 해당하는 선계비꽃(*Viola raddeana*)과 서울개발나물(*Pterygopleurum neurophyllum*) 등의 식물 외에도 멸종위기 야생생물 I급인 수달(*Lutra lutra*)과 멸종위기 야생생물 II급인 살(*Prionailurus bengalensis*) 등 멸종위기 야생생물의 서식처로 이용되며 이들의 보존과 관찰을 위한 생태관찰지가 설치되었다. 버드나무(*Salix pierotii*) 군락이 차지하는 면적이 넓고, 선버들(*Salix triandra*) 군락, 갈대(*Phragmites australis*) 군락 등 11종류의 주요 식물군락이 있어(Son et al., 2002) 생태적 가치 외에도 희소성과 학술적 및 교육적 가치가 높은 곳이다. 이곳은 2012년 '고향의 강 조성사업'에 의해 생태습지로서 당곡 인공 유수지 및 당곡 빗물펌프장이 설치되었고 유수지 내로 생태 탐방데크와 생태통로가 설치되면서 교란과 변화가 있었던 곳이다(Yangsan-si, 2013). 배후습지의 긍정적인 기능에도 불구하고, 낙동강 일대의 습지가 매립되어 농경지, 주거단지, 공장 등으로 전환되면서 면적의 90% 이상이 소실되고 교란되었기 때문에, 2000년대 이후 전국 내륙습지 자연환경 조사를 통해 습지보전 기초계획의 수립이 진행되었으며(The Ministry of Environment, 2001), 보전 가치가 매우 높은 지역임에도 불구하고 보호지역 지정은 아직 이루어지지 않고 있다.

원동습지의 자연 자원에 관한 연구는 많지 않으며, 주요 연구로는 The Ministry of Environment(2001), Yang et al.(2001), Nakdong River Basin Environmental Office(2006), Yangsan-si (2012; 2013) 등이 보고되

었다. 특히 저서성 대형무척추동물에 관한 연구는 매우 제한적이며 이에 대한 체계적인 조사가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 생태적 가치가 우수하여 보전 가치가 높은 원동습지의 보호지역 지정 필요성을 밝히기 위해 저서성 대형무척추동물의 군집구조 특성과 변화에 기반한 서식 환경평가와 습지 관리를 위한 기초자료를 제공하는 것이다. 이를 위해 2022년부터 2023년까지 원동습지의 저서성 대형무척추동물의 분류군별 분포조사를 통하여 생물지수, 우점종, 생물학적 수질 평가, 기능군 분석, 군집안정성 등을 분석하였다.

생물지수는 군집의 생물종 풍부도와 균등한 분포에 대한 지수로서, 군집에서 무작위로 개체를 추출하였을 때 어떠한 종이 나타날 불확실성의 정도를 의미하는 다양도(Diversity index, *H*), 총 개체수와 총 종수를 이용하여 군집의 상태를 표현하는 값으로, 값이 높을수록 종이 풍부하고 환경의 상태가 양호하다는 것을 의미하는 풍부도(Richness index, *RI*), 군집의 총 개체수에 대한 우점종과 아우점종의 개체수 비율을 나타내는 우점도(Dominance index, *DI*), 생태계의 안정성에 대한 척도로, 군집의 모든 종에 대한 개체수가 동일할 경우 다양도의 지수가 최대치가 되어 가장 높은 값을 얻을 수 있으며, 생태계가 안정적일수록 높은 값을 나타내는 균등도(Evenness index, *J*)를 확인하였다.

생물학적 수질평가를 위해 국내에서 대표적으로 사용되고 있는 기법인 저서성 대형무척추동물 생태점수(Ecological score of benthic macroinvertebrate community, ESB), 이의 보완지수인 총생태점수(Total ecological score of benthic macroinvertebrate community, TESB)와 평균생태점수(Average ecological score of benthic macroinvertebrate community, AESB)를 기본적으로 이용하였다. 또한 서식 분포가 확인된 분류군 중 오락계급치 및 지표가중치가 알려져 있는 종들을 분석하여 계급치를 구하는 군오염지수(Group pollution index, GPI), 하천에서 조사된 저서성 대형무척추동물의 정량자료와 환경부의 수질측정망 자료를 이용하여 지표생물군을 선정하고 각 지표생물군의 오락계급치 및 지표가중치를 산정한 한국오수생물지수(Korean saprobic index, KSI), 종 수준의 평균 내성도를 고려하는 저서생물지수(Benthic macroinvertebrates Index, BMI)를 사용하여 수질 환경의 건전성을 비교하였다. 이에 더해 유기오염 내성을 과(family) 단위에서 평가하는 과별생물지수

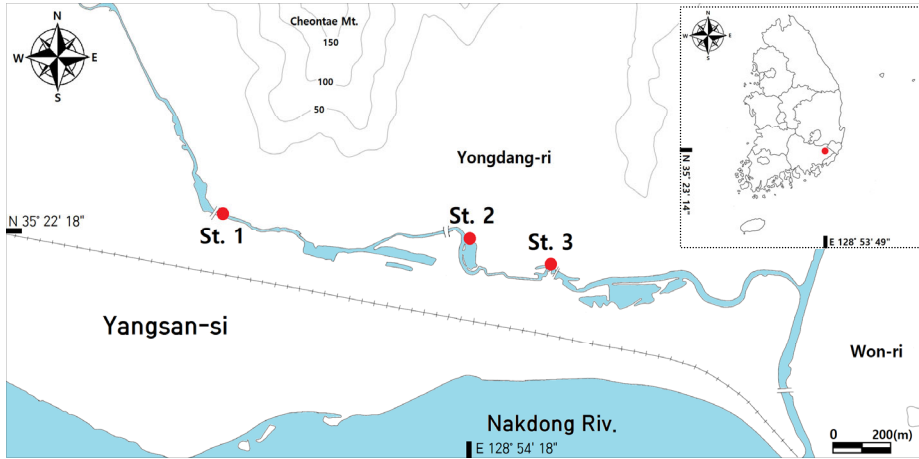


Fig. 1. Maps of the survey sites of benthic macroinvertebrate in Wondong Wetland.

(Family biotic index, FBI)와 생물학적 모니터링 작업 그룹(Biological monitoring working party, BMWP), 군집 안의 모든 분류군의 내성 수의 평균치를 나타내는 분류군별 평균 점수(Average score per taxon, ASPT)도 추가적으로 산정하여 원동습지의 생물학적 수질관리에 적합한 지수를 평가하였다.

기능군은 먹이원의 종류 및 섭식방법에 따라 구분하는 섭식기능군(Functional feeding group)과 각 미소서식 환경에 적응해 살아가는 방식에 따라 구분하는 서식습성군(Habitual dwelling group)의 현황을 분석하였으며, 군집안정성은 먼저, 군집 소실 지수(CLI)를 이용하여 과거에 대한 현재의 군집 소실 정도로 평가하였고, 수서곤충의 상대적 저항력과 회복력을 특성군의 분포로 분석하였다. 마지막으로, 원동습지의 생태적 보전과 지속 가능한 관리를 위한 방안을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 개황 및 조사기간

원동습지는 경상남도 양산시 원동면에 소재하며, 조사지는 St. 1(상류), St. 2(중류), St. 3(하류) 3개의 지점을 선정하여 2022년과 2023년에 봄(3월), 여름(6월), 가을(9월)에 총 6회의 현장 조사를 하였다(Fig. 1).

St. 1: 경상남도 양산시 용당리를 흐르는 당곡천의 상류부에 해당하며, 지리 좌표는 북위 35° 22' 20" N, 동경 128° 53' 50" E이다. 하폭은 5.5~6.0 m, 수심은 약

30~40 cm로 물의 흐름이 거의 없어 유속은 측정되지 않았다. 하상은 펄과 자갈, 호박돌로 다양하게 구성되어 있다. 호안의 경사가 완만하고, 수변을 따라 갈대군락이 우점하였으며, 2023년 6월과 9월 조사에서만 개구리밥(*Spirodela polyrhiza*), 마름(*Trapa japonica*), 붕어마름(*Ceratophyllum demersum*), 검정말(*Hydrilla verticillata*) 등의 수생식물이 관찰되었다. 오염원으로는 유입수 근처에 위치하는 요식업소와 화학공장, 빗물 펌프장, 공사지역 및 농경지가 인접한다.

St. 2: 경상남도 양산시 용당리 당곡천의 중류부에 해당하며, 지리 좌표는 북위 35° 22' 18" N, 동경 128° 54' 18" E이다. 하폭은 15.1 m, 수심은 약 1 m이다. 하상은 거의 진흙으로 구성되며, 약간의 호박돌과 자갈로 구성된다. 낚시터로 이용하기 위한 인공적인 구조물들이 수변에 있으며, 이에 따라 호안의 경사가 급하여 절벽처럼 깎여 있다. 물의 흐름이 거의 없어 유속이 측정되지 않으며, 수변에는 갈대와 버드나무군락이 우점하고, 수생식물로는 마름과 개구리밥이 소량 관찰되었다. 주 오염원은 낚시폐기물과 인접한 농경지이다.

St. 3: 경상남도 양산시 용당리 당곡천의 하류부에 해당하며, 지리 좌표는 북위 35° 22' 15" E, 동경 128° 54' 31" E이다. 하폭은 8.2~8.6 m, 수심은 약 1 m, 하상은 진흙으로 구성되고, 호안은 절벽처럼 깎여 있으며, 유속은 거의 없었다. 수변에는 갈대와 버드나무군락이 우점하며, 수생식물은 약간의 마름이 관찰되었다. 주 오염원으로는 조사지점에 인접한 농경지이다.

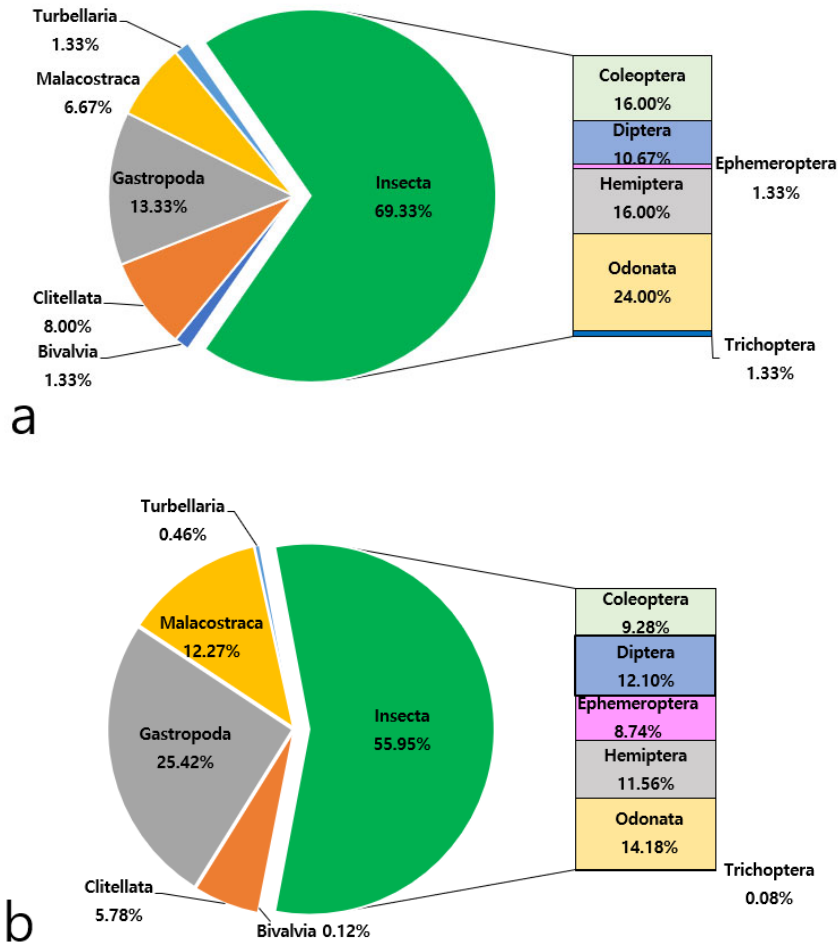


Fig. 2. Species composition(a) and abundance composition(b) by higher taxa than order of benthic macroinvertebrates in Wondong Wetland (2022~2023).

2.2. 채집 및 분류

조사지점과 조사 시기에 따른 분포현황 파악과 생물지수 산출을 위해 정량 조사를 하였다. 조사 방법은 제5차 전국자연환경조사 지침(National Institute of Ecology, 2019)를 참고하였다. 조사지점은 정수성 하천이며 폭 50 cm, 높이 30 cm, 망목 0.2 x 0.2 mm의 D frame net을 이용하여 조사지점별로 2 x 2 m의 면적을 끌어 정량 조사 하였다. 채집된 저서성 대형무척추동물은 Kahle's solution에서 1일간 고정 한 후, 70% Ethanol에서 저온 보관하였다(Jung et al., 2008). 동

정 및 분류를 위해 현미경 영상장치(Tech Xcam)로 관찰하였으며 참고문헌으로 Yoon(1995), Kawai and Tanida(2005), Won et al.(2005), Jung(2011), Kong et al.(2013), Kwon et al.(2013)을 활용하였다. 분류체계와 학명은 National Institute of Biological Resources(2022)를 따랐다.

2.3. 생물학적 수질평가와 생물지수

정량 채집된 원동습지의 저서성 대형무척추동물에 대하여 주요 생물학적 수질 평가지수를 산출하였다. 연

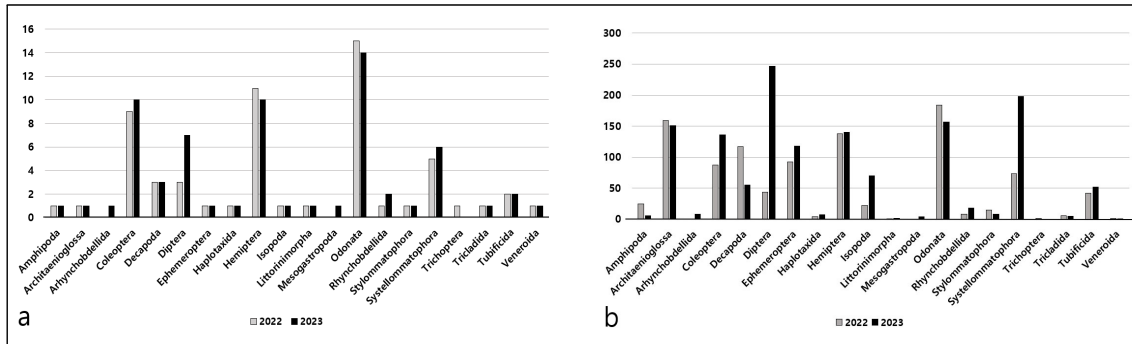


Fig. 3. Changes of number of species(a) and abundance(b) by the order of benthic macroinvertebrate in Wondong Wetland (2022~2023).

구에 이용된 지수는 생태점수(ESB), 총생태점수(TESB) 및 평균생태점수(AESB) (Kong et al., 2018), 군 오염지수(GPI) (Yoon et al., 1992), 한국오수생물지수(KSI) (Won et al., 2016), 저서생물지수(BMI)(Kong, 2018), 과별생물지수(FBI) (Plafkin et al., 1989), 생물학적 모니터링작업그룹(BMWP) (Chapman, 1996), 분류군별 평균점수(ASPT) (Chapman, 1996)이다.

생물지수는 다양도(H') (Shannon and Weaver, 1964), 풍부도(RI) (Margalef, 1958), 우점도(DI) (Mc Naughton, 1967), 균등도(J') (Pielou, 1975) 및 전체 개체수와 종별 개체수의 백분율인 종별 우점도를 이용하였으며 우점종의 개체수에 대한 종별 개체수를 백분율(%)로 나타낸 상대밀도(Relative density, RD)를 계산하였다.

2.4. 기능군과 군집안정성

기능군에 대해서는 섭식기능군과 서식습성군의 분포변화를 속(genus) 수준에서 분석하였다(Cummins and Klug, 1979; Ro and Jeon, 2004; Merritt et al., 2008).

하천생태계의 안정성을 평가하는 방법으로는 조사 지점의 분류군 변화를 나타내는 군집소실지수(Community loss index, CLI)(Plafkin et al., 1989)와 수서곤충류의 환경 내 안정성에 대한 특성을 상대적 저항력과 회복력(Ro, 2002)으로 구분하는 방법을 이용하였다. 군집소실지수는 원동습지의 군집 변동을 확인하기 위하여 선행연구(Yangsan-si, 2012)와 동일 조사지점의 출현 종을 비교하여 산출하였으며, 상대적 저

항력과 회복력은 수서곤충을 4개의 특성군으로 구분하는데 5를 기준으로 상대적 회복력과 저항력을 각각 4분면 위에 배치하는 방법이다. 이는 각각 상대적 저항력과 회복력이 모두 높은 특성군 I, 높은 상대적 회복력과 낮은 상대적 저항력을 보이는 특성군 II, 상대적 회복력과 저항력이 모두 낮은 특성군 III, 그리고 낮은 상대적 회복력과 높은 상대적 저항력을 보이는 특성군 IV를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 저서성 대형무척추동물 서식 현황과 주요종

조사 기간 원동습지에서 확인된 저서성 대형무척추동물은 총 4문 6강 20목 43과 75종 2,404개체였다. 2022년에는 4문 6강 18목 37과 59종 1,021개체, 2023년에는 4문 6강 19목 39과 64종 1,383개체로 확인되었다.

원동습지의 전체 분류군 중에서 강별 종수의 점유율은 곤충강(Insecta)이 52종(69.33%)으로 우점하였고, 다음으로 복족강(Gastropoda)이 10종(13.33%), 환대강(Clitellata)이 6종(8.00%), 연갑강(Malacostraca)이 5종(6.67%), 외충강(Turbellaria)과 이매패강(Bivalvia)이 각각 1종(1.33%)의 순으로 확인되었다. 강별 종수의 점유율이 가장 높은 곤충강의 목별 종수는 잠자리목이 18종(24.00%)으로 우점하였고, 다음으로 노린재목(Hemiptera)과 딱정벌레목(Coleoptera)이 각각 12종(16.00%), 파리목(Diptera)이 8종(10.67%), 수병안목(Systellommatophora)이 6종(8.00%), 십각목(Decapoda)이 3종(4.00%), 그 외의 목은 2종 이하로

Table 1. The dominant species and subdominant species of Wondong Wetland by survey site (2022~2023)

		St. 1	St. 2	St. 3	Total
2022	Dominant species	Cipangopaludina chinensis malleata (27.15%)	Cipangopaludina chinensis malleata (13.78%)	Macrobrachium nipponense (15.43%)	Cipangopaludina chinensis malleata (15.57%)
	Subdominant species	Physa acuta (9.95%)	Cloeon dipterum (9.29%)	Cloeon dipterum (15.13%)	Cloeon dipterum (9.01%)
2023	Dominant species	Cipangopaludina chinensis malleata (27.18%)	Cloeon dipterum (15.04%)	Chironomidae sp. (20.81%)	Chironomidae sp. (14.32%)
	Subdominant species	Chironomidae sp. (10.34%)	Chironomidae sp. (11.69%)	Leiodytes nicobaricus (16.56%)	Cipangopaludina chinensis malleata (10.92%)
Total	Dominant species	Cipangopaludina chinensis malleata (27.17%)	Cloeon dipterum (12.59%)	Chironomidae sp. (13.49%)	Cipangopaludina chinensis malleata (12.90%)
	Subdominant species	Physa acuta (9.60)	Chironomidae sp. (9.85%)	Cloeon dipterum (11.26%)	Chironomidae sp. (9.90%)

나타났다. 비곤충류에서는 수병안목이 6종(8.00%), 십각목이 3종(4.00%), 부리거머리목(Rhynchobdellida)과 실지렁이목(Archioligochaeta)이 각각 2종(2.67%), 그 외 12개의 목에서 1종씩(1.33%) 확인되었다(Fig. 2).

강별 개체수는 곤충강이 1,345개체(55.95%)로 우점하였고, 다음으로 복족강 611개체(25.42%), 연갑강 295개체(12.27%), 환대강 139개체(5.78%)였으며 그 외의 강에서는 1% 미만의 점유율을 나타냈다. 목별 개체수 점유율에서 곤충강은 잠자리목이 341개체(14.18%)로 우점하였고, 파리목 291개체(12.10%), 노린재목 278개체(11.56%), 딱정벌레목 223개체(9.28%), 하루살이목 210개체(8.74%)의 순으로 나타났으며, 비곤충류에서는 고설목(Architaenioglossa) 310개체(12.27%), 수병안목 271개체(11.27%), 십각목 172개체(7.15%), 실지렁이목 94개체(3.91%), 등각목(Isopoda) 92개체(3.83%), 단각목(Amphipoda) 31개체(1.29%), 부리거머리목(Rhynchobdellida) 26개체(1.08%), 그 외 8개의 목에서 1% 이하의 점유율을 나타냈다(Fig. 3).

2022년과 2023년의 목별 출현 종수와 개체수를 비교하였으며 종수는 파리목이 2023년에 전년도에 비해 3종에서 7종으로 2배 이상 증가했지만, 그 외의 목에서는 종수에서 많은 변화를 보이지 않았다(Fig. 3a). 목별 개체수는 변화폭이 크며 딱정벌레목은 2023년에 136개체로 전년도의 87개체에 비해 약 1.6배 증가하였다. 이는 St.

3에서 노랑머리테물방개(*Leiodytes nicobaricus*)의 개체수 증가의 영향이 크다. 십각목은 2023년에 55개체로 전년도의 117개체에 비해 약 2.1배 감소하였고 파리목은 2023년에 247개체로 전년도의 44개체에 비해 5.6배로 급증하였다. 등각목은 2023년에 70개체로 전년도의 22개체에 비해 약 3.2배 증가하였으며 수병안목은 2023년에 198개체로 전년도의 73개체에 비해 약 2.7배 증가하였다. 파리목의 종수와 개체수의 동반 증가와 등각목과 수병안목 개체수의 강한 증가는 2023년 여름부터 진행된 멸종위기종 자생지복원사업과 생태공원 조성공사로 인한 환경 교란과 관련 있는 것으로 보인다(Fig. 3b). 그러나 잠자리목의 개체수는 큰 변화 없이 150개체 이상 많은 수가 유지되어 원동습지는 잠자리목의 안정적인 서식지로 고려할 수 있다.

원동습지의 3개 조사지점에서 전체 및 연도별 우점종과 아우점종의 분포를 확인하였다. 조사기간 출현한 저서성 대형무척추동물 중 전체 우점종은 논우렁이(*Cipangopaludina chinensis malleata*)로 310개체, 우점도는 12.90%이며 아우점종은 깔따구류(*Chironomidae* sp.)로 238개체, 우점도는 9.90%이다. 2022년의 우점종은 논우렁이가 159개체, 우점도 15.57%, 아우점종은 연못하루살이(*Cloeon dipterum*)가 92개체, 우점도 9.01%로 나타났다. 2023년은 깔따구류가 198개체로 우점도 14.32%였으며, 논우렁이가 151개체 및 우점도 10.92%로 나타났다. 조사지점별로

Table 2. Biotic indices of benthic macroinvertebrates in Wondong Wetland (2022~2023)

Year	Site	Index			
		H'	RI	DI	J'
2022	St. 1	2.842	6.251	0.371	0.781
	St. 2	3.057	6.965	0.231	0.823
	St. 3	3.003	6.701	0.306	0.814
	Total	3.307	8.371	0.246	0.811
2023	St. 1	2.702	6.935	0.400	0.714
	St. 2	3.093	7.619	0.267	0.803
	St. 3	2.747	6.336	0.374	0.745
	Total	3.223	8.711	0.252	0.775
Total	-	3.367	9.506	0.228	0.780

St. 1: upstream, St. 2: midstream, St. 3: downstream, H' : diversity index, RI: richness index, DI: dominance index, J' : evenness index.

는 St. 1에서 논우렁이와 물달팽이, St. 2에서는 연못하루살이와 깔따구류, St. 3에서는 깔따구류와 연못하루살이가 각각 우점종과 아우점종으로 나타났다. 본 연구에서 우점종과 아우점종으로 확인된 종들은 공통으로 오염에 대한 내성이 높고, 수심이 얕은 담수성 정수 구역에서 서식하면서, 수초가 풍부한 환경에서 많이 발견되는 특징을 가지는데(Kwon, 2013), 원동습지는 이러한 논우렁이나 깔따구류, 연못하루살이, 물달팽이(*Radix auricularia*) 같은 생물들이 서식하기에 적합한 환경 특성을 나타낸다(Table 1).

특정 종 중 분포특이종(NIER종)으로 노랑머리테물방개, 각시물자라(*Diplonychus esakii*), 푸른아시아실잠자리(*Ischnura senegalensis*), 별날도래(*Ecnomus tenellus*)가 확인되었고, 기후변화지표종으로 푸른아시아실잠자리가 있었으며, 한반도 고유종과 멸종위기종은 확인되지 않았다.

3.2. 생물지수(Biotic Indices)

생물지수는 각 조사지점에 대해 연도별 및 계절별 다양도(H'), 풍부도(RI), 우점도(DI), 균등도(J')를 구했으며 조사 기간을 통합한 생물지수를 고려하면, 다양도는 3.367, 풍부도는 9.506, 우점도는 0.228, 균등도는 0.780으로 나타났다. 위의 지수는 2022년에 3.307, 8.371, 0.246, 0.811로 나타났고, 2023년은 3.223, 8.711, 0.252, 0.775로 각각 나타났다.

연도에 따른 조사지점별 지수를 고려하면, 2022년 다양도는 조사지점별로 2.842~3.057의 범위였으며,

St. 2에서 가장 높고 St. 1에서 가장 낮았다. 풍부도는 6.251~6.965의 범위였으며 St. 2에서 가장 높고 St. 1에서 가장 낮았다. 우점도는 0.231~0.371의 범위였으며, St. 1에서 가장 높고 St. 2에서 가장 낮았다. 균등도는 0.781~0.823의 범위였으며, St. 2에서 가장 높고 St. 1에서 가장 낮았다. 2022년 St. 1에서 다양도, 풍부도, 균등도가 가장 낮은 이유는 당시 해당 조사지점의 환경 교란으로 출현 종수가 적고 논우렁이와 원돌이물달팽이 등 오염 내성이 강한 종들에 개체수가 편중되었기 때문이다. 2023년 다양도는 2.702~3.093의 범위였으며, St. 2가 가장 높고 St. 1이 가장 낮았다. 풍부도는 6.336~7.619의 범위였으며, St. 2가 가장 높고 St. 3이 가장 낮았다. 우점도는 0.267~0.400의 범위였으며, St. 1이 가장 높고 St. 2가 가장 낮았다. 균등도는 0.714~0.803의 범위였으며 St. 2가 가장 높고 St. 1가 가장 낮았다. 이처럼 St. 1에서 다양도와 균등도가 낮은 이유는 전년도에 비해 환경이 개선되어 종수가 증가했음에도 불구하고, 논우렁이, 원돌이물달팽이, 깔따구류 등 오염 내성이 강한 일부 종들이 여전히 높은 개체수를 유지하고 있어서이기 때문이다. 다양도는 2022년 St. 3의 여름에 2.187로 가장 높았으며 이는 당시 St. 3의 수면에 식생이 풍부하여 저서성 대형무척추동물의 먹이 활동 및 산란, 은신처로서 좋은 환경이었기 때문이다. 그러나 다양도가 가장 높았던 St. 3이 2023년에는 다양도가 저하되었고 풍부도는 가장 낮아졌는데, 이는 2023년의 집중 강우로 인한 유량 증가로 수변 식생이 발달하지 않았고 비점오염원으로부터 오염 물질까지

유입되어 저서성 대형무척추동물의 서식에 불리한 환경이었기 때문으로 생각된다(Table 2).

계절에 따른 조사지점별 지수를 고려하면, 다양도는 St. 1의 여름에 1.982로 가장 낮았는데, 이는 St. 1에 오염물질의 유입 및 부영양화로 인해 오염 내성이 강한 종들만 출현하였기 때문이며 이 때문에 다양도가 낮은 것으로 판단된다. 풍부도는 St. 1의 가을에 4.845로 가장 높은 것이 특이하였는데, 대체로 풍부도와 다양도가 낮은 St. 1에서 이 시점에 풍부도가 높은 것은 2022년 가을 강우의 영향으로 당곡천의 상류부에서 많은 종이 원동습지의 입구인 St. 1로 유입되었기 때문일 것이다. 풍부도는 St. 1 여름에 2.354로 가장 낮았으며 St. 1의 생물지수는 계절에 따라 심한 등락을 나타냈다. 우점도는 2022년 St. 3의 여름에 0.221로 가장 낮다가 가을이 되자 동일 조사지점에서 오히려 0.550으로 가장 높았다. 이는 2022년 여름 St. 3의 수변 식생의 발달로 다양한 종 서식에 적합한 환경이었지만 강우의 영향으로 인해 미소 서식처가 파괴되었고 가을 조사에서는 꼬마등골물벌레(*Paraplea indistinguenda*)와 징거미새우(*Macrobrachium nipponense*)를 포함한 일부 종의 우점도가 높은 것이 원인으로 보인다(Table 2).

3.3. 생물학적 수질평가

원동습지의 저서성 대형무척추동물 분포를 바탕으로 아홉 가지 생물학적 수질 평가기법을 활용하여 환경질 점수를 산정하였으며 원동습지의 환경 모니터링에 가장 적합한 방법을 찾고자 하였다.

먼저, 저서성 대형무척추동물 생태점수(Ecological score of benthic macroinvertebrate community, ESB)는 조사지점에 따라 26~71의 범위로 나타났으며 수질 등급은 I~II로 평가되었다. 조사 시기를 모두 고려하면 2023년 봄에 St. 2의 지수가 가장 높고, 2022년 여름에 St. 1에서 가장 낮았다. ESB는 내성 수치를 갖지 않는 종의 수가 증가하면 계산값이 동반 상승하는 경향이 있어 변별력이 부족하다고 판단되어, ESB의 변형인 두 가지 지수 즉, 내성 수치를 가진 종들만 활용하는 저서성 대형무척추동물 총생태점수(Total ecological score of benthic macroinvertebrate community, TESB)와 저서성 대형무척추동물 평균생태점수(Average ecological score of benthic macroinvertebrate community, AESB)를 추가로 계산하였다. 저서성 대형무척추동물 총생태점수(TESB)는 조사지점에 따라

18~59의 범위로 나타났으며, 수질 등급은 II~III로 평가되었다. 조사 시기와 조사지점을 모두 고려하면 2023년 여름에 St. 1에서 지수는 가장 높고 2023년 봄 St. 1과 2022년 봄 St. 2에서 가장 낮았다. 총생태점수(TESB)를 종수로 나눈 평균생태점수(AESB)는 조사지점에 따라 2.000~2.458의 범위로 나타났으며 수질 등급은 III~IV 또는 V 등급으로 나타났다. 조사 시기와 조사지점을 모두 고려하였을 때 2023년 여름 St. 1에서 가장 높고 2023년 봄에 St. 1과 2023년 가을에 St. 3에서 가장 낮았다. 이 두 지수도 조사지역의 수질 평가에 적용하기에는 조사지점별로 내성 수치를 갖는 종들이 비슷하고 개체수의 영향은 받지 않기 때문에 변별력이 부족한 것으로 보인다. 군오염지수(Group pollution index, GPI)는 조사지점에 따라 1.796~2.467의 범위였으며 수질 등급은 III~IV로 나타났다. 조사 시기와 조사지점을 모두 고려하면 2023년 봄에 St. 1에서 가장 높았으며 이는 상류 지역 요식업소와 공장, 농경지로부터 오염물질의 유입과 자생지 복원사업 공사로 인한 오락수의 유입으로 오염 내성이 높은 실지렁이(*Limnodrilus hoffmeisteri*), 붉은색 깔따구류(*Chironomidae* sp.), 그리고 복족류(Gastropoda)의 출현 증가가 원인으로 생각된다. 조사지역은 정수성 하천으로 딱정벌레목 과 노린재목의 점유율이 높아 매우 중요한 분류군임에도 군오염지수(GPI)의 계산에 포함되지 않기 때문에 원동습지의 수질환경 모니터링에는 적합하지 않다고 생각한다. 한국오수생물지수(Korean saprobic index, KSI)는 0.987~4.475의 범위로 나타났으며 수질 등급은 II~V의 범위로 나타났다. 조사 시기와 조사지점을 모두 고려하면 2023년 여름 St. 3에서 가장 높았으며, 2023년 봄 St. 2에서 가장 낮았다. 한국오수생물지수(KSI)는 오염 내성이 강한 원돌이물달팽이나 붉은색 깔따구류 등의 출현 빈도가 높아질수록 수질 등급이 낮아지는 계산방식으로 원동습지에 적용하는 데에는 문제가 있다. 오염 내성이 강한 종들은 오염된 생태계뿐만 아니라 오염정도가 심하지 않은 생태계에서도 발견되고 한국오수생물지수(KSI)의 목록 중 깨끗한 물의 지표종으로 알려진 EPT군(Shin, 2008)은 원동습지에서 연못하루살이와 별날도래(*Ecnomus tenellus*)를 제외하고는 출현하지 않았기 때문에 적용에는 추가조사와 보완이 필요한 것으로 생각된다. 저서생물지수(Benthic macroinvertebrate index, BMI)는 조사지점에 따라 31.603~64.135의 범위였으며 수

Table 3. The evaluation of environmental quality of by benthic macroinvertebrates in Wondong Wetland (2022~2023)

Year	2022								
	St. 1			St. 2			St. 3		
Site	Spring	Summer	Autumn	Spring	Summer	Autumn	Spring	Summer	Autumn
ESB	32	26	60	40	40	49	44	49	42
WQ-ESB	II	II	II	II	II	II	II	II	II
TESB	28	40	41	18	34	31	46	31	36
WQ-TESB	III	II	II	III	II	II	II	II	II
AESB	2.333	2.353	2.412	2.250	2.429	2.385	2.300	2.385	2.400
WQ-AESB	III	III	III	III	III	III	III	III	III
GPI	2.225	2.216	1.907	2.125	1.950	1.891	2.125	1.804	2.108
WQ-GPI	III	III	III	III	III	III	III	III	III
KSI	3.634	3.419	1.532	2.333	2.230	2.239	4.122	3.043	3.638
WQ-KSI	V	V	II	III	III	III	V	IV	V
BMI	35.588	36.288	60.766	42.857	46.833	38.625	54.166	53.393	31.603
WQ-BMI	D	D	B	D	C	D	C	C	D
FBI	2.314	1.290	3.000	2.624	1.258	2.115	2.582	0.965	3.062
WQ-FBI	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
BMWP	51	31	93	40	25	72	45	63	61
WQ-BMWP	Moderate	Poor	Good	Poor	Poor	Good	Moderate	Moderate	Moderate
ASPT	4.250	3.875	4.895	3.800	3.571	4.800	4.091	4.500	5.083
WQ-ASPT	Moderate Pollution	Severe Pollution	Moderate Pollution	Severe Pollution	Severe Pollution	Moderate Pollution	Moderate Pollution	Moderate Pollution	Doubtful Quality

Year	2023								
	St. 1			St. 2			St. 3		
Site	Spring	Summer	Autumn	Spring	Summer	Autumn	Spring	Summer	Autumn
ESB	32	55	62	71	58	32	64	54	36
WQ-ESB	II	II	I	I	II	II	I	II	II
TESB	26	59	52	45	40	40	50	22	28
WQ-TESB	III	II	II	II	II	II	II	III	III
AESB	2.000	2.458	2.261	2.250	2.105	2.222	2.381	2.200	2.000
WQ-AESB	IV - V	III	III	III	III	III	III	III	IV - V
GPI	2.467	1.967	1.967	1.796	2.300	1.952	2.133	2.311	1.949
WQ-GPI	IV	III	III	III	IV	III	III	IV	III
KSI	3.763	2.670	3.156	0.987	4.019	2.844	2.069	4.475	4.236
WQ-KSI	V	IV	IV	II	V	IV	III	V	V
BMI	33.696	53.161	63.211	64.135	43.594	45.423	41.458	48.080	44.844
WQ-BMI	D	C	B	B	D	C	D	C	D
FBI	2.095	2.480	2.286	2.517	1.158	2.337	1.890	2.773	1.323
WQ-FBI	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
BMWP	34	67	88	64	77	53	68	56	39
WQ-BMWP	Poor	Moderate	Good	Moderate	Good	Moderate	Moderate	Moderate	Poor
ASPT	3.400	3.941	4.889	4.267	4.278	4.818	3.778	3.733	3.900
WQ-ASPT	Severe Pollution	Severe Pollution	Moderate Pollution	Moderate Pollution	Moderate Pollution	Moderate Pollution	Severe Pollution	Severe Pollution	Severe Pollution

ESB: ecological score of benthic macroinvertebrate community, GPI: group pollution index, KSI: Korean saprobic index, BMI: benthic macroinvertebrate index, FBI: family biotic index, BMWP: biological monitoring working party, WQ: water quality, ASPT: average score per taxon.

질 등급은 B~D로 평가되었다. 한국오수생물지수(BMI)는 2023년 봄 St. 2에서 가장 높고 2022년 가을 St. 3에서 가장 낮았다. 이 지수는 종수가 적어도 개체수가 많으면 산정값이 높으므로 변별력이 낮다고 판단되며, 이 지수를 원동습지에 적용하기 위해서는 역시 추가조사 및 계산식의 보완이 필요하다고 생각한다. 과별생물지수(Family biotic index, FBI)는 조사지점별로 0.965~3.062의 범위였으며 수질 등급은 모두 'Excellent'로 나타났다. 계산값은 2022년 여름 St. 3에서 가장 높았으나 St. 3에서는 가장 낮았다. 원동습지에서 확인된 중증 과별생물지수(FBI)의 목록에 포함되는 종은 많지 않으며 특히 전체 조사지점에서 매 조사 시 확인되는 환대강과 포아리물달팽이과(Planorbidae)가 목록에 포함되지 않아 점수 산정에 큰 영향을 미친다고 판단하여 이 습지의 수질 환경 모니터링에는 적합하지 않다고 생각한다. 생물학적 모니터링작업그룹(Biological monitoring working party, BMWP)은 25~93의 범위였으며 수질 등급은 'Poor~Good'의 범위로 나타났다. 상대적으로 안정된 생태계로 생각된 2022년 St. 1의 가을과 2023년 St. 1의 가을에는 높은 값을 나타내었으며, 생태계에 교란이 있었던 2023년 St. 1 봄, St. 2와 St. 3 가을에 낮은 값을 나타냈다. 다른 지수들에 비해 판정에서 제외되는 종들의 비율이 낮으며 변별력도 가지므로 생물학적 모니터링작업그룹(BMWP)은 원동습지의 모니터링에 적합한 지수로 생각된다. 분류군별 평균점수(Average score per taxon, ASPT)는 3.400~5.083의 범위로 나타났으며, 수질 등급은 'Probable sever pollution~Doubtful quality'의 범위로 나타났다. 이 지수는 생물학적 모니터링작업그룹(BMWP)의 값을 과(family)의 수로 나눈 것으로, BMWP와 거의 비슷한 경향을 보여주며 풍부도의 영향을 적게 받기 때문에 BMWP보다 수질 평가에 좀 더 적합한 것으로 보인다.

따라서, 여러 가지 생물학적 수질 평가 방법을 고려하였을 때 평가 결과는 조사지점과 계절에 따라 다르게 나타났지만, 원동습지의 모니터링에는 생물학적 모니터링 작업그룹(BMWP)과 분류군별 평균 점수(ASPT)의 두 가지 방법이 더 적합한 것으로 보인다(Table 3).

3.4. 기능군의 유형분석

조사 기간에 출현한 섭식기능군은 6개 군으로 다양한 무리가 있는 것으로 나타났으며, 찢어먹는 무리

(Shredder, SH), 긁어먹는 무리(Scraper, SC), 걸러먹는 무리(Filtering-collector, FC), 주워먹는 무리(Gathering-collector, GC), 찢어먹는 무리(Plant-piercer, PP), 잡아먹는 무리(Predator, PR)가 확인되었다.

원동습지 전체 조사지점에서의 종 구성은 잡아먹는 무리(PR)가 47.73%로 우점하였으며 이는 잠자리목, 노린재목, 딱정벌레목에 속하는 종들이 많이 출현하였기 때문이다. 다음으로 주워먹는 무리(GC) 30.68%, 긁어먹는 무리(SC) 6.82%, 걸러먹는 무리(FC) 5.68%, 찢어먹는 무리(SH)와 찢어먹는 무리(PP)가 같이 4.55%를 차지하였다. 이들은 잡아먹는 무리에 비해 저차 소비자에 해당하며, 다양한 섭식기능군이 서식지에서 확인되어 원동습지 수생태계의 생물군집이 안정적으로 기능하고 있다는 것을 알 수 있다(Fig. 4a). 섭식기능군의 개체수 구성은 주워먹는 무리(GC)가 44.20%로 우점하였으며, 이는 복족류와 십각목의 개체수가 많았기 때문이다. 다음으로 잡아먹는 무리(PR) 36.67%, 긁어먹는 무리(SC) 12.11%, 찢어먹는 무리(SH) 3.70%, 찢어먹는 무리(PP) 2.85%, 걸러먹는 무리(FC) 0.47%의 순으로 나타났으며 이를 통해 원동습지는 잡아먹는 무리와 주워먹는 무리가 주된 먹이 관계를 형성하는 생태계로 볼 수 있다(Fig 4c).

조사지점별 및 조사 연도별 섭식기능군의 무리별 종수 비율은 St. 1에서 두 해 사이에 현저한 변화는 없었다. 그러나 St. 2에서는 2023년에 전년도에 나타나지 않았던 걸러먹는 무리(FC)와 찢어먹는 무리(SH)가 확인되었다. St. 3에서는 2023년에 주워먹는 무리(GC)의 종수 비율이 전년도에 비해 8.44% 증가하고 잡아먹는 무리(PR)는 11.88% 감소하였다(Fig. 4b). 섭식기능군의 개체수 비율에는 변화가 뚜렷했으며, St. 1에서는 2023년 주워먹는 무리(GC)가 전년도에 비해 15.13% 대폭 증가하였다. 이는 환대강에 속하는 물지렁이(*Chaetogaster limnaei*)와 실지렁이, 파리목에 속하는 깔따구류, 고설목과 수병안목의 논우렁이와 원돌이물달팽이 등 오염된 생태계에서 주로 나타나는 종들의 개체수가 증가하였기 때문이다. 반면 잡아먹는 무리(PR)는 9.04% 감소하였다. St. 2에서는 2023년의 잡아먹는 무리(PR)가 전년도에 비해 11.86% 증가하였으며, 이는 물벌레과(Asellidae)에 속하는 종과 각시물자라(*Diplonychus esakii*) 등 노린재목에 속하는 종들의 비율이 증가하였기 때문이다. 반면, 긁어먹는 무리(SC)

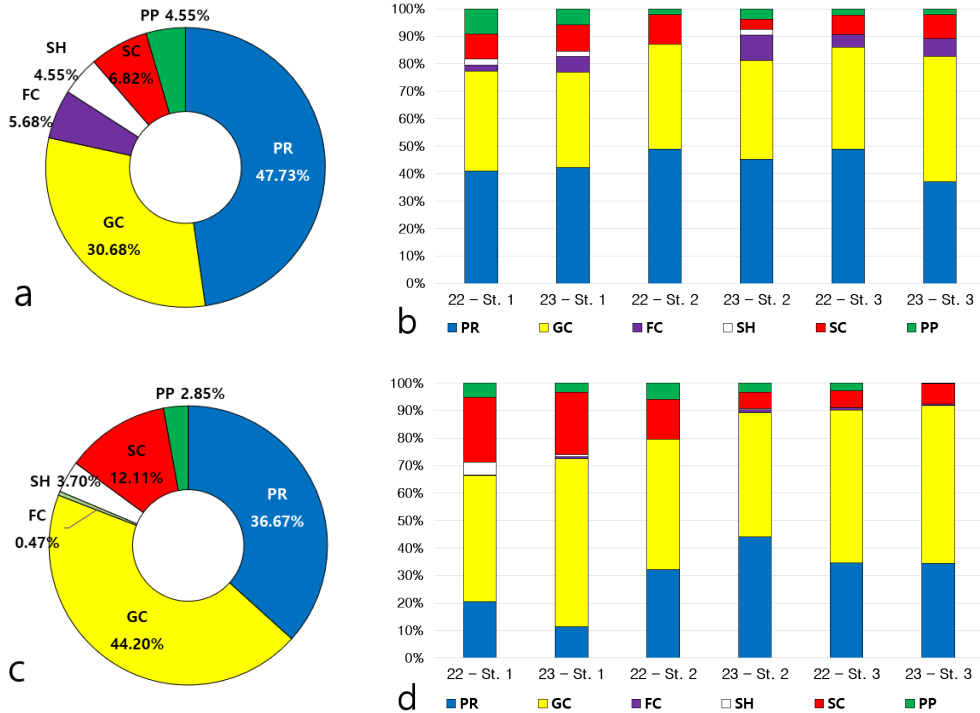


Fig. 4. Compositions of species and abundance by survey site and year on functional feeding group in Wondong Wetland (2022~2023). Species composition of functional feeding groups(a), species composition by survey site and year(b), abundance composition of functional feeding groups(c), and abundance composition by survey site and year(d) are shown. PR: predators, GC: gathering collectors, FC: filtering collectors, SH: shredders, SC: scrapers, PP: plant piercer.

는 8.47% 감소하였다. 또한, St. 3은 2022년 봄과 2023년 여름에 주워먹는 무리의 개체수가 많았으며, 이는 2022년 봄에 수심이 얇고 수초가 많은 환경에 주로 서식하는 연못하루살이가 우점하였기 때문이며, 2023년 여름은 생태공원 조성사업으로 서식지가 교란되어 다른 분류군에 비해 깔따구류 및 원돌이물달팽이의 개체수가 증가한 것이 원인이다(Fig. 4d).

조사 기간에 출현한 서식습성군은 7개 군으로 굴 파는 무리(Burrower, BU), 기는 무리(Sprawler, SP), 기어오르는 무리(Climber, CB), 붙는 무리(Clinger, CL), 잠수하는 무리(Diver, DI), 지치는 무리(Skater, SK), 그리고 헤엄치는 무리(Swimmer, SW)가 확인되었다. 원동습지 전체 조사지점에서의 서식습성군의 종구성은 기어오르는 무리(CB)가 26.89%로 우점하였으며, 이는 잠자리목과 노린재목, 딱정벌레목에 속하는 종들의 영향이 큰 것으로 보인다. 다음으로 헤엄치는 무리(SW) 20.17%, 기는 무리(SP) 19.33%, 붙는 무리

(CL) 15.97% 잠수하는 무리(DI) 7.56%, 굴파는 무리(BU) 6.72%, 지치는 무리(SK) 3.36%의 순으로 나타났다. 이들 또한 저차 소비자이며, 섭식기능군과 같이 서식습성군에서도 원동습지의 수생태계 먹이망의 구조가 안정적이라는 것을 알 수 있다(Fig. 5a). 서식습성군의 개체수 구성은 기는 무리(SP)가 30.69%로 우점하였으며, 이는 원동습지에 출현한 복족류와 십각목, 파리목 등의 영향이 큰 것으로 보인다. 다음으로 붙는 무리(CL) 23.18%, 기어오르는 무리(CB) 16.44%, 헤엄치는 무리(SW) 15.69%, 굴파는 무리(BU) 9.29%, 잠수하는 무리(DI) 3.10%, 지치는 무리(SK) 1.61%의 순으로 나타났다. 이를 통해 원동습지는 수초 및 바위에서 주로 생활하고, 물의 흐름이 거의 없는 곳을 선호하는 종들이 많은 것을 알 수 있었다(Fig. 5c).

조사지점별 및 조사 연도별 서식습성군의 무리별 종수 비율은 2023년이 전년도에 비해 전체적으로 현저한 감소나 증가를 나타내지 않았고 헤엄치는 무리(SW)가

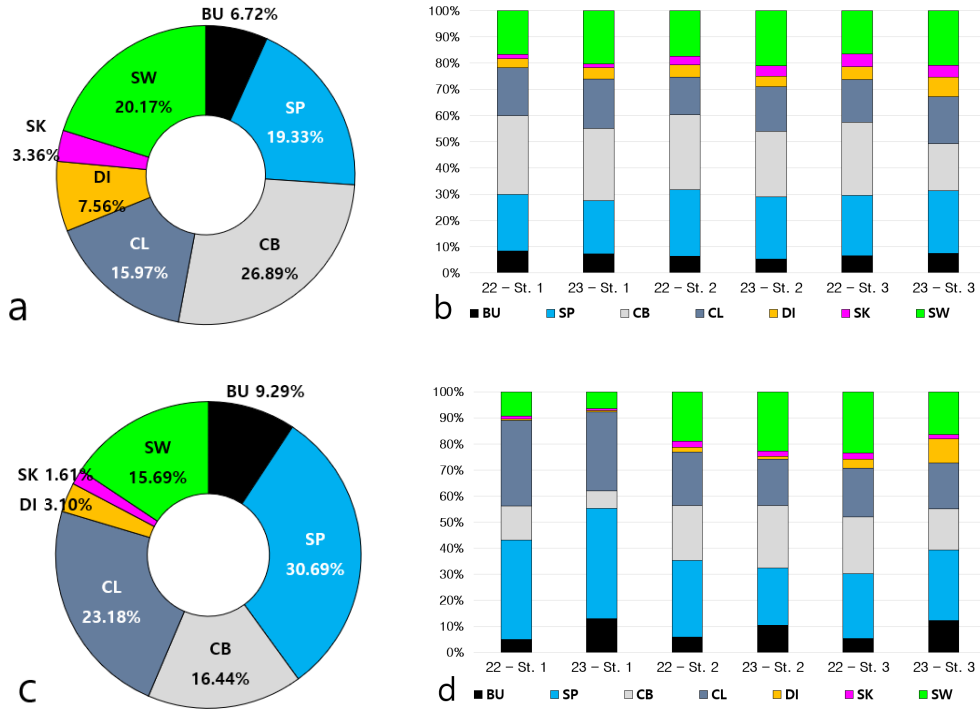


Fig. 5. Compositions of species and abundance by survey site and year on habitual dwelling group in Wondong Wetland (2022~2023). Species composition of habitual dwelling group(a), species composition by survey site and year(b), abundance composition of habitual dwelling groups(c), and abundance composition by survey site and year(d) are shown. BU: burrowers, SP: sprawlers, CB: climbers, CL: clingers, DI: divers, SK: skaters, SW: swimmers.

조사지점에 따라 3.59~4.51% 증가한 정도였다(Fig. 5b). 서식습성군의 무리별 개체수 비율은 St. 1에서 두 해 모두 기는 무리(SP)와 붙는 무리(CL)가 다른 조사지점에 비해 높은 데 반해, 헤엄치는 무리(SW)와 기어오르는 무리(CB)의 비율이 상대적으로 낮았다. 굴파는 무리(BU)는 2023년 봄에 증가하였으며, 이는 당시 유기물질의 유입으로 인해 오염에 내성이 높은 파리목과 환대강에 속하는 종들의 개체수가 증가하였기 때문이다. St. 3에서는 다른 두 지점에 비해 지치는 무리(SK)의 개체수 비율이 높아 2023년에 9.17%를 차지하였다(Fig. 5d).

3.5. 군집변동과 군집안정성

3.5.1. 군집 소실지수

서식지 내 군집의 시간에 따른 변동 정도를 군집 소실지수(Community loss index, CLI)로 확인하였다.

군집의 변동 정도는 두 가지 방법으로 비교하였으며, 먼저 2022년과 2023년을 각각의 조사지점 및 계절별로 비교하였고, 2011년의 선행조사(Yangsan-si, 2012) 중 조사지점과 조사 계절이 일치하는 St. 2의 자료를 본 조사 결과와 비교함으로써 10여 년 전의 환경에 비해 현재의 군집 변동이 어느 정도인지 알 수 있었다. 2023년의 전년도에 대한 군집 소실지수는 1.133에서 2.000의 범위였으며 St. 3에서 2023년 여름에 군집 소실지수가 가장 높고 같은 해 St. 1 여름에 가장 낮았다. 선행조사와 조사지점 및 시점이 같은 St. 2에 대해 2011년의 자료와 비교했을 때, 2022년 가을에 1.273, 2023년 가을에 1.467로 나타나 2022년보다 2023년에 군집 소실 정도가 더 심한 것으로 나타났다. 이는 앞서 고찰한 바와 같이 2023년 여름에 행해진 생태공원 조성사업으로 서식지가 교란된 것이 원인으로 보인다(Table 4).

Table 4. Change of benthic macroinvertebrate species in Wondong Wetland using CLI

Season	Site	Species number in 2022	Species number in 2023	Number of common species		CLI		
Spring	St. 1	14	16	7		1.438		
	St. 2	12	25	8		1.160		
	St. 3	27	27	16		1.407		
Summer	St. 1	17	30	13		1.133		
	St. 2	17	28	9		1.286		
	St. 3	22	15	7		2.000		
Autumn	St. 1	20	29	13		1.241		
	St. 2	22	25	11		1.440		
	St. 3	18	18	7		1.611		
Season	Site	Species number		Number of common species		CLI		
		2011	2022	2023	2022	2023	2022	2023
Autumn	St. 2	10	22	15	4	3	1.273	1.467

3.5.2. 상대적 저항력과 회복력

상대적 저항력(Relative resistance)과 상대적 회복력(Relative resilience)은 수서곤충 섭식기능군의 유형에 따라 사분면에 나누어 표시하는 방식이며 원의 크기는 종별 개체수를 의미한다. 상대적 저항력과 회복력은 수생태계 생물군집의 안정성을 나타낼 수 있는 중요한 요소이다(Ro, 2002).

조사지별 상대적 저항력과 회복력의 분석 결과, St. 1에서 특성군 I 및 특성군 I 과 IV의 경계에 위치하는 분류군들이 주로 확인되었으며, 2022년은 특성군 I 에 위치하는 분류군이 17종, 특성군 I 과 IV의 경계에 위치하는 분류군이 4종, 특성군 III에 위치하는 분류군은 1종이었다. 2023년에는 특성군 I 에서 18종, 특성군 I 과 IV의 경계에서 5종이 확인되었다. St. 2에서도 특성군 I 및 특성군 I 과 IV의 경계에 위치하는 분류군들이 주로 분포하는 것으로 확인되었으며, 2022년에는 특성군 I 에 위치하는 분류군이 17종, 특성군 I 과 IV의 경계에서 5종, 특성군 III에서 3종이 확인되었다. 2023년에는 특성군 I 에서 18종, 특성군 I 과 IV의 경계에서 7종, 특성군 III에서 1종으로 나타났다. St. 3에서는 특성군 I 과 특성군 I 과 IV의 경계에 위치하는 분류군들이 주로 분포하는 것으로 나타났으며, 2022년에는 특성군 I 에 위치하는 분류군이 20종, 특성군 I 과 IV의 경계에서 4종, 특성군 III에서 1종 확인되었다. 2023년에는 특성군 I 에서 14종, 특성군 I 과 IV의 경

계에 위치하는 분류군이 5종 확인되었다.

St. 1은 다른 지역보다 상대적 회복력 및 저항력이 높은 종들이 주로 출현하여 다른 지역에 비해 더 안정된 생태계임을 보여준다. 반면 St. 2와 St. 3는 St. 1과 달리 상대적 저항력은 높으나 회복력이 부족한 종들이 많이 출현하였으며, 이는 공사 등에 의한 환경변화로 저서성 대형무척추동물의 군집구조가 쉽게 교란될 수 있다는 것을 의미한다. 실제로 2023년 가을 St. 2와 St. 3은 원동습지 생태공원 준공 및 생태 테크 설치 등으로 서식지 교란이 있었고 같은 시기에 군집소실지수(CLI)도 급격히 증가하였으므로 St. 1에 비해 군집안정성이 낮다고 생각된다(Fig. 6).

원동습지는 다양한 생물종과 독특한 생태환경을 지닌 소중한 자연 자원으로, 지역 생태계에서 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구는 원동습지의 생태적 가치를 재확인하고, 저서성 대형무척추동물을 활용한 환경평가의 유용성을 입증하고자 하였다. 연구 결과는 원동습지 외에도 다른 배후습지의 보전 및 관리 방안을 수립하는 데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각되며, 원동습지의 보호와 관리를 위해 다음과 같은 제언을 하고자 한다. 첫째, 습지 내 복원사업의 영향에 대한 체계적인 검토를 위해 환경교란 전후의 분석 및 교란을 최소화하기 위한 보호조치가 필요하다. 둘째, 생물학적 수질 평가를 활용한 정기적인 모니터링 체계를 구축하여 환경변화를 예측하고 신속히 대응할 수 있도록 해야 한다. 나아가,

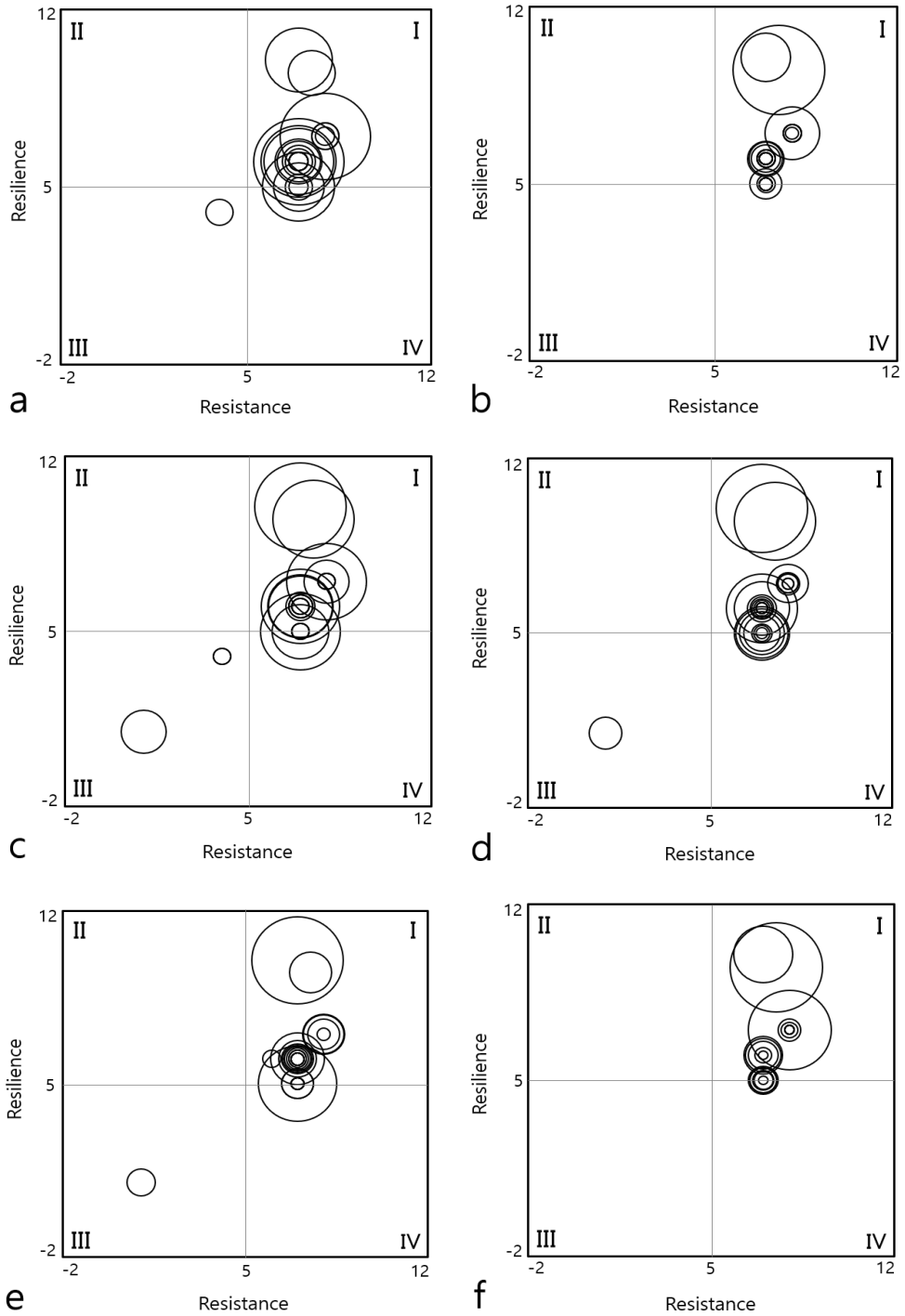


Fig. 6. Evaluation of community stability by relative resistance and relative resilience of benthic invertebrates of Wondong Wetland. St. 1 in 2022(a), St. 1 in 2023(b), St. 2 in 2022(c), St. 2 in 2023(d), St. 3 in 2022(e), St. 3 in 2023(f) are shown.

원동습지가 가지는 높은 학술적, 생태적 가치를 바탕으로 향후 보호지역으로 지정되고, 정책적 노력과 지속적인 관리가 이루어지기를 기대한다.

4. 결 론

본 연구는 원동습지의 저서성 대형무척추동물 군집 구조를 기반으로 생태적 변화를 분석하고 보전 및 관리의 기초자료를 제공하기 위해 수행되었다. 2022년과 2023년에 걸쳐 총 4문 6강 20목 43과 75종 2,404개체가 확인되었으며, 곤충강이 전체 종수와 개체수에서 우점하였다. 특히, 잠자리목은 이 습지의 주요 곤충군이며 우점종은 논우렁이(*Cipangopaludina chinensis malleata*)와 깔따구류(*Chironomidae* sp.) 등이 오염 내성 종으로 나타났다. 환경 교란으로 인해 특정 목의 종수 및 개체수에 변동이 있었으며, 2023년에는 파리목(Diptera), 수병안목(Systellommatophora) 및 등각목(Isopoda)의 개체수가 급증해 환경변화와의 관련성을 시사했다. 생물지수 중 다양도는 2022년 3.307에서 2023년 3.223으로 감소했으며, 풍부도는 소폭 증가하거나 비슷한 수준을 보였다. St. 1에서는 환경 교란과 오염 내성 종의 우세로 다양도와 균등도가 낮았으며, 2023년에는 일부 환경 개선에도 불구하고 오염 내성 종이 여전히 우점하여 지수가 낮았다. 생물학적 수질 평가에서 생물학적 모니터링작업그룹과 분류군별 평균 점수는 다른 지수들에 비해 변별력이 높고 풍부도의 영향을 덜 받아 모니터링에 적합한 방법으로 평가되었다. 특히 분류군별 평균 점수는 생물학적 모니터링작업그룹과 유사한 경향을 보이면서도 수질 평가에 더 적합한 것으로 판단되었다. 원동습지의 섭식기능군은 잡아먹는 무리와 주워먹는 무리가 우점하며, 서식 환경변화와 오염의 영향으로 연도별 비율 변화가 나타났다. 특히 St. 1에서는 오염 종 증가로 주워먹는 무리가, St. 2에서는 포식 종 증가로 잡아먹는 무리가 각각 두드러졌다. 서식습성군의 종 구성은 기어오르는 무리가 우점하였으며 개체수 구성에서는 기는 무리가 우점하였다. 조사 기간에는 서식습성군의 변화가 미미했으며, 2023년에 굴파는 무리와 지치는 무리의 개체수가 증가했다. 군집 소실지수는 2023년 군집 변동이 2022년보다 더 심각하다는 결과를 보여주었으며, 특히 2023년 여름에 군집 소실지수가 가장 높았다. 2011년 선행조사와 비교한 결과, 2023년 가을에는 군집 소실 정도가 더 심해진

것으로 나타났다. 상대적 저항력과 회복력은 St. 1에서 높아 생태계가 안정적이었으며, St. 2와 St. 3은 상대적 저항력은 높지만, 회복력이 부족해 군집이 쉽게 교란되는 경향을 보였다. 특히, 2023년 생태공원 조성으로 서식지 교란이 발생하여 군집안정성이 낮아졌다. 연구 결과를 바탕으로 원동습지는 다양한 종의 서식처로 보전 가치가 높으며, 보호지역 지정과 체계적인 관리가 필요함을 제안한다.

REFERENCES

- Chapman, D., 1996, Water quality assessments: A Guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 182-245.
- Cummins, K. W., Klug, M. J., 1979, Feeding ecology of stream invertebrates, *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 10, 147-172.
- Jung, K. S., 2011, Odonata larvae of Korea, 1st ed., Nature and Ecology, Seoul, Korea, 106-399.
- Jung, S. W., Nguyen, V. V., Nguyen, Q. H., Bae, Y. J., 2008, Aquatic insect faunas and communities of a mountain stream in Sapa highland, northern Vietnam, *Limnol.*, 9, 219-229.
- Kawai, T., Tanida, K., 2005, Aquatic insects of Japan : Manual with keys and illustrations, 1st ed., Tokai University Press, Kanagawa, Japan, 1-1276.
- Kong, D. S., Park, Y. J., Jeon, Y. R., 2018, Revision of ecological score of benthic macroinvertebrates community in Korea, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 34, 251-269.
- Kong, D. S., Won, D. H., Park, J. H., Kim, M. C., Ham, S. A., Kwon, S. j., Son, S. H., Han, S. C., Hwang, I. C., Lee, J. K., Lyu, D. H., Lee, S. H., Park, S. J., Yu, K. A., Kong, H. Y., 2013, Benthic macroinvertebrate ecology guide, 1st ed., Jeonghaengsa, Seoul, Korea, 21-473.
- Kwon, S. J., Jun, Y. C., Park, J. H., 2013, Underwater creature book, 1st ed., Nature and Ecology, Seoul, Korea, 24-771.
- Lambert, A., 2003, Economic valuation of wetlands: An Important component of wetlandmanagement strategies at the river basin scale, http://www.ramsar.org/features_econ_val1.htm.
- Lehner, B., Döll, P., 2004, Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands, *J. Hydrol.*, 296, 1-22.
- Margalef, R., 1958, Information theory in ecology, *General Systems.*, 3, 36-71.

- McNaughton, S. J., 1967, Relationship among functional properties of California grassland, *Nature*, 216, 168-169.
- Merritt, R. W., Cummins, K. W., Berg, M. B., 2008, *An Introduction to the aquatic insects of North America*, Kendal Hunt Publishing Company, Iowa, USA, 107-108.
- Nakdong River Basin Environmental Office, 2006, Wetland survey report of the Nakdong River Basin, Ministry of Environment, Korea, 1-275.
- National Institute of Biological Resources, 2022, National list of species of Korea, <https://species.nibr.go.kr/index.do>
- National Institute of Ecology, 2019, Guidelines for the 5th National Natural Environment Survey, The Ministry of Environment, Korea, 1-135.
- Pielou, E. C., 1975, Species diversity and pattern diversity in the study of ecological succession, *J. Theor. Biol.*, 10, 370-383.
- Plafkin, J. L., Barbour, M. T., Porter, K. D., Gross, S. K., Hughes, R. M., 1989, Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: Benthic macroinvertebrates and fish. 2nd ed., US EPA, Assessment and Watershed Protection Division, Washington, D.C., USA, 1-337.
- Ro, T. H., 2002, Resilience and resistance of biological community : Application for stream ecosystem health assessment, *J. Environ. Policy*, 1, 91-110.
- Ro, T. H., Chun, D. J., 2004, Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis, *Korean J. Limnol.*, 37, 137-148.
- Shannon, C. E., Weaver, W., 1964, *The mathematical theory of communication*, 10th ed., Univ. Illinois Press, Urbana, USA, 14-16.
- Son, S. G., Lee P. H., Kim, C. S., 2002, Vegetation structure and sediment properties of Wondong Wetland in Nakdong-gang, *J. Korean Wetl. Soc.*, 4, 21-31.
- The Ministry of Environment, 2001, *The national inland wetland natural environment survey : Nakdong River, Wondong*, The Ministry of Environment, Korea, 1-193.
- Tiner, R. W., 2017, *Wetland indicators: A Guide to wetland formation, identification, delineation, classification, and mapping*, 2nd ed., CRC Press, Ohio, USA, 1-303.
- Won, D. H., Jun, Y. C., Kwon, S. J., Hwang, S. J., Ahn, K. G., Lee, J. K., 2016, Development of Korean saprobic index using benthic macroinvertebrates and its application to biological stream environment assessment, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 22, 768-783.
- Won, D. H., Kwon, S. J., Jun, Y. C., 2005, *Aquatic insects of Korea*, 1st ed., Korea Ecosystem Service, Seoul, Korea, 1-363.
- Yang, H. J., Kum, D. J., Lee, Y. H., 2001, The Ichthyofauna and community structure of fish at Wondong Marsh in the kyeongnam province, Korea, *Korean J. Ichthyol.*, 13, 261-266.
- Yongsan-si, 2012, Basic river plan of Dangokcheon and strategic environmental assessment report for the hometown river restoration project, Yongsan-si, Korea, 118-163.
- Yongsan-si, 2013, Small-scale environmental impact assessment report for basic river planning of Dangokcheon stream and hometown river restoration project, Yongsan-si, Korea, 1-343.
- Yoon, I. B., 1995, *Aquatic insects of Korea*, 1st ed., Junghaengsa, Seoul, Korea, 5-237.
- Yoon, I. B., Kong, D. S., Ryu, J. K., 1992, Studies on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates (1) Saprobic valency and indicative value, *Korean J. Environ. Biol.*, 10, 24-39.

-
- Professor. Seon-Woo Cheong
Department of Biology & Chemistry, Changwon National University
swcheong@changwon.ac.kr
 - Researcher. Chun-Sik Yoon
Department of Biology & Chemistry, Changwon National University
biobioy@naver.com
 - Researcher. Sung-Jin Hong
Nakdong River Basin Environmental Office
s2228j@korea.kr
 - Graduate student. Seung-Hyeon Lee
Department of Biology & Chemistry, Changwon National University
aplsh419@daum.net
 - Graduate student. Hyeon-Woo Han
Department of Biology & Chemistry, Changwon National University
gusdn9609@naver.com