

Original article

## 제주도 일대 습지에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 군집 분포 특성

전영철 · 천승필<sup>1</sup> · 강미숙<sup>1</sup> · 박재흥 · 이창수<sup>2</sup> · 권순직<sup>3,\*</sup>

(주)생태자원연구소, <sup>1</sup>SOKN생태보전연구소 (주), <sup>2</sup>국립생태원 습지연구팀, <sup>3</sup>(주)에일

**Spatial Distribution of Benthic Macroinvertebrate Assemblages in Wetlands of Jeju Island, Korea.** Yung Chul Jun (0000-0003-3888-2275), Seung Phil Cheon<sup>1</sup> (0000-0002-4351-607X), Mi Suk Kang<sup>1</sup> (0009-0005-2132-3399), Jae Heung Park (0009-0005-6318-2571), Chang Su Lee<sup>2</sup> (0000-0003-0327-0463) and Soon Jik Kwon<sup>3,\*</sup> (0009-0005-2756-7423) (Institute for Ecological Resource, Seoul 02783, Republic of Korea; <sup>1</sup>SOKN Institute of Ecology and Conservation, Yangpyeong 12563, Republic of Korea; <sup>2</sup>Wetlands Research Team, National Institute of Ecology, Changnyeong 50303, Republic of Korea; <sup>3</sup>Corporation Aeil, Bucheon, 14676, Republic of Korea)

**Abstract** Most wetlands worldwide have suffered from extensive human exploitation. Unfortunately they have been less explored compared to river and lake ecosystems despite their ecological importance and economic values. This is the same case in Korea. This study was aimed to estimate the assemblage attributes and distribution characteristics of benthic macroinvertebrates for fifty wetlands distributed throughout subtropical Jeju Island in 2021. A total of 133 taxa were identified during survey periods belonging to 53 families, 19 orders, 5 classes and 3 phyla. Taxa richness ranged from 4 to 31 taxa per wetland with an average of 17.5 taxa. Taxa richness and abundance of predatory insect groups such as Odonata, Hemiptera and Coleoptera respectively accounted for 67.7% and 68.2% of the total. Among them Coleoptera were the most diverse and abundant. Taxa richness and abundance did not significantly differ from each wetland type classified in accordance with the National Wetland Classification System. There were three endangered species (*Clithon retropictum*, *Lethocerus deyrolli* and *Cybister (Cybister) chinensis*) and several restrictively distributed species only in Jeju Island. Cluster analysis based on the similarity in the benthic macroinvertebrate composition largely classified 50 wetlands into two major clusters: small wetlands located in lowland areas and medium-sized wetlands in middle mountainous regions. All cluster groups displayed significant differences in wetland area, long axis, percentage of fine particles and macrophyte composition ratio. Indicator Species Analysis selected 19 important indicators with the highest indicator value of *Ceriagrion melanurum* at 63%, followed by *Noterus japonicus* (59%) and *Polypylis hemisphaerula* (58%). Our results are expected to provide fundamental information on the biodiversity and habitat environments for benthic macroinvertebrates in wetland ecosystems, consequently helping to establish conservation and restoration plans for small wetlands relatively vulnerable to human disturbance.

**Key words:** benthic macroinvertebrates, distribution, wetlands, Jeju Island, cluster analysis

## 서론

Manuscript received 23 January 2024, revised 24 February 2024,  
revision accepted 27 February 2024  
\* Corresponding author: Tel: +82-32-545-3670, Fax: +82-31-601-9453  
E-mail: triopsidae@naver.com

습지(wetland)는 우리나라 습지보전법 제2조에서 “담수, 기수 또는 염수가 영구적 또는 일시적으로 그 표면을 덮고

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

있는 지역으로서 내륙습지 및 연안습지를 말한다.”로 정의하며 이 중 내륙습지는 육지나 섬에 분포하는 호수와 못, 늪, 하천, 하구 등의 지역을 포함한다. 이와 같은 습지의 개념은 국제적 기준이 되는 람사르협약(Ramsar Convention) Article 1.1에서 밝힌 정의와 크게 다르지 않다. 습지는 육상생태계와 수생태계의 전이지대로서 기본적으로 물의 저장소 및 정화작용, 지하수위 조절과 유지, 기후변화에 대한 완충작용 등의 역할을 함으로써 생태적 중요성이 높다(Mereta *et al.*, 2012). 또한, 습지는 비옥한 퇴적물과 영양물질을 함유하여 생산성이 높고 다양한 생물의 훌륭한 서식처를 제공하는 생태계이다(Rolon and Maltchik, 2006; Reis *et al.*, 2017). 특히 습지는 농경활동을 위한 용수 공급과 풍부한 수산자원 제공, 홍수 피해 저감, 경관적·심미적 효과 등 이용 가치가 높으므로 역사적으로 인간이 점유하여 이용해 왔다(Kingsford *et al.*, 2016). 최근 습지에 대한 인식이 변화하면서 습지 보전과 지속가능한 이용을 위한 많은 노력에도 불구하고 전 세계적으로 습지는 인간의 과도한 이용과 개발로 인하여 변형과 소멸의 지속적인 위협을 받고 있다. 무엇보다도 농업과 도시화는 습지생태계를 파괴하는 가장 큰 원인으로 지목되는데, 이로 인해 지난 한 세기 동안 전 세계 약 50% 정도의 습지가 소멸한 것으로 보고되고 있다(Shine and de Klemm, 1999; Hall *et al.*, 2004; Mereta *et al.*, 2012). 이러한 현상은 우리나라도 예외가 아니며, 관계법령으로 보호받지 못하는 많은 중·소형 습지가 전반적인 생태계 현황 파악을 하기도 전에 다양한 개발위협과 토지소유주 및 지역주민의 요구에 의하여 파괴되거나 사라지고 있다(Kim *et al.*, 2013).

아열대 기후지역에 속하는 제주도는 우리나라 최대 규모의 화산섬으로서 한라산과 해양의 영향으로 고도와 지형에 따라 지역별로 기온과 강수량 등의 기후적 특성이 다양하다(JRMA, 2011). 제주도는 지질학적으로 투수성이 큰 퇴적암층과 현무암 등의 화산암류와 화산쇄설암 등으로 이루어져 있다(Kang *et al.*, 2015). 제주도에 분포하는 하천은 한라산을 중심으로 대부분이 북쪽이나 남쪽 방향의 방사상으로 흐르는데, 현무암이 기반암을 형성하므로 건기에는 유량이 없는 건천이 많으며 강우가 집중되는 시기에만 일시적으로 흐름이 형성된다(JRMA, 2011; Jung *et al.*, 2011; Jung *et al.*, 2014). 그러나 제주도는 산정화구호와 같은 고산습지와 불투수층으로 이루어진 일부 지역에 형성된 습지, 인위적으로 조성한 저수지와 인공수로, 해안선을 따라 분포하는 연안습지 등 다양한 형태의 습지가 도내 전역에 걸쳐 산재한다(Kang *et al.*, 2015). 현재 환경부는 다양한 멸종위기 야생생물과 희귀종이 서식하며 식생 경관 및 형성 과정이 독특하여 생태적 가치가 높은 물영아리오름과 1100고지습지, 물장오리오름습지, 동백동산습지, 숨은물뱅디습지 등 5곳을 습

지보호지역과 람사르습지로 지정·등록하여 관리하고 있다(MOE, 2022). 한편, 중산간 지역에는 목축과 음용을 위해 소형 못의 형태로 조성한 인공습지들이 많은데, 일부 습지는 이용이 점차 감소하면서 방치되어 자연 습지의 모습으로 변하기도 하지만, 용도 변경으로 인하여 매립되거나 오염으로 훼손되는 사례가 빈번하게 발생한다(Oh *et al.*, 2009; Kang *et al.*, 2015). 이처럼 습지는 유수생태계와 달리 대부분 지리적으로 독립된 형태로 존재하여 외부 교란에 취약함에도 불구하고 관련 연구와 현황 파악이 미흡한 실정이다. 이에 습지생태계의 생태적 및 경제적 가치에 대한 중요성을 인식하여 습지 보전을 위한 노력과 제도적 지원이 요구된다.

저서성 대형무척추동물은 수생태계에서 먹이그물의 중심에 위치하여 일차생산력 조절과 유기물 분해, 영양물질 순환, 물질 이동, 오염물질 정화 등 중요한 역할을 한다(Wallace and Webster, 1996; Allan and Castillo, 2007). 또한, 저서성 대형무척추동물은 대부분의 수환경에 광범위하게 분포할 뿐만 아니라 개체수가 풍부하며 수체의 바닥에 비교적 제한되어 서식하고 환경변화에 민감하게 반응하므로 하천 및 정수 환경의 습지와 호수, 해양 등 다양한 수체의 건강성을 평가하는 데 유용한 지표생물로 폭넓게 인정받고 있다(Weisberg *et al.*, 1997; Kashian and Burton, 2000; Diaz *et al.*, 2004; Davis *et al.*, 2006; Jun *et al.*, 2012; Min *et al.*, 2022). 이에 따라서 서식환경에 따른 저서성 대형무척추동물 군집 특성과 이들의 분포 및 다양성에 영향을 미치는 환경인자와의 관계는 오래전부터 국내외 많은 연구에서 다루어진 중요한 관심사이다. 예를 들어 해발고도와 용존산소, 유속, 하상 구조는 유수생태계에서 종의 분포와 풍부도를 결정하는 주요 인자로 잘 알려져 있다(Vannote *et al.*, 1980; Nelson and Lieberman, 2002; Merz and Ochikubo Chan, 2005; Jiang *et al.*, 2010). 또한, 수변식생은 먹이원 공급과 천적에 대한 피난처 제공, 산란처 등의 역할을 하므로 습지와 같은 정수생태계에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 다양성과 군집 조성에 직접적인 영향을 미친다(Rolon and Maltchik, 2006; Braich and Kaur, 2017; Gleason *et al.*, 2018). 저서성 대형무척추동물의 분포는 대상지역의 서식환경과 출현종의 생물학적 특성에 따라서 다르게 나타나는데(Braich and Kaur, 2017), 일반적으로 하천에서는 수질환경과 용존산소에 민감한 하루살이목(Ephemeroptera)과 강도래목(Plecoptera), 날도래목(Trichoptera)의 EPT 분류군이, 유속의 영향이 없으며 수변식물이 풍부한 습지에서는 포식자로서 이동능력이 우수하고 내성범위가 상대적으로 넓은 잠자리목(Odonata)과 노린재목(Hemiptera), 딱정벌레목(Coleoptera)의 OHC 분류군의 종구성비가 높다(Williams and Feltmate, 1992; Son *et al.*, 2012; Chung *et al.*, 2020). 이러한 이유로 서식처의 환경

상태에 따른 저서성 대형무척추동물 군집의 분포 특성 연구는 대상 수체의 수환경 상태와 건강성에 대한 유용한 정보를 제공하고 생물다양성 보전 및 복원을 위한 기본적인 정보를 제공할 수 있다는 점에서 의미가 있다(Sharma and Rawat, 2009; Jun *et al.*, 2016; Dalu *et al.*, 2022).

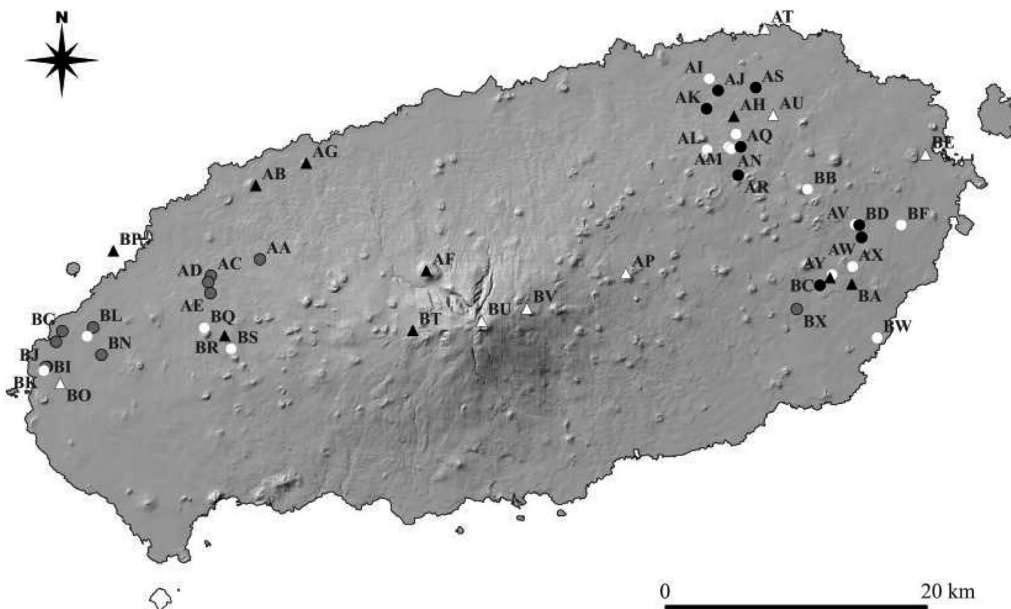
우리나라는 최근 국립생태원이 총면적 1,154.6 km<sup>2</sup>에 이르는 2,704개소의 내륙습지에 대한 목록을 구축하였고 서식 환경과 식생 조사를 통하여 습지 발육을 지속하고 있다. 습지 발육의 결과로 목록화된 습지는 수문 및 토양, 식생, 지형 특성에 따른 ‘국가습지 유형분류체계(2010)’에 근거하여 35개의 유형으로 분류하여 관리하고 있다(NIE, 2022). 이와 함께 국립생태원은 습지 보전을 위한 기초자료 수집을 목적으로 ‘내륙습지 기초조사’ 사업을 수행하여 습지별 현존식생도와 생물상 목록을 구축하고 있다. 그러나, 예산 및 인력 부족과 장기적인 사업 운영 계획 부재 등으로 인하여 목록화된 습지 수에 비하여 생태계 조사는 제한적으로 시행되고 있으며 대부분이 일회성 조사로 그치기 때문에 생물상 변화를 파악하기에는 무리가 있다. 습지의 생태적 가치와 인간에게 주는 다양한 순기능에도 불구하고 습지 관련 연구는 유수생태계인 하천에 비하여 상대적으로 적다. 더욱이 국내 습지에 서식하는 저서성 대형무척추동물 군집의 분포에 관련된 연구는 대부분이 규모가 크거나 관계 법령으로 지정한 습지 보호지역 또는 랍사르습지를 중심으로 이루어졌으며(Bae *et al.*, 2004; Hong and Cheong, 2020; Han *et al.*, 2022), 상대적

으로 규모가 작아서 인위적인 교란에 취약한 중·소형 습지에 대한 연구는 빈약하다. 제주도 습지에서의 저서성 대형무척추동물 연구는 Jeong *et al.* (2010b)과 Jung *et al.* (2011)에 의해서 도내 전역에 분포하는 습지와 하천을 선정하여 이들의 분포와 다양성 조사를 수행하였을 뿐, 대부분은 환경부의 전국자연환경조사와 전국내륙습지조사, 국립생태원의 내륙습지 기초조사 및 내륙습지 정밀조사, 도내 기초학술연구 등 일부 기관에서 단편적으로 진행되었다. 본 연구는 제주도 일대 중·소형 습지 50개소를 대상으로 저서성 대형무척추동물의 다양성과 특이종의 분포를 조사하였으며, 주요 환경 요인과의 관계를 통한 분포 특성을 파악하고자 하였다. 이러한 연구를 통하여 중·소형 습지에 대한 생물상과 서식환경에 대한 정보를 제공하고 향후 습지 보전과 복원을 위한 기초 자료로 활용되기를 기대한다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사대상 습지 및 현장조사

대상 습지의 기초 환경 및 저서성 대형무척추동물 자료는 국립생태원에서 수행한 “내륙습지 기초조사(21)” 사업의 제주특별자치도 내 습지 조사 결과를 수집하여 분석하였다. 대상 습지는 총 50개소로서 한라산과 주요 오름의 정상부에 위치하는 화구호(volcanic wetlands)에서부터 해안과 인접한



**Fig. 1.** The geographic location of survey wetlands in Jeju Island. Five macroinvertebrate-based wetland groups were classified as G1a (n = 11, gray circles), G1b (n = 15, white circles), G1c (n = 8, black circles), G2a (n = 9, black triangles) and G2b (n = 7, white triangles) based on Sørensen distance measure cluster analysis.

소택지에 이르기까지 서식환경이 다양하였으며 최대 습지면적 160,000 km<sup>2</sup> 미만인 정수환경의 중·소형 습지에 해당하였다(Fig. 1). 대상 습지는 NIE(2020)에서 적용하는 ‘국가습지 유형분류체계(2010)’에 따라서 자연호수습지 및 자연발생적 인공호수습지에 해당하는 담수호수습지(freshwater lakes and pools, L3)와 계절적 및 영구적 습원의 특성을 보이는 저층습원(fens, M2), 산지의 관목이 우점하는 늪과 묵논을 포함하는 소택지(swamps, M4), 인공담과 저수지와 같은 인공호수습지(human-made lakes, H1)의 네 유형으로 구분하였다. 제주도 일대 조사대상 습지의 일반적인 현황은 Appendix 1과 같다. 현장조사는 연 2회 실시하였으며 1차 조사는 2021년 3월부터 5월까지, 2차 조사는 8월부터 9월까지의 기간에 각각 기상 여건과 현장 상황을 고려하여 진행되었다.

저서성 대형무척추동물 채집은 기본적으로 내륙습지 조사 지침(NIE, 2020)에 근거하여 수행되었다. 즉, 조사자는 드렛지넷(dredge sampler; 폭 30 cm, mesh size 1 mm)을 이용하여 하상을 끌어내는 방식으로 대상 습지별 각 3회 정량채집하였으며, 이후 다양한 생물상을 확보하기 위하여 여러 미소서식환경에서 정성채집을 병행하였다. 채집된 시료는 현장에서 95% 에탄올로 즉시 고정하여 실험실로 운반하였으며 골라내기(sorting) 작업 후 80% 에탄올로 보존하여 적합한 참고 문헌을 이용하여 동정하였다. 일부 습지에서 임의 표본채집법(random sampling)에 의하여 포획된 멸종위기 야생생물에 해당하는 종은 현장에서 계수한 후 즉시 방사하였다. 한편, 각 대상 습지의 서식환경 요인 중에서 하상구성은 Cummins(1962)의 방법에 따라 분류하였으며 습지의 장축 길이는 거리측정기(Newcon Optik, LRM 1500)를 이용하였다. 이 외에도 해발고도와 습지면적, 수심, 수생식물 구성비의 정보는 국립생태원 에코뱅크의 DB를 이용하였다. 습지별 저서성 대형무척추동물의 개체수와 환경 자료는 평균값을 사용하였다.

## 2. 군집 분석

제주도 일대 습지에 서식하는 저서성 대형무척추동물의 군집 특성을 파악하기 위하여 대상 습지별 총 출현종수와 개체밀도, 군집지수를 산출하였으며 전체 출현종 중에서 개체밀도 점유율이 가장 높은 우점종을 선정하였다. 이때 군집지수는 정량채집된 자료로부터 우점도지수(Dominance index, DI)(McNaughton, 1967)와 다양도지수(Shannon diversity index, H')(Shannon and Weaver, 1949), 풍부도지수(Richness index, R1)(Margalef, 1958), 균등도지수(Evenness index, E1)(Pielou, 1975)를 산출하였다.

## 3. 통계 분석

국가습지 유형분류체계(2010)에 따른 습지 유형별 출현

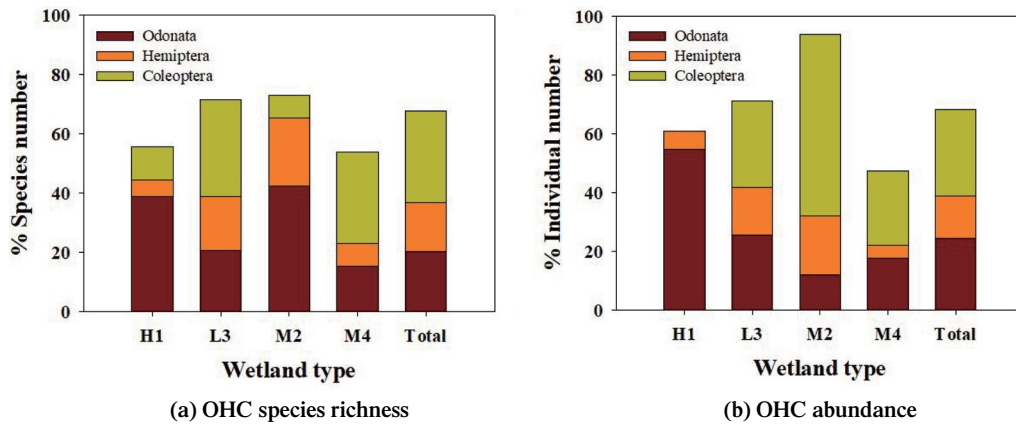
종수와 개체밀도의 차이는 비모수검정인 Kruskal-Wallis test를 적용하여 분석하였다(SPSS 18, SPSS Inc., Chicago, IL, USA). 또한, 저서성 대형무척추동물 군집의 공간적인 분포 특성을 파악하기 위하여 전체 습지를 대상으로 집괴분석(cluster analysis)을 실시하였다. 집괴분석은 모든 습지의 Sørensen distance를 계산하여 flexible beta 방법( $\beta = -0.25$ )으로 군집 구성의 유사성에 따라 그룹을 분류하는 방법을 적용하였다(McCune and Grace, 2002). 집괴분석으로 분류된 그룹의 유사성을 통계적으로 평가하기 위하여 비모수 통계 방법인 다수응답순열절차(multi-response permutation procedure, MRPP) 검정을 수행하였다(Mielke *et al.*, 1976). 이때 집괴분석 결과 얻어진 각 그룹은 저서성 대형무척추동물 군집 조성의 차이를 비교하기 위하여 다시 한 번 Kruskal-Wallis test를 실시하였다. 집괴분석에 의하여 나누어진 각 그룹을 대표하는 지표종과 지표값은 비계층적 분석 방법인 지표종 분석(indicator species analysis, ISA)을 이용하여 분석하였다(Dufrene and Legendre, 1997). 지표종 분석은 각 조사지점에서 출현한 종의 상대풍부도와 상대출현빈도를 이용하여 산출된 지표값에 근거하여 지표종을 판별하는 방법이다. 이때 지표값은 0부터 100까지의 범위에 있으며 지표값이 높을수록 해당 종의 지표성이 높음을 의미한다(Petersen and Keister, 2003). 지표종 분석 결과는 Monte Carlo test를 시행하여 유의성을 확인하였다.

저서성 대형무척추동물 다양성은 정량 및 정성 조사에 의하여 출현한 종수로 제시하였다. 통계분석은 정량적으로 확보된 자료만을 분석에 이용하였는데, 전체 조사습지에 대하여 점유율이 0.1% 미만을 차지하는 분류군은 rare taxa로 판단하여 제외하였으며 이후 모든 개체수는 일부 우점종에 의한 영향을 완화하고 정규성을 확보하기 위하여 Log(x + 1)로 변환하였다. MRPP와 집괴분석, 지표종 분석은 PC-ORD software (version 4.25)를 이용하였다(McCune and Mefford, 1999).

## 결 과

### 1. 저서성 대형무척추동물 다양성

제주도 일대 50개 습지에서 전체 조사시기 동안 확인된 저서성 대형무척추동물은 총 3문 5강 19목 53과 133종이었다. 분류군별 출현종수는 연체동물문이 13종(9.8%), 환형동물문이 6종(4.5%), 절지동물문이 114종(85.7%)이었는데, 절지동물문은 연갑강이 8종(6.0%)이었고 곤충강이 106종(79.7%)이었다. 곤충강은 딱정벌레목이 41종(30.8%)으로 가장 다양하였으며, 그 다음으로 잠자리목이 27종(20.3%)과 노린재



**Fig. 2.** The ratio of species richness (a) and abundance (b) of Odonata, Hemiptera and Coleoptera (OHC) taxa among wetland types in Jeju Island. Abbreviations for each wetland type indicate human-made lakes (H1), freshwater lakes and pools (L3), fens (M2) and swamps (M4).

**Table 1.** Comparison of benthic macroinvertebrate taxa richness and abundance among wetland types and former studies in Jeju Island. Average taxa richness and abundance were represented with standard deviation (in parenthesis). Fifty study wetlands were classified based on National Wetland Classification System (NIE, 2020) (H1: human-made lakes, L3: freshwater lakes and pools, M2: fens, M4: swamps). Kruskal-Wallis test revealed that taxa richness and abundance did not significantly differ from each wetland type ( $p = 0.282$  and  $p = 0.126$ , respectively). Because two former studies did not provide detailed species lists per sampling site, it was marked as ‘not available (N/A)’ for range and average of taxa richness and abundance. Jeong *et al.* (2010b) presented only the number of aquatic insect taxa.

Biological attributes	Wetland type				This study (n = 50)	Jeong <i>et al.</i> (2010b) (n = 102)	Jung <i>et al.</i> (2011) (n = 89)
	H1 (n = 2)	L3 (n = 39)	M2 (n = 3)	M4 (n = 6)			
<b>A. The number of major taxonomic groups</b>							
Phylum	2	3	2	3	3	1	5
Class	3	5	2	5	5	1	8
Order	8	18	8	14	19	7	21
Family	13	44	14	31	53	32	84
Species	18	116	26	52	133	100	207
<b>B. Taxa richness</b>							
Range	6~17	4~31	10~17	8~30	4~31	N/A	N/A
Average	11.5 (7.8)	18.4 (7.5)	13.0 (3.6)	15.7 (7.7)	17.5 (7.4)	N/A	N/A
<b>C. Taxa abundance</b>							
Range	130~309	117~1,482	137~597	398~1,372	117~1,482	N/A	N/A
Average	220 (127)	601 (361)	299 (258)	727 (392)	582 (365)	N/A	N/A

목이 22종 (16.5%), 파리목이 12종 (9.0%) 등의 순이었다. 대상 습지별 출현종수는 최소 4종에서 최대 31종의 범위였다. 특히 정수 환경을 선호하는 잠자리목(Odonata)과 노린재목(Hemiptera), 딱정벌레목(Coleoptera)의 OHC 분류군은 전체 출현종수와 개체밀도 대비 각각 67.7%와 68.2%로 구성비가 매우 높았다(Fig. 2).

국가습지 유형분류체계(2010)에 따른 습지 유형별 출현종수는 대상 습지의 수가 가장 많은 담수호습지(L3)가 총 3문 5강 18목 44과 116종으로 가장 다양하였으며 습지별 평균 18.4 (±7.5)종이 출현하였다(Table 1). 이와는 반대로 인공호습지(H1)는 총 2문 3강 8목 13과 18종으로 종다양성이 가장 낮았으며 습지별 평균 11.5 (±7.8)종이 출현하였다. 분류



군별 단위면적당(m<sup>2</sup>) 평균 개체수는 딱정벌레목이 172개체 (29.5%)로 가장 풍부하였으며 잠자리목이 143개체 (24.5%), 연체동물문이 92개체 (15.8%), 노린재목이 83개체 (14.3%) 등의 순이었다. 습지별 단위면적당(m<sup>-2</sup>) 개체밀도는 최소 117개체에서 최대 1,482개체의 범위였으며 전체 평균 582.4 (±364.7)개체였다. 그러나 Kruskal-Wallis test 결과 네 개의 습지 유형별 평균 출현종수 ( $p=0.282$ )와 개체밀도 ( $p=0.126$ )는 통계적으로 유의미한 차이가 없었다.

2. 특이종

본 연구에서 멸종위기 야생생물 II급에 해당하는 종은 기수갈고둥 (*Clithon retropictum*)과 물장군 (*Lethocerus deyrolli*), 물방개 (*Cybister (Cybister) chinensis*)의 3종이 출현하였다. 또한, 국가 기후변화 생물지표종으로 지정된 남색이마 잠자리 (*Brachydiplax chalybea flavovittata*)는 제주도 서부권

의 연화못과 돛곳물의 두 습지에서 확인되었다. 이 밖의 특이종은 큰누늬왕잠자리 (*Aeschnophlebia anisoptera*)와 도깨비왕잠자리 (*Anaciaeschna martini*), 노랑띠물방개 (*Canthydrus (Canthydrus) politus*), 큰알락물방개 (*Hydaticus (Prodaticus) conspersus*), 제주콩알물방개 (*Platambus stygius*), 맵시등줄물방개 (*Copelatus zimmermanni*)의 6종이 있었는데, 이 종들은 국내에서 제주도에만 분포하거나 주요 서식지가 제주도를 중심으로 남부지방에서만 서식하는 종으로 알려져 있다 (Jung et al., 2011; Jung, 2016). 한편, Jung et al. (2011)과 MOE/NIER (2021)은 한반도 고유종으로 우수생태계를 선호하는 한라하루살이 (*Baetis halla*)를 기록하기도 하였다.

3. 저서성 대형무척추동물 군집 유사성에 따른 습지 유형 분류

저서성 대형무척추동물 군집 조성의 유사성을 기초로 하

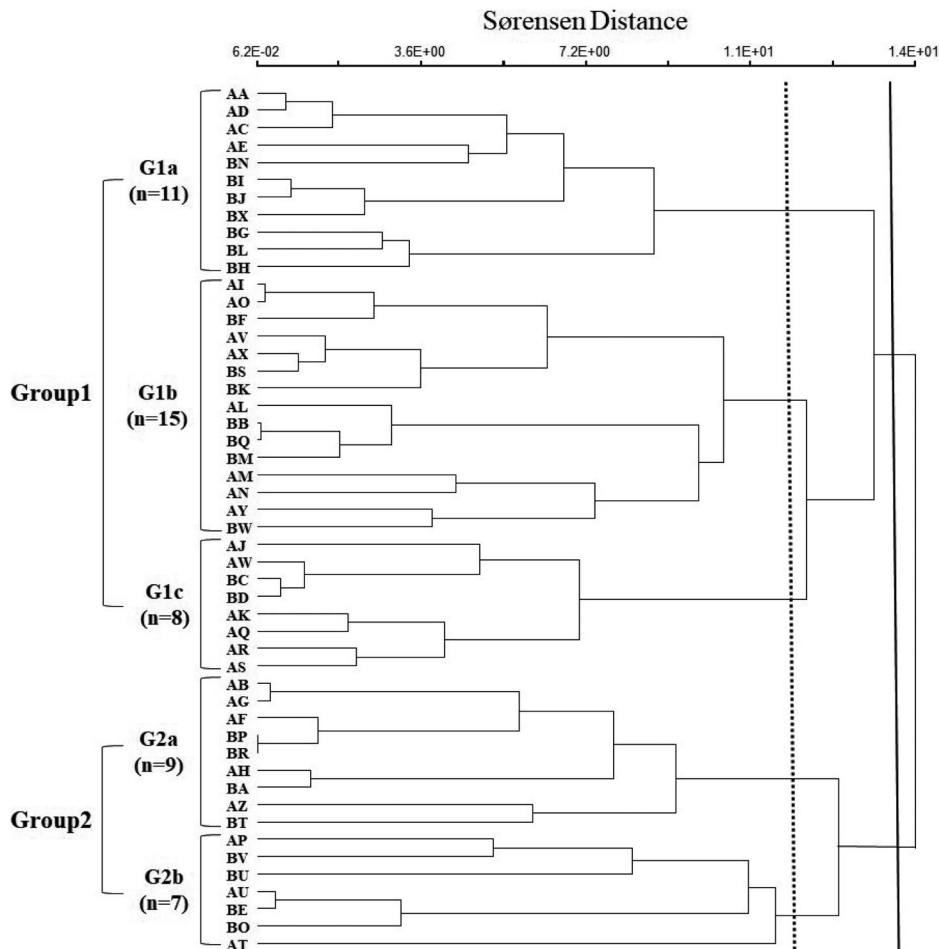


Fig. 3. Dendrogram of macroinvertebrate-based wetland classification using Sørensen clustering method. Five wetland groups were differentiated by the dashed line. More detailed information for each cluster group was enumerated in the text. The abbreviations for 50 survey wetlands are shown in Appendix 1.

Table 2. Comparison of environmental and biological attributes among five cluster groups.

Variables	Cluster group					P
	G1a (n = 11)	G1b (n = 15)	G1c (n = 8)	G2a (n = 9)	G2b (n = 7)	
<b>A. Regional wetland variables</b>						
Altitude (m)	107.3 (102.0) <sup>a</sup>	171.6 (120.5) <sup>a</sup>	153.1 (67.8) <sup>a</sup>	356.6 (473.9) <sup>ab</sup>	570.0 (744.0) <sup>b</sup>	0.603
Wetland area (m <sup>2</sup> )	2,536.8 (2,584.1) <sup>a</sup>	2,632.1 (3,218.0) <sup>a</sup>	2,556.0 (2,020.6) <sup>a</sup>	22,569.7 (32,255.3) <sup>b</sup>	26,608.1 (41,611.5) <sup>b</sup>	0.001
Long axis (m)	54.1 (26.0) <sup>a</sup>	52.3 (27.5) <sup>a</sup>	57.4 (30.3) <sup>a</sup>	193.3 (173.4) <sup>b</sup>	158.4 (161.6) <sup>b</sup>	0.001
<b>B. Physical variables</b>						
Water depth (cm)	47.3 (35.2) <sup>a</sup>	30.8 (22.2) <sup>a</sup>	45.6 (35.8) <sup>a</sup>	46.7 (42.6) <sup>a</sup>	61.4 (46.2) <sup>a</sup>	0.640
Coarse particles (%)	3.6 (8.1) <sup>a</sup>	4.7 (9.2) <sup>ab</sup>	16.3 (31.1) <sup>ab</sup>	23.9 (29.6) <sup>b</sup>	10.7 (15.4) <sup>ab</sup>	0.123
Fine particles (%)	93.6 (11.2) <sup>b</sup>	95.3 (9.2) <sup>b</sup>	82.5 (34.5) <sup>ab</sup>	69.4 (33.0) <sup>a</sup>	66.4 (28.7) <sup>a</sup>	0.020
<b>C. Wetland plant composition</b>						
Macrophyte (%)	10.5 (4.1) <sup>b</sup>	11.6 (3.9) <sup>b</sup>	13.2 (2.9) <sup>b</sup>	4.6 (4.0) <sup>a</sup>	6.0 (4.4) <sup>a</sup>	0.000
Hydrophyte (%)	26.3 (5.1) <sup>a</sup>	32.2 (5.8) <sup>b</sup>	30.4 (4.7) <sup>ab</sup>	27.3 (5.9) <sup>ab</sup>	25.8 (4.2) <sup>a</sup>	0.031
Xerophyte (%)	63.2 (7.7) <sup>b</sup>	56.2 (4.9) <sup>a</sup>	56.4 (5.1) <sup>a</sup>	68.1 (6.0) <sup>b</sup>	68.2 (8.2) <sup>b</sup>	0.000
<b>D. Benthic macroinvertebrate attributes</b>						
No. Species	18.4 (5.6) <sup>bc</sup>	22.8 (6.2) <sup>c</sup>	20.1 (4.1) <sup>c</sup>	7.8 (3.6) <sup>a</sup>	14.1 (5.8) <sup>b</sup>	0.000
No. Individuals (m <sup>-2</sup> )	620.4 (229.5) <sup>bc</sup>	818.5 (379.3) <sup>c</sup>	695.3 (390.9) <sup>c</sup>	225.6 (133.7) <sup>a</sup>	346.9 (214.4) <sup>ab</sup>	0.000
Dominance index	0.40 (0.09) <sup>a</sup>	0.43 (0.10) <sup>a</sup>	0.52 (0.09) <sup>ab</sup>	0.65 (0.12) <sup>c</sup>	0.61 (0.22) <sup>bc</sup>	0.000
Shannon diversity index	3.05 (0.45) <sup>b</sup>	3.28 (0.39) <sup>b</sup>	2.82 (0.34) <sup>b</sup>	2.04 (0.42) <sup>a</sup>	2.22 (0.91) <sup>a</sup>	0.000
Margalef's richness index	1.56 (0.51) <sup>b</sup>	2.03 (0.46) <sup>c</sup>	1.70 (0.33) <sup>bc</sup>	0.79 (0.29) <sup>a</sup>	1.13 (0.56) <sup>a</sup>	0.000
Pielou's evenness index	0.90 (0.04) <sup>b</sup>	0.86 (0.06) <sup>ab</sup>	0.79 (0.06) <sup>a</sup>	0.88 (0.04) <sup>b</sup>	0.80 (0.17) <sup>a</sup>	0.020
Major dominant species	<i>Diplonychus esakii</i>	<i>Gyraulus convexiusculus</i>	<i>Ceriatrion melanurum</i>	Chironomidae sp.	<i>Ischnura asiatica</i>	

Each line indicates an average with standard deviation (in parenthesis).

Kruskal-Wallis test was performed with all the variables.

The same small letters indicate no significant difference based on Duncan's test.

여 집괴분석을 실시한 결과, 제주도 일대 50개 습지는 크게 2개의 그룹과 5개의 하위 그룹으로 나누어졌다(Fig. 3). MRPP 분석 결과 집괴분석에 의하여 나누어진 5개의 그룹은 통계적으로 유의하였다( $A=0.121, p<0.01$ ).

집괴분석에 의하여 나누어진 각 그룹은 저서성 대형무척추동물 군집의 다양성과 풍부성을 결정하는 환경요소 중에서 습지면적과 모래 이하 세립질 입자의 하상 구성비(%), 습지 장축 길이, 수생식물 구성비의 항목에서 통계적으로 유의미한 차이를 보였다( $p<0.05$ ). 결과적으로 Group 1은 평균 고도와 습지면적이 각각 146.4 ( $\pm 105.3$ ) m와 2,583.4 ( $\pm 2,699.1$ ) m<sup>2</sup>인 저지대에 위치하는 소형 못이었으며 수생식물(macrophyte) 구성비가 상대적으로 높았고 하상이 주로 모래 이하의 세립질 입자로 이루어져 있었다(Table 2). 반면, Group 2는 평균 고도가 449.9 ( $\pm 594.3$ ) m이었으며 습지면적이 24,336.5 ( $\pm 35,380.3$ ) m<sup>2</sup>였고 백록담과 사라오름습지와 같은 화구호를 포함하여 대체로 중산간 지역에 위치하는 중형 습지가 많았다. 또한, Group 2는 수생식물 비율이 상대적으로 빈약하였고 모래와 자갈 이상의 조립질 입자가 혼재하였다.

G1a는 남선못을 제외하면 모두 서쪽 지역에 위치하였으며(Fig. 1) 평균 고도(107.3 m)와 습지면적(2,536.8 m<sup>2</sup>)이 모든 그룹 중에서 가장 낮았다. G1b는 모래 이하의 세립질 입자의 구성비(95.3%)가 가장 높았으며 습지의 장축 길이(52.3 m)가 가장 짧았고, G1c에 속하는 습지는 모두 동쪽에 위치하였으며(Fig. 1) 수생식물 구성비(13.1%)가 상대적으로 가장 높았다. 한편, G2a는 장축 길이(193.3 m)가 가장 길었으며 평균 수생식물 구성비가 4.6%에 불과하였다. G2b는 평균 고도(570.0 m)와 습지면적(26,608.1 m<sup>2</sup>)이 모든 그룹 중에서 가장 높았으며 세립질 입자의 구성비(66.4%)가 가장 낮았고 평균 수심(61.4 cm)이 깊었다. 모든 그룹 중에서 G1b는 종다양성과 풍부도가 가장 높았으며 또아리물달팽이(*Gyraulus convexiusculus*)가 우점종이었다. 이와는 반대로 G2a는 출현종수와 개체밀도가 빈약하였으며 서식환경이 열악하거나 교란을 받는 수체에서 높은 개체밀도로 출현하는 깔따구류(*Chironomidae* sp.)가 우점하였다(Table 2). 그룹별 생물서식환경 인자와 생물학적 속성은 고도와 수심, 조립질 입자 구성비를 제외한 모든 항목에서 통계적으로 유의미한 차이를 보였다(Kruskal-Wallis test,  $p<0.05$ ).

**Table 3.** Indicator values (%) for the most important species ( $p<0.05$ ) in each cluster group.

Indicator species	Group 1			Group 2		<i>p</i>
	G1a	G1b	G1c	G2a	G2b	
<i>Polypylis hemisphaerula</i>	<b>58</b>	1	0	0	0	0.001
<i>Gnorimosphaeroma</i> sp.	<b>27</b>	0	0	0	0	0.025
<i>Gammarus</i> sp.	<b>27</b>	0	0	0	0	0.017
<i>Diplonychus esakii</i>	<b>37</b>	6	0	0	2	0.012
Scirtidae sp.	<b>47</b>	7	1	1	0	0.001
<i>Gyraulus convexiusculus</i>	0	<b>45</b>	11	0	0	0.005
<i>Paraplea indistinguenda</i>	0	<b>44</b>	9	0	0	0.007
<i>Noterus japonicus</i>	12	<b>59</b>	5	0	0	0.002
<i>Hydrovatus subtilis</i>	0	<b>25</b>	1	0	0	0.045
<i>Laccobius (Laccobius) bedeli</i>	0	<b>33</b>	0	0	0	0.013
<i>Triaenodes</i> sp.	0	<b>27</b>	0	0	0	0.027
<i>Cloeon dipterum</i>	1	10	<b>36</b>	0	14	0.012
<i>Ceriagrion melanurum</i>	20	5	<b>63</b>	0	0	0.001
<i>Sympetrum eroticum</i>	1	1	<b>33</b>	0	0	0.026
<i>Hydaticus (Prodaticus) conspersus</i>	0	0	<b>25</b>	0	0	0.046
<i>Limnodrilus gotoi</i>	7	5	1	<b>42</b>	0	0.003
Chironomidae sp.	1	14	5	<b>58</b>	1	0.001
<i>Deielia phaon</i>	0	0	0	0	<b>43</b>	0.001
<i>Micronecta (Basileonecta) sedula</i>	0	1	0	0	<b>49</b>	0.001

Monte Carlo tests based on 999 permutations were used to assess the significance of each species as an indicator for the respective cluster group (G1a-G2b). Total 78 species whose contribution to total density was higher than 0.1% were analyzed.



4. 지표종 분석

집괴분석을 통해 구분된 각 그룹을 대표하는 지표종을 확인하기 위하여 지표종 분석(ISA)을 수행한 결과, 0.1% 이상의 개체수 점유율을 차지하는 총 78종 중에서 19종의 지표종이 선정되었으며, 그룹별 지표종은 최소 2종(G2a, G2b)에서 최대 6종(G1b)의 범위였다(Table 3). G1c 그룹의 지표종인 노란실잠자리(*Ceriagrion melanurum*)는 지표값이 63%로 가장 높았으며 습지면적( $r = -0.442, p < 0.01$ ) 및 습지의 장축( $r = -0.402, p < 0.01$ )과 음의 상관관계가 있었고 수생식물 구성비( $r = 0.543, p < 0.01$ )와 양의 상관관계를 보였다(Table 4). 이는 노란실잠자리가 제주도의 수생식물이 풍부한 소형 습지에서 출현빈도와 개체밀도가 높았음을 뒷받침한다. 또한, 지표값이 59%인 자색물방개(*Noterus japonicus*)는 G1b 그룹의 지표종으로 선정되었으며, 습지면적( $r = -0.405, p < 0.01$ ) 및 습지의 장축( $r = -0.383, p < 0.01$ )과 음의 상관관계가 있었고 모래 이하의 세립질 입자 구성비( $r = 0.379, p < 0.01$ ) 및 수생식물 구성비( $r = 0.377, p < 0.01$ )와 양의 상관관계를 보였다(Table 4). 한편, G2a 그룹에서는 내성종으로 구분하는 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*)와 깔따

구류(Chironomidae sp.)의 2종이, G2b 그룹에서는 밀잠자리붙이(*Deielia phaon*)와 꼬마물벌레(*Micronecta (Basileonecta) sedula*)의 2종이 지표종에 선정되었다. 이 중에서 밀잠자리붙이는 습지면적( $r = 0.459, p < 0.01$ )과 습지의 장축( $r = 0.405, p < 0.01$ )에 대하여 양의 상관관계가 비교적 높았다(Table 4).

고찰

현재까지 저서성 대형무척추동물 군집을 대상으로 한 제주도의 습지 연구는 물영아리오름 및 물장오리오름과 같이 습지보전법에 근거하여 지정된 습지보호지역을 중심으로 이루어졌다(MOE/NIER, 2008; Han et al., 2022). 또한, 대부분의 습지 연구는 특정 수체에 대하여 단편적으로 조사되었으며, 도내 전역에 걸쳐 광범위하게 수행한 연구는 드물다. 이 중에서 Jeong et al. (2010b)은 102개 정수환경의 습지에 서식하는 수서곤충상을 조사한 결과 총 7목 32과 73속 100종을 확인하였으며, Jung et al. (2011)은 89개 습지와 하천에서 총 5문 8강 21목 84과 157속 207종의 목록을 제시하였

Table 4. Pearson correlation coefficients between indicator species and abiotic and biotic environmental variables.

	Indicator species	Altitude	Wetland area	Fine particle (%)	Long axis	Macrophyte composition (%)
G1a	<i>Polypylis hemisphaerula</i>	-0.166	-0.331*	0.229	-0.327*	0.016
	<i>Gnorimosphaeroma</i> sp.	-0.325*	-0.114	0.157	-0.094	-0.115
	<i>Gammarus</i> sp.	-0.314*	-0.223	0.156	-0.210	-0.093
	<i>Diplonychus esakii</i>	-0.062	-0.065	0.139	-0.136	0.268
	Scirtidae sp.	-0.410**	-0.208	0.318*	-0.196	0.004
G1b	<i>Gyraulus convexiusculus</i>	0.029	-0.286*	0.291*	-0.324*	0.384**
	<i>Paraplea indistinguenda</i>	0.119	-0.222	-0.016	-0.251	0.424**
	<i>Noterus japonicus</i>	0.072	-0.405**	0.379**	-0.383**	0.377**
	<i>Hydrovatus subtilis</i>	0.017	-0.195	0.060	-0.148	0.162
	<i>Laccobius (Laccobius) bedeli</i>	0.093	-0.227	0.095	-0.228	0.015
	<i>Triaenodes</i> sp.	0.177	-0.127	0.062	-0.156	0.136
G1c	<i>Cloeon dipterum</i>	0.118	-0.105	0.136	-0.138	0.264
	<i>Ceriagrion melanurum</i>	-0.090	-0.442**	0.160	-0.402**	0.543**
	<i>Sympetrum eroticum</i>	0.069	-0.004	0.173	-0.023	0.032
	<i>Hydaticus (Prodaticus) conspersus</i>	0.019	-0.024	0.015	-0.025	0.208
G2a	<i>Limnodrilus gotoi</i>	-0.013	0.141	0.036	0.131	-0.190
	Chironomidae sp.	0.120	0.242	0.000	0.316*	-0.067
G2b	<i>Deielia phaon</i>	-0.291*	0.459**	-0.101	0.405**	-0.067
	<i>Micronecta (Basileonecta) sedula</i>	0.058	0.218	-0.150	0.148	-0.175

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$

다(Table 1). 본 연구와 상기 선행연구는 대상 분류군이나 생물서식처 유형, 조사시기, 조사지점 수에서 다소 차이가 있음에도 불구하고 공통적으로 제주도의 습지가 정수성 곤충류를 중심으로 저서성 대형무척추동물의 생물다양성이 매우 높음을 강조하였다. 이와는 반대로 MOE/NIER (2021)은 본 연구와 동일한 조사기간 동안 제주 일대 3개 하천(웅포천, 도근천, 동홍천)에서 총 3문 5강 8목 17과 20종의 생물상과 하천별 평균 9종의 출현종수를 기록하였는데, 이는 본 조사의 습지별 평균 17종과 비교하였을 때에도 종다양성이 빈약한 수준이었다. 제주도 내 하천은 화산암과 화산회토 등의 투수성이 높은 지반으로 인하여 대부분이 집중호우에 의해서 짧은 기간 동안만 하천유량을 유지하므로 건천이 많으며 하천 연속성이 단절된 경우가 많고 직류하천의 형태로 인하여 생물서식환경이 단조롭다(JRMA, 2011). 그러나 제주도 습지는 화구호를 비롯하여 연안과 저지대의 중·소형 연못 등 크기와 형태가 다양할 뿐만 아니라 상대적으로 자연성이 높고 서식환경이 대체로 안정적이다(Oh *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2011). 이러한 결과는 하천생태계와 정수환경의 습지생태계가 제주도의 생물다양성 측면에서 현저하게 차이를 보이는 주요한 원인으로 판단된다.

일반적으로 정수환경의 담수서식처는 OHC 분류군의 다양성과 풍부성이 높다(Williams and Feltnate, 1992; Son *et al.*, 2012; Chung *et al.*, 2020). 제주도에는 과거 목장과 마을의 용수 공급을 목적으로 못의 형태로 중산간 지역에 다양한 형태의 습지가 많았는데, 이용 감소로 방치되면서 사초과(Cyperaceae) 및 가래과(Potamogetonaceae) 등 다양한 수생식물이 정착하여 자연성이 높은 서식처로 변화한 사례가 많다(Oh *et al.*, 2009; Kang *et al.*, 2015). 이와 같은 습지 환경은 주요 섭식기능군(functional feeding group)이 포식자(predators)에 해당하는 OHC 분류군의 다양성과 풍부성에 직접적인 영향을 미치는 중요 요인으로 작용하며 이들이 수생식물을 은신처로 하여 먹이활동을 하는 데 유리한 조건이 될 수 있다(Williams and Feltnate, 1992). 본 연구에서 OHC 분류군은 전체 출현종수와 개체밀도에 대하여 각각 67.7%와 68.2%로 구성비가 매우 높았는데(Fig. 2), Jeong *et al.* (2010b)의 연구에서도 제주도 일대 습지에서 출현한 100종 중에서 포식자가 75%를 차지하는 것으로 보고한 바 있다. 습지생태계에서 OHC 분류군은 대체로 파리목(Diptera)을 포함한 무척추동물과 크기가 작은 올챙이를 주요 먹이원으로 하는데, 대부분의 조사습지에서 출현종이 많을수록 상대적으로 OHC 분류군의 다양성이 높았다. 이러한 결과는 제주도 습지를 대상으로 한 선행연구에서도 동일하였으며(Jeong *et al.*, 2010b; Jung *et al.*, 2011), 행정구역이 다른 내륙지역의 정수성 습지를 대상으로 수행한 연구에서도 유사

하였다(Son *et al.*, 2012; Chung *et al.*, 2020).

본 연구에서 확인한 멸종위기 야생생물 중에서 연체동물문(Mollusca)의 갈고둥과(Neritidae)에 속하는 기수갈고둥(*C. retropictum*)은 담수와 해수가 만나는 기수역에 서식하며 오염되지 않은 수체의 흐름이 있는 자갈 이상의 조립질 하상을 기어다니면서 부착조류를 섭식하는 종이다(Lee *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2021). 기수갈고둥은 해안의 높은 개발 압력으로 인한 지속적인 서식지 감소와 까다로운 생육조건으로 인하여 1998년 멸종위기 야생생물로 지정하여 현재에 이르고 있다(MOE, 2019; Han *et al.*, 2021; Jeong *et al.*, 2021). 국내에서 보고된 대부분의 기수갈고둥 개체군은 남해안을 중심으로 국지적으로 분포하는 것으로 알려져 있었으나, Noseworthy *et al.* (2012, 2013)이 제주도의 남부와 북부 지역 하천 말단에서 이 종을 최초 보고한 바 있다. 본 연구에서 기수갈고둥은 해안과 인접한 습지에서 비교적 풍부한 개체가 서식하였는데, 화산섬의 지질적 특성에 의한 제주 하천의 분포 양상과 우수 환경을 선호하는 기수갈고둥의 일반적인 생태적 습성을 고려하였을 때 이는 다소 이례적이며 주목할 만한 결과이다. 즉 수서곤충의 물장군(*L. deyrolli*)과 물방개(*C. chinensis*)와 같이 서식처 교란이 있을 때 우수한 비행능력의 도움으로 인근의 서식처로 쉽게 도피하여 재정착할 수 있는 종과는 달리, 본 종은 서식범위가 매우 제한적이고 환경변화에 취약하기 때문에 서식지가 훼손되었을 때 쉽게 사멸할 우려가 크다. 따라서 향후 종 보전과 서식지 보호를 위하여 도내 유사 환경에 대한 분포와 서식환경 특성에 대한 추가적인 연구가 요구된다(Han *et al.*, 2021).

또한, 우리나라에서 국가 기후변화 생물지표종으로 지정된 남색이마잠자리(*B. chalybea flavovittata*)는 인도와 인도네시아, 태국과 같이 주로 고온다습한 열대지역에 서식하는데, 2010년도 제주도에서 최초 기록된 이후 개체수가 점진적으로 증가하고 있으며 최근에는 영산강과 금강 일부 지역으로 서식범위가 확장하는 경향을 보여 기후변화에 따른 지속적인 모니터링과 생태연구가 요구되는 종이다(Choi *et al.* 2020). 이와 함께 제주도에서 내륙의 북부지역으로 서식범위가 점차 확대하는 종으로 도깨비왕잠자리(*A. martini*)와 하나잠자리(*Sympetrum speciosum*), 새노란실잠자리(*Ceriagrion auranticum*)가 있다(Jung, 2016).

제주도는 한라산과 해양의 영향으로 해발고도와 지형에 따라서 한대에서 아열대까지 여러 기후 환경이 공존하므로 다양한 동식물이 서식하며 내륙지역과 비교하여 생물상이 독특하다(JRMA, 2011; FNM, 2021). 아울러 제주도는 외국에서 비래하여 유입된 종이 정착하여 확산하는 중간 기착지로서 생물지리학적으로 중요한 위치에 있는 것으로 판단된다. 특히 제주도 습지는 생물서식환경이 다양하고 풍부하

므로 높은 생물다양성을 지탱하는 데 중요한 역할을 한다 (Jeong *et al.*, 2010b; Kang *et al.*, 2015). 우리나라는 향후 기후변화에 따른 기온 상승과 강수량 증가의 영향으로 생물서식환경의 변화가 예측되고 있다 (JRMA, 2011). 결과적으로 이는 생물다양성과 생물 군집의 조성에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있으며, 앞의 남색이마잠자리 사례에서와 같이 비행성이 우수한 분류군을 중심으로 도내에 제한적으로 분포하는 종의 서식범위가 내륙지역으로 점차 확대할 것으로 예상된다 (Choi *et al.*, 2020). 이러한 측면에서 세계적인 이슈인 기후변화가 제주도 일원의 습지환경과 생물다양성에 미치는 영향에 대하여 지속적인 관심과 함께 체계적인 모니터링 프로그램 실행이 필요하다.

저서성 대형무척추동물의 분포와 군집에 영향을 미치는 환경 인자를 규명하는 연구는 대상 수체와 생물다양성 보전을 위하여 필수적이다 (Sharma and Rawat, 2009; Jun *et al.*, 2016; Dalu *et al.*, 2022). 습지생태계에서 저서성 대형무척추동물 군집에 영향을 미치는 주요 환경인자는 습지면적과 고도, 수심, 수질, 수생식물 분포 등이 알려져 있는데 (Stenert and Maltchik, 2007), 본 연구에서 습지면적과 습지의 장축 길이, 모래 이하 세립질 입자의 구성비, 수생식물 구성비는 저서성 대형무척추동물 군집의 유사성에 따라 대상 습지를 구분하는 주요한 환경인자에 해당하였다.

일반적으로 서식지 면적은 저서성 대형무척추동물의 종다양성과 풍부성을 결정하는 중요한 인자로서 면적이 넓을수록 미소서식환경이 다양하며 가용할 만한 생태적 지위가 많고 자원 이용의 기회가 증가하므로 생물다양성이 높다 (Heino, 2000; Stenert and Maltchik, 2007; Stewart and Schriever, 2023). 이러한 관계는 대형 수생식물과 어류에서 밀접한 것으로 알려져 있다 (Tonn and Magnuson, 1982; Oertli *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2020). 이와는 반대로 Oertli *et al.* (2002)은 스위스의 80개 연못을 대상으로 면적과 생물다양성에 대한 연구 결과에서 일련의 소형 습지가 동일 면적의 규모가 큰 습지 하나와 비교하여 종다양성과 보전 가치가 높다고 하였다. 그러나 많은 연구에서 습지면적에 대한 저서성 대형무척추동물의 종다양성 변화 양상은 분류군에 따라 차이가 있는 것으로 제시하고 있다. 예를 들어, 잠자리목 (Odonata)과 복족류 (Gastropoda), 갑각류 (Crustacea)는 면적에 대하여 비례적으로 증가하는 반면 (Oertli *et al.*, 2002; Stenert *et al.*, 2008; Maltchik *et al.*, 2010), 딱정벌레목의 물방개과 (Dyticidae)는 감소하였다 (Heino, 2000). 본 연구에서 집괴분석 결과 저서성 대형무척추동물 군집은 습지면적에 따라 차이를 보였음에도 불구하고 출현종수 (Pearson correlation,  $r = -0.274$ ,  $p > 0.05$ )와 개체밀도 (Pearson correlation,  $r = -0.291$ ,  $p < 0.05$ )는 습지면적 증가에 따라서 감

소하는 경향을 보이기는 하였으나 개체밀도만이 상관관계가 유의미하였다. 이러한 결과는 제주도 일대 50개 대상 습지의 80%가 면적 10,000 m<sup>2</sup> 이하의 소형습지에 편중되어 있어 습지면적에 따른 종다양성과 풍부도의 관계를 파악하기에는 자료가 불충분한 것으로 판단된다 (Appendix 1).

수생식물 분포는 수생물 군집의 종다양성에 직접적인 기여를 하며 이러한 관계는 정수환경에서 더욱 명확하다. 다시 말해서 수생식물은 잔사물의 형태 또는 표면에 자라는 부착조류를 통해 먹이원을 제공하거나 산란처와 은신처로서의 역할을 하므로 저서성 대형무척추동물의 다양성 및 풍부도와 밀접한 관계가 있으며 수생식물이 차지하는 면적이 클수록 저서성 대형무척추동물의 출현종수와 밀도가 높다 (Attrill *et al.*, 2000; Bogut *et al.*, 2007). 또한, 저서성 대형무척추동물은 수생식물의 종구성과 생활사에 따라 출현시기와 군집 구조가 결정되기도 한다 (Van den Berg *et al.*, 1997). 화구호와 인공저수지를 포함하는 Group 2는 대체로 해발고도가 높은 산림에 위치하였으며 습지면적에 비하여 유량이 적어 수생식물보다는 건조한 환경을 선호하는 건건생식물 (xerophyte)의 구성비가 높았다. 결과적으로 저서성 대형무척추동물은 Group 2의 습지별 평균 출현종수와 밀도가 각각 10.5종과 278.6개체 m<sup>-2</sup>로서 상대적으로 수생식물이 풍부한 Group 1의 20.7종과 725.4개체 m<sup>-2</sup>에 비하여 적었다. 본 연구에서와 마찬가지로 물장오리오름습지는 수생식물이 차지하는 면적이 증가하는 하절기에 정수성 곤충류인 OHC 분류군을 중심으로 종다양도와 풍부도가 증가하는 것으로 보고된 바 있다 (Han *et al.*, 2022). 그러나 본 연구는 제주도 일대 대상 습지에 대한 수생식물의 세부적인 출현종과 습지 내부를 차지하는 면적에 대한 정량적 자료가 미흡하여 객관적인 연관성을 제시하기에는 어려운 한계가 있으며, 이는 향후 추가적인 연구를 통한 보완이 요구된다.

이 외에도 고도는 우수 및 정수생태계에서 저서성 대형무척추동물의 다양성과 분포에 영향을 미치는 제한요인으로 작용한다 (Oertli *et al.*, 2002; Jeong *et al.*, 2010a; Jun *et al.*, 2016). 즉 종다양성은 대체로 고도가 증가하면서 단조적으로 감소하거나 고봉형의 형태로 중간 고도에서 최대를 보이다가 이후 감소하는 경향을 보인다 (Sanders, 2002). Lawton *et al.* (1987)은 고도에 따른 종다양성 감소 원인으로 높은 고도에서의 서식처 면적 및 이용가능한 자원의 다양성, 생산력 감소와 함께 변화가 심하고 예측이 어려운 환경조건을 제시하였다. 제주도는 해발고도 1,947 m의 한라산을 중심으로 한대에서 아열대까지 기후 환경의 변화가 비교적 뚜렷하며 이는 온도에 민감한 수생물 군집의 분포와 다양성에 직접적인 영향을 미치는 제한요인으로 작용할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 습지면적에서와 마찬가지로 고도에 따라 출

현종수(Pearson correlation,  $r = -0.265$ ,  $p > 0.05$ )와 개체밀도(Pearson correlation,  $r = -0.215$ ,  $p > 0.05$ )가 감소하는 양상을 보였음에도 불구하고 통계적으로 유의미하지는 않았다. Jeong *et al.* (2010a)은 제주도 내 24개 습지를 대상으로 고도에 따른 수서곤충 다양성 변화를 분석한 연구에서 해발고도 증가에 따라서 출현종수는 감소하였으며 면적 효과를 제거하였을 때 해발고도 약 258.7 m에서 출현종수가 최대인 고봉형(hump-shaped)으로 나타난다고 하였다.

한편, 생물학적 지표종(biological indicators)은 생태계의 전반적인 상태 또는 생태계를 구성하는 환경 요소의 변화를 감지하고 평가하는 데 유용하게 활용하는 개념이다(Jun *et al.*, 2012; Min *et al.*, 2022). 저서성 대형무척추동물은 대부분의 수체에 분포하며 서식범위가 제한적일 뿐만 아니라 수명이 비교적 길고 채집과 동정이 용이하여 담수생태계의 환경 상태를 평가하기 위한 지표생물로 전 세계적으로 널리 활용되는 분류군이다(Rosenberg and Resh, 1993). 본 연구에서 제주도 습지 50개소를 대상으로 지표종 분석을 통하여 선정된 지표종은 총 19종으로 대부분이 딱정벌레목과 잠자리목, 노린재목의 포식성 곤충류가 해당하였다(Table 3). 또한, 수생식물이 풍부하고 세립질 입자의 구성비가 높은 저지대 소형 못을 대표하는 지표종은 15종인 반면, 중산간 지역의 중형 습지에서는 4종에 불과하였다(Table 3). 이 중에서 G2a 그룹은 우리나라 대부분의 담수생태계에 광범위하게 분포하며 환경교란에 대하여 내성범위가 넓어 교란이 심한 수체에서 높은 밀도로 서식하는 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*)와 깔따구류(Chironomidae sp.)가 지표생물로 선정되었다(Cooper *et al.*, 2006; Beyene *et al.*, 2009). G2a 그룹은 대체로 화구호의 고산습지 또는 인공적으로 조성한 습지를 포함하였으며 습지면적이 넓고 수생식물의 구성비가 낮은 열악한 환경의 특성을 보였고 출현종수와 개체밀도가 각각  $7.8 (\pm 3.6)$  종과  $225.6 (\pm 133.7)$  개체( $\text{inds. m}^{-2}$ )로 빈약하였다. 본 연구에서 선정된 대부분의 지표종은 습지의 주요 환경 인자와 상관관계가 통계적으로 유의미하였으며 환경 변화를 감지할 수 있는 잠재적인 활용 가치가 높을 것으로 판단되었다(Table 4). 다만, 일부 관계에 대한 상관계수가 낮게 산출되었는데, 이는 연안습지에서부터 화구호에 이르기까지 대상 습지가 다양하였음에도 불구하고 대부분의 조사 습지가 해발고도 200 m 이내의 저지대에 위치하는 면적  $3,000 \text{ m}^2$  이하의 소형 못에 편중되었기 때문이다. 이러한 문제는 본 연구와 연계하여 제주도 습지에 대한 지속적인 연구를 통하여 보다 다양한 유형의 습지를 포함하여 지속적으로 조사 자료를 축적한다면 개선될 수 있을 것이다.

제주도는 지질학적 특성으로 인하여 도 전역에 걸쳐 다양한 형태의 습지가 발달하여 있으며 생태적 가치가 높은 다

수의 람사르습지가 지정되어 있다. 그러나 관련 법령으로 보호받지 못하는 많은 습지는 생태계 현황을 파악하기도 전에 도시화와 농경 활동 등의 과도한 개발로 사라지거나 인위적인 교란에 방치되어 있다. 이러한 측면에서 본 연구는 제주도 일대 중·소형 습지를 대상으로 저서성 대형무척추동물의 다양성과 특이종의 분포를 분석하였으며 군집 유사성에 기초한 습지 유형화를 통하여 이들의 분포에 영향을 미치는 환경 요인과의 관계를 고찰하였고 습지생태계의 변화 관찰에 활용할 수 있는 지표종을 제시하였다. 조사 결과는 제주도의 전반적인 습지 현황과 생물다양성의 특성을 이해하는 유용한 자료가 될 수 있을 것이며 향후 습지생태계를 효율적이고 과학적으로 보전하기 위한 생물모니터링과 생물학적 평가에 기초자료로 활용되기를 기대한다.

## 적 요

습지는 생태적 중요성과 경제적 가치에도 불구하고 인간의 과도한 이용으로 인하여 교란받고 있을 뿐만 아니라 유수생태계인 하천에 비하여 습지 연구는 상대적으로 적다. 본 연구는 아열대 기후의 제주도에 분포하는 중·소형 습지 50개소를 대상으로 저서성 대형무척추동물 군집 특성과 주요 종의 분포 특성을 알아보기 위하여 2021년 현장조사를 실시하였다. 현장조사는 국립생태원의 “내륙습지 조사지침(2020)”에 따라 수행되었다. 조사기간 동안 출현한 저서성 대형무척추동물은 총 3문 5강 19목 53과 133종이었다. 습지별 출현종수는 4~31종의 범위였으며 평균 17.5종이 출현하였다. 포식성 곤충인 잠자리목과 노린재목, 딱정벌레목의 세 분류군은 출현종수와 개체밀도가 각각 전체의 67.7%와 68.2%를 차지하였는데, 특히 딱정벌레목의 구성비가 가장 높았다. 한편, 국가습지 유형분류체계에 따른 습지 유형별 출현종수와 개체밀도는 통계적으로 유의미한 차이가 없었다. 본 연구를 통하여 멸종위기 야생생물은 기수갈고둥과 물장군, 물방개의 총 3종이 확인되었으며 큰무늬왕잠자리를 비롯하여 제주도 내에만 국지적으로 분포하는 다수의 종이 기록되었다. 전체 대상 습지는 저서성 대형무척추동물 군집의 유사성에 따라 5개의 그룹으로 세분되었으며 각 그룹은 습지면적과 세립질 입자의 구성비, 습지 장축 길이, 수생식물 구성비의 항목에서 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. 지표종분석(ISA) 결과에서 총 19종의 지표종이 선정되었는데, 노란실잠자리는 지표값이 63%로 가장 높았으며 그 다음으로 자색물방개와 깔따구류의 순이었다. 습지 환경과 생물 자료를 지속적으로 축적한다면 지표종의 환경변화에 따른 반응을 보다 객관적으로 제시할 수 있으며 습지생태계의

현재 상태를 평가하고 관리하기 위한 생물학적 지표 개발에 적용이 가능할 것이다. 본 연구 결과는 중·소형 습지에 대한 저서성 대형무척추동물의 생물다양성과 서식환경에 대한 정보를 제공하고 향후 습지 보전과 복원을 위한 기초자료로 활용되기를 기대한다.

**저자정보** 전영철 (주식회사 생태자원연구소 책임연구원), 천승필 (SOKN생태보전연구소 주식회사 총괄이사), 강미숙 (SOKN생태보전연구소 주식회사 전임연구원), 박재홍 (주식회사 생태자원연구소 대표이사), 이창수 (국립생태원 전임연구원), 권순직 (주식회사 애일 연구소장)

**저자기여도** 자료분석 및 초고작성: 전영철, 현장조사 및 실내분석: 천승필, 강미숙, 원고 교정: 박재홍, 과제관리: 이창수, 방법론 및 최종원고 검토: 권순직, 원고초안 검토 및 수정: 모든 저자

**이해관계** 모든 저자는 본 논문의 결과에 동의하였으며 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

**연구비** 본 연구는 환경부 국립생태원에서 수행한 “내륙습지 기초조사(NIE-A-2024-18)”에 의해 이루어진 자료를 포함하는 것으로 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

Allan, J.D. and M.M. Castillo. 2007. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. Second edition. Springer Science & Business Media, Dordrecht, The Netherlands.

Atrill, J.J., J.A. Strong and A.A. Rowden. 2000. Are macroinvertebrate communities influenced by seagrass structural complexity? *Ecography* **23**: 114-121.

Bae, Y.J., S.I. Jo, D.H. Hoang, H.G. Lee and K.B. Na. 2004. Biodiversity and community composition of benthic macroinvertebrates from Upo wetlands in Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **18**: 75-91.

Beyene, A., T. Addis, D. Kifle, W. Legesse, H. Kloos and L. Triest. 2009. Comparative study of diatoms and macroinvertebrates as indicators of severe water pollution: Case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis Ababa, Ethiopia. *Ecological Indicators* **9**: 381-392.

Bogut, I., J. Vidaković, G. Palijan and D. Čerba. 2007. Benthic macroinvertebrates associated with four species of macrophytes. *Biologia* **62**: 600-606.

Braich, O.S. and R. Kaur. 2017. Temporal composition and distribution of benthic macroinvertebrates in wetlands. *Current Science* **112**: 116-125.

Choi, J.Y., S.K. Kim, J.C. Kim and S.J. Kwon. 2020. Habitat preferences and trophic position of *Brachydiplax chalybea flavovittata* Ris, 1911 (Insecta: Odonata) larvae in Youngsan

River wetlands of South Korea. *Insects* **11**(5): 273. <https://doi.org/10.3390/insects11050273>

Chung, H.Y., C.M. Yeom, J.H. Kim, S.Y. Park, Y.W. Lee, G.A. Pyo and S.H. Kim. 2020. Species diversity and community characteristics of benthic macroinvertebrates from irrigation ponds in the western CCZ area, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**(2): 173-184.

Cooper, M.J., D.G. Uzarski, T.M. Burton and R.R. Rediske. 2006. Macroinvertebrate community composition relative to chemical/physical variables, land use and cover, and vegetation types within a Lake Michigan drowned river mouth wetland. *Aquatic Ecosystem Health and Management* **9**: 463-479.

Cummins, K.W. 1962. An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. *The American Midland Naturalist* **67**(2): 477-504.

Dalu, T., R.N. Cuthbert, M.J. Methi, F. Dondofema, L.D. Chari and R.J. Wasserman. 2022. Drivers of aquatic macroinvertebrate communities in a Ramsar declared wetland system. *Science of The Total Environment* **818**: 151683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151683>

Davis, J., P. Horwitz, R. Norris, B. Chessman, M. McGuire and B. Sommer. 2006. Are river bioassessment methods using macroinvertebrates applicable to wetlands? *Hydrobiologia* **572**: 115-128.

Diaz, R.J., M. Solan and R.M. Valente. 2004. A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality. *Journal of Environmental Management* **73**: 165-181.

Dufrene, M. and P. Legendre. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monograph* **67**: 345-366.

FNM. 2021. Butterflies of Jeju Island. Forklore & Natural Museum Jeju Special Self-Governing Province. Jeju, Korea.

Gleason, J.E., J.Y. Bortolotti and R.C. Rooney. 2018. Wetland microhabitats support distinct communities of aquatic macroinvertebrates. *Journal of Freshwater Ecology* **33**: 73-82.

Hall, D.L., M.R. Willig, D.L. Moorhead, R.W. Sites, E.B. Fish, and T.R. Mollhagen. 2004. Aquatic macroinvertebrate diversity of playa wetlands: the role of landscape and island biogeographic characteristics. *Wetlands* **24**: 77-91.

Han, J.S., C.H. An, J.C. Lim, K.J. Cho and H.G. Lee. 2022. Analysis of benthic macroinvertebrate fauna and habitat environment of Muljangori-oreum wetland in Jeju Island. *Korean Journal of Environmental Biology* **40**(4): 363-373.

Han, S.P., I.C. Hwang and S.J. Kwon. 2021. Studies on distribution and ecology of *Clithon retropictus* (Martens, 1879) in South Korea. *Journal of Wetlands Research* **23**(4): 317-326.

Heino, J. 2000. Lentic macroinvertebrate assemblage structure along gradients in spatial heterogeneity, habitat size and water chemistry. *Hydrobiologia* **418**: 229-242.

Hong, S.J. and S.W. Cheong. 2020. A study on the community



- characteristics and changes of benthic macroinvertebrates in the conservation area of the Shinbulsan wetland. *Journal of Environmental Science International* **29**: 1079-1088.
- Jeong, J.Y., M.K. Sang, J.E. Park, D.K. Song, C.E. Hong, Y.T. Kim, H.J. Sin, H.J. Hwang, S.M. Jung, S.Y. Park, S.W. Kang, J.S. Lee, Y.S. Han, H.S. Park, Y.S. Lee and W.J. Kim. 2021. Molecular phylogenetic study of *Clithon retropictus* using metallothionein gene. *Korean Journal of Malacology* **37**(2): 69-74.
- Jeong, S.B., D.S. Kim, H.S. Jeon, K.S. Yang and W.T. Kim. 2010a. Species richness of aquatic insects in wetlands along the altitudinal gradient in Jeju, Korea: test of Rapoport's rule. *Korean Journal of Applied Entomology* **49**: 175-185.
- Jeong, S.B., H.S. Oh, H.S. Jeon, K.S. Yang and W.T. Kim. 2010b. Aquatic insects fauna and characteristics of distribution on Jeju Island wetlands. *Journal of Wetlands Research* **12**(2): 35-46.
- Jiang, X.M., J. Xiong, J.W. Qiu, J.M. Wu, J.W. Wang and Z.C. Xie. 2010. Structure of macroinvertebrate communities in relation to environmental variables in a subtropical Asian river system. *International Review of Hydrobiology* **95**: 42-57.
- JRMA. 2011. Regional Climate Change Report. Jeju Regional Meteorological Administration. Jeju, Korea.
- 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**: 3599-3628.
- Jun, Y.C., N.Y. Kim, S.H. Kim, Y.S. Park, D.S. Kong and S.J. Hwang. 2016. Spatial distribution of benthic macroinvertebrate assemblages in relation to environmental variables in Korean nationwide streams. *Water* **8**: 27. <https://doi.org/10.3390/w8010027>
- Jung, K.S. 2016. A distributional study and pictorial key of the Odonata (Insecta) from Korea. Ph D. dissertation, Andong University. 185pp.
- Jung, M.H., H.J. Cho, J.H. Yun and H.Y. Lee. 2014. Epilithic diatom communities in streams of Jeju Island. *Korean Journal of Environmental Biology* **32**: 16-25.
- Jung, S.W., Y.J. Park, S.A. Ham, M.C. Kim, H.S. Oh and Y.J. Bae. 2011. Diversity and species composition of benthic macroinvertebrates in Jeju Island. *Entomological Research Bulletin* **27**: 59-69.
- Kang, D.H., E.Y. Yim and M.O. Moon. 2015. Flora of aquatic and wetland habitats on Jeju Island. *Korean Journal of Plant Taxonomy* **45**(1): 96-107.
- Kashian, D.R. and T.M. Burton. 2000. A comparison of macroinvertebrates of two Great Lakes coastal wetlands: testing potential metrics for an index of ecological integrity. *Journal of Great Lakes Research* **26**: 460-481.
- Kim, T., J. Jeong, S. Moon, H. Yang and B. Yang. 2013. Introduction to national mid-term fundamental plan for wetlands conservation and management. *Journal of Wetlands Research* **15**: 519-527.
- Kingsford, R.T., A. Basset and L. Jackson. 2016. Wetlands: conservation's poor cousins. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **26**: 892-916.
- Lawton, J.H., M. MacGarvin and P.A. Heads. 1987. Effects of altitude on the abundance and species richness of insect herbivores on bracken. *Journal of Animal Ecology* **56**: 147-160.
- Lee, S.D., M.J. Kim and J.S. Kim. 2018. Ecological characteristic of *Clithon retropictus* inhabiting in Yeoncho River in southern coastal area. *Korean Journal of Environment and Ecology* **32**(6): 591-602.
- Maltchik, L., C. Stenert, C.B. Kotzian and M.M. Pires. 2010. Responses of odonate communities to environmental factors in southern Brazil wetlands. *Journal of the Kansas Entomological Society* **83**: 208-220.
- Margalef, R. 1958. Temporal succession and spatial heterogeneity in phytoplankton. pp. 323-349. *In: Perspectives in Marine Biology* (Buzzati-Traverso, A.A. ed.). University of California Press, Berkeley.
- McCune, B. and J.B. Grace. 2002. Analysis of ecological communities. MjM Software Design, Gleneden Beach, Oregon, USA.
- McCune, B. and M.J. Mefford. 1999. PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data, Vers. 4. User's Guide. MjM Software Design, Gleneden Beach, Oregon, USA.
- McNaughton, S.J. 1967. Relationships among functional properties of California Grassland. *Nature* **216**: 168-169.
- Mereta, S.T., P. Boets, A.A. Bayih, A. Malu, Z. Ephrem, A. Sisay, H. Endale, M. Yitbarek, A. Jemal, L. De Meester and P.L.M. Goethals. 2012. Analysis of environmental factors determining the abundance and diversity of macroinvertebrate taxa in natural wetlands of southwest Ethiopia. *Ecological Informatics* **7**: 52-61.
- Merz, J.R. and L.K. Ochikubo Chan. 2005. Effects of gravel augmentation on macroinvertebrate assemblages in a regulated California river. *River Research and Applications* **21**: 61-74.
- Mielke, P.W., Jr., K.J. Berry and E.S. Johnson. 1976. Multiresponse permutation procedures for a priori classifications. *Communications in Statistics* **A5**: 1409-1424.
- Min, J.K., H. Lee and D. Kong. 2022. Development of a benthic macroinvertebrate predictive model based on the physical and chemical variables of rivers in the Republic of Korea. *Journal of Freshwater Ecology* **37**: 425-453.
- MOE. 2019. The distribution map of *Clithon retropictum* (Martens, 1879). - Kyeongnam Region: Changwon, Goseong, Sacheon, Tongyoung and Geoje -. The Ministry of Environment. Sejong, Korea. 34pp.
- MOE. 2022. Designation Status of Wetland Protection Area in Korea (December 2022). <http://www.me.go.kr>. The Ministry of Environment. (accessed 06/30/2023).

- MOE/NIER. 2008. Intensive Survey on the Wetland Protected Areas. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea. pp. 129-139.
- MOE/NIER. 2021. Stream/River Ecosystem Survey and Health Assessment. - Youngsan River and Seomjin River -. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.
- Nelson, S.M. and D.M. Lieberman. 2002. The influence of flow and other environmental factors on benthic invertebrates in the Sacramento River, USA. *Hydrobiologia* **489**: 117-129.
- NIE. 2020. Survey Guidelines For Inland Wetlands. National Institute of Ecology, Changnyeong, Korea.
- NIE. 2022. Basic Survey on Inland Wetlands ('22). National Institute of Ecology, Seochon, Korea.
- Noseworthy, R.G., H.J. Lee and K.S. Choi. 2013. The occurrence of *Clithon retropictus* (v. Martens, 1879) (Gastropoda: Neritidae) in an unusual habitat, northern Jeju Island, Republic of Korea. *Ocean Science Journal* **48**(3): 259-262.
- Noseworthy, R.G., M.R. Mondol, S.J. Ju and K.S. Choi. 2012. The occurrence of *Clithon retropictus* (von Martens in Kobelt, 1879, Gastropoda: Neritidae) in Jeju Island, Republic of Korea. *Korean Journal of Malacology* **28**(2): 81-90.
- Oertli, B., D.A. Joye, E. Castella, R. Juge, D. Cambin and J. Lachavanne. 2002. Does size matter? The relationship between pond area and biodiversity. *Biological Conservation* **104**: 59-70.
- Oh, S.J., K.L. Zhin and S.C. Koh. 2009. Studies on flora of wetlands on Jeju City for application as nature exploration sites. *Journal of the Environmental Sciences* **18**(4): 411-422.
- Park, S.H., J.H. Kim, S.H. Baek, H.S. Choi, D.W. Kim, E.J. Ko and H.W. Kim. 2020. Characteristics of fish assemblage by reservoir size in Yeongsan-Seomjin River watershed in Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**: 229-240.
- Petersen, W.T. and J.E. Keister. 2003. Interannual variability in copepod community composition at a coastal station in the northern California Current: a multivariate approach. *Deep Sea Research* **50**: 2499-2519.
- Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. John Wiley and Sons, New York.
- Reis, V., V. Hermoso, S.K. Hamilton, D. Ward, E. Fluet-Chouinard, B. Lehner and S. Linke. 2017. A global assessment of inland wetland conservation status. *BioScience* **67**: 523-533.
- Rolon, A.S. and L. Maltchik. 2006. Environmental factors as predictors of aquatic macrophyte richness and composition in wetlands of southern Brazil. *Hydrobiologia* **556**: 221-231.
- Rosenberg, D.M. and V.H. Resh. 1993. Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates. Chapman and Hall, London and New York.
- Sanders, N.J. 2002. Elevational gradients in ant species richness: area, geometry, and Rapoport's rule. *Ecography* **25**: 25-32.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana.
- Sharma, R.C. and J.S. Rawat. 2009. Monitoring of aquatic macroinvertebrates as bioindicator for assessing the health of wetlands: a case study in the Central Himalayas, India. *Ecological Indicators* **9**: 118-128.
- Shine, C. and C. de Klemm. 1999. Wetlands, Water and the Law: Using Law to Advance Wetland Conservation and Wise Use. IUCN, Gland.
- Son, J.K., N.C. Kim, M.H. Kim and B.H. Kang. 2012. Community characteristics of benthic macroinvertebrates according to growth environment at rural palustrine wetland. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* **15**(5): 129-144.
- Stenert, C. and L. Maltchik. 2007. Influence of area, altitude and hydroperiod on macroinvertebrate communities in southern Brazil wetlands. *Marine and Freshwater Research* **58**: 993-1001.
- Stenert, C., R.C. Bacca, C.C. Mostardeiro and L. Maltchik. 2008. Environmental predictors of macroinvertebrate communities in coastal wetlands of southern Brazil. *Marine and Freshwater Research* **59**: 540-548.
- Stewart, N.A. and T.A. Schriever. 2023. Local environmental conditions influence species replacement in Great Lakes inter-dunal wetland macroinvertebrate communities. *Freshwater Biology* **68**: 46-60.
- Tonn, W.M. and J.J. Magnuson. 1982. Patterns in the species composition and richness of fish assemblages in northern Wisconsin lakes. *Ecology* **63**: 1149-1166.
- Van den Berg, M.S., H. Coops, R. Noordhuis, J. van Schie and J. Simons. 1997. Macroinvertebrate communities in relation to submerged vegetation in two *Chara*-dominated lakes. *Hydrobiologia* **342/343**: 143-150.
- Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell and C.E. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **37**: 130-137.
- Wallace, J.B. and J.R. Webster. 1996. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Annual Review of Entomology* **41**: 115-139.
- Weisberg, S.B., J.A. Ranasinghe, D.D. Dauer, L.C. Schnaffer, R.J. Diaz and J.B. Frithsen. 1997. An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for Chesapeake Bay. *Estuaries* **20**: 149-158.
- Williams, D.D. and B.W. Feltmate. 1992. Aquatic Insects. CAB International, Wallingford, Oxon, UK.

## Appendix 1. Information on the survey wetlands in Jeju Island, Korea.

Wetland	Type <sup>1)</sup>	Abbreviation <sup>2)</sup>	Altitude	Area (m <sup>2</sup> )	Latitude	Longitude
빌레못	L3	AA	257	901	33.40371	126.35110
연화못	L3	AB	69	16,085	33.45457	126.34735
돌개기못	L3	AC	194	1,895	33.39225	126.31092
역고못	L3	AD	210	651	33.38768	126.30886
걸월이못	L3	AE	241	2,662	33.38016	126.31059
어승생오름화구호	L3	AF	1,133	2,935	33.39658	126.48769
수산저수지	H1	AG	50	100,998	33.47016	126.38864
동백로습지	L3	AH	157	1,110	33.50360	126.73992
동북리목장2습지	L3	AI	66	803	33.52939	126.71957
동북리목장3습지	L3	AJ	112	1,597	33.52127	126.72692
반못	L3	AK	125	2,388	33.50866	126.71745
허튼물	L3	AL	274	482	33.48058	126.71794
덕천리목장1습지	L3	AM	263	3,037	33.48229	126.73561
덕천리목장2습지	L3	AN	267	6,211	33.48112	126.73789
북오름습지	L3	AO	212	439	33.49129	126.74171
물차오름습지	M2	AP	684	3,833	33.39554	126.65159
덕천오못	L3	AQ	236	1,651	33.48249	126.74550
몰순이못	L3	AR	284	5,363	33.46299	126.74358
서김녕리목장습지	L3	AS	99	568	33.52333	126.75786
당케해안습지	L3	AT	2	1,295	33.56414	126.76526
모사니물	L3	AU	126	3,005	33.50471	126.77220
쇠선동산습지	L3	AV	132	804	33.42933	126.83972
사려물	L3	AW	120	854	33.42038	126.84503
독자봉길습지	L3	AX	143	902	33.40028	126.83768
긴동산1습지	L3	AY	129	1,252	33.39478	126.82077
긴동산2습지	L3	AZ	125	2,113	33.39264	126.81912
문괴습지	L3	BA	103	2,319	33.38821	126.83704
미나리못	L3	BB	221	4,100	33.45342	126.80059
갈마못	L3	BC	124	2,034	33.38729	126.81084
한못	L3	BD	125	5,993	33.42883	126.84303
시흥리습지	L3	BE	1	40,509	33.47766	126.89744
대나물	L3	BF	75	1,204	33.42897	126.87746
사장밭2습지	M4	BG	9	550	33.35334	126.18924
비비논물옆습지	M4	BH	7	2,673	33.34598	126.18416
광쟁이1습지	M4	BI	12	9,044	33.32878	126.17688
광쟁이2습지	M4	BJ	11	1,057	33.32863	126.17587
도루목이습지	M4	BK	10	939	33.32601	126.17432
판포오름남쪽습지	L3	BL	48	2,874	33.35601	126.21447
수장동습지	L3	BM	32	12,383	33.34984	126.20969
돛곳물	L3	BN	52	415	33.33719	126.22150
용수저수지	H1	BO	26	115,947	33.31741	126.18779
필랑호	L3	BP	4	40,078	33.40891	126.23063
금오름화구호	L3	BQ	382	4,503	33.35616	126.30576
세미소	L3	BR	354	11,006	33.35103	126.32248
정물	L3	BS	352	401	33.34194	126.32788
볼레오름습지	M4	BT	1,214	26,483	33.35540	126.47690
백록담	M2	BU	1,846	11,152	33.36214	126.53326
사라오름습지	M2	BV	1,305	10,516	33.37089	126.57041
고타리못	L3	BW	16	2,022	33.35126	126.85787
남선못	L3	BX	139	5,183	33.37092	126.79196

<sup>1)</sup>Wetland types were assigned based on National Wetland Classification System (H1: human-made lakes, L3: freshwater lakes and pools, M2: fens, M4: swamps).<sup>2)</sup>Abbreviations means 50 survey wetlands used for cluster analysis in Fig. 3.