

제주도 내 점개구리밥(*Landoltia punctata*) 분포와 생태계 위해성 평가^{1a}

최종윤^{2*} · 김남영³ · 류태복³ · 최동희³ · 김덕기³ · 김성기²

Distribution Characteristics and Ecosystem Risk Assessment of Dotted Duckweed (*Landoltia punctata*) in Jeju Island, Korea^{1a}

Jong-Yun Choi^{2*}, Nam-Young Kim³, Tae-Bok Ryu³, Dong-Hee Choi³, Deokki-Kim³, Seong-Ki Kim²

요약

본 연구는 제주도 지역에서 처음 발견된 점개구리밥의 분포와 서식생물상에 대한 점개구리밥의 위해성을 평가하기 위해, 제주도 내 43개 습지 및 하천에서 환경요인과 서식생물상을 조사하였다. 점개구리밥은 43개 중 총 18개 조사 지역에서 출현이 확인되었으며, 이들 지역에서는 점개구리밥 외 수생식물의 생물량은 낮은 편이었다. 점개구리밥 등 수생식물과 환경요인에 대한 서식생물상의 영향을 분석하기 위해 SOM(Self-Organizing Map)을 활용한 패턴분석을 실시하였다. 분석 결과, 동물플랑크톤 등 서식생물상은 환경요인보다는 수생식물의 생물량에 대한 영향이 큰 것으로 나타났다. 특히 점개구리밥의 생물량은 부착성 종과 밀접하게 관련되는 것으로 분석되었다. 제주도 내 하천 및 습지는 수원이 일정하지 않고 수위변화가 급격하여 수생식물의 현존량이 적은 점을 감안하면, 제주도 지역의 교란 특성에 비교적 강한 점개구리밥은 서식생물상(동물플랑크톤 등)에게 서식처로서 중요하게 적용될 것으로 판단된다. 더욱이, 점개구리밥의 점유 공간 내 유기물이 서식동물상의 먹이원으로 활용되는 점 등을 볼 때 점개구리밥은 서식처인 동시에 먹이터로서의 역할을 수행하고 있는 것으로 보인다. 비록 점개구리밥의 밀생이 그늘 효과 등으로 일부 수생식물의 성장과 발달에 영향을 미치지만, 이것은 부유식물이 수표면에 우점하는 특성 때문이며, 점개구리밥의 위해성이라 판단하기는 어렵다. 결론적으로 점개구리밥은 제주도 지역 내 대부분의 수계에서 확산 및 정착된 것으로 조사되었으며, 서식생물상 및 수중 환경 내 미치는 영향은 적은 것으로 사료된다. 추후 제주도 지역 외 내륙에서의 점개구리밥 분포 및 확산에 대한 모니터링을 수행할 필요가 있다고 보여진다.

주요어: 점개구리밥, 위해성 평가, Self-Organizing Map(SOM), 동물플랑크톤, 서식처

ABSTRACT

We investigated the environmental factors and inhabiting biota such as macrophytes and zooplankton in 43 sites located on Jeju Island from May and June 2017 to evaluate the spread and ecosystem risk of dotted duckweed (*landoltia punctata*) which was recently found for the first time in Jeju Island. Dotted duckweeds were found in a total of 18 sites which tended to show low biomass of aquatic macrophyte species other than

1 접수 2018년 2월 21일, 수정(1차: 2018년 6월 15일), 게재확정 2018년 6월 25일

Received 21 February 2018; Revised(1st: 15 June 2018); Accepted 25 June 2018

2 국립생태원 생태평가연구소, Division of Ecological Assessment, National Institute of Ecology, Seo-Cheon Gun, Chungcheongnam province 33657, Korea

3 국립생태원 생태보전연구소, Division of Ecological Conservation, National Institute of Ecology, Seo-Cheon Gun, Chungcheongnam province 33657, Korea

a 이 논문은 국립생태원 '외래생물 정밀조사' 사업에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: Tel: 041-950-5351, Fax: 041-950-6157, Email: jyc311@naver.com

the dotted duckweed. We conducted a pattern analysis using SOM (Self-Organizing Map), which extracts information through competitive and adaptive properties, to analyze the effect of inhabiting biota on aquatic macrophytes such as the dotted duckweed and environmental factors. The SOM analysis showed that the inhabiting biota such as the zooplankton affected the biomass of aquatic macrophytes than they did the environmental factors. In particular, the biomass of dotted duckweed was positively related to plant-attached species (*Alona*, *Chydorus*, and *Pleuroxus*). Considering that low density of aquatic macrophytes covers the streams and wetlands on Jeju Island because of irregular water source and sharp change of water depth, the dotted duckweeds are likely to play an essential role as the vital habitat for micro-biota including zooplankton in wetlands and streams on Jeju Island.

Furthermore, considering that organic matters are utilized as the primary food source in the areas occupied by dotted duckweed, dotted duckweeds have the role of being both habitat and food source. Although the dense growth of dotted duckweed adversely affects growth and development of some aquatic plants due to the shadow effect, it is due to the dominance of floating plants on the water surface should not be regarded as the risk of the dotted duckweed. In conclusion, the dotted duckweeds have spread and settled in most of the water systems on Jeju Island, their impact on inhabiting biota and the aquatic environment was minor. It is necessary to monitor the distribution and spread of dotted duckweeds in the inland areas outside of Jeju Island in the future.

KEY WORDS : DOTTED DUCKWEED(*landoltia punctata*), EECOSYSTEM RISK ASSESSMENT, SELF-ORGANIZING MAP(SOM), ZOOPLANKTON, HABITAT

서 론

국가 또는 지역간 교류 확대에 의한 외래생물의 도입과 확산으로 인한 생물다양성 감소와 사회경제적인 피해는 지속적으로 증가되고 있다(Secretariat of the Convention on Biological diversity, 2010). 일반적으로 외래생물은 인위적인 교란이 빈번하게 발생하는 지역을 중심으로 확산되고 있으며, 이로 인한 고유종의 다양성 감소나 생태계 먹이망 건강성을 낮추는 등의 문제가 발생하고 있다. ‘생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률’에 의하면, 외래생물은 의도적 및 비의도적으로 도입되어 이동한 지역 내 생물다양성을 위협하는 생물을 침입외래생물로 정의하고 있다. 국내에서는 이미 돼지풀 등 외래식물과 황소개구리 뉴트리아 등 외래동물이 등록 및 지정되어 있으며, 이로 인해 생태계의 파괴되고 경제활동과 인체 보건에 대한 피해가 증가되고 있다(NIER, 2012). 외래생물들은 지속적으로 국내에 유입되고 있지만, 외래생물로 지정된 생물 외 생물의 분포나 유입 현황에 대한 파악은 사실상 어려운 실정이다.

점개구리밥(*Landoltia punctata*)은 개구리밥아과(Lemnaceae)에 속하는 식물로, 국내에서는 제주도에서 처음 발견되었다. 이들은 형태학적으로 좁개구리밥이 속하는 *Lemna*속과 개구리밥이 속하는 *Spirodela*속 사이에 위치하여 다른 종과의 구별이 어려운 특징을 가진다. 최초 발견 시 이 종이

*Landoltia*라는 속으로 분리되었으며, 이 후 DNA와 생화학적(Biochemical) 연구를 통해 이 종의 기원이 오스트레일리아(Australia)와 북아시아(South Asia)에 기원이 있는 것으로 밝혀졌다(Les and Crawford, 1999). 점개구리밥은 전형적인 수생식물이며, 생활형(Life cycle)에 따라 분류하면 부유식물(Free-floating plant)에 속한다. 뿌리는 7~12개가 나 있으며, 물 밑으로 자라 몸체가 수표면에 부유할 수 있게 균형을 잡아주는 역할을 한다. 일반적으로, 개구리밥속(*Spirodela*)은 *Lemna*속보다 뿌리가 더 긴 특징을 가진다. 이러한 뿌리의 구조는 작은 크기를 가진 동물들의 서식처로 활용될 수 있으며, 뿌리의 표면적 증가로 물의 급격한 수위 변화에도 적응할 수 있게 한다.

다양한 기존문헌들은 수생식물의 가장 중요한 역할 중 하나로 서식 생물들을 위한 서식처나 피난처를 제공하는 것으로 보고하고 있다(Jeppesen *et al.*, 1997; Meerhoff *et al.*, 2003). 수생식물이 부족한 개방수역(open water)은 생물 군집간 경쟁이나 포식 등의 상호관계가 가속화되어 종다양성이 상대적으로 저하되는 반면, 수생식물 등이 풍부한 지역은 다양한 미소서식처의 조성과 상호관계의 적절한 조절로 높은 생산성과 생물다양성을 가질 수 있다(Choi *et al.*, 2013). 수생식물의 다양한 형태에 따라 서식처로서의 효율성이 차이가 있지만(Kuczyńska-Kippen and Nagengast, 2006), 복잡한 형태를 가진 수생식물일수록 어류 등의 포식

활동을 제한하는 효과 또한 높다(Lauridsen and Lodge, 1996; Manatunge *et al.*, 2000). 이는 피식자의 생존률을 높이는 동시에 포식자를 위한 먹이원을 지속적으로 유지 가능하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 복잡한 구조를 가진 수생식물은 줄기와 뿌리 등의 표면 이질성이 높아 일부 부착성 종의 적절한 서식처로서 제공될 수 있다(Choi *et al.*, 2014a). 수생식물이 부족한 수체에서는 주로 부유성 종에 의해 우점되는 것을 감안하면, 부착성 종의 존재는 다양한 생물 군집 유지에 크게 기여할 수 있다. 다양한 수생식물의 생활형태 중, 침수식물은 수중 내에서 상대적으로 복잡한 형태를 가지기 때문에 다양한 동물들의 서식처로 적극 활용되는 것으로 알려져 있다(Muylaert *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2014b). 부유식물이나 부엽식물은 서식처 구조적인 측면에서 수표면 공간만을 점유하는 특징 때문에 서식생물들을 위한 부분적인 서식 공간을 제공한다. 반면, 침수식물은 수표면 아래공간에 주로 분포하기 때문에 개구리밥과 같은 부유식물과 함께 공존하면서 다양한 서식 공간을 창출할 수 있다. 부유식물이 차지하는 수중 점유 공간이 수표면으로 제한되어 있기 때문에, 주로 새각목(Branchiopoda)에 속하는 *Alona*, *Chyrorus*, *Pleuroxus* 등의 작은 크기의 부착성 성충의 종들이 서식처로서 활용하는 것으로 알려져 있다(Choi *et al.*, 2016). 수생식물의 뿌리와 줄기는 수중 내 다양한 부유입자를 포집할 수 있기 때문에 다양한 먹이원이 분포할 수 있다(van Donk and van de Bund, 2002). 이들에게 수생식물의 점유 공간은 적절한 서식처인 동시에 먹이터로서 활용될 수 있다. 국내의 생물다양성이 높은 것으로 보고되고 있는 습지들이 공통적으로 수생식물이 다양하고 풍부하게 분포하는 특징을 가진다는 점을 고려할 때(Engelhardt and Ritchie, 2001; Ervin and Wetzel, 2002), 서식 생물상이나 이들의 시·공간적인 동태 등은 수생식물에 의한 서식처 구조에 크게 영향 받는 것으로 보인다(Christie *et al.*, 2009). 따라서 담수습지나 하천과 같이 공간이 제한된 생태계 내 생물상 연구 시 수생식물의 분포나 천이 등을 감안할 필요가 있다고 보여진다.

제주도에서 발견된 점개구리밥은 국내 연구자료가 거의 없어 분포 특성이나 확산 등을 파악하기 위한 정보가 부족한 실정이다. 기존 문헌에 의하면, 주로 아열대 등 높은 수온을 가진 수체에서 주로 분포하며, 총질소(TN)나 총인(TP) 등 영양염류가 높은 환경을 선호하는 것으로 알려져 있다(Chen *et al.*, 2012). 개구리밥속의 특성상 서식환경의 호조 조건하에서 빠른 성장률을 가지는 점을 감안하면, 다른 종과의 상호관계나 위해성, 서식처로서의 효율성 등에 대한 연구가 필요하며, 파악된 정보를 기반으로 이들에 대한 관리 방안이 마련되어야 할 것으로 사료된다. 또한 제주도 내 수리수문 특성과 점개구리밥의 발아, 성장, 발달 상태간에 관

계를 파악하고, 추후 내륙 습지 및 하천에서의 확산 실태를 면밀하게 조사할 필요성이 있다. 본 연구 결과는 제주도에서 처음 발견된 점개구리밥의 확산 실태와 위해성을 분석함으로써 외래생물로서의 가치를 조명하고, 제주도 지역에서 이들의 관리 방안 시 기초적인 생태 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

연구방법

1. 제주도 수계의 특징 및 조사지역, 시기

제주지역의 수계 형태는 남북사면에 걸쳐 많이 발달해 있고, 동서측에서는 수계의 발달이 미약하다. 수계의 근원지는 한라산을 정점으로 대부분 중산간지대로서 해발 200~600m에 막대한 양의 지하수가 매장되어 있다. 제주시의 수계는 평상시에 물이 흐르거나 고여있지 않은 건천이 많은 것으로 알려져 있다. 이는 제주시의 지표면을 구성하고 있는 현무암 등이 지표의 물을 저장할 수 있는 능력이 결여되어 있기 때문이다. 따라서 지표를 구성하고 있는 화산암류와 화산쇄설물은 투수력이 매우 좋음으로 인해 지하수를 함양할 수 있는 능력은 뛰어난 반면, 지표수를 채집하여 강을 이룰 수 있는 능력은 상대적으로 빈약한 특징을 가진다. 그래서 제주시의 건천들은 집중호우시에 한라고지대의 상류부에서 형성된 대량의 물을 하류인 바다로 급속하게 운반해주는 배수로의 역할을 수행하는 것으로 보인다.

점개구리밥의 분포 현황을 파악하기 위해 제주도 지역 내 위치한 하천 및 습지의 현장 조사를 수행하였다. 기존 문헌에 의하면, 제주특별자치도는 총 143개소의 하천 및 습지가 분포하고 있는 것으로 파악되고 있으며(Jung and Yang, 2008), 이 중 물의 흐름이 적고 안정된 환경이라는 점과 점개구리밥의 서식처 선호성 등을 감안하여 총 43개소의 하천 및 습지를 최종 선정하였다(Fig. 1). 우리나라는 여름철에 강우가 집중되며, 강우 및 태풍의 세기와 정도에 따라 가을까지 영향을 미칠 수 있기 때문에, 43개 조사지에 대한 현지 조사는 물리적인 교란이 상대적으로 적은 시기인 5~6월에 주로 수행되었다. 또한, 점개구리밥이 풍부한 습지에서 점개구리밥이 담수생태계 먹이망에 미치는 영향을 평가하기 위해 6월과 8월에 서식생물상을 대상으로 안정동위원소 분석을 수행하였다.

2. 점개구리밥 분포 및 서식생물상 조사

1) 환경요인 및 서식생물상 조사

43개 조사지에 대한 환경요인의 측정, 동물플랑크톤 및

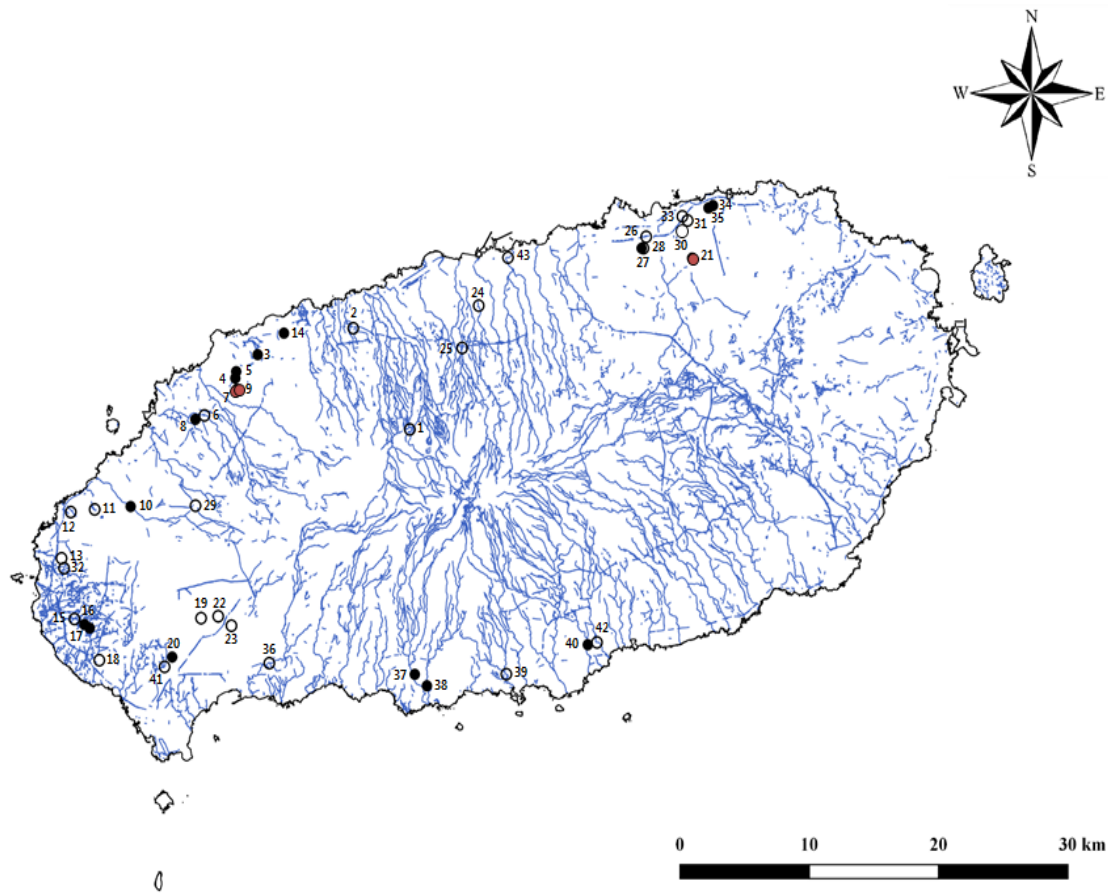


Figure 1. Map showing the study area in the Jeju Island, Korea. The opened and closed circles indicate study site with absence and presence of *Landoltia punctata*. The red circles indicate investigate site with stable isotope analysis.

Table 1. Analysis and survey method on environmental condition and biology groups measured by this study.

| | Factors | Methods | Note |
|--------------------------|---------------------------------|--|-------------------------|
| Environmental conditions | Water temperature | YSI-DO meter(Model 58) | Field measurement data |
| | Dissolved oxygen | YSI-DO meter(Model 58) | |
| | pH | Orion 407A pH meter | |
| | Conductivity | FISHER conductivity meter(Model 152) | Laboratory measurements |
| | Turbidity | Scientific Inc.,(Model 100B) | |
| | Chlorophyll a | Wetzel and Likens(1991) | |
| Biology groups | Zooplankton | Fix by Formalin, microscopic determination | Laboratory measurements |
| | Plant attached microcrustaceans | Fix by Formalin, microscopic determination | |
| | Macroinvertebrate | Fix by ethanol, microscopic determination | |

점개구리밥 등 수생식물 채집이 수행되었다. 조사 전 습지 및 하천의 면적을 고려하여 2~3개의 방형구(0.5 × 0.5m)를 조사 지점에 설치하였으며, 설치된 방형구 내에서 환경요인의 측정 및 생물상 채집이 시행되었다. 환경요인 중 수온,

용존산소, 수소이온농도(pH), 전기전도도 등은 측정 기계를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 탁도 및 클로로필 a 등의 항목은 실험실 내에 있는 측정 장비를 이용하여 분석하였다. Table 1에서는 각 환경요인의 측정 시 사용할 기계

의 모델명 및 방법이 명시되어 있다.

동물플랑크톤 조사는 방형구 내 포집된 동물플랑크톤 등의 이탈을 방지하기 위해 수생식물에 대한 조사 전에 진행되었다. 동물플랑크톤 채집은 원수 채수기(20ℓ 취수 가능)를 사용하여 약 10ℓ 를 채수하여 68 μ m Mesh를 가진 플랑크톤 네트에 여과 시킨 후 약 70ml의 농축된 시료를 폴리에틸렌 병에 5% 수크로스 포르말린 용액으로 고정하였다. 고정된 시료는 실험실로 운반하여 암실에 보관하였다가 동정 및 계수를 위해 활용되었다.

동물플랑크톤 중 수생식물에 부착된 종에 대해서 추가적인 조사가 수행되었다. 먼저, 부착성 동물플랑크톤의 채집을 위해 각 습지당 방형구 내에 있는 수생식물을 모두 채집하였다. 부착성 동물플랑크톤을 수생식물 건조량 당 개체수(ind./dry weight(g) of plant)로 환산하기 위해, 수생식물의 채집 시 침수된 부분만을 채집하였다. 저질 속에 있는 뿌리나 물 위에 나 있는 줄기나 꽃 등은 가위로 제거하였다. 이는 미소무척추동물이 부착할 수 있는 공간만을 산정하기 위함이다. 채집된 수생식물은 원수 20ℓ 를 5 μ m Mesh의 여과지에 여과시켜 부유물질 등을 제거한 물에 약 40~50회 정도 흔들어 부착된 개체를 떼어내었다. 부착성 미소무척추동물을 떼어낸 물은 68 μ m Mesh를 가진 플랑크톤 네트에 여과 시킨 후 약 70ml의 농축된 시료를 폴리에틸렌 병에 5% 수크로스 포르말린 용액으로 고정한다.

채집된 동물플랑크톤 시료들은 종 동정 및 계수를 위해 적당히 시료를 흔들 후 1ml의 시료를 settling chamber(직경: 2.5cm)에 침전시켰다. 동물플랑크톤의 동정 및 계수는 형광현미경(X100)을 이용하여 관찰하였으며, 속 또는 종 범위에 한해 Koste(1978), Smirnov and Timms(1983), Einsle(1993), Mizuno and Takahashi(1999)의 분류기를 활용하여 관찰되었다.

2) 점개구리밥 위해성 평가에 대한 동물상 선정의 적절성

동물플랑크톤은 수생태 내 먹이망에서 1차 소비자로서 식물플랑크톤 등을 섭식하고 대형무척추동물이나 어류 등의 주요 먹이원으로 활용되는 중요한 분류군이다(Wetzel and Likens, 2000). 대형무척추동물이나 어류는 동물플랑크톤의 강력한 포식자로서 이들의 절멸을 종종 이끌기도 한다(Milstein *et al.*, 1985, Arcifa *et al.*, 1986). 이러한 특징 탓에 동물플랑크톤 군집은 오랜 시간 동안 포식자로부터 개체의 생존을 위해 다양한 방어전략을 구사하여 왔다. 기존 문헌에서 낮과 밤에 따른 지각류의 수직이주(Vertical migration)이나 수평이주(Horizontal migration)은 서식 환경이나 포식자의 특성을 고려한 다양한 방어 전략 중 하나이다(Zaret and Suffern, 1976; Lauridsen *et al.*, 1996). 특히, 습지나 하천에서 우점하는 수생식물은 포식자로부터 자

신을 보호하기 위한 피난처로서 적극 활용되며, 수생식물의 구성이나 종별 형태에 따라 효율성의 차이가 있는 것으로 알려져 있다(Lauridsen *et al.*, 1996). 일반적으로 침수식물이나 부유식물 등이 줄기나 뿌리 등이 수중에서 복잡한 구조로 조성되기 때문에 동물플랑크톤 군집이 포식자를 회피하여 은닉하기 좋은 서식처로서 인식되고 있다. 이러한 측면에서, 동물플랑크톤 군집은 점개구리밥에 대한 위해성이나 서식처 활용 정도를 평가하기 위한 대상분류군으로 적당할 것으로 사료된다. 또한 동물플랑크톤 군집이 수환경 변화나 물의 물리적·화학적 특성에 민감한 특성을 감안하면 점개구리밥이 미치는 영향 정도를 파악하는데 크게 기여할 것으로 보인다.

3. 서식생물상의 안정동위원소 분석

점개구리밥의 점유공간 내 유기물이 동물플랑크톤 등 서식생물에 미치는 영향을 분석하기 위해 안정동위원소 분석을 수행하였다. 안정동위원소 분석을 위한 시료 마련은 점개구리밥이 풍부한 9번과 21번 조사지에서 6월과 8월에 각각 시행되었다. 분석 시료는 유기물(식물플랑크톤, 부착조류 등), 동물플랑크톤(주로 부유성), 부착성 동물플랑크톤(수생식물에 부착된 종), 저서무척추동물(잠자리, 하루살이 등) 등이며, 각 생물에 대한 안정동위원소 값의 오차를 낮추기 위해 시료당 2~3개의 서로 다른 샘플을 마련하였다.

담수생태계 먹이망에서 생산자 단계에 속하는 유기물은 두 종류로 구분하여 채집하였다. 첫 번째는 점개구리밥의 뿌리 사이에 고정된 유기물이며, 두 번째는 점개구리밥이 적은 개방된 공간에 부유하는 유기물이다. 각 지점에서 유기물의 채집을 위해 5ℓ 의 원수를 취수하였으며, 원수 취수 시 발생할 수 있는 교란을 최소화하기 위해 10ml의 스포이드를 활용하였다. 특히 스포이드는 점개구리밥의 뿌리 사이에 고정된 유기물을 물과 함께 채집하기 용이하였다. 채집된 유기물은 실험실로 가져와 멸균된 0.45 μ m 여과지에 여과 시킨 후 60 $^{\circ}$ C에서 48시간 정도 건조하였다. 건조 후 채집도구를 활용하여 여과지 위에 남아있는 유기물을 긁어내었으며, 이 시료들은 무기탄소를 제거하기 위해 1molℓ⁻¹ 염산(HCL)에 24시간 동안 담든 후, 증류수로 3~4번 정도 세척하여 분말 형태로 만들었다.

동물시료의 마련은 각 분류군에 적절한 채집방법을 통해 수행되었다. 먼저, 동물플랑크톤은 68 μ m Mesh를 가진 플랑크톤 네트에 20ℓ 의 원수를 여과시켜 조사되었으며, 부착성 동물플랑크톤은 수중에 침수된 수생식물의 줄기와 뿌리를 건져내어 여과수(원수 20ℓ 를 5 μ m Mesh의 여과지에 여과시켜 부유물질 등을 제거한 물)에 약 40~50회 정도 흔들어 부착된 개체를 채집하였다. 이 방법들은 각 조사지에서

동물플랑크톤과 부착성 동물플랑크톤의 밀도 산출을 위한 조사와 동일하다. 마지막으로 저서무척추동물은 휴대용 뜰채(Hand-net, 망목지름 1.0mm 이하)를 이용하여 채집되었다. 채집된 저서무척추동물은 하루살이, 잠자리유충, 실잠자리유충으로 구분하였다. 저서무척추동물 시료 또한 60℃에서 48시간 정도 건조시켰으며, 건조 후 지방성분을 제거하기 위해 Methanol, chloroform 및 water(2:1:0.8) 혼합액에 24시간 처리한 후 증류수로 세척하였다. 세척한 시료는 60℃에서 48시간 정도 다시 건조시킨 후, 분말 형태로 준비하였다.

준비된 분말 형태의 각 시료는 1.0~1.5mg를 tin capsule에 넣고 밀봉하여, 안정동위원소 질량분석기(CF-IRMS, Micromass isoprime)를 이용하여 탄소와 질소 안정동위원소비를 측정하였다. 잠재먹이원과 소비자 동물군이 가지는 안정동위원소비는 표준물질(탄소의 경우 PDB, 질소의 경우 air N₂)에 대한 시료의 비 값 변위를 천분율(‰)로 나타내어 기호(δ)로 표현하였다.

$$\delta X(\%) = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$$

여기서 X는 ¹³C 또는 ¹⁵N이며, R은 ¹³C: ¹²C 혹은 ¹⁵N: ¹⁴N을 가리킨다.

시료 분석 전 동위원소 비 값을 알고 있는 UREA를 이용하여 20회 이상의 반복실험에서 얻어진 값들에 대한 표준편차는 δ¹³C가 0.1‰ 그리고 δ¹⁵N이 0.3‰ 이하를 나타내었다.

4. 통계분석

점개구리밥 등 수생식물과 환경요인 및 동물 군집의 밀도 간의 관계는 생태정보학에서 널리 활용되고 있는 비선형 생태모형 기법 중 하나인 Self-Organizing Map(SOM) 알고리즘을 이용하여 패턴분석을 실시하였다. 본 연구에서 SOM 모형의 입력 변수로 현장조사를 통해 확보된 점개구리밥 등 수생식물 종별 생물량(건중량)과 조사대상 호소의 환경요인(수온, pH, 전기전도도, 용존산소, Chl.a) 및 동물상(동물플랑크톤 밀도, 종수, 부착성 미소무척추동물 밀도)의 공간적 분포 데이터를 활용하였다. 최적의 SOM 구조는 두 가지의 quantization error 및 topographic error를 이용하여 결정하였으며, 다양한 구조의 SOM 모형을 구축한 뒤 두 error 값이 가장 낮은 값을 보인 구조를 최종적으로 선택하였다. 조사지점을 클러스터링하기 위해서 U-matrix를 이용하였으며, SOM 모형을 구성하는 각각의 node들 간의 유사도를 이용하여 가장 적합한 클러스터를 추출하도록 하였다. SOM 모형 구축과 데이터 분석은 Matlab 6.1을 기반으로 이루어졌으며, SOM 모형 구축에 관련된 여러 가지 함수와 기능들은 Matlab 환경에서 구동되는 SOM_PAK(Kohonen *et al.*, 1996) 툴박스를 활용하였다.

또한 점개구리밥의 유무에 대한 환경요인, 동물플랑크톤 종수 및 밀도, 부착성 미소무척추동물 밀도 차이를 규명하기 위해 SPSS(ver. 14)를 활용한 t-test 분석을 시행하였다.

결과 및 고찰

1. 점개구리밥의 일반적인 특성

점개구리밥(*Landoltia punctata*)은 분류학상 택사목(Alismatales)- 천남성과(Araceae)- *Landoltia*속에 속한다. 전형적인 수생식물로 흐름이 거의 없는 안정된 수역에서 주로 서식한다. 생활형(Life cycle)에 따라 분류하면 부유식물(Free-floating plant)에 속한다. 대부분 잎이 녹색이지만 잎 뒷면은 빨간색 또는 갈색이다. 뿌리는 7~12개가 나 있으며, 개구리밥보다 길다. 일반적으로, 개구리밥속(*Spirodela*)은 *Lemna*속보다 뿌리가 더 긴 특징을 가진다(Fig. 2). 주로 봄부터 가을까지 수표면에 우점하며, 포자(Turions) 형태로 겨울을 난다. 그러나 포자는 공기주머니를 가지고 있지 않기 때문에 물 바닥에 주로 위치하며, 수온이 상승하면 다시 수표면으로 올라가 성체로 성장한다. 단일식물이며, 긴 어둠에서도 짧은 광주기만으로 꽃을 피울 수 있는 특징을 가진다. 엽상체마다 뿌리가 1개씩 나고, 잎이 작고 타원형이다. 엽상체 뒷면 좌우에 주머니를 1개씩 만들어 어미식체와 더불어 물 위에 떠서 중심으로 잡고 있다. 수표면에 부유하는 특징 때문에 수체의 흔들림에 따라 유동적이다. 그래서 이들은 안정된 수면에서 크게 발달되는 특징을 가진다. 호소나 습지의 연안대(Littoral zone)가 점개구리밥의 최적의 서식처이다(Koschnick *et al.*, 2006).

2. 점개구리밥 분포와 서식환경

조사 기간 동안, 점개구리밥은 43개소의 조사지 중 총 18개 지점에서 출현하는 것으로 나타났다(Fig. 1, Table 2). 이들은 주로 흐름이 적고, 수심이 얇은 하천 수변부(Littoral zone)나 습지 등에서 주로 출현하였으며, 안정된 수체 내에서 빠른 성장을 보였다. 내륙에 위치한 하천 및 습지와 같이 제주도 지역 또한 지하수나 유입 지천으로부터 유입되는 수원으로 평수위를 유지하는 점은 유사하나, 제주도 지역의 수문수문 특성상 유입 지천이 쉽게 건천화되기 쉽기 때문에 수위 변화가 매우 급격하다는 특징을 가진다. 이 때문에, 주로 수중 생활을 하는 부엽식물(floating-leaved plant)이나 침수식물(submerged plant)의 빈도는 상대적으로 낮으며, 갈대나 참새피 종류와 같이 육상화에 강한 정수식물에 의해 주로 우점된다. 점개구리밥 또한 하천 및 습지의 건천화에

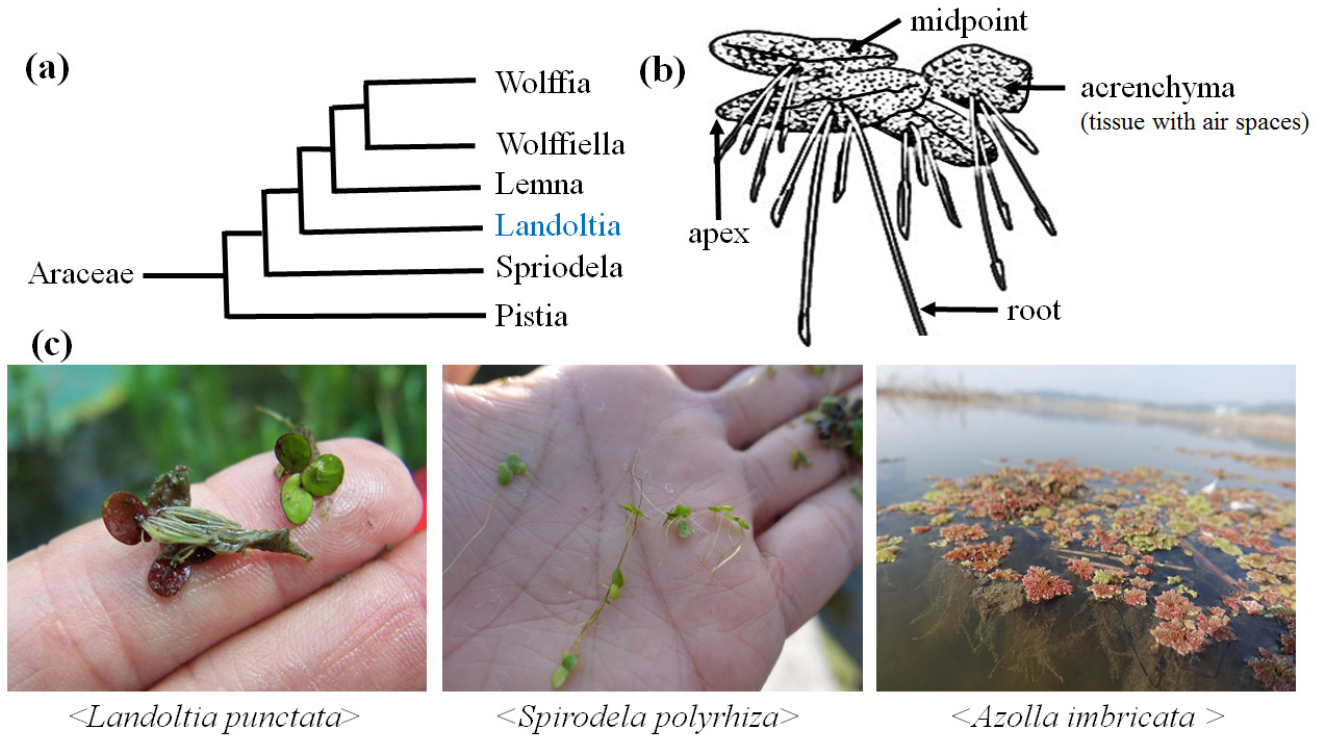


Figure 2. Taxonomic groups and morphological characteristics of *Landoltia punctata*.(a) Taxonomic groups,(b) morphological characteristics, and(c) a pictures of three duck weed(*Landoltia punctata*, *Spirodela polyrhiza*, *Azolla imbricata*)

상당히 적응된 것으로 보이며, 물이 거의 없는 습지 저토 위에서도 고사된 흔적 없이 분포하는 것으로 확인되었다.

정수식물의 경우, 줄기와 꽃이 수면 위에서 나기 때문에 수중으로 유입되는 빛을 차단하며, 서식 공간 내 밀생하는 특성 때문에 다른 식물의 성장을 억제하는 것으로 알려져 있다. 그래서 일반적으로 정수식물이 우점하는 지역은 정수 식물 외 식물이 매우 부족한 특징을 가진다(Cazzanelli *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2014a). 본 조사에서도 또한 갈대나 털물참새피 등이 우점하는 습지에서는 점개구리밥 등 식물의 현존량은 매우 낮았다(1, 2, 6, 7, 13, 19, 22, 24, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 41, 42, 43번 조사지, Table 2). 점개구리밥이 출현하는 지역에서 이들은 단독으로 분포하기도 하였지만(35, 38번), 대부분 부엽식물이나 침수식물과 함께 공존하는 것으로 나타났다. 부엽식물 또한 정수식물과 같이 수표면에 우점할 경우, 다른 수생식물의 발아나 성장을 억제할 수 있다. 점개구리밥 출현지역의 식물 분포 양상을 볼 때, 마름 등 점개구리밥과 공존하는 식물들은 성장 초기에 함께 발달한 개체인 것으로 사료되었으며(점개구리밥이 수표면에 밀생하기 전), 그 외 유식물(Seeding)은 거의 없는 것으로 나타났다. 특히 침수식물은 점개구리밥이 수표면에 밀생하는 지역에서는 거의 출현하지 않았으며, 점개구리밥

개체의 생물량이 상대적으로 적어 빛이 유입될 수 있는 개방 공간이 존재하는 지역에서는 붕어마름이나 나자스말 등의 침수식물의 출현이 확인되었다.

조사지 내 점개구리밥의 유무에 따른 환경 요인의 값은 항목별로 상이한 것으로 나타났다(Table 2). 수온과 용존산소의 경우, 점개구리밥 유무에 따라 통계적으로 유의한 차이는 적었지만(*t*-test, 각각 $p=0.43$, $p=0.15$), 대체적으로 점개구리밥이 현존하는 조사지에서 수온이 낮고 용존산소가 낮은 경향을 보였다. 점개구리밥과 같은 부엽식물이 수표면에 우점하면 빛이 수중으로 유입되지 않기 때문에 수온이 낮은 것으로 사료된다. 또한 습지와 하천을 비교할 때, 하천은 흐름이 있고, 수표면이 개방되어 있기 때문에 용존산소가 높으며, 습지는 흐름이 없고 수심이 얇은 탓에 수생식물이 우점 및 유기물의 부패시 산소의 잦은 활용 등으로 인해 용존산소는 낮은 경향을 나타낸다. 전기전도도는 점개구리밥이 존재하는 공간에서 더 높은 것으로 나타났다(*t*-test, $p=0.03$). 점개구리밥과 같은 수생식물은 물속에 침수된 줄기나 뿌리 등이 수중에 부유하는 유기물 입자를 고정하기 때문에 이온 함량이 높게 측정되어 전기전도도가 높은 것으로 보인다. 탁도가 점개구리밥이 우점하는 습지 및 하천에서 높은 성향을 나타내는 이유 또한 동일한 것으로 판단된

Table 2. The environmental conditions and plant biomass at the each study site in the Jeju Island.

| Num. | Type | WT | DO | Cond. | pH | Tur. | Chl.a | <i>L. punctata</i> | Other plants |
|------|-----------|------|-------|-------|------|------|-------|--------------------|--------------|
| 1 | Wetland | 31.1 | 137.1 | 114.1 | 9.81 | 12.5 | 32.5 | - | 24.4 |
| 2 | Wetland | 26.5 | 149.2 | 92.9 | 9.52 | 6.2 | 34.6 | - | 31.6 |
| 3 | Wetland | 22.8 | 76.1 | 227.7 | 7.4 | 20.5 | 5.98 | 26.1 | 61.6 |
| 4 | Wetland | 17.2 | 57.6 | 144.5 | 7.08 | 19.2 | 23.5 | 14.8 | 38.1 |
| 5 | Wetland | 20.1 | 74.6 | 142.9 | 7.45 | 16.2 | 14.7 | 16.3 | 13.4 |
| 6 | Stream | 21.6 | 80.9 | 329.4 | 7.21 | 6.5 | 28.6 | - | 18.6 |
| 7 | Wetland | 25.1 | 46.54 | 492.4 | 7.57 | 20.4 | 5.3 | 1.3 | 19.3 |
| 8 | Wetland | 27.3 | 39.4 | 317.5 | 7.45 | 18.6 | 7.5 | 30.1 | 46.7 |
| 9 | Reservoir | 26.8 | 84.6 | 228.7 | 7.24 | 23.5 | 30.6 | 24.5 | 40.7 |
| 10 | Wetland | 25.2 | 49.2 | 156.1 | 7.15 | 16.2 | 9.3 | 18 | 13.8 |
| 11 | Wetland | 20.1 | 125.3 | 48.3 | 7.14 | 14.2 | 35.6 | - | 0 |
| 12 | Reservoir | 25.4 | 38.6 | 189.0 | 6.92 | 16.2 | 34.5 | - | 0 |
| 13 | Wetland | 26.3 | 65.2 | 209.2 | 7.15 | 4.2 | 6.5 | - | 26.2 |
| 14 | Wetland | 26.5 | 23.5 | 111.3 | 6.8 | 15.8 | 5.3 | 34.2 | 78.9 |
| 15 | Wetland | 27 | 147.4 | 100.7 | 9.44 | 20.3 | 30.6 | - | 29.2 |
| 16 | Reservoir | 25.2 | 91.3 | 425 | 7.8 | 10.5 | 27.6 | 5 | 13.4 |
| 17 | Reservoir | 20.6 | 103.2 | 99.0 | 7.98 | 16.2 | 15.6 | 6.8 | 12.3 |
| 18 | Wetland | 21.1 | 125.2 | 143.9 | 7.24 | 21 | 41.2 | - | 0 |
| 19 | Wetland | 21.3 | 81.7 | 318.4 | 8.12 | 14.2 | 34.6 | - | 6.2 |
| 20 | Wetland | 24.1 | 81.5 | 423.5 | 7.39 | 23.4 | 36.4 | 26 | 40.4 |
| 21 | Wetland | 22.5 | 83.3 | 143.2 | 7.14 | 21.5 | 1.25 | 28.3 | 54.8 |
| 22 | Wetland | 23.6 | 98.6 | 168.6 | 7.25 | 16.2 | 26.4 | - | 20.6 |
| 23 | Wetland | 24.7 | 100.4 | 83.4 | 7.97 | 11.2 | 28.6 | - | 0 |
| 24 | Reservoir | 20.3 | 121.5 | 174.3 | 7.15 | 17.2 | 31.6 | - | 44.2 |
| 25 | Wetland | 22.5 | 88.4 | 196.2 | 8.24 | 14.2 | 27.8 | - | 0 |
| 26 | Reservoir | 29.6 | 132 | 72.7 | 8.24 | 13.2 | 35.6 | - | 13.2 |
| 27 | Wetland | 30.0 | 113.2 | 79.0 | 8.99 | 17.2 | 42.8 | - | 32.2 |
| 28 | Wetland | 27.3 | 89.4 | 65.2 | 8.91 | 15.4 | 23.6 | 16.8 | 24.6 |
| 29 | Wetland | 24.8 | 49.8 | 327.9 | 7.68 | 25.3 | 12.4 | 24.6 | 29.2 |
| 30 | Wetland | 21.4 | 108.2 | 99.3 | 7.24 | 12 | 32.5 | - | 10.6 |
| 31 | Wetland | 20.5 | 95.0 | 68.3 | 7.4 | 14.2 | 34.9 | - | 42.6 |
| 32 | Reservoir | 21.0 | 9.82 | 110.5 | 8.25 | 20.1 | 21.6 | - | 18.5 |
| 33 | Wetland | 25.3 | 110.2 | 57.7 | 8.94 | 7.2 | 28.7 | - | 26.7 |
| 34 | Wetland | 25.9 | 56.9 | 112.6 | 8.39 | 16.2 | 24.5 | 17.2 | 43.9 |
| 35 | Reservoir | 26.7 | 46.3 | 236.1 | 8.45 | 11.2 | 26.5 | 7 | 0 |
| 36 | Stream | 23.8 | 102.0 | 96.7 | 8.07 | 20.5 | 30.5 | - | 0 |
| 37 | Stream | 24.6 | 56.3 | 118.4 | 7.34 | 21.5 | 27.8 | 20.5 | 53 |
| 38 | Stream | 25.6 | 35.6 | 222.4 | 7.47 | 14.2 | 24.8 | 12.4 | 0 |
| 39 | Stream | 26.5 | 100.4 | 206.2 | 8.46 | 8.2 | 32.5 | - | 0 |
| 40 | Stream | 26.1 | 74.2 | 210.8 | 7.34 | 19.2 | 24.5 | 22.6 | 36.1 |
| 41 | Wetland | 20.8 | 80.0 | 137.0 | 8.37 | 14.2 | 24.6 | - | 5.3 |
| 42 | Stream | 23.5 | 115.1 | 221.6 | 9.09 | 19.2 | 21.5 | - | 8.2 |
| 43 | Stream | 22.8 | 59.1 | 232.6 | 7.87 | 14.2 | 24.8 | - | 28 |

*Water chemical variables were measured on a single point during the survey at the each study site.

다. 엽록소-a의 농도는 점개구리밥이 출현하지 않는 지역에서 주로 높은 경향을 보였다. 일반적으로, 엽록소-a는 영양염류 농도에 의존적이거나, 점개구리밥과 같은 수생식물은 타감물질을 생성하여 식물플랑크톤 등 엽록소-a를 낮출 수 있다(van Donk and van de Bund, 2002). 또한 점개구리밥 수표면 우점에 의한 빛의 차단은 엽록소-a 농도를 저하시키는 중요한 요인이다. 엽록소-a의 낮은 농도는 산소발생을 낮추고 이산화탄소가 증가를 유도하기 때문에 pH는 낮은 성향을 가진다.

3. 점개구리밥에 대한 서식생물상의 영향

각 조사지별로 수생식물의 풍부도는 동물플랑크톤 군집 밀도와 밀접하게 관련되는 것으로 나타났다(Fig. 3). 수생식물의 건중량이 60g 이상으로 풍부한 조사지(3, 8, 9, 14, 20, 34, 37, 40번)에서는 대부분 동물플랑크톤이 높은 밀도가 관찰되었다. 이들 조사지에서는 대부분 점개구리밥의 생물량 또한 높은 것으로 나타났다. 동물플랑크톤 군집 중 수생식물의 줄기나 뿌리에 부착된 종의 밀도는 대부분 점개구리밥의 생물량과 관련되었다.

점개구리밥 등 수생식물에 대한 동물플랑크톤 등의 생물군집간에 상호관계를 효율적으로 규명하기 위해 SOM 분석을 시행하였다. SOM 분석 결과, 6x5 구조에서 최적화되었으며, 총 3개의 클러스터로 구분되었다(Quantization error,

0.73; Topographic error, 0.01; $n=43$; Fig. 4). SOM 평면의 위쪽에 형성되어 있는 클러스터(Cluster)가 1이며, 아래쪽으로 왼쪽에 클러스터 2, 오른쪽이 클러스터 3이 각각 분포하였다(Fig. 4). 각 클러스터별 특징은(Table 3)에 설명되어 있다. 클러스터 1은 환경요인(수온, 용존산소 등)의 값이 높게 측정된 습지 및 하천들로 구성되어 있으며, 수생식물이나 동물플랑크톤 등의 밀도 및 종수는 낮았다(Fig. 5). 이 클러스터는 흐름 등 기타 교란의 지속적인 발생으로 수생식물의 성장과 발달이 어려워 생물상 천이가 거의 없는 습지 및 하천들로 구성된 것으로 보인다. 클러스터 2는 툴참새피 및 마름 등의 수생식물 생물량이 높은 습지 및 하천들로 구성되었으며, 동물플랑크톤 및 부착성 종의 밀도 또한 높았다. 일반적으로, 수생식물의 높은 풍부도는 복잡한 구조를 가진 서식처를 구성하기 때문에 동물플랑크톤과 같은 작은 크기의 동물에게 효율적인 서식 공간을 제공한다(Ramesh *et al.*, 1999; Meerhoff *et al.*, 2007; Thomaz and Cunha, 2010). 복잡하게 구성된 수생식물 점유 공간은 어류와 같은 포식자의 포식활동을 제한하고 동물플랑크톤 등 피식자의 발달과 개체군 성장에 기여할 수 있다(Warfe and Barmuta, 2004; Castro *et al.*, 2007). 본 연구에서 동물플랑크톤 등 군집 밀도 및 종수가 높게 나타난 습지 및 하천 또한 수생식물이 풍부한 것으로 조사되었다. 이 수생식물들은 동물플랑크톤 군집의 밀도 유지나 개체군 성장을 위한 적절한 서식처를 제공한 것으로 사료된다. 클러스터 3에서

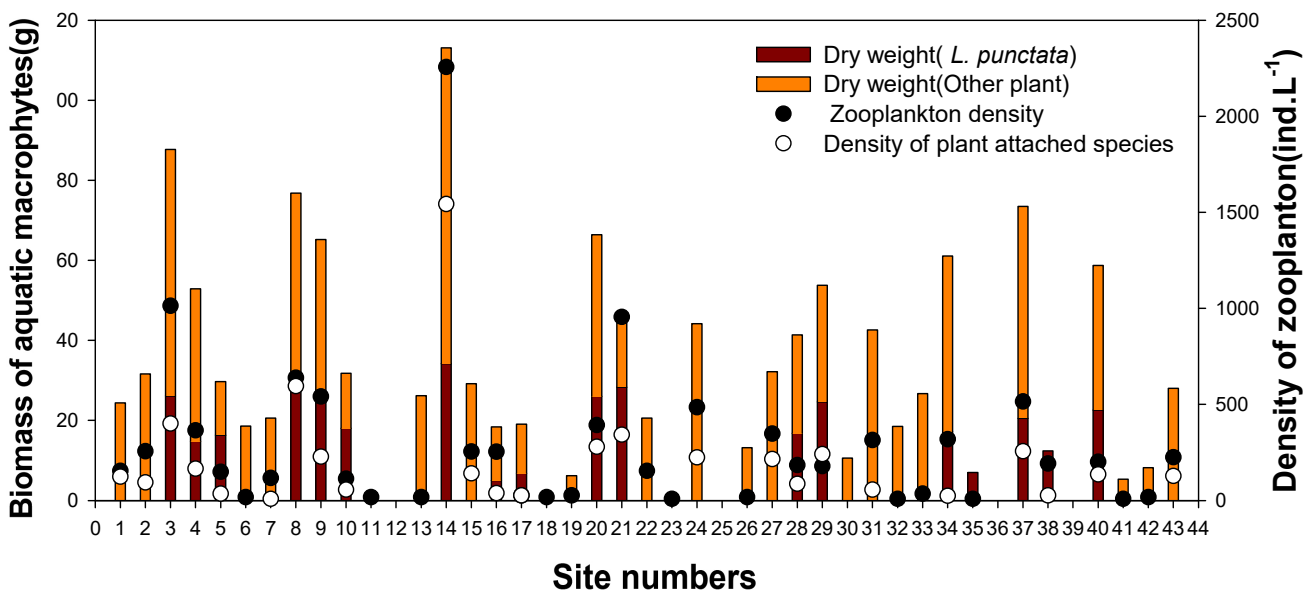


Figure 3. Dry weight of aquatic macrophytes and animal(zooplankton and plant-attached species) density at each study sites in Jeju Island.

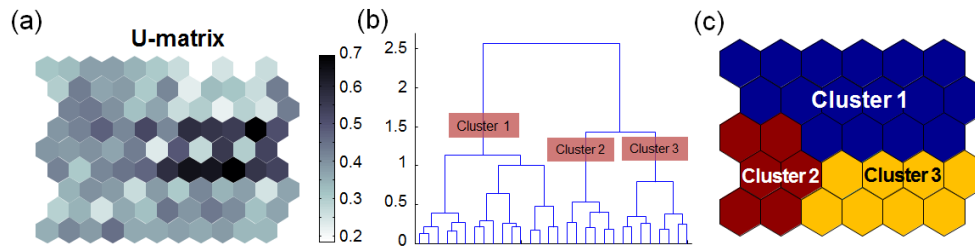


Figure 4. Clustering through data learning by the self-organizing map.(a): U-matrix, (b): hierarchical dendrogram, and (c): clustering result.

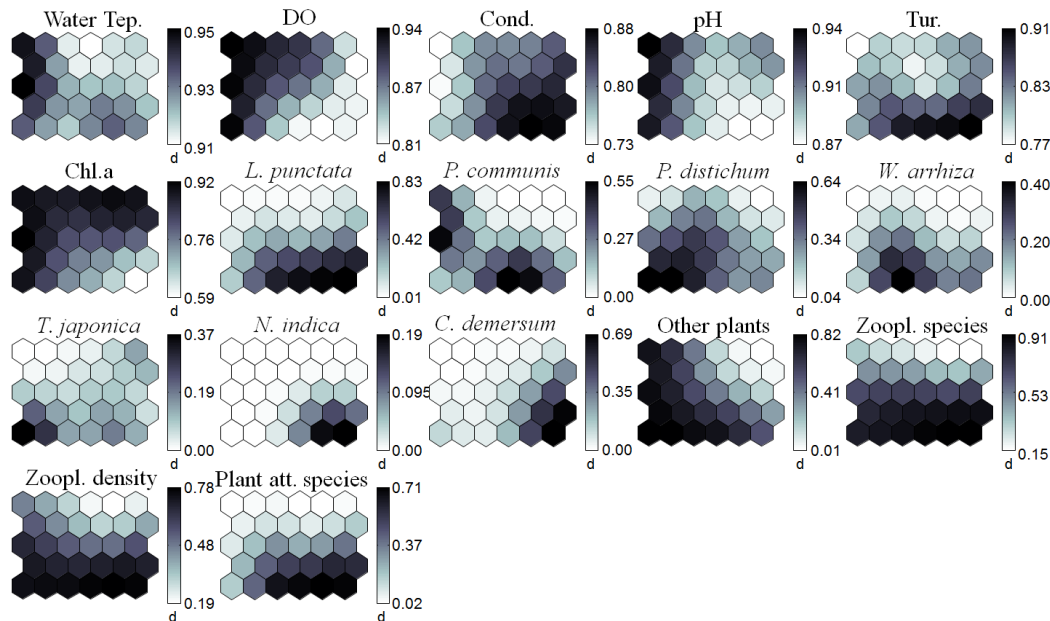


Figure 5. Component map of 6 environmental variables, 8 aquatic macrophytes, and 3 animal groups. Each band shows the individual number, transformed by natural logarithm. Water Temp., water temperature; DO, dissolved oxygen; Cond., conductivity; Tur., turbidity; Zoopl. Species, zooplankton species; Zoopl. density, Zooplankton density; Plant att. species, plant attached species.

Table 3. Characteristics of each cluster assumed based on the distribution patterns of input variables and number of study sites in each of clusters. Abbreviations for each input variable can be found in Table 1. WT, water temperature; DO, dissolved oxygen; Chl. a, Chlorophyll a.

| Clusters | Factors | | Cluster characteristics | Site numbers |
|-----------|--|--|---|--------------|
| | High factors | Low factors | | |
| Cluster 1 | WT, DO, pH, Chl. a, Other plants | <i>P. distichum</i> , <i>W. arrhiza</i> , <i>T. japonica</i> , <i>N. indica</i> , <i>P. communis</i> , Zoopl., density, Plant att. species | No influence of macrophytes and animal distribution on environmental condition | 22 |
| Cluster 2 | <i>P. distichum</i> , <i>T. japonica</i> , Other plants, Zoopl. density | Cond., Tur., <i>L. punctata</i> , <i>N. indica</i> , <i>P. communis</i> , Plant att. species | Positive relationship between aquatic plants(<i>P. distichum</i> and <i>T. japonica</i>) and zooplankton density and species number | 8 |
| Cluster 3 | Cond., Tur., <i>L. punctata</i> , <i>P. communis</i> , <i>T. japonica</i> , Zoopl. density, Plant att. species | WT, DO, pH, Chl. a, <i>P. distichum</i> , <i>W. arrhiza</i> , <i>T. japonica</i> , | Positive relationship between <i>W. arrhiza</i> and plant-attached micro-crustaceans | 13 |

는 점개구리밥의 생물량과 부착성 동물플랑크톤의 밀도가 높은 습지 및 하천으로 구성되었다. 부착성 동물플랑크톤은 점개구리밥의 줄기나 뿌리에서 채집된 것으로 점개구리밥의 생물량과 직접적으로 관련되어 있다. 제주도 지역 내 습지 및 하천은 독특한 수리수문 특성상(건천화 및 급격한 수위변화 등) 수생식물의 종다양성과 생물량이 내륙보다 성장할 수 있는 조건이 열악하기 때문에 상대적으로 교란에 강한 점개구리밥이 부착성 동물플랑크톤의 서식처로 활용되는 것으로 사료된다. 점개구리밥 외 다른 식물 또한 부착성 동물플랑크톤의 서식처로서 활용될 수 있지만, 상대적으로 생물량이 적다는 단점을 가진다. 특히, 부착성 동물플랑크톤은 점개구리밥의 생물량이 풍부한 습지나 하천에서 높은 밀도가 관찰되었다(Fig 6). 또한 이들 조사지에서는 점개구리밥의 생물량이 증가할수록 동물플랑크톤 및 부착성 미

소무척추동물 밀도 또한 증가하는 경향이 확인되었다(Fig. 7). 이것으로 볼 때 비록 내륙에서 개구리밥은 종류는 효율적인 서식처로서 인식되지 못하지만, 다른 수생식물이 부재한 상황에서 대체 서식처로 매우 중요성이 높다 할 수 있다. 제주도에 출현하는 부착성 동물플랑크톤이 대부분 소형 크기인 점을 감안할 때, 점개구리밥의 잎이나 뿌리 공간이 이들을 위한 효율적인 서식처를 제공하는 것으로 보인다.

본 연구의 결과, 점개구리밥 등 수생식물의 높은 생물량은 동물플랑크톤 군집의 중수와 밀도를 높게 유지할 수 있는 것으로 판단된다. 특히, 점개구리밥은 부착성 종의 서식처로 중요하게 활용된다. 제주도 지역은 수원이 일정하지 않아 강우에 매우 의존적이며, 이러한 탓에 하천 및 습지는 대부분 건천화되어 있는 특징을 가진다. 그래서 서식생물상이 단조롭고, 환경이 급격하게 변하는 특징을 가지고 있다.

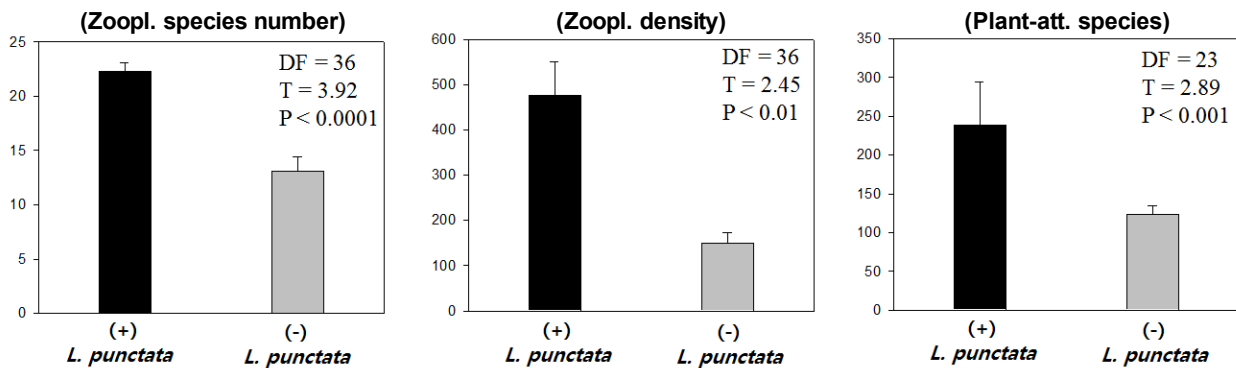


Figure 6. Zoopl.(zooplankton) species number and density, plant-att.(attached) species on presence and absence of *Landoltia punctata* in each study site.

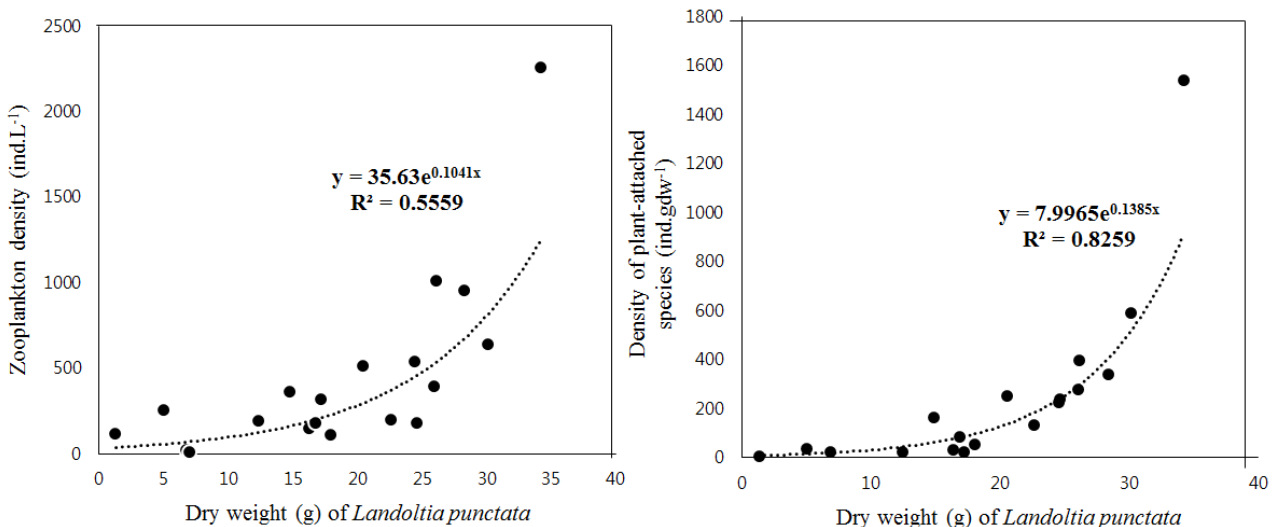


Figure 7. Regression analysis between animal groups(zooplankton and plant-attached zooplankton) and dry weight(g) of *Landoltia punctata*.

수생식물 또한 습지나 하천의 유지수량에 크게 의존적이지 않은 갈대나 털물참새피 등에 의해 우점하는 경향이 있으나, 서식처 구조나 단순하고 이질성이 적어 서식처로의 활용 가치는 적은 편이다(Kuczyńska-Kippen, 2007; Choi *et al.*, 2016). 일반적으로, 내륙습지에서는 갈대 등의 정수식물보다 어리연꽃이나 붕어마름, 나자스말 등의 식물이 수중에서 복잡한 형태를 가지기 때문에 동물플랑크톤을 위한 서식처가 풍부하지만, 제주도 내에서는 독특한 수리수문 특성 때문에 정수식물 외 수생식물이 부족하기 때문에 점개구리밥이 동물플랑크톤의 유일한 서식처로서 활용되는 것으로 판단된다. 그래서, 점개구리밥은 다른 수생식물이 부재한 상황에서 동물플랑크톤 등 미소동물들을 위한 서식처로서 중요하게 적용되는 것으로 보인다. 이는 동물플랑크톤의 유

지나 향후 개체군 성장 등에 영향을 줄 뿐만 아니라, 동물플랑크톤이 수생태 먹이망의 1차 소비자로서 중요한 위치에 있음을 감안할 때 무척추동물이나 어류 등의 고차소비자의 분포에 영향을 줄 것으로 판단된다.

4. 점개구리밥 점유 공간 내 유기물의 활용 현황

점개구리밥 점유공간의 유기물 활용 정도를 평가하기 위해 유기물과 서식동물상의 안정동위원소 분석을 시행한 결과, 각 지점과 시기별로 비슷한 관계가 산출되었다(Fig. 8). 점개구리밥의 점유 공간 내 유기물이 대부분 서식동물상의 주 먹이원으로 활용되는 것으로 나타났다. 점개구리밥이 점유하는 공간 내 탁도는 개방된 공간보다 더 높았으며(점유

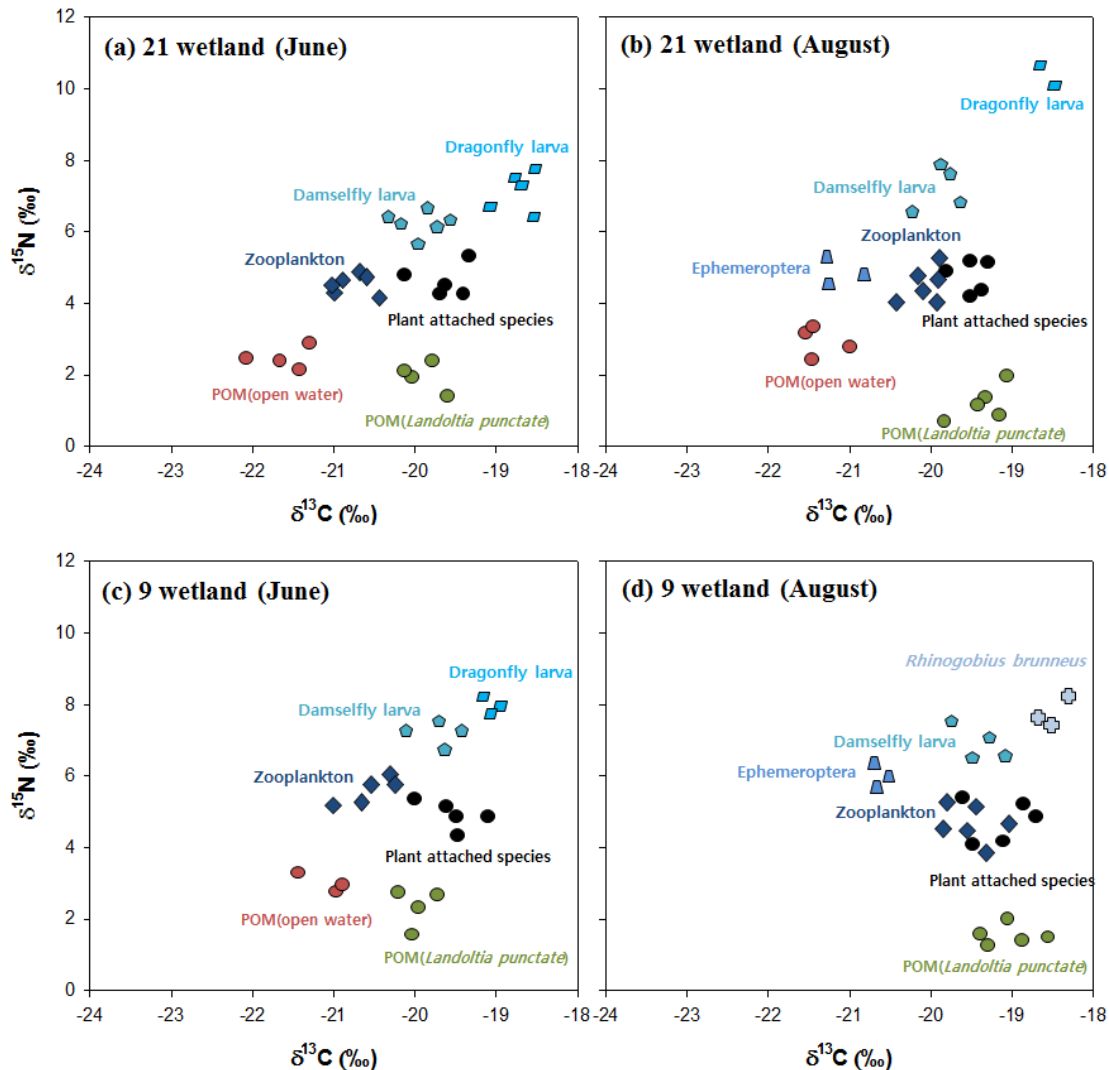


Figure 8. Carbon and nitrogen isotope plots of samples at 21 and 9 wetlands, in June and August. POM, particulate organic matter. POM, particular organic matter.

공간: 평균 32.4 NTU; 개방공간: 15.7 NTU), 이를 볼 때 점개구리밥 점유 공간 내의 유기물이 개방된 공간보다 더 높은 것으로 사료된다. 점개구리밥의 뿌리는 일반 개구리밥보다 2배 정도 더 길며, 조밀하게 분포하기 때문에 더 많은 유기물을 보유할 수 있다. 동물플랑크톤 중 부착성 종은 점개구리밥 점유 공간 내 유기물에 강하게 의존하는 것으로 나타났다. 소비자의 안정동위원소 비 값은 섭취하는 먹이원 비 값에 대해 영양단계 당 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 1% 이내, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 3% 정도 높아지는 동위원소 분별효과를 가지는 점을 감안하면(Lee *et al.*, 2002), 서식생물상의 먹이 소비 경향을 파악할 수 있다. 부착성 종의 소비 경향과 다르게, 동물플랑크톤 군집은 분석된 두 가지의 유기물 중 어느 하나에 대한 강한 의존도를 보이지 않았다. 동물플랑크톤 군집은 수중에서 부유하는 서식 특성상 개방공간 내 부유성 유기물에 대한 의존도가 더 높은 것이 일반적이지만, 출현종의 개체 크기가 작은 점 및 점개구리밥의 점유공간이 더 넓은 점 등을 감안해야 할 것으로 사료된다. 그러나 동물플랑크톤의 먹이 소비 경향은 두 먹이원의 분포 비율을 고려해야 할 것으로 보인다. 9번 습지의 경우, 조사시기에 개방공간의 비율이 매우 적은 상황에서 동물플랑크톤 군집은 점개구리밥 점유 공간 내 유기물에 더 의존적인 것을 확인할 수 있다. 습지 내 최상위 단계인 실잠자리나 잠자리 유충 또한 동물플랑크톤보다 부착성 종에 대한 기여도가 높은 것으로 나타났다. 이 또한 실잠자리나 잠자리 유충의 서식 특성을 볼 때, 주로 수생식물을 기질 표면을 활용하는 점을 감안하면, 개방공간보다 점개구리밥 점유공간을 더 서식처로서 활용할 것으로 판단되며, 먹이원 또한 서식 공간 내에서 활용할 것으로 보인다. 또한 부유성 동물플랑크톤보다 부착성 종의 밀도가 더 많은 것 또한 실잠자리나 잠자리 유충 등의 먹이 성향을 결정하는 중요한 척도가 될 것이다.

제주도 지역 내 습지 및 하천에서는 수리수문 특성상 건천화 된 곳이 많기 때문에 어류 등 생물상은 적으며, 주로 작은 생물이나 건천화에 적응된 개체 등이 주로 분포하고 있다. 또한 연중 수중에서 생활하는 수생식물의 생물량이 적고, 갈대나 털물참새피 등 상대적으로 단순한 구조의 식물이 주를 이루는 특징을 가진다. 이와 같은 감안하면, 점개구리밥의 출현과 우점은 수생식물의 생물량이 적은 시점에서 다양한 동물의 서식처로서 중요하게 활용될 것으로 사료된다. 점개구리밥의 습지 내 우점은 유기물을 포섭하고, 동물플랑크톤의 효율적인 서식처 및 먹이원의 제공하는 역할 때문이다. 본 연구에서, 점개구리밥 점유공간 내 유기물은 개방된 공간 내 유기물보다 제주도 지역 내 수생태 먹이망 구성에 중점적인 경로를 제공하는 것으로 분석되었다.

5. 점개구리밥 정착 및 확산 특성

점개구리밥은 제주도 전역의 다양한 서식지 유형에서 빈번하게 발견되는 것으로 보아, 이미 제주도 지역에 안정적으로 정착된 것으로 판단된다. 그러나 이들은 내륙에 위치한 습지 및 하천까지 분포는 확인되지 않고 있어 아직까지 제주도 지역 외 지역적 확산은 없는 것으로 사료되지만 추가적인 조사 필요한 실정이다. 점개구리밥은 제주도 지역 내 습지 및 하천의 고유의 독특한 환경 특성에 잘 적응하는 것으로 보인다. 이들은 오염, 건조, 교란 등 다양한 스트레스에 광범위한 적응력을 가지며, 계절 조사 결과 개체군 성장 또한 상대적으로 빠르다. 점개구리밥이 속한 개구리밥은 수생식물 중에서 가장 개체의 크기가 작으며, 잎과 뿌리만이 침수되어 있다. 그 중에서 점개구리밥이 속한 *Lemna*속은 뿌리가 상대적으로 길기 때문에 수분 흡수 등이 용이하여 습지의 급격한 수위 변화에도 잘 적응하는 것으로 사료된다. 제주도 지역이 수리수문 특성상 물이 적고 건천화되기 쉬움에도 불구하고, 점개구리밥은 43개 중 18개의 습지에서 관찰될 정도로 제주도 지역 내에서 빈번하게 분포하고 있다. 18개 습지 중 대부분은 물이 매우 부족하였지만, 점개구리밥의 건강 상태는 매우 양호하였다.

그러나 이들은 다른 식물과의 경쟁에 취약한 것으로 보인다. 점개구리밥의 출현이 확인된 습지 및 하천은 대부분 점개구리밥이 우점하였으며, 갈대나 털물참새피 등 정수식물이 주로 분포하는 지역이었다. 점개구리밥이 경쟁에 취약한 조건을 감안하면, 내륙 습지에서 이들의 성장 및 발달은 어려울 것으로 사료된다. 또한 내륙 습지 및 하천은 대부분 주변에 제방을 쌓아 연중 건조 현상이 빈번하지 않아 건조에 강한 점개구리밥의 특성 또한 장점으로 작용하기 어렵다. 따라서 제주도 지역에서의 수리수문 특성은 다른 수생식물이 발달하기 어려운 조건을 제공했기 때문에 상대적으로 경쟁에 취약한 점개구리밥이 분포할 수 있는 여건을 제공했을 것으로 사료된다.

6. 관리방안

점개구리밥은 제주도 지역의 수리수문 특성상 발생하는 다양한 교란에 대한 적응력이 강하며, 비교적 쉽게 성장 및 발달되는 특성으로 인해 이들의 발생을 완벽하게 억제하는 것은 쉽지 않을 것으로 사료된다. 점개구리밥은 가을에 모체에서 나온 작은 크기의 겨울눈 형태로 동면하는 전형적인 1년생 초본이며, 이러한 특성상 지속적인 물리적 제거가 이들의 발생을 크게 억제할 수 없을 것으로 판단된다. 그러나, 점개구리밥이 자생 식물이나 자연생태계에 대한 위해성은 보고된 바 없으며, 본 연구에서도 생태계 위해성 및 교란

피해가 크지 않은 것으로 조사되어 관리의 필요성이 크게 대두되지 않았다. 오히려, 제주도 지역 내 독특한 수리수문 때문에 수생식물의 현존량이 적으며 다양한 담수미소동물의 서식처가 부족한 것을 감안하면, 점개구리밥은 이들의 대체적인 서식처로서 활용될 수 있는 적당한 자원으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Arcifa, M.S., T.G. Northcote and O. Froehlich(1986) Fish-zooplankton interactions and their effects on water quality of a tropical Brazilian reservoir. *Hydrobiologia* 139(1): 49-58.
- Castro, B.B., S.M. Marques and F. Goncalves(2007) Habitat selection and diel distribution of the crustacean zooplankton from a shallow Mediterranean lake during the turbid and clear water phases. *Freshwater Biology* 52: 421-433.
- Cazzanelli, M., T.P. Warming and K.S. Christoffersen(2008) Emergent and floating-leaved macrophytes as refuge for zooplankton in a eutrophic temperate lake without submerged vegetation. *Hydrobiologia* 605: 113-122.
- Chen, Q., Y. Jin, G. Zhang, Y. Fang, Y. Xiao and H. Zhao(2012) Improving production of bioethanol from duckweed(*Landoltia punctata*) by pectinase pretreatment. *Energies* 5: 3019-3032.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, S.K. Kim and G.J. Joo(2014a) Sustainment of epiphytic microinvertebrate assemblage in relation with different aquatic plant microhabitats in freshwater wetlands(South Korea). *Journal of Limnology* 73: 11-16.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, S.K. Kim and G.J. Joo(2014b) Effect of removal of free-floating macrophytes on zooplankton habitat in shallow wetland. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 414: 11.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, S.K. Kim and G.J. Joo(2016) Impact of habitat heterogeneity on the biodiversity and density of the zooplankton community in shallow wetlands(Upo wetlands, South Korea). *Oceanological and Hydrobiological Studies* 45: 485-492.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, S.W. Hong, K.S. Jeong, G.H. La and G.J. Joo(2013) Zooplankton community distribution and food web structure in small reservoirs: Influence of land uses around reservoirs and littoral aquatic plant on zooplankton. *Korean Journal of Ecology and Environment* 46(3): 332-342. (in Korean with English abstract)
- Christie, H., K.M. Norderhaug and S. Fredriksen(2009) Macrophytes as habitat for fauna. *Marine Ecology Progress Series* 396: 221-234.
- Einsle, U.(1993) *Crustacea: Copepoda, Calanoida und Cyclopoida* (Vol. 4). Gustav Fischer Verlag.
- Engelhardt, K.A. and M.E. Ritchie(2001). Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services. *Nature* 411: 687.
- Ervin, G.N. and R.G. Wetzel(2002) Influence of a dominant macrophyte, *Juncus effusus*, on wetland plant species richness, diversity, and community composition. *Oecologia*: 130: 626-636.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen, M. Søndergaard, T. Lauridsen, L.J. Pedersen and L. Jensen(1997) Top-down control in freshwater lakes: the role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth. *Hydrobiologia* 342/343: 151-164.
- Jung, W.Y. and S.K. Yang(2008) Application of SWAT model on rivers in Jeju Island. *Journal of the Environmental Science* 17(9): 1039-1052. (in Korean with English abstract)
- Kohonen, T., J. Hynninen, J. Kangas and J. Laaksonen(1996) Sompak: The self-organizing map program package. Report A31, Helsinki University of Technology, Laboratory of Computer and Information Science.
- Koschnick, T.J., W.T. Haller and L. Glasgow(2006). Documentation of landoltia(*Landoltia punctata*) resistance to diquat. *Weed science* 54: 615-619.
- Koste, W.(1978) Rotatoria, die Radertiere Mitteleuropas: Überordnung Monogononta: ein Bestimmungswerk(German Edition). 2nd ed. Gebruder Borntraeger, Stuttgart.
- Kuczyńska-Kippen, N.(2007) Habitat choice in rotifera communities of three shallow lakes: impact of macrophyte substratum and season. *Hydrobiologia* 593(1): 27-37.
- Kuczyńska-Kippen, N.M. and B. Nagengast(2006) The influence of the spatial structure of hydromacrophytes and differentiating habitat on the structure of rotifer and cladoceran communities. *Hydrobiologia* 559: 203-212.
- Lauridsen, T., L.J. Pedersen, E. Jeppesen and M. Sønergaard(1996) The importance of macrophyte bed size for cladoceran composition and horizontal migration in a shallow lake. *Journal of Plankton Research* 18(12): 2283-2294.
- Lauridsen, T.L. and D.M. Lodge(1996) Avoidance by *Daphnia magna* of fish and macrophytes: chemical cues and predator-mediated use of macrophyte habitat. *Limnology and Oceanography* 41: 794-798.
- Lee, J.Y., T. Yoshioks and T. Hanazoto(2002) Faunal trophic interaction in an oligotrophic-dystrophic lake(Shirakoma-ike, Japan). *Limnology* 3: 151-158.
- Les, D.H. and D.J. Crawford(1999) *Landoltia*(Lemnaceae), a new genus of duckweeds. *Novon* 530-533.
- Manatunge, J., T. Aseada and T. Priyadarshana(2000) The influence of structural complexity on fish-zooplankton interactions: A study using artificial submerged macrophytes. *Environmental Biology of Fishes* 58: 425-438.
- Meerhoff, M., C. Iglesias, F.T. De Mello, J.M. Clemente, E. Jensen, T.L. Lauridsen and E. Jeppesen(2007) Effects of habitat com-

- plexity on community structure and predator avoidance behaviour of littoral zooplankton in temperate versus subtropical shallow lakes. *Freshwater Biology* 52: 1009-1021.
- Meerhoff, M., N. Mazzeo, B. Moss and L. Rodríguez-Gallego (2003) The structuring role of free-floating versus submerged plants in a subtropical shallow lake. *Aquatic Ecology* 37: 377-391.
- Milstein, A., B. Hopher and B. Teltsch(1985) Principal component analysis of interactions between fish species and the ecological conditions in fish ponds: II. Zooplankton. *Aquaculture Research* 16: 319-330.
- Mizuno, T. and E. Takahashi(1999) An illustrated guide to freshwater zooplankton in japan. Tokai University Press.
- Muyllaert, K., C. Pérez-Martínez, P. Sánchez-Castillo, T.L. Lauridsen, M. Vanderstukken, S.A.J. Declerck, K. Van der Gucht, J.M. Conde-Porcuna, E. Jeppesen, L. De Meester and W. Vyverman (2010) Influence of nutrients, submerged macrophytes and zooplankton grazing on phytoplankton biomass and diversity along a latitudinal gradient in Europe. *Hydrobiologia* 653: 79-90.
- NIER(National Institute of Environmental Research)(2012) Invasive Alien Species in Korea. National Institute of Environmental Research, Incheon.
- Ramesh, M.R., K.M. Shankar, C.V. Mohan and T.J. Varghese(1999) Comparison of three plant substrates for enhancing carp growth through bacterial biofilm. *Aquacultural Engineering* 19: 119-131.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity(2010) Global Biodiversity Outlook 3. Montréal, Canada.
- Smirnov, N.N. and B.V. Timms(1983) A revision of the Australian Cladocera(Crustacea). Australian Museum, Sydney, Australia.
- Thomaz, S.M. and E.R.D. Cunha(2010). The role of macrophytes in habitat structuring in aquatic ecosystems: methods of measurement, causes and consequences on animal assemblages' composition and biodiversity. *Acta Limnologica Brasiliensia* 22: 218-236.
- van Donk E. and W.J. van de Bund(2002) Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto-and zooplankton communities: allelopathy versus other mechanisms. *Aquatic Botany* 72: 261-274.
- Warfe, D.M. and L.A. Barmuta(2004) Habitat structural complexity mediates the foraging success of multiple predator species. *Oecologia* 141: 171-178.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens(2000) *Limnological Analyses*. Springer-Verlag, New York.
- Zaret, T.M. and J.S. Suffern(1976) Vertical migration in zooplankton as a predator avoidance mechanism. *Limnology and Oceanography* 21(6): 804-813.