

## 물리적인 교란(여름 강우)에 대한 동물플랑크톤 서식처로서 수생식물의 중요성

최종윤\* · 김성기<sup>1</sup> · 김동환 · 주기재<sup>2</sup>

국립생태원 생태평가연구소, <sup>1</sup>국립환경과학원 낙동강물환경연구소, <sup>2</sup>부산대학교 생명과학과

**Role of Aquatic Macrophytes as Refuge of Zooplankton on Physical Distribution (Summer Rainfall) in Shallow Wetlands.** Choi, Jong-Yun\* (0000-0001-6052-9473), Seong-Ki Kim<sup>1</sup> (0000-0001-6052-9473), Dong-Hwan Kim (0000-0003-2339-4420) and Gea-Jae Joo<sup>2</sup> (0000-0001-6052-9473) (National Institute of Ecology, Seo-Cheon Gun, Chungcheongnam-do 33657, Republic of Korea; <sup>1</sup>Nakdong River Environment Research Center, Goryeong-Gun, Gyeongsangbuk-do 40103, Republic of Korea; <sup>2</sup>Department of Biological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea)

**Abstract** In order to evaluate the role of macrophytes as refuge of zooplankton on physical distribution (i.e. summer rainfall), we investigated the environmental factors, macrophytes, and zooplankton in waterside zones (macrophytes zones) and open water zones of 17 wetlands from May and August, 2011. In this study, a total of 51 zooplankton species were identified, and *Polyarthra* sp. and *Diaphanosoma brachyurum* were found to be the most dominant species. Waterside area of each wetland were occupied by a total of 10 macrophyte species, species composition and biomass (dry weight) were different in the survey sites. Zooplankton was more abundant in waterside zone than open water zones lacking macrophytes (One-way ANOVA,  $df=2$ ,  $F=27.1$ ,  $P<0.05$ ), in particular, waterside zone of 1, 8, 9, 10, and 11 wetland were supported by high zooplankton density after summer rainfall. This wetlands were developed by various macrophyte species than other wetland, and submerged plant commonly presented. Waterside zones with various macrophyte species provides complexity to the habitat structure, should be utilized as refuge to avoid disturbance such as summer rainfall. The results indicate that macrophytes are the key components to enhance bio-diversity include zooplankton, and the inclusion of diverse plant species in wetland construction or restoration schemes will result in ecologically healthy food webs.

**Key words:** summer rainfall, habitat heterogeneity, submerged plant, biodiversity

### 서 론

강우는 담수생태계 내 주요 교란요소로서, 다양한 생물들의 시간적 및 공간적 분포에 영향을 미친다(Alexander

and Whlaen, 1998; Hamilton *et al.*, 2001). 특히, 우리나라를 포함한 동아시아 지역은 몬순기후의 영향으로 여름철에 강우가 집중되며, 수서 생물의 급격한 감소를 야기한다. 하천이나 강과 같이 흐름을 가진 담수생태계의 경우 강우 발생 시 급격한 유량 증가와 함께 유속 및 탁도의 증가가 관찰되며(Coulliette and Noble, 2008), 습지나 연못 등 정수생태계 또한 수위상승 및 물의 흐름이 감지된다(Rosenberry and Winter, 1997). 여름철에 집중된 강우는

Manuscript received 29 September 2016, revised 8 November 2016, revision accepted 10 November 2016  
\* Corresponding author: Tel: +82-41-950-5351, Fax: +82-41-950-5954, E-mail: jyc311@nie.re.kr

또한 용존산소나 pH와 같은 이화학적 요인의 변화를 발생시키며, 유거수(run-off)의 지속적인 유입으로 인해 총인, 총질소와 같은 영양염류 또한 높아지는 것으로 알려져 있다(e.g., Victor and Victor, 1997; Angeler *et al.*, 2000; Quintana, 2002). 따라서 여름 강우는 직접적 또는 간접적(이화학적 요인 및 영양염류 변화)으로 수서 생물의 계절 천이에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

담수생태계 내에 서식하는 다양한 수서 생물 중, 동물플랑크톤(Zooplankton)은 작은 크기와 낮은 유영 능력을 가진 탓에 강우와 같은 물리적인 교란에 쉽게 영향을 받는 분류군이다(Kim *et al.*, 2012). Osore *et al.* (1997)와 Campbell (2002)은 수생태계에서 강우 발생은 동물플랑크톤 군집의 감소를 야기할 수 있다고 보고하였다. 특히, 강이나 하천에서 발생하는 흐름은 여름철 강우 발생에 따라 급격하게 증가되기 때문에(Jeong *et al.*, 2007) 동물플랑크톤 분포에 강력한 영향을 미친다. 강우의 연도별 양과 세기에 따라 가을철 풍부도가 달라진다고 보고되기도 하였다(Choi *et al.*, 2011). 이와 대조적으로 습지나 연못에서 서식하는 동물플랑크톤은 강우 발생에도 하천과 같이 풍부도의 급격한 감소를 보이지 않는다. 하천 및 강과 다르게, 습지나 연못에서는 흐름이 거의 없기 때문에 강우 발생시 수표면에 물리적인 교란이 집중된다. 또한 바람 등에 의해 수체의 흔들림이나 강우량의 증가로 급격한 수위상승을 야기할 수 있다. 그러나 습지의 수표면에서는 대부분 수생식물이 빈번하게 우점하기 때문에 강우에 대한 직접적인 효과가 감소되기도 한다. 특히 부착 성향을 가진 동물플랑크톤 종(예, *Alona*, *Chydorus*, *Pleuroxus*)의 경우, 수생식물의 잎이나 줄기 표면에 부착함으로써 수위 상승이나 수체의 흔들림에 대해 저항할 수 있기 때문에 수생식물이 풍부한 습지나 연못과 같은 생태계에서 높은 풍부도를 가질 수 있다(Choi *et al.*, 2015). 그래서 일반적으로, 습지나 연못과 같은 정수생태계에서는 동물플랑크톤의 풍부도가 높고 생물종이 다양하다.

본 연구에서는 습지의 수변에 발달된 식생대가 강우 발생에 대한 동물플랑크톤의 피난처로서 종다양성과 밀도 유지에 미치는 영향을 조사하였다. 우리나라에서는 여름철에 강우가 집중되며 다양한 생물 군집(특히 플랑크톤)의 계절 천이에 주요 교란 요인으로 작용한다는 점을 감안할 때 수생식물의 피난처 효과에 대한 연구는 여름 이후(주로 가을) 생물의 종다양성과 분포 파악에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 수생식물의 종별 특성과 풍부도가 동물플랑크톤에게 미치는 영향에 대한 연구는 주로 어류 포식에 대한 피난처 효과를 중심으로 수행되었지만(Lauridsen and Lodge, 1996; Lodge, 2001; Sass *et al.*,

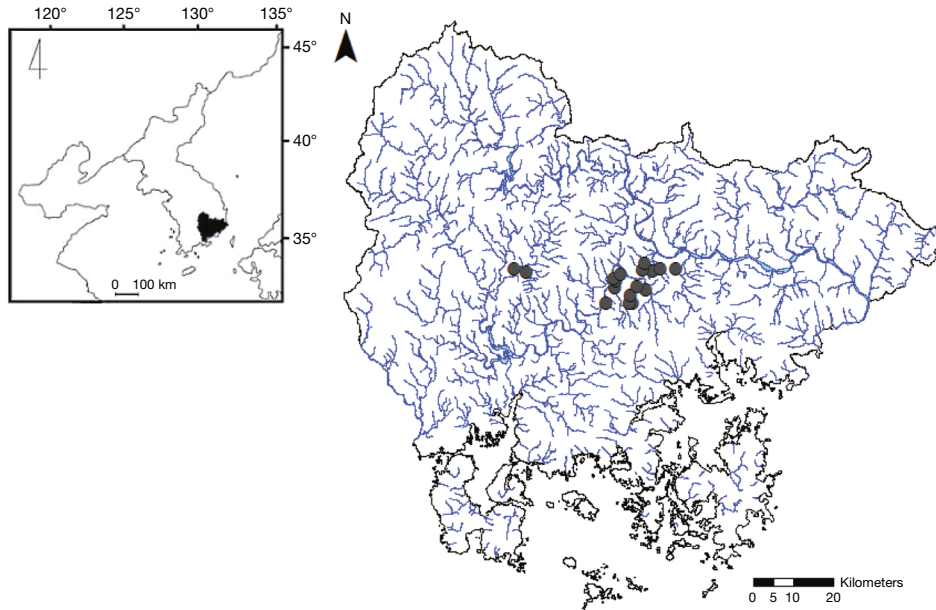
2006), 최근 수생식물의 잎이나 줄기 표면에 부착하는 종들의 서식처로 활용될 수 있음을 연구한 결과가 발표되는 등 수생식물이 생물다양성에 미치는 효과에 대한 다양한 연구가 진행되면서 중요성이 높아지고 있다(Van Donk and van de Bund, 2002; Choi *et al.*, 2014). Choi *et al.* (2015)는 이와 비슷하게 우포늪에서 장기간 동안(7년) 연도별 여름 강우가 동물플랑크톤 종조성과 밀도에 미치는 영향을 연구하였지만, 우포늪의 우점 수생식물만을 대상으로 했다는 한계를 가진다. 강우량이라는 교란 요인에 대한 수생식물의 종별 특성이나 공간적 구조 등이 가지는 피난처 효과를 다양한 환경에서 분석할 필요성이 있다. 낙동강 유역은 빈번한 범람과 지질학적 영향으로 토양 내 배수(물의 침투력)가 불량한 탓에 과거부터 다양한 형태의 습지가 존재하고 있으며, 주변 농경지로부터 유입된 풍부한 영양염류가 다양한 수생식물 종의 성장을 돕기 때문에 본 연구 주제를 조사하기에 적합한 지리적 특징을 가진다. 본 연구 결과는 국내외로 다양하게 제시되었던 ‘수생식물의 역할’ 규명에서 생물 간 상호작용뿐만이 아닌 물리적인 교란 요인(강우량)에 대한 영향을 분석하여 추가적인 정보를 제공하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사 지점 현황

경상남도는 한반도의 동남쪽에 위치하며 대부분이 평야 지대로서 빈번한 범람과 토양 배수가 좋지 않아 다른 지역보다 많은 물 웅덩이(습지)가 분포하고 있다. 대부분의 습지는 낙동강 및 주요 지천을 중심으로 위치하며, 특히 남강과 합류되는 지점에 집중된다(Son and Jeon, 2003). 습지 주변은 대부분 농경지로 구성되어 있으며, 지속적으로 영양염류가 유입되는 탓에 습지에서는 수생식물이 성장하기 적당한 조건을 가진다. 이 지역에 위치한 습지에서는 갈대(*Phragmites communis* Trin.), 털물참새피(*Picris hieracioides* L.), 생이가래(*Salvinia natans* L. All), 마름(*Trapa japonica* Flerow), 붕어마름(*Ceratophyllum demersum* L.) 등과 같은 수생식물이 빈번한 출현을 보인다(Choi *et al.*, 2014).

기존문헌을 통해 경상남도에는 164개의 정수역(습지, 저수지, 연못 등)이 위치하고 있는 것으로 파악되었으나(Choi *et al.*, 2014a), 그중에서 수변식생대와 개방수면이 뚜렷하게 구분된 습지는 100개 이상이며, 수변부 수심은 약 0.5~0.8 m로 얕지만, 저수지의 중앙부분은 7~8 m 정도의 깊은 수심으로 분명한 공간적 차이가 있다. 이러한 탓에 수변부에서는 수생식물이 발달하기 쉽지만, 개방수역에서는 거의



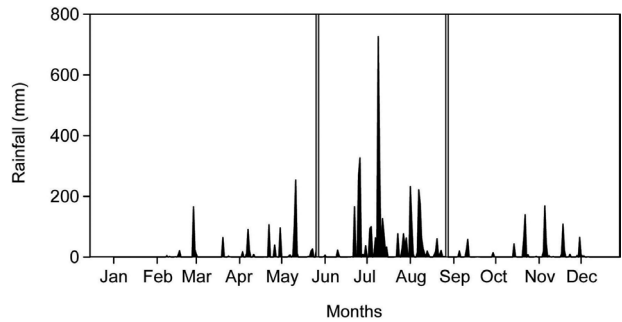
**Fig. 1.** Map of the study sites in south-eastern part of South Korea. The study sites are indicated as solid circles (●). The small map in the left side indicates the Korean Peninsula.

관찰되지 않는 특징을 가진다. 본 연구의 목적을 수행하기 위해 수변식생대를 구성하는 수생식물의 종류 및 구조를 기반으로 17개의 습지를 선정하였다(Fig. 1).

강우량에 대한 동물플랑크톤의 영향을 살펴보기 위해 조사지역의 일별 강우량을 분석하였다(Fig. 2). 본 연구에서는 조사된 시기(2011년)의 일별 강우량 패턴을 파악하였으며, 이에 대한 정보는 기상청(<http://www.kma.go.kr>)의 자료를 활용하였다. 창녕은 강우량 측정소가 없으므로 인근에 함안에서 측정한 강우량을 분석에 활용하였다. 수생식물과 동물플랑크톤 조사를 수행하기 앞서 기상청의 강우량 정보를 참고하여, 여름 집중 강우 전에 강우가 거의 없이 안정되어 있는 5월 말에 1차 조사를 수행하였으며, 여름 강우 후(8월 말) 2차 조사를 수행하였다.

## 2. 환경 요인 측정 및 동물플랑크톤 채집

환경 요인의 측정 및 플랑크톤과 수생식물 조사는 각 습지의 수변식생대와 개방수역에서 진행되었다. 본 연구의 목적인 강우량에 대한 영향을 살펴보기 위해 각 습지에서의 조사는 여름 강우 시기 전(5월 말)과 후(8월 말)로 비교하여 수행하였다. 환경 요인 중 수심, 수온, 용존산소, 전기전도도, pH 등은 현장에서 측정하였으며, 엽록소 a(Chlorophyll a)는 원수 취수 후 실험실에서 Wetzel and Likens (2000)의 방법에 준하여 분석하였다. 수심은 수심 측정기를 사용하여 측정하되, 강우 전후 동일한 지점에서 측정을



**Fig. 2.** Monthly pattern of rainfall during the study period (2011). Grey bars indicated sampling time before and after rainfall occurrence.

위해 1차 조사가 수행된 지점에 PVC 플라스틱 바로 표시하였다. 수온과 용존산소는 DO meter를 이용하여 측정하였으며(YSI DO Meter; Model 58), pH와 전기전도도는 각각 pH 측정기(Orion pH Meter; Model 58)와 전기전도도 측정기(Fisher Conductivity meter; Model 152)를 이용하여 측정되었다. 탁도는 각 습지에서 원수 100 mL를 채수한 후, 실험실로 운반하여 탁도측정기(Model 100B)를 이용하여 측정되었다.

동물플랑크톤의 채집을 위해 각 조사지점에서 원수 10L를 채수하였으며, 이를 68  $\mu$ m 망목의 네트에 여과하여 70 mL로 농축한 후 포르말린 용액으로 고정하였다. 특히 수변부의 동물플랑크톤 채집 시 수생식물에 부착된 종의 채

집을 위해 수생식물과 함께 원수를 채수한 후 채수된 원수 안에 털어줌으로써, 부유 및 부착 군집이 함께 채집될 수 있게 하였다. 고정된 동물플랑크톤 시료는 현미경을 이용하여 종 또는 속 수준까지 구분한 후 리터(L) 당 개체수로 환산하였다(Mizuno and Takahashi, 1999). 산출된 동물플랑크톤 종 정보는 밀도와 종 현황으로 구분하였으며, 생활사 형태에 따라 부유성과 부착 종으로 구분하여 분석하였다.

동물플랑크톤의 채집 후 각 습지에서 수생식물의 생체량을 측정하기 위해 수변부에서 0.5×0.5(m) 방형구를 이용하여 방형구 안에 수생식물을 모두 채집하였다. 수생식물의 채집 시 꽃이나 잎 등 물 밖에 있는 부분이나 저질 속에 있는 뿌리 등의 부분은 가위로 잘라 제거하고, 오직 물 속에 있는 부분만 채집하여 생체량 분석에 활용하였다. 채집된 수생식물은 60°C에서 48시간 동안 건조시킨 후 건조량(Gram dry weight)을 산출하여 습지별로 비교하였다.

3. 자료 분석

동물플랑크톤의 밀도 관점에서 ‘여름 강우의 영향’과 ‘수생식물의 서식처로서의 역할’을 분석하기 위해 One-Way ANOVA를 활용하여 통계분석을 수행하였다. 또한 수생식물의 종류 및 생체량에 따라 여름 강우 전과 후의 동물플랑크톤 밀도의 영향을 면밀히 분석하기 위해 각 습지의 수변식생대에서 수생식물의 생활사(정수식물, 부유식물, 부엽식물, 침수식물)에 따라 동물플랑크톤 밀도를 비교 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 환경 요인 분석

조사기간 동안, 각 습지에서 수변부와 개방수역 간에 측정된 환경요인은 몇 항목을 제외하고 차이가 미비했으나, 강우 전과 후 간에 상이한 값 차이를 보였다(Fig. 2, Table 1과 2). 수온은 5월과 8월에 각각 20.8~26.8°C와 26.1~30.8°C의 범위로 측정되었으며, 봄보다 여름에 더 높은 값을 나타냈다. 그러나 수변부와 개방수역 간에 차이는 매우 미미하였다. 용존산소 포화도는 대부분의 습지에서 5월(23.3~210.6%)에 측정된 값보다 8월(24.5~92.3%)에 더 낮은 값이 관찰되었으며, 두 번의 시기 모두 수변부보다 개방수역에서 측정된 값이 더 높았다. 일반적으로 수표면에서 수생식물의 높은 피도는 대기 중의 산소가 물 안으로 유입되는 것을 차단하기 때문에, 물 안으로 유입되는 용존산소의 농도를 감소시킬 수 있다. 더욱이 저층에서 발생하는 분해 작용에 상당히 많은 양의 산소가 소모되는 것 또한 습지에서의 낮은 산소 농도에 크게 기여한다(Brinson et al., 1981). 또한 엽록소 a는 수변부보다 개방수역에서 더 높은 농도를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 엽록소 a가 산소 증가에 관여한다는 점을 감안한다면 개방수역과 수변부 간에 용존산소의 농도 차이에 기여하는 것을 알 수 있다. 전기전도도는 5월에 91~627 μS cm<sup>-1</sup>의 범위로 다소 높았으며, 8월에는 24.5~291.3 μS cm<sup>-1</sup>의 범위로 상대적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 이것은 강우로 인한 물의 양의

Table 1. Environmental factors at study sites before rainfall occurrence (May).

Sites	Vegetated zones							Open water zones						
	WD	WT	DO	Cond.	pH	Tur.	Chl. a	WD	WT	DO	Cond.	pH	Tur.	Chl. a
1	25	25.1	93.1	120	8.4	6.0	14.2	152	25.8	136.9	121	8.5	8.9	21.8
2	26	25.8	65.2	209	7.2	1.9	6.5	138	26.3	87.9	210	7.6	1.8	17.5
3	34	26.4	86.4	546	7.7	7.2	18.7	141	26.8	131.1	549	7.8	4.1	34.6
4	37	24.1	23.3	387	7.0	10.3	25.6	126	24.2	111.5	423	7.4	8.4	27.1
5	34	26.2	34.6	306	6.8	6.8	14.8	146	26.8	74.4	323	7.0	6.2	18.3
6	28	23.2	87.2	149	7.7	3.9	20.5	101	24.1	96.7	147	8.3	2.4	25.6
7	43	23.0	89	268	8.1	2.1	21.8	129	23.6	86.5	268	8.4	1.7	16.3
8	35	24.4	103.9	234	8.2	2.8	16.2	132	25.6	118.6	232	8.5	1.9	21.6
9	30	20.8	89.5	217	8.3	1.7	12.5	156	21.4	132.5	220	8.5	2.9	25.6
10	34	24.4	84.8	342	7.3	47.3	16.2	137	25.1	100	342	7.6	36.5	34.3
11	28	25.5	95.7	634	7.1	3.1	8.3	129	25.6	94.4	627	7.6	3.0	15.3
12	26	25.8	68.7	147	7.2	7.9	16.4	151	26.2	85.6	151	7.7	7.2	21.3
13	37	27.9	43.8	354	7.3	7.3	12.6	137	28.2	139.1	355	8.2	7.3	20.6
14	29	21.6	75.3	91	7.1	5.6	23.1	132	22.5	84.3	94	7.2	3.3	41.6
15	30	25.6	74.3	210	7.3	4.5	7.5	148	26.2	86.4	208	7.4	4.0	22.5
16	21	23.3	82.3	144	8.1	6.2	18.4	140	23.8	92.2	142	8.4	1.7	27.8
17	32	27.0	188.7	243	9.4	25.3	15.9	154	26.7	210.6	244	9.6	16.5	30.9

WD, water depth (cm), WT, water temperature (°C); DO, %Saturation of dissolved Oxygen; Cond., Conductivity (μS/cm); Tur., Turbidity (NTU); Chl. a, chlorophyll a concentration (μg/L).

**Table 2.** Environmental factors at study sites after rainfall occurrence (August).

Sites	Vegetated zones							Open water zones						
	WD	WT	DO	Cond.	pH	Tur.	Chl. a	WD	WT	DO	Cond.	pH	Tur.	Chl. a
1	57	30.0	31.0	73.4	6.7	6.0	2.5	176	29.5	30.6	74.4	6.6	5.8	2.9
2	39	29.5	24.5	152.5	6.7	25.5	6.3	179	29.6	25.0	148.0	6.6	26.2	6.3
3	45	29.0	31.8	141.3	6.7	18.1	3.2	195	29.3	32.2	140.7	6.7	18.7	3.9
4	47	31.4	52.7	343.6	7.9	6.4	14.3	184	30.6	53.6	353.0	8.0	6.6	14.4
5	57	29.1	41.8	110.5	6.9	6.3	4.3	168	28.7	42.5	118.5	6.6	6.1	4.4
6	61	30.6	38.1	48.5	7.6	8.8	8.2	137	29.6	37.1	47.9	7.4	8.5	8.2
7	62	29.7	55.8	181.2	8.8	11.7	4.8	185	29.6	56.2	180.8	9.0	11.7	4.9
8	53	30.2	46.1	173.3	9.1	5.1	6.2	164	30.1	48.5	175.4	9.1	5.7	6.3
9	60	29.8	52.3	127.4	7.3	14.1	10.7	159	29.7	53.7	128.9	7.8	14.3	10.5
10	57	30.0	40.7	207.2	7.2	10.5	13.8	186	29.5	41.0	210.6	7.2	10.9	13.4
11	53	29.8	25.1	247.3	7.0	13.2	5.8	187	30.3	25.4	245.7	7.0	13.5	5.7
12	60	30.1	69.3	99.6	8.9	11.8	8.6	179	30.2	70.8	103.2	8.7	11.3	8.4
13	53	30.7	51.8	277.6	7.9	15.9	7.3	186	30.7	52.3	291.3	8.0	16.1	7.5
14	48	31.0	40.2	76.0	7.5	12.3	7.0	167	30.8	39.9	75.8	7.5	12.6	7.1
15	52	30.1	55.8	82.3	7.0	14.6	7.6	172	29.8	56.6	155.4	7.1	15.0	7.9
16	52	33.1	40.1	109.9	8.7	5.9	5.4	184	32.7	39.5	108.9	8.7	6.0	5.5
17	57	31.1	39.8	245.9	7.5	2.9	11.5	192	31.0	40.4	255.4	7.5	3.2	11.7

WD, water depth (cm), WT, water temperature (°C); DO, %Saturation of dissolved Oxygen; Cond., Conductivity (μS/cm); Tur., Turbidity (NTU); Chl. a, chlorophyll a concentration (μg/L).

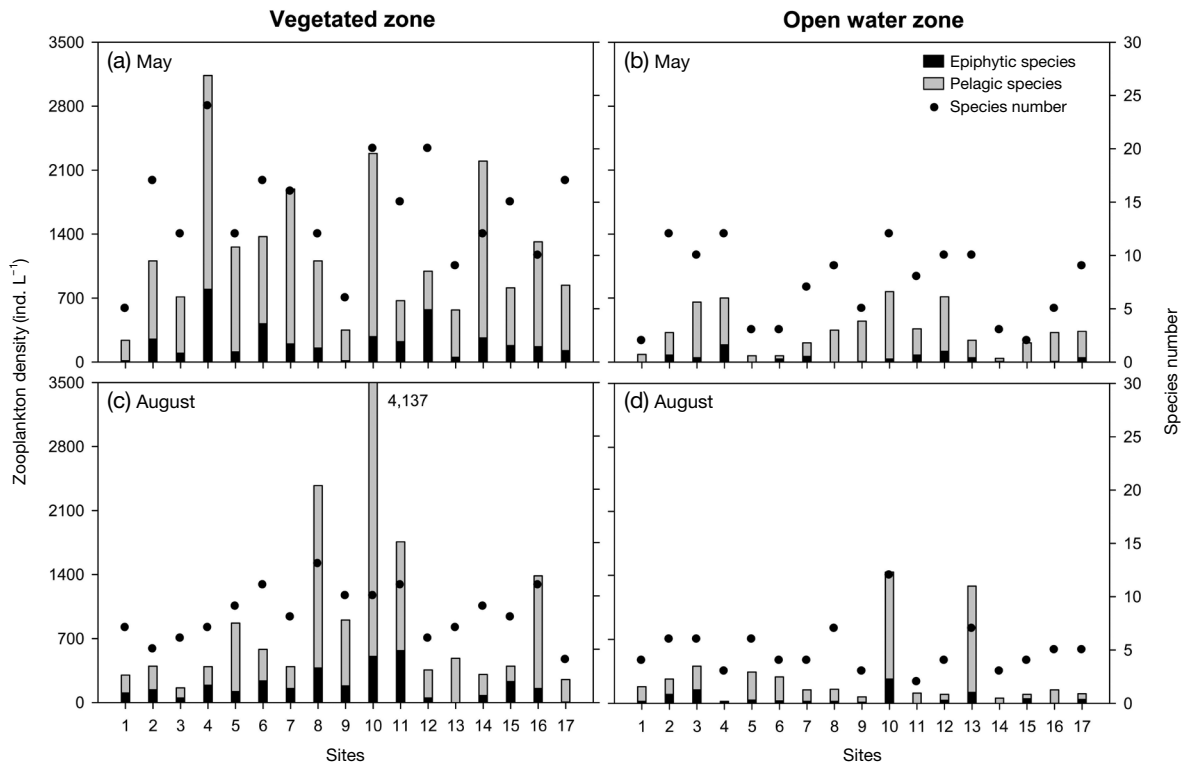
증가로 인해 희석된 것으로 판단된다. 그러나 수변부와 개방수역 간에 차이는 두 시기 모두 미비한 것으로 나타났다. pH는 5월에 7.1~8.4의 범위로 수변부보다 개방수역이 더 높은 값을 보였으나, 8월에는 6.7~9.0의 범위를 보여 5월과 비슷했으나 수변부와 개방수역 간 차이는 거의 없었다. pH는 일반적으로 이산화탄소 및 산소 농도와 밀접하게 연관되며, 생물의 호흡으로 인해 증가될 수 있다. 특히 강이나 하천과 같은 담수생태계에서는 식물플랑크톤이 광합성으로 인해 산소를 발생시키면서 pH의 증가를 야기시키지만(Reynolds *et al.*, 2002), 습지의 경우 수생식물의 우점으로 인해 식물플랑크톤이 경쟁으로 인해 성장과 발달이 억제되므로 일반적으로 여름에 측정된 pH 값은 낮다(Van Donk and van de Bund, 2002). 이와 같은 이유로 엽록소 a 또한 pH와 비슷하게 여름철에 더 낮은 값을 가진다. 엽록소 a는 5월에는 개방수역에서 측정된 값이 더 높았으나, 8월에는 두 지점 간 차이가 미비했다. 이는 전술하였듯이, 수생식물과의 경쟁으로 인해 수생식물이 풍부한 수변부에서는 엽록소 a가 낮고, 개방수역에서 높은 것으로 판단된다. 전술한 항목과는 대조적으로 탁도의 경우, 조사지점이나 시기별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 일반적으로 우리나라 강에서 측정된 탁도는 여름 강우 발생에 따라 증가되는 경향이 해마다 목격되며, 강우량의 정도에 따라 가을철까지 영향을 준다(Jeong *et al.*, 2007). 습지에서 또한 강우 발생에 따라 저층 입자의 부유, 유거수 발생으로 인해 습지 주변 토사 유입 등으로 탁도가 증가되는 현상이 발생

하지만, 습지 주변 토지 이용이나 기타 환경 특성에 의해 달라질 수 있다. 그래서 습지는 강과 달리 지점에 따른 차이가 발생할 수 있으며, 다양한 요인을 기반으로 한 해석을 통해 원인을 밝히는 면밀한 조사가 필요하다.

## 2. 동물플랑크톤 군집 분포

본 연구에서 동물플랑크톤은 총 51종이 출현하는 것으로 확인되었으며, 분류군별로는 윤충류가 30종, 미소갑각류가 21종으로 윤충류가 가장 우점하였다. 윤충류 중에서는 주로 *Polyarthra* sp.가 우점하였으며, 미소갑각류는 *Diaphanosoma brachyurum*와 요각류 유생(nauplius)이 높은 출현 빈도를 보였다. 이는 Choi *et al.* (2012)이나 Kim *et al.* (2015)에 의해 조사된 낙동강 유역권 내 호소 및 습지의 동물플랑크톤 종조성과 비교할 때 상대적으로 적은 종수였다. 본 연구는 여름에 집중적으로 조사가 수행되었기 때문에 여름을 포함한 모든 계절을 조사한 연구보다 상대적으로 적은 종수가 기록된 것으로 사료된다. 기존 연구를 살펴볼 때, 동물플랑크톤 군집은 포식자-피식자 또는 먹이 경쟁 등의 형태로 다양한 생물 군집과 밀접한 관계를 가지며(Lynch, 1979; Riisgård *et al.*, 2012), 강우량 등 물리적인 요인이나 용존산소나 pH 등 이화학적 요인 변화에도 민감하게 작용하기 때문에 계절 또는 연도에 따라 종 구성이 달라질 수 있다(Kochsiek *et al.*, 1979).

본 연구에서 조사된 동물플랑크톤 군집 밀도는 조사 시



**Fig. 3.** Density and species number of zooplankton at study sites of before (May) and after (August) rainfall occurrence. (a) vegetated zone before rainfall occurrence, (b) open water zone before rainfall occurrence, (c) vegetated zone after rainfall occurrence, and (d) open water zone after rainfall occurrence.

기별 (5월과 8월) 또는 조사된 지점 (수변부와 개방수면)에 따라 상이하였다 (Fig. 3). 대부분의 습지에서 동물플랑크톤 군집은 부착성 (Epiphytic) 종보다 부유성 (Pelagic) 종의 밀도가 더 높았으며, 특히 개방수면에서는 부착성 종이 거의 출현하지 않았다. 수생식물이 우점하는 얇은 습지의 경우, 수생식물의 잎이나 줄기와 같이 부착할 수 있는 기질체가 풍부하기 때문에 부착성 종이 부유성 종보다 더 높은 밀도를 가지게 되는 것이 일반적이지만 (Choi *et al.*, 2014a), 본 연구 지역의 경우 대부분의 수변부 식생이 갈대와 같은 정수식물로 구성된 점을 감안하면, 부착성 종이 다양하게 서식하기에 적당하지 않음을 알 수 있다. 정수식물은 줄기만이 물에 침수되어 있으며, 형태가 단조롭기 때문에 다른 수생식물 (부유식물, 부엽식물, 침수식물 등)보다 상대적으로 단순한 구조를 가진다. 이에 따라 식생대 내 정수식물의 우점은 부착성 동물플랑크톤의 밀도나 종 다양성 증가에 크게 기여하지 못한다 (Cheruvilil *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2014b). 그러나, 비록 식생대가 단순한 구조를 가진다고 할지라도, 수생식물이 거의 없는 개방된 수면보다 식생대가 서식처로서 적당하기 때문에 일반적으로 개방수역보다 식생대에서 더 많은 동물플랑크톤 밀도가 관찰될 수 있

다. Ono-way ANOVA 분석 결과, 동물플랑크톤 군집은 개방수역보다 수변부에서 밀도가 더 높은 것으로 분석되었으며, 두 지점 간에 밀도는 뚜렷한 차이를 나타냈다 ( $df=2$ ,  $F=27.1$ ,  $P<0.05$ ). 이는 부착성 및 부유성 종 또한 비슷한 공간 분포를 보였다. 조사기간 동안 출현한 동물플랑크톤 종 또한 수변부에서 출현한 종이 개방수역에서 채집된 종보다 다양성이 높았으며 (Table 3), 이는 부유성 종보다 부착성 종이 수변부에 수생식물에 주로 부착되어 있기 때문인 것으로 사료된다.

수변부에서 출현한 동물플랑크톤 군집은 5월에 4번 습지에서 3,136 개체  $L^{-1}$ 로 가장 높았으며, 그 다음으로는 10번과 14번 습지에서 2,282와 2,198 개체  $L^{-1}$ 로 각각 나타났다. 그러나 8월에는 10번 습지에서 가장 높은 동물플랑크톤 밀도인 4,137 개체  $L^{-1}$ 가 관찰되었으며, 8번 및 16번 습지 등에서도 높은 밀도가 관찰되었다. 일반적으로, 동물플랑크톤 군집은 포식이나 먹이원 등 생물학적 요인에 의해 개체수나 종다양성이 영향을 받지만, 습지에서는 서식처의 물리적인 구조에 따라 다른 생물과의 상호관계가 결정되기 때문에 동물플랑크톤의 공간분포를 이해하기 위해서는 서식처 특성을 우선적으로 고려해야 한다 (Jeppesen *et*

Table 3. Species list of zooplankton according study time and point at the study sites.

Taxa	May		August		Taxa	May		August	
	VZ	OWZ	VZ	OWZ		VZ	OWZ	VZ	OWZ
Aschelminthes									
Eurotorea									
<i>Anuraeopsis fissa</i> (Gosse, 1851)					<i>T. pusilla</i> (Lauterborn, 1898)*				
<i>Brachionus angularis</i> (Gosse, 1851)	+	+			<i>T. ruttus</i> (Müller, 1776)*		+		
<i>B. quadridentatus</i> (Hermann, 1783)	+		+		<i>Trichotria pocillum</i> (Müller, 1776)*	+		+	
<i>B. rubens</i> (Ehrenberg, 1838)	+		+		<i>T. tetractis</i> (Ehrenberg, 1830)*	+			
<i>Colurella obtusa</i> (Gosse, 1886)	+		+		Arthropoda				
<i>Euchlanis dilatata</i> (King, 1967)	+		+		Crustacea				
<i>Keratella valga</i> (Kolisko, 1938)	+	+	+		<i>Acroperus harpae</i> (Baird, 1834)*	+		+	
<i>Lecane bulla</i> (Gosse, 1886)*	+		+		<i>Alona guttata</i> (Sars, 1862)*	+		+	
<i>L. closteroerca</i> (Schmarda, 1859)*	+		+		<i>A. rectangula</i> (Sars, 1862)*	+		+	+
<i>L. furgata</i> (Murray, 1913)*	+		+		<i>Bosmina longirostris</i> (Müller, 1785)				
<i>L. hamate</i> (Stokes, 1896)*	+		+		<i>Camptocercus rectirostris</i> (Schoedler, 1862)*		+		
<i>L. ludwigii</i> (Eckstein, 1885)*	+		+		<i>Chydorus sphaericus</i> (Müller, 1785)*	+		+	
<i>L. pygmaea</i> (Daday, 1897)*	+		+		<i>Cyclops vicinus</i> (Uljanin, 1875)	+		+	
<i>Lepadella oblonga</i> (Ehrenberg, 1834)*	+		+		<i>Daphnia obtusa</i> (Kurz, 1874)	+			
<i>Monomata grandis</i> (Tessin, 1970)	+		+		<i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Lievin, 1848)	+		+	+
<i>Mytilina ventralis</i> (Ehrenberg, 1832)	+		+		<i>Graptoleveris testudinaria</i> (Fischer, 1848)*	+			
<i>Notholca labis</i> (Gosse, 1887)	+		+		<i>Ilyocryptus spinifer</i> (Herrick, 1882)*	+			
<i>Philodina roseola</i> (Ehrenberg, 1832)	+		+		<i>Mesocyclops leuckartii</i> (Claus, 1857)	+		+	
<i>Platyias patulus</i> (Müller, 1786)	+		+		<i>Moina macrocopa</i> (Straus, 1820)*	+			
<i>Ploesoma tetractis</i> (Levander, 1894)	+		+		<i>Pleuroxus aduncus</i> (Jurine, 1820)*	+		+	
<i>P. truncatum</i> (Levander, 1894)	+		+		<i>P. laevis</i> (Sars, 1861)*	+		+	
<i>Polyarthra remata</i> (Skonikov, 1896)	+		+		<i>Sida crystallina</i> (Müller, 1776)	+			
<i>Squatina mutica</i> (Ehrenberg, 1832)	+		+		<i>Simocephalus eximiosus</i> (Koch, 1841)*	+			
<i>Synchaeta stylata</i> (Wierzejski, 1893)	+		+		<i>S. vetulus</i> (Müller, 1776)*	+		+	
<i>Testudinella patina</i> (Hermann, 1783)	+		+		<i>Scapholeberis kingi</i> (Sars, 1903)*			+	
<i>Trichocerca gracilis</i> (Tessin, 1890)*	+		+		<i>Thermocyclops hyalinus</i> (Rehberg, 1880)	+			
	+		+		<i>T. taihokuensis</i> (Harada, 1931)	+		+	
	+		+		Total species number	41	18	28	9

VZ, vegetated zone; OWZ, open water zones. The species with \* mark were considered as epiphytic microinvertebrate species, in accordance with Sakuma *et al.* (2000) and Gyllström *et al.* (2005).

al., 1998). 담수생태계에서 수생식물은 플랑크톤 등 다양한 동물들을 위한 서식공간을 조성해주기 때문에 수생식물의 구성이나 구조 등은 서식처나 피난처로서 효율성에 영향을 미치게 된다(Manatunge *et al.*, 2000; Lodge, 2001). 높은 동물플랑크톤 밀도를 나타낸 습지에서는 수변부에 수생식물이 다양하게 구성되어 있는 공통된 특징을 가지며, 다양한 수생식물의 구성은 상대적으로 복잡한 구조를 야기하기 때문에, 높은 밀도를 유지할 수 있는 것으로 사료된다. 대조적으로, 개방수역에서 5월의 동물플랑크톤 군집은 대부분의 습지에서 리터 당 750 개체가 넘지 않는 밀도가 관찰되었으며, 이와 같은 양상은 8월에도 비슷하여 10번과 13번 습지를 제외한 대부분의 습지에서는 500 개체 L<sup>-1</sup> 이하의 밀도를 보였다. 10번과 13번 습지에서의 동물플랑크톤 군집은 1,435와 1,281 개체 L<sup>-1</sup>로 다른 습지와 비교할 때 상대적으로 높은 밀도가 관찰되었다.

**3. 강우 발생에 대한 동물플랑크톤의 피난처로서 수생식물**

수변부에 주로 발달된 식생대는 습지에 따라 다양한 수생식물 종에 의해 구성되는 것으로 나타났다(Table 4). 조사 지점에서 수생식물은 총 10종이 출현하였으며, 갈대, 툇물참새피, 줄(*Zizania latifolia* Turc.), 개구리밥(*Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid), 생이가래(*Salvinia natans* (L.) All), 자라풀(*Hydrocharis dubia* (Blume)), 마름, 말즘(*Potamogeton crispus* L.), 붕어마름, 나사말(*Vallisneria natans* (Lour.)

H. Hara) 등이 출현하였다. 툇물참새피는 17개 습지 중 13개 습지에서 관찰될 정도로 가장 많이 관찰되었으며, 그 다음으로는 마름이나 갈대 등의 출현빈도가 높았다. 그러나 침수식물은 상대적으로 적은 출현빈도를 보였다. 가장 많은 수생식물 종이 출현한 습지는 10번으로 총 건중량이 171.9g으로 가장 높았다. 그 밖에도 8번, 9번, 11번 습지에서도 7~8종의 수생식물이 출현하였으며, 100g 이상의 건중량이 측정되었다. 이와 대조적으로, 2번, 3번, 6번, 17번 습지에서는 10g 이하의 수생식물 건중량이 측정되었다.

각 습지에서 여름 강우 발생에 따라 동물플랑크톤 군집 밀도는 습지에 따라 상이하였다. 조사된 습지 중 1번, 8번, 9번, 10번, 11번, 16번 등의 습지 수변부에서 채집된 동물플랑크톤 군집은 여름 강우 발생 전과 비교할 때 후에 더 높은 밀도가 관찰되었다. 전술된 습지의 수변부에서는 다른 습지보다 다양한 수생식물 종이 분포하였으며, 높은 건중량이 산출되었다. 수생식물은 종에 따라 형태나 특징이 다르기 때문에 식생대 내에 다양한 수생식물이 구성될수록 복잡한 구조를 가질 수 있다(Meerhoff *et al.*, 2007). 특히 침수식물은 수생식물의 다른 분류보다 복잡한 구조를 가지기 때문에 침수식물의 구성은 식생대의 복잡성에 상당히 기여한다(Stansfield *et al.*, 1997). 대부분의 연구에서 식생대 내 침수식물의 구성은 서식처 복잡성에 영향을 미치며, 동물플랑크톤과 같이 식생대를 서식처로서 활용하는 동물들의 종다양성과 밀도를 증가시킨다고 보고하고 있다(Cattaneo *et al.*, 1998; Jeppesen *et al.*, 1998). 본 연구

**Table 4.** Dry weigh of macrophyte before rainfall occurrence at study sites.

Sites	Emergent			Free-floating		Floating-leaved		Submerged			Total
	PC	PD	ZL	SP	SN	HD	TJ	PC	CD	VN	
1	5.6		5.4								11
2		4.2					3.4				7.6
3		4.1	3.7								7.8
4	4.3		6.5	8.6	12.1		12.4			3.8	47.7
5		8.2			4.6	12.3					25.1
6	5.1			2.1			2.5				9.7
7	2.6	8.4					4.6				15.6
8	15.6	12.6		12.7	16.5		12.4	16.5	18.4	18.4	123.1
9		16.2		16.2	11.7		18.6	12.8	17.2	10.6	103.3
10	22.4	14.2		22.8	24.5	14.6	24.58		25.4	23.1	171.58
11		12.1	8.6		17.9		16.2	17.5	15.2	19.4	106.9
12	7.3						4.2				11.5
13		8.6	4.6				4.2				17.4
14		12.8									12.8
15		7.1	6.5								13.6
16		2.6	6.8	2.8							12.2
17	5.4	4.2									9.6

PC, *Phragmites communis* Trin.; PD, *Paspalum distichum* L.; ZL, *Zizania latifolia* Turc.; SP, *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid; SN, *Salvinia natans* (L.) All; HD, *Hydrocharis dubia* (Blume) Backer; TJ, *Trapa japonica* Flerow; PC, *Potamogeton crispus* L.; CD, *Ceratophyllum demersum* L.; VN, *Vallisneria natans* (Lour.) H. Hara.

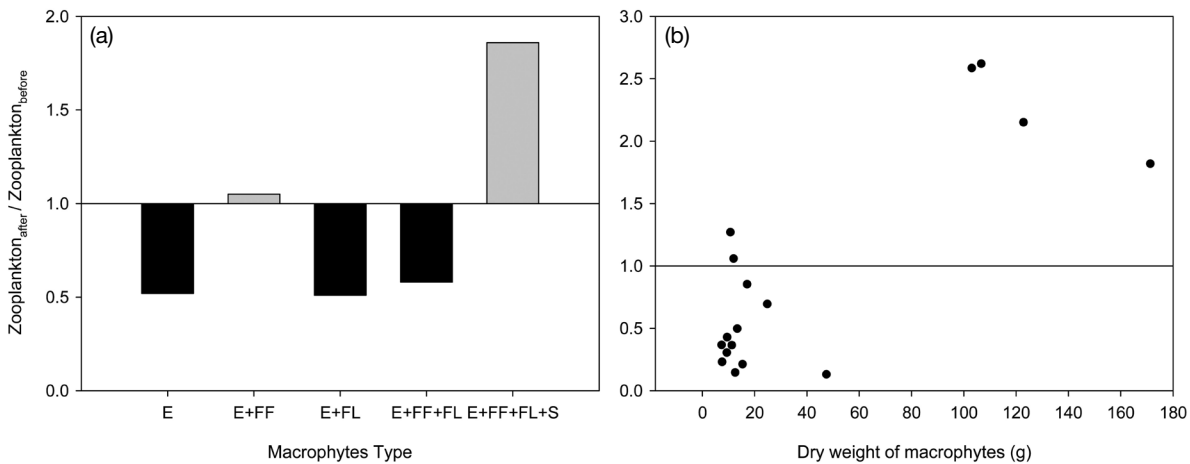


에서 침수식물은 4번, 8번, 9번, 10번, 11번 습지에서 출현하고 있으며, 이들 중 4번 습지를 제외한 습지들에서 채집된 동물플랑크톤 군집은 강우 발생 후 밀도가 증가하였다. 이들 습지에서는 강우 전후 간에 동물플랑크톤 밀도 차이가 매우 뚜렷하였다(One-Way ANOVA,  $df=2$ ,  $F=30.8$ ,  $P<0.01$ ). 특히, 8번과 10번의 습지 수변부에서 채집된 동물플랑크톤 군집은 강우 전에 1,106과 2,282 개체  $L^{-1}$ 였지만, 강우 발생 후 2,373과 4,137 개체  $L^{-1}$ 로 약 2배 이상의 증가율을 보였다. Choi *et al.* (2015)은 연중 강우 후에 일부 부착성 종의 밀도가 늘어나는 것을 관찰하였는데, 이는 일부 부착성 종이 수체의 흔들림 등 교란 발생시 수생식물의 잎이나 줄기에 더 많이 부착하여 강우 발생에도 생존율을 높일 수 있다고 제시하였다. 이러한 교란에 대한 수생식물의 피난처 효과로 인해 수변식생대에서 서식하는 동물플랑크톤 군집은 강우 발생 후에도 개방된 수역보다 더 높은 밀도를 유지할 수 있다. 더욱이, 침수식물의 존재는 식생대의 피난처 효과를 더욱 증가시키며, 동물플랑크톤의 천이에 크게 기여하는 것으로 사료된다. 전술한 습지 외 나머지 습지에서는 여름 강우 발생 후 동물플랑크톤 밀도가 감소하였는데, 이는 각 습지의 식생대가 갈대나 퉁물참새피와 같이 상대적으로 단순한 구조를 가진 수생식물로 주로 구성되어(Table 4) 강우와 같은 교란을 회피할 수 있는 피난처로서 효율성이 낮기 때문인 것으로 사료된다. 이와 대조적으로, 개방수역에서 채집된 동물플랑크톤 군집은 대부분 여름 강우 발생 후 감소하는 것으로 나타났다. 전술한 바와 같이 개방수역 내 동물플랑크톤 군집은 강우 발생 시 회피할 수 있는 피난처와 서식처가 부족하므로 강우 발

생 후 밀도가 감소하는 것으로 보인다. 예외적으로 10번과 13번 습지의 개방수면에서는 강우 발생 후에도 2~5배 이상 증가된 밀도가 관찰되었는데, 이들 습지에서 5월 조사 시 수생식물이 수변부에서만 집중되었으나 강우 발생 후(8월) 개방수역에서도 수생식물이 발달된 것을 관찰할 수 있었다. 비록 개방수역에서 발달된 수생식물은 수변부보다 서식처 복잡성이 낮지만 강우 발생 시 동물플랑크톤 군집의 생존에 기여한 것으로 보인다.

동물플랑크톤 군집의 종 수 또한 밀도와 비슷한 양상을 보였다(Table 3). 5월에 수변부에서는 가장 높은 동물플랑크톤 종 수인 41종이 관찰되었으며, 8월에는 5월보다 감소된 28종이 출현하였다. 개방수역 또한 5월에는 18종이 관찰되었으나, 8월에는 9종으로 감소하였다. 채집된 동물플랑크톤 군집 중, 부착성 종과 부유성 종은 각각 25, 26종으로 비슷하였으며, 부착성 종은 주로 수변부에서 관찰되었다. 이를 볼 때 조사기간 동안에 출현한 동물플랑크톤 종들은 강우라는 교란 하에 종 특이적인 성향을 보이지 않고, 비슷한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 강우 발생 후 대부분 부착성의 성향을 가진 종들의 생존율이 높았으며, 이는 수변부에서 두드러지게 나타났다.

수생식물의 구성에 따라 여름 강우 전·후 간 동물플랑크톤 밀도를 분석한 결과, ‘정수식물’, ‘정수식물+부엽식물’, ‘정수식물+부유식물+부엽식물’에 의해 구성된 습지에서 동물플랑크톤(8월)/동물플랑크톤(5월)의 밀도 비율은 1보다 낮았으며, ‘정수식물+부유식물’, ‘정수식물+부유식물+부엽식물+침수식물’에 의해 구성된 습지에서는 1보다 높은 비율로 나타났다(Fig. 4). 또한 수생식물의 건



**Fig. 4.** Relations among change of zooplankton density, habitat macrophytes composition and dry weight of macrophytes. (a): Ratio of zooplankton density on habitat composition, E, study sites with emergent plants, FF, study sites with free floating plants, FL, study sites with floating-leaved plants, S, Study sites with submerged plants. The grey bars indicate increase of zooplankton after rainfall, and the black bars indicate decrease. (b): Ratio of zooplankton density on dry weight of macrophytes. Black dots indicate each of the study sites.

중량이 높을수록 1보다 큰 동물플랑크톤 비가 분석되었다. 결과적으로, 정수식물, 부유식물, 부엽식물, 침수식물 등 수생식물의 4가지 생활 형태에 의해 구성된 식생대가 강우와 같은 교란 발생에 동물플랑크톤의 피난처로서 효율성이 가장 뛰어난 것으로 나타났다. Choi *et al.* (2014a)를 비롯한 다양한 문헌에서도, 식생대가 단일 식물로 구성된 것보다 다양한 형태를 가진 종에 의해 복합적으로 구성될 때 다양한 종류의 동물플랑크톤 종 다양성이 높은 것으로 분석되었다. 이는 동물플랑크톤 군집이 어류와 무척추동물을 포함한 다양한 포식자에게 먹이원으로서 활용됨을 감안하면, 고차소비자 군집의 성장과 발달에 크게 기여하는 물론 생태계의 건강성에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

이러한 관점에서, 수생식물은 생물다양성의 유지 및 증가를 위해 담수생태계 내에서 핵심적인 역할을 한다고 평가할 수 있다. 습지의 생산성 및 높은 생물다양성은 수생식물의 종조성 및 생물량과 밀접하게 연관되며, 생태계 건강성 증가에 크게 기여한다. 기존에 담수생태계 내에서 수생식물의 역할은 ‘포식자에 대한 피난처’나 ‘부착성 종을 위한 기질체 제공’ 등에 대해서 주로 알려져 있었지만, 우리나라와 같이 강우량이 집중되는 지역의 경우, 생태계 내 강력한 교란 요인으로 적용되기 때문에 서식 생물들은 개체수의 유지 및 발달을 위한 생존 전략이 절실하게 요구된다. 이와 같은 상황에서 수생식물은 좋은 서식처와 피난처를 제공할 수 있으며, 플랑크톤과 같이 수체의 흐름에 민감한 종을 보호하고, 개체수의 증가에 기여하여 고차소비자까지 에너지 전달에 중요한 역할을 하는 것으로 사료된다. 전술한 내용에 기반하여 살펴볼 때, 본 연구는 담수생태계를 복원하거나 새로 조성할 시 생물다양성 확보를 위한 전략 마련에 중요한 정보를 제공할 것으로 보인다.

## 적 요

물리적인 교란(강우 발생)에 대한 동물플랑크톤의 피난처로서 수생식물의 역할을 평가하기 위해, 경상남도에 위치한 17개 습지의 수변부와 개방수역에서 환경 요인, 수생식물, 동물플랑크톤 등에 대해 조사하였다. 조사기간 동안, 총 51종의 동물플랑크톤이 출현하였으며, *Polyarthra* sp. 및 *Diaphanosoma brachyurum* 등의 부유성 성향을 가진 종이 주로 우점하였다. 습지의 수변부에서는 털물참새피, 마름, 붕어마름 등 10종 정도의 수생식물이 출현하였으며, 습지에 따라 종조성이나 생체량 등이 상이하였다. 이와 대조적으로, 개방수역에서는 수생식물이 거의 관찰되지 않았다. 대부분의 습지에서 개방수역보다 수변부에서 더 높은

동물플랑크톤 밀도가 관찰되었으며, 특히 1번, 8번, 9번, 10번, 11번, 16번 습지의 수변부에 서식하는 동물플랑크톤 군집은 강우 발생에 거의 영향을 받지 않거나 증가된 밀도를 보였다. 이들 습지의 수변식생대는 침수식물이 공통적으로 나타났으며, 다른 습지보다 상대적으로 다양한 수생식물 종에 의해 구성된 특징을 가졌다. 침수식물이 수생식물 중 가장 복잡한 구조를 가지는 점을 감안하면, 침수식물의 존재는 식생대 내 서식처 복잡성에 크게 기여하며 강우와 같은 교란 요인에 저항하기 위한 피난처로서 높은 효율성을 가질 수 있다. 또한 침수식물은 서식 특성상 다양한 식물과 공존이 가능하며, 식생대 내 수생식물의 생체량을 증가시켜 더욱 복잡하게 만든다. 이러한 관점에서, 수생식물은 강우와 같은 교란 발생에 대한 생물다양성의 유지 및 증가에 크게 영향을 미치며, 우리나라와 같이 여름철에 강우가 집중되는 지역의 경우 플랑크톤 등 생물상에 대한 천이에 중요하게 고려되어야 할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 경상남도청의 ‘습지총량제 도입을 위한 습지등급화 조사(2011)’의 지원으로 작성되었습니다.

## REFERENCES

- Alexander, V., C.S. Whalen and K.M. Klingensmith. 1989. Nitrogen cycling in arctic lakes and ponds. *Hydrobiologia* **172**: 165-172.
- Angeler, D.G., M. Alvarez-Cobelas, C. Rojo and S. Sánchez-Carrillo. 2000. The significance of water inputs to plankton biomass and trophic relationships in a semi-arid freshwater wetland (central Spain). *Journal of Plankton Research* **22**: 2075-2093.
- Brinson, M.M., A.E. Lugo and S. Brown. 1981. Primary productivity, decomposition and consumer activity in freshwater wetlands. *Annual Review of Ecology and Systematics* **12**: 123-161.
- Campbell, C.E. 2002. Rainfall events and downstream drift of microcrustacean zooplankton in a Newfoundland boreal stream. *Canadian Journal of Zoology* **80**: 997-1003.
- Cattaneo, A., G.G. Galanti, S. Gentinetta and S. Romo. 1998. Epiphytic algae and macroinvertebrates on submerged and floating-leaved macrophytes in an Italian lake. *Freshwater Biology* **39**: 725-740.
- Cheruvilil, K.S., P.A. Soranno, J.D. Madsen and M.J. Roberson. 2002. Plant architecture and epiphytic macroinvertebrate communities: the role of an exotic dissected macrophyte.

- Journal of the North American Benthological Society* **21**: 261-277.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong and G.J. Joo. 2015. Rainfall as dominant driver of rotifer dynamics in shallow wetlands: Evidence from a long-term data record (Upo Wetlands, South Korea). *International Review of Hydrobiology* **100**: 21-33.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, H.W. Kim, K.H. Chang and G.J. Joo. 2011. Inter-annual variability of a zooplankton community: the importance of summer concentrated rainfall in a regulated river ecosystem. *Journal of Ecology and Environment* **34**: 49-58.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, S.K. Kim, G.H. La, K.H. Chang and G.J. Joo. 2014a. Role of macrophytes as microhabitats for zooplankton community in lentic freshwater ecosystems of South Korea. *Ecological Informatics* **24**: 177-185.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, S.K. Kim and G.J. Joo. 2014b. Sustainment of epiphytic microinvertebrate assemblage in relation with different aquatic plant microhabitats in freshwater wetlands (South Korea). *Journal of Limnology* **73**: 197-202.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, G.H. La, K.S. Jeong, H.W. Kim, T.K. Kim and G.J. Joo. 2012. Microcrustacean community dynamics in Upo Wetlands: Impact of rainfall and physiochemical factor on microcrustacean community. *Korea Journal of Limnology* **45**: 329-335.
- Coulliette, A.D. and R.T. Noble. 2008. Impacts of rainfall on the water quality of the Newport River Estuary (Eastern North Carolina, USA). *Journal of Water and Health* **6**: 473-482.
- Gyllström, M., L.A. Hansson, E. Jeppesen, F. García-Criado, E. Gross, K. Irvine, T. Kairesalo, R. Kornijow, M.R. Miracle, M. Nykänen, T. Nöges, S. Romo, D. Stephen, E. Van Donk and B. Moss. 2005. The role of climate in shaping zooplankton communities of shallow lakes. *Limnology and Oceanography* **50**: 2008-2021.
- Hamilton, P.B., K. Gajewski, D.E. Atkinson and D.R.S. Lean. 2001. Physical and chemical limnology of 204 lakes from the Canadian Arctic Archipelago. *Hydrobiologia* **457**: 133-148.
- Jeong, K.S., D.K. Kim and G.J. Joo. 2007. Delayed influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of *Microcystis aeruginosa* and *Stephanodiscus hantzschii* in a regulated river system of the lower Nakdong River (South Korea). *Water Research* **41**: 1269-1279.
- Jeppesen, E., T.L. Lauridsen, T. Kairesalo and M.R. Perrow. 1998. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton interactions in lakes, pp. 91-114. In: *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes* (Jeppesen, E., M. Sondergaard and K. Christoffersen, eds.). New York: Springer.
- Kim, D.K., K.S. Jeong, K.H. Chang, G.H. La, G.J. Joo and H.W. Kim. 2012. Patterning zooplankton communities in accordance with annual climatic conditions in a regulated river system (Nakdong River, South Korea). *International Review of Hydrobiology* **97**: 55-72.
- Kim, S.K., D.G. Hong, M. Kang, K.L. Lee, H.Y. Lee, G.J. Joo and J.Y. Choi. 2015. Zooplankton Community Dynamic in Lentic Freshwater Ecosystems in the Nakdong River Basin. *Korea Journal of Environment and Ecology* **29**: 410-420.
- Kochsiek, K.A., J.L. Wilhm and R. Morrison. 1971. Species diversity of net zooplankton and physiochemical conditions in Keystone Reservoir, Oklahoma. *Ecology* **52**: 1119-1125.
- 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.
- Lodge, D.M. 2001. Littoral zone structures as *Daphnia* refugia against fish predators. *Limnology and Oceanography* **46**: 230-237.
- Lynch, M. 1979. Predation, competition, and zooplankton community structure: An experimental study. *Limnology and Oceanography* **24**: 253-272.
- Manatunge, J., T. Asaeda 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 complexity on community structure and predator avoidance behaviour of littoral zooplankton in temperate versus subtropical shallow lakes. *Freshwater Biology* **52**: 1009-1021.
- Mizuno, T. and E. Takahashi. 1991. *An Illustrated Guide to Freshwater Zooplankton in Japan*. Tokai University Press, Tokyo.
- Osore, M.K.W., M.L.M. Tackx and M.H. Daro. 1997. The effect of rainfall and tidal rhythm on the community structure and abundance of the zooplankton of Gazi Bay, Kenya. *Hydrobiologia* **356**: 117-126.
- Quintana, X.D. 2002. Measuring the intensity of disturbance in zooplankton communities of Mediterranean salt marshes using multivariate analysis. *Journal of Plankton Research* **24**: 255-265.
- Reynolds, C.S., V. Huszar, C. Kruk, L. Naselli-Flores and S. Melo. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* **24**: 417-428.
- Riisgård, H.U., C.V. Madsen, C. Barth-Jensen and J.E. Purcell. 2012. Population dynamics and zooplankton-predation impact of the indigenous scyphozoan *Aurelia aurita* and the invasive ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in Limfjorden (Denmark). *Aquatic Invasions* **7**: 147-162.
- Rosenberry, D.O. and T.C. Winter. 1997. Dynamics of water-table fluctuations in an upland between two prairie-pothole

- wetlands in North Dakota. *Journal of Hydrology* **191**: 266-289.
- Sakuma, M., T. Hanazato, R. Nakazato and H. Haga. 2002. Methods for quantitative sampling of epiphytic microinvertebrates in lake vegetation. *Limnology* **3**: 115-119.
- Sass, G.G., C.M. Gille, J.T. Hinke and J.F. Kitchell. 2006. Whole-lake influences of littoral structural complexity and prey body morphology on fish predator-prey interactions. *Ecology of Freshwater Fish* **15**: 301-308.
- Stansfield, J.H., M.R. Perrow, L.D. Tench, A.J. Jowitt and A.A. Taylor. 1997. Submerged macrophytes as refuges for grazing Cladocera against fish predation: observations on seasonal changes in relation to macrophyte cover and predation pressure. In *Shallow Lakes' 95* (pp. 229-240). Springer Netherlands.
- 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.
- Victor, R. and J.R. Victor. 1997. Some aspects of the ecology of littoral invertebrates in a coastal lagoon of southern Oman. *Journal of Arid Environments* **37**: 33-44.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 2000. *Limnological Analyses*. Springer-Verlag, New York, pp. 20-70.