

담수생태계 특성을 고려한 동물플랑크톤 정량 조사법의 비교와 활용

오혜지 · 장광현* · 정현기¹ · 고순미² · 나금환³ · 김현우^{4,*}

경희대학교 환경학 및 환경공학과, ¹국립환경과학원 낙동강물환경연구소, ²경기도 보건환경연구원, ³공생랩, ⁴순천대학교 환경교육과

Quantitative Zooplankton Collection Methods for Various Freshwater Ecosystems and Their Applications. Hye-Ji Oh (0000-0003-2098-8485), Kwang-Hyeon Chang* (0000-0002-7952-4047), Hyun-Gi Jeong¹ (0000-0002-5162-7175), Soon-Mi Go² (0000-0003-3601-4378), Geung-Hwan La³ (0000-0002-0512-1018) and Hyun-Woo Kim^{4,*} (0000-0003-3898-5864) (Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, ¹Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, ²Gyeonggi-do Institute of Health & Environment, ³Eco-lab Gongsang, ⁴Department of Environmental Education, Suncheon National University)

Abstract Zooplankton is essential biological assemblage in understanding the structure and function of aquatic ecosystems, since it plays as a linkage between primary producers and higher trophic level organisms such as fish. Although zooplankton has planktonic characteristics, the sampling and treatment methods for its community analyses are more complicated and variable compared with phytoplankton due to its high diversity in body size and species-specific depth selection behaviors. In the present paper, we reviewed representative classical methods for field sampling and treatments of freshwater zooplankton in relation with quantification of its community structure, and suggested appropriate methods depending on various research objectives.

Key words: zooplankton sampling methods, sample treatments, zooplankton net, fixation, subsample

서 론

수생태계 생물군집의 정량적 조사는 순수한 연구목적 외 기초환경조사 및 건강성 평가에서 수질과 함께 중요한 항목으로 인식되고 있다(Yoccoz *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2011). 다양도, 풍부도, 균등도 및 우점도 지수를 포함하는 군집지수는 지점의 생물 정보를 대변하는 지표로 사용되며, 해당 수체 내 지표종과 민감종 같은 특수종의 출현 여

부 또한 종조성을 기반으로 한 생물지수로써 사용되고 있다. 이 같은 군집 정보는 일반적으로 지점을 대표할 수 있는 정량적인 생물량에 기초하여 계산되기 때문에, 환경평가에 생물군집을 사용할 경우 대표성을 높이기 위해 대상 생물의 시·공간 분포를 고려하여 채집하는 것이 필수적이다(Kim *et al.*, 2002; Chang and Hanazato, 2004; Grosbois *et al.*, 2017).

생물량은 대상종의 증식 및 번식 능력, 유영 특성 및 서식처 선택성과 같은 종특이적인 요인뿐만 아니라 먹이환경, 포식자의 유무, 수체의 물리화학적 특성 변화에도 영향을 받는다(Lucas and Baras, 2000; Joseph *et al.*, 2006). 따라서, 생물 채집 시 출현종 및 수체 내 분포, 출현량 등에 따라 채집방법을 달리하여 그에 적절한 지점 및 도구 선

Manuscript received 8 July 2019, revised 2 September 2019,
revision accepted 2 September 2019

* Corresponding author: Tel: +82-61-750-3384, Fax: +82-61-750-3308,
E-mail: hwkim@sunchon.ac.kr
Tel: +82-31-201-3392, Fax:
E-mail: chang38@khu.ac.kr

© 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.

정, 노력 정도의 산정이 고려되어야 한다. 조사 및 연구 목적에 따라 적합한 채집방법이 달라질 수 있다.

플랑크톤은 수중에 부유하는 생물들의 총칭으로, 크게 일차생산자 역할을 수행하는 식물플랑크톤과 저차소비자로서 일차생산자와 고차소비자를 연결시켜주는 동물플랑크톤으로 나누어진다. 담수생태학 연구의 주요 대상으로, 다양한 연구가 이루어지고 있는 동·식물플랑크톤은 수생태계 평가 항목으로도 활발히 사용되고 있다(Parmar *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2017). 이들은 유영능력이 뛰어나고 행동반경이 넓은 어류 등과 달리 유영능력이 낮고 비교적 균일하게 높은 밀도로 분포하는 특징을 가지므로, 환경평가가 시 상대적으로 좁은 공간 범위 내에서 채집이 가능하다. 식물플랑크톤은 수체의 유동에 따라 부유생활을 하며 빛을 이용한 광합성 활동이 필수적이므로 주로 수표면 가까이 분포한다. 이러한 분포특성으로 인해 플랑크톤 군집 분석을 위한 채집은 일정량의 표층수 채수를 통해 수집된 생물들을 고정하는 방식으로 주로 수행되어왔다(Wetzel and Likens, 1979; Suthers and Rissik, 2009; Ministry of Environment, 2017a, b). 하지만 식물플랑크톤을 주먹이원으로 섭식하는 동물플랑크톤의 시·공간 분포는 식물플랑크톤에 비해 보다 다양한 조건에 의해 영향을 받게 된다(Kim *et al.*, 2002).

동물플랑크톤의 경우, 식물플랑크톤과는 달리 상대적으로 활발한 유영활동이 가능해 먹이농도, 포식압, 피난처의 유무 등의 환경에 따라 수직 및 수평 분포를 달리할 수 있다는 특징을 가진다(Chang and Hanazato, 2003, 2004). 또한, 동물플랑크톤 군집은 상이한 크기로 인해 종에 따라 개체밀도 차이를 나타내어 대형 지각류 및 요각류(> 1 mm)의 경우 1 L 당 개체수가 한 개체 이하로 출현하기도 하는 반면, 소형 윤충류는 많게는 1 L 당 수만 개체 이상이 확인되기도 한다(Kim *et al.*, 2004, 2012, 2018; Chang and Hanazato, 2007). 이와 같이 개체별 분포, 출현량과 같은 생태적 특성을 고려해 볼 때, 동물플랑크톤을 대상으로 정량 채집을 수행하는 것은 일정량의 표층수를 채집하는 식물플랑크톤에 비해 쉽지 않다.

국내의 경우, 지침을 통해 동물플랑크톤 현장조사와 관련하여 전반적인 가이드라인을 제시하고 있지만, 해당 지침은 동시 다발적인 모니터링과 이를 통한 수체 간 상대 비교에 특화된 방법 위주로 동물플랑크톤 분류군별 분포 특성을 고려한 생태학 연구와 복잡한 수체 내의 공간 분포를 분석에 적용하기에는 한계가 있다(Ministry of Environment, 2017a, b). 동물플랑크톤 군집 분석을 기반으로 보다 전문적인 연구를 수행하기 위해서는 각 분류군의 생태적 특성에 따른 분포 경향을 고려하여 적절한 시료

채집 및 분석 방법을 적용할 필요가 있으나(Thomas *et al.*, 2016), 국내 연구자들이 종합적으로 참고 가능한 문헌자료를 확보하기는 어려운 실정이다. 따라서, 본 내용에서는 동물플랑크톤 시료의 채집, 고정, 계수 및 동정을 포함하는 전반적인 조사과정 중 연구를 수행하는데 있어 필요한 기초 이론과 정보를 정리하여 제시하였다. 또한, 호소 및 하천, 습지 등의 서식처에 따른 동물플랑크톤의 종조성 및 출현 특성을 요약하고, 이에 따른 채집방법과 정량화를 위한 시료 처리방법을 제시함으로써 연구목적에 맞는 적절한 방법을 적용하는 데 도움을 주고자 하였다.

1. 국내·외 동물플랑크톤 조사방법 비교

국내에서는 수생태계 건강성 제고를 목적으로 마련된 생물측정망 조사 및 평가지침을 통해 생물군집의 모니터링 체계와 조사 평가방법을 표준화하고 있다. 동물플랑크톤 군집의 경우, 대형하천의 보 구간 및 호소 환경을 대상으로 한 정량조사방법이 제시되어 있으며, 정리한 내용은 Table 1a와 같다(Ministry of Environment, 2017a, b). 이는 수질개선 및 수생태계 보전을 위한 조사항목으로써 동물플랑크톤 군집을 사용하기 위해 지침 내에서 명시하고 있는 정량조사방법으로, 지점, 주기, 시료처리와 같은 조사방법과 생체량, 군집지수 등 환경평가 관련 분석항목을 제시하고 그 계산법과 자료정리까지 구체화하고 있다.

국외의 경우에도 동물플랑크톤 정량조사에 표준화된 방법을 기관 주도적으로 제시하고 있으며, 일본과 미국의 사례를 대표적으로 정리하였다(Table 1b, 1c). 일본의 경우, 조사필요인원 및 재료, 네트규격, 채집횟수 등을 보다 상세하게 명시하고 있는 반면, 종조성 이외에는 분석항목 내용을 구체화하지 않았다. 최근 연구동향을 반영하여 종조성 분석용 시료 이외에 DNA 보존을 위한 시료 채집 및 보존 방법에 대한 내용을 포함하였으며, 전반적인 방법을 순차적으로 제시하고 있다. 국내 조사방법과 마찬가지로 채집정도에 따라 채집횟수를 달리하는 것을 권고하고 있다(Ministry of Environment Government of Japan, 2013; Osugi *et al.*, 2014). 미국의 가이드라인은 재료 및 채집방법 등을 세부적으로 지시하고 추가적인 샘플링이 필요할 경우에 다른 규격의 네트로 축적 인양거리를 달리하여 채집하는 방법 등을 제시하고 있다(USEPA, 2012). 오대호(Great Lakes)와 같이 정기조사가 이루어지고 있는 조사 대상지에 대해서는 네트 규격과 지점 등을 달리하여 대상 환경과 목적에 적합한 방법으로 동물플랑크톤을 채집하는 것을 권고하고 있다(USEPA, 2013).

국내에서 제시되고 있는 동물플랑크톤 정량조사방법은

Table 1. Comparing zooplankton investigation methods of domestic and foreign countries (three), Korea, Japan and the United States of America (USA).

	(a) Korea			(b) Japan		(c) USA
	Weirs	Lakes and reservoirs	River system in dams	Lakes and reservoirs	Lakes and reservoirs	Lakes
Subjects	Rotifers, cladocerans, copepods, protozoans	Rotifers, Arthropoda (cladocerans, copepods)	Rotifers, Arthropoda (cladocerans, copepods)	Rotifers, Arthropoda (cladocerans, copepods)	Rotifers, cladocerans, copepods	Rotifers, cladocerans, copepods
Community indices	Species composition; number of species; biomass; diversity; richness; evenness; dominance	Species composition; abundance; dominant species and its density; biomass; diversity; richness; evenness; dominance	Species composition	Species composition	Species composition	Composition; structure; size distribution
Survey site	Center of water body c.f. sites of water quality forecast system	<ul style="list-style-type: none"> Depending on the surface area <math>< 3 \text{ km}^2</math>; 3 points <math>< 30 \text{ km}^2</math>: tow vertically whole water column >math>30 \text{ km}^2</math>: oblique tow at a certain distance, around 5 m (60 μm mesh size) – 1 m s^{-1} 	5 layers (0, 5, 10, 15, 20 m) with 1 specimen in a point over 20 m depth among sites of water quality forecast system	The deepest point of water body among sites of water quality forecast system	<ul style="list-style-type: none"> Depending on the depth of lake 1~2 m: ten 0.5 m tow 2~3 m: five 1 m tow 4~6 m: two 2.5 m tow over 7 m: one 5 m tow 	
Survey period	–	Over 4 times/yr (March–November, except for August, rain fall) – 3 or 5 years cycle	3 times/yr (spring; summer; fall) – every year	Starting from August	Before lake turnover, June to September	
Sampling method	Collect 8–10 L raw water and filtration (60 μm mesh size)	<ul style="list-style-type: none"> Depending on depth >math>20 \text{ m}</math>: tow vertically at 20 m <math>\leq 20 \text{ m}</math>: tow vertically whole water column <math>\leq 5 \text{ m}</math>: oblique tow at a certain distance, around 5 m (60 μm mesh size) – 1 m s^{-1} 	Collect 10–20 L raw water in a 1 layer, total 50–100 L - Schindler traps, Van-Dorn sampler, pump etc. (100 μm mesh size)	Vertically integrated tow from 1 m above the bottom (100 μm mesh size) – 1 m s^{-1} * 250 mL bottle, 1 time of sampling and 2 times of net washing	Vertically integrated tow using a fine mesh (50 μm) and coarse mesh (150 μm) Wisconsin nets – 0.3 or 1 ft s^{-1}	
Preservation	3~5% formalin solution	Recommend sucrose formalin; formalin solution; alcohol	Recommend sucrose formalin; formalin solution; alcohol		95% Ethanol	
Characteristics	Present detail community indices for assessment	Present sampling method for DNA preservation samples separately in the case of lakes and reservoirs	Present sampling method for DNA preservation samples separately in the case of lakes and reservoirs		Present resampling method	

^{a)} Ministry of Environment, 2017a; ^{b)} Ministry of the Environment Government of Japan, 2013; Osugi *et al.*, 2014; ^{c)} USEPA, 2012

환경부 및 지자체가 주체가 되어 수행되며 그 결과가 데이터베이스화 되는 정기조사를 대상으로 하고 있어, 국외 조사방법에 비해 지점과 시기, 조사 도구 및 채집방법 등이 구체적으로 정해져 있다. 동물플랑크톤 관련 국가 과제들은 지점들 간의 개체군 밀도, 종조성, 다양도와 같은 군집수를 비교하여 대상 지점의 환경을 평가, 분류하거나 장기변화 추이를 파악하는 것을 목적으로 하고 있다. 국내·외 조사방법 모두 지점의 대표성과 채집과정의 객관성, 통일성 및 간편성을 우선 고려하고 있다. 경우에 따라서는 조사 지점에서 제시된 방법이 반드시 대상 수생태계의 동물플랑크톤 군집 특성을 대변하고, 생물학적 상호작용과 같은 생태적 특성을 파악하는 데 적합하다고는 할 수 없다. 지침으로 제시된 조사방법을 사용함으로써 데이터의 비교 및 활용범위를 넓힐 수 있다는 장점이 존재하나, 단순히 조사방법의 장·단점을 기준으로 선택하기보다는 연구자의 입장에서 연구목적 및 해석의 대상 등을 고려하여 상호보완적으로 참고하는 것이 중요하리라 생각된다. 지침에 따라 도구 사용의 선택 및 방법의 구체적인 설명 등이 제시되어 있으므로, 이를 참고하여 연구 목적에 타당한 방법을 적용하는 것이 필요하다(Table 1).

2. 동물플랑크톤 시료 채집 시 고려 사항

1) 수직 및 수평 분포를 고려한 채집방법의 선택

동물플랑크톤은 수체 내에서 종특이적 공간 분포를 나타낸다(Joo *et al.*, 2002). 이는 수생태계 내에서 공간에 따라 물리화학적 환경, 먹이 농도, 포식압 등이 이질적으로 작용하며, 종 특성에 따라 생존에 유리한 환경이 상이하기 때문이다. 대표적으로 물벼룩과 물벼룩속(*Daphnia*)과 같은 대형 갑각류 종들은 시각에 의존적인 포식자들(예: 치어 등)을 피함과 동시에 효율적인 섭식 활동을 수행하기 위해 낮 동안 대부분은 수심이 깊은 곳에 위치하고 해가 지고 나서 수표면으로 올라오는 일주수직이동(diel vertical migration) 전략을 사용한다(Chang *et al.*, 2001; Suthers and Rissik, 2009). 윤충류의 경우, 크기가 작고 유영능력이 뛰어나지 않아 일주수직이동의 폭이 크지 않으며, 주로 무척추동물 포식자의 영향을 받으므로 일반적인 일주수직이동과 반대되는 경향을 보이기도 한다(Chang *et al.*, 2001; Wallace *et al.*, 2006). 따라서, 동물플랑크톤의 군집별 공간 분포의 이질성을 이해하고 이에 따라 적절한 방법으로 시료를 채집함으로써 대상 수체를 대표할 수 있는 군집조성 분석이 가능하다.

정점에서 수심별로 채수하여 여과하는데 보편적으로 넷트와 컬럼샘플러(column sampler)가 사용되며, 두 가지 방

법 모두 저층에 닿게되면 퇴적물이 시료에 포함되어 현미경 검경이 어려워지는 경우가 발생하므로, 저층에서 일정 간격을 두고 채집하는 것이 필요하다. 종특이적 수직 분포 경향과 상관없이 수층(water column) 전체의 동물플랑크톤 군집을 보다 용이하게 채집하는데는 원추형 넷트를 수직 인양하는 방법이 주로 사용된다. 하지만 넷트 인양의 경우, 오버플로우(overflow)의 발생 우려가 있어 정확한 개체수 파악을 위해 정량적으로 채집하는데 사용하기에는 다소 한계가 있다(Change and Hanazato, 2003). 수심이 깊은 지점에서 넷트를 인양하는 경우 넷트 망구에 여수계(flow meter)를 부착하여 정확한 여과량을 계산할 수 있으나, 수심이 깊지 않은(<10 m) 호수, 저수지 및 하천의 경우 컬럼샘플러를 사용하여 이와 같은 문제를 보완할 수 있다. 컬럼샘플러는 원통형 아크릴 몸체 하단에 수압으로 조작이 가능한 볼 형태의 개폐 장치가 부착된 형태로, 수직 인양을 통해 원하는 수심에서 채수 가능하다. 정점에서 수심을 측정 후 그에 상응하는 적절한 길이의 컬럼샘플러를 사용하여 수표면에서부터 저층 상위 10 cm 정도 깊이까지 포함되는 수층 전체를 채수 여과하는 방법은 원추형 넷트 대비 비교적 정확하게 동물플랑크톤 개체군 밀도 파악에 용이하다는 장점이 있다. 또다른 방법으로는 조사정점에서 수심별로 채수, 여과하는 방법이 있다(Fig. 1). 이는 가장 이상적인 동물플랑크톤 채집방법으로, 일정 간격으로 채수 수심을 정해 동물플랑크톤 군집의 수심별 종조성과 출현량, 분포경향을 분석하는 동시에 가중 평균 깊이 계산법(weighted mean depth, 식 1)을 이용해 수층 전체에 존재하는 동물플랑크톤 출현량을 계산할 수 있기 때문에 수심에 따른 동물플랑크톤의 종특이적인 분포 경향을 파악할 수 있다(Frost and Bollens, 1992). 하지만, 수행 시 시간 소요가 크고 동시에 많은 노력이 요구된다는 단점이 있다.

$$WMD = (\sum n_i d_i) / \sum n_i \quad (\text{식 1})$$

$n_i = d_i$ 에서의 출현량(Inds. L^{-1})

$d_i =$ 각 깊이 층의 중간 지점

윤충류의 경우, 수표면에 상대적으로 높은 밀도로 분포하는 특성이 있어 정점의 표층수만 채수하여 여과하는 방식으로 채집 가능하다(May, 1986; Akinbuwa and Adeniyi, 1996; Kim *et al.*, 2000a; Gracia *et al.*, 2002; Oh *et al.*, 2017). 일반적으로 버킷(bucket)을 사용하여 채수하지만, 수표면 아래는 자외선에 의해 동·식물플랑크톤의 분포가 제한되는 것으로 알려져 있어 채수기 또는 컬럼샘플러를 사용하여 수심 0.5~1 m 사이의 원수가 채수되도록 하는 것이 바람직하다(Mostajir *et al.*, 1999).

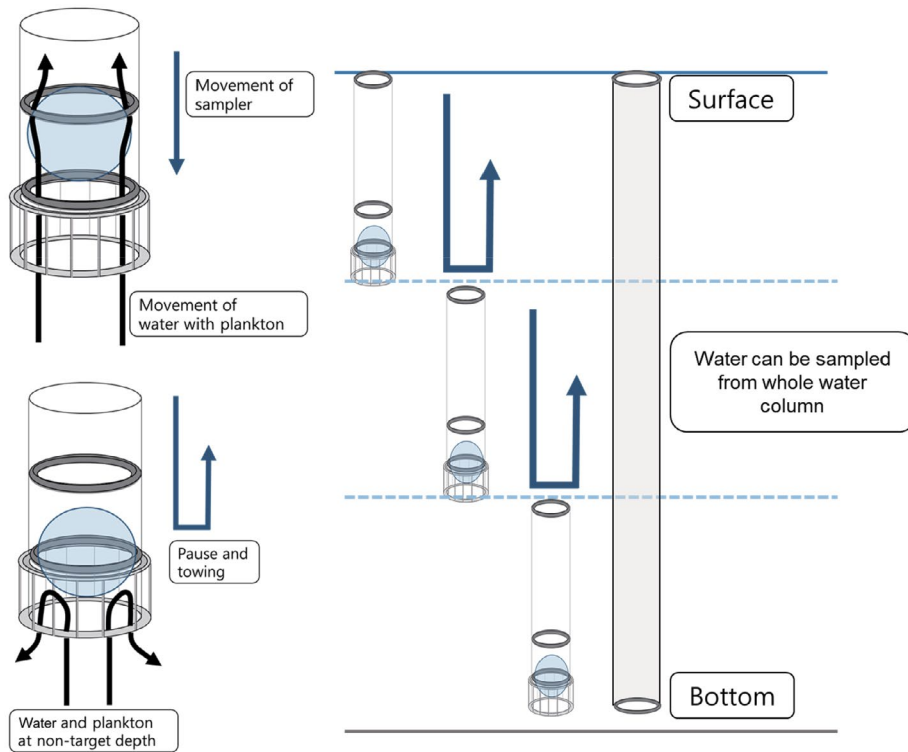


Fig. 1. Structure and collection method of column sampler.

하천의 경우, 물의 흐름으로 인해 수체 전체가 혼합되므로 동물플랑크톤은 수직적으로 균일하게 분포한다(Speirs and Gurney, 2001). 하지만 국내 대형하천은 수체가 정체되는 구간에서 호수와 유사한 이질적 수직 분포를 나타내는 경우가 있어 채집시 이 부분을 고려해야 한다(Joo *et al.*, 2002). 수생태계의 공간적 이질성은 수직적 그리고 수평적으로 나타난다. 수체의 중심부와 수변부는 수심, 유속, 유광대 비율 등 물리적 요인의 차이를 보이며, 그에 따라 수생식물 군락의 유무, 먹이자원 농도와 같이 동물플랑크톤의 서식 환경이 달라진다. 수변부에서는 수초대와 수생식물의 부식물과 같은 유기물 입자로 인해 동물플랑크톤 채집 및 조사가 비교적 어려워 수생태계 환경 평가에서는 일반적으로 중심부를 대표지점으로 선정하고 있다(Sakuma *et al.*, 2002). 하지만, 수변부의 동물플랑크톤 군집이 중심부 대비 풍부한 종으로 구성되어 있다는 연구결과도 있어(Suthers and Rissik, 2009), 연구목적에 따라서는 동물플랑크톤 전체 군집 조성 파악을 위해 수변부 조사를 동시에 실시하여 다양한 기질에 부착 형태로 서식하는 부착성 동물플랑크톤 종을 간과하지 않게 해야 한다(Taniguchi *et al.*, 2003). 이전에 수행된 연구 결과에 기반하여 윤충류(rotifers), 지각류(cladocerans), 요각류(copepods) 종들을 선호 서식처에 따라 분류한 내용은 Table 2와 같다.

수중에 존재하는 기질, 특히 수생식물에 부착하여 존재하는 동물플랑크톤을 채집하기 위해서는 Fig. 2와 같은 방법을 적용할 수 있다(Sakuma *et al.*, 2002). 이 방법은 수생식물을 직접 수중에서 잘라낸 후, 채수병에 보관하는 방법 대비 수생식물 처리 중 발생하는 부착 동물플랑크톤 이탈로 인한 손실이 적은 것으로 알려져 있다. 수초 표면과 같은 미세서식처의 동물플랑크톤 출현량에 대한 구체적인 정량화 방법은 국내에서는 현재까지 보고된 바가 없지만, 함께 채집한 수초의 건중량을 계산하거나 수초의 정해진 표면적에 대한 건중량을 구하여 이를 대입, 수초의 표면적에 대한 부착 동물플랑크톤의 출현량을 간접적으로나마 구할 수 있을 것으로 사료된다.

2) 분류군별 밀도 차이

동물플랑크톤은 종에 따라 상이한 개체 크기를 가지며, 이로 인해 분류군별 크기 스펙트럼이 다양하게 나타난다. 이러한 차이는 피식-포식 및 경쟁과 같은 생물학적 상호작용에 중요하게 작용하며, 부영양호의 경우 개체군 밀도 범위에서 역시 차이를 나타낸다(Kim *et al.*, 2012).

소형 동물플랑크톤으로 분류되는 윤충류는 계절별로 적게는 200 Inds. L⁻¹ 내외(겨울철)부터 많게는 1700 Inds. L⁻¹ 이상(봄철~여름철)까지 폭 넓은 밀도 범위를 나타낸다

Table 2. Classification of zooplankton species according to the preferred habitat (modified from Suthers and Rissik, 2009).

Taxa	Littoral	Pelagic	Coincident
Rotifers	<i>Brachionus quadridentatus</i> <i>Monommata</i> <i>Notommata</i> <i>Testudinella patina</i> most Bdelloids	<i>Asplanchna</i> <i>Brachionus angularis</i> <i>B. rubens</i> <i>Conochilus</i> <i>Filinia</i> <i>Hexarthra mirra</i> <i>Kelicottia longispina</i> <i>Platylas patulus</i> <i>Polyarthra vulgaris</i> <i>Synchaeta</i> <i>Trichotria truncata</i>	<i>Colurella obtusa</i> <i>Euchlanis dilatata</i> <i>Keratella cochlearis</i> <i>Lecane hamata</i> <i>Lepadella oblonga</i> <i>Macrochaetus collinsi</i> <i>Monostyla bulla</i> <i>M. quadridentata</i> <i>Mytilina trigona</i> <i>Philodina roseola</i> <i>Trichocerca capucina</i>
	Cladocerans	<i>Acroperus</i> <i>Camptocercus</i> <i>Ilyocryptus agilis</i> <i>Neothrix</i>	<i>Bosmina longirostirs</i> <i>Ceriodaphnia</i> <i>Daphnia</i> <i>Diaphanosoma</i> <i>Moina macrocopa</i> <i>Scapholeberis kingi</i>
Copepods		<i>Ectocyclops</i> <i>Eucyclops</i> <i>Macrocyclus</i> <i>Paracyclops</i>	<i>Calamoecia</i> <i>Boeckella</i> <i>Eudiaptomus</i> <i>Diaptomus</i> <i>Australocyclops</i> <i>Eucyclops</i> <i>Metacyclops</i> <i>Tropocyclops</i>

(Kim *et al.*, 2003). 하지만 서식처에 따라서는 낮게는 100 Inds. L⁻¹ 이하, 높을 때는 수천-수만 개체까지 계수되기도 한다(Sakamoto *et al.*, 2018).

지각류는 군집에 크기가 다양한 종을 포함한다. 소형 지각류로 부영양화 호소에서 우점하는 *Bosmina*속의 경우, 얇은 부영양호 내에서 1 Inds. L⁻¹ 이하(겨울철)부터 200 Inds. L⁻¹ 이상(봄철)까지 증가하는 경향을 보인다(Sakamoto *et al.*, 2018). 시기에 따라 유사한 환경에서 1 L 당 500 개체 이상 출현하기도 하며, 일반적으로 최대 밀도 200 개체 내외로 보고된다(Seo *et al.*, 2013; Diovisalvi *et al.*, 2015). 중대형 지각류인 *Ceriodaphnia*속, *Daphnia*속 등의 경우 1 L 당 50 개체 이하의 낮은 개체 밀도를 보이는 것이 일반적이나(Kim *et al.*, 2012; Seo *et al.*, 2013; Diovisalvi *et al.*, 2015), 시기에 따라 크게 증가하기도 하며 청수현상(clear water phase)이 발생하는 봄철의 경우 최대 300 Inds. L⁻¹까지 출현하기도 한다(Kim *et al.*, 2003; W. Effler *et al.*, 2015).

요각류의 경우는 얇은 부영양화 호수에서 성체와 copepodites가 1 Inds. L⁻¹ 이하(겨울철)에서 60 Inds. L⁻¹ 내외(봄철)의 범위로 출현한다(Sakamoto *et al.*, 2018). 하지만 환경에 따라서는 100 Inds. L⁻¹ 이상의 개체밀도를 나타내기도 한다(Seo *et al.*, 2013; Diovisalvi *et al.*, 2015). 한편, 요각류의 유생(nauplius)은 부영양호 및 둑병 등에서 봄철

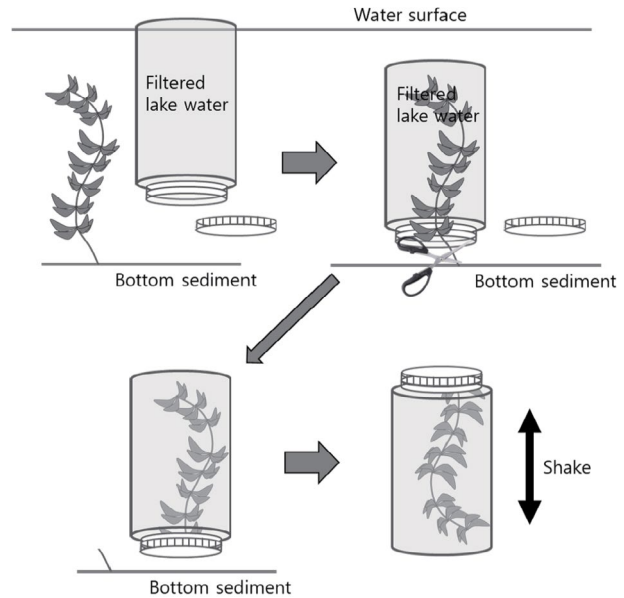


Fig. 2. Method overview for collecting zooplankton attached to macrophytes (modified from Sakuma *et al.*, 2002).

많게는 60~70 Inds. L⁻¹에서부터 적게는 겨울철 10 Inds. L⁻¹ 이하 범위의 개체밀도 범위를 보이며(Kim *et al.*, 2012; Seo *et al.*, 2013; Sakamoto *et al.*, 2018), 출현밀도가 높을 경우에는 1 L 당 수백 개체까지도 증가한다(Diovisalvi *et al.*

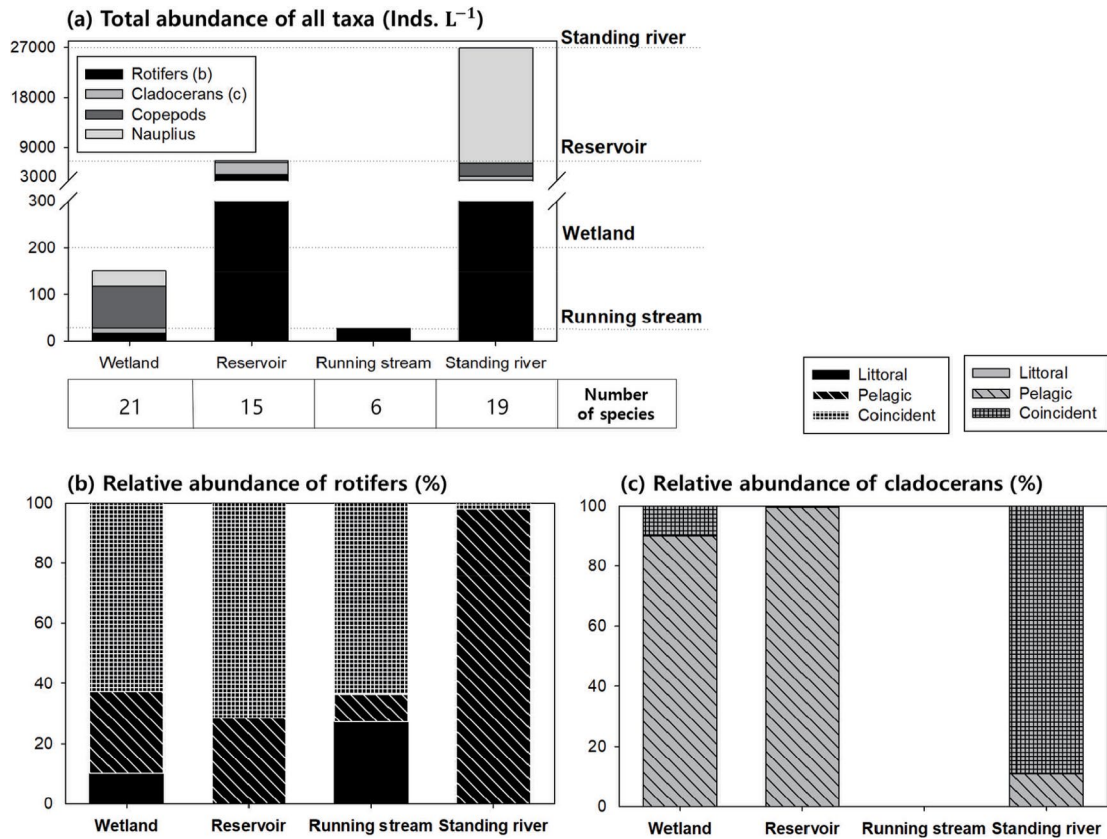


Fig. 3. Comparison of the number of species and abundance of zooplankton according to water body types, wetland; reservoir; running stream; standing river (a), and relative abundance of littoral, pelagic and coincident species in each water body of rotifers (b) and cladocerans (c).

al., 2015).

*Leptodora*속과 같이 크기가 10 mm에 이르는 대형 동물 플랑크톤 종은 대부분 원수 1L 당 1 개체 이하 정도의 낮은 밀도로 현존하고 있어 원수를 여과하는 식의 채집방법으로는 관찰이 어려운 경우가 발생한다. 이들의 경우에는 네트로 충분한 거리를 인양하여 대량의 원수를 여과하는 경우에 확인이 가능하다(Chang and Hanazato, 2003). 이와 같이 동물플랑크톤의 개체군 밀도는 계절에 따라 큰 차이를 나타내며 수체의 유형에 따라서도 종조성과 그 밀도가 상이하게 나타난다. 하천에서는 대체로 호소 대비 개체밀도와 종 다양성이 낮게 나타나는 경향이 있다. 이는 유수 환경에 의해 서식처에서 이동되며, 번식에 충분한 체류시간이 확보되지 못하기 때문이다. 이러한 하천 동물플랑크톤의 특징을 강조하여 potamoplankton이라 명명하며, 하천에서 유속에 의한 이동거리를 고려하여 동물플랑크톤 개체군 특성을 파악하기도 한다(Kim et al., 2000b; Chételat et al., 2006). 서로 다른 유형의 수체에서의 동물플랑크톤 출현종과 특징, 출현량에 맞추어 적절한 채집방법 및 연구

접근 방법을 고려할 수 있도록 국내의 다양한 수생태계 내 동물플랑크톤 정보를 Fig. 3에 제시하였다.

유속이 빠른 소형하천에서는 출현종 수 및 출현량 모두 낮게 나타난 반면, 정체된 수역들에서는 비교적 높게 나타났다(Fig. 3a). 주로 부유성 동물플랑크톤 종들의 개체밀도가 높게 나타나는 저수지와 정체된 대형하천과는 달리, 습지와 소형하천에서는 부착종들의 개체밀도가 상대적으로 높은 것으로 파악되었다(Fig. 3b, 3c). 습지의 경우, 수생식물 군락과 같은 서식처 및 피난처 환경이 발달되어 부착성 동물플랑크톤 종들에게 기질을 제공해줄 수 있는 환경으로 인해 부유종 이외에 부착종들이 상대적으로 많이 출현한 것으로 판단된다. 한편, 소형하천에서는 유수환경에서 기질에 부착하여 서식 가능한 종들이 부유종들에 비해 생존가능성이 높기 때문에 부착종들이 높은 비율로 존재하며, 이들 중 기질에서 이탈된 개체들이 주로 채집되는 것으로 여겨진다.

동물플랑크톤의 시기별, 공간별 개체군 밀도 특성을 고려하여 현장에서의 동물플랑크톤 채집방법, 채수 및 여과

량, 실내 동정·계수 작업 시 부차시료(subsample)의 양을 달리하여 적용할 필요가 있다. 동물플랑크톤 세 분류군 중 연중 비교적 높은 개체밀도를 가지는 윤충류는 적은 양의 원수를 여과한 시료로 충분히 동정 및 계수가 가능하여 일반적으로 원수를 채수하여 여과하는 방식으로 채집하는 것을 권고하고 있다(Ministry of Environment, 2017a, b). 중·대형 동물플랑크톤의 경우는 적은 밀도를 고려하여 시료의 농축 및 부차시료 양을 달리하여 조절해야 한다. 여건에 따라 가능하다면 네트를 이용하여 다량의 원수를 여과한 시료를 확보하는 것이 정확한 중 동정 및 계수 작업에 도움이 된다.

3) 여과와 네트의 사용

동물플랑크톤을 농축하는 방법에는 채수한 원수를 네트에 여과하거나 네트를 직접 수직 또는 수평으로 인양하는 방식으로 나뉘어진다. 채수한 원수를 네트에 여과하는 방식인 경우, 여과량은 사용되는 도구의 종류에 따라 상이하지만 보통 5~10 L 정도 사용하는 것이 일반적이다(Ministry of Environment, 2017a, b). 동물플랑크톤의 출현량은 여과량 내 존재하는 개체수에 기반하여 산출되기 때문에 개체군 밀도가 낮은 종의 경우는 군집조성 또는 종의 유무 분석에 오차를 발생시킬 수 있다. 이러한 경우에는 인양거리에 따라 네트를 통해 여과되는 물의 양이 달라지는 것을 이용하여(예: 구경이 30 cm인 네트를 이용하여 5 m 인양할 경우 약 353 L 여과) 직접 거리를 조절하여 인양, 여과시키는 방법을 통해 개체군 밀도가 낮은 종을 효과적으로 채집할 수 있다(Fig. 4).

네트를 사용하여 동물플랑크톤의 군집 분포를 조사하는 경우, 네트의 입구를 통해 들어오는 물의 속도와 망목보다 크기가 작은 유기물과 물이 네트를 빠져나가는 속도 차에 의해 네트 속의 동물플랑크톤이 물과 함께 네트 입구로 되돌아 나가는 현상인 오버플로우가 발생한다. 특히 부영양화 환경의 경우, 입자성 물질로 인해 네트의 망목이 막히며 물이 잘 통과되지 않는 현상이 종종 일어난다. 이로 인해 네트를 인양한 물의 부피와 실제 여과된 물의 부피에 차이가 발생한다. 이와 같은 여과효율(filtration efficiency)은 네트의 망목, 구경, 인양 방법 및 속도에 따라 그 결과가 상이하게 나타난다(Table 3). 수중의 현탁물 농도와 인양 속도 등에 영향을 받아 발생하는 네트막힘(clogging) 현상과 오버플로우는 망목에 의해 영향을 받으므로 적절한 망목의 선택도 중요하다. 네트막힘 현상은 주로 식물플랑크톤이나 크기가 큰 쇄설물 입자들에 의해 발생되기 때문에 현탁도뿐만 아니라 부영양화 정도에 의해서도 영향을 받게 된다(Riccardi, 2010). 따라서, 부영양화 수계에서 동물

플랑크톤 정량채집이 요구되는 경우 여과효율을 고려하여 오버플로우를 최소화시켜야 할 필요가 있다(Suthers and Rissik, 2009). 여과효율은 이론적 여과량 대비 네트의 망목, 구경, 길이 등에 따라 달라지는 실제 여과량에 계산되며 그 식은 다음과 같다(식 2; Smith *et al.*, 1968).

$$F = (FA \times h) / \{(D/2)^2 \times \pi \times h\} \times 100 \quad (\text{식 } 2)$$

$$B = a^2 / (a + f)^2 \quad (\text{식 } 2-1)$$

$$FA = B \times MA \quad (\text{식 } 2-2)$$

F = 여과효율(%), h = 네트길이(m), D = 네트구경(m)

B = 투과성, a = 망목(mm), f = 필라멘트 지름(mm)

FA = 여과면적(m²), MA = 망면적(m²)

또한, 네트 구경 안팎으로 여수계(flow meter)를 설치하여 유속 측정을 통해 측석에서 여과효율을 계산하는 방법도 있다(식 3; Jacobs and Grant, 1978). 유속은 여과량 및 네트 막힘 정도를 계산하는데 중요하게 사용된다(Smith *et al.*, 1968).

$$F_i = U_a / U_p \times 100 \quad (\text{식 } 3)$$

F_i = 측석여과효율(%)

U_a = 내부 혹은 구경 통과 시 유속(m s⁻¹)

U_p = 외부 혹은 이론적으로 계산된 유속(m s⁻¹)

네트의 인양 속도는 일반적으로 1~2 m s⁻¹ 정도로, 그보다 빠르거나 느리게 인양하게 되면 과소측정의 우려가 있어, 특히나 장거리 수평 인양 또는 수심의 깊은 지점에서의 수직 인양 시에는 여수계의 이용이 필수적이다(Suthers and Rissik, 2009). 답수 조사의 경우, 망목 50~126 μm의 동물플랑크톤 네트를 권장하고 있으며 국내 생물측정망 조사 및 평가지침과 이를 기반으로 하는 호소환경 조사 지침에서는 사용 네트의 망목을 60 μm로 명시하고 있다(Riccardi, 2010; Ministry of Environment, 2017a, b). 하지만 크기가 비교적 크고 유영능력이 뛰어난 종은 망목이 작을 경우 망목으로부터 압력을 감지하고 네트를 피할 수 있으며, 이를 방지하기 위해 크기를 키우게 되면 소형 종이 네트를 통과해 과소 측정 문제가 발생하기 때문에 연구 목적에 따라 적절한 망목의 네트를 사용해야 할 필요가 있다(Suthers and Rissik, 2009). 수평 인양은 수심이 얇은 지점에서 많은 여과량을 필요로 할 때 보편적으로 사용되는 방법이지만, 인양하는 중에 네트가 바닥에 닿거나 일정한 속도로 인양하는데 어려움이 있어 정량채집에는 다소 적합하지 않다. 따라서, 동물플랑크톤 출현종의 확인이나 특정종의 다량 채집의 경우에 유용한 방법이다. 동물플랑크톤

Table 3. Summary of mesh size information by the body size of major zooplankton.

Taxa	Body size	Proper mesh size of zooplankton net	References
Rotifers	0.1 ~ 0.5 mm	25-50 μm *NXXX 25	Suthers and Rissik, 2009; Dodson <i>et al.</i> , 2010;
Cladocerans	About 1 mm	90-150 μm *NXX 15-9	Reid and Williamson, 2010; Wallace and Snell, 2010;
Copepods	0.5 ~ 2 mm	200 μm *NXX 7	Tseng <i>et al.</i> , 2011

*mesh size: NXXX 25 = 41 μm ; NXX 15-9 = 80-150 μm ; NXX 7 = 200 μm / Nylon

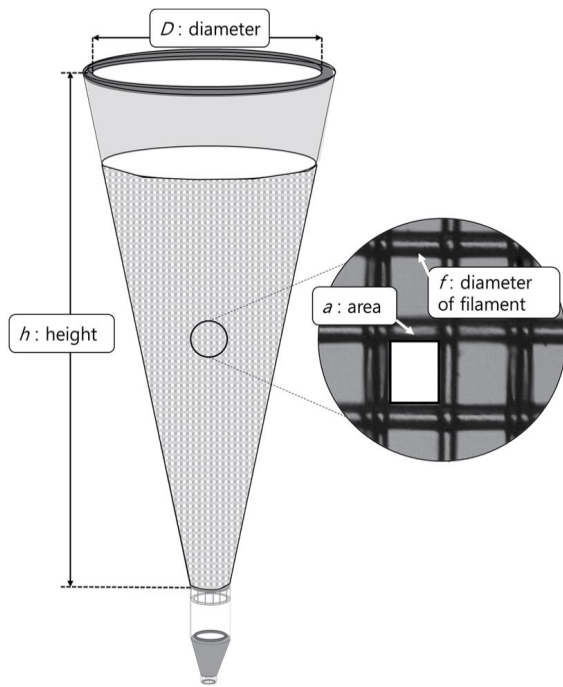


Fig. 4. Structure of zooplankton net.

네트는 1회 이상 사용 시 망목과 같은 속성에 따라 일정 거리 이상을 인양하게 되면 부분적 혹은 전체적으로 네트가 막힐 수 있기 때문에 여과효율을 최상으로 유지하기 위해서는 채집 후 세척이 필수적으로 요구된다(Suthers and Rissik, 2009).

4) 시료의 고정

동물플랑크톤 시료는 채집 이후 보존을 위해 고정하는 작업이 수행되어야 한다. 다양한 화학물질 처리를 통해 동물플랑크톤 고정이 가능하지만 그 중에서 최종농도 4%로 희석된 포르말린 혼합용액 (formalin; 37% 포르말데히드 용액)이 가장 보편적으로 사용된다(Suthers and Rissik, 2009).

포르말린을 이용한 개체 고정은 몇 가지 문제점을 안고

있다. 내구성이 낮은 표피(lorica)로 구성된 윤충류는 포르말린 고정액 사용 시 부속지 수축 혹은 형태 변형으로 인해 종 분류가 어려운 경우가 발생한다(예: *Asplanchna* sp.; *Synchaeta* sp.) (Hochberg *et al.*, 2015). 포르말린 처리 시 최종 농도를 2% 이하까지 낮추어 사용하는 것을 통해 이 같은 문제를 최소화할 수 있으나, 이 경우 장기간 보관에 주의가 필요하다(Zinabu and Bott, 2000). 알이 카라페이스(carapace) 내부에 위치하는 지각류는 포르말린 처리에 의해 형태가 왜곡됨에 따라 알의 손실이 발생하는 문제를 가지고 있다(Haney and Hall, 1973). 알의 갯수는 동물플랑크톤 개체군 동태 파악을 위한 출생률 계산에 중요한 요소로 시료 고정에 의한 알의 손실은 군집 변화를 연구하는데 부정확한 결과를 초래할 수 있다(식 4; Paloheimo, 1974; Chang and Hanazato, 2003). 이러한 현상은 수크로스-포르말린 사용을 통해 보완할 수 있다. 첨가된 수크로스인 높은 점성은 고정된 지각류의 카라페이스가 개방되어 알이 유출되는 것을 막아준다. 적절한 농도의 수크로스-포르말린 용액은 4% 포르말린에 40 g L⁻¹ 농도의 수크로스를 첨가하는 것으로 알려져 있으나, 적용하고자 하는 종의 크기 등에 따라 조정하여 사용 가능하다(Haney and Hall, 1973).

$$r = b - d \tag{식 4}$$

$$\ln D = a + b \times (\ln T)^2 \tag{식 4-1}$$

$$b = \ln\{(E + 1)/D\} \tag{식 4-2}$$

$$d = b - \{(\ln N_{t+1} - \ln N_t)/t\} \tag{식 4-3}$$

r = 개체군 성장률

D = 난발생 시간(days), a, b = 종특이적 상수, T = 평균 수온(°C), b = 출산율, E = 개체군 내 알의 개수,

d = 사망률, N = 개체군 크기, t = 채집시간(days)

그 외에도 알코올 및 루골액 등의 화학물질을 이용할 수 있다. 알코올의 경우, 최근 활발히 적용되는 유전자 검증을 고려하면 유용한 고정 방법이 될 수 있으나 포르말린 대비

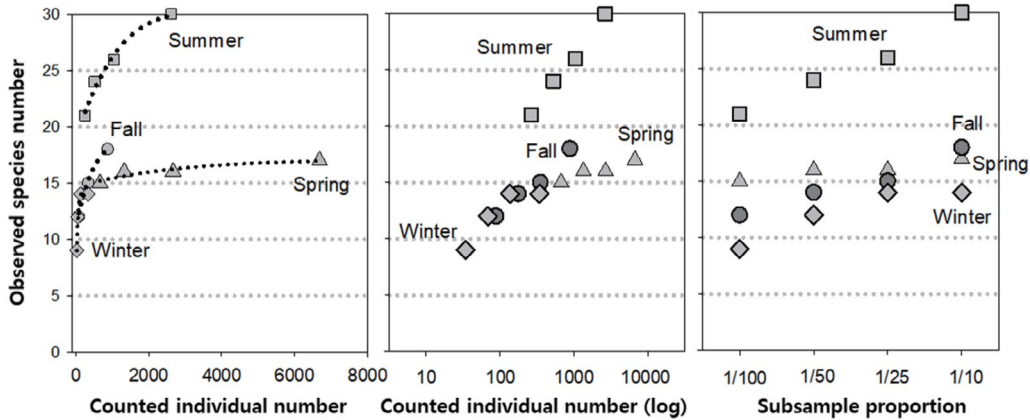


Fig. 5. Observed species number of zooplankton according to the counted individual number and the subsample proportion based on a specimen filtered by 10 L of raw water (Giheung reservoir, Korea; 37.24°, 127.09°).

Table 4. Summary of appropriate methods of zooplankton for different species and habitats.

Zooplankton group	Filter volume	Subsample concentration	Sampling method and device	Note	
Rotifers	> 5 L	1/100 (Eutrophic) 1/50 (Mesotrophic)	Lake	Column sampler (whole water column) Van Dorn sampler (selected depth)	Representative abundance and Index calculation Biological interaction and functional approach
			River	Surface water filtering Column sampler (vertical net towing alternatively)	Small fast-running river Large regulated river
			Lake	Vertical net towing (whole water column) Van Dorn sampler (selected depth)	Representative abundance and Index calculation Biological interaction and functional approach
Crustacean (Cladocera and Copepoda)	> 10 L	1/100 (Small Cladocera and Nauplius) 1/10 (Large Cladocera, Cyclopoida, Calanoida)	River	Surface water filtering Vertical net towing (whole water column)	Small fast-running river Large regulated river

수축과 왜곡의 정도가 심한 것으로 알려져 있다. 루골액 또한 개체를 염색 시켜 종 동정에 어려움을 준다는 한계가 있다. 최근, 사용의 안전성과 유전자 분석 활용을 위해 알코올을 통한 시료 고정이 많이 이루어지고 있지만, 이 경우에 지속적인 보존을 위해 주기적으로 알코올의 교체가 요구된다. 또한, 알코올 고정 시료의 경우 처리 농도가 높을수록 현미경 관찰 시 시료가 흐르는 현상이 나타나 현미경 검경을 통한 개체수 계수와 같은 작업에는 적합하지 않다.

5) 시료 동정 및 계수 시 부차시료의 추출

채집된 시료는 동물플랑크톤 군집의 구성과 출현량을 파악하는데 사용된다. 종의 동정과 계수는 일반적으로 동

일한 시료 농축 조건 하에서 일정량의 부차시료 추출을 통해 이루어지지만, 연구 목적에 따라 농축과 부차시료 추출량을 달리하여 적용할 수 있다. 서로 다른 수체간에 대표 출현종 및 총 출현량을 비교할 경우, 여과된 원수의 양이 동일하다는 가정 하에 상대적인 동정 및 계수가 가능하다. 하지만 부차시료 내 동물플랑크톤 종 수는 원수의 여과량에 비례하기 때문에 종다양성과 같이 소수의 종까지 검출이 요구되는 상황에서는 대상 수체의 환경을 고려하여 농축 정도와 부차시료의 추출량을 조절해야 할 필요가 있다. 실제 생물측정망 조사 및 평가지침 내 보 구간을 대상으로 한 동물플랑크톤 시료 농축 가이드라인에는 분류군에 따른 농축량을 명시하고 있다 (Ministry of Environment,

2017a).

동일한 조사지점(예: 기흥저수지)에서 채집된 동물플랑크톤 시료(원수 10L 여과 기준)를 부차시료 양에 따라 관찰되는 출현종 수를 비교해보면 시료를 농축하여 보다 많은 개체수를 계수할수록 출현종 수가 증가하였고, 그 경향성은 계절에 따라 상이하였다(Fig. 5b). 확인된 출현종 수는 계수하는 개체수가 일정량으로 증가하면 포화되는 경향을 보였으나 이때 계수된 개체수는 계절에 따라 다르게 나타났다. 따라서 대략적인 종조성과 출현량을 조사하는 경우와 달리, 출현종 수가 중요한 연구를 수행할 때에는 적정 농도로 시료를 농축하거나 부차시료의 추출 비율을 높이는 것이 필요하다.

결 론

동물플랑크톤의 기초연구는 출현종들의 조성과 개체수의 정량적 분석을 바탕으로 이루어지며, 이들 정보는 서식처 환경을 평가하는 다양한 지수를 계산하기 위한 기초 자료로 사용되어진다. 서식처를 대표할 수 있는 정량적 정보를 추출하기 위해서는 통일된 방법의 적용을 필요로 하며, 동시에 환경조사와 같은 많은 지점의 정보를 효율적으로 축적하기 위하여 가능한 간편한 방법의 적용이 요구되어진다. 식물플랑크톤의 섭식, 어류의 먹이원으로써 동물플랑크톤의 역할 등과 같은 생물학적 상호작용 및 이를 기반으로 한 생태적 해석을 위해서는 단순한 종조성과 출현량에 대한 정보 외에 서식처 내 시·공간 분포에 대한 정보 등이 추가적으로 요구되므로, 이에 대한 채집과 분석 방법을 고려할 필요가 있다. Table 4에는 하천과 호수에서 연구 목적에 따라 적용할 수 있는 적절한 동물플랑크톤 채집방법과 계수에 필요한 농축량을 요약하여 제시하였다.

동물플랑크톤 군집분석은 다양한 특성을 가진 종들의 생태를 연구하기 위한 목적뿐만 아니라 수생태계의 물질순환 구성과 순환 메커니즘을 이해하기 위해 필요한 연구이며, 일차생산을 이용한 고차 소비자로의 에너지 전환, 내수면 어족자원의 치어 성장의 먹이원으로써의 역할 등을 중심으로 향후 필요한 연구에 부합하는 채집방법의 개발이 지속적으로 요구될 것으로 예상된다. 해양생태계의 경우, 동물플랑크톤의 시·공간 분포 파악을 위해 자동채집방법, 환경유전자(eDNA) 분석과 같은 다양한 기술이 개발되어 적용되고 있다(Broughton and Lough, 2006; Bucklin *et al.*, 2016; Pitois *et al.*, 2016). 담수생태계의 경우에도 최근 유전자 분석과 같은 최신 기술을 이용한 종조성 및 환경스트레스 요인 분석과 같은 다양한 연구 접근이 시도되고 있다(Makino *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2018; Harper *et al.*,

2019). 이와 같은 기술의 개발과 적용을 위해서는 적절한 시료의 채집과 처리를 통한 보다 정확한 군집정보(종조성, 밀도, 시·공간 분포 양상 등)의 기초자료 확보가 필수적으로 수반되어야 한다. 본 논문에서는 현재 사용되고 있는 담수 동물플랑크톤 조사방법들을 현장에서의 채집과 전처리 과정에 초점을 맞추어 각각의 장·단점들을 함께 제시하여, 연구 목적에 부합하는 방법의 선택, 적용에 도움을 주고자 하였으며, 동시에 향후 수생태계 구조와 기능을 파악하기 위한 다양한 연구방법 개발과 응용에 필요한 기초정보를 제공하고자 하였다.

적 요

동물플랑크톤은 식물플랑크톤 및 기타 소형 미생물을 섭식하고, 고차 생물군집에 포식되어 일차생산과 상위 영양단계를 연결하는 중추적인 연결고리 역할자로 수생태계 내 물질 및 에너지 순환 구조와 기능을 이해하는데 필수적인 요소로 여겨지고 있다. 하지만, 동물플랑크톤은 분류군에 따라 상이한 크기와 유영능력, 그에 따른 다양한 서식 특성을 가지고 있어, 식물플랑크톤에 비해 다소 복잡한 채집 및 분석방법이 요구된다. 정확한 동물플랑크톤 정량화를 위해서는 종특이적인 분포를 고려하여 장소를 선정하고 적합한 도구(채수기, 플랑크톤 네트 등)를 이용하여 시료를 채집해야 할 필요가 있으며, 동정 및 계수 중에 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위해서는 고정법과 부차시료에 대한 고려도 중요하다. 본 논문에서는 현재 사용되고 있는 대표적인 동물플랑크톤 정량채집방법 및 시료처리방법의 장·단점을 소개하여 연구 목적에 부합하는 방법을 선택, 적용할 수 있도록 가이드라인을 제시하고자 하였다.

저자 기여도 개념설정: H.J. Oh, K.H. Chang & H.W. Kim, 방법론: H.J. Oh, K.H. Chang, H.G. Jeong, G.H. La & H.W. Kim, 분석: H.J. Oh & K.H. Chang, 자료제공: K.H. Chang, H.G. Jeong, S.M. Go, G.H. La & H.W. Kim, 자료관리: H.J. Oh & K.H. Chang, 원고 초안작성: H.J. Oh & K.H. Chang, 원고 교정: K.H. Chang, H.G. Jeong, G.H. La & H.W. Kim, 원고 편집: H.J. Oh, K.H. Chang & H.W. Kim, 과제관리: H.W. Kim, 연구비 수주: H.W. Kim

이해관계 본 연구에 참여한 모든 저자들은 학술 출판에 있어 어떠한 이해충돌의 여지가 없음을 알려드립니다.

REFERENCES

Akinbuwa, O. and I.F. Adeniyi. 1996. Seasonal variation, distri-

- bution and interrelationships of rotifers in Opa Reservoir, Nigeria. *African journal of Ecology* **34**(4): 351-363.
- Broughton, E.A. and R.G. Lough. 2006. A direct comparison of MOCNESS and Video Plankton Recorder zooplankton abundance estimates: possible applications for augmenting net sampling with video systems. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **53**(23-24): 2789-2807.
- Bucklin, A., P.K. Lindequ, N. Rodriguez-Ezpeleta, A. Albaina and M. Lehtiniemi. 2016. Metabarcoding of marine zooplankton: prospects, progress and pitfalls. *Journal of Plankton Research* **38**: 393-400.
- Chételat, J., F.R. Pick and P.B. Hamilton. 2006. Potamoplankton size structure and taxonomic composition: influence of river size and nutrient concentrations. *Limnology and Oceanography* **51**(1, part 2): 681-689.
- Chang, K.H., S.J. Hwang, M.H. Jang, H.W. Kim, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2001. Effect of juvenile fish predation on the zooplankton community in the large regulated Nakdong River, South Korea. *Korean Journal of Limnology* **34**: 310-318.
- Chang, K.H. and T. Hanazato. 2003. Seasonal and spatial distribution of two *Bosmina* species (*B. longirostris* and *B. fatalis*) in Lake Suwa, Japan: its relation to the predator *Leptodora*. *Limnology* **4**: 47-52.
- Chang, K.H. and T. Hanazato. 2004. Diel vertical migrations of invertebrate predators (*Leptodora kindtii*, *Thermocyclops taihokuensis*, and *Mesocyclops* sp.) in a shallow, eutrophic lake. *Hydrobiologia* **528**: 249-259.
- Chang, K.H. and T. Hanazato. 2007. Ecological role of predacious cladoceran *Leptodora kindtii* in a lake food web: a review. *Bulletin of the Plankton Society of Japan* **54**: 99-110.
- Diovisalvi, N., G.E.S. Echeverry, L. Lagomarsino and H.E. Zagarese. 2015. Seasonal patterns and responses to an extreme climate event of rotifers community in a shallow eutrophic Pampean lake. *Hydrobiologia* **752**(1): 125-137.
- Dodson, S.L., C.E. Cáceres and D.C. Rogers. 2010. Cladocera and other Branchiopoda. In *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. Academic Press, Cambridge: 773-827.
- Frost, B.W. and S.M. Bollens. 1992. Variability of diel vertical migration in the marine planktonic copepod *Pseudocalanus newmani* in relation to its predators. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **49**(6): 1137-1141.
- García, P.R., S. Nandini, S.S.S. Sarma, E.R. Valderrama, I. Cuesta and M.D. Hurtado. 2002. Seasonal variations of zooplankton abundance in the freshwater reservoir Valle de Bravo (Mexico). *Hydrobiologia* **467**(1-3): 99-108.
- Grosbois, G., P.A. del Giorgio and M. Rautio. 2017. Zooplankton allochthony is spatially heterogeneous in a boreal lake. *Freshwater Biology* **62**(3): 474-490.
- Haney, J.F. and D.J. Hall. 1973. Sugarcoated Daphnia: A preservation technique for Cladocera 1. *Limnology and Oceanography* **18**(2): 331-333.
- Harper, L.R., A.S. Buxton, H.C. Rees, K. Bruce, R. Brys, D. Halfmaerten, D.S. Read, H.V. Watson, C.D. Sayer, E.P. Jones, V. Priestley, E. Mächler, C. Múria, S. Garcés-Pastor, C. Medupin, K. Burgess, G. Benson, N. Boonham, R.A. Griffiths, L.L. Handley and B. Hänfling. 2019. Prospects and challenges of environmental DNA (eDNA) monitoring in freshwater ponds. *Hydrobiologia* **826**(1): 25-41.
- Hochberg, R., R.L. Wallace and E.J. Walsh. 2015. Soft bodies, hard jaws: an introduction to the symposium, with rotifers as models of jaw diversity. *Integrative and Comparative Biology* **55**(2): 179-192.
- Jacobs, F. and G. Grant. 1978. Guidelines for zooplankton sampling in quantitative baseline and monitoring programs. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/3-78/026.
- Joo, G.J., K.S. Jeong, H.W. Kim and K.H. Chang. 2002. Vertical distribution of zooplankton in the regulated river (Nakdong River). *Korean Journal of Limnology* **35**(4): 320-325.
- Joseph, L.N., S.A. Field, C. Wilcox and H.P. Possingham. 2006. Presence-absence versus abundance data for monitoring threatened species. *Conservation Biology* **20**(6): 679-1687.
- Kim, H.W., S.J. Hwang and G.J. Joo. 2000a. Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in the regulated Nakdong River (Korea). *Journal of Plankton Research* **22**(8): 1557-1577.
- Kim, H.W., G.J. Joo and N. Walz. 2000b. Differences of zooplankton development along a lake and a river stretch of the River Spree (Germany). *Korean Journal of Limnology* **33**(3): 197-205.
- Kim, H.W., S.J. Hwang, K.H. Chang, M.H. Jang, G.J. Joo and N. Walz. 2002. Longitudinal difference in zooplankton grazing on phyto- and bacterioplankton in the Nakdong River (Korea). *International Review of Hydrobiology* **87**: 281-293.
- Kim, H.W., K.H. Chang, K.-S. Jeong and G.J. Joo. 2003. The spring metazooplankton dynamics in the river-reservoir hybrid system (Nakdong River, Korea): its role in controlling the phytoplankton biomass. *Korean Journal of Limnology* **36**(4): 420-426.
- Kim, H.W., K.H. Chang, W.K. Shin, G.H. La, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2004. Population dynamics of predator (*Asplanchna* spp.) and its impact on herbivorous rotifers community in three tributaries of the Nakdong River (S. Korea). *Korean Journal of Limnology* **37**: 385-393.
- Kim, H.W., G.H. La, J.H. Park, H.J. Song, K.S. Hwang, B.J. Lim and H.U. Lee. 2012. Community size structure of zooplankton assemblages in 29 lentic ecosystems on the Youngsan-Seomjin River basin (2010~2011). *Korean Journal of Environmental Biology* **30**(1): 64-70.
- Kim, H.W., H.G. Jeong, J.Y. Choi, S.K. Kim, K.S. Jeong, G.H.

- La, H.J. Oh and K.H. Chang. 2018. Past history of freshwater zooplankton research in South Korea and Korean Society of Limnology and future directions. *Korean Journal of Environment and Ecology* **51**: 40-59.
- Lee, P.G. and C. Park. 2004. Impact of mesh size difference on zooplankton distribution data and community interpretation. *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography* **9**: 12-19.
- Lee, S.W., S.J. Hwang, J.K. Lee, S.I. Jung, Y.J. Park and J.T. Kim. 2011. Overview and application of the National Aquatic Ecological Monitoring Program (NAEMP) in Korea. *Journal of International Limnology* **47**(S1): S3-S14.
- Lucas, M.C. and E. Baras. 2000. Methods for studying spatial behaviour of freshwater fishes in the natural environment. *Fish and Fisheries* **1**(4): 283-316.
- Makino, W., N. Maruoka, M. Nakagawa and N. Takamura. 2017. DNA barcoding of freshwater zooplankton in Lake Kasumigaura, Japan. *Ecological Research* **32**: 481-493.
- May, L. 1986. Rotifer sampling—a complete species list from on visit? *Hydrobiologia* **134**: 117-120.
- Ministry of Environment. 2017a. Biomonitoring survey and assessment manual.
- Ministry of Environment. 2017b. Guideline for environmental assessment in lakes and reservoirs.
- Ministry of the Environment Government of Japan. 2014. Monitoring sites 1000 land water survey (lakes and marshes): 2009-2013 summary report. *Environmental Specialized data for Government offices* **49**(6): 47-126. (in Japanese)
- Mostajir, B., S. Demers, S. de Mora, C. Belzile, J. Chanut, M. Gosselin, S. Roy, P. Z. Villegas, J. Fauchot, J. Bouchard, D. Bird, P. Monfort and M. Levasseur. 1999. Experimental test of the effect of ultraviolet-B radiation in a planktonic community. *Limnology and Oceanography* **44**(3): 586-596.
- Oh, H.J., H.G. Jeong, G.S. Nam, Y. Oda, W. Dai, E.H. Lee, D. Kong, S.J. Hwang and K.H. Chang. 2017. Comparison of taxon-based and trophi-based response patterns of rotifer community to water quality: applicability of the rotifer functional group as an indicator of water quality. *Animal Cells and Systems* **21**(2): 133-140.
- Osugi, O., T. Shigeru and A. Kunihiro. 2014. Revision of the manual for national census on river environments in dams: improvement of plankton survey methods. Report of Water Resources Environment Research Institute: 40-46. (in Japanese)
- Paloheimo, J.E. 1974. Calculation of instantaneous birth rate. *Limnology and Oceanography* **19**(4): 692-694.
- Parmar, T.K., D. Rawtani and Y.K. Agrawal. 2016. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in Life Science* **9**(2): 110-118.
- Pitois, S.G., P. Bouch, V. Creach and J. Van der Kooij. 2016. Comparison of zooplankton data collected by a continuous semi-automatic sampler (CALPS) and a traditional vertical ring net. *Journal of Plankton Research* **38**: 931-943.
- Reid, J.W. and C.E. Williamson. 2010. Copepoda. In *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. Academic Press, Cambridge: 829-899.
- Riccardi, N. 2010. Selectivity of plankton nets over mesozooplankton taxa: implications for abundance, biomass and diversity estimation. *Journal of Limnology* **69**(2): 287-296.
- Sakamoto, M., T. Nagata, T. Hanazato, Y. Miyabara, J.Y. Ha, H.D. Park, H. Toda, H.J. Oh, Y. Oda and K.H. Chang. 2018. Long-term zooplankton community records (1996-2017) for Lake Suwa (Japan). *Ecological Research* **33**(1): 1-1.
- Sakuma, M., T. Hanazato, R. Nakazato and H. Haga. 2002. Methods for quantitative sampling of epiphytic microinvertebrates in lake vegetation. *Limnology* **3**: 115-119.
- Seo, D.I., G.S. Nam, S.H. Lee, E.H. Lee, M. Kim, J.Y. Choi, J.H. Kim and K.H. Chang. 2013. Plankton community in weir section of the Nakdong River and its relation with selected environmental factors. *Korean Journal of Environmental Biology* **31**(4): 362-369.
- Smith, P.E., R.C. Counts and R.I. Clutter. 1968. Changes in filtering efficiency of plankton nets due to clogging under tow. *ICES Journal of Marine Science* **32**(2): 232-248.
- Speirs, D.C. and W.S. Gurney. 2001. Population persistence in rivers and estuaries. *Ecology* **82**(5): 1219-1237.
- Suthers, I.M. and D. Rissik. 2009. *Plankton: a guide to their ecology and monitoring for water quality*. CSIRO publishing, Clayton.
- Taniguchi, H., S. Takano and M. Tokeshi. 2003. Influences of habitat complexity on the diversity and abundance of epiphytic invertebrates on plants. *Freshwater Biology* **48**: 718-728.
- Thomas, S.M., J.H. Chick and S.J. Czesny. 2016. Underestimation of microzooplankton is a macro problem: one size fits all zooplankton sampling needs alterations. *Journal of Great Lakes Research* **43**(1): 91-101.
- Tseng, L.C., H.U. Dahms, J.J. Hung, Q.C. Chen and J.S. Hwang. 2011. Can different mesh sizes affect the results of copepod community studies? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **398**(1-2): 47-55.
- USEPA. 2012. 2012 National lakes assessment: field operations manual.
- USEPA. 2013. Standard operating procedure for zooplankton sample collection and preservation and secchi depth measurement field procedures.
- W. Effler, S., M.E. Spada, R.K. Gelda, F. Peng, D.A. Matthews, C.M. Kearns and N.G. Hairston Jr. 2015. Daphnia grazing, the clear water phase, and implications of minerogenic particles in Onondaga Lake. *Inland Waters* **5**(4): 317-330.

- Wallace, R.L., T.W. Snell, C. Ricci and T. Nogrady. 2006. Rotifera part 1: biology, ecology and systematics. Guides to the identification of the microinvertebrates of the continental waters of the world. Backhuys Publishers, Leiden.
- Wallace, R.L. and T.W. Snell. 2010. Rotifera. p. 173-235 *In*: Ecology and classification of north American freshwater invertebrates (Thorp J.H. and A.P. Covich, eds.). Academic Press, New York.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1979. Limnological analyses. W.B. Saunders Company, Philadelphia.
- Yoccoz, N.G., J.D. Nichols and T. Boulinier. 2001. Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution* **16**(8): 446-453.
- Zinabu, G.M. and T.L. Bott. 2000. The effects of formalin and Lugol's iodine solution on protozoal cell volume. *Limnological-Ecology and Management of Inland Waters* **30**(1): 59-63.