

## 국내 주요 강 생태계 내 동물플랑크톤의 탄소, 질소, 인 비율 해석

김현우 · 라궁환 · 정광석<sup>1</sup> · 김동균<sup>2</sup> · 황순진<sup>3</sup> · 이재용<sup>4</sup> · 김범철<sup>4,\*</sup>

순천대학교 사범대학 환경교육과, <sup>1</sup>부산대학교 환경기술산업개발연구소,  
부산대학교 자연과학대학 생명과학과, <sup>2</sup>토론토대학교 물리환경과학과,  
<sup>3</sup>건국대학교 생명환경과학대학 보건환경과학과, <sup>4</sup>강원대학교 자연과학대학 환경학과

**Carbon, Nitrogen and Phosphorous Ratios of Zooplankton in the Major River Ecosystems. Kim, Hyun-Woo, Geung-Hwan La, Kwang-Seuk Jeong<sup>1</sup>, Dong-Kyun Kim<sup>2</sup>, Soon-Jin Hwang<sup>3</sup>, Jaeyong Lee<sup>4</sup> and Bomchul Kim<sup>4,\*</sup> (Department of Environmental Education, Suncheon National University, Suncheon 540-742, Korea; <sup>1</sup>Institute of Environmental Technology & Industry, Pusan National University, Busan 609-735, Korea; <sup>2</sup>Department of Biological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea; <sup>3</sup>Department of Physical & Environmental Sciences, University of Toronto, Ontario, Canada; <sup>4</sup>Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; <sup>4</sup>Department of Environmental Science, Kwangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)**

**Abstract** The amounts of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in relation to dry weight (D.W.) were measured in zooplankton from the large four rivers (Han R., Geum R., Yeongsan R. and Seomjin R.) during 2004~2008. The stoichiometry of total zooplankton in four river systems was highly variable. The ranges of average C, N and P-contents were 70~620 mgC mg<sup>-1</sup> D.W., 7.1~85.5 μgN mg<sup>-1</sup> D.W. and 2.5~7.4 μgP mg<sup>-1</sup> D.W., respectively. The mean C:N:P atomic ratios reflected large spatial differences. The C:P and N:P ratios of the zooplankton community ranged from 38 to 392:1 and from 4 to 65:1 in all sampling sites. Self-Organizing Map (SOM) was applied to the survey data, and the study sites were clearly classified into 3 clusters. Clustering was largely affected by the distribution pattern of C, N, P-contents, which is related with characteristics of river systems on the basis of stoichiometry.

**Key words:** zooplankton, river, stoichiometry, phytoplankton, Self-Organizing Map

### 서 론

플랑크톤에 대한 탄소, 질소, 인의 구성 비율에 대한 초기 연구 이후 (Redfield, 1934), 생산자와 소비자 간의 원소 구성 비율 이질성 (Elser *et al.*, 2000), 동물플랑크톤

의 종별 원소 비율 파악 (Ferrão-Filho *et al.*, 2007) 그리고 담수 및 해양에서 다양한 화학양론 관련 연구들이 진행되어왔다 (Sterner *et al.*, 2008). 특히 유수환경인 강 생태계에서는 강 형태의 변화 및 수문학적 요인 등이 동물플랑크톤 군집 동태 변화에 큰 영향을 미치며 (Lair, 2006), 아울러 수 환경에서 동물플랑크톤 군집 조성의 차이는 먹이망 구성 요소간의 탄소, 질소, 인의 순환 변화에 주요 역할을 하는 것으로 알려져 있다 (Andersen and Hessen, 1991). 일반적으로 강 생태계에서의 동물플랑크톤 관련 연구는 단일 수계에서 수행된 연구결과의

Manuscript received 9 December 2013, revised 9 December 2013,  
revision accepted 15 December 2013  
\* Corresponding author: Tel: +82-70-7535-3381, Fax: +82-61-750-3308,  
E-mail: bkim@kwangwon.ac.kr, hwkim@sunchon.ac.kr

비중이 높다(Lair, 2006). 동일 수계 내에서도 공간적인 위치의 차이에 따른 생물상 및 담수 환경요인의 변화는 유수생태계에서 매우 두드러지게 나타나며, 동종이라 하더라도 지리적인 위치나 개체발생학적 성장단계에 따라 개체 간의 탄소, 질소, 인 함량이 변하는 것으로 알려진다(Omori, 1969). 특히, 동물플랑크톤의 화학양론 비율에 대한 연구 자료는 강 생태계에서 영양물질 순환 등에 대한 주요한 정보를 제공해 주는 매개변수이나 국내 주요 강 생태계에서 동물플랑크톤의 화학적 조성 비율에 대한 비교 연구는 미흡한 실정이다. 특히 이러한 연구는 실험적으로 통제된 환경 하에 측정하는 것이 바람직하나, 방대한 실험량 등의 제약이 발생하여 현실적으로 접근이 힘들다. 따라서 현장에서 채집된 표본을 이용하여 측정된 데이터를 바탕으로 패턴을 추정하는 것이 가능하다. 하지만, 현장 데이터는 매우 높은 빈도로 오차를 갖게 되고, 이러한 오차는 데이터의 비선형성을 증대시켜 명확한 해석이 힘든 경우가 많다(Jeong *et al.*, 2008). 최근 10여 년 사이에 데이터의 비선형적인 데이터를 효율적으로 해석할 수 있는 ‘생태정보학(Ecological Informatics)’ 기법이 많이 소개되고 있으며, 이러한 기법들은 유사한 형태의 결과를 산출하는 통계적 기법에

비해 월등한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다(Guegan *et al.*, 1998). 비선형적 데이터 클러스터링을 통한 패턴 분석에서 강점을 보이는 자가조직화지도(Self-Organizing Map, SOM)가 많은 연구에서 활용되어 왔다(Kohonen, 1997; Giraudel and Lek, 2001; Kim *et al.*, 2006). 따라서 본 연구는 국내 강 생태계에서 동물플랑크톤의 탄소(C), 질소(N) 및 인(P) 함량 파악, 수계별 동물플랑크톤의 화학적 조성 비율(C:N:P)의 비교 결과를 좀 더 비선형적인 방식으로 데이터 특성을 구분할 수 있는 자가조직화지도(Self-Organizing Map: SOM) 분석을 통하여 패턴화하고, 강 생태계의 동물플랑크톤 화학양론의 특성을 파악하고자 하였다.

## 재료 및 방법

한강, 금강, 영산강 및 섬진강 유역권 내 총 36 지점을 대상으로 조사를 수행하였다(Fig. 1). 한강 수계(13 지점)에서는 2007년 4월부터 2008년 10월까지, 금강 수계(7 지점)에서는 2005년 10월부터 2006년 6월까지, 영산강 수계(8 지점) 및 섬진강 수계(8 지점)에서 2006년 6

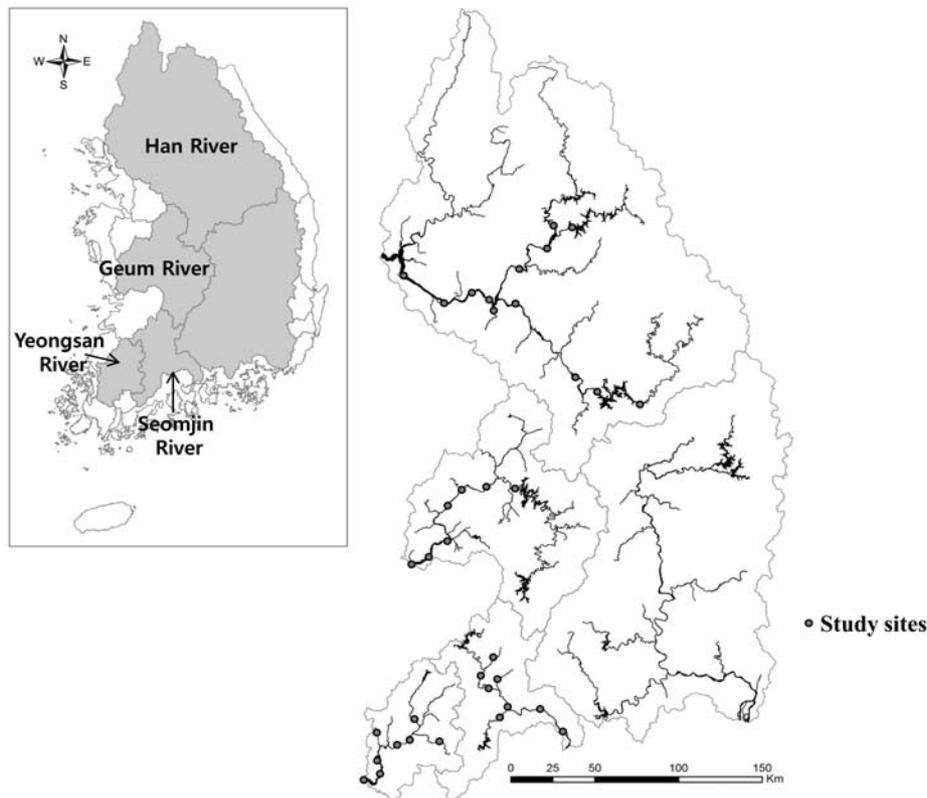


Fig. 1. Map showing river basin and water sample sites (●) for stoichiometry analysis between 2004 and 2008 in four river ecosystems.

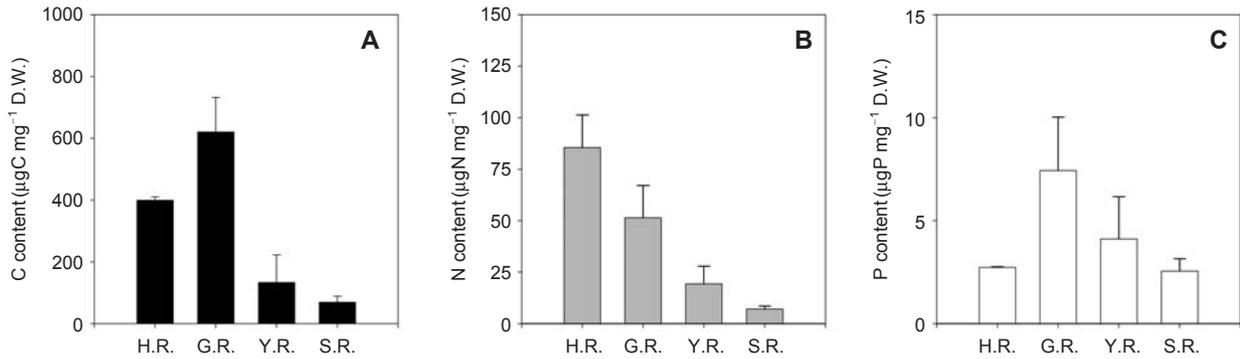


Fig. 2. The ranges of average C, N, and P-contents in relation to dry weight of zooplankton in study sites (G.R.; Geum River, H.R.; Han River, Y.R.; Yeongsan River, S.R.; Seomjin River).

월부터 2007년 2월까지 각 수계별 3~4회에 걸쳐 동물플랑크톤 시료를 채집하였다. 동물플랑크톤의 탄소(C), 질소(N) 및 인(P) 함량 조사를 위해 조사지점별로 약 100리터 이상의 원수를 동물플랑크톤 네트를(망목 직경: 63 µm) 이용하여 시료를 농축하여 동물플랑크톤만을 현미경 하에서 분리하였다. 분리 농축된 동물플랑크톤 시료를 60°C 드라이 오븐에서 24시간 건조 후 건조중량 측정하였다. 건조중량 내 탄소와 질소함량은 Perkin Elmer series CHN analyzer를 활용하였고 인 함량은 아스코르빅산 법 또는 Lachat QC FIA analyzer를 사용하였다. 각 지점별로 조사된 C, N, P의 지점별 특성을 입력변수로 하여 SOM 평면상에서 지점들이 배치되는 양상을 평가하고, 조사지점을 클러스터화하여 분석하였다. SOM은 인공지능망 기법 중 비감독학습(Non-supervised Learning)에 포함되는 알고리즘으로, 데이터 간의 특성을 이용하여 클러스터링을 실시한다. 학습과정을 통하여 SOM 평면을 구성하는 6각형 node에 데이터를 분류하고, 가장 적합한 node를 승자 node(winner node, 혹은 winner neuron)으로 결정한다. 승자 node의 특성을 이용하여 주변의 다른 node들이 적합한 데이터를 수용할 수 있도록 하고, 이러한 과정을 반복하여 최종적으로 데이터에 적합한 SOM 평면 구조를 완성시킨다. 학습이 완료된 SOM 모형의 각 node 특성은 결국 포함하는 데이터에 따라 결정되며, 유사한 특성의 node와 서로 다른 특성의 node를 U-matrix를 이용하여 구분할 수 있다. 구분된 node들은 인접한 node들 중 유사성이 상대적으로 높은 node들과 함께 클러스터를 형성하게 되고, 유사성이 낮은 node들은 별개의 클러스터를 형성한다. 이렇게 생성한 클러스터의 특성을 비교하여 C, N, P 특성을 파악하였다. SOM 분석은 Matlab 6.1 (MathWorks, Inc, Natick, MA, USA) 환경에서 SOM Toolbox for Matlab (Helsinki University

of Technology, Helsinki)을 이용하여 실시하였다.

### 결과 및 고찰

조사기간 동안 총 동물플랑크톤의 탄소(C), 질소(N), 인(P) 함량은 수계별로 뚜렷한 차이를 보였고, 동일 수계 내의 조사지점별 C, N, P 함량의 차이도 뚜렷하였다 (Fig. 2). 수계별 동물플랑크톤 건조중량당 평균 C, P 함량은 금강(C 함량: 620±111 µgC mg<sup>-1</sup>, P 함량: 7.4±2.5 µgP mg<sup>-1</sup>)에서 그리고 평균 N 함량은 한강에서 가장 높았으며 (85.5±15.8 µgN mg<sup>-1</sup>), 섬진강에서는 C, N, P 평균 함량이 가장 낮은 것으로 파악되었다. C:N:P 비율은 지점별 상이한 차이를 보였으며 (평균 200:29:1), 수계별로 N:C 비율과 P:C 비율의 현저한 차이를 나타내었다 (Fig. 3A). 동물플랑크톤 군집의 C:P 그리고 N:P 비율의 범위는 각각 38에서 392:1과 4에서 65:1이었다. 동물플랑크톤 평균 C:P 비는 한강과 금강에서 300:1과 226:1로 높았으며, N:P 비는 한강에서 58:1로 가장 높게 나타났고 다른 조사 수계(금강, 영산강, 섬진강)에서의 평균 비율 범위는 7에서 16:1인 것으로 나타났다 (Fig. 3B, C). 동물플랑크톤 중 지각류와 요각류 그리고 각 중별 화학양론에 대한 연구결과에 의하면 P 함량이 높은 동물플랑크톤 군집과 N 함량이 높은 동물플랑크톤 군집의 구성 비율에 의해서 수계 내 동물플랑크톤의 C:N:P 비율 및 생산자의 영양염 순환 기여도의 차이를 나타낼 수 있음이 보고된 바 있다 (Lehman, 1980). 아울러, 총 동물플랑크톤 생체량 중 요각류 (>250 µm) 및 지각류의 상대적 비율이 전체 동물플랑크톤의 C:P 비율과 N:P 비율의 변화와 유의한 상관성이 있는 것으로 알려져 있다 (Darchambeau *et al.*, 2005). 따라서 수계

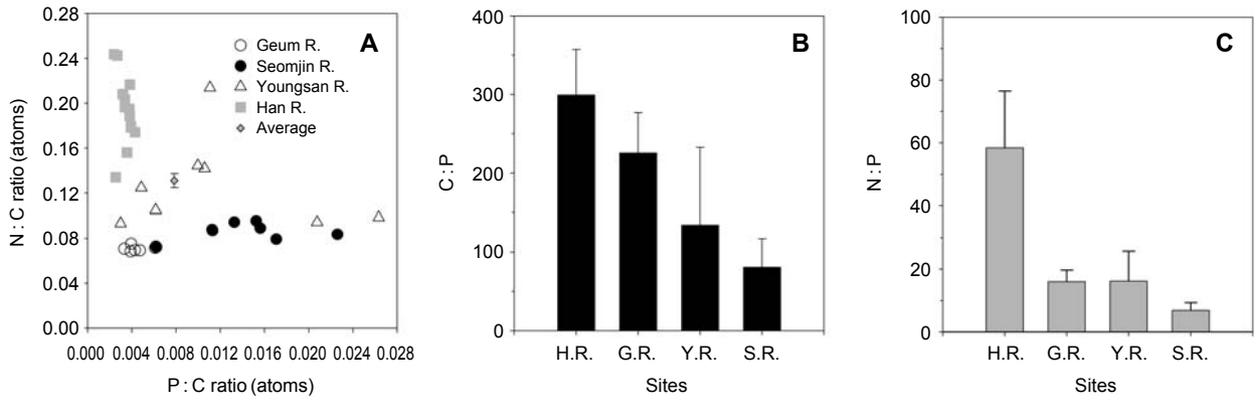


Fig. 3. C : N : P ratios of zooplankton (> 63 μm) in study sites. All ratios are determined by atomic weights.

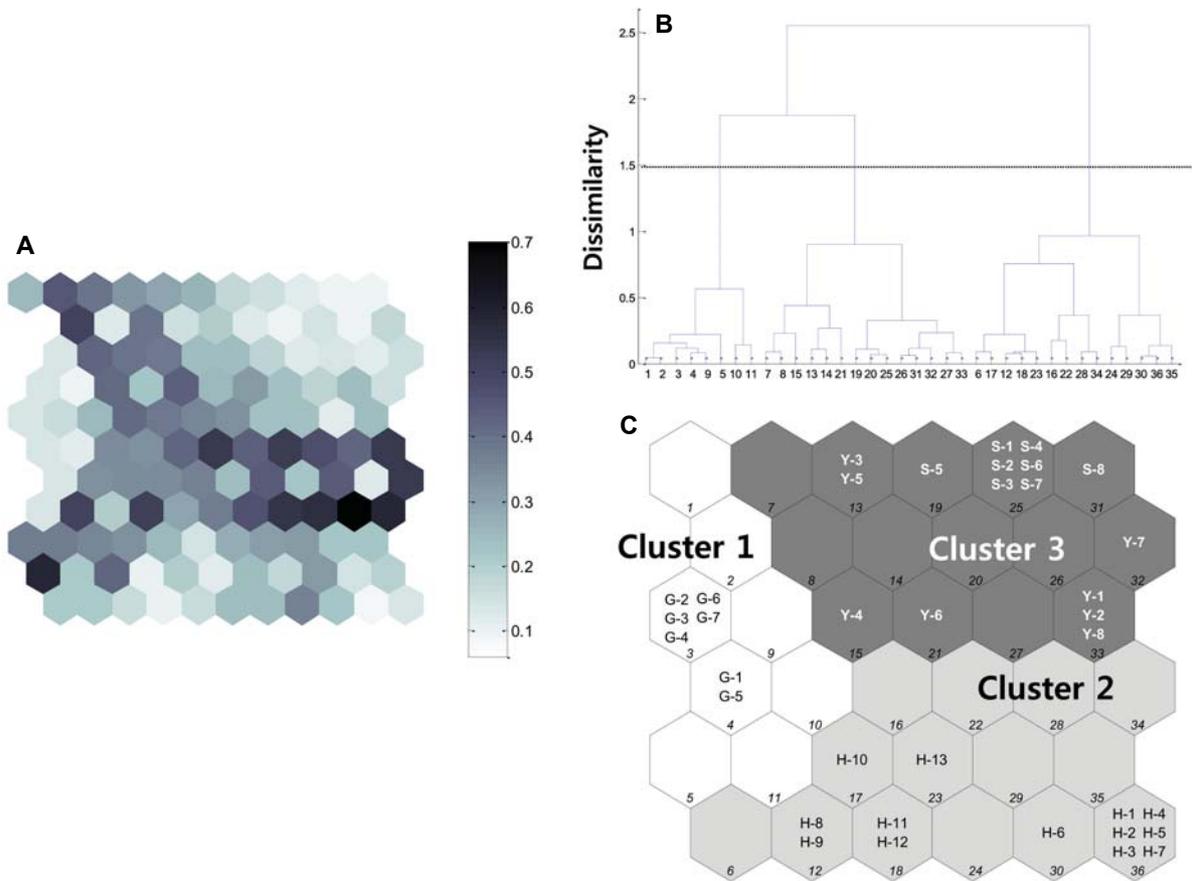


Fig. 4. Trained SOM model using the input data from the four major river systems. A, U-Matrix that represents Euclidean distances between sample and weight vectors; B, Dendrogram illustrating dissimilarity among the input nodes; C, Clustering results. The numbers in italic in the panel C indicates the node number, corresponding to the numbers shown on horizontal axis in the panel B. Abbreviations of the river names: H, Han River; G, Geum River; Y, Younsan River; S, Seomjin River.

별 동물플랑크톤 군집구성 비율과 우점 동물플랑크톤의 종 구성에 의한 C, N, P 함량의 차이 (Andersen and Hesse, 1991)가 국내 강 생태계 동물플랑크톤의 평균 C,

N, P 함량의 변화요인 중 한 요소일 것으로 파악된다. 전반적으로 우점 동물플랑크톤 군집은 윤충류인 것으로 조사되었고, 본 연구에서는 동물플랑크톤 화학양론에 대한

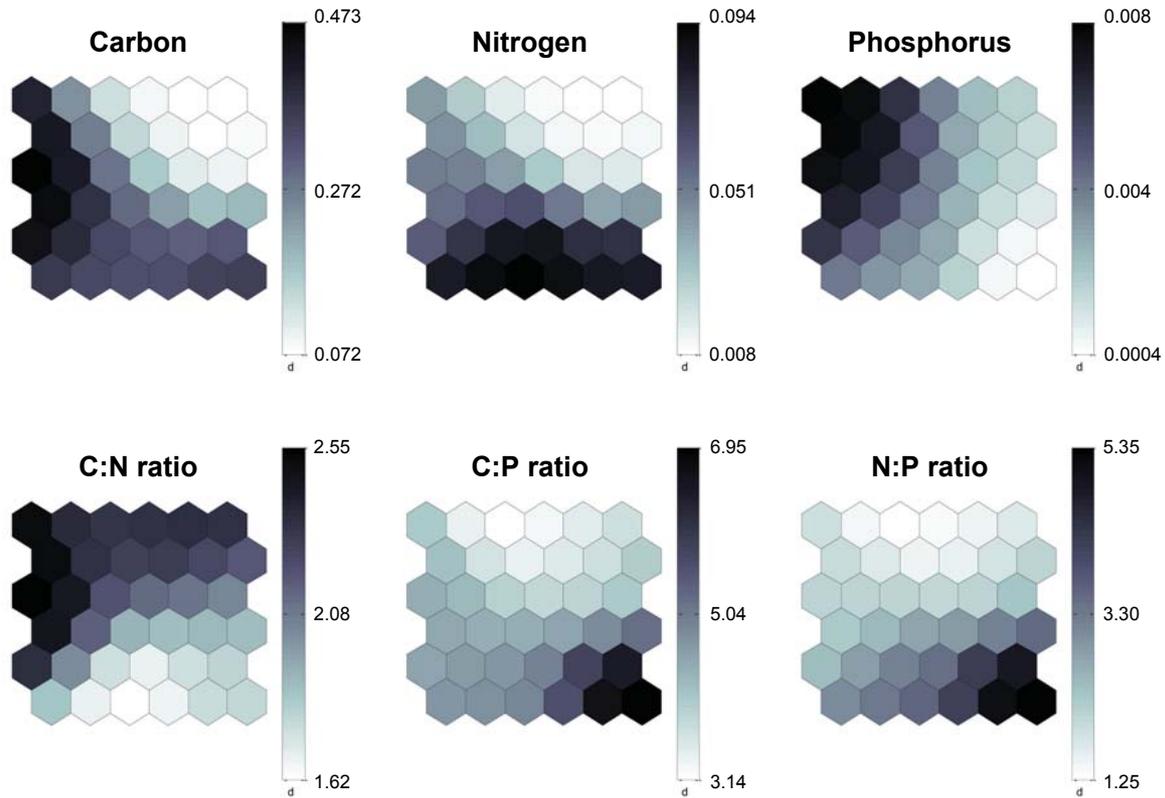


Fig. 5. Component planes from the trained SOM model, corresponding to each element examined in this study. The numbers indicate masses of each element in logarithmic scale.

중별 연구내용은 포함되지 않았으나 소비자-생산자 간의 군집 구조 변화에 대한 명확한 생태학적인 이해를 위해서는 추후 동물플랑크톤에 대한 중별 화학양론에 대한 지속적인 연구가 병행되어야 할 것으로 사료 된다 (Stern and Elser, 2002). C, N, P 함량 및 C:N, C:P, N:P 비율 자료를 이용하여 SOM 평면을 구축한 결과 6×6 구조에서 최적화되었으며, U-matrix를 기반으로 하여 양분되고 최종적으로 3개의 클러스터로 구분되었다 (Quantization error, 0.096; Topographic error, 0.000; Fig. 4). 클러스터 1은 금강 수계의 지점으로 이루어졌고, 클러스터 2는 한강 수계 지점, 클러스터 3은 섬진강 및 영산강 지점으로 구성되었다. 금강 지점들은 클러스터 1 내부에서 대체로 모여 있는 양상을 보였으나, 클러스터 2와 3은 지점들을 다소 분리하는 경향을 보였다. 한강의 경우 클러스터 2 내부에서 7조사지점들이 나머지 한강 지점들과 분리되어 있었고, 클러스터 3 내부에서는 영산강 지점들과 섬진강 지점들이 다소 독립적으로 분포하는 경향을 보였다. 다만, 영산강 지점 중 3과 5조사지점은 섬진강 지점들과 유사한 특성을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 5에 나타나 있는 각 입력변수 특성의 SOM 평면

분포 양상을 살펴보면, 클러스터 구분에서 C, N, P의 함량 분포 및 비율 분포 패턴이 작용한 것으로 나타났다. 클러스터 1은 C와 P의 함량이 상대적으로 높으면서 동시에 C:N의 비율이 비교적 높은 지점들로 구성되었다. 이와 달리 클러스터 2는 N의 함량이 높으면서 C는 비교적 높지만 P는 대체로 낮은 지점들로 구성되었으며, 이 클러스터의 지점들은 C:N은 낮고 C:P 및 N:P 비율이 높은 양상을 보였다. 따라서 한강 수계의 경우는 동물플랑크톤 화학양론 특성 구분에서 상대적으로 P가 중요한 요소로써 작용할 것으로 사료된다. 마지막 클러스터 3은 모든 원소의 함량이 다른 지점들보다 상대적으로 낮은 지점들로 구성되었으며, 대체로 C:N을 제외한 함량비 역시 낮은 지점들이 이 클러스터에 포함되었다 (Fig. 4B 참조), 이 결과에 따라 평가해보면 영산강 및 섬진강의 지점(클러스터 3)은 대체로 C, N, P의 함량이 다른 수계의 지점들에 비해서 작은 편이었으며, 반대로 금강의 지점들은(클러스터 1) C와 P의 함량이 다른 수계에 비해 큰 편으로 한강, 영산강 및 섬진강 수계와 대별되는 것으로 파악되었다. 최근 들어 환경 분야의 광범위한 정보 분석에 적용된 SOM 기법은, 우수생태계의 다양

한 생태학적 변화에 대한 원인분석과 구체적인 결과를 유도하는 데 활용된 바 있다(Chon *et al.*, 2000; Garcia and Gonzalez, 2004; Varbiro *et al.*, 2007). 특히, 강 생태계의 동물플랑크톤 분야에서 SOM 기법을 활용한 연구 결과 분석 사례는 많지 않으나(Kim *et al.*, 2006), 기후 변화 및 수문학적 요인과 동물플랑크톤 군집 동태(Kim *et al.*, 2012) 및 본 연구 내용인 공간적 이질성과 동물플랑크톤의 C, N, P 함량 간의 연관성을 파악하는데 활용성이 높을 것으로 사료된다.

## 사 사

이 연구의 일부는 국립환경과학원 지원 ‘수계 별 수중 생태계 수질모델인자조사 사업’의 일환으로 수행되었으며 강원대학교 부속 환경연구소의 지원에도 감사합니다.

## 적 요

국내 주요 강 생태계(한강, 금강, 영산강, 섬진강)에서 지난 2004년부터 2008년까지 총 동물플랑크톤의 탄소(C), 질소(N) 및 인(P) 함량에 대해 평가하였다. 동물플랑크톤의 건중량 당 C, N, P-함량은 강 시스템별로 변화가 뚜렷하였다. 조사지점별 평균 C, N, 그리고 P-함량의 범위는 70~620 mgC mg<sup>-1</sup> D.W., 7.1~85.5 µgN mg<sup>-1</sup> D.W. 그리고 2.5~7.4 µgP mg<sup>-1</sup> D.W.인 것으로 파악되었다. 평균 탄소: 질소: 인 비율은 지점별 상이한 차이를 보였으며 전 지점의 평균은 200:29:1인 것으로 파악되었다. 전 조사지점에서의 동물플랑크톤 군집의 탄소: 인 그리고 질소: 인 비율의 범위는 각각 38에서 392:1과 4에서 65:1이었다. 자가조직화지도(SOM)을 활용한 평면상 지점들의 배치 양상과 화학양론 자료들 간의 주요 그룹 분석 결과 크게 세 클러스터로 구분되었다. 클러스터링 결과 동물플랑크톤의 C, N, P-함량은 공간적 이질성에 의해 영향을 받았으며, 화학양론 자료는 강 생태계의 환경 특성 해석에 활용성이 높은 것으로 사료되었다.

## REFERENCES

- Andersen, T. and D.O. Hessen. 1991. Carbon, nitrogen, and phosphorus content of freshwater zooplankton. *Limnology and Oceanography* **36**: 807-814.
- Chon, T.S., Y.S. Park and E.Y. Cha. 2000. Patterning of community changes in benthic macroinvertebrates collected from urbanized streams for the short term prediction by temporal artificial neuronal networks. p. 99-114. *In: Artificial Neuronal Networks: Application to Ecology and Evolution* (Lek, S. and J.F. Guegan, eds.). Springer, Berlin.
- Darchambeau, F., I. Thys, B. Leporcq, L. Hoffmann and J.-P. Descy. 2005. Influence of zooplankton stoichiometry on nutrient sedimentation in a lake system. *Limnology and Oceanography* **50**: 905-913.
- Elser, J.J., R.W. Sterner, E. Gorokhova, W.F. Fagan, T.A. Markow, J.B. Cotner, J.F. Harrison, S.E. Hobbie, G.M. Odell and L.J. Weider. 2000. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters* **3**: 540-550.
- Ferrão-Filho, A.S., A.J. Tessier and W.R. DeMott. 2007. Sensitivity of herbivorous zooplankton to phosphorus-deficient diets: Testing stoichiometric theory and the growth rate hypothesis. *Limnology and Oceanography* **52**: 407-415.
- Garcia, H.L. and L.M. Gonzalez. 2004. Self-Organizing Map and clustering for wastewater treatment monitoring. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **17**: 215-225.
- Giraudel, J.L. and S. Lek. 2001. A comparison of self-organizing map algorithm and some conventional statistical methods for ecological community ordination. *Ecological Modelling* **146**: 329-339.
- Guegan, J.-F., S. Lek and T. Oberdorff. 1998. Energy availability and habitat heterogeneity predict global riverine fish diversity. *Nature* **391**: 382-384.
- Jeong, K.-S., D.-K. Kim, A. Pattnaik, K. Bhatta, B. Bhandari and G.-J. Joo. 2008. Patterning limnological characteristics of the Chilika lagoon (India) using a self-organizing map. *Limnology* **9**: 231-242.
- Kim, D.-K., G.-J. Joo, K.-S. Jeong, K.-H. Chang and H.-W. Kim. 2006. Patterning zooplankton dynamics in the regulated Nakdong River by means of the Self-Organizing Map. *Korean Journal of Limnological Society* **39**: 52-61.
- 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.
- Kohonen, T. 1997. *Self-Organizing Maps*. Springer, New York.
- Lair, N. 2006. A review of regulation mechanisms of metazoan plankton in riverine ecosystems: aquatic habitat versus biota. *River Research and Applications* **22**: 567-593.
- Lehman, J.T. 1980. Nutrient cycling as an interface between algae and grazers in freshwater communities. *American Society of Limnology and Oceanography Special Symposia* **3**: 251-263.
- Omori, M. 1969. The biology of a sergestid shrimp *Sergestes Zucens* Hansen. *Bulletin of the Ocean Research Institute, University of Tokyo*.
- Redfield, A. 1934. On the proportions of organic derivatives in

- sea water and their relation to the composition of plankton. p. 177-192. *In*: James Johnstone Memorial Volume (Daniel, R.J. ed.). University Press of Liverpool. Liverpool.
- Sterner, R.W. and J.J. Elser. 2002. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton Univ. Press.
- Sterner, R.W., T. Andersen, J.J. Elser, D.O. Hessen, J.M. Hood, E. Mccauley and J. Urabe. 2008. Scale-dependent carbon : nitrogen : phosphorous seston stoichiometry in marine and freshwaters. *Limnology and Oceanography* **53**: 1169-1180.
- Varbiro, G., E. Acs, G. Borics, K. Erces, G. Feher, I. Grigorszky, T. Japport, G. Kocsis, E. Karsznai, K. Nagy, Z. Nagy-Laszlo, Z. Pilinszky and K.T. Kiss. 2007. Use of self-organizing maps (SOM) for characterization of riverine phytoplankton associations in Hungary. *Archiv fur Hydrobiologie* **161**(Supplement): 388-394.