

인공신경망을 이용한 도시하천의 저서성 대형무척추동물 군집 유형성 연구

곽 인 실* · 김 좌 관¹ · 전 태 수²

(일본 이화학연구소 뇌연구센터, ¹부산카톨릭대학교 산업환경시스템학부,
²부산대학교 생명과학부)

Community Patterning of Benthic Macroinvertebrates in Urbanized Streams by Utilizing an Artificial Neural Network. Kwak, Inn-Sil*, Jwa-Kwan Kim¹ and Tae-Soo Chon² (*Brain Science Institute, The Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN, Wako, 351-0198, Japan, ¹Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Pusan 609-757, Korea, ²Division of Biological Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea*)

Benthic macro-invertebrates were seasonally collected in the Onchen Stream in Pusan, from July 2001 to March 2002. Generally 4 phylum 5 class 10 order 19 family 23 species were observed in the study sites. Ephemeroptera, Plecoptera and various species appeared in headwater stream while Oligochaeta and Chironomidae were dominated in downstream sites. Community abundance patterns, especially the dominant taxa, Oligochaeta and Chironomidae, appeared to be different depending upon the sampling months. Oligochaeta was usually observed in July, December and March while Chironomidae was appeared in September. The biological indices, TBI (Trent Biotic Index), BS (Biotic Score), BMWP (Biological Monitoring Working Party) were calculated with the appeared communities of the sampling sites through the survey months. TBI showed 1 to 8, BMWP was 1 to 93 and CBI appeared 9 to 387 in the different sites. The biological indices decreased from headstream to downstream sites. We implemented the unsupervised Kohonen network for patterning of community abundance of the sampling sites. The patterning map by the Kohonen network was well represented community abundance of the sampling sites. Also, we conducted RTRN (Real Time Recurrent Neural Network) for predicting of the biological indices in the different sites. The results appeared that the predicting values by RTRN were well matched field data (correlation coefficient of TBI, BMWP and CBI were 0.957, 0.979 and 0.967, respectively).

Key words : benthic macroinvertebrates, artificial neural network, community pattern, predicting, biological indices

서 론

하천생태계의 교란은 궁극적으로 그 서식처에 생존하

는 생물상의 변화를 초래하므로 생물군집에 대한 시공간적 분석은 환경변화의 영향을 감지할 수 있는 주요 척도가 된다. 특히, 저서생물은 이동성이 낮으며 다양한 서식처에 적응함으로써 담수생태계의 구조와 기능을 밝

* Corresponding author: Tel: 02) 2290-0951, Fax: 02) 2299-3495, E-mail: inkwak@hotmail.com

히는데 중요한 생물군으로 인식되었다. 또한 저서생물이 환경변화에 민감하고, 분류군에 따라 비교적 뚜렷한 내성범위를 가지고 있어서 담수생태계의 환경을 평가하는 지표로서 매우 유용하다고 보고되었다 (Hynes and Coleman, 1968; Hellowell, 1986; Resh and Rosenberg, 1984). 기존의 군집자료를 처리하기 위해 사용된 다변량 분석법인 Clustering이나 Ordination 방법보다 시공간적인 비선형적 양상을 포착시키기 위해 인공신경망이 뛰어나다는 연구가 최근 들어 많이 이루어졌다 (Legendre and Legendre, 1985; Chon *et al.*, 1996). 이에 수서 저서성 대형무척추동물 군집을 대상으로 Chon 등 (1996, 2000a)은 비지도학습 인공신경망인 Kohonen 신경망을 적용하여 군집 유형을 효과적으로 추출하였다. 최근에는 생태연구에 인공신경망이 다양하게 적용되어 군집의 시간적 발달과 군집예측 (Chon *et al.*, 2000b), 종의 성장과 개화시기 (Elizondo *et al.*, 1994), 동물군집의 크기 변이 (Stankovski *et al.*, 1998), 조류의 번성 (Recknagel *et al.*, 1997), 초원의 정착 (Tan and Smeins, 1996)에 도입되었다. 대다수 이러한 연구에 도입된 모델은 정시적 (static)이라는 한계를 내포하고 있어 회귀신경망과 같은 시간적 흐름이 내포된 신경망이 개발, 사용되었다 (Kung, 1993; Giles *et al.*, 1994; Haykin, 1994). 담수생태계 특히, 본 연구의 조사지와 같은 도심의 하천은 급작스런 교란 (교량공사, 공원조성, 집중강우, 폐수 유입 등)에 노출되어 있어 우점 분류군 이외의 분류군의 출현은 간헐적이고 또한 생활사와 연관되어져 출현여부를 예측하기는 쉬운 일이 아니다. 따라서 본 연구에서는 어떤 분류군의 출현을 예측하기보다는 수생태계를 반영하는 지수를 예측하여 담수생태계 군집의 경향성을 파악하여 지속적인 생태관리에 기여하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 저서생물 조사

2001년 7월부터 2002년 3월까지 총 5구역을 대상으로 각 구역마다 3지점을 대상으로 3회 반복 계절별로 조사하였다 (Fig. 1). 망목 크기가 0.5mm인 Surber sampler (30 × 30 cm²; Surber, 1937; APHA *et al.*, 1985)을 사용하여 약 10cm의 깊이로 1지점 당 3회 채집하였다. 하상과 기타 물질과 함께 채집된 샘플에서 저서성 대형 무척추동물만을 걸러낸 후 formalin 8%에 고정시켰다. 이후 걸러낸 저서생물은 현미경 (Olympus SZH10)하에서 동정 분류하고, 개체수를 산출하였다. 일반적인 수서곤충 및 저

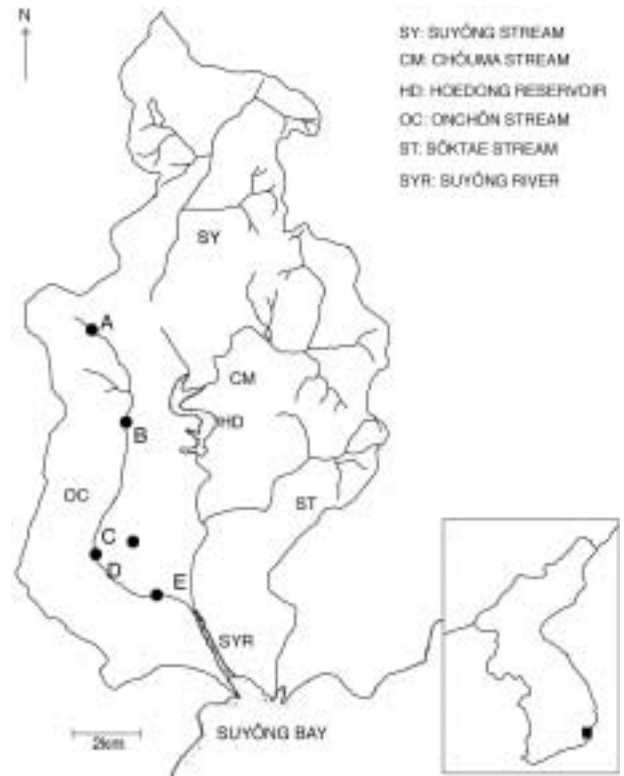


Fig. 1. Location of study sites for collecting benthic macroinvertebrates from Beomeosa to Onchon Stream, Pusan, Korea. A: Beomeosa, B: Pusan National University, C: Onchon Stream, D: Sebeung Bridge and E: Hapleuboo.

서생물의 분류는尹 (1988), Brigham 등 (1982), Merritt와 Cummins (1996), Pennak (1978) 등을 참조하였고, Chironomidae는 Merritt와 Cummins (1996), Wiederholm (1983)의 검색표를 따랐으며, Oligochaeta는 Brigham 등 (1982), Brinkhurst (1986)에 의해 분류하였다.

2. 조사지점의 환경특성

생물채집과 병행하여 환경요인인 수심, 유속, 전도도, DO를 조사하였다. 전도도, 수온, 기온은 조사 지점 당 1회 2~3 반복 측정하여 평균치를 기록하였으며, 유속과 수심은 채집한 지점마다 매번 측정하였다. DO는 조사지에서 DO meter (YSI, 55/12 FT)로 측정하였다. 또한 서식처 기능을 하는 하상구성비도 정량화하여 조사하였다.

최상류에 위치하는 범어사 지점은 5월 이후 행락객에 의한 하천 접근이 다수 이루어져 인적이 드문 곳을 선정하여 자연상태의 출현을 보고자 하였다. 인구 밀집한 도시를 거치는 부산대 지점은 하변과 하상을 시멘트로

처리하고 수변식물이 조성되지 않아 생물의 서식처가 결여되어 있는 상태였다. 조사시기 동안 하상은 부착조류로 덮여 있었으며 하변에는 인근 주민에 의한 쓰레기들이 방치되어 있었다. 온천천 지점은 상류부에서 유입된 모래 이하 입자가 곡류부라는 지형적인 특성과 함께 퇴적이 이루어지는 곳이며 수변식물 공간이 확보되어 조류들이 종종 관찰되었다. 세병교 지점에는 주차공간과 징검다리의 설치로 인해 사람들의 접근이 잦았으며 교각의 아래는 시멘트 덩어리가 깔려져 있고 비둘기 등이 둥지를 틀고 있어 배설물이 유입되고 있었다. 최하류부인 합류부는 수영하수 처리장으로 유입 후 정화되어 바다로 방출되는 지점으로 수심이 급격하게 깊어지며 바닷물이 밀려오는 특성을 보여 조사는 하변에서 이루어졌다. 하천 바닥은 전체가 검은색의 썩어 가까운 흙으로 이루어져 미끄러웠으며 하변에는 공원조성으로 산책로 등의 설치로 사람들의 접근이 잦았다.

3. 생물학적 지수 산정

저서성 대형무척추동물은 주로 하상공간에 부착하여 서식하며 수질의 변화에 반응하여 지표성이 있음이 보고되었다(Hynes, 1970; Hellowell, 1986). 현재 사용되는 지수로는 저서생물의 군집 출현에 따른 TBI (Trent Biotic Index), BS (Biotic Score), BMWP (Biological Monitoring Working Party) 등이 있다. TBI의 경우는 주로 서식처의 특성을 반영하는 종의 출현(강도래류, 날도래류, 하루살이류 등)과 출현 종의 밀도에 따라 지수가 계산되어지는데 점수가 높을수록 양호함을 의미한다. BS (플라나리아, 강도래과, 그물강도래과, 녹색강도래과, 메추리강도래과, 하루살이류, 뱀잠자리류 등)는 종의 출현과 풍부도에 따라 점수가 매겨지며 이를 합산하여 산출된다. BMWP의 경우는 서식처의 수환경을 반영하는 종의 출현(엣하루살이과, 방패하루살이과, 알락하루살이과, 갈래하루살이과, 납작하루살이과, 강도래과, 그물강도래과, 녹색강도래과, 메추리강도래과 등)과 밀도에 따라 점수가 합산된 지수이다.

4. 코호넨 신경망 (Kohonen Network)

군집자료를 유형화하기 위하여 비지도학습 인공신경회로망의 방법 중 가장 널리 사용되는 코호넨망(Kohonen, 1989)을 사용하였다. 코호넨 신경망은 M^2 의 출력뉴런으로 이루어진 출력층(output layer)과 N 의 입력뉴런으로 이루어진 입력층(input layer)으로 구성되며 (Fig. 2), 외부로부터 받은 벡터형 입력패턴은 자기조직(self-organiza-

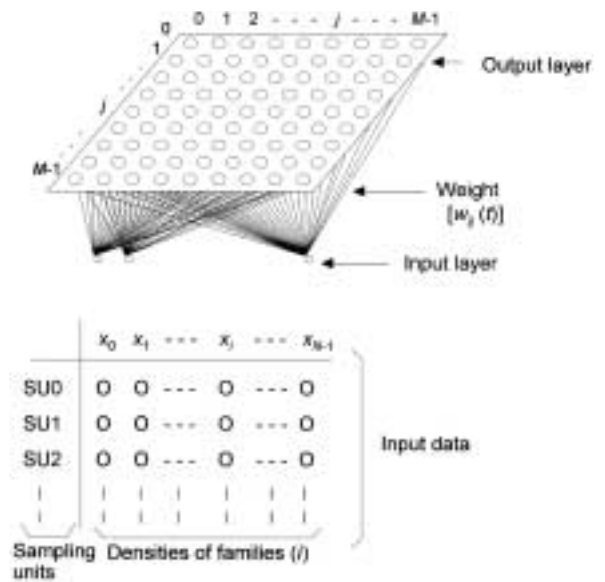


Fig. 2. Schematic diagram of the Kohonen network (Adapted from Chon et al., 1996).

tion)적인 최적화 과정을 거쳐 유형화하게 된다(Wasserman, 1989). 본 연구에서는 입력층과 출력층의 크기는 각각 20 (N) 뉴런과 40 ($M^2 = 5 \times 8$) 뉴런을 이용하였다. 출력뉴런 j 와 입력뉴런 i 는 연결계수 (weight) w_{ji} 로 서로 연결이 되어 있으며, 연결계수는 일련의 계산 반복과정을 거쳐 적응적으로 변화하게 되는데 이 과정을 학습이라 한다. 연결계수는 초기에는 무작위적으로 작은 수로 설정이 된다. 입력벡터 (\mathbf{x})가 주어지면 출력층 뉴런 (j) 각각에 대하여 입력값 (x_i ; 분류군 i 의 밀도)과 연결계수 (w_{ji})의 차이의 합 ($d_j(t)$)이 다음 식과 같이 계산된다 (Kohonen, 1989).

$$d_j(t) = \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - w_{ji}(t))^2$$

계산된 값 $d_j(t)$ 중에서 가장 작은 값을 가진 뉴런 j 가 승자뉴런 (winning neuron)으로 선택된다. 이후 승자 및 그 이웃뉴런은 연결계수와 입력벡터 사이의 차이를 감소시킬 수 있도록 연결계수를 다음과 같이 수정함으로써 학습하게 된다.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta(t) (x_i - w_{ij}(t)) Z_j$$

여기서 Z_j 는 승자와 그 이웃뉴런은 1로, 나머지 뉴런은 0으로 할당되어, 승자 및 그 이웃뉴런 연결계수의 조정을 가능하게 한다. $\eta(t)$ 는 학습률로서 반복계산 과정에서 학습효율을 조절하는데, 학습시간 t 에 따라 선형적

으로 감소하게 하였다. 선행 학습결과를 토대로 본 연구에서는 0.1~0.4 범위의 값을 사용하였다. 이웃뉴런의 크기를 나타내는 $r(t)$ 는 학습초기에는 $(M-1)/2$ 의 정수 값을 사용하여 학습진행 과정동안 점차 감소하여 0으로 변하게 하였다. 자세한 학습방법은 Chon 등 (1996, 2000c)의 방법을 따랐다. 코호넨망의 세부적인 알고리즘은 Lippmann (1987), Kohonen (1989), Hecht-Nielsen (1990), Zurada (1992) 등을 참고하였다.

5. 회귀신경망 (Real time recurrent neural network)

실시간 회귀신경망(RTRN)은 Hopfield network과 같은 잘 알려진 회귀망과 비교하면 은닉뉴우런을 가지고 있어 비선형적인 자료의 정보를 용이하게 추출할 수 있어, 시간 변이가 심한 자료의 입출력을 효율적으로 처리할 수 있다(Haykin, 1994). 실시간 회귀신경망은 전체 연결망(fully-connected network) 구조를 가지는데, M 개의 입력뉴런과 이를 포함한 N 개의 처리층(processing layer) 뉴런과 이 N 개의 뉴런이 시간 지연되어 다시 $t+1$ 의 입력뉴런 M 개와 합쳐져 연쇄층(concatenated layer) $N+M$ 개의 뉴런으로 구성되어 있다(Fig. 3). 여기서 은닉층 뉴런은 “ $N-M$ ”개로 구성된다. 외부 입력되는 M 개의 자료($\mathbf{x}(t)$)는 분리된 시간 t 에 적용된다. 출력뉴우런 N 에 상응하는 벡터는 시간 간격이 한 스텝 늦은 $t+1$ 에 생성되는 $\mathbf{y}(t+1)$ 로 표시된다. 입력 벡터 $\mathbf{x}(t)$ 과 한 스텝 연기된 출력벡터 $\mathbf{y}(t+1)$ 는 $\mathbf{u}(t)$ 으로 표시되는 i

번째 $(M+N)$ 의 벡터 $\mathbf{u}_i(t)$ 을 형성하기 위해 연결되어진다(Haykin 1994). 전체적으로 $N/(M+N)$ 회귀 가중치 매트릭스가 형성되어진다. 시간 t 에 뉴런 j 의 전체 activity function은 아래와 같이 표현된다.

$$v_j(t) = \sum w_{ji}(t) u_i(t)$$

여기서 $w_{ji}(t)$ 는 입력과 은닉층 사이의 가중치이다. 뉴런 j 를 외부입력 뉴런이라고 하면 $v_j(t)$ 는 $x_j(t)$ 가 되고 j 를 출력 뉴런이라고 하면 $v_j(t)$ 는 $y_j(t)$ 가 된다. $t+1$ 이 되면, 뉴런 j 의 출력은 앞서 생성된 $v_j(t)$ 가 비선형 함수(여기서는 sigmoid function)를 통해 계산된다.

$$y_j(t+1) = \psi(v_j(t))$$

이와 같은 신경망 구조에서, 역전파 알고리즘(back-propagation algorithm; Rumelhart *et al.*, 1986)이 실시간 회귀학습(real-time recurrent learning)을 구현할 수 있도록 적용되었다. 학습률과 모멘텀효율(coefficient)은 0.1와 0.9로 하였다.

결과 및 고찰

1. 물리화학적인 환경

각 조사지점의 환경은 뚜렷한 차이를 보였다. 용존산소량(DO)의 경우 상류지점인 범어사가 11.5 mg/l에서 12.2 mg/l의 범위를 나타낸 반면 온천천과 세병교 구간

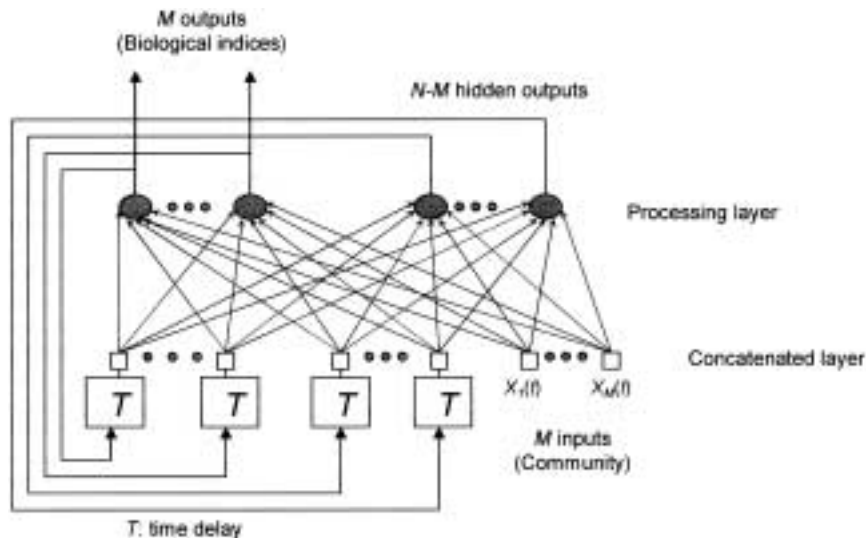


Fig. 3. A diagram of a real-time recurrent network for patterning community changes in benthic macroinvertebrates in streams. T: time delay.

은 7.4 mg/l에서 10.4 mg/l로 조사되었으며 하류부에 위치한 합류부는 상대적으로 낮은 3.9 mg/l에서 6.2 mg/l로 나타났다. 전도도의 경우도 범어사는 74.7에서 100 μ s, 온천천과 세병교는 915에서 2,200 μ s를, 합류부는 24,400에서 34,300 μ s의 범위를 보였다. 조사가 이루어진 7월, 9월과 12월의 유속과 수심의 분포는 지점별 차이를 보여 상류부에서 하류부로 갈수록 낮아지는 경향이 보였으나 2002년 3월에는 지점들 간의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았으며 부산대 지점의 경우는 유량이 크게 감소하여 수심과 유속을 측정할 수 없었다.

하상구성물로 인해서 생성되는 구성물간 공간은 저서생물의 은닉처 및 서식처로서의 기능을 한다. 따라서 이들의 조합은 저서생물들에게 중요한 환경요인으로 작용한다. 조사는 각각 12월과 3월에 이루어졌는데 먼저, 2001년 12월의 경우 세병교를 제외한 전 지점에서 8 mm 이하의 입자가 차지하는 비중이 50% 이상으로 높게 나타났다 (Fig. 4). 범어사의 경우는 50 mm 이상의 입자가 20% 이상을 차지하여 다양한 서식공간을 형성함을 시사하였으나 온천천의 경우 하상구성물 중 8 mm 이하의 입자가 75% 이상, 합류부도 8 mm 이하의 입자가 70% 이상을 차지하여 하천 하류부의 전형적인 특성을 보였다. 세병교의 경우는 잦은 하천 공사로 인해 구성물 입자가 다양하게 조사되었다. 2002년 3월의 하상구성은

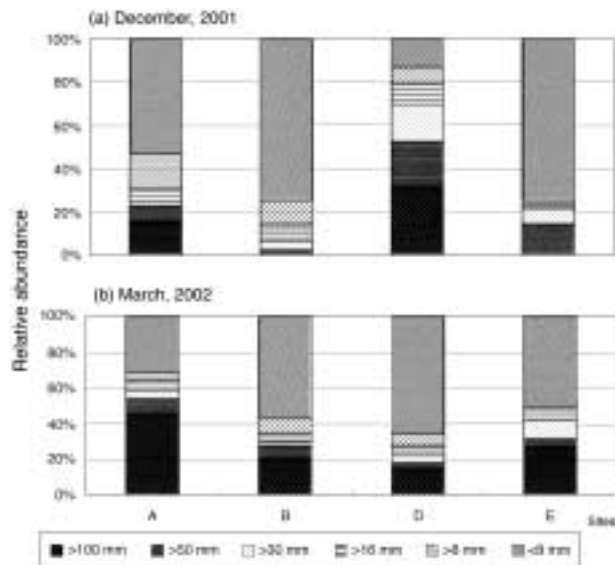


Fig. 4. Relative abundance of substrates compositions in different sites in December 2001 (a) and March 2002 (b). A: Beomeosa, B: Pusan National University, C: Onchon Stream, D: Sebung Bridge and E: Hapleuboo.

세병교를 제외한 전 지점에서 전반적으로 8 mm 이하의 입자가 차지하는 비중이 줄어든 반면 100 mm 이상의 큰 입자는 증가된 경향을 나타내었다.

2. 저서성 대형무척추동물의 군집구성

전 조사지점에서 총 4문 5강 10목 19과 23종이 조사되었다. 2001년 7월 조사에서 15종, 9월 조사시 14종, 12월 20종 그리고 2002년 3월에는 20종이 출현하였다. 범어사 지점을 제외한 나머지 지점에서는 빈모류 (Oligochaeta)와 깔따구류 (Chironomidae)가 우점하였다 (Fig. 5). 그러나 계절별 조사가 이루어진 본 연구에서 두 우점분류군의 출현시기 및 서식처로서의 선호에는 차이를 보여 7월, 12월과 3월은 실지렁이로 알려진 빈모류군이 우점을 차지하였으나 9월은 깔따구류가 우점을 차지하였다. 세병교를 경계로 상류부는 깔따구류가 하류부는 빈모류가 다수 출현하였다.

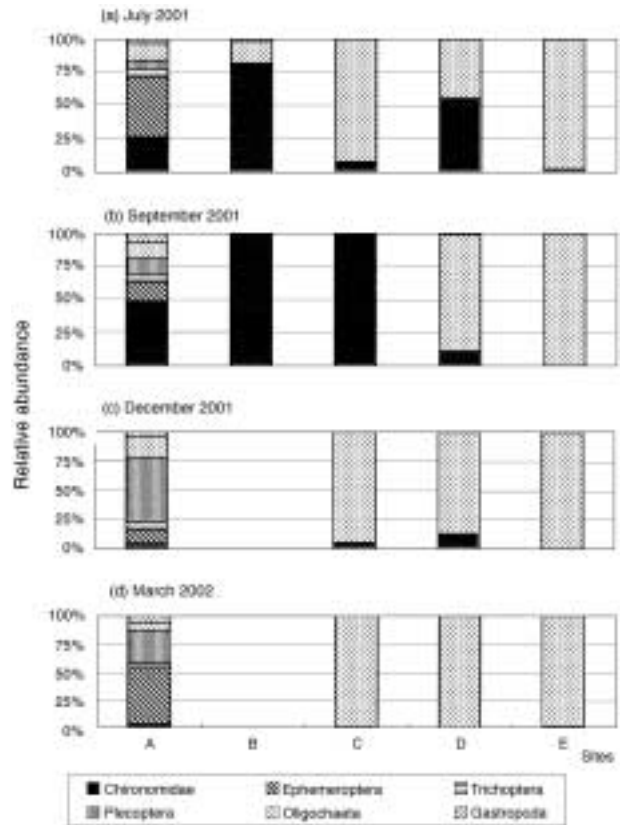


Fig. 5. Relative abundance of different observed taxa in different sites in July 2001 (a), September 2001 (b), December 2001 (c) and March 2002 (d). A: Beomeosa, B: Pusan National University, C: Onchon Stream, D: Sebung Bridge and E: Hapleuboo.

다른 지점에 비해 하상입자의 구성이 다양한 범어사 지점은 7월, 9월, 12월 그리고 3월 조사에서 각각 13종, 12종, 17종, 20종이 조사되었다. 행락객에 노출된 시기인 7월과 9월 조사에서 오염에 대해 지표성이 있는 깔따구류는 상대 풍부도가 25%에서 50%로 크게 증가되었으나 이후 접근이 줄어든 계절인 12월과 3월에는 다시 5% 이하로 감소되었다 (Fig. 5). 또한 청정지역의 대표적인 지표생물인 강도래류(Plecoptera)가 본 지점에서 조사되었는데 7월과 9월 조사시에는 10~15%의 출현이 보였으며 12월에는 급격히 증가하여 55%까지 증가하였으나 3월에는 다시 35%로 감소되었다. 하루살이류의 생활사는 온도의 변화에 따른 계절적인 영향이 반영되어 7월에는 상대적 풍부도가 50% 이상을 차지하였으나 이후 기온이 낮아지는 9월과 12월에는 15% 이하로 낮아지며 다시 3월에는 55%로 증가되는 것으로 나타났다. 반면 오염지표성이 있는 빈모류는 본 조사지에서는 큰 변화없이 5% 내외의 지속적인 출현을 보여주었다.

부산대지점은 출현한 분류군이 매우 빈약한 상태로, 일반적인 유기물 오염에 노출된 조사지점에서와 같이 깔따구류와 빈모류의 출현이 예상되었으나 유속이 다소 빠르게 흐를 수 있는 시멘트 하상으로 인해 빈모류의 출현도 2% 미만이었으며 깔따구류도 다른 지점에 비해 매우 소수가 조사되었다. 유량이 늘어난 7월에 소수 물달팽이류가 하천 바닥의 부착조류에 부착되는 것으로 관찰되었으나 이후 유량이 감소된 후에는 조사되지 않아 상류로부터의 유입에 따른 일시적인 출현임을 알 수 있었다.

온천천지점은 9월을 제외한 전 시기에 빈모류가 95% 이상을 차지하였으나 9월은 깔따구류가 차지하는 비중이 99%를 차지하여 매우 극적인 변화를 보였다. 이는 강우 후 유량이 급격히 줄면서 9월 조사시에 모래 하상이 노출되었고 곳곳에 얇은 웅덩이가 형성되었던 것에 기인한 것으로 사료된다. 이 웅덩이에서 다량의 깔따구류 유충과 알집들이 관찰되었다. 한편, 우점하였던 빈모류는 여름강우로 유실되어 하류부인 세병교와 합류부에 안착되는 형상을 보였다. 이후 온천천 지점의 우점을 이룬 빈모류는 회복되는 양상을 보여 서식처로서 선호하는 것으로 고려되었다.

경계를 이루는 세병교지점은 전체적으로 빈모류가 차지하는 비중이 85% 이상을 차지하였다 (7월은 45% 차지). 7월 조사에서는 깔따구류가 50% 이상을 차지하였으나 이후 급격히 감소하여 9월 10%, 12월 15%를 보이다가 3월에는 소수 조사되어 계절적인 출현분류군 임을 보여주었다. 또한 물달팽이류가 극소수 조사되었다.

빈모류가 전체 출현생물의 98% 이상을 차지한 합류부 지점은 다른 저서생물의 출현은 거의 이루어지지 않아 생물의 서식처로서는 열악함을 시사하였다. 7월 조사에서는 깔따구류가 소수 출현하여 전 지점에서 보여졌던 계절적인 영향이 반영되었다 (Fig. 5).

3. 생물학적 지수

본 조사에서 채집된 저서성 대형무척추동물을 대상으로 앞서 언급한 TBI, BMWP 및 CBI를 조사하였다 (Table 1). 전체적으로 범어사 지점에서 하류로 가면서 각 지수들이 낮아지는 경향이 나타났다. 먼저 TBI를 살펴보면, 범어사 지점은 7월과 9월은 7, 12월과 3월은 8을 나타내었으며 나머지 지점들은 전 기간동안 1~2로 나타났다. BMWP의 경우, 범어사 지점은 7월과 9월은 45-46을, 12월은 93을 보이다 3월에는 84를 보였다. 나머지 지점들은 7월과 9월에는 합류부(BMWP는 3-4)를 제외하고 6을, 12월에는 온천천과 세병교는 9, 합류부는 1로 조사되었다. 따라서 7월, 9월과 12월에는 범어사 구역, 부산대 지점에서 세병교 지점까지의 구역, 합류부 구역으로 3단계로 구분되어졌다. 그러나 3월에는 세병교지

Table 1. List of sample sites for collecting macroinvertebrates in Pusan, from 2000 to 2001 the location of patterned neurons trained by the Kohonen network. A: Beomeosa, B: Pusan National University, C: Onchon Stream, D: Sebung Bridge and E: Hapleuboo. The numerical digit present the month of survey in this research.

Sites	TBI	BMWP	CBI
A7	7	45	416
B7	2	6	16
C7	2	6	13
D7	2	6	38
E7	2	3	16
A9	7	46	383
B9	2	6	22
C9	0	0	0
D9	2	6	41
E9	1	4	9
A12	8	93	387
B12	0	0	0
C12	1	9	58
D12	2	9	58
E12	1	1	9
A3	8	84	332
B3	0	0	0
C3	2	6	13
D3	1	3	21
E3	1	3	21

점이 합류부와 같은 BMWP 3으로 조사되어 구역의 경계에 변화가 나타났다. CBI를 살펴보면, 언급된 두 지수에서와 마찬가지로 범어사는 7월에 416, 나머지 계절조사에서도 332-383의 범위를 보여 나머지 지점(9-58의 범위로 계상됨)과 큰 차이를 보였다.

4. 코호넨망을 이용한 유형분석

조사된 저서생물 자료를 코호넨망에 입력 후 학습을 통하여 유형화하였다 (Fig. 6). 학습은 대체적으로 700~1,000번의 반복과정을 거쳐 수렴되었다. 유사한 군집구성을 가진 지점들이 무리를 이루는 것으로 나타났다. 이런 경향은 주로 지점별로 묶여져 나타났다. 예로, 범어사는 map의 왼쪽 상단부(0, 0), (0, 1), (2, 1), (5, 0)에 모여졌으며 세병교(D) 왼쪽 중간에, 합류부(E)는 오른쪽 중간에, 온천천(C)은 오른쪽 하단에 모여졌다. 부산대지점은 12월과 3월에 출현한 분류군이 극소수였음이 반영되어 함께 (8, 0)에 모여졌다. 12월의 온천천 군집(C12, (0, 3))은 세병교의 군집구성과 유사하여 근접하여 모여졌다. 또한 세병교의 3월(D3, (8, 6))은 온천천의 군집구성과 근소한 차이를 보여 무리를 이루었다. 반면에 출현시기별로 다른 유형성은 약하게 나타나 강우를 거친 7월은 범어사를 제외한 지점들이 모여졌으며 12월도 열악한 부산대와 합류부를 제외한 지점들은 x가 0인 노드에 무리를 이루었다.

4. 회귀신경망을 통한 생물학적 지수 예측

코호넨 신경망에서와 같이 각 지점에서 출현한 분류

Neuron	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	A3					A7			B12,B3
1	A12		A9						
2									
3	C12					E9			E12
4			D9						
5	D12						E3		
6			D7		B7		E7		D3
7									
8	B9				C9		C7		C3

Fig. 6. The mapping was presented through the trained Kohonen network for patterning occurrence of benthic macroinvertebrates in different sites. The character and the numerical digit present study site and the month of survey in this research.

군의 밀도를 로그(log) 정규화하여 학습데이터로 입력하였고 이에 따른 목적치로는 앞서 언급하였던 생물학적 지수인 TBI, BMWP와 CBI를 주었다. 따라서 회귀신경망을 통한 각 지점의 출현 분류군의 구성은 학습이라는 과정을 거쳐 가중치(weight)가 생성되어 망(network)이 형성되게 된다. 이 과정에 도달한 후 새로운 데이터를 입력하게 되면 이미 형성되어진 망을 통해 각 지수를 예측하게 되는 것이다. 전체적으로 각 지수의 예측은 실제치와 잘 일치하여 나타났다 (Fig. 7). 실제치와 예측치의 차이를 보고자 상관계수(correlation coefficient)를 계산하였다 (Zar, 1984). TBI, BMWP와 CBI의 상관계수(correlation coefficient)는 각각 0.957 (F = 45.512, P < 0.0005), 0.979 (F = 94.238, P < 0.0005), 0.967 (F = 59.606, P < 0.0005)로 매우 높게 나타나 군집의 학습을 통해 지수의 예측이 잘 이루어졌음을 볼 수 있었다.

본 연구에서는 인공신경망 기법 중 코호넨 신경망을 적용하여 군집구성에 따른 지점별 유형성을 시각적으로 쉽게 구별지을 수 있음을 보여 주었다. 현재 다양한 조사지 및 서식처에 대한 연구가 진행되고 있는 실정임으로 향후 광범위한 생물자료를 통한 유사성을 평가하는데 있어 코호넨 신경망은 좋은 도구가 될 것으로 사료

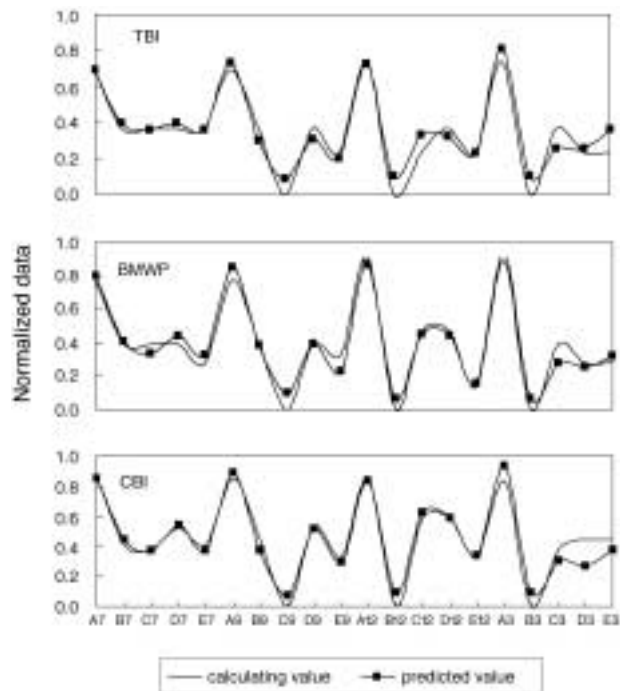


Fig. 7. Field data from July, 2000 to March, 2002 were trained and tested the RTRN network for predicting of the biological indices. The numbers of x-axis in the graph are explained in Appendix 1.

된다. 또한 회귀신경망을 통한 생물출현에 따른 생물학적 지수를 예측하는 것은 어떤 종이나 분류군이 출현하는 것을 예측하는 것보다 안정적으로 수생태계를 평가할 수 있게 할 수 있으리라 여겨진다. 특히, 현재와 같이 생태군집에 대한 연구 자료가 부족할 경우 어떤 분류군의 출현을 예측하기는 어려운 일임에 틀림없다(Chon *et al.*, 2001). 따라서 생물학적으로는 분류군의 출현이 매우 중요함에도 불구하고 이와 같은 지수를 예측하는 것도 관리 차원에서는 중요하다 할 수 있다.

일반적으로 유럽과 북미에서는 저서성 생물의 지표성(indicator)에 대한 다수 연구가 이루어져 생물학적인 지수로 사용되고 있으나(Hynes, 1970; Hellowell, 1986) 우리나라에서는 지표에 대한 연구가 미미한 상태이다. 또한 지표생물에 대한 연구는 주로 청정하거나 비교적 양호한 환경에 사는 생물로 제한되어져 이루어져 있는 한계가 있다. 따라서 우리나라 환경요건에 맞는 생물학적 지표를 개발하기 위한 기초적인 연구가 다수 이루어져야 하는 기본적인 문제가 있다. 대표적인 예로, 우리나라의 오염하천에서 흔히 보고되는 깔따구류(Chironomidae)는 기존의 생물학적 지수로 고려되어 있지 않은 상태이고 분류적인 연구도 매우 미미한 실정이며 나아가 기존의 많은 연구는 주로 자연형 하천에서 이루어져 현재 급격히 오염이 진행되는 오수생태계에 대한 연구는 매우 절실하다. 현실적인 필요성으로 인해 지표생물을 파악하는 연구는 가속화 될 것으로 사료되므로 정량적인 분석기법을 확보하는 것도 병행하여야 할 과제이다.

적 요

부산의 대표적인 자연형 계곡이 있는 범어사에서 도시하천인 온천천을 거쳐 수영강 합류부에 분포하는 저서성 대형무척추동물물을 계절별로 조사하였다. 전 조사지점에서 총 4문 5강 10목 19과 23종이 조사되었다. 범어사에서는 하루살이류(Ephemeroptera), 강도래류(Plecoptera) 등 다양한 분류군이 출현한 반면에 나머지 조사지에서 빈모류(Oligochaeta)와 깔따구류(Chironomidae)가 우점하였다. 두 우점분류군의 출현시기는 7월, 12월과 3월은 빈모류군이 우점을 차지하였으나 9월은 깔따구류가 우점을 차지하여 차이를 보였다. 생물학적 지수인 TBI(Trent Biotic Index), BS(Biotic Score), BMWP(Biological Monitoring Working Party)를 조사하였는데 전체적으로 범어사 지점에서 하류로 가면서 각 지수들이 낮아지는 경향이 나타났다. 전체적인 지수 분포는

TBI 1-8, BMWP 1-93 그리고 CBI는 9-387의 분포를 보였다. 비지도 학습법인 코호넨 신경망을 통하여 지점별 저서생물 출현의 유형화가 잘 반영되어 표출되었다. 또한 하천의 지속적인 관리를 위해 생물학적 지수를 회귀신경망을 통하여 예측하였는데 전체적으로 각 지수의 예측은 실제치와 잘 일치하여 나타났다(TBI, BMWP와 CBI의 상관계수(correlation coefficient)는 각각 0.957, 0.979와 0.967).

사 사

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었음.

인 용 문 헌

- 윤일병. 1988. 한국동식물도감. 제30권 동물편(수서곤충류). 문고부, 서울. 840p.
- APHA, AWWA and WPCF. 1985. Standard methods for the examination of water and waste water (16th. ed). APHA, Washington, DC. 1134p.
- Brigham, A.R., W.U. Bringham and A. Gnlika (eds). 1982. Aquatic insects and oligochaetes of North and South California. Midwest Aquatic Enterprise, Mahomet. 837p.
- Brinkhurst, R.O. 1986. Guide to the freshwater aquatic microdrile Oligochaetes of North America. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 84, Dept. of Fisheries and Oceans, Canada. 259p.
- Chon, T.-S., Y.S. Park, K.H. Moon and E.Y. Cha. 1996. Patternizing communities by using an artificial neural network. *Ecol. Model.* **90**: 69-78.
- Chon, T.-S., Y.S. Park and J.H. Park. 2000a. Determining temporal pattern of community dynamics by using unsupervised learning algorithms. *Ecol. Model.* **132**: 151-166.
- Chon, T.-S., I.S. Kwak and Y.S. Park. 2000a. Pattern recognition of long-term ecological data in community changes by using artificial neural networks: Benthic macroinvertebrates and chironomids in a polluted stream. *Korean Journal of Ecology.* **23**: 89-100.
- Chon, T.-S., Y.S. Park and E.Y. Cha. 2000b. Patterning of community changes in benthic macroinvertebrates collected from urbanized streams for the short time prediction by temporal artificial neural networks. In: Arti-

- ficial Neural Networks in Ecology and Evolution (Lek S. and J.F. Guegan eds). Springer-Verlag, Berlin.
- Elizondo, D.A., McClendon, R.W. and Hoongenboom, G., 1994. Neural network models for predicting flowering and physiological maturity of soybean. *Transactions of the ASAE*, **37**: 981-988.
- Giles, C.L., Kuhn, G.M. and Williams, R.J. 1994. Dynamic recurrent neural networks: theory and applications. *IEEE Transactions on Neural Networks*. **5**: 153-156.
- Haykin, S. 1994. Neural Networks. Macmillian College Publishing Company. New York.
- Hecht-Nielsen, R. 1990. Neurocomputing. Addison-Wesley, New York, 433pp.
- Hellawell, J.M. 1986. Biological Indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management. Elsevier, London. 546pp.
- Hynes, H.B.N. and M.J. Coleman. 1968. A simple method of assessing the annual production of stream benthos. *Limnol. Oceanogr.* **13**: 569-573.
- Hynes H.B.N. 1970. The ecology of running waters. Liverpool University Press, Liverpool, 555pp.
- Kohonen, T. 1989. Self-organization and Associative Memory. Springer-Verlag, Berlin, 312 pp.
- Kung, S.Y. 1993. Digital Neural Networks. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. p.444.
- Legendre, P., S. Dallot and L. Legendre. 1985. Succession of species within a community: chronological clustering, with applications to marine and freshwater zooplankton. *Am. Nat.*, **125**: 257-288
- Lippmann, R.P. 1987. An introduction to computing with neural nets. *IEEE Acoustics, Speech and Signal Processing Magazine* April: 4-22.
- Merritt, R.W. and K.W. Cummins. 1996. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. Hunt Publishing Company, Dubugue., pp. 722.
- Pennak, R.W. 1978. Fresh-water Invertebrates of the United States. John Wiley & Sons, Inc., New York. pp. 803.
- Recknagel, F., M. French, P. Harkonen and K.-I. Yabunaka. 1997. Artificial neural network approach for modelling and prediction of algal blooms. *Ecological Modelling*. **96**: 11-28.
- Resh, V.H. and D.M. Rosenberg. 1984. The ecology of aquatic insects. Praeger publishers.
- Rumelhart, D.E., G.E. Hinton and R.J. Williams. 1986. Learning internal representations by error propagation. In: D.E. Rumelhart and J.L. McClelland (Editors), Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, Vol. I: Foundations. MIT Press. Cambridge. pp. 318-362.
- Stankovski, V., M. Debeljak, I. Bratko and M. Adamic. 1998. Modelling the population dynamics of red deer (*Cervus elaphus* L.) with regard to forest development. *Ecological Modelling*. **108**: 143-153.
- Surber, E.W. 1937. Rainbow trout and bottom fauna production in one mile of stream. *Trans. Amer. Fish. Soc.* **66**: 193-202.
- Tan, S.S. and Smeins, F.E. 1996. Predicting grassland community changes with an artificial neural network model. *Ecological Modelling*. **84**: 91-97.
- Wasserman, P.D. 1989. Neural computing: Theory and practice. Van Nostrand Reinhold, New York, 230pp.
- Wiederholm, T. 1983. Chironomidae of the Holartic Region. Keys and Diagnoses. (Part 1. Larvae). Ent. Scand. Suppl. 19., pp.457.
- Yun, I.B. 1988. Illustrated Encyclopedia of Fauna and Flora of Korea Vol. 30. (Aquatic insects), Ministry of Education, Seoul. pp. 840.
- Zar, J.H. 1984. Biostatistical Analysis. Prentice-Hall International, Inc, New Jersey. p. 718.
- Zurada, J.M. 1992. Introduction to Artificial Neural Systems. West Publishing Company. New York, 683pp.

(Received 4 Jan. 2003, Manuscript accepted 5 Mar. 2003)