

우리나라 주요 호소의 수질 변동 경향성 분석 및 유형화

권용수 · 배미정 · 김준수 · 김용재^{1,*} · 김백호² · 박영석*

경희대학교 생물학과, ¹대진대학교 생명과학과, ²한양대학교 생명과학과

Characterizing Changes of Water Quality and Relationships with Environmental Factors in the Selected Korean Reservoirs. Kwon, Yong-Su, Mi-Jung Bae, Jun-Su Kim, Yong-Jae Kim^{1,*}, Baik-Ho Kim² and Young-Seuk Park* (Department of Biology, Kyung Hee University, Seoul 130-701, Korea; ¹Department of Life Science, Daejin University, Gyeonggi 478-711, Korea; ²Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

Abstract In this study, we evaluated the temporal changes of water quality in the 90 reservoirs in Korea and the relationships between water quality and their environmental factors in the reservoirs for effective management of reservoirs. The majority of study reservoirs were categorized as the eutrophic state based on Carlson's trophic index. Among 90 reservoirs, more than 55.0% were nutrient-rich based on TSI_{TP} in each month, where more than 50.0% were nutrient-rich based on TSI_{Chl-a} from June to November. Seasonal Mann-Kendall test was used to analyze temporal variation of water quality in the selected 60 reservoirs using monthly data from 2004 to 2008. The results showed that 27 (45.0%) reservoirs showed the improvement of water quality based on TP and Chl-*a* concentrations, while 14 (23.3%) and 11 (18.3%) reservoirs displayed the degradation of water quality based on TP and Chl-*a* concentrations, respectively. Meanwhile, a self-organizing map classified the study reservoirs into five groups based on differences of hydrogeomorphology (altitude, catchment area, bank height, lake age, etc.). Physicochemical factors and land use/cover types showed clear differences among groups. Finally, hydrogeomorphology of reservoirs were related to water quality, indicating that the hydrogeomorphological characters strongly affect water quality of reservoirs.

Key words : reservoir, trend analysis, self-organizing map (SOM), classification, hydrogeomorphometry, water quality

서 론

호소는 수자원의 저장고로써 인간활동에 중요한 역할을 하며, 우리나라에는 약 18,700개의 호소가 있는 것

으로 보고되었다(Hwang *et al.*, 2003). 국토의 약 70%가 산지로 구성되어 있는 우리나라는 강우의 유출이 빠르고 낮은 토지 보수력으로 인해 생활용수 및 농업용수의 확보 목적으로 호소의 중요성이 강조되고 있다(Park *et al.*, 2005). 또한 우리나라 1인당 1일 상수 소비량이 외국에 비해 월등히 높아 호소 개발 필요성이 더욱 대두되고 있다(Choi *et al.*, 1998; MOLIT, 2006).

호소는 자연상태에서는 오랜 시간에 걸쳐 천천히 변화하지만 지난 수십 년 동안의 각종 개발과 수자원의 이용 등으로 인해 최근에는 자연호 및 인공호 모두에서

Manuscript received 27 June 2014, revised 29 July 2014, revision accepted 1 August 2014

* Corresponding author: (YJK) Tel: +82-31-539-1851, Email: yjkim@daejin.ac.kr, (YSP) Tel: +82-2-961-0946, Fax: +82-2-961-0244, E-mail: parkys@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.

급격한 변화가 발생하고 있다(MOE, 2009). 특히 대부분의 인공호는 강의 계곡 또는 배수구역의 하류에 형성되며, 유역면적에 대한 호소 표면적의 비율이 커서 상대적으로 부영양화가 쉽게 진행되는 특성이 있다(Fee, 1979; Kim and Hong, 1992; Lee *et al.*, 2003). 또한 농업, 수자원 공급, 이수를 위한 용도로 만들어진 대부분의 호소들은 하도를 차단하거나 변형하여 생성된 댐 호로 이루어져서(Kim *et al.*, 2003), 여름철 부영양화로 인한 조류의 대발생이 빈번하게 일어나고 있다(MAF, 2000).

호소의 수질은 지역적인 기후 및 유역 내 오염원 현황을 비롯해 유입수량이나 수체의 흐름, 방류량 등과 관련된 수리수문학적 특성뿐만 아니라 호소 규모와 같은 형태학적인 특성에 영향을 받는다(Carmack *et al.*, 1979). 따라서 호소의 수질을 효율적으로 관리하기 위해서는 각각의 호소들이 가지는 특성을 이해하고, 그 특성에 따라 호소를 분류하여 관리하는 것이 필요하다. 이러한 필요성에 따라 호소의 특성을 분류하기 위한 다양한 시도가 있었으며, 그 중 호소의 부영양화도에 따라 분류하는 것이 가장 일반적인 방법이다. Carlson (1977)은 엽록소-*a* (Chl-*a*) 및 총인 (TP) 농도를 기반으로 호소의 영양상태를 구분하기 위한 부영양화 지수 (Trophic state index: TSI)를 개발하였으며, OECD (1982)는 Carlson의 TSI를 기반으로 부영양의 기준을 제시하였다.

한편 국내에서도 Carlson (1977)의 TSI 및 OECD (1982) 기준에 따라 호소를 분류하는 많은 연구가 진행되었다 (Kim *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2007a, b; Park *et al.*, 2014). 또한 호소의 수심에 따른 Chl-*a*의 농도 특성을 비교하여 호소를 4개 유형으로 나누거나 (Kim and Hwang, 2004; Kim *et al.*, 2007b), 유효저수량/수면적 비와 화학적산소요구량 (COD)을 이용하여 저수지를 4개의 유형으로 분류하였다 (MAF, 2005). 이들 방법은 모두 두 변수간의 상관관계에 따라 저수지 유형을 분류하는 것으로서 비교적 쉽게 할 수 있다는 장점이 있으나, 실제 자연 현상들은 다양한 인자들이 서로 복합적으로 작용하여 나타나기 때문에 이러한 다양한 특성이 복합적으로 고려된다면 보다 유용한 저수지 유형 분류가 될 수 있다 (Park *et al.*, 2014).

선진국들의 경우 호소의 수질을 평가하기 위한 방법으로 호소의 부영양화를 생물적 평가방법을 통해 평가하고 있으며, 이것으로부터 획득한 자료를 데이터베이스 (DB)화하여 호소의 종합적 관리에 이용하고 있다 (EEA, 2003; HELCOM, 2007). 한편 우리나라 환경부는 생물학적 평가법으로 1998년 팔당호, 대청호, 충주호 및 주

암호를 대상으로 조류예보제를 시행하였고, 2003년에 조류관리대책을 수립하여 20개 호소로 확대 운영하고 있다 (MOE, 2009). 또한 환경부는 호소환경조사 지침 (MOE, 2001)을 통해 수질항목과 더불어 생물상을 조사하고 있으며, 2003년에 전국 89개 호소를 대상으로 호소 수질관리 방안을 연구하였다 (MOE, 2003). 이들 연구들은 호소 수질 및 생태계 관리 대책을 점검하고 효과적인 호소 수질 보전대책을 수립하여 수질보존과 전국적으로 시행되고 있는 호소 환경조사에 대한 지침서로서 역할을 하는 데 그 목표를 두고 있다. 그러나 이와 같은 운영에도 불구하고 각 호소들이 다양한 오염원에 노출되어 있기 때문에 많은 호소에서 발생하는 부영양화에 대한 근본적인 관리는 잘 이루어지지 않고 있는 실정이다.

한편 Park *et al.* (2014)은 다양한 환경 요인들을 이용한 저수지의 유형화 및 다차원에서의 국내 저수지의 수질에 있어 토지피복 및 형태학적 요인의 영향을 평가하였으나, 시간에 따른 저수지 수질의 변동과 환경요인들과의 관계에 대한 평가는 이루어지지 않았다. 실제로 호소 수질을 효율적으로 관리하기 위해서는 수질인자들이 장기간에 걸쳐 시간에 따라 어떻게 변화하는가를 이해하는 것이 필요하다. 이를 위하여 다양한 연구가 진행되었다. Yang and Kim (2006)은 1992년부터 2005년까지 13년간 주암호의 수질변화, COD 및 Chl-*a* 농도의 상관관계 분석을 하였으며, Lee *et al.* (2010)은 주남저수지 유역의 오염원과 수질변동에 따른 식물플랑크톤 군집에 대한 연구를 하였다. 한편 Moon (2004)은 1997년부터 2000년까지 4년간 조사된 우리나라 농업용 저수지 492개소의 수질변화 특성에 대하여 보고하였으며, Han (2010)은 전국 884개 하천과 호소 지점에서 1989년부터 2009년까지 측정된 전국 하천과 호소 수질측정망 자료를 이용하여 수질의 시공간적 분석을 하였다. Song *et al.* (2012)은 2007년부터 2012년까지 경기도 내 호소의 수질변화 특성에 대하여 보고하였다. 한편 Kim *et al.* (2012)은 금강수계에 있는 6개 호소 수질의 장기변동 추세를 분석하였다. 그러나 이들 연구는 특정지역에 한정되거나 수질변동에 미치는 환경인자들의 분석에 대한 연구는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 환경부 관리 90개 주요 호소 (2003년 환경부 조사대상 호소 89개 및 시화호)의 수질변동 특성을 분석하고 이러한 수질에 미치는 환경인자들의 영향에 대하여 분석하고자 하였다. 이러한 정보는 호소의 수질관리에 기초적인 정보로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

재료 및 방법

1. 자료

호소 자료는 호소 환경 조사지침(MOE, 2001)에 따라 전국에 분포하는 호소들 중 1일 30만 톤 이상의 원수를 취수하거나, 만수위 50만톤 이상인 호소 및 주요 관리가 필요한 90개 호소(2003년 환경부 조사대상 호소 89개 및 시화호)를 대상으로 하였다(Appendix 1). 선택된 호소들의 특성을 분석하기 위해 호소의 수리지형형태적 요인을 비롯해 토지 이용/피복도, 이화학적 수질 요인 등 호소 특성을 나타내는 다양한 환경인자들을 고려하였다(Table 1).

수문 및 형태학적 요인은 한국수자원공사(<http://www.wamis.go.kr>) 및 한국농어촌공사(<http://www.ekr.or.kr>)에서 제공하는 자료와 기준에 출판된 보고서 및 문헌자료(MOE, 1994)를 이용하여 자료를 취합하였다. 취합된 인자로는 고도(Altitude), 유역면적(C_area), 저수지면적(S_area), 유효저수량(Pondage), 제방높이(B_height), 제방길이(B_width), 체류시간(R_time), 저수지 연령(Age)의 8개 요인을 이용하였다. 이들 호소의 연령이 알려진 것이 없는 6개 자연호(정양늪, 박실지, 질날벌, 화진포호, 향호, 매호)의 연령은 연구여건을 고려하여 분석에서 99년으로 가정하고 계산하였다. 이화학적 수질 자료는 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)에서 제공하는 수질측정망 자료 중 6개 이화학적 요인(용존산소(DO),

총부유물질(TSS), 총질소(TN), 총인(TP), 화학적산소요구량(COD), Chlorophyll-*a*(Chl-*a*))들에 대해 2004년부터 2008년까지의 월별 자료를 이용하여 수질의 경향성을 분석하였으며, 이들 자료 중 상대적으로 부영양화가 높은 8월 자료를 이용하여 유형화 결과에 따른 차이를 비교하였다. 이들 수질 자료는 COD 산성고온과망간산칼륨 방법, TP와 TN 자외선/가시선 분광법 등 환경부 수질오염공정시험법(MOE, 2004)에 준하여 분석된 자료를 활용하였다. 토지 이용/피복도는 MAFRA(2000)에서 제공하는 자료를 종합하여 나타내었다.

2. 부영양화지수

호소의 영양상태를 평가하기 위해 TSI 부영양화지수(Carlson, 1997)를 이용하였으며, 수질 인자들 중 Chl-*a*와 TP에 대해 다음 식(1)-(2)을 사용하여 TSI를 계산하였다(Carlson and Simpson, 1996). 계산된 TSI는 Kratzer and Brenzonik(1981)의 등급기준에 따라 5개 등급에 따라 호소의 영양상태를 평가하였다. Chl-*a*는 $\mu\text{g L}^{-1}$, TP는 mg L^{-1} 의 단위를 사용하였다.

$$TSI_{TP} = 14.42 \times \ln(TP) + 4.15 \quad \text{식 (1)}$$

$$TSI_{Chl-a} = 9.81 \times \ln(Chl-a) + 30.6 \quad \text{식 (2)}$$

3. Seasonal Mann-Kendall test (계절 맨-켄달 검정)

수질 변동 경향분석을 위해 제안된 여러 분석 방법들

Table 1. Variation (mean and range) of 19 variables in the 90 reservoirs.

	Variable	Abbreviation	Mean (\pm SD)	Range
Hydrogeomorphology	Altitude (m)	—	66.4 (\pm 59.3)	0.0~239.9
	Catchment area (km^2)	C_area	4.8 (\pm 2.3)	0.8~10.1
	Surface area (km^2)	S_area	1.7 (\pm 1.3)	0.1~4.9
	Pondage (10^3m^2)	—	10.1 (\pm 2.1)	4.3~14.5
	Bank height (m)	B_height	34.9 (\pm 24.5)	2.0~123.0
	Bank width (m)	B_width	6.1 (\pm 0.9)	4.5~9.0
	residence time (Day)	R_time	4.4 (\pm 1.6)	0.6~8.7
	Age (Year)	—	42.0 (\pm 26.0)	6.0~99.0
Physicochemistry	Dissolved oxygen (mg L^{-1})	DO	7.96 (\pm 1.48)	3.13~10.80
	Chemical oxygen demand (mg L^{-1})	COD	5.74 (\pm 4.23)	1.90~26.05
	Total suspended solid (mg L^{-1})	TSS	13.41 (\pm 12.91)	1.38~61.63
	Total nitrogen (mg L^{-1})	TN	1.67 (\pm 0.83)	0.47~4.17
	Total phosphorus (mg L^{-1})	TP	0.06 (\pm 0.05)	0.01~0.25
	Chlorophyll <i>a</i> (mg m^{-3})	Chl- <i>a</i>	17.94 (\pm 17.98)	2.89~92.35
Land use/cover type	Paddy field (%)	—	12.4 (\pm 13.3)	0.1~69.7
	Dry field (%)	—	8.4 (\pm 8.0)	0.5~58.1
	Bare soil (%)	—	2.1 (\pm 3.0)	0.0~18.7
	Forest area (%)	—	66.7 (\pm 21.4)	8.0~94.1
	Others (%)	—	14.5 (\pm 13.5)	1.4~98.7

중 계절 맨-켄달 검정 (Seasonal Mann-Kendall Test)은 비정규분포를 이루고 계절성을 보이며 결측치가 존재하는 등의 특징을 갖는 수질자료의 경향분석에 적합하며, 결측치의 영향을 배제하는 방법으로 결측치가 많은 경우에 사용될 수 있다(Mann, 1945; Kendall, 1975). 호소 수질 변동 경향성을 분석하기 위한 방법으로 앞선 TSI 계산에서 사용된 수질인자 TP, Chl-*a*에 대해 계절 맨-켄달 검정을 사용하였으며, 전체 90개 호소들 중 계절 맨-켄달 검정을 수행하는 데 있어 월별 수질 자료가 충분한 60개 호소를 대상으로 분석하였다. 계절 맨-켄달 검정은 관찰치들 사이의 상관 측정치를 통해 경향을 분석하는 비모수 통계방법으로 각 계절에 대해 켄달 검정을 독립적으로 시행한 후, 각 결과들의 가중합을 구하여 하나의 경향 분석 결과를 도출해냄으로써 계절성을 배제하는 방법이다(Kim and Park, 2004). 계절 맨-켄달 검정법은 상관계수인 Kendall's tau를 구하여 그 유의성을 검증함으로써 경향성의 유무를 파악하고 이에 수반되는 계절 켄달 기호기 통계량을 구하여 경향의 정도를 판단할 수 있다(Mann, 1945; Kendall, 1975; Lettenmaier, 1988). 이 연구에서는 95% 신뢰구간에서 켄달 통계 추정치(S)를 이용하였으며, 양과 음의 S값은 각 시간에 따른 수질 농도의 증가와 감소추이를 반영하였다.

4. Self-organizing map

Self-Organizing Map (SOM)은 비지도학습 신경회로망의 일종으로 군집분석, 분류, 시각화, 유형화 등에 효과적인 분석 방법으로(Kohonen, 2001; Park *et al.*, 2003), 본 연구에서는 90개 호소의 8개 수리지형형태적 인자의 공간적 분포 패턴을 유형화하기 위해 사용하였다. SOM은 계산단위체인 노드(또는 뉴런)로 구성된 입력층과 출력층의 두 층으로 구성되어 있으며, 입력된 자료를 받아 반복된 계산과정을 거쳐 입력자료를 최적화하고 자료의 차이성에 기인하여 분류하는 학습(훈련)의 과정을 거치게 된다. 학습은 사전에 조사된 자료를 대상 인공신경망에 반복 입력하여 입력층과 출력층 사이의 연결계수(connectivity weight)가 입력 자료의 정보 특성을 반영할 수 있도록 하는 것으로, 최종적으로 효율적인 시각화를 위한 이차원격자에 N개의 출력 뉴런으로 나타나게 된다. 출력층은 가로와 세로 방향에 대한 최적의 배열을 위해 육각형의 격자를 사용하였다(Kohonen, 2001; Park *et al.*, 2003). 선택된 출력 뉴런의 수 결정은 규정화된 원칙은 없으나, 이 연구에서는 경험식($5\sqrt{\text{표본수}}$)에 근거하여 42개 격자($N=7 \times 6$)를 사용하였다(Vesanto

and Alhoniemi, 2000).

SOM 결과의 평가를 위해 이 연구에서는 모델의 해상도를 평가하기 위한 quantization error (QE)와 위상을 평가하기 위한 topographic error (TE)의 두 기준을 사용하였다. 이들 두 error 값은 격자 mapping의 정확성을 나타내기 위한 값으로 사용하였다(Kohonen, 2001; Park *et al.*, 2003). SOM 분석 후 Euclidean distance를 이용한 Ward linkage 방법에 따른 계층적 군집분석을 사용하여 SOM unit들을 유형화하였으며, multi-response permutation procedure (MRPP)를 이용하여 유형화된 그룹들 간의 유의성을 평가하였다. SOM 분석은 Matlab (Ver. 6.1) 환경에서 이루어졌으며, SOM toolbox (<http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox>)에서 제공하는 함수와 인자들을 이용하였다.

5. 지표분석

지표분석(indicator analysis)은 출현한 종들의 상대 밀도와 상대 빈도의 곱으로 계산된 지표값(IndVal)을 통해 지표종을 평가하는 방법으로 지표값(IndVal)은 0(지표 아님)에서 100(완벽한 지표)의 범위에서 나타난다(Peterson and Keister, 2003). 본 연구에서는 SOM에 의해 유형화된 각 그룹의 환경요인들 중 주요 지표 요인을 평가하기 위하여 지표종 분석을 사용하였다. 지표값(IndVal)의 유의성을 결정하기 위해서 Monte Carlo tests를 사용하였으며, 이들 분석은 PC-ORD (Ver. 4.25; McCune and Mefford, 1999)를 이용하여 분석하였다.

6. 통계 분석

각 인자들의 연관성을 찾아내기 위하여 비모수 상관계수를 계산하였으며, 추가적으로 SOM에 의해 정의된 그룹들 간 특성의 차이를 비교하기 위해 Kruskal-Wallis (K-W) 검정과 사후검정으로 Dunn 다중비교검증을 통계 프로그램인 Statistica (Ver. 7)를 이용하여 실시하였다.

결 과

1. 환경 특성

본 연구에서 사용된 90개 호소들은 다양한 환경적 특성을 보이는 것으로 나타났다. 특히 수리지형형태적 요인들 중 고도는 0.0~239.9 m까지 다양한 고도 범위를 보였으며, 제방의 높이 또한 2.0~123.0 m까지 다양한

Table 2. Spearman rank correlation coefficient between hydrogeomorphological factors and physicochemical factors and land use/cover types in the 90 reservoirs.

Variable	Hydrogeomorphology								
	Altitude	C_area	S_area	Pondage	B_height	B_width	R_time	Age	
Physico-chemistry	DO	-0.13	0.14	0.06	-0.07	-0.08	-0.02	-0.22	-0.01
	COD	-0.70**	-0.33**	-0.25*	-0.47**	-0.73**	0.16	-0.35**	0.47**
	TSS	-0.49**	0.19	0.15	-0.02	-0.32**	0.31**	-0.34**	0.23*
	TN	-0.09	0.49**	0.46**	0.19	-0.05	0.34**	-0.36**	-0.24*
	TP	-0.67**	0.03	0.04	-0.17	-0.48**	0.30**	-0.46**	0.31**
	Chl-a	-0.51**	-0.06	-0.05	-0.30*	-0.49**	0.19	-0.41**	0.26*
Land use/cover type	Paddy field	-0.70**	0.03	0.07	-0.07	-0.53**	0.38**	-0.29*	0.20
	Dry field	-0.45**	0.06	0.14	-0.01	-0.38**	0.32**	-0.30*	0.20
	Bare soil	-0.56**	0.09	0.08	-0.06	-0.50**	0.19	-0.34*	0.28*
	Forest area	0.59**	-0.14	-0.21	0.08	0.47**	-0.36**	0.30*	-0.13
	Etc.	-0.38**	0.00	0.08	-0.06	-0.31**	0.21	-0.23	0.30**

*, P<0.05, **, P<0.01

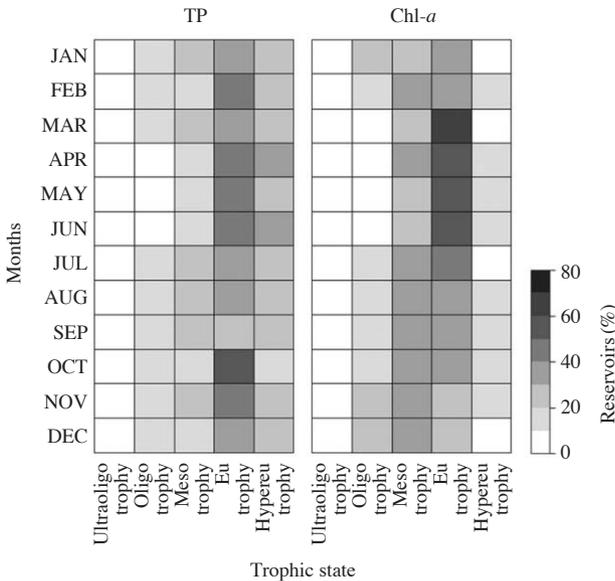


Fig. 1. Differences of trophic states of 90 reservoirs in each month based on Carlson's TSI.

분포 범위로 나타났다(Table 1). 이러한 수리지리형태적 특성은 90개 호소 각 유역의 토지이용/피복 특성 중 숲의 비율(8.0~94.1%)에서도 뚜렷하게 나타났으며, 90개 호소의 Chl-a 농도 범위는 2.89~92.35 mg m⁻³까지 계절 및 지점에 따른 변이가 큰 것으로 나타났다.

수리지리형태적 요인들 중 고도와 제방 높이는 DO와 TN을 제외하고 나머지 이화학적 요인들과 음의 상관성을 보였으며(P<0.05), 산림의 비율과는 양의 상관성을 보였다(고도: r=0.59, P<0.05, 제방 높이: r=0.47, P<0.05)(Table 2). DO는 모든 수리 및 형태학적 요인들과

Table 3. Trend analyses of trophic states at the 60 selected reservoirs using seasonal Mann-Kendall test.

Trophic state	Number of reservoir (%)		
	Increase	Decrease	No tendency
TSI _{TP}	14 (23.3)	27 (45.0)	29 (31.7)
TSI _{Chl-a}	11 (18.3)	27 (45.0)	22 (36.7)
Overall	3 (5.0)	14 (23.3)	6 (10.0)

는 유의한 상관성을 보이지 않았다(P>0.05). 체류시간은 DO를 제외한 이화학적 요인들과 유의한 음의 상관성을 나타내었다(P<0.05).

2. 호소 경영 상태 변화 추이

Carlson의 TSI를 이용한 영양상태 판별 결과 대부분의 호소들은 부영양화 이상의 영양상태를 보였다(Fig. 1). 특히 TSI_{TP}에 기초한 90개 호소의 영양상태는 모든 월별 조사 시기에서 55.0% 이상의(57.1~80.3%) 호소에서 부영양화 이상의 상태를 보였으며, 극빈영양상태를 보이는 호소는 3.0% 이하로 나타났다. 반면 TSI_{Chl-a}는 6월부터 11월까지에서만 50.0% 이상의(51.8~70.4%) 호소들에서 부영양화 이상의 상태를 보였고, 나머지 시기들에서는 50% 이하의(36.9~48.8%) 호소들만이 부영양화 이상의 영양상태를 보이는 것으로 나타났다.

시간에 따른 영양상태의 변화 경향성을 평가하기 위해 사용된 60개의 호소 중 계절 맨-켄달 검정 결과 TSI_{TP}는 41 (68.3%)개 호소가 유의한 변화 경향성을 나타낸 반면 나머지 29 (31.7%)개 호소는 유의하지 않은 경향성을 보였다(Table 3). 또한 TSI_{TP}(증가: 23.3%, 감소: 45.0%)

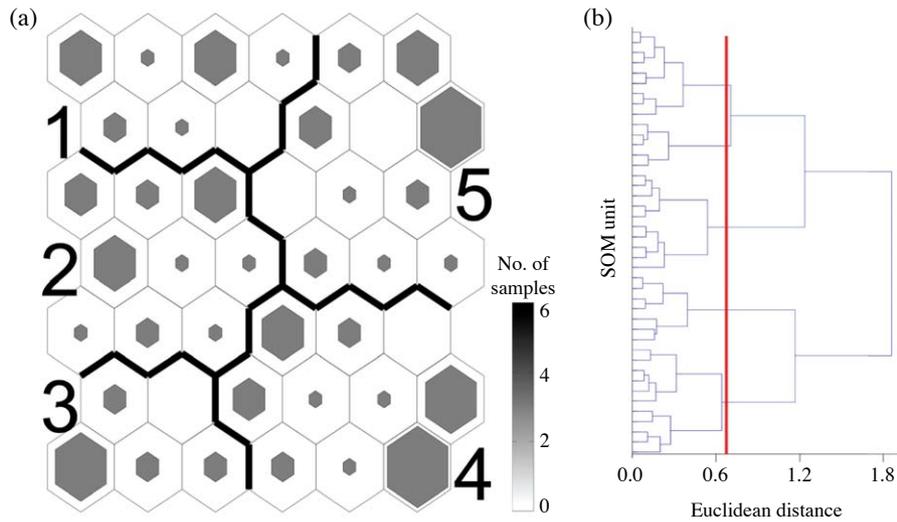


Fig. 2. Classification of 90 reservoirs based on 8 hydrogeomorphological factors in the SOM map (a) and dendrogram of SOM units using the Ward linkage with Euclidean distance (b).

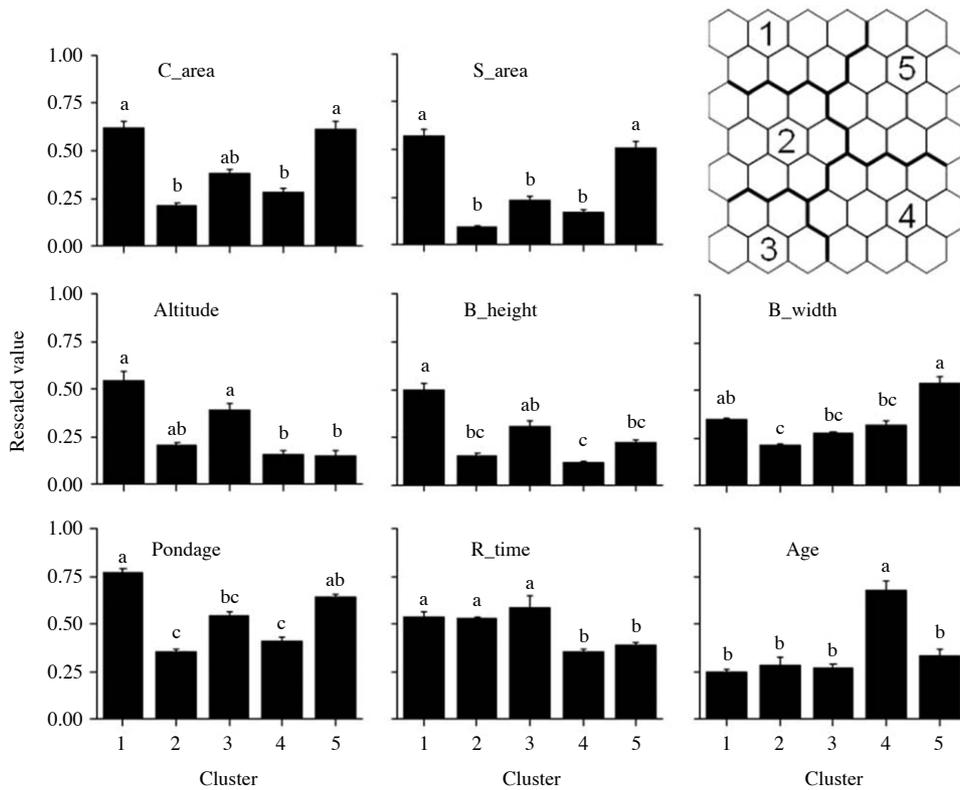


Fig. 3. Differences of hydrogeomorphological factors in the trained SOM. The values of each variable were obtained from the weights of trained SOM. Error bars indicate standard error. Different alphabets indicate statistically significant difference among clusters based on Dunn multiple comparison test ($P < 0.05$).

와 TSI_{Chl-a} (증가: 18.3%, 감소: 45.0%) 모두 유의한 감소 추세를 보이는 비율이 45.0% (27개 호소)로 유의한 증가 추세를 보인 비율에 비해 상대적으로 높았다(TSI_{TP} :

23.3%, TSI_{Chl-a} : 18.3%). TP와 Chl-a 두 요인들을 모두 고려했을 때 3개 호소(삼교호, 예당지, 팔당호)만 수질이 악화되는 것을 보였으며, 14개 호소(가창호, 경포호, 고

삼지, 괴산호, 나주호, 대아지, 대암호, 서호, 섬진강호, 시화호, 신갈지, 연초호, 춘천호, 화천호)는 수질이 향상되는 경향을 보였다.

3. 호소 유형화

호소의 수리지형형태적 특성을 이용한 SOM 분석 결과 QE와 TE는 각각 0.264와 0.000으로 SOM 학습이 원활하게 이루어진 것으로 나타났다. SOM 분석 결과 계층적 군집 분석의 계통수에서의 차이성에 기반하여 5개 그룹(1-5)으로 나누었으며(Appendix 1), 이들 그룹들 간에는 유의한 차이가 있었다(MRPP, $A=0.12$, $P<0.01$)(Fig. 2). 이때 각 SOM map에서 육각형격자의 크기는 호소의 수를 나타낸다. 5개 그룹들 중 그룹 4는 전체 9개 호소 중 서호, 질날벌을 포함한 25개 호소가 포함되었으며, 남강호, 아산호 등 22개 호소가 포함된 그룹 5가 두번째로 많은 호소들로 구성되었다. 반면 그룹 3은 안계호, 연초호 등 11개의 가장 적은 호소 수를 포함하였다.

SOM 분석에서 각 수리지형형태적 요인들의 차이는 Fig. 3에 나타내었으며, 수리지형형태적 특성이 잘 반영되어 나타났다. 고도와 제방높이는 그룹 1이 위치한 SOM map의 좌측 상단부에서 가장 높게 나타났으나, 그룹 4가 위치한 우측 하단부가 가장 낮은 값의 분포를 보였다(Dunn 검증, $P<0.05$). 또한 호소 유역면적, 저수면적, 유효저수량은 SOM map의 상부에 위치한 그룹 1과 5가 하부에 위치한 그룹 2-4에 비해 높은 값의 분포를 보였다(Dunn 검증, $P<0.05$). 제방 길이는 SOM map의 오른쪽 상단부에 위치한 그룹 5가 가장 높은 분포를

보였으며(Dunn 검증, $P<0.05$), 그룹 4가 위치한 SOM map 우측 하단부에 위치한 호소들의 생성 년도가 가장 오래된 것으로 나타났다(Dunn 검증, $P<0.05$).

이화학적 수질요인과 토지 이용/피복도에서 SOM 그룹들 간 차이를 비교한 결과 DO를 제외한 나머지 이화학적 수질요인들에서 그룹들 간 유의한 차이가 있었다(K-W 검증, $P<0.05$)(Table 4). 특히 그룹 5에 포함된 호소들의 이화학 수질요인들의 농도가 가장 높았으며, 그룹 2의 TSS($3.8\pm 2.9\text{ mg L}^{-1}$), TP($0.02\pm 0.01\text{ mg L}^{-1}$), Chl-*a*($7.1\pm 4.7\text{ mg L}^{-1}$)의 농도가 가장 낮았다(Dunn 검증, $P<0.05$)(Table 4). COD 농도는 그룹 1($2.9\pm 0.6\text{ mg L}^{-1}$)과 그룹 2($3.1\pm 1.1\text{ mg L}^{-1}$)가 유의하게 낮았으며, 그룹 4($7.3\pm 3.1\text{ mg L}^{-1}$)와 그룹 5($7.6\pm 6.1\text{ mg L}^{-1}$)가 유의하게 높았다(Dunn 검증, $P<0.05$). 한편 그룹 1에 위치한 호소들은 상대적으로 높은 산림 비율($79.4\pm 5.9\%$)을 보였으며, 산림을 제외한 나머지 토지 이용/피복도(논, 밭, 대지, 기타)는 상대적으로 낮은 비율을 보였다(Table 4). 반면 그룹 5에 위치한 호소들은 산림의 비율($50.1\pm 19.7\%$)이 5개 그룹들 중 가장 낮았으며, 기타 토지 비율을 제외한 나머지 토지 이용/피복도 비율이 가장 높은 것으로 나타났다(Dunn 검증, $P<0.05$). 이들 이화학적 수질요인과 토지 이용/피복도 중 TSS(IndVal=36.1), TN(IndVal=29.3), TP(IndVal=36.4) 및 대지의 비율(IndVal=39.1)은 그룹 5의 유의한 지표 요인으로 나타났으며, 산림의 비율(IndVal=24.2)은 그룹 1의 유의한 지표 요인으로 나타났다(Monte Carlo test, $P<0.05$)(Table 4). 또한 호소의 환경적 특성과 함께 각 그룹별 인위적인 교란 요인들의 차이로 인구 밀도와 가축 수를 비교하였다(Fig. 4). 그룹 5에 포함된 호소들의 유역 내

Table 4. Differences (mean \pm SD) in physicochemical factors and land use/cover types among the five clusters defined in SOM. Different alphabets in each variable indicate statistically significant difference among clusters based on Dunn's multiple comparison test ($P<0.05$). Indicator is based on the IndVal in indicator analysis.

Variable	Cluster					Indicator	
	1	2	3	4	5		
Physico-chemistry	DO (mg L^{-1})	7.92 (± 1.21)	7.31 (± 1.17)	8.73 (± 1.44)	7.88 (± 1.90)	8.38 (± 1.38)	—
	COD (mg L^{-1})	2.93 (± 0.58) ^b	3.14 (± 1.10) ^b	6.01 (± 2.32) ^{ab}	7.34 (± 3.13) ^a	7.57 (± 5.78) ^a	—
	TSS (mg L^{-1})	8.39 (± 8.17) ^{bc}	3.83 (± 2.93) ^c	13.75 (± 11.72) ^{abc}	14.04 (± 10.86) ^{ab}	22.62 (± 16.16) ^a	5
	TN (mg L^{-1})	1.58 (± 0.4) ^{ab}	1.32 (± 0.44) ^b	1.23 (± 0.61) ^{ab}	1.45 (± 0.95) ^b	2.32 (± 0.90) ^a	5
	TP (mg L^{-1})	0.03 (± 0.01) ^b	0.02 (± 0.01) ^b	0.05 (± 0.03) ^{ab}	0.07 (± 0.05) ^a	0.10 (± 0.06) ^a	5
	Chl- <i>a</i>	9.64 (± 5.80) ^{bc}	7.13 (± 4.71) ^c	13.88 (± 5.68) ^{abc}	22.57 (± 18.60) ^{ab}	26.31 (± 22.50) ^a	—
Land use/cover type	Paddy field (%)	5.3 (± 3.3) ^b	3.7 (± 3.0) ^b	15.0 (± 16.5) ^{ab}	16.8 (± 18.1) ^a	18.9 (± 14.4) ^a	—
	Dry field (%)	6 (± 1.7) ^{ab}	6.7 (± 12.8) ^b	7.0 (± 4.3) ^{ab}	8.7 (± 5.8) ^{ab}	11.5 (± 7.1) ^a	—
	Bare soil (%)	0.8 (± 0.5) ^{bc}	0.8 (± 0.9) ^c	1.0 (± 0.7) ^{abc}	3.0 (± 3.3) ^{ab}	3.7 (± 4.5) ^a	5
	Forest area (%)	79.4 (± 5.9) ^a	78.9 (± 20.1) ^a	65.2 (± 23.6) ^{ab}	66.8 (± 18.2) ^{ab}	50.1 (± 20.0) ^b	1
	Others (%)	9.3 (± 3.5) ^{ab}	14.1 (± 21.9) ^b	11.9 (± 9.9) ^{ab}	17.4 (± 11.5) ^{ab}	16.2 (± 9.2) ^a	—

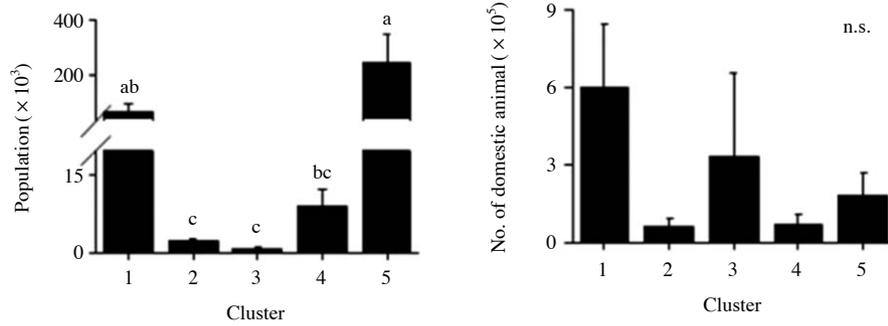


Fig. 4. Differences of human population density and domestic animals in basin of each study reservoir in the trained SOM. Different alphabets indicate statistically significant difference among clusters based on Dunn’s multiple comparison test ($P < 0.05$). n.s means no significant differences among clusters.

Table 5. Number of reservoirs classified in SOM according to their main usage purpose.

SOM cluster	Multipurpose	Agriculture	Hydroelectric power	Residential and industry
1	11	0	1	1
2	3	5	0	11
3	0	8	0	3
4	1	21	0	3
5	5	9	0	8

인구 밀도는 $292 \times 10^3 \pm 492 \times 10^3$ 명으로 5개 SOM 그룹들 중 가장 많았으며, 그룹 1을 제외한 나머지 그룹들의 인구 밀도($9,000$ 명/ km^2 이하)와는 유의한 차이를 보였다(Dunn 검증, $P < 0.05$) (Fig. 4a). 각 호소의 유역에서 사육하는 가축 수에서는 그룹 1이 $60 \times 10^4 (\pm 83 \times 10^4)$ 두로 가장 많았으나, 그룹들 간 유의한 차이는 없었다(Dunn 검증, $P < 0.05$).

한편 이들 각 SOM 그룹들에 포함된 호소들의 사용 목적을 비교한 결과 그룹 1에 포함된 호소들은 대부분 다목적 용도로 활용되고 있었으나, 그룹 3과 그룹 4에 포함된 호소들은 주로 농업용으로 사용되는 호소들을 포함하고 있었다(Table 5, Appendix 1). 그룹 2에 포함된 호소는 생활 및 공업용으로 주로 사용된 반면 그룹 5는 발전용을 제외한 다목적, 농업용, 생활 및 공업용으로 고르게 사용되는 호소들로 구성되었다.

토 의

일반적으로 호소 수질의 영양상태 판별을 위해 가장 널리 사용되는 Carlson의 TSI를 이용한 영양상태 판별은 각각의 조사시기 및 지점에 대한 영양상태를 판별

할 수 있으나 시간의 변화에 따른 영양상태의 경향성을 나타내기에는 어렵다(MOE, 2009). 또한 수질변화의 연구에서는 반드시 계절성의 고려가 필요하다(Yoo, 2002). 이에 본 연구에서는 계절 맨-켄달 검정법을 적용하여 수질의 경향성을 분석하였다. 수질 경향분석은 시간의 변화에 따른 수질의 영양상태의 경향성을 나타내기 적합한 방법으로, 수질을 개선하기 위한 정책 수립 및 효율적 관리와 평가를 위한 방법으로 국내외 많은 연구들에서 적용하고 있다(Han, 2010). 특히 통계적인 방법을 이용한 수질 경향분석은 국외의 경우 양질의 시계열 수질 자료의 구축이 이루어진 1970년 이후부터 본격적으로 이루어졌으며, 국내에서는 국가수질측정망 자료가 축적되어 물환경정보시스템을 통해 자료가 공개된 이후부터 수질의 경향분석에 있어 통계적 방법들이 적용되었다. 대표적인 예로 Park (1998)은 1990년부터 1997년까지 국내 주요 12개 호소의 Chl-*a*의 경향성을 분석한 결과 대부분의 호소에서 시간에 따른 유의한 경향성이 나타나지 않은 것으로 보고하였다. 또한 계절 맨-켄달 검정에 따른 본 연구에서는 국내 주요 60개 호소들 중 60% 이상(TSI_{TP} : 68.3%, TSI_{Chl-a} : 63.3%)이 유의한 경향성을 보였다(Table 3). 이러한 대상 지역의 수질을 평가하고 현황을 파악하기 위한 경향분석은 장기적인 수질 변동을 이해하고 이를 통해 적용된 수질관리 대책의 효율성과 새로운 수질관리를 위한 계획을 수립하는 데 활용할 수 있다(Han, 2010).

호소의 지리지형학적 특성은 호소의 수질을 결정하는 중요한 요인으로 작용한다(Park et al., 2014). 이는 호소의 수질이 지역적인 기후, 유역 내 오염원 현황, 호수 규모와 같은 형태학적인 차이를 비롯해 호소 유입수량, 수체의 흐름, 방류량 등의 수리수문학적 체계에 영향을 받게 되며, 이들 요인들은 호소의 지리지형학적 특성에 기

인하기 때문이다 (US EPA, 1974; Carmack *et al.*, 1979; Ahearn *et al.*, 2005; Håkanson, 2005; White and Greer, 2006; Lee *et al.*, 2009). 특히 제방 높이는 수심을 결정하는 주요 지표로 작용하며, 본 연구에서 고도는 제방 높이와 유의한 양의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다 ($r=0.61$, $P<0.01$). 제방 높이에 따라 결정되는 수심은 외부로부터 유입되는 영양염류의 희석용량과 관련된 저수지 부피를 결정하는 요인으로 저수지의 생산력을 결정하는 가장 중요한 요인으로 고려된다 (Thienemann, 1927; Rawawon, 1952; Rawawon, 1953; Rawawon, 1955; Sakamoto, 1966; vollenweider, 1968; Ryder *et al.*, 1974). 이로 인해 수심은 호소의 이화학적 인자들과 높은 상관성을 보이게 되는데, 수심을 나타내는 간접지표인 제방 높이가 TP ($r=-0.67$), COD ($r=-0.70$), Chl-*a* ($r=-0.51$)와 같은 이화학적 수질인자와 유의한 음의 상관관계를 보였다 ($P<0.01$) (Table 2). 한편 농업용 저수지의 체류시간은 저수지의 부영양화 및 조류대발생의 가능성 증가와 같은 수질을 악화시키는 원인으로 작용하는데, 본 연구 결과에서는 호소의 체류시간과 수질간의 음의 상관성을 보이는 것으로 나타났다 (Table 2). 이러한 차이는 농업용 저수지의 일반적인 체류시간이 10~130일 범위인 것에 비해 본 연구에서 사용된 호소들은 인공댐호 및 담수호로 주로 구성되어 있어 농업용 저수지에 비해 상대적으로 체류시간이 짧아 수질과의 음의 상관성을 보이는 것으로 사료된다 (Jeon *et al.*, 2002; Nam, 2003).

기존의 많은 연구들에서는 수질 특성을 반영한 호소 수질 등급의 산출을 위해 다양한 방법들이 제시되었다. 대표적으로 Carlson (1977)의 TSI를 이용한 수질의 영양상태 평가가 있으며, 국내에는 Cho (1997)의 중소하천의 자연도 평가방법 개발에 관한 연구 등이 있다. 그러나 이러한 연구들은 특정 요인에만 초점을 맞추어 등급을 산출하는 한계를 가지고 있다. 따라서 다양한 환경요인들에 영향을 받는 호소의 특성을 설명하기 위해서는 다양한 환경인자들에 대한 복합적인 고려가 필요하다. 최근 저수지 수질의 평가 및 유형화하기 위한 방법으로 기존의 Carlson (1977)의 TSI와 OECD (1982)의 분류체계 같은 전통적인 방법을 개선한 fuzzy logic과 SOM 분석과 같은 모델링 기법들이 사용되고 있다 (Lu and Lo, 2002; Søndergaard *et al.*, 2005; Icağa, 2007; Navarro *et al.*, 2009; Simeonova *et al.*, 2010; Nikoo and Mahjouri, 2013; Park *et al.*, 2014). 특히 SOM 기법은 고차원 공간 자료를 저차원으로 감소시킴에 따라 생태 자료와 같이 비선형을 가지고 있는 복잡한 자료의 개념화, 군집화 및 시각화하는 데 효율적인 방법이다 (Kohonen, 2001). 이

러한 SOM 분석은 다양한 생태학적 연구에 적용되고 있다: 오랜 시간 축적된 생태자료에 대한 자료탐색 (Hyun *et al.*, 2005; Kangur *et al.*, 2007), 천연자원에 대한 재해율 (Park and Chung, 2006; Park *et al.*, 2013), 수질 예측 (Lee and Scholz, 2006; Ahn *et al.*, 2011) 등에서 사용되고 있다. 특히 최근 Park *et al.* (2014)은 우리나라 302개 농업용저수지에 대한 연구에서 호소의 지형학적, 형태학적 특성이 수질에 밀접한 관계가 있다는 보고를 하였다.

호소의 형태적 특성은 생태계 시스템 내에서의 변화를 예상하는 데 도움이 되며, 생물체에 미치는 영향과 같은 변화가 어떻게 될지를 예측하는 데 도움이 되는 것으로 알려졌다 (Håkanson, 2005). 또한 호소의 수리지형형태적 특성은 호소 유역의 토지 이용과 높은 상관성을 가지는데, 인간의 토지 이용에 따라 발생하는 다양한 오염원은 호소로 유입되어 호소의 수질에 영향을 미치게 된다 (Park *et al.*, 2014). 최근의 연구들에서 호소의 형태적 특성이 호소로의 물질 이동을 비롯해 영양염 농도 조절 및 호소 내 일·이차 생산성에 영향을 주는 등 호소 수질에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다 (Cadenasso and Pickett, 2000; Hwang *et al.*, 2007). 이러한 결과는 우리 연구 결과와 유사하였다. SOM 그룹에 따른 호소의 수질 비교 결과 고도와 제방의 높이가 높은 그룹 1의 호소들은 상대적으로 수질이 양호하였으나, 고도가 낮고 제방 길이가 긴 호소들로 이루어진 그룹 5는 수질이 가장 높았다 (Dunn 검증, $P<0.05$, Table 4). 특히 수질 요인들 중 TSS (IndVal=36.1), TN (IndVal=29.3), TP (IndVal=36.4)는 상대적으로 높은 IndVal 값으로 그룹 5에서 유의한 indicator로 작용하였다 (Monte Carlo 검증, $P<0.05$) (Table 4). 일반적으로 유역면적이 증가할 경우 오염물질의 유입이 증가하여 호소의 부영양화의 가능성이 증가한다 (Kalff, 2001; Hwang *et al.*, 2003). 그러나 그룹 1과 그룹 5에 속한 호소들은 유역면적 및 저수지 면적이 크며, 유효저수량이 상대적으로 풍부한 호소들로 이루어져 있음에도 불구하고 수질 인자들 간 농도의 차이가 유의하게 차이가 났다 (Dunn 검증, $P<0.05$). 이러한 차이는 유역 내 다양한 토지 이용/피복의 비율에 따라 오염물질의 유입이 영향을 받기 때문이며 (Hwang *et al.*, 2007), 우리 연구 결과 그룹 1에 포함된 호소의 유역 내 토지 이용/피복이 대부분 유의한 지표 요인인 산림 (IndVal=24.2)으로 구성되어 있는데 반해 그룹 5에 속한 호소들은 대부분 농지로 구성되어 있는 차이를 보인다 (Table 4).

Carmack *et al.* (1979)에 따르면 지역적인 기후를 비롯해 유역 내 오염원 현황, 호소의 형태 및 수리수문학

적 특성이 호소의 수질에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 특히 한국은 일본, 중국, 인도 등과 함께 몬순기후 지역에 속해 있어 년 평균 강수량의 40% 이상이 여름철(6~7월)에 집중되는 등 수생 생태계에서의 유량의 극단적 변화가 나타난다(Jung *et al.*, 2001). 이러한 변화는 갈수기 수자원 확보의 어려움을 야기해 댐 등의 수자원 확보를 위한 구조물 건설의 당위성을 높이고, 이와 함께 호소의 관리 중요성 또한 부각되고 있다(Hwang *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2014). 호소의 수질을 효율적으로 관리하기 위해서는 각각의 호소들이 가지는 특성을 이해하고, 그 특성에 따라 호소를 분류하여 관리하는 것이 필요하다. 특히 호소의 유형화는 수질의 경향성을 찾는 데 기준으로 유용하며, 유형화된 호소들에 대한 유사한 관리 전략을 통한 단순화된 호소 관리는 유사한 결과들을 도출하게 된다(Martin *et al.*, 2011). 그러므로 이 연구 결과는 호소의 수리지형형태적 특성을 통한 유형화를 바탕으로 다양한 환경 요인들과의 관계를 평가한 본 연구 결과는 이러한 호소 관리를 위한 기초 자료로써 중요한 기여를 할 수 있다.

결 론

국내 주요 호소들 대부분은 부영양화 이상의 영양상태를 보이고 있으며, 특히 TSI_{TP}를 이용한 90개 호소의 부영양화를 평가한 결과 모든 월별 조사 시기에서 55.0% 이상의 호소에서 부영양화 이상의 영양상태를 보이는 것으로 나타났다. 한편 시간에 따른 영양상태의 변화 경향성을 평가하기 위한 계절 맨-켄달 검정에 따르면 TSI_{TP}와 TSI_{Chl-a} 모두 27개 호소(45.0%)에서 시간에 따른 수질의 개선이 발생하였으나, TSI_{TP}와 TSI_{Chl-a} 각각 14개(23.3%)와 11개(18.3%)의 호소들에서 시간에 따른 유의한 수질 감소 경향성이 나타났다. 한편 SOM 분석을 이용해 호소의 수리지형형태적 특성에 따라 호소를 유형화 하고, 유형화 결과를 바탕으로 수질 및 토지 이용/피복 등 다양한 환경 특성들과의 비교 및 호소 수질에 있어 다양한 환경 요인들 간의 관계를 평가하였다. 연구에서 사용된 호소들은 5개 그룹으로 유형화되었으며, 수질, 토지 이용/피복, 수리지형형태적 요인들에서 그룹들 간 차이를 보였다. 특히 수질 요인들 중 TSS, TN, TP 및 토지 이용/피복 요인 중 산림과 대지의 비율은 SOM 그룹에 있어 유의한 지표로 작용하였다. 이러한 결과는 수리지형형태적 특성이 호소의 수질을 결정하는데 중요한 요인으로 작용함을 의미한다. 따라서 본 연구

결과는 호소의 수리지형형태적 패턴이 호소의 수질에 유의한 영향을 미침을 확인해 주었다.

REFERENCES

- Ahearn, D.S., R.W. Sheibley, R.A. Dahlgren, M. Anderson, J. Johnson and K.W. Tate. 2005. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology* **313**(3-4): 234-247.
- Ahn, C.-Y., H.-M. Oh and Y.-S. Park. 2011. Evaluation of environmental factors on cyanobacterial bloom in eutrophic reservoir using artificial neural networks. *Journal of Phycology* **47**: 495-504.
- Cadenasso, M.L. and S.T.A. Pickett. 2000. Linking forest edge structure to edge function: Mediation of herbivore damage. *Journal of Ecology* **88**: 31-44.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic status index for lakes. *Limnology and Oceanography* **22**: 361-369.
- Carlson, R.E. and J. Simpson. 1996. A Coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods. North American Lake Management Society. pp. 96.
- Carmack, E.C., C.B.J. Gray, C.H. Pharo and R.J. Daley. 1979. Importance of lake-river interaction on seasonal patterns in the general circulation of Kamloops Lake, British Columbia. *Limnology and Oceanography* **24**(4): 634-644.
- Cho, Y.H. 1997. Development of an evaluation method of stream naturalness for ecological restoration of stream corridors. Seoul University. pp. 189.
- EEA. 2003. Europe's water: An indicator-based assessment.
- Fee, E.J. 1979. A relation between lake morphometry and primary productivity and its use in interpreting whole-lake eutrophication experiments. *Limnology and Oceanography* **24**: 401-416.
- Håkanson, L. 2005. The importance of lake morphometry for the structure and function of lakes. *International Review of Hydrobiology* **90**(4): 433-461.
- Han, D.H. 2010. Temporal and Spatial Analysis of Water Temperature and Water Quality Assessment of Streams and Reservoirs in Korea. PhD Thesis. University of Seoul, Seoul.
- HELCOM. 2007. Baltic marine environment protection commission.
- Hwang, S.J., S.K. Kwun and C.G. Yoon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy and Water Environment* **1**: 43-52.
- Hwang, S.J., S.W. Lee, J.Y. Son, G. Park and S.J. Kim. 2007. Moderating effects of the geometry of reservoirs on the relation between urban land use and water quality. *Landscape and Urban Planning* **82**(4): 175-183.
- Hyun, K., M.-Y. Song, S. Kim and T.-S. Chon. 2005. Using an

- artificial neural network to patternize long-term fisheries data from South Korea. *Aquatic Sciences* **67**(3): 382-389.
- Icaga, Y. 2007. Fuzzy evaluation of water quality classification. *Ecological Indicators* **7**(3): 710-718.
- Jeon, J.H., C.G. Yoon, J.H. Ham, H.I. Kim and S.J. Hwang. 2002. Effects of physical parameters on water quality in agricultural reservoir. *Korean Journal of Limnology* **35**: 28-35.
- Jung, H.-S., G.-H. Lim and J.-H. Oh. 2001. Interpretation of the transient variations in the time series of precipitation amounts in Seoul, Korea. Part I: diurnal variation. *Journal of Climate* **14**: 2989-3004.
- Kalff, J. 2001. *Limnology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Kangur, K., Y.-S. Park, A. Kangur, P. Kangur and S. Lek. 2007. Patterning long-term changes of fish community in large shallow Lake Peipsi. *Ecological Modelling* **203**: 34-44.
- Kendall, M.G. 1975. Rank correlation methods. Charles Griffin, London.
- Kim, E.S., J.H. Yoon, J.W. Lee and H.I. Choi. 2012. Analysis of long-term trends in lake water quality observations. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* **12**(1): 231-238.
- Kim, H.-J., K.-S. Yoon and K.-S. Lee. 2003. Characteristics of the water quality of Wanggung agricultural reservoir. *The KCID Journal* **10**(2): 24-35.
- Kim, B., J.H. Park, G. Hwang, M.S. Jung and K. Choi. 2001. Eutrophication of reservoirs in south Korea. *Limnology* **2**: 223-229.
- Kim, B.C., S.H. Sa, M.S. Kim, Y.K. Lee and J.K. Kim. 2007a. The limiting nutrient of eutrophication in reservoirs of Korea and the suggestion of a reinforced phosphorus standard for sewage treatment effluent. *Journal of Korean Society on Water Quality* **23**(4): 512-517.
- Kim, H.-S. and S.-J. Hwang. 2004. Analysis of eutrophication based on chlorophyll-*a*, depth and limnological characteristics in Korean reservoirs. *Korean Journal of Ecology and Environment* **37**(2): 213-226.
- Kim, H.S., E.M. Choi, D.W. Kim, D.S. Kong, K.M. Kim and B.C. Kim. 2007b. Water quality trend analysis based on watershed characteristics in agriculture reservoirs. *Korean Journal of Ecology and Environment* **40**(2): 214-222.
- Kim, J.H. and S.S. Park. 2004. Long-term trend analyses of water qualities in Nakdong river based on non-parametric statistical methods. *Journal of Korean Society on Water Quality* **20**(1): 63-71.
- Kim, J.K. and W.H. Hong. 1992. Studies on the physical environmental factor analysis for water quality management in Man-made lake of Korea. *Journal of the Korean Environmental Science Society* **1**(2): 49-57.
- Kohonen, T. 2001. *Self-organizing Maps*. Springer, Berlin.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin* **17**: 713-715.
- Lee, H.-J., J.-K. Seo, H.-K. Jeong, B.-M. Tak and J.-K. Lee. 2010. Phytoplankton community in Junam reservoir by pollution sources, loads and water quality. *Journal of the Environmental Sciences* **19**(11): 1445-1456.
- Lee, B.-H. and M. Scholz. 2006. Application of the self-organizing map (SOM) to assess the heavy metal removal performance in experimental constructed wetlands. *Water Research* **40**: 3367-3374.
- Lee, K.-S., K.-S. Yoon, H.-J. Kim and H.I. Kim. 2003. A program of water quality management for agricultural reservoirs by trophic state. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **22**(2): 166-171.
- Lee, S.W., S.J. Hwang, S.B. Lee, H.S. Hwang and H.C. Sung. 2009. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning* **92**(2): 80-89.
- Lettenmaier, D.P. 1988. Multivariate nonparametric tests for trend in water quality. *Journal of the American Water Resources Association* **24**(3): 505-512.
- Lu, R.S. and S.L. Lo. 2002. Diagnosing reservoir water quality using self-organizing maps and fuzzy theory. *Water Research* **36**(9): 2265-2274.
- McCune, B. and M.J. Mefford. 1999. PCORD. Multivariate Analysis of Ecological Data, Version 4.41, MjM Software, Gleneden Beach, Oregon, USA.
- Mann, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* **13**: 245-249.
- Martin, S.L., P.A. Soranno, M.T. Bremigan and K.S. Cheruvilil. 2011. Comparing hydro-geomorphic approaches to lake classification. *Environmental Management* **48**(5): 957-974.
- Ministry of Agriculture and Forestry (MAF). 2005. Development of management strategies and techniques to control nuisance algal blooms in Korean agricultural reservoirs. MAF. pp. 796.
- Ministry of Agriculture and Forestry (MAF). 2000. Report for measurement of pollution source in agricultural water quality (1997-2000). MAF. pp. 626.
- Ministry of Environment (MOE). 1994. The lakes handbook. MOE. pp. 220.
- Ministry of Environment (MOE). 2001. Investigation guideline for lake. MOE. pp. 90.
- Ministry of Environment (MOE). 2004. Standard Methods for Examination of Water quality, MOE.
- Ministry of Environment (MOE). 2009. Study on water quality management for reservoir. MOE. pp. 520.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2006. Water and Culture. K-Water. pp. 190.
- Moon, Y.M. 2004. A Study of the Characteristics of water quality change in Korean agricultural water. Mater Thesis, Hanyang National University, Anseong, Korea.
- Nam, G.-S. 2003. Biological purification and bacterial community dynamics of an agricultural reservoir. Pusan National University.
- Navarro, E., L. Caputo, R. Marcé, J. Carol, L. Benejam, E. García-

- Berthou and J. Armengol. 2009. Ecological classification of a set of Mediterranean reservoirs applying the EU Water Framework Directive: a reasonable compromise between science and management. *Lake and Reservoir Management* **25**: 364-376.
- Nikoo, M.R. and N. Mahjouri. 2013. Water quality zoning using probabilistic support vector machines and self-organizing maps. *Water Resources Management* **27**: 2577-2594.
- OECD. 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control. Organization for Economic Co-Operation and Development.
- Park, S.G., J.-H. Kim and G.W. Seo. 2005. Application of Electrical Resistivity Monitoring Technique to Maintenance of Embankments. *Geophysical Exploration* **8**(2): 177-183.
- Park, S.Y. 1998. Trend analysis of water qualities in major lakes of Korea with seasonal Mann-Kendall test. Ewha Womans University.
- Park, Y.-S. and Y.-J. Chung. 2006. Hazard rating of pine trees from a forest insect pest using artificial neural networks. *Forest Ecology and Management* **222**(1-3): 222-233.
- Park, Y.-S., R. Céréghino, A. Compin and S. Lek. 2003. Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters. *Ecological Modelling* **160**: 165-280.
- Park, Y.-S., Y.-J. Chung and Y.-S. Moon. 2013. Hazard ratings of pine forests to a pine wilt disease at two spatial scales (individual trees and stands) using self-organizing map and random forest. *Ecological Informatics* **13**: 40-46.
- Park, Y.-S., Y.-S. Kwon, S.-J. Hwang and S. Park. 2014. Characterizing effects of landscape and morphometric factors on water quality of reservoirs using a self-organizing map. *Environmental Modelling & Software* **55**: 214-221.
- Peterson, W.T. and J.E. Keister. 2003. Interannual variability in copepod community composition at a coastal station in the northern California Current: A multivariate approach. *Deep Sea Research* **50**: 2499-2517.
- Rawson, D.S. 1952. Mean depth and the fish production of large lakes. *Ecology* **33**(4): 513-521.
- Rawson, D.S. 1953. The bottom fauna of Great Slave Lake. *Journal of the Fisheries Board of Canada* **10**(8): 486-520.
- Rawson, D.S. 1955. Morphometry as a dominant factor in the productivity of large lakes. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **12**: 164-175.
- Ryder, R.A., S.R. Kerr, K.H. Loftus and H.A. Regier. 1974. The morphoedaphic index, a fish yield estimator-review and evaluation. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **31**: 663-688.
- Sakamoto, M. 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Archiv für Hydrobiologie* **62**: 1-28.
- Simeonova, P., V. Lovchinov, D. Dimitrov and I. Radulov. 2010. Environmetric approaches for lake pollution assessment. *Environmental Monitoring and Assessment* **164**: 233-248.
- Søndergaard, M., E. Jeppesen, J.P. Jensen and S.L. Amsinck. 2005. Water Framework Directive: ecological classification of Danish lakes. *Journal of Applied Ecology* **42**: 616-629.
- Song, J.-H., J.-Y. Jeong, S.-M. Hwang, W.-K. Nam, S.-J. Kwon, B.-J. Kim, J.-S. Woo, J.-G. Oh and J.-B. Lee. 2012. Water quality characteristics of lakes and reservoirs in Gyeonggi-do. The Report of Gyeonggi-do Institute of Public Health and Environment **25**: 227-237.
- Thienemann, A. 1927. Der Bau des Seebeckens in seiner Bedeutung für das Leben in See. Verh. *Verhandlungen der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Wien* **77**: 87-91.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). 1974. An approach to a relative trophic index system for classifying lakes and reservoirs. National Eutrophication Survey. Working Paper No. 24.
- Vesanto, J. and R. Alhoniemi. 2000. Clustering of the self-organizing map. *IEEE Transactions on Neural Networks* **11**: 586-600.
- Vollenweider, R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OECD pp. 193.
- White, M.D. and K.A. Greer. 2006. The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Peñasquitos Creek, California. *Landscape and Urban Planning* **74**: 125-138.
- Yang, H.J. and B.I. Kim. 2006. The trend of water quality variations and correlation between COD and Chl-*a* concentration for the Juam reservoir. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **28**(12): 1331-1336.
- Yoo, H.-S. 2002. Statistical analysis of factors affecting the Han River water quality. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **24**: 2139-2150.

Appendix 1. Ninety reservoirs used in this study. TSI: trophic state index for each factors, slope: changes of TSI as a function of year in the linear regression, TSI Hypereu: hypereutrophic, Eu: Eutrophic, Meso: Mesotrophic, Oligo: Oligotrophic, main usage purpose RE: residential and industry, AG: agriculture, MU: multipurpose, HY: hydroelectric power.

Reservoir	국명	SOM cluster	TP		Chl- <i>a</i>		Main usage purpose
			TSI _{TP}	Slope	TSI _{Chl-<i>a</i>}	Slope	
Gachang	가창호	5	Hypereu	-0.793	Eu	-0.431	RE
Ganwol	간월호	2	Oligo	1.116	Meso	-	AG
Gyoncheon	경천지	2	-	-	-	-	AG
Gyoncheonji	경천지	4	Eu	-	Eu	-	AG
Gyongpo	경포호	3	Hypereu	-0.719	Eu	-0.283	AG
Gosam	고삼지	5	Eu	-0.608	Meso	-0.669	AG
Gwanggyo	광교지	1	Eu	-	Meso	-0.922	RE
Gwangdong	광동호	4	Eu	-	Eu	0.400	RE
Gwangju	광주호	1	Meso	-	Eu	-0.324	RE
Goesan	괴산호	5	Hypereu	-0.835	Eu	-0.679	MU
Gucheon	구천호	1	Eu	0.835	Eu	-	RE
Geumgang	금강하구연	4	-	-	-	0.929	RE
Geumho	금호호	3	Meso	-	Eu	-	AG
Gidong	기동지	3	-	-	-	-	AG
Naju	나주호	5	Eu	-0.496	Meso	-0.337	RE
Nakdong	낙동강하구연	4	Eu	0.552	Hypereu	-0.184	RE
Namgang	남강호	2	Oligo	-	Oligo	-	MU
Namyang	남양호	3	Eu	-0.427	Eu	-	RE
Dalbang	달방호	2	Eu	-	Eu	-	RE
Damyang	담양호	5	Eu	-	Eu	-0.317	RE
Daedong	대동지	2	Eu	-	Meso	-	AG
Daea	대아지	2	Meso	-0.458	Oligo	-0.567	AG
Daeam	대암호	4	Eu	-0.460	Meso	-0.826	RE
Daechung	대청호	5	Hypereu	-0.256	Hypereu	0.411	MU
Dae	대호	2	Meso	0.998	Meso	-0.952	AG
Dukdong	덕동지	5	Hypereu	-	Hypereu	-	AG
Dongbok	동북호	5	Hypereu	-	Hypereu	-0.375	RE
Mae	매호	4	Eu	-	Eu	-	AG
Miho	미호지	5	Eu	-	Hypereu	-	AG
Baksil	박실지	4	Hypereu	-	Eu	-	AG
Boryong	보령호	5	Hypereu	-0.505	Eu	-	MU
Bomun	보문호	1	Eu	-0.741	Eu	-	RE
Bosung	보성강호	4	Meso	-0.296	Eu	-	MU
Bongsan	봉산지	5	Eu	-	Eu	-	AG
Bunam	부남호	5	Hypereu	0.702	Eu	-	AG
Buan	부안호	2	Oligo	0.461	Oligo	-	MU
Sayeon	사연호	4	Eu	-0.332	Eu	-	RE
Sabgyo	삽교호	5	Hypereu	0.366	Hypereu	0.602	RE
Sangsa	상사호	4	Eu	-0.625	Meso	0.278	MU
Seo	서호	1	Eu	-1.385	Meso	-0.608	AG
Seokmun	석문지	3	-	-	-	-	AG
Seonam	선암호	1	Meso	-	Meso	-0.432	RE
Seomjin	섬진강호	1	Meso	-0.319	Eu	-0.275	MU
Soyang	소양호	1	Eu	0.355	Meso	-0.307	MU
Songak	송악지	2	Meso	-	Meso	-	AG
Songji	송지호	4	Eu	-	Eu	-	AG
Sueo	수어호	1	Eu	1.378	Eu	-	RE
Siwha	시화호	4	Hypereu	-2.139	Eu	-2.485	AG
Shingal	신갈지	5	Hypereu	-0.250	Eu	-0.881	AG
Ahsan	아산호	4	Hypereu	-0.608	Eu	0.328	RE
Angye	안계호	4	Eu	-0.428	Hypereu	-	RE

Appendix 1. Continued.

Reservoir	국명	SOM cluster	TP		Chl- <i>a</i>		Main usage purpose
			TSI _{TP}	Slope	TSI _{Chl-<i>a</i>}	Slope	
Andong	안동호	3	–	–0.373	–	–	MU
Yeoncho	연초호	4	Hypereu	–0.349	Hypereu	–0.731	RE
Youngrang	영랑호	4	Eu	–	Eu	–	AG
Youngsan	영산호	2	Oligo	0.493	–	–	RE
Youngam	영암호	4	Oligo	–	Oligo	–	AG
Youngchoen	영천호	4	–	–	–	0.454	MU
Yedang	예당지	3	–	0.467	–	0.392	AG
Ohbong	오봉지	2	Meso	–	Meso	–	AG
Ohtae	오태지	1	Oligo	–	Oligo	–	AG
Okgye	옥계지	2	–	–	–	–	AG
Yongyeon	용연지	2	Eu	–	Eu	–	AG
Upo	우포늪	5	Eu	–	Eu	–	AG
Unmun	운문호	2	–	–	–	–0.405	MU
Woncheon	원천지	4	Hypereu	0.863	Hypereu	–0.493	AG
Uiam	의암호	5	Eu	–	Eu	–0.394	MU
Edong	이동지	5	Hypereu	–	Eu	–0.676	AG
Imha	입하호	5	Hypereu	–	Hypereu	–0.415	MU
Jangsung	장성호	5	Hypereu	–0.493	Eu	–	RE
Jangcheok	장척지	3	Eu	–	Meso	–	AG
Jungyang	정양늪	1	Eu	–	Eu	–	AG
Junam	주남지	3	–	–	–	–	AG
Juam	주암호	2	Meso	–0.230	Meso	0.321	MU
Jilnalbul	질날벌	4	Eu	–	Eu	–	AG
Chungcheon	청천지	2	Meso	–	Meso	–	AG
Chungcho	청초호	3	Eu	–	Eu	–	AG
Chungpyong	청평호	1	Eu	–	Meso	–	MU
Chuncheon	춘천호	2	Eu	–0.799	Meso	–0.526	MU
Chungjucho	충주조정지	2	Meso	–	Eu	–	RE
Chungju	충주호	4	Hypereu	0.148	Eu	–	MU
Tapjung	탑정지	5	Hypereu	–1.054	Hypereu	–	AG
Paldang	팔당호	4	Hypereu	0.403	Eu	0.232	MU
Pongrak	풍락지	1	Meso	–	Meso	–	AG
Hadong	하동지	2	Oligo	–	Meso	–	AG
Hapcheon	합천호	5	Hypereu	–	Eu	–	MU
Hyang	향호	3	–	–	–	–	AG
Whajinpo	화진포호	4	Eu	–	Hypereu	–	AG
Whachon	화천호	5	Eu	–0.631	Meso	–0.843	HY
Heodong	회동지	4	Eu	–	Eu	–	RE
Heoya	회야호	4	Hypereu	–	Eu	0.535	RE