

경포호에서 수질변수들의 장기적인 변화

곽성진 · 발데브 · 최광순¹ · 허우명*

강원대학교 환경공학과, ¹한국수자원공사 K-water 연구원

Long-term Variations of Water Quality Parameters in Lake Kyoungpo. Kwak, Sungjin, Bal Dev Bhatrai, Kwansoon Choi¹ and Woomyung Heo* (Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Samchok 245-711, Korea; ¹K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea)

Abstract In order to identify long-term trends of water quality parameters in Lake Kyeongpo, Mann-Kendall test, Sen's slope estimator and linear regression were applied on data, with 15 parameters from three different sites and rainfall, monitored once in every two months from March to November during 1998~2013. Seasonal variation analysis only used Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. Analysis result showed that salinity, transparency and nutrient variables (total phosphorus, dissolved inorganic phosphorus, total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonia nitrogen) were only parameters having statistically significant trend. In linear regression analysis, salinity (surface and bottom layer of all sites) and transparency (only at site 1), were figured out with statistically significant increasing trend, while in non-parametric statistical method, salinity and transparency in all sites (surface, middle, deep) were figured out with statistically significant increasing trend. Water quality parameters showing statistically significant decreasing trends were dissolved oxygen (surface layer of site 1 and bottom layer of sites 2 and 3), total phosphorus (sites 1 and 2), dissolved inorganic phosphorus, total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in the linear regression analysis and, dissolved oxygen (bottom layer of all sites), total phosphorus, dissolved inorganic phosphorus, total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in the non-parametric method. Seasonal trend analysis result showed that salinity, turbidity, transparency and suspended solids in spring, salinity, transparency, nitrate nitrogen and suspended solids in summer and temperature, salinity, transparency and suspended solids in fall were the variables depending on the season with increasing trends. In general, rainfall during the research period showed decreasing trend. The significant reduction trends of nutrients in Lake Kyeongpo were believed to be related to lagoon restoration and water management project run by Gangneung city and under-water wear removal, but further detailed studies are needed to know the exact causes.

Key words: trend analysis, Mann-Kendall test, Sen's slope estimator, Lake Kyoungpo

Manuscript received 9 March 2015, revised 28 May 2015,
revision accepted 3 June 2015

* Corresponding author: Tel: +82-33-570-6573, Fax: +82-33-574-7262,
E-mail: woo@kangwon.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.

서 론

석호(lagoon)는 전 세계적으로 널리 분포(Barnes, 1980) 하나 우리나라의 경우는 동해안에만 분포되어 있다(WREO, 2008, 2009a, b). 석호의 수심은 대부분 5 m 이하로 얕으며 해안의 자연과 생태계의 중요한 구성 요소이다. 이들 석호는 지역 주민들의 어업과 관광을 위한 개발 장소로 재공되어 왔다(Jakimavičius and Kovalenkoviene, 2010). 또한 석호는 해안에 있는 모든 구성요소 중에서 가장 생산성이 높다(Gonenc and Wolfin, 2005). Jakimavičius과 Kovalenkoviene(2010)은 석호가 균형 잡힌 기능(balanced function)을 유지해야 미래에 이들의 지속 가능한 이용을 보장 받을 수 있으며, 자연적 갯터짐에 대한 간섭은 환경에 미치는 영향을 최소화하거나 전혀 영향이 없도록 해야 한다고 하였다. 우리나라 동해안에는 18개의 크고 작은 석호가 산재해 있으나 일부 석호들은 인간의 직·간접적인 영향으로 석호로서의 기능이 상실되었거나 상실될 위기에 처해 있으며, 자연적 혹은 인위적인 매체에 의해 수면적이 크게 감소되고 있다. 특히 석호의 하구부에 건설된 국도나 해안도로 등은 자연적인 갯터짐을 방해하는 저해요인으로 작용하고 있다(WREO, 2008, 2009a, b).

경포호는 강릉시에 위치하고 있는 수심이 얕은 석호이다. 경포호는 유역면적이 36.6 km², 주류길이가 13.54 km인 경포천이 유입되고 있다. 호수 수면적은 1918년에 1.74 km²이었으나 많은 부분이 농경지로 개간되면서 2000년에는 0.9 km²로 52%가 줄었다. 따라서 호안 길이도 79%가 축소되어 2000년 현재 7.11 km이다(WREO, 2009b). 경포호는 지난 수십 년 동안 오염부하량 및 퇴적물 증가, 유량 감소 등으로 수환경이 크게 악화되어 왔다. 그러나 경포호는 역사적, 지리적, 생태학적으로 높은 가치를 지니고 있어 매년 동해안을 방문하는 수백만 명의 관광객들이 생태관광과 여가를 즐기는 중요한 지역이다. 따라서 1990년 이후 퇴적 오니 준설, 수중 보 철거 및 습지조성 등과 같은 복원 사업을 추진해 왔다.

강릉시는 경포호의 수질오염방지 조사연구를 수행하였으며, 이 연구에서 다양한 수질관리 방안(수초제거, 수문 보수 및 수문조작에 의한 심층염수배출, 하천유로변경 및 침사지 설치, 호수 퇴적물 준설 및 오염부하량 저감 등)이 제시되었다(Gangneung city, 1990). WREO(1997)도 동해안 석호 수질개선 대책을 수립하면서 경포호에 대한 오염 현황분석 및 다양한 수질개선 방안(하수관로 및 하수처리장 설치, 습지회복을 위한 농경지 매입, 경포천 정화 등)을 제시하였다. 또한 2007년에는 석호 물환경관리 기본계획

수립연구를 통해 경포호 등 중점관리 석호에 대해 향후 10년간(2016년까지)의 환경보전전략을 계획하였다(WREO, 2007). 2008년과 2009년에는 동해안 석호 생태계 보전 및 복원을 위한 생태계 정밀조사 및 관리방안이란 연구에서 경포호의 자연환경에 대한 중요성을 강조하고 복원 및 관리방안(생물서식처 조성, 완충 및 습지조성, 수질관리, 사구 식생복원, 생태계 교란 종 퇴치 등)을 수립한 바 있다(WREO, 2008, 2009a).

따라서 강릉시와 환경부(원주지방환경청)는 이와 같은 연구 결과를 토대로 1991년부터 2013년까지 약 313억 원을 투입하여 경포호의 수질관리 및 복원관련 재정사업을 실시하였다. 주요 사업으로는 1991년에 오·우수분리관 매설(1.194 km), 1991년부터 1997년까지 퇴적물 준설(670,788 m³), 1995년에 호안정비(4,180 m²), 1996년에 배수로 공사(3 km), 1996~7년에 복류수 유입시설(1.768 km) 설치 등이었으며, 2004년부터 2013년까지는 수질정화습지(9,641 m²), 생태습지(29,960 m²) 및 가시연습지(유수지, 273,515 m²) 등을 조성하였다(From Gangneung city, unpublished data). 따라서 경포호는 지난 수십 년 동안 여러 사업들로 인해 많은 변화를 겪어 왔다.

경포호를 비롯한 동해안 석호에 대한 수질조사는 이러한 복원사업과 더불어 1998년부터 원주지방환경청과 본 연구팀 주관으로 이루어졌다(WREO, 1998, 1999, 2000, 2003a, b, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009a, b, 2013). 2012년에는 경포호에서 이상 조류 번식의 원인분석과 수질개선 방안이란 연구를 수행하였다(KWGEC, 2012). 수질조사는 주로 용존산소, 염분, 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS), 탁도, 인(P), 질소(N) 및 엽록소 *a* 등이었다. 수질자료를 모니터링 하는 주요 목적 중에 하나는 다양한 수질 변수들의 농도변화를 평가하고 수환경을 개선하기 위한 것이다(<http://www.swfwmd.state.fl.us>). 이러한 평가를 통해 인간 활동으로 인한 수질변화를 파악하고, 수처리 시설 개선 및 토지이용 규제 등과 같은 실질적인 사업을 결정하게 된다. 그러나 석호의 수질은 생물지구화학적 환경과 수문기상학적 요인 등 자연적인 과정(강수량, 하천유량 등)에 의해 영향을 받을 수도 있다(Ravichandran, 2003; Qian *et al.*, 2007).

일반적으로 영양염류와 같은 수질변수들에 대한 장기적인 모니터링과 경향 분석은 수계의 생태학적 과정을 과학적으로 이해하는데 중요하다(Bekele and McFarland, 2004; Casey, 2011; Kwak, 2013). 자연수계에서 측정되는 수질자료는 강우 등의 변수 때문에 특정분포를 따르지 않으며 결측치도 종종 발생하므로 통계적 기법을 이용하여

분석하고 해석하는 것이 필요하다 (Hirsch and Slack, 1984; Drapela and Drapelova, 2011). Mann-Kendall test법은 단순 경향분석이며, 자료의 크기, 결측치 등에 의존하지 않는 비모수 분석 (non-parametric analyses) 이다 (Gilbert 1987; Reckhow *et al.*, 1993; Jaagus, 2006). 연안 석호 (coastal lagoon)의 경우 보통 수질자료가 분산형태를 보이지 않기 때문에 비모수 분석을 사용한다 (Doering, 1996; Doering and Chamberlain, 1999). Sen's slope test법은 수질자료에 대한 경향 (trend)의 크기를 반영하며 신뢰한계에 따른 유의수준의 경향성을 결정한다. 그러나 수질자료의 결측치가 많은 경우 Sen's slope test법은 적절하지 않을 수 있다 (<http://www.webapps.cce.vt.edu>).

Tabari *et al.* (2011)은 이란의 Maroon River에서 1989~2008년까지 조사된 16개의 수질변수들에 대해서 Mann-Kendall test, Sen's slope estimator 및 linear regression을 사용하여 장기변화를 분석하였다. Yenilmez *et al.* (2011)은 터키에 있는 Eymir Lake에서 10년 동안의 수질자료 (DO, TP, TSS, SD)와 수문자료 (강우량, 호수체적, 기온)를 바탕으로 수질변화의 경향을 Mann-Kendall test법을 이용하여 분석하였다. Mustapha (2013)은 나이지리아에 있는 Jakara River에서 2001~2010년까지 조사한 수질 및 강우량 자료에 대해 Mann-Kendall test와 Sen's Slope estimator를 이용하여 자료의 단순 경향과 변화의 크기를 분석하였다. 경포호에서는 장기적인 자료를 이용하여 경향분석을 시도한 적은 없으나 Heo *et al.* (1999)이 동해안 석호의 부영양화 평가에서 경포호의 부영양화도 지수 (TSI)가 총인, 투명도 및 엽록소 *a*의 평균이 76으로 매우 부영양화되었다고 보고한바 있다. 경포호는 복원사업 이전인 1990년 조사 결과를 보면 물이 혼탁하고 갈색을 띠며 냄새가 나는 등 매우 악화되어 있었음을 알 수 있다 (Gangneung city, 1990). 또한 일부 지역을 제외하고는 수심이 약 60 cm 내외로 매우 얇고 호수 전역에 수초가 밀생하고 호수 중앙부에서는 용존무기질소 (dissolved inorganic nitrogen)가 거의 고갈 상태를 보였음을 알 수 있다 (Gangneung city, 1990). 특히 2004년 이전에는 여름철에 어류 폐사가 종종 발생 하였으나 2004년에 경포호 하구부의 경호교 밑에 설치되었던 수중 보를 철거한 이후에는 발생하지 않았다. 보통 석호는 수질개선, 레크리에이션 및 낚시 환경개선 및 홍수예방 등을 위해 인위적으로 하구를 개방하는 경우가 있다 (Kok and Whitfield, 1986; Kjerfve, 1994; Roy *et al.*, 2001; Pinto and Teixeira, 2002; Saad *et al.*, 2002; Suzuki *et al.*, 2002; Elwany *et al.*, 2003). 그러나 경포호는 수중 보 철거 이후 해수의 유입량 증가로 염분이 높아지고, 해조류의 대 번식

이 나타나고 있다 (KWGEC, 2012; Heo, 2013).

따라서 본 연구에서는 경포호에서 수질 변수들의 장기적인 경향을 파악하기 위하여 1998년부터 2013년까지 매년 3월부터 11월까지 2개월에 1회씩 3개 지점에서 조사된 자료와 강우량자료를 이용하였다. 단 조사에 결측치가 있었던 2010과 2011년 자료는 포함하지 않았다. 수질변수들은 염분, 용존산소 (DO), 탁도, 투명도 (SD), 화학적산소요구량 (COD), 영양염류 (TN, TP 등) 및 엽록소 *a* 등이었으며, 장기적인 경향분석에는 Mann-Kendall test, Sen's slope estimator 및 linear regression을 적용하였다. 계절적인 경향 분석에는 Mann-Kendall test 및 Sen's slope estimator만 적용하였다.

재료 및 방법

1. 수질조사 자료

수질조사는 1998년부터 2013년까지 (2010~2011년 제외) 3개 지점에서 3월부터 11월까지 2개월에 1회씩 실시하였다 (Fig. 1). 3월과 5월 조사를 봄, 7~8월 조사를 여름, 9월과 11월 조사를 가을로 간주하였으며, 겨울조사는 호수 결빙으로 인해 제외시켰다. 조사는 대부분 원주지방환경청과 공동 혹은 지원으로 수행하였으며 (WREO, 1998, 1999, 2000, 2003a, b, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009a, b, 2013), 2012년 조사는 강원녹색환경지원센터의 지원으로 이루어졌다 (KWGEC, 2012). 용존산소, 탁도, 투명도, 수온 및 염분 등은 현장에서 측정하였다 (YSI-556MPS 등 이

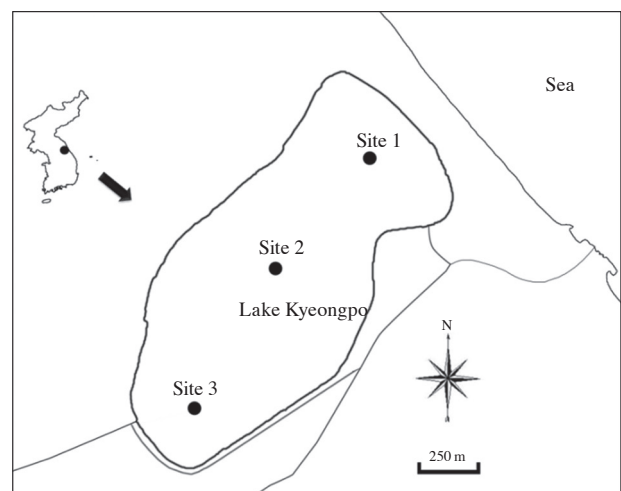


Fig. 1. Map showing the sampling site in Lake Kyeongpo.

Table 1. Mean values with standard deviation of the water quality parameters and precipitation at three sites during 1998~2013 (except 2010~2011).

Parameters	Site 1	Site 2	Site 3	Average
Rainfall ¹				177.9±185.2
Temp (°C)	18.1±6.7	18.3±6.8	18.6±6.7	18.4±6.7
Salinity (PSU)	16.7±8.3	17.0±8.1	16.8±8.2	16.9±8.2
Salinity (BL. ² , PSU)	19±8.5	19.4±8.5	18.5±8.2	18.9±8.3
DO (mg L ⁻¹)	10.3±3.7	10.5±3.5	10.6±3.7	10.4±3.9
DO (BL., mg L ⁻¹)	8.1±3.4	7.2±4.0	8.8±4.5	7.9±3.8
Turbidity (NTU)	16.4±10.7	16.7±12.4	21.9±15.2	18.2±12.7
SD (m)	0.5±0.2	0.5±0.2	0.5±0.2	0.5±0.2
COD (mg L ⁻¹)	5.8±3.3	6.1±3.1	6.7±3.9	6.2±3.3
TP (mg L ⁻¹)	0.121±0.069	0.129±0.074	0.137±0.081	0.131±0.069
DIP (mg L ⁻¹)	0.022±0.027	0.021±0.029	0.021±0.029	0.022±0.027
TN (mg L ⁻¹)	1.389±0.658	1.401±0.640	1.544±0.769	1.443±0.649
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.186±0.230	0.142±0.194	0.171±0.241	0.177±0.210
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.241±0.317	0.249±0.306	0.235±0.264	0.242±0.266
Chl.a (mg m ⁻³)	35.9±39.7	38.6±36.3	42.1±45.2	39.2±36.9
SS (mg L ⁻¹)	31.0±25.0	29.6±18.4	31.5±22.4	30.6±18.5

¹Rain: precipitation of 30 days before monitoring, BL.²: (Bottom layer)

용). 용존산소와 염분은 심층조사를 병행하였다. 채수된 시료는 냉장보관 하였으며 전처리를 걸친 후 수질분석에 이용하였다.

수질분석은 대부분 Standard method에서 제시한 분석법을 기준으로 실시하였다 (APHA, 1992). 총인 (TP)은 원시료를 persulfate 분해 후에 ascorbic acid법으로 측정하였고, 용존무기인 (DIP)은 여과한 시료를 ascorbic acid 법으로 측정하였다. 총질소 (TN)는 원시료를 alkaline persulfate 분해 후에 cadmium reduction법, 질산성 질소 (NO₃-N)와 암모니아성 질소 (NH₃-N)는 여과한 시료를 사용하여 각각 cadmium reduction법과 phenate법으로 분석하였다. 부유물질 (SS)은 GF/C로 여과 후 105°C에서 2시간 건조하여 건조 전·후의 무게 차로 계산하였다 (NIER, 1999). 화학적 산소요구량 (COD)는 과망간산칼륨법 (알칼리)으로 분석하였다. 1998년부터 2013년까지 (2010~2011년 제외) 조사 분석한 수질자료에 대한 기초 통계치는 Table 1과 같이 정리하였다. 강우량은 강릉기상관측소의 자료를 이용하였다.

2. 통계분석

경향분석 (trend analysis)은 조사기간 동안에 측정된 수질 변수들의 증·감 여부를 결정한다 (Naddafi *et al.*, 2007). 장기간의 기상 및 수문 자료들도 수질자료의 경향을 분석하는데 사용될 수 있다 (Tabari *et al.*, 2011). 본 연구에서는 수질변수들의 경향분석에 Mann-Kendall test, Sen's Slope estimator 및 linear regression을 적용하였으며, 계절적인

경향 분석에는 Mann-Kendall test 및 Sen's slope estimator만 사용하였다. 이들 통계처리 방법들은 아래와 같이 간략하게 정리하였다.

1) Mann-Kendall Test

Mann-Kendall Test는 Non-parametric test의 하나로 장기적인 시계열 자료의 경향성을 분석하는데 이용된다. 이 분석은 자료 값 (data values) 자체보다는 샘플 자료 (sample data)의 상대적인 크기를 비교한다 (Gilbert, 1987). 이 분석의 장점은 표본자료의 특성에 민감하지 않고 결측치나 분석한계를 벗어나는 자료에 대해서도 적용이 가능하다 (Jaagus, 2006).

자료 Y_t ($t=1, 2, \dots, N$)에 대하여 Y_t ($t=1, 2, \dots, N-1$)과 Y_t ($t=t+1, 2, \dots, N$)의 크기를 비교하여 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} Z_k &= 1 & \text{if } Y_t > Y_{t'} \\ Z_k &= 0 & \text{if } Y_t = Y_{t'} \\ Z_k &= -1 & \text{if } Y_t < Y_{t'} \end{aligned}$$

여기서 $k=(t'-1)(2N-t')+(t-t')$ 라 하면 Mann-Kendall test의 검정통계량은 다음과 같이 주어진다 (Hirsch *et al.*, 1982).

$$S = \sum_{t'=1}^{N-1} \sum_{t=t'+1}^N Z_k \quad (1)$$

$$U_c = \frac{S+j}{[V(S)]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

여기서,

$$V(S) = \frac{1}{18} [N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^G E_i(E_i-1)(2E_i+5)]$$

(3)

$$\begin{aligned} S < 1 & \text{ if } j = 1, \\ S = 1 & \text{ if } j = 0, \\ S > 1 & \text{ if } j = -1, \end{aligned}$$

G는 같은 값을 갖는 자료 군의 총수이며, E_j는 i 번째 자료 군에 속하는 같은 값을 갖는 자료의 수이다. 아래 식으로 조건이 만족되면 유의수준 α에서 주어진 자료가 상향(upward) 또는 하향 경향(downward trend)을 갖는다고 할 수 있다.

$$|U_c| > u_{1-\alpha/2} \tag{4}$$

2) Sen's Slope Test

Sen (1968)에 의해서 제한된 비매개변수적 방법으로, 특이 값에 영향을 받지 않고, 자료가 누락된 경우에도 분석이 가능하다. Y_t (t=1, 2, …, N)에 대하여 다음과 같이 새로운 변수 Z_k를 정의한다.

$$Z_k = \frac{Y_j - Y_i}{j - i} \tag{5}$$

여기서 모든 i와 j에 대해서 j > i이고, Z_k를 다시 크기 순으로 정렬한 값을 X_k로 정의하면 Sen의 경사에 대한 검정통계량은 다음과 같이 주어진다(Gilbet, 1987).

$$M \text{이 홀수일 때, } S = X_{\frac{M+1}{2}}$$

$$M \text{이 짝수일 때, } S = \frac{1}{2} [X_{\frac{M}{2}} + X_{\frac{M+2}{2}}]$$

여기서 $M = \frac{N(N-1)}{2}$ 로 위 식에서 구한 검정통계량이 다음의 신뢰한계 안에 있게 되면 유의수준 α에서 경향을 갖는다고 할 수 있다.

$$[X_{M_L} + X_{M_U}] \tag{6}$$

여기서,

$$M_L = \frac{M - u_{1-\frac{\alpha}{2}} [V(S)]^{\frac{1}{2}}}{2} \tag{7}$$

$$M_U = 1 + \frac{M + u_{1-\frac{\alpha}{2}} [V(S)]^{\frac{1}{2}}}{2} \tag{8}$$

이고, V(S)는 다음과 같다.

$$V(S) = \frac{1}{18} [N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^G E_i(E_i-1)(2E_i+5)] \tag{8}$$

그러므로 하 한계 X_{M_L}은 X값 중에서 가장 작은 값으로부터 M_L 번째 값이고, 상 한계 X_{M_U}는 M_U 번째 값이 된다.

3) Linear regression method

간단한 선형 회귀는 시계열에서 단순 경향을 식별하는데 중요하며, 보통 매개변수 방법(parametric method)이 사용된다. 이는 다른 하나의 변수나 다른 관심 변수 사이의 관계를 설명하는데 사용된다. 이것은 종종 시간에 따른 수문 및 기상 변수의 기울기를 얻기 위해 사용한다. 음의 기울기는 감소되는 경향을 나타내고 양의 기울기는 증가 추세를 보여준다(Tabari and Marofi, 2010).

회귀는 그 기울기에서 가설의 검증에 기초하여 중요도 측정치를 제공하는 장점을 가지고 있으며, 또한 변화율의 크기를 제공한다(Hirsch et al., 1991). 관측 기간 동안의 총 변화는 년 수(number of years)에 기울기를 곱함으로써 얻어진다.

결과 및 고찰

연간 수질 변수들에 대한 Mann-Kendall test, Sen's Slope estimator 및 linear regression의 결과를 Fig. 2, Tables 2와 3에 제시하였다. 연간 수질변수들의 분석에서 증가 경향과 감소 경향 모두가 나타났으며, 각 지점별로 대부분의 변수들에서 증가나 감소의 경향이 일치하였다. 수온, 염분, 투명도 및 부유물질(SS)은 조사기간 동안에 모든 지점에서 증가하는 경향을 보였으나, 나머지 변수들은 감소하는 경향을 나타냈다. 연강수량은 2004년 수중 보 철거 이전과 이후에 각각 평균 1,666 및 1,403 mm year⁻¹로 최근에 감소하는 경향을 보인 반면 염분은 수중 보 철거 이후 크게 증가하였다. Heo (2013)는 경포호의 염분이 수중 보 철거 전(1998~2003)에 7~14 psu에서 철거 후(2004년 이후)에 16~24 psu로 약 2배 증가하였다고 하였다. Hamill (2011)은 뉴질랜드 남섬(Southland)에 있는 Waituna 석호의 연구에서 호수 수질이 하구 개폐(open and closed)에 따라 크게 영향을 받는다고 하였으며, 전기전도도의 경우 개방(open) 시에 약 42,000 μS cm⁻¹이었으나 폐쇄(closed) 시에는 약 4,100 μS cm⁻¹로 감소되었다고 하였다. 본 조사기간 동안 경포호의 엽록소 a, COD 및 영양염류(인, 질소)는 뚜렷한 감소 경향을 보였다. 이 또한 수중 보 철거와 무관하지 않은 것으로 사료된다. 경포호는 2004년 이후 해수의 유입이

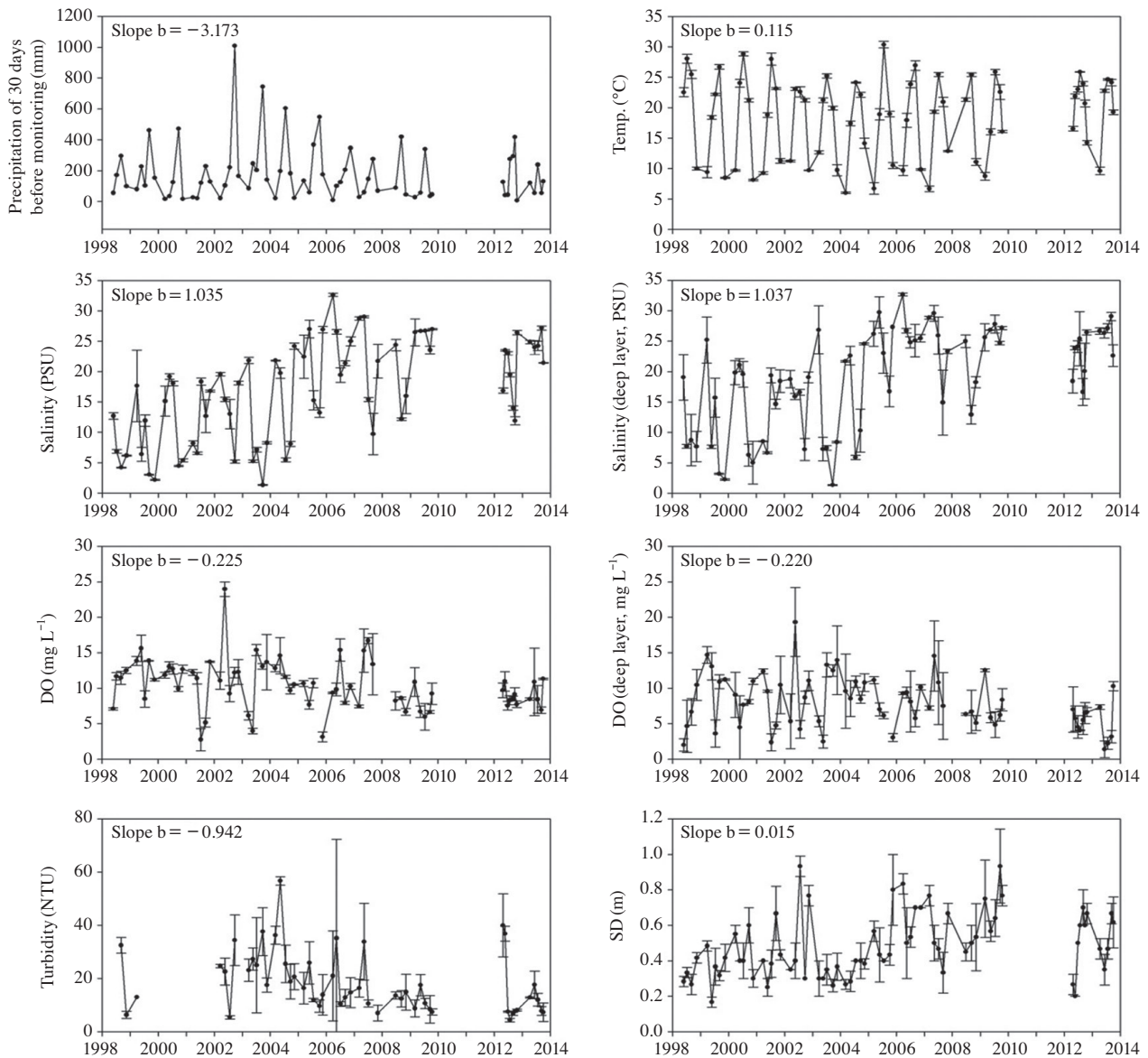


Fig. 2. Yearly variations of water quality parameters and slope b values of the linear regression analysis.

증가하면서 호수 전역에서 파래류가 대발생한 것으로 보고된 바가 있다(KWGEC, 2012). 일반적으로 수심이 얇은 호수에서는 식물플랑크톤과 수생식물은 빛과 영양염류에 대해 서로 경쟁관계에 있다(Wetzel, 2001). 경포호의 경우 해수유입으로 희석에 의해 투명도가 증가하면서 파래류가 증가한 것으로 판단된다. Hamill (2011)은 Waituna 석호에서 최근(2009~2010)에 Macroalgae (attached to sediments and plants)의 bloom으로 인해 빛과 영양염류에 대해 경쟁관계에 있는 planktonic algae의 성장이 둔화되었다고 하였다. 경포호에서 COD 및 영양염류(인, 질소)의 감소는 해

수 유입에 의한 희석효과와 1991년부터 실시해온 준설, 습지조성 등 복원사업의 결과로 사료된다(From Gangneung city, unpublished data). 실질적으로 경포호에서는 수질악화로 인해 여름에 가끔씩 발생하던 어류폐사가 2004년 수중보 철거 이후에는 나타나지 않았다. Sloan (2006)은 석호나 하구 같은 연안에서 수질악화의 명백한 증거중의 하나가 어류폐사라고 하였으며, 이는 자연적인 요인과 인간의 간섭에 의해 나타난다고 하였다. 수체내에서의 무산소층 형성과 영양염류의 지나친 과부하는 물고기 폐사의 원인일 수 있다(Diaz and Rosenberg, 1995; Breitburg, 2002). 미

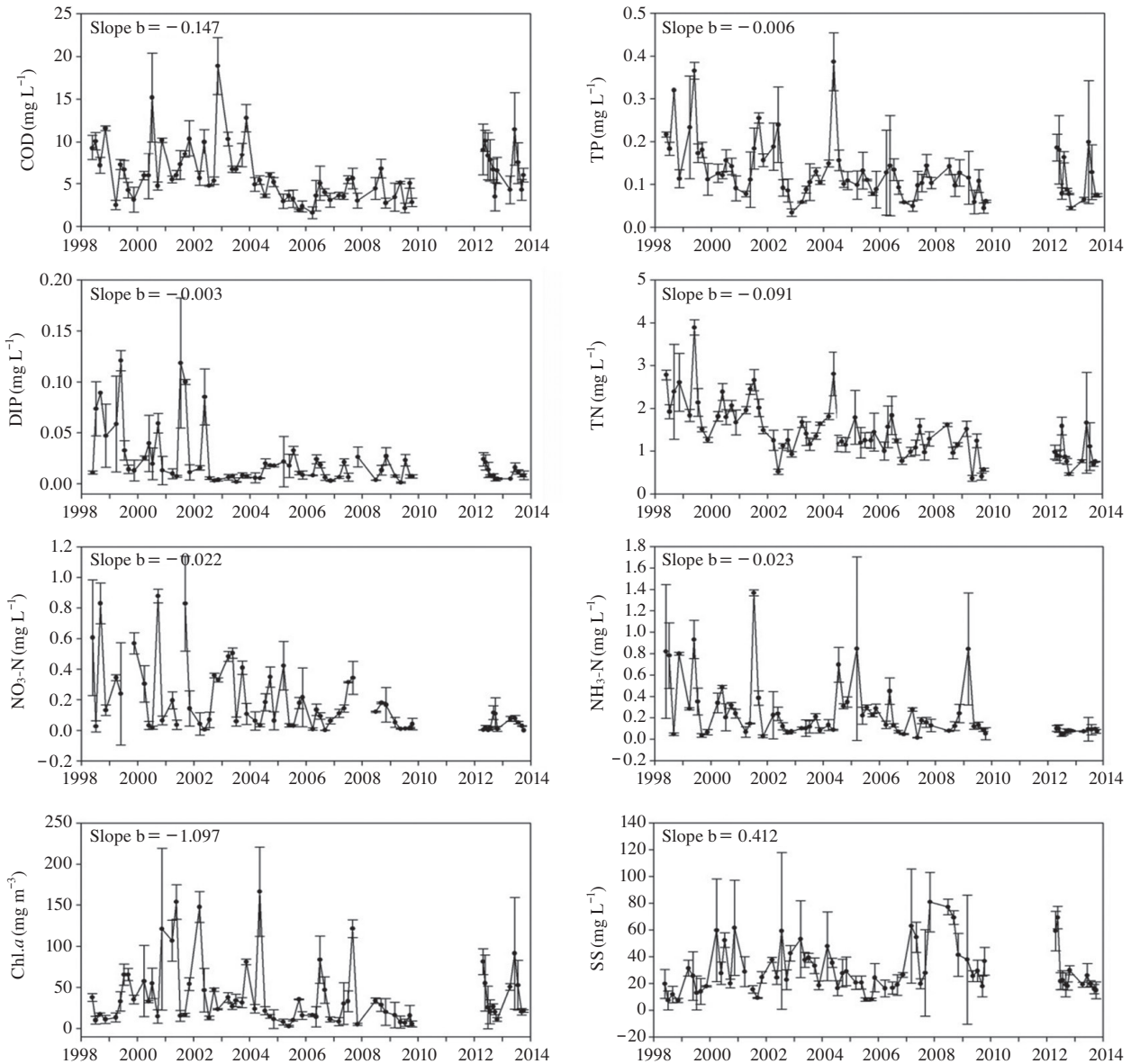


Fig. 2. Continued.

국 캘리포니아 연안에 있는 Pescadero lagoon에서는 석호와 바다 사이에 모래톱 (sandbar)이 형성될 때 성층이 강하게 발달하고 이로 인해 수체의 수직혼합이 제한되면서 심층에 무산소층이 형성되는 것으로 알려져 있으며 (Smith, 1990; ESA, 2004), 어류폐사는 이 모래톱이 다시 터질 때 수체의 혼합으로 전층에서 용존산소 농도가 낮아지면서 발생한다고 한다 (Smith, 1990, 2004; ESA, 2004; Sloan, 2006). 또한 Sloan (2006)은 무산소 상태일 때 독성 황화수소와 암모니아가 발생할 수 있으며 이는 어류폐사와 관련이 있다고 하였다. 경포호의 경우 2004년 이후 어류폐사가

발생하지 않은 것은 해수의 유입이 증가하면서 심층의 무산소 상태가 해소되었기 때문으로 사료된다.

Hamill (2011)은 Waituna 석호에서 하구 폐쇄가 총질소 증가(악화)의 원인이었다고 보고한 바 있다. Schallenberg *et al.* (2010)은 수리학적 체류시간 (hydraulic residence time)이 20일 이하이면 식물플랑크톤의 생체량 (biomass)을 효과적으로 조절할 수 있는 flushing 수준이라고 하였으며, Waituna Lagoon의 수리학적 체류시간은 유입수 기준으로 14.5 days로 하구가 개방되었을 때 식물플랑크톤 대번식 (bloom) 가능성이 작아진다고 하였다. 이와 같이 경포

Table 2. Results of the parametric methods for annual means of the water quality parameters and precipitation during 1998~2013 (except 2010~2011).

Parameters	Linear regression			
	Site 1	Site 2	Site 3	Average
Rainfull ¹				-0.237
Temp (°C)	0.183	0.235	0.202	0.208
Salinity (PSU)	0.738**	0.748**	0.751**	0.745**
Salinity (BL. ² , PSU)	0.740**	0.742**	0.735**	0.735**
DO (mg L ⁻¹)	-0.500*	-0.480	-0.386	-0.462
DO (BL., mg L ⁻¹)	-0.496	-0.507*	-0.513*	-0.456
Turbidity (NTU)	-0.405	-0.395	-0.282	-0.347
SD (m)	0.562*	0.489	0.461	0.524*
COD (mg L ⁻¹)	-0.381	-0.381	-0.238	-0.341
TP (mg L ⁻¹)	-0.596*	-0.583*	-0.450	-0.606*
DIP (mg L ⁻¹)	-0.697**	-0.656**	-0.626*	-0.698**
TN (mg L ⁻¹)	-0.779**	-0.789**	-0.710**	-0.772**
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	-0.738**	-0.715**	-0.763**	-0.779**
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	-0.573*	-0.595*	-0.706**	-0.657**
Chl.a (mg m ⁻³)	-0.386	-0.268	-0.001	-0.245
SS (mg L ⁻¹)	0.106	0.225	0.254	0.199

¹Rain: precipitation of 30 days before monitoring, BL.²: (Bottom layer)

호의 경우도 수중 보 철거 이후 해수의 유입량 증가로 수리학적 체류시간이 짧아져 식물플랑크톤의 밀도 감소 및 투명도 증가 등에 영향을 주었을 것으로 사료된다.

경포호에서 염분, 투명도 및 영양염류 (총인, 용존무기인, 총질소, 질산성 질소, 암모니아성 질소) 변수들만이 통계학적 방법에 의해 유의적인 경향이 증명되었다. 염분 (표층, 심층)과 투명도는 각각 99% 및 95% 신뢰수준에서 유의하였다. 염분과 투명도는 지난 15년 (1998~2013) 동안 각각 15.9 psu와 0.2 m 증가하였다. 영양염류 중 총인은 95% 신뢰수준에서 유의하였으나, 용존무기인, 총질소, 질산성 질소 및 암모니아성 질소는 모두 99% 신뢰수준에서 유의하였다. 총인, 용존무기인, 총질소, 질산성 질소 및 암모니아성 질소는 지난 15년 (1998~2013) 동안 각각 -0.088, -0.039, -1.396, -0.339 및 -0.351 mg L⁻¹ 감소하였다. 심층 용존산소는 선형회귀 분석에서 통계적으로 유의하지 않았으나, 비모수법에 의한 분석 결과 95% 신뢰수준에서 유의하였다.

조사기간 동안 (1998~2013) 수질 변수들의 계절적인 경향을 분석하기 위하여 Mann-Kendall test 및 Sen's Slope estimator을 적용하였으며, 수질변수들의 계절적인 경향과 통계적인 방법에 의해 얻어진 자료의 크기 (magnitude)를 Tables 4, 5 및 6에 제시하였다. Table 3에 제시된 바와 같이 봄에는 염분, 탁도, 투명도 및 부유물질 (SS)을 제외하고는 대부분 감소 경향을 나타냈다. 유의적인 경향은 표층 염분, 심층 용존산소, 총질소 및 질산성 질소에서만 관측되었다.

특히 표층 염분, 총질소 및 질산성 질소는 모든 지점에서 통계적으로 유의하였다. Mann-Kendall test 및 Sen's Slope estimator에 의해 각각 10개의 유의한 경향이 확인되었다.

여름자료에 대한 통계분석 결과 염분, 투명도, 질산성 질소 및 부유물질을 제외하고는 대부분 감소 경향을 나타냈다 (Table 5). 수질 변수 중 염분 및 암모니아성 질소만이 전 지점에서 유의적인 경향을 보였으며, 투명도는 정점 1과 3, 용존무기인은 정점 1, 엽록소 *a*는 정점 3에서만 유의적인 특징을 나타냈다. Mann-Kendall test 및 Sen's Slope estimator에 의해 각각 13개의 유의한 경향이 확인되었다. 가을에는 수온, 염분, 투명도 및 부유물질을 제외하고는 감소 경향을 보였다 (Table 6). 대체로 수질자료 중 염분, 용존산소, 탁도, 투명도, 총인 및 질산성 질소는 강한 유의적인 경향을 나타냈다. 가을기간 동안에는 Mann-Kendall test 및 Sen's Slope estimator에 의해 각각 26개의 유의한 경향이 확인되었다.

봄과 여름에 비해서 가을철에 Mann-Kendall test 및 Sen's Slope estimator에 의해 유의적인 경향을 나타낸 수질 변수들의 많았다. 이는 가을철이 다른 시기에 비해 수체의 수리학적 변화가 적은 시기이기 때문으로 사료된다. 계절별로 가장 큰 특징 중의 하나는 질산성 질소와 암모니아성 질소의 상반된 강한 유의성이다. 봄에 질산성 질소, 여름에 암모니아성 질소, 가을에 다시 질산성 질소가 강한 유의성을 보였다. 여름철에 질산성 질소가 유의적인 경향을 보이지 않았던 것은 해조류의 번식으로 질산성 질

Table 3. Results of the non-parametric methods for annual means of the water quality parameters and precipitation during 1998~2013 (except 2010~2011).

Parameters	Site 1		Site 2		Site 3		Average	
	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope
Rainfull ¹							-0.217	-4.287
Temp (°C)	0.233	0.157	0.250	0.163	0.300	0.177	0.283	0.169
Salinity (PSU)	0.633**	1.050**	0.600**	1.057**	0.650**	1.088**	0.650**	1.060**
Salinity (BL. ² , PSU)	0.561**	0.985**	0.567**	1.061**	0.583**	1.130**	0.517**	1.013**
DO (mg L ⁻¹)	-0.367	-0.257	-0.350	-0.225	-0.350	-0.243	-0.317	-0.206
DO (BL., mg L ⁻¹)	-0.533**	-0.308**	-0.450*	-0.220*	-0.533**	-0.394**	-0.433*	-0.264*
Turbidity (NTU)	-0.333	-0.571	-0.417*	-0.604*	-0.300	-0.507	-0.350	-0.479
SD (m)	0.433*	0.019*	0.444*	0.018*	0.400*	0.011*	0.400*	0.016*
COD (mg L ⁻¹)	-0.150	-0.131	-0.183	-0.170	-0.183	-0.084	-0.150	-0.121
TP (mg L ⁻¹)	-0.450*	-0.004*	-0.400*	-0.006*	-0.433*	-0.004*	-0.433*	-0.005*
DIP (mg L ⁻¹)	-0.550**	-0.002**	-0.567**	-0.001**	-0.450*	-0.002*	-0.583**	-0.002**
TN (mg L ⁻¹)	-0.683**	-0.091**	-0.700**	-0.094**	-0.717**	-0.114**	-0.683**	-0.101**
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	-0.683**	-0.020**	-0.600**	-0.016**	-0.600**	-0.021**	-0.633**	-0.023**
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	-0.517**	-0.019**	-0.500**	-0.017**	-0.633**	-0.023**	-0.583**	-0.020**
Chl.a (mg m ⁻³)	-0.333	-1.594	-0.217	-0.801	-0.117	-0.744	-0.267	-1.188
SS (mg L ⁻¹)	0.050	0.479	0.250	1.096	0.167	0.532	0.117	0.696

¹Rain: precipitation of 30 days before monitoring, BL.²: (Bottom layer) *: $\alpha < 0.05$, **: $\alpha < 0.01$

Table 4. Results of the non-parametric methods for the water quality parameters and precipitation in spring during 1998~2013 (except 2010~2011).

Parameters	Site 1		Site 2		Site 3		Average	
	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope
Rainfull ¹							0.083	1.585
Temp (°C)	-0.233	-0.231	-0.183	-0.166	-0.183	-0.166	-0.200	-0.187
Salinity (PSU)	0.383*	1.035*	0.400*	0.856*	0.433*	0.919*	0.417*	0.913*
Salinity (BL. ² , PSU)	0.317	0.557	0.350	0.562	0.350	0.812	0.333	0.543
DO (mg L ⁻¹)	-0.167	-0.187	-0.183	-0.219	-0.300	-0.282	-0.233	-0.238
DO (BL., mg L ⁻¹)	-0.467*	-0.268*	-0.033	-0.038	-0.20	-0.306	-0.167	-0.273
Turbidity (NTU)	0.025	0.063	0.217	0.861	0.310	1.010	0.267	0.933
SD (m)	0.180	0.010	0.249	0.015	0.111	0.005	0.176	0.010
COD (mg L ⁻¹)	-0.083	-0.106	0.000	-0.044	0.017	0.016	-0.033	-0.052
TP (mg L ⁻¹)	-0.267	-0.006	-0.233	-0.004	-0.167	-0.005	-0.233	-0.004
DIP (mg L ⁻¹)	-0.200	-0.001	-0.117	0.000	-0.133	-0.001	-0.217	-0.001
TN (mg L ⁻¹)	-0.6**	-0.124**	-0.650**	-0.111**	-0.783**	-0.124**	-0.750**	-0.118**
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	-0.583**	-0.015**	-0.417*	-0.010*	-0.567**	-0.015**	-0.600**	-0.016**
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	-0.300	-0.010	-0.283	-0.019	-0.283	-0.022	-0.367	-0.020
Chl.a (mg m ⁻³)	-0.017	-0.572	0.033	0.355	-0.017	-0.284	-0.033	-0.670
SS (mg L ⁻¹)	0.283	1.067	0.250	1.560	0.350	1.379	0.317	1.737

¹Rain: precipitation of 30 days before monitoring, BL.²: (Bottom layer), *: $\alpha < 0.05$, **: $\alpha < 0.01$

소의 소모가 많았기 때문으로 사료된다 (KWGEC, 2012). KWGEC (2012)는 경포호에서 여름철 표층의 질산성 질소가 거의 고갈 수준이라고 하였다. 가장 강한 증가 경향을

보인 것은 염분으로 봄보다는 여름과 가을에 뚜렷하였다. 투명도도 염분과 유사한 특성을 보였다.

강우량은 조사기간 동안 전체적으로 감소하는 경향을

Table 5. Results of the non-parametric methods for the water quality parameters and precipitation in summer during 1998~2013 (except 2010~2011).

Parameters	Site 1		Site 2		Site 3		Average	
	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope
Rainfull ¹							0.233	8.387
Temp (°C)	-0.033	-0.037	-0.050	-0.009	-0.100	-0.123	-0.083	-0.004
Salinity (PSU)	0.467*	0.894*	0.500**	0.911**	0.483**	0.917**	0.533**	0.921**
Salinity (BL. ² , PSU)	0.667**	0.895**	0.483**	0.904**	0.483**	0.901**	0.617**	0.912**
DO (mg L ⁻¹)	-0.183	-0.162	-0.200	-0.184	-0.150	-0.177	-0.167	-0.167
DO (BL., mg L ⁻¹)	-0.233	-0.211	-0.117	-0.179	-0.183	-0.18	-0.200	-0.194
Turbidity (NTU)	-0.067	-0.093	0.000	0.005	-0.033	-0.075	-0.033	0.000
SD (m)	0.432*	0.017*	0.351	0.013	0.531**	0.017**	0.050**	0.016**
COD (mg L ⁻¹)	-0.293	-0.185	-0.300	-0.245	-0.033	-0.044	-0.150	-0.171
TP (mg L ⁻¹)	-0.133	-0.002	-0.167	-0.002	-0.067	-0.001	-0.150	-0.002
DIP (mg L ⁻¹)	-0.383*	-0.002*	-0.333	-0.001	-0.233	-0.002	-0.350	-0.002
TN (mg L ⁻¹)	-0.200	-0.027	-0.250	-0.042	-0.167	-0.022	-0.233	0.000
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.168	0.001	0.209	0.002	0.228	0.001	0.142	0.002
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	-0.483**	-0.021**	-0.494**	-0.020**	-0.733**	-0.024**	-0.617**	-0.023**
Chl.a (mg m ⁻³)	0.017	0.035	-0.283	-1.357	0.000**	-0.024**	-0.017	-0.106
SS (mg L ⁻¹)	0.083	0.304	0.1000	0.476	0.233	0.863	0.200	0.666

¹Rain: precipitation of 30 days before monitoring, BL.²: (Bottom layer), *: $\alpha < 0.05$, **: $\alpha < 0.01$

Table 6. Results of the non-parametric methods for the water quality parameters and precipitation in autumn during 1998~2013 (except 2010~2011).

Parameters	Site 1		Site 2		Site 3		Average	
	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope	Mann-Kendall's tau	Sen's slope
Rainfull ¹							-0.383*	-13.379*
Temp (°C)	0.350	0.141	0.333	0.123	0.350	0.185	0.367	0.148
Salinity (PSU)	0.550**	1.284**	0.583**	1.268**	0.600**	1.365**	0.567**	1.286**
Salinity (BL. ² , PSU)	0.567**	1.348**	0.550**	1.338**	0.583**	1.311**	0.600**	1.238**
DO (mg L ⁻¹)	0.050**	-0.303**	-0.350	-0.231	-0.500**	-0.262**	-0.300	-0.257
DO (BL., mg L ⁻¹)	-0.633**	-0.288**	-0.283	-0.205	-0.583**	-0.326**	-0.533**	-0.245**
Turbidity (NTU)	-0.467*	-1.045*	-0.567**	-1.657**	-0.667**	-1.998**	-0.650**	-1.554**
SD (m)	0.521**	0.028**	0.509**	0.022**	0.468*	0.020*	0.517**	0.025**
COD (mg L ⁻¹)	-0.100	-0.170	-0.150	-0.213	0.050**	-0.265**	-0.133	-0.190
TP (mg L ⁻¹)	-0.333	-0.003	-0.567**	-0.007**	-0.300	-0.005	-0.517**	-0.007**
DIP (mg L ⁻¹)	-0.333	-0.002	-0.383*	-0.001*	-0.417*	-0.001*	-0.383*	-0.001*
TN (mg L ⁻¹)	-0.600**	-0.083**	-0.733**	-0.099**	-0.583**	-0.110**	-0.667**	-0.100**
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	-0.650**	-0.030**	-0.733**	-0.029**	-0.683**	-0.035**	-0.717**	-0.037**
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	-0.300	-0.012	-0.343	-0.012	-0.217	-0.010	-0.200	-0.012
Chl.a (mg m ⁻³)	-0.267	-2.176	-0.333	-2.140	-0.183	-0.810	-0.317	-1.903
SS (mg L ⁻¹)	0.1000	0.270	0.167	0.515	0.017	0.130	0.033	0.222

¹Rain: precipitation of 30 days before monitoring, BL.²: (Bottom layer), *: $\alpha < 0.05$, **: $\alpha < 0.01$

보였으나 (Table 3), 봄과 여름에는 증가 (Tables 4, 5), 가을에는 95% 신뢰수준에서 통계학적으로 유의적인 감소 (Table 6) 경향이 나타났다. 전체적인 강우량의 감소경향은

기후변화 및 2003년과 2004년에 있었던 태풍 루사와 매미 이후 큰 강우가 없었던 것에 기인되는 것으로 사료된다.

적 요

경포호에서 수질 변수들의 장기적인 경향을 파악하기 위하여 1998년부터 2013년까지 매년 3월부터 11월까지 2개월에 1회씩 3개 지점에서 조사된 15가지 수질변수들과 강우량자료를 이용하였으며, Mann-Kendall test, Sen's slope estimator 및 linear regression을 적용 분석하였다. 계절 변화 분석에는 Mann-Kendall test 및 Sen's slope estimator만 이용하였다. 분석결과 염분, 투명도 및 영양염류(총인, 용존무기인, 총질소, 질산성 질소, 암모니아성 질소)의 변수들만 통계학적으로 유의적인 경향을 보였다. 선형회귀 분석에서는 염분(표층과 심층의 전 지점)과 투명도(지점 1)만이 통계학적으로 유의적인 증가 경향을 나타냈으나, 비모수법에 의한 분석에서는 염분과 투명도 모두 전 지점에서 통계학적으로 유의적인 증가 경향을 보였다. 통계학적으로 유의적인 감소 경향을 보인 수질변수들은 선형회귀 분석에서는 용존산소(표층 지점 1, 심층 지점 2와 3), 총인(지점 1과 2), 용존무기인, 총질소, 질산성 질소 및 암모니아성 질소였다.

계절적인 경향을 분석한 결과 봄에는 염분, 탁도, 투명도 및 부유물질(SS), 여름에는 염분, 투명도, 질산성 질소 및 부유물질, 가을에는 수온, 염분, 투명도 및 부유물질만이 증가하는 경향을 보였으며 이들 변수들이 계절에 따라 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 특히 봄과 여름에 비해서 가을철에 Mann-Kendall test 및 Sen's Slope estimator에 의해 유의적인 경향을 나타낸 수질변수들이 많았다. 가장 강한 증가 경향을 보인 것은 염분이었으며 봄보다는 여름과 가을에 뚜렷하였다. 투명도도 염분과 유사한 특성을 보였다. 강우량은 조사기간 동안 전체적으로 감소하는 경향을 보였다.

경포호에서 영양염류의 유의적인 감소경향은 그동안 강릉시에서 추진해온 석호 복원사업 및 해수유통(수중 보철거) 등과 관련이 있는 것으로 판단되나 정확한 원인 규명을 위해서는 보다 면밀한 조사가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 “2014년도 강원대학교 학술연구구성비로 연구하였음(관리번호-220140038)”.

REFERENCES

- APHA. 1992. Standard Method for Examination of Water and Wastewater 18th ed. American Public Health Assn. Washington DC.
- Barnes, R.S.K. 1980. *Coastal Lagoons*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 106 pp.
- Bekele, A. and A. McFarland. 2004. Regression-based flow adjustment procedures for trend analysis of water quality data. *Transactions of the ASABE* **47**(4): 1093-1104.
- Breitburg, D. 2002. Effects of hypoxia, and the balance between hypoxia and enrichment, on coastal fishes and fisheries. *Estuaries* **25**: 767-781.
- Casey, R. 2011. Water Quality Conditions and Long-Term Trends in Alberta Lakes. Environmental Policy Division Alberta Environment and Water. <http://environment.gov.ab.ca/info/library/8544.pdf>
- Diaz, R.J. and R. Rosenberg. 1995. Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and behavioral responses of benthic macrofauna. *Oceanography Marine Biology Annual Review* **33**: 245-303.
- Doering, P.H. 1996. Temporal variability of water quality in the St. Lucie Estuary, South Florida. *Water Resources Bulletin* **32**(6): 1293-1306.
- Doering, P.H. and R.H. Chamberlain. 1999. Water quality and source of freshwater discharge to the Caloosahatchee Estuary, Florida *Journal of the American Water Resources Association* **35**: 793-806.
- Drápela, K. and I. Drápelová. 2011. Application of Mann-Kendall test and the Sen's slope estimates for trend detection in deposition data from Bílý Kříž (Beskydy Mts., the Czech Republic) 1997-2010. *Beskydy* **4**(2): 133-146.
- Elwany, M.H.S., R.E. Flick and M.M. Hamilton. 2003. Effect of a small southern California lagoon entrance on adjacent beaches. *Estuaries* **26**: 700-708.
- Environmental Science Associates (ESA). 2004. Pescadero Marsh Restoration Assessment and Recommendations for Future Management. Preliminary report to Department of Parks and Recreation.
- Gangneung city. 1990. Water pollution prevention research in Lake Kyoungpo.
- Gilbert, R.O. 1987. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. Van Nostrand Reinhold Company, New York. 204-208.
- Gonenc, I.E. and J.P. Wolfiin. 2005. Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Modeling for Sustainable Use and Development. CRC Press, London, 500 pp.
- Hamill, K. 2011. Southland Water 2010: Our Ecosystems Technical Report for lakes and lagoons. Prepared for Environment Southland by Opus International Consultants.
- Heo, W.M., B.C. Kim and M.S. Jun. 1999. Evaluation of eutrophication of lagoons in the Eastern Coast of Korea. *Kor-*

- ean Journal of Limnology* **32**(2): 141-151.
- Heo, W.M. 2013. Water Environment and Water Management of Lake Kyoungpo. Korea River Association. *River and Culture* **9**(3): 31-38.
- Hirsch, R.M., J.R. Slack and R.A. Smith. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research* **18**: 107-121.
- Hirsch, R.M. and J.R. Slack. 1984. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research* **20**(6): 727-732.
- Hirsch, R.M., R.B. Alexander and R.A. Smith. 1991. Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality. *Water Resources Research* **27**: 803-814.
- Jaagus, J. 2006. Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology* **83**: 77-88.
- Jakimavičius, D. and M. Kovalenkoviėnė. 2010. Long-term water balance of the Curonian Lagoon in the context of anthropogenic factors and climate change. *Baltica* **23**(1): 33-46. Vilnius. ISSN 0067-3064.
- Kjerfve, B. 1994. Coastal Lagoon Processes. Elsevier, Amsterdam, 577 pp.
- Kok, H.M. and A.K. Whitfield. 1986. The influence of open and closed mouth phases on the marine fish fauna of the Swartvlei estuary. *South African Journal of Zoology* **21**: 309-315.
- Kwak, S., B.D. Bhattarai, C. Lee and W. Heo. 2013. Long-term trends of Summer Season of Water Quality in Lake Doam. *KJEE* **46**(1): 128-134.
- KWGEC, Kangwon Green Environment Center. 2012. Cause analysis of over algae proliferate and water improvement in Kyoungpo.
- Mustapha, A. 2013. DETECTING SURFACE WATER QUALITY TRENDS USING MANN-KENDALL TESTS AND SEN'S SLOPE ESTIMATES. ISSN: 2278-7844, IJAIR: 108-114.
- Naddafi, K., H. Honari and M. Ahmadi. 2007. Water quality trend analysis for the Karoon River in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* **134**: 305-312.
- NIER. 1999. Standard Method for Examination of Water and Wastewater 1999. Ministry of Environment Republic of Korea. Gwacheon-si.
- Pinto, C.A. and S.B. Teixeira. 2002. Morphodynamics of the sandy barrier of Salgados coastal lagoon, Armação de Pêra Bay (Algarve-Portugal). In Eurocoast (Ed.), Littoral 2002, the Changing Coast. EUCC, Portugal, pp. 403-409.
- Qian, Y., K.W. Migliaccio, Y. Wan and Y. Li. 2007. Trend Analysis of Nutrient Concentrations and Loads in Selected Canals of the Southern Indian River Lagoon, Florida. Trend Analysis of Surface Water Nutrients. *Water Air Soil Pollut* **186**: 195-208.
- Ravichandran, S. 2003. Hydrological influences on the water quality trends in Tamiraparani Basin, South India. *Environmental Monitoring and Assessment* **87**: 293-309.
- Reckhow, K.H., K. Kepford and W.W. Hicks. 1993. Methods for the analysis of lake water quality trends. USA-EPA 841-R-93-003.
- Roy, P.S., R.J. Williams, A.R. Jones, I. Yassini, P.J. Gibbs, B. Coates, R.J. West, P.R. Scanes, J.P. Hudson and S. Nichol. 2001. Structure and function of south-east Australian estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **53**: 351-384.
- Saad, A.M., A.C. Beaumont and E.P. Caramaschi. 2002. Effects of artificial canal openings on fish community structure of Imboassica coastal lagoon, Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Coastal Research* **S136**: 634-639.
- Schallenberg, M., S.T. Larned, S. Hayward and C. Arbuckle. 2010. Contrasting effects of managed opening regimes on water quality in two intermittently closed and open coastal lakes. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. doi:10.1016/j.ecss.2009.11.001
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* **63**: 1379-1389.
- Sloan, R.M. 2006. "Ecological investigations of a fish kill in Pescadero Lagoon, California". Master's Theses. Paper 3032.
- Smith, J. 1990. The effects of sandbar formation and inflows on aquatic habitat and fish utilization in Pescadero, San Gregorio, Waddell and Pomponio Creek estuary/lagoon systems, 1985-1989. Report to California Parks and Recreation, 84-04-324.
- Smith, J. 2004. Sequence for fish kill at Pescadero Lagoon after sandbar breaching. Short report to Pescadero Marsh Technical Team.
- Suzuki, M.S., R.O. Figueiredo, S.C. Castro, C.F. Silva, E.A. Pereira, J.A. Silva and G.T. Aragon. 2002. Sand bar opening in a coastal lagoon (Iguipari) in the northern region of Rio de Janeiro state: hydrological and hydrochemical changes. *Brazil Journal of Biology* **62**: 51-62.
- Tabari, H. and S. Marofi. 2010. Changes of pan evaporation in the west of Iran. *Water Resources Management*, doi:10.1007/s11269-010-9689-6.
- Tabari, H., S. Marofi and M. Ahmadi. 2011. Long-term variations of water quality parameters in the Maroon River, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* **177**: 273-287.
- WREO, Wonju Regional Environmental Office. 1997. Water quality improvement measures of the lagoons on the East Coast.
- WREO, Wonju Regional Environmental Office. 1998, 1999, 2000, 2003a. Lagoon Reports.
- WREO, Wonju Regional Environmental Office. 2003b, 2004, 2005, 2006, 2007. Annals of the lagoon water quality.
- WREO, Wonju Regional Environmental Office. 2007. Water

- environment management basic planning studies of the lagoons on the East Coast.
- WREO, Wonju Regional Environmental Office. 2008. The Study of ecosystem scrutiny and management for ecosystem conservation and restoration of Lagoons on the East Coast (I).
- WREO, Wonju Regional Environmental Office. 2009a. The Study of ecosystem scrutiny and management for ecosystem conservation and restoration of Lagoons on the East Coast (II).
- WREO, Wonju Regional Environmental Office. 2009b. Lagoons ecosystem restoration project; Recommendation for restoration and management.
- WREO, Wonju Regional Environmental Office. 2013. Lakes Environmental and Ecology Research.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology. Lake and River Ecosystem. Third Edition. Academic Press. pp. 625-630.
- Yenilmez, F., F. Keskin and A. Aksoy. 2011. Water quality trend analysis in Eymir Lake, Ankara. *Physics and Chemistry of the Earth* **36**: 135-140.
- <https://sites.google.com/site/davidsstatistics/home/mann-kendall-trend>.
- <http://www.webapps.ccc.vt.edu/ewr/environmental/teach/sm-primer/sen/sen.html>.
- <http://www.swfwmd.state.fl.us/education/kids/watermonitoring/importance.html>.