

소규모 생태연못(원흥이 방죽)의 부영양화 평가

이흥수 · 정세웅[†] · 최정규 · 신상일

충북대학교 환경공학과

Evaluation of Trophic State of a Small-scale Pond (Wonheung) in Ecological Park

Heung Soo Lee · Se Woong Chung[†] · Jung Kyu Choi · Sang Il Shin

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 17 July 2008, Revised 16 September 2008, Accepted 14 October 2008)

Abstract

Many small-scale ponds that serve as ecological habitat, recreation and irrigation are faced to eutrophication problem, which causes aesthetic nuisance and ultimately loss of their functions. Thus accurate evaluation of the trophic state of these ponds is essential to provide rational information to the stakeholders so that they can develop effective management actions. In this study, the trophic state of a small pond (Wonheung) that experiencing water quality degradation due to vicinity land development was assessed using various Trophic State Indexes (TSIs) and statistical analysis including Principal Components Analysis (PCA) based on the field monitoring data obtained from May to December, 2007. The results showed that the pond is under eutrophic state with average total nitrogen (T-N) and total phosphorus (T-P) concentrations of 708.1 $\mu\text{g/L}$ and 59.3 $\mu\text{g/L}$, respectively. The factor loading plot obtained from PCA showed distinct two influencing factors, PC 1 and PC 2. PC 1 was grouped by T-P, Chlorophyll a (Chl-a), suspended solids (SS), TN/TP ratio, and transparency that all strongly related to the eutrophication state, while PC 2 by temperature, conductivity, dissolved oxygen (DO) and turbidity that explains the seasonal water quality variations. The limiting factor was identified as light rather than phosphorus by both T-N/T-P ratio and TSI indexes analysis. The results and methodology adopted in this study can be used for water quality assessment for other small ponds and lakes.

keywords : Eutrophication, Principal components analysis, Small pond, Trophic state index, Wonheung pond

1. 서론

최근 삶의 질 향상과 생활환경에 대한 관심이 증대되면서 아파트단지나 택지개발지 주변에 녹지공간과 생태적 기능을 포함한 생태공원의 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 생태공원은 체류시간 장기화에 따른 수질 악화로 생태공원의 기능을 상실하는 경우도 있다. 심지어 생태공원은 주변에 거주하는 주민들에게 시각적인 불쾌감과 악취 등으로 불편함을 주기도 한다(김성훈 등, 1998).

본 연구의 대상지역인 원흥이 방죽은 과거에 농업용수로 이용되었으나, 주변지역의 택지개발공사가 진행되면서 토지이용의 효율성을 높이기 위해 매립되어 사라질 위기에 처해 있었다(자연환경복원연구원, 2006). 그러나 지역시민단체 및 환경단체와 관계기관 간의 오랜 갈등 끝에 타협이 이루어져 그 원형이 유지되어 지금은 생태공원으로 이용되고 있다(자연환경복원연구원, 2006). 방죽은 두꺼비와 맹꽁이의 중요한 산란지로서 도심속에서 생물의 서식처, 경관 창출 및 새로운 생태계로의 통로로서 기능을 담당하고 있

으나 유입 및 유출 유량이 거의 없는 빈약한 폐쇄성 또는 준폐쇄성 수역에 해당하여 체류시간과 내부 오염부하의 증가를 초래한다.

호소는 폐쇄성 수역으로 일사량, 수온 및 영양염류 등의 적절한 수환경이 조성되면 조류가 발생된다. 일반적으로 호소에서 조류에 의한 부영양화는 수리학적 구조인 저수면적, 평균수심, 체류시간과 내부오염부하, 외부기원성인 비점오염원과 유입수 및 수문기상학적 특성에 의해 발생될 수 있다(정세웅 등, 2007; Thornton et al., 1990; Wetzel, 2001). 특히, 영양염류가 풍부하고, 수온이 25°C 이상으로 유지되며, 체류시간이 30일 이상인 정체수역에서 조류가 급격히 증가한다(김유경 등, 2007). 또한, 부영양화는 수심이 얇은 호소에서 쉽게 이루어진다(Vollenweider, 1968). 이는 빛과 영양염류의 이용성이 증가하고(김호섭과 황순진, 2004), 내부 오염부하인 퇴적층에서 영양염류인 인이 용출되어 바람에 의해 수직으로 혼합되기 때문이다(환경부, 2006). 따라서 수심이 얇고 내부오염부하가 큰 호소에서는 외부오염원을 적극적으로 차단할지라도 호소 내의 수질은 크게 개선되지 않을 것으로 판단된다.

최근 국내에서도 수질자료에 대한 영향인자를 과학적으로 추출하기 위하여 주성분분석(Principal Components Ana-

[†] To whom correspondence should be addressed. chung@chungbuk.ac.kr

lysis, PCA)을 이용하고 있다. 주성분분석을 실시하여 김미아 등(2007)은 금강 유역의 주요 수질측정 지점에 대하여 수질오염특성을 파악하고자 하였고, 이형진 등(2007)은 남한강 충주댐이하 중류구간을 대상으로 저수기 수질악화의 원인과 영향수역을 규명하였다.

일반적으로 호소의 부영양화 진행과정과 영양상태(trophic state)를 파악하기 위하여 투명도, Chl-a 및 T-P농도를 이용한 영양상태지수(Trophic State Index, TSI)를 이용하고 있다(Aizaki et al., 1981; Carlson, 1977; Walker, 1979). 국내의 호소에서 영양상태지수로 부영양화를 평가하는 연구는 활발하게 진행되어 왔다. Carlson의 영양상태지수를 이용하여 박제철 등(2004)은 금오지, 허우명 등(2004)은 화진포호를 평가하였고, 유순주 등(2005)은 용담호를 Aizaki의 영양상태지수로 평가하였으며, 김종규와 오승철(2007)은 군산소재 저수지를 Carlson과 Walker의 영양상태지수로 부영양화 정도를 평가하였다.

원흥이 방죽은 최근 호소 내 퇴적물 준설과 수질정화장치를 설치하여 운영하는 등 수질개선을 위하여 많은 노력을 기울이고 있으나, 뚜렷한 효과를 거두지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 원흥이 방죽을 대상으로 소규모 연못의 수질특성과 부영양화 상태를 진단하고 그 영향 인자를 평가하는 방법론을 제시하고자 하였으며, 이를 위해 정기적인 수질 측정을 수행하고 주성분 분석과 영양상태지수를 이용하여 방죽내 부영양화를 평가하였다. 연구결과는 현재 진행 중인 자연생태공원조성의 기초자료로 활용될 수 있으며, 제시된 연구방법론은 유사한 수질문제를 겪고 있는 국내 소규모 호소의 수질 평가를 위해 적용가능하리라 기대한다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상

본 연구의 대상인 원흥이 방죽(Fig. 1)은 행정구역상 충청북도 청주시 흥덕구 산남3지구에 위치하고 있고, 과거에

농업용수로 이용되었으나, 최근 주변지역의 택지개발공사로 인해 지형과 주변 여건이 계속 변화하여 지금은 생태공원으로 이용되고 있다. 특히, 방죽의 고도는 주변의 지반고보다 매우 낮아 집중호우와 공사기간 중 토사와 탁수 등의 비점오염원 노출에 매우 취약하였다.

방죽내 유입수와 유출수의 유량은 육안으로 관찰되지 않는 상태이었고, 강우시에만 적은 양의 유량이 관찰되었다. 이런 유입수의 부족은 수질과 생태계의 건강성을 위협할 수 있어 유량확보방안을 시급히 마련해야 할 것이다. 전체 수심은 0.9~1.7 m 범위으로써 유입부 부근이 0.9 m로 얇고, 중앙부와 유출부는 1.2~1.7 m로 유입부에 비해 상대적으로 깊었다. 또한, 수면적은 5,066 m²이고, 담수량은 9,316 m³이었으며, 수변연장은 277 m에 해당하였다. 방죽 내에는 여름과 가을철에 각각 마름과 개구리밥 등의 수생식물이 생육하고 있고, 특히 여름철에 마름이 유입부(St. 1)와 중앙부(St. 2) 부근에서 과다하게 성장하는 모습을 볼 수 있었다.

2.2. 조사항목 및 분석 방법

원흥이 방죽내 수질특성과 영양상태를 파악하기 위하여 2007년 5월~12월까지 유입부(St. 1), 중앙부(St. 2) 및 유출부(St. 3)의 총 3개 지점에서 월 1회(총 8회) 시료를 채수하였다(Fig. 1). 시료의 채수는 강우의 영향을 최소화하기 위해 선행 강우가 있는 후 3일 이상 경과된 시기를 선택하였다(Fig. 2). 고무보트를 이용하여 채수지점까지 이동 후 Van Dorm 채수기를 이용하여 표층(0.1 m)과 중층(표층 0.5 m 깊이)에서 각각 채수하였다. 다항목수질자동측정기인 YSI6000 meter를 이용하여 표층부터 0.2 m 간격으로 최고 저층까지 수온, DO, pH, 전기전도도 및 탁도를 측정하였고, 투명도(SD)는 직경 30 cm의 Secchi disk를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다.

수층별로 채수한 시료의 탁도는 HACH 2100P meter로 실험실에서 재측정하였고, 현장에서 YSI6000 meter로 직접 측정한 것과 비교 자료로 활용하였다. SS(suspended solids)는 전처리된 Whatman GF/C 여과지에 시료 일정량을 여과 후

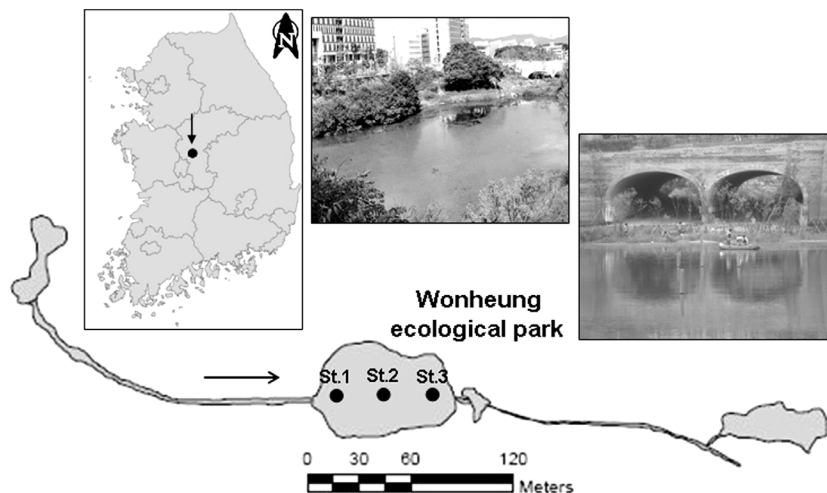


Fig. 1. Map showing the sampling sites in Wonheung ecological park.

105°C에서 무게 변화가 없을 때까지 건조시켰고, 여과전·후의 무게 차이로 계산하였다. Chlorophyll-a(Chl-a)는 일정량의 시료를 GF/C에 여과 후 90% 에탄올로 비등 추출하는 Nusch(1980)법으로 분석하였다. 또한, COD(chemical oxygen demand)는 Cr법으로 분석하였고, T-N(total nitrogen) 및 T-P(total phosphorus)의 영양염 항목은 Standard method (APHA et al., 1998)의 실험 방법에 준하여 분석하였다. 기온 및 강수량은 충청북도 청주시 흥덕구 복대동에 위치한 청주기상대의 기후자료(기상청, 2008)를 이용하였다.

2.3. 자료 분석

방죽내 수질항목간의 상호관계를 파악하고자 통계적 분석방법인 피어슨 상관계수(Pearson's correlation coefficient)를 MINITAB 통계 소프트웨어를 이용하여 선형관계를 파악하였다.

주성분분석(Principal Components Analysis, PCA)은 여러개의 변수들간의 분산과 공분산 관계를 이용하여 선형 관계식을 통하여 주성분을 찾아 차수(dimension)를 감소시켜 2~3개의 주성분으로 전체 변동(total variance)의 해석을 용이하게 하는 다변량 통계분석 방법이다(Davis, 1986; Stezenbach et al., 1999). 따라서 방죽내 수질자료로 주성분분석(PCA)을 실시하여 전체 수질 변수들의 선형결합으로 새로운 주성분을 찾아 이를 통하여 수질자료의 요약과 수질특성을 해석하였다. 주성분분석을 위해 통계프로그램인 XLSTAT Version 2007을 사용하였다(Addinsoft, New York, USA).

3. 결과 및 고찰

3.1. 기온 및 강수량

2007년 5월~12월까지 청주기상대에서 측정된 총 강수량은 1,351.0 mm이었고, 무강수일을 제외한 일 강수량의 평

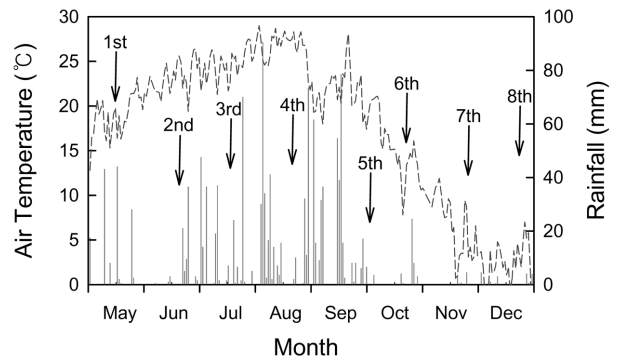


Fig. 2. Daily variations of air temperature, rainfalls and sampling times (arrows) from May to December 2007.

균은 13.6 mm이었으며, 그 범위는 0.1~90.5 mm이었다(Fig. 2). 우리나라의 여름철 기후 특성인 장마와 집중호우의 영향으로 연구기간 중 7~9월에 강수일은 56일(22.9%)이었고, 강수량은 1,050.1 mm(77.7%)에 해당하였다. 총 강수량(평균 기온)은 5월, 6월, 7월, 8월, 9월, 10월, 11월 및 12월에 각각 145.5 mm(18.9°C), 81.2 mm(23.1°C), 273.2 mm(24.7°C), 385.2 mm(26.6°C), 391.4 mm(21.7°C), 43.5 mm(15.4°C), 8.8 mm(7.0°C) 및 21.9 mm(2.2°C)로써 강수량은 11월과 12월에 적었고, 8월과 9월에 풍부하여 차이가 있었다(Fig. 2).

3.2. 수질특성

2007년 5~12월 동안 방죽내 각 정점별로 수심에 따른 수온, DO, 탁도의 수직 분포를 Fig. 3에 나타내었고, 정점별 표층과 증층에서 수질의 평균값은 Table 1과 같다. 또한, 수질항목간의 상관계수 값은 Table 2와 같고, 수질의 시공간적 변동을 Fig. 4에 나타내었다.

조사 시기 동안 방죽내 모든 정점에서 수심과 투명도의

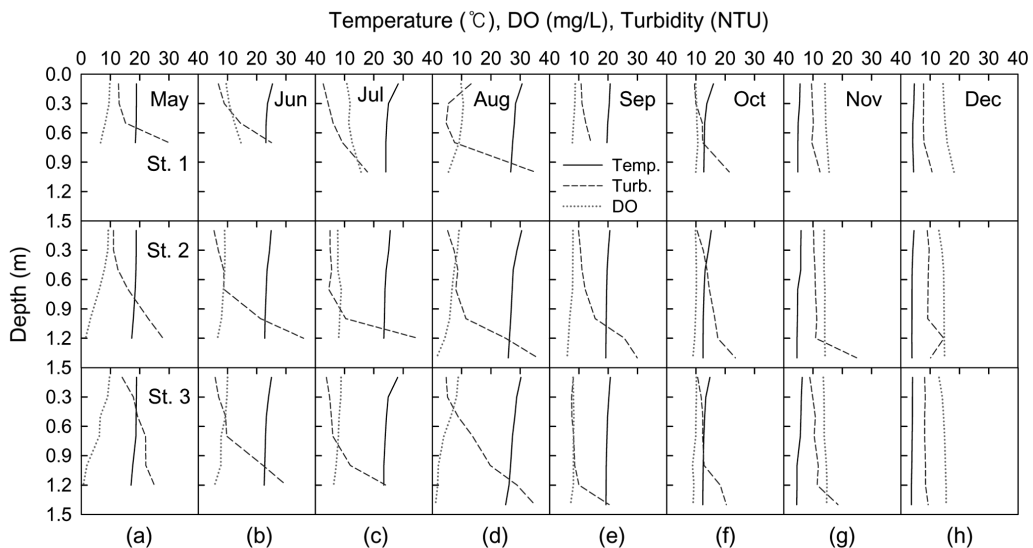


Fig. 3. Vertical profiles of monthly temperature (solid line), dissolved oxygen (dotted line) and turbidity (dash line) in Wonheung ecological park during May to December 2007. (a) May, (b) June, (c) July, (d) August, (e) September, (f) October, (g) November and (h) December.

Table 1. Mean values of water quality in each stations of Wonheung ecological park from May to December 2007. Plus-minus and parenthesis values indicate standard deviation, maximum and minimum, respectively (n=8)

Factors \ stations	St. 1		St. 2		St. 3	
	Surface	Middle	Surface	Middle	Surface	Middle
Depth (m)	1.1±0.1 (1.2/0.9)		1.4±0.1 (1.5/1.2)		1.6±0.1 (1.7/1.4)	
SD (m)	0.8±0.2 (1.0/0.5)		0.8±0.2 (1.1/0.5)		0.9±0.2 (1.2/0.6)	
Temperature (°C)	18.8±9.7 (30.6/4.6)	17.0±8.9 (28.0/4.1)	18.3±9.3 (30.5/4.5)	17.1±8.7 (27.6/3.9)	18.5±9.6 (30.2/4.0)	17.1±8.8 (28.2/3.9)
DO (mg/L)	10.9±2.1 (14.4/8.8)	11.3±2.6 (15.2/8.2)	10.0±2.2 (13.8/7.7)	9.8±2.8 (14.6/7.4)	10.3±2.0 (13.5/8.0)	9.6±3.1 (14.6/6.3)
pH	7.2±0.3 (7.6/6.7)	7.1±0.3 (7.5/6.7)	7.1±0.4 (7.5/6.4)	7.1±0.3 (7.4/6.5)	7.1±0.3 (7.4/6.6)	7.1±0.4 (7.9/6.5)
Conductivity (µS/cm)	283.9±51.1 (364.0/215.0)	284.3±51.3 (365.0/215.0)	283.9±49.7 (361.0/220.0)	285.3±48.9 (363.0/224.0)	284.6±49.5 (361.0/220.0)	285.0±47.9 (361.0/224.0)
Turbidity (NTU)	7.2±2.2 (10.6/3.4)	10.9±7.0 (27.2/4.4)	7.1±2.2 (9.7/3.9)	9.2±2.7 (14.0/5.3)	6.6±3.2 (11.5/1.0)	9.9±3.4 (16.3/6.7)
SS (mg/L)	5.9±2.4 (10.2/2.4)	10.9±9.4 (33.0/3.8)	6.2±2.2 (9.6/3.6)	8.9±4.9 (19.3/4.0)	6.4±3.4 (14.0/2.8)	9.2±5.4 (20.4/2.4)
COD _{Cr} (mg/L)	13.6±5.6 (26.4/8.8)	13.9±5.5 (26.9/9.3)	12.0±3.8 (20.1/8.6)	13.0±4.7 (24.1/9.5)	11.4±2.0 (14.9/8.8)	11.1±2.0 (14.7/8.4)
T-N (µg/L)	688.9±91.3 (808.0/576.0)	726.4±116.5 (992.0/615.0)	678.5±108.7 (871.0/540.0)	721.3±142.8 (997.0/580.0)	702.9±187.8 (1,065.0/460.0)	730.8±263.7 (1,285.0/420.0)
T-P (µg/L)	62.0±30.0 (120.0/27.0)	65.9±35.0 (129.0/34.0)	52.4±22.9 (97.0/34.0)	61.5±29.6 (118.0/36.0)	52.4±21.3 (87.0/30.0)	61.9±34.6 (115.0/33.0)
T-N/T-P ratio	13.1±5.0 (22.3/5.6)	13.7±6.2 (21.9/5.6)	14.8±5.1 (20.3/5.6)	14.1±6.2 (20.3/4.9)	15.1±5.5 (20.9/5.3)	14.3±6.5 (21.5/5.6)
Chl-a (µg/L)	7.5±4.9 (16.0/2.5)	8.3±5.3 (19.2/3.9)	7.1±4.7 (16.1/3.4)	8.6±6.9 (21.8/3.4)	8.1±5.8 (20.5/4.1)	8.5±7.3 (25.1/3.4)

Table 2. Correlation coefficients between the factors of the water quality in Wonheung ecological park (n=48)

Factors	SD	Temp.	DO	pH	Cond.	Turb.	SS	COD _{Cr}	T-N	T-P	TN/TP	Chl.a
SD	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Temp.	-0.172	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
DO	0.404**	-0.794**	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.
pH	0.369*	-0.029	0.266	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.
Cond.	0.419**	-0.828**	0.824**	0.419**	1.000	.	.	.	.	.	.	.
Turb.	-0.565**	-0.225	-0.120	-0.288*	-0.006	1.000	.	.	.	.	.	.
SS	-0.702**	0.107	-0.415**	-0.412**	-0.350*	0.908**	1.000	.	.	.	.	.
COD _{Cr}	-0.518**	0.042	-0.127	-0.502**	-0.280	0.557**	0.629**	1.000	.	.	.	.
T-N	-0.202	-0.068	-0.096	0.146	0.043	0.032	0.019	-0.187	1.000	.	.	.
T-P	-0.728**	0.336*	-0.502**	-0.390**	-0.415**	0.606**	0.740**	0.610**	0.087	1.000	.	.
TN/TP	0.562**	-0.492**	0.541**	0.426**	0.487**	-0.408**	-0.579**	-0.510**	0.250	-0.880**	1.000	.
Chl.a	-0.779**	0.108	-0.469**	-0.697**	-0.465**	0.612**	0.765**	0.591**	0.145	0.745**	-0.590**	1.000

*: significant at p<0.05 level, **: significant at p<0.01 level, respectively.

평균값(범위)은 각각 1.3 m(0.9~1.7 m) 및 0.8 m(0.5~1.2 m)이었다(Table 1). 수온의 수직 분포는 St. 1에서 St. 3까지 동일한 양상을 보였고(Fig. 3), 모든 정점의 표층과 중층에서 평균값(범위)이 각각 18.5°C(4.0~30.6°C), 17.1°C(3.9~28.2°C)로 표층에서 1.4°C 정도 높았다(Table 1, Fig. 4). DO의 수직 분포는 5월과 8월, 6월과 7월에 유사한 구조를 보였으며, St. 2와 St. 3에서 5월과 8월에 수심이 깊어질수록 DO가 급격하게 감소하였다(Fig. 3). 이는 퇴적층에서 미생물에 의해 유기물이 분해되는 과정에서 용존산소가 소모

된 것으로 사료된다. 반면, St. 1에서 6월과 7월에 수심이 깊어질수록 DO가 증가하는 경향은 녹색익을 가진 수생식물이 주간동안 활발하게 광합성활동을 했기 때문으로 판단된다(Fig. 3).

방죽내 pH의 평균값(범위)은 7.1(6.4~7.9)로 나타났다. 특히, 6월과 7월에 St. 1 중층에서 각각 7.4, 7.3으로 5월(6.7)과 8월(6.9)보다 상대적으로 높았다(Table 1). 전기전도도의 평균값(범위)은 284.5 µS/cm(215.0~365.0 µS/cm)으로 나타났다, 각 정점별 차이는 거의 없었다(Table 1, Fig. 4).

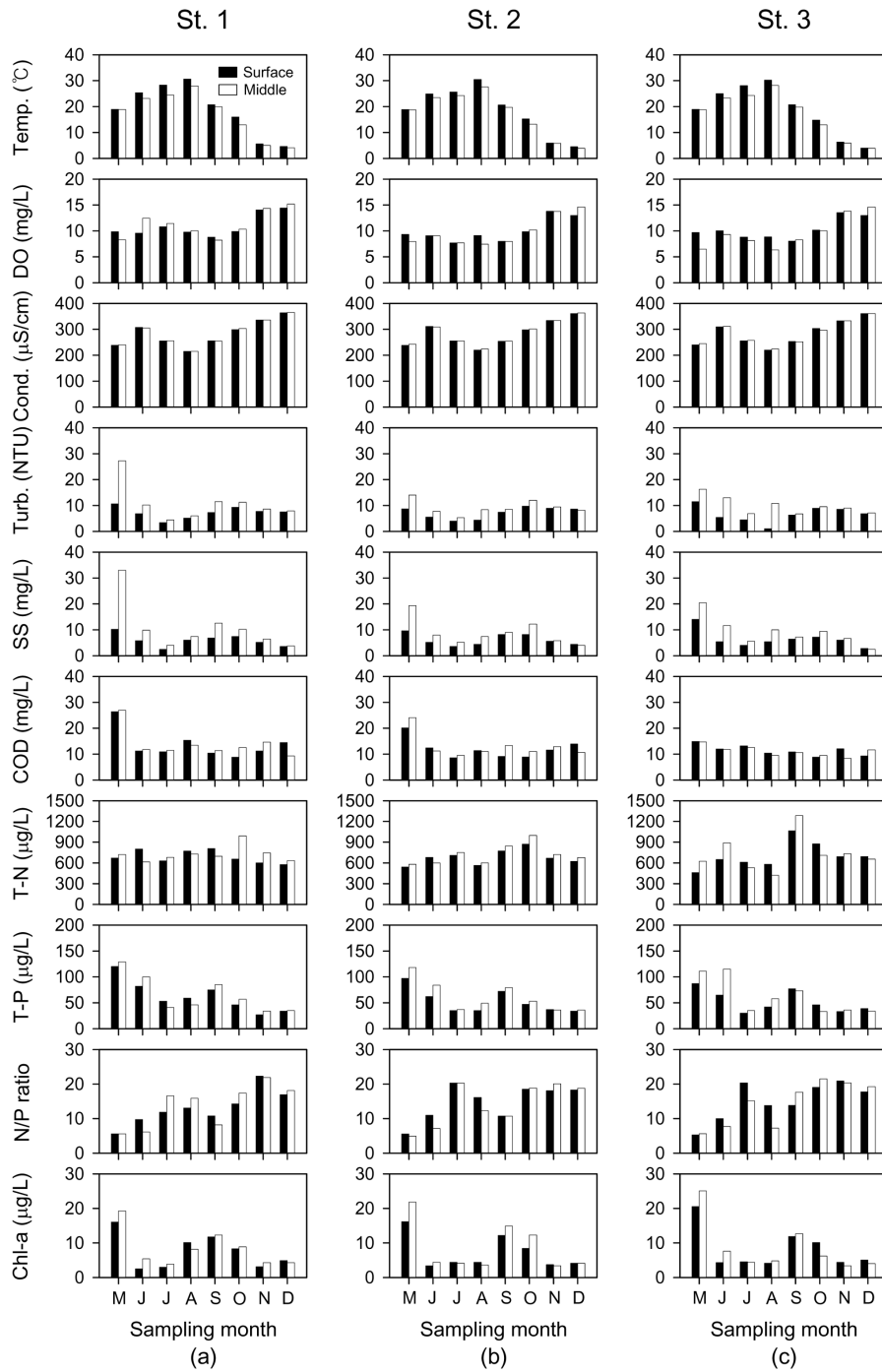


Fig. 4. Temporal and spatial variations of water quality in Wonheung ecological park from May to December 2007. (a) St. 1, (b) St. 2 and (c) St. 3.

탁도의 수직 분포는 모든 정점에서 수심이 깊어질수록 증가하는 경향을 보였고(Fig. 3), 실험실에서 재측정된 탁도는 표층과 중층에서 평균값(범위)이 각각 7.0 NTU(1.0~11.5 NTU), 10.0 NTU(4.4~27.2 NTU)로 표층에 비해 중층에서 약 1.4배정도 높았다(Table 1, Fig. 4). 또한, SS농도는 표층과 중층에서 평균값(범위)이 각각 6.2 mg/L(2.4~14.0 mg/L) 및 9.6 mg/L(2.4~33.0 mg/L)로 나타나 표층에 비해 중층에서 약 1.5배정도 높았고(Table 1, Fig. 4), 탁도의 분포 형태와 유사하였다($r=0.908$, $p<0.01$; Table 2).

유기물 지표인 COD_{Cr} 는 St. 1, St. 2 및 St. 3에서 평균값(범위)이 각각 13.8 mg/L(8.8~26.9 mg/L), 12.5 mg/L(8.6~24.1 mg/L) 및 11.3 mg/L(8.4~14.9 mg/L)로 나타나 유입부인 St. 1에서 상대적으로 높았다(Table 1, Fig. 4). 식물플랑크톤의 밀도를 간접적으로 추정하는 Chl-a의 평균값(범위)은 표층에서 7.6 µg/L(2.5~20.5 µg/L), 중층에서 8.5 µg/L(3.4~25.1 µg/L)로 대비가 되었으나 농도 수준은 큰 차이가 아니었다. 시기별로는 5월에 19.8 µg/L로 가장 높았고, 11월에 3.7 µg/L로 상대적으로 낮았다(Table 1, Fig. 4).

방죽내에서 Chl-a 농도는 SS($r=0.765$, $p<0.01$), T-P($r=0.745$, $p<0.01$) 및 COD_{Cr} ($r=0.591$, $p<0.01$) 농도와 높은 상관관계를 보여 조류의 성장이 부유물질, 영양염류 및 유기물 농도에 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다(Table 2).

조류 성장과 관련이 있는 영양염류인 T-N은 St. 1, St. 2 및 St. 3에서 평균값(범위)이 각각 707.6 $\mu\text{g/L}$ (576.0~992.0 $\mu\text{g/L}$), 699.9 $\mu\text{g/L}$ (540.0~997.0 $\mu\text{g/L}$) 및 716.8 $\mu\text{g/L}$ (420.0~1,285.0 $\mu\text{g/L}$)이었고, T-P는 각각 63.9 $\mu\text{g/L}$ (27.0~129.0 $\mu\text{g/L}$), 56.9 $\mu\text{g/L}$ (24.0~118.0 $\mu\text{g/L}$) 및 57.1 $\mu\text{g/L}$ (30.0~115.0 $\mu\text{g/L}$)이었다(Table 1, Fig. 4). 방죽내 T-N, T-P의 평균농도는 각각 708.1 $\mu\text{g/L}$, 59.3 $\mu\text{g/L}$ 로 호소수질환경기준으로 단순 비교하였을 경우 IV등급에 해당하였다. 또한, T-N/T-P비는 St. 1, St. 2 및 St. 3에서 평균값(범위)이 각각 13.4(5.6~22.3), 14.5(4.9~20.3) 및 14.7(5.3~21.5)로 정점별 차이는 거의 없었다(Table 1, Fig. 4). 조류의 성장을 제한하는 요인을 파악하기 위해 Redfield 등(1963)이 제시한 C:N:P=106:16:1의 기준으로 비교하면 T-N/T-P비가 16 이하로 인이 조류의 성장에 제한인자로 작용하지 않는 것으로 나타났다.

3.3. 수질 자료에 대한 주성분 분석

수질자료 12항목에 대한 총 576개 자료를 주성분분석(Principal Components Analysis, PCA)에 의해 산출된 고유값(Eigenvalue)과 기여율 및 누적기여율을 Table 3에 나타내었다. PC 1과 PC 2의 고유값은 각각 5.87, 2.33이고, 기여율은 각각 48.95%, 19.44%로 나타나 PC 1과 PC 2에서 전체 수질자료 분산의 68.38%가 설명된다. 또한, PC 3, PC 4, PC 5 및 PC 6의 고유값과 기여율은 각각 1.30, 0.89, 0.54, 0.43과 10.87%, 7.45%, 4.52%, 3.62%로 PC 3부터 PC 6까지 전체 수질자료 분산의 26.46%를 설명해 주고 있다.

방죽내 Factor loading plot(Fig. 5) 분석결과, PC 1은 T-P, Chl-a, SS, TN/TP ratio 및 투명도와 밀접한 관련을 나타내어 부영양화와 관련된 수질항목으로 규정할 수 있다. 그리고 PC 2는 수온, 전기전도도, DO 및 탁도로 분류되어 계절적인 수질변화를 설명하고 있다(Fig. 5). Factor scores plot(Fig. 6)에서 이러한 해석을 더욱 뒷받침해 주는데 부영양화가 잘 나타나는 5월이 PC 1과 가장 큰 상관관계를 보여 주고 있고, 계절적인 수질변화를 설명하는 PC 2는 7~8월과 11~12월이 상반되어 높은 신뢰도를 보여준다(Fig. 6).

방죽내 부영양화와 관련된 수질은 내부기원성이나 외부기원성에 의한 다양한 원인으로 발생될 수 있다(OECD, 1982). 방죽은 여름철과 가을철에 각각 마름과 개구리밥 등의 수생식물이 과잉 성장하여 경관상 녹조현상이 관찰되는 것처럼 여겨진다. 내부기원성 원인으로 이런 수생식물은 성장하면서 물속의 산소를 호흡을 통해 소비하여 수중 용존 산소를 고갈시키고, 사멸하면서 그 자체가 방죽의 바닥에 침전하여 내부오염부하를 증가시킨다. 따라서 적절한 시기에 물속에 뿌리를 내린 마름과 물위에 부유하는 개구리밥 등을 제거하여 미관상의 문제와 내부오염부하를 조금이나마 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Eigenvalues and variance percentage (accounted for and accumulative) corresponding to the principal component

PC number	Eigenvalue of cov (X)	Accounted for variance (%)	Accumulative variance (%)
1	5.87	48.95	48.95
2	2.33	19.44	68.38
3	1.30	10.87	79.25
4	0.89	7.45	86.70
5	0.54	4.52	91.22
6	0.43	3.62	94.84
7	0.33	2.79	97.62
8	0.13	1.05	98.67
9	0.08	0.70	99.37
10	0.04	0.31	99.68
11	0.02	0.19	99.86
12	0.02	0.14	100.00

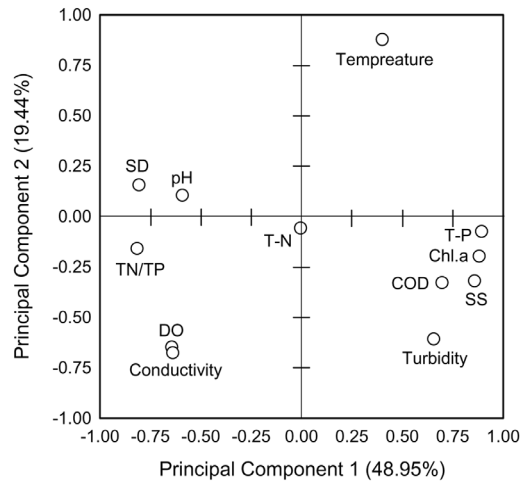


Fig. 5. Factor loading plot for the measured parameters as first two principal components.

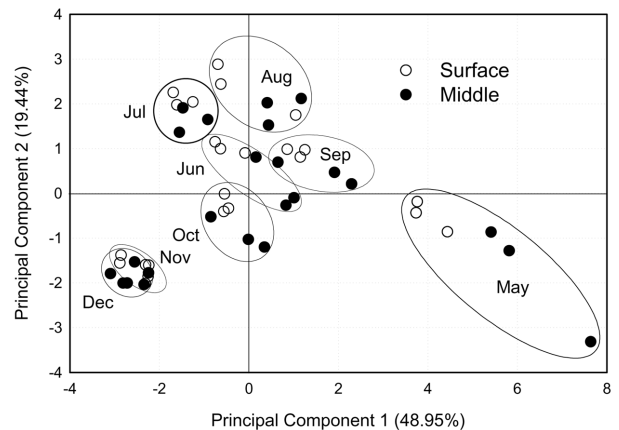


Fig. 6. Factor scores plot for the each sample as first two principal components.

또한, 외부기원성의 원인으로 방죽의 고도가 낮아 장마나 집중호우 시 주변의 택지개발공사장, 인근도로의 노면퇴적물로부터 비점오염원과 토양 무기 입자의 유입으로 판

단된다. 특히, 강우시 유입부 위에 건설된 도로교량에서는 비점오염원이 교량 아래인 방죽내로 바로 유입되고, 방죽의 양옆의 사면에서는 토양침식에 따른 토양 무기 입자의 유입이 우려된다. 신재기 등(2006)은 절골저수지의 수변 도로에 퇴적된 토사와 강우시 경작지에서 침식된 토사의 공급량이 상당히 많은 것으로 평가하고, 토양 유실에 의해 공급되는 영양염의 부하를 저감시키기 위해 배수로 정비를 제안하였다. 따라서 방죽을 중심으로 주위에 배수로를 정비하여 강우시 비점오염원 및 토양 무기 입자 등이 배수로로 흘러들게 하여 방죽내로 바로 유입되지 못하도록 하는 방안을 고려할 수 있다.

3.4. 영양상태 평가

방죽내 영양상태는 부영양화와 밀접한 관계를 가진 투명도, Chl-a농도와 T-P농도의 수질항목을 Carlson(1977)에 의하여 작성된 영양상태지수(Trophic State Index, TSI)로 평가하였다. 영양상태지수에 의한 평가방법은 투명도, Chl-a 및 T-P농도 중 어느 한 항목만을 측정하여도 영양상태를 파악할 수 있고, 부영양화와 밀접한 관계를 가진 수질 특성을 종합적으로 고려할 수 있는 장점이 있다. Carlson이 제시한 투명도, Chl-a 및 T-P농도의 영양상태지수는 식 (1)~(3)과 같이 계산된다.

$$TSI(SD) = 60 - 14.41 \ln(SD) \tag{1}$$

$$TSI(CHL) = 9.81 \ln(CHL) + 30.6 \tag{2}$$

$$TSI(TP) = 14.42 \ln(TP) + 4.15 \tag{3}$$

여기서, SD=secchi disk transparency (m), CHL=chlorophyll pigment concentration (µg/L), TP=total phosphorus concent-

rations (µg/L)를 나타낸다.

2007년 5월부터 12월까지 각 정점별로 영양상태지수를 계산하여 Fig. 7에 나타내었고, 이와 같이 산정된 영양상태의 판정은 Kratzer and Brezonik(1981)이 제시한 기준에 따라 판정하였다(Table 4).

방죽내 영양상태를 평가한 결과, TSI(CHL)의 평균값(범위)은 49.0(39.6~62.2)로 중영양(mesotrophic) 상태인 것으로 나타났고, TSI(SD)와 TSI(TP)의 평균값(범위)은 각각 62.8(57.4~70.0), 61.6(51.7~74.2)로 부영양(eutrophic) 상태인 것으로 나타났다(Fig. 7). St. 1, St. 2 및 St. 3에서 TSI(SD)의 평균값은 각각 63.8, 62.9 및 61.8이었고, TSI(CHL)의 평균값은 각각 63.8, 62.9 및 61.8로 나타났으며, TSI(TP)의 평균값은 각각 62.5, 61.2 및 61.0으로 각 정점별 차이는 크지 않았다. 또한, 모든 정점(St. 1~St. 3)의 표층과 중층에서 TSI(CHL)의 평균값이 각각 48.6 및 49.4이었고, TSI(TP)의 평균값은 각각 60.9 및 62.3으로 그 차이 또한 크지 않은 것으로 나타났다.

이러한 TSI의 상호편차를 이용하여 방죽내 부유물질의 조성과 조류 성장을 제한하는 요인들을 평가할 수 있다(Carlson, 1992). Chl-a의 TSI값이 T-P의 TSI값보다 크면 인이 조류 성장에 제한영양염이고, T-P의 TSI값이 Chl-a의

Table 4. Trophic state criteria of reservoir using Trophic State Index (TSI) by (Kratzer and Brezonik, 1981)

Trophic state index (TSI)	Trophic state of reservoirs
< 20	Ultra-oligotrophic
30~40	Oligotrophic
45~50	Mesotrophic
53~60	Eutrophic
> 70	Hypereutrophic

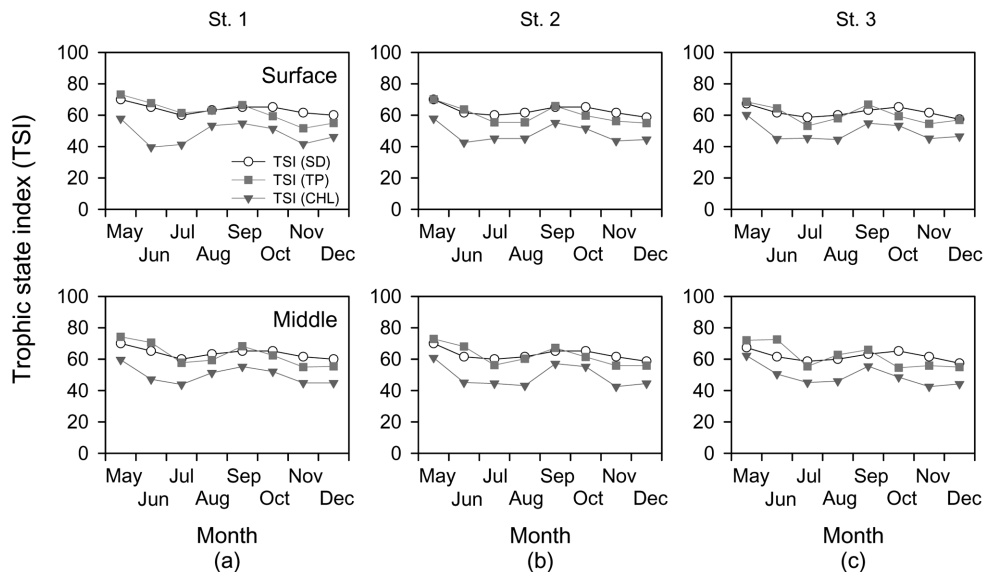


Fig. 7. Monthly variation of trophic state index (TSI) calculated from Secchi disk transparency, Chlorophyll-a and Total phosphorus concentration in Wonheung ecological park from May to December 2007. (a) Station 1, (b) Station 2 and (c) Station 3.

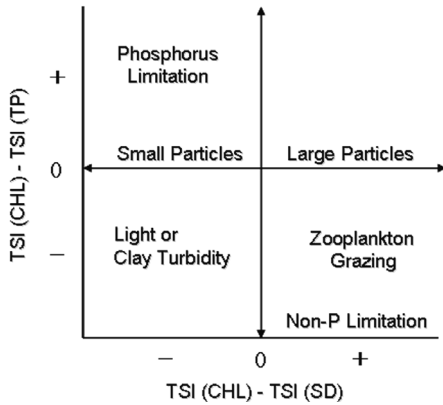


Fig. 8. Potential nutrient-limited and nonnutrient-limited causes for deviation of biomass-based trophic state index (TSI) by (Carlson, 1992).

TSI값보다 크면 인 이외의 다른 요인이 조류 성장을 제한할 가능성이 높은 것을 의미한다. 또한, Chl-a의 TSI값이 투명도의 TSI값보다 크면 부유물질 중 큰 입자의 구성비가 높고, 빛이 조류 성장에 제한요인이 될 수 없다. 반면, 투명도의 TSI값이 Chl-a의 TSI값보다 크면 부유물질 중 작은 크기의 입자들의 구성비가 높으며, 빛이 조류 성장에 제한요인이 될 가능성이 높음을 시사한다(Fig. 8).

방죽내 모든 정점의 표층, 중층에서 Chl-a의 TSI값이 T-P와 투명도의 TSI값보다 작게 나타났다(Fig. 9). 따라서 방죽내에 존재하는 부유물질은 작은 크기의 입자들로 구성되어 있고, 조류 성장이 인 농도가 아닌 빛에 의해 제한을 받는 것으로 판단된다. 이는 수질결과 중 T-N/T-P비가 16 이하로 나타나 인이 조류의 성장에 제한인자로 작용하지 않는다는 결과와 일치한다. 방죽내 존재하는 작은 크기의 입자들은 주변의 택지개발공사로 인하여 강우시 미세토사가 유입하고, 바람이 많이 부는 날에 시멘트가루와 분진 등의 입자상물질이 수표면으로 낙하하기 때문으로 사료된다. 이런 부유물질은 방죽내로 침강하여 수질오염을 가중시키는 것으로 생각되어 외부오염부하를 최대한 차단하기 위한 적극적인 수질관리 노력이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 빛이 조류 성장의 제한 인자로 작용하므로 연못주변에

나무를 심어 그늘을 형성하여 빛을 차단하는 방안도 고려할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 소규모 생태연못인 원흥이 방죽의 수질특성과 영양상태를 파악하기 위해 2007년 5월부터 12월까지 8회에 걸쳐 수질 조사를 실시하고, 수질 자료에 대한 주성분 분석과 영양상태지수를 이용하여 방죽의 부영양 원인인자를 평가하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 아래와 같으며, 연구결과는 소규모 연못의 수질평가와 효과적인 수질관리를 위한 기초자료로 활용 가능하리라 기대한다.

- 1) 방죽내에서 Chl-a 농도는 SS($r=0.765$, $p<0.01$), T-P($r=0.745$, $p<0.01$) 및 COD_{Cr} ($r=0.591$, $p<0.01$) 농도와 높은 상관관계를 보여 조류의 성장이 수체의 부유물질, 영양염류 및 유기물 농도에 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다.
- 2) T-N, T-P의 평균농도는 각각 708.1 $\mu\text{g/L}$, 59.3 $\mu\text{g/L}$ 로 호소수질환경기준으로 단순 비교하였을 경우 IV등급에 해당하였고, T-N/T-P비가 16이하로 인이 조류의 성장에 제한영양염으로 작용하지 않는 것으로 나타났다.
- 3) 주성분 분석 결과, Factor loading plot에서 PC 1은 T-P, Chl-a, SS, TN/TP ratio 및 투명도로 분류되어 부영양화와 관련된 수질항목으로 규정할 수 있고, PC 2는 수온, 전기전도도, DO 및 탁도로 분류되어 계절적인 수질변화를 설명하였다. 또한, Factor scores plot에서 부영양화가 잘 나타나는 5월이 PC 1과 가장 큰 상관관계를 보여 주었고, 계절적인 수질변화를 설명하는 PC 2는 7~8월과 11~12월이 상반되어 높은 신뢰도를 보였다.
- 4) TSI를 이용하여 영양상태를 평가한 결과, 방죽내 수질은 부영양 상태인 것으로 나타났다. 또한, TSI의 상호편차를 이용하여 방죽내 부유물질 조성과 식물플랑크톤을 제한하는 요인을 추출한 결과 방죽내에는 입자크기가 작은 부유물질이 많고, 조류 성장이 인 농도가 아닌 빛에 의해 제한을 받는 것으로 판단되었다.
- 5) 연구결과를 종합해 볼 때, 방죽내 수질오염을 가중시키

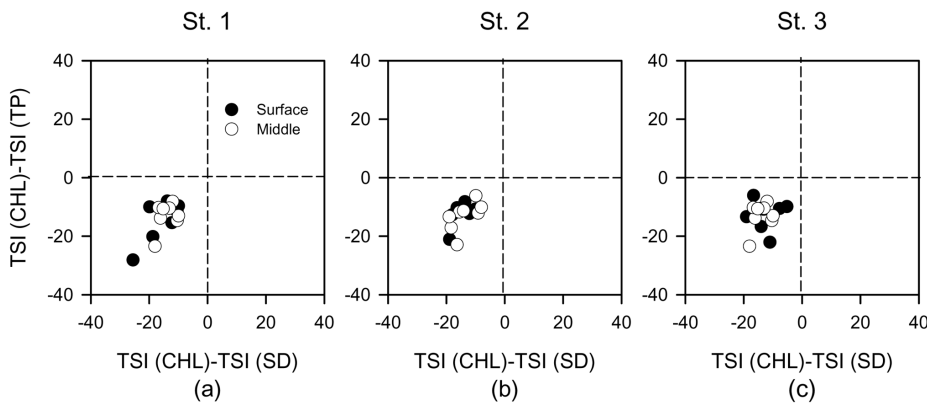


Fig. 9. Deviation of trophic state index (TSI) in Wonheung ecological park during May to December 2007. (a) Station 1, (b) Station 2 and (c) Station 3.

지 않기 위해 수생식물을 제거하여 내부오염부하를 줄이고, 배수로를 정비하여 강우시 토양입자의 유입을 차단하는 방안을 고려해야 할 것이다. 또한, 빛이 조류 성장의 제한 인자로 작용하므로 연못주변에 나무를 심어 그늘을 형성하여 빛을 차단하는 방안도 고려할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 기상청(2008). 청주기후자료. <http://www.kma.go.kr>.
- 김미아, 이재관, 조경덕(2007). 다변량분석법을 이용한 금강 유역의 수질오염특성 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 161-168.
- 김성훈, 오경미, 유금환, 박희경(1998). 소규모 연못의 수질 개선 방안에 관한 연구: 사례연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **14**(3), pp. 297-304.
- 김유경, 정세웅, 이흥수, 정용락(2007). 부상웨어 설치에 따른 대청호 조류 성장 억제 효과 수치모의. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(5), pp. 581-590.
- 김종구, 오승철(2007). 군산지역 저수지의 수질특성 및 부영양화 평가. *한국환경과학회지*, **16**(3), pp. 357-367.
- 김호섭, 황순진(2004). 육수학적 특성에 따른 국내 저수지의 부영양화 유형분석: 엽록소 a와 수심을 중심으로. *한국육수학회지*, **37**(2), pp. 213-226.
- 박재철, 김동섭, 이승환(2004). 금오지의 수환경 및 부영양화 평가. *한국환경과학회지*, **13**(4), pp. 389-401.
- 신재기, 이흥수, 허진, 박재충(2006). 백령도 절골저수지의 부영양화와 담수적조. *한국육수학회지*, **39**(2), pp. 271-283.
- 유순주, 채민희, 황종연, 이재안, 박종겸, 최태봉(2005). 담수 이후 용담호 영양상태 변동 요인 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(4), pp. 360-367.
- 이형진, 공동수, 김상훈, 신기식, 박지형, 김병익, 김성미, 장승현, 천세억(2007). 남한강수계 저수지 수질변동 특성에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(6), pp. 889-896.
- 자연환경복원연구원(2006). 구룡산 두꺼비 서식지 정밀생태조사.
- 정세웅, 박재호, 김유경, 윤성완(2007). 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 52-63.
- 허우명, 권상용, 이재일, 김동진, 김범철(2004). 동해안 석호의 육수학적 조사(3): 화진포호. *한국육수학회지*, **37**(1), pp. 12-25.
- 환경부(2006). 조류 예보제 시행계획.
- Addinsoft (2007). XLSTAT Version 2007 available at <http://www.xlstat.com/en/home>.
- Aizaki, M., Otsuki, A., Fukushima, T., Kawai, T., Hosomi, M., and Muraoka, K. (1981). Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese and its relationships to other parameters related to trophic stage. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn.*, **23**, pp. 13-31(in Japanese).
- APHA, AWWA and WEF (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed., American Public Health Association, Washington, DC, USA.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, **22**, pp. 361-369.
- Carlson, R. E. (1992). *Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs*. In: Proceedings of a National Conference on Enhancing the States, Lake Management Programs, Monitoring and Lake Impact Assessment, Chicago, pp. 59-71.
- Davis, J. C. (1986). *Statistical and data analysis in geology*. 2nd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Kratzer, C. R. and Brezonik, P. L. (1981). A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Research Bulletin*, **17**, pp. 713-715.
- Nusch, E. A. (1980). Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch. Hydrobiol. Beih. (Ergebn. Limnol.)*, **14**, pp. 14-36.
- OECD (1982). *Eutrophication of Waters. Monitoring, assessment and control*. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France. p. 154.
- Redfield, A. C., Ketchum, B. H., and Richards, F. A. (1963). *The influence of organisms on the composition of seawater*. The sea. Vol. 2, M. N. Hill (ed.), Wiley Interscience, New York, pp. 26-77.
- Stezenbach, K. J., Farnham, I. M., Hodge, V. F., and Johannesson, K. H. (1999). Using multivariate statistical analysis of groundwater major cation and trace element concentration to evaluate groundwater flow in a regional aquifer. *Hydrol. Process.*, **13**, pp. 2655-2673.
- Thornton, K. W., Kimmel, B. L., and Payne, F. E. (1990). *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*. A Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc., New York, p. 246.
- 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 Tech. Report, DAS/CSI/68.27, Paris, France.
- Walker, W. W. (1979). Use of hypolimnetic oxygen depletion rate as a trophic state index for lakes. *Water Resource Research*, **15**(6), pp. 1463-1470.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*, Third Edition. Academic Press, California.