

우리나라 다목적댐 인공호들의 규모에 따른 연별 · 계절별 수질변이 및 상 · 하류간 종적구배 특성

한 정 호 · 이 지 연 · 안 광 국*

(충남대학교 생명시스템과학대학 생명과학과)

Interannual and Seasonal Variations of Water Quality in Terms of Size Dimension on Multi-Purpose Korean Dam Reservoirs Along with the Characteristics of Longitudinal Gradients. Han, Jeong-Ho, Ji-Yeoun Lee and Kwang-Guk An* (Department of Bioscience of Biotechnology, College of Biological Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

Major objective of this study was to determine interannual and seasonal water quality along with characteristics of longitudinal gradients along the reservoir axis of the riverine zone (Rz)-to-lacustrine zone (Lz). Water quality dataset of five years during 2003~2007 used here were obtained from Ministry of Environment, Korea and ten physical, chemical and biological parameters were analyzed in the study. Similarity analysis, based on morpho-hydrological variables of reservoir surface area, watershed area, total inflow, and outflow, showed that the reservoirs were categorized as three groups of large-dam reservoirs (Chungju Reservoir, Daecheong Reservoir and Soyang Reservoir), mid-size reservoirs (Andong Reservoir, Yongdam Reservoir, Juam Reservoir and Hapcheon Reservoir), and small-size reservoirs (Hoengseong Reservoir and Buan Reservoir). According to the data comparison of high-flow year (2003) vs. low-flow year (2005), dissolved oxygen (DO), pH, biological oxygen demand (BOD), suspended solids (SS), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chlorophyll-*a* (CHL) and electrical conductivity (EC) declined along the longitudinal axis of Rz to Lz and water transparency, based on Secchi depth (SD), increased along the axis. These results indicate that transparency was a function of Values of pH, DO, SS, SD, and EC at each site were greater in the low-flow year (2005) than the high-flow year (2003), whereas values of BOD, COD, TN, TP and CHL were greater in the high-flow year (2003). When values of TN, TP, CHL and SD in nine reservoirs were compared in the three zones of Rz, Tz, and Lz, values of TN, TP and CHL declined along longitudinal gradients and SD showed the opposite due to the sedimentation processes from the water column. Values of TN were not statistically correlated with TP values. The empirical linear models of TP-CHL and CHL-SD showed significant ($p < 0.05$, $R^2 > 0.04$). In the mid-size reservoirs, the variation of CHL was explained ($R^2 = 0.2401$, $p < 0.0001$, $n = 239$) by the variation of TP. The affinities in the correlation analysis of mid-size reservoirs were greater in the CHL-SD model than any other empirical models, and the CHL-SD model had an inverse relations. In the meantime, water quality variations was evidently greater in Daecheong Reservoir than two reservoirs of Andong Reservoir and Hoengseong

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

Reservoir as a result of large differences of water quality by long distance among Rz, Tz and Lz.

Key words : Korean dam reservoir, water quality, longitudinal gradient, nutrient

서 론

우리나라는 연평균 강수량이 1,245 m²로 세계 평균 강수량인 880 m²보다 1.4배나 높아 연간 총강수량이 1,267 억 m²로 많은 양의 수자원을 보유하고 있지만, 이 중 용수로 이용되는 강수량은 301억 m²로 연간 총강수량의 26% 정도만 사용할 수 있으며, 이중 국민 1인당 사용할 수 있는 연 강수량은 2,591 m²로 세계 1인당 연 강수량의 1/8에 불과하여 사용할 수 있는 강수량이 극히 적은 것으로 나타난다(국토해양부, 2006). 이와 같은 이유는 국토의 65%가 산악지형이고, 하천경사가 급한 지리적 특성으로 많은 양의 강수가 육지에 머물지 않고, 대부분 바다로 빠져나가는 지형적인 특성을 가지고 있기 때문에 수자원의 이용측면에서 불리한 자연조건을 가지고 있다. 이에 따라서 정부에서는 용수의 이용도를 높이기 위해 하천에 댐이나 하구언을 건설하여 정체된 수계인 저수지 등과 같은 인공호를 4대강 전 권역에 많이 조성되어 생활용수 및 농·공업용수로 이용하고 있다(김, 2003).

이러한 목적으로 조성된 인공호는 자연호와는 달리 하천에 인위적으로 댐을 건설하여 만들어진 호수로서 형성 과정에 있어서 근본적으로 다른 인위적인 과정을 거쳐 형성(Jones *et al.*, 1997)되었기 때문에 생태적 특성이 현저히 다른 특성을 지니고 있다(Thornton, 1990; Wetzel, 1990). 하천 시스템을 물리적으로 차단시키는 효과 때문에 일차적으로는 유량 및 수온과 같은 수리·수문학적 요인 변화(Macan, 1961, 1974; Stuckenberg, 1969) 및 영양염류(인, 질소)와 같은 화학적인 수질변화와 수체의 투명도 감소효과(Macan, 1974; Krenkel *et al.*, 1979; Rada and Wright, 1979), 수체 내 서식하는 동·식물플랑크톤, 무척추 동물, 어류 등의 생물학적 개체군 구조 및 기능에 영향(Moss, 1980; Vannote and Sweeney, 1980; Edwards and Crisp, 1982; Merritt *et al.*, 1982; Ward, 1982; Sweeney *et al.*, 1986)을 주는 것으로 알려져 있다. 이러한 생태적인 특성들로 인하여 1990년대 이후 인위적으로 야기된 부영양화 문제를 경험하고 있는 저수지의 수가 매년 증가하고 있는 실정이다(농업기반공사, 2000). 특히, 최근 이런 인공 댐들은 건설한지 10~20년이 경과되면서 영양염류의 증가로 인하여 수체 내 물질순환 및 부영양화에 직접적인 영

향을 주어 수생태계의 기능 변화 및 다양한 환경문제(Allan, 1995; 최와 김, 2003; 여, 2004; 박, 2005)를 야기시키고 있기 때문에 이를 해결하기 위한 연구가 시급히 요구되고 있다.

인공호는 자연호에 비하여 시·공간적 수질 역동성이 크며, 수리·수문학적으로 더 큰 변이를 보이는 특성으로 인하여 인공호 내의 유역형태, 유속, 수체류 시간, 부유고형물, 그리고 빛과 영양물질 이용성과 같은 물리적 특성에 영향을 주며 이는 인공호의 종적 구배 특성에 따라 하천의 성향을 보이는 유수대(Riverine zone, Rz), 호수의 성향을 보이는 정수대(Lacustrine zone, Lz), 그리고 하천과 호수의 성향을 모두 보이는 전이대(Transition zone, Tz)로 대별된다. 이와 같이 물리적 특성의 차이로 인하여 이·화학적 수질에 있어서 매우 큰 공간적 이질성을 나타내며, 우리나라 하절기 몬순강우는 인공호의 수질변이에 지대한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(An *et al.*, 2001; 안과 신, 2005). 또한 몬순강우로 인한 저수지의 수위 및 유량뿐 아니라 유기물과 영양염 유입 등 전반적으로 저수지의 물리적, 화학적인 상태변화에 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다(김과 김, 2004). 이와 같은 하절기 집중 강우는 유역으로부터의 급격한 유량 증가를 가져와 인공호 수체에 음적, 양적 변화를 가져오는 것으로 보고가 되고 있으며(An *et al.*, 2001), 특히 비점오염원으로부터 각종 인과 질소 같은 영양염류의 유입이 보고되고 있다(안과 신, 2005). 이러한 여름철 장마기의 집중강우는 전기전도도의 감소를 유발하며 영양염류 중 TP의 증가를 가져오며, 인의 유입은 호소 내 부영양화를 가속시키는 원인이 되며, 이는 수체가 안정되는 장마 후기에 조류 생체량(CHL)의 증가를 유발하여 수체 내 투명도를 감소시키는 등(박과 안, 2007) 인공호 내 많은 변화를 가져오고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 첫째, 국내 9개 인공호를 대상으로 하여 각 인공호들의 물리적 변수를 이용하여 호수간의 연관성 및 상호관계를 분석하였으며, 둘째, 인공호들의 주요 수질 변수들의 시간적(월별, 연별) 변이 특성을 분석하였다. 셋째로, 인공호들의 계절적 몬순 강우 및 연별 강우분포에 따른 수질특성의 변이 및 경향성을 분석하였으며, 넷째로, 인공호들의 종적 구배 특성에 따른 공간적인(유수대, 전이대, 정수대) 수질특성을 분석하였다. 본 연구

결과는 향후 댐 건설에 따른 이화학적 수질변화에 대한 영향 파악 및 호수 생태계의 피해를 최소화하기 위한 효과적인 최적관리방안을 수립하는데 중요한 기초 자료로 제공하는 것에 목적을 두고 있다.

재료 및 방법

1. 조사지점 선정

본 연구에서 1965년 섬진강호를 시작으로 2006년 완공된 장흥호 등 16개 다목적댐 중 호수의 종적구배 특성을 보이는 충주호(CjR), 대청호(DcR), 소양호(SyR), 안동호(AdR), 용담호(YdR), 주암호(JaR), 합천호(HcR), 황성호(HsR), 부안호(BaR)의 9개 인공호를 선정하였으며, 각각의 인공호의 이·화학적 수질 자료를 분석하기 위하여 2003년 1월부터 2007년 12월까지 상류로부터 댐이 있는 하류까지 3개 지점 유수대(Rz), 전이대(Tz), 정수대(Lz)에서 측정된 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)의 월별자료를 이용하였으며, 각각 인공호별 3개 지점의 자세한 위치와 행정구역 명칭은 다음과 같다(Fig. 1).

- CjR: Rz (충북 단양군 단양읍 장회리)
 Tz (충북 제천시 청풍면 양평리)
 Lz (충북 충주시 중민동)
- JaR: Rz (전남 보성군 문덕면 덕지리)
 Tz (전남 순천시 송광면 대곡리)
 Lz (전남 순천시 주암면 대광리)
- DcR: Rz (충북 옥천군 안내면 장계리)
 Tz (충북 보은군 회남면 어성리)
 Lz (충북 청원군 문의면 덕유리)
- HcR: Rz (경남 합천군 봉산면 봉계리)
 Tz (경남 합천군 대방면 역평리)
 Lz (경남 합천군 대방면 고삼리)
- SyR: Rz (강원도 인제군 남면 부평리)
 Tz (강원도 양구군 남면 석현리)
 Lz (강원도 춘천시 신북읍 천전리)
- HsR: Rz (강원도 황성군 갑천면 구방리)
 Tz (강원도 황성군 갑천면 부동리)
 Lz (강원도 황성군 갑천면 대관대리)
- AdR: Rz (경북 안동시 임동면 마동)
 Tz (경북 안동시 임하면 노산동)
 Lz (강원도 춘천시 신북읍 천전리)
- BaR: Rz (전북 부안군 상서면 청림리)
 Tz (전북 부안군 변산면 중계리)

- Lz (전북 부안군 변산면 중계리)
- YdR: Rz (전북 진안군 상전면 향동리)
- Tz (전북 진안군 정찬면 모정리)
- Lz (전북 진안군 안천면 삼락리)

2. 수질 자료 분석

본 연구대상으로 선정된 9개 인공호에서 이·화학적 수질 자료를 분석하였으며, 이용된 수질 변수는 총 10개 항목으로서 수소이온농도(pH), 용존산소량(Dissolved oxygen, DO), 생물학적 산소요구량(Biochemical oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD), 부유물질(Suspended solids, SS), 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorus, TP), 투명도(Secchi depth, SD), 엽록소-a(Chlorophyll-a, CHL), 전기전도도(Electrical conductivity, EC)이며, 각 수질 변수들에 대하여 2003년 1월부터 2007년 12월까지 유수대(Rz), 전이대(Tz), 정수대(Lz)로 구분하여 공간적인 수질특성을 파악하였다. 또한 강우의 하절기 특성을 반영하고자 수질자료를 장마전기(Premonsoon, 5~6월), 장마기(Monsoon, 7~8월), 장마후기(Postmonsoon, 9~10월)로 구분하여 계절적인 수질특성을 분석하였고, 한국수자원공사 수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 댐수문자료(2003~2007년)에서 각 인공호별 강수량, 저수면적, 유입량, 방출량을 획득하였고, 이를 이용하여 9개의 인공호를 대형호(Large size reservoir), 중형호(Mid size reservoir), 소형호(Small size reservoir)로 구별하여 수리·수문학적 특성과 수질 변수들 간의 상관분석을 실시하였다.

3. 자료 분석

본 연구에서 각 인공호의 수질 변수들 간의 상관관계를 알아보기 위하여 4개의 수질 변수(TN, TP, CHL, SD)에 대한 측정치를 인공호 크기별로 대별하여 기본 통계량을 분석하였으며, 각 인공호 수질의 종적구배 특성을 분석하기 위하여 각 지점을 상류역의 유수대(Rz), 상류역과 댐의 중간역인 전이대(Tz), 댐에 인접한 정수대(Lz)로 대별하여 자료를 분석하였다. 통계적 측정 방법인 Pearson의 상관도 분석법을 이용하여 수질 항목들 간의 단순상관행렬을 구하여 상관관계를 산출하였으며, 이를 바탕으로 인공호의 크기별 시·공간적인 수질변화를 분석하였다. 또한, 유사도 분석(Cluster analysis)을 이용하여 9개의 인공호를 유역 크기별로 구분하였다. 통계처리는 SPSS(Version 12.0 KO for windows, 2004) 프로그램을 이용하여 분석을 수행하였다.

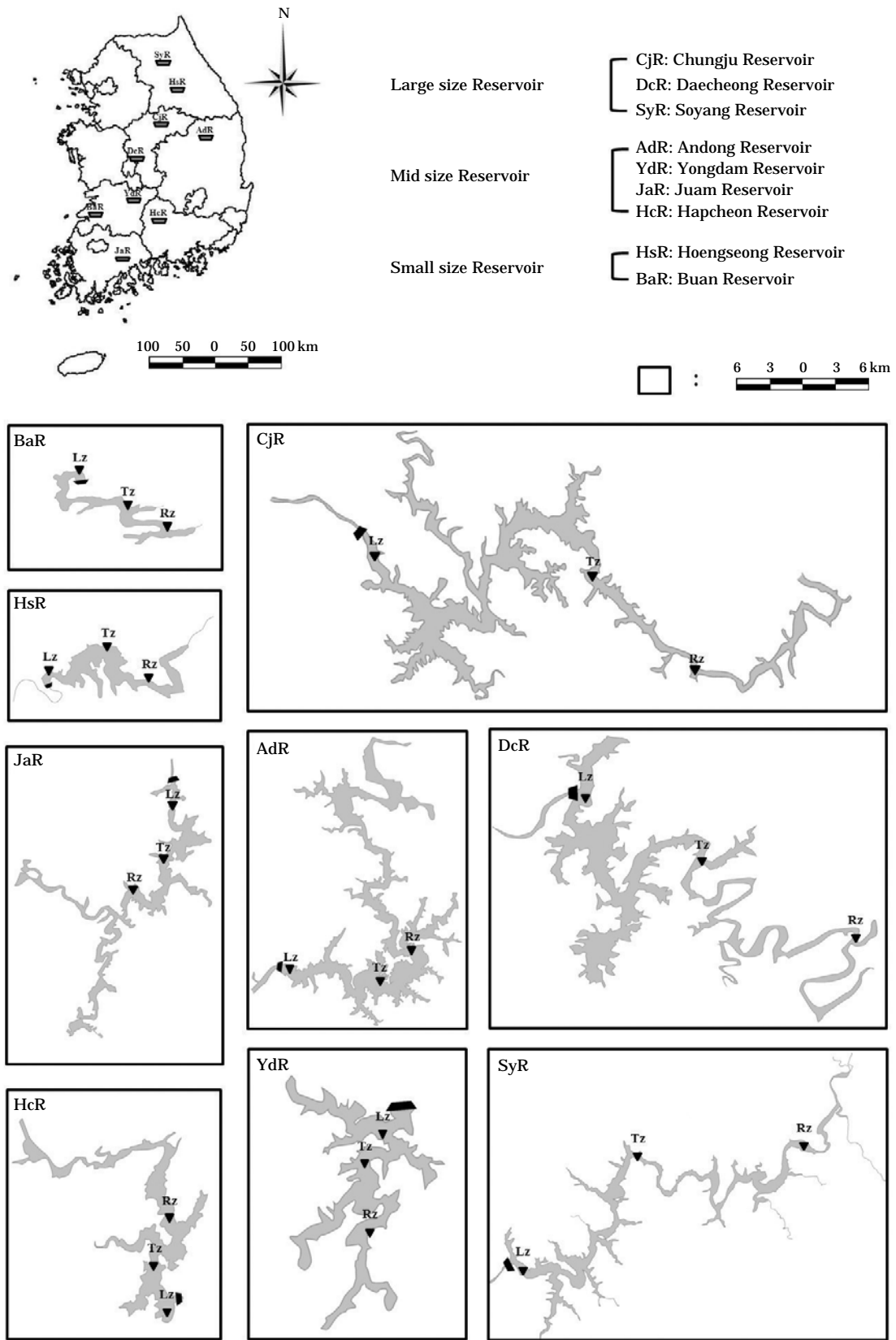


Fig. 1. The reservoir morphology and study sites of artificial dam reservoirs in the study area.

결과 및 고찰

1. 수리·수문학적 특성

2003년부터 2007년까지 연평균 강우량을 살펴보면, 2003년의 총 강우량이 1,785 mm 이상으로 다른 해에 비해 많은 강우가 내린 해(Wet year)로 나타난 반면, 2005년은

1,274 mm로 적은 강우가 내린 해(Dry year)로 나타났다. 강우량은 장마후기인 10월부터 이듬해인 5월까지 낮은 값을 보이다가, 장마기인 6~9월에 높게 나타났으며, 7월 평균 강우량이 422 mm로 주로 하절기에 편중된 것으로 나타나 몬순 기후지역의 일반적인 경향을 보였다(Fig. 2a). 이처럼 우리나라의 경우 연강우량의 50% 이상이 하계에 편중되고, 매년 강우량 및 하절기 강우 집중도에 따라 주기적 유량변동이 일어나는 것으로 알려져 있다. 배 등

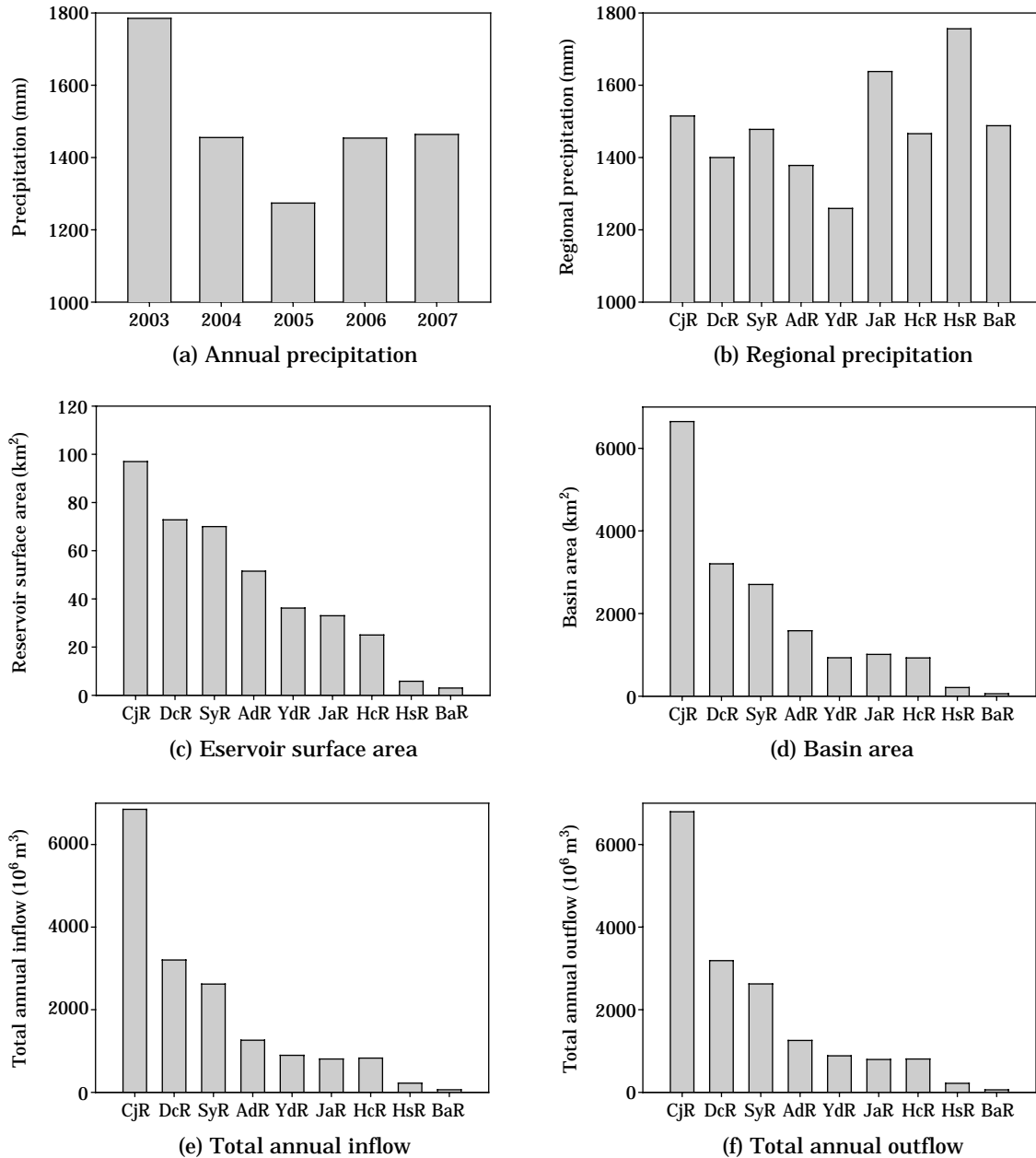


Fig. 2. Annual precipitation, regional precipitation, reservoir surface area, basin area, total annual inflow, and total annual outflow in each reservoir.

Table 1. Comparisons of water quality parameters in the wet year (2003) vs. dry year (2005).

Parameters	Wet year (2003)			Dry year (2005)		
	Rz	Tz	Lz	Rz	Tz	Lz
pH	7.52	7.42	7.31	7.66	7.63	7.51
DO (mg L ⁻¹)	9.49	9.14	8.84	10.18	9.85	8.95
BOD (mg L ⁻¹)	1.37	1.30	1.20	1.28	1.23	1.10
COD (mg L ⁻¹)	2.52	2.47	2.63	2.50	2.38	2.41
SS (mg L ⁻¹)	5.12	3.89	3.11	7.27	4.39	3.30
TN (mg L ⁻¹)	1.76	1.64	1.53	1.57	1.51	1.44
TP (μg L ⁻¹)	24.85	22.47	19.61	22.95	18.64	15.77
SD (m)	2.07	2.65	2.76	2.36	2.99	3.58
CHL (μg L ⁻¹)	8.65	7.30	5.67	5.89	4.85	3.59
EC (μS cm ⁻¹)	109.23	102.95	99.46	114.32	110.83	110.04

DO: Dissolved oxygen, BOD: Biochemical oxygen demand, COD: Chemical oxygen demand, SS: Suspended solids, TN: Total nitrogen, TP: Total phosphorus, SD: Secchi depth, CHL: Chlorophyll-*a*, EC: Electrical conductivity

(2007)의 연구결과에서도 하절기 집중되어 내린 강우량은 연평균 강우량을 98.4% ($p < 0.001$) 가량 설명하여 우기 동안의 강우가当年的 총강우량을 거의 결정한다는 것을 확인하였으며, 이러한 특성이 인공호의 이·화학적 수질 측정값에 직접적인 영향을 준다는 결과가 폭넓게 보고되고 있다(An and Jones, 2000a; An, 2001; An and Kim, 2003; 김과 김, 2004). 장마기 동안 강수량이 355 m²로 장마전기(143 m²)나 장마후기(122 m²)에 비해 월등히 강수량이 많음을 알 수 있었다.

인공호별 강우량을 비교한 결과, 횡성호가 1,756 m²로 가장 많은 강우량을 보였으며, 용담호가 1,259 m²로 가장 적은 강우량을 기록하였다(Fig. 2b). 소양호, 충주호, 대청호는 호소 면적, 유역면적, 유입량, 방류량이 높은 값을 보이는 대형 인공호인 반면, 횡성호, 부안호는 호소 크기뿐 아니라 유입, 방류량이 작은 것으로 나타났다(Fig. 2c-f). 저수면적, 유역면적, 유입량, 방류량은 대체로 충주호, 대청호, 소양호, 안동호, 용담호, 주암호, 합천호, 횡성호, 부안호 순으로 작아졌으며, 그 양상이 매우 유사하게 나타났다. 이와 같은 결과는 인공호의 규모와 같은 형태학적 차이뿐만 아니라 수리·수문학적인 특성이 부영양화 현상을 조절하는 가장 중요한 인자로 호소 내 수질 변화에 영향을 주는 것으로 사료되었다(Jones *et al.*, 1997; 김 등, 2002).

2. 수질분석을 통한 하절기 강우의 영향

몬순강우가 인공호 수질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 10개의 수질변수(pH, DO, BOD, COD, SS, TN, TP, CHL, SD, EC)를 대상으로 그 변화양상을 분석하였다. 수질변화를 분석하기 위하여 인공호를 3개의 구간(Rz, Tz, Sz)으로 구분하여 비교하였으며, 분석한 결과, 8개의 수질변수 중 pH, DO, BOD, SS, TN, TP, CHL, EC 유수대

(Rz)에서 정수대(Lz)로 갈수록 그 수치가 감소하는 양상을 보인 반면(Table 1), SD는 정수대(Lz)로 갈수록 수치가 증가하였다. 이러한 결과는 정수대로 갈수록 유속의 증적 변화가 감소하기 때문에 입자성 영양염류의 침전율이 증가하고, 수층으로부터 영양염류가 감소하기 때문에 CHL의 감소하게 되고, 이에 따라서 SD가 증가하는 것으로 사료되었다.

각 수질변수별 분석에 따르면, pH는 2003년이 2005년보다 각 구간별로 낮은 값을 보이는 것으로 나타났다. 이는 빗물의 pH가 보통 5.6임을 감안할 때, 홍수의 해인 2003년에 빗물로 수질의 pH가 호수 수질의 산성화에 영향을 준 것으로 판단되어 몬순강우의 강도에 따라서 인공호의 수질변화에 직접적인 영향을 주는 것으로 사료되었다. TN와 TP는 각 지점별 2003년이 2005년보다 높게 나타났다. BOD, COD는 2005년에 낮게 나타났는데, 이는 2003년이 집중강우와 함께 인근 수계로부터 유입된 비점 및 점오염원인 외부기원 유기물의 영향으로 사료되었다(안과 신, 2005). 전기전도도(EC)는 2003년이 2005년보다 낮게 나타났는데, 이는 하절기 몬순 강우의 희석효과에 의해 EC가 더 낮게 나타난 것으로 사료되었다(An, 2001).

지점별·월별 수질변화를 분석한 결과, SS는 2005년에 큰 폭으로 변화하였는데, 특히 7~8월 가장 높은 값을 보였다(Fig. 3). TN은 2005년에 비하여 2003년에 더 높은 것으로 나타났는데, 이는 장마기 집중호우로 인하여 외부기원 영양염류가 더 많이 유입되었기 때문인 것으로 사료되었다(안과 신, 2005). TP는 대체로 7~9월에 최대값을 보이다가 그 후 감소했는데, 이는 장마철(7~9월)에 유입되는 인(P)의 부하량이 연간 유입되는 인 부하량의 70%로 대부분이 우기에 집중되기 때문인 것으로 사료되었다(김, 1996; 허 등, 2000). 구간별로 분석한 결과, 2005

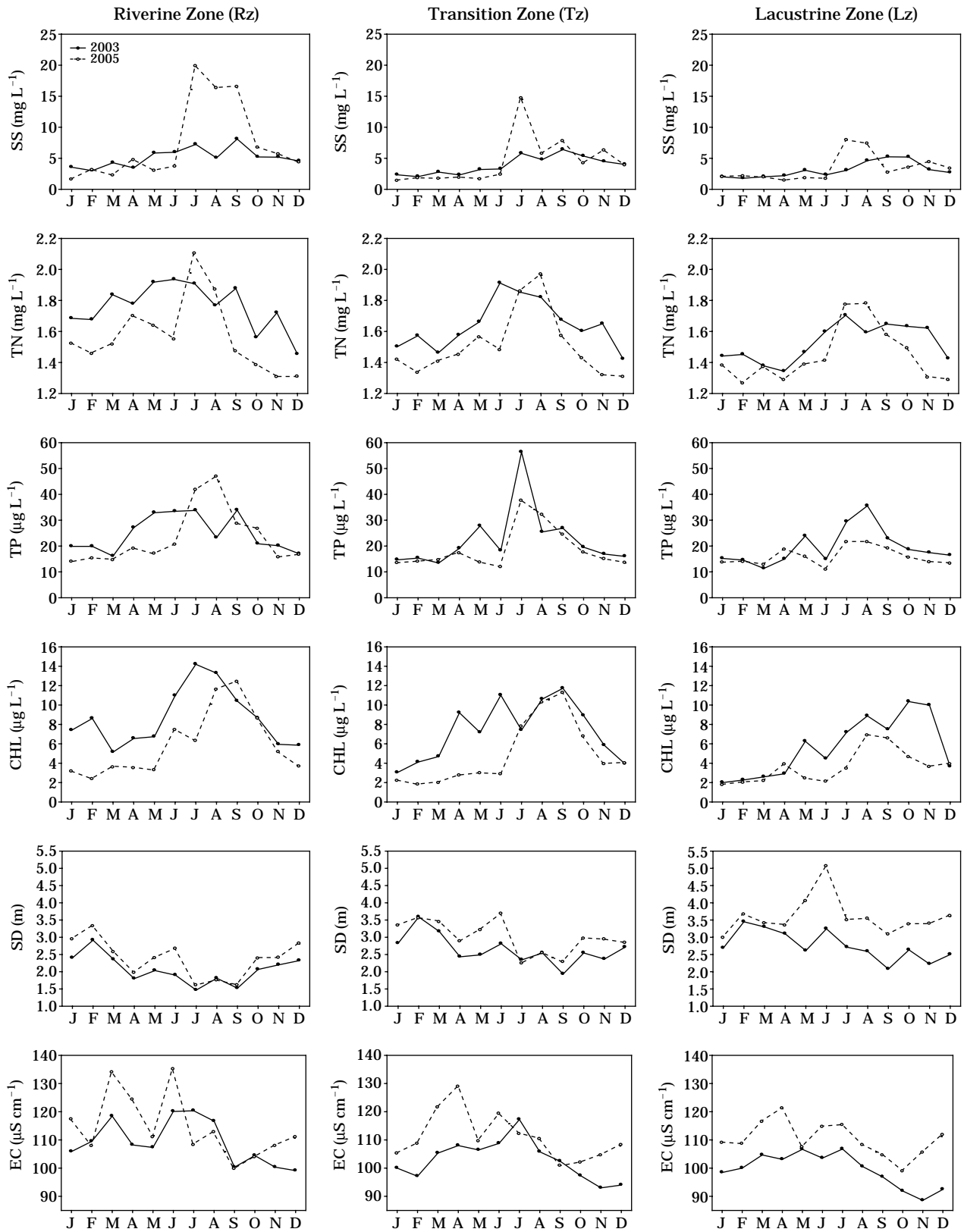


Fig. 3. Variations of monthly water quality in the riverine zone(Rz), transition zone (Tz), and lacustrine zone (Lz) during the wet year (2003) vs. dry year (2005).

년 Rz에서 8월에 TP가 $47 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 높은 값을 보인 반면, 2003년에는 Rz에서 8월에 TP가 $23 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 낮은 값을 나타냈는데, 이는 인 유입이 주로 하절기에 발생하지만, 8월에 집중강우로 인한 희석효과가 나타난 것으로 사료되었다(박 등, 2009). 호소 내 1차 생산력을 대변하는 CHL은(Kimmel and Groeger, 1984) 2003년에 구간별 평균이 각각 8.7 mg L^{-1} (Rz), 7.3 mg L^{-1} (Tz), 5.7 mg L^{-1} (Lz)을 나타냈으며, 2005년에는 5.9 mg L^{-1} (Rz), 4.9 mg L^{-1} (Tz), 3.6 mg L^{-1} (Lz)으로 나타나 구간 간의 농도 변화가 확연하게 나타났으며, TP, TN과 마찬가지로 상류에서 하류로 갈수록 평균치가 낮아지는 양상을 보였다(Table 1). CHL의 농도는 하절기에 집중적으로 높아졌는데, 특히 Rz의 경우 2003년 7월에 15 mg L^{-1} 을 나타낸 반면, 2005년 7월에는 8 mg L^{-1} 을 기록하여 많은 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 2003년에 많은 강우로 인하여 유수대 구간에 상대적으로 많은 양의 영양염류가 유입되었기 때문에 나타난 것으로 사료되었다. 한편, 구간별 CHL의 농도가 최고점을 나타내는 시기가 Rz는 7~8월, Tz는 8~9월, Lz는 9~10월로 나타나 댐축으로 갈수록 최대 농도를 나타내는 시기가 다르게 나타나 인공호로 유입되는 영양염류의 분포 및 이용성이 구간별로 다르게 전개되기 때문인 것으로 사료되었다(Petts, 1984). SD는 CHL과 반대 양상을 보였고, 7~9월에 가장 낮은 값을 보였다. 이는 SS, TN, TP, CHL의 값이 7~9월에 상대적으로 높아짐으로써 탁도가 상승하고, 이로 인하여 SD가 낮아진 것으로 사료되었다. SD는 Lz에서 2003년에 평균 2.8m에서 2005년에 3.6m로 강우의 강도에 의해서 영향을 받는 것으로 나타났다(Table 1). 또한 Rz에서 Lz로 진행됨에 따라서 SD의 값은 증가하는데, 이는 Rz에서 수체가 안정되는 장

마후기에 조류 생체량(CHL)의 증가를 유발하여 수체 내 투명도를 감소시키는 반면(박과 안, 2007), Lz에서는 외부로부터 유입된 영양물질이 침전과정을 걸쳐 수체 내 투명도가 증가된 것으로 사료되었다. 한편 SD는 Lz가 Rz와는 다르게 10월부터 이듬해 6월까지 지속적으로 수치가 낮아진 것으로 나타났는데, 이는 유입수가 호소수와의 밀도차를 보여 유입수가 중층으로 유입된 결과, 상층부에는 유입수의 영향이 미치지 않은 결과로 사료되었다(Table 1). EC는 7~8월 이후 그 수치가 급격히 작아졌으며, Rz에서 Lz로 갈수록 EC의 농도는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 2003년에 비하여 2005년의 EC의 농도가 더 높은 것으로 나타나, An(2001)의 연구와 마찬가지로 EC의 농도는 강우와 높은 연관성이 있는 것으로 사료되었다(Table 1).

3. 유역면적에 따른 인공호의 수질특성

물리적 변수를 이용하여 9개의 인공호에 대한 유사도 분석을 실시한 결과, 90% 이상의 유사도 지수에 의거할 때, 인공호는 크게 유역면적에 따라서 3개의 그룹으로 대별되었다(Fig. 3). 유역면적이 $2,000 \text{ km}^2$ 이상이고 호소 면적, 수심, 저수량 등이 높은 값을 가지는 충주호($6,648 \text{ km}^2$), 대청호($3,204 \text{ km}^2$), 소양호($2,703 \text{ km}^2$)가 대형인공호(Large-size reservoir)로 구분되었고, 유역면적인 $500 \sim 2,000 \text{ km}^2$ 사이인 안동호($1,584 \text{ km}^2$), 주암호($1,010 \text{ km}^2$), 용담호(930 km^2), 합천호(925 km^2)가 중형인공호(Mid-size reservoir), 유역면적이 500 km^2 이하이고, 호소 크기뿐 아니라 유입, 방류량 또한 작은 것으로 나타난 횡성호(209 km^2), 부안호(59 km^2)가 소형인공호(Small-size reservoir)로 구분하였다(Fig. 4). 이처럼 우리나라의 인공호 수질은 강수량이나 유량과도 밀접한 관계를 보이고 있지만(Jones et

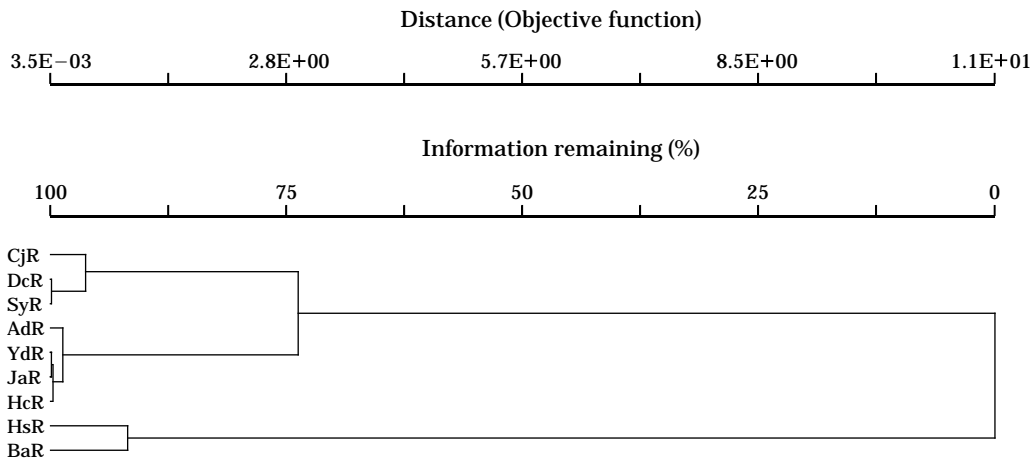


Fig. 4. The dendrogram representing the similarity among reservoirs.

al., 1997; 김 등, 2002), 물리적인 호소 형태(저수면적, 유역면적) 및 수리수문학적 요인(유입량, 방류량)과도 높은 연관성을 가지고 있다. 따라서 유역 면적에 따른 3개의 인공호 그룹과 그 그룹에 속한 인공호 수질변수들(TN, TP, BOD, COD, CHL, TN/TP ratio)과의 상관성을 분석한 결과(Table 2, Fig. 5), TN은 대형인공호에서 평균 1.8 ± 0.2 ($1.6 \sim 2.0$) mg L^{-1} , 중형인공호에서 평균 1.4 ± 0.3 ($1.2 \sim 1.7$) mg L^{-1} , 소형인공호에서는 평균 1.5 ± 0.3 ($1.1 \sim 1.8$) mg L^{-1} 로 나타났으며, TP는 대형인공호에서 평균 22.8 ± 11.6 ($11.2 \sim 34.3$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 중형인공호에서 평균 19.4 ± 7.3 ($12.2 \sim 26.7$) $\mu\text{g L}^{-1}$, 소형인공호에서 17.3 ± 7.2 ($10.1 \sim 24.5$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타나 인공호의 크기가 작아질수록 TP의 농도가 낮아지는 것으로 나타났다(Table 2, Fig. 5). 이와 같이 인공호의 크기별로 TP 농도가 차이를 보이는 원인은 대형인공호의 경우 상대적으로 유역면적이 크기 때문에 유역으로부터 받아들이는 영양염류의 유입량이 상대적으로

많은 반면, 작은 소형인공호의 경우는 단위 수체 부피당 유역면적이 적기 때문에 상대적으로 대형인공호에 비하여 유역으로부터 받아들이는 영양염류의 유입량이 적기 때문인 것으로 사료되었다. 한편, 인공호 별로 분석한 결과, TP가 부안호에서 평균 14.8 ± 7.6 ($7.1 \sim 22.4$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 작은 값을 나타냈으며, 대청호에서 평균 24.2 ± 14.6 ($9.6 \sim 38.8$) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 큰 값과 변이 폭을 보였는데, 이와 같은 특징은 대청호가 다른 인공호에 비하여 강(금강)의 중·하류부에 위치하고 있는 인공호이며, 상류에 용담호가 존재하고 있어서 장마철 상류댐(용담호)의 방류로 인하여 대청호의 수질에 영향을 주기 때문인 것으로 사료되었다(이 등, 2008). 유기물 오염의 지표로 이용되는 BOD와 COD의 평균 농도 및 범위는 인공호 크기별로 차이가 없으며(Fig. 5), 전체 인공호의 BOD 평균값은 1.3 mg L^{-1} ($1.0 \sim 1.6 \text{ mg L}^{-1}$), COD 평균값은 2.5 mg L^{-1} ($2.2 \sim 2.9 \text{ mg L}^{-1}$)로 나타나, 환경부 수질기준에 의거해 Ib 등급으로 평

Table 2. Nutrients (TN, TP), biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), TN:TP ratio and chlorophyll-a(CHL) in the reservoirs.

Reservoir	TN (mg L^{-1})	TP ($\mu\text{g L}^{-1}$)	BOD (mg L^{-1})	COD (mg L^{-1})	CHL ($\mu\text{g L}^{-1}$)	TN:TP	
LR	CjR	2.39 ± 0.20 (2.19 ~ 2.59)	20.76 ± 7.28 (13.48 ~ 28.04)	1.20 ± 0.25 (0.95 ~ 1.47)	2.16 ± 0.27 (1.89 ~ 2.43)	3.45 ± 2.35 (1.1 ~ 5.8)	141.20 ± 44.67 (96.33 ~ 184.87)
	DcR	1.54 ± 0.29 (1.25 ~ 1.83)	24.19 ± 14.56 (9.63 ~ 38.75)	1.03 ± 0.26 (0.77 ~ 1.29)	2.90 ± 0.33 (2.57 ~ 3.23)	8.89 ± 6.01 (2.28 ~ 14.9)	95.92 ± 43.98 (51.94 ~ 139.90)
	SyR	1.50 ± 0.17 (1.33 ~ 1.67)	23.41 ± 12.80 (10.61 ~ 36.21)	1.01 ± 0.17 (0.84 ~ 1.18)	2.38 ± 0.34 (2.04 ~ 2.72)	3.49 ± 2.53 (0.96 ~ 6.02)	91.96 ± 32.29 (59.67 ~ 124.25)
	Mean of LR	1.81 ± 0.22 (1.59 ~ 2.03)	22.79 ± 11.55 (11.24 ~ 34.33)	1.08 ± 0.23 (0.85 ~ 1.31)	2.48 ± 0.31 (2.17 ~ 2.79)	5.28 ± 3.63 (1.65 ~ 8.91)	109.69 ± 40.31 (69.38 ~ 150.01)
MR	AdR	1.43 ± 0.26 (1.17 ~ 1.69)	16.42 ± 5.02 (11.40 ~ 21.44)	1.26 ± 0.15 (1.11 ~ 1.41)	2.27 ± 0.17 (2.10 ~ 2.44)	4.14 ± 2.67 (1.47 ~ 6.81)	100.01 ± 28.04 (71.97 ~ 128.05)
	YdR	1.55 ± 0.23 (1.32 ~ 1.78)	20.46 ± 9.03 (19.53 ~ 29.49)	1.19 ± 0.25 (0.94 ~ 1.44)	2.64 ± 0.34 (2.30 ~ 2.98)	4.69 ± 3.01 (1.68 ~ 7.70)	99.76 ± 37.53 (62.23 ~ 137.29)
	JaR	0.93 ± 0.28 (0.65 ~ 1.21)	19.69 ± 8.63 (11.06 ~ 28.32)	1.18 ± 0.36 (0.82 ~ 1.54)	2.59 ± 0.38 (2.21 ~ 2.97)	10.25 ± 8.77 (1.48 ~ 19.02)	57.47 ± 21.44 (36.03 ~ 78.91)
	HcR	1.85 ± 0.36 (1.49 ~ 2.21)	21.16 ± 6.35 (14.81 ~ 27.51)	1.56 ± 0.39 (1.17 ~ 1.95)	2.38 ± 0.34 (2.04 ~ 2.72)	7.13 ± 5.98 (1.15 ~ 13.11)	95.52 ± 21.62 (73.90 ~ 117.14)
	Mean of MR	1.44 ± 0.28 (1.16 ~ 1.72)	19.43 ± 7.26 (12.18 ~ 26.69)	1.30 ± 0.29 (1.01 ~ 1.59)	2.47 ± 0.31 (2.16 ~ 2.78)	6.55 ± 5.11 (1.45 ~ 11.66)	88.19 ± 27.16 (61.03 ~ 115.35)
SR	HsR	1.81 ± 0.34 (1.47 ~ 2.15)	19.84 ± 6.78 (13.06 ~ 26.62)	1.09 ± 0.17 (0.92 ~ 1.26)	2.33 ± 0.28 (2.05 ~ 2.61)	3.58 ± 2.02 (1.56 ~ 5.60)	121.63 ± 59.28 (62.35 ~ 180.91)
	BaR	1.12 ± 0.32 (0.80 ~ 1.44)	14.75 ± 7.62 (7.13 ~ 22.37)	1.11 ± 0.21 (0.90 ~ 1.32)	2.56 ± 0.29 (2.27 ~ 2.85)	2.89 ± 1.40 (1.49 ~ 4.29)	109.66 ± 51.50 (58.16 ~ 161.16)
	Mean of SR	1.47 ± 0.33 (1.14 ~ 1.80)	17.30 ± 7.20 (10.10 ~ 24.50)	1.10 ± 0.19 (0.91 ~ 1.29)	2.45 ± 0.29 (2.16 ~ 2.73)	3.24 ± 1.71 (1.53 ~ 4.95)	115.65 ± 55.39 (60.26 ~ 171.04)

LR: Large-size reservoir, MR: Mid-size Reservoir, SR: Small-size reservoir, CjR: Chungju Reservoir, DcR: Daecheong Reservoir, SyR: Soyang Reservoir, AdR: Andong Reservoir, YdR: Yongdam Reservoir, JaR: Juam Reservoir, HcR: Hapcheon Reservoir, HsR: Hoengseong Reservoir, BaR: Buan Reservoir

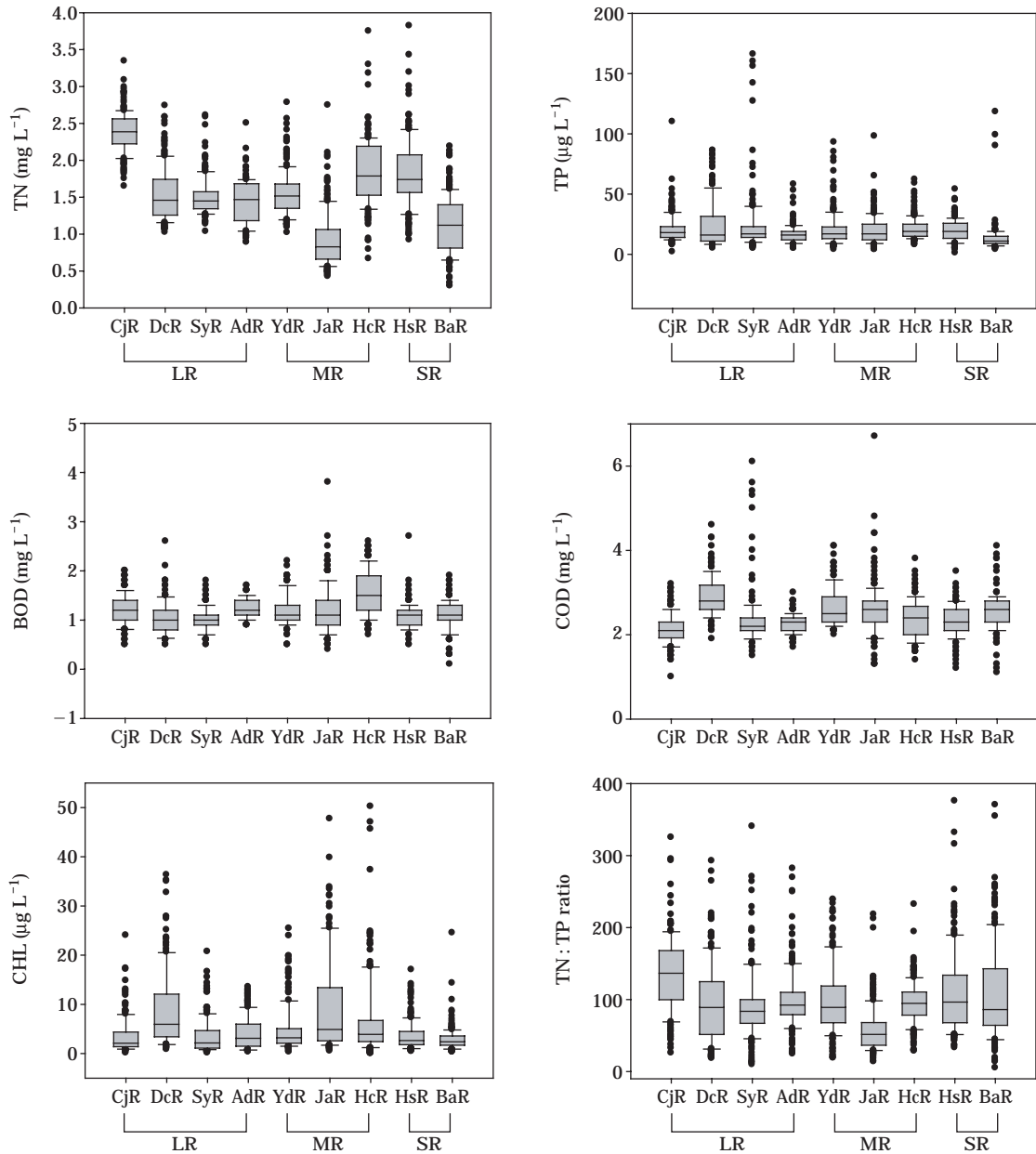


Fig. 5. Variation of trophic conditions in each reservoir of large-size reservoir (LR), mid-size reservoir (MR), and small-size reservoir (SR).

가되었다. BOD 평균 농도는 대체로 중형인공호에서 높았으며, 대형인공호에서 낮은 값을 보였다 (Table 2). 이는 대형인공호가 수심이 깊고 저수면적이 크기 때문에 상대적으로 많은 저수량에 의한 희석효과 때문인 것으로 사료되었다. 인공호별로 분석한 결과, BOD는 합천호에서 평균 $1.6 \pm 0.4 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 보였으며, 소양호에서 $1.0 \pm 0.2 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 낮은 값을 보였다. COD는 인공호 크기별로 유의한 차이를 보이지 않았으며, 대청호에

서 평균 $2.9 \pm 0.3 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 보였으며, 충주호에서 $2.2 \pm 0.3 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 낮은 값을 나타냈다 (Fig. 5). CHL 농도는 호소의 부영양화 정도를 잘 표현해주는 인자로서 중형인공호, 대형인공호, 소형인공호 순으로 점점 작아졌으며, 대청호에서 가장 높은 값을 보였으며, 부안호에서 가장 낮은 값을 보였다 (Table 2, Fig. 5). 부영양호에서는 인과 같은 제한영양소의 유입 증가로 인하여 조류의 생물량이 많아진다는 연구결과 (and Mann, 1973;

Schindler, 1978; Betlinsky, 1980)와도 마찬가지로 CHL 농도는 장마기보다 장마 후기에 더 높은 농도를 보였다. 이는 조류 생체량은 영양염류의 농도뿐만 아니라 수층의 안정화된 물리적 요인에도 영향을 받는 것으로 판단되었다 (An and Park, 2002; An, 2003). 또한 장마기의 CHL 농도가 장마 후기보다 더 낮은 이유는 장마기 호소의 유입량과 유출량의 급격한 증가로 인한 수체류 시간의 감소로 인해 조류의 세척현상(Flushing rate)과 Inorganic SS 등 유입물의 증가로 인한 인공호의 탁도 증가와 광투과도의 감소에 의해 CHL 생산량이 감소하는 것으로 사료되었다. 한편 여름철 몬순강우에 의해 CHL 농도가 증가함을 알 수 있는데, 이는 이 등(2002)의 호소의 수화현상

(Algal bloom)이 하절기 집중호우 이후에 나타날 가능성을 시사하는 것과도 일치하는 것으로 나타났다. TN:TP ratio는 소형인공호, 대형인공호, 중형인공호 순으로 점점 낮아졌으며, 충주호에서 평균 141로 가장 높은 값을 보였으며, 주암호에서 평균 57로 가장 낮은 값을 보였다 (Table 2, Fig. 5). 2006년 12월 개정된 수질 및 수생태계 환경기준의 호소생물환경기준에 따르면, TN의 농도 기준으로 6개 인공호의 유기물 오염 정도는 V등급으로 매우 심각한 것으로 나타났으나, TN:TP ratio가 9개 인공호 모두 17이상으로 인 (Phosphorus, P)제한 상태인 것으로 판명되어 호소수질기준 적용 시 총질소의 기준은 적용하지 아니하여야 한다. 일반적으로 TN:TP ratio가 17 이하일 경우 TN

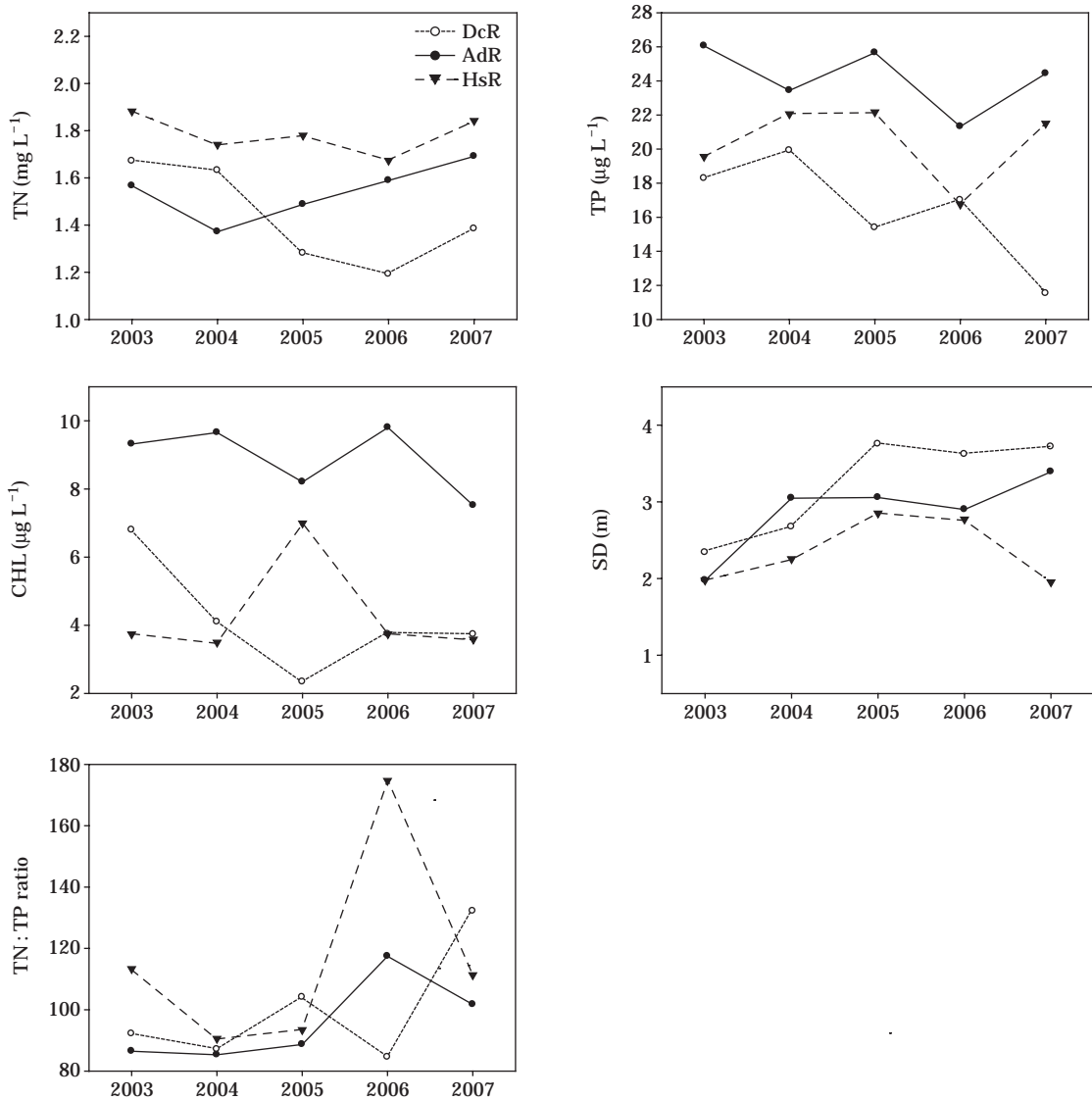


Fig. 6. Annual variations of water quality parameters in Daecheong Reservoir, Andong Reservoir, and Hoengseong Reservoir.

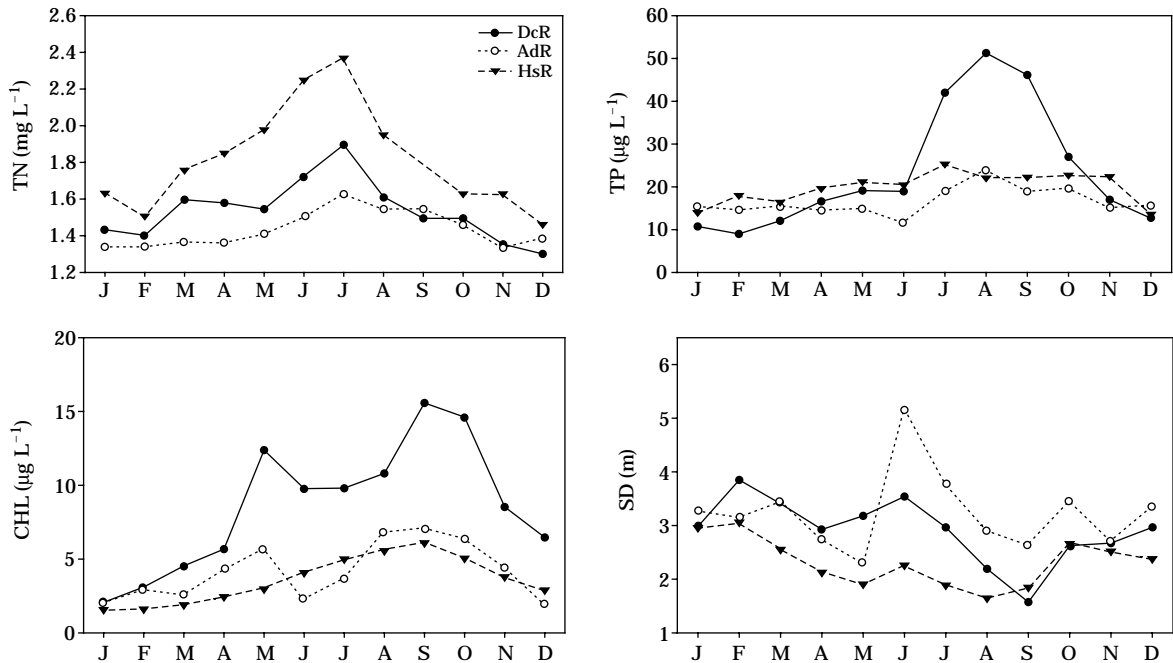


Fig. 7. Monthly variations of water quality parameters in Daechong reservoir, Andong Reservoir, and Hoengseong Reservoir.

이 제한 요인(Limiting factor)으로 작용하며, 29 이상일 경우 TN에 비하여 TP의 부족으로 1차 생산력에 제한요인으로 작용할 수 있는 잠재성(Forsberg and Ryding, 1980)을 보이기 때문에 9개의 인공호는 모두 P가 제한 요인으로 작용하는 것으로 나타났다. 또한 An and Jones (2000b)의 연구에서도 TP는 TN:TP ratio와 높은 역 상관관계($r=-0.51, p<0.01$)를 보였으나 TN와는 낮은 상관성($r=-0.21$)을 보여 TN:TP ratio가 TP의 변동 폭에 의해 주로 조절되는 것으로 사료되었다. 이와 같이 호수의 유역면적에 따라서 수질변이에 많은 차이를 보이는 것으로 나타나는데, 특히 소형인공호에서 대형인공호로 갈수록 수질의 오염도가 악화되는 것으로 나타났다. 이는 호소의 유역면적과 유입량이 크기 때문에 주변 유역으로부터 유입되는 오염원이 상대적으로 많기 때문인 것으로 사료되었다.

4. 시간적 수질변이 특성

시간적인 수질 변화를 분석하기 위하여 대형인공호(대청호), 중형인공호(안동호), 소형인공호(횡성호)별 대표성을 갖는 인공호를 선정하여 연별 수질자료를 분석하였다. 분석 결과, TN의 농도는 대청호에서 농도가 점차 증가하는 경향을 보였으며, 안동호에서는 2004년부터 TN의 농도가 감소하여 2006년에 1.2 mg L⁻¹ 가장 낮은 값을 나타냈다(Fig. 6). TP의 농도는 대체로 대청호, 횡성

호, 안동호 순으로 농도가 낮아지는 것으로 나타났다. TP는 대청호에서 7~9월에 평균 46.5 µg L⁻¹로 높은 값을 나타냈는데, 이는 대청호가 유역면적이 넓고, 장마기에 집중강우로 인하여 외부에서 기원된 다량의 영양염류 유입 때문인 것으로 사료되었다(An, 2000a). CHL의 농도는 호소의 부영양화 정도를 잘 표현해 주는 수질 변수로서(박 등, 2009), 대청호에서 연평균 24.2 µg L⁻¹로 매우 높은 값을 보였는데, 이는 인과 같은 제한영양염류 유입량의 증가로 인하여 조류 생체량도 증가한 것으로 사료되었다. CHL의 월별 분석에 의하면 3개 인공호 모두 9월에 가장 높은 값을 보였는데, 이는 CHL이 수층이 안정하고 빛과 영양물질이 적당한 양으로 유입되는 가을에 높은 농도를 보인 것(허, 2002)으로 사료되었다. 반면, SD는 대청호, 안동호에서 매년 증가하는 것으로 나타났으며, 횡성호에서는 SD가 증가하다가 2007년에 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

수질에 대한 장마의 영향을 분석하기 부영양화 지수와 관계된 수질 변수(TN, TP, CHL, SD)자료를 장마전기(Pre-monsoon), 장마기(Monsoon) 및 장마후기(Post-monsoon)로 구분하여 3개 인공호 수질자료(2003~2007년)를 비교한 결과, TN, TP는 대체로 장마기 동안 그 수치가 높았던 반면, SD는 장마기 동안 그 수치가 낮게 나타났다(Fig. 8). 이는 장마기 동안 집중강우에 의한 TN, TP의 유입과 CHL의 증가로 인하여 SD는 낮아진 것으로 사료되

었다. 한편 CHL 농도는 장마전기, 장마기, 장마후기로 갈수록 농도가 높아지는 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 인공호 구간 중 상류 구간인 Rz의 경우 영양염의 제한에 의한 결과보다 빛이 제한 요인으로 작용하여 식물플랑크톤의 성장에 영향을 준 것으로 판단되었다. 그리고 지점 Tz의 경우는 빛이 한 요인으로 작용을 한 것으로 조사되었지만, 어류나 동물성플랑크톤의 섭식으로 인한 식물플

랑크톤 성장에 영향을 준 것으로 조사되었다. 하류 구간인 Lz의 경우는 빛이 가장 큰 제한 요인으로 작용한 것을 확인할 수 있었다(Fig. 8).

1차 생산자의 성장을 제한하는 제한 요인을 분석하기 위하여 각 지점별 영양염류 및 투명도와의 상관도를 비교하였다(Table 3). 호수의 유역면적별로 구분하여 비교하였을 때, 중형인공호에서 수질 변수들 간의 유의한 상관

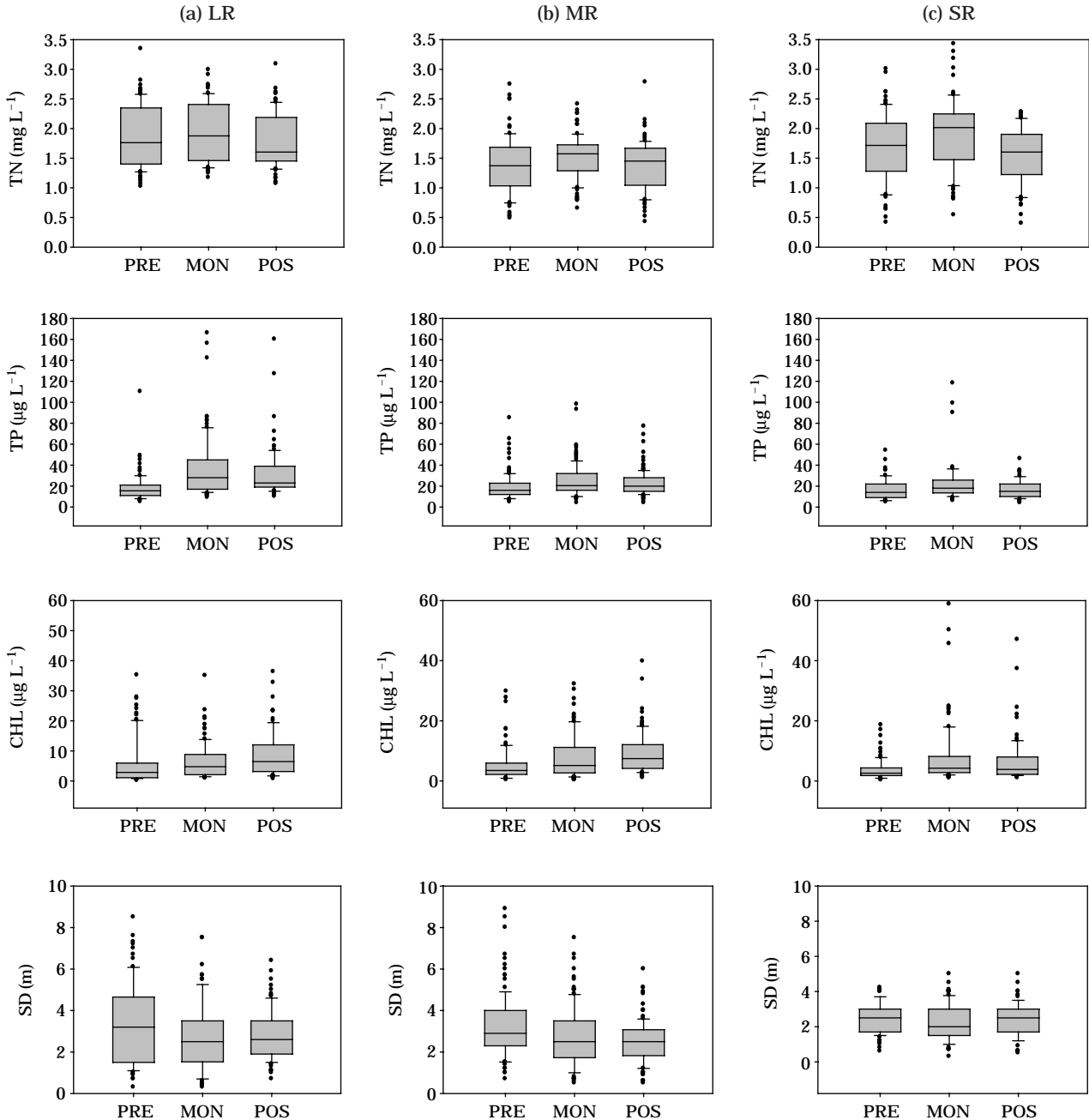


Fig. 8. Effects of water quality by seasonal monsoon rain in large-size reservoirs (LR), mid-size reservoirs (MR) and small-size reservoirs (SR).

성을 갖는 것으로 분석되었으며, 상대적으로 유역면적이 큰 대형인공호나 유역면적이 작은 소형인공호에서는 유의한 상관성을 보이지 않는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 문순기의 영향에 대하여 대형인공호에서의 수질변화는 인공호 내의 많은 저수량 특정 수질 변수 변화에 대한 반응에 희석효과나 완충 작용 등으로 인하여 즉각적인 반응이 일어나지 않기 때문인 것으로 사료되었다(An, 2000b). 반면 유역면적이 작은 소형인공호는 유역으로부터 유입되는 유입량에 대하여 수질변수들의 의존도가 강하기 때문에 호수 내 수질 변수들 간 상관성이 낮은 것으로 판단된다. 저수량과 유역면적에 대한 영향이 비교적 적은 중형인공호에서 CHL은 SD와 가장 밀접한 상관관계를 보였으며, TP와의 상관도에서도 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이는 수체가 비교적 불안정한 지점 Rz, Tz에서 SD가 1차 생산량에 가장 큰 영향을 미치는 반면, 수체가 안정된 지점 Lz에서는 투명도와 함께 총인의

농도가 조류생장에 제한요인으로 작용하는 것으로 사료되었다(Table 3).

5. 공간적 수질변이 특성

9개의 인공호에서 댐의 상류부에 위치한 강 유입부로부터 댐까지의 연속성을 따라 발생하는 인공호들의 종적구배(Longitudinal gradient) 특성에 따른 수질 변화를 살펴본 결과, 대체로 대형인공호에서는 Rz~Tz 사이의 거리가 약 10~30 km, Tz~Lz는 38~52 km, 중형인공호는 Rz~Tz 사이의 거리가 약 6~10 km, Tz~Lz는 8~16 km, 소형인공호에서는 Rz~Tz 사이의 거리가 약 3~4 km, Tz~Lz는 7~9 km로 대형인공호에서 소형인공호로 갈수록 지점 간 거리가 짧아졌다(Table 4). 각 구간별 특징을 살펴보면, Rz는 상대적으로 빠른 유속을 보였으며, 투명도가 낮고, 부유물이 많은 특징을 보였다. 또한 1차 생산이 빛에 의하여 제한되는 특성을 보였으며, 영양물질의 공급은 주로

Table 3. Pearson's correlation of log-transformed TN, TP, CHL and SD in the reservoirs.

Parameters	Size	Zone	Regression equation	R ² -value	p-value	N
Log ₁₀ TN vs. Log ₁₀ CHL	LS	Rz	Log ₁₀ CHL = -0.55Log ₁₀ TN + 0.78	0.0230	=0.0471*	172
		Tz	Log ₁₀ CHL = -0.13Log ₁₀ TN + 0.56	0.0013	=0.6357	180
		Lz	Log ₁₀ CHL = -0.51Log ₁₀ TN + 0.46	0.0195	=0.0613	180
	MS	Rz	Log ₁₀ CHL = 0.21Log ₁₀ TN + 0.64	0.0050	=0.2755	239
		Tz	Log ₁₀ CHL = 0.20Log ₁₀ TN + 0.58	0.0061	=0.2285	239
		Lz	Log ₁₀ CHL = 0.24Log ₁₀ TN + 0.49	0.0112	=0.1022	239
	SS	Rz	Log ₁₀ CHL = 0.15Log ₁₀ TN + 0.41	0.0060	=0.3985	120
		Tz	Log ₁₀ CHL = 0.05Log ₁₀ TN + 0.41	0.0007	=0.7707	120
		Lz	Log ₁₀ CHL = 0.13Log ₁₀ TN + 0.34	0.0054	=0.4259	120
Log ₁₀ TP vs. Log ₁₀ CHL	LS	Rz	Log ₁₀ CHL = 0.81Log ₁₀ TP - 0.45	0.1603	<0.0001**	172
		Tz	Log ₁₀ CHL = 0.85Log ₁₀ TP - 0.53	0.2137	<0.0001**	180
		Lz	Log ₁₀ CHL = 0.38Log ₁₀ TP - 0.12	0.0789	=0.0001**	180
	MS	Rz	Log ₁₀ CHL = 1.03Log ₁₀ TP - 0.68	0.2401	<0.0001**	239
		Tz	Log ₁₀ CHL = 0.75Log ₁₀ TP - 0.32	0.1215	<0.0001**	239
		Lz	Log ₁₀ CHL = 0.65Log ₁₀ TP - 0.23	0.1001	<0.0001**	239
	SS	Rz	Log ₁₀ CHL = 0.43Log ₁₀ TP - 0.07	0.0983	=0.0005**	120
		Tz	Log ₁₀ CHL = 0.41Log ₁₀ TP - 0.05	0.1267	<0.0001**	120
		Lz	Log ₁₀ CHL = 0.50Log ₁₀ TP - 0.23	0.1564	<0.0001**	120
Log ₁₀ CHL vs. Log ₁₀ SD	LS	Rz	Log ₁₀ SD = -0.09Log ₁₀ CHL + 0.30	0.0213	=0.0731	152
		Tz	Log ₁₀ SD = -0.17Log ₁₀ CHL + 0.57	0.2068	<0.0001**	180
		Lz	Log ₁₀ SD = -0.08Log ₁₀ CHL + 0.56	0.0168	=0.0912	171
	MS	Rz	Log ₁₀ SD = -0.28Log ₁₀ CHL + 0.57	0.3870	<0.0001**	239
		Tz	Log ₁₀ SD = -0.27Log ₁₀ CHL + 0.61	0.3732	<0.0001**	239
		Lz	Log ₁₀ SD = -0.23Log ₁₀ CHL + 0.58	0.2642	<0.0001**	239
	SS	Rz	Log ₁₀ SD = -0.11Log ₁₀ CHL + 0.31	0.0430	=0.0249*	117
		Tz	Log ₁₀ SD = -0.13Log ₁₀ CHL + 0.43	0.0701	=0.0039**	117
		Lz	Log ₁₀ SD = -0.14Log ₁₀ CHL + 0.48	0.0977	=0.0006**	117

** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$, LS: Large-size reservoirs, MS: Mid-size reservoirs, SS: Small-size reservoirs, Rz: Riverine zone, Tz: Transition zone, Lz: Lacustrine zone, TN: Total nitrogen, TP: Total phosphorus, SD: Secchi depth, CHL: Chlorophyll-a

외부기원으로 이루어지고, Tz나 Lz보다 부영양상태를 보이는 경향을 보이고 있었다. Tz는 유속이 감소하고, 광 제한이 완화되는 특징을 보였으며, 1차 생산력이 상대적으로 높은 특징을 나타냈다. Lz는 유속이 거의 없고, 투명도가 가장 높은 값을 보였으며 외부기원 영양물질보다는 내부기원 영양물질에 의하여 영양염류가 공급되고 있어서 빈영양상태를 띠는 경향을 보이고 있다(Thornton *et*

al., 1981).

9개 인공호의 Rz, Tz, Lz에서의 TN, TP, CHL, SD 수질 변수의 농도를 비교한 결과, TN, TP, CHL은 Rz에서 Lz으로 갈수록 농도가 낮아진 반면, SD는 Lz으로 갈수록 그 수치가 커져 TN, TP, CHL와 반대양상으로 나타났다(Fig. 9). 이와 같은 결과는 TN, TP, CHL가 SD에 직접적인 영향을 주고 있으며, 서로 유기적인 상관관계를 가지고 있는 것으로 사료되었다. 유역크기(대청호, 안동호, 황성호)에 따른 Rz, Tz, Lz에서 수질자료를 비교한 결과에서도, TN, TP, CHL, SS, EC는 Rz에서 Lz으로 갈수록 그 수치는 감소하는 양상을 보였다. 한편 대형인공호(대청호)에서 각 수질의 변동폭이 TP ($19 \sim 30 \mu\text{g L}^{-1}$), CHL ($6.2 \sim 12.2 \mu\text{g L}^{-1}$), SD ($1.8 \sim 3.7 \text{ m}$), SS ($2.5 \sim 5.1 \text{ mg L}^{-1}$) 모두 큰 폭으로 변화한 반면, 소형인공호(황성호)에서는 각 수질의 변동폭이 TP ($16 \sim 17 \mu\text{g L}^{-1}$), CHL ($6.5 \sim 12.3 \mu\text{g L}^{-1}$), SD ($1.9 \sim 2.6 \text{ m}$), SS ($3.2 \sim 3.5 \text{ mg L}^{-1}$) 모두 대형인공호에 비하여 좁은 것으로 나타났다(Fig. 10). 이는 종적 구배 특성이 유역 크기와도 관련성이 있으며, 구간 간 거리가 먼 대형인공호의 경우 Rz, Tz, Lz의 특성이 뚜렷하게 구분되는 반면, 구간간 거리가 좁은 소형인공호의 경우에는 Rz, Tz, Lz의 구분이 뚜렷하지 않기 때문에 나타난 것으로 사료되었다. SD는 TP, CHL과 반대 양상을 보였으며, 대청호 Rz에서 SD가 1.8m로 가장 작았다가 Lz에서

Table 4. The distance between riverine zone (Rz) and transition zone (Tz) and between transition zone (Tz) and lacustrine zone (Lz).

Reservoir	Distance	
	Rz~Tz (km)	Tz~Lz (km)
CjR	10.4	38.5
DcR	24.8	43.0
SyR	30.1	52.0
AdR	6.1	14.1
YdR	9.4	15.9
JaR	6.8	15.0
HcR	6.3	8.7
HsR	4.0	8.3
BaR	3.4	7.1

CjR: Chungju Reservoir, DcR: Daecheong Reservoir, SyR: Soyang Reservoir, AdR: Andong Reservoir, YdR: Yongdam Reservoir, JaR: Juam Reservoir, HcR: Hapcheon Reservoir, HsR: Hoengseong Reservoir, BaR: Buan Reservoir

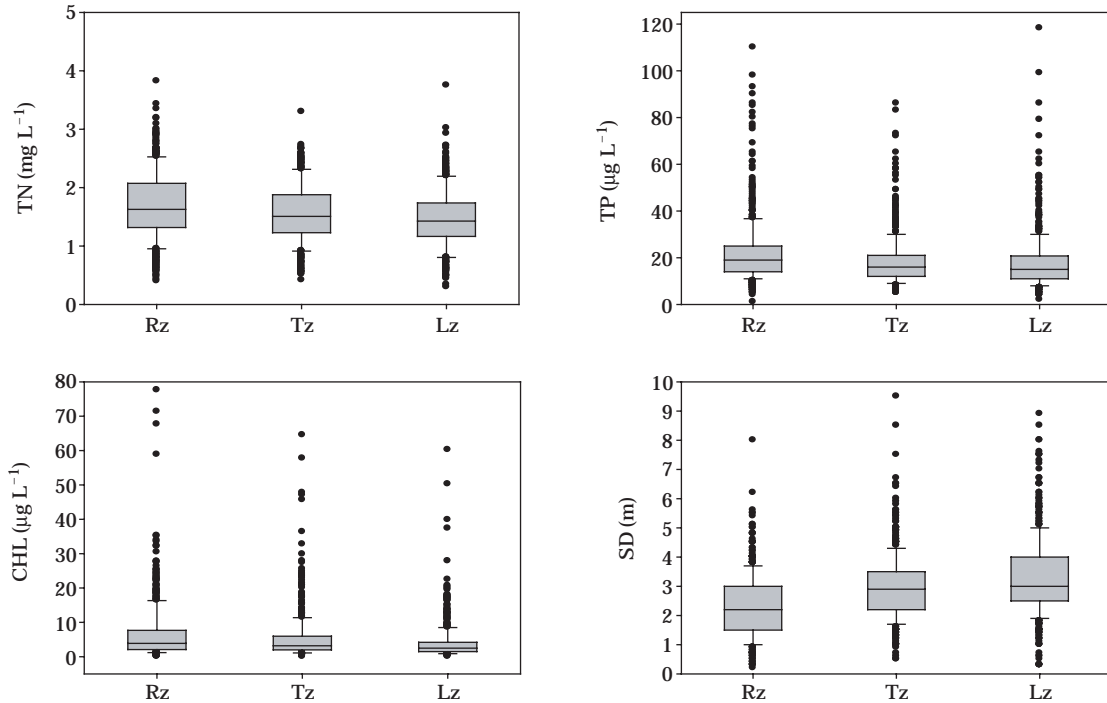


Fig. 9. Variation of trophic conditions in the three zones (Rz, Tz, and Lz).

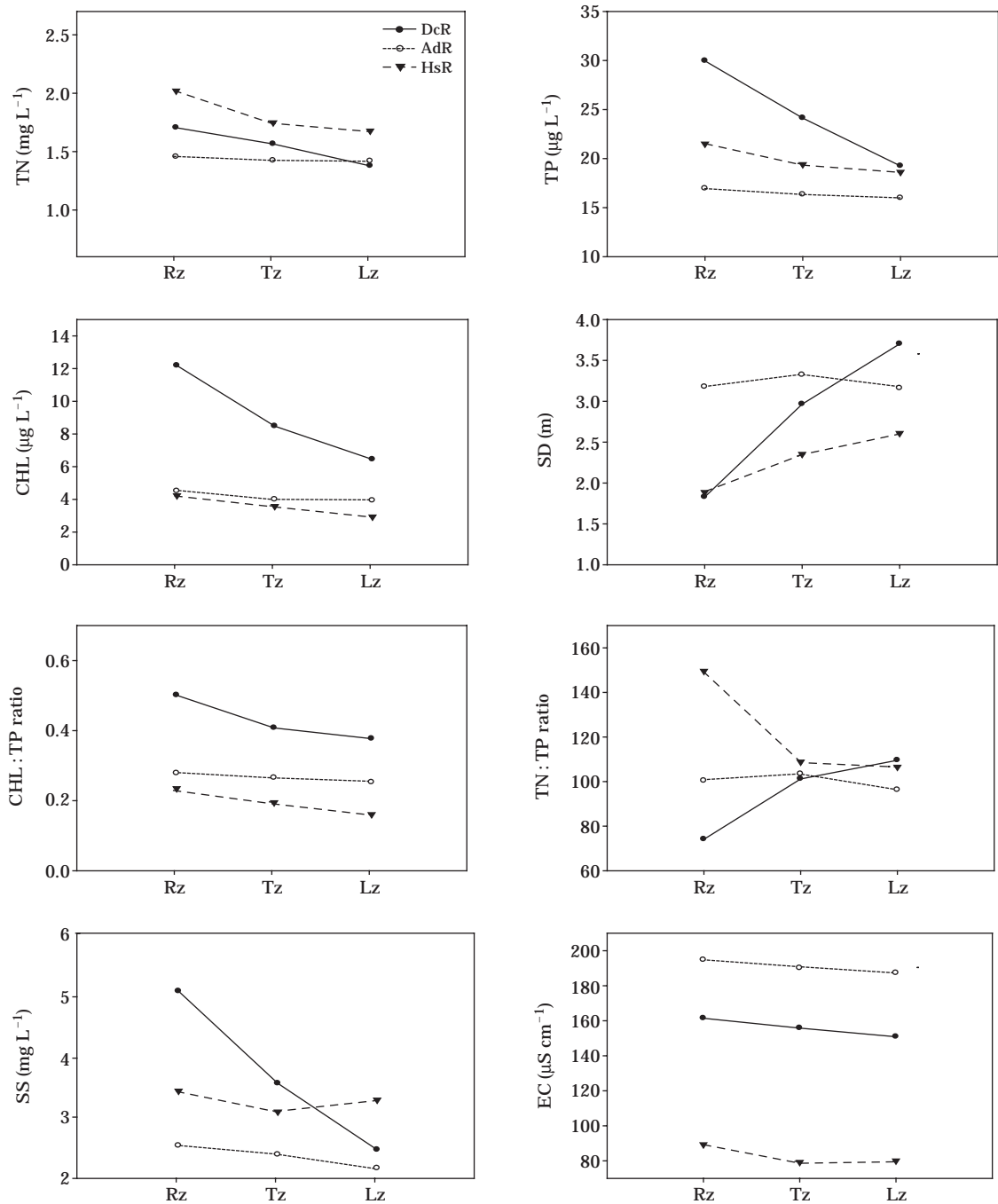


Fig. 10. Spatial variations of water quality parameters in the three zones of Daechong reservoir (DcR), Andong Reservoir (AdR), and Hoengseong Reservoir (HsR).

3.7 m로 가장 크게 나타났는데 (Fig. 10), 이는 수심이 깊은 대청호의 Lz에서 영양물질이나 부유물질의 침강작용에 의해서 SD가 크게 증가한 것으로 사료되었다. EC는 안동호에서 187.8~195.2 µS cm⁻¹로 높게 나타났으며, 횡성호에서 80.8~89.4 µS cm⁻¹로 낮게 나타났다. 이는 횡성

호의 강우량이 1,756 m²로 대청호 (1,400 m²), 안동호 (1,378 m²)에 비하여 많기 때문에 희석효과에 의해서 EC가 낮아진 것으로 사료되었다. CHL : TP ratio는 3개의 인공호 모두 Rz에서 Lz로 갈수록 감소하는 것으로 나타나 하루로 갈수록 CHL은 TP에 대한 의존도가 높아지는 것

을 간접적으로 반영하였다. 유역 면적이 큰 대형인공호에서 TP의 의존도는 더 큰 것으로 나타났으며, 유역면적이 작아질수록 의존도도 낮아지는 것을 나타냈다(Fig. 10). TN:TP ratio에서 유역 크기별로 비교한 결과, TN:TP ratio 값이 70 이상으로 TN보다는 TP에 의하여 1차 생산력이 영향을 받는 것으로 사료되었다. 대청호에서는 Lz로 갈수록 증가하는 일반적인 양상을 보인 반면, 안동호와 횡성호에서는 뚜렷한 양상을 보이지 않았다(Fig. 10). 이는 인공호의 종적구배 특성은 구간사이의 거리가 멀수록 더욱 뚜렷한 특성을 나타내는 반면, 구간사이의 거리가 좁을수록 구간별 뚜렷한 특성을 보이지 않기 때문인 것으로 사료되었다.

적 요

본 연구는 우리나라 인공호들에서 연별·계절별 수질변이 특성 및 상·하류 간 수질의 종적구배 특성을 파악하기 위해 2003~2007년의 자료(물환경정보시스템)의 월별, 연별, 공간별(유수대, 전이대, 정수대)의 수질자료를 비교 평가하였다. 10개의 물리적, 화학적, 생물적 수질 변수를 이용하였으며, 인공호들의 일반 수질 특성, 수리수문학적 수질 특성, 시간적 수질변이 특성, 공간적 수질 변이 특성을 분석하였다. 저수면적, 유역면적, 유입량, 방류량을 기준으로 9개의 인공호에 대하여 유사도 분석을 실시하였으며, 그 결과 대형인공호(충주호, 대청호, 소양호), 중형인공호(안동호, 용담호, 주암호, 합천호), 소형인공호(횡성호, 부안호)로 크게 3개 그룹으로 나누어졌고, 유역 크기별로 비슷한 수질 양상을 나타냈다.

홍수의 해(2003년)와 가뭄의 해(2005년)로 대별하여 수질 자료를 분석한 결과, pH, DO, BOD, SS, TN, TP, CHL, EC는 Rz에서 Lz으로 갈수록 값이 감소하였고, SD는 LZ으로 갈수록 값이 증가하였다. 이러한 결과는 인공호내의 영양물질과 부유물질의 침강작용 및 광제한으로 인한 CHL의 감소가 SD 값의 증가에 영향을 미친 것으로 사료되었다. 각 지점별 pH, DO, SS, SD, EC는 가뭄의 해인 2005년에 컸고, BOD, COD, TN, TP, CHL은 홍수의 해인 2003년에 높게 나타났다. 공간적인 수질분포 특성을 분석하기 위하여 9개 인공호의 Rz, Tz, Lz에서의 TN, TP, CHL, SD의 수치를 비교하였다. 그 결과, TN, TP, CHL은 Rz에서 Lz으로 갈수록 침강작용에 의해 그 값이 감소하였고, SD는 반대 양상을 보였다. TN과 TP 사이에서 상관관계를 분석한 결과, 두 수질 변수 사이의 상관성은 유의하지 않은 것으로 나타났다. 대형 인공호의 CHL-SD 모

델에서 Rz, Lz의 경우를 제외하고, TP-CHL, CHL-SD는 유의한 상관성이 있는 것으로 나타났으며, TP-CHL의 상관관계는 중형인공호의 Rz ($R^2=0.2401, p<0.0001, N=239$)에서 유의한 상관성을 보이는 것으로 나타났다. CHL-SD의 상관관계에서도 중형인공호가 가장 높게 나타났으나 TP-CHL의 상관관계와는 반대되는 역상관 관계를 나타냈다. 대청호, 안동호, 횡성호를 Rz, Tz, Lz에서 수질자료를 분석한 결과, 대청호에서 수질자료의 값이 구간별로 큰 변이성을 보이는 것으로 나타났는데, 이는 대청호가 대형인공호로서 구간 간 거리가 멀고, 수심이 깊어 Rz, Tz, Lz의 구간 간 특성이 뚜렷하게 구분된 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단 Eco-STAR project [과제명: 호수생태계 통합적 건강성 평가기법 개발(08-IV-11)]의 지원으로 수행되었기에 이에 감사합니다.

인 용 문 헌

국토해양부. 2006. 수자원장기종합계획. pp. 8-14.
 김미숙, 정영륜, 서의훈, 송원섭. 2002. 낙동강 부영양화와 수질 환경요인의 통계적 분석. 한국조류학회지 17(2): 105-115.
 김범철, 김윤희. 2004. 아시아 몬순지역의 대형댐(소양호)에서의 인 순환과 2차원모델의 적용. 한국육수학회지 37(2): 205-212.
 김재윤. 1996. 대청호 유역의 수질변동 특성 및 상관성에 관한 연구. 한국환경과학회지 5(6): 163-170.
 김재윤. 2003. 총인 부하량을 이용한 인공호의 부영양화 평가. 한국환경과학회지 12(7): 689-695.
 농림부 농업기반공사. 2000. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.
 박유미, 이의행, 이상재, 안광국. 2009. 탐정저수지의 부영양화 특성 및 주요 변수 간의 상호관계. 한국하천호수학회지 42(3): 382-393.
 박종근. 2005. 대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가. 한국육수학회지 38(3): 382-392.
 박희정, 안광국. 2007. 우리나라 대형인공호에서 영양상태 평가 및 수질변수를 이용한 경험적 모델 구축. 한국육수학회지 40(1): 14-30.
 배대열, 양은찬, 정승현, 이재훈, 안광국. 2007. 대청호에서 종적 구배에 따른 영양염류 및 엽록소의 역동. 한국육수학회지 40(2): 285-293.
 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 한국육수학회지 38(1): 54-62.
 여준호. 2004. 댐건설과 관련된 환경·사회적 피해사례. 환경포

- 림 **8(19)**: 1-8.
- 이순철, 한정호, 안광국. 2008. 상류댐 건설에 따른 대청호 부영양화에 대한 기능 변화. *한국하천호수학회지* **41(3)**: 348-359.
- 이혜원, 안광국, 박석순. 2002. 소양호 표층수 수질의 연별 추이 및 상·하류 이질성 분석. *한국육수학회지* **53(1)**: 36-44.
- 최지용, 김홍년. 2003. 환경친화적 댐 관리를 위한 사례연구. 한국환경정책평가연구원.
- 허우명, 권상용, 김범철, 박주현. 2000. 안동호 수질의 장기적인 변동. *한국육수학회지* **33**: 141-151.
- Allan, J.D. 1995. Modification of running waters by Human-kind, p. 305-321. *In: Stream ecology : structure and function of running waters* (Allan, J.D. and M.C. Maria eds.). Chapman and Hall, London.
- An, K.-G. 2003. Spatial and temporal variabilities of nutrient limitation based on in situ experiments of nutrient enrichment bioassay. *Journal of Environmental Science and Health Part A* **38**: 687-882.
- An, K.-G., J.W. Seo and S.S. Park. 2001. Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung reservoir. *Korean Journal of Limnology* **34(4)**: 327-336.
- An, K.-G. 2000a. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Korean Journal of Limnology* **33(3)**: 222-229.
- An, K.-G. 2000b. The impact of monsoon on seasonal variability of basin morphology and hydrology. *Korean Journal of Limnology* **33(4)**: 342-349.
- An, K.-G. 2001. Hydrological significance on interannual variability of cations, anions, and conductivity in a large reservoir ecosystem. *Korean Journal of Limnology* **34**: 1-8.
- An, K.-G. and D.S. Kim. 2003. Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake fish-farms. *Water, Air, and Soil Pollution* **149**: 27-49.
- An, K.-G. and J.R. Jones. 2000a. Temporal and spatial patterns in salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **436**: 179-189.
- An, K.-G. and J.R. Jones. 2000b. Factors regulating bluegreen dominance in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **432**: 37-48.
- An, K.-G. and S.S. Park. 2002. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-*a* total phosphorus models in reservoirs: a case study. *Ecological Modelling* **152(2-3)**: 191-203.
- Betlinsky, M. 1980. Estimating the productivity of lakes and reservoirs, p. 411-453 *In: The functioning of freshwater ecosystems* (LeCren, E.D. and R.H. Lowe-McConnell, eds.). Cambridge University Press, London, England.
- Brylinsky, M. and K.H. Mann. 1973. An analysis of factors governing productivity in lakes and reservoirs. *Limnology Oceanography* **18**: 1-14.
- Edwards, R.W. and D.T. Crisp. 1982. Ecological implications of river regulation in the United Kingdom, p. 843-865. *In: Gravel-Bed Rivers* (Hey, R.D., J.C. Bathurst, and C.R. Thorne, eds.). John Wiley and Sons, Chichester.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state in 30 Swedish waste receiving lakes. *Archiv Hydrobiologia* **89**: 189-207.
- Jones, J.R., M.F. Knowlton and K.-G. An. 1997. Developing a paradigm to study and model the eutrophication process in Korean reservoirs. *Korean Journal of Limnology Special Issue* **82**: 1-9.
- Kimmel, B.L. and A.W. Groeger. 1984. Factors controlling phytoplankton production in lake and reservoirs. U.S. EPA 440/5/84-001 277-281.
- Krenkel, P.A., G.F. Lee and R.A. Jones. 1979. Effects of the impoundments on downstream water quality and biota, p. 289-306. *In: The Ecology Of Regulated Stream* (Ward, J.V. and J.A. Stanford, eds.). Plenum Press, NY.
- Macan, T.T. 1961. Factors that limit the range of freshwater animals. *Biological Reviews* **36**: 151-198.
- Macan, T.T. 1974. *Freshwater Ecology*. John Wiley, NY.
- Merritt, R.W. D.H. Ross and G.J. Larson. 1982. Influence of stream temperature and seston on the growth and production of over Wintering larval black flies (diptera: *Simuliidae*). *Ecology* **63(5)**: 1322-1331.
- Moss, B. 1980. *Ecology of fresh waters*, Blackwell Scientific Publications, London.
- Petts, G.E. 1984. *Impounded rivers, perspectives for ecological management*. John Wiley and Sons, New York, NY.
- Rada, R.G. and J.C. Wright. 1979. Factors affecting nitrogen and phosphorus levels in canyon ferry reservoir Montana and its effluent waters. *Northwest Science* **53**: 213-220.
- Schindler, D.W. 1978. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwater. *Limnology Oceanography* **23**: 478-496.
- SPSS. 2004. SPSS 12.0 KO for windows. Apache software foundation.
- Stuckenberg, B.R. 1969. Effective temperature as an ecological factor in Southern Africa. *South African Journal of Zoology* **4(2)**: 145-197.
- Sweeney, B.W., R.L. Vannote and P.J. Dodds. 1986. The relative importance of temperature and diet to larval development and adult size of the winter stonefly. *Soyedina Carolinensis* (Plecoptera, Nemouridae). *Freshwater Biology* **16**: 39-48.

- Thornton, K.W. 1990. Perspectives on reservoir limnology. p. 1-4. *In: Reservoir Limnology: ecological perspectives* (Thornton, K.W. *et al.* eds.). John Wiley & Sons, New York.
- Thornton, K.W., R.H. Kennedy, J.H. Carrol, W.W. Walker, R.C. Gunkel and S. Ashby. 1981. Reservoir sedimentation and water quality. *Amer. Soc. Civil Engr.*, New York. pp. 654-661.
- Vannote, R.L. and B.W. Sweeney. 1980. Geographical analysis of thermal equilibria: a conceptual model for evaluating the effect of natural and modified thermal regimes on aquatic insect communities. *American Naturalist* **115**(5): 667-693.
- Ward, J.V. 1982. Ecological aspects of stream regulation: responses in downstream lotic reaches. *Water Pollution and Management Reviews New Delhi* **2**: 1-26.
- Wetzel, R.G. 1990. Reservoir ecosystems: conclusions and speculations. p. 227-238. *In: Reservoir Limnology: Ecological perspectives* (Thornton, K.W. *et al.* eds.). John Wiley & Sons, New York.

(Manuscript received 16 May 2010,
Revision accepted 16 June 2010)