

안동호와 임하호에서 관측한 장기 수질자료의 비교 분석

안광국* · 박선재 · 최성모 · 박종석

(충남대학교 생명과학부)

Comparative Analysis of Long-term Water Quality Data Monitored in Andong and Imha Reservoirs. An, Kwang-Guk*, Sun-Jae Park, Seong-Mo Choi and Jong-Seok Park (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The objectives of this study were to analyze trends of temporal water quality and trophic state in Andong and Imha reservoirs using chemical dataset during 1993~2004, obtained from the Ministry of Environment, Korea. According to long-term limnological analyses, Suspended solids (SS) in Imha Reservoir were 2~8 fold greater, than those in SS of Andong Reservoir, and the high solids increased total phosphorus (TP) and biological oxygen demand (BOD₅) and decreased the transparency, measured as Secchi depth (SD). Chlorophyll-*a* (CHL-*a*) increased little or decreased slightly in the both reservoirs during the high solids, resulting in reduced yields of CHL-*a* : TP ratios. The deviation analysis of Trophic State Index (TSI) in Imha Reservoir showed that about 70% of TSI (CHL-*a*)-TSI (SD) and TSI (CHL-*a*)-TSI (TP) values were less than zero and the lowest values were -60, indicating that influence of inorganic solids (or non-volatile solids) on phytoplankton growth was evident in Imha Reservoir and the impact was greater than that of Andong Reservoir. Inorganic solids in Imha Reservoir resulted in light limitation on phytoplankton growth and thus contributed variations in the relations among three parameters of trophic state index. Especially, seasonal data analysis of nutrients in both reservoirs showed that during the postmonsoon, mean TP concentration was Imha Reservoir greater in than that in Andong Reservoir. The higher TP concentration was mainly attributed to increases of inorganic solids from soil erosions and non-point source inputs within the watershed. The high inorganic turbidity in Imha Reservoir should be reduced for the conservation of water quality for, especially a tap water supply.

Key words : water quality, suspended solids, phosphorus, reservoir, chlorophyll-*a*

서 론

안동 다목적댐과 임하 다목적댐은 각각 1976년과 1991년에 완공된 대형 인공호로서 경상도 지역에 식수, 농업용수 및 공업용수로서 주로 이용되고 있으며 전력을 공급하고 있다. 특히, 2000년 이래 임하호에서는 무기성

부유물 (Inorganic suspended solids)의 과다유입으로 인해 탁도의 급격한 증가를 가져오고 있고(허 등, 2000), 이로 인한 생태계 변화 및 정수처리 문제 등이 큰 관심사가 되고 있다. 본 연구 대상호수 이외에 다른 몇몇 우리나라의 대형 인공호들에서 수질 문제는 1980년대 후반 이후 본격적으로 논의되어 왔으며, 호수의 수질 악화는 주로 영양염류의 과다 유입에 따른 것으로서(김 등,

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

1988, 1997, 1998, 1999; An and Kim, 2003), 영양염류의 유입원은 주로 유역내의 산림, 축사 및 농경지 등의 비점 오염원과 호수내의 가두리 양식어장으로 알려져 왔다(허 등, 1992, 2000; 한국수자원공사, 1996). 호수 유역으로부터의 영양염류 유입은 대부분 몬순 장마기에 발생하며 (An, 2000; An *et al.*, 2001), 특히 인(phosphorus)은 우리나라 주요 대형 인공호 수체내 식물성플랑크톤 성장을 위한 1차적인 제한 영양염류(limiting nutrient)로 널리 알려져 있어서(An and Park, 2002; An and Jones, 2002; An, 2003), 호수 부영양화와 영양단계 판정 및 식물성플랑크톤 생체량의 경험적 모델 지표로 종종 이용되어 왔다(Carlson, 1977; An and Park, 2002; An and Kim, 2003).

상기 대형 인공호들에서의 수화학적 특성 변화는 우리나라의 수리수문학적 특성에 직접적으로 영향을 주는 하절기 몬순강우의 강도에 의해 조절되는 것으로 보고되고 있다. 총 연평균 강우의 반 이상이 우기인 7~8월 사이에 집중되어 호수의 영양염류 유입량을 결정하기 때문에 호수의 이화학적 변화는 이런 장마의 영향으로 국외 호수보다 국내에서 더 복잡하게 나타날 수 있음이 지적되었다(안, 2000a, b, 2001). 따라서 우리나라의 대형 인공호의 수질 상태를 판단하기 위해서는 다음과 같은 점이 고려되어야 한다. 첫째, 모든 대형 호수가 하천에 인공댐을 건설하여 형성되었기 때문에 상, 하류간의 수질변이가 크게 나타날 수 있고 이를 수질 평가 시 고려해야 한다. 둘째, 여름 집중형의 강우현상으로 인한 호수내 영양염류의 유입 및 이온변화(An, 2001)가 계절에 따라 크게 달라질 수 있기 때문에 수질 평가시 장마기와 전·후를 구분하여야 한다(Jones, *et al.*, 1997). 대형 인공호수에서 나타나고 있는 수질의 시·공간적 변이의 중요성은 많은 연구(김 등, 1998, 1999; An, 2003)에서 지적되어 오고 있다.

안동호 및 임하호에서는 이화학적 수질특성, 식물성플랑크톤의 종 조성 및 생체량 변화, 수계 오염부하량 및 부영양도 상태 등에 대한 다각적인 연구가 수행된 바 있다. 안동호의 영양상태(Trophic state)에 대한 육수학적 연구는 박 등(1988), 허 등(2000) 및 Kim *et al.*(2001)에 의해 보고된 바 있다. 상기에서 언급한 우리나라 하절기 강우 특성에 대한 영양상태 변화를 연구한 박 등(1988)에 따르면, 안동호는 Forsberg와 Ryding(1980)의 부영양도 분류방식에 의거할 때 총인, 엽록소 *a*, 투명도의 항목분석에서 중영양-부영양 상태로 판정되었고, Carlson(1977)의 영양상태지수(Trophic State Index: TSI)에 의거할 때 중영양 상태로 판정되었다. 또한, 본 호수에서 Vollenweider

(1975) 기준에 의해서 엽록소 *a*와 총인의 유입을 각각 20%와 80% 감소시킨다면, 안동호 수질은 중영양호에서 빈영양호가 될 것이라고 보고한 바 있다. 안동호에서 1993~1998년까지의 장기적인 수질 변화를 연구한 허 등(2000)에 따르면, 본 호수의 영양상태는 Forsberg and Ryding(1980)의 기준과 US EPA(1976) 기준에 따른 총인, 총질소(TN), 엽록소 *a* 농도로부터 중영양-부영양상태로 분석하였다. Kim *et al.*(2001)은 TSI 결과로부터 안동호를 중영양호로 분류하였다. 이 밖에도 안동호에 관한 연구는 오 등(1994)에 의한 안동호와 임하호 주변지역의 농작물 재배 실태 조사와 이 등(2002)에 의한 안동호 상류 운곡천의 이화학적 수질특성과 식물성플랑크톤 군집 특성과 같은 연구가 수행된 바 있다. 한편, 임하호의 영양상태에 관한 연구에 따르면, 김 등(1995)은 임하호에서 출현한 식물성플랑크톤 군집분석과 우점종 및 이화학적 요인에 대한 비교분석에서 5월에는 빈영양호 또는 중영양호로 조사 되었으나, 7월 이후에는 전 지역에 있어 중영양호에서 부영양호로 전환되는 양상을 나타낸다고 보고하였다. 박 등(1999)은 여름철 임하호에서 식물성플랑크톤 군집의 비교 연구를 호수의 표층만이 아닌 층상별 군집 구조를 비교 분석하였다. 이 밖에도 임하호 수계에 대한 연구는 김과 정(1993)의 임하호의 식물성플랑크톤 군집분석, 류와 이(1995)의 임하호 저니침전물 성분에 관한 조사, 김 등(1997)의 임하호의 식물성플랑크톤 군집구조 등이 있다.

상기 두 개의 호수에 대한 연구는 개별적으로 여러 연구자들에 의해 이루어져 있으나 동일 수계내에 위치하는 안동호와 임하호의 비교 연구는 전무한 실정이다. 또한, 최근 환경부의 수질모니터링에 의한 수 많은 실측자료에도 불구하고, 장기적 연별변화, 계절별 특성 등에 대한 전반적 특성에 대한 자료 분석이 극히 미미한 상태이다. 특히, 최근 임하호에서 탁수에 의한 생태학적, 취수과정의 경제적인 문제가 발생하면서 무기성 부유물의 현격한 증가 시기 및 원인규명에 대한 문제가 학계 및 사회 관심의 대상이 되고 있어서 인접 수계내의 두 호수의 장기적 변동 및 계절변동에 대한 추이를 밝히는 것이 핵심 관건으로 떠오르고 있다.

본 연구의 목적은 첫째, 인근 수계내의 안동호와 임하호의 장기적 이화학적 수질 특성변화 분석, 둘째, 최근 임하호에서 문제가 되는 부유물의 시간적 역동성 및 변이 양상, 셋째, 영양상태 변이 분석법(Trophic State Index Deviation)에 의한 현 상태 요인분석을 통하여 두 호수간의 육수학적 특성 및 변화 양상을 비교 분석하는 것이다.

재료 및 방법

1. 분석 대상 항목

본 연구를 위해 이용된 자료는 1993년부터 2002년까지 10년 동안 월별로 안동호와 임하호의 상·중·하류 지점 표층수에서 측정된 투명도(Secchi transparency: SD), pH, 부유물(suspended solid: SS), 생물학적 산소요구량(biological oxygen demand: BOD), 총인(total phosphorus: TP), 총질소(total nitrogen: TN), 엽록소-a(chlorophyll-a, Chl), 전기전도도(electrical conductivity: Cond)의 환경부 자료를 분석하였다. 본 지역의 월별, 연별 강우분포 특성분석은 기상청에서 획득한 안동지역 강수자료를 이용하였다.

2. 지점 현황 및 수리수문학적 특성

이화학적 수질자료는 Fig. 1에서 제시된 바와 같이 환경부에서 월별로 모니터링 되는 안동호 3개 지점 및 임하호 2개 지점을 이용하였다.

- St. 1 경상북도 안동군 임동면 마동(A1, 안동호 상류부)
- St. 2 경상북도 안동군 임하면 노산동(A2, 안동호 중류부)
- St. 3 경상북도 안동시 성곡동 댐 앞(A3, 안동호 하류부)
- St. 4 경상북도 안동시 임하면 중평리 중평교(I1, 임하호 중류부)
- St. 5 경상북도 안동시 천전리 댐 앞(I2, 임하호 하류부)

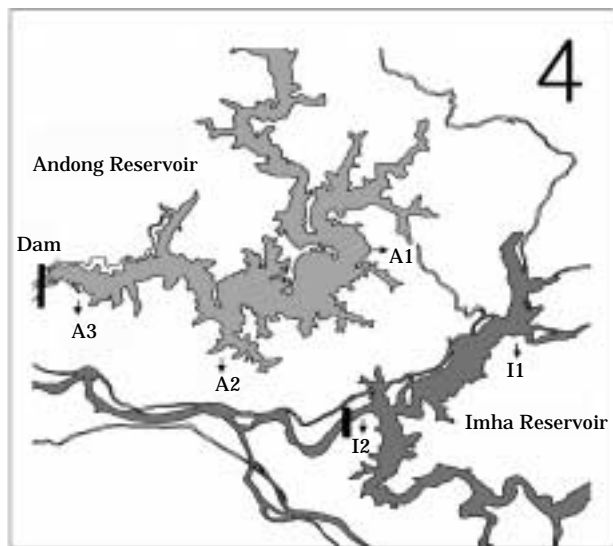


Fig. 1. The sampling sites of Andong Reservoir (A1, A2, and A3) and Imha Reservoir (I1 and I2) monitored by the Ministry of Environment, Korea.

안동댐은 낙동강 하구로부터 약 340 km 상류인 경북 안동시 성곡동에 위치하고 있으며 최대수심 60 m, 평균수심 19.4 m, 수체류시간이 1.33년, 저수용량 12억 4천 8백만 m³의 댐이다(한국수자원공사, 1996). 낙동강 유역의 수자원 종합개발사업의 일환으로 건설된 안동댐은 하류지역의 4,576 km²에 달하는 농경지에 연간 3억 m³의 농업용수를 공급하고, 부산과 대구 등 대도시와 마산과 구미 등 공업단지에 연간 4억 5천만 m³의 생·공용수를 공급하며, 또한, 연간 1억 5천 8백만 kWh의 전기를 생산하고 있다. 임하댐은 낙동강의 첫 번째 지류인 반변천의 상류 18 km 지점인 경북 안동시 임하면 천전리에 위치하고 있으며 댐높이 73 m, 길이 515 m, 저수용량 5억 9천 5백만 m³의 댐으로서 용수공급, 하류지역의 홍수피해 경감 및 연간 약 9천만 KW의 전기를 생산 공급하고 있다.

3. 영양상태지수 분석

영양상태지수(Trophic State Index) 분석은 엽록소-a(Chlorophyll-a, CHL-a), 총인(Total phosphorus) 및 투명도(Secchi transparency)의 변수를 이용하였고, 세부적인 연산식은 Carlson(1977)에 의거하였다. 또한, 1차 생산량에 대한 영양염류 제한효과(Nutrient limitation), 무기물(inorganic solids) 혹은 광제한 효과(Light limitation)를 분석하기 위해 영양상태지수 편이 분석법(Trophic State Index Deviation)을 이용하였고, 이에 대한 연산식은 Carlson(1991)에 의거하여 분석하였다.

4. 자료분석

본 연구에 사용된 조사 자료는 강우특성에 따른 수질변이의 자료분석을 위해 장마전기는 5~6월, 장마기는 7~8월, 장마후기는 9~10월의 3단계로 대별하여 분석하였다. 또한, 몬순강우의 강도에 따라 집중 강우해(Intense monsoon year, 300 mm 이상), 가뭄의 해(Drought monsoon year, 150 mm 이하), 중간강우 해(Intermediate monsoon year, 200~250 mm)로 대별하여 몬순강우에 의한 영양염류 및 이온변화 양상을 분석하였다. 공간적으로는 인공호의 본류를 댐에서부터의 거리를 기준으로 하류, 중류, 상류로 구분하여 종간구배(Longitudinal gradient) 특성을 분석하였다.

결과 및 고찰

두 호수가 위치한 안동지역의 연별 총 강우량은 1993, 1998, 1999, 2002년이 1,200 mm 이상으로 다른 해에 비

해 높은 강우를 보인 반면, 1994, 1995, 1996, 2001년에는 900 mm 이하로 적은 강우를 보였으며, 특히 1994, 1995년은 특히 가뭄의 해로 사료되었다 (Fig. 2a). 한편, 연강우 특성에 대한 하절기 7~8월의 몬순강우 영향 분석에 따르면, 1993, 1998, 2002에는 몬순집중 강우해 (Intense monsoon year)로 나타났고, 1999년은 높은 강우에도 불구하고, 하절기 몬순 강우 영향은 낮은 것으로 나타났다 (Fig. 2b). 10년간의 연 강우와 하절기 강우분포의 비교에 따르면, 1996년과 1999년에서 일부의 차이를 보였으며, 연간 총 강우량은 하절기 강우과 1차 함수관계 ($p < 0.05$, $n=10$)를 보였다. 그림 Fig. 2c에서 보여주는 홍수의 해 (1998), 가뭄의 해 (1994), 및 그의 중간의 해 (1997)의 비교분석에 의하면 강우는 1~6월, 9~12월은 각각 다른 강우의 해에 강우량에서 차이를 거의 보이지 않았고, 7~8월의 단 기간만 뚜렷한 차이를 보여 (Fig. 2c), 본 수계의 연 강우는 하절기의 7~8월의 몬순 강우량에 의해 직접적으로 조절되는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 이런 하절

기의 몬순강우 특성은 이전의 안 (2001) 및 An and Jones (2002) 연구에서와 일치한다.

안동호와 임하호에서 1993~2003년의 기간 동안 평균 전기전도도 값은 각각 $160 \mu\text{s cm}^{-1}$ 및 $164 \mu\text{s cm}^{-1}$ 로서 거의 차이를 보이지 않았으며, 전기전도도의 최대-최소의 범위는 전자의 경우 $104 \sim 228 \mu\text{s cm}^{-1}$, 후자의 경우 $77 \sim 305 \mu\text{s cm}^{-1}$ 를 보였다 (Fig. 3a). 즉, 임하호에서 전기전도도의 경우 최대:최소비는 3.96으로서 안동호(최대:최소비=2.19)에 비해 큰 시간적 변이를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 임하호의 경우 계절적으로 하절기 강우가 집중된 1993, 1998년의 경우 강우가 집중된 7~8월 이후에 $70 \mu\text{s cm}^{-1}$ 이하까지 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 3a), 하절기동안 이런 전기전도도의 급격한 감소 현상은 이전의 타 호수에서 연구 (An, 2001; An et al., 2001)와 일치하며, 감소원인은 강우에 의한 이온 희석현상에 의한 것으로 나타났다. 이런 기간 동안 pH는 6.7 이하로 급격히 낮아져 빗물에 의해 이온희석 현상과 함께 약 산성으로 변하는 것으로 나타났다 (Fig. 3d) 반면, 임하호에서 강우가 빈약한 1994, 1995, 1996년의 경우 pH는 증가하였으며, 동일 기간에 안동호에 비해 수소이온농도가 높게 나타났다.

부유물 농도 (Suspended solids)는 두 호수에서 몇몇 변이 시기를 제외하고는 일반적으로 4 mg L^{-1} 이하의 값을 보였다 (Fig. 3b). 특히 총부유물의 농도가 급격히 증가한 시기는 이온이 최대치로 희석되는 시기와 일치하였는데, 특히 연 강우 중 하절기 강우가 집중된 1993년 및 1998년에 총부유물 농도는 10 mg L^{-1} 이상의 값을 보였다 (Fig. 3b). 이런 집중 강우기 동안의 높은 부유물 농도는 조류등에 의한 유기성 부유물 (organic solids)의 영향보다는 무기성 부유물 (inorganic solids)의 영향이 더 클 것으로 사료되었으며, 이런 특성은 안동호보다는 임하호에서 뚜렷하게 나타났다. 무기성 부유물의 급격한 증가는 대청호 및 소양호 등의 대형인공호에서 집중강우기에 종종 관찰되었으며, 이런 기간 동안 중층수에서 10 NTU 이상의 탁수가 나타났다 (안, 2001; An and Jones, 2002). 반면에, 1994년의 가을에 부유물 농도가 12.3 mg L^{-1} 까지 증가한 것은 1994년의 가뭄의 해 동안 강우가 거의 없던 점을 감안한다면 부유물 농도의 대부분이 유기성 부유물 농도 증가에 의한 것으로 사료되었으며, 주로 우리나라 대형인공호에서 종종 발생하는 가을철의 수화현상과 일치하는 것으로 나타났다.

생물학적 산소요구량 (BOD)의 장기간 평균 농도는 임하호에서 1.9 mg L^{-1} (범위: $0.6 \sim 4.9 \text{ mg L}^{-1}$), 안동호에서 1.4 mg L^{-1} (범위: $0.9 \sim 2.1 \text{ mg L}^{-1}$)로서 BOD의 변화폭은

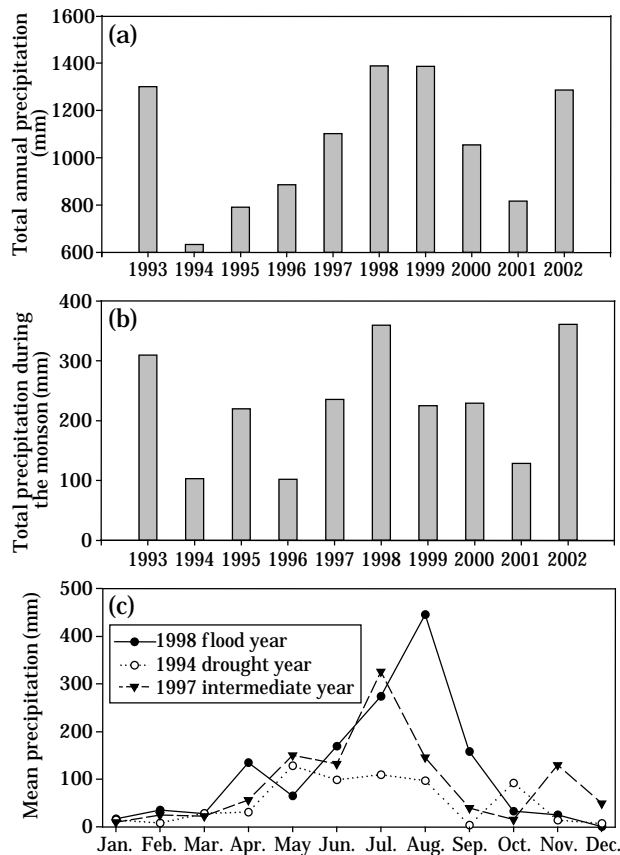


Fig. 2. Total annual precipitation (a), total precipitation during summer monsoon (b), and monthly precipitation (c).

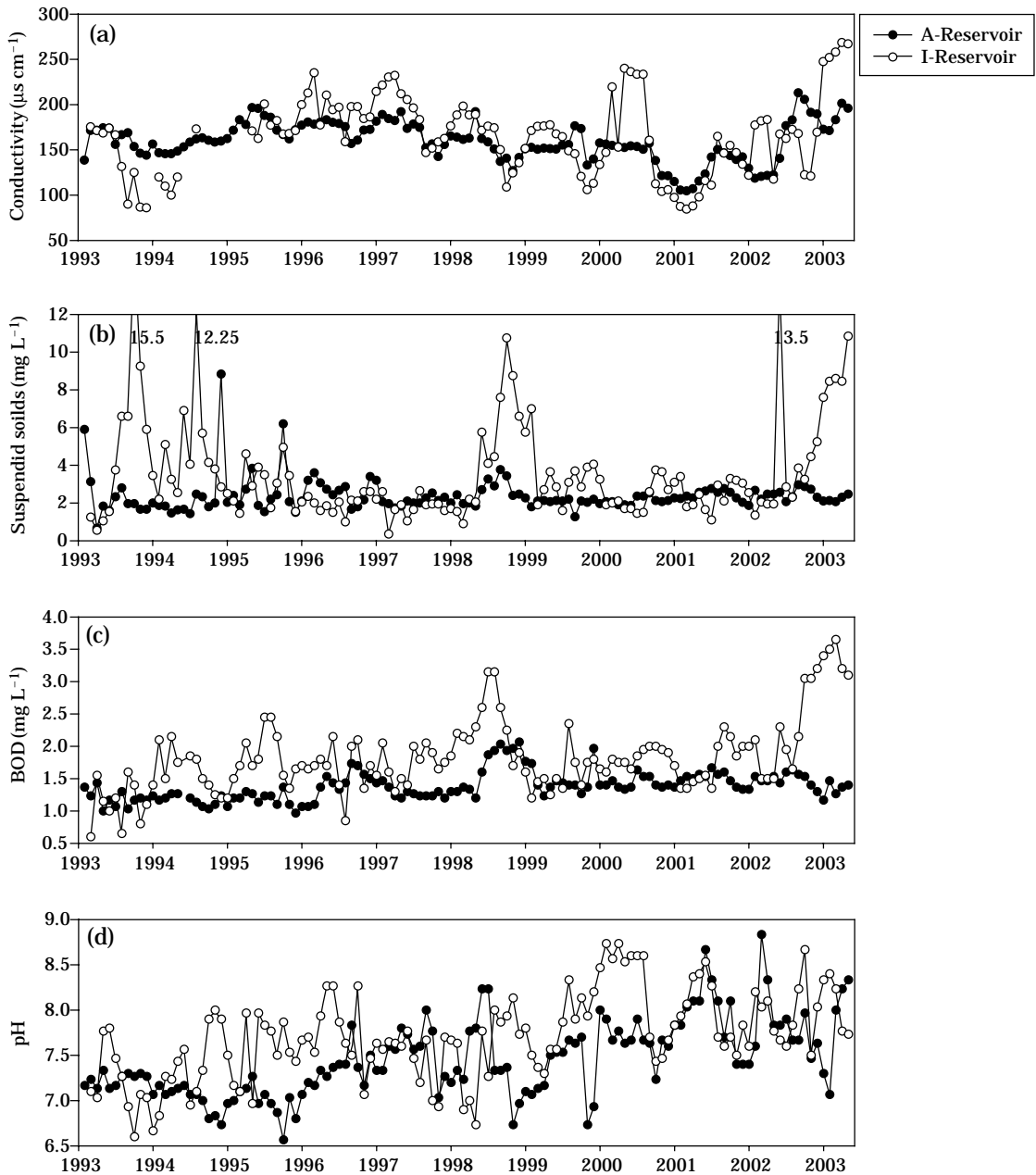


Fig. 3. Long-term variation of conductivity, suspended solids, BOD, and pH during 1993~2003.

임하호가 크게 나타났으며, 대부분의 BOD 절대농도 값은 안동호보다 임하호에서 높게 나타났다(Fig. 3c). 특히, 임하호에서 BOD 농도는 2002년 9월부터 급증하기 시작해서 최대치에 도달해 2002년 후반부터 시작된 혼탁한 물의 성분에는 유기물 농도가 증가해 이를 분해하는데 더 많은 산소가 소모되는 것으로 나타났다(Fig. 3c).

1994~2003년까지 총인(Total phosphorus)의 평균 농도는 안동호와 임하호에서 각각 18, 29 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로서(Fig.

4), Fosberg and Ryding (1980)의 기준에 의하면 각각 중영양 및 부영양상태로 나타났다. 안동호에서 총인 농도는 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 범위에서 연별로 그리고 계절 면에서 변이 폭이 아주 낮게 나타나 호수의 부영양화가 가속화 되지 않은 것으로 나타났다. 그러나 임하호의 경우 총인 농도는 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 거의 7배 이상까지 변화하였고, 이런 높은 값들은 주로 늦여름부터 가을 기간 사이에 증가되었다.

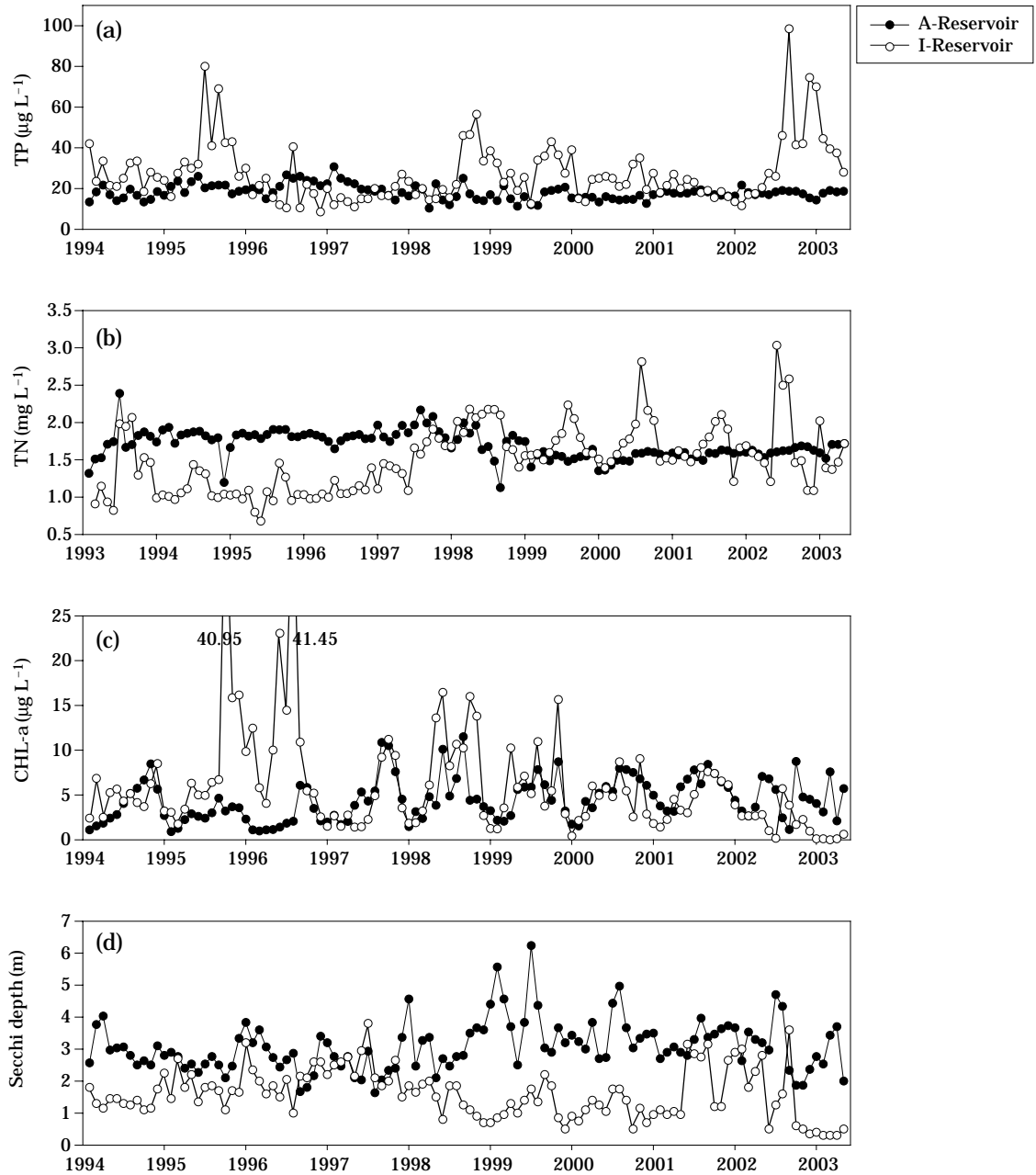


Fig. 4. Long-term variation of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chlorophyll-a (CHL-a), and transparency, measured as Secchi depth during 1993~2003.

총질소 (Total nitrogen, TN)의 경우 안동호 및 임하호에서 10년 동안 개개의 농도는 극히 몇 개의 시료를 제외하고는 0.8 mg L^{-1} 로서 Morris and Lewis (1988)의 기준에 의하면 이런 환경에서 질소는 식물성플랑크톤의 성장을 위한 제한요소 (limiting factor)로 작용하지 않을 것으로 사료되었다. 장기간의 TN 연변화의 분석에 따르면, 안동호에서는 1998년의 시점으로부터 뚜렷한 감소를 보

인 반면, 임하호에서는 1997년을 시점으로 증가하는 경향을 보여 두 호수에서 대조적인 현상을 보였다. 두 호수에서 모두 수체내 총 질소:총인의 평균비 (Mean TN:TP ratio)의 산정에 따르면, 안동호, 임하호에서는 각각 11 및 19로서, 질소제한 (N-limitation) 가능성이 전혀 나타나지 않았으며, 전체 관측치의 80% 이상은 30 이상을 보여 하절기 수체류시간이 짧고, 무기혼탁물의 증가시기를 제외

하고는 식물성 플랑크톤에 대한 인 제한 (P-limitation) 가능성을 보였다. 이런 특성은 우리나라의 소양호, 대청호, 충주호등의 대형 인공호들에서와 유사한 양상을 보였다.

두 호수 모두에서 엽록소-a(CHL-a)는 일반적으로 늦여름-가을 기간사이의 짧은 기간에 최대치를 보이는 "Monomodal Peak" 형태를 보여, 이런 특성은 북미 및 유럽에서의 봄, 가을의 피크현상과는 다른 것으로 나타났다. 임하호에서는 1996, 1997, 1998년에는 낮게는 $15 \mu\text{g L}^{-1}$ 부터 $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 높은 수치를 보였으며, 이런 기간 동안의 임하호에서 CHL-a의 최대치는 총인 (TP)이 증가한 후 1~2주 후에 발생하여 총인 (TP)과 CHL-a의 최대

치는 서로 일치하지 않았다. 즉, 임하호에서는 단지 TN:TP 비에 의거 할 때 인 (P)은 식물성 플랑크톤의 성장에 제한요인으로 작용할 수 있는 잠재성을 보였으나, TP와 CHL-a 관계에서는 인 제한 특성을 보이지 않았다. 특히, 2000년 이후부터 두 호수사이에 평균 TP 농도 비교에 따르면, 임하호에서 총인농도는 안동호에서보다 뚜렷하게 높았음에도 불구하고 CHL-a의 농도는 비슷하거나 감소하는 경향이 분명했으며, 2002년 가을의 경우 TP의 급격한 증가에도 불구하고 CHL-a는 거의 존재하지 않았다 ($3 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하). 이런 기간 동안 투명도는 0.5 m 이하의 최저치를 보였다. 즉, 식물성 플랑크톤의 성장이 거의 없는 상황에서 투명도의 최저치 (Fig. 4d)는 무기성 부유물에 의한 투명도 감소이며, 이런 무기물 증가는 수층의 광투과를 제한시켜 1차생산력 감소에 직접적으로 기여하는 것으로 나타났다.

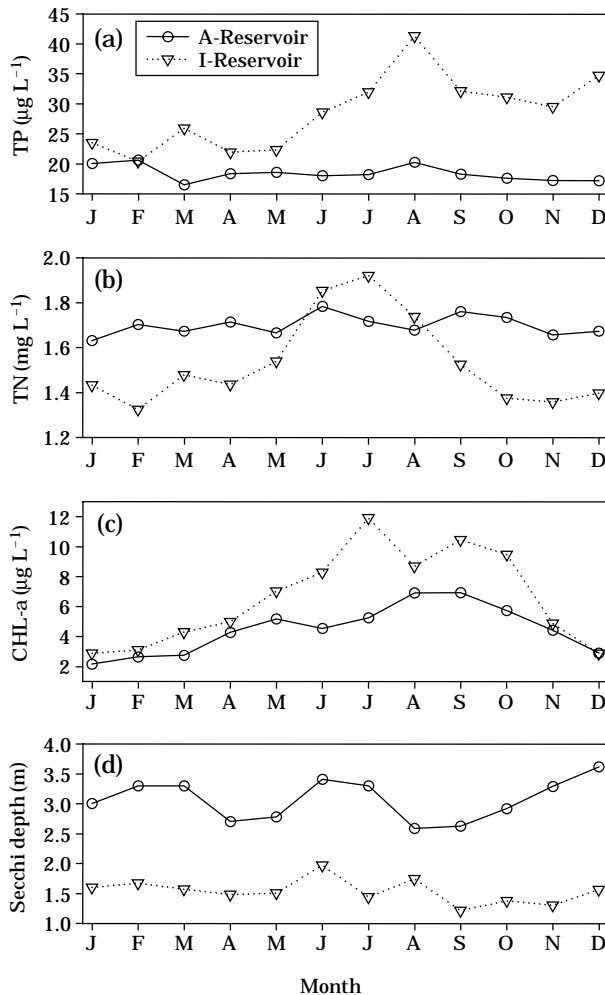


Fig. 5. Seasonal changes in total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chlorophyll-a (CHL-a), and the transparency, measured as Secchi depth. Each data point indicates monthly average during 1993~2003.

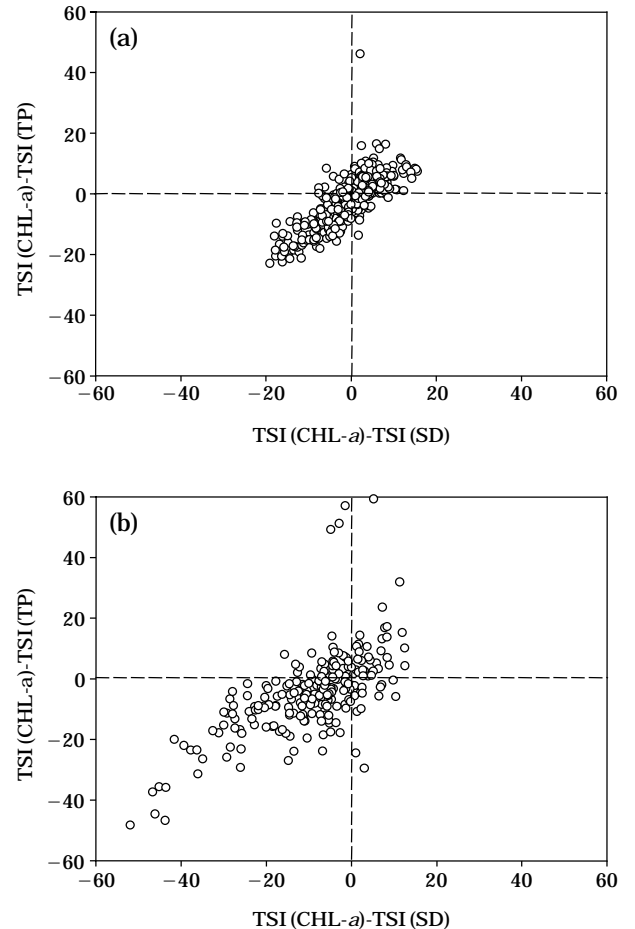


Fig. 6. The deviation analyses of Trophic State Index (TSI), based on chlorophyll-a (CHL-a), total phosphorus (TP), and Secchi depth (SD), in the Andong Reservoir (a) and Imha Reservoir (b).

투명도의 경우, 임하호와 안동호 사이에 급격하게 큰 차이를 보이기 시점은 1998년 말로 시작되어 임하호에서 투명도의 급격한 저하 현상을 보였으며, 동일시기에 4 m 이상까지의 큰 차이를 보였다 (Fig. 4d). 1998년 이후에 CHL-a 농도가 두 호수 사이에 큰 차이가 없는 점을 감안한다면 (Fig. 4c), 임하호의 1998년 이후의 투명도 감소 (Fig. 4d)는 무기성 부유물에 의한 것이며, 이런 사실은 1998년 이후에 총부유물 농도와 일치하였다.

두 호수에서 월평균 수질특성 분석에 따르면, 총인 (TP)의 경우 임하호에서는 8월에 $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 최대치를 보였으며, 6~9월 기간의 강우 집중기에 인 (P)이 증가하는 특성을 보인 반면, 임하호에서는 하절기에도 큰 변동을 보이지 않았다 (Fig. 5a). 총질소 (TN) 역시 안동호에서는 $1.6 \sim 1.8 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위에서 거의 변동을 보이지 않았으며, 임하호에서 TN은 6~8월에 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 5b). 안동호 및 임하호에서 월평균 CHL-a 농도는 $12 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로서 다른 대형 인공호들에 비해 낮은

농도를 보였으며, 11~12월, 1~4월까지 두 호수에서는 거의 차이를 보이지 않았고, 나머지 기간은 임하호에서 높게 나타났다 (Fig. 5c). 임하호에서는 TP가 최대치를 보인 8월에는 TP에 대한 CHL-a 생산율, 즉 CHL-a/TP 값은 0.21로서 뚜렷한 감소 경향을 보였으며, 이런 특성은 11~12월에도 나타나 단위 인 (P) 농도에 대한 조류생산력 (CHL-a: TP yield)의 감소를 보여 수층내 무기성 부유물에 의한 광 제한효과의 가능성을 보였다. 또한, 투명도는 임하호가 안동호보다 모든 계절 동안 2배 이상 광 투과가 낮은 것으로 나타났으며, 임하호의 투명도는 항상 2 m 이하로서 모든 계절 동안 광투과량이 높지 않았다 (Fig. 5d).

Carlson (1991)의 영양상태지수 변이분석법 (Trophic State Index Deviation)을 두 호수에 적용한 결과에 따르면, 임하호에서는 안동호에서보다 식물성플랑크톤의 광저하 현상이 뚜렷하게 나타났다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 임하호에서 "TSI (CHL-a)-TSI (SD)"의 값은 -63부터

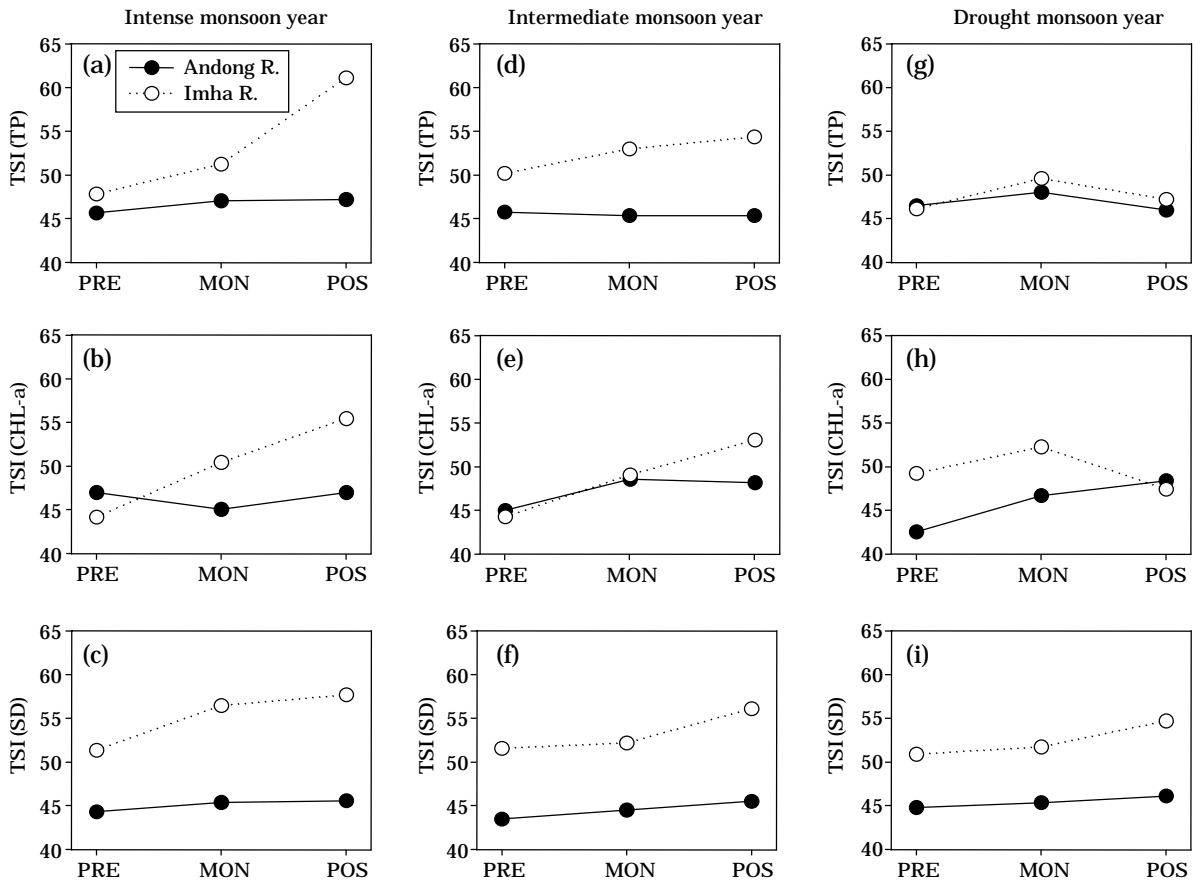


Fig. 7. Seasonal variation of Trophic State Index (TSI) depending on the intensity of the summer monsoon in Andong and Imha reservoirs [PRE=Premonsoon, MON=During monsoon, and POS=Postmonsoon].

17까지 범위에서 나타났으며, 전체 관측치중 65% 이상은 음수값을 보였다. 한편, 안동호에서 “TSI (CHL-*a*)-TSI (SD)” 값 및 “TSI (CHL-*a*)-TSI (TP)” 값은 -25 이하의 값을 보여 무기성 부유물 등에 의한 광저하 현상이 안동호에 비해 극히 미약한 것으로 나타났다.

연별 강우강도에 따른 영양상태지수 (Trophic State Index, TSI)의 분석결과는 Fig. 7과 같다. 안동호에서 집중 강우해 (Intense monsoon year), 보통 강우해 (Intermediate monsoon year), 가뭄해 (Drought monsoon year)의 장마전기, 장마중기, 장마후기에서의 TSI (TP), TSI (CHL-*a*), TSI (SD)의 모든 값들은 Carlson (1977)의 기준에 의거할 때 미약한 계절변이를 보였으며 (Fig. 7), 모든 값들은 일률적으로 중영양상태로 판정되었다. 이런 결과는 Kim *et al.* (2001)이 안동호에서 영양상태지수 (TSI)를 중영양상태로 분석한 결과와 일치한다. 한편, 임하호에서는 투명도에 의거한 TSI (SD) 값은 Carlson (1997)의 부영양도 기준에 의거할 때 중영양-부영양상태로 나타나 안동호보다는 부영양화된 것으로 나타났다. 특히, 임하호의 TSI (TP) 및 TSI (CHL-*a*)의 경우, 집중 강우해 및 보통 강우해의 장마시기 및 장마후기에 영양 상태는 부영양 상태에 있는 것으로 나타났으며, 가뭄해에 TP에 의거한 영양지수는 중영양 상태로 나타났다 (Fig. 7a, d, g).

안동호의 경우, 집중 강우해 (Intense monsoon year)에 하절기 몬순강우에 의해 인 (P)에 의거한 영양상태지수는 크게 변화하지 않았다. 한편, 임하호의 경우 집중 강우해 및 보통 강우의 해 (Intermediate monsoon year)의 장마후기 (Postmonsoon)에 인의 양이 뚜렷하게 증가하여 부영양 (Eutrophy) 특성을 보였으며 (Fig. 7a, d), 가뭄의 해에는 하절기에 인의 농도가 보통 강우의 해 및 집중 강우해 보다도 뚜렷하게 낮게 나타나 (Fig. 7g), 인 (P)에 의한 영양상태지수, TSI (TP)는 하절기 강우강도에 민감한 것으로 나타났다.

안동호에서 TSI (CHL-*a*)의 경우, 연강우의 강도에 상관없이 중영양 상태를 보였으며, 특히, 강우 집중해 (Intense monsoon year)의 하절기 몬순기간 동안 CHL-*a*는 일부 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 7b). 임하호의 경우, 집중 강우해 및 보통 강우 해에 CHL-*a*에 의거한 영양상태지수는 장마중기보다는 장마후기에 더 높게 나타나 무기물에 의한 탁도감소 시기에 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 7h). 또한, 임하호에서 TSI (CHL-*a*)는 가뭄 해의 하절기에 가장 높게 나타났다 (Fig. 7h). 즉, 가뭄의 해의 하절기에는 무기물에 의한 탁도 감소로 일차생산력이 증가 되는 것으로 사료되었다. 투명도에 의거한 TSI (SD)값은 안동호에서보다 임하호에서 뚜렷하게 높게 나타났으며

(Fig. 7c, f, i), 특히, 집중 강우해의 하절기 및 가을철에는 TSI (SD)값이 다른 해에 비해 급격한 증가를 보였다 (Fig. 7c). 이것은 수계로부터 빗물과 함께 유입되는 물에 무기성 부유물 (Inorganic solids)의 상승 및 강우 후의 식물성 플랑크톤의 증가에 의한 복합적인 요인으로 사료되었다.

적 요

본 연구는 1993~2004년의 기간에 환경부에서 측정된 안동호 및 임하호의 이화학적 수질자료를 이용하여 장기간의 영양상태 분석 및 그에 따른 계절별, 연별 수질변화 양상을 분석하였다. 장기적인 육수학적 추이분석에 따르면, 임하호의 총부유물 (Total suspended solids, TSS)의 농도는 안동호에 비해 특성 시기에 2~8배 이상의 큰 증가를 보였으며, 이런 기간 동안 총인 (Total phosphorus, TP) 및 생물학적 산소요구량 (Biological oxygen demand, BOD₅)은 증가하였고, 투명도 (Secchi depth, SD)는 감소를 보였다. 한편, 동일기간 동안 엽록소 (Chlorophyll-*a*, CHL-*a*)는 차이가 거의 없거나 일부 감소하는 경향을 보여 단위 총인당 엽록소의 농도 (Chl-*a*/TP ratio)는 뚜렷한 감소현상을 보였다. 영양상태 (Trophic State Index, TSI)의 변이 분석에 따르면, 임하호에서 TSI (CHL-*a*)-TSI (SD) 값 및 TSI (CHL-*a*)-TSI (TP) 값의 70% 이상이 0 이하의 음수값을 보였으며, 거의 -60까지의 값으로 나타나 무기성 부유물 (inorganic solids)의 영향이 안동호에 비해 크게 나타났다. 즉, 임하호에서 무기성 미세부유물은 식물플랑크톤 성장에 대한 광제한 효과를 보여 영양상태 지수들간의 상호관계의 변이에 안동호보다 좀 더 직접적으로 기여하는 것으로 나타났다. 특히, 장마전기, 장마기 및 장마후기에 두 호수의 수체내 총인 농도자료 분석에 따르면, 하절기 장마가 심할 때 임하호에서 장마후기의 총인농도는 안동호에 비해 월등하게 높게 나타났는데, 이런 주요 원인은 하절기의 집중강우에 의한 수계침식 및 비점오염원으로부터 부유물을 증가로 사료되었으며, 이에 대한 대책마련이 시급한 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호: R08-2003-000-10535-0) 지원으로 수행되었으며, 수질자료 (1993~2004)는 환경부의 자료를 이용한 바, 이에 감사를 표함.

인용문헌

- 김범철, 안태석, 조규승. 1988. 한강수계 인공호의 부영양화에 관한 비교 연구. *한국육수학회지* **21**: 151-164.
- 김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙. 1997. 국내주요호수의 육수학적 조사(1): 옥정호. *한국육수학회지* **30**: 431-453.
- 김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙. 1998. 국내주요호수의 육수학적 조사(2): 합천호. *한국육수학회지* **31**: 312-327.
- 김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙. 1999. 국내주요호수의 육수학적 조사(3): 진양호. *한국육수학회지* **32**: 111-126.
- 김용재, 정 청. 1993. 임하호의 식물성 플랑크톤 군집 분석. *한국육수학회지* **26**(3): 175-196.
- 김용재, 최재신, 김도한, 정 청. 1995. 임하호에서의 식물성플랑크톤 군집의 생태학적 고찰. *한국육수학회지* **28**(1): 61-77.
- 김용재, 최재신, 김한순. 1997. 임하호의 식물플랑크톤 군집구조. *한국육수학회지* **30**(4): 307-324.
- 류강기, 이희무. 1995. 임하호 저니 침전물 성분에 관한 조사 연구. *농업과학기술 연구논문집* **2**: 77-88.
- 박영규, 서유덕, 김정호. 1988. 안동호의 영양상태에 관한 연구. *한국물환경연구지* **4**(2): 23-30.
- 박정원, 신종학, 이갑숙. 1999. 하계 임하호에서 식물플랑크톤 군집의 구조. *한국환경생물학회지* **17**(1): 95-115.
- 안광국. 2000a. 호수내 인의 주요원으로 몬순 유입수. *한국육수학회지* **33**(3): 222-229.
- 안광국. 2000b. 호수 지형 및 수리수문학적 변화에 대한 몬순 영향. *한국육수학회지* **33**(4): 342-349.
- 안광국. 2001. 인공호에서 수온의 수직분포와 수층혼합의 계절적 변화 및 중층수 유입 현상의 영향. *한국육수학회지* **34**(1): 9-20.
- 오세명, 황재문, 윤태명, 정정학, 권순태. 1994. 안동호와 임하호 주변지역의 농작물 재배실태조사. *농업과학기술 연구논문집* **1**: 1-11.
- 이중복, 이희무, 이건주, 박정원, 박재충, 김동걸, 권기석. 2002. 안동호 상류 운곡천의 이화학적 수질특성과 식물플랑크톤 군집 특성. *환경연구지* **2**(1): 87-90.
- 이혜원, 안광국, 박석순. 2002. 소양호 표층수 수질의 연별 추이 및 상, 하류 이질성 분석. *한국육수학회지* **35**(1): 36-44.
- 한국수자원공사. 1996. 안동호 다목적관리연보. pp. 123.
- 허우명, 김범철, 안태석, 이기중. 1992. 소양호 유역과 가두리로부터의 인부하량 및 인수지 (phosphorus budget). *한국육수학회지* **25**: 207-214.
- 허우명, 권상용, 김범철, 박주현. 2000. 안동호 수질의 장기적인 변화. *한국육수학회지* **33**(3): 260-266.
- An, K-G. 2000. An influence of point source and flow events on inorganic nitrogen fractions in a large artificial reservoir. *Kor. J. Limnology* **33**: 350-357.
- An, K-G. 2000. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus in Taechung Reservoir, Korea. *Kor. J. Limnology* **33**: 222-229.
- An, K-G. 2000. The impact of monsoon on seasonal variability of basin morphology and hydrology. *Kor. J. Limnology* **33**: 342-349.
- An, K-G. 2001. Hydrological significance on interannual variability of cations, anions, and conductivity in a large reservoir ecosystem. *Kor. J. Limnology* **34**: 1-8.
- An, K-G. 2003. Spatial and temporal variabilities of nutrient limitation based on in situ experiments of nutrient enrichment bioassay. *Journal of Env. Sci. & Health-Part A*, **38**(5): 867-882.
- An, K-G. and D.S. Kim. 2003. Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake fishfarms. *Water, Air, and Soil Pollution* **149**(1-4): 27-49.
- An, K-G. and J.R. Jones. 2002. Reservoir response to the Asian monsoon with an emphasis on longitudinal gradients. *Journal of Freshwater Ecology* **17**(1): 151-160.
- An, K-G. and S.S. Park. 2002. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: A case study. *Ecological Modelling* **152**(2-3): 191-203.
- An, K-G. and S.S. Park. 2003. Influence of seasonal monsoon on the trophic state deviation in an Asian reservoir. *Water, Air, and Soil Pollution* **145**: 267-287.
- 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. *Kor. J. Limnology* **34**(4): 327-336.
- Carlson, R. 1977. A trophic state index for lake. *Limnology and Oceanography* **22**(2): 361-369.
- Carlson, R.E. 1991. Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs. *Enhancing the States's Lake Management Programs*, p. 59-71.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.* **89**: 187-207.
- Jones, R.J., M.F. Knowlton and K-G. An. 1997. Developing a paradigm to study and model the eutrophication process in Korean reservoirs. *Kor. J. Limnology Special Issue* **82**: 1-9.
- Kim, B., J.-H. Park, G. Hwang, M.-S. Jun, and K. Choi. 2001. Eutrophication of reservoirs in South Korea. *Limnology* **2**: 223-229.

Morris, D.P. and W.M. Lewis. 1988. Phytoplankton nutrient limitation in Colorado mountain lakes. *Freshwater Biology* **20**: 315-327.

U.S. EPA. 1976. Water Quality Criteria Research of the U.S. Environmental Protection Agency, Proceedings of an EPA Sponsored Symposium, EPA-600/3-7-079, 185.

Vollenweider, R.A. 1975. Input output models with special reference to the phosphorous loading concept in Limnology. *Schwei. for Hydro.* **37**: 53-84.

(Manuscript received 30 September 2005,
Revision accepted 26 January 2006)