

안동호 수질의 장기적인 변화

허우명* · 권상용 · 김범철¹ · 박주현¹

(삼척대학교 환경공학과, 삼척 245-711, ¹강원대학교 환경과학과, 춘천 200-701)

Long-term Variation of Water Quality in Lake Andong. Heo, Woo-Myung*, Sangyong Kwon, Bomchul Kim¹ and Ju-Hyun Park¹ (Dept. of Environmental Engineering, Samchok National University, samchok 245-711, Korea, ¹Dept. of Environmental Science, Kangwon National University, chunchon, 200-701, Korea)

Water quality parameters were surveyed in Lake Andong. Turbidity, temperature, secchi disc transparency (SD), phosphorus, nitrogen and chlorophyll *a* concentration were measured at dam site from July 1993 to December 1998. Minimum transparency in summer was only about 2 meters in 1993 and 1994, but it decreased to about 1 meter in 1997 and 1998. Total phosphorus concentration of the epilimnion increased slightly from 11~30 mgP/m³ in 1993 to 18~42 mgP/m³ in 1998. Total nitrogen concentration of the epilimnion decreased slightly from 1.81~2.96 mgN/L in 1993 to 1.48~2.57 mgN/L in 1998. TN/TP weight ratio decreased from 82~281 in 1993 to 21~143 in 1998 due to the increase of phosphorus concentration and the decrease of nitrogen concentration. Dissolved inorganic phosphorus and nitrate nitrogen concentration of the epilimnion were in the range of 0.9~5.3 mgP/m³ and 1.36~1.68 mgN/L, respectively. Chlorophyll *a* concentration in summer was in the range of 11.0~19.1 mg/m³ in 1994, 1996 and 1997, but it decreased to 2.3~6.5 mg/m³ in 1998. Trophic state of Lake Andong can be classified as mesotrophic to eutrophic from TP, TN and chlorophyll *a* concentration.

Key words : Lake Andong, Water quality, Total phosphorus, Total nitrogen, Chlorophyll *a*

서 론

국내 호수의 수질 문제는 '80년대 이후 소수의 연구자들에 의해 제기된 이래 '90년대 이후 본격적으로 논의되었다. 호수의 수질 악화는 주로 영양염류의 과다 유입에 따른 것으로 영양염류 유입원은 주로 유역내의 산림, 가축 및 농경지 등의 비점오염원과 호수내의 가두리양어장이다. 호수 유역으로부터의 영양염류 유입은 대부분 우기시 발생한다. 특히 인의 유입은 호수 부영양화에 매우 중요하며 (Schindler and Fee, 1974; Bolesch *et al.*,

1977) 호수의 영양단계 판정 및 식물플랑크톤 생체량 예측을 위한 지표자료로 제시되어 왔다 (Stauffer, 1985). 우리나라 대형 인공호의 경우 강우시의 인유입량은 연간 총인유입량의 70~80%에 해당하는 수준이다 (허 등, 1992; 이 등, 1993; 김 등, 1997; 허 등 1998). 안동호 유역은 2개시 3개군으로 태백시, 안동시, 봉화군, 영양군 및 울진군에 걸쳐 있다. 유역면적은 1,583.5 km², 유역내 총인구는 '96년 기준 96,396명이다. 유역내의 주요 경제 활동은 농·축산업이며, 태백시의 경우 광산업이 주종을 이루었으나 석탄산업합리화 정책에 따라 대부분 폐광되고 점차 일반 소비도시화 되어 가고 있다. 현재 가행광

* Corresponding author: Tel: 033) 570-6573, Fax: 033) 574-7262, E-mail: hlimnol@samchok.ac.kr

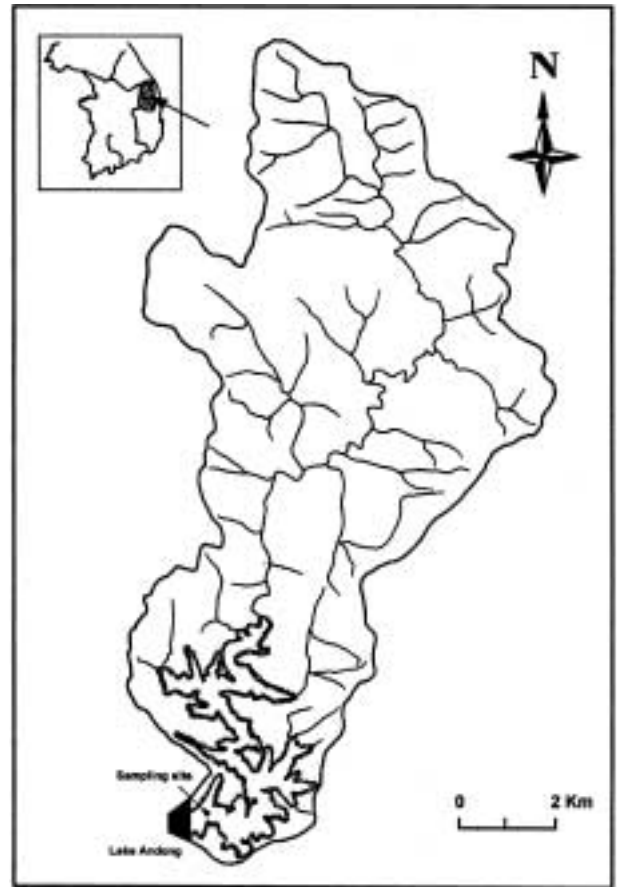
Table 1. Hydrological characteristics and utilization of drainage basin of Lake Andong. Yearly average records from 1994 to 1998 (한국수자원공사, 1996).

Surface area (km ²)	51.5
Water capacity ($\times 10^6$ m ³)	1,248
Average water volume ($\times 10^6$ m ³)	587
Yearly average inflow ($\times 10^6$ m ³)	827.3
Yearly average outflow ($\times 10^6$ m ³)	935.2
Maximum depth (m)	60
Maximum water level (m)	161.7
Average water level (m)	143.8
Mean Depth (m)	19.4
Hydraulic residence time (year)	1.33
Drainage area (km ²)	1,584
Drainage area : lake area ratio	31
Urban area in drainage basin (km ²)	256
Paddy and dry field area in drainage basin (km ²)	142
Forest and mountain area (km ²)	1,325
Total population in drainage basin (persons)	96,396
Urban population in drainage basin (persons)	56,215
Rural population in drainage basin (persons)	40,181
Annual precipitation (mm/yr)	1,076
Length of main axis (km)	43.5
Mean width (km)	1.2

산은 태백광업소 등 4개소로 태백시 및 봉화군에 산재되어 있으며, 주요 공장으로는 석포제련소가 있다. 호수내의 가두리 양어장 면적은 '96년 기준으로 55,555.8 m²이며 (한국수자원공사, 1996), 가두리양어장으로 부터의 영양염류 유입은 양어장에서 투여하는 사료와 어류 배설물로 유역으로부터의 유입량과 유사하며 때로는 초과한다(김 등, 1993). 우리나라 대형 인공호수내의 가두리 양어장은 '80년대를 전후하여 대형화되기 시작하였으며 '90년대 들어 최고의 수준을 보였다. 안동호 유역의 오염발생 부하량은 BOD, SS, TN 및 TP가 각각 16,211, 20,822, 3,256 및 642 kg/day이다(한국수자원공사, 1996).

안동호는 낙동강 중·상류지역에 건설된 다목적댐으로 최대저수용량이 약 12.5억톤, 수표면적이 51.5 km² 인 국내 대형 인공호수중 비교적 규모가 크다. 안동호는 안동시와 그 일원의 상수원일 뿐만 아니라 낙동강 수계의 수질오염 경감을 위한 유지용수로서의 기능을 담당하고 있다. 낙동강 수계의 중요한 호수임에도 불구하고 안동호에 대한 연구는 거의 전무한 상태로 앞으로 다각적인 면에서 연구가 요구된다.

본 논문은 안동호의 장기적인 수질변화를 관찰하기 위해 '93년부터 '98년까지 호수내 댐앞지점에서 수온, 탁도, 투명도, 영양염류(인, 질소) 및 엽록소 *a* 농도를 조사·분석하였다.

**Fig. 1.** Map showing the watershed and sampling site in Lake Andong.

재료 및 방법

안동호는 낙동강 본류의 중상류지역인 안동시 성곡동과 상아동에 건설된 댐높이 83 m, 댐길이 612 m의 중앙차수벽형토석댐이다. 안동호의 최대수심은 60 m이며, 평균수심 19.4 m, 수리학적 체류시간 1.33년인 대형인공호이다. 안동호의 수리학적 특성 및 유역의 이용현황은 Table 1과 같다.

수질조사는 호수의 댐앞지점에서 실시하였으며 (Fig. 1), 시료는 PVC Van Dorn 채수기로 수심 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 및 bottom에서 채수하였다. 조사시기는 1993년 7월부터 1998년 12월까지 매월에 1회씩 조사하였다. 채수된 시료는 실험실로 운반하여 운반즉시 GF/C 유리섬유 여과지로 여과하여 여과지는 냉동보관하였다가 엽록소 *a* 분석에 사용하였고, 계산은 Lorenzen (1967)의 방법을 사용하였다. 여과액은 용존형태의 인 및 질소분석에 사용하였으며 총인 및 총질소 분석용 시

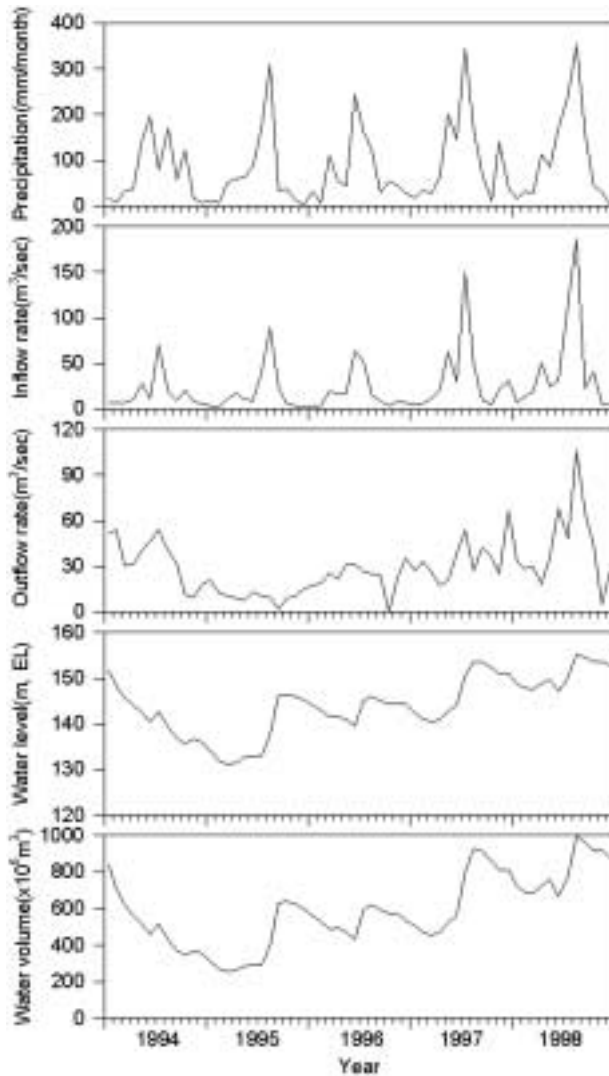


Fig. 2. The variations of monthly averages of hydrological parameters in Lake Andong.

료는 여과하지 않은 시료를 사용하였다. 무기인은 Standard Methods (1992)의 ascorbic acid법으로 분석하였으며, 총인 (TP)은 시료 250 ml를 냉장보관하였다가 Standard Methods의 persulfate digestion과 ascorbic acid법에 따라 측정하였다. 질소는 cadmium 환원법으로 분석하였으며 (BRAN+LUEBBE, AutoAnalyzer3), 수온 및 탁도 등은 Multiprobe (YSI 6000)을 사용하여 측정하였다.

결 과

안동호 유역의 수년간 강수량과 수문학적 특성은 Fig. 2와 같다. 안동호 유역의 강수량은 월별 평균 약 90 mm

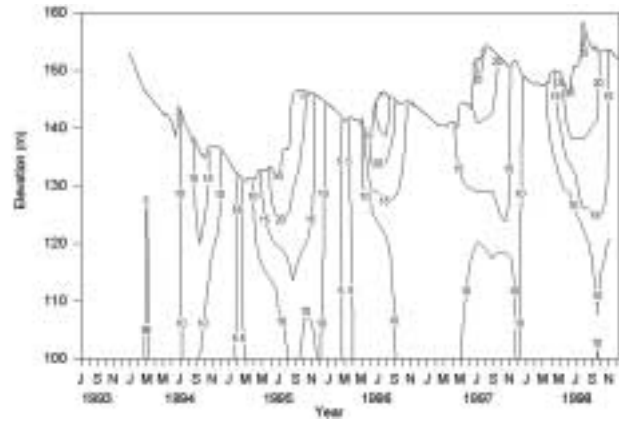


Fig. 3. The isopleths of temperature ($^{\circ}\text{C}$) in Lake Andong.

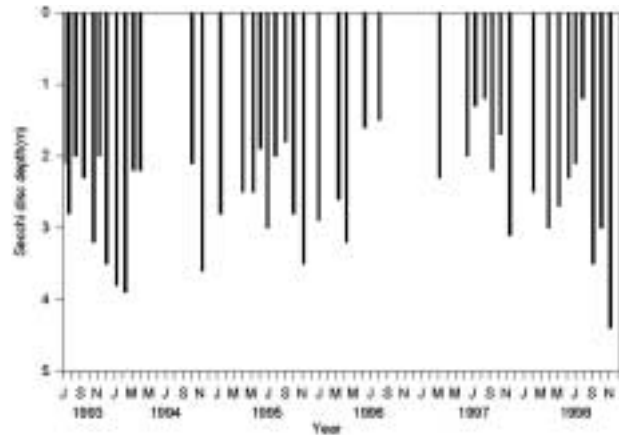


Fig. 4. The monthly variations of secchi disc transparency in Lake Andong.

내외로 년평균 약 1,076 mm 정도이다. 본 조사기간 동안 연간 수위변화를 보면 '95년 3월에 약 130 m로 가장 낮았으며, '98년 8월에 약 158 m로 가장 높아 약 27 m의 변화폭을 갖는 것으로 나타났다. 월별 수위변화도 장마가 시작되기 전인 봄철에 최저수위를 보이며, 장마 이후 최고의 수위를 보이는 것으로 나타났다.

수온의 수직분포는 매년 비슷한 양상을 보였으며(Fig. 3), 11월 이후 서서히 혼합이 진행되어 1월에서 3월 사이에 호수 전체가 혼합(turnover)되는 것으로 나타났다. 표층수의 수온은 계절별로 4~28 $^{\circ}\text{C}$ 범위를 보였으며, turnover시의 수온은 4~5 $^{\circ}\text{C}$ 내외였다. 수온약층은 여름에 약 10~15 m 사이에서 형성되는 것으로 나타났다.

연도별로 하절기의 최저 투명도 값은 '93년부터 '98년까지 각각 2.0, 2.1, 1.8, 1.5, 1.2 및 1.2 m로 매년 점차 낮아지고 있다. 계절별로는 '93년부터 '98년까지 각각

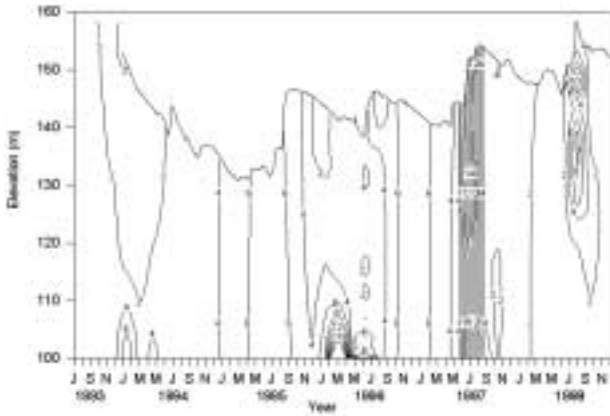


Fig. 5. The monthly variations of turbidity (NTU) in Lake Andong.

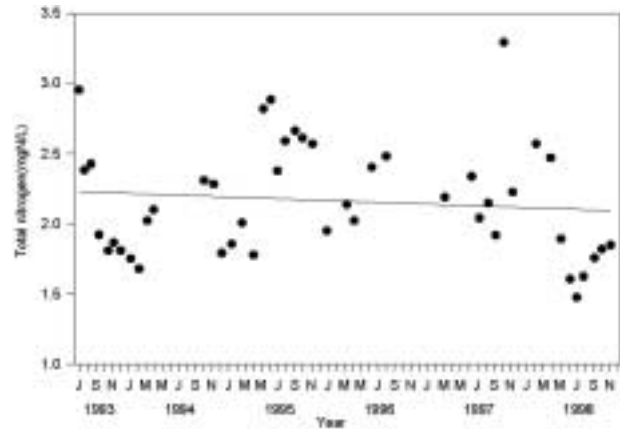


Fig. 7. The monthly variations of total nitrogen concentration in Lake Andong (average of 0, 2, 5 m).

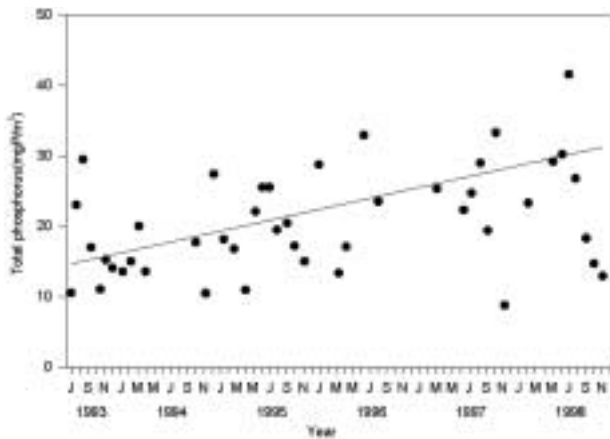


Fig. 6. The monthly variations of total phosphorus concentration in Lake Andong (average of 0, 2, 5 m).

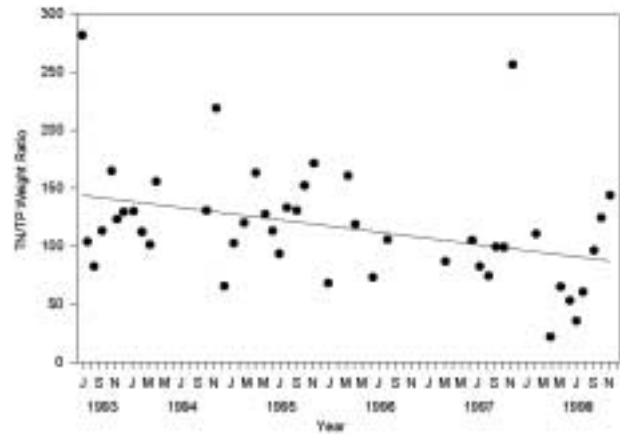


Fig. 8. The monthly variations of total nitrogen vs. total phosphorus weight ratio in Lake Andong (average of 0, 2, 5 m).

2.0~3.5, 2.1~3.9, 1.8~3.5, 1.5~3.2, 1.2~3.1 및 1.2~3.5 m로 비교적 하절기에 식물플랑크톤이 증가하는 시기에 낮았다(Fig. 4).

안동호의 연간 수직적인 탁도(turbidity)분포를 보면 연중 2~6 NTU로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 그러나 계절적으로 보면 우기 이후 중층에서 높게 나타나고 있다. 강우량이 비교적 많았던 '97년에는 호수 전층에서 60~70 NTU로 높게 나타났으며, 1998년에도 우기 이후 중층에서 10~15 NTU를 보였다(Fig. 5).

표층수(0~5 m)의 평균 총인(TP) 농도는 약 21 mgP/m³으로 '93년에 11~30 mgP/m³ 범위이었으나, '98년에는 18~42 mgP/m³으로 매년 1.85 mgP/m³씩 증가하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 6). 계절별로는 약간의 차이는 있으나 우기 이후인 하절기에 높게 나타났다. 총질소

(TN)의 표층 평균 농도는 '93년에 1.81~2.96 mgN/L의 범위 이었으나, '98년에는 1.48~2.57 mgN/L로 점차 감소되고 있는 것으로 나타났다(Fig. 7). 연평균 질소 농도는 2.17 mgN/L로 1.90~2.41 mgN/L의 범위이었다. 계절별로는 약간의 차이는 있으나 총인과 마찬가지로 우기 이후인 하절기에 높게 나타났다. TN/TP 무게비의 연변화를 보면 '93년에 82~281이었으나, '98년에는 21~143으로 크게 감소되었다(Fig. 8). 용존무기인(DIP)은 연평균 3.6 mgP/m³이었으며, '93년부터 '98년까지 각각 3.2, 5.3, 3.3, 0.9, 2.4 및 4.9 mgP/m³으로 1996년에 가장 낮은 값을 보였다(Fig. 9). 질산성질소(NO₃-N)는 연평균 1.50 mgN/L이었으며, '94년부터 '98년까지 각각 1.46, 1.68, 1.55, 1.40 및 1.36 mgN/L으로 '95년 이후 점차 낮아지고

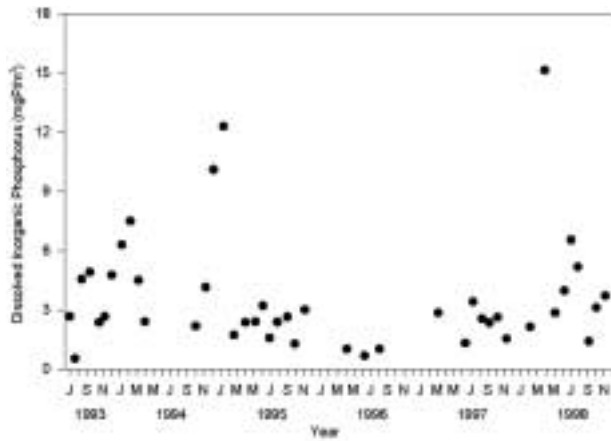


Fig. 9. The monthly variations of dissolved inorganic phosphorus (mgP/m³) in Lake Andong (average of 0, 2, 5 m).

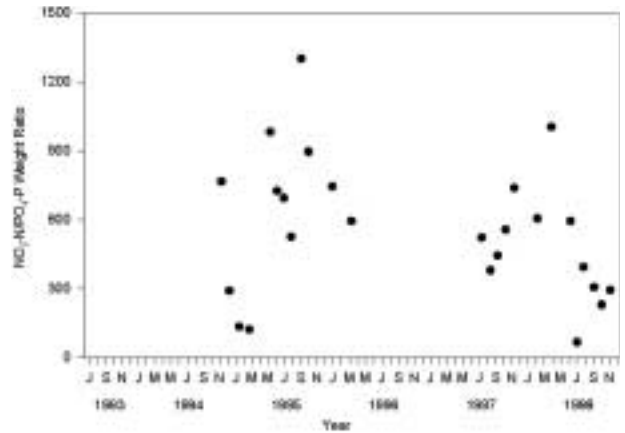


Fig. 11. The monthly variations of NO₃-N vs. PO₄-P weight ratio in Lake Andong (average of 0, 2, 5 m).

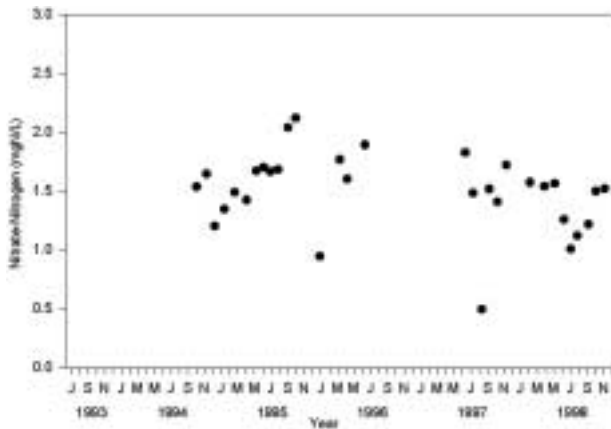


Fig. 10. The monthly variations of nitrate-nitrogen (mgN/L) in Lake Andong (average of 0, 2, 5 m).

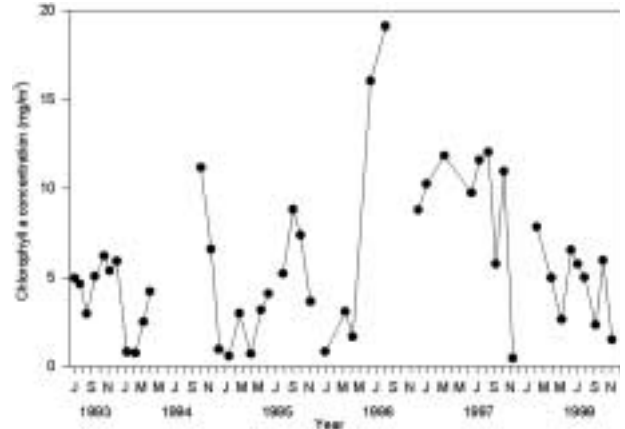


Fig. 12. The monthly variations of chlorophyll a concentration in Lake Andong (average of 0, 2, 5 m).

있는 것으로 나타났다 (Fig. 10). NO₃-N/PO₄-P 무게비의 연변화를 보면 '94, '95, '97 및 '98년에 각각 327, 853, 606 및 314로 '95년 이후 점차 감소되고 있는 것으로 나타났다 (Fig. 11).

엽록소 a 농도의 년평균 표층 (0~5 m) 값은 5.6 mg/m³으로 '93년부터 '98년까지 각각 5.0, 3.9, 4.1, 8.3, 8.9 및 4.6 mg/m³이었으며, '97년까지는 점차 증가하였으나, '98년에는 다소 감소하였다 (Fig. 12). 계절별 표층 농도는 '93년부터 '98년까지 각각 5.0~6.2, 0.8~11.2, 0.6~8.8, 0.8~19.1, 0.4~12.0 및 1.5~7.8 mg/m³으로 동계에 낮고 하계에 높았다. 하계 (6~10월) 표층 평균값은 '93년부터 '98년까지 각각 4.8, 11.2, 6.4, 17.6, 10.0 및 5.0 mg/m³이었다.

고 찰

안동호는 계절별 수위 차가 약 30 m 내외로 비교적 큰 것으로 나타났다. 우리나라는 몬순기후의 영향을 받아 강우가 보통 6~9월에 집중되기 때문에 이 시기를 전후하여 큰 폭의 수위변화를 보이고 있으며, 이러한 현상은 국내 대부분의 호수에서 나타나는 전형적인 특징이다 (허, 1993; 황 등, 1994; 김 등, 1997; 김 등, 1998). 또한 안동호는 일년에 한번 겨울철 (1~3월)에 호수전체가 혼합되는 전형적인 溫帶一循環 (worm monomictic) 호수이며 (Hutchinson, 1967; Welch, 1980), 이는 우리나라 대형 인공호에서 여름 성층기에 나타나는 전형적인 현상으로 볼 수 있다 (Kim & Cho, 1989; 허, 1993).

연도별 하절기의 최저 투명도 값이 '94년 이후 매년 낮아지고 있으며, '97년과 '98년에는 1.2 m로 낮은 값을 보였는데, 이는 하절기에 식물플랑크톤의 증가에 따른 것으로 판단된다. 소양호의 경우도 조류의 bloom이 일어나는 시기에 투명도가 2 m 내외를 보였다고 보고된 바 있다(허, 1993). 또한 안동호의 투명도 값은 옥정호의 연간 1.5~4.0 m(김 등, 1997), 합천호의 1.5~4.0 m(김 등, 1998) 및 진양호의 0.8~3.5 m(김 등, 1999)와 유사한 수준인 것으로 판단된다.

일반적으로 호수에서의 탁도는 우기시 증가되는 것으로 알려져 있으며(Kim, 1987; 허, 1993; Tanaka *et al.*, 1996; 허 등, 1998; 김, 1998; 허 등, 1999), 허 등(1998)은 소양호의 상류에서 하류 댐앞까지 약 50 km 구간에서 오염수괴의 이동 경로를 정밀조사한 결과 우기 이후부터 탁도층이 매우 뚜렷하게 중층 밀도류를 따라 이동되고 있음을 밝힌 바 있다. 안동호의 경우 상류수역부터 하류 댐앞지점까지 오염수괴의 이동은 조사하지 않았지만 댐앞지점에서 우기 이후 높은 탁도층이 관찰되는 것으로 보아(Fig. 5 참조) 소양호와 마찬가지로 우기시 중층 밀도류를 따라 탁도층이 형성되었을 것으로 판단된다. Tanaka와 Tsuda(1996)는 Biwa호의 연구에서 1993년 8~9월 사이에 있는 세 번의 태풍으로 최대의 탁도 값이 이 시기에 중층에서 발견되었다고 보고한 바 있다. 또한 허 등(1999)은 달방댐 유입수의 강우에 따른 인농도와 인부하량 연구에서 초기 강우시 유입수량 증가에 따라 비점오염원으로부터 오염물이 일시에 호수로 유입되었다고 하였다. 따라서 안동호의 수질을 관리하기 위해서는 유역내의 비점오염원 관리와 우기시 중층으로 다량 유입되는 오염수괴를 적절한 시기에 방류시켜야 할 것으로 사료된다.

안동호 표층의 총인 농도는 연평균 21 mgP/m³으로 Forsberg와 Ryding(1980)의 영양단계 분류에 따르면 중영양호의 수준이며, U.S. EPA(1976) 기준으로 볼 때는 부영양호 수준으로 판단된다. 또한 총인 농도가 매년 1.85 mgP/m³ 씩 증가하고 있어 수질이 더욱 악화될 가능성도 있으나, 최근 호수내의 가두리양식장이 폐쇄되고 있는 추세이므로 향후 호수내의 총인농도는 낮아질 것으로 사료된다. 총질소의 경우는 연평균 2.17 mgN/L로 Forsberg와 Ryding(1980)의 부영양호 기준 0.6 mgN/L를 3배 이상 초과하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 안동호는 총인과 총질소 농도로 볼 때 현재 부영양호 수준에 있는 것으로 판단된다. 특히 안동호의 총질소 농도는 매년 감소 추세에 있는데 이는 질산성질소의 감소에 따른 것으로 사료된다. 안동호의 질산성질소 농도는 연

평균 1.5 mgN/L로 소양호의 0.6 mgN/L 보다 약 2배 이상 높은 수준이다(허 등, 1991).

호수내 표층 용존무기인(DIP) 농도는 식물플랑크톤의 증식에 중요한 요인으로 특히 부영양한 호수의 경우 표층에서 조류나 세균에 의해 빠르게 흡수 및 합성되어 그 존재량이 매우 낮은 편이다(Lean, 1973). 따라서 이 시기의 용존무기인의 유입은 식물플랑크톤의 대량증식을 유발할 수 있으며, 또한 식물플랑크톤의 증식은 용존무기인 농도를 크게 감소시킬 수 있다. 안동호의 용존무기인 농도는 '96년에 0.9 mgP/m³으로 가장 낮았으며, 이 시기에 하계 평균 엽록소 *a* 농도는 17.6 mg/m³으로 가장 높았다(Fig. 12 참조). 이는 식물플랑크톤의 증가가 용존무기인 감소에 기여한 것으로 볼 수 있다. TN/TP 무계비는 '93년에 82~281이었으나, '98년에는 21~143으로 매년 감소되고 있는데 이는 주로 총인의 증가에 따른 것으로 볼 수 있으나 안동호의 경우 총질소의 감소도 중요한 요인으로 판단된다. 안동호의 '98년 TN/TP 비는 국내 주요 인공호의 40~160(Kim *et al.*, 1997)과 유사한 수준이다. NO₃-N/PO₄-P 무계비도 '95년 이후 점차 감소되고 있는데, 이는 질산성질소 농도의 감소에 따른 것으로 사료된다(Fig. 10 참조).

안동호 표층 엽록소 *a* 농도는 매년 약간의 차이는 있으나 진양호의 0.9~13.6 mg/m³(김 등, 1999), 옥정호의 2.4~18.7 mg/m³(김 등, 1997)과 유사한 수준이며, 합천호의 0.8~20.2 mg/m³(김 등, 1998)보다는 약간 낮은 수준이다. 하계의 엽록소 *a* 농도는 매년 약간의 차이를 보였으나 '94, '96 및 '97년에는 U.S. EPA(1976)의 부영양호 기준 10 mg/m³을 약간 초과하였다.

적 요

안동호의 강우량은 연평균 약 1,076 mm이며, 연간 수위변화는 약 27m로 변화폭이 비교적 크다. 표층수의 수온은 계절별로 4~28°C 범위를 보였으며, 혼합시기(turn-over)의 수온은 4~5°C 내외이었다. 연도별로 하절기의 최저 투명도 값은 '93년부터 '98년까지 각각 2.0, 2.1, 1.8, 1.5, 1.2 및 1.2 m로 매년 점차 낮아지고 있다. 탁도는 강우량이 비교적 많았던 '97년에 호수 전층에서 60~70 NTU로 높았다. 표층수(0~5 m)의 평균 총인(TP) 농도는 약 21 mgP/m³으로 '93년에 11~30 mgP/m³ 범위였으나, '98년에는 18~42 mgP/m³으로 매년 1.85 mgP/m³ 씩 증가하였다. 총질소(TN)의 표층 평균 농도는 '93년에 1.81~2.96 mgN/L의 범위이었으나, '98년에는 1.48~2.57 mgN/L로 점차 감소하였다. TN/TP 무계비의

연변화를 보면 '93년에 82~281이었으나, '98년에는 21~143으로 크게 감소되었다. 용존무기인 (DIP)은 연평균 3.6 mgP/m³이었으며, 질산성질소 (NO₃-N)는 연평균 1.50 mgN/L으로 '95년 이후 점차 낮아지고 있다. 엽록소 a 농도의 하계 평균 표층 (0~5 m) 값은 '93년부터 '98년까지 각각 4.8, 11.2, 6.4, 17.6, 10.0 및 5.0 mg/m³이었다. 따라서 안동호는 총인, 총질소 및 엽록소 농도로 볼 때 중영양호에서 부영양호의 사이에 있는 것으로 판단된다.

인 용 문 헌

- 김범철, 허우명, 전만식, 김징호. 1993. 사료의 인함량에 따른 향어양식으로 부터의 인배출. 한국수질보전학회지 **9**: 114-121.
- 김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙. 1997. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (1): 옥정호. 한국육수학회지 **30**: 431-453.
- 김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙. 1998. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (2): 합천호. 한국육수학회지 **31**: 312-327.
- 김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙. 1999. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (3): 진양호. 한국육수학회지 **32**: 111-126.
- 김윤희. 1998. 홍수시 소양호에서 중층탁류의 이동 및 영향에 관한 연구. 강원대학교 대학원. 석사학위논문. 34-49pp.
- 이기중, 허우명, 김범철. 1993. 대청호 유역과 가두리양어장으로 부터의 인부하량과 인수지. 한국수질보전학회지 **9**: 139-144.
- 한국수자원공사 (KOWACO). 1996. 안동호 다목적댐 관리연보.
- 허우명, 김범철, 조규승. 1991. 소양호 부영양화에 따른 N/P비의 변화와 남조류 Bloom. 한국육수학회지 **24**: 283-288.
- 허우명, 김범철, 안태석, 이기중. 1992. 소양호 유역과 가두리로부터의 인부하량 및 인수지. 한국육수학회지 **25**: 207-214.
- 허우명. 1993. 소양호의 부영양화와 남조류 bloom에 관한 연구. 강원대학교 대학원. 박사학위논문. 60-62pp.
- 허우명, 김범철, 김윤희, 최광순. 1998. 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동. 한국육수학회지 **31**: 1-8.
- 허우명, 김범철, 김윤희. 1999. 달방댐 유입수의 강우에 따른 인농도 변화와 인부하량. 한국육수학회지 **32**: 43-48.
- 황길순, 김동섭, 허우명, 김범철. 1994. 대청호의 일차생산과 가두리양어장 및 유역으로부터의 유기물부하량. 한국육수학회지 **27**: 299-306.
- APHA, Standard methods for the examination of Water and Wastewater. 1992. 18th Ed., American Public Health Association, Washington, DC, 1081 pp.
- Bolesch, J.P., P. Stadelman and H. Buhner. 1977. Primary production and sedimentation in the euphotic zone of two Swiss lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 511-526.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch fur Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Hutchinson, G.E. 1967. Treatise on Limnology. Vol. II. Jhon Wiley and Sons, Inc. New York.
- Kim, B. 1987. An Ecological Study of Phytoplankton in Lake Soyang. Ph. D. Thesis. Seoul National University. 34-38pp.
- Kim, B., J.H. Park, G. Hwang and K. Choi. 1997. Eutrophication of Large Freshwater Ecosystem in Korea. *Kor. J. Limnol.* **30**: 512-517.
- Kim, B. and K.S. Cho. 1989. The hypolimnetic anoxic zone and metalimnetic oxygen minimum layer in a deep reservoir, Lake Soyang. *Kor. J. Lim.* **22**: 159-166.
- Lean, D.R.S. 1973. Movements of phosphorus between its biologically important forms in lake water. *J. Fish. Res. Bd. Can.* **30**: 1525-1536.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: Spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- Schindler, D.W. and E.J. Fee. 1974. Experimental Lakes Area: Whole lake experiments in eutrophication. *J. Fish. Res. Bd. Can.* **31**: 973-953.
- Stauffer, R.E. 1985. Relationships between phosphorus loading and trophic state in calcareous lakes of south-east Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.* **30**: 123-145.
- Tanaka, Y. and R. Tsuda. 1996. Daily fluctuations in thermal stratification, chlorophyll a, turbidity and dissolved oxygen concentration in Lake Biwa. *Jpn. J. Limnol.* **57**: 377-393.
- Tanaka, Y., T. Kimoto and R. Tsuda, 1996. Turbid water penetration from Yasu River into Lake Biwa at the seasonal thermocline. *Jpn. J. Limnol.* **57**: 475-465.
- U. S. EPA. 1976. Water Quality Criteria Research of the U. S. Environmental Protection Agency, Proceeding of an EPA Sponsord Symposium, EPA-600 (3-76-079): 185.
- Welch, E.B. 1980. Ecological effects of waste water. Cambridge Univ. Press. Cambridge. pp. 133.