

섬진강 · 영산강 수계 주요 호소의 수질 동향과 영양상태 조사

이상현 · 신용식* · 장남익¹ · 김종민¹ · 김현구¹ · 조영관² · 정진²

(목포해양대학교 해양시스템공학부,

¹국립환경과학원 영산강물환경연구소, ²광주시수질연구소)

Trophic State and Water Quality in Major Lakes of the Sumjin and Youngsan River Systems. Yi, Sanghyon, Yongsik Sin*, Namik Chang¹, Jongmin Kim¹ Hyunku Kim¹, Young-Gwan Cho² and Jin Jeong² (Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Chonnam 530-729, Korea; ¹Youngsan-River Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Kwangju 500-480, Korea; ²Water Quality Research Institute of Waterworks, Kwangju 503-350, Korea)

This study aimed to analyze water quality (temperature, secchi depth, DO, NH₄, NO₃, PO₄, TN, TP, chlorophyll a) and trophic state index during the period of year 2000~2004 in Lake Juam, Lake Dongbok and Lake Youngsan. Lakes Juam and Dongbok except Lake Youngsan were stratified during warm seasons. Water turbidity estimated by secchi disk depth was the highest in Lake Youngsan compared with other lakes. DO concentrations were low in the bottom water when chlorophyll a was high in Lake Juam and Dongbok. Nutrient concentrations were higher in Lake Youngsan than other lakes whereas chlorophyll a was highest in Lake Dongbok. Lake Youngsan was the most eutrophic compared to other two lakes based on the Trophic State Index (TP) and TSI (SD). The TSI (CHL) was high but the TSI (TP) were low in Lake Juam and Dongbok. These results suggest phytoplankton may be limited by phosphates (P) in Lake Juam and Dongbok whereas light availability in the water column may affect growth of phytoplankton in Lake Youngsan.

Key words : Lake Juam, Lake Dongbok, Lake Youngsan, phytoplankton, water quality, trophic state index

서론

호소의 부영양화는 일반적으로 무기영양염류의 유입량 증가에 의해 호소내 식물의 생산력 또는 현존량이 증가하는 현상으로 (Welch and Lindell, 1992) 이로 인해 식물성플랑크톤이 대량 발생하게 되면, 수중의 중속영양 소비자들 뿐만 아니라 영양물질과 용존산소의 분포에도 영향

을 미친다. 또한 수체에 pH를 증가 시키며, 호소의 유기물 함량을 증가시키고, 수중 산소고갈과 그에 따른 생태계 파괴 및 악취 발생을 일으킨다. 또한 동물과 인체에 유해한 독성물질을 생산하기도 하며, 정수처리 시 응집을 저해하고, 여과지 폐색 등의 정수처리장애훈을 유발시켜 (박등, 2000) 국내 용수자원 수질악화의 가장 보편적인 주요 요인으로 등장하고 있다. 특히 상수원일 경우, 이취미 문제 및 조류 독소 문제, 수중의 용존산소 감소문제가 크게

* Corresponding author: Tel: 061) 240-7054, Fax: 061) 240-7284, E-mail: yongsik@mmu.ac.kr

대두 되고 있다. 그러므로 식물플랑크톤의 동태와 영양상태에 대한 조사는 효율적인 수질관리에 절대적으로 필요하게 되었다. 호소자체의 수리, 수문학적 차이뿐만 아니라 호수내의 수중 생태계를 구성하고 있는 먹이망에서 생물들간 그리고 생물과 환경간의 상호작용의 형태가 다르기 때문에 부영양화가 진행되는 과정이나 영양상태는 호소별로 다르게 나타난다.

담수에서는 인이 주요 제한영양염으로 존재하기 때문에 총인의 유입량 증가로 인해 엽록소의 증가와 투명도의 감소가 발생한다. 따라서 영양상태는 총인, 엽록소, 투명도의 상관성이 밀접하게 나타난다(김 등, 1988; 박, 2005). Carlson은 영양상태를 정량적으로 나타내기 위해 이들 총인, 엽록소, 투명도의 수치로부터 계산된 부영양화도 지수를 제안하였다(Carlson, 1977). 국내에서도 부영양화도 지수를 활용하여 주요 호소의 영양상태를 보고 하였으며(신과 전, 2002; 이 등, 2002; 서 등, 2003; 박, 2005; 유 등, 2005) 특히 이 등(2002)은 주요 10개 호소의 영양상태를 평가하였다.

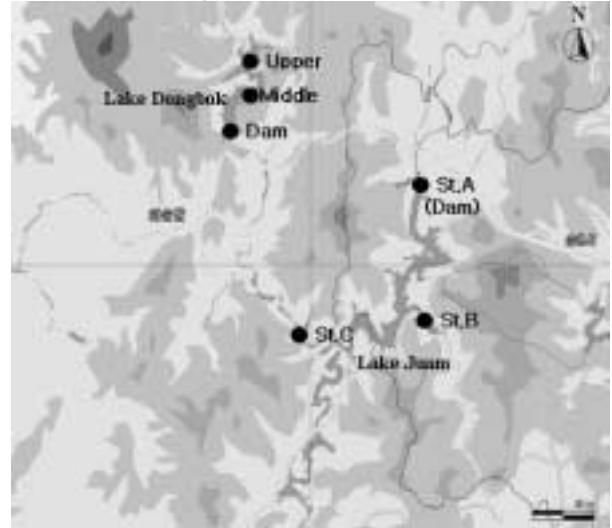
주암호와 동북호는 상수원으로 이용되고 있으며 영산호는 농업용수로 이용되어 각 호소의 사용 용도는 다르나 현재 섬진강과 영산강 수계가 통합관리 되고 있다. 이 호소들의 영양상태는 배 등(2000)과 조 등(1999)의 연구 결과에 보고되어졌으나 광주 · 전남지역의 중요한 수자원으로 이용되는 것에 비해 영양상태 및 수질조사 등의 학술적 보고가 부족한 실정이며 또한 이들 호소가 일괄적으로 관리되고 있는 실정에서 3개 호소 각각의 특징을 종합적으로 고찰한 연구들이 부족하다. 그러므로 본 연구는 상수원으로 이용되는 주암호와 동북호 그리고 농업용수로 이용되는 영산호의 수질과 영양상태를 비교하여 영산강 · 섬진강 수계의 효율적인 수자원 관리를 위한 정보 및 기초 자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사시기 및 조사지점

본 조사는 2000~2004년 동안 섬진강 수계의 주암호, 동북호와 영산강 수계의 영산호를 대상으로 댐 인근수역에서 각각 1개의 정점을 조사하였다(Fig. 1A, B). 주암호는 2001년 이후부터는 1~2월과 12월(겨울)을 제외한 나머지 기간에 조사가 이루어졌으며 2000~2001년에는 월 2회, 2003년에는 월 1회, 2004년에는 년 4회로 실시하였다. 동북호는 매년 월 1회로 조사하였다. 한편 영산호에서는 겨울(12월, 1~2월)동안을 제외한 시기에 2000

A) Lake Juam & Dongbok



B) Lake Younsan



Fig. 1. Sampling stations in the the Lakes Juam, Dongbok (A) and Younsan (B).

년과 2002~2003년에 월 1회, 2004년에는 년 4회로 실시하였다.

본 연구 조사 지역인 섬진강 수계에는 5개 호소가 있으며 전 호소가 담수호 형태를 취하고 있다. 이중 주암댐은 다목적댐으로 이용되고 있으며, 동북댐은 생활용수를 목적으로 관리되고 있다. 주암댐은 광주광역시와 여수, 순천, 광양 등 호남 일원의 용수난을 해소하기 위한 목적으로 건설한 댐으로 본댐과 조절지댐(이사천댐)으로 이루어져 있다. 전남 순천시 주암면에 있는 본댐은 높이 57 m, 길이 330 m로 유역면적이 1,010 km², 저수용량은 4억 5천7백만 m³, 홍수조절용량은 6천만 m³이고, 1992년 12

월에 완공하여 생활용수 공급과 전력생산에 용이하게 이용되고 있다. 동북댐은 광주·전남지역의 상수원수를 확보하기 위하여 1971년 2월에 준공되었으나, 인구의 도시 집중화 등으로 인한 식수량의 수요 증가에 따라 1976년과 1977년 두 차례에 걸쳐 댐 높이를 19.3 m에서 44.7 m로 높여 현재 9,200만 m³의 저수량을 확보하기에 이르렀다(한국수자원공사 <http://www.kowaco.or.kr>). 영산강 하구둑은 길이 4,350 m, 최대높이 20 m, 저수량은 2억 5,000만 m³이고 영산강지구 농업종합개발계획 2단계 사업의 핵심 사업으로 건설되어 1981년 12월에 완공되었으며 공업용수와 농업용수로 이용되고 있다.

2. 수질조사

수질측정항목인 수온, 탁도 및 DO (Dissolved Oxygen)는 Hydrolab사의 Surreyor 4와 Minisonde를 이용하여 표층(surface, 수면 1 m 아래)과 저층(bottom, 바닥에서 1 m 위)에서 측정하였다. 투명도는 Secchi Disc를 사용하여 측정하였으며, 채수는 Van Dorn 채수기를 이용하였다. 채수된 수질시료는 얼음상자에 냉장 보관하여 실험실로 이송한 후, 실험실에서 NO₃, NH₄, PO₄, TN (Total Nitrogen) 및 TP (Total Phosphorus)를 측정하였다. NH₄은 채수된 시료를 실험실에서 45 mm GF/C 여지로 여과 한 후 여액을 250 mL PE병에 담아 냉동보관 후 Parsons *et al.*

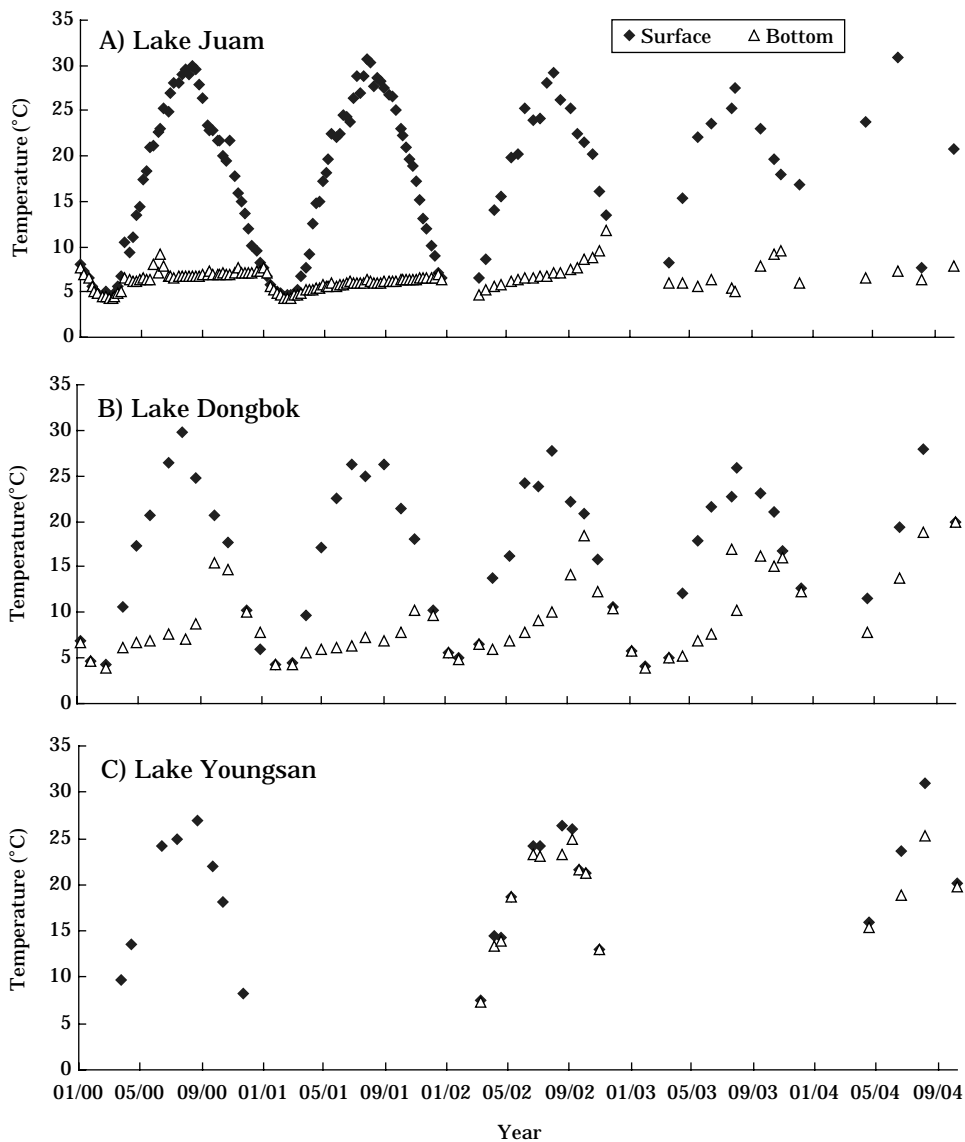


Fig. 2. Temporal variations of temperature (2000~2004) in the Lakes Juam, Dongbok and Youngsan.

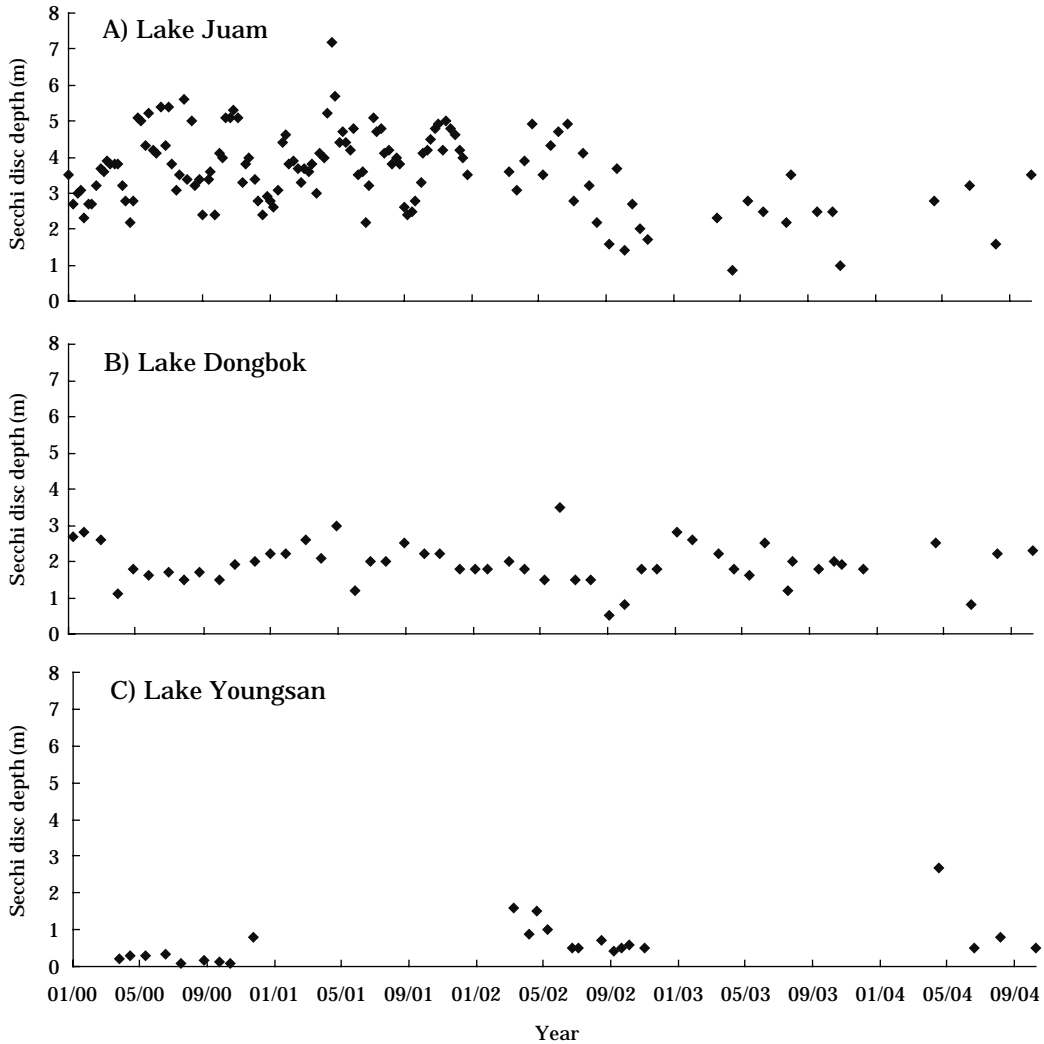


Fig. 3. Temporal variations of secchi disk depth (2000~2004) in the Lakes Juam, Dongbok and Youngsan.

(1984)에 준하여 자동분석기 (ALLIANCE Evolution II)로 측정하였고, PO₄는 IC (Ion Chromatography)를 이용하여 측정하였고, 이외의 다른 화학적 인자들은 수질오염공정시험법 (환경부, 2000)에 따라 분석하였다. 2000~2003년 클로로필 a는 표층 시료 500~1,000 mL를 직경 45 mm GF/C 여지로 여과하여 90% Acetone으로 냉암소에서 24 시간 동안 추출한 후 흡광광도계 (Perkin-Elmer Lambda 40)를 이용하여 750, 665, 647, 630 nm의 파장으로 흡광도를 측정한 후 공정시험법에 따라 계산하였고, 2004년에는 채수된 시료 50 mL를 유리 섬유 여과지로 필터하였고 사용된 필터들을 클로로필 추출용액인 아세톤 90% 8 mL가 담긴 차광 시험관에 넣고 12시간이 지난 후 24 시간 내로 Turner Designs 10-AU Fluorometer를 사용하여 측정하였다.

3. 영양상태 조사

주암호와 동북호의 상, 중, 하류지역과 영산호에서의 영양상태는 Carlson에 의한 Trophic State Index (Carlson, 1977)를 이용하여 평가하였다. Carlson에 의해 제언된 지수 계산 공식은 아래의 수식과 같으며 (수식 1~3), 투명도 (SD)의 단위는 m, 클로로필 a (CHL)은 µg L⁻¹, 총인 (TP)은 mg L⁻¹이다. 각 항목별 조사된 수치 및 농도는 수식에 대입하여 계산하였으며 0~100까지 지수로 나타낸다.

$$TSI(SD) = 10 \left(6 - \frac{\ln(SD)}{\ln(2)} \right) \tag{1}$$

$$TSI(CHL) = 10 \left(6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln(CHL)}{\ln(2)} \right) \tag{2}$$

$$TSI(TP) = 10 \left(6 - \frac{\ln(0.48/TP)}{\ln(2)} \right) \quad (3)$$

본 연구에서는 TSI의 지수를 통해 5단계의 영양상태를 분류한 Ktatzner and brezonik (1981)에 따라서 TSI가 20 이하는 극빈영양, 30~40은 빈영양, 45~50은 중영양, 53~60은 부영양, 70 이상은 과영양으로 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 물리적 환경인자

조사기간 동안 (2000~2004) 주암호와 동북호에서는

겨울을 제외한 시기에 표층과 저층의 수온차이로 인해 성층화 현상을 볼 수 있었으나 영산호에서는 나타나지 않았다 (Fig. 2). 주암호의 수온약층은 4월 이후에 형성되어 수층이 표층과 심층으로 나누어져 하계에 매우 강한 성층을 보여주며 추계로 가면서 표층의 수온이 저하되고 심층으로의 열전달이 일어나 혼합층의 깊이가 깊어져 2월에 수체가 완전히 혼합되었다. 주암호의 성층화 현상은 계절별 수온구조 및 열수지에 관한 연구를 통해서도 보고되었다(김 등, 2001; 선 등, 2003). 호소 내부의 오염물질 이동은 내부순환 즉 수온이나 유속에 의해 영향을 받게 되는데 (Imberger, 1998) 일반적으로 호소에서는 기온이 높은 여름에 표층과 저층간에 온도차이가 커 성층화

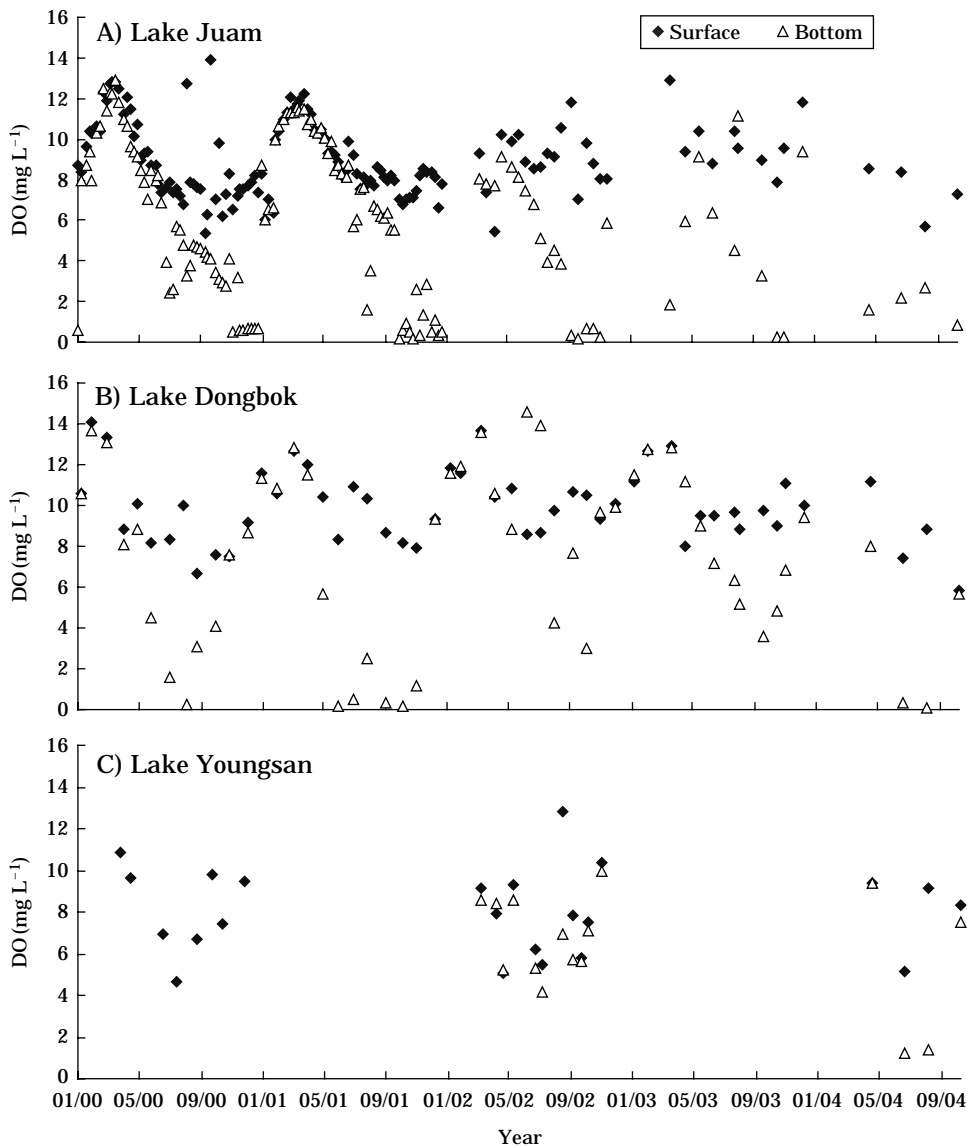


Fig. 4. Temporal variations of dissolved oxygen (DO, 2000~2004) in the Lakes Juam, Dongbok and Youngsan.

를 나타나게 되며 이로 인해 상하 혼합이 제한되어 저층 수로의 산소이동이나 저층수에서 미생물에 의해 발생하는 영양염의 순환이 제한된다. 각 호소의 계절적 수온 분포를 보면 주암호에서는 4.3~30.9°C, 동북호에서는 3.9~29.7°C, 영산호에서는 7.3~31.0°C의 범위를 보이고 있다. 주암호의 투명도는 0.9~7.2 m, 동북호에서는 0.5~3.5 m로 하계에 낮게 나타나는 경향을 보였으며 이는 선행연구(김 등, 1998)에서도 나타났다. 1998 영산호에서는 0.1~2.7 m로 평균적으로 다른 호소에 비해 낮은 투명도를 보였고 전기에 높은 투명도를 보여준 조 등(1999)의 보고와 비슷하게 나타났다(Fig. 3). 주암호에서는 클로로필 *a* 농도가 증가한 2002년 9월 이후 투명도가 낮아졌으며 특히 2003년 4월 조사에서 클로로필 *a* 농도가 159.1 µg L⁻¹으로 높게 나타났을 때에 0.9 m로 가장

낮은 투명도를 보여 이 시기에 self-shading (Kirk, 1994)이 발생하였다고 볼 수 있다.

2. 화학적 환경인자와 식물플랑크톤

용존산소 농도는 주암호에서 0.2~13.9 mg L⁻¹, 동북호에서 0.1~14.6 mg L⁻¹, 영산호에서 1.3~12.8 mg L⁻¹로 나타났다(Fig. 4). 주암호와 동북호에서는 식물플랑크톤의 생물량이 높게 나타나는 가을에 저층의 용존산소 농도가 0.2~0.9 mg L⁻¹로 낮았으며 이런 저층의 저산소 현상은 김(1998)과 이 등(2000)의 연구결과에도 나타났다. 여름에서 가을까지 이어지는 성층화로 인해 수계의 상하 혼합이 제한되어 저층으로 공급되는 산소가 부족하게 되었고, 또한 가을철에 대량 증식된 식물플랑크톤이 동물플랑크톤을 포함한 상위포식자들에 의해 포식되지 않고 저

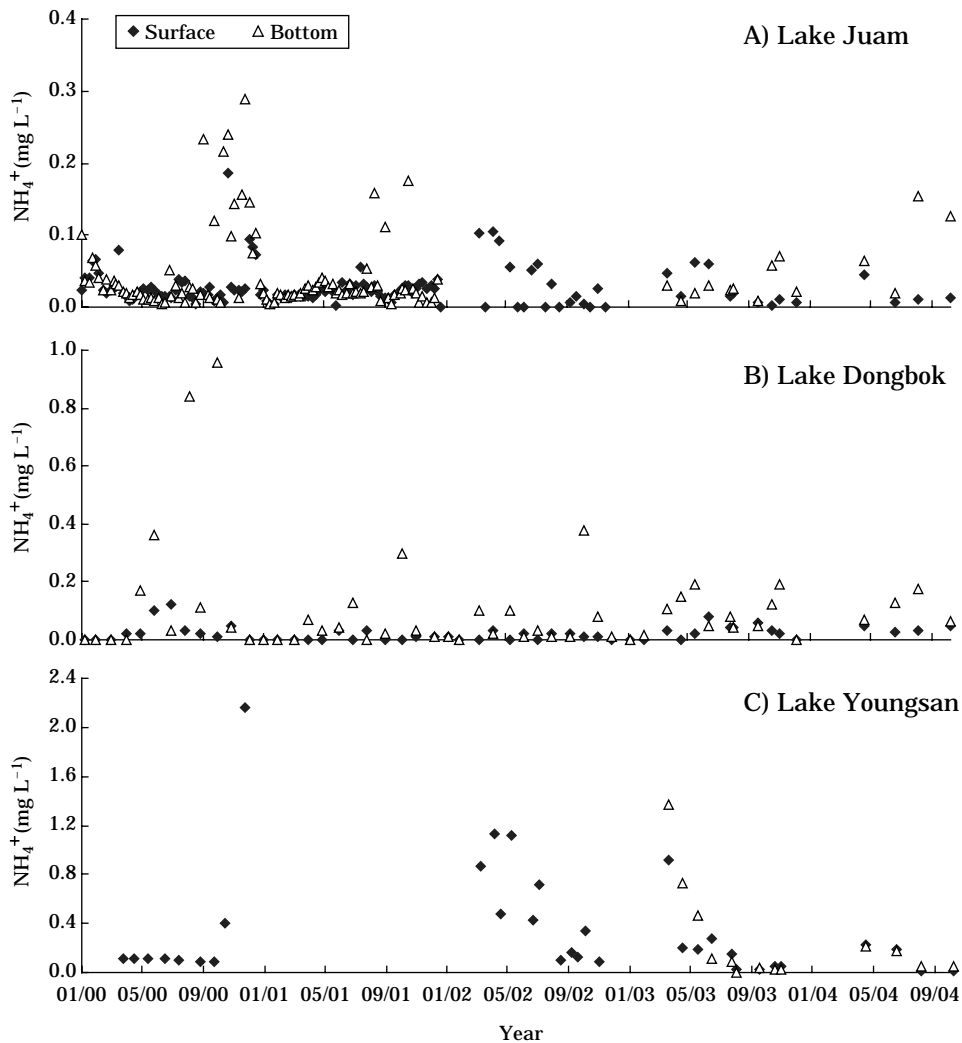


Fig. 5. Temporal variations of ammonium (2000~2004) in the Lakes Juam, Dongbok and Youngsan.

층으로 침전되어 박테리아 등의 미생물 활동으로 인해 분해되면서 산소 소모량이 증가하였기 때문에 판단된다. 부영양화가 심해지면 저층의 용존산소가 고갈되며 많은 양의 인산염이 용출되고, 황화수소와 메탄가스와 같은 환원 가스가 발생하여 악취를 유발하고 호소의 생물상에 큰 악영향을 주기 때문에 성층화가 일어나는 호소에서의 저층 산소고갈은 많은 문제점을 야기한다. 이 등(2000)에 따르면 동북호에서는 1999년 8~10월까지 용존산소가 2.0 mg L^{-1} 로 나타났으며 이 기간 동안에 철, 망간, 총인, 총질소의 농도가 뚜렷이 증가하는 것으로 나타났다. 호소 저층의 산소고갈 및 저산소 현상은 국내 대형인공호에서 많이 나타나고 있다(김, 1998; 신 등, 2002; 박 등, 2004).

암모니아 농도는 주암호에서 $0.000 \sim 0.289 \text{ mg L}^{-1}$, 동북호에서는 $0.000 \sim 0.960 \text{ mg L}^{-1}$, 영산호에서는 $0.006 \sim$

2.163 mg L^{-1} 으로 나타나 평균적으로 영산호에서 높은 농도를 보였다(Fig. 5). 주암호에서는 2000년 이후부터 2003년까지 감소경향을 보였으나 2004년에 다시 높게 나타났고 동북호에서는 시간에 따라 감소하였다. 한편 조사기간 동안 주암호와 동북호에서는 김 등(2003)의 결과와 비슷하게 여름과 가을에 표층에 비해 저층의 암모니아 농도가 높았다. 이는 식물플랑크톤을 포함한 유기물의 분해 시 생성된 암모니아가 수온에 의한 성층의 영향으로 물질순환이 원활히 이루어지지 않아서 저층에 고농도로 분포하는 것으로 판단된다. 영산호에서는 2000년 이후 암모니아 농도가 높았으며 2002년과 2003년 겨울, 봄에 암모니아 농도가 높게 나타났으며 이는 김(2003)의 연구결과와 비슷하다.

질산염은 주암호에서 $0.000 \sim 1.242 \text{ mg L}^{-1}$, 동북호에서

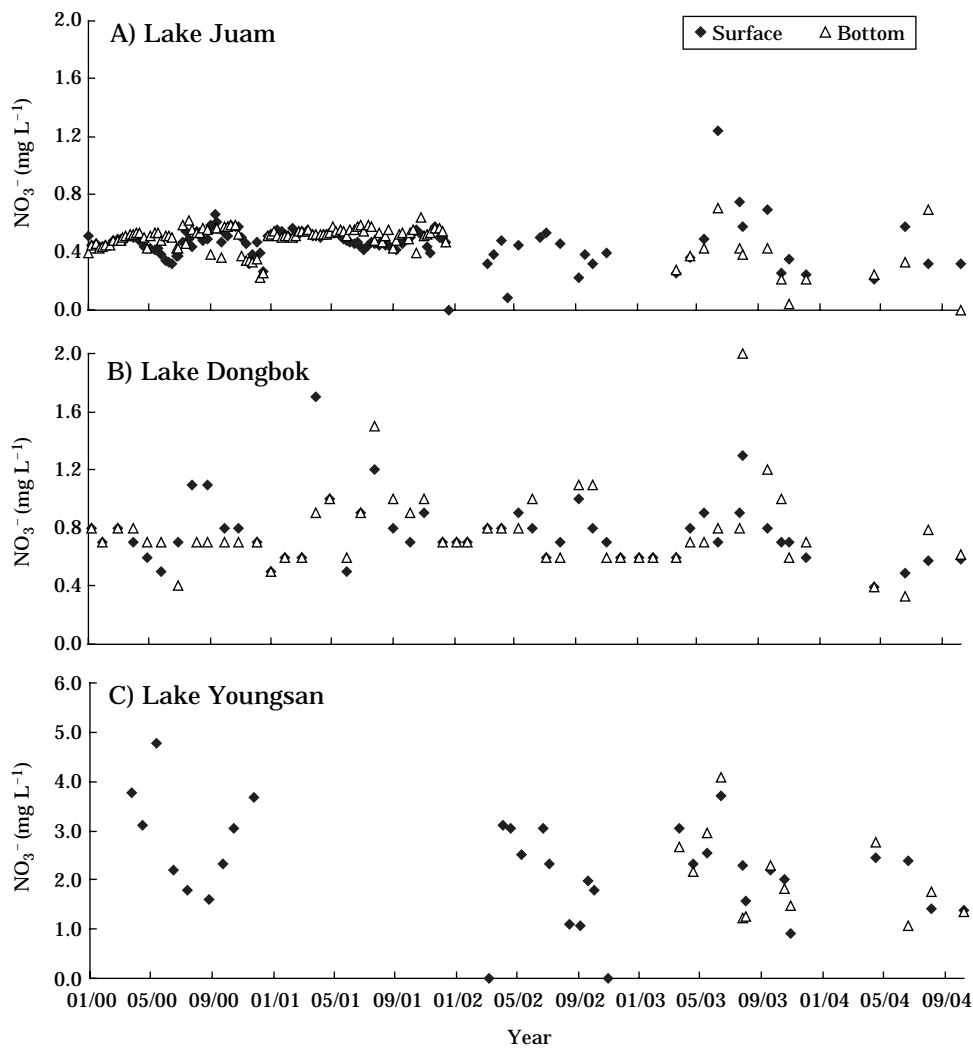


Fig. 6. Temporal variations of nitrate (2000~2004) in the Lakes Juam, Dongbok, and Youngsan.

는 $0.332 \sim 2.000 \text{ mg L}^{-1}$, 영산호에서는 $0.917 \sim 4.788 \text{ mg L}^{-1}$ 로 영산호에서 높았다 (Fig. 6). 주암호는 2002년과 2004년에 낮은 농도를 보였으며 동북호에서는 2001년 이후 감소 경향을 보였으며, 영산호에서도 계절적 변동은 있으나 2000년부터 감소하는 경향을 보였다. 주암호와 동북호에서의 질산염 분포는 강우시기인 여름철에 증가한 후 가을철 식물플랑크톤에 의한 동화로 질산염의 농도는 감소하는 경향으로 선행연구 결과들(김 등, 2001; 김 등, 2003)과 비슷하게 나타났다. 영산호는 봄 또는 여름에 높게 나타나며 가을에 낮은 경향을 나타내고 있으며 이런 계절적 분포는 선행연구에서도 보고되었다(조 등, 1999).

담수에서 식물플랑크톤의 성장에 주요인자로 작용하는 인산염은 주암호, 동북호 및 영산호에서 각각 $0.000 \sim$

0.026 mg L^{-1} , $0.000 \sim 0.016 \text{ mg L}^{-1}$ 및 $0.015 \sim 0.234 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 영산호에서 높은 농도를 보였다 (Fig. 7). 주암호의 인산염 농도는 2000년 겨울과 봄에 높은 농도를 보인 후 시간에 따라 감소하였고 식물플랑크톤이 대량으로 번식했던 2002년 겨울과 봄에 높았다. 동북호의 인산염 분포는 2001년 겨울과 봄에 저층에서 높았고 그 이후 식물플랑크톤의 증식으로 감소하였으며 2002, 2003년 여름에 높은 인산염 농도 또한 가을철 식물플랑크톤이 대량발생하면서 감소하는 경향을 보였다. 주암호와 동북호에서는 인산염이 높은 농도를 보인 후 식물플랑크톤의 증식이 발생하였으며 이에 따라 인산염의 농도가 감소함을 알 수 있는데 이는 인산염이 식물플랑크톤의 성장에 있어서 중요한 작용을 하였을 것으로 판단된다. 영산호의 인산염은 조 등(1999)에 따르면 여름에 낮고 겨울에 높은 농도

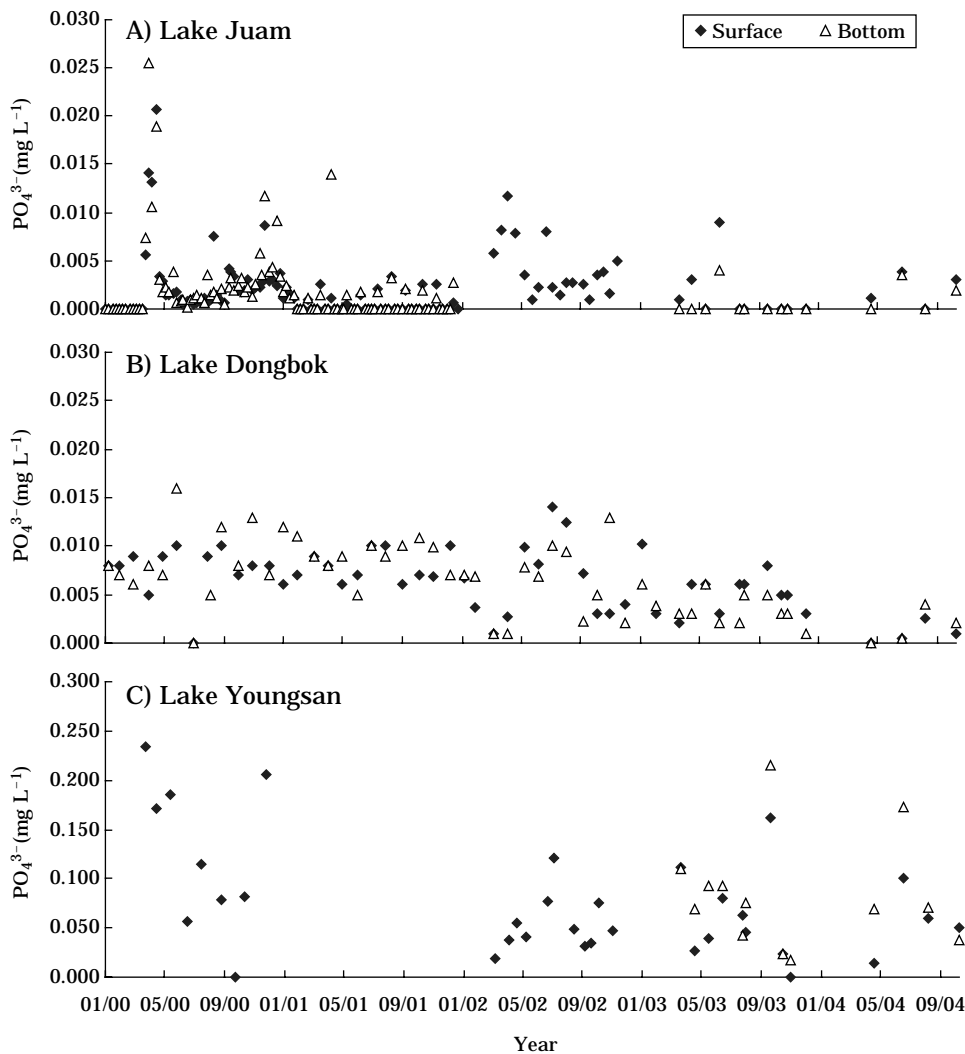


Fig. 7. Temporal variations of orthophosphate (2000~2004) in the Lakes Juam, Dongbok, and Youngsan.

를 보여주었으나 본 연구결과에서는 여름에 높았고 가을로 가면서 낮아지는 경향을 보였다.

TN은 주암호, 동북호 및 영산호에서 $0.000 \sim 1.413 \text{ mg L}^{-1}$, $0.336 \sim 1.685 \text{ mg L}^{-1}$, $1.126 \sim 8.809 \text{ mg L}^{-1}$ 를 보였고 TP는 각각 $0.000 \sim 0.087 \text{ mg L}^{-1}$, $0.003 \sim 0.079 \text{ mg L}^{-1}$, $0.048 \sim 1.090 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 영산호에서 높게 나타났다 (Figs. 8, 9). 조사기간 동안 주암호와 동북호의 TN은 봄 이후부터 여름철 강우에 의한 영양염 유입으로 증가하기 시작하여 식물플랑크톤이 대량 발생하는 가을 이후부터 감소하였다. 선행 연구결과 (김 등, 2001; 이 등, 2005)는 주암호의 총질소는 겨울과 봄에 높으며 질산염과 비슷한 계절적 분포를 보여 본 연구결과와는 다르게 나타났다. 영산호에서는 식물플랑크톤의 번식이 높은 시기인 봄 동

안 높으며 가을에 낮은 분포를 보였고 이는 윤 등 (2003)의 연구 결과와 비슷하게 나타났으며 조 등 (1998)의 결과에서는 6월 강우 초기에 높은 농도를 보인 것으로 보고하였다. 주암호, 동북호, 영산호의 총인은 대체로 여름에 높게 나타나 선행연구들 (김 등, 2001; 윤 등 2003; 이 등, 2005)의 결과와 비슷하다.

클로로필 *a*는 주암호에서 $0.1 \sim 176.3 \mu\text{g L}^{-1}$, 동북호에서는 $0.3 \sim 190.83 \mu\text{g L}^{-1}$, 영산호에서는 $0.3 \sim 115.43 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 동북호에서 가장 높았고 영산호에서 낮았다 (Fig. 10). 주암호에서는 2002, 2003년 가을에 높았으며 동북호에서는 주암호에서 대량 번식이 있기 전 2001년 가을부터 높은 농도를 보였고 시간에 따라 증가하는 경향을 보였다. 즉 주암호와 동북호에서는 시간에 따라 내부 생산,

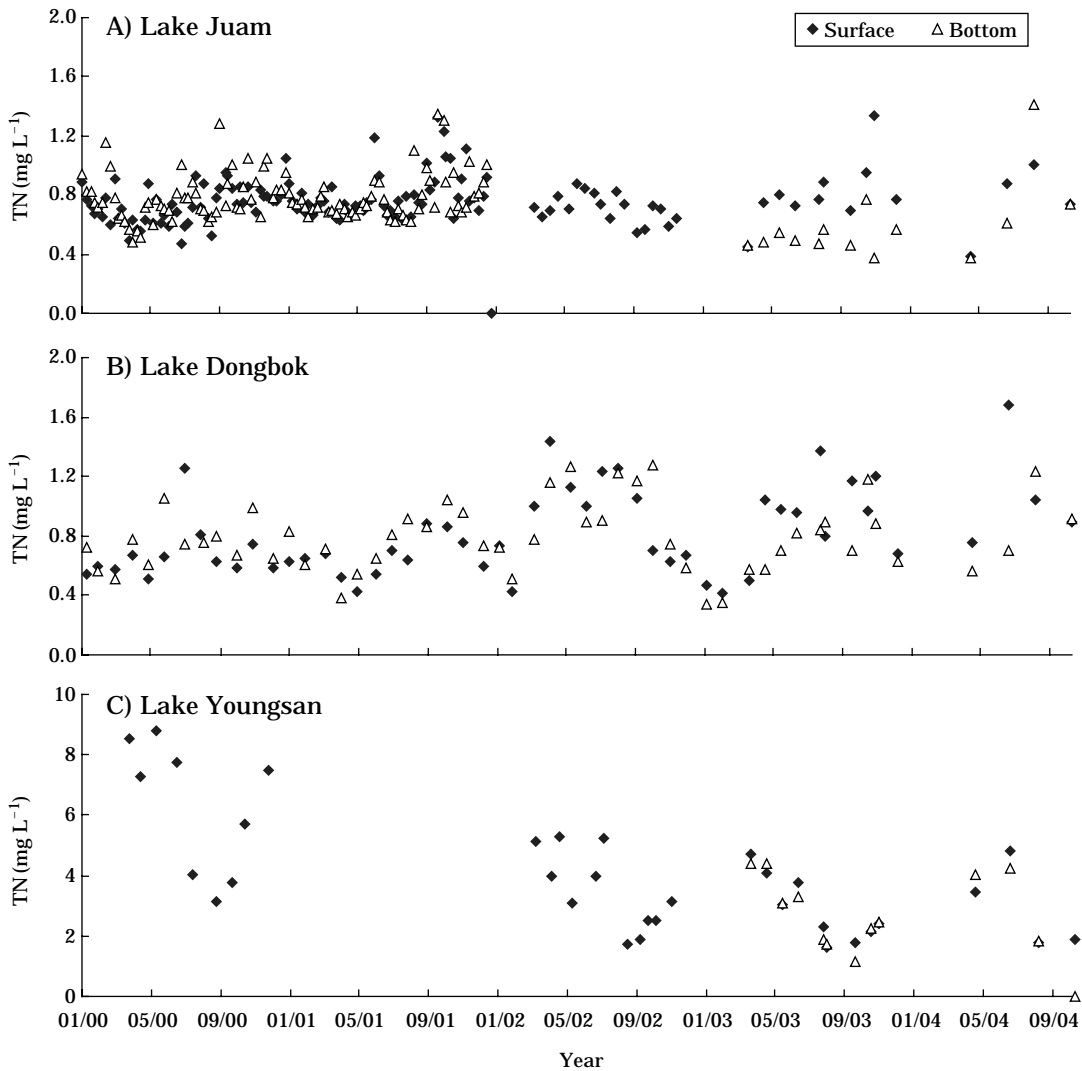


Fig. 8. Temporal variations of total nitrogen (2000~2004) in the Lakes Juam, Dongbok, and Youngsan.

클로로필 *a* 농도가 증가추이를 보여주고 있어 내부생산에 의한 유기물 증가가 문제시 될 것으로 생각된다. 영산호에서는 2000년에는 봄과 가을철 두 번의 높은 분포가 있었으나 2002년 이후부터 늦봄 또는 여름에 높은 농도를 보였고 시간에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.

3. 영양상태 평가

호소의 영양수준을 평가하는 시도는 1919년 스웨덴의 Naumann에 의해 소개된 후 부영양화와 밀접한 관계를 가진 수질항목을 기준으로 평가하는 방법과 영양상태지

수에 의한 평가 방법이 이용되고 있다(유 등, 2005). 수질항목에 의한 평가방법은 측정이 간단하고 수체의 여러 특성을 종합적으로 고려할 수 있는 반면에 수질인자 간에 영양상태의 평가 결과가 다르게 나타날 경우 영양상태를 판단하는데 어려움이 있다. 한편 영양상태지수(Carlson, 1974)에 의한 평가 방법은 수질의 제반특성을 종합적으로 고려할 수 있으며 부영양화의 발생여부 및 진행정도를 0~100 사이의 연속적인 수치로 표현하여 정량적으로 나타낸 방법이다.

TSI는 온도에 의해 제한 받지 않고 영양염류의 농도가 클로로필 *a* 농도로 대표되는 조류의 생산성과 직접적인

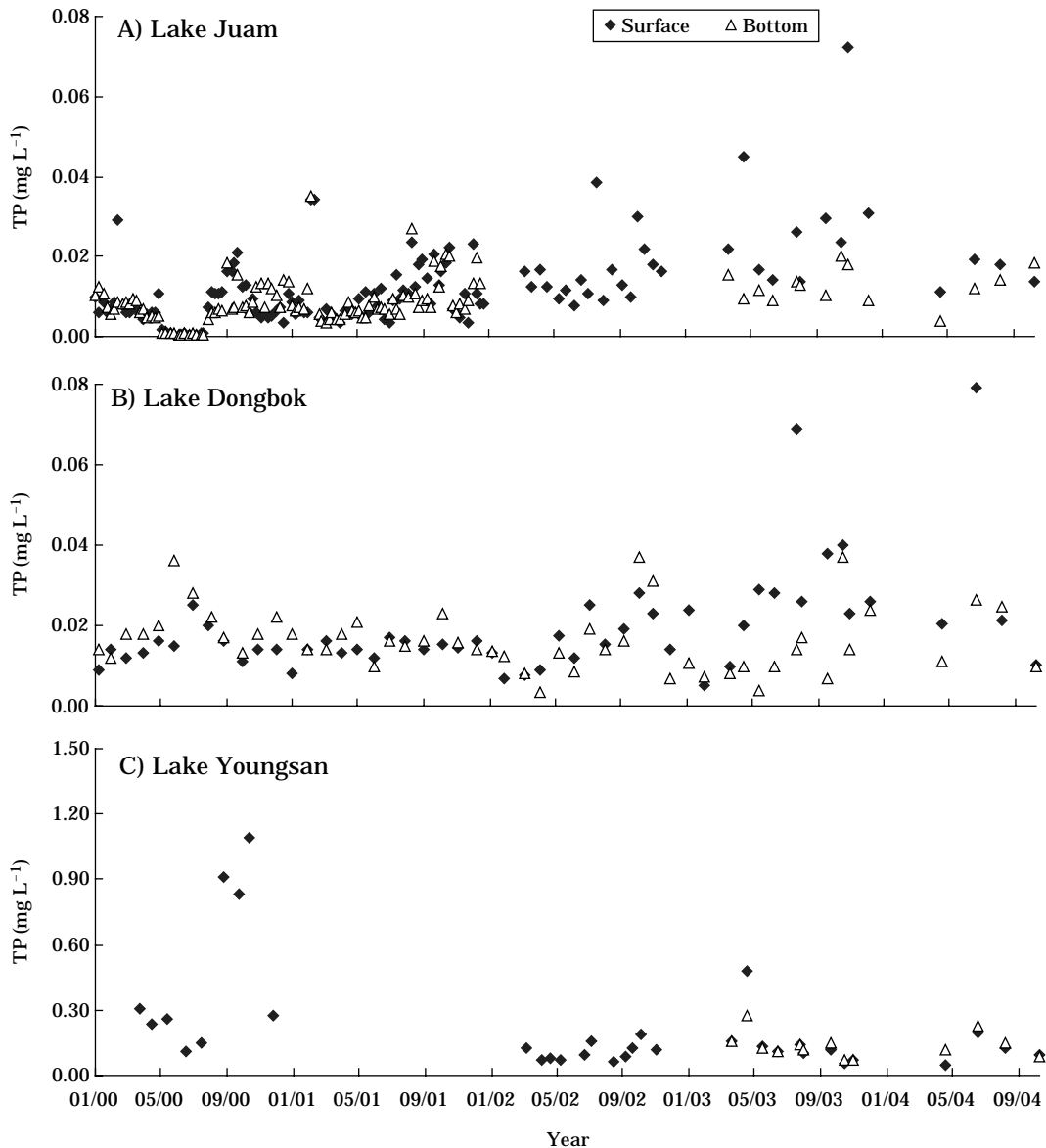


Fig. 9. Temporal variations of total phosphorus (2000~2004) in the Lakes Juam, Dongbok, and Youngsan.

상관관계를 명확히 보여주는 시기(여름)의 투명도와 클로로필 a 농도, 총 인 농도사이의 상관관계를 나타내는 지표이기 때문에 주로 하절기 자료가 TSI 계산에 활용되고 있다(김과 최, 1996). 본 연구에서는 영양상태의 계절적인 차이점을 파악하기 위해 영양염의 유입이 많은 시기인 여름과 식물플랑크톤의 생존량이 높게 나타나는 가을로 나누어 조사하였으며 또한 연평균 수치를 이용하여 잠재적 제한 인자들을 조사하고자 하였다.

여름 동안 주암호의 영양상태 지수는 평균적으로 낮았으며 영산호에서 높았다(Fig. 11A, D, G). 주암호와 동북호에서는 평균적으로 TSI (CHL)의 지수가 높았으며 영산호에서는 주암호와 동북호에 비해 TSI (SD)와 TSI (TP)가 높았는데 2000년에는 각각 85 ± 5 , 84 ± 1 로 매우 높았으며 시간에 따라 감소하여 2004년에는 67 ± 3 , $77 \pm$

3으로 나타났다. Ktatzter and Brezonik (1981)의 기준에 따르면 주암호에서 빈, 중영양을, 동북호에서는 중, 부영양을 영산호에서는 부, 과영양을 나타내었다.

가을에도 여름과 비슷하게 주암호에서 부영양지수가 낮으며 영산호에서 높았다(Fig. 11B, E, H). 주암호, 동북호에서는 TSI (TP)가 낮으며, TSI (CHL)이 높았는데 2000년 이후부터 2003년까지 증가 추이를 보였다. 영산호에서는 TSI (SD)와 TSI (TP)가 높았는데 2000년에는 TSI (SD), TSI (TP), TSI (CHL)이 각각 82 ± 9 , 97 ± 3 , 66 ± 6 으로 매우 높았다. 영산호의 TSI는 시간에 따라 감소하였고 특히 주암호와 동북호에서 TSI (CHL)이 증가 추이를 보인 반면에 영산호에서는 매우 감소하여 이들 호소의 내부 생산성의 차이를 보여주고 있다. 가을의 각 호소들의 영양상태를 보면 주암호에서는 빈, 중영양에서

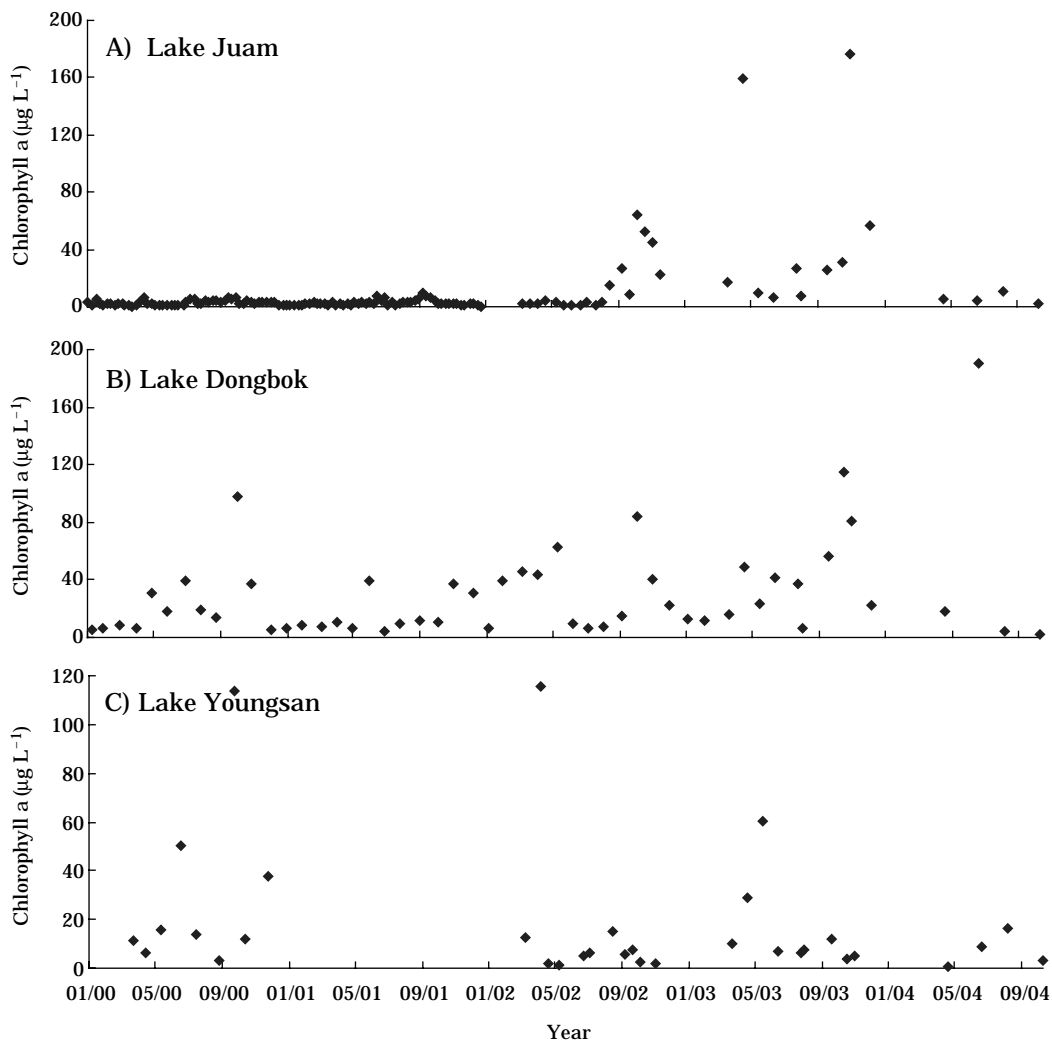


Fig. 10. Temporal variations of chlorophyll a (2000~2004) in the Lakes Juam, Dongbok, and Youngsan.

2002년 이후 중부영양으로, 동북호에서는 중, 부영양을 나타냈으며, 영산호에서는 2000년 과영양에서 감소하여 부영양상태를 보였다.

연평균 각 호소의 부영양화도 지수는 주암호에서 낮고 영산호에서 높다 (Fig. 11C, F, I). 주암호에서는 2003년을 제외하고 TSI (TP)가 낮으며 TSI (CHL)이 높으며 2002년 이후 중영양 상태를 보였고 동북호에서는 TSI (CHL)이 높았으며 중, 부영양을 보였고 영산호에서는 TSI (SD), TSI (TP)가 높았으며 부, 과영양상태를 보였다. 주암호에서는 선행연구들에서도 중영양 상태를 나타내었고 (배 등, 2000; 김 등, 2001), 영산호에서는 부영양상태를 넘어 과영양상태가 된 것으로 보고하였다 (조 등, 1998).

여름과 가을의 부영양화지수 차이를 각 호소별로 나누어 보면 주암호에서는 2001년 여름동안 TSI (TP)가 매우 낮게 나타났으며 2002~2003년에 TSI (CHL)이 가을에 비해 여름에 낮았다. 동북호 주암호와 비슷하게 TSI (TP)는 계절별 큰 변동을 보이지 않으나 TSI (TP)가 미소하게 여름에 높았고 TSI (CHL)은 가을철에 매우 높게 나타났음을 알 수 있다. 즉 주암호와 동북호에서는 여름에는 강우에 의한 입자성물질의 유입으로 TSI (TP)가 높을 것으로 여겨졌으나 여름과 가을에 차이를 보이지 않았고 2004년을 제외한 가을에는 여름철 강우를 통해 유입되었을 TP에 비해 발생하는 클로로필 a양이 많아 TSI (CHL)이 다른 TSI 지수 항목에 비해 높게 나타났다. 영

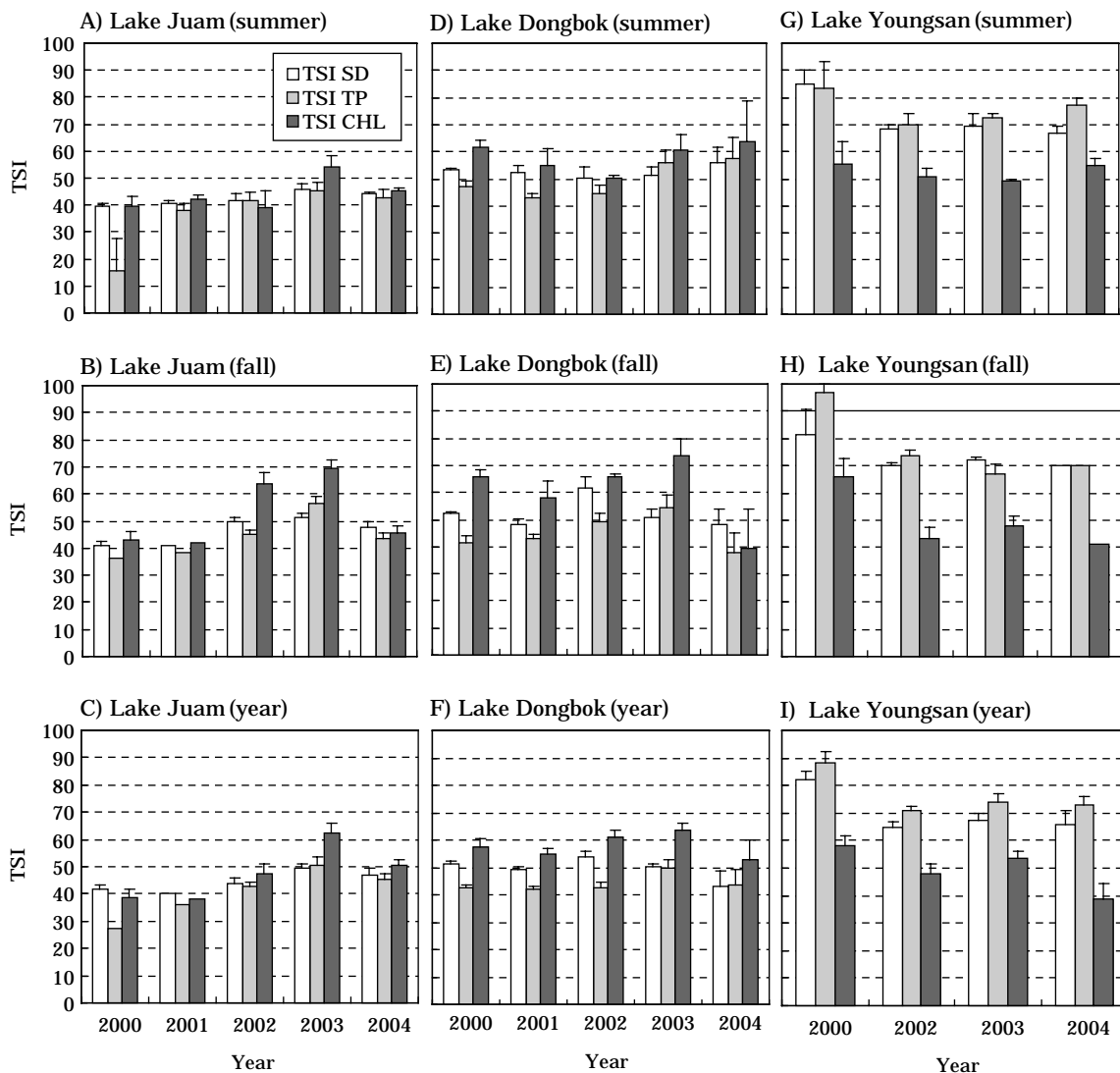


Fig. 11. The trophic state index averaged over the summer, fall and a year cycle from 2000 to 2004 in the Lakes Juam, Dongbok and Youngsan.

산호에서는 2000년 TSI (PT)가 가을에 높게 나타났으며 2004년 여름에 TSI (TP)가 높게 나타난것을 제외하고는 특별한 차이를 보이지 않고 있다.

그러므로 영양상태 지수는 단순히 여름의 자료만을 토대로 부영양화 상태를 평가하기보다는 가능한 모든 자료를 사용한 후 종합적으로 판단하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 또한 영양상태를 판정하기 위해서는 특정한 시기 즉 강우시기에 의한 현탁물 증가로 인해 투명도가 매우 감소하는 등의 비정상적인 현상을 고려해야 하며 1~2년 정도의 단기간 자료로는 판단의 오차가 생길 수 있으며 평가하는데 있어 한계가 있기 때문에 여러 해 동안의 조사를 통해 평가하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

Havens (2000)는 TSI (CHL)이 TSI (TP)보다 훨씬 작다면 인이 아닌 다른 요인이 조류의 성장을 제한한다고 유추할 수 있으며 만약 TSI (CHL)이 TSI (SD)보다 훨씬 작다면 호소 내 seston 중 아주 작은 무생물적 입자들의 구성비가 높다고 추정할 수 있음을 보고하였고 이 경우 빛이 제한 요인으로 될 것으로 판단하였다. 반대로 TSI (CHL)이 TSI (TP)보다 작지만 TSI (SD)보다 크다면 수중의 빛을 산란시키는 입자들이 크기가 크다고 추정할 수 있고 이 경우 조류의 성장은 동물플랑크톤의 섭식에 의해 제한 받을 가능성이 크다고 보고하였다. 또한 TSI (CHL)에 비해 TSI (TP)는 낮을 경우 인산염이 식물플랑크톤의 제한영양염으로 작용할 가능성이 있는 것으로 보고하였다.

본 연구에서 주암호의 경우 부영양화 지수항목 중 TSI (CHL)이 높게 나타나는 반면 TSI (TP)는 낮게 나타나고 있어 인산염이 식물플랑크톤의 제한영양염으로 작용할 가능성을 나타내고 있다. 배 등 (2002)은 주암호의 수질을 악화시키는 가장 큰 원인을 유역으로부터 오염물질의 지속적인 유입이며 인구와 축산활동이 주요 배출원인 것으로 보았으며 이 때 수화의 발생과 조류의 사멸이 반복되고 있는 것으로 보고하였다. 이와 같이 주암호의 인근이 상수원 보호지역이나 소규모의 인구 분포와 축산업으로 인해 인을 포함한 영양염이 유입되어 중영양상태를 나타내고 있으며 호소내의 1차 생산을 증가시키는 것으로 판단된다.

동북호에서도 주암호에서와 마찬가지로 TSI (CHL)이 다른 항목에 비해 높게 나타나고 있으며 TSI (TP)가 낮아 주암호에서와 마찬가지로 인산염이 조류성장에 있어 주요 영양염으로 작용할 가능성이 있는 것으로 사료된다. 영산호는 TSI (CHL)에 비해 TSI (TP)와 TSI (SD)가 매우 높게 나타나고 있다.

영산호의 부영양화지수의 중요한 특징은 TSI (TP)와

TSI (SD)의 지수는 큰 감소를 보이지 않고 있으나 TSI (CHL)은 다른 항목에 비해 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있어 입자성 물질들의 증가에 따른 광량의 감소는 식물플랑크톤에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 또한 이는 호소로 유입되는 인 부하량의 증가와 영산호의 짧은 체류시간으로 설명될 수 있는데 김 등 (1995)에 의하면 체류시간이 짧은 팔당호에서는 총인의 농도가 약 4배 증가한 것에 비해 클로로필 *a*의 증가는 약 2배 정도의 증가를 보였고 이는 호소에 유입된 인은 식물플랑크톤이 광합성 하는데 필요한 소비속도와 소비량은 수체의 체류시간과 상관관계를 갖게 되어 체류시간이 짧은 호소의 경우 인을 이용할 시간이 짧기 때문에 높은 농도의 인이 식물플랑크톤의 생체량에 큰 기여를 하지 못할 것으로 판단하였다. 즉 영산호에서 나타나는 높은 TSI (TP)에 비해 낮은 TSI (CHL)은 영산호의 짧은 체류 시간에 의한 영향도 어느 정도 작용하였을 것으로 판단된다. 이러한 연구 결과들은 현재 일괄적으로 관리되고 있는 호소들이 호소 나름대로의 고유한 특성을 내포하고 있음을 보여주고 있으므로 향후 효율적인 수질관리를 위해 필요한 정보 및 자료로 이용 될 것으로 여겨진다.

적 요

조사 시기 동안 (2000~2004년) 주암호와 동북호에서는 겨울을 제외한 시기에 표층과 저층의 수온차이로 인해 성층화가 발생하였지만 영산호에서는 나타나지 않았다. 투명도는 주암호>동북호>영산호 순으로 영산호에서 낮은 투명도를 보였으며 주암호와 동북호에서는 식물플랑크톤의 생물량이 높게 나타나는 가을 저층에는 저산소 상태로 수질 악화를 나타내었다. 암모니아, 질산염, 인산염 TN, TP는 주암호와 동북호에 비해 영산호에서 높게 나타났으나 클로로필 *a*는 평균적으로 동북호에서 높았으며 영산호에서 낮았다. 3개호소의 여름, 가을 연평균 영양상태는 평균적으로 영산호>동북호>주암호 순으로 영산호에서 높았다. 주암호와 동북호에서는 TSI (CHL)>TSI (SD)>TSI (TP) 순으로 나타나 조류성장에 있어 인산염이 제한영양염으로 작용할 가능성을 나타내었으며 영산호에서는 TSI (TP)>TSI (SD)>TSI (CHL) 순으로 나타났다. 영산호에서는 인산염에 의한 제한보다는 탁도 즉 광량에 의한 제한이 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 주암호는 빈, 중영양을 보였으며, 동북호에서는 중, 부영양을 영산호에서는 부, 과영양을 보였다.

사 사

현장조사와 자료분석에 도움을 준 목포해양대학교 해양환경미생물실험실원들께 감사드립니다.

인 용 문 헌

김동섭, 김범철, 황길순, 박주현. 1995. 팔당호의 부영양화 경향 (1998~1994), 한국수질보전학회지 **11**: 295-302.

김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최종수. 2001. 국내 주요 호수의 육수학적 조사(4): 주암호, 육수지 **24**: 30-44.

김범철, 안태석, 조규송. 1988. 한강수계 인공호의 부영양화에 관한 비교 연구, 육수지 **21**: 151-163.

김용재. 1998. 보문호의 LSI에 의한 영양상태 판정, 환경생물 **16**: 107-116.

김용재. 2003. 영산강의 식물플랑크톤 군집 동태, 한국조류학회지 'Algae' **18**: 207-212.

김원재, 최의소. 1996. 국내의 부영양화 지수 활용에 관한 연구, 한국수질보전학회 논문초록집. pp. 11-15.

박재철, 김동섭, 이승환. 2004. 금오지의 수환경 및 부영양화 평가, 한국환경과학회지 **13**: 389-2004.

박종근. 2005. 대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가, 육수지 **38**: 382-392.

박혜경, 천세억, 박승익, 이문호, 유재근. 1992. 국내 주요댐호에 있어서의 계절별 종류종 천이, 한국수질보전학회지 **8**: 150-158.

배상욱, 이용운, 이성우, 정선용. 2000. 주암호 영양상태 및 인 부하 분석, 환경영향평가 **9**: 291-300.

서정관, 유재정, 이재정, 양상용, 정익교. 2003. 운문호의 식물플랑크톤 군집동태와 영양단계 평가, 한국조류학회지 'Algae' **18**: 135-143.

선연중, 조 철, 김병춘, 허인에, 윤준현, 장남익, 차성식, 조양기. 2003. 주암호의 계절별 수온 구조와 열수지 변화, 육수지 **36**: 227-285.

신윤근, 전상호. 2002. 아산호의 생태학적 연구 1. 이화학적 특성과 영양상태, 육수지 **35**: 181-186.

정 준, 김한순, 김용재, 1994. 낙동강 하구댐의 식물플랑크톤 군집구조, 육수지 **27**: 33-46.

조기안, 안병권, 홍순강, 정동욱. 1999. 영산강하류의 계절 변화에 따른 수질특성과 유기인산염의 분해율에 관한 연구 I- 부영양화를 중심으로-, 한국환경과학회지 **8**: 691-697.

유순주, 채민희, 황종연, 이재안, 박종겸, 최태봉. 2005. 담수 이후 용담호 영양상태 변동 요인 분석, 한국물환경학회지 **21**: 360-367.

윤석태, 고영구, 오강호, 문병찬, 김해경. 2003. 영산강 하류권역 하천수의 수질평가, 환경영향평가 **12**: 259-270.

이기호, 백순기, 김백호. 2005. 주암호 식물플랑크톤 군집 동태-와편모조 *Peridinium bipes*를 중심으로, 육수지 **38**: 249-260.

이대행, 조영관, 이정진. 2000. 동북호 퇴적물이 수질에 미치는 영향, 공동춘계학술발표회 논문집. pp. 307-310.

이정호, 박종근, 김은정. 2002. 국내 주요 호수의 식물플랑크톤 종조성 및 영양단계 평가, 한국조류학회지 'Algae' **17**: 275-281.

Barnes, R.S.K. and K.M Mann. 1991. Fundamentals of Aquatic Ecology. Blackwell Scientific Publications. Oxford.

Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.

Forsberg, O., S.-O. Ryding, A. Forberg and A. Claesson. 1978. Water chemical analyses and/or algal assay? Sewage effluent and polluted lake water studies. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 252-363.

Fujimoto, N. and R. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N : P supply ratios and temperatures. *Limnol. Oceanogr.* **42**: 250-256.

Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environment: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 796-822.

Imberger, J. 1998. Physical processes in lakes and oceans. American Geophysical Union, Washinton D.C.

Karl, E.H. 2000. Using Trophic State Index(TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data. *Korea J. Limnol.* **33**: 187-196.

Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A Carson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Res. Bull.* **17**: 713-715.

Redfield, A.C. 1985. The biological control of chemical factors in the environment. *Amer. Sci.* **46**: 205-255.

Seppälä, J., T. Tamminen, S. Kaitala. 1999. Experimental evaluation of nutrient limitation of phytoplankton communities in the Gulf of Riga. *J. Mar. Syst.* **23**: 107-126.

Smith, V.H, 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Sci.* **221**: 669-671.

Welch, E.B. and T. Lindell, 1992. Nutrient limitation. In: Ecological effects of wastewater, 2nd. Chapman & Hall Press, London, pp. 34-135.

Wetzel, R., 2001. Limnology. In: Lake and River Ecosystem, 3rd ed. Academic Press.

(Manuscript received 16 May 2006, Revision accepted 30 August 2006)