

## 화진포호의 수환경변화에 관한 연구

허우명\* · 최상규 · 곽성진 · 발데브 · 이은주<sup>1</sup>

(강원대학교 환경공학과, <sup>1</sup>한국플랑크톤연구소)

The Study of Water Environment Variations in Lake Hwajinpo. Heo, Woo Myung\*, Sang Gyu Choi, Sung Jin Kwak, Bal Dev Bhattraï and Eun Joo Lee<sup>1</sup> (Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Samchok 245-711, Korea; <sup>1</sup>Institute of Korean Algaetech, Gangneung 210, Korea)

This study is conducted to know the change in water environment of Lake Hwajinpo from 2000 to 2008 with physico-chemical parameters; salinity, dissolved oxygen, total phosphorus and total nitrogen and others. And zooplanktons and phytoplanktons were studied from 2007 to 2008. From the water quality data of Lake Hwajinpo from 2000 to 2008; water temperature, salinity, transparency, chemical oxygen demand and dissolved oxygen ranges are 2.8~29.4°C, 0.23~33.2‰, 0.2~1.8 m, 0.2~20.2 mg L<sup>-1</sup> and 0.1~17.4 mg L<sup>-1</sup> and the average values are 18.0°C, 15.7‰, 0.7 m, 5.7 mg L<sup>-1</sup> and 8.0 mg L<sup>-1</sup>, respectively. Total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) ranges are 0.024~0.869 mg L<sup>-1</sup> (average 0.091) and 0.240~5.310 mg L<sup>-1</sup> (average 1.235). Average TN/TP ratio is 16.4. The annual variations in COD, TP, TN and Chl.a are compared. COD in 2000 is 4.83 mg L<sup>-1</sup> and 2008 is 1.80 mg L<sup>-1</sup> which is reduced by 0.34 mg L<sup>-1</sup> every year. TP in 2000 is 0.07 mg L<sup>-1</sup> and 2008 is 0.05 mg L<sup>-1</sup> reduced gradually. Yearly reduction in TN is 0.09 mg L<sup>-1</sup>, in 2000 and 2008 the values are 1.54 mg L<sup>-1</sup> and 0.77 mg L<sup>-1</sup> respectively. Chl.a in 2000 is 46.30 µg L<sup>-1</sup> and 5.78 µg L<sup>-1</sup> in 2008; yearly reduction is 4.50 µg L<sup>-1</sup>. The trophic state index (TSI) in south and north parts of Lake Hwajinpo in 2000 are 67 and 63 which are reduced to 63 and 59 in 2008 respectively. North and south part of Lake Hwajinpo have 67 species of phytoplankton under 47 families in 2007 and 2008. Dominant species in south part in 2007 are; *Asterococcus superbis* in May, *Lyngbya* sp. in September and *Trachelomonas* spp. in November and in 2008 *Anabaena spiroides* in August are abundant and varies with time. Zooplankton species in Lake Hwajinpo are 25 of 25 families. Dominant species in south part in May and August 2007 and May and November in 2008 Copepoda larvae and in September 2007 *Protozoa* spp. of Protozoan and *Brachionus plicatilis* and *Brachionus urceolaris* of Cladocera in August 2008. Dominant species in north part *Asplanchna* sp. of Cladocera in August and November 2007 and rest of the time are larvae of Copepoda. In this way, the water quality of Lake Hwajinpo is changing with slow rate in the long period specially nutrients concentration (TP, TN etc) is decreasing.

**Key words :** Lake Hwajinpo, brackish lagoon, nutrients, TSI

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

## 서 론

동해안의 석호는 파도나 해류의 작용으로 해안선에 생기는 사주(砂洲)에 의해 하천의 하구가 막혀서 생성된 기수호(汽水湖)로, 염분은 대체로 5~15‰를 보인다. 일반적으로 염분이 5‰ 이하이면 담수생태계가 형성되고, 15‰ 이상이면 해양생태계가 형성된다고 알려져 있다. 동해안에는 총 18개의 석호가 있으며 이중 화진포호는 동해안의 최북단에 위치한 호수로서, 그 형상이 잘 보존되어 있고 염분농도가 비교적 높은 전형적인 기수호이다. 수심이 얕음에도 불구하고 표층과 심층의 수직혼합이 극히 제한되어 심층 산소 고갈 현상이 자주 발생하며, 담수와 해수가 공존하는 특성 등으로 인해 화학성층이 형성된다(허 등, 1999; 신 등, 2000; Ueda *et al.*, 2000; Gray *et al.*, 2002; McLusky and Elliott, 2004; Tsutsumi, 2006; 최 등, 2008). 이러한 이유로 미국, 일본 등 선진국에서는 기수역의 부영양화 문제를 하천수질관리의 중요한 과제로 인식하여 기수역에 대한 환경조사지침서를 제작하고 수질 개선기법을 개발하는 연구를 하고 있다(Kramer *et al.*, 1994; Kennish, 2000; Orive *et al.*, 2002; 汽水域の河川環境の捉え方に關する検討會, 2004).

화진포호는 유역에 산재한 비점오염원 등으로부터 다량의 영양염류가 유입되어 종종 식물플랑크톤의 대량 증식 및 어류폐사 등이 발생하고 있다(원주지방환경청, 2009). 일반적으로 인의 유입이 많은 경우 식물플랑크톤의 현존량 및 생산력이 증가하고 투명도가 감소하게 된다. 또한 호수의 N/P 비율이 10~17 이상일 경우 P가 N에 비해 상대적으로 결핍된 것으로 평가하며 일차적으로 조류의 성장을 제한하는 것으로 알려져 있다(Smith, 1982).

화진포호는 과거에 군사시설에 대한 일반인의 출입 제한으로 다른 석호에 비해 상대적으로 인위적인 간섭을 적게 받아 왔다(엄, 1998; 염 등, 2002). 따라서 화진포호는 주변 경관이 아름답고 자연환경이 잘 보존되어 있어 1971년에 강원도 기념물 제10호로 지정되어 현재까지 보호되고 있다. 그러나 1990년대 이후부터 군사지역의 규제 완화에 따라 1991년 국민관광휴양지로 지정되면서 호수 주변지역에 각종 숙박 및 위락시설 등이 조성되었으며 일반인의 출입이 가능하게 됨에 따라 경작 등에 의해 오염물질 유입이 가중되고 있다. 원주지방환경관리청(1997)의 보고에 따르면 화진포호의 주요오염원은 가축에 의해 기인된다고 하였으며, 중평천과 월안천, 그리고 2~3개의 소하천으로부터 오염원이 유입되어 적조현상이 나타나는 부영양화 현상을 보이고 있다고 하였다. 고

성군에서는 수질개선을 위해 습지조성과 수초재배심 조성 등의 사업을 수행하였으며, 낚시금지구역과 조수보호 구역을 설정하여 화진포호를 보호, 관리하고 있다.

홍 등(1969)은 화진포호에서 2회에 걸쳐 이화학적 수질과 플랑크톤상을 연구한 바 있으며, 엄(1971)은 기수호인 화진포와 영랑호 등을 대상으로 식물플랑크톤 군집의 생산구조를 Chl.a의 수직분포로서 파악하고 이로써 각 호소의 유형화를 시도하였다. 홍과 나(1975)는 향호, 매호, 영랑호, 송지호, 광포호 및 화진포호 등을 대상으로 4회에 걸쳐 수질과 플랑크톤을 조사하여 육수학적 특징을 밝힌 바 있다. 조 등(1975)은 같은 시기에 향호, 매호, 영랑호, 광포호, 송지호 및 화진포호 등 6개 기수호에 대하여 플랑크톤의 분포를 조사하고 수질과의 관계에 따른 기수호의 특성을 연구하였다. 김 등(1981)은 이화학적 수질 특성, 생산잠재력, 부유생물, 저서생물 및 유영생물 등을 조사한 바 있다. Osamu *et al.* (1984)은 요소, 용존유기탄소, 질소 및 인에 관하여, 편(1984) 등은 기수호 환경 및 생물상 등을 조사 보고한 바 있다. 전 등(1996)은 동해안 자연 호수의 수질조사와 관련하여 동해안 대부분의 자연호가 Chl.a와 총인을 기준으로 볼 때 과부영양화 수준에 있음을 지적하였다. 원주지방환경청(1998, 1999, 2002, 2003, 2004, 2005)에서는 동해안 주요 석호에 대해 일반현황, 오염원 및 수질조사를 오랜 기간 실시해 오고 있다. 허 등(1999)도 수질 및 식물플랑크톤 등의 자료를 토대로 동해안 석호의 부영양화 평가를 시도하였다. 권(2002)은 화진포호에서 수질, 식물플랑크톤, 저질 자료 등을 조사 분석하여 육수생태학적 특성을 밝힌 바 있다. 원주지방환경청(2006, 2007, 2008, 2009)은 최근에 동해안 석호에 대해 복원 기본계획을 수립하고, 생태계 정밀조사 및 복원지침을 수립한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 화진포호의 장기적인 수환경변화를 알아보기 위하여 2000년부터 2008년까지 이화학적 요인(수온, DO, 염분, COD, 총인, 총질소 등) 및 Chl.a를 분석하였으며, 2007년과 2008년에는 동·식물플랑크톤 현존량을 추가로 조사 분석하였다.

## 재료 및 방법

화진포호는 호소면적이 2.06 km<sup>2</sup>, 유역면적 20.07 km<sup>2</sup>, 호수길이 16 km, 및 평균 수심이 1.2 m이다(Table 1). 수표면적은 북호에 비해 남호가 4배, 유역면적은 3배 정도 크다. 수위 변동은 강우시를 제외하고는 유입수량이 적고, 동해와 인접하고 있어 비교적 작다. 화진포호 지역의

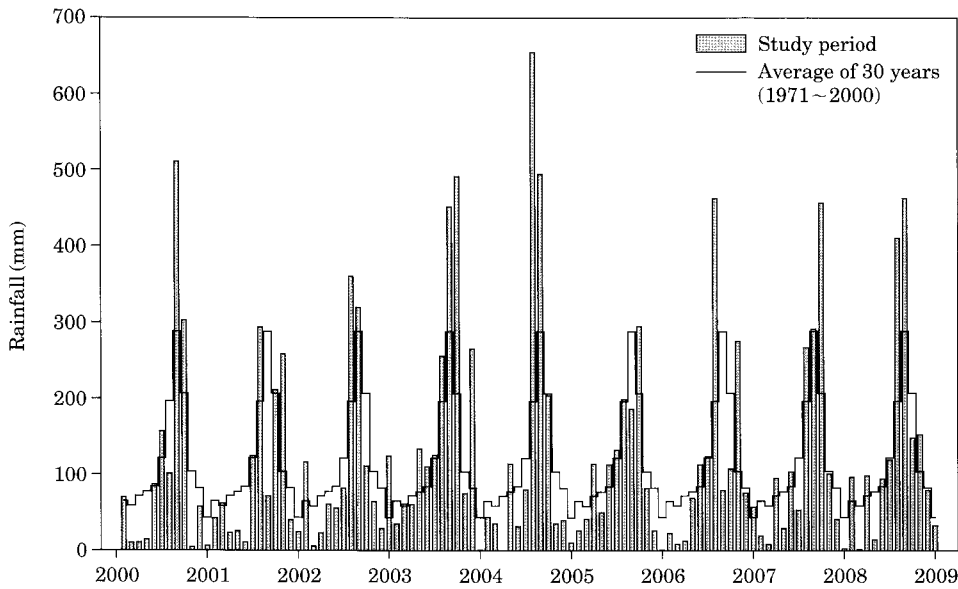


Fig. 1. Rainfall variation during the period of 2000~2008.

**Table 1.** Hydrological characteristics and utilization of drainage basin and generation loadings (N, P) of Lake Hwajinpo.

|  |                      |
|--|----------------------|
| Lake area (km <sup>2</sup> )                 | 2.06                 |
| Watershed area (km <sup>2</sup> )            | 20.07                |
| Lake area/Catchment area                     | 0.10                 |
| Average catchment altitude (m)               | 48.64                |
| Average catchment slope (%)                  | 16.15                |
| River/stream length (km)                     | 16.02                |
| Catchment density (km km <sup>-2</sup> )     | 0.80                 |
| River mouth direction                        | North                |
| Inflow river shape                           | Verticality          |
| Seawater inflow chances                      | Possible             |
| Surrounding land use                         | paddy, farms, forest |
| Generation N loading (kg day <sup>-1</sup> ) | 242                  |
| Generation P loading (kg day <sup>-1</sup> ) | 66                   |

지난 30년간 연평균 강수량은 약 1,342mm이었으며, 여름철인 6월부터 9월 사이에 전체 연 강수량의 약 60% 정도가 집중되는 것으로 나타났다(Fig. 1). 2000년에는 약 1,345mm로 6월부터 9월 사이에 약 80% 정도의 강우가 집중되는 현상을 보였다. 특히, 최근 몇 년간은 엘리뇨현상과 태풍 루사(2002), 매미(2003) 및 메기(2004) 등에 의해 강우량의 분포가 일정하지 않았다. 화진포호의 수리수문학적 특성은 Table 1과 같으며, 질소와 인의 오염발생량은 각각 242와 66 kg day<sup>-1</sup>이다.

수질조사는 2000년부터 2008년까지 남호와 북호 각각 2개의 정점에서 겨울의 결빙시기를 제외하고 2개월 간격으로 조사하였다(Fig. 2). 시료는 PVC Van Dorn 채수기

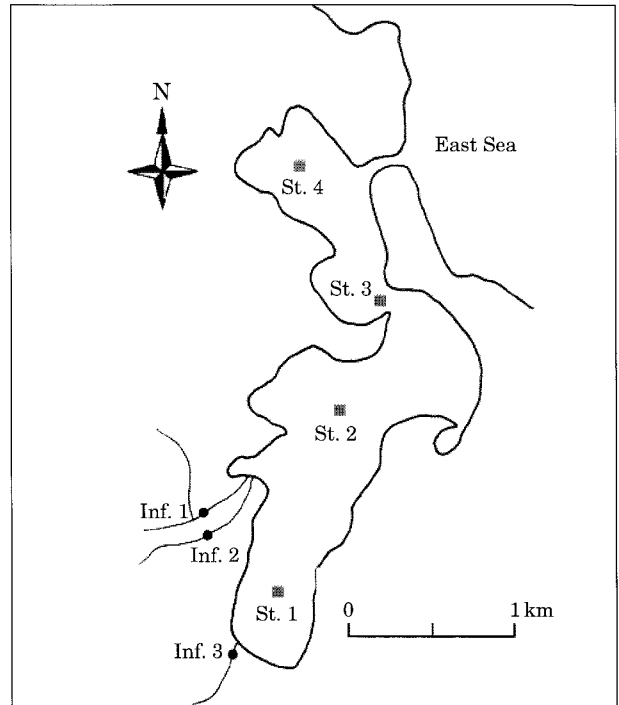


Fig. 2. Map showing the sampling sites of Lake Hwajinpo.

를 사용하였다. 채수된 시료는 실험실로 즉시 운반하여 GF/C glass fiber filter paper로 여과하였다. 여과지는 냉동보존하였다가 엽록소 a (Chlorophyll-a; Chl.a) 측정에 사용하였고 Lorenzen(1967)의 방법으로 농도를 계산하였다. 여과한 물은 영양염류 분석을 위해 사용하였으며

질산성질소(Nitrate nitrogen;  $\text{NO}_3$ ) 및 암모니아성질소(Ammonia nitrogen;  $\text{NH}_3$ )는 수질자동분석기(AutoAnalyzer3, BRAN±LUEBBE), 용존 무기인( $\text{PO}_4\text{-P}$ )은 Standard methods (APHA, 1992)의 ascorbic acid법으로 분석하였다. 총인(Total Phosphorus; TP)과 총질소(Total nitrogen; TN) 분석용 시료는 여과하지 않은 시료를 사용하여 persulfate digestion 후 총인은 ascorbic acid법, 총질소는 cadmium 환원법을 이용한 수질자동분석기(AutoAnalyzer3, BRAN±LUEBBE)를 이용하여 분석하였다. 화학적 산소 요구량(Chemical Oxygen Demand; COD)은 과망간산칼륨법(수질오염공정시험방법)으로, 투명도는 30 cm 투명도판을 사용하여 측정하였으며 수온, 용존산소량(Dissolved Oxygen; DO), 염분도(Salinity), 전기전도도(Electrical Conductivity; EC) 및 수소이온농도(pH)는 Multiprobe (YSI556MPS)을 이용하여 현장에서 측정하였다.

부영양화도 지수(TSI)는 2000년부터 2008년까지 식물플랑크톤의 성장시기를 고려하여 하계평균치(5~9월)를 사용하였으며 Carlson(1977) 및 Kratzer and Brezonik(1981)가 제안한 방법으로 계산하였다. 동식물플랑크톤은

2007년과 2008년에 5월, 8월 및 11월에 채집하여 정량 분석하였다.

식물플랑크톤은 표층수를 채수하여 500 mL 폴리에틸렌 시료병에 담아 Lugol 용액으로 현장고정 후 약 2주일 이상 침강시킨 후 (APHA·AWWA·WPCF, 1989) siphon으로 상등 액을 뽑아내는 방식으로 농축시켰다(Sukhanova, 1978). 세포의 계수는 Palmer-Maloney counting chamber를 사용하였으며, 광학현미경을 이용하여 400~1,000배에서 검경하였다. 동물플랑크톤의 채집은 표층수를 채수기로 채수하여 표층수 2L의 물을 동물플랑크톤 넷트(mesh size 80~100  $\mu\text{m}$ )를 이용하여 거른 후 농축하여 250 mL 폴리에틸렌 시료병에 담아 현장에서 포르말린으로 고정한 후 실험실로 옮겨서 광학현미경 400~1,000배에서 검경한 후 계산하였다. 동식물플랑크톤의 종 동정은 Mizuno(1964), Hirose and Yamogishi(1977), Chihara and Murano(1997)에 의하였다. 종의 다양성 지수는 Shannon-Wiener diversity index (Shannon, 1949)를 사용하여 산출하였다.

**Table 2.** A statistical summary of nutrient concentrations, their ratios, and the relevant hydrographical parameters measured during the entire campaign period (2000~2008).

|   | Mean  | 1SD <sup>a</sup> | 1SE <sup>b</sup> | Min   | Max   | N   |
|---|-------|------------------|------------------|-------|-------|-----|
| I. The measured N- and P- data <sup>1</sup>                 |       |                  |                  |       |       |     |
| TN  | 1.235 | 0.658            | 0.038            | 0.240 | 5.310 | 297 |
| $\text{NO}_3\text{-N}$                                      | 0.075 | 0.091            | 0.006            | 0.001 | 0.442 | 256 |
| $\text{NH}_3\text{-N}$                                      | 0.144 | 0.188            | 0.011            | 0.003 | 2.093 | 288 |
| $\text{NO}_2\text{-N}$                                      | 0.058 | 0.193            | 0.012            | 0.000 | 1.615 | 281 |
| TP  | 0.091 | 0.070            | 0.004            | 0.024 | 0.869 | 297 |
| DIP   | 0.017 | 0.041            | 0.002            | 0.001 | 0.672 | 289 |
| II. The calculated nutrient-to-nutrient ratios <sup>2</sup> |       |                  |                  |       |       |     |
| TN/TP   | 16.4  | 8.4              | 0.5              | 3.267 | 54.5  | 297 |
| $\text{NO}_3/\text{NH}_3$                                   | 2.0   | 5.2              | 0.3              | 0.006 | 42.7  | 247 |
| III. The relevant hydrographic parameters <sup>3</sup>      |       |                  |                  |       |       |     |
| Chl. <i>a</i>   | 32.8  | 33.6             | 2.0              | 0.3   | 242.5 | 296 |
| DO  | 8.0   | 4.7              | 0.2              | 0.1   | 17.4  | 847 |
| COD   | 5.7   | 3.3              | 0.2              | 0.2   | 20.5  | 267 |
| SD  | 0.7   | 0.3              | 0.0              | 0.2   | 1.8   | 186 |
| Turb  | 13.0  | 16.3             | 1.0              | 0.2   | 40.5  | 256 |
| SS  | 28.6  | 27.8             | 1.8              | 2.0   | 152.0 | 248 |
| Temp  | 18.0  | 6.7              | 0.2              | 2.8   | 29.4  | 855 |
| Sal   | 15.7  | 8.3              | 0.3              | 0.23  | 33.2  | 885 |
| pH  | 8.48  | 4.7              | 0.2              | 5.95  | 11.38 | 855 |

<sup>a</sup>1SD=standard deviation; <sup>b</sup>1SE=standard error (1 Se=1 SD/N<sup>0.5</sup>)

<sup>1</sup>Units for all nutrient species are in mg L<sup>-1</sup>

<sup>2</sup>For the calculation of all ratios, mg-N and mg-P values were used for N- and P-related terms, respectively.

<sup>3</sup>The units for the hydrographic parameter are as follows: mg L<sup>-1</sup> (DO, BOD, COD, turbidity, SS),  $\mu\text{g L}^{-1}$  (Chl.*a*), m (SD), °C (temperature),  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (conductivity).

결 과

화진포호에서 2000년부터 2008년까지 조사된 수질자료에 따르면 수온, 염분, 투명도, COD 및 DO는 각각 2.8~29.4°C, 0.23~33.2‰, 0.2~1.8 m, 0.2~20.5 mg L<sup>-1</sup> 및 0.1~17.4 mg L<sup>-1</sup>의 범위로 평균은 각각 18.0°C, 15.7‰,

0.7 m, 5.7 mg L<sup>-1</sup> 및 8.0 mg L<sup>-1</sup>이었다. Chl.a는 0.3~242.5 µg L<sup>-1</sup>으로 평균 32.8 µg L<sup>-1</sup>이었다. TP와 TN는 각각 0.024~0.869 mg L<sup>-1</sup>(평균 0.091) 및 0.240~5.310 mg L<sup>-1</sup>(평균 1.235)의 범위를 보였다. TN/TP 비는 평균 16.4이었다(Table 2).

수온은 심층으로 갈수록 낮았으나 9월과 11월에는 심층 수온이 표층보다 더 높은 수온역전 현상이 관찰되었

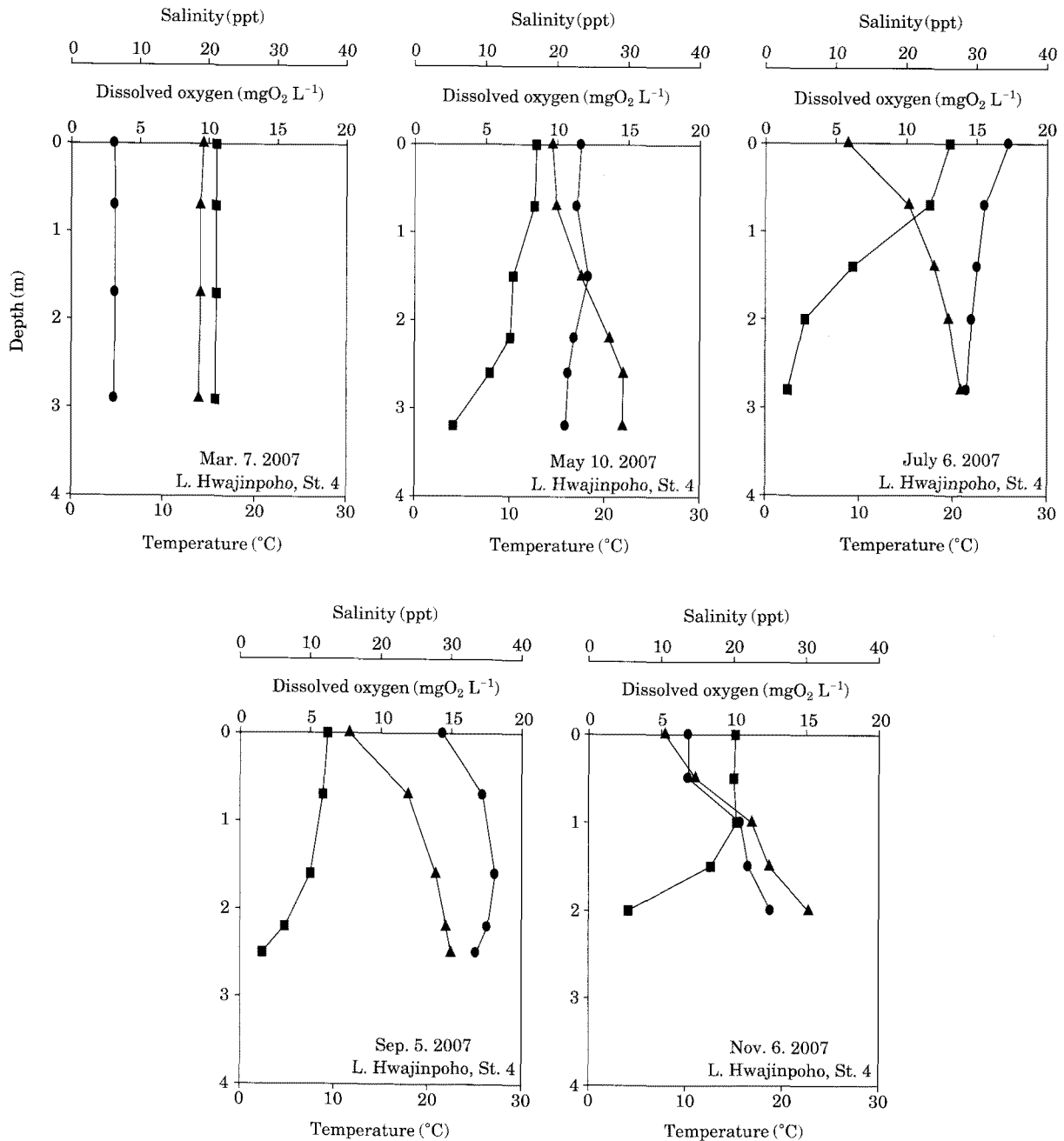
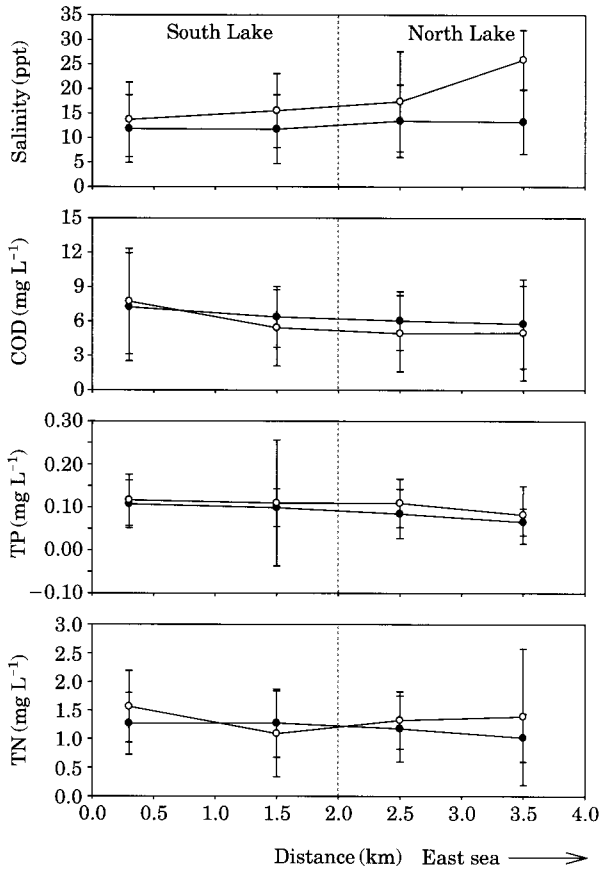


Fig. 3. Vertical profiles of temperature, dissolved oxygen and salinity at the Site 4 (●: Temp., ■: DO, ▲: Sal.).

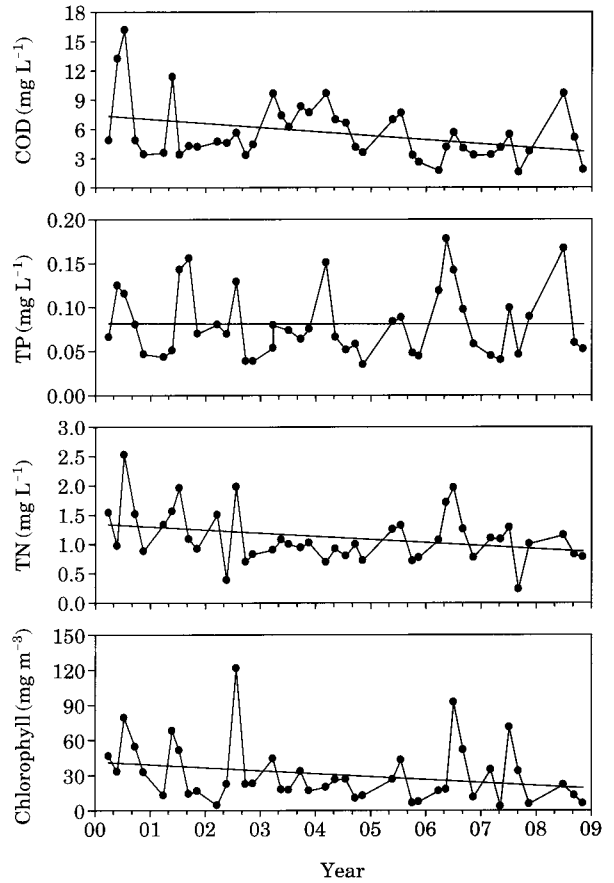


**Fig. 4.** Horizontal variations of Salinity, COD and TN concentration in Lake Hwajinpo the period of 2000 ~ 2008 (●: Epilimnion, ○: Hypolimnion).

다. 특히 염분이 급격한 증가를 보인 수심에서 화학성층이 형성되었으며 수층 간의 상하혼합이 제한되는 것으로 나타났다. 용존산소도 화학성층이 형성되는 시기에 심층에서 낮았다(Fig. 3).

화진포호에서 염분, COD, TP 및 TN의 거리(정점)에 따른 변화를 보면 염분은 유입수가 유입되는 정점1에서 표층과 심층이 각각 11.8 및 13.7‰이었으나 바다와 연결되는 정점4에서는 각각 13.2와 25.9‰로 정점1보다 높았다. COD는 정점1의 표층과 심층에서 모두 7.2 mg L<sup>-1</sup>이었으나 정점4에서는 5.8과 4.7 mg L<sup>-1</sup>로 점차 감소하였다. TP도 정점1에서 각각 0.107과 0.116 mg L<sup>-1</sup>이었으나 정점4에서는 0.066과 0.082 mg L<sup>-1</sup>로 점차 감소하였다. TN은 정점1의 표층과 심층은 각각 1.27과 1.57 mg L<sup>-1</sup>이었으나 정점4에서는 1.02과 1.39 mg L<sup>-1</sup>로 총인과 마찬가지로 바다 인접지점에서 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 4).

COD, TP, TN 및 Chl.a의 연변화를 보면 COD는 2000



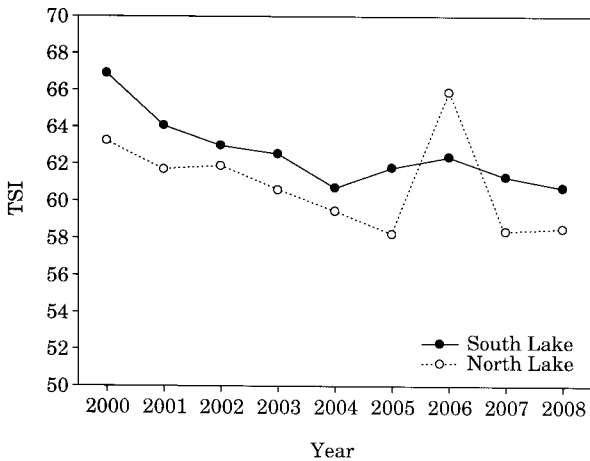
**Fig. 5.** Annual mixolimnion concentration of chemical oxygen demand (COD), nutrients (TN, TP), and chlorophyll a in Lake Hwajinpo.

년에 7.32 mg L<sup>-1</sup>이었으나 2008년에는 3.70 mg L<sup>-1</sup>로 매년 0.40 mg L<sup>-1</sup>씩 감소하였다. TP는 2000년과 2008년에 각각 0.08 mg L<sup>-1</sup>로 변화가 없었다. TN은 2000년에 1.34 mg L<sup>-1</sup>이었으나 2008년에는 0.88 mg L<sup>-1</sup>로 매년 0.05 mg L<sup>-1</sup>씩 감소하였다. Chl.a는 2000년에 40.90 μg L<sup>-1</sup>이었으나 2008년에는 19.20 μg L<sup>-1</sup>로 매년 2.41 μg L<sup>-1</sup>씩 감소하였다(Fig. 5). 화진포호의 Orgnic-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N 및 NO<sub>2</sub>-N의 평균 존재 형태별 구성 비율은 각각 78.9, 7.0, 12.4 및 0.8%로 대부분 유기질소 형태이었으며, 남·북호의 차이(2개 지점 평균)는 거의 없었다. 그러나 암모니아성 질소가 질산성질소보다 다소 높았다(Table 3).

화진포호의 부영양화도 지수(TSI)는 2006년 북호를 제외하고는 매년 감소 추세를 보였다. 남·북호의 부영양화도 지수는 2000년에 각각 67과 63에서 2008년에는 63과 59로 감소하였다(Fig. 6). TSI 지수들 간의 상호편차를 이용하여 조류의 성장을 제한하는 요인을 추정할 결과 TSI(CHL)이 TSI(TP)보다 높고, TSI(SD)가 TSI

**Table 3.** Distribution of nitrogen percentage (%) of Lake Hwajinpo.

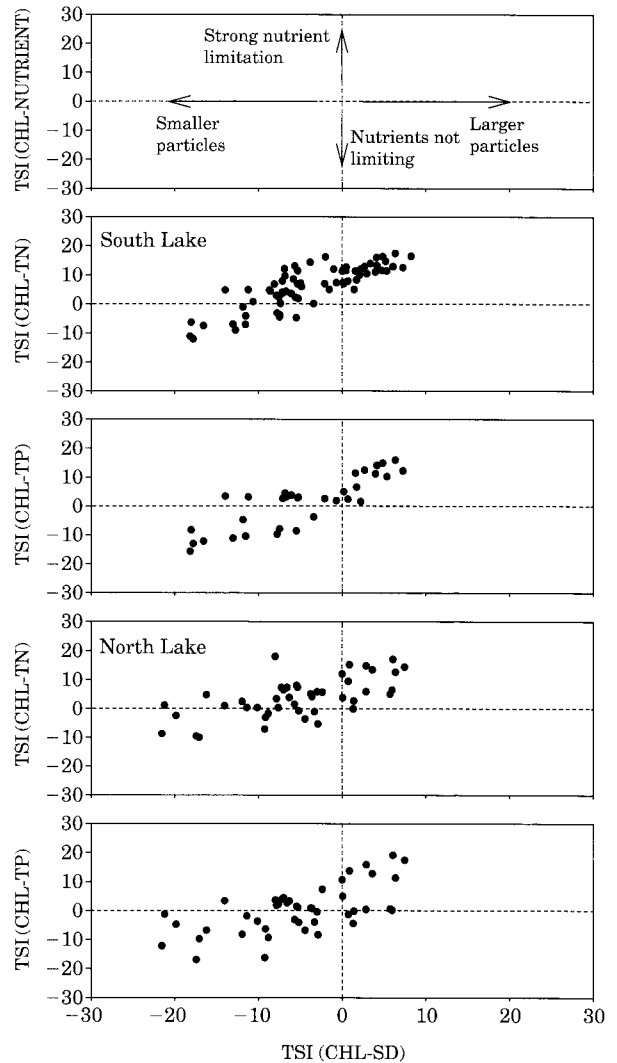
|                   | Organic-N | NO <sub>3</sub> -N | NH <sub>3</sub> -N | NO <sub>2</sub> -N |
|-------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>South Lake</b> |           |                    |                    |                    |
| Epilimnion        | 82.4      | 7.1                | 10.1               | 0.6                |
| Hypolimnion       | 79.0      | 7.2                | 11.3               | 1.2                |
| <b>North Lake</b> |           |                    |                    |                    |
| Epilimnion        | 82.1      | 6.3                | 10.9               | 0.8                |
| Hypolimnion       | 72.2      | 7.2                | 17.2               | 0.6                |
| Average           | 78.9      | 7.0                | 12.4               | 0.8                |



**Fig. 6.** The yearly variations of trophic state index (TSI) of Lake Hwajinpo. TSI was calculated from warm season average (July ~ September).

(CHL)보다 크게 나타났다(Fig. 7).

화진포 남호와 북호에서 2007년과 2008년 조사기간 동안 출현한 식물플랑크톤은 총 56속 69종으로 황색편모조류(Chrysophyceae) 1속 1종, 갈색편모조류(Cryptophyceae) 2속 2종, 외편모조류(Dinophyceae) 6속 6종, 유글레나류(Euglenophyceae) 2속 5종, 홍조류(Rhodophyceae) 3속 3종, 남조류(Cyanophyceae) 5속 5종, 규조류(Bacillariophyceae) 24속 31종 그리고 녹조류(Chlorophyceae) 14속 16종이었다. 조사기간 동안 화진포 북호는 25종, 남호는 44종으로 출현 종수는 남호가 많았다. 식물플랑크톤의 현존량 및 우점종의 계절변화는 남호와 북호가 각각 Table 4와 5 같다. 식물플랑크톤의 현존량은 조사기간 동안 남호와 북호가 각각 18~21,961 및 153~10,070 cells mL<sup>-1</sup>의 범위로 남호에서 더 많았으며, 남·북호 모두 2007년 7월에 최소를 보였다. 우점종은 남호의 경우 2007년 5월에 *Asterococcus superbis*, 9월에 *Lyngbya* sp., 11월에 *Trachelomonas* spp.이었으며, 2008년 7월에



**Fig. 7.** Differences among trophic state index (TSI) indicating the extent of nutrient limitation and the composition of seston.

는 *Anabaena spiroides*로 시기에 따라 크게 다른 양상을 보였다. 또한 남호에서 출현 종수는 많지 않았지만 *Cryptomonas* sp.가 조사기간 동안 꾸준히 출현하였다. 북호의 우점종은 2007년 5월에 *Prorocentrum* sp., 9월에 *Lyngbya* sp., 11월에는 *Trachelomonas* spp.이었으며, 2008년 7월과 11월에는 각각 *Rhodella* sp. 및 *Schroederia setigera*로 남호와 비슷하게 조사 시기마다 다른 양상을 보였다. 또한 북호에서 출현 생물량은 많지 않았지만 *Cryptomonas* sp.와 *Lyngbya* sp.가 조사기간 동안 꾸준히 출현하였다. 남호와 북호의 종 다양성 지수는 0.87~1.98(평균 1.41) 및 0.42~1.47(평균 1.07)로 남·북호 모두 2008년 5월에 높았다.

**Table 4.** Dominant species and standing crops (cells mL<sup>-1</sup>) of phytoplankton South Lake Hwajinpo from March 2007 to November 2008.

| Dominant species                                      | May   | Jul. | Sep.   | Nov.  | May  | Jul.   | Nov. | Total  |
|---|-------|------|--------|-------|------|--------|------|--------|
| <i>Asterococcus superbis</i>                          | 1,045 |      | 11     | 9     | 2    |        | 18   | 1,085  |
| <i>Cryptomonas</i> sp.                                | 174   |      | 867    | 384   |      | 505    |      | 1,930  |
| <i>Trachelomonas armata</i>                           |       | 10   | 144    |       |      |        |      | 154    |
| <i>Lyngbya</i> sp.                                    |       |      | 17,341 |       |      | 3,488  |      | 20,829 |
| <i>Trachelomonas</i> spp.                             | 3     |      | 867    | 1,343 |      |        |      | 2,213  |
| <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> |       |      |        |       | 42   |        |      | 42     |
| <i>Anabaena spiroides</i>                             |       |      |        |       |      | 5,808  |      | 5,808  |
| <i>Schroederia setigera</i>                           |       |      |        |       |      | 505    | 92   | 597    |
| Standing crops of dominant species                    | 1,222 | 10   | 19,230 | 1,736 | 44   | 10,306 | 110  | 32,658 |
| Total cell number                                     | 1,942 | 18   | 21,961 | 3,296 | 140  | 15,219 | 274  | 42,850 |
| Diversity   | 1.00  | 0.98 | 0.87   | 1.43  | 2.06 | 1.58   | 1.98 | 1.41   |
| Evenness  | 0.45  | 0.89 | 0.31   | 0.62  | 0.86 | 0.63   | 0.90 | 0.66   |
| Dominance   | 0.43  | 0.41 | 0.63   | 0.28  | 0.16 | 0.25   | 0.18 | 0.33   |

**Table 5.** Dominant species and standing crops (cells mL<sup>-1</sup>) of phytoplankton North Lake Hwajinpo from March 2007 to November 2008.

| Dominant species                   | May   | Jul. | Sep.   | Nov.  | May  | Jul.  | Nov.  | Total  |
|------------------------------------|-------|------|--------|-------|------|-------|-------|--------|
| <i>Prorocentrum</i> sp.            | 1,148 |      | 459    | 250   |      |       |       | 1,857  |
| <i>Cryptomonas</i> sp.             | 255   | 17   |        | 250   |      | 444   | 2     | 968    |
| <i>Anabaena</i> sp.                |       | 86   |        |       |      | 225   |       | 311    |
| <i>Peridinium</i> sp.              |       |      | 21     | 750   |      | 2     |       | 773    |
| <i>Lyngbya</i> sp.                 | 51    |      | 9,174  | 66    | 80   | 540   |       | 9,911  |
| <i>Trachelomonas</i> spp.          |       | 50   | 5      | 2,000 |      |       |       | 2,055  |
| <i>Rhodella</i> sp.                |       |      |        |       | 661  | 2,889 |       | 3,550  |
| <i>Schroederia setigera</i>        |       |      |        | 83    |      | 222   | 1,582 | 1,887  |
| <i>Geminella interrupta</i>        | 504   |      |        |       |      |       |       | 504    |
| Standing crops of dominant species | 1,958 | 153  | 9,659  | 3,399 | 741  | 4,322 | 1,584 | 21,816 |
| Total cell number                  | 2,000 | 165  | 10,070 | 3,605 | 996  | 4,857 | 2,093 | 23,786 |
| Diversity                          | 1.13  | 1.2  | 0.42   | 1.38  | 1.19 | 1.47  | 0.75  | 1.07   |
| Evenness                           | 0.54  | 0.67 | 0.16   | 0.71  | 0.48 | 0.50  | 0.31  | 0.48   |
| Dominance                          | 0.41  | 0.38 | 0.83   | 0.36  | 0.47 | 0.38  | 0.61  | 0.49   |

화진호에서 출현한 동물플랑크톤은 총 31속 33종으로 원생동물(Protozoa) 7속 7종, 윤충류(Rotatoria) 10속 12종, 절지동물(Arthropoda) 중 요각류(Copepoda) 11속 11종 그리고 환형동물(Annelida) 1속 1종이었다(Tables 6, 7). 이중 북호는 18종, 남호는 15종으로 식물플랑크톤과 마찬가지로 남호가 북호보다 약간 종수가 적었다. 남호의 우점종은 2007년 5월과 7월 및 2008년 5월과 11월에 요각류의 유생이었으나, 2007년 9월에는 미등정 원생동물, 2008년 8월에는 *Brachionus plicatilis*이었다. 북호의 우점종은 2007년 5월에는 Arthropoda인 *Brachionus improvisus*, 11월에는 윤충류인 *Brachionus* sp.이었다. 2008년에는 조사기간 내내 모두 요각류 유충인 Nauplius

of *Copepoda*가 우점하였다. 동물플랑크톤의 밀도는 남호에서  $80 \times 10^3 \sim 3,902 \times 10^3$  ind. L<sup>-1</sup>, 북호에서  $88 \times 10^3 \sim 2,106 \times 10^3$  ind. L<sup>-1</sup>로 남호에서 더 높았다. 종 다양성지수는 남호와 북호가 각각 0.53~1.47(평균 0.83) 및 0.66~1.46(평균 1.09)으로 남·북호 모두 2008년 7월에 높았다. 남호의 경우 2007년 7월에는 윤충류가 출현하지 않았으나 2008년 7월에는 윤충류가 우점 분류군이었던.

## 고 찰

수온은 조사기간 동안 5.9~29.4°C의 범위로 대기 기



**Table 6.** Standing crops ( $\times 10^3$  ind. L<sup>-1</sup>) of zooplankton in South Lake Hwajinpo from March 2007 to November 2008.

| Species                                       | May   | Jul.  | Sep.  | Nov. | May  | Jul.  | Nov. | Occupation rate |
|---|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-----------------|
| Protozoa                                      |       |       |       |      |      |       |      |                 |
| <i>Protozoa</i> spp.                          |       |       | 2,162 |      |      |       |      | 2,162           |
| Rotatoria                                     |       |       |       |      |      |       |      |                 |
| <i>Keratella cochlearis</i> var. <i>tecta</i> | 215   |       |       | 237  |      |       |      | 452             |
| <i>Brachionus plicatilis</i>                  |       |       |       |      |      | 1,313 |      | 1,313           |
| <i>Brachionus urceolaris</i>                  |       |       |       |      |      | 1,193 |      | 1,193           |
| Copepods                                      |       |       |       |      |      |       |      |                 |
| Nauplius of <i>Copepoda</i>                   | 1,288 | 375   |       |      | 195  | 119   | 50   | 1,338           |
| <i>Canthocalanus</i> sp.                      |       |       |       | 118  |      |       |      | 118             |
| Arthropoda                                    |       |       |       |      |      |       |      |                 |
| <i>Balanus improvisus</i>                     |       | 856   | 853   |      | 292  | 955   |      | 2,956           |
| Dominant species standing Crops               | 1,503 | 1,231 | 3,015 | 355  | 487  | 3,580 | 50   | 10,221          |
| Total standing crops                          | 1,546 | 1,231 | 3,015 | 355  | 779  | 3,902 | 80   | 10,908          |
| Diversity                                     | 0.53  | 0.61  | 0.6   | 0.64 | 1.32 | 1.47  | 0.66 | 0.83            |
| Evenness                                      | 0.48  | 0.89  | 0.86  | 0.92 | 0.95 | 0.71  | 0.95 | 0.82            |
| Dominance                                     | 0.71  | 0.58  | 0.59  | 0.56 | 0.28 | 0.27  | 0.53 | 0.50            |

**Table 7.** Standing crops ( $\times 10^8$  ind. L<sup>-1</sup>) of zooplankton in North Lake Hwajinpo from March 2007 to November 2008.

| Species                         | May   | Jul. | Sep. | Nov. | May   | Jul. | Nov. | Occupation rate |
|---------------------------------|-------|------|------|------|-------|------|------|-----------------|
| Protozoa                        |       |      |      |      |       |      |      |                 |
| <i>Favella campanula</i>        |       |      | 39   |      |       |      |      | 39              |
| Rotatoria                       |       |      |      |      |       |      |      |                 |
| <i>Asplanchna</i> sp.           |       | 55   |      | 378  |       | 60   |      | 493             |
| Copepods                        |       |      |      |      |       |      |      |                 |
| Nauplius of <i>Copepoda</i>     | 526   |      | 39   | 42   | 250   | 120  | 64   | 1,041           |
| Arthropoda                      |       |      |      |      |       |      |      |                 |
| <i>Balanus improvisus</i>       | 1,053 |      | 39   |      | 624   | 40   | 192  | 1,948           |
| Annelida                        |       |      |      |      |       |      |      |                 |
| Dominant species standing crops | 2,053 | 55   | 117  | 420  | 874   | 220  | 256  | 3,995           |
| Total standing crops            | 2,106 | 88   | 117  | 572  | 1,060 | 300  | 332  | 4,575           |
| Diversity                       | 1.20  | 0.66 | 1.10 | 0.97 | 1.15  | 1.46 | 1.13 | 1.09            |
| Evenness                        | 0.75  | 0.95 | 1.00 | 0.60 | 0.72  | 0.91 | 0.82 | 0.82            |
| Dominance                       | 0.35  | 0.53 | 0.33 | 0.49 | 0.41  | 0.26 | 0.40 | 0.39            |

은 변화와 유사하였으며, 9월과 11월에는 심층의 수온이 표층보다 더 높은 수온역전 현상이 관찰되었다. 이는 수심이 얕음에도 불구하고 염분에 의해 형성된 강한 화학성층(chemocline)으로 인해 심층으로 수직혼합이 극히 제한되기 때문인 것으로 보인다. 허 등(1999)은 동해안 석호의 대부분이 중층에서 강한 화학성층이 형성되고, 화학성층 이하 지역에서는 염분이 증가하고 용존산소가 감소되었다고 하였다. 또한 화학성층 아래 수심의 수온이 표층보다 오히려 약 2°C 정도 높았다고 보고하여 본 조사와 유사한 경향을 보였다. 특히 이런 현상은 대기 기온이 하강하는 가을 이후에 나타나고 있다고 하였다(허 등, 1999). 일반적으로 기수역의 염분성층의 형성과 소멸과

정은 바람, 조수, 지하수의 침투, 담수의 유입량 등 그 지역의 기상과 수리수문 특성에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 (Schroeder *et al.*, 1990; Uncles *et al.*, 1990), 특히 담수의 유입이 가장 중요한 요인으로 판단된다(Schroeder *et al.*, 1990).

염분의 수직분포 특성은 용존산소(DO) 및 수온의 분포에도 많은 영향을 미치는 것으로 보인다. 염분이 급격한 증가를 보인 지점에서 화학성층이 형성되었고 수층간의 상·하 혼합이 제한되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 수체의 정체가 심화되는 심층은 혐기성 상태가 유지되면서 유기물분해가 매우 느리게 진행되는 것으로 판단된다. 일반적으로 하구나 석호에서는 담수의 유입이나

지하수의 침투로 화학성층이 형성되는 것으로 알려져 있다 (Huzzey *et al.*, 1994).

용존산소는 화학성층 이하의 수심에서 매우 낮았는데 이는 염분에 의한 용해도 감소와 다량의 유기물 분해과정에서 용존산소가 급격히 낮아진 것에 기인하는 것으로 사료된다. 또한 유기물을 함유하고 있는 저니층의 부상으로 유기물 분해 과정에서 용존산소를 소모했을 가능성 등을 들 수 있다. Gray *et al.* (2002)과 McLusky and Elliott (2004) 등은 수체의 정체에 의해 조류의 대량증식 현상과 유기퇴적토의 분해에 의해 용존산소의 고갈이 쉽게 나타날 수 있다고 하였다. 일반적으로 호수 생태계에서 DO 농도는 1차생산자인 식물플랑크톤의 광합성과 미생물에 의한 유기물 분해에 의해 영향을 받는다 (Horne and Goldman, 1994). 식물플랑크톤의 대량증식은 수체내 유기물 증가의 원인이 되며, 이들의 사멸로 인해 심층의 용존산소 결핍과 혐기성가스 발생 등의 수질문제를 가져올 뿐만 아니라 저서생태계에도 치명적인 영향을 줄 수 있다 (Diaz and Rosenberg, 1995; Ueda *et al.*, 2000; Wetzel, 2001). Mizuno *et al.* (1980)은 화진포호 조사에서 심층의 용존산소가 고갈상태를 보였고, 특히 여름철의 경우 무산소층이 종종 부근까지 상승한다고 밝힌 바 있다. 본 조사에서도 여름철 심층에서 무산소층이 형성되는 것이 관찰되었으며, 매년 반복되었다. 따라서 화진포호에서는 용존산소 등 수환경 개선 및 수생태계 복원이 절실하다.

투명도는 0.2~1.8m의 범위로 7월보다 9월에 높았는데 이는 7월에 강우에 의한 유입수량 증가 등 호수의 안정도(stability) 변화에 따른 것으로 판단된다. 수환경에서 투명도에 영향을 주는 주요 요인으로는 용해성 물질에 의한 색도, 토사 등의 무기성 현탁고형물과 유기성 현탁고형물 등이 있다. 일반적으로 강우 시 유입된 흙탕물에 의한 투명도 값은 제외하나 화진포호의 경우 수심이 얕고 수체가 적은 특성상 부유물질(SS)이 많은 반면 식물플랑크톤의 밀도가 높아 정상적으로 사용하였다. 허 등(1999)은 경포호 및 영랑호의 투명도가 0.5m 내외로 낮은 것은 준설에 따른 퇴적층의 교란이 한 가지 원인이 될 수 있다고 한 바 있다. OECD(1982)기준으로 볼 때, 화진포호의 연평균 투명도는 0.7m로 매우 부영양화된 호수로 분류된다.

COD는 북호와 남호가 각각 0.2~16.2 mg L<sup>-1</sup>와 0.1~16.1 mg L<sup>-1</sup>이었다. 허 등(1999)의 연구에 따르면 동해안 석호의 COD는 경포호가 7.1~11.6 mg L<sup>-1</sup>, 영랑호가 4.4~15.2 mg L<sup>-1</sup>, 화진포호가 3.6~16.4 mg L<sup>-1</sup>이었다. 따라서 화진포호의 COD농도는 다른 석호에 비해 다소 높았으며, 우리나라 호수의 COD수질 등급으로 볼 때 IV~V

등급 수준인 것으로 판단된다. 이처럼 COD가 높은 원인을 허 등(2004)은 호수의 부영양화에 따른 식물 플랑크톤의 대량 번식, 강우로 인한 무기현탁물의 유입과 파도 등 기상변화에 의한 저니층의 교란 및 부상에 따른 부유물질의 증가 등으로 설명한 바 있다.

표층의 총인은 남호에서 0.03~0.23 mg L<sup>-1</sup>, 북호에서 0.029~0.279 mg L<sup>-1</sup>로 나타났는데 이는 OECD(1982)가 제시한 부영양화 기준(0.035~0.100 mg L<sup>-1</sup>)을 초과하는 수준이다. 권(2002)은 이처럼 인 농도가 높은 것은 우선 수체의 체류시간이 길고, 유역으로부터 유입되는 토사의 대부분이 호수내에 침전되며, 그리고 호수 주변에 번성한 수초대가 자라고 죽고를 반복하면서 수체로 식물사체(detritus)를 구성하던 영양염이 용출되기 때문인 것으로 보고하였다. 실제로 화진포호 수체의 체류시간은 약 543일로 길다(원주지방환경청, 2010). 허 등(1999)은 동해안 석호의 부영양화 평가에서 해수와 가까운 호수에서 인의 농도가 낮아진다고 보고하였는데 화진포호에서도 이와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 화진포호의 용존무기인은 조사기간 동안 평균 0.017 mg L<sup>-1</sup>이었다. 일반적으로 용존무기인은 조류가 바로 이용할 수 있는 형태로서 해로운 조류의 대 발생은 무기인 농도가 0.010 mg L<sup>-1</sup> 이상일 때 일어나는 것으로 알려져 있어(Sawyer, 1947) 화진포호의 경우 항시 해로운 조류가 발생할 가능성이 존재한다. 총질소는 조사기간 중 2003과 2004년이 다른 해에 비해 다소 높게 나타났는데 이는 2003년과 2004년에 각각 태풍 매미(1,897 mm)와 메기(1,587 mm)의 영향으로 이 시기의 강수량이 연평균강수량(1,342 mm)보다 많았으며 이로 인해 비점오염원의 유출이 증가한 것에 기인되는 것으로 보인다.

표층과 심층에서 질소의 존재형태별 구성 비율은 유기질소, 암모니아성질소 및 질산염 순으로 유기질소가 많은 부분을 차지하였으며, 암모니아성 질소의 경우 표층에 비해 심층에서 약 2배 정도 높았다. 이는 심층에서의 무산소층 형성으로 인한 혐기성 분해로 높아진 것으로 보인다. 화진포호의 총질소와 총인의 비는 약 16으로 낮아 질소가 호수내 수중 생물의 성장과 생성에 제한 요소로 작용할 가능성이 있다. 일반적으로 담수에서는 인이 해수에서는 질소가 제한영양소로 작용하는 것으로 알려져 있다 (Schindler, 1978; Hecky and Kilham, 1988). 그러나 화진포호의 경우 전반적으로 인과 질소의 농도가 높은 상태이므로 단순히 총인과 총질소의 비만으로 조류의 제한요소를 평가하는 것은 무리가 있는 것으로 사료된다. 허 등(1999)은 동해안 석호의 경우 총질소와 총인의 비가 대부분 6~14로 하구호보다 낮은 수준이며, 질소가 인에

비해 상대적으로 낮은 수준이라고 보고한 바 있다.

화진포호의 Chl.a 농도는 U.S. EPA(1976)와 Likens(1975)의 분류기준에 따르면 부영양호 수준이다. 또한 Chl.a 농도가 남호에서 높은 것은 북호에 비해 해수의 영향을 덜 받고 영양염의 농도가 높아 식물플랑크톤이 성장하기 좋은 조건이기 때문인 것으로 사료된다. 부영양화도지수(TSI)는 식물플랑크톤의 성장 시기를 고려하여 하계 평균치(6~9월)를 사용하였으며 계산결과 남·북호 모두 점차 감소하는 추세를 보였는데 이는 총인, 총질소 및 Chl.a 농도의 감소에 따른 것으로 판단된다. 허 등(1999)은 영랑호와 송지호를 비롯한 동해안 석호의 TSI가 56~79 정도로 낙동강 본류와 유사한 영양상태를 보였다고 밝힌 바 있다. 권(2002)은 화진포호의 육수학적조사에서 유사성을 보고하였다.

TSI 지수들 간의 상호편차를 이용하여 조류의 성장을 제한하는 요인을 추정한 결과 인(P) 이외에 다른 요인이 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 것으로 나타났다. 특히 화진포호의 남호에서는 강우에 의한 탁도 증가 및 바람에 의한 바닥층 교환 등에 의해 빛이 제한 요인이 되고 있는 것으로 사료된다. 수심이 얇은 해안가의 석호에서는 바람이 혼합을 일으키는 중요한 인자임이 보고된 바 있다(Simth, 1990). Havens(2000)는 TSI(CHL)이 TSI(TP)보다 작다면 인이 아닌 다른 요인이 조류의 성장을 제한한다고 유추할 수 있으며 만약 TSI(CHL)이 TSI(SD)보다 작다면 호소내 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 제한받을 가능성이 크다고 보고하였다. 또한 TSI(CHL)에 비해 TSI(TP)가 낮을 경우 인산염이 식물플랑크톤의 제한영양염으로 작용할 가능성이 있는 것으로 보고하였다. 이러한 분석의 결과는 신뢰성과 일관성이 매우 높으며, 일반적으로 다른 직접적인 방법들에 의해 얻어진 결과들과도 잘 일치한다.

화진포 남·북호에 출현하는 동·식물플랑크톤의 종수는 북호가 남호보다 약간 많았고 생물량은 남호가 더 많아 남호가 북호보다 부영양화된 것을 알 수 있다. 또한 계절적으로 동·식물플랑크톤의 종 조성 및 생물량의 변이가 큰 것으로 나타났는데 이는 기수역의 특징 때문으로 사료된다. 화진포호는 기수호로 해수 및 담수에 의한 영향을 항상 받고 있으며, 수심이 얇아 바람에 의한 영향도 큰 변수가 되고 있다. 따라서 연중 수시로 조류의 대량

증식이 나타날 수 있으며 수환경 악화가 초래될 수 있다. 그러므로 향후 이에 대한 연구가 보다 더 체계적으로 다루어져야 할 것이다.

화진포호의 수질은 장기적으로 약간씩 변동하고 있으며, 특히 영양염류(TP, TN 등)가 점차 감소되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 화진포호는 자연적 갯터짐이 제한적이고 어류의 폐사가 자주 발생하는 등 수환경개선 및 생물다양성 증진을 위한 다양한 연구와 투자가 요구된다 하겠다.

## 적 요

화진포호에서 장기간의 수환경변화를 알아보기 위해 2000년부터 2008년까지 염분, 용존산소, 총인 및 총질소 등이 화학적 조사를 하였으며, 동식물플랑크톤은 2007년과 2008년에 조사하였다.

화진포호에서 2000년부터 2008년까지 조사된 수질자료를 보면 수온, 염분, 투명도, COD 및 DO는 각각 2.8~29.4°C, 0.23~41.8‰, 0.2~2.8 m, 0.2~20.2 mg L<sup>-1</sup> 및 0.1~17.4 mg L<sup>-1</sup>의 범위로 평균은 각각 18.0°C, 15.7‰, 0.7 m, 5.7 mg L<sup>-1</sup> 및 8.0 mg L<sup>-1</sup>이었다. Chl.a는 0.3~242.5 µg L<sup>-1</sup>으로 평균 32.8 µg L<sup>-1</sup>이었다. TP와 TN는 각각 0.024~0.869 mg L<sup>-1</sup>(평균 0.091) 및 0.240~5.310 mg L<sup>-1</sup>(평균 1.235)의 범위를 보였다. TN/TP 비는 평균 16.4이었다. COD, TP, TN 및 Chl.a의 연변화를 보면 COD는 2000년에 4.83 mg L<sup>-1</sup>이었으나 2008년에는 1.80 mg L<sup>-1</sup>로 매년 0.34 mg L<sup>-1</sup> 감소를 보였다. TP는 2000년에 0.07 mg L<sup>-1</sup>이었으나 2008년에는 0.05 mg L<sup>-1</sup>로 차츰 감소하였다. TN은 2000년에 1.54 mg L<sup>-1</sup>이었으나 2008년에는 0.77 mg L<sup>-1</sup>로 매년 0.09 mg L<sup>-1</sup> 감소하였다. Chl.a는 2000년에 46.30 µg L<sup>-1</sup>이었으나 2008년에는 5.78 µg L<sup>-1</sup>로 매년 4.50 µg L<sup>-1</sup>씩 감소하였다. 화진포호의 Orgnic-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N 및 NO<sub>2</sub>-N의 평균 존재 형태별 구성 비율은 각각 78.9, 7.0, 12.4 및 0.8%로 대부분 유기질소 형태이었다. 부영양화도 지수는 남호와 북호에서 2000년에 각각 67과 63에서 2008년에는 63과 59로 감소하였다.

화진포 남호와 북호에서 2007년과 2008년 조사기간 동안 출현한 식물플랑크톤은 총 56속 69종이었다. 식물플랑크톤의 현존량은 남호와 북호가 각각 18~21,961 및 153~10,070 cells mL<sup>-1</sup>의 범위로 남호에서 더 많았으며, 남·북호 모두 2007년 7월에 최소를 보였다. 우점종은 남호의 경우 2007년 5월에 *Asterococcus superbus*, 9월에 *Lyngbya* sp., 11월에 *Trachelomonas* spp.이었으며, 2008

년 7월에는 *Anabaena spiroides*로 시기에 따라 크게 다른 양상을 보였다. 남호와 북호의 종 다양성 지수는 0.87~1.98(평균 1.41) 및 0.42~1.47(평균1.07)로 남·북호 모두 2008년 5월에 높았다.

화진포호에서 출현한 동물플랑크톤은 총 31속 35종이었다. 남호의 우점종은 2007년 5, 7월과 2008년 5, 11월에는 요각류의 유생이었으나, 2007년 9월에는 미동정 원생동물, 2008년 8월에는 *Brachionus plicatilis*이었다. 북호의 우점종은 2007년 7월과 11월에는 지각류인 *Asplanchna* sp.이었으나 그 이외의 시기에는 요각류의 유생이었다. 동물플랑크톤의 밀도는 남호에서  $80 \times 10^3 \sim 3,902 \times 10^3 \text{ ind. L}^{-1}$ , 북호에서  $88 \times 10^3 \sim 2,106 \times 10^3 \text{ ind. L}^{-1}$ 로 남호에서 더 높았다. 종 다양성지수는 남호와 북호가 각각 0.53~1.47(평균 0.83) 및 0.66~1.46(평균 1.09)의 범위로 남·북호 모두 2008년 7월에 높았다.

## 인 용 문 헌

- 권상용. 2002. 화진포호의 육수생태학적 연구. 삼척대학교 공학석사 학위논문.
- 김종만, 이순길, 허성범, 김동엽, 이재학, 이진환, 허형택. 1981. 동해안 기수호(향호, 송지호, 영랑호)의 해양생태학적 연구. *Bulletin of KORDI* 3: 29-38.
- 신재기, 김동섭, 조경제. 2000. 시화호에서 해수유입 전·후의 수환경 요인과 식물플랑크톤 동태. *한국환경과학회지* 9(2): 109-117.
- 엄규백. 1971. 호소에 있어서의 생산구조에 관한 연구. *식물학회지* 14: 15-23.
- 엄정훈. 1998. 동해안 석호의 수질 및 퇴적물 특성과 주변 지역 변화에 관한 연구. *한국지리환경교육학회지* 6(2): 95-110.
- 염종권, 유강민, Sampei, Y., Touoka, T., Nakamura, T. 2002. 동해안 화진포 석호의 최근 400년간 퇴적 환경 변화. *지질학회지* 38(1): 21-32.
- 원주지방환경청. 1997. 동해안 석호 수질개선대책보고서.
- 원주지방환경청. 1998. 98동해안 석호 조사보고서.
- 원주지방환경청. 1999. 석호 연구 보고서.
- 원주지방환경청. 2002. 동해안 석호 수질 개선방안.
- 원주지방환경청. 2003. 석호연구보고서(III).
- 원주지방환경청. 2004. 제3회 석호 심포지엄 [환경의 날 기념].
- 원주지방환경청. 2005. 동해안 10개 석호 조사 보고서.
- 원주지방환경청. 2006. 석호 수질연보.
- 원주지방환경청. 2007. 동해안 석호 생태계 보전 및 복원을 위한 생태계 정밀조사연구 및 관리방안 연구 보고서.
- 원주지방환경청. 2008. 동해안 석호 생태계 보전 및 복원을 위한 생태계 정밀조사연구 및 관리방안(II) 연구 보고서.
- 원주지방환경청. 2009. 동해안 석호 생태계 보전 및 복원을 위한 생태계 정밀조사연구 및 관리방안(II) 연구 보고서.
- 원주지방환경청. 2010. 동해안 석호 지킴이 워크숍.
- 전상호, 전방욱, 유성환. 1996. 동해안 자연 호수의 수질 조사(강릉경실련) 동해안 호수 보존 심포지움, 강릉, p. 83-118.
- 조규승, 홍사욱, 나규환. 1975. 동해안 기수호군의 육수조진과 Plankton상의 비교 연구. *한국육수학회지* 8: 25-37.
- 최광순, 김새원, 김동섭, 오영택, 허우명, 이윤경, 박용순. 2008. 해수유입이 제한된 시화호 기수역에서 염분도, 수온, 용존 산소, 탁도의 시공간적 분포특성. *한국하천호수학회지* 41(2): 216-227.
- 편충규. 1984. 기수호(향호·매호·영랑호·송지호·화진포)의 환경 및 생물상 조사 보고. *제주대학교논문집* 18: 93-105.
- 허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해안 석호의 부영양화 평가. *한국육수학회지* 32(2): 141-151.
- 허우명, 권상용, 이재일, 김동진, 김범철. 2004. 동해안 석호의 육수학적 조사(3): 화진포호. *한국육수학회지* 37(1): 12-25.
- 홍사욱, 나규환. 1975. 동해안기수호의 육수학적 연구. *성대논문집* 20: 7-95.
- 홍사욱, 조규승, 나규환. 1969. 화진포의 수질과 Plankton에 관한 연구. *한국육수학회지* 2: 35-42.
- 汽水域の河川環境の捉え方に關する檢討會. 2004. 汽水域の河川環境の捉え方に關する手引書.
- APHA (America Public Health Association). 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 18th ed, Washington D.C.
- APHA · AWWA · WPCF. 1989. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 17th ed. APHA, N.Y.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology Oceanography* 22: 361-369.
- Chihara, M. and M. Masaaki. 1997. An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan. 1574 pp.
- Diaz, R.J. and R. Rosenberg. 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and behavioural responses of macrofauna. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 33: 245-303.
- Gray, J.S., R.S.S. Wu and Y.Y. Or. 2002. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Marine Ecology Progress Series* 238: 249-279.
- Havens, K.E. 2000. Using Trophic State Index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data. *Korean Journal of Limnology* 33(3): 187-196.
- Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments; A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology Oceanography* 33: 796-822.
- Hirose, H. and T. Yamagishi. 1977. Illustration of the Japan-

- ese Fresh-water Algae. Uchidaroka-kuno Publishing Co., Japan.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology. McGraw Hill College.
- Kennish, M.J. 2000. Estuary Restoration and Maintenance. CRE Press, Florida.
- Kramer, K.J., U.H. Brockmann and R.M. Warwick. 1994. Tidal estuaries: manual of sampling and analytical procedures. AA Balkema, Rotterdam.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A Carlsontype trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin* **17**: 713-715.
- Likens, G.E. 1975. Primary production of inland aquatic ecosystem, p. 185-202. *In*: Primary Productivity of the Biosphere (Lieth, H. and R.H. Whittaker, eds.). Springer Verlag, New York.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: Spectrophotometric equation. *Limnology Oceanography* **12**: 343-346.
- McLusky, D.S. and M. Elliott. 2004. The Estuarine Ecosystem Ecology, Threats, and Management. Oxford University Press.
- Mizuno, T. 1964. Illustrations of the Freshwater Plankton of Japan. Hoikusa Publishing Co., LTD.
- Mizuno, T. and K.S. Cho. 1980. Paleolimnological study from the present status of the lake hwajin-po and yeong-rang. *Korean Journal of Limnology* **13**: 17-22.
- OECD. 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control. OECD, Paris, 154pp.
- Orive, E., M. Elliott and V.N. de Jonge. 2002. Nutrients and eutrophication in estuaries and coastal waters. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Osamu, M. and K.S. Cho. 1984. Urea, DOC, DON, and DOP in two brackish lagoons on the eastern coast of Korea. *Korean Journal of Limnology* **17**: 73-80.
- Sawyer, C.N. 1947. Fertilisation of lakes by agricultural and industrial drainage. *New England Water Works Association* **61**: 109-127.
- Schindler, D.W. 1978. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwater. *Limnology Oceanography* **23**: 478-486.
- Schroeder, W.W., S.P. Dinnel and W.J.W. Wiseman. 1990. Salinity stratification in a river-dominated estuary. *Estuaries* **13**(2): 145-154.
- Shannon, C. and W. Weaver. 1949. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, p. 29-125.
- Smith, N.P. 1990. Wind domination of residual tidal transport in a coastal lagoon, p. 123-133. *In*: Residual Currents and Longterm Transport (Cheng, R.T. ed.). Springer-Verlag, New York.
- Smith, V.H. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis. *Limnology Oceanography* **27**: 1101-1112.
- Sukhanova, I.N. 1978. Settling without the inverted microscope. 'Phytoplankton Manual', UNESCO.
- Tsutsumi, H. 2006. Critical events in the Ariake Bay ecosystem: Clam population collapse, red tides, and hypoxic bottom water. *Plankton and Benthos Research* **1**(1): 3-25.
- Ueda, N., H. Tsutsumi, M. Yamada, K. Hanamoto and S. Montani. 2000. Impact of oxygen-deficient water on the macrobenthic animals in the innermost areas of Dokai Bay and on the mud flats adjacent to the bay, in Kitakyushu, Japan. *Marine Pollution Bulletin* **40**: 906-913.
- Uncles, R.J., J.E. Ong and W.K. Gong. 1990. Observations and analysis of a stratification-destratification event in a tropical estuary Estuarine. *Coastal and Shelf Science* **31**: 651-665.
- U.S. EPA. 1976. Water Quality Criteria Research of the U.S. Environmental Protection Agency, Proceeding of an EPA Sponsored Symposium, EPA-600 (3-76-079): 185.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology. 3th ed., Academic Press, New York.

(Manuscript received 29 September 2010,  
Revision accepted 19 January 2011)