

## 대청호에 설치된 수중폭기시설이 조류 발생에 미치는 영향

### Effects of Submerged Aerator on the Growth of Algae in Daechung Reservoir

오경희 · 정동환\* · 양상용\* · 전태완\* · 조영철†

Kyoung-Hee Oh · Dong-Hwan Jeong\* · Sang-Yong Yang\* · Tae-Wan Jeon\* · Young-Cheol Cho†

충북대학교 환경공학과 · \*국립환경과학원 금강물환경연구소

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

\*Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(2013년 2월 12일 접수, 2013년 4월 9일 채택)

**Abstract :** To evaluate the effects of submerged aerators installed at Chudong and Muneui areas in Daechung Reservoir on improvement of water quality and reduction of algal bloom, the water quality was monitored at the effected and control areas at the time of operation. The water temperature and concentrations of dissolved oxygen, total phosphorus, and total nitrogen in depth at the effected and control areas were not different each other, indicating the submerged aerators at these areas are not effective for circulation of water body and reduction of nutrients. In warmer season, the concentrations of total phosphorus in deep water, which was probably released from contaminated sediment or inflowed from watershed, was high. To decide the operation of aerators in this season, the concentration of total phosphorus in water should be considered because the dispersed phosphorus by operation of aerators can enhance the algal growth.

**Key Words :** Submerged Aerator, Daechung Reservoir, Water Quality Improvement, Reduction of Algal Bloom, Contaminated Sediment

**요약 :** 대청호의 추동과 문의수역에 설치된 수중폭기시설의 수질 개선 및 조류저감 효과를 평가하기 위하여, 폭기시설의 영향지점과 대조지점에서 시설의 가동 전·후 수질을 분석하였다. 분석 결과, 폭기지점과 대조지점에서 수심에 따른 수온 및 용존산소의 농도 차이는 거의 없었으며, 조류의 주요 성장인자인 총인과 총질소의 농도도 거의 차이가 없었다. 이러한 결과로부터 추동과 문의수역에서 폭기시설에 의한 수체 순환 및 영양염류 저감 효과가 크지 않은 것으로 판단되었다. 하절기에 심층의 총인 농도가 매우 높았으며, 이는 오염된 퇴적물로부터 용출되었거나 강우에 의해 외부로부터 유입된 것으로 판단되었다. 이 시기에 폭기시설을 가동할 경우 총인이 확산되어 조류의 성장을 촉진시킬 수 있으므로, 폭기시설의 가동 시기를 결정할 때 이를 고려하여야 한다.

**주제어 :** 수중폭기시설, 대청호, 수질 개선, 조류 저감, 오염 퇴적물

## 1. 서론

우리나라는 낮은 수자원 보유율을 높이기 위해 대형 댐을 건설하여 많은 양의 물을 저장하고 있다. 댐의 건설로 인해 호소수의 수리학적 체류시간이 길어졌으며, 정체수역이 형성되어 호소 내부 및 외부로부터의 오염물질 유입에 의한 부영양화가 진행되고 있다.<sup>1)</sup> 호소의 부영양화는 수자원 이용에 어려움을 일으키기도 하며, 조류의 대발생을 유발하기도 한다.<sup>1,2)</sup> 조류대발생은 수체의 착색 뿐만 아니라 이취미를 발생시켜 음용수의 가치를 떨어뜨리기도 하며, 독소를 생산하는 조류가 대량 증식하는 경우 인간이나 가축에 해를 끼치기도 한다.<sup>1,2)</sup>

조류대발생에 대한 제어 대책은 적용 위치에 따라 호소의 대책과 호소내 대책으로 나뉘지며, 기술의 원리에 따라 물리적, 화학적, 생물학적 제어 기술로 나눌 수 있다. 물리적 제어 기술은 수중폭기 장치, 가압부상시설, 초음파, 조류차단막, 조류제거선 등이 있다.<sup>3-6)</sup> 화학적인 기술로는 황토, 응집제, 살조제 등을 살포하는 방법이 있으며,<sup>7,8)</sup> 생물학적 방

법은 수생식물, 살조세균, 포식자 등을 이용하여 조류를 제어하는 것이 사용되고 있다.<sup>9,10)</sup>

수중폭기시설은 물리적 제어 기술로 동력을 사용하여 호수의 상층과 저층의 물을 혼합시키거나 저층에 산소를 공급하는 것이다.<sup>4)</sup> 수층의 혼합은 표층의 수온을 하강시켜 조류의 번식을 억제하는 효과를 나타내며, 저수층에 산소를 공급함으로써 무산소상태에서 생성되는 환원가스 발생을 억제한다. 이를 통하여 악취를 해소하고 유기물의 분해를 통한 자정작용을 촉진하며 퇴적물로부터 영양염류의 용출을 억제하는 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다.<sup>11)</sup> 하지만 조류가 발생한 상태에서 폭기시설을 가동할 경우 표층에 서식하는 조류가 전수층으로 확산되거나 상수원수의 취수구로 유입될 가능성이 높아질 수 있으며, 수심이 얇은 호소에서는 저층을 교란시켜 오히려 조류발생이 증가할 수 있다는 보고도 있다.<sup>4)</sup>

수중폭기시설은 다양한 형식이 있으나 국내에는 주로 간헐식과 산기식이 사용되고 있으며, 일부 호소에는 대류식이 운영되고 있다.<sup>12,13)</sup> 간헐식은 양수통 하부에 공기실을 두어

† Corresponding author E-mail: choy@chungbuk.ac.kr Tel: 043-261-2465 Fax: 043-261-3577

사이펀(syphon) 기능에 의해 공기실 공기를 간헐적으로 방출하는 방식으로 공기가 관 내부의 물을 밀어 올림과 동시에 호수 하부의 물을 흡입함으로써 수체의 순환을 유도한다. 이 방식은 수심이 10 m 이상 깊은 지역과 소규모 댐에 설치할 경우 수질 개선 효과가 크며, 수심이 낮은 지역에서는 효과가 미흡한 것으로 알려져 있다. 산기식은 호수 심층부에 설치된 산기관을 통해 미세 공기를 공급함으로써 산소가 물에 잘 용해되도록 유도하고 지속적인 물의 상승류를 만드는 방식이다. 간헐식과 달리 수심에 따른 제약이 없어 수심이 낮은 지역에도 적용할 수 있다는 장점이 있으나, 하천형 호소 및 홍수기에 다량의 퇴사가 유입되는 지점에 적용이 곤란하며 대규모 댐에 설치할 경우 산기관이 많이 소요되어 유지관리가 어려운 단점이 있다.<sup>12-15)</sup> 대류식은 간헐식과 유사하게 양수통을 이용하며, 양수통 내의 호소수를 임펠러(impeller)를 이용하여 상부로 밀어 올려 수체가 순환하도록 운영하는 방식이다. 따라서 용존 산소(DO) 농도가 높은 표층수가 순환되어 심층의 DO 농도를 높이는 역할을 한다. 이 방식은 동력을 직접 임펠러에 사용하므로 에너지 효율이 높고 유지관리비가 저렴한 장점이 있다.<sup>13)</sup> 2012년을 기준으로 한국수자원공사가 관리하는 인공호수 중 21개에 총 343개의 수중폭기장치가 설치되어 있으며, 이 중 간헐식이 110개이고, 산기식과 대류식이 각각 223개와 10개이다.<sup>16)</sup> 국내 호수에 설치된 수중폭기시설에 대하여, 이의 운영으로 인한 수질 개선, 조류성장 저해효과 및 조류 군집 변화에 대한 다양한 연구가 시행되었다. 일부 호수에서는 수중폭기시설의 가동으로 인해 성층파괴, 저층의 DO 증가 등의 효과가 있었으나, 일부 호수에서는 이의 가동으로 인한 효과가 크지 않은 것으로 판단되었다.<sup>12-14,17-20)</sup> 수중폭기시설의 효과 분석에 대한 연구는 주로 연초호, 광동호, 달방호, 황성호, 수어호 등 유효저수량이 1,000천 m<sup>3</sup> 이하의 호수에 대해서 이루어졌으며, 대청호와 같이 대형 호수에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 대청호에서는 1992년 추동수역에 15기의 수중폭기시설이 설치된 후 1993년과 1992년의 수질 차이로 수중폭기시설의 효과를 평가한 연구가 있으나,<sup>21)</sup> 이 연구에서는 연도별 환경요인의 차이에 대해 고려하지 않고 단순 비교를 통하여 수중폭기시설의 효과를 평가하였기 때문에 이러한 부분을 고려한 보다 정확한 평가가 필요하다.

중부권의 주요 용수원인 대청호는 지형적인 영향으로 정체수역이 많으며 이에 따라 매년 초여름부터 초가을까지 규조류, 갈색편모조류, 남조류 등에 의한 녹조현상이 빈번히 발생하고 있어, 안전한 식수 공급을 위한 근본적인 대책이 시급히 요구되고 있다.<sup>22)</sup> 대청호에는 현재 추동수역에 산기식 수중폭기시설 42기가 설치되어 운영되고 있으며, 문의수역에는 간헐식 8기와 산기식 25기가 운영 중이다. 본 연구에서는 대청호의 추동과 문의수역에 설치된 수중폭기시설의 수질 개선 효과를 평가하기 위하여, 폭기시설의 영향지점과 비영향지점을 각각 선정 후 각 지점에서 시설의 가동 전·후의 수질을 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료의 채취

대청호의 추동과 문의수역에서 운영 중인 수중폭기시설의 효과를 조사하기 위하여, 두 수역에서 시설의 영향지점(폭기지점)과 비영향지점(대조지점)을 각각 선정하였다. 영향지점은 폭기시설이 집중적으로 배치되어 있는 지역의 중심 지점으로 선정되었다. 수중폭기시설의 영향 반경은 100 m 이내이므로,<sup>23)</sup> 비영향지점은 폭기시설이 설치된 지역으로부터 100 m 이상 떨어져 있는 지역 중 영향지점과 수심이 비슷한 지역으로 선정되었다. 효과 분석을 위한 수시료는 2011년 5월 2일, 5월 30일, 8월 25일, 9월 8일에 Van Dorn 채수기로 각 지점에서 수심별로 채취되었다(Fig. 1, Table 1). 추동과 문의수역의 조류의 농도 및 종류 분석을 위한 시료는 2011년 8월 16일에 영향지점의 표층에서 채취되었다.

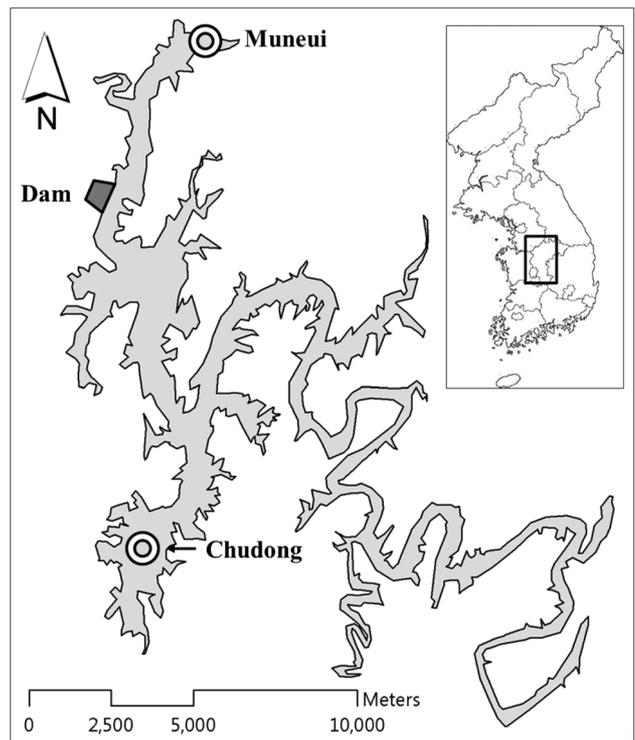


Fig. 1. Map of sampling locations.

Table 1. Location of sampling sites

Area	Site	GPS	Depth <sup>a)</sup> (m)
Chudong	C-1 Influence site	127° 29' 32.03" E, 36° 22' 25.58" N	17
	C-2 Control site	127° 29' 19.69" E, 36° 22' 53.20" N	15
Muneui	M-1 Influence area	127° 30' 20.25" E, 36° 30' 44.83" N	9
	M-2 Control area	127° 30' 04.56" E, 36° 30' 26.07" N	15

<sup>a)</sup> On May 2, 2011

추동수역에서 수중폭기시설의 운영 주체는 대전광역시 상수도 사업본부이며, 조류경보제와 관계없이 조류 성장 시점이 되면 상시적으로 시설을 운영한다. 2011년의 경우, 5월 23일부터 11월 4일까지 폭기시설을 가동하였다. 문의수역에 설치된 시설은 한국수자원공사에서 운영하고 있으며, 조류경보의 시행에 따라 탄력적으로 운영하고 있다. 2011년에는 조류주의보가 발령되기 직전 7월 21일에 가동되었으며, 그 중 간헐식 폭기시설 7대는 8월 18일에 가동을 중단하고, 산기식 25대는 조류주의보가 해제된 9월 26일까지 가동하였다. 본 연구에서 수중폭기시설의 효과 분석은 2011년에 4회(5월 2일, 5월 30일, 8월 25일, 9월 8일)에 걸쳐 수행되었다. 추동수역의 경우 1차 조사(5월 2일)가 폭기시설 가동 전이며 나머지는 시설 가동 중이다. 문의수역의 경우에는 1차와 2차가 폭기시설 가동 전이며 3차와 4차가 시설 가동 중에 해당된다.

## 2.2. 시료의 분석 및 통계 분석

채취된 시료는 냉장 보관된 상태로 실험실로 옮겨졌으며, 채취 당일에 이화학적 항목에 대한 분석이 수행되었다. 수질분석 항목은 수온, pH, DO, 탁도, 총질소(Total Nitrogen, T-N), 총인(Total Phosphorus, T-P), 용존성 총인(Dissolved Total Phosphorus, DTP), 용존무기인(Dissolved Inorganic Phosphorus, DIP), 엽록소 a이었다. 수온, pH, DO는 현장에서 YSI 6600 meter (YSI Inc., USA)를 사용하여 분석하였다. 탁도, 총질소, 총인, DTP, DIP, 엽록소 a는 수질오염공정시험기준(환경부고시 제2010-48호)에 따라 분석하였다. 수문 및 기상자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS; <http://www.wamis.go.kr/>)에서 제공한 것을 사용하였다.

시료 중 조류의 종류 및 농도를 분석하기 위하여 채취된 시료에 Lugol 용액을 1~2% (v/v) 되도록 가하여 고정시킨 후, 조류의 농도에 따라 희석하여 현미경으로 검경하였다. 계수에는 Sedgwick-Rafter counting chamber를 사용하였으며, 조류의 종은 한국동식물도감(담수조류편)의 분류체계에 따라 동정하였다.<sup>1,24)</sup>

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 수온

수심이 깊은 호수에서 수심별 수온 분포는 수체의 수직 혼합 및 성층화의 원인이 되며, 이로 인해 체류시간, 광량, pH, DO 및 영양염류의 농도 분포에 영향을 미치기 때문에 호수의 오염 정도를 예측하는데 매우 중요한 요소이다.<sup>25)</sup> 호수가 성층화가 되면 심수층에서는 상부에서 침강된 조류의 잔해와 같은 유기물의 분해에 의해 용존산소가 소비되어 무산소층이 되며, 이로 인해 퇴적물에서 영양염류가 용출되어 내부부하를 가중시키게 된다.<sup>26)</sup> 일반적으로 평균 수심이 10 m가 넘고 연간 평균 체류시간이 20일을 넘는 저수지의 경우 성층화가 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>27)</sup>

1차 조사 결과 추동수역에서 폭기지점(C-1)의 수온은 표층 13.8°C, 심층 7.0°C로써 6.8°C의 차이가 낮으며, 비영양지점(C-2)에서 표층 14.1°C, 심층 7.1°C로써 7.0°C의 차이가 나, 두 지점간의 수온 차는 거의 없었다(Fig. 2). 시설이 가동된 후인 2차 조사 결과, C-1과 C-2에서 표층과 심층의 온도 차이는 각각 9.8°C와 8.7°C로 오히려 폭기 지점에서 온도 차이가 큰 것으로 나타났다. 하지만 폭기지점의 수심이 대조지점 보다 약 2 m 정도 깊기 때문에, 같은 깊이인 14 m에서 두 지점의 온도는 각각 14.4°C와 14.1°C로 거의 차이가 없었다. 하절기인 8월 25일에 폭기지점과 대조지점에서 표층과 심층의 온도 차이는 각각 3.1°C와 2.7°C이었으며, 9월 8일에는 각각 3.9°C와 3.6°C로 폭기지점과 대조지점의 차이가 크지 않았다. 문의수역의 경우에도, 수온은 1차 조사 결과 폭기지점(M-1)과 대조지점(M-2)에서 표층과 심층의 차이는 각각 6.7°C와 8.6°C로 M-2에서 차이가 큰 것으로 측정되었으나, 같은 수심인 8 m에서 수온은 각각 9.6°C와 8.7°C로 차이가 없었다(Fig. 2). 폭기시설이 가동 중인 3차와 4차 조사에서도 M-1과 M-2에서 수심에 따른 수온의 차이가 없었다.

1차와 2차 조사에서 표층과 심층의 온도 차이가 큰 것은 수온이 상승하는 초여름에 성층이 형성되기 때문인 것으로

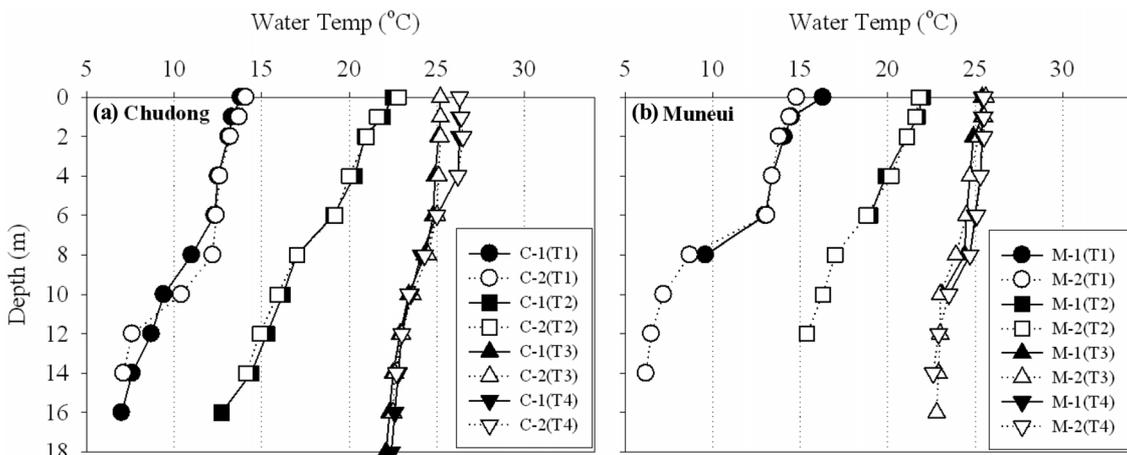


Fig. 2. Variation of water temperature in depth at Chudong and Muneui areas.

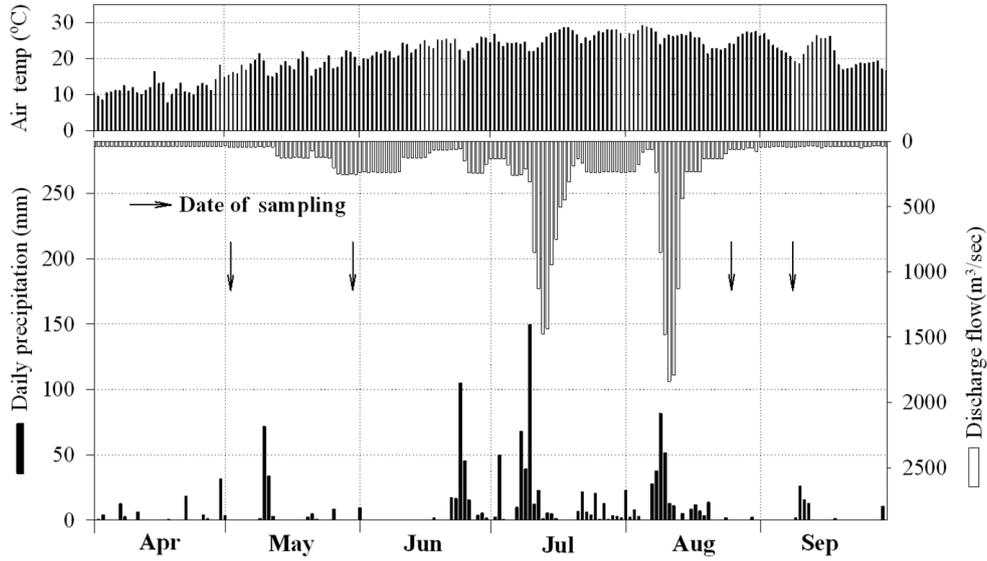


Fig. 3. Variation of air temperature, daily precipitation, and discharge flow at the Daechung Reservoir from April to September in 2011.

보인다. 여름철인 3차와 4차 조사에서 수심에 따른 수온 차이가 크지 않은 것은 추동과 문의수역이 만입부라는 구조적 특성과 시료 채취일 이전인 8월 14일에 댐의 수문방류가 중지되어 수체의 흐름이 거의 없는 상태에서 높은 기온에 의해 물의 심층까지 수온이 올라갔기 때문인 것으로 판단된다 (Fig. 3). 하절기인 3차와 4차 시기에 심층의 수온이 22.6~23.5°C로 남조류의 최적 성장온도 범위(20~25°C)<sup>28)</sup>에 있으며 표층과 심층의 수온 차이가 크지 않기 때문에, 폭기시설의 가동으로 심층의 물이 표층으로 순환된다고 해도 표층에서 남조류의 성장을 저해하지 못할 것으로 보인다. 또한 표층과 심층의 온도 차이가 크지 않아 밀도 차이에 의한 수층 분리가 되지 않기 때문에, 퇴적층에서 용출된 영양염류가 표층으로 이동하여 조류의 성장을 촉진할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2. pH와 용존산소 농도

추동과 문의수역에서 폭기지점과 대조지점의 pH는 1차 조사에서 7.6~8.0의 범위였으며 표층과 심층의 차이가 최대

0.3으로 측정되었다. 3차와 4차 조사에서는 표층의 pH가 최대 9.3까지 상승하였으며, 이는 조류의 성장에 의한 것이다 (Fig. 4). 추동보다 문의수역의 표층 pH가 더 높은 것은 문의수역에 조류의 농도가 높기 때문이다(Fig. 5). 추동과 문의수역에서 폭기지점과 대조지점의 깊이에 따른 pH의 경향은 거의 유사하였으며, 통계적으로도 차이가 없었다(t-test,  $p > 0.05$ ).

용존산소의 경우, 조류의 농도가 낮은 1차 조사에서는 전 수층에서 거의 비슷한 농도 분포를 보였으며, 추동과 문의수역, 폭기지점과 대조지점에서 모두 같은 경향을 나타내었다. 2차 조사에서는 표층의 DO는 거의 비슷한 수준을 유지하였으나 심층의 DO가 낮아졌으며, 이러한 현상은 3차와 4차 시기에 더욱 심화되는 경향을 나타내었다(Fig. 4). 표층에서는 조류의 광합성으로 인해 지속적으로 산소가 공급되기 때문에 DO가 유지되는 반면, 심층에서는 조류가 분비하는 유기물(exudate)을 세균이 대사하는 과정에서 산소가 소비되면서 DO가 감소된다.<sup>29)</sup>

4차 시기에 수심별 DO 분포를 보면, 수심이 증가하면서

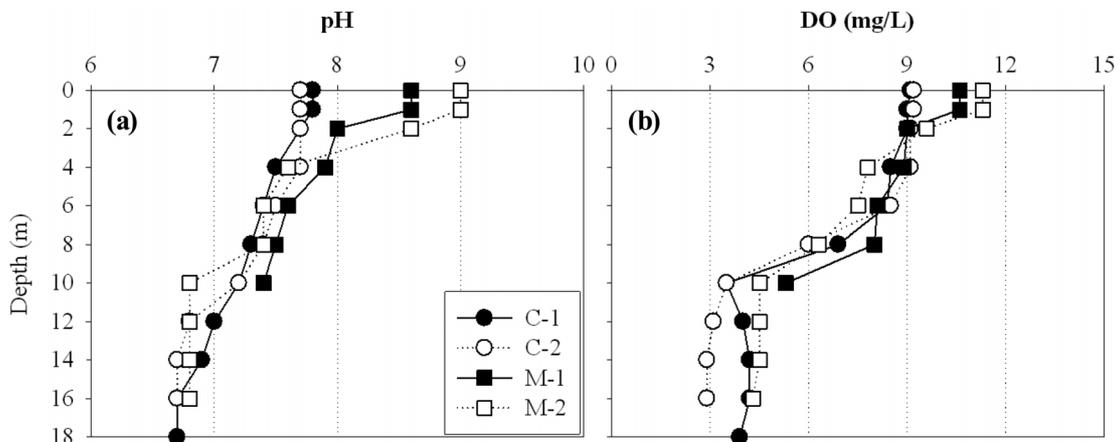


Fig. 4. Variation of pH and DO in depth at Chudong and Muneui areas.

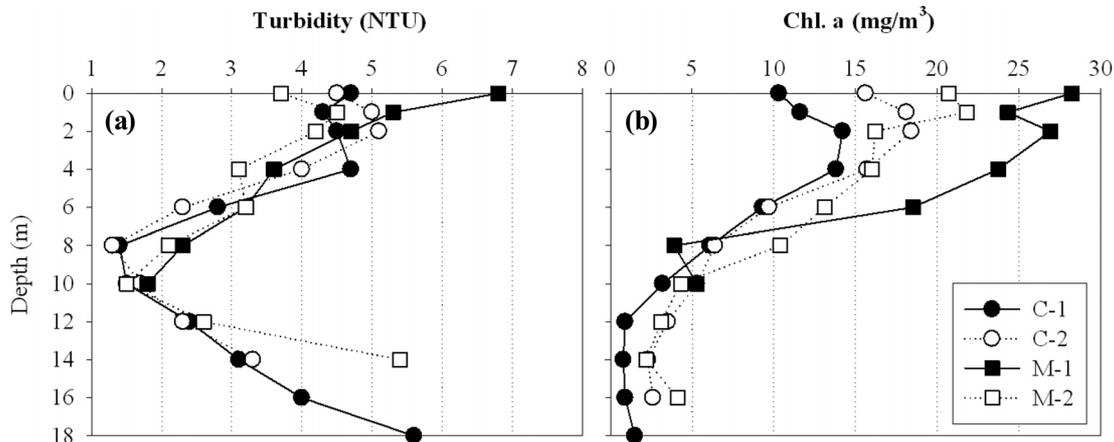


Fig. 5. Variation of turbidity and chlorophyll a concentration in depth at Chudong and Muneui areas.

DO가 감소하다가 약 10 m의 수심에서 대조지점에 비해 폭기지점의 DO가 약간 증가(추동수역)하거나 DO가 일정하게 유지(문의수역)된다(Fig. 4). 이러한 현상은 폭기시설의 가동으로 인한 용존산소 공급 효과 때문인 것으로 판단되지만, 대조지역과 비교하였을 때 그 효과는 크지 않은 것으로 보인다.

### 3.3. 탁도와 엽록소 a의 농도

여름철인 3차와 4차 시기에 수심별 탁도를 보면 표층에서 높았다가 수심 10 m 지점에서 낮아진 후, 심층으로 갈수록 증가하는 양상을 나타내었으며, 추동과 문의수역, 폭기지점과 대조지점에서 모두 동일한 경향을 나타내었다(Fig. 5). 표층의 높은 탁도는 조류의 성장에 기인한 것으로 보인다. 심층의 높은 탁도는 수중폭기장치의 운영에 의한 탁질의 발생, 경우에 의해 외부로부터 탁도 원인물질의 유입, 또는 표층에서 사멸되어 침전된 조류에 의해 일어날 수 있다. 폭기지점과 대조지점에서 수심별 탁도를 보면 거의 유사한 것으로 나타나 심층의 높은 탁도는 수중폭기장치에 의해 발생하지 않은 것으로 판단된다. 또한 수심별 엽록소 a의 농도를 보면 표층에 비해 심층에서 매우 낮은 것으로 나타나 조류의 침전에 의해 발생한 것으로 보이지 않는다. 따라서 추동과 문의수역의 폭기지점 심층에서 탁도가 높은 것은 8월 초의 많은 강우에 의해 다량의 탁도 원인물질이 유입되었으며, 이러한 물질이 수체의 정체로 인해 호수의 심층에 장기간 체류하였기 때문인 것으로 판단된다.

3차와 4차 시기의 표층 시료에서 엽록소 a의 농도의 범위는 10.3~28.2 mg/m<sup>3</sup>로 매우 높았으며, 추동과 문의수역에서 각각 10.3~15.6 mg/m<sup>3</sup>, 17.5~28.2 mg/m<sup>3</sup>로 추동수역에

비해 문의수역에서 농도가 높았다(Fig. 5). 3차 시기에 추동수역에서 폭기지점(C-1)과 대조지점(C-2)의 수심 4 m까지 엽록소 a의 농도는 각각 평균 12.5, 17.0 mg/m<sup>3</sup>로 폭기지점에서 26% 낮은 값을 나타내었다. 문의수역의 경우에는 폭기지점(M-1)과 대조지점(M-2)에서 엽록소 a의 농도는 각각 25.8, 18.7 mg/m<sup>3</sup>로 폭기지점이 더 높았다. 추동수역에서 엽록소 a의 농도가 낮은 것은 수중폭기시설에 의한 조류저감 효과보다는 대상지역에서 우점한 조류의 특성에 기인한 것으로 판단된다. 2011년 8월 16일에 추동과 문의수역에서 채취한 표층시료에서 우점한 조류는 남조세균이었으며, 이들 중 *Aphanizomenon*과 *Oscillatoria*와 같이 군체를 형성하는 사상성 남조세균이 우점하였다(Table 2). 군체를 형성하는 남조세균이 우점할 경우 같은 시기에 동일 지점에서 채취한 시료에서 채취방법에 따라 엽록소 a의 농도 차이가 클 수 있다.<sup>30)</sup> 이러한 결과는 수체 중 엽록소 a의 농도는 폭기시설의 효과를 판단할 때 적절한 지표가 아님을 의미한다. 반면, 수온과 영양염류의 농도는 수체에서 지점에 따른 차이가 크지 않으며 조류의 성장에 직접적으로 영향을 미치지 때문에 폭기시설의 효과를 평가할 때 적절한 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다. 폭기시설이 가동 중인 3차 시기에 추동수역의 폭기지점(C-1)에서 수심에 따른 수온과 영양염류의 농도가 대조지점(C-2)과 차이가 거의 없었다. 따라서 폭기지점의 표층에서 대조지점보다 엽록소 a의 농도가 낮은 것이 수중폭기시설의 가동에 의한 조류저감 효과로 보기는 어려운 것으로 판단된다.

### 3.4. 영양염류의 농도

추동과 문의수역에서 깊이에 따른 총질소의 농도를 분석

Table 2. Composition and number of algae at the samples taken from Chudong and Muneui areas (unit: cells/mL)

Site	Cyanophyceae					Total	Bacillariophyceae	Chlorophyceae	Others
	<i>Microcystis</i>	<i>Anabaena</i>	<i>Aphanizomenon</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Chroococcus</i>				
Chudong	152	182	2,550	232	8	3,124	538	418	90
Muneui	512	136	1,898	2,610	8	5,164	348	108	14

\* Samples were taken on Aug. 16, 2011.

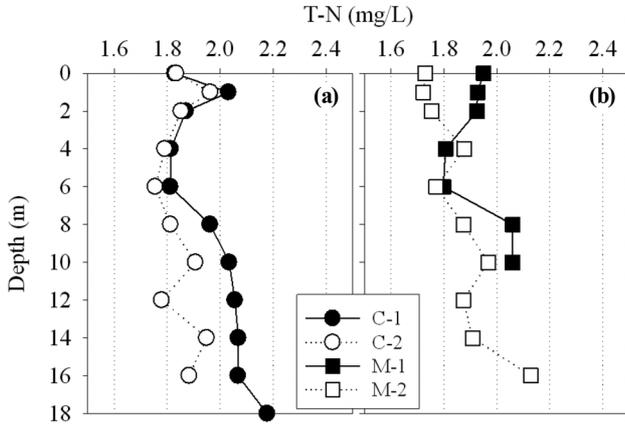


Fig. 6. Variation of total nitrogen concentration in depth at Chudong and Muneui areas.

한 결과, 1차와 2차 시기에 깊이에서 농도 차이가 크지 않았으며, 폭기지점과 대조지점에서 농도의 차이가 없었다. 3차 시기에 추동수역에서 깊이에서 다른 변이는 있었으나 대체적으로 표층보다 심층에서 총질소의 농도가 높았다 (Fig. 6). 특히 대조지점(C-2)보다 폭기지점(C-1)에서 총질소의 농도가 높게 나타났다. 이러한 현상은 수중폭기시설의 가동에 의해 퇴적물이 교란되었기 때문인 것으로 사료된다. 수심이 낮은 호수(~10 m)에서 수중폭기시설이 가동될 경우 저층의 오염물을 확산시켜 조류대발생을 가속화시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup> 문의수역의 경우, 폭기지점(M-1)의 표층과 심층에서 총질소의 농도가 높은 것으로 측정되었는데, 표층의 총질소는 조류에 의한 것으로 보이며, 심층의 경우에는 추동과 마찬가지로 수중폭기시설의 가동에 의한 영향으로 판단된다.

추동과 문의수역에서 수심에 따른 총인의 농도를 분석한 결과, 폭기시설 운영 전인 1차 시기에 깊이에서 다른 차이는 없었으며, 폭기지점과 대조지점 간의 차이도 거의 없었다. 3차 시기에 총인의 수심별 농도를 보면, 표층에서 약간 높았으며 수심 10 m까지 감소하다가 다시 급격히 증가하는 경향을 나타내었으나, 폭기지점과 대조지점에서 큰 차이가 없었다(Fig. 7). 이러한 결과는 폭기시설의 가동에 의해 퇴적

물로부터 인의 용출을 억제하는 효과가 나타나지 않았음을 의미한다.

추동과 문의수역의 표층에서 총인의 농도가 높은 것은 조류에 의한 입자성 인에 기인한 것으로 보인다. 이는 수심 8 m까지 총인의 농도는 급격히 감소하였으나, DTP와 DIP의 농도는 수심에 따른 차이가 크지 않았기 때문이다. 심층에서 총인의 농도가 높은 원인으로 강우에 의한 외부로부터의 입자 유입을 들 수 있으며, 3차 시기에 추동과 문의수역의 심층에서 탁도가 높게 측정되었다(Fig. 5). 하지만 탁질에 포함된 인은 대부분 입자성이며 3차 시기에 심층에서 총인 중 DTP가 차지하는 부분이 49~75%(추동수역)로 매우 높은 것으로 나타나, 강우에 의해 유입된 입자가 총인의 농도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 수중폭기시설의 가동으로 인한 퇴적물 교란이 원인이 될 수 있으나, 수심이 깊어질수록 총인의 농도가 높아지며 수중폭기시설의 비영양지역인 대조지점에서도 같은 양상이 관찰되어, 폭기시설의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

대상지점의 심층에서 총인의 농도가 높은 또 다른 원인으로 퇴적물로부터 인의 용출을 들 수 있다. 대청호에서 가장 오염이 심한 곳으로 알려진 추소리 퇴적물의 강령감량과 총인의 농도가 각각 8.35%, 0.957 mg/g sediment인데 반하여, 추동수역 퇴적물의 경우 각각 11.1%와 1.12 mg/g sediment로 추동수역의 퇴적물 오염이 더욱 심한 것으로 나타났다(미발표 자료). 대청호 퇴적물에서 총인의 용출속도는 4.70~7.36 mg/m<sup>2</sup>/day로 부영양호로 알려진 남양호 또는 안동호보다 높았다.<sup>26,31)</sup> 일부 연구에서는 호수의 교란이나 심층폭기가 퇴적물로부터 인용출을 증가시켜 내부부하를 증가시키며,<sup>32)</sup> 유기물 오염도가 심한 퇴적물에서는 호기상태에서 유기물의 분해에 의해 유기인이 용출되기도 한다.<sup>26)</sup> 이와 같이 대청호 퇴적물의 오염도를 볼 때, 심층에서 총인의 농도가 높은 것은 수온이 상승하면서 퇴적물에 포함된 미생물의 활성 증가로 퇴적물로부터 인이 용출에 의해 심층의 총인 농도가 증가되었을 가능성이 있다.

국내에서 연초댐(유효저수량, 4.6 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), 광동댐(8.0 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), 달방댐(7.5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) 등의 호수에서는 수중폭기

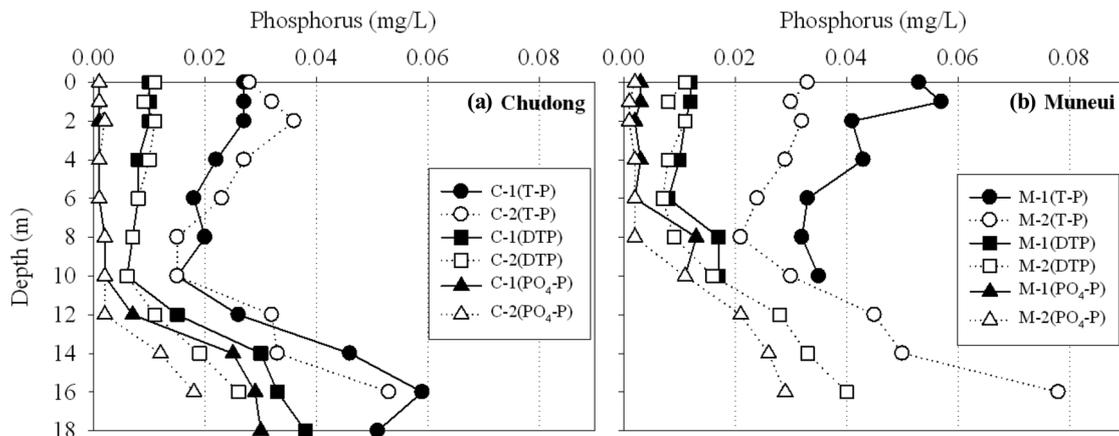


Fig. 7. Variation of phosphorus concentration in depth at Chudong and Muneui areas.

시설의 가동에 의해 이취미 저감, 성층과괴, 조류 저감 등의 효과가 있는 것으로 나타났다.<sup>12,17)</sup> 달방댐에서는 폭기장치를 가동한 이후 수층의 인 농도가 감소하였으며, 하절기의 우점종이 *Microcystis*, *Anabaena*와 같은 남조류에서 *Asterionella*, *Melosira*와 같은 규조류로 천이가 된 것으로 나타났다.<sup>19)</sup> 남조류에 비해 규조류의 최적성장온도가 낮기 때문에, 남조류에서 규조류로 천이가 일어나는 것은 폭기시설에 의해 표층의 수온이 저하되었음을 의미한다.<sup>28)</sup> 반면, 시화호의 경우에는 인공폭기에 의해 수질이 개선되지 않았으며,<sup>11)</sup> 횡성호( $73.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ )에서는 폭기시설의 운영 기간에도 수온 약층이 형성되었고 폭기 영향 지점과 비영향 지점에서 조류의 종류 및 농도에 큰 차이가 없어 시설의 가동에 의한 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.<sup>20,23)</sup> 이와 같이 호수에 따라 수중폭기시설의 효과가 다르게 나타난 원인으로 호수의 크기,<sup>4)</sup> 폭기시설의 배치,<sup>18)</sup> 필요한 시설의 용량 및 숫자<sup>4,13)</sup> 등이 제시되었다. 대청호(유효저수량,  $790 \times 10^6 \text{ m}^3$ )는 수지형 호수이며 폭기시설이 설치된 추동과 문의수역은 만입부에 위치하고 있어 수체의 유통이 원활하지 않다. 따라서 호수의 크기가 추동과 문의수역에서 수중폭기시설의 효과가 낮은 원인으로 제시되는 것은 적절하지 않으며, 폭기시설의 용량 및 숫자에 대한 검토를 통하여 폭기시설의 효과를 높일 수 있는 방안을 도출해야 할 것으로 판단된다.

수중폭기시설을 연속적으로 가동할 경우 막대한 동력 비용이 들며 장치의 수명이 짧아지는 문제가 있다.<sup>4)</sup> 이러한 문제를 해결하고 장치의 효과를 극대화하기 위하여 이의 가동 시기를 결정하는 것이 중요하며, 결정 인자로는 수온, 엽록소 a 및 용존산소의 농도 등이 있다.<sup>15,33)</sup> 즉 수온이나 엽록소 a의 농도가 높아 조류의 증식이 우려되거나, 상·하층의 수온차가 커서 성층이 형성될 경우, 또는 심층의 용존산소 농도가 낮아서 혐기화가 될 가능성이 있을 때 폭기시설을 가동하는 것이 좋다고 알려져 있다. 본 연구에서 수중폭기시설이 설치된 지역의 심층에서 총인의 농도를 분석한 결과, 퇴적물로부터 용출에 의해 표층에 비해 매우 높은 농도를 나타내었다. 심층의 총인 농도가 높을 때 폭기시설이 가동되면 인이 확산되어 조류의 성장이 촉진될 수 있다. 따라서 저수지의 성층현상과 폭기장치의 특성을 연관지어 장치를 효율적으로 운영함으로써 시설의 설치 및 운영의 효율화를 기하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 대청호의 추동과 문의수역에 설치된 수중폭기시설의 수질 개선 및 조류 저감 효과를 평가하기 위하여, 폭기시설의 영향지점과 대조지점에서 시설의 가동 전·후 수질을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

추동과 문의수역의 폭기지점과 대조지점에서 수심에 따른 수온 및 용존산소의 농도 차이는 거의 없었으며, 조류의 주요 성장인자인 총인과 총질소의 경우에도 거의 차이가 없

었다. 이러한 결과로부터 추동과 문의수역에서 폭기시설에 의한 수체 순환 및 영양염류 저감 효과가 크지 않은 것으로 판단되었다.

수체 중 엽록소 a의 농도는 우점조류의 종류, 시료채취지점, 및 채취방법에 따라 변이가 크기 때문에 폭기시설의 효과를 평가할 때 적절치 않은 반면, 지점에 따른 차이가 크지 않으며 조류 성장에 직접적으로 영향을 미치는 환경요인인 수온과 영양염류의 농도가 적절한 지표로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

하절기에 추동과 문의수역의 심층에 총인의 농도가 매우 높았으며, 이는 오염된 퇴적물로부터 용출되었거나 강우에 의해 외부로부터 유입된 것으로 판단되었다. 총인의 농도가 높을 때 수중폭기시설이 가동될 경우, 이를 확산시켜 조류의 성장을 촉진할 수 있으므로 폭기시설의 운영시 이를 고려하여야 한다.

추동과 문의수역에 설치된 수중폭기시설의 조류저감 효과를 높이기 위하여, 시설의 용량, 적정 수량 및 시설의 배치 등에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 금강수계관리위원회의 “환경기초조사사업비” 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

#### 참고문헌

1. Park, H. K., “Survey method relating freshwater phytoplankton for the management of water resources,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **29**(6), 593~609(2007).
2. Oh, K. H., Jeong, D. H., Shin, S. H. and Cho, Y. C., “Simultaneous quantification of cyanobacteria and *Microcystis* spp. using real-time PCR,” *J. Microbiol. Biotechnol.*, **22**(2), 248~255(2012).
3. Ko, S. R., Ahn, C. Y., Joung, S. H., Kim, H. S. and Oh, H. M., “Change of phytoplankton community by ultrasonication in eutrophic ponds,” *Kor. J. Environ. Biol.*, **24**(3), 221~229(2006).
4. Seo, D. I., Seog, K. S., Lee, B. D. and Jeong, S. G., “Design methods and capacity analysis of artificial circulation systems in Korean reservoirs,” *J. Kor. Soc. Water Wast.*, **18**(3), 366~376(2004).
5. Yi, H. S., Jeong, S. A. and Shin, J. K., “Algal removal vessel developed by K-water,” *Proceeding of the 2010 Autumn Joint Conference of KSWE and KSWW*, pp. 287~288(2010).
6. Lee, H. S., Chung, S. W., Jeong, H. Y. and Min, B. H., “Analysis the effects of curtain weir on the control of algal bloom according to installation location in Daechung Reservoir,” *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **26**(2), 231~242(2010).

7. Park, H. K., Jung, E. Y., Lee, Y. J., Jung, J. M., Choi, S. Y. and Hong, Y. K., "A study on the removal of *Microcystis aeruginosa* by coagulants of the ceramic-zeolite type and yellow loess," *J. Environ. Sci.*, **11**(4), 405~409(2002).
8. Kim, H. Y. and Song, H. M., "A study of injection of algicidal agent to manage water quality of reservoirs," Proceeding of the 2006 Spring Conference of KSEE, Ilsan, pp. 883~887(2006).
9. Kim, B. H., Jung, S. W., Seo, J. K., Suh, M. Y. and Han, M. S., "Effects of biological control agent algicidal bacterium on the phytoplankton community and microcystin-LR contents in a mesocosm experiment," *Kor. J. Limnol.*, **38**(2), 261~270(2005).
10. Kwon, S. H., Na, H. R., Jung, J., Baek, N. I., Park, S. and Choi, H. K., "A comparison of radical scavenging activity and cyanobacteria growth inhibition of aquatic vascular plants," *Kor. J. Limnol.*, **45**(1), 11~20(2012).
11. Kim, D. S., Park, S. Y., Na, K. J., Lee, H. J., Jeong, S. K. and Park, D. J., "A study on the lake restoration by aeration in Lake Sihwa," Proceeding of the Conference of Korean Society on Water Quality, Seoul, pp. 49~52(1997).
12. Choi, D. H. and Kang, H., "Effect of aeration on water quality in lakes," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **14**(1), 47~56(1998).
13. Lee, Y., Lee, K. M., Koh, D. K. and Yum, K. T., "Study on effect of convection current aeration system on mixing characteristics and water quality of reservoir," *Kor. J. Limnol.*, **42**(1), 85~94(2009).
14. Kim, S. K., Lee, B. D., Cho, C. K., Song, H. Y., Lee, Y. W., Kim, S. K. and Seok, K. S., "Reservoir water quality improvement estimate by air lift system," Proceeding of the 2001 Spring Joint Conference of KSWE and KSWW, Gwangju, pp. 77~80(2001).
15. Lim, K. H., Jeong, S. M., Han, Y. S. and Park, Y. O., "Strategic operation of the artificial aeration system for water quality management of the reservoir," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **18**(3), 261~270(2002).
16. K-water, "Annual Report of Management of Water Supply System in year 2011"(2012).
17. Jun, H. B., Kim, H. S. and Lee, T. Y., "Water quality improvement of a small reservoir by the operation of air-lifters," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **12**(2), 141~149(1996).
18. Lee, S., Lee, G., Park, H., Park, S. and Yum, K., "Effect of hypolimnetic aerator on algal growth in Sueo Dam," Proceeding of the 2008 Autumn Joint Conference of KSWW and KSWE, Seoul, pp. 61~62(2008).
19. Heo, W. M., Kim, J. O. and Kim, B., "A study of water quality variations on the artificial aeration in water supply system (Lake Dalbang)," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **15**(3), 335~343(1999).
20. Heo, W. M., Kwon, S. and Kim, B., "The limnological survey and phosphorus loading of Lake Hoengsung," *Kor. J. Limnol.*, **37**(4), 411~422(2004).
21. Jeong, D. W., Kim, J. S. and Lee, B. W., "Discussion about aerators and change of water quality-case study of Daechung Reservoir," Proceeding of the Conference of KSWW, pp. 1~5(1994).
22. Cho, W. H., Yum, K. T., Kim, J. S., Ban, Y. J. and Chung, S. W., "Study on algae occurrence in Daecheong Reservoir," *J. Environ. Impact Ass.*, **21**(3), 367~380(2012).
23. Choi, I. H. and Kim, H. C., "Effect on phytoplankton by hydraulic-gun-aerators and selective withdrawal in Hoengseung Reservoir," *J. Environ. Impact Ass.*, **16**(1), 15~26(2007).
24. Jeong, Y. H., "Illustrated Guide to Korean Animals and Plants-Vol. 9, Freshwater Algae," Academy Press(1968).
25. Chung, S. W., Lee, H. S., Choi, J. K. and Ryu, I. G., "Simulations of thermal stratification of Daecheong Reservoir using three-dimensional ELCOM model," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **25**(6), 922~934(2009).
26. Cho, Y. C. and Chung, S. W., "Sediment release rate of nutrients from Namyang Reservoir," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **29**(12), 1345~1352(2007).
27. Ford, D. E. and Johnson, L. S., "An assessment of reservoir mixing processes," Technical Report E-86-7, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS(1986).
28. Paerl, H. W., Hall, N. S. and Calandrino, E. S., "Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change," *Sci. Total Environ.*, **409**(10), 1739~1745(2011).
29. Brock, T. D. and Clyne, J., "Significance of algal excretory products for growth of epilimnetic bacteria," *Appl. Environ. Microbiol.*, **47**(4), 731~734(1984).
30. Ahn, C. Y., Joung, S. H., Park, C. S., Kim, H. S., Yoon, B. D. and Oh, H. M., "Comparison of sampling and analytical methods for monitoring of cyanobacteria-dominated surface waters," *Hydrobiol.*, **596**(1), 413~421(2008).
31. K-water, "A study of organic sediment decomposition and release on dam reservoir(II)"(2002).
32. Osgood, R. A. and Stiegler, J. E., "The effects of artificial circulation on a hypereutrophic lake," *J. Am. Water Res. Assoc.*, **26**(2), 209~217(1990).
33. K-water, "Report of Effectiveness Analysis of Submerged Aerators in year 2000"(2000).