

가압부상법을 이용한 부영양저수지의 수질개선

김호섭 · 정동일 · 이일국¹ · 황순진^{2,*}

(국립환경과학원 수질총량과, ¹효림산업, ²건국대학교 환경과학과)

Application of Dissolved Air Flotation Technique to Improve Eutrophic Reservoir Water Quality. Kim, Ho-Sub, Dong-Il Jung, Il-Kuk Lee¹ and Soon-Jin Hwang^{2,*} (Total Water Pollution Load Research Division, Environmental Research Complex, Incheon 404-170, Korea; ¹Hyorim Industries Inc., Sungnam-si, Kyunggi-do 463-839 Korea; ²Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

This study was conducted to test the efficiency of water quality improvement using the dissolved air flotation (DAF) technique in a shallow eutrophic reservoir. The application of DAF was followed by the addition of a chemical coagulant (poly aluminum chloride; PAC). The experiment was conducted in the mesocosm scale (wide × length × depth: 6 m × 6 m × 3 m). Suspended solids (SS) and volatile SS (VSS) concentration decreased by 54~71% and 57~79% of the initial concentrations, respectively. Total phosphorus and Chl-*a* concentration also decreased by 74~92% and 54~98%, respectively. BOD decreased by >86% while COD decrease ranged 29~63%. Dissolved inorganic P (DIP) and dissolved total P (DTP) concentration decreased by 34~88% and 62~88%, respectively. After DAF application further onto the sediment, DIP-release rates from the sediment decreased by 17% (0.82 → 0.68 mg m⁻²day⁻¹) in the oxic condition and 23% (2.27 → 1.76 mg m⁻²day⁻¹) in the anoxic condition, compared to the release rate from the untreated sediment. DTP-release rate from both the oxic and anoxic sediments also decreased by 33% (5.62 → 3.78 mg m⁻²day⁻¹) and 20% (6.23 → 4.99 mg m⁻²day⁻¹), respectively. These results suggest that the DAF application both to the water column and onto the sediment be effective to improve water quality by removing particulate matters in the water column as well as reducing P-release from the sediment.

Key words : eutrophic reservoir, water quality, DAF, PAC, P-release rate, sediment

서 론

부상분리의 일종인 가압부상법 (Dissolved-air flotation, DAF)은 침전공정의 대안으로서 20여년 전부터 유럽과 미국을 중심으로 정수처리 공정 뿐만 아니라 조류 제거를 위한 방법으로도 사용되고 있다 (Zabel, 1985; Malley and Edzwald, 1991; Edzwald *et al.*, 1994). 가압

부상법은 발생하는 기포의 크기가 50~100 μm 정도로 부상물질인 플러크가 파괴될 가능성이 적고, 입자와 기포사이에서는 충돌, 침강, 트랩핑, 흡수의 결과로 부착이 일어나기 때문에 계면활성제 등의 첨가제가 필요성이 없다. 또한, 응집 및 침전 시설면적의 축소가 가능하고, 빠른 시간 내에 현장에 설치·운영할 수 있으며, 여과속도가 빠르고 여과지속시간이 오랫동안 유지되며, 4°C 이하의 낮은 수온에서도 처리수질이 양호한 장점이 있다 (Zabel, 1985;

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

Frederick, 1990; Malley and Edzwald, 1991; Edzwald *et al.*, 1994). 특히, 처리에 대한 부산물이 호소 외로 배출됨으로써 응집제의 직접살포에 따른 퇴적물량의 증가가 없으며, 처리효과가 서서히 나타나는 황토살포나 수중폭기 등과 같은 물리적인 방법이나 인공습지, 부도, 먹이망 조절과 같은 생물학적인 수면제어기술에 비해 효과가 빠르다는 장점이 있다.

국내에서도 가압부상법이 기존의 상수처리 과정인 응집·침전법의 대안으로서(박과 장, 1997), 처리효율에 영향을 주는 요인들과 관련된 많은 연구들이 진행된 바 있다(김과 이, 1997; 한 등, 1999; 독고 등, 1999). 또한, 폐수나 정수처리공정 외에도 부영양호수에서 문제가 되고 있는 조류를 제거하는 방법으로서 적용된 바 있으며, 그 효율성이 입증되고 있다(국립환경연구원, 1999; 환경관리공단, 2001). 팔당호의 유입수인 경안천과 서낙동강에서 가압부상법에 의해 조류 제거 뿐만 아니라 수중의 유기물질 및 영양염류 등에 대한 높은 제거효율을 나타냈다(국립환경연구원, 1999; 환경관리공단, 2001).

지금까지의 가압부상 정수처리나 현장적용에 따른 수질개선효과는 수체 내에서의 유기물과 영양염에 대한 농도변화를 통해 효과를 평가하였을 뿐 퇴적물을 포함한 수체 전체에 대해 검토된 연구는 전무하다. 가압부상시 수체로부터 제거되지 않은 입상성 물질의 침전이나 잔류응집제는 퇴적환경에 변화를 야기하고 그로인해 수체 내 물질교환에 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서는 부영양 저수지에서 가압부상법 적용에 따른 수질개선효과를 평가하기위해 가압부상법 적용 전·후의 수질과 퇴적물로부터의 인 용출율을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 조사 시기

가압부상에 의한 부영양저수지의 수질개선 효과 분석을 위한 실험이 충청남도 보령시 주안면에 위치한 신구저수지에서 2004년 4월부터 6월까지 총 4회에 걸쳐 수행하였다(4월 22일, 5월 18일, 6월 4일, 6월 5일)(Fig. 1). 신구저수지의 수표면적은 0.1 km²이고 유효저수량은 38.8만 톤으로, 여름철 심층에 무산소층이 형성되며 겨울철에는 저수지 수표면 전체가 결빙되는 알고 부영양한 저수지이다(김과 황, 2004). 계절에 따른 조류 종 조성은 봄철 규조류와 녹조류가 우점한 시기를 제외하고는 연중 *Oscillatoria* spp., *Aphanizomenon* sp., *Microcystis* spp.

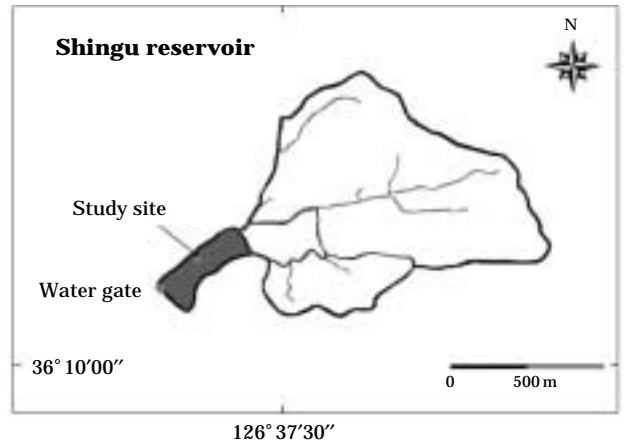


Fig. 1. Map showing the study area.

와 같은 남조류가 우점하고 있다(김과 황, 2005). 가압부상에 따른 처리효과는 가압부상 전후의 수질 비교를 통해 이루어졌다. 6월 5일에는 미세기포발생장치에서 발생하는 기포를 통해 퇴적물을 교란 시킨 후 가압부상을 실시하였고, 실험 후 퇴적물을 채취하여 실험 전·후의 인 용출량을 측정하였다.

2. 가압부상장치 구조

본 실험을 위해 철재 구조물에 타포린 재질의 방수막을 둘러싼 3개의 Mesocosm (6 m × 6 m × 3 m)을 설치하였다. 바닥으로부터 Mesocosm으로 유입되는 호소수를 최소화하기 위해 편평한 곳에 설치하였다. 가압부상장치는 펌프본체, 배관, 밸브류, 유량계(현장직독식), 압력계, 공기유량계, 압력조절밸브(Pressure Regulation Valve), 에어벤트, 응집제 투입을 위한 약품탱크, 약품펌프, 약품유량계로 구성되어 있다(Fig. 2). 기액혼합펌프 부상분리시스템은 전단에 설치된 유입펌프에 의해 원수가 원수탱크로 유입되며, 유입된 원수는 배관을 통해 기액혼합펌프로 유입된다. 기액혼합펌프는 처리된 원수를 일부 재순환하여 부상조로 이송하는 펌프로, 공기용해장치, 가압펌프 및 공기압축기의 역할을 동시에 수행한다. 유입된 원수는 기액혼합펌프에 의해 순환되며, 기액혼합펌프 전단의 공기흡입에 의해 펌프에서 1차 Air를 작게 분쇄한 뒤, 배관상에서 기체와 원수가 혼합된다. 기체가 용해된 혼합수는 기액혼합펌프 후단의 응집설비에서 토출되는 응집제와 함께 혼합되어 배관을 통해 이동하게 된다. 기체, 액체, 응집제가 혼합된 물은 압력조절밸브를 거쳐 토출부에 장착된 계란형태의 미세기포발생장치에 의해 미세한 기포

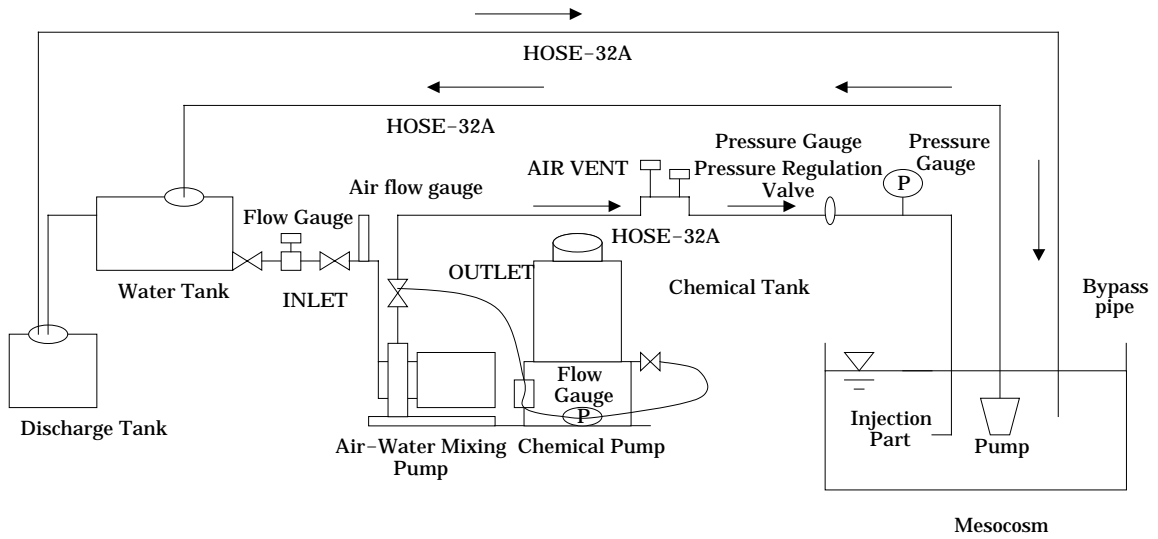


Fig. 2. Diagram of dissolved air flotation (DAF) system.

Table 1. Initial condition of mesocosms, and pH and conductivity before and after dissolved air flotation operation.

Date	Initial condition					pH		Conductivity ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	
	Operating time (hr)	PAC (mg L^{-1})	Depth (m)	Volume (m^3)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Before	After	Before	After
April 22	8	15	3.2	115.2	16.7	8.9	7.3	213.7	230.0
May 18	8	15	3.0	108	18.2	7.9	7.2	206.3	218.9
June 4	3	15	0.9	32.4	23.0	9.1	6.5	169.2	207.4
June 5	3	15	0.8	28.8	24.5	9.4	6.3	169.5	212.0

형태로 분출되게 된다. 미세기포발생장치의 분출공의 출구에는 외부액체와 기액혼합유체가 격렬히 충돌하며 양자의 간극을 통과하는데 이때 미세기포가 발생하게 된다.

3. 가압부상 가동조건

실험기간 동안 수위가 4월에 최대 3.2 m에서 6월에 0.8 m까지 변화함에 따라 가압부상에 의한 처리수량은 115.2~28.8 m^3 범위였다 (Table 1). PAC (poly aluminum chloride) 총 투입량은 가압부상 전 Jar-test에서 결정된 최적 PAC 농도 15 mg L^{-1} 를 처리수량과 곱하여 계산하였다 (Table 1). 가압부상의 가동시간은 20% 반송비에 처리수를 곱한 다음 펌프용량 ($2 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$)을 나누어 계산하였다.

4. 수질 및 조류 분석방법

수질 분석을 위한 시료는 아크릴로 제작된 Integrated

sampler ($\Phi 15 \text{ cm}$, Length 1.5 m)를 사용하여 채취하였다. 시료는 산 세척된 7L 폴리에틸렌 병에 담아 실험실로 운반하였다. 부유물질 측정을 위한 시료를 GF/F여과지로 여과하였으며, 여과된 시료는 용존성 영양염 측정을 위해 2N 염산으로 산 세척된 250 mL 플라스틱 용기에 담아 -20°C 에서 냉동보관 하였다. 여과 하지 않은 원수 시료는 입자성영양염 분석을 위해 2N 염산으로 산 세척된 250 mL 플라스틱 용기에 담아 -20°C 에서 냉동보관 하였다.

현장에서 수소이온농도와 전기전도도는 각각 pH meter (HORIBA)와 Conductivity meter (HORIBA)로 측정하였고 수온은 digital thermometer로 측정하였다. 부유물질 (SS)은 여과 전 여과지의 무게와 여과 후 100°C Dry oven에서 건조된 여과지의 무게차로부터 계산하였다 (APHA, 1995). 용존무기인 (dissolved inorganic phosphorus; DIP)은 ascorbic acid 법으로 분석하였고, 총 인 (TP)과 용존총인 (dissolved total phosphorus; DTP)은 원수와 여과수를

각각 과망간산칼륨 (persulfate)으로 분해한 후, ascorbic acid 법으로 측정하였다. 화학적 산소요구량 (COD_{Mn})은 알칼리성 과망간산법으로 측정하였으며 (환경부, 1998), 생화학적 산소요구량 (BOD)은 시료를 20°C 암 조건에서 5일간 배양한 후에 azide변법으로 용존산소농도를 측정하여, 배양전의 용존산소 농도와와의 차이로부터 산출하였다 (APHA, 1995).

엽록소 *a* 농도 측정을 위해 일정량의 시료를 GF/F여과지로 여과하였고, 여과지에 100%메탄올을 넣어 24시간 동안 냉암소에 보관한 후, 추출된 엽록소의 흡광도를 흡광광도계를 이용하여 측정하여 Maker가 제시한 식에 따라 계산하였다 (Maker, 1972; Maker *et al.*, 1980).

5. 인 용출량 분석방법

퇴적물은 core sampler로 가압부상 전과 후에 시설물 내 20지점 이상에서 채취하여 혼합하였다. 시료를 밀폐 용기에 담아 질소 가스를 주입한 후 4°C 이하로 냉암 보관하여 실험실로 운반하였고, 실험 전까지 4°C 이하의 암실에 보관하였다. 인 용출실험은 퇴적물 채취 후 2일 이내에 완료하였다.

인용출 실험은 아크릴재질로 제작된 내경 20 cm, 높이 30 cm의 실험 용기에서 수행하였다 (Fig. 3). 퇴적물을 담을 수 있도록 제작된 용기 (내경 19.5 cm, 높이 5 cm)에 퇴적물을 3 cm 두께로 고루 편 후 용존산소가 2 mg L⁻¹ 이하 (혐기적 조건이라 함) 또는 7.0 mg L⁻¹ (호기적 조건이라 함) 이상인 증류수를 퇴적물이 교란되지 않도록 가

득 채웠다. 혐기적 조건은 실험 초기에 질소가스를 투입해 조성하였고 실험이 진행되는 동안 밀폐된 상태를 유지하였다. 호기적 조건으로 조성된 용기에는 퇴적물의 교란이 없는 위치에 기포기를 설치하여 지속적으로 공기를 주입하였다. 실험은 24시간 동안 dark 상태에서 온도 10, 15, 20, 25°C를 유지하는 배양기에서 이루어졌으며, 실험이 진행되는 동안 퇴적물이 교란되지 않도록 교반기 (DC 9V motor)의 속도를 조절하여 회전시켰다. 24시간 후에 DO meter (YSI 58)로 용존산소를 측정하였고 인 분석을 위한 상등수를 채수하였으며 pH를 측정하였다. 인 용출량은 초기농도와 24시간 후의 농도차로써 정량하였다 (Seitzinger, 1993).

$$R_p = \frac{(C_t - C_0) \times V}{A \times T}$$

- R_p : phosphorus flux from sediment
- C_t : phosphorus concentration after t time
- C₀ : phosphorus concentration at time zero
- V : Water volume (8.5 L)
- A : water-sediment interface area (0.023 m²)
- T : time (1 day)

서로 다른 온도에서 측정된 인 용출량 (R_p)은 온도와 생물학적 반응관계식으로 전환하여 산소조건에 따른 20°C에서의 인 용출량을 비교하였다.

$$R_T = R_{20} \theta^{(T-20)}$$

- R_T : Phosphorus flux at T temperature (mgP m⁻² day⁻¹)
- R₂₀: Phosphorus flux at 20°C
- θ : coefficient
- T : Temperature (°C)

결과 및 고찰

1. 수질개선효과

가압부상장치에 따른 엽록소 *a* 농도는 시설의 반송율과 약품 투입량에 의해 계산된 가동시간의 1/3시간이 경과된 이후에 70% 이상 감소하였다 (Fig. 4). 가압부상에서 가압수량은 공기량을 결정하는 중요한 인자로 정수처리시 부상분리 장치의 반송비 (가압수/처리수)는 7~8% 정도에서 최적의 수처리효율이 나타나는 것으로 보고된 바 있고 (Rees and Zabel, 1979), 김 등 (2002)은 20% 이상의 반송비에서 처리수질이 안정적임을 제시한바 있다. 본 실

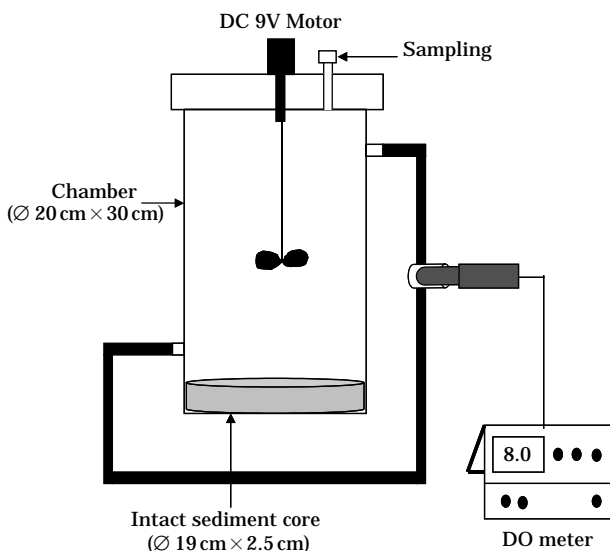


Fig. 3. Experimental apparatus of the batch system to determine P flux from the sediment.

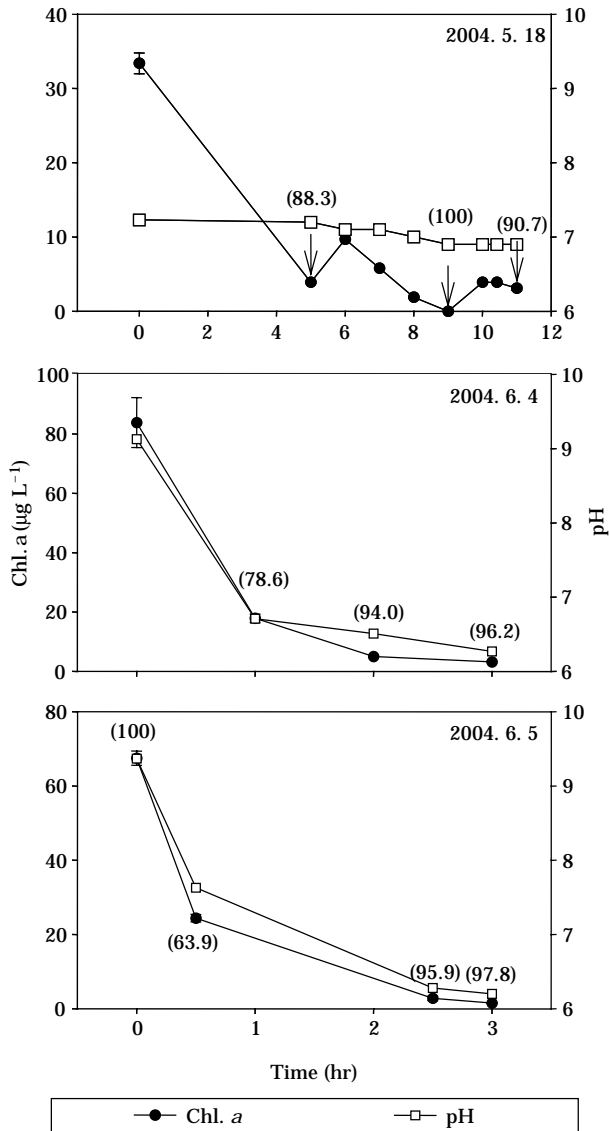


Fig. 4. Temporal variation of Chl-*a* concentration and pH after dissolved air flotation operation. The values in parentheses are removal efficiency (%).

험은 처리수를 회수하는 반송개념이 아니라 특성상 원수를 그대로 사용하여 가압수를 생산하는 것으로 설계되었다. 따라서 시간에 따라 원수의 특성이 달라지고 그로 인해 공기 용해도가 변함으로써 가압효율이 낮아질 것으로 예상되어, 적정 반송비를 20%로 하여 가동시간을 계산하였다. 응집제가 가동시간동안 일정하게 투입될 수 있도록 초기화된 상태에서, 가동시간의 2/3가 경과된 이후 수체 내 엽록소 *a* 농도는 $8 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하(OECD기준의 중영양상태)를 유지하였다. 본 연구에서 계산된 응집제 양은 현장수를 이용한 Jar-test를 통해 결정된 것으로, 이

는 응집제 투입량에 영향을 주는 수체의 알칼리도나 TOC농도를 고려한 것으로 판단할 수 있기 때문에(김 등, 1998), 필요이상 투입된 것은 아닌 것으로 생각할 수 있다.

가압부상에 따른 입자성 물질의 뚜렷한 제거효과가 나타났고, 실험 초기 수체 내 입자성물질의 농도에 따라 제거효율은 증가하였다(Fig. 5). 부유물질 제거효율은 54.4~71.2%로 실험 초기 농도가 $41.0 \pm 0.0 \text{ mg L}^{-1}$ 이었던 6월 4일에 가장 높았다. 휘발성고형물 제거효율은 초기 농도가 $8.0 \pm 1.0 \text{ mg L}^{-1}$ 이었던 5월 18일에 57.3%로 가장 낮았고, 초기 농도가 $20.5 \pm 1.0 \text{ mg L}^{-1}$ 이었던 6월 5일에 78.5%로 가장 높았다. 생화학적 산소요구량(BOD)은 모든 시기에 86% 이상의 제거효율을 나타냈으나 화학적 산소요구량(COD) 제거효율은 28.9~62.8%로 BOD에 비해 낮았다. 가압부상 처리에 따라 입자성 물질 감소와 더불어 용존성 물질도 감소하였으며 질소보다는 인에서 뚜렷한 감소가 나타났다. 조류의 성장에 쉽게 이용될 수 있는 용존무기인(DIP)은 34.1~88.2%의 감소율을 보였고 용존총인은 61.8~87.6%의 높은 감소율을 나타냈다. 총인은 초기 농도가 75.2 mg L^{-1} 이하였던 시기에는 73.5%와 75.2%의 제거효율을 보였으나, 초기 농도가 149.3 mg L^{-1} 과 148.6 mg L^{-1} 로 높았던 시기에는 91% 이상 감소하였다. 본 연구 결과와 유사하게 일산 호수공원에서 연구결과에서도 유입수내 인 농도 증가에 따라 제거효율이 증가함을 보고하였고(고양시, 1997), 김과 이(1997) 또한 부유물질 농도에 따라 제거효율이 증가함을 보고한 바 있다. 그러나 지금까지 선행된 가압부상에 의한 처리효과와 관련된 연구에서 초기농도가 높을수록 제거효율이 증가하는 원인은 명확히 밝혀진 바 없고, 단지 응집제의 종류나 pH, 수온이 중요한 물리적인 인자로 제시되고 있다(Baker, 1982; Cooke *et al.*, 1993; 김과 이, 1997).

본 연구에서 사용된 알루미늄의 경우 pH에 따라서 형태가 다르므로 응집효과에 영향을 줄수 있다. pH 6~8 사이에서 알루미늄은 인에 대한 흡착력이 높은 불용성의 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 로 존재하지만, pH가 8 이상에서는 흡착된 인이 탈착하게 된다(Cooke *et al.*, 1993). 반면 pH가 4.5~5.5의 범위에서는 $\text{Al}(\text{OH})_2^-$ 형태로 가수분해되어 흡착력이 감소할 뿐만 아니라 생물에게 독성을 야기할 수 있다(Baker, 1982). 본 연구에서 가압부상 전 pH는 9.4~7.9 범위였고, 가압부상 후 pH는 6.3 이상을 유지하였기 때문에(Table 1, Fig. 4) pH 변화에 따른 응집효과 감소나 생물에 대한 영향은 적었을 것으로 판단된다. 수온 또한 응집효과와 관련된 중요한 요인으로 수온이 증가할수록 가

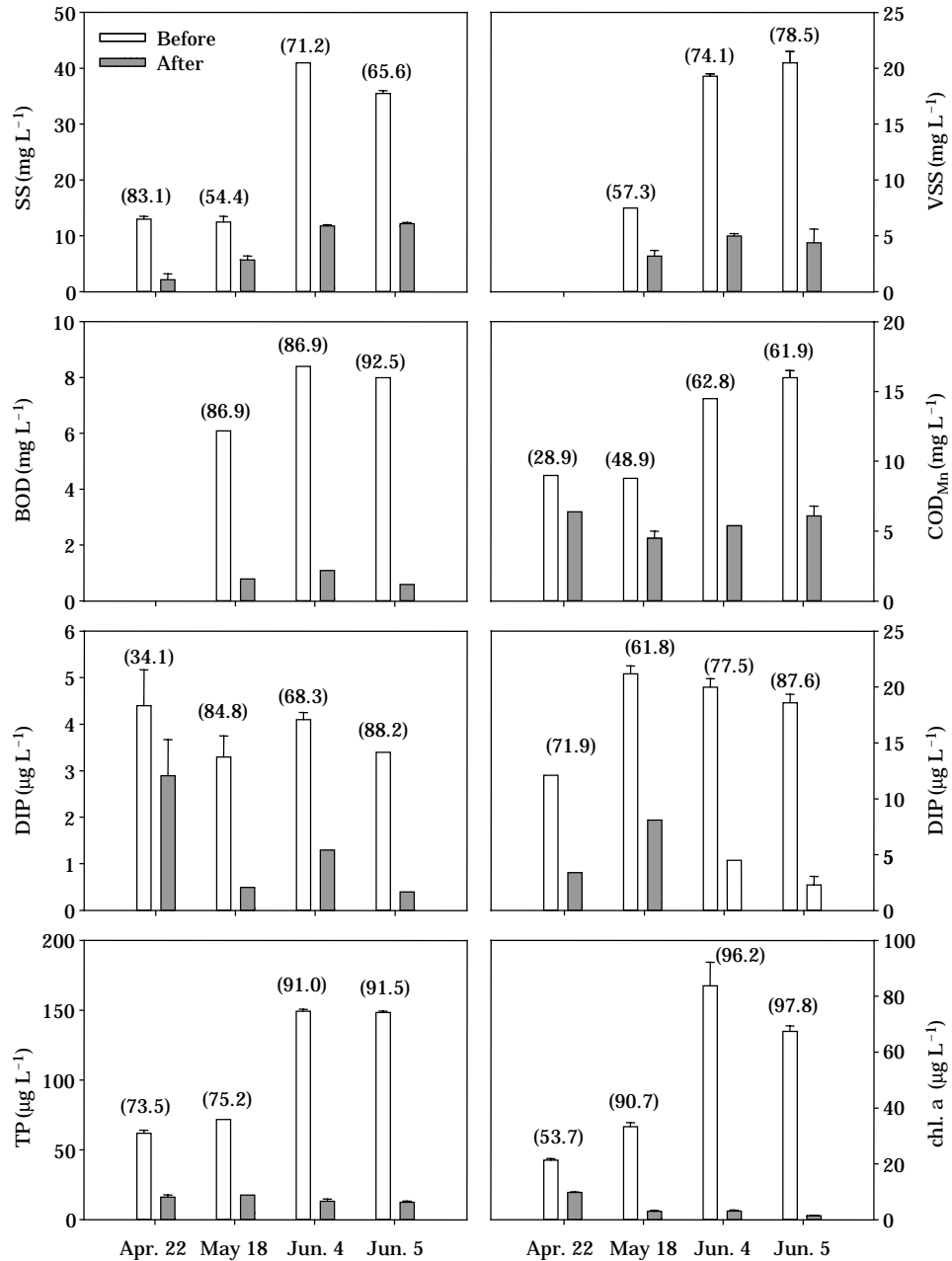


Fig. 5. Variations of suspended solids (SS), volatile suspended solids (VSS), biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD_{Mn}), dissolved inorganic phosphorus (DIP), dissolved total phosphorus (DTP), total phosphorus (TP) and Chl-*a* concentration before and after dissolved air flotation operation. The values in parentheses are removal efficiency (%).

수분해 반응이 촉진되고 입자들의 충돌빈도가 증가하여 결과적으로 응집효과는 증가하는 것으로 알려져 있다 (Cooke *et al.*, 1993; 김과 이, 1997). 본 연구기간 동안 수온은 16.7~24.5°C 범위로 (Table 1), 4월 보다는 6월에 높았기 때문에 응집효과에 영향을 야기했을 가능성이 있

다.

본 연구에서 가압부상에 따른 엽록소 *a* 농도 제거효율은 90% 이상으로 나타났다 (스컴 회수장치가 설치되지 않아 응집 부상된 스컴이 제대로 회수되지 않은 4월 22일 제외). 본 연구에서 나타난 조류의 높은 제거 효과는

다른 유사한 많은 연구에서도 입증된 바 있다 (Zabel, 1985; Edzwald and Walsh, 1992; 국립환경연구원, 1999; 환경관리공단, 2001). Edzwald와 Walsh (1992)는 녹조류인 *Chlorella vulgaris*가 우점하고 있는 수체에서 가압부상시 90% 이상 제거됨을 보고한 바 있다. *Microcystis*와 *Anabaena*와 같은 남조류가 식물플랑크톤 군집 구조의 99% 이상을 차지하고 있는 서낙동강에서 수행한 결과에서도 가압과 응집제 투입된 동시에 실시된 처리군에서의 조류제거효율은 85~96%였으며, 가압처리만 한 실험에서도 69~78% 이상 감소하였다 (환경관리공단, 2001). 이러한 조류의 높은 제거율은 조류가 무기고형물에 비해 밀도가 낮기 때문에 가압부상에 의해 쉽게 제거될 수 있는 것으로 추정된다. 조류 중 조성에 따른 처리효율과 관련된 연구는 진행된 바 없으나 알루미늄이온은 인과 결합하여 혐기성 상태에서도 안정한 불용성 $AlPO_4$ 형태로 침전하고 퇴적물로부터 용출되는 인을 억제하여 인 내부부하를 감소시켜 결과적으로 조류 중 조성을 변화하게 하거나 생물량을 감소시킬 수 있다 (Garrison and Knauer, 1984; James *et al.*, 1991; Cooke *et al.*, 1993; Welch and Cooke, 1995; Holz and Hoagland, 1999). Holz와 Hoagland (1999)는 과영양상태의 호수에 알루미늄을 투입한 이후 여름철 남조류의 성장이 억제되는 반면에 녹조류와 규조류 성장이 증가함을 보고한 바 있다. 이와 유사하게 Erie호와 Campbell호에서도 매년 여름철에 우점했던 *Aphanizomenon*이 알루미늄 첨가 이후에는 관찰되지 않았다 (Welch and Cooke, 1995). 본 연구에서는 조류 중 조성과 관련된 연구는 수행하지 않았으나 장기간에 걸친 가압부상의 효과를 평가하기 위해서는 이와 관련된 연구가 진행될 필요가 있다.

2. 퇴적물 부상분리에 따른 인 용출량 변화

가압부상과 병행하여 퇴적물의 부상분리 후 퇴적물에서의 인 용출율은 현저히 감소하였다 (Figs. 6 and 7) (Table 2). 호기적 조건과 혐기적 조건에서 퇴적물 부상분리 전 20°C에서의 용존 무기인 용출율은 각각 0.821 $mg\ m^{-2}\ day^{-1}$ 과 2.270 $mg\ m^{-2}\ day^{-1}$ 이었으나, 부상분리 후에는 0.684 $mg\ m^{-2}\ day^{-1}$ 와 1.760 $mg\ m^{-2}\ day^{-1}$ 으로 호기적 조건에서는 17%, 혐기적 조건에서는 23% 정도의 감소효과를 나타냈다 (Fig. 6). 용존총인 용출율 또한 가압부상 전·후에 호기적 조건과 혐기적 조건에서 각각 32.7% (5.62 → 3.78 $mg\ m^{-2}\ day^{-1}$)와 20% (6.23 → 4.99 $mg\ m^{-2}\ day^{-1}$)의 감소가 나타났다 (Fig. 7). 퇴적층으로부터 용출되는 인 농도에 영향을 주는 인자로서 DO, pH,

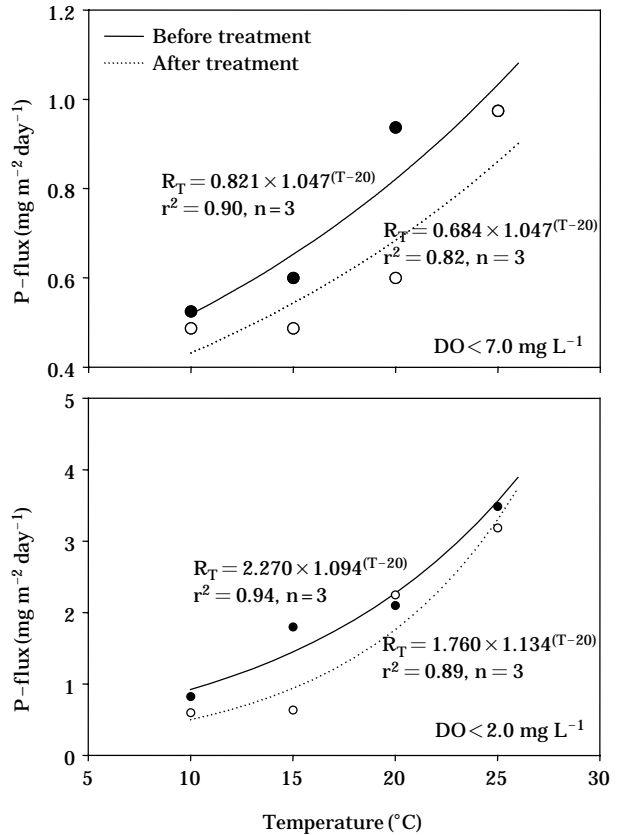


Fig. 6. P-flux (DIP) from the sediment at the different air conditions before and after dissolved air flotation operating. The values in parentheses are removal efficiency (%).

Table 2. P-flux from the sediment before and after dissolved air flotation operation.

P-fraction	Temp (°C)	Aerobic (> 7.0 mg L ⁻¹)		Anaerobic (< 2.0 mg L ⁻¹)	
		Before	After	Before	After
(mg m ⁻² day ⁻¹)					
DIP	25	0.974	0.974	3.485	3.185
	20	0.937	0.600	2.099	2.248
	15	0.600	0.487	1.799	0.637
	10	0.525	0.487	0.824	0.600
DTP	25	6.146	4.197	7.232	5.584
	20	5.584	3.897	6.146	5.022
	15	5.022	3.373	5.584	4.459
	10	5.022	2.811	4.459	3.897

온도 등과 용해된 인 농도, 퇴적물의 양, 수층의 깊이 그리고 입자 종류 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Fillos and Molof, 1972; Fillos and Swanson, 1975;

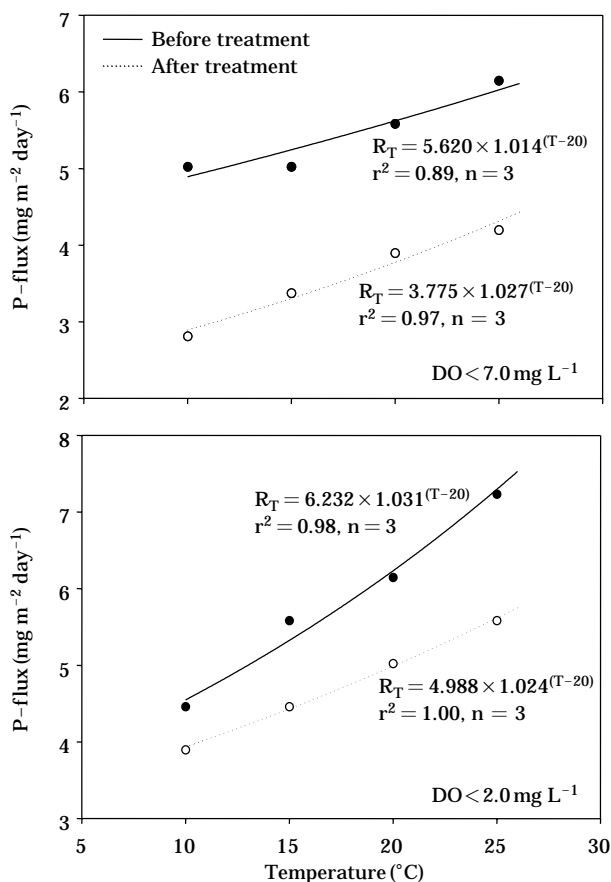


Fig. 7. P-flux (DTP) from the sediment at different air conditions before and after dissolved air flotation operation. The values in parentheses are removal efficiency (%).

Brannon *et al.*, 1985; 김 등, 1997; 정과 조, 2003). 특히, 수중에서의 DO 농도는 퇴적층과 수층간의 인 흡착 및 용출에 상당한 영향을 끼치는데 일반적으로 부영양상태의 저수지내 퇴적물로부터의 인 용출율은 호기적 조건에 비해 혐기적 환경에서 증가하는 것으로 알려져 있다 (Fillos and Swanson, 1975; Brannon *et al.*, 1985; 김 등, 1997; 정 등, 2003). 본 연구에서 산소 농도에 따른 용존 무기형태의 인 용출율은 혐기적인 조건에서 약 3배 정도의 차이를 보였고, 낙동강 하구호, 금강하구호와 영산강 유역의 하천저질토를 대상으로 한 인 용출 실험에서도 호기적 조건과 혐기적 조건에서 약 2배 이상의 차이를 보였다 (Yang *et al.*, 1990; 김 등, 1997).

본 연구에서 퇴적물 부상분리와 가압부상 후 감소된 인 용출율은 퇴적층으로부터의 인 용출을 억제함으로 수질개선효과를 지속시킬 수 있는 가능성을 제시한다. 장기간 유기물이 퇴적층에 축적된 부영양호수에서는 퇴적

층이 중요한 인 공급원으로, 깊은 저수지에서는 수층 혼합 시기에 (Jeppesen *et al.*, 1991; Cooke *et al.*, 1993; Van der Molen and Boers, 1994), 수심이 얕은 수체에서는 바람에 의해 수체가 교란되는 시기에 (Williams and Barko, 1991) 퇴적물로부터 용출된 인이 수층으로 공급됨으로 식물플랑크톤 생물량이 증가할 수 있다. 가압부상에 따른 수체 내 입자성물질의 제거효율은 예측된 가동시간의 2/3 경과 후에 90% 이상으로 나타났기 때문에 이후 주입되는 응집제는 수체 내 잔류할 가능성이 있다. 수체 내 잔존하는 알루미늄이온은 수체에 잔존하는 무기인과 공침하거나 퇴적층으로부터 수층으로의 인 확산을 억제하므로 (Garrison and Knauner, 1984; James *et al.*, 1991; Cooke *et al.*, 1993; Welch and Cooke, 1995; Holz and Hoagland, 1999), 내부부하에 의한 조류의 재성장을 억제할 수 있을 것이다. 본 연구에서 나타난 결과를 토대로 가압부상시 폭기에 의해 수층전체가 호기적인 환경을 유지하고 퇴적물표면적이 수표면적 (0.1 km²)과 동일한 것으로 가정할 때, 퇴적물로부터 20°C 조건의 호기적 환경에서 용출되는 용존총인 562 g day⁻¹ (5.62 mg m⁻² day⁻¹ × 0.1 km²)중 잔류 알루미늄에 의해 퇴적물로부터 용출이 억제되는 양은 약 184.0 g day⁻¹ (562 g day⁻¹ × 32.7%)으로, 유입수를 통해 유입되는 용존총인 378.1 g day⁻¹ (김과 황, 2004)의 약 49%에 해당한다.

적 요

본 연구는 PAC를 응집제로 사용한 가압부상법에 의한 부영양저수지의 수질과 퇴적물의 개선효과를 평가하기 수행되었다. 얕은 부영양 저수지에 설치한 mesocosm에서 (가로×세로×높이: 6×6×3 m), 입자성물질과 용존성물질의 변화와 노출에 의한 퇴적물 교란 전·후의 퇴적물로부터 인용출률을 조사하였다. 부유물질 (SS)과 휘발성고형물의 제거효율은 각각 54.4~71.2%와 57.3~78.5%였다. 총인과 엽록소 a 농도는 제거효율은 각각 73.5~91.5%, 53.7~97.8%였다. 생화학적 산소요구량은 86% 이상의 제거효율을 나타냈으나 화학적 산소요구량의 제거효율은 28.9~62.8%로 낮았다. 조류의 성장에 쉽게 이용될 수 있는 용존무기인 (DIP)과 용존총인은 각각 34.1~88.2%와 61.8~87.6%의 제거효율을 나타냈다. 퇴적물 부상분리 전 호기적 조건과 혐기적 조건의 산소 환경에서 용존무기인 용출율은 각각 0.821 mg m⁻² day⁻¹과 2.270 mg m⁻² day⁻¹이었다. 반면에 부상분리 후에는 각각 0.684 mg m⁻² day⁻¹와 1.760 mg m⁻² day⁻¹로 호기적 조건

에서는 17%, 혐기적 조건에서는 23% 정도의 감소효과를 나타냈다. 용존총인 용출을 또한 가압부상 후에 호기적 조건과 혐기적 조건에서 각각 33% ($5.62 \rightarrow 3.78 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)와 20% ($6.23 \rightarrow 4.99 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)의 감소가 나타났다. 이러한 결과들은 가압부상시 수체 내 입자상물질의 제거 뿐만 아니라 퇴적물로 부터의 인용출이 억제되므로 얇은 부영양 저수지의 수질개선을 위한 효과적인 대안이 될 수 있음을 제시한다.

사 사

본 연구는 농림부 기획연구과제 (과제 302006-03-2-SB010)인 '농업용저수지의 조류 제어기법개발 연구'의 일환으로 수행되었음.

인 용 문 헌

- 고양시, 1997. 일산호의 최적수질관리연구.
- 국립환경연구원, 1999. 호소내 조류 대발생에 대한 수면제어 기술에 관한연구(II)-팔당호 수역을 중심으로 한 제어기술의 개발- pp. 161-172.
- 국립환경연구원, 1999. 호소내 조류 대 발생에 대한 수면제어 기술에 관한연구(II). 팔당호 수역을 중심으로 한 제어기술의 개발.
- 김미정, 이병호. 1997. DAF (Dissolved Air Flotation)의 운전 인자들이 오염물질의 제거율에 미치는 영향에 대한 기초 연구. 대한환경공학회지 **19**: 755-762.
- 김상구, 류재익, 류병순. 1998. 원수중의 알칼리도와 유기물농도에 따른 응집제 주입을 결정. 한국물환경학회지 **14**: 161-166.
- 김성환, 윤인길, 권오섭. 1997. 회분식 배양에 의한 서낙동강 저서층의 영양염류 용출. 한국육수학회지 **30**: 281-288.
- 김성훈, 유제선, 김영미, 박희경. 2002. 전산유체 기법을 이용한 DAF 부상조에서의 수리 특성 고찰. 부상분리 국제워크샵 발표논문집.
- 김호섭, 황순진. 2004. 얇은 부영양저수지의 육수학적 특성-계절에 따른 수질변화. 한국육수학회지 **37**: 180-192.
- 김호섭, 황순진. 2005. 얇은 부영양저수지의 동·식물플랑크톤 군집변화 특성. 한국육수학회지 **38**: 18-29
- 독고석, 한무영, 박중현, 남기진. 1999. 용존공기부상법(DAF)에서 미세기포와 충돌이론의 실험적 증명. 한국물환경학회지 **15**: 185-192.
- 박중용, 장석조. 1997. 가압부상법과 혐기성여상법을 이용한 염색폐수의 전처리에 관한 비교연구. 대한환경공학회지 **19**: 763-772.
- 정하영, 조경제. 2003. 낙동강 하류 수계에서 저질퇴적층의 SOD와 영양염 용출. 한국육수학회지, **36**: 322-335.
- 한무영, 독고석, 박중현. 1999. 용존공기부상법(DAF)에서 미세기포와 입자의 충돌이론. 한국물환경학회지 **15**: 175-184.
- 환경관리공단. 2001. 서낙동강 수질개선방안 타당성 조사. 최종보고서(안).
- 환경부. 1998. 수질오염공정시험법. 동화기술. p. 134
- APHA. 1995. Standards methods for the examination of water and wasterwater (19thEd.). American Public Health Association, Washington, D.C.
- Baker, J.P. 1982. Effects on fish of metals associated with acidification. pp. 165-176. *In: Acid rain Fisheries* (R. E. Johnson, Ed.). American Fisheries Society.
- Brannon, J.M, R.L. Chen and D. Gunnison. 1985. Sediment-water interactions and mineral cycling in reservoirs. pp. 121-134. *In: Microbial Process in reservoir.* (D. Gunnison. Dr. W. ed.). Junk Pub., Dordrecht.
- Cooke, G.D., E.B. Welch, S.A. Peterson and P.R. Newroth. 1993. Restoration and management of lakes and reservoirs. Lewis Publishers and CRC Press, Boca Raton, FL.
- Edzwald, J.K. and J.P. Walsh. 1992. Dissolved air flotation : Laboratory and pilot plant investigation. AWWA research foundation and american water works association, U.S.A.
- Edzwald, J.K., D.Q. Bunker, J. Dahlquist, L. Gillberg and T. Hedberg. 1994. "Dissolved Air Flotation : Pretreatment and comparisons to sedimentation". Proceedings of the Gothenburg Symposium 1994 on Chemical Water and Wastewater Treatment III. Gothenburg. Sweden. pp. 3-17.
- Fillos, J. and A.H. Molof. 1972. Effects of Benthic Deposits on Oxygen and Nutrient Economy of Flowing Water. *J. Water Poll. Control Fed.* **44**.
- Fillos, J. and W.R. Swanson. 1975. The release rate of nutrients from river and lake sediments. *J. Wat. Pollut. Contr. Fed.* **47**: 1032-1042.
- Frederick, W.P. 1990. Water Quality and Treatment. 4th Edition. McGraw-Hill Inc. pp. 426-453.
- Garrison, P.J. and D.R. Knanuer. 1984. Long term evaluation of three alum treated lakes. pp. 513-517. *In: Lake and Reservoir management.* EPA/440/5/84-001.
- Holz, J.C. and K.D. Hoagland. 1999. Effects of Phosphorus Reduction on Water Quality: Comparison of Alum-Treated and Untreated Portions of a Hypereutrophic Lake. *J. Lake and Reservoir Management* **15**: 70-82.
- James, W.F., J.W. Barko. and W.D. Taylor. 1991. Effect of alum treatment on phosphorus dynamics in a north-temperate reservoir. *Hydrobiologia* **215**: 231-241.

- Jeppesen, E., P. Kristensen, J.P. Jensen, M. Sndergaard, E. Mortensen, and T.L. Lauridsen. 1991. Recovery resilience following a reduction in external phosphorus loading of shallow eutrophic danish lakes: duration, regulating factors and methods for overcoming resilience. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* **48**: 127-148.
- Marker, A.F.H. 1972. The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin. *Freshwater Biol.* **2**: 361-385.
- Marker, A.F.H., E.A. Nusch, I. Rai and B. Riemann. 1980. The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods: Conclusions and recommendations. *Arch. Hydrobiol. Beih.* **14**: 91-106.
- Malley, J.P. and J.K. Edzwald. 1991. Laboratory comparison of DFA with conventional treatment. *J. AWWA.* **83**: 56-61.
- Rees, D.J. Rodman and T.F. Zabel. 1979. Water Clarification by Flotation-5, TR114. Water Research Center, Medmenham, United Kingdom.
- Seitzinger, S.P. 1993. Denitrification and nitrification rates in aquatic sediments. *In: Handbook of Methods in Aquatic Micrology.* pp. 633-641. Lewis Publisher, Boca Raton, FL.
- Van der Molen, D.T. and P.C.M. Boers. 1994. Influence of internal loading on phosphorus concentration in shallow lakes before and after reduction of the external loading. *Hydrobiologia* **275/276**: 379-389.
- Welch, E.B. and G.D. Cooke. 1995. Effectiveness and longevity of alum treatments in lakes. Water Resources Series Technical Report No. 145, University of Washington, Seattle, WA, p. 92.
- Williams, W.F. and J.W. Barko. 1991. Estimation of phosphorus exchange between littoral and pelagic zones during nighttime convective circulation. *Limnol. Oceanogr.* **36**: 179-187.
- Yang, J.-W., K.-O. Song and S.-M. Lee. 1990. Release characteristics of phosphorus in Nakdong Estuary Barrage. *Bull. Korean Fish. Soc.* **23**: 192-197.
- Zabel, T. 1985. Advantages of dissolved-air flotation for water Treatment. *J. AWWA.* **77**: 42-45.

(Manuscript received 26 July 2005,
Revision accepted 5 September 2005)