미세기포를 이용한 퇴적물 정화 Remediation of Sediments using Micro-bubble

강상율 · 김형준 · 김충일* · 박현주*,† · 나춘기** · 한무영
Sang Yul Kang · Hyoung Jun Kim · Tschung Il Kim* ·
Hyun Ju Park*,† · Choon Ki Na** · Moo Young Han

서울대학교 건설환경공학부 · *서울대학교 건설환경종합연구소 · **목포대학교 환경공학과

Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

*Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University

**Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

(Received January 3, 2016; Revised April 29, 2016; Accepted July 18, 2016)

Abstract : This study was conducted on the sediment remediation using micro-bubble to remove fine particles. For this study, characteristics of contamination and release in sediment were analyzed. And then, the characteristics of bubbles on removal efficiency was investigated at various operation conditions. In particle size distribution of the sediment used for the study, the proportion of clay and silt (<0.075 mm) was about 7.7%, sand (0.075~4.75 mm) was about 67.8%, and gravel (≥ 4.75) was 24.5%. Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) of the sediment were 2,790~3,260, 261~311 mg/kg respectively. Ignition loss and water content were 4.1~9.6, 32.9~53.2% respectively. In analysis of removal efficiency according to operation conditions of micro-bubble, it was the highest when operation condition is pressure 6 atm, pressurized water ratio 30%, and coagulant dosage 15 ppm. At the time, the sediment's removal efficiency was 19.9%. Accordingly removal efficiency of TN and TP were 21.4, 22.6% respectively. Finally a research was found that fine particles in sediment were almost removed by micro-bubble, which led to decrease nutrients' release at about 20.1~64.3% in comparison to sediment including lots of fine particles.

Key Words : Dissolved Air Flotation (DAF), Micro Bubbles, Sediment, Fine Particles, Nutrients

요약 : 본 연구는 미세기포를 이용하여 하천 및 호수의 퇴적물 내 영양염류 제어 가능성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 실제 호수에서 퇴적물을 채취하여 용출 특성 실험 및 기포를 이용한 퇴적물 및 영양염류 제거 실험을 수행하였다. 연구에 사용된 퇴적물의 입도분석 결과, 점토와 실트(<0.075 mm)비율은 약 7.7%, 모래(0.075~4.75 mm)는 약 67.8%, 자갈은(≥ 4.75 mm) 약 24.5%로 나타났다. 총질소(T-N), 총인(T-P), 강열감량은 각각 2,790~3,260 mg/kg, 261~311 mg/kg, 4.1~9.6%로 나타났다. 퇴적물의 입도별 T-N과 T-P를 분석한 결과, 입도가 클수록 퇴적물의 T-N과 T-P 함량은 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 입도가 클수록 비표면적이 작아져 흡착되는 오염물질량이 줄어들기 때문으로 판단된다. 기포의 특성에 따른 퇴적물의 제거 효율을 분석한 결과, 압력 6기압, 순환율 30%, 응집제 주입량 15 ppm의 조건으로 실험을 수행하였을 때 퇴적물의 제거율이 19.9%로 가장 높게 나타났다. 이 때의 T-N, T-P의 제거효율도 21.4, 22.6%로 가장 높게 나타났다. 운전조건을 고정시키고 기포 주입횟수를 증가시키면서 T-N과 T-P의 제거효율을 살펴본 결과, 주입횟수 2회까지 T-N과 T-P의 제거효율은 높았으나, 3회부터는 제거효율이 낮아짐에 따라 주입횟수가 증가하더라도 제거효율에는 큰 변화를 보이지 않았다. 그리고 미세입자가 제거된 퇴적물의 영양염류 용출량은 미세입자를 제거하지 않은 퇴적물의 용출량보다 약 20.1~64.3% 정도 감소함을 알 수 있었다. 이를 통해 미세기포를 퇴적물에 반복적으로 주입하는 방안은 퇴적물 및 퇴적물에서의 영양염류 용출을 제어하는 효과적인 방안으로써 가능성이 있음을 확인할 수 있었다.

주제어 : 용존공기부상공정, 미세기포, 퇴적물, 미세입자, 영양염류

1. 서론

산업 활동이 증가하고 외부오염원이 확대됨에 따라 자연 수계의 호소수에 오염물질의 유입이 증가하였다.¹⁾ 이에 따라 부영양화가 촉진되면서 조류가 빈번하게 발생하고 있다.

수계에 부정적인 영향을 끼치는 녹조현상을 해결하기 위해서 용존공기 부상분리법(Dissolved Air Flotation, DAF)이 적용되고 있다.²⁾ DAF 공정은 공기가 용존된 가압수를 대기압에 분사하여 큰 기압차에 의해 기포를 발생시키고, 기포의 부상력을 이용하여 수중의 오염물질을 수면 위로 분리하는 수처리 기법이다.³⁾ 특히, DAF 공정은 저밀도 조류나

입자상 물질을 제거하는데 효과적이다.⁴⁾

그러나 호소수의 오염은 외부오염원뿐 아니라 내부오염원에 의해서도 발생한다. 저층퇴적물의 미세입자에 축적된 오염물질은 조류발생을 촉진시키기 때문에, 수중의 부유물질과 조류만을 제거해서는 호소수의 수질을 근본적으로 개선하기 어렵다.⁵⁾ 따라서 호소수의 내부오염원으로 작용하는 저층의 퇴적물에 대한 관리가 필요하다.

저층의 퇴적물을 제거하기 위해서 주로 이용하는 방법은 준설이다. 그러나 준설은 퇴적물을 한꺼번에 제거함으로써 동·식물의 서식지를 일시적 또는 영구적으로 파괴시킨다.⁶⁾ 그러므로 수계에 미치는 부정적인 영향을 최소화하면서 오

† Corresponding author E-mail: narjiis@hanmail.net Tel: 02-880-4321 Fax: 02-885-7376

염물질만을 선택적으로 제거할 수 있는 대안이 필요하다.

현재까지 부상공정을 이용하여 수중의 부유물질과 조류를 제거함으로써 수질을 개선한 연구는 많이 진행되었다.^{7,8)} 그러나 부상공정을 통하여 퇴적물을 정화함으로써 수질을 개선하고자 하는 연구는 아직 진행된 바가 없다.

본 연구의 목적은 부상공정의 미세기포를 이용하여 부영양화 및 녹조발생의 요인 중 하나인 퇴적물 내 영양염류를 제거하는데 있다. 이를 위해 가압수를 이용하는 용존 공기 부상분리공정을 적용하고, 기포의 특성 및 운전조건에 따른 퇴적물의 미세입자 및 퇴적물 내 영양염류의 제거효율을 분석하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 퇴적물 시료 채취

본 연구에 사용된 퇴적물은 서울특별시 관악구 대학동 관악호수공원 3개 지점에서 채취하였다(Fig. 1). 채취한 퇴적물은 현장에서 밀봉하여 실험실로 운반하였으며, 건조기에서 110℃로 24시간 건조시켰다. 건조한 시료는 균등한 입도분포를 위하여 4 mm의 표준체로 거른 후 실험에 사용하였다.

2.2. 퇴적물 분석

2.2.1. 퇴적물 성상 분석

채취한 퇴적물의 성상 및 오염특성을 파악하기 위하여 입도분석, T-P, T-N, 강열감량, 수분함량을 분석하였다. 분석 방법은 Table 1과 같다.

2.2.2. 퇴적물 용출실험

퇴적물 내 영양염류의 용출특성을 파악하기 위하여 용출 실험을 진행하였다.

Fig. 1. Gwanak Lake Park.

Table 1. Analysis methods of sediments

Analysis item	Method of analysis
Particle-size distribution	Sieve analysis
T-P	Decomposition method by nitric acid-hydrochloric acid
T-N	Kjeldahl's method
Ignition loss	Standard analytical method for wastes
Water content	Standard analytical method for soils

Fig. 2. Schematic diagram of release experiment.

용출실험은 칼럼(60 mm × 500 mm)에 퇴적물 50 ± 0.1 g과 증류수 약 970 mL를 넣고 호기성 조건에서 진행하였으며(Fig. 2), 매일 퇴적물 바로 위 상등수 100 mL를 채수하여 수질오염공정시험법에 따라 T-P, T-N, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도를 측정하였다. 상등수를 채수한 후, 이를 보충하기 위하여 같은 양의 증류수를 칼럼에 채워 넣었다. 실험실의 내부 온도는 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 으로 유지하였다.

2.3. 부상분리 실험

2.3.1. 기포의 특성 및 운전조건에 따른 퇴적물 및 영양염류 제거효율 분석

미세기포 특성 및 운전조건에 따른 퇴적물 및 영양염류 제거효율을 분석하기 위하여, Fig. 3과 같이 칼럼에 시료를 넣고 압력, 가압수 비율, 응집제 주입량, 기포 주입횟수를 변경하면서 부상분리 실험을 수행하였다. 칼럼에 건조된 퇴적물 50 ± 0.1 g과 증류수 약 970 mL를 넣고 15분간 침강시킨 다음, 기포 생성을 위해 가압수를 주입하였다. 5분간 부상분리 후에 칼럼 상층부에서 부상된 슬러지를 채취하여 입도분석과 슬러지 중의 T-P, T-N를 측정하였다.

Fig. 3. Schematic diagram of sediment removal experiment using micro-bubble.

슬러지 채취 후 30분 후에 칼럼에 잔류하는 퇴적물을 전량 회수하여 110℃에서 완전 건조한 후, 건조퇴적물의 무게를 0.001 g까지 측정하였다. 퇴적물 및 영양염류의 제거효율은 다음 식으로 계산하였다.

$$\text{퇴적물 제거율 (\%)} = \frac{W_{sb} - W_{sa}}{W_{sb}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{영양염 제거율 (\%)} = \frac{(W_{sb} - W_{sa})C_r}{W_{sb}C_s} \times 100 \quad (2)$$

여기서, W_{sb} : 기포 주입 전 퇴적물의 건조중량(g)
 W_{sa} : 기포 주입 후 퇴적물의 건조중량(g)
 C_s : 부상분리 전 퇴적물 중의 T-N, T-P (μg/g)
 C_r : 부상분리된 퇴적물 중의 T-N, T-P (μg/g)

2.3.2. 퇴적물 제거가 영양염류 용출에 미치는 영향 분석

퇴적물의 제거가 영양염류 용출에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 부상분리 실험을 수행한 다음 24시간 후부터 매일 100 mL씩 채수하여 T-P, T-N, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도를 측정하였다. 채수한 시료수는 같은 양의 증류수를 칼럼에 채워 넣어 보충하였다. 실험실의 내부 온도는 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물 특성 분석

3.1.1. 성상 및 오염특성 파악

퇴적물의 입도를 분석한 결과, 점토와 실트(≤ 0.075 mm) 약 7.7%, 모래($0.075 \sim 0.475$ mm)는 약 67.8%, 자갈(≥ 0.475 mm) 약 24.5%의 분포를 나타냈다(Fig. 4).

퇴적물 내 T-N과 T-P의 함량은 각각 2,760~3,260 mg/kg, 261~311 mg/kg로 나타났다. 강열감량은 4.1~9.3%, 수분함량은 32.9~53.2%로 나타났다(Table 2).

Fig. 4. Grain size distribution curve.

Table 2. Nutrients concentration, ignition loss, and, water content of sediments

Site	T-N (mg/kg)	T-P (mg/kg)	Ignition loss (%)	Water content (%)
site 1	3,590	262	4.3	32.9
site 2	3,550	266	4.1	37.4
site 3	3,540	313	9.6	53.2

퇴적물 입자크기별 총질소와 총인 분석결과, <0.075 mm에서는 총인과 총질소가 각각 3470 mg/kg과 359 mg/kg, $0.075 \sim 0.125$ mm에서는 2930 mg/kg과 289 mg/kg, $0.125 \sim 0.150$ mm에서는 2580 mg/kg과 273 mg/kg, $0.150 \sim 0.250$ mm에서는 2480 mg/kg과 232 mg/kg, $0.250 \sim 0.50$ mm에서는 1580 mg/kg과 142 mg/kg, $0.50 \sim 2.0$ mm에서는 1980 mg/kg과 206 mg/kg, $2.0 \sim 4.75$ mm에서는 380 mg/kg과 206 mg/kg이 검출되어, 입자크기가 커질수록 총질소와 총인의 함량은 낮아지는 경향을 나타냈다(Fig. 5). 이 연구결과는 기존연구자들의 결과와 비슷한 경향을 나타냈는데, 이는 입자크기가 커짐에 따라 비표면적이 줄어들면서 흡착되는 오염물질량이 줄어들기 때문이다.^{9,10)}

Fig. 5. Total concentration of nutrients and particle fraction.

Fig. 6. Release characteristics of nitrogen in release experiment.

Fig. 7. Release characteristics of phosphorus in release experiment.

3.1.2. 용출특성

퇴적층에서 주로 용출되는 질소의 형태는 NH₃-N이며,¹¹⁾ 물리적 충격이나 확산 현상에 의해서 쉽게 이동하는 것으로 알려져 있다.

호기성 조건에서 질소계열(T-N, NH₃-N, NO₃-N)의 용출량은 전체적으로 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 6). T-N의 용출농도는 초기에 3.5 mg/L에서 시간이 지남에 따라 조금씩 증가하다가 5일차부터 서서히 감소하였다. NH₃-N의 용출농도도 초기에 약간 증가하다가 16일차부터 감소하는 경향을 나타냈다. 이에 반해 NO₃-N의 용출농도는 초기에 거의 변화가 없었으나, 시간이 지남에 따라 천천히 증가하는 경향을 보였는데, 이러한 NO₃-N의 용출거동은 용출반응조가 호기성 조건인 점을 고려할 때 질산화 반응에 의해 NH₃-N가 NO₃-N로 전환되었기 때문으로 판단된다.

이상의 결과로부터 퇴적물의 질소계열 용출특성은 암모니아성 질소의 용출에 의해 대부분 지배되고 있음을 확인할 수 있었다.

인계열의 용출특성을 분석한 결과, T-P의 용출농도는 초

기 0.10 mg/L에서 작은 폭으로 감소하다가 14일차부터 다시 증가하는 경향을 나타냈으며, PO₄-P의 용출농도는 초기 0.03 mg/L에서 약간 감소하다가 10일차부터 작은 폭으로 증가하였다(Fig. 8). T-P 증가의 대부분은 PO₄-P의 증가로 인한 것이며, PO₄-P의 용출량 증가는 컬럼내 증류수의 pH가 초기 7.1에서 8.4까지 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 이는 퇴적물에 포함된 CaCO₃에서 CO₃²⁻가 생성되어 컬럼 내 증류수와 반응함으로써 수산화 이온이 증가하였기 때문이다(식 (3)).

퇴적물에서 인의 용출은 pH, 온도, DO 등에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 일반적으로 인의 용출은 용존산소와 반비례 관계를 가지며, 용존산소량이 1 mg/L 이하로 감소할 경우 인의 용출량은 급격하게 증가한다. 그리고 온도가 20℃ 이상이면 용출량도 매우 큰 폭으로 증가한다. 또한 Min 등¹³⁾은 pH 3 이하 또는 pH 8 이상에서는 인 용출량이 증가한다고 보고하였다.

3.2. 기포의 특성 및 운전조건에 따른 영향

3.2.1. 압력의 영향

압력의 변화에 따른 퇴적물 및 영양 염류 제거 효율은 각각 Fig. 8, 9와 같다. 가압조의 압력을 3기압에서 6기압으로 증가시키에 따라 퇴적물의 제거효율이 13.2%에서 18.8%로 증가하였다. 그에 따라 T-N 및 T-P의 제거효율도 각각 14.2%에서 20.2%로, 15.0%에서 21.3%로 향상되었다. 이는 압력이 증가함에 따라 기포의 크기가 줄어들어 퇴적물 단위 입자당 충돌 가능한 기포수가 증가되었기 때문이라 판단된다. 또한 높은 압력으로 가압된 유체일수록 감압밸브를 통해 부상분리조로 들어갈 때 강한 난류를 형성하는 점도 충돌효율을 증가시키는데 역할을 했을 것으로 판단된다.

Fig. 8. Sediment removal efficiency at each pressure.

Fig. 9. Nutrient's removal efficiency at each pressure.

Fig. 10. Sediment removal efficiency at various pressurized water ratio.

Fig. 11. Nutrient's removal efficiency at various pressurized water ratio.

3.2.2. 가압수 비율의 영향

가압수 비율의 영향을 알아보기 위하여 가압수 비율 10%, 20%, 30% 조건에서 부상분리를 실시하고 각 조건별 퇴적

물의 제거효율을 분석하였다. 가압수 비율을 10%에서 30%로 증가시키에 따라 퇴적물의 제거량은 7.5 g에서 9.9 g으로 증가하였고, 퇴적물 제거효율도 15%에서 19.9%로 증가하였다(Fig. 10). 이러한 경향은 영양염류의 제거효율에서도 동일하게 나타난다(Fig. 11). 이는 가압수 비율이 증가함에 따라 기포 발생량이 많아지면서 기포와 입자간 부착효율을 증가시킨 것으로 판단된다.

3.2.3. 응집제 주입량의 영향

가압수 중의 응집제(PAHCs) 농도가 부상분리공정에서 퇴적물과 영양염류의 제거효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 가압수의 응집제 주입량이 0~15 mg/L인 조건에서 부상분리 실험을 실시하였다.

응집제 주입량이 0 mg/L에서 15 mg/L로 증가함에 따라 퇴적물의 제거효율은 13.8%에서 18.8%로 증가하였다(Fig. 12). 그에 따라 T-N과 T-P의 제거효율도 14.8%에서 20.2%, 15.6%에서 21.3%로 각각 증가하였다(Fig. 13).

Fig. 12. Sediment removal efficiency at various coagulant dosage.

Fig. 13. Nutrient's removal efficiency at various coagulant dosage.

Fig. 14. The T-N removal according to the number of micro-bubble injection.

Fig. 15. The T-P removal according to the number of micro-bubble injection.

3.2.4. 기포주입횟수의 영향

운전조건(압력 6 atm, 가압수 비율 20%, 응집제 주입량 15 ppm)을 고정시키고 가압수 주입횟수를 증가시켜가면서 퇴적물의 제거효율을 분석하였다. Fig. 14와 15에서 알 수 있듯이, 가압수 주입 2회까지 T-N과 T-P의 제거효율은 높게 나타났으나, 3회부터는 제거효율이 급격히 낮아져 주입 횟수가 증가하더라도 제거효율은 크게 향상되지 않았다. 기포를 3회 주입했을 때, T-N과 T-P의 누적제거효율은 각각 29.2, 31.3%로 나타났다. 이를 통해 초기 반복적인 기포주입을 통해 퇴적물 내 영양염류를 효과적으로 제거할 수 있음을 알 수 있었다.

3.3. 퇴적물의 제거가 영양염류 용출에 미치는 영향

3.3.1. 제거되는 입자 크기

미세기포에 의해서 제거되는 입자크기를 분석한 결과, 압력 6기압, 가압수 비율 20%, 응집제 주입량 15 mg/L으로 기포를 주입하였을 때 부상되는 입자의 크기는 8.4~86.4 μm 로 나타났으며(Fig. 16), 평균 입도는 약 36.1 μm 로 나타났

Fig. 16. Particle size distribution of floated sediment by micro-bubble

다. 미세기포에 의해 부상되는 입자의 최대크기는 약 274.2 μm 로 측정되었는데, 이는 한 개의 입자표면에 여러 개의 기포가 부착되어 부상된 것으로 판단된다.

3.3.2. 용출량 비교

퇴적물 내 미세입자의 제거가 영양염류 용출 농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 미세입자가 제거된 퇴적물을 대상으로 질소(T-N, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$)와 인 성분(T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$)의 용출특성을 분석하여 미세입자가 제거되지 않은 퇴적물과 비교하였다.

T-N의 경우, 미세입자가 제거되지 않는 퇴적물의 1, 10, 20, 30일차 용출농도는 3.52, 3.70, 3.61, 2.32 mg/L로 나타났고, 미세입자가 제거된 퇴적물의 1, 10, 20, 30일차 용출농도는 2.37, 1.75, 1.24, 0.85 mg/L로 나타났다. 미세입자 제거에 따른 퇴적물의 T-N 용출농도 감소율은 1, 10, 20, 30일차에 각각 32.8, 52.6, 65.6, 63.3%로 나타났으며, 평균 감소율 53.6%이었다.

$\text{NH}_3\text{-N}$ 의 경우, 미세입자가 제거되지 않는 퇴적물의 1, 10, 20, 30일차 용출농도는 1.68, 2.0, 1.85, 1.15 mg/L로 나타났고, 미세입자가 제거된 퇴적물의 1, 10, 20, 30일차 용출농도는 0.68, 0.74, 0.54, 0.46 mg/L로 나타났다. 미세입자

Fig. 17. Comparison of nitrogen concentrations in water after 1, 10, 20, 30 days in release experiment.

Fig. 18. Comparison of phosphorus concentrations in water after 1, 10, 20, 30 days in release experiment.

제거에 따른 퇴적물의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 용출농도 감소율은 각각 59.3, 63.1, 71.1, 60.4%로 나타났고, 평균 감소율은 63.4%이었다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우, 1, 10, 20, 30일차 용출농도 감소율은 각각 59.3, 71.1, 33.2, 28.9%로 나타났고, 평균 감소율은 48.1%이었다. $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 용출농도 감소율이 T-N이나 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 용출농도 감소율보다 상대적으로 높게 나타났다. 이는 $\text{NH}_3\text{-N}$ 가 점토 및 실트 등의 미세입자에 많이 흡착되어 있었음을 의미하며, 기포에 의해 미세입자가 제거됨에 따라 $\text{NH}_3\text{-N}$ 도 함께 제거됨으로써 용출 농도에 큰 영향을 끼친 것으로 판단된다.

T-P의 용출농도는 미세입자가 제거되지 않는 퇴적물인 경우 1, 10, 20, 30일차에 각각 0.10, 0.05, 0.06, 0.07 mg/L로 나타났고, 미세입자가 제거된 퇴적물의 경우 각각 0.06, 0.03, 0.02, 0.03 mg/L로 나타났다. 미세입자 제거에 따른 퇴적물의 T-P 용출농도 감소율은 각각 39.9, 50.5, 64.2, 54.6%로 나타났고, 평균 감소율은 52.3%이었다.

$\text{PO}_4\text{-P}$ 의 경우, 미세입자 제거에 따른 퇴적물의 용출농도 감소율은 1, 10, 20, 30일차에 각각 46.6, 26, 20, 20%로 나타났으며, 평균 감소율은 28.2%이었다.

4. 결론

가압수를 이용하는 용존공기 부상분리법을 오염 퇴적물의 정화에 적용하고, 부상분리공정의 운전조건에 따른 퇴적물 및 퇴적물 내 영양염류의 제거효율을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 퇴적물의 총질소와 총인 함량은 입도가 작을수록 증가하였다. 이는 입도가 작을수록 비표면적이 커져 흡착되는 오염물질량이 증가하기 때문이다. 이를 통해 입도는 퇴적물 내 영양염류 농도에 영향을 끼치는 중요한 요인임을 확인하였다.

2) 가압수의 압력, 순환비율 및 가압수내 응집제 주입량이 증가할수록 퇴적물의 부상분리 제거효율이 증가하였다. 이에 따라 퇴적물 입자에 포함된 총질소와 총인도 함께 제거됨을 알 수 있었다.

3) 기포 주입횟수에 따른 영양염류 제거효율에 대한 실험을 통해 초기 반복적인 기포주입을 통해 퇴적물의 미세입자를 제거함으로써 영양염류를 효과적으로 제거할 수 있었다.

4) 미세입자가 제거된 퇴적물의 영양염류 용출농도는 미세입자가 제거되지 않은 퇴적물의 영양염류 용출농도보다 약 20.1~64.3% 정도 감소함을 알 수 있었다. 이를 통해 퇴적물의 미세입자 제거는 퇴적물의 영양염류 용출량의 감소에 효과적임을 확인할 수 있었다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부의 차세대 이코이노베이션 사업(413-111-008)의 지원을 받았으며, 이에 감사를 표합니다.

KSEE

References

1. Eggleton, J. and Thomas, K. V., "A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events," *Environ. Int.*, **30**(7), 973~980 (2004).
2. Teixeira, M. R., Sousa, V. and Rosa, M. J., "Investigating dissolved air flotation performance with cyanobacterial cells and filaments," *Water Res.*, **44**(11), 3337~3344(2010).
3. Dupre, V., Ponasse, M., Aurelle, Y. and Secq, A., "Bubble formation by water release in nozzles - I. Mechanisms," *Water Res.*, **32**(8), 2491~2497(1998).
4. Edzwald, J. K., "Dissolved air flotation and me," *Water Res.*, **44**(7), 2077~2106(2010).
5. Larsen, D. P., Malueg, K. W., Schults, D. W. and Brice, R. M., "Response to Eutrophic Shagawa Lake, Minnesota, U. S. A., to Point-Source, Phosphorus Reduction," *Verhandlungen Inter. Vereinigung Limnol.*, **19**, 884~892(1975).
6. Newell, R. C., Seiderer, L. J. and Hitchcock, D. R., "The impact of dredging works in coastal waters: a review of the sensitivity to disturbance and subsequent recovery of biological resources on the sea bed," *Oceanogr. Mar. Biol.: An Annual Rev.*, **36**, 127~178(1998).
7. Bare, W. R., Jones, N. B. and Middlebrooks, E. J., "Algae removal using dissolved air flotation," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **47**(1), 153~169(1975).
8. Koivunen, J. and Heinonen-Tanski, H., "Dissolved air flotation (DAF) for primary and tertiary treatment of municipal wastewaters," *Environ. Technol.*, **29**(1), 101~109(2008).
9. Andrieux-Loyer, F. and Aminot, A., "Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics

- in French coastal areas,” *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, **52**(5), 617~629(2001).
10. Selig, U., “Particle size-related phosphate binding and P-release at the sediment-water interface in a shallow German lake,” *Hydrobiol.*, **492**(1-3), 107~118(2003).
 11. Kemp, W. M., Sampou, P., Caffrey, J., Mayer, M., Henriksen, K. and Boynton, W. R., “Ammonium recycling versus denitrification in Chesapeake Bay sediments,” *Limnol. Oceanogr.*, **35**(7), 1545~1563(1990).
 12. Sondergaard, M., Jensen, P. J. and Jeppesen, E., “Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes,” *The Scientific World J.*, **1**, 427~442(2001).
 13. Min, Y.-H., Hyun, D.-Y., Eum, C.-H., Chung, N.-H., Kang, S.-W. and Lee, S.-H., “A study on the relationship between concentration of phosphorus, turbidity, and pH in water and soil,” *Anal. Sci. Technol.*, **24**(4), 304~309(2011).