J. Kor. Soc. Environ. Eng., 35(10), 737~742, 2013
Original Paper
http://dx.doi.org/10.4491/KSEE.2013.35.10.737
ISSN 1225-5025

# 초음파 및 마이크로공기부양법을 이용한 양식장 퇴적물 제거 특성

# Removal of Sediments below Breeding Ground Using Supersonics and Micro-Air Flotation

김석구 · 안재환 · 윤상린 · 강성원 · 이정우 · 이제근* · 임준혁** · 김동수* · 이태윤*,†
Seog-Ku Kim · Jae-Hwan Ahn · Sang-Leen Yun · Sung-Won Kang · Jungwoo Lee
Jea-Keun Lee · Jun-Heok Lim · Dong-Soo Kim · Tae-yoon Lee*,†

한국건설기술연구원 환경연구실 · *국립부경대학교 환경공학과 · **국립부경대학교 화학공학과
*Environmental Engineering Research Disision, Korea Institute of Construction Technology*
**Department of Environmental Engineering, Pukyong National University*
***Department of Chemical Engineering, Pukyong National University*

(2013년 10월 7일 접수, 2013년 10월 25일 채택)

**Abstract :** The purpose of this study was to remove sediments obtained from breeding ground using supersonics and micro-air flotation method. Sediments from Tongyong breeding grounds showed no contaminations of heavy metals but had great amount of organics. Thus, efficient removal of sediments was required to preserve water quality near breeding ground. Supersonics treatment for sediments was determined to be essential because higher removal efficiency of sediments was obtained when supersonics treatment was used. In addition, application of coagulants increased removal efficiency because its usage increased particle size of sediments, which enabled easy trapping of sediments particle into micro-air bubbles. Removal efficiency of sediments slightly decreased from 95.8% (1 g/L) to 83.9% (8 g/L) at the tests for different amount of sediments, but most of tiny particles were removed from water where sand size particles were left in the bottom of reactors.
**Key Words :** *Breeding Ground, Sediments, Micro-Air Flotation, Supersonics, Coagulants*

**요약 :** 본 연구는 양식장 퇴적토의 효과적 제거를 위해 초음파와 마이크로 공기를 이용한 퇴적토 부상제거를 위한 연구이다. 통영지역 양식장 퇴적토는 중금속 오염은 없으나 많은 양의 유기물을 함유한 것으로 파악되었고 수질보전을 위해 이들 퇴적토의 효과적 제거가 필요한 실정이다. 실험실 규모의 실험에서 초음파를 사용하지 않은 경우는 마이크로 공기를 주입하더라도 제거율은 초음파를 사용한 경우보다 현격히 낮아 초음파 사용이 필요함을 알 수 있었다. 또한, 마이크로 공기 주입 시 응집제의 사용은 퇴적토 입자의 크기를 증가시켜 마이크로 공기에 의한 부상을 용이하게 하여 제거율이 크게 향상되었다. 퇴적토 양에 따른 부상제거 실험에서는 퇴적토 양이 증가함에 따라 제거율이 95.8% (1 g/L)에서 83.9% (8 g/L)로 감소하였으나, 대부분의 미세입자는 마이크로 공기에 의해 부상처리되어 제거되었음을 알 수 있었다.
**주제어 :** 양식장, 퇴적토, 마이크로 공기 부상법, 초음파, 응집제

## 1. 서 론

해양퇴적물은 하천을 통해 육지에서 유입되는 산업 및 생활 오폐수, 산업생활 폐기물의 침전에 의해 오염이 심각하며, 하계 저층수의 저산소화, 부영양화, 적조발생 등 생태계 파괴의 큰 원인이 되고 있다.[1,2] 특히, 항만에서의 퇴적물 오염이 심각하며, 2005년 부산시 자료에 의하면 부산항만 퇴적물의 경우 각종 중금속(Cu, Cd, Pb, Zn, Mn)에 의해 심하게 오염이 된 것으로 알려졌으며, 높은 강열감량 값을 나타내어 유기물 함량이 높은 것으로 밝혀졌다.[3,4] 남해안의 경우 하천유입수에 의한 오염과 더불어 양식장 운영으로 인한 퇴적토 오염문제가 최근들어 주목을 받고 있다. 여러 양식장 운영방식 중 국내 양식업계에서 많이 사용하는 가두리 양식장이 주는 환경적 문제는 잉여먹이 및 양식 생물의 배설물에 의한 퇴적물의 유기물 오염, 양식에 사용되는 항생제 및 약품의 배출, 양식장에서 유출된 생물이 주변 생물과 교배하면서 발생되는 유전학적 문제, 해양생물 질병의 전이 등이 있다.[5~8] 양식장 퇴적물과 해수계면에서의 유기물 분해특성은 퇴적물 상층부에서 40% 이상의 유기물이 분해되면 분해된 유기물은 퇴적물에 축적되어 장기간에 걸쳐 해수 수질에 영향을 주는 것으로 보고되었다.[9]

양식장의 환경악화로 인한 수산물 수출 저해현상도 발생했는데, 미국 식품의약국(FDA)은 2012년 3월 남해안 굴 양식장이 있는 지정해역에서 위생점검을 실시하여 식중독을 일으키는 노로바이러스가 검출되자 굴 수입을 중단하였다. 이러한 조치는 연간 최대 790억원에 이르는 굴양식 어민들의 피해가 예상되고 있으며 남해안 굴 수출 지정해역이 거제-한산만, 자란-사랑해역, 산양해역, 가막만, 창선해역, 강진만 등으로 전체 면적은 1,822 ha에 이르기 때문에 추가적인 피해가 발생할 수 있다. 노로 바이러스의 경우 무분별하게 투기된 분변에 의한 영향이 크지만 양식장 해저퇴적물의 용출, 교란 등과 같은 문제가 발생할 경우 중금속 및 기타 유

† Corresponding author E-mail: badger74w@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6530 Fax: 051-629-6523

기물 오염이 우려되는 상황이 발생할 수 있다.

기존 양식장 퇴적물 처리를 위해서는 수력준설과 기계준설 방법이 사용되는데, 경제성 및 주위 환경에 미치는 영향을 고려할 때 최적의 대안으로 보기에는 어려움이 있다. 수력준설의 경우 준설토를 이송장치를 통해 육상으로 이동하여 준설토 선별시스템을 이용하여 처리하는데 상대적으로 많은 비용이 들어 큰 규모의 준설이 아니면 적용하기 어렵다. 기계준설의 경우 부유물질이 과다하게 발생하여 이로 인한 2차피해가 우려되므로 양식장 준설에 적용하기에는 한계가 있다고 할 수 있다. 최근 연구에서는 준설대신에 마이크로 공기를 이용하여 퇴적물질을 제거하는 연구가 각광을 받고 있다. 마이크로 공기는 직경 10~50 μm의 크기를 가지고 있으며 환경분야를 포함한 다양한 분야에 응용되고 있다.[10] 환경분야에서는 대부분이 수처리분야에 응용이 되고 있는데, 이는 마이크로 공기의 주입을 통해 기체-액체상의 물질교환을 촉진시키고 수중에 포함된 오염물질을 제거할 수 있기 때문이다.[11~15]

본 연구는 실제 통영지역 양식장 하부에서 채취한 퇴적토를 이용하여 효율적이고 빠르게 퇴적토를 제거할 수 있는 기법을 제시하고자 하였다. 먼저, 초음파를 이용하여 퇴적토를 미세한 입자로 파쇄하였으며 천연 응집제를 투입하여 응집반응을 시켰다. 이후 응집된 플록을 마이크로 공기를 주입하여 해수표면으로 부상시켜 퇴적토를 제거하고자 하였다. 부상분리 처리방법의 경우 탁도 유발물질을 영구적으로 신속히 제거할 수 있는 이점이 있기 때문에 기존 준설방법에 비해 처리시간을 획기적으로 단축시키는 것이 본 연구의 목표이다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

#### 2.1.1. 퇴적토 시료채취

통영수로 저층의 퇴적물을 채취하기 위해 부산 소재 P대학교의 600톤급 해양탐사선을 2012년 11월에 투입하여 약 7,000 m 길이의 통영수로에 9개의 시료채취 장소를 설정한 후 Vanveen grab sampler로 시료를 채취하였다. 샘플러의 용량은 9 L이며, 320 ϕ × 270 mm의 크기에 무게는 25 kg이었다. 퇴적물 시료는 시료의 균일성 확보를 위해 각 시료채취 장소를 기준으로 동서남북 50 m에 위치한 4지점에서 채취하여 균일하게 혼합 후 실험실로 운반하여 4℃에서 냉장보관 후 해양환경 공정시험방법에 의거하여 분석을 실시하였다. 9개의 시료채취 장소는 Fig. 1에 표시하였다. 본 연구에서는 양식장이 집중적으로 위치한 T4 지역에서 채취한 퇴적토를 이용하여 연구를 수행하였다.

#### 2.1.2. 퇴적토 분석

퇴적물의 유기물 함량을 나타내는 강열감량은 해양환경공정시험법의 강열감량 시험방법에 따라 충분히 건조된 시료 5 g을 550℃ 전기로에서 2시간 동안 강열시킨 후 시료를 데시케이터 속에서 항량이 되도록 건조한 후, 강열 전 · 후의 무게 차로서 계산하였다. 퇴적토 입자의 입도 분석은 해양환경공정시험법의 해저퇴적물 시험방법에 따라 분석을 수행하였다.

퇴적물의 중금속 함량은 해양오염공정시험방법의 중금속 분석방법(유도결합플라즈마발광광도법)에 따라 분석하였다. 퇴적물 시료 1.0 g을 테플론 비이커에 넣고 진한 질산 10 mL, 과염소산 10 mL를 첨가한 후 가열판 온도를 서서히 130℃까지 증가시켜 시료를 분해시켰다. 발연이 끝난 후 실온까지 방치한 후 100 mL 매스플라스크에 유리섬유여지를 이용하여 잔사를 분리한 후 시료용액을 담은 후 1 N 질산용액으로 정용하여 측정용 시료액을 준비하였다. 본 연구에서는 Elan 6100 Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)를 사용하여 중금속 항목을 분석하였다. 플라즈마 파워는 2.0 kW, 냉각수 유속은 15 L/min, 분무(nebulizer) 가스 유속은 1.0 L/min, 압력은 22 kPa로 고정시킨 후 분석하였다.

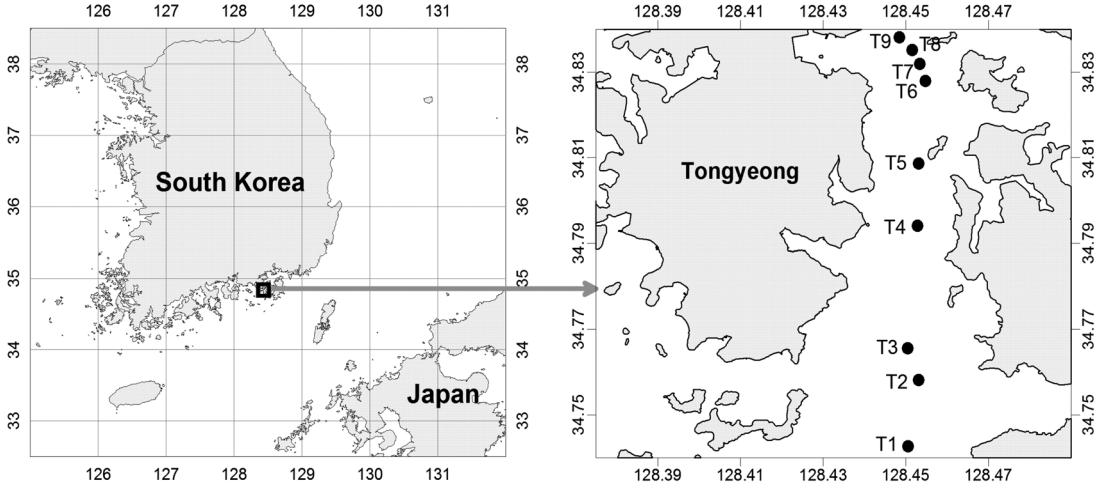


Fig. 1. Map showing the sampling sites of Tongyong Channel.

#### 2.1.3. 인공해수 및 응집제

인공해수는 Coralife Scientific Grade Marine Salt (Na 464 mM, Mg 64 mM, Ca 10.1 mM, K 9.3 mM, Sr 0.08 mM, $Cl^-$ 566 mM, $SO_4^{-2}$ 15 mM, $BO_3$ 1.26 mM, $HCO_3^-$ 0.32 mM, Coralife Salt 1 kg)을 첨가하여 비중을 1.02~1.025로 조정한 후 사용하였으며, 인공해수의 초기 탁도는 15~18 NTU 이었다. 본 실험에서 사용된 응집제는 PGα21Ca (PGA)이다. 본 실험에서 사용된 응집제인 PGA는 발표된 콩에서 발생되는 점성을 유지하는 성분의 주요소인 폴리글루타민산으로, 환경 및 생물에 대한 안전성이 높고, 식품에서 유래된 천연 물질로서 미생물에 의해 분해가 가능한 생분해성이기 때문에 친환경적인 고분자응집제이다.

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 탁도 및 퇴적토 제거율 측정

실험에 사용된 인공해수와 처리수의 탁도는 탁도계(Model 2100AN, Hach Company, Loveland, CO)를 이용하여 각 시료당 3회씩 측정하여 평균값을 사용하였다. 퇴적토 제거율은 초기 퇴적토의 양과 부상된 퇴적토의 양의 차이를 계산하여 산정하였다.

#### 2.2.2. 공기부상 실험방법

본 실험에 사용된 반응조는 2 L 용량의 유리플라스크이며, 이 유리 플라스크에 1 L의 인공해수와 퇴적토를 넣은 후 초음파를 조사하여 고르게 분쇄하면서 응집제를 투입하고 이어 마이크로 공기를 주입하였다. 응집제 투입 후 1분간의 반응시간을 두어 플록이 형성되도록 한 후 여기에 마이크로 공기를 5초간 주입하였다. 이때 마이크로 공기 주입과 더불어 물도 같이 주입이 되는데, 반응조 용량을 고려하여 5초간 주입하여 2 L 반응조에 탁수 1 L, 마이크로 공기를 포함한 물 1 L가 되도록 하였다. 마이크로 공기는 서서히 부상하면서 플록이 형성된 퇴적토 물질을 수면으로 같이 부상시켰으며, 이때 소요된 시간은 약 5분이었다.

실험에 사용된 장치의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 응집제를 사용하여 자체적 응집성을 높여 주었으며 미세기포를 발생시킬 수 있는 미세기포 발생장치(Guardian, Axle systems Co., Korea)를 이용하여 미세 공기를 주입하였다. 미세공기 주입 시 비교적 빠른 속도로 부유물질이 부상하였으며, 탁도 측정은 공기 방울 주입 1분 후 측정하였다.

응집제 주입량은 0.05 g/L, 0.1 g/L, 0.2 g/L, 0.3 g/L, 0.4 g/L, 0.5 g/L로 증가 시키면서 응집제 주입량에 따른 효율을 알아보았다. 부상 공정을 위한 기포를 생성하는 원리는 단순한 압력 차에 의한 공기의 용해도 차이 또는 노즐의 크기에 비례해서 생성되기 때문에 비교적 큰 기포가 발생하게 되는데, 본 실험에 사용한 미세기포의 크기는 2~20 μm이며 (Guardian, Axle systems Co., Korea) 응집제에 의해 응집된 오염물질과 결합해 수면으로 부상된 후 처리되어진다.

## 3. 실험결과 및 해석

### 3.1. 퇴적토 성분 및 입도

통영수로에서 채취한 T-4번 시료에 대한 강열감량은 10.26 %였으며, TOC는 1.78%였다. 5개 중금속의 농도는 Cr은 10.3 mg/kg, Cd은 검출되지 않았으며, Cu는 16.1 mg/kg이

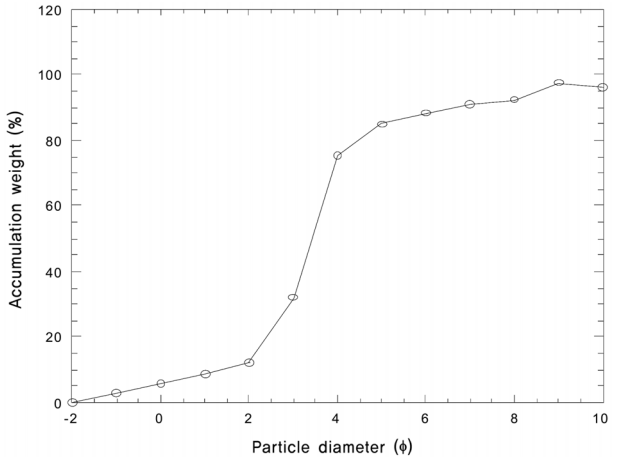


Fig. 3. Particle size distribution curve of T-4 sediment obtained from Tongyong breeding ground.

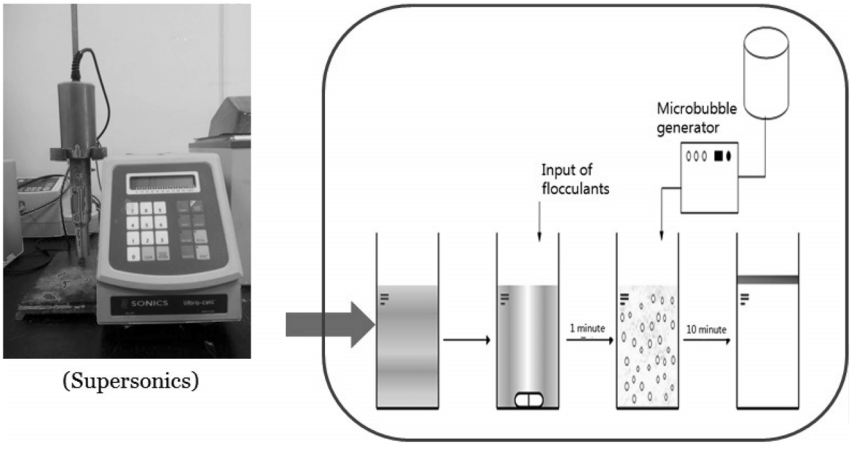


Fig. 2. Schematic diagram of micro-air flotation test.

었다. Ni과 Zn은 17.1과 75.7mg/kg이었다. T-4 시료에 대한 입도분석 결과 평균입도는 3.51 ϕ이며 분급도는 1.96 ϕ였다 (Fig. 3).

### 3.2. 퇴적토 부상제거

#### 3.2.1. 초음파 조사를 통한 퇴적토 분쇄

양식장 하부의 퇴적토는 퇴적물이 침전 후 압밀 과정을 통해 강하게 뭉친 입자형태이므로 이들 입자를 초음파를 통해 가는 입자로 분쇄할 필요가 있다. 채취한 퇴적토 20 g을 500 mL 비이커에 손으로 다져넣은 후 초음파를 조사하였다. 선행실험에서 2분의 초음파 조사로도 충분히 퇴적토를 분쇄하는 것을 확인하였으므로, 본 실험에서는 초음파 조사시간을 2분으로 통일하였다. 초음파 조사 위치에 따른 퇴적토의 분쇄결과는 Fig. 4에 나타나 있다.

대기와 인공해수면 바로 아래에서 초음파를 조사한 경우 바닥에 위치한 퇴적토가 일부 분쇄되었으나(140 NTU), 대부분의 퇴적토는 초음파 발생원과의 거리로 인해 분쇄되지 않았다. 이에 반해, 초음파 발생기를 퇴적토에 가까이 위치시킬수록 퇴적토 분쇄 및 분산이 증가하는 것을 알 수 있었다. 초음파 발생기가 퇴적토와 해수면 중간일 경우 탁도는 9,440 NTU로 증가하였고 퇴적토 바로 위에 발생기가 위치한 경우 탁도는 15,560 NTU로 급격히 증가하였으며 대부분의 퇴적토가 분쇄되어 수중에 고르게 분산되는 것으로 파악되었다. 따라서, 이후 실험에서는 모든 초음파 조사는 퇴적토 바로위에서 2분간 이루어졌다.

#### 3.2.2. 응집제 투입량 결정 및 마이크로 공기 주입

채취한 퇴적토를 양을 달리하여 2 L 비이커에 채운 후 인공해수를 1 L 눈금에 맞추어 채워넣었다. 사용한 퇴적토 양은 1, 2, 4, 8 g이며 농도로 환산하면 각각 1, 2, 4, 8 g/L일 때 이다. 준비된 비이커에 초음파 발생장치를 퇴적토 바로 위에서 2분간 조사하여 퇴적토를 가는 입자로 파쇄 및 수중에 분산시킨 후 응집제인 PGA를 0.5 g/L 양으로 비이커에 투입하여 분산된 퇴적토를 응집시켰다. 응집작용 후 마이크로 공기 발생기를 비이커에 3초간 주입하여 응집된 퇴적토를 수면으로 부상시켰다. 마이크로 공기의 주입은 외부 물의 추가 투입이 있기 때문에 최종 물의 부피는 2 L로 증가하였다. 초음파 및 마이크로 공기를 이용한 부상실험결과는 Fig. 5에 표시하였다.

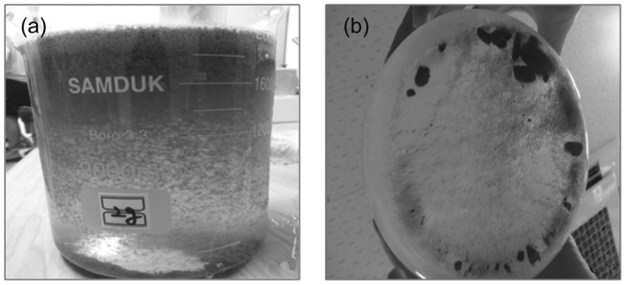


Fig. 5. Removal of sediments using micro-air flotation method: (a) Coagulation of sediment particles using PGA coagulant and (b) Removed sediments via micro-air bubbles.

응집제를 사용하지 않은 경우에는 부상분리에 의한 효과가 없었다. 하지만, 응집제의 양이 0.1에서 8 g/L로 증가함에 따라 초기탁도 3,000 NTU는 115.3 NTU와 42.7 NTU로 감

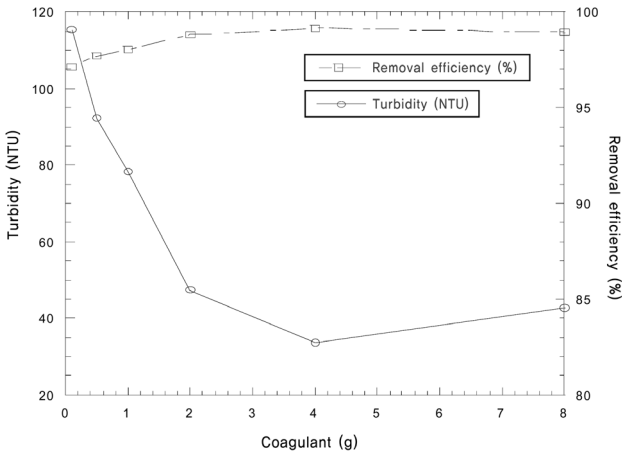


Fig. 6. Removal of sediments using micro-air flotation method for different amount of coagulant.

Fig. 4. Fragmentation of sediments using supersonics at the surface of seawater, in the middle of surface and sediments and top of the sediments.

소하였다. 초기탁도에 대한 제거율도 0.1 g/L일 때 97.1%에서 8 g/L로 증가함에 따라 98.9%로 소폭 증가하였다(Fig. 6). 응집제의 양이 1 g/L를 초과할 경우에는 일부 응집제가 용해되지 않고 수중에 부유하는 현상이 관측되었는데, 이는 PGA가 소수성 성질을 가지고 있기 때문이었다. 따라서, 많은 양의 응집제 주입은 경제성 문제뿐만 아니라 응집제로 인한 2차오염의 문제가 있을 수 있으므로 본 연구에서는 응집제 주입량을 0.5 g/L로 고정하여 실험을 진행하였다.

### 3.2.3. 퇴적토 양에 따른 퇴적토 제거 효율

채취한 퇴적토를 양을 달리하여 2 L 비이커에 채운 후 인공해수를 1 L 눈금에 맞추어 채워넣었다. 사용한 퇴적토 양은 1, 2, 4, 8 g이며 농도로 환산하면 각각 1, 2, 4, 8 g/L 이다. 준비된 비이커에 초음파 발생장치를 퇴적토 바로 위에서 2분간 조사하여 퇴적토를 가는 입자로 파쇄 및 수중에 분산시킨 후 응집제인 PGA를 0.5 g/L 양으로 비이커에 투입하여 분산된 퇴적토를 응집시켰다. 응집작용 후 마이크로공기 발생기를 비이커에 3초간 주입하여 응집된 퇴적토를 수면으로 부상시켰다. 마이크로 공기의 주입은 외부 물의 추가 투입이 있기 때문에 최종 물의 부피는 2 L로 증가하였다. 퇴적토 양에 따른 실험결과는 Fig. 7에 표시하였다.

퇴적토를 초음파 처리한 경우와 처리하지 않은 경우에 제거효율에 큰 차이를 보여주었다. 초음파 처리를 하지 않은 경우에는 제거효율이 1 g/L일 때 95.2%였으나 퇴적토 양이 증가함에 따라 급격히 감소하여 8 g/L일 경우에는 10.6%로 감소하였다. 이에 반해 초음파 처리를 한 경우에는 제거효율이 1 g/L일 때 95.8%였고 퇴적토 양이 증가함에 따라 서서히 감소하였으나 8 g/L일 경우에도 83.9%의 높은 제거효율을 보여주었다. 제거되지 않고 남은 퇴적토의 경우 대부분 모래성분이라 마이크로공기에 의한 부상처리는 불가능한 것으로 파악되었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 양식장 하부 퇴적물을 효과적으로 제거하기 위한 기술을 개발하기 위하여 수행된 선행연구로써 초음파, 응집제 및 마이크로 공기를 이용한 퇴적토의 부상처리에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 통영 양식장 하부에서 채취한 퇴적토는 중금속 성분은 높지 않았으나 강열감량은 10.26%로 높은 편인데, 이는 양식활동으로 인해 발생한 유기물이 퇴적토에 많이 유입된 것으로 판단된다. 또한, 평균입도는 3.51 ϕ이면 분급도는 1.96 ϕ로 미세한 점토입자로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

2) 양식장 하부의 퇴적토는 오랜 압밀과정을 통해 강하게 결합된 형태이기 때문에 부상처리에 앞서 결합된 형태의 퇴적토를 가는 입자로 분쇄할 필요가 있다. 이에 초음파 발생기를 이용하여 퇴적토 분쇄실험을 수행하였으며, 초음파 발생기의 위치에 따른 분쇄효과가 차이가 많으므로 발생기 위치는 퇴적토에 최대한 근접하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3) 초음파로 분쇄된 퇴적토에 마이크로 공기를 주입하였을 때 부상효과로 인한 제거는 거의 없었는데, 이는 퇴적토 입자가 마이크로 공기 입자보다 작아 결합효과가 떨어지는 것으로 판단된다. 이에 퇴적토 입자의 크기를 응집제를 이용하여 큰 입자로 만들었고 여기에 마이크로 공기를 주입 시 퇴적토 입자가 부상하여 제거되었다. 사용된 응집제의 양은 0.5 g/L가 최적으로 판단되었으나 이는 본 실험의 경우에 적용이 되는 것이고 실제 현장에서 적용할 경우에는 상황에 맞는 최적 응집제의 투입량이 결정되어야 할 것이다.

4) 퇴적토양에 따른 부상처리 효과를 통해 본 실험조건에서는 8 g/L의 퇴적토의 경우도 제거율 83.9%로 높은 제거효율을 보였다. 이에 반해 초음파를 사용하지 않는 경우에는 같은 조건에서 제거율이 10.6%에 그쳐 대부분이 제거가 되지 않는 것을 확인하였다.

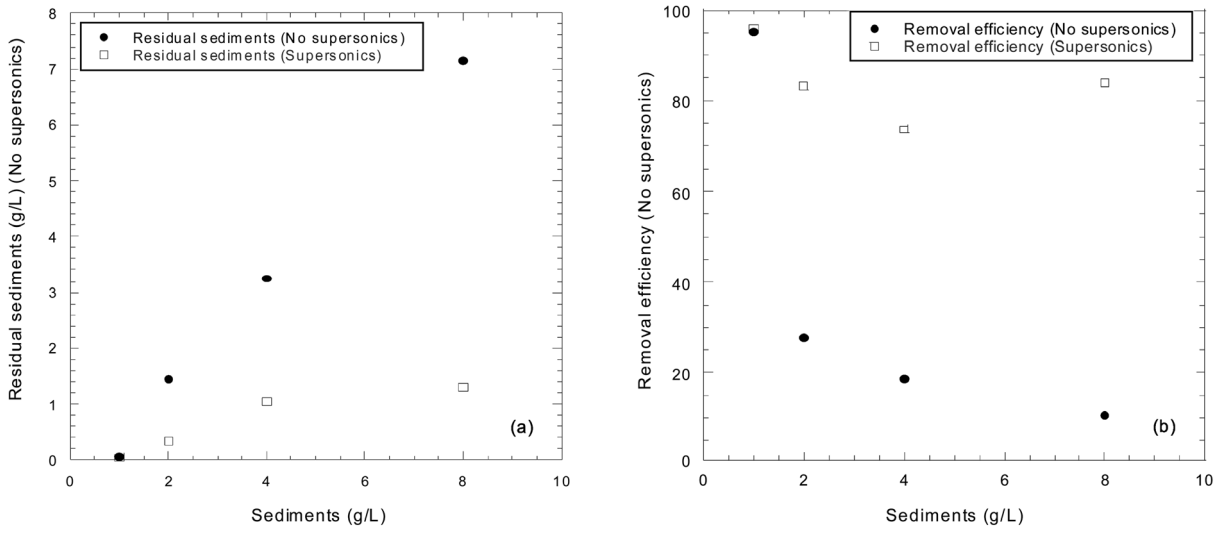


Fig. 7. Results of micro-air flotation tests conducted at different amount of sediments: (a) Residual amount of sediments after tests and (b) Removal efficiency of sediments.

## 사 사

본 연구는 한국건설기술연구원 2013년 주요사업(2013-0328) 연구비로 수행되었습니다.

KSEE

## 참고문헌

1. Yang, H. S. and Kim, S. S., "Pollution of Heavy Metals and Sedimentation Rate in the Sediments of Suyeong Bay, Pusan," *Bullet. Kor. Fish. Soc.*, **27**(5), 643~658(1994).
2. Cho, E. I., Lee, S. M. and Park, C. K., "The Characteristics and the Effects of Pollutant Loadings from Nonpoint Sources on Water Quality in Suyeong Bay," *J. Kor. Fish. Soc.*, **28**(3), 279~293(1995).
3. Choi, B. R. and Lee, T. Y., "Evaluation of Organic Compounds and Heavy Metals in Sediments from the Busan Harbor," *Korean J. Waste Manage.,* **28**(3), 269~274(2011).
4. Lee, T. Y., "Evaluation of Contamination Levels of Sediments Obtained from the Southern Busan Harbor," *Korean J. Waste Manage.,* **30**(2), 119~123(2013).
5. Heggberget, T. G., Johnson, B. O., Hinder, K., Jonsson, B., Hansen, L. P. and Jensen, A. J., "Interaction between wild and cultured Atlantic Salmon, a review of the Norwegian experience," *Fish. Res.*, **18**, 123~146(1993).
6. Hirata, H., Kadowaki, S. and Ishida, S., "Evaluation of water quality by observation of dissolved oxygen content in mariculture farms," *Bullet. Natl. Res. Inst. Aquacult.,* **1**, 61~65(1994).
7. Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N. and Troell, M., "Effect of aquaculture on world fish supplies," *Nature*, **405**, 1017~1024(2000).
8. Yongson, A. E., Dosdat, A., Saroglia, M. and Jordan, W. C., "Genetic interactions between marine fish species in European aquaculture and wild conspecies," *J. Appl. Ichthyol.*, **17**, 153~162(2001).
9. Shim, J. H., Kang, Y. C. and Choi, J. W., "Chemical fluxes between seawater surfaces and sediments at Tongyong breeding ground," *J. Kor. Fish. Soc.,* **30**(3), 151~159(1997).
10. Agarwal, A., Ng, W. J. and Liu, Y., "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment," *Chemosphere*, **84**(8), 1175~1180(2011).
11. Takahashi, M., "ζ potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas-water interface," *J. Physic. Chem. B*, **109**(11), 21858~21864(2005).
12. Takahashi, M., Chiba, K. and Li. P., "Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus," *J. Physic. Chem. B*, **111**(8), 1343~1347(2007).
13. Chu, L. B., Xing, X. H., Yu, A. F., Zhou, Y. N., Sun, X. L. and Jurcik, B., "Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles," *Chemosphere*, **68**(12), 1854~1860(2007).
14. Chu, L. B., Xing, X. H., Yu, A. F., Sun, X. L. and Jurcik, B., "Enhanced treatment of practical textile wastewater by microbubble ozonation," *Proc. Safety Environ. Protection,* **86**(2), 389~393(2008a).
15. Chu, L. B., Yan, S. T., Xing, X. H., Yu, A. F., Sun, X. L. and Jurcik, B., "Enhanced sludge solubilization by microbubble ozonation," *Chemosphere*, **72**(3), 205~212(2008b).