

천연 무기응집제를 이용한 조류 제거

Removal of Algae by Natural Coagulants of Soil Origin

김석구 · 김동관* · 강성원 · 안재환 · 김일호 · 윤상린 · 이상협** · 이원태*[†]

seog-ku Kim · Dong-kwan Kim* · Sungwon Kang · JaeHwan Ahn

Il-ho Kim · SangLeen Yun · Sanghyup Lee** · Wontae Lee*[†]

한국건설기술연구원 · *금오공과대학교 토목환경공학부

**한국과학기술연구원 물자순환연구단 · 고려대학교 그린스쿨대학원

Korea Institute of Construction Technology · *Kumoh National Institute of Technology

**Korea Institute of Science and Technology · Graduate School of Convergence Green Technology & Policy, Korea University

(2013년 11월 17일 접수, 2013년 11월 21일 채택)

Abstract : Coagulation and sedimentation tests were conducted with clay and three different coagulants of soil origin (AC-A, AC-B, AC-C) to determine optimal coagulant types and doses to remove algae in stagnant water bodies such as reservoirs. Raw water had an algal density of 2,950 cells/mL and was dominated by Cyanobacteria. Removal rates of algal density by clay (50 mg/L) were 49% and 85% after 10 and 30 minutes sedimentation, respectively. Other natural coagulants achieved 80-90% removal in 10 minutes and 89-94% removal in 30 minutes of sedimentation after adding 20 mg/L each. AC-A was the optimal coagulant from this study considering algal removal rates and other water quality parameters such as turbidity and pH. For the same removal rates of algae, raw waters with higher algal densities required higher coagulant doses although no strong correlation was observed. The coagulants of soil origin did not impact organic contents and pH of raw water, but remove phosphate up to 70%.

Key Words : Algae, Algal Density, Natural Coagulants, Coagulation, Sedimentation

요약 : 조류 발생이 문제시 되는 정체수역이나 호소에서 현장적용에 적합한 응집제를 선정하고 응집제별 적정 주입농도를 찾기 위하여 황토와 개량된 토양기반 무기응집제 세 가지(AC-A, AC-B, AC-C)를 주입하며 응집·침전실험을 실시하였다. 남조류가 주종이고 조류밀도가 2,950 cells/mL인 원수에 대한 황토(50 mg/L 주입)에 의한 조류밀도 제거율은 10분 침전후 49%, 30분 침전후 85%로 나타났고, 다른 세 가지 무기응집제(20 mg/L 주입)의 경우 10분 침전 후 80-90% 제거율, 30분 침전 후에는 89-94%의 조류 제거율을 나타냈다. 조류 제거와 탁도, pH 등의 수질인자 특성을 종합적으로 고려할 때 본 연구에서 고려된 천연 무기응집제 중 AC-A가 가장 적합한 것으로 판단된다. 원수의 조류밀도가 높을수록 같은 제거효율을 얻기 위한 응집제 주입량이 증가하는 경향을 나타냈으나 선형적인 상관관계는 찾을 수 없었다. 황토를 비롯한 천연 무기응집제는 원수의 유기물 제거 및 pH 변화에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났고, 인산염의 경우 주입량을 늘임에 따라 제거율이 높아져 최대 70%까지 제거되었다.

주제어 : 조류, 조류밀도, 천연응집제, 응집, 침전

1. 서론

최근 갈수 및 이상고온 등 기후변화의 영향으로 부영양화 된 호수나 유속이 느린 하천에서 조류(algae) 발생이 심화되고 있다.¹⁾ 특히 부유성 조류가 대량으로 증식하여 수면의 물색을 현저하게 녹색으로 변화시키는 것을 녹조현상이라 칭하는데, 남조류(Blue-green algae 또는 Cyanobacteria)에 해당되는 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon*속 등이 녹조현상의 원인 미생물이라고 알려져 있다.²⁾ 남조류는 질소 고정능, 휴면포자 형성능, 체내 인축적능, 부상능, 수온 및 pH 적응성, 군체 형성능 등이 다른 조류에 비해 우수하여 부영양화 된 수역에서 우점하여 녹조현상을 일으킨다.^{3,4)} 환경부에서 실시하는 조류 예보제는 남조류 세 포수를 기준으로 500 cells/mL 이상일 경우 조류주의보, 5,000 cells/mL 이상일 경우 조류경보, 1,000,000 cells/mL 이상일 경우 조류대발생경보로 나뉜다.⁵⁾

수계의 조류에 의해 발생하는 이취미 물질은 수돗물의 냄새를 유발할 수 있고,⁶⁾ 일부 조류가 발생하는 독소물질은 인체 및 가축의 건강을 해칠 수 있다.⁷⁾ 또한 조류가 정수장으로 유입될 시 정수과정 중 여과지 폐쇄, 응집·침전 효율 저하, 과다염소처리로 인한 소독부산물 발생 등의 문제도 일으킬 수 있어⁸⁾ 조류가 대량으로 발생하는 것을 방지하고, 또 생성된 조류를 조속히 처리하기 위한 선제적 대응과 국가 차원의 체계적인 관리가 필요한 실정이다.¹⁾

조류는 하수의 인제거, 비점오염원 관리 등 발생원을 제어 및 관리하여 근본적으로 발생을 줄일 수 있다. 수계에 조류가 대량발생 된 경우에는 물리화학적(예, 응집제 투여 후 가압부상)으로 처리할 수 있다. 다만, 응집처리 시 황산알루미늄(alum)이나 PACl (polyaluminum chloride)와 같은 응집제를 사용할 경우 수생태계에 영향을 미칠 수 있어 수계 내에서 직접적으로 처리하는데 한계가 있다.⁹⁾ 수계에서 직접 조류를 제거할 경우 수생태계에 미치는 영향을 최소화하기

[†] Corresponding author E-mail: wtlee@kumoh.ac.kr Tel: 054-478-7636 Fax: 054-478-7859

위하여 황토(clay) 등 천연물질을 활용할 수 있다.⁹⁾ 지난 30여 년간 일본⁹⁾과 한국¹⁰⁾을 비롯한 여러 나라에서 황토를 이용한 유해조류 제거에 대한 연구 및 활용이 많이 진행되어 왔으며 비용이나 환경에 미치는 영향 등이 적어 비교적 효율적이라고 알려져 있다.⁹⁾ 다만, 황토 내 존재하는 유기물이나 중금속 등이 환경에 영향을 미칠 수도 있다.¹¹⁾

최근에는 개량된 토양 및 광물질을 수계의 인, 중금속 등의 제거에 활용하는 연구 및 사례가 증가하고 있다.^{12,13)} 이러한 물질들은 조류제거에 사용되는 황토의 대체재로 활용도가 높을 것으로 판단되나, 국내에서는 관련된 연구가 미약한 실정이다. 따라서 본 연구는 황토와 여러 가지 개량된 토양 및 광물질을 대상으로 녹조현상이 발생했을 경우 현장에서 바로 사용할 수 있는 천연 무기응집제를 찾는 것이 목표이다. 이를 위해 조류밀도가 천연 무기응집제에 의한 조류제거효율에 미치는 영향과 조류밀도별 최적 응집제 주입량 등을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 원수

본 연구를 위해 사용된 시료는 낙동강 중류의 A보 상류지역(원수A)과 경기도의 B저수지(원수B)에서 채수하였다. 원수A의 조류밀도는 2,950 cells/mL이었고, 다른 수질인자의 특성은 Table 1과 같다. 조류밀도별 제거효율을 조사하기 위해 B저수지에서 조류 채집망을 이용하여 높은 농도의 조류밀도(12,700,000 cells/mL)를 가진 원수를 채수하였으며, 조류밀도 실험을 위해 희석하여 사용하였다. 희석수는 원수A를 이용하였다.

조류종 분석결과, 두 원수 모두 남조류(*Cyanobacteria*)가 우점종이었으며, 원수A는 *Microcystis*종이 58%, *Eudorina elegans*가 26%이었고, 원수B는 *Microcystis*종이 99%로 대부분을 차지하였다. 조류종은 한국농어촌공사의 협조를 받아 DNA분석을 통해 분류하였다.

2.2. 응집제

응집제별 조류제거 특성을 조사하기 위하여 황토와 토양 기반으로 개량된 무기응집제 artificial clay A (AC-A), arti-

Table 2. Compositions of clay and artificial clay A

Composition	Clay (%)	Artificial clay A (%)
SiO ₂	50-60	40-60
CaO	4-16	7-15
Al ₂ O ₃	8-12	5-10
MgO	2-6	1-4
Fe ₂ O ₃	2-9	1-6

ficial clay B (AC-B), artificial clay (AC-C) 등을 사용하였다. 토양기반 천연 무기응집제의 주성분은 Al₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Fe₂O₃, SiO₂, TiO₂, MnO₄ 이었다. 실험에 사용된 응집제 가운데 제조사의 동의를 얻은 황토와 AC-A의 wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry (WDXRF) 분석값을 Table 2에 정리하였다. 천연 무기응집제의 효율을 비교하기 위해 기존에 조류제거를 위한 응집제로 흔히 사용되고 있는 PACl를 대조군으로 응집·침전실험을 수행하였다.

2.3. 응집·침전 실험

2.3.1. 응집제별 조류 제거 실험

황토와 개량된 무기응집제별 조류 제거특성을 비교하고 조류제거에 적합한 응집제를 찾기 위하여 원수A를 대상으로 자테스트(jar test)를 수행하였다. 응집·침전실험은 환경부에서 제시한 “조류제거효율 및 생태독성평가 방법”에 맞추어 실시하였다.¹⁴⁾ 먼저 조류가 포함된 2 L의 시료를 준비하여 120 rpm로 교반하며 각 응집제를 농도별(10~200 mg/L, 황토는 500 mg/L까지 주입)로 주입하였다. 응집제는 20,000 mg/L의 슬러리 형태로 만들어 주입하였고, 용액 속에서 응집제가 침전되지 않도록 유리막대로 저어가면서 채취한 다음 시료에 주입하였다. 응집제 주입 후 120 rpm에서 1분간 교반하고 10분, 30분 침전시킨 다음, 각각 상등수를 채취하여 수질항목과 조류밀도를 분석하였다.

2.3.2. 조류밀도 농도별 실험

원수의 조류밀도가 제거효율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 응집제별 조류 제거특성 실험에서 최대의 조류 제거율을 보인 AC-A 응집제를 사용하여 추가적인 실험을 수행하였으며, 황토를 대조군으로 사용하였다. 다양한 조류밀도 농도에 대한 실험을 하기 위하여 조류밀도가 낮은 원수 A 대신 원수B(조류밀도 12,700,000 cells/mL)를 희석하여 사용하였다. 희석수는 저수지의 물을 GF/C (Whatman, USA) filter로 여과한 물을 사용하였다. 희석 시 목표했던 조류밀도는 5,000, 10,000, 50,000, 100,000, 200,000 cells/mL이었다. 하지만, 희석 후 실제 조류밀도는 각각 6,936, 12,536, 44,320, 104,970, 222,233 cells/mL이었으며, 실험결과 해석을 위해 간략하게 7,000, 12,000, 45,000, 105,000, 222,000 cells/mL로 표기하였다. 응집·침전실험은 Jar tester를 이용해 응집제 주입 후 120 rpm에서 1분간 교반하고 30분 침전시킨 뒤 각각 상등수를 취하여 수질항목과 조류밀도를 분석하였다.

Table 1. Characteristics of raw water A

Parameter	Unit	Value
Algal density	cells/mL	2,950
Chl-a	mg/L	2.596
Turbidity	NTU	3.0
TSS	mg/L	4.8
UVA@254 nm	cm ⁻¹	0.077
pH	s.u.	7.1
PO ₄ ³⁻	mg/L	0.035
Zeta potential	mV	-12.8

2.4. 분석방법

조류밀도는 1 L의 상등수에 루골(Lugol) 용액 10 mL를 주입하고 암소에서 3일간 보관한 후 수질오염공정시험기준의 식물성플라크톤-현미경계수법(ES 004705. 1)으로 측정하였다.¹⁵⁾ 루골용액을 넣고 침전시킨 후 사이편을 이용하여 상등수를 표면부터 제거한 다음, 일정배율로 농축한 후 현미경(CH30, OLYMPUS)을 이용하여 200배로 확대하여 개수하였다. 실험에 사용된 슬라이드 글래스는 1 mm × 1 mm 크기의 구계가 총 1,000칸으로 나누어진 것을 사용하였으며, 이 중 40칸의 구계를 일정하게 관측하여 조류밀도를 구하였다. 조류밀도를 구하는데 사용한 식은 (1)과 같다.

$$\text{조류밀도(Cell/mL)} = \frac{C \times 1000 \text{ mm}^3}{A \text{ (mm}^2) \times D \text{ (mm)} \times F \times V} \quad (1)$$

- C : 계수된 총 개체수
- A : 한 구계당 체적(mm²)
- D : 구계당 높이(mm)
- F : 계수한 구계수
- V : 농축배율

루골을 넣기 전에 채취한 상등액의 pH, 탁도, 인산염인, 제타전위, 입도분포를 측정하였으며, 유기물의 제거특성을 알아보기 위하여 254 nm에서 UVA (UVA₂₅₄)를 측정하였다. pH는 pH meter (Star A series, Thermo, USA)로, 탁도는 turbidity meter (HI98703, HANNA)로 분석하였고, 인산염인은 수질오염공정시험기준(ES 04362.1)에 따라 시료를 발색시킨 후 UV-Vis spectrophotometer (Humas HS-3300)를 사용하여 측정하였다.¹⁵⁾

제타전위는 Photal사의 ELS Z를 사용하여 분석하였으며, 분석용 cell은 flow zeta cell을 사용하였고, conversion equation은 Smoluchowski식을 이용하였다. 입도분포는 Mastersizer 2000 (Malvern Instruments, UK)을 이용하여 0.02 μm에서 2,000 μm까지 입도분포를 측정하였다. UVA₂₅₄는 UV-Vis spectrophotometer (Humas HS-3300)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 응집제별 조류 제거 특성

현장에 적용하기 적합한 응집제를 선정하고 응집제별 최적 주입농도를 찾기 위하여 황토와 토양기반 개량 무기응집제 세 가지를 주입하며 응집·교반실험을 실시하였다. 천연 무기응집제(AC-A, AC-B, AC-C)의 경우 응집제 주입량을 증가시킬수록 조류밀도 농도는 감소하여 주입량 20 mg/L에서 조류밀도가 최저값을 나타내었으며, 20 mg/L 이후에는 조류밀도 감소에 큰 변화가 없었다. 황토는 주입량 50 mg/L에서 최저의 조류밀도 값을 나타내었으며, 다른 무기응집제와 마찬가지로 주입량을 증가시켜도 조류밀도 제거에 큰 차

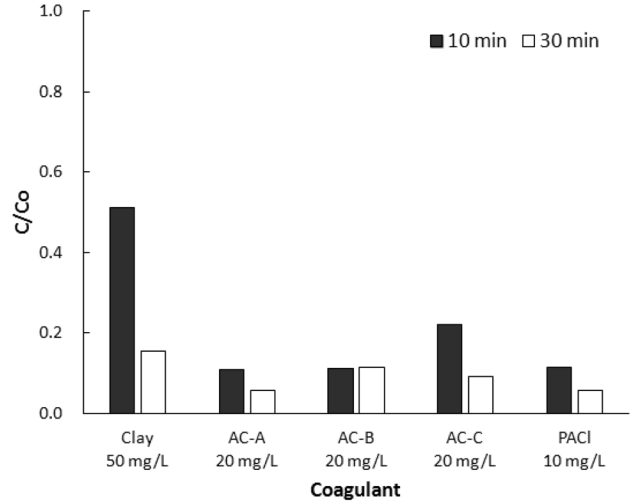


Fig. 1. Comparison of algal densities for the jar tested waters with various coagulants (C₀ = 2,950 cells/mL, sedimentation time = 10 and 30 min).

이는 없었다. 황토 및 개량된 천연 무기응집제에 의한 조류의 침전은 흙 입자와 조류 세포 간의 전하중화, 공침, 자동력(algal cell motility) 상실 등에 의해 일어난다.¹⁶⁾

한편, PACI의 경우 조류밀도 최저값이 10-50 mg/L에서 나타났다. 100 mg/L 이후에는 다시 조류밀도가 증가하였다. 이것은 PACI의 양전하가 조류 입자의 표면전하(원수 제타전위 -12.8 mV)를 중화시키는 최적 농도가 10-50 mg/L 사이이고, 100 mg/L 이후부터 PACI의 양전하가 증가함에 따라 전하중화에 의한 응집제거효율이 낮아지고 입자의 재안정화(restabilization)가 일어났기 때문으로 판단된다.¹⁷⁾

Fig. 1은 응집·교반 후 침전시간 10분과 30분 후의 조류밀도 변화를 응집제별로 나타낸 것이다. 각 응집제별로 조류밀도 제거율이 높은 최적 주입량에 대하여 조류밀도를 비교하였다. 황토의 경우 50 mg/L, 다른 천연 무기응집제는 20 mg/L, PACI는 10 mg/L 주입량의 조류밀도 값을 비교하였다. PACI는 주입량 10 mg/L로 10분 침전 후 조류밀도 제거율 88%를, 30분 침전 후 조류밀도 제거율 94%를 달성할 수 있었다. 황토는 다른 응집제에 비하여 많은 주입량(50 mg/L)이 필요했고 처리효율도 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 다른 천연 무기응집제의 경우 10분 침전 후에는 AC-A (89%)와 AC-B (89%)가 AC-C (78%)에 비하여 높은 조류밀도 제거율을 나타냈고, 30분 침전 후에는 비슷한 조류밀도 제거율(89-94%)을 나타내었다.

침전시간이 조류밀도 제거율에 미치는 영향도 황토가 다른 천연 무기응집제에 비해 큰 것으로 나타났다. 다른 개량 무기응집제들도 침전시간이 길어질수록 조류밀도 제거율이 다소 증가하였으나, 침전시간 10분만으로도 80-90%의 조류를 제거할 수 있었다. 반면, 황토(50 mg/L 주입)에 의한 조류밀도 제거율은 10분 침전 후 49%, 30분 침전 후 85%로, 황토를 이용하여 조류를 제거하는 경우에 충분한 침전시간이 필요한 것으로 나타났다.

Fig. 2는 조류밀도 제거율 기준으로 각 응집제의 최적주입

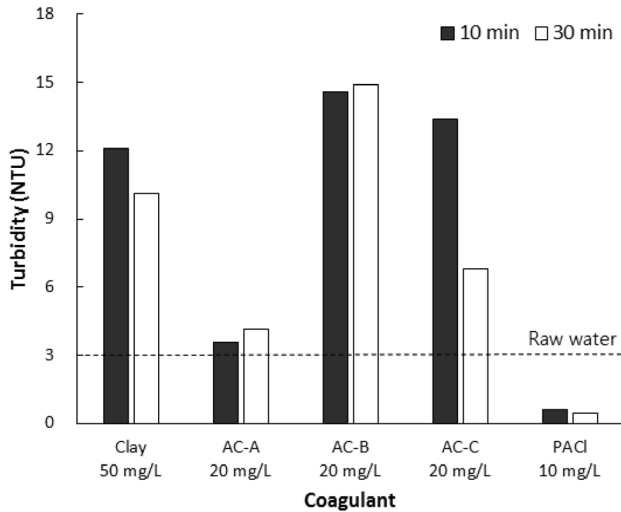


Fig. 2. Turbidity of jar tested waters with various coagulants (sedimentation time = 10 and 30 min).

량을 주입하였을 때의 탁도 변화를 나타낸 것이다. PACI의 경우 응집·침전 10분과 30분 후 각각 0.59 NTU 및 0.46 NTU로 원수(3 NTU)에 비해 탁도가 80% 정도 감소하였다. 반면, 황토와 천연 무기응집제로 응집·침전한 시료는 원수의 탁도(3 NTU)보다 높은 탁도를 나타냈으며, AC-A 응집제가 상대적으로 가장 낮은 탁도를 보였다. 이러한 현상은 천연 무기응집제의 미세입자들이 30분 안에 충분히 가라앉지 못했기 때문으로 사료되며, 이것은 처리수 상등수의 입자분포로 설명될 수 있다. 입자분포 측정결과 PACI이 주입되고 응집·침전 10분 후 상등수는 100 μm 이하 입자가 차지하는 비율이 38%로 나타난 반면, AC-A가 주입되고 응집·침전 10분 후 상등수는 65%로 다른 응집제(clay, AC-B, AC-C)의 70-75%에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 상대적으로는 AC-A의 탁도가 가장 낮게 나타나기는 하였으나, 황토를 비롯한 천연 무기응집제는 탁도가 높아져 문제가 될 수도 있을 것으로 사료된다.

침전시간에 따른 탁도의 영향은 AC-A와 AC-B의 경우 침전시간에 따른 차이가 미미한 반면, AC-C는 침전시간이 10분에서 30분으로 길어지면서 탁도가 50% 감소하였다. 이러한 현상은 조류밀도 제거율에서도 비슷한 경향을 보였다(Fig. 1). 즉 AC-C는 침전시간이 길어짐에 따라 탁도와 조류밀도 모두 제거율이 증가하였으나, 효율적인 조류 및 탁도의 제거가 이루어지기 위해서는 최소한 30분 이상의 침전시간이 필요한 것으로 판단된다.

일반적으로 무기응집제를 주입하면 용존유기물도 제거되는데, PACI의 경우 응집제 주입량을 증가시키기에 따라 용존유기물의 제거율도 높아졌다(Fig. 3). UVA_{254} 값 변화를 통해 살펴본 유기물 제거효율은 응집제 주입량 50 mg/L에서 최대 제거율(60%)을 나타낸 이후로 다시 제거율이 감소하였다. 이는 앞서 조류밀도 제거율 부분에서 설명한 바와 같이 최적 주입량을 초과하여 주입한 경우 재안정화가 일어나기 때문이다. 황토를 비롯한 대부분의 천연 무기응집제는 UVA_{254}

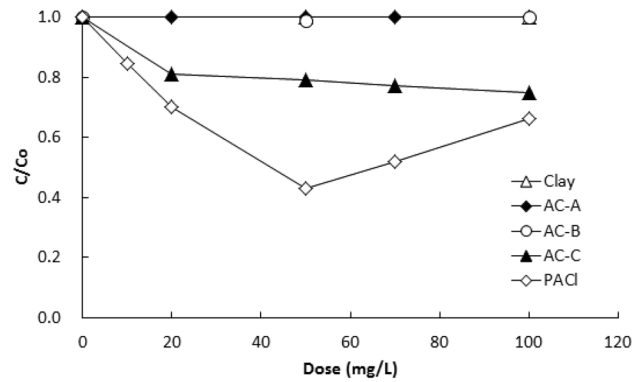


Fig. 3. UVA_{254} variations of jar tested waters with various coagulants ($C_o = 0.077 \text{ cm}^{-1}$, sedimentation time = 30 min).

값의 변화가 없어 유기물 제거에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났지만, AC-C의 경우에는 응집제 주입량을 증가시킬수록 5-30%의 유기물 제거율을 나타내었다.

천연 무기응집제 주입에 따른 pH 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 모든 천연 응집제의 경우 응집제 주입량이 많을 경우 pH가 다소 낮아지기는 했으나 pH 7.5 이상을 유지(원수 pH 7.8)하였다. PACI의 경우 응집제 주입량을 증가시키기에 따라 pH가 낮아져 50 mg/L 주입시 pH 6.0으로 낮아지고, 응집제 100 mg/L 주입시 pH 4.6까지 낮아졌다. 조류밀도, 탁도, pH 등 이상의 수질인자 및 제거특성을 종합적으로 고려할 때, 천연 무기응집제 중 AC-A가 가장 적합한 것으로 판단된다.

3.2. 조류밀도에 따른 조류제거율 변화

응집제별 조류제거 특성실험에서 가장 적합한 무기 응집제로 판단된 AC-A와 황토를 이용하여 조류밀도가 조류제거효율에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 4는 조류밀도가 다른 시료를 대상으로 황토와 AC-A 주입량에 따른 조류밀도 변화(C/C_o)를 나타낸 결과이다. 원수의 조류밀도가 높을수록 동일한 제거효율을 얻기 위한 응집제 주입량이 증가하는 경향을 보였으나, 선형적인 상관관계는 찾을 수 없었다.

조류밀도가 7,000 cells/L인 원수의 경우, 70%의 조류를 제거하기 위해 황토는 200 mg/L를 주입한 반면, AC-A는 20 mg/L를 주입하였다. 조류밀도 45,000 cells/mL인 원수는 황토 500 mg/L 주입시 46%의 조류제거율을 나타냈으나, AC-A는 50 mg/L 주입으로 유사한 조류제거율(44%)을 획득할 수 있었다. AC-A의 단가가 황토에 비해 약 4배 비싼 것을 고려하더라도 경제성면에서 AC-A가 유리한 것으로 나타났다. 조류밀도 100,000 cells/mL 이상의 원수에서는 황토(clay)와 AC-A의 주입량 차가 다소 감소하였으나, 동일한 조류제거율을 얻기 위해서는 AC-A에 비해 3~4배 많은 양의 황토를 주입해야만 했다.

AC-A는 조류제거 뿐 아니라 탁도 감소에도 황토에 비하여 높은 효과를 나타냈다. 황토의 경우 20 mg/L 이하의 저농도에서는 탁도가 감소하였으나 100 mg/L 이상 주입한 경우에는 모든 시료에서 탁도가 원수보다 높게 나타났다. 반

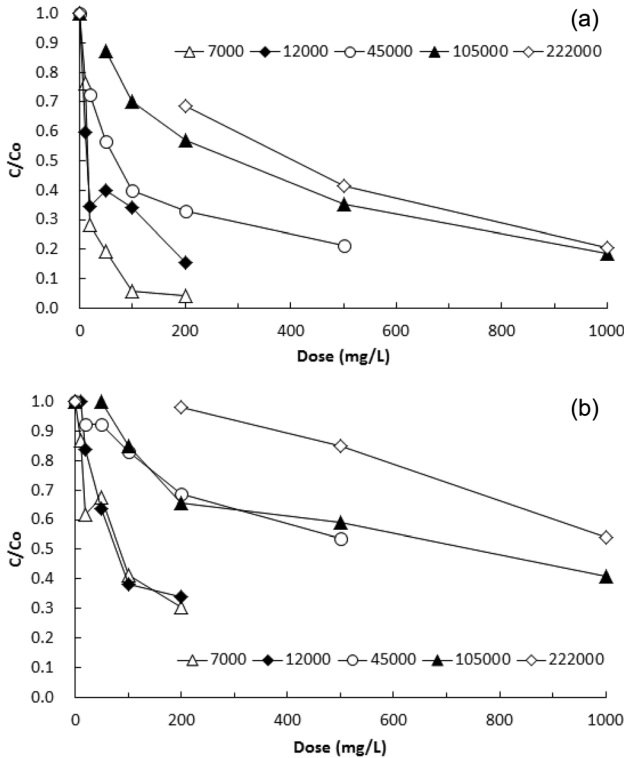


Fig. 4. Algal density variations of jar tested waters with (a) clay and (b) AC-A at various algal densities.

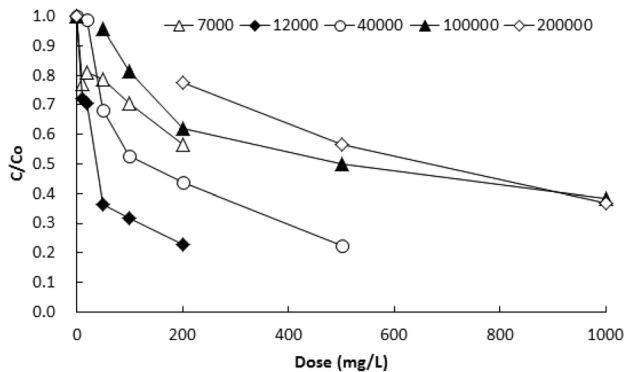


Fig. 5. Turbidity variations of jar tested waters with AC-A at various algal densities.

면, AC-A는 조류밀도에 관계없이 주입량을 증가시킬수록 탁도가 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 5).

황토와 AC-A 모두 조류밀도 및 주입량에 관계없이 유기물(UVA₂₅₄) 제거는 5% 이하로 유기물은 거의 제거되지 않았다. 다만, 인산염의 경우 황토와 AC-A 모두 주입량이 증가함에 따라 제거율이 높아져 최대 70%까지 제거되었다. 이것은 광물에 결합되어 있던 산소(O)가 해리되며 K²⁺, Mg²⁺ 등 양이온화 된 성분이 무기염류와 화학적 결합을 이루었기 때문으로 사료된다.¹⁸⁾ 조류제거에 중점을 둔 본 실험의 내용에는 포함되지 않았으나, 이렇게 침전된 플러크로 형성된 퇴적층에서 인이 수중으로 다시 녹아 들어갈 수 있으므로 무기 응집제 활용 시 인의 재용출에 대한 추가 실험이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

조류 발생이 문제시 되는 정체수역이나 호소에서 현장적용에 적합한 응집제를 선정하고 응집제별 적정 주입농도를 찾기 위하여 황토와 토양기반 개량 무기응집제를 대상으로 응집·침전실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에 사용된 개량 천연 무기응집제(AC-A, AC-B, AC-C)는 황토보다 적은 양으로 높은 조류제거율을 달성할 수 있었다. 조류 제거와 탁도, pH 등의 수질인자 특성을 종합적으로 고려할 때 본 연구에서 고려된 천연 무기응집제 중 AC-A가 가장 적합하였다.

2) AC-A를 제외한 다른 천연 무기응집제(황토, AC-B, AC-C)를 활용할 경우 응집제 주입량이 증가함에 따라 처리수의 탁도가 높아져 문제가 될 수도 있을 것으로 사료된다. 입도분포 분석결과를 근거로 볼 때, 처리수의 탁도 증가는 무기응집제로 처리한 물에 반응하지 못하고 잔류하는 부유성 미세입자에 의한 것으로 판단된다.

3) 남조류가 주종인 원수의 조류밀도가 높을수록 같은 제거효율을 얻기 위한 응집제 주입량이 증가하는 경향을 나타냈으나 선형적인 상관관계는 찾을 수 없었다.

4) 황토를 비롯한 대부분의 천연 무기응집제는 원수의 유기물 제거 및 pH 변화에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 인산염의 경우 황토와 AC-A 모두 주입량이 증가함에 따라 제거율이 높아져 최대 70%까지 제거되었다.

5) 조류제거에 중점을 둔 본 연구의 내용에는 포함되지 않았으나, 침전된 플러크로 형성된 퇴적층에서 인의 재용출 등 2차 오염이 발생하는 것에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

KSEE

참고문헌

1. National Institute of Environmental Research, Watershed Ecology Research Team, "Long-term roadmap for algae related R&D," (2012).
2. Watanabe, M., K-I. and Harada, H. H., "Waterblooms-its appearance and toxins," Uni. of Tokyo Press (1984).
3. Okino, T., "Studies on the blooming of *Microcystis aeruginosa*," *Jap. J. Bot.*, **20**, 381~402(1973).
4. Song, J. J. "Removal of red/green tide and diatoms by titania photocatalyst," Master's Thesis, Sunmoon University (2008).
5. National Institute of Environmental Research, "Enforcement plan for algae forecast system," (2008).
6. Wnorowski, A. U., "Tastes and odors in the aquatic environment-a review," *Water SA*, **18**(3), 203~214(1992).
7. Haddix, P. L., Hughley, C. J. and Lechevallier M. W., "Occurrence of microcystins in 33 US water supplies," *J. AWWA*, **99**(9), 118~125(2007).

8. Plummer, J. D. and Edzwald, J. K., "Effect of ozone on disinfection by-product formation of algae," *Water Sci. Technol.*, **37**(2), 49~55(1998).
9. Shirota, A., "Red tide problem and countermeasures," *Int. J. Aquac. Fish. Technol.*, **1**, 195~223(1989).
10. Choi, H. G., Kim, P. J., Lee, W. C., Yun, S. J., Kim, H. G. and Lee, H. J., "Removal efficiency of cochlodinium polykrikoides by yellow loess," *J. Kor. Fish. Soc.*, **31**(1), 109~113(1998).
11. Sengco, M. R. and Anderson, D. M., "Controlling harmful algal blooms through clay flocculation." *J. Eukaryot. Microbiol.*, **51**(2), 169~172(2004).
12. Huang, W., Wang, S., Zhu, Z., Li, L., Yao, X., Rudolph, V. and Haghseresht, F., "Phosphate removal from wastewater using red mud," *J. Hazard. Mater.*, **158**(1), 35~42(2008).
13. Yim, S., Kim, J. and Song, H., "Removal characteristics of Cd and Pb by adsorption on red mud," *J. Kor. Geo-Environ. Soc.*, **12**(7), 39~47(2011).
14. Ministry of Environment, "Guideline for Installation and Operation of Algae Removal Facilities and Equipments," (2012).
15. Ministry of Environment, "Korean Standard Methods for Water Quality," (2011).
16. Stace, E. B., Mario, R. S. and Donald, M. A., "Using clay to control harmful algal blooms: deposition and resuspension of clay/algal flocs," *Harmful Algae*, **4**, 123~138(2005).
17. Letterman, R. D., Amirtharajah, A. and O'Melia, C. R., "Coagulation and flocculation," *Water Quality and Treatment*, McGraw Hill, New York, pp. 6.1~6.66(1999).
18. Jackson, G. A. and Lochmann, S., "Modeling coagulation of algae in marine ecosystems." In: Buffle, J., Leeuwen, H. P. (Eds.), *Environmental Particles. Environmental, Analytical, and Physical Chemistry*. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 387~414(1993).