



천연조류제거제를 활용한 응집·부상 전처리공정의 기존 응집공정 대체 가능성

Substitutability of coagulation process by pre-treatment of coagulation·flotation using natural algae coagulant

장여주¹·정진홍²·임현만²·장향연³·김원재^{2*}

Yeo-Ju Jang¹·Jin-Hong Jung²·Hyun-Man Lim²·Hyang-Youn Chang³·Weon-Jae Kim^{2*}

¹에덴녹화산업(주), ²한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소, ³과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과

¹E.D.R Landscaping Industry Co., LTD.,

²Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,

³University of Science & Technology

ABSTRACT

In the coagulation/sedimentation (C/S) process of the water treatment process, the inflow of massive algal bloom causes many problems including fouling of filter media. This study was conducted to find out the way to remove the algae's harmful effects by addition of pre-treatment prior to C/S process. Many Jar-tests were conducted such as ① ACF (Algae Coagulation-Flotation) process using natural algae coagulant (Water Health[®]), ② ACF + C/S process and ③ C/S process with a variety of conditions using cultured algae. The average values of turbidity were ① 0.42 NTU for ACF process, ② 0.13 NTU for ACF + C/S process and ③ 0.25 NTU for C/S process. It was shown that the treatment efficiency of ACF process could get low turbidity results, and ACF + C/S process could achieve more efficient results than those of C/S process. Any negative effects of ACF process to the efficiency of C/S process were not observed in ACF + C/S process. In order to reduce the unfavorable effects of algae, it was found out that the introduction of ACF process in the forms of ① ACF or ② ACF + C/S could be one of the effective and alternative solutions.

Key words: ACF (Algae Coagulation-Flotation) process, Algae removal, Coagulation/Sedimentation process, Natural algae coagulant

주제어: ACF 공정, 조류 제거, 응집/침전 공정, 천연조류제거제

1. 서 론

일반적으로 정수처리공정은 크게 응집, 침전, 여과 및 소독의 4단계로 이루어진다. 이 과정에서 조류의 과다 유입은 응집불량을 초래하여 여과지의 조기 막힘 현상을 일으키기도 하고, 조류독소(microcystin 및 anatoxin) 방출, 맛·냄새(Geosmin, 2-Methylisoborneol (2-MIB))

및 THM (Trihalomethane) 생성 등 여러 문제를 유발한다. 따라서 응집공정에서의 적절한 조류 제거는 정수처리공정의 운영에 필수적임과 동시에, 이 공정은 과량의 약품과 에너지를 사용하는 많은 비용이 발생하는 공정이기 때문에 응집제 투입량을 최적화하는 것도 또한 매우 중요하다.^(1,2,3)

응집이란 약품을 투입하여 수중에 존재하는 작은 콜로이드 상의 물질을 서로 뭉치게 하여 크기를 증가시켜 후속의 침전·부상이나 여과공정에서 제거하도록

Received 2 December 2016, revised 24 January 2017, accepted 2 February 2017

*Corresponding author: Weon-Jae Kim (E-mail: wjkim1@kict.re.kr)

pp. 001-006
pp. 007-012
pp. 013-019
pp. 021-028
pp. 029-037
pp. 039-050
pp. 051-062
pp. 063-072
pp. 073-081
pp. 083-091
pp. 093-101
pp. 103-114

하는 공정이며, 혼화공정과 플록형성공정으로 나뉘어져 있다.^(4,5) 사용되는 응집제로는 알루미늄과 철염 등의 금속성 응집제와 폴리염화알루미늄(Polyaluminum chloride, $[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$, 이하 PAC), 폴리수산화염화 규산알루미늄(Polyaluminum hydroxychlorosilicate, $[Al_2(OH)_nCl_6SiO_2]_m$, 이하 PACS), 폴리수산화염화황산알루미늄(Polyaluminum hydroxychlorosulfate, $Al_{13}(OH)_{28}Cl_9SO_4$, 이하 PAHCS) 등 고분자 응집제가 있다. PAC나 PACS는 일정농도 이상에서는 전위반전이 일어나 침전수의 탁도가 급격히 다시 증가하는 경향이 있으나 PAHCS의 경우에는 이 두 응집제와는 달리 주입농도를 증가시켜도 탁도 저감의 효율성 면에서 크게 차이를 나타내지 않기 때문에 원수의 수질이나 유량이 급변하는 경우 사용하기에 용이한 것으로 보고되었다. 또한 pH와 알칼리도의 저감 정도 또한 PAC나 PACS보다 적어 우기 시 고탁도 원수가 유입될 경우 주입량을 증가시키더라도 pH가 급격히 떨어지지 않기 때문에 수질사고의 발생 위험을 최소화시킬 수 있는 장점이 있다.⁽⁶⁾

본 연구에 앞선 선행 연구에서, M사에서 제조하여 이미 상용화된 천연조류제거제(Water Health®, 이하 W.H.)를 이용한 ACF (Algae Coagulation·Flotation, 이하 ACF) 공정의 주요 기작을 설명하고, 유입 원수의 수질 변화에 대응하여 최적의 W.H.주입량을 결정하는 식을 제시한 바 있다. ACF 공정이란 참나무 유래의 살조물질 등을 포함하는 천연조류제거제인 W.H.를 기존 정수처리공정의 전 단계에 주입함으로써 조류를 응집·부상시켜 사전에 제거하는 공정으로, 후속의 정수처리공정에 미치는 조류의 영향을 효과적으로 저감할 수 있도록 개발되었다. W.H.를 이용한 ACF 공정은 광(光)이 조사되고 있는 조건에서 ① W.H. 주입, ② 광물질성분에 의한 미세조류 응집, ③ 응집된 미세조류 플럭의 침전, ④ 타감작용에 의한 침전된 미세조류의 광합성 활성화, ⑤ 미세조류 플럭 내·외부의 미세기포 생성 및 성장, ⑥ 미세기포의 성장에 따른 부력 상승 및 플럭 부상의 단계를 거쳐서 진행된다. 선행 연구에서 제안된 식은 W.H. 주입량을 유입 원수의 클로로필 a (이하 Chl-a) 및 탁도로부터 용이하게 결정하도록 함으로써 실제 정수처리시설에 대한 적용성을 갖도록 하였다.⁽⁷⁾

그러나 현재까지 전 세계에서 정수처리공정에 W.H.를 활용한 전처리공정이 적용된 사례가 없기 때문에, ACF 공정이 기존 정수처리공정에 미치는 영향에 대한

검토 또한 충실하게 이루어진 바가 없고 이와 관련된 연구보고 또한 전무한 실정이다. 따라서 이에 대한 실험적 기초연구와 더불어 현장 적용성 확보를 위한 실용화 기반연구를 수행하였다. 본 연구에서는 W.H.를 이용하여 조류를 제거하는 ① ACF 단독공정과 ② ACF + 응집/침전(Coagulation/Sedimentation, 이하 C/S) 연계공정의 운전성을 분석하고, 이를 ③ 기존 C/S 단독공정과 비교하였다. 또한 ACF 공정이 후속의 C/S 공정에 미치는 영향에 대하여 상세히 모니터링하였다. 이상의 결과를 바탕으로 조류의 영향을 저감하기 위하여 ACF 공정을 단독 또는 ACF + C/S 연계공정의 형태로 기존 정수처리공정의 전처리공정으로 적용하는 방안의 타당성을 검토하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1 조류의 배양

조류의 배양조건은 선행 연구의 내용을 참조하였다. 실험에 사용된 조류 원시료는 한강물환경연구소에서 남조류 2종(*Microcystis aeruginosa* (이하 *Microcystis*), *Anabaena circinalis* (이하 *Anabaena*))을 분양받은 후 계대배양하여 사용하였으며, 배양수로는 지하수(한국건설기술연구원 내 채수), 일차증류수 및 2일 이상 정치시킨 수돗물을 단독 또는 혼합하여 사용하였다.⁽⁷⁾

Jar-test에는 두 종의 조류 원시료를 각각 과량으로 증식시켜 사용하였다. 계대배양 시에는 진탕배양기(Shaking incubator)에서 배양온도 25℃, 진탕조건 40 rpm으로 배양하였으며, 배양용기로는 300 mL 삼각플라스크를 이용하였다. Jar-test 실험원수 확보를 위한 대량배양 시에는 별도의 유리 배양조를 제조하여 수온 25℃, 무진탕 조건에서 배양하였다. 계대배양은 남조류의 지속적인 배양을 위해 활용하였으며, Jar-test를 위한 대량배양 시에는 계대배양된 조류를 배양수에 접종한 후 정체수역의 현장 여건을 반영하여 무진탕 조건으로 하였다. 유리 배양조는 20 L 및 40 L 규격의 2종을 이용하였다. 특히 하절기동안 배양조 주위의 강제 공기순환을 유도하여 수온이 25℃ 이상의 고온으로 상승하지 않도록 제어하였다.

배양액은 다음의 2종을 사용하였다. 계대배양 시에는 Cyanobacteria BG-11 Freshwater Solution(50x)(C3061-500ML, Sigma)을 20 mL/L 비율로 희석하여 사용하였고, 대량



배양 시에는 CB배지(100x)(직접 제조)를 10 mL/L 비율로 희석하여 사용하였다.⁽⁸⁾

2.2 실험방법

실험에 사용된 천연조류제거제는 W.H. 원액을 100배 희석한 10,000 mg/L stock을 제조하여 사용하였다. Kaolin (SANCHUN Co., LTD.)은 오븐에서 24시간 이상 건조시킨 후 10,000 mg/L stock을 제조하여 사용하였다. 응집제로는 PAHCS (Al(OH)₃ 기준 10.5%)와 PAC (Al(OH)₃ 기준 17%)를 사용하였으며, 각각의 원액을 100배 희석한 10,000 mg/L stock을 제조하여 사용하였다.

Jar-test를 위한 실험원수의 제조 시에는 배양된 조류를 목적 농도에 맞게 조정된 후, Kaolin stock을 사용하여 목적 탁도에 부합하도록 추가로 조절하였다. 희석수는 한강 상수원수의 일반적인 알칼리도 범위인 60~70 mg/L (as CaCO₃)의 값을 갖도록 하기 위하여, 증류수와 지하수를 5:5 비율로 섞어서 조제하였다.

실험원수는 동일한 성상을 갖도록 20 L 이상 대량으로 제조한 후, ① ACF 단독공정, ② ACF + C/S 연계공정 및 ③ C/S 단독공정으로 구분하여 각 조건에 맞는 Jar-test를 실시하였다. ① ACF 단독공정에서는

W.H.를 주입하여 조류를 응집/부상시키는 1차 Jar-test만을 실시하였다. ② ACF + C/S 연계공정에서는 1차 Jar-test 처리수의 탁도를 분석한 후, 해당 탁도에 부합하는 응집제를 추가로 주입한 이후 2차 Jar-test를 연속하여 실시하였다. ③ C/S 단독공정에서는 원수의 탁도에 대응하여 응집제를 주입하는 기존의 일반적인 Jar-test를 실시하였다. ACF 공정의 Jar-test에서는 W.H. 주입 후 응집·부상 단계에서 10000 Lux 이상의 조도를 유지하였다. C/S 공정의 Jar-test 방법은 상수도시설 기준(2010)을 따랐다.⁽⁹⁾

Jar-test의 전체 흐름도는 아래의 Fig. 1과 같다. Jar-test는 chl-a 및 탁도를 목적 농도에 부합하도록 조절하는 과정을 거친 후, ① ACF 단독공정, ② ACF + C/S 연계공정 및 ③ C/S 단독공정으로 나누어 진행하였으며, 배양된 조류와 Kaolin이 잘 섞이도록 초기 5분간 80 rpm으로 사전 교반을 실시하였다.

ACF 공정은 천연조류제거제인 W.H.를 주입하여 조류 등을 응집, 침전시킨 후 빛을 조사하여 응집된 플러를 부상시켜 제거하는 공정이다. W.H.는 참나무의 잎과 줄기에서 추출한 살조물질이 포함된 응집제로서, 응집기능과 더불어 타감작용을 유도함으로써 광합성 반응을 촉진한다. 따라서 수중의 미세 부유조류를

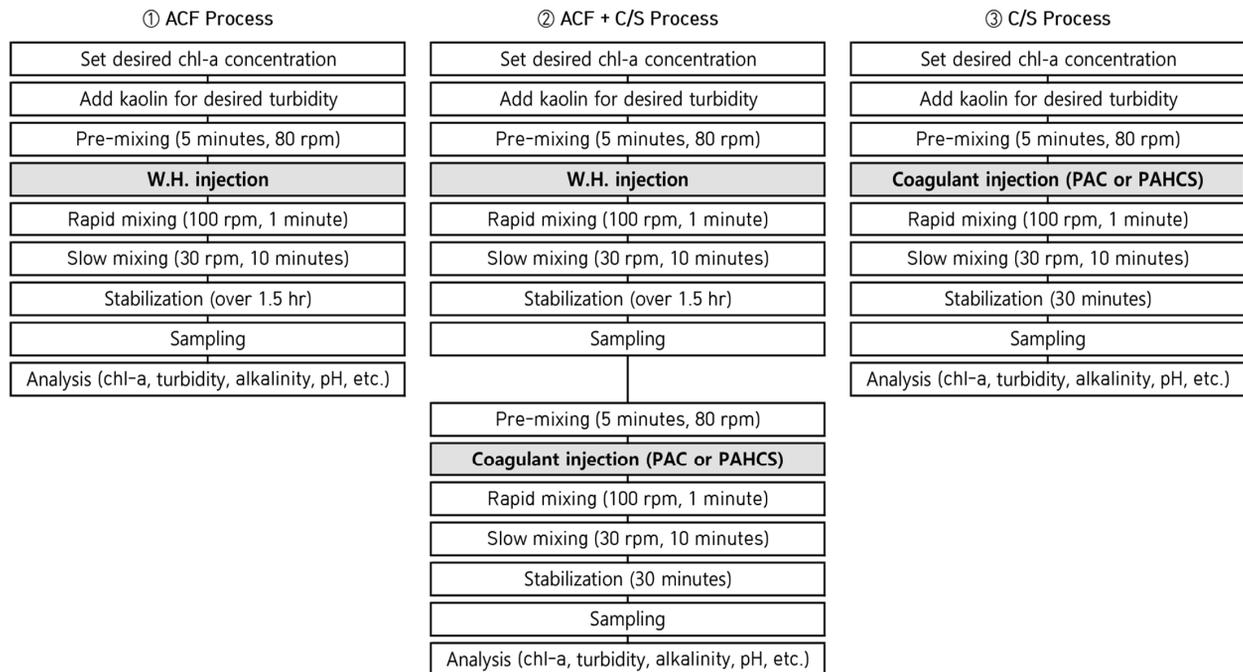


Fig. 1. Procedure of jar-test.

pp. 001-006
pp. 007-012
pp. 013-019
pp. 021-028
pp. 029-037
pp. 039-050
pp. 051-062
pp. 063-072
pp. 073-081
pp. 083-091
pp. 093-101
pp. 103-114

응집시킨 후 별도의 추가공정 없이 자력으로 부상시켜 제거할 수 있다. 해당 응집제는 국립환경과학원의 수처리제 자가기준 및 자가규격으로 인증되어 수많은 현장에 적용된 바 있다.

ACF 단독공정에서는 사전 교반 이후에 W.H.를 주입하였으며, 이때의 주입량은 선행 연구의 결과에 따라 Chl-a와 탁도를 동시에 고려하는 $[Y = 0.479 X_1 + 1.250 X_2 + 1.546]$ 의 식에 따라 산정하였다(Y: 최적 W.H. 주입농도(mg/L), X_1 : Chl-a의 농도($\mu\text{g/L}$), X_2 : 탁도(NTU)). 그 후 1분간 100 rpm으로 급속교반 한 뒤, 10분간 30 rpm으로 완속교반을 진행하였다. 교반 완료 후 10000 Lux 이상의 광조건 하에서 1.5시간 이상 정치시킨 다음 부상 및 침전된 플러를 제외한 상등액을 처리수로 채수하였다. 채수된 처리수에 대하여 Chl-a, 탁도, 알칼리도 및 pH 등을 분석하였다.

ACF + C/S 연계공정의 경우, ACF 단독공정을 거친 Jar-test 처리수를 대상으로 아래와 같은 절차의 C/S 공정의 Jar-test를 추가로 수행하였다.

C/S 단독공정의 경우, 각 Jar에 조류 배양액을 1 L 씩 넣어 Jar-test를 수행하였다. 각 Jar별로 응집제 주입 농도를 변화시켰으며, 이때의 주입농도는 선행 기초 실험을 통하여 이미 확립되어 있는 절차에 따라 탁도를 기준으로 최적주입농도를 우선 산정한 이후, 이 농도를 중심으로 상하 각각 일정 비율로 가감하여 주입하였다. 응집제 주입 이후 1분간 100 rpm으로 급속교반 한 다음, 10분간 30 rpm으로 완속교반 하였다. 30분간 정치시킨 후 부상 및 침전된 플러를 제외한 상등액을 경사법 등으로 최종 채수하여 처리수로 하고, 해당되는 분석항목(Chl-a, 탁도, 알칼리도 및 pH)을 분석하였다.

Jar-test의 효율을 분석하기 위한 주요 항목으로 Chl-a (Chlorophyll probe, 기술과환경(주)), 탁도(2100N Turbidimeter, HACH), pH 및 수온(HI2210 pH meter, HANNA Instruments), 알칼리도를 분석하였다. 알칼리도는 0.02 N의 황산에 의한 적정법(Easy pH, METTLER TOLEDO)으로 분석하였다(단위: mg/L as CaCO_3).

2.3 한강 원수의 수질 검토

본 연구에서는 Jar-test에서 수도권의 취수원인 한강 원수(팔당댐)의 탁도 및 Chl-a의 범위를 포괄하기 위하여 2013년 1월부터 2015년 12월(최근 3년간)까지 경안천 하류의 팔당호 유입지점인 “팔당댐5” 지점의 부유물질량(Suspended Solids, 이하 SS), 탁도 및 Chl-a의

데이터를 분석하여 백분위수 10%, 50% 및 90%에 해당하는 값을 도출하였다.¹⁰⁾ 원 데이터에서는 탁도에 대한 측정이 이루어지지 않았으나 본 연구에서는 Jar-test의 처리효율을 탁도를 기준으로 판단하고 있기 때문에, 해당 데이터의 SS (mg/L) 농도를 Foster (1992)의 논문에서 제시하고 있는 SS와 탁도의 선형 비례관계를 활용하여 탁도(NTU)로 변환하여 사용하였다.¹¹⁾ 3년 동안의 데이터를 분석한 기술통계량으로서, 각 백분위수 및 주요 대표값을 Table 1에 정리하였다. SS는 1.3~19.0 mg/L, 탁도는 3.4~26.5 NTU 및 Chl-a는 10.1~86.4 $\mu\text{g/L}$ 범위의 값을 갖는 것으로 나타났다. 탁도 및 Chl-a에 대한 누적분포 그래프는 Fig. 2와 같다. 탁도 및 Chl-a 모두 유사하게 누적확률 90%에 해당하는 지점(각각 약 17 NTU 및 40 $\mu\text{g/L}$)까지 선형적으로 증가하다가 그 이상의 농도에 해당하는 데이터들이 양의 방향으로 긴 꼬리 형태를 갖는 전형적인 특징을 나타내었다.

Table 1. Descriptive statistics of SS, turbidity and Chl-a for Han river (Site: Paldang-Dam 5) (n=91)

Accumulative Percentage	SS (mg/L)	Turbidity* (NTU)	Chl-a ($\mu\text{g/L}$)
5%	1.9	4.2	11.1
10%	2.9	5.5	11.7
25%	4.5	7.6	14.1
50%	6.8	10.6	20.2
75%	9.6	14.2	29.8
90%	11.3	16.4	39.9
95%	14.0	20.0	55.5
Minimum	1.3	3.4	10.1
Maximum	19.0	26.5	86.4
Average	7.21	11.13	24.60
Median	6.80	10.59	20.20
Standard deviation	3.73	6.60	15.27

*Turbidity (NTU) = 1.3×SS (mg/L) + 1.75

이상의 논의를 바탕으로 본 연구에서는 Chl-a 및 탁도의 전 구간을 대표하는 세 지점(백분위수 10%, 50% 및 90%)을 대상으로 Jar-test를 진행하였다. 실험조건 I 은 Chl-a 11.7 $\mu\text{g/L}$ 및 탁도 5.5 NTU (백분위수 10% 해당), 실험조건II는 Chl-a 20.2 $\mu\text{g/L}$ 및 탁도 10.6 NTU (Median 해당), 그리고 실험조건III은 Chl-a 39.9 $\mu\text{g/L}$ 및 16.4 NTU (백분위수 90% 해당)에 근사하도록 실험원수의 조건을 설정하였다.

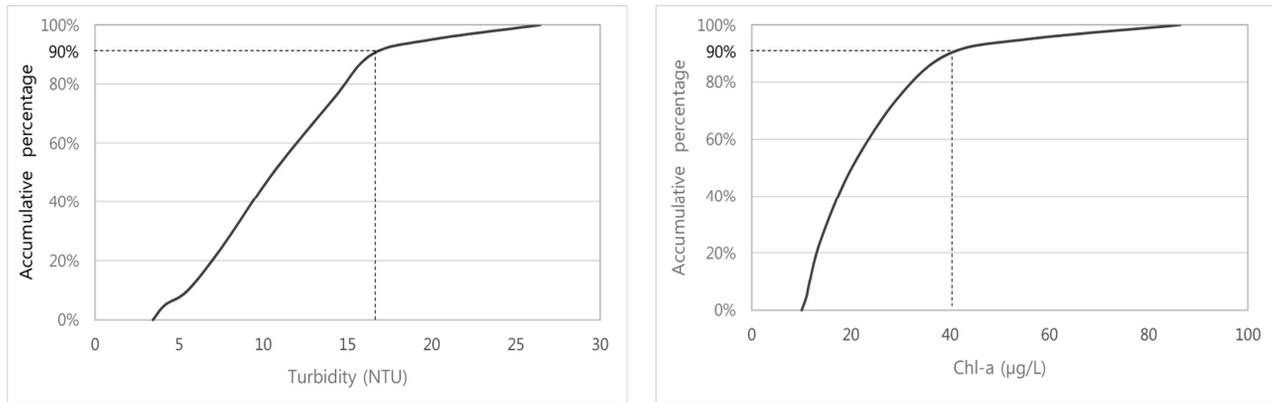


Fig. 2. Accumulative graphs of each parameter at Paldang-Dam 5 site of Han river (Left: Turbidity, Right: Chl-a).

Table 2. Turbidity of sedimentation basins in Korea(Unit: NTU)

	Plant						Total
	Gumi	Asan	Siheung	Onsan	Cheongju	Gunsan	
Minimum	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
Maximum	2.2	1.1	1.2	1.4	1.6	4.3	4.3
Average	0.44	0.64	0.50	0.53	0.44	0.81	0.57
Median	0.37	0.63	0.48	0.52	0.42	0.66	0.51
Standard deviation	0.27	0.14	0.11	0.16	0.18	0.47	0.29

2.4 국내 정수처리시설 침전지 유출수 탁도 검토

우리나라에서는 정수처리시설의 탁도에 대해서 급속여과·직접여과 및 막여과 시설의 경우 매월 측정된 시료수의 95% 이상이 0.3 NTU 이하이고, 각각의 시료에 대한 측정값이 1.0 NTU 이하일 것을 기준으로 하고 있다. 또한, 완속여과 시설의 경우 매월 측정된 시료수의 95% 이상이 0.5 NTU 이하이고, 각각의 시료에 대한 측정값이 1.0 NTU 이하일 것을 기준으로 하고 있다.⁽¹²⁾ 침전수에 대한 탁도 기준은 없으며, 다만 상수도시설 유지관리매뉴얼에서 보통침전지의 경우 침전수의 탁도를 10 NTU 이하가 되도록 항상 원수 및 침전수를 감시할 것을 권고하고 있다.⁽¹³⁾

한편, 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하고 있는 정수처리시설 침전수의 탁도에 대한 1년간 (2013년 1월 1일-12월 31일)의 수질 데이터를 참조한 결과, 총 6곳의 정수장의 침전수 탁도는 Table 2와 같았다.⁽¹⁴⁾ 0.10~4.30 NTU의 범위에 해당하였으며, 전체의 평균은 0.57 NTU로 나타났다.

이상의 국내 정수처리시설의 탁도 기준 및 침전수 탁도에 대한 실증적 검토를 바탕으로, 본 연구에서는

① ACF 단독공정만으로도 침전수의 탁도를 0.57 NTU 이하로 저감시킬 수 있는지에 대한 가능성과, ② ACF + C/S 연계공정 처리 시 기존의 C/S 단독공정보다 더 양호한 수준으로 탁도를 개선할 수 있는지 여부를 검증하려 하였다.

2.5 Jar-test를 위한 기초실험

본 실험에 들어가기에 앞서 선행 기초실험을 진행하였다. 먼저, 목적으로 하는 실험원수의 탁도를 얻기 위해서 탁도와 Kaolin 주입농도 사이의 상관관계를 확인하였다. Kaolin stock을 이용하여 100, 50, 25, 12.5 및 6.25 mg/L로 각각 희석한 후 각 희석배율에 따른 탁도를 측정하여 Kaolin 주입농도와 탁도 사이의 선형식이 $\text{탁도(NTU)} = 1.61 \times \text{Kaolin(mg/L)} + 2.14$ 의 상관관계를 갖고있음을 확인하였다($R^2=0.994$). 본 실험에서는 이 관계식을 이용하여 목적으로 하는 탁도를 얻기 위한 Kaolin 주입량을 결정하였다.

또한, 응집제인 PAHCS 및 PAC의 최적주입농도를 확인하기 위한 Jar-test를 실시하였다. Kaolin stock을 이용하여 목표로 하는 탁도로 조제한 후 Jar-test를 실

- pp. 001-006
- pp. 007-012
- pp. 013-019
- pp. 021-028
- pp. 029-037
- pp. 039-050
- pp. 051-062
- pp. 063-072
- pp. 073-081
- pp. 083-091
- pp. 093-101
- pp. 103-114

시하여 해당 탁도에 맞는 최적주입농도를 우선 도출하였다. 본 실험의 C/S 공정에 대한 Jar-test에서는 도출된 최적주입농도를 중간값(100%)으로 두고, 70%, 85%, 115% 및 130%에 해당하는 주입조건을 추가하여 70-130%로 확장된 구간에 대한 실험을 실시하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 Jar-test를 통한 ACF 공정의 효과 분석

실험은 총 1번 실험(Set No. 1)부터 4번 실험(Set No. 4)까지 4 세트의 Jar-test를 실시하였으며 각 실험의 구성 및 조건은 Table 3과 같다. 1번 실험의 경우 앞서 고찰한 한강 원수의 수질 검토 사항에서 설정된 실험조건 I (Chl-a 11.7 µg/L, 탁도 5.5 NTU)의 조건에 근사하도록 Chl-a와 탁도를 설정한 후, ① ACF 공정, ② ACF + C/S 및 ③ C/S 공정을 구분하여 Jar-test를 실행하였다. 2번 실험부터 4번 실험까지의 실험 또한 해당되는 실험조건에 Chl-a와 탁도를 맞추는 후 세 공정을 구분하여 Jar-test를 실행하였다.

각 실험에서 응집제는 ACF 공정단계에서는 W.H.를 사용하였으며, C/S 공정단계에서는 PAHCS와 PAC의 두 종을 사용하였다. 1번, 2번 및 3번 실험에서는 PAHCS를, 4번 실험에서는 PAC를 사용하였다.

예시로서, 4번 실험(Chl-a 75.0 µg/L, 탁도 15.1 NTU)의 결과를 그래프로 도시하면 Fig. 3과 같다. 각 그래프에는 (a) ACF 공정, (b) ACF + C/S 공정 및 (c) C/S 공정 후의 결과를 나타내었다. 해당 내용을 정리하면, Chl-a의 경우 ACF 공정, ACF + C/S 공정 및 C/S 공정에서 모두 높은 효율로 제거되었다. 탁도의 경우 ACF 공정에서는 15.1 NTU에서 0.30 NTU로 감소하는 결과를 보였고, ACF + C/S 공정에서는 0.14 NTU까지,

C/S 공정에서는 최대 0.30 NTU까지 감소하였다. 탁도 제거에 있어 가장 우수한 공정은 ACF + C/S 공정으로 나타났으며, ACF 공정과 C/S 공정은 비슷한 제거 효율을 나타내었다.

전체 4 세트의 실험결과를 정리하면 Table 4와 같다.

1번 실험(Set No. 1)을 살펴보면, ① ACF 공정에서는 W.H. 14.3 mg/L를 투여하여 실험을 진행하였으며, ② ACF + C/S 연계공정에서는 응집제(PAHCS) 주입농도를 변화시켜 투여(0.0~18.7 mg/L)하며 Jar-test를 시행하였다. ACF + C/S 공정 및 C/S 공정의 경우 응집제 농도를 변화시켜 각각 다른 결과가 도출되었으므로, 그 중 탁도 수치가 가장 낮을 때를 최적(Optimal) 결과로 선택하였다. 해당 실험에서는 응집제 12.5 mg/L를 투여하였을 때, 탁도값이 0.09 NTU까지 저감되어 이 때를 최적조건으로 선정하였다. ③ C/S 공정은 원수조건으로부터 응집제(PAHCS)를 변동시키면서(0.0~25.2 mg/L) Jar-test를 시행하였고, 응집제 23.1 mg/L를 투여하였을 때 탁도가 0.26 NTU로 가장 높은 효율로 처리되어 이 조건을 최적조건으로 선정하였다.

2번(Set No. 2)에서 4번 실험(Set No. 4) 또한 다양한 원수조건으로부터 ① ACF 공정, ② ACF + C/S 공정 및 ③ C/S 공정을 실험하였고, 각 세트의 결과를 정리한 후 탁도가 가장 낮은 Jar-test 결과에 대하여 최적조건으로 선정하여 비고(Remark)에 표시하였다.

1번 실험에서 4번 실험의 최적(Optimal)결과만을 정리한 후 IBM SPSS(ver. 21) 프로그램을 활용한 기술통계분석을 통해 대표값을 산출한 결과는 Table 5와 같다. 각 공정의 결과를 비교해 보면, 탁도의 경우 ① ACF 공정에서 평균 0.42 NTU(분석범위: 0.40~0.45 NTU)까지 처리되었고, ② ACF + C/S 공정에서는 평균 0.13 NTU(분석범위: 0.09~0.15 NTU)까지, ③ C/S 공정에서는 평균 0.25 NTU(분석범위: 0.18~0.30 NTU) 저감되었다.

Table 3. Jar-test conditions

Set No.	Coagulant	Raw water condition		Remarks
1	W.H. and/or PAHCS	Condition I :	Chl-a: 11.0 µg/L Turbidity: 6.0 NTU	① ACF, ② ACF+C/S, ③ C/S using PAHCS or PAC
2		Condition II :	Chl-a: 23.0 µg/L Turbidity: 11.5 NTU	
3		Condition III :	Chl-a: 70.0 µg/L Turbidity: 16.2 NTU	
4	W.H. and/or PAC	Condition III :	Chl-a: 75.0 µg/L Turbidity: 15.1 NTU	

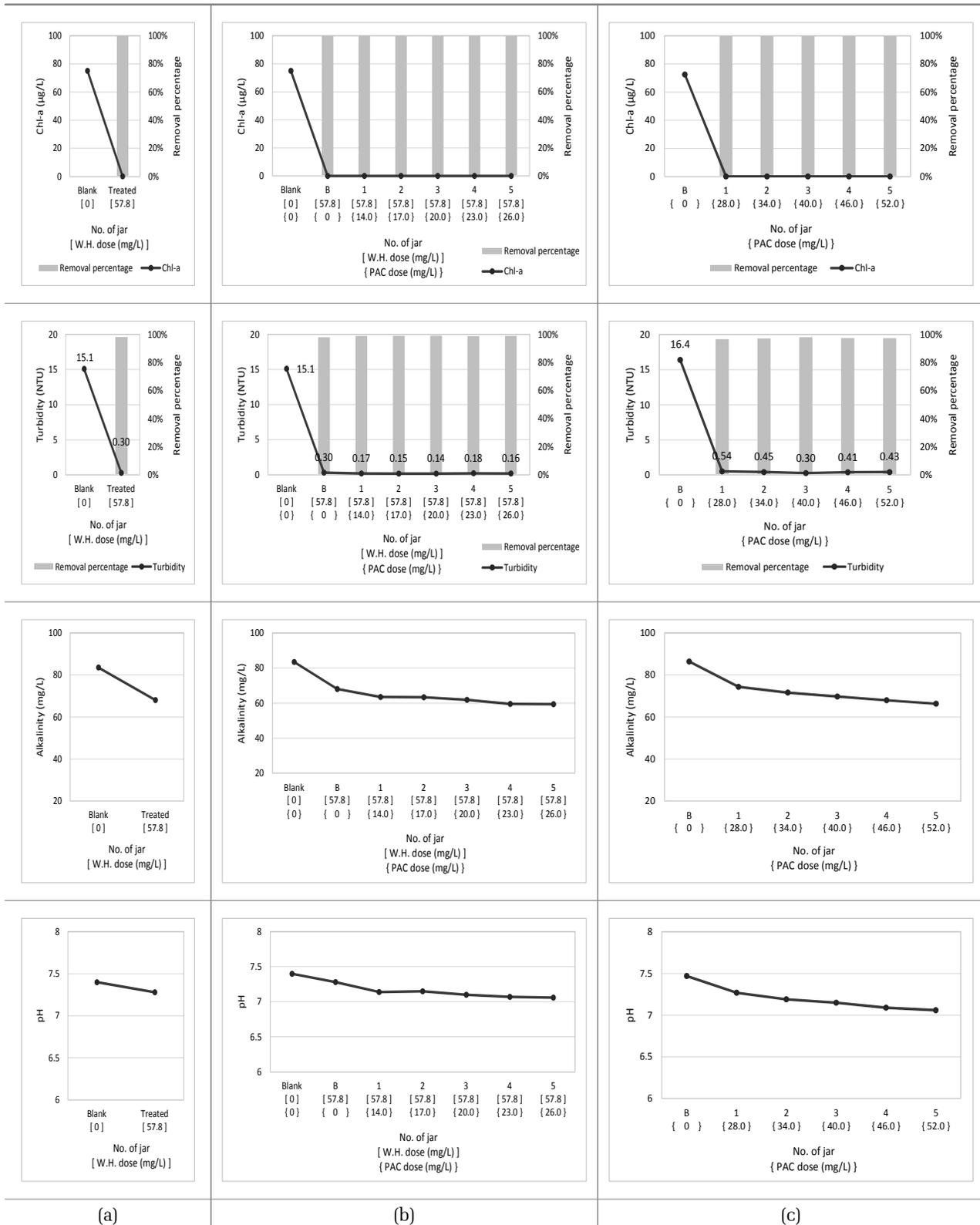


Fig. 3. Jar-test results of set No. 4 (Chl-a: 75.0 µg/L, turbidity: 15.1 NTU): (a) ACF process, (b) ACF + C/S process, (c) C/S process.

pp. 001-006
pp. 007-012
pp. 013-019
pp. 021-028
pp. 029-037
pp. 039-050
pp. 051-062
pp. 063-072
pp. 073-081
pp. 083-091
pp. 093-101
pp. 103-114

Table 4. Results of Jar-tests

Set No.	Raw water condition		Process	Sample	W.H. dose (mg/L)	Coagulant	Coagulant concentration (mg/L)	Chl-a (μg/L)	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/L)	pH	Remarks	
1	Chl-a (μg/L)	11.0	① ACF	Treated water	14.3	-		0.0	0.42	52.8	7.4		
				B									
	Turbidity (NTU)	6.00	② ACF + C/S	1	14.3	PAHCS	0.0	0.0	0.55	56.0	7.4		
				2			12.5	0.0	0.09	50.5	7.4	Optimal	
				3			14.0	0.0	0.09	50.3	7.3		
				4			15.6	0.0	0.18	50.3	7.4		
				5			17.2	0.0	0.18	51.1	7.3		
	Alkalinity (mg/L)	61.0	③ C/S	B	-	PAHCS	0.0	6.2	4.45	55.5	7.2		
				1			16.8	0.0	0.45	54.1	7.2		
				2			18.9	0.0	0.45	53.7	7.2		
				3			21.0	0.0	0.29	54.4	7.2		
				4			23.1	0.0	0.26	54.1	7.2	Optimal	
	pH	7.0	③ C/S	5	-	PAHCS	25.2	0.0	0.34	52.9	7.2		
				1			16.8	0.0	0.45	54.1	7.2		
				2			18.9	0.0	0.45	53.7	7.2		
3				21.0			0.0	0.29	54.4	7.2			
4				23.1			0.0	0.26	54.1	7.2	Optimal		
2	Chl-a (μg/L)	23.0	① ACF	Treated water	26.9	-	-	0.0	0.40	57.3	7.2		
				B									
	Turbidity (NTU)	11.50	② ACF + C/S	1	26.9	PAHCS	0.0	0.0	0.34	60.4	7.5		
				2			12.5	0.0	0.20	55.8	7.4		
				3			14.0	0.0	0.19	55.1	7.4		
				4			15.6	0.0	0.15	55.5	7.3	Optimal	
				5			17.2	0.0	0.16	54.9	7.3		
	Alkalinity (mg/L)	65.1	③ C/S	B	-	PAHCS	0.0	11.3	6.80	63.6	7.2		
				1			18.5	0.0	0.26	62.2	7.3		
				2			20.8	0.0	0.26	61.6	7.4		
				3			23.1	0.0	0.20	60.9	7.4		
				4			25.4	0.0	0.18	60.6	7.4	Optimal	
	pH	7.2	③ C/S	5	-	PAHCS	27.7	0.0	0.36	61.0	7.4		
				1			18.5	0.0	0.26	62.2	7.3		
				2			20.8	0.0	0.26	61.6	7.4		
3				23.1			0.0	0.20	60.9	7.4			
4				25.4			0.0	0.18	60.6	7.4	Optimal		
3	Chl-a (μg/L)	70.0	① ACF	Treated water	55.2	-	-	0.0	0.45	64.5	7.2		
				B									
	Turbidity (NTU)	16.20	② ACF + C/S	1	55.2	PAHCS	0.0	0.0	0.62	63.3	7.4		
				2			12.5	0.0	0.18	62.3	7.3		
				3			14.0	0.0	0.18	61.3	7.3		
				4			15.6	0.0	0.14	61.3	7.3	Optimal	
				5			17.2	0.0	0.15	61.4	7.3		
	Alkalinity (mg/L)	79.0	③ C/S	B	-	PAHCS	0.0	66.0	13.60	81.2	7.5		
				1			20.6	0.0	0.48	77.8	7.4		
				2			23.1	0.0	0.36	76.1	7.4		
				3			25.7	0.0	0.33	78.2	7.4		
				4			28.3	0.0	0.27	77.8	7.4	Optimal	
	pH	7.3	③ C/S	5	-	PAHCS	30.8	0.0	0.52	77.9	7.4		
				1			20.6	0.0	0.48	77.8	7.4		
				2			23.1	0.0	0.36	76.1	7.4		
3				25.7			0.0	0.33	78.2	7.4			
4				28.3			0.0	0.27	77.8	7.4	Optimal		



Set No.	Raw water condition		Process	Sample	W.H. dose (mg/L)	Coagulant	Coagulant concentration (mg/L)	Chl-a (μg/L)	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/L)	pH	Remarks	
4	Chl-a (μg/L)	75.0	① ACF	Treated water	57.8	-	-	0.0	0.41	69.2	7.3		
				B			0.0	0.0	0.30	68.0	7.3		
	Turbidity (NTU)	15.10	② ACF + C/S	1	57.8	PAC	14.0	0.0	0.17	63.5	7.1		
				2			17.0	0.0	0.15	63.4	7.2		
				3			20.0	0.0	0.14	61.9	7.1	Optimal	
				4			23.0	0.0	0.18	59.5	7.1		
				5			26.0	0.0	0.16	59.4	7.1		
	Alkalinity (mg/L)	83.5	③ C/S	B	-	PAC	0.0	72.5	16.40	86.4	7.5		
				1			28.0	0.0	0.54	74.4	7.3		
				2			34.0	0.0	0.45	71.6	7.2		
				3			40.0	0.0	0.30	69.8	7.2	Optimal	
				4			46.0	0.0	0.41	68.0	7.1		
	pH	7.4	③ C/S	5	-	PAC	52.0	0.0	0.43	66.3	7.1		

Table 5. Statistical data of the optimal jar-test conditions

Process		Items (Statistics)	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/L)	pH
① ACF process	Results	Set No. 1	0.42	52.8	7.4
		Set No. 2	0.40	57.3	7.2
		Set No. 3	0.45	64.5	7.2
		Set No. 4	0.41	69.2	7.3
	Descriptive statistics	Minimum	0.40	52.8	7.2
		Maximum	0.45	69.2	7.4
		Average	0.420	60.95	7.28
		Standard deviation	0.022	7.31	0.10
② ACF + C/S process	Results	Set No. 1	0.09	50.5	7.4
		Set No. 2	0.15	55.5	7.3
		Set No. 3	0.14	61.3	7.3
		Set No. 4	0.14	61.9	7.1
	Descriptive statistics	Minimum	0.09	50.3	7.1
		Maximum	0.15	61.9	7.3
		Average	0.130	57.25	7.25
		Standard deviation	0.027	5.46	0.10
③ C/S process	Results	Set No. 1	0.26	54.1	7.2
		Set No. 2	0.18	60.6	7.4
		Set No. 3	0.27	77.8	7.4
		Set No. 4	0.30	69.8	7.2
	Descriptive statistics	Minimum	0.18	54.1	7.2
		Maximum	0.30	77.8	7.4
		Average	0.253	65.58	7.30
		Standard deviation	0.051	10.39	0.12

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114

따라서 ACF + C/S 공정을 통해 처리하면 가장 낮은 탁도를 얻을 수 있으며 이어서 C/S 공정, ACF 공정 순으로 저감되는 것으로 분석되었다. 알칼리도의 평균값은 ① ACF 공정 이후 61.0 mg/L, ② ACF + C/S 공정 이후 57.3 mg/L 및 ③ C/S 공정 이후 65.6 mg/L 로 C/S 공정이 가장 높고 ACF + C/S 공정이 가장 낮은 것으로 분석되었으나, 그 값의 차이는 10 mg/L 이내의 범위로 나타났다. pH의 평균값은 7.25(② ACF + C/S 공정)부터 7.30(③ C/S 공정) 사이에 분포하는 것으로 나타나 편차가 미미한 것으로 분석되었다.

해당 통계 결과를 최종 고찰해보면 정수공정에서 중요한 요소 중 하나인 탁도는 ACF + C/S 공정을 거쳤을 때 가장 낮았으며, 동시에 문제를 일으킬만한 요소(낮은 알칼리도 및 pH)에 대해서는 관찰되지 않은 바, 실제 정수처리 공정에서도 ACF + C/S 공정을 도

입하여 운영하였을 때 기존보다 낮은 탁도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

위의 4 세트의 실험 결과 중 탁도 인자만에 대해서 ① ACF 공정, ② ACF + C/S 연계공정 및 ③ C/S 단독 공정 간의 제거율을 비교한 그래프는 Fig. 4와 같다. 가로축은 응집제를 달리 투여한 한 세트의 Jar-test에서 1번부터 5번까지의 Jar를 나타내며, ACF 공정의 경우에는 1개의 Jar에서 시행하였으므로 편의상 1번부터 5번을 동일 값으로 표시하였다. 세 공정을 비교했을 때 ACF + C/S 연계공정에서 탁도값이 모든 Jar에서 가장 낮았으며 탁도 제거율도 항상 최대임을 관찰하였다. 주요 인자 중 Chl-a의 경우 두 공정 모두 적정 농도를 주입했을 경우 모두 제거되었으며, 알칼리도 및 pH의 경우 유의미한 수치의 편차가 관찰되지 않아 해당 그래프에서는 생략하였다.

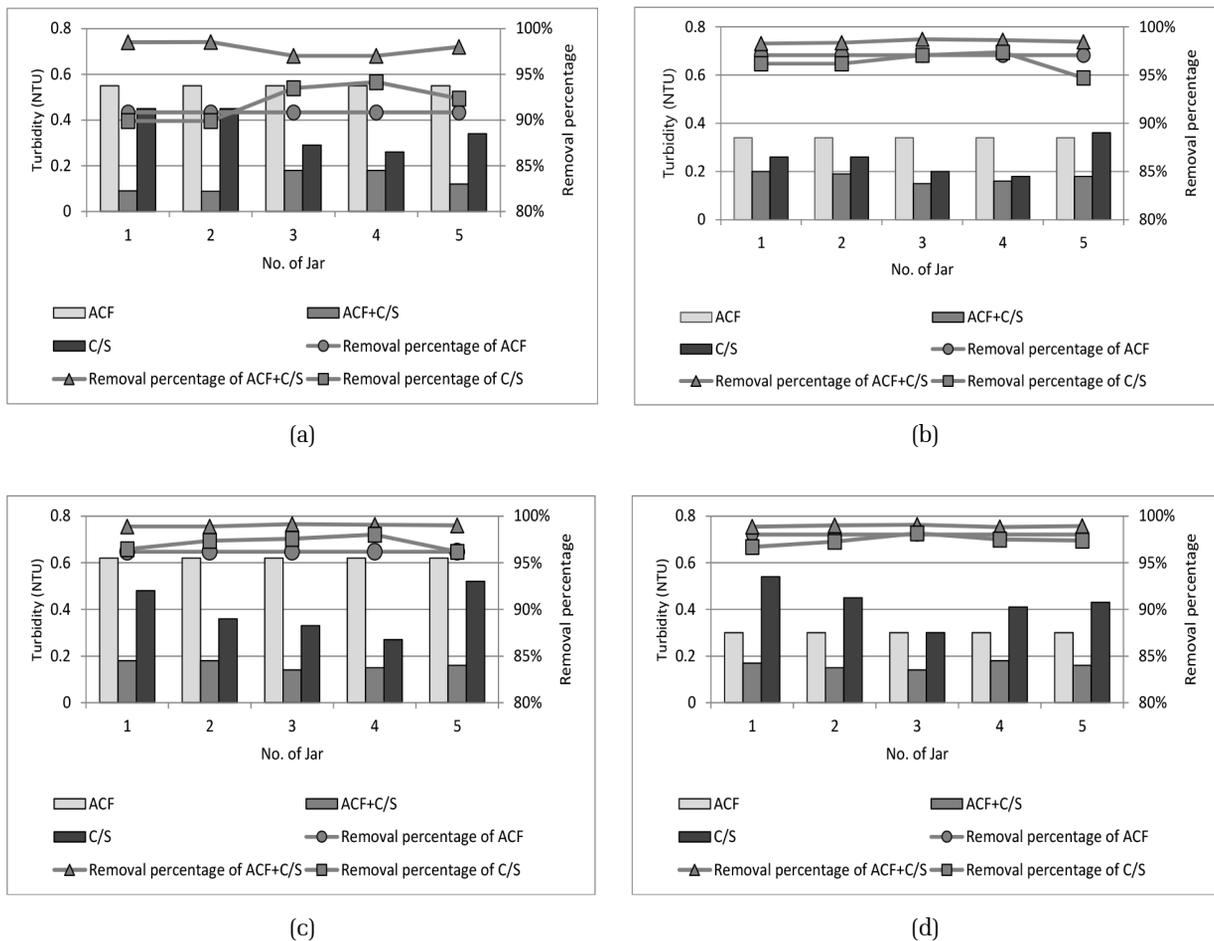


Fig. 4. Comparison of ① ACF process, ② ACF + C/S process and ③ C/S process for turbidity: (a) Set No. 1 (Chl-a: 11.0 µg/L, turbidity: 6.0 NTU), (b) Set No. 2 (Chl-a: 23.0 µg/L, turbidity: 11.5 NTU), (c) Set No. 3 (Chl-a: 70.0 µg/L, turbidity: 16.2 NTU), (d) Set No. 4 (Chl-a: 75.0 µg/L, turbidity: 15.1 NTU).



3.2 Jar-test 결과의 고찰

앞서 고찰하였던 국내 정수장 침전지 유출수 탁도 상황 검토에서, 국내 정수장 6곳의 침전지 처리수 탁도는 0.10~4.3 NTU 사이의 값을 나타내었으며, 평균치는 0.57 NTU로 분석되었다. 이는 ACF 단독공정 처리수의 평균치(0.42 NTU)뿐만 아니라 최대치(0.45 NTU)보다도 높은 수치이며 이는 ACF 단독공정만으로도 국내 정수장의 침전수 평균치보다 우수한 수질을 얻을 수 있음을 시사한다. ACF + C/S 공정에서는 ACF 공정 이후 남아있는 약간의 탁질을 소량의 응집제를 추가로 투여하여 제거함으로써 가장 낮은 탁도(평균: 0.13 NTU)를 달성할 수 있는 것으로 나타났다.

이를 통해서 1) W.H.를 처리한 ACF 단독공정만으로도 현재 국내 정수장 평균 탁도치를 만족시키는 수질을 얻을 수 있으며, 기존의 응집/침전 공정을 ACF 공정으로 대체할 수 있음이 시사되었다. 2) 더욱 우수한 탁도 수치를 얻고자 한다면 ACF 단독공정 이후에 추가로 소량의 응집제를 사용할 수도 있음을 확인하였다.

ACF + C/S 공정과 C/S 공정의 응집제(PAHCS 또는 PAC) 사용량을 비교하면, ACF + C/S 공정에서 PAHCS의 투입 범위는 12.5~18.7 mg/L로서 평균 15.1 mg/L이 사용되었다. C/S 단독공정의 경우 투여한 PAHCS의 범위는 16.8~30.8 mg/L이고 평균 25.6 mg/L이 사용되어 ACF + C/S 공정 운영 시 평균 10.5 mg/L의 PAHCS를 저감할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한, ACF + C/S 공정을 통해 사용된 PAC의 투입 범위는 14.0~26.0 mg/L, 최적 PAC 투여농도는 20.0 mg/L으로 나타났으며, C/S 단독공정의 경우 28.0~52.0 mg/L, 최적 PAC 투여농도는 40.0 mg/L으로 나타나 ACF + C/S 공정 운영 시 약 20.0 mg/L의 PAC가 저감되는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

정수처리공정에서 조류의 과다 유입은 응집불량을 초래하여 여과지의 조기 막힘 현상을 일으키기도 하고, 조류독소 방출, 맛·냄새 및 THM 생성 등 여러 문제를 유발한다. ACF (Algae Coagulation·Flotation) 공정은 천연조류제거제인 W.H. 주입을 통하여 정수처리 전 단계에서 조류를 응집·부상시켜 사전에 제거하는 공정으로, 정수공정에 미치는 조류의 영향을 효과적

으로 저감할 수 있다. 본 연구에서는 현재 정수장에서 적용되고 있는 응집/침전 공정(C/S 단독공정)과 비교하기 위하여 전처리 공정으로 ACF 공정을 추가하여 ① ACF 단독공정 및 ② ACF + C/S 연계공정을 구성하고, 각 공정을 대상으로 다양한 조건에 대한 Jar-test를 실시함으로써 주요 수질인자에 대한 운전특성을 검토하였다. 또한 각 공정의 처리수질을 국내 정수장의 침전수 탁도와 비교함으로써 ① ACF 단독공정 및 ② ACF + C/S 연계공정의 효율성을 검토하여 기존의 ③ C/S 단독공정에 대한 대체가능성을 논의하였다. 본 연구의 주요한 결과는 다음과 같다.

- 1) Chl-a는 ① ACF 단독공정, ② ACF + C/S 연계공정 및 ③ C/S 단독공정에서 모두 매우 높은 효율로 제거되었다.
- 2) 탁도의 경우, ① ACF 단독공정에서 평균 0.42 NTU, ② ACF + C/S 연계공정에서 평균 0.13 NTU 및 ③ C/S 단독공정에서 평균 0.25 NTU로 나타났다. 이를 통해 모든 공정에서 탁도가 매우 높은 효율로 제거됨을 확인하였으며, C/S 단독공정보다 ACF + C/S 연계공정에서 더 높은 효율이 관찰되었다.
- 3) 모든 Jar-test 조건에서 알칼리도의 편차는 10 mg/L 이내로 나타났으며, pH는 공정에 따른 차이가 관찰되지 않았다.
- 4) 본 연구에서 실시된 Jar-test 결과를 국내 정수장의 침전지 유출수의 탁도와 비교하였다. 국내 정수장 침전수 탁도의 평균치(0.57 NTU)를 고려할 때, ACF 단독공정(평균 0.42 NTU)만으로도 기존 정수공정에 상응할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 전처리공정을 ACF 공정으로 대체하였을 때 추가적인 응집제의 주입 없이도 높은 수준으로 탁도가 제거가능함이 시사되었다.
- 5) ACF 단독공정 이후에 소량의 응집제를 추가 주입할 경우(ACF + C/S 연계공정)에는 응집제만 단독으로 주입하였을 경우(C/S 단독공정 평균: 0.25 NTU)보다 더 낮은 탁도(평균: 0.13 NTU)를 얻을 수 있었다. 이는 기존 응집/침전 공정보다 더 양호한 탁도 제거효율을 얻고자 할 때 ACF + C/S 연계공정이 대안이 될 수 있음을 시사한다.
- 6) C/S 단독공정 대비 ACF + C/S 연계공정에서의 응집제 저감량은 PAHCS는 평균 10.5 mg/L, PAC는 평균 20.0 mg/L에 달하는 것으로 나타났다.

pp. 001-006
pp. 007-012
pp. 013-019
pp. 021-028
pp. 029-037
pp. 039-050
pp. 051-062
pp. 063-072
pp. 073-081
pp. 083-091
pp. 093-101
pp. 103-114

사 사

본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화 지원사업의 “자연형하천 조성을 위한 수량수질 의사결정·관리기술 실용화”를 통해 지원받은 과제임(과제번호: 16TBIP-C094406-02).

References

- Y. S. Lim, W. S. Song, J. S. Cho, H. J. Lee and J. S. Heo, “The effect of algae on coagulation and filtration of water treatment process”, *Korea Journal of Environmental Agriculture*, 19(1), 13~19(2000).
- M. K. Kim, B. R. Moon, T. K. Kim and K. D. Zoh, “A study on production & removal of microcystin, taste & odor compounds from algal bloom in the water treatment processes”, *The Korean Journal of Public Health*, 52(1), 33~42(2015).
- B. S. Kang, K. H. Chang, J. S. Kim and J. H. Kim, “A case study of the GAC F/A operation effect through full scale WTP”, Annual Meeting of *KSWW·KSEW*, Daedeok Convention Town, Daegu, A-27~A-28(2004).
- M. Y. Han, “Considerations for the optimum design and operation of coagulation process in water treatment plant”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 19(2), 239~254(1999).
- C. J. Cheong, “Removal of microalgae using inorganic coagulants in coagulation and sedimentation processes for water treatment”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 30(1), 85~89(2008).
- KECO, Water intake·treatment plant operation and management manual(2012).
- Y. J. Jang, J. H. Jung, H. M. Lim, Y. H. Yoon, K. H. Ahn, H. Y. Chang and W. J. Kim, “Decision algorithm of natural algae coagulant dose to control algae from the influent of water works”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 38(9), 482~496(2016).
- Linda E. Graham, *Algae*(second edition), BioScience(2010).
- KWWA, "Water supply facilities standards"(2010).
- Ministry of environment, National institute of environmental research, “Water information system”, <http://water.nier.go.kr>(2016).
- I. D. L. Foster, R. Millington and R. G. Grew, “The impact of particle size controls on stream turbidity measurement; some implications for suspended sediment yield estimation” (1992).
- Ministry of environment, "Water treatment standards manual" (2013).
- KWWA, "Water supply facilities maintenance manual"(2007).
- Han river flood control office, Water resources management information system, <http://www.wamis.go.kr>(2016).