정수장 유입조류 전처리를 위한 천연조류제거제(W.H.)의 최적주입농도 결정

Decision Algorithm of Natural Algae Coagulant Dose to Control Algae from the Influent of Water Works

장여주 · 정진홍* · 임현만* · 윤영한* · 안광호* · 장향연** · 김원재*[†]

Yeo-Ju Jang · Jin-Hong Jung* · Hyun-Man Lim* · Young H. Yoon*

Kwang-Ho Ahn* · Hyang-Youn Chang** · Weon-Jae Kim*[†]

(주)에텐녹화산업 · *한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소 · **과학기술연합대학원대학교

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

*Environmental and Plant Engineering Research Institute,

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**University of Science & Technology

(Received June 24, 2016; Revised August 8, 2016; Accepted August 17, 2016)

Abstract : Algal blooms of cyanobacteria (blue-green Algae) due to the eutrophication of rivers and lakes can cause not only the damage by its biological toxins but also the economic loss in drinking water treatment. The natural algae coagulant, a commercial product known as W.H. containing the algicidal and allelopathic material derived from oak, can control algal problems proactively through the coagulation-flotation process. However, because there have been no applications of the process for pre-treatment in drinking water plants, we could find no report on the optimum injection dose of W.H.. In this study, we have conducted several sets of jar-tests while changing W.H. dose and concentration of chl-a for ① Han-river samples and ② subcultured cyanobacteria samples, and monitored the removal mechanisms of algae intensively. Based on these jar-test results, two linear equations with variables of chl-a and turbidity have been deduced to predict the optimal W.H. dose after the multiple regression analysis using IBM-SPSS. Also, prototypes of automatic control logic have been suggested to inject the optimal W.H. dose promptly in response to the variation of water quality.

Key Words : Natural Algae Coagulant, Coagulation-Flotation Process, Optimal Dose, Algae, Cyanobacteria

요약 : 하천과 호수의 부영양화로 인하여 남조류가 대량으로 증식하게 되면 고유의 생물독소로 인한 위해뿐만 아니라 정수처리 과정에서 경제적 손실을 야기할 가능성이 있다. 현재 상용화되어있는 천연조류제거제인 M사의 W.H. 응집제(이하 W.H.)는 참나무 유래 성분의 살조 및 타감작용을 이용한 응집·부상공정을 통하여 조류를 사전에 제거함으로써 정수공정에 미치는 영향을 효과적으로 저감할 수 있다. 그러나, W.H.를 활용한 응집·부상공정은 정수처리의 전처리공정으로 적용된 사례가 없기 때문에 최적주입농도의 결정방법에 대한 보고 또한 전무한 실정이다. 본 연구에서는 ① 한강에서 채취한 복합 조류와 ② 남조류를 선택적으로 대량 배양하여 광조건 하에서 W.H. 투여량 및 조류농도 등의 여러 조건을 변화시키면서 Jar-test를 시행하여 응집·부상공정에서의 조류의 제거기작을 검토하였다. Jar-test 결과를 바탕으로 IBM-SPSS를 활용한 다중회귀분석을 실시하여 최적 W.H. 주입농도를 결정하기 위한 Chl-a 농도와 탁도를 변수로 하는 두 가지 선형식을 도출하였다. 또한 유입수질의 변동에 따라 W.H. 주입농도를 신속하게 결정하고 자동화할 수 있는 자동제어 로직의 프로토타입(Prototype)을 제시하였다.

주제어 : 천연조류제거제, 응집·부상공정, 최적주입농도, 조류, 남조류

1. 서론

하천의 수질환경은 수원으로부터 유하함에 따라 악화되는 경향을 나타낸다. 호수와 비교하면 영양염의 농도는 낮지만 하상의 부착조류나 수생식물에 끊임없이 영양이 공급되어 같은 수준의 영양염 농도를 갖는 호수보다도 높은 생산력을 유지한다. 건강한 하천생태계는 종속영양의 경향을 보이는 상류부를 제외하면 부착조류와 수생식물의 생산력이 기초를 이루고 있다.

최근 우리나라 하천과 호수에서 미세 부유조류의 과증식이 심각한 사회적 현안이 되고 있다. 호수 및 하천의 부영양화로 인해 남조류가 대량 증식하는 사례가 빈발하고 있으며,

미관상이나 냄새로 인한 문제뿐만 아니라 마이크로시스틴 등의 생물독소로 인해 다양한 생물종과 더불어 인간에게도 악영향을 끼칠 우려가 제기되고 있다.¹⁾ 또한 정수처리 과정에서 염소 및 분말활성탄 등 약품 투입 증가에 따른 경제적 손실을 야기함과 동시에 여과지 막힘 등을 유발하여 정수공정의 운영을 어렵게 만든다.^{2,3)} 이에 대한 대안으로 정수장으로 조류가 유입되기 이전 단계에서 천연조류제거제를 적정량 주입하여 문제를 유발하는 고농도 미세 부유조류를 사전에 제거함으로써 정수공정에 미치는 영향을 저감하는 방안인 응집·부상공정이 새롭게 부각되고 있다.

참나무를 포함한 육상 및 수생식물들은 유해 남조류인 *Microcystis aeruginosa*를 포함한 조류의 성장을 억제하는 물

[†] Corresponding author E-mail: wjkim1@kict.re.kr Tel: 031-910-0303 Fax: 031-910-0291

질을 가지고 있는데, 이러한 타감물질(allelochemicals)은 주로 탄닌과 페놀류의 화합물로서 다른 식물들의 발아, 호흡, 광합성, 양분 흡수 및 호르몬 합성 등을 저해하는 것으로 보고되고 있다.⁴⁾ 조류 또한 여러 가지 유기물질을 분비하여 다른 생물에 영향을 미치는 타감작용을 갖는 것으로 알려져 있으며, 이러한 체외대사물질은 생물학적 상호작용과 타감작용에 의해 조류의 대량증식을 조절하는 기능과 더불어 다른 조류의 성장을 억제하는 기능도 가질 수 있다.⁵⁾ M사에서 개발하여 상용화된 조류제거제인 W.H. 응집제는(이하 W.H.), 응집기능과 더불어, 참나무의 잎과 줄기에서 추출한 살조물질을 통해 조류의 성장을 억제하고 타감작용을 유도함으로써 광합성 반응을 촉진하여 수중의 미세 부유조류를 별도의 추가공정 없이 자력으로 응집·부상시켜 제거할 수 있도록 개발되었다.⁶⁾

한편, W.H.를 주입하여 조류를 제거하는 과정은 광이 조사되고 있는 조건에서, ① W.H. 주입, ② 응집(침전) 및 ③ 부상·제거의 3단계에 걸쳐서 진행되고, 각 과정은 상호 복합적인 영향을 주고받기 때문에 효율적으로 조류를 저감하기 위해서는 유입수질에 대응하여 적절한 농도를 주입해야 할 필요가 있다. 또한, 유입수질은 실시간적으로 변동하기 때문에 W.H. 주입농도를 신속하게 결정하고 자동화할 수 있는 자동제어시스템 구축의 필요성이 제기된다. 이와 같은 필요성에도 불구하고, 천연조류제거제를 활용한 응집·부상공정은 국내는 물론이고 해외에서도 정수처리의 전처리 공정으로 적용된 사례가 없기 때문에 최적주입농도 결정기법에 대한 연구 사례 또한 전무한 실정이다. 따라서 이에 대한 실험적 기초연구와 더불어 현장적용성 확보를 위한 실용화 기반연구 또한 시급한 실정이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 정수장으로 유입되는 조류를 사전에 효율적으로 제거하는데 필요한 최적의 W.H. 주입농도를 결정하기 위하여 다양한 조건을 아우르는 Jar-test를 실시하여 W.H.의 주입조건에 따른 조류 제거기작에 대하여 상세하게 검토하고, 다변량분석 등의 통계기법을 활용하여 해석함으로써 W.H.의 최적주입농도를 결정하는 알고리즘을 도출하였다. 또한 이상의 결과를 바탕으로 W.H. 기반의 정수장 유입조류 제어를 위한 자동제어 로직의 Prototype을 제시하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1. 조류의 배양

본 실험에서는 실험 목적에 따라 두 종류의 복합조류 원시료를 사용하였다. 1차 복합조류 원시료는 2014년 8월경 한강 본류구간에 조류가 과증식했던 시기에 행주대교 상류 지점에서 채취하였으며,^{7,8)} 2차 복합조류 원시료는 한강물환경연구소에서 남조류 2종(*Microcystis aeruginosa*(이하 *Microcystis*), *Anabaena circinalis*(이하 *Anabaena*))을 분양받은 후 계대배양하여 준비하였다. 배양수로는 원수에 따라 큰 차이를 나타내는 다양한 알칼리도 조건을 반영하기 위하여 지

하수(한국건설기술연구원 내 채수), 샘물(풀무원샘물(주)), 일차증류수(직접 제조), 2일 이상 정치시킨 수돗물을 단독 또는 혼합하여 사용하였다.

Jar-test에는 두 종류의 복합조류 원시료를 각각 과량으로 증식시켜 사용하였다. 계대배양 시에는 진탕배양기(Shaking incubator)에서 배양온도 25℃, 진탕조건 10 rpm으로 배양하였으며, 배양용기로는 50 mL conical tube 및 300 mL 삼각플라스크의 2종을 이용하였다. 실험원수 확보를 위한 대량배양 시에는 별도의 유리 배양조를 제조하여 수온 25℃, 무진탕 조건으로 배양하였다. 유리 배양조는 20 L 및 40 L 규격의 2종을 이용하였다. 수온은 동절기에는 온도조절기(thermostat) 일체형 수중히터를 이용한 직접가열 방식으로 제어하였으며, 하절기에는 수중히터와 공기순환방식을 병행하여 25℃ 이상의 고온으로 상승하지 않도록 제어하였다(Fig. 1).

배양액으로는 다음의 2종을 사용하였다. 계대배양 시에는 Cyanobacteria BG-11 Freshwater Solution (50x) (C3061-500 ML, Sigma)을 20 mL/L 비율로 희석하여 사용하였고,⁹⁾ 대량배양 시에는 CB배지(100x)(직접 제조)를 10 mL/L 비율로 희석하여 사용하였다.^{10,11)} 각 배지의 구성성분은 Table 1과 같다.

Fig. 1. (a) Shaking incubator, (b) Large incubation container with light source.

Table 1. Comparison of BG-11 medium and CB medium

Components of BG-11 medium	Concentration (mg/L)	Components of CB medium	Concentration (mg/L)
Boric acid	2.86	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	150
Calcium chloride dihydrate	36	KNO ₃	100
Citric acid	6	β-Na ₂ glycero-phosphate	50
Cobalt nitrate·6H ₂ O	0.0494	MgSO ₄ ·7H ₂ O	40
Cupric sulfate·5H ₂ O	0.079	Vitamin B ₁₂	0.0001
EDTA disodium magnesium	1	Biotin	0.0001
Ferric ammonium citrate	6	Thiamine-HCl	0.001
Magnesium sulfate·7H ₂ O	75	Bicin	500
Manganese chloride·4H ₂ O	1.81	FeCl ₃ ·6H ₂ O	0.0588
Potassium phosphate di-basic	40	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.0108
Sodium carbonate	20	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.0066
Sodium molybdate·2H ₂ O	0.39	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.0012
Sodium nitrate	1500	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.00075
Zinc sulfate·7H ₂ O	0.222	Na ₂ EDTA·2H ₂ O	0.3

Fig. 2. Photographs of subcultured *Microcystis* and *Anabaena*.

계대배양 상태의 2차 복합조류 원시료인 *Microcystis* 및 *Anabaena*가 광학현미경(MX-4300H, MEIJI)에 의해 모니터링된 모습은 Fig. 2와 같다. 한국담수조류도감을 참고하여 두 종이 외부 오염 없이 단일 종으로 계대 증식하고 있는 것으로 판단하였다.¹²⁾

2.2. 유입 조류 전처리를 위한 Jar-test

실험에 사용된 천연조류제거제는 W.H.를 100배 희석하여 10,000 mg/L stock을 제조하여 사용하였으며, kaolin (SAN-CHUN Co., LTD.)은 오븐에서 24시간 이상 건조시킨 후 1,000 mg/L stock을 제조하여 사용하였다.

유입 조류 전처리에 적합한 W.H. 주입농도를 결정하기 위한 Jar-test (Jar-tester, SW ENG) 방법은 다음과 같다. 상온의 실험실에서 고농도로 배양된 조류배양액을 실험목적에

맞는 농도가 되도록 배양수와 희석한 후에 6개의 Jar에 1 L 씩 채운 후에, Jar-tester를 이용하여 원수와 배양수가 원활히 섞이도록 100 rpm으로 사전교반을 실시하였다(약 5분간). 사전교반 후 실험조건에 따라 10-120 mg/L 사이의 W.H.를 순차적으로 주입한 다음, 2분간 150 rpm으로 급속교반을 시행한 뒤 15분간 30 rpm으로 완속교반을 실시하였다. 완속교반 완료 후 10분 간격으로 응집 및 침전, 부상 특성을 관찰하고 이를 사진 등으로 기록하였다. 완속교반 완료 후 1시간이 경과하면 최종처리수에서 부상하거나 침전된 플록(Floc)을 배제한 상등액을 채수하여 다양한 수질항목에 대한 추가 분석을 실시하였다. Jar-test의 흐름도 및 실험의 진행과정은 Fig. 3과 같다.

원수 및 각 처리수에 대하여 Chl-a (Chlorophyll probe, 기술과환경(주)), 탁도(2100N Turbidimeter, HACH), pH 및

Fig. 3. (a) Procedure of jar-test, and (b) Jar-tester.

수온(HI2210 pH meter, HANNA Instruments), 알칼리도, 조도, 입자수 및 입자표면적(LaserTrac Particle counter PC3400, CHEMTRAC) 등을 분석하였다. 알칼리도는 0.02 N의 황산에 의한 적정법(Easy pH, METTLER TOLEDO)으로 분석하였다(단위: mg/L as CaCO_3). 입자수는 2-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30, 30-50, 50-100 및 100 μm 이상의 총 8구간으로 입경대를 구분하여 mL당 10^2 개 단위로 집계하고, 입경대별 표면적을 산출한 후 적산하여 입자표면적을 산정하였다(단위: $10^4 \mu\text{m}^2/\text{mL}$). 각 처리수에 대하여 조류의 부상 유무 및 부상시 부상 시작시각과 종료시각을 관찰하였고, 필요시 사진으로 촬영하였다.

최적 W.H. 주입농도는 Chl-a 농도가 원수(Blank) 대비 90% 이상 제거되거나 10 $\mu\text{g/L}$ 이하가 되는 최소의 농도로 결정하였다.

한편, 데이터의 통계적 해석을 위하여 Excel 2013 프로그램의 데이터 분석기능과 IBM-SPSS (ver.21)를 이용하였다. IBM-SPSS의 등분산성 분석, 독립성 분석, 상관분석 및 다중회귀분석 등을 활용하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. Jar-test 결과 해석기법

Jar-test 결과의 해석기법을 예시하기 위하여 1 set의 결과에 대하여 보다 상세히 소개하면 다음과 같다. 이 실험에서는 W.H.를 0, 20, 40, 60, 80 및 100 mg/L의 농도로 주입하였으며, 광조사 조건은 사전 예비실험을 통하여 결정된 5,000 Lux로 고정하였다.

Jar-test의 진행과정을 순차적으로 기술하면, W.H. 주입 후 완속교반 시 조류 입자들이 점점 응집되며, 교반 완료 후 Jar 바닥에 일시적으로 침전되었던 플러들이 작은 덩어리를 이루면서 다시 부상하는 모습이 관찰된다. 최종 부상완료 후의 모습은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서는 조류 플러들이 부상한 후 시간이 지날수록 압밀되어 부상 슬러지의 겉보기밀

도가 높아지는 모습이 관찰되었다. 즉, W.H.를 이용한 응집·부상공정에서 ① 미세조류 응집, ② 응집된 미세조류 플러의 침전, ③ 타감작용에 의한 침전된 미세조류의 광합성 활성화, ④ 미세조류 플러 내·외부의 미세기포 생성 및 성장, ⑤ 미세기포의 성장에 따른 부력 상승 및 플러의 부상, ⑥ 부상 슬러지의 압밀 등의 과정이 순차적으로 관찰되었다.

Jar-test 완료 후 채수하여 분석된 항목 중 Chl-a는 W.H. 60 mg/L 주입 시 78 $\mu\text{g/L}$ 에서 9.5 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 효율적으로 저감되었다(최소값: W.H. 80 mg/L 주입 시의 5.8 $\mu\text{g/L}$). 탁도는 16.2 NTU에서 1.23 NTU까지 감소하다가 2.50 NTU으로 다시 반등하였다(최소값: W.H. 80 mg/L 주입 시의 1.23 NTU). pH는 9.5에서 7.0까지 지속적으로 감소하였다. 알칼리도는 48 mg/L에서 25 mg/L (as CaCO_3)까지 지속적으로 감소하였다. 부상 시작 및 종료 시간과 부상속도 등은 W.H. 주입농도에 따라 차이가 있었다. 이 Jar-test에서는 완속교반 완료 후 20분에서 28분 사이에 Blank를 제외한 모든 Jar에서 플러가 부상하기 시작하여 38분에서 60분 사이에 부상이 모두 완료되었다. W.H. 60 mg/L를 주입한 조건에서 부상의 시작과 종료가 가장 빨리 진행되었다. 입자수 및 입자표면적에서도 W.H. 60 또는 80 mg/L를 주입한 조건에서 최소값이 관찰되었다. Chl-a는 W.H.의 과주입 시에도 지속적으로 제거되는 경향이 관찰되고 있으나, 탁도, 부상 조건, 입자수 및 입자표면적 등은 적정 주입농도 이상으로 과주입되었을 때 오히려 처리효율이 저하되는 경향이 나타나고 있다. 또한 pH 및 알칼리도의 과도한 저하 또한 수처리에 바람직하지 않기 때문에 적정 농도 이상의 W.H. 주입은 처리 효율성 및 경제성을 고려할 때 지양해야 할 것으로 판단된다. 이상의 결과는 응집 또는 부상 공정의 완료시점 및 조류 또는 탁질의 제거효율이 항상 동시에 최적화되지 않을 수 있다는 사실을 시사한다. 주요 수질항목에 대한 Jar-test 결과를 도시한 그래프는 Fig. 5와 같다.

본 논문에서는 한강 채취 복합조류(1차 복합조류)를 이용한 11 set와 남조류 선택 배양액(2차 복합조류)을 이용한 8

Fig. 4. Photographs of jar-tests at the end of flotation.

Fig. 5. Results of jar-test according to W.H. dose: (a) Chl-a, (b) Turbidity, (c) pH, (d) Alkalinity, (e) Floating start and finish time, and (f) No. and surface area of particles.

set 등 모두 19 set의 Jar-test 결과를 활용하였으며, 이상의 모든 Jar-test를 종합한 결과는 Table 2와 같다. 최적 W.H. 주입농도 및 원수의 수질을 요약한 결과는 Table 3과 같다. 최적 W.H. 주입농도는 10-60 mg/L(평균 : 30.8 mg/L), 원수의 Chl-a 농도는 10.4-104.0 μg/L(평균 : 49.5 μg/L), 탁도는 1.1-16.2 NTU(평균 : 4.4 NTU), pH는 6.9-9.5(평균 : 8.3), 알

칼리도는 46-100 mg/L (as CaCO₃) 등의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

3.2. W.H. 최적주입농도에 미치는 수질항목의 영향: 상관분석

한강 채취 복합조류를 배양하여 실험한 Jar-test 결과를 바

Table 2. Total data of jar-tests

(n=19)

No.	Raw water						W.H. dose	Treated water						Start time (min)	Finish time (min)	Optimal W.H. dose
	Chl-a ($\mu\text{g/L}$)	Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (mg/L)	Particle No. ($\times 10^2/\text{mL}$)	Particle S.A. ($\times 10^4 \mu\text{m}^2/\text{mL}$)		Chl-a ($\mu\text{g/L}$)	Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (mg/L)	Particle No. ($\times 10^2/\text{mL}$)	Particle S.A. ($\times 10^4 \mu\text{m}^2/\text{mL}$)			
1	10.4	1.7	7.8	70			10	6.5	0.5	7.5	67					
							20	0.0								
							30	0.0								10
							40	0.0								
							50	0.0								
							20	10.0								
2	18.0	1.1	8.1	73			30	0.0	0.5	7.5	67					
							40	0.0								20
							50	0.0								
							60	0.0								
							20	11.6	1.2	7.8	66					
3	25.0	1.7	8.5	72			35	0.0	0.6	7.7	63			47	60	
							50	0.0	0.4	7.3	60			50	60	20
							65	0.0	0.5	7.2	55			55	60	
							80	0.0	0.4	7.2	53			60	60	
							10	28.8								
4	50.8	1.4	8.2	81			20	3.6								
							30	0.2	0.2	7.6	62					20
							40	0.5								
							50	1.0								
							20	5.7								
5	56.0	2.0	8.5	95			40	0.0	0.4	7.9	67					
							60	0.0								20
							80	0.0								
							100	0.0								
							10	31.0	2.4	8.3	78					
6	49.0	3.1	8.0	82			20	22.0	2.3	7.8	75					
							30	2.2	1.6	7.7	72			2	60	30
							40	0.0	1.5	7.5	69			2	35	
							50	0.0	0.6	7.4	68			2	44	
							20	17.0	2.8	8.1	67					
7	50.0	7.0	8.8	70			35	0.0	1.6	7.7	62			15	45	
							50	0.0	1.4	7.5	57			30	60	35
							65	0.0	0.7	7.2	50			35	60	
							80	0.0	1.5	7.3	54			43	60	
							20	63.0								
8	88.0	2.5	8.9	81			30	46.0	0.9	7.7	75					
							40	0.0								40
							50	0.0								
							60	0.0								
							20	55.0	2.9	8.5	81					
9	74.0	2.5	9.1	84			35	36.0	2.5	8.3	78			60	60	
							50	9.0	1.3	7.9	73			10	60	50
							65	0.0	1.0	7.7	66			11	44	
							80	0.2	0.9	7.5	62			18	60	
							20	56.0	3.7	8.0	102					
10	102.0	5.1	8.2	100			40	28.0	2.6	7.8	91			13	60	
							60	17.0	2.2	7.4	86			1	60	60
							80	6.0	1.6	7.3	82			1	60	
							100	0.0	0.7	7.2	74			1	60	

Jar-test results using Han-river samples

Table 2. Continued

No.	Raw water						W.H. dose	Treated water						Start time (min)	Finish time (min)	Optimal W.H. dose
	Chl-a (μg/L)	Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (mg/L)	Particle No. ($\times 10^2$ /mL)	Particle S.A. ($\times 10^4$ μm ² /mL)		Chl-a (μg/L)	Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (mg/L)	Particle No. ($\times 10^2$ /mL)	Particle S.A. ($\times 10^4$ μm ² /mL)			
11	104.0	4.0	8.1	95			20	86.0	4.4	8.9	96					
							30	48.0	2.9	8.8	90			23	60	
							40	38.0	2.5	8.6	88			2	60	60
							50	17.0	2.1	8.3	84			1	45	
							60	19.0	1.8	8.1	81			1	51	
12	29.5	1.6	7.2	52	291	1017	10	4.0	0.2	6.1	47	35	224			
							20	2.4	0.2	6.0	43	60	718			
							30	3.9	0.3	6.0	41	83	701			10
							40	3.5	0.3	5.9	38	63	177			
							50	3.5	0.4	5.9	37	70	298			
13	35.0	2.1	8.3	65	296	1171	20	0.3	0.3	7.8	60	74	975	52		
							40	0.2	0.3	7.6	57	74	866			
							60	1.1	0.3	7.6	56	98	1107			20
							80	0.0	0.2	7.2	46	59	1054			
							100	1.0	0.4	7.1	42	60	566			
14	36.0	6.7	8.2	65	302	920	20	1.1	1.0	7.9	61	263	1493	41		
							40	0.5	1.2	7.6	55	228	868	42		
							60	1.2	0.9	7.4	50	216	1452	42		20
							80	0.3	0.9	7.2	46	151	596	46		
							100	0.0	0.8	7.1	42	515	967	51		
15	24.0	1.7	7.3	64	257	489	20	1.1	0.2	7.6	59	36	425			
							40	1.7	0.2	7.4	54	36	279			
							60	1.5	0.3	7.2	50	28	263			20
							80	1.0	0.2	7.1	46	27	247			
							100	0.9	0.5	7.0	42	29	267			
16	20.0	9.8	8.1	59	276	545	20	4.7	0.5	7.7	55	83	1152			
							40	3.9	0.3	7.5	49	101	3533			
							60	3.0	0.4	7.3	45	81	2497			20
							80	3.2	0.3	7.1	41	131	5382			
							100	3.3	0.7	7.0	37	118	2747			
17	30.0	6.8	6.9	70	297	1251	10	30.0	6.9	6.4	67	302	1135			
							20	26.0	5.6	6.3	64	296	611			
							30	7.5	2.9	6.1	62	291	559			30
							40	4.5	1.7	6.1	59	291	920	49		
							50	2.0	1.1	6.0	58	269	622	44		
18	61.0	7.3	9.4	46	301	936	20	16.5	4.5	8.9	40	284	1335	63		
							40	3.5	1.4	8.1	36	170	454	67		
							60	2.5	0.9	7.7	30	120	591	70		40
							80	3.0	0.7	7.3	27	103	900	64		
							100	10.5	1.6	7.1	23	190	1279	69		
19	78.0	16.2	9.5	48	303	1513	20	49.0	9.0	9.1	43	303	1378	21	60	
							40	24.5	3.4	8.4	37	284	1471	27	40	
							60	9.5	1.8	7.6	32	239	1232	20	38	60
							80	5.8	1.2	7.3	27	181	1235	23	39	
							100	10.1	2.5	7.0	25	231	1418	28	60	

Table 3. Statistical data of the optimal W.H. dose and raw water qualities (n=19)

Statistical Items	Optimal W.H. dose (mg/L)	Chl-a (μg/L)	Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (mg/L)	No. of particles (x10 ² /mL)	Surface area of particles (x10 ⁴ μm ² /mL)
Minimum	10	10.4	1.1	6.9	46	257	489
Average	30.8	49.51	4.44	8.27	72.2	290.4	980.3
Maximum	60	104.0	16.2	9.5	100	303	1513
Standard deviation	16.5	28.49	3.84	0.69	15.4	16.0	344.6

탕으로, 최적 W.H. 주입농도를 종속변수로 설정하여 각각의 다른 4가지 수질항목(Chl-a, 탁도, pH 및 알칼리도)과의 단순회귀분석을 실시한 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. Chl-a가 W.H. dose와 가장 유의미한 상관성($R^2 = 0.830$)을 보이는 것으로 분석되었으며, 다른 3가지 수질항목(탁도, pH 및 알칼리도)에 대해서는 뚜렷한 상관성이 관찰되지 않았다.

이상의 Jar-test 결과에 대한 이변량 상관분석 결과는 Table 4와 같다. Chl-a와 W.H. dose의 상관계수가 0.911(유의확률: 0.000)로 가장 상관성이 높은 것으로 분석되었으며, 다음으로 알칼리도와 Chl-a와의 상관계수가 0.796(유의확률: 0.003), W.H. dose와 알칼리도와의 상관계수가 0.652(유의확률: 0.030)

로 높은 상관성을 갖는 것으로 분석되었다.

한강 채취 복합조류 배양액을 대상으로 W.H. 주입농도를 결정하고자 시행한 이상의 Jar-test 결과를 요약하면, 최적 W.H. 주입농도는 유입원수의 Chl-a 농도를 단독으로 활용한 선형회귀함수의 형태로 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Results of bivariate correlation analysis using Han-river samples

		W.H. dose	Chl-a	Turbidity	pH	Alkalinity
W.H. dose	Pearson correlation coefficient	1.00				
	P (significance probability)	-				
Chl-a	Pearson correlation coefficient	.911**	1.00			
	P (significance probability)	.000	-			
Turbidity	Pearson correlation coefficient	.595	.479	1.00		
	P (significance probability)	.053	.136	-		
pH	Pearson correlation coefficient	.307	.322	.243	1.00	
	P (significance probability)	.359	.335	.472	-	
Alkalinity	Pearson correlation coefficient	.652*	.796**	.189	-.020	1.00
	P (significance probability)	.030	.003	.577	.954	-

** correlation coefficient is statistically significant in 0.01 (both side)

* correlation coefficient is statistically significant in 0.05 (both side)

Fig. 6. Results of bivariate regression analysis between W.H. dose and each water index for Han-river samples: (a) Chlorophyll-a, (b) Turbidity, (c) pH, and (d) Alkalinity.

Fig. 7. Results of bivariate regression analysis between W.H. dose and each water index for subcultured *Microcystis* and *Anabaena* : (a) Chlorophyll-a, (b) Turbidity, (c) pH, (d) Alkalinity, (e) Number of particles, and (f) Surface area of particles.

남조류를 선택적으로 배양하여 실험한 Jar-test 결과를 바탕으로, 최적 W.H. 주입농도를 종속변수로 설정하여 다른 6가지 수질항목(Chl-a, 탁도, pH, 알칼리도, 입자수 및 입자표면적)과의 단순회귀분석을 실시한 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6과 마찬가지로 Chl-a와 W.H. dose의 상관성($R^2 = 0.815$)이 가장 유의미한 것으로 분석되었으며, 탁도

와도 높은 상관성($R^2 = 0.683$)을 갖는 것으로 분석되었다. 다른 4가지 수질항목(pH, 알칼리도, 입자수 및 입자표면적)에 대해서는 유의미한 상관성이 관찰되지 않았다.

이상의 Jar-test 결과에 대한 이변량 상관분석 결과는 Table 5와 같다. Chl-a와 W.H. dose의 상관계수가 0.903(유의확률: 0.002)으로 가장 상관성이 높은 것으로 분석되었으며, 다음

Table 5. Results of bivariate correlation analysis using subcultured *Microcystis* and *Anabaena* samples

		W.H. dose	Chl-a	Turbidity	pH	Alkalinity	Particle No.	Particle S.A.
W.H. dose	Pearson correlation coefficient	1.00						
	P (significance probability)	-						
Chl-a	Pearson correlation coefficient	.903**	1.00					
	P (significance probability)	.002	-					
Turbidity	Pearson correlation coefficient	.826*	.672	1.00				
	P (significance probability)	.011	.068	-				
pH	Pearson correlation coefficient	.728*	.838**	.644	1.00			
	P (significance probability)	.041	.009	.085	-			
Alkalinity	Pearson correlation coefficient	-.504	-.694	-.418	-.688	1.00		
	P (significance probability)	.202	.056	.303	.059	-		
Particle No.	Pearson correlation coefficient	.438	.616	.388	.470	-.268	1.00	
	P (significance probability)	.277	.104	.343	.240	.522	-	
Particle S.A.	Pearson correlation coefficient	.597	.666	.422	.317	-.197	.810*	1.00
	P (significance probability)	.118	.071	.298	.445	.640	.015	-

** correlation coefficient is statistically significant in 0.01 (both side)

* correlation coefficient is statistically significant in 0.05 (both side)

으로 Chl-a와 pH의 상관계수 0.838(유의확률 : 0.009), 탁도와 W.H. dose의 상관계수 0.826(유의확률 : 0.011), 입자수와 입자표면적의 상관계수 0.810(유의확률 : 0.015), pH와 W.H. dose의 상관계수 0.728(유의확률 : 0.041)의 순서대로 높은 상관성을 나타내었다.

남조류의 선택적 배양액을 대상으로 W.H. 주입농도를 결정하고자 시행한 이상의 Jar-test 결과를 요약하면, 최적 W.H. 주입농도는 유입원수의 Chl-a 농도를 단독으로 활용한 선형 회귀함수 또는 Chl-a 농도와 탁도를 동시에 활용한 다중선형 회귀함수의 형태로 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

한강 채취 복합조류와 선택 배양 남조류의 상관분석 결과를 종합적으로 비교하면 다음과 같다. 한강 채취 복합조류를 대상으로 한 실험에서 최적 W.H. dose와 상관성이 큰 인자들은 Chl-a, 알칼리도 및 탁도의 순이었으며, 선택 배양 남조류의 경우에는 Chl-a, 탁도 및 pH의 순이었다. 두 실험 모두에서 높은 상관성을 갖는 인자는 Chl-a 및 탁도인 것으로 나타났다. 알칼리도와 pH는 실험조건에 따른 일관성이 결여되어 이후 진행되는 회귀분석에서 핵심적인 독립변수로

서 기능할 가능성은 높지 않은 것으로 판단된다.

3.3. 1차 및 2차 Jar-test 결과를 통합한 최적 W.H. 주입농도의 결정

1차 및 2차 Jar-test 결과를 통합한 데이터를 바탕으로, 최적 W.H. 주입농도를 종속변수로 설정하여 다른 6가지 수질 항목(Chl-a, 탁도, pH, 알칼리도, 입자수 및 입자표면적)과의 단순회귀분석을 실시한 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 본 회귀분석은 원수의 위 6가지 수질항목 중 일부 항목의 변동이 최적 W.H. 주입농도를 통계적으로 유의한 수준에서 결정할 수 있다는 가설을 바탕으로 진행하였다. Chl-a와 W.H. dose의 상관성($R^2 = 0.794$)이 가장 높은 것으로 분석되었으며, 다른 5가지 수질항목(탁도, pH, 알칼리도, 입자수 및 입자표면적)에 대해서는 유의미한 상관성이 관찰되지 않았다.

1차 및 2차 Jar-test 결과를 통합하여 다변량분석을 실시하기 이전에 두 실험군의 통계적 특성(등분산성 및 동일성 검정)을 검토하였다. IBM-SPSS를 이용하여 두 실험군(한강 채취 복합조류 배양액 이용 Jar-test 및 남조류 선택 배양액 이용 Jar-test)간 등분산성 검정(Levene 등분산 검정) 및 t-test를 통한 동일성 검정을 실시한 결과는 Table 6과 같다. W.H. dose, Chl-a, pH 및 알칼리도는 두 집단간의 등분산성이 확인되었으며, 다만 탁도에 대해서는 유의수준 0.05의 기준에서 기각 가능한 것으로 분석되었다($P = 0.049$). 따라서, 이상의 등분산성 검정의 결과에 따라 동일성 검정시 W.H. dose, Chl-a, pH 및 알칼리도에 대해서는 등분산 가정 조건을 적용하고, 탁도에 대해서는 이분산 가정 조건을 적용하였다. t-검정 결과, 실험계획에 따라 통제된 알칼리도를 제외한 W.H. dose, Chl-a, 탁도 및 pH의 네 수질항목에서 실험

Table 6. Homoscedasticity test and t-test using IBM-SPSS for total samples (n=19)

Item		Homoscedasticity test of Levene		t-test				
		F	P	t	P (both side)	Mean difference	95% confidence interval	
							Lower bound	Upper bound
W.H. dose	(a)	.363	.555	.730	.475	5.682	-10.729	22.092
	(b)			-	-	-	-	-
Chl-a	(a)	1.991	.176	1.380	.185	17.831	-9.425	45.086
	(b)			-	-	-	-	-
Turbidity	(a)	4.497	.049					
	(b)			-1.963	.084	-3.610	-7.821	0.601
pH	(a)	4.408	.051	.787	.442	0.255	-0.428	0.938
	(b)			-	-	-	-	-
Alkalinity	(a)	.111	.744	5.061	.000	23.466	13.683	33.249
	(b)			-	-	-	-	-

(a) Assumed homoscedastic condition

(b) Assumed heteroscedastic condition

Fig. 8. Results of bivariate regression analysis between W.H. dose and each water index for total samples: (a) Chlorophyll-a, (b) Turbidity, (c) pH, (d) Alkalinity, (e) Number of Particles, and (f) Surface area of particles.

데이터의 동일성이 확인되었다. 따라서, 알칼리도의 경우에는 배양수의 조합 조건에 따라 적용범위를 다양화하는 측면을 고려하고, 나머지 수질항목들에 대해서는 실험 데이터의 동일성이 확인되었으므로, 두 실험군의 데이터를 통합하여 시행하는 통계분석이 유의미한 것으로 간주하고 추가적인 다중회귀분석을 실시하였다.

IBM-SPSS를 이용하여 최적 W.H. 주입농도에 영향을 미

치는 변수들을 선택하기 위해 단계선택법에 의한 다중회귀 분석을 실시한 결과, 순차적으로 두 개의 모형이 도출되었다(Table 7). 도출된 두 모형에서 모두 공선성 통계량(Collinearity statistics) 분석을 위한 공차(Tolerance)가 0.1 이상으로 나타나 다중공선성의 가능성은 낮은 것으로 판단되었다.

모형 1에서 진입된 변수는 Chl-a 단일 항목이었으며, 이 모형은 R값 0.891, R^2 값 0.794 및 개선된 R^2 값이 0.782로 분

Table 7. Results of multiple regression analysis using total samples (regression method: stepwise) (n=19)

	Included predictors	Coefficient	t	P	
Model 1	(Constant)	5,204	1,438	.169	
	Chl-a	.517	8,101	.000	
	Excluded predictors	Coefficient	t	P	Collinearity statistics
					Tolerance
	Turbidity	.624	3,198	.006	.949
	pH	.188	.765	.455	.749
	Alkalinity	-.353	-1,508	.151	.766
Model 2	(Constant)	1,546	.494	.628	
	Chl-a	.479	9,078	.000	
	Turbidity	1,250	3,198	.006	
	Excluded predictors	Coefficient	t	P	Collinearity statistics
					Tolerance
	pH	-.035	-.136	.894	.661
	Alkalinity	.106	.415	.684	.428

석되어 적합성이 높은 것으로 나타났다(유의확률: 0.000). 이를 통해 Chl-a의 농도를 알면 최적 W.H. 주입농도를 예측할 수 있는 것으로 분석되었다. 도출된 식은 아래의 식 (1)과 같다. 이 모형에서 제외된 변수는 탁도, pH 및 알칼리도의 세 수질항목이며, 각각의 유의확률은 0.006, 0.455, 0.151이었다. pH 및 알칼리도의 유의확률은 충분히 높아 제외하는 것이 바람직하나, 탁도를 진입시킨 조건에 대한 추가적인 분석이 필요한 것으로 나타났다.

$$Y = 0.517 X + 5.204 \quad (1)$$

여기에서, Y: 최적 W.H. 주입농도(mg/L)

X: Chl-a의 농도(μ g/L)

모형 2에서 진입된 변수는 Chl-a와 탁도 두 가지 수질항목이며, 이 모형은 R값 0.935, R^2 값 0.874, 개선된 R^2 값은 0.859로 적합성이 매우 높은 것으로 나타났다(유의확률: 0.000). 이를 통해 Chl-a 농도와 탁도를 모니터링함으로써 최적 W.H. 주입농도를 예측할 수 있는 것으로 분석되었다. 도출된 식은 아래의 식 (2)와 같다. 이 모형에서 제외된 변수는 pH 및 알칼리도의 두 수질항목이며, 각각의 유의확률은 0.894 및 0.684이었다.

$$Y = 0.479 X_1 + 1.250 X_2 + 1.546 \quad (2)$$

여기에서, Y: 최적 W.H. 주입농도(mg/L)

X_1 : Chl-a의 농도(μ g/L)

X_2 : 탁도(NTU)

Fig. 9. Results of multiple regression analysis using equation 3.

이상의 결과는 최적 W.H. 주입농도가 Chl-a 농도에 가장 크게 영향을 받아 모형 1에 의해 결정 가능함을 나타냄과 동시에, 탁도와도 높은 상관성을 갖고 있음을 의미한다(모형 2). 이는 조류 응집·부상공정의 적정조건이 조류의 활성도 및 광조건은 물론 응집조건뿐만 아니라 후속의 부상조건이 적정한지 여부에 의해서도 결정된다는 사실에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서, 조류 자체가 탁도를 유발하기도 하고(조류 기인 탁도), 원수에 유입된 유기·무기의 탁도 유발물질(조류에 기인하지 않는 탁도)로 인해 원수의 탁도가 높아짐에 따라 최적 W.H. 주입농도 또한 높아져야 하는 개연성을 고려할 때 타당한 모형인 것으로 판단된다.¹³⁾

식 (2)를 활용하여 새로운 변수 X를 도출하고, 그 관계를 그래프로 도시하면 Fig. 9와 같고, 이때의 상관식은 아래의 식 (3)과 같다.

$$Y = 0.875 X + 3.864 \quad (R^2 = 0.874) \quad (3)$$

여기에서, Y: 최적 W.H. 주입농도(mg/L)

X: $0.479 \cdot \text{Chl-a} + 1.250 \cdot \text{Turbidity} + 1.546$

식 (1)과 식 (3)을 비교하였을 때, 각각의 R^2 값은 0.794, 0.874이었으며, 이는 Chl-a 하나의 수질항목만으로 W.H. dose를 결정하는 것도 유의하나, Chl-a와 탁도의 두 수질항목을 활용하여 결정하면 더 높은 신뢰도를 확보하는 것으로 해석할 수 있다.

참고로, 이상의 실험에 사용된 한강 복합조류 및 선택배양 조류 모두 우점종은 *Microcystis*인 것으로 나타났다. 우리나라에서 수온이 높아지는 여름철에 호수와 강에서 발생하는 녹조는 대부분 남조류 중 *Microcystis*가 우점하는 것으로 보고되고 있으므로,^{14,15)} 본 실험은 그에 부합하는 의미를 갖는다고 판단된다. 타 조류종을 대상으로 하여 W.H. 주입농도를 결정하기 위해서는 별도의 추가적인 연구가 보완되어야 할 것이다.

Fig. 10. Decision algorithm of W.H. dose: (a) Model 1, and (b) Model 2.

3.4. 최적 W.H. 주입농도 자동제어 로직 제안

이상의 결과로부터, 천연조류제거제인 W.H.를 이용한 응집·부상공정을 통해 부유 미세조류를 제거하고자 할 때 최적 W.H. 주입농도는 Chl-a 농도 단독(모형 1) 또는 Chl-a 농도와 탁도를 동시에 모니터링(모형 2)하여 결정할 수 있음이 확인되었다. 이를 기반으로 최적 W.H. 주입농도를 자동제어하기 위한 로직을 제안하면 아래의 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)는 모형 1에 기반하고 있으며, Fig. 10(b)는 모형 2에 따른 자동제어 로직이다. 자동제어 로직의 도출과정에서는 ① Jar-test 결과의 반영, ② 처리효율성, ③ 시스템의 안정성과 안전성, ④ W.H. 주입농도 결정을 위한 모니터링의 단순성, ⑤ 운전·제어의 용이성 및 ⑥ 경제성 등을 고려하였다. 처리효율의 측면에서는 Chl-a의 제거효율을 우선 고려하였다. 시스템의 안정성과 안전성을 확보하기 위하여 W.H. 주입농도의 최소값 및 최대값을 사전에 설정할 수 있도록 하였다. W.H. 주입농도는 원수의 Chl-a(필수항목) 또는 탁도(선택항목)만으로 결정가능하도록 하여 최대한 단순화하였다. 원수의 Chl-a 농도가 일정한 설정값 이하(예를 들어 10 $\mu\text{g/L}$ 미만)로 유입될 때에는 W.H.의 주입을 방지하거나 최소 설정값만큼만 주입하여 경제성을 제고하거나 처리효율을 높일 수 있도록 구성하였다.¹⁶⁾

두 자동제어 로직 모두 최소주입농도(Low W.H. dose) 및 최대주입농도(High W.H. dose)를 사전에 설정하고 있어서, 유입원수의 모니터링을 통하여 산정된 'W.H. dose(Y)' 값이 'Low W.H. dose' 이상이고, 'High W.H. dose' 이하인 정상 조건에서는 이에 해당하는 값만큼 주입하게 된다. 한편, 'W.

H. dose(Y)' 값이 'Low W.H. dose' 미만일 때는 사전에 설정되어 있는 'Low W.H. dose' 값만큼 주입하여 처리효율을 제고하고, 'High W.H. dose'를 초과할 때에는 'High W.H. dose' 값만큼만 주입함으로써 과다 주입을 방지하게 된다.

참고로, 한강 본류의 한 지점(경안천의 팔당호 유입지점인 "팔당댐5" 측정소)을 대상으로 2013년 1월부터 2015년 12월까지 3년간의 Chl-a 농도의 분포를 분석한 결과, 10.1~86.4 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로서 95% 백분위 농도는 55.5 $\mu\text{g/L}$ 인 것으로 나타났다.¹⁷⁾ 이를 바탕으로 본 연구에서는 10.4 $\mu\text{g/L}$ 에서 104.0 $\mu\text{g/L}$ 까지의 폭넓은 범위에 걸쳐 실험을 진행함으로써 국내 주요 수원에서 관찰되는 일반적인 Chl-a의 검출 범위를 포함하도록 하였다. 다만 본 연구결과의 현장적용을 위해서는 각 현장의 개별적인 조건들을 충분히 고려할 필요가 있음을 권고한다.

4. 결론

우리나라 하천에서 미세 부유조류, 특히 남조류의 과증식에 의한 녹조현상이 심각한 사회적 현안으로 떠오르고 있다. 따라서 과증식된 부유 미세조류가 정수공정으로 유입되기 이전에 천연조류제거제(W.H.)를 이용한 응집·부상공정을 통해 사전에 제거하는 방안이 새롭게 부각되고 있다. 응집·부상공정은 기존의 응집·침전공정이나 용존공기부상공정(Dissolved air flotation)에 비하여 운전·제어인자가 거의 구명되어 있지 않은 신공정이기 때문에 효율적인 운영을 위해서 최적의 W.H. 주입농도를 결정하기 위한 실증적

연구가 필수적이다.

이를 위하여 다양한 원수 조건에 대하여 Jar-test를 실시하여 W.H.에 의한 미세 부유조류 제거기작에 대하여 검토하고, 다변량분석 등의 통계기법을 활용하여 그 결과를 해석함으로써 응집·부상공정에서의 최적주입농도를 결정하는 알고리즘을 도출하였다. 본 연구의 주요한 결과는 다음과 같다.

1) 여러 조건에 대하여 Jar-test를 시행하고, Chl-a농도, 탁도, 알칼리도, pH, 입자수, 입자표면적, 부상시작시간 및 부상종료시간 등을 종합적으로 분석한 결과, 천연조류제거제(W.H.)를 이용한 응집·부상공정에서 ① W.H. 주입, ② 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 플럭의 부상, ⑦ 부상 슬러지의 압밀 등의 과정이 순차적으로 관찰되었다.

2) W.H.의 주입농도를 최소 10에서 최대 120 mg/L의 범위 주입한 Jar-test에서 Chl-a의 제거율은 W.H.의 주입농도 증가에 따라 지속적으로 상승하는 반면, 탁도, 입자수, 입자표면적, 부상시작시간 및 부상종료시간 등은 적정 주입농도에 도달할 때까지 감소한 이후 그 이상의 농도로 주입되면 다시 반등하는 경향성이 관찰되었다. 이상의 결과는 조류 및 탁도, 기타 부상조건이 동시에 최적화되지 않을 수 있다는 가능성을 시사한다. 따라서, 효과적인 정수장 유입조류 전처리를 위해서는 처리대상물질(미세 부유조류), 처리효율 및 경제성 등을 종합적으로 고려한 최적 W.H. 주입농도 결정기법의 개발이 필수적이라는 사실이 재차 확인되었다.

3) 한강에서 채취한 복합조류를 대량 배양하여 Jar-test를 시행한 결과, 최적 W.H. 주입농도는 Chl-a와 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났으며, 다른 수질항목(탁도, pH 및 알칼리도)에 대해서는 뚜렷한 상관성이 관찰되지 않았다.

4) 남조류를 선택적으로 대량 배양하여 Jar-test를 시행한 결과, 최적 W.H. 주입농도는 Chl-a와의 상관성이 가장 높고, 탁도와 관련해서도 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났으며, 다른 수질항목(탁도, pH, 알칼리도, 입자수 및 입자표면적)과는 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다.

5) 한강 복합조류 및 남조류 선택 배양액을 활용한 모든 Jar-test 데이터를 통합하여 다중회귀분석을 실시한 결과, 아래의 두 가지 모형이 적합한 것으로 도출되었다.

$$<\text{모형 1}> Y = 0.517 X_1 + 5.204 \quad (R^2\text{값: } 0.782)$$

$$<\text{모형 2}> Y = 0.479 X_1 + 1.250 X_2 + 1.546 \\ (R^2\text{값: } 0.874)$$

여기에서, Y: 최적 W.H. 주입농도(mg/L)

X_1 : Chl-a의 농도($\mu\text{g/L}$)

X_2 : 탁도(NTU)

6) 부유 미세조류가 정수공정으로 유입되기 이전에 W.H. 등 천연조류제거제를 이용한 응집·부상공정을 통해 사전에 제거하고자 할 때의 최적주입농도는 유입원수의 Chl-a 농도 단독(모형 1) 또는 Chl-a 농도와 탁도를 동시에 모니터링(모형 2)하여 결정할 수 있으며, Chl-a 농도 및 탁도의 증가에 비례하여 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

7) 이상의 결과로부터, 천연조류제거제인 W.H.를 이용한 응집·부상공정을 통해 부유 미세조류를 제거하고자 할 때, ① 처리효율성, ② 시스템의 안정성과 안전성, ③ 모니터링의 단순성, ④ 경제성 등을 고려한 자동제어 로직의 Prototype을 제시하였다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부의 “조류감시 및 제거활용기술개발 실증화 사업”을 통해 지원받은 과제임(D116-00180-0401-1).

KSEE

References

1. Lee, J. H., Kim, B. H., Moon, B. C. and Hwang, S. J., “Optimization test of plant-mineral composites to control nuisance phytoplankton aggregates in eutrophic reservoir,” *Korean J. Limnol.*, **44**(1), 31~41(2011).
2. Kim, B. C., Kim, E. K., Pyo, D. J., Park, H. D. and Heo, W. M., “Toxic cyanobacterial blooms in Korean lakes,” *Environ. Res. Annual Report*, **13**(8), 64~70(1996).
3. Korea environment corporation, *Algae control technologies to improve the safety of aquatic ecosystem*, pp. 1~229(2012).
4. Kim, B. H., Lee, J. H., Kim, K. H., Yu, Y. H. and Hwang, S. J., “Algal growth inhibition activity of domestic plants and minerals using simple extraction method,” *Korean J. Limnol.*, **43**(2), 221~231(2010).
5. Kim, B. C., Heo, W. M., Hwang, G. S., Ahn, T. S. and Shim, J. H., “The allelopathic effect of cyanobacterial extracellular byproduct upon algal photosynthesis,” *Korean J. Environ. Biol.*, **12**(1), 52~57(1994).
6. Mcekorea, <http://www.mcek.co.kr>(2016).
7. Han river flood control office, *Water resources management information system*, <http://www.wamis.go.kr>(2016).
8. Ministry of environment, *National institute of environmental research, Water information system*, <http://water.nier.go.kr> (2016).
9. Watanabe, M. F. and Oishi, S., “Effects of environmental factors on toxicity of a cyanobacterium (*microcystis aeruginosa*) under culture conditions,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **49**(5),

- 1342~1344(1985).
10. Shirai, M., Matumaru, K., Ohtake, A., Takamura, Y., Aida, T. and Nakano, M., "Development of a solid medium for growth and isolation of axenic *microcystis* strains (*cyanobacteria*)," *Appl. Environ. Microbiol.*, **55**(10), 2569~2571(1989).
11. Pyo, D. J., Yim, M. Y. and Kim, E. J., "A study on the massive cultivation of *cyanobacteria* and strip analysis of cyanobacterial toxin," *Anal. Sci. Technol.*, **25**(6), 388~394(2012).
12. Jung, J., Illustrated guide to Korean freshwater algae, Academy, Seoul, pp.1~496(1993).
13. Lee, T. K. and Jin, J. S., "The effect of turbidity on the coagulation of algae," *J. NERI*, **4**(1), 1~8(1999).
14. Kim, H. S., Hwang, S. J. and Kong, D. S., "Cyanobacterial development and succession and affecting factors in a eutrophic reservoir," *Korean J. Limnol.*, **40**(1), 121~129(2007).
15. Choi, C. M., Kim, J. H., Kim, W. I., Lee, J. S., Jung, G. B., Lee, J. T. and Moon, S. G., "Phytoplankton Flora and Community Structure in the Lower Nakdong River," *Korean J. Environ. Agric.*, **26**(2), 159~170(2007).
16. The office of waterworks, Seoul metropolitan government, Research on the development of OJT (Online Jar Tester), pp. 1~181(2007).
17. Han river flood control office, Water resources management information system, <http://www.wamis.go.kr>(2016).