

ORIGINAL ARTICLE

미세기포를 이용한 *Microcystis sp.* 제거에 관한 연구

형성희 · 이갑두¹⁾ · 박상원^{1)*}

계명대학교 환경과학과, ¹⁾계명대학교 녹색융합기술연구소

A Study on the Elimination of *Microcystis sp.* using Microbubble

Sung-Hee Hyung, Kap-Du Lee¹⁾, Sang-Won Park^{1)*}

Department of Environmental Science Keimyung University, Daegu 42601, Korea

¹⁾Center for Green & Fusion Technologies, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

Abstract

This study carried out zeta potential measurements of the *Microcystis sp.* under various solutions condition and investigated the characteristics of *Microcystis sp.* through the size control of microbubbles to eliminate algae that causes problems in aquatic ecosystems and human activities. DAF process was adopted and several coagulants were used to remove the *Microcystis sp.*

CCD Camera was used to measure and analyze the size of microbubble, and fluorescent microscope was used to observe the particle, algae species and community. Zeta potential behavior of the algae was analyzed by using ELS-Z. Lab-scale and pilot-scale experiments were conducted to test flotation process. Polyaluminium chloride(PAC) coagulant was used, and the removal efficiency of the algae was assessed through Chlorophyll-a analysis. In the Lab-scale experiment, 2.2 ppm, 11 ppm, 22 ppm, and 44 ppm of polyaluminium chloride was injected to coagulate the algae. The coagulated algae was floated by the microbubble. The microbubbles in the experiments were generated at a air pressure of 450 ~ 550 kPa. The microbubble size was controlled in 36 μm , 100 μm , and 200 μm , respectively by using different diffuser. The results of lab-scale experiments on flotation plant indicated that the average removal rate was about 90% or above for 11 ppm, 22 ppm, and 44 ppm of polyaluminium chloride. On the other hand, in the pilot-scale experiment, the removal efficiency was in the range of 85% to 95% in all dose ranges of polyaluminium chloride and aluminium sulfate coagulants.

Key words : *Microcystis sp.*, Microalgae, Coagulation, DAF process, Microbubble, Zeta potential

1. 서론

최근 우리나라는 기후변화로 인한 온도상승과 인간의 산업활동으로 인해 국내 주요 하천 및 호소 대부분이 영양염류의 과다로 미세조류가 급격하게 번식하고 있다 (Lim et al., 2000). 정체되어 있는 수역에서 물 속의 영양염류가 급증하면 미세조류인 남조류, 녹조류, 규조류

등이 이상증식 한다. 이러한 미세조류가 수표면에서 군집으로 덮이는 현상을 녹조현상이라고 정의한다. 녹조현상의 주요 원인 조류는 남조류로 알려져 있으며, 남조류의 발생종으로는 *Microcystis sp.*, *Anabaena sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Aphanizomenon sp.* 등이 있다(Kwon, 2014).

남조류는 이형세포(Heterocyst)로 인하여 질소고정

Received 31 December, 2015; Revised 18 February, 2016;

Accepted 10 March, 2016

*Corresponding author : Sang-Won Park, Department of Environmental Science Keimyung University, Daegu 42601, Korea
Phone: +82-53-580-5212
E-mail: swpark@kmu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(Nitrogen Fixation)능력을 지니고 있어 수중 질소의양이 극미량 일지라도 분열증식에 필요한 에너지원으로 사용할 수 있다. 또한, 세포 속 가스포(Gas vacuole)가 존재하여 광합성에 필요한 빛에너지 수급을 위한 수직운동이 가능하다(Jung, 2007). 이런 특성들로 인하여 남조류가 다른 미세조류에 비해 급증하며 특히, 우리나라 수계에서는 *Microcystis sp.*가 빈번히 출현한다.

남조류는 흙내, 곰팡내가 나며 Geosmin과 2-MIB (2-Methylisoborneol)와 같은 이취미 물질을 생산한다(McGuire et al., 1983). 이취미 물질은 불안감과 불쾌감을 주며, 정수처리과정 중 부유성질로 인하여 침전되지 않은 플록(Floc)들이 여과지 폐쇄현상을 발생시켜 여과효율을 감소시키며, 미세조류 분해로 생성된 유기전구물질(Humic substance)이 염소와 반응 후 발암성물질인 THM(Trihalomethane)을 생성시킨다(Lim et al., 2000). 또한, 간장독소(Hapatotoxin), 신경독소(Neurotoxin), 피부독성(Dermatotoxin)을 생성하며, 우리나라 수계에 빈번히 출현하는 *Microcystis sp.*는 인체, 가축등에 피해를 주는 Microcystin인 간장독소를 생성한다(Carmichael, 1994; Hawkins et al., 1985).

여러 피해를 야기하는 녹조현상을 해결하기 위해 일반적으로 황토살포, 응집침전, 염소처리 등이 이용되고 있다(Han et al., 2001). 기존의 제거기술은 침전된 남조류들이 혐기성 상태에서 썩게 되어 BOD, COD 증가의 우려가 있다. 부상공정은 침전에 의해 발생하는 문제점을 방지하며, 침전공정에 비해 적은 응집제가 사용된다(Kim, 2013). 또한, 기존의 침전공전에 비해 매우 우수한 효율을 보인다(Edzwald, 1993). 특히, 용존공기부상(dissolved air flotation : DAF)법은 대표적인 부상공법으로 저탁도, 부유성 수질에 대한 처리가 우수한 것으로 알려져 있다(Kang et al., 2005).

본 연구에서는 남조류 중 *Microcystis sp.*의 특성을 파악하고, DAF공정 현장 적용시 최적의 운전조건을 Lab-scale 실험을 통해 도출하여 *Microcystis sp.* 제거를 하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. *Microcystis sp.* 배양 및 미세기포 특성분석

본 연구에서 미세조류의 선정은 현재 수계에서 여름

철 빈번히 발생하며 호소 부영양화의 지표인 남조류의 대표종인 *Microcystis sp.*를 선정하였으며, 한국생명공학연구원 미생물자원센터에서 분양받아 계대배양 하여 사용하였다.

미세기포 특성분석은 일반미세기포와 외류식 미세기포 장치를 개발하여 36 μm , 100 μm , 200 μm 의 미세기포 크기를 측정하였다. 미세기포 크기의 측정을 위하여 CCD Camera(charge coupled device, CoolSNAP MYO, Photometrics)와 배율이 $\times 10$ 의 렌즈를 사용하여 분석하였다.

2.2. 정량화 분석

본 연구에서는 군집의 특성을 나타내는 *Microcystis sp.*가 일정한 농도로 정량이 되지 않아 오차값 및 검증선 실험을 실시 하였다. 정량화 실험은 1 L 메스실린더 2개를 이용하여 *Microcystis sp.* 800 mL와 증류수 800 mL를 각각 넣고 2 L 용량플라스크에 혼합하여 실온에서 15 min 교반하여 정량화를 실시하였다.

2.3. Lab-scale 실험

본 연구에서는 대표적인 양이온 응집제인 폴리염화알루미늄(polyaluminium chloride : PAC, 11%, SAMUOO)를 사용하였으며, 정량화실험을 거친 *Microcystis sp.*를 증류수와 1:1로 혼합하여 500 mL를 제조하여 원수로 하였다. 500 mL 비커 4개를 사용하여 정량화된 *Microcystis sp.*를 각각 250 mL를 넣은 뒤 PAC를 2.2 ppm, 11 ppm, 22 ppm, 44 ppm을 주입하여 120 rpm에서 3 min, 급속교반후 80 rpm에서 15 min 완속교반하여 응집 실험을 실시하였다. 응집 전후의 표면전위의 변화를 알아보기 위해 응집 전과 응집 후의 제타전위를 측정하였다. 응집 실험 후 미세기포 발생장치를 이용하여 450 ~ 550 kPa의 압력에서 부상 실험을 실시 하였으며, 외류식 미세기포장치의 경우 미세기포의 크기를 36 μm , 100 μm , 200 μm 로 조절하여 실험을 하였다. 부상공정을 거친 처리수 중 50 mL를 여과지를 사용하여 Aspirator로 여과하였으며, 여과 후 아세톤 20 mL 여과지를 혼합하여 원심분리튜브에 넣어 녹인 뒤 상온에서 24 hr 방치하여 보관하였다. 실험에 사용한 아세톤(99.5%)은 아세톤과 증류수를 9+1로 희석한 아세톤을 사용하였다. 24 hr 후 원심분리기를 사용하여 2000 rpm, 20 min 원심분리 하였

으며, 상등액을 채취하여 분광광도계를 사용하여 파장 663 μm , 645 μm , 630 μm , 750 μm 에서 OD값을 측정하여 식 1을 이용하여 클로로필 a(Chlorophyll-a:Chl-a)를 측정하였다.

$$Y = 11.64X_1 - 2.16X_2 + 0.10X_3$$

$$X_1 = OD663 - OD750$$

$$X_2 = OD645 - OD750$$

$$X_3 = OD630 - OD750$$

$$\text{Chlorophyll-a}(\mu\text{g/l}) = \frac{Y \times \text{상등액량}(ml)}{\text{시료량}(l)}$$

2.4. Pilot-scale 실험

본 연구에서는 Lab-scale 실험에서 도출한 인자들을 바탕으로 약 100 ton/day(1day 8 hr) 규모의 Pilot plant 를 J 정수사업소에 설치 하였다. 녹조제거 장치로 들어오는 원수의 유량은 시간당 15.75 ton/hr 으로 고정하여 실험하였으며, Lab-scale과 같은 응집제인 PAC를 사용하였다. PAC의 주입 농도는 5.5 ppm, 11 ppm, 22 ppm,

33 ppm 으로 하였으며 교반시간은 15 min, 기압수 발생 장치 속의 압력은 500 ~ 600 kPa로 조절하였다. 부상된 슬러지는 스키머를 사용하여 부상슬러지조에 저장하였으며, 처리수는 처리수 저장조에 저장하였다. 처리수의 특성 분석은 Lab-scale 실험과 같은 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 미세기포 및 미세조류 특성분석

일반적으로 DAF 공정은 문헌상에서 알려진 400 kPa 에서 가장 적합하다고 알려져 있다. Shin(2009)의 연구에 따르면 400 kPa 이상의 압력에서의 미세기포의 크기가 큰차이를 보이지 않았다. Baek(2014)의 연구에서 볼 수 있듯이 400 ~ 500 kPa의 경우 미세기포의 크기는 약 10 ~ 100 μm 의 크기를 가지는 것을 볼 수 있다. 본 연구에 사용된 미세기포측정사진은 Fig. 1에 나타내었다. 전체적으로 미세기포의 크기는 32.43 ~ 350.14 μm 로 나타났다. 측정결과를 살펴보면 (a)는 미세기포의 밀도가 현저히 낮은 것을 볼 수 있으며, (b)~(e)는 와류식 기포

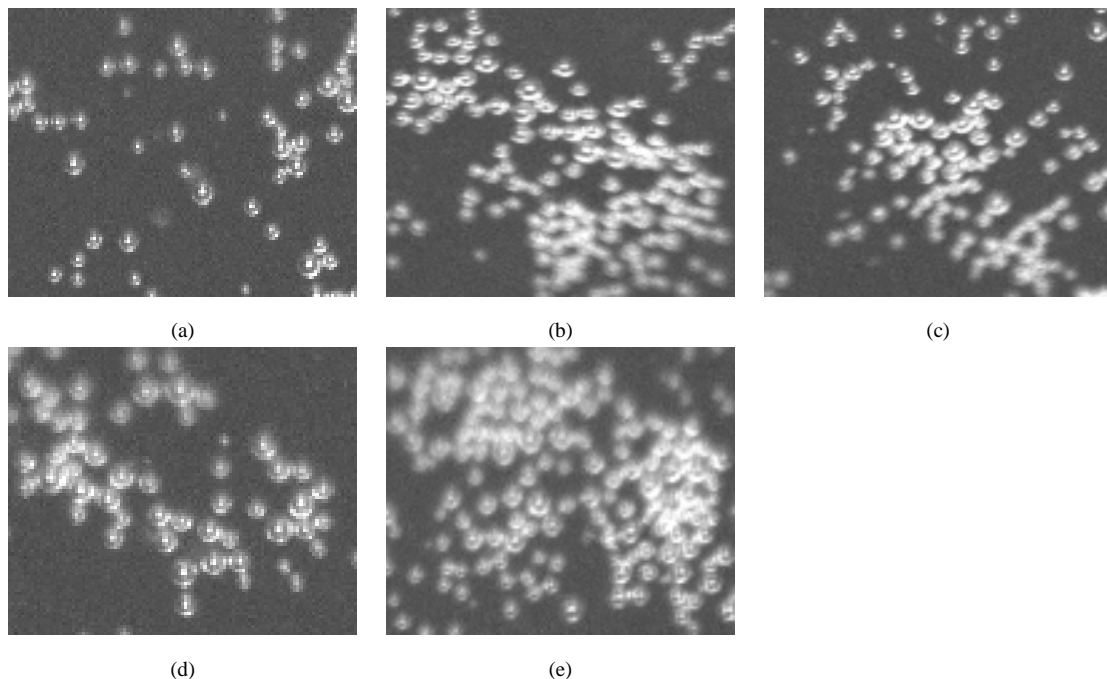


Fig. 1. Microbubbles image of (a) Microbubbles(Nomal), (b) 36 μm Microbubbles(Vortex), (c) 100 μm Microbubbles (Vortex), (d) 200 μm Microbubble(Vortex), (e) Pilot plant Microbubble(Vortex).

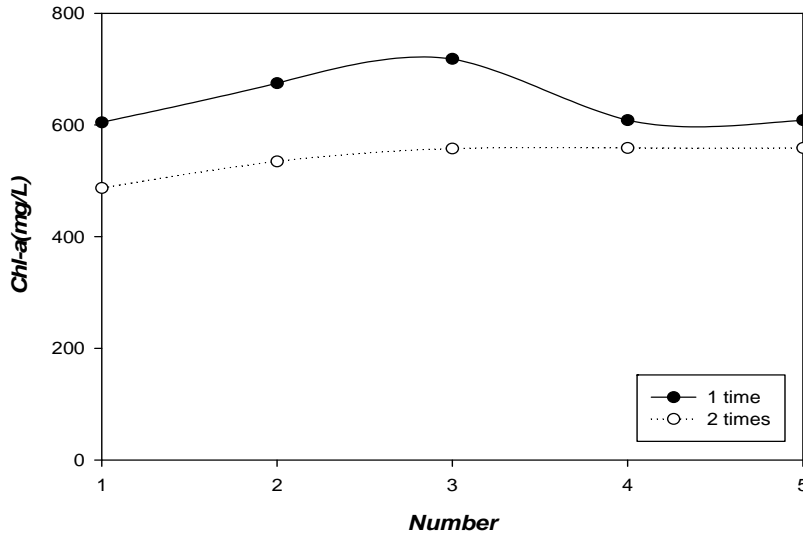


Fig. 2. Quantify experimental error values due to *Microcystis sp.*

발생장치를 이용하여 발생시킨 미세기포로 (a)의 미세기포보다 밀도가 높은 것을 볼 수 있다. 또한, (b) ~ (d)는 Lab-scale에 적용된 미세기포이며, (e)는 Pilot plant에 적용된 미세기포이다. (a) ~ (d)보다 (e)의 미세기포 밀도가 훨씬 높은 것을 볼 수 있으며, 이는 미세조류의 부상 분리 실험 시 제거효율 측면에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3.2. 정량화 분석

일반적으로 미세조류는 군집의 특성을 나타내므로 농도가 일정하게 정량화 되지 않는다. 이에 본 연구에서는 응집 실험에 앞서 오차값 및 검증선 실험을 실시하였다. Fig. 2은 같은 양의 *Microcystis sp.*를 채취해 Chl-a값을 분석한 결과이다. 분석결과를 살펴보면, 1 time의 실험에서 Chl-a값이 604.84 ~ 718.41 $\mu\text{g/L}$ 로 오차범위가

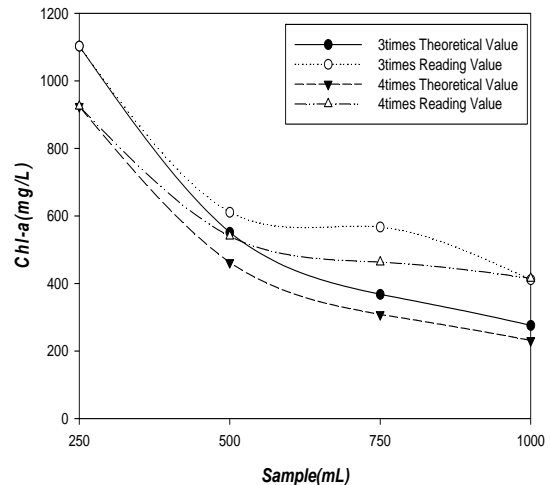
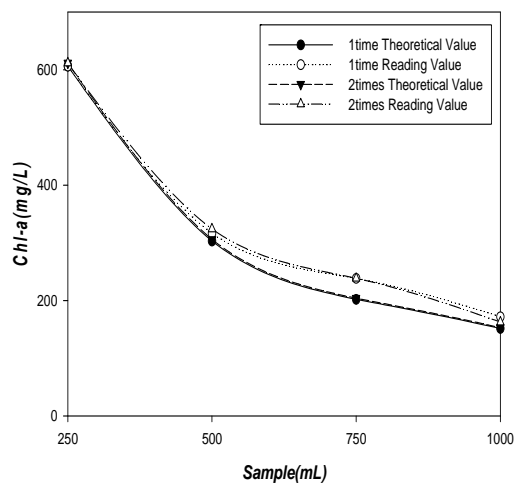


Fig. 3. *Microcystis sp.* theoretical value and the error value differences.

15.8%로 나타났으며, 2 times의 실험에서는 Chl-a값이 487.13 ~ 559.03 $\mu\text{g/L}$ 로 오차범위가 12.8%로 나타났다. 두 번의 실험결과 10% 이상의 오차범위를 나타냈으며, 오차범위 문제로 인해 미세조류 실험 시 정량화 실험이 필요한 것으로 판단된다.

이에 Fig. 3는 미세조류의 정량화 실험을 실시한 결과이다. 시료원수를 500 mL, 750 mL, 1000 mL로 하여 이론값과 실제값을 비교 하였다. 실험결과를 살펴보면, *Microcystis sp.*의 1 time 오차범위는 500 mL에서 4.2%, 750 mL에서 15.2%, 1000 mL에서 11.8%이며, 2 times는 500 mL에서 6.0%, 750 mL에서 14.5%, 1000 mL에서 6.0%로 나타났다. 3 times는 오차범위가 500 mL에서 9.7%, 750 mL에서 35.2% 1000 mL에서 33.0%로 나타났으며, 4 times는 500 mL에서 14.4%, 750 mL에서 33.40%, 1000 mL에서 44.28%로 나타났다. 4회의 실험 결과를 평균해 보면, 500 mL에서 6.5%, 750 mL에서 21.6%, 1000 mL에서 20.7%로 나타났다. 이에 오차범위가 가장 적은 500 mL에서 실험을 실시하는 것이 타당하다고 사료된다.

3.3. Lab-scale 실험

본 연구에서는 미세조류를 제거하기 위한 적절한 응집제의 주입량을 결정하기 위해 제타전위 분석실험 및 응집실험을 실시하였다. 응집제는 미세조류의 제타 분석 실험 결과 음(-)의 값을 가지므로 대표적인 양이온 응집제인 PAC를 선정하였으며, 주입 농도는 2.2 ppm, 11 ppm, 22 ppm, 44 ppm으로 하였다.

Fig. 4 ~ 7은 PAC의 주입 농도에 따른 *Microcystis sp.*의 제타전위 분석 결과를 나타낸 것이다. Before는 PAC를 주입후 응집된 상태의 *Microcystis sp.* 제타전위를 측정된 결과이며, After는 응집 후 DAF 공정을 거친 상태의 *Microcystis sp.*의 제타전위를 측정된 결과이다. 실험결과를 살펴보면, Before와 After 모두 PAC를 2.2 ~ 44 ppm으로 주입했을 시 *Microcystis sp.*의 제타전위가 약 -20 ~ +25 mV를 나타내었다. 22 ppm의 구간에서 제타전위 절대값이 등전점(zero point charge; ZPC)에 근접하게 나타났다. 이에 22 ppm에서 응집효율이 가장 높을 것으로 판단되며, 그 이상의 PAC를 주입하였을 경우 제타전위가 역전되어 양(+)의 값을 나타냄으로 응집효율이 감소할 것으로 판단된다. 또한, DAF 공정

적용 시에도 22 ppm에서 제거효율이 가장 높을 것으로 사료된다.

미세조류의 제타전위 분석실험을 바탕으로 미세기포를 이용하여 *Microcystis sp.* 제거효율 평가를 실시하였다. Fig. 8 ~ 11와 Table 1은 PAC의 농도별, 미세기포 크기별로 *Microcystis sp.*를 제거실험을 실시한 결과이다. *Microcystis sp.*의 제거 실험은 총 3회 반복 실험을 실시하였다. 결과를 살펴보면 일반 미세기포를 사용하였을 때 평균 제거효율은 2.2 ppm에서 34.1%, 11 ppm에서 86.2%, 22 ppm에서 88.2%, 44 ppm에서 91.4%로 나타났다. 36 μm 크기의 미세기포를 이용하였을 때 평균 제거효율은 2.2 ppm에서 35.8%, 11 ppm에서 95.8%, 22 ppm에서 94.7%, 44 ppm에서 88.4%로 나타났다. 100 μm 크기의 미세기포를 이용하였을 때 평균 제거효율은 2.2 ppm에서 48.6%, 11 ppm에서 94.8%, 22 ppm에서 95.5%, 44 ppm에서 93.6%로 나타났다. 200 μm 크기의 미세기포를 이용하였을 때 평균 제거효율은 2.2 ppm에서 24.8%, 11 ppm에서 96.4%, 22 ppm에서 95.3%, 44 ppm에서 97.5%로 나타났다. *Microcystis sp.*의 최적효율은 200 μm 크기의 미세기포와 44 mg/L의 응집제 농도에서 97.5%로 나타났다. 또한, 응집제 주입농도별 평균제거효율을 살펴보면 2.2 ppm은 35.8%, 11 ppm은 93.3%, 22 ppm은 93.4%, 44 ppm은 92.7%로 나타났으며, 미세기포 크기별 평균제거효율을 살펴보면 일반 미세기포는 88.6%, 36 μm 는 93.0%, 100 μm 는 94.6%, 200 μm 는 96.4%로 나타났다. 단, 가장 낮은 2.2 ppm의 주입 농도에서 편차가 심함으로 제외하여 평균결과를 나타냈다. 따라서 가장 적은 응집제 주입량인 2.2 ppm을 제외한 나머지 응집제 주입량이 최고효율을 보이는 응집제 주입량과의 제거효율 차이가 많이 나지 않기 때문에 실제 현장실험을 평가해야지만 최적의 주입 농도를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 미세기포 크기별 미세조류 제거효율을 살펴보면, 가장 낮은 농도를 제외한 나머지 농도에서 일반 미세기포를 이용하여 부상분리 했을 때보다 균일한 크기의 미세기포로 부상분리 하였을 때 평균적으로 제거효율이 10% 이상 높게 나타났다. 또한 앞서 기술한 예상과는 달리 미세조류 제거효율 평가결과 ZPC인 22 ppm에서 제거효율이 가장 높지 않았다. 이는 미세조류 제거에 있어 일정한 크기의 미세조류 플록이 형성되어 부상이 이루어 진다면, 응집의 최적 농도인

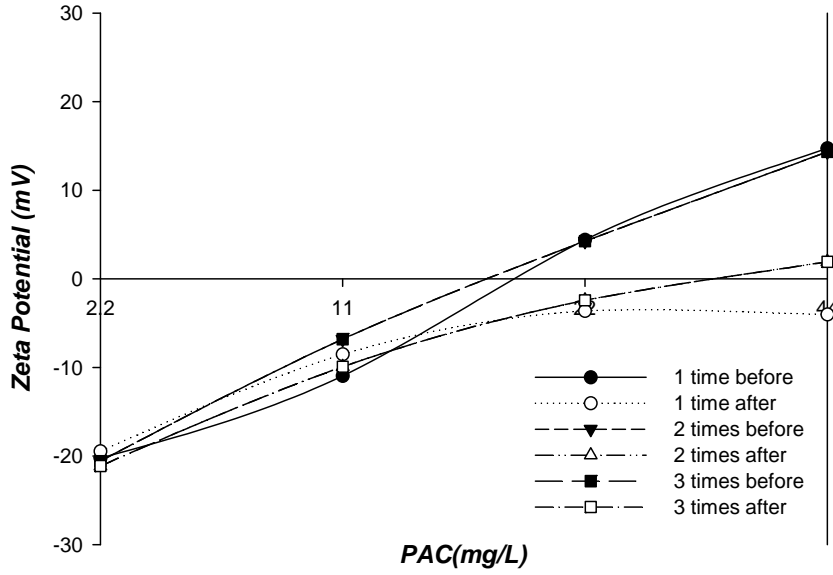


Fig. 4. The zeta potential of a cohesive *Microcystis sp.*(Normal).

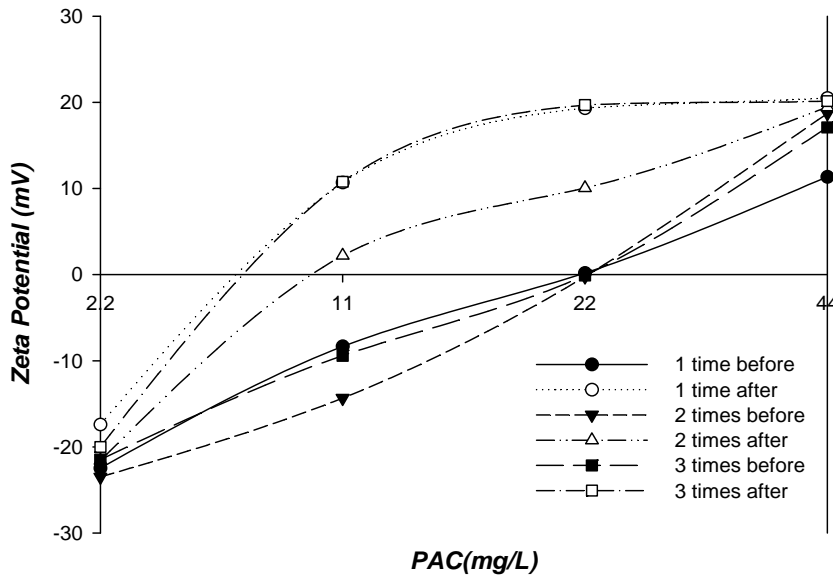


Fig. 5. The zeta potential of a cohesive *Microcystis sp.*(Vortex, size : 36 μ m).

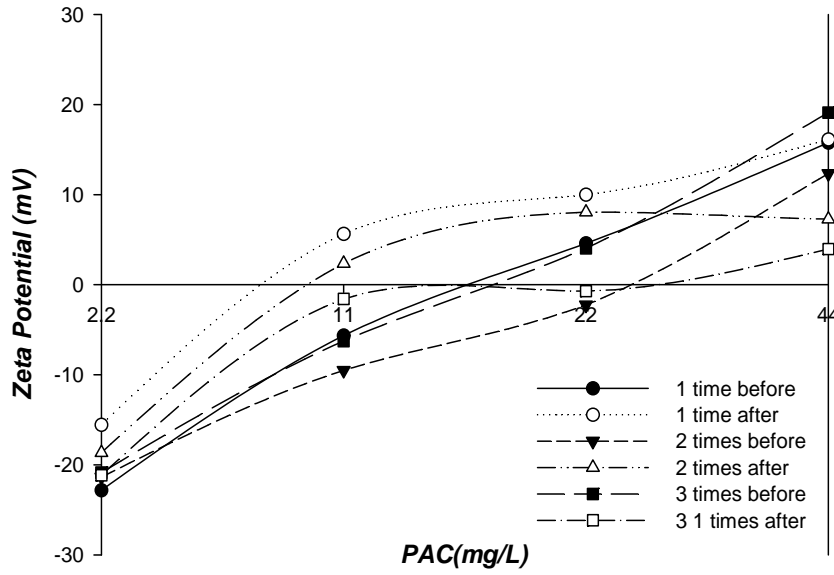


Fig. 6. The zeta potential of a cohesive *Microcystis sp.*(Vortex, size : 100 μm).

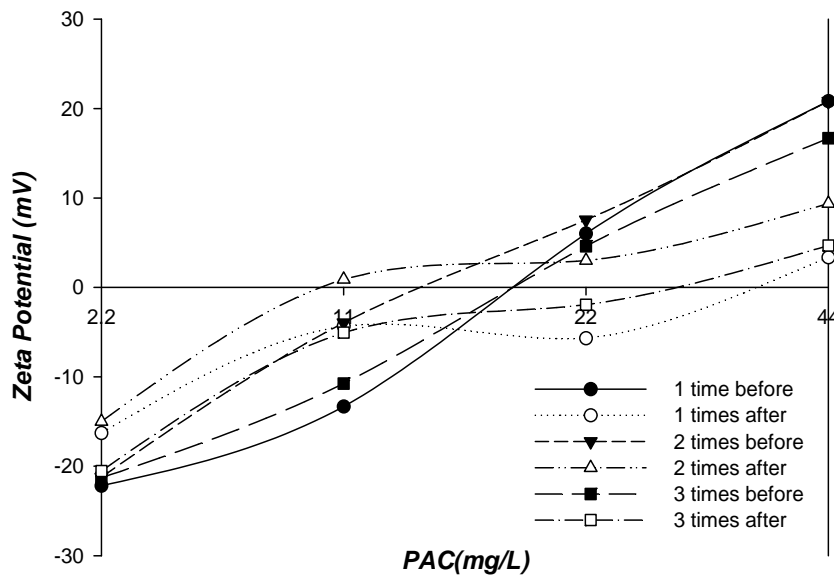


Fig. 7. The zeta potential of a cohesive *Microcystis sp.*(Vortex, size : 200 μm).

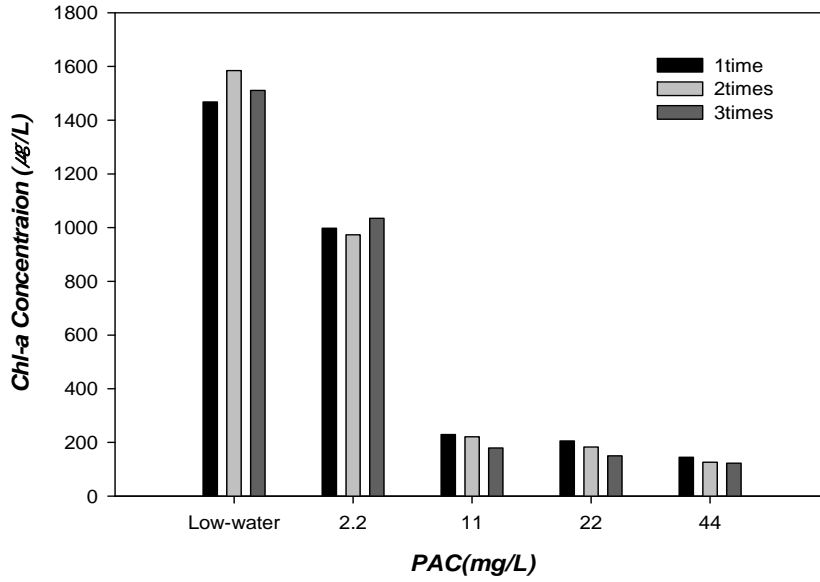


Fig. 8. The amount of *Microcystis sp.* in accordance with the amount of aggregation(Nomal).

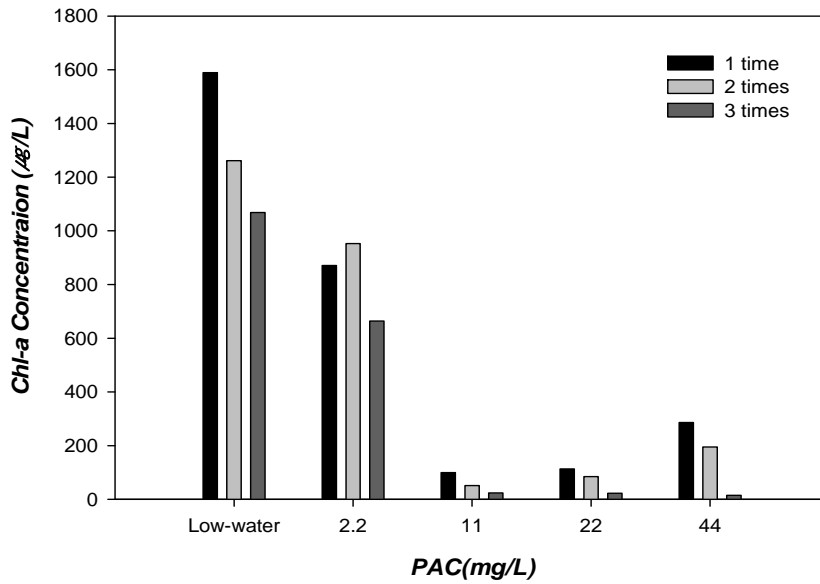


Fig. 9. The amount of *Microcystis sp.* in accordance with the amount of aggregation(Vortex, size : 36 µm).

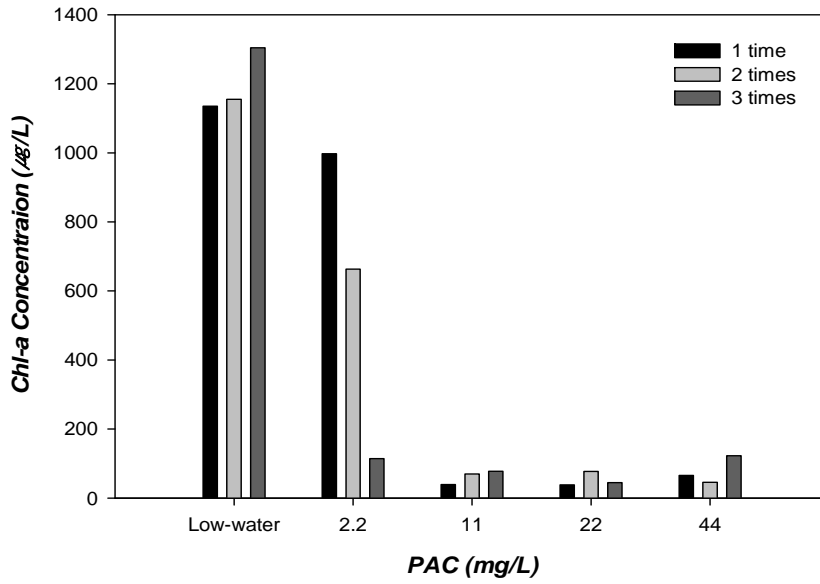


Fig. 10. The amount of *Microcystis sp.* in accordance with the amount of aggregation(Vortex, size : 100 µm).

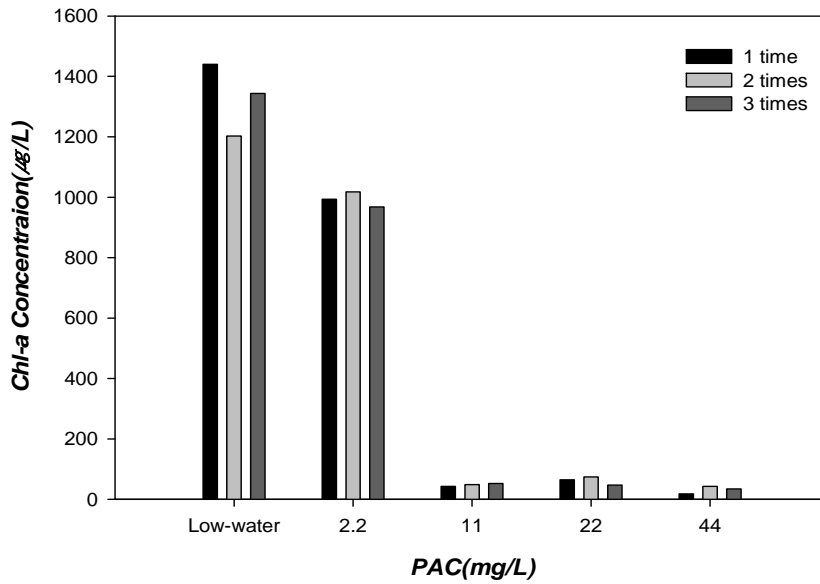


Fig. 11. The amount of *Microcystis sp.* in accordance with the amount of aggregation(Vortex, size : 200 µm).

Table 1. Removal efficiency of the floatation of the PAC (Unit : %)

	ppm	Nomal	36 μm	100 μm	200 μm
1 st.	2.2	32.1	45.2	12.1	31.0
	11	84.4	93.7	96.5	97.0
	22	86.0	92.9	96.6	95.5
	44	90.2	82.0	94.2	98.8
2 nd.	2.2	38.6	24.5	42.6	15.4
	11	86.0	96.0	94.0	96.0
	22	88.5	93.3	93.3	93.8
	44	92.0	84.5	96.0	96.4
3 rd.	2.2	31.5	37.8	91.2	27.9
	11	88.1	97.8	94.0	96.1
	22	90.1	97.9	96.6	96.5
	44	91.9	98.6	90.6	97.4

ZPC와 상관없이 제거된다는 것을 의미한다. 이상의 결과를 종합하여 경제성을 고려할 시, 최적의 응집농도는 11 ppm으로 판단되며, 미세기포의 크기의 경우 균일한 크기로 부상분리 실험을 실시하는 것이 가장 적합한 것으로 사료된다.

3.4. Pilot-scale 실험

본 연구에서는 Lab-scale 실험에서 도출한 인자를 바탕으로 Pilot-scale 실험을 실시하였다. PAC의 농도는 5.5 ppm, 11 ppm, 22 ppm, 33 ppm으로 실시하였다. Fig. 12는 제타전위를 분석한 결과이다. 결과를 살펴보면, 모든 농도 구간에서 현장조류의 제타전위가 약 -20 ~ +30 mV로 나타났다. 응집제는 11 ppm의 농도를 기점으로 ZPC가 역전이 이루어 졌으며, 이 구간에서 제거 효율이 가장 높을 것으로 예상된다. Pilot-scale 실험의 경우 집수조에 유입수(Influent water)를 집수시켜 운전하였다. 이 때 Pilot-scale 실험은 유입수를 집수 하는 과정에서 Chl-a의 농도가 지속적으로 변화하기 때문에 정량화가 불가능 하였다. 따라서 매회 유입수를 측정하여 응집제 농도별 제거효율 실험을 실시 하였다. Fig. 13의 경우 응집제 농도별 원수가 같지 않아 원수의 농도를 응집제 농도별로 다르게 표시하였다. Fig. 13의 (a)는 5.5

ppm과 11 ppm의 원수농도가 비슷하여 평균한 수치이며 22 ppm과 33 ppm의 원수농도가 비슷하여 평균한 수치를 나타내었다. (b)는 5.5 ppm과 11 ppm의 원수의 농도가 각각 다르며 22 ppm과 33 ppm의 원수농도가 비슷하여 평균하여 나타냈다. (c)는 전 구간의 농도가 비슷한 원수농도로 나타나 하나의 원수로 평균하여 나타냈다. 실험결과를 살펴보면, 전반적으로 전 구간에서 Chl-a 농도가 비슷하게 나타났으며, 이는 Pilot-scale 실험이 Lab-scale 실험과 마찬가지로 응집의 최적 농도인 ZPC와는 관계가 없는 것으로 판단된다. 또한, *Microcystis sp.*의 제거에 있어 부상분리 공정을 적용할 시 *Microcystis sp.*가 부상이 가능할 정도의 플록형성이 이루어 진다면 ZPC와는 관계없이 최적농도로 결정할 수 있다는 것을 의미한다. Table 2는 현장시료를 제거한 실험결과 이다. 결과를 살펴보면 평균제거효율이 5.5 ppm은 90.94%, 11 ppm은 91.8%, 22 ppm은 91.2%, 33 ppm은 91.0%로 나타났다. J 정수사업소 현장시료의 최고효율은 11 ppm구간에서 98.1%로 최고의 효율을 보였다. 하지만 경제성을 고려 한다면 모든 구간의 제거효율이 90% 이상으로 비슷하므로 이에 본 연구에서는 경제적 측면을 고려할 시 최적응집제 농도를 5.5 ppm으로 선정하는 것이 유리한 것으로 판단된다.

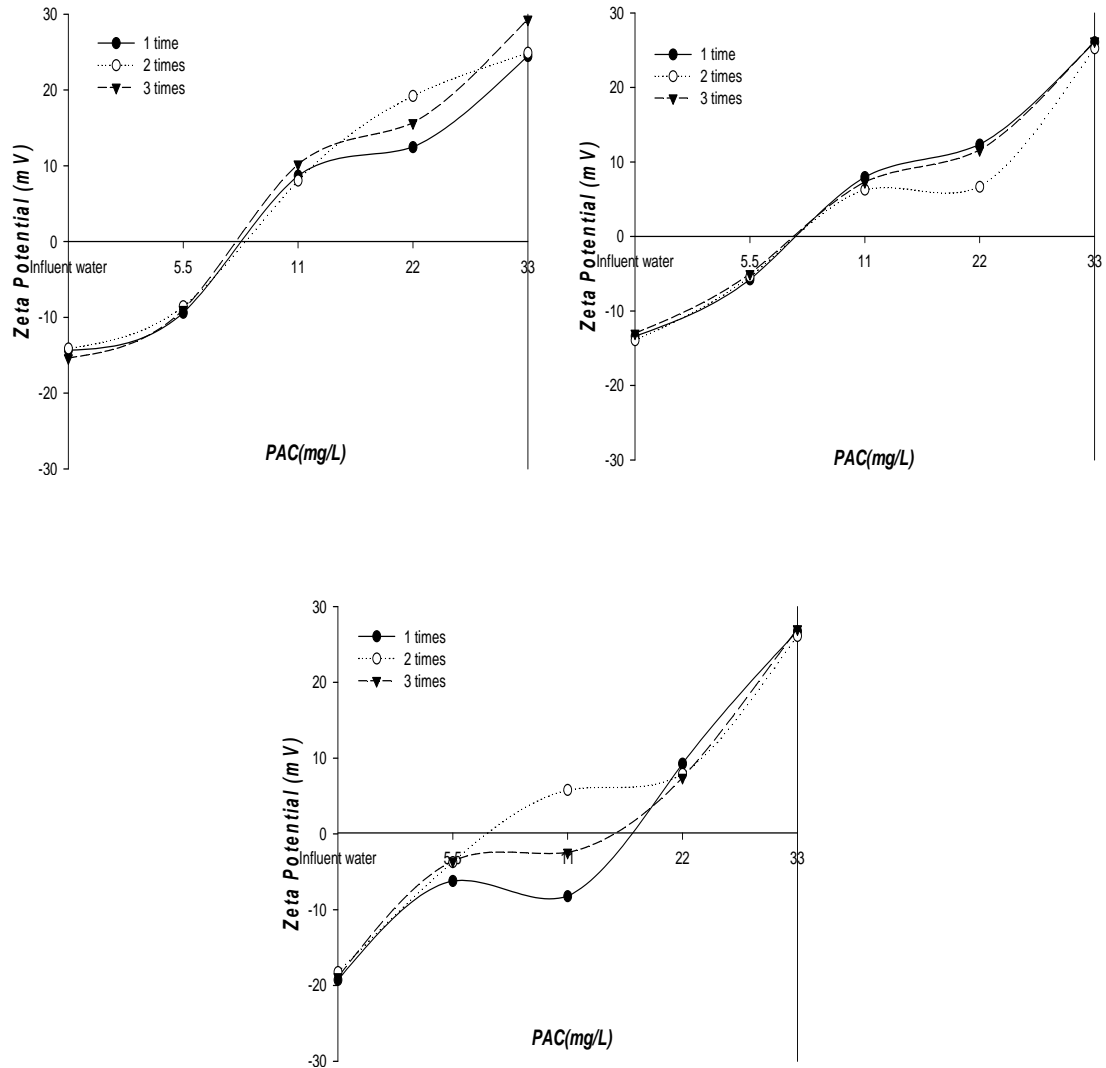


Fig. 12. The zeta potential change in PAC(J Purification plant).

Table 2. The floatation removal efficiency of J Purification plant

(Unit : %)

	5.5 ppm	11 ppm	22 ppm	33 ppm
1 st	85.3	83.7	93.5	97.7
2 ed	93.9	98.1	89.6	83.7
3 rd	93.6	93.6	90.1	91.7

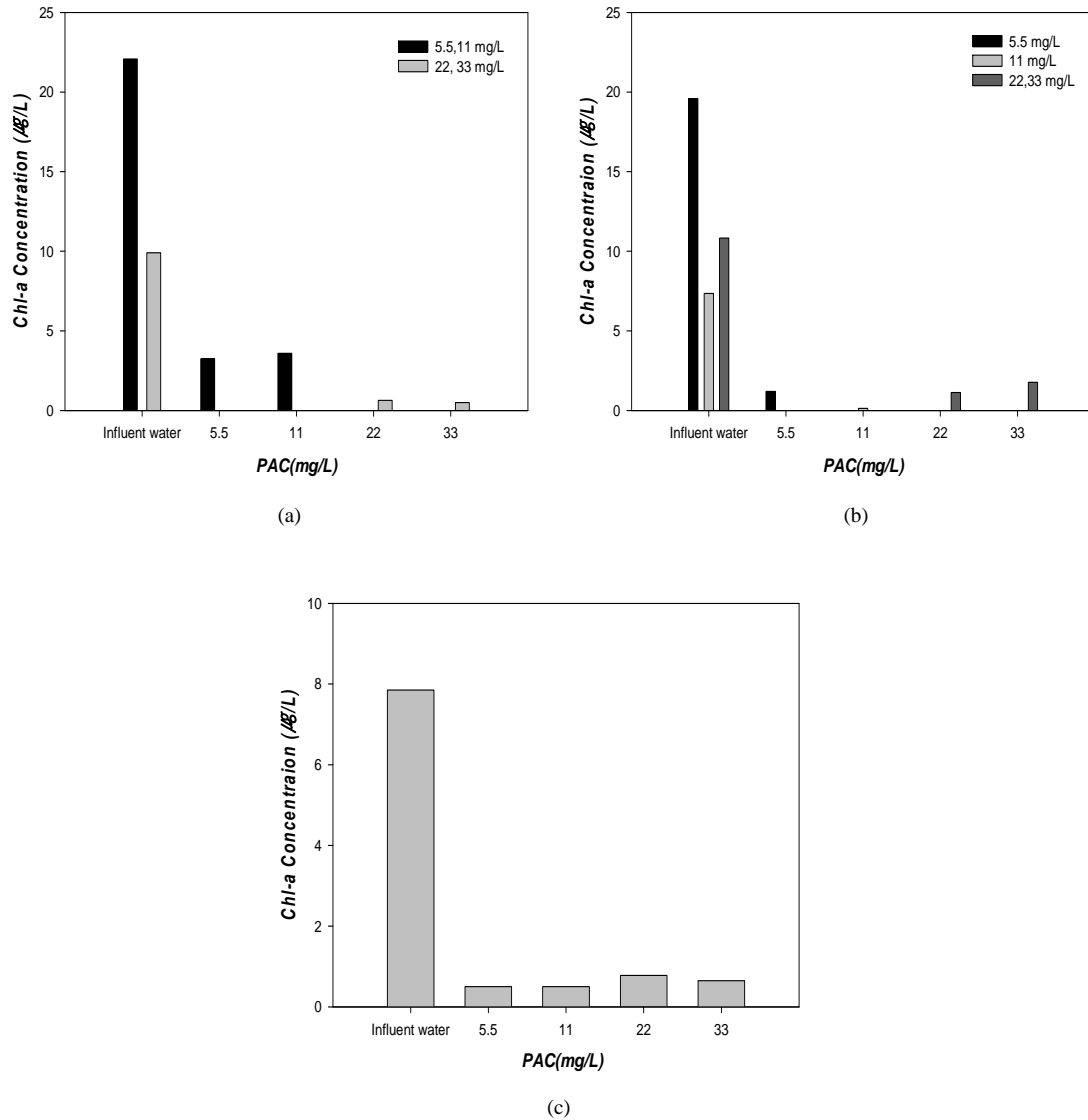


Fig. 13. Chl-a concentration of the PAC(J Purification plant).

4. 결론

본 연구에서는 녹조현상의 원인 물질인 미세조류 중 빈번히 우점하는 *Microcystis sp.*를 제거하기 위해 *Microcystis sp.*의 제타전위 분석 및 특성을 파악하고, 효율적인 응집제 주입량을 결정하였다. 또한, DAF 공법

적용 시 미세기포크기 및 응집제 주입량과의 상관관계를 확인하는 실험을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서 전반적인 미세기포의 크기를 측정할 결과 32.43 ~ 350.14 µm 사이의 크기로 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, *Microcystis sp.*의 제타전위를 측정

한 결과, 음(-)의 전하(-20 ~ -10 mV)를 띠고 있었으며, 군집 특성이 관찰되어 정량화 실험이 필요하였다. 따라서 정량화 실험을 실시한 결과 미세조류의 오차범위는 500 mL에서 6.5%, 750 mL에서 21.6%, 1,000 mL에서 20.7%로 나타나 본 연구에서는 500 mL에서 실험을 하는 것이 가장 적합하다고 판단된다.

(2) Lab-scale 실험에서 폴리염화알루미늄의 제타전위는 약 -20 ~ +25 mV의 범위를 나타냈고, 22 ppm의 농도에서 응집효율이 가장 높게 나타났다. 부상분리 실험결과를 살펴보면 미세기포 크기가 200 μm 응집제 주입농도가 44 ppm 일 때 98.76%로 가장 높은 효율이 나타났으며, 응집제 주입농도별 평균제거효율을 살펴보면 2.2 ppm은 35.8%, 11 ppm은 93.3%, 22 ppm은 93.4%, 44 ppm은 92.7%로 나타났으며, 미세기포 크기별 평균제거효율을 살펴보면 일반미세기포는 88.6%, 36 μm 는 93.0%, 100 μm 는 94.6%, 200 μm 는 96.4%로 나타났다. 단, 가장 낮은 2.2 ppm의 주입농도에서 편차가 심함으로 제외하여 평균결과를 나타냈다. 결과에서 볼 수 있듯이 미세조류 제거에 있어 일정한 크기의 미세조류 플록이 형성되어 부상이 이루어진다면, 응집의 최적 농도인 ZPC와 상관없이 제거된다는 것을 알 수 있다.

(3) Pilot-scale 실험에서 폴리염화알루미늄의 경우 평균제거효율은 5.5 mg/L에서 90.9%, 11 mg/L에서 91.8%, 22 mg/L에서 91.1 %, 33 mg/L에서 91.0%로 나타났다. J 정수사업소의 시료의 최고효율은 11 mg/L에서 98.1%로 최고의 효율을 보였지만, 경제성을 고려할 시 5.5 mg/L의 응집제를 주입하는 것이 가장 적합하다고 판단된다.

본 연구에서는 와류식 미세기포 발생장치를 사용하였기 때문에 환경적 측면뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 탁월한 효과를 지닐 것으로 판단된다. 향후, 미세기포의 밀도와 *Microcystis sp.* 제거에 관한 연구가 체계적으로 이루어진다면 DAF공정을 이용한 미세조류제거에 있어 큰 역할을 할 뿐만 아니라 타 미세조류제거 연구에도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 남동화력발전(주) 현장기술 연구개발사업의 일환으로 수행하였음.

REFERENCES

- Baek, S. H., 2014, Analysis of dissolved ozone concentration and oxidation efficiency by sub-micron ozone bubble, Master's Thesis, Seoul National University.
- Carmichael, W. W., 1994, The toxins of cyanobacteria, *Scientific American*, 170, 78-86.
- Edzwald, J. K., 1993, Algae, bubbles, coagulants, and dissolved air flotation, *Water Science & Technology*, 27, 67-81.
- Han, M. Y., Kim, W. T., Kim, D. J., 2001, A theoretical consideration on the clay spreading method as a remedy for algal blooms in natural waters, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 15, 217-221.
- Hawkins, P. R., Runnegar, M. T. C., Jackson, A. R. B., Falconer, I. R., 1985, Severe hepatotoxicity caused by the tropical cyanobacterium(blue-green alga) *Cylindrospermopsis raciborskii(woloszynska)* Seenaya and Subba Raju isolated from a domestic water supply reservoir, *Appl. Environ. Microbiol.*, 50, 1292-1295.
- Jheon, W. H., Lee, K. L., Kim, J. M., Choi, H. J., 2007, A study on the production and behavior of cyanobacterial toxin, InCheon: National Institute of Environmental Research, Administrative Publications 000-0000.
- Kang, T. H., Oh, B. S., Cheong, Y. C., Kwon, S. B., Sohn, B. Y., Kang, J. W., 2005, Evaluation of ozone application for drinking water treatment process using DAF, *Korea Society of Environmental Engineers*.
- Kim, B. K., 2013, Control of zeta potential of bubble using multivalent metal ion and its application to algae removal, Master's Thesis, Seoul National University.
- Kwon, D. R., 2014, Growth, buoyancy and geosmin production of cyanobacteria under different temperature and light condition, Master's Thesis, Konkuk University.
- Lim, Y. S., Song, W. S., Cho, J. S., Lee, H. J., Heo, J. S., 2000, The effect of algae on coagulation and filtration of water treatment process, *Korea Journal of Environmental Agriculture*, 19, 13-19.

McGuire, M. J., Krasne, S. W., Hwang, C. J., Izaguirre, G., 1983, An early warning system for detecting earthy-musty odors in reservoir, *Water Science & Technology*, 15, 266-277.

Shin, M. C., 2010, Characteristics of dissolved ozone flotation and dissolved air flotation for lake treatment, Master's Thesis, University of Seoul.