Journal of Environmental Science International
29(9); 907~914; September 2020

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.9.907

ORIGINAL ARTICLE

2단계 전기부상-상승 공정을 이용한 탁도 제거 향상

김동석 · 박영식[1)*]
대구가톨릭대학교 환경과학과, [1)]대구대학교 자유전공학부

Improvement of Turbidity Removal using the Two Stage Electroflotation-rising Process

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park[1)*]
Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 37430, Korea
[1)]Division of of Liberal Studies, Daegu University, Gyeongbuk 38453, Korea

Abstract

In this study, the two-stage electroflotation-rising process was investigated with the aim of improving the performance of the conventional one-stage electroflotation process. A total of 32 min (the electroflotation and rising times were 30 min and 2 min, respectively,) was required when a current of 0.35 A was applied in the one-stage electroflotation-rising experiment. The amount of electric power required to treat 1 m^3 of water was 1.75 kWh/m^3. For the two- stage system, the time required to achieve a turbidity removal rate of over 95% was 16 min (50% of the one-stage system). The amount of electric power required to treat 1 m^3 of water was 0.59 kWh/m^3, which was only 33.7% of that required for the one-stage process. The total treatment time and electric power were excellent in case of the two-stage system in comparison with those of the one-stage process. The rate of turbidity removal for the horizontal electrode arrangement is 9.3% higher than that of vertical electrode arrangement. When Na_2SO_4 was used as the electrolyte, the optimum electrolyte concentration was 1.0 g/L.

Key words : Electroflotation-rising, Stainless steel electrode, Turbidity, Two-stage treatment

1. 서 론

수중에 존재하는 고형물을 제거하는 공정은 종래의 응집·침전(coagulation-sedimentation), 용존공기부상(DAF, dissolved air flotation) 및 전기응집(EC, electro-coagulation)과 전기부상(EF, electroflotation) 등의 전기화학 공정 등이 있다(Kim and Park, 2010).

현재 수처리에서 고형물 제거공정 중에서 가장 많이 이용되고 있는 응집·침전 공정은 처리효율이 낮고 응집 후 침전하는 방법을 사용하기 때문에 처리시간이 많이 소요된다. 또한 화학약품을 사용하며, 응집 공정 결과 발생하는 슬러지를 처리하는데 문제점이 있다(Han et al., 2004).

용존공기부상 공정은 높은 압력으로 공기를 물에 충분히 용해시킨 후 이를 통해 발생하는 미세기포와 수중의 입자를 부착시켜 부력으로 제거하는 공정이다(Han et

Received 30 June, 2020; **Revised** 11 August, 2020;
Accepted 7 September, 2020
*Corresponding author: Young-Seek Park, Division of Liberal Studies, Daegu University, Gyeongbuk 38453, Korea
Phone: +82-53-850-4571
E-mail: ysparkk@daegu.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.

al., 2007). 이 공정은 다양한 크기의 입자성 오염물질들을 비교적 좁은 공간에서 빠르게 제거가 가능한 장점으로 인해 최근에 녹조 제거를 위한 정수처리 공정에 이용되는 등 적용범위가 점차 넓어지고 있다(Ki et al., 2012). 그러나 용존공기부상 공정은 공기 압축기와 가압장치가 따로 필요하고, 처리대상 입자의 크기가 10 ~ 2000 μm 범위에 있을 때 효과적이며, 미세입자 처리시 처리효율이 낮은 것으로 보고되고 있다(Hosny, 1996; Park, 2010).

한편 전기응집 공정은 철 또는 알루미늄과 같이 희생(sacrificial) 전극을 양극(anode)으로 사용하며, 전기분해 반응 중 양극에서 철과 알루미늄 이온이 용출되고, 음극에서는 물의 전기분해에서 발생하는 OH^-가 생성되어 이들이 반응하여 $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$, 및 $Al(OH)_3$ 등이 형성되어 응집제 역할을 한다. 수중의 입자성 물질이 이들 금속 수산화물과 결합하여 중화되고 응집·침전이 일어나게 된다(Jeong and Lee, 2002). 용해성 전극을 이용하는 전기응집의 경우 응집제-고형물 플럭이 부상하기 위해서는 전기분해시 발생하는 수소와 산소 기포가 필요한데, 응집제로 사용하기 위해 필요한 금속이온보다 많은 금속이온이 용출되기 쉽기 때문에 상등액에 잔류 금속농도가 높을 수 있는 가능성이 있어 이들 잔류 금속으로 인한 2차 오염이 우려된다(Roh, 2001; Jeong et al., 2015). 따라서 잔류 금속이온 농도를 고려하여 운전 범위를 결정하여야 한다(Kim and Oh, 2000).

전기부상 공정은 미세 기포를 이용하는 점에서 용존공기부상 공정과 유사하지만 전기분해시 발생하는 수소와 산소 기포를 이용한다는 점이 다르며, 전기분해를 이용한다는 점에서 전기응집 공정과 유사하지만 철이나 알루미늄과 같은 희생 전극을 이용하지 않고 불용성인 stainless steel이나 촉매성 산화물 전극(DSA, Dimensional Stable Anode)와 같은 전극을 사용하여 발생되는 기포만 이용한다는 점이 다르다. 전기부상 공정은 기포 크기가 10 ~ 100 μm인 용존공기부상 공정에 비교할 때 기포 크기가 20~40 μm로 작고 균일하기 때문에 기포-입자 간의 충돌효율이 높고, 전류 밀도를 변화시켜 기포 발생량을 간단하게 조절할 수 있다는 장점이 있다(Hosny, 1996; Kim and Park, 2007). 그러나 전기부상 공정의 경우 미세기포만으로는 수중의 입자를 제거하기 어려우므로 용존공기부상 공정과 같이 보통 응집제를 같이 사용한다(Shin et al, 2002).

본 연구는 전원 인가시 기포 발생과 부상 및 전기 제거 후 잔류 기포의 상승으로 이루어진 일반적인 1단계 전기부상 공정의 운전 성능을 높이기 위한 방법으로 2단계 전기부상 공정을 적용하였을 때의 성능을 구하고 1단계 전기부상 공정의 성능과 비교하여 2단계 전기부상 공정의 적용가능성을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 반응기와 실험방법

반응기의 크기는 600 mm × 60 mm × 50 mm이고, 아크릴로 제작하였다(Fig. 1). 전원공급 장치는 DC power supply (GPR-11H30D)를 사용하였다. 전기부상 공정은 전원을 인가하여 산소와 수소 기포를 발생시키는 전기부상과 전원을 끈 후 및 상승한 기포가 상승하는 상승(rising) 공정으로 이루어진다. 전기부상-상승 공정에서 전기부상은 전원 공급 후 기포발생과 동시에 기포-고형물의 부상이 이루어지며, 상승(rising) 공정은 전원 공급을 끊은 후 전극에서 발생한 잔류 기포의 상승으로 인해 기포-고형물 응결체가 추가 부상하는 단계이다.

전기부상-상승 실험은 2 단계로 구성되었으며, 종래의 1단계 전기부상-상승 공정은 1차 전기부상-상승 공정으로 이루어져 있다. 본 연구에서 제안하는 2단계 전기부상-상승 공정은 1차 전기부상-1차 상승-2차 전기부상-2차 상승 공정으로 구성되어 있다. 높은 전류(0.35 A)를 전극에 인가하여 1차 전기부상을 실시하고 전원을 끄고 1차 상승 공정을 실시한 후 용액에 남아 있는 미부상 플럭를 제거하기 위해 낮은 전류(0.05~0.25 A)에서 2차 전기부상을 실시한 후 2차 상승을 실시하였다. 1차 전기부상에 인가하는 전류는 예비 실험을 통하여 최적 전류로 전류 0.35 A를 선정하였다.

시험수는 수돗물 1 L에 탁도 물질인 kaoline을 0.30 g/L 투입하제 제조하였으며, 초기 탁도는 400~404 NTU이었다. 응집제인 $Al_2(SO_4)\cdot 18H_2O$ 0.253 g/L을 교반기에서 5분 동안 혼합하여 만들었으며, 기초 실험을 통하여 최적 응집제 농도를 결정한 후 실험하였다. 실험에 사용한 불용성 전극인 스테인리스 스틸(SUS) 전극은 크기가 55 mm × 50 mm(반응 면적: 24.75 cm^2)이며, 메시 구멍(opening) 한 변의 길이가 1.61 mm인 메시형

SUS를 사용하였다. SUS 전극은 반응기의 바닥으로부터 약 1 cm 상부에 실험에 따라 수평 또는 수직으로 설치하였으며, 전극의 간격은 5 mm이었다. 전해질의 영향 실험은 염소계 산화제를 발생시키지 않는 Na_2SO_4를 사용하였으며, 실험 종류에 따라 0.5 ~ 2.0 g/L를 증류수에 첨가하여 실험하였다. 다른 실험은 전해질을 첨가하지 않은 조건에서 수돗물을 이용하여 실험하였다(Park, 2011).

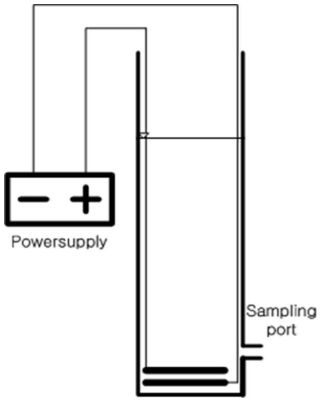

Fig. 1. Schematic diagram of electroflotation equipment.

2.2. 분석 및 측정방법

탁도 측정용 샘플은 반응기 하부 10 cm 지점에 설치된 샘플액 유출구에서 채취하여 탁도를 측정하였다. 탁도는 탁도계(HACH, 2100P Turbiditymeter)를 이용하여 측정하였다. 전기전도도는 전기전도도 미터(Eutech, Cyberscan PC300)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 1단계 전기부상-상승 공정의 성능 평가

Fig. 2에 종래의 1단계 전기부상-상승 공정에서 전기부상 시간(3-30분)과 상승 시간(0-10분) 변화에 따른 탁도 변화를 나타내었다. 전기부상 시간 3분과 5분에서는 전기부상 시간이 끝난 직후 탁도가 거의 제거되지 않았으며, 상승 시간이 4분으로 증가되면서 탁도가 감소하기 시작하여 상승 시간이 10분 일 때 58.1%의 탁도가 제거되었다. 상승 시간을 주지 않은 조건에서 3분과 5분의 전기부상 시간은 전원 인가시간이 짧아 발생한 기포량이 적어 제거되는 탁도가 적은 것으로 판단되었고, 미부상한 기포가 상승하도록 상승 시간을 주어 운전한 결과 미부상 기포가 부상하지 못한 kaoline을 마저 부상시키기 때문에 제거율이 49.9 ~ 58.1%까지 나온 것으로 판단되었다.

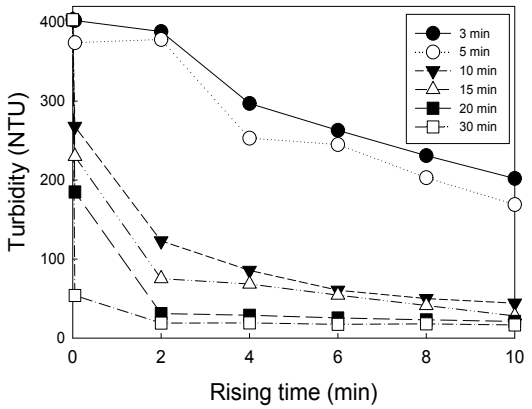

Fig. 2. Variation of turbidity with 1st electroflotation time (3~30 min) and rising time. [(0~10 min), Intitial turbidity, 400 NTU; Current, 0.35 A]

반면 전기부상 시간이 10분인 경우 전기를 인가하는 동안 기포가 생성되면서 10분 동안 부상이 이루어지기 때문에 전기부상 직후 탁도는 268 NTU로 나타났고(초기 탁도, 403 NTU; 제거율, 33.0%), 상승 시간이 2분으로 증가하면서 최종 탁도는 123 NTU(제거율, 69.5%)로 제거율이 2배 이상 증가하였다. 상승 시간이 2분 이후부터는 탁도가 서서히 감소하여 10분의 상승 시간 이후 잔류 탁도는 44 NTU(제거율 89.1%)로 나타났다. 전기부상 시간이 증가하면서 전기부상 시간이 끝난 직후의 잔류 탁도는 낮게 나타나는데 30분의 전기부상 직 후 잔류 탁도는 53.9 NTU(제거율 86.6%), 2분의 상승 시간 후 잔류 탁도는 18.9 NTU(제거율, 95.3%)로 나타나 1차 전기부상 후 2분의 상승 시간을 가지면 8.7%의 제거율이 증가하기 때문에 연속운전보다 전기부상-상승으로 이루어진 간헐 운전이 제거율 증가에 효과적인 것으로 판단되었다. 30분의 전기부상 시간에서 상승 시간이 10분인 경우 잔류 탁도는 16.5 NTU(제거율, 95.9%)로 상승 시간의 증가에 따른 탁도 감소가 낮은 것으로 나타났다. 이는 전기부상 시간이 30분으로 길어 기포의 발생과 상승이 지속적으로 이루어지기 때문에 전기부상 시간이 끝났을 때 이미 많은 양의 탁도가 부상되어 제거되고 미부

상한 기포가 상승하면서 잔류 탁도를 제거하는 상승 시간에서 제거할 탁도가 적기 때문에 일정 시간 이상의 상승 시간은 불필요한 것으로 판단되었다.

95% 이상의 탁도를 제거하기 위해서는 1차 전기부상 시간이 30분, 1차 상승 시간이 2분으로 나타나, 총 32분의 시간이 필요하였다. 1 m^3의 물을 처리하기위해 필요한 전력량은 0.35 A 인가에 필요한 전압 10 V와 전기 인가 시간 30분으로 전력을 계산하고, 1 L를 1 m^3으로 환산한 후 구한 결과 1.75 kWh/m^3으로 나타났다.

3.2. 2단계 전기부상-상승 공정의 적용가능성과 성능 평가

1단계 전기부상-상승 실험에서 탁도 제거율을 높이기 위하여 전기부상 공정만 적용하지 않고 상승 시간도 같이 적용하여 전기부상-상승 공정으로 운전할 때 처리율이 증가하였는데, 1단계 전기부상-상승 공정에서 상승 시간은 2분으로 짧지만 전기를 인가하는 전기부상 시간은 30분으로 길다. 따라서 1차 전기부상 시간을 줄이는 것이 총 처리시간과 전력량을 줄일 수 있어 경제성을 높일 수 있는 방안이 된다. 1단계 전기부상 실험에서 전기부상 시간이 10분이고 상승 시간이 4분인 경우 총 탁도 제거율이 78.8%로 나타났다. 이는 1차 전기부상 시간이 부족하기 때문이며, 1단계 처리 이후 2단계 전기부상-상승 공정을 적용할 경우 탁도 제거율을 높일 수 있다고 판단하여 예비실험한 결과 2단계 처리가 가능하다고 판단되었다(data not shown).

2단계 전기부상-상승에 대한 실험은 1차 전기부상-1차 상승-2차 전기부상-2차 상승으로 이루어지므로 30분과 같이 긴 1차 전기부상 시간이 필요하지 않아 0.35 A에서 1차 전기부상 후 상승시 효과가 가장 높았던 10분의 1차 전기부상 시간을 선택하였고, 2분의 상승 시간만으로 탁도 제거율이 2배 이상 상승하여 1차 상승 시간을 2분으로 고정하였다. 2차 전기부상-상승 실험에 이용할 전류를 결정하기 위하여 2차 전기부상 시간을 2분, 2차 상승 시간을 2분을 기준으로 설정한 후 2차 전기부상에 인가하는 전류를 0 ~ 0.25 A로 변경하여 2단계 전기부상의 성능을 평가하여 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 보듯이 1단계 전기부상-상승 공정만 적용한 경우는 기포 발생량이 적고 상승 시간이 짧아 총 탁도 제거율은 66.2%이었다. 2단계 전기부상-상승 공정을 적용하기 위하여 2차 전기부상 공정의 전류를 0.05 A인가하고 2분의 전기부상 후 2분의 상승 시간을 적용하였을 때 총 탁도 제거율은 77.3%로 나타났다. 2차 전기부상 공정의 전류를 0.1 A로 증가시켰을 때 1차 전기부상-상승 공정에서 65.4%의 제거율을 나타내었고(■), 2차 전기부상-상승 공정을 적용한 결과(□) 31.5%의 추가적인 제거율을 얻어 총 탁도 제거율은 96.9%를 나타내었다. 2차 전기부상 공정의 전류가 0.15 A로 증가되면서 총 탁도 제거율은 96.6%를 나타내어 0.10 A와 비슷한 제거율을 나타내었다. 2차 전기부상 공정의 전류가 0.20 A와 0.25 A로 증가하면서 총 탁도 제거율은 89.9%와 86.5%로 감소되었다. 전류가 증가하면 기포 발생량이 많아 kaoline 플럭의 상승에 도움을 줄 수 있는데 0.20~0.25 A에서는 탁도 제거 효과가 적고 오히려 감소하는 것으로 나타나 반응기 내부의 기포와 플럭의 상승을 관찰하였다. 전류가 높을 경우 속도가 빠른 다량의 기포가 발생하며, 이들 기포가 kaoline 플럭을 상승시키는데 빠른 속도로 인해 플럭이 깨어지고 일부 플럭은 하강하여 상승을 방해하기 때문에 탁도 제거율이 낮아지는 것이 관찰되었다. 따라서 2차 전기부상 전류는 적은 전류로 서서히 플럭을 상승시켜야하기 때문에 0.10 A가 최적인 것으로 판단되었고 2단계 처리시 1단계 처리 이상의 제거율을 얻어 2단계 처리의 적용이 가능하다고 판단되었다.

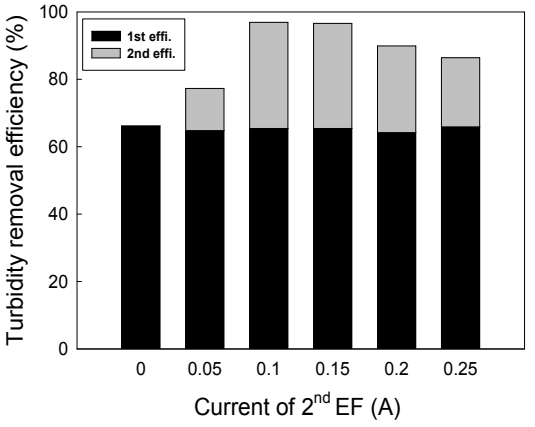

Fig. 3. Effect of secondary electroflotation current on turbidity removal efficiency(Intitial turbidity, 402 NTU; 1st Current, 0.35 A, 1st electroflotation, 10 min; 2nd electroflotation 2 min; 2nd rising 2 min).

3.3. 2단계 전기부상-상승 공정의 성능 평가

2단계 전기부상-상승 공정의 1차 전기부상에서 전류 0.35 A, 전기부상 시간 10분, 상승 시간 2분, 2차 전기부상에서 전류 0.10 A, 상승 시간 2분인 조건에서 2차 전기부상 시간을 1~4분으로 변경하여 2차 전기부상 시간이 탁도 제거율에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 보듯이 2차 전기부상 시간이 1분인 경우 1차 전기부상-상승만 적용하였을 때의 처리율인 65.9%(■)보다 20.3% 높아져 총 제거율이 86.2%(□)로 나타나, 1분간의 2차 전기부상 시간의 효과가 매우 큰 것으로 판단되었다. 2차 전기부상 시간을 2분으로 증가시켰을 경우는 탁도 제거율이 33.4% 높아져 총 97.2%의 제거율을 나타내었다. 2차 전기부상 시간이 3분으로 증가하면서 탁도 제거율은 22.6% 증가, 4분으로 증가하면서 19.3% 증가에 그쳐 2분 이상의 2차 전기부상 시간은 불필요하며 최적 2차 전기부상 시간은 2분으로 나타났다.

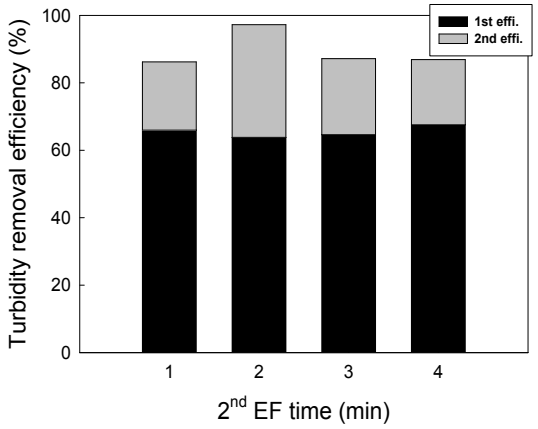

Fig. 4. Effect of 2nd electroflotation time on turbidity removal efficiency(Intitial turbidity, 404 NTU; 1st Current, 0.35 A, 1st electroflotation, 10 min; 1st rising, 2 min; 2nd electroflotation current, 0.10 A; 2nd rising, 2 min).

Fig. 5에 2차 상승 시간의 영향을 고찰하기 위하여, 1차 전기부상 전류 0.35 A, 부상시간 10분, 상승 시간, 2분, 2차 전기부상에서 전류 0.10 A, 전기부상 시간 2분인 조건에서 2차 상승 시간에 따른 탁도 제거율을 나타내었다.

2차 상승 시간이 1분인 경우 9.4%의 추가 제거율을 나타내어 총 탁도 제거율은 74.7%로 나타났고, 2분인 경우 32.2%의 추가 제거율을 나타내어 총 제거율은 97.5%, 3분인 경우 97.6%, 4분인 경우 97.5%의 제거율을 나타내어 최적 2차 상승 시간은 2분으로 나타났다.

95% 이상의 탁도 제거율을 얻기 위해서 Fig. 1의 1단계 전기부상-상승 공정에서는 총 32분의 시간이 필요하고, 1 m^3의 물을 처리하기 위해 필요한 전력량은 1.75 kWh/m^3으로 나타났다. 반면 2단계로 처리할 경우 1차 전기부상 전류 0.35 A, 부상시간 10분, 1차 상승 시간 2분이 소요되고, 2차 전기부상 전류 0.10 A, 전기부상 시간 2분, 2차 상승 시간 2분으로 총 소요시간은 16분이 소요되어 1단계보다 50%에 불과하였다. 또한 1 m^3의 물을 처리하기 위해 필요한 전력량은 0.59 kWh/m^3으로 나타나 1단계 전기부상 공정만으로 처리할 경우의 33.7%에 불과하였다. 즉, 1단계 처리 대신 2단계로 처리할 경우 전력량이 높고 소요시간이 긴 1단계 공정에서의 전력과 시간을 줄일 수 있기 때문에 1단계 전기부상-상승 공정보다 2단계 전기부상-상승 공정이 처리시간과 전력비 면에서 우수하다고 판단되었다.

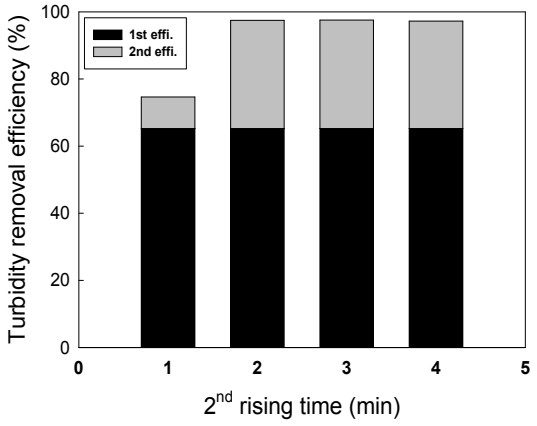

Fig. 5. Effect of secondary electroflotation time on turbidity removal efficiency(Intitial turbidity, 404 NTU; 1st Current, 0.35 A, 1st electroflotation, 10 min; 1st rising, 2 min; 2nd electroflotation current, 0.10 A; 2nd electroflotation, 2 min).

3.4. 2단계 전기부상-상승 성능에 미치는 전극 설치 방향과 전해질 농도의 영향

전극 형태에 대한 선행 연구에서 평판형(plate) 전극은 발생하는 기포가 합체되어 구멍이 있는 메시(mesh)형 전극에서 발생하는 기포보다 평균 기포크기가 크고, 평판형 전극은 기포가 합체되었다 작아지는 과정에서 기포가 합체될 때 전류의 흐름이 원활하지 못하여 전압의 불규칙하게 변동하므로 메시형 전극을 사용하는 것이 전기부상에 유리한 것이 관찰되었다(Zheng et al., 2017).

Mesh No. 12(opening size, 1.61 mm)인 메시형 스테인리스 스틸 망을 전극으로 사용하여 전극을 수평과 수직으로 배열하여 전극의 배열이 2단계 전기부상-상승 조건에서 탁도 제거에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보듯이 수평으로 배열한 전극은 Fig. 3~5의 실험에서 관찰된 바와 같이 1단계 처리에서 탁도 제거율이 66.5%로 나타났으며 2단계의 탁도 제거율은 28.3%, 최종 탁도 제거율은 94.8%로 나타났다. 반면 수직으로 배열한 전극은 1단계 처리에서 탁도 제거율이 50.9%, 2단계의 탁도 제거율은 34.6%, 최종 탁도 제거율은 85.5%로 나타나 수평으로 배열한 전극의 제거율이 수직으로 배열한 전극보다 탁도 제거율이 우수한 것으로 나타났다. 수평배열 전극의 1차 처리가 수직배열 전극보다 15.6% 높았으나 2차 처리는 수직배열 전극의 처리율이 6.3% 높게 나타났다. 이는 1차 처리시의 처리율이 낮기 때문에 잔류 탁도가 높아 2차 처리시의 처리율이 높은 것으로 판단되었다. Lucero et al.(2018)은 본 연구와 동일한 스테인리스 스틸 메시 전극을 사용한 실험에서 단위 시간당 생성되는 미세기포 생성량은 수직배열(5.75 cm^3/min)이 수평배열(5.45 cm^3/min)에 비해 5.2% 높지만, 기포 크기의 경우 수평배열(54.14 μm)이 수직배열(57.42 μm)보다 5.7% 작다고 보고하였다. 본 연구의 경우 수평배열과 수직배열 조건에서 기포와 플럭 상승을 관찰한 결과 수직배열의 경우 반응기 중간에서 상승 흐름이 생기고 지속적으로 기포를 생성할 경우 시간이 경과하면서 전극의 좌우로 하향 흐름이 발생하는 것이 관찰되었고, 이 하향 흐름에 의해 플럭의 일부가 다시 하향하면서 제거율에 부정적인 영향을 주는 것으로 판단되었다. 반면 수평배열의 경우 전극이 반응기 하부 층 전체에 걸쳐 있으므로 기포와 플럭이 균일하게 상승하고 전극의 좌우에서 하향 흐름이 발생하지 않는 것이 관찰되었다. 기포발생량과 크기 외에도 유체의 흐름이 중요한 것으로 판단되었다. 따라서 기포 발생량은 수직배열보다 적지만 기포크기가 적고 하향 흐름이 발생하지 않는 수평배열의 전극 성능이 우수하다고 판단되었다.

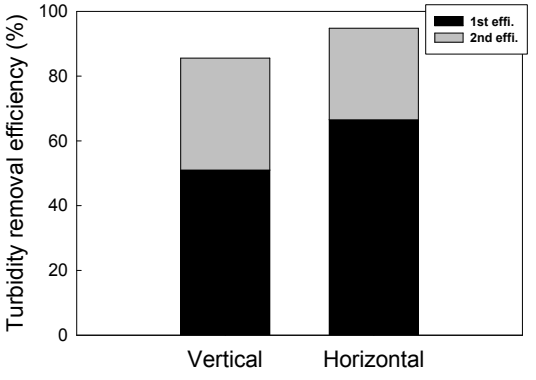

Fig. 6. Effect of electrode arrangement on turbidity removal efficiency(Intitial turbidity, 404 NTU; 1st Current, 0.35 A, 1st electroflotation, 10 min; 1st rising, 2 min; 2nd electroflotation current, 0.10 A; 2nd electroflotation, 2 min).

전해질 농도가 2단계 전기부상-상승 공정에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 전해질로 Na_2SO_4를 증류수에 투입하고 전해질 농도에 따른 탁도 제거율을 Fig. 7에 나타내었다. 전해질 실험을 제외한 인자에 관한 실험인 Fig. 2~6의 실험은 모두 전해질을 첨가하지 않은 수돗물에서 실험하였다.

전해질 농도를 제외한 다른 조건은 앞의 실험과 같은 조건에서 실험하였으며, 전해질 농도가 0.5 g/L에서 1차 전기부상-1차 상승 공정의 제거율은 42.3%로 낮았고, 2차 전기부상-2차 상승 공정의 제거율은 41.9%로 총 공정의 탁도 제거율은 84.2%로 나타났다. 전해질이 1.0 g/L로 증가하면서 1차와 2차 제거율은 각각 65.7%와 30.7%으로 나타났고 총 탁도 제거율은 96.4%로 증가하였다. 전해질 농도가 1.5 g/L로 증가하면서, 1차와 2차 공정에 의한 제거율은 각각 62.3%와 34.6%으로 나타났고 총 탁도 제거율은 96.9%로 증가하였다. 전해질 농도가 2.0 g/L로 증가하면서, 1차와 2차 공정의 제거율은 각각 48.5%와 45.1%으로 나타났고 총 탁도 제거율은 93.6%로 증가하였다. 전해질 농도가 1.0 g/L와 1.5 g/L의 경우 제거율이 비슷하게 나타나 최적 전해질 농도는 1.0 g/L라고 판단되었다. 최적 전해질 농도 이상에서는

1차 전기부상-상승 공정의 제거율은 낮아진 반면 2차 전기부상-상승 공정의 제거율은 높아졌다. 전기부상 차수에 따른 제거율 차이는 향후 고찰이 필요한 것으로 판단되었다.

수돗물을 사용한 조건(무전해질)에서 실험하였을 때의 Fig. 2~6의 결과와 비슷한 탁도 제거율은 Na_2SO_4 농도가 1.0 g/L이었다(수돗물의 전기전도도, 225 μS/cm, 수돗물과 같은 전기전도도를 가지는 Na_2SO_4 농도 : 0.114 g/L). Zheng et al.(2017)은 메시형 알루미늄 전극을 이용한 전기응집/부상 공정을 이용한 탁도 제거에서 수돗물의 경우 전기전도도는 낮지만 다양한 양이온이 포함되어 있고, 알칼리도가 존재하기 때문에 응집반응이 잘 이루어져 증류수에 NaCl을 전해질로 첨가한 경우보다 탁도 제거율이 높다고 보고한 결과와 유사한 결과가 나타났다. 본 실험은 전해질만의 영향을 관찰하기 위한 목적이었으므로 수돗물에 전해질을 첨가한 실험은 수행하지 않았다.

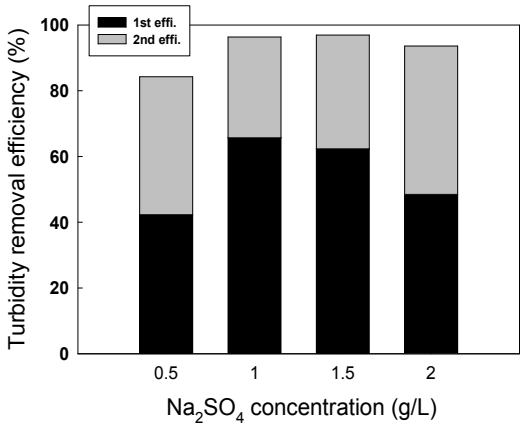

Fig. 7. Effect of electrolyte concentration on turbidity removal efficiency(Intitial turbidity, 404 NTU; 1st Current, 0.35 A, 1st electroflotation, 10 min; 1st rising, 2 min; 2nd electroflotation current, 0.10 A; 2nd electroflotation, 2 min).

Kim and Park(2007a)은 불용성 전극을 이용한 전기부상 공정에서 전력량을 일정하게 유지하면서 전해질인 NaCl 농도(0~1.0 g/L)가 증가할 경우 기포발생량이 증가하지만 일정 농도 이상에서는 발생량 차이가 크지 않다고 한다고 하였다. 또한 같은 전력량에서 NaCl 농도가 증가할수록 평균기포 크기가 커지며, NaCl을 1 g/L 첨가한 경우의 기포크기가 NaCl을 첨가하지 않은 경우보다 3 μm 커졌다고 보고하였다. Kim and Park(2007b)는 불용성 전극을 이용하고 응집제를 첨가하지 않은 슬러지 농축을 위한 전기부상 공정에서 NaCl을 첨가할수록(조건 : 같은 전력량) 슬러지 농축시간이 줄어들고 농축 슬러지 농도가 증가하지만, 일정 농도이상에서는 효과가 증가하지 않아 최적 NaCl 농도가 존재한다고 하였다.

상기 연구와 본 연구 결과를 종합하면 전해질 농도 증가는 기포발생량(+영향), 기포 크기(-영향) 등이 서로 상반된 영향을 미치고 최적 전해질 농도가 존재한다고 판단되었다.

4. 결 론

Kaoline의 탁도를 제거하기 위하여 스테인리스 스틸 전극을 이용한 전기부상 공정에서 전기부상 공정의 성능을 높이기 위한 방법으로 2단계 전기부상-상승 공정을 적용하고 기존 1단계 전기부상-상승 공정과의 성능과 경제성을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 1단계 전기부상-상승 실험에서 0.35 A의 전류를 인가한 조건에서 95% 이상의 탁도를 제거하기 위한 1단계 전기부상 시간과 상승 시간은 각각 30분, 2분으로 총 32분의 시간이 필요하였다. 1 m^3의 물을 처리하기 위해 필요한 전력량은 1.75 kWh/m^3으로 나타났다.

2. 2단계 전기부상-상승 공정에서 1차 전기부상 공정의 전류 0.35 A, 전기부상 시간 10분, 1차 상승 시간 2분, 2차 전기부상 전류 0.10 A, 2차 전기부상 시간과 2차 상승 시간은 각각 2분이 최적 조건인 것으로 나타났다. 최적 2단계 시스템의 경우 95% 이상의 탁도 제거율을 얻기 위해 소요되는 시간은 총 16분으로 1단계 시스템의 50%, 물 1 m^3 처리에 필요한 전력량은 0.59 kWh/m^3으로 1단계 전기부상 공정-상승 만으로 처리할 경우의 33.7%에 불과하였다. 즉, 1단계 처리 대신 2단계로 처리할 경우 처리시간과 전력비 면에서 우수하다고 판단되었다.

3. 수평전극 배열의 경우 전극이 반응기 하부 전체에 걸쳐 있어 기포와 플럭이 균일하게 상승하고 전극의 좌우에서 하향 흐름이 발생하지 않아 수직전극 배열보다

탁도 제거율이 9.3% 높은 것으로 나타났다.

4. 전해질로 Na_2SO_4를 증류수에 투입한 조건에서 전해질이 1.0 g/L와 1.5 g/L로 증가하면서 각각 96.4%와 96.9%로 증가된 후, 2.0 g/L로 증가할 때 93.6%로 나타나 최적 전해질 농도는 1.0 g/L라고 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 대구대학교 교내연구비의 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Arpon Lucero, A. Jr, Park, Y. S., Kim, D. S., 2018, Removal of freshwater microalgae by flocculation-enhanced electro-flotation using Stainless Steel mesh electrode, Arab. J. Sci. Eng., 43, 2339-2351.

Han, M. Y., Kim, C. I., Park, S. W., Kim, H. R., Lee, K. W., You, H. W., 2007, Development and application of tailored bubble size generator for dissolved air flotation, J. Wat. Treat., 15, 13-23.

Han, M. Y., Song, J. M., Park, S. C., 2004, Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation in removal on water treatment, J. Kor. Soc. Wat. Wastewat., 18, 689-695.

Hosny, A. Y., 1996, Separating oil from oil-water emulsions by electro-flotation technique, Sepa. Tech., 6, 9-17.

Jeong, J. S., Lee, J. B., 2002, Cost analysis of electroco -agulation as pretreatment process for chemical wastewater treatment, J. Kor. Soc. Wat. Wastewat., 16, 447-454.

Jeong, K., Kim, D. G., Kim, W. J., Ko, S. O., 2015, Evaluation of operation parameters for the removal of algae by electro-coagulation, J. Kor. Soc. Wat. Environ., 31, 94-102.

Ki, J. H., Kim, H. J., Lee, J. Y., Han, M. Y., Gang, H. W., 2012, Analysis of the operating factors of dissolved air flotation (DAF) process for effluent quality improvement from aquaculture rearing tank, J. Kor. Soc. Wat. Wastewat., 26, 107-113.

Kim, D. S., Park, 2007a, Study on bubble generation and size by dimensionally stable anode in electroflotation process, J. Environ. Sci., 16, 1189-1195.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2007b, Sewage sludge thickening using electroflotation, J. Environ. Sci., 16, 1085-1090.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2010, Optimization of the turbidity removal condition from TiO_2 wastewater using a response surface methodology in the electrocoagulation/ flotation process, J. Kor. Soc. Wat, Qual., 26, 35-43.

Kim, Y. K., Oh, M. Y., 2000, Treatment of textile wastewater by electrocoagulation, J. Environ. Res., 17, 25-32.

Park, Y. S., 2010, Turbidity treatment of TiO_2 wastewater by electrocoagulation/flotation process, J. Environ. Sci., 19, 89-96.

Park, Y. S., 2011, Formation of oxidants and removal of dye Rhodamine B using PbO_2 electrode, J. Kor. Soc. Wat. Environ., 27, 194-199.

Roh, H. S., 2001, Application of aeration - electro coagulation process to the treatment of fowl- slaughter wastewater, Ms. Dissertation, Inha University, Incheon, Korea.

Shin, M. S., Lee, K. H., Kim, D. J., Han, M. Y., 2002, A Study on the removal characteristics of TiO_2-containing wastewater by electroflotation, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 24, 71-78.

Zheng, C., Kim, D. S., Park, Y. S., 2017, Turbidity removal of Kaolin in an electrocoagulation/flotation process using a mesh-type aluminum electrode, J. Environ. Sci. Int., 26, 563-572.

• Professor. Dong-Seog Kim
Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu
kimds@cu.ac.kr
• Professor. Young-Seek Park
Division of Liberal Studies, Daegu University
ysparkk@daegu.ac.kr