

TECHNICAL NOTE

전기응집-전기부상 2단계 공정을 이용한 TiO₂ 제거

김동석 · 박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 보건안전학과, ¹⁾대구대학교 자유전공학부

TiO₂ Removal using Electrocoagulation-electroflotation Two-step Process

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park^{1)*}

Department of Health and Safety, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 38430, Korea

¹⁾Division of Liberal Studies, Daegu University, Gyeongbuk 38453, Korea

Abstract

There is a need for a method that can effectively remove wastewater containing small-sized particles such as TiO₂. In this study, we attempted to remove TiO₂ wastewater using electrocoagulation-electroflotation two-step separation. The TiO₂ wastewater was effectively removed via batch electrocoagulation-electroflotation separation. However, in the batch process, the simultaneous operation of electrocoagulation and electroflotation was challenging due to the high residual turbidity. In the continuous operation, electrocoagulation and electroflotation reactors were kept separate. The turbidity removal in continuous operation was similar to that in the batch process, nevertheless, the residual Al concentration was high, leading to the conclusion that counterterm ensures against residual Al were necessary.

Key words : Electrocoagulation-electroflotation, Residual Al concentration, TiO₂ wastewater, Turbidity

1. 서론

TiO₂는 은폐성과 백색도가 높아 페인트, 도료, 고분자, 제지, 플라스틱 및 화장품 등에 광범위하게 사용되고 있는데, 건축, 공업제품 및 자동차용 도료 및 수성 에멀전계의 도료로 약 50% 정도 사용되고 있고, 제지 및 고무용으로 약 30%, 고분자 첨가제로 약 20% 사용되고 있다(Kim et al., 2000). TiO₂의 전 세계 사용량은 400 만톤/년 이상으로 알려져 있다(Mathur et al., 2000). 그러나 입자의 크기가 nm ~ μm로 작아서 백색도가 높은 TiO₂ 특성상 TiO₂를 함유하고 있는 폐수를 효과적

으로 제거할 수 있는 방법이 필요하다(Park, 2010).

TiO₂는 무기 고형물질이므로 물리·화학적 공정을 이용하여 처리하는데, 주로 침강분리법이나 응집제를 사용하여 부상시키거나 침전시키는 화학응집 분리법을 사용한다(Kim, 1995). TiO₂ 폐수에 존재하는 TiO₂ 입자의 크기는 μm 이하이므로 자연적인 침강이 어려운 콜로이드 용액의 특성을 가지고 있다. 따라서 통상적인 침강법으로는 분리가 어렵고, 화학응집은 약품이나 에너지 비용 등 운전비가 많이 소요되고, 응집 공정 결과 발생하는 슬러지 처리에 비용이 많이 소요되어 개선이 필요하다(Han et al., 2004).

Received 16 March, 2023; Revised 10 April, 2023;

Accepted 14 April, 2023

*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.

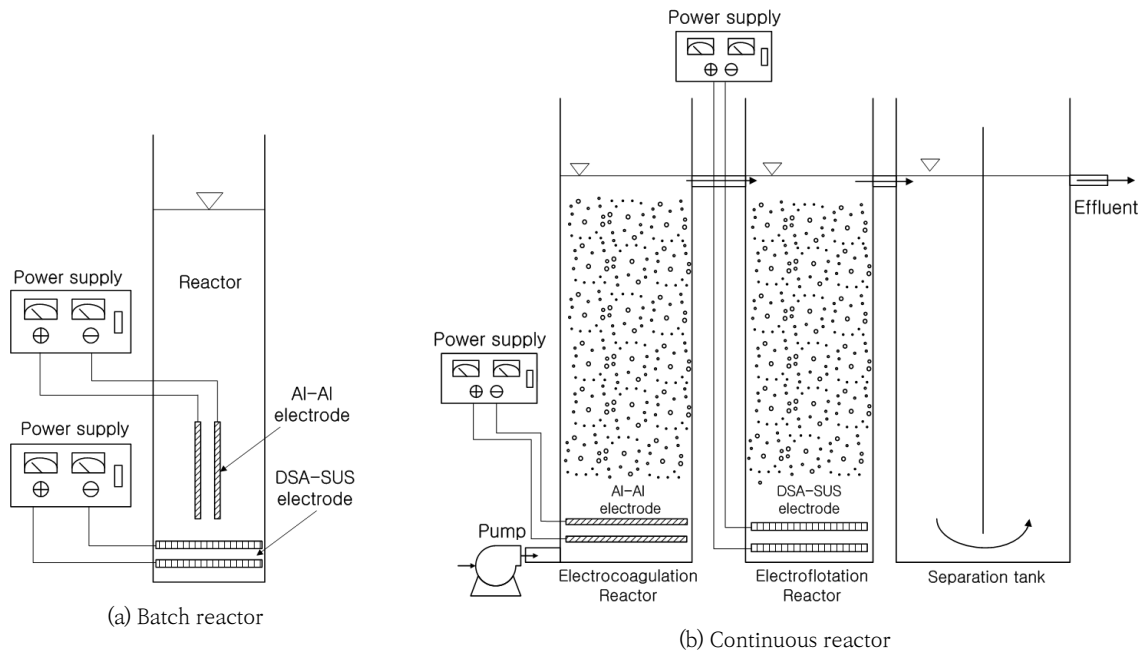


Fig. 1. Schematic diagram of batch and continuous reactor.

최근 전기화학적 폐수처리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 전기화학적 폐수처리는 물과 같은 전도성 액체에 양극과 음극에 전류를 흘렸을 때 생기는 반응을 이용하여 수처리에 이용한다. 전류가 흐를 때 양극(Anode)에서는 산화반응, 음극(Cathode)에서는 환원반응이 일어나는데 티타늄과 같은 모체에 이리듐, 루테튬 등의 귀금속 산화물을 코팅한 불용성 전극(DSA, Dimensionally Stable Anode)을 이용하여 양극의 산화반응을 이용하여 오염물질을 제거하는 공정은 전기분해 공정이다(Park, 2002). 전기화학적 수처리에서 양극에 불용성 전극 대신 철이나 알루미늄과 같은 용해성인 희생 전극(Sacrificial electrode)을 이용하면, 양극에서 Fe^{2+} , Al^{3+} 등의 금속 양이온이 산화되어 용출이 일어나고, 음극에서는 OH가 생성되어 응집제 역할을 하는 $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$ 또는 $Al(OH)_3$ 등과 같은 금속 수산화물이 생성되는데, 이 물질들이 응집제의 역할을 하며, 희생 전극을 이용하는 전기화학적 수처리 공정을 전기응집 공정이라고 한다(Oh and Kim, 2001; Park, 2010). 양극을 DSA 전극이나 스테인리스 스틸, 티타늄과 같은 불용성 전극을 이용하고 전류를 낮게 인가하여 발생하는 미세기포를 이용하여 수중

의 물질을 용존시키는 공정을 전기부상 공정이라고 한다(So et al., 2003). 전기분해, 전기응집 및 전기부상 공정에서 발생하는 산소와 수소 기포는 크기가 약 $20 \sim 40 \mu m$ 정도로 알려져 있어 TiO_2 와 같이 미립자를 포함하고 있는 무기성 폐수처리에 적절한 기술이라고 판단된다(Kim and Park, 2007).

본 연구는 TiO_2 폐수의 탁도를 제거하기 위하여 용해성 전극을 사용하여 응집제를 발생시켜 전기응집시킨 후 불용성 전극을 이용하여 부상시키는 2 단계 전기응집-전기부상 공정의 적용 가능성과 최적 운전조건을 찾고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료 및 실험방법

실험에 사용한 TiO_2 는 입자크기가 nm로 알려져 있는 시약용 TiO_2 (Daegusa P25 TiO_2)를 사용하였다. TiO_2 25 g/L 수용액을 만든 후 PVA (Polyvinyl alcohol, 안정화제)를 1% 혼합하여 혼합액을 만들고 혼합액 15 mL를 증류수에 혼합하여 탁도 1200 NTU의 용액 1.5 L를 만들었다(Park, 2010).

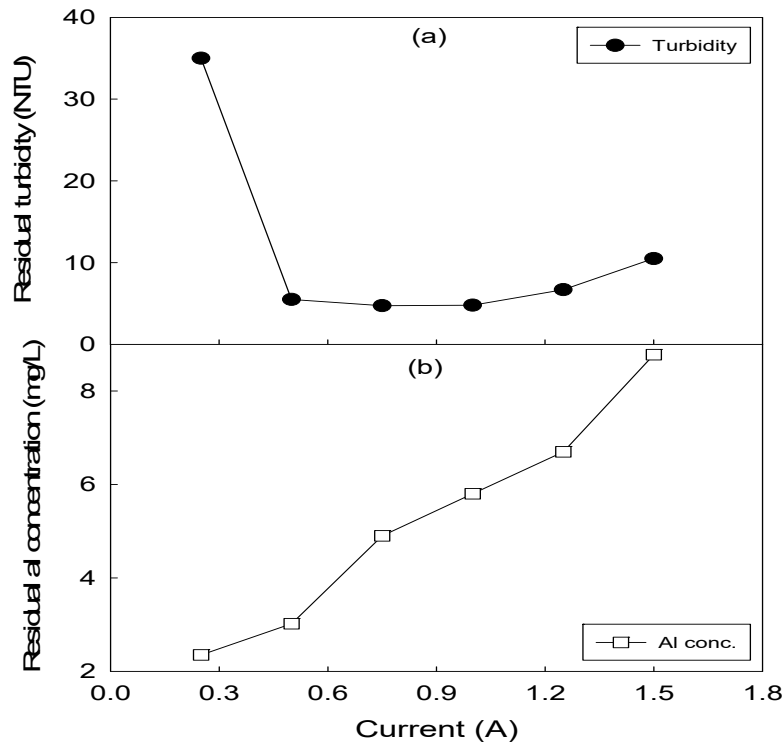


Fig. 2. Effect of electrocoagulation current on residual turbidity and Al concentration. (Electrocoagulation time, 5 min; Electroflotation current, 0.2 A; Electroflotation time, 5 min, Na₂SO₄ coccentration, 0.5 g/L)

실험은 운영 방법에 따라 회분식과 연속식으로 운전하였으며 반응기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 회분식 실험은 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 반응 부피가 1 L인 아크릴 반응기를 사용하였다. 회분식 반응기의 전극 세트는 전기응집용 전극과 전기부상용 전극 세트로 이루어져 있다. 전기부상에 사용하는 전극은 메시(Mesh)형 전극으로 균일한 기포 발생을 위해 반응기 하부에 수평으로 설치되어 있다. 전기응집용 전극은 평판형 전극으로 전기부상용 전극 1 cm 위에 수직으로 설치되어 있다. 전기응집용 전극은 응집제 발생이 주목적이고, 전기부상용 전극의 기포 상승에 대한 방해를 줄이기 위하여 수직으로 세워 설치하였다. 전기부상용 전극의 양극은 Ti 모재에 Ru와 Ir이 코팅되어 있는 DSA 전극, 음극은 스테인리스 스틸 전극을 사용하였다. 전기응집용 전극은 양극과 음극 모두 알루미늄(Al) 전극을 사용하였다. 실험에 사용한 모든 전극은 크기가 35 x 35 mm, 양극과 음극의 간격은 5 mm이었다. 회분식 반응기에서 전기응집-전기부상-정지 공정은 모두 한

반응기에서 순차적으로 이루어졌다.

연속식 반응기 시스템은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 한 반응기 내에서의 전기응집-전기부상-정지로 이루어진 회분식 공정을 분리하여 전기응집조(1.0 L), 전기부상조(1.0 L) 및 정지 배출조(1.45 L)로 구성하였다. 연속 운전은 전기응집조-전기부상조-정지 배출조를 순서대로 거쳐 배출되는 형식이다. 연속식 실험에서 전기응집 반응기에 설치된 Al-Al 전극은 회분식과는 달리 수평으로 설치하였다. 모든 실험은 수돗물을 사용하였고, 전해질은 전기분해로 인한 염소계 산화제가 발생하지 않는 Na₂SO₄를 전해질로 사용하였다.

2.2. 분석 및 측정방법

TiO₂ 폐수의 탁도는 탁도계(HACH, 2100P Turbidimeter)를 이용하여 측정하였다. 수중의 잔류 알루미늄 농도는 Perkin Elmer사의 ICP-OES (Optima, 7300 DV)를 이용하여 측정하였다.

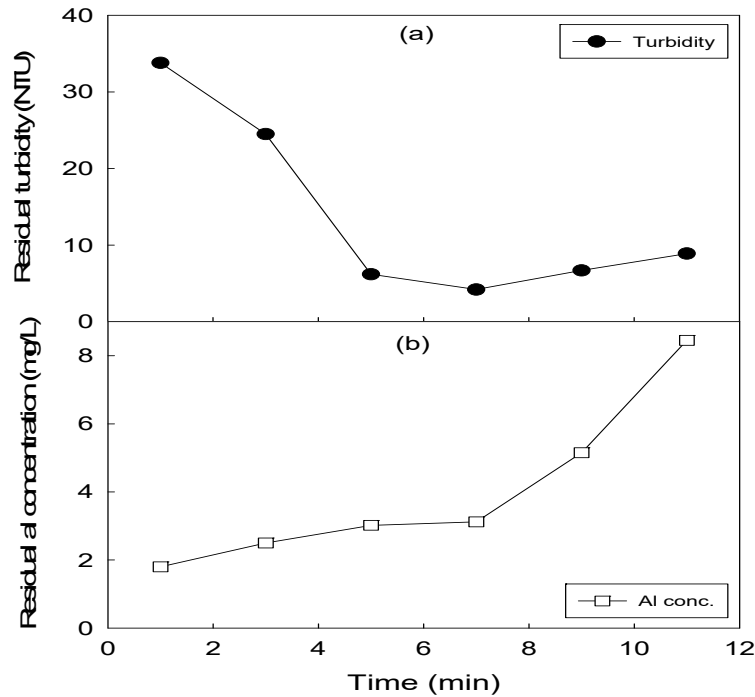


Fig. 3. Effect of electrocoagulation time on residual turbidity and Al concentration. (Electrocoagulation current, 0.5 A; Electroflotation current, 0.2 A; Electroflotation time, 5 min, Na_2SO_4 coccentration, 0.5 g/L)

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 전기응집 전류와 시간이 잔류 탁도와 알루미늄 농도에 미치는 영향

전기응집용 전극에 인가되는 전류를 결정하기 위하여 전기응집용 전극에 0.25 ~ 1.50 A의 전류를, 전기부상용 전극은 임의로 초기조건으로 설정한 0.2 A의 전류를 흘려주었다. 반응기에 전해질인 Na_2SO_4 을 0.5 g/L 첨가하여 제조한 조절한 TiO_2 폐수를 투입한 후 전기응집용 전극에 전류를 5분 동안 흘려주어 알루미늄을 발생시키고 기포를 발생시켜 응집시킨 후 전기를 끊고(전기응집 공정), 전기부상용 전극에 전류를 5분간 흘려 TiO_2 와 Al로 이루어진 응결체를 부상시킨 후 전기를 끊고(전기부상 공정), 10분 동안 전기응집/전기부상 동안 부상되지 않은 응결체와 기포가 완전히 부상되기를 기다린 후(정지 공정) 시료를 채취하여 잔류 탁도와 Al 농도를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2(a)에서 보듯이 전기응집 전류가 0.25 A인 경우 잔류 탁도는 35 NTU이었으나 0.5 A로 증가되면서

잔류 탁도가 5.5 NTU로 감소되었으며, 0.75 A에서는 4.74 NTU, 1.00 A에서는 4.8 NTU로 나타났다. 전류가 1.25 A로 증가되면서 잔류 탁도는 6.7 NTU, 1.50 A로 증가되면서 잔류 탁도는 10.5 NTU로 증가되어 수중의 잔류 탁도가 가장 낮게 나타나는 전기응집 공정의 전류는 0.75 A인 것으로 나타났다.

Fig. 2(b)에 실험 후 수중의 잔류 Al 농도를 나타내었다. 전기부상 공정에서는 불용성 전극인 DSA-SUS 전극을 이용하므로 잔류 Al은 Al 전극이 있는 전기응집 공정에서만 발생한다. 전기응집용 전극에 인가되는 전류가 0.25 A에서 전류가 증가할수록 수중의 잔류 Al 농도가 직선적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 전기응집 반응의 부산물인 잔류 Al이 낮은 조건에서 탁도를 제거할 수 있는 전류가 필요하며, 0.5 A가 잔류 Al 농도는 낮고(3.02 mg/L), 잔류 탁도가 0.75 A보다 불과 0.76 NTU 높아 최적 전류인 것으로 판단되었다. 전기응집-전기부상 공정 후 정지시간이 잔류탁도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 총 10분 전기응집(5분)-전기부상(5분) 직후, 5분 정지 후, 10분 정지 후 잔류탁도 농

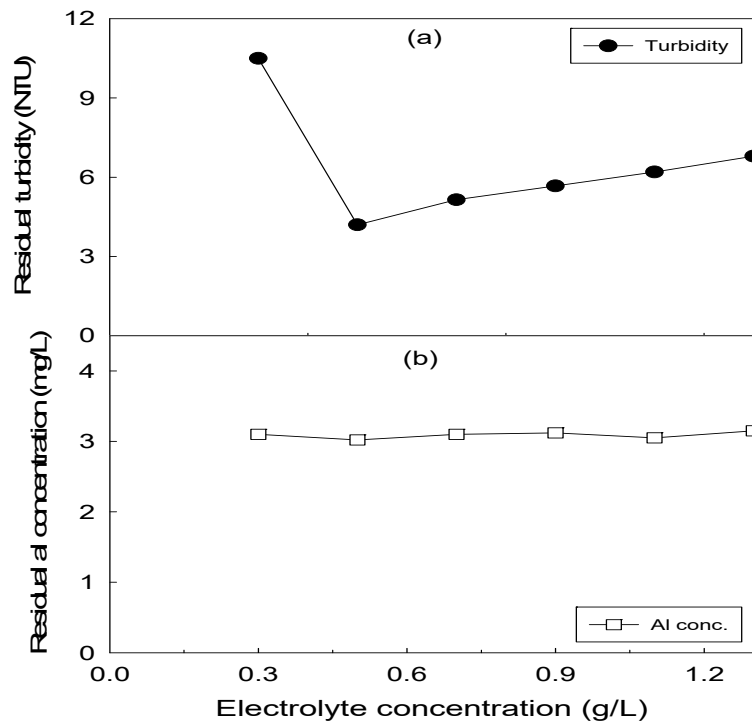


Fig. 4. Effect of electrolyte concentration on residual turbidity and Al concentration. (Electrocoagulation current, 0.5 A; Electrocoagulation time, 7 min; Electroflotation current, 0.2 A; Electroflotation time, 5 min)

도를 측정하고 결과 전기응집-전기부상 직 후에 측정된 잔류 탁도는 18.9 NTU, 5분 정치 후 8.9 NTU, 10분 후 Fig. 2의 결과와 같은 5.5 NTU로 나타났다. 이의 원인을 파악하기 위하여 반응기 속의 TiO_2 -Al-기포응결체와 미세기포의 거동을 관찰한 결과 전기응집-전기부상 직후는 TiO_2 -Al-기포 응결체와 미세기포가 완전히 부상되지 못한 상태에서 계속 부상을 하고 있기 때문에 TiO_2 -Al-기포 응결체와 미세기포가 완전히 부상하는 시간이 정치시간이 필요하며 전기응집-전기부상 후 최적 정치시간은 10분인 것으로 판단되었고, 이후 실험은 10분의 정치시간 후 시료를 채취하였다.

전기응집 공정에 대한 최적 전류가 0.5 A이고, 전기부상 공정에 대한 조건을 고정한 상태에서 전기응집 공정에 전류를 인가하는 시간이 TiO_2 폐수처리에 대한 잔류 탁도와 잔류 Al 농도에 미치는 영향을 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 나타내었다.

Fig. 3(a)에서 보듯이 전기응집 시간이 1분인 경우 잔류 탁도는 33.8 NTU, 3분인 경우 24.5 NTU, 5분인 경우는 6.2 NTU로 나타났다. 7 분은 4.2 NTU, 9분부

터는 잔류 탁도가 7분보다 증가하는 경향을 나타내었다. 전기응집 시간이 1분과 3분에서는 TiO_2 폐수의 응집에 필요한 정도의 Al이 용출되지 않아 응집이 잘 이루어지지 않아 잔류 탁도가 높은 것으로 판단되었으며, 잔류 탁도 농도로 볼 때 최적 시간은 7분으로 나타났다. Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 전기응집 시간의 증가에 따른 잔류 Al 농도를 보면 전기응집 시간이 증가할수록 잔류 Al 농도가 증가하는 것으로 나타났으며, 잔류 Al 농도는 3분의 경우 2.5 mg/L, 5분은 3.02 mg/L, 7분은 3.12 mg/L로 나타났다. 9분과 11분에서 높은 Al 농도는 응집에 이용되지 않고 남은 Al 농도가 증가하기 때문에 잔류 Al 농도가 증가하는 것으로 판단되었다.

전기응집 공정에서 전류를 0.5 A, 7분 인가하는 것이 잔류 Al 농도가 낮으면서 탁도 제거율은 높아 최적의 전기응집 시간이라고 판단되어 이 후 실험에서는 전기응집 시간을 7분으로 고정하여 실험하였다.

3.2. 전해질 농도가 잔류 탁도와 알루미늄 농도에 미치는 영향

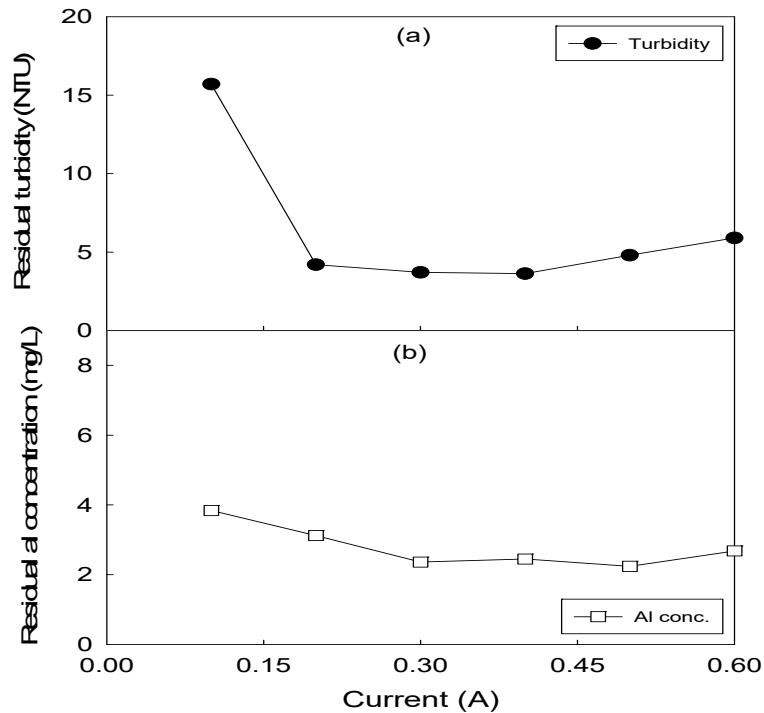


Fig. 5. Effect of electroflotation current on residual turbidity and Al concentration. (Electrocoagulation current, 0.5 A; Electrocoagulation time, 7 min; Electroflotation time, 5 min; Na_2SO_4 coccentration, 0.5 g/L)

전기응집과 전기부상 공정은 산화제를 발생시켜 이를 이용하는 전기분해 공정이 아니므로 본 연구에서 사용한 전해질은 염소계 산화제를 발생시키지 않는 Na_2SO_4 를 사용하였으며, 전해질 농도를 0.3 g/L에서 1.3 g/L로 증가시키면서 전해질 농도가 잔류 탁도와 잔류 Al 농도에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다.

전해질 농도가 가장 낮은 0.3 g/L에서 잔류 탁도는 10.5 NTU로 나타났으며, 0.5 g/L에서 4.2 NTU, 전해질 농도가 0.7 g/L였을 때 5.15 NTU로 나타났고, 0.5 g/L 이상에서는 잔류 탁도의 감소가 적어 최적 전해질 농도는 0.5 g/L로 나타났다. 이는 NaCl을 전해질로 사용하고 전기응집 공정을 이용한 TiO_2 제거에서 일정 농도 이상에서는 탁도 제거율이 거의 일정하였다고 보고한 Park(2010)의 결과나 불용성 전극을 이용하고 응집제로 alum을 사용하고, 전해질로 NaCl을 이용한 전기부상 공정에서 최적 NaCl 농도가 나타났다고 보고한 Kim et al. (2001)의 결과와 유사하였다.

Fig. 4(b)에 전해질 농도에 따른 잔류 Al 농도의 변화를 나타내었다. 잔류 Al 농도는 전해질 농도와 관계

없이 3.02 mg/L에서 3.15 mg/L로 나타나 전해질 농도에 따른 잔류 Al 농도는 차이는 거의 없는 것으로 판단되었다.

3.3. 전기부상 전류와 시간이 잔류 탁도와 알루미늄 농도에 미치는 영향

지금까지의 전기응집 공정을 이용하는 부유물질 제거 공정은 주로 Al-Al 단일 전극 시스템을 이용하여 전기 인가시 발생하는 Al 이온에 의해 응집을 시키고 미세 기포에 의하여 부상시키는 공정을 이용하는 시스템이 주요 시스템이었다(Park, 2010; Lee, 2017). 그러나 전기응집 공정만 이용할 경우 전류는 Al 전극에서의 응집제 발생에만 이용되는 것이 아니라 응결체를 부상시키기 위한 미세기포 발생에서도 이용되어야 하므로 부상을 위한 전류 인가시에도 용해성 전극인 Al이 계속 용출되기 때문에 수중의 잔류 Al 농도가 문제가 될 수 있다(Jung et al., 2015).

따라서 본 연구에서는 응집제로 사용되는 Al 이온의

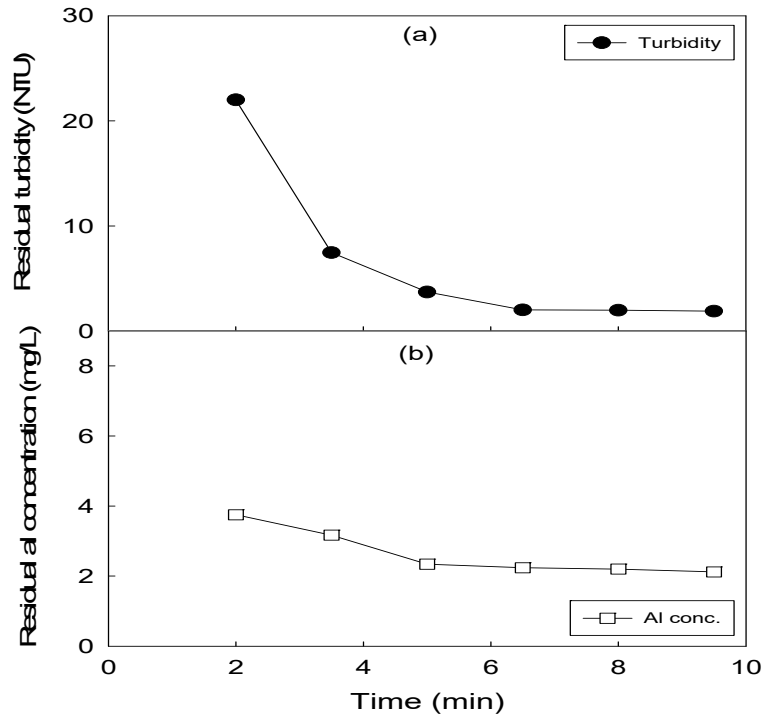


Fig. 6. Effect of electroflotation time on residual turbidity and Al concentration. (Electrocoagulation current, 0.5 A; Electrocoagulation time, 7 min; Electroflotation current, 0.3 A; Na_2SO_4 coccentration, 0.5 g/L)

발생이 주요 목적이었고 미세기포 발생으로 인한 부상은 부수적인 공정인 전기응집 공정을 1차 공정, 불용성 전극을 이용하여 응집제가 발생하지 않고 미세기포만 발생하는 전기부상 공정을 2차 공정으로 2단계 전기응집-전기부상 시스템을 이용하여 실험하였다. Fig. 5에 전기응집 공정의 조건(0.5 A, 7 min)을 고정한 상태에서 전기부상 공정의 전류를 0.1 A ~ 0.6 A로 0.1 A씩 변경하면서 5분 동안 운전하였을 때 잔류 탁도[Fig. 5(a)]와 잔류 Al 농도[Fig. 5(b)]를 나타내었다.

Al-Al 전극을 이용한 전기응집 후 DSA-SUS 전극을 이용한 전기부상 공정에서 TiO_2 -Al 응결체를 부상시키는 전기부상 공정의 전류가 0.1 A에서 잔류 탁도는 15.7 NTU로 나타났고, 0.2 A에서는 4.2 NTU, 0.3 A에서는 3.71 NTU로 나타났다. 0.4 A에서는 3.63 NTU, 0.5 A에서는 4.8 NTU로 나타나 0.5 A에서는 잔류 탁도가 높아졌다. 0.1 A에서는 전기부상 공정에서 TiO_2 -Al 응결체를 부상시키는데 필요한 충분한 미세기포가 생성되지 않았기 때문이며, 0.5 A 이상의 전류에서는 많이 발생한 미세기포가 상승 흐름에 의해서만 플러

를 상승시키는 것이 아니라 다량의 빠른 기포의 상승이 오히려 플러를 깨고 상승을 방해하는 것이 반응기 내부의 플러와 기포 관찰에서 관찰되었다.

Fig. 5(b)에서 보듯이 전기부상 공정에서 잔류 Al 농도는 전류가 0.1 A에서는 3.84 mg/L, 0.2 A에서는 3.12 mg/L로 나타났고, 0.3 A 이상에서는 전류에 관계 없이 2.24 ~ 2.68 mg/L이었으며, 전류 변화에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 전기부상 공정이 Al의 용출과 관계없는 공정이지만 전류가 0.1 A와 0.2 A에서는 TiO_2 -Al 응결체의 제거에 필요한 기포가 모자라기 때문에 잔류 Al 농도가 3 mg/L 부근의 잔류 Al 농도를 나타낸다고 사료되었다. 잔류 Al 농도의 경우 0.3 A 이상에서는 전류에 따른 차이가 거의 없으므로 잔류 탁도가 낮고 전류가 낮은 0.3 A를 전기부상을 위한 최적 전류라고 판단하여 이 후 실험은 0.3 A에서 실시하였다.

전기부상 공정의 최적 전류를 0.3 A로 유지한 조건에서 전기부상 시간에 따른 잔류 탁도와 Al 농도를 Fig. 6에 나타내었다. 전기응집 후 전기부상 공정의 시간이

Table 1. Residual turbidity according to electrocoagulation-electroflotation simultaneous operation mode

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
Operation mode	*Coa.: 7 min **Flo.: 6.5 min	Coa.: 5 min ***Coa.-Flo.: 2 min Flo.: 4.5 min	Coa.: 3.5 min Coa.-Flo.: 3.5 min Flo.: 3.0 min	Coa.: 2.0 min Coa.-Flo.: 4.5 min Flo.: 2.0 min	Coa.: 0.5 min Coa.-Flo.: 6.5 min Flo.: 0 min
Residual turbidity (NTU)	2.01	5.40	8.91	13.5	25.4

* Coa.: Electrocoagulation

** Flo.: Electroflotation

*** Coa.-Flo.: Electrocoagulation-electroflotation simultaneous operation mode

2분인 경우 잔류 탁도는 22.0 NTU로 나타났고, 3.5분에서는 7.46 NTU, 5분은 3.71 NTU, 6.5분은 2.01 NTU, 8분은 1.98 NTU, 9.5분에서는 1.89 NTU로 나타났다. 이는 미부상한 TiO_2 -Al 응결체를 일정 전류와 시간에서 부상시키면 수중에 잔류하는 고형물질이 거의 존재하지 않으며, 이 시간 이후의 부상시간은 필요하지 않은 것으로 판단되었고, 최적의 전기부상 시간은 6.5분인 것으로 나타났다.

Fig. 6(b)에 전기부상 시간에 따른 잔류 Al 농도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 잔류 Al 농도는 부상 시간에 2분에서는 3.75 mg/L, 3.5분은 3.17 mg/L, 5분은 2.34 mg/L, 6.5분은 2.24 mg/L, 8분은 2.20 mg/L, 9.5분은 2.12 mg/L로 나타났다. 2분과 3.5분의 전기부상 시간은 TiO_2 -Al 응결체가 다 부상하지 않았기 때문에 잔류 Al 농도가 다른 부상시간보다 높은 것으로 판단되었다. 잔류 Al 농도 면에서는 5분의 전기부상 시간이 필요한 것으로 나타났고, 잔류 탁도와 Al 농도를 모두 고려한 최적 전기부상 시간은 6.5분으로 판단되었다.

3.4. 전기응집-전기부상 동시 운전과 연속운전 시험

3.1절에서 3.3절까지의 고찰을 통하여 구한 TiO_2 폐수를 처리하기 위한 공정은 단일 반응기 내에서 전기응집(0.5 A, 7분)-전기부상(0.3 A, 6.5분)-정지(10분)라는 총 운전시간 23.5분의 회분식 공정으로 운전된다. 운전의 편리성을 위해 전기응집 공정 후 전기부상 공정으로 분리 운전되는 운전 모드를 전기응집-전기부상 동시 운전 모드로 운전할 경우 응집과 부상에 소요되는 시간이 줄어들기 때문에 전기응집-전기부상 공정을 동시에 운전하는 방법으로 운전시간을 변경하여 동시 운전이 잔류 탁도에 미치는 영향을 Table 1에 나타내었다.

전체 운전 모드 중 정지시간은 10분으로 동일하다.

모드 1은 3.1~3.3.절에서 구한 최적 운전조건인 전기응집(0.5 A, 7분)-전기부상(0.3 A, 6.5분)-정지 공정(10분)인 공정으로 정지운전을 제외한 전기응집과 전기부상 공정은 분리되어 운전되고 총 운전시간은 13.5분이다. 모드 2는 전기응집 5분 운전 후 2분간 전기응집과 전기부상 공정을 동시에 운전한 후 동시 운전시간을 제외한 4.5분의 전기부상 공정으로 이루어져 있다. 전기응집-전기부상 동시 운전시간이 증가하면서 전기응집과 전기부상 단일 공정의 운전시간은 줄어든다. 모드 5에서는 0.5분의 전기응집과 6.45분의 전기부상 동시 운전공정으로 이루어져 있어 정지를 뺀 총 운전시간은 7분이다.

Table 1에서 나타난 바와 같이 전기응집-전기부상 동시 운전시간이 증가할수록 잔류 탁도 농도가 증가하였다. 전기응집-전기부상 동시 운전시간이 가장 긴 모드 5에서는 잔류 탁도가 25.4 NTU로 동시운전을 하지 않는 모드 1에 비해 12.6배로 나타나 전기응집-전기부상 동시 운전보다는 단독 운전 모드로 운전해야 함을 알 수 있었다. 잔류 Al 농도는 2.24 ~ 3.54 mg/L로 나타났고 운전 모두 변화에 따른 경향성은 나타나지 않았다.

전기응집-전기부상 동시 운전은 탁도 제거 성능이 떨어지므로 연구를 더 진행하지는 않았다. 운전이 편리하기 위해서는 회분식 운전보다는 연속식 운전이 유리하므로 연속식 운전의 가능성을 살펴보았다. 연속운전을 위해 전기응집 반응기와 전기부상 반응기를 분리할 필요가 있고, 또한 정지 공정도 분리하여야 한다. 따라서 Fig. 1(a)와 같은 회분식 반응기에서 Fig. 1(b)와 같이 각 공정을 분리한 연속식 공정을 만들었다. 회분식 공정에서 전기응집-전기부상-정지에 대한 최적시간이 7분-6.5분-10분으로 나타나, 연속식 반응기에서는 기본 체류시간을 전기응집 시간(7분)에 맞추어 7분(전

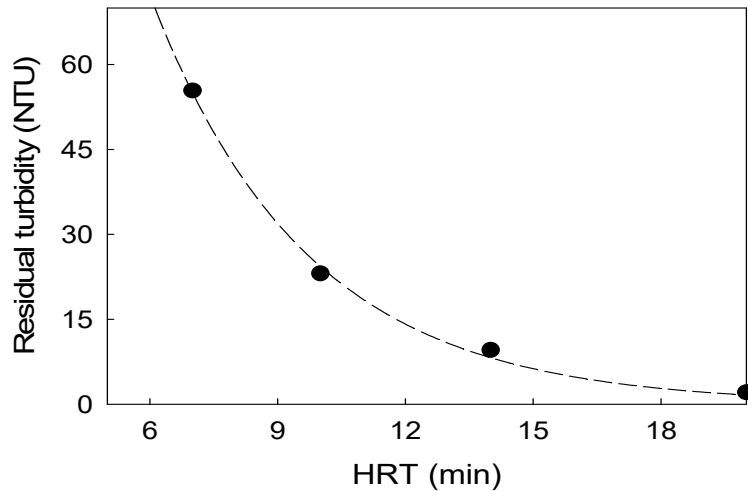


Fig. 7. Effect of hydraulic retention time of continuous electrocoagulation-electroflotation process on residual turbidity. (Electrocoagulation current, 0.5 A; Electroflotation current, 0.3 A; Na₂SO₄ coccentration, 0.5 g/L)

기응집) -7분(전기부상) -10분(정치)으로 반응기를 제작 및 운전하였다. 전기부상 공정은 회분식 공정에서는 6.5분이지만 연속식 공정에서는 간단하게 간단하게 만들기 위하여 7분으로 설정하였다.

회분식 공정에서 최적 전기응집 시간이었던 7분을 기준으로 체류시간 7, 10, 14 및 20분으로 연속식 공정으로 운전하여 처리수의 잔류 탁도 농도를 Fig. 7에 나타내었다. 전기응집 공정 기준 연속식 반응기의 체류시간을 7분으로 운전하였을 경우 잔류 탁도는 55.4 NTU로 나타나 회분식 공정의 1.4배에 해당하는 10분으로 증가시켜 운전한 결과 23.1 NTU로 나타났으며, 2배에 해당하는 14분으로 운전한 결과 9.6 NTU로 나타났다. 체류시간을 20분으로 증가시킨 결과 2.1 NTU로 나타나 회분식 공정의 최적 잔류 탁도인 2.01 NTU와 거의 같게 나타났다. 회분식 공정에서의 총 운전 시간은 20.5분, 연속식 공정에서는 체류시간이 20분으로 나타나 TiO₂ 폐수의 탁도 제거 성능은 거의 유사한 것으로 나타났다.

체류시간 증가에 따른 탁도 감소는 지수적인 감소형태로 나타났으며, 이를 경험식으로 나타낸 결과 식 (1)과 같이 나타났으며, $R^2 = 0.9976$ 으로 나타났다.

$$\text{Residual turbidity(NTU)} = 370.0108 \times e^{(0.2721 \times \text{time})} \quad (1)$$

하지만 Al이 용해되어 나오는 전기응집 공정의 체류

시간이 20분이므로 잔류 Al 농도는 5.78 mg/L로 나타나 회분식 공정의 잔류 Al 농도인 2.12 mg/L보다 높아 잔류 Al 농도를 낮출 필요성이 있는 것으로 판단되었다.

4. 결론

TiO₂와 같이 미세입자를 함유한 폐수를 처리하기 위하여 회분식과 연속식 전기응집-전기부상 공정을 운전한 결과 다음의 결과를 얻었다.

【회분식 공정】

1. 전기부상 운전이 일정한 조건에서 전기응집 공정의 전류를 0.5 A로 7분간 운전하는 것이 잔류 Al 농도 (3.12 mg/L)가 낮으면서 잔류 탁도 농도(4.2 NTU)가 낮은 것으로 나타났다. 전기응집-전기부상 후의 정치시간은 10분이 최적인 것으로 나타났다.
2. 전해질(Na₂SO₄) 농도가 증가함에 따라 잔류 탁도 농도가 감소하다 0.5 g/L 이상에서는 잔류 탁도의 감소가 적어 최적 전해질 농도는 0.5 g/L로 나타났다. 처리수 중의 잔류 Al 농도는 전해질 농도와 관계없이 3.02 mg/L에서 3.15 mg/L로 나타났다.
3. 전기응집 공정 후 전기부상 공정에서 최적 전류는 0.3 A로 나타났고, 6.5분의 전기부상 시간 이후 잔류 탁도 농도가 감소하지 않아, 최적의 전기부상 시간은 6.5분인 것으로 나타났다.

【연속식 공정】

4. 회분식 공정에서 전기응집-전기부상 동시 운전시간이 증가할수록 잔류 탁도 농도가 증가하여 동시 운전은 어려운 것으로 판단되었다. 전기응집, 전기부상, 정치배출조를 분리하여 연속식으로 운전한 결과 체류시간 20분에서는 회분식 공정과 유사한 탁도 제거 성능을 나타내었으나 잔류 SI 농도는 높게 나타나 연속식으로 운전할 경우 이에 대한 대책이 필요한 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 대구대학교 교내연구비의 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Han, M. Y., Song, J. M., Park, S. C., 2004, Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation in removal on water treatment, J. Korean Soc. Water & Wastewater, 18, 689-695.
- Jung, K., Kim, D. K., Kim, S. K., Kim, W. J., Ko, S. O., 2015, Evaluation of operation parameters for the removal of algae by electro-coagulation, J. Korean Soc. Water Environ., 31, 94-102.
- Kim, D. J., Lee, K. H., Kwon, A. Y., Han, M. Y., 2000, A Study on the coagulation characteristics of TiO₂, Proceedings of the Joint Fall Academic Presentation of the Korean Society of Water & Wastewater·Korean Society on Water Environment, 277-280.
- Kim, D. J., Lee, K. H., Kwon, A. Y., Han, M. Y., 2001, Optimum operation conditions for TiO₂ wastewater treatment by electroflotation, J. Korean Soc. Water & Wastewater, 15, 34-39.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2007, Study on bubble generation and size by dimensionally stable anode in electroflotation process, J. Environ. Sci., 16, 1189-1195.
- Kim, H. T., 1995, Water treatment by chemical coagulation and electro-coagulation system, Prof. Eng., 10, 20-24.
- Lee, J. Y., 2017, Electrochemical treatment of water soluble cutting oil using electrode material, J. Korean Soc. Water Treat., 25, 67-75.
- Mathur, S., Singh, P., Moudgil, B. M., 2000, Advanced in selective flocculation technology for solid-solid separations, Int. J. Miner. Process. 58, 201-222.
- Oh, M. Y., Kim, Y. K., 2001, Removal characteristics of organics in landfill leachate by electrocoagulation, J. Korean Soc. Environ. Eng., 23, 31-38.
- Park, D. W., 2002, Electrochemical wastewater treatment, is it a new alternative?, J. Korean Soc. Water Qual., 18, 441-448.
- Park, Y. S., 2010, Turbidity treatment of TiO₂ wastewater by electrocoagulation/flotation process, J. Environ. Sci., 19, 89-96.
- So, J. H., Choi, S. I., Jo, J. H., Han, S. K., Ryu, D. H., 2003, A Study on oil-water separation from soil wash effluent using electroflotation: effects of electrolytes, Proceedings of Fall Conference of Korean Society of soil and Groundwater Environment, 463-465.

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