

전기부상을 이용한 하수슬러지 농축

김 동 식 · 박 영 식*

대구가톨릭대학교 환경과학과, *대구대학교 보건환경전공
(2007년 6월 8일 접수; 2007년 8월 29일 채택)

Sewage Sludge Thickening Using Electroflotation

Dong-Seog Kim and Young-Seek Park*

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

*Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea

(Manuscript received 8 June, 2007; accepted 29 August, 2007)

The performance of EF (electroflotation) on the thickening of activated sludge were investigated using laboratory scale batch flotation reactor. In this paper, the effects of parameters such as electrode material, NaCl dosage, initial sludge concentration and electrode distance were examined. The results showed that the performance for sludge thickening of the five electrodes lay in: Pt/Ti > Ru/Ti > Ir/Ti > Ti mesh > Ti plate. The more NaCl dosage was high, the more sludge was thickened and the shorter thickening time was obtained. However, considering the final thickening time and sludge concentration, optimum NaCl dosage was 0.5 g/L. Thickening time and sludge concentration was not affected by electrode distance. In DAF (dissolved air flotation) system, optimum recycle ratio was 40% and thickening performance was lower than that of the EF.

Key Words : Electroflotation, Current, Electrode, NaCl, Sludge thickening

1. 서 론

하수처리시 발생하는 1차, 2차 또는 혼합슬러지의 농축은 고형물 함량을 증가시키고 부피를 감소시켜 소화나 탈수 등의 후속 슬러지 처리공정을 원활하게 하는데 그 목적이 있다. 슬러지의 농축성 및 탈수성을 개선하면 슬러지 처리공정에서 농축조의 용량뿐만 아니라 후속공정 즉 탈수공정으로의 슬러지 유입량이 감소하여 탈수조의 용량 또한 축소시킬 수 있고 이에 따라 경제성 또한 높아질 수 있다¹⁾.

슬러지 농축을 위해 보통 중력 침강식 농축이나 가압부상법(DAF, dissolved air flotation) 또는 원심분리를 이용한 방법이 많이 이용된다²⁾.

국내에서 일반화되어 있는 생물학적 하수처리공정에서의 중력 침강식 농축법은 유입수의 수질과 유량 및 처리조건에 따라 슬러지 침전성의 변화가 심하여 벌킹(bulking)을 자주 일으키는 것으로 알려

져 있다. 중력 침강식 농축법은 1차 슬러지에서 가장 효과적이지만 슬러지 밀도가 1.01~1.09 g/cm³인 2차 슬러지 처리에는 그다지 좋은 방법이 아닌 것으로 보고 되고 있다³⁾.

가압부상법은 슬러지 팽화에 대한 문제가 없고, 농축 슬러지의 총고형물 농도가 2~3%로 중력 침강식 농축법에 비해 고효율 농축공정이다. 그러나 가압부상법은 기포발생을 위해 추가적인 설비가 필요하고, 높은 압력을 유지하기 위한 동력비가 소요되는 단점이 있다⁴⁾.

전기부상법(EF, electroflotation)은 물을 전기분해할 때 발생하는 수소 기포와 산소 기포를 이용하여 고액 분리의 목적을 달성하고자 개발된 방법으로 전기분해로 보다 쉽게 미세한 기포를 얻을 수 있고, 복잡한 기계 장비가 필요하지 않기 때문에 최근 들어 각광을 받고 있는 기술이다^{5,6)}.

전기부상법은 철이나 알루미늄 등의 분해성 전극을 이용하거나 전극 성분이 물에 용출되지 않는 촉매성 산화물 전극(DSA, dimensionally stable anode)을 이용하여 기포를 발생시킨다. 분해성 전극은 전극 자체가 분해 되어 현탁, 용존 및 콜로이드성 물

Corresponding Author : Young-Seek Park, Department of Health & Environment, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea
Phone: +82-53-650-8043
E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

질로 수산화물을 형성하게 되어 zeta 전위가 낮기 때문에 응집, 흡착 및 침강 특성이 우수하여 주로 인 제거⁷⁾, 매립장 침출수 제거⁸⁾, 중금속 제거⁹⁾ 등 주로 전기응집-전기부상(electrocoagulation- electroflotation)을 이용한 수처리에 이용되어 왔다. 반면 불용성 전극은 산소나 염소 발생에 대한 과전압이 비교적 낮으며 전극의 수명이 길어 수용액에서 염소나 산소를 생산하기 위한 목적으로 많은 관심을 받고 있으며, 전극 표면에서 전자의 이동에 의해 오염물이 파괴되는 직접 분해와 산소가 발생하는 전위 전후에서 발생하는 여러 산화제에 의한 간접 분해에 의해 난분해성 유기물 자체를 이산화탄소와 물로 변화시켜 대상 유기물을 연소(incineration)시킬 수 있는 것으로 알려져 최근 폐수 처리 분야에서 많은 관심을 불러일으키고 있다^{10,11)}.

그러나 국내·외에서 촉매성 산화물 전극을 하수 슬러지 농축에 이용된 경우는 드문 실정으로 본 연구에서는 전기부상을 이용한 2차 침전조의 슬러지 농축시 전기부상 공정의 타당성과 효율을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

실험에 사용한 슬러지는 S 하수처리장의 반송슬러지를 채취하여 폭기되는 저류조에 보관하였다. 슬러지는 일정한 농도와 성상을 유지하도록 인공 합성폐수를 주기적으로 공급하여 실험에 사용하였으며(Table 1), 실험에 사용시 슬러지를 세척하여 슬러지의 전도도를 350~450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로 조절하여 사용하였다. 슬러지 농도 실험을 제외한 모든 실험은 평균 반송슬러지 농도인 $5000 \pm 10 \text{ mg/L}$ 를 기준으로 실험하였다.

실험에 사용한 전극은 전기분해시 불용성인 촉매성 산화물 전극을 사용하였다. 전극의 형태는 메쉬형(mesh)과 평판형(plate) 두 종류를 사용하였으며, 순수 Ti 전극과 Pt, Ir 및 Ru를 바탕물질인 Ti 금속에 코팅한 전극을 사용하였다. Pt/Ti 전극과 Ir/Ti 전극은 현재 상업적으로 이용 가능하므로 Ti 메쉬 두께가 0.5 mm이고 코팅 두께가 5 μm 인 메쉬형 도금 전극(현성 E&E)을 구매하여 사용하였다. Ru/Ti 전극은 제조하여 사용하였으며, 두께가 0.5 mm이고 $35 \times 35 \text{ mm}$ (면적: 7.69 cm^2) 크기의 메쉬형 Ti 판(Kobe Steel TP340, 98.9%)을 전처리하고, RuCl_3 hydrate(Sigma-Aldrich, reagent plus) 2 g (96 mmol)을 농염산(35%)과 n-butanol이 10:90의 부피비로 혼합된 코팅액을 이용하여 코팅하였으며, 자세한 제조법은 기 발표된 논문¹²⁾에 수록되어 있다.

Table 1. composition of synthetic wastewater (Unit : mg/L)

Item	Concentration
Glucose	200
Urea	50
NaH_2PO_4	50
NaCl	15
KCl	7
MgSO_4	7

2.2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용한 전기부상 장치는 반응부피가 1 L이며, 반응기 하부에 크기가 $35 \times 35 \text{ mm}$ 인 전극을 실험 조건에 따라 2~8 mm 간격으로 설치하였다(Fig. 1). 전원은 직류전원공급기(Hyunsung, 50 V, 20 A)로 실험조건에 따라 전류를 변화시켜 인가하였다. 부상 실험은 전원을 공급한 후 슬러지가 부상한 후(부상시간) 전원을 끊고 5분간의 농축 시간을 준 뒤 종료하였다.

2.3. 분석 및 측정

농축된 슬러지는 시간에 따라 슬러지 계면 상부에서 피펫을 이용하여 채취한 뒤 농도를 측정하였으며, 부상수조 하부의 슬러지는 부상수조 하부 5 cm지점의 채취구에서 10 mL 채취하여 농도를 측정하였다. 슬러지 농도(total solids)는 standard methods에 따라 측정하였다¹³⁾. 전기전도도는 전도도미터(Eutech, Cybercan PC 300)를 이용하여 측정하였다.

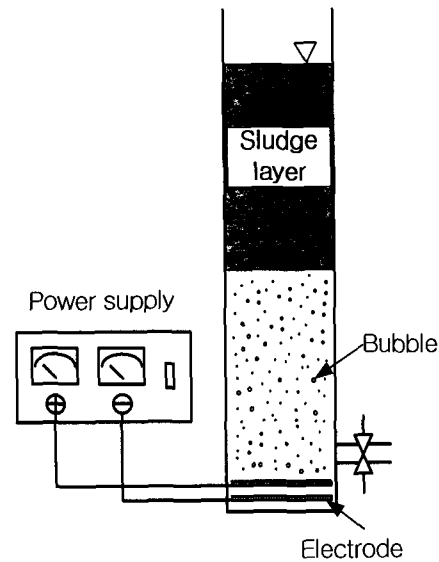


Fig. 1. Schematic diagram of electroflotation reactor.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전극 종류가 슬러지 농축에 미치는 영향

전극 재질과 종류에 따른 슬러지 농축 특성을 Fig. 2에 나타내었다. 농축 종료 후 Ru/Ti 전극을 이용한 경우의 슬러지 농도는 17,500 mg/L로 가장 높은 슬러지 농도를 나타내었다. 농축 종료에 소요되는 시간은 Pt/Ti 전극은 25분 (부상시간, 20분; 농축시간, 5분), Ru/Ti, Ir/Ti 전극은 40분, Ti 메쉬, Ti 평판 전극은 모두 55분으로 나타나 전극 종류별 농축 시간에 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

최종 농축 시간이 가장 짧았던 Pt/Ti 전극을 기준으로 25분에 각 전극 종류별 농도는 Pt/Ti > Ru/Ti > Ir/Ti > Ti mesh > Ti plate의 순서로 나타났고 Pt/Ti 전극의 경우 최종 농도는 16,200 mg/L로 나타나 원 슬러지 농도에 비해 3.2배 농축되는 것으로 나타났다.

Ti 전극의 경우 메쉬형과 평판형으로 전극의 면적과 모양이 바뀐 경우 메쉬형 전극의 슬러지 농축 농도가 높은 것으로 나타났다. 메쉬형과 평판형 Ti 전극 모두 크기가 35 x 35 mm이지만 평판형의 면적은 12.3 cm², 메쉬형 전극은 전극 표면의 구멍으로 인해 7.7 cm²이고, 전압은 각각 40.2 V (20.1 W)와 51.5 V (25.8W)로 나타나 전극에 인가되는 전력량이 차이 있기 때문에 슬러지 농축 성능이 차이 나는 것으로 판단되었다. Pt/Ti, Ru/Ti 및 Ir/Ti 전극은 각각 21.3 V (10.7 W), 23.8 V (11.9 W), 34.8 V (17.4 W)로 나타나 실험한 5종류의 전극 중 Pt/Ti 전극이 소모 전력량이나 부상시간 및 부상농도의 측면에서 가장 좋은 것으로 나타나 향후 실험에서는 Pt/Ti 전극을 사용하여 실험하였다.

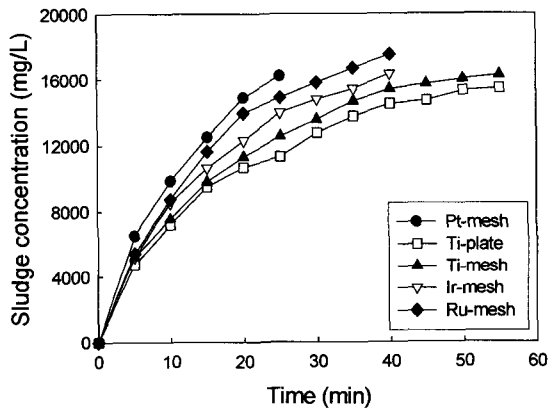


Fig. 2. Effect of electrode materials on the sludge thickening. (initial MLSS, 5,010 mg/L; NaCl 0.5 g/L; current, 0.5 A; electrode distance, 2 mm)

3.2. NaCl이 슬러지 농축에 미치는 영향

전기분해시 사용되는 전해질은 전기전도도를 높여 전력량을 줄여주는 역할을 한다¹⁴⁾. Fig. 3에 Pt/Ti 전극을 사용하고 NaCl 첨가량을 0~0.75 g/L로 변화시키면서 첨가하고 전류를 0.5 A로 일정하게 유지시켰을 때의 농축 슬러지 농도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 모든 NaCl 농도에서 총 농축 시간은 25분으로 나타났으나, NaCl 농도가 증가할수록 농축 슬러지의 농도는 감소하는 것으로 나타났다. 그 이유를 알아보기 위하여 NaCl 첨가량에 따른 소모 전력량과 전기전도도 변화를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 나타난 바와 같이 NaCl 첨가량이 많을수록 전력량은 감소하는 것으로 나타났다. 전기전도도의 경우는 NaCl 첨가량 증가량에 따라 선형적으로 증가하였다. 박 등¹⁵⁾은 같은 실험조건에서 NaCl 첨가량에 따른 기포 발생량을 측정된 결과 NaCl이 첨가되지 않은 경우의 기포 발생량이 가장 많았으며, NaCl 첨가량이 증가함에 따라 기포 발생량이 감소하였다고 보고하였다. Fig. 3과 Table 2의 결과 및 박 등¹⁵⁾의 결과를 종합해보면 NaCl 첨가량이 적은 경우가 적용 전력량이 많아 기포 발생량이 많기 때문에 농축 슬러지 농도가 높은 것으로 사료되었

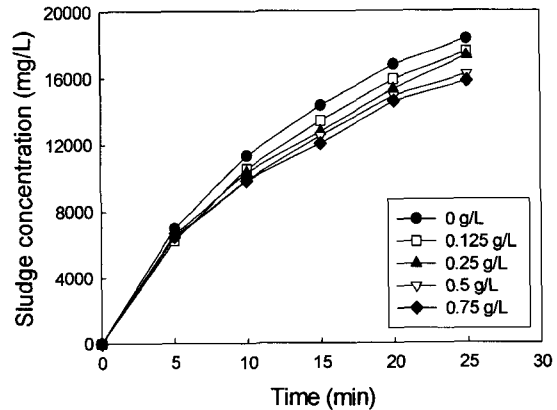


Fig. 3. Effect of NaCl concentration on the sludge thickening. (initial MLSS, 5,010 mg/L; current, 0.5 A; electrode distance, 2 mm)

Table 2. Change of electric power and conductivity with NaCl dosage

NaCl dosage (g/L)	0	0.125	0.25	0.5	0.75
Electric power (W)	40.2	30.1	22.3	16.2	12.7
Electric conductivity (μS/cm)	386	695	982	1363	1833

다. NaCl 무첨가와 0.75 g을 첨가한 경우의 25분 후 슬러지 농도는 각각 18,300 mg/L, 15,800 mg/L로 NaCl 0 g 첨가시 슬러지 농축 농도가 1.2배 많지만 전력량은 3.2배 증가하는 결과를 나타내어 전력량과 농축 슬러지농도를 같이 고려할 때 NaCl 첨가가 바람직한 것으로 나타났다.

같은 전력량에서 NaCl의 영향을 고려하기 위하여 NaCl 0.5 g/L 첨가시 0.5 A에서의 전력량 16.2 W를 기준으로 NaCl 첨가량에 따라 전류를 변화시켜 16.2 W로 전력량을 고정시키고 부상실험을 행하여 농축 슬러지의 농도를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이 같은 전력량에서 NaCl 첨가량이 증가할수록 총 농축 시간이 줄어들고, 농축 슬러지 농도는 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 0.5 g/L 이상의 NaCl 농도에서는 총 농축 시간과 슬러지 농도가 비슷하게 나타나 최적 NaCl 투입량이 존재하는 것으로 나타났고, 0.5 g/L가 최적 투입량인 것으로 사료되었다.

3.3. 전극 간격과 초기 슬러지 농도가 슬러지 농축에 미치는 영향

전극 간격은 전극을 이용한 반응기에서 운전에 주요 요소이다. 전류를 0.5 A로 유지하면서 전극 간격을 2~8 mm로 변화시켜 전극 간격에 따른 농축 슬러지 농도를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 전극 간격에 따른 농축 시간의 변화나 농축 농도의 변화는 관찰되지 않아 전극 간격이 슬러지 부상에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

그러나 전극 간격에 따른 전압은 21.3 V (2 mm), 27.5 V (4 mm), 30.7 V (6 mm) 및 35.5 V (8 mm)로 나타나 전극 간격이 멀어질수록 같은 전류가 흐

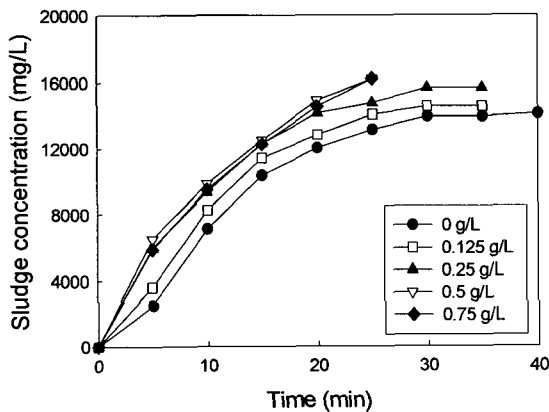


Fig. 4. Effect of NaCl concentration on the sludge thickening at same electric power (16.2 W). (initial MLSS, 5,010 mg/L; electric power, 16.2 W; electrode distance, 2 mm)

르기 위해 더 높은 전압이 필요한 것으로 판단되었고, 전극 간격은 좁을수록 전력량의 소비가 낮아지기 때문에 유리하며, 같은 전력량에서는 전극 간격이 넓을수록 부상 효율이 감소할 것이라고 사료되었다. 윤⁶⁾은 메쉬형 Ti 전극을 사용하여 하수슬러지를 전기부상하였을 때 전극 간격이 좁을수록 전력이 절약되어 유리하다고 보고한 결과와 일치하였다.

초기 슬러지 농도를 1,000~8,200 mg/L로 변화시켜 초기 슬러지 농도가 농축 시간과 농축 슬러지 농도에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 초기 슬러지 농도가 높을수록 부상 초기의 슬러지 농도가 높은 것으로 나타났다. 초기 슬러지 농도 1,000 mg/L에서는 농축 완료 후 11,900 mg/L, 5,010 mg/L는 16,200 mg/L, 8,200 mg/L에서는 20,100 mg/L로 나타나 초기 슬러지농도가 높을수록

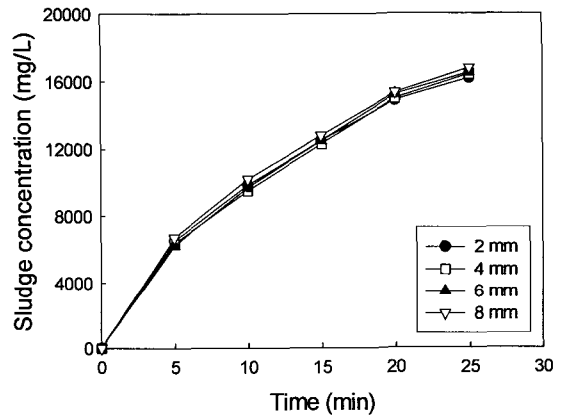


Fig. 5. Effect of electrode distance concentration on the sludge thickening. (initial MLSS, 5,005 mg/L; NaCl 0.5 g/L; current, 0.5 A)

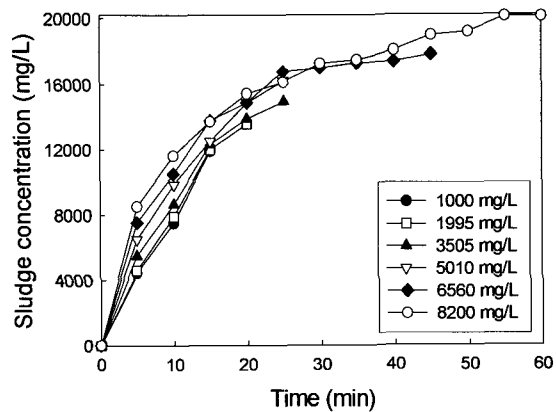


Fig. 6. Effect of initial sludge concentration on the sludge thickening. (NaCl, 0.5 g/L; current, 0.5 A; electrode distance, 2 mm)

농축 완료 후 농축 슬러지 농도가 높아지지만, 농축비는 낮은 초기 슬러지 농도에서 높은 것을 알 수 있었다.

반면 총 농축 시간은 초기 슬러지 농도가 1,000 mg/L인 경우는 15분, 2,000 mg/L는 20분, 3,500와 5,000 mg/L는 25분, 6,500 mg/L는 45분, 8,200 mg/L는 60분으로 나타나 농축에 걸리는 시간은 초기 슬러지 농도가 높을수록 길어지는 경향을 나타내었다. 농축 농도나 운전비와 관계되는 시간의 관점에서 볼 때 전기부상 공정은 약 5,000 mg/L이하의 슬러지 농도에서 운전하는 것이 경제적이라고 판단되었다.

3.4. 중력침강과 DAF와의 성능 비교

전기부상과 DAF에 의한 부상성능을 비교하기 위하여 가압수조와 부상수조로 이루어진 DAF 시스템을 이용하여 초기 농도가 5,005 mg/L인 슬러지를 대상으로 실험하였다. DAF 시스템의 자세한 제원과 실험방법은 기 발표된 논문에 제시되어 있다¹⁶⁾.

Fig. 7에 가압수 순환비를 20~50%로 변화시켜 25초의 가압수 주입 시간 이후 부상시간에 따른 슬러지 농도를 나타내었다. 총 40분의 부상시간이후 농축 슬러지 농도가 가장 높은 가압수 순환비는 40%로 나타났고 이때의 농축 슬러지 농도는 11,540 mg/L로 나타나 전기부상을 이용한 농축 슬러지 농도보다는 낮은 것으로 나타났다.

5,000 mg/L의 슬러지를 농축하기 위해 전기부상 실험에서 전원 인가 시간은 20분, DAF는 25초이지만 DAF는 가압수조에 5 atm의 압력을 40분정도 가해 물에 공기를 충분히 용해시켜야 하기 때문에 회분 실험에서 직접 경제성 비교는 곤란하고 연속실험

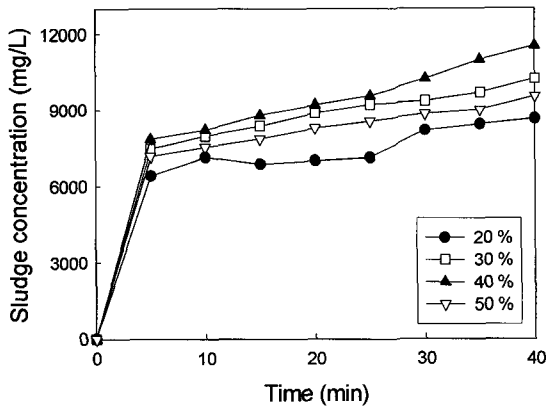


Fig. 7. Effect of recycling ratio on the sludge thickening with DAF system. (initial MLSS, 5,005 mg/L; pressure, 5 atm; injection time of pressured water, 25 sec)

수행을 통해서 비교가 필요한 것으로 사료되었다.

중력 침강의 경우 메스실린더에 5,010 mg/L의 슬러지를 투입하고 30분의 침강 후 슬러지 층의 높이 변화는 거의 나타나지 않았으며, 4시간 후의 슬러지 농도는 5,500 mg/L로 나타나 약 1.1배의 농축율을 나타내어 농축효율이 매우 낮은 것으로 나타났다.

4. 결 론

축매성 산화물 전극 (DSA, dimensionally stable anode)을 사용하여 하수처리장의 2차 슬러지의 농축 효율과 DAF 및 중력 침전과의 효율을 비교하여 다음의 결과를 얻었다.

1. Pt/Ti 전극이 실험에 사용한 전극 중에서 최종 농축 시간이 가장 짧았으며, 최종 농축 농도도 가장 높은 것으로 나타났다. 메쉬형 전극의 슬러지 농축 농도는 적은 면적으로 인해 전극에 인가되는 전력량이 차이 나기 때문에 평판형 전극보다 높은 것으로 나타났다.

2. NaCl 첨가량이 적은 경우가 적용 전력량이 많아 기포 발생량이 많기 때문에 농축 슬러지 농도가 높지만 전력량과 농축 슬러지 농도를 같이 고려할 때 NaCl 첨가가 바람직한 것으로 나타났다. 같은 전력량 (16.2 W)에서 NaCl 첨가량이 증가할수록 총 농축 시간이 줄어들고, 농축 슬러지 농도는 증가하는 것으로 나타났으나 0.5 g/L가 최적 투입량인 것으로 사료되었다.

3. 전극 간격이 슬러지 농축에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나, 전극 간격은 좁을수록 전력량의 소비가 낮아지기 때문에 좁은 전극 간격이 유리한 것으로 사료되었다.

4. 초기 슬러지 농도가 높을수록 농축완료 후 농축 슬러지 농도가 높아지지만, 농축비는 낮은 초기 슬러지 농도에서 높은 것을 알 수 있었으며, 총 농축에 걸리는 시간은 초기 슬러지 농도가 높을수록 길어지는 경향을 나타내었다.

5. 농축 농도나 운전비와 관계되는 시간의 관점에서 전기부상의 경우 약 5,000 mg/L이하의 슬러지 농도에서 운전하는 것이 경제적이라고 판단되었다.

6. DAF 공정은 전기부상을 이용한 농축 슬러지 농도보다는 낮은 것으로 나타났다. 중력 침강의 경우 농축효율이 매우 낮은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 산학협동재단의 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) 정성현, 2004, 전해부상(EF) 및 슬러지층여과

- (SBF)에 의한 슬러지의 농축성 및 탈수성 개선, 석사학위논문, 토목환경공학과, 성균관대학교, 서울.
- 2) 최영균, 정태학, 염익태, 2005, 전해부상을 이용한 활성슬러지의 농축효율 향상, 상하수도학회지, 19(3), 295-300.
 - 3) Vanderhasselt A., Verstraete W., 1999, Short-term effects of additives on sludge sedimentation characteristics, Wat. Res., 33(2), 381-390.
 - 4) 박용호, 한무영, 안현주, 허창원, 2003, 전해부상법에 의한 슬러지 농축특성, 대한환경공학회 춘계학술발표회 논문집, 271-274.
 - 5) 김원태, 2001, 전해부상법에서 미세기포와 입자의 기초특성 연구를 통한 제거 메커니즘 연구, 석사학위논문, 지구환경시스템공학부, 서울대학교, 서울.
 - 6) 윤창곤, 2005, 전해부상을 이용한 하수슬러지 고액분리의 최적화, 석사학위논문, 토목환경공학과, 성균관대학교, 서울.
 - 7) 이준, 2004, 부상공정에 의한 상수슬러지 농축, 석사학위논문, 지구환경시스템공학부, 서울대학교, 서울.
 - 8) 허목, 김병현, 김광진, 2002, 전기분해법에서의 전극변화에 따른 위생매립장 침출수의 처리 특성, 폐기물자원화, 10(1), 68-74.
 - 9) Gao, P., Chen, X., Shen, F., Chen, G., 2005, Removal of Chromium(VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter, Sepa. and Puri. Tech., 43, 117-123.
 - 10) 김광욱, 이일희, 김정식, 신기하, 정봉익, 2002, 고온 소결된 촉매 산화물 전극의 재료 특성 및 유기물 분해능 연구, 공업화학, 13(3), 285-290.
 - 11) 김홍석, 서인석, 최일환, 김연권, 김지연, 이진영, 2004, 용존공기를 이용한 소독능 향상 전기분해 소독공정개발, 한국물환경학회대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집, 625-628.
 - 12) 김동석, 박영식, 2007, 불용성 전극을 이용한 Rhodamine B의 전기화학적 탈색, 한국물환경학회지, 23(3), 377-384.
 - 13) APHA. AWWA. WPCF., 1998, Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed., APHA. AWWA. WPCF., 2-51-2-58pp.
 - 14) Comninellis C., Nerini A., 1995, Anodic oxidation of phenol in the presence of NaCl for wastewater treatment, J. of Appl. Electrochem., 25, 23-28.
 - 15) 박영식, 김동석, 2007, 전기 부상 공정에서의 기포 발생량 고찰, 한국환경과학회 춘계학술발표대회 논문집, 16(1), 361-365.
 - 16) 김동석, 박영식, 2006, 슬러지의 성상이 DAF(dissolved air flotation)를 이용한 팽화 슬러지의 농축에 미치는 영향, 한국물환경학회지, 22(1) 97-103.
 - 17) 김동석, 박영식, 2006, DAF(Dissolved air flotation)를 이용한 팽화 슬러지 농축, 한국환경과학회지, 15(1), 77-84.