

정수처리에서 전기응집과 화학응집의 처리효율 비교

Comparison of Electrocoagulation and Chemical Coagulation in Removal on Water Treatment

한무영^{1,*} · 송재민² · 박상철¹

Han, Moo-Young^{1,*} · Song, Jae-Min² · Park, Sang-Cheol¹

1 서울대학교 지구환경시스템공학부

2 메사추세츠 공과대학

(2004년 8월 13일 접수; 2004년 9월 14일 최종수정논문채택)

Abstract

Electrocoagulation has been suggested as a promising alternative to conventional coagulation. The process is characterized by reduced sludge production, no requirement for chemical use, and ease of operation. However, this coagulation has scarcely been studied in water purifying process. This study was performed several batch experiments to compare turbidity removal between electrocoagulation and chemical coagulation. In addition, characteristics of floc were evaluated with zeta potential and particle size distributions. Electrocoagulation showed a relatively higher removal of turbidity (approximately 5%) with the same aluminum amount than conventional chemical coagulation. In addition, turbidity removal by electrocoagulation was less sensitive to pH and was greater for more extensive pH range than chemical coagulation. The results of zeta potential and floc size distributions illustrated that electrocoagulation provided the preferable conditions for coagulation such as zeta potential close to zero millivolt and increased portions of particles in the range of 40 and 100 μm .

Key words: Electrocoagulation; Chemical coagulation; Removal efficiency; Floc characteristic

주제어: 전기응집, 화학응집, 탁도 제거율, 플록 특성

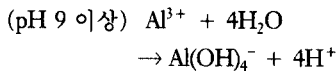
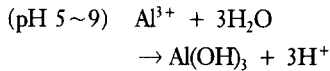
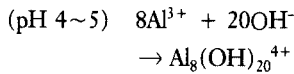
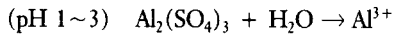
1. 서 론

응집이란 물 속의 아주 작은 콜로이드 상의 물질들을 서로 뭉치게 하여 크게 만든 후 다음에 오는 침전

이나 여과공정에서 제거하도록 하는 정수장에서 가장 중요한 공정 중의 하나이다. 현재 우리나라 정수장의 응집 공정은 약품을 적절한 양으로 주입하여 콜로이드 표면을 응집제에 의해 생성된 양전하로 중화함으로써 콜로이드의 전기적 반발력을 줄이고, 이 후 입

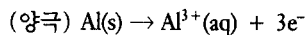
*Corresponding author Tel.: +82-2-880-8915, Fax: +82-2-885-7376, E-mail: myhan@shu.ac.kr (Han, M.Y.)

자는 브라운 운동이나 수류에 의한 유동으로 상호의 근접 접촉이 가능해져 침전에 용이한 플록을 형성시키는 화학응집이 대부분이다. 화학응집에서 pH에 따른 알루미늄 응집제의 화학반응은 다음과 같다.

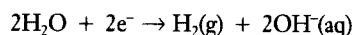


하지만 이러한 화학응집은 약품 및 에너지 등의 운전비가 많이 소요되며, 응집공정의 결과 발생하는 슬러지의 처리에 많은 비용이 들고 있어 많은 개선이 필요한 부분이다.

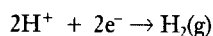
전기응집 공정은 전기를 공급하여 음전하를 띠고 있는 수중의 불순물들이 양극에서 용출된 금속이온에 의해 전기적으로 중화하여 응집, 침전이 일어나게 하는 것이다. 원수에 부과된 전류는 화학반응을 일으키는 전기적 추진력으로 작용하게 되고 용해된 금속이 가수분해하여 현탁용존성 및 콜로이드성의 수산화물을 형성하게 되는데, 이는 응집, 흡착 및 침강 특성이 우수하며 수처리에 효과적이다. 즉, 전류에 의해 전극에서 발생된 이온이 화학반응 및 침전을 일으키거나 콜로이드 입자를 응집 및 전리 부상시켜 오염물질을 제거하는 것이 전기응집 처리 방법이다. 알루미늄 극판을 사용하였을 경우, 전기응집시 나타나는 현상에 대한 화학반응식은 아래 식과 같으며, 양극에서는 Al^{3+} 이온이 용출되고, 음극에서는 두 가지 Mechanism에 의해 수소가스가 발생한다(Rajeshwar and Ibanez, 1997).



(음극) Mechanism 1



Mechanism 2



이 전기응집 공정은 슬러지의 발생량이 작고, 부가

의 화학약품 첨가가 불필요하며 운전이 용이하다는 장점이 있어 염료 폐수 처리, 하수 처리, oil-water emulsion 등과 같은 다양한 수처리 분야에 이용되고 있다. 그러나 전기응집이 정수처리에 적용된 연구는 거의 없는 실정이다. 전기응집 공정이 기존의 정수장 시설에 이용 가능하다면 이는 기존 화학응집 공정에 비하여 간편한 운전과 부가 약품과 급속혼화에 따른 에너지를 절약할 수 있으므로 환경 친화적이며 경제 적일 것으로 사료된다.

기존의 화학응집에서는 Jar-test에 의한 적정 응집제 양과 pH 범위를 산정하고, 입자의 제타전위를 등 전점에 가깝도록 만든 후 플록을 형성하였을 때 침전에 양호한 큰 플록을 형성하는 것이 응집과 플록형성의 효율을 판단하는 주요인자이다. 전기응집 또한 화학응집과 마찬가지로 알루미늄 극판에서 용출된 알루미늄의 양과 pH 범위, 알루미늄에 의한 입자의 제타전위, 크기별 입자의 분포 변화를 살펴봄으로써 응집의 효율을 살펴볼 수 있다.

따라서 본 연구는 화학응집과 전기응집에 대한 회분식 실험을 통해 (1) 알루미늄 양과 pH에 의한 탁도 제거효율과 (2) 입자의 제타전위와 크기별 분포에 의한 플록의 특성을 비교 분석하여 전기응집의 효율성을 검토하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

본 실험에서는 전기응집과 화학응집 모두 2L용량의 사각 아크릴 Jar tester 용기($10.5 \times 10.5 \times 22\text{cm}^3$)를 이용하여 회분식 실험을 실시하였다. 샘플은 수표면에서 10cm 깊이에 있는 샘플링 포트에서 받아서 측정, 분석하였다. 전기응집과 화학응집의 실험 배치는 Fig. 1에 표현된 것처럼 전기응집은 전기분해, 플록형성, 침전의 순서이고, 화학응집의 경우는 응집, 플록형성, 침전의 순이다. 실험에 사용된 원수는 수돗물에 약 0.016g/L kaolin을 첨가하여 9 NTU의 탁도로 조제하였으며 측정된 원수의 성상은 Table 1에서 보여주고 있다.

실험 배치는 전기응집의 경우 위의 장치와 같이 $8 \times 16\text{cm}$ 의 알루미늄 극판 4개를 병렬로 연결하였으며 극판의 간격은 각각 0.5cm 간격으로 설치하였다. 전원공급은 직류전원공급장치를 이용하여 극판에 24V

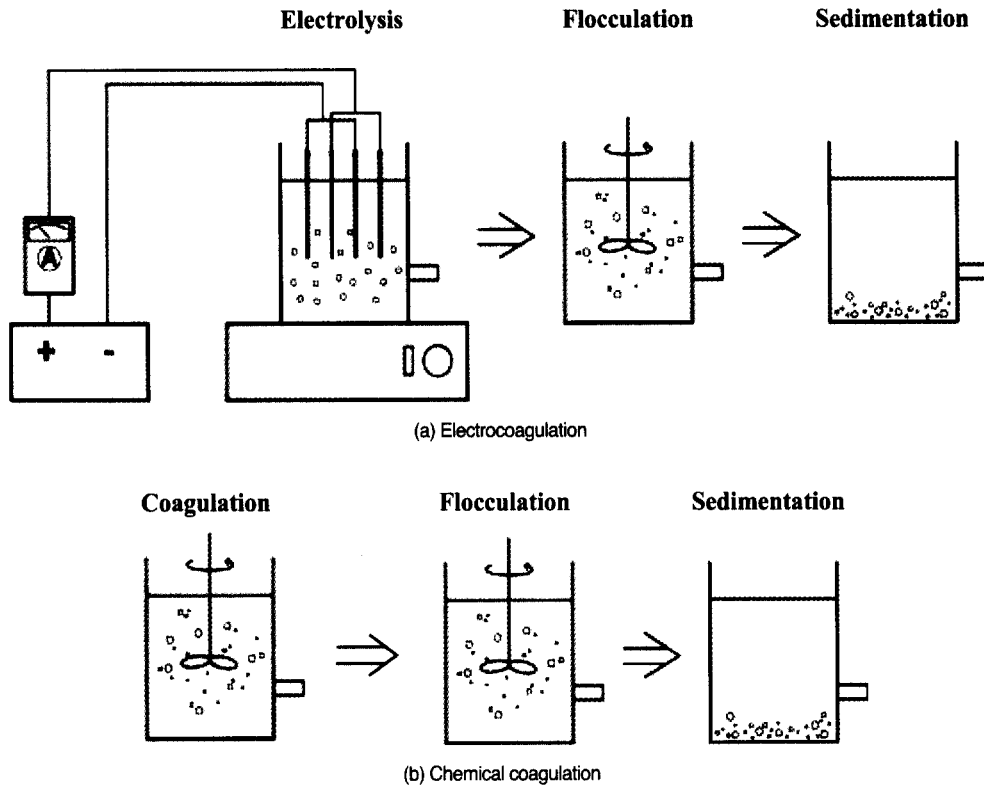


Fig. 1. Experimental setup for electrocoagulation and chemical coagulation.

Table 1. The characteristics of raw water

Turbidity	Temperature	pH	Alkalinity
9 NTU	15-18°C	7.2	35 mg/L as CaCO ₃

직류전압을 공급하였으며, 전류계를 회로에 직렬로 연결하여 전류를 측정하였다. 실험 수행 중 전류는 1.9~2.1A의 값을 보였다. 극판에서 용출된 알루미늄이 원수 중에 균일하게 분포할 수 있도록 마그네틱 스티러를 이용하여 교반을 하였다. 화학응집의 경우

는 응집제로 Al₂(SO₄)₃ · 16H₂O를 사용하여 응집제 주입과 동시에 급속 혼화를 30 초간 100rpm으로 시행하였으며, 완속 교반 및 침전은 전기응집과 동일하게 15분, 25rpm으로 완속 교반을 실시하였고, 30분 동안 침전시킨 후 시료를 채취하였다. 화학응집에 사용된 응집제 주입량의 범위는 1~6mg/L as Al이며, 전기응집에서는 동일한 알루미늄 용해량을 얻기 위해 전류를 30sec~10min로 변화시켰다(Table 2). pH 3~11까지의 변화는 H₂SO₄와 NaOH를 사용하여 이

Table 2. The conditions of experiment

	Electrocoagulation	Chemical coagulation
Coagulation	<ul style="list-style-type: none"> • Electrode : Aluminum • Voltage : 24 V • Time : 30sec~10 min 	<ul style="list-style-type: none"> • Coagulant : Alum • Aluminum doses : 1~6 mg/L as Al • Rapid mix : 100 rpm, 30 sec
Flocculation	25 rpm, 15 min	
Sedimentation	30min	

루어졌다.

알루미늄 농도는 ICP-AES(Inductively coupled plasma-Atomic Emission Spectrometer, Shimadzu)를 이용하여 측정하였으며 알루미늄 총 양의 계산은 측정된 알루미늄 이온의 농도에 총 시료 부피를 곱하여 계산하였다. pH는 Orion사의 550A 모델의 pH미터로 측정하였다. 제타전위는 전기응집과 화학응집에 대하여 각각 전기분해, 급속 혼화 후 DELSA 440 SX (Beckman & Coulter, USA)를 이용하여 측정하였으며, 플록형성 후 연속 입자계수기(PC2400D, Chemtrac, USA)를 이용하여 2~100 μ m 범위에서 6개의 채널에 의해 원수와 급속 교반, 완속 교반, 침전 후의 입자의 크기 및 분포를 측정하였다. 탁도는 HACH사 2100P 모델의 탁도계를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 탁도 제거율 비교

3.1.1 알루미늄 양

응집에 사용된 알루미늄 양에 따른 탁도 제거효율에 관하여 알아보았다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 알루미늄 양에 따른 탁도 제거효율은 거의 모든 영역에 대하여 전기응집의 제거 효율이 화학응집에 비해 더 우수하게 나타났음을 알 수 있다. 같은 알루미늄 주입량을 기준으로 보았을 때 전기응집의 경우가 약 5% 정도 탁도 제거율이 증가하였다. 또한, 90%의 탁도가 제거되는 곳을 최적으로 가정하였을 때 전기응집의 경우 약 2.9mg/L의 알루미늄이 필요한 반면 화학응집의 경우 3.8mg/L의 알루미늄 주입량이 필요하였다. 따라서 전기응집을 사용하였을 경우 화학응집에 사용된 알루미늄 양의 약 24% 정도를 절약할 수 있다. 알루미늄의 양은 결과적으로 침전 후 발생하는 슬러지의 양과도 밀접한 관계가 있으므로 알루미늄 양의 절감은 발생 슬러지 양 감소, 처리 및 운반 비용 감소라는 부가의 경제적 효과를 창출할 것으로 기대된다.

한편 전기응집과 화학응집에서 높은 탁도 제거율을 얻는데 필요한 알루미늄의 양이 대략 4mg/L 이상이었다. Amirtharajah and Mills(1997)에서 제시된 Fig. 3의 알루미늄 응집 영역에서 비교해 보면, 4mg/L의

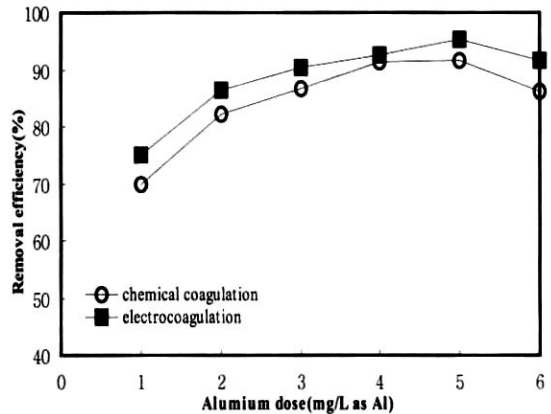


Fig. 2. Effects of aluminum doses on turbidity removal.

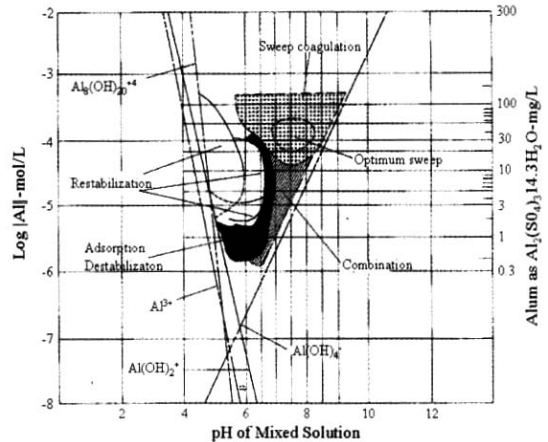


Fig. 3. Design and operation diagram for alum coagulation²⁾

값을 Log Al as mol/L로 계산하면 -3.73으로 계산된다. Fig. 3에서 보면 이 값은 모두 중성 pH 범위에서 Optimum sweep 영역에 해당하는 값으로 전기응집이나 화학응집에서 주요 탁도 제거 메커니즘은 Sweep coagulation임을 알 수 있다.

3.1.2 pH 영향

원수의 pH는 응집제를 이용한 탁도 제거율에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이는 앞서 서론에서 설명한 바와 같이 pH에 따라서 알루미늄염의 성질이 변하기 때문이다. 본 실험에서는 원수의 pH에 대하여 화학응집과 전기응집에서의 탁도 제거율에 대하여 비교해 보고자 하였다. pH에 따른 탁도제거율은 Fig. 4에서와 같이 전기응집과 화학응집의 경우 원수의 pH 변

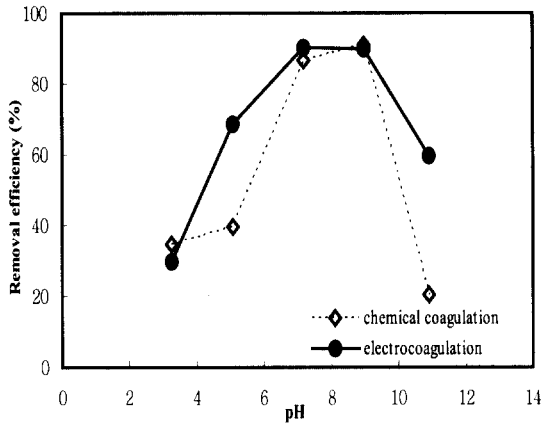


Fig. 4. Effects of pH on turbidity removal.

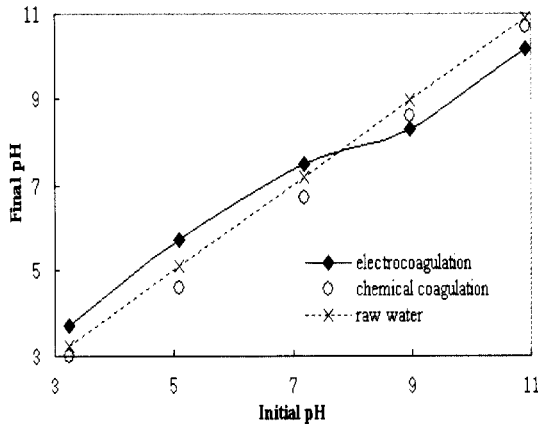


Fig. 5. Initial and final pH in electrocoagulation and chemical coagulation.

화에 대하여 비교적 비슷한 경향을 보이고 있다. 두 경우 모두 pH에 따라서 제거율이 포물선 모양으로 중성영역(약 pH 7~9)에서 대략 90% 정도의 높은 탁도 제거율을 보이고 있다. 그러나 pH 5, pH 11의 경우는 전기응집이 화학응집에 비하여 약 20~30% 정도 높은 탁도 제거율을 보이고 있다. 이는 Fig. 5와 같이 전기응집 및 화학응집 반응 후 처리수의 최종 pH 변화에 의해서 설명될 수 있다. 알루미늄의 응집은 알루미늄 응집표에 의하면 중성영역에서 잘 이루어지는 것으로 알려져 있다(Amirtharajah, 1982). 전기응집의 경우 전기응집 반응 후 유출수의 pH가 화학응집의 pH에 비해 중성부분에 근접하고 있다. 전기응집의 경우 유출수의 pH가 중성부분으로 이동하

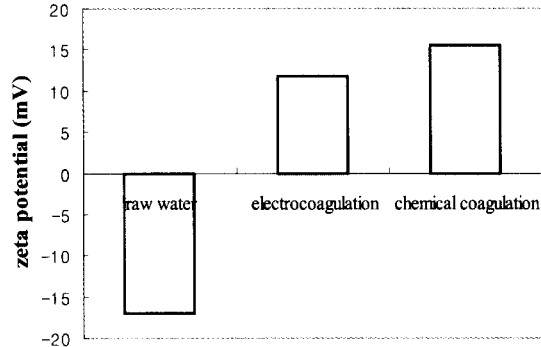
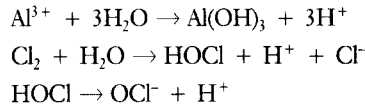


Fig. 6. Zeta potential of floc created from rapid mix in chemical coagulation and from electrolysis in electrocoagulation (Aluminum dose = 4 mg/L as Al, pH = 7.2).

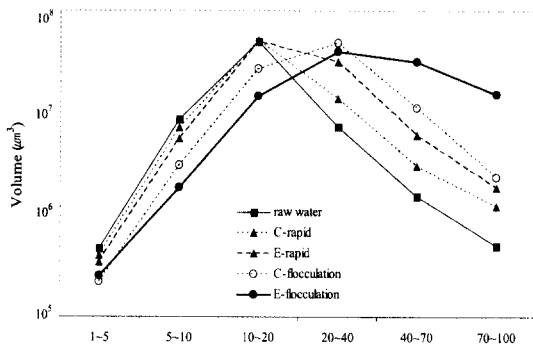
는 것에 대해서는 기존의 연구에서도 언급되어진 바가 있다. 이를 정리해 보면, (1) 산성영역에서 pH가 상승하게 되는 주 원인은 음극에서 생성된 OH⁻ 때문일 것으로 판단된다. (2) 염기성영역에서 pH가 감소하여 중화현상을 보이는 원인은 아래 식과 같이 H⁺의 증가가 원인인 것으로 설명된다(Chen, 2000).



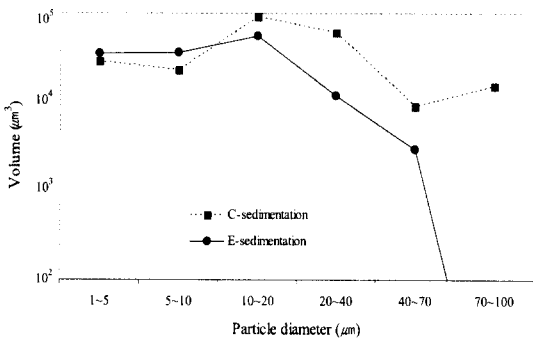
3.2 플록의 특성 비교 실험

3.2.1 제타전위

전기응집과 화학응집에서 90%의 탁도 제거율을 나타내는 알루미늄 양 4mg/L인 조건에 대하여 전기분해와 급속 혼화 직후 입자의 제타 전위를 측정하였다. 일반적으로 응집에서 입자는 -10mV에서 +10 mV 범위의 제타전위값을 가지는 것을 추천하고 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 초기의 원수는 약 -17 mV의 값을 가지고 있었으며 전기분해, 급속 혼화 후 그 값은 양의 값으로 바뀌었다. 여기에서 전기분해 직후의 입자는 11.7mV, 화학응집의 경우 급속 혼화 후의 입자는 15.5mV의 제타전위를 보이고 있었다. 따라서 전기응집으로 만들어진 입자의 경우 응집에 보다 용이한 범위 안의 제타전위를 띄고 있었다.



(a) Particle volume distribution before sedimentation



(b) Particle volume distribution after sedimentation

note: C-: After chemical coagulation, E-: After electrocoagulation

Fig. 7. Particle volume distributions after flocculation in each process (Aluminum dose = 4 mg/L as Al, pH = 7.2)

3.2.2 플록 크기 분포

본 실험에서는 알루미늄 양 4mg/L인 경우에서 입자 크기 특성을 알아보기 위하여 Particle counter를 이용하여 2~100 μ m 범위의 입자들을 6개 채널을 통해 원수와 전기분해 및 급속교반, 플록 형성 후, 30분 침전 이후의 화학응집과 전기응집에 대해 입자 크기 및 분포를 측정해 보았다. Fig. 7(a)에서 보여지듯 원수의 대부분 입자 분포는 10~20 μ m 범위에 존재한다. 전기응집의 전기분해와 화학응집의 급속교반의 결과로 큰 플록이 형성됨을 확인할 수 있었으며, 플록플레이션에 의한 영향으로 전기응집과 화학응집 모두 20 μ m 이상의 플록에서 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 화학응집에 비해 전기응집이 같은 알루미늄 양에서 큰 플록을 형성하는데 더 유리한 결과를 보여주고 있다. 70~100 μ m의 입자를 살펴보면, 플록

형성 후 전기응집이 화학응집에 비해 10배 더 높은 입자의 부피를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 크기의 플록은 Fig. 7(b)에서 침전후 처리수의 입자 분포를 살펴본 바와 같이 큰 플록이 전기응집의 경우 침전에 유리하게 작용한 것으로 보인다. 그러나 두 응집에 2~10 μ m의 작은 입자의 경우는 비슷한 양을 보이고 있었다.

앞서 살펴본 탁도 제거율과 비교해 보았을 때, 전기응집이 화학응집에 비해 더 높은 탁도 제거율을 가지는 이유를 설명할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 정수처리 공정에서 기존의 응집방법에 대한 대안으로 회분식 실험을 통해 전기응집과 화학응집을 비교하여 분석해 보았다. 실험 결과 다음과 같은 세부 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 탁도 제거율은 실험에 사용된 알루미늄 주입량 범위 내에서 전기응집이 화학응집에 비해 약 5% 높게 나타났으며, 동일한 제거율을 얻기 위해서는 전기응집의 경우가 화학응집에 사용된 알루미늄 양에 비해 적게 소요됨을 확인할 수 있었다. 또한 pH로부터 영향을 비교적 적게 받아 화학응집에 비해 넓은 범위의 pH에서도 안정적인 탁도 제거율을 보이고 있었다.

(2) 플록의 특성을 살펴볼 때, 제타전위는 전기응집이 화학응집에 비해 등전점에 가까운 전위를 보였다. 플록의 크기 분포는 플록형성공정 이후 화학응집보다 큰 플록을 형성하여 전기응집이 침강성이 높은 플록형성에 유리함을 알 수 있었다.

이 외에도 부가적으로 전기응집은 전극을 배플로 설치하게 되면 화학응집에서의 급속교반 효과가 필요하지 않으며, 화학 약품 저장소 및 이를 투여하기 위한 여러가지 설치 및 운영비가 절감될 수 있다.

이와 같이 회분식 실험을 바탕으로 전기응집이 화학응집에 비하여 효율적으로 나타났으나, 이의 실제 적용을 위해서는 다양한 응집제 주입 조건과 응집 pH 범위에서의 실험이 필요하며, 중대규모의 pilot 테스트 또는 실제정수장에서의 실험적 연구가 더욱 요구된다.

참고문헌

- 丹保憲仁, 상수처리: 정수의 기술(1995), 동화기술, pp. 67-68.
- 송재민, 한무영, 정태학(2001). 전기응집 공정에서 응집시간이 탁도제거율에 미치는 영향, *J. of KSWW*, **15**(1), pp. 55-57.
- America Water Works Association (1999) Water Quality and Treatment 5th Ed., McGraw Hill, USA.
- Amirtharajah, A. and Mills, K.M. (1982) Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation, *Journal Amer. Water Works Assn.*, **74**(4), pp. 210-216.
- Chen, X., Chen, G. and Yue, P.L. (2000) Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, **19**, pp. 65-76.
- Gveren, .B. and Koparal, S. (1997) Electrocoagulation for oil-water treatment. *J. Environ. Sci. Health*, **A32**(9-10), pp. 2507-2520.
- Lin, S.H. and Peng, C.F. (1994) Treatment of textile wastewater by electrochemical method. *Wat. Res.* **28**(2), pp. 277-282.
- Mills, D.(2000). Anew process for electrocoagulation. *J. Am. Water Works Assoc*, **92**(6), pp. 34-43.
- M. Han, J. Song and A. Kwon (2002) Preliminary investigation of electrocoagulation as a substitute for chemical coagulation, *Water Science and Technology: Water Supply*, **2**(5-6), pp. 73-76.
- M.Y. Han, J.S. Shim, Y.K. Chung and Y.H. Park (2002) Diagnosing and optimizing water treatment processes by using particle counter: a case study in Korea, *Water Science and Technology*, **45**(4-5), pp. 511-518.
- Rajeshwar, K. and Ibanez, J.G. (1997) Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement. Academic Press, San Diego.
- Tsai, C.T., Lin, S.T., Shue, Y.C. and Su, P.L.(1997). Electrolysis of soluble organic matter in leachate from landfills. *Wat. Res.*, **31**(12), pp. 3073-3081.
- Vik, E.A., Carlson, D.A., Eikum, A.S. and Gjessing, E.T. (1984). Electrocoagulation of potable water. *Wat. Res.*, **18**(11), pp. 1355-1360.