

유동흐름 전류계를 이용한 정수장 고탁도 유입수 응집 제어 방법에 대한 연구

남승우 · 조병일 · 김원경* · 조경덕†

서울대학교 보건대학원 환경보건학과, *삼보과학

Coagulation Control of High Turbid Water Samples Using a Streaming Current Control System

Seung-Woo Nam, Byung-Il Jo, Won-Kyong Kim*, and Kyung-Duk Zoh†

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

*Sam Bo Scientific Co., Ltd., Seoul, Korea

ABSTRACT

Objectives: This study was aimed at determining the optimum coagulation dosage in a high turbid kaolin water sample using streaming current detection (SCD) as an alternative to the jar test.

Methods: SCD is able to optimize coagulant dosing by titration of negatively charged particles. Kaolin particles were used to mimic highly turbid water ranging from 50 to 600 NTU, and polyaluminum chloride (PAC, 17%) was applied as a titrant and coagulant. The coagulation consisted of rapid stirring (5 min at 140 rpm), reduced stirring (20 min at 70 rpm), and settling (60 min). To confirm the coagulation effect, a jar test was also compared with the SCD titration results.

Results: SCD titration of kaolin water samples showed that the dose of PAC increased as the pH rose. However, supernatant turbidity less than 1 NTU after coagulation was not achieved for high turbid water by SCD titration. Instead, a conversion factor was used to calculate the optimum PAC dosage for high turbid water by correlating a jar test result with that from an SCD titration. Using this approach, we were able to successfully achieve less than 1 NTU in treated water.

Conclusions: For high turbid water influent in a water treatment plant, particularly during summer, the application of SCD control by applying a conversion factor can be more useful than a jar test due to the rapid calculation of coagulation dosage. Also, the interpolation of converted PAC dose could successfully achieve turbidity in the treated water of less than 1 NTU. This result indicates that an SCD system can be effectively used in a water treatment plant even for high turbid water during the rainy season.

Keywords: kaolin, streaming current, coagulation, charge titration, poly aluminum chloride

I. 서 론

2011년 먹는 물의 수질기준의 강화와 더불어 기존 정수처리장의 노후 처리시설에 대한 보완 및 강화가 이루어지고 있는 가운데 새로운 정수 처리 공정에

대한 도입 및 관심이 높아지고 있다. 기존 정수장의 주요 처리기술로는 ‘응집-침전-여과-소독’ 공정을 들 수 있는데 이 중에서도 화학적 응집공정은 콜로이드(colloid) 입자 및 이에 흡착된 입자성 오염물질의 제거를 통하여 유입수의 탁도를 줄여주어 전체적인 정

†Corresponding author: Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University, Seoul 157-742, Korea, Tel: +82-2-880-2737, Fax: +82-2-745-9104, E-mail: zohkd@snu.ac.kr

Received: 29 March 2012, Revised: 3 April 2012, Accepted: 12 April 2012

수장의 처리목표를 달성하는데 기여하는 중요한 과정이라 할 수 있다. 이 공정에서 응집제의 최적 투입량의 결정과 제어는 경제적인 측면에서의 사용을 줄여 비용절감이 특히 중요한 부분이다.

정수장의 처리수는 우리가 매일 섭취하고 있는 수돗물로서 인체에 직접적으로 영향을 주므로, 인간 건강 측면에서 응집제의 과다 주입은 심각한 건강 영향을 발생시킬 수 있다. 특히 우리나라 정수장에서 주로 사용되어지는 알루미늄 계열의 응집제인 폴리염화알루미늄(polyaluminum chloride, 일명 PAC), 폴리 수산화염화 황산알루미늄(polyaluminum hydroxychloro sulfate) 등은 응집처리시 알루미늄 이온의 만성적인 노출로 신경 장애 및 알츠하이머병의 유발을 일으킬 수 있다.^{1,2)} 따라서 음용수에 존재하는 알루미늄의 노출을 줄이기 위해서도 적절한 화학적 응집제의 투입량의 산출이 필요하다.

최적의 응집조건 결정을 위해 활용하는 대표적인 방법인 Jar test는 간헐적인 시료의 측정과 시행착오 접근방법(trial and error)을 이용하기 때문에 시간이 많이 소요된다.^{3,5)} 특히 우리나라의 경우 장마철 집중적인 강우시 400 NTU 이상의 고탁도 수질의 급격한 변화는 Jar test만으로 응집제의 주입조건을 결정하기에는 실시간 대응에 어려움이 존재한다.^{6,8)}

최근에 유동흐름전류계(streaming current detector, 일명 SCD)나 zeta-meter 등 실시간 수질변화에 빨리 대응할 수 있는 응집공정에 대한 온라인 제어체계들이 연구되고 있으며, 이 중 일부는 실제 정수장에 적용되어 운영 중에 있다. 특히 SCD 시스템은 유동전위(streaming current)를 발생시켜 전기적 이중층(electrical double layer)을 교란하고 실시간으로 콜로이드 물질들이 띄는 음전하를 측정하여 전기적 중성 유도를 위한 적정제를 주입하도록 제어하는 시스템이다.^{3,9-16)} 그러나 SCD의 정수장에 실제 도입은 아직 초기단계에 있고, 이에 대한 국내연구 결과들이 부족하여 정수장에서 실시간 대응하는 방법의 적절성과 적용원리에 대한 가시화가 이루어지지 못하고 있다. 실제로 채선하¹⁷⁾의 연구결과에 의하면, SCD 장치의 정수처리장 운전결과 고탁도 조건에서 제어 장치가 적절한 투입량 결정을 수행하지 못하여 이에 대한 문제점을 제시하였다. 따라서 현재는 SCD 제어가 이루어지는 일부 정수장에서는 주입량 산정결과에 대한 확인을 위해 근본적으로는 Jar test 방법

에 의존한 최적 응집조건 확인이 이루어지고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위해서는 여름철 집중호우가 빈번한 고탁도 상황에서의 SCD 시스템을 이용하여 적절한 응집 효과를 달성시킬 수 있는 주입량의 환산 방법이 적용된다면, 수질변화에 신속한 대응이 가능하고 정확한 정수 처리 제어방법이 될 수 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 SCD 시스템을 활용하여 실험실 규모로 카올린(kaolin) 용액을 이용하여 수중에 고탁도 조건의 부여하고, 국내 정수장에서 응집제로 사용하는 PAC를 이용하여 SCD 장비에 적용하여 최적의 응집제 주입량을 결정하는 방법에 대하여 고찰하였다.

II. 실험 재료 및 방법

1. 실험재료 및 인공 시료의 조성

합성 시료를 만들기 위하여 kaolin 점토(kaolin: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, Sigma-Aldrich)를 활용하였다. kaolin의 탁도 측정을 통한 고탁도 조건을 확인하여 조성하였고, kaolin 농도 1100, 500, 1000 mg/l에서의 실제 측정된 탁도는 57~619 NTU의 분포를 보였다. 또한 중성 pH(pH=7)를 맞추기 위하여 중탄산나트륨($NaHCO_3$, Sigma-Aldrich)을 주입하여 충분한 알칼리도를 유지하였다.^{6,7)} 17%의 폴리염화알루미늄(poly aluminumchloride: PAC, $[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$, Samgoo Chemical, Korea)은 응집제이자 SCD 적정제(titrant)로 사용하였다. 합성시료의 농도에 따른 탁도 범위 및 세부적인 사용 조건은 Table 1과 같다.

2. SCD 장비의 측정 및 제어 방법과 기타 분석 방법

정수처리에 활용되는 SCD 장비 중 하나인 charge analysis system(CAS, AFG, Germany)을 이용하여 전하 적정(charge titration)을 통한 응집 제어조건을

Table 1. Composition of kaolin suspension

Kaolin concentration (mg/l)	Turbidity range (NTU)	pH	Coagulant
100	57.1~64.8		
500	303.7~311.4	7	PAC
1000	611.9~619.9		

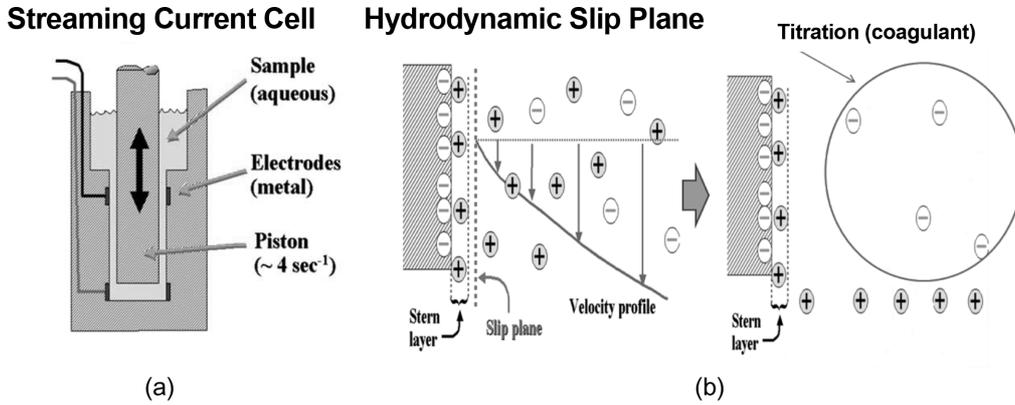


Fig. 1. Schematic diagram of (a) CAS and (b) charge titration.^{7,8)}

측정하였다. 이 장비는 측정부내 피스톤의 왕복운동을 통하여 합성시료 내에서 내부에 존재하는 물질들이 양전하 및 음전하로 양분화 되는 전위 유동현상을 발생시킨다. 이때 kaolin 입자들이 띠는 음전하의 크기가 전극을 통하여 정량화되고, 이러한 음전하의 상쇄를 위해 양이온의 성질을 띠는 적정제의 점차적으로 주입한다. 이후 전기적 중성을 유지하게 되는 등전점(point of zero charge)에 도달할 때까지 컴퓨터와 연동하여 실시간 주입량을 확인할 수 있는 기기이다. 이 기기를 통하여 결정된 값을 통하여 응집공정에 적용하고 정수장의 응집반응을 제어한다. 이 측정 장치의 구조와 운용 원리는 Fig. 1에 나타내었다.^{7,8)}

응집조건의 결과를 확인하기 위하여 Jar tester(SF6, Chosun instrument, Korea)를 이용하였고, 측정 시료는 1 l의 부피에 대하여 측정하였으며, 운전시간의 구성은 급속교반 5분(140 rpm), 완속교반 20분(70 rpm), 침전 60분순으로 편성하여 시험을 실시하였다. 침전 후 상등수의 탁도는 탁도계(Turbidimeter 2100P, Hach사)를 활용하여 동일 시료에 대하여 3회 이상 반복 측정하여 평균값을 활용하였다. 적정 pH 유지는 pH meter(Istek, Korea)를 활용하여 확인하였으며 실험실의 온도는 25°C를 유지하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 카올린(kaolin)의 응집 특성

탁도 발생 물질인 kaolin에 대하여 기초적인 응집

Table 2. Jar test results

Experimental conditions	Kaolin concentration (n = 30)		
	100 mg/l	500 mg/l	1000 mg/l
PAC (mg/l) ^a	35	44	60
Alkalinity (mg/l as CaCO ₃)	600	800	1000
pH	7±0.2	7±0.2	7±0.2

^aSupernatant turbidity < 1 NTU.

특성을 알아보기 위하여 kaolin 100 mg/l의 입자농도를 부여하고, Jar test를 통한 중성(pH 7) 조건에서 PAC 응집제의 주입 조건을 결정하였다(Table 2). 또한 결정된 투입량에 대한 pH 2~12에서의 변화에 따른 응집반응 후의 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

시료에 대한 Jar test간 PAC 투입량의 결정에 있어서 먹는 물 수질 기준인 상등수 탁도 기준인 1 NTU 이하의 수준을 달성을 위하여 반복적인 실험을 실시하였다. 실험 결과 PAC 농도 35 mg/l에서 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 이와 같은 적절한 응집제 투입량 유지는 여과공정의 추가적인 단계가 존재할 경우, 유입 부하를 감소시켜 여과막(membrane)의 막힘(fouling) 주기를 연장시키고 좀 더 안정적인 수질을 유지할 수 있는 여건을 보장한다.^{9,20)}

pH 2~12의 변화에 따른 응집반응의 결과는 중성 pH(pH=7)에서 가장 최적의 상등수 탁도 조건을 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 비록 성상이 다른 시료에 대한 탁도 제거 실험이지만, PAC를 이용한 선행연구의 응집반응 결과에서도 중성 pH의 조건에

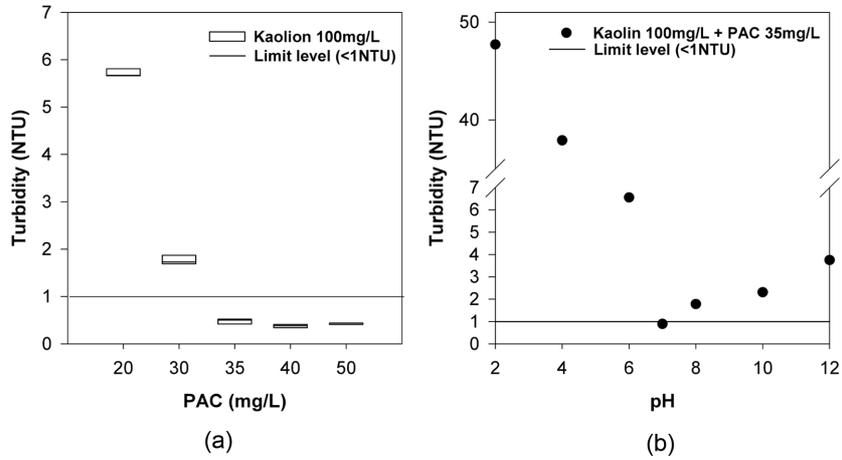


Fig. 2. Jar test result using kaolin in (a) PAC dosage test and (b) pH test.

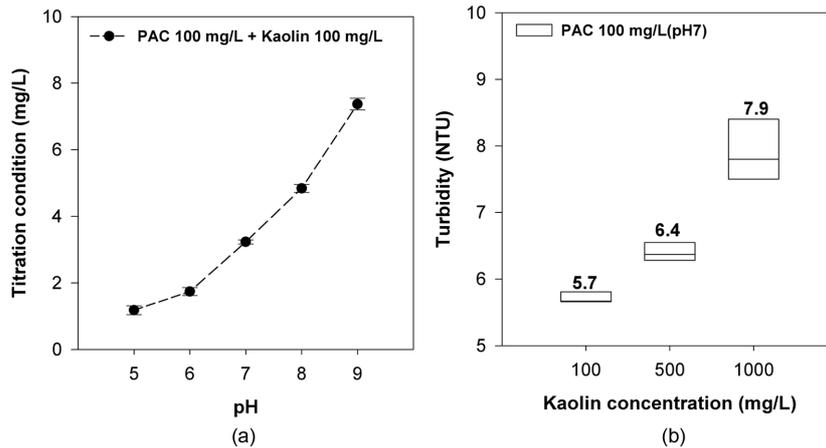


Fig. 3. SCD condition change at (a) pH test and (b) Jar-test result.

서 적절한 응집조건을 나타내 유사한 경향을 보여 주었다.^{6,9,21,22)}

2. 고탁도 조건에서의 SCD 적정(titration) 특성

SCD 장치를 이용한 적정은 먼저 pH 변화에 따른 측정 경향을 살펴보기 위하여, kaolin 농도 100 mg/l에서 pH 5, 6, 7, 8, 9의 조건으로 PAC 농도 100 mg/l인 응집적정제를 활용하여 실험하였다. 실험결과 pH 7을 기준으로 산성조건(pH=5, 6)에서는 응집제가 과소 주입되었고, 염기성조건(pH=8, 9)에서는 초과 주입이 발생하였다(Fig. 3(a)). 이는 알루미늄계 응집제인 PAC가 산성, 중성, 염기성 조건별로 각각 $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_3$, $Al(OH)^{+}$ 의 형태로 각

각 다른 종으로 존재하게 된다. 따라서 음전하를 띠는 kaolin 입자와의 전기적인 결합에 있어 산성에서는 비교적 작은 주입량으로도 쉽게 전기적 중성에 도달되나, $Al(OH)^{2+}$ 의 형태인 양이온으로의 하전이 많아 전기적으로 반발하고 염기성에서는 음이온이 대부분 차지하여 상호 반발력이 커져서 더 많은 주입량이 소모된다.^{23,24)} 응집과정에서는 $Al(OH)_3$ 의 형성을 통한 Van der Waals force을 통한 입자간의 응집이 주된 기작이 되므로 측정 간에는 중성 pH의 유지가 중요하다.

고탁도 조건에 대한 SCD 적정실험은 중성 pH의 조건에서 kaolin 100, 500, 1000 mg/l의 합성 시료에 대하여 PAC를 100 mg/l 농도로 희석하여 적정제로

Table 3. SCD titration results and charge reduction rate constant

SCD titration (n = 30)	Kaolin concentration		
	100 mg/l	500 mg/l	1000 mg/l
PAC titration volume (ml)*	0.33±0.017 [†]	0.43±0.03	0.58±0.028
K (mV/m/s)	14.84	11.79	7.92

* [PAC]=100 mg/l

[†]Dosage(m): mean±standard error

사용하였고, 10 ml 시료에 대하여 30초당 PAC 단위 주입량 40 µl를 적용하여 각각 조건에 대한 10회의 반복측정결과를 산출하였으며 SCD 적정간 소요시간은 시료당 평균 2~4분이 소요되었다. 고탁도 조건의 시료에 대한 측정임을 고려하였을 때, 전하적정의 소요가 비교적 적은 저탁도 시에는 좀 더 측정시간의 단축이 이루어질 것으로 판단된다. Table 3에서는 PAC의 평균적인 적정 결과와 반복측정의 편차를 보여주고 있다. PAC의 적정결과에서는 전체적으로 kaolin 농도가 증가함에 따라 적정제의 주입량이 증가하였고, 또한 그 편차도 고탁도 조건에서 좀 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과들은 SCD 적정시 전기적인 중성(electrical neutrality)을 달성함에 있어서 입자의 음전하에 대한 상쇄를 위해 상대적으로 좀 더 많은 양의 PAC가 주입되었고 이러한 주입조건은 측정 시료가 고탁도 조건이 될수록 주입량이 증가하는 것으로 판단된다.

PAC의 주입량 증가에 대해 좀 더 자세하게 관찰하기 위하여 kaolin 농도 100, 500, 1000 mg/l에서의 SCD 측정결과 값들의 단위 시간당 10회 평균 음전하 감소량을 속도상수화하여 식 (1)과 같은 방법으로 산출하였다.²⁵⁾

$$K = \frac{\Delta(SC)}{\Delta t \times PAC} \quad (1)$$

여기서 K는 SC 감소 속도 상수(mV/m/s), ΔSC는 음전하의 변화량 (mV), Δt는 측정시간(30 sec×dosage number), ΔPAC는 titrant dosage(0.04 ml×dosage number)이다.

속도상수(K)는 최초 시료에 대한 음전하 측정치로부터 등전점까지의 전위차 값에 대한 단위주입 시간인 30초 당 40 µl의 주입횟수를 통하여 산출되었고 이렇게 산출된 속도상수 값들은 Table 3에 나타내었

다. 속도상수는 kaolin 농도가 높아질수록 값이 작아져, 음전하를 감소시키는 PAC의 효과가 kaolin 입자의 농도가 점차적으로 커질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상으로 인하여 시료가 좀 더 고탁도화 될수록, 전기적 중성을 유지하기 위해서 더 많은 양의 PAC의 주입이 요구되었다.

이와 같은 경향과 더불어 SCD장비에서 측정된 응집제의 투입조건만을 이용하여 각 조건별로 6회씩 Jar test를 통한 반복적인 응집실험 결과를 확인하였다. 그 결과는 Fig. 3(b)에서처럼 상등수 탁도가 수질기준인 1 NTU를 훨씬 초과하는 결과를 보여주었고 SCD 장치에 의한 제어가 고탁도 조건에서 적절하지 못한 것으로 나타났다.

3. 고탁도 제어결과 분석 및 응집제 환산계수 (conversion factor)의 적용

PAC를 이용한 응집반응은 알루미늄 수산화물(Al(OH)₃)과 여러 입자들 간의 결합을 통하여 입자간 가교 작용(inter-particle bridging)을 유도함으로써 플록(floc)을 형성하는 기작이다.^{23,24,26,27)} 그러나 동일 kaolin 시료에 대한 응집제 투입량을 결정시 SCD를 활용한 응집 제어는 기존의 Jar test를 통해 얻어진 투입량보다는 작은 측정값을 나타내어 전기적인 중성은 달성되어 응집반응시 초기에 작은 floc을 형성하지만 좀 더 미세한 콜로이드를 floc에 흡착시켜 상등수 탁도를 좀 더 낮출 수 있는 제거를 플록(sweep floc) 형성을 위한 충분한 수산화알루미늄(Al(OH)₃)이 존재하지 않아 입자의 침전속도가 느리고 상등수의 탁도가 높은 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 이 결과는 SCD 제어방법을 통한 실시간 응집공정의 제어에 있어 단점이 될 수 있고 선행연구 결과에서 정수장내 적용시 10 NTU 이하의 저탁도에서는 제어가 잘 이루어 졌으나, 수질이 고탁도 조건으로 변화할수록 SCD를 이용한 응집제어가 어려운 현상을 제시한 것에 대한 이론적 해석이 될 수 있다.¹⁹⁾

SCD 장치를 활용한 고탁도 응집제어시 발생하는 단점을 보완하기 위해서는 SCD 측정값과 실제 응집반응 시 sweep floc 형성을 위한 주입량간의 차이를 보완해야 한다. Fig. 4는 kaolin 농도에 따른 SCD 평균 응집제의 결정 결과와 Jar test를 통한 평균 응집제의 주입량 산출값의 회귀분석을 통한 선형적 증가 경향을 볼 수 있다. 이러한 상호 연관성을 보았

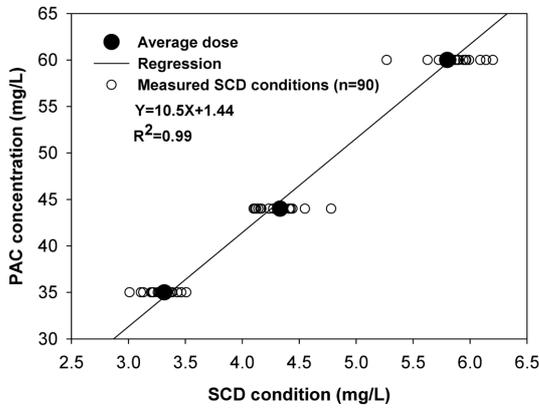


Fig. 4. Regression of Jar test results and SCD titrations.

을 때 SCD 측정값을 이용하여 체거름 응집을 위한 적절한 환산이 가능할 것으로 판단되었고, 본 연구에서 최저 탁도를 유지하는 kaolin 100 mg/l에서 결정된 PAC의 Jar test 결과의 투입량을 토대로 식 (2)~(3)과 같은 방법을 통하여 환산된 응집제 투입량을 산출하였다.²⁸⁾

$$f_{actor} = \frac{\Delta J_a}{\Delta S_c} \quad (2)$$

여기서 factor는 환산계수(conversion factor), ΔJ_a 는 reference dosage of Jar-test(mg/l), ΔS_c 는 알고 있는 시료의 SCD dose(mg/l)이다

$$C_{NEW} = f_{actor} \times S_{NEW} \quad (3)$$

여기서 C_{NEW} 는 converted PAC dose(mg/l)이고, S_{NEW}

Table 4. Conversion factor and calculated coagulant dosage of PAC obtained from SCD titration

Kaolin concentration (mg/l)	Reference SCD condition (mg/l)	Conversion factor	Calculated coagulant dosage of PAC (mg/l)
100	3.31		35
250	3.78		41.6
500	4.33	11	47.7
750	4.71		51.81
1000	5.8		63.8

는 미지시료의 SCD dose(mg/l)이다.

이와 같은 환산계수를 활용하여 kaolin 농도 100, 250, 500, 750, 1000 mg/l에서의 SCD 측정 조건을 응집반응에 투입할 응집제의 투입량으로 전환하였고 그 결과는 Table 4와 같다. Table 4에서는 기존의 kaolin 농도 100, 500, 1000 mg/l 조건과 더불어 250, 750 mg/l 조건을 추가하여 환산(conversion)을 실시하였는데 이는 내삽법(interpolation)을 적용하여 Jar test를 실시하지 않아도, SCD 장비 결과와 환산계수(conversion factor)의 적용에 의한 응집반응시 적절한 처리가 이루어지는 지의 여부를 확인함으로써 환산계수 적용의 유효성을 확인하고자 하였다. 실제로 산출된 PAC 투입량에 따른 Jar test 결과 kaolin 100~1000 mg/l의 범위 내에서 모두 상등수 탁도 1 NTU 이내의 값을 얻을 수 있었다. kaolin 입자 농도별 응집 실험시 상등수 탁도 범위는 Fig. 5와 같다.

환산계수 값의 산출은 전기적 중성을 유지하는 가

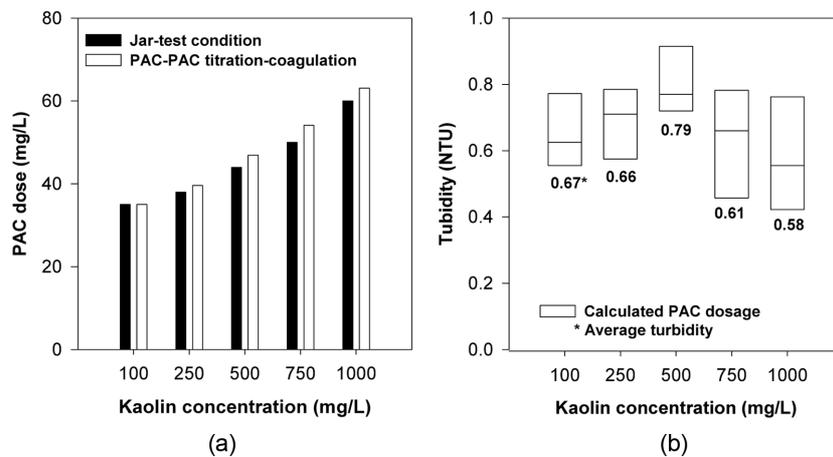


Fig. 5. Interpolation of conversion factor in (a) calculated PAC concentration and (b) jar-test result.

운데 고분자 응집제의 sweep floc 형성에 있어서 SCD의 측정값과 응집반응의 투입량의 긴밀한 관계를 확인할 수 있었고 이를 통하여 정수장내 미지의 유입수 조건에 대한 응집제의 투입량에 대하여 신속한 결정이 가능할 것으로 판단되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 kaolin 입자를 사용하여 탁도 50~600 NTU의 고탁도 조건을 구현하였으며, 국내 정수장에서 주로 사용되는 PAC를 응집제로 하여 유동흐름 전류계(SCD)를 이용한 최적 응집제 주입량과 응집 후 탁도를 산정 및 측정하였고, 이와 같은 실험결과들을 토대로 정수 처리시 수질변화에 신속히 대응이 가능하고 효율적인 응집제의 사용을 제어할 수 있는 방법을 모색하였다. 실험결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 50~600 NTU의 고탁도 kaolin에 대한 PAC의 응집반응은 Jar test 결과 pH 중성 조건에서 알루미늄 이온(Al^{3+})에 대한 floc의 형성 조건인 수산화알루미늄 ($Al(OH)_3$) 형태의 유지가 잘 이루어져 가장 효과적인 응집효과를 얻을 수 있었다.

2. PAC를 적정제로 사용하여 kaolin 입자에 대한 SCD 장치의 측정은 2~4분 이내의 짧은 시간내 측정이 가능하여 수질변화에 대한 신속한 대응이 가능할 것으로 판단되었고, 고탁도 시료에 대한 SCD 측정 결과 탁도 증가에 음전하에 측정 및 측정이 명확하게 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 SCD 장치를 통하여 획득된 응집제조건은 50~600 NTU의 고탁도 범위에서는 응집 후 상등수 탁도가 5 NTU 이상의 수질을 보여 응집제에서 탁도를 줄이는 데에는 한계를 보였다.

3. 부여된 고탁도 범위에서의 SCD 측정값은 Jar test로부터 유추된 sweep floc 형성을 위한 환산계수 (conversion factor) 값을 적용하여, 응집제 투입량으로 전환하였고 미지 조건으로 상정된 kaolin 250~750 mg/l에서의 응집시, 100~1000 mg/l에서의 결과와 더불어 상등수 탁도가 모두 1 NTU이하의 결과를 유지할 수 있어, 고탁도 조건에서 SCD 측정조건을 통하여 환산된 PAC 응집제의 투입량으로 적절하게 제어될 수 있을 것으로 판단되었다.

본 연구의 결과는 실험실 규모의 제한된 범위를

가지나, 고분자 응집제의 응집특성과 SCD 측정의 원리를 적용한 고탁도 시료에 대한 응집제어 방법을 제시함으로써, 기존의 Jar test에서 문제가 되는 홍수기나 갈수기에서의 급격한 수질변화에 대한 실시간 대응의 어려움과 응집제 투입량의 산정에 대한 과도한 시간소요를 해결할 수 있고, 기존의 SCD 장치의 사용시 고탁도 제어에 관련된 응집제 주입량 판단의 문제를 개선할 수 있다는 측면에서 정수처리 공정의 자동화 및 효율적인 응집공정의 운영에 대한 가능성을 보여준 연구라 하겠다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 서울시 『중소기업 제품개선 지원사업』에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Yang ZH, Huang J, Zeng GM, Ruan M, Zhou CS, Li L, et al. Optimization of flocculation conditions for kaolin suspension using the composite flocculant of MBFGA1 and PAC by response surface methodology. *Bioresour. Technol.* 2009; 100(18): 4233-4239.
2. Campbell A. The potential role of aluminium in Alzheimer's disease. *Nephrol Dial Transplant.* 2002; 17(suppl 2): 17-20.
3. Xia S, Li X, Zhang Q, Xu B, Li G. Ultrafiltration of surface water with coagulation pretreatment by streaming current control. *Desalination.* 2007; 204(1-3): 351-358.
4. Wu GD, Lo SL. Effects of data normalization and inherent-factor on decision of optimal coagulant dosage in water treatment by artificial neural network. *Expert Syst Appl.* 2010; 37(7): 4974-4983.
5. Khayet M, Zahrim AY, Hial N. Modelling and optimization of coagulation of highly concentrated industrial grade leather dye by response surface methodology. *Chem Eng J.* 2011; 167(1): 77-83.
6. Lin JL, Huang C, Pan JR, Wang D. Effect of Al(III) speciation on coagulation of highly turbid water. *Chemosphere.* 2008; 72(2): 189-196.
7. The Martin hubbe's streaming current definitions and concepts. Available from: <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/Definitns/SteamCur.htm/>. [accessed 1 March 2010].
8. The Martin hubbe's plane of shear definitions and concepts. Available from: <http://www4.ncsu.edu/>

- ~hubbe/Definitns/ShearPln.htm/. [accessed 1 March 2010].
9. Kweon JH, Hur HW, Seo GT, Jang TR, Park JH, Choi KY, et al. Evaluation of coagulation and PAC adsorption pretreatments on membrane filtration for a surface water in Korea: A pilot study. *Desalination*. 2009; 249(1): 212-216.
 10. Di bernardo D. Performance of two-stage filtration system for treating high turbidity water. *J Water Supply Res Technol-Aqua*. 2006; 55(7-8): 499-515.
 11. Zong D, Zhang X, Zhang G. Variation of streaming current along water treatment process. *Environ Sci Technol*. 2008; 11: 86-88.
 12. Dentel SK, Thomas AV, Kingery KM. Evaluation of the streaming current detector-I. use in jar tests. *Water Res*. 1989; 23(4): 413-421.
 13. Dentel SK, Thomas AV, Kingery KM. Evaluation of the streaming current detector-II. continuous flow tests. *Water Res*. 1989; 23(4), 423-430.
 14. Henneberry YK, Kraus TEC, Fleck JA, Krabbenhoft DP, Bachand PM, Horwath WR. Removal of inorganic mercury and methylmercury from surface waters following coagulation of dissolved organic matter with metal-based salts. *Sci Total Environ*. 2011; 409(3): 631-637.
 15. Chen J. Dependency of polyelectrolyte complex stoichiometry on the order of addition. 1. effect of salt concentration during streaming current titrations with strong poly-acid and poly-base. *Colloids Surf A*. 2003; 223(1-3): 215-230.
 16. Song ZX, Song Z, Zhao Y, Liu C. Research on predictive control of coagulant dosage based on neural network. *IEEE*. 2011; 1: 217-221.
 17. Bachand PAM, Bachand SM, Lopus SE, Heyvaert A, Werner I. Treatment with chemical coagulants at different dosing levels changes ecotoxicity of stormwater from the Tahoe basin, California, USA. *J Environ Sci Health, Part A*. 2010; 45(2): 137-154.
 18. Zaucha M, Adamczyk Z, Barbasz J. Zeta potential of particle bilayers on mica: a streaming potential study. *J Colloid Interface Sci*. 2011; In Press.
 19. Chae SH. Monitoring and automatic control of coagulation process by streaming current detector. *J Kor Soc Water and Wastewater*, 2001; 15(6): 542-550.
 20. Lee BB, Choo KH, Chang D, Choi SJ. Optimizing the coagulant dose to control membrane fouling in combined coagulation/ultrafiltration systems for textile wastewater reclamation. *Chem Eng J*. 2009; 155(1-2): 101-107.
 21. Lee H, Lee CH, Jung CG, Lee YJ. Improving coagulation performance with ph preadjustment in drinking water treatment. *Kor J Environ Health Sci*. 2003; 29(2): 1-6.
 22. Kim JK, Ko YS, Nam SH. A removal of heavy metals through conventional water treatment processes. *Kor J Environ Health Sci*. 1994; 20(4): 36-44.
 23. Trinh TK, Kang LS. Response surface methodological approach to optimize the coagulation-flocculation process in drinking water treatment. *Chem Eng Res Des*. 2011; 89(7): 1126-1135.
 24. Gregory J, Duan J. Hydrolyzing metal salts as coagulants. *Pure Appl Chem*. 2001; 73(12): 2017-2026.
 25. Zembala M, Déjardin P. Streaming potential measurements related to fibrinogen adsorption onto silica capillaries. *Colloids Surf B*. 1994; 3(1): 119-129.
 26. Shin JY, Spinette RF, O-Melia, CR. Stoichiometry of coagulation revisited. *Environ Sci Technol*. 2008; 42(7): 2582-2589.
 27. Tadros T. Interparticle interactions in concentrated suspensions and their bulk (Rheological) properties. *Adv Colloid Interface Sci*. 2011; 168(1-2): 263-277.
 28. Walker CA, Kirby JT, Dentel SK. The streaming current detector: a quantitative model. *J Colloid Interface Sci*. 1996; 182(1): 71-81.