

최적 응집을 위한 Streaming Current의 기준값 설정에 관한 연구

유명진 · 장미정[†] · 박귀수

서울시립대학교 환경공학부

(2005년 5월 4일 접수, 2006년 1월 5일 채택)

Determination of Set Point of Streaming Current for Optimum Coagulation

Myong Jin Yu · Mi Jeong Jang[†] · Gui Su Park

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

ABSTRACT : The objectives of this study were to investigate the affecting factors on streaming current(SC) and to evaluate set point(SP). For the study, a pilot scale apparatus with a capacity of 12 L/min was operated at Guui water intake of Seoul. SC was monitored with varying poly aluminium chlorides(PACs) dose and water quality parameters like conductivity, turbidity, temperature, and pH. The removal efficiencies were evaluated in terms of turbidity and dissolved organic carbon(DOC) with varying coagulation conditions. The effects of affecting factors on SC and SP were also estimated.

According to the result observed from the variation of SC with water quality parameters during the experimental period, tendencies of SC and conductivity were very similar, and SC and conductivity had a strong linear relation. At the optimum condition of coagulation, SP decreased as the rainy season changed to the dry season, during the experimental period. Especially, in condition of low turbidity, conductivity had relatively more effect on SC than turbidity. As conductivity increased, SP decreased and coagulant dose per unit increase of SC gradually increased.

In view of the results so far obtained, it may be possible to determine the SP range considering the real time variation of water quality, especially conductivity.

Key Words : Coagulation, SCD, SP, PACs, Conductivity

요약 : 본 연구에서는 원수의 수질 변화 중 SC에 대한 영향 인자와 이런 인자가 streaming current(SC) 및 set point(SP)에 미치는 영향 정도를 조사하였다. 서울시 구의 취수장의 전염소 처리되지 않은 원수를 실험에 사용하였다. Pilot scale 실험을 통하여 원수 수질 변화에 따른 SC의 변화와 응집제인 poly aluminium chlorides(PACs)의 변화에 따른 SC의 변화를 알아보았다. 또한, 탁도와 용존유기탄소(dissolved organic carbon, DOC)의 처리 효율에 대한 인자들의 영향에 대하여 평가하였다. 실제 한강 원수를 대상으로 일정 기간 동안 원수의 수질과 SC의 변화를 관찰한 결과, SC와 전기전도도가 높은 상관성을 보임을 알 수 있었다. SC를 기준으로 응집 처리한 결과, 최적 응집 조건으로 대표되는 SC, 즉 SP가 연구기간 동안 우기에서 건기로 변화함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 특히 원수의 수질이 저탁도 일 때, 탁도에 비해 전기전도도가 SC에 미치는 영향이 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다. 전기전도도가 SC와 SP 그리고 응집에 미치는 영향에 대한 실험을 수행한 결과 전기전도도가 증가할수록 SP는 감소하였고, 단위 SC 증가를 위해 투입된 응집제의 양은 점점 증가하였다. 이상의 결과를 통해 볼 때, 응집 공정의 최적 제어를 위해 SC를 이용한 응집 제어는 매우 효율적으로 수행할 수 있었으며, 특히 SP 설정을 위해서는 원수의 수질 특히 전기전도도의 실시간 측정을 고려할 필요가 있는 것으로 나타났다.

주제어 : 응집, SCD, SP, PACs, 전기전도도

1. 서론

수중의 현탁 성분은 강우에 의한 토양의 유출과 산업 폐수 및 도시하수로 인한 유기·무기 물질의 여러 성분으로부터 기인하며,¹⁾ 그 성질 또한 다양하다. 정수처리에 있어서 이러한 현탁 성분의 제거가 중요하며, 이를 위해 응집, 침전 및 여과 공정이 효율적으로 운영되어야 한다. 특히 응집 공정은 후속 공정의 처리 효율 및 운전 방식에 영향을 줄 수 있을 뿐만 아니라, 응집제 사용량의 최적화와 발생 슬러지 감소에

대한 요구로 그 중요성이 재인식되고 있다.

응집 공정의 운영에 있어서 핵심은 수질 특성에 맞는 적정량의 응집제를 수체에 투입하여 최적의 교반 강도와 접촉 시간을 확보한 상태에서 응집제와 결합된 불순물이 침전성이 우수한 플록이 되도록 하는 것이다. 즉, 정수시설에서 교반 강도와 접촉 시간에 대한 조건을 만족시킨다고 가정한다면, 응집공정에서 가장 중요한 변수는 수질의 변화에 즉각적으로 대응하여 응집제 투입율을 결정하는 것이다.

응집제 투입율 결정을 위한 방법으로는 육안 감시, jar test, pilot filter 그리고 zeta potential(ZP) 등이 사용되어 왔으나, 1) 소요 시간이 길고, 2) 간헐적인 sampling으로 인해 급격한 수질 변화에 대한 즉각적인 대처가 어렵고, 3) 고탁도 원수

[†] Corresponding author

E-mail: bluegangster@empal.com

Tel: 02-2210-2987

Fax: 02-2244-2245

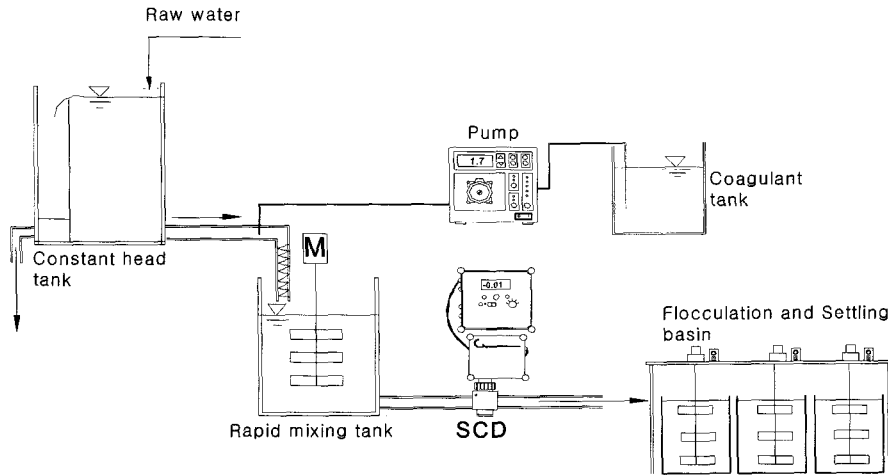


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus.

에 대한 적절한 평가가 힘들며, 특히 ZP의 경우, 측정을 위해 고도의 실험 기술이 요구되는 단점이 있다.²⁾ 이에 따라 실시간으로 응집 공정을 감시할 수 있는 장치로서 streaming current detector(SCD)가 주목받게 되었고, 이에 대한 많은 연구가 진행되었다.

SCD는 ZP와 유사한 원리를 적용하여 입자의 하전을 측정하는 장비로, 응집제 주입의 적정여부에 대한 실시간 감시가 가능하다. 또한 일반적으로 과량 주입되고 있는 응집제량을 적정 주입하도록 함으로써 응집제 주입량의 감소효과가 있는 것으로 알려져 있다.³⁾ 국내외의 연구 사례들을 보면, 수질 인자 변화에 따른 SC의 반응성에 대한 연구를 통해, streaming current(SC)와 현탁 입자 고유의 특성인 ZP와의 관계를 밝힌 바 있으며,⁴⁾ SC를 이용한 응집제 주입을 조절을 통해 약품 사용량 감소를 확인했다.⁵⁾ 이런 연구의 결과를 바탕으로 SCD와 Proportional-Integrate-Derivative(PID) 및 Fuzzy 제어 시스템을 결합한 자동 응집 제어에 대한 연구가 다양한 방법을 통해 시도되었고, 그 적용성이 입증되었다.^{6~11)}

그러나 현재 국내 대부분의 정수장에서는 응집제 주입을 제어 위해 주로 온도와 탁도에 대한 경험적인 관계식에서 비롯된 주입률 표를 이용하거나 매일 jar test를 하여 원수 수질에 따른 응집제의 주입율을 구하고 있다. 또한 pH, 수온 및 전기전도도 등에 대한 연산식을 이용하고 있으며, 일부 정수장에서는 이 연산식에 SC 값을 가감할 수 있는 입력변수를 설정하여 SCD를 수동제어에 이용 가능한 상태로 유지하고 있을 뿐, SCD를 실시간 제어 방안으로 사용하지 않고 있는 실정이다.³⁾

이전의 연구에서 SCD의 사용상 가장 큰 단점으로 sampling line의 막힘 현상을 지적했으나,¹²⁾ 이런 문제점은 처리시설의 보완과 주기적 세정으로 해결될 수 있다.¹¹⁾ 따라서 응집 제어에 있어 SCD를 이용하는 방법이 약품비 절감과 실시간 감시를 가능하게 하면서 동시에 처리 효율을 향상시킬 수 있으므로 다른 방법에 비해 효율적이라 할 수 있다.

Set point(SP)는 SCD 운전 시 설정하는 SC의 기준값으로 최적 응집 조건의 SC를 의미하는데, 지금까지의 연구와 현장 적용에서는 SP 설정을 위해 주로 jar test를 이용하거나, 운

Table 1. Characteristics of raw water used in this study during Dec.2001 ~ Nov.2003

Parameters	Unit	Range (average)
pH	-	6.7 ~ 8.4 (7.3)
Temperature	℃	3.2 ~ 27.7 (17.8)
Turbidity	NTU	1.8 ~ 625.0 (13.9)
DOC	mg/L	1.71 ~ 2.9 (2.09)
Alkalinity	mg/L as CaCO ₃	43.2 ~ 93.4 (59.8)
Conductivity	μS/cm	105.0 ~ 229.0 (177.9)

전자의 경험적 판단을 통해 임의의 값을 이용하기도 하였다. 그러나 이는 이전의 방법과 크게 다르지 않고, 또한 SP 설정에 대한 기준이 없기 때문에 수시로 다른 방법을 통해 확인 및 보정을 해주어야 한다. 그렇기 때문에 SCD가 응집제 주입량을 결정하기보다는 단지 모니터링 기능으로서 다른 방법들을 통해 이미 주입된 응집제 량의 감시를 위해 사용되고 있는 실정이다. 이와 같은 이유로, 본 연구에서는 합리적인 SP의 설정을 연구 목적으로 하였다.

실험을 통하여 원수 수질 변화에 따른 SC의 변화로부터 SC에 대한 영향인자와 그 영향인자가 SP에 미치는 영향을 알아보았다. 이 결과로부터 SP 설정에 대한 영향인자를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1. 대상 원수

본 실험에서는 서울시 구의 취수장에서 취수한 전염소 처리되지 않은 한강원수를 이용하였고, 그 수질 특성은 Table 1과 같다.

2.2. 실험장치

실험장치는 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이, 원수조, 유량조정조, 급속혼화조 및 플러형성조로 구성되어 있으며, 유량은 12 L/min로 유지하였다. 급속혼화조에서 1분 동안 150

rpm으로 급속교반 후 SCD(SCM 2200 XRW, Chemtrac system, USA)를 통과한 물 2 L를 조에 받아 응결과 침전 과정을 거친 후 잔류탁도를 측정하였다. 실제 원수의 수질 변화와 SC의 변화를 모니터링 하였으며, SP를 찾기 위해, 응집제 주입을 변화에 따른 SC와 잔류탁도를 확인하였다. 응집제는 현재 서울시에서 일반적으로 사용하고 있는 poly aluminium chlorides(PACs, 17% as Al₂O₃)를 사용하였으며, 전기전도도 변화를 위해 NaHCO₃를 사용하였다.

2.3. 분석방법

분석대상은 원수와 급속혼화수, 침전수를 대상으로 하였다. 분석항목과 측정 방법은 Table 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수 특성 변화

Fig. 2는 본 연구기간인 2003년 8월 19일부터 2003년 11

Table 2. Analytical parameters and methods

Item	Unit	Analytical method	Instrument
pH	-	-	pH meter 725P, Istek, Korea
Temperature	℃	-	Digital thermometer Dual-logger, EUTECH, Singapore
Conductivity	μS/cm	-	Conductivity meter 430C, Istek, Korea
Turbidity	NTU	Standard method	Turbidimeter, HACH 2100A, USA
DOC	mg/L	UV-Persulfate oxidation method	TOC Analyzer, DC-180, Dohrman, USA
Alkalinity	mg/L as CaCO ₃	Standard method	-

월 25일까지의 원수 특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 원수의 탁도는 최저 7.91 NTU에서 최대 625 NTU로 변화

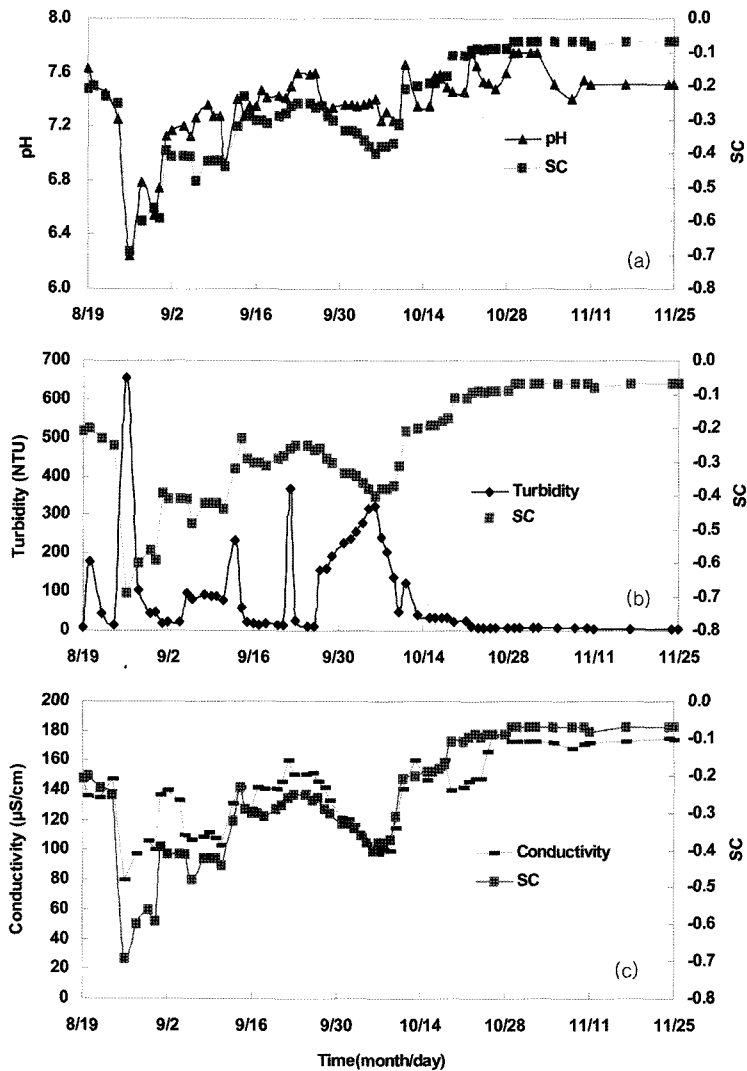


Fig. 2. Variation of (a) pH, (b) turbidity, (c) conductivity with SC during the experimental period.

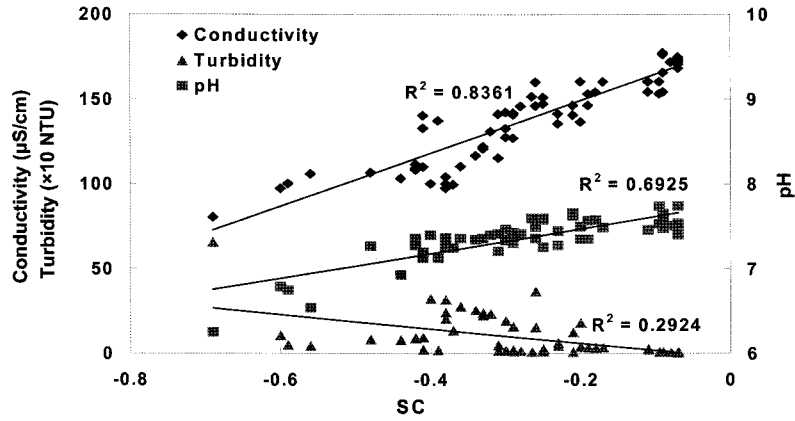


Fig. 3. Correlationship of pH, turbidity, conductivity with SC during the experimental period.

하였고, 본 실험기간은 한강에서의 강우기와 갈수기를 대표할 수 있는 조건이다. 강우기 동안에는 SC에 영향을 미치는 것으로 알려진 pH, 전기전도도, 탁도 및 온도 등¹³⁾의 변화가 매우 급격하였다. 이런 변화 가운데 pH와 전기전도도가 SC 변화 추이와 유사함을 알 수 있었고, 특히 SC는 전기전도도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다(Fig. 3). 전기전도도와 SC가 유사한 경향으로 변화하는 것은 강우에 의한 이온성 물질 농도와 탁질의 변화가 pH의 변화에 비해 전기전도도를 직접적으로 변화시키고, 이는 다시 SC에 영향을 미치는 것을 의미한다.^{14,15)} 그러므로 SC에 대한 가장 큰 영향 인자는 전기전도도라 할 수 있으며, 또한 SCD 연구에 있어서 강우에 따른 원수의 특성 변화와 SC의 관계가 중요함을 나타낸다.

이와 더불어 일반적으로 정수장에서 응집제 주입율의 제어를 위해 탁도를 가장 중요한 지표로 사용하고 있으나, 이런 경향은 SC를 이용한 응집 제어에서 전기전도도도 유용한 지표인 것을 시사하는 것이다.

SC가 수중 입자의 하전 상태와 양을 나타내는 값이라면, 전기전도도는 수중에 존재하는 이온성 물질의 양을 대표하는 값이므로, 이 두 지표의 차이를 이해한다면 이런 상관성이 SC의 이용에는 물론 응집 공정 제어에 도움이 될 것으로 사료된다. Fig. 2와 3에서, SC와 탁도와 상관성이 크다는 이전의 연구 결과와는 달리,¹¹⁾ 실제 상황에서는 상관성이 크

지 않은 것으로 나타났다. 이런 현상은 한강의 탁도 유발 물질 중 콜로이드와 같이 하전을 띠는 물질에 비해 비이온성 무기물질의 비율이 높음을 나타내는 것으로 탁도의 증가가 반드시 응집제 주입량의 증가를 의미하는 것이 아님을 나타내는 것이라 할 수 있다. 온도 역시 SC와 상관성이 크지는 않았지만 온도 자체는 물의 점성, 입자 및 응집제 반응에 대한 영향이 있는 만큼 응집 공정에서 고려되어야 할 중요한 인자이다.

3.2. 수질변화와 SP

Jar test를 실시하여 최적 응집제 주입량을 구한 후(ZP = -15~5 mV), 이 주입량을 급속혼화조에 수동으로 주입하여 SC를 측정하여 보았으나, 매번 일정하지 않은 (-)값을 나타내었고, 침전 후 탁도는 4~7 NTU로 양호하지 않았다. 하전 중화가 일어난 상태에서도 SCD가 (-)값을 나타내는 현상은 SCD 구조상 발생하는 현상으로, 콜로이드 입자가 실린더 내부를 전면적으로 도포하지 않을 경우 발생한다. 입자를 거의 포함하지 않는 증류수를 SCD에 통과시킬 경우 (-)값을 나타내는 것도 바로 이 때문이다.¹⁶⁾ 이러한 현상은 jar test가 전기중화에 의한 최적응집조건을 나타내는 것은 아니기 때문이며, 각 정수장마다의 실제 응집 공정의 조건들이 다르기 때문에 SCD의 이용에 있어, jar test를 통한 SP의 결정에는 한계가 있다는 것을 의미한다.

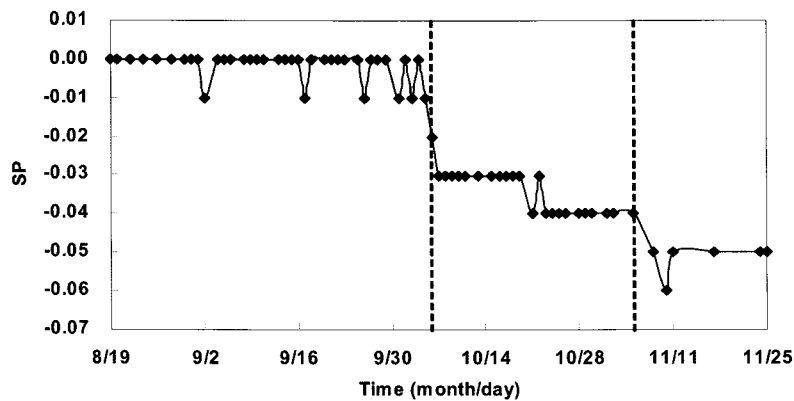


Fig. 4. Variation of SP during the experimental period.

이러한 이유에 의하여 원수에 응집제의 주입율을 단계적으로 증가시켜가며 SC의 변화와 각 SC에서의 침전수의 탁도를 측정하여 적정 SP를 조사하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 초기 1개월 동안은 SP가 0으로 고정된 값을 나타냈으나 시간이 지날수록 점점 감소하였다. 실험시작부터 2003년 10월 6일까지는 SP가 0~-0.01, 10월 6~10월 23일까지는 -0.03, 그리고 10월 23일~10월 30일까지는 -0.04, 11월 이후로는 -0.05로 점점 감소하는 경향을 보였다. Table 3은 적정 SP의 차이를 크게 보인 두 기간 동안의 수질 인자의 특성을 나타낸 것이다. 3.1절에서 언급했듯이 SC와 온도, 그리고 탁도와 상관성이 전기전도도에 비하여 낮음을 감안한다면, 강우기에서 갈수기로 갈수록 증가한 전기전도도가 SP 감소의 주원인임을 알 수 있다. 수중 이온의 증가는 콜로이드의 이중층의 두께를 축소시키게 되며, 압축된 이중층으로 인해 센서가 감지할 수 있는 하전의 양은 감소하게 된다.¹⁶⁾ 그러므로 상대적으로 전기전도도가 높은 갈수기에서 더 낮은 SP를 보이게 되는 것이다.

Table 3. Characteristics of water quality

Parameter	2003. 8. 19~10. 5	2003. 10. 6~11. 25
Turbidity (NTU)	7.9~625.0 (98)	2.71~10.2 (6.7)
Conductivity (μS/cm)	80.4~160.5 (120.4)	147~178.5 (163)
Temperature (°C)	19.2~23.3 (22)	7.8~18.9 (14)

3.3. SC 적용시 응집제 주입량과 침전수 수질

Fig. 5는 원수의 SC와 SP (Fig. 4)에 따른 응집제 주입율을 나타낸 것이며, Fig. 6은 원수의 탁도와, Fig. 5의 조건으로 응집하였을 때의 침전수의 탁도를 보여준다. 원수의 탁도의 변화가 심했지만 일반적으로 강우시 정수장의 침전수 탁도가 3~5 NTU정도임을 감안한다면, 본 실험에서 침전수의 탁도는 강우시에도 3 NTU 이하로 양호한 처리 효율을 보였다. 또한 응집제 주입량에 있어서 정수장에서 이용되는 조건표 주입량과 비교했을 때 감소되었으며, 고탁시에는 최소 20%에서 최대 50% 정도까지 감소함을 알 수 있었다(Fig. 7). 이를 통해 볼 때, 일반적으로 정수장에서 응집제를 상당기간 과량 주입하고 있음을 알 수 있었으며, SC를 이용함으로써 경제성 향상을 도모할 수 있을 것이다.

Fig. 8에서와 같이 실험 기간동안 DOC 농도는 1.94~3.45 mg/L의 범위로 원수의 탁도가 증가할 경우 다소 증가하는 경향을 보여주었으나, 침전수의 DOC 농도는 최저 1.3 mg/L에서 최고 2.0 mg/L로, 평균 1.6 mg/L정도로 유지되었다. 원수와 침전수의 DOC를 비교해본 결과 대략 40% 정도의 제거 효율을 얻을 수 있었다.

3.4. 전기전도도와 SP

Fig. 9와 Fig. 10은 35 NTU의 원수를 대상으로 전기전도도의 변화에 따른 SP와 응집제 주입량의 변화를 나타낸 것

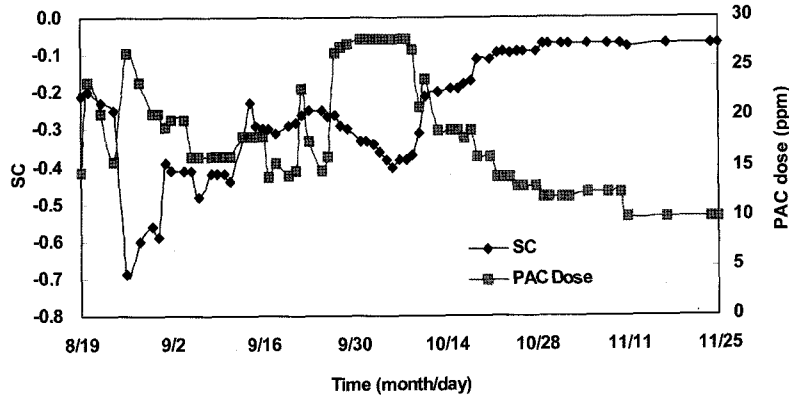


Fig. 5. SC and PAC dose during the experimental period.

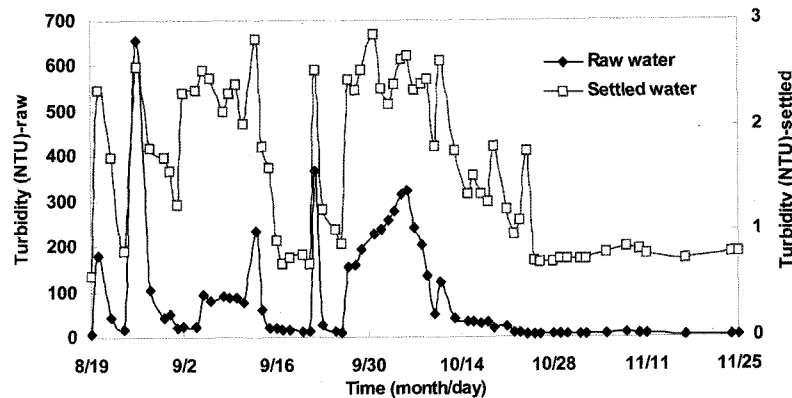


Fig. 6. Turbidity of raw and settled water during the experimental period.

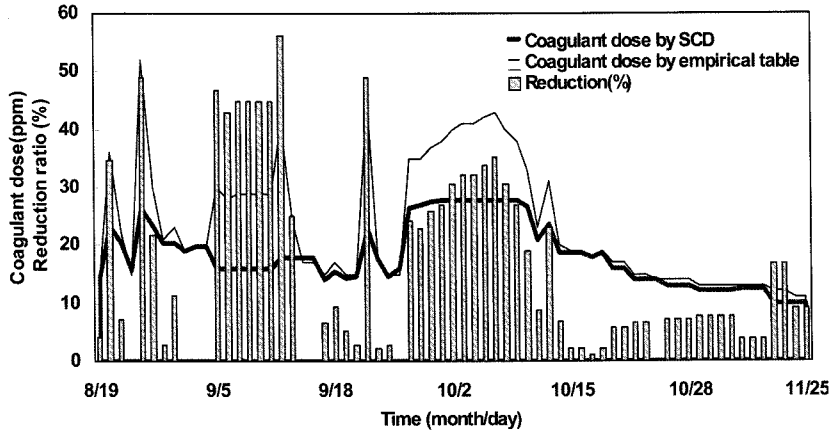


Fig. 7. Comparison between coagulant doses controlled by SCD and empirical method.

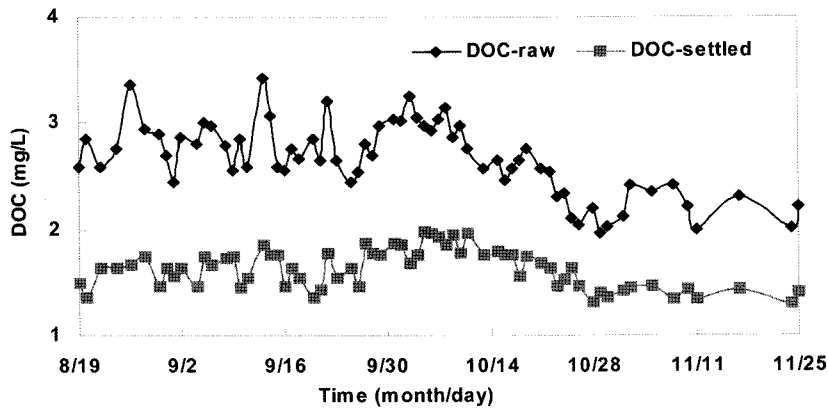


Fig. 8. DOC of raw and settled water during the experimental period.

이다. Fig. 9는 원수의 전기전도도 (160, 184, 217 $\mu\text{S}/\text{cm}$)가 다른 경우 응집제 주입에 따른 SC의 변화를 나타낸다. 침전수 탁도가 가장 낮아질 때가 최적 SC가 되며, 이 값을 SP로 설정할 때 최적응집조건이 되는 것이다. 결과적으로 전기전도도가 증가하면 SP가 감소하며, 변화된 SP에서의 침전수 탁도 또한 감소함을 알 수 있다. Fig. 10을 통해 볼 때, 원수의 전기전도도가 다른 경우 일정 SC에 도달하기 위해서는, 전기전도도가 높을수록 응집제 양이 증가됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 유사 조건하의 원수에서 전기전도도가 높을

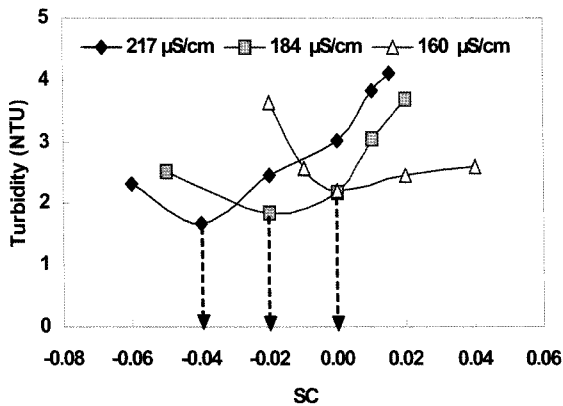


Fig. 9. Effect of conductivity on SP, at 35 NTU.

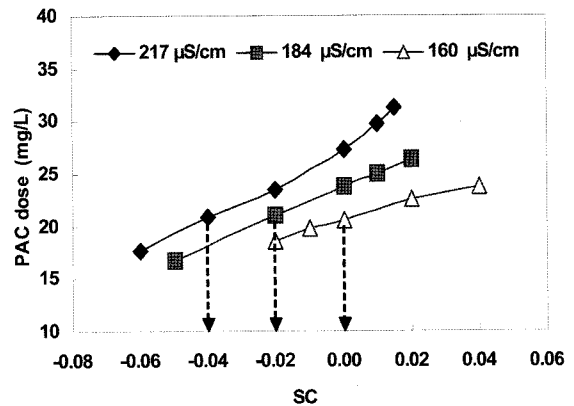


Fig. 10. Effect of conductivity on SC and coagulant dose, at 35 NTU.

수록 SP를 낮게 설정하여야 하며, 전기전도도 변화에 관계없이 SP를 일정한 값으로 유지하면 응집제 주입량이 크게 됨을 확인하는 것이다.

Fig. 11과 Fig. 12는 8 NTU의 원수에 대한 동일한 실험 결과이다. Fig. 11에서도 원수의 탁도가 35 NTU인 Fig. 9와 마찬가지로 전기전도도가 증가하면 SP를 감소시켜야 함을 보여준다. Fig. 11의 경우에도 Fig. 10과 마찬가지로 일정 SC에 도달하려면 전기전도도가 높을수록 응집제 양이 증가함을

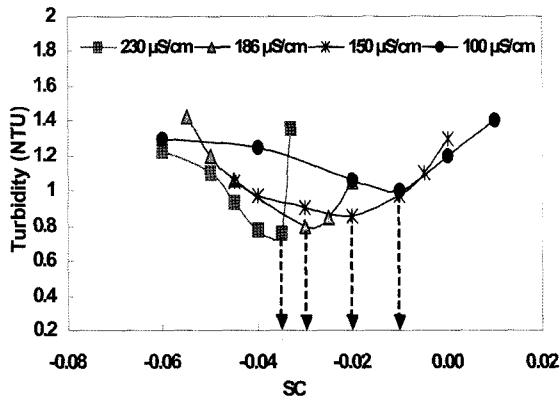


Fig. 11. Effect of conductivity on SP, at 8 NTU.

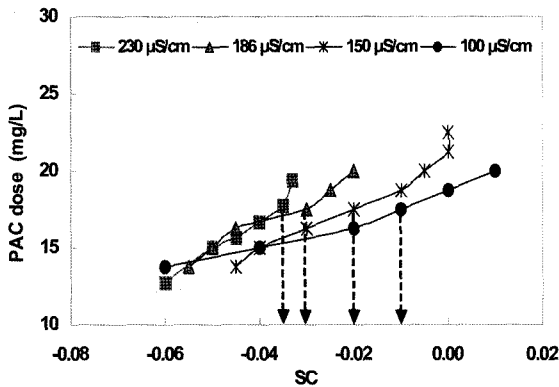


Fig. 12. Effect of conductivity on SC and coagulant dose, at 8 NTU.

보여준다. Fig. 9와 Fig. 11을 비교하면 저탁도에서 전기전도도가 SP에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 저탁도시에는 탁도 입자의 농도가 낮으므로 탁도 입자의 표면 전하량이 작아져 전기전도도의 영향이 커지게 된다. 또한 Fig. 10과 Fig. 12에서 전기전도도의 증가에 따라 변화시키는데 더 많은 응집제가 소요됨을 알 수 있다. 그러나 전기전도도가 큰 경우에는 SP값이 작게 설정되므로 응집 시 변화시켜야 할 SC의 범위가 감소되고, Fig. 10과 Fig. 12에 나타난 바와 같이 전기전도도가 클수록 최적 응집 조건의 응집제 주입량은 약간 증가하였으나 그 차는 크지 않게 나타났다. 이를 통해 전기전도도의 증가는 SP에 영향을 미치지 않지만 SP를 적정값으로 설정한다면 응집제 주입량에는 큰 변화를 주지 않음을 알 수 있다. 그러나 전기전도도 변화에 관계없이 SP를 일정한 값으로 설정한다면, 전기전도도가 높을 때 과량의 응집제가 소모될 뿐만 아니라 침전수 탁도도 더 높게 된다.

4. 결론

원수특성 변화에 따른 SC의 반응과 SP 변화 경향을 알아본 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실제 한강 원수를 대상으로, 일정 기간 동안의 원수의 수질과 SC의 변화를 관찰한 결과, SC와 전기전도도의 경향

이 매우 유사하고, 높은 상관성을 보임을 알 수 있었다.

2) SC를 기준으로 응집 처리한 결과, 최적 응집 조건을 나타내는 SC, 즉 SP가 연구기간동안의 계절적 수질 변화, 특히 전기전도도 변화에 따라 변화함을 알 수 있었다. 특히 원수의 수질이 저탁도 일 때, 전기전도도가 SP에 미치는 영향이 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다.

3) 전기전도도가 증가할수록 SP를 낮게 설정하여야 하며, 전기전도도 증가에 따라 SP를 조정하지 않으면 응집제가 많이 소모될 뿐만 아니라 침전수의 탁도도 불량하게 된다.

4) SCD를 이용한 응집 공정 제어를 위해서는 기준이 되는 SP의 계절적 변화를 파악해야 하며, 특히 SP 변화에 대한 대표적인 영향인자인 전기전도도의 변화를 고려한다면, SCD에 의한 최적 응집의 자동 제어는 더욱 용이해질 것으로 조사되었다.

사 사

본 연구는 2003학년도 서울시립대학교 교내학술연구지원비 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 유명진, 조용모, 상수처리-정수의 기술, 동화기술, 서울 (1996).
2. Bryant, R. L., "Optimizing coagulation with the streaming current monitor," *J. of NEWWA*, **12**, 268~275(1996).
3. 서울특별시 수도기술연구소, "흐름전위를 이용한 응집제 투입을 변화에 관한 연구," 수도기술연보, 제2호, 160~165(2000).
4. 윤태일, "응집제 주입량 콘트롤을 위한 Streaming Current Detector의 이용," 대한환경공학회지, **8**(1), 69~76(1986).
5. 안상진, 최계운, 윤남중, "저탁도 원수에서 응집 및 침전 인자가 탁도 제거 효율에 미치는 영향," *J. of KTSWT*, **4**(2), 11~15(1996).
6. 전항배, 이영주, 채선하, "SCD를 이용한 알루미늄 수화물의 하전 및 응집특성 평가," *J. of KSEE*, **25**(4), 454~459(2003).
7. 한무영, 한정철, "응집공정 개선을 위한 SCD의 적용," 대한토목학회 학술발표회 논문집, (2), 519~522(1995).
8. 한종화, 흐름전위와 PID 제어를 이용한 응집 공정 평가, 서울시립대학교 대학원 석사학위 논문(2003).
9. Fanceschi, M., Girou, A., Carro-Diaz, A. M., Maurette, M. T., and Puech-Costes, E., "Optimization of the coagulation-flocculation process of raw water by optimal design method," *Water Res.*, **36**, 3561~3572(2002).
10. Liu, J. C. and Wu, M. D., "Fuzzy control of coagulation reaction through streaming current monitoring," *Water Science and Technology*, **36**(4), 127~134(1997).
11. Abu-Orf, M. M., Dentel, S. K., "Automatic control of

- polymer dose using the streaming current detector," *Water Environmental Research*, **70**(5), 1005~1018(1998).
12. 이준호, 응집공정에서 흐름전위를 이용한 응집제 투입률에 관한 연구, 서울시립대학교 도시과학대학원 석사학위논문(2001).
 13. Dental, S. K. and Kingery, K. M., "Using streaming current detectors in water treatment," *J. AWWA*, **3**, 85~94(1989).
 14. 전항배, 이준상, 이선주, "SCD를 이용한 Ca^{2+} 이온이 자연유기물질 응집에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **25**(6), 753~759(2003).
 15. Mayers, D., *Surfaces, interfaces and colloids: principles and application* 2nd ed., WILEY-VCH, U.S.A.(1999).
 16. Elicker, M. L., Resta, J. J., Hunt, J. W., and Dentel, S. K., "Fundamental considerations in use of the streaming current detector," *Chemical Water and Wastewater Treatment II*, CHEMICAL WATER AND WASTEWATER TREATMENT, 165~180(1992).