

정수장 응집혼화공정에서의 응집플럭 연속 모니터링

가길현 · 장현성 · 김영범* · 곽중운†,*

서울시 영등포아리수정수센터 · *(주)에코노벨 기술연구소

(2009년 4월 13일 접수, 2009년 4월 28일 채택)

On-line Monitoring of the Flocs in Mixing Zone using iPDA in the Drinking Water Treatment Plant

Gil-Hyun Ga · Hyun-Sung Jang · Young-Beom Kim* · Jong-Woon Kwak†,*

Seoul Youngdeungpo Arisu Waterworks · *EcoNovel Company, Ltd.

ABSTRACT : This study evaluated the flocs forming characteristics in the mixing zone to increase the coagulation effect in the drinking water plant. As a measuring tool of formed flocs, on-line particle dispersion analyzer (iPDA) was used in Y drinking water plant. To evaluate the forming flocs, many parameters such as poly amine, coagulant dosing amount, raw water turbidity, and pH was applied in this study. During the periods of field test, poly aluminium chloride (PACl) as a coagulant was used. With the increase of the raw water turbidities, poly amine was also added as one of aids for increasing in coagulation efficiency. The turbidity and pH of raw water was ranged from 7 to 9 and from 25 to 140 NTU, respectively. The increasing of raw water turbidity brought the bigger floc sizes accordingly. From a regression analysis, R² value was 0.8040 as a function of T, raw water turbidity. Floc size index (FSI) was obtained from a correlation equation as follows;

$$FSI = 0.9388\log T - 0.3214$$

Also, polyamine gave the bigger flocs the moment it is added to the coagulated water in the rapid mixing zone. One of parameters influencing the floc sizes was the addition of powdered active carbon(PAC) in the mixing zone. In case of higher turbidity of raw water, R² value was 0.9050 in the parameters of [PACl] and [PAC];

$$FSI = 0.0407[T]^{0.324}[PACl]^{0.769}[PAC]^{0.178}$$

On-line floc monitor was beneficial to evaluate the flocs sizes depending on the many parameters consisting raw water properties, bring the profitable basic data to control the mixing zone more effectively.

Key Words : iPDA, Floc Monitoring, Coagulation, FSI

요약 : 본 연구는 Y 정수장 혼화지의 응집효율을 향상시킬 목적으로 혼화지에서 생성되는 플럭을 실시간 온라인으로 평가하였다. 플럭크기를 평가하는 장비로는 온라인으로 플럭을 연속적으로 평가할 수 있는 응집플럭성장측정장치(iPDA)를 사용하였다. 플럭크기를 평가하기 위해 유기고분자 응집제인 폴리아민, 무기응집제 투입량, 원수의 탁도, pH같은 여러 가지 인자를 변수로 적용하였다. 현장실험 기간 동안 사용된 응집제는 폴리염화알루미늄(PACl)이었고, 응집보조제로 폴리아민이 사용되었다. 현장 테스트 기간 동안 원수의 탁도는 25~140 NTU 범위, pH는 7~9이었다. 원수의 탁도가 증가할수록 생성되는 플럭의 크기도 증가하여 침전속도에 영향을 미쳤다. 회귀분석으로 부터 FSI (Floc size index)와 탁도 T 값과의 관계식을 다음과 같이 얻었다.

$$FSI = 0.9388\log T - 0.3214 \quad (R^2 = 0.8040, T : \text{Turbidity})$$

또한 보조제로 사용된 폴리아민도 플럭크기값에 큰 영향을 주었고, 색도제거제로 사용된 활성탄(PAC)도 그 자체 입자로 작용하여 응집플럭크기 값에 영향을 상당히 주는 것으로 나타났다. 고탁도인 경우 FSI는 [PACl]과 [PAC]함수로 다음과 같은 식을 유도할 수 있었으며 R² = 0.9050이었다.

$$FSI = 0.0407[T]^{0.324}[PACl]^{0.769}[PAC]^{0.178} \quad [PACl] = \text{PACl 투입농도}, [PAC] = \text{활성탄 투입농도}$$

상대적 응집속도 $\Delta FSI/\Delta T$ 값은 응집제의 투입량보다는 활성탄의 투입량이 더 큰 영향을 주었다. 본 연구과정에서 활성탄투입량이 응집속도에 미치는 영향은 응집제의 투입농도가 미치는 것보다 $\Delta FSI/\Delta T$ 값이 1.41 배 큰 것으로 나타났다. 본 연구에서 연구한 결과 플럭크기값 FSI는 여러 가지 영향인자에 상당한 영향을 받는 것으로 분석되었고, 응집혼화 효율향상에 유익한 데이터를 얻을 수 있었다.

주제어 : iPDA, 플럭 모니터링, 응집, 플럭크기값, 응집효율

1. 서론

정수장에서 응집공정은 수처리 전과정에 영향을 미치게

되므로 중요한 공정중의 하나다. 정수장에 유입되는 입자들은 대개 콜로이드성 입자가 많이 분포하므로 적절한 크기로 성장시키기 위해 응집제를 사용한다.

응집공정은 원수내 입자물질의 전하를 응집제 투입 후 급속혼화를 통해 중화하는 과정과 완속혼화를 통해 중화된 입자물질의 크기를 크게 만드는 응결(flocculation)과정

† Corresponding author

E-mail: jkwak@econovel.com

Tel: 02-2109-6601

Fax: 02-2109-6604

으로 나눌 수 있다. 대개 급속혼화지에서 사용하는 응집제는 무기응집제인 무기고분자를 사용하고 완속교반지에 입구에 유기응집제를 사용하게 된다.¹⁾

응집의 원리는 입자표면에 존재하는 -전하값을 인위적으로 +전하값을 가진 알루미늄 금속이온이나 철금속 이온을 주입하게 된다. 이론적으로 보면 응집은 입자표면의 불안정화(destabilization), 흡착과정, 화학적 반응, 물리적 체거름현상(enmeshment) 등 복잡한 과정을 거쳐서 하나의 플러크가 형성된다.²⁾

정수장 혼화지에서는 최적 플러크기값을 유도하기 위해 적절한 G값을 주어서 조절한다. 정수장마다 수리조건이 상이하므로 획일적으로 최적 G값을 사용하기 보다는 정수장 조건에 따라 맞춤형 G값 조건이 현재 적용되고 있다.

기존 정수장의 경우 최적 응집제 주입량을 계산하기 위하여 자-테스트 장치를 사용하는데 많은 정수장에서 자-테스트장치에서 결정된 최적 주입량보다 많게는 10% 이상 현장에서는 더 주입하는 사례가 많은 실정이다. 자-테스트 최적 주입량을 계산하는 경우, 대개는 육안분석과 응집침전 후 상등액을 분석하여 최적 주입량을 산출한다. 이 경우 플러크의 육안분석(visual analysis)은 정량적으로 평가할 수 없는 단점이 있다. 또한 관찰자에 따라 다르게 평가할 수 있어서 정량적 산출이 용이하지 않다. 최근 정수장 응집혼화지 플러크를 온라인 실시간으로 평가할 수 있는 장치가 개발되어 실험실과 현장에서 연구되고 있다. 플러크는 여러 가지 물리화학적 인자에 영향을 받는데, 영향인자로써 원수의 탁도, pH, 알칼리도, 유기물농도, 무기물농도와 같은 수질 인자와 응집제의 종류 및 주입량, 수온과 같은 화학적 인자, 그리고 혼화강도, 시간, 혼화기 형태와 같은 물리적 인자가 있다.

이러한 다양한 영향인자의 조건변화에 따라 플러크성장 상태가 달라지는데 기존의 경우 육안분석으로만 플러크를 평가할 수 있어 혼화지에 성장하는 플러크 상태를 확인하는데 상당한 어려움이 있었다. 그동안 응집지 현장에서 성장하는 플러크의 평가를 위해서는 플러크의 상태를 정량화 할 수 있는 방법이 없어서 육안관찰에 의지해 왔고 침전수 탁도값과의 비교를 통해 응집효율을 간접적으로 평가를 해 왔다.

본 연구에서는 이러한 단점을 개선하기 위해 혼화지에서 생성되는 플러크기값을 실시간 평가하여 원수의 다양한 물리화학적 인자가 플러크 성장에 어떠한 영향을 주는지 분석하고자 하였다. 플러크에 관한 실험실 연구는 되어있지만,³⁾ 본 연구에서는 최근에 개발된 응집플러크성장측정장치(iPDA)를 이용하여 원수수질 조건이 플러크 생성에 미치는 영향, 응집제의 주입량, 활성탄 주입량, 폴리아민 등이 플러크 성장에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 또한 응집플러크의 생성 및 성장에 미치는 영향을 실시간 측정할 수 있는 플러크기값 FSI (Floc Size Index)을 분석하여 응집효율을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험실 규모 테스트

현장적용을 위해 활성탄 주입량을 변화시킬 때 자-테스트 실험을 통해 성장하는 플러크를 iPDA장치를 통해 분석하였다. 분말활성탄(PAC, 40%)을 이용하여 20,000 ppm로 희석한 1차 희석용액으로 2 L Jar 용기에 각각 20, 30, 40 ppm를 주입하여 실험하였다.

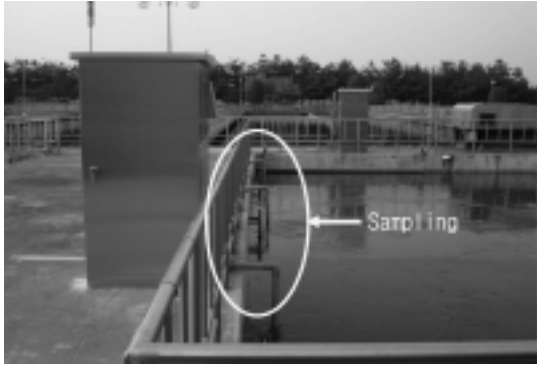
실험시 원수조건으로는 탁수정 원수탁도 4.5 NTU, pH 7.63, 알칼리도 51.5 ppm이었고, 실공정과 똑같이 하기위해 황산 2 ppm을 주입하여 동일조건에서 수행하였다. 우선 단계적으로 활성탄주입률을 20, 30, 40 ppm으로 변경시키며 그때의 탁도와 플러크기값을 비교하였다.

현장적용을 위해 응집제 주입율을 변화시킬 때 자-테스터에서 성장하는 플러크를 iPDA장치(iPDA-200, EcoNovel Company)를 통해 분석하였다. 동일한 원수조건에서 PACI (poly aluminum chloride, 염기도 40~50%, 10% Al₂O₃) 응집제의 주입량을 8~18 ppm까지 2 ppm 간격으로 변화를 주면서 성장플러크의 상태를 iPDA를 통해 온라인 실시간으로 모니터링 하였다. 또한 실험의 정확성을 위해 제타전위계측기를 이용하여 제타전위를 측정하였다. 제타전위계측기는 SEPHY사의 제품(± 100 mV)을 사용하였으며 전기영동법을 이용해 제타전위를 측정하였다.

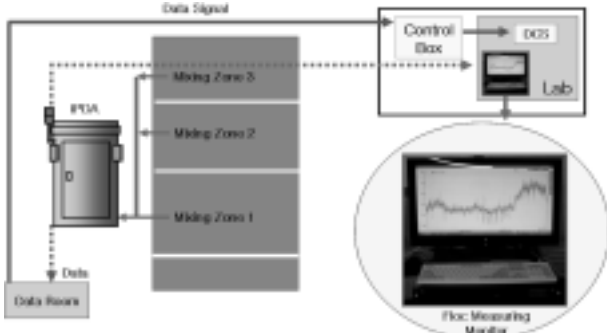
양이온성 고분자응집제인 폴리아민(분자량 10,000~20,000 AQ FLOC)의 주입량이 플러크 성장에 미치는 영향을 평가하기 위해서 PACI 응집제의 주입량은 동일하게 유지하고 폴리아민의 주입량 변화시키면서 자-테스터에서 성장하는 플러크를 iPDA장치를 통해 분석하였다. 폴리아민원액을 200 ppm의 1차 희석용액으로 희석하여 각각 0.3, 0.5, 0.7 ppm 주입하여 분석하였다. 실험 시 원수조건으로는 활성탄 주입률 변경과 응집제 주입률변경실험과 같이 동일조건에서 수행하였다. 또한 플러크기 분포 특성과 실제 폴리아민 주입률변경에 대한 자-테스트 실험을 비교하였다. 5개의 Jar 비이커에 PACI 응집제 11 ppm을 동일하게 주입하고, 폴리아민을 각각 0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 ppm를 주입한 후 급속교반 200 RPM 1분, 완속교반 55 RPM, 35 RPM, 24 RPM 각각 2분 30초간 실시한 후 15분간 정치시켜 잔류 탁도를 측정하였다.

2.2. 현장규모 테스트

서울시 Y정수장 응집지 3호지에 iPDA를 설치하여 2008년 5월 1일부터 12월 4일까지 연속 운전을 하였다(Fig. 1(a)). 시료의 샘플은 응집지 1단에서 채취하였으며 샘플링은 1분 간격으로, 유속은 40~60 mL/min으로 유지하였다. 운전 기간 중 원수의 탁도는 평균 13.1 NTU (3.6~141 NTU)의 나타났다. PACI 응집제의 주입량은 저탁도시에는 13~14 ppm으로 고탁도 원수 유입시에는 최대 30 ppm까지 투입하였다. 응집제 주입을 변경에 따른 플러크기 영향에 대한 현장실험은 정수생산 여건상 1일 8시간의 단기간으로 모니터링하였다. 응집제 주입을 변동 현장실험은 PACI 응집제 8 ppm 부터 2시간 간격으로 2 ppm 증가시켜 16 ppm까지 실험하여 온라인 실시간으로 플러크성장 효과를 분석하였다.



(a) Sampling point



(b) Data processing of FSI from iPDA located in mixing zone

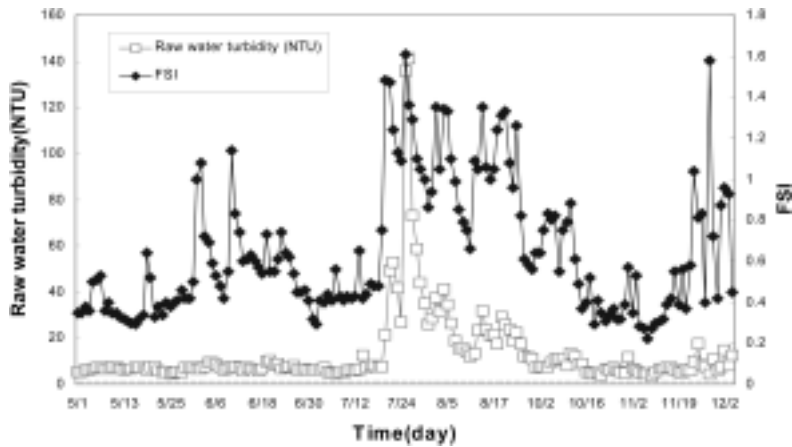
Fig. 1. Set up of iPDA in a plant.

현장의 데이터의 처리과정은 Fig. 1(b)에 나타내었다. 응집지 1단에서 연속 측정된 플럭크기값은 시그널 전송을 통해 공정제어실의 DCS(Distributed Control System)와 실험실 분석시스템 모니터로 전송되어 현장에서 생성된 플럭의 상태를 실시간 모니터링 하였다. 누적된 데이터와 정수장 자체에서 분석되는 항목들과 상호비교 검토하였다.

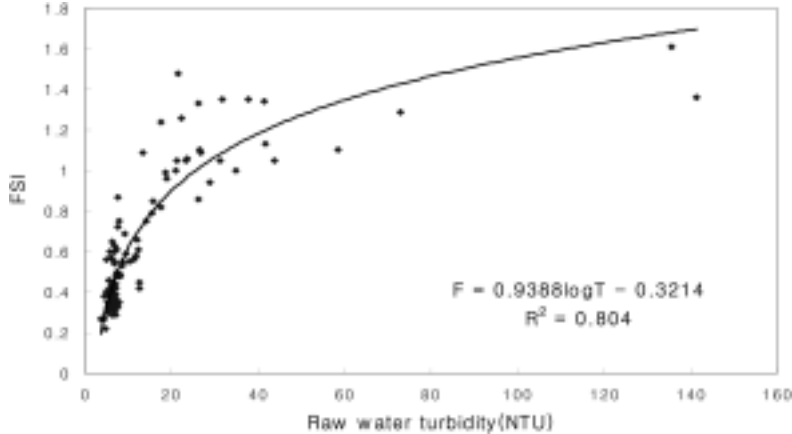
3. 결과 및 고찰

3.1. 원수탁도가 플럭크기값에 미치는 영향

Fig. 2는 원수탁도 변화시 약품주입량이 플럭크기값에 미치는 영향을 모니터링 한 것이다. 본 연구실험기간 동안 원수조건변화는 원수탁도가 5~140 NTU, 수온 7~27°C, pH 6.8, 그리고 알칼리도는 15~55 ppm범위였다. Fig. 2에서 보면 몇 가지 독특한 응집현상이 나타나고 있다. 5월 1일부터 7월 12일까지 원수의 탁도값이 큰 변동이 없는데도 불구하고 플럭크기값은 상대적으로 상당한 변동폭을 나타내고 있다. 이것은 정수장에서 색도제거를 위해 그 기간 동안 입자성 활성탄을 사용하였기 때문으로 사료된다. 입자성 활성탄이 유입되면 탁도증가효과를 가져와 물리적 개념에서 플럭의 성장이 촉진된다. 수온이 높은 여름철의 경우 실제 탁도값이 100 NTU 이상 증가하였으며



(a) Effects of raw water turbidity on FSI



(b) Recession analysis for relationship of raw water turbidity with FSI

Fig. 2. Effect of raw water turbidities on FSI.

생성된 플럭크기값 FSI는 1.6까지 상승하는 경향을 보여 주었다. 여름철 원수유입 탁도값이 가파르게 증가하다가 완만하게 감소하는 반면, 상응하는 플럭크기값 FSI는 변동폭이 상당히 높게 나타났다.

본 연구를 통해서 특징적으로 알 수 있는 것은 탁도값이 증가할수록 플럭크기도 상대적으로 증가하는 경향을 보여 주고 있다는 것이다. 생성된 플럭크기와 유입된 탁도값과의 상관관계를 분석하기 위하여 본 연구에서는 회귀분석을 하여 식 (1)을 유도하였다.

$$FSI = 0.9388\log T - 0.3214 \quad (R^2 = 0.8040) \quad (1)$$

여기서 T는 원수탁도값(NTU)이다. FSI는 $R^2 = 0.8040$ 의 상관관계를 보여주었는데 플럭크기는 유입된 원수의 탁도값과 상당한 관계가 있다는 것을 보여준다. 특히 원수탁도값이 40 NTU범위까지는 그러한 현상이 현저하게 나타났다. 일반적으로 플럭크기값에 영향을 주는 물리화학적 인자는 응집제의 종류와 주입량, 주입방법, 원수의 pH, 알칼리도, 그리고 교반조건에 따라 다양한 양상을 나타낸다. 여러 변수를 고정했을 때 본 현장에서 보는 것처럼 원수 중에 포함된 입자의 농도가 플럭크기값에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 알려진 바와 같이 응집제는 미세한 입자를 응집시켜 큰 플럭스로 성장시키는 역할을 한다. 플럭를 성장시키는 인자로서 응집제는 절대적 영향을 준다. 그러나 본 연구에서 보는 바와 같이 적정량 응집제가 주입된 조건에서는 응집제 주입량 뿐 아니라 수중에 포함된 입자의 농도도 플럭크기값에 상당한 영향을 미치고 있음을 FSI값 분석을 통해 알 수 있었다.

3.2. PACl 응집제 주입량이 플럭크기값에 미치는 영향

Fig. 3은 응집제 주입량이 Y정수장 3응집지에서 얻어진 현장 FSI값을 온라인으로 연속적으로 모니터링 한 것이다. 본 연구에서는 응집제 주입량이 혼화지에서 플럭크기값

에 비례적으로 어떠한 영향을 주는지를 분석하기 위해 실험하였다. 당시 자체스트로 분석한 결과 현장에서 최적 응집제 주입량은 PACl 12 ppm이었다. 현장인 점을 고려하여 실험을 위해 최소로 필요한 응집제 주입량을 8 ppm으로 가정하고 PACl 주입량을 12 ppm에서 8 ppm으로 감소시켰다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 주입량을 감소시켰을 때 플럭크기값이 급격히 감소하는 경향을 볼 수 있는데 이것은 -전하를 띤 입자의 표면전하를 완전히 중화시키지 못했기 때문으로 사료된다. 이론적으로 완전중화가 일어나려면 다음조건을 만족하면 된다.

$$\sum P^- + \sum M^+ = 0 \quad (2)$$

$\sum P^-$: 입자의 -총전하량, $\sum M^+$: 금속의 +총전하량

여기서 P는 각 입자의 표면전하를 나타내며 pH에 따라 다르지만 대개의 경우 -전하값을 나타내며 M^+ 는 Al 금속 양이온의 +전하량을 의미한다. 이론적으로 보면 $\sum P^-$ 값과 $\sum M^+$ 과 균형을 이루면 가장 이상적으로 응집이 일어나는 조건이 되다. 그러나 수중에서 물리화학적인 인자가 존재하므로 전하중화적인 개념으로만 볼 수 없다. 응집제 영향을 주는 3대 인자가 있다. 원수변수로는 탁도, 입자표면적, 유기물 농도, 알칼리도, pH, 조류가 전형적인 응집에 미치는 영향들이고, 외부요인으로 화학적 변수가 있는데 응집제의 종류, 유기응집제, 염소주입 등이 여기에 해당된다. 그리고 물리적 변수로 급속교반 강도, 완속교반 강도도 최적 응집에 상당한 영향을 주는 인자들이다. 본 연구에서는 원수인자와 화학적변수의 영향들을 연구대상으로 고려하였다.

특히 주입한 Al 염의 수화반응속도에 영향을 주는 pH와 알칼리도값도 최적 응집에 절대적인 영향을 미치는 인자중의 하나다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 최적 응집조건과 상응하는 것으로 플럭크기값 FSI를 간접 평가인

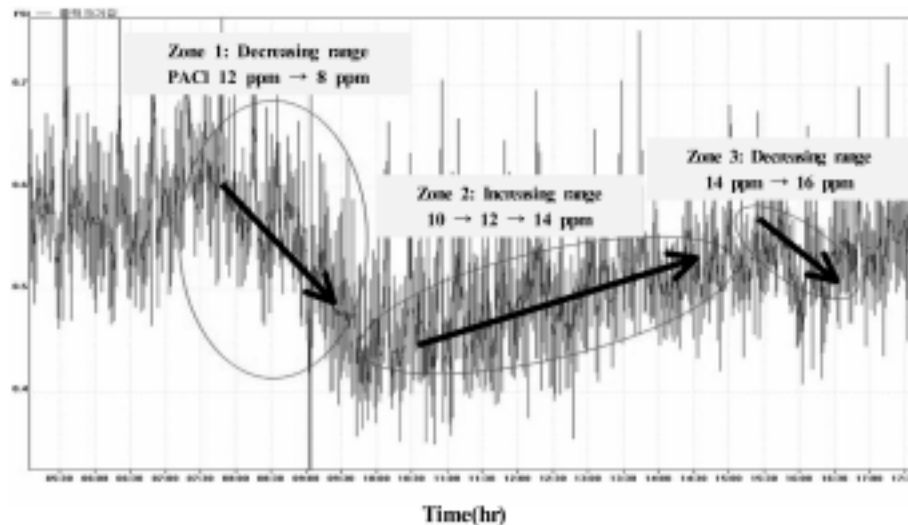


Fig. 3. FSI real values obtained from field test using PACl coagulants.

자로 채택하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 응집제 주입량을 12 ppm에서 8 ppm으로 감소시켰을 때 FSI는 감소하는 경향을 나타냈으며, 응집제 주입량을 8 ppm부터 2 ppm 간격으로 증가시킬 때 10~14 ppm까지는 계속 증가하였으나 16 ppm 주입시에는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.⁵⁾

Fig. 3에서 보면 제 1영역은 응집제의 첨가량이 부족한 영역을 나타낸다. 이 응집영역에서는 이론적으로 $\Sigma P > \Sigma M^+$ 현상으로 추정할 수 있으며, 다시 8 ppm에서 12 ppm으로 응집제의 첨가량을 증가시키면 입자의 불안정화 속도가 증가하면서 응집이 효과적으로 일어나 잔류탁도가 급격히 감소하는 제 2영역(Zone 2)으로 전이한다. 그러나 14 ppm에서 16 ppm으로 응집제 주입량을 증가시키면 전하역전 현상이 일어나게 된다. 즉 $\Sigma P < \Sigma M^+$ 현상으로 수중에 +전하값이 여유로 남아있다는 것을 의미하며 제 3영역(Zone 3)이 여기에 해당된다. 이 영역에서는 적정 응집량을 넘어서면 입자의 재안정화(restabilization)가 일어나 오히려 잔류탁도 값이 증가하는 경향을 나타내게 된다. 응집제가 응집제가 과량투입 되어 첨가해 준 알루미늄의 일부가 금속수산화물($Al(OH)_3$)을 형성하는 원인이 될 수 있다.

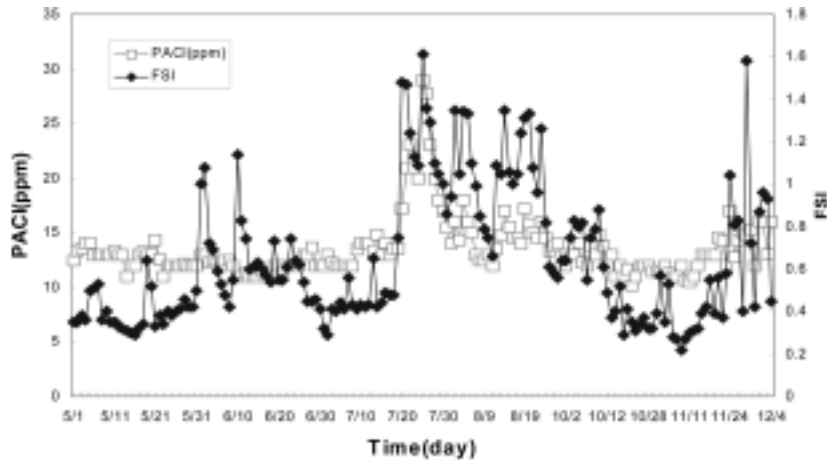
가장 이상적인 응집영역은 화학적 응집균형의 법칙(SCP, stoichiometry coagulation point)이 적용되는 시점인데 본

연구에서는 14~16 ppm범위에서 이러한 현상이 나타난다. 이 중간 영역에서는 이론적으로 보면 입자전하총량과 금속전하총량이 균형을 이루는 $\Sigma P = \Sigma M^+$ 관계식이 성립하게 된다. 즉 본 연구에서 iPDA에서 얻어진 FSI값으로 정확한 SCP현상 즉 최적응집주입량을 결정할 수 있었다. Fig. 3에서보는 바와 같이 다른 응집변수들을 고정시켰을 때 응집제 하나만을 단일변수로 보면 최적 응집 주입 포인트를 결정을 할 수 있음을 시사한다.

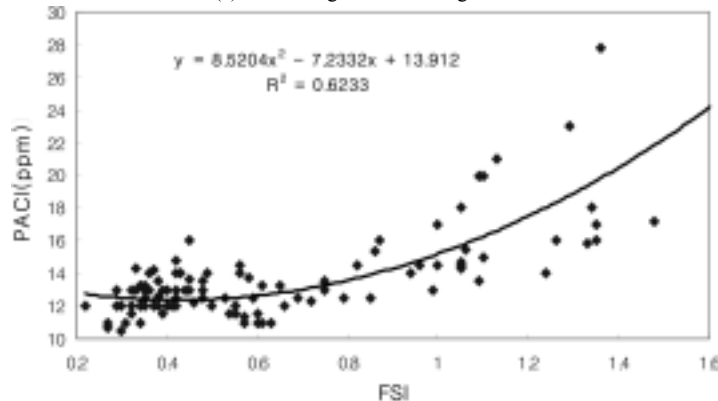
또한 응집제 주입량이 12~15 ppm 범위에서도 플럭크기값이 1~1.2 FSI까지 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 플럭크기값은 응집제의 주입량뿐 아니라 다른 변수도 크게 작용하고 있다는 것을 간접적으로 알 수 있다.

Fig. 4(a)는 응집제의 주입량과 플럭크기값 FSI와의 상관관계를 유도해보았다. 전반적으로 응집제주입량이 증가할수록 FSI값도 상대적으로 증가하는 경향을 보여주었다.

Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 회귀선 분석을 했을 때 실험기간 동안 응집제-FSI값 상관관계는 $R^2 = 0.6232$ 을 보여주었다. 유입수 탁도값과 FSI 상관관계식에서는 $R^2 = 0.8040$ 을 보여준 반해 상대적으로 낮은 수치를 보여주었다. 이는 응집제 주입과정에서 다른 화학적 변수가 크게 작용했음을 시사한다. 대체적으로 수중의 미세 입자(브라운운동물 입자들)는 외부에서 화학적 반응을 유도하는 응집제를 주



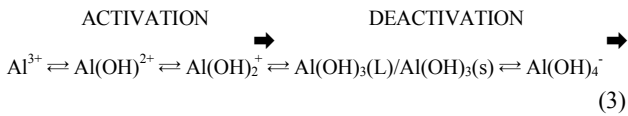
(a) FSI change with treating time



(b) Recession analysis between FSI and PACI dosages.

Fig. 4. Effects of PAC dosages on FSI.

입하지 않는 한 대체적으로 안정하다. 그러나 응집제는 수중에 유입되는 즉시 다음 반응식처럼 수화반응(hydrolysis)이 촉진된다.^{2,6,7)}



주입한 응집제가 모두 응집반응에 참여하는 것은 아니다. 일부는 응집역할에 기여하기보다는 Al(OH)₃(L)/Al(OH)₃(s) 같은 화합물을 생성시켜 하나의 응집체(seed)를 형성하는 원인이 될 수 있다. Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 상대적으로 낮은 R² = 0.6232을 보여주는 것은 비례적으로 주입한 응집제가 응집역할에 상당부분 기여하지 않았던 것을 보여준다.

PACI주입량이 플럭 성장에 미치는 효과를 좀 더 이론적으로 알아보기 위해 실험실 연구와 비교검토를 하였다. Table 1은 PACI 응집제 주입량을 변화시킬 때 플럭크기값의 변화와 같은 조건에서의 급속혼화이후 샘플을 취해 제타전위를 측정된 결과다. 응집제 주입량이 증가하면 FSI 값도 증가한다. 그러나 14 ppm부터 오히려 감소하는 경향을 보여주는데 Table 1에서 보는 바와 같이 제타퍼텐셜 값도 -값에서 +값으로 역전하는 현상을 볼 수 있다.

PACI응집제의 주입량을 8~12 ppm까지 증가시켰을 때

Table 1. FSI and Zeta values depending on coagulants dosages

Dosages(ppm)	FSI	Zeta (mV)
8	Increased	-10.76
10	Decreased	-3.91
12	Increased	-0.82
14	Decreased	5.55
16	Decreased	13.24
18	Increased	10.6

에 플럭크기값은 계속 증가하였으나 12 ppm 이상에서는 더 이상 성장하지 않았고 14 ppm에서는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 제타포텐셜의 경우도 12~14 ppm으로 변화하였을 때 전하역전이 일어난 것을 확인할 수 있었다. 식 (3)에서 보인 바와 같이 Al(OH)₃(L), Al(OH)₃(s), Al(OH)₄⁻ 다 같은 알루미늄 화학종이 생성되었기 때문에 사료된다. 이들 화합물중에서 Al(OH)₃(L), Al(OH)₃(s)와 같은 화학종들은 체거름(sweeping) 응집제 역할에 기여할 수 있는 종이지만 Al(OH)₄⁻ 응집제 방해인자로 활동한다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 응집제 주입량이 8~14 ppm까지는 주입량이 커질수록 반응속도는 증가했지만 그 이상에서는 오히려 감소하는 경향을 보여주었다. 실험조건에서는 10~12 ppm이 적절한 주입량으로 판단되었다.

응집제 주입농도가 응집속도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 ΔFSI/ΔT값을 분석하였다. 이 기울기는 응집속도(aggregation rate)를 나타냄으로 활성탄이 응집속도에 미치는 상대값을 유도해 낼 수 있다. Fig. 5, 6에서처럼 주어진 응집시간 ΔT 동안 성장한 플럭성장값 ΔFSI값을 산출해 내면 응집속도를 상대적 크기로 도출 할 수 있다.⁸⁾

$$S = \frac{\Delta FSI}{\Delta T} \quad (4)$$

식 (4)에서 S는 기울기 값이다.

여기서 기울기 값이 클수록 주어진 조건에서 응집속도가 더 빠른 것을 의미한다.

식 (4)로 Fig. 5에서 실험한 각 응집반응의 응집기울기(ΔFSI/ΔT)값을 비교해 보면, 8 ppm에서 1.00, 12 ppm에서는 1.48, 14 ppm에서는 1.63, 그리고 18 ppm에서는 1.23으로 나타났다. 응집제 주입량이 증가할수록 증가하다가 18 ppm에서는 오히려 1.23으로 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 응집제의 과주입으로 전하역전현상(charge reversal)이 유발, 응집반응효과가 감소되었기 때문이다.

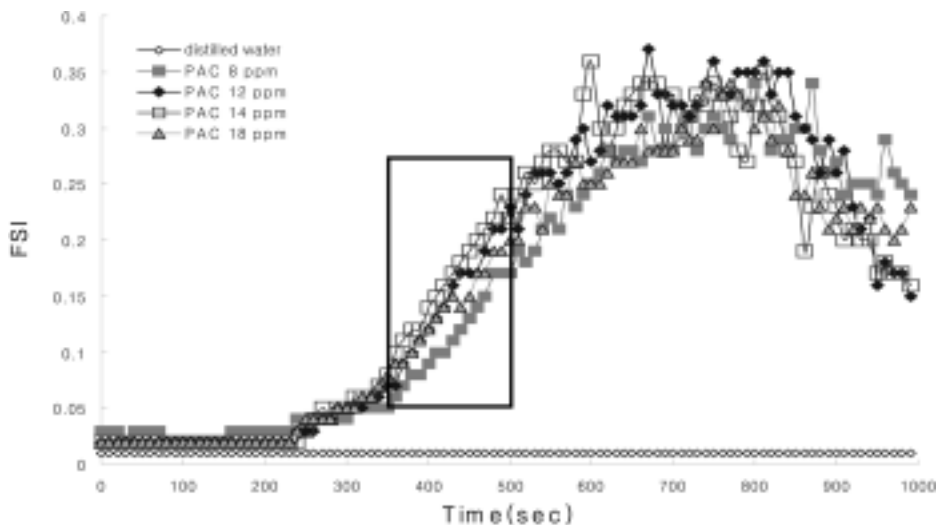


Fig. 5. Effects of coagulant dosages on FSI in the lab test.

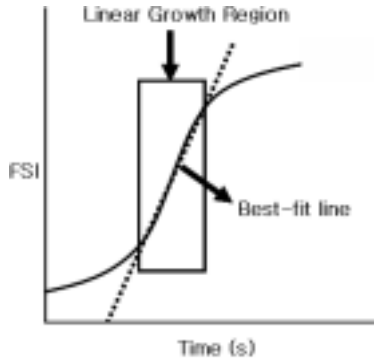


Fig. 6. Fitting line description for coagulation rate.

3.3. 분말활성탄(PAC) 주입량이 플러크기값에 미치는 영향

본 연구에서는 활성탄이 플러크기값에 미치는 영향을 검토하기 위해 실험실 테스트를 좀 더 구체적으로 수행하였다. 실험실 테스트에서 활성탄 주입률에 따른 탁도와 플러크기값은 Table 2와 같다. 분말활성탄(PAC)을 주입하기 전에 원수탁도 3.5~4.5 NTU였다. Table 2에서 보는 바와 같이 분말활성탄 투입전에 비해 주입률을 변경시켜 실험한 결과 주입률증가에 따라 탁도와 플러크기값도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 원수탁도에 활성탄을 주입하면 투입전과 비교하여 활성탄 10 ppm 당 평균 0.04 FSI만큼 상승하는 결과를 나타내었다. 또한 활성탄 40 ppm 주입 시 원수의 탁도는 대략 14 NTU 까지 증가하는 경향을 나타내었으며 이 때 플러크기 FSI값은 0.19로써 순수원수에 비해 약 9.5배 증가하였다.

Table 2. Effects of PAC addition on turbidity and FSI

PAC dosages	Turbidity(NTU) in test			FSI obtained from jar test		
	1st	2nd	3th	1st	2nd	3th
0 ppm	4.5	3.5	3.9	0.02	0.03	0.04
10 ppm	7.0	7.2	8.2	0.08	0.09	0.10
20 ppm	10.3	10.0	9.9	0.12	0.13	0.14
30 ppm	11.9	11.8	-	0.16	0.17	-
40 ppm	13.6	-	-	0.19	-	-

활성탄 주입률에 따른 플러크기값의 변화를 연속적으로 실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. PAC 주입농도가 증가할수록 FSI값은 비례적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 활성탄 주입 후 약 20분 후에 PACI 응집제를 12 ppm로 주입하였다. 주입과 동시에 FSI값은 비례적으로 플러크기값이 증가하고 있음을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다. PAC 40 ppm 주입시에는 FSI값이 최대 1.61까지 증가했으며 30 ppm 주입시 1.29, 20 ppm 주입시 0.87, 미주입시에는 0.37를 각각 나타내었다. 이는 PAC미립자가 플러크성장에 상당한 영향을 준 것으로 판단된다.

한편 Fig. 7에서 활성탄 주입농도가 응집속도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 $\Delta FSI/\Delta T$ 값을 분석하였다. 활성탄을 주입하지 않았을 때는 S값은 0.5인 반면, 활성탄을 20 ppm 주입했을 때에는 1.1, 30 ppm을 주입하였을 때에는 1.75, 40 ppm 주입하였을 때에는 S값이 2.3으로 나타났다. 활성탄을 40 ppm에 주입하였을 때와 미주입시의 응집속도를 비교하면 약 4.6배 차이가 나는 사실을 알 수 있다. 이것은 활성탄 입자농도가 증가하므로 입자상호간 충돌횟수가 증가하였기 때문으로 사료된다.

정수장 현장에서는 상시적으로 활성탄을 사용하는 것은 아니다. 본 연구에서는 활성탄을 주입한 현장데이터를 가지고 활성탄 주입량과 탁도크기값과 FSI값을 상호 연관식을 유도하고자 하였다. 자-테스트에서 얻어진 결과와 유사하게 활성탄 농도 증가에 따라 FSI값도 상대적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 이 현장자료로부터 활성탄주입량과 플러크기값의 상관관계식을 도출하였다. 갈수기 기간 10월 7일~10일 중의 플러크기와 응집변수인 탁도, 응집제주입량, 활성탄주입량의 관계를 다중회귀분석을 통해 알아보기 위하여 다음과 같은 관계식을 가정하였다.

$$FSI = k[T]^a[PAC]^b[PAC]^c \tag{5}$$

위 식을 양변에 ln을 취하여 다음과 같이 변환시켜 k, a, b, c의 상수 값을 다중회귀 분석을 이용하여 구한 다음, 아래와 같이 변수들의 지수승으로 나타내었다.

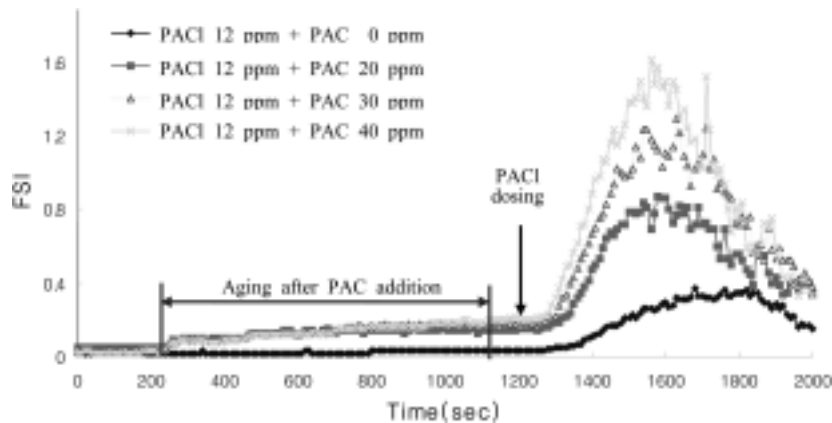


Fig. 7. Effects of coagulants dosages and coagulation time on FSI.

$$\ln[\text{FSI}] = \ln(-7.3578) + 0.0932 \ln[T] + 2.3738 \ln[\text{PAC}] + 0.3679 \ln[\text{PAC}] \quad (6)$$

여기서 k는 주어진 원수에 대한 고유상수이고 T는 탁도를 나타낸다. 따라서 갈수기 기간(10월 7일~10일) 플러크크기와 탁도, 응집제 주입량, 활성탄주입량과의 관계식에서 $R^2 = 0.6870$ 이었다.

$$\text{FSI} = 0.0006[T]^{0.932}[\text{PAC}]^{2.3738}[\text{PAC}]^{0.3679} \quad (7)$$

그러나 현장연구기간 5~12월 평균적으로 보면 식 (7)로부터 [PAC]-[PAC]의 다중상관계수 $R^2 = 0.4560$ 이었다. 원수의 풍납취수장내 침사지의 준설공사로 인해 탁도변화가 심했던 시기인 12월 1일에서 4일에 대한 관계식을 유도해보면 다음과 같았다. 이 경우에는 [PAC]-[PAC] 다중상관계수 $R^2 = 0.9050$ 로 나타났다.

$$\text{FSI} = 0.0407[T]^{0.324}[\text{PAC}]^{0.769}[\text{PAC}]^{0.178} \quad (8)$$

현장에서 플러크크기값과 여러 응집변수와의 관계를 다중회귀분석을 실시한 결과 갈수기시 10월 7일~10일의 경우에는 상관성이 $R^2 = 0.6870$ 으로 나타났고, 원수 탁도 변화가 심하였던 시기 12월 1일~4일에는 $R^2 = 0.9050$ 의 상관성을 나타내었다.

본 연구결과로 보면 저탁도 원수 경우분말 활성탄을 사용할 경우 색도제거 기능뿐 아니라 플러크를 성장시키는 부수적 효과도 기대할 수 있다. 향후 현장에서의 활성탄이 플러크크기값에 미치는 영향은 실험실 테스트보다는 좀 더 체계적인 플러크크기값 모니터링을 통해서 보다 신뢰성이 높은 상관 관계식을 설정해야할 것으로 사료된다.

3.4. 폴리아민이 플러크크기값에 미치는 영향

최적 폴리아민 주입량을 설정하기 위해 먼저 실험실에서 최적 주입량을 산출하였다. 폴리아민 주입실험은 0~0.7 ppm 범위에서 수행하였다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 주입량을 0.3, 0.5, 0.7 ppm로 증가하였을 때 비례적으로 FSI값은 증가하는 경향을 보이지 않았으나 유기응집제

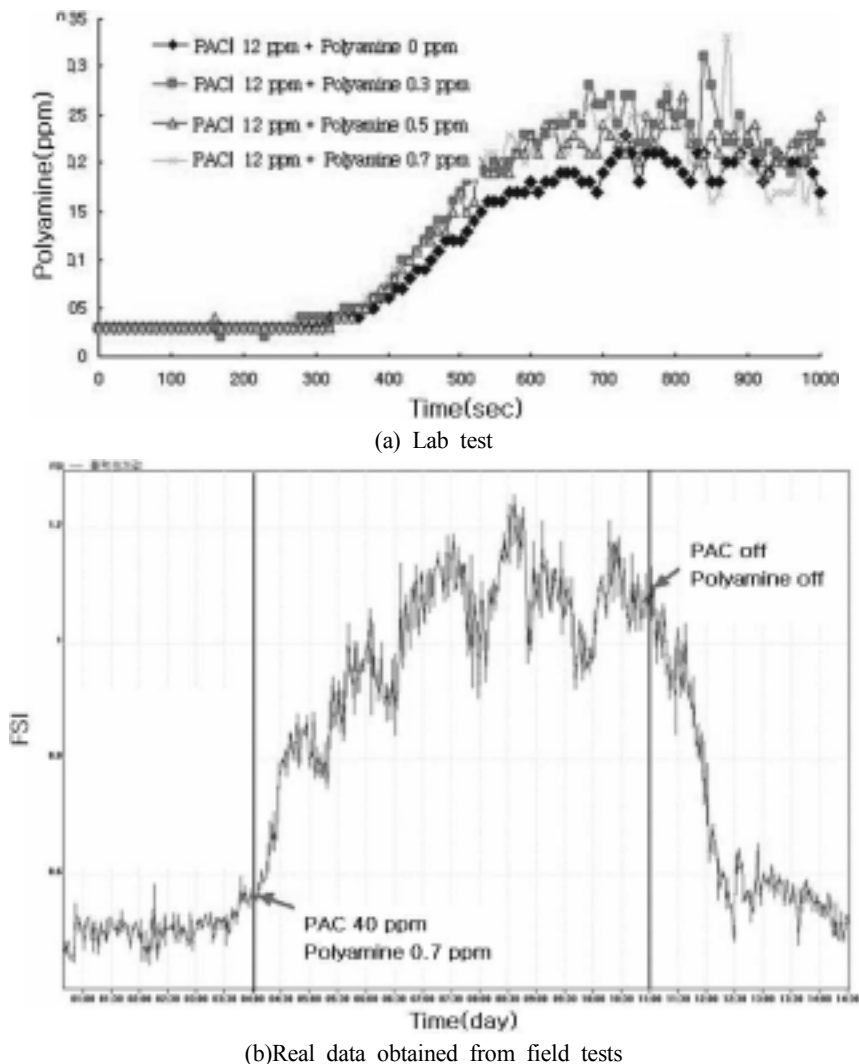


Fig. 8. Effect of added polyamine dosages on FSI.

Table 3. Jar-test results using polyamine

	Jar 1	Jar 2	Jar 3	Jar 4	Jar 5
PAC (ppm)	11	11	11	11	11
H ₂ SO ₄ (ppm)	2	2	2	2	2
Polyamine (ppm)	0	0.3	0.5	0.7	0.9
Residual turbidity (NTU)	1.69	1.57	1.46	1.55	1.67

를 전혀 주입하지 하지 않았을 때와 비교하면 유기응집제를 주입하는 경우 FSI값이 상대적으로 미소하게 증가하였음을 알 수 있다.

즉, 주어진 무기응집제에 대해 유기응집제의 적절한 최적 주입범위가 있음을 알 수 있다. 무기응집제의 기능은 미세한 입자를 상대적으로 크게 키워주는 역할을 하지만 유기응집제는 어느 정도 성장한 플록을 더 큰 플록으로 성장시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 무기 응집제를 주입한 후 약 20초 뒤에 유기응집제를 주입하였다. Fig. 8(b)는 실제 현장에서 얻어진 데이터로서 폴리아민과 활성탄 주입시 플록크기값이 증가하다가 미주입시 급격히 감소하는 경향을 보여 주었다. Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 PACI와 폴리아민의 주입은 물리화학적 인자의 하나로 플록의 성장속도에 비례적으로 영향을 주는 것으로 사료되었다.

Table 3은 폴리아민 주입량을 변화시키면서 테스트를 한 결과를 보여준다. 상등수 기준으로 보면 PACI 11 ppm인 경우 폴리아민 주입량이 0.5 ppm인 경우가 상등수 잔류 탁도값이 가장 낮게 나타났다. 자-테스트 상에서도 유기응집제의 최적 주입포인트가 있는 것을 확인하였다. 즉 유기응집제도 적절한 최적 주입포인트가 있음을 시사해 준다.

5. 결론

본 연구에서 얻어진 연구결과는 다음과 같다.

1) 원수의 탁도가 증가할수록 생성되는 플록크기값 FSI값도 증가하였으며 원수탁도와 FSI 상관관계식은 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$FSI = 0.9388\log T - 0.3214$$

상관관계식으로부터 $R^2 = 0.8040$ 을 얻었으며 원수탁도의 증가는 FSI값을 거의 비례적으로 증가시켰으며 응집혼화 공정운영에 적용 가능한 것으로 판단되었다.

2) 상대적 응집속도 $\Delta FSI/\Delta T$ 값은 응집제의 주입량보다는 활성탄의 주입이 더 큰 영향을 주었다. 본 연구과정에서 활성탄주입량이 응집속도에 미치는 영향은 응집제의 주입농도가 미치는 것보다 $\Delta FSI/\Delta T$ 값이 1.41배 큰 것으로 나타났다.

3) FSI값과 [PACI]과 [PAC]과의 상호관계성을 도출한 결과, 갈수기 기간에는 $R^2 = 0.6870$ 으로 나타났고, 원수탁도가 7~14 NTU 범위에서는 $R^2 = 0.9050$ 높은 아래 식처럼 상관관계를 보여주었다. 즉 유입원수 자체의 탁도값이 응집플록 성장에 더 큰 영향을 나타내었다.

$$FSI = 0.0407[T]^{0.324}[PACI]^{0.769}[PAC]^{0.178}$$

4) 응집 보조제로 사용되는 유기고분자 응집제도 최적 주입포인트가 존재하였으며 적정 주입량을 벗어나면 오히려 플록크기값이 저하하는 경향을 보여주었다. 저탁도시 활성탄과 유기응집제의 첨가는 응집효율을 증가시키는 것으로 사료되었다.

Further works

현장에서 교반 강도값이 플록성장값에 미치는 효과와 유기응집제의 적절한 투입위치와 최적 주입량 그리고 완속 혼화지 1단에서 플록이 침전지에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 지속적인 현장연구가 계속적으로 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- Duan, J. and Gregory, J., "Coagulation by hydrolysing metal salts," *Adv. Colloid Interface Sci.*, 475~502(2003).
- 곽종운, 물리화학적 수처리 원리와 응용, 성안당(2009).
- Matsui, Y. and Tambo, M., "On line floc size evaluation," *Water Supply*, 9, 71~78(1991).
- Gregory, J., "Laminar dispersion and the monitoring of flocculation," *J. Colloids Interface Sci.*, 118, 297~409 (1987).
- Kwak, J., "Roles of molar OH/Al ratios in Al-based salts on neutralizing particle surface charges for coagulation," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, 2(1), (1997).
- Kwak, J. W., "Influences of Al-based coagulants with different OH/Al ratios on drinking water treatability," *Environ. Technol.*, 18, 293~300(1997).
- Huang, C. and Chen, G., "Use of the fiber-optical monitor in evaluating the state of flocculation," *Water Res.*, 30(11), 2723~2727(1996).
- Hopkins, D. and Ducoste, J., "Characterizing flocculation under heterogeneous turbulence," *J. Colloid Interface Sci.*, 264, 184~194(2003).
- Kam, S. and Gregory, J., "The interaction of humic substances with cationic polyelectrolytes," *Water Res.*, 33(15), 3557~3566(2001).