

## 수질에 따른 응집제 주입 자동운영 방안

전옥표\* · 오석영\* · 라병필\*

### 1. 서 론

#### 1.1 연구목적 및 배경

일반적으로 정수장에서는 원수의 탁질제거를 위해 응집침전과 여과공정을 거친다. 원수에 존재하는 탁질의 대부분을 제거하는 응집침전 공정에서는 응집제를 주입하여 불순물이 서로 응집하도록 조건을 만들어 주고 커진 플록의 자중에 의한 침전으로 탁질을 제거한다. 이때 주입되는 응집제주입률은 수질자동측정기에서 측정되는 원수의 탁도, 수온, 알카리도, pH, 전기전도도 외에도 수많은 인자가 서로 유기적이며 비선형적인 관계를 갖고 있다. 또한 응집제 주입 지점인 혼화지 유입부와 응집제 주입에 따른 탁질제거 효과를 판단할 수 있는 침전지 유출지점간에는 체류시간이 3시간 이상 존재하여 실시간 피이드백제어가 곤란하다. 이러한 문제가 있어 정수장에서는 Jar-Test를 1회/일 이상 실시하여 응집제주입률을 결정하고 있으나, 실제 운영에 있어 실험에 소요되는 시간이 길고 급격한 수질변화에 신속하게 대응할 수 없는 어려움이 있어 약품주입 자동화의 결실됨이 되고 있다. 특히 수질이 급변할 경우에는 Jar-Test에 소요되는 시간 때문에 실시간 대응이 불가능하여 정수장 근무자들이 어려움을 겪고 있다.

또한, 정수장 수처리공정에 있어 응집제주입설비의 정밀한 검토 및 선정여하에 따라 수처리공정의 성능에 큰 영향을 미치고 있으며, 점차 정수장의 운영은 자동화 및 통합화 추세에 있어 응집제주입공정의 자동화는 반드시 해결하여야할 사항이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 응집제에 관하여 보다 손쉽게 주입량을 결정하고 수질변화에 따라서 자동적으로 주입량을 결정하고 조절할 수 있는 시스템으로 구성하

여 정확하고 실시간 자동제어가 가능하도록 약품주입 설비를 구성하고자 하였다. 이를 위하여 우선 현장의 운영사례 조사를 통해 각종 약품주입률 결정방법을 분석하고, 현장 여건에 맞는 방법을 선정하여 기존 주입 장치의 신뢰도 향상을 위한 개선방안을 검토한 후 수질과 수량변화에 따른 응집제 자동주입시스템을 구성하여 현장실험을 통한 현장적용방안을 수립 제시코자 한다.

#### 1.2 연구내용

정수장에서 수질에 적합한 응집량을 주입한다는 것은 수처리에서 매우 중요한 위치를 차지한다. 그 이유는 이러한 공정이 응집, 침전, 여과공정 등 후속 수처리공정에 대한 영향이 지대하기 때문이다. 이와 같은 응집응결은 침전과 여과효율에도 영향을 미치고 물의 물리화학적 성질을 변화시키므로, 살균처리에도 영향을 미치게 된다. 또한, 점차 정수장의 운영은 자동화 및 통합화 추세에 있으나 원수의 수질변동에 따른 응집제 주입률을 자동으로 조절할 수 있는 시스템이 국내에서는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 응집제주입률을 자동으로 결정하기 위하여 영향인자인 탁도, 수온, 알카리도, pH, 전기전도도 등의 수질자료를 계측기를 통하여 실시간으로 측정하고 과거에 주입하였던 실적을 토대로 다항식회귀방정식에 의한 통계처리 기법을 통하여 응집제주입률을 결정하도록 구성하였으며, 현장 정수장의 수질자료를 바탕으로 실제운전 주입률과 선형회귀방정식 및 지수회귀방정식에 의한 주입률을 계산하여 비교실험을 실시하였다.

또한, 다항식회귀방정식에 의한 통계처리법은 과거 수질자료를 이용하여 응집제주입률을 예측하기 위한 시뮬레이션 방법이므로 과거 수질자료의 신뢰성과 현재 수질과의 일치성이 수반되어야 하는 문제점이 있으므로 현재의 수질변화에 따른 실시간 제어를 목적으로

\* 한국수자원공사  
E-mail : ukpyo@kowaco.or.kr

응집제 주입 직후의 수질상태를 계측기를 이용한 측정으로 후속공정에서의 결과를 예측함으로써 실시간 제어를 실현하고자 SCD에 의한 Feed Back 제어시스템을 구축하였다.

## 2. 응집제주입률의 결정

### 2.1 수질인자와 응집제 주입률의 관계

대체로 우리나라의 수질은 하절기에 고탁도, 고수온이고, 동절기에는 저탁도, 저수온인 뚜렷한 특징을 가지고 있으며 특히 강수량이 많은 하절기의 알카리도와 pH는 동절기보다 매우 낮은 값을 나타내는 등 그 변화 정도가 매우 커서 응집처리를 어렵게 하는 원인이 된다.

정수처리에 있어서의 침전효과는 탁도 유발물질의 양과 종류, 입자의 크기, 특성이온의 존재여부, 수온, 알카리도, pH, 전기전도도 등에 영향을 받게 된다. 일반적으로 응집제주입률에 영향을 미치는 인자는 원수의 탁도, 알카리도, pH와는 비례하고, 수온과는 반비례의 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

현재 각 정수장에서 응집제 주입률을 결정할 때는 Jar-Test를 실시하여 그 결과를 적용하거나, 조건표를 원수 수질별로 작성하여 이 표를 기준으로 응집제 주입률을 결정하고 있다. 따라서 응집제 주입공정의 자동화를 위해서는 응집제주입률에 관계되는 수질인자들의 지속적인 자료축적을 통하여 각 정수장의 실정에 맞는 통계해석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 2.2 Jar-Test를 이용한 주입방법

수중의 탁질을 제거하는 고액분리조작에는 여과, 침전, 원심분리 등 여러 가지 방법이 있으며, 상수도의 각 정수장에서는 응집제에 의한 응집, 침전 조작을 주로 실시하고 있다. 실제로 정수처리에 있어서의 응집효과는 탁도 유발물질의 양과 종류, 입자의 크기, 특정 이온의 존재여부, pH, 알카리도 등에 영향을 받게 된다. 그러나, 현재 각 정수장에서 응집제 주입률을 결정할 때 대개 과거의 Jar-Test의 결과에 따른 조건표를 원수탁도 및 수온별로 작성하여 이표를 기준으로 응집제 주입률을 결정하고 있다. 따라서, 동일한 탁도의 원수에는 거의 같은 양의 응집제가 주입될 수 있고 과거의 주입률이 그대로 적용되는 경우가 있으므로 동일한 탁도일 때 다른 수질인자가 응집반응에 미

치는 영향이 적절히 고려될 수 없는 단점이 있다. 일반적으로 하천수의 수질은 하절기에 고탁도, 고수온이며 동절기에는 저탁도, 저수온인 뚜렷한 특징을 지니고 있으며, 특히 강수량이 많은 하절기의 알카리도와 pH는 동절기 보다 매우 낮은 값을 나타내는 등 변화 정도가 커서 응집처리를 어렵게 하는 원인이 된다.

### 2.3 과거자료에 기초한 통계처리법을 이용한 방법

정수장으로 유입되는 원수의 수량과 수질에 따라 응집제를 자동으로 주입하기 위한 방법으로 과거의 각종 수질자료, Jar-Test 및 계절 등의 각종 인자들을 데이터 베이스화 하고 이들 데이터로부터 주어진 조건하에서의 최적 약품주입률을 연산하여 주입량을 설정하는 방식이 80년대 중반부터 일본에서 연구되기 시작하였다.

정수장의 응집제 주입률 제어분야에서의 자동화는 약품의 종류와 원수의 수질항목에 따라서 응집제 주입률을 결정해주는 제어기술을 의미하는 것으로 일반적으로 Jar-Test를 이용하여 원수수질에 따라서 최적 운전조건을 설정한 후 이들 축적된 데이터를 기준으로 하여 응집제의 주입률을 결정하는 것이다.

기본적으로 과거 수질자료에 기초한 통계처리법을 이용하는 방법은 마이크로프로세서를 이용하여 약품주입 데이터 파일과 수질관련 데이터 파일로부터 읽어들이 통계방정식을 이용하여 최적 주입률을 연산하는 방식으로 목적으로 하는 변수는 응집제주입률이 되고 이와 같은 목적변수를 구하는데 필요한 변수로는 탁도, 수온, 알카리도, pH, 전기전도도 등의 수질계측항목이 사용된다.

### 2.4 유동전류계를 이용한 주입방법

SCD(Streaming Current Detector)는 혼화·응집공정과 배출수처리공정내 고형물 조정과 탈수시설에서 응집제 주입량을 모니터링하고 자동적으로 제어하기 위하여 개발되어온 기술중의 하나이다. SCD는 입자의 하전상태를 연속적으로 측정하는 것이 가능하므로 응집제 주입의 모니터링과 제어기능을 가지고 있으며, 원수의 유량 및 탁도의 변화에 대처가능한 기술로 연구되어오고 있다.

SCD는 응집제가 주입된 후 물속의 전기적 변화를 측정하는 기기로서, 시료수 중에 전기적으로 하전된

입자들은 SCD 내부에서 왕복운동을 하는 피스톤에 순간적으로 부착하여 전극의 흐름에 따라서 움직이며, 이때 측정된 전류를 전기적으로 처리하여 출력한 값이 SC이다. SC값과 연관이 있는 입자의 물리적인 특성으로는 제타전위(Zeta Potential)를 들 수 있다. 제타전위란 표면에 전기를 띤 콜로이드 입자가 전기장에서 움직일 때 전단면에서의 전위를 말한다. Helmholtz는 제타전위를 다음의 식으로 표현했다.

$$\zeta = \frac{4\pi\mu u}{\epsilon H} \quad (1)$$

여기서  $\zeta$  : 입자의 제타전위(zeta potential)  
 $\mu$  : 물의 점성계수(viscosity of water)  
 $u$  : 입자의 전기전도도  
 $\epsilon$  : 물의 유전상수  
 $H$  : 전기장의 강도

SCD의 제어장치는 설정 SP(Setting Point)값에 대한 측정된 SC값을 비교하여 이 값이 일치할 때까지 응집제 주입률을 재조정한다. 최적 운전조건을 의미하는 SP는 원수의 수질조건에 따라 실험을 통하여 결정되어야 하며, 최적의 SP값은 고정된 값이 아니라 수질조건에 따라 이동하는 값이기 때문에 운영에 주의가 필요하다.

### 3. 자동제어시스템의 구성

#### 3.1 기본방향

응집제 자동주입을 위한 제어시스템의 구성은 기존의 Jar-Test에 의한 주입방식이나 과거데이터를 이용한 통계처리법과 퍼지이론에 의한 인공지능 방식 등이 원수의 수질변화에 실시간으로 대응하는 것이 곤란한 문제점을 앓고 있어 최근 실제 활용을 위한 연구가 진행되어온 SCD에 의한 자동제어를 적용하였다.

또한 SCD에 의한 자동제어시 원수가 도착하여 SC값을 측정하여 주입률을 제어하는 시점까지 초기제어를 위해 근무자들이 이해하기가 용이하고 시스템 구성이 용이한 통계처리법을 통하여 자동제어를 실시하고, SC값의 계측가능 시점에 도달하였을 경우 SCD에 의한 자동제어가 진행되도록 하는 복합제어방식으로 시스템의 안정성을 높이고자 하였다.

### 3.2 제어 알고리즘의 구성

#### 3.2.1 제어 알고리즘의 기본이론

응집제 자동주입을 위한 알고리즘의 구성은 통계해석법에 의해서 도출시키는데 통계해석시 목적값으로 하는 목적변수를 응집제 주입률로 하고 이와 같은 목적변수를 구하는데 필요로 하는 변수로 탁도, 수온, 알카리도, pH, 전기전도도를 종속변수로 하여 선형 회귀방정식과 지수회귀방정식을 비교 검토하였다.

선형 회귀방정식은 데이터에 가장 적합한 직선을 구하는 최소자승법을 사용하여 선의 통계를 계산하고 선에 대한 배열을 구하는 방법으로, 식 (2)와 같이 목적변수  $y$ 는 독립변수인 TB, Te, Al, pH, EC의 함수이고,  $a_1 \sim a_5$ 값은 각각의 독립변수값에 해당하는 계수이며, C값은 절편값이다.

$$y = [(a_1 \times TB) + (a_2 \times Te) + (a_3 \times Al) + (a_4 \times pH) + (a_5 \times EC)] + C \quad (2)$$

여기서,  $y$  : 응집제주입률(ppm)  
 TB : 탁도(NTU)  
 Te : 수온(°C)  
 Al : 알카리도(mg/l)  
 pH : 수소이온농도  
 EC : 전기전도도( $\mu$ S/cm)  
 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  : 상수  
 C : 절편(Intercept)

지수 회귀방정식은 회귀분석에서 데이터에 맞는 지수곡선을 계산하여 식 (3)과 같이 그곡선을 나타내는 값의 배열을 구한다.

$$y = [(a_1 \times \ln TB) + (a_2 \times \ln Te) + (a_3 \times \ln Al) + (a_4 \times \ln pH) + (a_5 \times \ln EC)] + C \quad (3)$$

여기서,  $y$  : 응집제주입률(ppm)  
 TB : 탁도(NTU)  
 Te : 수온(°C)  
 Al : 알카리도(mg/l)  
 pH : 수소이온농도  
 EC : 전기전도도( $\mu$ S/cm)  
 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  : 상수  
 C : 절편(Intercept)

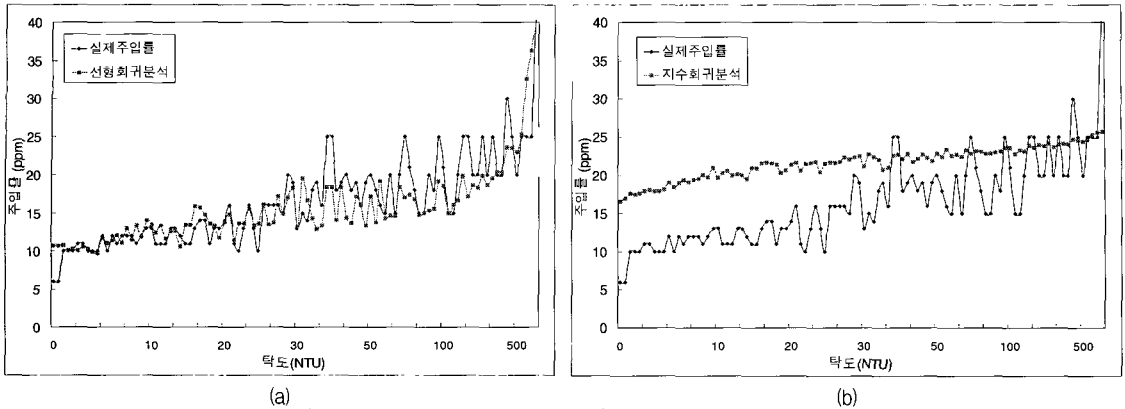


Fig. 1 (a) Liner Regression Method and (b) Exponent Regression Method

Fig. 1은 한국수자원공사 황지정수장의 수질자료를 이용하여 선형회귀방정식과 지수회귀방정식을 시뮬레이션하여 실제주입률과 다항식회귀방정식에 의한 예측주입률을 나타낸 것이며, 그림에서 보는 바와 같이 선형 회귀방정식은 실제 주입률에 매우 민감하게 대응하여 추적이하고 있으며, 지수 회귀방정식은 실제 주입률의 변화에 따라 완만한 곡선 형태로 추적하고 있으나, 곡선의 기울기가 정확하게 일치하지 않고 있음을 알 수 있다.

황지정수장에 시범적용되는 응집제 자동주입 알고리즘은 다항식회귀방정식에 의한 시뮬레이션 결과를 토대로 실제 주입률의 변화에 매우 민감하게 대응하고 있으나, 이동평균선의 기울기가 실제 주입률과 비교적 일치하고 있는 선형회귀방정식으로 선정하였다.

### 3.2.2 통계방정식의 적용결과

실제 적용된 응집제 자동주입시스템에서 원수 수질에 의한 자동운전을 실시한 결과 원수 수질인자중 가장 큰 영향인자인 탁도와 응집제주입률을 실시간으로 비교하였으며 하절기 강우로 인한 급격한 수질변화시 응집제주입률의 변화량을 조사한 결과 Fig. 2에서와 같이 수질변화에 연동하여 자동으로 응집제주입률이 결정된 것을 볼 수 있다.

### 3.2.3 SCD에 의한 자동제어

SCD에 의한 자동제어시 최적 응집조건을 만족시키기 위해서는 최적의 setpoint 설정이 가장 중요하다. 이 setpoint는 고정된 값이 아니라 수질조건에 따라 이동하는 목표값이라는 점 때문에 시시각각으로

변화하는 수질조건에 어떻게 대응하느냐가 과제라고 할 수 있다.

따라서 SCD에 영향을 미치는 인자들에 대한 검토 결과 SCD값과 전기전도도는 비례하는 경향이 있으므로 취수원의 수질조건에 따라 전기전도도별 setpoint를 설정하고, 식 (4)와 같이 설정된 setpoint값과 측정된 SC값을 비교하여 Zeta Potential 0일때의 SC값 만큼을 보정하도록 구성하였다.

$$y = y' + (SP - SC) \times \beta \tag{4}$$

- 여기서,  $y$  : 응집제주입률 (ppm)
- $y'$  : 이전 응집제주입률 (ppm)
- SP : Setpoint (mV)
- SC : Stream Current (mV)
- $\beta$  : 보정계수

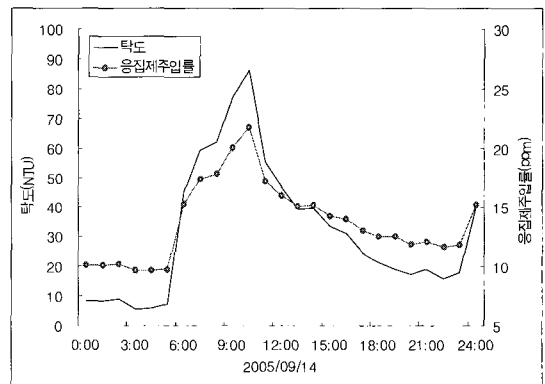


Fig. 2 A Variation of coagulant dosage rate by the quality of water

### 3.3 자동제어 설비의 구성

#### 3.3.1 응집제 주입설비의 구성

응집제 자동주입을 위한 설비의 구성은 한국수자원 공사 황지정수장에 적용되는 설비로써 일평균 35,000 m<sup>3</sup> 정도의 용수를 공급하고 있으며, 응집제의 주입은 PACS 기준으로 최소 6 l/h에서 최대 50 l/h까지 주입하고 있다. 황지정수장은 심야전력을 이용한 비용 절감을 위해 일일 용수생산량이 시간대별 큰 차이를 나타내고 있어 약품주입량 또한 시간대별 편차가 큰 편이므로 설비의 안정성이 확보되고 응집제 주입범위를 폭넓게 조정할 수 있는 튜브펌프 형식으로 응집제 주입설비를 선정하였다.

응집제 주입공정의 구성은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 원수유량과 원수수질 data를 바탕으로 과거수질 data를 활용하여 다항식회귀방정식에 의한 통계처리법을 통하여 응집제주입률을 결정하여 주입하고, 일정 시간 경과 후 SCD에 의한 feed back 제어를 실시하도록 구성하였다.

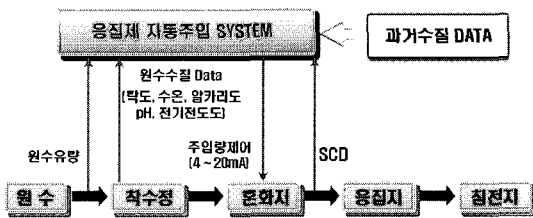


Fig. 3 Block diagram of coagulation dosing process

또한 상부 HMI와의 연계를 위한 네트워크의 구성은 Fig. 4에서와 같이 필드버스 방식의 개방화시스템을 적용하여 하부 PLC에서 상부 HMI까지 통신케이블을 통한 데이터 통신 방식으로 많은 데이터의 실시간 전송이 가능함으로써 비용절감 및 원격지에서의 자동제어가 가능하도록 구성하였다.

#### 3.3.2 자동제어 화면의 구성

응집제 주입의 자동제어를 위한 제어화면의 구성은 수동, 반자동, 자동모드로 구분하여 구성하였으며, 수동 운전모드에서는 응집제주입률 또는 응집제주입량을 운전근무자가 설정하여 운영하도록 구성하였고, 반자동 운전모드 선택시 운전근무자가 다항식회귀방정식에 의한 자동제어와 SCD에 의한 자동제어 중에서 선택하여 운영할 수 있도록 구성하였으며, 자동운전모드 선택시 최초 응집제의 주입은 원수유량과 원수수질 Data를 실시간 계측하여 다항식회귀방정식에 의해 주입률을 결정하고 SC값 검출시점까지 안정화 시간 경과 후 SCD에 의한 feed back 제어를 실시하도록 구성하였다.

또한, 우리나라의 수질은 계절별 수질변화가 심하고 특히 홍수시 급격한 수질변화가 발생하는 점을 감안하여 Fig. 5에서와 같이 저탁도 및 고탁도시에 각각의 운전모드를 구성하여 원수의 수질변화에 따라 모드를 변환하면서 운영하도록 구성하였으며, SCD에 의한 자동제어시 수질조건에 따라 setpoint를 자동결정하도록 구성하였다.

## 5. 결론

응집제의 자동주입 방안과 주입장치의 신뢰도 향상

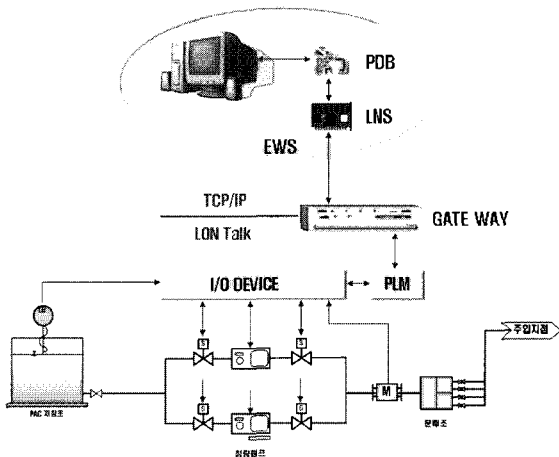


Fig. 4 A Distribution diagram of coagulant dosage facility

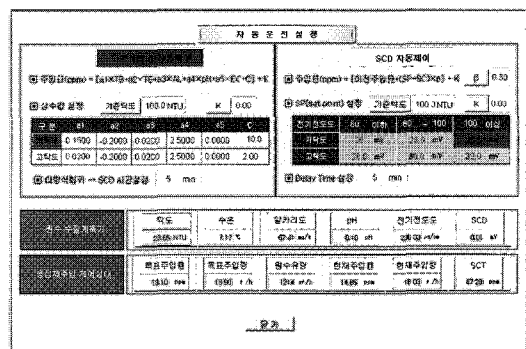


Fig. 5 Setting Screen of Automatic Control

을 위해 한국수자원공사 황지정수장의 수질자료를 바탕으로 시범적용을 위한 자동주입 알고리즘을 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 과거의 수질자료를 활용한 응집제 주입률의 자동결정을 위하여 통계방정식을 이용한 알고리즘 중에서 선형회귀방정식과 지수회귀방정식에 대한 실제주입률과의 시물레이션을 통하여 비교 분석하였으며, 자동주입의 성공을 위해서는 과거 수질자료에 대한 정확한 데이터의 축적과 수질계측기의 신뢰도가 중요함을 알 수 있었다.
- 2) SCD에 의한 응집제 주입률의 자동제어는 현재까지 수질변화가 심할 경우 추적결과가 좋지 않은 문제점 등으로 인하여 실제 적용이 지연되고 있으나, 수질조건에 따라 Setpoint를 자동결정하도록 구성하고 저탁도 및 고탁도시에 각각의 운전모드를 구성하여 원수의 수질변화에 따라 모드를 변환하면서 운영하도록 구성함으로써 자동제어가 가능함을 확인하였다.

### 참고문헌

- (1) 김용열, 2004, “지능알고리즘을 이용한 정수처리공정의 응집제주입률 결정,” 충남대 박사학위논문, pp. 14~28.
- (2) M. A. Mohammad, K. D. Steven, 1998, “Automatic Control of Polymer Dose using the Streaming Current Detector”, Water Environment Research, Vol. 70, pp. 1005~1018.
- (3) 오석영, 1995, “전용 약품투입기 개발 연구(1차년도),” 한국수자원공사, pp. 4~61.
- (4) 김홍석, 김수현, 1993, “Jar-Test를 이용한 응집제 주입률 결정에 관한 실험연구,” 대한상하수도학회, pp. 39~46.
- (5) S. Kawamura, 1997, “Integrated Design of Water Treatment Facilities,” John Wiley-Sons, INC, pp. 64~70, 316~348.
- (6) 한국수도협회, 1997, 상수도시설기준.
- (7) 채선하, 2001, “SCD에 의한 혼화공정의 모니터링 및 자동제어,” 상하수도학회지, Vol. 15, No. 6, pp. 542~550.
- (8) 수자원교육원, 2004, “정수처리설비과정,” 수자원교육원, pp. 105~123.
- (1) 김용열, 2004, “지능알고리즘을 이용한 정수처