

제어로직 프로그램 개발을 통한 소독공정 자동운전에 관한 연구

박종덕¹, 신강욱², 홍성택², 이창구^{3*}

¹K-water, ²K-water 연구원, ³전북대학교 전자공학부

A Study of Disinfection Process Automation through Control Logic Program Development

Jong-Duk Park¹, Gang-Wook Shin², Sung-Taek Hong²
and Chang-Goo Lee^{3*}

¹K-water, ²K-water Institute, ³Chonbuk National University

요 약 본 연구는 수처리 주요공정의 소독공정에 대한 자동운전 구축현황과 목표주입율 결정시 체류시간동안 염소 소모량을 분석하고 활용하기 위한 기술을 연구하고 제시하는데 있다. 본 연구를 위하여 자동운전을 위한 시설물 구조 및 하부설비 설치현황을 조사하였으며, 현 시스템의 문제점을 분석하고 해결을 위한 자동운전 프로그램을 개발하여 적용하였으며 이에 따른 효과도 분석 제시하였다. 특히 시지연공정 및 다변수 공정제어에 적합한 모델예측제어 알고리즘을 적용하여 환경인자와 반응시간 등의 상관관계를 분석하고 최적 제어 입력값을 추론할 수 있도록 함으로써 안정적인 공정제어가 가능함을 모델평가를 통하여 확인하였다.

Abstract This study proposes the automation of disinfection process in water treat plant to reach target effluent chlorine concentration rate according to chlorine consumption rate by varying travel time. Hydraulic analysis about the process and local facility was surveyed first and the program for automatic operation was developed to solve current problem, whose applied result was presented and proved to be better than present controller. Especially using multi variable process algorithm, the correlation coefficient is analyzed between environment factor and reaction time, and process control prove to be stable through model estimation with optimal control input.

Key Words : Disinfection Process, Control Logic Program, SCADA

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 배경

정수처리공정은 수도시설의 중추시설이며, 그 정수처리방법과 운영관리는 수도시스템 전반에 직접적으로 영향을 미친다. 정수시설의 기능은 정수처리로 소요수질의 물을 필요량만큼 안정적으로 얻는 것이 기본이며, 종래보다도 한층 높은 수준의 기능을 갖추도록 정수처리방법, 운영관리에 대하여도 충분히 조사하고 계획되어야 한다 [1,2].

정수처리방법에는 약품, 소독, 여과, 고도처리방식 또는 기타 처리방식을 추가하는 방식이 있으며, 이와 같은 처리방법을 선정하는 것은 어떠한 원수수질에 대해서도 정수수질의 관리목표를 만족시킬 수 있는 적절한 정수처리방법이어야 함은 물론이고 정수시설의 규모나 운전제어 및 유지관리기술의 수준 등을 고려하여 선정하는 것이 바람직하다.

이와 같은 요구에 부응하기 위해서는 체계적이고 과학적인 연구를 통하여 정수처리공정을 효율적으로 운영할 수 있는 수처리 단위공정 자동운전 프로그램 개발이 선

*교신저자 : 이창구(changgoo@jbnu.ac.kr)

접수일 11년 06월 17일 수정일 (1차 11년 07월 20일, 2차 11년 08월 02일, 3차 11년 08월 04일) 게재확정일 11년 08월 11일

행되어야 한다.

본 연구는 소독공정에 대한 자동운전 구축현황과 목표 주입을 결정시 체류시간 동안 염소소모량을 분석하고 활용하기 위한 기술을 연구하고 제시하는데 있다.

1.2 연구의 내용 및 구성

본 연구는 한국수자원공사 수도사업장중 청주정수장에 대한 수처리 주요공정인 소독공정을 대상으로 한국수자원공사(K-water) 자체 HMI 브랜드인 표준수운영시스템(iWater) 기반의 범용 프로그래밍 언어를 사용하여 정수장에 공통적으로 적용할 수 있는 공통 어플리케이션 모듈형태로 개발하여 적용 분석하였다.

첫째, 정수처리 개요 및 소독공정에 대한 일반적인 특성 및 시설에 대한 전반적인 이해와 구성요소에 대하여 조사하였다.

둘째, 최적 소독공정 제어알고리즘 개발을 위한 모델 분석, 제어로직 프로그램 시스템구성도, 개발프로그램 및 인터페이스방안에 대해서 조사하였고, 또한 주요 개발공정인 소독공정에 대한 알고리즘 구성요소 및 주요특징에 대해 조사하였다.

셋째, 수질 및 수량 등 환경인자와 반응시간 등의 상관관계를 분석하여 소독공정 자동운전 프로그램을 개발하고 현장에 적용하였으며 적용한 프로그램의 활용 결과를 검증하였다.

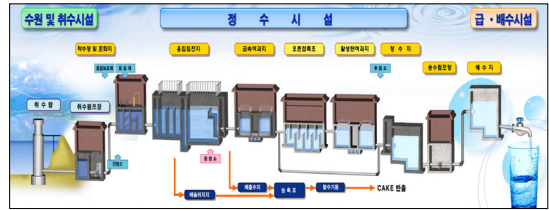
2. 정수처리 공정

2.1 정수처리 개요

2.1.1 개념

광역상수도는 취수장, 정수장, 가압장 및 수운영시설로 구성되어 있으며, 용수생산 공급과정은 취수에서 부터 정수처리 및 가압송수까지 유기적으로 연계되어 운영되고 있다. 용수생산시설은 단위 사업장 단위로 시스템이 구성되어 있으며, 의사결정 지원을 위한 통합운영시스템이 도입되어 있는 상태이다[3.4]. 일반적인 정수처리 공정은 그림 1에서와 같이 취수장에서부터 정수장으로 공급되는 원수는 착수정, 혼화지, 침전지, 여과지를 거쳐 음용수가 생산되며 이를 정수지와 배수지를 통하여 각 가정으로 공급되고 있다.

본 절에서는 정수생산 과정에 필요한 공정별 특성, 염소 일반사항, 그리고 염소처리에 필요한 공정별 특성에 대하여 살펴보고자 한다.



[그림 1] 정수처리공정 개념도
[Fig. 1] Basic water treatment process

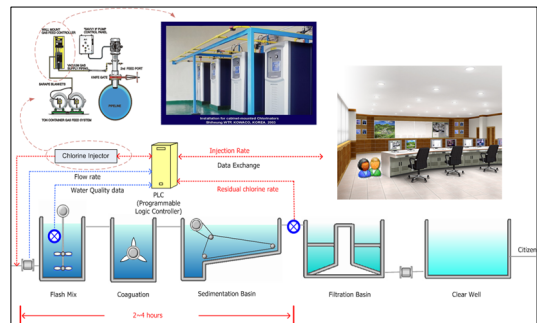
2.1.2 염소(소독)처리 공정이론

전염소는 암모니아성 질소, 철, 망간, 조류(미생물), 기타 오염을 제거하기 위해 착수정(着水井)에서 전염소를 주입하여 소독 및 침전 효과의 증대를 꾀하는 데 이때 전염소의 주입율은 물에 포함된 여러 가지 물질에 따라 변동한다. 즉, 취수량, 원수의 수온, 수질, 계절(일조량, 날씨), 분말 활성탄 주입 처리의 유무, 조류발생의 유무 등의 영향인자를 종합적으로 조작원이 판단해서 수동설정하거나 주입율 설정 값 변경 Table에 따라 변경하는 경우가 대부분이다.

후염소는 정수처리가 완료된 물에 이차 오염원으로부터 오염되는 것을 방지하기 위하여 일정량의 잔류염소농도를 유지하기 위하여 여과지 후단에 주입하고 있다. 재염소는 상시 잔류염소량이 부족한 기간에 이를 보완하기 위하여 추가 염소를 주입하는 것을 말한다.

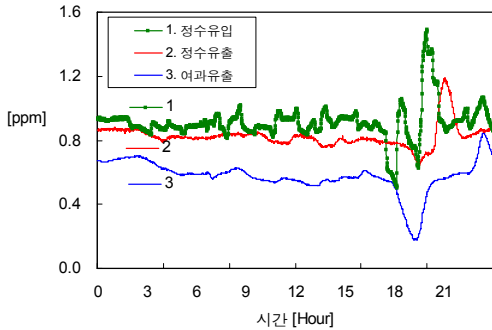
특히 후염소는 재염소를 투입하지 않는 경우에는 직접 시민들이 마시는 물이므로 과소 주입에 따른 바이러스의 재성장을 막을 수 없거나 과대 주입으로 인한 맛, 냄새 등을 야기할 수 있어 매우 중요한 공정이다[5-7].

전염소와 후염소는 실시간으로 변화하는 외부환경과 돌발적인 날씨변동에 따라 예측 제어하기에는 대단히 어렵다. 또한, 수동설정의 경우에도 숙련된 조작원이 하루 24시간 항상 설정 값을 조절해야 하며 2~7시간의 체류시간을 관찰하여 제어하기에는 매우 어려움이 있다.



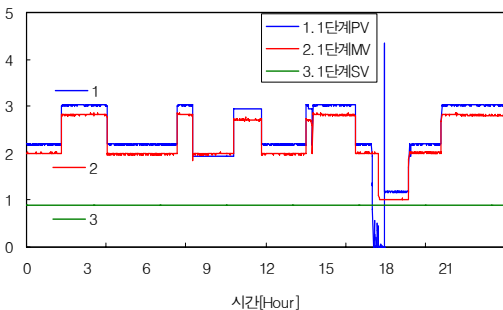
[그림 2] 염소투입 공정 개념도
[Fig. 2] Basic chlorination process

지연을 10~20분으로 설정하고, 정수유입 지점과 유출 지점간의 확산시간을 약 1~3시간으로 고려하고 있다. 이러한 조건에서, 그림 5에서 확인하는 바와 같이 정수유입 잔류염소의 변동 폭이 큰 결과를 보이고 있고, 정수유출 잔류염소의 경우 0.64 ~0.93 ppm의 넓은 범위를 보이고 있다.



[그림 5] 정수유입 및 유출 잔류염소 변화량
[Fig. 5] Residual chlorine variations

그림 6에서 나타난 그래프의 결과는 유량, 설정 값, 조작 값, 그리고 출력값과의 응답특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 염소주입량의 설정 값(MV)은 염소 주입율(SV)와 유량의 변화에 따라 기준 값이 추종되고 있음을 알 수 있다. 그러나 유량 투입량의 설정 값(MV)을 제어하는 염소투입기의 조작 값과 실제 주입된 염소 주입량간에는 지속적인 편차가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이는 염소투입기의 제어모듈에서 정확한 제어성능을 발휘하지 못하거나 시량계와 밸브 등의 액츄에이터의 성능에 따른 영향이라 할 수 있다.



[그림 6] 목표주입량과 실제주입량 비교
[Fig. 6] Comparison of chlorination process

3. 최적 소독공정 제어알고리즘 개발

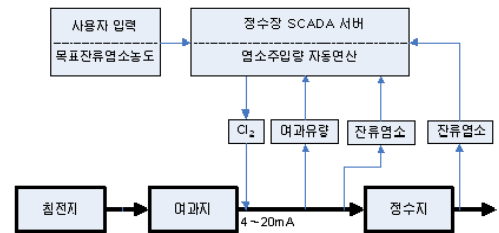
3.1 염소주입 자동제어모델

일반적으로 적절한 염소주입제어방식을 선정하기 위해서는 수량, 수질변화 등을 고려하여 제어하고 있으며, 본 연구에서는 후염소 자동제어모델에 대해서 설명한다.

후염소주입을 자동결정은 후염소 주입 후단에 설치된 정수유입, 정수유출 잔류염소 측정지점의 목표농도를 설정하여 정수유입 목표농도와 측정농도의 차이값을 보정값 A로 계산하고, 정수유출지점의 목표농도와 측정농도의 차이값을 보정값 B로 계산하여 정수유입목표 농도를 재설정하여 후염소 주입율을 결정함으로써 정수지유입, 유출지점 잔류염소 농도를 일정하게 유지하기 위한 Feedback 제어를 수행한다[8,9].

$$\begin{aligned} \diamond & \text{ 후염소 주입율} = \text{이전 주입율} + \text{보정값 A} \\ \diamond & \text{ 정수지 유입목표농도} = \text{이전 정수지 유입목표농도} + \text{보정값 B} \end{aligned}$$

보정값 A는 정수지 유입목표농도를 유지하기 위하여 보정주기마다 산출되며 후염소주입율을 결정하는데 사용되고, 보정값 B는 보정주기마다 정수지 유출지점의 오차를 정수지 유입목표농도에 반영함으로써 Feedback 제어를 수행한다[7].



[그림 7] 후염소주입을 자동결정 개요도
[Fig. 7] Configuration for automatic determination of post-chlorination

보정값 A는 정수지유입 목표잔류염소농도를 입력받아 정수지유입 현재잔류염소농도의 차에 보정상수 α 를 곱해서 결정되며, 이 때 정수지유입 현재 잔류염소 측정값은 자동제어의 안정성을 고려하여 일정시간 단위의 이동평균값을 사용한다.

[표 1] 후염소 보정값 A 입력변수

[Table 1] Variables of corrective A

보정값 A = (정수지유입 목표 잔류염소농도-정수지유입 현재 잔류염소농도)×α		
정수지유입 목표 잔류염소농도	ppm	설정값
정수지유입 현재 잔류염소농도	ppm	계측기기 이동평균값
보정상수(α)		설정값
갱신주기(Delay Time)	min	설정값

보정값 B는 정수지유출 목표 잔류염소농도를 입력받아 정수지유출 현재 잔류염소농도의 차에 보정상수 β를 곱해서 결정되며, 이 때 정수지유출 현재 잔류염소 측정값은 자동제어의 안정성을 고려하여 일정시간 단위의 이동평균값을 사용한다.

3.2 제어로직 프로그램 개발

소독공정의 제어로직 프로그램은 운영자의 의사결정 사항을 자동으로 수행하는 iWater 기반의 자동운전 프로그램으로 범용 프로그래밍 언어를 사용하여 전 정수장에 공통적으로 적용할 수 있는 형태로 개발방향을 수립하였으며, 개발된 프로그램은 청주정수장에 시범 적용함으로써 프로그램의 신뢰성과 안정성을 확보하고자 하였다.

개발된 프로그램은 단위정수장 SCADA서버에 설치되

어 iWater와 인터페이스하여 취득된 실시간 및 과거데이터를 사용하여 제어로직 프로그램이 실행된다. SCADA 서버가 이중화되어 있음에 따라 이중화방식에 따라 제어로직이 동작할 수 있도록 구성하였다.

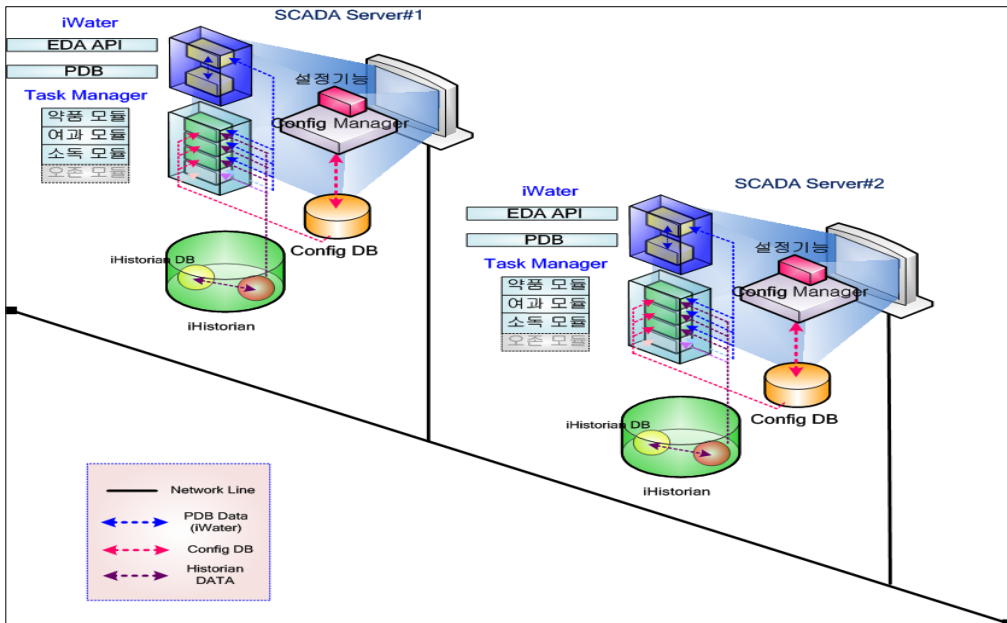
3.2.1 시스템구성방안

정수처리 소독공정의 자동운전에 필요한 소독공정의 제어로직 프로그램을 K-water의 모든 정수장에 공통적으로 적용할 수 있는 모듈단위로 응용프로그램을 개발하여 단위사업장 SCADA서버에 탑재하여 실행되도록 구성하였다.

소독공정의 제어로직 프로그램은 자동제어 실행모듈과 제어모듈의 실행관리, 이중화 설정 및 동작상태의 감시기능을 가지는 Logic Task Manager, 제어모듈 수행에 필요한 태그매핑, 환경변수 설정 및 계정관리 등을 관리하는 Config Manager로 크게 나눌 수 있다.

가. Config Manager

Config Manager에서 소독공정 제어에 필요한 변수 설정값은 모두 태그화하여 PDB에 저장하고, 중요변수의 태그정보, 태그값 등의 설정정보는 ini형태로 자체 DB화하여 저장하고 있다.



[그림 8] 제어로직 시스템 구성도

[Fig. 8] Schematic diagram for control logic system



[그림 9] 소독공정 Config Manager
[Fig. 9] Config manager of disinfection process



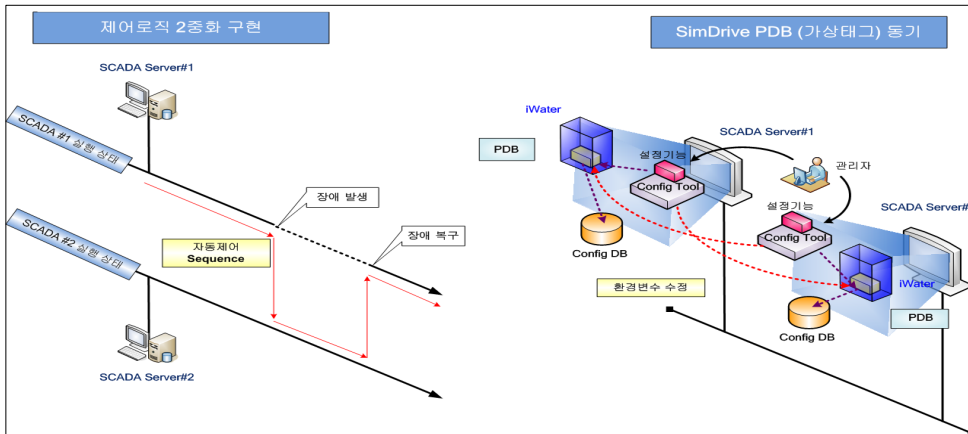
[그림 10] Task Manager 실행화면
[Fig. 10] Task Manager

나. Task Manager

Task Manager는 각 공정별 제어모듈을 실행, 관리하는 프로그램으로 iWater의 SCU(System Configuration Unit) 메뉴에 등록하여 iWater 기동시 자동으로 실행되도록 구성했으며, Config Manager에서 기 설정한 공정별 제어모듈 실행목록 정보를 읽어들이어 Task Manager가 실행될 때 설정한 제어모듈이 같이 실행되도록 한다.

3.2.2 이중화 구성방안

이중화 구현방식은 Config Manager에서 설정한 SCADA 설정정보를 기준으로 Logic Task Manager가 SCADA서버의 Primary, Back-up 정보와 Active, Non-active 동작정보를 읽어들이어 Primary 서버의 iWater가 Active 상태일 경우 제어모듈이 동작하도록 하고, Back-up 서버의 제어모듈은 대기모드로 구동되도록 한



[그림 11] 이중화 구성방안
[Fig. 11] Configuration for redundancy control system

다. Primary 서버의 장애발생으로 Primary 서버의 iWater 상태정보가 Non-active로 판단될 경우 제어모듈을 대기 모드로 전환하고, Backup 서버의 iWater 상태를체크하여 Active일 경우 제어모듈이 Back-up 서버에서 동작되도록 한다.

A로 계산하고, 침전지유출지점의 목표농도와 측정농도의 차이값을 보정값 B로 계산하여 착수정유입 목표농도를 재설정하여 전염소 주입율을 결정함으로써 착수정유입, 침전지유출지점 잔류염소 농도를 일정하게 유지하기 위하여 Feedback 제어를 수행한다[11,12].

4. 개발 프로그램적용 및 결과분석

청수정수장은 전, 후염소를 투입하여 있으며, 전염소 주입율, 후염소 주입율 모두 유입측 목표농도를 설정하여 측정 농도와와의 차이만큼 보정값으로 산출하여 유입측의 염소주입율을 결정하여 투입하고 있고, 유출측 목표농도와 측정농도와와의 차이만큼 보정값으로 유입측 목표농도를 재설정함으로써 피드백 제어를 수행한다.

SCADA서버의 iWater에서 실행중인 전, 후염소 자동 제어모듈에서 계산한 목표주입율을 iWater의 PDB에 1차 Write하고 KADAC-21S가 설치된 Gateway에 OPC통신을 통해 2차 Write한 후 I/O드라이버 통신을 통해 현장제어반(RCS)으로 전, 후염소 목표주입율을 전송한다.

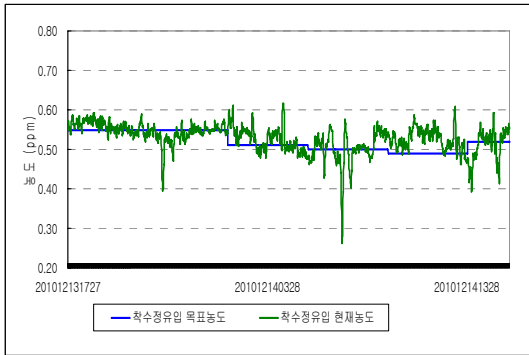
현장제어반(RCS)으로부터 전, 후염소 목표주입율을 전송받아 전, 후염소투입기에서는 투입할 전, 후염소 목표주입량을 계산하여 하부의 펌프 또는 밸브를 통해 전, 후염소 주입량을 조절하고 실제주입량을 측정하여 현장 제어반(RCS)으로 전송한다.

4.1 전염소 자동제어로직

착수정유입 목표농도와 측정농도의 차이값을 보정값

[그림 12] 전염소 자동로직 설정화면
[Fig. 12] Pre-chlorination setting box

전염소의 경우, 착수정유입 목표농도와 착수정유입 현재농도를 비교하여 그 차이만큼을 보정값 A로 피드백받아 전염소 주입율을 결정하여 운전되며, 착수정유입 목표농도는 초기 0.55ppm에서 목표지점인 침전지 후단 목표농도와 현재농도의 차이만큼을 보정값 B로 피드백받아 착수정유입 목표농도가 $0.55(\text{초기}) \Rightarrow 0.51 \Rightarrow 0.49 \Rightarrow 0.52\text{ppm}$ 으로 재설정되어 운영된 결과이다. 착수정 유입 잔류염소 추이를 살펴보면 0.4~0.6ppm 내에서 유지되고 있으며, 급격하게 낮아진 지점은 측정값의 일시적인 현탕 현상으로 추정하고 있다.



[그림 13] 전염소 공정 잔류염소(착수정 유입)
[Fig. 13] Results of pre-chlorination process

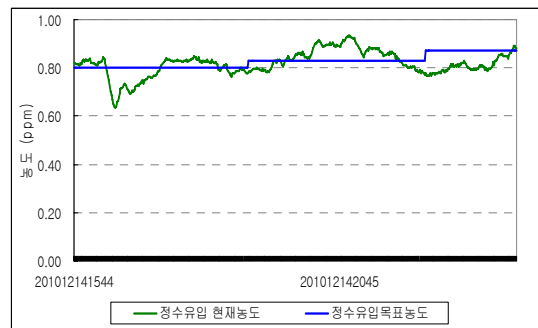
4.2 후염소 자동제어로직

후염소주입을 자동결정은 후염소 주입 후단에 설치된 정수유입, 정수유출 잔류염소 측정지점의 목표농도를 설정하여 정수유입 목표농도와 측정농도의 차이값을 보정값 A로 계산하고, 정수유출지점의 목표농도와 측정농도의 차이값을 보정값 B로 계산하여 정수유입 목표농도를 재설정하여 후염소 주입율을 결정함으로써 정수유입, 정수유출지점 잔류염소 농도를 일정하게 유지하기 위하여 Feedback 제어를 수행한다.

후염소 자동제어 모듈로 운전하는 경우에는 정수유입 목표농도와 정수유입 현재농도를 비교하여 그 차이만큼을 보정값 A로 피드백받아 후염소 주입율을 결정하여 운전되며, 정수유입 목표농도는 초기 0.8ppm에서 목표지점인 정수유출 목표농도와 현재농도의 차이만큼을 보정값 B로 피드백받아 정수유입 목표농도가 $0.8(\text{초기}) \Rightarrow 0.83 \Rightarrow 0.87\text{ppm}$ 으로 재설정되어 운영된 결과이다.



[그림 14] 후염소 자동제어로직 설정화면
[Fig. 14] Post-chlorination setting box



[그림 15] 후염소 공정 잔류염소(정수장 유입)
[Fig. 15] Results of Post-chlorination process

5. 결 론

본 연구는 수처리 주요공정의 소독공정 자동운전에 있어, 목표주입을 결정시 침전수 유출 잔류염소를 이용함으

로서 여과지 체류시간동안 염소소모량 측정불가로 부정확한 주입을 산출로 인하여 운전자가 수동으로 주입율을 결정함으로써 원격자동운전 기회를 저해시키고 있는 실정이다.

이에 정수처리공정을 효율적으로 운영할 수 있도록 최적 소독공정 제어로직 프로그램을 개발하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 제조사별 제어로직 프로그램이 현장 감시제어설비 (DCS, PLC)에 탑재되어 있으며 정수장 환경에 따라 개별적으로 구성되어 사용언어 또한 상이함으로 제작사에 종속되는 경향이 있었으나, 하드웨어와 독립적으로 운영할 수 있도록 제어로직 탑재위치를 SCADA서버로 일원화함으로써 제어로직 S/W를 표준화하였다.
- (2) 원격자동운전을 저해하는 구조물 조사와 설비현황 및 특성조사를 통하여 여과유출 잔류염소계 및 정수지유출 잔류염소계를 추가 설치하고 제어인자로 활용함으로써 후염소 목표주입율의 정확성을 기할 수 있었다.
- (3) 선정된 최적 입력 파라메타를 이용하여 공정별 시간지연 인자를 도출하고 적용함으로써 환경인자와 반응시간 등의 상관관계를 분석하고 최적 제어 입력값을 추론할 수 있도록 함으로써 안정적인 공정 제어가 가능함을 모델평가를 통하여 확인하였다.
- (4) 향후, 본 연구에서 적용한 실시간 잔류염소 추이분석을 통한 최적 소독공정 제어로직 프로그램은 사업장 환경특성을 고려하여 반영할 수 있도록 확장성, 유연성을 고려하여 기능개선 및 고도화가 필요하다고 판단된다.

References

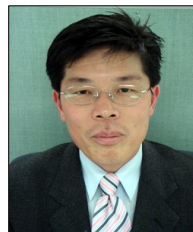
- [1] K-water, seoul metropolitan integrated operation system final report, 2006.
- [2] Korea water and wastewater works association, Water facilities standard, pp. 265-266, 2004
- [3] Korea water and wastewater works association, Water facilities standard(maintenance), 2004
- [4] Shin, G.W, Lee, K.H, "The development of a optimal control method in disinfection process using real time residual chlorine trend analysis", K-water, pp3-6, 2007
- [5] Lee, A.K "The Optimal Communication Method for

Efficiency Improvement of an Integrated Operation System", Journal of The Institute of Webcasting, Internet Television and Telecommunication pp.187-193, 2009.

- [6] V.K.Chambers, J.D. Creasey, J.S. Joy, Modeling free and total chlorine decay in potable water distribution systems, Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua 44(2)(1995) 60-69
- [7] K-water, chung-cheong integrated operation system final report, 2006.
- [8] Control and measurement works(2) : instrumentation design and construction, Technology book research group, 1997
- [9] Heo, K.Y, Solution book for a instrumentation. : water and wastewater instrumentation technology solution, Dong-Hwa tech, 1991
- [10] F. Hua, J.R. West, R.A. Barker, C.F. Forster, Modeling of chlorine decay in municipal water supplies, Water Research 33(12)(1999) 2735-2746
- [11] L. Kiene, W. Lu, Y. Levi, Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water distribution systems, Water Science and Technology 38(6)(1998)219-227
- [12] Lee, A.K, Yang, J.A, Kim, N "The study on the direction of the control logic improvement for an advancement integrated operation system", The Institute of Webcasting, Internet Television and Telecommunication conference, 2010.

박 종 덕(Jong-Duk Park)

[정회원]



- 1994년 2월 : 조선대학교 전자공학과 (공학사)
- 2011년 8월 : 전북대학교 정보기술학 제어계측공학 (공학석사)
- 1994년 4월 ~ 현재 : 한국수자원공사 재직중

<관심분야>

제어계측 기술, 상수도설비 및 데이터베이스

신 강 욱(Gang-Wook Shin)

[정회원]



- 1993년 4월 ~ 현재 : 한국수자원공사 재직중

<관심분야>

플랜트제어 및 응용, 모델링, 지능 및 원격감시제어, 센서응용

홍 성 택(Sung-Taek Hong)

[정회원]



- 1996년 2월 ~ 현재 : 한국수자원공사 재직중

<관심분야>

전자회로설계, 위성통신망, 원격감시제어, 센서응용

이 창 구(Chang-Goo Lee)

[정회원]



- 1983년 2월 : 전북대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1983년 ~ 1991년 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 1991년 2월 : 전북대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1992년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 전자공학부 교수

<관심분야>

현대제어, 퍼지제어, 지능형시스템, 홈 제어시스템