

정수장 잔류염소 일정제어를 위한 지능형 제어기 개발

Intelligent Controller for Constant Control of Residual Chlorine in Water Treatment Process

이호현* · 장상복* · 홍성택** · 전명근*

Ho-Hyun Lee, Sang-Bok Jang, Sung-Taek Hong and Myung-Geun Chun[†]

*충북대학교 제어로봇공학과, **K-water 연구원

[†] Department of Control and Robot Engineering, Chungbuk National University

요 약

본 논문에서는 발암물질 저감을 위하여 정수장 염소투입공정 중 전염소 주입에 따른 침전지의 염소 증발량이 주야간, 계절별 현격한 차이가 발생함에 따라 시간대별/계절별/날씨별 유입목표 잔류염소를 변경하고자 운영자의 경험에 기반한 퍼지 모델링 기법을 도입하였다. 퍼지에 의해 설정된 목표 잔류염소농도를 유지하기 위하여 침전지 유입부에 잔류염소 계측기를 추가 설치하여 피드백 Loop 시간을 최소화하였고 지연시간이 긴 시스템에 적용되는 이중 피드백 제어시스템인 캐스케이드 제어를 병행 실시하였다. 이를 통해 소독공정의 고유특성인 시간지연에 대한 선제적 대응 및 침전지 잔류염소농도 변화폭을 7.3배가량 안정화를 시키고 염소소모량을 저감하여 안정적인 물 공급이 가능하도록 하였다.

키워드 : 퍼지시스템, 지능제어, 정수장, 잔류염소, 증발량

Abstract

In this study, chlorine modeling technique based on fuzzy system is proposed to reduce the carcinogenic substance and decide the optimal chlorine injection rate, which is affected by chlorine evaporation rate in sedimentation basin according to detention time, weather and water quality. The additional chlorine meter is installed in the inlet part of sedimentation to reduce the feedback time and implement cascade control, which leads to maintaining the residual chlorine concentration decided by fuzzy rule. It helps to take a preemptive action about long time delay, the characteristics of the disinfection process, and reduce the variation of residual chlorine rate by 7.3 times and the chlorine consumption by 40,000 dollars. It made a significant contribution to supply hygienically safe drinking water.

Key Words : Fuzzy System, Intelligent Control, Water Treatment Plant, Residual Chlorine, Evaporation

1. 서 론

수돗물은 병원생물에 오염되지 않고 위생적으로 안전하여야 한다. 일반적인 정수처리방법인 침전, 여과방법으로는 수중의 세균을 완전히 제거하기가 불가능하고 또한 배수계통에서 위생상의 안전을 유지하기 위하여 수돗물은 항상 확실하게 소독되어야 한다. 따라서, 정수 시설에서는 정수방법의 종류나 시설규모의 대소에 불구

하고 소독설비를 설치하여야 하며, 소독방법으로는 염소, 클로라민, 이산화염소, 오존 등에 의한 것이 있으나 수도법에 규정하는 급수전수에서의 잔류염소조건을 만족시키기 위해 통상적으로 저렴한 염소를 사용하고 있다[1].

그림 1에서는 일반적인 정수처리 공정이며 전염소는 약품투입동에서 주입되어 혼화/응집/침전과정을 거쳐 침전지 후단 및 여과지에서 계측된다. 국내 일반시민들이 마시는 물은 WTO가 권고하는 5 NTU나 국내기준 2 NTU 보다 훨씬 좋은 0.1 NTU(수자원공사 자체기준)이하로 공급되고 있어 탁도 측면에서는 매우 안정적으로 공급되고 있다.

하지만 잔류염소는 virus를 비롯한 미생물의 체성장 및 불활성화를 방지하기 위하여 일정하게 유지하여야 하나 수질 및 기상여건에 영향을 받아 제어하는데 어려움이 많고 민원도 빈번하게 발생하고 있다[2]. 염소 과다투입은 수중의 유기물과 반응하여 196종의 소독부산물을 발생한다는 것으로 알려져 있으며, 소독과정에 발생하는 소독 부산물 중 일부는 인체에 잠재적 위험성을 갖고 있으며, 그 중 부산물의 약 50% 이상을 차지하는

접수일자: 2013년 9월 1일

심사(수정)일자: 2013년 10월 12일

게재확정일자: 2014년 4월 9일

[†] Corresponding author

본 논문은 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업(GT-11-G-02-001-6)”에서 지원하여 연구하였음.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

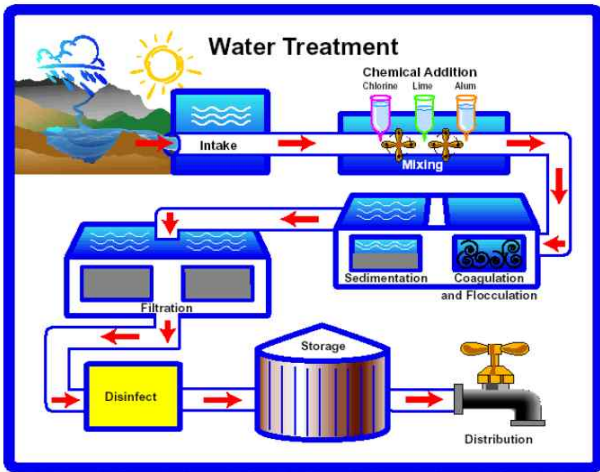


그림 1. 일반적인 정수처리과정
Fig. 1. General water treatment process

HAA(할로초산), THM(트리할로메탄)은 발암성과 관련이 있는 것으로 동물실험결과 밝혀졌다. 또한 과소주입의 경우 미생물, 바이러스의 재성장을 초래하여 배양이 등 위험에 노출될 수 있으며 적절한 소독레벨로 유지하는 것은 정수처리과정에서 무엇보다 중요하다 하겠다 [3]. 전염소는 취수량, 원수의 수온, 수질, 계절(일조량, 날씨), 분말 활성탄 주입 처리의 유무, 조류발생의 유무 등의 영향인자를 종합적으로 운영자가 판단하여 대부분 수동주입하고 있다[4].

2. 전염소 공정 제어 알고리즘

본 논문에서는 최적 전염소 주입률 결정을 위해 침전지 출구 잔류염소를 일정하게 유지하기 위하여 지식기반의 Fuzzy 시스템과 2 Loop PID Controller를 병행하여 제어하는 Hybrid Fuzzy Controller를 검토하였다. 또한 과거자료 중 기상요인, 수질요인을 고려하여 침전지 잔류염소 증발량을 예측하기 위하여 Neuro Fuzzy 알고리즘을 검토하였다.

2.1 전염소 공정제어의 문제점

2.1.1 Plant Modeling 어려움

전염소 주입률(Input)을 인가하고 변수(온도, 습도, 수온 등)에 따라 침전지 잔류염소(Output) 변화를 물리적으로 이해하고 Modelling한 기존수식이 존재하지 않으며 지속적인 수질변화 및 기상조건 변화에 따라 이를 모델링하기에 매우 어려움이 있다[5-6].

2.1.2 침전지 체류시간

정수장에 유입된 물은 침전지에서 약 3~7시간 체류한 후 확인할 수 있으며 이를 토대로 Feedback 제어가 불가하며 임의적인 판단에 의해 높거나 낮았을 때 더욱 진폭이 심한 출력결과를 얻을 수 있다.

2.1.3 기상 및 수질인자의 영향

염소는 원수에 포함된 암모니아성 질소, 철, 망간 등의 수질요소에 의한 소모분과 대기에 노출된 침전지의

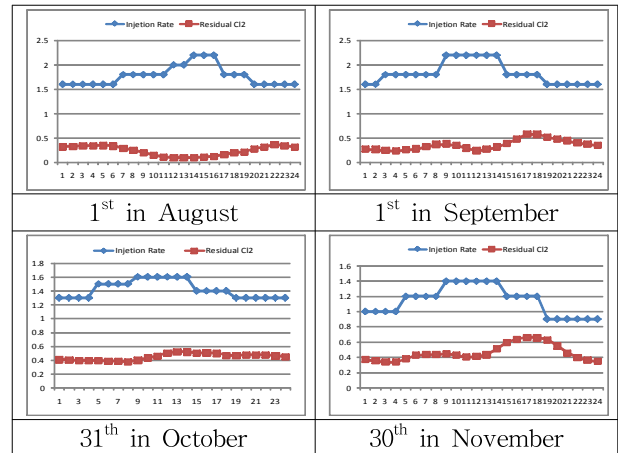
일사량에 따라 증발되므로 이러한 조건들을 경험 및 지식기반 하에 잔류염소제어를 지속적으로 제어해 주어야 한다.

2.1.4 Human Error

적정 잔류염소 값을 확보하지 못했을 때 근무자의 숙련도 여부에 따라 상황이 나아지거나 더욱 악화될 수 있고 24시간 지속 감시하는 것이 사실상 불가하다. 또한 근무자별 운영 Knowhow가 달라 일관된 제어를 실시하지 못하고 있다.

표 1에서는 월별 염소주입률과 시간별 침전지 잔류염소를 표현하고 있다. 염소주입률 제어는 하루 5, 6회 변경하였고 여름철인 8~9월의 경우 염소주입률(파란색 선)을 주간시간대에 더 높이 주입하였음에도 불구하고 침전지 잔류염소(갈색선)가 감소함을 확인할 수 있다. 날씨가 서서히 추워지는 10, 11월에는 주간시간대에 주입률을 높이면 3~7시간 후에 서서히 잔류염소가 증가하는 특성을 보이고 있다. 이러한 수질 및 기상여건에 따라 달라지는 잔류염소 패턴으로 인하여 제어하는데 어려움이 있다.

표 1. 월별 염소주입률과 침전지 잔류염소
Table 1. Monthly chlorine injection and residual chlorine



2.2 전염소 공정제어 알고리즘

2.2.1 데이터 분석

위와 같은 문제를 극복하고자 정수장의 과거 자료를 분석하고 운영형태를 모사하고자 시간대별 증발률을 계산하기 위하여 정수장에 유입되는 양과 침전지 체적 양과의 관계를 분석하였다.

수식 (1)에서는 침전지 체적유량과 시간대별 누적유량 값을 음의 부호가 나올 때까지 계산하여 시 정보 n을 취득하였고 분 단위 정보($f(x_i)$)를 계산하였다.

$$f(x_t) = \frac{V - \sum_{i=0}^n x_{t-i}}{x_{t-i}} \quad (1)$$

V =침전지체적유량, x_t = 시간누적유량, $i=0 \sim n$ until $f(x_t) < 0$

수식 (2)에서는 시 정보와 분 정보를 더해 체류시간 H를 구하였다.

$$H = n + 1 - f(x_t) \quad (2)$$

현재 유입잔류염소(InCL_t)는 계산된 체류시간 H 후의 값이 최종 유출잔류염소(OutCL_t)가 되므로 수식 (3)과 같이 계산하였다.

$$OutCL_t = OutCL_n \times (1 - f(x_t)) + OutCL_{n+1} \times f(x_t) \quad (3)$$

이를 통해 유입과 유출 잔류염소의 비를 침전지 증발률로 계산하였고 이에 영향을 주는 인자를 조사하기 위하여 상관관계 및 주성분 분석을 실시하였다.

상관분석(Correlation Analysis)은 확률론과 통계학에서 두 변수 간에 어떤 선형적 관계를 갖고 있는지를 분석하는 방법이다. 두 변수는 서로 독립적인 관계로부터 서로 상관된 관계일 수 있으며 이때 두 변수간의 관계의 강도를 상관관계라 한다[7]. 일반적으로 많이 사용되는 Pearson 상관관계식을 수식 (4)에 표현하였으며 변수 x, y간 관계정도(r)를 -1 ~ 1사이의 값으로 표현해 준다.

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

독립변수와 종속변수의 상관관계 및 독립변수 상호간 분석을 위하여 통계프로그램으로 널리 사용되고 있는 Minitap을 이용하였다. 그림 2의 분석결과를 보면 종속변수인 증발량을 예측하는데 시간이 0.760으로 가장 영향을 많이 주고 습도는 -0.427로 두 번째로 영향을 주고 있으며 증발량에 반비례함을 보여주고 있다.

상관: 시간, 현재기온, 습도, 풍속, 증발량	시간	현재기온	습도	풍속	증발량
현재기온	0.307	0.000			
습도	-0.248	-0.155	0.000		
풍속	0.191	0.388	-0.183	0.000	
증발량	0.760	0.210	-0.427	0.156	0.000

그림 2. 상관관계 분석결과
Fig. 2. Correlation analysis of variables

통계학에서 주성분 분석은, 혹은 PCA(Principal component analysis)는 데이터 집합을 분석하는 기법 가운데 하나이다. 주성분 분석은 데이터를 한 개의 축으로 사상시켰을 때 그 분산이 가장 커지는 축이 첫 번째 좌표축으로 오고, 두 번째로 커지는 축이 두 번째...와 같은 방법으로 차례로 놓이도록 새로운 좌표계로 데이터를 선형 변환한다[8]. 그림 3에서는 주성분 분석 결과를 보여주고 있으며 주성분 분석에서도 시간의 고유값이 1.7469로 가장 크고 비율이 43.7%으로 가장 높아 가장 영향을 인자임을 확인할 수 있었다.

변수	PC1	PC2	PC3	PC4
시간	0.499	0.325	0.711	-0.375
현재기온	0.560	-0.399	0.163	0.708
습도	-0.410	-0.727	0.512	-0.204
풍속	0.519	-0.455	-0.454	-0.563

그림 3. 주성분 분석결과
Fig. 3. PCA analysis of variables

2.2.2 Fuzzy 제어기

퍼지이론은 애매하고 불분명한 상황에서 여러 문제들을 두뇌가 판단 결정하는 과정에 대하여 수학적으로 접근하기 위하여 1965년 미국 버클리대학교의 L. A.자데(Zadeh) 교수에 의해 도입된 퍼지집합의 사고방식을 기초로 하고 있다.

퍼지집합의 개념은 각 대상이 어떤 모임에 속한다 또는 속하지 않는다는 이진법 논리로부터, 각 대상이 그 모임에 속하는 정도를 소속함수(membership function)로 나타냄으로써 수학적으로 표현할 수 있다. 그림 4는 일반적인 퍼지로직 구성도이며 내부적으로 퍼지화기(fuzzifier), 규칙 베이스(rule base), 퍼지 추론기(fuzzy inference engine), 비퍼지화기(defuzzifier)로 구성되어 있다.

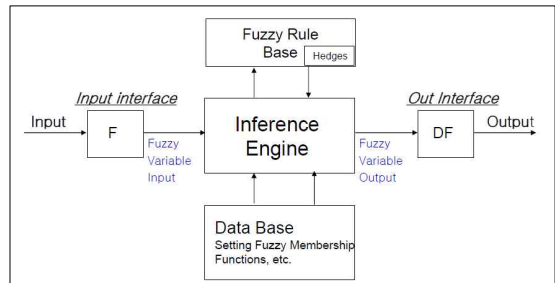


그림 4. 퍼지로직 구성도
Fig. 4. A membership function for input & output

1) 소속함수

퍼지 제어기에서 입출력변수는 언어적인 값으로 표현된다. 언어적인 값은 퍼지 부분 집합으로 정의되며, 소속함수로 나타내어진다. 전염소 투입공정의 경우 상관관계 분석결과를 토대로 입력 변수로 시간 및 습도 인자를 고려하였고 출력을 유입목표 잔류염소값으로 설정하였다. 시간은 햇빛의 밝기를 토대로 하루를 12시를 최대로 하고 12시까지 점점 값이 오르고 이후에 점점 값이 내리도록 설정하였다. 또 다른 입력변수인 습도는 0~100%, 출력변수인 유입목표잔류염소는 0~4ppm를 설정 하도록 하였다. 이를 그림 5와 같이 4개의 퍼지 부분집합으로 구분하였다.

VL : Very Low, ML : Mid Low,
MH : Mid High, VH : Very High

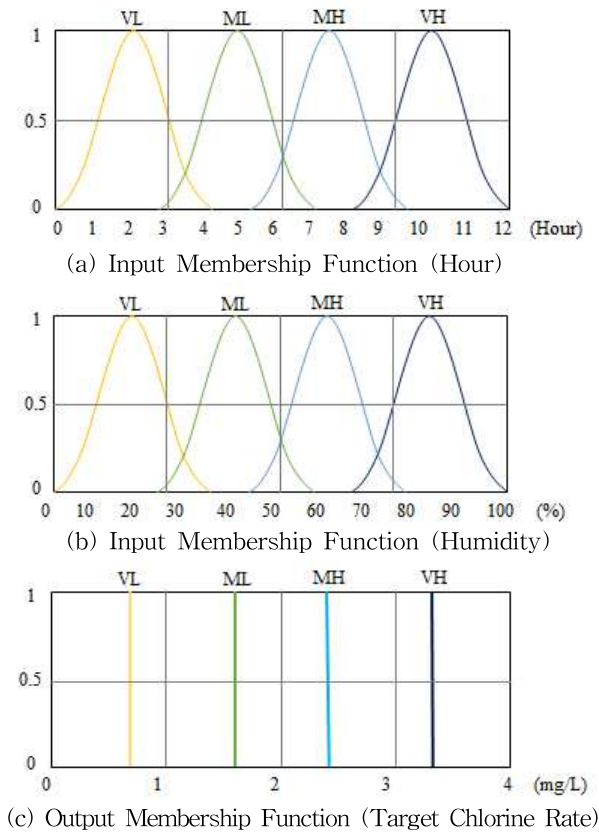


그림 5. 입출력 변수에 대한 소속함수 정의
Fig. 5. A membership function for input & output

2) 퍼지 제어규칙 및 추론

퍼지 제어기의 제어규칙은 전문가의 지식이나 경험에 의하여 얻어진다. 퍼지 제어 규칙은 충분한 실험을 통하여 제어 대상의 특성을 파악하여 작성되어야 한다. 제어 규칙들과 사실들을 지식 기반에서 IF-THEN' 형식의 언어적인 규칙들로 구성되어 있다. 일반적인 형태는 다음과 같다.

규칙 IF x is A and y is B THEN z is C

여기서 x, y, z는 언어적 변수이고 A, B, C는 언어적 값이다. 표 2의 잔류염소 제어를 위한 목표 값 설정 제어규칙은 다음의 기준으로 작성 하였다.

- 아침시간이고 습도가 높지 않은 맑은 날씨에는 유입 목표잔류염소를 높여서 운전하고 흐리거나 비가 오는 경우에는 잔류염소 농도를 약간 낮추어 운전한다.
- 점심시간으로 갈수록 염소 증발량이 증가하므로 유입 목표 잔류염소를 높게 운전하여야 하며 날씨가 나쁘면 목표농도를 약간 낮춘다.
- 오후시간에는 침전지 체류시간을 고려하여 잔류염소를 서서히 낮추어서 운전하여야 한다.
- 저녁과 새벽시간에는 날씨에 상관없이 가장 적은 유입잔류염소로 운전하여야 하며 체류시간을 고려하여 해가 오르기 3~4시간 전부터 서서히 유입 잔류염소를 높여서 운전하여야 한다.

표 2. 전염소공정제어를 위한 제어규칙

Table 2. Control rule for pre-chlorination process

Hour \ Humidity	VL	ML	NH	VH
VL	ML	MH	VH	VH
ML	ML	MH	MH	VH
NH	VL	ML	MH	NH
VH	VL	VL	NL	NH

3) 비퍼지화기

퍼지 추론한 결과를 시스템에 입력하기 위해서는 물리적인 양으로 변환해야 한다. 본 논문에서는 비퍼지화 방법으로 식 (5)와 같이 무게 중심법을 사용하였다. 이 방법은 가장 일반적으로 사용되며 중첩되어 있는 면적이 있을 경우에 중첩되는 부분을 고려하여 다음과 같이 계산한다[9].

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{5}$$

w_i : 가중치, y_i = 개별규칙의 결과 값

2.2.3 Neuro Fuzzy Algorithm

침전지에서 체류시간은 시간대별 시민들이 용수 소모량이 일정하지 않아 매번 변경되고 있고 시간 및 환경 인자에 따라 염소 소모량이 달라 이에 대한 특성 분석을 하기 위하여 Neuro Fuzzy 알고리즘을 고려하였다. Neuro Fuzzy 알고리즘의 동작 순서는 그림 6과 같이 5단계로 구분되어지며 각 단계별 계산과정은 다음과 같다[10].

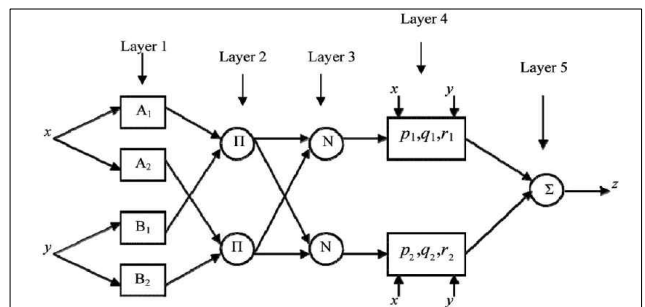


그림 6. 뉴로퍼지 구조도

Fig. 6. Architecture of a neuro fuzzy

Layer 1. Determination of Membership Function

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \text{ for } i = 1, 2, \text{ or} \tag{6}$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \text{ for } i = 3, 4 \tag{7}$$

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \tag{8}$$

$\{a_i, b_i, c_i\}$: premise parameters

기 결정된 a, b, c에 의해 각 Fuzzy Set 별 Membership Value를 계산하는 단계이다.

Layer 2. Computation of Compatibility

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

가중치 w는 각 변수의 Membership Value의 Product를 취하여 계산한다.

Layer 3. Normalization

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

가중치 w를 Normalize 하여 각 Rule 별 가중치를 결정하는 단계이다.

Layer 4. Rule based Output

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

$\{p_i, q_i, r_i\}$: consequent parameters

기 결정된 p, q, r에 의해 각 Rule에 해당하는 Fuzzy Output Value 계산한다.

Layer 5. Overall Output

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (12)$$

각 Rule의 가중치와 결과 값을 토대로 최종 Output 결정한다.

표 3에서는 위의 계산과정을 거쳐 Neuro Fuzzy 알고리즘의 Forward Pass와 Backward Pass의 Parameter 추종 과정을 나타내었으며 Forward에서는 LSE방법을 사용하고 Backward에서는 Gradient Descent 기법을 사용한다.

표 3. Neuro Fuzzy 파라미터 추종방법
Table 3. Parameter estimation of neuro fuzzy

	Forward Pass	Backward Pass
Premise parameters	Fixed	Gradient descent
Consequent parameter	Least square estimator	Fixed
Signals	Node output	Error Signal

3. 지능형 제어기 구현 및 개발

3.1 침전지 유입 잔류염소계 신설 & 피드백 제어

기존 전염소 처리공정은 근무자에 경험에 의하여 염소 투입량을 설정하여 원하는 목표 잔류염소를 얻는데 한계가 있다. 따라서 그림 7에서와 같이 원하는 침전지 유출 잔류염소를 일정하게 유지하기 위하여 체류시간이 장시간 소요되는 점을 개선하기 위하여 유입부에 침전지 유입 잔류염소계를 신설하였다. 염소투입 후 잔류염소가 계속되는 10분의 제어주기를 갖고 1단 피드백 루

프를 구성 하였고 침전지 유출잔류염소 일정제어를 위하여 2단 피드백 루프를 추가하였다.

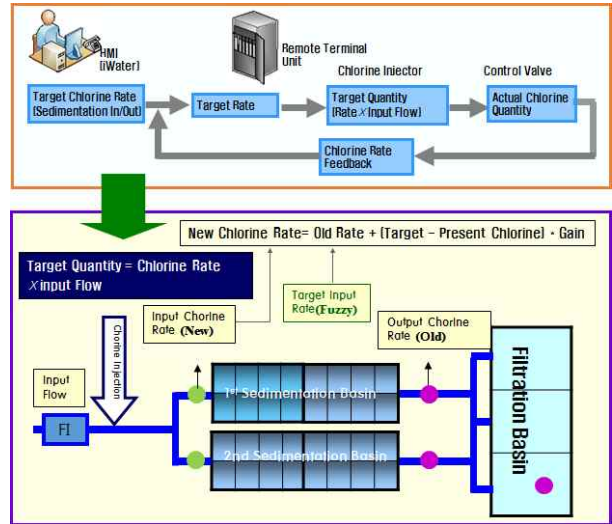


그림 7. 전염소 처리 공정도
Fig. 7. Configuration of pre-chlorination process

3.2 Hybrid Fuzzy Controller 개발

이중 피드백 제어인 캐스케이드 제어는 두 개의 피드백 제어 루프로 구성되고 1차 조절계의 출력이 2차 조절기의 설정 값이 된다. 시간 지연이 많이 발생하는 전염소 공정에 사용하기에 매우 적당하나 체류시간이 가변되고 기상여건에 따라 Process 달라지는 환경에서는 제어하기가 곤란하여 퍼지제어를 도입하여 유입목표 잔류염소농도를 제공하도록 한 Hybrid Fuzzy Controller를 개발하였다. 그림 8의 시스템 구성도는 퍼지제어를 통하여 유입목표 잔류염소를 제공하면 내부 피드백 루프(2차제어기)에 의하여 제공된 유입 잔류염소를 일정하게 유지하고 하루정도의 장시간을 제어주기를 갖고 침전지 유출 잔류염소 평균값을 계산하여 외부 피드백 루프(1차제어기)에 의하여 2차 제어기의 유입 목표 값을 일부 변경하도록 하였다.

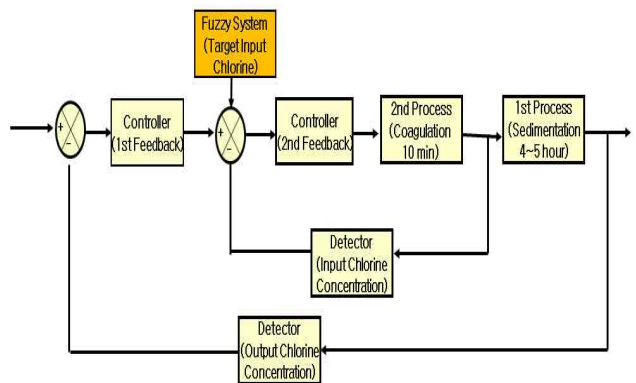
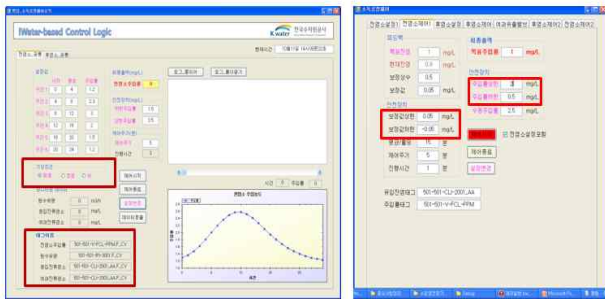


그림 8. 하이브리드 퍼지 제어기 구성도
Fig. 8. Diagram of hybrid fuzzy controller

그림 9에서는 Hybrid 제어기를 Software 프로그램으로 개발하여 정수장 플랜트에 적용할 수 있도록 하였

다. 플랜트 적용의 용이성을 위하여 정수장에서 사용하고 있는 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) System과 OPC(OLE for Process Control) 프로토콜을 이용하여 원하는 데이터를 취득하도록 하였다. 현장 계측데이터는 SCADA에서 사용하고 있는 Tag 정보만 입력하면 취득할 수 있도록 개발하였으며 퍼지시스템으로 설정된 유입목표 잔류염소 값을 모니터링 할 수 있도록 하였다. 또한 갑작스러운 날씨 변화에 대응하기 위하여 맑음/흐림/비의 Fuzzy Set을 미리 구성하여 퍼지로직에 익숙하지 않은 근무자가 쉽게 변경토록 하였다.

피드백 제어기에서는 퍼지에서 설정한 목표 잔류염소 값을 일정하게 맞추기 위하여 제어주기마다 오차를 계산하여 이를 보상하도록 하였다. 하지만 계측데이터의 신뢰성이 현장에서는 항상 담보되지 않기 때문에 염소 투입량의 상하한 설정 및 1회에 보상해주는 값을 제한하는 안전조치를 취하여 만일의 사고를 방지할 수 있도록 하였다.



(a) 퍼지로직 (b) 피드백 제어기
그림 9. 전염소 제어기

Fig. 9. Pre-chlorination controller

3.3 지능제어 알고리즘

전염소 제어를 어렵게 하는 체류시간에 따른 잔류염소 증발량을 계산하여 이에 대한 정보제공을 위하여 학습알고리즘을 비교하여 보았다. Table 4에서는 통계적인 기법을 이용한 잔류염소 증발량을 예측한 결과이다. 다중선형회귀방정식(Multi Linear Regression)의 오차가 15.6% 가장 크고 비선형 방정식인 Neuro-Fuzzy와 MLP(Multi Layer Perceptron)가 9.79%, 9.82%로 에러가 적어 비선형 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 침전지 염소 증발량에 대한 모델링을 구축하기 위해서는 Nonlinear 학습알고리즘을 사용하여야만 한다.

표 4. 비선형 특성 분석

Table 4. Analysis of nonlinear characteristic.

Algorithm Error	MLR	Neuro-Fuzzy	MLP
MAPE(%)	15.6%	9.79%	9.82%

4. 정수장 운영 결과

제안된 알고리즘 및 프로그램을 2011년 6월부터 정수장에 운영하기 시작하였으며 초기에 운영자의 경험 및 현장여건을 고려한 Fuzzy Set으로 투입하였지만 운영을 시작한 후 지속적으로 보완하여야 하였다. 이러한 안정화 과정을 거치는데 몇 개월을 소요되었으며 안정화 이후 안정적인 수질 및 염소 투입량을 절감할 수 있었다.

4.1 수질개선효과

수질개선효과를 평가하기 위해서는 침전지 유출 잔류염소를 얼마나 일정하게 유지하였는지를 평가하면 된다. 한 가지 고려해야 할 사항으로는 원수 수질이 급격히 변화하는 경우에는 침전지 목표잔류염소를 높게 혹은 낮게 일정기간 유지하여야 한다.

4.1.1 잔류염소 변화율 개선

그림 10에서는 전염소 알고리즘 개선으로 침전지 유출 잔류염소 안정화를 기존 알고리즘과 비교한 결과를 보여주고 있다. 2011년도 5월에는 침전지 잔류염소가 0.1~1.2mg/L사이로 변화하고 있다. 이때에는 침전지 유출목표 잔류염소를 얼마를 두고 운영자가 운영을 하였는지 가늠할 수가 없을 정도로 변화폭이 컸다. 시스템이 안정적으로 운영된 2012년 6월에는 침전지 유출 잔류염소를 0.2mg/L로 유지하려고 하였다. 실제 잔류염소는 0.15~0.3mg/L 사이였으며 기존 제어기에 비하여 변화율이 약 7.3배 개선되었다.

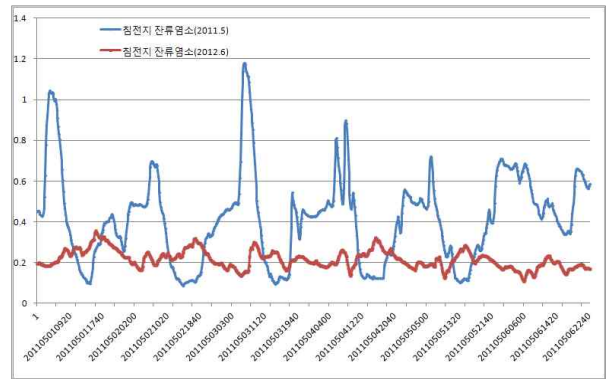


그림 10. 침전지 유출잔류염소 변화율 개선

Fig. 10. Improvement of residual chlorine variation

4.1.2 연간 투입결과 분석

프로그램의 장기간 운영결과분석을 통하여 프로그램의 적용성을 평가해 보았다. 그림 11에서는 2010년 1월에서 12월까지 시간대별 침전지 및 여과지 잔류염소농도를 나타내고 있다. 침전지 잔류염소의 경우 0.2~1.4mg/L 사이의 넓은 범위로 수동 제어되고 있었으며 여과지를 거친 후 다소 농도가 저하되긴 하였으나 0~1mg/L 이상으로 표시되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 근무자별 전염소 제어 능력의 제어능력의 차이 및 실시간 제어가 불가함에 따라 발생한 것으로 사료된다.

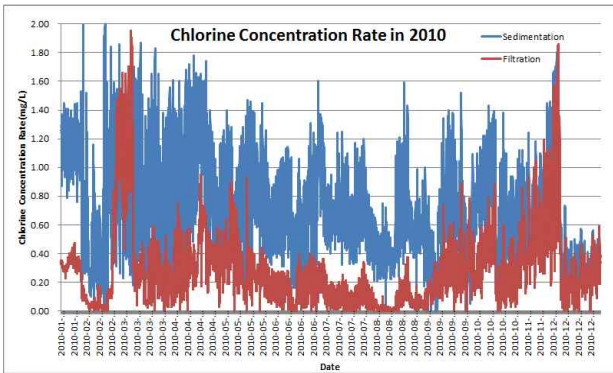


그림 11. 2010년도 침전지/여과지 잔류염소
Fig. 11. Output residual chlorine in 2010

그림 12에서는 2013년 1~11월까지 시간대별 침전지 및 여과지 잔류염소농도 운영결과를 보여주고 있다. 제안된 알고리즘으로 상시 운전한 결과 침전지 잔류염소는 0.4~1mg/L 사이에서 운전되고 있었으며 여과지 잔류염소의 경우에도 0.1~ 0.5mg/L사이에서 안정적으로 운전하였다. 여기에서 1~3월 및 6월 구간은 원수에 망간이 포함되어 잔류염소 농도를 0.4mg/L 정도로 유지하였으며 망간유입이 없었던 다른 계절에는 0.2mg/L 이하로 운영하였다. 또한 1~3월에는 다소 잔류염소 변화폭이 다른 월에 비하여 커서 Fuzzy Rule에 대하여 좀 더 고민해야 할 것으로 사료된다.

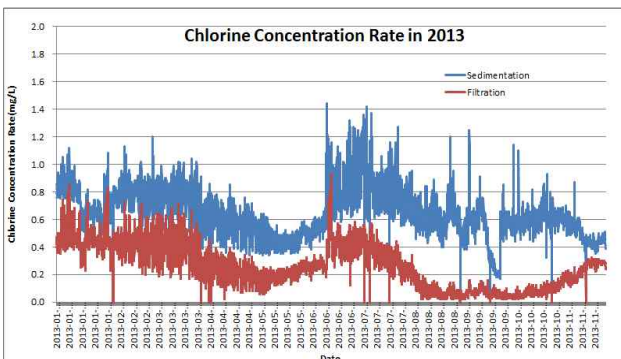


그림 12. 2013년도 침전지/여과지 잔류염소
Fig. 12. Output residual chlorine in 2013

표 5에서는 침전지 및 여과지 표준편차를 년도 별로 나타내었으며 이는 목표 침전지/여과지 잔류염소농도가 수질상황에 따라 수시로 변화하기 때문에 실질적인 오차를 계산하기 어려움이 있어 연간 자료의 표준편차를 구하여 데이터가 얼마나 유동성이 있는지 평가하였다. 2010년도 자료를 보면 침전지/여과지 표준편차가 0.357과 0.275를 나타내었던 것을 2013년도에는 0.181과 0.162로 운영하여 46%의 변화율을 저감하였다. 이는 제안된 Fuzzy 시스템을 통하여 운영자의 노하우를 일관되고 실시간으로 제어함으로써 개선되었음을 보여주고 있다.

표 5. 연도별 잔류염소농도 표준편차

Table 5. Standard deviation of output residual chlorine

Year	Standard Deviation		Remark
	Sedimentation	Filtration	
2010	0.357	0.275	Manual
2011	0.429	0.257	Auto after June
2012	0.276	0.172	Auto
2013	0.181	0.162	Auto

4.2 자원절감 효과

표 6에서는 제안된 제어로직으로 염소를 투입한 결과와 기존 수동제어와의 염소 소모량을 비교하여 경제적인 효과를 산출해 보았다. 기존 수동제어를 실시한 2010년도에는 평균 주입률이 2.73mg/L 이었으나 제안된 퍼지기법을 활용한 2013년도에는 1.57ppm로 현격히 감소하였으며 연간 염소사용량으로 환산하면 8,810톤에 해당한다. 따라서 이를 소규모 도시에 공급하는 10만톤 정수장으로 일반화 시키면 연간 44백만원의 절감할 수 있다. 또한 환경과피의 주범인 탄소 절감량으로 환산해 본 결과 연간 3,453(kgCO₂)를 절감하는 것으로 나타났다.

표 6. 염소사용량 절감 효과(용량 : 20,800m³/d)

Table 6. Reduction of chlorine usage(Capacity : 20,800m³/d)

	Before	After
Average Flow	656(m ³ /h)	867(m ³ /h)
Average Injection Rate	2.73(ppm)	1.57(ppm)
Chlorine Injection Quantity	1.79(kg/h)	1.36(kg/h)
Monthly Reduction Quantity	734(kg)	
Yearly Reduction Quantity	8,810(kg)	
Yearly Carbon Reduction Quantity	3,453(kgCO ₂)	
Yearly Reduction Cost(20,000m ³ /d)	9,250,613(원)	
Yearly Reduction Cost(100,000m ³ /d)	44,474,099(원)	

※ 염소가격 : 1,050원/kg(가격정보)

5. 결 론

제안된 제어 알고리즘을 이용하여 하이브리드 퍼지 제어기를 구성하였으며, 정수처리공정의 전염소 공정을 제어하였다. 침전지에서 시간에 따른 시민들이 물 사용량이 일정하지 않아 매번 변경되는 체류시간과 환경요소에 따라 달라지는 염소증발량을 퍼지 제어기를 통하여 모사하고 이중 피드백 제어기에 복합하여 운영해 본 결과 야간 및 새벽시간대에 염소 주입률을 낮게 운영하고 주간시간 및 맑은 날씨일수록 염소 주입률을 높게

운영하는 운영자가 원하는 제어를 구성할 수 있었다. 이를 통하여 침전지 유출 잔류염소를 7.3배가량 안정화시켰으며 염소 소비량을 현격히 줄여 원가 절감은 물론 탄소배출량도 절감 할 수 있었다. 하이브리드 퍼지 제어기는 비선형성이 강한 염소투입공정 제어를 수행 하는데 아주 적절함을 확인할 수 있었다.

Reference

- [1] Tove A. Larsen, Kai M. Udert, Judit Lienert, "Source Separation and Decentralization for Wastewater Management", IWA Publishing, Chapter 26, pp. 383-397, 2013.
- [2] D.H Kim, D.J Lee, K.P Kim, C.H Bae, H.E Ju, "Proper re-chlorine injection rate decision and effect analysis to secure residual chlorine concentration in water distribution network," Journal of Korea environmental engineering, vol.32, no.10 pp. 916-927, 2010.
- [3] Korea Water and Wastewater Works association, "Installation standard of drinking water facility," pp. 293, 2008.
- [4] J.D Park, G.W Shin, S.T Hong, C.G Lee, "Study of automatic control for disinfection process," Journal of Korea academia-industrial cooperation, vol.12, no.8 pp. 3644-3653, 2011.
- [5] 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, vol. 44, no. 2, pp. 60-69, 1995.
- [6] F. Hua, J.R. West, R.A. Barker, C.F. Forster, "Modeling of chlorine decay in municipal water supplies," Water Research, vol. 33, no. 12, pp. 2735-2746, 1997.
- [7] Jacob Cohen, Patricia Cohen, Stephen G. West, Leona S. Aiken, "Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences," Routledge, pp. 19-31, 2013.
- [8] Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stoke. "Pattern Classification," Wiley, pp. 114-125, 2012.
- [9] J.H Seol, Y.D Lim, "Study of position control for DC servo motor using neuro fuzzy system," Korea institute of intelligent system, vol. 7, no. 5, pp. 51-59, 1997.
- [10] Jyh-Shing Roger Jang, Chuen-Tsai Sun and Eiji Mizutani. "A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence," IEEE Transactions on automatic control, vol. 42, no. 10, pp. 1482-1484, 1997.

저 자 소 개



이호현(Ho-Hyun Lee)

1998년 : 원광대학교 전자공학과 공학사
 2010년 : KAIST 로봇학제 석사
 2013년 ~ 현재 : 충북대학교 대학원
 제어로봇공학과 박사과정

관심분야 : Fuzzy, Machine Learning, Optimization
 Phone : +82-42-8700-7656
 E-mail : dlghgus@gmail.com



장상복(Sang-Bok Jang)

1989년 : 영남대학교 전자공학과 공학사
 2003년 : 한밭대학교 제어계측공학과 석사
 2011년 ~ 현재 : 충북대학교 대학원
 제어로봇공학과 박사과정

관심분야 : Data Mining, Vision, Neural Network
 Phone : +82-2-2150-0538
 E-mail : jsbok0502@kwater.or.kr



홍성택(Sung-Taek Hong)

1993년 : 한밭대학교 전자공학과 공학사
 1995년 : 한밭대학교 전자공학과 석사
 2007년 : 충북대학교 전자공학과 박사수료

관심분야 : Satellite, Intelligent Control, Recognition
 Phone : +82-42-870-7681
 E-mail : sthong@kwater.or.kr



전명근(Myung-Geun Chun)

1987년 : 부산대학교 전자공학과 공학사
 1989년 : KAIST 전기 및 전자공학과
 공학석사
 1993년 : KAIST 전기 및 전자공학과
 공학박사

1996년 : 삼성전자 자동화연구소 선임연구원
 1996년 ~ 현재 : 충북대학교 전자공학부 교수
 2007년 ~ 현재 : ISO/IEC SC27 정보보호 표준화 전문위원
 2008년 ~ 현재 : TTA PG505 전문위원

관심분야 : 지능시스템, 정보보호, 영상처리
 Phone : +82-43-261-2388
 E-mail : mgchun@cbnu.ac.kr