

論 文

## 퍼지 推論技法을 이용한 淨水工程의 前鹽素注入率 制御에 관한 研究

이 상 석\* · 소 명 옥\*\* · 이 준 탁\*\*\*

A Study on the Dosage Rate Control of the Pre-Chlorine in  
Water Purification Process using Fuzzy Inference Technique

*Sang-Seuk Lee\* · Myung-Ok So\*\* · Joon-Tark Lee\*\*\**

### 〈 목 차 〉

Abstract

1. 서 론

2. 전염소 주입 제어 시스템

2.1 퍼지제어기의 구성

2.2 전염소 주입율 결정을 위한 제어규칙

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4. 결 론

참고문헌

### Abstract

This paper describes a fuzzy controlled pre-chlorination technique for purifying the polluted raw water in water purification plants. For the purpose of obtaining the high quality water, the appropriate pre-chlorine dosage rate has to be continuously adjusted according to a change in quality of a intake raw water, weather, solar energy amount, temperature and etc. Therefore, the method of expressing an expert's empirical knowledge cumulated from his past carrier by fuzzy reasoning and the fuzzy controller design technique is necessary.

In this paper, fuzzy membership functions and rules according to empirical knowledge and experimental field data were obtained. And also fuzzy controller design using four feedforward components for the determination of pre-chlorine dosage rate and four feedback ones for the compensation of its dosage rate with residual chlorine and its change rate, was executed.

\* 부산시 상수도 본부

\*\* 정희원, 한국해양대학교 해사대학 교수

\*\*\* 동아대학교 전기·전자·컴퓨터공학부 교수

## 1. 서 론

최근 상수도 원수의 수질악화로 오염되고 있는 원수를 정수처리하기 위해 정수장에서는 암모니아성 질소( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), 철, 망간, 미생물 등을 제거하고, 살균 및 응집의 촉진에 유효한 염소와 응집제(PAC : Polymerized Aluminium chloride) 및 알칼리 등의 화학물질을 주입함으로써 안전하고 깨끗한 물을 음용수로 공급하고 있다.

특히, 염소의 주입처리는 정수된 물을 관할 수용가까지 소독할 목적으로 주입하는 후염소(Post-chlorination) 처리와 철, 망간을 제거함은 물론 원수가 심하게 오염되어 세균, 암모니아성 질소 및 각종의 유기물들을 침전과 여과의 정수법만으로는 제거되지 않는 경우 이를 제거할 목적으로 여과전에 염소를 주입하는 전염소(Pre-chlorination) 처리로 나뉘질 수 있다.

정수장에서의 전염소 주입 프로세스는 수질, 기상 및 기온 등의 영향인자가 많고 화학반응이 비선형적으로 복잡하여 수학적 모델링이 불가능하며, 지연 시간이 2~4시간으로 길고 수질이 수시로 변하는 경우 운전원이 원수의 수질과 기상 조건을 고려하면서 염소 주입율을 매일 매회 수정 변경함에 따라 운전원의 오판 가능성 및 능률 저하로 인한 문제점이 산재하고 있으며, 돌발적인 날씨 변화나 수질의 급변동 등이 운전원의 부담을 크게 가중시키고 있다.

본 논문에서는 일사량, 날씨 및 기온 등의 환경 영향인자를 고려하여 염소 주입율을 결정하고, 잔류염소 추정이 가능하며, 숙련된 운전원과 동등한 제어를 할 수 있도록 조작자의 경험이나 지식을 이용한 퍼지추론 알고리즘 제어기법을 전염소 주입공정에 적용하고자 한다. 전염소 주입 제어시스템에 퍼지추론 알고리즘 제어기법을 적용할 경우, 4개의 피드포워드(FF : feedforward)요인에 의한 주입율 추론을 먼저 실행하여 피드포워드제어 주입율( $D_i$ ,  $i=1\sim4$ )을 구하고, 4개의 피드백(FB : feedback)요인에 의한 주입율 보정추론을 행하여 피드백제어 보정주입율( $\Delta D_j$ ,  $j=1\sim3$ )을 산출함으로써, 전체 전염소 주입율( $D_i + \Delta D_j$ )을 결

정한다. 이 때 퍼지제어 시스템은 63개의 제어규칙과 21개의 멤버쉽 함수로 구성되며, 시뮬레이션을 수행함으로써 본 연구에서 논의된 시스템의 우수성과 외란에 대한 강인성을 입증하고자 한다.

## 2. 전염소 주입 제어 시스템

### 2.1 퍼지제어기의 구성

철, 망간, 미생물 및 기타 오염을 제거하기 위해 착수정(着水井)에서는 물에 전염소를 주입하여 소독 및 침전 효과의 증대를 꾀하는데, 이 때 전염소의 주입율은 물에 포함된 여러가지 물질에 따라 변동된다. 즉, 취수량, 원수의 수온, 수질, 계절(일조량, 날씨), 분말 활성탄 주입처리의 유무 및 조류발생의 유무 등의 영향인자를 종합적으로 판단해서 주입하고 있다. 또한 주입된 염소는 날씨, 주야간, 물의 처리량에 따라 침전지나 여과지에서 소비되는 정도가 변하기 때문에 잔류염소의 농도도 변한다. 즉 정수장의 염소 주입제어는 외란 요소가 대단히 많고 반응효과 시간이 길어 피드백제어가 곤란하므로 6~8시간 전에 미리 외란요인을 고려하여 주입율을 예측하는 피드포워드제어가 필요하다.

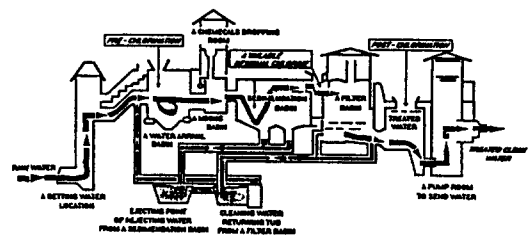


Fig. 1 Water purification process

Fig. 1은 정수장에서의 정수설비 계통이며, Fig. 2는 정수장의 전염소 주입처리의 특징을 고려한 퍼지제어 알고리즘이다. 본 논문에서는 기상요인 및 수질요인으로부터의 주입율 추론부와, 현재의 기상변화, 현재의 염소요수량, 잔류

염소량의 편차 및 변화율로부터의 주입을 보정 추론으로 퍼지제어 시스템을 구성하여 전체 전염소 주입율을 결정하며, 이 때 퍼지제어 시스템은 63개의 제어규칙과 21개의 멤버십 함수로 이루어진다. 주입을 결정 요인을 기상요인에 의한 것(D<sub>1</sub>), 수질요인에 의한 것(D<sub>2</sub>), 분말 활성탄 주입에 의한 것(D<sub>3</sub>) 과 살조처리 주입에 의한 것(D<sub>4</sub>)으로 구분하여 퍼드포워드 요인에 의한 주입을 추론으로 퍼드포워드제어 주입율(D<sub>i</sub>, i=1~4)을 구하고, 다시 현재 날씨변화에 의한 것(ΔD<sub>1</sub>), 현재 염소요구량에 의한 것(ΔD<sub>2</sub>)과 침전지 출구의 잔류염소편차 및 잔류염소 변화율에 의한 것(ΔD<sub>3</sub>)으로 구분하여 퍼드백 요인에 의한 주입을 보정추론으로 퍼드백제어 보정 주입율(ΔD<sub>j</sub>, j=1~3)을 계산하며, 전체 전염소 주입율(D)은 퍼드포워드제어 주입율(D<sub>i</sub>)과 퍼드백제어 보정주입율(ΔD<sub>j</sub>)을 합하여 식 (1)과 같이 결정한다.

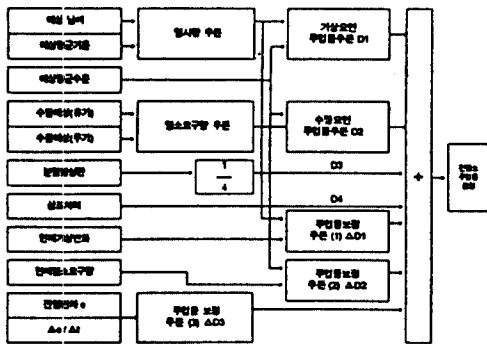


Fig. 2 Schematic diagram of fuzzy control algorithm

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + \Delta D_1 + \Delta D_2 + \Delta D_3 \text{ [mg/l]} \quad (1)$$

염소 소비모델에 의한 침전수의 잔류염소량은 식 (2)와 같다.

$$Rec'l = a_0 + a_1 \cdot (\text{염소주입율}) + a_2 \cdot (\text{일사량}) + a_3 \cdot (\text{수온}) + a_4 \cdot (\text{염소요구량}) \quad (2)$$

여기서  $a_0 \sim a_4$  는 상수이다.

### 2.2 전염소 주입율 결정을 위한 제어규칙

D<sub>1</sub>은 제어를 실시하는 하루중의 예상평균기온과 하루중의 예상날씨로부터 예상일사량(일출부터 일몰까지 시간의 적사량)을 퍼지추론하는 제 1단계와, 하루중의 예상수온과 예상일사량으로부터 주입율을 퍼지추론하는 제 2단계로 이루어진

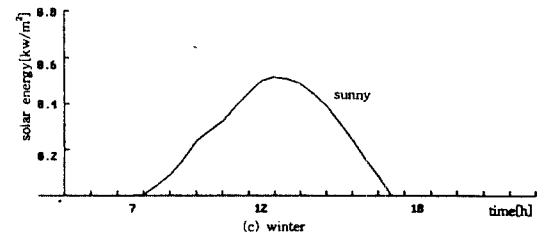
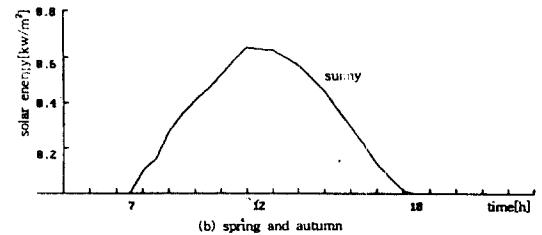
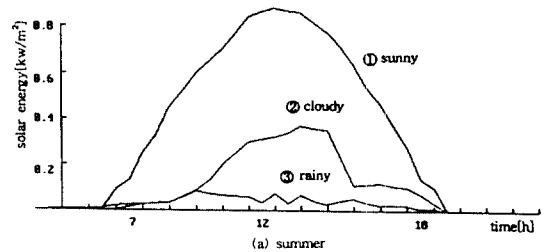


Fig. 3 Varying pattern of solar energy amount in season

다. 기상요인의 자외선에 의한 차아염소산(HOCl)과 동이온(OCl<sup>-</sup>)의 분해소비는 220~400nm정도 파장의 광에 의한 것이다. 이 자외선량은 실제에서는 일사량에 의해 계속 평가된다. 일사량에는

직달일사량과 전천일사량의 두 종류가 있으며 전염소 주입제어에서는 순시치를 나타내는 직달일사량[kw/m<sup>2</sup>]을 적용한다. Fig. 3은 기상대에서 측정 한 직달일사량의 변화모양을 나타낸 것이고 Fig. 4는 수온의 변화모양을 나타낸 것이다. 맑은 날씨의 직달일사량은 해가 뜬 무렵부터 증가하기 시작해서 정오에 최대치에 달하게 되고, 이후 감소되다가 해가 질 무렵에 0으로 된다. 또, 날씨가 맑음에서 흐림, 비로 됨에 따라 직달일사량도 감소하고 있다. 예상일사량 추론과 전염소 주입율 D<sub>1</sub> 추론을 위한 제어규칙은 각각 Table 1, Table 2와 같으며, 이하 Table에서 사용되는 약어의 정의는 아래와 같다.

- NB : Negative Big      PB : Positive Big
- NM : Negative Medium    PM : Positive Medium
- NS : Negative Small    PS : Positive Small
- ZE : Zero

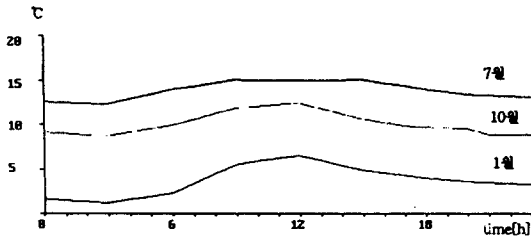


Fig. 4 Varying pattern of water temperature in season

Table 1 Rules for the prediction of solar energy amount

|                  |    | 예상평균기온 |    |    |
|------------------|----|--------|----|----|
|                  |    | NB     | ZE | PB |
| 예<br>상<br>날<br>씨 | 비  | NB     | NS | ZE |
|                  | 흐림 | NS     | ZE | PS |
|                  | 맑음 | ZE     | PS | PB |

Table 2 Rules for the dosage rate(D<sub>1</sub>) of pre-chlorine

|                       |    | 예상평균수온 |    |    |
|-----------------------|----|--------|----|----|
|                       |    | NB     | ZE | PB |
| 예<br>상<br>일<br>사<br>량 | NB | NB     | NS | ZE |
|                       | ZE | NS     | ZE | PS |
|                       | PB | ZE     | PS | PB |

D<sub>2</sub>는 예상무기물과 예상유기물로부터 예상 염소요구량을 퍼지추론하는 제 1단계와, 하루중의 예상수온과 예상 염소요구량으로부터 주입율을 퍼지추론하는 제 2단계로 이루어진다. 즉, 수질요인에 의한 주입율 추론은 암모니아, 철, 망간 등의 무기물에 의한 요구량과 유기물에 의한 요구량으로부터 예상 염소요구량을 추론한다. 예상 염소요구량 추론과 전염소 주입율 D<sub>2</sub> 추론에 적용된 제어규칙은 각각 Table 3 및 Table 4와 같다.

Table 3 Rules for the demanded amount of predictive chlorine

|  |    | 예상유기물염소요구량 |    |    |
|--|----|------------|----|----|
|  |    | NB         | ZE | PB |
| 예<br>상<br>무<br>기<br>물<br>염<br>소<br>요<br>구<br>량 | NB | NB         | NS | ZE |
|  | ZE | NS         | ZE | PS |
|  | PB | ZE         | PS | PB |

Table 4 Rules for the dosage rate(D<sub>2</sub>) of pre-chlorine

|                                 |    | 예상평균수온 |    |    |
|---------------------------------|----|--------|----|----|
|                                 |    | NB     | ZE | PB |
| 예<br>상<br>염<br>소<br>요<br>구<br>량 | NB | NB     | NS | ZE |
|                                 | ZE | NS     | ZE | PS |
|                                 | PB | ZE     | PS | PB |

$\Delta D_1$ 은 예상일사량과 현재 날씨의 변화에 대해서,  $\Delta D_2$ 는 예상 염소요구량과 현재 추정염소요구량의 변화에 대해서, 그리고  $\Delta D_3$ 는 현재 잔류염소량의 편차 e와 잔류염소량의 변화율  $\Delta e/\Delta t$ 에 대해서 퍼지추론하여 구해지며 이에 따른 퍼지제어 규칙은 각각 Table 5, Table 6 및 Table 7과 같다.

Table 5 Rules for the modified dosage rate ( $\Delta D_1$ ) of pre-chlorine

|          |    | 예상일사량 |    |    |
|----------|----|-------|----|----|
|          |    | NB    | ZE | PB |
| 현재 날씨 변화 | NB | ZE    | NS | NB |
|          | ZE | PS    | ZE | NS |
|          | PB | PB    | PS | ZE |

Table 6 Rules for the modified dosage rate ( $\Delta D_2$ ) of pre-chlorine

|         |    | 예상염소요구량 |    |    |
|---------|----|---------|----|----|
|         |    | NB      | ZE | PB |
| 추정염소요구량 | NB | ZE      | NS | NB |
|         | ZE | PS      | ZE | NS |
|         | PB | PB      | PS | ZE |

Table 7 Rules for the modified dosage rate ( $\Delta D_3$ ) of pre-chlorine

|             |    | 잔류염소량의 변화율 $\Delta e/\Delta t$ |    |    |
|-------------|----|--------------------------------|----|----|
|             |    | NB                             | ZE | PB |
| 잔류염소량의 편차 e | NB | PB                             | PS | ZE |
|             | ZE | PS                             | ZE | NS |
|             | PB | ZE                             | NS | NB |

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig. 5는 Fig. 2의 퍼지제어 알고리즘에 의한 시뮬레이션 흐름도이고, Fig. 6은 각 날씨에 따른 데이터를 이용한 염소 투입율의 결과이며, Fig. 7은 이 중에서 맑은 날의 결과에 염소 투입율을 수동설정한 경우와 퍼지추론한 경우의 잔류염소를 비교한 것이다. 수동설정에 의한 투입에서는 일출시간까지의 투입에 대한 잔류염소량은 기준치보다 0.15 (mg/l) 과잉주입되고 있으며, 정오시간에는 0.13 (mg/l) 정도로 부족주입되고 있다. 그러나 퍼지추론에 의한 투입에서는 잔류염소량이 목표치 0.4 (mg/l)의  $\pm 0.05$  (mg/l) 범위내에 주입되고 있으므로, 수동설정에 비해 투입량도 절약될 뿐만 아니라 비교적 안정한 수렴특성을 보였다.

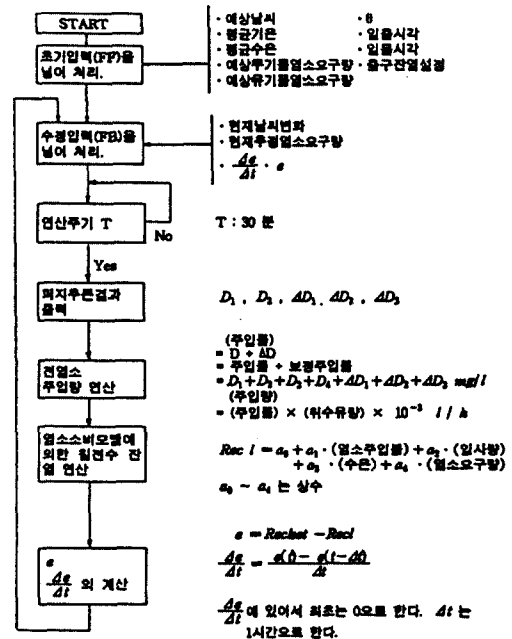
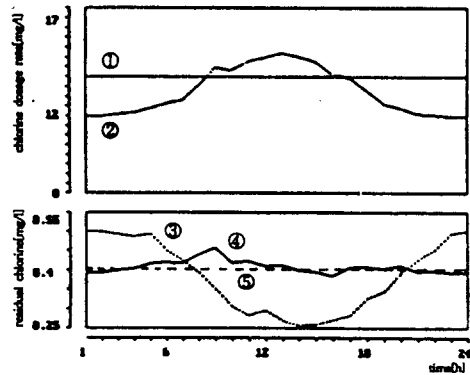
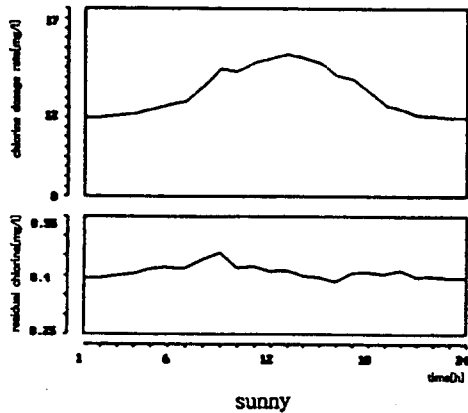


Fig. 5 Flowchart for the fuzzy controlled water purification process



- ① manual setting of dosage rate
- ② fuzzy reasoning of dosage rate
- ③ residual chlorine on manual setting of dosage rate
- ④ residual chlorine on fuzzy control
- ⑤ setpoint of residual chlorine

Fig. 7 Comparison of pre-chlorine dosage rate and residual chlorine

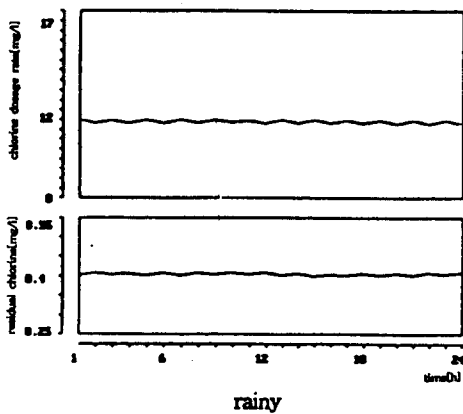
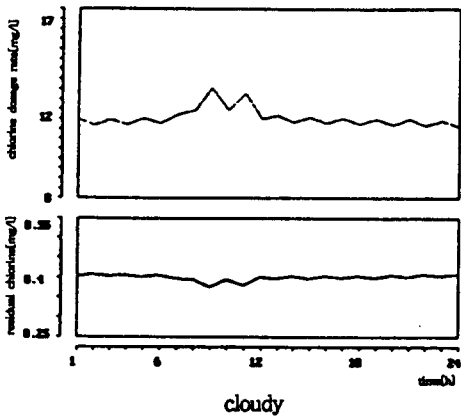


Fig. 6 Simulation results of chlorine dosage rate and residual chlorine(sunny, cloudy, rainy)

#### 4. 결 론

본 제어시스템에서는 원수의 취수량과 암모니아성 질소를 계측하여 현재 시각과 기상을 운전원이 입력하면 이 입력량으로 기준 주입율의 퍼지추론과 주입율 보정퍼지추론을 행하여 전염소 주입율을 결정한다. 이렇게 기상의 입력만으로 목표값이 구해지게 되므로 운전원의 부담이 경감되고, 운전원의 훈련에 필요한 시간과 작업량이 대폭 경감될 수 있다. 또한, 퍼지추론을 사용하여 전염소 주입율을 결정한 경우는 수동설정된 경우보다 잔류염소 농도가 목표치에 훨씬 근접되어 제어되며, 주입량도 절약됨을 알 수 있다. 한편, 지금까지 각종 조건 하에서 시뮬레이션한 결과, 일사량의 영향이 큰 맑은 날씨에 더욱 효과적이고, 하절기의 대폭적인 수질 변동시에도 안정한 주입제어가 가능하며 수질이 안정됨을 알 수 있다. 앞으로 시뮬레이션 결과와 실제 데이터의 차이가 작도록 제어규칙 및

멤버십 함수를 조정하여 최적제어를 실현하는 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] O.Yagishita, O.Itoh, and M.Sugeno, "Application of Fuzzy Reasoning to the Water Purification Process", Elsevier Science Publishers B.V.(North-Holland), 1985.
- [2] 廣田 薫, "特輯 ファジィ 制御", 컴퓨터 로-르, No.28, 1989.
- [3] 伊藤修, "ファジィ理論の制御への應用", '87 計裝制御技術會議 予稿集.
- [4] "上水道 源水 水質惡化에 따른 改善對策", 부산직할시 (1990.6).
- [5] 三浦 良輔, 渡守 修, "淨水場鹽素注入制御モデル의選擇", 水システム自動計測 制御 워크숍 논문집 p. 29.
- [6] 三浦 良輔, 遠矢 辛男, "非常時 鹽素注入制御의 시뮬레이션解析", 第33回 全國水道研究發表會講演集, p. 329.