

## 실수형 유전-퍼지를 이용한 정수장 응집제주입제어에 관한 연구

### A Study on the Coagulant Dosage Control in the Water Treatment Using Real Number Genetic-Fuzzy

김용열<sup>1</sup> · 강이석<sup>2,\*</sup>

Kim, Yong-Yeol<sup>1</sup> · Kang, E-Sok<sup>2,\*</sup>

1 한국수자원공사 수자원교육원

2 충남대학교 기계설계공학과

(2004년 1월 16일 접수; 2004년 4월 20일 최종수정논문 채택)

#### Abstract

The optimum dosage control is presumably the goal of every water treatment plant. However it is difficult to determine the dosage rate of coagulant, due to nonlinearity, multivariables and slow response characteristics, etc. To deal with this difficulty, the real number genetic-fuzzy system was used in determining the dosage rate of the coagulant. The genetic algorithms are excellently robust in complex optimization problems. Since it uses randomized operators and searches for the best chromosome without auxiliary informations from a population which consists of codings of parameter set. To apply this algorithms, we made the real number rule table and membership function from the actual operation data of the water treatment plant. We determined optimum dosages of coagulant(LAS) using the fuzzy operation and compared them with the dosage rate of the actual operation data.

**Key words:** genetic-fuzzy, fuzzy system, water treatment, coagulant dosage rate

**주제어:** 유전-퍼지, 퍼지시스템, 정수장, 응집제주입률

#### 1. 서론

도시지역에서는 인구의 증가와 급속한 산업화에 따른 생활하수·공장폐수의 증가와 축산폐수, 비료 및 농약의 사용으로 오염은 심화된 반면 생활수준의 향상으로 수요량의 급증과 양호한 수질에 대한 욕구는 점점 높아지고 있어 효과적인 체계적인 정수처

리가 요구되고 있다. 상수도 정수장에서는 원수의 탁도 제거를 위해 응집·침전과 여과공정을 거친다. 원수에 존재하는 탁질의 대부분을 제거하는 응집·침전에서는 응집제를 주입하여 불순물이 서로 응집하도록 조건을 만들어주고 커진 플록의 자중에 의한 침전으로 탁질을 제거한다. 이때 주입되는 응집제주입률은 자동수질측정기에서 측정되는 원수의 탁도, pH, 알

\*Corresponding author Tel: +82-42-821-6647, FAX : +82-42-822-7366, E-mail: eskang@cnu.ac.kr (Kang, E.S.)

칼리도, 수온, 전기전도도 외에도 수많은 인자가 서로 유기적이며 비선형적인 관계를 갖고 있다. 또한 응집제 주입지점인 혼화지 유입부와 응집제주입에 따른 탁질제거효과를 판단할 수 있는 침전지 유출지점 간에는 체류시간이 3시간 이상 존재하여 실시간 피이드백 제어가 곤란하다. 이러한 문제가 있어 정수장에서는 자-실험(jar-test)을 1회/일 이상 실시하여 응집제주입률을 결정하고 있으나 조건의 변화, 단속적인 결과, 수동실험의 불편 등으로 약품주입자동화의 결핍됨이 되고 있다.

응집제주입률 결정에서 이와 같은 어려움을 개선하고자하는 노력은 크게 세 가지로 분류되고 있다. 첫째는 기존의 방법인 자-실험의 불편함과 정도를 개선하고자 자동실험장치를 개발하려는 노력으로 자동자-실험기에 의해 응집제와 알칼리제의 자동주입이 가능함을 발표하였다(山本信二, 1992). 둘째는 응집제 주입 직후의 상태를 센서를 이용한 측정으로 체류시간 후의 결과를 예측함으로써 실시간 피이드백 제어를 실현하고자하는 방안이다. 응집제주입에 따른 체타전위값의 변화나(Dutta, 1975), 유동전류측정기(streaming current detector)에 의한 피이드백 제어가 연구되었으며(Dental, 1989), 유동전류측정기를 이용한 폴리머 자동주입제어에 대한 연구도 수행되었다(Mohammad, 1998). 셋째는 통계적인 방법, 원수 수질에 따른 계산식 산출 및 과거운전자료나 자-테스트 자료의 학습에 의한 최적주입률 결정 등과 같은 피이드퍼워드 제어를 실현하고자하는 방안이다. 다변수회귀법을 이용하여 수질인자와 응집제주입률과의 관계

를 주입률식으로 표현하였으며 신속하고 정확하게 응집제주입률을 구할 수 있었다고 보고하였다(김홍석, 1993). 운전자의 경험을 바탕으로 퍼지추론하여 운전실적자료와 비교한 연구와(Tagagi, 1985) 신경회로망을 학습하여 결과를 운전실적자료와 비교한 연구(우광방, 1997; 박희경, 1999), 유전알고리즘-퍼지를 이용하여 최적화 퍼지시스템을 구하였고, 결과를 운전주입률과 비교분석하였으며(강이석, 1999), 뉴로-퍼지에 의한 응집제주입률을 구하였다(정우섭, 1997). 알고리즘에서 퍼지시스템이 정수처리시스템에 적합하다는 것은 입증되었으나(Sugeno, 1985), 그 구성의 어려움으로 학습능력이 있는 유전알고리즘, 신경회로망 등과의 합성으로 최적화 알고리즘을 구성하여 목적을 달성하려하고 있다.

본 논문에서는 퍼지추론의 구성요소인 규칙표(rule table)와 멤버십함수로 구성된 실수형 문자열을 유전알고리즘에 의해 최적화시켜 응집제주입률을 예측하는 퍼지추론시스템을 구하였으며, 실수형 유전-퍼지시스템에 의한 결과를 비교분석 하였다. 탐색에 사용된 입력자료는 정수장의 실제 과거운전실적자료의 일간 수질(수온, pH, 탁도, 알칼리도) 및 응집제주입률로 조류발생일과 전도현상이 발생하는 기간의 자료를 제외하고 탐색을 수행하였고, 탐색에 사용하지 않은 과거운전실적자료로 최적화 퍼지시스템의 성능비교와 응집제주입공정의 자동화 가능성을 확인하였다.



IF TU = ZE and pH = PS and AL = ZE and  
Tem = PS THEN LAS = 13.2ppm

여기서 TU는 원수탁도, pH는 pH, AL는 알칼리도, Tem는 수온, LAS는 응집제를 나타낸다. 추론엔진으로는 여러 종류가 있으나 다른 방법과 차이가 적고 간단한 내적-합 무게중심(product-sum gravity)법을 적용하였다. 퍼지추론에 사용되는 멤버쉽함수는 삼각형을 사용하여 수질변동폭을 균등 분할한 후 출력멤버쉽함수형의 규칙표와 동시에 충분히 탐색하였으며, Fig. 2에서와 같이 실수형 유전-퍼지알고리즘으로 전환하여 최적화 퍼지시스템을 탐색하였다 (Park, 1994; 김용열, 1999). 멤버쉽함수의 탐색에는 지지요소(support element)인 삼각형 꼭지점요소 각각을 최적화하는 방법으로 탐색을 실시하였다.

### 3.3. 실수형 유전-퍼지시스템

퍼지시스템에서 가장 어려운 점은 규칙표와 멤버쉽함수를 구성하는 일이다. 고도의 비선형 다변수특성을 갖는 시스템의 규칙을 단순히 전문가의 경험적 지식이나 실험에 의해 구성하는 일은 상당히 주관적이며 장기간이 소요되고 경험에 의존하기 때문에 최적의 규칙표를 결정하기란 쉽지 않다. 유전 알고리즘은 정점 근방까지는 빨리 수렴하고, 국부적인 최적화에 빠지지 않는 장점이 있으나 최종값을 보장하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 합성을 실시하였다(황희수, 1992; Park, 1994). 응집제주입률 결정을 최적화하기 위해서는 궁극적으로 Eq.(2)의 목적함수값 E를 최소화시키는 규칙표와 멤버쉽함수를 구성하는 것이다. 반면에 유전

알고리즘에서는 적합도 함수를 최대화시키도록 진화가 이루어지므로 Eq.(3)과 같이 최소화문제를 최대화 문제로 변경하여 사용하였다.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N |RLAS - CLAS|}{\sum_{i=1}^N RLAS} \quad (2)$$

$$f = 1/E \quad (3)$$

여기서 RLAS는 실제 주입된 응집제주입률이고, CLAS는 퍼지추론에 의하여 계산된 응집제주입률 그리고 N은 자료의 개수이다.

복수 파라미터로 구성된 최적화 문제를 푸는데 성공적으로 사용된 코딩 방식은 다수의 단일 파라미터를 직렬로 연결하는 것이다. 규칙표의 경우에 자동수질측정기에서 측정되는 입력변수 4가지에 대하여 퍼지변수의 수를 5로 하면 중복순열에 의하여  $5 \Pi 4 = 625$ 가지의 퍼지규칙이 필요하다. 멤버쉽함수의 경우는 입력변수 4가지에 각 변수별로 그림 3과 같은 멤버쉽함수의 지지요소(support element)인 삼각형 꼭지점요소가 13개씩 있어 총 52개의 문자로 구성하였다(김용열, 1999). 최적화시는 유전알고리즘의 장점을 유지하기 위하여 출력멤버쉽함수형으로 탐색을 실시하여 전체적인 최적에 접근한 후에 실수형 유전-퍼지알고리즘으로 전환하여 미세조정에 의한 정점탐색을 실시하였다. 출력멤버쉽함수형에서는 퍼지변수의 수가 5이므로 5가지로 한정되는 반면 실수형 유전-퍼지알고리즘에서는 규칙표 자체가 응집제주입률을 나타내는 값이므로 많은 퍼지변수 수를 갖는 구조이므로 정밀 추론이 가능하게 된다. 규칙표와 멤버쉽함수의 최적화는 Fig. 2와 같다. 출력 멤버쉽함수형 최적화 후 실수형 유전-퍼지알고리즘으로 전환하여 좌측의 조정문자열이 우측의 규칙표와 멤버쉽함수를 조정하여 최적화시킨다.

멤버쉽함수는 Eq.(4) 및 Fig. 3과 같이 멤버쉽함수의 지지요소인 삼각형 꼭지점요소 각각을 좌우 이동하여 최적의 멤버쉽함수를 탐색하는 방법이다.  $\Delta$ 는 꼭지점요소의 좌우 이동량을 나타내는 변수이고  $A_i$ 는 멤버쉽함수의 삼각형 꼭지점요소이다.

$$A_i = A_j + \Delta \quad (4)$$

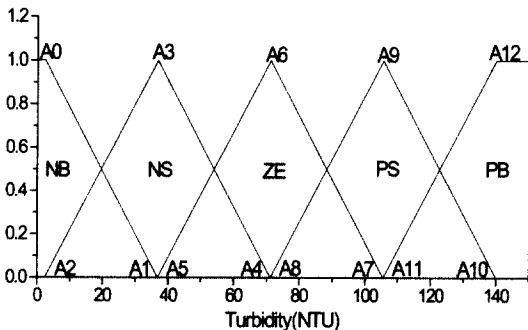


Fig. 3. 퍼지멤버쉽함수.

여기서  $i = 0, \dots, 12$ 이다.

### 3.4. 탐색영역조정

유전 알고리즘 특성상 여러 방향에서 탐색을 수행하여 국부수렴의 문제가 발생하지 않지만, 원수수질 자료 중에는 급변하는 자료가 적어, 적은 수의 탐색 자료에서 큰 오차가 발생하여도 전체 적합도에 미치는 영향이 적다. 따라서 정점근방으로 접근하는데 많은 시간이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 탐색영역을 조정하였다.

운전주입률과의 오차에 한계치를 설정하여 한계치를 초과하는 문자열을 도태시키는 방법을 사용하였는데, 이 한계치를 탐색횟수에 따라 축소시키면 정점에 빠른 시간내 접근하게 된다.

## 4. 전산모사

### 4.1. 유전-퍼지시스템의 모델링

정수처리공정의 응집제 주입제어의 모델링은 Fig. 4와 같다. 최소한 최근 1년간의 운전실적자료를 탐색 데이터로 이용하여 실수형 유전-퍼지알고리즘에 의해 최적화 퍼지시스템이 구성된다. 자동수질측정기에서 얻어진 데이터(수온, pH, 탁도, 알칼리도)를 최적화된 퍼지시스템으로 추론하여 응집제주입률을 결정한다. 응집제주입률이 결정되면 정수장 유입유량과 곱해서 실제 주입해야할 응집제양을 결정하고, 응집제주입기에 의해 자동제어 된다.

실수형 유전-퍼지알고리즘을 이용한 퍼지시스템의 최적화 탐색과정은 Fig. 5과 같다. 적합도가 비교적 높은 상위 반은 보존하고, 비교적 낮은 반 이하의 문자열만 변경시킨다. 유전알고리즘의 조정문자열이 유전연산에 의하여 결정되면, 이 조정문자열이 규칙표

와 멤버쉽함수 문자열을 조정하여 변경시킨다. 변경된 규칙표와 멤버쉽함수로 평가하여, 조정문자열, 규칙표와 멤버쉽함수 문자열에 적합도가 주어진 다음 탐색과정으로 인계된다. 이때 조정은 탐색데이터와 관련된 규칙표, 멤버쉽함수만 조정되고 관련이 없는 부분은 초기 설정값이 유지된다.

이러한 과정을 반복하면서 규칙표와 멤버쉽함수는 최적화가 이루어진다. 최종적으로는 가장 우수한 문자열의 규칙표와 멤버쉽함수가 퍼지시스템을 구성한다.

멤버쉽함수를 문자열로 구성한 것을 Fig. 2에서 보여주고 있다. 초기에는 탐색데이터를 읽어 수질별 최소값과 최대값을 구한 다음 균등분포로 구성한 후 탐색 조정한다.

규칙표도 동시에 같은 방법으로 최적화가 이루어지는데, 이때 목표 적합도나 반복회수를 초과하면 반복을 정지한다. 이렇게 작성된 규칙표와 멤버쉽함수에 원수수질을 입력자료로하여 응집제주입률을 결정하게 된다.

운영시에는 유전-퍼지알고리즘에 의해 탐색을 계속하고 있다가 자동수질측정기에서 측정된 수질데이터 중 하나라도 5%이상의 변화가 있다면 그 동안 탐색된 최적화 퍼지시스템에 의해 변화된 수질을 입력자료로 응집제주입률을 결정하여 주입을 계속한다. 주입률 변경 후에는 계속하여 탐색을 실시하여 퍼지시스템을 최적화시킨다.

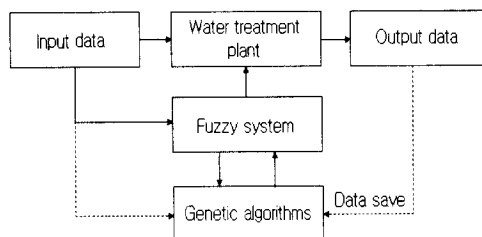


Fig. 4. 정수처리공정의 응집제주입제어.

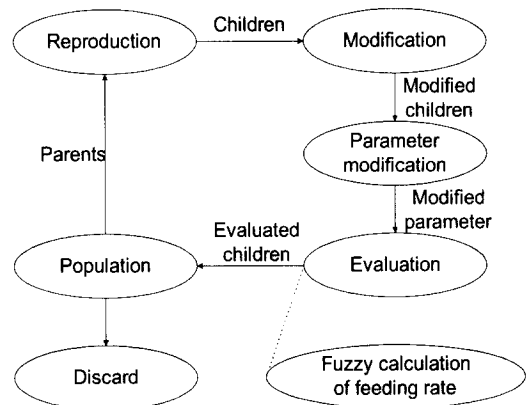


Fig. 5. 규칙표와 멤버쉽함수의 최적화 탐색과정.

Table 1. 초기설정값

|            | 실수형 유전-퍼지      |
|------------|----------------|
| 문자열 수      | 4              |
| 교배율        | 0.7            |
| 돌연변이율      | 0.1            |
| 교배방법       | Uniform        |
| 부모문자열 선정방법 | Roulette wheel |
| 규칙표 수      | 625            |
| 멤버쉽함수 변수   | 52             |

4.2. 전산모사

탐색과 검증에 사용된 자료는 2000~2002년까지 G정수장의 일간 운전실적자료를 사용하였다. G정수장은 하천 취수하므로 수량 및 수질의 변동이 심하여 안정되지 않은 운전조건을 갖추고 있고, 수질도 좋지 않다. 또한 조류발생이나 전도현상 발생시는 자동수질측정기에서 얻어진 수질데이터와 응집제주입률과의 관계가 달라지므로 제외하고 탐색에 사용하였다. 조류발생 시에는 조류가 발생한 데이터만을 모아 별도의 시스템으로 구성하면 해결이 가능하나, 조류발생시점을 알 수 있는 센서가 없어 원수수온에 따라 추정하여 운영하고, 근무자가 조류발생에 대하여 항상 관심을 가지고 조심하여 운영하면 자동화가 가능할 것으로 본다. 또한 원수의 수질에 알칼리제 주입에 따른 pH와 알칼리도의 변화는 상수도시설기준에 의거하여 변경 후 탐색에 이용하였다.

따라서 열악한 환경에서 운전한 자료를 가지고 시험함으로써 본 시스템의 성능을 검증할 수 있는 조건을 갖추고 있다. 운전실적자료를 이용하여 실수형 유전-퍼지알고리즘을 이용한 퍼지시스템을 구성하였고 검증을 위하여 탐색에 사용하지 않은 자료로 응집제 주입률을 결정하고, 같은 기간에 주입된 실제주입률과 비교 검토하였다.

탐색시 Table 1과 같이 초기값을 설정하여 충분한 탐색을 실시하였다.

5. 결과 및 고찰

실제 정수장 운전자료를 탐색자료로 실수형 유전-퍼지알고리즘에 의하여 최적화 퍼지시스템을 구하였

Table 2. 결과비교

|      | 탐색결과  | 시험결과  |
|------|-------|-------|
| 적합도  | 13.37 | 10.55 |
| 최대오차 | 9.81  | 13.27 |
| 평균오차 | 2.71  | 3.14  |

다. 이 최적화 퍼지시스템에 탐색에 사용하지 않은 원수수질데이터를 입력자료로 하여 응집제주입률을 결정하고 실제주입률과 비교 분석을 실시하였다. 탐색시에는 330 일분의 자료를 사용하여 탐색을 실시하였으며 탐색 결과를 Fig. 6에서 제시하고 있다. 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이렇게 만들어진 퍼지추론 시스템을 이용하여 Fig. 7과 같이 탐색에 사용하지 않은 자료를 퍼지 연산하여 얻은 주입률과 운전주입률을 Fig. 8에 나타내고 있다.

Table 2와 같이 탐색시의 결과와 시험시의 결과를 비교하였다. 시험시에 적합도가 더 작은 이유는 탐색시 사

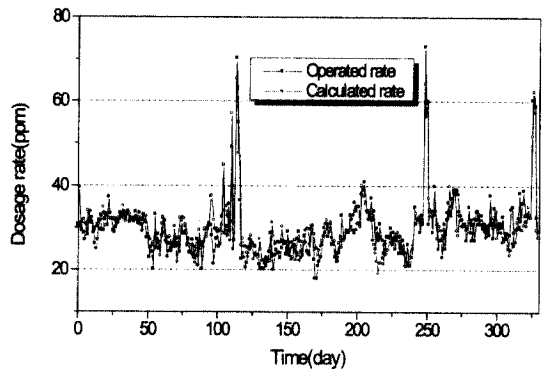


Fig. 6. 실수형 유전-퍼지에 의한 응집제주입률 비교(탐색시).

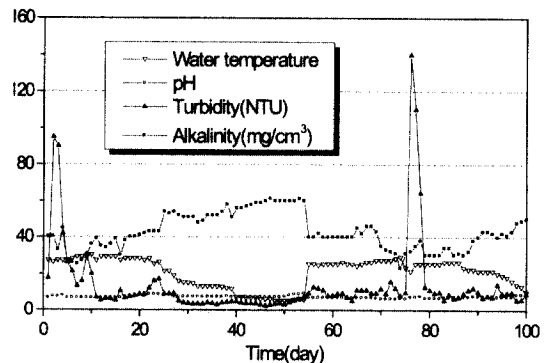


Fig. 7. 시험용 수질입력 데이터.

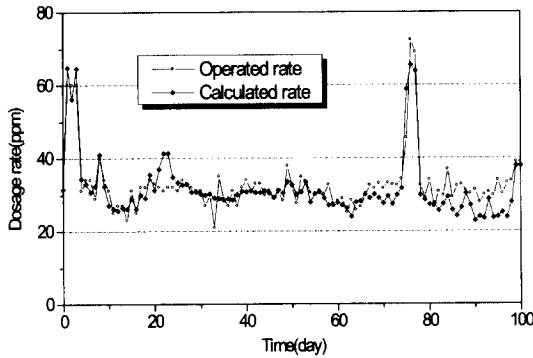


Fig. 8. 실수형 유전-퍼지에 의한 응집제주입률 비교(시험시).

용한 자료의 수는 330일분으로 시험시의 자료 수 100 일분보다 많아서 주입률의 변화가 더 크기 때문이다. 최대오차가 탐색시보다 증가하는 것은 당연하다고 할 수 있으나, 최대오차 발생시간이 수질변화가 큰 시기에 발생하고 있기 때문에 자-실험이 빠른 수질변화에 적응하지 못하는 것이 일반적이다. 따라서 안전하게 운영하는 과잉주입에 따른 오차를 상당부분 포함하고 있을 것으로 본다. 평균오차 또한 약간 증가하였으나 비슷한 결과를 보이고 있어 4가지 수질인자가 수질특성을 잘 대변하고 있음을 알 수 있다.

Table 3에서는 실수형 규칙표와 Fig. 9에 실수형 유전-퍼지알고리즘에 의한 규칙표와 멤버쉽함수의 탐색에 의한 최적화 후의 결과를 보여주고 있다. Fig. 10에서는 유전-퍼지알고리즘에 의한 반복탐색으로 적합도가 향상되는 과정을 보여주고 있다. 랜덤하게

탐색되는 과정을 볼 수 있다.

근본적으로 자-실험에 의한 응집제 주입률 결정과 근무자에 의한 조정에 의하여 운전되는 운전실적 자료이므로 어느 정도의 오차를 포함하고 있고, 이러한 데이터를 이용한 최적화이며, 4가지 수질인자가 모든 수질을 대변하고 있으므로 응집제주입률에 반영 안된 수질인자는 오차로 작용하는 반면에 응집제의 작용범위가 있어 오차부분을 보완하고 있다. 정수처리에서는 수질기준이 강화되고 있고, 응집제도 새로운 제품이 개발되고 있어, 이러한 경우에는 본 시스템을 바로 적용하기는 어려우나 최근에 적용하기 시작한 유동전류측정기와 같은 센서와의 결합에 의한 상호 단점을 보완하여 좀더 정도를 높일 수 있는 방안 등 지속적인 정도향상노력이 있어야 할 것으로 판단된다. 특히 조류발생에 따른 문제점 해결이 선행되어야만 본 시스템의 적용과 응집제주입의 자동화가 완성될 것으로 본다. 그렇지만 수질 급변시에는 자-실험에 의한 대처가 곤란하므로 본 실수형 유전-퍼지시스템을 사용하여 정수처리공정의 응집제주입률을 결정하면 수질 급변시에 발생하기 쉬운 수질사고를 미연에 방지할 수 있는 시스템으로의 역할은 충분하여 맑은 물 생산에 기여하는 바가 클 것으로 기대된다.

## 6. 결론

비선형이고 다변수적인 특성을 갖는 정수장 응집제주입률 결정을 위한 실수형 유전-퍼지 알고리즘을

Table. 3. 실수형 규칙표

|    |    | 알칼리도 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    |    | ZE   |      |      |      |      | PS   |      |      |      |      |      |
|    |    | 수온   |      | ZE   | PS   | PB   | 수온   |      | ZE   | PS   | PB   |      |
| NB | NS | NB   | NS   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| NS | pH | NB   | 45.6 | 45.6 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 |
|    |    | NS   | 31.5 | 59.5 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 |
|    |    | ZE   | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 |
|    |    | PS   | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 |
|    |    | PB   | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 |
| 탁도 | pH | NB   | 17.9 | 18.2 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 34.6 | 31.2 | 45.2 | 31.7 | 31.7 |
|    |    | NS   | 17.9 | 72.5 | 73.1 | 31.7 | 31.7 | 34.6 | 73.0 | 45.1 | 72.7 | 31.7 |
|    |    | ZE   | 31.7 | 18.2 | 17.9 | 31.7 | 31.7 | 34.6 | 31.7 | 45.4 | 72.8 | 31.7 |
|    |    | PS   | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 34.6 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 |
|    |    | PB   | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 34.6 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 |

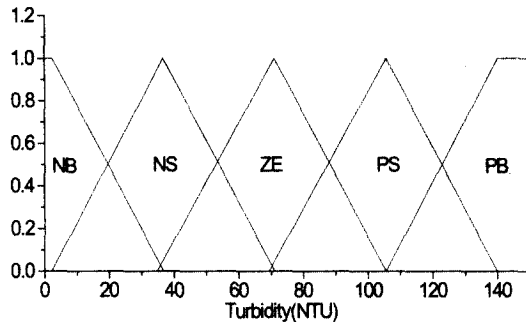


Fig. 9. 멤버쉽함수 최적화시 탁도 멤버쉽함수.

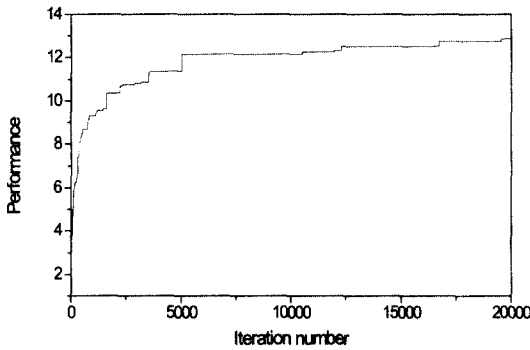


Fig. 10. 적합도 향상.

제안하였으며, 제안된 알고리즘이 수질변화에 잘 추 적합을 확인하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 퍼지시스템을 구성하는데 있어 가장 어려운 문제인 규칙표와 멤버쉽함수의 구성에 실수형 유전-퍼지알고리즘을 이용하여 최적화된 퍼지시스템을 구성할 수 있었다.

2) 실수형 유전-퍼지알고리즘에 의한 응집제주입 제어의 자동화 가능성을 확인할 수 있었다.

3) 대 국민 음용수와 관련되어 민감한 사항이므로 off-line으로 실제 검증기간을 거친 후 실용화하여야 할 것이다.

4) 향후과제로는 근본적으로 어느 정도의 오차를 포함하고 있는 최적화이므로 정도를 높일 수 있는 방안을 지속적으로 모색하여야 할 것이다.

## 참고문헌

- 김용열, 강이석 (1999) 유전-퍼지를 이용한 정수장 응집제 주입률 결정, 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 5(7), pp. 876-882.
- 김홍석, 김성현 (1993) Jar-Test를 이용한 凝集劑 注入率 決定에 관한 實驗研究, 대한상 하수도학회지, 2, pp. 39-46.
- 남의석, 박종진, 장석호, 차상엽, 우광방, 이봉국, 한태환, 고택범 (1997) 신경회로망을 이용한 상수처리시스템의 응집제 주입 공정 최적화, 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 3(6), pp. 644-651.
- 山本信二, 鈴木潔 (1992) Automatic Dosing Control of Coagulant and Alkaline Chemicals by The Auto Jar Tester, 일본 공업용수, 407, pp. 12-17.
- 정우섭, 오석영 (1997) 지능형 응집제 투입 시스템의 개발, 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 3(6), pp. 652-658.
- 황희수, 오성권, 우광방 (1992) 유전알고리즘과 퍼지 추론 시스템의 합성, 전기학회논문지, 41(9), pp. 1095-1103.
- Daihee Park, Abraham Kandel, and Gideon Langholz (1994) Genetic-based new fuzzy reasoning models with application to fuzzy control, *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, 24(1), pp. 39-47.
- David E. Goldberg (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-wesley.
- M. Mizumoto (1994) *Fuzzy Controls under Product-Sum-Gravity Methods and new Fuzzy Control Methods*, Fuzzy Control System, CRC Pres. Inc.
- Mohammad M. Abu-orf and Steven K. Dental (1998) Automatic Control of Polymer Dose Using The Streaming Current Detector, *Water Environment Research*, 70, pp. 1005-1018.
- Steven K. Dental and Kristine M. Kingery (1989) Using Streaming Detectors in Water Treatment, *J. AWWA*, 81(3), pp. 85-94.
- Tomohiro Takagi, Michio Sugeno (1985) Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, SMC-15(1), pp. 116-131.
- V. S. Gupta, S. K. Bhattacharjya, B. K. Dutta (1975) Zeta-Potential Control for Alum Coagulation, *American Water Work Association*, pp. 21-22.