

퍼지논리 알고리즘을 이용한 염색기 제어 시뮬레이터의 개발

The Developments of Dyeing Machine Control Simulator using Fuzzy Logic Algorithm

조 현 찬*, 김 광 선**, 정 형 찬***, 전 홍 태****

Hyun Chan Cho*, Kwang Sun Kim**, Hyung Chan Jung***, and Hong Tae Jeon****

ABSTRACT

Intelligent control of the dyeing machine is a central part to improve the productivity of autonomous dyeing systems. Recently, many number of control methods are introduced. One of them is fuzzy logic algorithm. Fuzzy logic based controller has many desirable advantages, which are simple to implement on the real time and need not the information of dynamic characteristics of the systems. In this paper we propose a new dyeing machine control simulator using fuzzy logic algorithm as an approach to develop the intelligent auto-dyeing control system. This developing approach of the fuzzy control simulator is based on linguistic control stratege of experts.

I. 서 론

최근 염색 제조분야의 국제화, 염색품질의 균일화 및 이에 따른 제조공정의 어려움, 작업환경의 개선등을 목적으로 염색 제조업체의 자동화 도입이 적극적으로 요구 되고 있으며 그에 관한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다 [11]. 본 연구도 그 일환으로 그림 1과 같은 염색 자동화 시스템중 염색 설비 제어의 일부분으로써 중요한 위치를 차지하고 있는 염색기의 퍼지제어를 위한 시뮬레이터를 설계 및 개발한다.

일반적으로 염색공정에 사용되는 제어시스템은 고전적인 선형귀환 제어기법(PID 제어기법)에 의해 제어되나 이는 염색기의 온도특성등이 매우 비선형적이고 수학적인 모델링이 어려워 만족할만한 결과를 얻지 못한다. 설령 시행착오법(try and error)에 의해 하나의 보편적이라 보여지는 PID 이득값을 얻는다 할지라도 새로운 환경에서의 강건성(robustness)에 문제점을 갖는다. 이 경우 또다시 시행착오법에 의해 PID 이득 값을 결정 한다면 이것은 많은 시간을 소비할 뿐더러 전문가가 아니면 불가능하다. 이런 어려움을 극복하기 위한 한가지 방법은 염색공정의 제어시스템 도입시 인간의 지적 능력을 도입하는 것이다[3][4][5]. 예를 들면 염색 작업에 숙련된 전문가의 능력(시스템의 시간 지연, 동특성의 비 선형성, 성능이 부실한 센서에 의한 부정확한 정보의 획득에도 불구하고 주어질 염색 시스템을 정상적으로 운전할 수 있는 능력)을 논리적으로 전개하여 염색 제어 시스템에 적용하는 것

* 한국기술교육대학 전자공학과
** 한국기술교육대학 기계공학과
*** 한국기술교육대학 수학과
**** 중앙대학교 전자공학과
* Dept. of Electronic Engineering, KITE
** Dept. of Mechanical Engineering, KITE
*** Dept. of Mathematics, KITE
**** Dept. of Electronic Engineering, Chungang Univ.

이다.

상기와 같이 인간의 애매한 능력을 이론적으로 표현해줄 수 있는 방법으로는 퍼지(fuzzy)이론이 있다. 1965년 미국 캘리포니아 대학의 Zadeh 교수에 의해 제안된 퍼지이론은 애매한 정보로부터 유용한 정보를 추출해낼 수 있는, 즉 인간의 애매한 표현을 처리할 수 있는 이론적 바탕을 제공해 주고 있다[1][2]. 이 퍼지이론은 논리 및 추론(inference)의 잇점을 갖고 있으며 퍼지집합론(fuzzy set theory), 퍼지논리(fuzzy logic), 퍼지측도(fuzzy measure)등의 개념이 수학적으로 비교적 잘 정립되어 있으며 최근 우리나라를 비롯해 일본 등지에서 공장자동화(factory automation : FA) 및 가전제품등에 활발히 이용되어 그 효용성이 입증되고 있다.

본 연구에서는 염색공정 통합시스템중의 제어시스템 설계에 있어서 상기와 같은 퍼지이론을 도입하여 보다 지능화된 제어 알고리즘을 갖는 시스템을 개발하고자 한다. 즉, 제이시 퍼지논리(fuzzy logic)를 이용해 기존의 제어이론에 전문가의 언어적 제어(linguistic control)규칙 베이스를 첨가하여 요구되는 성능을 만족하도록 폐귀환 제어시스템을 개발한다[6].

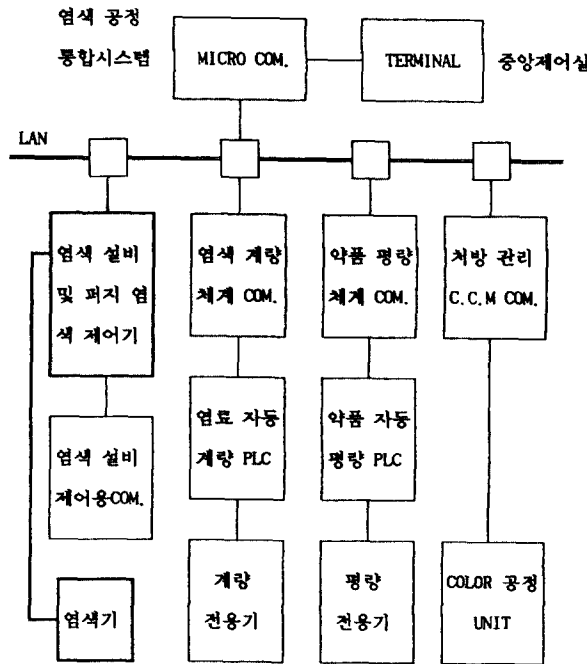


그림 1. 염색 자동화 시스템 개요도

II. 문제서술

고전적인 PID 제어기법에 의한 염색기의 제어는 염색기의 온도특성이 매우 비선형적이고 염색기의 수학적인 모델링이 어려워 만족할만한 결과를 얻지 못한다. 또한 제어환경이 변할 경우에는 PID 이득값을 변경시켜야 함으로 새로운 환경에서의 강건성에 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 본 연구에서는 퍼지 논리(logic)와 퍼지 추론(inference)의 장점을 갖는 퍼지 제어를 적용한다.

퍼지 제어는 퍼지 이론의 응용분야로서 인간의 판단등, 애매성을 포함한 제어 알고리즘을 If-Then 형식으로 표현하고, 퍼지 추론을 이용하여 제어량을 결정한다. 그러므로 퍼지 제어기는 인간의 사고방식을 바탕으로 한 지능

형 제어기라 할 수 있다[2][8].

2-1. 염색기의 수학적 모델링

일반적으로 퍼지 제어기의 성능 분석을 위해서 모의 실험을 실행할 경우에 플랜트의 수학적 모델링을 필요로 한다. 본 연구에서는 염색기 구조를 단순화하여 그림 2와 같이 선정하고 다음과 같은 가정하에서 염색기의 동적 방정식을 유도하였다.

가정 1: steam관 사이의 온도는 입력 온도(T_{in})과 출력 온도

(T_{out})와의 평균치($T_{aver} = (T_{in} - T_{out})/2$)로 일정하다.

가정 2: 염색기안의 온도와 압력은 일정하다.

상기의 가정하에서 steam이 염색기에 공급하는 열량은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_s = \dot{m} C_p (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_s = \rho V C_p \dot{T} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_s = hA \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{2} - T \right) \quad (3)$$

$$\dot{m} = \beta \dot{m}_{max} \quad (4)$$

- 여기서, \dot{m} : steam 공급량 (kg/sec)
 \dot{m}_{max} : steam 최대 공급량 (kg/sec)
 C_p : steam의 비열 (kcal/kg $^{\circ}$ C)
 C_p' : 염색액체의 비열 (kcal/kg $^{\circ}$ C)
 V : 염색기의 부피 (m 3)
 ρ : 염색액체의 밀도 (kg/m 3)
 h : 대류 열전달 계수 (kcal/m 2 sec)
 A : 염색액체와 접촉면적(m 2)
 β : valve 조정량
 $\dot{T} (= dT/dt)$: 시간에 대한 온도변화율

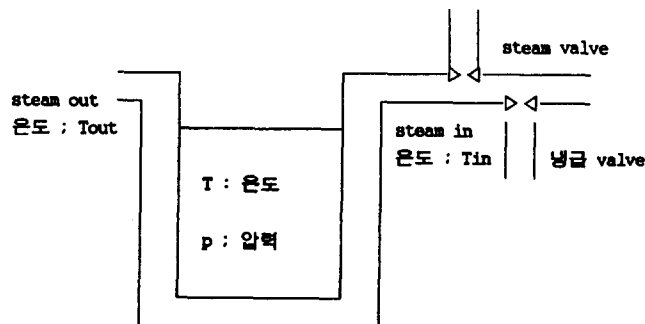


그림 2. 염색기의 간략화된 모델

상기의 식(1)(2)로부터 Tout은 식(5)와 같다.

$$T_{out} = - \frac{\rho V C_p \dot{T} - \beta \dot{m}_{max} C_p T_{in}}{\beta \dot{m}_{max} C_p} \quad (5)$$

또한 식(3)과 (5)로부터 염색기 내부 온도와 steam valve 조정량과의 관계식, 즉 염색기의 간략화된 동적 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{T} = \frac{hA 2\beta \dot{m}_{max} C_p}{\rho V C_p (2\beta \dot{m}_{max} C_p + hA)} T \quad (6)$$

2-2. 문제 서술

본 연구에서는 온도와 대응하는 시간 pattern이 주어졌을 때의 정확한 온도 제어가 목적이다. 이때의 염색기 온도제어 목적은 염색기 내부의 온도가 주어진 온도에 추종하도록 하는 것으로 다음 식의 실행지수를 최소화 하도록 제어를 설계한다.

$$\text{최 소 화 : } J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (PX_e^2 + RX_{de}^2) dt \quad (7)$$

제한조건 : $Q_H^{\min} \leq Q_H \leq Q_H^{\max}$

여기서, X_e ; 온도 오차
 Q_H ; 가열 열량
 P, R ; 가중 요소

염색기의 동적특성은 염색기의 구조, 외부 온도 조건에 의한 발열량, 염색 액체의 비열, 그리고 steam의 공급 특성등 많은 환경조건에 따라서 달라지게 되며 비선형성과 지연시간이 큰 특성을 보인다. 그러므로 고전적인 선형제어이론인 PID제어로는 제한된 범위내에서만 만족할 만한 성능을 얻을 수 있으나 일반적으로 퍼지 제어는 PID보다는 더 강건한 성능을 보장한다. 퍼지제어기와 PID제어기와의 성능평가는 상기의 실행지수에 의해서 평가된다.

III. 염색기의 퍼지 온도제어 알고리즘

3-1. 제어시스템의 구성

퍼지제어기를 염색기 온도 제어에 적용한 전체 시스템은 그림 3과 같다.

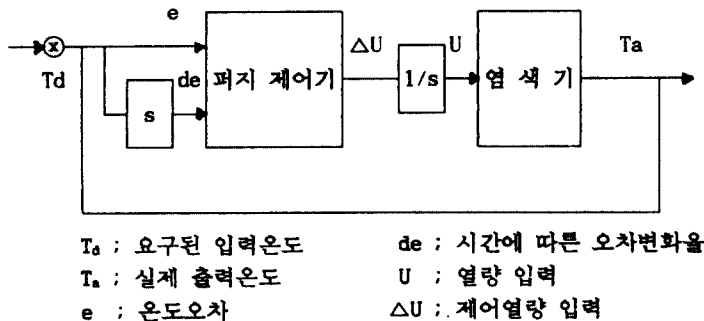


그림 3. 퍼지 온도 제어시스템의 블록도

3-2. 퍼지 온도제어 알고리즘

퍼지 제어기의 실제 적용시 최초로 문제가 되는 것은 제어기의 설계, 즉 퍼지 제어 규칙을 어떻게 설계하는가이다. 고전 제어이론과 같이 수학적 방법으로 설계하는 방식은 아직 설립되어 있지 않다. 그러나 설계 지침은 정리되어 있다. 이를 바탕으로 한 본 연구에서의 온도 제어알고리즘은 다음과 같은 단계로 설계되었다[4][8].

[단계 1] 퍼지 입출력 변수 결정:

비선형 특성을 갖는 열색기의 온도제어를 위해서 상기 식(6)으로부터 다음과 같은 퍼지 제어기의 입출력 관계를 설정하였다.

- 퍼지 제어기의 입력 변수(전건부) : 온도오차($e = T_d - T_a$),
오차변화($de = e(t+1) - e(t)$)
- 퍼지 제어기의 출력 변수(후건부) : valve 조정량($\Delta U_v : -1 \sim 1$)
 - ① $-1 \sim 0$: 냉각 밸브 조정량
 - ② $0 \sim 1$: steam 밸브 조정량

[단계 2] 퍼지 소속함수 형태를 결정:

퍼지 규칙에서 조건부와 후건부의 언어적 변수는 퍼지 집합에 대응된다. 이 집합은 각각 한 전체 집합내에서 정의된 퍼지 집합을 나타낸다. 퍼지 변수에 어떤 퍼지 변수값이 주어졌을 때 이는 퍼지 변수가 가지는 값인 동시에 자체로 소속함수를 가진 퍼지 집합으로 정의된다. 여기서 퍼지 변수는 다음과 같은 퍼지 값을 갖는다.

- NB : Negative Big
- NS : Negative Small
- ZO : Zero
- PS : Positive Small
- PB : Positive Big

퍼지 집합은 전체 집합의 형태에 따라 이산형과 연속형의 소속함수를 가질 수 있다. 소속함수의 형태는 종형과 삼각형, 그리고 singleton으로 나누어진다. 본 연구에서는 입출력 변수에 다음과 같은 소속함수의 형태를 결정하였다.

- 입력변수 : 이등변 삼각형(isosceles triangle)
- 출력변수 : 퍼지 싱글톤(fuzzy singleton)

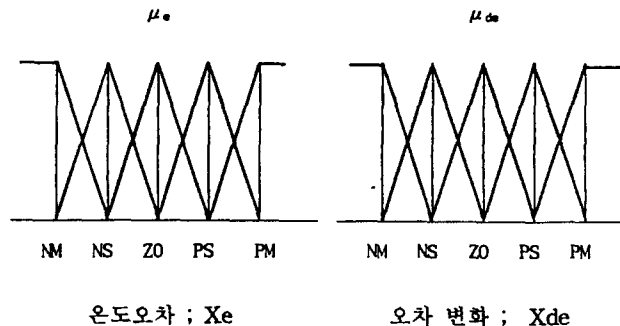
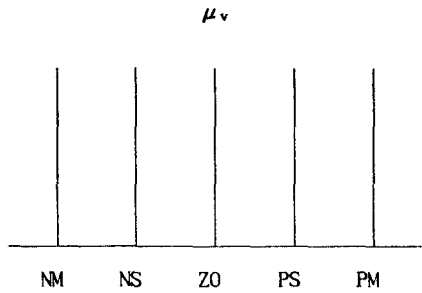


그림 4. 전건부의 퍼지 소속함수 형태



밸브 조정량 : ΔUv

그림 5. 후건부의 퍼지 소속함수 형태

[단계 3] IF ~ THEN ~ 에 의한 퍼지 규칙의 구성 :

입력 퍼지 변수가 결정되고, 그 변수의 값수가 결정되면 그림 6과 같이 입력공간이 정의된다. 이중에서 시스템의 특성을 고려해서 입력변수 영역을 나누어 그에 따라 제어규칙을 결정하게 된다. 일반적으로 퍼지 입출력 공간의 영역분할을 하는 일정한 규칙이 있는 것은 없으며 최적의 선택규칙도 없다. 다만 시스템의 특성에 대한 지식을 응용하고, 시행착오를 통해서 가장 좋은 퍼지 영역분할을 하게된다.

본 연구에서는 다음과 같은 속도형 제어규칙을 설정하였다. 이러한 속도형 제어규칙은 적은 제어규칙으로 제어할 수 있는 장점을 갖는다. 빈공간은 제어규칙이 사용되는 않는 부분에 해당한다.

ΔUv		e				
		NB	NS	ZO	PS	PB
de	NB			NB		
	NS			NS		
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	PS			PS		
	PB			PB		

그림 6. 퍼지 규칙 베이스

[단계 4] 추론 및 비퍼지화에 의한 제어 입력의 결정 :

퍼지제어에서 추론방식은 여러가지가 있으나 여기서는 단순 추론방식을 사용하였다. 퍼지제어에서는 퍼지집합을 플랜트의 조작량으로 플랜트를 제어할 수 없다. 즉, 퍼지집합을 실제 수치로 변환하여 조작량을 결정하여야

한다. 이러한 과정은 비퍼지화 과정으로 식 (8)과 같이 무게 중심법과 유사한 방식으로 실제 제어조작량을 계산한다.

- 퍼지 연산자 : MIN-SUM 연산자
- 추론 방식 : Simplified Inference Method

- ① 전건부의 적합도 계산 : $\mu_d = \mu_e \wedge \mu_{de}$
- ② 실제 제어량은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta U_T = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{di} \cdot \mu_{vi}}{\sum_{i=1}^n \mu_{di}} \quad (8)$$

여기서, n은 퍼지규칙 갯수

IV. 시뮬레이터 설계

4-1. 시뮬레이터의 기본 구성

단순형 퍼지 연색제어기 시뮬레이터는 그림 7에서 보듯이 크게 입력부, 알고리즘부, 그리고 출력부의 3 부분으로 나뉘어져 있다. 입력부는 패턴 입력과 연색기의 물리적 변수 및 PID 이득의 입력으로 구성되어 있으며(그림 8

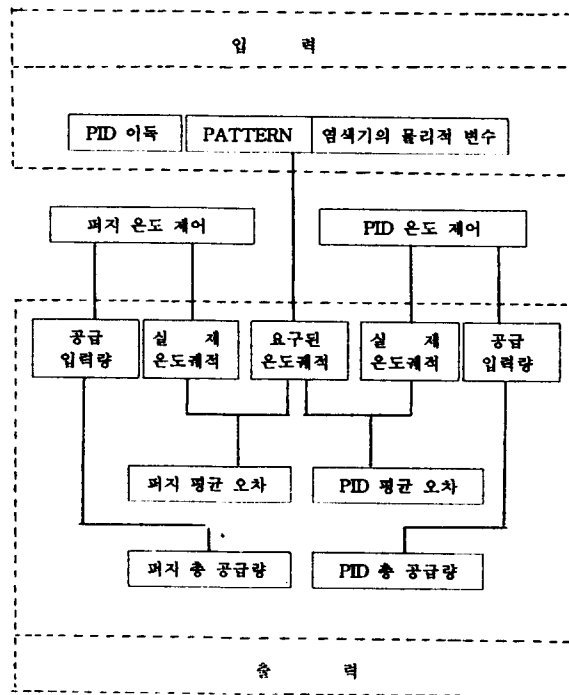


그림 7. 퍼지 연색 제어기 시뮬레이터의 기본 구성

및 9 참조) 알고리즘부는 퍼지 논리에 의한 온도제어 부분과 PID에 의한 온도제어 부분으로 구성되어 있다.

한편 출력부는 총 9개의 소부분으로 구성되어 있는데 그것은 각각 퍼지 제어부와 PID 제어부의 입력량(steam 혹은 냉각수량)과 실제 출력되는 온도제적 출력의 4 부분과 입력 패턴에 의한 요구되는 온도제적 출력, 그리고 퍼지 제어와 PID 제어에 의한 전체 평균오차 출력 및 염색기의 제어시 소비되는 전체 입력량의 4 부분이다.

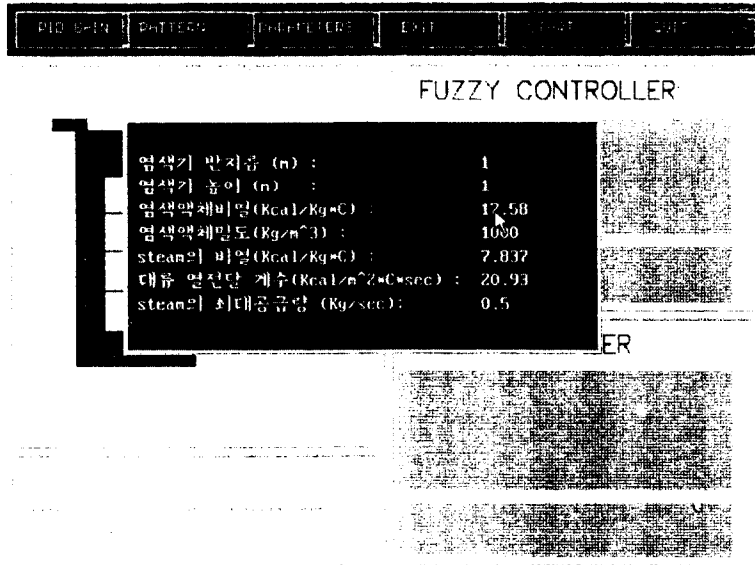


그림 8. 염색기의 물리적 변수 입력

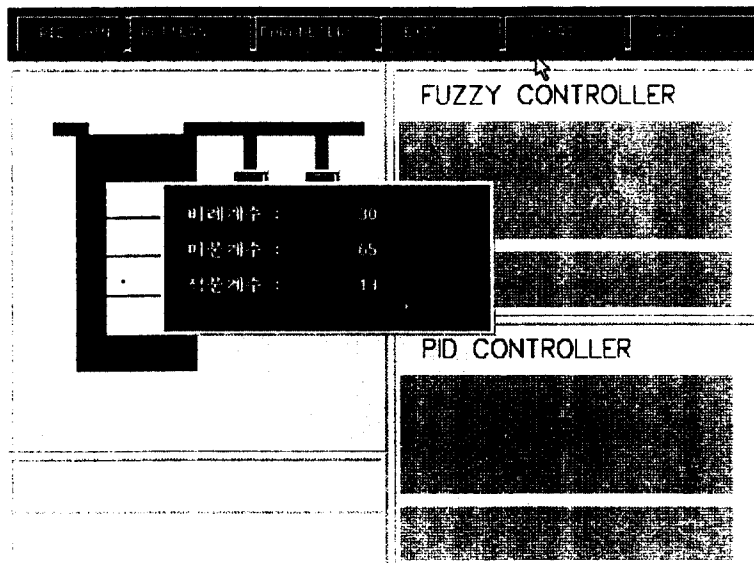


그림 9. PID 이득 입력

4-2. 성능평가

시뮬레이터의 성능평가를 위해 그림 10, 11, 12 와 같은 3개의 기본 입력 패턴에 대한 PID와 퍼지제어기의 온도 제어 결과를 제시하였다. 성능평가는 그림 13, 14, 15에서 본 바와 같이 평균오차와 총 입력량을 고려해 볼때 퍼지제어기가 PID제어기보다 성능이 뛰어난을 볼 수 있다. 즉, 총 입력량에서 PID제어기보다 적은 제어입력으로

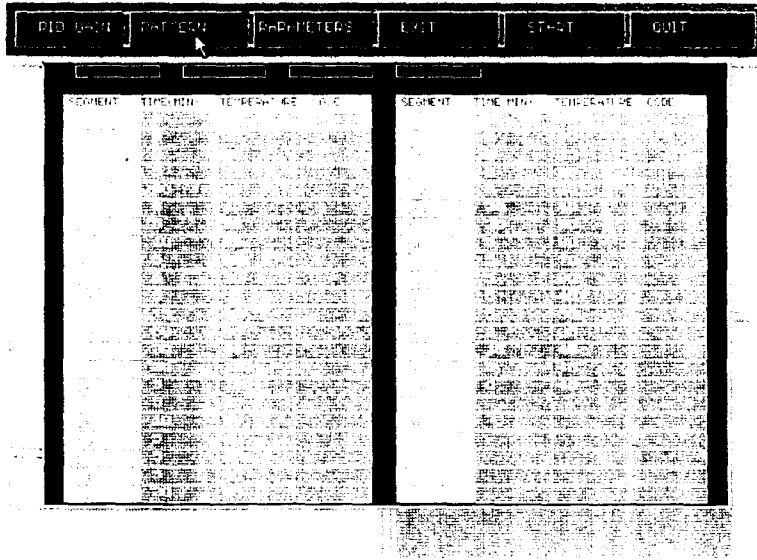


그림 10. 기본 패턴 1

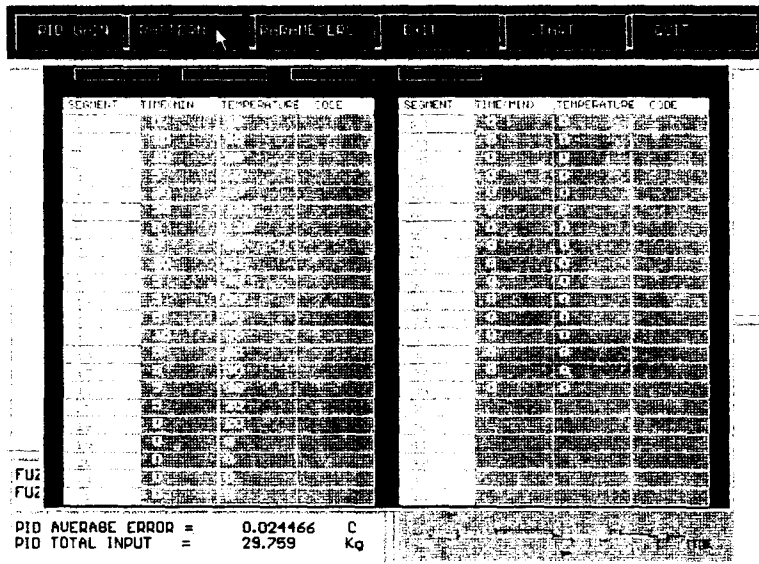


그림 11. 기본 패턴 2

주어진 온도 궤적을 더 잘 추정함을 알 수 있다. 이것은 PID제어기 보다 퍼지제어기에 의한 제어동작이 보다 향상된 열효율을 갖는다는 것을 나타낸다. 특히 그림 15에서 보듯이 제어기의 성능평가에 효과적인 계단 입력에 대한 각 제어기의 출력응답은 퍼지제어기가 PID 제어기보다 월등히 뛰어남을 알 수 있다. 이 경우 퍼지제어기는 평균오차가 약 40% 작고, 총 공급량은 PID 제어기에 비해 30%에도 못미치는 높은 에너지 효율을 내고있다.

SEGMENT	TIME(MIN)	TEMPERATURE	CODE
1	0	0	0
1	1	0	0
1	2	0	0
1	3	0	0
1	4	0	0
1	5	0	0
1	6	0	0
1	7	0	0
1	8	0	0
1	9	0	0
1	10	0	0
1	11	0	0
1	12	0	0
1	13	0	0
1	14	0	0
1	15	0	0
1	16	0	0
1	17	0	0
1	18	0	0
1	19	0	0
1	20	0	0
1	21	0	0
1	22	0	0
1	23	0	0
1	24	0	0
1	25	0	0
1	26	0	0
1	27	0	0
1	28	0	0
1	29	0	0
1	30	0	0
1	31	0	0
1	32	0	0
1	33	0	0
1	34	0	0
1	35	0	0
1	36	0	0
1	37	0	0
1	38	0	0
1	39	0	0
1	40	0	0
1	41	0	0
1	42	0	0
1	43	0	0
1	44	0	0
1	45	0	0
1	46	0	0
1	47	0	0
1	48	0	0
1	49	0	0
1	50	0	0
1	51	0	0
1	52	0	0
1	53	0	0
1	54	0	0
1	55	0	0
1	56	0	0
1	57	0	0
1	58	0	0
1	59	0	0
1	60	0	0
1	61	0	0
1	62	0	0
1	63	0	0
1	64	0	0
1	65	0	0
1	66	0	0
1	67	0	0
1	68	0	0
1	69	0	0
1	70	0	0
1	71	0	0
1	72	0	0
1	73	0	0
1	74	0	0
1	75	0	0
1	76	0	0
1	77	0	0
1	78	0	0
1	79	0	0
1	80	0	0
1	81	0	0
1	82	0	0
1	83	0	0
1	84	0	0
1	85	0	0
1	86	0	0
1	87	0	0
1	88	0	0
1	89	0	0
1	90	0	0
1	91	0	0
1	92	0	0
1	93	0	0
1	94	0	0
1	95	0	0
1	96	0	0
1	97	0	0
1	98	0	0
1	99	0	0
1	100	0	0

그림 12. 기본 패턴 3

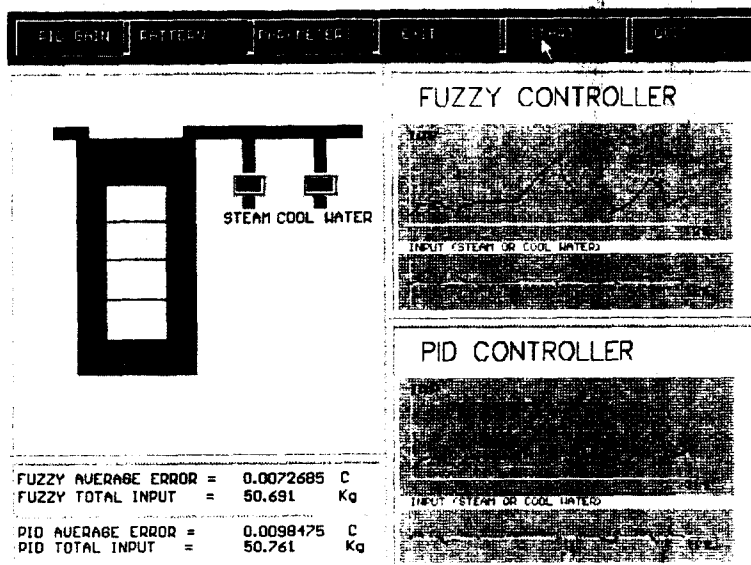


그림 13. 기본 패턴 1에 대한 동작상황

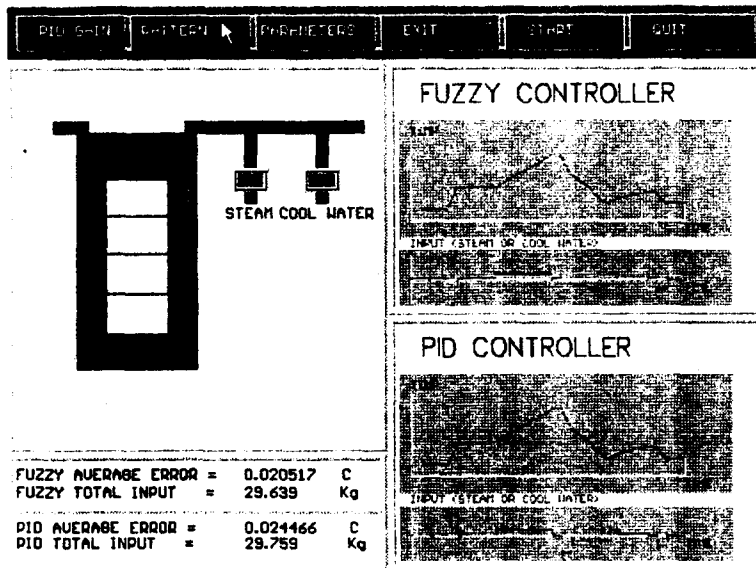


그림 14. 기본 패턴 2에 대한 동작상황

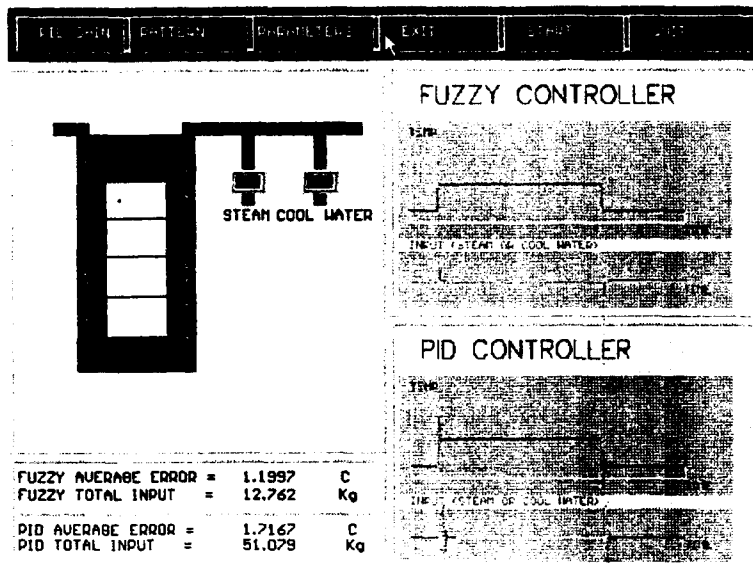


그림 15. 기본 패턴 3에 대한 동작상황

V. 결 론

본 연구에서 제시한 퍼지 염색제어기 시뮬레이터는 다음과 같은 특징을 보여주고 있다.

- ① 기존의 PID기법에 의한 제어보다 뛰어난 오차수렴성과 안정성을 갖는다.
- ② PID 제어기와 비교해서 한 공정에서 소비되는 steam 및 냉각수의 양이 적으므로 에너지효율이 향상되었다.
- ③ 열색기의 제어에 있어서 퍼지논리를 이용함으로써 열색기 제어의 지능화를 기대할 수 있으며 추후 기능이 향상된 제어기 개발이 쉬워진다.

즉, 개발된 시뮬레이터는 실제 열색기를 퍼지이론에 의해 온도제어하고자 할때 실제 열색기의 구동전에 미리 기존의 PID 제어기법과 퍼지 제어기법의 제어오차를 비교함으로써 하드웨어(hardware)적인 측면에서 퍼지 열색 제어기의 개발을 쉽게 해준다. 또한 퍼지 열색제어기 시뮬레이터는 열색 자동화시스템의 일부인 열색기의 제어에 퍼지논리를 이용함으로써 지능화된 열색 통합 자동화시스템의 구축을 도모할 수 있는 기반을 마련하였다. 이는 향후 다음과 같은 열색 자동화 통합시스템으로 확대 적용 가능할 것이다.

- ① 퍼지논리를 염료 계량시스템(CCK)에 적용한다.
- ② 퍼지결정법(fuzzy decision making)을 컴퓨터를 이용한 컬러매칭(CCM)에 적용한다.
- ③ 약품 평량시스템으로 퍼지 알고리즘을 확대 적용한다.

참 고 문 헌

1. L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," Inf. Control vol. 8, pp. 338-353, 1965
2. L. A. Zadeh, "Fuzzy logic," IEEE, Computer Mag., pp. 83-93, Apr. 1988
3. Abraham Kandel, "Fuzzy Mathematical Techniques with Applications," Addison-Wesley Publishing Company, 1986
4. M. Sugeno and M. Nishida, "Development of fuzzy algorithms for servo system," Fuzzy Sets and Syst., vol. 16, pp. 103-113, 1985
5. Y. F. Li and C. C. Lau, "Development of fuzzy algorithms for servo systems," IEEE Control Syst. Mag., pp. 65-72, Apr. 1989
6. J. A. Bernard, "Use of a rule-based system for process control," IEEE Control Syst. Mag., pp. 3-13, Oct. 1988
7. T. Tagaki and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," IEEE Trans. Syst. Man and Cybern., vol. SMC-15, pp. 116-132, Jan./Feb. 1985
8. C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-Part I, II," IEEE Tran. Syst. Man and Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 404-435, Mar./Apr. 1990
9. S. Shao, "Fuzzy self-organizing controller and its application for dynamic processes," Fuzzy Sets and Syst., vol. 26, pp. 151-164, 1988
10. H. Mizumoto, "Realization of PID controls by Fuzzy control methods," IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp. 709-715, 1992
11. 김 광선, "제어시스템의 응용사례," 대한기계학회 90년도 고체역학부문 학술강연회 초록집, pp. 37-51, 1990