

유리 용해로 온도 제어를 위한 퍼지 로직과 PI 제어기의 복합형 제어 알고리즘

A Hybrid Algorithm of Fuzzy Logic and Conventional PI Controller for the Temperature Control of Glass Melting Furnace

문운철, 김홍식, 박영문

(Un-Chul Moon, Heung Shik Kim and Young Moon Park)

Abstract : This paper presents a practical application of fuzzy logic control to temperature control of glass melting furnace. Due to the characteristics of glass melting furnace, a hybrid algorithm of conventional PI controller and fuzzy logic controller is proposed and discussed. Practical implementation results of the production furnace showed the effectiveness of the proposed control algorithm.

Keywords: fuzzy logic control, hybrid algorithm, PI controller, glass melting furnace

I. 서론

퍼지라는 개념이 Zadeh 교수에 의해서 주장된[1] 이후로, 퍼지이론은 패턴 인식(pattern recognition), 의사결정(decision making), 분류(classification), 최적화(optimization), 자동제어 등 많은 분야에 성공적으로 적용되었다[2]-[4]. 이들 중 자동제어 분야에서는 Mamdani 교수에 의해서 그 기본 개념이 제시된 이후로 [5][6], 여러 산업 현장에서 성공적으로 적용되었다[7][8]. 퍼지제어의 기본 개념은, 인간의 제어 지식과 경험을 퍼지이론을 이용하여 자동제어를 구현하고자 하는 시도로 이해될 수 있다[5][6][11]. 따라서 기존의 자동제어 이론으로 제어하기 힘든, 잘 정의되지 않은(ill-defined) 프로세스를 숙련된 인간 전문가가 직접 제어하고 있다면 이는 퍼지제어를 적용하기 위한 좋은 대상 플랜트가 될 수 있다.

이러한 관점에서 유리 용해로(glass melting furnace)의 온도 제어는 퍼지제어의 좋은 응용 분야가 될 수 있다. 원료를 안정적으로 용해하여 유리로 만드는 유리 용해로에서는 제품의 불량률을 줄이기 위한 안정적인 온도 제어가 필수적이다. 적절하지 못한 용해로의 온도 제어는 용해된 유리 내부에 기포 혹은 불순물을 포함하여 완제품 불량률의 원인이 될 뿐만 아니라 용해로의 안정 운전에도 큰 영향을 미치게 된다. 그러나, 이러한 용해로의 내부 현상은 아직 완전하게 이해되지 못하고 있다[13]. 따라서 이러한 용해로의 온도 제어는 아직도 숙련된 용해로 운전자의 몫으로 남아있는 실정이다.

Aoki, Kawaguchi, Sugeno 등은 유리 용해로에 적용할 수 있는 2가지의 퍼지 제어 응용 기법을 제시하였다[13]. 그 논문에서는 인간 전문가의 지식을 이용하여 미래의 온도 값을 예측한 다음, 그 예측된 온도 값을 퍼지제어기의 입력으로 사용하거나, 혹은 그에 따라 연료량을 추가로 조정하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 퍼지제어기와 기존 제어기의 장점을 병합하려는 시도를 하였다. 전체적인 용해로의 동역학은 비선형과 시변이지만, 그 중 부분적인 일부의 동역학은 기존 제어기를 충분히 적용할 수 있을 정도로 좋은 선형적인 특징을 보여준다. 잘 정의된(well-defined) 선형 동역학에 대해서는, 오랜 역사를 가지고 있는 기존 제어방식이 설계하기도 용이

하고, 더 뛰어난 제어 성능을 기대할 수 있다. 따라서, 이러한 잘 정의된 동역학에 대해서는 선형 모델을 바탕으로 한 기존의 PI(proportional Integral) 제어기를 이용하고 정의되지 않은(ill-defined) 부분에 대해서는 전문가의 운전 지식을 이용하는 복합형 제어기를 제시함으로써, 서로의 장점을 취합하는 방식을 취하였다. 제시된 복합형 제어기는 실제 TV 브라운관 생산 공정에 성공적으로 적용되었다.

II. 유리 용해로 (glass melting furnace)

유리 용해로는 유리 공정에 있어서 가장 중요한 공정 중의 하나이다. 유리 용해로는 원 재료를 용융하여 유리 물(molten glass) 형태로 만든 다음, 이를 성형 공정에서 성형할 수 있도록 하는 역할을 하기 때문에 최종적인 제품의 질 및 불량률에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이 때, 유리 용해로의 온도 제어는 용융에 사용되는 연료의 양을 조정하여 유리 물의 온도를 일정하게 유지하는 역할을 하게 된다. 그러나 용해로의 동역학은 그 복잡성으로 인하여 아직 완전하게 이해되지 못하고 있다[13]. 즉, 많은 종류의 외란과 용융된 유리 물 내부의 3차원적인 여러 흐름이 존재함으로써 고정적인 수식 모델의 성립에 많은 어려움이 있다. 부적절한 용해로의 운전은 온도의 연동을 유발하게 되고, 이는 용융된 유리 물 내부에 미소 거품, 혹은 불순물을 내포하게 하여 불량률의 주요 원인이 되고 있다. 특히, 빛을 투과하여 시각적인 정보를 전달하게 하는 TV 브라운관 유리의 경우에 있어서는 미소한 거품이나 불순물도 최종적인 제품 불량으로 연결되기 때문에, 안정적인 온도 제어가 매우 중요한 제어 이슈가 되고 있다. 이러한 용해로의 온도 제어는 아직 숙달된 인간 전문가의 몫으로 남겨져 있는 실정이다.

그림 1은 전형적인 유리 용해로의 구조로서 상부에서 내려다본 그림이다. 유리 용해로는 크게 두개의 독립된 공간, 즉, 멜터(melter)와 리파이너(refiner)로 구성되어 있다. 멜터는 굵은 선으로 그려진 사각형, 그리고 리파이너는 굵은 선으로 그려진 원으로 나타내어져 있다. 3차원적으로, 멜터는 직육면체의 구조이고 리파이너는 원기둥 형태의 구조이다. 유리의 원료는 그림에서 멜터의 왼쪽에서 공급되어 상하의 포트(port)들에서 벵커-C유를 연소하여 가열함으로써, 유리로 화학변화를 일으키게 된다. 멜터에서 용해된 유리 물은 스로트(throat)라고 불리우는 통로를 통하여 리파이너로 흘러 들어가게 된다. 리파이너에서는 용해된 유리 물이 성형하기 적당한 온도로 다시 조절되게 된다.

연소 공기는 그림 1에서의 멜터 위 아래의 리제너레이터(regenerator)를 통하여 공급되고 빠져나간다. 그림에서와 같이 각 리제너레이터는 몇 개의 포트를 포함하고 있고 이 포트에는 연소 공기의 공급과 배출을 위한 통로들과 연료를 연소시키는 버너(burner)가 장착되어 있다. 한쪽 리제너레이터에서 연료와 산소가 공급되어 연소가 일어나는 동안 다른 쪽의 리제너레이터에서는 연소 가스가 배출되게 된다. 높은 온도의 연소 가스는 배출되는 동안 지그재그 형태로 쌓여 있는 벽돌들을 통과하게 되고 이 과정에서 열에너지를 리제너레이터 내부에 저장하게 된다. 연소 불꽃과 연소 공기의 방향은 20분 주기로 바뀌게 된다. 즉, 한쪽의 리제너레이터가 연소 공기와 불꽃을 공급하는 동안, 다른 쪽에서는 연소 가스를 방출하는 역할을 하게 되고, 20분 후에는 그 역할을 바꾸게 된다. 따라서, 방출되는 연소 가스의 열에너지는 리제너레이터에 의해서 재활용이 되게 된다.

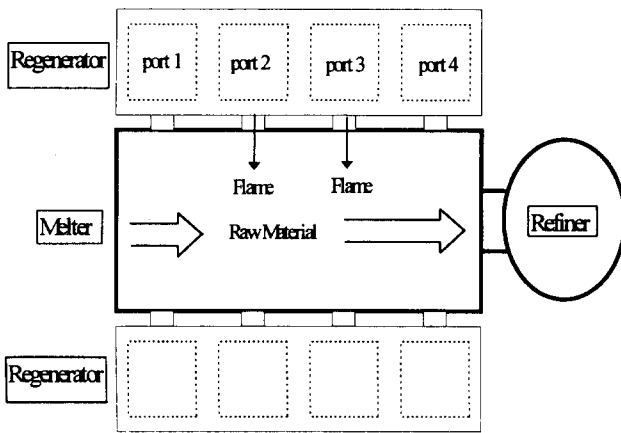


그림 1. 유리 용해로의 구조.
Fig. 1. The structure of glass melting furnace.

III. 복합형 제어 알고리즘

1. 용해로의 열적 특성

용해로 내부의 열적인 상태를 측정하기 위하여, 여러 개의 온도 센서들이 멜터의 바닥과 천정에 설치되어 있다. 천정 온도 센서(crown thermocouple)는 멜터 내부의 최상부에 설치되어 멜터 내부의 공기 온도와 방사 에너지를 측정하는 역할을 하고, 바닥 온도 센서(bottom thermocouple)는 멜터의 바닥에 설치되어 용융된 유리 물의 온도를 측정하게 된다. 따라서 최종적인 용해로 온도 제어의 목적은 연소되는 연료의 양을 조절하여, 용융된 유리 물의 온도, 즉, 바닥 온도 센서의 값을 일정하게 유지시키는 것으로 귀결될 수 있다.

이 두 종류의 온도 센서들은 상당히 다른 특징을 보여준다. 천정 온도는 연료 사용량이나 기타 외부 대기의 온도, 유리 물 표면의 상태, 그리고 원료의 조성 및 상태 등의 외란에 의해서 5분 정도의 시정수로 반응하면서도 각 요인들에 의해 단순 비례하는 간단한 특징을 나타내었다. 이에 비하여, 바닥 온도는 천정 온도로부터의 전달 시간, 용융된 유리 물 내부의 다양한 흐름, 그리고 그 밖의 여러 종류의 외란에 의해서 그 반응시간이 30분에서 6시간에 이르는 등의 복잡하고, 비선형이며 시변하는 특징을 나타내었다. 이러한 열적 특성은 외부 대기의 온도, 유리 색깔(glass color), 유리 물의 표면 상태, 원료 조성, 그리고 성형하기 위해 뽑아 쓰는 유리 물의 양, 즉 풀(pull)에 의하여 여러 가지로 영향을 받게 된다.

2. 복합형 제어기의 설계

용해로 운전자들은 그림 2에서와 같이 바닥 온도와 천정 온도를 동시에 고려하여 수동으로 온도 제어를 시행한다. 즉, 바닥 온도와 천정 온도를 파악한 후에, 그 상황에 적합하도록 연소 연료량을 조절한다. 예를 들면, 만일 바닥 온도가 낮고, 천정 온도가 보통이면 연료는 약간 줄인다, 등등이다.

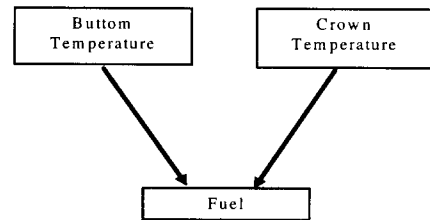


그림 2. 수동 온도 제어 개념.
Fig. 2. The structure of manual operation.

본 논문에서는 기존의 PI제어기와 퍼지 제어기의 장점을 결합하려고 시도하였다. 기존의 운전 데이터를 통한 분석 결과, 천정 온도는 전형적인 선형 1차 시간 지연 (first order plus dead time, FOPDT) 모델의 특성을 나타내었다 [15]. 즉, 선형 1차 시스템에 약간의 시간 지연이 포함된 동특성을 나타내었다. 이때, 시정수는 5분, 지연 시간은 4분 정도의 선형 모델로 나타내어 졌다. 그러나 바닥 온도는 지연 시간이 30분에서 5시간 이상으로 일정치 않고, 시정수 또한 1시간에서 6시간 정도로 일정하지 않아서 기존의 선형 시스템으로 모델링하기는 어려운 것으로 밝혀졌다.

그런데, 천정 온도는 바닥 온도에 비해서 응답 시간이 빠르기 때문에 용해로 운전자가 지속적으로 천정 온도를 감시하며 일정한 온도 범위를 유지하기에는 용이하지 않은 실정이다. 따라서 이러한 경우 천정 온도는 성립된 FOPDT 모델을 바탕으로 한 기존의 PI제어기로서 효과적으로 제어될 수 있다[14][15]. 퍼지제어기가 여러 분야에서 성공적으로 적용되고 있지만 이는 주로 비선형이거나, 잘 정의되지 않는(ill-defined) 시스템을 대상으로 한 것임에 유의할 필요가 있다[2]-[6]. 잘 정의된 선형 시스템에 대해서는 기존의 선형 제어기가 더 효율적이고 설계하기도 용이하다.

그림 3은 제시된 복합형 제어기의 개념도이다. 퍼지 룰 베이스(fuzzy rule base)는 바닥 온도를 입력 받아 천정 온도의 목표값(setpoint)을 설정하는 구조이고 인간 전문가의 제어 룰(rule)로서 구축된다. 천정 온도는 FOPDT 모델을 바탕으로 하여 설계된 PI 제어기에 의해서 제어되는 구조이다.

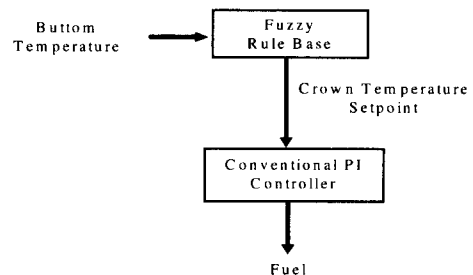


그림 3. 제시된 복합형 제어 개념.
Fig. 3. The structure of the proposed hybrid controller.

퍼지 추론 시스템(fuzzy inference system)의 입력은 바닥 온도(y_b)와 바닥 온도의 변화량(Δy_b)이고 출력은 천정 온도 목표값의 변화량(Δy_{sc})이다. 두 개의 입력 y_b 와 Δy_b

는 각각 5개의 언어적인 표현으로 분할된다. 즉, Positive Big(PM), Positive Medium(PM), Zero(ZO), Negative Medium(NM), 그리고 Negative Big(NB)으로 나뉜다. 그림 4는 y_b 와 Δy_b 의 분할을 보여준다. 퍼지 추론의 출력인 Δy_{sc} 는 7개의 언어적인 표현으로 분할된다. 즉, Positive Big(PM), Positive Medium(PM), Positive Small(PS), Zero(ZO), Negative Small(NS), Negative Medium(NM), Negative Big(NB)으로 나뉜다. 그림 5는 Δy_{sc} 의 분할을 보여준다. 제시된 분할은 제어기 튜닝과정에서 적절하게 스케일링을 하였다.

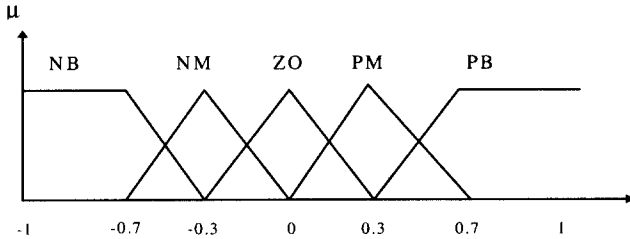


그림 4. 바닥온도(Δy)와 그 변화량(Δy_b)의 언어적 분할.

Fig. 4. Linguistic expression of Δy_b and Δy_b .

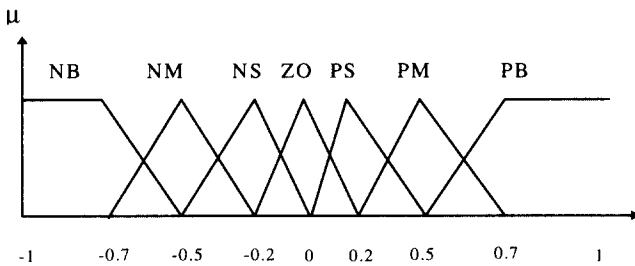


그림 5. 천정온도 목표값 변화량(Δy_{sc})의 언어적 분할.

Fig. 5. Linguistic expression of Δy_{sc} .

퍼지 룰 베이스(fuzzy rule base)는 용해로 운전자로부터 형성된다. 그 몇 가지 예는 다음과 같다.

- IF y_b is PB and Δy_b PB, THEN Δy_{sc} is NB.
- IF y_b is PM and Δy_b ZO, THEN Δy_{sc} is ZO.
- IF y_b is NM and Δy_b ZO, THEN Δy_{sc} is ZO.

테이블 1은 추출된 퍼지 룰 테이블이다. 이러한 물을 바탕으로, 근사추론(approximate reasoning)의 한 방법인 퍼지 추론을 통하여 출력을 계산하게 된다. 퍼지 추론 방법으로 본 논문에서는 가장 일반적인 표준 승산 추론(standard production inference)[2]-[4]이 사용되었다. 또한 역 퍼지화(defuzzification)로는 무게중심법(center of gravity)이 사용되었다[2]-[4].

표 1. 퍼지 룰 테이블.
Table 1. Fuzzy rule table.

$\Delta y_b \backslash y_b$	NB	NM	ZO	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS
NM	PB	PM	PM	PS	PS
ZO	PM	ZO	ZO	ZO	NM
PM	NS	NS	NM	NM	NB
PB	NS	NM	NM	NB	NB

기존의 PI제어기는 y_c 의 선형 모델을 바탕으로 설계되었다. 천정 온도의 FOPDT 모델은 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{Y_c(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ts}}{\tau s + 1} \quad (2)$$

여기서,

- y_c : 천정 온도,
- u : 연료,
- K : 정상 상태 이득,
- T : 지연 시간,
- τ : 시정수.

(2)를 바탕으로 PI제어기는 최소 적분 오차 방법으로 설계된다[10][15]. PI 제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (3)$$

여기서,

- K_c : 비례 이득,
- τ_i : 재설정 시간(Reset time).

K_c 와 τ_i 를 구하기 위하여, 다음과 같은 시간-비중 오차 자승의 적분 (integral of the time-weighted square of the error, ITSE) 평가 함수를 최소화하는 K_c 와 τ_i 를 구한다.

$$ITSE = \int_0^\infty t e^2(t) dt \quad (4)$$

(2)에 대하여 (4)를 최소화하는 K_c 와 τ_i 는 다음과 같다[14].

$$K_c = \frac{0.586}{K} \left(\frac{T}{\tau} \right)^{-0.916} \quad (5)$$

$$\tau_i = \frac{\tau}{1.03 - 0.165 \left(\frac{T}{\tau} \right)} \quad (6)$$

설계된 PI 제어기의 목표값은 퍼지 시스템의 출력으로부터 결정된다. 그림 6은 제시된 복합형 유리 용해로 제어기의 전체 구조이다.

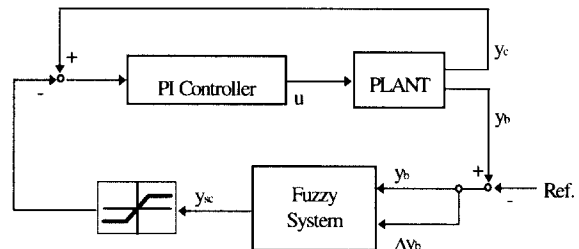


그림 6. 복합형 유리 용해로 온도 제어기.

Fig. 6. The system architecture of the proposed hybrid controller.

IV. 적용 결과

제시된 복합형 제어기는 실제 TV 브라운관 유리 생산 공정에 적용되었다. 그림 7은 1주일 동안 수동 운전을 하였을 때의 전형적인 바닥 온도의 변화를 보여준다. 그림 7에서 바닥 온도의 목표값은 0이다. 온도 변화는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 정도이고 이 때의 표준 편차는 0.43이다. 그림 8은 제시된 복합형 제어기를 1주일 동안 적용하였을 때의 바닥 온도 변화이다. 그림 7과 마찬가지로 목표값은 0이다. 온도 변화는 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 정도이고 이 때의 표준 편차는 0.23이다. 그림 9는 그림 7과 8의 1주일 동안의 온도 변화량과 표준 편차의 상대적인 비율을 비교한 그림이다. 수동 운전을 시행하였을 경우에 비해서 전체 온도 변화구간은 46%로 줄었으며, 표준편차가 53%로 줄어들었음을 알 수 있다.

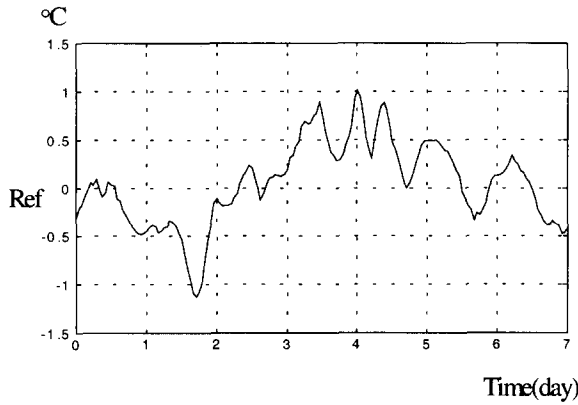


그림 7. 수동 운전 시의 바닥 온도 변화.
Fig. 7. Temperature deviation of manual control.

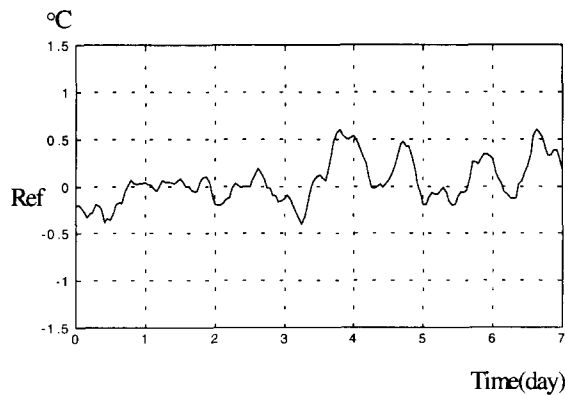


그림 8. 제시된 복합형 제어기의 바닥 온도 변화.
Fig. 8. Temperature deviation of the proposed control.

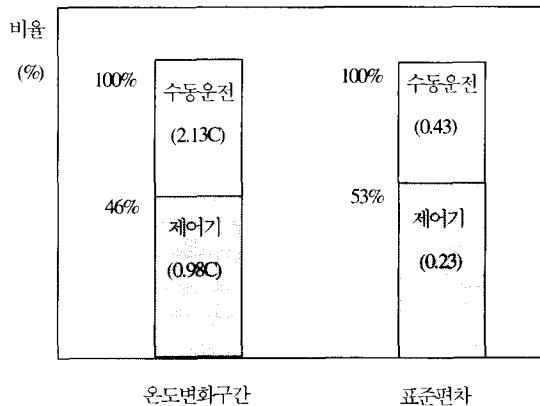


그림 9. 수동운전과 제시된 복합형 제어기의 성능비교.
Fig. 9. Comparison of performance.

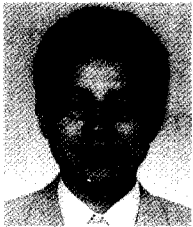
V. 결론

본 논문에서는 기존의 PI 제어기와 퍼지 제어기의 장점을 결합한 복합형 유리 용해로 온도 제어 알고리즘을 제시하였다. 비록, 전체적인 유리 용해로의 동역학이 복잡하고, 비선형이지만, 그 중 일부의 동역학은 기존의 선형 제어를 적용하기에 충분한 정도의 선형적인 특성을 나타낸다. 따라서 이러한 동역학 부분에 대해서는 선형 모델을 바탕으로 한 PI제어를 이용하였고, 기타 잘 정의되지 않는 (ill-defined) 부분에 대해서는 기존 운전자의 제어 지식을 이용한 퍼지 제어 방식을 사용하였다. 제시된 제어기는 실제 생산 공정에 이용되어 그 효용성을 입증하였다.

알림 : 본 연구를 수행하는데 많은 도움을 주신 삼성코닝의 박병극 과장님께 깊은 감사를 전합니다.

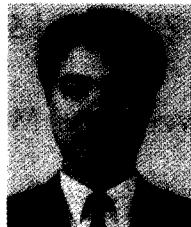
참고문헌

- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Inform. Contr.*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [2] W. Pedrycz, *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, John Wiley & Sons, 1989.
- [3] H. J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and Its Application*, Kluwer-Nijhoff, 1986.
- [4] B. Kosco, *Neural Network and Fuzzy Systems*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1992.
- [5] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *Int. J. Man Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975.
- [6] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis," *IEEE Trans. Computer*, vol. C-26, no. 12, pp. 1182-1191, 1977.
- [7] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control system : fuzzy logic controller - Part I & II," *IEEE Trans. System Man, Cybernetics*, vol. SMC-20, no. 2, pp. 404-435, 1990.
- [8] M. Sugeno, "An introductory survey of fuzzy control," *Information Science*, vol. 36, pp. 59-83, 1985.
- [9] P. Ramaswamy, R. M. Edwards and K. Y. Lee, "An automatic tuning method of a fuzzy logic controller for nuclear reactors," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 40, no. 2, April, 1993.
- [10] P. Ramaswamy, R. M. Edwards and K. Y. Lee, "Wide range nuclear reactor temperature control using automatically tuned fuzzy logic controller," *Trans. American Nuclear Society*, vol. 66, pp. 101-103, Nov., 1992.
- [11] Y. M. Park, U. C. Moon and K. Y. Lee, "A self-organizing fuzzy logic controller for dynamic system using a fuzzy auto-regressive moving average (FARMA) model," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 3, no. 1, Feb., 1995.
- [12] Y. M. Park, U. C. Moon and K. Y. Lee, "A self-organizing power system stabilizer using fuzzy auto-regressive moving average (FARMA) model," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 11, no. 2, pp. 442-448, June, 1996.
- [13] S. Aoki, S. Kawachi and M. Sugeno, "Application of fuzzy control logic for dead time process in a glass melting furnace," *Fuzzy Sets and Systems* 38, pp. 251-265, 1990.
- [14] A. M. Lopez, P. W. Murrill and C. L. Smith, "Controller tuning relationships based on integral performance criteria," *Instrument Technology*, vol. 14, no. 11, pp. 57, Nov., 1967.
- [15] C. A. Smith and A. B. Corripio, *Principles and Practice of Automatic Process Control*, John Wiley & Sons, 1985.



문운철

1991년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1993년 및 1996년 동 대학원 석사, 박사 학위 취득, 현재 삼성 SDS 제조개발팀 근무. 관심 분야는 퍼지 이론과 인공 신경 회로망 등의 인공지능 기법을 이용한 자동제어 이론 및, 전력 계통과 화학 플랜트를 대상으로 한 자동 제어의 적용.



김흥식

1985년 서강대학교 화학공학과 졸업, 1987년 및 1991년 동 대학원 석사, 박사 학위 취득, 현재 삼성 SDS 제조개발팀 근무. 주요 관심 분야는 공장 자동화, MPC (Model Predictive Control), 운전정보 시스템 구축(Operation Information System) 및 운전 최적화 등.



박영문

서울대학교 전기공학부 교수, 1989년~1990년까지 대한전기학회 회장 역임. 현재 IEEE Fellow, 관심 분야는 발전, 송전, 배전 등 전력 계통 공학 일반 및 퍼지이론, 인공 신경망, 유전자 알고리즘, 전문가 시스템 등의 인공지능 기법의 전력 계통 응용.