

성능향상을 위한 새로운 지능형 제어방식 고찰

김문성* 곽훈성**

Analysis of New Intelligent Control Method for Performance Improvement

Moon-Seong Kim* Hoon-Sung Kwak**

요 약

본 논문에서는 전형적인 PI 제어에 의한 건물 공조와 새롭게 제안된 신경망 제어에 의한 건물 공조의 성능 비교를 통하여, 신경망 제어 알고리즘의 건물 공조에 대한 적용성 여부를 규명하였다. 이를 통하여 기존의 PI 제어에 의하여 운영되던 건물을 신경망 제어로서 운영하였을 경우에 기후적, 시스템적 변화에 자체적 대응이 가능한 제어로서 충분히 적용이 가능하다는 것을 보여준다.

Abstract

In this paper, by comparing the performance of HVAC(Heating Ventilating and Air Conditioning) by the typical PI(Proportional-Integral) control and the HVAC by the new neural network control, it will show the applicability of neural network control algorithm to HVAC of buildings. These show that neural network system that can respond to changes in temperature and system can replace PI control that has been conventionally used in buildings.

* 대원과학대학 컴퓨터정보통신과 조교수

** 전북대학교 컴퓨터공학과 교수

I. 서론

일반적으로 건축 설비 시스템의 자동화 기술의 기능은 감시 기능과 제어 기능으로 나누어지는데, 건물 실내의 환경 조건 및 시스템의 운전 상태를 지속적으로 감시하면서 그 결과를 토대로 하여 건축 설비 시스템의 최적화 운전, 에너지 관리 및 유지 등의 건축 설비 시스템의 자동 제어 기능을 효율적으로 수행하는 것을 의미한다 [1][2].

따라서 효율적인 건축 설비 시스템의 자동 제어의 목적은 거주 공간의 쾌적도를 저하시키지 않으면서 냉·난방시스템, 환기 시스템 등의 에너지 사용을 최소화하고자 하는 것이다.

현재 많은 자동화된 건물들에서는 건물 공조에 대한 제어로서 구조가 단순하고 매우 건설한 특성을 지닌 PI(proportional-integral) 제어에 의한 공조를 수행하고 있지만 좋은 성능을 유지하기 위해서는 적절한 동조(tuning)가 필요하다. 동조 과정은 시간과 경비가 소모될 뿐 만 아니라 강한 비선형성이나 큰 지연시간을 갖는 시스템에서는 매우 어렵다. 또한 동조 후에도 시스템의 비선형성, 시변 특성 등에 의하여 제어 성능이 감소하기 때문에 재동조(re-tuning)가 필요하다[3][4]. 이에 건물의 특성 변화에 대해 비선형적으로 대처할 수 있는 신경회로제어망을 건물 공조 시스템에 대하여 적용함으로써 시스템적 변화, 외기 등의 영향으로 인한 제어 특성의 변화에 대처할 수 있는 신경망 제어 개념의 적용 가능성을 검토하여 보았다.

따라서 본 연구에서는 PI 제어에 의한 건물 공조와 신경망 제어에 의한 건물 공조에 대한 성능의 비교를 통하여 신경망 제어 알고리즘의 건물 공조에 대한 적용성 여부에 대하여 규명하여 보고자 한다.

II. 제어 이론

피드백(feedback) 제어의 목적은 동적 시스템의 출력 변수가 기준 입력의 종류나 외란 또는 시스템의 변수가 변화함에도 불구하고 원하는 기준 경로를 추종하는 데 있다. 뿐만 아니라 피드백 제어는 시스템을 안정화시키고 과도 응답 속도를 증진시키고 정상 상태 특성을 개선하며 외란(disturbance) 제거 효과를 가져오고, 파라미터 변동에 대한 민감도를 줄여주는 데 이용될 수 있다. 원하는 기준 경로가 일정한 경우를 조절(regulation) 문제라고 하며 기준 경로가 비예측적으로 변하는 경우를 추종(tracking) 문제라고 한다. 여기서 온도 제어와 같은 경우는 일정 온도를 유지하는 것이므로 조절 문제라 할 수 있다[5][6].

이러한 목적을 위하여 산업계에서 사용되는 기본적인 제어기로서는 On-Off 제어기와 PID 제어기가 있고, 최근에 들어 퍼지 제어기 및 신경망 제어기가 많이 사용되고 있다. 본 장에서는 이 중에서 본 연구에 사용된 PID 제어기 및 신경망 제어기의 기본 원리에 대하여 살펴보기로 한다.

1. PI 제어 이론

비례제어 동작, 적분제어 동작을 조합한 PID 제어기의 방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s}$$

2. 신경망 제어 이론

신경망 회로는 다수의 원소가 동시에 동작하는 병렬처

리 기계의 일종으로 인간 뇌의 정보처럼 하드웨어 및 소프트웨어적인 병렬 분산 처리를 하는 시스템이다. 신경망 회로의 특징은 입력층에서 다인자의 입력 변수를 입력받아 이를 다인자의 출력값으로 도출시키는 MIMO(Multi Input Multi Output) 개념의 제어 방법으로서 기존의 단일 입력에 대한 단일 출력이 가지는 단점을 극복할 수 있다.

신경망 회로의 중요한 구성 요소는 뉴런(neuron)과 이들 상호 간의 연결이다. 뉴런의 구성은 Fig. 1과 같다. 뉴런에 연결된 다른 뉴런들로부터의 입력을 연결선의 가중치를 곱리한 후, 그 결과를 적당한 전이 함수(transfer function)로 처리한 후 연결된 다른 뉴런으로 출력한다.

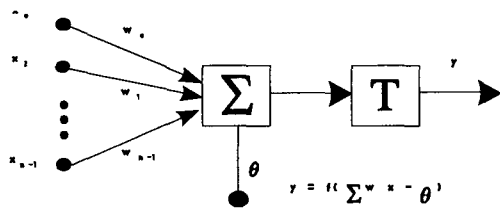


그림 1. 뉴런의 구성
Fig. 1 Configuration of neuron

하나의 뉴런이 다른 뉴런의 출력을 입력 X_i 로 받아 각 연결강도 W_{ij} 에 대한 각 입력의 가중치 합은 다음과 같다.

$$Net_j = \sum_{i=0}^n W_{ij} X_i$$

위 식의 결과를 뉴런에 대한 출력으로 하여 이와 연결되어 있는 다른 뉴런으로 보낸다.

$$Y_j = F\left(\sum_{i=0}^n Net_j + \theta_j\right)$$

W_{ij} 는 i 번째와 j 번째 뉴런 사이의 연결강도이고, X_i 는 i 번째 입력, θ_j 는 j 번째 뉴런의 고유 바이어스값이다. 전체 출력 Y_j 와 입력 X_i 의 관계는 전이 함수 F 에 의해서 정해지는데, 이들 중에 많이 사용하는 전이 함수는 계단 응답, 선형, 로그-시그모이드 전이 함수들이다.

III. 시스템 해석

1. 모델링

1.1 건물 모델링

본 연구에 적용된 대상 건물의 평면도는 Fig. 2와 같다. 해석적 연구는 이 건물의 비온돌 실험실을 대상으로 수행되었다. 이 비온돌 실험실의 용적은 약 50m^3 ($6.9\text{m} \times 3\text{m} \times 2.4\text{m}$)이고 실험실 내부에는 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 크기의 창이 2조 설치되어 있다.

건물의 벽체, 창호 등의 외피를 통한 열 전달량은 건물 열 부하의 상당 부분을 차지하므로 외피의 구조 및 배열, 각 재료의 열 특성에 관한 규명은 매우 중요하다. 환경실험실 내 실험동의 벽체를 외벽, 구역과 구역을 분할하는 내부벽, 바닥, 천장 등으로 분류하고, 설계 도면을 근거로 하여 각 부분의 재료 및 물성치는 TRNSYS PREBID 수록 표준목록을 바탕으로 상용하는 물성치와 특성을 갖는 유사 재료를 선정하였고 이를 Table 1에 나타내었다.

표 1. 벽체와 두께
Table 1. Wall layer and thickness

Wall Name	Layer Material	Thickness (mm)	Conductivity (kJ/hmK)	Capacity (kJ/kgK)
External	Red brick	90	2.55	0.84
	Urea form	50	0.13	0.04
	Cement brick	190	5.44	0.84
	Mortar	5	5.04	1.0
Internal	Mortar	5	5.04	1.0
	Concrete	120	7.756	1.0
	Mortar	5	5.04	1.0
Bottom	Concrete	120	7.756	1.0
	Concrete	120	7.756	1.0
Top	Concrete	120	7.756	1.0
	Urea form	80	0.13	0.04
	Air layer	650	0.047	-
	Gypsum plaster	5	0.54	1.2
Window	U-Value : 1.4 W/m2K			

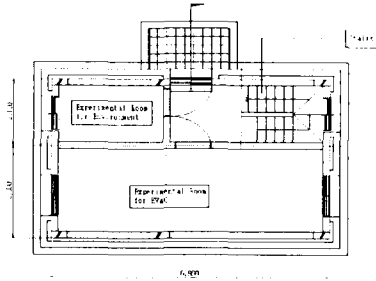


그림 2. 대상건물의 평면도
Fig. 2 Schematic diagram of zone in the simulation

1.2 시스템 모델링

해석적 연구를 위하여 채택된 공조 시스템의 개요도가 Fig. 3에 나타나 있다. 이 그림을 보면 급기 팬에 의해서 외부로부터 유입된 공기는 히팅 코일을 통과하여 각 존(zone)으로 유입된다. 그리고 이 존에서 사용된 공기는 순환 팬을 통하여 배출되는데 일부는 외부로 배출되고 일부는 댐퍼(damper)를 통하여 다시 유입되는 구조이다.

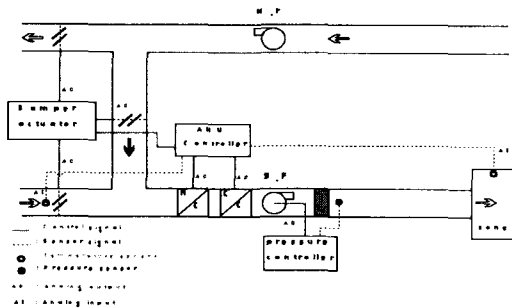


그림 3. 공조시스템의 개요도
Fig. 3 Circuit of conditioning system

IV. TRNSYS 프로그래밍

실내 공간의 동적 해석을 위해서 본 연구에서는 미국의 Wisconsin 대학에서 개발되어 건물의 동적 에너지 해석에 많이 이용되고 있는 TRNSYS 프로그램을 이용하였다. TRNSYS 프로그램에는 PID 제어나 Neural Networks 제어에 대한 프로그램이 없으므로 이들을 프

로그래밍 하여 TRNSYS의 모듈로 구성하였다.

시스템의 성능 해석을 위하여 시스템 도면(Fig. 3)을 TRNSYS 프로그램 환경으로 작성한 것이 Fig. 4이다.

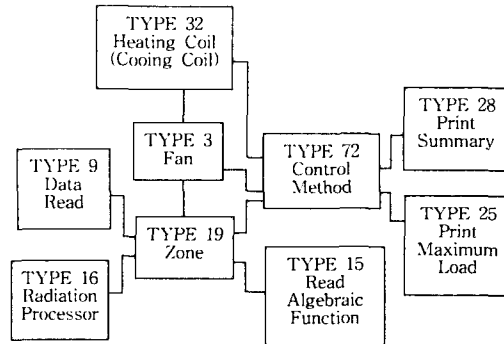


그림 4. TRNSYS 프로그래밍 개요도
Fig. 4 Flow chart of TRNSYS programming

V. 연구결과 및 검토

1. PI 제어에 의한 건물 시스템 시뮬레이션

1.1 PI 제어에 의한 건물 냉방 시뮬레이션

여름철 건물 냉방에 있어서 PI 제어에 대한 온도 추종이 잘 이루어지는 개인값인 K_p , K_i 값의 도출을 위한 절차를 다음과 같이 수행하였다. 이때 이 시뮬레이션을 위한 실내 온도의 설정 온도를 22℃, 27℃, 22℃로 순차적으로 변화하여 이 설정 온도에 대한 유량의 변화에 대한 온도 추종을 알아보았다.

덕트를 통과하는 송풍 공기의 최대 유량이 1000kg/hr (2.4m/s)일 때의 적절한 개인값을 알아보기 위하여 임의의 K_p 개인값과 K_i 개인값을 적용하여 설정 온도에 대하여 추종이 잘 이루어지는 개인값을 알아보았다.

Fig. 5는 유량이 1000kg/hr일 때의 임의의 개인값 적용에 대한 온도 추종 곡선이다. 이 그래프에서 보면 K_p 개인값이 0.5이고 K_i 개인값이 1.7일 경우의 상태에서 온도 추종이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 여름철 PI 제어에 의한 건물 냉방 시에 위의 개인값을 적용하여 시뮬레이션하였다.

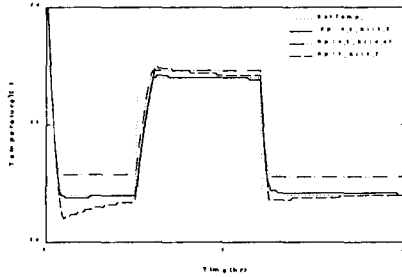


그림 5. 온도추종곡선
Fig. 5 Time vs. temperature in summer
(Max. flow rate : 1000kg/hr)

1.2 PI 제어에 의한 건물 난방 시뮬레이션

겨울철 덕트를 통과하는 송풍 공기의 최대 유량이 1000kg/hr일 때의 적절한 게인값을 알아보기 위하여 임의의 K_p 게인값과 K_i 게인값을 적용하여 설정 온도에 대하여 추종이 잘 이루어지는 게인값을 알아보았다.

Fig. 6은 유량이 1000kg/hr일 때의 임의의 게인값 적용에 대한 온도 추종 곡선이다. 이 그래프에서 보면 K_p 게인값이 0.5이고 K_i 게인값이 0.05일 경우의 상태에서 온도 추종이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 겨울철 PI 제어에 의한 건물 난방 시에 위의 게인값을 적용하여 시뮬레이션하였다.

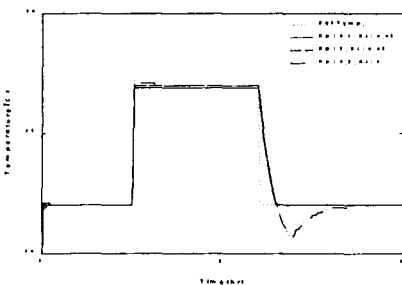


그림 6. 온도추종곡선
Fig. 6 Time vs. temperature in winter
(Max. flow rate : 1000kg/hr)

2. 신경망을 이용한 시스템 시뮬레이션

2.1 신경망 제어를 이용한 온도 추종

PI 제어에서 나타난 한계적인 문제들을 개선시키고 시스템의 성능을 최대한 활용할 수 있는 건물 공조 제어 방법으로서 신경망 제어 기법을 활용하여 보았다.

이 제어를 위하여 역전파(back-propagation) 네트워크를 이용하였고 공조기의 특성상 출력이 0과 1사이에서

무한의 값을 가질 수 있기 때문에 로그-시그모이드 전이 함수를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

이 시뮬레이션의 수행을 위하여 우선 TRNSYS를 이용한 PI 제어에서 획득된 데이터들을 기본으로 하여 신경망 제어기에 사용되기 위한 기본 입력 계층을 생성하였다. 여러 가지의 히든층(hidden layer)에 대하여 추종 곡선을 살펴본 결과 히든 유닛의 개수가 150개가 가장 적당하였고, 그 이하나 그 이상의 히든 유닛을 사용하였을 경우에는 누적 에러율이 증가하는 경향을 보였기에 적정 온도 추종 경향을 보이는 히든층의 개수를 150개로 설정하였다.

Fig. 7은 히든 유닛의 개수에 따른 누적 에러율을 나타내는 그래프로서 이 그래프를 보면 히든 유닛의 개수가 150개 정도일 때 가장 좋은 에러율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

신경망의 온도 세팅 및 시간 범위는 PI 제어와의 비교를 위하여 같은 온도 변화인 22℃, 27℃, 22℃일 때를 조건으로 하였고 변화 시간 또한 1.7시간 후의 온도 변화와 2.5시간 후의 온도 변화를 조건으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

이때 신경망의 적용 시 유량의 변화에 대하여는 온도 추종에 대하여 항상 같은 조건의 유량 변화 추종 곡선을 형성하였기에 더 이상의 변화에 대한 추종값들을 얻지 않았다.

이 시뮬레이션은 여름철과 겨울철에 대한 시뮬레이션을 수행하였는데 이때 입력 계층에는 여름과 겨울에 대한 각각의 데이터들을 모두 입력하여 외기온에 대한 각각의 입력 계층을 사용하지 않는 상태를 만들었다. Fig. 9는 여름철 냉방에 대한 신경망 적용 시의 온도 추종에 대한 그래프이고 Fig. 10은 겨울철 난방에 대한 온도 추종을 나타내는 그래프이다.

Fig. 8과 Fig. 9를 보면 신경망을 이용한 제어는 PI 제어 시와 같이 비교적 정확한 온도 제어가 가능하다는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 이렇게 학습되어진 데이터 값을 가지고 외기온의 변화 및 유량의 변화에 대해서도 항상 동일한 온도 제어 곡선을 가지므로 시스템 및 기후의 변화에 대하여 자체적으로 대응할 수 있는 지능형 온도 제어가 가능하다는 것을 보여주고 있다.

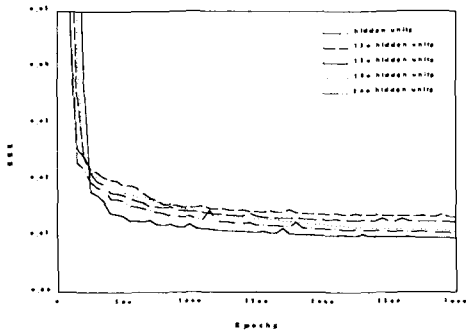


그림 7. 누적 에러율
Fig. 7 Epoch vs. Sum Square Error

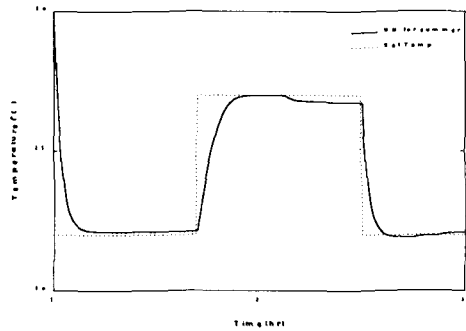


그림 8. 여름철 신경망 온도제어
Fig. 8 Time vs. temperature in summer (NN Control)

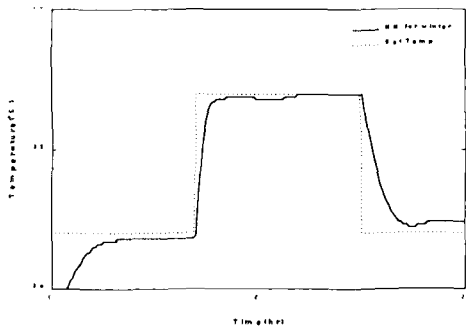


그림 9. 겨울철 신경망 온도제어
Fig. 9 Time vs. temperature in winter (NN Control)

2.2 PI 제어와 신경망 제어의 비교

Fig. 10은 여름철 신경망 제어의 온도 추종 정도를 알아보기 위한 PI 제어와의 비교 그래프이다. 그래프를 보면 최대 유량이 1000kg/hr일 때의 PI 제어에 의한 온도

추종과 신경망 제어를 이용한 온도 추종은 거의 유사한 상태를 나타내고 있다. 그러므로 신경망 제어는 PI 제어에 대한 온도 추종을 충분히 만족할 수 있는 상태임을 알 수 있는 것이다.

Fig. 11은 겨울철 신경망 제어의 온도 추종 정도를 알아보기 위한 PI 제어와의 비교 그래프이다. 그래프를 보면 최대 유량이 1000kg/hr일 때의 PI 제어에 의한 온도 추종과 신경망 제어를 이용한 온도 추종은 거의 유사한 상태를 나타내고 있다.

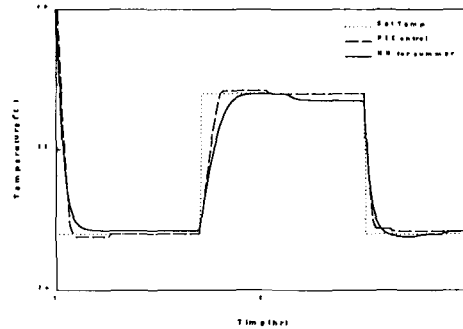


그림 10. 여름철 PI/NN 제어 비교
Fig. 10 Time vs. temperature in summer (PI and NN Control)

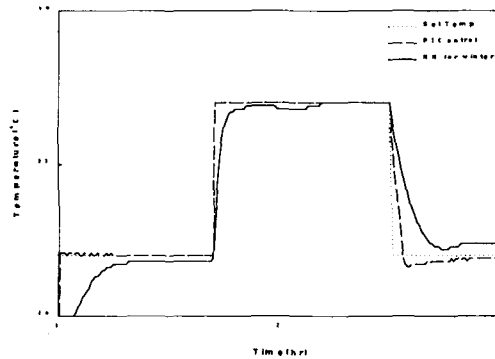


그림 11. 겨울철 PI/NN 제어 비교
Fig. 11 Time vs. temperature in winter (PI and NN Control)

2.3 PI 제어 및 신경망 제어의 오차비교

설정 온도 대 실내 온도의 제어에 대한 오차값은 PI 제어 시에 최소 0에서 최대 0.2도까지였고 신경망 제어 시에는 최소 0도에서 최대 0.32도 였다.

이때 Fig. 12은 오차 범위는 온도가 설정온도에 대해 안정된 출력을 나타내는 때부터의 에러율을 나타낸 것이다.

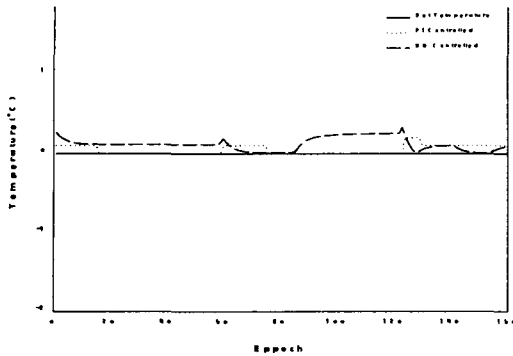


그림 12. 설정온도 에러율
Fig. 12 Epoch vs. temp. between set temp. and controlled temp.

VI. 결 론

본 연구에서는 일반적인 건물의 공조 시스템의 제어에 이용되고 있는 비례-적분(PI) 제어의 적용 특성을 알아보고, 새로운 지능형 제어 방식 중의 하나인 신경망(neural networks) 제어의 적용 가능성을 검토하여 보았다. 이와 같은 이론적 연구를 통하여 도출된 결과는 아래와 같다.

1. 국내와 같이 외기온의 변화가 심한 경우에는 PI 제어기의 게인값을 적절히 조절하여 주어야만 공조 시스템의 운영이 최적화 될 수 있다.
2. 지능형 제어 방식인 신경망 제어를 이용할 경우 PI 제어에 의한 건물 제어와 유사한 결과를 얻을 수 있으므로 외기온의 변화 시 항상 최적 게인값을 찾아주어야 하는 단점을 보완할 수 있다.
3. 공조 시스템 제어 시 신경망 제어를 이용할 경우 기존의 PI 제어에서 최적의 게인값을 찾고자 많은 시간이 소요되고 이에 따른 에너지 손실을 수반하는 최적 상태로의 운전이 힘든 현실적인 어려움을 해결할 수 있는 새로운 제어 방법이다. 그러나 신경망 제어 시스템이 최적으로 유지되기 위해서는 학습 데이터의 확보와 적절한 히든 유닛의 개수 설정을 통한 학습률의 향상이 수반되어야 한다는 것을 나타내고 있다.

이를 통하여 기존의 PI 제어에 의하여 운영되던 건물

을 신경망 제어로써 운용하였을 경우에 기후적, 시스템적 변화에 자체적 대응이 가능한 제어로써 충분히 적용이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

참고문헌

- [1] J. E. Braun and Ross, T. M., 1996, "Minimizing Operating Costs of Vapor Compression Equipment with Optimal Service Schedule", *International Journal of Heating, Ventilating Air Conditioning and Refrigerating Research*, 2(1), pp. 23-47.
- [2] Hyvarinen, J., 1996, "Real Time Simulation of HVAC System for Building Optimization", *Fault Detection and Diagnosis Source Book*, IEA ANNEX 25, VTT
- [3] HANG, C.C., LIM, C.C., and SOON, S.H., "A new PID auto-tuner design based on correlation technique" *Proc. 2nd Multinational Instrumentation Conf., China*, 1986
- [4] J. E. Bekker, P.H. Meckl, and D.C. Hittle, 1991, "Tuning Method for First-Order Processes With PI Controllers", *Proceedings of ASHRAE*, pp. 19-23.
- [5] Doyle, J.C., Francis, B.A., and Tannenbaum, A.R., "Feedback Control Theory", Macmillan, New York, 1992
- [6] G. S. Virk and D.L. Loveday, 1992, "A Comparison of Predictive, PID, and On/Off Techniques for Energy Management and Control", *Proceedings of ASHRAE*, pp. 3-10.

저자소개



김 문 성

1993년 2월 : 한남대학교 물리
학과 졸업

1995년 2월 : 한남대학교 컴퓨
터공학과 석사

1998년 8월 : 전북대학교 컴퓨
터공학과 박사수료

1997년 3월~현재 : 대원과학
대학 컴퓨터정보통신과
조교수

<관심분야>

Image Processing, Control
Performance, Computer
Simulation



곽 훈 성

1971년 2월 : 전북대학교 전자
공학과 졸업

1975년 2월 : 전북대학교 전자
공학과 석사

1980년 2월 : 전북대학교 전자
공학과 박사

1991년 1월~1993년 5월 :
미국 텍사스 대학교 교환
교수

1993년 10월~1994년 10월 :
전북대학교 전자계산 소장

1996년 10월~1998년 11월 :
전북대학교 영상특성화 사
업단 단장

1978년 4월~현재 : 전북대학
교 전자정보공학부 정교수

<관심분야>

멀티미디어 통신, 영상처리, 영
상압축