

신경망을 이용한 건물 공조시스템의 최적제어 관한 연구 (A Simulation of Neural Networks Control for Building HVAC)

육 상 조* 유 승 선** 이 극***
(Sang-Jo Youk) (Seung-Sun Yoo) (Geuk Lee)

요 약

본 연구에서는 일반적인 건물의 공조시스템의 제어에 이용되고 있는 비례-적분(PI)제어의 적용특성을 알아보고 새로운 지능형 제어방식중의 하나인 신경망(neural networks) 제어의 적용가능성을 검토하여 보았다.

PI제어에 의한 건물공조와 신경망 제어에 의한 건물공조에 대한 성능을 비교한다. 기존의 PI제어에 의하여 운영되던 건물을 신경망 제어로서 운용하는 경우 기후적, 시스템적 변화에 자체적 대응이 가능한 제어로 적용 가능하다.

ABSTRACT

This study is to verify the application characteristics of PI control and to simulate the applicability of Neural Networks control HVAC TRNSYS program.

Each performance of HVAC by PI control and by Neural Networks is compared. According to the result of simulation, Neural Networks control is favorably applicable than previous PI control for the variation of weather condition and systematic changes.

Key words: HVAC(공조), PI(비례-적분), Neural Network(신경망)

1. 서론

일반적으로 건축설비시스템의 자동화기술의 기능은 감시기능과 제어기능으로 나누어지는데, 건물실내의 환경조건 및 시스템의 운전상태 등을 지속적으로 감시하면서 그 결과를 토대로 하여 건축설비시스템의 최적화 운전, 에너지관리 및 유지 등의 건축설비시스템의 자동제어기능을 효율적으로 수행하는 것을

의미한다.[1][2]

따라서 효율적인 건축설비시스템의 자동제어의 목적은 거주공간의 쾌적도를 저하시키지 않으면서 냉난방시스템, 환기시스템 등의 에너지 사용을 최소화하고자 하는 것이다.

현재 많은 자동화된 건물들에서는 건물공조에 대한 제어로서 구조가 단순하고 매우 견실한 특성을 지닌 PI(Proportional-Integral)제어에 의한 공조를 수

* 정희원 : 한남대학원 컴퓨터공학과 박사과정

** 정희원 : 전북대학교 영상정보공학과 박사수료

*** 정희원 : 한남대학교 컴퓨터전자통신공학부 교수

행하고 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 제어능력이 감소하기 때문에 재 동조가 필요하다.[3][4] 이에 건물의 특성 변화에 대해 비선형적으로 대처할 수 있는 신경회로제어망을 건물공조시스템에 대하여 적용함으로써 시스템적 변화, 외기 등의 영향으로 인한 제어특성의 변화에 대처할 수 있는 신경망 제어 개념의 적용가능성을 검토하여 보았다.

본 연구에서는 PI제어에 의한 건물공조와 신경망 제어에 의한 건물공조에 대한 성능의 비교를 통하여 신경망 제어 알고리즘의 건물공조에 대한 적용성 여부에 대하여 규명하여 보고자 한다.

2. 제어 이론

피드백(feedback)제어의 목적은 동적시스템의 출력 변수가 기준입력의 종류나 외란 또는 시스템의 변수가 변화함에도 불구하고 원하는 기준경로를 추종하는 데 있다. 뿐만아니라, 피드백제어는 시스템을 안정화시키고 과도응답 속도를 증진시키고 정상상태 특성을 개선하며 외란제거 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 온도제어와 같은 경우는 일정온도를 유지하는 것이므로 조절문제라 할 수 있다.[5][6]

이러한 목적을 위하여 산업계에서 사용되는 기본적인 제어기로서는 On-Off제어기와 PID 제어기가 있고, 최근에 들어 퍼지제어기 및 신경망 제어기가 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 이 중에서 본 연구에 사용된 PID 제어기 및 신경망 제어기의 기본 원리에 대하여 살펴보기로 하였다.

2.1 PI 제어 이론

비례제어동작, 적분제어동작을 조합한 PID 제어기의 방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad \text{전달함수는 다}$$

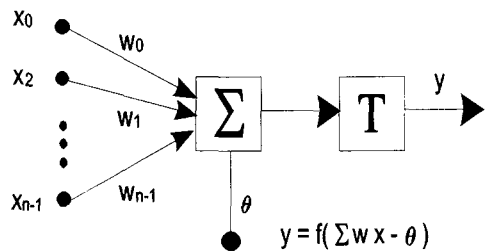
음과 같다.

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

2.2 신경망 제어 이론

신경망회로는 다수의 원소가 동시에 동작하는 병렬처리 기계의 일종으로 인간 뇌의 정보처리 하드웨어 및 소프트웨어적인 병렬 분산 처리를 하는 시스템이다. 신경망회로의 특징은 입력층에서 다인자의 입력변수를 입력받아 이를 다인자의 출력값으로도 출시키는 MIMO(Multi Input Multi Output)개념의 제어방법으로서 기존의 단일입력에 대한 단일출력여가지는 단점을 극복할수 있다.

신경망회로의 중요한 구성 요소는 뉴런과 이들 상호간의 연결이다. 뉴런의 구성은 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 뉴런의 구성

[Fig. 1] Configuration of neuron

뉴런에 연결된 다른 뉴런들로부터의 입력을 연결선의 가중치를 고려한 후, 그 결과를 적당한 전이 함수(transfer function)로 처리한 후 연결된 다른 뉴런으로 출력한다.

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 뉴우런 사이의 연결강도이고, X_i 는 i 번째 입력, θ_j 는 j 번째 뉴우런의 고유 바이어스 값이다. 전체출력 Y_j 과 입력 X_i 의 관계는 전이함수 F 에 의해서 정해지는데, 이들 중에 많이 사용하는 전이함수는 계단응답, 선형, 로그-시그모이드 전이함수들이다.

3. 시스템 해석

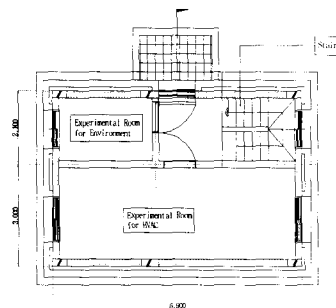
3.1 모델링

3.1.1 건물 모델링

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

건물의 벽체, 창호 등의 외피를 통한 열전달량은 건물 열부하의 상당부분을 차지하므로 외피의 구조 및 배열, 각 재료의 열특성에 관한 규명은 매우 중요하다. 환경실험실내 실험동의 벽체를 외벽, 구역과 구역을 분할하는 내부벽, 바닥, 천장 등으로 분류하고, 설계도면을 근거로 하여 각 부분의 재료 및 물성치는 TRNSYS PREBID 수록 표준목록을 바탕으로 상응하는 물성치와 특성을 갖는 유사재료를 선정

하였고 이를 <표 1>에 나타내었다.



[그림 2] 시뮬레이션 건물 개요도

[Fig. 2] Schematic diagram of building for simulation

<표 1> 건물 벽의 층과 두께

<Table 1> Wall layer and thickness

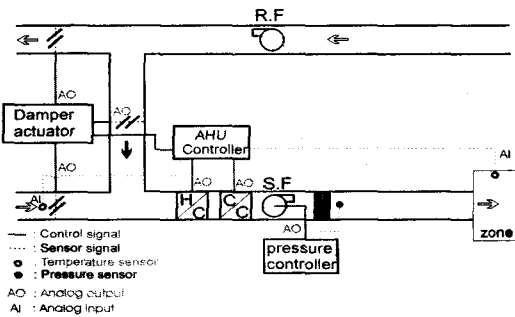
Wall Name	Layer Material	Thickness (mm)	Conductivity (kJ/hmK)	Capacity (kJ/kgK)
External	Red brick	90	2.55	0.84
	Urea form	50	0.13	0.04
	Cement brick	190	5.44	0.84
	Mortar	5	5.04	1.0
Internal	Mortar	5	5.04	1.0
	Concrete	120	7.756	1.0
	Mortar	5	5.04	1.0
Bottom	Concrete	120	7.756	1.0
Top	Concrete	120	7.756	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/m ² K			

3.2 시스템 모델링

해석적 연구를 위하여 채택된 공조시스템의 개요

도가 [그림 3]에 나타나 있다.

이 그림을 보면 급기 팬에 의해서 외부로부터 유입된 공기는 히팅 코일을 통과하여 각 존으로 유입된다. 그리고 이 존에서 사용된 공기는 순환 팬을 통하여 배출되는데 일부는 외부로 배출되고 일부는 댐퍼를 통하여 다시 유입되는 구조이다.



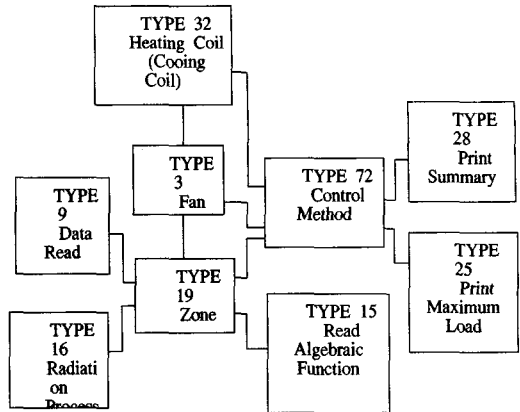
[그림 3] 공조시스템의 개요도

[Fig. 3] Schematic diagram of HVAC system

4. TRNSYS 프로그래밍

실내공간의 동적해석을 위해서 본 연구에서는 미국의 Wisconsin 대학에서 개발되어 건물의 동적에너지 해석에 많이 이용되고 있는 TRNSYS 프로그램을 이용하였다. TRNSYS 프로그램에는 PID 제어나 Neural Networks 제어에 대한 프로그램이 없으므로 이들을 프로그래밍하여 TRNSYS의 모듈로 구성하였다.

시스템의 성능해석을 위하여 시스템 도면[그림 3]을 TRNSYS 프로그램 환경으로 작성한 것이 [그림 4]이다.



[그림 4] TRANS 프로그래밍의 흐름도

[Fig. 4] Flow chart of TRNSYS programming

5. 연구결과 및 검토

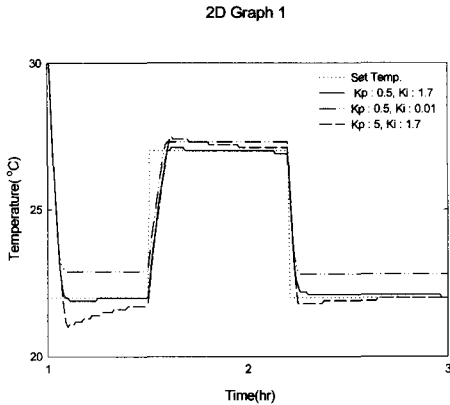
5.1 PI제어에 의한 건물 시스템 시뮬레이션

5.1.1 PI제어에 의한 건물 냉방시뮬레이션

여름철 건물 냉방에 있어서 PI제어에 대한 온도추종이 잘 이루어지는 이득(gain) 값인, Kp, Ki 값의 도출을 위한 절차를 다음과 같이 수행하였다. 이때 이 시뮬레이션을 위한 실내온도의 설정온도를 22℃, 27℃, 22℃로 순차적으로 변화하여 이 설정온도에 대한 유량의 변화에 대한 온도추종을 알아보았다.

덕트를 통과하는 송풍 공기의 최대유량이 1000kg/hr(2.4m/s) 일 때의 적절한 이득 값을 알아보기 위하여 임의의 Kp 이득 값과 Ki 이득 값을 적용하여 설정온도에 대하여 추종이 잘 이루어지는 이득 값을 알아보았다.

[그림 5]는 유량이 1000kg/hr일 때의 임의의 이득 값 적용에 대한 온도추종곡선이다. 이 그래프에서 보면 Kp 이득 값이 0.5이고 Ki 이득 값이 1.7일 경우의 상태에서 온도추종이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 여름철 PI제어에 의한 건물 냉방시 위의 이득 값을 적용하여 시뮬레이션 하였다.



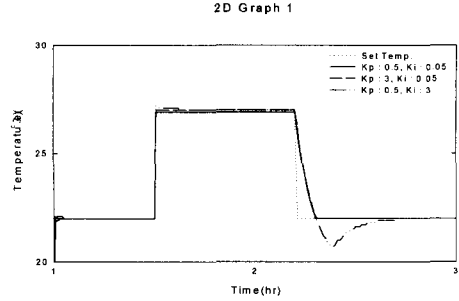
[그림 5] 여름의 시간과 온도 그래프
(최대유량 : 1000kg/시간)

[Fig. 5] Graph of time vs. temperature in summer(Max. flow rate : 1000kg/hr)

5.1.2 PI제어에 의한 건물 난방 시뮬레이션

겨울철 덕트를 통과하는 송풍 공기의 최대유량이 1000kg/hr 일 때의 적절한 이득 값을 알아보기 위하여 임의의 Kp 이득 값과 Ki 이득 값을 적용하여 설정온도에 대하여 추종이 잘 이루어지는 이득 값을 알아보았다.

[그림 6]은 유량이 1000kg/hr일 때의 임의의 이득 값 적용에 대한 온도추종곡선이다. 이 그래프에서 보면 Kp 이득 값이 0.5이고 Ki 이득 값이 0.05일 경우의 상태에서 온도추종이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 겨울철 PI제어에 의한 건물 난방 시에 위의 이득 값을 적용하여 시뮬레이션 하였다.



[그림 6] 겨울의 시간과 온도 그래프
(최대유량 : 1000kg/시간)

[Fig. 6] Graph of time vs. temperature in winter(Max. flow rate : 1000kg/hr)

5.2 신경망을 이용한 시스템 시뮬레이션

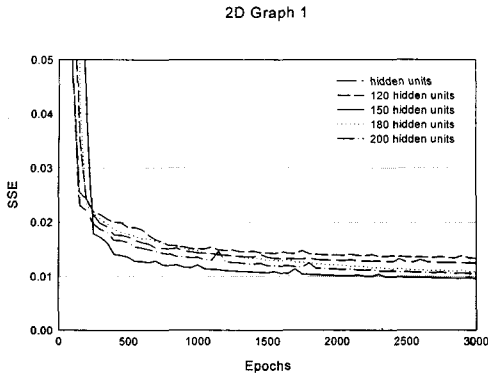
5.2.1 신경망 제어를 이용한 온도 추종

PI제어에서 나타난 한계적인 문제들을 개선시키고 시스템의 성능을 최대한 활용할 수 있는 건물 공조 제어방법으로서 신경망 제어기법을 활용하여 보았다.

이 제어를 위하여 역전파 네트워크를 이용하였고 공조기의 특성상 출력이 0과 1사이에서 무한의 값을 가질 수 있기 때문에 로그-시그모이드 전이함수를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

이 시뮬레이션의 수행을 위하여 우선 TRNSYS를 이용한 PI제어에서 획득된 데이터들을 기본으로 하여 신경망 제어기에 사용되어지기 위한 기본 입력계층을 생성하였다. 여러 가지의 은닉층(hidden layer)에 대하여 추종곡선을 살펴본 결과 은닉유닛의 개수가 150개가 가장 적당하였고 그 이하나 이상의 은닉유닛을 사용하였을 경우에는 누적 에러율이 증가하는 경향을 보였기에 적정 온도추종경향을 보이는 은닉층의 개수를 150개로 설정하였다.

[그림 7]은 은닉유닛의 개수에 따른 누적에러율을 나타내는 그래프로서 이 그래프를 보면 은닉 유닛의 개수가 150개 정도 일 때 가장 좋은 에러율을 나타내고 있음을 알 수 있다.



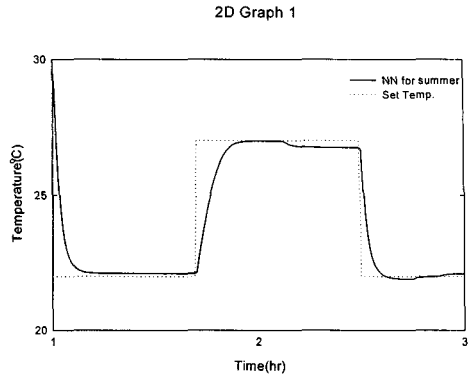
[그림 7] Epoch 대비 누적 에러율
[Fig. 7] Epoch vs. accumulation error

신경망의 온도세팅 및 시간범위는 PI제어와의 비교를 위하여 같은 온도 변화인 22℃, 27℃, 22℃ 일 때를 조건으로 하였고 변화 시간 또한 1.7시간 후의 온도변화와 2.5시간 후의 온도변화를 조건으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

이때 신경망의 적용시 유량의 변화에 대하여는 온도추종에 대하여 항상 같은 조건의 유량변화 추종 곡선을 형성하였기에 더 이상의 변화에 대한 추종값들을 얻지 않았다.

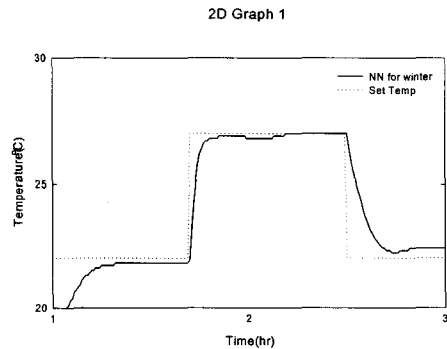
이 시뮬레이션은 여름철과 겨울철에 대한 시뮬레이션을 수행하였는데 이때 입력계층에는 여름과 겨울에 대한 각각의 데이터들을 모두 입력하여 외기온에 대한 각각의 입력계층을 사용하지 않는 상태를 만들었다. [그림 8]은 여름철 냉방에 대한 신경망 적용시의 온도추종에 대한 그래프이고 [그림 9]는 겨울철 난방에 대한 온도추종을 나타내는 그래프이다.

[그림 8]과 [그림 9]를 보면 신경망을 이용한 제어는 PI제어와 같이 비교적 정확한 온도제어가 가능하다는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 이렇게 학습되어진 데이터 값을 가지고 외기온의 변화 및 유량의 변화에 대해서도 항상 동일한 온도 제어곡선을 가지므로 시스템 및 기후의 변화에 대하여 자체적으로 대응할 수 있는 지능형 온도제어가 가능하다는 것을 보여주고 있다.



[그림 8] 여름의 시간과 온도 그래프
(신경망 제어)

[Fig. 8] Graph of time vs. temperature in summer(NN Control)



[그림 9] 신경망 제어 겨울 온도추종곡선(신경망 제어)

[Fig. 9] Trend curve of time vs. temperature in winter(NN Control)

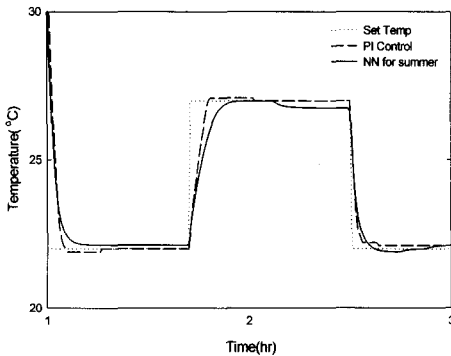
5.2.2 PI제어와 신경망 제어의 비교

[그림 10]은 여름철 신경망 제어의 온도 추종정도를 알아보기 위한 PI제어와의 비교그래프이다. 그래프를 보면 최대유량이 1000kg/hr 일 때의 PI제어에 의한 온도추종과 신경망 제어를 이용한 온도추종은 거의 유사한 상태를 나타내고 있다. 그러므로 신경망 제어는 PI제어에 대한 온도추종을 충분히 만족할

수 있는 상태임을 알 수 있는 것이다.

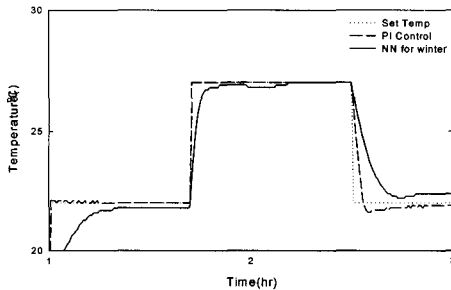
[그림 11]은 겨울철 신경망 제어의 온도 추종정도를 알아보기 위한 PI제어와의 비교그래프이다. 그래프를 보면 최대유량이 1000kg/hr일 때의 PI제어에 의한 온도추종과 신경망 제어를 이용한 온도추종은 거의 유사한 상태를 나타내고 있다.

2D Graph 1



[그림 10] 여름의 시간과 온도(PI와 신경망 제어)
[Fig. 10] Time vs. temperature in summer(PI and NN Control)

2D Graph 1



[그림 11] 겨울의 시간과 온도(PI와 신경망 제어)
[Fig. 11] Time vs. temperature in winter(PI and NN Control)

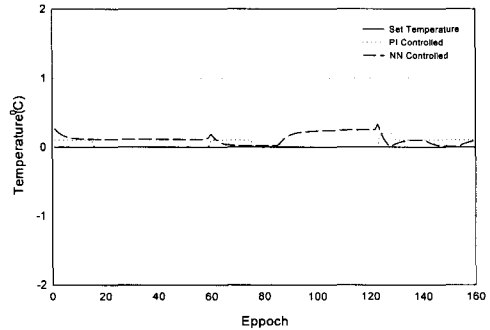
5.2.3 PI제어 및 신경망 제어의 오차비교

설정온도대 실내온도의 제어에 대한 오차값은 PI 제어시에 최소 0에서 최대 0.2도까지였고 신경망 제

어시에는 최소 0도에서 최대 0.32도 였다.

이때 [그림 12]는 오차범위는 온도가 설정온도에 대해 안정된 출력을 나타내는 때 부터의 에러율을 나타낸 것이다.

2D Graph 1



[그림 12] Epoch과 온도

[Fig. 12] Epoch vs. temperature

6. 결론

본 연구에서는 일반적인 건물의 공조시스템의 제어에 이용되고 있는 비례-적분(PI)제어의 적용특성을 알아보고 새로운 지능형 제어방식중의 하나인 신경망(neural networks) 제어의 적용가능성을 검토하여 보았다.

이와 같은 이론적 연구를 통하여 도출된 결과는 아래와 같다.

첫째, 국내와 같이 외기온의 변화가 심한 경우에는 PI제어기의 이득 값을 적절히 조절하여 주어야만 공조시스템의 운영이 최적화 될 수 있다.

둘째, 지능형 제어방식인 신경망 제어를 이용할 경우 PI제어에 의한 건물 제어와 유사한 결과를 얻을 수 있으므로 외기온의 변화시 항상 최적 이득 값을 찾아주어야하는 단점을 보완할 수 있다.

셋째, 공조시스템 제어시 신경망 제어를 이용할 경우 기존의 PI제어에서 최적의 이득 값을 찾고자 많은 시간이 소요되고 이에 따른 에너지 손실을 수

반하는 최적상태로의 운전이 힘든 현실적인 어려움을 해결할 수 있는 새로운 제어방법이다. 그러나 신경망 제어시스템이 최적으로 유지되기 위해서는 학습데이터의 확보와 적절한 은닉뉴트의 개수 설정을 통한 학습률의 향상이 수반되어야 한다는 것을 나타내고 있다.

이를 통하여 기존에 PI제어에 의하여 운영되던 건물을 신경망 제어로서 운용하였을 경우에 기후적, 시스템적 변화에 자체적 대응이 가능한 제어로서 충분히 적용이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

※ 참고 문헌

[1] J. E. Braun and Ross, T. M., "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, 1996.

[2] Hyvarinen, J., "Real Time Simulation of HVAC System for Building Optimization", *Fault Detection and Diagnosis Source Book, IEA ANNEX 25, VTT*, 1996.

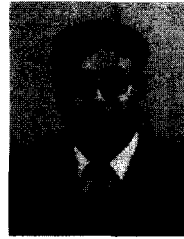
[3] 황형수, 최정내, 이원혁, "PID 제어기의 On-Line 퍼지 자동 동조" *전기학회논문지*, 49권 2호, pp. 55-61, 2000.

[4] J. E. Bekker, P.H. Meckl, and D.C. Hittle, "Tuning Method for First-Order Processes With PI Controllers", *Proceedings of ASHRAE*, pp. 19-23, 1991.

[5] 이재원의 4인 공역, "피드백 제어시스템", 반도출판사, pp.99-116, 1992.

[6] G. S. Virk and D.L. Loveday, "A Comparison of Predictive, PID, and On/Off Techniques for Energy Management and Control", *Proceedings of ASHRAE*, pp. 3-10, 1992.

육 상 조



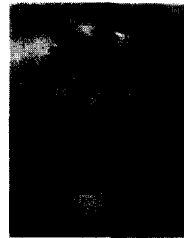
1990 한남대학교 전자계산공학과 학사
 1994 한남대학원 컴퓨터공학과 석사
 1997년 ~ 현재 한남대학원 컴퓨터공학과 박사과정
 관심분야 : 신경망, 음성인식, 정보보호, 멀티미디어

유 승 선



1988 한남대학교 전자계산과 학사
 1994 동대학원 컴퓨터공학과 석사
 2002 - 현재 전북대학교 영상정보공학과 박사수료
 1988 - 2001.5 한국에너지기술연구원 연구원
 2001.7 현재 비맥(주) 기술이사
 관심분야 : 신경망, 이미지프로세싱, 멀티미디어, 인공지능

이 국



1983년 경북대학교 전자공학과 (전산전공) 공학사
 1986년 서울대학교 컴퓨터공학과 공학석사
 1993년 서울대학교 컴퓨터공학과 공학박사
 1988년 ~ 현재 한남대학교 컴퓨터전자통신공학부 컴퓨터공학전공 교수
 관심분야 : 신경망, 음성인식, 정보보호, 멀티미디어, 컴퓨터 교육