

## HVAC 시스템에 대한 Multi Fuzzy 제어기 설계

정승현, 최정내, 오성권  
수원대학교 전기공학부

### Design of Multi Fuzzy Controller for HVAC System

Seung-Hyun Jung, Jeoung-Nae Choi, Sung-Kwon Oh  
Department of Electrical Engineering, The University of Suwon

**Abstract** - 본 논문은 HVAC(heating, ventilating, and air conditioning) 시스템에 대하여 Multi Fuzzy 제어기 설계를 제안한다. HVAC 시스템은 Compressor(압축기), Condenser(응축기), Evaporator(증발기), Expansion Valve 로 구성되며, 각각의 기기에 대한 제어가 독립적으로 이루어져 있다. 기존의 제어가 한 제어기를 사용한 단일방식으로 이루어지다보니 HVAC 시스템의 특성인 냉매의 상태가 달라지면 시스템 전반적으로 그 영향이 과급되는 부분까지 고려를 해 주지 못하고, 제어기의 성능이 효율적이지 못했다. 본 논문에서는 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어할 수 있는 Fuzzy 제어기를 구성하여 Expansion Valve 와 Compressor 에서 동시에 제어하는 Multi 제어기를 설계한다. 제안된 Multi Fuzzy 제어기는 HVAC 시스템의 효율성과 안정성에 기초하여, 과열도와 저압을 제어한다.

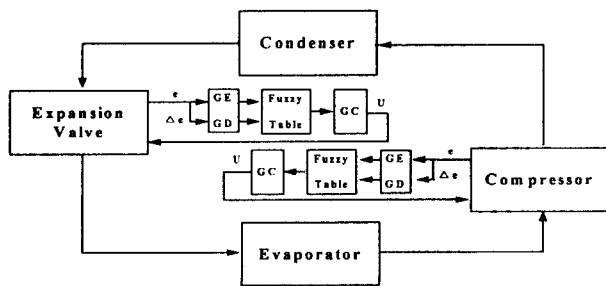
#### 1. 서 론

최근 생활 수준의 향상으로 인해 주거 환경에 대한 쾌적성의 요구가 높아짐에 따라 사무공간뿐만 아니라 가정에서도 HVAC 시스템[1-6]의 사용이 필수화 되어지고 있으며 더 나아가 1가구 1대에서 1실 1대로 되어가고 있는 실정이다. 이에 따라 HVAC 시스템이 급속하게 발전하고 있고 근래에 인버터 기술의 발전에 따라서 HVAC 시스템에 사용되는 압축기의 구동에 인버터를 적용한 제품이 선진국을 중심으로 널리 사용되고 있다. 부하변동에 따라 압축기의 용량을 가변 제어하는 인버터의 도입은 ON/OFF 제어만으로 작동되던 기존의 압축기를 넓은 영역에서 가변속 운전할 수 있도록 함으로써, 에너지 효율 및 제어 성능의 향상을 가져다 준다. 그러나 가변요소가 다양하고 이들 사이에 많은 의존성이 존재하는 HVAC 시스템에 인버터형의 압축기를 사용하므로 사용자의 요구에 만족시키는 제어로직의 결정이 더욱 어려워졌다. 또한 시스템의 복잡성 및 비선형성으로 인한 시스템의 수학적 분석이 매우 복잡할 뿐 아니라 제어기의 설계에도 많은 어려움이 있어, 기존의 연구는 제어기 설계보다는 냉매에 대한 연구와 기계적인 개발에 치중되어 왔었다. 그러나 시스템이 더욱 복잡해짐에 따라 최적의 환경과 더불어 에너지 절감, 수명 연장 등의 부가적인 효과를 위해 효율적인 제어기의 설계에 많은 관심을 기울이고 있다.

이에 본 논문에서는 HVAC 시스템에 대해 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어할 수 있는 Fuzzy PI 제어기[6-7]를 설계한다. 그리고 HVAC 시스템은 어느 한 부분에서 냉매의 상태가 달라지면 시스템 전반적으로 영향을 미치기 때문에 Expansion Valve 와 Compressor 에서 동시에 제어를 하는 Multi Controller 를 설계한다. 먼저 제어 대상은 HVAC 시스템의 안정성과 효율성에 영향을 주는 과열도 그리고 저압을 선택한다. 그리고 설정치와 공정 출력의 오차 및 오차의 변화분을 제어기의 입력으로 사용하고, Fuzzy 추론방법 중 Mandani 방법을 사용하여 제어기의 출력을 추론한다.

#### 2. HVAC(heating, ventilating, and air conditioning)

HVAC 시스템은 냉매의 상태변화를 통한 열의 흡수 및 방출을 통하여, 실내의 온도를 사용자가 원하는 온도로 맞춰주는 시스템으로 냉장고, 에어컨 등의 냉난방 시스템이 이에 속한다. 최근에는 최적의 환경을 구축하기 위한 냉난방 시스템이 많이 개발되고 있다.

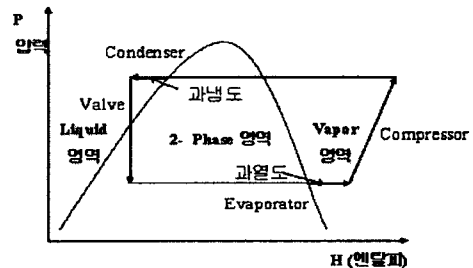


<그림 1> HVAC 시스템 구성도

그림 1에서 보듯이 HVAC 시스템은 Compressor, Condenser, Evaporator, Expansion Valve로 구성되며, 냉매가 각 장치를 통과하면서 Compressor 에서 압력저장, Condenser 에서 액화, Expansion Valve 에서는 유량조절, Evaporator 에서는 기화를 통하여 주위의 온도가 변화된다.

다시 말하면 Compressor 는 저압의 기체상태 냉매를 고온고압 상태의 기체 만들고, Condenser 는 에너지를 외부로 방출함으로써 고온 고압상태의 기체를 저온 상태의 액체로 변환을 하고, Valve 는 저온 고압의 액체를 저온 저압 상태로 만들어주며 Evaporator 는 외부의 에너지를 흡수함으로써 저온 저압상태의 냉매를 고온 저압상태의 기체로 변환하는 기능을 갖고 있다. 이 순환이 반복함으로써 사용자가 원하는 온도로 맞춰주게 된다.

HVAC 시스템은 Compressor(압축기), Condenser(응축기), Evaporator(증발기), Expansion Valve 의 조합에 따라 새로운 시스템(난방기, 냉방기)을 구성하게 되며 각 장치마다 별도의 제어기가 요구된다. 각각의 장치들은 비선형성이 매우 강한 MIMO(Multi Input Multi Output) 시스템이며 각각의 입출력 상태에 따라 설정치를 조정해주어야 하는 제어기의 연동이 매우 중요시 된다. 이 HVAC 시스템 사이클에서 중요한 점은 Evaporator 를 거친 냉매는 모두가 기체 상태이어야 하고, Condenser 를 거친 냉매는 완벽하게 액체상태가 되어야 한다. 그렇지 않으면 효율 저하, 기계의 수명 단축 및 고장의 원인이 된다.



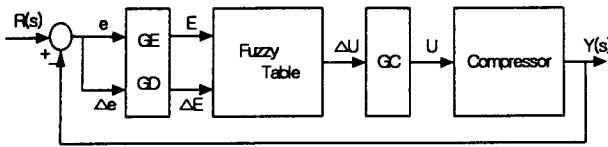
<그림 2> 모리엘 선도(p-h선도)

그림 2는 모리엘 선도상에 HVAC 시스템의 사이클을 p-h 선도상에 표시해 놓은 것이다. 그림에서 사다리꼴 모양이 HVAC 시스템의 사이클이고, 포물선은 냉매의 포화곡선이다. 이때 포화곡선과 Condenser 의 출구온도 차이가 과냉각이고, 포화곡선과 Evaporator 의 출구온도 차이가 과열도이다.

과열도, 과냉각, 저압에 대해 자세히 기술하자면 Compressor 입구에서의 냉매 상태는 완전히 기체화 되어 압축에 지장이 없어야 하는데, 급격한 실내 부하 변동이 있을 경우 냉매에 조금의 액체 상태가 있을 수 있다. 이 액체 상태의 냉매가 Compressor 로 들어가면 압축기의 고장을 유발하고 압축 효율을 저하시키므로, 이를 방지하기 위하여 Evaporator 를 통과한 냉매가 Compressor 로 가는 과정에서 온도를 올려주어 완전한 기체 상태로 만들어 준다. 이때 올려주는 온도를 과열도라고 한다. 그리고 Condenser 에서 나오는 냉매의 온도를 낮춰 완전한 액체 상태로 만들면 Evaporator 에서 증발하는 냉매량이 증가하여 냉매의 효율이 높아지는데 이때 낮춰주는 온도를 과냉각이라 한다. 저압은 Compressor 에서 냉매의 유량을 조절하는 과정에서 생기는 압력 변화를 의미하는데 HVAC 시스템은 어떤 부분에서 냉매의 상태가 바뀌면 그 영향이 과급되기에 저압도 제어해야 한다. 본 논문에서 제어 목표는 주위 온도보다는 과열도, 과냉각, 저압의 제어에 중점을 두었다.

#### 3. Fuzzy 제어기 설계

기존의 PID 제어기가 선형 시스템에서는 우수한 성능을 보이나 비선형 동적 시스템, 고차 시스템, 수학적 모델 선정이 어려운 시스템에는 비효과적인 것에 반해 퍼지 제어기는 인간의 지식과 경험을 이용한 지적 제어 방식으로 IF-THEN 형식의 규칙으로부터 제어입력을 결정하는 병렬적 제어이다. 이는 과도상태에서 큰 오버슈트 없이 설정치에 도달하게 하는 속속성과 강인성이 좋은 제어 기법으로 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어할 수 있는 장점을 가진다.



〈그림 3〉 Fuzzy 제어기

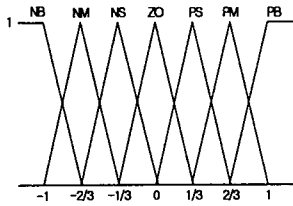
그림 3은 퍼지 PI 제어기의 기본 구성도를 나타낸 것이다. 여기서 e는 설정치와 공정 출력의 오차, Δe는 오차의 변화분, GE 및 GD는 표준화된 퍼지 값으로 표현하는 수치를 의미하는 오차변화의 퍼지 환산계수이고 GC는 퍼지 추론 규칙의 출력을 공정의 차원과 일치시키는 제어 출력의 퍼지 환산계수이다.

퍼지제어의 알고리즘은 일반적으로 식 (1)의 형태를 취하는 N개의 독립적인 제어 규칙들로 구성된다.

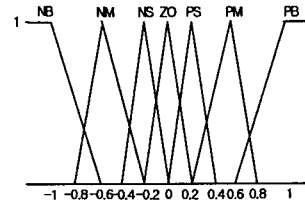
$$R^i: \text{IF } E \text{ is } A_i \text{ and } \Delta E \text{ is } B_i, \text{ THEN } \Delta U \text{ is } C_i \quad (1)$$

$R^i$ : i번째 제어규칙(i=1,2,...,N), E: 오차값, ΔE: 오차의 변화분  
 $\Delta U$ : 제어출력의 변화값,  $A_i, B_i, C_i$ : 퍼지 변수

전반부 및 후반부의 언어적 제어 변수인 오차(e), 오차의 변화분(Δe) 및 제어 출력의 변화값(ΔU)는 각각 NB:Negative Big, NM:Negative Medium, NS:Negative Small, ZO:Zero, PS:Positive Small, PM:Positive Medium, PB:Positive Big 의 7개로 구성되어 있으며 전체적인 제어 규칙표는 표 1과 같다.



〈그림 4〉 E, ΔE M.F.



〈그림 5〉 ΔU M.F.

〈표 1〉 퍼지 제어 규칙

		ΔE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	NS	AZ
	NS	NM	NM	NS	NS	AZ	AZ	PS
	ZO	NM	NS	AZ	AZ	PS	PS	PM
	PS	NS	AZ	AZ	PS	PS	PM	PM
	PM	AZ	PS	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PB

$$w_i = \min [v_{A_i}(E_k), v_{B_i}(\Delta E_k)] \quad (2)$$

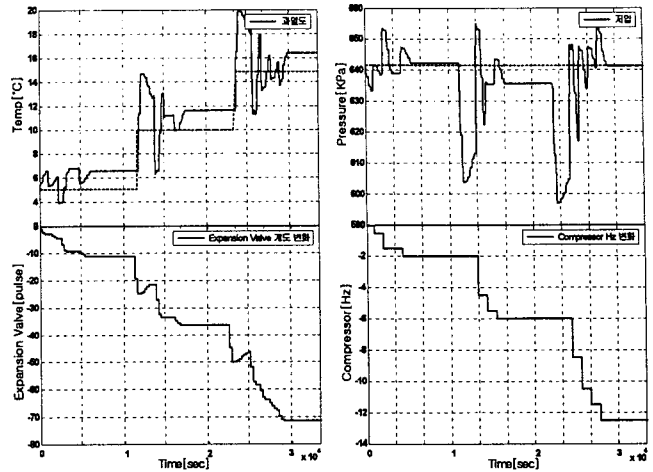
$$\Delta U = \sum_{i=1}^N w_i C_i / \sum_{i=1}^N w_i \quad (3)$$

표 1의 제어 규칙에서 임출력 변수의 멤버십 함수는 그림 4, 5와 같이 [-1,1]에 의해 표준화된 삼각형 형태를 사용한다. 각각의 규칙에 있어 전반부 추론 결과값은 식 (2)와 같고 비퍼지화(defuzzification) 과정을 거친 후 전반부 추론결과 값은 식 (3)과 같다.

#### 4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서는 과열도와 목표저압을 Mandani 추론법을 이용한 Lookup-table 을 구성하여 제어하였다. 과열도는 Expansion Valve 에서 제어하는 부분으로 오차(e)와 오차의 변화분(Δe)은 [-6, 6], 개도 변화율(ΔU)은 [-15, 15] 를 7개의 멤버십으로 구성하였고 퍼지 제어 규칙은 표 1을 사용하였다. 저압은 Compressor 에서 제어하는 부분으로 오차(e)와 오차의 변화분(Δe)은 [-90, 90], 인버터의 주파수 변화율(ΔU)은 [-24, 24] 를 7개의 멤버십으로 구성하였고 퍼지 제어 규칙은 표 1을 사용하였다.

각각의 제어기의 환산계수는 과열도제어: GE = 1, GD = 1, GC = 0.55, 목표저압제어: GE = 1, GD = 1, GC = 0.5 로 주었다. 초기값으로는 Expansion Valve 개도를 500, Compressor 의 Hz를 70으로 주었다. 시뮬레이션 시간은 3600sec, 초기 목표치를 과열도는 5°C, 목표저압은 641KPa로 설정하고 1200sec 마다 목표 과열도를 10°C, 15°C 로 변경하며 원하는 값으로 수렴되는지 확인하였다.



〈그림 6〉 Fuzzy PI Multi 제어기의 시뮬레이션 결과

그림 6는 제어기의 시뮬레이션 결과이다. 좌측 상단은 과열도를 좌측 하단은 Expansion Valve의 개도변화를 나타내는 그림이고, 우측 상단은 저압을 우측 하단은 Compressor의 Hz 변화를 나타내는 그림이다.

그림에서 볼 수 있듯이 제어기는 목표 과열도와 목표 저압에 수렴하기 위해 Expansion Valve의 Pulse 를 줄여주고, Compressor의 Hz를 낮추며 유량조절을 한다. 이는 HVAC 시스템은 어느 한 부분에서 냉매의 상태가 달라지면 시스템 전반적으로 영향을 미치기 때문에, 시스템을 전체적으로 제어할 수 있는 Multi 제어를 해야 하기 때문이다.

과열도는 목표치를 변경할 때마다 600[sec] 정도의 시간이 지난후 목표치에 수렴하고 있고, 저압 역시 과열도와 마찬가지로 시간이 다소 걸리지만 수렴함을 볼 수 있었다. 이는 HVAC 시스템 특성상 냉매의 상태변화가 시스템에 전반적으로 영향을 주기 때문이라고 해석된다.

#### 5. 결 론

HVAC 는 비선형성이 매우 강한 MIMO 시스템이며 어떤 부분에서 냉매의 상태가 달라지면 시스템 전반적으로 그 영향이 파급된다. 본 논문에서는 기계적인 성능 개선 보다는, Fuzzy PI 제어기를 통한 시스템의 성능 개선 시도하였고 Expansion Valve 와 Compressor 에서 동시에 제어를 하는 Multi Controller 를 설계하여, HVAC 시스템의 안정성과 효율성에 영향을 주는 과열도와 저압을 제어하였다. 설계된 퍼지 PI 제어기는 과열도의 목표치를 변경하여도 안정적으로 제어됨을 확인하였다.

기존의 HVAC 시스템은 냉매에 대한 연구 또는 기계적인 개발에 치중되어 왔다. 하지만 본 논문에서와 같이 제어기 부분의 연구를 통해서도 안정적이고 효율적인 HVAC 시스템 개발의 발전 가능성을 확인하였다. 그리고 Fuzzy 제어기를 이산형이 아닌 연속형으로 구성하고 환산계수들을 GAs(유전자 알고리즘)나 Complex 알고리즘 등의 최적화 알고리즘을 이용하여 튜닝한다면 더욱 성능이 좋은 제어기를 설계할 수 있을 것이라 기대한다.

#### 〈참고 문헌〉

- [1] Rajat Shah, "Dynamic Modeling and Control of Single and Multi-Evaporator Subcritical Vapor Compression Systems" ACRC TR-216, Aug. 20 03.
- [2] Rajat Shah, Bryan Rasmussen, and Andrew Alleyne, "Application of Multivariable Adaptive Control to Automotive Air Conditioning Systems," the International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Special Issue on Signal Processing and Adaptive Control for Automotive Applications.
- [3] Marten Dane, "Investigation of Control Strategies for Reducing Mobile Air Conditioning Power Consumption" ACRC TR-199, Marten Dane, Aug. 2002
- [4] Kim,D.M., Jun, Y.H., Kwon, Y.C., Lee, Y.S., Moon, J.M. andHong, J. T, "Experimental study on performance evaluation of system A/C using PWM or inverter method(Heating characteristics at low temperature conditions)", Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 7, pp. 551-556. 2003.
- [5] Batzaida, A., and Miguel, V., "Nonlinear Control of a Heating, Ventilation, and Air Conditioning System with Thermal Load Estimation", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 56-63. 1999
- [6] Piao, Y., Zhang, H., and Zeungnam, B., "A Simple Fuzzy Adaptive Control Method and Application in HVAC", proc. of the IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems, Vol. 1, pp. 528-532. 1998.
- [7] S.-K. oh, "Fuzzy Model & Control System by C-Programmin", Naeha Press, 2002.