

## HVAC 시스템에 대한 PSO 알고리즘을 이용한 최적화된 Multi-Fuzzy 제어기 설계

정 승 현<sup>1</sup>, 최 정 내<sup>1</sup>, 오 성 권<sup>1</sup>, 최 한 중<sup>2</sup>, 류 병 진<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>수원대학교 전기공학과  
<sup>2</sup>LG전자 디지털어플라이언스 사업본부 DAC연구소

### Design of Optimized Multi-Fuzzy Controller by Means of Particle Swarm Optimization Algorithm for HVAC System

Seung-Hyun Jung<sup>1</sup>, Jeoung-Nae Choi<sup>1</sup>, Sung-Kwan Oh<sup>1</sup>, Han-Jong Choi<sup>2</sup>, Byoung-Jin Ryu<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, The university of suwon  
<sup>2</sup>DAC Research Lab. Digital Applia nce Company, LG Electronics

**Abstract** - 본 논문은 HVAC(heating, ventilating, and air conditioning) 시스템에 대해 Particle Swarm Optimization(PSO) 알고리즘을 이용하여 최적화된 Multi-Fuzzy 제어기 설계를 제안한다. HVAC 시스템의 효율과 안정도에 결정적인 영향을 미치는 과열도와 저압(증발기의 압력)을 제어하기 위해, 3대의 Expansion Valve 와 1대의 Compressor 에서 동시에 제어하는 Multi-Fuzzy 제어기를 설계한다. 그리고 최적화 알고리즘 중 하나인 사회적인 행동양식을 기반한 PSO 알고리즘을 이용하여 설계된 Multi-Fuzzy 제어기를 최적화한다. 시뮬레이션의 결과 비교를 통해, 대표적인 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘을 사용한 최적화된 제어기와 제안한 PSO 알고리즘을 이용한 최적화된 제어기의 성능을 평가한다.

#### 1. 서 론

HVAC(heating, ventilating, and air conditioning) 시스템[1]은 냉·난방 및 공기 조화를 통해 사용자가 원하는 온도 및 상태를 만들어 주는 시스템으로, 최근 생활수준의 향상으로 인해 실외기 1대에 여러 대의 실내기를 사용한 다중 증발기를 갖는 HVAC 시스템이 많은 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 그러나 시스템의 복잡성, 비선형성 및 시스템 상호 연동성 등으로 인한 시스템의 수학적 분석이 매우 복잡할 뿐 아니라 제어기의 설계에도 많은 어려움이 있어 기존의 HVAC 시스템의 성능향상을 위한 연구는 제어기 설계보다는 냉매에 대한 연구나 기계적인 장치의 개선에 치중되었으며, 제어기로서는 시행착오나 경험을 바탕으로 설계된 PID 제어기나 간단한 Fuzzy 제어기가 사용되고 있다. 그러나 시스템이 더욱 복잡해짐에 따라 최적의 환경과 더불어 에너지 절감, 수명 연장 등의 부가적인 효과를 위해 효율적인 제어기의 설계에 많은 관심을 기울이고 있다.

퍼지 이론이 1965년 Zadeh에 의해 제창된 이래 여러 분야에서 응용이 시도되었다. 그 중 눈에 띄는 결과를 내놓는 분야가 제어분야이다. 인간의 지식과 경험을 이용한 지능 제어 방식인 퍼지 제어기[2]는 과도상태에서 큰 오버슈트없이 설정치에 도달하게 하는 속응성과 강인성이 좋은 제어기법으로 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어 할 수 있는 장점을 가진다. 퍼지제어기는 PID제어기와 비슷한 형태의 제어 파라미터들을 가지고 있다. 그러나 이 퍼지 제어기의 파라미터들은 수식에 의해 결정될 수 없으며, 시행착오를 거쳐 구하거나 최적화 알고리즘을 이용하여 구한다.

Particle Swarm Optimization(PSO) 알고리즘[3]은 사회 심리학 특성과 진화연산의 결합에 의한 최적화 알고리즘이다. PSO 알고리즘은 기존의 최적화 방법론들과는 달리 최적해의 탐색이 초기값에 의존하지 않는다. 즉 탐색 공간의 어느 곳에서 출발하든지, 최적해의 수렴을 보여준다. 그리고 PSO는 전역탐색과 지역탐색 사이에서의 관계를 유연하게 조절할 수 있다. 이것은 빠른 수렴과 탐색능력을 강화할 수 있는 PSO의 특징이다. 또한 PSO는 많은 연산자를 갖는 유전자 알고리즘과 달리 하나의 연산자만을 사용하여, 구현이 용이하고 간결하며 연산의 효율성의 특징을 갖는다.

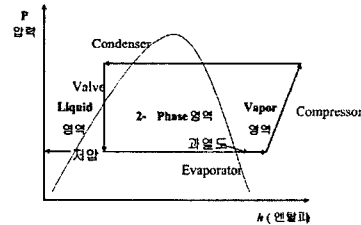
이에 본 연구에서는 다중 증발기를 갖는 HVAC 시스템의 압축기와 확장밸브마다 퍼지 제어기를 구성하고, 앞서 설명한 PSO 알고리즘을 이용하여 제어기들의 파라미터를 튜닝한 최적화된 퍼지 제어기를 설계한다. 그리고 유전자 알고리즘을 사용한 최적화된 제어기와 제안한 PSO 알고리즘을 이용한 최적화된 제어기의 성능을 시뮬레이션 결과를 비교한다.

#### 2. HVAC 시스템

HVAC 시스템은 냉매의 상태를 변화시키므로써 발생하는 열에너지의 흡수 및 방출현상을 이용하여, 내부의 열에너지를 흡수 내부로 방출 또는 외부의 에너지를 흡수하여 내부에 방출함으로써 실내의 온도를 조절할 수 있는 시스템이다. HVAC 시스템은 크게 압축기(Compressor), 응축기(Condenser), 증발기(Evaporator), 확장 밸브(Expansion Valve)로 구성되며 동관으로 서로 연결되어있다. 냉매가 각 장치를 통과하면서 Compressor 에서 압력조절, Condenser 에서 액화, Expansion Valve 에서는 유량조절, Evaporator 에서는 기화를 통하여 주위의 온도가 변화된다. 즉 냉매의 순환이 반복하여 실내의 에너지를 흡수하여 실외로 방출함으로써 실내의 온도를 사용자가 원하는 온도로 낮출 수 있다. 이러한 HVAC 시스템의 장치들

은 비선형성이 매우 강한 MIMO(Multi Input Multi Output) 시스템이며, 한 장치의 제어에 의한 출력의 변화는 다른 장치의 제어에 의하므로 작용하게 되어 각각의 입력력 상태에 따라 설정치를 조정해주어야 하는 제어기의 연동이 매우 중요시 된다.

또한, 최근 생활수준의 향상으로 인해 HVAC 시스템의 수요가 많아지면서 하나의 실외기에 여러 대의 실내기, 즉 압축기 한대에 여러 대의 확장밸브와 증발기를 갖는 HVAC 시스템이 개발되어지고 있고, 많은 연구가 이루어지고 있다. 이 다중 증발기를 갖는 HVAC 시스템은 에너지 효율 측면이나, 설치공간의 절약, 미관성, 공사비의 절약 등등 여러 장점을 가지고 있지만, 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 있었다. 그러나 시스템이 더욱 복잡해짐에 따라 최적의 환경과 더불어 에너지 절감, 수명 연장 등의 효과를 위해 효율적인 제어기의 설계가 꼭 필요하다.



<그림 1> HVAC 공정 사이클 및 모리엘 선도(p-h 선도).

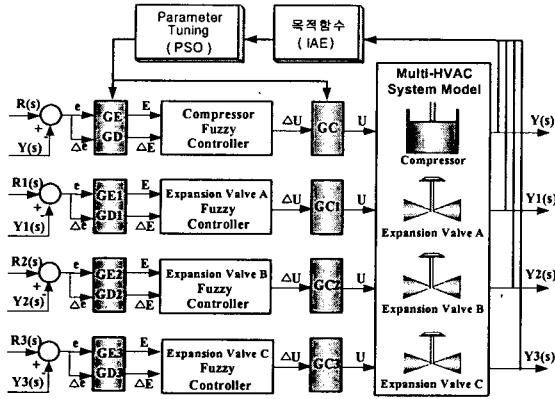
그림 1은 HVAC 공정 사이클을 모리엘 선도(p-h 선도) 상에 표시해 놓은 것으로 그림에서 사다리꼴 모양이 에어컨 시스템의 사이클이고, 포물선은 냉매의 포화곡선이다. 이 에어컨 공정 사이클에서 중요한 점은 증발기를 거친 냉매는 모두가 기체 상태여야 하고, 응축기를 거친 냉매는 액체상태가 되어야 한다. 그렇지 않으면 효율 저하 및 기계의 고장의 원인이 된다.

본 논문에서는 제어목표는 실내의 온도가 아니라 다중 증발기를 갖는 에어컨 시스템의 효율과 안정도에 많은 영향을 주는 과열도와 저압을 제어목표로 하여 Fuzzy 제어기를 설계하였다. 그림 1에서 포화곡선과 증발기의 출구온도 차이가 과열도이고, 증발기의 내부 압력이 저압이다.과열도는 확장밸브에서 개도 변화를 통해 제어를 하고, 저압은 압축기의 용량을 가변 제어하는 인버터의 주파수 변화를 통하여 제어한다. 그림 2에서와 같이 1대의 압축기에 3대의 확장밸브와 증발기를 갖는 에어컨의 과열도와 저압을 제어하기 위해, 압축기내의 인버터의 주파수 제어를 위한 1대의 Fuzzy PI 제어기와 확장밸브들의 개도를 제어하기 위한 3개의 Fuzzy PI 제어기로 구성된 Multi - Fuzzy PI 제어구조를 사용하였다.

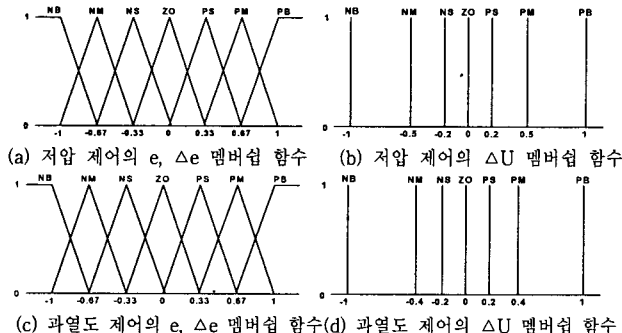
#### 3. Multi-Fuzzy Controller

그림 2는 Multi - Fuzzy PI 제어기의 기본 구성도를 나타낸 것이다. 다중 증발기를 갖는 HVAC 시스템의 압축기와 3 대의 확장밸브에 각각의 제어기를 구성하고 동시에 제어하도록 하였다. 여기서 e는 설정치와 공정 출력의 오차, Δe는 오차의 변화분, ΔU는 플랜트 제어 입력의 변화분이다. GE, GE1, GE2, GE3 및 GD, GD1, GD2, GD3는 각각의 제어기에서 표준화된 퍼지 값으로 표현하는 수치를 의미하는 오차변화의 퍼지 환산계수이고, GC, GC1, GC2, GC3는 퍼지 추론 규칙의 출력을 공정의 차원과 일치시키는 제어 출력의 퍼지 환산계수이다. 환산 계수들은 최적의 제어기 설계에서 가장 중요한 관건으로 본 논문에서는 다음 장에서 설명하는 PSO 알고리즘을 이용하여 동조하였다.

본 연구에서는 퍼지추론 방법 중 간략추론 방법을 사용하였고, 저압 제어기와 과열도 제어기의 오차(e)와 오차의 변화분(Δe), 제어출력의 변화분(ΔU)의 멤버쉽 함수는 그림 3과 같다. 간략추론 방식은 후반부 변수로 실상수를 사용한다. 각각의 확장밸브에서 제어하는 3대의 과열도 제어기 모두 같은 멤버쉽 함수를 사용하였고, 그림에서 알 수 있듯이 7개의 멤버쉽 함수들로 구성하였다. 그리고 49개의 제어 규칙을 사용하였다.



〈그림 2〉 최적화 Multi-Fuzzy 제어기.



〈그림 3〉 간략추론 방식의 e, Δe, ΔU 멤버십 함수

전반부에서는 식 (1)와 같이 입력의 적합도에 대해 min연산을 취하고, 후반부에서는 식 (2)에서 볼 수 있듯이 구한 적합도와 후반부 적합도를 product 연산을 통해 최종 추론결과를 구한다.

$$w_i = u_{A1}(E_i) \wedge u_{B1}(\Delta E_i) \quad (1)$$

$$\Delta U = \left( \sum_{i=1}^n w_i \times u_{C_i} \right) / \sum_{i=1}^n w_i, \forall c \in C \quad (2)$$

#### 4. Particle Swarm Optimization(PSO) 알고리즘

Kennedy and Eberhart에 의해 처음 소개된 PSO는 사회 심리학 특징과 진화연산의 결합에 의한 최적화 알고리즘이다. PSO는 물고기, 새 떼와 같은 생물의 행동 양식을 바탕으로 고안되었다. 사회과학 측면에서 PSO는 사회(social) 모델과 인지(cognition) 모델의 결합이다. 사회적 요소의 특징으로 각 개체들은 그들 자신의 경험을 무시하고 이웃 개체의 성공적인 확신에 따라 그들의 행동양식을 조절한다. 반대로 인지적 요소에서 각 개체들은 독립적인 존재로서 다루어진다. 이러한 두 가지 기준을 바탕으로 각 swarm을 이동시키며 최적점을 찾게 된다.

PSO의 기본요소는 각각의 개체인 particle 과 n 개의 particle 집합인 swarm으로 이루어지고, PSO의 유일한 연산자인 식 (3)의 이동속도를 통해 최적의 해를 찾아가는 것이다.

$$v_{jk}(t+1) = w(t) \cdot v_{jk}(t) + c_1 \cdot r_1(pbest_{jk}(t) - x_{jk}(t)) + c_2 \cdot r_2(gbest_k(t) - x_{jk}(t)) \quad (3)$$

여기서, w는 관성하중(inertia weight)으로 현재 속도에 대한 이전 속도의 영향을 조절하기 위한 파라미터이다. 따라서 이 값은 particle의 전역 탐색 능력과 지역탐색 능력 사이의 관계를 조절한다. 초기에는 전역탐색의 강화를 위해 큰 관성하중 값을 설정하고, 반대로, 탐색후반부에는 좀더 나은 지역탐색을 위해 관성하중을 감소시킨다. 0.9(wmax) - 0.4(wmin)까지 선형적으로 감소시키는 방법이 자주 이용된다. c1과 c2는 가속상수로서 각 particle이 pbest와 gbest로 향하는 확률적인 가속의 가중치를 표현한다. 이들의 낮은 값은 목적지가 아닌 곳을 떠돌게 만든다. 반면에, 높은 값은 목적지를 지나치거나 갑작스런 방향 전환을 유도한다. 기존에 많은 실험들은 이들 값을 2.0으로 설정하였다. r1과 r2는 [0 1]의 랜덤상수이다. 식 (3)에서 pbest(t)는 각 particle의 이동경로 중 가장 좋은 적합도를 갖는 점에서의 particle의 위치(값)이고, gbest(t)는 최적의 위치정보를 가지는 particle들, 즉 pbest의 모든 particle중 가장 최적의 위치정보를 나타내는 particle이다. 따라서 gbest는 주어진 문제의 최적해가 된다. PSO는 pbest(t)와 gbest(t)를 기준으로 거리 차에 따른 이동속도를 연산하여 식 (4)와 같이 각 개체들의 위치를 조절한다.

$$x_{jk}(t) = v_{jk}(t) + x_{jk}(t-1) \quad (4)$$

중요 조건을 만족할 때까지 반복적으로 식 (4)를 통해 위치를 조절하며 최종적으로 생성된 gbest는 최적의 위치정보를 가진다.

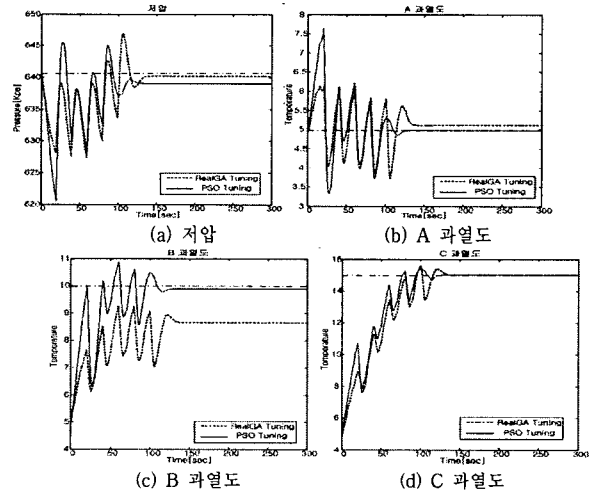
#### 5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서는 Multi-Fuzzy 제어기를 설계하고 PSO 알고리즘을 사용하여 제어기의 최적화를 수행하며, 유전자 알고리즘을 사용한 최적 제어기와 시뮬레이션 결과 비교를 통해 제안된 제어기의 성능을 평가한다. PSO와 유전자 알고리즘 둘 다 150개체로 설정하였고, 목적함수로는 식 (5)와 같이 IAE의 합을 사용하였으며, 100세대동안 최적화시켰다.

$$f = 0.15IAE_{comp} + 0.29IAE_{evA} + 0.28IAE_{evB} + 0.28IAE_{evC} \quad (5)$$

시뮬레이션 초기값으로는 Expansion Valve 개도를 500Pulse, Compressor의 주파수를 70Hz으로 주었고, 시뮬레이션 시간은 300sec으로 하였다. 제어 주기는 저압은 20sec, 과열도는 3 대의 제어기 모두 5sec를 주었다. 그리고 목표치를 각 Evaporator의 과열도 A = 5°C, 과열도 B = 10°C, 과열도 C = 15°C로 설정하고, 저압은 641KPa로 설정하여 시뮬레이션 하였다.

그림 4는 각각의 최적화된 제어기의 저압과 과열도의 결과를 보여준다. 수렴속도나 정상상태 오차 등 PSO 알고리즘에 의한 최적 제어기가 유전자 알고리즘을 사용한 최적 제어기보다 성능이 좋을음을 알 수 있다. 그리고 300sec 동안 IAE의 합에 의한 목적함수 값은, PSO 알고리즘에 의한 최적 제어기는 313.85이고 유전자 알고리즘에 의한 최적 제어기는 389.51이다. 값이 작은 결과가 더 좋을음을 의미한다. 그리고 PSO 알고리즘이 유전자 알고리즘보다 최적해에 빠르게 수렴하였다.



〈그림 3〉 저압과 과열도 시뮬레이션 결과

#### 6. 결 론

다중 증발기를 갖는 HVAC 시스템은 비선형성이 매우 강한 MIMO 시스템이며, 어떤 부분에서 냉매의 상태가 달라지면 시스템 전반적으로 그 영향이 파급된다. 이러한 시스템의 복잡성, 비선형성 및 시스템 상호연동성 등으로 인해, 제어기의 설계에 많은 어려움이 있는 에어컨 시스템을 본 논문에서는 PSO 알고리즘을 이용한 최적화된 Multi-Fuzzy PI 제어기를 통해 시스템의 성능 개선을 시도하였다. 3대의 Expansion Valve와 Compressor에서 동시에 제어하는 Multi Controller를 설계하고, PSO 알고리즘을 이용해 환산계수의 최적화를 수행하여, HVAC 시스템의 안정성과 효율성에 영향을 주는 과열도와 저압을 제어하였다. 그리고 시뮬레이션 결과를 통하여 설계된 Multi-Fuzzy PI 제어기가 유전자 알고리즘을 사용한 최적화된 제어기의 성능보다 좋을음을 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.

#### 감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구지원사업 (I-2004-0-074-0-00) 주관으로 수행된 과제임

#### 참고 문헌

- [1] Rajat Shah, "Dynamic Modeling and Control of Single and Multi-Evaporator Subcritical Vapor Compression Systems" ACRC TR-216, Aug. 2003.
- [2] S.-K. oh, "Fuzzy Model & Control System by C-Programmin", Naeha Press, 2002.
- [3] Z.L.Gaig, "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 19, no. 2, pp.384-391, 2004.