

다중 퍼지 제어기의 최적 설계와 에어컨 시스템으로의 적용

Optimal Design of Multi-Fuzzy Controller and Its application to Air Conditioning System

장한중¹, 최정내², 오성권³

^{1,2,3} 경기도 화성시 수원대학교 전기공학과
E-mail: ohsk@suwon.ac.kr

요 약

에어컨 시스템은 압축기(Compressor), 응축기(Condenser), 증발기(Evaporator)와 확장밸브(Expansion Valve)로 구성되며, 에어컨 시스템에서 과열도와 저압(증발기의 압력)은 시스템의 효율 증대 및 성능 개선과 안정성에 대하여 결정적인 영향을 미친다. 따라서, 과열도와 저압을 조절하기 위해, 각각의 압축기내의 인버터 주파수와 확장밸브의 개도 제어가 중요하며 선형과 비선형 시스템 모두에 대하여 견실한 성능을 나타내고, 외란에 대하여 강인한 성능을 보이는 퍼지 제어기를 설계한다.

본 논문에서는 과열도와 저압을 제어하기 위하여, 3대의 확장밸브와 1대의 압축기를 가진 에어컨 시스템에 대하여 다중 퍼지 제어기를 설계한다. 또한, 각 제어 플랜트에 대하여 최적의 퍼지 제어기를 설계하기 위하여 3가지 최적화 알고리즘을 사용한다. 즉, 직렬 유전자 알고리즘(Serial Genetic Algorithm; SGA)과 병렬 유전자 알고리즘인 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘(Hierarchical Fair Competition Genetic Algorithm; HFCGA), 그리고 Particle Swarm Optimization(PSO)을 사용하여 다중 퍼지 제어기를 최적화하고 시뮬레이션의 결과를 비교한다.

Key Words : air conditioning system, Multi-Fuzzy controller, Serial Genetic Algorithm, Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization

1. 서 론

생활의 수준과 기술에 발전을 통하여 사람들은 주거공간과 사무공간 등에 대하여 많은 관심을 보인다. 많은 장소들에서 사람들은 쾌적하고 편안한 환경을 만들기 위하여 에어컨을 사용하게 된다. 이에 따라 에어컨 시스템이 급속하게 발전하고 있고 근래에 인버터를 적용한 제품이 선진국을 중심으로 널리 사용되고 있다. 그러나 에어컨 시스템의 복잡성, 비선형성 및 시스템 상호 연동성 등에 의하여 시스템의 수학적 분석이 매우 복잡할 뿐 아니라 제어기의 설계에도 많은 어려움이 있다[1].

퍼지 제어기는 Zadeh의 퍼지이론의 한 응용 분야로서 많은 적용분야에서 큰 성공을 이루고 있다. 인간의 지식과 경험을 이용한 지적 제어 방식인 퍼지 제어기는 과도상태에서 큰 오버슈트없이 설정치에 도달하게 하는 속응성과 강인성이 좋은 제어기법으로 비선형 및 선형 시스템에 대하여 견실한 능력을 보이며 불확실하고 복잡한 시스템을 쉽게 제어 할 수 있는 장점을

가진다[2]. 그러나 퍼지 제어기의 파라미터들은 수학적 해석이 용이하지 않아 전문가의 경험을 바탕으로 선택 되어지는 경우가 많다. 따라서 퍼지 제어기의 파라미터들은 최적화 알고리즘을 이용하여 구해진다.

본 연구에서는 에어컨 시스템에 대하여 최적의 다중 퍼지 제어기를 설계하기 위하여 3가지 최적화 알고리즘을 사용한다. 즉, 직렬 유전자 알고리즘(SGA), 병렬 유전자 알고리즘인 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘(HFCGA)과 PSO(Particle Swarm Optimization)을 사용하여 최적의 다중 퍼지 제어기를 설계한다[3-4].

그리고 에어컨 시스템에 대해 시뮬레이션 결과를 통하여 각각의 다중 퍼지 제어기의 성능을 비교한다.

2. 에어컨 시스템

에어컨 시스템은 냉매의 상태를 변화시킴으로써 발생하는 열에너지의 흡수 및 방출현상을

이용하여, 내부의 열에너지를 흡수 내부로 방출 또는 외부의 에너지를 흡수하여 내부에 방출함으로써 실내의 온도를 조절할 수 있는 시스템이다. 에어컨 시스템은 크게 압축기(Compressor), 응축기(Condenser), 증발기(Evaporator), 확장 밸브(Expansion Valve)로 구성되며 동관으로 서로 연결되어 있다. 이러한 에어컨 시스템의 장치들은 비선형성이 매우 강한 MIMO(Multi Input Multi Output) 시스템이며, 한 장치의 제어에 의한 출력의 변화는 다른 장치의 제어기에 외란으로 작용하게 되어 각각의 입출력 상태에 따라 설정치를 조정해 주어야 하는 제어기의 연동이 매우 중요시 된다.

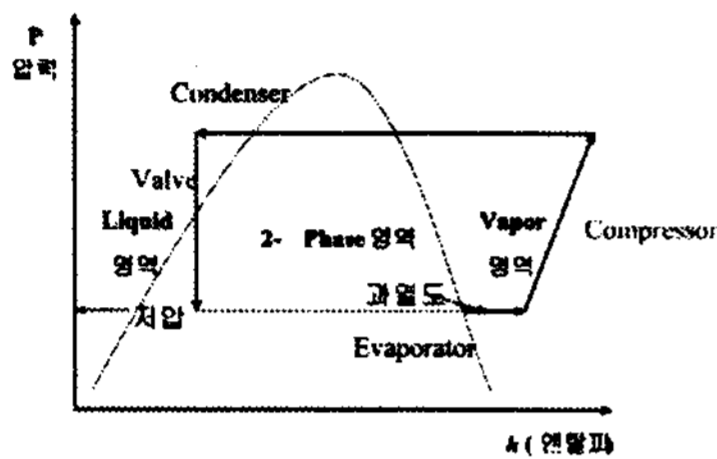


그림 1 에어컨 공정 사이클 및 모리엘 선도

그림 1은 에어컨 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 상태이어야 하고, 응축기를 거친 냉매는 액체상태가 되어야 한다. 그렇지 않으면 효율 저하 및 기계고장의 원인이 된다.

본 논문에서의 제어목표는 실내의 온도가 아니라 다중 증발기를 갖는 에어컨 시스템의 효율과 안정도에 많은 영향을 주는 과열도와 저압을 제어목표로 하여 Fuzzy 제어를 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.

3. 다중 퍼지 제어기

그림 2는 다중 퍼지 제어기의 기본 구성도를 나타낸 것이다. 다중 증발기를 갖는 에어컨 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 오차변화

의 퍼지 환산계수이고, GC, GC1, GC2, GC3는 퍼지 추론 규칙의 출력을 공정의 차원과 일치시키는 제어 출력의 퍼지 환산계수이다.

본 연구에서는 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.

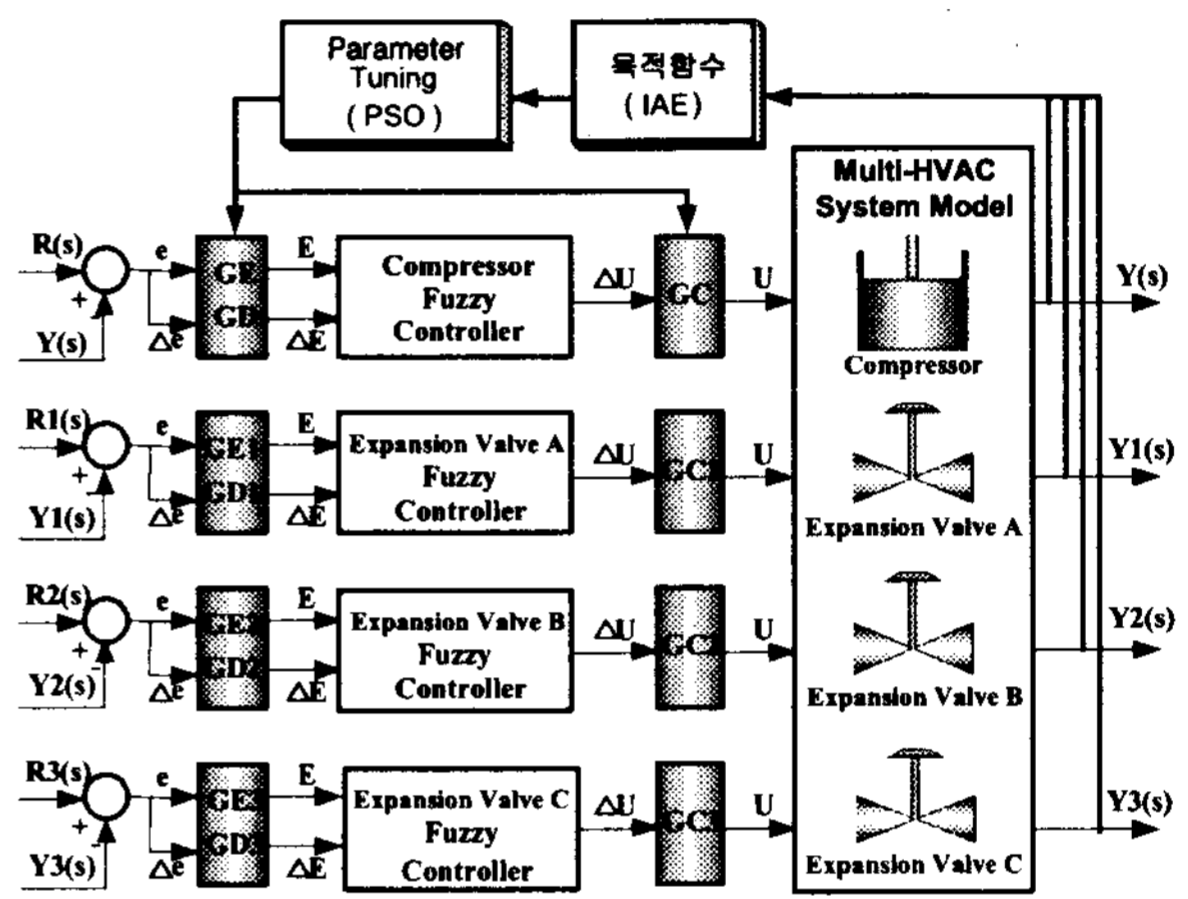


그림 2 최적화 Multi-Fuzzy 제어기

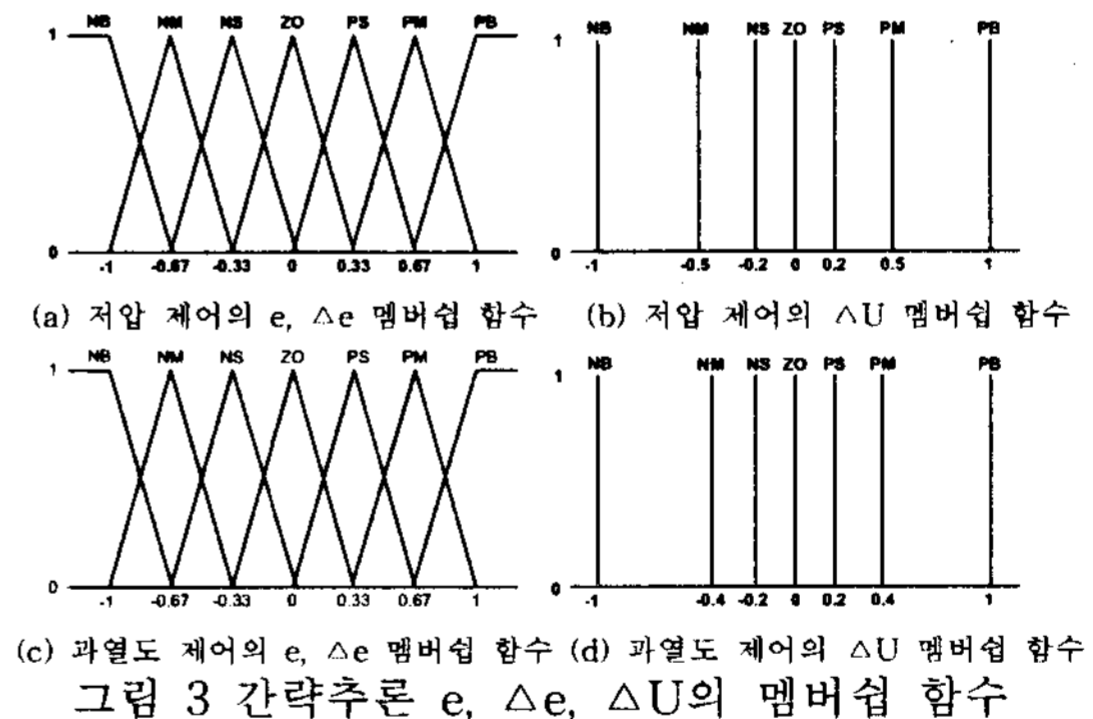


그림 3 간략추론 e, Δe, ΔU의 멤버쉽 함수

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.

$$w_i = u_{A_i}(E_i) \wedge u_{B_i}(\Delta E_i) \quad (1)$$

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

4. 최적화 알고리즘

본 논문에서는 최적의 퍼지 제어기를 설계하기 위하여 제안된 2가지 최적화 알고리즘을 사

용한다.

4.1 계층적 공정 경쟁(HFC) 유전자알고리즘

기존 SGA의 문제점인 집단의 다양성 유지와 계산량의 부담을 개선하기 위하여 최근 병렬 유전자 알고리즘 중 우수한 성능을 나타내는 HFCGA가 제안된다[2]. HFCGA는 유사한 적합도를 가진 개체들끼리 집단을 생성하여 공정한 경쟁을 시켜 초기 생성된 미약한 개체가 진화를 통하여 개선될 기회가 박탈되는 경우를 미연에 방지할 수 있다.

또한 HFCGA는 일정 세대마다 각 집단들마다 정보를 교환하게 된다. 이러한 이주과정은 다음과 같다.

[Step 1] 각각의 집단 개체들의 적합도를 정규화한다.

$$nf_{ji} = f_{ji} / f_{max} \quad (3)$$

여기서, f_{ji} 는 j집단(demo)의 i번째 개체 적합도, f_{max} 는 전체 집단의 최대 적합도

[Step 2] 정규화된 적합도를 정해진 문턱 적합도들과 비교하여 적합도 수준에 맞는 임시버퍼(Admission buffer)에 개체들을 저장한다.

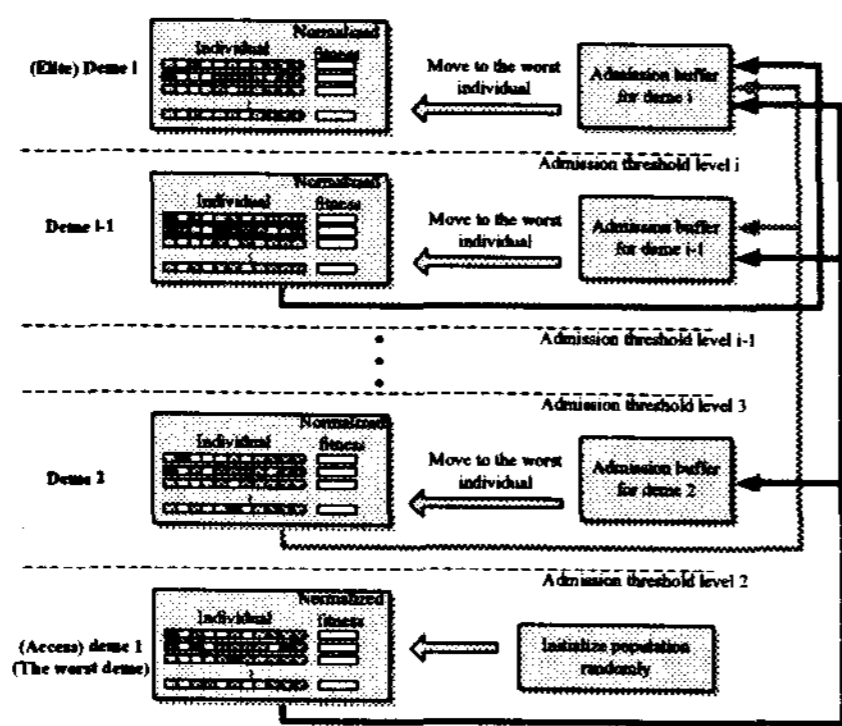


그림 4 HFCGA의 이주구조

[Step 3] 각각의 임시버퍼에 저장된 개체들과 해당하는 집단의 낮은 수준의 개체들을 바꾸어 준다. 그리고 최하위수준의 집단은 모든 개체들을 랜덤하게 다시 생성한다.

4.2 Particle Swarm Optimization(PSO)

PSO는 사회 심리학 특징과 진화 연산의 결합에 의한 최적화 알고리즘이다. PSO는 물고기, 새 떼와 같은 생물의 행동 양식을 바탕으로 고안되었다[3]. PSO 알고리즘은 기존의 최적화 알고리즘들과 달리 최적해의 탐색이 초기 값에 의존하지 않으며, 전역탐색과 지역탐색 사이에서의 관계를 유연하게 조절할 수 있다.

PSO 알고리즘은 6단계로 나누어진다.

[Step 1] Initialization - 랜덤하게 m개의 particle들을 탐색공간내에 생성한다. m개의 particle들은 초기 swarm이 된다. 또한, 초기 particle velocity를 $[-vmax, vmax]$ 에서 임의로

선택한다. 초기 swarm의 각 particle은 목적함수를 이용하여 평가되고, 이들 모두는 pbest로 설정한다. 초기 particle 최적의 값은 다시 gbest로 선정된다.

[Step 2] Inertia weight & velocity updating - 관성하중 값을 계산하고, (4)를 이용하여 j번째 particle velocity를 계산한다. 제한조건 $[-vmax, vmax]$ 을 확인한다.

$$v_{jk}(t+1) = w(t) \cdot v_{jk}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_{jk}(t) - x_{jk}(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_k(t) - x_{jk}(t)) \quad (4)$$

[Step 3] Position updating - 식 (5)에 의해 particle의 위치정보는 조절된다.

$$x_{jk}(t) = v_{jk}(t) + x_{jk}(t-1) \quad (5)$$

여기서, $x_k^{min} \leq x_{jk}(t) \leq x_k^{max}$ 이다.

[Step 4] Individual & global best updating - 새로운 위치정보를 가진 particle들은 목적함수에 의해 평가된다. 각 particle의 적합도는 이전 pbest의 적합도와 비교되며 pbest를 재설정한다. pbest의 particle 중 최적 해를 가지는 particle의 적합도와 이전 gbest의 적합도를 비교하여 최적 위치정보를 가진 particle을 gbest로 재설정한다.

[Step 5] Stopping criteria - 종료조건을 만족하면 탐색과정을 종료하고, 그렇지 않으면 [Step 2]부터 반복한다.

[Step 6] Optimal parameter - 최종적으로 생성된 gbest는 최적의 위치정보를 가진다.

5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서는 다중 퍼지 제어를 설계하고 3가지의 최적화 알고리즘을 이용하여 제어기의 최적화를 수행하여 에어컨 시스템의 성능을 비교한다. 최적화 알고리즘의 목적함수는 식 (6)와 같이 IAE의 합을 사용하였으며, 100세대동안 최적화 시켰다.

$$f = IAE_{COMP} + IAE_{LEV_1} + IAE_{LEV_2} + IAE_{LEV_3} \quad (6)$$

시뮬레이션 초기 값으로는 확장 밸브 개도를 500Pulse, 압축기의 주파수를 70Hz으로 주었고, 시뮬레이션 시간은 300sec로 하였다.

Table 3. SGA와 HFCGA의 파라미터 및 연산자

	SGA	HFCGA
세대수	100	100
집단크기	150	[30 30 30 30 30]
교배율	0.65	[0.95 0.75 0.65 0.65 0.65]
돌연변이율	0.1	[0.2 0.15 0.1 0.1 0.1]
이주		세대수의 10%마다
문턱적합도		[0 0.1 0.3 0.5 0.85]
선택연산자	선형 순위 선택 알고리즘	선형 순위 선택 알고리즘
교배연산자	수정된 단순 교배 알고리즘	수정된 단순 교배 알고리즘
돌연변이 연산자	균일 돌연변이 알고리즘	균일 돌연변이 알고리즘
엘리트전략	사용	사용

Table 4. PSO 알고리즘의 파라미터

		PSO
Parameter	Generation	100
	Swarm Size	150
	V_{max}	20% of the search space
	[w_{min} w_{max}]	[0.4 0.9]
	$c1, c2$	2.0

그림 5은 각 최적화 알고리즘에 따른 세대수 증가의 성능지수 값을 보여준다. 기존의 SGA 보다 본 연구에서 제안한 HFCGA와 PSO 알고리즘의 성능이 우수함을 알 수 있다. 그리고 HFCGA와 PSO 알고리즘의 최종 수렴 값은 비슷하지만, PSO 알고리즘이 최적 값에 더욱 빨리 수렴하는 것을 볼 수 있었다.

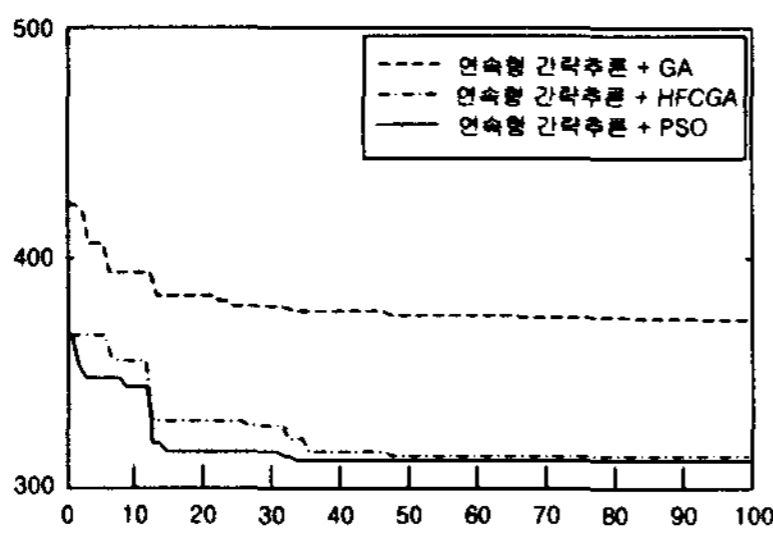
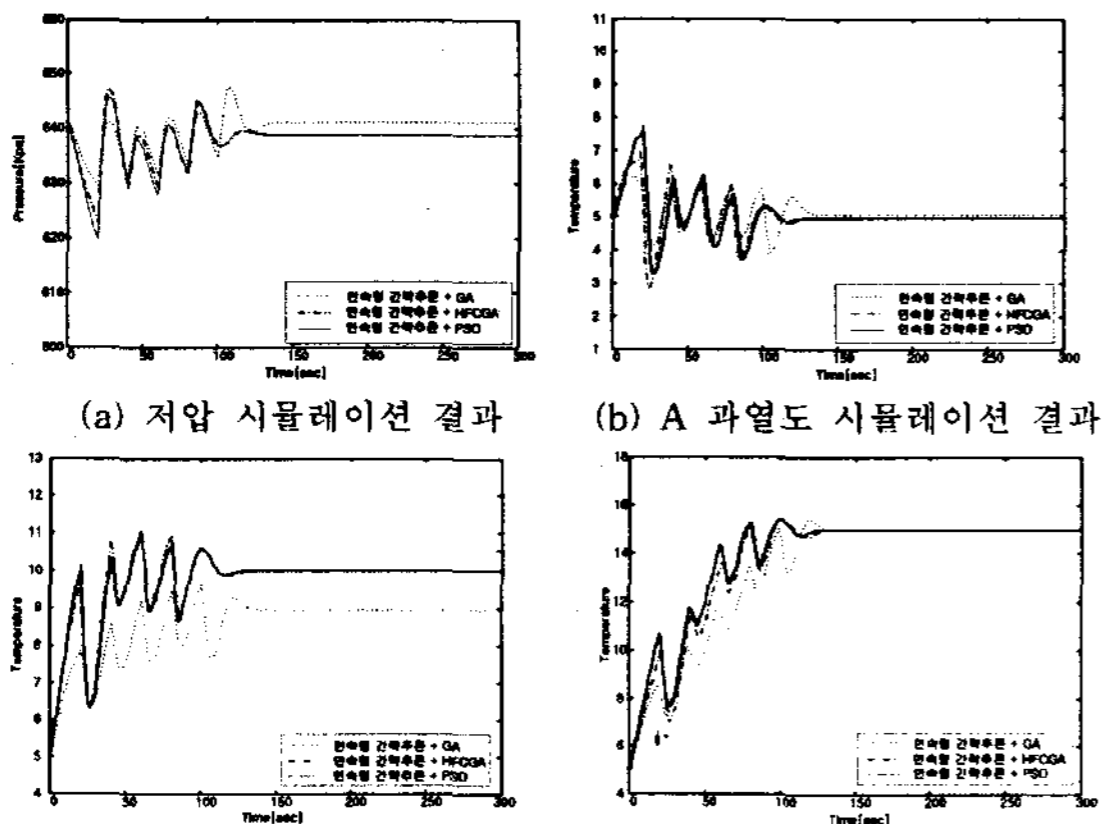


그림 5 최적화 알고리즘의 세대수 증가에 따른 성능지수

따라서, SGA보다 유전적 다양성의 유지로 적합도 상승요인을 더 많이 보유하고 있는 HFCGA의 성능이 더 우수하였고, PSO 알고리즘을 이용한 연속형 간략 퍼지추론 방식의 최적 퍼지제어기가 313.8555 로 가장 좋은 성능을 보였다. 그림 6은 각 최적화 알고리즘에 따른 시뮬레이션 결과이다. 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘 및 PSO 알고리즘을 사용한 최적 퍼지제어기의 성능이 기존의 SGA를 사용한 최적 퍼지제어기보다 우수함을 확인할 수 있었다.



(a) 저압 시뮬레이션 결과 (b) A 과열도 시뮬레이션 결과
(c) B 과열도 시뮬레이션 결과 (d) C 과열도 시뮬레이션 결과
그림 6 에어컨 시스템의 시뮬레이션 결과

5. 결론

다중 증발기를 갖는 에어컨 시스템은 어떤 부분에서 냉매의 상태가 달라지면 시스템 전반적으로 그 영향이 파급된다. 이러한 에어컨 시스템에 대하여, 최적 제어기의 설계를 위해 3가지의 최적화 알고리즘을 이용한 최적 다중 퍼지 제어기를 통해 시스템 성능 개선을 시도하였다. 3대의 확장 밸브와 압축기에서 동시에 제어하는 다중 제어기를 설계하고, 최적화 알고리즘을 이용해 환산계수의 최적화를 수행하여, 에어컨 시스템의 안정성과 효율성에 영향을 주는 과열도와 저압을 제어 하였다. 그리고 시뮬레이션 결과를 통하여 기존의 SGA 알고리즘을 사용한 것보다 HFCGA와 PSO를 사용한 최적 퍼지 제어기의 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(F01-2007-000-10058-0).

참 고 문 헌

[1] S.-H Jung, J.-N Choi, S.-K Oh and H.-K Kim, "Design of optimized Multi-Fuzzy Controllers by Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithms for Air-Conditioning System", *Journal of Control, Automation and Systems Engineering* Vol. 13, No. 4, pp. 344-351, 2007

[2] S.-K Oh, W. Pedrycz, S.-B Rho and T.-C Ahn, "Parameter estimation of fuzzy controller and its application to inverted pendulum" *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 17, Issue 1, pp.37-60, 2004.

[3] Hu, J.J., Goodman, E. "The Hierarchical Fair Competition (HFC) Model for Parallel Evolutionary Algorithms." *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*. IEEE. Honolulu. Hawaii. (2002)

[4] Z.L.Gaing, "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.