

공조시스템의 에너지절약을 위한 Fuzzy제어 적용방안 연구

안병천[†], 송재엽^{*}

[†] 경원대학교 건축설비공학과, ^{*}경원대학교 건축설비공학과 대학원

Fuzzy Control Application Strategy for Energy Saving in HVAC System

Byung-Cheon Ahn[†], Jae-Yeob Song^{*}

[†] Department of Building Equipment System Engineering, Kyungwon university, 461-701, korea

^{*} Department of Building Equipment System Engineering, Kyungwon graduate school, 461-701, korea

Abstract

The fuzzy control algorithm for HVAC system has been developed for minimizing energy consumption while maintaining the comfort of indoor thermal environment in terms of the environmental variables such as time varying indoor cooling load and outdoor temperatures. The optimal set-points of control parameters with fuzzy control are supply air temperature, chilled water temperature and condenser temperature. This study has been done by using TRNSYS program in order to analyze the HVAC system response. As a result, the fuzzy control algorithm with PID algorithm shows good energy performance in comparison with conventional one.

Key words : Fuzzy control(퍼지 컨트롤), HVAC system(공조시스템), Optimal control algorithm(최적제어 알고리즘), Set-point temperature(설정온도)

기 호 설 명

Load : 냉방부하[KJ/hr]
P : 에너지소비량[KW]
SHR : 현열비(sensible heat ratio)
T_{chw.set} : 냉수온도의 설정치[°C]
T_{cond.set} : 냉각수온도의 설정치[°C]
T_{spa.set} : 급기온도의 설정치[°C]
T_{wb} : 습구온도[°C]

cond : 냉각수
opt : 최적치
spa : 급기
set : 설정치
wb : wet-bulb

1. 서론

에너지 자원의 해외 의존도가 크고 최근 건물 부문에서 고급연료의 선호경향으로 특히 수입에 너지 소비가 폭발적으로 증가하고 있는 우리나라 실정을 감안하여 볼 때, 건물 에너지 절약에 대한 연구 개발 및 적용은 매우 중요하다. 건물에서의 효율적인 에너지 절약은 건물주는 물론 국가 기간산업에도 직·간접적인 영향을 주는 중요한 요소이며, 따라서 이에 대한 연구개발 및 투자가 절

하첨자

chw : 냉수

[†] Corresponding author
Tel.: +82-31-750-53094; fax: +82-31-750-5314
E-mail address: bcahn@kyungwon.ac.kr

실히 요구되고 있는 실정이다. 건물에서의 에너지 낭비는 빌딩 내 건축설비의 비효율적인 운전 및 관리와 관련되어 있다고 볼 수 있으며, 특히 하절기 전력수요의 20% 가량이 건물의 총 부하 중에서 냉방부하의 몫이라는 결과는 냉방부하가 피크 전력과 전력 예비율에 상당한 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 건물 에너지시스템인 중앙 열원 및 공조시스템에 있어서 에너지 소비량에 영향을 주는 주요 제어변수들로는 냉수 및 냉각수 유량, 보일러 순환펌프의 유량, 냉각탑 팬 및 공조기 팬의 공기유량, 급기온도, 냉수온도, 냉각수온도(혹은 냉각탑 공기유량), 공조기 팬의 정압 등이 있다. 이러한 제어변수들의 최적 설정치들에 대한 조합을 구하는 것은 시스템 구성요소들의 상호 관계를 고려해 볼 때 쉬운 문제는 아니다.^(1, 2)

각각의 제어변수들의 크기에 따라 시스템 구성요소들의 전력소비량은 증가하거나 감소하는 등의 복잡한 영향이 나타나기 때문에 전체시스템의 총 에너지 소비량이 최소가 되는 제어변수들의 최적 설정치의 선정을 위해서는 열원 및 공조시스템에 적합한 최적제어 알고리즘의 개발을 요구하게 된다.

이에 본 연구에서는 실시간 제어 알고리즘으로 구현이 용이한 퍼지제어 알고리즘을 이용하여 제어변수들의 최적설정치를 구하고자 하였으며, TRNSYS 프로그램을 활용하여 시뮬레이션연구를 수행하였다.

2. 제어 알고리즘

전체 중앙냉방시스템의 에너지소비량에 관련하여 비용함수를 나타내면 다음 식 (1)과 같이 표현될 수 있으며⁽¹⁾, 이 식을 이용하여 제어변수들과 환경변수들에 따른 에너지소비량을 예측할 수 있게 된다.

$$P = P(T_{chw,set}, T_{spa,set}, T_{cond,set}, Load, T_{wb}, SHR) \quad (1)$$

식(1)의 모든 계수들은 최소자승선형회귀기법⁽³⁾을 사용하여 결정되어질 수 있다. 여기서 P는 에

너지 소비량, $T_{chw,set}$ 은 냉수설정온도, $T_{spa,set}$ 은 급기설정온도, $T_{cond,set}$ 은 냉각수설정온도, $Load$ 는 냉방부하, T_{wb} 는 습구온도, SHR은 현열비를 각각 나타낸다.

따라서, 식(1)을 제어변수들에 관한 1차 도함수(derivative)를 취하여 정리하면 식 (2)와 같이 환경변수들에 대한 함수로 제어변수들을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{chw,set,opt} &= G_1(Load, T_{wb}, SHR) \\ T_{spa,set,opt} &= G_2(Load, T_{wb}, SHR, T_{chw,set,opt}) \\ T_{cond,set,opt} &= G_3(Load, T_{wb}, SHR, T_{chw,set,opt}, T_{spa,set,opt}) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 $T_{chw,set,opt}$, $T_{spa,set,opt}$, $T_{cond,set,opt}$ 은 각각 냉수, 급기, 냉각수의 최적설정온도를 나타낸다. 여기서 제어변수들의 최적설정치들은 1차함수식으로 나타내지는데, 냉수온도의 최적설정치는 환경변수들만의 함수로 급기온도의 최적설정치는 환경변수들 뿐만 아니라 냉수온도의 최적설정치의 함수로 표현된다. 그리고 최적의 냉각수온도는 환경변수들과 급기 및 냉수온도들의 설정치 등으로 표현⁽⁴⁾된다.

위 식(2)를 이용하여 함수 G1, G2, G3를 각각 구해내어 각 환경변수에 따른 제어변수들의 최적설정치를 구하고 이를 참고하여 환경변수를 입력변수로 선정하고 제어변수의 최적설정치를 출력변수로 선정하는 퍼지룰을 작성하여 퍼지제어 알고리즘을 구성하였다.

급기온도와 냉수 온도의 경우 냉방부하와 현열비에 영향을 많이 받고 습구온도의 영향은 거의 나타나지 않으며, 냉각수 온도의 경우는 부하와 습구온도에 따라 영향을 많이 받고, 현열비의 영향은 거의 나타나지 않는다⁽⁵⁾. 따라서 급기온도와 냉수온도의 경우 퍼지룰의 구성은 입력변수를 냉방부하 및 현열비로 나타내었으며, 냉각수온도의 경우는 입력변수를 냉방부하 및 외기의 습구온도 값으로 하였다. 이에 따른 퍼지룰은 다음 Table 1~Table 3과 같으며, 또한 입력의 퍼지화를 위한 삼각형 연속 멤버십 함수는 다음 Fig. 1과 같다.

또한 Fig. 2는 그에 따른 출력함수로서 제어변수인 냉수온도, 급기온도, 냉각수온도의 출력의 퍼지화를 위한 삼각형 연속 멤버십함수 이다. 출

Table 1. Fuzzy rule for optimal chilled water set-point temperature

		Cooling Load				
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
Sensible heat ratio (SHR)	H ₁	N ₉	N ₈	N ₇	N ₆	N ₅
	H ₂	N ₈	N ₇	N ₆	N ₅	N ₄
	H ₃	N ₇	N ₆	N ₅	N ₄	N ₃
	H ₄	N ₆	N ₅	N ₄	N ₃	N ₂
	H ₅	N ₅	N ₄	N ₃	N ₂	N ₁

Table 2. Fuzzy rule for optimal supply air set-point temperature

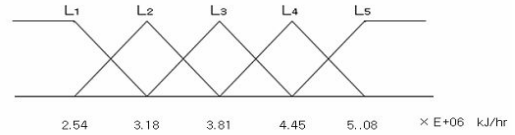
		Cooling Load				
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
Sensible heat ratio (SHR)	H ₁	K ₉	K ₈	K ₇	K ₆	K ₅
	H ₂	K ₈	K ₇	K ₆	K ₅	K ₄
	H ₃	K ₇	K ₆	K ₅	K ₄	K ₃
	H ₄	K ₆	K ₅	K ₄	K ₃	K ₂
	H ₅	K ₅	K ₄	K ₃	K ₂	K ₁

Table 3. Fuzzy rule for optimal condenser water set-point temperature

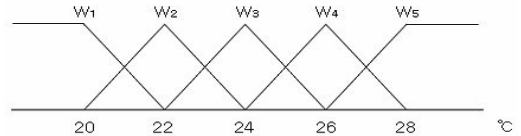
		Cooling Load				
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
Wet-bulb temperature (T _{wb})	W ₁	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
	W ₂	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
	W ₃	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
	W ₄	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
	W ₅	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉

력변수의 경우는 총 9단계의 구분을 두어 작성하였으며 냉수온도의 경우 6℃에서 10℃까지 0.5℃씩 N₁~N₉로 나누었으며, 급기온도는 11℃에서 15℃까지 0.5℃단위로 K₁~K₉로, 냉각수온도는 2℃에서 30℃까지 1℃단위로 C₁~C₉로 나누어 작성하였다.

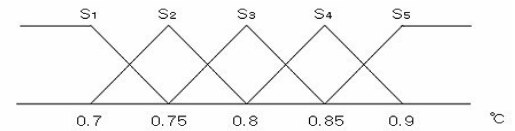
추론을 위하여 조건부 적합도 중 최소값을 이용하여 각 룰의 적합도를 구하고 각 규칙들의 추론 결과들 중 최대값을 최종 추론 결과로 얻는 최소-최대법을 사용하였으며 최종적인 냉수온도, 급기온도, 냉각수온도에 대한 설정점 결정을 위한 디퍼지화 과정은 무게 중심법을 사용하여 최종 추론 결과를 수치값으로 변화하였다.



(a) Membership for cooling load.

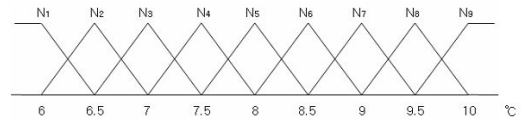


(b) Membership for web-bulb temperature.

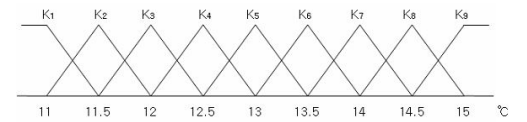


(c) Membership for SHR.

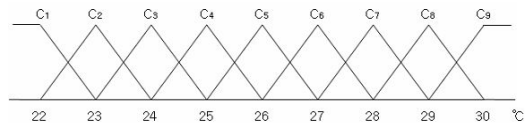
Fig. 1 Membership for fuzzification of input.



(a) Membership for chilled water temperature.



(b) Membership for supply air temperature.



(c) Membership for condenser water temperature.

3. 시스템 모델링

본 연구에서는 냉동기, 냉수순환펌프, 급기팬

및 환기팬, 냉각수순환펌프, 냉각탑, 냉각코일, 실내부하모델 등의 구성 요소, PID제어기 및 시스템 제어기로 구성된 중앙난방시스템의 특성을 시물레이션으로 고찰하는데 과도 시물레이션 해석 프로그램인 TRNSYS를 사용하였다.

Fig. 3은 시물레이션 해석을 위한 구성요소들의 상관관계를 나타내고 있다. 간단히 살펴보면 외기 조건 데이터가 실내부하 모델, 냉각탑, 퍼지제어기에 입력되어지게 되면 외기조건의 변화에 따라 퍼지제어기에서 냉수온도, 급기온도 및 냉각수온도의 최적설정치를 선정하고 냉수온도의 최적 설정치는 냉동기의 설정값에 입력신호를 주며 급기온도와 냉각수온도의 경우 피드백 제어기인 PID제어기의 원하는 출력값으로 입력되어지게 된다. 이에 따라 피드백제어기는 급기온도와 냉각수온도를 제어하기 위하여 냉수순환펌프와 냉각탑 팬을 회전수 제어 하게 된다. 실내공기온도의 경우 PID제어기에 직접 실내공기온도의 설정온도를 입력하게 되면 급기팬과 환기팬을 제어하기 위하여 제어신호를 팬에 입력하여 팬을 회전수제어 하여 실내공기온도를 제어설정치로 유지하도록 제어하게 된다.

Fig. 4에서와 같이 본 연구에서는 TRNSYS 프로그램을 이용하여 시스템을 구성하였으며 시스템의 시물레이션을 위해 각 시스템 구성요소로 이루어진 모델이 사용되었다. 이러한 각 구성요소들의 모델에 대한 정보는 TRNSYS 프로그램 내에서 시스템 매개변수(parameter)로 주어지며, 이것은 선정된 시스템 구성요소들의 기준설정 조건이나 용량, 혹은 성능을 나타낸다. 본 연구의 시스템 구성요소의 매개변수의 선정은 실내부하모델을 제외한 시스템 모델의 매개변수는 실내 부하에 대하여 최대값을 선정하여 실험하였다.

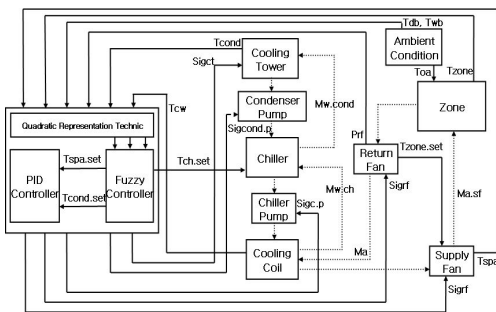


Fig. 3 Flow diagram for control system.

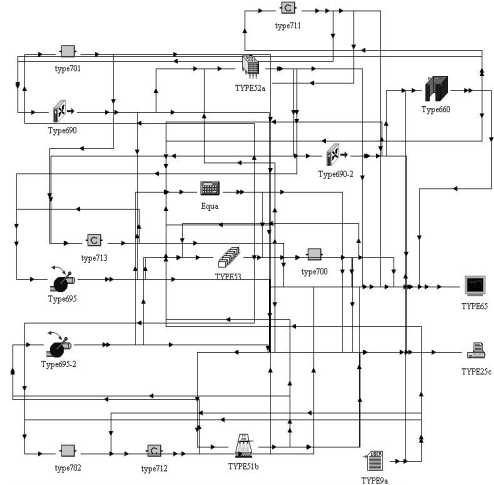


Fig. 4 TRNSYS program for central cooling control system.

시물레이션에 사용된 환경조건의 데이터는 다른 여러 구성요소에서의 재계산을 위한 입력값으로 제공되며, 본 연구에서는 변화하는 주변조건에 대한 값들을 제공하는 역할을 한다. 이러한 환경조건으로 서울의 여름철 하루 동안의 건구온도 및 습구온도가 사용되어지며, 이는 실내부하모델에서 실내 평균온도의 계산 및 퍼지 제어기에서 실내부하의 계산과 입력값으로 사용되며 냉각탑에서의 냉각탑 부하의 계산에 사용된다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 환경조건이 변화함에 따라 24시간 동안 냉수, 급기 및 냉각수 온도의 설정점의 변화를 나타낸 그림이다. T_{db} 및 T_{wb} 는 각각 건구온도 및 습구온도를 나타내며 약 16시 정도에 최고온도를 나타내는 것을 알 수 있으며 T_{cw} 는 냉수온도 설정점, T_{sa} 는 급기온도 설정점, T_{cond} 는 냉각수온도 설정점을 나타낸다. 그림에서 살펴보면 환경조건의 변화에 따라 각각의 설정온도가 적절히 변하는 것을 알 수 있다. 냉방부하가 적은 1시에서 8시 구간에서는 냉수온도는 9℃, 급기온도는 14℃, 냉각수온도는 26℃로 되며, 냉방부하 등의 환경변수가 변화함에 따라 각각의 설정온도 값도 변화하여 최대부하인 16시 지점에서는 냉수온도 7℃, 급기온도 12℃, 냉각수온도 28℃로 됨을 알 수 있다.

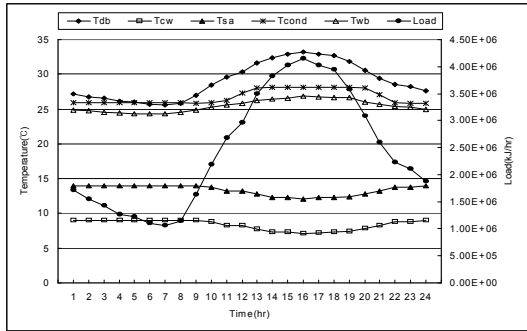


Fig. 5 Changes of optimal set-point temperature with time varying environment conditions.

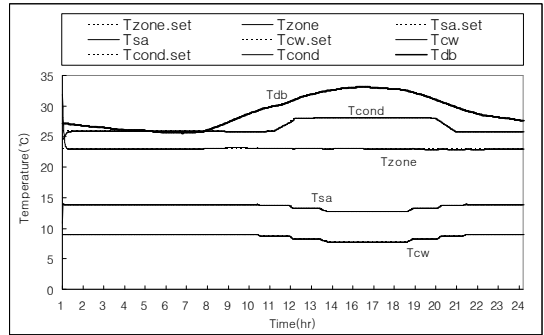


Fig. 6 The responses of fuzzy control system with time varying outdoor temperature.

Fig. 6은 실제 환경조건의 변화에 따른 퍼지제어를 통하여 선정된 설정점이 피드백 제어기인 PID제어기로의 입력값으로 하였을 경우 각 대상온도의 동특성을 살펴본 그림이다. 여기에서 $T_{zone,set}$ 및 T_{zone} 은 실내공기온도의 설정온도 및 실내공기온도 값이며 여기에서 실내공기 설정온도 $T_{zone,set}$ 은 실내 쾌적성을 고려하여 23°C로 입력값을 직접 주었다. 또한 $T_{cw,set}$ 및 $T_{sa,set}$, $T_{cond,set}$ 은 각각 냉수온도, 급기온도 및 냉각수 온도의 설정온도를 의미하며 이는 퍼지제어를 통하여 피드백제어기에 입력되어진다. T_{cw} , T_{sa} , T_{cond} 는 각각 냉수온도, 급기온도, 냉각수 온도의 대상온도를 의미한다. 그림에서 살펴보면 퍼지제어기에서 출력 되어지는 설정온도 값에 따라 PID제어를 통하여 대상온도를 제어함에 따라 설정온도의 변화에 대상온도가 거의 차이가 나타나지 않는 양호한 동특성을 보이며 추종하는 것으로 나타났다. 실내공기온도의 경우 초기온도를 32°C로 설정하였을 때 초반에 언더슈트가 작게 나타나며 부하가 커지는 시간대에서도 냉수온도, 급기온도, 냉각수온도의 변화에도 큰 차이를 보이지 않으며 양호한 추종성을 나타내었다.

Fig. 7은 퍼지제어를 하지 않았을 경우 급기설정온도의 변화에 따른 총 에너지 소모량을 나타낸 그림이다. 이때의 냉수온도, 냉각수온도의 설정온도는 각각 8°C, 28°C로 고정하였다. 그림에서 살펴보면 급기설정온도가 13°C일 경우 가장 작은 에너지 소모를 나타내며 13°C보다 커지거나 작아질수록 에너지 소모가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 퍼지제어를 하지 않았을 경우 냉수설

정온도의 변화에 따른 총 에너지 소모량을 나타낸 그림이다. 이때의 급기온도, 냉각수온도의 설정온도는 각각 13°C, 28°C로 고정하였다. 그림에서 살펴보면 냉수설정온도가 8°C일 경우 가장 작은 에너지 소모를 나타내며 8°C보다 커지거나 작아질수록 에너지 소모가 증가함을 알 수 있다.

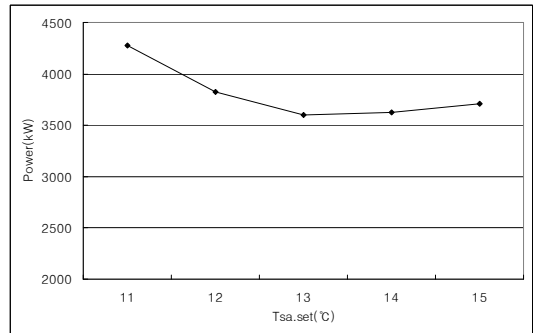


Fig. 7 Total energy consumption with different supply air set-temperature.

Fig. 9는 퍼지제어를 하지 않았을 경우 냉각수 설정온도의 변화에 따른 총 에너지 소모량을 나타낸 그림이다. 이때의 급기온도, 냉수온도의 설정온도는 각각 13°C, 8°C로 고정하였다. 그림에서 살펴보면 냉각수설정온도가 28°C일 경우 가장 작은 에너지 소모를 나타내며 28°C보다 커지거나 작아질수록 에너지 소모가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10은 실내공기 설정온도를 23°C로 하였을 때 환경조건의 변화에 따라 제어변수의 최적설정치를 퍼지제어를 통해 선정한 경우(Case1)와 퍼지제어를 하지 않고 제어변수의 제어설정치를 고

정입력으로 하였을 경우(Case2, Case3)의 총 에너지 소모량을 나타낸 그림이다. 이때 Case 2의 제어설정치는 급기설정온도 11℃, 냉수설정온도 10℃, 냉각수설정온도 26℃로 선정된 것이며 Case 3의 제어설정치는 급기설정온도 13℃, 냉수

설정온도 8℃, 냉각수설정온도 28℃로 한 경우(기준조건)이다. 그림에서 살펴보면 Case 1이 Case 2의 경우보다 총 에너지 소모량이 31%정도 절감되었으며 Case 3의 경우 보다는 약 7%정도의 절감을 나타내었다. 이로서 살펴볼 때 퍼지제어를 하여 냉방시스템을 최적제어 하였을 경우 에너지 절약 면에서 유리함을 알 수 있었다.

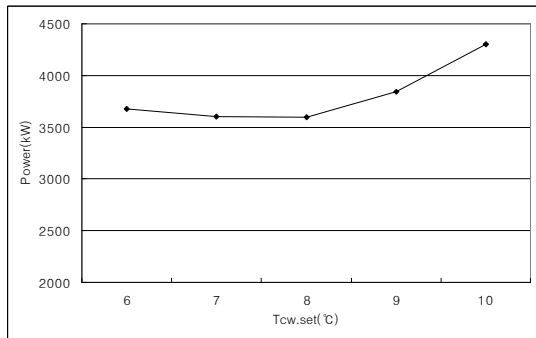


Fig. 8 Total energy consumption with different chilled water set-temperature.

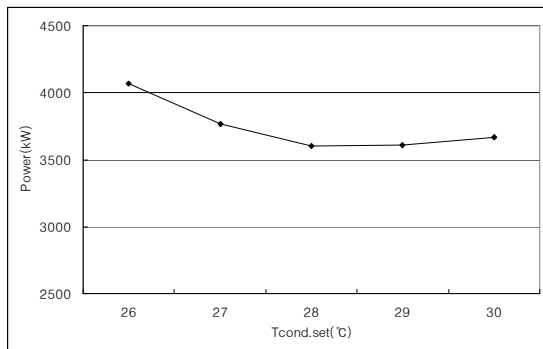


Fig. 9 Total energy consumption with different condenser water set-temperature.

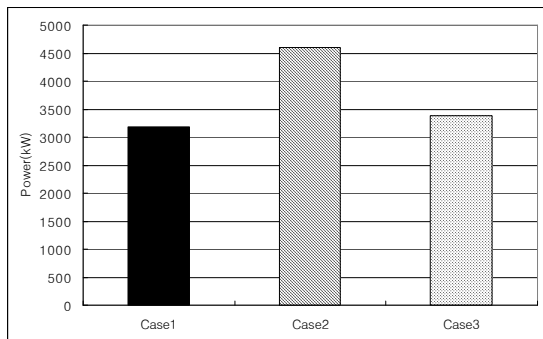


Fig. 10 Total energy consumptions with fuzzy control system or non-fuzzy control systems.

5. 결론

본 연구에서는 중앙냉방시스템에 관하여 급기, 냉수 및 냉각수온도 등의 제어변수들에 대한 퍼지제어 알고리즘을 구성하였으며, 실시간으로 변화하는 건물부하 및 환경조건의 변화에 대해 TRNSYS 프로그램을 활용하여 시뮬레이션 해석 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실내냉방부하의 실시간 변화에 따라 퍼지제어를 통한 냉각수, 급기 및 냉수의 최적 설정온도 값이 적절히 변화됨을 알 수 있었으며, 부하가 증가함에 따라 냉각수 최적 설정온도는 증가하고 급기 및 냉수 최적 설정온도는 감소함을 알 수 있었다.
- (2) 퍼지제어를 하지 않았을 경우 각 제어변수들의 설정치를 변화시켜본 결과 환경조건에 대해 에너지 소모가 가장 적은 최적조건이 존재함을 알 수 있었다.
- (3) 퍼지제어를 하였을 경우와 퍼지제어를 하지 않고 각 제어 설정치를 고정했을 때의 에너지 소모량을 비교해본 결과 최대 약 31%, 최저 약 7%정도의 에너지 절감 효과를 나타내었으며, 이로서 미루어 볼 때 퍼지제어를 통한 냉방시스템을 최적제어 하였을 경우 에너지 절약적 측면에서 유리함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Ahn, B.C. and J.W. Mitchell, 2001, Optimal control Development for Chilled Water Plant Using a Quadratic Representation, Energy and Buildings 33, 371-378.
2. Braun, J.E., S.A. Klein, W.A. Beckman, and

- J.W. Mitchell, 1989, Methodologies for Optimal Control of Chilled Water Systems without Storage, ASHRAE Transactions, Vol.95, Part 1: 652-662.
3. Draper, N.R. and H. Smith, 1981, Applied Regression Analysis, Second Edition, John Wiley & Sons, New York
 4. Ahn, B.C. and J.W. Mitchell, 1999, Optimal Set-point Control for Central Cooling Plants, Society of Air Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Summer Association Conference, pp 1031-1036.
 5. Ahn, B.C, 2000, Optimal Control for Central Cooling System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigerating Engineering, Vol. 12, No. 4, pp 354-362.