

중앙난방시스템의 온라인 최적제어기법에 관한 연구

안 병 천[†], 최 상 곤*, 조 성 환**

경원대학교 건축설비공학과, *경원대학교 대학원, **한국에너지기술연구원 건물에너지연구센터

On-line Optimal Control Technology for Central Heating System

Byung-Cheon Ahn[†], Sang-Gon Choi*, Sung-Hwan Cho**

Department of Building Equipment System Engineering, Kyungwon University, 461-701, Korea

**Building Energy Research Center, KIER, 305-343, Korea

(Received October 4, 2004; revision received December 10, 2004)

ABSTRACT : The on-line optimal control algorithm for central heating system has been researched for minimizing energy consumption while maintaining the comfort of indoor thermal environment in terms of the environmental variables such as indoor heating load and outdoor temperature variation. This study has been done by using TRNSYS program in order to analyze the central heating system. The optimal control algorithm shows good energy performances in comparison with the conventional one.

Key words : Central heating system(중앙난방시스템), On-line optimal control algorithm(온라인 최적제어 알고리즘), Indoor thermal environment(실내 열환경), Setpoint temperature(설정온도)

기 호 설 명

PT_{tot} : 총 에너지 소모량 [kW]
 P_{Boiler} : 보일러 에너지 소모량 [kW]
 PP_{pump} : 온수 순환펌프 에너지 소모량 [kW]
 PF_{fan} : 급기/환기 팬 에너지 소모량 [kW]
 ΔT_a : 온수코일 입출구 공기 온도차 [°C]
 ΔT_z : 급기와 실내 온도차 [°C]
 K : 특성계수 [kW/°C]
 $T_{sa,opt}$: 최적 급기온도 [°C]
 $T_{sw,opt}$: 최적 온수온도 [°C]

$m_{sa,opt}$: 최적의 급기풍량 [kg/hr]
 T_{rw} : 환수되는 온수 온도 [°C]
 T_z : 실내 온도 [°C]

1. 서 론

경제 발전과 고도 정보화 사회로 변화하는 과정에서 보다 쾌적하고 편리한 환경에 대한 요구도 커지고 있다. 특히 실내에서 생활시간이 많아지는 겨울철에는 실내의 환경이 근무자에게 많은 영향을 주게 된다. 현재 난방을 위해 사용하고 있는 에너지원은 대부분 화석연료이고 특히 우리나라는 연료의 해외 의존도가 크기 때문에 에너지 절약은 국가 경제력 뿐만 아니라 환경적 측면과 자원 절약적인 측면에서 고려할 때 매우 유익하다 하겠다. 건물에 들어가는 비용 중에 운영관

[†] Corresponding author

Tel:+82-31-750-5309; fax:+82-31-750-5314

E-mail address: bcahn@kyungwon.ac.kr

리비용이 대부분을 차지하고 있는 점을 감안할 때 건물에 투입되는 에너지를 절감하는 것은 운영비용 감소뿐만 아니라 화석연료의 사용을 줄이는 한 가지 방법이기에 때문에 건물 에너지 절약에 대한 연구는 매우 필요하다 하겠다.

일반적으로 에너지 절약 방법 중에 있어서 단기간의 연구개발로 에너지를 절감을 실현시킬 수 있는 방법으로는 제어 기술의 발전이라 할 수 있는데 공조 설비의 최적 운전 및 관리를 직접 디지털 제어기(DDC)의 에너지 절약 소프트웨어의 적절한 사용 등을 통해서 에너지 절약효과를 극대화 할 수 있다.

중앙난방시스템은 실내 공기의 온도, 습도 및 청정도를 사용목적에 알맞은 상태로 유지하기 위하여 공기를 공급하는 공기조화설비, 실내의 난방부하에 대하여 온도를 유지하기 위해 공기조화기의 난방코일(heating coil)에 온수를 공급하는 보일러 등으로 구성되어 있다. 일반적으로 실내(zone)로부터 환기되어 나오는 공기 중에서 외부로 배기되는 공기를 제외한 나머지 공기는 외부로부터 유입되는 공기와 혼합되어지며 혼합공기는 난방코일을 통과하면서 가열되고 공기를 공급하는 급기 팬에 의해 다시 실내로 공급된다. 이러한 시스템에서는 보일러에서 소비되는 에너지, 급기 팬의 동력, 온수 순환펌프 동력을 총합한 것이 전체시스템의 총 에너지가 되며, 이러한 총 에너지의 절감을 위해 환경조건의 변화에 따라 각 구성요소의 최적운전 설정값들을 찾는 것은 매우 중요하며, 설정값들이 상호 연관성을 갖고 있기 때문에 설정값들의 선정에는 많은 어려움이 있다.

설정값들은 구성요소 및 전체 시스템의 에너지 소모량에 많은 영향을 미치기 때문에 환경변화에 따라 적절한 시스템 운영을 통하여 에너지소비를 최소화하고자 하는 연구가 많이 이루어지고 있는데, Boyens et al.⁽¹⁾ 중앙난방시스템의 최적화를 위해 Braun et al.⁽²⁾이 제안한 최적제어개념을 급기 팬과 가스 난방으로 구성되어있는 난방시스템에 적용하여 실험적 연구를 수행하였다. 그러나 최적 설정값을 구하기 위해서 환경 및 제어변수의 변화에 대한 에너지 소모량을 2차함수로 나타내고, 이 2차함수의 계수를 실험과 통계적인 처리 방법 등을 통해 구해야 하기 때문에 실시간 제어에 적용하기가 어렵다. Zaheer-uddin⁽³⁾ 등은 기존

에 공조시스템에서 많이 적용하는 정풍량 방식과 가변 풍량 방식을 혼합한 새로운 다단계 최적화(multi-stage optimization) 방식을 제안하였는데 이 방식이 다른 방식보다 에너지 절감 효과를 25%이상 얻을 수 있음을 보여주었다. 그러나 최적화 문제를 해결하여 알고리즘을 구함에 있어 복잡한 계산방법을 사용하여야 하기 때문에 실제 구현 및 적용함에 있어서 어려움이 있다.

Kaya⁽⁴⁾는 준 정상상태(quasi steady state) 부하 조건에서 에너지 소비량을 구성요소들에 기초하여 구하고자 하였고 이로부터 얻은 최적제어 알고리즘은 실시간에 적용함에 있어 용이한 방식으로 판단되나, 최종 제어대상인 실내의 환경조건을 고려하지 않고 열원 및 공조 설비들의 상호관계만을 고려한 최적제어 알고리즘을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 Kaya⁽⁴⁾의 모델을 기초로 하였으며, 열원 및 공조 시스템을 운영하는 목적이 실내의 열 환경을 최적으로 유지하는데 있으므로 최적의 설정값을 결정하는 알고리즘을 구성하는데 있어 제어대상인 실내의 환경 조건(난방부하, 설정온도 등)을 고려하여 전체시스템의 구성요소들의 최적 설정값을 구하고자 하는 간단하고 현장적용이 용이한 실시간 최적 제어 알고리즘을 제시하고자 한다.

2. 온라인 최적제어 알고리즘

최적제어 알고리즘을 위한 기본 가정은 다음과 같다.

1) 최적의 온수설정온도와 난방코일의 공기 측 급기설정온도, 급기 유량을 계산 할 때 부하는 준 정상상태(Quasi-steady state)를 유지한다. 이 가정은 온수와 실내공기의 온도제어를 위한 시간상수는 20분 이내이며 설비는 15분이나 20분 이내에 거의 준 정상상태에 도달할 수 있기 때문이다.

2) 최적 온수 설정온도와 급기 설정온도를 계산할 때에는 온수코일의 입 출구 온수온도차와 공급열량은 일정한 것으로 가정한다. 이것은 난방코일을 통과하는 온수량과 난방코일을 지나는 공기량은 설정치 계산 시간에 일정하다는 것을 의미한다.

3) 물과 공기의 비열은 부하조건에 대해 일정하다. 이 가정은 열교환시 냉수와 공기의 온도 변화 범위가 크지 않기 때문이다.

이상의 기본 가정을 기초로 하여 본 연구에서 제시하는 온라인 최적제어 알고리즘에 대해 간단히 기술하면 다음과 같다. 먼저 보일러, 온수 펌프 및 급기 팬 등에서 소모되는 에너지의 총합을 총 에너지 소모량으로 고려하였다. 따라서 총 에너지 소모량을 수식으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{Tot} = P_{Boiler} + P_{Pump} + P_{Fan} \quad (1)$$

보일러의 효율과 난방코일에서의 열 교환 관계로부터 보일러의 공급되는 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Boiler} = K_{Boiler} \cdot \Delta T_a \quad (2)$$

여기서 또한, 온수의 순환계통에서 온수 순환 펌프 동력을 수식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Pump} = K_{Pump} \cdot \Delta T_a^3 \quad (3)$$

난방부하를 고려한 팬의 동력소모량을 급기와 실내의 온도차를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$P_{Fan} = K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_z^3} \quad (4)$$

전체 시스템의 총 에너지 소모량은 다음과 같이 난방코일의 입·출구 공기 온도차 ΔT_a 와 실내에 공급되는 공기와 실내의 온도차(이하 급기 온도차) ΔT_z 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$P_{Tot}(\Delta T_a, \Delta T_z) = K_{Boiler} \cdot \Delta T_a + K_{Pump} \cdot \Delta T_a^3 + K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_z^3} \quad (5)$$

열역학적 모델의 단순화를 위하여 환기를 위한 외기도입은 없는 것으로 가정하고, 난방코일의 입·출구 공기온도차와 급기온도차의 관계를 이용하여 총에너지 소모량을 급기온도차의 함수로 표현하면 식(6)과 같이 된다.

$$P_{Tot}(\Delta T_z) = K_{Boiler}' \cdot \Delta T_z + K_{Pump}' \cdot \Delta T_z^3 + K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_z^3} \quad (6)$$

이 식을 미분하고 Newton-Raphson 방법으로 근을 구하면 총 에너지 소모량이 최소가 되는 최

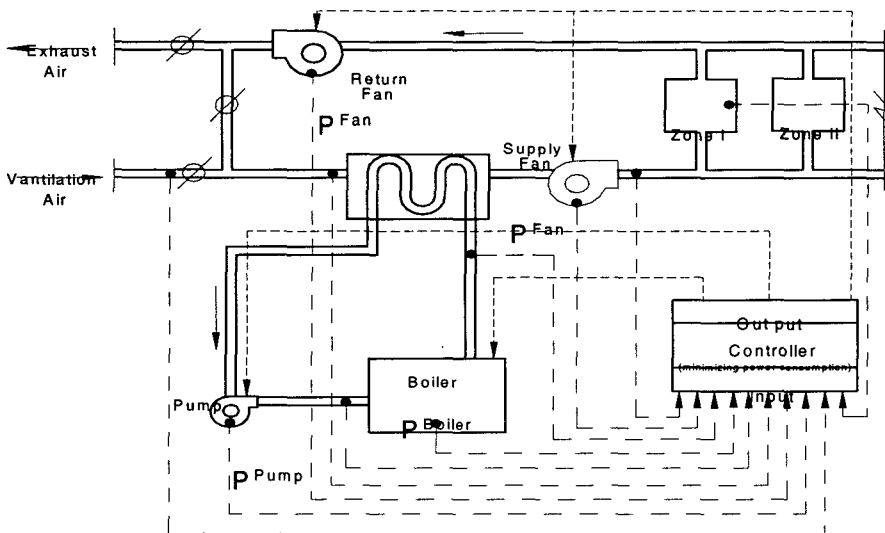


Fig. 1 Schematic diagram of central heating control system.

적 급기온도차를 얻을 수가 있으며 이는 K_{Boiler} , K_{Pump} , K_{Fan} 등과 같은 특성계수들로부터 결정되어진다. 난방코일 출구의 공기온도의 최적 설정치는 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$T_{sa,opt} = \Delta T_{z,opt} + T_z \quad (7)$$

난방코일에서의 공기와 온수와의 열 교환을 통해 보일러로부터 공급되는 온수의 최적 설정치를 구할 수 있다.

$$T_{sw,opt} = \Delta T_{w,opt} + T_{rw} \quad (8)$$

$$C_w \cdot m_w \cdot \Delta T_{w,opt} = C_a \cdot m_a \cdot \Delta T_{a,opt}$$

또한 난방부하에 의해 존재 공급되어야 하는 급기공기의 흐름량은 다음과 같다.

$$m_{a,opt} = \frac{Q_L}{C_a} \cdot \frac{1}{\Delta T_{z,opt}} \quad (9)$$

3. 제어시스템 해석 모델링

Fig. 1은 시뮬레이션 해석을 위한 구성요소들의 상관관계를 나타내고 있다. 외기의 온도와 실내 설정온도 등의 환경조건과 공급되는 온수의

온도, 급기 온도, 실내 온도 등의 공조시스템의 상태 그리고 보일러, 온수순환펌프, 급기 팬의 동력이 제어기에 입력되면 제어기는 최적의 설정치를 계산하고 각 구성요소에 출력할 제어신호의 크기를 결정한다. 최적의 설정치는 현장제어기로 보내고 피드백 제어가 이루어진다. 난방코일의 출구 온도가 설정값에 도달하여 유지하도록 온수순환관로에 설치되어 펌프의 회전수를 제어하여 난방코일에 유입되는 온수량을 제어한다. 또한 온수의 공급온도 제어는 보일러의 작동에 의해 수행되며 실내에 유입되는 급기의 양은 VAV 터미널을 제어하여 조정하고 각 실내에 유입되는 공기량을 모두 합한 양만큼 급기팬은 공급한다. 본 연구에서는 보일러, 온수순환펌프, 급배기팬, 난방코일, 실내 등의 구성 요소와 시스템 제어기로 구성된 중앙난방시스템의 이론적 해석을 위해 과도 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS 15를 사용하였으며, 전체시스템 해석을 위해 구성된 시뮬레이션 프로그램은 Fig. 2에 나타내었다.

4. 제어 알고리즘의 성능 해석

최적제어에서는 최적제어 알고리즘을 통하여 환경변화에 따라 온수온도와 급기온도의 최적설정값을 구하며, 펌프의 회전수제어에 의해 온수유량이 제어되고 이로 통해 급기온도가 설정값에 유지되도록 하며, 급기팬을 제어함으로써 실내의

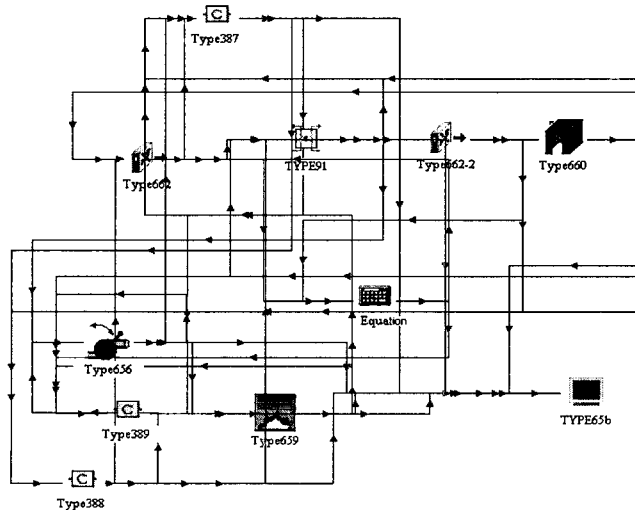


Fig. 2 TRNSYS program for simulation.

온도를 설정값에 유지되도록 하였다. 여기서 제어기는 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어를 사용하였다. 또한 보일러의 공급열량의 제어를 통해 보일러 출구 온수온도를 제어하며, 온수온도의 경우 하한 온수공급온도를 40℃로 하고 상한 온수공급온도를 80℃로 설정하였다. 최적제어의 성능을 고찰하기 위하여 종래의 제어방식과의 에너지 성능을 비교하였는데, 여기서 종래의 제어방식은 순환펌프를 정격회전수로 운전한 상태에서 온수코일의 온수출구 측의 삼방제어 밸브를 통하여 온수가 바이패스(By-Pass)제어가 되도록 하고, 보일러는 80℃로 일정히 유지된다고 가정하였다. 따라서 급기온도의 제어는 삼방밸브의 바이패스 제어에 의해 이루어진다. 또한 보일러 온수온도 및 급기온도는 부하에 따라 변화시켜주지 않고 항상 일정한 값으로 유지되는 것으로 가정하였다.

본 논문에 사용된 부하모델은 Total heat loss coefficient 가 1180620 kJ/h·k 로 실내가 20℃ 실외가 -15℃ 인 경우 41321700 kJ/h 의 열부하를 갖도록 모델링 하였다. 팬 동력이 큰 이유는 실제 건물인 경우는 외부존과 내부존을 나누어 팬코일 유닛을 사용하거나 각 존별로 냉·난방 방식을 달리하게 되지만 본 논문의 경우 대형부하를 전공기 방식으로 처리하는 구조이므로 팬의 동력이 상대적으로 클 뿐만 아니라 급기, 환기 각각 팬동력의 합이고, 실제 건물의 경우는 대형부하일 수록 열원을 고온의 증기 등을 이용하지만 본 논문의 경우 최고 80℃의 온수를 사용하기 때

문에 상대적으로 공급공기 유량의 증가로 인해 팬동력이 큰 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig.3과 같이 외기온도가 변화될 때 소요되는 총 에너지와 각각의 구성요소들의 소요 에너지를 나타내면, 총 에너지의 소비량은 외기온도가 낮아질수록, 즉 부하가 커질수록 선형적으로 증가하게 된다. 이러한 에너지 소비량의 선형적인 증가는 상대적으로 외기온도 또는 부하에 직접적으로 영향을 받는 보일러의 에너지 소모량이 총 에너지 소비량에 상대적으로 많은 영향을 미치고 있기 때문이다. 그러나 부하가 줄어들수록 상대적으로 보일러 에너지가 적은 영향을 미치게 됨으로서 외기온도가 5℃ 이상인 곳에서는 펌프 및 팬의 소비량에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 팬과 보일러의 동력의 합은 electric power로 나타내었다.

Fig. 4는 외기 변화에 따른 공급공기의 설정온도, 온수의 설정온도, 공기 풍량, 온수 유량의 변화를 나타내고 있다. 외기온도 변화로 인한 부하 변동으로 공급공기의 설정점은 약 23℃에서 27℃까지 변화하는 것을 볼 수 있다. 그러나 보일러의 출구 온수 설정온도가 40℃에서 80℃까지 변화하는 것에 비하여 상대적으로 작은 값이 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 공급공기의 온도를 급격히 변화시키는 것보다 완만하게 급기온도를 변화시키면서, 보일러 출구 온수온도를 변화시켜 부하를 추종하는 것이 에너지 절약에 도움이 된다는 것을 나타내고 있다. 또한 외기온도가 10℃ 이상이 되면 온수의 온도가 40℃에 유지하게 되고 외기

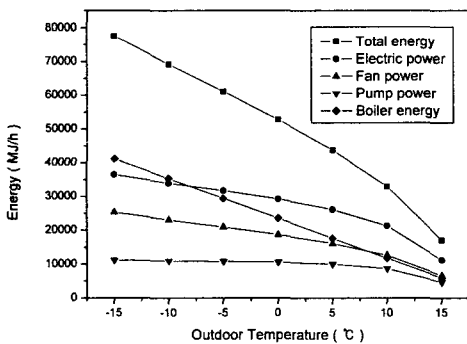


Fig. 3 Total and component energy consumption for different outdoor temperatures.

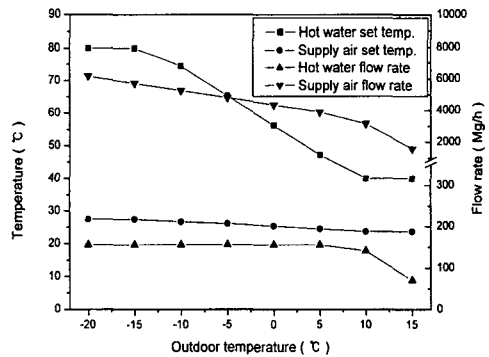


Fig. 4 Optimal setpoint temperatures and flowrates for different outdoor temperatures.

온도가 15℃까지 부하가 감소하면 더 이상 온수의 온도를 낮출 수 없으므로 상대적으로 공급공기의 풍량과 온수량이 급격히 감소하여 부하를 추종하는 것을 알 수 있다. 또한, 외기온도가 -15℃ 이하인 경우에는 온수온도가 80℃로 상한 온수공급 온도에 유지되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 외기온도 0℃에서 실내의 난방 설정 온도를 변경하였을 경우에 대한 온수온도 및 급기온도의 최적 설정값과 온수 유량 및 급기 풍량을 각각 나타낸 것이다. 실내 온도 설정값은 약 29℃정도에서 상한 온수 설정 온도가 나타나는 것을 알 수 있으며 이러한 결과는, 서울특별시 소재 건물의 부하계산 시 고려되는 외기온도 -11.9℃에 대해 실내온도의 설정값을 18℃에서 28℃로 하는 일반적인 건물에서는 온수공급의 상한점에 도달하지 않고 운전할 수 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 6은 제안된 최적제어 알고리즘을 적용한 경우와 종래의 제어방법에 의한 경우의 에너지 성능을 비교하기 위해, 외기온도 변화에 따른 에너지사용량을 비교 도시한 것으로서 최적제어방식이 종래의 운전방식에 비해 외기온도 변화에 따라 평균 7%에서 최고 12% 정도의 에너지가 절약되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 시간에 따라 변화되는 난방부하의 변화에 따라 최적제어 알고리즘이 적절히 이루어지고 있는지를 확인하기 위해 시간에 따라 변화되는 외기 온도특성에 따라 결정된 온수온도 및 급기온도의 설정값들을 나타내고 있으며, 또한 실내 설정온도를 20℃로 하였을 경우로서, 외기온도가 -5℃에서 10℃까지 변화함에 따라 제안된 최적제어 알고리즘에 의해 실내온도가 20℃로 운전되고 있으며, 온수온도 및 급기온도의 최적설정값들을 적절히 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 외기온도의 변화 즉 난방부하의 변화에 따라 재실자가 실내의 온도설정값을 변화시켜 주었을 경우 중앙난방시스템의 총 에너지 소비량을 최소화 할 수 있도록 제어변수로서 온수온도의 설정값과 급기온도의 설정값을 구할 수 있는 최적제어 알고리즘은 제안하였다.

제안된 최적제어 알고리즘을 이용하여 시물레

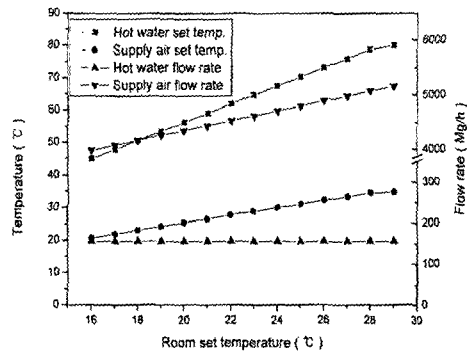


Fig. 5 Optimal setpoint temperatures and flowrates for different room air setpoint temperatures.

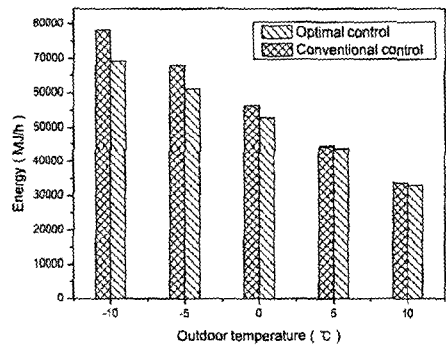


Fig. 6 Total energy consumptions with suggested optimal control system in comparison with conventional one for different outdoor temperatures.

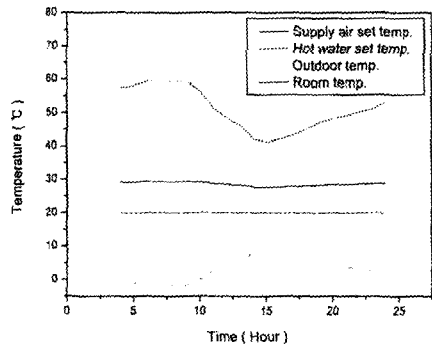


Fig. 7 Optimal setpoint temperatures for time-varying outdoor temperature.

이선 연구를 수행한 결과 외기온도에 변화에 따라 실내온도는 설정된 온도를 적절히 유지하면서, 중앙난방시스템의 총 에너지를 평균 7% 감소할 수 있는 것으로 나타났으며, 부하가 큰 경우는 최대 12% 정도의 에너지를 감소시키는 것으로 나타났다.

제안된 최적제어 알고리즘은 프로그램의 구성이 기존 알고리즘에 비해 상대적으로 간단하고 현장적용이 용이하여 온라인 최적 제어 알고리즘으로서의 활용이 가능하리라 판단되고, 향후 실험적 연구를 통한 검증이 필요하며, 이를 통한 DDC의 에너지 절약 소프트웨어로서의 활용이 가능하리라 사료된다.

참고문헌

1. A. Boyens., 1990, Experimental validation of a methodology for determining heating system control strategies, ASHRAE Transaction, pp. 24-30.
2. Braun, J. E., Klein, S. A., Mitchell, J. W., and Beckman, W.A. 1989, Methodology for optimal control to chilled water systems without storage, ASHRAE Transaction, Vol. 95, pp. 652-662.
3. Zaheer-Uddin, M. and Zheng, G. R., 2001, Multistage optimal operating strategies for HVAC systems, ASHRAE Transaction, Vol. 107, Part 2, pp. 346-352.
4. Kaya, A., Enterline, L. L., and Sommer, A. C., 1983, Chiller optimization by distributed control to save energy, Proceedings of the Instrument Society of America Conference, Houston, TX.
5. Klein, S. A., et al, TRNSYS : a Transient System Simulation Program, University of Wisconsin-Madison.
6. Ahn, B. C. and Mitchell, J. W., 1999, Optimal Control for central cooling plants, Sixth International IBPSA Conference, Kyoto, Japan, pp. 179-186.
7. Ahn, B. C. and Mitchell, J. W., 2001, Optimal control development for chilled water plants using a quadratic representation, Energy and Buildings 33, Elsevier, pp. 371-378.