

중앙냉방시스템의 에너지절약 제어기술



안 병 천

중앙냉방시스템의 에너지 절약을 위해서는 실내외의 환경 변화에 따라 시스템제어변수들인 최적의 운전조건들을 선정할 수 있고, 온라인으로 실제 적용이 용이한 최적화 기술이 필요하며, 이를 통한 효율적인 에너지 관리시스템의 구성이 이루어져야 한다.

시스템 구성 및 운전문제해결을 위한 신기술

중앙냉방시스템의 에너지 사용특성에 영향을 주는 요인들은 많으며, 이러한 요인들은 시스템의 설계, 운전방법, 유지관리, 부하, 그리고 각 운전점의 크기 등을 들 수 있다. 시스템 각 구성요소들에 있어서 효율측면에서의 단위제품설계 및 제작기술의 발전은 건물에 있어서 소모되어지는 에너지의 절감에 기여를 하고 있으나, 요소부품개발에 투자한 시간과 비용에 비하면 에너지절감 효과는 그리 크지 못한 것은 사실이다. 반면에, 시스템의 적절한 운전 및 유지관리 또한 에너지 절감에 커다란 영향을 미치고 있으며, 시스템의 적절치 못한 유지관리 및 운전은 불필요한 에너지의 증가를 초래함과 동시에 쾌적한 실내환경의 유지가 어렵게 된다.

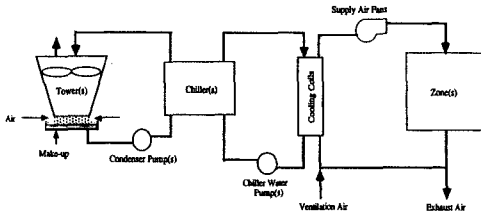
건물에서의 중앙냉방시스템은 일반적으로 냉방부하를 처리하기 위해 냉동기 및 냉각탑 등의 열원장치 부분과 공조장치부분 등으로 크게 구성되어 있으며, 이러한 장치들은 펌프와 팬 등의 동력부하장치들을 수반한다. 따라서 중앙냉방시스템의 에너지 사용은 주로 전력에너지의 형태로 나타나게 된

다. 또한 시스템의 각 구성요소들에 있어서는 다양한 운전방식 및 운전점들이 존재하며, 에너지 소비를 최소화함과 동시에 건물내 쾌적한 열적환경의 유지가 전제되는 조건내에서 선정되어야 한다.

종래에는 시스템의 운전자들이 오랜기간 동안의 시행착오적 운전을 통해 얻은 경험을 토대로 하여 시스템의 운전을 수행하였으며, 부분적으로 도입된 자동제어의 개념조차도 미리 설정시켜준 운전점을 유지하기 위한 시스템 구성요소에 대한 현장제어기(local controller)의 적용이 전부였다. 최근에 와서는 시스템에서 소비되는 에너지를 절감하기 위한 방안으로서 전체시스템의 최적운전점(optimal setpoint)을 선정하고자 하는 감시제어(supervisory control)에 관한 연구와 이와 연계하여 설정치를 유지시키고자 하는 현장제어기에 관한 연구들이 부분적으로 나타나고 있으며, 시스템에 이러한 최적제어기법을 도입하여 줌으로써 전체시스템 에너지를 10~20% 절감이 가능함을 제시하기도 하였다.

그림 1은 일반적인 중앙냉방시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 중앙냉방시스템은 조절된 온습도를 갖는 공기를 실내에 공급하

집중기획 제어기술을 통한 에너지 절약



〈그림 1〉 중앙냉방시스템의 개략도

는 공조기부분, 냉방부하에 대해 급기의 온습도 조절을 위해 냉수와의 열교환이 이루어지는 증발기부분, 냉동기의 사이클로부터 발생되는 열을 제거시켜 주기 위한 냉각탑, 그리고 냉방부하로서의 실내 존 등으로 구성되어 있다. 이러한 중앙냉방시스템에 적용되고 있는 일반적인 운전개념을 요약하면 다음과 같다.

- 실내의 존별온도는 각각의 VAV(variable air volume) 상자에 있는 댐퍼를 이용하여 풍량을 조절함으로써 이루어진다.
- 공조기의 급기팬은 VFD(variable frequency driver)나 VIV(variable inlet vane) 등을 이용하여 급기덕트내의 정압을 설정된 크기로 유지되도록 조절된다. 여기서 정압은 적절한 VAV 시스템의 운전이 가능하도록 최소의 요구조건이 만족되도록 하여야 하며, 모든 VAV상자들에 의해 요구되는 만큼의 급기풍량이 공급되도록 하여야 한다. 대부분의 경우 급기의 정압은 일정한 값으로 설정시켜 놓고 있다.
- VAV 상자에 공급되는 급기의 온도는 냉수밸브를 이용하여 냉각코일을 통해 흐르는 냉수(chilled water)의 유량을 밸브를 이용하여 조절함으로써 목표설정치를 유지시켜 주도록 한다. 급기온

도의 설정치는 일정한 값으로 고정시켜 놓는다. 그러나 외기의 상태를 고려하여 급기온도를 조절하기 위해 이코노마이저(economizer)를 종종 적용하기도 한다.

- 냉각코일의 냉수온도의 목표 설정치는 냉동기의 출력을 조절해 줌으로써 이루어지며, 일반적으로 냉수온도는 약 5~10°C의 범위내에서 설정된다. 대부분의 시스템에 있어서는 냉동기의 에너지 소비량을 줄이고자 냉동기의 부하가 감소함에 따라 냉수온도의 설정치는 큰 값으로 리셋시켜 준다. 이러한 방법은 냉동기의 전력소모량은 줄여주게 되지만, 펌프 및 팬의 전력소모량에 영향을 주어 오히려 전체에너지의 증가를 야기시키게 된다.
- 냉수펌프는 일반적으로 정속도 운전을 한다. 2차(secondary) 냉수펌프가 존재할 경우 냉수파이프의 배관내에서 먼거리의 압력과 압력차를 유지하기 위해 펌프의 속도를 조절하기도 한다.
- 냉동기와 냉각탑을 통과하는 냉각수의 유량은 일반적으로 일정하게 유지시켜 주며, 냉각탑의 팬 속도는 냉동기의 부분부하 및 외기의 습구온도 등을 고려하여 개회로 제어(open loop control)의 개념을 도입하여 조절하기도 한다.

건물내에서 쾌적한 열환경을 유지하기 위해서는 적당한 실내온도, 습도 및 환기량 등이 중앙냉방시스템에 의해 조절될 수 있어야 한다. 이러한 중앙냉방시스템에는 실내환경 및 에너지 효율에 영향을 주는 설정치들이 존재하며, 이러한 설정치들은 주위 환경의 변화에 따라 설정된 범위내에서 변화시킬 수 있어야 하고, 또한 실내환경조건을 만족시켜 주어야 한다. 일반적으로 중앙냉방시

집중기획 제어기술을 통한 에너지 절약

시스템에 있어서 에너지 소비량에 영향을 주는 제어변수들로써는 다음과 같은 중요한 변수들을 고려해 볼 수 있다.

- 급기 온도
- 냉수 온도
- 냉각수 온도 (혹은 냉각탑 공기유량)

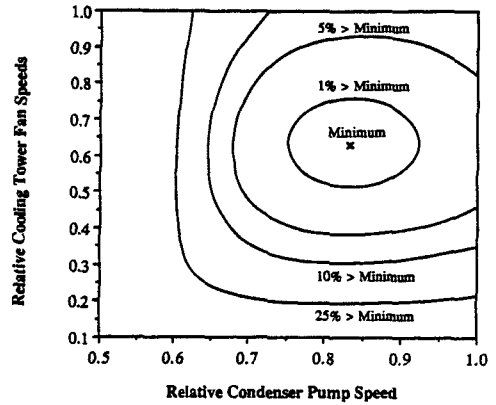
냉각수의 유량을 제어변수로 설정하여 조절하기도 하며, 이러한 냉각수 유량의 변화는 냉각수 온도의 조절범위에 영향을 주고, 부적합 유량조절은 오히려 시스템 전체 에너지 소모량의 증가를 야기시키게 된다. 또한 위에서 열거한 제어변수들의 설정치 변화는 시스템의 운전특성 및 에너지 소비량에 많은 영향을 준다. 예로서,

- 공조기에 공급되는 냉수온도를 증가시키면 냉동기에서 소모되는 전력 에너지는 감소되지만, 냉수펌프 및 급기팬에 의한 전력 소모량은 증가하게 된다.
- 냉각수의 온도를 감소시키면 증기압축식 냉동기의 효율은 증가하지만, 냉각탑의 공기유량을 증가시켜 주어야 하며 이로 인해 팬의 전력소비량을 증가시켜 주게 된다.

이처럼 복잡한 중앙냉방시스템에 대하여 여러 제어변수들의 최적의 설정치들의 조합을 구하는 것은 시스템 구성요소들의 상호관계를 고려해 볼 때 쉬운 문제는 아니다.

■ 운전조건과 에너지소모량 특성

중앙냉방시스템의 시스템요소들의 운전이 에너지 소모량특성에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 그림 2는 냉각탑의 팬과 냉각수 펌프의 회전수 변화와 전체시스

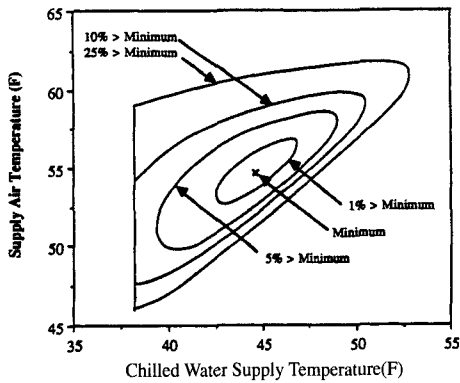


〈그림 2〉 냉각수 펌프와 냉각탑 팬의 회전수 변화와 전체 에너지 소모량과의 관계

템의 전력소비량과의 관계를 나타낸 그림이다. 에너지가 최소가 되는 점(minimum)이 존재하며 이 점을 벗어날 경우 전력소비량은 점차적으로 증가하게 됨을 알 수 있다. 또한, 전력소비량의 증가율은 냉각수 펌프의 회전수가 작을수록 더욱 커지는 것을 볼 수 있다. 냉각수 펌프의 경우 최소 수두(head)가 존재하며 만약 펌프가 이 상태에서 운전된다면, 냉각수유량은 매우 작게 되어 냉각수 펌프의 전력소모량은 줄어들게 되나, 오히려 냉동기의 전력소비량은 매우 크게 증가하게 된다. 일반적으로 펌프의 회전수는 낮게 설정하는 것보다는 크게 설정하는 것이 바람직하다.

외기의 습구온도가 일정한 상태에서 부하가 증가할 경우 냉수온도와 급기온도는 감소시켜 주어야 한다. 왜냐하면, 부하의 증가에 따른 급기팬의 전력소모량의 증가율이 냉동기의 전력소모량의 감소율보다 크기 때문이다. 반면에 부하가 일정한 상태에서 습구온도가 증가하게 된다면 냉수온도 및 급기온도는 증가시켜 주어야 한다. 그림 3은 주어진 부하와 외기의 습구온도 조건에서

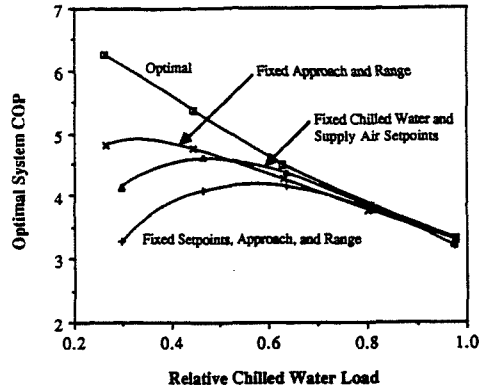
집중기획 제어기술을 통한 에너지 절약



〈그림 3〉 냉수 및 급기온도와 전체 에너지 소모량과의 관계

냉수온도와 급기온도가 전체시스템의 에너지 소비량에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 각각의 온도설정치를 적절히 선정하였을 경우 에너지가 최소로 되는 점이 존재하며, 각 온도의 최적설정치의 2°F내에서는 에너지가 최소에너지 소비량의 1% 증가내에 있게 된다. 그러나 설정치의 크기가 그 밖을 벗어나면 에너지의 소비량은 급속히 증가하게 됨을 볼 수 있다. 또한, 두 온도의 차가 감소하게 됨에 따라 냉각수 펌프의 유량은 증가시켜 주어야 하며, 이로 인하여 펌프의 전력소비량은 증가하게 됨을 알 수 있다.

부하 및 습구 온도의 변화에 따라 냉각탑 웅과 냉각수 펌프 회전수의 제어는 부하 및 습구온도의 변화에 관계없이 냉각수 온도와 습구온도와 차(approach)를 일정하게 유지하거나 응축기의 입출구온도의 차(range)를 일정하게 유지하기 위한 목적으로 수행되기도 한다. 광범위한 주위환경조건 변화속에서 최적의 냉각수와 급기 온도, 냉각탑의 approach, 그리고 range 등의 고정된 값은 존재하지 않는다. 단지, 설계조건에서 최적에 가까운 성능을 발휘할 수 있도록 합당한 고



〈그림 4〉 종래의 제어방법과 최적제어방법과의 냉동기 성능지수 비교

정치를 결정하는 정도가 가장 간단한 방법이라 하겠다. 그림 4는 4가지의 제어방법을 각각 적용하였을 경우에 대해서 습구온도를 일정한 상태에서 냉동기 부하율의 변화에 따른 냉동기의 성능지수(COP)를 나타낸 것이다. 여기서, 4가지 제어방법은 1) 급기와 냉수온도, approach, range 등을 모두 고정시킨 경우, 2) 급기와 냉수만을 고정시킨 상태에서 냉각수 펌프 및 냉각탑 웅의 최적제어가 도입된 경우, 3) 냉각탑의 approach와 range를 고정시킨 상태에서 냉수유량조절을 최적화시킨 경우, 4) 전체시스템의 최적화가 이루어진 경우 등이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대부하조건부근에서는 각 경우의 성능지수의 크기가 유사하게 나타나고 있다. 이것은 일반적으로 시스템의 설계조건인 최대부하조건부근에서 급기와 냉수온도, approach, range 등의 고정값들을 결정하였기 때문이다. 그러나, 부분부하의 경우에 있어서는 각 경우의 성능지수의 크기가 큰 차이를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과에서 볼 수 있듯이 부하를 포함한 환경변수들의 변화에 따라 전체시스템을 적절히 최적제어를 수행하면 냉동기의 성능지수의

집중 기획

제어기술을 통한 에너지 절약

항상 및 이를 통한 커다란 에너지의 절감을 이룰 수 있게 된다.

최적화 기법 및 적용 예

전체시스템의 최적화를 위해 해석적으로 결정될 수 있는 최적조건이 존재하기 위한 간단한 함수는 2차함수로서, 불연속 제어변수 M 과 연속 제어변수 U 로 구성된 제어변수와 제어할 수 없는 강제함수(forcing function)인 환경변수 f 들로서 비용함수(cost function) J 를 나타낼 수 있다.

$$J(f, M, u) = u^T A u + b^T u + f^T C f + d^T f + f^T E u + g \quad (1)$$

여기서, A 는 hermitian 행렬(matrix)으로서 대칭(symmetric)행렬, C 와 E 는 계수행렬, b 와 d 는 계수벡터, g 는 스칼라를 각각 의미한다. 일반적으로, 제어변수들은 최소 허용온도 또는 최대 허용유량과 같은 제한을 가질 수 있으며, 거주 공간에서의 온도와 습도한계와 같은 기준이 만족되도록 하여야 한다. 이러한 한계들은 불연속제어 변수들로서 최적화 과정에서 고려되어야 한다. 각 제어변수들의 최적치는 식(1)이 2차함수라는 특성을 고려하여 각 제어변수에 대한 1차도함수가 0 (zero)이 될 때 ($\partial J / \partial u = 0$) 결정되어지며 그 결과는 다음식으로 표현된다.

$$u = -\frac{1}{2} A^{-1} b - \frac{1}{2} A^{-1} E f \quad (2)$$

식(1)의 비용함수가 최소가 되기 위한 이 제어법칙은 hermitian행렬이 positive definite 행렬일 때만 가능하다. 그리고, 이 제어법칙은 연속제어변수에 대한 것으로, 제한치를 갖지 않는다. 만약 시스템이 불연속적 변수

를 갖고 있으면, 이 변수들의 적정조합을 통한 최적제어방법이 필요하게 된다. 다양한 환경조건 및 운전방식에 영향을 받는 식(1)의 계수들은 실험 및 경험적으로 결정되어야 하고, 이를 위해 최소자승 선형회귀기법(least square linear regression technique)이 적용될 수 있다. 그리고, 식(1)에 있어서 결정되어야 하는 계수들의 숫자는 다음과 같다.

$$N_{coeff} = N_u^2 - \frac{N_u(N_u-1)}{2} + N_u + N_f^2 - \frac{N_f(N_f-1)}{2} + N_f + N_f N_u + 1 \quad (3)$$

여기서, N_u 는 제어변수의 갯수를 의미하며, N_f 는 환경변수의 개수를 의미한다. 만약 3개의 제어변수와 3개의 환경변수를 선정하였을 경우에는 28개의 계수가 회귀기법에 의해 결정되어야 한다.

여기서, 상기의 최적화 개념을 중앙냉방시스템에 적용한 간단한 예를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 3개의 제어변수, 즉 냉각수온도($T_{cool, set}$), 급기온도($T_{sup, set}$), 그리고 냉수온도($T_{chwi, set}$) 등을 고려하여 환경변화에 따라 에너지소비량을 최소화할 수 있는 제어변수들의 설정치를 구한다. 여기서 고려된 환경변수들은 냉방부하, 외기의 습기온도, 현열비(SHR: sensible heat ratio) 등이며, 건구온도의 경우는 냉방시스템의 총 전력소비량에 거의 영향을 끼치지 못하기 때문에 본 연구에서는 건구온도의 변화특성은 고려하지 않는다.

제어변수들이 최적의 운전점에서 유지되도록 하기 위한 현장제어기로서 피드백제어시스템의 구성이 필요하게 되는데, 이를 위해 급기온도가 일정하게 유지되도록 냉각코일 수량을 조절하는 냉수 펌프의 회전수를 피드백제어하며, 냉각수온도는 냉각탑 웅의 회전속도를 제어하여 설정치에 유지하도록 한다

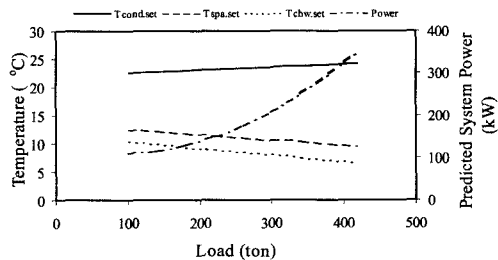
집중 기획 제어기술을 통한 에너지 절약

또한 냉동기의 압축기용량을 제어하여 냉수 온도가 설정된 운전점에 유지되도록 한다. 냉각코일내의 급기량은 실내의 설정온도와 급기설정온도, 그리고 현열비를 고려하여 구할 수 있다. 그리고, 냉각탑내 펌프 회전속도는 정격회전속도로 운전되며 일정하다고 가정한다. 피드백 제어기로는 제어기구성이 비교적 간단하고 공정제어시스템에서 많이 사용되고 있는 PID제어 알고리즘을 사용한다.

전체 시스템의 에너지 소모량은 제어 및 환경변수들의 2차함수로 반드시 표현되지는 않는다. 그러나, 최적운전조건 근처에서는 시스템 에너지가 변수들의 2차함수로 근사화가 가능하다. 따라서, 보다 정확한 식을 얻기 위해서는 최적조건근처의 충분한 데이터가 필요하게 되며, 그 데이터를 이용하여 제어변수 및 환경변수들의 에너지소모량에 대한 2차함수식을 얻게 된다.

식(1)과 같은 최적화를 위한 비용함수를 전체 중앙냉방시스템의 에너지소비량에 관련하여 나타내면 다음과 같이 표현될 수 있으며, 이식을 이용하여 제어변수들과 환경변수들에 따른 에너지소비량을 예측할 수 있게 된다.

$$P = P(T_{chw.set}, T_{spa.set}, T_{cond.set}, Load, T_{wb}, SHR) \quad (4)$$



〈그림 5〉 냉방부하변화에 따른 각 온도의 최적설정치 및 총 전력소모량 특성

식(4)의 모든 계수들은 최소자승선형회귀 기법을 사용하여 결정되어질 수 있다.

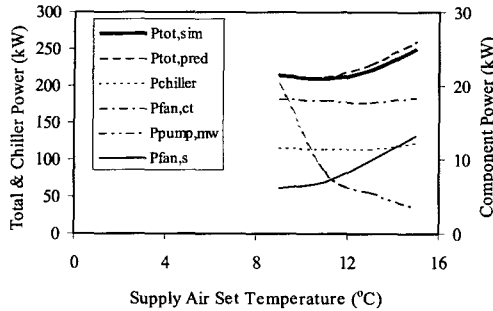
따라서, 식(4)를 제어변수들에 관한 1차도함수를 취하여 정리하면 식(5)와 같이 환경변수들에 대한 함수로 제어변수들을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{chw.set,optimal} &= G_1(Load, T_{wb}, SHR) \\ T_{spa.set,optimal} &= G_2(Load, T_{wb}, SHR, \\ &\quad T_{chw.set,optimal}) \\ T_{cond.set,optimal} &= G_3(Load, T_{wb}, SHR, \\ &\quad T_{chw.set,optimal}, T_{spa.set,optimal}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 제어변수들의 최적설정치들은 1차함수식으로 나타내지는데, 냉수온도의 최적설정치는 환경변수들만의 함수로, 급기온도의 최적설정치는 환경변수들 뿐만아니라 냉수온도의 최적설정치의 함수로 표현된다. 그리고, 최적의 냉각수온도는 환경변수들과 급기 및 냉수온도들의 설정치 등으로 표현된다.

그림 5는 냉방부하의 변화에 따른 냉각수 온도, 급기온도 및 냉수온도들의 최적설정치의 크기의 변화와 총 전력소모량의 예측치를 각각 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 온도의 최적설정치들은 환경변수들의 변화에 따라 1차함수적으로 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 전력소모량이 식(1)처럼 2차식으로 나타내지고, 이식의 1차도함수로부터 환경변수들에 대한 각 온도의 최적설정치를 구한 식(5)가 1차 선형함수로 표현되어지기 때문이다. 그림 5는 주변 습구 온도(18°C)와 현열비(0.8)를 고정된 상태에서 냉방부하의 변화만을 고려한 것으로써 부하가 증가함에 따라 최적 급기($T_{spa.set}$) 및 냉수 설정온도($T_{chw.set}$)는 감소시켜 주어야 하며, 반면에 냉각수 최적설정온도($T_{cond.set}$)는 오

집중 기획 제어기술을 통한 에너지 절약



〈그림 6〉 급기온도의 설정치 변화에 따른 전력소모량의 변화특성

히려 증가시켜 주어야 함을 알 수 있다. 또한 냉방부하의 증가에 따라 총 전력소모량은 증가하고 있음을 볼 수 있다.

그림 6은 급기온도의 설정치를 달리 선정하였을 때 시스템 각 요소들로서 급기팬($P_{fan,s}$), 냉수펌프($P_{pump,mw}$), 냉각탑 팬($P_{fan,ct}$), 냉동기의 압축기($P_{chiller}$) 등의 전력소모량들과 전체 총 전력소모량의 계산치($P_{tot,sim}$), 그리고 식(4)로부터 얻은 총 전력소모량의 예측치($P_{tot,pred}$)등을 각각 나타낸 그림이다. 총 전력소모량과 냉동기 전력소모량은 좌측 y축에, 그 외의 구성요소들의 전력소모량은 우측 y축에 나타내었다. 냉각탑 펌프는 정속도 운전 하도록 함에 따라 전력소모량은 항상 일정하다고 가정하여 그림에 나타내지 않았다. 그러나 총 전력소모량은 냉각탑펌프의 전력소모량을 포함한 값이다.

각각의 결과들에 대한 환경변수들의 기준 조건으로는 냉방부하는 300ton, 주위습구온도는 18°C, 그리고 현열비는 0.8 등으로 하였다. 그리고, 냉수 및 냉각수 설정온도는 각각 7°C와 26°C로 고정한 상태에서 급기온도만을 변화시켜 주었을 때의 에너지 소모특성을 나타낸 것이다. 그림에서 총 전력소모량에 있어서 계산된 값과 예측치는 거의 일치되어 나타나고 있음을 볼 수 있다. 급기 설정온도를 증가시켜 줌에 따라 냉방부하를

처리하기 위해 공기유량이 증가되어야 하기 때문에 급기팬 전력소모량은 증가하며, 냉수 펌프 전력소모량은 급기 설정온도의 증가에 따라 오히려 빠르게 감소되어 나타남을 볼 수 있다. 그리고, 냉동기 및 냉각탑 팬 전력소모량은 급기 설정온도가 증가함에 따라 미소한 감소를 나타내고 있다. 각 요소들의 전력소모량의 총합인 총 전력소모량은 급기 설정온도가 11°C에서 최소가 되었으며, 급기 설정온도를 15°C로 하였을 경우에 비해 총 전력소모량을 15.7% 정도 절감할 수 있음을 알 수 있다.

중앙냉방시스템의 에너지 소모량에 영향을 주는 제어변수들은 많으며, 계속적으로 변화되는 주위 환경속에서 고정된 값의 제어변수는 존재하지 않는다. 일반적으로, 시스템의 설계시 제어변수들의 설정치를 적절히 고정시켜 사용하고는 있으나, 그로 인해 불필요한 에너지 소모량의 증가를 초래하여 왔다. 또한, 다양한 제어변수들이 존재하며, 이러한 제어변수들의 설정치를 변화시켜 주었을 때 시스템의 운전특성과 에너지 소비량에는 많은 영향을 주게 된다. 임의의 제어변수의 설정치 변화로 인해 전체시스템중 부분적인 에너지 절감은 이를 수 있을지는 모르나, 이것이 다른 구성요소에 영향을 주어 전체적인 에너지의 소모량을 오히려 증가시켜줄 수도 있게 된다. 이처럼 복잡한 중앙냉방시스템에 대하여 여러 제어변수들의 최적의 설정치들의 조합을 구하는 것은 시스템 구성요소들의 상호관계를 고려해 볼 때 쉬운 문제는 아니다. 따라서 중앙냉방시스템의 에너지 절약을 위해서는 실내외의 환경변화에 따라 시스템제어변수들인 최적의 운전조건들을 선정할 수 있고, 온라인으로 실제 적용이 용이한 최적화기법의 개발을 통한 효율적인 에너지 관리시스템이 필요하다 하겠다. ●