

냉방부하 예측을 이용한 냉방시스템 최적제어 기술

윤 홍 익

(주)가교테크(yoonhi@gagyotech.com)

연구배경

우리나라 전체 에너지 수요 중 약 30%는 건물 부문이 차지하고 있으며, 건물에너지 사용량 중 50% 이상 정도가 냉·난방과 관련된 공조설비에 사용되고 있다. 따라서 건물의 냉난방에너지를 절감하는 것은 국가적으로 매우 중요한 과제이며, 이를 위해서 기존의 터보와 흡수식 냉동기 외에 빙축열, 수축열, 지열, 지역냉방과 같은 환경 친화적이고, 에너지 절약적인 냉방시스템이 건물의 냉방에 적용되어 확산되고 있다. 이러한 냉방시스템들은 건물의 지리적 환경이나 에너지 수요 패턴에 따라 여러 장치가 조합된 형태로 구성되어 있고, 운전 전략도 다양하기 때문에 쾌적한 냉방조건과 에너지 절감을 동시에 달성하기 위한 효과적인 냉방시스템의 운전 방법이 매우 중요하다. 이러한 점을 고려할 때 냉방시스템의 효과적인 운전 전략을 실질적으로 수립하는 운전자를 위한 최적제어 기술 개발이 필요하다.

본 기술은 운전자가 건물의 시간별 냉방부하 수요 패턴을 사전에 예측할 수 있도록 해주고, 예측된 냉방부하를 바탕으로 시간별, 계절별로 달라지는 전기 및 가스 요금을 고려하여 시스템 운전 전략을 수립할 수 있도록 안내해줌으로써 냉방시

스템의 효율적인 운전과 에너지 절감을 가능하게 해준다. 본 '냉방부하 예측을 이용한 냉방시스템 최적제어 기술'은 3개의 핵심요소 기술인 '외기온도와 습도 예측 기술', '냉방부하 예측 기술', '냉방시스템 최적제어 기술'로 구성되어 있다. '외기온도와 습도 예측 기술'에서는 기상청에서 예보하는 최고온도와 최저온도만을 가지고, 익일의 시간대별 온도와 습도를 예측하는 방법을 제시하였으며, '냉방부하 예측 기술'에서는 예측된 외기 온습도와 건물의 4가지 공조 설계값만을 사용하여 냉방부하를 예측할 수 있는 방법을 제안하였으며, '냉방시스템 최적제어 기술'에서는 예측된 냉방부하와 복합 냉방시스템의 개별 에너지 단가 및 성능을 고려하여 최적운전 기법을 제시하였다.

외기온도 및 습도 예측 기술

냉방부하가 발생하는 5월~9월의 외기온도와 상대습도를 분석하기 위해 기상청에서 측정한 2001년~2005년까지 5년간 데이터를 활용하였다. 지리적 특성으로 인해 외기온도와 상대습도는 지역마다 차이가 있으므로 이를 고려하기 위해 내륙에 위치한 서울과 대전의 데이터와 해안가에 위치한 부산의 데이터를 분석하여 비교하였다.

그림 1은 2005년 7월~8월 특정한 날 대전지역의 하루 동안 외기온도, 상대습도, 비습도변화를 나타낸 것이다. 비가 오는 날은 과도한 습도에 의한 잠열의 영향으로 외기온도의 변화가 무질서하므로 본 연구에서는 맑은 날만을 고려하여 분석하였다. 온도의 경우 최고온도는 13시~15시 사이에 나타났고, 새벽 4시~6시 사이에 최저온도가 나타났다. 또한 최고온도와 최저온도 사이에서 단조증가와 단조감소를 하면서 매일 일정한 변화 양상을 보이고 있다.

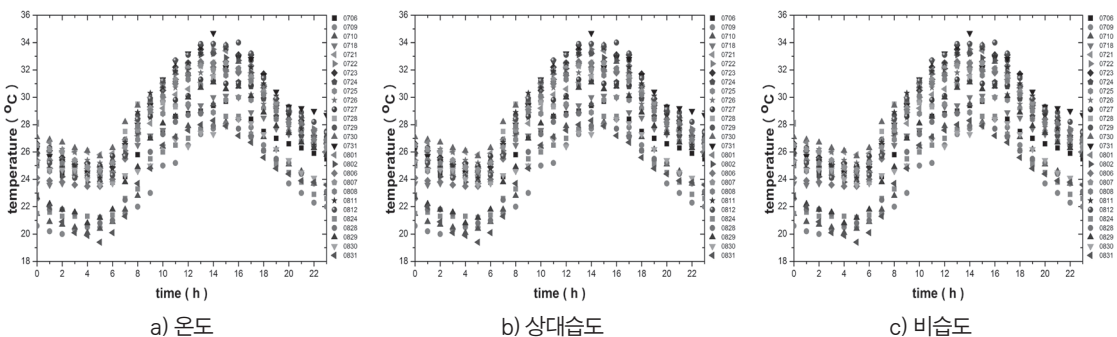
상대습도의 변화는 온도와 비교해 보았을 때 외기온도가 높을 때는 상대습도가 낮고, 반대로 외기온도가 낮을 때는 상대습도가 높은 것이 일반적인 경향이다. 비습도의 변화는 하루 중 변화량이 매우 작으며, 7월에는 증가하고 8월에는 감소하는 것을 알 수 있다.

외기온도를 예측하기 위해 하루 동안 외기온도를 무차원화 시킨 뒤 월별 평균값을 산출하였다. 그림 2는 2001년부터 2005년까지 서울, 대전, 부산 지역에 대해 6월~9월까지 맑은날의 외기온도 평균값을 최고온도를 1로 최저온도를 -1로 설정하여 식 (1)을 이용하여 무차원하여 나타낸 것이다.

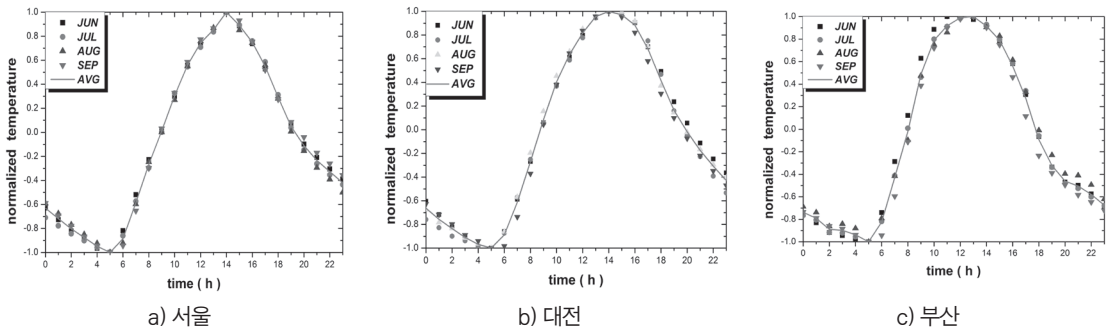
$$T^* = \frac{T(h) - T_{avg}}{T_{max} - T_{avg}}, -1 \leq T^* \leq 1 \quad (1)$$

여기서 T_{max} 는 하루 중 최고온도이며, T_{avg} 는 최고온도와 최저온도의 산술평균값이며, 이 결과로부터 각 지역별 예측온도 상관식을 얻을 수 있다. 내륙에 위치한 서울과 대전에서 하루동안 온도변화는 거의 일치하며 오후 2시에 최고 온도가 나타나고, 새벽 5시에 최저온도를 보이는 일정한 경향을 가짐을 알 수 있다. 서울과 대전 지역과 달리 해안에 위치한 도시인 부산 지역의 온도 특성은 최고 온도의 경우 서울과 대전 지역보다 빠른 12시~13시 사이에 나타나고, 최저온도는 두 지역과 같은 새벽 5시에 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 부산지역이 서울과 대전지역에 비해 해가 약간 빨리 뜨고, 해풍의 영향으로 내륙 지역에 비해 대류가 활발하게 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 또 한가지 특이한 사항은 6월~9월의 무차원온도 평균값이 서울, 대전, 부산 지역 모두 그림 2와 같이 하나의 곡선으로 나타낼 수 있다는 사실이다.

상대습도를 예측하기 위해 하루 동안 상대습도의 월별 평균값을 산출하여 예측 상대습도 함수를 구하여 비교하였다. 그림 3은 서울, 대전, 부산지역의 5년간 상대습도를 월별로 평균한 값이다. 상대습도는 하루 중 외기온도가 가장 높은 13시~15시 사이에 최저값을 가지며, 최저온도가 포함된 4시~6시 사이에 최고 상대습도를 가짐을 알 수 있다. 부산지역의 상대 습도 변화폭은 내륙에 위치한 서울, 대전에 비해 비교적 작음을 볼 수 있고, 대전 지



[그림 1] 대전지역의 하루동안 온도 및 습도 변화



[그림 2] 5년간 월별 평균 외기 온도 변화

역의 변화폭이 가장 큼을 알 수 있다. 그 이유는 내륙 지방으로 갈수록 해풍의 영향이 작아지기 때문이라 사료된다. 월별 상대습도 변화는 7월과 8월에는 약간 높고, 6월과 9월에는 약간 낮지만 변화폭은 약 5% 정도인 것을 알 수 있다.

상대습도도 온도와 마찬가지로 최고상대습도를 1로 최저상대습도를 -1로 설정하여 식 (2)와 같이 무차원화시켜 예측상대습도상관식을 얻을 수 있다.

$$RH^* = \frac{RH(h) - RH_{avg}}{RH_{max} - RH_{avg}}, -1 \leq RH^* \leq 1 \quad (2)$$

그러나 최고·최저 상대습도는 온도와는 달리 기상청의 자동응답시스템을 통해서 얻을 수 있는 정보가 아니므로 온도와 연계하여 값을 예측

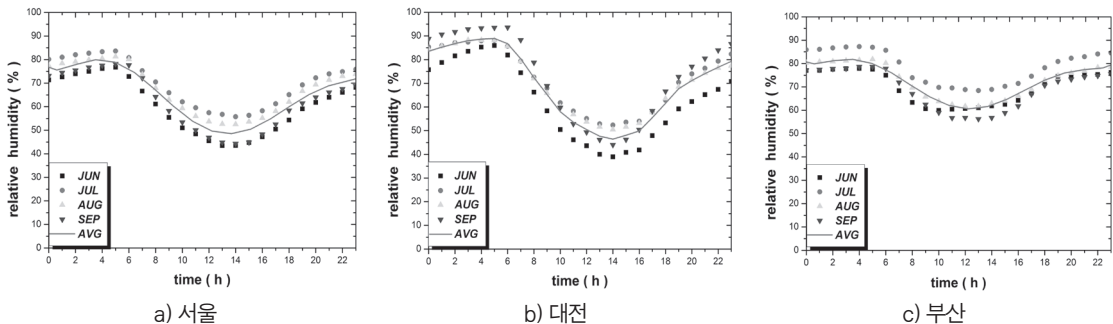
하여야 한다. 본 기술개발에서는 최고·최저 상대습도를 예측하기 위해 퍼지추론 방법 중의 하나인 mamdani의 퍼지 추론법을 사용하였다.

이와같이 도출한 예측온도 상관식으로 구한 무차원 온도와 기상청의 자동응답시스템을 통해서 쉽게 얻을 수 있는 최고온도와 최저온도를 식 (3)에 대입하면 하루 동안의 시간별 온도변화를 구할 수 있다.

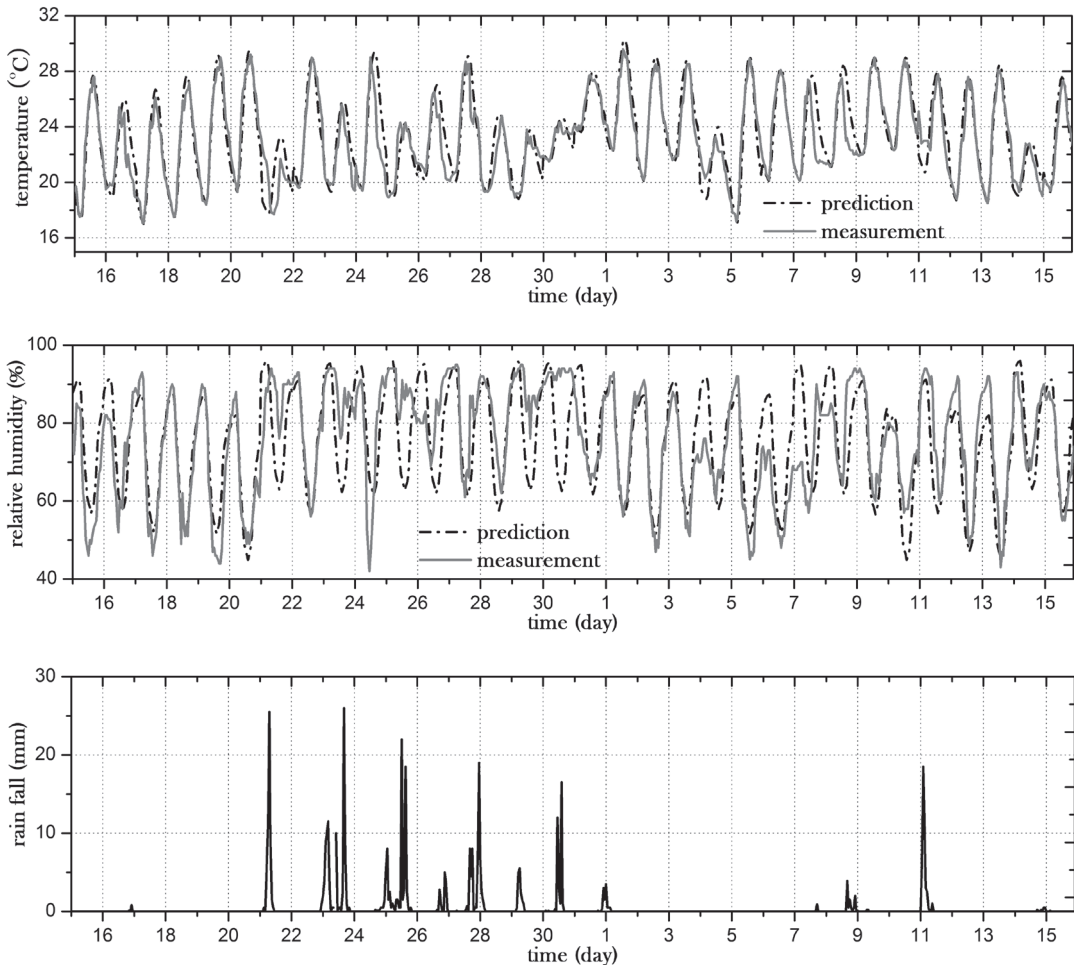
$$T_{es} = T_{avg} + T^* (T_{max} - T_{avg}) \quad (3)$$

마찬가지 방법으로 예측상대습도 상관식으로 구한 무차원 상대습도와 상관식의 기준점인 최고상대습도 최저상대습도를 식 (4)에 대입하면 하루

$$RH_{es} = RH_{avg} + RH^* (RH_{max} - RH_{avg}) \quad (4)$$



[그림 3] 5년간 월별 평균 상대습도 변화



[그림 4] 온도와 상대습도 실측치와 예측치의 비교

동안의 시간별 상대습도변화를 구할 수 있다.

여기서 RH_{es} 는 익일 예측상대습도이고, RH^* 는 상관식으로 구한 무차원 상대습도이며, RH_{max} 와 RH_{avg} 은 익일 최고상대습도와 평균상대습도이다.

그림 4는 2008년 7월 15일~8월 15일까지 한달 동안 대전지역의 예측한 온도와 상대습도를 실제 측정된 데이터와 비교한 것이며, 강수량을 함께 도시하였다. 예측온도와 실측온도는 매우 잘 일치하고 있으며, 여름 장마철로 인해 강수량이 집중적으로 기록된 기간에도 기대 이상으로 예측이 정확한 것을 알 수 있다. 상대습도의 경우는 맑은 날에는

예측값과 실측값이 잘 일치하고 있으나, 강수량이 많은 기간에는 예측값과 실측값이 약간의 차이를 보이고 있다.

냉방부하 예측 기술

건물의 냉방 수요를 원활히 충족하고, 에너지 절약적인 시스템이 되려면 냉방부하를 예측하고 그에 대응하여 냉방시스템을 제어함으로써 가능하다. 냉방부하의 계산방법은 연간을 통해 기후에 따라 끊임없이 변화하는 일정기간 동안의 부하

를 계산하는 기간부하계산법과 특정시간대의 최대부하를 계산하는 최대부하계산법이 있다. 먼저 기간부하는 합리적인 공조 설비의 계획과 연간 운전비를 산출하기 위해 각 지역별 난방도일 또는 표준기상자료를 사용하여 계절 또는 1년 동안에 발생하는 총 부하를 의미한다. 최대부하는 공조 설비의 용량을 결정하기 위해 연중 가장 추운 날 또는 더운 날로 가정된 설계용 외기온도를 이용하여 계산한다. 냉방부하를 계산할 때 일사의 영향을 고려한 실내외 온도차를 구하는 방법에는 CLTD(Cooling Load Temperature Difference)법, TETD(Total Equivalent Temperature Difference)법, ETD(Equivalent Temperature Difference)법 등이 있다. 이와 같은 방법으로 냉방부하를 계산하기 위해서는 냉방부하 계산 프로그램에 대한 전문적인 지식이 요구되며, 많은 입력 데이터와 계산시간이 소요된다. 냉방시스템의 냉방부하 예측제어는 정확한 계산을 필요로 하지 않으며, 하루 동안 냉방부하의 변화 추세와 냉방기간 동안 1일평균 냉방부하 변화 등과 같은 경향성이 중요하다. 본 기술의 특징은 비전문가도 누구나 손쉽게 사용할 수 있으며, 신뢰할 수 있는 정확도를 갖는 냉방부하 예측방법을 제시하는데 있다.

냉방부하는 유리와 벽체를 통과하는 태양복사열, 외기와 실내의 온도차에 의해 전달되는 전도열, 인체나 실내가구의 내부발생열, 침입공기와 환기에 의한 도입외기의 냉각감소열, 급기덕트의 손실을 포함한 기타부하 등이 있으며, 냉방부하는 현열부하와 잠열부하로 구분하여 다음과 같이 계산한다.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_{int} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l \quad (5)$$

여기서 \dot{Q} 는 냉방부하, \dot{Q}_{sol} 은 태양복사열, \dot{Q}_{cond} 는 전도열, \dot{Q}_{air} 는 침입외기와 도입외기에 의한 열, \dot{Q}_{int} 는 내부발생열과 기타 열부하, \dot{Q}_s 는 현열부하, \dot{Q}_l 은 잠열부하를 나타낸다. 상기 식으로 냉방

부하를 계산하기 위해서는 건물을 구성하는 모든 공간에 대해 4가지 부하를 각각 구하여 합산해야 하므로, 수백개 혹은 수천개의 건물설계 데이터가 필요하며 계산시간도 많이 소요된다. 이것을 단순화하여 4개의 건물설계 데이터만 가지고 냉방부하를 계산하는 것이 본 기술의 특징이다.

냉방부하 중 현열부하인 태양복사열과 전도열은 외기온도와 실내온도차에 따라 달라지고, 외기에 의한 현열은 도입외기의 양과 상태에 따라 달라지며, 내부발생현열과 기타 현열부하는 실내외 온도차에 민감하지 않으므로 위식의 냉방부하 중 현열부하는 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$\dot{Q}_s = P_s(T_o - T_i) + n_{ven} \dot{m}_a (h_{io} - h_i)(1 - e_s) + \dot{m}_{in} (h_{io} - h_i) + C_s \quad (6)$$

여기서 P_s 는 현열부하계수, \dot{m}_a 은 외기계수, C_s 는 현열부하상수로 명명하였으며, T_o 는 외기온도, T_i 는 실내온도, h_{io} 는 실내비습도와 외기온도가 만나는 점에서 공기의 엔탈피, h_i 는 실내조건에서 공기의 엔탈피, e_s 는 도입외기의 현열회수율을 나타낸다. 유사한 개념으로 상기 수학적식의 냉방부하 중 잠열부하를 도입외기의 양과 상태에 따라 상수항으로 구분하여 나타내면 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$\dot{Q}_l = n_i \dot{m}_a (h_o - h_{io})(1 - e_i) + \dot{m}_l (h_o - h_{io}) + C_l \quad (7)$$

여기서 \dot{m}_a 은 외기계수, C_l 은 잠열부하상수로 명명하였으며, h 는 외기조건에서 공기의 엔탈피, h_{io} 는 실내비습도와 외기온도가 만나는 점에서 공기의 엔탈피, e_i 는 도입외기의 잠열회수율이다. 건물의 설계자료에서 설계현열부하 $\dot{Q}_{s,d}$, 외기계수 m_a , 현열부하 상수를 구하고, 외기설계 온도 $T_{o,d}$, 실내 설계온도 $T_{i,d}$, 실내설계비습도와 외기설계온

도가 만나는 점에서 공기의 엔탈피 $h_{i,o,d}$, 실내설계 조건에서 공기의 엔탈피를 아래 식에 대입하면 현 열부하계수 P_s 를 구할 수 있다.

$$\dot{Q}_{s,d} = P_s(T_{o,d} - T_{i,d}) + \dot{m}_f(h_{i,o,d} - h_{i,d}) + C_s \quad (8)$$

유사한 방법으로 설계잠열부하 $\dot{Q}_{l,d}$, 외기계수 \dot{m}_a 를 건물의 설계자료에서 구하고, 외기 설계조건에서 공기의 엔탈피 $h_{o,d}$ 와 실내설계비습도와 외기설계 온도가 만나는 점에서의 공기의 엔탈피 $h_{i,o,d}$ 를 아래 식에 대입하면 잠열부하상수 C_l 을 구할 수 있다.

$$\dot{Q}_{l,d} = \dot{m}_f(h_{o,d} - h_{i,o,d}) + C_l \quad (9)$$

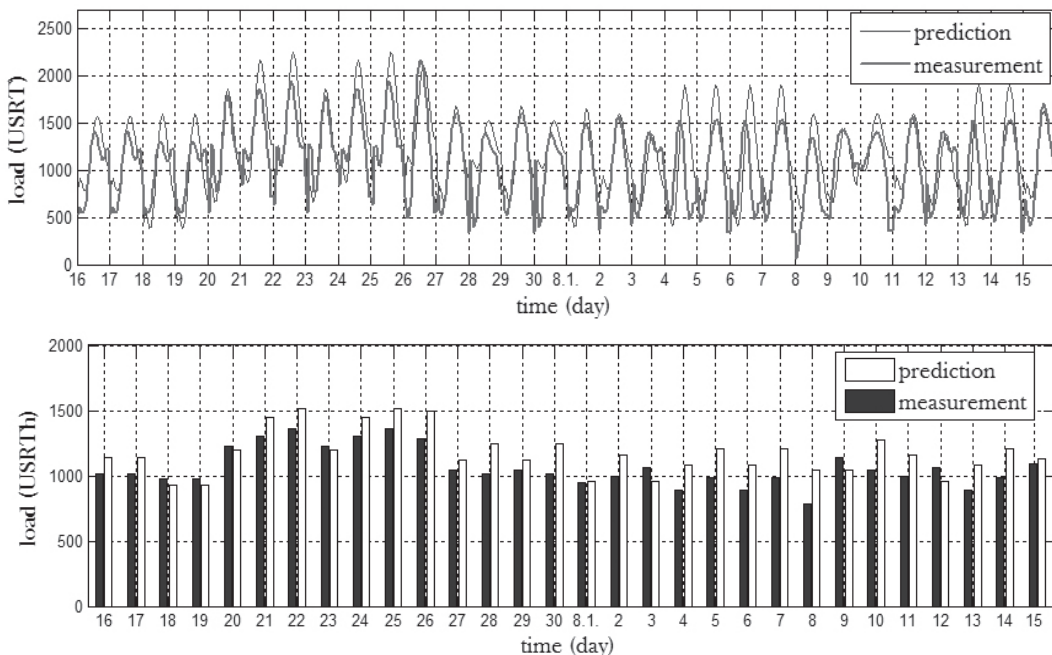
한편, 잠열부하상수 C_l 는 건물 설계자료로부터 직접 구할 수도 있다.

이러한 방법으로 예측되는 냉방부하의 정확성을 검증하기 위해 실제 건물에 냉방부하를 공급하

는 시스템에 적용해 보았다. 그림 5는 건축연면적 93,854.7, 지하 3층, 지상 15층으로 이루어진 대전 지역 내의 대형 종합병원 건물에 냉방부하 예측을 한 달간 적용해본 결과이다. 예측된 냉방부하의 정확성을 검토하기 위해 실제 건물의 냉방시스템 열원의 공급부하와 비교해 본 결과 시간별 예측 냉방부하 분포는 실측부하 분포와 매우 잘 일치하였으며 1일 총부하량의 예측치와 실측치 사이의 오차는 7.7%로 정량적으로도 정확한 예측 결과를 보여주었다.

냉방시스템 최적제어 기술

시간별 냉방부하를 예측하는 궁극적인 목적은 예측된 부하 프로파일을 통해 가장 효율적이고 경제적인 최적화된 냉방시스템 운전 전략을 수립하기 위함이다. 즉 냉방부하를 예측하고 이에 따라 운전비용을 최소화할 수 있는 최적화 기법을 적용하



[그림 5] 종합병원 건물에 적용한 시간별, 일별 냉방부하 예측

〈표 1〉 현재 우리나라 전력요금 현황

구분		기본요금(원/kW)	전력량요금(원/kWh)			
			시간대	여름철(7~8월)	봄, 가을철(4~6,9월)	겨울철(10~익년3월)
고압A	선택 I	5,320	경부하	42.50	42.50	42.50
			중간부하	85.30	63.50	79.50
			최대부하	146.40	85.30	106.80
	선택 II	6,120	경부하	38.30	38.30	38.30
			중간부하	81.10	59.40	74.40
			최대부하	142.50	81.10	101.70
고압B	선택 I	5,320	경부하	41.20	41.20	41.20
			중간부하	82.50	61.50	77.10
			최대부하	141.40	82.50	103.40
	선택 II	6,120	경부하	37.00	37.00	37.00
			중간부하	78.50	57.50	72.50
			최대부하	137.40	78.50	98.30

여 운전함으로써 운전비용을 절감할 수 있을 것이다. 표 1과 2에서 보는 바와 같이 우리나라의 전력요금과 가스요금 체계는 복잡한 구조를 가지고 있다. 동일량의 에너지를 사용하더라도 계절별, 시간대별로 다른 요금을 지불해야 한다. 즉 경제적인 냉방시스템 운전을 위해서는 에너지원의 다원화 및 다각적인 검토를 하여 에너지 정책 제도적인 혜택을 통해 에너지 원단위를 최소화할 수 있는 전략으로 운전하는 것이 바람직하다.

다양한 열원으로 구성된 냉방시스템을 최적으로 운전하기 위해서는 이미 냉방운전이 시작되기 이전에 운전계획을 수립하여야 하며, 냉방 운전기간에 해당하는 시간 동안의 냉방부하가 미리 예측되어야 한다. 최적운전계획을 위해서 모든 시스템의 시뮬레이션은 임의의 시간간격으로 분할한 상태에서 계산하며, 건물 냉방부하는 독립변수로 고려한다. 시간에 따라 일정 간격으로 분할한 형태로써 하루 중 운전비용을 최소화시키려는 최적화 문제는 다음과 같은 목적함수로 표현된다.

$$J(k) = \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^N E(k,n)C(k,n)\beta(k,n)\Delta t \quad (10)$$

〈표 2〉 도시가스 요금체계 (단위: 원/m³, 부가세별도)

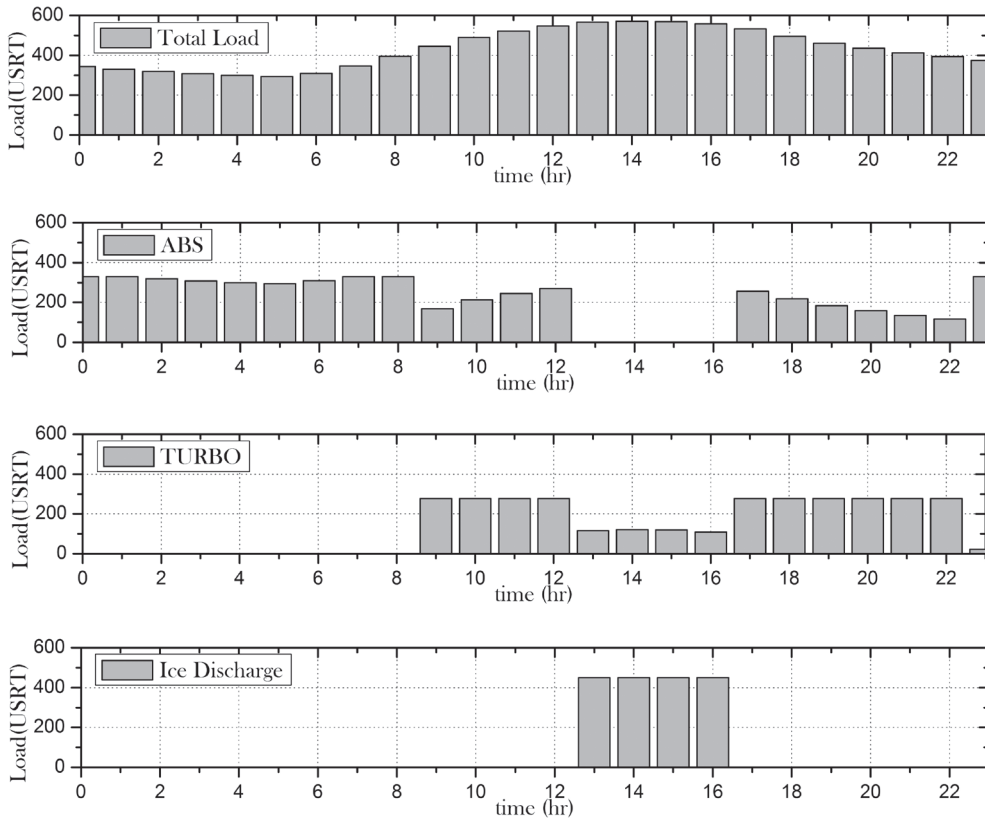
구분	도매요금
주택·난방용	601.55
일반용	545.92
냉방용	365.28
산업용	526.63

위 식에서 $J(k)$ 는 임의의 시간 k 에서의 총 에너지 비용을 나타내며, $E(k,n)$ 는 임의의 시간 k 에서 임의의 열원 n 이 감당하게 될 에너지 소비율이고, $C(k,n)$ 는 각 열원에 해당하는 표 1과 2에서와 같은 전기 및 가스 요금이며, $\beta(k,n)$ 은 열원별 성능계수를 의미한다. 한편, 시스템에 필요한 제한조건은 다음과 같이 설정하였다.

$$\sum_{n=1}^N E(k,n) = E_p(k) \quad (11)$$

$$E_{nom}(n) \geq E(k,n) \geq E_{min}(n) \quad (12)$$

식 (11)의 의미는 어떤 순간 k 에서의 모든 열원들의 에너지 소비율의 합은 예측된 냉방부하 $E_p(k)$ 와 같아야 한다는 것이다. 식 (12)는 임의의 열원이



[그림 6] 예측 냉방부하에 대한 냉방시스템의 열원별 최적운전

공칭용량 $E_{nom}(n)$ 을 초과할 수 없고, 시스템의 성능 및 안정성을 위해 최소용량 $E_{min}(n)$ 이상으로 운전되어야 함을 의미한다. 따라서 해당 열원의 공칭용량 및 최소용량은 열원 제작사에서 제시하는 값을 이용할 수 있고, $\beta(k,n)$ 은 열원의 성능곡선으로부터 추정할 수 있다.

위에서 제시한 제한조건을 만족시키는 동시에 운전비용을 최소화하는 문제는 선형탐색(Linear Search) 문제로 정의할 수 있다. 즉 M단계를 갖는 전과과정에서 임의의 시간 k단계에서 시간 $t=k\Delta t$ 에서의 최적운전값을 결정하는 것은 N개의 열원으로 구성된 시스템의 운전을 순차적으로 결정하는 과정이기 때문이다. 이러한 선형탐색 문제를 최적화하기 위해 동적계획법(Dynamic Programming)을

선택했으며, 함수 방정식은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$f(s) = \min C(x | S) + f(S-x) \tag{13}$$

여기서 열원 요소 x 로 이루어진 전체 열원 시스템집합 S 에 대하여 $C(x | S)$ 는 식 (13)에 열원 x 를 대입했을 때의 가격함수이며, $f(s)$ 는 최적경로에 의한 비용을 나타낸다. 따라서 순차적 결정 x 를 제외한 집합 $\{S-x\}$ 에 대해 재귀적 순환을 통하여 최소비용을 나타내는 각 시간단계별 열원 용량이 결정되어지게 된다. 이러한 과정은 식 (11)과 (12)의 제한조건을 모두 만족하여야 한다.

그림 6은 4개의 개별 건물로 구성된 연구소 건

물에 냉방부하를 공급하는 냉방시스템에 본 최적화 기법을 적용해 본 결과이다. 냉방시스템의 공급부하는 심야전력을 이용하는 빙축열조의 방냉, LNG를 열원으로 하는 흡수식 냉동기, 전력을 열원으로 하는 터보 냉동기로 구성되어 있다. 적용한 냉방시스템으로부터 부하를 공급받는 건물들은 정밀 실험실이 위치한 건물로서 24시간 냉방이 필요할 뿐만 아니라 4월~10월까지 지속적으로 냉방이 필요한 건물이기도 하다. 최적제어가 적용된 냉방시스템은 빙축열 시스템으로 구성되어 있기 때문에 전력요금이 가장 비싼 최대부하 요금 시간대인 13

시~17시까지 축냉조의 방냉을 통해 냉방을 공급하는 운전을 하고 있으며, 그 외 주간 시간은 산업용 전력을 열원으로 하는 터보식 냉동기에 의해 운전되고 있음을 볼 수 있다. 또한 야간부하는 빙축열시스템의 축냉운전으로 인해 터보냉동기를 이용한 냉방이 불가능 하므로 흡수식 냉동기가 야간 냉방을 공급하고 있음을 볼 수 있다. 이와같은 결과는 여름철 최고외기온도가 30℃ 이상일 경우, 전력수요가 집중되는 7월, 8월의 최적운전 스케줄링 방법으로 볼 수 있다. 