

건물예냉과 실내온도의 선형상승에 의한 피크냉방수요 저감

이 경 호[†], 양 승 권, 한 승 호
한국전력공사 전력연구원

Reducing Peak Cooling Demand Using Building Precooling and Modified Linear Rise of Indoor Space Temperature

Kyoung-ho Lee[†], Seung-kwon Yang, Seung-ho Han
KEPRI, KEPCO, 65 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-380, Korea
(Received October 12, 2009; revision received December 18, 2009)

ABSTRACT: The paper describes development and evaluation of a simple method for determining gradient of modified linear setpoint variation to reduce peak electrical cooling demand in buildings using building precooling and setpoint adjustment. The method is an approximated approach for minimizing electrical cooling demand during occupied period in buildings and involves modified linear adjustment of cooling setpoint temperature between 26 °C and 28 °C. The gradient of linear variation or final time of linear increase is determined based on the cooling load shape in conventional cooling control having a constant setpoint temperature. The potential to reduce peak cooling demand using the simple method was evaluated through building simulation for a calibrated office building model considering four different weather conditions. The simple method showed about 30% and 20% in terms of reducing peak cooling demand and chiller power consumption, respectively, compared to the conventional control.

Key words: Building precooling(건물예냉), Cooling load(냉방부하), Space cooling setpoint temperature(건물냉방설정온도), Building energy simulation(건물에너지 시뮬레이션)

기 호 설 명

- C : 열용량(thermal capacitance)
- $modLR$: 수정된 선형의 온도상승(modified linear rise)
- M : 일정한 실내설정온도에서의 냉방부하에 대한 미분방정식의 계수
- N : 일정한 냉방부하를 갖도록 하는 온도에 대한 미분방정식의 계수
- NS : 밤 시간대에 설정온도를 올려주는 냉방 운전방식(night-setup)

- PC : 건물예냉(precooling)
- Q : 열전달율(heat transfer rate)
- R : 열저항(thermal resistance)
- SU : 계단형태의 온도상승(step-up)
- T : 온도(temperature)
- t : 시간(time)

위첨자

- * : 냉방설정온도에 대한 수정된 선형방식을 적용하기 위한 선형증가의 최종시간

아래첨자

- d : 두꺼운 구조체 노드(deep mass node)와

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-865-5392; fax: +82-42-865-5919

E-mail address: leekh@kepri.re.kr

- 얇은 구조체 노드(shallow mass node) 사이
- g,c : 대류에 의한 열취득(convective gain)
- g,r : 복사에 의한 열취득(radiative gain)
- m,d : 건물 구조체 중 실내공기와 접하지 않는 두꺼운 부분의 열회로 노드(deep mass)
- m,s : 건물 구조체 중 실내공기와 접하는 얇은 두께 부분의 열회로 노드(shallow mass)
- s : 얇은 구조체 노드와 실내 공기노드 사이
- z : 건물 실내공기 존 노드(building zone)
- z,s : 건물 실내공기 존에 작용하는 현열전달

1. 서 론

건물의 최대전력수요는 전력요금 중 기본요금에 영향을 미치게 되며, 주로 여름철에 최대전력수요가 나타나므로 건물 냉방부하로 인한 전력수요 저감을 통하여 건물 최대전력수요를 감소하는데 크게 기여할 수 있다. 최근에는 유가의 급등으로 냉방에너지절감을 위하여 건물 실내 냉방설정온도를 26℃ 이상으로 높여 설정하도록 권장되고 있다.⁽¹⁾

실내온도를 제어함으로써 하루 중 짧은 특정 시간대의 피크냉방부하를 저감시키기 위하여 Lee and Braun⁽²⁾에 의하여 건물에 대한 인버스모델(Inverse model)기법으로 건물모델을 구하여 시뮬레이션을 통한 실내온도제어 알고리즘 개발에 대한 연구가 이루어진 바 있다. 또한 Lee and Braun⁽³⁻⁴⁾은 하루 중 오후시간대의 피크 냉방수요를 최소화하기 위한 간단한 방법으로서 세 가지 방법을 제안하였다. 이 중 데이터를 기반으로 한 WA(Weighted-Averaging) 기법은 매우 단순하면서도 피크부하저감 성능이 가장 우수하였다. 그러나 WA법은 하루 중 매우 짧은 시간대의 실내온도와 냉방부하간의 선형성에 대한 가정을 전제로 한 방법이므로, 하루 전체 냉방기간에 걸쳐서 적용하는 데는 적합하지 않을 수 있다.

본 논문은 건물의 전체 냉방시간대에 걸쳐 최대전력수요를 저감하기 위한 방법으로 냉방으로 인한 전력부하를 최소화하기 위한 간단하면서도 실용적인 기법을 제안하고자 한다. 실내 냉방온도 조절을 통하여 냉방으로 인한 피크전력수요의 저감효과를 증대시키기 위하여 새벽에 실내설정온도를 낮추어 건물을 예냉하고, 냉방시간대에는 건물 냉방설정온도를 건물별로 다르게 적용가능한 기술을 갖는 선형의 방식으로 높여줌으로써 피크냉방부하를 저감시키는 방법을 제안하며, 그 성

능을 EnergyPlus⁽⁵⁾로 모델링한 건물의 시뮬레이션을 통하여 평가하였다.

2. 피크냉방부하 저감 알고리즘

2.1 냉방설정온도와 냉방부하

건물과 주변 환경은 열적으로 상호작용을 이루고 있다. 건물의벽과 창문을 통한 태양복사열, 외기온도와 실내공기의 온도차에 의한 열전도와 실내벽면과 실내공기간의 열대류, 외기온도의 실내 침입 등과 같은 요인으로 열부하가 발생한다. 냉방부하는 실내의 환경을 원하는 온도와 습도로 맞추기 위하여 건물실내에 전달된 이와 같은 열을 에어컨이나 냉방시스템 등이 건물 밖으로 그 열을 이동시켜야 할 열적인 부하이다. 그러므로 실내공기의 설정온도는 냉방부하에 영향을 미치는 매우 중요한 요소라고 할 수 있으며, 이를 조절함으로써 냉방부하 조절이 가능하다. 한편, 건물의 벽체는 열용량을 가지고 있어, 현열형태로 열에너지를 저장할 수 있으며, 냉방부하의 시간지연 효과를 갖게 된다. 즉, 열용량이 큰 건물일수록 최대부하는 더 작아지게 된다. 냉방설정온도를 가변시켜 이러한 건물이 가지고 있는 축냉효과를 이용할 수 있으며, 그 중 한 방법으로는 밤 시간대에 실내설정온도를 낮춤으로써 건물 내벽면의 온도를 낮추어 축냉효과를 갖도록 한 후, 냉방시간대에는 냉방온도를 상승시켜 실내로 유입한 열에너지를 벽체에서 흡수하도록 하여 냉방부하를 낮추는데 이용하는 것이다.

본 논문에서의 피크냉방부하 저감 알고리즘은 냉방시간대 이전의 새벽시간대에 건물의 실내온도를 설정조건인 하한온도값으로 낮추어 미리 냉방을 실시하는 건물예냉(Building precooling)운전 단계와 냉방시간대에 설정온도를 설정조건인 상한온도값까지 적절히 상승조절하는 설정온도상승운전 단계로 나누어진다. 특히, 본 논문에서 제안하는 방법은 설정온도상승운전 단계에서 선형으로 증가하는 설정온도의 기울기 결정 방법에 대한 것이다.

2.2 피크냉방부하 저감을 위한 설정온도

건물의 열적인 모델을 실내공기와 접하고 있는

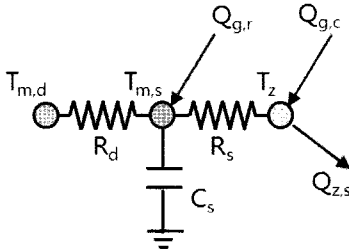


Fig. 1 Simplified building thermal network model.⁽⁷⁾

얇은 두께(Shallow mass)의 구조체 부분과 그 외의 나머지 두꺼운 구조체(Deep mass)부분으로 나누어 열저항과 열용량으로 구성된 열회로로 모델링하여 Fig. 1과 같이 열적 노드, 열저항, 열용량 등으로 단순화하여 표현할 수 있다.^(6,7) 얇은 두께의 구조체는 열용량(C_s)이 작아 시간에 따라 온도가 달라지는 동적 특성을 갖지만, 두꺼운 구조체 부분은 온도가 거의 일정하다고 가정할 수 있을 것이다. 얇은 구조체 노드($T_{m,s}$)에는 태양복사 등으로 인한 복사열전달로 인한 열취득($Q_{g,r}$), 실내공기 노드(T_z)에는 대류열전달에 의한 열취득($Q_{g,c}$)과 냉방시스템에 의하여 실내에서 제거하는 부하($Q_{z,s}$)를 고려한다.

열노드 $T_{m,s}$ 와 T_z 에 열평형방정식을 각각 적용하면 다음과 같다.

$$C_s \frac{dT_{m,s}(t)}{dt} = \frac{T_{m,d} - T_{m,s}(t)}{R_d} + \frac{T_z(t) - T_{m,s}(t)}{R_s} + Q_{g,r}(t) \quad (1)$$

$$0 = \frac{T_{m,s}(t) - T_z(t)}{R_s} + Q_{g,c} - Q_{z,s}(t) \quad (2)$$

위 식에서 $Q_{g,c}$ 는 대류에 의한 실내공기의 열취득으로서, 냉방시간대에 걸쳐서 일정하다고 가정한다.

실내 온도가 일정한 상태로 유지되는 통상의 냉방운전의 경우, $T_z =$ 일정하다고 볼 수 있으며, 식(2)를 시간에 대하여 미분하면 다음이 된다.

$$\frac{dT_{m,s}(t)}{dt} = R_s \frac{dQ_{z,s}(t)}{dt} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)으로부터 식(1)의 $T_{m,s}$ 를 소거하여 정리하면 다음과 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dQ_{z,s}(t)}{dt} = M_1 Q_{z,s}(t) + M_2 \frac{dQ_{g,c}(t)}{dt} + M_3 Q_{g,c}(t) + M_4 Q_{g,r}(t) + M_5 \quad (4)$$

위 식에서 M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 는 상수항이며, 부록에 그 표현식을 나타내었다. 냉방부하에 대한 초기조건을 적용하여 식(4)에 대한 해를 구하면, 실내온도가 일정하게 유지되는 조건에서 냉방부하의 시간에 따른 변화를 구할 수 있다.

한편, 냉방부하를 일정하게 유지하면서 피크냉방부하를 최소화하고자 하는 냉방운전의 경우, 식(2)에서 냉방부하 $Q_{z,s} =$ 일정으로 두고, 식(2)를 시간에 대하여 미분한 후에 앞서와 같은 방식으로 정리하면, 다음과 같이 실내온도에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dT_z(t)}{dt} = N_1 T_z(t) + N_2 \frac{dQ_{g,c}}{dt} + N_3 Q_{g,c}(t) + N_4 Q_{g,r}(t) + N_5 \quad (5)$$

위 식에서 N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 는 상수항이며, 부록에 그 표현식을 나타내었다. 실내온도조건에 대한 초기조건을 식(5)에 적용하여 해를 구하면, 일정한 냉방부하로 피크냉방부하를 최소화하기 위한 실내온도의 시간에 따른 변화 즉 냉방설정온도에 대한 해를 구할 수 있다.

식(4)와 식(5)를 비교하면, 동일한 형태의 미분방정식이며 해의 형태가 유사함을 의미하는 것이다. 바꾸어 말하면, 피크냉방부하를 최소화하기 위한 냉방설정온도인 식(5)의 해와 실내온도가 일정한 상태에서 발생하는 냉방부하인 식(4)의 해는 동일한 함수형태를 갖게 될 것이다. 통상의 일정한 냉방운전에서는 일정한 설정온도를 갖으며, 이에 따른 냉방부하 형태로부터 피크냉방부하 최소화를 위한 냉방설정온도의 형태를 정성적으로 유사한 형태로써 추정할 수 있을 것이다. 즉, 피크냉방부하를 최소화하기 위해서는 기존 운전방식의 냉방부하를 참조하여 냉방부하가 증가하는 시간대에는 설정온도를 증가시켜주고, 냉방부하가 감소하는 시간대에는 설정온도를 감소시켜주는 것이

필요하다. 다만, 설정온도를 감소시켜주지 않고 일정하게 유지하도록 하여 냉방부하가 오히려 증가하는 가능성을 배제시킬 필요는 있다.

Braun and Lee⁽⁷⁾은 냉방부하를 최소화하기 위한 냉방설정온도의 변화체적을 표현하는 지수함수형태의 간단한 방정식을 유도하였으며, 그 성능을 시뮬레이션으로 검증하여 피크냉방부하를 저감하는데 매우 효과적임을 밝혀내었다. 지수함수를 갖는 방정식의 형태를 결정짓는 것은 시정수 파라미터이었으며, 건물의 열적 특성에 따라 달라지는 값으로서 건물마다 그 값을 결정하는 것이 용이하지 않아 반복적인 방법 등의 특별한 절차가 필요하다.

본 논문에서는 지수형태의 실내설정온도 형태를 더욱 선형으로 단순화하여 선형의 기울기 결정만을 필요로 하는 방법을 제안하고자 한다. Fig. 2에 냉방부하의 형태와 선형으로 이로부터 피크냉방부하를 최소화하기 위한 실내 설정온도를 근사적으로 결정하는 방법에 대한 개략적인 개념을 나타내었다.

Fig. 2의 상단부의 그림은 통상의 냉방운전인 일정한 실내온도 조건에서의 냉방부하 형태를 나타내었고, 하단부에는 일정한 냉방부하를 갖도록 하기 위한 설정온도 솔루션으로서 지수함수적으로 증가하는 온도변화를 실선으로 표시하였다. 선형의 온도변화로 근사화하는 방법은 점선으로 나타

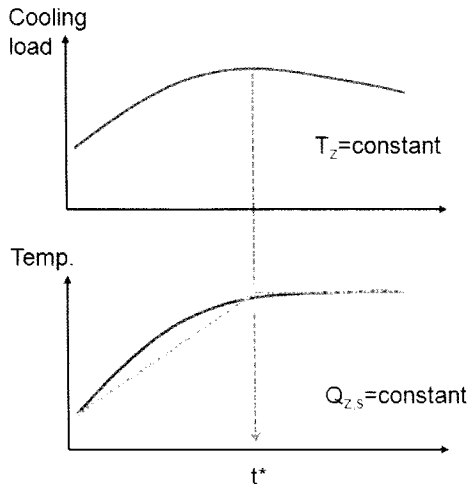


Fig. 2 Schematic diagram for determining approximated setpoint variation to reduce peak cooling demand.

낸 것과 같이 t^* 까지 선형으로 증가하다가 상한값에 도달한 이후에는 상한온도를 유지하도록 하는 것이다. t^* 의 시점은 통상의 냉방부하가 감소하기 시작하는 시점과 동일하게 결정한다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 일정한 실내온도에서의 냉방부하곡선과 일정한 냉방부하를 위한 실내온도곡선의 형태가 유사하다는 것으로부터, 솔루션의 변화가 상한값에 도달하여 일정하게 유지되는 시점과 t^* 가 거의 형태상으로 일치한다는 접근법을 기반으로 한다.

본 논문에서 제안하는 건물에너지 이후에 실내설정온도를 수정된 선형방식으로 증가시켜 피크냉방부하를 저감시키기 위한 접근법에서, 설정온도를 결정하기 위한 방법은 다음의 3가지 규칙으로 정리할 수 있다.

- 규칙(1): 냉방시간대에 걸쳐 실내설정온도의 변화는 냉방설정온도 하한값과 상한값의 범위 내에서 하나의 기울기를 갖는 선형이다.
- 규칙(2): 선형의 기울기를 결정하기 위해서는 일정한 설정온도를 갖는 냉방방식으로 운전하였을 경우의 더운 여름철 냉방부하를 참조하여 냉방부하가 감소하는 시간대의 초기시각을 선형증가구간의 최종시각(t^*)으로 결정하고, 이후에 냉방설정온도는 정해진 상한온도를 유지한다.
- 규칙(3): 건물에너지 직후의 냉방시간대 초기시점에서는 종래 냉방방식의 냉방부하 형태에 무관하게 선형증가를 시작한다. 이것은 밤 시간대에 누적된 열량을 제거하기 위하여 냉방시간대 초기에 발생하는 냉방부하(Pick-up load)에 의한 영향을 배제하기 위한 것이다.

이상의 내용을 요약하면, 피크냉방부하를 저감시키기 위한 온도조절방법으로서 본 논문에서 제안하는 방법은 통상의 냉방부하곡선을 통하여 냉방부하가 감소하는 시점을 찾아낸 후, 피크냉방부하 저감을 위한 운전을 행할 때 설정온도를 그 시점까지 선형의 형태로 점진적으로 증가한 후에 상한선 도달 후에는 상한온도에서 유지시켜 주는 방법으로서, 건물부하의 모델을 구하기가 용이하지 않고 종래 냉방부하에 대한 데이터가 있는 경우에 용이하게 적용가능하다.

3. 건물 시뮬레이션 방법 및 결과

3.1 시뮬레이션 방법

본 논문에서는 냉방설정온도 조절에 의한 효과 분석을 위하여 건물에너지 시뮬레이션을 이용하였으며, 프로그램은 EnergyPlus⁽⁵⁾ 건물 동적 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하였고, 기후 데이터는 EnergyPlus 프로그램 사용을 목적으로 미국 에너지부(DOE)에서 제공하는 기후데이터를 사용하였다. 대상건물 모델로는 기존 연구에서 Energy Plus 건물모델 성능을 검증한 건물을 대상으로 하였다.⁽⁸⁾ 대상건물은 공공용도의 사무용 건물이며, 건물바닥면적은 3,720 m²의 주로 콘크리트로 지어진 3층 건물로서 벽면과 창문 면적비는 0.67로 남향이고, 내부 조명 및 전기기기에 의한 열취득은 5.4 W/m² 수준이다.

건물 냉방은 6월부터 9월까지로 하였으며, 냉방 피크전력수요 저감이 필요한 시기는 일반적으로 냉방부하관리기간인 7월 중순부터 8월 중순까지의 1개월로 설정하여, 1개월 동안의 냉방용 냉동기의 피크전력수요와 전력소비량을 비교하였다. 냉방기간 중 토요일과 일요일은 휴무로 적용하였다.

기후가 다른 지역에 대한 시뮬레이션을 위하여 기후데이터는 EnergyPlus 시뮬레이션용으로 제공되는 한국의 지역 4곳 울산, 강릉, 인천, 광주에 대한 기후데이터를 이용하여 각각 시뮬레이션하였다. 또한, 본 논문에서 제안하는 방법은 냉방부하의 형태를 통하여 냉방설정온도의 기울기를 결정하므로 냉방부하형태가 상이한 경우에 대한 검토를 위하여 냉방시간대를 수정하여 냉방부하의 형태가 다르게 나타나도록 하여, 냉방부하가 오후 시간대에 걸쳐서 계속적으로 증가하는 형태를 갖도록 한 경우를 추가로 고려하였으며, 이러한 경우는 건물의 서향에 창문이 있거나, 오후에 실내 열취득이 지속적으로 증가하는 경우가 해당될 수 있을 것이다.

실내설정온도와 관련하여 설정치의 하한온도는 최근에 정부에서 권장하고 있는 26℃이상의 실내 냉방설정온도로 하였고,⁽¹⁾ 비교기준조건(Baseline)으로서의 운전방식에서는 냉방설정온도를 26℃로 하였다. 건물벽체의 열저장효과를 이용하여 피크 냉방전력수요와 에너지 소비를 저감하기 위한 운전방식에서는 실내온도설정을 건물 거주시간대 이

전의 새벽에는 권장 하한온도 26℃로 설정하여 4시간 동안 유지하여 실내 내벽체를 차갑게 하여 둔 후, 오전 9시부터 오후 6시까지의 냉방시간대에는 수정된 선형상승의 온도조절을 적용한다. 이 방식과의 비교를 위한 운전방식들로는 야간과 새벽에는 냉방을 하지 않고 냉방시간대에 걸쳐서 냉방설정온도를 26℃, 27℃, 28℃로 일정하게 하는 경우로서 각각 NS(26), NS(27), NS(28)이며, 새벽에 4시간 동안 26℃로 냉방 후 냉방시간대의 초기시각인 오전 9시에 28℃로 재설정하는 경우로서 PC(26)+SU(28)을 벤치마킹 대상의 운전방식으로서 포함하였다. 여기에서 PC는 건물예냉(Precooling), SU는 계단식 증가(Step-Up), modLR은 수정된 선형 증가(modified Linear-Rise)의 약자로 사용하였다. Fig. 3에 NS(26), NS(27), NS(28), PC(26)+SU(28), PC(26)+modLR(28)을 나타내었다. 괄호안의 숫자는 설정온도조건을 나타낸다. 즉, PC(26)은 26℃로 건물을 예냉한다는 의미이며, SU(28)과 modLR(28)에서는 설정온도의 상한값이 28℃임을 나타낸다. 본 논문에서 설정온도 조절의 범위는 26℃와 28℃의 사이로 하였으므로, 이후로는 PC+SU, PC+modLR로써 표기하기로 한다.

PC+SU 방식은 냉방시간대에 걸쳐 설정온도는 NS(28)과 동일하지만, 냉방시간대 이전의 새벽에 26℃로 실내를 차갑게 해두기 때문에 냉방시간대 초기에는 28℃보다 낮은 상태에서 어느 정도 유지될 수 있어 NS(28)보다는 쾌적도 측면에서 더 유리할 수 있지만 1~2시간 이후에는 급격하게 실

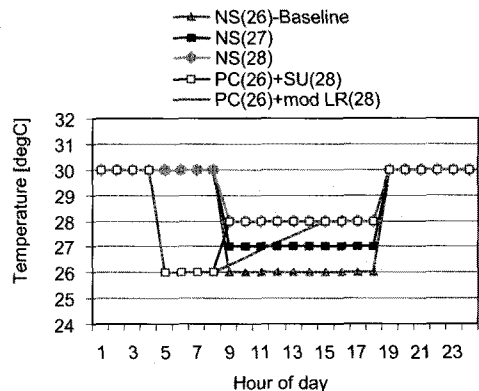


Fig. 3 Building space setpoint variation with different control strategies.

내온도가 상승하여 28℃에 도달하게 되므로 냉방 시간대 대부분의 시간은 28℃를 유지하게 된다고 볼 수 있다. 이에 비하여 PC+modLR의 경우 냉방 시간대의 대부분이 28℃보다 낮은 온도로서 조절되어 PC+SU보다 실내 열환경적인 측면에서 더욱 쾌적할 것이므로 실내 거주자가 받아들이기에 더 유리한 제어방식이라고 할 수 있다.

3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 대상건물에 대한 EnergyPlus 모델에 대하여 국내의 강릉, 인천, 광주, 울산 등 4개 도시지역의 기후데이터로 냉방시뮬레이션을 수행하였다. 냉방운전조건은 앞서 설명한 바와 같이 NS(26), NS(27), NS(28), PC+SU, PC+modLR의 5가지 방식을 적용하였다. Fig. 4에 울산의 기후데이터로 시뮬레이션한 더운 여름철 하루의 냉동기 전력부하를 서로 다른 운전조건에 대하여 비교하였다. 사용된 냉방설정온도의 변화는 Fig. 3과 동일하다. NS(26)조건에 따른 냉방부하변화에서 오후 3시부터 감소하는 경향을 나타내므로, modLR기법을 적용한 냉방설정온도는 오후 3시를 t^* 로 결정하였다. 그러므로 Fig. 3에서 PC+modLR에 대한 냉방설정온도에서 나타낸 바와 같이 오전 9시부터 선형으로 증가시키고, 기온기는 오후 3시에 28℃에 도달하도록 결정하였다. Fig. 4에 나타낸 냉동기의 전력수요를 살펴보면, NS(26), NS(27), NS(28)과 같이 냉방설정온도를 높일수록 냉방부하가 전반적으로 감소함을 알 수가 있다. 또한 건물에

냉 후에 설정온도변경방식인 PC+SU, PC+modLR의 경우에 새벽의 예냉으로 인한 냉방부하가 발생하였고, PC+SU의 경우 오전 9시에 설정온도를 28℃로 재설정하였을 때에는 냉방부하가 급격하게 감소하였지만, 다시 급격히 증가하는 경향을 나타내 결국 피크전력부하는 NS(28)에서의 피크부하에 근접하게 된다. PC+modLR 운전방식에서는 다른 운전방식에 비하여 냉방시간대에 걸쳐서 부하가 더욱 평활화한 형태를 나타내었다.

강릉, 인천, 광주지역의 기후데이터를 이용한 시뮬레이션에서도 냉동기 냉방소비전력에 있어서 Fig. 4와 유사한 결과를 나타내었다.

7월 중순부터 8월 중순까지의 1개월간에 걸친 연중 냉동기의 피크전력수요와 전력소비량을 운전방식에 따라서 Fig. 5에 비교하였다. 시뮬레이션 결과, PC+modLR의 운전에서의 피크전력부하가 가장 낮게 나타났으며, NS(26)를 비교기준으로 울산, 강릉, 인천, 광주에 대하여 각각 37%, 39%, 34%, 29% 정도의 피크냉방전력부하 저감효과를 나타내었다. PC+SU와 비교하면 8%, 1.2%, 2.4%, 7.3% 정도 추가의 피크전력부하 저감효과가 있는 것으로 계산되었다. 한편, 막대로 표시한 전기에너지 소비량을 비교하면, 가장 낮은 전기에너지소비량은 NS(28)이었으며, 다음으로 PC+SU와 PC+modLR의 순으로 나타났다. PC+modLR 운전에서의 전기에너지 소비량은 NS(27)보다는 낮고 NS(28)보다는 높은 수준이었다.

정리하면, 피크냉방전력부하를 저감하기 위한 운전방식으로 가장 효과가 큰 것은 PC+modLR이었으며, 전기에너지소비량 측면에서는 NS(28)에서 가장 절감효과가 크게 나타났으며, PC+modLR 방식의 전기에너지소비량은 NS(28)과 PC+SU보다는 다소 높게 나타났다. 28℃를 온도상한값으로 한 PC+modLR에서는 냉방시간대의 대부분은 28℃보다 낮은 온도를 유지하므로, NS(28)과 PC+SU와 비교하여 실내 쾌적성 관점에서 상당함을 더 올릴 수 있는 여지가 있다. 즉, PC+modLR기법을 적용하므로써 실내온도 상한값을 더 올릴 수 있는 가능성을 더 높혀주어 피크냉방수요를 저감하는 효과를 더욱 증대시키면서 실내 쾌적성측면에서는 NS(28)이나 PC+SU와 유사하거나 더 나을 수 있을 것이다.

Fig. 6에는 울산, 강릉, 인천, 광주에 대한 1개월간의 일간 피크냉방전력부하를 NS(26), PC+SU,

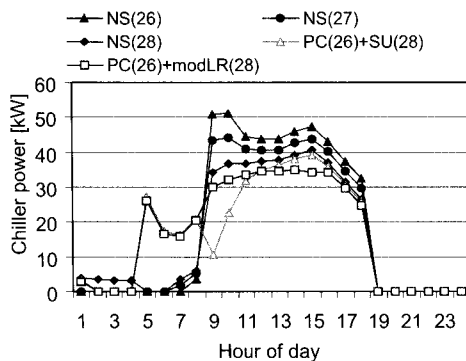


Fig. 4 Comparison of cooling demands with different control strategies for a hot summer day in Ul-san weather condition.

PC+modLR에 대하여 비교하였다. NS(26)과 PC+SU에 비하여 PC+modLR이 대부분 더 낮은 일간 피크냉방전력부하를 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 최고 더운 여름철을 위한 연간 피크냉방전력 수요를 저감하기 위한 운전 뿐만이 아니라 어느 날이든 피크전력수요를 낮출 필요가 있는 경우에 적용가능하다. 이러한 특성은 향후 스마트그리드(Smart Grid)⁽⁹⁾의 주요기술인 수요반응(Demand Response)⁽¹⁰⁾ 프로그램과 같이 전력회사에서 전력피크를 낮추기 위하여 고객의 년중 참여를 필요로 하는 프로그램에 적합하다.

t*를 결정하기 위한 다른 예로서, 기존 운전방식을 적용한 경우에 있어서의 건물의 냉방부하 형태를 달리한 경우에 대하여 운전성능을 분석하기 위하여 울산기후 데이터를 적용하고 앞서 시뮬레이션에서와 같이 NS(26), NS(27), NS(28), PC

+SU, PC+modLR 등의 다양한 운전기법을 적용하여 시뮬레이션하였다. 서로 다른 운전방식에 따른 냉방전력부하를 Fig. 7에 나타내었고, 이와 관련한 냉방설정온도를 Fig. 8에 나타내었다. NS(26)에 의한 냉방부하의 형태에서 감소하는 구간이 나타나지 않으므로, 규칙 (1)~규칙 (3)에 의하여 modLR의 냉방온도는 냉방시간대초기와 냉방시간대 말기까지 설정온도의 하한값과 상한값을 선형으로 연결하는 형태와 동일하게 된다.

Fig. 9에 나타낸 피크냉방전력부하와 전기에너지소비량을 보면, PC+modLR은 NS(26)에 비하여 27%와 14%의 절감율을 각각 나타내었으며, PC+SU에 비해서는 9.3%의 추가 피크전력부하 절감 효과가 있었으나, 전력소비량은 4.8%증가하였다. modLR 방식을 적용한 냉방부하 형태가 그다지 평준화되지 않은 결과를 나타내었는데, 이것은 냉

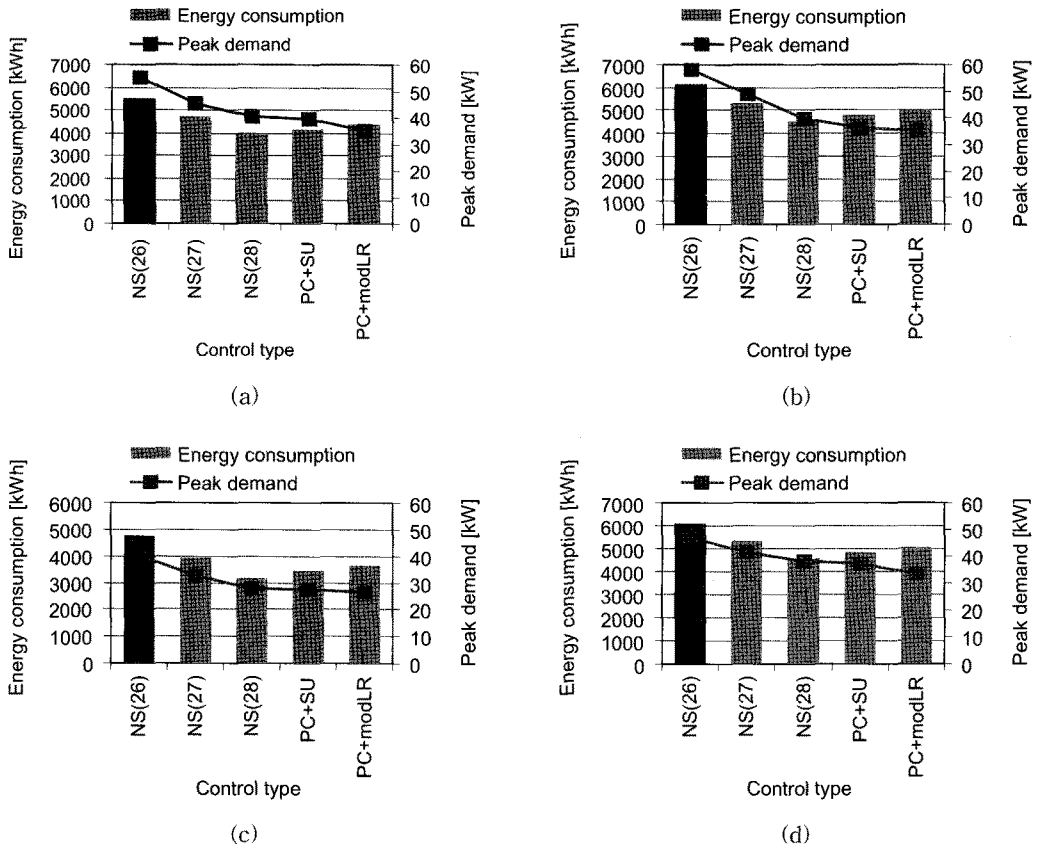


Fig. 5 Comparison of chiller peak demand and energy consumption for a month in different weather conditions of (a) Ul-san, (b) Gang-neung, (c) In-cheon, and (d) Gwang-ju.

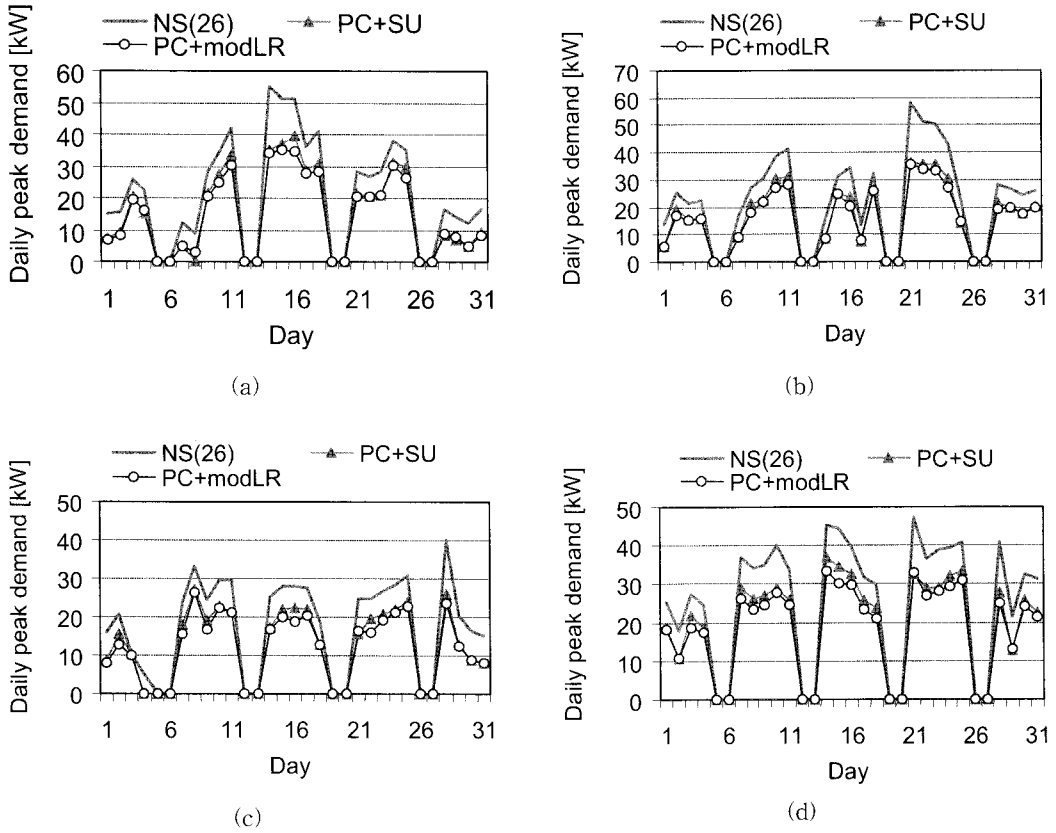


Fig. 6 Comparison of daily peak cooling demand in different weather conditions of (a) UI-san, (b) Gang-neung, (c) In-cheon, and (d) Gwang-ju.

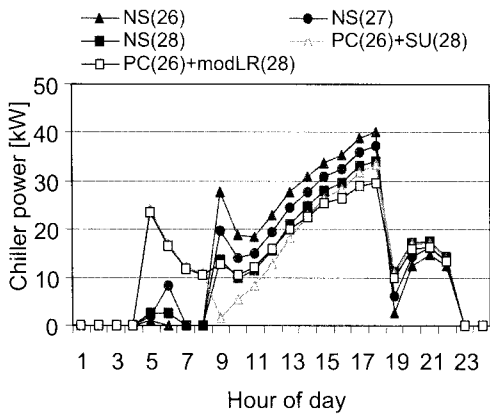


Fig. 7 Comparison of cooling demands with increasing load shape under NS and associated loads for different control strategies in UI-san weather condition.

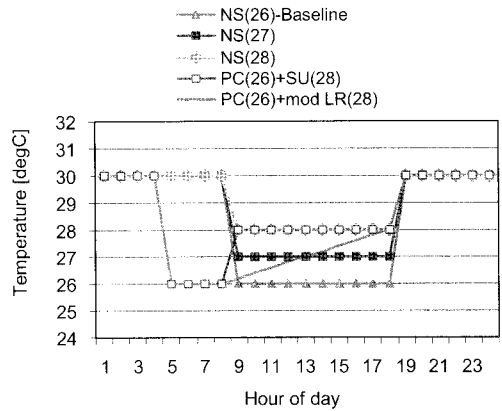


Fig. 8 Building space setpoint variation with different control strategies and modified linear rise strategy associated with load shape in Fig. 7.

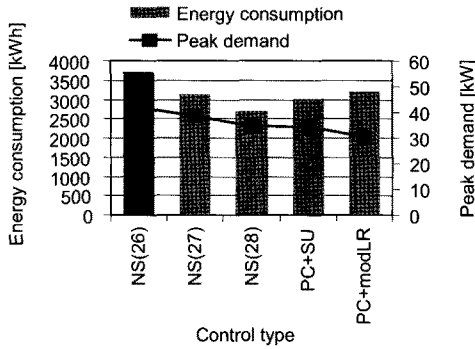


Fig. 9 Chiller peak cooling demand and energy consumption for the case of cooling load shapes in Fig. 7 with Ul-san weather condition.

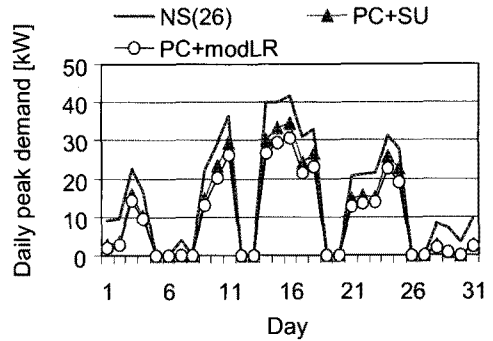


Fig. 10 Daily peak cooling demand for the case of cooling load shapes in Fig. 7 with Ul-san weather condition.

방부하의 형태가 급속한 증가를 보이는데 비하여 냉방설정온도를 조절할 수 있는 범위가 26℃부터 28℃까지로 범위가 충분하지 못하였기 때문으로 보이며, 이 온도범위가 더 넓다면 냉방부하형태는 더욱 평평한 형태에 근접할 수 있었을 것이다. Fig. 10에는 7월 중순과 8월 중순에 걸쳐서 일간 피크 전력부하를 NS(26), PC+SU, PC+modLR에 대하여 비교하였다. 대부분 PC+modLR 방식이 NS(26), PC+SU 방식보다 더 낮은 피크전력수요를 나타내었다.

본 논문에서는 특정 건물에 대하여 두 가지 냉방부하 패턴을 대상으로 하여 건물예냉과 실내온도 설정값 변경을 통한 피크냉방부하 저감효과를 검토하였다. 건물의 축열특성은 건축물과 실내 가구 등을 구성하는 재료의 밀도, 비열, 열전도계수 등에 영향을 받게 되므로, 건물마다 축열성능이 다를 것이다. 건물의 축열효과가 큰 건물일수록 예냉에 의한 축열에너지 밀도가 더 높아질 것으로 기대되며, 이로 인하여 피크 이전 시간대로 이전할 수 있는 부하량이 더 높아질 수 있을 것이다. 그렇지만, 창문 등의 위치, 실내 거주 시간대, 실내부하의 시간분포에 따른 냉방부하의 형태에 따라서 그 효과는 다소 달라질 것이다.

또한, 본 논문에서 비교대상으로 한 냉방운전 조건 이외에 검토대상으로 적합한 온도조건은 26℃ 조건에서 건물예냉 이후에 새로운 설정온도를 쾌적성을 고려하여 26℃와 28℃의 중간온도인 27℃로 설정하는 방식일 것이다. 이 경우에 울산지역을 대상으로 한 계산을 보면, 냉방에너지절감

효과와 피크 냉방부하절감 효과는 28℃로 재설정된 PC+SU(28) 경우의 효과에 비하여 45%와 79% 수준으로 더 효과가 작은 것으로 나타났고, PC+modLR(28)과 비교해서는 54%와 62% 정도로 효과가 떨어지는 것으로 나타났으나, 비교기준 운전방식인 NS(26)에 비해서 23%와 11%의 에너지 및 피크부하 절감효과를 기대할 수 있다.

본 논문에서 검토한 운전방식의 주 목적은 피크 냉방부하의 저감이었으나, 냉방에너지 소비량에 대한 절감효과도 함께 Fig. 5에 피크부하 저감 효과와 함께 비교하였다. 건물예냉에 의한 운전방식이 냉방 전기에너지 소비절감에는 최적의 방식은 아닌 것으로 나타났으나, 기준 비교조건에 비해서는 상당히 절감효과가 있는 것으로 나타났으며, 이러한 효과는 비교기준에 따라서 다소 달라질 것이다. 또한, 건물 예냉시간대의 외기온도조건이 낮을수록 냉방시스템의 운전효율이 향상되므로, 이로 인한 고효율운전 효과에 의하여 하루 냉방운전에 있어서 전체 냉방에너지 절감효과가 더욱 증대할 수도 있다.⁽¹¹⁾

4. 결 론

본 논문에서는 최근 건물에서의 에너지관리 필요성이 높아지고 있는 가운데 냉방온도설정용 효과적으로 활용함으로써 에너지소비저감과 피크냉방전력수요 저감에 대하여 건물 냉방시뮬레이션을 통하여 그 효과를 비교하였다. 또한 울산, 강릉, 인천, 광주 등 네 지역의 기후데이터를 적용

하여 시뮬레이션하였다.

본 연구에서는 건물의 냉방설정온도로 권장되고 있는 26℃ 이상 28℃ 이하의 온도범위에서 설정온도를 조절하는 것으로 하였다. 냉방이전의 새벽시간대에 실내온도를 미리 26℃로 설정하여 냉각하고 냉방시간대에는 서서히 실내온도를 증가시켜 줌으로써 피크부하저감효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 실내온도를 증가시키기 위한 경로를 결정하기 위하여 수정된 선형증가방식을 제안하였으며, 직선의 기울기는 통상의 일정한 냉방설정온도로 냉방운전한 더운 여름 하루의 냉방부하 곡선에서 냉방부하가 감소하는 시점을 직선의 끝점으로 하여 기울기를 결정하는 방식이다. 제안된 방식은 기존의 일정하게 26℃의 실내온도를 유지하는 냉방방식에 비하여 피크냉방전력부하 및 전력소비량에 있어서 약 30% 및 20% 정도의 절감효과를 나타내었으며, 울산, 강릉, 인천, 광주 등의 기후데이터를 대상으로 한 계산결과에서도 유사한 절감효과를 나타내었다. 년중 가장 더운 여름철 기간이라고 할 수 있는 7월 중순부터 8월 중순까지에 예냉과 실내온도 선형증가방식을 적용한 결과, 대부분의 날에 걸쳐서 피크부하는 감소하는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었고, 이로써 임의의 날에 본 논문에서 제시한 기법을 적용가능할 것으로 기대할 수 있다. 또한, 냉방부하의 형태를 임의로 달리한 경우에도 본 논문에서 제안한 방식을 적용하여 울산기후에서의 시뮬레이션 결과, 27%와 14%의 피크냉방부하와 냉방에너지 절감효과를 나타내었다.

냉방부하를 저감하기 위해서는 실내온도를 28℃로 단순하게 높이는 방법을 적용할 수 있지만, 실내 쾌적도 측면에서 실내 거주자가 받아들일 수 있는 수준인가에 대한 실내환경적인 면도 고려하여야 한다. 이러한 측면에서 새벽에 실내온도를 26℃로 낮추어 건물 실내벽면을 차갑게 하여둔 후에 실내온도를 서서히 증가시키는 방식이 실내 쾌적성과 피크전력부하 저감 측면에서 더욱 바람직한 접근 방식일 것이다.

앞서 설명한 바와 같이 실내설정온도를 조절하여 부하를 조절하기 위해서는 온도조절범위가 냉방부하와 실내쾌적성에 있어서 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 향후에는 실내설정온도의 조절범위와 실내온도의 조절방식이 실내 쾌적도에 미치는 영향에 대한 검토가 필요할 것이다.

참고문헌

1. Korea Ministry of Knowledge Economy, 2008.
2. Lee, K-H. and Braun, J., 2008, Model-based Demand-Limiting Control of Building Thermal Mass, *Building and Environment*, Vol. 43, No. 10, pp. 1633-1646.
3. Lee, K-H. and Braun, J., 2008, Development of methods for determining demand-limiting setpoint trajectories in buildings using short-term measurements, *Building and Environment*, Vol. 43, No. 10, pp. 1755-1768.
4. Lee, K-H. and Braun, J., 2008, Evaluation of methods for determining demand-limiting setpoint trajectories in buildings using short-term measurements, *Building and Environment*, Vol. 43, No. 10, pp. 1769-1783.
5. EnergyPlus, Energy Simulation Software, <http://www.eere.energy.gov>.
6. Antonopoulos, K. A. and Koronaki, E. P., 2001, On the dynamic thermal behavior of indoor spaces, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 929-940.
7. Braun, J.E. and Lee, K-H., 2006, Assessment of demand limiting using building thermal mass in small commercial buildings, *ASHRAE Transactions*, Vol. 112, No. 1, pp. 547-558.
8. Lee, K-H. and Braun, J., 2008, Performance evaluation of a dynamic inverse model with EnergyPlus model simulation for a building loads, *Korean Journal of SAREK*, Vol. 20, No. 3, pp. 205-212.
9. Wikipedia internet home webpage, http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_grid.
10. Wikipedia internet home webpage, http://en.wikipedia.org/wiki/Demand_response.
11. Lee, K-H. and Braun, J., 2008, A data-driven method for determining zone temperature trajectories that minimize peak electrical demand, *ASHRAE Transactions*, Vol. 114, No. 2, pp. 66-74.

부 록

식(4)와 식(5)에 나타낸 상수 M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 와 N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 에 대한 표현은 각각 다음과 같다.

$$M_1 = -\frac{1}{R_s C_s} \left(1 + \frac{R_s}{R_d} \right),$$

$$M_2 = 1,$$

$$M_3 = \frac{1}{R_s C_s} \left(1 + \frac{R_s}{R_d} \right),$$

$$M_4 = \frac{1}{R_s C_s},$$

$$M_5 = \frac{T_{m,d} - T_z}{C_s R_s R_d}.$$

$$N_1 = -\frac{1}{R_d C_s},$$

$$N_2 = -R_s,$$

$$N_3 = \frac{1}{C_s} \left(1 + \frac{R_s}{R_d} \right),$$

$$N_4 = \frac{1}{C_s},$$

$$N_5 = \frac{T_{m,d}}{C_s R_d} - \frac{Q_{z,s}}{C_s}.$$