

외기냉방제어의 효율적인 운영에 관한 연구

A study on the energy efficient operation of economizer cycle control

이 현 우*, 이 승 복**
H. W. Lee, S. B. Leigh

Key words : Energy efficient operation(에너지절약운영), Economizer cycle control(외기냉방제어), Temperature control(온도제어), Enthalpy control(엔탈피제어)

Abstract

As the cooling energy requirement in an office building increases due to the increased internal heat gains, the effort to minimize the energy consumption through efficient operation of existing HVAC systems will be beneficial. In this study, one of the energy conserving efforts in an office building, operational strategies of Economizer Cycle Control have been investigated through DOE-2.1E computer simulation. The findings can be summarized : 1) Economizer Cycle Control saves energy throughout the year, 2) Econo-Limit-T must be applied seasonally based on the outside and return air conditions, 3) use of Enthalpy control is more energy efficient than that of Temperature control.

기 호 설 명 1. 서 론

T_M : 혼합공기온도, °C
 T_{APP} : 혼합공기설정온도, °C
 T_{DB} : 외기온도, °C
 T_R : 환기온도, °C
 P_o : 외기비율

사무자동화 등으로 인한 실내발열이 증가하면서 사무소용 건물에서 소비되고 있는 냉방에너지 수요가 점차 증가하는 추세이다. 이에 따라 건물의 에너지 소비특성을 파악하여 운영과정에서 소요되는 에너지를 줄이려는 건물에너지 관리시스템(Energy Management and Control Systems)의 중요성이 부각되고 있으며, 기존건물에서 사용하고 있는 설비시스템의 운전방법 개선을 통한 에너지관리는 추가비용의 투자없이 기존의 시스템을 에너지 효율적으로 운용할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 특히, 수시로 변화하는 외기조건에 따라 냉동기를

*정회원, 광운대학교 건축공학과

**정회원, 성균관대학교 건축공학과

가동하는 대신에 외기를 직접 실내로 도입함으로써 냉방에너지를 절약할 수 있는 방안이 적극적으로 모색되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 사무소용 건물을 대상으로 외기냉방제어(economizer cycle control)에 적용되는 각종 변수를 동적 에너지해석 프로그램인 DOE-2.1를 이용하여 시뮬레이션하고, 이를 바탕으로 각 제어방법의 에너지 효율을 비교·분석하였다.

2. 외기냉방제어(economizer cycle control)

‘외기냉방제어(economizer cycle control)’란 공조기를 순환하는 환기(還氣, return air)에 비해 외기의 온도나 엔탈피가 낮을 때, 외기를 끌어들여 이를 냉방에 이용함으로써 냉방공조에 사용되는 에너지의 양을 줄이려는 에너지 절약제어의 한 개념이다. Fig.1에서 나타난 바와 같이, 기본적인 외기냉방제어시스템은 혼합공기와 외기의 온도(혹은 엔탈피)를 감지하는 센서(T), 덤퍼의 작동을 조절하는 제어기(C), 외기덤퍼의 최소외기량을 조절하는 스위치(SW)와 릴레이(R), 그리고 덤퍼(DM) 등으로 구성되어 있다.

여기에서 제어기(C)는 센서가 인식한 온도(혹은 엔탈피)를 바탕으로 외기덤퍼와 환기덤퍼의 개폐를 결정함으로써 실내에 공급되는 공기의 온도를 적절히 조절하게 된다. 이 과정에서 일반적으로 12.8°C ~ 18.9°C의 최저공급온도를 유지하게 되며, 외기온이 21°C ~ 24°C를 초과하면 환기를 목적으로 최저 외기도입량을 유지하게 된다.⁽¹⁾

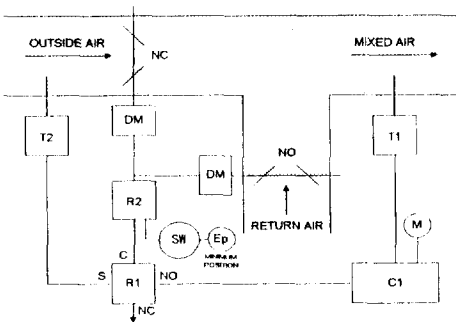


Fig.1 Economizer cycle control system

외기냉방제어는 제어의 대상과 방법에 따라 다음과 같이 ‘온도제어’ 및 ‘엔탈피제어’로 구분할 수 있다.

2.1 온도제어

‘온도제어’에서는 건구온도를 기준으로 하여 외기도입량을 결정하며, 외기의 건구온도만을 기준으로 삼는 경우(non-integrated dry bulb control)와 외기의 건구온도 뿐만 아니라 환기의 건구온도까지 측정하여 기준으로 삼는 경우(integrated dry bulb control)가 있다.⁽²⁾

2.2 엔탈피제어

온도제어에 비해 보다 개선된 방법으로, 공조설비의 운전을 위한 외기도입량을 외기와 환기의 엔탈피를 기준으로 결정한다. 이를 위해 외기덤퍼와 환기덤퍼에 설치된 센서가 온도와 상대습도를 동시에 측정함으로써 엔탈피를 파악한다. 만약, 외기의 엔탈피가 환기의 엔탈피보다 높으면 외기덤퍼(outside air damper)와 환기덤퍼(return air damper)가 조정되어 외기의 도입을 최소화하며, 외기의 엔탈피가 환기의 엔탈피보다 낮으면 최대한의 외기를 도입할 수 있도록 외기덤퍼와 환기덤퍼가 조절된다.

2.3 가변풍량(VAV)시스템의 외기냉방제어 특성

가변풍량(VAV)시스템에서는 송풍량을 조절함으로써 실내부하의 변동에 대응한다. 이 경우 부하량의 변화에 따라 송풍공기의 양이 일정하지 않기 때문에 공급되는 공기에 포함되는 최소외기량 또한 일정하지 못한 특성이 있다. 따라서, 가변풍량시스

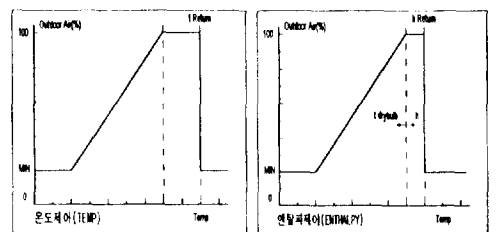


Fig.2 Concept of temperature control and enthalpy control

템의 경우 쾌적한 실내공기환경을 유지하기 위하여 일반적인 시스템의 최소외기량인 30% 보다 많은 40% 정도의 최소외기량을 확보할 필요가 있다.

2.4 DOE 프로그램의 외기냉방제어 알고리즘

DOE-2.1E 프로그램에서는 외기도입을 제어하기 위하여 외기제어방법(OA-CONTROL), 최소외기도입량(MIN-OA), 최대외기도입율(MAX-OA-FRACTION), 최저도입한계온도(ECONO-LOW-LIMIT), 최고도입한계온도(ECONO-LIMIT-T) 등을 변수로 사용한다. 만약 외기도입방법이 FIXED로 지정되면 프로그램은 외기냉방제어가 없는 것으로 가정하고 혼합공기온도(T_M)를 식(1)과 같이 계산한다.⁽³⁾

$$T_M = (P_o \times T_{DB}) + [(1.0 - P_o) \times T_R] \quad (1)$$

외기도입방법을 TEMP 혹은 ENTHALPY로 설정하면, 외기의 온도를 ECONO-LIMIT-T와 비교하여 외기도입여부를 결정하며, 혼합공기에 사용되는 외기의 상대적인 비율을 식(2)와 같이 계산한다.

$$P_o = \frac{T_{APP} - T_R}{T_{DB} - T_R} \quad (2)$$

3. 시뮬레이션 대상건물

시뮬레이션을 위하여 서울에 위치한 S증권 건물을 기본모델로 선정하고, 기존의 사무소 건물의 현황에 대한 문헌, 설계기준, 그리고 최근에 신축된 사무소용 건물의 자료 등을 참고로 하여 입력자료를 작성하였다.^{(4),(5)} 시뮬레이션 대상 건물의 규모 및 개략적인 특징은 다음과 같다.

건물은 각층의 면적 900㎡, 연면적 18,000㎡의 지상 20층으로 구성된 사무소용 건물이다. 건물의 단위평면은 가로, 세로 각 30m, 면적 900㎡로 공간의 열적 특성과 벽의 구분에 따라 총 9개의 존(Zone)으로 구분하였다. 외주부는 건물의 외피에서 5m의 깊이로 건물의 동, 서, 북측에 위치하고, 내주부는 코어의 위치와 존의 특성에 따라 다시 세분하였으며, 기본모델건물은 이 단위평면을 기본평면

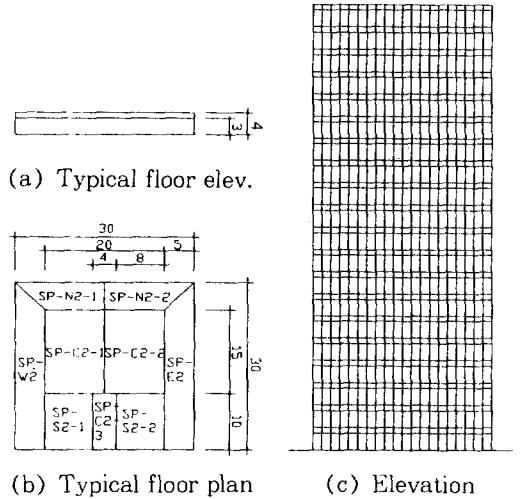


Fig.3 Base model building

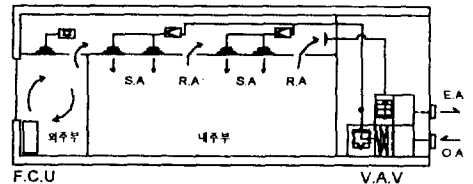


Fig.4 HVAC system of typical floor

으로 하여 총 20개의 동일한 층으로 구성하였다. Fig.3과 같이 기준 단위평면의 단면은 4m의 층고를 가지며, 천정고가 3m, 환기구(return air plenum) 높이가 1m로 구성되어 있다.

건물의 공조시스템은 각 층별 개별공조를 기본으로 하여 존을 구분하였으며, 내주부는 가변풍량(VAV)시스템이 냉방부하를 담당하고, 외주부는 팬코일(fan-coil)시스템이 냉방부하와 난방부하를 담당하게 하였다. 또한, 환기(return air)를 위해서는 Fig.4와 같이 천장의 덕트스페이스를 환기구(return air plenum)로 사용하였다.

공조시스템의 기본적인 설계항목과 그 설정값은 Table 1과 같다.

또한, 각각의 변수가 부하에 미치는 영향을 파악하기 위하여 외기냉방제어의 방법에 대해 Table 2와 같이 변수를 변환하여 시뮬레이션을 실시하였다.

Table 1 Design variables and input data of HVAC system

Design variables	Input data
Indoor temperature	cooling season : 26°C heating season : 20°C
Internal heat gain	heat gain from people : 100(W/P) heat gain from lighting : 8(W/m ²) heat gain from equipment : 1(W/m ²)
Temperature control	proportional
Humidity range	30%~80%
Preheat Coil	7.2°C
Supply-Delta-T	3°C
Fan Schedule	weekday 08:00~17:00(1), other hour(0) saturday 08:00~14:00(1), other hour(0) sunday, holiday all hour(0)
Reheat-Delta-T	18°C
System on/off	always on
MIN-OA	0.4

Table 2 Parametric variables and alternative values

Parametric variables	Alternative values
OA-CONTROL	FIXED/TEMP/ENTHALPY
ECONO-LIMIT-T	none/19/22/25
ECONO-LOW-LIMIT	-10/-5/0/5/10

시뮬레이션을 위한 기후데이터는 공기조화냉동공회회의 서울지역 기상데이터를 DOE 프로그램에서 사용할 수 있도록 TRY양식으로 변환하여 사용하였다.

4. 시뮬레이션의 결과 및 분석

기본모델 및 변수변환을 통한 다양한 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과, 에너지부하^(a)는 Table 3에서 나타난 바와 같다. 여기에서 에너지부하는 1

(a) 여기에서 '에너지부하'라 함은 시뮬레이션을 통해서 예측된 시스템에 의한 에너지 요구량을 의미함.

Table 3 Simulation results(AHU-1)

	OA-CTRL	E-L-T (°C)	E-L-L (°C)	ENERGY(MWH)		
				CL	HT	TOTAL
BASE-11	FIXED	-	-	70.908	19.391	90.30
BASE-12	TEMP	-	-	55.705	27.976	83.68
BASE-13	TEMP	19	-	51.113	27.625	78.74
BASE-14	TEMP	22	-	50.002	27.825	77.83
BASE-15	TEMP	25	-	50.795	27.919	78.71
BASE-22	ENTHALPY	-	-	49.206	27.982	77.19
BASE-23	ENTHALPY	19	-	51.116	27.625	78.74
BASE-24	ENTHALPY	22	-	49.745	27.824	77.57
BASE-25	ENTHALPY	25	-	49.396	27.921	77.32
BASE-31	TEMP	22	-10	50.023	27.824	77.85
BASE-32	TEMP	22	-5	50.321	27.650	77.97
BASE-33	TEMP	22	0	51.631	26.875	78.51
BASE-34	TEMP	22	5	55.092	24.939	80.03
BASE-35	TEMP	22	10	60.041	22.652	82.69

개충을 담당하고 있는 AHU-1의 에너지 사용량을 의미하며, 이는 전체에너지의 비와 동일하다. 따라서, 여기에서는 상대적인 비교를 위해 AHU-1의 값을 사용하였다.

위의 표에서 나타난 결과를 요약해 보면, 1)의 기냉방제어(economizer cycle control)의 적용시 현저하게 전체 에너지부하가 감소함을 알 수 있었으며, 2) 온도제어의 경우, 최고도입한계온도가 22°C일 때 에너지부하가 가장 작은 것으로 나타났고, 3) 엔탈피제어의 경우, 최고도입 한계온도를 지정하지 않을 때 가장 효율적이었으며, 4) 최저도입한계온도는 최소한으로 낮춤으로써 에너지부하가 최소가 됨을 알 수 있었다. 각각의 변수변환에 따른 에너지부하의 상대적인 차이를 비교해 보면 다음과 같다.

4.1 최고도입한계온도의 변환에 따른 에너지부하

최고도입한계온도(ECONO-LIMIT-T)의 변수변환에 따른 에너지부하의 월별 변화를 살펴보면, 냉방기의 경우 최고도입한계온도를 지정하지 않은 경우에 비하여 지정한 경우의 에너지부하가 현저하

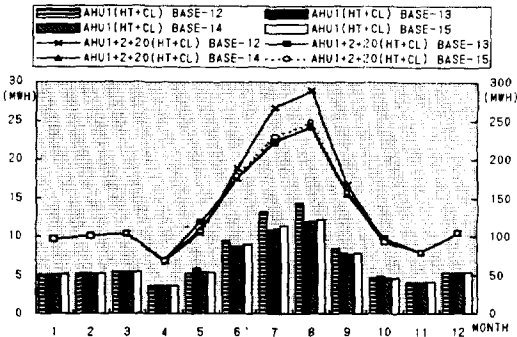


Fig.5 Energy demand varied with ECONO-LIMIT-T

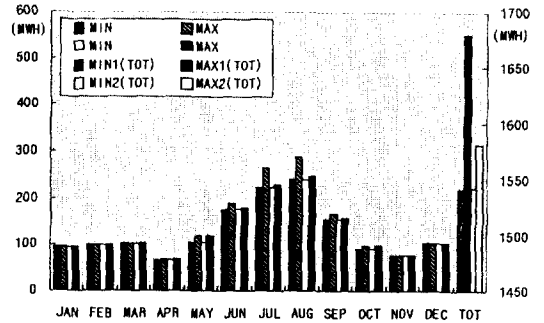


Fig.6 Max/min energy demand varied with ECONO-LIMIT-T

감소되었다. 반면에 중간기의 경우에는 Fig.5에서 보듯이 오히려 최고도입 한계온도를 지정한 경우의 에너지부하가 다소 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 냉방기의 경우 외기온이 상대적으로 높아 외기를 도입하는 것이 환기(return air)를 사용하는 것보다 불리하기 때문에 한계온도를 지정하지 않은 경우 최고도입한계온도를 통해 외기의 도입을 제한함으로써 최소외기만을 사용한 경우에 비해 에너지부하가 증가한 것으로 판단된다. 또한, 중간기의 경우에는 온도에 비해 낮은 엔탈피를 가지는 외기의 계절적 특성으로 인해 한계온도이상의 외기를 도입하더라도 실질적인 냉방에너지 감소효과를 보임으로써 에너지부하가 감소된 것으로 분석된다.

또한, 최고도입한계온도를 서로 다르게 지정한 경우에는 에너지부하의 차이가 상대적으로 작았으나, 일반적으로 22℃로 지정한 경우 전체적으로 가장 작은 에너지부하를 보이고 있다. 그러나, 계절별로 살펴보면 중간기와 냉방기의 경우 25℃로 지정했을 때 부하가 비교적 작았으며, 냉방기의 부하는 거의 동일한 것으로 나타났다.

4.2 최고도입한계온도 변환시의 최대/최소에너지부하

각각의 모델에 대한 에너지부하의 변화를 종합하여 에너지부하가 가장 큰 경우(최대 에너지부하)와 가장 작은 경우(최소 에너지부하)를 비교해 보면, 난방기에는 부하변화가 상대적으로 작은 데 비하여 중간기와 냉방기에는 부하의 변화가 상대적으로 크

게 나타나고 있다. 최고도입한계온도를 지정하지 않은 경우를 포함하여 월별 최대/최소에너지부하의 차이를 비교한 결과, 연간 최소부하는 1,541.1MWH, 최대부하는 1,679.9MWH를 나타냄으로써 약 138.8MWH의 차이를 보였다. 최고도입한계온도를 지정한 경우만을 비교하였을 경우, 최소부하는 1,542.5MWH, 최대부하는 1,581.2MWH를 나타냄으로써 약 38.7MWH의 차이를 보였다. 따라서, 계절별로 에너지부하를 최소화할 수 있도록 최고도입한계온도를 지정함으로써 효율적인 방법으로 외기 도입냉방을 운영할 경우, 최고도입한계를 지정하지 않은 경우를 포함하면 8.26%(MIN1, MAX1), 최고도입한계온도를 지정한 경우만을 대상으로 하면 Fig.6에서 보는 바와 같이 2.45%(MIN2, MAX2)의 에너지 절감이 가능함을 알 수 있다.

4.3 온도차 및 엔탈피 차이에 따른 에너지부하

최고도입한계온도를 지정하여 일정온도 이상이면 외기 도입을 억제한 경우(BASE-14)와 최고도입한계온도를 지정하지 않음으로써 환기의 온도보다 외기의 온도가 낮으면 최대한 외기를 도입하는 경우(BASE-12)의 에너지부하 특성을 하루의 시간대별로 비교해 보았다. 그 결과, 외기의 온도와 환기의 온도는 외기의 도입여부를 결정하는 요인은 되지만, 이러한 결정이 반드시 에너지 부하를 줄일 수 있는 방안은 아닌 것으로 나타났다. Fig.7에서도 볼 수 있듯이, 막대 그래프에 의해 표현된 외기와 환기의 온도 차이와 꺾은선 그래프에 의해 표현된 에너지

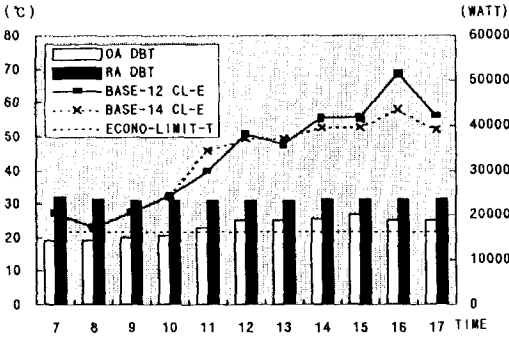


Fig.7 Temperature difference and energy demand varied with ECONO-LIMIT-T

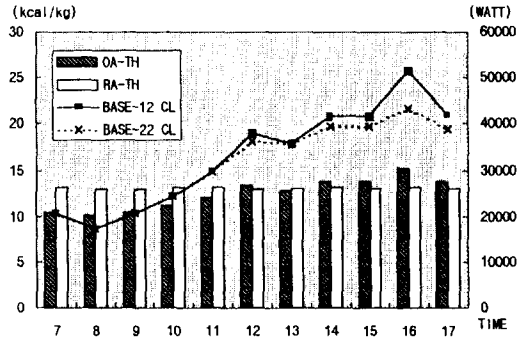


Fig.9 Comparison of temperature control and enthalpy control

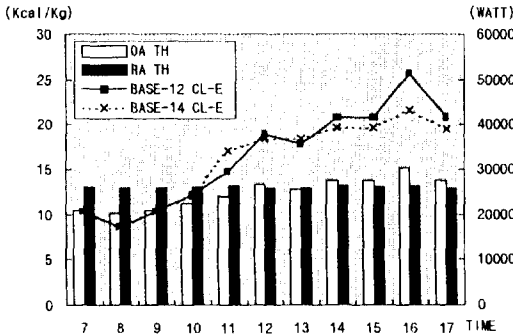


Fig.8 Enthalpy difference and energy demand varied with ECONO-LIMIT-T

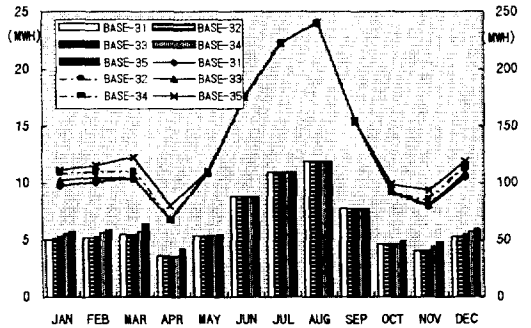


Fig.10 Energy demand varied with ECONO-LOW-LIMIT

부하의 차이를 살펴 보더라도 전 시간에 걸쳐서 외기의 온도가 낮음에도 불구하고 오히려 외기의 도입을 억제한 경우의 에너지부하가 작음을 알 수 있다.

그러나, 이와는 달리 외기 및 환기의 온·습도를 동시에 고려한 엔탈피의 차이를 계산하여 이를 에너지부하와 비교하여 보면, 엔탈피의 특성과 에너지부하의 증감이 일치함을 알 수 있었다. Fig.8에서 보듯이, 막대 그래프에 의해 표현된 엔탈피의 차이에 따라 외기의 엔탈피가 낮을 때 외기를 도입함으로써 에너지부하가 감소함을 볼 수 있으며, 외기의 엔탈피가 상대적으로 클 때에는 오히려 외기를 도입하는 것이 에너지부하를 증가시키는 요인이 됨을 알 수 있다.

4.4 온도제어 및 엔탈피제어의 특성

온도제어와 엔탈피제어를 동일한 조건에서 시뮬레이션한 결과, 엔탈피제어의 에너지부하가 온도제어의 에너지부하에 비해 연중 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있었으며, 온도제어에서 나타났던 외기 도입량의 증가에 따른 에너지부하의 증가현상은 발생하지 않았다. Fig.9에서 보듯이, 외기의 엔탈피가 작을 때(BASE-22) 적극적으로 외기를 도입하는 것이 온도차를 기준으로 도입하는 경우(BASE-12)에 비해서 상대적으로 에너지부하가 감소함을 알 수 있었다. 이것은 외기의 도입여부와 부하의 발생여부가 모두 엔탈피의 차이에 의해 결정되기 때문이며, 따라서 온도제어보다는 엔탈피제어를 통해

보다 에너지의 효율적인 제어가 가능함을 알 수 있었다.

4.5 최저도입한계온도 변환시의 에너지부하

최저도입한계온도(ECONO-LOW-LIMIT)를 지정한 경우, Fig.10과 같이 냉방기 에너지부하의 변화는 거의 없었으며, 중간기와 난방기의 에너지부하 변화가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이것은 냉방기의 경우, 외기온이 지정된 최저도입한계온도 이하로 떨어지는 경우가 극히 드물었으며, 중간기와 난방기에는 외기의 도입여부가 최저도입한계온도에 의해 결정하는 경우가 많았기 때문인 것으로 분석된다.

최저도입한계온도의 변수변환에서는 낮은 온도의 한계온도를 지정한 경우의 에너지부하가 높은 온도로 지정한 경우에 비해 난방기에 특히 유리한 것으로 나타났으나, 너무 낮은 온도의 외기도입은 과냉각, 동결 등의 문제가 발생할 수 있는 가능성을 내포하고 있으므로 외기도입으로 인한 문제가 없는 한도내에서 난방기의 외기도입을 허용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 결 론

사무소용 건물의 냉방에너지 절약을 위한 외기도입냉방시스템의 효율적인 운영과 관련한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 외기도입에 의한 에너지부하의 감소효과가 연간에 걸쳐 나타나므로 가능한 외기도입냉방을 적극적으로 활용하는 것이 냉방에너지 절감을 위하여 효율적임을 알 수 있었다.

2) 온도제어에서 최고도입한계온도와 최저도입한계온도의 설정은 연중 일정한 값을 유지하기보다는 외기온과 실내기온의 최적조건을 시뮬레이션을 통해 파악함으로써 계절별로 적정한 값을 설정하여 운영하는 것이 바람직하다. 가령, 냉방기의 경우 최고도입한계온도를 지정(약 22°C)함으로써 에너지부하를 최소화할 수 있으며, 중간기의 경우에는 최고도입한계온도의 지정보다는 외기온도가 환기온도

보다 낮을 경우 적극적으로 외기를 도입하는 것이 유리하고(실질적으로 외기온이 25°C를 초과하는 경우가 적음), 난방기의 경우 과냉각, 동결 등의 문제가 없는 한도내에서 최저도입한계온도를 낮게 설정하는 것이 바람직하다.

3) 또한, 온도차와 엔탈피의 차이에 따른 에너지부하의 변화를 분석해 본 결과에 의하면, 외기의 도입방법에 관계없이 에너지부하는 외기와 환기의 엔탈피차에 의해서 결정됨을 확인할 수 있었으며, 외기도입을 제어하는 방법으로서 엔탈피제어가 온도제어에 비해 매우 효율적인 것으로 나타났다. 따라서, 온도 및 습도를 동시에 고려한 엔탈피제어가 불가능하여 온도제어를 통한 외기도입냉방을 시도할 경우 시뮬레이션 결과를 토대로 계절별 외기의 상태에 따른 최고도입한계온도의 설정을 조정함으로써 건물의 에너지성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4) 엔탈피 차이에 따라 외기의 도입 여부를 결정하는 엔탈피제어의 경우, 엔탈피의 특성과 에너지부하의 증감이 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 엔탈피제어의 경우, 최고도입한계온도를 지정하는 것 보다는 외기온에 상관없이 외기와 환기의 엔탈피차에 의한 외기도입 여부를 판단하도록 함으로써 냉방에너지 절감효과를 극대화할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Haines, Roger W. 1991, Roger Haines on HVAC Controls, TAB Professional and References Books.
2. Abel, Enno 1992, Energy Efficient Retrofitting of Office Buildings, CADDET.
3. LBL, 1982, DOE-2 Engineers Manual version 2.1A.
4. 공기조화냉동공학회, 1995, 준공사례발표회(II)-여의도 증권타운설비분야.
5. 건설부, 1993, 건축물 에너지 절약 설계기준 개선연구.