

오피스 건물 설계인자의 교호작용 분석을 통한 냉난방부하 최적화 방안

윤 태 균, 김 진 호*, 이 상 엽*, 홍 희 기**, 구 준 모***

경희대학교 대학원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구센터*, 경희대학교 기계공학과**

Optimization of Building Design Factors for Thermal Loads Using Experimental Design Considering Interactions

Tae-Kyun Yun, Jin-Ho Kim*, Sang-Youp Lee*, Hiki Hong**, Junemo Koo***

Graduate School, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea

*Samsung C&T Corporation Construction Technology Center, Seoul 135-935, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea

ABSTRACT: A systematic statistical method was presented to determine the building design factors to minimize the building heating and cooling loads using the fractional factor design method of resolution IV to consider important second order interactions. The dynamic simulation of building heating and cooling loads were performed, and the relations between the loads and the design factors were obtained statistically in a polynomial equation with which the global optimum condition was determined. The building thermal loads were found to decrease by 25% at the optimum condition. The optimum design was validated by the simulation results of the determined condition.

Key words: Building Thermal Loads(건물부하), Design of Experiment(실험계획법), Optimization (최적화), Interaction(교호작용)

1. 서 론

급격히 증가한 세계의 에너지 소비에 따른 문제로 공급의 어려움과 에너지 자원의 고갈, 환경에 심각한 영향이 발생하면서 국제적으로 에너지 사용량 절감에 대한 관심이 높아지고 있으며⁽¹⁾, 기후변화에 대한 대응으로 선진국에 온실가스 감축의무가 부과되면서 에너지 절약이 사회적으로 대두되고 있다. 국내에서 건물부분에서의 에너지 사용량은 점차 증가하는 추세로 에너지 사용량

절감을 위해서는 건물 기획 단계에서 에너지 사용량을 예측하여 설계 단계에서부터 에너지를 줄이는 것이 필수적이다. 건물의 냉난방부하에 영향을 주는 설계요소들은 매우 다양하며 설계초기단계에서 건물 열부하에 큰 영향을 미치는 설계요소를 파악하고⁽²⁾ 냉난방부하를 최소화 할 수 있는 설계방안들이 설계초기단계에서부터 성능검토를 바탕으로 검토되어야하며 설계자가 에너지 성능 평가에 대한 전문적인 지식이 없어도 설계안의 에너지 성능을 쉽게 확인함으로써, 다양한 설계대안에 대한 의사결정수단으로 활용할 수 있다.⁽³⁾

본 연구의 목적은 실험계획법을 이용하여 주어진 설계인자의 인자수준 범위 내에서 임의의 설계인자의 조합인 설계조건에 따른 연간 평균 및 최대 냉난방부하 변화의 함수를 결정하고, 인자의

† Corresponding author

Tel.: +82-2-201-3834; fax: +82-2-202-8106

E-mail address: jmkoo@khu.ac.kr

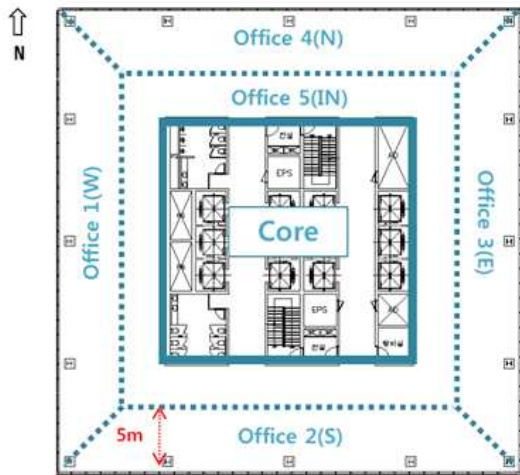


Fig. 1 Schematics of the base model

영향을 비교분석하며, 최적 설계조건을 제시하는데 있으며, 선정 설계조건에 따른 건물 열부하는 TRNSYS 17을 이용한 시뮬레이션으로부터 얻었다.

2. 기준모델 및 인자 선정

본 연구에서 건축적인 기준모델은 평면의 장단 변비를 1:1, 중심코어, 코어의 면적 비율은 29.4%로 설계하였고 ASHRAE 기준을 적용하였으며, 기준이 없는 항목에 대해서는 국내기준과 미국 DOE에서 정한 E-Quest 기준을 적용하였다.⁽⁴⁾

건물 열부하 모델링시, 실제 공조 공간 그대로를 해석 프로그램 상에 구현하는 것이 가능하다면 좋겠지만 현대 건축물은 단순한 주거 공간으로서의 기능 외에 미적, 환경적 요소가 가미되어 건물의 외관 및 구조가 복잡하게 되어있어 공조 공간 해석 시에 실제 공조 공간 그대로를 완벽하게 모델링하는 것은 사실상 불가능하여 열교환을 고려한 단순화 과정을 거쳐 모델링을 진행하였다. 열전달 면적, 벽면 총 전열계수, 설정온도 및 외기온도를 고려하여 전열량을 계산하여, 상호 열교환에 의한 효과를 단순하게 처리하였다.

시뮬레이션 대상공간인 기준 모델을 조닝을 거쳐 해석하고자 하는 구역을 나누어 Fig. 1과 같이 나타내었다. 태양복사에너지 도달량에 따라 내주부, 외주부를 고려하여 6개의 구역(Office1, Office2, Office3, Office4, Office5, Core)으로 나누었다. 기준층 건물의 면적은 약 1,500m²이고 6개의 구역 위에는 높이 1m의 플레넘이 있고 벽두

계를 합친 층고는 3.9m이다. 6개의 구역 중 Core를 제외한 구역에는 냉난방이 가능하도록 하였고 냉방온도는 26°C에 상대습도 50%, 난방온도는 20°C에 상대습도 40%로 설정하였고 조명밀도는 12 W/m², 재실인원은 0.1 인/m², 기기밀도는 16 W/m², 침입외기는 일반적으로 통용되는 0.3 ACH를 사용하였다. 재실 인원 수 및 조명, 기기와 냉난방 가동 스케줄은 일반적인 업무시간인 주중 및 토요일과 일요일로 구분하여 적용하였다.

실험계획법에 고려하는 인자선정을 위해 기존 연구결과와 에너지 빌딩 사례조사 및 분석을 실시하여, 건물 열부하에 영향을 주는 10개의 인자를 선정하였고 그 최대, 최소 수준을 Table 1에 표시하였다. 고려된 인자의 평균수준을 이용한 기준모델 동적시뮬레이션 결과, 연평균 난방부하 6.1 kJ/m²h, 냉방부하 62.6 kJ/m²h로 분석되었다.

3. 유효인자 결정 및 방향성 고려

요인배치법(Factorial Design)은 고려하고 있는 인자의 모든 수준의 조합을 실험 대상으로 하여 실험을 행하고 그 결과를 분석하는 방법이다. 이 방법은 모든 인자조합을 고려하므로 2차 및 고차 교호작용을 모두 고려할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 고려할 인자수가 증가함에 따라 실시할

Table 1 List of factors and their levels

구분	인자	수준		
		최소	기준	최대
건물의 개요 및 규모	기준층 바닥면적 (m ²)	1,000	1,500	2,000
	장단변비	1:1	1:1.5	1:2
	건물의 향	남(S)	북(N)	서(W)
건물의 입단면	창호 면적비율 (%)	25	40	55
	천장고 (m)	2.4	2.7	2.9
	플레넘 (m)	0.8	1	1.2
건물의 부위별 계획	외벽단열 (W/m ² K)	0.36	0.25	0.15
	창호단열 (W/m ² K)	2.84	1.7	0.75
	창호 SHGC	0.6	0.4	0.2
	기밀성능 (ACH)	0.3	0.2	0.1

Table 2 Design factor of simulation model

인자	
A	바닥면적
B	장단변비
C	창호면적비(E)
D	창호면적비(W)
E	창호면적비(S)
F	창호면적비(N)
G	천장고
H	플래넘
J	창호단열(E,N)
K	창호단열(W)
L	창호단열(S)
M	SHGC(E,N)
N	SHGC(W)
O	SHGC(S)
P	기밀성능

실험수가 기하급수적으로 증가한다는 단점이 있다. 따라서 열부하에 주는 영향이 미약한 인자를 제거하여 고려하는 인자수를 축소하면 분석이 용이해지며, 통계적으로 이러한 일을 하는 것을 Screening DOE라 한다.⁽⁵⁾ 이를 위하여 Plackett-Burman Design(이하 PB DOE)을 이용하였다. PB DOE는 주효과와 2인자 교호작용이 교락되어 있어 교호작용 검출없이 주인자 효과만을 해석할 수 있는 기법으로 Screening DOE 목적에 잘 맞는다. 본 연구에서는 실험에서 취급하고 싶은 인자가 많으나 실험횟수를 가급적 적게 하고자 할 경우에 편리한 부분실험시법(Fractional Factorial Design)을 실시하였다. 일반적으로 반응치와 인자간의 주효과와 2인자 교호작용만을 추정이나 검정하며, 그 이상의 고차 교호작용은 일반적으로 유의하지 않으며, 유의하다고 해도 물리적 해석이 어렵거나 실질적인 행동을 취하기 곤란하므로 고려하지 않는데, 이를 이용하여 분석에 필요한 실험수를 줄이는 방법이다.

PB DOE를 이용 해석한 결과, 건물향과 외벽단열은 모든 반응치에서 유의하지 않은 인자로 판별되었고 이로부터 이후 실시할 부분실험시법에서는 Table 1의 10개의 설계인자에서 이 두 인자를 제거하고 해석을 진행하였다. 앞서 결정한 8개의 설계인자에서 창호관련인자에 방향성을 고려하여 인자수는 15개로 증가하였으며, 이를 Table 2에 표시하였다. 15개의 설계인자를 2수준으로 배치하면 $2^{15}=32,768$ 회의 시뮬레이션이 요구되지만 일부

2인자 교호작용이 교락된 해상도 IV 부분실험시법을 사용하여 128회의 시뮬레이션을 진행하였다.

4. 실험계획법 적용결과

실험계획법에 의해 분석 대상 설계조건을 결정하고 건물에너지 동적시뮬레이션을 통하여 해당 설계조건에 대한 건물 열부하를 얻어, 통계 소프트웨어 미니탭을 이용하여 해석하였다.

15인자 부분실험시법 128회 분석결과 난방부하의 경우 모든 오피스에서 창호단열이 가장 중요한 인자로 분석되었고, 창호면적비, 창호단열과 창호면적비의 교호작용, SHGC와 기밀성능 등도 주요 인자임을 확인하였다. 냉방부하는 SHGC가 가장 중요한 인자로 분석되었고, 각 방향별 창호면적비와 창호단열이 다음으로 중요한 인자로 나타났으며 그 다음으로 이 인자들과 관련된 교호작용효과가 주요인자로 확인되었다. 최대난방부하와 최대냉방부하는 바닥면적이 가장 중요한 인자로 판명되면서 PEAK부하에는 오피스의 부피가 중요함을 파악하였다.

건물 설계 시, 에너지 관점에서는 건물의 에너지 사용량을 최소화하기 위하여 부하를 최소화하려 할 것이다. 부하 최소화를 위하여 우선 설계인자의 변화에 따른 부하의 변화를 예측하는 식이 필요하며 이는 일반적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Load_i = c_{0i} + \sum_{j=1}^N c_{ji}x_j + \sum_{j=1, k=1, j \neq k}^N c_{jki}x_jx_k \quad (1)$$

여기서, 하첨자 i는 건물 부하의 종류, 즉, 평균 냉난방, 최대냉난방 부하를 나타내며, 앞서 도출된 냉난방부하 예측식에서 x_i 는 인자, c_i 들은 각항의 계수를 나타내며, 식 (1) 우변의 첫 항은 상수를 두 번째 항은 주효과를 세 번째 항은 교호작용효과를 나타낸다. 여기서 각항의 계수 c_i 들은 미니탭을 이용한 실험계획법 분석결과로 얻어진다. 이는 고려하는 인자의 수준 내, 임의의 인자간 조합에 의한 설계조건에서의 건물 열부하를 예측할 수 있음을 의미한다. 예측식의 결정계수는 오차항 풀링후 모두 95%이상을 나타내었다. 실제 주어진 설계인자 수준에 따른 건물 열부하 계산은 위의 식 (1)을 이용하여, 15개의 인자수준을 입력하면

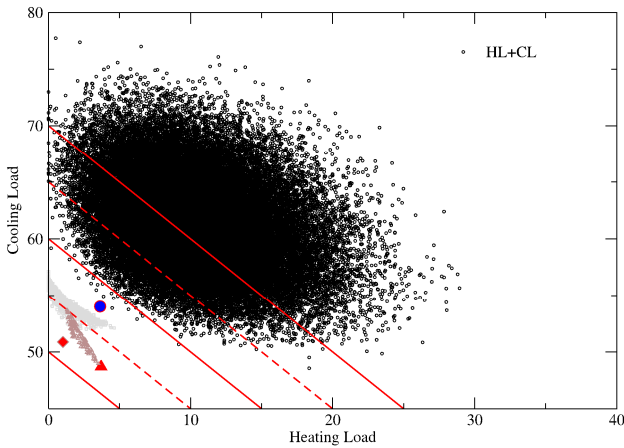


Fig 2. Optimization results of loads

예측값을 출력하도록 엑셀의 스프레드시트 기능을 이용하여 시뮬레이션 실행에 사용되는 변수를 확률분포로부터 임의적으로 선택하여 특정 확률분포를 따르는 일련의 난수를 반복적으로 발생시켜 수행하는 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다.

식 (1)을 이용하여 다양한 건축 설계안을 대입하여 얻은 경우에 대한 냉난방부하를 생성하는 Monte Carlo 시뮬레이션을 행한 결과를 Fig. 2에 보였다. x축은 난방부하, y축은 냉방부하를 의미하고 사선은 난방부하와 냉방부하의 단순합이 같은 레벨이며 비례함인 경우, 사선의 기울기가 달라지게 되며 원점에 가까울수록 최소값이다. 다양한 설계안에 대하여 냉방 난방부하의 조합이 타원형으로 분포되어 있음을 Fig. 2에서 볼 수 있다. 타원의 장축은 난방부하와 냉방부하가 서로 반비례하는 방향이다. 냉방부하와 난방부하의 단순합을 최소화하기 위해서는 그림에서의 직선군들 중 타원 형태에 아래쪽에서 접하는 직선을 선택해야 하며, 이 직선의 절편값을 읽으면 그 합이 최소가 된다. 주어진 Monte Carlo 시뮬레이션에서 찾은 최적조건은 파란 원점으로 나타내었다. Monte Carlo 시뮬레이션을 통해서 최적화의 개념을 파악한 후, 실제 전역 최적조건은 엑셀 내의 “해 찾기” 기능을 사용하여 찾았다. 그림에서의 붉은 다이아몬드 기호가 그 최적조건(연평균 난방부하:1.02 kJ/m²h, 연평균 냉방부하:50.87 kJ/m²h)을 나타낸다. 이는 기준모델 대비 25% 에너지부하가 저감된 결과이다. 식 (1)을 이용하여 확인한 최적조건을 TRNSYS 17을 이용한 건물에너지 해석을 이용하여 확인하였고 오차범위 5%이내의 수

치를 나타냈다.

설비 시스템을 적용할 경우 각 부하의 일차에너지로의 전환 등을 고려하기 위하여 가중치를 주어야 한다. 그 예로 1:4로 가중치를 주어서 시뮬레이션을 수행하였고 Fig. 3에 가중치를 주었을 경우를 나타내었다. 가중치를 주었을 경우, 난방부하는 연중 발생하지 않았으며 냉방부하는 53.6 kJ/m²h를 나타내었다. 타원에 접하는 접선의 기울기가 다른 경우로 이해하고 해당 직선을 찾으면 된다. 혹은 해당 가중치를 각 부하에 곱한 후, 앞과 같은 직선과 만나는 접선을 구할 수도 있다. 가중치를 주었을 경우의 최적 인자조합은 앞서 수행한 가중치를 주지 않았을 때와 비교하여 서측 창호단열 값만 다르게 나왔다. 이는 서측을 통한 단열성능의 강화로 인해 난방부하의 감소가 냉방부하의 증가보다 커서 1:4의 비율 때문에 최소값이 된 것으로 볼 수 있다.

이 결과로부터 설비시스템에 따라 최적 인자조합이 달라져서 동시에 고려를 해야 할 것으로 사료되고 부하의 최적화가 에너지 사용의 최적화가 아님을 알 수 있다.

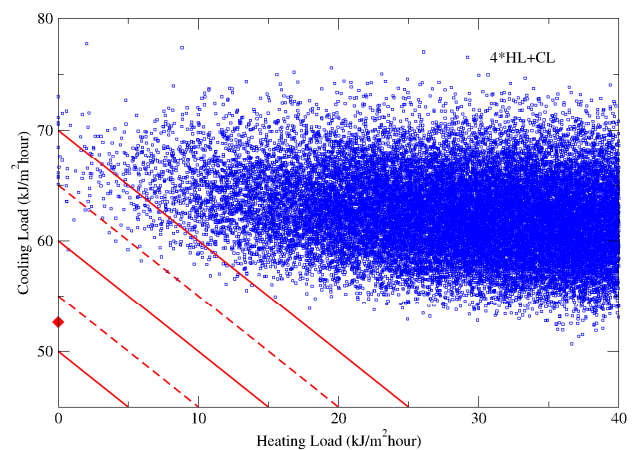


Fig 3. Weighted optimization results of loads

4. 결론

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 설계인자의 건물 열부하에의 민감도 분석을 실시하였으며, 부분실험으로부터 얻어진 예측식을 이용하여 건물 열부하 최적화하는 방법을 제시하였다.

결과에 따르면 중심코어형 오피스건물에서는 최적화를 통하여 약 25%의 부하저감이 가능함을 보였다.

설비 시스템에 따라 Passive 방안이 달라져야하고 부하의 최적화가 에너지 사용의 최적화가 아닌 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Luis Perez-Lombard, 2008, "A review on buildings energy consumption information", *Energy and Buildings*, Vol. 40, Issue. 3, pp. 394-398.
2. 김강수, 2009, "건물에너지 시뮬레이션을 활용한 사무소 건물의 에너지성능평가," *한국건축친환경설비학회 학술발표대회 논문집*, pp. 238-243.
3. 손우진, 2011, *공동주택 설계초기단계에서의 에너지 성능평가를 위한 부하 예측식 개발에 관한 연구*, 석사학위논문, 중앙대학교.
4. 김진호, 2013, "코어 위치와 층형비 및 방위에 따른 건물 에너지 부하 분석" *한국지열에너지학회논문집*, Vol. 9, No. 1, pp. 15-19.
5. 박성현, 2003, *현대실험계획법*, 민영사.