

건물의 냉, 난방 부하비율과 HVAC&R 시스템 1차 에너지 소비량의 상관관계분석 및 합리적 설계방안 연구

Interaction Analysis between Cooling-to-Heating Load Ratio and Primary Energy Consumption of HVAC&R System for Building Energy Conservation

조진균(Jinkyun Cho)[†], 김진호(Jinho Kim), 이성재(Suengjae Lee), 강호석(Hosuk Kang)

삼성물산(주) 건설부문 기술개발실

Construction Technology Division, Samsung C&T Corporation, Seoul, 137-956, Korea

(Received October 22, 2014; revision received December 24, 2014; Accepted: December 28, 2014)

Abstract HVAC&R systems account for more than 50% of the energy consumption of buildings. The purpose of this study is to propose an optimal design method for the HVAC&R system and to examine the possibility for the energy conservation of a selected system. The energy demand for cooling and heating is determined by using TRNSYS and HEET. By an interaction between total system efficiency and cooling-to-heating load ratio, the optimal HVAC&R systems will be decided. The results showed that this proposed method is significantly capable of determining optimal system and building design for saving energy.

Key words Thermal load(건물열부하), HVAC&R system(냉, 난방설비), System efficiency(시스템 효율), Cooling-to-Heating load ratio(부하비율), 1차 에너지(Primary energy)

[†] Corresponding author, E-mail: jinkyun.cho@samsung.com

기호설명

E : Primary energy consumption [kWh]
 Q : Building thermal load [W]
 η : System efficiency
 t : Annual operating hours [h]
 PLR : Part-load ratio

상첨자

P : Peak
 A : Annual
 A/C : Air-conditioning system
 $Plant$: Plant w/distribution system

하첨자

c : Cooling
 h : Heating

1. 서 론

전 세계적으로 온실가스, 환경부하 감축과 관련한 건물의 에너지저감 정책은 국가적인 관점에서 더 이상 선

택이 아닌 필수사항이 되었다. 현대식 건물에서 냉, 난방 및 환기와 연계되는 HVAC&R(Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration) 시스템이 사용하는 에너지 소비량이 지속적으로 증가하여 전체 건물에너지 소비량의 약 50%를 이상을 차지하고 있다.^(1,2) 현재의 설계 프로세스상 초기 단계에서 HVAC&R 시스템이 결정이 되고, 이 결정이 건물의 에너지성능과 거주만족 및 운영비에 절대적인 영향을 미친다.^(3,4) 이러한 이유로 최근 효과적인 에너지절약을 위해 HVAC&R 시스템 선정에서 최적화 기법의 활용이 증가하고 있다. 컴퓨터 기술이 발달함에 따라서 정교한 공학적 해석 방법론이 보편화 되고 있고, 많은 연구자들은 기존의 상용 에너지 시뮬레이션 툴을 활용하여 에너지 소비량과 생애주기비용을 몇몇 건물의 요소의 조합을 통해 최적화 툴을 개발하였다.^(5,7) 에너지 시뮬레이션 툴은 정확하지만 이를 사용하기 위해서는 전문적인 지식과 상세한 입력변수에 대한 이해도 및 상당한 시간이 필요하다.⁽⁸⁾ 따라서 실무에서는 설계초기 단계에서 쉽고 편리하게 사용 가능한 툴이 지속적으로 요구되고 있다. 이러한 단점을 보완하여 최소기준 HVAC&R 시스템을 분석하고 상호 비교평가기법을 활용하여 다양한 조합의 시스템 에너지 및 경제성

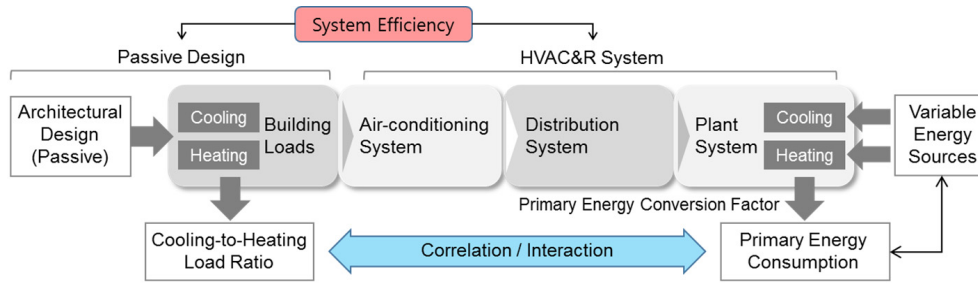


Fig. 1 Correlation between building thermal load and HVAC&R systems' primary energy.

을 검토가 가능한 분석 틀이 개발되었고 이는 설계 단계에서 의사결정 프로세스에 활용이 가능하였다.⁽⁹⁾ 건물의 에너지 성능은 설계 및 운영방법에 따라 변하게 된다. 또한 다양한 건축디자인(passive)요소 및 설비시스템(active)과 상호작용에 의해 결정된다. 따라서 각각의 단계에서 최적화도 중요하지만 조합에 의한 통합설계의 개념이 보다 중요해지고 있다.⁽¹⁰⁾ 최근에는 에너지사용량, 에너지비용, 실내 쾌적성 등 상호작용을 고려한 다중설계 최적기법에 대한 연구가 수행되고 있다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 이렇듯 다양한 목적과 필요에 의해서 건물에너지 최적화에 대한 많은 연구가 진행되었지만 실제 프로젝트에 적용하기에는 많은 한계를 가지고 있다. 기존의 건물설계 과정은 건축디자인과 설비시스템이 최소한의 관계성만 유지하면서 단일방향으로 독립적으로 진행되고 수행 시간도 차이가 있었다. 즉, 건축설계가 완료되는 시점에서 설비시스템 설계가 시작되는 경우가 많고, 상호영향을 고려한 피드백 과정이 생략되거나 시점상 수행하기 어려웠다. 동일한 이유로 에너지성능 최적화도 건축요소와 HVAC&R 시스템 최적화가 분리되었다. 우선, 건축요소를 통한 건물의 에너지요구량 및 부하를 최소화하고 이후 HVAC&R 시스템 선정 및 에너지 효율화를 통해서 최적 대안을 도출하는 방법을 주로 사용하였다. 그러나 제도, 법적규제 및 발주처의 요구사항 등과 같은 사업적 제약에 의해 합리적인 최적화 도출이 불가능한 경우가 빈번하게 발생한다. 이러한 한계는 단일방향 설계 프로세스의 원인도 있지만 HVAC&R 시스템 조건에 따라 건축요소 및 부하가 어떻게 최적화가 되는지에 대한 정확한 정보를 줄 수 없었기 때문이다. 기존의 건물에너지 최적화를 위한 방법이 건물 냉, 난방 부하의 총합인 양적 측면에만 고려했지만 HVAC&R 시스템 구성이 건물 냉, 난방 부하의 양적인 측과 함께 비율에도 영향을 받기 때문에 건물 에너지 분석을 위해 반드시 고려해야 한다. 건물 냉, 난방 부하의 비율을 HVAC&R 시스템 선정 프로세스에 반영하여 1차 에너지를 산출하고 다시 피드백하여 건물부하요소를 조정하는 방법으로 에너지를 최적화하는 방법론은 현재까지 제시된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 냉, 난방 부하 비율에 따른 HVAC&R 시스템 선정 및 다시 건축설계에 피드백이 가능한 종합적인

HVAC&R 시스템 효율 정보를 도출하였다. 이를 통하여 설계단계에서 시스템별 고유한 에너지성능을 파악함으로써 합리적인 시스템 대안 도출이 가능하다는데 그 의미를 부여할 수 있다.

2. 건물부하와 1차 에너지의 상관관계

건물은 실내의 거주환경 조건을 유지하기 위해 지속적으로 에너지가 요구된다. 건물의 냉, 난방 부하는 외부환경의 영향(기후/위치/주변건물)과 내부환경(제실 조건)에 따라 연중 다양한 패턴과 크기가 결정된다. 그리고 이러한 건물의 부하를 제거하기 위해서 공조, 반송, 열원시스템이 필요하고 건물의 냉, 난방 부하에 따라 에너지를 소비하면서 열을 제거하거나 공급한다. HVAC&R 시스템은 공조, 반송, 열원시스템의 다양한 조합이 되고, 그 조합과 시스템 효율에 따라서 1차 에너지 소비량이 결정된다.^(9, 14) 일반적으로 식(1)~식(3)과 같이 건물의 HVAC&R 시스템의 1차 에너지 소비량은 건물의 연간 부하량에 비례한다.⁽¹⁵⁾ 다시 냉, 난방 부하 비율은 최종적으로 냉방에너지와 난방에너지의 비율로 이동한다. 그리고 냉방 및 난방 열원시스템이 사용하는 에너지원(전기, 가스, 지역열원 등)과 장비의 효율에 따라서 1차 에너지 사용량이 달라진다. 따라서 비슷한 총 부하량을 갖는 건물이 냉, 난방 부하비율에 따라서 동일 HVAC&R 시스템에서도 1차 에너지 사용량이 달라질 수 있다. 이러한 경우 Fig. 1에서와 같이 passive design을 전략적으로 수행하여 에너지를 최적화 할 수 있다. 각 HVAC&R 시스템 효율 정보를 알면 건물 냉, 난방 부하의 양적, 비율적인 최적화가 가능하고 이는 다시 1차 에너지 사용량 최소화가 가능하다.

$$E_c = \frac{Q_c^A}{\eta_c} \quad (1)$$

$$E_h = \frac{Q_h^A}{\eta_h} \quad (2)$$

$$E = E_c + E_h = \frac{Q_c^A}{\eta_c} + \frac{Q_h^A}{\eta_h} \quad (3)$$

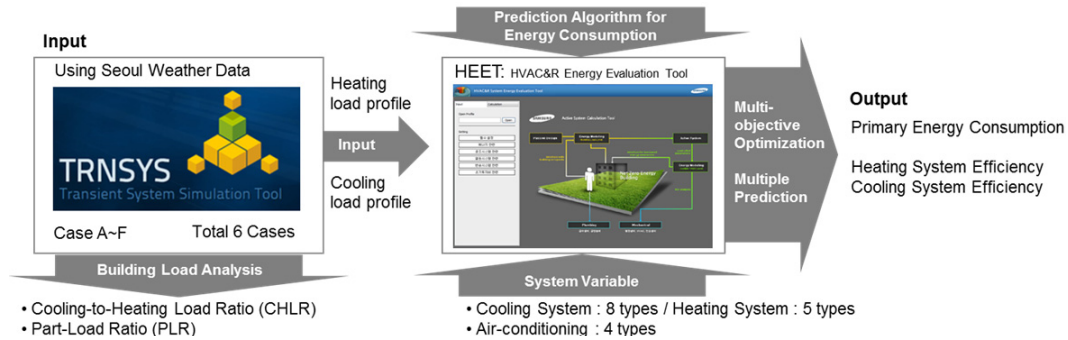


Fig. 2 Research methodology and procedure.

본 연구는 Fig. 2의 프로세스를 통해, 서로 비슷한 건물 부하량을 갖는 건축조건을 기준으로 냉, 난방 부하 비율에 따라 HVAC&R 시스템의 1차 에너지 소비량이 어떻게 변하는지를 분석하였다. 그리고 다양한 시스템의 종합 효율을 도출함으로써 역으로 우선 선정된 HVAC&R 시스템으로부터 냉, 난방 부하비율의 최적화를 위한 passive design 방향제시와 시스템 효율 정보를 제공한다. 건물부하 분석은 상용프로그램인 TRNSYS를 사용하였고 HVAC&R 시스템 1차 에너지 소비량은 선행연구^{9, 16)}를 통하여 개발된 다중 시스템 에너지 평가 툴인 HEET를 사용하여 분석하였다. HEET는 동일한 건축조건(동일한 건물부하)에서 다양한 HVAC&R 시스템 조합의 1차 에너지를 동시에 산출할 수 있는 분석툴로 TRNSYS 시뮬레이션 프로그램과 연계하여 사용이 가능하다. 시스템의 최적화 모델에 대한 해석 조건 및 방법은 우선, 건물부하와 기상데이터에 대한 기본적인 정보가 입력되면 기준 시스템을 해석이 가능하고 이것이 모든 시스템의 평가기준이 된다. 입력데이터를 이용하여 33개의 기본 HVAC&R 시스템의 에너지 분석을 하고, 그 다음 기본 시스템의 열원-공조-반송 시스템에 대한 기준시스템 대비 에너지 소비비율을 각각 산출한다. 구성시스템의 변경에 따른 각각의 영향도가 계산되면 이러한 비율과 가중치를 이용하여 확장 시스템의 에너지를 분석을 한다. 여기에는 2차 에너지 기준의 연간 에너지비용과 1차 에너지 소비량이 산출된다. 시스템의 초기투자비도 에너지 분석과 동일한 방법으로 기준/기본 시스템을 산출하고 공사비를 세분화하여 960개 확장 시스템의 초기투자비를 산출할 수 있도록 구성하였다. 마지막으로 시스템별 에너지비용과 초기투자비를 비교하여 경제성분석이 가능하다.

3. 건물 냉, 난방 부하모델 선정 및 분석

본 장에서는 건물부하 산출을 위해서 우선적으로 건축기준모델을 선정하고 동적에너지 시뮬레이션을 수행하여 유사한 총량의 건물부하와 다양한 냉, 난방 비율을 갖는 평가모델을 도출하였다.

3.1 건축기준 및 평가모델 설정

객관적인 건축기준모델을 선정하기 위해 건물의 연면적, 층수, 기준층 면적 등을 고려한 다양한 설계사례 및 문헌조사를 통해 지상 30층 규모의 오피스 건물로 선정하였다.¹⁷⁾ 건물의 형태 및 기준층의 평면은 Fig. 3과 같다. 선정된 건축기준모델을 근거로 하여 TRNSYS를 이용하여 에너지 시뮬레이션을 실시하였다. 이러한 작업을 반복하여 건축요소의 17인자를 변경하면서 냉, 난방 부하비율을 변화시킨 6개의 분석대안(Case A~F)을 도출하였다. 선행연구¹⁸⁾의 17개의 인자의 선정과정과 당위성은 TRNSYS 시뮬레이션과 실험계획법을 병행하여 설계인자의 건물 냉, 난방 부하에 대한 민감도를 분석을 실시하여 17개의 인자를 선정하였고, 2차 교호작용을 고려한 부분 실시법으로부터 얻어진 예측식을 이용하여 건물의 냉, 난방 부하를 비율을 예측하는 방법을 도출하였다. 본 연구에서는 비슷한 건물부하의 총량을 갖지만 부하비율이 다른 건물의 디자인 요소를 도출하기 위해 선행연구의 예측식을 사용하였고 이를 통하여 17인자의 성능의 수준을 정하여 건물설계안의 조합을 도출하였다. 시뮬레이션을 위한 주요 경계조건은 Table 1과 같다. 일반적으로 건물에서 기준층, 최상층의 열 부하 해석조건이 모두 다르다. 건물부하해석은 기준층을 기준하였다. 최상층은 외피면적에서 차이가 있기 때문에 기준층과는 부하조건이 다르다. 그러나 본 논문에서는 30층 건물전체의 냉, 난방 부하비율 및 HVAC&R 시스템 선정에 큰 영향을 주지 않는다는 판단으로 최상층 부분은 배제하고 기준층 기준으로 분석을 수행했다.

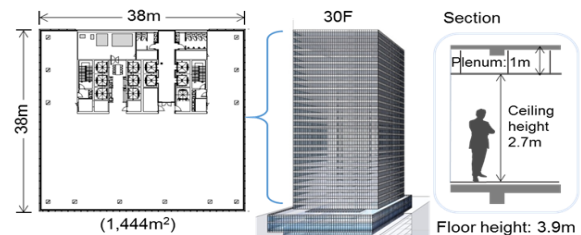


Fig. 3 An isometric model and typical plan.

Table 1 Simulation modeling boundary conditions for various cooling-to-heating load ratio

Items	Design factors(major 17)	Performance ranges					
		Case A	Case B	Case C	Case D	Case E	Case F
Typical floor plan	- Core type	Side core(N)					
	1 Area(m ²)	1,444					
	2 Aspect ratio(-)	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
Elevation/section	3 W-W ratio-E(%)	50	50	50	50	50	50
	4 W-W ratio-W(%)	25	25	25	25	25	25
	5 W-W ratio-S(%)	25	25	25	25	50	50
	6 W-W ratio-N(%)	25	25	25	25	25	50
	7 Ceiling height(m)	2.4	2.4	2.9	2.9	2.9	2.9
	8 Plenum(m)	0.8	0.8	1.2	1.2	1.2	1.2
Building component	- Ex-wall U-value(W/m ² K)	0.36					
	9 Window U-value-E(W/m ² K)	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84
	10 Window U-value-W(W/m ² K)	2.84	1.73	2.84	2.84	2.84	2.84
	11 Window U-value-S(W/m ² K)	2.84	0.8	0.8	2.84	2.84	2.84
	12 Window U-value-N(W/m ² K)	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84
	13 Window SHGC-E(-)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	14 Window SHGC-W(-)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	15 Window SHGC-S(-)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	16 Window SHGC-N(-)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	17 Airtight-Infiltration(ACH)	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1
Design condition	- Internal heat gain(W/m ²)	16					
	- Set temperature(°C)	22/24					

3.2 냉, 난방 부하비율 및 부분부하율 분석

건물의 건축요소 17인자를 변경하여 건물부하를 산출한 결과, Fig. 4에서와 같이 냉, 난방 피크부하의 비율은 58:42에서 74:26로 다양한 분포를 보였다.

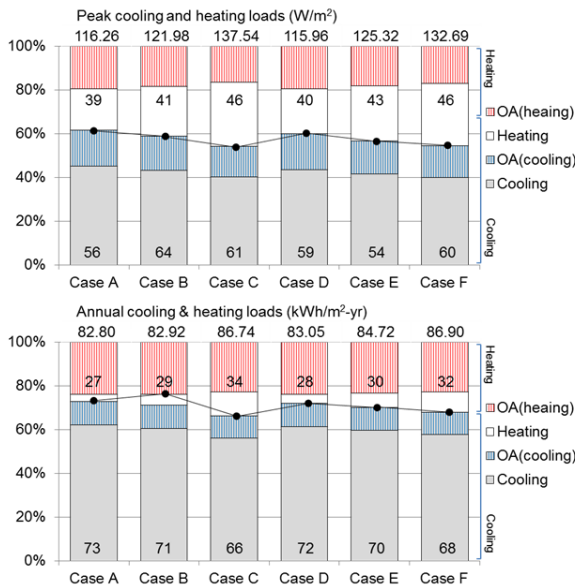


Fig. 4 Analysis of cooling-to-heating load ratio.

연간 부하비율은 냉방부하가 90% 이상으로 지배적이며 난방 부하만 보면 큰 편차를 보이고 있다. 그러나 여기에 재실자를 위한 신선외기 공급에 의한 외기부하를 고려하면 부하패턴은 다소 변하게 된다. 즉, 국내 기후에서는 외기부하의 비율이 높아서 외기부하를 포함하면 건축요소에 의한 냉, 난방 부하비율 영향도가 축소됨을 볼 수 있다. 따라서 냉, 난방 피크부하의 비율은 완화되어 약 6:4 수준을 형성한다. 연간부하 비율도 완화되었지만 66:34에서 73:27의 일정비율 이상의 수준을 형성하였다. 국내 기후를 기준으로 하는 건물의 냉, 난방 비율을 확연하게 차이를 벌리기에는 한계가 있지만 냉방 또는 난방 중 한쪽이 지배적인 타 기후대에서 그 영향도를 보다 객관적으로 판단할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 한계를 인지하고 국내 기준으로 부하비율 최적화의 타당성 평가수준에서 수행되었다. Table 2에서와 같이, 선정된 6개의 평가모델의 피크부하와 연간부하를 기준으로 식(4)~식(6)을 사용하여 국내 기후의 특성이 반영된 냉, 난방 부분부하율(PLR) 산출이 가능하다.^(1,14,15)

$$Q^A = Q_c^A + Q_h^A \quad (4)$$

$$Q_c^A = Q_c^P \times t_c \times PLR_c \quad (5)$$

$$Q_h^A = Q_h^P \times t_h \times PLR_h \quad (6)$$

단, $t_c = 1,820$ (h), $t_h = 1,831$ (h)

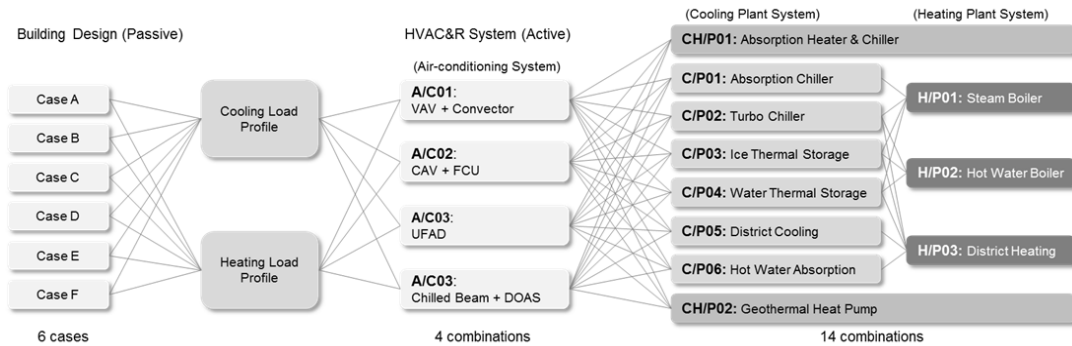


Fig. 5 Combination of HVAC&R system configurations for total efficiency analysis.

Table 2 Summary of building thermal loads

	Case(building model)					
	A	B	C	D	E	F
Q_c^p (W/m ²)	71	72	75	70	71	72
Q_h^p (W/m ²)	45	50	63	46	54	60
C-to-H load ratio	61:39	59:41	54:46	60:40	57:43	54:46
Q_c^A (kWh/m ² · yr)	60	59	57	60	59	59
Q_h^A (kWh/m ² · yr)	22	24	29	23	25	28
C-to-H load ratio	73:27	71:29	66:34	72:28	70:30	68:32
$Q_c^p \times t_c$ (kWh/m ² · yr)	130	130	135	126	129	131
$Q_h^p \times t_h$ (kWh/m ² · yr)	81	91	115	85	99	110
PLR_c	0.46	0.45	0.42	0.47	0.46	0.45
PLR_h	0.27	0.26	0.25	0.27	0.26	0.25

기후에 영향을 많이 받는 부분부하율은 동일 부하 내에서 냉, 난방 부하별로는 상이 하지만 동일한 기후 대에서는 서로 다른 부하 조건에서도 냉방 또는 난방 부분부하율은 유사한 값을 보인다. 6개의 평가모델의 국내 기상데이터를 기준으로 산출된 평균 냉방 부분부하율은 0.46이고 난방 부분부하율은 0.26이다. 모든 건물의 형태와 디자인요소 및 열 성능에 대해서 냉, 난방 부하비율과 HVAC&R 시스템의 상관관계를 일반화하는 것을 매우 어렵다. 이 문제는 건물부하와 관련한 에너지 최적화의 주제를 갖고 연구하는 분야에 모두 해당된다. 6개의 case study로 상호관계를 검증하는 방법으로 연구를 진행하였기 때문에 다양한 형상비를 갖는 건물에는 적용될 수 없는 한계가 있을 수 있다.

4. HVAC&R 시스템 효율 산출 및 최적화

4.1 효율 평가를 위한 HVAC&R 시스템 선정

HVAC&R 시스템 효율 분석을 위해서 냉, 난방 부하 비율을 조정한 Case A~F의 6개 건축대안을 기준으로 다양한 시스템별 1차 에너지 사용량을 분석하는 작업이 선행되어야 한다. HVAC&R 시스템은 공조시스템과

열원시스템이 연결되어 서로에 상호영향을 주기 때문에 두 개를 분리해서 따로 평가하는 것이 불가능하다. 즉 실제로 에너지를 주로 사용하는 곳은 열원시스템이기 때문에 공조시스템을 평가하려해도 반드시 열원시스템을 선정해야 결과 값을 도출할 수 있다. Fig. 5는 HVAC&R 시스템의 분석대안을 보여준다. 공조시스템은 다양한 시스템이 있지만 오피스 건물에 많이 적용되는 정풍량, 변풍량 및 바닥급기 시스템과 최근 에너지 절약적인 시스템으로 주목을 받고 있는 칠드빔 시스템 등 4개의 시스템(A/C-01~04)을 선정하였다. 그러나 열원시스템은 직접적으로 에너지를 소비하는 요소이기 때문에 조합 가능한 다수의 시스템을 포함하기 위해 냉방열원(C/P-01~08, CH/P-01~02)과 난방열원(H/P-01~03)을 구분하여 총 14개의 조합을 구성하였다. 따라서 분석 대상 HVAC&R 시스템은 다시 공조시스템과 열원시스템의 조합으로 연결되는 64개의 시스템으로 확장되었다. 그리고 최종적으로는 냉, 난방 부하비율이 서로 다른 건축대안 6개에 대한 HVAC&R 시스템의 시물레이션 평가대상을 총 384개로 설정하였다.

4.2 시스템별 1차 에너지 소비량 및 비율분석

TRNSYS를 통해 산출된 건축대안별 건물부하를 기준으로 다중 시스템의 상호 비교평가기법⁽⁹⁾을 활용한 HEET 프로그램을 사용하여 총 384개의 HVAC&R 시스템의 1차 에너지 소비량을 산출하였다. 시물레이션 결과, 공조 방식 및 열원시스템의 종류에 따라서 1차 에너지의 냉, 난방비율은 서로 상이한 수치를 보였다. 이는 각 HVAC&R 시스템이 갖고 있는 냉, 난방 시스템 효율의 차이라고 볼 수 있다. Fig. 6은 건물부하 Case A의 공조 및 열원시스템 조합에 따른 단위면적당 1차 에너지 소비량과 냉, 난방에너지 비율을 산출한 그래프이다. 이러한 분석은 Case A~F까지 동일하게 실시하였다. Fig. 6에서와 같이, 4개의 공조시스템별 14개의 열원시스템의 1차 에너지 소비량과 비율을 비교하였다. 소비량 총량은 정풍량 시스템(A/C02)이 가장 높고 다른 시스템에 비해 난방에너지의 비율(46:54~61:39) 또한 상대적으로 높다.

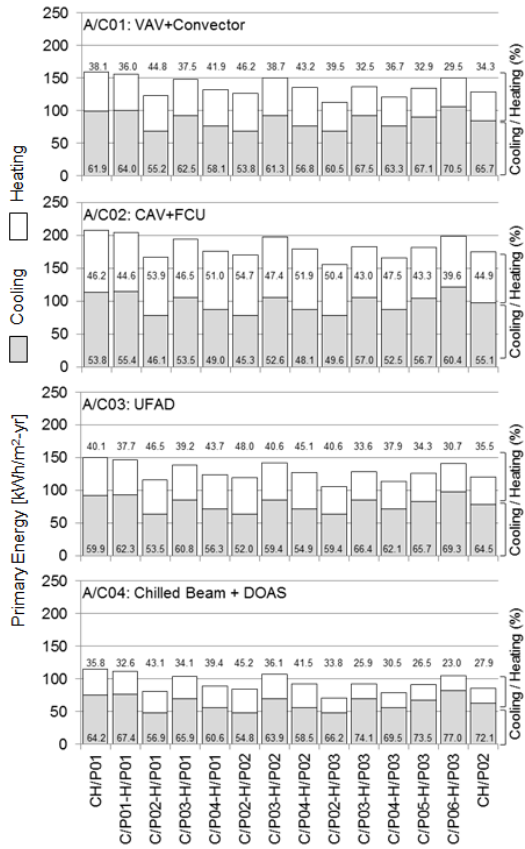


Fig. 6 Primary energy consumptions and cooling-to-heating energy ratio of Case A.

이러한 결과는 A/C02가 다른 공조시스템에 비해 난방의 시스템 효율이 낮다는 것을 의미이다. 그리고 열원시스템도 냉방 및 난방 시스템 및 구성장비의 효율에 따라서 냉, 난방 1차 에너지의 비율이 반영된다. 다시, 이러한 HVAC&R 시스템의 냉, 난방의 시스템 효율과 건물의 냉, 난방 부하 비율에 따라 복합적인 영향도를 효과적으로 보기 위해서 건물부하 대안별로 HVAC&R 시스템의 냉, 난방에너지를 Fig. 7과 같이 2차원 좌표에 표시하였다. 이 경우에는 각 시스템별 1차 에너지 총량 및 냉, 난방 에너지 비율을 건축대안별로 비교할 수 있다. 공조시스템은 앞에서 언급한 바와 같이, 정풍량 시스템(A/C02)이 1차 에너지 소비량이 가장 크고 칠드빔 시스템(A/C04)이 가장 작다. 그리고 동일한 열원시스템과 조합된 경우를 기준으로 보면 변풍량(A/C01), 바닥급기(A/C03) 및 칠드빔 시스템(A/C04)은 냉, 난방 에너지 비율이 비슷하지만 정풍량(A/C02) 시스템은 상대적으로 난방 에너지 비율이 높다. 열원시스템은 동일한 공조시스템을 기준으로 직화식 흡수식냉온수기(CH/P01)의 1차 에너지 소비량이 가장 크고 전기식(터보)냉동기+지역난방(C/P02-H/P03)이 가장 작다. 그리고 중온수 흡수식냉동기+지역난방(C/P06-H/P03)이 그래프에서 우측하단에 분포하는데, 이것은 상대적으로 냉방에너지 비율이 높은 것이다. 냉, 난방열원 조합에서도 유추가 가능하듯이, 중온수 흡수식냉동기(C/P06)는 냉방열원 대안 중에서 장비효율(COP)이 가장 낮고 지역난방(H/P03)은 1차 에너지 환산효율이 우수하여 두 개가 조합된 시스템은 결과적으로 냉방에너지 비율이 높아지게 된다. 반대로 전기식냉동기+온수보일러(C/P02-H/P02)는 좌측 상단에 분포하는데, 이는 전기식냉동기의

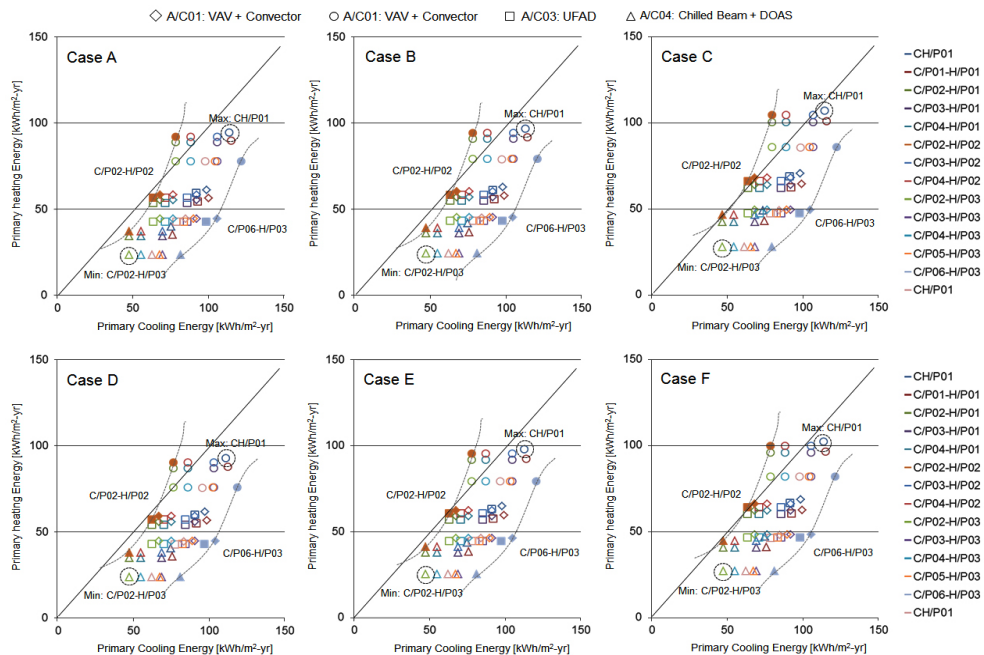


Fig. 7 384 of HVAC&R system's cooling and heating primary energy consumptions and ratio.

장비효율(COP)이 가장 우수하기 때문에 상대적으로 난방에너지 비율이 커지게 된다. 마지막으로 HVAC&R 시스템 냉, 난방에너지 비율은 건물의 냉, 난방 부하비율에 영향을 받아서 전체적으로 동일한 비율이 이동하는 것을 볼 수 있다. 이것은 반드시 각 냉, 난방 부하 비율에 맞는 HVAC&R 시스템이 존재하고, 효과적으로 1차 에너지 소비량을 최소화하기 위한 각 시스템의 종합적인 효율 데이터 구축 및 정보 활용의 가능성을 확인할 수 있었다.

4.3 HVAC&R 시스템 효율 도출

앞에서 각 HVAC&R 시스템의 1차 에너지 소비량과 냉, 난방 에너지비율 정보를 도출하였고 다시 식(1), 식(2)를 사용하여 역으로 HAC&R 시스템 효율을 도출할 수 있다. Fig. 8과 같이 냉방시스템과 난방시스템을 구분하여 산출가능 하지만 공조시스템의 종류에 따라 구분해야한다. 공조시스템은 직접적으로 에너지를 사용하지 않기 때문에 열원시스템과 연계하여 시스템 효율 계산이 가능하고 1차 에너지 소비량과 반비례하기 때문에 열원시스템은 구성장비의 효율에 따라 냉, 난방 시스템 효율의 상대적인 비율이 반영된다.

Fig. 9는 냉, 난방 부하비율이 상이한 6개의 건축 대안별 64개 HVAC&R 시스템의 평균 냉방시스템 효율과 난방시스템 효율의 분포를 보여주고 있다. 향후, 시스템 효율의 활용도를 높이기 위해서는 앞에서 도출된 공조 시스템과 열원시스템 효율이 복합적으로 반영된 시스템 효율에서 각 공조시스템과 열원시스템으로 분리하는 것이 필요하다. 따라서 HVAC&R 시스템의 냉방시스템 효율과 난방시스템 효율에서 변풍량 방식(A/C01)의 공조 시스템 효율을 1.00로 설정하였다. 다시 이것을 기준으로 다른 공조시스템 및 열원의 시스템 효율을 산출하였고 Table 3과 같다. 본 연구에서 도출된 각각의 시스템 효율은 한국기후의 특정 기준층 형태를 갖는 오피스건물 및 구성된 장비의 기본적인 효율에 국한되는 것이지만, 각 시스템이 갖고 있는 일반적인 경향은 같기 때문에 전반적인 HVAC&R 시스템 효율의 성격을 파악하는 측면에서는 매우 유용한 결과이다. 예를 들어, 바닥공조시스템(A/C03)과 빙축열(C/P03) 및 지역난방(H/P03)시스템을 적용할 경우, 총 냉방시스템 효율은 $0.70(= 1.08 \times 0.65)$ 이고 난방시스템 효율은 $0.53(= 1.04 \times 0.54)$ 로 산출이 가능하다.

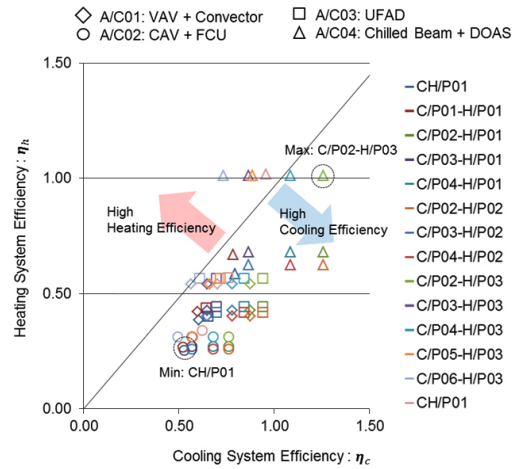


Fig. 9 Cooling and heating system efficiency distribution of 64 HVAC&R systems.

Table 3 Cooling and heating system efficiency of air-condition and plant system separately

HVAC&R system	System efficiency	
	Cooling($\eta_c^{A/C}$)	Heating($\eta_h^{A/C}$)
Air-conditioning system		
A/C01 : VAV+Convactor	1.00	1.00
A/C02 : CAV+FCU	0.87	0.63
A/C03 : UFAD	1.08	1.04
A/C04 : C/B+DOAS	1.35	1.60
Plant system	Cooling(η_c^{Plant})	Heating(η_h^{Plant})
CH/P01 : Absorption H&C	0.60	0.39
CH/P02 : Geothermal HP	0.70	0.54
C/P01 : Absorption Chiller	0.60	
C/P02 : Turbo Chiller	0.88	
C/P03 : Ice Th-Storage	0.65	
C/P04 : Water Th-Storage	0.78	
C/P05 : District Cooling	0.66	
C/P06 : HW Absorption	0.56	
H/P01 : Steam Boiler		0.42
H/P02 : Hot Water Boiler		0.40
H/P03 : District Heating		0.54

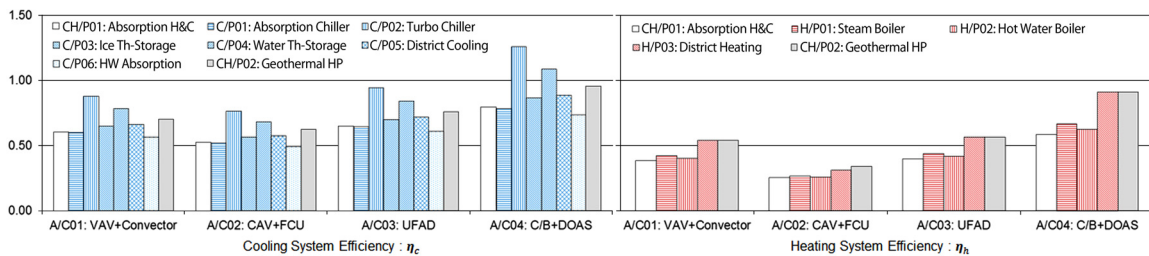


Fig. 8 Cooling and heating plant system efficiency comparison by the air-conditioning system.

5. 건물의 냉, 난방 부하비율과 HVAC&R 시스템 효율의 상호영향도 분석

앞에서 다양한 건축대안과 HVAC&R 시스템 조합을 통해 총 384 경우의 시뮬레이션을 수행하여 1차 에너지 소비량과 각각의 시스템 효율을 도출하였다. 본 장에서는 도출된 기본적인 시스템 효율정보를 기준으로 건물의 냉, 난방 부하 비율에 따라 어떠한 HVAC&R 시스템을 적용하고 최종적으로 1차 에너지 소비량이 어떻게 반영되는지를 분석하는 것이 주요 목적이다. 따라서 상호영향도를 효과적으로 분석하기 위해 우선 냉, 난방 부하비율이 가장 많이 차이가 나는 Case A와 Case C의 건축대안을 선정하였다. 그리고 HVAC&R 시스템은 냉방시스템 효율과 난방시스템 효율의 차이를 반영할 수 있는 공조시스템과 열원시스템을 각각 2개씩 선택하여 분석하였다. 분석대안 및 결과는 Table 4와 같다. 건축대안 Case A와 C의 연간 냉, 난방 부하는 각각 82 kWh/m²·yr와 86 kWh/m²·yr로 약 5%의 양적인 차이를 보이고 있으며 냉, 난방 부하비율은 73:27과 66:34로 일정부분 격차를 유지하고 있다. HVAC&R 시스템 적용에 있어서 정공량 공조시스템(A/C02)과 상대적으로 냉방시스템 효율이 우수한 전기식냉동기(C/P02) 및 온수보일러(H/P02)의 열원을 선정한 scenario A는 연간 1차 에너지 사용량에서 각각 165.7 kWh/m²·yr와 189.5 kWh/m²·yr로 양적이 차이가 14%로 더 커지는 것을 볼 수 있었다. 이때의 냉, 난방 에너지 비율은 난방시스템 효율이 저하되어 47:53와 40:60로 냉방과 난방의 비율이 역전되었다. 반대로 난방시스템 효율이 우수한 칠드림(A/C04) 공조시스템과 지역난방(H/P03) 및 중온수 흡수식냉동기(C/P06)를 적용한 scenario B의

경우는, 1차 에너지 소비량 비율은 연간 냉, 난방 부하 비율과 유사한 76:24와 69:30을 유지하고 있었으며 총 에너지 사용량도 104.8 kWh/m²·yr와 109 kWh/m²·yr로 양적이 차이가 4%로 수준으로 감소되어 scenario A와 확연하게 다른 결과를 볼 수 있다. Table 5는 시뮬레이션을 통하여 산출된 상세 데이터와 연간 건물 부하량과 시스템 효율을 사용하여 산출한 단위면적당 1차 에너지 사용량을 비교한 표이다. 결과적으로는 약 ±10% 내외의 오차를 보이며, 초기 계획시에 시스템을 선정하는 기준으로써의 신뢰도는 충분하게 갖는다. 이러한 결과는 Fig. 10과 같이 동일한 건물부하조건에서도 어떠한 HVAC&R 시스템을 적용하는가에 따라서 1차 에너지 소비량이 확연하게 다른 경향을 보인다.

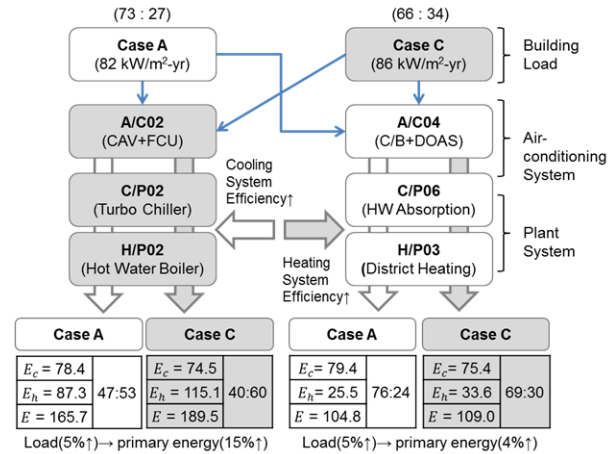


Fig. 10 A Schematic diagram of building load and system efficiency interaction analysis.

Table 4 Analysis scenarios for interaction between C-to-H load ratio and system efficiency

Scenario A	Annual load (kWh/m ² ·yr)	C-to-H L ratio	Cooling system efficiency		Heating system efficiency		Primary energy (kWh/m ² ·yr)	C-to-H E ratio	
			A/C02	C/P02	A/C02	H/P02			
Case A Cooling	$Q_c^A = 60$	73:27	$\eta_c^{A/C} = 0.87$	$\eta_c^{Plant} = 0.88$	-	-	$E_c = 78.4$	47:53	
Case A Heating	$Q_h^A = 22$				$\eta_h^{A/C} = 0.63$	$\eta_h^{Plant} = 0.40$			$E_h = 87.3$
Case A Total	$Q^A = 82$				$E = 165.7$				
Case C Cooling	$Q_c^A = 57$	66:34	$\eta_c^{A/C} = 0.87$	$\eta_c^{Plant} = 0.88$	-	-	$E_c = 74.5$	40:60	
Case C Heating	$Q_h^A = 29$				$\eta_h^{A/C} = 0.63$	$\eta_h^{Plant} = 0.40$			$E_h = 115.1$
Case C Total	$Q^A = 86$				$E = 189.5$				
Change rate	5% increase						14% increase		
Scenario B	Annual Load (kWh/m ² ·yr)	C-to-H L ratio	Cooling system efficiency		Heating system efficiency		Primary energy (kWh/m ² ·yr)	C-to-H E ratio	
			A/C04	C/P06	A/C04	H/P03			
Case A Cooling	$Q_c^A = 60$	73:27	$\eta_c^{A/C} = 1.35$	$\eta_c^{Plant} = 0.56$	-	-	$E_c = 79.4$	76:24	
Case A Heating	$Q_h^A = 22$				$\eta_h^{A/C} = 1.60$	$\eta_h^{Plant} = 0.54$			$E_h = 25.5$
Case A Total	$Q^A = 82$				$E = 104.8$				
Case C Cooling	$Q_c^A = 57$	66:34	$\eta_c^{A/C} = 1.35$	$\eta_c^{Plant} = 0.56$	-	-	$E_c = 75.4$	69:30	
Case C Heating	$Q_h^A = 29$				$\eta_h^{A/C} = 1.60$	$\eta_h^{Plant} = 0.54$			$E_h = 33.6$
Case C Total	$Q^A = 86$				$E = 109.0$				
Change rate	5% increase						4% increase		

Table 5 Primary energy comparison with simulation result and calculation by system efficiency

Primary energy(kWh/yr)		Scenario A		Scenario B	
		Case A	Case C	Case A	Case C
Simulation results	Air distribution(Cooling)	548,650	583,622	164,380	164,380
	Air distribution(Heating)	1,589,087	1,690,379	163,304	163,304
	Terminal unit fan energy (C/H)	444,564	441,661	-	-
	Heating plant	857,816	1,125,090	420,222	546,055
	Cooling plant	982,366	964,908	1,615,390	1,558,106
	Chilled water distribution	214,748	218,836	173,493	171,423
	Condenser water distribution	430,013	438,199	544,849	538,350
	Hot water distribution	140,746	147,447	124,326	131,002
	Total primary cooling energy	2,398,060	2,426,397	2,498,113	2,432,261
	Total primary heating energy	2,809,932	3,183,748	707,852	840,361
	Primary cooling energy per unit area(kWh/m ² · yr)	78.4	79.0	81.7	79.5
Primary heating energy per unit area(kWh/m ² · yr)	91.9	108.1	24.2	30.5	
$E_c = \frac{Q_c^A}{\eta_c}, E_h = \frac{Q_h^A}{\eta_h}$	Primary cooling energy per unit area(kWh/m ² · yr)	78.4	74.5	79.4	75.4
	Primary heating energy per unit area(kWh/m ² · yr)	87.4	115.1	25.5	33.6
Range of error(difference %)		0~4.9	-6.4~5.7	-5.3~2.8	5.1~10.1

즉, 냉, 난방 부하비율이 다를 경우, 총량은 비슷하여도 적용 HVAC&R 시스템에 따라서 총 1차 에너지 사용량 및 냉, 난방 에너지 비율이 변하고 냉방 또는 난방 중 어느 한쪽이 지배적인 기후대에서는 에너지 총량의 역전도 가능할 것으로도 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 건물의 1차 에너지 소비량을 효과적으로 저감하기 위해 건물의 부하 및 냉, 난방시스템 특성을 고려한 상호보완적인 최적화 방법론의 가능성을 제시하였다. 이를 위해 총 384개의 HVAC&R 시스템 및 건축대안 조합에 대한 시뮬레이션을 수행하여 건물의 냉, 난방 부하비율과 1차 에너지 사용량의 상관관계를 분석하였고 이를 통하여 HVAC&R 시스템의 다양하고 종합적인 냉방 및 난방 시스템 효율을 도출하였다. 이것은 최소한의 부하정보인 건물의 피크부하(Q^p), 부분 부하율(PLR)과 HVAC&R 시스템 효율(η)의 정보만을 가지면 10% 오차 안에서 1차 에너지 사용량(E) 산출이 가능하게 되었다. 기존의 단일방향(passive → active) 및 건물부하의 양적 최소화에 의한 건물에너지 최적화 방법은 여러 가지 제약을 가지고 있었다. 따라서 본 연구를 통하여 도출된 방법론 및 시스템 효율 정보를 활용하여 건축계획으로 피드백이 가능한 양방향 에너지 최적화 프로세스(Fig. 1 참조) 활용이 가능하며 설계 초기 단계에서 건물부하 특성을 고려한 시스템 선정 및 의사결정에 매우 유용할 것으로 판단된다. 그러나 건물의 에너지는 건물의 형태, 기후, 용도 등에 따라서 다양한 패턴을 보이기 때문에 일반화하기에 매우 어려

운 점이 있다. HVAC&R 시스템 조합 및 에너지효율 정보는 본 연구에 사용된 대상건물들에 국한된 연구결과이기 때문에 범용성 및 일반화에 대한 한계가 있다. 건물의 냉, 난방비율과 HVAC&R 시스템의 1차 에너지와의 상관관계를 일반화하고 합리적인 양방향 설계 프로세스의 구체성을 확보해야 한다는 측면에서 보다 객관적인 검증 결과의 제시가 필요하고 이를 위해 다양한 건물 형태와 디자인, 기후 및 HVAC&R 시스템을 고려한 확장된 후속 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문의 에너지 저감형 병원 및 제로에너지빌딩 구현기술개발에서 파생된 연구결과이며, 연구의 시작과 총괄 및 역량을 모아주신 신승호 소장님께 감사의 마음을 전하며 이 논문을 드립니다.

References

1. Perez-lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C., 2008, A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 3, pp. 394-398.
2. DTI, 2010, *Energy consumption in the UK*, Department of Trade and Industry, London.
3. Shahrestani, M., Yao, R., and Cook, G. K., 2013, Characterising the energy performance of centralised HVAC&R systems in the UK, *Energy and Buildings*, Vol. 62, pp. 239-247.

4. Elovitz, D. M., 2002, Selecting the right HVAC system, *ASHARE Journal*, Vol. 4, pp. 24-30.
5. Wang, W., Zmeureanu, R., and Rivard, H., 2005, Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization, *Building and Environment*, Vol. 40, pp. 1512-1525.
6. Tuhus-Durow and D. Krarti, M., 2010, Genetic algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings, *Building and Environment* Vol. 45 No. 7, pp. 1574-1584.
7. Youssef, B. and Moncef, K., 2011, Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings, *Energy and Buildings* Vol. 43, pp. 3373-3382.
8. Yang, C., Li, H., Rezgui, Y., Petri, I., Yuce, B., Chen, B., and Jayan, B., 2014, High throughput computing based distributed genetic algorithm for building energy consumption optimization, *Energy and Buildings*, Vol. 76, pp. 92-101.
9. Cho, J., Shin, S., Kim, J., and Hong, H., 2014, Development of an energy evaluation methodology to make multiple predictions of the HVAC&R system energy demand for office buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 76, pp. 169-183.
10. Hayter, S., Torcellini, P., Hayter, R. B., and Judkoff, R., 2001, *The Energy Design Process for Designing and Constructing High-Performance Buildings*, *Clima 2000/ Napoli 2001 World Congress*.
11. Pantelic, J., Raphael, B., and Tham, K., 2012, A preference driven multi-criteria optimization tool for HVAC design and operation, *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 118-126.
12. Wemhoff, A. P., 2010, Application of optimization techniques on lumped HVAC models for energy conservation, *Energy and Buildings* Vol. 42, pp. 2445-2451.
13. Kong, D., Janng, S., and Huh, J., 2014, A multi-objective Optimization Method for Energy System Design Considering Initial Cost and Primary Energy Consumption, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 26, No. 8, pp. 357-365.
14. Perez-Lombard, L., Ortiz, J., and Maestre, I. R., 2011, The map of energy flow in HVAC systems, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 12, pp. 5020-5031.
15. *ASHRAE fundamentals handbook*, 2009, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
16. Cho, J., Shin, S., Kim, J., Hwang, D., and Hong, H., 2013, Development of an HVAC&R Systems Energy Evaluation Methodology and Simulation Program for Office Buildings, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp. 363-370.
17. Cho, J., Shin, S., and Kim, J., 2012, System Impact Assessment for Energy Consumption Characteristic of Office Building HVAC&R Systems, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 8, No. 11, pp. 393-400.
18. Xu, J., Kim, J., Hong, H., and Koo, J., 2014, Optimization of building HVAC loads considering interactions between building design factors, *Proceedings of the SAREK 2014 Summer Annual Conference*, pp. 199-202.