

공조시스템 최적화를 통한 건물에너지 절감사례 연구

허 정 호, 권 한 솔*, 한 수 곤*, 임 병 찬**

서울시립대학교 건축학부, *서울시립대학교 대학원, **동아대학교 건축학부

A Case Study on the Building Energy Savings through HVAC System Optimization Process

Jung-Ho Huh, Han-Sol Kwon*, Soo-Gon Han*, Pyeongchan Ihm**

Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

*Graduate School, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

**Faculty of Architectural Design & Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

(Received January 13, 2006; revision received April 4, 2006)

ABSTRACT: The requirements for the optimal building system design is numerous. However, most system designers do not take care of various design strategies. They often argue that the proper simulation tools are not existed to solve the implicated design requirements and the time to consider many alternatives of building systems are insufficient. The aim of this study is to develop the optimization interface program that considers various system design variables and eventually find both the optimal values of annual energy use and cost. Therefore, Doe2Opt is developed to easily perform simulation-optimization process based on DOE2 and GenOpt, and minimizes energy cost of small-to-medium sized building for 6.7% and that of large sized building for 3% with optimizing several HVAC system variables.

Key words: HVAC system(공조시스템), Office building(사무소건물), Optimization(최적화), Building energy(건물에너지), Energy simulation(에너지 시뮬레이션)

1. 서 론

건설 산업의 전 과정 중에서 프로젝트의 기획 단계, 계획 및 설계 초기단계는 에너지비용 등 프로젝트의 경제성에 미치는 영향이 어느 단계보다 상대적으로 크다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 즉, 설계 초기 단계에서부터 에너지효율화에 대한 개념을 고려하게 되면 에너지절약에 관한 선택의 폭이 넓어지게 되지만 그 시기가 늦어지면, 설계를 재차해야 하거나 에너지절감효과를 반감시키는 결과를

초래하게 된다.

설계 초기단계인 공기조화설비 계획의 가장 중요한 사항은 건축물에 적합한 공조시스템을 결정하는 것이다. 일반적으로 건물에너지 시뮬레이션 프로그램은 일단 기본적인 공조시스템이 결정되면, 공조시스템의 용량과 설계변수값을 결정하는데 널리 활용되고 있다. 또한 전통적인 공조시스템뿐만 아니라 대안시스템의 에너지성능을 결정하는 다양한 파라미터를 최적화할 수 있다면 건물에너지 효율화에 큰 역할을 할 것이다.

Al-Homoud,⁽²⁾ Wetter and Wright⁽³⁻⁴⁾의 연구에 의하면, 건물과 공조시스템의 설계가 최적화가 될 경우 약 5~30% 정도의 에너지사용량이 절감된다고 보고하고 있다.

† Corresponding author

Tel.: +82-51-200-7619; fax: +82-51-200-7616

E-mail address: ihmp@dau.ac.kr

그러나 대부분의 설계자는 에너지효율성 등 설계요구조건에 복잡한 문제를 해결할 수 있는 적합한 틀이 없다고 보는 경향이 있다. 즉, 설계과정은 항상 수많은 시스템의 대안을 모색하는 데 소요되는 시간과 비용이 부족하다는 이유로 필요조건들을 만족시키려는 시도에 부정적이거나 대안결정을 위한 시스템 시뮬레이션의 범위를 좁혀서 실행하고 있는 상황이다.

또한 기존의 최적화 프로그램인 GenOpt을 건물 시뮬레이션 프로그램과 함께 실행하기 위해서 시뮬레이션에 필요한 입력값들은 이와 관련된 각 입력파일들을 매번 수정하여야 한다. 또한 건물 시뮬레이션 프로그램을 연동하기 위해서는 추가적인 설정이 필요하므로 이 프로그램을 사용하기가 용이하지 않다.

본 연구의 목적은 공조설비시스템의 에너지절약을 위하여 경제성 있는 최적의 공조시스템 설계를 할 수 있도록 시뮬레이션 기반 최적화를 위한 인터페이스 틀을 개발하는데 있다. 이를 위하여 DOE2(2.1E 버전)⁽⁵⁾와 GenOpt(2.0 버전)⁽⁶⁾의 수정 없이 두 프로그램 간의 연동방법을 개발하였고, 실행의 단순화를 위하여 시뮬레이션-최적화 인터페이스 프로그램인 Doe2Opt를 개발하였다.

개발한 Doe2Opt를 사용하여 2개의 국내 사무소건물(대형 및 중소형)을 선정하고 컴퓨터 모델링, 시뮬레이션, 최적화 분석을 실행하여 개발된 방법과 틀의 적정성을 확인하였다. 즉, 공조시스템 부분에서 에너지와 실내공기질(IAQ)에 큰 영향을 주는 것으로 알려진 외기도입의 문제에 주안점을 두어 최적화 사례연구를 진행하였다.

2. Doe2Opt의 개발

Fig. 1은 본 연구의 최적화 방법으로서 시뮬레

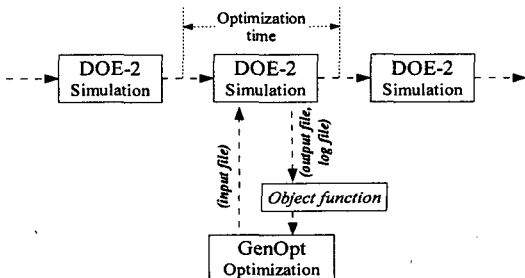


Fig. 1 Simulation-optimization process.

이션 틀과 최적화 기법과의 연계를 통하여 최적해를 구하는 절차를 도식화하였다. GenOpt에서는 목적함수값만 요구되며, DOE2는 GenOpt에서 최적화 수행과정을 통하여 생성된 변수값을 이용하여 새로운 입력파일을 생성한다. 이후 목적함수값은 다시 DOE2 출력파일로부터 읽어 들인다. 이러한 과정은 GenOpt 내에서 정지명령이 날 때까지 계속 반복 진행된다. 목적함수인 연간 에너지소비량 혹은 연간 에너지비용은 시뮬레이션 프로그램을 통하여 평가되며 제약조건을 만족하면서 최적화 과정이 진행된다.

본 연구의 특성에 가장 적합한 최적화 알고리즘을 선정하기 위하여 GenOpt 상에서 가능한 다양한 알고리즘을 테스트한 결과, 일반화된 패턴 탐색방법의 부류인 Hooke-Jeeves 알고리즘을 선정하였다. Hooke-Jeeves 알고리즘은 목적함수의 계곡을 따라 효과적으로 이동하기 때문에 대상으로 하는 문제의 차원 수를 낮출 수 있다. 이 알고리즘은 자료의 피팅(fitting)에 효과적이며 미분과정을 필요치 않기 때문에 시뮬레이션 프로그램을 사용하는 본 연구와 같이 목적함수가 불연속적이라고 예상되는 것에 적합하다.

경제적인 공조시스템을 설계하기 위해서는 설계 초기단계에서부터 여러 가지의 요구조건들을 반영하는 다양한 대안을 검토하게 된다. 최적화 알고리즘은 건물 시뮬레이션 프로그램과 최적화 프로그램을 연동하여 실행할 수 있으나, 이 과정

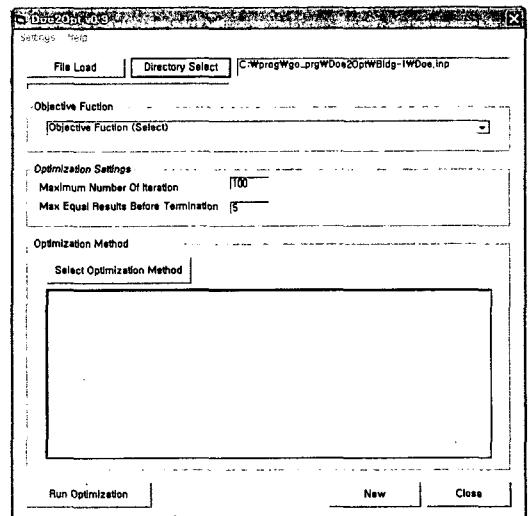


Fig. 2 Doe2Opt program.

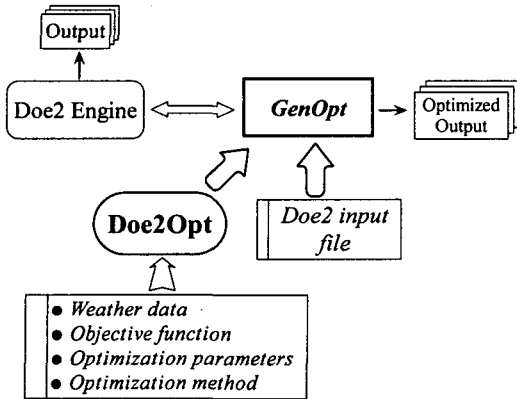


Fig. 3 Schematic diagram of the interconnected programs (Doe2Opt, GenOpt and Doe2).

이 쉽지 않기 때문에 회사에서는 최적 설계 프로세스에 대한 고려를 하지 않고 몇 가지 기본 시스템의 단순한 검토를 거친 후에 시스템을 선정하고 있다.

본 연구에서는 최적화 도구의 사용자 편의성을 위하여 Fig. 2의 시뮬레이션-최적화 기반 프로토타입 인터페이스인 Doe2Opt 프로그램을 개발하여 설계 초기단계에서부터 수치적 최적화 기법을 적극적으로 활용하도록 유도하였다.

Fig. 3은 최적화에 관여하는 프로그램 상호관계를 보여주고 있다. Doe2Opt는 GenOpt의 입력사항과 DOE2 및 GenOpt를 연동시켜 설정을 단순화시키는 프로그램이며, 이를 통하여 DOE2로 구현 가능한 공조시스템의 에너지 성능에 관여하는 설계변수는 기본적으로 모두 최적해를 구할 수가 있다.

3. 사례분석

3.1 중소형 사무소 건물

3.1.1 대상건물

대상건물은 1965년도에 건설되었으며, 서울 도심에 위치한 중소규모 사무소 건물이다. 1988년 한 차례의 열원설비와 덕트 및 배관의 개보수가 있었으나 건물 전체적으로 열적인 측면에서 효율이 매우 떨어질 것으로 판단된다. 건물의 주출입구는 남쪽을 향하고 있으며, 건물의 주변 역시 남향이다. 건물의 개요는 Table 1과 같다.

Table 1 Summary of small-to-medium office building

Grouping		Contents
Location	Address	Euljiro Junggu Seoul
	District	Commercial zone
Area	Plottage	1,206.29 m ²
	Building area	1,008.27 m ²
	Total area	12,805.35 m ²
Building	Service	Office
	Structure	Steel Reinforced Concrete
	Exterior	Granite, Pair glass 6 mm
	Floor info.	Under 2+Ground 11 (Office)
	Completion	December 1965

3.1.2 공조시스템

대상건물의 공조시스템의 개요는 아래와 같으며, 냉·난방시스템은 외주부에 설치되어 있는 팬코일 유닛(FCU)이다. 정풍량시스템(CAV)은 주로 환기의 목적으로 사용된다. 정풍량시스템과 빙축열 등 열원시스템의 구체적인 제원은 Table 2와 같다.

- 냉·난방: 팬코일 유닛(FCU)
 - 환기: 정풍량(CAV)시스템
 - 배기: 각 층 천장 플레넘을 통해 이루어짐
- 건물의 실제 운영스케줄을 조사하여 다음과 같은 실내환경 설정조건을 기준모델에 적용하였다.
- 실내설정온도(하계/동계): 27.5°C/23.5°C
 - 실내설정습도(하계/동계): 60%/40%
 - 외기 도입량: 6.94 [L/s·인]

3.1.3 사무소 건물의 기준모델 검증

대상건물에 대한 시뮬레이션 결과와 대상건물의 월별 에너지고지서를 참조하여 실제 에너지사용량을 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 월별 에너지(전기 및 가스)사용량을 상호 비교해 봄으로써 건물의 정확한 에너지 성능분석을 할 수 있으며, 최적화 시뮬레이션을 위한 기본 모델로 사용하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 실제 건물에서 1996년에 사용된 전기 및 가스 사용량과 시뮬레이션 결과를 월별로 기준 모델과 비교하였다. 따라서 시뮬레이션시 사용된 기상자료는 1996년 서울의 기상자료를 이용하였다. 전기사용량의 경우 전기사용량이 많은 6, 7월달의 오차가 큰 것으로 나타났다. 그

Table 2 HVAC system and plants of the small-to-medium office building

Two pipe fan coil						
Heating coil		Cooling coil		Supply fan		
Supply temp : 60°C		Supply temp : 9.5°C		Static pressure : 74.65 Pa		
Control : Constant		Control : Constant		Efficiency (%) : 0.5		
Heat source : High temp. water for plant				Draw-through fan placement		
Boiler						
Quantity	Higher calorific power (kcal/hr)	Heat surface area (m ²)	Rated quantity of evaporation (kg/hr)	Upper used pressure (kg/cm ²)	Efficiency (%)	
2	965,550	9.99	1,500	10	91.5	
Refrigerator						
Class	Quantity	Capacity (RT)	Cooling water temp.	Evaporator ((L/min)/kW)	Compressor ((L/min)/kW)	Cooling water pump
Reciprocating	2	112	12/7°C	4.29	3.7	15 HP × 2
Ice storage system						
Class	Working (Str/End)	Storage	Max ice temp.	Tank heat loss factor		
Ice on coil	8 pm / 5 am	100%	-4.4 ~ -4.6°C	0.001		
Cooling tower						
Class	Quantity	Capacity	Setting temp.	Temp. control		
Open type	1	250 RT	27°C	Fixed temp.		

러나 월별 전기사용량 특성은 거의 동일하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 실제 건물의 전기사용량의 경우 2,416 MWh인데 반하여 기준 모델은 2,354.7 MWh로써 61.3 MWh의 차이를 나타내었으며, 약 2.53%의 오차를 보였다.

가스의 경우 월별 사용량에서 1, 2월달에는 차이를 보이고 있으나, 월별 사용량 패턴이 실제 대상건물과 매우 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 전체 사용량의 경우에는 실제 에너지사

용량은 1,791.5 MWh이며, 기준 모델의 가스사용량은 1,582.0 MWh로 약 209 MWh의 차이가 나타나며, 약 11.6%의 오차를 보였다.

위에서와 같이 전기와 가스 사용량의 차이는 에너지사용량 예측을 위한 시뮬레이션을 하였을 경우 공조설비 및 열원설비의 특성 및 운영상의 특성들을 반영하는 데는 한계가 있으며, 당시(1996년)의 시스템운영 상태 및 조건을 반영하는 데 한계가 있는 것으로 판단된다.

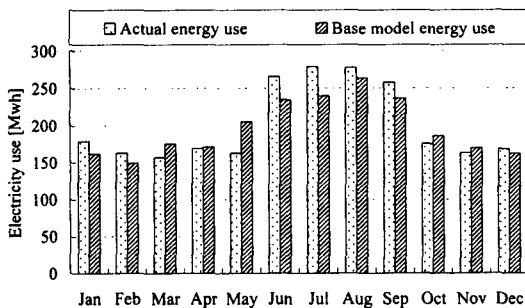


Fig. 4 Comparison of electricity use between actual and base model at small-to-medium office building in 1996.

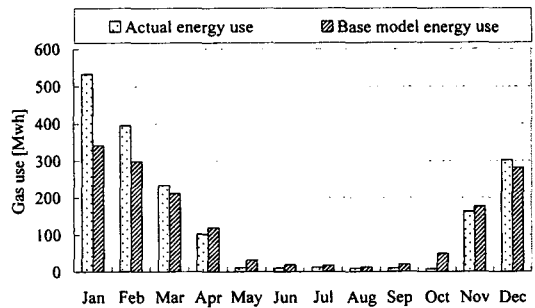


Fig. 5 Comparison of gas use between actual and base model at small-to-medium office building in 1996.

3.1.4 공조시스템 최적화

최적화 사례연구에서는 실제 건물에서 운전 중인 공조시스템에 건물에너지 절감을 위하여 3개의 컴포넌트(이코노마이저, 열회수코일, 외기량 조절댐퍼)를 추가하여 컴포넌트에 관련된 변수의 최적값을 도출하였으며, 최적화 전후의 에너지비용을 비교하였다.

Fig. 6은 기존건물의 공조시스템에 3개의 컴포넌트를 추가한 최적화 대상의 건물공조시스템 구성도를 나타내고 있다.

에너지비용의 계산에서 전기의 경우, 한국전력의 요금체계(2004. 3. 1 시행)를 기반으로 일반용 전력(갑)을 적용하여 모델링하였으며, 가스비용은 서울 도시가스 공급업체의 요금체계를 반영하였다.

최적화 알고리즘으로 Hooke-Jeeves 알고리즘을 사용하였으며 연간 건물에너지비용의 최적화를 수행하였다. 이 최적화 과정을 통해 도출된 각 변수의 최적화된 결과값은 Table 3에 나타낸다.

Fig. 7은 실제 건물에서의 월별 에너지비용과 최적화된 에너지비용을 비교한 것이다. 최적화된 과정을 통하여 매월 에너지사용비용이 절감되는 것을 알 수 있다. 대상건물의 연간 에너지비용에 대한 최적화 전후의 비교는 Table 4에 나타나 있으며 연

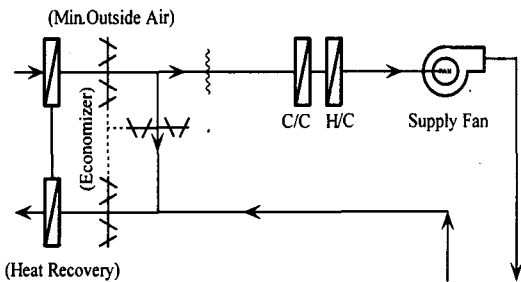


Fig. 6 Schematic diagram of the CAV system in the small-to-medium office building.

Table 3 Optimized results of HVAC system variables for the small-to-medium office building

Component	Variable	Value
Economizer	Lower temperature limit (°C)	3
	Upper temperature limit (°C)	21
	Enthalpy limit (kJ/kg)	58.6
Heat recovery	Heat exchange effectiveness	0.67
O.A. damper	Min. outside air ratio (%)	0.7

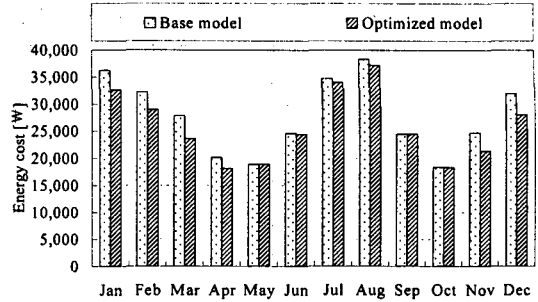


Fig. 7 Monthly building energy cost at small-to-medium office building.

Table 4 Yearly energy cost for small-to-medium office building (Unit: ₩1,000)

Energy source	Reference cost	Optimum cost	Reduction
Electricity	239,662	231,974	3.2%
Gas	93,063	78,304	15.9%
Yearly total cost	332,725	310,278	6.7%

간 에너지비용은 약 6.7%까지의 절감효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고 전력량보다는 가스량의 절감규모가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

3.2 대형 사무소 건물

3.2.1 대상건물

대상건물은 서울시 중구에 위치한 지상 18층, 지하 6층 규모로 1992년에 완공된 에너지사용량

Table 5 Summary of large sized office building

Grouping		Contents	
Location	Address	Bonglaedong Junggu Seoul	
	District	Commercial zone	
Area	Plottage	3,351.83 m ²	
	Building area	1,232.34 m ²	
	Total area	37,708.38 m ²	
Building	Service	Office	
	Structure	Steel Reinforced Concrete	
	Exterior	Granite, Pair glass 6/12/6mm	
	Floor info.	Under 2-6	: Parking
		Under 1	: Restaurant, Parking
	Ground 1	: Lounge, Bank	
Ground 2-18	: Bank, Office		
Completion		July 1992	

이 비교적 많은 요구되는 고층 빌딩이다. 건물의 관리상태가 양호하며 최근에 도심에 지어진 사무소 건축의 전형적인 예라고 할 수 있다. 건물의 주출입구는 남동쪽을 향하고, 건물의 주면은 남동향이며 건물의 개요는 Table 5와 같다.

3.2.2 공조시스템

건물의 냉·난방을 담당하는 시스템은 건물의 외주부에 설치되어 있는 컨벡터와 내주부에 설치되어 있는 VAV 공조시스템이다. 아래에는 냉난방설비의 개요를 나타내었으며, VAV 시스템과 열원시스템의 구체적인 사양은 Table 6과 같다.

- 냉·난방 : 가습기 설치 VAV 시스템
- 난방 : 방열기(Convector)
- 배기 : 각 층의 천장덕트를 통해 강제배기

또한 건물에서 실제로 사용하는 공조설비의 운전조건을 조사하여 다음과 같은 실내환경 설정조

건을 기준모델에 적용하였다.

- 실내 설정온도(하계/동계) : 27.5℃/23.5℃
- 실내 설정습도(하계/동계) : 60%/40%
- 외기 도입량 : 9.44 [L/s·인]

3.2.3 사무소 건물의 기준 모델 검증

Fig. 8와 Fig. 9는 실제 건물의 전기 및 가스 사용량을 시뮬레이션을 통하여 구한 기준 모델과 월별로 비교하여 나타내었다. 전기사용량의 경우 전기사용량이 많은 7월과 8월의 오차가 큰 것으로 나타났다. 건물의 실제의 전체 전기사용량은 5,602 MWh이며, 대상건물의 시뮬레이션을 실행한 결과, 연간 총 전기사용량은 5,269 MWh이다. 따라서 그 오차가 5.9%로 나타났으나, 월별 전기사용량을 비교하였을 경우 그 패턴은 거의 동일하게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

가스의 경우 건물의 연간 실제 가스사용량은

Table 6 HVAC system and plants of large-sized office building

VAV system						
Heating coil			Cooling coil			
Water supply temp. : 65℃ Air supply temp. : 21℃ Heating capacity : 500,000 kcal/hr Heat source : High temp. water for plant			Water supply temp. : 12℃ Air supply temp. : 16℃ Cooling capacity : 1,500,000 kcal/hr			
Supply fan			Return fan			
Variety : Axial (Variable pitch) Airflow control : Blade Static pressure : 140 mmAq (1~9 floor), 110 mmAq (10~18 floor) Airflow : Max. 1,833.5 m ³ /min., Min. 880 m ³ /min.			Variety : Axial (Variable pitch) Airflow control : Blade Static pressure : 90 mmAq (1~9 floor), 70 mmAq (10~18 floor) Airflow : Max. 1,650 m ³ /min., Min. 600 m ³ /min.			
Humidifier (Relative humidity : 30%, Steam : 400 kg/hr)						
Boiler						
Quantity	Higher calorific power (kcal/hr)	Heat surface area (m ²)	Rated quantity of evaporation (kg/hr)	Upper used pressure (kg/cm ²)	Efficiency (%)	
2	965,550	9.8	1,500	10	90 or more	
Refrigerator						
Class	Quantity	Capacity (RT)	Cooling water temp.	Evaporator ((L/min)/kW)	Compressor ((L/min)/kW)	Cooling water pump
Turbo	2	540	5℃	10.08	12.2	3 HP
Cooling tower						
Class	Quantity	Capacity	Setting temp.	Temp. control		
Open model	2	600 RT	25.8℃	Fixed temp.		

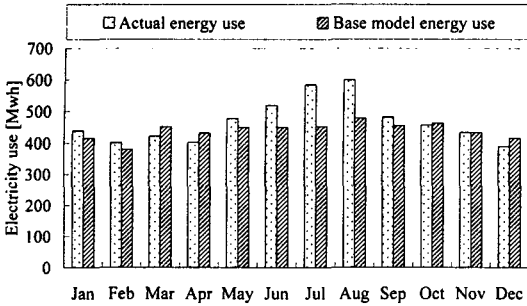


Fig. 8 Comparison of electricity use between actual and base model at large sized office building in 1996.

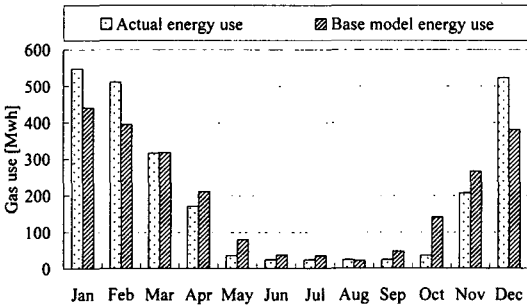


Fig. 9 Comparison of gas use between actual and base model at large sized office building in 1996.

2,448 MWh로 조사되었으며, 시뮬레이션 결과는 2,375 MWh로 나타나 약 2.9%의 오차를 나타내고 있다. 그러나 월별 사용량 패턴도 역시 매우 유사하게 나타나고 있다.

실제 사용량과 시뮬레이션 결과의 차이는 중소형 사무소 건물의 경우와 마찬가지로 실제의 공조설비 및 열원설비의 특성 및 운영상의 특성을 시뮬레이션에 정확히 반영하는 데는 한계가 있으며 건물의 공조시스템을 운전, 관리하는 방법에 따라 차이를 보이기 때문인 것으로 판단된다.

3.2.4 공조시스템 최적화

대상건물에 실제로 설치되어 운영 중인 시스템은 단일덕트 VAV 시스템이다. 공조시스템의 최적화 문제, 에너지 사용요금 체계, 최적화 알고리즘의 설정은 앞에서 기술한 중소형 사무소 건물 사례와 동일하다.

최적화 과정을 통해 도출된 각 변수의 최적변

Table 7 Optimized results of HVAC system variables for large sized office building

Component	Variable	Value
Economizer	Lower temperature limit (°C)	3
	Upper temperature limit (°C)	20
	Enthalpy limit (kJ/kg)	58.6
Heat recovery	Heat exchange effectiveness	0.6
O.A. damper	Min. outside air ratio (%)	10

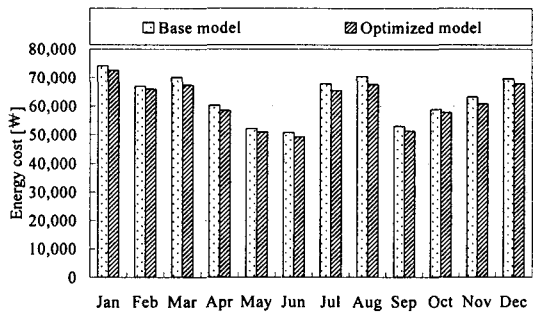


Fig. 10 Monthly building energy cost at large sized office building.

Table 8 Yearly energy cost for large sized office building (Unit: ₩1,000)

Energy source	Reference cost	Optimum cost	Reduction
Electricity	608,334	594,416	2.3%
Gas	148,641	140,307	5.6%
Yearly total cost	756,975	734,723	3.0%

수값은 Table 7에 나타낸다. Fig. 10은 실제 건물의 월별 에너지비용과 최적화된 에너지비용을 비교한 것이다. 최적화된 과정을 통하여 매월 에너지사용비용이 절감되는 것을 알 수 있다. 대상건물의 연간 에너지비용에 대한 비교는 Table 8에서 나타나듯 약 3%, 금액으로는 2천만원 정도의 절감효과가 있다. 또한, 전력사용량보다는 가스사용량의 절감이 큰 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 시뮬레이션-최적화 기법을 기반으로 하는 사용자 인터페이스 프로그램을 개발하였다. 사례연구로서 두 가지 형태의 사무소 건물

(저부하, 고부하)을 사용하여 기존건물의 공조시스템에서 에너지절감을 위한 컴포넌트를 추가시킨 후 개발된 프로그램을 적용하여 최적화 전후의 에너지비용을 비교하였다. 연구에서 도출된 결과는 다음과 같다.

(1) 개발된 시뮬레이션-최적화 인터페이스 프로그램을 사용하여 공조시스템에 관여하는 여러 가지 설계 결정요소를 동시에 고려할 수 있으며 최적설계 변수값을 용이하게 구할 수 있다.

(2) 공조시스템에서 외기도입효과에 관련된 최적화 사례결과로서, 중소사무소 건물의 연간 에너지비용의 절약률은 약 6.7%이며 가스의 절감비용이 더 큰 것으로 나타났다. 대형 사무소 건물의 경우, 약 3%의 연간 에너지비용(약 2,000만원에 해당)이 절감되는 것으로 분석되었다. 전력보다는 가스에서 소비되는 에너지비용이 더 절감되었다. 사무소 연면적의 크기에 따라 절감비율이 다른 이유는 대형 건물의 경우 전체 에너지소비량의 20%가 공조시스템에 사용된 반면, 중소형 건물에서는 전체 에너지소비량의 40%가 공조시스템에 사용되었기 때문이라고 사료된다.

(3) 기존건물에서 시뮬레이션-최적화 프로그램을 사용하여 시스템에 관련된 최적화된 변수값을 고려하면 향후 건물시스템 운영에 있어 경제성 판단의 지표로 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2003년 건설교통부 지원 건설기술연구 개발사업인 에너지 효율향상을 위한 건축설비

최적설계 및 관리시스템 기술개발(2차년도) 중 “공조설비를 위한 시스템 최적화 설계기술 개발”의 일부분으로 수행됨.

참고문헌

1. Energy Design Resources, 2004, Design Briefs: Integrated Energy Design, <http://www.energydesignresources.com>.
2. Al-Homoud, M., 1997, Optimum thermal design of office buildings, International Journal of Energy Research, Vol. 21, pp.941-957.
3. Architectural Energy Corporation, 2004, VisualDOE 4.0 User Manual.
4. Wetter, M., 2004, Generic Optimization Program User manual Version 2.0.0, University of California, USA.
5. Jeong, Y. S., 2001, Energy Retrofit and Estimate for Small-to-Medium Office Buildings, University of Seoul, Korea.
6. Wetter, M. and Wright, J., 2003, Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method, Proc. of the 8th IBPSA Conference, Vol.3, pp.1401-1408.
7. Wetter, M. and Wright, J., 2003, A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization, Building and Environment, Vol. 39, Issue 8, pp.989-999.