

# 건물에너지 효율향상을 위한 최적화 툴의 개발

권 한 솔<sup>\*†</sup>, 한 수 곤<sup>\*</sup>, 임 병 찬<sup>\*\*</sup>, 허 정 호<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>서울시립대학교 대학원, <sup>\*\*</sup>동아대학교 건축학부, <sup>\*\*\*</sup>서울시립대학교 건축학부(건축공학전공)

## Development of Optimization Program for the Building Energy Efficiency Improvement

Han-Sol Kwon<sup>\*†</sup>, Soo-Gon Han<sup>\*</sup>, Pyeongchan Ihm<sup>\*\*</sup>, Jung-Ho Huh<sup>\*\*\*</sup>

**ABSTRACT:** This study develops an optimization program to use optimum design of building HVAC system reducing building energy use and cost. Doe2Opt developed is an interface program between DOE2 and GenOpt to perform the optimization procedure more easily. The optimum results can be used to estimate the economical efficiency concerning the building management.

**Key words:** Optimization(최적화), Building Energy(건물에너지), Energy simulation(에너지 시뮬레이션)

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 배경 및 목적

건물의 시스템설계 단계에서부터 고려해야 하는 요구사항이 갈수록 다양해지고 있으며 설계단계에서의 한계성(축박한 설계시간, 비전문성, 분야 간 상충, 불확실성 등)이 상존하여 디자인 개발의 신속성과 체계성을 갖추는데 많은 어려움이 있다. 또한, 고성능, 다기능설계에 대한 사회적 필요성도 점차 요구되고 있다. 그러나, 대부분의 설계자는 에너지효율성 등 설계요구 조건의 복잡한 문제를 해결할 수 있는 적합한 툴이 없다는 측면과 설계과정은 항상 수많은 시스템의 대안을 모색하는데 소요되는 시간과 비용이 부족하다는 이유로 필요조건들을 만족시키려는 시도에 부정적

이거나 대안결정을 위한 시스템 시뮬레이션의 범위를 좁혀서 실행하고 있는 상황이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 설계 결정요소를 동시에 고려하여 균형있고 유기적인 방법으로 최적설계결과를 구하는 설계자동화기술을 개발할 필요가 있다.

기존연구 결과(AI-Homoud, 1997; Wetter and Wright, 2003a, b)에 의하면, 건물과 HVAC설계가 최적화가 될 경우, 약 5~30%정도의 에너지 사용량이 절감된다고 분석하고 있다. 이는 바닥면적이 10,000m<sup>2</sup>인 사무소건물에서, 평균 비용절감이 15%, 평균 에너지가격이 1kWh당 66원, 연간 200kWh/m<sup>2</sup>의 에너지를 사용하고 있다고 가정한다면, 건물 및 HVAC설계의 최적화를 통하여 연간 1,200만원이 절약되는 것으로 분석할 수 있다. 대형 건물의 프로젝트인 경우, 대부분은 건물 에너지 시뮬레이션 분석을 통하여 설계가 진행되므로 시뮬레이션기반 최적화는 충분한 투자 가치가 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 건물공조시스템의 설계에 활용하고 건물에너지사용량 및 에너지비용을 절감하기 위

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2472;

E-mail address: soly501@nate.com

하여 공조시스템의 최적설계결과를 설계 시 유용하게 활용될 수 있는 시뮬레이션 기반 최적화를 위한 툴을 개발하는데 있다.

## 1.2 연구의 내용 및 범위

본 연구의 핵심은 공조설비 설계프로세스 중 기획 및 계획단계 혹은 설계 초기단계에서 경험이나 관행으로 결정되고 있는 공조시스템에 대하여 과학적이고 체계적인 프로세스와 방법을 사용하여 에너지 측면에서 경제성 있는 최적의 공조시스템 설계를 위한 시뮬레이션-최적화 툴을 개발하는 데 있다.

최적화 툴(optimizer)은 각 공조시스템의 설정 변수들 중에서 시뮬레이션-최적화과정을 통하여 가장 에너지 효율적이고 경제성 있는 변수값을 찾는다. 이를 위하여 GenOpt 프로그램에서 구현 가능한 알고리즘을 선정 및 분석하였다. 또한 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램인 DOE2와 GenOpt간의 연동방법을 개발하였으며 실행의 단순화를 위한 시뮬레이션-최적화 인터페이스 프로그램인 Doe2Opt를 개발하였다.

이를 사용한 사례연구로서 국내에 현존하는 사무소를 선정하고 컴퓨터 모델링, 시뮬레이션 그리고 최적화를 실행하여 개발된 방법과 툴의 타당성을 확인하였다.

## 2. 최적화 프로그램 기반 사항 및 개발

### 2.1 건물에너지 최적화 절차 및 기반사항

Fig. 1은 본 연구의 최적화방법으로서 시뮬레이션 툴과 최적화기법과의 관계를 통하여 최적해를 추적해 나가는 절차를 도식화 한 것이다. GenOpt에서는 목적함수 값만 요구되며 DOE-2는 GenOpt에서 최적화 수행과정을 통하여 생성된 변수값을 이용하여 새로운 입력파일이 생성된다. 그 후 목적함수 값은 다시 DOE2 출력파일로부터 읽어 들인다. 이러한 과정은 GenOpt내에서 정지 명령이 날 때까지 계속 반복 진행된다. 목적함수인 연간에너지소비량 혹은 연간 에너지비용은 시뮬레이션 프로그램을 통하여 평가되며 제약조건을 만족하면서 최적화과정이 진행된다.

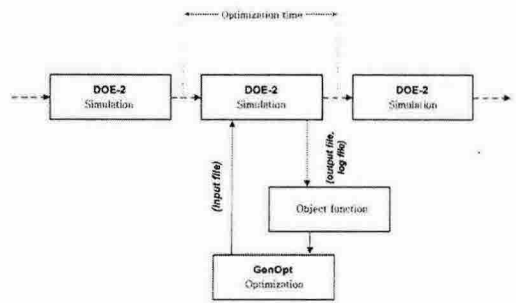


Fig. 1 Simulation - Optimization Process

### 2.1.1 최적화 알고리즘

최적화 알고리즘은 일반적으로 다음과 같은 고려사항에 따라 주로 결정된다.

- 함수의 구성(선형, 비선형, 블록형, 연속형, 국소역 최소 값의 개수 등)
- 1차 및 2차 미분 값의 존재여부
- 최적화 문제의 사이즈(독립변수의 개수)
- 문제의 제약조건(독립변수 및 종속변수, 독립변수 또는 종속변수)

본 연구의 특성에 가장 적합한 알고리즘을 선정하기 위하여 GenOpt상에서 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 데이터 피팅(fitting)에 효과적이며 미분과정을 필요치 않기 때문에 시뮬레이션 프로그램을 사용하는 본 연구와 같이 목적함수가 불연속적이라고 예상되는 것에 적합하다.

### 2.1.2 GenOpt

GenOpt는 LBNL(Lawrence Berkely National Laboratory)의 시뮬레이션 연구그룹에 의하여 개발된 소프트웨어로서 일반적인 최적화 요구사항을 충족시키는 도구이다. Fig. 2는 최적화 툴(GenOpt)과 시뮬레이션 프로그램의 상호연동 구조를 보여주고 있다. GenOpt는 시뮬레이션 엔진에서 사용되는 텍스트 입력파일을 최적화 과정을 통하여 생성시키며, 시뮬레이션 프로그램은 텍스트파일로 결과값을 출력한다. 이 출력된 텍스트파일을 GenOpt가 읽어 목적함수 값을 계산하여

목적함수 조건에 따른 후 처리과정을 수행하게 된다.

### 2.1.3 DOE-2.1E

미국 에너지성(U.S. Department of Energy)의 지원 하에 LBNL에서 오래 전에 개발되어 최근 까지 지속적으로 수정·보완 및 관리되어 왔다. 현재 2.1E버전까지 업데이트된 이 프로그램을 통하여 신뢰성 있는 동적 열부하 계산 및 건물에너지의 분석이 가능하다. DOE-2.1E는 시뮬레이션이 가능한 HVAC 시스템 및 열원기기 종류가 다양하고 정밀하여 현재 발표되고 있는 프로그램들의 표준이 되고 있으며 타당성 및 정밀도 분석의 기준으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 DOE2 입력용 템플릿 파일을 쉽게 생성하기 위해 VisualDOE4.0 프로그램을 사용하였다. VisualDOE4.0은 DOE-2.1E를 계산엔진으로 사용한 입·출력 기능을 향상시킨 프로그램이며 Fig. 3은 DOE2와 VisualDOE간의 연동관계를 나타낸 것이다.

## 2.2 프로토타입 최적화 툴 개발

최적화 알고리즘은 건물 시뮬레이션 프로그램과 최적화 프로그램을 연동하여 실행할 수 있으나, 이 과정이 쉽지 않기 때문에 회사에서는 최적 설계 프로세스에 대한 고려를 하지 않고 몇 가지 기본 시스템의 단순한 검토를 거친 후에 시스템을 선정하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 최적화 도구의 사용자 편의성을 위하여 Fig. 4의 시뮬레이션-최적화기반 프로토타입 인터페이스인 Doe2Opt 프로그램을 개발하여 설계초기단계에서부터 수치적 최적화기법을 적극적으로 활용하도록 유도하였다. Fig. 5는 최적화에 관여하는 프로그램 상호간의 인터페이스를 개략적으로 보여주고 있다. Doe2Opt는 GenOpt의 입력사항과 Doe2 및 GenOpt를 연동시켜 설정을 단순화시키는 프로그램이다.

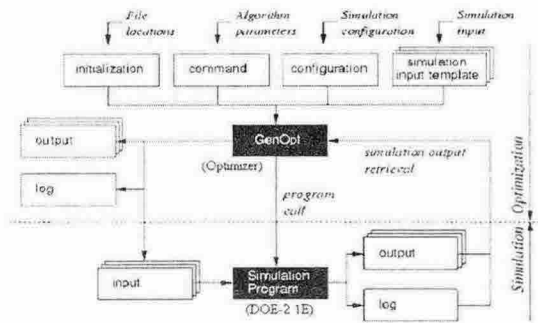


Fig. 2 Linkage of GenOpt and Simulation program

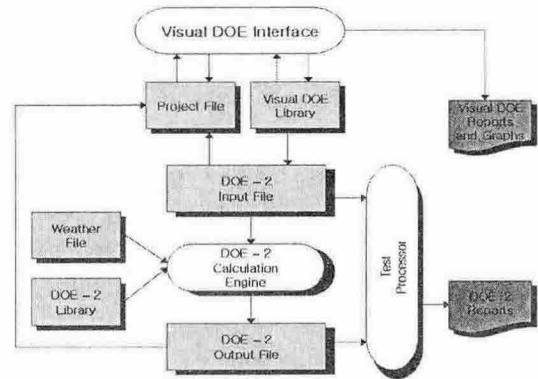


Fig. 3 Structure of Visual DOE

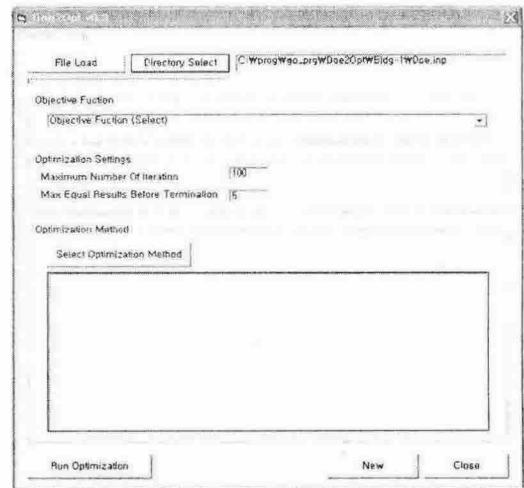


Fig. 4 Doe2Opt program

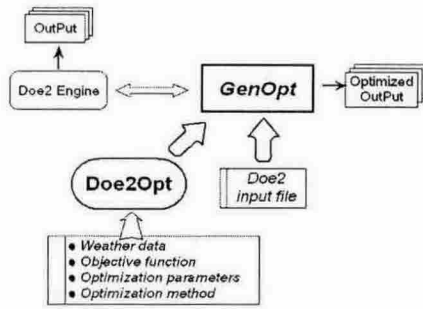


Fig. 5 Linkage of programs (Doe2Opt, GenOpt, Doe2 engine)

DOE2 프로그램으로 구현 가능한 공조시스템의 에너지 성능에 관여하는 설계변수는 기본적으로 모두 가능하다. 공조설비 최적조합과 같은 문제의 특성은 다음과 같이 대략적으로 분류할 수 있다.

- 컴포넌트 종류 및 개수
- 컴포넌트 형상 연결(topological connection)
- 컴포넌트 용량(혹은, 물리적 크기)
- 시스템 운전(혹은, 제어전략 방안)

### 3. 결과

#### 3.1 대상건물의 개요 및 HVAC시스템의 사양

##### 3.1.1 대상건물의 현황

대상건물은 서울시 중구에 위치한 지상 18층, 지하 6층 규모로 1992년에 완공된 에너지 사용량이 비교적 많은 요구되는 고층빌딩이다. 건물의 관리 상태가 양호하며 최근에 도심에 지어진 사무소 건축의 전형적인 예라고 할 수 있다. 건물의 주출입구는 남동쪽을 향하고, 건물의 주변은 남동향이며 건물의 개요는 Table 1과 같다.

##### 3.1.2 HVAC시스템의 사양

건물의 냉·난방을 담당하는 시스템은 건물의 외주부에 설치되어 있는 컨벡터와 내주부에 설치되어 있는 VAV 공조시스템이다.

- 냉·난방 : 가습기 설치 VAV 시스템
  - 난방 : 방열기(Convector)
  - 배기 : 각 층의 천장덕트를 통해 강제 배기
- VAV 시스템과 열원시스템의 구체적인 사양은 Table 2와 같다.

Table 1 Summary of object building

Grouping	contents		
Location	Address	Bonglaedong Junggu Seoul	
	District	Commercial zone	
Area	Plottage	3,351.83 m <sup>2</sup>	
	Building area	1,232.34 m <sup>2</sup>	
	Total area	37,708.38 m <sup>2</sup>	
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		
Note	Height : 79.9 m Azimuth angle of building is east side 42°		

Table 2 HVAC system and Plants

VAV system						
Heating coil			Cooling coil			
Water supply Temp. : 65 °C			Water supply Temp. : 12 °C			
Air supply Temp. : 21 °C			Air supply Temp. : 16 °C			
Heating capacity : 500,000 kcal/hr			Cooling capacity : 1,500,000 kcal/hr			
Heat source : High temp. water for plant						
Supply fan			Return fan			
Variety : Axial (Variable pitch)			Variety : Axial (Variable pitch)			
Airflow control : Blade			Airflow control : Blade			
Static pressure : 140 mmAq (1-9 floor)			Static pressure : 90 mmAq (1-9 floor)			
110 mmAq (10-18 floor)			70 mmAq (10-18 floor)			
Airflow : Max. 1833.5 m <sup>3</sup> /min.			Airflow : Max. 1650 m <sup>3</sup> /min.			
Min. 880 m <sup>3</sup> /min.			Min. 600 m <sup>3</sup> /min.			
Humidifier (Relative humidity : 30%, Steam : 400kg/hr)						
Boiler						
Quantity	Higher calorific power (kcal/hr)	Heat surface area (m <sup>2</sup> )	Rated quantity of evaporation (kg/hr)	Upper used pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Efficiency (%)	
2	965,550	9.8	1,500	10	90 or more	
Refrigerator						
Class	Quantity	Capacity	Cooling Water Temp.	Evaporator (L/min)/kW	Compress or (L/min)/kW	Cooling water pump
Turbo	2	540	5 °C	10.08	12.2	3 PH
Cooling tower						
Class	Quantity	Capacity	Setting Temp.	Temp. control		
Open model	2	600 ton	25.8 °C	Fixed Temp.		

건물 관리자의 실제 운영 스케줄을 조사하여 다음과 같은 실내 환경 설정 조건을 기준모델에 적용하였다.

- 실내 설정온도(하계/ 동계) : 27.5℃/ 23.5℃
- 실내 설정습도(하계/ 동계) : 60%/ 40%
- 외기 도입량 : 9.44[(ℓ/s)/1인]

### 3.2 공조시스템 최적화의 예

#### 3.2.1 최적화 문제의 설정

대상 건물에 실제로 설치되어 운영 중인 시스템은 단일덕트 VAV시스템이다. 본 최적화 사례 연구에서는, 실제 건물에서 운영중인 HVAC 시스템에 건물에너지 절감을 위하여 3개의 컴포넌트(이코노마이저, 열회수코일, 외기량 조절댐퍼)를 추가하였으며, 전체적인 건물의 HVAC 시스템 구성은 Fig. 7과 같다.

#### 3.2.2 목적함수 및 제약조건

본 연구에서 목적함수는 연간 에너지사용량과 연간 에너지비용이다. 목적함수는 시뮬레이션 툴의 연간 시뮬레이션 실행을 통해서만이 추정 가능하다. 에너지 비용에서 전기의 경우, 한국전력의 요금체계를 기반으로 일반용 전력(갑)을 적용하여 모델링 하였으며, 가스비용은 서울 도시가스 공급업체의 요금체계를 반영하였다.

본 연구에서 적용한 제약조건으로서 독립변수의 상·하단 값을 단순히 설정함으로써 최적 값의 가능범위를 한정하였다.

#### 3.2.3 최적화 결과 분석

Table 3은 사례연구에서 사용된 HVAC 시스템 변수 및 제약조건을 나타낸다. 이를 바탕으로 연간 에너지 시뮬레이션 및 최적화를 Doe2Opt을 이용하여 실행하였다. Fig. 8은 최적화 알고리즘으로 Hooke-Jeeves 알고리즘을 사용하여 연간 건물에너지비용의 최적화 연산이 진행되는 과정이다. 이 최적화과정을 통해 도출된 각 변수의 최적화된 결과값은 Table 4에 나타낸다. Fig. 9는 실제 건물에서의 월별 에너지비용과 최적화된 에너지비용을 비교한 것이다. 최적화된 과정을 통하여 매월 에너지사용비용이 절감되는 것을 알 수 있다.

대상건물의 연간 에너지비용에 대한 비교는 Table 5에서 나타나듯 약 3%, 금액으로는 2천만 원정도의 절감효과가 있다. 그리고 전력사용량보다는 가스사용량의 절감이 큰 것을 알 수 있다.

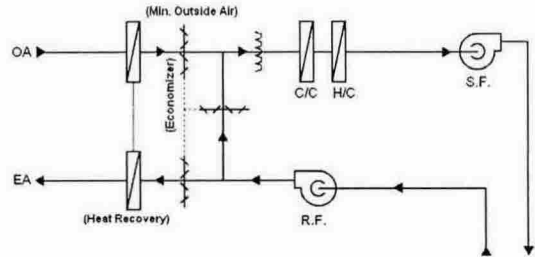


Fig. 7 Optimization system of object building (VAV system+adding component)

Table 3 Optimized variables and limitation

Component	Variable	Min.	Max.	Ini.	Step
Econo-mizer	Lower Temperature Limit (°C)	3	9	6	0.5
	Upper Temperature Limit (°C)	19	25	22	0.5
	Enthalpy Limit (kJ/kg)	50.2	67	58.6	0.42
Heat recovery	Heat Exchange Effectiveness	0.5	0.7	0.6	0.01
O.A. damper	Min. Outside Air Ratio (%)	10	30	20	1

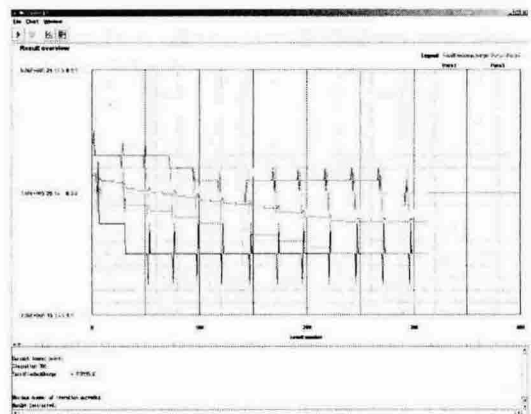


Fig. 8 Optimization procedure

Table 4 Results of optimized system variables

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

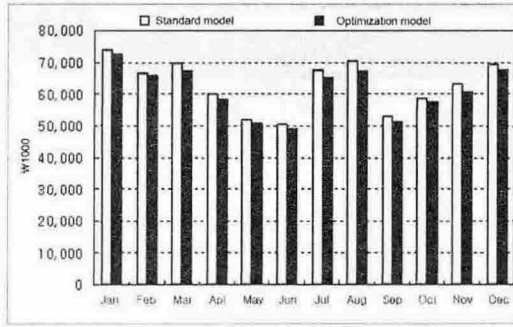


Fig. 9 Monthly building energy cost

Table 5 Yearly energy cost (Unit : W1000)

Energy Source	Reference cost	Optimum cost	Reduction
Electronic (MWh)	608,334	594,416	2.3%
Gas (m <sup>3</sup> )	148,641	140,307	5.6%
Yealy tot. energy	756,975	734,723	2.94%

#### 4. 결론

본 연구에서는 시뮬레이션-최적화기법을 기반으로 하는 사용자 인터페이스 프로그램을 개발하였다. 사례연구로서 개발된 프로그램을 사용하여 기존건물의 공조시스템에서 에너지 절감을 위한 컴포넌트를 추가시킨 후 에너지비용절감을 위한 최적화를 실행한 결과는 다음과 같다.

(1) 개발된 시뮬레이션-최적화 인터페이스 프로그램을 사용하여 공조시스템에 여러 가지 설계 결정요소를 동시에 고려할 수 있었으며 최적설계 변수 값을 용이하게 구할 수 있었다.

(2) 실제 사례연구 결과 공조시스템부분에만 최적화를 적용했을 경우 연간 건물에너지비용은 약 3%, 약 2000만원이 절약되었다. 전력보다는 가스에서 소비되는 에너지 비용이 더 절감되었다.

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

#### 후 기

본 연구는 2003년 건설교통부 지원 건설기술 연구 개발사업인 에너지 효율향상을 위한 건축설비 최적설계 및 관리시스템 기술개발(2차년도) 중 “공조설비를 위한 시스템 최적화 설계기술 개발”의 일부분으로 수행됨.

#### 참고문헌

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