

초기투자비와 1차 에너지소비량을 고려한 에너지시스템의 다중최적 설계 방법론

A Multi-objective Optimization Method for Energy System Design Considering Initial Cost and Primary Energy Consumption

공동석(Dong-Seok Kong)^{1†}, 장용성(Yong-Sung Jang)², 허정호(Jung-Ho Huh)¹

¹서울시립대학교 건축공학과, ²GS건설기술연구소

¹Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Republic of Korea

²GS E&C Building Science Research Team, Gyeonggi-do, Yongin, 449-831, Republic of Korea

(Received March 25, 2014; revision received May 14, 2014; Accepted: May 16, 2014)

Abstract This paper proposed a multi-objective optimization method for building energy system design using primary energy consumption and initial cost. The designing of building energy systems is a complex task, because life cycle cost and efficiency of building are determined by decisions of engineer during the early stage of design. Therefore, methods such as pareto analysis that can generate various alternatives for decision making are necessary. In this study, the optimization is performed using the NSGA II, and case study was carried out for feasibility of the proposed method. As a result, alternative solutions can be obtained for the optimal building energy system design.

Key words Energy system design(에너지시스템 설계), Initial cost(초기투자비), Alternatives(대안), Multi-objective optimization(다중최적화), Pareto analysis(파레토 분석)

† Corresponding author, E-mail: br011503@naver.com

기호설명

n : 기기의 효율
 Q_{load} : 건물의 냉난방 부하 [kW]
 $Q_{device, rated}$: 열원의 정격출력 [kW]
 PLR : 부분부하율(Part Load Ratio)

하첨자

i : 시간, 1~24

1. 서론

건물의 에너지시스템은 열원의 유형과 용량, 열원분할 대수에 따라서 다양한 조합이 발생될 수 있고, 어떻게 조합되느냐에 따라서 건물의 생애주기 동안의 에너지소비량과 효율이 결정된다. 에너지시스템의 설계 과정은 이러한 전 생애에 걸친 건물의 성능을 결정짓는 중요한 과정이다. 때문에 다양한 설계안을 검토하여 에너지사용량과 비용을 분석하고 여러 대안을 제공해 사용자의 의도에 맞게 설계되어야 한다. 그러나 대부분의 경우 설계정보와 검토시간의 부족, 제도적 규제,

클라이언트의 요구사항과 같은 사업적 제약들로 인해 다양한 설계조합들을 검토하지 못하는 실정이다. 때문에, 전문가의 능력에 의존하여 소수의 설계 대안을 검토하는 관례적인 설계가 반복되고 있다. 하지만 이러한 방식은 과대설계로 이어지는 경향이 있고, 건물의 에너지 성능과 초기 투자비용에 상당한 악영향을 주게 된다. 특히, 건물의 에너지 성능은 설계초기 과정의 노력에서 잠재적으로 가장 큰 영향력을 미치게 되므로⁽¹⁾, 설계과정에서의 판단이 경제적, 에너지적으로 가장 중요하다. 에너지시스템의 경우, 교환주기가 20년 이상으로⁽²⁾ 변경 및 개보수가 어렵기 때문에 더욱 신중하게 결정되어야 한다.

더욱이 최근 에너지 부족과 건물에너지 절감에 대한 이슈로 인해서, 신재생에너지, 고효율기기, 지열히트펌프, 빙축열, 수축열, 흡수식냉온수기와 같은 에너지절약형 열원과 기존의 터보냉동기, 가스보일러, 흡수식냉동기와 같은 일반 열원들을 복합적으로 이용하는 사례가 증가하는 추세이다. 이러한 다양한 열원들은 각각 기계적 특성(성능곡선)이 다르고, 방대한 설계조합이 발생되기 때문에 최적화를 통한 다양한 설계조

합의 검토가 수반되어야 한다.⁽³⁻⁶⁾

본 연구에서는 기존의 건물 에너지시스템의 설계방식과 에너지사용량 분석 방법을 검토하여 설계과정의 제약사항과 문제점을 파악하고, 이를 바탕으로 설계초기과정의 제약된 정보들을 바탕으로 수행 될 수 있는 에너지시스템 설계 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법은 다양한 열원에 대한 조합을 분석하여 최적의 대안을 제시할 수 있는 방법으로 열원의 타입과 용량에 따라서 에너지사용량과 초기투자비를 계산하고 그 결과를 바탕으로 최적설계 대안을 제공한다. 최적화는 다중최적화 알고리즘인 NSGA II(non-dominated sorting genetic algorithm)를⁽⁷⁾ 사용하여 수행되었고, 파레토분석 방법을 이용하여 최적 대안을 제공한다. 그리고 설계 사례분석을 통해서 제안되는 방식을 기존의 방식과 비교하였다.

2. 기존 건물 에너지시스템 설계과정의 한계와 문제점

2.1 기존 건물 에너지시스템 설계 프로세스

기존의 연구문헌에 의하면⁽⁸⁻⁹⁾ 일반적인 건물 에너지시스템의 설계 프로세스는 다음과 같은 과정으로 이루어진다.

- (1) 건물의 부하계산 : CLTD(Cooling Load Temperature Differential Method), RTS(Radiant Time Series Method)⁽¹⁰⁾와 같은 최대부하계산 방법이 사용되며 이러한 방법을 통해 냉방 또는 난방 대표일의 부하프로파일이 산출된다.
- (2) 열원의 타입 선택 : 열원의 타입은 건물의 용도와 특성에 따라서 결정된다. 이 과정에서 엔지니어는 발주처의 요구사항과 제도적 설계기준 등을 충족하는 열원의 타입을 선택한다. 예를 들어, 발주처에서 지열히트펌프, 수축열과 같은 시스템을 원하는 경우가 있을 수 있고, 특정 행정구역에서는 지역난방을 사용한 냉난방을 계획해야한다. 이 경우 흡수식냉온수기 또는 흡수식냉동기를 열원으로 결정할 수 있다. 이러한 요건들을 검토하여 열원의 타입과 대수를 결정한다.
- (3) 열원의 용량 결정 : (1)과정으로 계산된 건물의 최대냉난방 부하를 감당할 수 있도록 용량을 결정한다. 경우에 따라 안전율이 고려되기도 하지만 열원의 용량은 건물의 에너지소비에 큰 영향을 주기 때문에 불필요한 과대설계는 피하는 것이 원칙이다.
- (4) 에너지시스템의 성능분석 : 계획된 에너지시스템의 효율 및 에너지소비량을 분석한다. 이 과정에서 신재생에너지, 제어시스템 등의 에너지 절감을 위한 옵션들이 검토되고, 경제성 분석이 동반된다.

이와 같은 에너지시스템의 설계과정을 통해 설계자

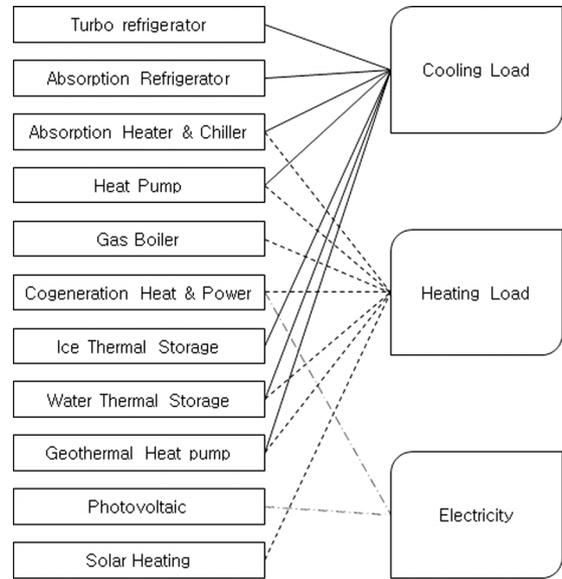


Fig. 1 Various type of device for building energy system.

는 적절한 대안을 제공해야 한다. 그러나 열원의 타입과 용량을 결정하는 과정은 전문가의 판단이나 제조사의 정보에 의존하는 경우가 대부분이다. 실제로 조사 결과에 따르면 응답자의 47%는 제조사의 정보에 의존하고, 14%는 과거의 경험을 바탕으로 선택하는 것으로 나타났다.⁽¹⁾ 이러한 방법은 전문가의 경험과 판단에 의존하는 방식이기 때문에 다양한 열원의 조합을 검토하는데 있어서 한계가 있다. 특히, 최근 Fig. 1과 같이 다수의 열원 타입에 대한 수요가 있는 경우 이를 검토할 수 있는 체계적인 방법이 필요하다.

2.2 설계과정의 에너지소비량 분석 문제

제 2.1절을 통해서 알아본 설계과정은 에너지시스템의 설계를 위해 건물의 최대냉난방부하를 산출하는 최대부하계산방법으로 에너지소비량을 계산하는 기간부하계산 방식과는 크게 다르다. 그러나 설계과정은 최대부하계산 중심이기 때문에 최대부하에 대한 정보만으로 에너지소비량을 계산하기에는 많은 제약이 따른다. 연구결과에 따르면, 건물의 에너지절감을 위한 분석에서 31%의 응답자는 과거의 경험을 바탕으로, 26%는 가이드라인에 따라서, 20%는 제조사의 정보를 통해 이러한 분석을 하는 것으로 나타나⁽¹⁾ 대다수의 경우 정밀한 분석을 수행하지 않는 것으로 나타났다. 이는 장기적인 측면에서 건물의 에너지소비에 상당한 악영향을 줄 수 있다. 연구결과에 따르면 건물의 에너지시스템의 특성에 따라 에너지소비는 30%까지 차이가 발생하는 것으로 나타나⁽¹¹⁾ 설계과정에서 에너지소비량 분석이 상당히 중요하다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서

는 기존의 연구문헌을 바탕으로^(3,4) 기기의 특성을 나타내는 성능곡선 기반의 에너지해석 방법을 이용하여 에너지소비량을 산출하였다. 에너지소비량은 설계정보인 냉난방 대표일을 중심으로 산출된다(제 3.3절 참조).

3. 에너지시스템의 다중최적설계 방법론

3.1 방법론의 개요

본 연구에서 제안하는 방법은 최적화 알고리즘을 이용해서 건물의 에너지시스템 설계 시, 적용 가능한 다양한 조합을 검토하여 최적의 대안을 제공하는데 목적이 있다. 설계자 또는 엔지니어는 초기투자비, 에너지성능, 생애주기비용, 탄소발생량 등 다양한 지표들을 고려해서 에너지시스템을 설계한다. 하지만 일차적으로 가장 중요한 지표는 건물의 시공에 투입되는 투자비와 건물 운영시간 동안의 에너지소비량이다. 이 두 가지 지표를 최소화하는 설계가 가장 합리적인 대안으로써 의사결정에 있어 중요한 솔루션이 될 수 있다. 하지만 고효율기기들은 에너지소비량이 적지만 투자비가 높고, 투자비가 적은 열원들은 에너지소비량이 많은 경향이 있으므로 이 두 가지의 지표를 동시에 고

려할 수 있는 방법이 필요하다. 제안하는 방법은 다중 최적화 알고리즘을 이용해 다수의 최적해군을 제공하는 방법이다. 유전자 알고리즘을 기반으로 하는 다중 최적화 방법인 NSGAII를 이용하는 방법은 효과적인 최적해군을 형성할 수 있는 방안으로 여러 연구에서 검증된바 있다.^(7, 12, 13)

Fig. 2는 본 연구에서 제안하는 방법론의 개념도를 나타내고 있다. 이 방법은 열원의 타입과 용량을 변수로 에너지소비량과 초기투자비를 산출한다. 다음 Table 1은 본 연구에서 반영한 열원의 타입과 용량을 보여주고 있다. 제 2절에서 진술한 바와 같이 에너지시스템의 설계는 최대부하 계산 중심으로 이용 가능한 정보가 제한적이므로 냉난방기와 중간기 대표일의 프로파일일 기반으로 에너지소비량을 산출하고 열원의 용량에 대한 함수로 작성된 초기투자비 모델을 이용해서 투자비를 산출한다. 초기투자비와 에너지소비량은 각각 최적화의 목적함수로 적용되고 사용자의 요구사항과 제도적 사항들은 제약 조건으로 반영되어 최적화가 진행된다. 이 모든 과정은 Matlab 플랫폼에서 코딩된 함수를 바탕으로 수행된다. 다중최적화 알고리즘을 통해 평가된 대안들은 파레토분석을 이용하여 다수의 최적해군을 제공하게 되고, 이 솔루션들은 각각의 대안으로 의사결정에 활용될 수 있다.

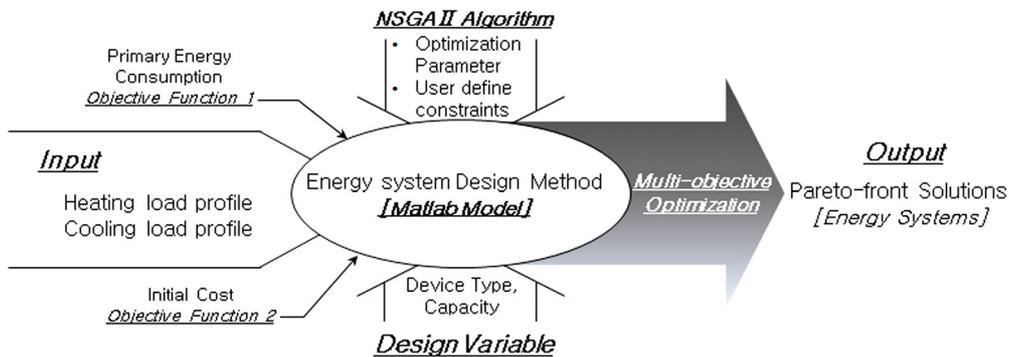


Fig. 2 Schematic diagram of proposed method.

Table 1 Device type and capacity line-up for building energy system design

Type	Acronym	Capacity Line-up of device[kW] - Variable								
Turbo Refrigerator	TR	0	390	470	630	680	780	945	1,000	
Absorption Refrigerator	AR	0	95	125	160	320	380	560	630	
Absorption Heater and Chiller	AHC	0	95	125	160	320	380	560	630	
Heat Pump	HP	0	25	30	40	50	63	78	100	
Gas Boiler	GB	0	60	85	115	150	185	290	350	
Co-Generation System	CGS	0	115	200	230	300	350	480	600	
Ice Thermal Storage	ITS	TR capacity×10h								
Water Thermal Storage	WTS	AHC or GSHP capacity×10h								
Geothermal Heat Pump	GSHP	0	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	
Photovoltaic	PV	0	20	50	100	150	200	250	300	
Solar Heating	Solar	0	20	50	100	150	200	250	300	

Table 2 Variables for Optimization

Type	Device Number	Variables
TR	4	x01-x04
AR	2	x05-x06
AHC	1	x07
HP	2	x08-x09
GB	4	x10-x13
CGS	2	x14-x15
ITS	1	x04
WTS	1	x07 or 16
GSHP	1	x16
PV	1	x17
Solar	1	x18

열원의 용량은 설계 대상의 에너지시스템의 규모에 따라서 변경될 수 있지만 Table 1의 열원의 용량은 여러 제조사의 카탈로그와 생산 라인업을 기반으로 작성되었다. 터보냉동기와 가스보일러는 대부분할을 고려하여 최대 4대까지 분석이 가능하도록 분할하였고, 흡수식 냉동기와 히트펌프, 소형열병합시스템은 각각 2대, 기타 열원은 1대씩 고려하였다. 빙축열시스템의 용량은 터보냉동기 1대와 연결되어 터보냉동기용량×심야 전력시간(10h)으로 산출된다. 수축열 시스템은 흡수식 냉온수기 또는 지열히트펌프와 연결되어 사용되며 빙축열시스템과 동일하게 연결열원의 용량×축열시간(10h)로 용량을 산출한다. 지열히트펌프의 용량은 냉난방 피크의 10%~70%로 설정하였다. 열원의 용량은 최적화의 변수로 정수화 되어 최적화알고리즘에서 불연속 변수로 처리되었다.

Table 2는 최적화 대상의 변수를 보여주고 있다. 각각의 변수는 최적화 대상열원의 용량을 의미한다.

3.2 목적함수(1) : 에너지사용량

본 연구에서의 에너지사용량은 에너지시스템의 열원이 소비하는 에너지를 의미하고 다음 식(1)과 같이 표현될 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$E_{system} = \sum_{d=1}^{365} \sum_{i=1}^{24} \frac{Q_{load,d,i}}{\eta} \quad (1)$$

에너지소비량은 건물의 냉난방 부하 $Q_{load,d,i}$ 를 기기의 효율 η 로 나누는 것으로 계산될 수 있고, 이를 시간별(i), 일별(d)로 합산하면 연간 에너지소비량으로 환산할 수 있다. 하지만 열원의 효율은 부분부하율에 따라서 다르게 나타난다. 부분부하율(PLR)은 건물의

냉난방 부하와 열원의 정격출력에 대해 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 열원의 성능은 특성에 따라서 2차 식 또는 3차 식으로 나타낼 수 있으며 3차 식으로 표현할 경우 식(3)과 같이 표현할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$PLR_{d,i} = \frac{Q_{load,d,i}}{Q_{device,rated}} \quad (2)$$

$$\eta = C_1 + C_2 \times PLR + C_3 \times PLR^2 + C_4 \times PLR^3 \quad (3)$$

PLR에 따라서 열원의 효율이 변하게 되는데 이는 열원의 특성과 타입에 따라서 고유한 패턴으로 정의할 수 있다. 이를 성능곡선이라고 한다. 본 연구에서는 Table 1의 열원타입을 이러한 성능곡선을 기반으로 정의하였다. Fig. 3은 열원의 특성에 따른 성능곡선의 샘플을 보여주고 있다.

이러한 패턴은 열원의 타입별로 제조사의 성능데이터를 통해서 입수할 수 있으며 본 연구에서는 카탈로그 데이터를 기반으로 수집한 정보를 통해서 작성하였다. 에너지 사용량 계산에 필요한 건물의 부하는 장치용량계산을 위해 작성된 건물의 설계 대표일의 부하프로파일을 사용한다. Fig. 4는 설계 대표일 3일의(1월 : 난방, 4월 : 냉방-중간기, 8월 : 냉방) 부하프로파일의 사례를 보여주고 있다.

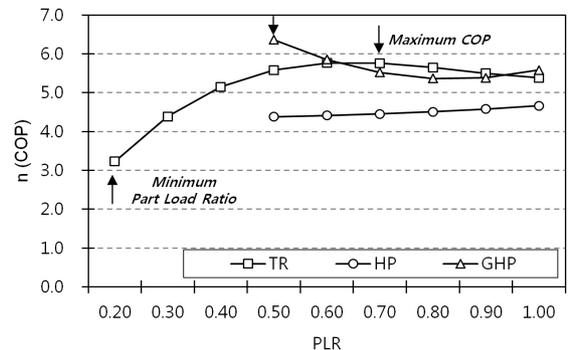


Fig. 3 Device Curve of PLR(example).

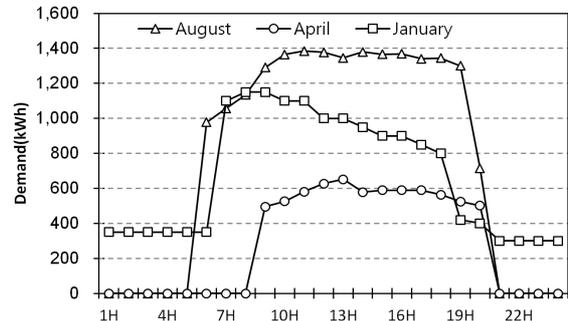


Fig. 4 Load profile of building(example).

```

for  $Q_{device1}$   $PLR_{d,i} = [0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]$ 
  for  $Q_{device2}$   $PLR_{d,i} = [0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]$ 
    if  $Q_{load,d,i} \leq Q_{device1,rated} * PLR_{device1,d,i} + Q_{device2,rated} * PLR_{device2,d,i} + \dots + Q_{devicen,rated} * PLR_{devicen,d,i}$ 
      
$$\min E_{d,i} = \frac{Q_{device1,rated} * PLR_{device1,d,i}}{f(PLR_{device1,d,i})} + \frac{Q_{device2,rated} * PLR_{device2,d,i}}{f(PLR_{device2,d,i})} + \dots + \frac{Q_{devicen,rated} * PLR_{devicen,d,i}}{f(PLR_{devicen,d,i})}$$

    end
  end
end
next  $i = i + 1$ 

```

Fig. 4 Energy Calculation Function.

Fig. 4는 에너지사용량을 계산하는 코딩을 나타내고 있다. 건물의 에너지시스템은 건물의 부하에 대응하기 위해 열원을 가동하고 이 과정에서 부분부하율이 발생한다. 하지만 열원이 두 대 이상인 경우, 다양한 PLR의 조합이 발생하게 된다. 이러한 조합을 검토하기 위해서 각 열원의 부분부하율을 0부터 0.25단위로 1까지 정의했다. 예로, i시간에서 건물의 냉방부하가 100 kW이고, 검토하는 에너지시스템의 조합이 100 kW 냉동기 3대라면, i시간에서의 열원의 PLR은 냉동기 1대가 100%인 경우, 냉동기 2대가 50%씩 가동되는 경우, 냉동기 3대가 30%, 40%, 40%인 경우 등 다양한 운전조합이 발생되게 된다. 이러한 경우 모든 열원의 PLR을 25%~100%까지 변경하면서 발생가능한 모든 조합을 검토하고 최소의 에너지사용량을 갖는 PLR 조합을 선택하도록 프로그래밍하였다. 이는 에너지시스템이 최적으로 가동된다는 가정하에 최상의 열원조합을 검토하기 위함이다. 이러한 과정은 설계대표일 3일(1월, 4월, 8월)의 72시간에 대해서 수행된다. 열원의 타입에 따라 소비되는 에너지원이 다르기 때문에 이를 통합하기 위해 모든 에너지사용량은 1차 에너지 소비량으로 변환하였다. Table 3은 1차 에너지 환산계수를 나타내고 있다.

3.3 목적함수 2 : 초기투자비

에너지시스템의 초기 투자비는 열원의 타입 별로 각각 용량에 대한 함수로 정의되었으며, 다음 식(4)로

Source	Factor
Gas	1.1
Electricity	2.75
District Heating	0.614
District Cooling	0.937

표현할 수 있다.

$$f_{cost}(Q_{device,rated}) = a + b * e^{-Q_{device,rated}} \quad (4)$$

이와 같은 함수는 조사된 단가를 통해 정의되었다. 자료조사는 한국물가정보센터의⁽¹⁵⁾ 열원단가와 견적단가를 기반으로 수행되었다.

Fig. 5는 초기투자비 모델을 보여주고 있다. 비용모델은 단위용량에 대한 투자비용으로 기기의 용량에 대한 함수로 작성되었다. 조사된 데이터에 식(4)에 정의된 함수를 피팅하여 투자비 모델을 작성하였다. 각 열원의 비용모델은 용량이 큰 기기를 적용할수록 단위 용량당 투자비용이 작아지며, 동일 용량일지라도 작은 용량으로 열원을 분할하는 경우 투자비가 상승하게 된다. 투자비 모델의 경우, 조사연도와 물가 상승에 따라 기반데이터가 변동될 경우 지속적인 데이터의 업데이트가 필요하다.

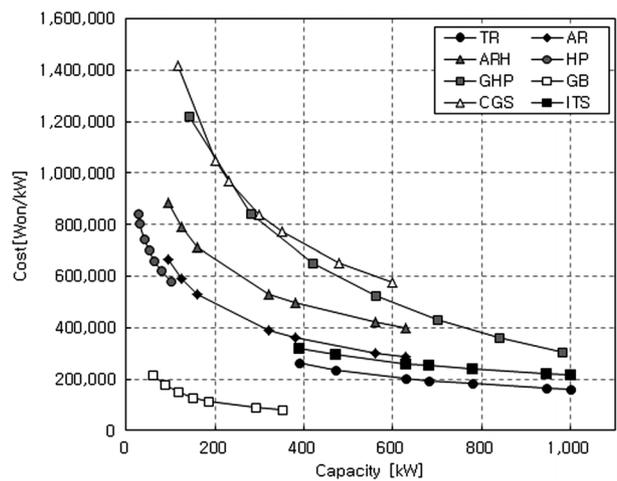


Fig. 5 Initial Cost Model of Energy System Design.

3.4 제약조건

제약조건은 에너지시스템 설계에 있어 제도적으로 규정된 의무적인 반영사항 또는 사용자의 요구사항, 에너지시스템의 최소용량 등을 반영하게 된다. 따라서 설계 케이스에 따라 변할 수 있는 사항이다. 공통적인 사항으로 에너지시스템의 최소용량에 대한 조건이 있다. 최소용량은 일반적인 설계와 유사하게 안전율을 고려하여 냉난방 설계부하의 110%로 규정하였다. 안전율은 설계부하에 대한 에너지시스템의 부족분을 고려한 것으로 설계자 및 디자이너에 따라서 110%~140%까지 반영하기도 하는 것으로 알려졌지만,^(16, 17) 과대설계 방지를 위해서 110%로 정의하였다. 이 밖의 신재생에너지원의 의무사용, 축열시스템의 적용, 제도적 요구조건 등은 사용자의 특성에 따라 케이스 별로 입력된다.

3.5 파레토 분석과 최적해군

본 연구의 결과물은 파레토 분석을 통해 제공된다. 파레토분석의 기본 개념은 “비지배”라는 개념이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, A와 B라는 두 개의 솔루션이 있는 경우, 초기투자비와 1차 에너지 사용량이라는 지표에 대해서 B가 A보다 모두 더 좋은 값을 갖고 있다. 이때 B는 A를 지배한다고 한다. 하지만 B와 C의 경우, B는 C에 비해서 1차 에너지 소비가 더 적지만 비용이 더 많고, C는 B에 비해서 1차 에너지 소비가 더 많지만 비용이 더 작다. 따라서 B와 C 두 개의 솔루션은 비용과 1차 에너지소비량에 대해서는 어느 대안이 더 좋다고 말할 수 없으며, 이 두 솔루션은 서로 비지배 관계에 있다고 정의한다. 그리고 이 두 솔루션은 잠재적인 최적해군이 되며, 이러한 비지배 솔루션을 연결하는 선을 “파레토-프론트”라고 정의한다. 이러한 파레토를 기반으로 하는 다중최적화 알고리즘은 더 이상 최적화 할 수 없는 파레토 최적해의 집합을 찾는 것을 목적으로 한다. 이와 같은 파레토 분석기법은 다양한 최적화된 다수의 솔루션을 사용자가 선택 가능하도록 제공하는 점에서 의사결정 모델에 많이 활용되는 기법이다.

제 4장에서는 제 3장에서 설명한 에너지시스템의 비용과 에너지소비량에 관한 최적화 문제를 설계에 적용한 사례분석을 수행하여 제시된 최적설계 방법론의 적용 가능성을 검증하였다.

4. 사례 분석

4.1 대상건물

대상건물은 신축되는 업무용 건축물로서, 최대냉방부하 5,693 kW, 최대난방부하 4,962 kW를 기준으로 에너지시스템이 설계되었다. 설계원안의 에너지시스템은

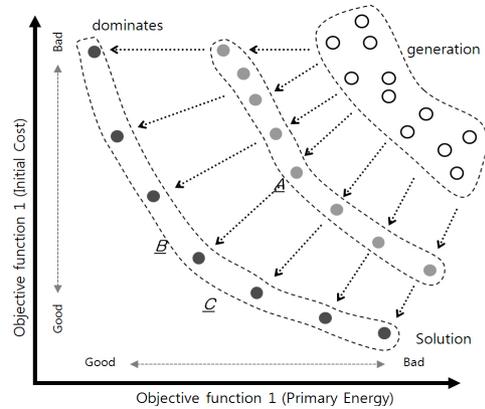


Fig. 6 Concept of Pareto-Optimal Solution.

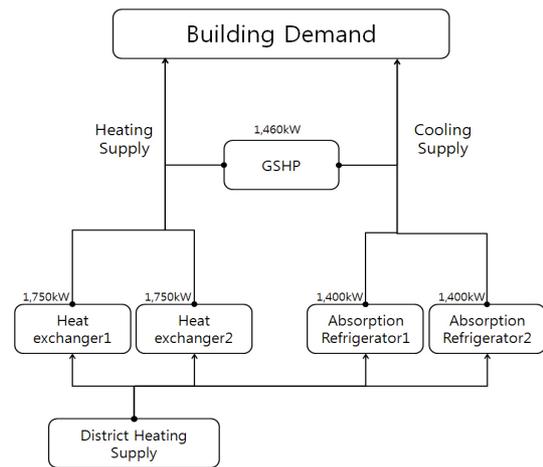


Fig. 7 Original Energy System of Target Building.

중온수의 지역난방을 공급받아 열교환기를 통해 난방을, 흡수식냉동기를 통해 냉방을 공급하며, 에너지절감을 위해 지열히트펌프(GSHP)를 최대냉방부하의 40%를 설치하는 에너지시스템을 갖고 있다. Fig. 7은 대상건물의 설계원안의 에너지시스템을 보여준다. 원안의 대표 프로파일에 대한 에너지소비량은 1차 에너지로 환산하는 경우 32,000 kWh로 나타났고, 초기투자비는 약 22억 원으로 분석되었다.

4.2 분석 및 제약조건

건축물의 에너지시스템 설계는 기술력 및 원가에 대한 경쟁력확보가 중요한 사안이다. 하지만 GSHP와 같은 에너지시스템은 에너지 효율적이지만 원가상승에 대한 부담이 있고, 따라서 최적설계를 통해 다양한 에너지시스템의 조합을 검토하는 것이 중요하다. 본 연구에서 사례분석은 설계 원안의 조건과 동일한 제약조건으로 GSHP를 40% 적용한 케이스와 전체조합을 랜덤하게 탐색한 케이스를 분석하였다.

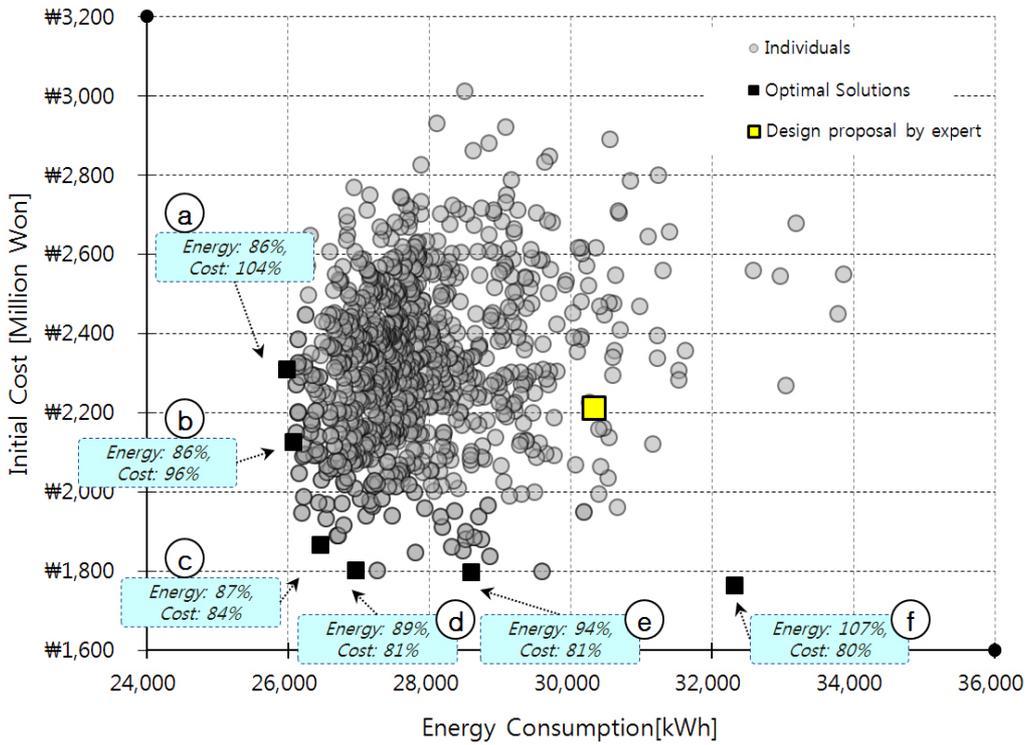


Fig. 8 Pareto-Optimal Solution of Case-study(Constraint with GSHP 40%).

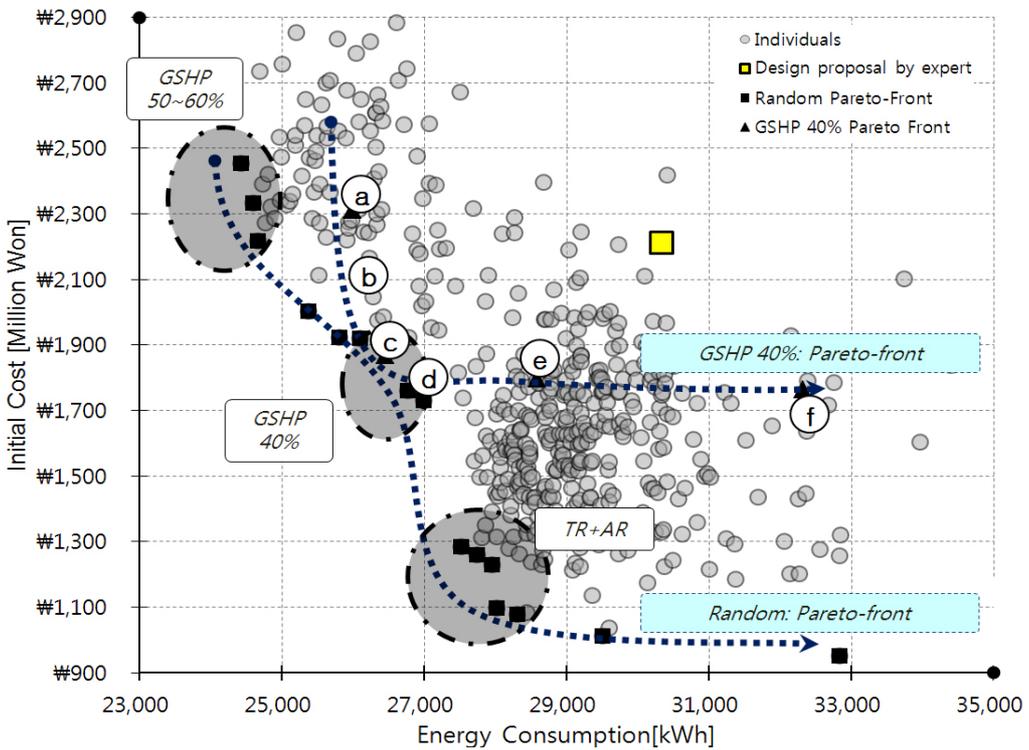


Fig. 9 Pareto-Optimal Solution of Case-study(Comparison with GSHP 40%).

4.3 최적화 결과

Fig. 8은 GSHP를 최대냉방부하의 40%를 적용한 케이스에 대한 최적화 결과를 나타내고 있다. Fig. 8과 Fig. 9에서 상단의 사각형은 설계 원안을(design proposal by expert) 나타내고, 검은색 사각형은 최적화를 통해 작성된 최적 대안을(optimal solutions), 원형의 점들은 검토된 대안들을(individuals) 나타낸다. 원안과 비교하여 최적화된 에너지시스템의 결과는 다양한 에너지적 비용적 절감이 가능한 에너지시스템의 조합을 만들어 낼 수 있다. 최적화 결과는 원안대비 에너지소비 86%~107%, 초기투자비는 80%~104%까지의 결과를 제공한다. 조합①의 경우 초기투자비는 4% 증가하지만 에너지소비는 원안에 비해 14% 절감하는 대안을 제공할 수 있고, ②, ③, ④, ⑤의 경우 원안에 비해서 비용적 에너지적으로 우위에 있는 설계 대안을 제공할 수 있으므로 투자비용의 상승없이 에너지절감을 이룰 수 있는 에너지시스템의 결과를 제공한다.

Fig. 9는 GSHP를 40%적용한 케이스와 제약조건이 없는 상태에서 분석된 결과를 비교하여 보여주고 있다. 제약조건이 있는 경우 랜덤조건에서의 탐색보다 최적화로 생성된 대안의 영역이 더욱 상단에 배치됨을 알 수 있다. GSHP의 경우 에너지 효율이 좋지만 초기 투자비용이 크기 때문에 용량에 따라서 다양한 최적안이 발생할 수 있는데 Fig. 9는 이러한 다양한 대안을 보여준다. 랜덤조건에서의 최적대안 중 GSHP 50~60%의 결과는 40% 조건에서의 결과인 ①, ②와 유사한 투자비를 가지지만 에너지소비량이 더 유리한 대안으로 50~60에서의 최적결과를 보여준다. ③, ④안의 경우 40%에서의 결과와 랜덤조건에서의 결과가 중첩되어 ③, ④안은 GSHP 40%에서 비용적 에너지적인 최적결과됨을 알 수 있다. 비용적으로 유리한 조합은 터보냉동기(TR)과 흡수식냉동기(AR)를 병행하여 쓰는 것으로 나타났다.

이와 같이 다중 최적화를 이용한 건물의 에너지시스템설계는 다양한 조합이 발생할 수 있는 복합적인 에너지시스템의 설계에 최적의 대안들을 제공할 수 있는 방법임을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 건물 에너지시스템 설계를 위해 초기투자비와 1차 에너지소비량을 최소화 하는 열원의 타입과 용량을 산정하는 방법론을 제안하고 적용성을 검증하였다. 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존의 건물에너지 시스템 설계 방식은 다양한 열원의 조합을 검토하기 문제점이 있다. 따라서 정책적, 사회적, 환경적인 요구에 기술적으로 대응할

수 있는 최적설계 방법론이 필요하다.

- (2) 제안된 방법론은 1차 에너지소비량과 초기투자비를 최소로 하는 다중최적 방법론으로 설계초기의 정보인 대표일의 부하프로파일과 열원의 기계적 특성을 나타내는 성능곡선을 사용하여 에너지시스템의 조합에 따른 에너지소비량을 산출하였고, 초기투자비는 조사를 통해서 작성된 모델을 기반으로 계산하였다.
- (4) 사례분석을 통해서 제안된 방법론의 적용성과 활용성을 검증하였고, 파레토 기반의 분석방법을 사용하여 다양한 최적설계안을 분석하였다. 결과적으로 복합적인 에너지시스템 설계에 최적의 대안을 제공할 수 있는 방법임을 확인하였다.
- (5) 제안된 방법론은 발주자와 엔지니어의 의도를 반영한 최적설계로 다양한 설계 대안을 통해 의사결정을 지원하고 장기적인 측면에서의 에너지적 비용적 효율을 극대화 할 수 있는 설계방법으로 사료된다. 본 연구에서는 의사결정의 요인으로 1차 에너지소비량과 초기투자비만을 고려하였다. 향후, 설계시 반영되어야 하는 의사결정 지표에 대한 추가적인 연구를 통해서 에너지 비용과 생애주기 비용, 탄소발생량 등의 다양한 요인을 반영할 수 있는 연구가 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 국토해양부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2013년도 도시건축사업의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다(과제번호 : 11 도시건축 G02).

References

1. Jacobs, P. and Henderson, H., 2002, State of the art review of whole building, building envelope, and HVAC component and system simulation and design tools, Final report ARTI-21CR/30010-01, Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute, Arlington, VA.
2. Hafez, O. and Bhattacharya, K., 2012, Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids, Renewable Energy, Vol. 45, pp. 7-15.
3. Kayo, G. and Ooka, R., 2010, Building energy system optimizations with utilization of waste heat from cogenerations by means of genetic algorithm, Energy and Buildings, Vol. 42, No. 7, pp. 985-991.
4. Ooka, R. and Komamura, K., 2009, Optimal design

- method for building energy systems using genetic algorithms, *Building and Environment*, Vol. 44, No. 7 pp. 1538-1544.
5. Kayo, G. and Ooka, R., 2009, Optimal design method for distributed energy system using genetic algorithm: Examining the influence of GA parameters on the accuracy of calculation results estimated by the optimal design method and confirming the applicability of designing distributed energy system, *Journal of Environmental Engineering-Transactions of Architectural Institute of Japan*, Vol. 74, No. 641, pp. 869-876.
 6. Kayo, G. and Ooka, R., 2010, Multi-objective genetic algorithm optimized for energy consumption and cost in building energy system design, *Journal of Environmental Engineering-Transactions of Architectural Institute of Japan*, Vol. 75, No. 654, pp. 735-740.
 7. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T., 2002, A fast and elitist multi-objective genetic algorithm : NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197.
 8. Burdick, A., 2012, Strategy guideline : HVAC equipment sizing, Building Technologies Program, US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy.
 9. Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Coronel, J. F., and Maestre, I. R., 2011, A review of HVAC systems requirements in building energy regulations, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 2-3, pp. 255-268.
 10. ASHRAE fundamentals handbook chapter 28 non-residential cooling and heating load calculations, 1997, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
 11. Elkhuizen, P. A., Peitsman, H. C., and Wienk, W. J., 2003, A new design guideline for the heating and cooling curve in AHU of HVAC systems, *Building Services Engineering Research and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 191-202.
 12. Hamdy, M., Hasan, A., and Siren, K., 2013, A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010, *Energy and Buildings*, Vol. 56, pp. 189-203.
 13. Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W., and Carlucci, S., 2013, Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design, *Energy and Buildings*, Vol. 60, pp. 110-124.
 14. EnergyPlus engineering reference, 2013, US Department of Energy.
 15. Korea Price Information Corp. website, <http://www.kpi.or.kr>.
 16. Djunaedy, E., van den Wymelenberg, K., Acker, B., and Thimmana, H., 2011, Oversizing of HVAC system : Signatures and penalties, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 2-3, pp. 468-475.
 17. Kong, D. S., Jang, Y. S., Ann, M. H., and Huh, J. H., 2012, A study on the methodology of design optimization in cooling system, *Proceedings of the SAREK 2012 Summer Annual Conference*, No. 6, pp. 632-635.