

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.6.396

도시기반 에너지공급시스템의 최적화 방안 연구

김용기[†] · 이태원* · 우남섭*

(2008년 6월 11일 접수, 2009년 4월 29일 수정, 2009년 4월 30일 심사완료)

A Study on the Optimal Design of Urban Energy Supply Systems

Yong-Ki Kim, Tae-Won Lee and Nam-Sub Woo

Key Words: Energy Supply System(에너지공급시스템), Co-Generation(열병합발전), Optimization(최적화), Linear Programming(선형계획법), Energy Saving(에너지 소비절감)

Abstract

Recently many efforts have been carried out on the development of energy-efficient and environment-friendly systems in order to preserve natural environment and to reduce environmental loads in the branch of the urban planning and the building design. In this study, a mathematical method was developed and a numerical analysis was carried out with various parameters to provide substantial data for optimal design and operation of urban energy supply systems. Components of the system and their specifications, such as a co-generation system and other heating and cooling systems, could be obtained through this analysis for various resource and energy requirements in urban area. In this study, the system constituents and operating characteristics, and their economic performances such as the value of objective function, the amount of energy consumption were discussed for various load patterns and power load ratios. Also, it turns out that the optimal energy supply system can save energy by 10~20% in comparison with the conventional energy supply system.

1. 서 론

최근 들어 불안정한 국제정세 및 원유의 수급 불균형에 따라 고유가가 지속되고 있어, 에너지 수요의 대부분을 외국에서 도입해야 하는 국내의 경우, 에너지의 합리적 이용은 매우 중차대한 과제가 아닐 수 없다. 더욱이 국민소득의 향상과 쾌적한 생활환경에 대한 욕구증대에 따른 하절기 냉방용 전력수요가 급격히 증가하고 있고, 계절별, 주야시간대별 전력수요의 격차가 심화됨에 따라 전력공급 계통 등의 효율은 크게 떨어지는 결과가 초래되고 있다.⁽¹⁾

이에 따라 정부에서는 에너지의 소비를 억제하

고 비효율적인 에너지 소비구조를 개선하기 위하여 다양한 대책과 제도를 마련하여 시행함으로써 에너지의 합리적 소비를 유도하고 있다. 건물분야의 정책으로는 냉난방 기준온도의 설정과 건축물의 냉방설비를 전기구동 압축식 냉방시스템에서 빙축열이나 흡수식 냉방시스템으로 전환, 보급하는 방안이 포함되어 있으나, 도시 전체적인 측면에서는 에너지사용계획서를 작성하는 것 외에는 특별한 대책 및 제도가 없는 실정이다.

한편, 선형계획법을 이용한 에너지공급시스템에 대한 기존의 연구를 살펴보면, Gustafsson⁽²⁾은 건물 에너지공급시스템에 대한 최적화를 시도하였고, Ryohei Yokoyama 등⁽³⁾은 복잡한 구조를 가지는 에너지공급시스템에 대하여 혼합정수선형계획법(MILP ; Mixed integer linear programming) 중 분해접근(decomposition approach) 방법이 효과적 인 해석방법임을 고찰하였다.

[†] 책임저자, 회원, 한국건설기술연구원 설비플랜트연구실

E-mail : kimyk@kict.re.kr

TEL : (031)910-0490 FAX : (031)910-0491

* 한국건설기술연구원 설비플랜트연구실

본 연구에서는 도시기반 에너지공급시스템의 효과적인 최적 설계 방안을 도출, 제시하기 위하여 열병합발전설비를 포함한 에너지공급시스템에 대한 해석모델을 구성하여 수치해석을 수행하였으며, 기존 도시 및 신도시에서의 각종 부하구조에 대한 에너지소비량을 비교, 분석하여 최적의 부하구조를 도출하고, 그에 따른 에너지 절감율을 산출하고자 한다.

2. 해석모델 및 방법

2.1 해석모델

에너지 공급시설로는 가스터빈과 증기터빈에 의한 열병합발전시설과 보조보일러가 선정될 수 있는데, 발전 후 발생하는 폐열은 회수되어 열원으로 이용되고 있다. 이들 시설의 에너지원으로 는 주로 유류나 고체연료 등 주로 화석연료가 사용되는데 도시지역에서는 환경적인 측면을 고려하여 도시가스가 사용되고 있다. 이와 아울러 냉방용 열원을 생산하기 위해 전기구동 냉동기와 비전기식 냉동기 등이 필요하며, 부족한 전력의 공급 및 비상시의 수요를 위해 상용전력계통으로부터 전기에너지를 공급받음과 동시에 상용전력계통으로의 전력판매도 가능하다. 이상에서 기술한 시스템에 적절한 가정에 의해 해석모델을 설정하였으며 이와 같은 도시기반 에너지공급시스템의 개념도를 Fig. 1에 도시하였다. 본 논문에서

는 Fig. 1의 여러 가지 시설 중 하수처리장의 열 펌프와 소각장의 배열회수는 고려하지 않았으며, 향후 추가 연구에서 고려하기로 한다.

2.2 지배방정식 및 제약식

본 연구에서는 도시기반 에너지 공급시스템을 최적화하기 위하여 선형계획법을 사용하였다. 혼합정수계획법을 사용한 에너지공급시스템의 최적화는 기기의 댓수 제어에 따른 초기투자비의 영향을 고려할 수 있고 또한 기기의 운전 또는 정지를 나타내는 0-1계획법을 도입해야 한다. 혼합정수계획법을 풀기 위하여 분지한정법을 이용하였다.

목적함수는 연간 고정비와 운전비의 합 또는 연간 에너지소비량 등으로 나타낼 수 있으며 목적함수 즉 시스템의 연간 경상비용이나 에너지소비량을 최소화하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 도시지역의 건물 및 단지에 소요되는 각종 에너지의 공급을 위해 가스터빈, 보조보일러, 흡수식냉동기, 터보냉동기, 열펌프 등 i 개의 기기들이 사용될 수 있다고 생각한다. 이때 각 기기의 출력은 선형화 시킬 수 있으며, 연간고정비와 연간운전비의 합인 연간경상비(목적함수, z)에 관한 식 (1)로 표현할 수 있다. 중괄호 안의 첫 번째 항은 기기의 초기투자비를 나타내고 두 번째 항은 에너지 비용을 나타낸다. 또한 제약조건의 첫 번째 식은 에너지 밸런스를 고려하는 식이다.

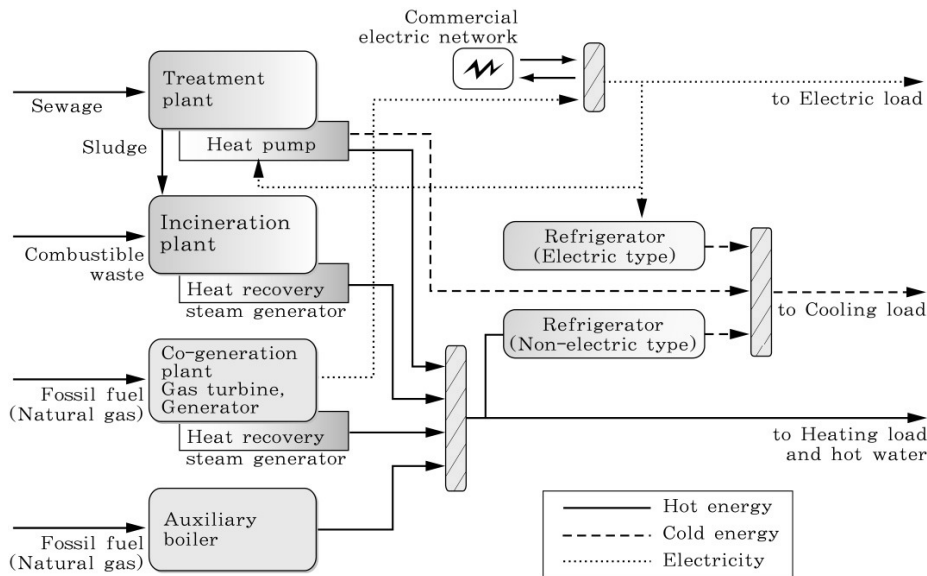


Fig. 1 The modeling of the urban energy supply system considered

$$\begin{aligned}
 \min \quad & z = \sum_{i=1}^I \left\{ R(X_i \gamma_i + Y_i \eta_i) + \phi_i \sum_{j=1}^J T_j u_{ij} \right\} \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^I v_{ij} = V_j \quad (j = 1, 2, \dots, J) \\
 & \eta_i = \zeta_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J) \\
 & \underline{\eta}_j \gamma_i \leq \eta_i \leq \overline{\eta}_j \gamma_i \\
 & \gamma_i \in \{0, 1\} \\
 & v_{ij} = p_i(\zeta_{ij})u_{ij} + q_i(\zeta_{ij})\delta_{ij} \\
 & \underline{v}_i(\zeta_{ij})\delta_{ij} \leq v_{ij} \leq \overline{v}_i(\zeta_{ij})\delta_{ij} \\
 & \delta_{ij} \leq \zeta_{ij} / \underline{\eta}_i \\
 & \delta_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 i 는 기기의 종류를 의미하며, R 은 자본 회수계수, X 와 Y 는 계수, η 는 설비용량, γ 는 0-1 변수, ϕ 는 에너지요금 단가, j 는 계절별, 일간 부하별 분할률 의미하며, u 는 에너지소비량, T 는 기기의 연간 운전시간을 의미한다. 제약조건에서 v 는 기기의 출력을 의미하며, V 는 에너지부하, ζ 는 연속변수, p 와 q 는 계수이다.

식 (1)은 분해분석방법(decomposition method)을 이용해서 식 (2)와 같이 정리될 수 있고, 목적함수의 제약식은 전기 및 냉난방부하(D_E, D_C, D_H)를 만족시키는 식과 각 기기의 입력값의 제한값으로 식 (3)과 같이 표현될 수 있다. 여기서 δ 는 0-1 변수로서 0일 때는 기기의 정지, 1일 때는 운전을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \\
 z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_n x_n
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{s. t} \\
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n &\geq D_E \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n &\geq D_C \\
 a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n &\geq D_H \\
 x_{n,\min} \cdot \delta_n &\leq x_n \leq x_{n,\max} \cdot \delta_n \\
 x_i &\geq 0, \quad \forall i
 \end{aligned} \tag{3}$$

한편, 일반적으로 모든 기기는 성능방정식이 비선형방정식으로 구성되어 있으며, 이를 선형방정식에 도입을 하고자 선형방정식으로 모델링을 수행하여야 한다. Figure 2는 각 종 기기의 성능 특성 모델링 방법을 보여주고 있다. 열병합발전의 주원동기로 가스터빈, 가스엔진, 증기터빈, 연

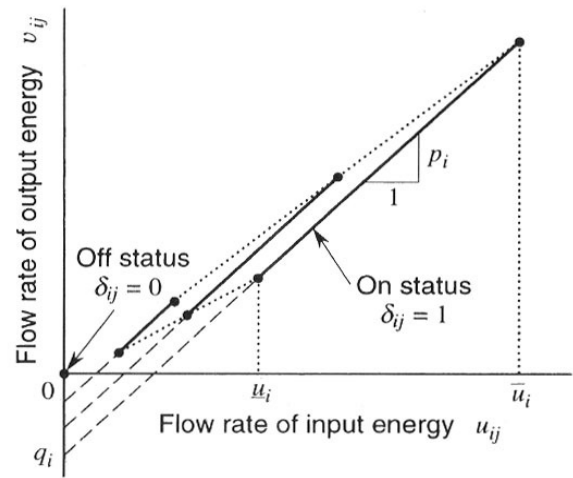


Fig. 2 Simplification of the performance of the apparatus.

료전지 등 수많은 기기들이 선택될 수 있으나, 본 연구에서는 최근 소형화가 이루어지고 있는 가스터빈을 선정하기로 한다.

2.3 해석방법

해석알고리즘은 단체법을 사용하였으며, 초기 투자비를 경상비로 나타내기 위하여 연등가비용법을 사용하였다. 열병합발전 원동기는 가스터빈(simple cycle)을 사용하였고, 외부 계통으로부터의 수전 및 매전을 하지 않고, 자체발전으로 전력부하를 담당하였다. 목적함수는 에너지요금 체계의 영향을 최소화하기 위하여 연간 에너지소비량(단위: TOE)으로 하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 해석모델의 검증

해석모델을 검증하기 위하여 인구 12만 명 규모의 D시 에너지사용계획서⁽⁴⁾에 보고되어 있는 에너지사용량과 수치해석을 통해 계산한 에너지사용량을 비교, 분석하였다. D시는 개발면적이 9 백만 m² 정도이고, 이중 주택건설용지가 33.3%, 공공시설용지가 66.7%를 차지하고 있으며, 에너지 수요예측은 열이 88만 Gcal/year, 전력이 713 GWh/year로 계획되었다. 또한, 에너지사용계획서에 의하면 D시의 연면적 3,000m² 이상의 건물 중 60%는 흡수식냉방기를 이용하고, 나머지 40%는

전기식냉방기(터보냉동기 등)를 이용하며, 주거용 및 연면적 3,000㎡ 미만의 건물은 패키지에어컨, 선풍기 등을 이용하는 것으로 계획하였다. 한편, 전력부하는 외부 계통으로부터 수전을 통해 공급하고, 열부하는 열전용 보일러를 이용하여 지역 난방을 수행하는 것으로 계획하였다. 해석모델 조건들을 Table 1에 정리하였다. 또한 Fig. 3은 해석을 위하여 모델링된 D도시에서의 에너지부하 패턴을 보여주고 있다.

이상의 모델도시에 대한 에너지 부하 및 에너지 공급시스템을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 연간 에너지사용량이 293천 TOE로 산출되었으며, D시 에너지사용계획서 상의 287천 TOE와의 오차율은 2% 정도를 보임으로써 비교적 잘 일치하였다.

3.2 시스템 규모 및 전력부하의 영향

본 절에서는 기존 도시를 대상으로 시스템 규모 및 전력부하의 영향을 고찰하였다. 기존의 도시란 국내에서 일반적으로 채택되고 있는 도시계획의 개념을 적용하여 건설된 도시를 말하며, 주로 주거용 건물의 비율이 다른 용도의 건물보다 현저히 많은 것이 특징이라 말할 수 있다.

Table 1 Analysis conditions of model city

	Specification
Model city	120,000 inhabitants 9 million m ²
Energy system	CHP : 511 MW Boiler : 342 Gcal/h
Load	Heat : 880,000 Gcal/year Electricity : 713 GWh/year

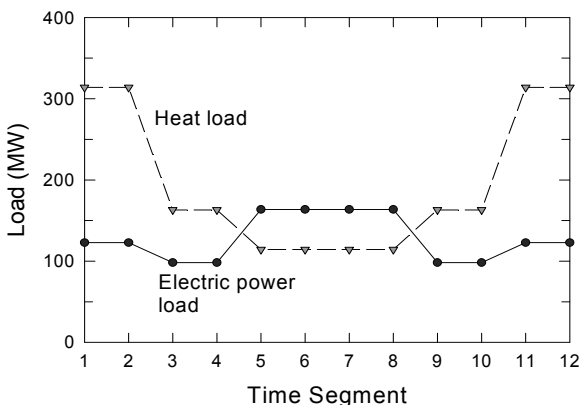


Fig. 3 Energy loads and their patterns of D-city

또한 자립형(소규모) 시스템(small system)이란 당해 도시의 에너지 부하에 적합한 에너지공급시스템으로 앞에서 기술한 D도시의 부하를 공급할 수 있도록 시스템을 구성한 것, 그리고 인프라(대규모) 시스템(large system)이란 발전위주의 시스템으로 대규모 열병합발전시설을 건설하여, 인근 대도시의 도심지역에 전력을 공급할 수 있도록 시스템을 구성한 것을 말한다. 인프라 시스템에서의 열병합발전시설의 용량은 화성 동탄 신도시에 건설되고 있는 열병합발전소(준공일 2007년 11월, 511MW)의 경우를 참고하였다.

Table 2는 기존의 도시 부하구조 하에서 에너지 공급시스템의 수치해석을 위해 자립형 및 인프라 시스템의 각 경우에 대해 설정한 전력부하를 기존 도시의 전력부하에 대한 비율로 각각 정리한 것이다.

Figure 4는 에너지 공급시스템의 규모 및 전력 부하에 따른 연간 에너지사용량의 변화를 도시한 것으로, 전력과 열부하를 포함한 전체 에너지 부하에 대해 최적화된 시스템에 대한 계산결과이다. 먼저 각각의 전력부하 비율에 대해 대규모 시스템의 경우 에너지사용량이 자립형 시스템에 비해 3배 이상 많음을 볼 수 있는데, 이는 앞에서 기술한 바와 같이 인근 도심으로의 전력공급에 따라 시스템 용량이 증가하기 때문이다.

또 각각의 에너지 공급시스템의 규모에 있어서 전체 에너지 부하 중 기존 부하비율 대비 전력부하의 비율이 감소함에 따라 연간 에너지사용량은 점차 감소하다가 일정 비율 이상 감소하면 다시 증가하는 경향을 보여주고 있고 이에 따라 최적의 전력부하 비율이 있음을 알 수 있다. 즉 자립형 시스템에 대해서는 S3, 즉 전력부하가 기존 경우의 부하에 비해 10% 감소하는 경우 최소의 에너지사용량을 보인 반면, 대규모 시스템의 경우에는 기존 부하 대비 전력부하가 20% 감소할 때 최소의 에너지사용량을 보여주고 있다.

이와 같은 이유는 자립형 시스템에 대해 전력부하의 비율 변화에 따른 하절기 발전배열 이용량을 도시한 Fig. 5로써 설명될 수 있다. 전력부하가 상대적으로 큰 S1의 경우에는 발전배열의 이용률이 매우 적으며 특히 발전량이 많은 고부하시의 이용률이 적음을 보여주고 있다. 반면 전력부하 비율이 10% 감소한 S3의 경우에는 발생한 배열을 모두 이용하고 있음을 볼 수 있다.

Table 2 Variables with system capacity and power load ratio for parametric study

Small system	Electric power load in summer	Large system	Electric power load in summer
Case S1	Conventional	Case L1	Conventional
Case S2	Decrease of 5%	Case L2	Decrease of 10%
Case S3	Decrease of 10%	Case L3	Decrease of 20%
Case S4	Decrease of 15%	Case L4	Decrease of 30%
Case S5	Decrease of 20%		

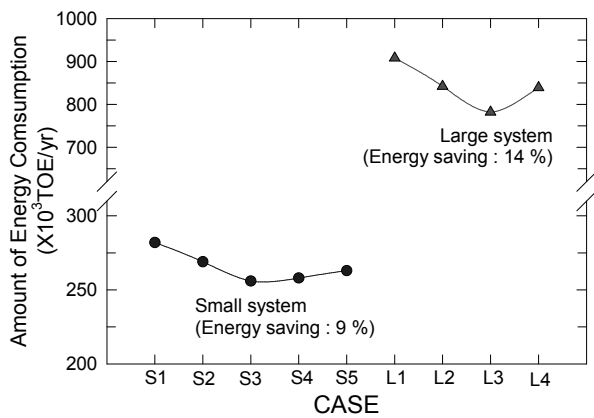


Fig. 4 The amount of annual energy consumption with system capacity and power load ratio

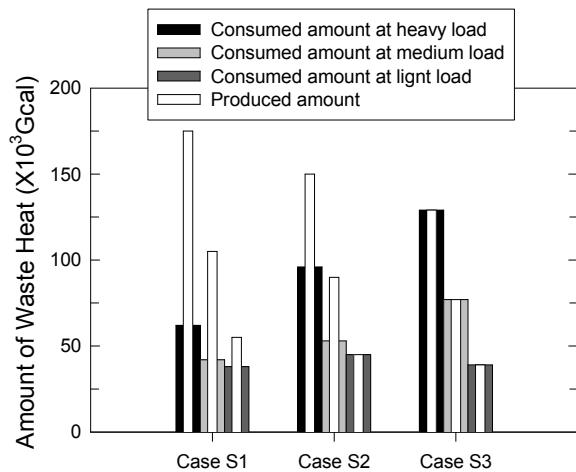


Fig. 5 The amount of waste heat produced and used in summer with power load ratio

결과적으로 자립형 시스템인 S3의 경우 냉방부하의 처리를 위해 발전배열을 충분히 이용함으로써 앞의 그림에서 본 바와 같이 기존의 에너지

부하구조를 가지는 S1에 비해 9%의 에너지 절감이 가능한 것으로 예측되었다. 한편 대규모시스템에서는 기존의 에너지 부하구조를 가지는 L1에 비해 전력부하를 20% 감소시킨 L3의 경우 14%의 에너지를 절감할 수 있다.

한편 에너지 공급시스템의 규모 및 전력부하의 비율에 따른 하절기 발전배열 이용율 변화를 Fig. 6에 도시하였다. 시스템 규모에 따라 에너지사용량이 최소로 되는 S3(자립형 시스템으로 전력부하가 10% 감소) 및 L3(대규모 시스템으로 전력부하가 20% 감소)의 경우에 발전배열의 이용율이 100%에 달함으로써 가장 좋은 효율을 얻을 수 있을 것으로 예측되었다.

이상의 검토결과를 통해 자립형 시스템(Case S)의 경우 1TOE의 에너지 비용을 30만원으로 가정할 때 연간 운전비는 846억원이고, 에너지 공급시스템의 최적화에 따라 연간 약 76억원의 운전비를 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 대규모 시스템(Case L)의 경우에는 연간 운전비가 2,723억원, 최적화에 따른 연간 운전비 절감액은 381억원으로 산정되었다.

3.3 용도별 건물면적 및 전력부하의 영향

다음에는 용도별 건물면적의 변화에 따른 에너지 공급시스템의 최적화를 위해 상주인구 5만명의 도시에 대상으로 하여 전체의 건물을 주거용과 비주거용으로 구분하고, 에너지 부하별 원단위를 활용하여 부하량을 산출한 후 계산을 수행하였다. 이때 건물의 용도가 변화해도 도시 내 전체 연면적은 동일한 반면, 용도별 연면적이 변화함에 따라 에너지 부하별 절대량은 단위면적당 원단위를 고려한 만큼 변화하게 된다. Table 3은 건물용도 및 에너지원별 적용한 원단위를 보여주고 있다. 모델도시의 건물 연면적은 50m²/명을 적용하여 250만m²로 계산하였다. Table 4는 에너지 공급시스템의 수치해석을 위해 건물의 용도에 따라 설정한 전력부하를 기존 도시의 전력부하에 대한 비율로 각각 정리한 것이다.

Fig. 7은 용도별 건물면적 및 전력부하에 따른 연간 에너지사용량의 변화를 도시한 것으로, 전력과 열부하를 포함하여 전체 에너지 부하에 대해 최적화된 시스템에 대한 계산결과이다. 먼저 각각의 전력부하 비율에 대해 도시 내에 비주거용 건물이 증가함에 따라 연간 에너지사용량이

증가함을 볼 수 있는데, 이는 비주거용 건물이 주거용 건물에 비해 단위 온열부하, 단위 냉열부하 및 단위 전력부하가 크기 때문이다. 각 용도별 건물면적에 있어서는 전체 에너지 부하 중 기존 부하비율 대비 전력부하의 비율의 변화에 따라서는 앞에서 고찰한 바와 같은 경향을 보여주

Table 3 Unit energy load with use of buildings

Classification of building	Unit load for heating	Unit load for cooling	Unit load for electric power load
Use of a residence	64	0	65
The others	100	120	100

Table 4 Variables with building area and power load ratio for parametric study

Case	Classification of building	
	Use of a residence	The others
Case NA	80%	20%
Case NB	50%	50%
Case NC	20%	80%

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Case NA	Conventional electric power load	Decrease of 5% in summer	Decrease of 10% in summer	Decrease of 15% in summer
Case NB				
Case NC				

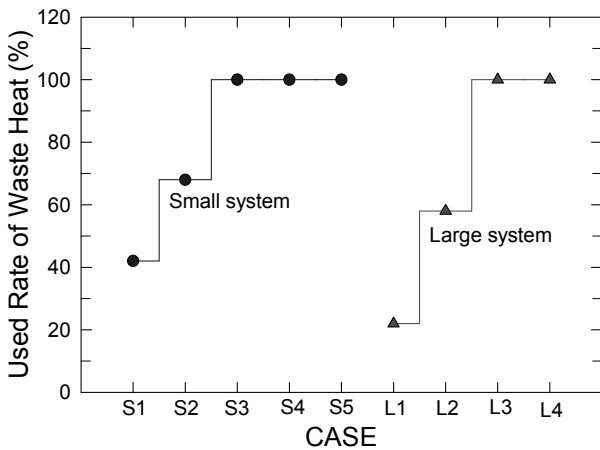


Fig. 6 Rate of waste heat used with system capacity and power load ratio in summer

고 있고, 모든 경우에 기존 부하 대비 전력부하가 10% 감소할 때 최소의 에너지사용량을 보여주고 있다. 결국 주거용 건물의 면적이 80%를 차지하는 경우(NA, 기존 국내 신도시의 토지이용계획 상 일반적인 비율)에는 기존의 에너지 부하구조를 가지는 경우에 비해 10%의 에너지 절감이 가능한 것으로 예측되었다. 또 주거용 건물의 면적이 50%(NB) 및 20%(NC)를 차지하는 경우에는 각각 19% 및 15%의 에너지 절감이 가능함을 알 수 있다.

한편, 용도별 건물면적 및 전력부하의 비율에 따른 하절기 발전배열 이용을 변화를 도시한 Fig. 8에서는 전력부하가 기존의 경우에 비해 10% 이상 감소할 때 발생하는 발전배열을 모두 이용할 수 있음을 볼 수 있다.

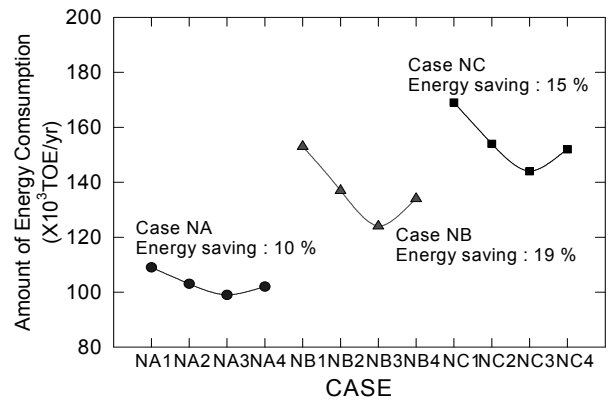


Fig. 7 The amount of annual energy consumption with building area and power load ratio

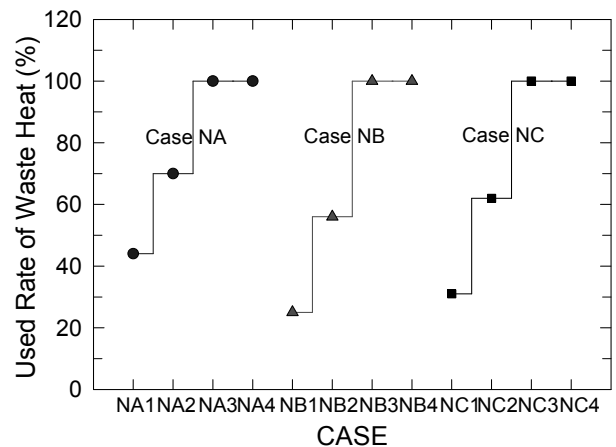


Fig. 8 Rate of waste heat used with building area and power load ratio in summer

4. 결 론

본 연구에서는 도시기반 에너지공급시스템의 효과적인 최적 설계 방안을 도출하기 위하여 열병합발전설비를 포함한 도시기반 에너지공급시스템에 대한 해석모델을 구성하여 수치해석을 수행하였으며, 기존 도시 및 신도시에서의 각종 부하구조에 대한 에너지소비량을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 총 에너지 부하 중에서 전력부하의 비율에 따라 연간 에너지사용량이 변하며 그 값이 최소가 되는 최적의 전력부하 비율이 존재하는 것을 확인하였는데, 이는 열병합발전의 배열 이용을 변화에 기인한다. 소규모 시스템의 경우는 전력부하 비율이 기존 부하비율 대비 10% 감소하면 에너지사용량을 9% 절감할 수 있으며, 대규모 시스템의 경우는 부하비율이 20% 감소하는 경우에 에너지사용량을 14% 절감할 수 있다.

(2) 또한 도시계획 관점에서 용도별 건물면적 비율 변화에 따라 에너지사용량이 최소가 되는 부하구조가 존재하는데, 업무용 및 공공용 건물면적에 대한 주거용 건물 면적의 비율을 변화시킬 경우 도시의 연간 에너지사용량(냉난방 및 전력)의 10~20% 정도를 절감할 수 있는 것으로 예측되었다.

후 기

본 연구는 국토해양부에서 시행한 2007년도 건설교통기술연구개발사업(과제번호 : 07플랜트B0102)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, T. W., *et al.*, 2004, "Design of the Integrated System Model of the Individual Urban Utility Plants Using Underground Space," *Construction & Transportation R&D Report*, R&D/99S01-01, pp. 43~111.
- (2) Gustafsson, S. I., 2000, "Optimization and Simulation of Building Energy Systems," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, pp. 1731~1741.
- (3) Ryohei Yokoyama, Yasushi Hasegawa and Koichi Ito, 2002, "A MILP Decomposition Approach to Large Scale Optimization in Structural Design of Energy Supply Systems," *Energy Conversion & Management*, Vol. 43, pp. 771~790.
- (4) Korea Land Corporation, 2002, *Report of energy utilization plan(dong tan)*, pp. 61~129.