

CHP Capacity Optimizer를 이용한 건물 열병합 시스템의 경제성 평가

윤 린[†]
한밭대학교 기계공학과

Economic Analysis of CHP System for Building by CHP Capacity Optimizer

Rin Yun[†]

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

(Received February 1, 2008; revision received March 27, 2008)

ABSTRACT: This paper presents and analyzes the effects of on-grid electricity cost, fuel price and initial capital cost of a CHP system, on the optimum DG and AC capacity and NPV, by using the ORNL CHP Capacity Optimizer, which was applied to a library in a university. By considering the current domestic energy cost and initial capital cost, it is shown that the installation and operation of the CHP system is not economical. However, with the current domestic CHP installation cost and fuel price, the NPV achieved by the installation of CHP system is greater when the on-grid electricity price is a factor of x1.5 the present value. Regarding the initial capital cost of the CHP system, the reduction of the DG cost is much more economical than that of the AC cost, with respect to NPV. Electricity cost and fuel price have opposite effects on NPV, and NPV is more sensitive to an increase of the electricity cost than an increase of the fuel price.

Key words: CHP(열병합발전), DG(분산발전시스템), AC(흡수식 냉동기), NPV(순현재가치),
Optimum capacity(최적용량)

기 호 설 명

AC : 흡수식 냉동기
 d_{ei} : 총 전기 수요량 [kW]
 $d_{e'r}$: 냉방을 제외한 전기수요량 [kW]
 d_{pAC} : 흡수식 냉동기 구동 전력 [kW]
 k_{AC} : 흡수식 냉동기의 선호도 1 혹은 0
 DG : 분산 발전 시스템
 M_{ei} : 최대 CHP 전기 수요량 [kW]

1. 서 론

현재 세계는 이산화탄소의 배출로 인한 지구온난화로 인해 심각한 기후변화를 겪고 있다. 이산화탄소는 주로 화력연료의 연소를 통해 발생되며 이를 줄이기 위한 노력은 국가규모로 다양한 방면에서 전개되고 있다. 1990년대 말에 들어 배기가스 거래제가 도입되어 미국의 몇몇 주와 유럽 연합에서는 이를 실행하고 있다. 그러나 무엇보다도 에너지의 사용을 줄일 수 있고 에너지 효율을 높일 수 있는 기술을 개발해야 할 것이다.

최근 생활수준의 향상으로 인해 국내의 전력소비가 매년 크게 증가하고 있는데, 예를 들어 2000

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1732; fax: +82-42-821-1587

E-mail address: yunrin@hanbat.ac.kr

년의 전력수요는 GDP 성장률 9%를 증가하는 11.3%의 증가율을 나타냈다.⁽¹⁾ 이 같은 전력수요의 증가에 대처하기 위해서는 대규모의 발전설비를 신설해야 하는데 한국전력의 민형화에 따라 발전부지마련과 송전비용 등 현실적인 어려움을 겪고 있다.⁽²⁾ 또한 대규모 발전시설의 가동에 따른 대기오염물질의 배출 또한 국제적인 규제가 불가피하다. 이와 같은 현실은 선진국을 중심으로 열병합발전 시스템에 대한 관심을 고조시켰고, 최근에는 단일 건물뿐 아니라 공동주택, 병원, 호텔 등을 중심으로 보급이 확대될 전망이다. 실제로 CHP시스템의 보급으로 전력피크의 완화와 하절기 가스수요의 확대로 현행 동고하저형의 수급구조를 개선할 수 있다.

건물의 열병합발전 시스템은 엔진 혹은 가스 터빈을 구동시켜 발전하고, 그 배열을 유효하게 회수하여 열을 이용하는 시스템, 즉 전기와 열을 동시에 생산하는 시스템으로 기존 발전효율을 30% 정도 향상시키고, CO₂량을 45% 이상 감소시키며 전체 시스템 효율을 80%까지 얻을 수 있는 고효율 에너지이용 기술이다.⁽³⁾ 실제로 전력 1 kWh와 열 발생량 1.43 Mcal를 이용하는 측면에서 CHP시스템 도입 시 에너지절감은 36% 그리고 CO₂ 배출절감은 36%였다.⁽²⁾ 1990년도에 들어서면서 마이크로터빈과 연료전지 기술을 이용하여 1~400 kW급의 작은 용량의 CHP를 구성할 수 있게 되었고, 특히 마이크로터빈의 경우 브레이튼 사이클을 기반으로 한 30~500 kW급의 전기를 생산할 수 있으며, 연료전지에 비해 유지보수 기간을 8000 h 정도 증가시키면서 상업화를 가능케 하고 있다.⁽⁴⁾ 소형 가스 열병합발전이 있어서 국내의 경우는 2006년 말 기준으로 총 130개소, 14만 8천 kW가 설치되어 총 발전용량의 0.2%를 차지하고 있다. 일본의 경우에는 2001년말에 244만 kW를 생산하고 있으며, 2010년 까지 464만 kW를 목표로 하고있다. 유럽의 경우는 2010년 말까지 총 발전용량의 18%를 목표로 하고 있다.⁽²⁾

일반적으로 건물의 열병합 발전 시스템은 CHP 시스템을 자체보일러와 전기구동식 냉방시스템으로 구성된 non-CHP시스템에 추가로 설치하는데, 각 시스템의 운전시간은 대상 건물의 전력 및 냉·난방부하에 따라 보다 경제적인 운전방식으로 결정된다. 따라서 CHP시스템의 설치에 있어서 이를 고려한 최적의 분산전력 용량과 최적의 흡

수식 냉동기의 용량을 계산하는 것은 반드시 필요한데, 본 연구에서는 대학 내 도서관건물을 대상으로 하여 ORNL에서 개발한 CHP 용량 최적화 프로그램을 적용하여, 분산발전 시스템의 초기투자비, 흡수식 냉동시스템의 초기 투자비, 중앙발전 시스템의 전기요금, 그리고 연료요금에 따른 최적 분산발전용량 및 흡수식 시스템 용량, 그리고 NPV를 계산하였다. 본 연구의 목적은 이들 변수에 따른 시스템의 최적용량과 NPV의 영향을 고찰해보고, 국내에서 CHP시스템이 경제성을 가질 수 있는 초기투자비, 전기와 연료요금을 제시하는데 있다. 이를 통해 CHP시스템의 보급을 확대할 수 있는 정부의 지원방안에 기준을 제공할 것이다.

2. 건물 CHP시스템의 해석 방법

2.1 CHP 용량 최적화 프로그램의 구성⁽⁵⁾

발전부와 흡수식냉동기를 포함하는 CHP시스템은 일반적으로 기존의 전기구동식 냉동기와 자체 보일러 설비에 부가적으로 설치된다. CHP시스템의 구동 시 생산된 전기는 대상 건물에 전기를 공급하게 되고 이 때 발생한 배열은 흡수식 냉동기를 가동시키거나 열교환기를 통해 난방에 직접 이용된다. CHP시스템의 가동여부는 매 시간 non-CHP시스템의 운전비용과 CHP시스템의 운전비용을 비교하여 결정하게 된다.

2.1.1 CHP 용량 최적화 프로그램의 알고리즘

Fig. 1과 같이 본 프로그램은 기존의 non-CHP 시스템에 CHP시스템의 설치로부터 얻을 수 있는 경제적 이득을 기준으로 CHP시스템의 용량을 최적화한다. 비선형 최적화 알고리즘을 이용하여 두 시스템의 운전에 있어서 매 운전시간마다 보다 경제적인 운전을 하는 조건, 즉 최대 NPV를 나타내는 CHP시스템의 최적용량을 결정하게 된다.

2.1.2 CHP 시뮬레이션 구조

각 운전시간당 분산 전력시스템의 용량을 결정하기 위해서는 최대로 예측되는 전기 수요량을 알아야한다. 이를 결정하기 위한 본 CHP시스템의 기본적인 운전기준은 다음과 같다. 첫째 CHP 시스템의 작동여부는 단위시간 당 non-CHP시스

템과의 운전비용의 비교를 통해 유일하게 결정된다. 둘째 대상 건물의 열 및 전기요구량을 만족시키는데 있어서, CHP시스템의 운전만으로 전기, 냉방, 그리고 난방요구량을 만족시키지 못한다면 중앙발전 시스템과 자체 보일러에 의해 충족되어야 한다. 마지막으로 CHP시스템의 연료효율은 전기생산에 있어서 매우 중요한데, CHP시스템의 가동률이 전기 요구량의 50%에 해당되는 경우에는 전기를 기존 발전시설로부터 사오는 것이 더 경제적이다. 한편, CHP시스템의 운전 방식을 모델링하는 경우 전기 생산 후의 배열을 어떻게 사용하느냐도 결정해야 한다. 위와 같은 기준으로 최대전기 수요량을 다양한 조건에서 결정하게 된다. 흡수식 냉동기가 주어진 단위 시간에 작동하는 것이 가능하고, 분산발전 시스템의 전기생산이 냉방이외의 전력요구량인 $d_{e,r}$ 와 흡수식 냉동기를 작동시키기 위한 기생 전력(d_{pAC})을 충족시키고, 난방과 냉방(흡수식의 열원)요구량을 모두 만족시키기에 충분한 열에너지를 만들어 낸다면 최대 전기 수요량은 식(1)과 같다.

$$M_{ei} = d_{e,r} + d_{pAC} \quad (1)$$

만일 위의 조건을 만족시키기 못하면, M_{ei} 는 열에너지의 사용 선호기호인 k_{AC} 에 따라 달라지고 $k_{AC} = 1$ 인 경우는 열에너지를 흡수식의 열원으로 사용하는 것을 우선으로 하고, $k_{AC} = 0$ 인 경우는 CHP시스템의 열에너지가 우선적으로 난방요구에 사용되어 질 때이다. 즉 다음의 2가지 경우는 열에너지가 냉방에 우선적으로 적용되는 경우이다.

① 냉방요구량이 흡수식냉동기의 최소작동 수준과 동등하거나 큰 경우

② 해당 열에너지를 흡수식 냉동기에 사용하지 않고 전기냉동기로 대체하는데 요구되는 비용이 해당 열에너지를 대신하여 자체 보일러로 대체하는데 요구되는 비용보다 큰 경우

한편, $k_{AC} = 1$ 인 경우 흡수식냉동기를 사용해서 냉방용량을 만족시키기에 충분한 열에너지가 없다면, 전기 냉동기의 공급을 위한 추가적인 전기 생산을 CHP시스템이 해야 할 것이다.

설치된 흡수식 냉동기의 최소운전에 필요한 열에너지의 요구량이 난방에 사용되고 남은 열에너지의 양보다 클 경우에는 $k_{AC} = 0$ 인 조건을 사용하며, 냉방을 위한 열에너지가 충분하지 않은 경우에는, $M_{ei} = d_{ei}$ 가 된다. 난방수요를 충족하고도 충분한 열에너지가 남았지만 냉방요구량을 충족시키기에 부족한 경우에는 추가적인 전기 생산을 CHP시스템이 해야 할 것이다.

본 프로그램은 NPV(순현재가치)를 최적화하는데 초점이 맞추어져 있기 때문에 CHP시스템을 운전함으로써 얻어지는 비용절감이 가장 중요한 변수가 되고 이는 식(2)와 같다.

$$C_S = C_U - \sum_{i=1}^{8760} C_{CHPi} \quad (2)$$

여기서 C_U 는 매 해 non-CHP시스템의 운전비용을 나타낸다. 따라서 C_S 는 비용절감을 의미한다.

$$C_{CHPi} = C_{DG} + C_{gsi} + C_{esi} \quad (3)$$

식(3)에서 C_{CHPi} 는 크게 세 부분으로 구성되어 있는데, 분산 전력시스템의 운전비용, 보조 난방을 위한 연료비, 그리고 보조 전력부하를 충족하기 위해 기존 발전설비로부터 사온 전기요금이다.

$$NPV_{CHP} = PW[C_S \times (1-t)] - I_{CHP} + PW(D_n) \quad (4)$$

위 식은 본 최적화 프로그램의 목적함수인 순현재가치를 나타낸다. 위 식에서 PW (the present worth of a series of cash flow)는 미래편익의 현재가치를, t 는 유효 소득세를, I 는 총 설비 투자비를, 그리고 D_n 은 CHP시스템의 자본투자의 감가상각으로부터 나오는 매해 세금 이득을 나타낸다.

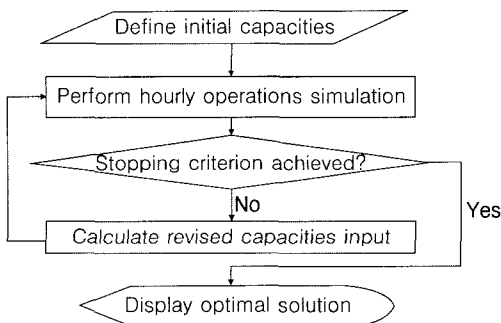


Fig. 1 Flow chart for optimization model.

연금 현가 계수는 10%로 장비 사용연수는 16년으로 계산하였다.

3. 최적화 시뮬레이션결과

3.1 대학 도서관의 적용

본 프로그램을 대전에 위치한 한밭대학교 도서관에 적용하였다. 대학 도서관의 경우 단일 건물로서 규모가 클 뿐만 아니라 1년 동안 지속적으로 냉방과 난방이 필요하며, 냉난방에 소비되는 전력 외에 조명, 컴퓨터 등에 소비되는 전력도 상당하다. 따라서 건물 열병합발전의 대상으로서 병원, 호텔, 공동주택과 더불어 유력한 대상 건물이 될 수 있을 것으로 판단하여 본 연구에서는 대학 도서관을 선택하였다. 본 도서관 건물의 규모와 공간활용도 냉난방설비는 Table 1과 같다.

본 프로그램을 실행하기 위한 기본적인 입력 자료는 Table 2와 같다. 시간당 건물의 냉·난방 부하, 냉방 전력 소모량, 그리고 냉방을 제외한 전력 소모량은 DOE에서 개발한 BHP screening tool⁽⁶⁾ 이용하여 계산하였다. BHP screening tool은 Table 1에 나타낸 건물의 기본정보, 건물의 냉·난방 장비의 개수와 용량, 그리고 냉·난방 가동시간 및 가동조건, 실내 열원, 건물 내 공간의 활용용도, 그리고 건물 벽체를 입력해 주면 년 중 매 시간별 냉난방 부하와 총 전력부하를 계산한다. Table 3은 BHP screening tool로 계산한 연간 냉난방 및 전기부하와 시간당 최대값을 나타낸다. 전기요금의 입력은 한국전력에서 제공하는 요금체계 중 교육용을 참조했다.⁽¹⁾ 본 도서관에 공급되는 전력의 기본요금(demand charge)은 4340원/kW-mo이고, 전력량요금은 계절에 따라 달라지므로 이를 고려하여 달리로 환산하여 각각 입력하였다. 연료의 경우는 한국가스공사의 발표자료를⁽⁷⁾ 참조하여 LHV기준으로 10.67 \$/MBTU를 본 프로그램에 이용하였다. 흡수식의 설치비(\$/RT installed)는 물가정보 자료를 참조하여 722.1 \$/RT로 하였고, 분산발전 시스템의 설치비(\$/net kW installed)와 운영경비는 Schienbein et al.의 연구보고서와⁽⁸⁾ 국내 가스엔진 및 열발생설비의 초기 투자비를⁽²⁾ 고려하여 입력하였다. 이 외의 입력값인 분산발전 시스템의 전력/열에너지 비율, d_{PAC} , 전기식 냉방기 및 흡수식 냉동기의 효율, 그

Table 1 Description of the library, utilized in the present optimization program

Building description	Values
Location	Daejeon
Length of building	102 m
Width of building	57 m
Number of floor	6
Story height	22.3 m
Building rotation	Due south
Lead space cooling equipments	250 USRT
Leg space cooling equipments	250 USRT
Heating boiler capacity	223 HP
Cooling tower capacity	300 RT
Cooling setpoint temperature	23 C
Heating setpoint temperature	17 C
Weekday operating schedule	9AM to 5PM
Saturday operating schedule	9AM to 5PM
Occupant density	32.3 ft ² /person
Lighting density	0.6 W/ft ²
Space of Book collection	60% of the library
Classrooms	30% of the library
Robby	10% of the library
Ceiling material	Gypsum
Roof structure	8inch HW concrete
Window type	single pane clr. 3 mm

Table 2 Input data for the CHP optimizer program

Important demand data	Sources
Cooling and heating load, cooling electric load and non-cooling electric load	BHP screening tool
Electric and LNG price	Kepeco and kogas information
DG capital cost	References (2, 8)

Table 3 Demands of electricity, heating and cooling

Demands	Electricity	Heating	Cooling
Annual	4,745,101 (kWh)	8,748 (MMBtu)	984,569 (RT-hr)
Maximum	1816 (kW)	7.5 (MMBtu/hr)	1204 (RT)

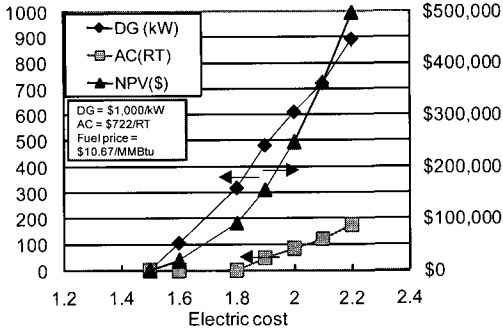


Fig. 2 The effects of electricity cost on the capacity of DG, AG, and the NPV.

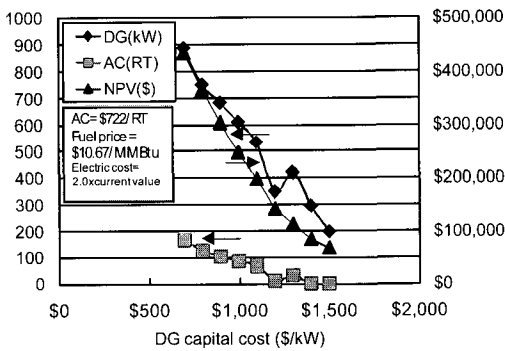


Fig. 3 The effects of DG capital cost on the capacity of DG, AG, and the NPV.

리고 분산전력 시스템의 효율 등은 본 프로그램에서 기본적으로 지정된 값을 이용하였다. 이들 입력자료를 바탕으로 한발대학교 도서관에 설치될 수 있는 CHP시스템에 대해 다음과 같은 결과를 얻었다. Fig. 2는 기본요금과 전력량요금을 합한 현재의 전기요금을 1이라고 할 때 전기요금의 증가에 따른 최적의 발전용량, 흡수식 시스템의 용량, 그리고 CHP시스템의 도입으로 인한 경제적 이득에 대한 NPV를 나타낸다. 이 때 CHP시스템의 초기 투자비와 연료비는 고정하였다. 전기요금이 현재요금의 1.5배까지는 분산전력, 흡수식 냉방 시스템의 용량 및 NPV가 0으로 나타나는데, 이는 CHP시스템을 도입하는 것 보다는 중앙발전 시스템으로부터 전기를 사오는 것이 경제적이라는 것을 의미한다. 그러나 현재 국내의 전기요금은 미국에 비해 1.3배, 일본의 경우보다 2.5배, 그리고

프랑스에 비해 1.5배 정도 저렴하게 공급되는 상황을 고려해 볼 때⁽¹⁾ 중앙발전에서 공급되는 전기요금은 꾸준히 상승하리라 예측되고 CHP시스템의 적용이 적극 검토될 것이라 판단한다. 현재의 전기요금보다 1.5배 이상인 경우에는 분산발전 시스템의 용량이 지속적으로 증가하고 있고, 이에 따라 NPV도 증가하는 경향을 보인다. 한편, 흡수식 시스템의 경우는 전기요금이 현재보다 1.8배 이상 되는 경우에 설치하는 것이 경제적임을 나타냈다. 그러나 위의 값들은 분산발전 시스템과 흡수식 냉방시스템의 초기 투자비에 따라 달라지며 이에 대한 경향은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타났다. Fig. 3은 전기요금을 현재의 2.0배로 고정시켰을 때 분산발전 시스템의 초기투자비에 따른 발전용량과 흡수식 시스템의 용량, 그리고 NPV를 나타낸다. 발전 시스템의 초기 투자비가 \$700/kW에서 \$1500/kW 까지 증가함에 따라 NPV가 감소함을 볼 수 있다. 이는 현재 터빈으로 운전되는 분산발전 시스템의 초기투자비가 \$1500/kW 정도임을^(2, 8) 고려할 때 초기투자에 대한 정부지원금의 정도를 파악할 수 있다. Fig. 4는 흡수식 시스템의 초기투자비에 따른 CHP시스템용량과 NPV를 나타낸다. 이 때 분산발전 시스템의 초기투자비는 \$1000/kW로 고정하였고, 전기요금의 경우는 현재의 2배이다. 분산발전 시스템의 초기투자비와 마찬가지로 흡수식 냉방시스템의 초기투자비가 감소할수록 최적 분산발전용량과 흡수식 냉방용량이 증가하였다. Fig. 4를 Fig. 3과 비교해 볼 때 각 초기투자비의 감소에 대해 분산발전 시스템의 초기투자비 감소가 흡수식 냉방시스템의 초기투자비의 감소에 비해 더 큰 NPV를 나타내고 있다. 이 값은 본 대상 건물의 냉·난방부하에 따라 달라질 수 있으나, CHP시스템의 NPV는 분산발전 시스템의 초기투자비에 더 크게 의존함을 볼 수 있고, 이는 실제 CHP시스템의 운전에 있어서 분산발전 시스템의 발전용량이 냉방용량보다 크게 나타나기 때문이다. Fig. 5는 연료가격의 상승에 따른 최적용량 및 NPV의 변화를 나타낸다. 흡수식 냉방 시스템의 투자비는 \$577.6/RT로, 분산발전 시스템은 \$1,000/kW로 그리고 전기요금은 현재의 2배로 고정하였다. 예상할 수 있듯이 연료비의 상승에 따라 NPV는 급격하게 감소하고 있다. 전기요금과 연료비의 상승 정도에 따라 본 CHP시스템의 NPV는 크게 달라지는데 예를 들어 연료비가 현재보다 20% 상승한

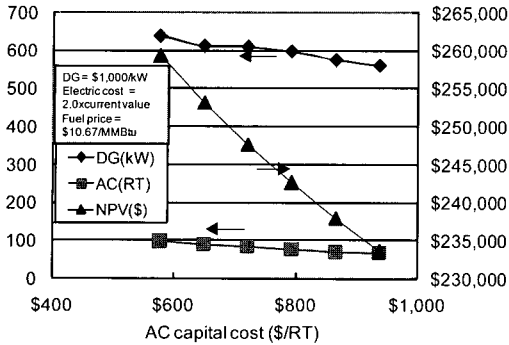


Fig. 4 The effects of AC capital cost on the capacity of DG, AG, and the NPV.

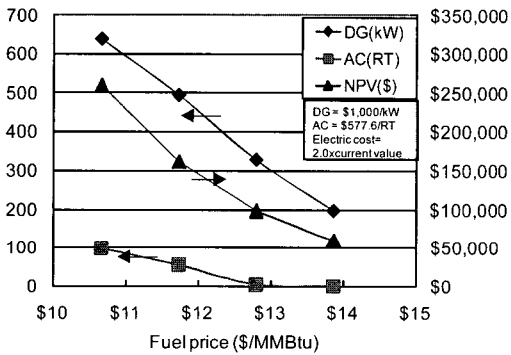


Fig. 5 The effects of fuel price on the capacity of DG, AG, and the NPV.

경우에도 현재의 전기요금의 1.6배를 기준으로 전기요금이 20% 상승한 경우에는 \$56,510의 NPV를 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 ORNL에서 개발한 CHP 용량 최적화 프로그램을 이용하여 대학 내 도서관을 대상 건물로 분석하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 국내의 전기요금과 연료비, 그리고 CHP시스템의 초기투자비를 고려할 때 아직까지는 건물용 CHP시스템의 설치가 경제성이 없는 것으로 판단되었다.

2) 분산발전 시스템의 초기투자비가 \$1000/kW, 흡수식냉방시스템의 경우 \$722/RT, 그리고 연료비가 \$10.67/MMBtu일 때, 현재의 전기요금보다 1.5

배 이상인 경우부터 NPV가 증가하는 경향이 나타난다.

3) 각 초기투자비의 감소에 대해 분산발전 시스템의 초기투자비 감소가 흡수식 냉방시스템의 초기투자비의 감소에 비해 더 큰 NPV를 나타내고 있고, 이는 실제 CHP시스템의 운전에 있어서 분산발전 시스템의 발전용량이 냉방용량보다 크기 때문이다.

4) 전기요금과 연료비의 상승정도에 따라 본 CHP시스템의 NPV는 크게 달라지므로 실제 CHP의 설치여부는 이 두 요소를 모두 고려해야 한다.

후 기

이 논문은 2006년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

참고문헌

1. <http://www.kepco.co.kr>.
2. Yun, H., 2003, Small sized CHP system and the plan to boost CES market, Magazine of the SAREK, Vol. 32, No. 11, pp. 6-13.
3. Cho, K., 2002, Absorption and CHP Systems, Proceeding of the SAREK 2002 summer annual conference, pp. 1561-1566.
4. Hwang, Y., 2004, Potential energy benefits of integrated refrigeration system with microturbine and absorption chiller, International Journal of Refrigeration, Vol. 27, pp. 816-829.
5. Hudson, C. R., 2005, ORNL CHP Capacity Optimizer User Manual, ORNL/TM-2005/267 Draft.
6. Glazer, J., Cornell, T., and Witte M. J., 2003, BCHP Screening Tool Manual Version Vol. 1, p. 2.
7. <http://www.kogas.co.kr>.
8. Schienbein, L. A., Balducci, P. J., Nguyen, T. B., 2004, Avoiding distribution system upgrade costs using distributed generation, DistributeCH Conference and Exhibition 2004, PNNL-SA-39886.