제주지역 환경시설지구의 미활용 에너지 최적 활용방안에 관한 연구
A Study on Optimum Application of Unutilized Energies in the Jeju Environment Facility

강병찬 · 박윤철
B. C. Kang and Y. C. Park

Key Words : Waste Heat(폐열), Linear Programming(선형계획법), Optimization(최적화)

Abstract : This paper provides a methodology for the optimization of waste heat usage in Jeju Province. The incineration plant was considered as heat source and the food garbage plant and the youth hostel were selected as heat sink of this study. The distribution of the reusing energy in incineration plant is decide by load analysis and numerical calculation of the operational methodology. The main objective of this study is on the reduction of the fuel costs and reuse of waste heat. As the results, the efficiency of the incineration plant and two heat sink, the food garbage plant and the youth hostel, are improved and economical suggestions are proposed through the optimization analysis.

기호 설명

C : 에너지단가 [원/Mcal]
D_H : 난방부하 [kcal/h]
Dc : 냉방부하 [kcal/h]
LHV : 저위발열량 [kcal/kg]
n : 기기 수
m : 질량 [kg]
Q_{tot} : 총 에너지 [kcal]
Q_L : 저위 발열량 [kcal/kg]
t : 계절별, 일간부하별 분할
X : 에너지소비량 [Mcal/yr]

그리스 문자

δ : 0-1 변수
η : 효율 [%]

1. 서 론

최근 제주도는 국제자유화도시 지정과 함께 활발한 지역개발이 이루어지고 있으며, 생활수준의 향상에 따라 에너지 소비도 날로 증가하여 추가적인 발전소의 증설이 이루어지고 있다. 이러한 지역적인 에너지 소비의 증가를 완화하고 국가적인 이산화탄소 저감 정책 등에 기여하기 위한 방안으로 미활용 폐열의 재활용에 대한 관심이 커지고 있다. 또한, 제주도에서는 대규모 에너지 다소비형 복합건물(호텔, 사우나 등)이 늘어나고 있지만 이러한 시설에서 발생하는 폐열을 제대로 활용하지 못하고 있다.

미활용 에너지에 대한 관심이 증가하고 있는 현시점에서 미활용 폐열을 이용하는 기술개발이 확산되고 있는 추세이나[1], 제주도의 경우에는 산업시설의 미비로 폐열이용 기술개발뿐만 아니라 폐열이용 시설이 거의 없는 것이 현실이다[2,3].

본 연구는 제주도의 대표적인 폐열발생장소 중의 하나인 환경시설지구의 미활용 에너지의 최적 활용방안을 살펴보고 이에 대한 경제성을 평가하기 위한 연구이다.

2. 에너지자원의 이용현황

제주도 환경시설지구는 지구내의 각 시설들이 설계과정에서부터 미활용 에너지에 대한 활용계획이 어느 정도 검토되었으나, 구체적이고 체계적인 에너지 활용에 대한 방안 및 시설경험이 부족하였다. 또한 시설들 간의 이용효율이 다르고 각 시설간에 에

접수일 : 2007년 4월 13일, 채택확정 : 2007년 8월 9일
박윤철(책임저자) : 제주대학교 기계에너지시스템공학부
E-mail : ycpark@cheju.ac.kr, Tel : 064-754-3626
강병찬 : 한국건설기술연구원 화재설비연구부

너지에 대한 이용비용에 대한 협의가 적절히 진행되지 못하는 등 여러 가지 문제점이 있는 것이 현실이다. 현재는 각 시설들은 독자적인 냉난방설비와 시설유지에 필요한 에너지설비를 구비하고 있으며, 경유 혹은 벙커C유 등을 연료로 사용하고 있다.

환경시설지구내의 미활용 폐열이 발생하는 에너지관련 시설은 광역소각장, LFG(Land fill gas)발전소이며, 이러한 미활용 폐열을 활용할 수 있는 시설은 음식물쓰레기 자원화센터, H리조트 및 Y호스텔이다. 이들 시설의 에너지 이용현황을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 환경시설지구의 폐열발생 시설현황

제주시 광역소각장은 하루 200톤의 시설용량을 가진 소각시설이며, 본 연구에서는 설계자료를 기준으로 폐열부존량 및 미활용 에너지량을 결정하였다. 광역소각장에 유입되는 쓰레기의 종류는 여러 가지이며, 쓰레기에 함유된 성분에 따라 쓰레기의 질을 양질, 중질 및 저질로 구별할 수 있다. 본 연구에서 유입 쓰레기의 저위발열량은 평균발열량인 1,800kcal/kg으로 가정하였다.

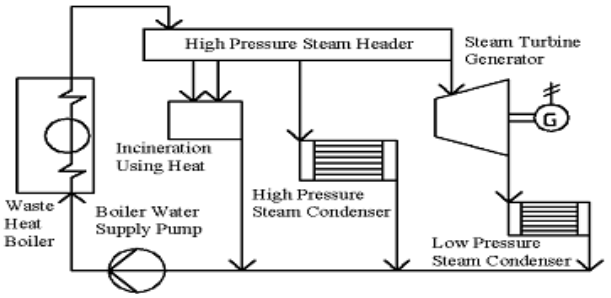


Fig. 1 Schematic of waste heat utilization at the incineration plant

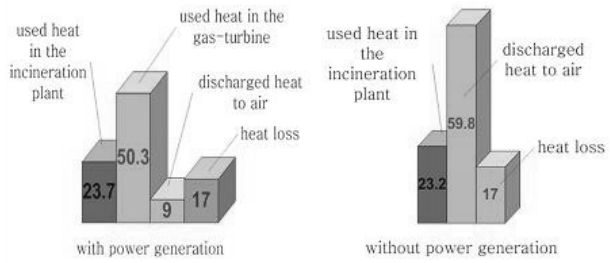


Fig. 2 Energy supply trend to each facility with or without operation of power generator at the Jeju Incineration Plant

Fig. 1은 광역소각장의 각 설비의 개략도이며, 현재의 운전현황 및 에너지 사용비율을 살펴보면 Table 1과 같다. 광역소각장에서 발전용 증기터빈(Power generator)을 운전할 경우와 운전하지 않을 경우에 따라 폐열발생량은 차이가 나며, 전체회수폐열 중에서 광역소각장내의 자체이용, 복수기를 통하여 공기 중에 방열하는 열량 및 연도손실 등의 비율은 Fig. 2와 같다.

Table 1 Operational status of the Jeju Incineration Plant

Capacity	200 ton/day
Garbage supply	100 ton/day
Power generation	400 kW
Utilized energy by facility itself	23.7%
Used energy for power generation	50.3% (29,234 Gcal/yr)
Energy losses	17%
Rejected energy to air at steam condenser	9% (5,230.8Gcal/yr)
Steam temperature	250℃
Steam generation	12,000 kg/hr

환경시설지구의 또 다른 에너지 발생설비로써 LFG 발전소의 발전용량은 25평형 아파트 5,600세대의 전력공급이 가능한 2 MW이다. 이러한 발전량을 기준으로 LFG 발전소에서 발생하는 폐열량은 연간 10,950 Gcal이며, 이 양은 다음 절에서 소개되는 각 수요처의 연간 냉난방부하를 충족시키기에 충분한 에너지양이다.

2.2 환경시설지구의 폐열이용가능 시설현황

제주도 환경시설지구에 위치한 음식물쓰레기 자원화센터에서는 제주시의 발생하는 연간 약 33,000 ton/yr의 쓰레기를 처리하고 있으며, 음식물쓰레기를 원료로 하여 퇴비를 생산하고 있다. 음식물쓰레기를 이용하여 양질의 퇴비를 얻기 위해서는 음식물쓰레기를 건조하여 함수율 40%이하로 조절하여야 하며, 이때 건조를 위한 연료로 경유를 사용하고 있다.

Fig. 3은 음식물쓰레기 자원화센터의 음식물쓰레기 반입량과 사용 연료량으로써 반입량과 연료의 사용량은 비례하지는 않는 것을 알 수 있는데, 이것은 음식물쓰레기의 조성이 일정하지 않기 때문이다.

음식물쓰레기 자원화센터에는 현재 두개의 공장을 운영중이며 운전현황은 Table 2와 같다. 두개의

공장에서 음식물 건조에 필요한 에너지를 경유의 저위발열량을 기준으로 산정하면 식(1)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$\dot{Q} = P_{FC} \times \frac{\rho}{P_C} \times Q_L \quad (1)$$

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{\dot{Q}}{h_v - h_l} \quad (2)$$

Table 2 Specification of the Food Waste Resource Center

Fuel consumption(L)	479 (Factory Ⅰ=384) (Factory Ⅱ= 95)
Fuel type	Light oil (LHV : 9,200 kcal/kg)
Energy price (₩/yr)	193×10^6 (Factory Ⅰ=138×10^6) (Factory Ⅱ= 55×10^6)
Energy demand (Gcal/yr)	2,240 (Factory Ⅰ=1,600) (Factory Ⅱ= 640)
Steam demand (ton/yr)	4,051 (Factory Ⅰ= 2,894) (Factory Ⅱ= 1,157)
Steam temperature(℃)	160
Fuel consumption for heating 1 ton of water from 100℃ to 160℃(L)	72.4
Energy price for 1 ton of steam generating(₩)	55,024

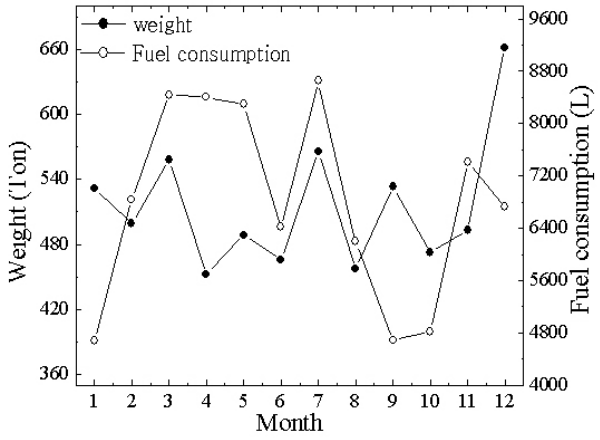


Fig. 3 Inflow of waste garbage and fuel consumption

여기서 $\dot{Q}$는 음식물자원화센터에서의 필요한 에너지(kcal/yr), P_{FC}는 손실률(%), ρ는 밀도(kg/m^3), P_C는 연간 에너지사용량(m^3/yr), $\dot{m}_{vapor}$는 증기의 질량유량(kg/s)이며, h_v, 및 h_l은 각각 증기와 물의 엔탈피(kcal/kg)이다.

각 센터에서 음식물쓰레기의 건조에 필요한 증기량은 식(2)에 나타낸 바와 같이 대기압에서 수증기의 엔탈피 차이와 건조용 에너지량으로부터 계산할 수 있다.

제주시 광역소각장에서 약 2 km 거리에 위치한 H리조트는 또 하나의 미활용 폐열을 이용할 수 있는 시설이다. 약 400개의 객실을 갖춘 대형 숙박시설로 건물의 냉난방 부하가 큰 시설중의 하나이다. Table 3은 H리조트의 열원설비의 현황을 나타내고 있다.

또한, 제주시 광역소각장에서 직선거리로 약 700 m 거리에 위치한 Y호스텔 또한 H리조트와 마찬가지로 숙박시설로서 건물 냉난방용 에너지가 필요한 시설이다. Y호스텔의 운전현황은 Table 4와 같다.

Table 3 Energy facility specifications of the H Resort

Area	9,221.48 m^2
Room no.	396
Boiler capacity	2 Gcal/hr × 3 EA 1 Ton/hr × 2 EA
Fuel type	LPG (LHV : 12,000 kcal/kg)
Fuel consumption	563,737 kg/yr
Absorption chiller	200 RT × 2 EA
Demand energy	5,412 Gcal/yr

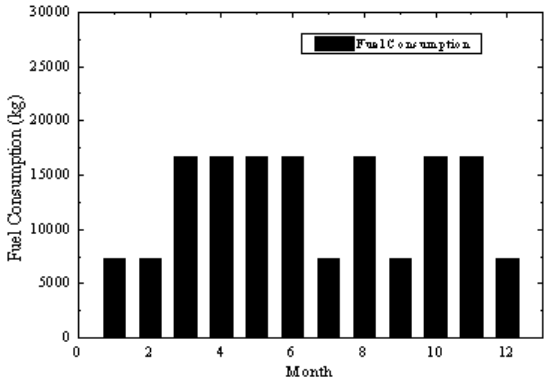
Table 4 Energy facility specifications of the Y Hostel

Area	2,512 m^2
Boiler capacity	Main - 300 Mcal/hr Sub - 2 Mcal/hr
Fuel type	Kerosene (LHV : 8,700 kcal/kg)
Fuel consumption	2,500 L/yr
Demand energy	167 Gcal/yr

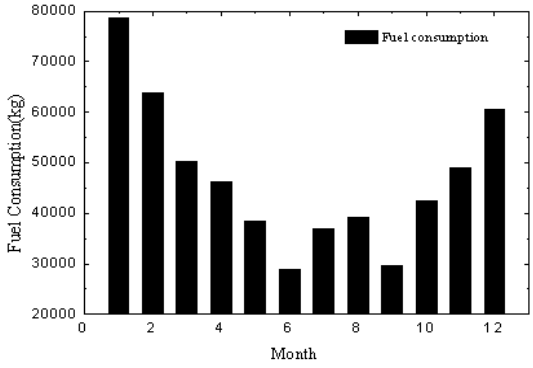
3. 결과 및 고찰

3.1 폐열 활용 최적화

폐열활용의 최적화를 위해서는 열수요처의 부하패턴이 필요하다. 본 연구에서 음식물쓰레기 자원화센터는 연중 연속운전하며 일정한 부하패턴을 보인다고 가정하였다. Y호스텔은 Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같은 월별 연료소모량으로부터 부하패턴을 설정하였고, H리조트의 부하패턴도 Y호스텔과 마찬가지로 Fig. 4(b)와 같이 H리조트의 연료소모량을 기준으로 부하패턴을 설정하였다. 이때 각 시설의 부하중에서 냉방, 난방 및 온수부하의 비율은 Fig. 5와 같이 대표적인 숙박용 건물의 부하패턴을 적용하였다[5].



(a) Y Hostel



(b) H Resort

Fig. 4 Fuel consumption of heat sinks

본 연구에서 적용한 폐열활용의 최적화를 위한 이론해석 및 수치실험은 선형계획법(Linear programming)을 사용하였다. 선형계획법은 최대의 이익과 최소비용의 목표를 얻기 위해 수리계획법(Mathematical programming)을 이용하여 실제문제를 수식화하여 최적치에 대한 문제의 해를 구체적으로 구하는 방법으로서 수리계획법의 한 분야이다[4,5].

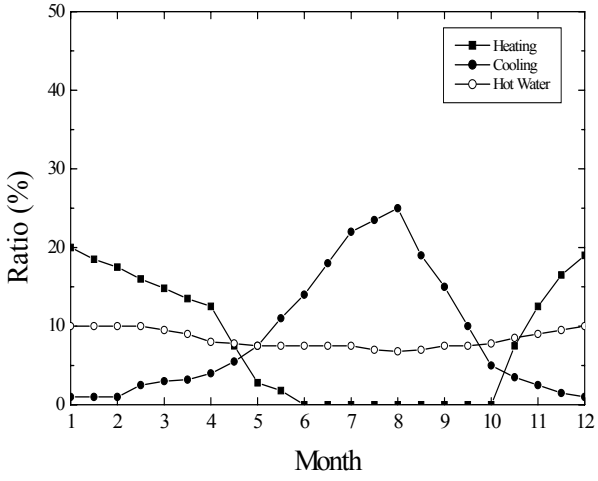


Fig. 5 Annual load patterns of conventional hotels

본 연구의 해석방정식의 목적함수는 식(3)과 같이 연간경상비를 선택하여 식(4)와 같이 나타내었고, 에너지시스템의 전체 경상비를 최소화하기 위한 수치해석을 수행하였다[6,7].

$$Min\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}(C_n^t \cdot X_n^t \cdot H)\right) \tag{3}$$

$$Min(c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_{nx_n}) \tag{4}$$

$$a_{11}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \geq D_H \tag{5}$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \geq D_C \tag{6}$$

$$\min x_n \times \delta_n \leq x_n \leq \max x_n \times \delta_n \tag{7}$$

에너지공급을 위한 설비로 보일러 및 냉동기 등 n개의 기기들이 사용되고, 운전시간(H)에 따라 식(3), 식(4)의 값이 최소가 되기 위하여 목적함수의 구속조건(제약식)은 식(5) 및 (6)과 같다. 여기서 각 기기는 냉·난방 난방부하 D_H와 냉방부하 D_C를 만족시키며, 각 기기의 입력값의 제한범위는 식(7)과 같으며, δ는 0-1변수로서 0일 때는 기기의 정지, 1일 때는 운전을 의미한다. 해석알고리즘은 단체법(Simplex method)을 사용하였으며, 기기의 운전 혹은 정지를 나타내는 0-1계획법을 이용하였다.

3.2 폐열활용 시스템의 연계방안

폐열을 최적으로 활용하기 위한 방법에 대하여 본 연구에서는 세 가지 경우에 대하여 폐열의 활용방안을 검토하였다.

첫째, 광역소각장의 폐열보일러를 통하여 회수된 열량 중에 일부는 소각장내부의 열 이용설비에 활용하고, 일부는 폐열활용시설인 증기터빈을 사용한 발전에 이용하며, 나머지 잉여 폐열로써 복수기를 이용하여 대기중에 방열되는 폐열(9%)을 활용하는 방안이다. 폐열보일러에서 회수된 열량중의 9%의 열량을 이용할 경우에 음식물쓰레기 자원화센터와 Y호스텔의 부하를 감당할 수 있으나 H리조트의 부하까지를 감당하기에는 부족한 열량이다.

둘째, 광역소각장에서 발전용 증기터빈을 정지하고 증기터빈에 사용되는 폐열(59.3%)까지 각 수요처에 공급할 경우에 대하여 검토하였다. 이 경우에 각 수요처에 열량을 공급하고도 많은 양의 열량이 남게 된다. 각 수요처의 부하들의 합만큼 충당하고 남는 폐열은 증기터빈운전을 통하여 발전에 활용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

셋째, LFG 발전소의 폐열을 각 수요처에서 활용할 경우에는 H리조트의 동절기 난방부하만을 충당하지 못하고 있다. 따라서 이 시기에는 H 리조트의 자체보일러를 가동하여야 부하를 만족할 수 있다.

3.3 경제성 분석

본 연구에서는 공급처와 수요처간 모두가 경제적으로 이득을 봐야 하는 면을 고려하여 폐열의 단가를 5,000 ₩/Gcal에서 20,000 ₩/Gcal 사이에서 결정된다고 가정하였다. 현재 서인천 복합화력발전소의 폐열을 이용하여 지역냉난방을 보급하고 있는 지역냉난방공급회사에서는 기본요금을 제외한 공급요금은 약 51,000 ₩/Gcal을 적용하고 있다(2007년 2월 청라에너지(주) 기준). 본 연구에서 기존의 폐열가격보다 낮은 범위에서 경제성을 분석한 이유는 수요처까지 폐열을 공급하기 위한 공사비가 기존에 화력발전소보다 상대적으로 아주 적기 때문이다. 대부분의 폐열활용 설비는 다수의 수요처에 냉난방을 공급하고 있으나, 본 연구에서는 수요처가 1-2개로써 제한적이다. 또 다른 이유는 폐열을 판매하는 폐열공급처가 지자체 소속시설이며, 수익사업을 위한 폐열공급이 아니라 대기중에 버려지는 폐열을 활용하여 에너지의 재활용에 초점이 맞춰진 연구이다. 이와 같은 이유로 폐열판매를 통한 수익보다는 폐열활용시설을 설치하기 위한 기본적인 시설비를 중심으로 폐열단가가 산정되었다.

정확한 폐열의 단가는 본 연구에서 고려한 단가 범위 안에서 결정되어야만 본 연구의 경제성 평가가 의미를 가질 수 있다.

Fig. 6은 H리조트에 있어서 난방부하를 충당하기 위해 광역소각장(증기터빈운전 혹은 터빈정지) 혹은 LFG 발전소의 폐열을 활용할 경우에 대하여 증기단가에 따른 연간경상비를 비교하였다. LFG 발전소와 광역소각장(증기터빈운전)의 폐열을 활용할 경우에는 앞에서 언급한 바와 같이 각 폐열 발생처가 단독으로 H리조트의 부하를 충당할 수 없다. 따라서 거리에 따른 초기투자비 뿐만 아니라 부족한 부하를 충당하기 위해 H리조트의 자체 보일러를 활용하여 기존 연료를 사용하므로 연간경상비가 크다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 각 시설별로 증기단가, 연간운전비 및 연간경상비를 비교하였고, 이를 기준으로 경제성 분석을 통하여 폐열활용을 위해 어떠한 시스템을 구축하는 것이 경제적인지를 살펴보았다. 이때 Y호스텔의 경우에는 폐열을 활용하였을 때 연간 절감액과 투자에 따른 순회수금액이 초기투자비에 비해 현저히 적어 경제성 분석에서 제외를 하였다. 경제성분석을 위한 평가지표는 다음과 같은 식으로부터 계산하였다.

Table 5 Economical analysis for three types of network (unit: 10^3won)

Supply/Demand	LFG-> Food Recycle	Incineration Plant-> H Resort	Incineration Plant-> Food Recycle
Investment	272,000	680,000	408,000
Depreciation (15 year)	18,130	45,000	27,200
Energy price per year	279,000	357,500	279,000
Capital(15 year, rate 0.2%)	8,270	20,690	8,270

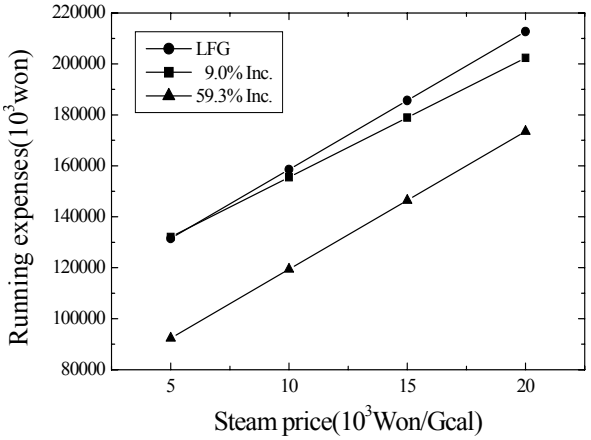


Fig. 6 Comparison of annual running cost with steam price in the H Resort

단순투자회수기간=초기투자비/연간 순회수액
연간 순회수액=절감액-(감가상각비+운전비)
절감액=연간연료사용비-운전비

본 연구에서는 LFG 발전소의 폐열을 음식물쓰레기 자원화센터의 건조용으로 사용하는 경우, 광역소각장의 폐열을 H리조트의 난방용으로 사용하는 경우 및 광역소각장의 폐열을 음식물쓰레기 자원화센터의 건조용으로 사용하는 세 가지 경우에 대하여 폐열 발생처와 수요처의 연계형태에 따른 경제성을 평가하였다. Table 5는 폐열활용 시설에 소요되는 비용에 대하여 초기투자비, 감가상각비, 연료사용비 및 원리금을 계산한 결과이며, 이를 기준으로 증기단가에 따른 운전비, 절감액, 연간순회수금액 및 단순투자회수기간은 Table 6과 같다. 여기서 초기투자비는 폐열활용을 위하여 소요되는 배관시설비만을 고려하였으며, 단위 km당 6.8억원으로 계상하였다.[(2)]

4. 결 론

본 연구에서 제주시 환경시설지구내의 폐열발생처와 폐열수요처를 조사하여 잉여폐열의 최적 활용방안에 대한 검토를 통한 결론은 다음과 같다.

(1) 광역소각장에서 발생하는 폐열 중에서 연간 미활용 열량은 증기터빈운전시 5,231 Gcal, 증기터빈정지시 29,234 Gcal 이며, LFG 발전소에서 매립가스의 연간 부존 에너지는 10,950 Gcal이다. 환경시설지구의 음식물쓰레기 자원화센터의 연간 필요열량은 2,240 Gcal, H리조트의 연간 열부하는 5,412 Gcal 및 Y호스텔의 연간 열부하는 167 Gcal 이다.

(2) 환경시설지구의 폐열활용을 위한 시스템구성방안을 검토한 결과 에너지 활용시스템은 LFG 발전소-음식물쓰레기 자원화센터, 소각장(터빈정지)-H리조트 및 소각장(터빈운전)-음식물쓰레기 자원화센터 세 가지를 구축할 수 있다.

(3) 폐열단가를 결정하였을 경우 폐열활용을 위한 시설투자에 따른 단순투자회수기간을 산출하면, 증기단가가 10,000 Won/Gcal 라고 결정되었을 경우에 LFG발전소-음식물자원화센터로 구축된 시스템에서는 1.26년, 소각장(터빈정지) - H리조트로 구축된 시스템에서는 9.2년 및 소각장(터빈운전)-음식물자원화센터로 구축된 시스템에서는 1.97년의 기간이 필요하다.

참고 문헌

1. 박준택, 1998, 지역별 미활용 에너지 부존량 및 이용가능성조사, 산업자원부, 97-E-ID02-P-16.1.
2. 박윤철, 2002, “ 제주지역 폐열배출 실태와 재이용 가능성조사”, 제주지역 환경기술개발센터 2002년도 최종보고서, pp. 20～51.
3. Kim, S, H., Park, Y. C., Kown, K, R., 2003, "A Study on Unused Energy Management of Jeju City Waste Environment Center, The Korea Society for Power System Engineering, Vol. 8

Table 6 Calculation of payback period of three types of energy network (unit: 10^3 won)

Network	Energy price	Running cost	Saving	Net return money	Payback period(year)
LFG Plant-> Food Waste Resources Center	5(10^3 ₩/Gcal)	11,200	267,800	238,470	1.14
	10(10^3 ₩/Gcal)	22,400	256,600	216,070	1.26
	15(10^3 ₩/Gcal)	33,600	245,400	193,670	1.4
	20(10^3 ₩/Gcal)	44,800	234,200	171,270	1.6
Incineration plant-> H Resort	5(10^3 ₩/Gcal)	92,300	265,200	127,900	5.3
	10(10^3 ₩/Gcal)	119,400	238,100	73,700	9.2
	15(10^3 ₩/Gcal)	146,400	211,100	N/A	N/A
	20(10^3 ₩/Gcal)	173,500	184,000	N/A	N/A
Incineration plant-> Food Waste Resources Center	5(10^3 ₩/Gcal)	11,200	267,800	229,400	1.79
	10(10^3 ₩/Gcal)	22,400	256,600	207,000	1.97
	15(10^3 ₩/Gcal)	33,600	245,400	184,600	2.2
	20(10^3 ₩/Gcal)	44,800	234,200	162,200	2.5

No. 1, pp. 48~54.
4. Lee, T. W., 2002, A Design of the Integrated System Model of the Individual Urban Utility Plants Using Underground Space, Report of Korea Institute of Construction Technology, R&D/99S01.
5. Lee, T. W., 2004, A Design of the Integrated System Model of the Individual Urban Utility Plants Using Underground Space, Report of Korea Institute of Construction Technology, R&D/99S01-01.
6. Park, S. D., Operation Research, 4th ed, Minyoungsa, 2000.
7. LINGO System Inc., "LINGO user's guide", 1998.