

제주도광역소각장의 폐열활용 최적화에 관한 연구

강병찬* · 박윤철**

A study on optimization of waste heat usage in the incineration plant of Jeju Province

B. C. Kang*, Y. C. Park**

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 the incineration plant is decided 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 drawn through the optimization analysis.

Key Words : Waste heat, linear programming, incineration plant, optimization.

I. 서론

산업혁명 이후에 과학기술의 발전과 산업화의 결과로 인해 화석에너지사용이 급격히 늘어나고 유가 시대를 맞이하게 되었다. 우리나라는 총에너지 소비의 97% 이상을 해외에 의존하고 있으며, 기후변화협약(교토의정서)에 의거 2차 공약기간 중 온실가스 감축의무 부담이 가시화될 전망으로

보인다. 이러한 국제환경규제에 능동적으로 대응하고 에너지안보 확보를 위해서는 대체에너지 개발, 미활용 에너지의 최적이용 및 보급 확대의 필요성이 대두 되었다. 최근에는 공공기관의 대체에너지 의무이용을 골자로 하는 「대체에너지 개발 및 이용 보급 촉진법시행령」 개정안이 확정되어, 국가기관, 지자체, 투자·출자·출연기관 및 특별법인 등 공공기관은 건축법 시행령에 의하여 11개 용도별 시설물중 건축연면적 3천㎡ 이상의 건물을 신축할 경우 건축공사비의 5% 이상을 대체에너지 설비의 설치에 사용하여야 한다.

제주도는 국제자유도시 지정으로 지역개발이 활발히 이루어지고 있으며, 제주도민의 생활수준의 향상에 따라 에너지 소비는 더욱 증가하고 있다. 다량의 에너지가 소비되는 곳에서는 필요불가결하게 에너지이용에 따른 에너지손실이 발생한다. 제주지역에서 폐열이 대량으로 발생하는 시설로는 광역폐기물소각장 및 발전소 등이 있고 대

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 기계·에너지·시스템공학부, 첨단기술연구소

Faculty of Mechanical, Energy & System Eng.,
Research Institute of Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

량의 에너지 소비처로 복합건물(호텔, 사우나 등)이 늘어나고 있지만 대량의 폐열이 발생하는 시설에서 폐열활용이 제대로 이루어지지 못하고 있는 것이 현실이다.

미활용에너지의 활용이 부각되는 요즘, 폐열을 이용하는 기술이 점차 개발되고 확산되는 추세이나, 제주도의 경우에는 산업시설의 미비로 폐열이용기술이 아직까지 정착하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 제주시 회천동 소재의 환경시설지구 내에 있는 대량의 폐열발생처인 광역폐기물소각장의 발생폐열을 활용하는 방안에 대한 연구로서 환경시설지구내의 대규모 에너지 수요처를 지정하여 활용방안에 강구하여, 에너지 공동체의 구축에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서 폐열의 활용처로는 환경시설지구내의 음식물쓰레기 자원화센터와 인근의 청소년 휴양시설인 유스호스텔을 대상으로 하였다.

II. 에너지 정산 및 최적화 방안

2.1. 광역폐기물소각장 폐열 부존량 분석

제주시 광역폐기물소각장은 2002년 2월부터 시험운전 후에 2002년 8월부터 본격적인 가동에 들어갔다. 최근에 측정된 자료에 의하면 유입 쓰레기의 조성은 평균발열량 1,800 kcal/kg이상의 쓰레기로 나타났다. Fig. 1은 광역폐기물소각장의

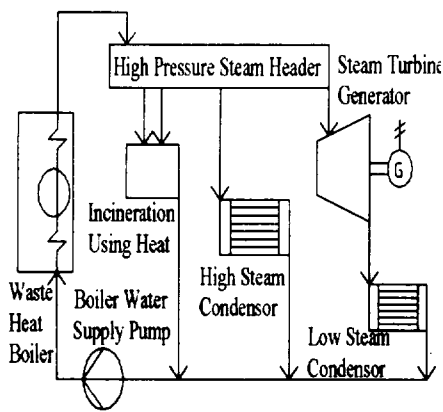


Fig. 1 Schematic diagram of facility of waste heat in incineration plant.

개략도를 나타내며, Fig. 2는 소각장의 열정산을 나타내었다. 본 연구에서는 유입 쓰레기의 저위발열량과 반입량은 각각 1,800 kcal/kg과 100 ton으로 가정하였다. 이러한 쓰레기로 소각할 때 발생하는 고온·고압의 증기를 회수하여 활용 가능한 에너지는 식(1)로 계산하였다. 여기서 Q_{tot} 는 소각장에서 발생하는 총 에너지를 나타내며, Q_L 은 경유의 저위발열량, m 은 질량, η 는 효율을 나타낸다.

$$Q_{tot} = Q_L \cdot m \cdot \eta \quad (1)$$

제주도광역폐기물 소각장에서 연간 발생하는 폐열은 54,531 Gcal이며, 증기터빈 정지시 소각장 자체 사용열과 열손실을 제외한 외부 이용 가능량은 폐열발생량의 약 59.8%인 연간 39,288 Gcal이고, 증기터빈 운전시 외부 이용 가능량은 폐열발생량의 약 9%인 4,908 Gcal이다.

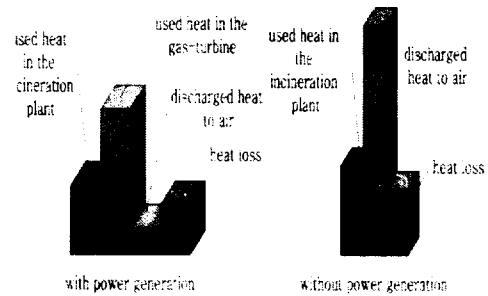


Fig. 2 Heat balance of the incineration plant(%).

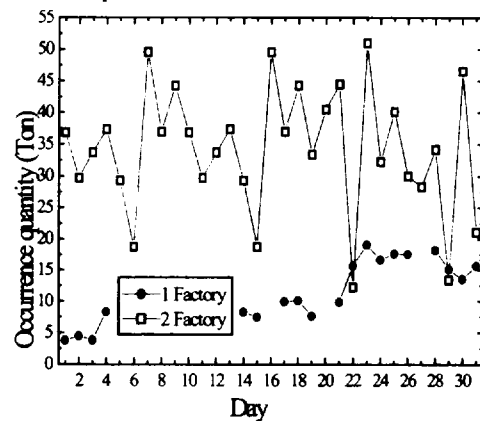


Fig. 3 Carry in quantity of food garbage plant.

2.2. 음식물쓰레기 자원화센터 열정산

제주시 음식물쓰레기 발생량은 하루에 약 89 ton이며, 음식물쓰레기를 퇴비나 혹은 사료용으로 재활용하기 위하여 설립된 음식물자원화센터는 2003년 2월에 제 2공장을 준공하였으며, 기존의 제 1공장의 쓰레기 반입량은 하루 평균 약 12 ton이며, 제 2공장은 32 ton이다. 두개의 공장에서 쓰레기를 건조시키기 위하여 하루평균 소비된 경유의 양은 제 1공장에서 95ℓ이며, 제 2공장은 384ℓ를 소비하고 있다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 한 달간 음식물쓰레기의 반입량과 연료 사용량을 나타내었다.

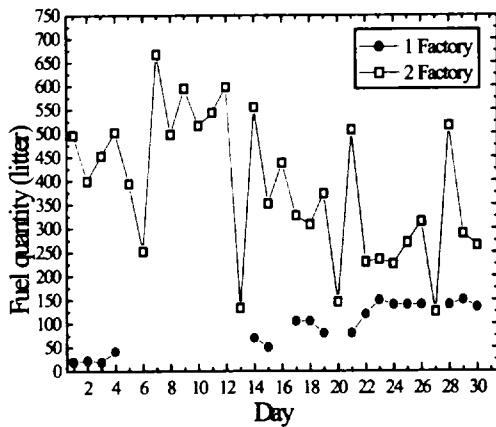


Fig. 4 Fuel consumption in the factory.

측정된 연료소비량을 기준으로 각 공장에서 필요로 하는 음식물 쓰레기 건조용 증기(steam)량을 계산하였다. 증기의 톤당 생산가격의 산출은 열병합 발전소와 같은 집단 에너지 공급업체에서 사용하는 계산방법을 이용하였다[1].

음식물쓰레기 자원화센터에서 연간 사용연료비는 약 1.93억원이며 이것을 경유의 저위발열량을 기준으로 열량으로 환산하였을 경우에 연간 필요열량은 연간 2,240 Gcal이다. 이러한 열량을 광역소각장의 폐열이용을 고려하여 증기량으로 환산하였을 경우에 필요증기량은 연간 4,051 ton이다. 이것은 160℃의 증기가 100℃의 물로 냉각된다는 가정 하에 계산한 것이다.

폐열의 발생처인 광역소각장에서 수요처인 음식물쓰레기 자원화센터까지의 거리는 측정결과 1.4 km인 것으로 나타났다.

2.3. 유스호스텔의 열정산

제주 유스호스텔은 환경시설지구에서 근거리 에 위치한 대규모 에너지 다소비형 건물로써 건평이 약 7백60여평(2,512m²)이며, 광역소각장까지의 거리가 약 2 km이다.

유스호스텔에는 냉난방시설로서 보일러와 흡수식냉동기가 설치되어 있으며, 연료는 경유를 사용하고 있다. 연간연료비는 약 2.5억원으로 가정하였으며, 이를 열량으로 환산하였을 경우에 연간 필요열량은 약 2,874 Gcal이다.

Fig. 5는 유스호스텔과 같은 숙박시설의 난방부하, 냉방부하 및 급탕부하의 연간변화를 나타내는 대표적인 부하선도이다[2].

본 연구에서 제주 유스호스텔의 부하패턴은 장기간의 모니터링의 작업이 필요하여 일반적으로 사용되는 숙박시설의 부하패턴인 Fig. 5를 이용하였다.

2.4. 에너지자원 최적화 모델

제주도 광역소각장에서는 쓰레기 소각시 발생하는 열을 폐열보일러를 통하여 회수하고 회수된 에너지를 고압증기헤더에서 분배하여 일부는 증기터빈발전기를 구동 열원으로 사용하고, 일부는 소각장 운영에 필요한 열원으로 사용하며, 이외의 잉여 열은 고압복수기를 통하여 외기로 방열하고 있다.

한편 근거리 에 위치한 제주시 음식물쓰레기 자원화센터와 제주 유스호스텔은 난방과 냉방 에

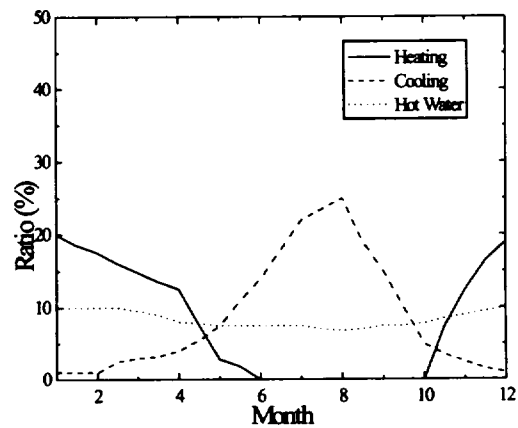


Fig. 5 Building load of a youth hostel.

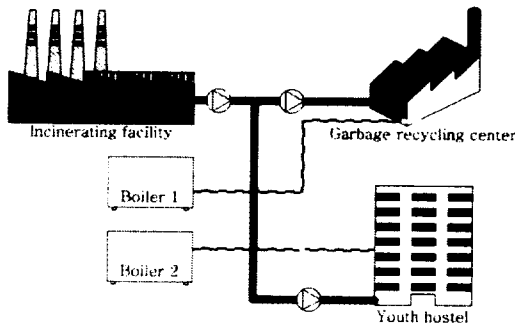


Fig. 6 Schematic diagram of energy network in the Jeju Environment Center.

너지원으로 고가의 유류를 사용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 폐열의 발생처인 광역소각장과 에너지의 수요처인 음식물쓰레기 자원화센터 및 유스호스텔 사이의 구간에 증기수송관로가 설치되어 있다는 가정 하에 광역소각장의 발전용 증기터빈에 사용되고 있는 에너지와 복수기에서 대기로 방열되는 폐열을 수요처에 사용할 때 에너지 활용도를 평가하는 모델을 개발하였다. Fig. 6은 환경시설지구의 에너지 최적화 모델의 개략도를 나타내었다. 즉, 현재 사용중인 각 수요처의 보일러를 보조보일러로 활용하고 광역소각장에서 수송된 증기로 각 수요처의 부하를 감당할 수 없을 경우에만 보조보일러를 사용한다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 폐열 활용 최적화

제주시 광역소각장은 폐열이 대량으로 발생하는 폐열원으로서 폐열을 최대한 활용하기 위하여 각 수요처의 에너지 부하에 따라 각 시설들이 유기적으로 연결될 때 각 시설의 기능이 최대로 발휘되어 전체의 시스템 효율은 크게 향상될 것이다. 즉, 폐열 발생처에서의 공급량과 수요처에서의 자체 생산하는 에너지량을 수요처 부하에 맞춰 능동적이고 탄력적으로 공급하는 것이 가능해지므로 결과적으로 에너지의 효율적 이용이 가능해지고 전체 시스템의 효율도 향상시킬 수 있다[3].

본 연구에서는 우선 해석에 사용될 각종시설이 용도별 부하패턴을 작성하였다. 음식물쓰레기 자원화센터는 연속적으로 운전하여 일정한 부하패턴을 보인다고 가정하였으며, 유스호스텔의 부하특성은 중부지역 숙박용 건물의 부하패턴을 적용하였다. 각 시설의 부하는 Table 1과 같다.

본 연구에서 에너지활용의 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].

$$\text{Min} \left(\sum_{n=1}^T \sum_{n=1}^N (c'_n \cdot x'_n \cdot h) \right) \quad (2)$$

$$\text{Min}(c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n) \quad (3)$$

$$a_{11}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq D_H \quad (4)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \geq D_C \quad (5)$$

$$\min(x_n) \times \delta_n \leq x_n \leq \max(x_n) \times \delta_n \quad (6)$$

위 식들에서 c 는 생산단가, x 는 생산량, h 는 운전시간을 나타낸다.

식 (2)와 같이 본 연구의 해석방정식의 목적함수는 연간경상비(연간 운전비의 합)를 선택하여 식 (3)과 같이 나타내었고, 목적함수 즉 시스템의 전체 경상비를 최소화하기 위하여 수치해석을 수행하였다.

에너지공급을 위한 설비로 보일러 및 흡수식 냉동기 등 n 개의 기기들이 사용되고, 목적함수의 구속조건(제약식)은 식 (4)와 식(5)으로 나타내었다. 난방부하 D_H 와 냉방부하 D_C 를 만족시키는 식과 각 기기의 입력값의 제한범위는 식(6)과 같이 나타내고, δ 는 0~1변수로서 0일 때는 기기의 정지, 1일 때는 운전을 의미한다. 해석알고리즘은 단체법(simplex method)을 사용하였으며, 기기의 운전 혹은 정지를 나타내는 0-1계획법을 도입하였다[6].

광역소각장의 폐열을 수요처에 공급할 때 공급단가를 결정하고 결정된 공급단가에 따라서 경상비와 연간 절약비용을 구할 수 있다.

Fig. 7은 폐열의 공급가격에 따라 각 시설들

이 절약할 수 있는 절약비용을 시간의 경과에 따

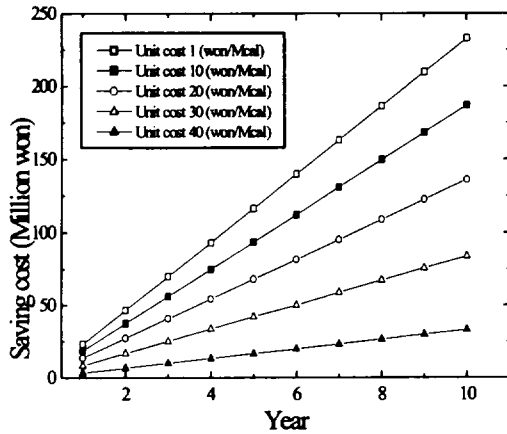


Fig. 7 Saving money variation with time at each supply hot water price.

라 나타내었다. 절약비용은 음식물자원화센터와 유스호스텔의 절약비용의 합으로 나타내었다. 일반적으로 예측할 수 있는 바와 같이 공급단가가 낮을 경우에 절약효과가 큰 것을 알 수 있는데 이 결과는 정량적인 절약비용을 알 수 있다는 점에서 제시하였다.

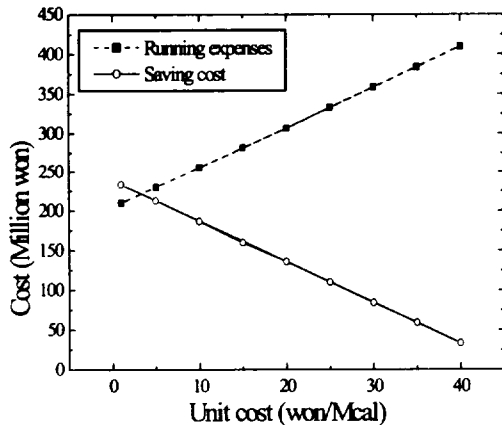


Fig. 8 Running expense and money saving variation with supply price of hot water.

Fig. 8은 증기의 공급단가가 증가할 때 경상비와 절약비용을 나타내고 있다. 증기의 단가가 증가함에 따라 수요처의 입장에서 관찰하였을 경우, 경상비가 선형적으로 증가하며 연간 절약비용은 감소함을 알 수 있다. 따라서 시설투자비에 따

른 증기의 공급단가를 결정할 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 바와 같이 폐열 발생처인 광역소각장과 수요처간에 증기 수송배관을 설계 할 경우에 Fig. 7과 Fig. 8을 이용하여 초기 시설투자비를 어느 정도의 시간이 경과 하여야 회수할 수 있는지에 대한 투자회수기간을 쉽게 도출할 수 있다.

또한, 현재 절약비용은 음식물자원화센터와 유스호스텔의 절약비용의 합으로 나타내어 있기 때문에 각 수요처의 연간필요열량, 시설투자 비용 비율 등을 고려하여 절약비용의 비율을 결정할 수 있다.

Table 1 Heating and cooling load trend of a hotel.

	load	Heating load (Mcal/h)	Cooling load (Mcal/h)
Winter (Dec.-Mar.)	Max.	753.9	-
	Mid.	527.7	-
	Min.	391.9	-
Midium (Apr.-May, Oct.-Nov.)	Max.	376.8	28.9
	Mid.	244.9	14.1
	Min.	163.3	2.9
Summer (June-Sep.)	Max.	125.3	145.4
	Mid.	62.8	109.0
	Min.	37.7	43.7

3.2. 최적화 시설 활용

환경시설지구내에 광역 소각장뿐만 아니라 또 다른 폐열 발생처인 LFG 발전소가 운전중에 있고, 음식물쓰레기 자원화센터와 유스호스텔보다 더 많은 에너지를 소비하고 있는 숙박시설인 환화콘도가 근거리에 위치하고 있다.

본 연구에서는 환경시설지구내의 폐열발생처와 수요처들간에 에너지 자원 활용을 위한 방안이 일부의 실측자료와 일부의 가정된 자료를 활용하였기에 일년 이상의 오랜 시간동안 각각의 시설에서의 에너지흐름을 모니터링하여 더 정확한 자료를 획득하여야 할 것이다. 이를 기초 자료로 하여 본 연구를 통하여 환경시설지구내의 시설들 간에 에너지자원 최적화에 대한 계획의 가능성을 기대할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 제주도 광역소각장에서 발생하는 소각폐열을 인근의 음식물쓰레기 자원화센터와 유스호스텔에 공급할 때 에너지 자원을 최적화하기 위한 시스템 구축의 기본모델을 제시하였다.

최적화에 대한 모델링을 통하여 제주도 음식물자원화센터와 유스호스텔에 광역소각장의 폐열을 이용할 경우에 증기의 단가에 따른 에너지 절약량과 경상운전비를 계산할 수 있다.

위의 결과를 바탕으로 제주도 환경시설지구내의 시설들 간에 효율적 에너지 이용을 위해 폐열을 적극 활용하는 것이 유리하다는 결론을 얻을 수 있다.

참고문헌

- 1) 박윤철, 2002, 제주지역 폐열배출 실태와 재이용 가능성 조사, 제주지역환경기술개발센터 연구보고서.
- 2) 이태원, 1998, Green Town 개발사업, 한국건설기술연구원.
- 3) 박윤철, 2004, 환경시설지구의 에너지자원 활용 최적화 프로그램 개발, 제주지역환경기술개발센터 연구보고서.
- 4) 광노균, 1998, 경영과학, 다산출판사.
- 5) 박순달, 1987, 선형계획법, 대영사.
- 6) 이태원외 6인, 2003, 지하공간을 이용한 혐오시설의 복합플랜트화, 한국건설기술연구원 연구보고서.