

제주시 폐기물환경사업소의 미활용에너지 활용방안 연구 A Study on Unused Energy Management of Jeju City Waste Environment Center

김상혁 · 박윤철 · 권기린

S. H. Kim, Y. C. Park and K. R. Kwon

Key Words : Waste heat(폐열), Heat recovery(열회수), Reuse(재활용), LFG power plant(대립가스발전소), Incineration plant(소각장), Depreciation(감가상각)

Abstract : In this study, waste heat of Jeju City Waste Environment Center is investigated and the utilization method is suggested with economical analysis of additional investment that needed for new facility. Energy balance of the typical facilities is considered in this study such as incineration plant and LFG power plant. The payback period of the investment which is used for the LFG power plant waste heat utilization facility is about 2.4 years and the economic profit of the facility during 10 years operation is up to 926 million won.

기호설명

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| C : 메탄가스 함유량 [%] | t : 기간 [yr] |
| C_p : 정압비열 [kJ/kg/K] | V : 체적 [m ³] |
| $C_{p,air}$: 공기 정압비열 [kJ/kg/K] | γ : 이율 [%] |
| C_{p,CH_4} : 메탄가스 정압비열 [kJ/kg/K] | ρ : 밀도 [kg/m ³] |
| h_v : 복수기 입구 엔탈피 [kJ/kg] | η : 효율 [%] |
| h_i : 복수기 출구 엔탈피 [kJ/kg] | |
| I : 시설투자비 [원] | |
| m : 질량 [kg] | |
| \dot{m} : 질량유량 [kg/s] | |
| P : 원리금 [원] | |
| P_C : 경유단가 [원/l] | |
| P_{FC} : 연간 연료비 [원/년] | |
| Q_{tot} : 총 에너지 [kcal] | |
| Q_L : 저위 발열량 [kcal/kg] | |
| Q : 열량 [kcal] | |
| R : 기체상수 [kJ/kg/K] | |

1. 서 론

제주도는 최근의 국제자유도시 지정과 함께 지역개발이 활성화되고 있으며, 생활수준이 날로 향상됨에 따라 에너지 소비가 급격히 증가하고 있다. 에너지 소비는 필연적으로 폐열이 발생하며, 부수적으로 발생하는 폐열 중에서 제대로 활용되지 못하고 손실되는 양이 무시할 수 없을 정도로 많은 실정이다.

세계적으로는 지구 온난화와 환경 문제가 집중적으로 부각되면서 교토의정서와 같은 수단을 통하여 화석연료로부터 발생하는 배출가스를 규제하기 위한 구체적인 방안이 채택되고 있으며, 지속적인 경제성장과 더불어 에너지 소비량 역시 급증하고 있다.

우리나라의 에너지소비총량은 세계 10위이고, 국내 부존자원이 부족하여 소비되는 에너지는 전량 수입에 의존하고 있으며, 최근의 이라크 전쟁과 국제적인 유가의 불안정 등은 에너지 수입 의존도가 높은 우리나라의 경제를 더욱 어렵게 할

접수일 : 2003년 10월 30일
박윤철(책임저자) : 제주대학교 기계에너지생산공학부
E-mail : ycpark@cheju.ac.kr, Tel : 064-754-3636
김상혁 : 제주대학교 대학원 기계공학과
권기린 : 제주대학교 기계에너지생산공학부

전망이다.

에너지 자원이 부족한 우리나라의 에너지 수급 구조를 감안하고 에너지수입에 따른 국제수지 악화를 개선하는 측면에서도 미활용 되고 있는 폐열을 회수하여 재사용하는 것은 중요한 과제중의 하나이다. 그러나 에너지 사용에 따라서 발생하는 폐열은 시간적으로 혹은 공간적으로 산재되어 있어 폐열 가운데 이용할 수 있는 열을 조사하고 또한 활용하기까지는 많은 시간, 기술 및 자본이 투자되어야 가능하다.

본 연구에서는 미활용되고 있는 에너지부존량을 파악하기 위하여 대표적인 폐열 발생처이며 에너지밀도가 높아 활용성이 매우 높은 제주도 광역소각장의 소각폐열과 제주시 쓰레기 매립장의 매립가스(landfill gas)이용 LFG 발전소의 발전폐열에 대하여 에너지 부존량조사를 수행하였다.

제주시 회천동 소재의 제주시 환경관리센터에는 광역소각장, 쓰레기 매립장, 매립가스 발전소 및 음식물자원화센터 등의 환경관련시설들이 대단위의 단지형태로 형성되어 있으며, 인근에 대규모의 콘도미니엄, 음식물쓰레기 자원화시설 및 LFG발전소가 가동 중에 있다.

위와 같은 공간집약적인 환경시설 혹은 설비의 회수가능한 폐열량을 분석하여 미활용 에너지를 같은 환경관리센터내에 있는 음식물 쓰레기의 자원화시설의 음식물쓰레기 건조에 사용하는 방안에 대한 연구를 수행하였다.

2. 에너지정산 및 분석

2.1 광역소각장 폐열 부존량 분석

쓰레기의 소각시에 발생하는 열량은 고질의 에너지이며, 에너지 집약도가 높은 에너지이다.

제주도 광역소각장은 2002년 2월부터 시험운전 후에 2002년 8월 현재 본격적인 가동에 들어갔다. 최근에 측정된 자료에 의하면 유입 쓰레기의 조성은 평균 발열량 1,900 kcal/kg이상의 중질의 쓰레기로 분류되었으나, 계절적인 변동 등을 고려하여 본 연구에서는 유입되는 쓰레기의 조성을 평균 지위 발열량이 1,500 kcal/kg인 중질의 쓰레기로 가정하였다. 소각장에 유입되는 소각쓰레기량은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 2002년 2월부터 4월 중순까지 제주도 광역소각장에 유입되는 쓰레기의 평균 반입량을 기준으로 계산하였다. 개량설비에서 측

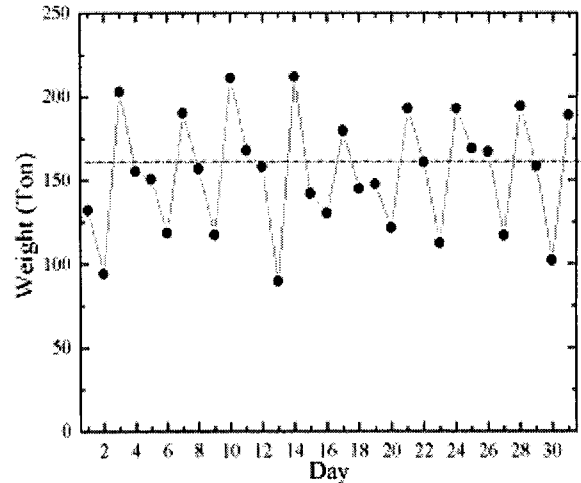


Fig. 1 Quantity of incineration garbage

정되는 일일 유입되는 반입량은 약간의 변동을 가지지만 평균 154 ton이 유입되고 있는 것으로 나타났다으며, 이러한 쓰레기로 소각할 때 회수하여 활용 가능한 에너지는 식 (1)로 부터 계산한다.

$$Q_{out} = Q_L \cdot \dot{m} \cdot \eta \cdot t \quad (1)$$

여기서, 손실되는 열량을 소각시 발생하는 전체 발열량의 18%를 적용하였을 때 광역소각장의 활용 가능한 폐열량은 연간 약 69,138 TOE이다.

TOE는 여러 가지 단위로 표시되는 에너지원들을 원유 1톤이 발열하는 칼로리를 기준으로 표준화한 단위로써, 약 1 Gcal에 해당한다.

제주도 회천동 소재의 광역소각장은 근거리에 위치한 콘도미니엄과 수영장 등의 지역 복지시설에 소각폐열을 사용하여 생산된 증기를 공급하도록 설계되었다. 현재에는 소각장내의 열활용 설비에 폐열이 사용되고 있으며, 일부는 터빈발전기에 활용하고 나머지는 복수기를 통하여 대기중으로 방출하고 있다.

광역소각장의 시설 개략도는 Fig. 2와 같으며, 열정산은 Fig. 3과 같다. 폐열보일러에서 회수된 열량중에서 증기터빈구동을 통한 발전에 약 50%가 사용되고 있으며, 소각장 운영에 필요한 24%의 열량을 제외하고 나면 손실열을 포함하여 총 26%는 공랭식 응축기를 통하여 대기 중으로 방출하고 있는 것이다. 소각장에서 폐열열교환기를 통하여 회수되는 69,138 TOE중에서 소각장에서 활용되는 에너지는 51,162 TOE이며, 대기로 방출되고 있는 폐열 에너지량은 17,976 TOE이다.

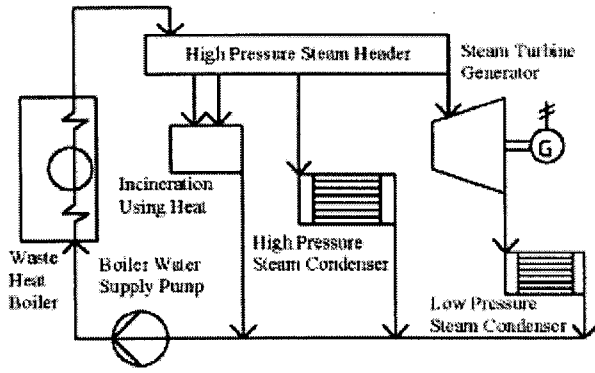


Fig. 2 Schematic diagram of facility of waste heat in incineration plant

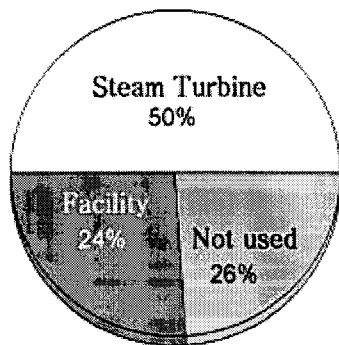


Fig. 3 Heat balance of refuse incineration plant in Jeju Province

2.2 매립가스 발전폐열 부존량 분석

우리나라는 가정과 산업체에서 배출되는 생활 쓰레기 중에서 약 70%를 매립을 통하여 처리하고 있으나, 향후 매립지의 부족으로 매립하는 비율은 점차 감소될 것이다. 현재 운영중인 대부분의 매립지의 매립방식은 혐기성매립 위생방법이다. 이 방식은 샌드위치식으로 쓰레기를 매립하고 그 위에 약 30 cm 복토를 하여 복토층 하부를 혐기성으로 유지하는 방법이다. 혐기성 분해시에 메탄가스와 이산화탄소가 다량 발생하여 환경적인 측면에서는 큰 해가 되지만 조성 중에 50%이상의 고농도 메탄을 함유하고 있어 이를 대체에너지원으로서 이용할 수 있다. 매립가스의 에너지원으로서의 활용은 매립가스가 환경에 미치는 영향을 감소시키고 한편으로는 미활용되어 버려지는 에너지자원을 활용한다는 경제적인 이점까지 가지고 있다.

최근에는 쓰레기가 매립된 지역에서 발생하는 가스(landfill gas)의 자원화에 관한 연구 및 기술

개발이 활발히 진행되고 있으며, 2003년에 제주시 회천동 쓰레기 매립장에 매립가스발전소가 건설되었다. 발전소에서 측정된 가스 생성량은 일일 43,200 m³에 달하는 것으로 나타났다.

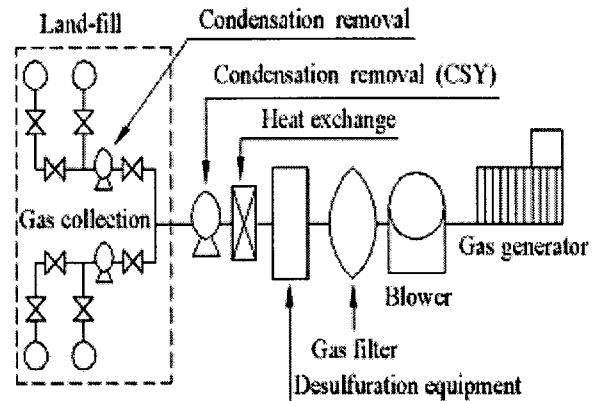


Fig. 4 Schematic diagram of LFG power plant

Fig. 4는 매립가스발전소의 시설계통도이다. 설치된 발전기는 내연기관을 이용한 1 MW급 발전기로서 2기가 가동 중에 있다.

쓰레기 매립장에 매립된 가스는 포집관을 통하여 포집된 후 버터플라이 밸브를 거쳐 메인밸브로 유입되며, 가스탱크내에서 배수펌프를 이용하여 가스 중에 포함된 침출수 등의 불순물을 밖으로 배출한다. 불순물이 정화된 매립가스는 열교환기를 거치면서 탈황설비로 유입되면 촉매전 산화철을 이용하여 탈황시킨다. 탈황된 매립가스는 숯을 이용한 활성탄으로 구성된 가스필터를 통과하고 블로어(blower)에 의하여 발전기에 연료로 공급된다.

발전기의 배기가스의 온도는 약 600~650℃에 달하며, 이를 폐열교환기 등을 통하여 회수할 경우에 막대한 에너지자원의 회수가 가능하다. 매립가스발전기 후단의 배기가스로부터 폐열교환기에서 회수할 수 있는 미활용 에너지는 식 (2)로 부터 계산한다.

$$Q_{lost} = Q_L \cdot \dot{m} \cdot C \cdot t \quad (2)$$

메탄가스 발전기에 사용되는 LFG는 주성분이 메탄 (CH₄) 인 매립가스는 메탄가스(C_p =2.254 kJ/kgK, R =0.1583 kJ/kgK)가 71.4%이고 공기(C_p =1.004 kJ/kgK, R =0.287 kJ/kgK)가 28.6%이며, 이때의 혼합가스의 평균 정압비열은 식(3)과 같다.

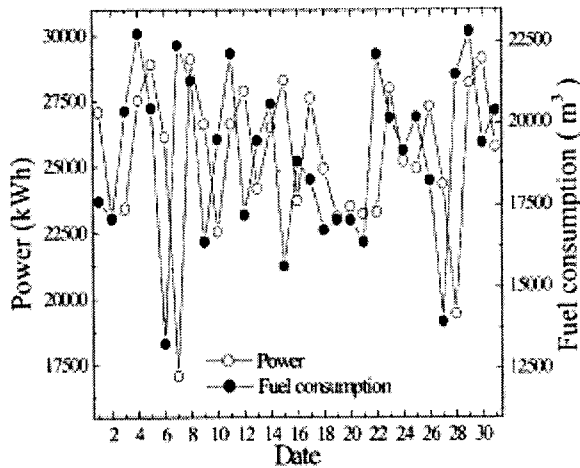


Fig. 5 Power generation and fuel consumption of the LFG power plant

$$C_p = \frac{(\dot{m}_{CH_4} \times C_{p_{CH_4}}) + (\dot{m}_{air} \times C_{p_{air}})}{\dot{m}_{CH_4} + \dot{m}_{air}} \quad (3)$$

매립가스의 정압비열은 1.896 kJ/kgK 이고, 이상기체 방정식으로부터 혼합기의 밀도는 0.587 kg/m³이다. 혼합가스의 기체상수는 식 (4)와 같이 계산하며, 매립가스의 경우 0.195 kJ/kgK 이다.

$$R = \frac{(\dot{m}_{CH_4} \times R_{CH_4}) + (\dot{m}_{air} \times R_{air})}{\dot{m}_{CH_4} + \dot{m}_{air}} \quad (4)$$

Fig. 5는 한 달 동안 발전소에서 사용된 가스량과 발전전력량을 나타내고 있다. 발전용 내연기관은 배기량이 40,000 cc이고 엔진의 분당 회전수 1,800 rpm라고 하였을때 식 (5)로부터 계산된 연간 폐열량은 22,141 TOE이며, 현재 가동중인 2기의 총 폐열량은 44,283 TOE이다.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot t \quad (5)$$

2.3 폐열수요처의 열성산

제주시 음식물 쓰레기의 일일 발생량은 89 ton으로 연간 32,500 ton이 발생할 것으로 예상하고 있다. 제주도의 경우에 음식물쓰레기의 수거지역이 주로 식당 및 대규모 아파트 지역에만 한정되어 있고, 소규모의 주거지역인 경우에는 수거의 어려움으로 인하여 수거량이 매우 미흡한 실정이다.

2003년 후반부터 수거지역이 확대되어 음식물 쓰레기의 수거율이 80%에 이르게 되면 가동 중인 제1 공장에서만 처리가 불가해 질 것으로 예상됨에 따라 2003년 2월에 제2공장을 준공하였으며, 현재 60%의 가동율을 보이고 있다.

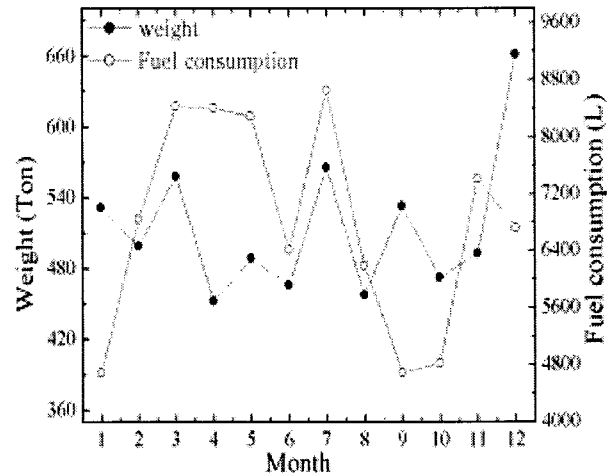


Fig. 6 Food garbage of Jeju in 2002

Fig. 6은 2002년도 음식물자원화 센터에 유입된 반입량과 사용된 연료량을 나타내고 있다. 음식물 쓰레기 반입량은 호퍼에 내장된 전자저울에 의하여 계측된 값이며, 연료량은 음식물쓰레기의 건조에 사용된 경유의 소비량이다. 연료는 음식물 쓰레기를 양질의 퇴비로 생산하고자 함수를 40%로 조절하기 위하여 건조용으로 사용하고 있다.

각 공장에서 음식물쓰레기의 건조용으로 필요한 증기량을 열원으로 사용되고 있는 경유의 저위발열량을 기준으로 산정하였다. 각 공장의 시간당 연료사용량은 제 1공장에서 384 l 및 제 2공장에서 95 l 를 소비하고 있다.

각 공장에서 연간 필요로 하는 열량은 식 (6)과 같으며, 이때 대기압에서의 수증기의 엔탈피 차이를 이용한 식 (7)로부터 음식물 쓰레기의 건조에 필요한 증기의 질량유량으로 계산하였다.

$$\dot{Q} = P_{FC} \times \frac{P}{P_C} \times Q_L \quad (6)$$

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \frac{\dot{Q}}{h_v - h_f} \quad (7)$$

Table 1에 나타낸 바와 같이 제 1공장의 필요 증기량은 연간 1,157 ton이며, 제 2공장은 2,894 ton의 증기가 필요한 것으로 계산되었다.

Table 1 Steam demands of the two factories

	Fuel price [1000₩/yr]	Heat capacity [Mcal/yr]	Steam amount [ton/yr]
Factory I	55,176	640,179	1,157
Factory II	137,940	1,600,448	2,894

경제성 분석에 필요한 증기의 톤당 생산가격의 산출은 열병합 발전소와 같은 집단 에너지 공급업체의 사용하는 계산방법을 사용하였다.

사용하는 연료는 경유이며, 수증기의 온도는 160℃로 가정하였다. 1톤의 물을 100℃의 응축수에서 160℃증기로 만드는데 필요한 연료량은 약 72.4 l 이다. 2002년 저유소 판매가격인 리터당 760원을 원유의 가격으로 산정하였을 경우에 1톤의 수증기를 만드는데 필요한 비용은 55,024원이다 또한 집단에너지 생산업체에서 적용하는 방법과 같이 증기 1톤당 2,500원의 부대경비를 추가하였을 경우에 증기의 생산가격은 약 57,524원이다. 공급가격은 사용업체의 부대경비를 포함하고 관례에 따른 증기공급가격은 생산가격의 반액인 1톤당 30,120원이다.

2.4 경제성 분석 방법

폐열의 부존량을 조사한 후 폐열을 이용할 수 있는 설비를 증설하기 위해서는 경제성 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서 폐열활용설비에 대한 감가상각비는 현금 유출에는 포함되지 않으나 세금 감면효과를 발생시키므로 분석에서 이를 고려하였다.

감가상각을 계산하는 방법은 균등 상각법인 정액법(SLM, straight line method), 사용시간 비례법(AM, activity method), 체감 상각법인 정률법 및 연수합계법(SYDM, sum of the year's digits method) 등이 있으나 계산한 결과는 정액법(SLM, straight line method)과 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 일정한 감가상각을 나타내는 정액법이 자산 가치의 감소가 작은 설비에 적합하다고 볼 수 있으므로 본 연구에서는 정액법을 사용하여 경제성을 분석하였다. 정액법은 매 분기의 감가상각비를 균등하게 처리하는 방법 중의 하나로서 계산이 쉬우며, 재무계산상 손실의 균등부담에 도움이 된다는 장점이 있다.

Table 2는 음식물 자원화센터에서 소각장 및 LFG발전소의 폐열활용을 위하여 필요한 시설 투자비를 나타내고 있다. 본 연구를 통하여 계산된 시설투자비 4억8백만원과 시설변경에 따른 추가비용으로 제1공장에 500만원 및 제2공장에 1500만원을 포함하였다. 이자율을 0.04%로 하고 복리로 하였을 경우 이자는 식(8)로부터 계산할 수 있다.

$$P = I \times [(1+r)^t - 1] \tag{8}$$

Table 2 Investment cost

Item	Incineration plant(₩)	LFG Power Plant(₩)
Material	265,534,282	216,250,637
Labor charge	61,923,680	24,779,620
Expense	41,910,595	27,565,437
General expense	20,315,270	14,772,763
Profit margin	18,622,431	10,067,673
Total	408,306,258	266,146,330

3. 결과 및 고찰

3.1 광역소각장 폐열활용

본 연구에서는 제주도 광역소각장에서 미활용되고 있는 소각폐열을 인근의 음식물 자원화센터에 음식물쓰레기의 건조용 증기로 공급할 경우에 대하여 설비 투자의 경제성을 분석하였다.

음식물자원화센터에서 폐열을 공급받기 위해서는 광역소각장에서부터 증기공급 배관이 설치되어야 한다. 증기공급을 위한 배관설비를 증기의 공급측인 광역소각장에서 부담할 경우에 시설투자비 회수기간을 계산하면 Fig. 7과 같다. 음식물자원화센터의 두개의 공장중에서 제2공장의 건조설비만을 폐열 활용 설비로 교체할 경우에는 약 6.2년 후부터 시설투자비 대비 손익 분기점에 도달하며, 제 1공장과 제2공장 동시에 설비를 교체할 경우에는 약 4.3년 이후부터 시설투자비에 대한 손익분기점에 도달하는 것으로 분석되었다.

따라서 제1공장과 제2공장 동시에 설비를 교체하는 것이 유리하며, 이때는 건조설비 교체비용만이 약간 증가할 뿐이며, 기초적인 증기공급배관 비용은 큰 차이점이 없으므로 되도록이면 많은 증기를 사용하는 것이 합리적인 방안임을 알 수 있다.

두 번째 경우로 증기공급을 위한 배관설비와 기타 시설교체비용을 증기의 수요측인 음식물자원화센터에서 전액 부담할 경우에 있어서 투자비에 대한 손익분기점은 Fig. 8과 같다. 제 2공장에만 공급할 경우에 손익분기점까지 약 10.8년이 걸리나 제1공장과 제2공장에 동시에 공급할 경우에는 약 8년의 투자비 회수기간이 필요하다.

제주시의 음식물쓰레기 반입량을 전년과 비교하였을 때 약 2.5배에 달하는 증가율을 보였으므로 향후 제1공장과 제2공장이 완전 가동된다면 분석된 투자비 회수기간은 상당히 단축될 수 있을 것이다.

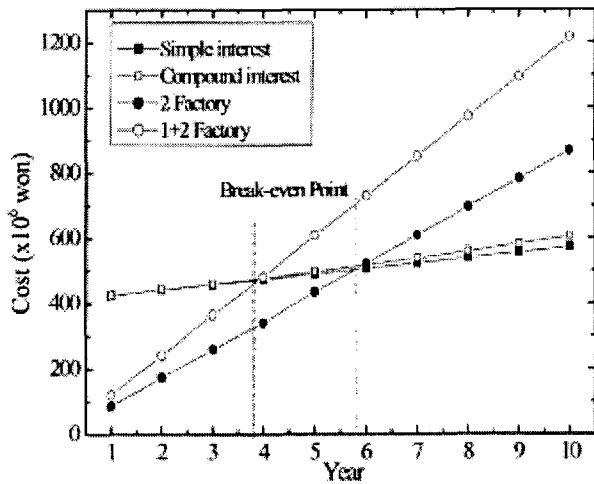


Fig. 7 Break-even point of equipment in incineration plant

3.2 LFG 발전 폐열활용

쓰레기 매립장에 건설된 LFG발전소의 발전폐열을 음식물자원화센터에서 활용하는 방안에 대하여 고찰하였다. 음식물자원화센터가 LFG발전소로부터 발전폐열을 공급받기 위하여 증기배관 설비가 필요하지만, 두 시설이 비교적 근거리에 위치하고 있어 시설투자비가 광역소각장 보다 약 1/3정도 적게 드는 장점이 있다.

LFG발전소에서 설비 공사비 266백만원을 전액 투자할 경우 1, 2공장에서 음식물 건조에 따르는 연간 연료비가 약 2억원에 달하므로 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 발전폐열을 2공장에서만 활용시에 약 3.5년, 1, 2공장에서 동시에 사용 할 경우에는 2.4년이면 손익분기점에 도달한다.

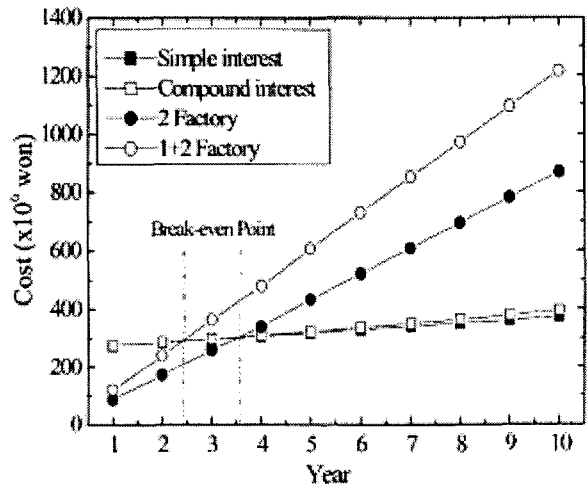


Fig. 9 Break-even point of equipment in LFG power plant

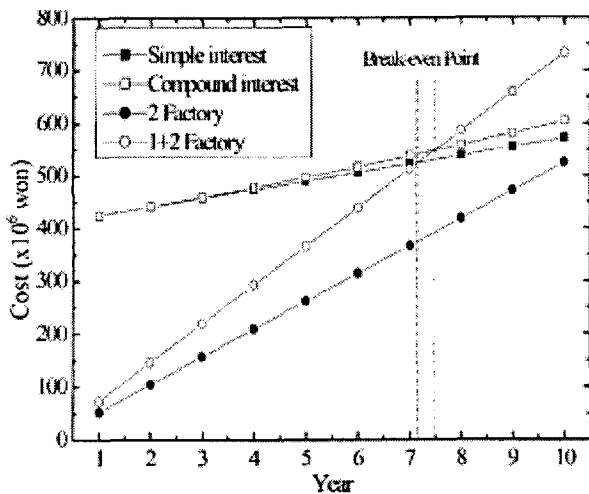


Fig. 8 Break-even point of equipment in recycling facilities

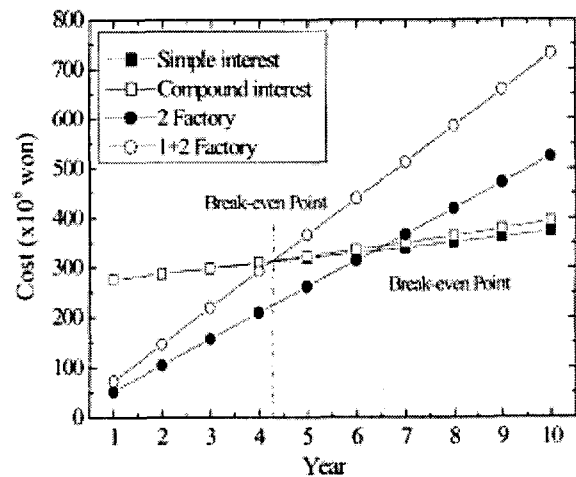


Fig. 10 Break-even point of equipment in recycling facilities

또한 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 수요측인 음식물 쓰레기자원화시설에서 설비공사비 전액 부담할 경우에는 2공장에서만 사용 시 6.5년, 1, 2공장에서 동시에 사용 할 시에는 약 4.3년 이후부터 경제효과를 기대할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 제주시 회천동 소재의 폐기물 환경사업소내의 환경시설들에 대한 에너지정산을 통하여 활용되지 못하고 있는 폐열량을 조사분석하였으며, 이러한 미활용 폐열의 재활용을 위한 시설투자비와 투자의 경제성을 분석하였다.

본 연구의 미활용 에너지 분석대상은 광역소각장의 소각폐열 및 LFG발전소의 발전폐열의 두 가지 에너지원으로 선정하였으며, 폐열의 소비처는 콘도미니엄 등의 여러 가지 에너지소비처 중에서 음식물자원화센터에 활용하는 방안을 연구하였다.

음식물자원화센터의 모든 건조설비를 폐열 활용이 가능한 설비로 교체하고 시설비의 부담주체가 광역소각장일 경우에는 약 4.3년 이후부터 시설투자비에 대한 손익분기점에 도달한다. 반면에 음식물자원화센터에서 시설투자를 한 경우에는 약 8년의 투자비 회수기간이 필요하다.

또한 LFG발전소의 폐열을 음식물자원화센터에서 활용할 경우에는 쓰레기 건조에 필요한 설비비용을 LFG발전소에서 전액 부담하고 제1공장 및 제2공장에서 동시 활용할 경우에 있어서 손익분기점은 2.4년이며, 설비의 내구 수명을 10년으로 보았을 경우 약 926만원의 경제 효과를 기대할 수 있다. 반면에 음식물자원화센터에서 설비비용을 부담하였을 경우에는 손익분기점까지 약 4.3년이라는 시간이 필요하며, 전자와 같이 내구수명을 10년으로 적용하였을 경우 4억2천만원의 경제수익을 누릴 수 있다.

제시된 결과를 바탕으로 사업의 추진 가능성을 분석한 결과 제주시 음식물 자원화시설은 소각장보다 지리적으로 유리한 위치에 있는 LFG 발전소에서 발전폐열을 공급받아 음식물쓰레기 자원화시설에 활용하는 것이 유리하다는 결론을 얻을 수 있다.

참고 문헌

1. 제주지역 환경기술개발센터, 2003, "제주지역 폐열배출실태와 재이용가능성 조사".
2. 에너지관리공단, 2002, "에너지절약 통계핸드북, 에너지관리공단".
3. 대구광역시, 1998, "미활용에너지 실태조사 및 이용방안 연구".
4. 신현준, 이세권, 1996, "하수열원 열펌프 시스템을 이용한 건물의 냉난방 연구", 제11회 에너지절약 기술워크샵.
5. 최용광, 박준택, 1998, "생활폐기물 소각열 이용 실태 조사연구", 제13회 에너지기술워크샵.
6. 산업자원부, 1998, "지역별 미활용에너지 보존량 및 이용가능성 조사에 관한 최종보고서".
7. 제주시, 2002, "제주시 음식물 쓰레기 설비시설 운영 현황".
8. 김호성, 오명도, 2002, "서울시 미활용에너지 부존량 분석 및 이용대책", 설비저널, Vol. 31, No.8, pp. 40~49.