

## 지역 특성을 고려한 폐열이용 실증 분석 연구

이덕기, 박수익, 이승진  
 한국에너지기술연구소

### A Study on Analysis of Actual Proof for Using Waste Heat

Deokki Lee, Soo-Uk Park, Seung-Jin Lee  
 Korea Institute of Energy Research

#### 1. 서 론

우리 나라 에너지 문제는 소비되고 있는 에너지의 대부분을(에너지수입의존도, 98%이상)을 해외에서 수입하고 있는 실정으로 최근의 고유가 시대를 맞이하여 에너지 중요성이 점점 크게 부각되고 있다. 에너지 문제 해결은 생산 자체에서도 의미를 부여할 수 있지만 국내 에너지 자원 특성상 사용에너지의 절약 및 폐열에너지 재활용에서 큰 역할을 찾을 수 있다.

일반적으로 폐열의 경우 대부분이 활용되지 못하고 버려지고 있는 실정인데 이는 폐열 활용 대책의 경제적, 제도적 장애요인에 기인하는 경우도 있지만 폐열 발생업체에서의 활용의지 부족이 더욱 큰 이유로 부각되고 있다. 본 논문에서는 폐열의 발생 및 적용처를 실질적으로 발굴하였으며 이에 따른 인근 수요처 공급의 기본설계 및 경제성 분석을 통해 폐열 활용의 고도화를 추진코자 하였다.

#### 2. 폐열의 수요/공급 Balancing 및 평가

##### 2-1. 증기부하 분석

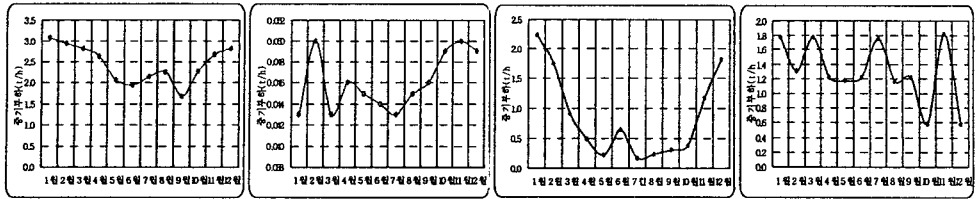
수요처 D1의 경우 하루 및 시간별 증기부하 변화는 크지 않고, 계절별 부하는 난방에 사용하는 것으로 평균 부하 2.98t/h, 하절기 평균 부하 2.15t/h, 최소부하 1.95t/h로 분석되었으며 수요처 D2의 경우 하루 및 시간별 증기부하 변화는 주야로 차이가 있으나 계절별 부하는 차이가 심하지 않는 것으로 나타났다.

수요처 D3의 경우 하루 및 시간별 증기부하 변화는 거의 일정하며 계절별 부하는 난방에 사용하는 것으로 평균 부하 0.85t/h, 하절기 평균 부하 0.35t/h, 최소부하는 1.42t/h로 나타났다. 수요처 D4의 경우 하루 및 시간별 증기부하 변화는 없고, 계절별 부하는 차이가 심하지 않는 것으로 나타났으며 주문량에 따라서 부하변동이 심하게 변화하고 있는 것으로 보아 계절적 시간적 부하변동은 제품의 주문량과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

<표 1> 수요처별 증기 부하분석

(단위 : t/h)

수요처	구 분	증기부하	최대부하	최소부하
D1	동 절 기	2.98	3.09	2.82
	하 절 기	2.15	2.25	1.94
D2	동 절 기	0.047	0.05	0.043
	하 절 기	0.044	0.045	0.043
D3	동 절 기	1.94	2.24	1.75
	하 절 기	0.35	0.64	0.17
D4	동 절 기	1.22	1.78	0.58
	하 절 기	1.38	1.76	1.16



<D1 월별 증기부하> <D2 월별 증기부하> <D3 월별 증기부하> <D4 월별 증기부하>

[그림 1] 수요처별 증기 부하

## 2-2. 폐열을 이용한 열 공급측 및 수요측 조건 Balancing/평가

폐열을 이용하여 공급측과 수요측의 요구되는 요인들을 상호 비교하여 보면 온도 및 물량은 크게 영향을 끼치지 않으나 압력 및 품질이 제약요인으로 대두되고 있다. 이에 따라 공급처와 수요처와의 상호 조건에 대한 Balance결과 D1, D2, D3의 조건은 공급측에서 수용할 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 수요처D4의 경우는 양적으로는 문제가 되지 않지만 Steam의 질적인 면에서 차이를 보이고 있는데 이러한 질적인 문제를 개선하려면 공급자측의 증기 성분의 불순물을 제거할 수 있는 정제장치가 필요한 것으로 분석되며 이 장치를 설치(공급처의 시설 설치비가 첨가 등)하려면 많은 비용이 소요되므로 경제적 측면에서 다소 애로점이 발생하는 것으로 나타났다. 이상과 같은 공급측과 수요측의 조건 분석 결과에 따라 요구되는 요인들을 상호 평가하여 3개 업체를 수요처로 선정하였다. 한편, 이러한 조건에 따라 시 설계를 하였으며 이는 다음의 조건을 기준으로 실시하였다.

압력 : 15(kg/cm<sup>2</sup> · g) / 온도 : 300(℃) / 공급량 : 15(t/h)/ 품질 : 공급측 기준

<표 2> 수요/공급처별 조건 Balancing

구 분	Capa.	Supply	Demand			
			D1	D2	D3	D4
Pressure (kg/cm <sup>2</sup> · g)	MAX	23	5.5	7	10	17
	MIN	19	3.8	3	5	17
	AVE	21	4.6	5	7.5	17
Temperature (℃)	MAX	300	160	120	179	200
	MIN	280	155	120	151	200
	AVE	290	157	120	165	200
Quantity (t/h)	MAX	80	5	0.5	7	4
	MIN	40	4.5	0.3	5	1.5
	현재	20	4.7	0.4	6	2.7

<표 3> 수요/공급처별 조건 Balancing 평가결과

구 분	Demand			
	D1	D2	D3	D4
Pressure	○	○	○	△
Temperature	○	○	○	○
Quantity	○	○	○	○
Quality	○	○	○	×
Total	○	○	○	△

\* 주 : ○ 우수 △ 보통 × 열악

### 3. 열공급 수송관의 기본설계 및 경제성 분석

#### 3-1. 열공급 수송관 설계

열공급을 위한 수송관 설계를 위해서는 여러 가지 설비공사가 뒤따라야 하며 이를 위해 기본적으로 고려되어야 할 사항들(수송관 두께, 압력손실, 신축량 등)에 대한 계산을 실시하였다.

##### 3-1-1. 열수송관의 두께 산정

후프 응력식 (hoop stress)(내압을 받는 관의 두께를 정하는 기본 공식)을 실제 적용에 적합토록 변형한 식을 사용하면 다음과 같다.

$$t = \frac{P \cdot D_0}{200 \sigma_a \cdot \eta + 0.8P} + C = \frac{20 \times 216.3}{200 \times 9.5 \times 0.85 + 0.8 \times 20} + 4.8$$

$$= 7.4527\text{mm}$$

t : 두께 (mm)      P : 설계압력(kg/cm<sup>2</sup>) <25kg/cm<sup>2</sup>>

D<sub>0</sub> : 외경(mm) <216.3mm>      σ<sub>a</sub> : 인장 응력 (kgf/mm<sup>2</sup>)      SPPS 38 : 9.5kgf/mm<sup>2</sup>

η : 관의 길이 방향 이음 효율 <0.85>

C : 부가상수(부식여유) <0.4mm/년 × 20년 × 0.6 = 4.8mm>

<표 4> 두께 산정에 따른 열 수송관 선정

호칭경(A)	계산두께	적용관 두께	SCH.NO	비고
200	7.4527	8.2	40	

##### 3-1-2. 신축량

20m당 신축량을 구하는 식  $e = \alpha \cdot \Delta T \cdot l$ 를 이용하면 팽창량은 다음과 같으며 본 설계에서는 신축 흡수량이 크며 관리가 용이한 Slip Joint로 적용하였다.

$$e = 20\text{m} \times 10.225 \times 10^{-6} \times 280 = 0.05726 \text{ m} = 57.26 \text{ mm}$$

e : 신축량(thermal expansion length (mm/m))      α : 열팽창 계수(cm/°C · cm)

ΔT : 온도 변화량(°C)      l : 길이(m)

##### 3-1-3. 압력 손실 산출

배관에 있어서 압력손실은 증기(수송매체의 압력과 수송속도)에 따라 관경 선정 등을 결정하는 중요한 요소이다.

$$\Delta P = 675 \times \frac{\nu \left(\frac{G}{100}\right)^{1.85}}{\left(\frac{D_i}{100}\right)^{4.97}} = 675 \times \frac{0.1732 \left(\frac{15}{100}\right)^{1.85}}{\left(\frac{199.9}{100}\right)^{4.97}} = 0.1118\text{kg/cm}^2$$

15kg/cm<sup>2</sup> 증기의 배관경을 φ200로 선정하였을 때 100m당 압력강하 ΔP는 0.1118kg/cm<sup>2</sup>이며, 전체 압력강하는 최대 2.2425kg/cm<sup>2</sup>, 최저 1.4969kg/cm<sup>2</sup>로 계산되었다.

##### 3-1-4. 열수송관 시공

열수송관 시공은 신뢰성이 있고 안전한 열공급이 이루어지며, 유지관리가 원활하게 설계와 시공이 되도록 열공급측 소각로 보일러에서 수요측 보일러실까지의 열 수송관을 설계 시공한다.

- 공급처 구내 : 기존배관 + (지지대 + 지면인접 + 지하)배관
- 각회사 정문 : 지하 매설(2중 강관 배관)
- 사용자 구내 : 지면인접배관 + 기존배관

### 3-2. 경제성 분석

경제성 분석은 수요와 공급의 열부하 분석을 통하여 타당성을 검토하고 최적 공급방안에 대한 투자비를 산정하여 경제적 손익 분석으로 기술적으로 우수하고 가장 경제적인 방향을 선택하기 위한 수단이다. 일반적으로 경제성 분석은 연간 수익과 비용(지출)을 대비하여 설비의 수명 기간 내에서 경제성 여부를 판단한다.

폐열공급의 경제성 분석은 연간 에너지 비용 절감액을 시설투자비 및 운영비와 대비하여 공급자와 사용자 각각의 경제성 여부를 판단하고 아울러 국가적 차원의 에너지의 유효이용에 대한 투자 경제성을 판단하므로 설비 투자계획 검토에 있어서 중요한 기준이 된다. 본 경제성 분석에서는 수요조사에 의해 조사된 각 수요처의 필요 요구량을 근거로 하여 총 시설 투자비 대비 공급물량의 금액으로 환산하여 회수되는 투자회수기간법(Pay Back Period Method)을 사용하여 분석하였다.

이를 위해 비교적 객관성을 기할 수 있도록 하기 위해 여러 각도의 분석을 실시하였으며 특히 수요처에서 요구하는 최대 요구량 및 최저 요구량을 년간동안 일정하게 공급할 경우와 실질적으로 수요조사에서 분석된 월별 연료 소모량을 근거로 산출된 증기 부하에 따른 공급 요구량으로 구분하여 경제성을 분석하였다.

#### 3-2-1. 증기공급 가격 산정

공급측의 증기 생산가격은 증기 생산을 위해 연료를 사용하지 않고 폐기물 소각에 의해 발생하는 필수 부산물임에 따라 비교적 낮은 금액으로 산정될 수 있을 것으로 분석되며, 공정 수요열만 판매시 공급자와 사용자간에 협의하여 결정하여야 하겠으나 기존 열공급 사업자의 열공급 가격을 비교하고 양측의 경제성을 고려하여 상호간의 가격을 결정하는 것이 적당할 것으로 판단된다. 본 경제성 분석에 필요한 증기의 톤당 가격 산출은 일반적으로 집단에너지 공급업체에서 사용하는 방법을 인용하여 산출하였으며 산출식은 다음과 같다.

$$\text{증기생산가격(PCd)} = P \times C + \alpha \text{ (원/ton)}$$

$P$  : 증기 1톤을 생산하기 위해 소모되는 연료량(ℓ)

$C$  : 연료유 단가(원/ℓ)

$\alpha$  : 증기 1톤을 생산하기 위해 소요되는 직·간접비(인건비, 용수비, 전력비, 수리비, 환경부담비 등)

상기 식을 적용하여 열공급 가능 가격을 추정하고 이를 산출하여 보면 다음과 같다.

- $P=72.4 \ell <100^\circ\text{C}$  응축수를  $160^\circ\text{C}$  증기로 만드는데 필요한 연료량, 경유기준>
- $C=543.3(\text{원}/\ell) <1999\text{년 } 9\text{월 적용}>$
- $\alpha=2,500\text{원} <\text{집단에너지 공급업체에서 적용하는 금액 적용}>$
- 증기생산가격(수요처)<PCd> =  $72.4(\ell) \times 543.3(\text{원}/\ell) + 2,500\text{원}/\text{t}$   
= 41,834원/ton
- 증기생산가격(공급처)<PCs> = 2,500원/t
- 증기공급가능가격(공급처)<SC> =  $(\text{PCd}+\text{PCs})/2$   
=  $(41,834+2,500)/2= 22,167\text{원}/\text{ton}$

### 3-2-2. 각 수요처별 증기 요구량에 따른 가격 산출

각 수요처의 수요조사에 따른 최대요구량과 함께 최저요구량을 연간 일정하게 공급할 수 있는 량으로 산출하였으며 이를 22,167원/h를 적용하여 요구 증기량의 가격으로 나타내고 이를 비교 분석하였다.

각 수요처 증기 요구량을 연간 가동시간을 감안하여 수요조사에서 제시한 량으로 산출 할 때 최대 수요량은 102,420(t/년)이며 가격으로는 2,270.3백만원, 최저 수요량은 80,300(t/년)에 공급가격은 1,780.8백만원으로 분석되었다.

<표 5> 연간 증기 공급가격(폐열이용 공급가격 기준)

구 분		수요처	D1	D2	D3	Total
MAX		증기요구량(t/년)	39,600	1,500	61,300	102,420
		소각열 공급가격(백만원/년)	877.8	33.3	1,359.2	2,270.3
MIN		증기요구량(t/년)	35,640	900	43,800	80,300
		소각열 공급가격(백만원/년)	790.0	19.9	970.9	1,780.8

한편, 이들 수요 요구량을 각 수요처별로 자체 생산할 경우에 소요되는 가격은 최대 수요 량의 경우 4,284.6백만원, 최저 수요량의 경우 3,361.0백만원이 소요되는 것으로 분석되었다.

<표 6> 연간 증기 생산가격(수요처 기준)

(단위 : 백만원)

구 분		수요처	D1	D2	D3	Total
MAX		증기요구량 (t/년)	39,600	1,500	61,300	102,420
		수요처 생산가격 (백만원/년)	1,656.6	62.7	2,565.3	4,284.6
MIN		증기요구량 (t/년)	35,640	900	43,800	80,300
		수요처 생산가격 (백만원/년)	1,491.0	37.7	1,832.3	3,361.0

이들 각 수요처별 생산가격 및 공급가격을 상호 비교할 때 최대 수요일 경우 2,041.3백만원, 최저수요일 경우 1,580.2백만원의 경제적 가치가 있는 것으로 분석되었다.

<표 7> 생산가격과 공급가격의 비교(최대 공급을 충족하였을 경우)

(단위 : 백만원)

구 분		수요처	D1	D2	D3	Total
		수요처 생산가격 (백만원/년)<A>	1,656.6	62.7	2,565.3	4,284.6
		소각열 공급가격 (백만원/년)<B>	877.8	33.3	1,359.2	2,270.3
		경제차액 (백만원/년)<A-B>	778.8	29.4	1,206.1	2,041.3

<표 8> 생산가격과 공급가격의 비교(최소 공급을 충족하였을 경우)

(단위 : 백만원)

구 분		수요처	D1	D2	D3	Total
		수요처 생산가격 (백만원/년)<A>	1,491.0	37.7	1,832.3	3,361.0
		소각열 공급가격 (백만원/년)<B>	790.0	19.9	970.9	1,780.8
		경제차액 (백만원/년)<A-B>	701.0	17.8	861.4	1,580.2

한편, '99년도 수요조사에 따른 연료소비량을 감안하여 추정된 증기 수요량을 기준으로 분석하여 보면 생산가격 대비 공급가격은 약 576.4백만원의 경제적 가치가 있는 것으로 분석되었다.

<표 9> 생산가격과 공급가격의 비교('99년도 증기생산량 기준) (단위 : 백만원)

구 분 \ 수요처	D1	D2	D3	Total
수요량 추정(t/년)	21,420.0	403.6	7,482.4	29,306.0
수요처 생산가격(백만원/년)<A>	896.1	16.9	313.0	1,226.0
소각열 공급가격(백만원/년)<B>	474.8	8.9	165.9	649.6
경제차액(백만원/년)<A-B>	421.3	8.0	147.1	576.4

### 3-2-3. 시설투자비 산출

기본설계된 내용을 근거로 실시 시공업체의 견적 및 물가정보에 따라 시설투자비를 산출하였으며 총 1,244백만원의 투자비가 계상되었다.

<표 10> 시설 초기 투자비 (단위 : 원)

비 목	금 액
배관 자재비	655,088,988
배관 인건비	292,848,273
직접 노무비	256,659,310
간접 노무비	36,188,962
경 비	158,906,352
기계경비	53,478,262
기타경비((재+노)*8.207%)	77,797,211
안전관리비((재+직노)*1.81%)	16,502,644
보험료(노*3.8%)	11,128,234
일반관리비((재+경+노)*5.5%)	608,76,398
이윤((노+경+일반관리비)*15%)	76,894,653
합 계	1,244,614,666

### 3-2-4. 투자회수기간

투자회수기간은 연간 증기요구량이 최대일 경우 연간 증기판매가격은 2,270.3백만원으로 0.548년으로 나타났으며 최소일 때는 1,780.8백만원으로 0.699년으로 나타났다.

그리고, 증기사용에 따른 가격추정에 따른 투자회수기간의 경우 649.6백만원에 대한 1.92년으로 투자회수기간이 대체적으로 빠른 것으로 나타났다.

<표 11> 투자회수기간(Pay-back period) 산출 (단위 : 백만원)

구 분	투자비 (백만원/년)<A>	공급가격 (백만원/년)<B>	투자회수기간 (년)<A/B>
최대공급량(MAX) 기준	1,244	2,270.3	0.54
최소공급량(MIN) 기준	1,244	1,780.8	0.69
'99년도 추정 소비량	1,244	649.6	1.92

#### 4. 결 론

본 연구사업은 이용 가능한 폐열 발생처를 발굴하고 이를 적용 가능한 수요처에 대해 폐열활용 방안의 제시와 함께 이를 시범사업으로 연계될 수 있도록 하기 위한 열 공급 기본설계와 경제성 분석을 실시하여 제시하였다.

본 연구결과에 따르면 발굴된 폐열 발생처는 폐열활용을 위해 우수한 조건을 갖추고 있는 것으로 평가되고 있으며 그에 따른 사업성에 있어서도 충분한 가치가 있는 것으로 나타났으며 수요처의 조건도 매우 양호한 것으로 분석되었다.

한편, 이러한 폐열활용을 보다 적극적으로 추진하기 위해서는 다음과 같은 내용이 지속적으로 추진되어야 한다. 첫째, 발굴된 사업처에 대한 적극적인 사업 추진 유도가 필요하다. 폐열활용은 개발 여하에 따라 지역 경제 발전은 물론 홍보 등에 매우 유익한 결과를 도출할 수 있는 분야로서 보다 능동적인 사업추진이 필요하다. 둘째, 폐열활용 수요처 발굴이 지속적으로 유지되어야 하며 이를 위해 국가 산업단지 뿐만 아니라 공업지역에서의 수요처 발굴을 위한 지속적인 모니터링을 통한 발굴을 촉진해야 할 것이다. 셋째, 기업의 폐열활용 인식 개선에 대한 노력 강화가 필요하다. 폐열 발생 업체들이 기술적, 경제적, 제도적 문제가 있으면 적극적인 자세로 해결하여 폐열 활용에 보다 효과적으로 대처할 수 있는 방안을 모색하여야 하며 이를 위해 관련기관의 적극적인 노력이 필요할 것이다.

#### 참고문헌

1. H.-M Groscurth, Th. Bruckner, and R. Kümmel, "Modeling of Energy-Service Supply System", Energy-The International Journal, Vol. 20, No.9, pp.941-958, 1995.
2. H.-M Groscurth, "Energy, Cost, and Carbon Dioxide Optimization of Disaggregated, Regional Energy-Supply Systems", Energy-The International Journal, Vol. 18, No.12, pp.1187-1205, 1993.
3. Ranjan K. Bose and G. Anadalingam, "Sustainable Urban Energy- Environment Management with Multiple Objectives", Energy-The International Journal, Vol. 21, No.4, pp.305-318, 1996.
4. 松稿隆治 "都市エネルギーシステムの分析", 日本エネルギー工學會志, 第76卷,8號, pp.760-765, 1997.
5. 한국에너지기술연구소/울산광역시, "공단폐열 이용방안 연구", 2000. 2.