

폐열을 이용한 도시에너지 시스템 모델링에 관한 연구

박수익, 이덕기, 백종건
한국에너지기술연구소

Modeling of Municipal Energy System Using Waste Heat

Soo-Uk PARK, Deok-ki Lee, Jong-Gun Paek
Korea Institute of Energy Research

요 약

“폐열을 이용한 도시에너지 시스템”은 산업단지나 발전소 등에서 발생하는 폐열을 회수하여 원격지로 수송을 하고, 도시지역의 수요처에서 수송된 열을 효율적으로 이용하는 에너지 시스템이다.

본 연구는 “폐열을 이용한 도시에너지 시스템” 모델링을 위해 시스템을 폐열공급원에서 최종 열수요처까지의 전체시스템을 이루는 GES(Global Energy System)와 열의 입출력·이송·저장·변환이 이루어지는 EFS(Energy Flow System)로 구분하였다. 그리고 EFS를 프로세스별로 구분하고, 이들을 최적화하는 시스템 모델링을 구축하였다.

1. 서론

우리나라 1차 에너지의 52%는 산업부문에서 사용되고 있으며, 이중 산업부문에서 이용되지 못하고 손실되는 폐열은 약 60%로 연간 4천만 TOE에 이르고 있어 이의 활용이 적극 요망되고 있다. 그런데 이처럼 막대한 폐열이 적극적으로 이용되지 못하는 것은 폐열회수 기술이 부족하고, 폐열의 온도가 낮고, 열손실로 장거리 수송이 곤란하며, 열수요처인 배후도시가 열공급원으로 부터 10~30km 이상 떨어져 있는 등의 이유 때문이다.

“폐열을 이용한 도시에너지 시스템”은 산업단지나 발전소 등에서 발생하는 폐열을 회수하여 원격지로 수송을 하고, 도시지역의 수요처에서 수송된 열을 효율적으로 이용하는 에너지 시스템이다. 이 시스템은 많은 하부시스템과 프로세스 등으로 구성되어 있기 때문에 효율적인 도시에너지 시스템을 구현하기 위해서는 시스템적인 관점에서 시스템을 모델링하고, 최적화 방안을 수립하여 이를 적용해야 한다.

본 연구는 “폐열을 이용한 도시에너지 시스템” 모델링을 통해 시스템 최적화를 위한 기반을 마련하고자 한다.

2. 시스템 해석

본 시스템의 구성을 위한 용어적 해석은 첫째, 에너지흐름시스템(Energy Flow System : 시스템은 적용기술, 재화의 흐름, 각 프로세스 포함)과 둘째, 광역에너지시스템(Global Energy System(GES) : 각 그룹별 프로세스의 활동범위 전체를 일컫음)이며, 이들은 아래의 정의와 가정을 만족한다.

2.1 Definition

- (1) Energy Flow System(EFS)는 어떤 시점에서 기후조건, 열흐름 등에 대한 공간적 동차성(Spatially Homogeneous)를 갖고 있으며, 각각의 하부시스템은 프로세스(Process)로 구성된다.
- (2) EFS는 환경적요인(Environment), 비용적요인(Cost), 기술적요인(Technology)에 의존한다.
- (3) EFS에서의 열흐름은 프로세스간의 측정량으로 표시되며, 입출력의 표시는 H_{in} (입력되는 열), H_{out} (출력되는 열)로 한다.

2.2 Assumption

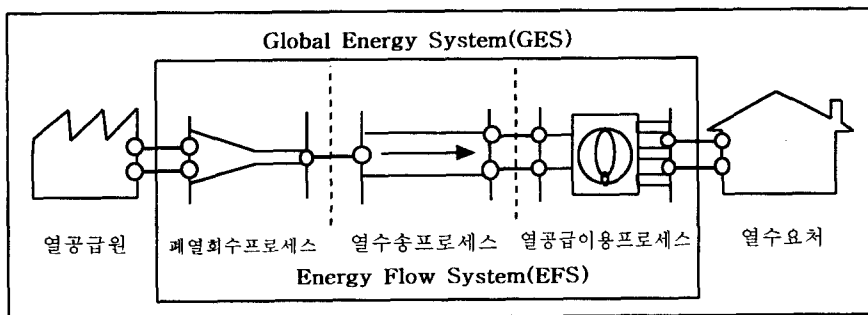
- (1) 열흐름에는 시간적 간격(Time Lag)이 없다.
- (2) $EFS \subset GES$

Definition (2)에서 환경(Env.)요인은 환경오염요소의 처리비용 (CO_2 , SO_x , NO_x , CH_4 등의 환경오염요소)으로 나타내며, 비용(Cost)요인은 EFS의 구현과 운영에 소요되는 비용 (열흐름상에 지불되는 변동비, 고정비 등의 비용요소), 기술적(Tech.)요인은 기술의 성숙도에 따른 각 기술의 적용비용 (폐열회수, 열수송, 열공급이용 등의 프로세스에 적용되는 기술)을 나타낸다. 이것을 바탕으로 총 평균비용(TC)는 아래의 식을 만족한다.

$$TC \equiv (Cost, Env, Tech) \quad (1)$$

2.3 시스템상의 열흐름 체계

전체 에너지흐름은 GES에서의 열공급, EFS, 열수요처로 이루어지고, EFS는 폐열회수, 열수송, 열공급이용 프로세스로 구성되며 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 각 시스템별 구성도

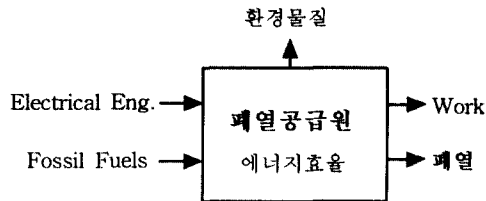
3. 폐열 이용 도시에너지 시스템 구성

3.1 광역에너지시스템

광역에너지시스템(GES)은 폐열공급처, 열흐름프로세스(EFS), 열수요처 등의 개별시스템으로 이어지며, 각 시스템은 아래의 네트워크를 구성한다.

• 폐열공급원

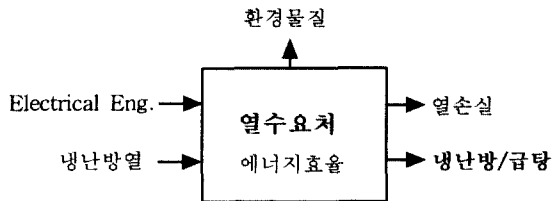
폐열공급원은 전기나 화석연료 등을 바탕으로 목적하는 일(Work)을 수행하고, 시스템의 에너지효율에 의해 폐열과 환경물질 등이 방출된다. 이때 폐열은 열흐름프로세스(EFS)에 의해 회수되어, 재사용된다[그림 2].



[그림 2] 폐열공급원의 열흐름도

• 열수요처

열수요처는 열흐름프로세스(ESF)에서 공급하는 전기나 냉방열을 이용하여 건물과 산업부문의 냉난방과 급탕에 이용된다[그림 3].



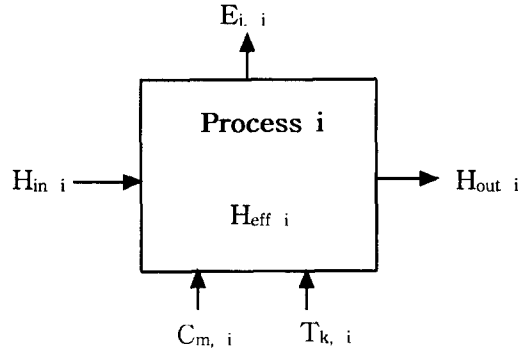
[그림 3] 최종수요처의 열 공급도

3.2 에너지흐름시스템(EFS)상의 Process

EFS는 열공급원에서 발생한 폐열을 여러 가지 프로세스를 거쳐 열수요처에서 이용하게 하는 과정으로 폐열회수, 열수송, 열공급이용 프로세스로 구성된다.

폐열회수 프로세스는 열공급원으로부터 폐열을 회수하며, 열수송 프로세스는 수집된 폐열을 원거리의 열수요처까지 열손실을 최대한 줄여 이송하고, 열공급이용 프로세스는 수송되어온 열을 수요처의 열이용장치(난방, 냉방설비 등)를 통해 열수요처에 공급하는 역할을 한다.

모든 프로세스는 [그림 4]와 같이 나타내며, 다음과 같은 관계가 있다.



[그림 4] 프로세스 상의 열흐름도

- i : 각 프로세스 ($i \in \{\text{폐열회수, 열수송, 열공급이용}\}$),
- $H_{in\ i}$: 프로세스 i 에서 입력되는 열량,
- $H_{out\ i}$: 프로세스 i 에서의 열효율($H_{eff\ i}$)에 의해 출력되는 열량,
- $E_{j\ i}$: 프로세스 i 에서 외부로 배출되는 환경오염물질 j ($j \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_x, \text{NO}_x, \text{CH}_4\}$)의 량,
- $C_{m\ i}$: 프로세스 i 에 소요되는 m ($m \in \{\text{변동비, 고정비}\}$)의 비용,
- $T_{k\ i}$: 프로세스 i 에서 기술 k ($k \in \{\text{기존기술, 도입기술, R\&D기술}\}$)에 소요되는 비용
- $H_{eff\ i}$: 프로세스 i 에서의 열효율

이때 프로세스 i 의 비용 $Cost_i$ 는,

$$Cost_i = \sum_m C_{m\ i} \quad (2)$$

프로세스 i 의 환경오염요소의 처리비용 Env_i 는,

$$Env_i = \sum_j A_j \cdot E_{j\ i} \quad (3)$$

으로, A_j 는 환경오염물질 j ($j \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_x, \text{NO}_x, \text{CH}_4\}$)의 단위처리비용이며, 프로세스 i 의 에너지기술 적용비용 $Tech_i$ 는,

$$Tech_i = \sum_k T_{k\ i} \quad (4)$$

의 관계가 있다.

폐열을 이용해서 절약되는 비용 H_{save} 는,

$$H_{save} = H_{in\ 1} \cdot H_{cost} \cdot \prod_i H_{eff\ i} \quad (5)$$

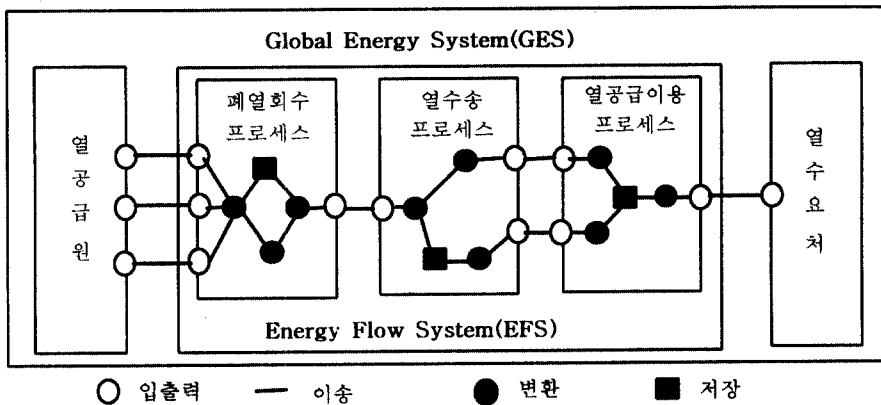
으로, H_{cost} 는 단위열량을 생산하는데 소요되는 비용을 나타내며, 각 프로세스는 (2) ~ (5)의 관계식으로 연결된다.

3.3 Sub-process

각 프로세스는 입출력, 변환, 저장, 이송 등의 서브 프로세스로 구성된다.

- 입출력 (Input/Output) : 각 프로세스에 투입되는 폐열(배기가스, 폐온수)/투입 에너지와 프로세스를 거쳐 다음 하부시스템에 투입되는 에너지를 나타낸다.
- 변환 (Conversion) : 입력된 에너지를 프로세스에서 요구하는 에너지 상태(종류, 온도, 압력 등)로 바꾸어 주는 과정을 나타낸다.
- 저장 (Storage) : 프로세스의 효율을 높이기 위해 일정량의 에너지를 보관하고, 필요한 시기와 장소에 공급하는 역할을 수행한다.
- 이송 (Network) : 각 프로세스 사이의 최적경로 이동과 프로세스 내부에서의 에너지 흐름을 나타낸다.

폐열을 이용한 도시에너지 시스템은 열공급원, EFS(폐열회수, 열수송, 열공급이용 이용), 열수요처로 이루어진다[그림 5].



[그림 5] 각 시스템별 서브 프로세스 구성

4. 시스템 모델링

폐열을 이용한 도시에너지 시스템의 최적화 모델링은 EFS의 물리적 에너지 흐름에 기반을 둔 프로세스 접근법을 바탕으로 하였다. 그리고 Energy Balancing이 이루어지도록 네트워크로 표현하고, 수리계획을 이용하여 최적화 모델로 정형화하였다.

전체적인 EFS의 목적은 총비용의 최소화이며, Sec. 3에서 서술한 것을 바탕으로 식(6)의 최적화 모델로 표현된다.

$$\text{Min. (TC)} = \sum_i \left(\sum_m C_{m,i} + \sum_j A_j \cdot E_{j,i} + \sum_k T_{k,i} \right) - H_{in,i} \cdot H_{cost} \cdot \prod_i H_{eff,i} \quad (6)$$

$$\text{and } C_{m,i}, A_j, E_{j,i}, T_{k,i}, H_{eff,i}, H_{cost} \geq 0$$

5. 결론

본 연구는 “폐열을 이용한 도시에너지 시스템” 모델링을 위해 시스템을 폐열공급원에서 최종열수요처까지의 전체 시스템을 이루는 GES(Global Energy System)와 열의 입출력·이송·저장·변환이 이루어지는 EFS(Energy Flow System)로 구분하였다. 그리고 EFS를 프로세스별로 구분하고, 이들을 최적화하는 시스템 모델링을 구축하였다

이 연구를 통해 “폐열을 이용한 도시에너지 시스템”을 효과적으로 모델링하는 시스템 최적화의 도구를 제공하게 되며, 시스템의 구현을 통해 폐열을 효율적으로 이용할 수 있어 에너지수급 및 환경개선에 기여하게 될 것이다.

6. 참고문헌

- [1] Christos A. Frangopoulos and Yannis C. Caralis, " A Method for taking into account Environmental Impacts in the Economic Evaluation of Energy Systems", International Journal of Energy, Vol.38, No.15, pp.1751-1764.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Th. Bruckner, H.-M Groscurth, and R. Kümmel, "Competition and Synergy between Energy Technologies in Municipal Energy System", Energy-The International Journal, Vol. 22, No.10, pp.1005-1014, 1997.
- [6] 省에너지센터, “에코-도시에너지 시스템”, 일본 省에너지센터, 1997.
- [7] 松稿隆治 “도시에너지 시스템의 분석”, 일본에너지공학회지, 제76권, 8호, pp.760-765, 1997.
- [8] 한국에너지기술연구소, “도시종합에너지 시스템 개발 연구”, 한국에너지기술연구소, 1997.