

엑서지분석 기법의 현실적용 방안 연구

박명호, 김철, George Tsatsaronis *

아주대학교 에너지시스템연구센터, * 베를린공대 에너지공학 연구소

A Practical application of the exergy analysis method

Moung-Ho Park, Chul Kim, George Tsatsaronis *

Energy Sysems Research Center, Ajou University

* Institute for Energy Engineering, Technical University of Berlin

1. 서론

엑서지는 시스템이 환경과 평형이 되는 동안에 시스템으로부터 얻을 수 있는 최대 유효일을 의미한다. 엑서지분석 기법은 에너지의 질적인 가치를 평가할 수 있기 때문에, 시스템에서 발생하는 비효율성의 원인 및 크기 등을 파악할 수 있게 해 준다. 이로 인하여 에너지시스템의 분석 및 최적화 등에 널리 사용되어지고 있다. 에너지 시스템에서 비효율성의 원인들인 비가역적인 열전달, 교축(throttling) 및 연소 등은 에너지의 질을 저하시키지만 에너지분석으로는 나타나지 않고 엑서지분석에 의하여만 파악되어질 수 있다.

엑서지분석의 이러한 장점에도 불구하고, 실제 공정을 설계하는 경우에 자주 적용되지 못하는 이유는, 열역학 1법칙을 이용한 에너지분석기법이 이미 널리 자리를 잡고 있다는 이유 이외에도, 엑서지분석 기법 자체의 문제점이 더 큰 문제라 할 수 있다.

엑서지분석 결과가 공정개선의 잠재성 또는 가능성을 제시할 수 있지만, 이러한 개선이 현실적으로 가능한지의 여부는 파악할 수 없다. 그 이유는, 엑서지분석이 대상시스템의 성능을 평가함에 있어 공정의 구동력이 무시되거나 아주 작은 이상적인 경우와 비교하여 정의되기 때문이다. 하지만, 실제공정은 공정을 구동시키기 위하여 일정량 이상의 구동력을 필요로 한다. 이러한 공정의 구동력은 엑서지손실로 나타나며, 구동력이 클수록 엑서지손실도 더욱 크게 나타난다. 이러한 엑서지손실 중에서 일부분은 공정을 아무리 개선한다 할지라도 피할 수 없는 엑서지손실(Unavoidable exergy loss)로서, 그 크기는 공정에 따라 각기 다르게 나타난다. 공정의 구성이 복잡하고, 엑서지손실이 크게 발생하는 경우에, 대부분의 엑서지손실은 개선이 불가능할 것이며, 현재의 기술적 및 경제적인 제약조건도 이러한 최소한의 엑서지손실에 포함되어야 할 것이다.

본 연구에서는 에너지시스템에서 발생하는 엑서지손실 중에서 개선 가능한 부분과 불가능한 부분을 분리할 수 있는 방법을 제시하고, 이를 통하여 엑서지방법의 현실적용이 보다 수월해질 수 있는 방법을 도출하였다.

2. 엑서지 및 개선가능 엑서지분석방법¹⁾

일반적으로 정상상태에서 엑서지는 물리 및 화학엑서지로 구분되며, 이를 위하여 적절한 기준환경의 설정이 필요하다. 개방계의 물리적 엑서지는 다음 식들에 의하여 나타내어진다.

$$E^{PH} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (1)$$

위 식에서 H 및 S는 각각 시스템의 엔탈피 및 엔트로피를 나타내고, 하첨자 0은 기준환경을 나타낸다.

화학엑서지는 기준환경에 대하여 물질의 화학성분이 가지는 능력을 나타내는 것으로서, 혼합물 중에 포함된 각 성분의 표준화학엑서지값과, 몰분율의 함수로서 다음 식에 의하여 계산되어진다.

$$E^{CH} = \sum x_k e_k^{CH} + \dot{R}T_0 \sum x_k \ln x_k \quad (2)$$

$$e_k^{CH} = -\dot{R}T_0 \ln x_k^e \quad (3)$$

여기서, x_k 는 성분 k의 몰 분율, \dot{R} 는 가스상수, e_k^{CH} 는 성분 k의 표준화학엑서지, x_k^e 는 기준환경의 성분 k의 몰 분율을 각각 나타낸다. 표준화학엑서지의 계산을 위한 기준환경은 Ahrendts의 모델을 적용하여 대상공정의 각 흐름들에 대한 엑서지값이 계산되었다.⁵⁾ 엑서지분석은 화학공정 시뮬레이터인 ASPEN PLUS를 이용하여 수행되고, 물리 및 화학엑서지는 Fortran을 이용한 코드를 개발하여 ASPEN PLUS에 연계시켜 계산되도록 하였다.

이를 통하여 ASPEN PLUS를 통하여 모사된 어느 공정에 대하여도 엑서지값들이 사용자가 원하는 부분에 출력되어 질 수 있다. 본 연구에서 개발한 엑서지모델은 각 물질흐름을 기체 및 액체혼합물, 순수고체물질(탄소 및 황 등)과 고형물질(석탄, 회 및 슬래그 등)로 구분하여 계산되므로, 대상 공정들에 따라 적절히 조합하여 사용할 수 있다.

대상공정 및 단위기기의 엑서지효율은 다음과 같이 정의되어질 수 있다.

$$\zeta = \frac{\text{exergy value of desired result}}{\text{exergy value of inputs utilized to produce that results}} \quad (4)$$

시스템의 총 엑서지손실은 다음과 같이 나타내어진다.²⁾

$$ED_T = ED_A + ED_{UNA} \quad (5)$$

ED_T 는 시스템내의 총 엑서지손실을 나타내며, 이러한 손실은 기술적 및 경제적으로 피할 수 없는 최소한의 엑서지손실(ED_{UNA})과 개선 가능한 손실(ED_A)로서 나타내어진다. 여기서 정의된 ED_{UNA} 는 기술적으로 실행 불가능하거나, 경제적으로 개선 불가능한 부분으로서, 이 값들은 기술진보와 경제적인 환경의 변화에 의하여 달라진다. 이 값의 계산은 각 단위기기 모델을 이용, 현재의 기술상황 등을 고려하여 적절한 입력 값들을 선정하여 수행된다.

3. 엑서지 및 개선가능 엑서지분석

본 연구에서 개발된 기법을 그림 1에 나타난 CGAM으로 명명된 가스터빈 구동 단순 열병합 시스템에 적용하였다.³⁾

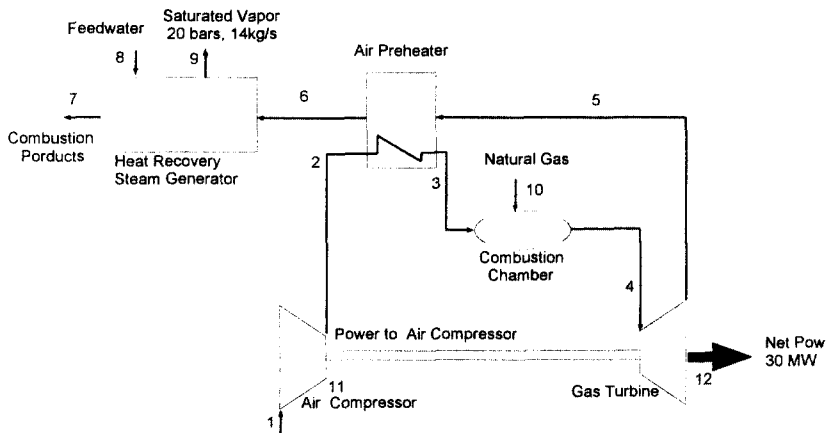


그림 1. CGAM problem

엑서지 및 개선가능 엑서지효율은 다음 식들로서 정의되었다. 여기서 연소기를 제외한 기기들의 엑서지값들은 물리 및 화학엑서지 값들이 통합된 총 엑서지값들이 적용되었다. 연소기의 경우에, 엑서지효율식은 문헌에 제시된 식을 적용하는 과정에서 문제점을 보완하여 새로운 형태의 효율식을 제시하였다.

$$\text{압축기} \quad ; \quad \zeta = \frac{E_2 - E_1}{E_{11}}$$

$$\text{터빈} \quad ; \quad \zeta = \frac{E_4 - E_5}{E_{12}}$$

$$\text{공기예열기} \quad ; \quad \zeta = \frac{E_3 - E_2}{E_5 - E_6}$$

$$\text{HRSG} \quad ; \quad \zeta = \frac{E_9 - E_8}{E_6 - E_7}$$

$$\text{연소기} ; \zeta = \frac{m_3(e^{\text{PH}}_4 - e^{\text{PH}}_3) + m_3(e^{\text{CH}}_4 - e^{\text{CH}}_3) + m_{10}(e^{\text{PH}}_4 - e^{\text{PH}}_{10})}{m_{10}(e^{\text{CH}}_{10} - e^{\text{CH}}_4)}$$

본 연구에서 수행한 엑서지효율은 위의 식들이 적용되었으며, 개선가능 엑서지 분석을 위하여 각 기기에 적용된 가정은 다음과 같다.

- 압축기 : 등엔트로피 효율 90%
- 팽창기 : 등엔트로피 효율 92%
- 공기예열기 : 최소온도차 10K
- 연소기 : 단열연소, 연소기출구온도 1500℃, 연료투입온도 811.15K
공기예열온도 1001K, 기준공정과 동일한 엑서지생성량
- HRSG : 기준공정과 동일한 증기생성량, 증기생성 압력 120bar
최소온도차 10K

위의 가정들에서 압축기와 팽창기는 CGAM문제에 제시된 기기비용의 계산한 계점들이고, 연소기의 온도는 세라믹 터빈을 적용하는 경우에 가능한 것으로 알려지고 있으며, 연료 및 공기의 예열온도는 연료 및 공기예열기에서 최소온도차 10K 조건으로 가열 가능한 최대의 온도를 나타내었다. 이때 연료의 최대예열온도는 메탄의 발화온도로서 설정하였다.⁴⁾ 폐열회수보일러에서 증기압력은 최신의 연구에서 제시된 데이터를 적용하였다.⁶⁾

4. 결과 및 결론

ASPEN PLUS와 엑서지모듈을 이용한 시스템의 엑서지계산결과를 표 1에 나타내었다. 각 기기의 엑서지 및 개선가능 엑서지분석 결과는 표 2에 나타내었다. 결과에 의하면, 연소기는 약 20MW의 손실이 발생하여 전체손실의 약 60%를 차지하는 것으로 나타났다. 이외에 HRSG, 팽창기, 공기예열기 및 압축기의 순으로 손실이 크게 나타났다. 이에 반하여, 개선가능 엑서지분석에 의하면, 연소기의 개선 가능한 손실은 전체손실 20MW중에서 4.4MW정도 인 것으로 나타났으며,

15.6MW는 현실적으로 개선이 불가능한 것으로 나타났다.

표 1 Exergy values of each streams

Stream No.	m (kg/s)	T (K)	P (bar)	E^{PH} (MW)	E^{CH} (MW)	E^{LOI} (MW)
1	91.406	298.1	1.013	0.000	0.000	0.000
2	91.406	611.5	10.130	27.753	0.000	27.753
3	91.406	850.0	9.623	41.515	0.000	41.515
4	92.960	1520.0	9.143	100.990	0.336	101.300
5	92.960	1011.0	1.100	38.120	0.336	38.460
6	92.960	793.2	1.066	21.791	0.336	22.130
7	92.960	435.4	1.013	2.750	0.336	3.086
8	13.789	298.2	20.000	0.027	0.000	0.027
9	13.789	485.5	20.000	12.579	0.000	12.579
10	1.554	298.2	12.000	0.589	79.860	80.450

표 2 Exergy and Avoidable exergy analysis

Component	E_F (MW)	E_P (MW)	E_D (MW)	E_L (MW)	ζ (%)	E_{AVO} (MW)	ζ_{AVO} (%)
AC	29.9	27.8	2.11	0.00	92.9	0.651	94.888
APH	16.3	13.8	2.57	0.00	84.3	2.339	98.383
CC	79.9	59.3	20.60	0.00	74.2	4.426	78.933
GT	62.9	59.9	3.01	0.00	95.2	1.259	97.339
HRSRG	19.0	12.6	6.49	0.00	65.9	3.340	82.015
Total	80.4	42.6	34.78	3.08	52.9	12.015	

이러한 결과는 기존의 엑서지분석으로는 파악되어질 수 없는 것으로써, 이 시스템의 경우에 전체 손실중의 약 1/3인 12MW정도만이 개선 가능한 부분으로 판명되었다. 따라서, 기존의 엑서지분석에 의한 결과를 이용하면 투자 및 기술개발의 방향이 현실적으로 적절하지 못하게 되어 적용이 어려운 것을 알 수 있다. 하지만, 본 연구에서 제시한 방법을 적용하여 개선 가능한 부분을 정확히 파악할 수 있지만, 이러한 개선활동을 수행하는 경우에, 경제적인 기준 하에서 개선 가능한 부분의 투자우선순위를 파악할 수 있다면, 보다 현실적인 적용이 가능할 것이다.

참고문헌

1. A.Bejan, G.Tsatsaronis, M.J.Moran, "Thermal Design & Optimization", Wiley International, 1996
2. Xiao Feng, X.X.Zhu, J.P.Zheng, "A practical exergy method for system analysis", 31th IECEC, 1996
3. A.Valero, etc., "CGAM problem: definition and conventional solution", ECOS '92 special issue, 1992
4. Bobcock & Wilcox, "Steam; its generation and use", 40th edition, 1992
5. J. Ahrendts, "Reference states", Internation Journal of Energy, Vol.5, 1980
6. 김종진, "엑서지분석에 의한 석탄가스화 복합발전시스템의 성능개선 기법연구", 박사학위 논문, 1997. 2, 아주대학교 에너지학과