

엑서지분석을 이용한 가스화기 성능평가

박명호, 김철
아주대학교 에너지시스템연구센터

A Gasifier evaluation based on the exergy analysis

Moung Ho Park, Chul Kim
Energy Systems Research Center, Ajou University

1. 서론

석탄가스화기는 석탄을 연소가 아닌 부분산화에 의하여 CO 및 H₂ 등의 합성 가스를 생산하는 장치이다. 가스화시스템의 효율은 투입되는 석탄의 에너지와 석탄가스의 화학에너지의 비율인 냉가스효율로서 계산되어진다. 이는 단순히 생성물인 석탄가스의 생성량과 조성만을 대상으로 하기 때문에 가스화기에서 여타 생성물들인 열, 증기 및 슬래그 등이 보유하고 있는 에너지는 분석시에 포함되지 않는다. 이들을 고려한다 할지라도, 엔탈피를 기준으로 하는 기존의 분석방법으로는 각 배출물들이 가지는 질 적인 부분을 고려할 수 없기 때문에, 결과가 오도 되어질 수밖에 없고, 이러한 결과들이 다른 시스템과의 비교 및 공정개선 등의 연구에 적용되어지면 그 개선의 방향과 시스템 성능개선을 위한 우선 순위를 정확히 판단할 수 없다.

이를 위하여 본 연구에서는 열역학 1법칙 및 2법칙에 근거한 엑서지분석방법을 통하여 가스화시스템의 효율을 분석함으로써 에너지보존의 원리에 근거한 기존의 분석방법이 가지는 한계를 극복하고 이를 통하여 가스화시스템의 개선방향을 제시하고자 한다.

2. 엑서지분석

분류층 습식가스화기를 대상으로 투입 및 배출흐름들에 대한 엑서지값을 계산하고 이로부터 엑서지효율을 도출하였다.¹⁾ 물질흐름의 총 엑서지는 물리적엑서지와 화학엑서지로 구분되어질 수 있다. 물리적엑서지는 시스템의 온도 및 압력에 의한 엑서지이고, 화학엑서지는 시스템의 화학성분에 의한 값이다. 물리적 엑서지의 계산을 위해서는 기준상태의 온도와 압력만이 필요한 반면에, 화학엑서지의

계산을 위해서는 기준물질이라 불리는 환경에 존재하는 안정적인 물질들의 조성이 추가로 필요하게 된다. 기준환경으로부터 계산되는 표준화학엑서지가 제시되지 않은 경우에 필요한 절대엔탈피와 엔트로피 값들은 석탄 및 회분의 경우에 문헌에 제시된 식을 이용하였고, 여타의 물질들에 대한 값들은 ASPEN PLUS의 값들을 이용하였다.²⁾ 모든 계산은 ASPEN PLUS를 이용하여 수행되었으며, 기체, 액체, 고체 및 연료(석탄)의 엑서지계산을 위하여 포트란을 이용한 코드를 개발하여 ASPEN PLUS에 연계시켜 엑서지값을 계산하였다. 이러한 방법은 사용자가 ASPEN PLUS에서 모사한 모든 공정에 대하여 적용 가능하다.

물질흐름의 엑서지계산 : 엑서지는 시스템이 환경으로부터 어느 정도 떨어져 있는지를 나타내기 때문에, 먼저 사용되어질 환경을 정의하여야 한다. 이러한 환경은 깁스에너지가 낮은 물질들로 구성되어지고 이들 서로는 열역학적으로 평형상태인 것으로 추정되어진다. 엑서지계산을 위하여 사용된 기준환경으로서 25°C 및 1.01325bar에서 Ahrendts의 모델을 적용하였다.³⁾ 물리, 화학 및 총엑서지는 각각 다음 식에 의하여 계산된다.

$$\dot{E}^{PH} = \dot{m}e^{PH} = \dot{m}[(h-h_0)-T_0(s-s_0)] \quad (1)$$

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

$$e_k^{CH} = -\dot{R}T_0 \ln x_k^e$$

$$\dot{E}^{TOT} = \dot{E}^{PH} + \dot{E}^{CH} \quad (3)$$

여기서 \dot{m} 은 질량흐름(kg/s), e^{PH} 는 비 물리엑서지(MJ/kg), 하첨자 0은 기준상태를 의미하며 e^{CH} 는 표준화학엑서지(MJ/kg)를 각각 나타낸다. 여기서 표준화학엑서지의 계산은 Ahrendts의 변형모델을 이용하여 계산되어졌고, 이 값들은 ASPEN PLUS의 엑서지 계산모듈에 데이터로서 입력되어졌다. 석탄 등과 같은 연료의 화학엑서지는 표준화학엑서지 값은 다음의 식으로 계산되어졌다.⁴⁾

$$e_{MAF}^{ch}(T_0, P_0) = (HHV)_{fuel, in} - T_0[s_{fuel, in} + \nu_{O_2, in} s_{O_2, in} - \sum_1 \nu_{1, out} s_{1, out}] + [\sum_1 \nu_{1, out} e_{1, out}^{ch} - \nu_{O_2, in} e_{O_2, in}^{ch}] \quad (4)$$

여기서, ν 는 양론계수, s 는 엔트로피를 나타내며, HHV는 연료의 고위발열량을 각각 나타낸다.

엑서지효율정의 : 경계조건하에서 주어진 시스템의 에너지효율은 다음과 같이 정의되어진다.

$$\eta = \frac{\text{net energy produced by the process}}{\text{total energy supply to the process}} \quad (5)$$

하지만 이 효율은 에너지의 질에 대한 기준 없이 단지 열역학 1법칙의 관점을 통하여 에너지의 양을 비교할 수 있다. 반면에 엑서지개념을 도입하는 경우에, 에너지의 질이 다음에 정의된 엑서지효율을 통하여 에너지의 질이 비교되어질 수 있다.

$$\zeta = \frac{\text{exergy value of desired result}}{\text{exergy value of inputs utilized to produce that results}} \quad (6)$$

대상 가스화시스템 : 본 연구에서 대상으로 하는 습식 분류층가스화기의 경계조건들은 Figure 1에 나타내었다. 대상 가스화기는 산소를 산화제로 사용하며, 연료는 물과 석탄이 혼합된 슬러리를 이용한다. 엑서지분석 경계조건으로서 생성가스가 가스화기로부터 배출되는 지점을 선정하였다. 대상가스화기는 ASPEN PLUS의 깁스에너지 최소화법을 이용한 반응기모델로서 모사하였고, 설계조건은 다음과 같다.⁵⁾

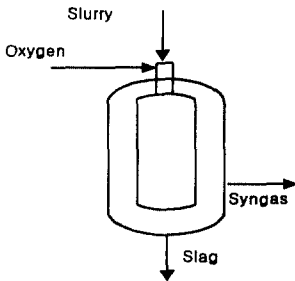


Figure 1. Gasifier Diagram

Table 1. Gasifier design conditions

Coal mass flow(kg/s)	25.894
Water mass flow(kg/s)	8.153
Oxygen mass flow(kg/s)	20.782
Coal inlet temp.(K)	394.15
Water inlet temp.(K)	394.15
Oxygen inlet temp.(K)	477.34
Gasifier Temperature(K)	1718
Gasifier Heat Loss	3%

3. 결과

대상 시스템의 에너지 및 엑서지분석 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Energy and exergy analysis

Cold Gas Efficiency(%)	79.387
Exergy Efficiency(%)	84.997
Exergy Consumption(MW)	90.904
Exergy Input(MW)	696.9364
Exergy Products(MW)	598.2375

Table 2에서 엑서지효율은 생성가스의 현열(물리엑서지)도 고려하기 때문에 가스의 발열량만을 이용하는 냉가스효율보다 높게 나타났다. 이러한 차이는 가스가 함유한 물리적엑서지와 거의 일치하는 양이다. 가스화기에서 약 90MW의 손실이 발생함을 알 수 있으며, 이는 투입되는 엑서지의 약 13%에 해당하는 큰 양이다.

이러한 손실을 줄이기 위하여, 몇 가지 변수들에 대한 엑서지기준 민감도 분석을 수행함으로써, 가스화기 운전조건을 최적화를 시도하였다. 변수로서 산소공급을 및 산소공급온도와 슬러리 농도 및 슬러리 투입온도를 사용하였다. 민감도분석 결과는 Figure 2~5에 나타내었다.

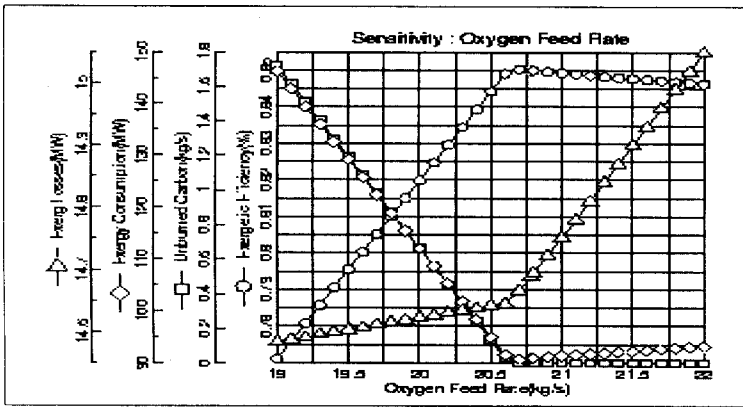


Figure 2. Relationship between exergy values and O_2 feed rate

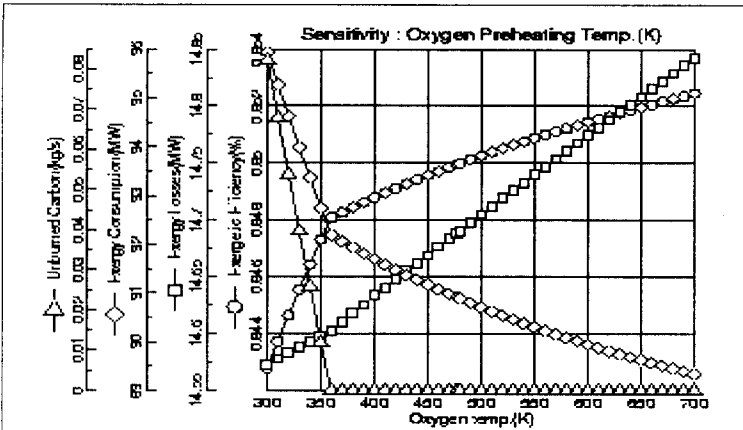


Figure 3. Relationship between exergy values and O_2 temp.

Figure 2에서, 석탄중의 탄소가 완전히 전환되는 곳에서 엑서지효율이 최대로 나타났으며, 산소/석탄 비율이 0.772(20.7kg/s)이다. 따라서, 투입되는 산소의 양은 최소한 이보다 커야 한다는 것을 알 수 있다. Figure 3에 의하면 산소예열온도가 증가함에 따라 엑서지효율이 지속적으로 증가하는데, 민감도분석 결과로서 산소

투입온도는 최소한 360K 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 또한 산소예열온도가 높을수록 보다 효율적임으로, 산소를 최대한 예열하는 것이 보다 효율적임을 알 수 있다.

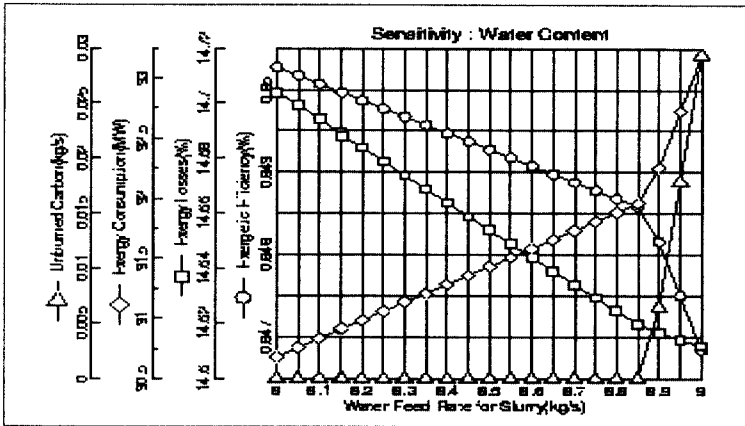


Figure 4. Relationship between exergy values and H₂O flow rate

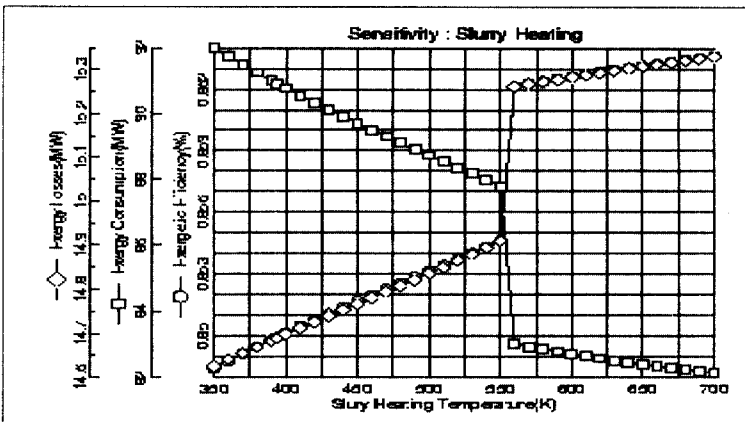


Figure 5. Relationship between exergy values and H₂O temp.

Figure 4에는 슬러리에 첨가되는 급수의 양이 변화하는 경우에 가스화기의 엑서지값들을 살펴보았다. 슬러리농도가 낮아질수록(수분의 양 증가) 엑서지효율이 감소하다가, 미반응탄소가 발생하는 수분/석탄비율이 0.34(8.85kg/s)이상인 곳에서 엑서지효율이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 슬러리 제조를 위하여 투입되는 수분은 수분/석탄비율 0.34이하에서 가능한 한 적은 양이 투입되어야 한다. Figure 5에 슬러리 예열온도의 변화에 의한 엑서지변수들의 영향을 나타내었다. 약 550K 정도의 온도에서 슬러리중의 수분이 증발하기 때문에 각 변수들이 급격히 변하는 것으로 나타났다. 이 온도는 가스화기의 운전압력에 따라 달라지게 된다. 따라서, 가스화기의 손실을 줄이기 위하여 슬러리 예열온도를

주어진 압력에서 수분의 증발온도 이상으로 유지하는 것이 타당함을 알 수 있다. 실제로, 이 경우는 Destec 가스화기에서 최근에 채택되어진 옵션이다.

4. 결론

가스화기에 대한 엑서지분석을 수행함으로써, 가스화기의 적정 운전변수들을 파악하였다. 엑서지기준 민감도분석 결과 산소/석탄 비율은 0.772, 산소예열온도는 360K 이상, 수분/석탄 비율은 0.34 이하로 나타났으며, 슬러리 예열온도는 550K 이상으로 유지하는 경우에, 가스화기의 손실을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서와 같이, 에너지시스템의 성능분석 및 최적화연구에 엑서지개념을 도입하는 경우에, 보다 효율적으로 시스템을 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. G. Tsatsaronis, T. Tawfik, "Application of the exergy concept to the analysis of a gasifier", Tennessee Technological University, DOE, Project No. DE-FC21-89MC26019, 1989
2. Eisermann, W., Johnson, P. and Conger, W. L., "Estimating Thermodynamic Properties of Coal, Char, Tar and Ash", Fuel Processing Technology, Vol. 3, 1980, pp.39-53
3. J. Ahrendts, "Reference states", Int' l J. of Energy, Vol. 5, 1980
4. A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran, "Thermal Design & Optimization", 1996, John Wiley & SONS, Inc., New York
5. "IGCC process evaluation", prepared for KEPRI by Bechtel Power, 1995