

LNG 냉열의 보유 엑서지 분석

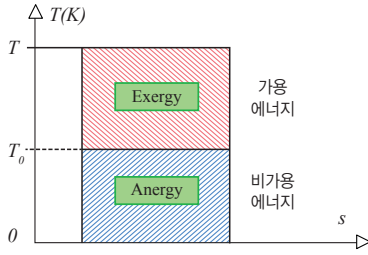
최근 -162°C 의 LNG가 보유하고 있는 냉열의 사용 가능 에너지양으로 엑서지(Exergy)양이 자주 제시되면서 매우 적은 양이라고 강조되고 있는 것을 자주 접한다. 과연 그러할까? 우리는 이 엑서지와 에너지의 차이를 확실히 구분할 필요가 있겠다.

서론

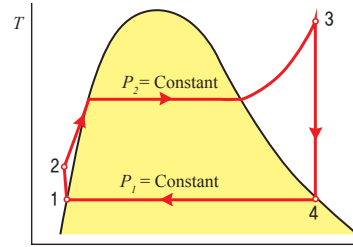
최근 LNG 형태로 도입되고 있는 천연가스를 안전하고 안정적으로 공급하기 위하여 노력하는 가스 전문가들이 LNG가 보유하고 있는 냉열 관련으로 엑서지(Exergy)란 생소한 용어를 자주 사용하고 있다. 특히, LNG 냉열을 회수하여 이용하는 산업들이 사업성이 없는 것으로 주장하는 데 이 엑서지를 이용하고 있어 이에 대한 바른 검토가 필요해 보인다.

엑서지 정의

엑서지는 고온이나 저온의 에너지원 상태에서 우리가 생활하고 있는 환경까지 실질적으로 얻을 수 있는 일 형태의 최대 유효 에너지양을 의미한다. 그림 1(a)는 T-s선도에 표시한 카르노 사이클에 기준한 엑서지 값으로 붉은 빗금친 면적이 최대 일로 전환할 수 있는 부분의 에너지양이다. 반면 이용하지 못하고 버려지는 에너지양을 무효에너지(Anergy)라 하며, 에너지 총량은 엑서지와 무효에너지의 합으로 나타낼 수 있다.



(a) Carnot Cycle의 Exergy와 Anergy



(b) Rankine Cycle

[그림 1] Exergy와 Anergy

즉, 엑서지는 에너지 총량에서 얼마만큼을 일 형태로 유용하게 얻어질 수 있는가의 일(Work) 에너지 양의 척도인 것이다.

예를 들면, 우리가 증기동력발전소의 랭킨 사이클을 T-s선도에 나타낸다면, 그림 1(b)가 되고 면적 1-2-3-4-1가 얻어지는 엑서지, 즉 유효 일량으로 37% 정도가 되는 것이며 아래 부분이 버려지는 무효 에너지양이 된다.

밀폐계의 엑서지 산정

그러면, 이 엑서지양은 무엇을 기준하여 산정하는가?

에너지의 형태는 열과 일이 있으며, 우리는 일 상에서 천연가스 에너지원을 소비할 때 발생하는 열에너지를 난방, 취사나 발전에 사용한다. 이러한 에너지 사용에는 필수적으로 손실이 있게 마련인데, 이 에너지인 열과 일의 변환과 손실을 해석하는 이론으로 열역학 제1 법칙과 제2 법칙이 있다. 제1 법칙은 '에너지보존 법칙'으로 열과 일의 변환에 손실이 없이 전량 변환되는 것을 기준하여 해석하는 것이고, 제2 법칙은 '비가역의 법칙'인데 에너지 사용시 손실을 고려하여 실제 이용 가능량을 추산하는 것이다. 엑서지는 이 제2 법칙을 기준하여 대기 압과 대기온도까지 일(Work) 형태로 사용할 수 있는 에너지양을 산정하게 되며, 밀폐계에 적용되는 열역학 제1 법칙 식과 제2 법칙 식 그리고 엑서지

식은 다음과 같다.

$$\delta Q - \delta W = du, \quad dS = \frac{\delta Q}{T} + dS_g$$

$$\begin{aligned} \text{Exergy} &= \text{내부에너지} + \text{시스템에서 얻는 일량} \\ &\quad - \text{비가역 손실 열량} \\ &= u + P dv - \delta Q \\ &= dh - T dS \end{aligned}$$

여기서 어떤 밀폐계 과정이 등온과정으로 발생한다면 엑서지 값과 에너지 값이 동일하게 된다.

그러면 고온이나 극저온의 에너지원이 보유하고 있는 엑서지양, 즉 일을 할 수 있는 에너지 가능성은 얼마나 될까? 이의 산정은 아래 식과 같으며, T_0 와 P_0 는 대기 온도와 압력으로 298.15 K(25°C), 101.3 kPa이 된다.

$$\begin{aligned} e_{x,1} &= T_0 \cdot (s_o - s_1) - (h_o - h_1) \\ &= (h_1 - h_o) - T_0 \cdot (s_1 - s_o) \end{aligned}$$

$$h - h_o = \int_{T_o}^T C_p dT \tag{1}$$

$$S - S_o = \int_{T_o}^T C_p \frac{dT}{T} - R \int_{P_o}^P \frac{dP}{P}$$

$$\begin{aligned} e_{x,1} &= C_p(T - T_o) - T_o C_p \ln \frac{T}{T_o} \\ &\quad + R T_o \ln \frac{P}{P_o} \end{aligned} \tag{2}$$

예를 들어 비교하여 보면, 고온 100°C, 1기압의

물 1 kg과 50°C, 1기압의 물 3 kg을 25°C까지 이용한다면 에너지양은 동일하나, 엑서지양은 2.7배의 차이가 나게 된다.

- 에너지양 :

$$1) Q = m C_p dT = (1 \text{ kg})(1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C})(100-25^\circ\text{C}) = 75 \text{ kcal}$$

$$2) Q = m C_p dT = (3 \text{ kg})(1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C})(50-25^\circ\text{C}) = 75 \text{ kcal}$$

- 엑서지양 :

식 (2)에서 압력항은 동일하므로 무시되고

$$1) Ex_1 = m C_p (T - T_o) - m T_o C_p \ln \frac{T}{T_o} = (1 \text{ kg})(1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C})(100-25^\circ\text{C}) - (25+273) \ln \frac{100}{273+100} = 8.1 \text{ kcal/kg}$$

$$2) Ex_1 = m C_p (T - T_o) - m T_o C_p \ln \frac{T}{T_o} = (3 \text{ kg})(1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C})(50-25^\circ\text{C}) - (3 \text{ kg})(25+273) \ln \frac{50}{273+50} = 2.98 \text{ kcal/kg}$$

이 된다. 이는 온도가 높은 경우는 엑서지양이 에너지양의 10.8%에 해당하는 8.1 kcal/kg의 최대 일 에너지양에 해당하며, 낮은 경우는 4%의 일을 얻을 수 있다는 의미인 것이다. 동일한 에너지양을 이용하지만, 에너지의 질을 보면 고온이 훨씬 많은 유효 일을 얻는 데 유리하다는 의미인 것이며, 이와 같이 엑서지 값은 같은 에너지양이라 하더라도 어떻게 적용하는 것이 유용하고 에너지 손실을 줄일 수 있는가 하는 에너지 질을 판단하는 기준이 되는 것이 엑서지이다.

개방계의 엑서지 산정

질량의 입출이 있는 개방계 정상상태의 경우, 열역학 제1 법칙과 제2 법칙 관계식은 다음과 같으며,

$$Q_{cv} - W_{cv} = (h_o + \frac{X_o^2}{2} + gZ_o) - (h_i + \frac{X_i^2}{2} + gZ_i)$$

$$m_o S_o - m_i S_i = (\frac{\dot{Q}_{cv}}{T}) + (\frac{\dot{L}_w}{T})$$

이로부터 엑서지 산정식은 다음과 같이 주어진다.

엑서지 = 온도 T에서의 열에 의한 전달-축 혹은 경계 일+유동 일-엔트로피 생성에 의한 엑서지 붕괴

$$e_{x,2} - e_{x,1} = (1 - \frac{T_o}{T_k}) Q_k - [W - P_o (V_2 - V_1)] + [(m_i \psi_i) - (m_e \psi_e)] - T_o S_g$$

열 이용의 엑서지 분석

우리가 에너지를 일의 형태가 아닌 열의 형태로 이용할 때의 엑서지양은 어떻게 될까?

열을 이용하는 열매체 간의 열전달 공정은 열교환기를 통하여 이루어지며, 질량의 입출이 있으므로 개방계가 된다. 그러면 실제 전열량 산정은 어떻게 하는가? 열전달 과정 중 입출 유체의 운동에너지와 위치에너지를 무시하면 열역학 1법칙에 기준 한 열전달 해석은 고온 유체와 저온 유체의 엔탈피 차로 전열량을 계산하게 된다.

그러면 열전달에 있어 엑서지는 무엇이고, 개방계 열전달의 엑서지 산정식은?

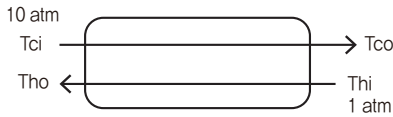
열전달에 있어 엑서지 분석은 열을 제공하는 유체의 유효 에너지양과 제공받는 유체의 유효 에너지양을 분석함으로써 열전달 유체의 에너지 질을 평가하여 열전달의 비효율성을 제거하여 보다 많은 질 높은 에너지가 전열되도록 분석하는 데 엑서지가 사용된다.

예를 들어, 고압의 극저온 메탄기체 1 kg/s와 동일량의 저압 상온 메탄기체의 열교환 효율을 에너지와 엑서지의 관점에서 비교하면 표 1, 그림 2와 같다.

〈표 1〉 고저압 메탄기체의 엑서지 산정값

($h_o=217.69$, $S_o=1.596$ kJ/kgK at $T_o=298.2^\circ\text{C}$, $P_o=1$ atm)

구 분		T(°C)	dT	h(kcal/kg)	dh(kcal/kg)	s(kcal/kgK)	Ex(kcal/kg)
저압메탄 (1atm)	Thi	10	120	209.74	61.15	1.569	0.1014
	Tho	-110		148.59		1.289	22.45
고압메탄 (10atm)	Tci	-120	120	135.27	66.72	0.934	114.99
	Tco	0		201.99		1.258	85.09



〔그림 2〕 고저압 메탄기체의 열교환(예)

- 흡수한 엑서지 : $Ex_{h_o} - Ex_{h_i} = 22.35$ kcal/kg로 엑서지 손실은 7.55 kcal/kg가 되며, 엑서지 효율은

$$\dot{\eta}_{ex} = 22.35/29.9 = 0.747$$

엑서지 산정기준은 25°C , 1 atm으로 하고 운동 에너지와 위치에너지가 무시되면 식 (2)에서

$$Ex_{h_i} = (209.74 - 217.69) - (298.2)(1.569 - 1.596) = 0.1014 \text{ kcal/kg}$$

$$Ex_{h_o} = (148.59 - 217.69) - (298.2)(1.289 - 1.596) = 22.45 \text{ kcal/kg}$$

$$Ex_{c_i} = (135.27 - 217.69) - (298.2)(0.934 - 1.596) = 114.99 \text{ kcal/kg}$$

$$Ex_{c_o} = (201.99 - 217.69) - (298.2)(1.258 - 1.596) = 85.09 \text{ kcal/kg}$$

여기서 열전달 효율(Heat Transfer Effectiveness)은

$$\varepsilon = (201.99 - 135.27) / (209.74 - 148.59) = 0.916$$

로 열교환기의 열전달량 관점에서는 잘 설계된 것으로 보이지만, 메탄가스의 기준 조건인 25°C , 1 atm 조건에서 엑서지 값으로 산정한 효율은 좋은 것은 아니다.

- 차가운 메탄가스의 배출 엑서지 : $Ex_{c_i} - Ex_{c_o} = 29.9$ kcal/kg

이 된다. 이 열교환에서 비가역적인 열전달 손실을 최소화하고 엑서지 손실을 줄이기 위하여는 저온 측 유량을 증가시키거나 열전달 면적을 넓혀 cold-side 온도차를 줄이면 엑서지 효율이 증가하게 된다. 즉, 유량을 1.1 kg/s로 하면 흡수 엑서지양이 24.4 kcal/kg이 되어 효율은 82.2%가 된다.

즉, 열교환기를 이용하여 열을 회수 이용할 수 있는 실질적 총 에너지양은 엔탈피차 값이며, 만약 이 회수한 에너지를 일의 형태로 사용하고자 한다면, 되도록 많은 유효한 일을 얻기 위하여 질(Quality)인 엑서지를 평가하여 손실부를 줄이는 노력이 필요한 것이다.

LNG 냉열의 엑서지양

그러면 LNG 냉열의 엑서지양은 얼마나 될까?

통상 우리가 나타내는 에너지양은 1법칙에 기준하여 표현한다. 예를 들면, LNG 냉열이 갖고 있는 극저온 에너지양, 즉 기화에 필요한 열량은 1기압에서 1 kg당 200 kcal, 72기압에서는 약 160 kcal가 된다.

그러면 LNG 냉열의 엑서지양, 즉 실제 얻을 수 있는 최대 유효 일 에너지양은 얼마가 되는가?

LNG는 우리가 익히 알고 있듯이 천연가스 산

지에서 -162°C 까지 온도를 저하시켜 액체 상태로 생산, 운송 후 인천 등 생산기지의 탱크에 저장된다. 그 후 1, 2차 펌프를 이용하여 72기압까지 가압한 후 다시 해수로 기화시켜 공급하고 있다. 그러므로 LNG는 극저온의 상변화 잠열을 포함한 온도 에너지와 고압의 압력 에너지가 이미 가하여져 있는 것이다. 그러므로 LNG 냉열 이용량 분석은 고압 극저온 액체가 되어 있는 상태에서 회수 이용 가능한 차가운 열에너지양을 분석하는 것이지, 상온의 천연가스로부터 시작하여 극저온을 만들고 압력을 가하는 데 투입된 다량의 에너지를 고려하면서 이를 기화시켜 열을 수 있는 유효 이용량을 분석하는 것이 아니다.

LNG(메탄 90%, 에탄 7%, 프로판 3%로 가정)의 엑서지를 분석하여 보면, 72기압, -155°C (엑서지 : 230.7 kcal/kg)에서 0°C (엑서지 : 139.0 kcal/kg)까지 엑서지양은 91.74 kcal/kg 가 된다. 이는 일로 변환될 수 있는 최대 유효 에너지양을 의미하며 에너지의 질(Quality)일 뿐이지 에너지의 양(Quantity)이 아닌 것이다.

그럼 LNG 냉열의 이용형태는?

LNG 냉열은 일이나 열 형태의 에너지로 이용이 가능하다. 즉, 일의 이용에는 LNG로부터 전기를 얻는 '직접팽창식 혹은 랭킨사이클 냉열발전' 공정을 들 수 있고, 극저온의 열을 이용하는 것은 냉동창고, CO_2 액화, 공기액화분리 공정 등이 있다. 여기서 열 형태의 이용공정의 냉열이용량은 유효 일량인 엑서지양이 91.74 kcal 적용되나, 열 형태의 이용 냉열량은 LNG의 기화에 필요한 에너지양으로 제1 법칙에 근거한 160 kcal 이 되는 것이다. 일이 아닌 열 형태의 냉열이용은 에너지 이용량이 훨씬 증가하는 것을 의미한다.

LNG 생산기지에서 저온 열이용 공정의 예를 들자면 LNG 기화기를 들 수 있다. 해수기화기(ORV)

나 수중연소기화기(SMV)는 LNG의 엑서지양 만큼만을 주입하는 것이 아니라, 기화에 필요한 열에너지만큼 해수나 천연가스를 연소시켜 열을 공급하는 것으로 알 수 있을 것이다. 역으로 얘기하면 해수가 저온 열을 가져오는 것으로, 냉열이용 공정도와 동일하게 열교환 유체가 엑서지양이 아닌 저온 열에너지(Energy)를 동일량 회수하여 오는 것이다.

결론

LNG 냉열이용 공정들의 냉에너지(Energy) 이용량 추정에 엑서지양을 기준으로 분석하는 것은 큰 오류를 범하는 것이며, 에너지값이 아닌 엑서지값을 기준하여 LNG 냉열량 회수 이용의 무용론이 대두되는 것은 매우 안타까운 일이다.

그러므로 우리는 이러한 엑서지의 명확한 인식과 함께, 이미 액화비용을 지불하고 도입하였음에도 불구하고 바다에 버려지고 있는 액화천연가스(LNG)의 안전 공급에 영향을 받지 않는 범위 내에서 극저온 열(Cold-heat) 에너지를 회수하여 이용하는 노력을 하는 것은 에너지 빈국으로서 매우 바람직하고 뜻깊은 일일 것이다.

참고문헌

1. Tsatsaronis, G. and Czesla, F., Exergy Analysis of Simple Processes, Energy, Energy System Analysis and Optimization, Vol.1.
2. Sonntag, R.E., Fundamentals of thermodynamics, pp. 359-385.
3. Gundersen, T., 2011, An Introduction to the Concept of Exergy and Energy Quality, Energy and process Engineering, Version 4. 