

발전 플랜트의 엑서지 해석으로부터 발전량 및 발전효율 최적화



김덕진

djkim@koiptc.com

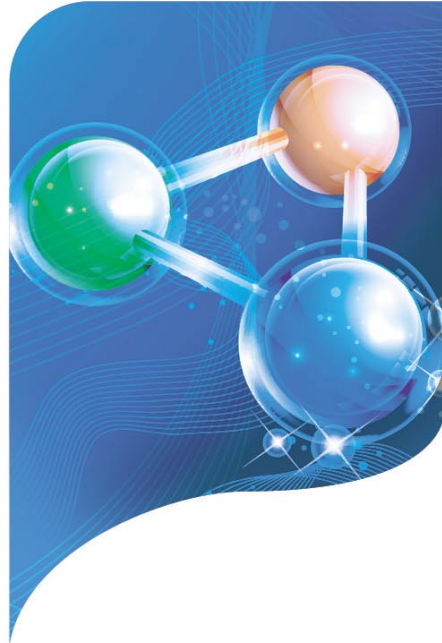
중앙대학교 기계공학과 졸업
(주)IPTC 차장

1. 소개

발전시스템의 성능은 증기터빈 입구 즉 주증기의 온도와 압력에 가장 큰 영향을 받는다. 위의 원리는 주증기의 온도와 압력을 알면 발전시스템의 거시적인 성능을 파악할 수 있다는 것을 알려준다. 그러나 일반적으로 주증기의 온도와 압력으로부터 엔탈피(Enthalpy)를 구할 뿐이며 그 엔탈피로부터는 어떠한 정보도 얻을 수 없다.

엑서지(Exergy)는 어떤 유체가 주어진 상태에서부터 환경상태로 변할 때까지 얻을 수 있는 최대 유용 일이며, 엑서지율(Exergy ratio)은 엑서지와 엔탈피의 비이다. 엑서지의 개념은 19세기말 Gouy, Stodola 등에 의해 손실일에 관한 연구^[1]로부터 시작되었으며, 1956년 Rant^[2]는 주어진 에너지에서 일로 변환 가능한 부분을 엑서지 그리고 일로 변환 불가능한 부분을 아너지(Anergy)라고 제안하였다. Baehr^[3]는 이 엑서지를 열시스템에 적용하여 엑서

Plant Technology



지 손실의 근원과 그 크기를 산정할 수 있는 수식을 상세하게 유도하였고, Hussein 등^[4]은 열기관에 대한 엑서지 효율을 연구하였으며, 열경제학(Thermoeconomics) 및 엑서지경제학(Exergoeconomics)의 응용에 관하여 Robert^[5] 및 Tsatsaronis^[6] 등의 다양한 연구가 있다.

한편 Kim은 공기^[7] 및 증기^[8]의 T-s 선도상에 엑서지와 엑서지율을 작도하여 수식적으로만 이해되어 왔던 개념을 차트화시켜 이해의 편의를 도모한 바 있으며, 열역학적인 성능과 경제학적인 비용을 함께 해석하는 열경제학 분야에서 비용배분(Cost allocation), 비용해석(Cost analysis), 비용최적화(Cost optimization)에 대한 새로운 방법론^[9]을 제시한 바 있다.

이와 같이 엑서지의 활용 분야는 광범위하며, 증기터빈 시스템에서 엑서지는 최대발전량에, 엑서지율은 최대발전효율에 비례한다라는 선행 연구^[9]를 수행한 바 있다. 본 기사에서는 주증기의 온도 및 압력으로부터 엑서지와 최대발전량, 그리고 엑서지율과 최대발전효율을 파악할 수 있는 차트를 개발해 보았다.

2. 엑서지 및 엑서지율의 정의

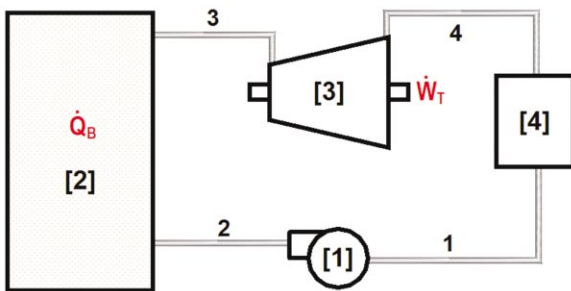
엑서지(Exergy)는 어떤 주어진 상태의 에너지원이 환경상태와 열역학적 평형상태에 도달할 때까지 얻을 수 있는 일의 최대양이다. 이것은 핀치기법과 함께 공정진단 및 시스템 최적화설계에서 중요한 인자이며, 발전, 열병합, 열교환, 냉동, 열펌프, 냉열, 화학 등의 다양한 분야에서 활발히 적용되고 있다. 엑서지율(Exergy ratio)은 엑서지와 그 유체가 보유한 에너지의 비로, 보유한 에너지의 유용도를 나타낸다.

엑서지는 물리적엑서지, 화학적엑서지, 속도엑서지, 위치엑서지 등으로 이루어져 있다. 속도엑서지와 위치엑서지는 물리적엑서지에 비해 상당히 작으므로 일반적인 열적시스템에서 생략 가능하며, 증기는 단일원소로 이루어져 있으므로 화학적엑서지는 0이다. 따라서 정상상태의 시스템에서 물 및 증기에 대한 엑서지와 엑서지율의 수식은 다음과 같다.

$$e_x = h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{e_x}{h - h_0} = 1 - \frac{T_0 \cdot (s - s_0)}{h - h_0} \quad (2)$$

여기서 e_x 는 비엑서지, h 는 비엔탈피, T 는 절대온도, s 는 비엔트로피, ϵ 는 엑서지율, 그리고 하첨자 0는 환경상태를 뜻한다.



[그림 1] Schematic diagram of simple rankine cycle

3. 최대발전량 및 최대발전효율

그림 1의 개략도와 같이 급수펌프, 보일러, 터빈, 복수기로 이루어진 단순랭킨 사이클을 고려할 때, 각 구성기기의 에너지균형 및 발전효율은 다음과 같다.

$$\dot{W}_P = h_1 - h_2 \quad (3)$$

$$\dot{Q}_B = h_3 - h_2 \quad (4)$$

$$\dot{W}_T = h_3 - h_4 \quad (5)$$

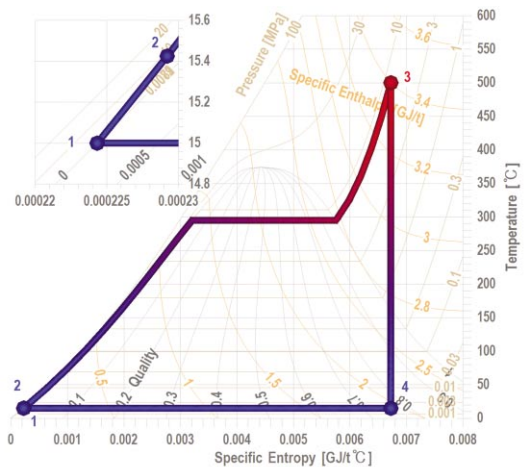
$$\dot{Q}_C = h_1 - h_4 \quad (6)$$

$$\eta_{sys} = (h_3 - h_4) / (h_3 - h_2) \quad (7)$$

위 시스템에서 이상적인 최대발전량은 그림 2의 상태 해석과 같이 터빈효율이 100% 그리고 복수기의 냉각온도가 환경상태의 온도와 같을 때이다. 이 경우 h_1 및 h_2 는 환경상태의 엔탈피 h_0 로 대체할 수 있고, 환경온도 T_0 에서의 복수기의 열방출량 $h_4 - h_1$ 은 엔트로피 정의와 터빈의 등엔트로피 과정으로부터 $T_0 \cdot (s_3 - s_0)$ 로 대체할 수 있다. 따라서 최대발전량 \dot{W}_{max} 및 최대발전효율 η_{sys} 은 다음과 같다.

$$\dot{W}_{max} = h_3 - h_0 - T_0 \cdot (s_3 - s_0) \quad (8)$$

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_0(s_3 - s_0)}{h_3 - h_0} \quad (9)$$



[그림 2] System analysis on T-s diagram

식(8)의 최대발전량 수식은 식(1)의 엑서지 수식과, 식(9)의 최대발전효율 수식은 식(2)의 엑서지율 수식과 서로 같다. 따라서 터빈입구의 엑서지는 최대발전량을 그리고 엑서지율은 최대발전효율을 대표한다고 할 수 있다.

4. T-s 및 T-P 선도 상에서의 표현

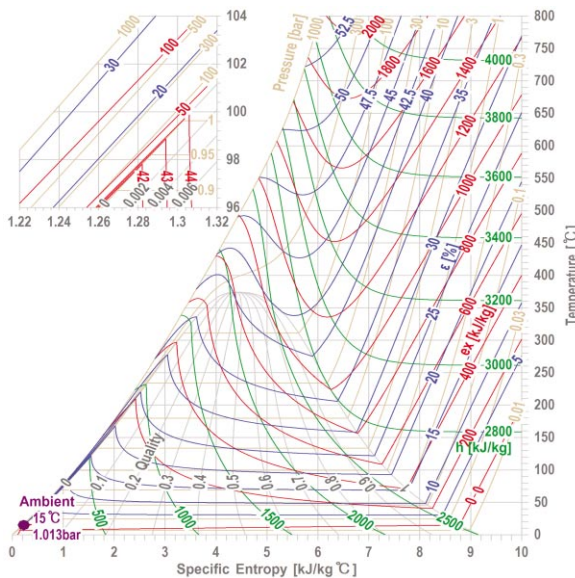
그림 3에는 온도-엔트로피 차트 상에서 비엔탈피(초록색), 식(1)의 비엑서지(빨간색) 및 식(2)의 엑서지율(파란색) 선이 도시되어 있으며, 비엔탈피 선도와 비엑서지 선도의 경향이 전혀 다름을 볼 수 있다. 그림 3에서 엑서지 선도 및 엑서지율 선도의 특징은 극점이 존재하는 포물선이라는 것이다. 이 극점을 서로 연결하면 그림 4와 같이 도시된다. 이 선도로부터 발전량 최적화와 발전효율 최적화는 서로 다르다는 것을 이해할 수 있으며, 발전 시스템 최적화를 위해서는 주증기 온도 및 압력이 그림 4에서 도시된 최대 엑서지 선도와 최대 엑서지율 선도 사이에 위치해야 함을 알 수 있다. 즉 그림 4에 도시된 Supercritical thermal power와 Solar thermal

power의 주증기 압력은 최적화와 상당한 거리가 있다는 것을 에너지 시스템 비전공자라도 한눈에 파악할 수 있다.

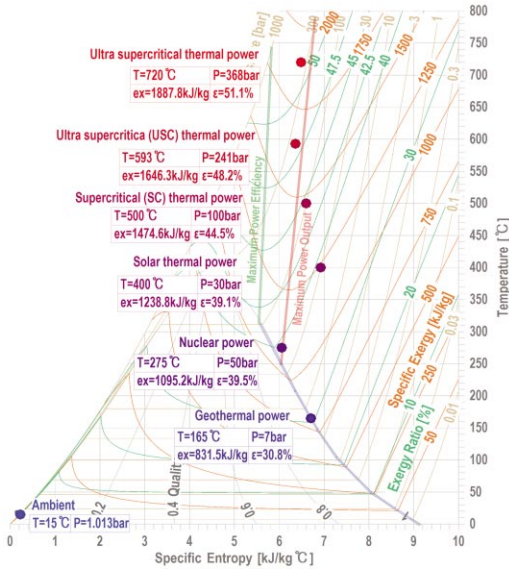
온도 약 250℃ 이하에서는 최대발전량과 최대발전효율이 정확히 서로 일치함을 볼 수 있다. 즉 유체가 물일 경우 주증기 온도가 약 250℃ 이하이면 시스템 최적화는 주증기가 건도 1인 상태일 때 얻을 수 있음을 파악할 수 있다.

그림 4의 엑서지율에서 볼 수 있듯이 물은 고온에서 효율적인 작동유체이지만 70℃~400℃의 중저온 사이클에서는 그러하지 못하다. 유기랭킨 사이클(ORC: Organic Rankine Cycle)은 화력발전 시스템과 그 구성은 동일하지만 작동유체로 유기혼합물(Organic compound)을 사용하며 중저온에서 그 효율이 높다. 유기혼합물로 프레온 계열의 냉매와 프로판 등의 탄화수소계 물질 등이 주로 사용되고 있다. 유기혼합물의 엑서지와 엑서지율 선도가 차트화 된다면 증기 사이클 선도와 비교하여 그 최적화의 개념을 보다 쉽게 이해할 수 있을 것이다.

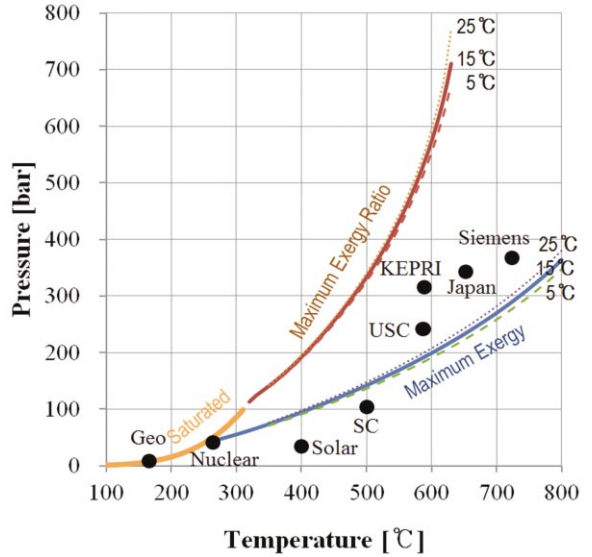
그림 5에는 온도-압력 선도 상에서 최대 엑서지 선도와 최대 엑서지율 선도가 도시되어 있다. 화력발전(SC) 및 태양열발전(Solar)을 살펴보면 발전량은 최적화가 가깝지만 사이클 효율은 최적화되지 못했음을 볼 수 있다. 만약 온도를 높인다면 최적화와 더욱 멀어지게 되므로, 압력을 집중으로 높여야 함을 이해할 수 있다. 초초임계발전(USC)에서 터빈입구의 상태는 593℃, 241 bar 이상이다. 우리나라에서는 1993년 전력연구소(KEPRI)를 중심으로 593℃, 310 bar의 발전소를 건설한 바 있고, 최근 일본에서는 650℃, 343 bar의 발전소를, 현재 영국과 독일의 Siemens에서는 720℃, 368 bar의 발전소를 계획 중에 있다. 이 발전소들 모두 최대 엑서지량과 최대 엑서지율 사이에 위치 즉 최적화된 시스템이라고 판단할 수 있다. 원자력발전(Nuclear) 및 지열발전(Geo)의 주증기의 상태는 건도 1인 포화상태이므로 최적화되었다고 결정지을 수 있다.



[그림 3] Specific exergy and exergy ratio chart



[그림 4] Maximum power output and maximum power efficiency on T-s chart



[그림 5] Maximum power output and maximum power efficiency on T-P chart

5. 결론

엑서지는 100여 년 전부터 열역학 분야에서 제시되어 온 상태량이며 그 활용 또한 광범위하다. 엑서지 및 엑서지율은 T-s 및 h-s 선도 상에 표현될 수 있으며, 본 기사를 통하여 작동유체가 물일 경우 최대 엑서지량은 최대발전량과 그리고 최대 엑서지율은 최대발전효율과 서로 비례한다는 수식으로부터 발전 시스템의 최적화를 위한 주증기의 온도-압력 차트를 개발하였다.

개발된 차트를 통하여 발전량 최적화와 발전효율 최적화는 서로 다르다는 것을 파악할 수 있었고, 이 두 가지를 동시에 구현하기 위해서는 주증기의 온도 및 압력이 최대발전량 곡선과 최대발전효율 곡선 사이에 위치해야 함을 이해할 수 있었다. 또한 작동유체가 물일 경우 주증기 온도 약 250°C 이하에서는 건도 1인 포화상태가 최적화된 조건임을 파악하였다.

발전 플랜트의 최적화는 전문가도 이해하기 힘든 개념이지만 본 기사에서 제시한 차트를 통하여 비전문가들도 발전 플랜트의 최적화를 예측할 수 있으며, 향후

다양한 유체에 대해 T-s 선도, h-s 선도 및 T-P 선도 상에 그 최적화 차트를 개발해 나아갈 예정이다.

참고문헌

1. Adrian, B., 1988, Advanced Engineering Thermodynamics, John Wiley & Sons, pp. 114.
2. Rant, Z., 1956, Exergie, einneues Wort fur Technische Arbeitsfähigkeit, Forsch, Arb. Geb. Ing. Wes., 22, pp. 36-37.
3. Baehr, H. D., 1978, Thermodynamik, 4th ed. Springer, Berlin.
4. Hussein, M., Wood, R. J., O'Callaghan, P. W. and Probert, S. D., 1980, Efficiencies of Exergy Transductions, Applied Energy, Vol. 6, p. 371.
5. Robert, B. E., 1980, Thermoeconomic Solution and Exergy Analysis, Energy, Vol. 5, pp. 805-821.

6. Tsatsaronis, G. and Winhold, M., 1985, Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy-Conversion Plants, Energy, Vol. 10, No. 1, pp. 81-94.
7. Kim, D. J., 2009, Comprehension of Exergy and Exergy Ratio on the T-s Chart of Air, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 509-515.
8. Kim, D. J., 2010, Comprehension of Exergy on the T-s Chart of Steam, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 14-19.
9. Kim, D. J., 2010, A new thermoeconomic methodology for energy systems, Energy, Vol. 35, No. 1, pp. 410-422. 