

물의 T-s 선도 상에서 엑서지 및 엑서지율의 고찰

김 덕 진[†], 김 덕 봉^{*}

에너코스, *광주과학기술원

Consideration of Exergy and Exergy Ratio on T-s Chart of Water

Deok-Jin Kim[†], Duck-Bong Kim^{*}

ABSTRACT: Exergy is the amount of reversible work obtainable when some matter is brought to a state of thermodynamic equilibrium with ambient. This exergy is availability or useful work induced from carnot cycle, and this can calculate the irreversible loss work which occurs within any thermal or power cycle. The exergy ratio is the value of exergy divided by enthalpy of ambient reference, where the quality of energy or enthalpy in substances is evaluated by exergy ratio. Exergy is very important in optimal design method of thermal system or each component, and the value of exergy at given state is calculated by equation. Here, designer can easily understand and find the value of enthalpy because enthalpy is graphically drawn in chart, however exergy did not. In this paper, exergy and exergy ratio of air were drawn on temperature-entropy chart, and we wish to this chart is a help to design, analysis and education.

Key words: Water(물), Vapor(증기), Exergy(엑서지), Exergy ratio(엑서지율), Lost work(손실 일), T-s chart(온도-엔트로피 선도), Optimal design(최적화설계)

1. 서 론

엑서지(Exergy)는 어떤 주어진 상태의 에너지원이 환경상태와 열역학적 평형상태에 도달할 때까지 최대한 얻을 수 있는 일의 양이다. 이 엑서지는 핀치기법(Pinch technology)과 함께 공정진단 및 시스템 최적화 설계에서 매우 중요한 인자이며, 발전, 열병합, 열교환, 냉동, 열펌프, 냉열, 화학 등의 다양한 분야에서 활발히 적용되고 있다. 엑서지율(Exergy ratio)은 엑서지와 그 유체가 보유한 에너지와의 비로써, 그 에너지의 유용도를 나타낸다.

엑서지의 개념은 19세기말 Gouy, Stodola 등에

의해 손실일에 관한 연구로부터 시작되었으며, 1956년 Rant는 주어진 에너지에서 일로 변환 가능한 부분을 엑서지(Exergy) 일로 변환 불가능한 부분을 아너지(Anergy)라는 이름을 제안하였다. Baehr는 이 엑서지를 열적시스템에 적용하여 엑서지 손실의 근원과 그 크기를 산정할 수 있는 수식을 상세하게 유도하였고, Hussein 등은 열기관에 대한 엑서지 효율을 연구하였으며, 열역학적인 경제성평가의 응용에 관하여 Robert 및 Tsatsaronis 등의 다양한 연구가 있다.

최적화 설계에서 엑서지 해석의 목적은 각 구성기별 엑서지 파괴 또는 손실을 계산하고, 개선 가능한 요소를 찾아 시스템의 성능향상을 이루는데 있다. 한편, 더욱 중요한 요인이라 할 수 있는 것은 수식을 통한 엑서지의 계산이 아니라, Sama 등이 제안한 13가지의 엑서지 분석 가이드 라인을 통해 알 수 있듯이 엑서지에 대한

[†] Corresponding author

Tel.: +82-61-793-2730; fax: +82-61-794-2730

E-mail address: enecos@hotmail.com

개념을 설계자가 가지고 설계 초기부터 최적화에 대한 방향을 올바르게 갖추어 나가는 것이다.

일반적으로 개념 또는 직감이라는 것은 상당한 경험이 있어야 이루어 질 수 있다. 즉 설계 입문자는 설계의 직감에 대해 이해하기 힘들 수 있으며, 더 나아가 엑서지의 개념에 대해 정립하지 못할 수도 있을 것이다. 엑서지의 개념 및 직감을 향상시킬 수 있는 가장 쉬운 방법은 온도, 압력, 비체적, 엔탈피, 엔트로피를 선도를 통하여 시각적으로 쉽게 이해할 수 있듯이, 선도 상에서 엑서지 및 엑서지율을 시각적으로 이해하는 것이라 여겨진다.

따라서 본 연구에서는 물-증기에 대한 엑서지 및 엑서지율을 T-s 선도상에 표현하고, 선도를 통하여 그 개념 및 최적화 설계의 초기 방향을 도모하고자 한다.

2. 엑서지 및 엑서지율의 수식

엑서지는 물리적, 화학적, 운동 및 위치 엑서지 등 여러 요소의 합으로 이루어진다. 여기서 운동 ($V^2/2$) 및 위치 (gZ) 엑서지 등은 그 값이 상대적으로 매우 작으므로 열적시스템 해석에서는 일반적으로 생략한다.

물리적 엑서지(Physical exergy)는 고열원 T 의 열원으로부터 열량 Q 를 받아 T_0 의 환경에 열을 방출하는 카르노(Carnot) 사이클에서 생산할 수 있는 최대일 W_{max} 이며, 다음의 수식과 같다.

$$W_{max} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q \quad (1)$$

여기서 하첨자 0는 환경상태를 그리고 T 는 절대온도를 뜻한다.

이 수식과 개방계(Open system)에 대해 $-dQ = dh = C_p dT$ 의 관계식을 적용하면 다음과 같다.

$$e_X^{phy} = \int_T^{T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2)$$

식(2)에서 $h - h_0$ 는 고열원으로부터 받은 열량, $T_0(s - s_0)$ 는 아너지, 그리고 e_X^{phy} 는 물리적 엑서지이며, 주어진 상태 T, P 에서 제한적 사상태

T_0, P_0 로 변할 때까지의 유용에너지이다.

한편, 화학적엑서지는 구성물질의 화학반응 또는 물비 변화에 따른 유용에너지로서 작동유체가 물인 경우 이 값은 0이다. 따라서 물의 엑서지 e_X 값은 식(2)로 계산한다.

한편, 엑서지율 ε 은 주어진 상태에서의 에너지에 대한 유용한 일의 비로서, 이 값이 에너지의 질 또는 가치를 나타내며, 수식은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{e_X}{h - h_0} = 1 - \frac{T_0(s - s_0)}{h - h_0} \quad (3)$$

3. 엑서지 및 엑서지율의 작도

엑서지 및 엑서지율은 환경상태에 따라 그 값이 변하기 때문에 상태량이 아니다. 이로 인해 차트에서는 이 값들을 표현할 수 없다. 그러나 소프트웨어적으로 표현되는 차트는 사용자의 환경상태에 따라 실시간 화면상에 표현해 주므로, 차트상에서 이 값들을 상태량화 할 수 있다.

Fig. 1에는 온도 $0^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$, 압력 $0.01 \text{ bar} \sim 1000 \text{ bar}$, 엔트로피 $0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \sim 10 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ 의 범위에서 엔탈피, 엑서지, 그리고 엑서지율이 출력되어 있다. 엔탈피, 엔트로피를 계산하기 위해 Propath ver.11.1⁽¹⁾의 물성치 코드를 적용하였으며, 15°C , 101.325 kPa 의 환경상태를 기준으로 엑서지는 식(2), 엑서지율은 식(3)으로 계산하였다.

4. 검토 및 고찰

물-증기 시스템에는 다양한 종류가 있으며, 그 중 가장 대표적인 시스템이 화력발전이다. 따라서 Fig. 1에서 선도로 표현된 엑서지와 엑서지율의 개념을 화력발전에 적용해 보고자 한다.

4.1 온도 변화에 따른 고찰

전체적인 온도에 대해 살펴보면 압력이 일정할 경우 온도가 증가할수록 엑서지와 엑서지율은 증가함을 볼 수 있다. 엑서지가 증가할수록 생산할 수 있는 전력의 양이 증가하고 또한 엑서지율이 증가할수록 발전효율이 증가하므로 최적화설계를 위해서는 보일러에서 가능한 작동유체의 온도를 높여야 함을 알 수 있고, 이것은 보일러 입구온

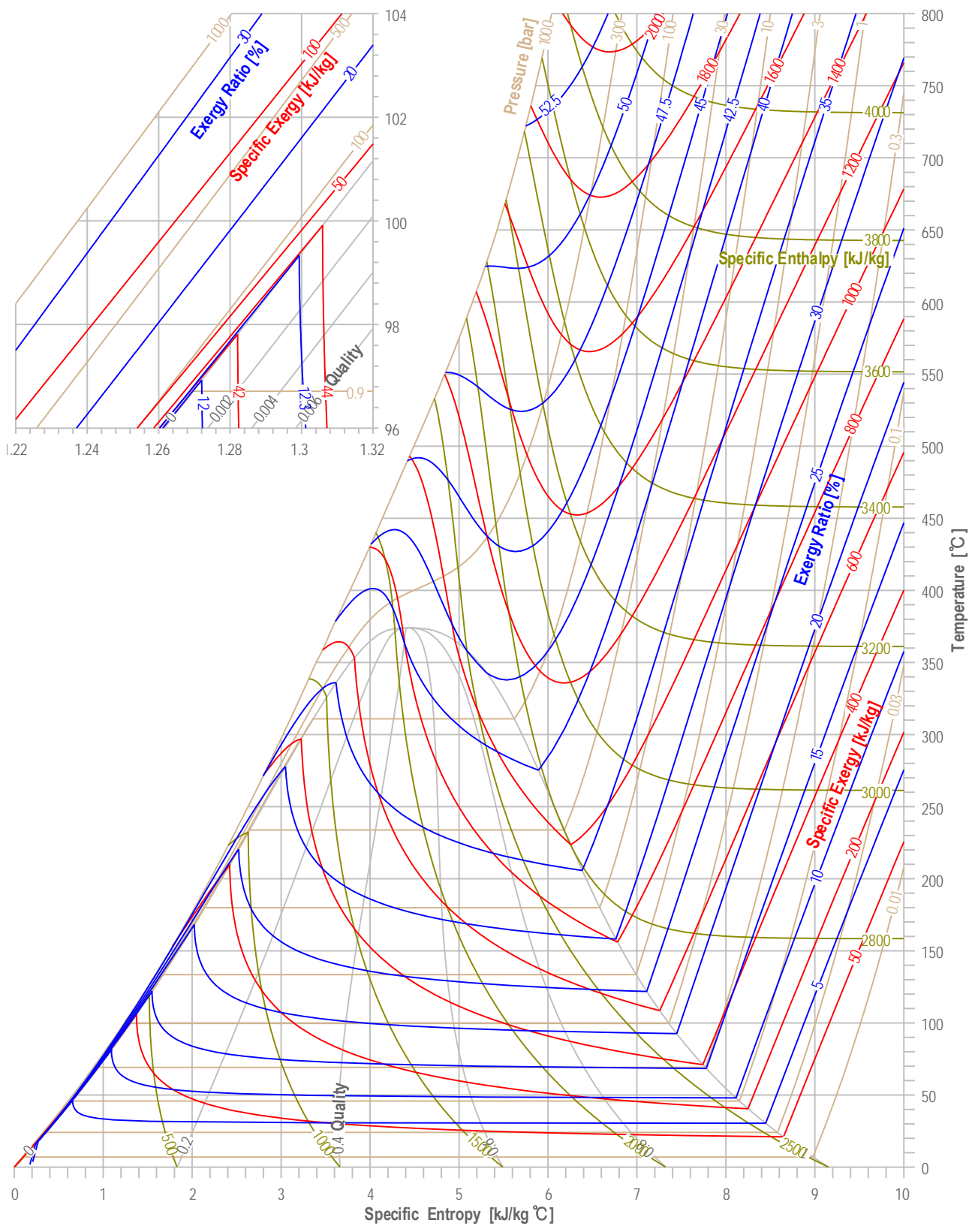


Fig. 1 Exergy and exergy ratio on T-s diagram.

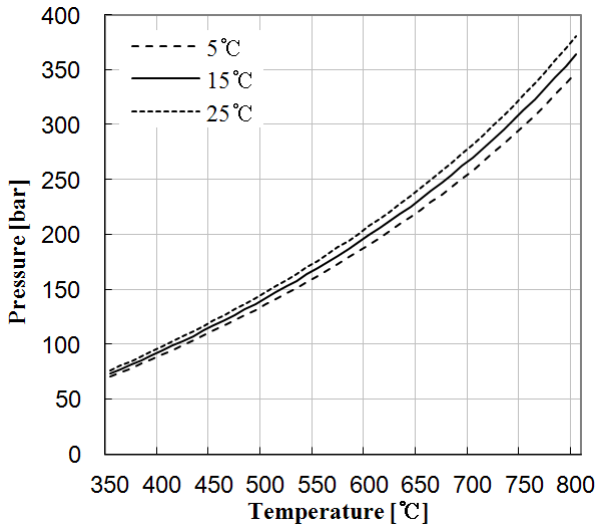


Fig. 2 State at maximum exergy.

도를 높이고, 보일러 내부에서 엑서지의 손실 또는 파괴를 줄여야 한다는 뜻과 같다.

4.2 압력 변화에 따른 고찰

Fig. 1의 T-s 선도에서 특징적인 것은 엑서지와 엑서지율 선도가 포물선 형태이라는 것이다. 즉 온도가 일정할 경우 압력의 증가에 따라 엑서지와 엑서지율은 증가하나, 포물선의 극값에서부터 감소함을 볼 수 있다. Fig. 2에는 주어진 온도에서 최대의 엑서지량을 갖는 압력값이 도시되어 있고, Fig. 3에는 주어진 온도에서 최대의 엑서지율을 갖는 압력값이 도시되어 있다. 이 특징으로부터 주어진 온도에서 최적화할 수 있는 시스템의 압력 범위를 산정할 수 있고, 그 범위는 최대 엑서지량을 갖는 압력과 최대 엑서지율을 갖는 압력 사이임을 파악할 수 있다.

4.3 초초임계압 화력발전

일반적으로 화력발전에서 터빈 입구의 증기 상태는 대략 500°C, 100 bar 정도이다. 이 온도와 압력을 Fig. 1에 적용하면, 엑서지는 1475 kJ/kg, 엑서지율은 44.5%이다. Fig. 1에서 이해할 수 있듯이 압력 또는 온도를 증가시키면 엑서지량과 엑서지율의 향상을 도모할 수 있으며, 이 직감으로부터 초초임계(Ultra Super Critical, USC) 발전을 구상할 수 있다. 초초임계 발전소는 주증기 또는 재열증기 온도가 593°C 이상이고 증기압력

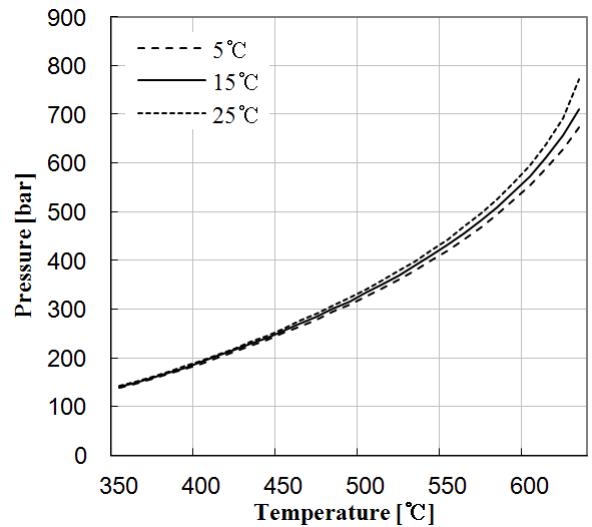


Fig. 3 State at maximum exergy ratio.

이 241 bar 이상인 고효율 저공해 발전소이다. 이 온도와 압력에서 엑서지는 1646 kJ/kg, 엑서지율은 48.2%이며, 기존에 비해 성능이 향상될 것임을 간단히 파악할 수 있다.

초초임계발전은 1980년대 상용화되기 시작하였으며, 우리나라에서는 1993년 전력연구소(EPRI)를 중심으로 593°C, 310 bar의 발전소를 건설하였다. 이 상태에서의 엑서지는 1631 kJ/kg, 엑서지율은 48.7%이다. 최근 일본에서는 650°C, 343 bar의 발전소를 연구한 바 있으며, 이 상태에서의 엑서지는 1744 kJ/kg, 엑서지율은 49.9%이다. 현재 영국과 독일의 Siemens에서는 720°C, 368 bar의 발전소를 연구 중에 있으며, 이 상태에서의 엑서지는 1888 kJ/kg, 엑서지율은 51.1%이다.

위의 상태들을 Fig. 1에 도시하면, 모두 최대 엑서지량을 갖는 압력과 최대 엑서지율을 갖는 압력 사이에 존재함을 볼 수 있다. 결론적으로 T-s 선도상에 표현된 엑서지와 엑서지율을 통해 초초임계발전의 성능을 간단하게 파악할 수 있었고, 차트상으로도 파악할 수 있듯이 더 높은 온도와 더 높은 압력을 갖는 발전소의 기술개발이 필연적으로 진행될 것임을 알 수 있다.

4.4 태양열발전

태양열발전(Solar thermal power)은 집광형식에 따라 trough, tower, dish형이 있으며, 증기터빈 입구 온도는 일반적으로 300°C~500°C 정도이다. Fig. 1에서 300°C 영역에서 엑서지율은 약

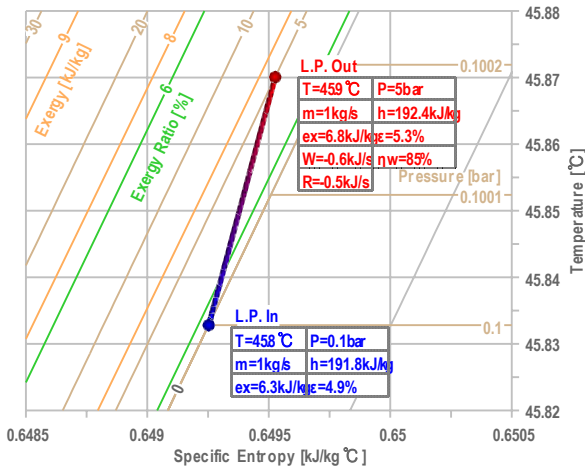


Fig. 4 Analysis of pump.

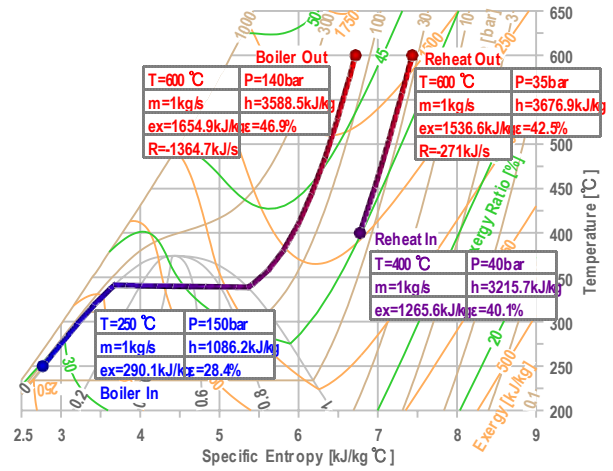


Fig. 5 Analysis of boiler.

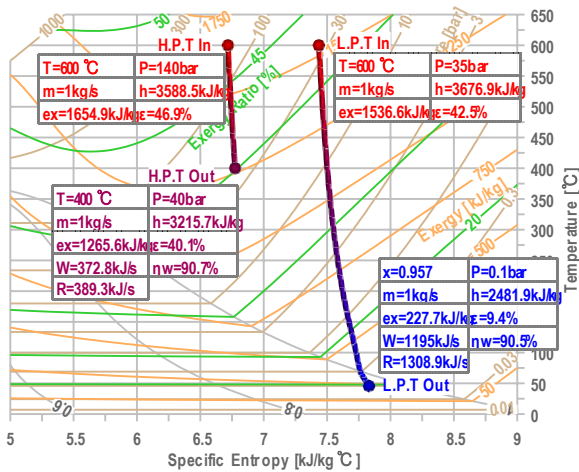


Fig. 6 Analysis of turbine.

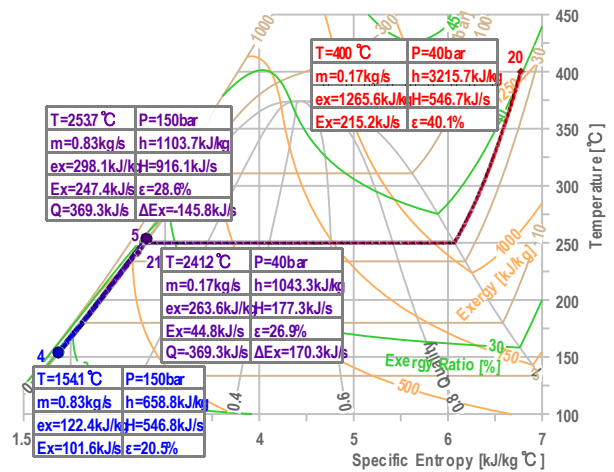


Fig. 7 Analysis of heater.

30% 정도로, 응축기에서 환경으로 버리는 엑서지를 고려하면 실제효율은 이보다 낮아지게 된다. 터빈입구의 온도 및 압력 상승에 따라 발전효율 및 발전량은 크게 개선되는 바, 지속적인 기술개발이 필수적이다.

4.5 지열발전

지열발전(Geothermal power)은 포화액의 형태로 지중에 존재하는 지열수를 이용하는 시스템으로, 통상 고온수(약 170°C)의 경우 포화증기를 직접 터빈으로 통과시키는 플래쉬 방식으로, 중·저온수(약 100°C) 또는 이용이 불가능한 저압증기의 경우 열교환기를 통해 끓는점이 낮고 저온에서도 높은 기체압력을 보이는 2차 순환유체를 이용한 바이너리 방식으로 운전하고 있다. 이 지

열발전에서의 터빈입구온도는 지열수보다 더 낮으며, Fig. 1의 선도 상에서 엑서지율은 약 20%~30% 정도이다. 응축기에서 환경으로 버리는 엑서지를 고려하면, 실제효율은 상당히 낮을 것임을 예상할 수 있다.

4.6 원자력발전

원자력발전(nuclear power generation)은 우라늄 또는 플루토늄을 연료로, 경수 또는 중수를 감속재와 냉각재로 사용한다. 이외의 부분은 기본적으로 화력발전과 같으나 터빈 입구의 증기온도는 화력발전에 비해 상당히 낮다. 터빈 입구의 온도 및 압력이 275°C, 10 bar일 경우, 그 엑서지율은 33% 정도이며, 발전효율은 화력발전에 비해 낮음을 예상할 수 있다.

4.7 구성기기 해석

Fig. 4~Fig. 7에는 어떤 화력발전소에서의 펌프, 보일러, 터빈, 그리고 오픈히터를 해석한 결과가 도시되어 있다.

Fig. 4의 입구상태 건도 0, 압력 0.1 bar 그리고 출구조건 5 bar 인 효율 85%의 펌프를 해석하면, 입구의 엑서지는 6.3 kJ/kg, 엑서지율은 4.9% 그리고 출구의 엑서지는 6.8 kJ/kg, 엑서지율은 5.3%로 계산된다. 0.6 kJ/kg의 전력을 투입하여 그 중 0.5 kJ/kg은 작동유체의 엑서지로 변환 되었고, 0.1 kJ/kg은 파괴된 엑서지 즉 손실일로 되었다. 액체인 물의 상태에서 엑서지와 엑서지율은 압력선도와 거의 평행함을 볼 수 있다.

Fig. 5에는 입구상태 250°C, 150 bar, 출구상태 600°C, 140 bar, 재열기 입구상태 400°C, 40 bar, 재열기 출구상태 600°C, 35 bar인 보일러를 해석한 결과가 도시되어 있다. 위에서 설명한 바와 같이 보일러 출구상태의 압력과 온도가 높을수록, 엑서지와 엑서지율은 증가함을 선도상으로 확인할 수 있고, 엑서지율 40.1%의 작동유체를 재열하면 그 엑서지율도 높아지고 또한 엑서지량도 상승함을 알 수 있다. 즉 발전량과 발전효율이 상승할 것임을 예상할 수 있다.

추기 재열하는 초초임계발전을 Fig. 5의 형태로 Fig. 1에 최대 엑서지율을 갖는 영역 그리고 최대 엑서지량을 갖는 영역에 각각 도시하여보면, 전자는 후자에 비해 엑서지량은 비슷하지만 엑서지 효율이 더 높음을 볼 수 있다. 따라서 초초임계발전 기술은 최대 엑서지율을 갖는 영역으로 개발되어야 할 것으로 파악된다.

Fig. 6에는 고압 및 저압 터빈을 해석한 결과가 도시되어 있다. 작동유체가 터빈을 통과하면서 그 엑서지율이 낮아지는 이유는 식(3)에서 알 수 있듯이 전기생산으로 인해 엑서지는 점점 감소하지만, 아너지는 변하지 않기 때문이다. 따라서 효율이 높은 터빈일수록 터빈 출구의 엑서지율은 낮아지게 된다.

Fig. 6에서 터빈 출구의 엑서지율은 9.4%이다. 즉 100%의 에너지 중에서 최대 생산 가능한 전력은 9.4%이나, 경제적 측면에서 전력 생산의 실현성이 낮은 숫자임을 판단할 수 있다. 따라서 응축기를 통해 보유열량의 90.6%인 아너지뿐만 아니라 엑서지 또한 환경으로 방출해야 한다.

Fig. 7에는 터빈에서 추기한 400°C, 40 bar, 0.17 kg/s의 작동유체와 고압펌프 출력 상태인 154.1°C, 150 bar, 0.83 kg/s의 작동유체를 급수가 열기에서 열교환한 결과가 도시되어 있다. 이 가열에서 24.5(=170.3-145.8) kJ/kg의 엑서지 파괴 또는 손실일이 발생하였으며, 최적설계를 위해서는 다수의 추기와 히터로 발생하는 손실일을 최소화 하는 것이다. 추기 0.17 kg/s로 전력을 생산할 수 있으나, 그 전력생산을 포기하고 액체상태의 물과 혼합을 하고 있다. 이와 같이 시스템을 구성하는 이유는 보일러 출구온도를 상승시키기 위해서 이며, 이것은 위에서 설명하였듯이 더 많은 엑서지량과 더 높은 엑서지율을 갖게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 물-증기의 엑서지 및 엑서지율을 T-s 선도 상에서 표현하였고, 이 선도를 이용하여 엑서지와 엑서지율의 개념에 대해 어떤 증기터빈발전을 대상으로 고찰하여 보았다.

선도상에서, 온도가 높을수록 엑서지와 엑서지율은 증가하나 압력이 높아짐에 따라서는 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 즉 선도상에서 엑서지와 엑서지율은 표물선 형태로 표현되었으며, 터빈 입구 상태의 온도와 압력이 엑서지 선도의 극점과 엑서지율 선도의 극점과의 사이에 위치할 때 최적화된 시스템임을 파악하였다. 특히, 상용화된 또는 연구 중인 초초임계발전이 위의 조건에 해당됨을 보였으며, 압력과 온도가 동시에 높을수록 엑서지율이 상승하는 바, 초초임계발전을 넘어서는 기술 개발이 향후 필연적으로 진행될 것으로 파악된다.

T-s 선도의 특징상 액체 상태인 물의 영역을 차트로 표현하기에는 많은 무리가 있었다. 따라서 향후 P-h 선도 상에 엑서지와 엑서지율을 표현하는 연구를 수행할 예정이며, 개발된 차트는 열시스템의 교육, 해석, 설계 등의 분야에서 도움이 될 수 있을 것으로 여겨진다.

참고문헌

1. ROPATH Group, PROPATH: A program package for thermophysical properties of fluids, version 11.1.