

증기의 T-s 선도상에서 엑서지의 이해

김 덕 진[†]

에너코스

Comprehension of Exergy on the T-s Chart of Steam

Deok-Jin Kim[†]

ABSTRACT: Exergy is the amount of maximum work obtainable when some matter is brought to a state of thermodynamic equilibrium with ambient. The exergy is availability or useful work induced from carnot cycle, which can calculate the irreversible loss work that 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 important in optimal design method of thermal system or each component, and the value of exergy at given state is calculated by the equation. System designers can easily understand and find the value of enthalpy, because enthalpy is graphically drawn in chart. However, exergy is not easily understood. In this paper, the exergy and exergy ratio of water and steam were drawn on temperature-entropy chart. We wish to this chart is a help to the design, analysis, and education.

Key words: Water(물), Steam(증기), Exergy(엑서지), Exergy ratio(엑서지율), Optimization(최적화), Thermoconomics(열경제학), Quantity of state(상태량), Property(물성치)

1. 서 론

엑서지의 개념은 19세기말 Gouy, Stodola 등에 의해 손실일에 관한 연구⁽¹⁾로부터 시작되었으며, 1956년 Rant⁽²⁾는 주어진 에너지에서 일로 변환 가능한 부분을 엑서지(Exergy) 그리고 일로 변환 불가능한 부분을 아너지(Anergy)라는 이름을 제안하였다. Baehr⁽³⁾는 이 엑서지를 열시스템에 적용하여 엑서지 손실의 근원과 그 크기를 산정할 수 있는 수식을 상세하게 유도하였고, Hussein 등⁽⁴⁾은 열기관에 대한 엑서지 효율을 연구하였으며, 열경제학(Thermoconomics) 및 엑서지경제학(Exergoeconomics)의 응용에 관하여 Robert⁽⁵⁾

및 Tsatsaronis⁽⁶⁾ 등의 다양한 연구가 있다.

일반적으로 개념 또는 직감이라는 것은 상당한 경험이 있어야 이루어 질 수 있다. 즉 입문자는 설계의 직감에 대해 이해하기 힘들 수 있으며, 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.

선행연구에서 공기에 대한 엑서지 및 엑서지율을 T-s 선도상에 표현⁽⁷⁾하여 그 개념을 도모해 본 바 있다. 본 연구에서는 물(Water) 및 증기(Steam)에 대한 엑서지 및 엑서지율을 온도-엔트로피 선도(T-s chart)상에 표현하고, 선도를 통하여 그 개념 및 최적화 설계(Optimal design)의 초기 방향을 도모하고자 한다.

[†] Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

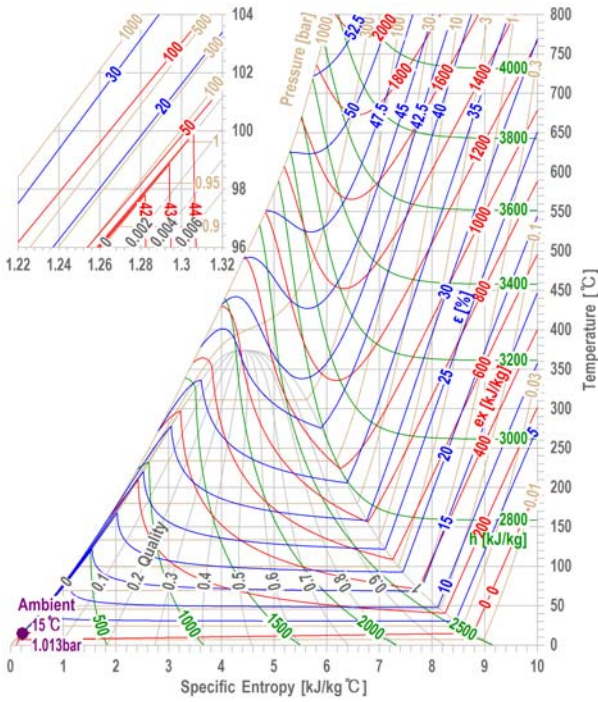


Fig. 1 Exergy and exergy ratio chart.

2. 엑서지 및 엑서지율

엑서지(Exergy)는 어떤 주어진 상태의 에너지원이 환경상태와 열역학적 평형상태에 도달할 때까지 얻을 수 있는 일의 최대양이다. 이 엑서지는 핀치기법(Pinch technology)과 함께 공정진단 및 시스템 최적화설계에서 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.

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

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

$$\varepsilon = \frac{e_X}{h - h_0} = 1 - \frac{T_0(s - s_0)}{h - h_0} \quad (2)$$

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

3. T-s 선도상에서의 작도

엑서지 및 엑서지율은 환경상태에 따라 그 값이 변하며 Combination property라 불린다. 이 값들은 차트상에 표현될 수 없다. 그러나 소프트웨어적으로 표현되는 차트는 사용자의 환경상태에 따라 실시간 화면상에 표현해 주므로, 차트상에서 이 값들을 표현할 수 있다.

Fig. 1에는 온도 0°C~800°C, 압력 0.01 bar~1000 bar, 엔트로피 0 kJ/kg °C~10 kJ/kg °C의 범위에서 엔탈피, 엑서지, 그리고 엑서지율이 출력되어 있다. 엔탈피, 엔트로피를 계산하기 위해 Propath ver.11.1⁽¹⁾의 물성치 코드를 적용하였으며, 15°C, 1.013 bar의 환경상태를 기준으로 엑서지는 식(1), 엑서지율은 식(2)로 계산하였다.

4. 엑서지 및 엑서지율의 이해

4.1 터빈입구의 온도와 압력

Fig. 2에는 초초임계압발전(Ultra supercritical thermal power generation, USC), 초임계압발전(Supercritical thermal power generation, SC), 태양열발전(Solar thermal power generation), 원자력발전(Nuclear power generation), 지열발전(Geo-thermal power generation)에 대한 터빈 입구의 대표적인 온도와 압력이 도시되어 있다. 터빈입구의 온도와 압력이 동시에 높을수록 엑서지가 크고 엑서지율 또한 커짐을 볼 수 있다.

터빈 입구의 상태에 대해 식(1)과 (2)를 적용하면, $h - h_0$ 는 보일러에서 얻을 수 있는 최대 열량, e_X 는 터빈에서의 얻을 수 있는 최대 출력량, 그리고 ε 는 최대 사이클효율이다. 이 값들은 식(3)과 같이 터빈입구의 엑서지는 발전량 w_{net} 을 그리고 식(4)와 터빈입구의 엑서지율은 사이클효율을 대표할 수 있다.

$$e_X = w_{\max} \propto w_{net} = w_T + w_P \quad (3)$$

$$\varepsilon = \eta_{\max} \propto \eta_{cycle} = w_{net} / \Delta h_B \quad (4)$$

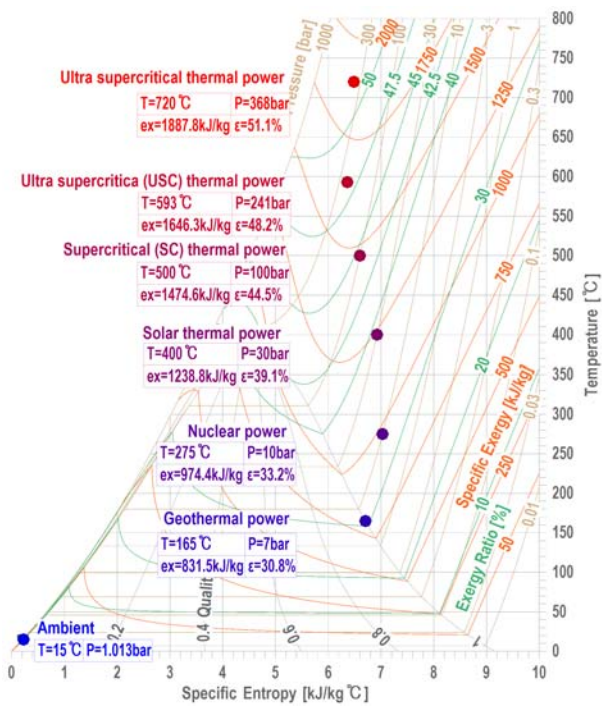


Fig. 2 Inlet state of steam-turbine.

이와 같이 터빈입구의 온도와 압력의 상태는 시스템 해석에서 매우 중요함을 알 수 있다.

4.2 발전량과 사이클효율

Fig. 3에서 도시된 사이클과 같이 보일러, 88% 효율의 터빈, 0.05 bar의 응축기, 85% 효율의 펌프로 이루어진 단순한 증기터빈발전시스템을 고려해 본다. 터빈입구의 온도와 압력에 따라 발전량 w_{net} 과 사이클효율 η_{cycle} 의 계산값이 Table 1에 제시되어 있다.

Fig. 2에서 도시된 6 종류의 발전 시스템은 터빈입구의 온도 T 와 압력 P 이 전혀 다르다. 그러나 Table 1의 발전량과 터빈입구의 엑서지량과의 비 w_{net}/e_x 를 보면 그 값이 비슷함을 볼 수 있

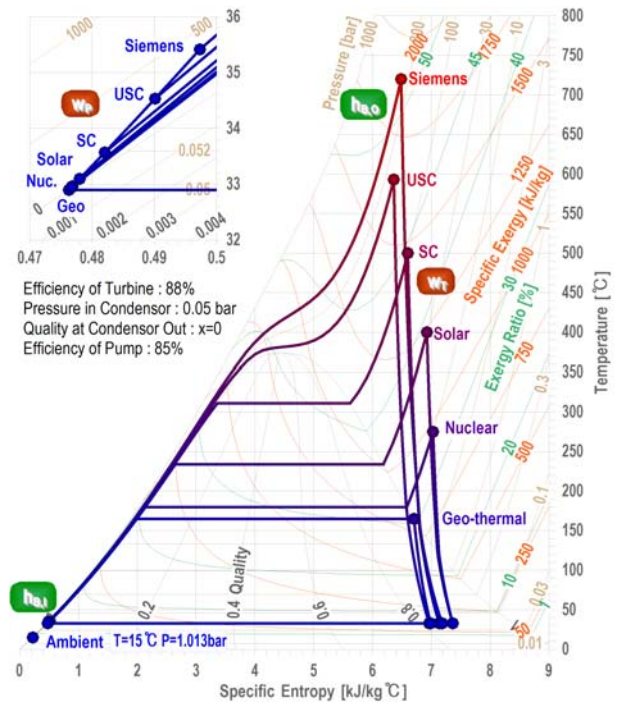


Fig. 3 Each steam cycle of power systems.

다. 따라서 터빈입구 엑서지의 80% 정도를 발전량으로 근사화 시킬 수 있다. 사이클효율과 터빈입구의 엑서지율과의 비 η_{net}/ϵ 를 보면 약 83% 정도로 근사화 시킬 수 있다. 이와 같이 터빈입구의 엑서지와 엑서지율로서 발전시스템의 성능을 Fig. 1의 엑서지 차트를 통하여 직감적으로 파악할 수 있다.

4.3 증기터빈 입구 상태의 최적화

Fig. 1에서 전체적인 온도에 대해 살펴보면 압력이 일정할 경우 온도가 증가할수록 엑서지와 엑서지율은 증가함을 볼 수 있다. 특징적인 것은 엑서지와 엑서지율 선도가 포물선 형태이라는 것이다. 즉 온도가 일정할 경우 압력의 증가에 따라 엑서지와 엑서지율은 증가하나, 포물선의 극

Table 1 Comparison of the values of the turbine inlet state and the overall system

System	T °C	P bar	e_x kJ/kg	ϵ %	Δh_B kJ/kg	w_{net} kJ/kg	η_{cycle} %	w_{net}/e_x %	η_{cycle}/ϵ %
Siemens	720	368	1887.8	51.13	3,574	1521.5	42.57	80.6	83.3
USC	593	241	1646.3	48.21	3,312	1325.8	40.03	80.6	83.0
SC	500	100	1474.6	44.53	3,225	1187.5	36.82	80.6	82.7
Solar	400	30	1238.8	39.08	3,091	983.2	31.81	79.4	81.4
Nuclear	275	10	974.4	33.20	2,860	751.2	26.27	77.1	79.1
Geo-thermal	165	7	831.5	30.81	2,623	630.9	24.05	75.9	78.1

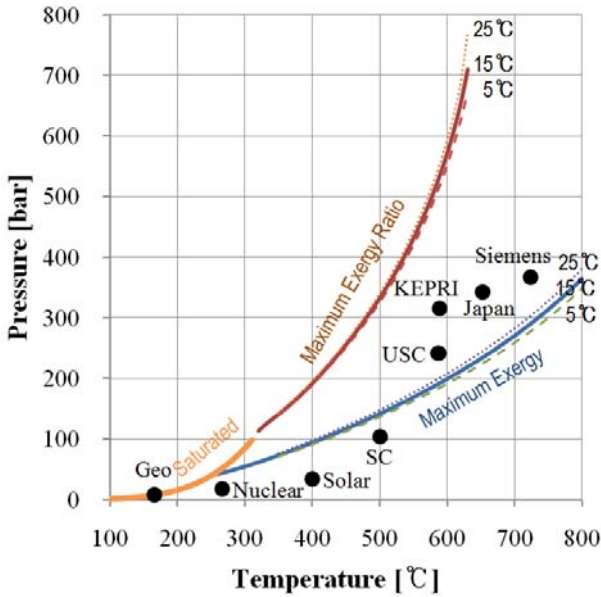


Fig. 4 Optimal values at turbine inlet.

값에서부터 감소함을 볼 수 있다. 엑서지는 최대 출력일을 그리고 엑서지율은 최대효율을 뜻하므로, 그 포물선의 극점은 시스템 최적화의 특징을 뜻한다. Fig. 4에는 Fig. 1에서의 엑서지 선도의 극점과 엑서지율 선도의 극점을 파악한 값이 도시되어 있다. 이 차트로부터 터빈 입구의 최적화된 온도와 압력을 직감적으로 파악할 수 있다.

Fig. 4에서 화력발전(SC), 태양열발전(Solar), 원자력발전(Nuclear)을 살펴보면, 발전량은 최적화에 가깝지만 사이클효율은 최적화되지 못했음을 볼 수 있다. 만약 온도를 높인다면 최적화와 더욱 멀어지게 되므로, 압력을 집중으로 높여야 함을 이해 할 수 있다. 초초임계발전(USC)에서 터빈입구의 상태는 593°C, 241 bar 이상이다. 우

Table 2 Effect on temperature ($P = 100$ bar)

T °C	e_x kJ/kg	Δe_x kJ/kg	ϵ %	$\Delta \epsilon$ %	w_{net} kJ/kg	Δw_{net} kJ/kg	η_{cycle} %	$\Delta \eta_{cycle}$ %
500	1474.6		44.53		1187.5		36.82	
510	1490.5	15.9	44.67	0.14	1201.0	13.5	36.96	0.13
520	1506.5	16.0	44.81	0.14	1214.6	13.6	37.08	0.12
530	1522.5	16.0	44.95	0.14	1228.2	13.6	37.21	0.13
540	1538.5	16.0	45.09	0.14	1241.8	13.6	37.34	0.13
550	1554.6	16.1	45.23	0.14	1255.4	13.6	37.48	0.13
560	1570.7	16.1	45.38	0.15	1269.1	13.7	37.60	0.12
570	1586.8	16.1	45.52	0.14	1282.9	13.8	37.73	0.13
580	1603.0	16.2	45.66	0.14	1296.7	13.8	37.87	0.13
590	1619.3	16.3	45.81	0.15	1310.6	13.9	38.00	0.13
600	1635.7	16.4	45.95	0.14	1324.5	13.9	38.13	0.13

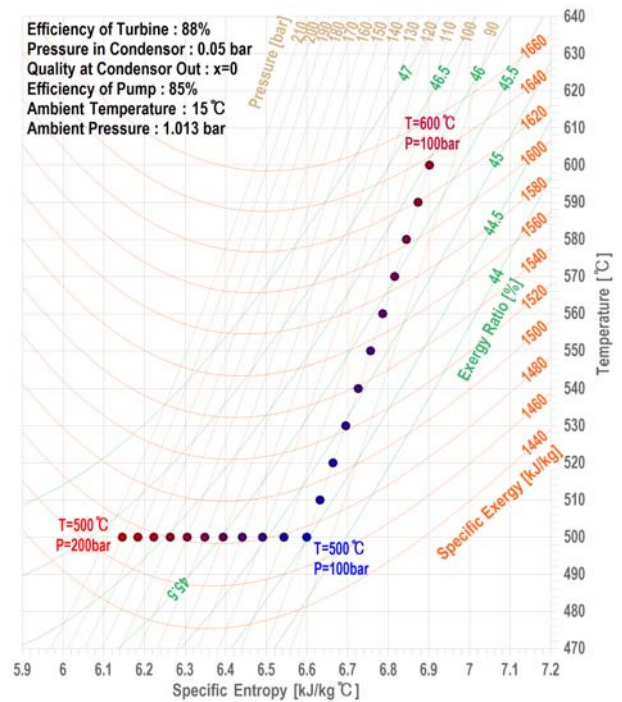


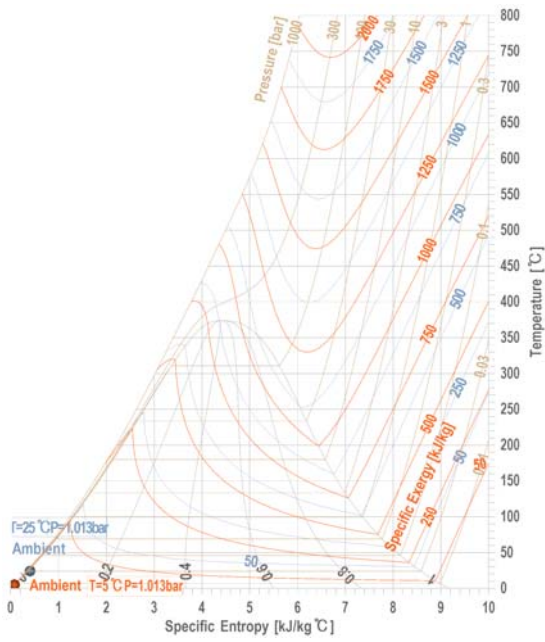
Fig. 5 Variation of temperature and pressure.

리나라에서는 1993년 전력연구소(KEPRI)를 중심으로 593°C, 310 bar의 발전소를 건설한 바 있고, 최근 일본에서는 650°C, 343 bar의 발전소를, 현재 영국과 독일의 Siemens에서는 720°C, 368 bar의 발전소를 계획 중에 있다. 이 발전소들 모두 최대 엑서지량과 최대 엑서지율 사이에 위치 즉 최적화된 시스템이라고 판단할 수 있다.

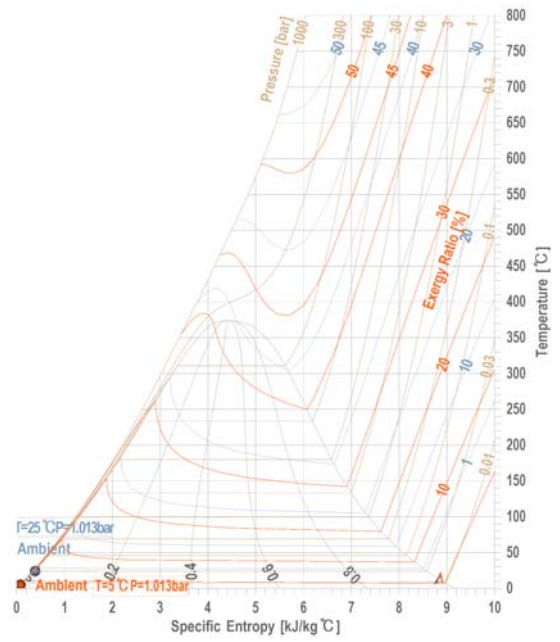
차트상에서 특징적인 것은 터빈입구 온도가 약 260°C 이하일 경우 건도 1의 포화상태가 최적화된 상태라고 판단할 수 있다. 환경온도에 따라 발전성능이 약간 변하고, 온도와 압력이 낮을 수 로 그 영향은 미미함을 볼 수 있다.

Table 3 Effect on pressure ($T = 500$ °C)

P °C	e_x kJ/kg	Δe_x kJ/kg	ϵ %	$\Delta \epsilon$ %	w_{net} kJ/kg	Δw_{net} kJ/kg	η_{cycle} %	$\Delta \eta_{cycle}$ %
100	1474.6		44.53		1187.5		36.82	
110	1478.4	3.8	44.81	0.28	1190.6	3.1	37.08	0.26
120	1481.0	2.6	45.06	0.25	1192.5	1.9	37.29	0.21
130	1482.5	1.5	45.28	0.22	1193.4	0.9	37.49	0.20
140	1483.1	0.6	45.48	0.20	1193.5	0.1	37.66	0.17
150	1482.8	-0.3	45.66	0.18	1192.8	-0.7	37.80	0.14
160	1481.8	-1.0	45.82	0.16	1191.5	-1.3	37.94	0.14
170	1480.2	-1.6	45.96	0.14	1189.5	-2.0	38.06	0.11
180	1478.0	-2.2	46.09	0.13	1187.0	-2.5	38.16	0.10
190	1475.2	-2.8	46.21	0.12	1184.0	-3.0	38.26	0.10
200	1471.8	-3.4	46.31	0.10	1180.5	-3.5	38.33	0.08



(a) Exergy.



(b) Exergy ratio.

Fig. 6 Effect on ambient temperature.

4.4 온도와 압력 증가에 따른 발전성능 향상

Fig. 5에는 터빈입구 500°C, 100 bar를 기준으로 온도 10°C 그리고 압력 10 bar의 증가에 따른 상태가 출력되어 있다. 차트상에서 터빈입구온도가 증가할 때 엑서지와 엑서지율 모두 증가함을 볼 수 있고, 터빈입구압력이 증가할 때 엑서지량의 변화는 무의미하며 엑서지율은 증가함을 볼 수 있다. Table 2에는 온도 10°C 증가에 따른 Table 3에는 압력 10 bar 증가에 따른 엑서지, 엑서지율, 발전량, 사이클효율이 계산되어 있다. 테이블에서 볼 수 있듯이 엑서지의 변화는 발전량의 변화와 같고, 엑서지율의 변화는 사이클효율의 변화와 같다. 500°C, 100 bar를 기준으로 온도 10°C 당 발전량은 14 kJ/kg 그리고 사이클효율은 0.13% 증가하나, 압력 10 bar 당 발전량과 사이클효율 값은 무의미함을 볼 수 있다. 이것은 터빈입구의 상태가 차트상의 어디에 위치하고 있는가에 따라 시스템 성능이 달라진다는 뜻이며,

시스템 최적화시 이점에 유의해야 할 것이다.

4.5 환경 온도의 영향

Fig. 6에는 환경온도가 25°C 그리고 5°C 일 때 엑서지와 엑서지율이 비교되어 있다. 터빈입구의 온도와 압력이 동일할 경우 환경상태 5°C의 엑서지는 약 125 kJ/kg 그리고 엑서지율은 약 2.5% 더 높다. 따라서 환경온도가 시스템 성능에 상당한 영향을 미칠 것임을 예상할 수 있다.

Table 4에는 연료투입량 3311.2 kJ/kg, 터빈입구압력 241 bar, 그리고 응축온도와 환경온도 차이가 18°C인 경우에 대하여 환경온도의 변화에 따른 성능 변화값이 나와 있다. 환경온도 10°C가 낮아질 경우 터빈입구의 엑서지량의 차는 약 33 kJ/kg 그리고 엑서지율의 차는 약 1% 정도이므로, 발전량은 약 27 kJ/kg 그리고 사이클효율은 약 0.83%가 증가할 것임을 예측할 수 있다.

Table 4 Effect on ambient temperature

T_{amb} °C	P_{cond} bar	Δh_B kJ/kg	T °C	P bar	e_x kJ/kg	Δe_x kJ/kg	ε %	$\Delta \varepsilon$ %	w_{net} kJ/kg	Δw_{net} kJ/kg	η_{cycle} %	$\Delta \eta_{cycle}$ %
25	0.086	3311.2	607.4	241	1613.3		47.24		1297.6		39.19	
15	0.050	3311.2	593.0	241	1646.3	33.0	48.21	0.97	1325.3	27.7	40.02	0.83
5	0.028	3311.2	578.9	241	1680.1	33.8	49.20	0.99	1353.6	28.3	40.88	0.86

4.6 유기랭킨 사이클의 성능 비교

Fig. 1의 엑서지율에서 볼 수 있듯이 물은 고온에서 효율적인 작동유체이지만 70°C~400°C의 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. 만약 유기혼합물의 엑서지와 엑서지율 선도가 차트화 된다면 증기사이클 선도와 비교하여 그 성능 비교를 보다 쉽게 수행할 수 있을 것이다.

4.7 에너지 시스템의 비용해석

열경제학(Thermoeconomics) 또는 엑서지경제학(Exergoeconomics)은 열역학 제 2법칙과 경제 원칙의 접목을 통해 생산품의 비용배분, 시스템의 비용최적화, 그리고 시스템 내부의 비용해석을 수행하는 기법⁽⁹⁾이다. 비용배분의 목적은 생산품의 각 원가를 산정하고 그 비용을 배분하는 것이다. 이 기법은 전기와 열을 동시에 생산하는 열병합발전에서 중요하고, 생산품의 판매단가 결정, 이익과 손실 계산, 그리고 경제성 평가를 위해 필요로 된다. 비용최적화의 목적은 주어진 제약조건하에 열원과 자본의 투입비용을 최소화하는 또는 생산품의 산출비용을 최대화하는 것이다. 이 해석으로부터, 에너지시스템의 성능과 비용의 최적화를 수행할 수 있다. 비용해석의 목적은 시스템 내부의 비용형성과정을 파악하고, 각 상태 및 각 구성기기에서 비용흐름의 양을 계산하는 것이다. 이러한 정보는 각 상태 및 각 구성기기를 평가하고 주 구성기기의 비용흐름을 개선하기 위해 유용하다.

이 비용흐름을 해석하는 데에 엑서지가 활발히 적용되고 있으며, 개발된 차트는 열경제학을 이해하는 데에 도움을 줄 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 증기의 엑서지 및 엑서지율을 T-s 선도 상에서 표현하였고, 그 선도를 이용하

여 엑서지와 엑서지율의 개념을 종합적으로 고찰하여 보았으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 터빈입구의 엑서지는 발전량을 그리고 엑서지율은 사이클효율의 특성을 반영한다.

2) 터빈입구 엑서지의 약 80%를 발전량으로 그리고 엑서지율의 약 83%를 사이클효율로 근사화할 수 있다.

3) 시스템의 최적화에서 터빈입구의 상태가 중요하며, 그 상태는 최대 엑서지량 선도와 최대 엑서지율 선도 사이에 위치해야 한다.

4) 단위 온도 증가당 또는 단위 압력 증가당 시스템 성능의 증가량은 고정된 값이 아니다.

5) 엑서지 선도로부터 환경 온도의 변화에 따른 시스템 성능의 변화를 파악할 수 있다.

향후 다양한 유체에 대한 차트 개발을 수행할 예정이며, 개발된 차트들이 에너지 시스템의 교육, 해석, 설계 등의 분야에서 도움이 될 수 있기를 희망한다.

참고 문헌

1. Adrian, B., 1988, *Advanced Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, pp. 114.
2. Rant, Z., 1956, Exergie, ein neues Wort für 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, pp. 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. ROPATH Group, PROPATH: A program package for thermophysical properties of fluids.
9. Kim, D. J., 2010, A new thermoeconomic methodology for energy systems, *Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 410-422.