

# 공기의 T-s 선도 상에서 엑서지 및 엑서지율의 이해

김 덕 진<sup>†</sup>

에너코스

## Comprehension of Exergy and Exergy Ratio on the T-s Chart of Air

Deok-Jin Kim<sup>†</sup>

**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, and this 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. Here, a designer 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 air, 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:** Air(공기), Water(물), Steam(증기), Exergy(엑서지), Exergy ratio(엑서지율), Lost work(손실일), Reversible work(가역일), Quantity of state(상태량)

### 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. 엑서지의 동의어로는 availability, available energy, available useful work, maximum (or minimum) work, reversible work, ideal work 등이 있으며, 시스템과 그 환경과의 combination

property<sup>(1)</sup>라 부른다. 엑서지율(Exergy ratio)은 엑서지와 그 유체가 보유한 에너지와의 비이며, 그 에너지의 유용도를 나타낸다.

엑서지의 개념은 19세기말 Gouy, Stodola 등에 의해 손실일에 관한 연구<sup>(2)</sup>로부터 시작되었으며, 1956년 Rant<sup>(3)</sup>는 주어진 에너지에서 일로 변환 가능한 부분을 엑서지(Exergy) 그리고 일로 변환 불가능한 부분을 아너지(Anergy)라는 이름을 제안하였다. Baehr<sup>(4)</sup>는 이 엑서지를 열시스템에 적용하여 엑서지 손실의 근원과 그 크기를 산정할 수 있는 수식을 상세하게 유도하였고, Hussein 등<sup>(5)</sup>은 열기관에 대한 엑서지 효율을 연구하였으며, 열경제학(Thermoeconomics) 및 엑서지경제학(Exergoeconomics)의 응용에 관하여 Robert<sup>(6)</sup> 및 Tsatsaronis<sup>(7)</sup> 등의 다양한 연구가 있다.

최적화 설계에서 엑서지 해석의 목적은 각 구성기기별로 엑서지 파괴 또는 손실을 계산하고,

<sup>†</sup> Corresponding author

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

E-mail address: enecos@hotmail.com

개선 가능한 요소를 찾아 시스템의 성능향상을 이루는데 있다. 한편, 더욱 중요한 요인이라 할 수 있는 것은 수식을 통한 엑서지의 계산이 아니라, Sama<sup>(8)</sup> 등이 제안한 13가지의 엑서지 분석 가이드 라인을 통해 알 수 있듯이 엑서지에 대한 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 입문자는 설계의 직감을 이해하기 힘들 수 있으며, 더 나아가 엑서지의 개념을 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 공기에 대한 엑서지 및 엑서지율을 T-s 선도상에 표현하고, 선도를 통하여 개념 및 최적화의 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 온도 및 압력의 영향에 비해 상대적으로 매우 작으므로 열시스템 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.

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

이 수식과 개방계에 대해  $-dQ = d\bar{h} = \bar{C}_p dT$ 의 관계식을 적용하면 다음과 같다.

$$\bar{e}_X^{phy} = \int_T^{T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ = (\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0) \quad (2)$$

식(2)에서  $\bar{h} - \bar{h}_0$ 는 고열원으로부터 받은 열량,  $T_0(\bar{s} - \bar{s}_0)$ 는 아너지, 그리고  $\bar{e}_X^{phy}$ 는 물리적 엑서지

이며, 주어진 상태  $T, P$ 에서 제한적 사상상태  $T_0, P_0$ 로 변환 때까지의 유용에너지이다.

주어진 물질이 대기의 구성물질만으로 구성되어 있을 경우 제한적 사상상태  $x$ 에서 사상상태  $x_0$ 로 변환 때까지 화학적 엑서지  $\bar{e}_X^{che}$ 는 대기의 구성물질과의 화학포텐셜 차로써 다음으로 계산된다.

$$\bar{e}_X^{che} = \sum x_i(\mu_i^* - \mu_{i,0}^*) = \bar{R}T_0 \sum x_i \ln \frac{x_i}{x_{i,0}} \quad (3)$$

$$|where| \mu_i^* = \bar{g}_i(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln x_i$$

여기서,  $x_i$ 는  $i$ 번째 구성 물질의 몰비,  $\mu_i$ 는 단위 몰당 화학포텐셜,  $\bar{g}_i$ 는 깁스에너지이다.

따라서 총 엑서지는 다음과 같다.

$$\dot{E}_X = \dot{N} \cdot (\bar{e}_X^{phy} + \bar{e}_X^{che}) \quad (4)$$

엑서지율  $\varepsilon$ 은 주어진 상태에서의 에너지에 대한 유용한 일의 비로서, 이 값이 에너지의 질 또는 가치를 나타내는 합리적인 척도라 평가되고 있으며, 수식은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{e_X}{h - h_0} = 1 - \frac{T_0(s - s_0)}{h - h_0} \quad (5)$$

## 3. T-s 선도상에서 엑서지 및 엑서지율

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 표현할 수 있다.

Fig. 1에는 공기의 엑서지 및 엑서지율이 출력되어 있다. 엔탈피와 엔트로피를 계산하기 위해 Propath ver.11.1<sup>(9)</sup>의 이상기체에 대한 물성치 코드를 적용하였으며, 15°C, 101.3 kPa의 환경상태, N<sub>2</sub> 78.05%, O<sub>2</sub> 20.99%, Ar 0.93%, CO<sub>2</sub> 0.03%로 이루어진 건공기를 대상으로 하였다. 따라서 Fig. 1의 차트에서 식(3)의 화학엑서지는 0이다.

Fig. 1의 엑서지와 엑서지율 선도에서 그 특징은 T-s 좌표계에서 거의 선형으로 표현된다는 것이다. 이것은 식(2)로 부터 엑서지는 엔탈피와

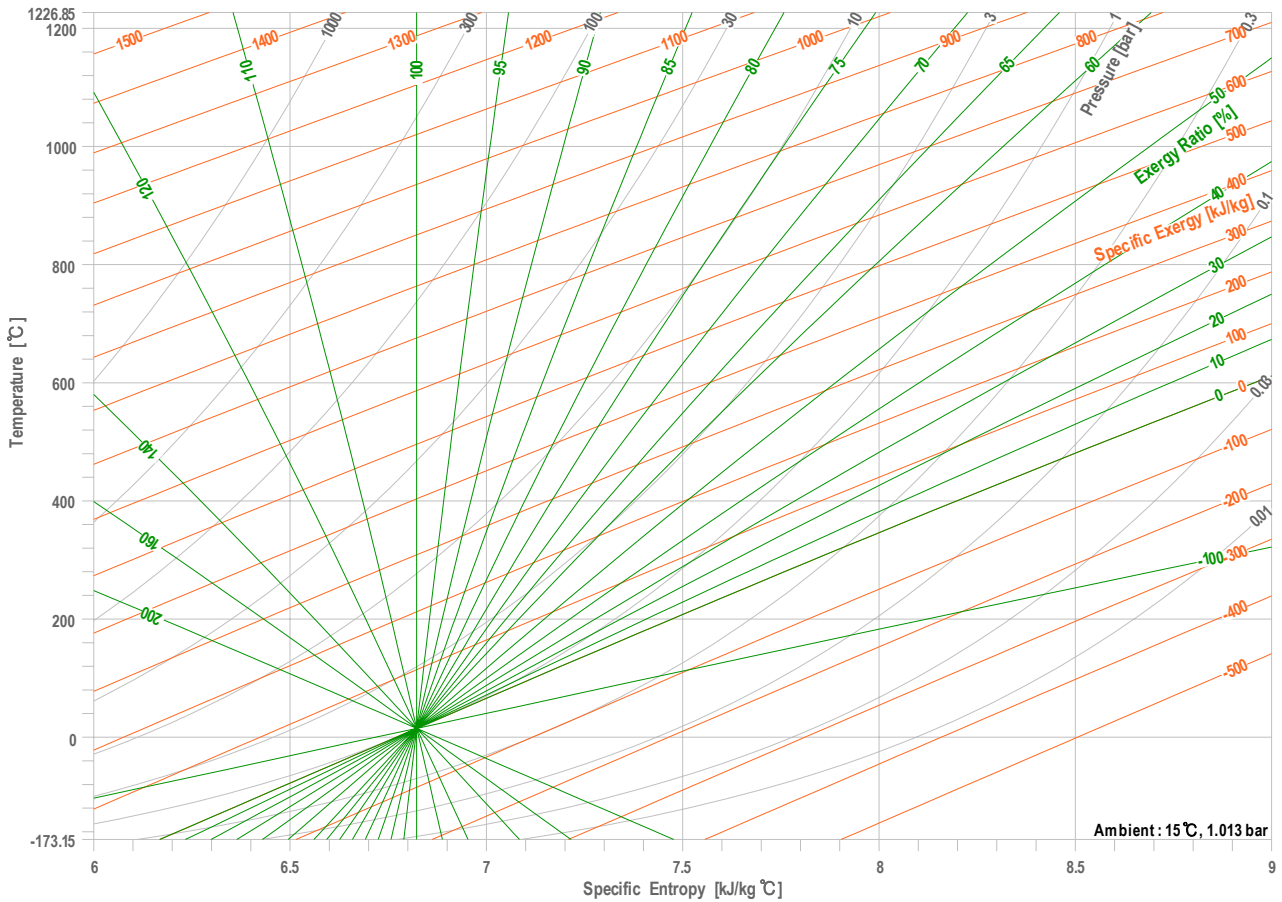


Fig. 1 Specific exergy and exergy ratio on the T-s chart of air.

엔트로피의 일차 함수이며, 이상기체의 경우 엔탈피는 온도만의 함수이기 때문이다. 엑서지 선도에서 특이한 점은 그 값이 음수가 존재한다는

것이다. 이것은 그 상태에서 환경상태로 진행하기 위해서는 반드시 일이 투입되어야 함을 뜻하며 실제 투입일은 더 증가한다. 엑서지율 선도에서 특이한 점은 그 값이 100%가 넘는 구간이 존재한다는 것이다. 이것은 엔탈피보다 엑서지가 더 크다는 뜻이며, 환경상태로부터 주어진 상태로 만들기 위해 사전에 일의 투입과 열의 방출이 있었음을 인지해야 하겠다. 만약 어떤 시스템에서 이 상태의 유체를 환경으로 방출하다면, 이 값은 추가로 터빈을 장착하여 전력을 생산해야 한다는 것을 알려준다.

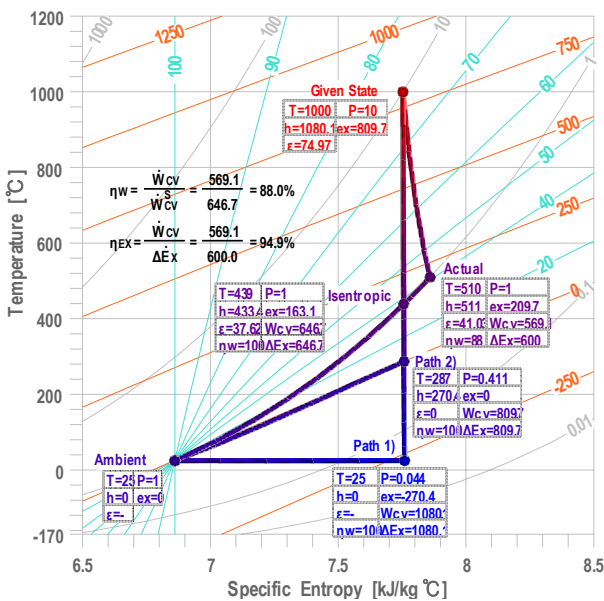
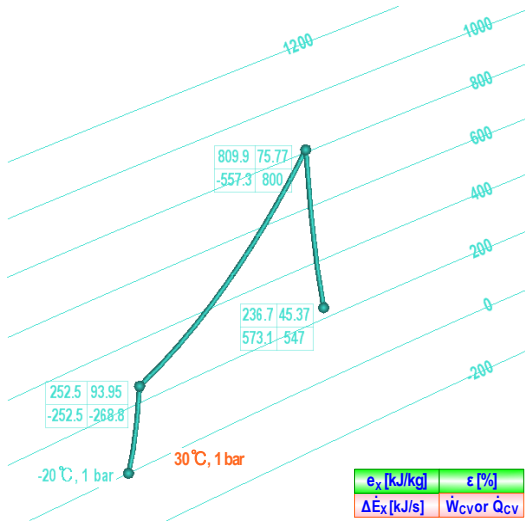


Fig. 2 Path of exergy.

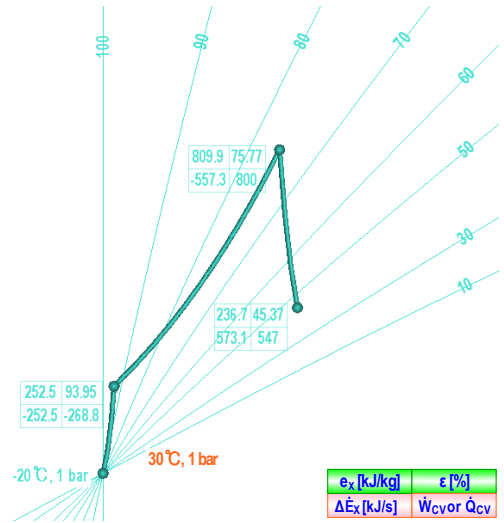
#### 4. 검토 및 고찰

##### 4.1 엑서지 및 엑서지율의 이해

Fig. 2에는 1000°C, 10 bar의 공기가 25°C, 1 bar, 상대습도 70%의 환경으로 진행하는 경로가 도시되어 있다. 등엔트로피 과정과 등온과정의



(a) Exergy.



(b) Exergy ratio.

Fig. 3 Difference according to ambient temperature.

경로는 Path 1)이고, 등엔트로피 과정과 제로엑서지 과정의 경로는 Path 2)이다. 여기서 제로엑서지라는 단어는 기존 열역학에서 다루고 있지 않다. Fig. 2의 Path 1)과 Path 2)에 표기된 엔탈피  $h$ , 엑서지  $ex$ , 엑서지율  $\epsilon$ , 전력량  $W_{cv}$  값들을 비교해 보면, Path 2)의 해석이 Path 1) 보다 조금 더 쉽다는 것을 알 수 있다. 따라서 엑서지와 엑서지율의 이해는 선도를 통하여 기존보다 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 구성기기의 효율에는 열효율, 등엔트로피 효율, 그리고 엑서지 효율이 있다. Fig. 1의 경우 등엔트로피 효율은 88.0%이며 이 값은 그 터빈의 특성으로 명확하다. 작동유체의 입장에서 본다면, 77.6 kJ/kg의 전력을 생산하지 못하는 대신 46.7 kJ/kg의 엑서지를 얻었다. 즉 그 작동유체는 다른 구성기기에서 최대 46.7 kJ/kg의 발전을 할 수 있다는 뜻이며, 엑서지효율은 94.9%이다. 터빈에서 확보된 엑서지 46.7 kJ/kg을 시스템 최적화를 통하여 최소의 손

실로 전력화해야 한다. 이것이 최적화 설계의 방향이며, 최적화 설계를 수행하면 그 터빈의 엑서지 양 및 효율 또한 달라진다. 따라서 엑서지 양 및 효율은 최적화 설계와 연결된 값이다.

### 3.2 환경 온도의 영향

Fig. 3에는 환경온도 30°C와 -20°C일 때의 건공기의 엑서지와 엑서지율 선도가 비교되어 있다. 엑서지선도로부터 확인할 수 있듯이 환경온도가 낮을수록 공기를 압축하기 위해 투입되어야 할 엑서지량이 감소하며, 동일상태의 터빈입구에서 환경온도가 낮을수록 산출되는 엑서지량은 증가한다. 이것은 압축동력은 감소하고 출력량은 증가하게 된다는 뜻이다. Table 1에는 상대습도 70%, 환경압력 1 bar, 압축비 10, 압축기 및 터빈 효율 88%, 그리고 투입열량 800 kJ/kg의 고정조건일 때, 환경온도  $T_{amb}$ 의 변화에 따른 압축기에

Table 1 Effect on ambient temperature.

$T_{amb}$ °C	$\dot{W}_{cp}$ kJ/s	$\Delta \dot{E}_{X,cp}$ kJ/s	$\eta_{II,cp}$ %	$\Delta \dot{E}_{X,tb}$ kJ/s	$\dot{W}_{tb}$ kJ/s	$\eta_{II,tb}$ %	$\dot{W}_{net}$ kJ/s	$\eta_{net}$ %	$\Delta \eta_{net}$ %	$\dot{E}_{X,tb}^{exit}$ kJ/s	$\epsilon_{tb}^{exit}$ %	$\eta_{net}^{max}$ %	$\Delta \eta_{net}^{max}$ %
30	-324.2	-304.4	93.89	619.7	588.1	94.90	263.9	32.99		222.9	41.57	60.9	
20	-312.3	-293.3	93.92	609.9	579.6	95.03	267.3	33.41	0.42	225.6	42.35	61.6	0.76
10	-301.1	-282.8	93.92	600.6	571.3	95.12	270.2	33.78	0.36	228.3	43.09	62.3	0.70
0	-290.2	-272.6	93.94	591.4	563.1	95.21	272.9	34.11	0.34	231.0	43.84	63.0	0.68
-10	-279.4	-262.5	93.95	582.2	555.0	95.33	275.6	34.45	0.34	233.8	44.59	63.7	0.69
-20	-268.8	-252.6	93.97	573.1	547.0	95.45	278.2	34.78	0.32	236.7	45.36	64.4	0.69

Table 2 Effect on relative humidity.

$T_{amb}$ °C	$\phi = 80\%$							$\phi = 40\%$							Difference ( $\phi_{80\%} - \phi_{40\%}$ )			
	$\dot{W}_{cp}$ kJ/s	$\dot{W}_{tb}$ kJ/s	$\dot{W}_{net}$ kJ/s	$\eta_{net}$ %	$\dot{E}_{X,tb}^{exit}$ kJ/s	$\epsilon_{tb}^{exit}$ %	$\dot{W}_{cp}$ kJ/s	$\dot{W}_{tb}$ kJ/s	$\dot{W}_{net}$ kJ/s	$\eta_{net}$ %	$\dot{E}_{X,tb}^{exit}$ kJ/s	$\epsilon_{tb}^{exit}$ %	$\Delta \dot{W}_{net}$ kJ/s	$\Delta \eta_{net}$ %	$\Delta \dot{E}_{X,tb}^{exit}$ kJ/s	$\Delta \epsilon_{tb}^{exit}$ %		
30	-324.7	588.3	263.6	32.95	222.8	41.53	-322.9	587.6	264.7	33.09	223.2	41.69	-1.1	-0.14	-0.4	-0.16		
10	-301.2	571.3	270.1	33.76	228.3	43.08	-300.7	571.1	270.4	33.80	228.4	43.13	-0.3	-0.04	-0.1	-0.05		
-10	-279.5	555.0	275.5	34.44	233.8	44.60	-279.4	555.0	275.6	34.45	233.9	44.60	-0.1	-0.01	-0.1	-0.01		

서의 전력 투입량  $\dot{W}_{cp}$ , 엑서지 증가량  $\Delta \dot{E}_{X,cp}$ , 엑서지 효율  $\eta_{II,cp}$ , 터빈에서의 엑서지 투입량  $\Delta \dot{E}_{X,tb}$ , 전력 출력량  $\dot{W}_{tb}$ , 엑서지 효율  $\eta_{II,tb}$ , 총 전력생산량  $\dot{W}_{net}$ , 발전효율  $\eta_{net}$ , 발전효율의 증가량  $\Delta \eta_{net}$ , 터빈출구에서의 엑서지량  $\dot{E}_{X,tb}^{exit}$ , 엑서지율  $\epsilon_{tb}^{exit}$ , 복합발전에서의 최대 전력 효율  $\eta_{net}^{max}$ , 그 효율 증가량  $\Delta \eta_{net}^{max}$ 이 계산되어 있다. 환경온도가 10°C 낮아지면 발전효율은 약 0.35% 증가하고 있다. 터빈출구의 배기가스가 보유하고 있는 엑서지량  $\dot{E}_{X,tb}^{exit}$ 은 공기예열기 또는 HRSG를 통하여 반드시 회수되어야 한다. 터빈출구의 배기가스로부터 엑서지를 회수하여 증기사이클을 가동할 경우 최대 얻을 수 있는 발전량은  $\dot{E}_{X,tb}^{exit}$ 이며 그 최대효율은  $\epsilon_{tb}^{exit}$ 이다. 이 값 역시 환경온도가 낮을수록 증가하고 있다.  $\eta_{net}^{max}$  값은 복합사이클의 최대발전효율이며 엑서지 해석으로부터 복합발전의 효율은 환경온도가 낮을수록 증가한다는 것을 예측할 수 있다.  $\eta_{net}^{max}$  값은 약 60%로 정도 계산되나 증기사이클에 투입된 엑서지의 약 40%가 손실될 것을 예상하면 실제 복합발전의 효율은 약 50%로 그리고 환경온도 10°C 감소 당 그 효율의 증가량은 실제 약 0.55% 정도가 될 것임을 추측할 수 있다.

### 3.3 상대습도의 영향

Table 2에는 상대습도 80%와 상대습도 40%인

Table 3 Mole fraction of LNG, air, and gas.

	LNG		Air		Gas	
CH <sub>4</sub>	89.43%		N <sub>2</sub>	77.130%	N <sub>2</sub>	74.856%
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6.80%		O <sub>2</sub>	20.743%	O <sub>2</sub>	14.022%
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.52%		Ar	0.919%	Ar	0.892%
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.02%		CO <sub>2</sub>	0.030%	CO <sub>2</sub>	3.186%
N <sub>2</sub>	0.20%		H <sub>2</sub> O	1.178%	H <sub>2</sub> O	7.045%
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.03%		Ambient : 15°C, 1.013 bar, $\phi$ 70%			

경우에 대해 시스템 해석 값이 계산되어 있다. 여기서 고정조건 및 각 항의 해석은 3.2절과 같다. 상대습도가 높을수록 시스템의 성능은 떨어지고 있다. 상대습도의 영향은 겨울철에는 미미하나 여름철에는 유의해야 함을 알 수 있다.

### 3.4 기체 분자 구성비의 영향

Table 3에는 LNG, 공기, 그리고 연소가스에 대한 분자 구성비가 나와 있다. 이 경우 LNG의 저위발열량(LHV)은 49.202 MJ/kg, 엑서지 발생량은 49.152 MJ/kg, 엔트로피 발생량은 0.000173 MJ/kg°C이다. 질량기준의 공연비가 56.0일 경우 연소가스의 분자 구성비는 Table 3과 같다.

엑서지는 온도와 압력의 변화에 따른 물리적 엑서지와 화학성분비의 변화에 따른 화학적 엑서지로 나누어진다. 화학적 엑서지는 연소시 발생하는 엑서지와 기체 분자 구성비에 따른 엑서지로 구분된다. Table 3에서 볼 수 있듯이, 환경상태의 분자 구성비와 연소가스의 분자 구성비는 서로 다르므로 이 차이만큼 화학적 엑서지가 추가로 존재하며, 그 값은 연소가스 1 kg 당 16.6 kJ 이다. 터빈입구상태의 연소가스 1035.6°C, 10.13 bar에서 엑서지는 894.2 kJ/kg, 엑서지율은 76.3%이다. 만약 물리적 엑서지만을 고려하면 그 엑서지율은 74.9%로 낮아진다. HRSG 출구상태의 배기가스 110°C, 1.02 bar에서 엑서지는 30.7 kJ/kg, 엑서지율은 30.9%이다. 이것은 110°C의 배기가스가 그 양은 작지만 가치 있는 에너지라는 뜻이다. 물리적 엑서지만을 고려한다면 그 엑서지율은 14.2%이며 그 가치가 현저히 줄어들었

Table 4 Effect on mole fraction.

Fluid	$w_{tb}$ kJ/kg	$T_{tb}^{exit}$ °C	$\dot{E}_{X,tb}^{exit}$ kJ/kg	$\epsilon_{tb}^{exit}$ %
Gas	603.5	537.0	249.3	43.88
Air	566.4	508.5	218.0	42.16
Difference	37.1(6.6%)	28.5	31.3	≈1.7

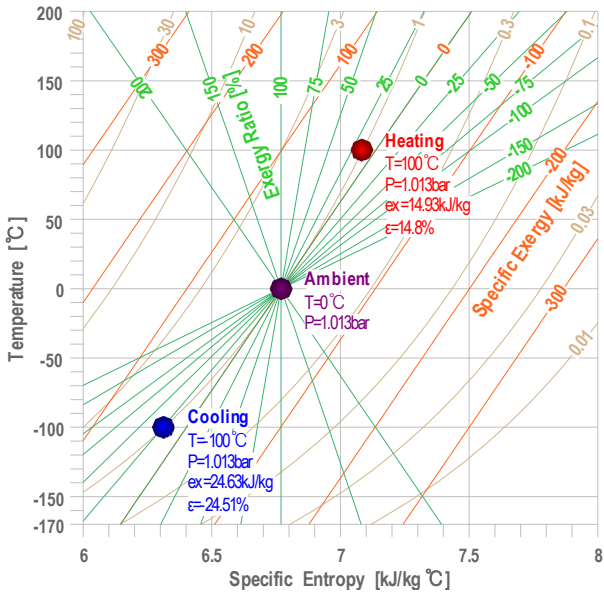


Fig. 4 Worth of heating and cooling.

다. 따라서 분자 구성비의 차가 의미가 없는 에너지 시스템일 경우 물리적 엑서지만을 고려하여 그 엑서지율을 계산하는 것이 타당할 것이다.

Table 4에는 Table 3의 작동유체 가스와 공기에 대해 88% 효율의 터빈입구 1000°C, 10.13 bar에서 1.013 bar로 변하는 동안의 출력량, 배기가스의 온도, 엑서지량, 그리고 엑서지율이 계산되어 있다. 여기서 엑서지량과 엑서지율에서 화학 엑서지는 제외하였다. 계산결과는 연소과정을 해석해야 한다는 것을 보여 주며, 출력량의 오차는 6.6% 이다.

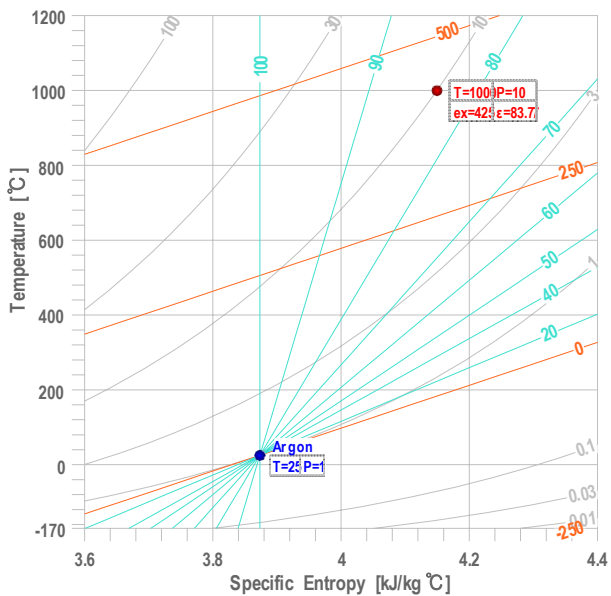


Fig. 6 T-s chart of argon.

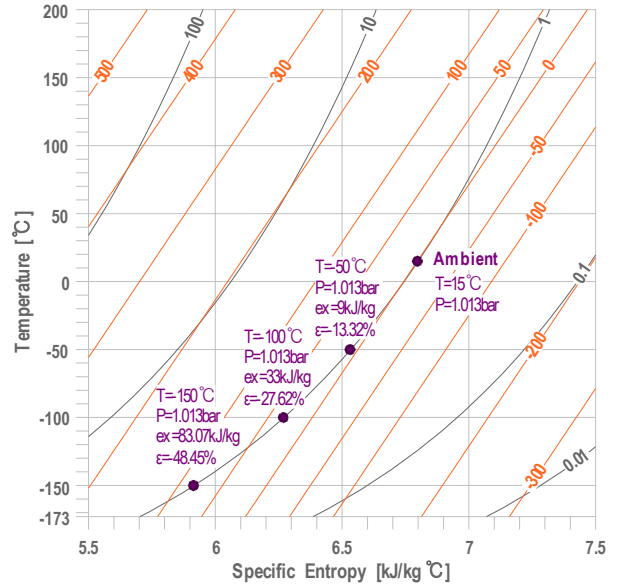


Fig. 5 T-s chart of N<sub>2</sub>.

### 3.5 온열과 냉열의 가치평가

엔탈피적으로 해석한다면 유체 1 kg 당 온열 100°C와 냉열 100°C의 값은 같다. 그러나 상식적으로 볼 때 냉열의 가치가 더 높아야 한다. 에너지의 가치평가기준으로서 엑서지가 가장 합리적으로 인정받고 있다. Fig. 4에는 엑서지와 엑서지율이 도시되어 있으며, 냉열(-24.5%)이 온열(14.8%)보다 약 1.65배 더 가치가 있고 평가한다. 따라서 배열을 활용한 흡수식냉동기 등과 같이 냉열의 재활용을 적극적으로 검토해야 하겠다.

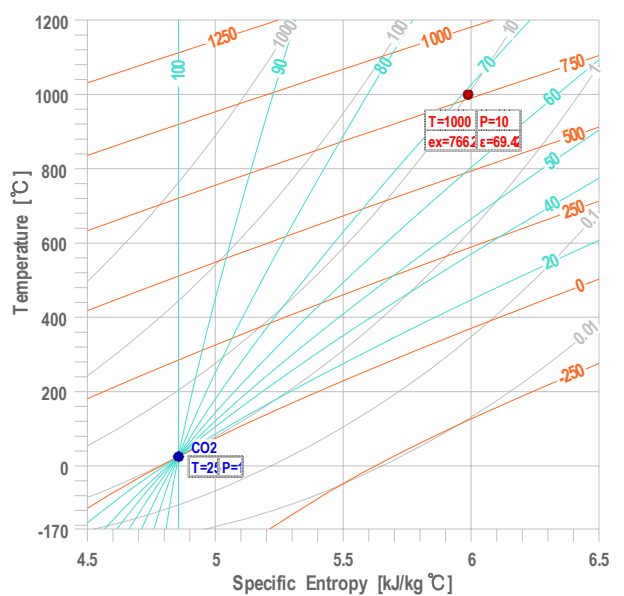


Fig. 7 T-s chart of CO<sub>2</sub>.

Table 5 Comparison on the sort of gas.

Fluid	1000°C, 1 bar			
		Air	Argon	CO <sub>2</sub>
$e_x$	kJ/kg	809.7	425.0	766.2
$\varepsilon$	%	74.97	83.77	69.42

### 3.6 LNG 냉열을 이용한 발전

액화천연가스(Liquefied Natural Gas)의 냉열 (-162°C ~ 0°C, 약 800 kJ/kg, 부피비 1/600)이 작동유체 질소(N<sub>2</sub>)의 밀폐 브레이크 사이클에 활용되고 있다. 질소를 -50°C까지 냉각시킨다면 받은 냉열량의 13.2% 즉 9.0 kJ/kg의 엑서지를 확보할 수 있고, -100°C일 경우 27.6% 즉 33.0 kJ/kg의 엑서지 그리고 -150°C일 경우 48.45% 즉 83.1 kJ/kg의 엑서지를 확보할 수 있다. 여기서 온도가 낮아질수록 엑서지량은 더욱 많아짐을 확인할 수 있다. Table 1의 공기 1 kg/s 당 발전량은 270 kJ/kg 정도이며, 이 값과 확보한 엑서지량을 비교한다면 냉열을 이용한 발전이 시스템 성능개선에 많은 도움이 된다는 것을 알 수 있다.

### 3.7 기체 종류에 따른 비교

Fig. 6에는 아르곤에 대한 Fig. 7에는 이산화탄소에 대한 엑서지와 엑서지율이 도시되어 있으며, Fig. 2의 공기차트와 비교할 수 있다. Table 5에는 1000°C, 1 bar 상태에서 공기, 아르곤, 이산화탄소에 대한 엑서지와 엑서지율이 비교되어 있다. 엑서지량은 공기 그리고 엑서지율은 아르곤이 높다. 즉 작동유체로서 공기를 적용한다면 발전량이 많아지고 아르곤을 적용한다면 발전효율이 높아짐을 예측할 수 있다. 공기는 작동유체로서 가장 이상적이다. 그러나 특수한 시스템일 경우에는 특수한 유체가 적용될 수도 있다. 차트를 통한 엑서지와 엑서지율의 파악은 그 시스템의 특성을 쉽게 예측하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 공기의 엑서지 및 엑서지율을 T-s 선도 상에서 표현하였고, 그 선도를 이용하여 엑서지와 엑서지율의 개념을 종합적으로 고찰

하여 보았으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 등엔트로피 과정과 제로엑서지 과정으로 엑서지를 이해하면 보다 쉽다.
  - 2) 환경온도가 낮을수록 엑서지, 엑서지율, 발전량, 발전효율은 높아진다.
  - 3) 겨울철 상대습도의 영향은 아주 미미하지만 여름철의 변화는 고려해야할 정도로 변한다.
  - 4) 동일 온도 및 압력에서 공기의 해석과 연소 가스의 해석은 상당한 차이를 보인다.
  - 5) 엔탈피적으로 온열과 냉열은 정확히 같으나 엑서지적으로는 냉열이 약 1.6배 더 가치가 높다.
  - 6) 냉열을 이용할 경우 엑서지량은 높아진다.
  - 7) 기체 종류에 따라 엑서지와 엑서지율은 많은 차이를 보이며, 차트를 통한 이해는 시스템에 대한 설계자의 직감에 많은 도움을 줄 수 있다.
- 향후 다양한 유체에 대한 차트 개발을 수행할 예정이며, 열시스템의 교육, 해석, 설계 등의 분야에서 도움이 될 수 있을 것으로 여겨진다.

## 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. Perrot, Pierre, 1998, A to Z of Thermodynamics. Oxford University Press.
8. Sama, D. A., Qian, S. Gaggioli, R., 1989, A common-sense 2nd law approach for improving process efficiencies, TAIES '89, Beijing, China.
9. ROPATH Group, PROPATH: A program package for thermophysical properties of fluids, version 11.1.