

증기 원동소의 엑서지 손실에 관한 연구

A Study on the Exergy Losses of Steam Power Plant

박 재 철*, 장 문 석**, 이 창 식***
J.C. Park, M.S. Jang, C.S. Lee

ABSTRACT

The purpose of this paper is to obtain enthalpy balance and exergy analysis for the energy losses in a steam power plant. The enthalpy and exergy analysis of the steam power plant were carried out on the various output of steam turbine.

While enthalpy analysis shows that circulating loss in the condenser is maximum, exergy evaluation of the power plant shows that the losses of the boiler and turbine are considerably larger than those of condenser and feed water heater.

Most irreversible losses of the power plant occur at the boiler. For improving the performance, the precise study about the irreversible losses of the boiler is necessary.

1. 서 론

지금까지 일반적으로 이루어지고 있는 에너지 관리 방법은 열역학 제1법칙에 주안을 둔 에너지의 양적 평가에 의한 엔탈피 평가에 의존하는 열정산이다. 이 방법은 열의 유출 개소와 그 양을 규명하는 열정산으로서, 에너지의 유효 이용이라는 점에서 매우 중요하다. 엑서지의 개념은 19세기말 Gibbs, Gouy 등에 의한 최대 유효일의 연구^{1,2)}로부터 시작되어 일의 능력, 원동력, 유효 에너지 등으로 불리어오다가 Rant³⁾에 의하여 엑서지(exergy)란 말로 사용하게 되었다. 엑서지는 비가역 과정에 의한 손실일을 정량적으로 취급하는 유효한 상태함수로서, 열 에너지의 질과 양을 동시에 파악할 수 있으며 열설비의 능력

과 설비비와의 상관성을 이용한 평가가 가능하므로 각종 열설비의 에너지 정산에 점차 그 이용 범위가 확대되고 있다. 엑서지에 관한 연구로는 열기관에 대한 엑서지 효율에 관한 연구⁵⁾를 비롯하여 에너지 유효 이용이란 측면에서 원동소에 대한 열역학적 에너지 이용 평가에 주안을 둔 경제성 평가의 응용에 관한 연구^{6,7)} 등이 있다. 그러나 증기 원동소에 대한 이론을 증기 원동소에 적용한 연구^{8,9)}는 일부 연구가 있으나 그다지 많지 않은 실정이다. 또한 열역학 제2법칙에 의한 엑서지 해석에 의하면 단순한 손실만이 아니라 원동소 시스템의 어느 부분에서 얼마만큼의 손실이 수반되는지를 쉽게 파악할 수 있으므로 에너지 손실을 줄이고 원동소 효율을 증대시킬 수 있는 방안을 강구할 수 있는 특징이 있다.

* 한국전력공사

** 한양대학교 대학원

*** 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

이러한 관점에서 본 연구에서는 현재 운전되고 있는 증기 원동소의 사이클 작동 조건 및 각 상태치로부터 엔탈피 정산과 엑서지 정산을 통하여 상태 개선이 필요한 부분을 파악하고 그 효율을 정량적으로 검토할 목적으로 엑서지 해석법을 적용하여 에너지의 손실을 부하 변화에 대하여 비교 검토하였다.

2. 증기 원동소의 엑서지 해석

2.1 계의 엑서지

절대 온도 T 인 고열원과 절대 온도 T_0 인 주위의 저열원 사이에 작동하는 열기관에서 고온 열원으로부터 열량 Q 를 받았을 때 얻을 수 있는 최대일 즉 엑서지 E 는

$$E = Q \frac{T - T_0}{T} \dots\dots\dots (1)$$

로 표시된다.

지금 어느 물질의 온도가 T 로부터 T_0 가 될 때까지 방출되는 열량으로부터 얻을 수 있는 엑서지 E 는

$$E = \int_{T_0}^T C_p dT - T_0 \int_{T_0}^T \frac{C_p dT}{T} \\ = (H - H_0) - T_0 (S - S_0) \dots\dots\dots (2)$$

식 (2)를 다시 쓰면

$$E = (H - H_0) \left\{ 1 - \frac{T_0}{T - T_0} \ln \frac{T}{T_0} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

로 표시된다.

2.2 엑서지 계산식

(1) 연료의 화학 엑서지

연료가 연소할 때 방출하는 반응 에너지로부터 얻어지는 최대 유효일로 표시되며, 고체 및 액체 연료의 화학 엑서지 e_f 는 연료의 고발열량 H_h kcal/kg, 연료중 수소, 탄소, 산소, 유황, 질소 및 수분의 중량 분율을 각각 h , c , a , s , n , w 할 때 고체 및 액체 연료에 대하여 다음 식으로 표시된다.

$$e_f = H_h + T_0 (\sum m_{gi} g_{gi0} - s_{f0} - O_{min} s_{o20}) \\ = H_h + T_0 (1.25c - 4.67h + 0.25s + 1.63o +$$

$$1.65n + 0.93w - s) \dots\dots\dots (4)$$

여기서 O_{min} 은 연료 1kg당 연소에 필요한 이론 산소량이고, 점차 0는 주위 상태, f 는 연료, g_i 는 배출 성분 가스이다.

(2) 연료의 현열 엑서지

연료의 평균 비열을 c_f , 유입 연료의 온도를 T , 주위 온도를 T_0 라 할 때 연료의 현열에 의한 엑서지 e_{fs} 는 다음 식으로 계산한다.

$$e_{fs} = c_f \left\{ (T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

(3) 공기의 현열 엑서지

보일러로 공급되는 공기의 현열 엑서지 e_a 는 유입 공기량을 m_a , 공기의 평균 비열을 c_a , 유입 공기의 온도를 T_a , 주위의 온도를 T_0 라 하면 다음 식으로 표시된다.

$$e_a = m_a \left\{ c_a (T_a - T_0) - T_0 c_a \ln \frac{T_a}{T_0} \right\} \dots (6)$$

(4) 보일러 급수 및 증기의 엑서지

보일러로 공급되는 급수 및 증기의 엑서지 e_{ws} 는 다음 식으로 구한다.

$$e_{ws} = m_w [(h_w - h_{w0}) - T_0 (s_w - s_{w0})] \dots (7)$$

여기서 m_w 는 급수 또는 증기량, h_w 는 급수 또는 증기의 비엔탈피, h_{w0} 는 주위 온도에 대한 포화수의 비엔탈피, s_w 는 h_w 에 대응하는 비엔트로피, s_{w0} 는 h_{w0} 에 대응하는 비엔트로피이다.

(5) 연소 배출 가스의 엑서지 손실

연소에 의해서 배출되는 연소 가스에 의한 엑서지 손실 e_g 는 다음 식으로 표시된다.

$$e_g = m_g [(h_g - h_{g0}) - T_0 (s_g - s_{g0})] \dots\dots (8)$$

여기서 m_g 는 배출 가스 중량, h_g 는 배출 가스의 비엔탈피, h_{g0} 는 주위 상태에서의 비엔탈피, s_g 는 배출 가스의 비엔트로피, s_{g0} 는 주위 상태에서의 배출 가스의 비엔트로피이다.

(6) 연소의 비가역 손실 엑서지

연소의 비가역 손실을 계산하기 위하여는 단열 연소 온도 t_{ad} 를 알아야 한다. 그러나 엔탈피가 온도의 함수이므로 가스 표를 써서 반복 계산하여야 하나 여기서는 엔탈피의 근사

식을 써서 t_{ad} 를 구하기로 한다.

가스 온도가 $1,400^{\circ}\text{C} \leq t_{ad} \leq 2,000^{\circ}\text{C}$ 일 때는

$$t_{ad} = [H_l + Q_{fs} + t_o(\sum V_{gi} a_{1i} + t_o \sum V_{gi} b_{1i}) - \sum V_{gi} b_{2i}] / \sum V_{gi} a_{2i} \dots\dots\dots (9)$$

이고, 가스 온도가 $2,000^{\circ}\text{C} \leq t_{ad} \leq 3,000^{\circ}\text{C}$ 에서는

$$t_{ad} = [H_l + Q_{fs} + t_o(\sum V_{gi} a_{1i} + t_o(\sum V_{gi} b_{1i}) - \sum V_{gi} b_{3i})] / \sum V_{gi} a_{3i} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 각 계수 a, b, c 는 문헌 [4]의 값을 이용하여 구한다.

따라서 연소에 의한 비가역 손실 엑서지 e_{rc} 는 t_{ad} 에 대한 엔탈피를 h_{gad} 라 하면 다음 식으로 표시된다.

$$e_{rc} = (e_f + e_{fs} + e_{as}) - m_g h_{gad} \dots\dots\dots (11)$$

(7) 단열에 의한 비가역 손실 엑서지 보일러에서 전열에 의한 비가역 손실 엑서지 e_{rh} 는 다음 식으로 구한다.

$$e_{rh} = (m_g e_{gad} - e_g - e_{bg}) - (e_f - e_w - e_{bw}) \dots\dots\dots (12)$$

여기서 e_{gad} 는 t_{ad} 에 대한 유효 에너지이며 그 때의 엔탈피, 엔트로피를 각각 h_{gad}, s_{gad} 라 하면

$$m_g e_{gad} = m_g [(h_{gad} - h_{go}) - T_o(s_{gad} - s_{go})] = V_g [(H_{gad} - H_{go}) - T_o(s_{gad} - s_{go})] \dots\dots\dots (13)$$

이고, e_{bg} 는 배기 가스중 노내 분입 증기에 의한 엑서지 손실, e_{bw} 는 노내 분입 증기분 급수의 엑서지로서 다음 식으로 표시된다.

$$e_{bg} = m_b [(h_{bg} - h_{wo}) - T_o(s_{bg} - s_{wo})] \dots\dots (14)$$

$$e_{bw} = m_b [(h_w - h_{wo}) - T_o(s_w - s_{wo})] \dots\dots (15)$$

3. 증기 원동소의 성능 시험 및 측정결과

3.1 증기 원동소

본 연구에 사용한 증기 원동소의 보일러는 증발량 1,796.6 ton/h인 강제 순환식, 단동 복사 재열 보일러이며, 주증기 압력은 최고 압력 177.2 kg/cm², 주증기 온도 540.6°C, 재열 증기 압력 35.9 kg/cm², 재열 증기 온도 540.6°C이며, 증기 터빈은 증동형, 재열 발생 복수 식으로서 정격 출력은 560 MW이다. 한편, 터빈의 회전 속도는 3,600 rpm, 추기단은 7 단이며, 발전기 용량은 660,000 kVA이다.

Table 1은 엑서지 정산에 이용한 증기 원동소의 엑서지 해석 영역을 구분하여 나타낸 것이다. 그 주요부는 보일러 영역, 터빈 영역, 복수기 영역 및 급수 가열기 영역으로 구분되며, 본 연구에서는 이들 4개 영역에 대한 계통을 중심으로 엔탈피 및 엑서지 정산을 하기로 한다.

Table 1. Test results of power plant

Region	Flow rate(ton/h)	T °C	P ata
Boiler	1	1619.325	541.25 173.53
H.P. turbine	1	1619.325	541.25 173.53
I. P. turbine	2	148.183	536.49 36.26
L.P. turbine	3	1321.195	372.14 11.42
Condenser	4	1064.488	0.05
HE 1	5	33.647	95.28 0.06
HE 2	6	70.145	73.55 0.35
HE 3	7	98.346	313.53 5.81
HE 4	8	55.568	182.34 1.74
HE 6	10	44.749	445.31 17.47
HE 7	11	134.970	204.90 37.41
	12	1546.960	246.21
	13	1462.250	329.60 37.41

3.2 증기 원동소의 성능 시험 및 측정치

본 연구에 사용된 증기 원동소에 대한 성능 시험 및 그 측정 결과를 요약하면 Fig.1과 같다. 이 결과는 부하 555 MW일 경우에 대한 보일러, 터빈, 복수기, 급수가열기 등으로 유입, 유출하는 해석조건을 도시한 것이다. 한편, 증기 원동소에서 사용한 연료는 석탄이며 발열량은 6,000 kcal/kg의 것을 사용하였다.

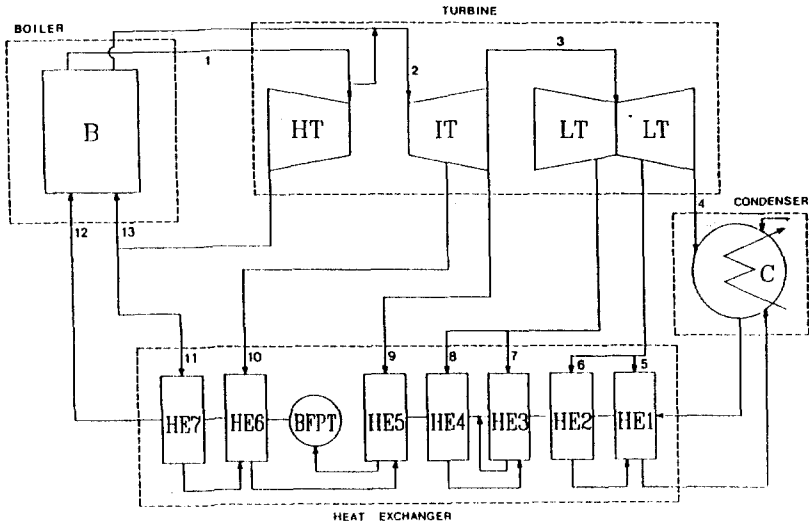


Fig. 1 Schematic diagram of steam power plant

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 엔탈피 평형 계산

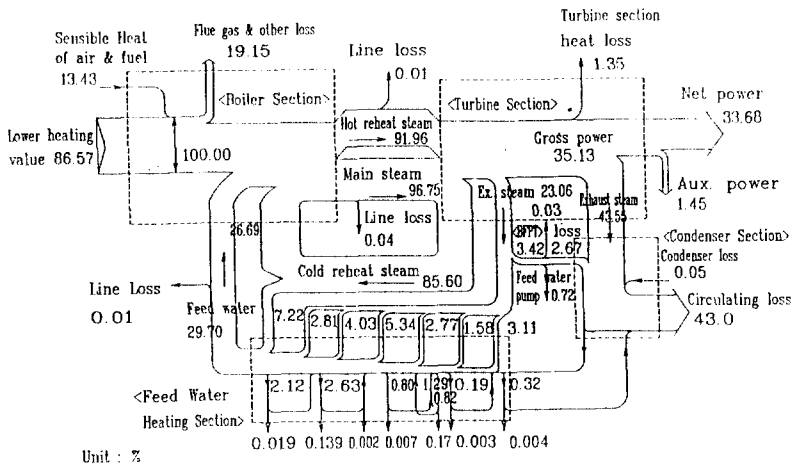
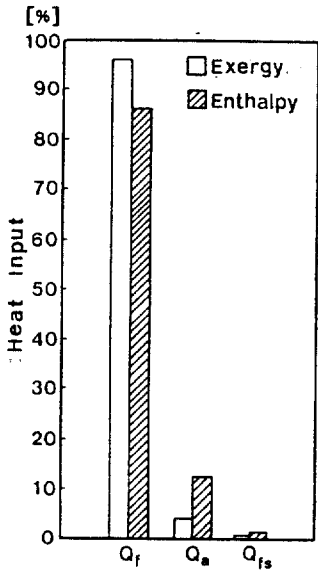


Fig. 2 Enthalpy balance diagram (load 555 MW)

Fig. 2는 부하 555 MW일 때의 엔탈피 정산도를 도시한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 공급되는 에너지는 연료의 저발열량이 86.57%, 공기의 현열이 12.31%, 연료의 현열이 1.12%이었으며, 유효한 일로 전환되는 에너지는 35.13%이며, 이 중 소내 소비 에너지

가 1.45%이었다. 한편, 복수기에서 해수로 제거되는 열량이 43.1%로 가장 크고, 보일러 급수 펌프 손실이 0.03%로 가장 적은 것으로 나타났다. 한편, 보일러에서 손실을 살펴 보면 복사 및 전열 손실이 13.0%이고, 연소 배출 가스 손실 4.73%, 미연 가스 손실이 1.43

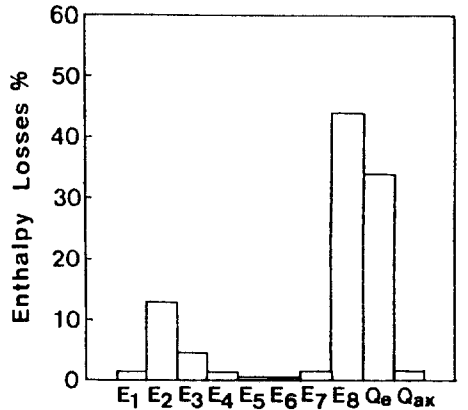
%로 보일러에서의 손실은 19.16%이었다. 한편 복수기 영역을 살펴보면 터빈으로부터 받은 열량이 43.55%, 급수 펌프로부터 받은 열량이 2.67%, 드레인되는 열량이 0.31%, 복수기 손실이 0.05%, 냉각수로 제거되는 손실이 43.1%, 급수로 들어가는 열량이 3.48%이었다. 급수 가열기 영역의 입·출열은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 극히 적은 것으로 나타났다.



Q_f : Chemical energy of fuel
 Q_a : Sensible heat of air
 Q_{fs} : Sensible heat of fuel

Fig. 3 Input energy of steam power plant

한편 Fig.3은 증기 원동소로 공급되는 연료의 화학 에너지 Q_f , 공기의 현열 Q_a , 연료의 현열 Q_{fs} 을 엔탈피와 엑서지로 계산하여 표시한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 원동소로 공급되는 화학 에너지는 엑서지의 경우 $Q_f = 95.3\%$, $Q_a = 4.3\%$, $Q_{fs} = 0.4\%$ 이고, 엔탈피 정산의 경우에는 $Q_f = 86.57\%$, $Q_a = 12.31\%$, $Q_{fs} = 1.12\%$ 이었다. 엑서지의 경우 Q_f 는 식 (1)에서 보는 바와 같이 연료의 고발열량에 각 성분 가스의 주위 온도에서의 보유 열량의 합으로 표시되기 때문이며, Q_a , Q_{fs} 는 엔탈피 정산의 경우가 큰 것으로 나타났다.



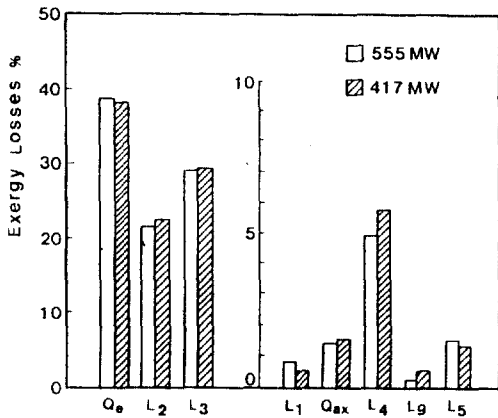
E_1 : Unburnt loss
 E_2 : Radiation heat loss and others
 E_3 : Flue gas loss
 E_4 : Turbine loss
 E_5 : BFPT loss
 E_6 : Condenser loss
 E_7 : Plant line and other loss
 E_8 : Circulating loss
 Q_e : Net power
 Q_{ax} : Auxiliary power

Fig. 4 Enthalpy losses of steam power plant

Fig.4는 원동소 출력 555MW일 때의 엔탈피 계산 결과를 도시한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 공급 에너지 중에서 유효하게 이용된 에너지는 유효 출력 $Q_e = 33.68\%$, 소내 출력 $Q_{ax} = 1.45\%$ 이며, 보일러손실이 19.16%, 복수기에서 제거되는 열량이 43.1%로 가장 크며, 다른 손실은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

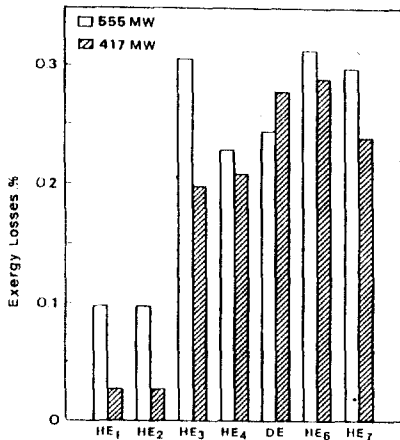
4.2 엑서지 평형 계산

Fig.5는 앞에서 다룬 엑서지식을 이용하여 계산한 결과를 도시한 것이다. 이 흐름도에서 보는 바와 같이 해석 영역은 엔탈피 정산일 때와 같이 보일러, 터빈, 복수기 및 급수 가열기 영역으로 구분하였으며, 그 상세한 흐름 내용은 평형도와 같다. 엔탈피 정산과 비교하여 보면 전열 손실이 28.4%, 연소에 의한 비가역 손실이 22.0%로 매우 높은 것으로 나타났다. 그러나 유용한 엑서지는 38.3%로 엔탈피 정산의 경우보다 높은 것으로 나타났다. 이들 중



Q_e : Net power
 L_2 : Combustion loss
 L_3 : Boiler transfer loss
 L_1 : Flue Gas loss
 Q_{ax} : Auxiliary power
 L_4 : Turbine loss
 L_9 : BFPT loss
 L_5 : Condenser transfer loss

Fig. 7 Comparison of exergy losses

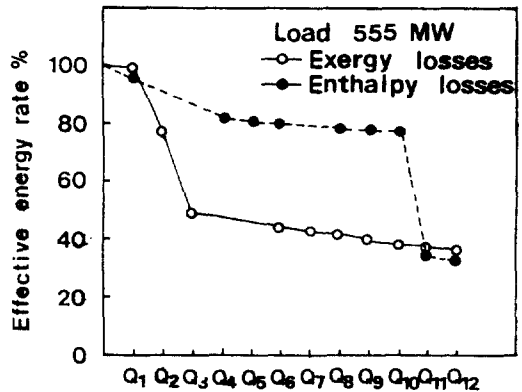


HE : Heat Exchanger, DE : Deaerator

Fig. 8 Exergy losses of heat exchanger

지식할 수는 없으나 출력조건에 따른 엑서지 손실의 분포 경향은 대체로 유사하며, 손실의 차이는 크게 나타나지 않았다.

Fig. 8은 추기에 의한 열교환기의 엑서지 손실을 앞에서와 같이 2 가지 부하에 대하여 비교한 것이다. 이들 선도에서 보는 바와 같



Q_1 : Flue gas loss
 Q_2 : Combustion loss
 Q_3 : Boiler transfer loss
 Q_4 : Radiation heat loss and others
 Q_5 : Unburned loss
 Q_6 : Turbine loss
 Q_7 : Feed water transfer loss
 Q_8 : BFPT loss
 Q_9 : Line loss
 Q_{10} : Condenser loss
 Q_{11} : Circulating loss
 Q_{12} : Auxiliary loss

Fig. 9 Effect of enthalpy and exergy losses on the effective energy rate

이 보일러 및 터빈부 손실에 비하여 급수 가 열기에서 생기는 손실은 극히 적음을 알 수 있다. 따라서 손실을 저감시키고 성능을 향상시키기 위해서는 보일러 및 터빈에서 발생하는 유효 에너지 손실을 저감할 수 있도록 설비를 개선하는 것이 필요하다. Fig. 9는 유효 에너지율과 원동소 손실과의 관계를 도시한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 유효 에너지율은 보일러 설비를 통과할 때까지는 엔탈피 기준으로 보면 80.84%이고 엑서지 기준의 경우에는 48.68%이었다. 한편 터빈설비의 경우에는 엔탈피 기준의 경우 33.68%이고 엑서지 기준의 경우에는 36.72%이었다. 이들을 비교하여 보면 송전단 출력에는 큰 차이가 없으나 엑서지의 경우에는 보일러 구간 손실이 크고, 엔탈피의 경우 터빈구간 손실이 크음을 알 수 있다. 부하의 변화에 대한 영향을 살펴보면 대체로 엑서지 손실 비

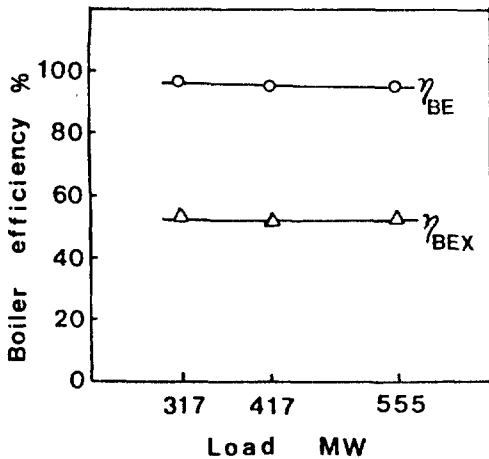


Fig. 10 Effect of plant load on the boiler efficiency

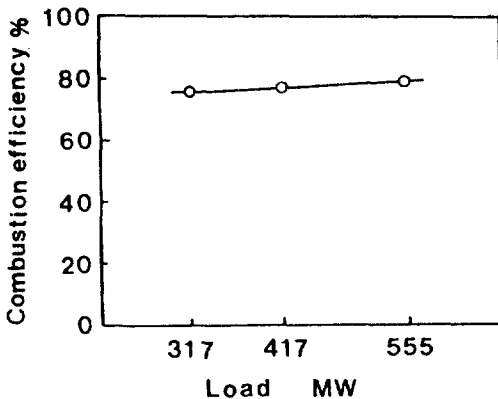


Fig. 11 Effect of plant load on the combustion efficiency

율은 거의 유사하나 연소 효율은 Fig. 10에서 보는 바와 같이 부하의 증가와 더불어 다소 증가하는 경향을 보이고 있으며 보일러의 엔탈피 효율 및 엑서지 효율은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 큰 변화는 나타나지 않았다.

5. 결 론

충동형 재생 재열 복수식 증기 원동소 사이클의 부하 변화에 대한 성능 실험치를 이용하여 보일러, 터빈, 복수기 급수 가열기에 대한 엔탈피 및 엑서지 정산으로부터 얻은 결

과는 다음과 같다.

(1) 증기 원동소의 열평형 계산을 엔탈피 및 엑서지 정산 방법을 확립하고, 원동소의 보일러, 터빈, 복수기 및 급수 가열기 등의 엑서지 평형을 구하고 유효 에너지 정산 방법을 제시하였다.

(2) 증기 원동소의 엔탈피 정산 결과 복수기의 냉각 손실 열량이 가장 크고 그 다음이 보일러 손실이며, 유효하게 일로 변환되는 에너지는 원동소 출력 555 MW의 경우 35.13% 정도이다.

(3) 증기 원동소의 엑서지 손실은 보일러의 전열 손실이 가장 크고 그 다음이 연소에 의한 비 가역 손실이며, 유효하게 일로 전환되는 엑서지는 원동소 출력 555 MW인 경우 38.3% 정도이다. 따라서 원동소 성능 향상을 도모하기 위해서는 보일러의 전열 손실과 연소에 의한 손실을 저감시킬 수 있는 성능 개선책이 강구되어야 한다.

(4) 엑서지 정산 결과 증기 원동소의 급수 가열기와 복수기의 손실 엑서지는 보일러 손실과 터빈 손실에 비하여 매우 적다.

(5) 증기 원동소의 연소 효율은 원동소 부하가 증가함에 따라 증가하며, 원동소 부하 변화가 보일러 효율에 미치는 영향은 그다지 크지 않는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 伊藤文夫·小林武志·藤本健悦: “火力發電ユニットのエクセルギー評價” 火力原子力發電 Vol. 30, No. 7, p.674, 1979.
2. Adrian Bejan: “Advanced Engineering Thermodynamics”, John Wiley & Sons, pp.114, 1988.
3. Adrian Bejan: “Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow”, John Wiley & Sons, pp.32, 1982.
4. 藤田恭伸·大田治彦: “ボイラのエネルギー勘定について”, 熱管理と公害 Vol. 29, No. 12, p. 144, 1977.

5. M. Hussein, R.J. Wood, P.W. O'Callaghan and S.D. Probert: "Efficiencies of Exergy Transductions", *Applied Energy* Vol.6, pp.371, 1980.
6. G. Tsatsaronis and M. Winhold: "Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy-Conversion Plants", *Energy* Vol. 10, No.1, pp.81-94, 1985.
7. Robert B. Evans: "Thermoeconomic Solution and Exergy Analysis", *Energy* Vol.5, pp.805-821, 1980.
8. K.F. Knoche, W. Hasberg and M. Roth: "Possibilities of Improving the Efficiency of Power Generation with Regard to Electrolytic Water Splitting", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.9, No.8, pp.669-676, 1984.
9. J.W. Chinneck and M. Chandrashekar: "Models of Large-Scale Industrial Energy System", *Energy* Vol.9, No.1, pp.21-34, 1984.