

## 엑서지분석에 의한 熱併合發電의 效率提高에 관한 연구

오영삼 · 김종진 · 최기련\* · 목영일

아주대학교 에너지학과

\*에너지자원기술개발지원센터

## Exergy Analysis of A Combined Heat and Power Plant

Young Sam Oh, Jong Jin Kim, Ki Ryun Choi\* and Young Il Mok

Department of Energy, Ajou University

\*R & D Management Center for Energy and Resources

### 요 약

엑서지의 개념을 이용하여 에너지변환시스템의 성능을 분석함으로써 시스템의 최적화의 시스템효율을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하였다. 복합화력 열병합 발전 시스템을 운전방식에 따라 3가지 시스템조합으로 구분하고 이에 대한 엑서지효율, 그리고 시스템조합의 각 흐름들에 대한 엑서지량과 엑서지 손실량을 계산하였다. 또한 이 양들에 대한 경제적 가치를 평가하고 엑서지 효율이 낮고 비용이 많이 드는 장치를 규명하여 썬브시스템의 교체와 보수·유지에 대한 우선 순위를 결정하였다. 이러한 결과는 에너지 변환시스템의 효율 향상과 경제적 운영을 위한 계획수립에 도움을 줄 수 있다.

**Abstract**—In this paper, the performance of an energy conversion system is analyzed using two efficiency concepts, one of conventional and the other of exergetic efficiency. The objective of this analysis was to improve and optimize the energy conversion system in point, namely, and LNG-fired Combined Heat and Power Plant (CHP). To this end, exergies which represent the true efficiency figures were evaluated for various flows of the system with a set of system configurations given. Then the economic values of the exergies were assigned to respective flows and subsystems. With these economic data locations of inefficiencies and opportunities for improvement are identified.

### 1. 서 론

에너지를 이용함에 있어서 전기와 같은 고급 에너지를 사용하기 위해서는 반드시 에너지 변환과정을 거쳐야 한다. 이러한 에너지의 변환과정에서 시스템의 비가역성으로 인하여 에너지의 손실이 필연적으로 발생하게 된다. 기존의 화력발전방식의 열효율은 현재 열역학 이론이나 기술적 개선으로 대폭적인 효율증가를 바랄 수 없는 한계에 도달하였다. 그렇지만 성능의 저하 감소 즉, 장치나 썬브시스템을 파악함으로써 발전소의 효율을 향상시킬 수 있는 여지는 남아 있다. 따라서 발전소 전반의 성능을 분석하고 총괄효율을 증대시키는데 도움을 줄 수 있는 분석방법에 대한 필요성이 제기된다.

종래에는 열기관의 성능분석을 통상적으로 열과 일의 입력/출력을 단순히 비교하는 에너지효율(energy efficiency)로 그 성능을 분석하였다. 그러나 열과 전력을 같이 생산하는 열병합 발전소의 효율을 계산함에 있어서 기존의 효율의 개념을 사용하는 것은 많은 모순을 내포하고 있으며 해석결과가 지니는 의미도 제한되어 있다. 왜냐하면 열과 일의 가치는 동등하지 않기 때문이다. 따라서 비교의 기준으로서 열(heat)과 일(work) 중 어느 하나를 기준으로 하여 효율이 계산되고 이러한 효율로 시스템들간의 비교가 이루어져야 한다. 이러한 이유에서 성능의 비교기준으로서 기준상태에 도달할 때까지 얻을 수 있는 최대한의 일의 양을 뜻하는 유용에너지(available energy) 즉, 엑서지(exergy) 개념을 도입하여 효율을

비교·분석하는 것이 바람직하다.<sup>11)</sup>

따라서, 본 연구는 열병합 발전과 기존의 전력만을 생산하는 발전소와의 효율을 비교하는데 대한 비교기준으로서 엑서지효율을 정의하고, 복합화력 열병합 발전소의 운전모드에 따라 시스템구성에 대해 에너지효율(energy efficiency)과 엑서지효율(exergetic efficiency)을 계산하여 비교·검토하였다. 또한 시스템의 각 조합에 대해 엑서지밸런스(exergy balance)와 코스트밸런스(cost balance)를 세워 시스템의 각 흐름의 엑서지에 대한 가치를 계산하였고, 그 결과로서 엑서지손실비용이 많이 발생하는 장치를 규명하였다.

이러한 분석의 결과는 시스템의 각 장치들에 대한 엑서지손실비용을 제공해 주는데, 이것은 손실이 어떤 장치에서 많이 발생되며 그 손실들의 크기는 어느 정도인지를 상대적으로 보여주게 된다. 이러한 정보는 시스템의 보수·유지에 대한 우선순위를 정해줌으로써 시스템의 효율향상에 도움을 줄 뿐만 아니라 보다 효율적인 시스템 설계에 이용될 수 있다.<sup>12)</sup>

본 연구에서는 파이프에서의 에너지손실은 없다고 가정하였으며, 엑서지 경제성분석시 시스템의 투자비용을 함몰비용(sunk cost)이라고 가정하여, 투입 연료 비용만이 분석에서 고려되어졌다.

## 2. 엑서지 경제성분석

### 2-1. 엑서지의 개념과 기본식

한 에너지원이 가지고 있는 에너지는 일로 전환할 수 있는 부분과 전환할 수 없는 부분으로 나뉘질 수 있다. 이 때 일로 전환할 수 있는 부분의 에너지를 엑서지(exergy)라고 하며, 전환할 수 없는 부분의 에너지를 아니지(anergy)라고 부른다.<sup>11)</sup> 즉, 엑서지(exergy)는 한 에너지원이 주어진 상태에서 기준 환경조건(environmental condition)과 평형상태에 도달할 때까지 최대한으로 얻을 수 있는 일의 양을 말하므로 한 형태의 에너지로부터 다른 형태의 에너지로 변환되어질 수 있는 총 에너지량을 의미한다.<sup>12)</sup> 이처럼 엑서지는 에너지와 유사한 개념으로서 에너지의 가치를 나타내며 한 에너지원이 가지고 있는 유용한 에너지에 대한 표현이라 할 수 있다.<sup>11)</sup>

이 엑서지량은 일반적으로 주위라고 생각되어지는 저온열원을 기준으로 하여 계산되어지기 때문에 어떤 온도 T에 있는 한 에너지원에서 온도 T<sub>0</sub>인 저온열원으로 에너지가 흐를 때 두 온도 사이에서 최대한 얻을 수 있는 일(work)의 양은 저온열원의 온도가 낮으면 낮아질수록 많아지게 된다. 이러한 저온열원의 온도는 환경모델(environmental model)에 따라 정하여지며, 환경모델은

저온열원에 대한 기준을 제공해 주므로 환경모델을 어떻게 정하느냐에 따라 한 시스템이 가지고 있는 엑서지량의 계산값이 달라진다. 그러나 엑서지 분석에서는 엑서지의 변화량을 사용하여 분석하기 때문에 기준이 되는 환경모델에 대한 영향은 무시할만 하다.<sup>13)</sup>

엑서지분석(exergy analysis)에서 엑서지량은 한 시스템과 주위(surroundings) 사이에 열전달이 일어날 때 시스템의 온도 T와 주위온도 T<sub>0</sub>사이에서 작동되는 카르노사이클에서 생성되어지는 일에 의해서 측정된다. 따라서 시스템이 한 상태(1)에서 기준상태(0)로 도달하면서 외부로 일을 할 때, 시스템에 대한 열역학 제 1, 2법칙은 식(1)과 식(2)와 같다.

$$Q_{0,1} + W_{0,1} = H_1 - H_0 \quad (1)$$

$$(S_1 - S_0)T_0 - Q_{0,1} = 0 = S_{gen}T_0 \quad (2)$$

여기서,

H<sub>1</sub> - H<sub>0</sub> : 기준상태(T<sub>0</sub>)로 도달될 때까지 시스템에 공급되어지는 열량(kcal)

W<sub>0,1</sub> : 외부로 행해지는 일의 양 즉, 엑서지량(kcal)

Q<sub>0,1</sub> : 저온 열원으로 배출되는 열량(kcal)

S<sub>gen</sub> : 상태변화로 인한 생성 엔트로피(kcal/K)

T<sub>0</sub> : 기준상태의 온도(K)

이다. 위의 식(1)과 식(2)의 조합으로, 식(4)와 같은 한 흐름의 엑서지에 대한 표현을 유도해 낼 수 있다.

$$W_{0,1} = H_1 - H_0 - T_0(S_1 - S_0) \quad (3)$$

즉,

$$E = H_1 - H_0 - T_0(S_1 - S_0) \quad (4)$$

여기에서 E는 엑서지를 의미한다. 따라서 식(4)로부터 어떤 장치로 투입되는 엑서지량과 배출되는 엑서지량을 계산할 수 있다. 그리고 열전달에 대한 엑서지는 식(5)처럼 주어진다.

$$dE = dQ \times (T - T_0) / T \quad (5)$$

여기서,

Q : 고온열원에서 저온열원으로 전달되는 열량(kcal)

T : 고온열원의 온도(K)

T<sub>0</sub> : 기준상태(저온열원)의 온도(K)

만일 열교환기에서 처럼 한 과정(process)이 진행되는 동안 외부로 아무일도 행해지지 않는다면 이 엑서지의 변화량은 엑서지손실량(exergy loss)이 된다.

엑서지의 양을 계산하는데 있어 다음 3가지의 가정이

필요하다. 첫째, 가역과정이라야 하며, 둘째, 열전달은 계와 주위사이에서만 이루어져야 한다. 이것은 엑서지 상태는 주위와 평형상태에 있다.

연료의 엑서지량은 다음의 란트(rant)의 근사식을 이용하여 구할 수 있다.<sup>4)</sup>

$$\text{기체연료: } E = 0.95 H_h \quad (6)$$

$$\text{액체연료: } E = 0.975 H_h \quad (7)$$

$$\text{고체연료: } E = H_1 + rW \quad (8)$$

여기서,

- $H_h$  : 연료의 고위발열량(kJ/kg)
- $H_1$  : 연료의 저위발열량(kJ/kg)
- $r$  : 1 atm 25°C 에서의 물의 증발열(2438 kJ/kg)
- $W$  : 연료중의 전체 수분량(g)

그리고, 연소과정에서 비가역 손실은 식(9)와 같이 된다.

$$\text{연소과정의 비가역 손실} = m \times \Delta H \frac{T_0}{T_F} \quad (9)$$

여기서,

- $m$  = 유량(kg/hr)
- $\Delta H$  = 연료의 반응엔탈피(kcal/kg)
- $T_0$  = 기준온도(K)
- $T_F$  = 연소온도(K)

### 2-2. 에너지효율과 엑서지효율(Exergetic Efficiency)

에너지 변환시스템의 분석과 평가에 사용되어지는 변수중의 하나는 에너지효율(energy efficiency)이다. 그러나 엑서지분석에서는 시스템의 효율을 엑서지효율(유효도; effectiveness)에 의해서 평가되어진다.

발전시스템에 대한 에너지효율  $\eta$ 와 엑서지효율  $\epsilon$ 는 식(10)과 식(11)로 정의되어진다.<sup>1)</sup>

$$\text{에너지효율} = \frac{\text{시스템으로부터 생성되는 에너지량}}{\text{시스템에 투입되는 에너지량}} \quad (10)$$

$$\text{엑서지효율} = \frac{\text{시스템으로부터 생성되는 엑서지량}}{\text{시스템에 투입되는 에너지량}} \quad (11)$$

$$= \frac{\text{생성엑서지} - \text{손실엑서지}}{\text{투입엑서지}}$$

만일 열병합 발전에서 처럼 투입연료의 유효에너지가 전력과 난방열을 동시에 생산하게 될때 엑서지효율은 다음과 같이 된다.

$$\epsilon = \frac{W_e + E_H}{Q_F - T_0 \Delta S_{R_x}} \quad (12)$$

여기서,

- $W_e$  : 생산되는 전력량(kcal)
- $E_H$  : 난방열에 대한 유효에너지(kcal)
- $Q_F$  : 투입되는 연료의 발열량(kcal)
- $T_0$  : 기준온도(주위온도) (K)
- $S_{R_x}$  : 연료의 반응엔트로피(kcal/K)

그리고 이러한 엑서지효율에서 난방열에 대한 유효에너지( $E_H$ )를 난방열( $Q_H$ )로 대체하면 기존개념의 열효율( $\eta$ )이 된다.

$$\eta = \frac{W_e + Q_H}{Q_F} \quad (13)$$

위의 식에서 보는 바와 같이 엑서지효율( $\epsilon$ ; exergetic efficiency)와 열효율( $\eta$ ; efficiency)의 차이는 난방열을 유효에너지의 관점에서 보느냐 아니면 그렇지 않느냐의 차이일 뿐이다. 그런데 난방열을 일(work)이란 관점에서 본다면 난방열에 대한 엑서지량이 출력이 되므로 전력과 난방열을 같이 생산하는 시스템에서의 효율은 엑서지효율로 평가되는 것이 바람직하다.

현존 에너지 변환시스템의 분석에서 중요한 과제는 시스템에서 유효일이 손실되는 위치와 손실의 정도, 그리고 보수나 교체가 이루어진다면 이러한 손실들 중 어떤 손실을 우선적으로 줄이는 것이 시스템의 효율을 가장 높일 수 있는지를 결정하는 것이다.

### 2-3. 엑서지분석과 엑서지 경제성분석

엑서지분석은 에너지 변환시스템의 각 장치들에서 엑서지손실들을 규명하여 최적의 설계와 시스템의 효율을 향상시킬 수 있는 정보를 제공해 준다. 엑서지분석과 경제성분석을 조합한 엑서지 경제성분석(exergoeconomic analysis)은 엑서지밸런스 뿐만 아니라 투자비, 운전비 등을 고려한 코스트밸런스(cost balance)를 기초로 하여 시스템의 각 장치로 들어가고 나오는 엑서지 흐름들에 대한 경제적 가치를 분석하는 것이다. 이러한 분석으로부터 비가역성에 의한 비용의 계산을 가능하게 해준다. 이러한 비용 즉, 엑서지손실(exergy loss)에 대한 경제적가치(economic value)는 엑서지효율이 낮고 비용이 많이드는 장치를 규명하는데 사용되어질 뿐 아니라, 에너지 변환시스템의 운영과 보수, 유지에 대한 유익한 정보들을 제공해 주게 된다.<sup>1)</sup>

엑서지 경제성 분석방법은 여러 단계들로 이루어진다. 본 연구에서는 주어진 열평형도로부터 엑서지정산을 행하여 각 장치에 대한 투입항목 엑서지와 산출항목

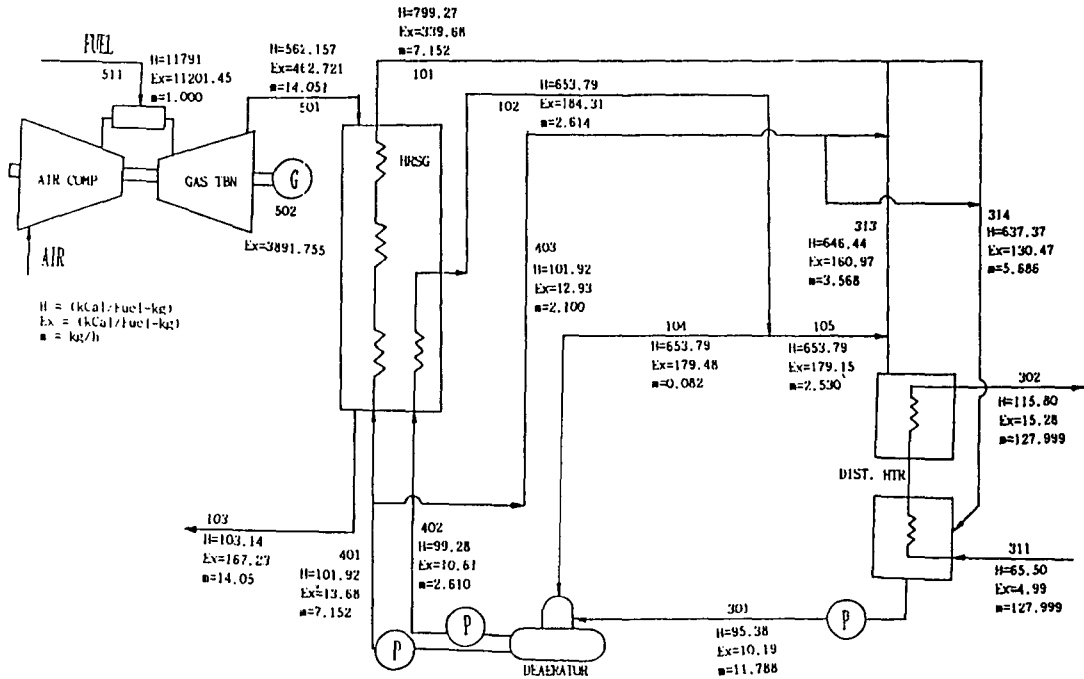


Fig. 1. Exergy balance of system I

엑서지를 계산한 후에 각각의 장치들에 대한 엑서지효율(exergetic efficiency)을 계산하였다. 그리고 각 흐름들에 대한 단위 엑서지가격(cost of unit exergy)과 각 장치들에 대한 평균 엑서지가격, 그리고 단위 엑서지손실비용(cost of unit exergy loss)을 구하였다. 마지막으로 각 장치들에 대한 엑서지손실비용(average cost of exergy loss)을 구하여 엑서지효율이 낮고 비용이 많이 드는 장치를 규명하여 보았다.

2-3-1. 적용시스템

본 연구에 적용한 CHP power plant(combined heat and power plant) 발전설비의 구성은 운전모드에 따라 3가지 시스템으로 구성할 수 있다. 즉, 시스템 조합 I은 가스터빈(gas TBN)과 배열회수보일러(HRSG)를 조합한 시스템으로서 가스터빈의 배열만을 배열회수보일러에서 흡수하여 발생된 증기 전량을 지역난방 열교환기로 공급함으로써 열수요를 충족시켜주는 방식이다. 시스템 조합 II는 가스터빈(gas TBN), 배열회수보일러(HRSG), 배압터빈(HP-TBN)을 조합한 시스템으로 가스터빈의 배열을 배열회수보일러에서 흡수하여 발생된 증기를 배압터빈에 보내어 전력을 생산하고, 증기터빈에서 배출된 증기를 지역난방 열교환기로 공급함으로써 필요한 열부하를 충족시켜주는 방식이다. 그리고 시스템 조합 III은 가스터빈(gas TBN), 배열회수보일러(HRSG), 배압터빈(HP-TBN) 그리고 복수터빈(LP-TBN)을 조합한

시스템으로 가스터빈의 배열을 배열회수보일러에서 흡수하여 발생된 증기로 배압터빈을 구동시키고, 배압터빈에서 나온 증기를 다시 복수터빈으로 보내어 많은 전력을 생산하는 방식이다.

2-3-2. 엑서지량과 엑서지밸런스

엑서지분석을 위해서는 먼저 각 흐름들에 대한 엑서지량을 계산하고 엑서지 밸런스를 세워야 한다. Fig. 1, 2, 3에서는 각각 시스템 조합 I, II, III의 엑서지밸런스이며 분석의 편의를 위해 각 장치에 들어가고 나오는 흐름에 대해 번호를 붙였다.

2-3-3. 시스템의 총괄 에너지효율 및 엑서지효율

시스템 조합 I, II, III에 대한 gas turbine, CHP cycle, combined cycle에 대한 총괄효율은 Table 1과 같다. Table 1에서 CHP cycle의 효율은 배열회수보일러를 통하여 회수되어지는 열을 이용하는 rankin cycle의 효율을 의미하며 combined cycle의 효율은 gas turbine과 rankin cycle을 합한 전체 가스터빈 복합화력발전의 총괄효율을 의미한다.

2-3-4. 단위 엑서지가격

시스템의 각 흐름에 대한 단위 엑서지가격(cost of unit exergy)은 각 장치에 대한 코스트밸런스를 이용하여 구할 수 있다. 시스템의 각 장치들에 대한 코스트밸런스는 다음과 같은 일반식으로 나타낼 수 있다.

$$\sum E_{PCO} = Z_k + \sum E_{FCI} \tag{17}$$

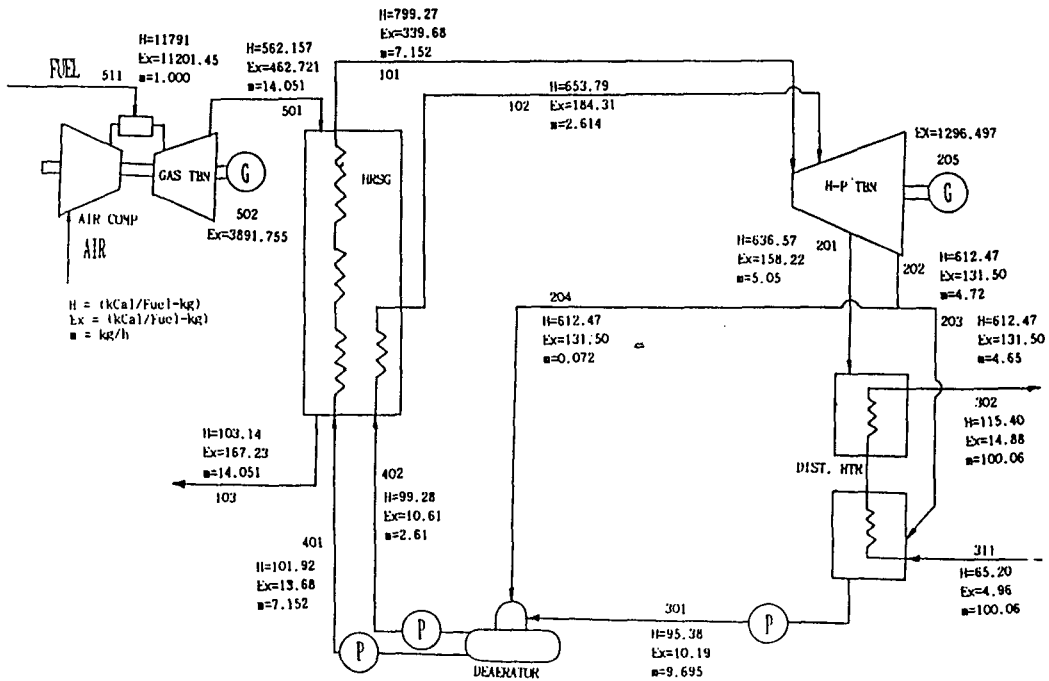


Fig. 2. Exergy balance of system II

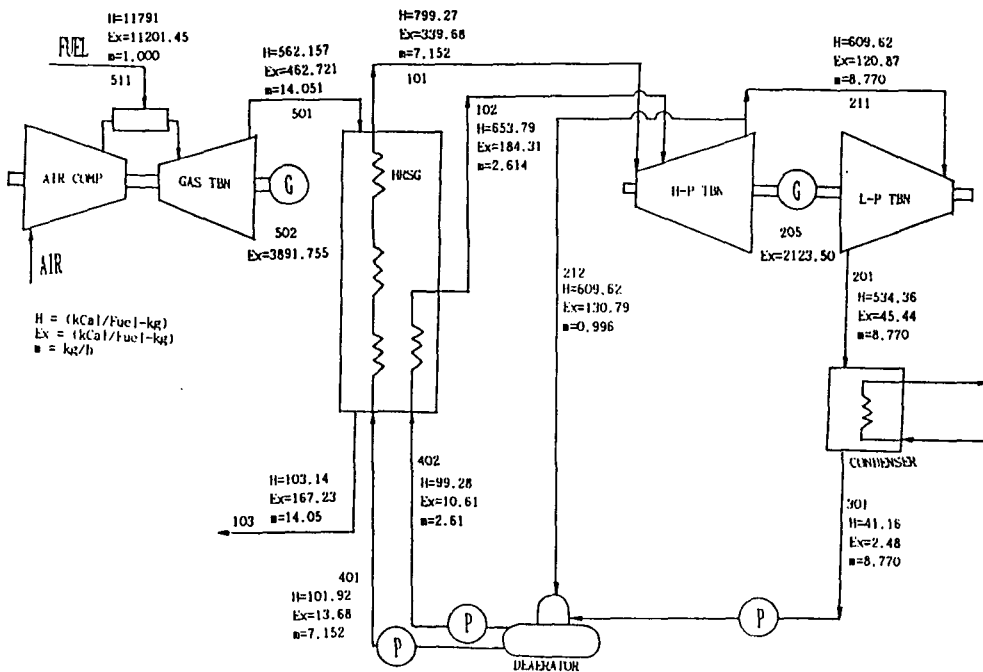


Fig. 3. Exergy balance of system III

식(17)에서  $E_P$ 와  $E_F$ 는 각각 산출항목과 투입항목의 엑서지량이며  $c$ 는 단위 엑서지가격을 나타낸다. 그리고

$Z_k(0 \leq Z_k \leq K)$ 로 나타내어지는 항목은 전체 투자비에서 각 장치들의 투자비가 차지하는 일정비율을 나타낸다.

**Table 1. Energy and exergetic efficiency**

System Combination	I	II	III
Gas Turbine Efficiency	33.0%	33.0%	33.00%
Gas Turbine Exergetic Efficiency	34.70%	34.70%	34.70%
CHP Cycle Efficiency	81.51%	80.05%	26.45%
CHP Cycle Exergetic Efficiency	20.25%	35.20%	32.14%
Combined Cycle Efficiency	87.61%	86.65%	50.74%
Combined Cycle Exergetic Efficiency	46.50%	55.18%	53.40%

†) CHP Cycle: Rankin Cycle  
 Combined Cycle: Gas Cycle+Rankin Cycle

**Table 2. Fuel exergy and product exergy**

System	Component	Fuel exergy	product exergy	exergy loss	exergetic efficiency
		$E_{FK}$ (kcal/kg <sub>F</sub> /hr)	$E_{PK}$ (kcal/kg <sub>F</sub> /hr)	$E_{LK}$ (kcal/kg <sub>F</sub> /hr)	$\epsilon_k$
I	Gas TBN	4699.758	3891.755	808.075	0.828
	HRSG	4151.943	2805.982	1345.961	0.676
	Dist. Heater	2796.790	1316.662	1480.128	0.471
II	Gas TBN	4699.758	3891.755	808.075	0.828
	HRSG	4151.943	2785.585	1366.359	0.676
	HP Turbine	1491.987	1296.497	195.481	0.869
	Dist. Heater	1310.932	849.756	318.757	0.648
III	Gas TBN	4699.758	3891.755	808.075	0.828
	HRSG	4151.943	2772.943	1379.851	0.668
	HP-LP TBN	2368.904	2123.495	245.409	0.896

†) kg<sub>F</sub> : unit mass of fuel.

그리고 첨자  $i$ 와  $o$ 는 각각 장치에 들어가고 나오는 흐름을 나타낸다. 그리고 한 장치에 대한 엑서지가격(cost of exergy)은 식(18)과 같이 정의된다.<sup>13)</sup>

$$II_r = E_r C_r \tag{18}$$

여기서,

$r = 1 \dots \dots NS$ (시스템의 총 흐름수)

위 식에서  $II_r$ 는 각 흐름에 대한 엑서지가격이며  $E_r$ 은  $r$ 번째 흐름에 대한 엑서지량을 나타낸다. 그리고  $C_r$ 은 각 흐름에 대한 상대적인 비용으로서 단위 엑서지가격을 나타낸다.

만일  $ND$ 개의 장치들로 이루어진 시스템에서는  $ND$ 개의 코스트밸런스(cost balance)가 세워질 수 있다. 그리고 전체 엑서지흐름의 수가  $NS$ 개라면 공정의 각 흐름들에 대한 단위 엑서지가격을 계산하기 위하여( $NS-ND$ )개의 관계식이 더 필요하게 된다. 추가적인 단위 엑서지가격 계산은 다음과 같은 가정하에 구하여 졌다.<sup>1)</sup>

(1) 한 장치로 투입되는 엑서지가격(exergy cost)은

그 장치로부터 배출되는 엑서지가격과 같다. (2) 한 장치로부터 배출되는 흐름이 여러 개일 경우 각 흐름에 대한 단위 엑서지가격은 그 흐름의 엑서지량에 비례한다. (3) 한 흐름이 여러 갈래로 나누어질 때, 그 흐름들에 대한 엑서지가격은 서로 같다. (4) 외부에서 시스템 내로 투입되는 흐름과 외부로 배출되는 흐름 중 지역난방용 열교환기로 들어가는 흐름과 배열회수보일러로부터 배출되는 흐름의 엑서지가격은 각각 그 흐름의 엑서지량에 비례한다. (5) 투입되는 공기의 엑서지는 무시할 수 있다. (6) 각 장치에 대한 자본비용과 기타 고정비용은 0 (zero)이다. (7) 연료 LNG gas의 단위 질량당가격은 158.15원이다. (8) 환경모델로서 주위온도는 285.15 K이다. (9) 연료의 화염온도(flame temperature)는 1373.15 K이다.

각 장치들의 흐름에 대한 단위 엑서지가격은 엑서지의 절대값과 ( $NS-ND$ )개의 추가적인 관계식을 얻기 위해 선택한 환경모델(environmental model)에 따라 변하게 된다. 그래서 단위 엑서지가격은 어느 정도는 주관적이라고 할 수 있으나 엑서지 경제성분석은 시스템의 각

**Table 3. Thermodynamic property and unit exergy cost of system I**

Flow No.	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> )	H (kcal/kg)	S (kcal/kg·K)	m (kg/kg <sub>F</sub> )	Ex (kcal/kg)	c <sub>r</sub> (₩/Mcal)
101	470.0	65.00	799.27	1.6135	7.152	339.68	17.507
102	143.4	4.05	635.79	1.6482	2.614	184.31	3.472
103	110.0	1.06	103.23	—	14.051	167.23	2.993
104	143.4	4.05	653.79	1.6663	0.082	179.48	0.106
105	143.5	4.05	653.79	1.6663	2.534	179.15	3.272
301	67.6	3.00	95.38	0.2998	11.788	10.19	3.193
311	65.0	12.00	65.50	0.2132	127.999	4.99	4.519
302	115.4	12.00	115.80	0.3536	127.999	15.28	13.831
313	120.4	2.05	646.44	1.7043	3.568	160.97	17.507
314	95.3	0.87	637.37	1.7795	5.686	130.47	17.507
401	100.2	91.00	101.92	0.3105	7.152	13.68	0.705
402	99.1	4.50	99.28	0.3120	2.614	10.61	0.200
403	100.2	91.00	101.92	0.3105	2.102	12.93	0.705
501	530.0	1.06	562.16	—	14.051	462.72	7.848
502	—	—	—	—	—	3891.76	27.525
511	12.0	—	11791.00	—	1	11201.45	14.119

**Table 4. Thermodynamic property and unit exergy cost of system II**

Flow No.	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> )	H (kcal/kg)	S (kcal/kg·K)	m (kg/kg <sub>F</sub> )	Ex (kcal/kg)	c <sub>r</sub> (₩/Mcal)
101	470.0	65.00	799.27	1.6135	7.152	339.68	18.958
102	142.9	3.93	635.79	1.6482	2.614	184.31	3.760
103	110.0	1.06	103.14	—	14.051	167.23	3.056
201	—	2.09	636.57	1.6793	5.046	158.22	10.533
202	142.9	1.03	612.47	1.6885	4.721	131.50	8.191
203	142.9	1.03	612.47	1.6885	4.649	131.50	8.191
204	142.9	1.03	612.47	1.6885	0.072	131.50	8.191
205	—	—	—	—	—	1296.50	26.513
301	67.6	3.00	95.38	0.2998	9.695	10.19	1.226
302	115.0	12.00	115.40	0.3536	100.058	14.88	10.140
311	65.0	12.00	65.20	0.2132	100.058	4.96	3.382
401	100.2	91.00	101.92	0.3105	7.152	13.68	0.764
402	99.1	4.50	99.28	0.3120	2.614	10.61	0.217
501	530.0	1.06	562.16	—	14.051	462.72	8.454
502	—	—	—	—	—	3891.76	26.513
511	12.0	—	11791.00	—	1	11201.45	14.119

흐름에 대한 엑서지가격(exergy cost) 계산을 통하여 시스템 내부의 비용흐름(monetary flows)에 대한 정보를 우리에게 제공해 준다. 그리고 엑서지손실비용을 계산해야 할 필요가 있을 때, 이러한 단위 엑서지가격은 각 장치의 엑서지 손실비용을 계산하기 위한 기초자료가 된다. 또한 엑서지 손실비용은 엑서지가격(II)들간의 차이를 말하므로 이러한 값들은 단위 엑서지가격보다 환

경모델의 주관적인 선택으로부터 발생하는 오류를 줄일 수 있다.

Table 3,4,5는 각 시스템 조합의 열평형 데이터와 엑서지량, 단위 엑서지가격을 나타낸 것이다.

2-3-5. 투입항목 엑서지와 산출항목 엑서지

시스템의 각 장치에 대한 투입항목과 산출항목은 엑서지효율의 정의에 의해서 구별되어진다. 즉, 투입항목

Table 5. Thermodynamic property and unit exergy cost of system III

Flow No.	T (°C)	P (kg/cm <sup>2</sup> )	H (kcal/kg)	S (kcal/kg·K)	m (kg/kg <sub>F</sub> )	Ex (kcal/kg)	c <sub>r</sub> (₩/Mcal)
101	470.0	65.00	799.27	1.6135	7.152	339.68	21.388
102	143.4	4.05	635.79	1.6482	2.614	184.31	4.242
103	110.0	1.05	103.14	—	14.051	167.23	3.447
201	—	0.03	534.36	1.7164	8.770	45.44	3.508
205	—	—	—	—	—	2123.50	24.703
211	—	1.03	609.62	1.7158	8.770	120.87	1.147
212	—	1.03	609.62	1.6810	0.996	130.79	1.147
301	—	0.08	41.16	0.1366	8.770	2.48	0.192
401	100.2	91.00	101.92	0.3105	7.152	13.68	0.861
402	99.1	4.50	99.28	0.3120	2.614	10.614	0.244
501	530.0	1.06	562.16	—	14.051	462.72	9.538
502	—	—	—	—	—	3891.76	24.703
511	12.0	—	11791.00	—	1	11201.45	14.119

은 엑서지효율식에서 분모항에 포함된 모든 흐름들로 이루어지며, 산출항목은 분자항에 포함되는 모든 흐름들로 이루어진다. 그러므로 투입항목(fuel)은 변화가 이루어지도록 추진력을 제공하는 엑서지량이며, 산출항목(product)은 바람직한 방향으로 생성되는 엑서지량을 말한다.<sup>13)</sup>

엑서지효율은 각 장치에 대한 엑서지밸런스로부터 구할 수 있다. 한 시스템의 k번째 장치에 대한 엑서지밸런스는 식(14)와 같이 표현된다.

$$E_{Fk} = E_{Pk} + E_{Lk} \tag{14}$$

여기서,

$E_{Fk}$  : 투입항목 엑서지(kcal/kg)

$E_{Pk}$  : 산출항목 엑서지(kcal/kg)

$E_{Lk}$  : 손실항목 엑서지(kcal/kg)

$k = 1 \dots \dots ND$ (장치의 수)

그리고 엑서지손실(exergy loss)은 엑서지밸런스 식으로부터 식(15)와 같이 표현된다.

$$E_{Lk} = E_{Fk} - E_{Pk} \tag{15}$$

한 장치에 대한 엑서지효율(exergetic efficiency)은 전체 시스템에 대한 엑서지효율의 정의처럼 한 장치에 투입된 엑서지에 대한 생성된 엑서지의 비를 말하므로, 한 장치에 대한 엑서지효율은 식(16)처럼 표현된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_k &= E_{Pk}/E_{Fk} \\ &= 1 - E_{Lk}/E_{Fk} \end{aligned} \tag{16}$$

시스템 조합 I, II, III의 각 장치에 대한 투입항목

엑서지와 산출항목 엑서지는 Fig. 2와 같다.

2-3-6. 투입항목과 산출항목의 평균단위 엑서지가격과 엑서지 손실비용

각 장치들에 대한 투입항목 엑서지와 산출항목 엑서지의 평균단위 엑서지가격(average cost of unit exergy)은 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$C_{Pk} = II_{Fk}/E_{Fk} \quad k = 1 \dots \dots ND(\text{장치의 수}) \tag{19}$$

$$C_{Pk} = II_{Pk}/E_{Pk} \quad k = 1 \dots \dots ND(\text{장치의 수}) \tag{20}$$

여기서,  $II_{Fk}$ 와  $II_{Pk}$ 는 각각 투입항목과 산출항목의 엑서지가격을 말한다. 엑서지 경제성분석을 위해 정의되어진 변수는 단위 엑서지손실비용  $\Delta C_L$ 이다. 한 장치의 단위 엑서지손실비용(cost of unit exergy loss)  $\Delta C_{Lk}$ 는 다음과 같이 정의되어진다.<sup>13)</sup>

$$\Delta C_{Lk} \equiv C_{Pk} - C_{Fk} \tag{21}$$

$$= (Z_k C_{Fk} E_{Lk})/E_{Pk} \tag{21}'$$

$$= (Z_k + C_{Pk} E_{Lk})/E_{Fk} \tag{21}''$$

위 식에서 투자비용  $Z_k$ 를 함몰비용이라고 가정하면 다음과 같다.

$$\Delta C_{Lk} \equiv C_{Pk} - C_{Fk} \tag{22}$$

$$= (C_{Fk} E_{Lk})/E_{Pk} \tag{22}'$$

$$= (C_{Pk} E_{Lk})/E_{Fk} \tag{22}''$$

따라서 k번째 장치에서 투입항목 엑서지나 산출항목 엑서지에 대한 단위 엑서지손실비용은 투자비용을 고려하지 않았을 때 엑서지손실량에 의해서 결정된다. 위의 식(22)''에서 보면 투입항목의 엑서지량  $E_{Fk}$ 이 고



**Table 6. Average cost of unit exergy and unit cost of exergy loss**

System	Component	Average cost of unit exergy		unit cost of exergy loss $\Delta_{CLK}$ (₩/Mcal)
		$C_{FK}$ (₩/Mcal)	$C_{PK}$ (₩/Mcal)	
I	Gas TBN	22.794	27.525	4.731
	HRSG	10.627	15.729	5.102
	Dist. Heater	15.669	18.349	2.680
II	Gas TBN	21.956	26.513	4.557
	HRSG	11.509	16.613	5.104
	HP TBN	22.028	26.513	4.485
	Dist. Heater	10.139	15.788	5.649
III	Gas TBN	20.456	24.703	4.247
	HRSG	12.985	19.443	6.458
	HP-LP TBN	22.144	24.703	2.559

**Table 7. Cost of exergy loss**

System	Component	cost of exergy loss	
		$A_{FK}$ (₩/kg <sub>F</sub> )	$A_{PK}$ (₩/kg <sub>F</sub> )
I	Gas TBN	18.597	22.255
	HRSG	14.302	21.172
	Dist. Heater	23.191	27.158
II	Gas TBN	17.741	21.423
	HRSG	15.725	22.698
	HP TBN	4.306	5.108
	Dist. Heater	3.233	5.033
III	Gas TBN	16.531	19.962
	HRSG	17.989	26.827
	HP-LP TBN	5.436	6.062

†) fuel exergy cost of subsystem K  
 product exergy cost of subsystem K  
 (₩/kg<sub>F</sub>):cost of unit input fuel mass

정되면, 산출항목의 단위 엑서지가격은 k번째 장치의 엑서지손실에 대한 한계비용이 된다. 이것은 전체 시스템에 아무런 변화를 주지 않고 k번째 장치에서  $dE_{Lk}$ 만큼의 엑서지손실을 줄일 수 있다면  $c_p dE_{Lk}$ 만큼의 비용을 절감할 수 있다는 것을 말해준다. 따라서 단위 엑서지가격과 엑서지손실과의 곱 즉,

$$A_{FK} = c_{FK} E_{Lk} \quad (23)$$

$$A_{PK} = c_{PK} E_{Lk} \quad (24)$$

는 k번째 장치에서 엑서지손실을 줄임으로서 절감가능한 비용을 말한다. 그러므로 한 장치의 엑서지손실비용이 크면 클수록 엑서지손실을 줄이기 위해서 그 장

치의 투자에 대한 우선순위가 높아진다.

Fig. 6은 각 시스템 조합에 대한 단위 엑서지가격과 단위 엑서지손실비용을 나타내었으며 Fig. 7은 절감가능한 엑서지 손실비용을 나타낸 것이다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 시스템 조합 I, II, III의 복합사이클(combined cycle)에 대한 에너지효율(energy efficiency)과 엑서지효율(exergetic efficiency)을 비교한 것이다. Fig. 4에서 보듯이 에너지효율(energy efficiency)로 보면 난방열을 공급하는 시스템 조합 I과 시스템 조합 II에 대해서는 모두 효율이

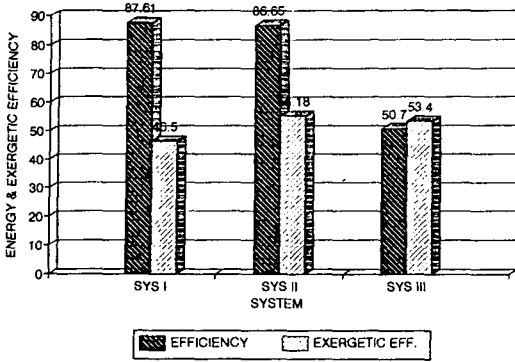


Fig. 4. Efficiency and exergetic efficiency of combined cycle

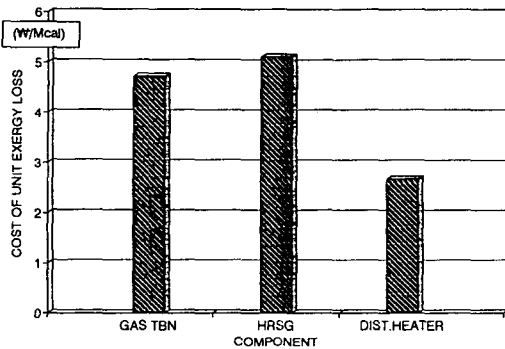


Fig. 5. Unit exergy loss of system I

80%를 넘는다. 그러나 열을 생산하지 않고 전력만을 생산하는 시스템 조합 III는 효율이 약 50% 정도 밖에 안된다. 그러나 이러한 사실만으로 결코 시스템 조합 I, II가 시스템 조합 III보다 훨씬 효율적이라고는 말할 수 없다. 엑서지효율(exergetic efficiency)로 보면 시스템 조합 II의 효율이 다른 시스템 조합보다 높게 나타내는데, 이는 복합화력 열병합 발전소의 열병합사이클에서 열이나 전력만을 생산하는 운전모드 보다는 열과 전기를 함께 생산하는 방법이 에너지 이용효율이 높고 시스템을 효율적으로 이용할 수 있다는 것을 보여준다.

Fig. 5,6,7은 엑서지 경제성분석을 통하여 구해진 시스템 조합 I, II, III에 대한 장치별 단위 엑서지손실비용을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 단위 엑서지손실을 줄임으로써 절약할 수 있는 비용(원/Mcal)을 비교해 보았을 때 시스템의 전체 효율향상을 위해서는 시스템 조합 I에서는 배열회수보일러에, 시스템 조합 II에서는 지역난방용 열교환기와 배열회수보일러, 그리고 시스템 조합 III에서는 배열회수보일러의 효율을 우선적으로 향상시키는 것이 전체 시스템 효율을 가장

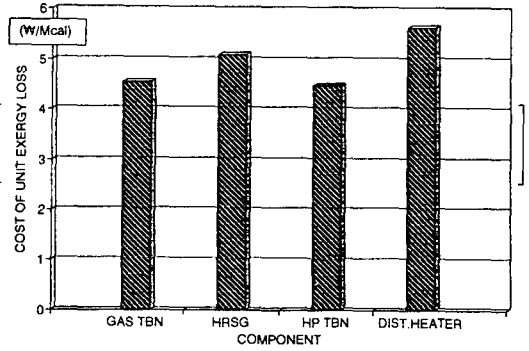


Fig. 6. Unit exergy loss of system II

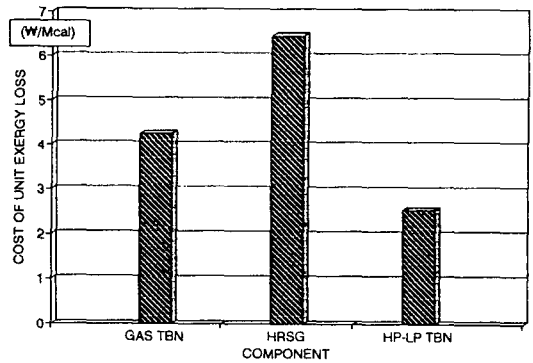


Fig. 7. Unit exergy loss of system III

효과적으로 증가시킬 수 있다는 것을 보여준다. 따라서 이러한 장치에 우선적으로 투자가 이루어지는 것이 바람직하다. 그러가 이런 결과는 보수나 교체에 대한 비용은 고려되어지지 않은 것이며, 만일 그러한 비용이 고려되었을 경우는 결과가 달라질 수 있다.

시스템의 성능향상을 위해서 장치들에 대한 보수나 교체에 대해 결정을 내려야 할 때 가장 중요하게 고려되는 것은 운전비용이라 할 수 있기 때문에 그러한 결정을 내리기 전에 미리 그러한 변화가 생산물의 비용을 낮추는지 그렇지 않은지를 알아보기 위해서는 투자비를 고려한 엑서지 경제성분석을 수행해야 할 필요가 있다. 분석결과, 만일 보수나 교체가 이루어져도 그 비용이 너무 커서 생산비를 낮추지 못한다면 그 장치에 투자를 하지 않는 쪽이 더 바람직할 수도 있다. 따라서 단위 엑서지손실비용만을 고려하는 것보다는 엑서지손실을 줄임으로써 절약가능한 비용이 어느 정도 되는지를 함께 고려 하는 것은 좀더 정확한 결과를 줄 수 있다.

Fig. 8,9,10은 각 시스템 조합에 대해 단위 질량의 연료를 사용했을 때 발생하는 엑서지손실을 줄임으로써 절감가능한 엑서지손실비용(원/kg-Fuel)의 크기를 나타

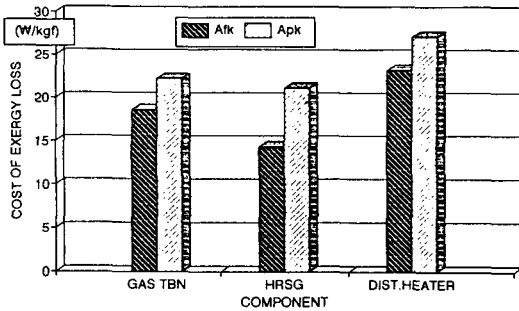


Fig. 8. Exergy loss of system I

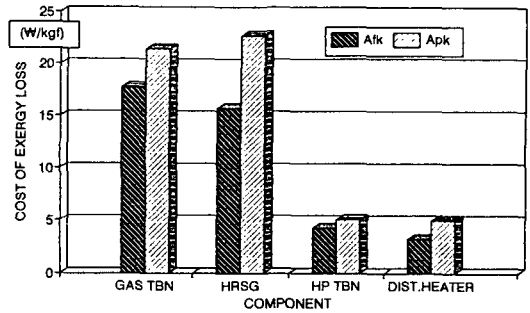


Fig. 9. Exergy loss of system II

낸 것이다. 그림에서  $A_{Fk}$ 와  $A_{Pk}$ 는 투입항목 엑서지와 산출항목 엑서지비용을 나타낸다.

그림에서 보듯이 시스템 I에서는 지역난방용 열교환기에서 절감 가능량이 크게 나타나며 시스템 II와 III에서는 배열회수보일러에서 엑서지손실비용 즉, 절감 가능한 손실비용이 가장 크게 나타나므로 단위 엑서지 손실비용과 같이 고려해 볼때 가스터빈과 배열회수보일러의 성능을 향상시키는 것이 전체 시스템 효율향상 뿐만 아니라 운전비용을 가장 많이 절감할 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이상에서와 같이 복합화력 열병합발전의 엑서지효율 분석과 엑서지 경제성분석을 수행하였다. 그 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

첫째, 복합화력 열병합발전에서 배열회수보일러에서 회수되는 열로 지역난방용 열과 전기를 생산할 때 가장 엑서지효율이 높았으며, 그 다음으로 전력만을 생산할 때이고 그리고 열을 모두 지역난방용 열로 이용할 때, 시스템의 엑서지효율이 가장 낮음을 알 수 있었다.

둘째, 전체 시스템의 효율을 증대시키기 위해서, 시스템 조합 I에서는 엑서지손실비용이 큰 배열회수보일러와 지역난방용 열교환기 순으로 장치의 성능을 우선적으로 개선할 필요가 있으며, 시스템 조합 II와 III에서는 배열회수보일러, 가스터빈 순으로 성능을 개선하는 것이 효과적으로 전체 시스템의 효율을 증대시킬 수 있다.

셋째, 대부분의 시스템 조합에 있어서 배열회수보일러의 효율을 높여 발생하는 엑서지손실을 줄이는 것이 운전비를 가장 많이 절감할 수 있는 기회를 준다.

그러나 위의 엑서지 경제성분석 결과에서는 투자비용, 장치비용 그리고 교체비용에 대한 고려가 이루어지지 않았으므로 손실비용이 많이 발생하는 장치를 교체하거나 보수하는 것이 전체적으로 보았을 때 합리적인가를

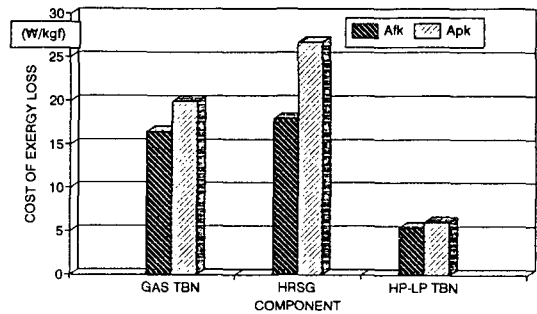


Fig. 10. Exergy loss of system III

알 수는 없다. 그러나 실제 시스템의 운영에 있어서는 운전비용이 중요하기 때문에 그러한 운전비용만을 고려했을 때 손실이 발생하는 장치들에 대한 투자의 우선순위 결정하는 것은 의미가 있으며 본 연구의 중요성이 있다고 할 수 있다. 시스템에 대한 투자비, 운전비, 장치보수 및 교체비 등 제반비용을 모두 고려해 분석을 하게 되면, 한 장치를 교체하는데 대한 더욱 합리적이고 타당한 결과들을 제공해 주게 될 것이다.

#### 참고문헌

- 오영삼: "열병합발전의 엑서지 경제성분석에 관한 연구," 아주대학교 석사학위논문 (1992).
- 김종진: "엑서지기법에 의한 화력발전소 성능분석 연구," 연세대학교 석사학위논문 (1988).
- 박재철: "증기원동소의 엑서지손실에 관한 연구," 한양대학교 석사학위논문집 (1988).
- 信澤寅男: "エネルギー工學の ための エクセルギー入門," 오ーム社 (1980).
- 한국전력공사 기술연구원: "복합발전," 한국전력공사 (1986).
- 한문관: "증기보일러의 열 및 엑서지정산에 관한 연구," 한양대학교 석사학위논문 (1988).
- Ahern, J.E.: "The Exergy Method of Energy Sys-

- tem Analysis," John Wiley & Sons (1980).
8. Gaggioli, R.A. and Wepfer, W.J.: "Exergy Economics," *Energy* **5** (1980).
  9. Kestin, J.: "Availability The Concept and Associated Terminology," *Energy*, **5** 679-692 (1980).
  10. Khelifa, H.E.: "The Economic Implications of The Exergy and Thermal Efficiencies of Energy Conversion Systems," Intersociety Energy Conversion Eng., Conf. (1981).
  11. O'Callaghan, P.W.: "Design and Management for Energy Conservation : A Handbook for Energy Managers Plant Engineers and Designers," Pergamon Press (1981).
  12. Sahai, V.: "Thermoeconomic Analysis of a Steam Cycle," Tennessee Technological University (1989).
  13. Tsatsaronis, G. and Winhold, M.: "Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy-Conversion Plants-I A New General Methodology," *Energy*, **10** (1), 69-80 (1985).
  14. Tsatsaronis, G. and Winhold, M.: "Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy-Conversion Plants-II Analysis of A Coal-Fired Steam Power Plant," *Energy*, **10**(1), 81-94 (1985).