

증기터빈 열병합 시스템에 대한 에너지 및 엑서지 해석

조 성 철[†]

건국대학교 대학원 기계공학과

Energy and Exergy Analysis of a Steam Turbine Cogeneration System

Sung-Chul Cho[†]

ABSTRACT: In recent decades, exergy analysis has been holding spotlight as a useful tool in the design, assessment, optimization, and improvement of energy system. This paper presents the results of the energy and exergy analysis of a steam turbine cogeneration system for industrial complex using two efficiency concepts of conventional one and exergetic one. In order to obtain the destroyed exergy of each component, mathematical analysis is conducted by using exergy balance and the second law of thermodynamics, according as the parameters are changed, such as the ratio of returned process steam, process steam supplied, temperature and pressure of boiler and power. The computer program developed in this study can determine the efficiencies and exergy destroyed at each component of cogeneration system. As a result of this study, a component having the largest destroyed exergy was boiler. And closed and opened feedwater heater had the lowest one. The affects to the cogeneration system due to the variation of process steam flow and return rate of condensed water is shown that the total electric power efficiency(η_E) is decreased as increasing the return rate of condensed water under constant process steam flow. As the boiler pressure is increased for the more production of electricity, the efficiency of cogeneration system was decreased.

Key words: Energy(에너지), Exergy(엑서지), Steam Turbine(증기터빈), Cogeneration(열병합 발전)

기 호 설 명

E	: 에너지 [kJ]	Q	: 열 [kJ]
ECO	: 경제성 비율 [%]	r_c	: 응축수 회수율[%]
\dot{E}_x	: 엑서지 [kJ/kg]	s	: 엔트로피 [kJ/kg]
h	: 엔탈피 [kJ/kg]	T	: 온도 [°C]
m	: 유량 [kg/s]	W	: 일 [kW]
P	: 압력 [kPa]		

그리스 문자

[†] Corresponding author	ϵ	: 엑서지 효율
Tel.:+82-2-3480-9022; fax: +82-2-3480-9988		
E-mail address: sungchul21@hotmail.com		

상첨자

CH : 화학
E : 전기
F : 연료
gen : 생성
KN : kinematic
PH : physical
PT : potential
S : 증기
· : rate

하첨자

B : 보일러
D : destroyed
E : 전기
in : 입구
k : component
out : 출구

1. 서론

1.1 연구 배경 및 동향

1.1.1 연구 배경

여러 수요처에 증기를 공급함과 아울러 전기도 생산하여 판매하는 공업단지 내 열병합 발전소는 전기 생산을 연중으로 거의 일정하게 생산하는 것이 요구되는 반면에 공정용 증기는 계절에 따라서, 또 시간에 따라서 변동이 심하기 때문에 열병합 발전의 운전에는 전기 생산을 일정하게 유지하며 변동되는 공정용 증기의 공급량을 공급할 수 있는 운전이 요구되며, 운전에 따라서 효율이 크게 달라진다.

1.1.2 연구 동향

Nesheim와 Ertesvag⁽¹⁾는 열과 전기를 동시에 생산하는 여러 종류의 산업용 발전 시스템에 대하여 엑서지 효율을 포함한 다수의 성능 지표를 이용하여 서로 비교분석에 대한 연구를 수행하였다. Ertesvag⁽²⁾는 동일한 시스템을 대상으로 열역

학 1법칙 및 2법칙 해석을 통하여 시스템들의 성능을 나타내는 US PURPA 효율⁽³⁾, Feng et al.은 효율⁽⁴⁾ 등에 대한 정량적인 비교를 할 수 있는 인자들 및 절차에 대한 연구를 수행하였다. Kim 등⁽⁵⁾은 137MW급 스팀 동력 플랜트에 대하여 질량 및 엑서지 보존식들을 스팀 발전시스템의 각 구성기기에 적용하고 Oh⁽⁶⁾ 등이 개발한 엑서지 균형식을 이용하여 이론적인 해석을 수행하였다.

1.2 연구 목적

에너지 시스템의 합리적인 운용을 위하여 열역학적 성능해석과 경제적인 측면을 고려한 시스템의 비용계산 및 최적계획에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 열병합 발전 시 공정용 증기의 공급량 변화에 따른 열에너지 분석과 엑서지 해석을 통한 효율 산정에 관한 연구가 미진하였다.

본 논문에서는 산업용 열병합 발전시스템을 대상으로 이론적 모델링을 통하여 공정증기, 회수 응축수 비율, 발전량, 보일러 압력 및 온도 등을 변수로 정하여 에너지 해석 및 엑서지 해석으로 이러한 변수들이 열병합 발전시스템의 효율에 미치는 영향을 수치적 방법으로 연구하고자 한다.

2. 열병합 발전시스템 모델링

2.1 발전 시스템 모델

2.1.1 시스템 모델링

본 연구 대상으로 삼은 산업용 열병합 발전시스템은 2개의 주보일러, 고압 터빈과 저압 터빈, 복수기, 다수의 밀폐형과 개방형 급수가열기 그리고 서로 다른 압력의 4가지 공정용 증기 공급라인 등으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 각각 하나의 주보일러, 고압터빈, 저압터빈, 4개의 펌프, 그리고 4개의 밀폐형과 1개의 개방형 급수 가열기 및 4개의 서로 다른 공정용 증기를 공급하는 모델을 고려한다.

2.1.2 수학적 모델링

정상상태에서 임의의 시스템의 각 장치 및 지

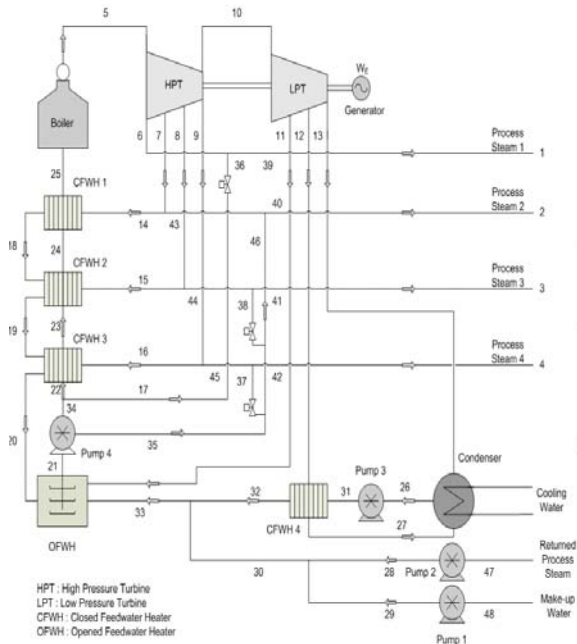


Fig. 1 Schematic diagram of cogeneration system

점에서의 정상상태 질량평형은 질량 유동율을 m 이라 하였을 때 입·출구의 유량이 동일하다는 것으로 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} \quad (1)$$

시스템의 각 포인트에서의 정상상태 에너지 보존은 입·출구의 에너지가 동일하다는 것으로 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있으며, 각 지점에서의 에너지는 유량과 엔탈피의 함수로 주어진다.

$$\sum E_{in} = \sum E_{out} \quad (2)$$

터빈에서의 생산동력은 보일러에서 고압터빈으로 들어온 에너지에서 추기된 에너지와 저압터빈에서 재생증기로 추기된 에너지의 차이로 표현된다.

$$W_E = m_5 h_5 - \left(\sum_{i=6}^9 m_i h_i + \sum_{i=11}^{13} m_i h_i \right) \quad (3)$$

2.1.3 에너지 효율

전체효율(η)은 순생산 동력과 공정증기로 나가는 열량에 대한 보일러 입열량의 비율로 주어지며, 열병합 발전효율(η_E)은 순생산 동력과 보일러 입열량의 비율이다.

$$\eta = \frac{W_E + Q_{PN}}{Q_B} \quad (4)$$

$$\eta_E = \frac{W_E}{Q_B} \quad (5)$$

2.1.4 엑서지 해석

2.1.4.1 엑서지 효율

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 엑서지라 하며, 한 에너지원이 주어진 상태에서 기준 환경 조건(environmental condition)과 평형상태에 도달할 때까지 최대한 얻을 수 있는 일의 양을 말하므로 한 형태의 에너지로부터 다른 형태의 에너지로 변환되어질 수 있는 총 에너지량을 의미한다. 이처럼 엑서지는 에너지와 유사한 개념으로서 에너지의 가치를 나타내며 한 에너지원이 가지고 있는 유용한 에너지⁽⁷⁾에 대한 표현이라 할 수 있다. 열병합 발전소의 엑서지 효율은 단순 보일러 설비의 엑서지 효율보다 높으며 엑서지 효율을 사용하면 다른 종류의 출력 에너지에 대한 유용성 수준을 쉽게 나타낼 수 있으며, 열병합 발전소의 엑서지 효율^(8,9)을 표시하는 방법은 아래와 같다.

$$\epsilon = \frac{\dot{E}_X^E + \dot{E}_X^S}{\dot{E}_X^F} \quad (6)$$

2.1.4.2 각 장치의 엑서지 파괴

임의의 개방계에서 전기, 자기, 표면장력 및 핵반응 등이 없을 경우 시스템의 전체 엑서지는 물리적 엑서지, 운동엑서지, 위치엑서지, 그리고 화

Table 1. Production and input exergy for each component

	\dot{E}_{X_p}	$\dot{E}_{X_{in}}$
Boiler	$\dot{E}_5^S - \dot{E}_{25}^W$	$(1 - T_0/T_5)Q_B + \dot{E}_{25}^S$
Turbine	W_E	$\dot{E}_5^S - \left[\sum_{i=6}^9 \dot{E}_i^S + \sum_{i=11}^{13} \dot{E}_i^S \right]$
CFWH 1	$\dot{E}_{25}^S - \dot{E}_{24}^S$	$\dot{E}_{14}^S - \dot{E}_{18}^S$
CFWH 2	$\dot{E}_{19}^S + \dot{E}_{24}^S$	$\dot{E}_{15}^S + \dot{E}_{18}^S + \dot{E}_{23}^S$
CFWH 3	$\dot{E}_{20}^S + \dot{E}_{23}^S$	$\dot{E}_{16}^S + \dot{E}_{19}^S + \dot{E}_{22}^S$
CFWH 4	$\dot{E}_{32}^S - \dot{E}_{31}^S$	$\dot{E}_{12}^S - \dot{E}_{17}^S$
OFWH	\dot{E}_{21}^S	$\dot{E}_{11}^S + \dot{E}_{20}^S + \dot{E}_{33}^S$

학역서지로 나눌 수 있다.

$$\dot{E}_X = \dot{E}_X^{PH} + \dot{E}_X^{KN} + \dot{E}_X^{PT} + \dot{E}_X^{CH} \quad (7)$$

정상상태 엑서지 평형은 입·출구의 엑서지 차이는 파괴된 엑서지와 같다.

$$\text{입출구 엑서지 차} = \sum \dot{E}_{X_{in}} - \sum \dot{E}_{X_{out}} \quad (8)$$

Table 1은 위에서 설명한 열병합 발전시스템을 이루고 있는 각 구성기기들에 대한 생성 엑서지, 투입엑서지 및 엑서지 효율을 표시하였다.

2.2 해석 알고리즘

Fig. 1의 열병합 시스템에 대한 수학적 모델링을 에너지 및 엑서지 해석을 위한 해석 알고리즘은 Fig. 2와 같다. 미지의 방정식을 풀기 위하여 LU분해법을 이용했으며 물 및 수증기의 상태량⁽¹⁰⁾은 Propath 121.1⁽¹¹⁾을 이용하여 구하였다.

2.3 시뮬레이션 프로그램의 검증

Fig. 3는 실제 열병합발전소의 운전결과와 시뮬레이션 시스템의 전체발전효율의 비교를 보여주는 표이다. 전체 발전효율은 순수일과 공정증기 열의 합과 보일러 입열량의 비율이다. 실제 공정증기 유량이 200ton/h인 열병합 발전소의 2007년 12월 운전 결과의 발전비는 평균 67.3%

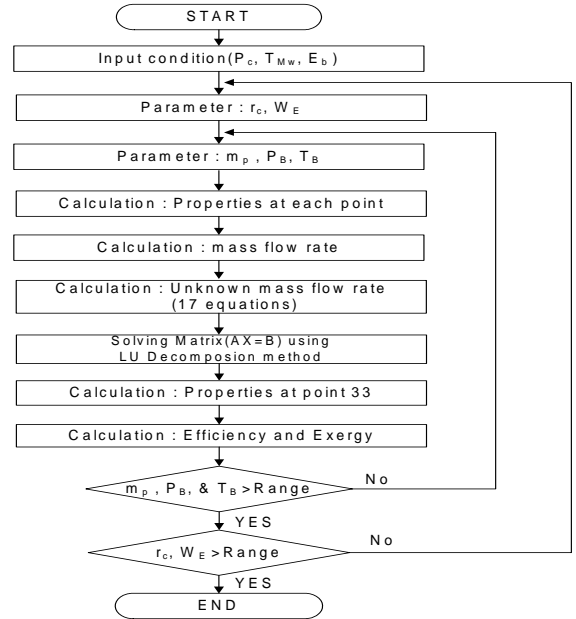


Fig. 2 Simulation flow chart of cogeneration system

이며, 이는 본 연구에서 회수율이 0.4, 공정증기 유량이 200ton/h일 때 효율 69.9%와는 편차는 2.6%p로 본 시뮬레이션 결과와 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다.

3. 시뮬레이션 해석 결과 및 고찰

공정증기는 산업용 열병합 발전에서 가장 민감한 사안인 부하변동과 직접적인 연관이 있는 인

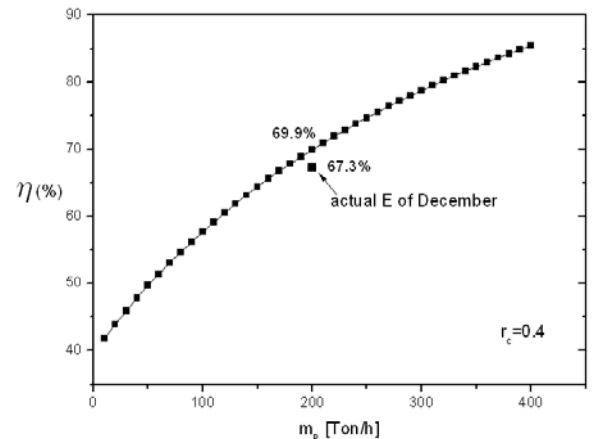


Fig. 3 Comparison of calculated and actual cogeneration efficiency with total mass flow rate

Table 2. Range of design variables in simulation

design variable		range
Ratio of returned process steam	r_c	0.2 ~ 0.8
Process steam	m_{P1}	10 ~ 150 ton/h
	m_{P2}	
	m_{P3}	
	m_{P4}	
Power	W_E	50 ~ 80 MW
Boiler pressure	P_B	7 ~ 13 MPa
Boiler temperature	T_B	400 ~ 540 °C

자이며, 응축수 회수율 즉, 공정증기 회수율은 부하변동에 따라 수요처에 공급된 공정증기 양이 달라지기 때문에 얼마만큼의 공정증기를 회수할 때 가장 경제적으로 운전할 수 있는가는 중요한 문제이다. Table 2는 인자들에 대한 적용범위를 표시하였다.

3.1 에너지 해석에 의한 성능 변화

3.1.1 고압 및 저압 공정증기의 영향

Fig. 4에서 증기가 일정하고 회수율이 증가할 수록 회수 열량이 많아지게 되므로 순수 공정증기 열량은 감소하여 결과적으로 전체발전효율은 낮아지게 된다. 또한 회수율이 일정하고 공정

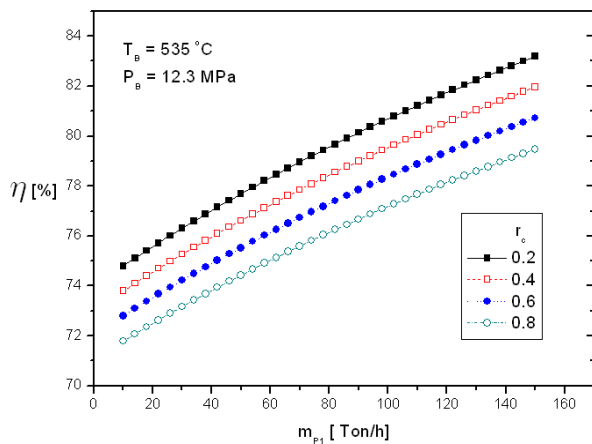


Fig. 4 Cogeneration efficiency with m_{P1} and r_c

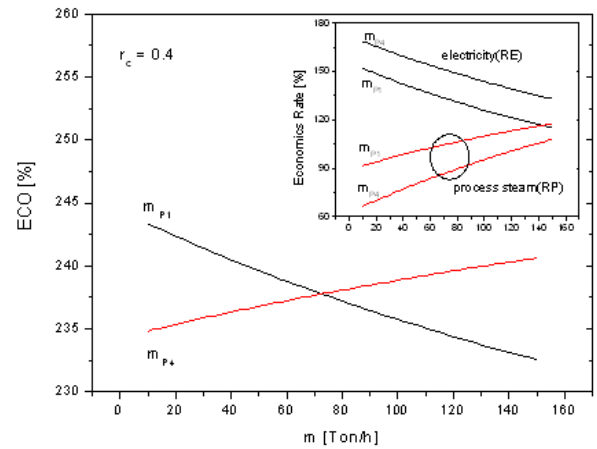


Fig. 5 Economic rate with m_{P1} and m_{P4}

증기 유량이 많아질 경우에는 반대의 경향을 보인다.

Fig. 5은 전기판매 경제성(RE)과 증기 판매 경제성(RP)의 합으로 주어지는 전체 경제성(ECO)의 변화를 나타낸다. 고압의 공정증기 유량 m_{P1} 이 증가할 때에 ECO는 감소하는 반면, 저압의 공정증기 유량 m_{P4} 이 증가할 경우에는 고압의 경우와 달리 증가함을 보여준다. 이는 공정증기가 증가할 때 전기 판매 경제성(RE)은 감소, 공정증기 판매 경제성(RP)은 증가하는 사실로부터 기인하며, 본 그림에서와 같이 저온저압과 고온고압 증기의 유량이 약 70ton/h의 경우 동일한 경제성을 나타내므로, 실제 열병합 발전 운전 시, 압력별 공정증기를 적절히 공급하는 것이 경제적인을 보여준다.

3.1.2 발전량 (W_T)과 보일러 압력, 온도, 고압 공정증기(m_{P1})의 영향

3.1.2.1 발전량 및 보일러 압력의 영향

Fig. 6에서와 보여주는 것과 같이 보일러 압력 P_B 와 발전량이 증가할 경우에는 발전효율은 증가하는 경향을 보였다. 발전량을 80MW로 고정시키고 보일러 압력을 7MPa에서 13MPa으로 증가(약 87%)시켰을 경우 효율은 20.5%에서 23.3%로 높아지게 된다. 또한, 공정증기를 고려하지 않은 발전효율은 단순히 보일러 압력을 증가시킴으

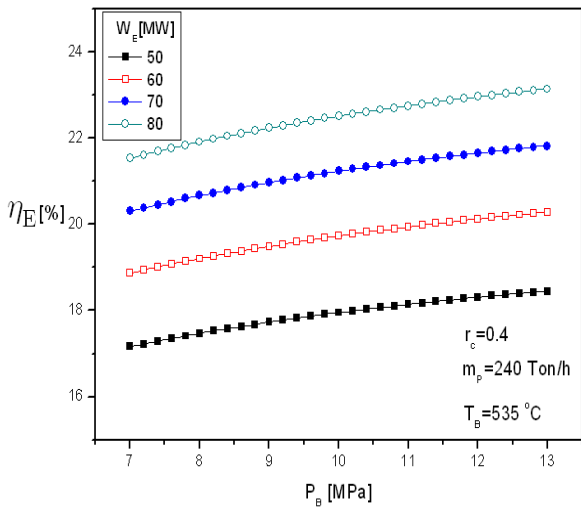


Fig. 6 Electricity cogeneration efficiency with P_B

로써 증기를 생산하지 않은 일반 발전소의 경우처럼 전력 생산을 높이는 것만으로 효율은 높아지게 된다.

Fig. 7는 발전량 60MW일 경우 압력이 7MPa에서 13MPa로 변할 때 발전비는 각각 76.9%, 83.3%로 증가하는 것으로 나타났으나, 압력이 고정되었을 경우 발전량 증가에 따른 발전비는 오히려 감소한다. 즉 전력 생산을 증가시키기 위하여 단순히 보일러 압력을 증가시키는 경우는 오히려 효율을 감소시킨다.

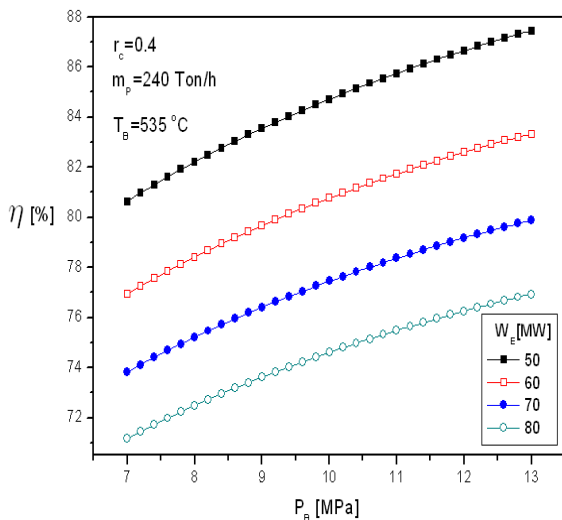


Fig. 7 Cogeneration efficiency with P_B and W_E

3.1.2.2 발전량 및 보일러 온도의 영향

Fig. 8와 9에서 보일러 온도 T_B 와 발전량이 증가할 경우에 η_E 는 증가하며, η 는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 공정증기를 고려하지 않은 효율 η_E 는 단순히 보일러 압력을 증가시킴으로서 일반 발전소의 경우처럼 전력 생산을 높이는 것만으로 효율은 높아지게 되지만, 전력과 공정증기를 동시에 고려한 효율 η 는 Fig. 6와 7에서 보일러 압력의 영향에서 보여준 결과와 같이 η_E 와 반대의 경향을 나타낸다. 또한, 일정한 전력을 생산할 경우 T_B 를 증가시키면 두 효율 η 와 η_E 를 증가하는 경향을 나타낸다.

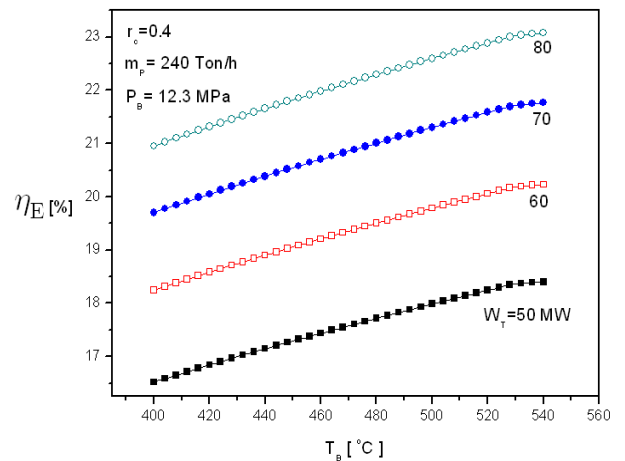


Fig. 8 Electricity cogeneration efficiency with T_B and W_T

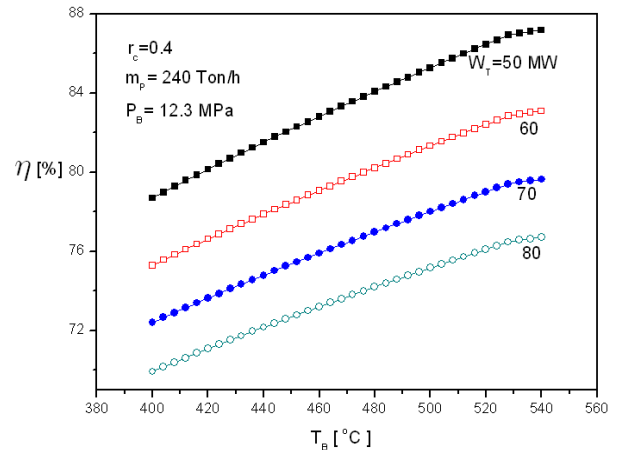


Fig. 9 Cogeneration efficiency with T_B and W_T

3.2 엑서지 해석에 의한 각 장치의 엑서지 손실

3.2.1 고압 공정증기의 영향

Fig. 10에서는 회수율이 일정할 때 고압의 공정증기 m_{P1} 이 증가할수록 Fig. 4에서 보여준 바와 같이 보일러에 투입되는 엑서지가 증가하므로 파괴 엑서지는 커지는 경향을 보인다. 회수율 r_c 가 증가하는 경우에는 파괴 엑서지는 감소하는 경향을 보인다.

반면, Fig. 11에서 보여주는 것처럼 터빈에서의 파괴 엑서지는 보일러의 그것과는 반대경향을 보이며, 이는 m_{P1} 의 증가할수록 공정증기 부하변동

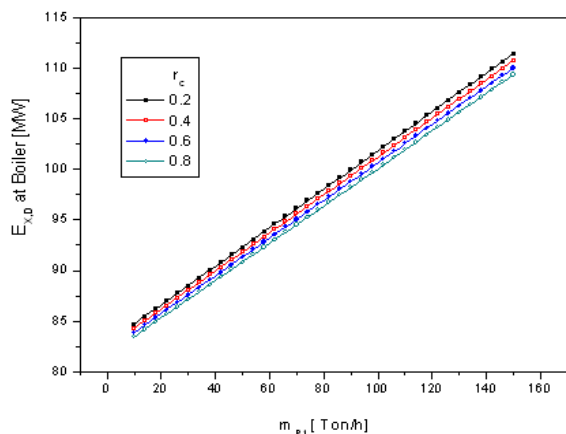


Fig. 10 Exergy destruction at boiler with m_{P1} and r_c

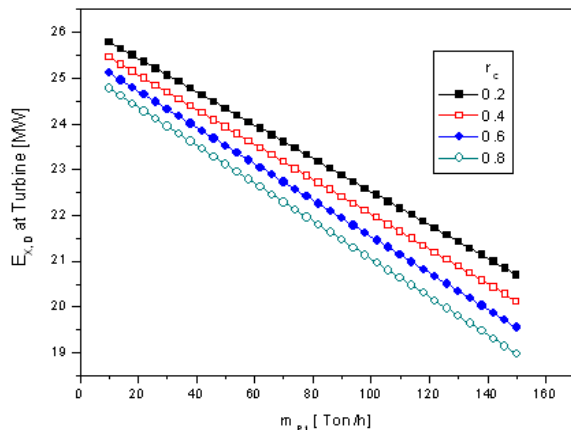


Fig. 11 Exergy destruction at turbine with m_{P1} and r_c

에 따른 추기량 m_g 의 증가로 이어지며 이때 생성 엑서지는 일정한 반면 투입 엑서지 감소로 인하여 파괴 엑서지가 감소하기 때문이다.

3.2.2 발전량(W_E)과 보일러 압력, 온도, 고압 공정증기의 영향

3.2.2.1 발전량 및 보일러 압력의 영향

Fig. 12에서는 발전량이 50MW로 일정할 때 보일러 압력이 고압으로 될수록 파괴 엑서지는 최저 압력일 때 82.7MW, 최고압력일 때 71MW로 감소한다. 또한, 보일러 최저 압력에서 파괴 엑서지는 발전량이 50MW일 때 82.7MW, 80MW일 때 105.8MW로 증가하게 된다. 그리고 최고 압력에서 파괴 엑서지는 71MW에서 91MW로 증가함을 보여준다.

Fig. 13에서 보여주는 것처럼 터빈에서의 파괴 엑서지는 Fig. 12에서 보여준 보일러에서의 파괴 엑서지 경향과 비슷함을 나타낸다. 발전량이 50MW로 일정할 때 보일러 압력이 고압으로 될수록 터빈에서의 파괴 엑서지는 최저 압력일 때 16.2MW, 최고압력일 때 6.7MW로 감소한다. 또한, 보일러 최저 압력에서 터빈의 파괴 엑서지는 발전량이 50MW일 때 16.2MW, 80MW일 때 35.2MW로 증가하게 된다. 그리고 최고 압력에서 터빈의 파괴 엑서지는 67.4MW에서 23.4MW로 증가함을 보여준다.

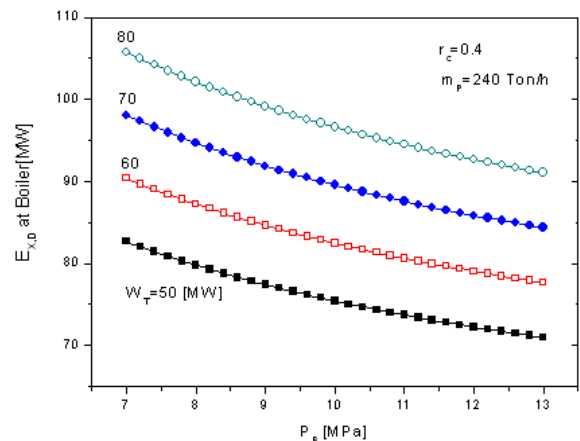


Fig. 12 Exergy destruction at boiler with P_B and W_T

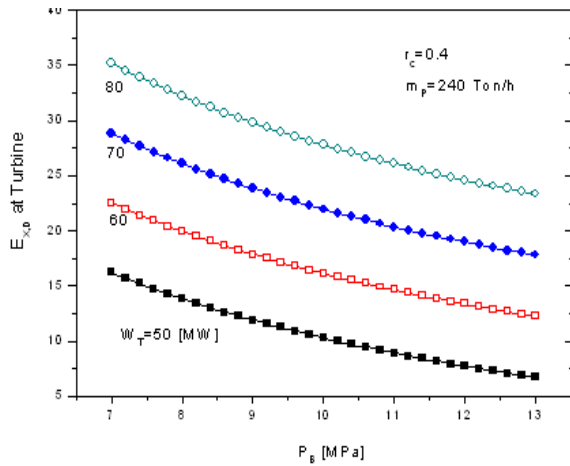


Fig. 13 Exergy destruction at turbine with P_B and W_T

3.2.2.2 발전량 및 보일러 온도의 영향

Fig. 14에서 발전량이 80MW일 때 보일러에서 파괴 엑서지는 보일러 온도 400°C에서는 83.3MW, 450°C에서는 92.2MW로 증가하며, 또한 최저 온도에서는 발전량이 증가함에 따라 65.6MW에서 83.3MW로 파괴 엑서지가 증가하게 된다. 그러나, Fig. 15에서는 터빈에서의 파괴 엑서지는 발전량이 80MW일 때 터빈에서 파괴 엑서지는 최저 온도 400°C에서는 37.7MW, 최고 온도 450°C에서는 23.8MW로 감소한다. 발전량 증가에 따른 대한 파괴 엑서지 변화는 최저 온도에서는 19.1MW에서 37.7MW, 최고 온도에서는 7.1MW에서 23.7MW로 증가하게 된다. Fig. 16은 투입 엑서지와 생성 엑서지를 이용하여 열병합 시스템의 전체 파괴 엑서지에서 각 장치가 차지하는 파괴엑서지의 비율을 나타내며, 엑서지 파괴는 급수가열기, 터빈, 보일러의 순으로 커진다. 전체 파괴 엑서지에서 보일러가 차지하는 비율은 보일러 온도 400°C에서 69.7%, 540°C에서 83%로 보일러 온도가 높아짐에 비율은 증가한다. 터빈에서는 보일러에서의 과열도가 증가함에 따라 24.6%에서 13.3%, 급수가열기는 5.7%에서 3.7%로 감소한다.

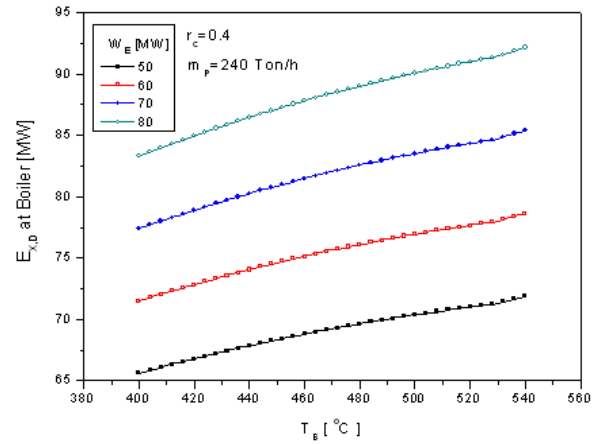


Fig. 14 Exergy destruction at boiler with T_B and W_E

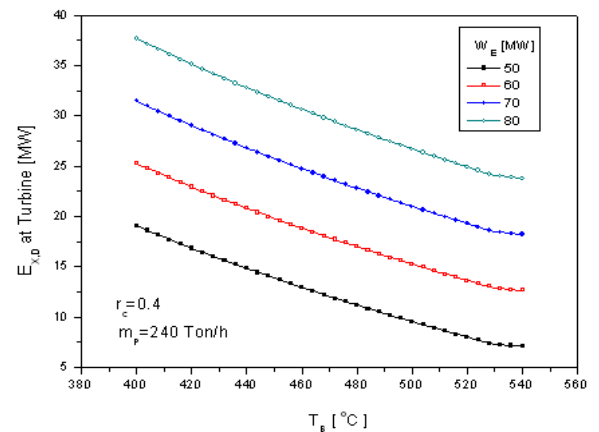


Fig. 15 Exergy destruction at turbine with T_B and W_E

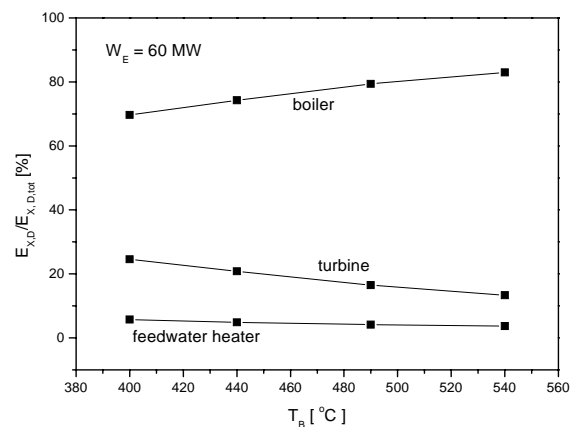


Fig. 16 Ratio of exergy destruction at each component with T_B

4. 결 론

본 논문은 산업용 열병합 발전시스템을 대상으로 이론적 모델링을 통하여 공정증기, 회수 응축수비율, 발전량, 보일러 압력 및 온도 등을 변수로 정하여 에너지 및 엑서지 해석을 수행 하였다. 해석 모델은 현재 상용 운전 중인 열병합 시스템과 성능 비교를 통하여 검증 하였으며, 이를 토대로 각 변수들이 열병합 발전시스템 효율 및 각 장치에서의 파괴 엑서지에 미치는 영향을 연구하였다. 해석모델 분석을 위해 실제 운전중인 열병합 발전소의 운전데이터를 입력조건으로 하여 이론적 모델에 대한 검증을 수행한 결과 거의 일치하였다.

(1) 공정증기 부하 변동 및 회수 응축수 비율이 열병합 발전시스템에 미치는 영향은 공정 증기가 일정하고 회수율이 증가할수록 전체 발전효율은 낮아진다. 저온저압과 고온고압 증기의 유량이 약 70ton/h의 경우 각각의 경제성 파라메타가 균형을 갖게 된다.

(2) 전력만 고려한 발전시스템과 달리 전력과 공정증기를 동시에 생산하는 열병합 발전시스템에서는 전력 생산을 증가시키기 위하여 단순히 보일러 압력만을 증가시킬 경우 오히려 효율이 감소됨을 알았다. 또한 보일러 온도가 높으면 열병합 발전시스템의 경제성은 향상되지만 보일러 온도가 510℃ 이상이 되면 발전량의 증가는 경제성에 큰 도움이 되지 않는다.

(3) 열병합 발전시스템에서 가장 큰 엑서지 파괴를 보인 장치는 보일러이며 그 다음은 터빈으로 나타났다. 개방형 급수가열기와 밀폐형 급수가열기에서의 엑서지 파괴는 보일러나 터빈에 비하여 아주 낮게 나타났다.

(4) 일정한 전력생산 하에서 보일러 온도 상승은 보일러의 엑서지 파괴를 증가 시키는 반면 터빈에서는 반대로 감소하는 것으로 나타났다. 5개의 급수가열기의 전체 엑서지 파괴는 거의 일정하였다.

본 논문에서 제시한 해석 방법은 향후 타 열병합 발전시스템의 효율산정 및 각 장치의 엑서지 해석의 기초자료가 될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. S. J. Nesheim, Ivar S. Ertesvag, 2007, "Efficiencies and indicators defined to promote combined heat and power(CHP)", Energy Covers Manage, 48, pp. 1004-1015.
2. Ivar S. Ertesvag, 2007, "Exergetic comparison of efficiency indicators for combined heat and power(CHP)", Energy, In Press, pp. 1161-1168.
3. US Public Utility Regulatory Policies Act 18CFR292.205.
4. Feng X, Cai Y-N, Qian L-L, 1998, "A new performance criterion for cogeneration system", Energy Covers Manage, 39(15), pp. 1607-1609.
5. D. J. Kim, J. Y. Jung, H. Y. Kwak, 2003, "Exergetic and thermoeconomic analysis of steam power plant", Journal of KSME, Vol. 27, No. 1, pp. 76-83.
6. Oh S., Pang H., Kim S., Kwak H., 1996, "Exergy analysis for a gas-turbine cogeneration system", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 118, pp. 782-791.
7. Kotas T. J., 1995, The Exergy Method in Thermal Plant Analysis, 2nd ed., Krieger, Malabar.
8. Ahern J. E., 1980, The Exergy Method of Energy System Analysis, John Wiley & Sons.
9. Sonntag R. E., Borgnakke C., Van Wylen G. J., 2002, Fundamentals of Thermodynamics, 6th ed., Wiley, New York.
10. JANAF Thermochemical Tables, 1971, National Bureau of Standard Publications, NSRDS-N3537, Washington, DC.
11. A Program Package for thermophysical properties of fluids(PROPATH), Ver. 12.1, PROPATH GROUP.