

가스터빈 복합 열병합 발전의 최적 운전조건에 관한 연구

조영빈[†] · 손정락^{*} · 노승탁^{*}

(2004년 7월 2일 접수, 2004년 10월 14일 심사완료)

A Study for the Optimal Operating Conditions of the Gas Turbine Based Combined Cycle Cogeneration Power Plant

Young Bin Cho, Jeong Lak Sohn and Sung Tack Ro

Key Words : Combined Cycle Cogeneration(복합 열병합), Optimal Operational Condition(최적운전조건), Fuel Consumption(연료소모), Power Load(전력 부하), Heat Load(열 부하)

Abstract

The purpose of this study is to show the existence of optimal operation conditions for minimum fuel consumption of the gas turbine based combined cycle cogeneration power plant. Optimal operational condition means the optimal distribution of the power generated by each gas turbine and the heat generated by each HRSG. Total fuel consumption is calculated by the sum of the fuels for gas turbines and supplementary boiler. Fuel consumption is calculated by numerical methods of energy equations which contain the power generated from gas and steam turbines, the heat generated by HRSG and the heat extracted from high pressure steam turbine.

기호설명

\dot{F} : 연료 소모량
 f : 성능 함수
 IGV : 가변 안내깃
 LHV : 저위 발열량
 \dot{m} : 질량 유량
 \dot{Q} : 열량
 \dot{W} : 출력
 α : 고압 증기터빈 유입 열량의 비율
 β : 저압 증기터빈 유입 열량의 비율
 η : 효율

h : 고압
 i : 가스터빈 일련번호
 l : 저압
 S : 증기터빈

하첨자

B : 보조 보일러
 c : 연소
 f : 연료
 G : 가스터빈
 H : 열회수 증기 발생기

1. 서론

1.1 개요

국내 발전 용량의 상당 부분은 원자력 발전에 의해서 생산되고 있지만 최근들어 분산발전 개념의 확대와 청정발전에 대한 사회적인 관심으로 인하여 복합 화력발전에 대한 관심이 증대되고 있는 상황이다.

가스터빈 복합 열병합 발전은 효율적인 연료 사용과 친환경적인 측면에서 다른 발전 방식보다 우수한 특성을 지니고 있으며, 전력과 함께 지역 난방용 열을 공급할 수 있기 때문에 전체적인 에너지 이용율을 극대화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 흡수식 냉방시설과의 연계를 통하여 전기의 수요가 높은 하절기의 첨두 부하를 낮추어 전력 계통의 안정성을 확보하는 효과를 기대할 수 있다. 이러한 특징으로 인하여 가스터빈 복합 열병합 발전은 선진국을 중심으로 그 보급이 확대되고 있는 추세이며, 현재 국내에도 이를 기반으로 하는 다

[†] 책임저자, 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부
 E-mail : cybin77@s-oil.com
 TEL : (02)880-7434 FAX : (02)889-6205

^{*} 회원, 서울대학교 기계항공공학부

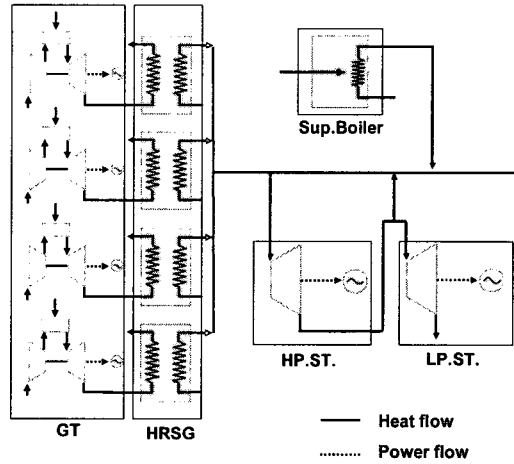


Fig. 1 Schematic diagram of the gas turbine-based combined cycle cogeneration system

수의 발전소가 운영되고 있다.

가스터빈 복합 열병합 발전 시스템에서 전력을 생산하는 구성부는 가스터빈과 증기터빈으로 구성된다. 또한 지역 난방 열원으로 사용하기 위한 열을 생산하는 구성부는 열회수 증기 발생기와 보조 보일러에 해당한다. 일반적으로 가스터빈 복합 열병합 발전설비는 Fig. 1과 같이 다수의 구성부로 구성되어 있으므로, 주어진 전력 및 열 부하를 각 구성부에 적절히 분배하여 운전할 수 있는 최적 운전 조건의 설정은 설비의 경제적인 운영을 위해서 필수적이다.

가스터빈 복합 열병합 발전 시스템의 성능 해석과 관련하여 지금까지 다수의 연구가 진행되어 왔다. 그 중에서도 Ito^(1,2)는 연간 열 수요와 전기 수요를 가정하여 장기적인 경제성 측면에서 각 부하별 최적 운전 시간을 산출하였으며, Gyarmathy⁽³⁾는 각 구성부의 성능 특성을 기반으로 한 전체 시스템의 성능을 예측한 결과를 발표하였다. 그 이외에도 다수의 연구들이 존재하지만 대부분의 연구들은 시스템의 성능의 예측이나 비교적 장기간의 경제적인 운전 전략에 초점을 두고 있다.

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 가스터빈 복합 열병합 발전 시스템에서 주어진 전력 및 열 부하 조건을 만족하는 운전 조건 중 연료 소모량이 최소인 운전 조건을 결정하는 것이다. 이를 위하여 전체 시스템을 구성하는 각 구성부의 성능을 나타내는 변수의 함수로 연료 소모량을 열역학적 수식으로 표현하였다. 이로부터 주어진 부하 조건에서의 최소 연료 소모량을 구하고 이 상태에서의 각 구성부의

주요 성능 변수들을 수치적으로 분석하였다.

2. 모델링 및 해석

가스터빈 복합 열병합 발전 시스템의 연료 소모량은 요구되는 전력 및 열 부하량과 시스템을 구성하고 있는 각 구성부의 성능에 따라 영향을 받게 된다. 본 연구에서 채택한 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다.

2.1 구성부 모델링

가스터빈 복합 열병합 발전 시스템을 구성하고 있는 구성부는 크게 상부 시스템과 하부 시스템으로 구분할 수 있다. 상부 시스템은 가스터빈으로 이루어져 있고, 하부 시스템은 열회수 증기 발생기와 증기 터빈, 보조 보일러로 이루어져 있다. 증기 터빈은 다시 고압 증기 터빈과 저압 증기 터빈으로 구분한다. 가스터빈과 고압 및 저압 증기터빈에서 전력을 생산하고, 열회수 증기 발생기에서 가스터빈의 배기열 중 일부를 회수하여 증기를 생산하며, 생산된 증기 중 일부는 고압 증기터빈으로 분배되고 나머지는 지역난방열원으로 사용된다. 고압 증기터빈에서 일부의 증기는 추가되어 다시 지역난방 열원으로 사용되며, 고압 증기터빈을 통과한 증기 중 일부는 지역난방열원으로 사용되고, 나머지는 저압 증기터빈을 구동하는데 사용된다. 전체 시스템의 연료 소모량을 수학적으로 표현하기 위해서 각각의 구성부 성능을 나타내는 변수들을 이용하여 아래와 같이 열역학적 관계식들을 구성하였다.

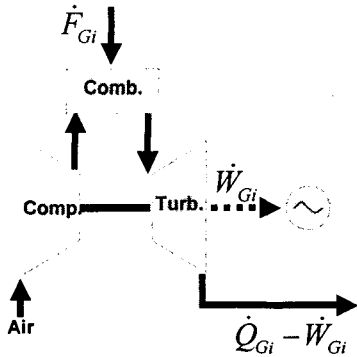


Fig. 2 Schematic diagram of the gas turbine

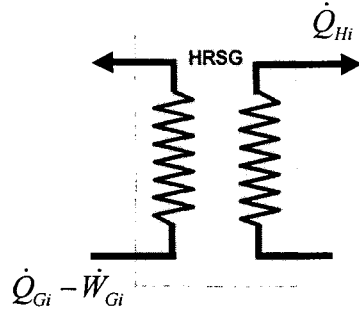


Fig. 3 Schematic diagram of the heat recovery steam generator

2.1.1 가스터빈 모델링

가스터빈의 열흐름은 Fig. 2 와 같다. 가스터빈은 직접 전력을 생산할 뿐만 아니라 열회수 증기발생기에 배기열을 제공하는 역할을 하기 때문에 본 시스템에서 가장 중요한 구성부에 해당한다.

가스터빈의 열역학적 효율은 아래와 같이 정의된다.

$$\eta_{Gi} = \frac{\dot{W}_{Gi}}{\eta_c \dot{m}_f LHV_f} \tag{1}$$

가스터빈에 유입되는 연료는 연소과정을 거쳐서 열량으로 전환되기 때문에 연소기 효율을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{Gi}}{\dot{m}_f LHV_f} \tag{2}$$

식 (2)에서 가스터빈의 연료 소모량을 공급 연료에 의한 에너지 소모량으로 환산하여 식 (1)과 결합하면 아래와 같다.

$$\dot{F}_{Gi} = \dot{m}_f LHV_f = \frac{\dot{W}_{Gi}}{\eta_c \eta_{Gi}} \tag{3}$$

식 (3)에서 가스터빈의 에너지 소모율을 계산하기 위해서는 가스터빈의 출력과 연소기 효율, 가스터빈의 열역학적 효율을 계산하여야 한다. 본 연구에서는 임의로 연소기 효율이 90%로 일정하다는 가정 하에서 계산을 수행하였고 가스터빈의 열역학적 효율은 출력의 함수로 계산하였다. 따라서, 가스터빈의 연료 소모량은 가스터빈의 출력에 따른 열효율에서 계산되며 이를 이용하면 가스터빈에 공급되는 열량과 생성 출력의 관계는 아래와

같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\dot{Q}_{Gi} = f_G(\dot{W}_{Gi}) \tag{4}$$

가스터빈의 배기 열량은 공급 열량 중에서 출력으로 소모된 만큼을 제외한 열량으로 표현되며 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{Q}_{Gi} - \dot{W}_{Gi} = \eta_c \dot{F}_{Gi} - \dot{W}_{Gi} = f_{Gi}(\dot{W}_{Gi}) - \dot{W}_{Gi} \tag{5}$$

2.1.2 열회수 증기발생기 모델링

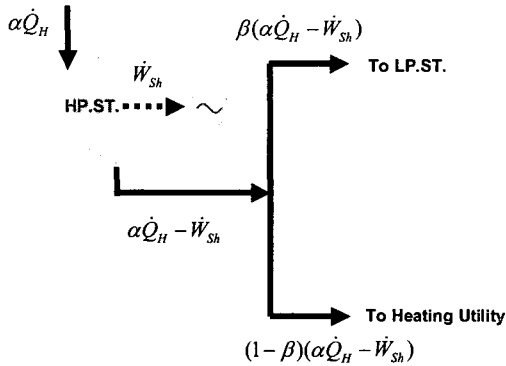
열회수 증기발생기는 가스터빈의 배기열을 이용하여 증기를 생산하는 열교환기이며 관련 열 흐름도는 Fig. 3과 같다. 증기발생량은 가스터빈의 배기 열량에 의해서 결정되므로 열회수 증기발생기의 성능은 가스터빈의 출력의 함수로 식 (6)과 같이 표현하였다. 열회수 증기 발생기는 각각의 가스터빈에 모두 장착되어 있으므로, 각각의 열회수 증기 발생기에서 회수한 가스터빈의 전체 배기열량은 식 (7)과 같이 계산하였다.

$$\dot{Q}_{Hi} = f_H(\dot{Q}_{Gi} - \dot{W}_{Gi}) \tag{6}$$

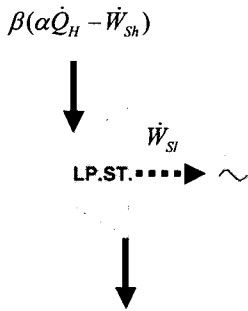
$$\dot{Q}_H = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{Hi} \tag{7}$$

2.1.3 증기터빈 모델링

Fig. 1에서와 같이 본 연구에서 고려중인 가스터빈 복합 열병합 발전 시스템의 증기터빈은 고압 및 저압 터빈으로 구성되어 있으며, 각각의 열 흐름도는 Fig. 4 의 (a), (b)와 같다. 실제 발전 설비의 증기 터빈은 배압, 추기, 복수 터빈의 특성이 모두 포함되어 있다. 이러한 구성은 전력 부하와 열 부하의 변동이 심한 가스터빈 복합 열병합 발전의 특성에 따라서 열과 전기의 생산을 유연하게 조절



(a) High pressure steam turbine



(b) Low pressure steam turbine

Fig. 4 Schematic diagram of the steam turbine

하기 위한 목적을 지니고 있다. 전기 부하가 높은 여름철의 경우에는 고압 증기터빈과 저압 증기터빈을 모두 구동하게 되고, 열 부하가 높은 겨울철의 경우에는 고압 증기터빈만을 구동하거나 고압 증기터빈에서 증기를 추가시켜 열 부하를 충족시키게 된다. 실제 과정에서 증기터빈의 부하조절은 밸브에 의한 증기 유량과 압력의 조절을 통해 이루어지고 추기과정에서 발생하게 되는 손실과 밸브를 통과하면서 발생하는 손실 등 많은 변수들이 존재하지만, 본 연구의 목적이 최적 운전 조건을 결정하는 것이므로, 증기의 상태는 고려하지 않고 증기 터빈의 열소비율만을 고려하였다.

고압 증기터빈에서는 지역 난방열원으로 사용하기 위한 추기 과정과 고압 증기터빈을 통과한 증기가 저압 증기터빈에서 다시 팽창하므로 배압 추기 터빈으로 구성하였다. 저압 증기터빈을 통과한 증기는 복수기를 통과하여 응축하게 되므로 복수 터빈으로 구성하였다.

열회수 증기발생기에서 발생한 증기 중 일부는 지역 난방 열원으로 사용되므로 열회수 증기발생기에서 발생한 열량 중 일부만 고압 증기터빈으로

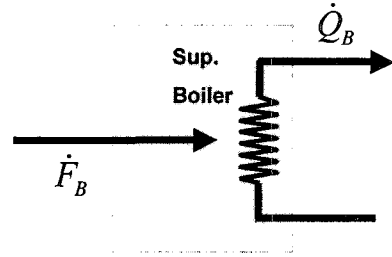


Fig. 5 Schematic diagram of the supplementary boiler

유입된다. 그리고 고압 증기터빈에서 추가된 열량과 고압 증기터빈을 통과한 열량 중 일부는 지역 난방 열원으로 사용되고 나머지가 저압 증기터빈에서 전력 생산을 위해서 사용된다. 여기서 열회수 증기발생기에서 발생한 열량 중 고압 증기터빈으로 분배되는 열량의 비를 α , 고압 증기터빈에서 저압 증기터빈으로 분배되는 열량의 비를 β 로 정의하였다.

가스터빈의 출력이 결정되면 열회수 증기 발생기에서 회수할 수 있는 열량이 결정되기 때문에, 고압 증기터빈과 저압 증기터빈에서 생산하는 전력은 α 와 β 를 변수로 설정하였으며, 이를 이용한 고압 및 저압 증기터빈의 출력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{W}_{Sh} = f_{Sh}(\alpha \dot{Q}_H) \tag{8}$$

$$\dot{W}_{Sl} = f_{Sl}(\beta(\alpha \dot{Q}_H - \dot{W}_{Sh})) \tag{9}$$

2.1.4 보조 보일러 모델링

보조 보일러의 열흐름은 Fig. 5와 같다. 보조 보일러는 열회수 증기발생기에서 생산된 열량 중 지역난방에 사용되는 열량이 열부하에 비해서 적은 경우에 추가적인 열량을 생산하기 위하여 작동된다. 보조 보일러에 입력되는 연료량에 의해서 보조 보일러에서 생산되는 열량이 결정되므로 아래와 같이 계산하였다.

$$\dot{Q}_B = f_B(\dot{F}_B) \tag{10}$$

2.2 시스템 모델링

가스터빈 복합 열병합 발전 시스템의 열역학적 성능 특성은 위에서 기술한 식 (1)~(10)의 조합으로 표현된다. 각각의 식을 조합하는 과정에서 상부 시스템에 의해서 하부 시스템의 성능이 결정되는 부분도 존재하기 때문에, 실제 전력 및 열 부하 조건을 만족시키기 위해서 설정해야 하는 변수들은 각 가스터빈의 출력, 열회수 증기발생기에서 회수된 전체 열량 중 고압 터빈으로 분배되는 열

량의 비(α), 고압 터빈에서 저압 터빈으로 분배되는 열량의 비(β), 그리고 보조 보일러의 연료 소모량이 된다. 따라서 가스터빈의 개수가 N 일 때, 전체 변수는 개수는 $N+3$ 개가 된다. 이 변수들을 사용하여 연료 소모량과 전력 부하, 열 부하 조건을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{F} = \sum_{i=1}^N \dot{F}_{Gi} + \dot{F}_B \quad (11)$$

$$\dot{W} = \sum_{i=1}^N \dot{W}_{Gi} + \dot{W}_{Sh} + \dot{W}_{Sl} \quad (12)$$

$$\dot{Q} = (1-\alpha)\dot{Q}_H + (1-\beta)(\alpha\dot{Q}_H - \dot{W}_{Sh}) + \dot{Q}_B \quad (13)$$

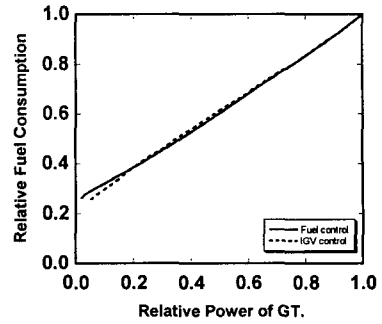
2.3 구성부의 운전 특성 및 범위

주어진 부하 조건을 만족시키는 운전을 위해서는 상부 시스템인 가스터빈이 부분 부하 상태에서 운전되어야 하며, 이를 위해서는 적절한 부하 조절 방법의 설정이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 연료량 조절에 의한 연료 제어 방식과 흡입 공기량 조절에 의한 가변 안내깃 제어 방식을 모두 고려하였다.^(4,5)

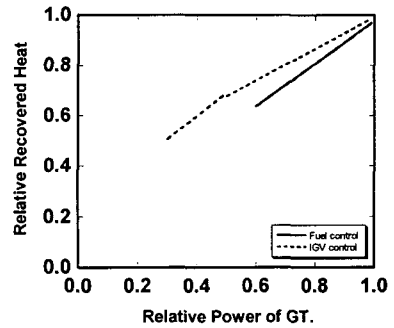
가스터빈 복합 열병합 발전 시스템에서 실제로 운전하는 과정에서 각 구성부들은 일정한 작동 범위 내에서만 운전된다. 본 연구에서 모든 구성부는 기준 설계 출력보다 높은 범위에서는 운전하지 않는 것으로 가정하였다. 그리고 가스터빈의 배기열을 열회수 증기 발생기에서 회수하는 경우, 가스터빈의 배기 온도가 일정 온도 이하로 낮아지면 열교환이 불가능 하기 때문에 연료 제어 방식의 가스터빈은 설계 출력의 60%, 가변 안내깃 제어 방식의 가스터빈은 설계 출력의 30%이하에서는 작동하지 않는 것으로 가정하였다.

2.4 해석 방법

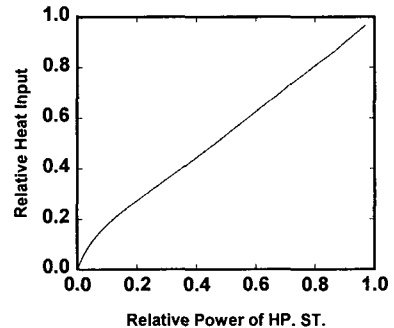
주어진 부하조건에서 전체 시스템에 대한 최적 운전 조건을 찾는 것은 식 (12)과 식 (13)을 제한 조건, 식 (11)을 목적 함수로 하는 다 변수 함수의 최적화 문제이다. 변수로 설정되는 운전 조건들은 위에서 언급한 바와 같다. 본 연구에서 설정한 가스터빈의 개수는 4 개 이므로 7 개의 변수를 설정할 수 있다. 다 변수 함수 최적화 문제의 해를 구하는 방법은 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 구성부의 작동 한계에 따른 변수들의 범위가 존재하고 또한 주어진 제한 조건을 만족하는 해가 무한히 존재하며 목적 함수가 가스터빈의 On-Off 상태에 따라 불연속적인 속성을 갖기 때문에 해석적인



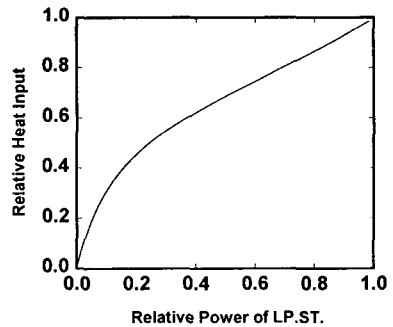
(a) Gas turbine



(b) HRSG



(c) High pressure steam turbine



(d) Low pressure steam turbine

Fig. 6 Performance data of the part-load operation of each component of the system

해를 구할 수 없다. 따라서 7 개의 변수 중 5 개를 일정 간격으로 가정하여 제한 조건식 (11), (12)을 만족하는 2 개의 변수를 찾아내고, 이 조합을 식 (13)에 적용하여 해 집합을 결정하여 목적함수가 최소가 되는 변수 집합을 찾아내는 방식으로 해석하였다.

2.5 구성부 성능 데이터

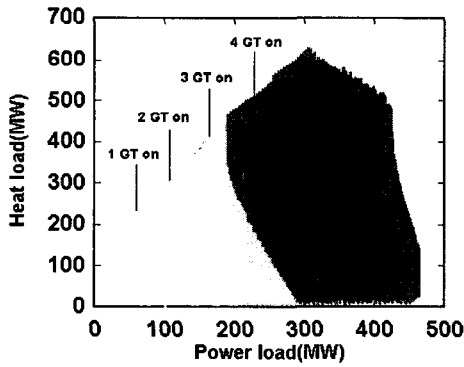
본 연구에서 대상으로 하는 가스터빈 복합 열병합 발전 시스템 구성부의 설계점 성능은 Table 1 과 같다.

이와 함께 전체 시스템의 최적 운전 조건을 찾는 계산을 수행 위해서는 각 구성부의 부분 부하 성능에 대한 자료가 필요하다. 해석에 필요한 데이터들은 기존의 자료들에서 본 연구에 적합하도록 수정하였으며 그 결과는 Fig. 6 과 같다.

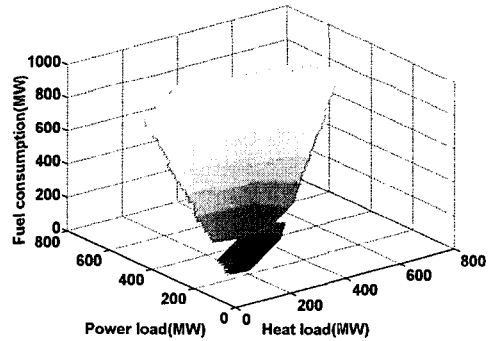
가스터빈의 출력에 따른 부분 부하 조건에서의 연료 소모량의 계산은 Kim 과 Ro,⁽⁶⁾ Kim⁽⁵⁾에서 계산된 결과들을 사용하였다. 연료 제어 방식의 경

Table 1 Performance data of the system at the design-point operating condition

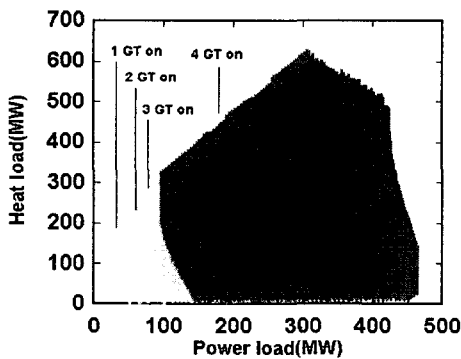
Component	Value
Gas Turbine	Power : 79.4MW
	Fuel Input : 224.6MW
HRSG	Heat Input : 137.0MW
	Heat Output : 134.1MW
HP Steam Turbine	Power : 122.5MW
	Heat Input : 496.4MW
LP Steam Turbine	Power : 42.1MW
	Heat Input : 374.0MW
Supplementary Boiler	Heat Input : 148.8MW
	Heat Output : 119.0MW



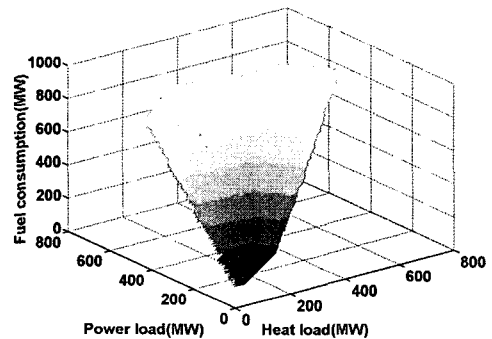
(a) Fuel control



(a) Fuel control



(b) IGV control



(b) IGV control

Fig. 7 Operation range of the system with given loads

Fig. 8 Fuel consumption of the system at given load conditions

우 가스터빈의 부분부하에서 흡입 공기의 유량은 변화하지 않으며 출구 온도만 출력에 따라 변화하는 것으로 가정하였다. 가변 안내깃 제어 방식의 경우 가스터빈 설계 출력의 50%이상의 출력에서 흡입 공기 유량이 변화하며, 출력의 30~50%범위에서는 변화하지 않는 것으로 설정하였다. 소모 연료량은 천연 가스를 연료로 사용하는 경우로 가정하여 소모 연료량을 열량으로 환산하여 계산하였다.

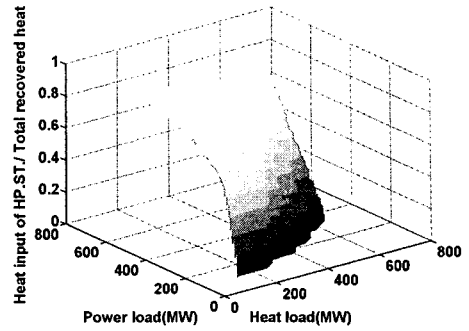
열회수 증기발생기의 입력 열량에 따른 출력 열량 계산은 Kim 과 Ro⁽⁶⁾에서 계산된 2 중압 열회수 증기발생기의 성능 곡선을 참고하였다. 열회수 증기발생기의 성능은 가스터빈의 배기가스의 온도와 유량의 영향을 크게 받기 때문에 가스터빈 배기가스의 온도 및 유량에 따른 열회수 증기발생기의 성능과 가스터빈의 출력에 따른 배기가스의 온도 및 유량 변화를 고려하여 성능 곡선을 계산하였다. 또한 가스터빈의 배기가스의 온도가 설계점의 85%이하인 경우에 열교환이 불가능 한 것으로 가정하였다.

고압 증기터빈의 성능 데이터는 국내 가동중인 열병합 복합화력 발전소의 고압 증기터빈의 성능을 기준으로 계산하였다. 저압 증기터빈의 성능은 Gyarmathy⁽³⁾의 연구에서 계산된 증기터빈의 성능을 참고로 계산하였다. 보조 보일러의 성능은 주어진 입력 열량의 80%를 지역난방 열원으로 전환하는 것으로 가정하고 사용된 연료는 천연 가스로 가정하여 입력 열량을 계산하였다.

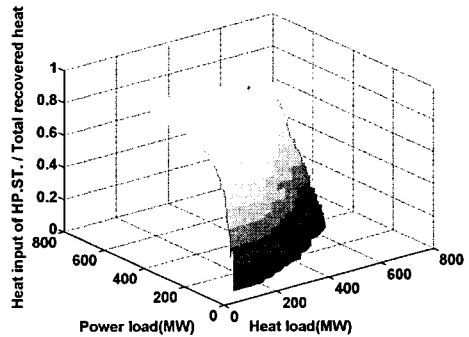
3. 결과 분석 및 고찰

Fig. 7은 해석 대상 가스터빈 복합 열병합 발전 시스템 구성부의 설계점 성능 및 부분부하 성능자료를 바탕으로 전체 시스템의 운전 가능한 전력 및 열 부하의 범위를 계산한 결과이다. 약 300MW 이하의 전력부하 영역에서는 전력부하가 증가 할수록 열 부하의 변화폭이 증가하게 되는데 이는 전력 부하가 증가 할수록 가스터빈의 부하 분담율이 증가하여 그만큼 회수할 수 있는 배기열이 증가하여 보다 넓은 영역의 열 부하를 충족시키는 것이 가능하기 때문이다. 전력부하가 약 300MW 이상의 영역에서는 가스터빈이 최대 출력 한계를 초과하였으므로 가스터빈의 배기열에 의한 열량의 증가가 없고, 회수된 열량 중 증기 터빈에서 출력을 생산하는데 쓰이는 열량의 비율이 증가하게 되어서 열부하의 폭이 감소하게 된다. 가변 안내깃 제어 방식의 경우 사용하는 가스터빈의 최저 출력 범위가 연료 제어 방식보다 낮기 때문에 상대적으로 넓은 영역의 부하를 담당할 수 있음을 알 수 있다.

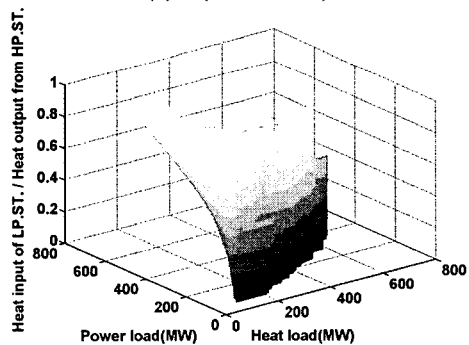
주어진 부하 조건에서 연료 소모가 최소인 운전



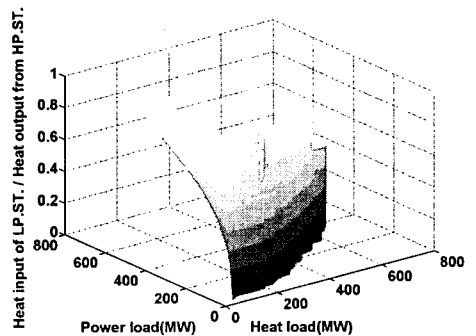
(a) α (Fuel control)



(b) α (IGV control)



(c) β (Fuel control)



(d) β (IGV control)

Fig. 9 Amount of supplied heat to steam turbines at given load conditions

조건에서의 전체 시스템의 연료 소모량을 열량으로 환산한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 가변 안내깃 제어방식을 적용한 가스터빈의 부분 부하 효율이 연료 제어 방식의 가스터빈보다 높기 때문에 전체 영역에서 최소 연료 소모량이 더 낮음을 알 수 있다.

Fig. 9는 주어진 부하 조건에서 최소 연료 소모 조건에서의 열회수 증기 발생기에서 회수된 열량 중 고압 증기터빈으로 분배되는 열량의 비(α)와 고압 증기터빈에서 저압 증기터빈으로 분배되는 열량의 비(β)이다. α 의 경우에는 전력 부하가 낮고 열 부하가 높은 경우에 낮게 분포하며, 전력 부하가 높고 열 부하가 낮은 경우일수록 높게 분포한다. 이는 고압 증기터빈에서 추기되거나 배기되는 열량의 규모가 전력 부하에 따라 변하기 때문이다. 전력 부하가 일정하고 열 부하가 증가하는 경우 α 는 일정한 값을 갖게 되며, 일정한 열 부하 이상에서는 감소하게 된다. 여기에서 α 가 감소하는 열 부하 조건에서는 보조 보일러를 사용하기 때문에 α 가 감소하게 된다. β 의 경우에는 α 의 경우와 마찬가지로 전력 부하가 높고 열 부하가 낮은 경우에 높게 분포하며 열 부하가 증가하면 β 가 감소한다. 그러나, 일정한 전력 부하에서 열 부하가 증가하는 경우 β 가 감소하는 열 부하의 조건이 α 에 비해서 훨씬 낮게 나타난다. 여기서 저압 증기터빈이 고압 증기터빈 보다 열 부하에 훨씬 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 즉, 열 부하가 높은 경우에 열회수 증기 발생기의 열량을 직접 난방 열원으로 사용하는 것 보다 고압 증기터빈에서 추기되거나 배기되는 열량을 난방 열원으로 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

Table 2와 3은 주어진 전력 및 열 부하 조건에서 최소 연료 소모 조건에서의 각 가스터빈의 부하 분배상태를 나타내고 있다. 연료 소모량을 줄이기

위해서는 가스 터빈의 효율을 높게 유지하여야 하며 이를 위해서는 작동하는 가스터빈의 출력은 최대한으로 유지시키고, 저부하 운전을 최소화시켜야 한다. 이를 위해서는 4대의 가스터빈을 균일하게 저부하 운전시키는 것보다는 일부의 가스 터빈은 운전시키지 않고 운전되는 가스터빈의 출력은 가능한 높게 유지시켜야 하는데 이러한 결과가 Table 2와 3에 잘 나타나있다. 또한 가변 안내깃 제어 방식의 경우에는 연료제어의 경우보다 고 부하 영역에서 높은 배기가스 온도 유지가 가능하므로 작동 가스터빈의 부하 량을 최대로 높일 수가 있다. 예를 들어 전력 부하가 200MW, 열 부하가 300MW인 경우, 연료 제어만을 사용한 가스터빈 보다 가변 안내깃을 사용한 가스터빈의 경우 고 부하 운전이 가능하기 때문에 작동하는 가스터빈의 대수를 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 가스터빈 복합 열병합 발전 시스템의 연료 소모량을 각 구성부의 성능 변수의 함수로 표현하고, 이를 이용한 수치 해석을 통하여 주어진 전력 및 열 부하 조건에서의 최소 연료 소모량을 갖는 시스템 최적 운전 조건들을 해석적으로 분석한 결과 다음과 같은 주요 결론들을 도출하였다.

- (1) 열 부하의 변동 폭은 전력 부하의 변동폭의 증가와 함께 증가하지만 전력 부하량이 가스터빈의 출력규모 보다 클 경우에는 가스터빈의 배기 열 회수에 의한 증기터빈의 구동으로 인하여 줄어들을 수 있었다.
- (2) 입구 안내깃 제어방식이 가스터빈의 출력 생성 부하 범위의 확장으로 인하여 연료 제어 방식에 비하여 상대적으로 넓은 부하 영역에 적용 가능하며, 연료 소모량도 줄일 수가 있다.

Table 2 Distribution of GT power (fuel control)

Power load	Heat load	GT ₁	GT ₂	GT ₃	GT ₄
100MW	100 MW	95%	0%	0%	0%
	200 MW	65%	60%	0%	0%
200 MW	100 MW	90%	90%	0%	0%
	200 MW	95%	95%	0%	0%
	300 MW	80%	80%	60%	0%
	400 MW	85%	80%	80%	0%
300 MW	100 MW	90%	85%	85%	0%
	200 MW	90%	90%	90%	0%
	300 MW	95%	95%	90%	0%
	400 MW	95%	95%	90%	0%
400 MW	100 MW	85%	85%	85%	85%
	200 MW	90%	90%	85%	85%
	300 MW	90%	90%	90%	85%
	400 MW	95%	95%	90%	90%

Table 3 Distribution of GT power (IGV control)

Power load	Heat load	GT ₁	GT ₂	GT ₃	GT ₄
100 MW	100 MW	95%	0%	0%	0%
	200 MW	75%	50%	0%	0%
200 MW	100 MW	90%	90%	0%	0%
	200 MW	95%	95%	0%	0%
	300 MW	95%	95%	0%	0%
	400 MW	85%	80%	80%	0%
300 MW	100 MW	90%	85%	85%	0%
	200 MW	90%	90%	90%	0%
	300 MW	95%	95%	90%	0%
	400 MW	95%	95%	90%	0%
400 MW	100 MW	85%	85%	85%	80%
	200 MW	90%	90%	85%	85%
	300 MW	90%	90%	90%	85%
	400 MW	95%	0%	0%	0%

(3) 열 부하가 높은 경우, 열회수 증기 발생기의 열량을 직접 난방 열원으로 사용하는 것 보다 고압 증기터빈에서 추기되거나 배기되는 열량을 난방 열원으로 사용하는 것이 바람직하다.

(4) 가변 안내깃 제어방식의 경우가 연료 제어 방식에 비하여 고 부하 운전영역에서 높은 가스터빈 배기 가스 온도 유지가 가능하므로 전력 부하의 집중화에 의한 최소 연료 소모를 위한 최적 운전 방식 설정에 유리하다.

참고문헌

- (1) Ito, K., Yokoyama, R., Akagi, S. and Matsumoto, Y., 1990, "Influence of Fuel Cost on the Operation of a Gas Turbine-Waste Heat Boiler Cogeneration Plant," *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 112, pp. 122~128.
- (2) Yokoyama, R., Ito, K. and Matsumoto, Y., 1991, "Optimal Sizing of a Gas Turbine Cogeneration Plant in Consideration of Its Operational Strategy," *ASME COGEN-TURBO, IGTI*, Vol. 6, pp. 363~370.
- (3) Gyarmathy, G., 1989, "On Load Control Methods for Combined Cycle Plants," *ASME COGEN-TURBO, IGTI*, Vol. 6, pp. 39~50.
- (4) Kim, T. S., 1995, "Design and Performance Analysis of Gas Turbines with Applications to Cogeneration Systems," Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- (5) Kim, J. H., 2000, "Analysis on Transient Behavior of Gas Turbines for Power Generation," Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- (6) Kim, S. J. and Ro, S. T., 1997, "The Performance Analysis of a Single and Dual Pressure HRSG," *Proceeding of the KSME Spring Annual Meeting B*, pp. 7~12.