

## 120MW급 열병합 복합발전시스템의 열역학적 효율 특성

최명진<sup>1</sup>, 김홍주<sup>2</sup>, 김병현<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>호원대학교 국방과학기술학부

<sup>2</sup>(주) 수완에너지

<sup>3</sup>전남과학대학교 특수장비과

## The thermodynamic efficiency characteristics of combined cogeneration system of 120MW

Myoungjin Choi<sup>1</sup>, Hongjoo Kim<sup>2</sup>, Byeongheon Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Defense Science & Technology, Howon University

<sup>2</sup>Suwan Energy Co., Ltd.

<sup>3</sup>Dept. of special Equipment, Chunnam Techno University

**요약** 본 논문은 열병합 복합발전이란 하나의 프로세스에서 전기 또는 기계 동력과 열에너지의 두 형태를 생산하는 것이다. 가스터빈 열병합 발전 시스템의 각 구성부의 성능을 변수로 전체 시스템의 연료 소모와 각 구성부의 열과 전기의 성능을 표현하여야 한다. 전체시스템은 상부 시스템인 가스터빈 2대와 하부시스템인 열회수 증기발생기(HRSG) 2대, 증기터빈 1대, 지역 난방열교환기 2대로 구성되어 있다. 가스터빈 열병합 복합발전시스템에서 가동시간 기준 10,000시간 후 성능시험을 각종 시험장치 설치 및 ASME PTC 46에 준한 성능시험으로 실시하였고, 발전소 전체의 종합출력과 효율에 대한 성능을 분석하였다. 이러한 성능시험 실시자료를 기초로 시험성능을 비교하여 성능변화 값을 확인하였다. 이 논문에서 가스터빈, 열회수 증기발생기, 증기터빈의 열역학적 시스템 해석을 통하여 이론적 결과 값을 산출하였다. 비교 대상은 전체 시스템의 생산열량과 대기로 배출되는 열량을 이론값과 실험값을 비교하였고, 전기출력 및 열 출력에 대한 효율을 이론값과 실제 값을 비교하였다. 가스터빈 열병합 복합발전소 성능 특성에 대한 시험결과를 열역학적 효율 특성과 비교하였으며, 0.3%의 오차를 보였다.

**Abstract** In this study, a combined cogeneration power plant produced two types of thermal energy and electric or mechanical power in a single process. The performance of each component of the gas turbine-combined cogeneration system was expressed as a function of the fuel consumption of the entire system, and the heat and electricity performance of each component. The entire system consisted of two gas turbines in the upper system, and two heat recovery steam generators (HRSG), a steam turbine, and two district heat exchangers in the lower system. In the gas turbine combined cogeneration system, the performance test after 10,000 hours of operation time, which is subject to an ASME PTC 46 performance test, was carried out by the installation of various experimental facilities. The performance of the overall output and power plant efficiency was also analyzed. Based on the performance test data, the test results were compared to confirm the change in performance. This study performed thermodynamic system analysis of gas turbines, heat recovery steam generators, and steam turbines to obtain the theoretical results. A comparison was made between the theoretical and actual values of the total heat generation value of the entire system and the heat released to the atmosphere, as well as the theoretical and actual efficiencies of the electrical output and thermal output. The test results for the performance characteristics of the gas turbine combined cogeneration power plant were compared with the thermodynamic efficiency characteristics and an error of 0.3% was found.

**Keywords** : Combined Heat and Power, CHP, Heat Recovery Steam Generator, Gas turbine, Steam Turbine

\*Corresponding Author : Byeongheon Kim(Chunnam Techno University)

Tel: +82-10-5118-1772 email: byounghean@nate.com

Received March 21, 2017

Revised (1st May 24, 2017, 2nd May 29, 2017)

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

## 1. 서론

열병합발전(Combined Heat and Power, CHP)이란 하나의 프로세스에서 전기 또는 기계 동력과 열에너지의 두 형태를 생산하는 것이다. 에너지를 효율적으로 이용할 수 있으며, 환경오염을 줄일 수 있다[1-4]. 가스터빈 열병합 발전 시스템은 기존 화력 발전 시스템에 비하여 열효율이 높다. 그리고 천연가스를 사용하기 때문에 대기오염의 문제가 상대적으로 적은 편이다. 수요지와의 근거리에 설치할 수 있어서 분산형 발전방식에 적합한 발전시스템으로 운용이 쉬운 장점이 있다[5-7].

열병합 발전은 계절의 변화에 따라 여러 가지 운전모드와 운전방법에 따라 성능특성의 변화가 발생되고 있다[5]. 열병합 발전의 연구동향을 살펴보면 가스터빈 발전 시스템의 성능향상을 위한 연구를 진행하였다[5]. 증기분사 가스터빈 방법과 흡수식 칠러 냉각 시스템을 결합한 시스템의 성능해석을 하였다. 복합열병합발전 플랜트에 대하여 해석 프로그램을 이용하여 운전 특성을 파악하고 성능 계산을 수행하였다[8]. 열병합발전 시스템의 모델링하고, 다양한 운전모드에 대한 운전특성을 통한 최적운전 모드를 도출하여 열과 전력 생산량을 분석하였다[11]. 유기랭킨사이클을 이용한 병렬 열병합 발전시스템의 열역학적 이론 성능 특성을 연구하였다[12].

열병합발전소의 일정시간 경과 한 10,000시간 후의 성능시험을 각종 시험장치 설치 및 ASME PTC 46[13]에 준한 성능시험으로 실시하였고 발전소 전체의 종합출력과 효율에 대한 성능뿐만 아니라 보정을 통한 주요 보정계수 산정 및 보정계수 적용시의 성능에 대하여서도 분석하였다. 이러한 성능시험 실시자료를 기초로 보증 성능과 시험성능을 비교하여 성능변화 값을 확인하며 성능저하 원인을 연구하였다[14].

본 논문에서 가스터빈 열병합 복합발전소 성능 특성에 대한 결과[14]를 열역학적인 효율 특성과 비교하여 검증하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

가스터빈 열병합발전 시스템의 각 구성부의 성능을 변수로 전체 시스템의 연료 소모와 각 구성부의 열과 전기의 성능을 표현하여야 한다. 본 연구에서 대상으로 삼

은 가스터빈 열병합발전 시스템의 열흐름은 Fig. 1과 같다. 전체시스템은 상부 시스템인 가스터빈 2대와 하부시스템인 열회수 증기발생기(HRSG) 2대, 증기터빈 1대, 지역난방열교환기 2대로 구성되어 있다.

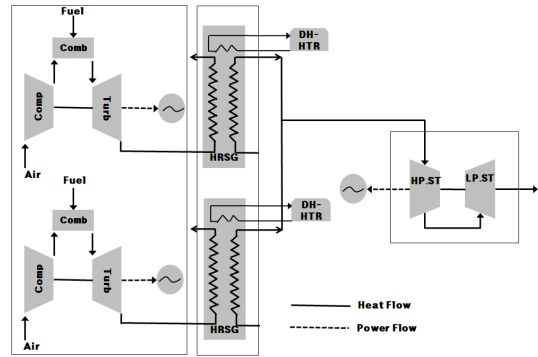
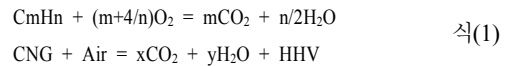


Fig. 1. Flow of heat and power in the CHP system

열병합발전의 연료는 CNG 기체연료이고 이론적 성능계산을 위해서 연소는 완전연소로 가정하였으며 기체연료의 연소방정식은 식(1)과 같다.



식(1)에서 HHV는 천연가스의 고위발열량으로서 Table 1과 같이 54,717kJ/kg이다.

이론적 성능계산을 위해 입력데이터는 외기조건, 연료 주입조건, 연료 특성, 연소효율 등이 있으며 제작사의 설계조건에 따라 외기조건은 온도 32℃, 압력 101.325kPa 및 상대습도 60%이고, 연소효율은 99.5%이다. 연소기로 공급되는 가스연료의 압력은 2941.995kPa이고 연료 조성은 Table 1에 나타내었다. 연료의 유량은 김창주의 연구[12]에서 터빈 3단 출구의 배기가온도를 설계 값으로 유지하기 위하여 연소효율과 연소기의 에너지 균형식으로 연료의 유량을 결정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{gt} &= \dot{m}(h_{product} - h_{reactant}) \\ &= \eta_{comb} (\dot{m} \text{HHV})_{fuel} \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

식(2)에서  $\eta_{comb}$ 는 연소효율이고  $\dot{m}$ 는 공급한 천연가스의 단위시간당 질량이며  $\dot{Q}_{gt}$ 는 가스터빈에 공급하

는 단위시간당 열량이다.

**Table 1.** Fuel Composition

CNG specification		Value
CH <sub>4</sub>	[mol %]	92.334
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	[mol %]	4.854
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	[mol %]	2.047
I-C <sub>2</sub> H <sub>10</sub>	[mol %]	0.286
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	[mol %]	0.300
N <sub>2</sub>	[mol %]	0.164
High Heating Value(HHV)	[kJ/kg]	54,717

열병합발전소는 가스터빈 발전기, 증기터빈 발전기가 있으며 발전기는 연료의 화학에너지를 전기적인 에너지로 변환하는 장치이며, 전체 발전기의 효율( $\eta_{overall}$ )은 화학에너지의 입력에 대한 전체 전기적인 출력( $\dot{W}_{net, electric}$ )의 비로 식(3)과 같이 정의된다[15].

$$\eta_{overall} = \frac{\dot{W}_{net, electric}}{HHV \times \dot{m}} \quad \text{식(3)}$$

### 2.1 가스터빈의 열역학적 이론

가스터빈 시스템은 브레이튼 사이클(Brayton Cycle)로써 주위 상태의 새로운 공기가 압축기로 유입되어 온도와 압력이 올라간다. 고압의 공기는 연소실로 들어가고 연료는 연소실에서 정압과정으로 연소되며 연소실에서 나온 고온고압의 가스는 터빈으로 들어가고 동력을 발생시키며 대기압까지 팽창한다. 터빈을 떠나는 배기가스는 재순환되지 않고 주위로 배출된다. 이때, 열효율은 식(4), 가스터빈의 열역학적인 효율( $\eta_{gt}$ )은 식(5), 가스터빈에서의 전기출력은 식(6)과 같이 각각 정의된다.

$$\eta_{gt} = \frac{\dot{W}_{turbine, 3-4} - \dot{W}_{compressor, 1-2}}{\dot{Q}_{in, 2-3}} \quad \text{식(4)}$$

$$\eta_{gt} = \frac{\dot{W}_{gt}}{\dot{Q}_{gt}} \quad \text{식(5)}$$

$$\dot{W}_{gt} = \eta_{comb} \eta_{gt} \dot{m} HHV \quad \text{식(6)}$$

가스터빈의 에너지 소모율을 계산하기 위해서는 가스터빈의 출력과 연소효율, 가스터빈의 열역학적 효율을 결정해야 한다. 본 연구에서는 연소효율이 0.995로 일정하다는 가정하에서 계산하고 가스터빈의 열역학적 효율은 가스터빈의 출력에 따른 성능으로 구할 수 있다.

가스터빈의 배기가스는 열 회수 증기발생기에서 증기의 형태로 열이 회수된다. 이때 열 회수 증기발생기에서 회수되는 열량은 배기가스의 유량과 온도에 따라 결정된다. 또한 배기가스의 유량과 온도는 가스터빈의 출력에 따라 결정된다.

배기가스의 열량은 연소에 의해서 열량으로 전환된 열량 중 가스터빈의 출력을 제외한 열량으로 식(7)과 같이 계산한다[15].

$$\dot{Q}_{gt} \dot{W}_{gt} = \frac{\dot{W}_{gt}}{\eta_{gt}} - \dot{W}_{gt} = \left( \frac{1}{\eta_{gt}} - 1 \right) \dot{W}_{gt} \quad \text{식(7)}$$

### 2.2 열회수 증기발생기의 열역학적 이론

열회수 증기발생기(HRSG : Heat Recovery Steam Generator)의 성능은 상부 시스템인 가스터빈의 출력을 독립 변수로 하며 식(8)과 같이 정의한다.

$$\dot{Q}_{hr} = (\dot{Q}_{gt} - \dot{W}_{gt}) - \dot{Q}_o - \dot{Q}_{dh} \quad \text{식(8)}$$

식(8)에서  $\dot{Q}_{hr}$ 은 열회수 증기발생기에서 증기발생을 위한 열량,  $\dot{Q}_o$ 은 증기를 생성하고 남은 것으로 굴뚝을 통해서 대기 중으로 버려지는 열량이며  $\dot{Q}_{dh}$ 는 열회수 증기발생기의 맨 끝부분에서 생산되는 지역난방으로 공급되는 열량이다. 열회수 증기발생기는 각 가스터빈마다 설치되어 있기 때문에 전체 회수열은 각 열회수 증기 발생기에서 회수된 열량의 합으로 식(9)와 같이 정의한다 [15].

$$\dot{Q}_{hr} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{hr, i} \quad \text{식(9)}$$

### 2.3 증기터빈의 열역학적 이론

실제 열병합 복합발전시스템에서 증기터빈은 대단히

복잡한 구조를 지니고 있다. 전체 시스템이 담당하는 열 및 전기 부하를 유동적으로 적용하기 위해서 증기터빈은 고압 증기터빈과 저압 증기터빈으로 구분된다. 본 연구에서는 열회수 증기발생기에서 생성된 열량은 지역난방 열원을 제외한 모든 열량은 증기터빈으로 유입된다고 가정하고 또한 고압증기터빈에서 추기된 열량은 손실 없이 전량 저압 증기터빈으로 유입된다고 가정한다.

$\dot{Q}_{hr} - \dot{W}_{st}$  은 증기터빈에서 일을 완료하고 더 이상 열역학적 에너지 생성이 어려운 것으로 대기 중으로 버려지는 에너지이다. 이때, 증기터빈의 열역학적 효율은 식(10)과 같이 정의 된다.

$$\eta_{st} = \frac{\dot{W}_{st}}{\dot{m}_{HHV}} \quad \text{식(10)}$$

식(10)에서 증기터빈의 열역학적 효율을  $\dot{m}_{HHV}$ 으로 나누어 주는 이유는 전체 연료공급 열량에 대한 각 구성원의 효율을 산정하기 위해서이다[15].

### 2.4 전체 시스템의 열역학적 이론

본 연구에서 전체 시스템의 성능을 계산하기 위한 독립 변수로 설정한 구성부의 성능은 가스터빈의 출력, 열회수 증기 발생기에서 생성한 열량, 증기터빈의 출력, 지역난방 열교환기에서 생성한 열량이며 성능 자료와 독립 변수들을 통하여 계산이 가능하다. 전체시스템의 전기출력은 식(11)과 같이 정의한다.

$$\dot{W}_{total} = \sum_{i=1}^N \dot{W}_{gt,i} + \dot{W}_{st} \quad \text{식(11)}$$

전력을 생산하는 구성부는 각 가스터빈과 증기터빈이며 전체 전기부하는 각각의 구성부의 전력 생산의 합으로 계산된다. 전체 시스템의 열부하( $\dot{Q}_{total}$ )는 식(12)와 같이 정의한다.

$$\dot{Q}_{total} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{dh,i} \quad \text{식(12)}$$

열을 생산하는 구성부는 ModeIII 운전에서 지역난방 열교환기를 거쳐서 생산하므로 전체 시스템의 열부하를 정

의하였다. 전체 시스템의 열역학적 효율( $\eta_{chp}$ )은 식(13) 같이 정의한다.

$$\eta_{chp} = \frac{\dot{W}_{total} + \dot{Q}_{total}}{\dot{m}_{HHV}} \quad \text{식(13)}$$

위 식에서  $\dot{m}_{HHV}$  는 전체 시스템에 공급된 연료의 총 열량을 의미한다[15].

## 3. 시험장치 및 방법

### 3.1 성능시험 장치

열병합발전소의 성능시험을 위해서 시험장치를 Fig. 2의 성능시험 장치 설치도와 같이 각종 계측장비를 가스터빈 공기 흡입 여과기(Gas turbine Air Intake Filter House) 입구에 온도계, 습도계, 대기압계를 설치하고 터빈 층에 데이터수집시스템(DAS : Data Acquisition System)을 설치하여 각종 계측장비와 DAS를 케이블로 연결하였다. 데이터 모니터링 용도인 노트북에 통합데이터관리시스템(Integrated Data Management System)을 설치하였으며 열병합발전소 중앙제어실에 있는 분산제어시스템(DCS : Distributed Control System) 데이터를 노트북에 연결하여 전송하였다[14].

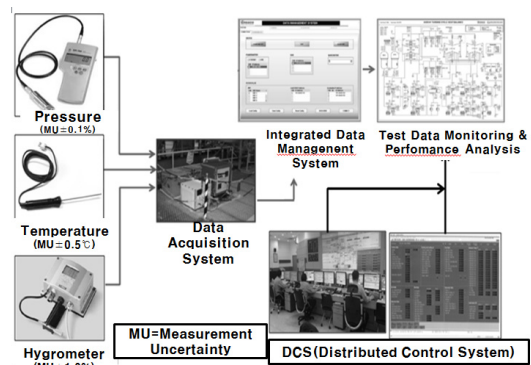


Fig. 2. Performance testing devices

### 3.2 성능 시험방법

발전소 특성상 수시로 출력의 변화, 운전모드 변화, 작동 기기의 변화 등이 빈번히 일어남에 따라 성능시험

시 설비부하 안정화는 매우 중요하다.

성능시험 장치는 예비시험 24시간 전에 설치하여 각종 장치의 이상 유무를 파악하고 설치 위치에 정확히 설치하였다.

시험 당시의 외기온도가 24~28℃ 이었으므로 보증 성능 조건인 운전 Mode III 32℃ 기준으로 모든 성능시험을 실시하는 것으로 하였으며, Guaranteed Heat Balance Diagram 을 성능시험 자료로 참조하였다[14].

### 4. 열역학적 효율 분석결과 및 고찰

가스터빈 열병합발전 시스템의 각 구성부의 성능을 변수로 하여 전체 시스템의 연료소모와 구성부의 열과 전기의 성능을 열역학적 성능으로 분석하였다. 가스터빈 열병합발전 시스템의 열흐름은 Fig. 3과 같으며 ModeIII 운전에 따른 구성부의 열역학적 해석은 이론적 배경에서와 같이 여러 형태로 표현된다.

성능이나 효율은 생산되는 출력 대비 요구되는 입력으로 나타낸다.

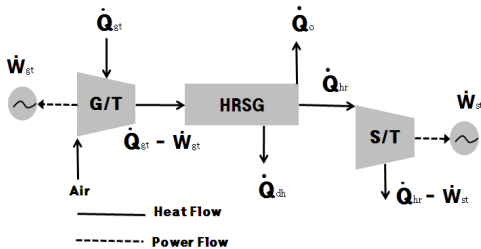


Fig. 3. Schematic of overall system

열역학적 효율 분석을 위해 이론 분석 값과 실험값의 비교를 Table 2 로 나타내었다. 실험값은 성능시험 결과에 나온 시험 1~3의 평균 Data를 이용하여 비교하였고 연료의 발열량은 Table 1 연료조성물을 이용하여 계산하였다.

전체 시스템은 가스터빈 2대, 열회수 증기발생기 (HRSG) 2대, 증기터빈 1대, 지역난방 열교환기 2대로 구성되어 있으며 Table 2 의 값은 2대의 구성부를 합한 값이다.

Table 2. Performance of theoretical and experimental values

Devision [kW]		Theoretical value	Experimental value	Difference
$\dot{Q}_{gt}$	Gas turbine inlet calories	251,562	251,562	-
$\dot{W}_{gt}$	Gas Turbine production output	81,212	80,536	$\nabla$ 676
$\dot{Q}_{gt} - \dot{W}_{gt}$	HRSG Inlet calories	170,350	171,876	$\Delta$ 1,526
$\dot{Q}_o$	Chimney exhaust heat	35,723	35,495	$\nabla$ 228
$\dot{Q}_{dh}$	Producing heat for district heating	8,812	8,859	$\Delta$ 47
$\dot{Q}_{hr}$	Steam turbine inlet calories	125,815	126,672	$\nabla$ 857
$\dot{W}_{st}$	Steam Turbine production output	31,923	31,677	$\nabla$ 246
$\dot{Q}_{hr} - \dot{W}_{st}$	Emission to air heat	93,892	95,010	$\Delta$ 1,118

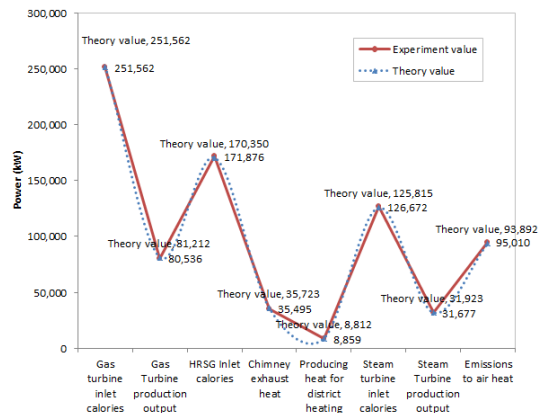


Fig. 4. Performance graph of theoretical and experimental values

Fig. 4는 열역학적 이론값과 실제 실험값을 그래프로 표현하였으며 각각의 차이를 분석결과 가스터빈의 출력은 실험값이 이론값보다 676kW 감소하였고, 증기터빈의 출력은 실험값이 이론값보다 246kW 낮은 수치를 나타내었다. 이것은 실험 시 열손실에 의한 것으로 판단된다. 지역난방 열원 열량은 실험값이 이론값보다 47kW 높았다. 두 값의 차이는 매우 적은 것으로 그래프에서 나타나듯이 본 연구에서의 열역학적 이론해석에 의한 이론값과 실제 성능시험에 의한 실험값이 매우 잘 일치한다. Table 2의 열역학적인 이론 해석은 식(14)와 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{Q}_{gt} = \sum_{i=1}^N \dot{W}_{gt,i} + \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{o,i} + \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{dh,i} + \dot{W}_{st} + \left( \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{hr,i} - \dot{W}_{st} \right) \quad \text{식(14)}$$

식(14)에서 가스터빈의 입구 연료에 의한 열량은 가스터빈 생산출력, 굴뚝으로 배출되는 열량, 지역난방 열원 열량, 증기터빈 생산출력과 최종 대기로 배출되는 열량의 합과 같으며, 전체 시스템에서 생산되는 열량( $\dot{Q}_{product}$ )과 배출되는 열량( $\dot{Q}_{out}$ )을 열역학적 이론해석은 식(15)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{product} &= \sum_{i=1}^N \dot{W}_{gt,i} + \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{dh,i} + \dot{W}_{st} \\ \dot{Q}_{out} &= \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{o,i} + \left( \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{hr,i} - \dot{W}_{st} \right) \end{aligned} \quad \text{식(15)}$$

Table 3은 위의 열역학적 이론 해석 식에 의한 전체 시스템의 생산열량과 대기로 배출되는 열량을 이론과 실험값을 비교하여 나타내었다. 비교 결과 전체 생산되는 열량은 실험값은 121,072kW이며 이론값은 121,072kW로 실험값이 이론값보다 875kW 적으며, 전체 배출되는 열량은 실험값이 이론값 보다 890kW 많음을 알 수 있다.

Table 3. Comparing of product and out heat

Devison [kW]		Theoretical value	Experimental value	Difference
$\dot{Q}_{gt}$	Heat at gas turbine inlet	251,562	251,562	-
$\dot{Q}_{product}$	The total amount of heat produced	121,947	121,072	▽875
$\dot{Q}_{out}$	The total amount of heat exhausted	129,615	130,490	△890

Table 4는 전기출력 및 열출력에 대한 효율을 나타낸 것으로 이론값과 실제 값을 비교하여 나타내었다. 비교 결과 전체 CHP 생산효율의 이론값은 48.48%, 실험값은 48.14%로 실험값이 이론값보다 0.34% 낮게 나타났으며 반대로 전체 CHP 방출율은 상대적으로 0.34% 높게 나타냄을 알 수 있다. 효율의 오차는 0.34%

를 보이고 있다.

Table 4. Theoretical and experimental efficiencies

Devison [%]		Theoretical value	Experimental value	Difference
$\eta_{gt}$	Gas turbine electrical efficiency	32.28	32.01	▽0.27
$\eta_{dh}$	District heating efficiency	3.51	3.54	△0.03
$\eta_{st}$	Electric steam turbine efficiency	12.69	12.59	▽0.1
$\eta_{chp}$	Full production efficiency CHP	48.48	48.14	▽0.34
$\eta_{out}$	CHP overall release rate	51.52	51.86	△0.34

Fig. 5는 전체시스템에 대한 열량과 효율을 표현하였다.

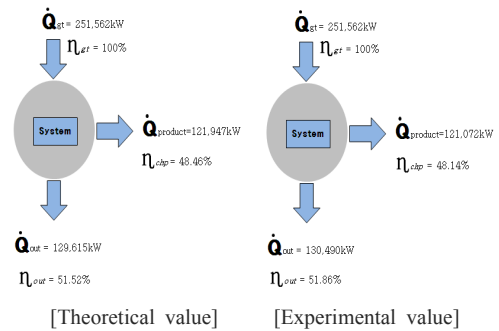


Fig. 5. Theoretical and experimental heat flux

전체 시스템에 대한 열역학적 이론값과 실제 성능 실험값을 비교한 결과 실제 성능 실험값이 지역난방 열원을 제외하고 대부분 낮은 결과를 나타내었다. 이는 실제 성능 시험 시 외부로 배출되는 열량  $\dot{Q}_{out}$  가 약 880kW 많이 발생한 결과이며 실제 성능 시험 시 외부온도에 의해 빼앗기는 손실열량 때문으로 판단된다.

또한 본 연구에서 열역학적 이론에 의한 열량과 실제 성능시험에 의한 열량을 비교한 결과 이론과 실험값이 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다.

## 5. 결론

가스터빈 열병합 복합발전소 성능 특성에 대한 결과 [15]를 열역학적인 효율 특성과 비교하여 검증한 결과는

다음과 같다.

- (1) 전체 시스템의 생산열량과 대기로 배출되는 열량을 이론값과 실험값을 비교 결과 전체 생산되는 열량은 실험값은 121,072kW이며 이론값은 121,072kW로 실험값이 이론값보다 875kW 적으며 전체 배출되는 열량은 실제 값이 이론값 보다 890 kW 많음을 알 수 있다.
- (2) 전기출력 및 열출력에 대한 효율을 나타낸 것으로 이론값과 실제 값을 비교 결과 전체 CHP 생산효율의 이론값은 48.48%, 실험값은 48.14%로 실험값이 이론값보다 0.34% 낮게 나타났으며 반대로 전체 CHP 방출율은 상대적으로 0.34% 높게 나타남을 알 수 있다. 효율의 오차는 0.34%를 보이고 있다.
- (3) 전체 시스템에 대한 열역학적 이론값과 실제 성능 시험 값을 비교한 결과 실제 성능 실험값이 지역 난방 열원을 제외하고 대부분 낮은 결과를 나타내었다. 이는 실제 성능 시험 시 외부로 배출되는 열량  $\dot{Q}_{out}$  가 약880kW 많이 발생한 결과이며 실제 성능 시험 시 외부온도에 의해 빼앗기는 손실열량 때문으로 판단된다.
- (4) 열역학적 효율 분석결과 이론에 의한 열역학적 효율과 실제 성능시험 효율의 차이가 0.3%로 이론값과 실험값이 매우 잘 일치한다.

## References

- [1] Ahn J., Lee Y. S., Kim H. J., "Combustion characteristics of a premixed burner in a stirling engine for a domestic cogeneration system", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.(B)*, vol. 36, no. 2, pp. 211-216, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2012.36.2.211>
- [2] Kang B. H., Yun C. H., Ahn J., "Impact of residential CHP systems on greenhouse Gas emissions in korea", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 25, no. 10, pp. 555-561, 2013. DOI: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2013.25.10.555>
- [3] Ryu M. R., Lee J. S., Park J. H., Lee S. B., Lee D. H., "Performance analysis of high efficiency co-generation system using the experimental design method", *Transactions of KSAE*, vol. 20, no. 3, pp. 20-25, 2012.
- [4] Basu A. K., Chodhury, S., Chowdhury, S. P., "Operational management of CHP-based microgrid", *Proceedings of IEEE Power System Technology*, pp. 24-28, 2009.
- DOI: <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666084>
- [5] Lee C. H., Jin S. Jun, Chung T. C., "A study of performance enhancement of small gas turbine combined heat and power system by steam injection and intake air cooling", *Proceeding of KSME*, vol. 2013 no. 5 pp. 57-58, 2013.
- [6] Ro S. H., "A study on economic analysis of cogeneration system for total energy system", *Korea Industrial Technology Graduate Master's Thesis*, 2006.
- [7] Sin J. H., "A study on the schemes for increasing the profitability of combined heat and power plant", *Hanyang University Graduate Master's Thesis*, 2010.
- [8] Kim M. S., "Analysis of the performance characteristics of combined heat and power systems for district heating", *Inha University Graduate Master's Thesis*, 2008.
- [9] You K. S., "A study on operation mode optimizing of combined heat and power plant", *Yonsei University Graduate Master's Thesis*, 2002.
- [10] Cho Y. B., Sohn J. L., Ro S. T., "A study for the optimal operating conditions of the gas turbine based combined cycle cogeneration power plant," *Proceeding of KSME*, vol. 2003 no. 11, pp. 156-162.
- [11] Song H. Y., "Optimal multi-mode operation of cogeneration systems for short-term energy scheduling", *Konkuk University PhD thesis*, 2013.
- [12] Kim K. H., "Theoretical characteristics of thermodynamic performance of combined heat and power generation with parallel circuit using organic rankine cycle, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 31, no. 6, pp 1598-6411, 2011. DOI: <https://doi.org/10.7836/kses.2011.31.6.049>
- [13] Tina L., Toburen, Larry J., "How to conduct a plant performance test", *Power*, 2006.
- [14] Kim H. J., "A study on performance degradation analysis of gas turbine combined heat and power plant", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 248-255, 2016. DOI: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2016.28.6.248>
- [15] Kim C. J., Won J. M., Son C. M., "A study on the performance characteristics of combined cycle power plant applying power and efficiency enhancement technologies", *Proceeding of KSME*, vol. 2014 no. 11, pp. 1290-1295.

**최 명 진(Myoungjin Choi)**

[종신회원]



- 1999년 2월 : 숭실대학교 산업공학과(공학학사)
- 2009년 2월 : 국방대학교 정보관리학(공학석사)
- 2016년 2월 : 전북대학교 산업정보시스템공학(공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 호원대학교 국방과학기술학부 무기체계학전공 교수

<관심분야>

Data-Mining, ILS, 신뢰성 공학, 무기시스템 공학

---

**김 흥 주(Hongjoo Kim)**

[정회원]



- 2015년 8월 : 전남대학교 산업대학원 기계공학과 석사
- 2007년 11월 ~ 현재 : 수원에너지 열병합발전소 기술팀장

<관심분야>

열병합발전

---

**김 병 현(Byeong-Heon Kim)**

[종신회원]



- 2015년 8월 : 전남대학원 일반대학원 기계공학과 (기계공학석·박사 통합)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 전남과학대학교 특수장비과 교수

<관심분야>

연료전지자동차, 연료전지하이브리드시스템