

소형 가스엔진 열병합발전의 운전거동 예측을 위한 컴퓨터 시뮬레이션

조 우 진, 이 관 수[†], 김 인 규^{*}
한양대학교 기계공학과, *LG전자

Computer Simulation to Predict Operating Behavior of a Gas Engine Driven Micro Combined Heat and Power System

Woojin Cho, Kwan-Soo Lee[†], In-Kyu Kim^{*}
School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
**LG Air Conditioning Company, Changwon 641-713, Korea*

(Received August 16, 2010; revision received November 10, 2010)

ABSTRACT: The present study developed a computer simulation program to determine the optimum strategy and capacity of a micro combined heat and power(CHP) system. This simulation program considered a part-load electrical/thermal efficiency and transient response characteristics of CHP unit. The result obtained from the simulation was compared with the actual operation of 30 kW gas engine driven micro CHP system. It was found that the simulation could reproduce the daily operation behavior, such as operating hours and mean load factor, closely to the actual behavior of the system and could predict the amount of electrical/thermal output and fuel consumption with the error of less than 12%.

Key words: CHP, Combined heat and power(열병합발전), Simulation operation(운전)

기 호 설 명	상첨자
C_p : 비열 [kJ/kg°C] hd : 급탕요구 lf : 운전부하율 p : 전력 [kW] pd : 발전요구 q : 열 [kW] T : 온도 [°C]	ρ : 밀도 [kg/m ³] ω_n : 고유진동수 [rad/s] ξ : 감쇠비 (i) : i 번째 계산 값
그리스 문자	하첨자
η : 효율	chp : 열병합발전 $elec$: 전기 $fuel$: 연료 $therm$: 열 tst : 축열조

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-2-2220-0426; fax: +82-2-2296-9021
 E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

1. 서 론

소형 열병합발전 도입 계획에 있어 운전 전략과 용량의 선정은 중요한 부분을 차지한다. 소형 열병합발전의 수용가는 에너지 요금체계와 부하 패턴에 각각의 개성(個性)을 지닌다. 경험적 지침만으로는 이러한 다양한 수용가에 대한 최적 운전 전략과 용량의 선정을 기대하기 어렵다. 효과적인 최적 운전 전략과 용량의 선정은 각 수용가에서 소형 열병합발전의 운전 결과를 정확히 예측하여 주는 도구를 필요로 한다.

최근 10년 간 국내 주요 학술저널에 실린 열병합발전 논문은 40편 정도이다. 이 중 소형 열병합발전의 운전 전략이나 용량 선정을 다룬 연구는 3편^(1~3)에 그친다. Jeong et al.⁽¹⁾은 열병합발전과 보조 설비들의 수리모델에 진화 알고리즘을 적용하였으며, Cha⁽²⁾는 혼합정수계획법을 적용하여 최적 운전계획을 도출하였다. 두 연구는 열병합발전의 열출력 대 발전출력 비가 운전부하율에 종속됨과 축열조에 저장한 열이 이월(移越)될 수 있음을 고려하지 않았다. Kang et al.⁽³⁾은 소형 열병합발전의 용량을 변화시키며 경제성을 예측하고, 그 결과를 비교하여 최적 용량을 선정하였다. 이들은 부분부하 운전에 따른 열병합발전의 효율 변화를 고려하지 않았으며, 축열조가 무한한 용량을 갖는 것으로 가정하였다. 요컨대, 상기 연구들은 대체로 부분부하 효율 변화와 축열조의 모델링 과정에서 나타나는 비선형적 함수를 다루는 것에 어려움을 보인다. 이러한 문제점들은 최적화 과정에서 선형계획법을 도입한 연구들에서 주로 발견된다. 선형계획법을 도입한 국외 연구로는 Yokoyama et al.⁽⁴⁾과 Peacock et al.⁽⁵⁾, Hawkes et al.⁽⁶⁾과 Seo et al.⁽⁷⁾ 등이 있다. 이 연구들 역시 비선형적인 부분부하 효율을 선형으로 근사⁽⁴⁾하거나 상수로 가정⁽⁵⁾하고 있으며, 축열조의 모델링 과정에서도 온도를 무시⁽⁶⁾하거나 축열조 자체를 고려하지 않는⁽⁷⁾ 모습을 보이고 있다. Matics et al.⁽⁸⁾과 Wakui et al.⁽⁹⁾은 동적 시뮬레이션을 통해 선형계획법의 문제들을 해결하였다. 이들은 부분부하에서의 비선형적인 효율 변화를 선형화 없이 시뮬레이션에 반영하였으며, 축열조의 온도 변화를 모사하는 시뮬레이션을 개발하였다. 동적 시뮬레이션 개념은 국제에너지기구의 프로그램 Energy Conservation for Building and Community System에서 수행한 소형 열병합발전 시뮬레이션 개발(Annex 42)에 도입되

고 있어, 그 타당성을 검증 받은 것으로 여겨진다. 그러나 국외 연구의 시뮬레이션 결과물을 국내에 적용하는 것은 바람직하지 못하다. 열병합발전의 운전 전략 등은 설치 환경에 따라 차이를 보이며, 국내와 국외의 설치 환경은 동일하지 않다.

이 연구는 소형 열병합발전 운전 전략과 용량 선정의 최적화 도구로써 시뮬레이션 프로그램을 개발하고자 한다. 동적 시뮬레이션을 도입하여 열병합발전의 부분부하 운전 특성과 축열조의 온도 변화를 반영하며, 전력부하 추종 특성을 고려하여 비매전형 계통연계와 같은 국내 환경을 현실적으로 반영한다. 시뮬레이션 프로그램의 타당성은 30 kW급 소형 가스엔진 열병합발전의 실증실험을 통해 검증한다.

2. 시뮬레이션 프로그램 개발

시뮬레이션 프로그램은 제어기 모듈(controller module), 열병합발전기 모듈(CHP unit module), 축열조 모듈(thermal storage tank module), 보일러 모듈(boiler module)로 Fig. 1과 같이 구성되어 있다.

2.1 제어기 모듈

제어기 모듈은 전력부하의 크기와 축열조의 온수 온도를 측정하여 열병합발전기의 운전을 제어한다. 이 논문은 열부하와 전력부하를 동시에 추종하는 FHAP(following heat load and power load) 전략을 따르는 소형 열병합발전을 모사한다. 해당 전략의 열병합발전은 발전요구와 급탕요구가 동시에 존재하

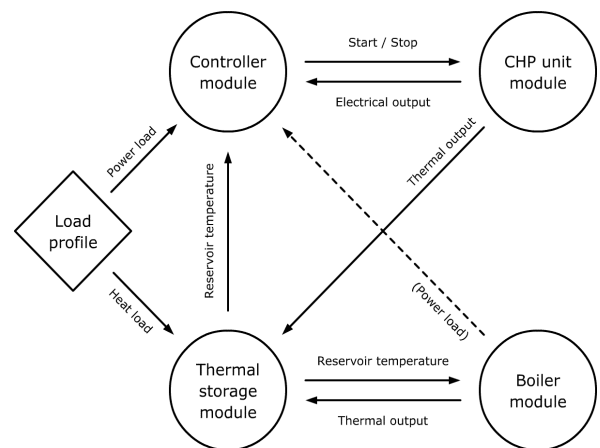


Fig. 1 Four modules considered in a computer simulation.

는 경우 운전한다. 발전요구(pd)는 전력부하($pload$)가 최소 전력부하($pload,min$)를 초과하면 발생한다.

$$pd^{(i)} = \begin{cases} 1, & pload^{(i)} \geq pload,min \\ 0, & pload^{(i)} < pload,min \end{cases} \quad (1)$$

급탕요구(hd)는 축열조 온수온도(T_{tst})가 최저 온수온도($T_{tst,min}$) 이하 감소하면 발생하며, 최대 온수온도($T_{tst,max}$) 이상 증가하면 중단된다.

$$hd^{(i)} = \begin{cases} 1, & T_{tst}^{(i)} - T_{tst}^{(i-1)} < 0 \\ & \text{and } T_{tst}^{(i)} < T_{tst,min} \\ 0, & T_{tst}^{(i)} - T_{tst}^{(i-1)} > 0 \\ & \text{and } T_{tst}^{(i)} > T_{tst,max} \end{cases} \quad (2)$$

위 조건에 해당하지 않으면 이전 급탕요구의 상태가 유지된다.

$$hd^{(i)} = hd^{(i-1)} \quad (3)$$

발전요구와 급탕요구가 동시에 존재하면 열병합발전기 모듈로 목표출력을 전달한다. 목표출력($pdes$)은 전력부하($pload$)와 여유전력($pclear$)으로부터 계산된다. 여유전력은 역송전을 예방하기 위한 조치이며, 목표출력은 최대 발전출력($pchp,max$)을 초과하지 못한다.

$$pdes = \begin{cases} pload - pclear, & hd^{(i)} pd^{(i)} = 1 \\ 0, & hd^{(i)} pd^{(i)} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 열병합발전기 모듈

열병합발전기 모듈은 가스엔진, 발전기, 폐열 회수용 열교환기를 모사한다. 제어기 모듈이 목표출력을 전달하면 열병합발전기 모듈에서 발전출력을 내보낸다. 발전출력은 목표출력 추종 중 과도응답 과정을 거친다. 목표출력($pdes$)에 따른 발전출력($pchp$)은 다음의 2nd order servo system에 대한 과도응답 수치계산식으로 계산한다.

$$pchp^{(i)} = \frac{(2 + 2\zeta\omega_n \Delta t)p_{chp}^{(i-1)} - p_{chp}^{(i-2)}}{(1 + 2\zeta\omega_n \Delta t + \omega_n^2 \Delta t^2)} + \frac{(2\zeta\omega_n \Delta t + \omega_n^2 \Delta t^2)p_{des}^{(i)}}{(1 + 2\zeta\omega_n \Delta t + \omega_n^2 \Delta t^2)} \quad (5)$$

$$- \frac{(2\zeta\omega_n \Delta t)p_{des}^{(i-1)}}{(1 + 2\zeta\omega_n \Delta t + \omega_n^2 \Delta t^2)}$$

위 식에서 고유진동수(ω_n)와 감쇠비(ζ)는 실험 결과로부터 측정된 값을 사용한다. 수치계산의 시간 간격(Δt)은 부하의 시간 간격과 동일하다. 비매전형 계통연계에서 발전출력은 전력부하를 초과할 수 없다. 발전출력($pchp$)은 전력부하($pload$)를 초과할 경우 일정 시간($tRPR$) 동안 강제 차단된다. 이러한 RPR(reverse power relay)은 아래의 식을 사용하여 모사한다.

$$t_{wait}^{(i)} = \begin{cases} t_{RPR}^{(i-1)}, & pchp^{(i)} > pload^{(i)} \\ t_{RPR}^{(i-1)} - \Delta t, & pchp^{(i)} < pload^{(i)} \end{cases} \quad (6)$$

$$pchp^{(i)} = \begin{cases} 0, & t_{wait}^{(i)} \geq 0 \\ pchp^{(i)}, & t_{wait}^{(i)} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

가스엔진의 연료사용률(q_{fuel})은 발전출력($pchp$)과 발전효율(η_{elec})로부터, 열출력(q_{chp})은 연료사용률(q_{fuel})과 열효율(η_{therm})로부터 각각 계산한다.

$$q_{fuel}^{(i)} = \frac{pchp^{(i)}}{\eta_{elec}(lf^{(i)})} \quad (8)$$

$$q_{chp}^{(i)} = \eta_{therm}(lf^{(i)}) q_{fuel}^{(i)} \quad (9)$$

위 식에서 발전효율(η_{elec})과 열효율(η_{therm})은 운전 부하율(lf)에 대한 함수이다. 관련 상관식이 다양한 연구들로부터 제시되고 있으나, 이 논문에서는 실증실험에서 얻은 회귀식을 사용한다.

2.3 축열조 모듈

축열조 모듈은 수용가의 열부하(q_{load})와 열병합발전기의 열출력(q_{chp}), 보일러의 열출력(q_{hob})으로부터 축열조 온수온도를 계산한다. 축열조의 부피(V_{tst})는 일정하므로, 열 저장량은 온도(T_{tst})만을 사용하여 나타낼 수 있다.

$$T_{tst}^{(i)} = T_{tst}^{(i-1)} + \frac{q_{chp}^{(i)} + q_{hob}^{(i)} - q_{load}^{(i)}}{\rho^{(i)} V_{tst} C_p^{(i)}} \Delta t \quad (10)$$

위 식에서 물의 밀도(ρ)와 비열(C_p)은 축열조 온수온도의 값을 사용한다. 축열조 온수온도는 제어기 모듈로 전달되어 다음 차례의 급탕요구 존재를

판단하기 위해 사용된다.

2.4 보일러 모듈

열병합발전기의 보조 보일러는 역할에 따라 두 종류로 구분된다. 첫째는 보조 열원으로 사용하는 보일러이며, 둘째는 온수의 공급 온도를 일정하게 유지하기 위한 보일러이다. 보일러는 사용 연료와 제어 방법에 따라서도 다양한 종류로 나뉜다. 이 연구는 보조 열원 역할을 수행하며 전기를 연료로 하는 개폐제어 보일러를 모사한다. 이는 실증실험과 동일한 조건이다. 보일러는 축열조 온수온도가 최저 온수온도 이하 감소하면 동작한다. 보일러의 연료 사용률($q_{fuel,hob}$)은 보일러 용량($q_{hob,max}$)과 보일러 효율(η_{hob})로부터 계산한다.

$$q_{fuel,hob}^{(i)} = \begin{cases} \frac{q_{hob,max}}{\eta_{hob}}, & T_{tst}^{(i)} < T_{tst,min} \\ 0, & T_{tst}^{(i)} > T_{tst,min} \end{cases} \quad (11)$$

2.5 시뮬레이션 프로그램

시뮬레이션 프로그램은 National Instrument의 LabVIEW를 사용하여 개발하였으며, GUI로 구현하였다. 시뮬레이션 프로그램의 입력은 수용가의 전력 부하와 열부하이며, 출력은 소형 열병합발전의 발전출력, 열출력, 연료사용률이다.

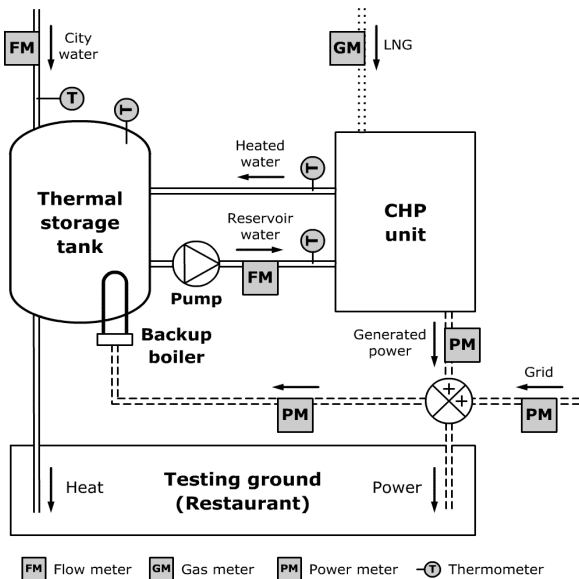


Fig. 2 Schematic of the micro combined heat and power system.

3. 실험

3.1 실험 장치 및 설치 장소

시뮬레이션 프로그램의 개발 및 검증은 목적으로 30 kW 가스엔진 열병합발전 시스템의 실증실험을 수행한다. 열병합발전 시스템은 열병합발전기와 그 보조 설비들을 총칭한다. Fig. 2는 실험 장치의 구성도이며, 세부 사양은 Table 1에 기재하였다.

설치 장소는 총 144석 규모의 레스토랑으로 소형 열병합발전 시스템을 사용하여 전력과 온수를 공급받는다. 실험 장소의 월평균 전력사용량은 약 6,300 kWh이고 월 평균 열사용량은 여름이 약 7,100 kWh, 겨울이 약 13,700 kWh이다.

3.2 측정 장치 및 실험 방법

실험에서 측정 대상은 설치 장소의 전력부하와 열부하, 실험 장치의 발전출력과 열출력(회수열) 및 연료사용률이다. 전력부하와 발전출력은 변류기와 전력신호변환기(watt transducer)를 사용하여 측정한다. 열부하와 열출력은 RTD와 전자기식 유량계를 사용하여, 연료사용률은 터빈 유량계를 사용하여 측정한다. 터빈 유량계에서 측정된 연료사용률은 유

Table 1 Specification of a combined heat and power system

Specification	Description
Model name	LG Hybrid Cogen
Output	3p3w, 380 V, 60 Hz
Rated electrical output	30 kW
Thermal storage tank volume	2,000 L
Backup boiler capacity	20 kW
Max. fuel consumption rate	8.4 m ³ /hr

Table 2 Measuring instruments and their resolutions

Measurement	Instrument	Error[%]
Power load	Watt transducer	2.0
Electrical output	Watt transducer	2.0
Heat load and heat output	Flowmeter	0.25
	RTD	0.15
Gas consumption	Turbine flow meter	0.50

Table 3 Operating parameters and values

Operating parameter	Value
Minimum power load to start the CHP unit($p_{load,min}$)	15 kW
Clearance between desired electrical output and power load(p_{clear})	8 kW
Desired temperature range of reservoir water ($T_{lst,min}$ to $T_{lst,max}$)	55°C to 65°C

량 환산 장치를 거쳐 표준 상태 가스유량(또는 질량 유량)으로 보정한다. Table 2에 각 측정 장치의 오차를 기재하였다.

실험 장치는 실험 기간 중 일정한 운전 전략과 운전 조건에 따라 운전한다. 운전 전략은 FHAP이며, 상세 운전 조건은 Table 3과 같다. 실험 기간은 총 12개월이며, 측정 간격은 1초이다.

3.3 시뮬레이션 개발을 위한 성능 실험 결과

시뮬레이션 프로그램은 발전효율, 열효율과 같은 열병합발전의 성능 자료를 필요로 한다. 아래는 시뮬레이션 프로그램에 필요한 열병합발전의 성능 등을 측정된 결과이다.

3.3.1 운전부하율 대 발전효율

운전부하율(lf)은 발전출력(p_{chp})을 최대 발전출력($p_{chp,max}$)으로 나눈 값이고, 발전효율(η_{elec})은 발전출력(p_{chp})을 연료사용률(q_{fuel})로 나눈 값이다. 연료사용률은 단위시간당 사용한 가스의 저위발열량이다.

$$lf = \frac{p_{chp}}{p_{chp,max}} \quad (12)$$

$$\eta_{elec} = \frac{p_{chp}}{q_{fuel}} \quad (13)$$

운전부하율과 발전효율의 관계는 실험에서 측정된 15,000개의 표본으로 분석하였다. Fig. 3(a)는 운전부하율 대 발전효율 산점도와 회귀모형이다. 회귀모형의 결정계수는 0.98이며, 아래의 2차 다항식으로 이루어져 있다.

$$\eta_{elec}(lf) = 0.0392 + 0.431 lf - 0.199 lf^2 \quad (14)$$

연속운전시간, 외기온도 등의 요인은 발전효율에

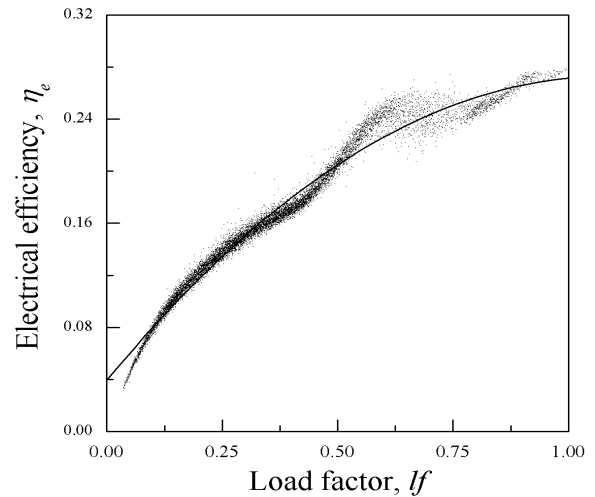
큰 영향을 미치지 않는다.

3.3.2 운전부하율 대 열효율

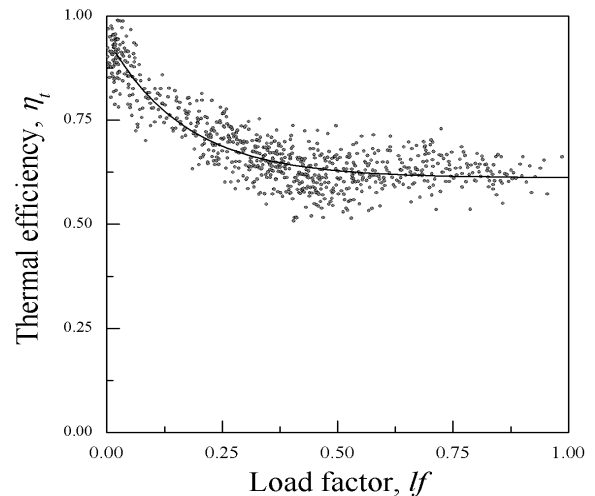
열효율(η_{therm})은 열출력(q_{chp})을 연료사용률(q_{fuel})로 나눈 값이다.

$$\eta_{therm} = \frac{q_{chp}}{q_{fuel}} \quad (15)$$

운전부하율과 열효율의 관계는 총 1,500개의 표본을 추출하여 분석하였다. 하나의 표본은 인접한 60개 측정값에 대한 평균이다. 열출력은 열병합발전의 출력 변화에 즉시 반응하지 못한다. 이는 열관성(thermal inertia) 및 가변적 환수 유량에 따른 결과이다.



(a) Electrical efficiency



(b) Thermal efficiency

Fig. 3 Electrical/thermal efficiencies according to load factor.

이에 따른 측정 오차는 측정값의 평균을 하나의 표본으로 취급함으로써 부분적으로 해결 하였다. Fig. 3(b)는 운전부하율 대 열효율 산점도 및 이에 대한 회귀모형이다. 회귀모형은 아래 식으로 표현되며, 0.81의 결정계수를 갖는다.

$$\eta_{therm}(lf) = 0.611 + 0.336lf \quad (16)$$

열효율은 환수의 온도와 유량에 영향을 받는다. 환수의 온도와 유량은 축열조 내 온수 성층화, 시수 강제유입(펌프) 등에 따라 변하므로 이를 시뮬레이션에 반영하기는 어렵다. 이 연구는 운전부하율에 따른 열효율의 변화만을 고려하였다.

3.3.3 발전출력의 과도응답 특성

실험 장치는 비대전 계통연계 되어 있으므로, 열병합발전은 항상 전력부하를 추종하여야 한다. 발전출력의 과도응답 특성을 분석하여, 이러한 전력부하 추종 모습을 모사할 수 있다. Fig. 4는 단위 전력부하 입력에 대한 실험 장치의 발전출력 거동을 관찰한 결과이다. 상승시간(rise time, t_r)이나 최대 오버슈트(maximum overshoot, M_p) 등을 측정하여, 발전출력의 고유진동수와 감쇠비를 구할 수 있다. 실험 장치는 0.074 rad/sec의 고유진동수와 0.217의 감쇠비를 갖는다.

3.3.4 월별 시수온도

시수온도는 열부하 및 축열조 용량의 기저온도이며, 실험 장소에서 약 16°C의 연교차를 보인다. 측

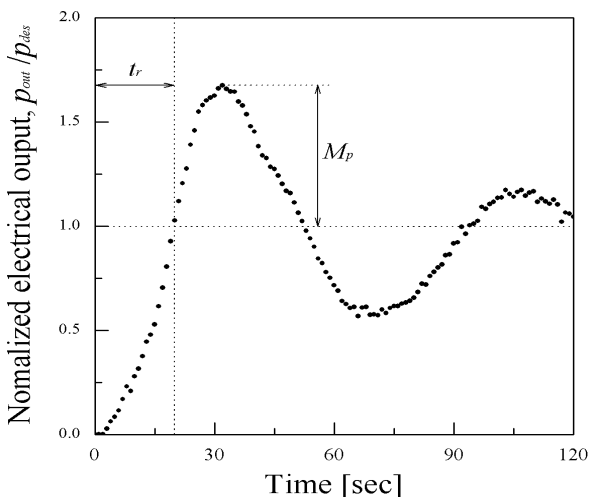


Fig. 4 Unit-step response of the CHP unit's electrical output.

열조 온수온도 60°C로, 연평균 시수온도 15°C로 가정하면, 연교차에 의한 축열조 열 저장량의 변화는 ±18%에 달한다. 시수온도의 변화는 시뮬레이션에 반드시 반영되어야 하며, Fig. 5은 실험 장소(서울시)의 월별 시수온도 측정 결과이다.

4. 결과 및 고찰

시뮬레이션의 예측 결과를 실증실험의 소형 열병합발전 운전 결과와 비교하여 프로그램의 타당성을 검증하였다. 비교 대상은 소형 열병합발전의 일일 전력생산량, 열생산량, 연료사용량, 발전효율, 열효율, 운전비용이다. 이러한 비교는 매월 하루씩 총 12일의 실증실험 결과에 대해 수행하였다. Table 4는 일일 전력생산량, 열생산량, 연료사용량 등을 비교하고 있다. 표의 오차(e)는 실증실험의 측정값(y)과 시뮬레이션의 예측값(y_p)를 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$e = \frac{y_p - y}{y} \times 100\% \quad (17)$$

시뮬레이션은 일일 전력생산량, 열생산량, 연료사용량 예측에 각 1.7%, 1.0%, 1.5%의 제곱평균제곱근오차(RMSE)를 보이고 있다. 전력생산량의 최대 오차는 11.9%(표본 8)이며 열생산량의 최대 오차는 7.5%, 연료사용량의 최대 오차는 8.8%(이상 표본 3)이다. 시뮬레이션 프로그램은 열생산량 예측에 높은 정확도를 갖고, 전력생산량 예측에 다소 낮은 정확

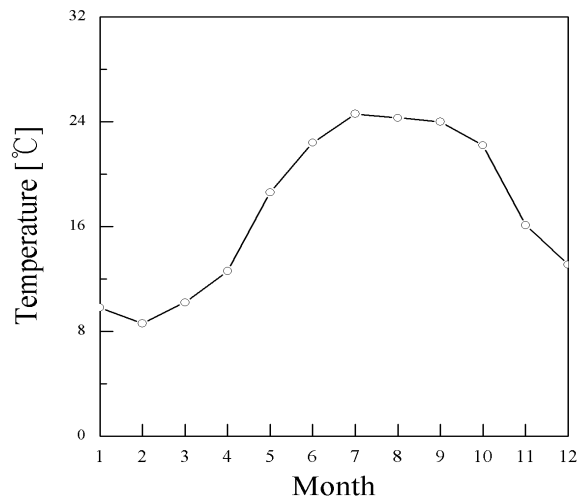


Fig. 5 Monthly averaged temperature of the city water.

Table 4 Comparison of simulated daily operation results with experiments for twelve-month-period

Month	Electrical output [kWh/day]			Thermal output [kWh/day]			Fuel consumption [kWh/day]			Electrical efficiency [%]			Thermal efficiency [%]			Energy cost [103 won/day]		
	Exp.	Sim.	Err.	Exp.	Sim.	Err.	Exp.	Sim.	Err.	Exp.	Sim.	Err.	Exp.	Sim.	Err.	Exp.	Sim.	Err.
1	101	104	3.0%	446	444	-0.4%	673	651	-3.3%	15.0	15.5	6.5%	66.3	68.2	2.9%	34.9	33.3	-4.5%
2	98	101	3.1%	428	432	0.9%	652	641	-1.7%	15.0	15.5	4.8%	65.6	67.4	2.7%	33.8	32.9	-2.6%
3	103	105	1.9%	402	372	-7.5%	623	568	-8.8%	16.5	16.9	12%	64.5	65.5	1.5%	32.3	28.8	-11%
4	101	97	-4.0%	306	310	1.3%	506	487	-3.8%	20%	19%	-0.2%	60.5	63.7	5.3%	24.4	23.5	-3.7%
5	97	100	3.1%	301	305	1.3%	499	481	-3.6%	19.4	20.0	7.0%	60.3	63.4	5.1%	24.2	23.0	-5.3%
6	91	87	-4.4%	283	278	-1.8%	463	438	-5.4%	19.7	18.8	-1.1%	61.1	63.5	3.8%	21.9	20.7	-5.7%
7	89	82	-7.9%	248	257	3.6%	411	408	-0.7%	21.7	20.0	-7.2%	60.3	63.0	4.4%	16.2	16.7	2.9%
8	84	94	12%	244	256	4.9%	400	427	6.8%	21.0	23.5	4.8%	61.0	60.0	-1.7%	16.0	16.7	4.2%
9	82	76	-7.3%	247	241	-2.4%	401	372	-7.2%	20.4	19.0	-0.1%	61.6	64.8	5.2%	18.8	17.5	-7.2%
10	92	84	-8.7%	268	253	-5.6%	438	400	-8.7%	21.0	19.2	-0.0%	61.2	63.3	3.4%	20.8	19.0	-8.7%
11	98	92	-6.1%	372	384	3.2%	579	577	-0.3%	16.9	15.9	-5.8%	64.2	66.6	3.6%	28.3	29.6	1.0%
12	97	98	1.0%	395	397	0.5%	605	591	-2.3%	16.0	16.2	3.4%	65.3	67.2	2.9%	30.9	30.0	-3.0%

도를 갖는다. 에너지 효율과 운전비용은 전력생산량, 열생산량, 연료사용량으로부터 계산하였으며, 운전비용의 경우 2010년 8월 현재의 요금(한국전력, 서울도시가스)을 적용하였다. 시뮬레이션은 발전효율, 열효율, 운전비용 예측에 각 1.8%, 1.1%, 1.7%의 제곱평균제곱근오차를 보인다. 이는 시뮬레이션 프로그램이 소형 열병합발전의 효율과 운전비용을 효과적으로 예측하고 있음을 나타낸다.

일일 운전거동을 관찰하여 운전횟수와 운전시간, 평균 운전부하율, 가동률 등을 살필 수 있다. 이러한 정보는 소형 열병합발전의 운전 전략 수립에 중

요하게 활용된다. Fig. 6은 실험과 시뮬레이션의 소형 열병합발전 일일 운전거동을 보여준다. 시뮬레이션은 소형 열병합발전의 운전시각과 운전시간을 실제에 근사하게 예측하고 있음을 관찰할 수 있다. 단, 겨울의 예측 결과는 실제와 다소의 차이를 보인다. 이는 축열조와 배관에서 발생하는 열손실, 시수온도의 일교차 등을 시뮬레이션에 반영하지 않아 발생한 것으로 추정된다.

열병합발전의 발전용량 대비 수용가의 전력부하 변동폭이 높아질수록 발전출력의 과도응답 특성이 시스템의 운전거동에 미치는 영향도 높아진다. 따라

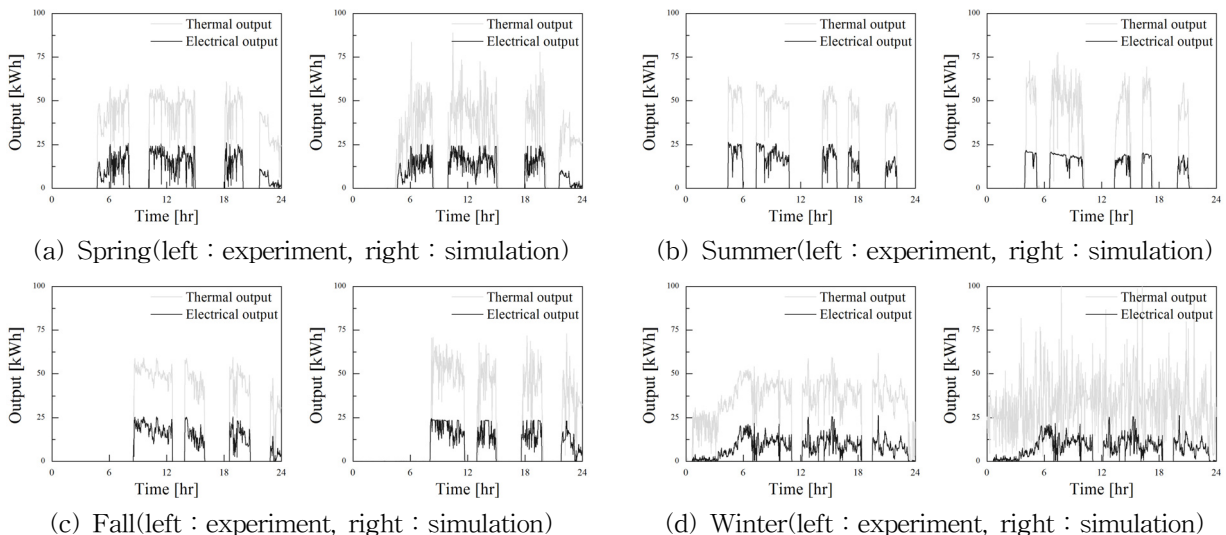


Fig. 6 Comparison of the daily operation between experiment and simulation.

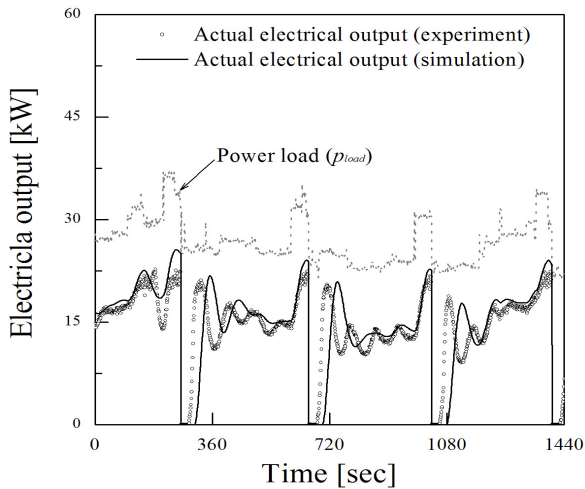


Fig. 7 Comparison of the electrical output between experiment and simulation.

서 규모가 작은 열병합발전의 시뮬레이션에는 발전 출력의 과도응답 특성을 반영할 필요가 있다. 이 연구는 2nd order servo system의 과도응답 수치계산식을 사용하여 소형 열병합발전의 과도응답을 모사하였다. Fig. 7로부터 이러한 모사 방안이 타당하였음을 보여준다. 시뮬레이션이 예측한 소형 열병합발전의 발전출력은 실제 발전출력의 전력부하 추종양상을 근사하게 모사하고 있다.

5. 결 론

이 연구는 소형 열병합발전의 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 동적 시뮬레이션 개념을 도입하여 부분부하 운전에서 발전효율과 열효율의 변화, 축열조 온도가 열병합발전의 운전 거동에 미치는 영향, 전력부하 추종에 따른 과도응답 특성 등을 예측 결과에 반영하였다. 30 kW급 소형 가스엔진 열병합발전의 실증실험을 통해 시뮬레이션 프로그램의 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션 프로그램은 운전시각과 운전시간, 평균 운전부하율과 같은 소형 열병합발전의 일일 운전거동을 실제에 가깝게 재현하였으며, 일일 전력생산량, 열생산량, 연료사용량을 최대 12%의 오차 이내에서 예측하였다.

후 기

이 연구는 지식경제부가 주관하는 에너지/자원 기술 개발 사업(2009T100200107)에 의해 수행되었으며, 실험은 LG전자가 제공한 실험 장치로 이루어졌습

니다. 이에 감사를 표하는 바입니다.

참고문헌

1. Jung, J. and Lee, J., 2002, A development of GUI system for optimal operational scheduling on industrial cogeneration systems using evolutionary algorithms, The Transactions of KIEE, Vol. 51A, pp. 544-550.
2. Cha, J., 2002, Optimum operational schedule for cogeneration systems using the mixed integer programming, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical installation Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 75-82.
3. Kang, Y., Ky, B., Hwang, Y., Song, J., Cheong, S. and Lee, J., 2009, Optimal design of cogeneration system for general facilities considering LCC analysis, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 21, No. 8, pp. 439-447.
4. Yokoyama, R. and Ito, K., 2002, Optimal design of energy supply systems based on relative robustness criterion, Energy Conversion and Management, Vol. 43, pp. 499-514.
5. Peacock, A. D. and Newborough, M., 2008, Effect of heat-saving measures on the CO2 savings attributable to micro-combined heat and power systems in UK dwellings, Energy, Vol. 33, pp. 601-612.
6. Hawkes, A. D. and Leach, M. A., 2007, Cost-effective operating strategy for residential micro-combined heat and power, Energy, Vol. 32, pp. 711-723.
7. Seo, H., Sung, J., Oh, S., Oh, H. and Kwak H., Economic optimization of a cogeneration system for apartment houses in Korea, Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 961-967.
8. Matics, J. and Krost, G., 2008, Micro combined heat and power home supply : Prospective and adaptive management achieved by computational intelligence techniques, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 2055-2061.
9. Wakui, T., Yokoyama, R., Tamura, I. and Kegasa, A., 2009, Effect of power interchange operation of multiple household gas engine cogeneration systems on energy saving, Energy, Vol. 34, pp. 2092-21.