

초소형 열병합발전시스템(μ CHP) 운전거동 시뮬레이션 프로그램 개발

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

Heat Transfer in a Duct with Various Cross Section of Ribs

Woo-Jin 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*

ABSTRACT: We developed a program, “CogenSim- μ ,” to simulate the operation of micro-combined heat and power (μ CHP) system. The CogenSim- μ can reflect the variation of energy efficiency by handling the real-time loads (heat and power) fluctuation. The result obtained using this program was compared with the real operation of 30 kWe gas engine driven μ CHP. It was found that the CogenSim- μ could predict the amount of generated-power, recovered-heat and consumed-fuel with the error less than 3%, and heat and power efficiency with the error less than 4%. The CogenSim- μ reconstructed the profile of on-off cycle, which represented the operation of a facility, with more than 93% accuracy. The CogenSim- μ can reflect the effects of various factors such as size of thermal storage tank, desired temperature of reservoir water, natural frequency of generator, etc. As a result, the CogenSim- μ can be used to optimize the μ CHP operation.

Key words: CHP(열병합발전), cogeneration(코제너레이션), micro-CHP(초소형 열병합발전), operation(운전거동), simulation(시뮬레이션)

———— 기 호 설 명 ————

P : 전력 [kW]
 Q : 열 [kW]
 T : 온도 [°C]
 V : 유량 [m³/hr]
 m : 질량 [kg]

그리스 문자

η : 효율
 ζ : 감쇠비

하첨자

e : 전기
t : 열
gen : 발전기
load : 부하

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

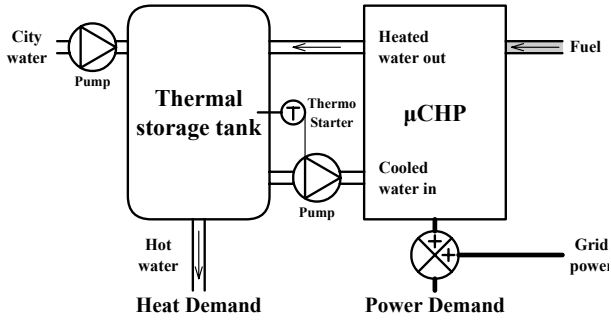


Fig. 1 Schematic of the μ CHP system

1. 서론

초소형 열병합발전(μ CHP)은 자가사용을 목적으로 설치되어 보다 다양한 제한 조건 아래 운전한다. 첫째, μ CHP는 잉여전력 이용에 제한을 받는다. 국내에서는 계통연계 협의에 의해 잉여전력의 역송전이 금지되는 것이 일반적이다. 둘째, μ CHP의 잉여 회수율은 방열되어 에너지 낭비를 발생시킨다. μ CHP는 잉여 회수율이 생산되지 않도록 운전하여야 한다.

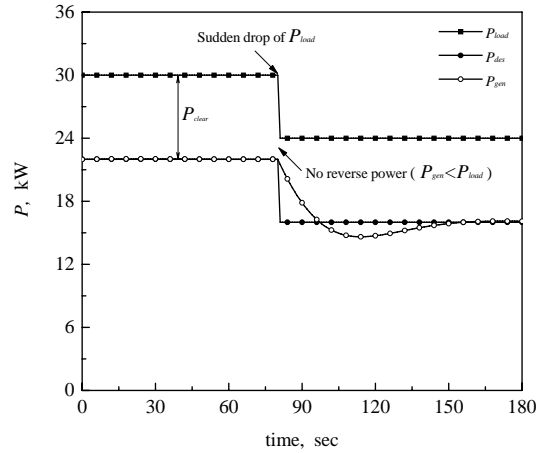
열병합발전 운전거동 예측을 다룬 기존 연구를 살펴보면, Choe et al.⁽¹⁾은 부하의 동적인 특성을 고려치 않고 발전전력의 크기가 항상 일정함을 가정하여 운전거동 예측을 수행하였다. Seo et al.⁽²⁾은 건물에너지 해석 프로그램 eQUEST를 통해 부하의 동적 특성을 반영하였으나, 역송전 제한 등 현실적인 μ CHP 운전 환경을 반영치 못하고 있다.

본 연구는 운전부하율에 따른 설비의 효율 변화 및 부하의 동적 특성을 반영하는 열병합발전 운전거동 예측 프로그램 개발을 목적으로 한다. 특히, 운전거동 예측 과정에 잉여전력 및 잉여 회수율에 대한 제한 조건을 반영하여 해석 대상을 기존 열병합발전에서 μ CHP로 확대한다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 실증 실험을 통해 그 타당성을 평가하도록 한다.

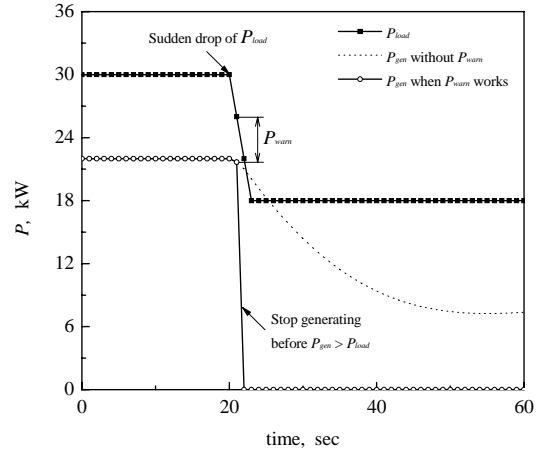
2. 시스템 모델링

2.1 운전 알고리즘

CogenSim- μ 는 본 연구에서 개발한 μ CHP 운전거동 예측 프로그램이다. Fig. 1은 프로그램에



(a) The interval between power load and desired power



(b) Reverse power relay at preset reverse power level

Fig. 2 Reverse power protection in the μ CHP system

서 묘사하는 μ CHP의 물리적 구성도이다. 저탕조는 μ CHP의 회수율 저장하고, 이를 열 사용처에 공급한다. 순환펌프는 저수(貯水)를 μ CHP로 이송하고, μ CHP는 이를 가열하여 저탕조로 공급한다. 시수펌프는 저탕조에 시수를 공급한다.

μ CHP는 운전 방식에 따라 열추종과 전추종으로 나뉘고, 계통연계 형태에 따라 매전형과 비매전형, 단독운전형과 비단독운전형으로 나뉜다. 본 연구는 비단독운전형, 비매전형 계통연계에서 운전하는 열추종 μ CHP를 대상으로 한다.

가상 μ CHP의 운전 여부는 저수온도에 의해 결정된다. 저수온도(T_{st})가 최저 저수온도(T_{on})이하로 감소하면 가상 μ CHP가 운전을 시작하고 목표 발전전력(P_{des})을 선정한다. P_{des} 는 전력부하(P_{load})

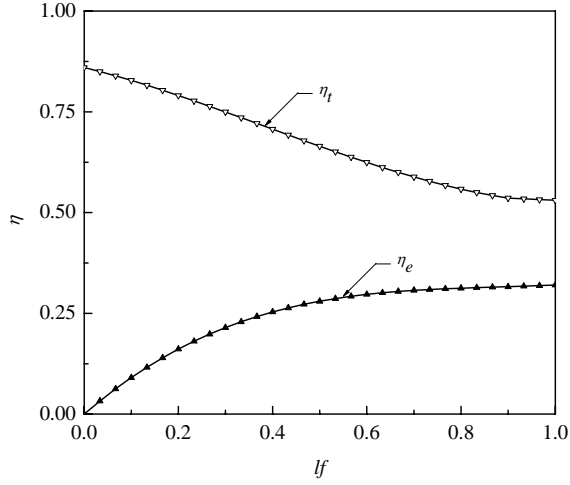


Fig. 3 Efficiency with load factor

와 여유전력(P_{clear})의 차로 구한다. 단, 목표전력의 최대 값은 μ CHP의 정격발전전력(P_{capa})을 초과하지 못한다.

$$P_{des} = \min(P_{load} - P_{clear}, P_{capa}) \quad (1)$$

가상 μ CHP는 목표전력에 따라 발전전력(P_{gen}), 회수열(Q_{re}), 연료소비량(V_{fuel})등을 예측한다. 가상 저장조는 열부하와 회수열로부터 저수(T_{off})의 온도변화를 구하고 이를 최대 저수온도(T_{off})와 비교하여 μ CHP의 운전 여부를 결정한다.

2.2 가상 μ CHP 모델링

본 연구는 30 kWe 가스엔진 유도발전 μ CHP를 바탕으로 가상 μ CHP의 모델링을 수행하였다. 가상 μ CHP의 발전 조건은 다음과 같다.

$$P_{load} - P_{gen} > P_{warn} \quad (2)$$

역송전차단전력(P_{warn})은 여유전력(P_{clear})과 함께 역송전을 방지하기 위한 조치이다. Fig. 2는 P_{clear} 및 P_{warn} 의 역할을 나타낸다. 식 (2)가 만족되면 가상 μ CHP가 발전을 시작하고 발전전력 P_{gen} 를 예측한다. 발전전력을 모사하는 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{P}_{gen} + 2\xi\omega_n(\dot{P}_{gen} - \dot{P}_{des}) + \omega_n^2(P_{gen} - P_{des}) = 0 \quad (3)$$

여기서 ξ 는 μ CHP 발전기의 감쇠비, ω_n 은 발전기의 고유진동수이다. 발전전력(P_{gen})으로부터 연료소비량(V_{fuel})과 회수열량(Q_{re})를 예측한다. V_{fuel} 은 P_{gen} 과 발전효율(η_e)를 이용하여 계산하고, Q_{re} 는 P_{gen} 과 열효율(η_t)을 이용하여 계산한다.

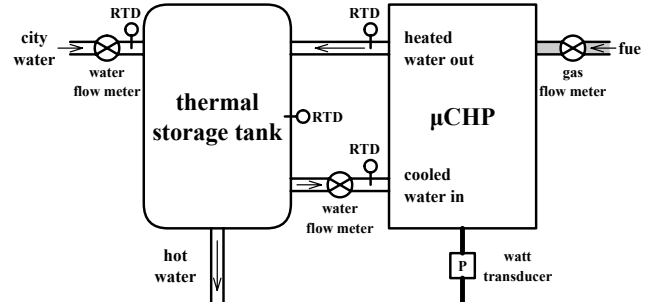


Fig. 4 Schematic of the experiment

$$V_{fuel} = \frac{P_{gen}}{\eta_e \cdot LHV} \quad (4)$$

$$Q_{re} = \frac{\eta_t \cdot P_{gen}}{\eta_e} \quad (5)$$

식(4)의 LHV 는 연료의 저위발열량을 뜻한다. 효율 η_e 와 η_t 는 운전부하율(lf)에 따라 변화한다. lf 는 다음과 같이 정의된다. Fig. 3은 본 연구의 모사 대상 μ CHP에 대한 η_e 및 η_t 의 곡선이다.

2.3 가상 저장조 모델링

가상 저장조는 회수열(Q_{re}) 및 열부하(Q_{load})로부터 부하 데이터 시간 간격(Δt)사이 발생하는 저장조의 온도 변화를 계산한다.

$$T_{st}^{(i)} = T_{st}^{(i-1)} + \frac{Q_{re} - Q_{load}}{m_{st} \cdot C_p (T_{st} - T_{cw})} \quad (6)$$

여기서 m_{st} 는 저수의 총 질량이며, T_{surr} 는 시수의 온도를 뜻한다.

3. 실험

30 kWe 가스엔진 유도발전 μ CHP의 실증실험을 수행하였으며, 측정장비 구성도는 Fig. 4와 같다. 발전전력(P_{gen})은 전력신호변환기(watt transducer)를 이용하여 측정하였다. 회수열(Q_{re})은 전자기식유량계(electromagnetic flow meter) 및 RTD를 이용하여 측정하였다. 가스사용량은 터빈유량계로 측정하였으며, 유량제어기를 이용하여 압력 및 온도에 따른 부피유량의 변화를 보정하였다. 각 측정장비의 오차는 Table 1에 정리되어 있다.

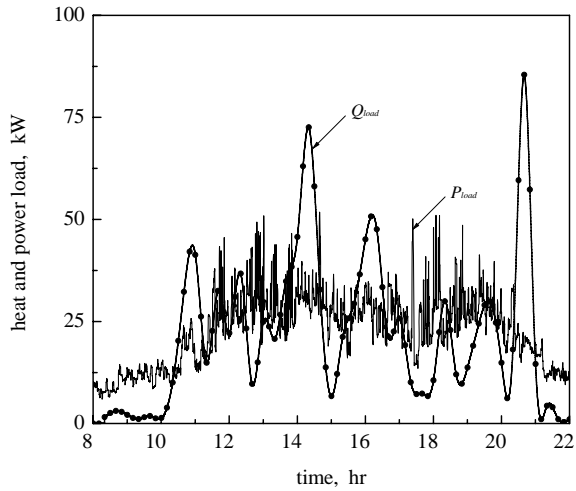


Fig. 5 Heat and power loads with time during a day

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 실험 장소의 전력부하(P_{load}) 및 열부하(Q_{load})이다. 일일 총 부하는 전력 328 kWh, 열 306 kWh로 측정되었다. Fig. 6은 실증실험과 시뮬레이션의 운전거동 비교이며, Table 2는 항목별 상세 비교이다. 운전시간과 공회전시간 외 항목은 모두 7% 이하의 오차를 보인다.

Fig. 7은 급격한 전력부하 변동 빈도가 높은 시간대에서 실증실험과 시뮬레이션의 발전전력을 비교한 것이다. 이 구간에서 역송전 방지를 위해 발전전력이 차단된 횟수 실제 10회이며, 시뮬레이션은 이를 9회로 근사하게 예측하였다. 구간내 평균 발전전력은 14.22 kW이며, 시뮬레이션은 이를 14.51 kW로 예측하였다. 이는 약 2.1%의 오차이며 Table 4의 0.8%보다 다소 높다. 급격한 전력부하 변동 구간에서 시뮬레이션의 정확도가 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

Table 1 Measuring instruments and errors

| Object | | Instrument | Error |
|------------------|-------------------|----------------------------|-------|
| Power generation | | watt transducer | 2% |
| Heat recovery | Water flow rate | electromagnetic flow meter | 0.25% |
| | Water temperature | RTD (3-wire) | 0.15% |
| | Total | | |
| Gas consumption | | turbine flow meter | 0.50% |

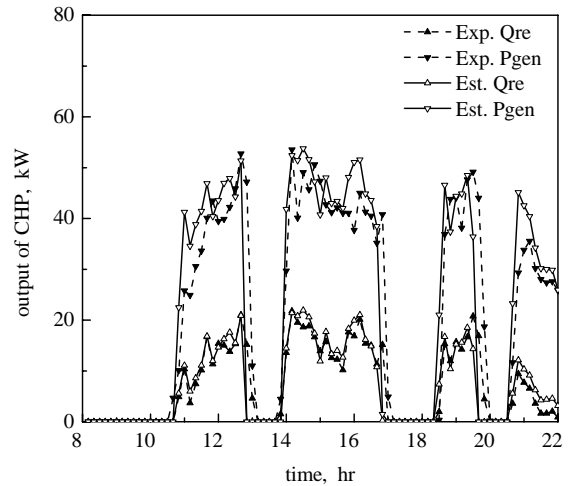


Fig. 6 Comparison of the operation between experiment and simulation

5. 결론

본 연구는 μ CHP 운전거동 예측 프로그램을 개발하였다. CogenSim- μ 는 운전부하율에 따른 설비의 효율 변화와 부하의 동적 특성을 반영한 운전거동 예측을 수행할 수 있다. 해당 프로그램의 검증에 위해 30 kW 가스엔진 유도발전 μ CHP의 실증실험을 수행하였다. 그 결과 발전전력, 회수열량, 가스사용량, 운전시간, 공회전시간, 운전횟수 등을 예측함에 있어 95% 이상의 정확도를 보이는 것으로 확인되었다.

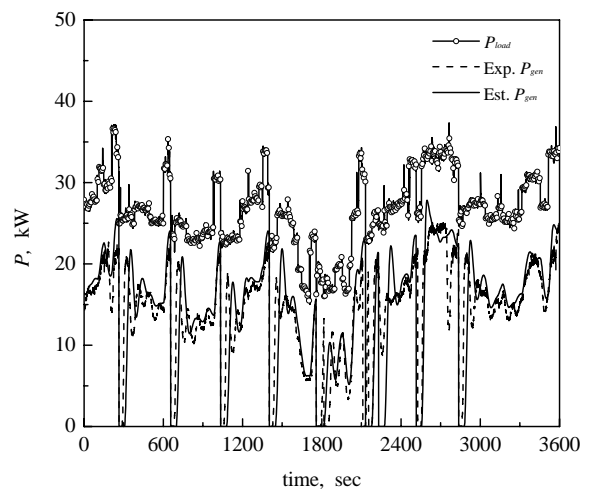


Fig. 7 Comparison of the generated-power between experiment and simulation

Table 2 Results of the operation and errors

| Parameter | Exp. | Simulation | Error |
|-------------------------|----------------------|----------------------|-------|
| Power generation | 101.22 kWh | 100.38 kWh | 0.8% |
| Heat recovery | 306.29 kWh | 312.58 kWh | -2.1% |
| Gas consumption | 45.25 m ³ | 44.67 m ³ | 1.3% |
| Generating eff. | 20.1% | 20.2% | -0.5% |
| Heat eff. | 60.8% | 63.0% | -3.6% |
| Operating hour | 7.0 hr | 6.5 hr | 7.1% |
| Idling hour | 1.1 hr | 0.6 hr | 36.4% |
| Number of on-off cycles | 4 times | 4 times | 0.0% |

CogenSim- μ 는 내부의 가상 μ CHP 모델링 변경만으로 다양한 규모의 μ CHP에 대한 운전거동을 예측할 수 있도록 개발하였다. 이를 이용하여 설치 장소 특성을 반영한 보다 현실적인 운전거

동 예측이 가능하다. μ CHP의 도입 타당성 평가, 설비 최적 용량 선정, 효율적인 운전 계획 수립 등 다양한 활동에 있어 높은 활용도가 기대된다

참고 문헌

1. Choe, J. H., Kim, J. Y., Hong, W. H., 2006, A Study on the Economic Evaluation with the Cogeneration System Operating Pattern of Apartment in Daegu, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.22, No.9, pp.299~307.
2. Seo, D. H., Koh, J. Y., Park, Y., 2009, Energy and Economic Analysis of Heat Recovery Cogeneration Loop Integrated with Heat Pump System by Detailed Building Energy Simulation, Journal of SAREK, Vol.21, No.2, pp.71~78.