

가정용 PEMFC 운전 최적 설계

김 기영¹⁾, 서 석호²⁾, 오 시덕³⁾, 곽 호영⁴⁾

Optimal Operational Planning of 1 kW Household PEMFC System

Ki Young Kim, Seok-Ho Seo, Si-Doek Oh, Ho-Young Kwak

Key words : Demand Pattern(부하패턴), Optimal Planning(최적설계), PEMFC(고분자 전해질 연료전지)

Abstract : The fuel cell which converts directly chemical energy of fuel into electric energy has higher efficiency than the conventional power generation which involves several additional processes. Especially, polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) of which the electrolyte is a thin proton conductive polymer membrane is affordable for portable power applications and small-scale distributed power generation including household and small building. It is very important to not only increase the efficiency of FC itself but determine the optimal operation mode. The optimal operational planning of 1kW household PEMFC system based on the daily electricity and heat demand patterns was performed. The estimated economic gain was up to 20% by adoption of PEMFC system.

Nomenclature

C_{base} : base rate, kW
 C_p : constant pressure heat capacity, kJ/kgK
 m : mass flow rate, kg/s
 M : water mass in heat reservoir, kg
 P : electricity, kWh
 P_D : electric demand, kWh
 Q : heat, kWh
 Q_D : heat demand, kWh
 t : time, s
 T : temperature, K
 T_{set} : hot water temperature, K
 X : fuel consumption, NM³
 Z_r : operation cost, kW

subscript

AUX : auxiliary boiler
FC : PEMFC
HR : heat reservoir

1. 서론

산업의 발전으로 에너지 소비에 대한 욕구가 증가하여 화석연료의 소비량 증가 및 이에 따른 유해 가스 배출로 지구 온난화 등의 환경 문제가

큰 이슈가 되고 있다. 이에 따라 에너지 효율이 좋으면서 환경부하가 적은 에너지원 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

특히 연료전지 발전시스템은 기존의 발전시스템과는 달리 화학 에너지를 전기 에너지로 직접 전환하는 발전 시스템으로 발전 효율을 극대화할 수 있으며, 대기 중에 배출되는 오염 물질의 양을 획기적으로 줄일 수 있다.^{1,2)}

연료전지 발전시스템은 전기를 생산하는 스택을 구성하는 전해질의 종류에 따라 인산형(phosphoric acid), 고분자 전해질형(polymer electrolyte membrane), 용융탄산염형(molten carbonate), 고체산화물형(solid oxide) 연료전지 등이 있다. 특히 가정 및 상업용 발전 용량인 1 kW ~ 10 kW 급에 적용 가능한 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 전해질 누출의 위험이 없

-
- 1) (주)효성
E-mail : kykim@hyosung.com
Tel : (02)707-4306 Fax : (02)707-4399
 - 2) (주)효성
E-mail : shseo@hyosung.com
Tel : (02)707-4394 Fax : (02)707-4399
 - 3) (주)효성
E-mail : ohsidk@hyosung.com
Tel : (02)707-4360 Fax : (02)707-4399
 - 4) 중앙대학교 기계공학부
E-mail : kwakhy@cau.ac.kr
Tel : (02)820-5278 Fax : (02)826-7464

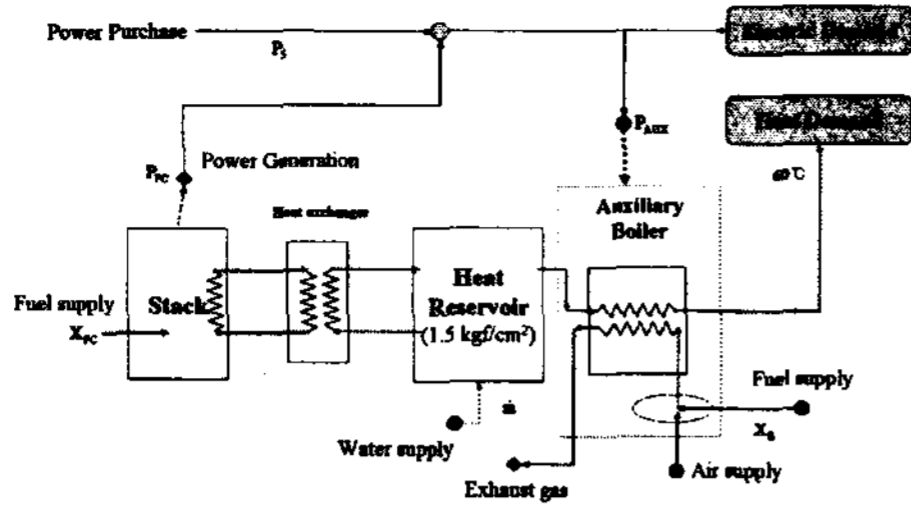


Fig. 1 Schematic of 1.0 kW household PEMFC system.

고, 낮은 온도에서 작동할 수 있으며, 연료 개질 시 발생하는 이산화탄소에 영향이 적은 장점을 가지고 있다.^{1,3)}

연료전지 시스템을 구성하는 스택, 개질기 등의 성능 향상 및 신소재 개발 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 현재 1kW 가정용 PEMFC의 경우 상용화를 목표로 일본 등에서 국가적인 지원이 이루어지고 있다. 일본의 경우 '06년에 1257 기가 설치 가동 중에 있으며, 한국의 경우 '08년까지 100 기를 목표로 실증사업을 진행 중에 있다. 하지만 향후 연료전지 상용화 시 요구되는 전력 및 열수요 패턴에 따른 운전 모드 분석 및 경제성 평가에 대한 연구는 미진한 상태이다.

본 연구에서는 1kW급 가정용 PEMFC 시스템의 운전 최적화 알고리즘에 대하여 소개하고자 하며, 이를 적용하여 아파트의 계절별 1일 전기 및 열수요 패턴에 대하여 계절별 최적화된 운전 모드 및 운전비용의 절감액을 계산하였다.

2. 가정용 PEMFC 시스템

1kW급 가정용 PEMFC 시스템은 연료로부터 전기와 열을 생산하는 PEMFC 모듈, 열저장조 그리고 보조 보일러로 구성되며, 시스템 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

2.1 PEMFC Module

현재 당사에서 시험 운행 중에 있는 1 kW급 가정용 PEMFC 시스템의 전력 및 열 성능곡선으로부터 연료소비에 따른 전력 및 열 출력을 다음과 같은 선형 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{FC} = a_{FC} X_{FC} + b_{FC} \quad (1)$$

$$Q_{FC} = \alpha_{FC} X_{FC} + \beta_{FC} \quad (2)$$

2.2 열저장조(heat reservoir)

연료전지에서 발생한 열은 열교환기를 통하여 열저장조에 저장된 온수의 온도를 높이게 된다. 열수요가 발생할 경우 열저장조에 저장된 온수는 방출되며, 방출된 온수만큼 외부로부터 공급받아 열저장조의 온수량이 항상 일정하게 유지된다. 따라서 열저장조의 온도는 다음과 같은 관계식이 성립하게 되며,

$$MC_p \frac{dT_{HR}}{dt} = Q_{FC} - \dot{m} C_p (T_{HR} - T_{\infty}) \quad (3)$$

식(3)을 적분하여 정리하면 열저장조의 온도를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$T_{HR}(t+\Delta t) = T_{HR}(t) \exp\left(-\frac{\dot{m}}{M} t\right) + \left(\frac{\dot{Q}_{FC}}{\dot{m} C_p} + T_{\infty}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\dot{m}}{M} t\right)\right] \quad (5)$$

이때 보조 보일러에 공급되는 온수의 유량은 열수요와 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\dot{m} = \frac{Q_D}{C_p (T_{set} - 273.15)} \quad (4)$$

2.3 보조보일러(Auxiliary Boiler)

수요처에 공급될 온수의 온도가 T_{set} 보다 낮을 경우 보조보일러를 이용하여 온수의 온도를 증가시키게 된다. 이때 보조보일러를 사용하여 추가되는 열량은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{AUX} = \dot{m} C_p (T_{set} - \bar{T}_{HR}) \quad (6)$$

여기서, 열저장조의 평균온도 \bar{T}_{HR} 는 다음과 같다.

$$\bar{T}_{HR} = \left(\frac{\dot{Q}_{FC}}{\dot{m} C_p} + T_{\infty}\right) + \frac{M}{\dot{m} \Delta t} \left(\exp\left(\frac{\dot{m}}{M} \Delta t\right) - 1\right) \left(\frac{\dot{Q}_{FC}}{\dot{m} C_p} + T_{\infty} - T_{HR}\right) \quad (7)$$

3. 운전 최적화

1 kW PEMFC 시스템의 운전 모드에 따른 운전비용은 연료전지 및 보조보일러 운전에 따른 운전비용 및 외부 전력 사용량에 따른 비용의 합으로 나타낼 수 있다.⁴⁾

$$Z_r = \sum_{m=1}^M (C_{FC} X_{FC}^m + C_{AUXB} X_{AUXB}^m + C_P W_P^m) + C_{Base} \quad (8)$$

만약 열저장조에 저장된 열에너지를 고려한다면 식(8)은 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

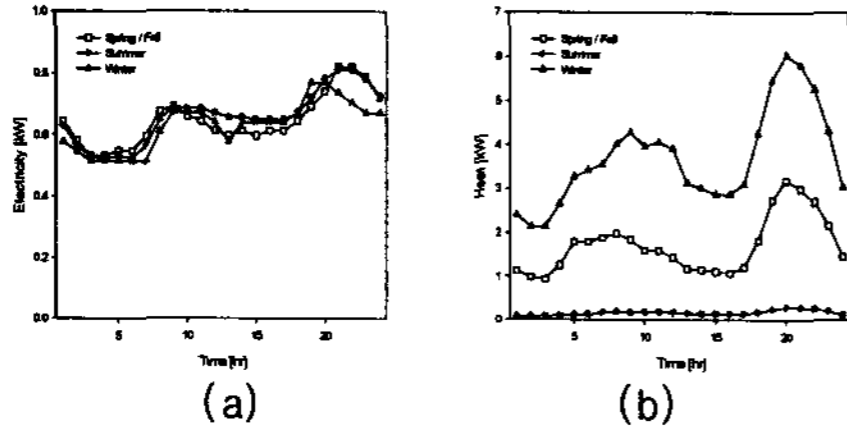


Fig. 2 Electricity (a) and heat (b) demand patterns of APT.

$$Z_r = \sum_{m=1}^M (C_{FC} X_{FC}^m + C_{AUXB} X_{AUXB}^m + C_P W_P^m) - \left[\sum_{m=1}^M C_{FC} X_{ST}^m \right]_{ST} + C_{Base} \quad (9)$$

여기서 열저장조에 저장된 에너지는 다음과 같다.

$$Q_{ST} = Q_{FC} + Q_{AUXB} - Q_D \quad (10)$$

따라서 전기 및 열수요 패턴에 대하여 PEMFC 시스템의 운전비용을 나타내는 식(8) 또는 식(9)가

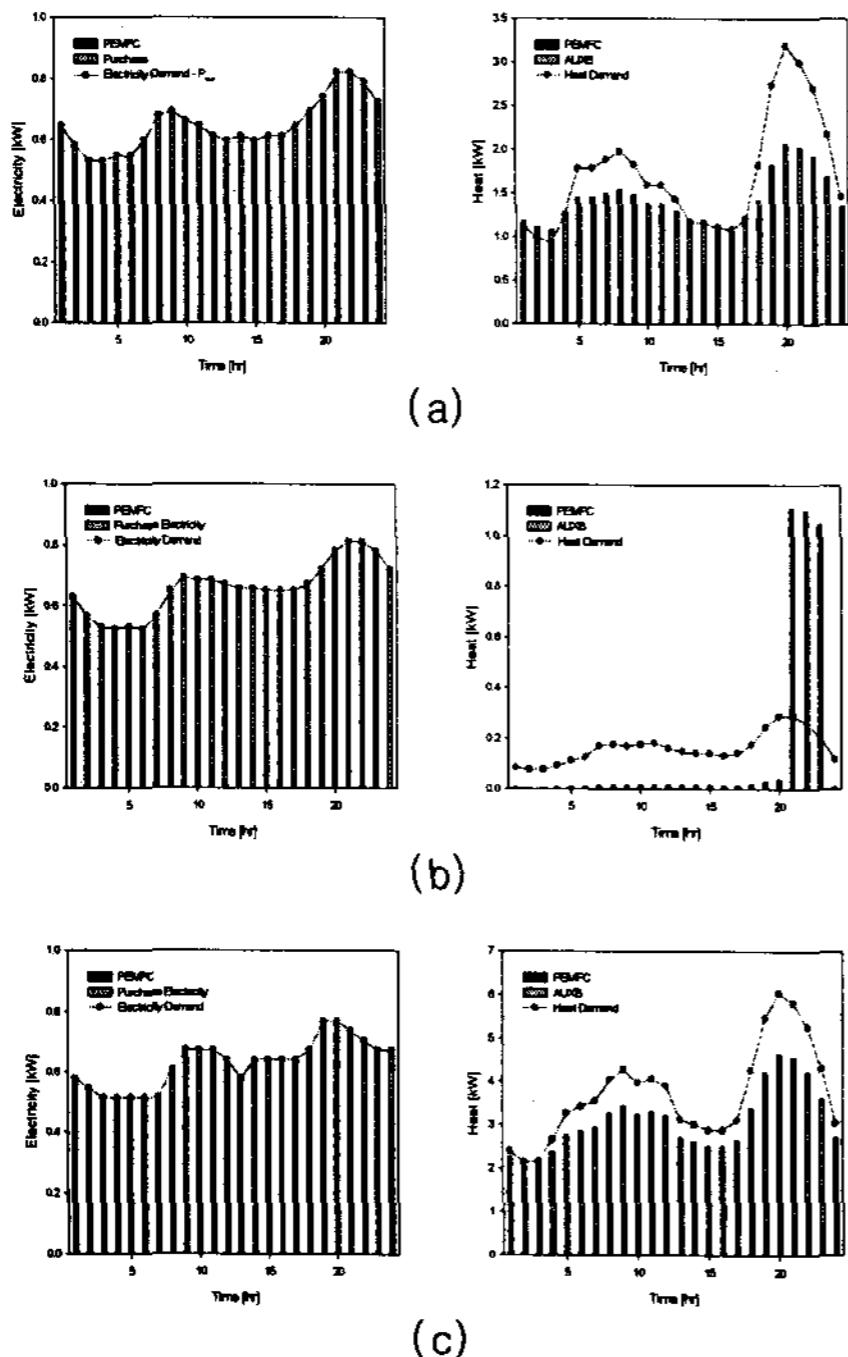


Fig. 3 Optimal operation plan calculated by Eq. (8), (a) Spring/fall, (b) Summer, (c) Winter.

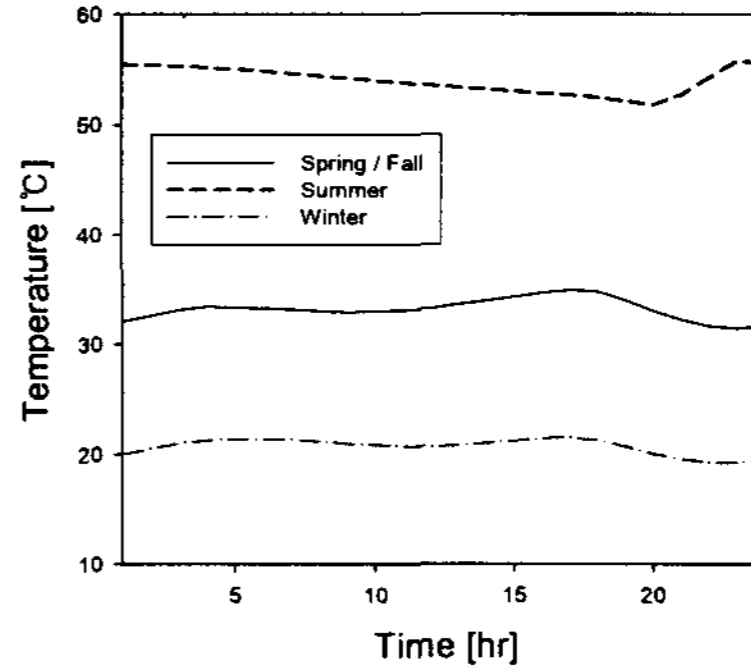


Fig. 4 Heat reservoir temperature for the case of Fig. 3.

최소가 되는 연료 사용량 및 전력 구매량을 계산하여 최적화된 운전 모드를 계산하였다.⁵⁻⁶⁾ 이때 목적함수인 식(8) 또는 식(9)는 전기 열수요 패턴에 대하여 다음과 같은 부하조건을 만족해야 한다.

$$P_{FC} + P_P - P_{AUXB} \geq P_D \quad (11a)$$

$$Q_{AUXB} + C_P m (\bar{T}_{HR} - 273.15) \geq Q_D \quad (11b)$$

4. 결과

본 연구에서는 월 평균 371 kWh의 전력과 1,340 kWh의 난방을 사용하는 1가구 아파트에 PEMFC 시스템 설치 운영 시, 최적화된 운전 모드 및 에너지 절감액을 3절의 운전최적화 알고리즘을 이용하여 계산하였다. 이때 PEMFC의 최소 부하는 50%로 가정하였다.

고려 대상 아파트의 계절별 전기 및 열수요 패턴을 Fig. 2에 나타내었는데 전력 사용량은 계절에 거의 무관하지만, 겨울철 난방의 경우 실내 난방 및 온수 사용량 증가로 최대 6 kWh 이상 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 식(9)를 사용하여 계산된 최적화된 운전 모드로 봄/가을과 겨울의 경우 24시간 연속 운전을 하며, 이때 PEMFC의 가동 부하는 최소 부하로 운전하는 것을 알 수 있다. 반면 여름철의 경우 난방 부하가 거의 없기 때문에 4시간 이상 PEMFC를 가동한다면 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 열저장조의 온도가 상한값인 56°C 이상 증가하게 되어 PEMFC 스택 성능을 저하시킬 수 있다.

열저장조에 저장되는 에너지를 고려하여 계산된 최적 운전 모드를 Fig. 5에 나타내었는데, 여름철 운전 모드는 앞서 계산한 경우와 일치하는 결과를 얻었다. 하지만 봄/가을과 겨울철에는 24시간 연속 운전이 아닌 21시간 동안 운전을 하며 이때 PEMFC의 시간대별 가동률은 전력 부하에 따라 동시에 변화하는 것을 알 수 있다.

이와 같이 열저장조에 저장되는 에너지를 최적화 목적함수에 적용했을 때 PEMFC 가동률 패턴

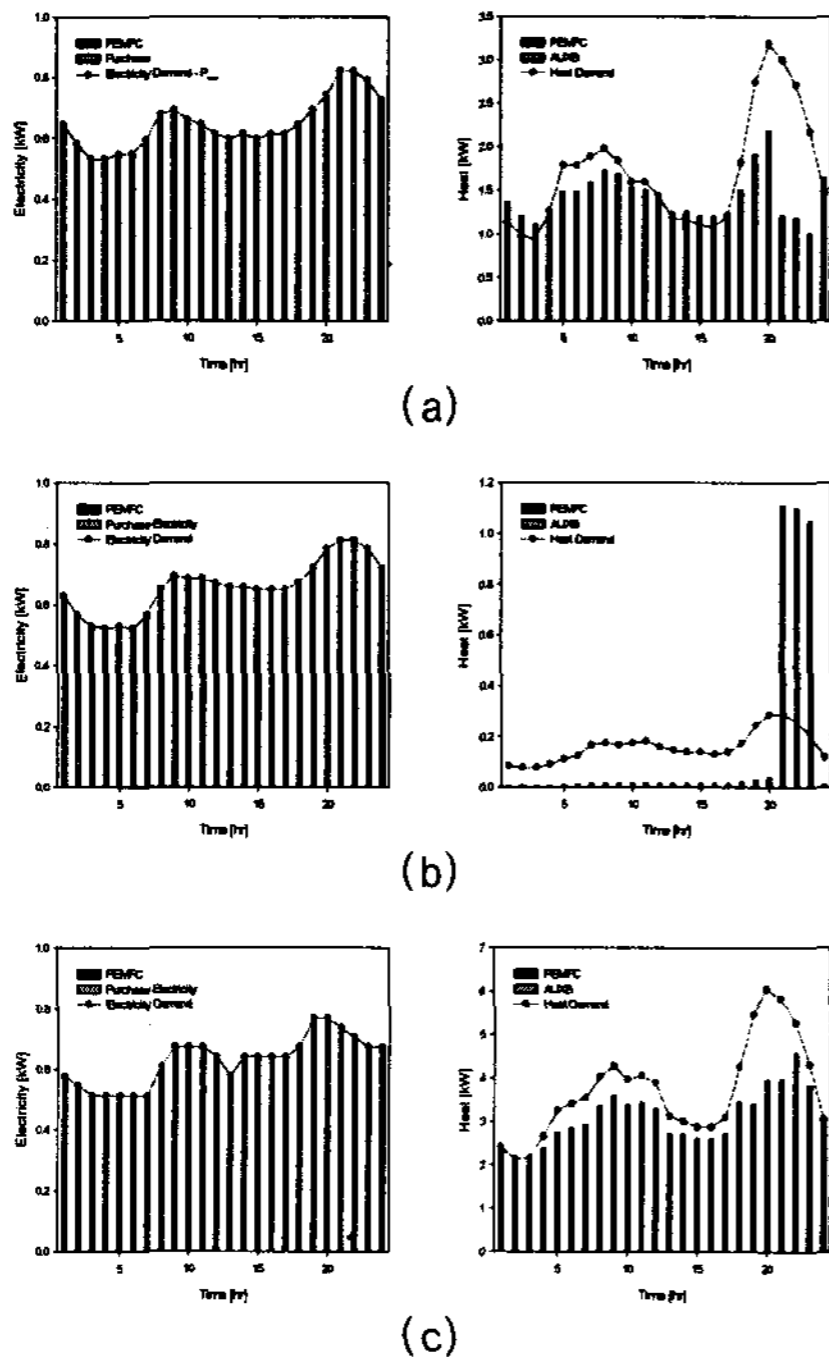


Fig. 4 Optimal operation plan calculated by Eq. (9), (a) Spring/fall, (b) Summer, (c) Winter.

이 변화하는 이유는 다음과 같다. 에너지 저장을 고려하지 않을 경우, PEMFC의 가동률이 증가하면 천연가스 사용량 증가로 운전 비용이 증가하기 때문에 운전비용을 낮추기 위하여 PEMFC의 가동률이 최소가 되는 운전 모드를 찾게 된다. 반면 식(9)을 사용하여 최적 운전 모드를 계산할 경우 열저장조에 저장되는 열에너지만큼 운전비용이 감소하기 때문에 PEMFC 가동률이 증가된 운전 모드를 선택하게 된다. Table 1은 전기 및 도시가스 월 사용액으로 PEMFC를 설치 운영할 경우 운전 모드에 상관없이 20% 이상 운전비용을 감소시킬 수 있어 연간 500천원의 절감 효과를 얻을 수 있다.

Table 1 Calculated monthly operational cost.

	Conventional system [kW]	PEMFC with Eq. (8) [kW]	PEMFC with Eq. (9) [kW]
Spring/Fall	151	96	95
Summer	99	79	79
Winter	216	165	165

5. 결론

1 kW급 가정용 PEMFC 시스템을 아파트에 적용할 경우 20% 이상의 운전비용 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 또한 본 연구에서 제시한 1 kW급 가정용 PEMFC 시스템의 운전 최적 알고리즘은 향후 연료전지 실증사업 및 경제성 평가에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Barbir, F., 2005, PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- [2] Kordesch, K. Simade, G., 1996, Fuel Cells and Their Applications, VHC, Weinheim.
- [3] Anahara, R., Yokokawa, S. Sakurai, M., 1993, "Present Status and Future Prospects for Fuel Cell Power Systems," Proc. IEEE, Vol. 81, No. 3, pp. 399-408.
- [4] Horii, S., Ito, K., Pak, P. S., Suzuki, Y., 1987, "Optimal Planning Gas Turbine Co-Generation Plants Base on Mixed-Integer Linear Programming," Int. J. Energy Res., Vol. 11, pp. 507-50.
- [5] Oh, S., Lee, H., Jung, J., Kwak, H., 2007, "Optimal Planning and Economic Evaluation of Cogeneration System," Energy, Vol. 32, pp. 760-771.
- [6] Oh, S., Oh, H., Kwak, H., 2007, "Economic Evaluation for Adoption of Cogeneration system," Appl. Energy, Vol. 84, pp. 266-278.