

한국과 일본에서의 가정용 PEMFC 시스템 경제성 분석

오 시덕¹⁾, 김 기영²⁾, 서 석호³⁾

Economic feasibility of 1kw household PEMFC System in Korea and Japan

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

Key words : Economic Feasibility(경제성), Optimal Planning(최적설계), PEMFC(고분자 전해질 연료전지)

Abstract : Fuel cell with high electric efficiency has many probabilities of commercial use. Especially, proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) which is a low temperature fuel cell and has less influence on CO₂ concentration is considered the power generation system of small building and household. We calculated the optimal operational plans of 1 kW household PEMFC power system based on the daily electricity and heat demand patterns of Japan and Korea. Calculated results show that the economic feasibility of PEMFC power system is very sensitive to the cost policy of electricity and natural gas.

Nomenclature

C_{base} : base price
P : electricity, kWh
P_D : electric demand, kWh
Q : heat, kWh
Q_D : heat demand, kWh
X : fuel consumption, NM³
Z_r : operation cost

subscript

AUX : auxiliary boiler
FC : PEMFC
HR : heat reservoir

1. 서론

영국의 물리학자 Grove가 1839년 최초로 연료전지의 원리를 발견하였고¹⁾, 영국 Cambridge 대학의 Bacon과 Frost는 다공성 금속을 이용한 alkaline 연료전지에 대한 연구를 수행하였다. Bacon 등의 연구는 이후 1960년대 초에 미국 NASA의 우주선에 실질적으로 사용되기 시작하였다.

연료전지는 화학에너지를 전기 에너지로 직접 전환하기 때문에 일반적인 발전 시스템보다 효율이 매우 높고 환경 부하가 적은 청정에너지 발전 시스템이다. 또한 석유에너지 이외에 메탄올, 에탄올, 천연가스 등의 대체에너지를 이용하여

발전할 수 있어 절대적인 자원이 부족한 국가에서 연료전지는 차세대 동력원으로 주목받고 있다.²⁻³⁾

특히 전해질 누출의 위험이 없고, 낮은 온도에서 작동할 수 있으며, 연료 개질 시 발생하는 이산화탄소에 영향이 적은 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 1 kW ~ 10 kW 급 가정 및 상업용으로 많은 연구가 진행되고 있다.³⁻⁴⁾

일본의 경우 1 kW급 가정용 연료전지 실증사업을 통해 '05년 480 기, '06년 777 기가 현재 가동 중에 있으며, 올해 1,000를 추가할 계획을 가지고 있다. 우리나라의 경우 '08년까지 100 기를 목표로 실증사업을 진행 중에 있다.

상용화를 위한 연료전지 효율 극대화 및 원가 절감 등에 많은 연구가 진행 중에 있지만, 운전 모드의 최적화를 통하여 연료전지를 효율적이고 합리적으로 운영할 수 있는 방법을 제시할 수 있으며 더불어 연료전지 도입에 있어서 중요한 전력 및 연료 단가 정책에 대하여 정량적인 분석의 수단으로 활용할 수 있음에도 불구하고 아직까지 에너지 수요패턴에 따른 운전 모드 최적 설계 및 경제성 평가에 대한 연구는 미진한 상태이다.

-
- 1) (주)효성
E-mail : ohsidk@hyosung.com
Tel : (02)707-4360 Fax : (02)707-4399
 - 2) (주)효성
E-mail : kykim@hyosung.com
Tel : (02)707-4306 Fax : (02)707-4399
 - 3) (주)효성
E-mail : shseo@hyosung.com
Tel : (02)707-4394 Fax : (02)707-4399

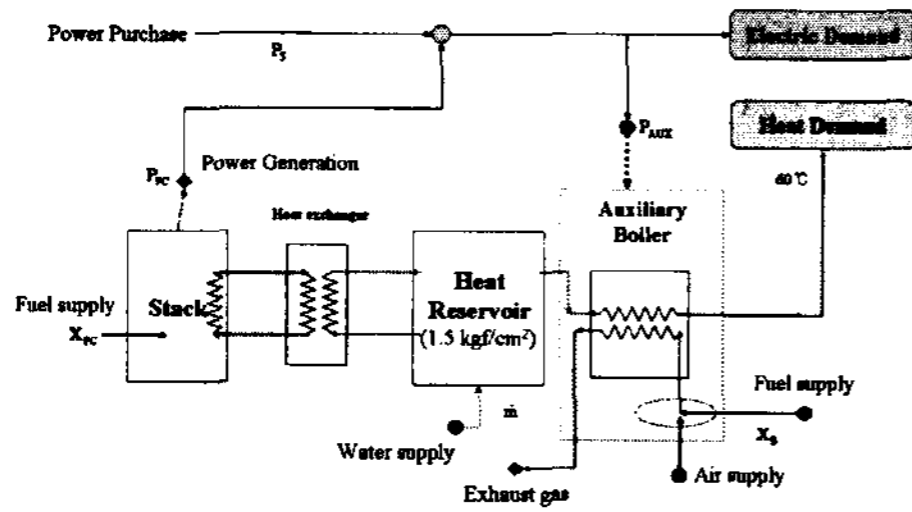
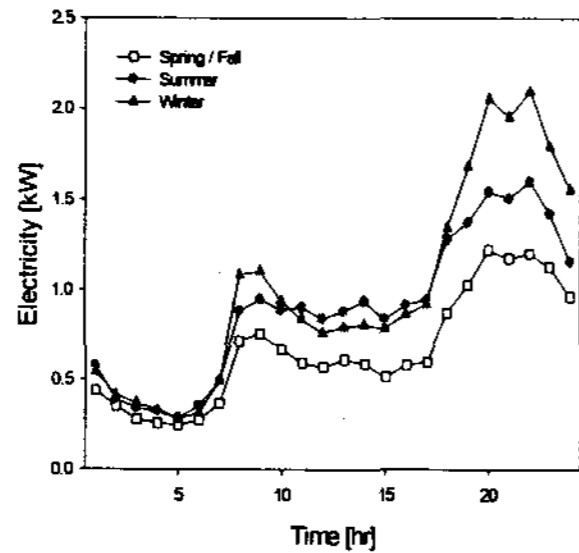


Fig. 1 Schematic of 1.0 kW household PEMFC system.

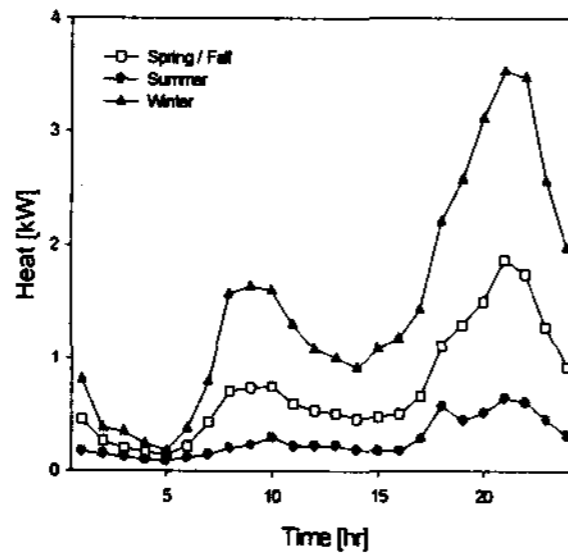
본 연구에서는 일본 및 한국 가정의 계절별 평균 전력 및 열 부하 패턴을 사용하여 1 kW PEMFC 시스템 운전 최적화를 수행하여 가정용 PEMFC 시스템 도입에 따른 한일간 경제성을 분석하였다.

2. 가정용 PEMFC 운전 최적화

1kW급 가정용 PEMFC system은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 PEMFC 모듈, 열저장조 그리고 보조 보일러로 구성되는데, PEMFC 모듈은 천연가스 등과 같은 연료를 사용하여 수소를 생산하는 연료처리부, 생산된 수소로부터 전기를 생산하는 스택 등으로 구성된다. 특히 스택에서 수소와 산소를 이용하여 전기를 생산할 때 부수적으로 발생하는 열을 열교환기를 이용하여 제거하게 되며, 이때 열교환기로부터 제거된 열을 회수하기 위하여 열저장조를 설치하여 발생한 폐열을 저장하게 된



(a)



(b)

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

Table 1 Electricity price list in Tokyo, Japan: Meter-rate lighting C.

	Rate [₩]
0 ~ 120 kWh	145.96
121 kWh ~ 300 kWh	193.63
301 kWh ~	208.11

Table 2 Natural gas price list for household FC power generation in Tokyo, Japan

	Rate [₩]
0 m ³ ~ 20 m ³	971
21 m ³ ~ 80 m ³	837
81 m ³ ~ 200 m ³	811
201 m ³ ~ 500 m ³	768
501 m ³ ~ 800 m ³	719
801 m ³ ~	645

다. 만약 열 수요가 발생할 경우 열저장조에 저장된 온수를 공급하게 되며 부족한 온수는 보조 보일러를 사용하여 보충하게 된다.

1 kW PEMFC 시스템의 운전 모드에 따른 운전비용은 연료전지 및 보조보일러 운전에 따른 운전비용 및 외부 전력 사용량에 따른 비용의 합으로 나타낼 수 있다.⁵⁾ 이때 열저장조에 저장된 열에너지를 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

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

여기서 저장된 에너지는 다음과 같다.

$$Q_{ST} = Q_{FC} + Q_{AUXB} - Q_D \quad (2)$$

이때 식(1)은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$P_{FC} + P_P - P_{AUXB} \geq P_D \quad (3a)$$

$$Q_{AUXB} + C_P m (\bar{T}_{HR} - 273.15) \geq Q_D \quad (3b)$$

전기 구입량, PEMFC 및 보조보일러 가동률은 운전비용을 나타내는 목적함수 식(1)이 최소가 되는 전력 및 천연가스 사용량으로부터 구할 수 있다.^{6,7)} 이때 일본의 도쿄 전기회사의 전력 요금⁸⁾ 및 도쿄 가스의 가정용 연료전지 요금표⁹⁾를 사용하여 최적 운전 설계에 적용하였고 Table 1 과 2에 나타내었다. 한국의 경우에는 한전 주택용 고압용 요금표 그리고 천연가스는 개별난방용 단가(562.52 m³/₩)를 적용하였다.

3. 결과

Fig. 2는 일본 가정의 계절별 평균 전력 및 열 부하 패턴으로 오전 8 시와 오후 8~10 시 사이에 전력 및 열사용이 증가하며 특히 겨울철 난방에

Table 3 Calculated monthly operational cost of Japanese household.

	Conventional system [kW]	PEMFC system [kW]	Saving rate (%)
Spring/Fall	135	126	7
Summer	133	132	1
Winter	218	197	10

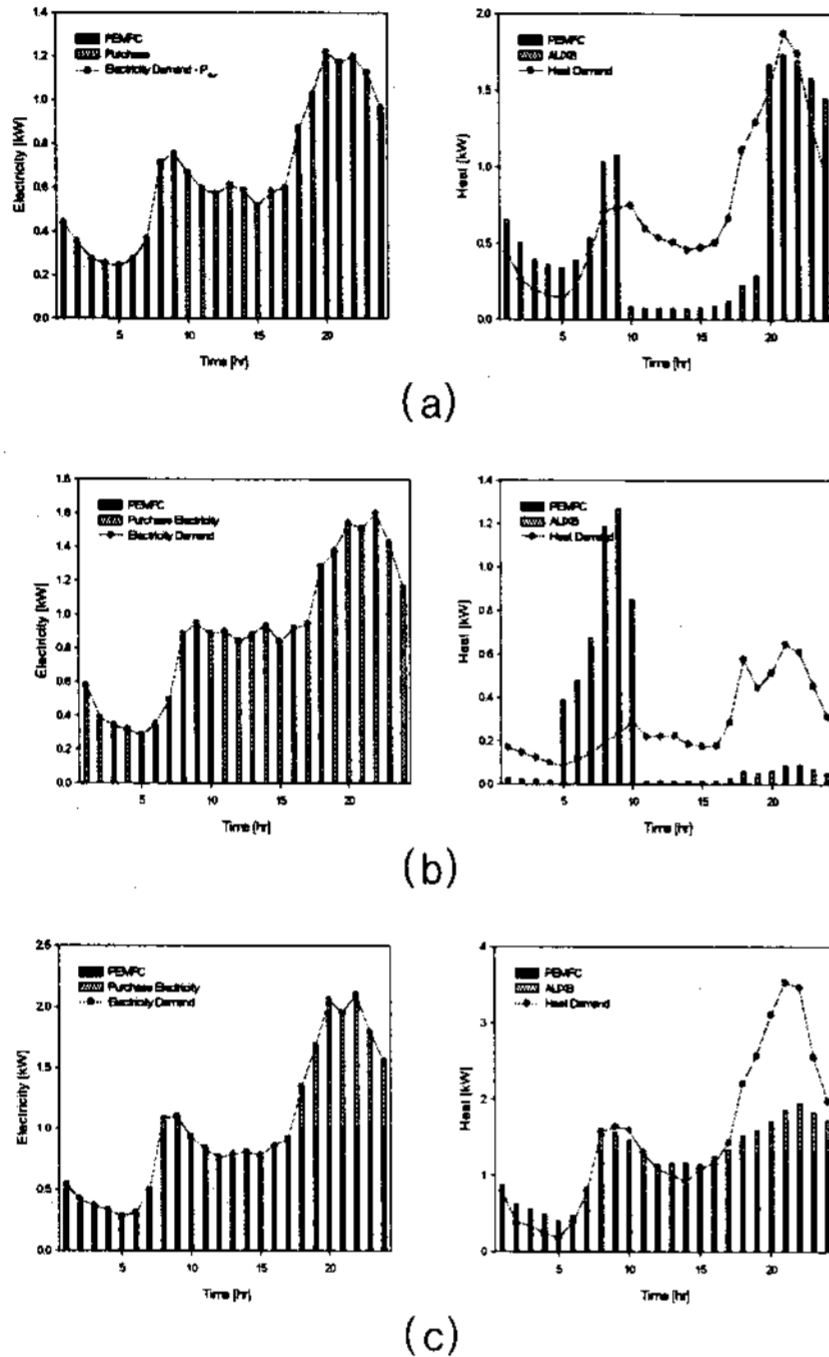


Fig. 3 Calculated optimal operation plan of Japanese household, (a) Spring/fall, (b) Summer, (c) Winter.

의한 전기 및 열 사용량이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 일본 도쿄의 전력 요금 및 가스요금표를 사용하여 계산된 최적 운전 모드이다.

봄/가을의 경우 20시부터 14시간 PEMFC를 운전하여 심야에 필요한 전력 및 열을 생산하며 생산된 열의 일부는 열저장조에 저장된다.

여름의 경우에는 오전 5시부터 6시간 연속운전을 하게 되는데 여름철 낮은 난방부하로 6시간 운전만으로도 1일 동안 필요한 난방부하(약 0.2 kWh)의 대부분을 생산한다. 이때 생산된 열은 열저장조에 저장하여 난방부하가 큰 저녁시간 이후에 사용하게 된다.

겨울철의 경우에는 Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이 전력 및 열수요가 매우 크기 때문에 24시간 연속운전을 하며 전력 수요량에 따라 가동률이 동시에 변화한다.

Table 3은 계산된 운전 모드로부터 1 kW 급 가정용 PEMFC 도입에 따른 월 절감액을 비교해 본

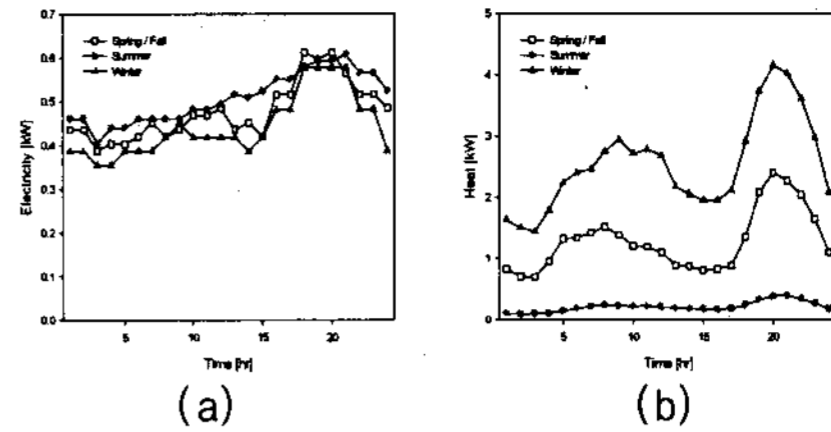


Fig. 4 Electricity (a) and heat (b) demand patterns of Korean APT.

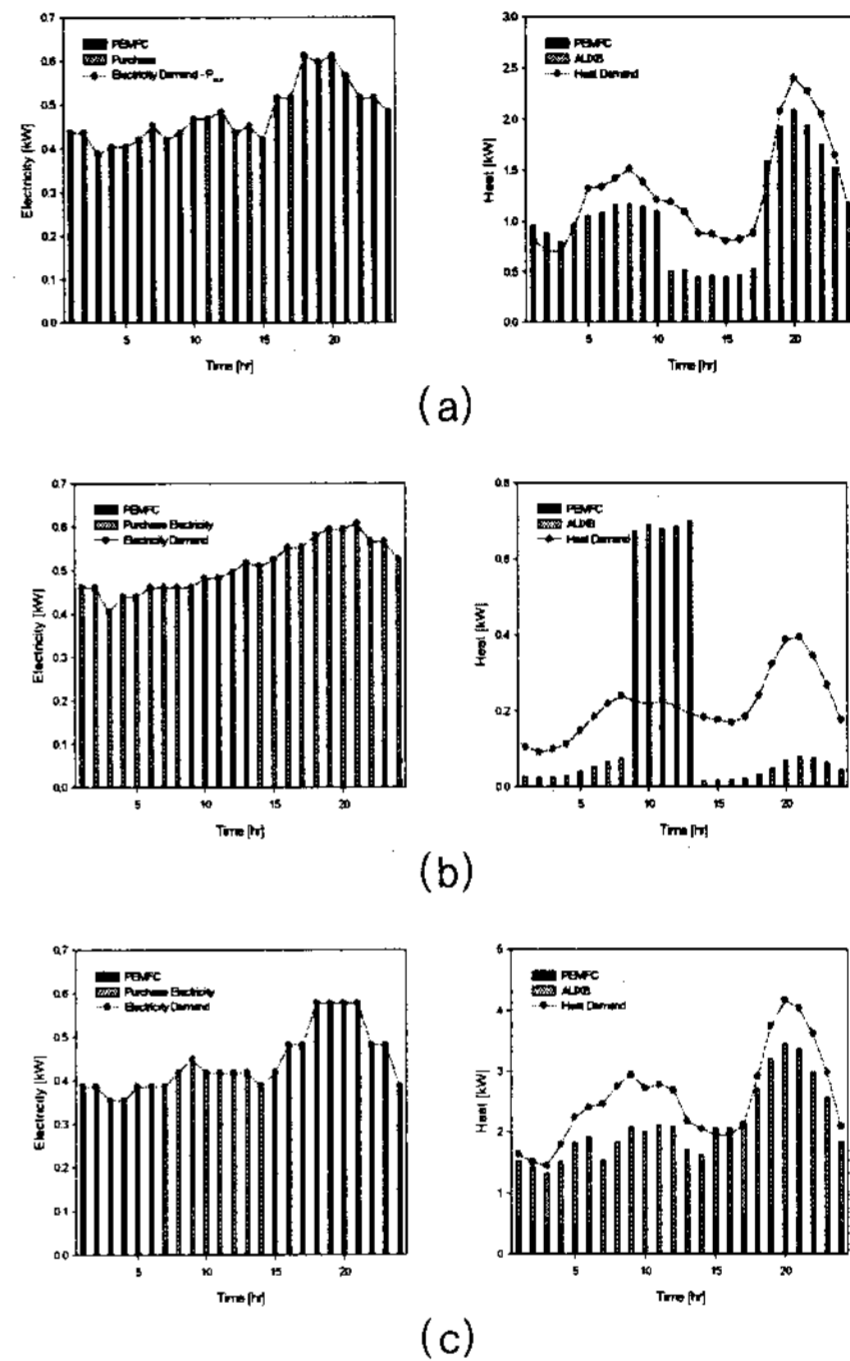


Fig. 5 Calculated optimal operation plan of Korean APT, (b) Summer, (c) Winter.

결과로 겨울철 10%의 운전비용 절감을 제외하고는 PEMFC 시스템을 도입에 따른 경제적 이득이 매우 작다는 것을 알 수 있다.

다음은 한국의 일반적인 가구 형태인 APT에 PEMFC 시스템을 도입했을 때 운전비용의 변화를 살펴보고자 한다.

Fig. 4는 한국의 아파트에서 요구되는 전력 및 열수요 패턴으로 전력의 경우 계절 변화에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

한국 아파트의 계절별 전력 및 열수요 패턴을 바탕으로 계산된 최적 운전모드는 Fig.5이다. 계절 변화에 따라 전력수요의 변화는 없지만 열수요의 차이 때문에 봄/가을은 19시간, 여름은 5시간 그리고 겨울은 16시간의 운전하는 것이 가장 경제적인 운전 방법으로 계산되었다.

특히 여름의 경우 일본 가정에서의 운전패턴과 동일한 5시간을 운전함으로써 하루 동안 필요한 열수요의 대부분을 생산하게 된다. 그 이상

Table 4 Calculated monthly operational cost of Korean APT.

	Conventional system [kW]	PEMFC system [kW]	Saving rate (%)
Spring/Fall	94	71	25
Summer	62	48	23
Winter	132	113	15

운전 시 열저장조의 온도 상승으로 PEMFC의 효율 감소가 발생할 수 있기 때문에 운전을 멈추게 된다.

Table 4는 운전 모드 분석으로부터 얻어진 계절별 운전비용으로 봄/가을철에 25%가 절약되는 등 평균 20%의 운전비용이 절감되어 연 200 천원 이상의 이득이 발생하는 것으로 예측되었다. 반면 일본 가정의 경우 2 배가 적은 100 천원의 운전비용이 절감될 것으로 예상된다.

이와 같이 PEMFC 발전 시스템을 도입하였을 때 한일간 경제성이 차이가 나는 이유는 한일간 전력요금 정책에서 있다고 사료된다. 일본의 전력 요금은 Table 2에서 알 수 있듯이 3 단계로 나뉘어져 있어 사용량 증가에 따라 약 20%의 누진율을 가진다. 하지만 우리나라의 경우 전력 사용량에 따른 최대 누진세율이 100%에 이르러 월 300 kWh 초과 사용량의 경우 일본보다 비싸지게 되며, 500 kWh 초과 사용량은 무려 3 배 이상 비싸다. 따라서 전력 사용량이 많은 가정에 1 kW급 PEMFC 시스템을 도입하여 전력을 생산할 경우 일본보다 한국이 경제성 확보에 더 유리한 조건에 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 한국과 일본의 1가구의 전력 및 열수요 패턴을 바탕으로 1 kW급 가정용 PEMFC 도입에 따른 최적 운전 모드를 계산하여 경제성을 분석한 결과, 일본의 전력 요금 체계보다 전력 사용량에 따른 누진세율이 큰 한국의 경우

PEMFC 시스템 도입에 따른 운전비용 절감 효과가 커 약 20% 이상의 운전비용을 절감할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

현재 상용화를 목표로 실증사업을 진행 중인 가정용 PEMFC 시스템이 경제성을 갖기 위해서는 PEMFC의 성능향상 및 생산원가 절감은 물론 운전 비용에 큰 영향을 미치는 전력 및 도시가스 요금 체계 및 제도 개선에 대한 국가적 관심이 요구된다. 또한 경제성이 확보될 수 있는 전력 및 열 부하 패턴을 가지는 수요처 선정에 신중한 검토가 필요하다.

References

- [1] Grove, W., 1839, "A small voltaic battery of Great Energy," *Philosophical Magazine*, Vol. 15, pp. 287-293.
- [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] Barbir, F., 2005, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- [5] 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.
- [6] Oh, S., Lee, H., Jung, J., Kwak, H., 2007, "Optimal Planning and Economic Evaluation of Cogeneration System," *Energy*, Vol. 32, pp. 760-771.
- [7] Oh, S., Oh, H., Kwak, H., 2007, "Economic Evaluation for Adoption of Cogeneration system," *Appl. Energy*, Vol. 84, pp. 266-278.
- [8] <http://www.tepco.co.jp>
- [9] <http://home.tokyo-gas.co.jp>