

연료전지 기반 공동주택 에너지시스템 분석모델에 관한 기초연구

이홍철[†]·황인주^{*}

A Preliminary Study on the Analysis Model of Energy System based on Fuel Cell for Apartment Houses

Hong-Cheol Lee and In-Ju Hwang

Key Words: Apartment Houses(공동주택), Fuel Cell(연료전지), load Pattern(부하패턴)

Abstract

In the present study, preliminary investigation were carried out by analysis of energy system(heat and electricity) based on phosphoric acid fuel-cell of 50 kW for eco-apartment houses. Analysis model were consisted of fuel cell energy system, secondary energy unit and residential building of 5 stories with 20 and 40 households. And the investigation results reviewed under load pattern of heat and electric power of the apartment houses. The results showed mismatch between the needed heat load pattern and output of fuel cell energy system. The mismatch rate were assessed about 10-180% of heat load for apartment houses with season. We found that secondary energy unit are needed in order to supply insufficient heat.

기호설명

\dot{m}	: 유량, (Nm ³)
P_{AC}	: 송전단 출력, (kW)
P_i	: 공급열량, (kW)
Q	: 발열량, (kJ)
\dot{Q}_{surf}	: 표면에서의 열전달량, (kW)
\dot{Q}_{inf}	: 침기 열손실, (kW)
\dot{Q}_{vent}	: 환기 열손실, (kW)
\dot{Q}_g	: 내부 발열량, (kW)
q	: 가스발열량, (kJ/Nm ³)
η_e	: 송전효율, (%)
η_h	: 배열효율, (%)

1. 서론

최근 지구환경의 위기에 대비하여 산업 활동의 각 단계에서 단순히 에너지 및 자원을 절약하자는 차원을 넘어 환경보전 및 생태질서를 회복하려는 움직임이 활발하다. 특히, 유럽, 일본 등 선진국을 중심으로 환경친화적인 에너지 및 자원의 단계적, 재이용 등 순환이용을 위한 기술개발에 적극적이다.

기존 건축물에서의 자원 및 에너지 사용패턴은 주로 일방향으로 진행되어 많은 손실과 배출을 수반하고 있다. 이러한 제반 문제점을 개선하기 위하여 건물의 건설 및 운영단계에서 에너지 및 물질이 활용도에 따라 단계적으로 순환이용이 가능한 에너지시스템 도입이 요구되고 있다.

또한 21세기 국제사회는 환경보전의 수준이 그 국가의 삶의 수준지표가 될 것으로 예측되며, 건물 측면에서도 기존 대규모 공급위주의 설비개념에서 탈피하여 보다 적극적으로 환경을 보전할 수 있는 개념의 공급 및 처리시스템의 개발이 필요한 시기이다.

[†] 한국건설기술연구원

E-mail : hclee@kict.re.kr

TEL : (031)910-0258 FAX : (031)910-0381

^{*} 한국건설기술연구원

향후 국내의 주거분야에서는 도시가스 공급의 확대로 소규모 에너지공급시스템의 보급이 확대될 것으로 전망되며, 보다 적극적으로 태양열 및 태양광발전, 지열 등 청정에너지와 연계하여 적용되어야 할 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 환경공생빌딩 건축기술 개발의 세부기술 분야로 도시가스를 연료로 하는 연료전지(Fuel Cell) 기반의 공동주택 에너지공급시스템을 설정하고, 기초적인 조사 및 분석모델 등을 검토하였다.

본 연구에서는 먼저 공동주택의 열 및 전력부하특성을 조사 및 분석하였으며, 에너지공급시스템 분석모델로 열원의 온도수준을 고려하여 50 kW 인산형 연료전지(PAFC)를 선정하였다. 그리고 공동주택의 계절별 전력부하를 기준으로 연료전지를 운전특성과 제반 문제점을 평가하였다.

2. 에너지공급시스템 분석모델 구축

2.1 공동주택 에너지공급시스템 현황

국내의 경우 신규로 건설되고 있는 대부분의 주택이 공동주택이며, 이러한 공동주택에는 기본적으로 광역전력계통이 연계된다. 그리고 열원부분에 있어서는 크게 지역난방방식과 개별난방방식으로 구분할 수 있으며, 지역난방의 경우 별도로 취사를 위한 가스계통이 연계되어 있다.

이와 같이 기존 단지나 건물에는 대부분 화석연료를 기반으로 하는 전력계통, 열계통, 가스계통 등이 각각 독립적으로 공급라인을 확보하고 있으며, 이로 인한 시설비나 수송손실 등이 중복되고 있다.

이러한 문제점을 개선하고 보다 합리적인 에너지공급시스템으로 단지나 건물에서 독자적으로 열 및 전기를 생산하여 공급하는 방식인 분산형(on-site) 에너지공급시스템에 대한 관심과 연구가 증대되고 있다.

본 연구에서는 전력 및 열을 동시에 공급하면서 총량적인 에너지 효율이 높고, 환경적으로 기존 화석에너지에 비하여 오염물질의 배출이 적은 연료전지를 공동주택 적용대상으로 설정하였다.

2.2 분석모델

본 연구에서는 분석대상 건물의 용도를 주거용 공동주택으로 설정하였으며, 규모는 5층 구조의

20세대를 기준단위로 Fig. 1과 같이 설정하였다.

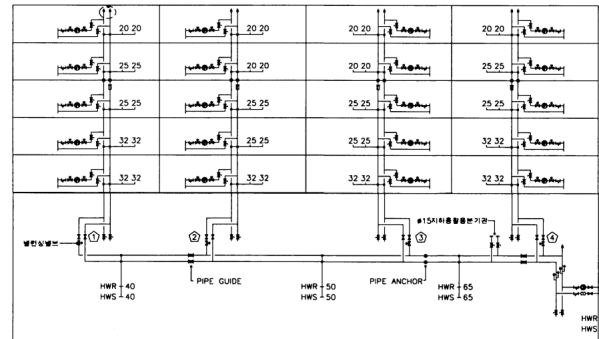


Fig. 1 Analysis model of residential building.

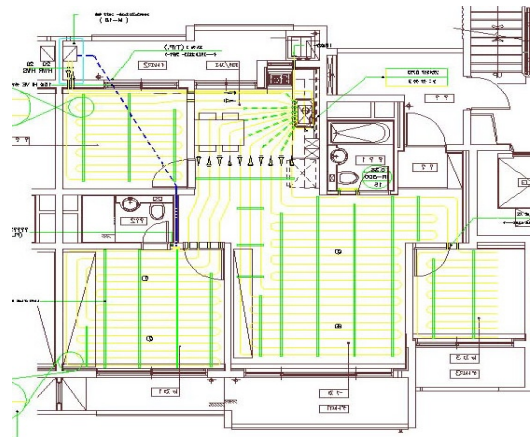


Fig. 2 Layout of a household for load calculation.

이러한 기준규모는 단지의 규모에 따라 모듈형식으로 증가하며, 이에 따라 에너지시스템의 용량도 적절하게 고려되어야 한다.

그리고 난방부하량을 계산하기 단위세대의 평면도를 Fig. 2에 도시하였다.

그리고 에너지시스템 분석모델로는 주거분야에서 필요로 하는 온도 및 열원의 온도를 고려하여 200°C 전후에서 작동하는 인산형 연료전지를 모델로 설정하였다.

연료전지는 연료(수소)의 화학에너지가 전기에너지로 직접 변환되어 직류 전류를 생산하는 능력을 갖는 전지(cell)로 정의되며, 종래의 전지와는 다르게 외부에서 연료와 공기를 공급하여 연속적으로 전기와 열을 발생시킨다. 실제의 연료전지는 개질장치, 전지본체 및 직·교류 변환장치(인버터)의 3가지 주요부로 구성되어 있다.

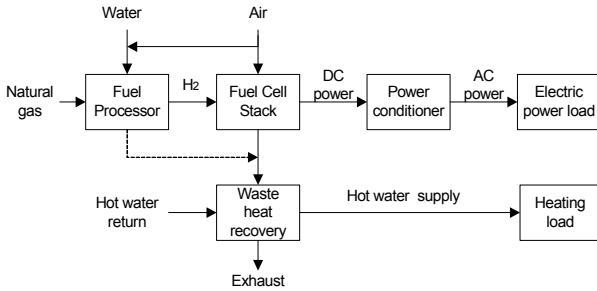


Fig. 3 Schematic diagram of fuel cell system.

그리고 시스템 구성은 Fig. 3과 같이 연료전지 스택을 중심으로 연료 및 공기의 입력과 전기 및 열 그리고 부수적인 배출물 등을 도시하였다. 연료전지에서 발생하는 전기 및 열은 공동주택에서 필요로 부하 측에 연계되어 있다.

2.3 분석방법

공동주택의 열부하를 계산을 위하여 열원기기의 공급/제거 열량을 포함하여 식(1)과 같이 실내 온도를 계산함으로써 부하측과 HVAC 작동조건의 실제상황을 모사할 수 있도록 하였다.

$$C_i \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{surf} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_g + \dot{Q}_{cplg} - P_i \quad (1)$$

연료전지의 고유한 운전특성은 전력부하율에 따른 전기 및 열효율을 측정된 선행연구결과를 수식화 하여 식 (2), 식 (3)과 같이 계산에 활용하였으며, 운전을 위한 기준조건은 공동주택에서 측정된 전력부하패턴을 검토하여 적용하였다.

$$\eta_e = P_{AC} / \dot{m} \cdot q = a_0 x^3 + a_1 x^2 + a_2 x + a_3 \quad (2)$$

$$a_0 = 0.00005278, \quad a_1 = -0.01664286$$

$$a_2 = 1.68472222, \quad a_3 = -17.50238095$$

$$\eta_h = \dot{Q} / \dot{m} \cdot q = b_0 x^4 + b_1 x^3 + b_2 x^2 + b_3 x + b_4 \quad (3)$$

$$b_0 = -0.00001178, \quad b_1 = 0.00284015$$

$$b_2 = -0.22779167, \quad b_3 = 6.57258658$$

$$b_4 = 2.49285714$$

3. 공동주택의 열 및 전력부하 특성

공동주택에서 에너지부하는 급탕 및 난방부하, 전력부하로 구분할 수 있으며, 이러한 부하의 절대량이나 시간대별 사용량은 거주자의 습관이나 생활양식 그리고 지역별로 차이를 보일 것으로 판단된다.

공동주택의 경우 하나의 세대에서 얻은 일간 급탕 및 난방부하패턴은 그 세대의 설계를 위해서는 효과적으로 사용될 수 있으나, 독립세대별로 거주특성과 급탕사용패턴이 각각 다르기 때문에 일반적인 적용을 위한 표준화된 패턴이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

이러한 부하패턴의 설계를 위해서 실측자료 및 이론적 기법을 통하여 전체 세대에 대해 확률적으로 일정한 패턴과 사용량 범위를 지역별 또는 경우별로 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

3.1 열부하패턴

본 연구에서는 공동주택에서 요구하는 열부하를 급탕 및 난방으로 구분하였으며, 1997년 한국 지역난방공사에서 공동주택단지를 대상으로 측정된 급탕 및 난방 부하량을 토대로 계절별 열부하패턴을 설정하였다.

이러한 부하패턴은 계절별 평균치를 대표적인 패턴으로 나타낼 수 있으나 실제 설계 시에는 첨두부하 등을 고려하여야 한다. 또한 사례를 보다 다양한 경우에 적용가능한지를 검증하기 위하여 TRNSYS 프로그램을 이용하여 이론적인 모델을 설정하였으며, 해당 건축물의 공간구획 및 재료 등 특성을 반영하여 평가하였다.

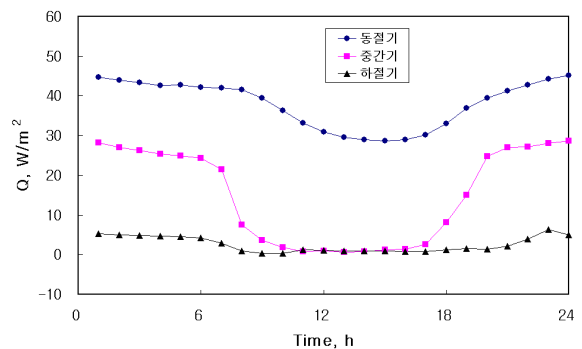


Fig. 4 Averaged daily heating load pattern.

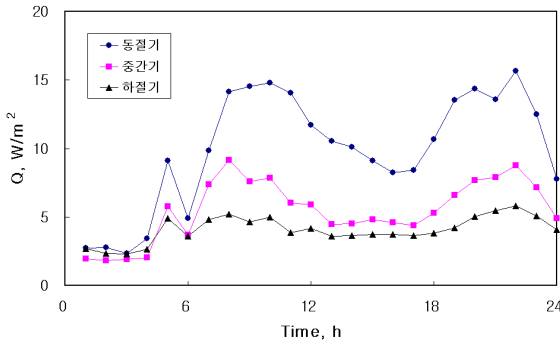


Fig. 5 Averaged daily hot water load pattern.

Figures 4와 5는 공동주택의 단위면적당 난방부하 및 급탕부하패턴을 나타내고 있다. Fig. 4에서 공동주택의 난방부하는 18시 ~ 08시를 중심으로 나타나고 있으며, 주로 중간기와 동절기에 난방부하가 뚜렷하게 나타나고 있다. 하절기에는 주간의 난방부하가 거의 발생하지 않고 있으며, 야간에 약간 증가하는 현상은 일부 세대를 위하여 난방수를 순환함에 따른 결과로 판단된다.

Figure 5는 급탕부하를 나타낸 결과로서, 오전에 급격히 증가하다가 주간 오후에 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 야간에 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 동절기, 중간기, 하절기 순서로 완화되고 있으며, 하절기에 비하여 동절기, 중간기의 급탕부하가 각각 2.4배, 1.3배를 나타내고 있다.

Figure 6은 공동주택의 단위면적당 열부하패턴을 급탕 및 난방열량을 합산하여 나타낸 결과이다.

공동주택의 경우 동절기, 중간기 열부하는 하절기에 비하여 각각 7.2배, 3.1배 정도 크게 나타나고 있으며, 이는 하절기에 비하여 동절기, 중간기에 각각 14.9, 5.8배의 크기로 동절기에 급격하게 증가하는 난방부하의 특성에 기인한다.

Figure 7은 TRNSYS 프로그램을 이용하여 계산한 난방부하와 실측한 난방부하를 비교한 결과이다.

그림에서 계산한 결과는 중간세대와 측벽이 외기에 노출된 세대로 구분하고, 현장에서 측정한 결과는 단위난방부하로 구분하여 표기하였다.

전반적으로 유사한 실측값과 난방부하패턴을 보이고 있으며, 실측한 결과가 중간값 정도를 나타내고 있다. 그러나 야간에는 실측값과 계산치가 크게 차이를 보이고 있다.

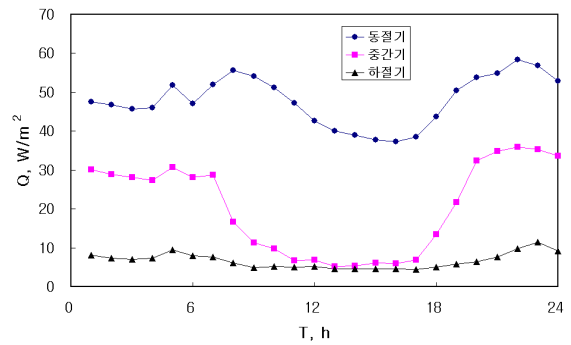


Fig. 6 Averaged daily heat load pattern.

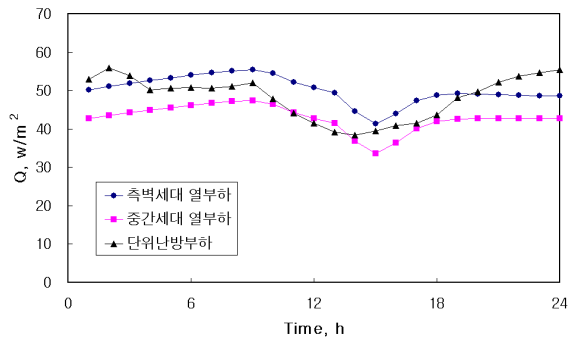


Fig. 7 Comparison of heating load patterns.

3.2 전력부하패턴

전력부하패턴은 세대별 보유한 가전제품의 종류나 용량, 사용주기 등에 따라 다양하게 나타나고 있으며, 열부하패턴과 유사하게 정형화 할 수 있다.

Figure 4는 주택에서 측정한 단위 세대당 전력부하패턴을 계절별로 도시한 결과이다. 그림에서 8시 전후, 야간 21시 전후에 침투부하가 나타나고 있으며, 계절별 부하 절대량의 편차가 비교적 작게 나타나고 있다.

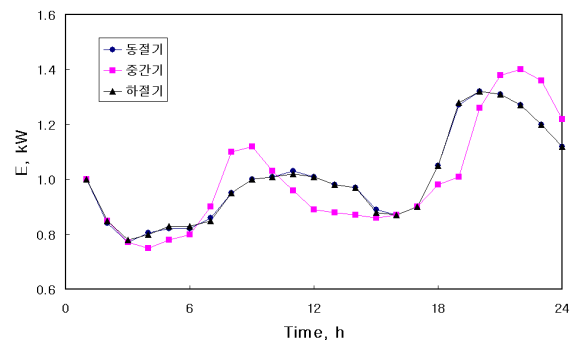


Fig. 8 Averaged daily electric power load pattern.

4. 운전결과 및 개선방향

이상과 같이 공동주택 에너지시스템과 전력 및 열부하 분석모델을 검토하였으며, 공동주택 전력 부하패턴에 따른 운전결과를 공동주택 부하패턴과 비교하여 다음과 같이 평가하였다.

Figures 9 ~ 11은 크게 공동주택의 부하 세대수를 20세대, 40세대로 구분하고, 이에 따른 전력부하패턴에 따른 시스템 운전특성과 공동주택의 열부하를 비교 및 평가한 결과이다.

먼저 Fig. 9는 동절기 운전특성을 도시한 결과로서, 20세대 및 40세대의 전력부하패턴에 따라 발생한 열량은 공동주택에서 요구하는 열부하에 비하여 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

Figure 9에서 20세대의 경우 공동주택에서 요구하는 열부하의 약 39% 정도, 40세대의 경우 약 23% 정도를 공급하는 것으로 평가되었다.

Figure 10은 중간기 운전특성을 나타낸 결과로서, 주간에 20세대 및 40세대의 경우 모두 연료

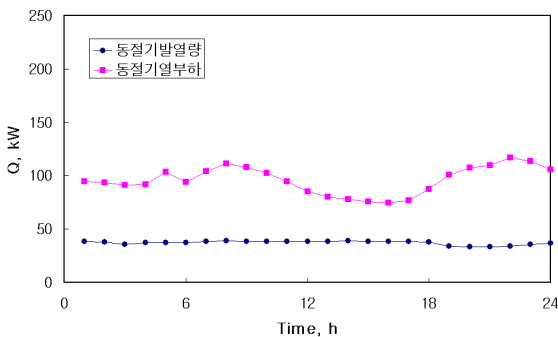
전지에서 발생하는 열량이 공동주택에서 요구하는 열부하를 초과하고 있으며, 잉여열량이 발생하고 있음을 알 수 있다.

그러나 야간 운전 시에는 앞서 Fig. 9의 경우와 유사하게 열부하량을 충족시키지 못하는 결과를 보였다.

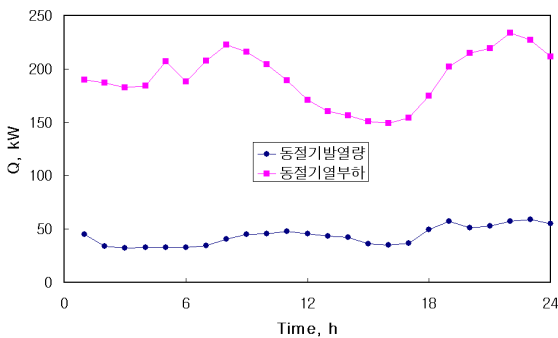
이와 같은 중간기에는 20세대의 경우에 하루 중 열부하의 약 90% 가량 충족시킬 수 있는 것으로 계산되었으며, 40세대의 경우에는 약 50%를 충족시키는 것으로 평가되었다.

Figure 11은 하절기의 운전특성을 나타낸 결과로서, 대체적으로 연료전지에서 생성된 열량이 공동주택에서 요구하는 열부하를 초과하는 것으로 계산되었다. 그러나 앞서 동절기 및 중간기 보다는 그 편차가 크지 않음을 알 수 있다.

이와 같은 하절기에는 시스템의 운전에 따라 생성된 열량의 절대량은 공동주택에서 요구되는 열부하량을 20세대 및 40세대의 경우에 각각 180%, 60% 정도 초과하는 것으로 평가되었다.

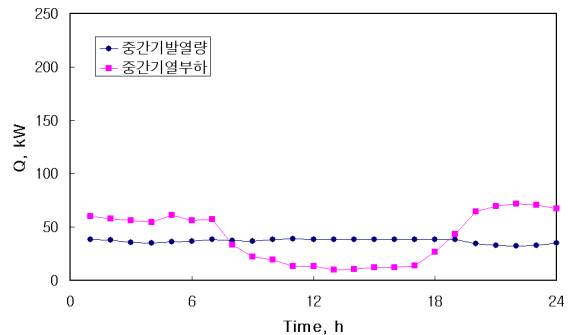


(a) 20 households

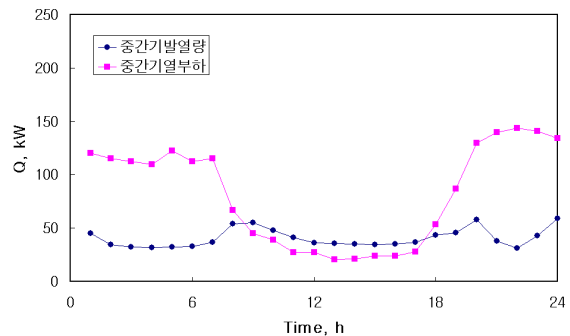


(b) 40 households

Fig. 9 Heat production of fuel cell energy system with electric power load pattern in heating season.

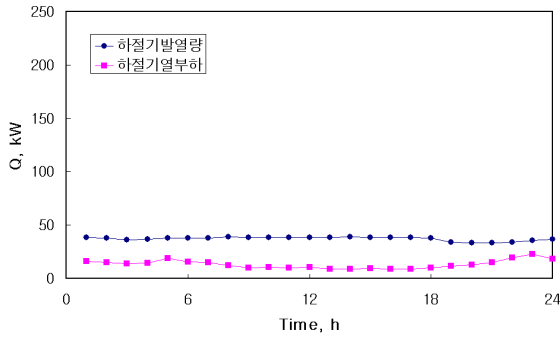


(a) 20 households

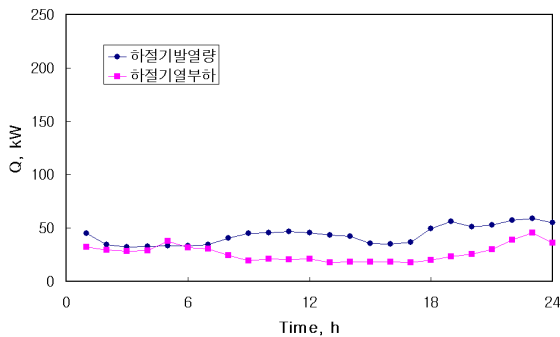


(b) 40 households

Fig. 10 Heat production of fuel cell energy system with electric power load pattern in spring season.



(a) 20 households



(b) 40 households

Fig. 11 Heat production of fuel cell energy system with electric power load pattern in summer season.

전체적으로 인산형 연료전지(PAFC) 기반 에너지 공급시스템을 전력부하율이 60%에서 90%인 범위에서 운전할 경우, 공동주택의 전력부하패턴에 따라 운전할 경우에는 비교적 열부하의 편차가 크게 나타남을 파악하였다.

이와 같은 시스템을 보다 효과적으로 운용하기 위해서는 표준적인 열 및 전력부하패턴을 설정하고, 축열조 및 2차적인 열원기기와 연계하여 통합적으로 운전되어야 할 것으로 판단된다.

향후 미래에는 건물에너지 분야에서 친환경성을 고려하여 태양에너지나 지열원 등과 연계하여 복합에너지시스템(hybrid energy system)을 구축하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

이상과 같이 주거용 환경공생빌딩에 도입하기 위한 에너지시스템에 관한 기초적인 검토를 수행하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1) 공동주택의 경우 에너지시스템 설계시 표준화된 열 및 전력부하패턴을 고려하여 합리적인 시스템의 구성이 필요하다.

2) 연료전지기반 에너지공급시스템 적용시 계절별로 열부하 편차를 해소하기 위해 보조 열원기기의 도입이 필요함을 파악하였다.

향후 일반화된 결과 도출을 위하여 이론에 기반한 분석모델을 개발하고, 복합시스템 구성, 용량 및 운전조건 등 설계인자를 제시하고자 한다.

후 기

본 논문은 공공기술이사회 지원으로 한국건설기술연구원에서 “PLUS50 환경공생빌딩 건축기술 개발사업”의 세부과제인 “에너지·자원의 유효이용을 위한 순환형 공급처리기술” 연구의 일부 결과임을 알립니다.

참고문헌

- (1) K. Sugiura, I. Naruse, 2002, Feasibility study on the co-generation system with direct internal reforming-molten carbonate fuel cell for residential use, Journal of Power Sources, Vol. 106, pp. 51-59.
- (2) I-J Hwang, H-J Shin, H-C Lee, 2002, An experimental study on the operating characteristics of solar assisted hot water system for apartment houses, Proceedings of the KSME 2002 Spring Annual Meeting, pp. 2125-2130.
- (3) Th. F El-Shatter, M. N. Eskandar, M. T. El-Hagry, 2002, Hybrid PV/fuel cell system design and simulation, Renewable Energy, Vol. 27, pp. 479-485.
- (4) P. Costamagna, L. Magistri, A. F. Massardo, 2001, Design and part load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine, Journal of Power Sources, Vol. 96, pp. 352-368.
- (5) M.T. Iqbal, 2003, Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system, Renewable Energy, Vol. 28, pp. 223-237.