

흡착식 냉방 시스템을 이용한 수소개질/연료전지 시스템의 효율향상

무자히드 나심 · 김철민 · 이상용[†]

동국대학교 기계로봇에너지공학과

A Study on the Efficiency Enhancement of the HT-PEMFC Having Fuel Processing System by Connecting Adsorption Chilling System

MUJAHID NASEEM, CHUL-MIN KIM, SANGYONG LEE[†]

Department of Mechanical Robotics & Energy Engineering, Dongguk University, 30 Pildong-ro 1-gil Jung-gu, Seoul 04620, Korea

[†]Corresponding author :
SangyongLee@dongguk.edu

Received 30 August, 2019
Revised 11 October, 2019
Accepted 31 October, 2019

Abstract >> An adsorption chiller is connected to the fuel processing/fuel cell system to increase the energy efficiency of the system. Since, the minimum temperature of 70°C is needed to operate the adsorption chiller, HT-PEMFC is used as a heating source and 80°C hot water in the water tank at the system is supplied to the chiller. Experimentally measured COP of the adsorption chiller was between 0.4-0.5 and the total calculated efficiency of the connected system was between 60% and 70% comparing to 47% without adsorption chilling system.

Key words : Adsorption chiller(흡착식 냉방기), High temperature polymer electrolyte membrane fuel cell (HT-PEMFC, 고온연료전지), Steam reforming(수증기 개질), Efficiency(효율)

1. 서론

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)은 여러 종류의 연료전지 중 가정용으로 가장 많이 사용되며 수소를 원료로 사용한다¹⁾. 일반적으로 가정에 공급되는 PEMFC의 원료인 수소는 천연가스로부터 개질을 통해 생산되어 공급된다¹⁾. 수소 개질 공정은 크게 수증기 개질, 자기열 개질 그리고 부분연소 개질 방식이 있으며 이중 수증기 개질 공정은 현재 가정용 수소를 생산하는 가장 보편적이고 경제적인 공정 중 하나이다²⁾. 이러한 개질 공정으로부터 생성된 수소는 PEMFC로 공급되어 필요한 전기를 생산하

게 되며, 전체 공정의 효율성을 높이기 위해 PEMFC의 폐열로부터 생성된 온수는 난방용 혹은 욕실용으로 사용된다²⁾. 일반적인 수증기 개질 공정의 효율을 80%, 연료전지의 효율을 약 50% 그리고 인버터의 효율을 92%로 계산하고 손실되는 에너지를 고려할 때 전체 시스템의 효율은 온수 사용을 고려하지 않을 때 약 40%를 조금 넘는다고 볼 수 있다²⁾. 만일 온수를 모두 열로 사용한다는 가정 하에 전체 시스템의 열효율을 계산 시 약 70%가 조금 넘는다. 하지만 현실적으로 폐열인 온수 사용의 제약성을 고려할 때 실질적인 효율은 40%가 조금 넘는다고 할 수 있다. 따라서 실질적 효율의 향상을 위해서는 연료전지 시

시스템으로부터 발생하는 폐열을 이용할 수 있는 열 회수시스템이 필요하다^{3,4)}. 본 연구에서는 전체 효율을 높이기 위하여 PEMFC의 낮은 폐열을 냉방에 이용할 수 있는 흡착식 냉방기와의 연계를 통해 전체 효율을 증가시키는 방법을 검토하였다. 흡착식 냉방기는 흡착과 탈착(재생) 두 개의 챔버로 구성되어 있으며 탈착(재생) 반응을 위해서 연료처리장치와 연료 전지로부터 발생한 열을 이용한 온수를 공급한다^{5,6)}. 약 750 mmHg의 진공 압력 상태에서 탈착(재생)된 물은 응축기에서 응축된 후 펌프에 의해 증발기로 운송되어 낮은 압력 낮은 온도에서 모두 기체의 형태로 변환하며 주위의 냉매로부터 증발열을 흡수한다^{5,6)}. 냉매가 증발기에서 냉각된 후 펌프를 통해 냉방 시키고자하는 지점으로 순환되어 열을 흡수한다^{5,6)}. 흡착식 냉방기는 흡착과정과 탈착(재생)과정이 교차되면서 동시에 일어나도록 설계되어 냉매의 지속적 공급이 가능하도록 되어있다^{5,6)}. 흡착 반응 시 제거하는 열은 별도의 냉수를 순환하여 얻는다. 냉수는 흡착 시 열을 흡수하고 외부의 냉각탑에서 열을 방출한 후 흡착식 냉동기로 순환된다^{5,6)}. 따라서 냉각탑으로부터 순환되는 냉수의 온도는 외부 기상조건에 따라서 달라진다. 전형적인 흡착식 냉방기의 사이클은 Fig. 1에 요약하였다. 본 연구에서 흡착식 냉방기는 75°C 이상의 열원이 필요함을 고려하여 60-80°C에서 운전되는 저온 polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) 대신에 약 150°C 내외에서 운전되는 high temperature PEMFC (HT-PEMFC)를 사용하였다. 개질기를 포함한 HT-PEMFC의 온수탱크에서 최종적인 온수의 온도는 약 80°C가 유지된다⁴⁾. 따라서 본 연구에서 사용된 전체적인 구성은 다음과 같다.

- 1) 수증기 개질 시스템
- 2) 고온 PEMFC 시스템
- 3) 흡착식 냉방 시스템

본 연구에서 개질시스템과 연료전지 시스템의 연계실험은 생략하였으며 흡착식 냉방시스템에 대한 실험을 실시하고 개질시스템과 연료전지 시스템에 대한 정보가 필요 시 본 연구기관에서 실시되었던 기존의 연구 결과를 사용하였다.

2. 실험

흡착식 냉동장치의 구성에 대한 개략도는 Fig. 2 그리고 구성 사진은 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 실험장치는 흡착식 냉방기, 냉동기, 온수탱크, 열 교환기로 구성되어있다. 흡착식 냉방기

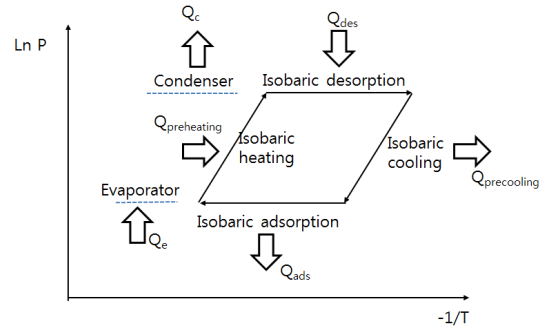


Fig. 1. Cycle of the adsorption chilling system

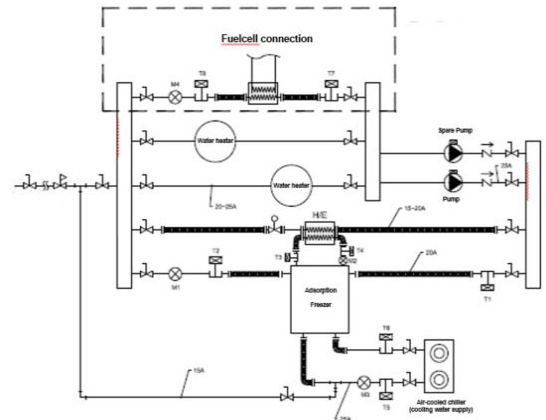


Fig. 2. Schematic diagram of the adsorption chilling system



Fig. 3. Picture of the adsorption chilling system

는 (주)구성이엔드씨의 ECOGRID LTC 5를, 연료전지 시스템으로부터 생성되는 폐열의 모사를 위하여 두 개의 온수 탱크를 이용하여 약 75-80°C의 온수를 만들어 사용하였고, 외부로 연결되는 냉각탑을 모사하기 위해서 (주)삼정이엔씨 APC-21 냉각기를 사용하여 냉수의 순환 온도를 27-30°C에서 조정하였다. 흡착식 냉방기의 열 부하에 대한 효율을 측정하고자 열교환기와 미세밸브를 설치하였다. 흡착식 냉방기로부터 열교환기로 공급되는 냉수는 온수와 열교환을 한 후 흡착식 냉방기로 회수된다. 이때 열교환기에서 온수가 냉수에 빼앗긴 열의 계산을 통하여 간접적으로 흡착식 냉방기에서의 증발열을 계산해 냉각성능 (coefficient of performance, COP)을 계산할 수 있다. 흡착식 냉방기의 가동을 위해 최소로 필요한 열량은 약 6 kW이며 두 개의 온수 탱크로부터 약 5-10 kW의 열량이 흡착식 냉방 시스템으로 공급되었으며, 이에 따른 흡착식 냉방기의 효율을 실험을 통해서 구하였다. 실험을 통하여 흡착식 냉각기에서 외부의 열

교환기로 보내지고 회수되는 각 지점에서의 냉매의 온도와 유속, 온수탱크에서 외부의 열교환기로 공급되는 온수의 온도와 회수되는 온수의 온도 그리고 유속을 측정 기록하였다. 또한 흡착식 냉동기로 공급되는 총 온수의 열량과 외부 냉각탑으로 방출되는 열량을 측정하고자 흡착식 냉각기로 공급되는 온수의 온도, 회수되는 온수의 온도와 유속 그리고 냉동기로 순환되는 냉수의 온도와 유속을 약 1초 간격으로 data acquisition system을 이용하여 측정 기록하였다. 실험의 결과는 기존의 연료개질장치 및 연료전지 시스템의 결과와 결합하여 전체 시스템의 효율을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

실험결과는 Figs. 4-11에 나타내었다. Fig. 4와 Fig. 5는 온수의 온도 75°C 그리고 흡착식 냉동장치로 순환되어 들어가는 냉각수의 온도를 25°C로 하여 실험

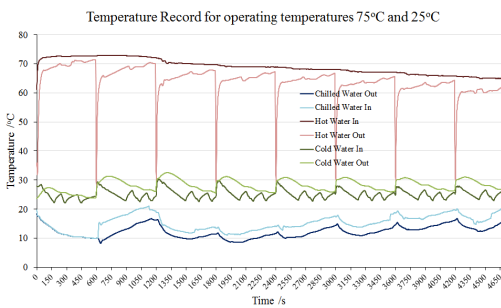


Fig. 4. Temperature record for operating 75°C & 25°C

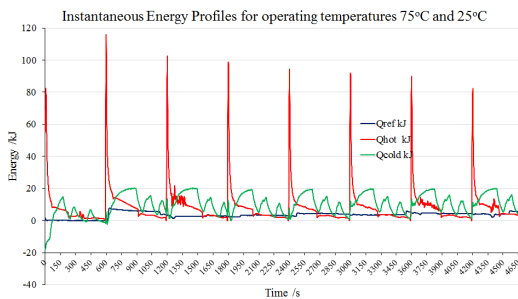


Fig. 5. Energy profiles for operating temperature 75°C & 25°C

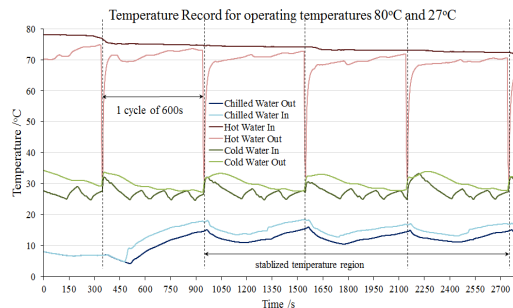


Fig. 6. Temperature record for operating 80°C & 27°C

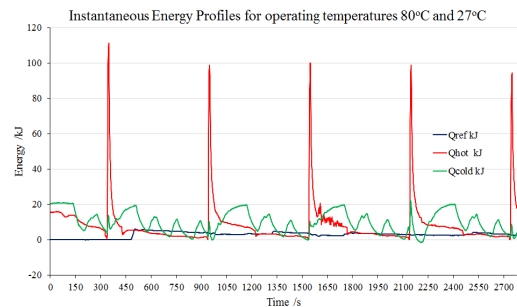


Fig. 7. Energy profiles for operating temperature 80°C & 27°C

하였을 때 각 실험측정 장치의 시간에 따른 온도의 변화와 이를 이용하여 계산된 입/출입 열량을 각각 나타낸 것들이다. Fig. 6와 7은 온수의 온도 80°C 그리고 흡착식 냉동장치로 순환되어 들어가는 냉각수의 온도를 27°C로 하여 실험한 결과들이고, Fig. 8과 9은 온수의 온도 80°C 그리고 흡착식 냉동장치로 순환되어 들어가는 냉각수의 온도를 29°C로 하여 실험한 결과들이며, Fig. 10과 11은 온수의 온도 80°C 그리고 흡착식 냉동장치로 순환되어 들어가는 냉각수의 온도를 31°C로 하여 실험한 결과들이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡착식 냉동장치는 두 개의 챔버들이 동시에 흡착과정과 탈착과정을 하고 이중 탈착과정 시 증발열을 흡수하여 냉방기의 역할을 하므로 냉매는 두 개의 챔버에 번갈아 가면서 공급 순환된다. 본 실험에서 사용된 흡착식 냉동기의 주기는 약 600초이며 70-80°C의 온도에서 탈착과정을 수행하기 위해 대기압보다 약 720 mmHg 낮은 압력을 유지한다. 냉방시스템이 가동 시작 후 안정화되기 위하여 약 10-20분의 시간이 필요하다. 이는 흡착제의 온도

를 탈착공정에 필요한 온도까지 가열하는 데 필요한 시간이다. 이후 흡착식 냉방기는 안정되며, 본 실험에서의 결과는 흡착식 냉방기가 안정화 된 후 각 열량의 입/출입 계산 시 각 주기의 평균값을 구하여 사용하였다. Figs. 4, 6, 8 그리고 10은 시간에 따른 온수, 냉각수와 냉매의 각 지점에 따른 온도 변화를 나타내었으며, Figs. 5, 7, 9 그리고 11은 흡착식 냉방기로 공급되는 열량, 냉동기에서 제거되는 열량 그리고 흡착식 냉방기에서 제거되는 열량에 대한 계산 결과이다. 흡착식 냉방기의 효율을 계산하기 위하여 열

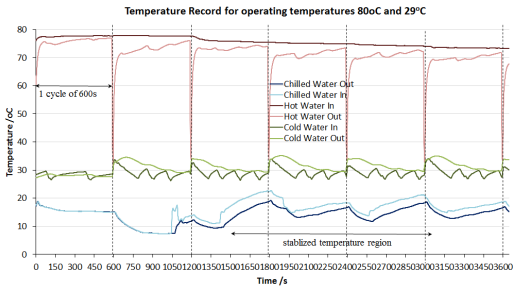


Fig. 8. Temperature record for operating 80°C & 29°C

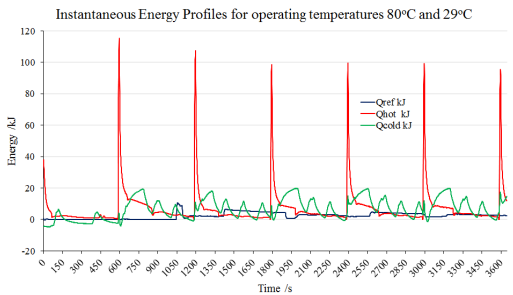


Fig. 9. Energy profiles for operating temperature 80°C & 29°C

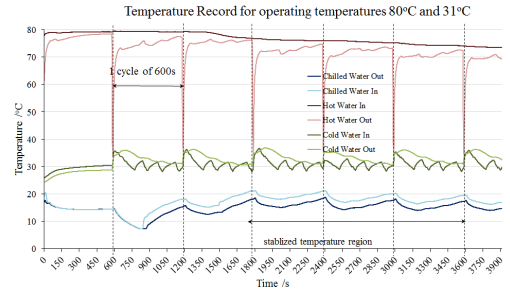


Fig. 10. Temperature record for operating 80°C & 31°C

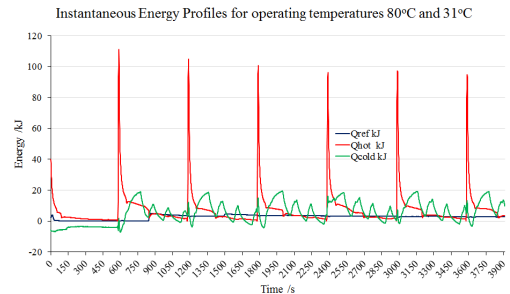


Fig. 11. Energy profiles for operating temperature 80°C & 31°C

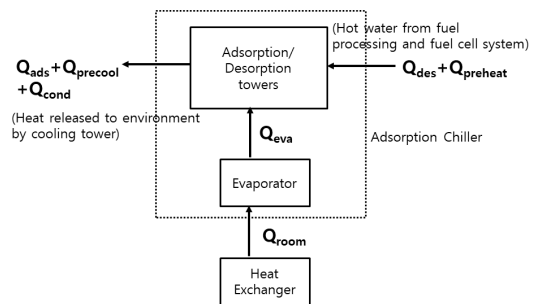


Fig. 12. Heat balance of the adsorption chilling system

출입관계를 Fig. 12에 나타내고 energy balance equation (1)을 다음과 같이 정리하였다.

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{system} = (\dot{Q}_{des} + \dot{Q}_{preheat} + \dot{Q}_{eva} - (\dot{Q}_{ads} + \dot{Q}_{precool} + \dot{Q}_{con})) \quad (1)$$

Q_{ads} 과 Q_{des} 은 각각 물의 흡착열과 탈착열, $Q_{preheat}$ 는 물을 흡착온도까지 가열하는 데 필요한 열량, Q_{eva} 는 냉매의 증발열, $Q_{precool}$ 은 물의 탈착온도까지 냉각열, Q_{cond} 는 냉매의 응축열이다. 연료전지의 온수탱크로부터 흡착식 냉방기로 공급되는 온수의 열량은 물의 탈착을 위한 가열열, 탈착열을 위하여 공급되며 냉매의 증발에 의한 열량을 얻기 위한 열을 주위로부터 흡수함으로 냉방을 한다. Q_{des} , $Q_{precool}$ 그리고 Q_{cond} 를 위하여 방출하여야 할 열량은 외부와 연결되어진 냉각탑을 통해서 방출된다. 실험에서는 열교환기를 사용하여 실내로부터 제거되는(냉방에 사용되는) 열량을 모사하였으며, 외부의 냉각탑 대신 실험용 소형 냉각기를 사용하였다. 따라서 각각의 열량은 다음 식 (2)를 통하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{hot} &= \dot{Q}_{des} + \dot{Q}_{preheat} \\ &= \dot{m}_{water(hot)} C_{p,water} (T_{hot,out} - T_{hot,in}) \end{aligned} \quad (2)$$

$\dot{m}_{water(hot)}$ 는 흡착식 냉방시스템으로 공급/회수되는 온수의 유속, $C_{p,water}$ 는 물의 비열 그리고 T_{hot} 는 흡착식 냉방기로 공급 혹은 회수되는 온수의 온도이다. 연료전지 시스템에 연결 시 연료전지의 온수저장탱크의 온수 열원을 사용한다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{cold} &= \dot{Q}_{ads} + \dot{Q}_{precool} + \dot{Q}_{con} \\ &= \dot{m}_{water(cold)} C_{p,water} (T_{cold(out)} - T_{cold(in)}) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 $\dot{m}_{water(cold)}$ 는 냉각기에서 흡착식 냉방기로 공급/회수되는 냉각수의 유속이고, T 는 냉각기에서 공급 혹은 회수되는 온도이다. 흡착식 냉방기의

효율을 계산하기 위해서는 다음의 식 (4)가 적용된다.

$$\eta = COP = \frac{Desired\ Output}{Required\ Input} = \frac{\dot{Q}_{eva}}{\dot{Q}_{hot}} \quad (4)$$

\dot{Q}_{eva} 는 냉매의 증발을 위해서 공급되는 열량이고 이를 계산하기 위하여 시스템(Fig. 1)에서 열교환기를 사용하여 식 (5)와 같이 계산하였다.

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{water(eva)} C_{p,water} (T_{HEX(out)} - T_{HEX(in)}) \quad (5)$$

식 (5)에서, $\dot{m}_{water(eva)}$ 는 흡착식 냉방기의 증발기로부터 열교환기로 공급/회수되는 물의 유속이며 T 는 흡착식 냉방기에서 열교환기로 공급 혹은 회수되는 물의 온도로 이는 방으로부터 공급되는 혹은 열(냉방열)을 모사하였다. 흡착식 냉방기는 두 개의 챔버가 번갈아 작동하면서 냉방을 한다. 따라서 두 개의 batch system이 번갈아 작동하는 형태로써 Figs. 4-11에서 보는 바와 같이 흡수되는 열량은 최고점과 최저점 사이의 순환과정으로 구성된다. 따라서 시스템의 평균 효율 계산을 위해서 적용되는 식은 아래 식 (6), (7)과 같다.

$$Q_{hot} = \frac{1}{t_{cycle}} \int_0^{t_{cycle}} \dot{m}_{hot} C_{p,water} (T_{hot(out)} - T_{hot(in)}) dt \quad (6)$$

$$Q_{eva} = \frac{1}{t_{cycle}} \int_0^{t_{cycle}} \dot{m}_{ref} C_{p,water} (T_{HEX(out)} - T_{HEX(in)}) dt \quad (7)$$

흡착식 냉방기의 외부 온도(25-30°C) 그리고 공급되는 온수의 온도(75-80°C)에 따른 COP는 약 0.4-0.5 사이의 값을 가진다(Fig. 13, Table 1). 흡착식 냉방기와 연료전지 시스템의 연계 시 흡착식 냉방기의 가동을 위하여 최소 열량공급량을 충족시켜야하며 이를 위하여 작은 연료전지 시스템을 사용 시 수개의 연료전지 시스템을 연결하여 개략도(Fig. 14)와 같은 형태로 구성할 수 있다. Fig. 14의 시스템을 운전 시 연료전지 시스템과 흡착식 냉방 시스템의 효율이 전체의 효율에 미치는 영향을 각각 계산하여 Fig. 15에

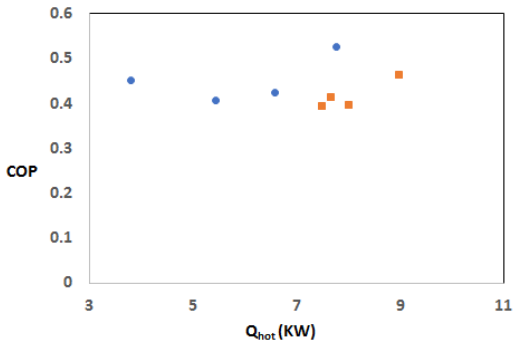


Fig. 13. Effect of Q_{eva} on COP calculation at various hot water temperature and atmospheric temperature conditions

Table 1. Q_{eva}, Q_{hot}, Q_{cold} at various temperature conditions

T _{hot_water} (°C)	Q _{hot} (kW)	COP	Q _{cold} (kW)	Q _{eva} (kW)
75°C	7.76	0.527	10.82	4.09
	6.59	0.425	12.55	2.8
	5.43	0.408	10.59	2.22
	3.81	0.452	4.62	3.81
80°C	8.97	0.465	12.78	4.17
	8	0.396	9.55	3.17
	7.66	0.415	7.44	3.18
	7.49	0.395	8.8	2.96

요약하였다. 폐열을 이용한 흡착식 냉방시스템이 연계되지 않았을 경우 연료처리 시스템/연료전지 시스템은 약 45-48%의 효율을 가진다. 하지만 흡착식 냉방시스템과 연계 시 흡착식 냉방 시스템의 효율에 따라 약 60-70%의 전체 효율을 가진다. 각 시스템의 효율이 전체 시스템에 미치는 영향을 고려 시 연료전지 시스템의 효율보다는 흡착식 냉방장치의 효율이 전체 효율에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 흡착식 냉방 시스템을 연료처리장치/연료전지 시스템에 연계하였다. 흡착식 냉방 시스템은 여러 조건에서의 실험을 실시하여 효율을 측정

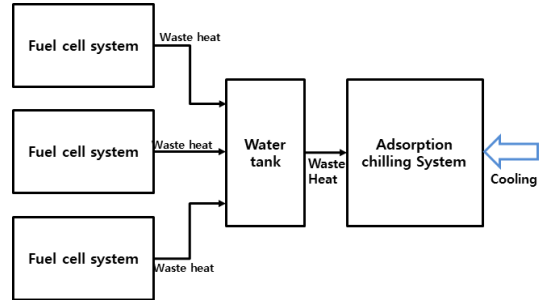


Fig. 14. Connection of adsorption cooling system to multiple fuel cell system

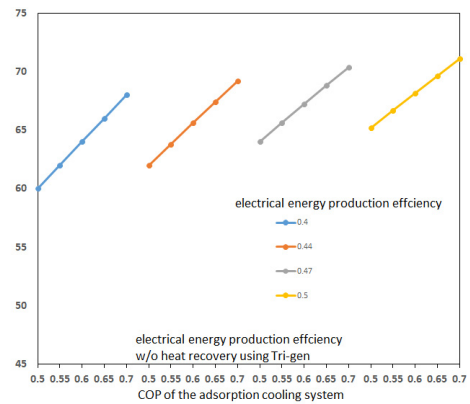


Fig. 15. Connection of adsorption cooling system to multiple fuel cell system

계산하였으며, 연료처리장치/연료전지 시스템의 효율은 본 실험실에서 측정한 기존의 결과를 이용하였다. 흡착식 냉방장치와 연료처리장치/연료전지 시스템의 연계 시 전체 효율은 식 (8)으로 계산되었으며, Fig. 15에서 보는 바와 같이 냉방시스템의 효율에 더욱 민감하게 영향을 받는다.

$$\eta =$$

$$\frac{\text{Electrical energy produced} + \text{Energy Recovered by Adsorption chiller}}{\text{Enthalpy of Process Natural Gas} + \text{Enthalpy of Burner Gas}} \quad (8)$$

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제

입니다(NO. 20163010032000). 흡착식 냉방시스템 실험을 위해 도움주신 (주)구성의 윤석구 대표님과 연구진에게 감사드립니다.

References

1. J. Larminie and A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", 2nd, Wiley & Sons, UK, 2003.
2. D. Shekhawat, J. J. Spivey and D. A. Berry, "Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing", Elsevier, USA, 2011.
3. J. I. San Martín, I. Zamora, V. Aperribay, J. J. San Martín, "Trigeneration Systems with Fuel Cells", RE&PQJ, Vol. 1, No. 6, 2008, doi: <https://doi.org/10.24084/repqj06.245>.
4. W. Y. Lee, M. J. Kim, Y. J. Sohn, S. G. Kim, "Analysis of a High Temperature Polymer Electrolyte Fuel Cell based Trigeneration System", New & Renewable Energy, Vol. 13, No. 2, 2017, pp. 60-68.
5. A. S. U. Marlinda, T. Miyazaki, Y. Ueda and A. Akisawa, "Performance Analysis of a Double-effect Adsorption Refrigeration Cycle with a Silica Gel/Water Working Pair", Energies, Vol. 3, No. 11, 2010, pp. 1704-1720.
6. P. Goyal, P. Baredar, A. Mittai, A. R. Siddiqui, "Adsorption refrigeration technology – A overview of theory and its sloar energy applications", Renewable and Sustainable Energy Review, Vol. 53, 2019, pp. 1380-1440.