



[2016-6-FC-004]

고온 고분자연료전지와 유기랭킨사이클 복합 발전시스템 이론적 해석

이원용¹⁾ · 김민진^{2)*} · 손영준³⁾ · 김승곤⁴⁾

Analysis of a High Temperature Polymer Electrolyte Fuel Cell Combined with an Organic Rankine Cycle System

Won-Yong Lee¹⁾ · Minjin Kim^{2)*} · Young-Jun Sohn³⁾ · Seung-Gon Kim⁴⁾

Received 29 March 2016 Revised 21 April 2016 Accepted 27 April 2016

ABSTRACT Model equations of a combined system with a high temperature polymer electrolyte fuel cell (HT-PEFC) system based on phosphoric acid (PA)-doped polybenzimidazole(PBI) membranes and a heat recovery power system were derived. In this study, an organic Rankine cycle system (ORCS) was proposed as a bottoming cycle system to convert the waste heat from a fuel cell stack to electric power. To optimize the combined system, the efficiency at the maximum power of the heat recovery system was derived. To calculate the ORCS performance analytically, a modified Carnot cycle coupled to heating and cooling fluids with a finite heat capacity rate was considered using the entropic average temperature. This simple equation does not require any detailed thermodynamic data of organic working fluids. By combining the ORCS with the HT-PEFC system, the electric power was improved by 6% to 8% according to the load conditions. As the fuel cell load is increased, the efficiency of the fuel cell is decreased, but the contribution of the heat recovery power system to the total combined system efficiency was increased due to the increased waste heat produced in the stack. The methods proposed in this paper can provide a useful measurement of the performance available in practical fuel cell-based hybrid power systems without complex numerical calculations.

Key words High Temperature Polymer Electrolyte Fuel Cell(고온 고분자연료전지), Organic Rankine Cycle System(유기랭킨사이클 시스템), Combined Power System(복합 동력 시스템), Maximum Power Efficiency(최대 출력 효율)

Nomenclature

A : pre-exponential coefficient for PA doping level

B : pre-exponential coefficient for humidity

b : barrier energy, J

C : heat capacity rate, WK⁻¹

DL : doping level

F : Faraday's constant, C mol⁻¹g : molar Gibbs free energy, J mol⁻¹h : molar enthalpy, J mol⁻¹i : current density, A m⁻²k : electric conductivity, S m⁻¹

n : number of transfer electrons

- 1) Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research
- 2) Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research /Advance Energy Technology, Korea University of Science and Technology E-mail: minjin@kier.re.kr
Tel: +82-42-860-3781 Fax: +82-42-860-3104
- 3) Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research /Advance Energy Technology, Korea University of Science and Technology
- 4) Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research

P	: power, W
Q	: heat, W
R	: universal gas constant, $J mol^{-1}K^{-1}$
RH	: effective relative humidity
S	: surface area, m^2
s	: entropy, $J mol^{-1} K^{-1}$
T	: temperature, K
t	: thickness, m
V	: voltage, V

Greek letters

α	: transfer coefficient
δ, Δ	: difference
ζ	: power ratio to the stack
μ	: stoichiometric ratio
η	: Overpotential, Efficiency

Subscript

0	: exchange
acc	: accessory power
act	: activation
c	: condenser
conc	: concentration
e	: evaporator
FC	: fuel cell
st	: fuel cell stack
H	: heat source
L	: heat sink
l	: limiting
max	: maximum
ohm	: ohmic
opt	: optimal
p	: pinch temperature
ref	: standard, reference conditions
rev	: reversible

1. 서론

신재생에너지는 기후변화 대응을 위해 보급 확대가 필요한 기술로서 새로운 성장 동력산업으로 가능성도 높아서 경쟁적으로 선진 각국에서 기술 개발이 이루어지고 있다. 연료전지는 높은 에너지 변환효율과, 다양한 연료 사용, 설치 면적이 작은 장점을 가지고 있는 등, 적용성이 우수하여 다양한 규모로 자동차는 물론 건물과 주택용으로 개발되어 보급되고 있다.^[1-3] 지금까지 주로 전해질로 인산과 용융탄산염을 이용한 300kW급 이상의 분산형 발전시스템과 저온 고분자전해질을 이용한 5kW급 이하의 주택용 연료전기 보급되었다. 고분자전해질 연료전지(PEFC)는 동력밀도가 높고 제작이 용이하여 자동차용이나 이동형 전원으로 효과적으로 적용되었으며, 주택의 코제너레이션 시스템으로 적용되어 전기와 난방열을 공급하고 있다. 기존 PEFC는 운전 온도가 낮아서 시동성과 부하 변화에 대한 운전 특성이 우수하나, 개질가스 사용 시 CO에 대한 피독성 문제와 낮은 스택 온도로 인한 열 및 물관리의 어려움, 그리고 연료전지 배열을 동력 등으로 회수하기는 어려운 단점이 있었다.^[4-7] 본 논문은 기존의 저온 고분자전해질 연료전지의 단점을 극복하고 열이용률을 높이기 위한 작동 온도 120°C 이상에서 사용 가능한 고온 고분자전해질 연료전지(HT-PEFC)를 기반으로 하는 복합 시스템에 대한 것으로, 연료전지 스택의 배열을 전기로 회수하여 전기 효율을 향상시키기 위한 시스템의 최적 성능을 다루었다.

PEFC의 배열을 회수하여 난방열로 이용하기 위한 코제너레이션 시스템에 대한 연구는 다수 이루어져 각국의 기후 조건에 맞는 실제 시스템에 대한 연구가 이루어졌으며,^[8-12] 열역학적이거나 경제적인 해석을 통해 PEFC 열병합 시스템의 최적화를 위한 연구도 수행되었다.^[13-15]

본 논문은 HT-PEFC와 연계된 ORCS의 최적화에 대한 것으로, ORCS의 최대 출력과 최대 출력시의 효율을 사용하여 복합시스템의 성능향상 정도를 제시하였다. HT-PEFC의 배열을 이용하여 저온의 하부(bottoming) 시스템에서 최대로 동력을 회수할 경우의 전기변환 효율을 이론적으로 계산하였다. 이론적인 최적 효율식과 최적 출력 값을 계산하기 위하여 랭킨사이클을 수정한 비가역 카르노 사이클을 이용하였다. 정확성이 검증된 Lee^[20-23]에 의해 발표된 이론식을 개선하여 증발기와 응축기의 핀치점 온도가 주어진

비가역성 사이클을 이용하여 이론적인 최대 출력 시 효율을 구하여 사용하였다.

기존 PEFC의 낮은 작동 온도로 인하여 스택의 배열을 전기로 회수하기 위한 연구는 많이 이루어지지 않고 있으며, Long^[16], Zhao^[17]와 Perna^[18]에 의해 발표되었다. Long은 배열을 전기로 변환시키기 위하여 열전 사이클(Thermally Regenerative Electrochemical Cycle, TREC)을 사용하였으며 Zhao와 Perna는 유기랭킨사이클 시스템(Organic Rankine Cycle System, ORCS)을 사용하여 작동유체에 따른 열 회수 성능을 분석하였다. ORCS는 저온에서 증발이 일어나는 작동 유체를 사용하여 증기터빈을 구동시키는 것으로 폐열 회수와, 태양열, 지열, 해양열 등 저온열 회수를 위하여 일반적으로 적용되는 시스템이다.^[19] Zhao는 기존의 저온 PEFC와 연계된 ORCS를 수치해석하여 5% 정도 효율 향상이 있는 것을 계산하였으며, Perna는 HT-PEFC와 연계된 ORCS의 성능을 2가지 작동유체를 이용하여 해석하여 전력은 약 10% 그리고 전체 전기변환 효율은 3% 정도의 향상되는 것을 확인하였다.

본 논문에 유도한 이론식을 사용할 경우 연료전지와 유기랭킨사이클 시스템으로 구성된 복합 동력 시스템의 최적 성능을 복잡한 수치해석 없이 간단하게 예측할 수 있어 시스템 초기 설계시에 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

2. 연료전지 복합 시스템

본 연구의 복합발전 시스템은 Fig. 1과 같이 HT-PEFC

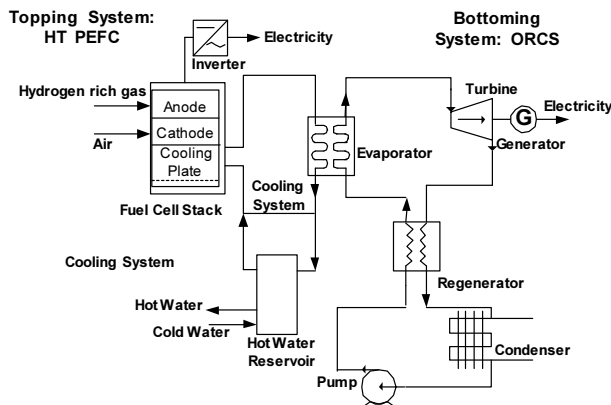


Fig. 1. Combined Power System with a HT PEFC and an ORCS

를 상부(topping) 시스템으로 하고 ORCS를 하부 시스템으로 하고 있다. ORCS는 저온에서 쉽게 증발되는 유기 냉매를 작동 유체로 사용하는 증기 동력 사이클 시스템으로 저온열 회수에 유리하다. 연료전지 시스템은 도시가스를 연료로 하여 수소를 제조하는 개질기와 수소와 공기를 이용하여 전기화학적으로 직접 전기를 발생시키는 스택, 스택에서 발생된 직류 전기를 교류로 변환시키는 인버터, 그리고 스택의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 냉각시스템으로 구성된다. 스택에서 발생된 열을 전기로 회수하기 위한 ORCS는 기본적으로 증발기, 터빈, 응축기, 펌프와 추가로 내부 사이클에서 열을 회수하여 사이클 효율을 높이기 위한 재생기로 구성된다.

3. 시스템 성능 모델식

3.1 연료전지 모델

인산이 담지된 PBI(polybenzimidazole) 전해질 기반 HT-PEFC 스택의 1차원적 모델식을 구하였다. 전지에서 일어나는 전압손실과 관련된 전기화학적 반응을 모델식으로 표시하였다. 모델식을 위한 가정은 다음과 같다.

- 모든 반응은 정상상태이며 이상가스 상태로 이루어진다.
- 접촉면의 전기 저항은 무시한다.
- 반응물질은 전해질을 투과하지 않는다.
- 수소극에서의 활성화 과전압은 무시한다.
- 전극촉매의 두께는 무시한다.
- 확산층은 균일(homogeneous.)하다.

연료전지 전압은 전류의 함수로 가역전압과 손실인 활성화 과전압, 저항 과전압, 확산 과전압을 고려하여 계산할 수 있다.^[3,24]

$$V_{cell} = V_{rev} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (1)$$

열역학적인 가역 전압은 표준조건에서 Gibbs 자유 에너지

지를 이용하여 구할 수 있다.

$$V_{\Delta g}^{ref} = -\frac{\Delta g^{ref}}{nF} \quad (2)$$

연료전지의 운전 온도조건 T_{cell} 에서의 엔트로피 손실과 개회로에서의 반응가스의 농도를 고려한 Nernst 가역전압은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$V_{rev} = V_{\Delta g}^{ref} + \frac{\Delta s}{nF}(T_{cell} - T_{ref}) + \frac{RT_{cell}}{nF} \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \quad (3)$$

활성화 과전압은 Butler Volmer 방정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$i_g = i_o (e^{\frac{\alpha n F \eta_{act}}{RT}} - e^{-(1-\alpha) n F \eta_{act}/(RT)}) \quad (4)$$

여기서 i_o 는 교환전류이며, i_g 는 실제 전지의 전류(i_{cell})와 내부 손실과 반응가스의 누설 등에 의한 손실전류(i_{loss})를 포함한 값이다. 비교적 높은 부하영역만을 고려하면 식 (4)의 두 번째 항은 무시할 수 있으므로 활성화 과전압은 일반적으로 많이 사용하는 Tafel 식으로 표시할 수 있다.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \left(\frac{i_{cell} + i_{loss}}{i_o} \right) \quad (5)$$

교환전류는 온도와 농도의 함수로 다음 식으로 구할 수 있다.

$$i_o = i_o^{ref} S_{pt}^{eff} \left(\frac{p_{O_2}}{p_{O_2}^{ref}} \right)^\gamma e^{\frac{\Delta b_{act}}{RT} \left(1 - \frac{T}{T^{ref}} \right)} \quad (6)$$

여기서 i_o^{ref} 는 표준상태에서의 전류이며, S_{pt}^{eff} 는 유효 백금 촉매 표면적이며 Δb_{act} 는 activation barrier energy이다.^[25]

전극에서의 저항 손실은 상대적으로 거의 무시할 수 있으므로 저항 과전압은 전해질의 손실만으로 표시할 수 있다. 전해질의 이온 전도 손실은 두께 t_m 와 양이온 전도도

k_m 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{ohm} = i_{cell} \frac{t_m}{k_m} \quad (7)$$

양이온 전도도는 PBI 전해질막의 인산 담지량, 습도량, 그리고 온도의 함수이며 Arrhenius 식으로 표시할 수 있다.^[26]

$$k_m = \frac{AB}{T} e^{-\frac{E_{act}}{RT}} \quad (8)$$

여기서 A와 B는 인산 담지량과 습도의 함수로 표시되는 변수이며 E_{act} 전해질의 활성화에너지이다.

$$E_{act} = -619.6DL + 21700 \quad (9)$$

$$A = -168DL^3 - 6324DL^2 + 65750DL + 8460 \quad (10)$$

$$B = 1 + (0.1432T - 56.89)RH \quad (11)$$

확산 과전압은 한계전류밀도(i_L)를 사용하여 구할 수 있다.

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i_{cell}} \right) \quad (12)$$

따라서 각각의 과전압을 고려한 단위전지의 전압은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$V_{cell} = V^{ref} - \frac{RT}{\alpha n F} \ln \left(\frac{i_{cell} + i_{loss}}{i_o} \right) - i_{cell} \frac{t_m}{k_m} - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i_{cell}} \right) \quad (13)$$

연료전지 셀의 전압 효율과 스택 효율은 앞에서 식 (13)의 전압과 연료 이용률 μ_f 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_{cell} \equiv \frac{V_{cell}}{V_{\Delta h}^{ref}} \quad (14)$$

$$\eta_{FC_st} = \eta_{cell} \mu_f \quad (15)$$

여기서 $V_{\Delta h}^{ref}$ 는 식 (2)와 같이 표준상태에서 연료의 발열량을 이용해서 구한 전압이다. 스택에서 전기로 변환되지 못한 손실은 열에너지로 방출되므로 방출열은 다음과 같이 전지의 운전전압과 $V_{\Delta h}^{ref}$ 의 차이로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{FC_st} &= Ni_{cell} (V_{\Delta h}^{ref} - V_{cell}) \\ &= P_{FC_st} \left(\frac{V_{\Delta h}^{ref}}{V_{cell}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 Q_{FC_st} 는 스택에서 발생하는 열이다. ORCS에 입력되는 열량은 스택 발생열량에서 스택방열 손실과 입출력 반응가스들의 엔탈피차를 제외하여 구할 수 있다.

$$Q_H = Q_{FC_st} - Q_{loss} - \Delta h_{Gsh} \quad (17)$$

일반적으로 연료전지 스택은 단열을 하게 되므로 자연대류 열손실(Q_{loss})이 상대적으로 작으며 가스의 현열(Δh_{Gsh})도 상대적으로 크지 않으므로 여기서는 무시하기로 한다.

$$Q_H \cong Q_{FC_st} \quad (18)$$

3.2 ORCS 최대출력시 효율

연료전지 스택 배열을 열원으로 하여 ORCS에서 최대한 얻을 수 있는 출력 조건에서의 효율을 구하였다. 연료전지 스택에서 배출되는 총열량은 식 (16)과 같이 스택 출력과 전압에 의해 결정될 수 있다.

ORCS 증발기 입구에 공급되는 열원의 온도는 스택의 냉각유체 온도가 되며, 응축기에 공급되는 냉각 유체의 온도는 대기온도로 주어진 값이다. 본 연구에서는 각 열교환기에 출구 온도를 계산하기 위하여 설계조건으로 Fig. 2와 같이 열원과 작동유체 사이의 온도 최소차이점인 핀치점 온도차 T_{pH} , T_{pL} 를 설정하였다.

Fig. 2는 이상적인 포화 랭킨사이클의 엔트로피-온도 (T-S Diagram)으로 사이클은 팽창(1-2), 등압 응축(2-4), 압축(4-5) 그리고 등압 예열 및 증발과정(5-1)으로 이루어

져 있다.

2-3의 응축 과정과 5-6 예열 과정에서 일부 열원은 재생기에 의해 열교환되어 회수된다. ORCS는 기존의 랭킨사이클과 달리 포화증기곡선의 특성상 증발된 작동유체를 거의 과열시키지 않고 포화증기 사이클로 운전할 수 있기 때문에 이상적인 카르노 사이클과 유사한 조건이 될 수 있다. 등가 카르노 사이클은 엔트로피 평균 온도를 사용하여 구성할 수 있다. ORCS의 포화증기 사이클을 등가 카르노 사이클로 구성할 수 있는 또다른 이유는 증발 잠열량이 작동유체의 예열과정(5-6)이나 증기의 과열에 필요한 현열량에 비해 상대적으로 크며, 재생기에 의해 현열부분을 최소화 시킬 수 있기 때문이다. 증발기의 온도를 엔트로피 평균 온도로 구하면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{h_1 - h_5}{s_1 - s_5} \quad (19)$$

Fig. 2에서 동력은 다음식으로 구할 수 있다.

$$P = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \quad (20)$$

비가역성을 고려한 등가 사이클의 엔트로피 관계식은 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{Q}_H / T_e = \dot{Q}_L / T_c - \delta s \quad (21)$$

가역 카르노 사이클의 경우 $\Delta s=0$ 이 되어 다음식이 된다.

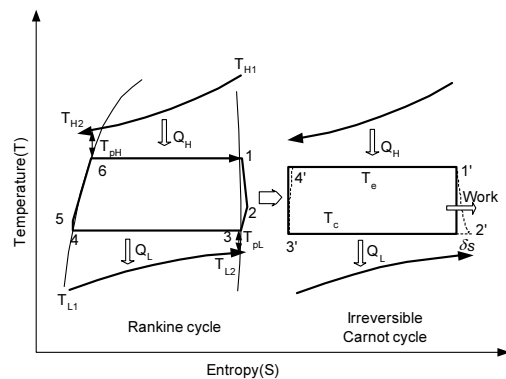


Fig. 2. Temperature-entropy diagram of a organic Rankine cycle system and Modified irreversible Carnot cycle

$$\dot{Q}_H / T_e = \dot{Q}_L / T_c \quad (22)$$

Lee^[23] 등에 의해 가역조건에서의 작동온도와 따라 출력을 최적화시킬 경우 랜킨사이클 시스템의 효율과 최대 출력값은 다음 식으로 주어진다.

$$P_{rmax} = \frac{C_H C_L (T_{He}^{0.5} - T_{Le}^{0.5})^2}{C_H + C_L} \quad (23)$$

$$\eta_{ORCS,opt} = 1 - (T_{Le} / T_{He})^{0.5} \quad (24)$$

여기서 C_H 와 C_L 은 고온 열원과 저온 열원의 열용량($C_H = \dot{m}_H C_{pH}$, $C_L = \dot{m}_L C_{pL}$)이며, T_{He} 와 T_{Le} 는 고온열원과 방열원의 입구 온도를 대표하는 값으로 즉 스택 운전 온도와 대기온도와 핀치점 온도만의 함수로 주어진 값이다.

$$T_{He} = T_{IH} - T_{pH} \quad (25)$$

$$T_{Le} = T_{LI} + T_{pL} \quad (26)$$

비가역성을 고려한 등가 사이클의 최대출력 시 효율은 다음 식으로 주어진다.

$$\eta_{ORCS,opt} = \frac{\eta_{ORCS,opt} - 2(1-\tau)\epsilon + (1+\tau^{0.5})\epsilon^2}{(1-\epsilon)[\eta_{ORCS,opt} - (1+\tau^{0.5})\epsilon]} \quad (27)$$

여기서 $\tau = T_{Le} / T_{He}$, $\epsilon = \delta s / (C_H + C_L)$ 로 온도와 비가역성을 나타내는 무차원 대표값으로 τ 는 연료전지 스택의 작동온도와 대기온도로 주어지는 고정된 값이며 ϵ 는 시스템의 손실 등 비가역성을 나타내는 값이다. 일반적인 ORCS의 해석을 위해서는 작동 유체의 물성치가 사용되나 실제 다양한 작동 유체를 사용하여 수치해석을 수행한 결과 효율 등 열역학적 성능에 차이가 거의 없으므로^[17,21-22] 이론적인 해석식 (27)로 충분히 성능을 예측할 수 있다.

3.2 복합 동력 시스템의 종합 효율

연료전지와 ORCS 하이브리드 시스템의 종합 전기 변환 효율은 연료전지에 입력되는 연료의 열량에 대한 연료전지

와 ORCS 복합시스템의 전기 출력비로 나타낼 수 있다.

$$\eta_C = \frac{(P_{FC} - P_{FC_acc}) + P_{orcs}}{\Delta h_{fuel}} \quad (28)$$

여기서 P_{FC_acc} 는 연료전지 부속설비에 사용되는 동력이다. 연료전지 출력은 스택 출력에 전력변환기의 효율 곱하여 구할 수 있으며, ORCS의 출력은 연료전지 스택 열량과 ORCS의 최적 효율인 식 (27)을 사용하여 나타낼 수 있으므로 복합 시스템 효율은 다음 식으로 표시 할 수 있다.

$$\eta_C = \frac{P_{FC_st} \eta_{inverter} + P_{FC_acc} + Q_{FC_st} \eta_{orcs_opt}}{\Delta h_{fuel}} \quad (29)$$

식 (29)를 연료전지 효율의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\eta_C = \frac{P_{FC_st}}{\Delta h_{fuel}} (\eta_{inverter} + \frac{P_{FC_acc}}{P_{FC_st}} + \eta_{ORCS_opt} \frac{Q_{FC_st}}{P_{FC_st}}) \quad (30)$$

$$\eta_C = \eta_{FC_st} (\eta_{inverter} + \zeta_{acc} + \eta_{ORCS_opt} \frac{V_{\Delta h}^{ref} - V_{Cell}}{V_{Cell}}) \quad (31)$$

식 (49)에서 나타난 바와 같이 연료전지와 배열회수 시스템의 종합 전기 변환 효율은 연료전지 시스템의 효율과 셀전압 그리고 연료전지 운전 온도의 함수인 ORCS의 효율 함수로 표시된다.

4. 해석 결과 분석

4.1 연료전지 모델 검증

Fig. 3이 본 연구에서 HT-PEFC 모델식과 한국에너지기술연구원 연료전지 연구실에서 실험한 자료를 비교한 것이다.

실험은 작동온도 160°C에서 모의 개질 가스와 공기를 이용하여 실험하였다. 연료와 공기비는 각각 1.6, 2.0이었다. 실험과모델식에 의한 계산값과의 차이는 root mean square error(RMSE)값으로는 0.007 Volt이며, 실측값을 기준으로 계산한 절대 오차의 평균값은 0.85% 정도로 비교적 정

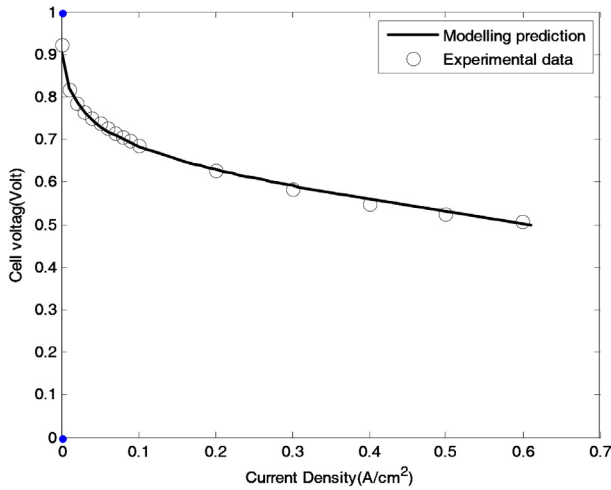


Fig. 3. IV curves for model and experimental data

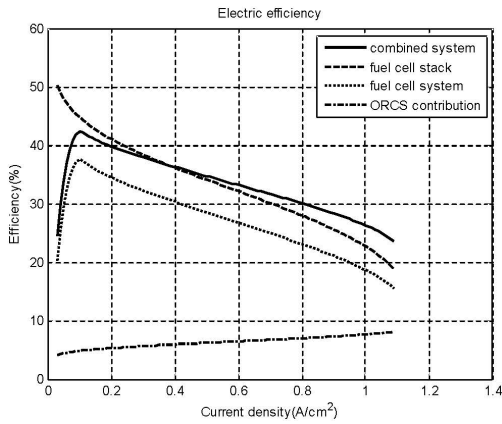


Fig. 4. Comparison of system efficiencies

확하게 예측하는 것을 알 수 있다.

4.2 복합 시스템 성능 해석

Fig. 4가 연료전지 시스템과 복합 시스템의 효율을 비교한 것이다. 해석은 Table 1에 주어진 조건에서 수행하였다.

HT-PEFC와 ORCS의 복합시스템의 성능을 비교하기 위해 주전원인 연료전지에서 주로 사용하는 단위 전류당 성능값을 사용하였다. 여기서 단위 전류는 연료전지의 부하를 나타내는 변수로 연료전지에 대비한 성능을 표시하는데 유효하게 사용될 수 있다. Fig. 3이 연료전지 작동 온도 160°C에서 부하 즉 단위전류 따른 연료전지와(스택 및 시스템) ORCS 그리고 복합 시스템의 효율을 나타낸 것이다.

연료전지 시스템 효율은 식 (15) 스택 효율에 인버터 효율과 기계적 설비 등에 필요한 추가 동력을 고려하여 구한 값이다. Table 1에 나타나 있는 바와 같이 ORCS의 주어진 조건으로 증발기와 응축기의 핀치 온도차가 각각 10°C, 7°C 그리고 ORCS의 비가역성(ϵ)을 0.001로 설정하여 구한 값이다. 이값은 이상적인 ORCS의 효율을 100%로 했을 경우 터빈과 펌프 등 비가역성에 의해 85% 정도 성능이 저하되었을 경우의 값이다.

Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 운전 영역에서 부하가 증가하면 스택에서 과도전압이 증가하여 연료전지 스택과 시스템의 효율은 감소하게 된다. 그러나 식 (16)과 같이 과

Table 1. Conditions of the proposed combined system

Parameters	Value	Parameters	Value
Fuel Cell Geometric Parameter			
GDL thickness	$3.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}$	Membrane thickness	$5.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}$
Anode/Cathode Thickness	$3.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$	Activated area	$2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Fuel Cell Physical Properties			
Standard state free energy change, Δ_{grxn}	$-237,000 \text{ J mol}^{-1}$	Stoichiometry of cathode gas	2.0
Faraday constant, F	$96,485 \text{ C mol}^{-1}$	Anode/cathode pressure, p	1.08/1.14 atm
Gas constant, R	$8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Leak current density,	$5.0 \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$
Effective diffusivity of hydrogen,	$1,490 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Transfer coefficient, α	0.2
Effective diffusivity of oxygen,	$2,950 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Reference exchange current density,	$5,38 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$
Stoichiometry of anode gas	1.2	Doping level, DL	31
Rated Operating Condition of ORCS			
Operating Temperature	160°C	Accessory Power ratio, ζ_{acc}	0.08
Pinch Temperature, T_{ph}, T_{pl}	10°C, 7°C	Inverter efficiency	92%
Irreversibility ratio, ϵ	0.001		

도전압에 비례하여 열량이 증가하게 되므로 ORCS의 효율은 부하에 따라 향상되는 것은 알 수 있다. 이것은 고부하 영역에서 감소되는 연료전지 성능을 ORCS를 통한 동력 회수를 통해 감쇄시킬 수 있음을 나타내는 것으로 고효율 운전영역을 확대시킬 수 있음을 나타내는 것이다. Table 2에 알 수 있는 바와 같이 정격 부하 영역 0.2A/cm²에서는 17% 정도 성능이 향상되었지만 고부하 영역인 0.5A/cm²에서는 25% 정도 성능이 향상되어 연료전지 단독 시스템에 비해 부하 증가에 따라 효율 저하 정도가 감소되는 것을 알 수 있다. ORCS를 작동시킬 경우 연료전지 단독 운전에 비해 효율을 6~8%정도 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이때 ORCS의 열효율은 약 14%이다. 즉, 저부하 영역에서는 연료전지에 투입된 에너지의 35% 정도가 전기로 변환되며, 나머지 열로 배출된 에너지의 14% 정도가 다시 전기로 변화되는 것이다.

Fig. 5가 연료전지와 복합 동력 시스템의 전력 특성을 비교한 것이다. 각 시스템의 전력은 연료전지의 특성값인 동력 밀도로 환산하여 표시하였다. 해당되는 연료전지의 전류밀도에서 ORCS로 증가된 전력값을 연료전지의 동력밀도에 더해서 복합 시스템의 전력밀도로 표시하였다.

Table 2. Comparison of system performances between the combined system and HT-PEFC

구분		효율 (%)	동력밀도 watt/cm ²	성능향상 (%)
0.2 A/cm ²	연료전지	34.5	0.104	17%
	복합 시스템	40.5	0.122	
0.5 A/cm ²	연료전지	28.5	0.214	25%
	복합 시스템	35.5	0.267	

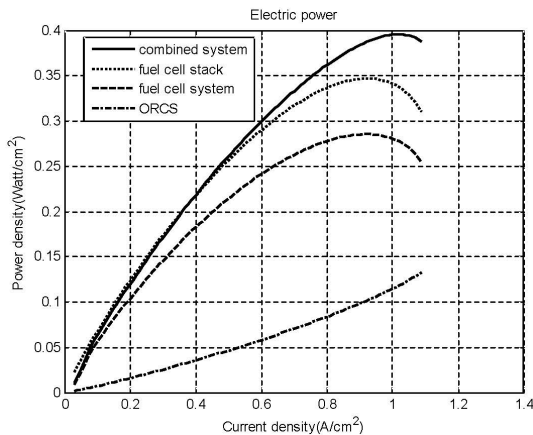


Fig. 5. Comparison of power densities

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 운전영역에서 동력밀도는 효율 특성과 달리 전류밀도가 증가하면 계속 증가하다가 농도과전압이 급격하게 증가하는 영역에서 감소하게 된다. 부하 증가에 따라 동력 밀도가 계속 증가하는 이유는 부하 증가에 비해 전압 손실의 감소율이 적기 때문이다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 ORCS에 의해 회수되는 동력의 비율이 연료전지 부하에 비례하여 증가하게 되므로 복합 시스템의 최고 출력점도 연료전지에 비해 고부하 영역으로 이동하게 된다. 이런 효과에 의해 연료전지의 운전 영역보다 복합시스템의 운전 범위를 고부하 영역으로 확장시킬 수가 있다. 또한 Table 2에 알 수 있는 바와 같이, 연료전지 효율이 높은 저부하 영역에서 보다는 연료전지 효율이 낮은 고부하 영역에서 성능 향상 효과가 커서 ORCS와 연료전지 시스템이 서로 보완시키는 효과가 있다.

본 논문은 연료전지와 ORCS의 주어진 설계 조건과 운전 조건에서 성능을 해석한 것으로 연료전지 작동 온도와 ORCS의 비가역성과 핀치점 온도 등 다양한 설계와 운전조건에 따른 성능은 추가로 다루기로 한다.

5. 결론

고온 고분자연료전지시스템과 유기랜킨사이클 시스템의 이론식을 이용하여 복합 동력시스템의 성능을 계산하였다. 연료전지의 모델식은 실험을 통해 정확성을 검증하였으며 ORCS의 경우도 정확도가 확인된 성능식을 개선하여 사용하였다.

연료전지 작동 온도 160°C에서 복합시스템의 효율은 부하에 따라 6~8% 정도 향상되었으며 출력은 17~25% 정도 향상되는 것을 확인 할 수 있었다.

연료전지는 부하가 증가하면 과전압에 의해 전기효율이 감소하는 경향이 있는데, ORCS의 출력은 스택의 배열양에 비례하여 증가하므로 부하가 증가하여 연료전지의 스택의 효율이 감소하는 영역에서 오히려 ORCS의 회수 동력은 증가하는 것을 확인 할 수 있었다, 연료전지 배열을 이용하는 ORCS 하부 시스템을 통해 상부 시스템인 연료 전지의 낮은 효율 영역을 보완하는 긍정적인 효과를 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안된 이론식과 계산 방법은 연료전지 복

합 시스템의 최대 출력과 최적 설계 조건을 계산하기 위한 열역학적 해석에 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 연구성과실용화 진흥원 및 산업통상자원부(민군기술협력진흥센터)의 지원으로 이루어진 민군협력사업(13-DU-SP-01-MKE)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Neff, H.J., 2009, "International overview of hydrogen and fuel cell research", *Energy*, 34, 327-333.
- [2] Lucia, U., 2014, "Overview on fuel cells", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 164-169.
- [3] Larminie, J., Dicks, A., 2003, "Fuel cell systems explained", 2nd ed., Wiley, England
- [4] Authayanun, S., Im-orb, K., Arpornwichanop, A., 2015, "A review of the development of high temperature proton exchange membrane fuel cells", *Chinese Journal of Catalysis*, 36, 473-483.
- [5] Kim, J., Kim, M., Kang, T., Sohn, Y.-J., Song, T., Choi, K.H. 2014, "Degradation modeling and operational optimization for improving the lifetime of high-temperature PEM fuel cells", *Energy*, 66, 41-49.
- [6] Wainright, J. S., Wang, J. T., Weng, D., Savinell, R.F., Litt, M., 1995, "Acid-doped polybenzimidazoles : a new polymer electrolyte", *Journal of the Electrochemical Society*, 142(7), L121-123.
- [7] Samms, S.R., Wasmus, S., Savinell, R.F., 1996, "Thermal stability of proton conducting acid doped polybenzimidazole in simulated fuel cell environments", *Journal of the Electrochemical Society*, 143(4), 1225-1232.
- [8] Ellamla, H.R., Staffell, I., Bujlo, P., Pollet, B.G., Pasupathi, S., 2015, "Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector", *Journal of Power Source*, 293, 312-28.
- [9] Chu, H.-S., Tsau, F., Yan, Y.-Y., Hsueh, K.-L., Chen, F.-L., 2008, "The development of a small PEMFC combined heat and power system", *Journal of Power Sources*, 176, 499-514.
- [10] Inaka, H., Sumi, S., Nishizaki, K., Tabata, T., Kataoka, A., Shinkai, H., 2002, "The Development of effective heat and power use technology for residential in a PEFC co-generation system", *Journal of Power Sources*, 106, 60-67.
- [11] Maeda, K., Masumoto, K., Hayano, A., 2010, "A study on energy saving in residential PEFC cogeneration systems", *Journal of Power Sources*, 195, 3779-3784.
- [12] Roh, C.W., Kim, M.S., 2008, "A Study on the Economic Evaluation with Super-Micro Fuel Cell Home Cogeneration System by Varying the Floor Area of House", *The Korea Society for New and Renewable Energy*, 4(2), 45-51.
- [13] Napoli, R., Gandigilo, M., Lanzini, A., Santarelli, M., 2015, "Techno-economic analysis of PEMFC and SOFC micro-chp fuel cell systems for the residential sector", *Energy and Building*, 103, 131-146.
- [14] Saidi, M.H., Ehyaei, M.A., Abbasi, A., 2005, "Optimization of a combined heat and power PEFC by exergy analysis" *Journal of Power Source*, 143, 179-184.
- [15] Sohn, Y.-J., Park, G.-G., Yang, T.-H., Yoon, Y.-G., Lee, W.-Y., Yim S.-D., Kim, C.-S., 2005, "Operating characteristics of an air cooling PEMFC for portable application", *The Korea Society for New and Renewable Energy*, 1(1), 71-78.
- [16] Long, R., Li, B., Liu, Z., Liu, W., 2015, "A hybrid system using a regenerative electrochemical cycle to harvest waste heat from the proton exchange membrane fuel cell", *Energy*, 93, 2079-2086.
- [17] Zhao, P., Wang, J., Gao, L., Dai, Y., 2012, "Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell", *International Journal of Hydrogen*, 37, 3382-3391.
- [18] Perna, A., Minutillo, M., Jannelli, E., 2015, "Investigation on an advanced power system based on a high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell and an

- organic Rankine cycle for heating and power production”, *Energy*, 88, 874-884.
- [19] Lecompte, S., Huisseune, H., Broek, M.V., Vanslambrouck, B., Paepe, M.D., 2015, “Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 448-461.
- [20] Lee, W.Y., Kim, S.S., Won, S.H., 1990, “Finite-time optimization of a heat engine”, *Energy*, 15(11), 979-985.
- [21] Lee, W.Y., Kim, S.S., 1991, “An analytical formula for the estimation of a Rankine-cycle heat engine efficiency at maximum power”, *International Journal of Energy Research*, 15, 149-159.
- [22] Lee, W.Y., Kim, S.S., 1992, “Finite-time optimization of a Rankine heat engine”, *Energy Conversion and Management*, 33(1), 59-67.
- [23] Lee, W.Y., Kim, S.S., 1990, “Power optimization of a irreversible heat engine”, *Energy*, 16(7), 1051-1091.
- [24] Korsgaard, A.R., Refshauge, R., Nielsen, M.P., Bang, M., Kær, S.K., 2006, “Experimental characterization and modeling of commercial polybenzimidazole-based MEA performance”, *Journal of Power Sources*, 162(1), 239-245.
- [25] Birgersson, E., Nojonen, M., Vynnycky, M., 2005, “Analysis of a two-phase non-isothermal model for a PEFC”, *Journal of the Electrochemical Society*, 152(5), A1021-1034.
- [26] Olapade, P.O., Meyers, J.P., Borup, R.L., Mukundan, R., 2011, “Parametric study of the morphological proprieties of HT-PEMFC components for effective membrane hydration”, *Journal of The Electrochemical Society*, 158(6), B639-649.