

블로워 구성 변경에 따른 상압형 자동차용 고분자 전해질형 연료전지 시스템의 효율 특성 연구

김일중 · 이정재 · 김한상[†]

서울과학기술대학교 기계 · 자동차공학과

Study on the Characteristics of Low-pressure Automotive Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System Efficiency with Blower Configuration

IL-JOONG KIM, JUNG-JAE LEE, HAN-SANG KIM[†]

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

[†]Corresponding author :
hskim1101@seoultech.ac.kr

Received 3 April, 2018
Revised 20 April, 2018
Accepted 30 April, 2018

Abstract >> Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system receives great attention as a promising power device for automotive applications. For the wide commercialization, the efficiency and performance of automotive PEMFC system should be further improved in terms of total system (stack and balance of plant [BOP]). Air supply module, which is a major part of the BOP, greatly affects the efficiency of automotive PEMFC system. In this paper, a systematic study on the low-pressure automotive PEMFC system was made in an attempt to enhance the net system efficiency. This study mainly presents an investigation of the effect of blower configuration (1-blower and 2-blower) on the net system efficiency of automotive PEMFC system. For this purpose, the effect of operating pressure and cathode stoichiometry on the system efficiency was investigated with stack temperature under the fixed net system power condition. Results indicate that 1-blower system is better in system efficiency over 2-blower system under an air stoichiometry of 2. However, 2-blower system is better in system efficiency under an air stoichiometry of 3. The simulation results show that the optimum operating strategy needs to be established for various blower system configurations considering blower performance maps.

Key words : Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질 형 연료전지), Air supply module(공기 공급 시스템), Blower(블로워), System efficiency(시스템 효율), Cathode stoichiometry(공기극 양론비)

Nomenclature

A_{act}	: active area of fuel cell, cm^2
b_1	: function of membrane water content
b_{11}, b_{12}, b_2	: empirically determined constant
c_1, c_2, c_3	: modeling constants
C_p	: specific heat, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$
E_{oc}	: open-circuit voltage (OCV), V
HHV_{an}	: hydrogen higher heating value, J/kg
i	: current density, A/cm^2
i_{max}	: current density that causes precipitous voltage drop, A/cm^2
I_{stack}	: stack current, A
\dot{m}_{an}	: anode gas mass flow rate, kg/s
\dot{m}_{ca}	: cathode gas mass flow rate, kg/s
\dot{m}_w	: stack coolant mass flow rate, kg/s
n_{st}	: number of stacked cells
p_{H_2}	: partial pressure of hydrogen, bar
p_{O_2}	: partial pressure of oxygen, bar
P	: pressure, bar
r_{ohmic}	: internal electrical resistance, $\Omega \cdot \text{cm}^2$
T	: temperature, K
T_{cell}	: fuel cell temperature, K
t_m	: membrane thickness, cm
V_0	: voltage drop at 0 A/cm^2 , V
V_{act}	: activation overvoltage, V
V_{cell}	: cell voltage, V
V_{con}	: concentration overvoltage, V
V_{ohmic}	: ohmic overvoltage, V
V_{stack}	: stack voltage, V
W_{bl}	: blower consumption power, W
W_h	: parasitic load of humidifier, W
W_{net}	: net system power, W
W_p	: parasitic load of pump, W
$W_{parasitic}$: parasitic load of BOP, W
W_{stack}	: stack gross power, W

Greek letters

γ	: specific heat ratio
ΔP_w	: stack coolant pressure drop, kPa
η_{bl}	: blower efficiency
η_p	: pump efficiency
η_{system}	: fuel cell system efficiency
λ_m	: membrane water content
ρ_w	: coolant density, kg/m^3
σ_m	: membrane conductivity, $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$

Subscripts

in	: inlet
out	: outlet
act	: activation
con	: concentration

1. 서론

최근 전 세계적으로 환경오염 및 지구 온난화에 대한 인식이 강화되면서 자동차 산업에서도 친환경, 무공해 자동차의 개발과 이를 구현하기 위한 친환경 에너지 동력원에 대한 관심이 크게 증대되고 있다^{1,2)}. 이미 자동차 회사는 하이브리드 기술을 채용하고 배기가스 저감을 위한 다양한 기술들을 적용하여 이러한 요구에 대응하려는 노력을 경주해 오고 있다. 하지만 기존의 내연기관으로는 무공해 및 CO₂의 근본적인 저감을 구현하기에는 한계가 있다. 연료전지는 연료의 화학 에너지를 연소가 아닌 전기화학 반응에 의해 전기 에너지로 변환시킬 수 있어 친환경 동력원으로 자동차 산업에 적용이 적극 검토되고 있다³⁾.

그중에서도 수소를 사용하는 고분자전해질형 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 낮은 작동 온도, 고에너지 효율, 우수한 출력 밀도, 빠른 시동 특성 등 자동차 분야에 적합한 특성으로 차세대 친환경 자동차의 추가적인 도약을 이끄는 동력원이 될 것으로 기대를 모으고 있다^{1,2)}. 하지만

자동차 메이커의 시각에서는 PEMFC가 자동차용 동력원으로 상용화되기 위해서는 전체 시스템 측면의 가격 저감과 성능, 효율, 내구성의 추가 개선이 반드시 필요한 상황이다³⁾.

PEMFC의 핵심은 전기를 생성하는 스택(stack)이다. 단위 PEMFC의 경우 발생하는 출력 전압은 열역학적으로 한계가 존재하므로 자동차에서 요구되는 출력을 만족시키기 위해서는 직렬로 연결하여 스택 형태로 적용하는 것이 필수적이다⁴⁾.

따라서 PEMFC가 자동차용으로 적용되기 위해서는 시스템 형태를 갖춰야 하는데, 이를 위해 스택뿐 아니라 다양한 주변 장치(balance Of plant, BOP)들을 필요로 한다⁵⁾. 자동차용 PEMFC 시스템의 BOP는 공기 및 수소 공급 장치, 가습 장치, 열 및 물 관리 장치 등으로 구성되는데, 이는 스택으로 유입되는 공급 가스들의 압력, 온도, 습도 등에 큰 영향을 미쳐 전체 연료전지 시스템의 효율은 이들 장치들의 설계 및 운전 전략에 직접 영향을 받는다^{6,7)}. 그러므로 BOP 각 요소들은 작동을 위하여 동력을 소모하므로 전체 PEMFC 시스템의 효율 개선을 위해서는 BOP 전체 소모 동력 측면의 BOP의 최적 설계 및 운전 전략 마련이 자동차용 PEMFC 시스템 개발에 있어 필수적인 과제로 인식되고 있다³⁾.

그중 공기 공급 장치는 PEMFC 성능에 직접적인 영향을 미치는 요소로 인식되어 자동차 구동을 위하여 요구되는 출력 구현을 위한 스택 작동에 필요한 공기를 공급할 수 있는 최적의 기능을 갖추도록 요구받고 있다^{8,9)}.

특히 자동차용 PEMFC 시스템에서는 공기 공급 장치의 경우 에너지 소모를 최대한 줄일 수 있도록 하는 노력이 매우 중요하다. 기존 연구에 의하면 압축기의 경우 소모 동력이 스택 발생 출력의 약 15%를 차지하는 경우도 있어 BOP 장치 중 가장 큰 소모 동력을 차지하는 부품으로 알려져 있다^{8,10)}.

공기 공급 장치의 작동 압력은 자동차용 PEMFC 시스템 설계시 가장 중요한 인자로 인식되고 있으며 이에 따라 PEMFC 시스템은 가압형(high-pressure operating)과 상압형(low-pressure operating)으로 크

게 구분되기도 한다³⁾. 2가지 시스템은 작동 압력에 따라 각각 고유한 장, 단점을 가지고 있어 2종류의 시스템 모두 자동차용 PEMFC 시스템에서 적용되어 오고 있다.

또한 공기극 작동 압력에 따라 자동차용 PEMFC 시스템의 레이아웃도 크게 변경되므로 시스템의 가격 및 부피 등을 제한조건으로 공기 공급 장치의 효율 최대화를 구현하기 위하여 다각도로 개발이 요구되고 있다^{8,9)}. 가압형 시스템은 압축기, 상압형 시스템은 블로워가 주요 요소로 이 장치들의 실 작동조건에 따른 시스템 효율과 소모 동력 등과 관련된 연구가 PEMFC 시스템 최적화 측면에서 필수적이지만 아직까지 관련한 실용적인 연구는 드문 실정이다.

최근 압축기 자체의 특성에 대한 연구와 더불어 이를 장착한 가압형 PEMFC 시스템에 대한 성능 및 효율 관련한 연구가 관심을 끌고 있다¹⁰⁻¹²⁾. 하지만 상압형 PEMFC 시스템에 대한 효율 분석 연구^{5,12,13)}는 가압형에 비하여 연구가 미비한 상황이다.

본 연구는 블로워를 적용하는 자동차용 상압형 PEMFC 시스템 차원의 효율 향상을 위한 연구의 일환으로 시도되었으며 구체적으로는 상압형 공기 공급 장치인 블로워 수를 변경한 PEMFC 시스템에 대한 가능성을 단순화된 시스템 해석 연구를 통하여 확인해 보고자 하였다. 이를 위하여 MATLAB/Simulink를 활용한 자동차용 상압형 PEMFC 시스템 모델링을 진행하였고, 모델링된 tool을 적용하여 공기 공급 장치 핵심 요소인 블로워의 수(1개, 2개)에 따른 전체 시스템의 효율 변화 특성을 비교, 분석하였다.

2. 자동차용 PEMFC 시스템 해석

2.1 PEMFC 시스템(상압형)

자동차용 PEMFC 시스템은 자동차 개발사에 따라 그 특성과 구성 요소들이 각각 다르다. 그리고 이에 대한 시스템 모델링도 복잡성 정도에 따라 다양한 모델들이 제시되고 있다.

본 논문에서는 블로워의 수에 따른 PEMFC 시스

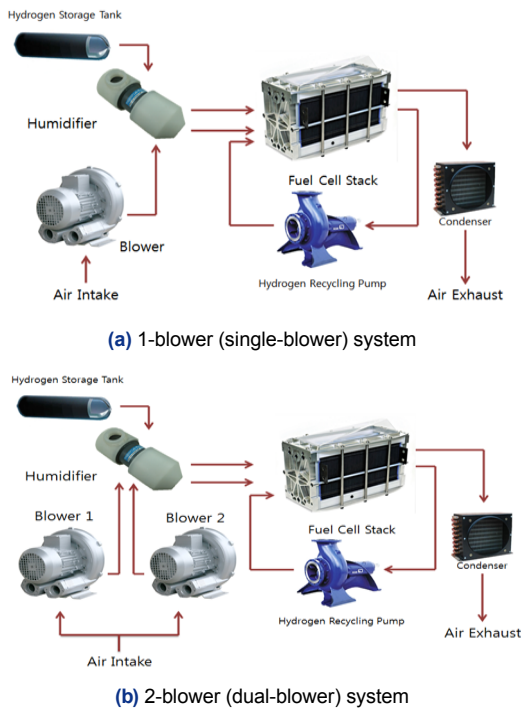


Fig. 1. Schematic representation of two low-pressure operating PEMFC systems for vehicular applications

템의 효율 측면의 분석에 주안점을 두어 연구를 진행하고자 단순화된 시스템 모델을 적용하였다.

본 연구에 적용된 자동차용 PEMFC 시스템 구성을 Fig. 1에 도시하여 나타내었다. Fig. 1(a)는 블로워 1개를 사용하는 기존 시스템이고, Fig. 1(b)는 논문에서 채택한 블로워 2개를 적용하는 시스템 구성이다.

블로워 1개를 적용하는 경우와 비교할 때 블로워 2개를 적용하는 시스템의 경우는 각 블로워가 공기량을 동일하게 토출하여 PEMFC 시스템에서 요구하는 순 출력을 만족시킬 수 있는 공기량을 공급할 수 있도록 고려하였다.

2.2 PEMFC 공기 공급 장치(블로워) 모델

본 연구에서는 자동차용 상압형 PEMFC 시스템에 적용되는 터보 블로워를 적용하였다. 블로워를 구동하기 위해 요구되는 동력은 식 (1)과 같이 구해질 수 있는데, 이 식에서 가장 중요한 인자는 블로워의 효

율(η_{bl})이다.

블로워의 효율은 유입되는 가스의 질량 유량, 온도, 압력비 등 주요 인자에 의해 결정되는데⁸⁾, 이는 PEMFC의 주요 작동조건이기도 하다. 블로워의 효율은 Ji 등¹²⁾의 연구에서 제시된 터보 블로워의 효율 곡선(map)을 활용하여 구하였다.

적용된 터보 블로워는 정격 작동조건에서 대기조건 15°C, 101.3 kPa에서 질량 유량 0.08 kg/s, 압력비 (pressure ratio) 1.3이다. 이는 80 kW의 PEMFC 출력에 해당하는 정격 용량을 나타낸다¹²⁾.

$$W_{bl} = \dot{m}_{ca} C_p \frac{T_{in}}{\eta_{bl}} \left(\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (1)$$

2.3 PEMFC 시스템 스택 모델

신뢰도 있는 PEMFC 스택 성능 데이터는 다양한 작동조건 하에서 많은 횟수의 시험을 수행하여야 확보 가능하다¹⁰⁾. 하지만 시험을 수행하는 데 많은 노력과 비용이 소요되므로 대다수 연구에서 시스템 해석 모델에 기초하여 스택 성능을 평가하여 데이터로 활용하고 있는 실정이다.

본 연구에서도 스택 시험 데이터를 사용할 수 없었으므로 단위 연료전지의 성능을 예측하고 이를 사용하여 스택의 출력을 산정하는 방법을 사용하였다. 이를 위하여 단위 연료전지의 셀 출력 전압을 시스템 작동조건을 고려하여 전류 밀도에 따라 예측할 수 있는 시험 데이터에 기초한 단순화된 모델¹⁴⁾을 적용하였다.

이 모델에서는 주로 분리판의 종류, 유로 형태에 따른 반응 가스의 농도 분포, 온도 분포, 분리판 및 촉매 등 재질 관련한 사항들은 이론적인 수식으로는 고려되지 않았다³⁾.

단위 연료전지의 셀 전압을 활성화 손실, 저항 손실, 농도 손실 등을 고려하여 전류 밀도와와의 식으로 구할 수 있다. Table 1에 관련된 수식(식 [2]-식 [9])을 정리하여 나타내었다.

여기에서 얻어진 단위 셀에 대한 성능 데이터를

Table 1. Empirical equations for a single PEMFC model^{11,14,15)}

Equation description	
$V_{cell} = E_{oc} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con}$	(2)
$E_{oc} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{cell} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{cell} [\ln(p_{H_2}) + 0.5 \ln(p_{O_2})]$	(3)
$V_{ohmic} = i \times r_{ohmic}$	(4)
$r_{ohmic} = \frac{t_m}{\sigma_m}$	(5)
$\sigma_m = b_1 \exp\left(b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{cell}}\right)\right)$	
$b_1 = b_{11} \lambda_m - b_{12}$	(6)
$V_{act} = V_0 + V_a(1 - e^{-c_i})$	(7)
$V_{con} = i \left(c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3}$	(8)
$I_{stack} = i \times A_{act}$	(9)

써서 스택의 전압 및 출력을 식 (10)과 (11)을 이용하여 각각 구하였다.

$$V_{stack} = n_{st} \cdot V_{cell} \quad (10)$$

$$W_{stack} = I_{stack} \cdot V_{stack} \quad (11)$$

2.4 PEMFC 시스템의 효율

PEMFC 시스템은 스택에서 생성되는 에너지 (W_{stack}) 중 일부를 주변 장치의 구동에 소모하므로 온전히 생산되는 전기 에너지는 시스템의 순 출력 (W_{net})으로 표시된다. 즉, PEMFC 시스템에서 순 출력은 스택에서는 발생하는 전기 에너지와 주변 장치에서 소모되는 동력($W_{parasitic}$)의 차인 식 (12)와 같이 나타내어질 수 있다.

본 연구에서는 주변 장치에서 소모되는 동력으로 블로워, 가습기, 펌프 소모 동력을 고려하여 식 (13)과 같이 계산되었다.

Table 2. Basic stack parameters used in the study

Parameters	Value
Number of cells	500
Area of active cross section	400 cm ²
Inlet air temperature	25 °C
Ambient air pressure	1.0 bar
Water content	14
Cathode stoichiometry	2.0
Anode stoichiometry	1.2
Cathode stack inlet RH	70%

가습기 소모 동력은 가습기에 장착된 히터에서 소비되는 동력으로 산정하였다. 이 때 히터의 효율은 80%로 가정하였다. 펌프의 소모 동력은 식 (14)와 같이 산정되었다. 식 (14)에서 펌프의 효율은 일정(90%)한 것으로 가정하였다.

$$W_{net} = W_{stack} - W_{parasitic} \quad (12)$$

$$W_{parasitic} = W_b + W_h + W_p \quad (13)$$

$$W_p = \frac{1}{\eta_p} \frac{\dot{m}_w \Delta P_w}{\rho_w} \quad (14)$$

본 연구에서는 PEMFC 시스템의 효율(η_{system})을 투입된 연료(수소)의 에너지 양에 대한 PEMFC 시스템 순 출력으로 아래 식 (15)와 같이 정의하여 결과 분석에 활용하였다³⁾.

$$\eta_{system} = \frac{W_{net}}{m_{an} \cdot HHV_{an}} \quad (15)$$

2.5 해석 주요 작동 변수 선정 및 해석 과정

블로워의 수가 다른 2종류의 상압형 PEMFC 시스템에 대한 효율 비교를 위하여 본 연구에서는 순 출력을 동일하게 한 조건에서 계산을 진행하였다.

PEMFC 시스템은 다양한 작동 변수에 따라서 성능 및 효율이 변화한다. 그중 상대적으로 영향이 큰

Table 3. Main operating parameters of the simulation results of this study

Parameters	Value
Net system power	50 kW
Operating cathode pressure	1.2, 1.3, 1.4 bar
Cathode stoichiometry	2, 3
Stack temperature	35-80 °C (increasing by 5 °C)
Stack inlet relative humidity (RH)	70, 80%

주요 변수로 알려져 있는 공기극 작동 압력, 스택 온도, 공기극 양론비, 공기극 습도 등을 주요 작동인자로 선정하였다³⁾. 상세한 스택 관련 기본 파라미터들을 Table 2에 요약하여 나타내었다.

해석은 작동 압력을 변화시키면서 스택 작동 온도에 따른 2종류 시스템의 효율을 구하는 방식으로 해석을 진행하였다. 또한, 공기극 양론비에 따른 파라미터 해석도 동일한 방법으로 수행되었다. Table 3에 자세한 해석 수행조건을 정리하여 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PEMFC 성능 특성

3.1.1 단위 PEMFC 성능

Fig. 2는 본 연구에 적용된 단위 셀 모델을 적용하여 단위 PEMFC의 성능을 해석한 결과를 나타낸다. 스택의 성능 예측을 위해 도입된 모델을 통하여 다양한 시스템 작동조건 하에서 PEMFC의 I-v 성능 특성을 효과적으로 예측할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 작동 압력이 시스템 효율에 미치는 영향

자동차용 상압형 PEMFC 시스템의 경우 작동 압력이 시스템의 성능 및 효율에 가장 큰 영향을 미친다.

PEMFC 시스템의 경우 작동 압력이 증가하면 스택 출력도 증가하는 장점이 있는 반면 작동 압력이 증가함에 따라 블로워에서 소모되는 동력도 함께 증가하므로 순 출력 및 시스템의 효율 측면에서는 반

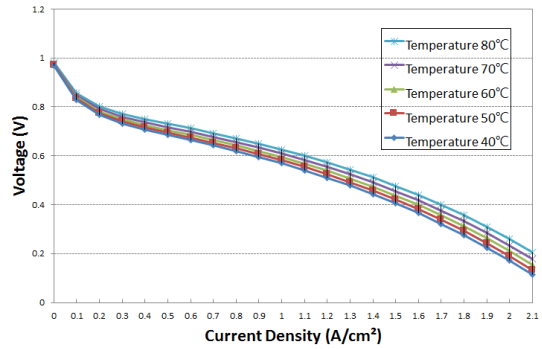


Fig. 2. I-v characteristic curves with unit cell operating temperature at a cathode pressure of 1.3 bar and cathode stoichiometry of 2

드시 장점으로 작용한다고만 볼 수는 없다.

특히 작동 압력의 증가가 스택의 성능 향상보다 블로워의 소모 동력의 증가 영향으로 더 크게 나타난다면 순 출력 및 시스템 전체 효율 측면에서는 불리하다⁸⁾. 블로워 소모 동력의 증가는 블로워 전후의 압력 비, 입구 온도, 유입 가스 유량 등이 증가하는 경우와 블로워의 효율 감소와 직접 관련이 있다. 이와 연관되는 PEMFC 시스템의 작동변수는 공기극 양론비, 작동 압력, 스택 입구 습도 등으로 요약된다.

본 연구에서와 같이 블로워의 수를 2개로 변화시킨 경우는 블로워에 유입되는 공기량을 변화시키는 효과를 나타낼 수 있다. 이는 유입 공기 유량이 지나치게 증가하는 경우 블로워의 효율이 감소하는 부작용을 줄여 블로워의 전체 소모 동력을 줄이는 방안으로서 장점이 있다.

따라서 다음 절에서는 공기극 양론비(=2, 3)에서 PEMFC 작동 압력 변화에 따른 시스템 효율 특성을 설명하였다.

3.2.1 공기극 양론비 2인 경우 작동 압력의 영향

Figs. 3-5는 공기극 양론비 2에서 작동 압력 1.2, 1.3, 1.4 bar 조건에서 PEMFC 시스템 효율을 스택 작동 온도에 따라 나타낸 것이다.

전체적인 PEMFC 시스템 효율 특성은 스택 작동 온도가 증가함에 따라 개선되는 특성을 나타낸다. 그리고 스택 입구 습도가 상대적으로 낮은 경우가 시

스택 효율이 높은 경향을 나타낸다. 이는 가습을 위한 소모 동력이 상대적으로 줄어 효율 증가에 기여

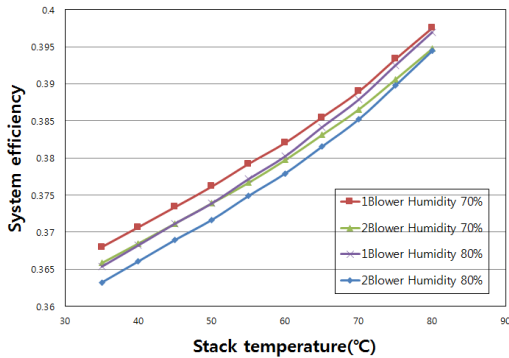


Fig. 3. System efficiency with 1-blower and 2-blower systems varying stack temperature and relative humidity at a cathode stoichiometry of 2 and an operating pressure of 1.2 bar

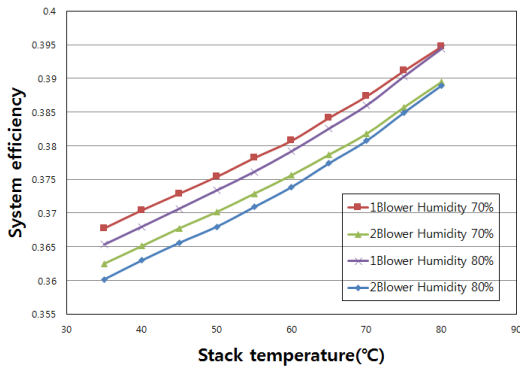


Fig. 4. System efficiency with 1-blower and 2-blower systems varying stack temperature and relative humidity at a cathode stoichiometry of 2 and an operating pressure of 1.3 bar

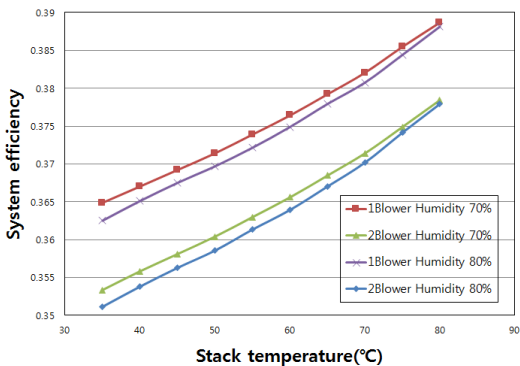


Fig. 5. System efficiency with 1-blower and 2-blower systems varying stack temperature and relative humidity at a cathode stoichiometry of 2 and an operating pressure of 1.4 bar

한 때문으로 생각된다. 단, 스택 온도가 높아질수록 습도가 시스템 효율에 미치는 영향은 상대적으로 작아짐도 함께 알 수 있다.

작동 압력이 증가함에 따라 2종류 시스템 모두 효율은 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 작동 압력이 증가함에 따라 2종류 시스템 간 효율의 차이가 더 커지는 경향을 파악할 수 있다. 이는 압력비가 증가함에 따라 블로워의 효율이 감소하는 경향을 나타내는데 작동 압력이 증가하여 압력비가 증가한 경우 2개의 블로워를 사용하여 유량을 줄여 블로워를 사용하는 경우 블로워의 효율이 상대적으로 감소하는 특성이 반영된 때문으로 분석된다.

요약하면 공기극 양론비 2인 경우는 블로워를 1개 사용하는 기존 시스템이 PEMFC 시스템 효율 측면에서 더 유리함을 알 수 있다.

3.2.2 공기극 양론비 3인 경우 작동 압력의 영향

Figs. 6-8은 공기극 양론비 3인 조건에서 작동 압력 1.2 bar, 1.3 bar, 1.4 bar 조건에서 PEMFC 시스템 효율 해석 결과를 스택 온도에 따라 나타낸 것이다.

공기극 양론비 2인 경우와 스택 온도와 스택 입구 습도에 의한 영향은 유사한 경향을 보이지만 공기극 양론비가 3으로 증가하면서 2개의 블로워를 사용하는 시스템이 더 우수한 효율 특성을 나타냄을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 다음과 같이 이해할 수 있다.

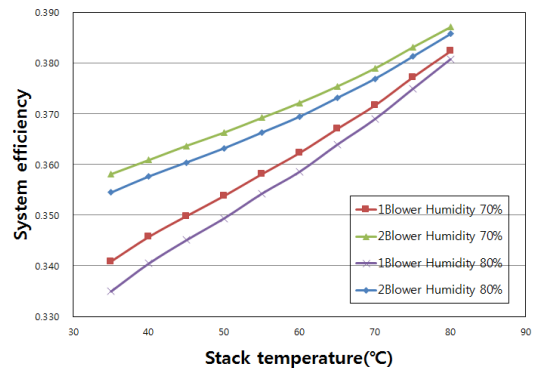


Fig. 6. System efficiency with 1-blower and 2-blower systems varying stack temperature and relative humidity at a cathode stoichiometry of 3 and an operating pressure of 1.2 bar

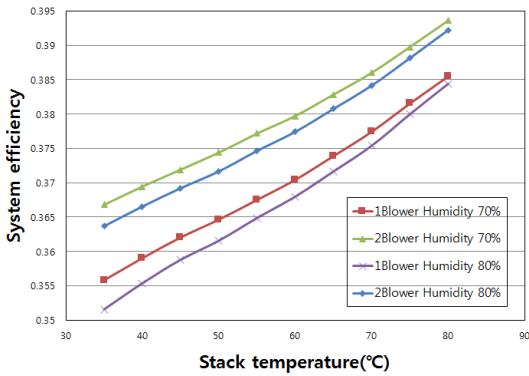


Fig. 7. System efficiency with 1-blower and 2-blower systems varying stack temperature and relative humidity at a cathode stoichiometry of 3 and an operating pressure of 1.3 bar

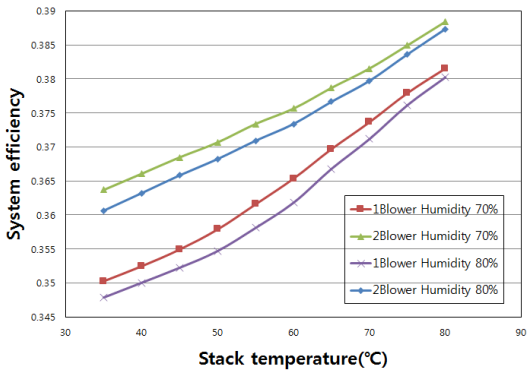


Fig. 8. System efficiency with 1-blower and 2-blower systems varying stack temperature and relative humidity at a cathode stoichiometry of 3 and an operating pressure of 1.4 bar

공기극 양론비가 증가하면서 1개의 블로워를 적용하는 시스템에서 블로워의 효율이 감소하는 범위에 해당되어 효율 감소에 영향을 받은 반면 2개의 블로워를 적용하는 시스템의 경우 유량이 반으로 줄어드는 효과가 있어 블로워의 효율 감소 영향이 상대적으로 작게 나타난 것으로 판단된다.

또한 공기극 양론비가 2인 경우 작동 압력이 증가함에 따라 시스템 효율이 감소되는 특성과는 달리 공기극 양론비가 3인 경우는 1.3 bar인 경우 효율이 가장 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 블로워에서 공급해야 할 공기량이 많아짐에 따라 작동 압력이 낮은 1.2 bar에서는 블로워 효율 측면에서 불리하기 때문으로 판단된다. 작동 압력이 1.4 bar인 경우가

1.2 bar인 경우보다 시스템 효율이 더 높은 결과는 공기량에 따라 적절한 작동 압력에 대한 분석과 최적화 연구가 필요함을 의미한다.

PEMFC 시스템 전용으로 작동조건이나 운전 특성을 체계적으로 고려한 블로워 개념 설계 데이터를 토대로 블로워를 개발, 제작하고 이에 대한 다양한 조건 하의 성능 시험을 진행하여 블로워 성능 맵을 확보하여 본 연구에 적용할 수 있다면 PEMFC 시스템 효율 및 이의 최적화를 위한 공기 공급 시스템 개발을 위한 정량적으로 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 자동차용 연료전지 시스템의 순 출력(50 kW) 고정조건에서 공기 공급 장치인 블로워를 1개 장착한 경우와 2개를 장착한 경우에 대한 시스템 해석을 수행하였다. 주요 시스템 변수인 작동 공기 압력, 작동 온도, 스택 입구 습도, 공기극 양론비를 변화시키며 2가지 경우에 대한 시스템 효율 변화를 분석하였다. 본 연구에서 제시된 사양과 해석 조건 하에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 연료전지 시스템의 효율은 공기극 양론비가 2인 경우에는 블로워 1개를 적용한 시스템의 효율이 더 높고 공기극 양론비가 3인 경우에는 블로워 2개를 적용한 시스템의 효율이 더 높다.
- 2) 동일 조건에서 공기 양론비 2와 3에서 최고 효율을 나타내는 작동 공기 압력은 각각 1.2 bar, 1.3 bar임을 파악할 수 있다.
- 3) PEMFC 시스템의 작동 온도가 높아짐에 따라 시스템 효율은 습도의 영향을 적게 받는다(단 스택 입구에서의 습도가 높을수록 가습기에서 소모되는 동력이 증가하기 때문에 시스템 효율은 감소하는 경향을 보인다).
- 4) 본 연구는 자동차용 상압형 PEMFC 시스템의 효율 개선용 설계 및 구동 전략 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었다.

References

1. J. Larminie and A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley & Sons, Ltd., UK, 2003.
2. Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, and X. C. Adroher, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research", *Applied Energy*, Vol. 88, 2011, pp. 981-1007.
3. H. S. Kim, D. H. Lee, K. Min, and M. Kim, "Effect of Key Operating Parameters on the Efficiency of Two Types of PEM Fuel Cell Systems", *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 2, 2005, pp. 1018-1026.
4. Y. Qin, Q. Du, M. Fan, Y. Chang, and Y. Yin, "Study on operating pressure effect on the performance of a proton exchange membrane fuel cell power system", *Energy Conversion and Management*, Vol. 142, 2017, pp. 357-365.
5. D. Cho and H. S. Kim, "A Study of the Effect of Compressor Performance Map on the Efficiency of High-pressure Operating PEMFC Systems in Automotive Applications", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 6, 2012, pp. 604-611.
6. J. M. Cunningham, M. A. Hoffman, and D. J. Friedman, "A Comparison of High-Pressure and Low-Pressure Operation of PEM Fuel Cell Systems", SAE Paper No. 2001-01-0538, 2001.
7. A. Vasilyev, J. Andrews, L. M. Jackson, S. J. Dunnett, and B. Davies, "Component-based modelling of PEM fuel cells with bond graphs", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 42, 2017, pp. 29406-29421.
8. B. Blunier and A. Miraoui, "Proton Exchange Membrane Air Management in Automotive Applications", *J. of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 7, 2010, pp. 041007-1-041007-11.
9. M. Venturi, J. Sang, A. Knoop, and G. Hornburg, "Air Supply System for Automotive Fuel Cell Application", SAE Paper No. 2012-01-1225, 2012.
10. Q. Meyer, A. Himeur, S. Ashton, O. Curnick, R. Clague, T. Reisch, P. Adcock, P. R. Shearing, and D. J. L. Brett, "System-level electro-thermal optimisation of air-cooled open-cathode polymer electrolyte fuel cells: Air blower parasitic load and schemes for dynamic operation", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 40, 2015, pp. 16760-16766.
11. D. Zhao, L. Xu, Y. Huangfu, M. Dou, and J. Liu, "Semi-physical modeling and control of a centrifugal compressor for the air feeding of a PEM fuel cell", *Energy Conversion and Management*, Vol. 154, 2017, pp. 380-386.
12. S. W. Ji, N. S. Myung, and T. S. Kim, "Analysis of operating characteristics of a polymer electrolyte membrane fuel cell coupled with an air supply system", *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 4, 2011, pp. 945-955.
13. D. K. Kim, H. E. Min, I. M. Kong, M. K. Lee, C. H. Lee, M. S. Kim, and H. H. Song, "Parametric study on interaction of blower and back pressure control valve for a 80-kW class PEM fuel cell vehicle", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 41, 2016, pp. 17595-17615.
14. J. I. Pukrushpan, "Modeling and Control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors", Ph. D Thesis, The University of Michigan, 2003.
15. Z. Abdin, C. J. Webb, and E. MacA. Gray, "PEM fuel cell model and simulation in Matlab-Simulink based on physical parameters", *Energy*, Vol. 116, 2016, pp. 1131-1144.