

# 압축기 성능 맵이 자동차용 가압형 고분자전해질형 연료전지 시스템 효율에 미치는 영향 연구

조동훈 · 김한상<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

## A Study of the Effect of Compressor Performance Map on the Efficiency of High-pressure Operating PEMFC Systems in Automotive Applications

DONGHOON CHO, HAN-SANG KIM<sup>†</sup>

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,  
172 Gongreung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

**Abstract >>** For the commercialization of fuel cell powered vehicle, it is highly important to improve the performance and efficiency of an automotive polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system. The performance and efficiency of PEMFC systems are significantly influenced by their operating conditions. Among these conditions, the system operating pressure is considered as the one of the main factors. In this study, to investigate the effects of operating pressure on the performance and efficiency of automotive PEMFC systems, two types of high-pressure operating PEMFC systems adopting two different compressors (i. e. different performance maps) are modeled by using MATLAB/Simulink environment. The PEMFC system efficiency and parasitic compressor power are mainly analyzed and compared for the two types of high-pressure operating PEMFC systems under the same system net power conditions. It is expected that this kind of study can contribute to provide basic insight into the operating strategies of high-pressure operating PEMFC systems for automotive use.

**Key words :** PEMFC(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)(고분자전해질형 연료전지), Operating pressure (작동 압력), Compressor(압축기), Performance map(성능 맵), Net power(순 출력)

### Nomenclature

$C_p$  : specific heat, J/kg·K  
 $c_1$  : modeling constant  
 $c_2$  : modeling constant  
 $c_3$  : modeling constant  
 $E$  : open circuit voltage (OCV), V

$i$  : current density, A/cm<sup>2</sup>  
 $i_{max}$  : current density that causes precipitous voltage drop, A/cm<sup>2</sup>  
 $HHV_{H_2}$  : hydrogen higher heating value, J/kg  
 $\dot{m}_{cw}$  : mass flow rate of stack coolant, kg/s  
 $\dot{m}_{H_2}$  : mass flow rate of hydrogen gas, kg/s  
 $P_{BOP}$  : parasitic load of BOP, W  
 $P_{compressor}$  : compressor consumption power, W  
 $P_{gross}$  : system gross power, W  
 $P_{H_2}$  : partial pressure of hydrogen, bar

<sup>†</sup> Corresponding author : hskim1101@seoultech.ac.kr

[ 접수일 : 2012.12.03 수정일 : 2012.12.24 게재확정일 : 2012.12.31 ]

Copyright © 2012 KHNES

- $P_{\text{humidifier}}$  : parasitic load of humidifier, W
- $P_{\text{net}}$  : net system power, W
- $p_{\text{O}_2}$  : partial pressure of oxygen, bar
- $P_{\text{pump}}$  : parasitic load of pump, W
- $P_{\text{stack}}$  : stack gross electric power, W
- $R_{\text{ohm}}$  : ohmic resistance,  $\Omega \cdot \text{cm}^2$
- $T_{\text{fc}}$  : fuel cell temperature, K
- $v_0$  : voltage drop at 0  $\text{A}/\text{cm}^2$ , V
- $v_{\text{act}}$  : activation overvoltage, V
- $v_{\text{conc}}$  : concentration overvoltage, V
- $v_{\text{fc}}$  : fuel cell voltage, V
- $v_{\text{ohm}}$  : ohmic overvoltage, V
- $W_m$  : mass flow factor,  $\text{kg}^{-1} \text{K}^{1/2} \text{bar}^{-1}$
- $W_{\text{rel}}$  : relative mass flow ratio

**Greek letters**

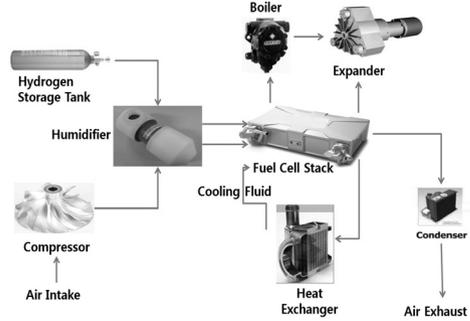
- $\gamma$  : specific heat ratio
- $\Delta p$  : pressure drop of stack coolant
- $\eta_c$  : compressor efficiency
- $\eta_{\text{pump}}$  : pump efficiency
- $\eta_{\text{total}}$  : fuel cell system efficiency
- $\Pi$  : pressure ratio
- $\rho$  : density of stack coolant

**Subscripts**

- 1 : inlet
- 2 : outlet
- act : activation
- conc : concentration
- cw : cooling water
- ohm : ohmic
- rel : relative

**1. 서 론**

지구 온난화, 공해 등 환경 문제와 더불어 석유 자원의 고갈 등으로 인하여 전 세계적으로 친환경, 무공해 자동차의 개발에 큰 관심이 집중되면서 자동차 업계는 친환경 자동차 분야의 기술 선점을 위하여 치열한 경쟁을 하고 있다.



**Fig. 1** Schematic diagram of the high-pressure operating PEMFC system

그 중 연료전지 자동차는 고효율, 청정 에너지를 동력원으로 하는 차세대 친환경 자동차로 인식되어 선진 자동차회사들에서 상용화 개발을 위한 적극적인 노력이 경주되고 있다. 그러나 연료전지 자동차의 양산 및 대중화를 위해서는 기술적인 측면과 인프라 구축 등 다양한 측면에서 획기적인 개선이 요구되고 있다. 특히, 고성능, 고효율의 연료전지 시스템의 개발은 상용화 구현을 위한 필수 불가결한 과제로 인식되고 있지만, 시스템 개발을 위해서는 고가의 실험 비용과 많은 시간이 요구되고 있는 상황이다<sup>1,2)</sup>.

일반적으로 연료전지 시스템의 성능과 효율은 시스템의 작동 조건(온도, 압력, 양론비 등)에 큰 영향을 받는데, 특히 연료전지의 작동 압력은 시스템 전체의 구성 및 성능, 효율을 좌우하는 핵심 인자로 인식되어 집중적인 연구의 대상이 되고 있다<sup>3-7)</sup>.

자동차용 연료전지 시스템의 경우 가압형과 상압형으로 크게 나뉘어져 개발이 진행되어 오고 있는데 가압형의 경우 상승된 공급 기체의 압력으로 인한 스택(stack)의 성능 향상, 필요 수증기량의 감소로 따른 습도 조절이 용이하다는 장점이 있지만 시스템에 적용되는 압축기(compressor)의 소모 동력을 최소화해야 하는 기술적인 문제를 안고 있다. 따라서 가압형 연료전지 시스템의 개발에서 압축기의 성능 및 효율에 따른 시스템의 효율 분석은 적합한 압축기의 선정 및 연료전지 시스템의 성능 및 효율 향상에 매우 중요하다.<sup>3,5)</sup>

본 연구에서는 MATLAB/Simulink를 이용하여 연

료전지 스택과 시스템 주변 장치(Balance of Plant, BOP)로 구성된 자동차용 가압형 연료전지 시스템을 모델링하고 2가지 종류의 서로 다른 압축기 성능 맵을 적용하여 시스템의 효율 및 성능을 비교, 분석하였다. 이를 통해 압축기 성능 맵에 따른 연료전지 시스템의 순 출력(net power), 압축기 소모 동력, 압축기의 효율 등을 분석하였다.

## 2. 연료전지 시스템 해석

### 2.1 자동차용 연료전지 시스템

Fig. 1은 본 연구에 적용된 자동차용 가압형 연료전지 시스템의 구성도이다. 가압형 시스템에서는 공급되는 공기는 압축기로 가압되어 가습기(humidifier)에 의하여 가습된 후 스택으로 공급된다.

#### 2.1.1 가정

실제 자동차용 연료전지 시스템 모델은 그 복잡성의 정도에 따라 종류가 매우 다양하다. 본 연구에서는 시스템의 주요 작동 변수의 영향을 효과적으로 살펴보기 위하여 단순화된 시스템 모델을 적용하였다. 본 연구에서는 연료전지 시스템 모델링 시 다음 가정을 적용하였다<sup>3,4)</sup>.

- 1) 연료전지 시스템 내의 공간적인 온도 분포는 고려하지 않는다.
- 2) 스택으로 공급되는 공기와 수소는 이상기체이다.
- 3) 공기와 수소의 양론비는 각각 2와 1.2이다.

### 2.2 연료전지 시스템 모델링

#### 2.2.1 단위 연료전지 모델링

단위 셀에서의 전압은 개회로 전압( $E$ )에 활성화 손실( $v_{act}$ ), 저항 손실( $v_{ohm}$ ), 농도 손실( $v_{conc}$ )을 고려하여 전압과 전류 밀도의 상관 식으로 식 (1)-(5)를 이용하여 계산하였다<sup>4)</sup>.

$$v_{fc} = E - v_{act} - v_{ohm} - v_{conc} \quad (1)$$

$$E = 1.229 - 0.85 \times (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (2)$$

$$v_{act} = v_0 + v_a (1 - e^{-\alpha i}) \quad (3)$$

$$v_{ohm} = i \times R_{ohm} \quad (4)$$

$$v_{conc} = i \left( c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \quad (5)$$

#### 2.2.2 스택 구성

본 연구에서는 단순화된 시스템 해석을 위하여 활성화 면적  $400\text{cm}^2$ 의 단위 셀을 구성하고 500개의 단위 셀을 적층시켜 스택을 구성하였다. 단순화된 해석을 적용하였으므로 스택 구성에 필요한 분리판의 종류, 유로 구조, 엔드 플레이트 및 이와 관련된 온도 분포 등은 고려하지 않았다.

스택의 출력은 단위 전지의 출력에 적층된 단위 전지의 수를 곱하여 산출하였다.

#### 2.2.3 압축기 모델링

일반적으로 자동차용 가압형 연료전지 시스템에 적용되는 압축기는 스크류(screw) 압축기와 원심(centrifugal) 압축기가 있는데 본 연구에서는 이 2종류의 압축기 성능 맵을 이용하여 모델링을 진행하였다.

##### 1) 압축기 소모 동력

압축기를 구동하는 데 필요한 동력은 식 (6)과 같이 계산되었다. 소모 동력의 산정에 필요한 압축기의 효율 ( $\eta_c$ )은 해당 압축기의 성능 및 효율 맵<sup>2,6)</sup>을 이용하여 얻을 수 있다<sup>2)</sup>.

$$P_{compressor} = C_p \frac{T_1}{\eta_c} \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \dot{m} \quad (6)$$

### 2) 압축기 성능 맵

Fig. 2는 참고문헌 (2)에 제시되어 있는 대표적인 스크류 압축기(Lysholm)에 대한 성능 맵이다. 압축기 효율은 식 (7)의 압력비  $\Pi$ 와 식 (8)의 질량 유동 인자(mass flow factor)  $W_m$ 를 이용하여 도출할 수 있다.

$$\Pi = \frac{P_2}{P_1} \tag{7}$$

$$W_m = \frac{\dot{m} \sqrt{T_1}}{P_1} \tag{8}$$

원심 압축기의 경우는 비교적 단단하며 신뢰성이 높아 자동차용으로 일반적으로 많이 사용되는데 압축기의 성능 맵은 스크류 압축기와 달리 압력이 급변하는 선(surge line)이 존재한다<sup>6)</sup>.

본 연구에서는 참고문헌 (6)에 제시되어 있는 성능 맵을 이용하여 원심 압축기의 효율을 도출하였다. 이 경우 사용된 상대 유량 ( $W_{rel}$ )은 해당 압축기의 허용 최대 유량인 0.076 kg/s를 기준으로 상대적인 수치로 식 (9)를 이용하여 계산하였다.

$$W_{rel} = \frac{W_m}{0.076} \tag{9}$$

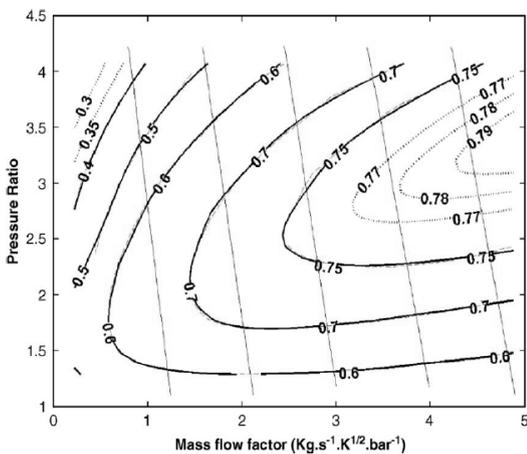


Fig. 2 Performance map for the screw compressor<sup>2)</sup>

### 2.2.4 주변 장치 모델링

#### 1) 가습기 소모 동력

가습기의 실제 소모 동력 계산을 위해 사용되는 히터의 효율과 열전달 효율은 각각 70%와 100%로 가정하였다.

#### 2) 펌프(pump)의 소모 동력

펌프의 구동을 위하여 이용되는 소모 동력은 식 (10)과 같이 계산된다. 단, 펌프의 소모 동력은 1kW 미만이므로 펌프의 효율( $\eta_{pump}$ )은 일정한 것으로 가정하였다.

$$P_{pump} = \frac{\dot{m}_{cw} \Delta p}{\rho \eta_{pump}} \tag{10}$$

### 2.2.5 시스템의 순 출력

시스템의 순 출력은 연료전지 스택 출력과 주변 장치에서의 소모 동력의 대수적인 차로 식 (11)과 같이 표현되며, 주변 장치의 소모 동력은 식 (12)를 이용하여 구할 수 있다.

$$P_{net} = P_{gross} - P_{BOP} \tag{11}$$

$$P_{BOP} = P_{humidifier} + P_{pump} + P_{compressor} \tag{12}$$

### 2.2.6 시스템의 효율

전체 시스템의 효율( $\eta_{total}$ )은 연료전지 시스템의 순 출력을 얻기 위해 공급된 수소의 양( $\dot{m}_{H_2}$ )과 수소의 고위 발열량( $HHV_{H_2}$ )을 통하여 식 (13)을 이용하여 계산하였다.

$$\eta_{total} = \frac{P_{net}}{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV_{H_2}} \tag{13}$$

### 2.3 연료전지 시스템의 주요 작동 변수 설정

본 연구에서는 연료전지 시스템의 순 출력을 고정

시켜 다양한 조건의 스택 온도와 작동 압력에 대하여 연료전지 시스템의 성능과 효율을 비교, 분석하였고 연료전지 시스템의 최대 순 출력 조건에서의 전체 시스템의 효율을 분석하였다.

본 연구에서 사용된 주요 시스템 작동 조건을 Table 1에 나타내었다. 2 종류의 압축기 성능 맵을 적용하여 Table 2에 제시된 바와 같이 연료전지 시스템의 다양한 순 출력 고정 조건에서 스택 온도와 공기극 압력을 주요 작동 변수로 지정하여 해석을 진행하였다.

### 3. 해석 결과 및 토론

#### 3.1 공기극 압력 변화에 따른 단위 셀의 성능 곡선

Fig. 3은 작동 온도 65°C에서 공기극 압력(1.8 - 3.2 bar)의 변화에 따른 단위 셀의 전류 밀도에 따른 출력 전압의 변화를 나타낸 것이다. 단위 셀의 성능은 공기극 압력이 증가함에 따라 효과적으로 증가하는 경향을 잘 나타냄을 확인할 수 있다.

#### 3.2 공기극 압력 변화에 따른 시스템의 효율

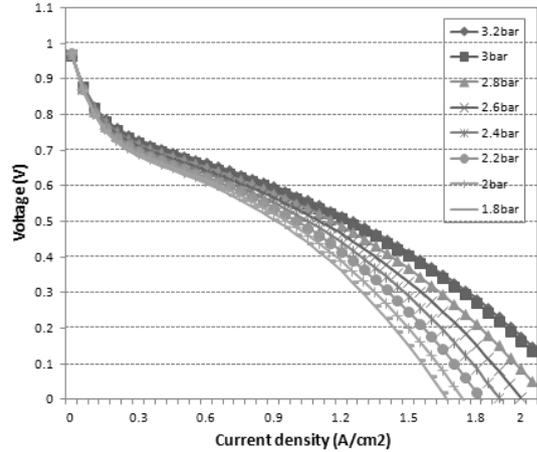
2 종류의 압축기에 대한 각각의 압축기 효율을 이용하여, 공기극 압력과 순 출력 변화에 따른 전체 시스템의 효율을 분석해 보았다. 스택의 온도는 65°C로 고정하여 진행하였다.

**Table 1** Simulated system conditions

Stoichiometry H <sub>2</sub>	1.2	Stoichiometry O <sub>2</sub>	2.0
Inlet humidity (%)	50	Outlet humidity (%)	100
No. of cells	500	Active area (cm <sup>2</sup> )	400

**Table 2** Simulated system variations

Net system power (kW)	30, 40, 50, 60, 70
Cathode air pressure (bar)	1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.2
Stack temperature (°C)	45, 50, 55, 60, 65, 70

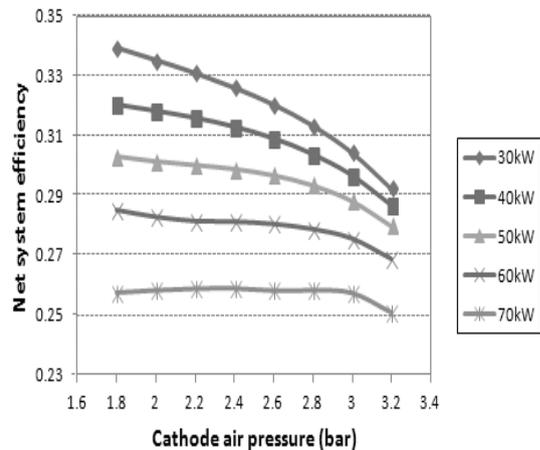


**Fig. 3** I-V polarization curves for cell operating temperature of 65°C and varying operating pressure from 1.8 to 3.2 bar

#### 3.2.1 스크류 압축기 적용 시 연료전지 시스템 효율

Fig. 4는 스크류 압축기를 이용한 경우 공기극 압력 변화에 따른 시스템 효율을 나타낸 것이다.

순 출력을 고정한 조건에서 스크류 압축기의 경우 작동 압력이 증가할수록 압축기로 공급되는 공기의 유량이 커져 압축기의 소모 동력이 증가하여 시스템의 효율이 작아지는 경향임을 확인할 수 있다.



**Fig. 4** Net system efficiency as a function of cathode air pressure under different net system power conditions (using screw compressor performance map)

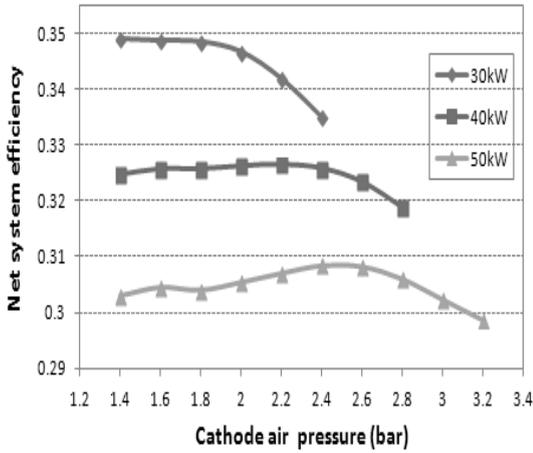


Fig. 5 Net system efficiency as a function of cathode air pressure under different net system power conditions (using centrifugal compressor performance map)

### 3.2.2 원심 압축기 적용 시 연료전지 시스템 효율

Fig. 5는 원심 압축기를 적용한 경우 공기극 압력 변화에 따른 연료전지 시스템 효율을 나타낸 것이다. 본 연구에서 적용된 원심 압축기의 경우 압력 급변선 때문에 작동 범위가 연료전지 시스템 순 출력 30~50kW로 제한됨을 알 수 있었다. 시스템 순 출력 20kW 이하에서 연료전지 시스템 작동 시에는 원심 압축기의 성능 맵에서 압력 급변선(surge line)을 넘어서 운전이 어렵다. 40kW와 50kW의 순 출력으로 작동 중에는 각각 공기극 압력 2.2 bar과 2.6 bar 부근에서 연료전지 시스템 최고의 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉 시스템 순 출력이 증가함에 따라 시스템 효율을 최대화할 수 있는 공기극 압력은 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

### 3.3 작동 압력 변화에 따른 압축기의 소모 동력

2 종류 압축기의 성능 맵을 이용하여 각각의 경우 압축기의 효율을 구하여 공기극 압력과 순 출력 변화에 따른 압축기 소모 동력을 분석하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 스크류 압축기와 원심 압축기를 사용한 경우의 공기극 압력에 따른 다양한 순 출력 조건에서의 압축기 소모 동력을 나타낸 것이다.

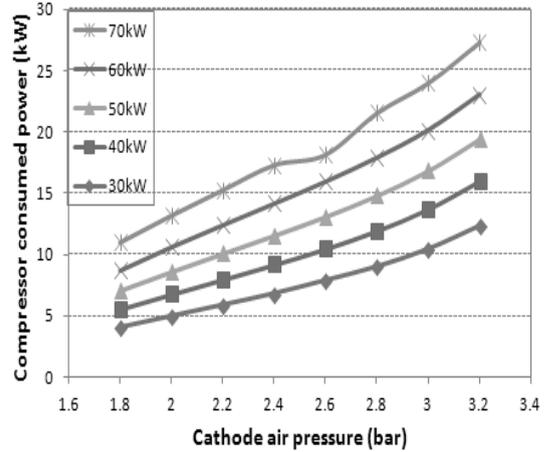


Fig. 6 Compressor consumed power as a function of cathode air pressure under different net system power conditions (using screw compressor performance map)

2 종류의 압축기 모두 시스템의 공기극 압력을 높이면 소모 동력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 원심 압축기를 사용했을 경우는 스크류 압축기를 적용한 경우와 비교할 때 공기극 압력 증가에 따른 소모 동력 증가율이 작아 작동 압력이 높아졌을 때 상대적으로 소모 동력이 작아짐을 알 수 있다. 이는 원심 압축기의 경우 압력 급변선의 존재로 다양한 연료전지 순 출력 조건에서 운전하는 데는 스크

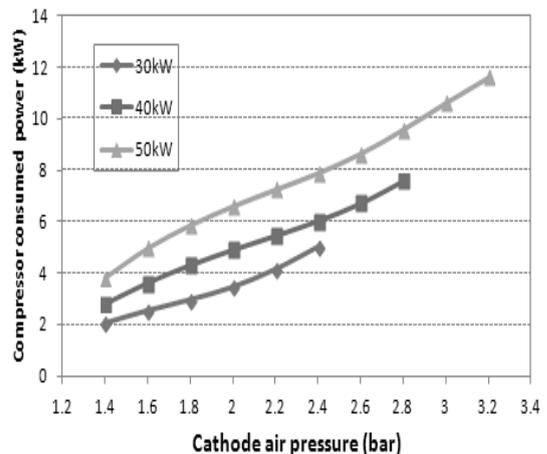


Fig. 7 Compressor consumed power as a function of cathode air pressure under different net system power conditions (using centrifugal compressor performance map)

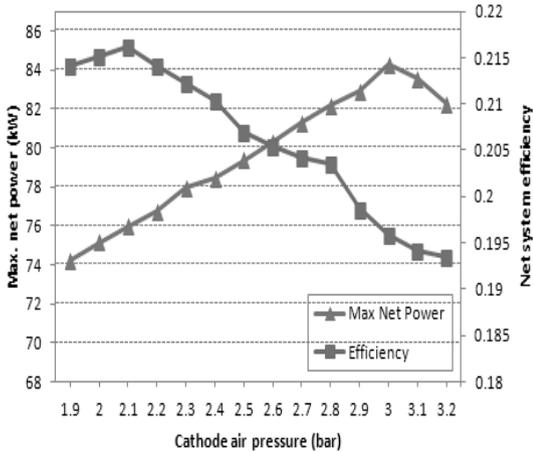


Fig. 8 Maximum net system power and system efficiency as a function of cathode air pressure (using screw compressor performance map)

류 압축기에 비하여 불리하지만, 압력 급변선 근처에서는 압축기 효율이 스크류 압축기에 비하여 우수하기 때문에 분석된다.

### 3.4 시스템 최대 순 출력 조건에서의 공기극 압력 변화에 따른 시스템의 효율

Fig. 8은 스크류 압축기를 적용한 경우 공기극 압력 변화에 따른 연료전지 시스템의 최대 순 출력 조건에서의 시스템 효율을 나타낸 것이다. 시스템 최대 효율을 얻을 수 있는 공기극 압력이 존재함을 알 수 있으며, 그 압력은 2.1 bar임을 확인하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 연료전지 스택과 몇 가지 주변 장치를 이용하여 자동차용 가압형 연료전지 시스템을 구현하여, 2 종류의 압축기의 성능 맵을 이용하여 연료전지 시스템의 성능과 효율에 대하여 비교, 분석하였으며, 아래와 같은 결과를 얻었다.

1) 스크류 압축기의 경우 압력 급변선이 나타나지

않고 비교적 넓은 범위의 조건에서 연료전지 시스템을 사용할 수 있다. 반면, 원심 압축기의 경우 압력 급변선과 관련하여 제한된 순 출력 조건에서만 연료전지 시스템을 사용할 수 있지만 제한된 범위 내에서는 스크류 압축기 대비 우수한 효율을 가지며, 압축기 소모 동력을 감소시키는 데 효과적이다.

- 2) 스크류 압축기의 경우 스택으로 공급되는 공기의 압력을 높일수록 시스템의 효율이 떨어지는 반면, 원심 압축기의 경우 스택으로 들어가는 공기의 압력을 높임에 따라 최적의 효율을 나타내는 공기 압력이 있음을 확인할 수 있다.
- 3) 시스템 최대 순 출력 조건에서는 스크류 압축기의 경우 스택으로 공급되는 공기의 압력과 시스템의 효율을 비교해 보았을 때 최대의 효율을 나타내는 공기극 압력(2.1 bar)이 존재함을 확인할 수 있다. 반면, 원심 압축기의 경우 최대 순 출력 조건에서는 허용 유량 조건을 넘어서 최적 공기극 압력은 얻을 수 없다.
- 4) 본 연구의 결과를 토대로 자동차용 가압형 연료전지 시스템의 작동 압력 조건에 따른 적합한 압축기를 선정하는 데 기초 데이터로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

“본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구 지원비로 수행되었습니다.”

## 참 고 문 헌

1. Seung Bin Lim, “R&D Program Trend of Green Car for Greengrowth”, KSAE, 2010, 10-A0544.
2. J. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons, Ltd., UK. 2003.
3. H.-S. Kim, D.-H. Lee, K. Min, and M. Kim, “Effects of Key Operating Parameters on the Efficiency of Two Types of PEM Fuel Cell

- Systems”, *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 4, 2005, pp 1018-1026.
4. J. T. Pukrushpan, “Modeling and Control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors”, Ph. D Thesis, The University of Michigan, 2003.
  5. 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.
  6. R. Tirnovan, A. Miraoui, and S. Giurgea, “Modeling and Analysis of a High Pressure Operating Fuel Cell Hydrogen/Air system”, *IEEE Conference ICCEP (International Conference on Clean Electrical Power)*, Vol. 86, 2007, pp. 433-438.
  7. J. Kim, Y. Noh, U. Jeon, and J. Lee, “Modeling of Hydrogen Recirculation System for Fuel Cell Vehicle”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 4, 2011, pp. 481-487.