

PEM 연료전지 자동차의 급기 시스템의 모델링 및 분석

장현탁, 강이석..

*대천대학 자동차기계학부, **충남대학교 기계설계공학과

Modeling and Analysis of the Air Supply System for Vehicular PEM Fuel Cell

*Hyuntak Jang, Esak Kang

*Dept. of Automotive · Mechanical Eng. Daechon College
Dept. of Mechanical Design Eng. ChungNam National University

ABSTRACT

This paper focuses on developing a model of a PEM fuel cell stack and to integrate it with realistic model of the air supply system for fuel cell vehicle application. The fuel cell system model is realistically and accurately simulated air supply operation and its effect on the system power and efficiency using simulation tool Matlab/Simulink. The Peak performance found at a pressure ratio of 3, and it give a 15mV increase per cell. The limit imposed is a minimum SR(Stoichiometric Ratio) of 2 at low fuel cell load and 2.5 at high fuel cell load.

주요기술용어: PEMFC(고분자 전해질형 연료전지), Fuel cell stack model(연료전지 스택모델), Compressor(압축기), Performance map(작동개요), System operation line(작동 채계)

1. 서 론

연료전지는 화학연료에 내재하고 있는 화학에너지지를 전기화학적 반응경로를 통해 전기에너지로 변환시키는 청정 에너지 변환 장치이다. 고분자 전해질형 연료전지(Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC 또는 Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 수소 이온 전도성 고분자막을 전해질로 사용하는 연료전지로, 높은 전력밀도

및 효율을 얻을 수 있다. 또한 부식문제가 없고 100°C 이하의 낮은 온도에서 작동하기 때문에 미래의 차세대 연료전지 자동차의 동력원으로 연구에 박차를 가하고 있다.

현재 직접 수소를 연료로 사용하는 직접 수소(Direct Hydrogen) 연료전지 자동차가 산업체에서 활발히 개발되고 시험중이다^{1, 4)}. 그리고 수소연료 저장탱크의 용기재료나 충전 압력의 제한과 수소 인프라스트럭처(Infrastructure)의 부족으로

인한 현실적 대안으로 간접 메탄올(Indirect Methanol), 간접 탄화수소(Indirect Hydrocarbon)를 연료로 각각 사용하는 시범자동차의 제작을 위한 개발이 이루어지고 있다. Fig. 1은 직접수소 연료전지 시스템을 보여준다³⁾. 연료전지 자동차를 구성하는데 연료전지 스택, 연료 공급 시스템, 급기 시스템, 냉각 및 물 관리 시스템, 전력 변환 장치, 동력 제어 장치, 축전지 관리 시스템 등을 통합해야 한다. 연료전지 스택의 전력은 스택에서 유도된 전류와 스택 전압에 의존한다. 연료전지 전압은 전류, 반응물 분압, 온도 그리고 막 습도의 함수이다. 연료전지 스택의 공기 제어 시스템은 스택 전압 감소를 줄이기 위해서 막을 통과하는 반응물 분압, 막 수화, 최적 온도, 고효율과 내구성을 요구한다.

본 논문에서는 연료전지 스택 모델과 연료 전지 급기 시스템의 모델이 결합된 연료 전지 스택 모델을 제안하였다. 제안된 연료 전지 시스템 모델은 단순한 정상 상태 모델로 연료전지 시스템

성능으로 정확히 표현하고 효과적으로 계산되며, 입력/출력 구조를 갖는다. 그리고, 연료전지 스택과 급기 시스템의 상호 작용 및 용량 선정의 변화에 의한 영향, 연료전지의 총 출력 전력의 운전에 대한 영향에 대하여 논의하고자 한다. 또한, 시스템 효율 측면에서 공기 압축기의 손실 전력을 최소화하고 반응에 충분한 최적 질량유량과 압축비를 살펴보았다.

2. 연료전지 스택모델

수소/산소 연료전지의 반응은 다음과 같이 표현된다.

anode(연료극):



cathode(산소극):

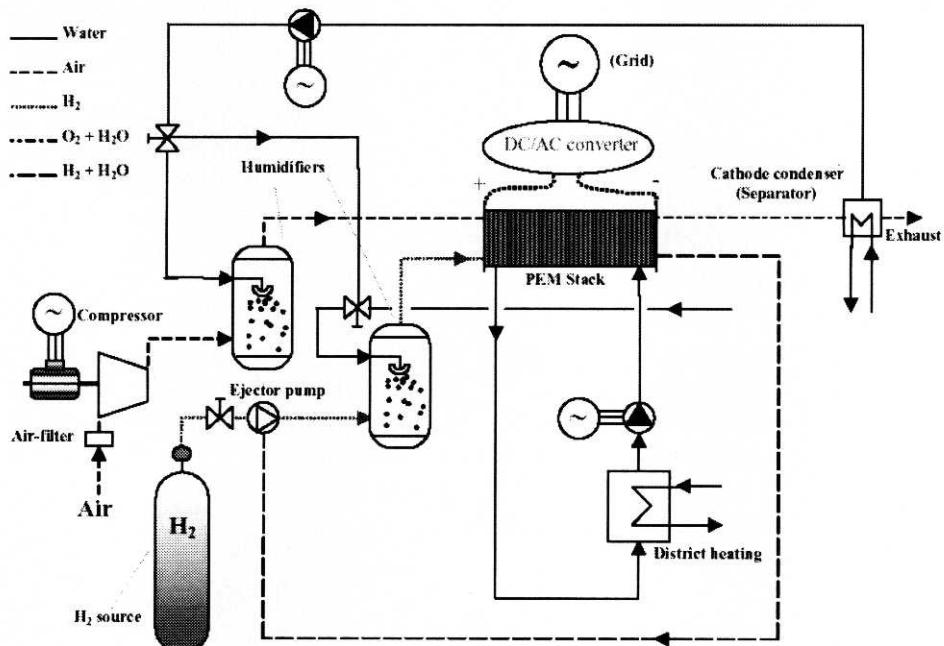
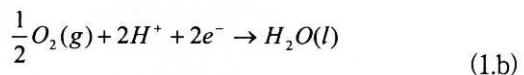
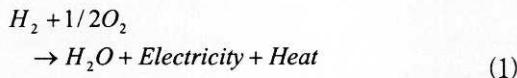


Fig. 1. Direct Hydrogen fuel cell system schematic

반쪽반응을 결합하여 총 반응식은 다음과 같이 표현된다.



연료전지에서 가역 일은 전기적 일로 정의된다. 셀의 기전력은 화학반응의 자유에너지 변화에 대하여 전기화학반응이 일어나면서 cathode 가역 전위와 anode 가역 전위의 차로 인해 회로를 통해 이동한 전하량으로 정의된다. 따라서, 전체 전기화학 반응으로 단위 연료 전지의 최대 일은 이동한 전자수 z 가 포함되어야 한다.

$$W_e = \Delta G = -zFE \quad (2)$$

여기서 ΔG 는 자유에너지 변화, z 는 반응 연료의 $kmol$ 당 이동한 전자수²⁾, E 는 셀의 전위(V), F 는 페러데이 상수(96,487 Coulombs / mole) 만약 반응물과 생성물이 표준상태라면,

$$\Delta G^0 = -zFE_R^0 \quad (3)$$

여기서 E_R^0 는 표준상태 가역 전위, 첨자⁰는 표준상태 ($25^\circ C, 1atm$)

이상 기체 혼합물에 대해서 Gibbs 자유에너지

$$G_i = G_i^0 + n_i RT \ln\left(\frac{P_i}{P_i^0}\right) \quad (4)$$

여기서 P_i 는 i 성분의 분압, n_i 는 i 성분의 몰수, G_i^0 는 표준상태의 이상기체 i 성분의 Gibbs 자유에너지

수소/산소 연료전지 화학반응식에 대한 자유에너지 변화는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \cdot \ln\left[\frac{a_{H_2O}}{a_{H_2} a_{O_2}^{1/2}}\right] \quad (5)$$

여기서, a 는 반응물과 생성물의 활성도로 반응물 분압과 등가이다.

식(3)을 식(5)에 대입하고 셀 전압으로 재정리하면, 기전력의 함수로 실제 반응물 분압이 결합

된 Nernst 식을 얻는다

$$E = E_R^0 + \frac{RT}{2F} \cdot \ln\left(\frac{p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) \quad (6)$$

여기서, E_R^0 는 활동도가 1 일 때의 기준전위표준 상태 가역 전위

생산된 물(H_2O)이 액체 상태이므로, 물 분압은 1로 설정하면 다음식을 얻는다.

$$E = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} \cdot (\ln(p_{H_2}^*) + 1/2 \ln(p_{O_2}^*)) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E_R^0 &= -\Delta G / zF \\ &= -(-237,200J / 2 \times 96,487J/V) \\ &= 1.229V \end{aligned} \quad (8)$$

정압 조건에서 자유에너지 변화가 온도 변화의 영향을 고려한 따른 전위식으로 확장하여 유도 할 수 있다²⁾.

$$E^o = E_R^0 + (T_k - T_0) \left(\frac{\Delta S^o}{nF} \right) \quad (9)$$

여기서, T_0 는($298.15K$) 표준상태 온도 주어진 반응의 엔탈피 변화는 거의 일정하므로 기준 전위는 온도에 따라 변하게 된다.

$$E^o = \beta_1 + \beta_2 T_k \quad (10)$$

여기서,

$$\beta_1 = 1.229 - \frac{298.15 \Delta S^o}{zF} \quad (10.a)$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta S^o}{zF} \quad (10.b)$$

표준상태 엔트로피 변화에 대해서 문현 값²⁾을 사용하면 이 식의 β_2 의값은 $-0.85 \times 10^{-3} V/K$ 로 계산된다. 따라서 개회로 출력전압은 온도와 압력의 변화에 따른 식으로 표현 할 수 있다⁶⁾.

$$E_{Nernst} = 1.299 - 8.5 \times 10^{-4} (T_k - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_k [\ln p_{H_2}^* + 0.5 \ln p_{O_2}^*] \quad (11)$$

여기서, $p_{H_2}^*$ 는 anode의 촉매/가스 계면에서의 수소 분압(atm), $p_{O_2}^*$ 는 cathode 촉매/가스 계면에서의 산소 분압(atm)

그러나, 실제로 셀을 운전하여 전류를 흐르게 하면, PEM 연료전지의 출력전압은 Nernst 식으로부터 이론적으로 구한 개회로 출력 전압보다 과전압(활성화 손실, 농도 과전압 그리고 전극, 촉매 층, 전해질 막의 음 저항)을 뺀 값이다. 이것은 다음식으로 표현된다.

$$V_{fc} = E - \eta_{con} - \eta_{ohmic} - \eta_{act} \quad (12)$$

이들 PEM 연료전지의 실험 데이터로부터 전기화학 반응의 파라미터로 연료전지의 이론적인 모델은 복잡한 물질전달과 전기화학, 열역학, 유체역학 등 상세한 현상을 제공하지만, 유연하지 않아서 급기 시스템에 통합하기 적용하기 힘들다. 한편, 경험적 모델은 실험 데이터를 통계적 기법으로 구한 모델로 적용범위와 운전조건에 따라 수정해야 한다. 그러나, 반 경험적 모델은 반응 내의 기본 현상을 염밀하게 염밀하게 반영하지 않지만 비교적 단순하고, 반응의 수지식을 근거한 모델이기 때문에 유효하는 근본적인 이점을 갖는다. 따라서 Ballard Mark V PEM fit 하여 모델링 한 것을 사용한다²⁾.

활성화 분극은 계면에서 일어나는 전기화학반응이 진행하려면 활성화 장벽을 극복하는데 전위 손실이 발생한다. 활성화에 의한 전압 손실 η_{act} 은 Amphlett가 제안한 식으로부터 상수 값을 대입하고 실험적 파라미터를 fit 하여 구한 식을 사용한다²⁾. 전류 밀도와 온도, 반응 산소의 농도에 직접 관련되어 있으며 다음식으로 계산된다^{2,5,6)}.

$$\eta_{act} = -0.9514 + 3.12 \times 10^{-3} T_k + 7.4 \times 10^{-5} T_k \cdot \ln(c_{O_2}^*) - 1.87 \times 10^{-4} T_k \cdot \ln(i) \quad (13)$$

여기서, $c_{O_2}^*$ 는 산소농도, 전류 밀도 i 는 다음식을 사용하여 계산한다.

$$i = I_{fc} / A_a \quad (14)$$

여기서, A_a 는 연료전지스택의 활성화 면적, I_{fc} 는 단위 연료 전지의 전류

식(13)에 사용되는 $p_{H_2}^*$, $p_{O_2}^*$ 분압과 $c_{O_2}^*$ 농도는 다음과 같은 과정으로 얻을 수 있다.

첫번째로, 물의 포화압력 $P_{H_2O}^{sat}$ 은 연료전지의 운전온도에서 포화수증기압에 의해서 결정된다.

$$P_{H_2O}^{sat} = 10^{-2.1794 + 0.02953T_c - 9.1837 \times 10^{-5} T_c^2 + 1.4454 \times 10^{-7} T_c^3} \quad (15)$$

여기서, T_c 는 섭씨 온도

다공성 cathode $p_{O_2}^*$ 와 $p_{H_2}^*$ 는 Stefan-Maxwell 식을 사용하고 상수 값을 대입하면 다음식으로 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$p_{H_2}^* = 0.5 P_{H_2O}^{sat} \cdot \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{1.653i}{T^{1.334}}\right) x_{H_2O}^{anode}} - 1 \right] \quad (16.a)$$

$$p_{O_2}^* = P_{H_2O}^{sat} \cdot \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{4.192i}{T^{1.334}}\right) x_{H_2O}^{cathode}} - 1 \right] \quad (16.b)$$

여기서 $x_{H_2O}^{cathode}$ 와 $x_{H_2O}^{anode}$ 는 cathod와 anode에서 물의 물 분율 $x_{H_2O}^{cathode}$ 와 $x_{H_2O}^{anode}$ 의 물의 물 분율은 각각 다음식에서 계산된다.

$$x_{H_2O}^{cathode} = \frac{P_{H_2O}^{sat}}{P_{air}} \quad (17.a)$$

$$x_{H_2O}^{anode} = \frac{P_{H_2O}^{sat}}{P_{H_2}} \quad (17.b)$$

P_{air} 와 P_{H_2} 는 공기와 수소의 압력식(17.a)과

(17.b)을 식 (16.a)와 (16.b)에 대입하고 재정리하면 다음식으로 표현된다.

$$\dot{p}_{O_2}^* = \frac{p_{air}}{\exp\left(\frac{4.192i}{T^{1.334}}\right)} - p_{H_2O}^{sat} \quad (18.a)$$

$$\dot{p}_{H_2}^* = 0.5 \frac{p_{H_2}}{\exp\left(\frac{1.653i}{T^{1.334}}\right)} - p_{H_2O}^{sat} \quad (18.b)$$

공기와 수소의 압력은 보통 연료전지 스택 내부에서 일정한 압력이 유지하도록 동일하게 선택한다.

그리고, 액상과 기상 계면에서 용해된 산소의 농도 $c_{O_2}^*$ 는 *Henry's law*의 형태로 계산된다.

$$c_{O_2}^* = \frac{\dot{p}_{O_2}^*}{5.08 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T_k}\right)} \quad (19)$$

한편, 옴 저항은 고분자 전해질막에서의 이온 이동에 의한 저항으로 생긴다. 이동의 저항은 온도 T_k 와 전류밀도 i 같은 파라미터에 종속적이다. 옴 저항에 의한 전압 손실 η_{ohmic} 는 옴 법칙의 정의로 표현된다.

$$\eta_{ohmic} = -i \cdot R \quad (20)$$

$$R = (1.605 \times 10^{-2} - 3.5 \times 10^{-5} T_k + 8.0 \times 10^{-5} i) \quad (20.a)$$

농도 분극은 반응물질이 전기화학반응 활성 계면으로 전달될 때의 물질 전달 속도의 한계에 기인한다. 즉, *Nernst* 식이 기전력과 농도 과전압의 결합된 식이라는 정의로부터 다음식으로 표현된다.

$$E - \eta_{conc} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} (\ln(p_{H_2}^*) + 1/2 \ln(p_{O_2}^*)) \quad (21)$$

또한, 연료전지 시스템의 생산되는 전력은 다음식으로 계산된다.

$$P_{fc} = n_{stack} \cdot N \cdot V_{fc} \cdot i \cdot A_a \quad (22)$$

여기서, n_{stack} 은 N 은 스택에서 셀 수 시스템에서 스택 수

회부회로를 통해 이동한 전자의 이동 속도를 토대로 전류는 다음식으로 기술된다.

$$I_{fc} = F \frac{dn_{e^-}}{dt} \quad (23)$$

여기서, n_{e^-} 는 이동한 전자량($kmol$), t 는 시간(s)

수소가스의 소모량과 전기화학 반응에 따라 발생되는 전류사이에는 다음과 같은 *Faraday* 법칙의 화학 양론식이 성립한다.

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = M_{H_2} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{dn_{e^-}}{dt} \quad (24)$$

여기서, 수소의 몰질량($kg / kmol$)

식(24)에 식(23)을 대입하면,

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{M_{H_2}}{2F} I_{fc} \quad (25)$$

실제로 연료전지 들어가는 수소는 반응을 보장하기 위해서 당량비가 1이상이고, 셀의 개수가 N 인 스택에 대하여 수소 질량유량 식을 얻는다³⁾.

$$\dot{m}_{H_2} = SR_{H_2} \cdot N \cdot \frac{M_{H_2}}{2F} I_{fc} \quad (26)$$

수소 질량유량식과 유사한 방법으로 공기 질량유량식도 유도 할 수 있다. 수소 1몰 반응에 대하여 산소 1/2몰이 반응하고, 만약 공기를 사용할 경우에 공기 중의 산소 조성비를 고려하여 표현한다.

$$\dot{m}_a = \frac{1}{2 \cdot 0.21} \frac{M_a}{2F} I_{fc} \quad (27)$$

실제로 연료전지 들어가는 산소는 반응을 보장하기 위해서 당량비가 1이상이고, 셀의 개수가 N인 스택에 대하여 산소 질량유량 식을 얻는다.

$$\dot{m}_a = SR_a \cdot N \cdot \frac{1}{2 \cdot 0.21} \frac{M_{O_2}}{2F} I_{fc} \quad (28)$$

실제 연료전지 효율은 앞에서 살펴 보듯이, 다양한 손실로 상당히 작아진다. 단위 연료전지 효율은 연료 입력에 대한 연료전지 출력 전력으로 정의된다.

$$\eta_{fc} = \frac{\text{electrical power output}(P_{fc})}{\text{fuel input}(F_{in})} \quad (29)$$

연료 입력은 수소 소모율(kg/s)과 엔탈피(ΔH)의 곱이다. 수소의 고위 발열량은 $142,000 kg/s$ 이다.

$$F_{in} = \frac{M_{H_2} \Delta H}{2F} I_{fc} \quad (30)$$

식(30)의 $\frac{M_{H_2} \Delta H}{2F}$ 항은 $1.482(V)$ 값을 갖는다.

식 (29)에 대입하고 정리하면, 연료전지 효율은 실제 작동 전압과 $1.482(V)$ 의 비율이다.

$$\eta_{fc} = \frac{V_{fc}}{1.482} \quad (31)$$

3. 급기 시스템 모델

급기 시스템-*cathode* 루프는 연료시스템-

anode 루프와는 독립적이며, 연료전지 스택의 설계된 용량에 따라서, *cathode* 측의 공급되어야 하는 공기의 질량유량과 압력의 결정으로 부품 선정 (sizing)이 결정된다. 또한, 연료전지 시스템의 운전 조건에 따라 최소의 손실부하를 얻기 위하여 산소분압의 제어가 요구된다. 연료 전지와 공기 압축기 사이에 성능 최적화를 얻기 위하여 매칭(matching) 문제가 증가한다. 급기 시스템은 물-열 조절기와 서로 상호 연관되어 있다. PEM 연료전지 시스템에서 높은 전류 밀도를 얻기 위하여 고분자 막은 매우 중요한 인자이다. 만약 막이 견조 되면 이온 전달이 어려워져 연료전지의 성능이 저하되므로, 일반적으로 공기에 외부 가습기에서 과포화 시킨 후 연료 전지 내부로 공급한다.

공기 압축기의 압축과정이 등 엔트로피이고 이상기체로 가정하고, 정상상태 열역학 1법칙을 정의로 부터, 압력이 P_1 에 P_2 로 압축하기 위해 필요한 비 일은 얻는다¹⁰⁾.

$$-W_{is} = \frac{k}{k-1} R T_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (32)$$

이 과정은 이상적인 가역 단열 과정이므로, 실제 조건으로 보상하려면 등 엔트로피 효율을 사용한다.

등 엔트로피 효율은 등 엔트로피 조건에 대한 실제 엔트로피 조건으로 차이며, 엔트로피 변화 비율이다

$$\eta_{is} = \frac{h_{2,is} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2,is} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (33)$$

등 엔트로피 온도 $T_{2,is}$ 는 이상적 상태로 이루는 경우이다. 압축기에 가해진 동력을 완전히 압축기 내부의 유체의 온도를 증가시키는데 사용되었다. 이 온도는 직접적으로 측정되지 않기 때문에, 식

(33)은 압력 비로 재정리하여 사용한다.

$$\eta_{is} = \frac{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1} \quad (34)$$

실제 요구되는 비일은 다음의 공식이 된다.

$$-W = \frac{k}{k-1} R T_1 \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{is}} \quad (35)$$

공기 압축기를 작동하는데 필요한 실제 동력은 단순히 비일과 공기 질량유량의 곱과 같다.

$$P_c = \dot{m}_a W \quad (36)$$

압축기 질량유량은 *Allied Signal* 의 공개된 제품 데이터의 압축기 성능 맵으로 주어 값을 이산화하여 사용한다.⁸⁾ 성능 맵에서, 질량유량과 효율은 알고 있는 변수, 보통 속도와 압력 비의 함수로 주어진다. 압축기 성능 데이터의 조건표 (*lookup table*)의 데이터 값은 최소 자승법을 통하여 온라인으로 추정하여 사용한다⁷⁾.

$$\dot{m}_c = f_1 \left(N_c, \frac{p_2}{p_1} \right) \quad (37)$$

$$\eta_c = f_2 \left(N_c, \dot{m}_c \right) \quad (38)$$

연료전지 내에서 전자가 이동하는 동안에 수분은 막을 통해 이동하는 수소이온을 따라 *anode*에서 *cathode*로 이동하게 되며, 이러한 현상은 막의 *anode*쪽은 건조시키고 막의 *cathode* 표면은 물 범람(*water flooding*) 형성하게 된다. 따라서, *anode*에서는 막이 건조되는 것을 방지하기 위하여 가습기에서 공기에 수분을 공급해야 한다.

공기-물 수증기의 혼합물에서 절대 습도는 1 kg의 건조 공기 속에 함유된 수증기의 kg으로 정의된다. 물 수증기 분자량은 18.02, 공기의 분자량은 28.97을 이용하여 절대 습도를 kg H₂O/kg dry air 으로 나타내면

$$\frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} = \frac{m_v}{m_a} = \frac{kg H_2 O}{kg mol air} \quad (39)$$

식(39)을 가습기에서의 분사되는 물의 질량유량으로 정리하여 표현한다.

$$\dot{m}_v = \frac{18.02}{28.97} \frac{p_v}{p_{c,in} - p_v} \dot{m}_a \quad (40)$$

공기-물 수증기 혼합물에서 포화 된 양은 분압 *p_v*와 같은 온도에서 포화수증기압수증기 *p_g*의 비로 나타내는 습도를 상대 습도라 한다.

$$\phi_a = \left(\frac{p_v}{p_g} \right)_{T,p} \quad (41)$$

식(41)을 식(40)에 대입하여 정리하면 가습기에 요구되는 물의 질량유량이 계산된다.

$$\dot{m}_v = 0.622 \cdot \dot{m}_a \cdot \frac{\phi_a p_g}{p_{c,in} - \phi_a p_g} \quad (42)$$

4. 전산 모사

Table 1은 연료 전지 스택의 모델에 주요한 파라미터를 정리 요약한 것이다.

이 연구의 전산 모사에서는, 공기 압축기의 입구의 공기의 온도 25°C, 압력은 1atm, 상대습도는 50%RH로 가정하였다.

Table 1. Fuel cell system parameter

Fuel cell gross power	67 kW
Fuel cell area	675cm ²
Number of cells in stack	210
Voltage range	140~190V
Current range	0~475A
Operating temperature	353.15 K
Initial fuel cell relative humidity	75 %

Fig. 2의 압축기 성능 맵은 Matlab 프로그램에 사용에서 조건표로 사용하였으며, 2차원 정상상태 형태의 속도 선과 데이터 점들을 보여주고 있다. 속도선의 범위는 10kpm부터 105kpm까지이다. 압축기의 질량은 100g/s, 압력 비는 3.5까지 작동 범위를 가지고 있다.

5. 결 과

최적 압력은 연료전지 스택 전압 이득과 이로 인

해서 생기는 압축기 전압 손실의 차, 즉 순 이득이 최대인 값이다. 압력 p_1 이 p_2 로 증가 시의 단위 전지 당 전압 이득은 다음과 같다.

$$V_{gain} = C \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (43)$$

여기서, C 는 상수이며, 막 특성 및 가습에 의존하며, 실험적으로 이 값은 0.03~0.1 범위에 있다.

공기를 압축하는데 필요한 동력인 식(36)으로부터 전압 손실을 얻을 수 있다.

$$V_{loss} = 3.58 \times 10^{-7} \times \frac{T_1}{\eta_m \eta_C} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0.286} - 1 \right) \cdot SR_a \quad (44)$$

식(43)와 식(44)의 차는 순 전압 이득이다.

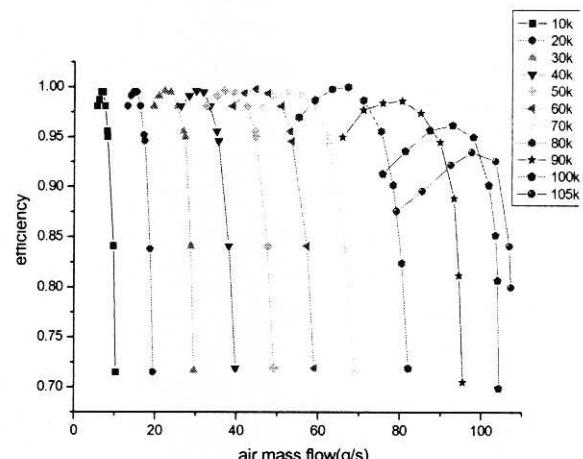
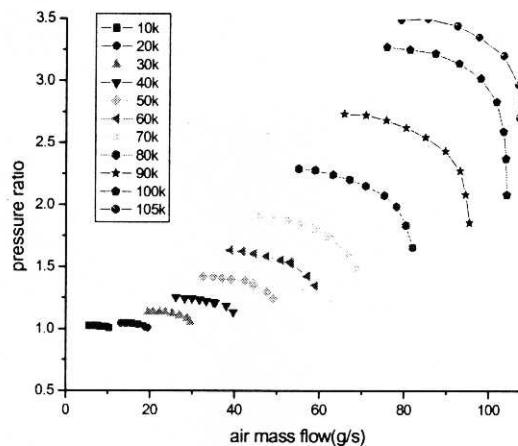


Fig. 2. Compressor pressure and efficiency lines versus mass flow and rotational speed.

$$\begin{aligned} \Delta V_{net,gain} &= V_{gain} - V_{loss} \\ &= 3.58 \times 10^{-7} \times \frac{T_1}{\eta_m \eta_C} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0.286} - 1 \right) \cdot SR_a \end{aligned} \quad (45)$$

Fig. 3은 식(45)를 기초로 한 공기 압축기의 운전압력의 범위를 1~3.5로 변화시키면서 $SR=1.75$, 2, 2.5 따른 순 전압 이득을 보여준다. $SR = 2.5$ 이 상 값에서는 공기의 질량유량의 증가에 따라 전압이득이 압축기 구동에 의한 전압 손실을 초과함을 알 수 있다.

따라서, 연료전지 시스템이 고 부하일 때는 당

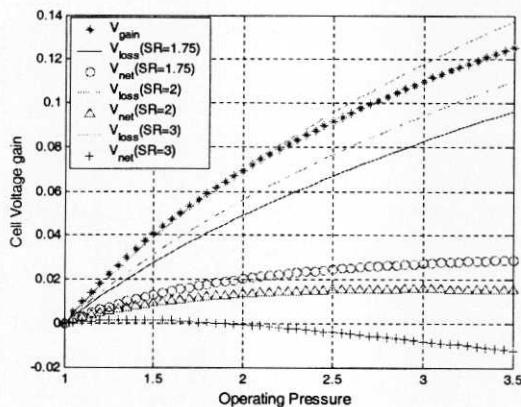


Fig. 3. Net voltage gain as a function of operating pressure and SR.

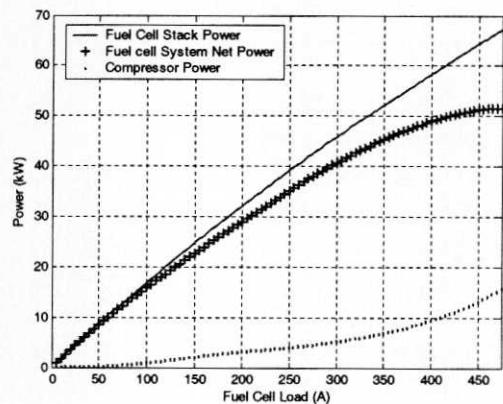


Fig. 4. Fuel cell stack and fuel cell system power.

량 비는 2.5이하로 운전하고, 저 부하 일 때는 연료전지의 반응을 보장하기 위해서 2로 낮추어 운전하는 것이 최적임을 알 수 있다. 그리고, 운력 압력이 3atm을 초과하면서 순 전압 이득이 17mV 이상 증가하지 않음을 알 수 있다. 따라서 압축기 모터는 가변적으로 1-3atm 범위에서 연료전지 시스템의 부하에 따라 제어해야 한다.

Fig. 4는 연료전지 스택 전력과 압축기 구동에 요구는 동력으로 인한 연료전지 시스템 출력의 차이를 보여준다. 또한, 공기 압축기의 전력 손실과 이득을 보여준다. 연료전지의 운전 온도를 80°C 고정하고 전산모사 한 결과, 연료 전지 스택의 최

대 동력은 67kW이고, 연료전지 시스템 순 최대동력은 52kW이다.

작동 선은 연료전지 시스템에 사용되는 공기의 압력 비와 질량유량의 스케줄(schedule)이다. 요구 공기량은 특정한 부하에 의해 요구되는 공기량과 당량 비와의 곱이다. 일반적으로 단위 전지 내의 압력은 반응 기체의 배출구에 연결된 후 압조절기(back pressure regulator)로 제어 된다. 따라서, 연료 전지의 전체 부하에 대한 정상상태에서 최고의 시스템 효율(스택, 압축기)을 얻도록 압축기의 작동 선을 찾는다.

Fig. 5의 실제 작동 선은 연료전지 시스템의

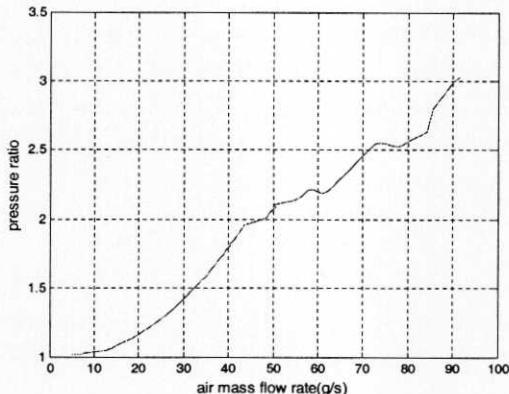


Fig. 5. compressor operating line.

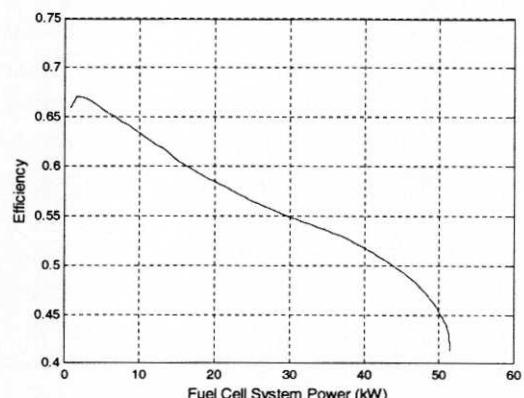


Fig. 6. Fuel cell system efficiency.

저·고 부하에서의 당량 비는 2-2.5으로 변하며, 각각의 요구 질량유동과 압력 비에서 공기 압축기의 단열 효율의 피크 값을 연결한 선이다. 저 질량유량에서 압력 비는 거의 1에 가까우며, 최고 질량유량에서 압력 비는 3.2에 접근한다. 이 선은 다소 고르지 않고 변동이 심하다. 이런 이유는 압축기 성능 맵(map)에서 운전 선이 서지 영역으로 진입하는 것을 방지하는 알고리즘에 의한 것이다.

Fig. 6는 터보 압축기가 있는 연료전지 시스템의 효율선이다. 이 선도는 터보 압축기의 작동 선으로 공기 질량유량과 압력비가 제어되어 운전 할 때의 연료전지 시스템 효율선의 거동을 보여 준다. 저 부하 영역에서 효율은 거의 0.65이며, 고 부하 영역에서 터보 압축기에 요구하는 압력의 증가로 효율이 0.4로 다소 비례적으로 감소한다.

연료전지 자동차는 대기 조건이 고온, 저온, 또는 상대습도가 극히 높거나 낮은 조건으로 운행 된다. PEM 연료전지에서 물 수지는 공기 가습에 필요한 물의 양에서 수소-산소 반응으로 cathode 측에서 생성된 물과 anode에서 cathode로 이동한 물의 양과 차이다.

Fig. 7은 압축기의 최적 작동 선에서 가습기의 3가지 입구 조건(온도와 상대 습도)에 따른 물 수지의 전산모사의 결과를 보여준다. 3 가지 조건 중에서 고온 (50°C), 높은 상대 습도 (100% RH)는 저온(0°C), 낮은 상대습도 (0% RH)보다 최대 부하에서 물 수지에 9 g/s 차이를 보인다. 저 부하에서 연료전지는 저압력으로 작동하므로 물의 생산양은 적으며, 물 수지는 음 (-) 영역에 존재 하며, 가습에 필요한 물의 양보다 생산된 물의 양이 작다.

그런데, 20-25kW 이상에서 물 수지는 영(zero) 점을 초과한다.

6. 결 론

고분자 연료 전지 자동차의 연료전지 스택 모

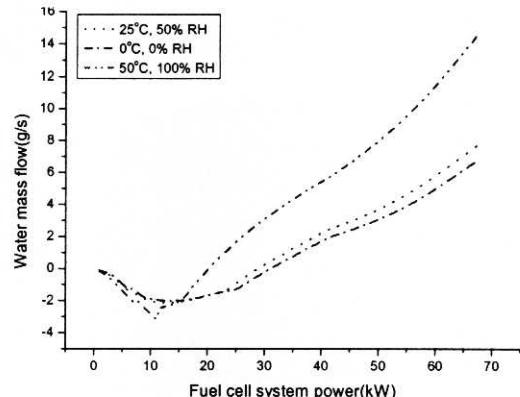


Fig. 7. Water balance at inlet condition.

델과 급기 시스템의 모델을 결합하고 전산모사 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 공기 압축기의 당량 비과 압력 비는 각각 2-2.5 범위, 3atm 이하로 유지하는 것이 최적의 운전 및 제어 조건임을 알 수 있었다.
- 2) 연료 전지의 전체 부하에 대한 정상상태에서 최고의 시스템 효율(스택, 압축기)을 얻도록 압축기의 작동 선을 찾을 수 있었다.
- 3) 가습기 입구조건이 고온, 고습인 경우에 물 수지는 크게 증가하므로 압축기 성능과 연관하여 라디에이터/펌프의 설계 시 부품 선정(sizing) 및 비용, 페키지(package)를 반드시 고려해야 한다.

참 고 문 헌

- 1) James Larminie, Andrew Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons, LTD, Chichester, 2001
- 2) J. C. Amphlett, et al., Performance Modeling of the Ballard Mark IV Soild Polymer Electrolyte Fuel Cell, J. Electrochemical Society, Vol .142, No.1, 1995, pp. 1-8.
- 3) Frano Barbir, et al., Trade-Off Design Analysis of Operating Pressure and

- Temperature in PEM Fuel Cell Systems, Proceedings of the ASME, AES-Vol. 39, 1999, pp. 305-315.
- 4) Daisie D. Boettner, et al., Proton Exchange Membrane(PEM) Fuel Cell System Model for Automotive Vehicle Simulation and Control, Proceedings of the ASME, AES-Vol. 41, 2001, pp. 555-563.
 - 5) D. Xue and Z. Dong, Optimal Fuel Cell System Design Considering Functional Performance and Production Costs, J. of Power Sources Vol. 76, 1998, pp. 69-80.
 - 6) Ronald F. Mann et al., Development and Application of a Generalized Steady-State Electrochemical Model for a PEM fuel Cell, Journal of Power Sources, Vol. 86, 2000, pp. 173-180.
 - 7) Jeferson Marian Corrêa, et al., An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using an Electrical Model, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics, 2001, pp. 141-146,
 - 8) Joshua M. Cunningham et al., Requirements for a Flexible and Realistic Air Supply Model for Incorporation into a Fuel Cell Vehicle(FCV) System Simulation, SAE Technical Paper No.1999-01-2912
 - 9) D. Thirumalai and R.E. White, Steady-State Operation of a Compressor for a Proton Exchange Membrane Fuel Cell System, Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 30, 2000, pp. 551-559.
 - 10) Galen W. Kulp, et al., A Comparison of Two Fuel Cell Air Compressor Systems at Low Load, SAE Technical Paper No.2001-01-2547
 - 11) N. Watson and M.S. Janota, Turbocharging The Internal Combustion Engine, Macmillan Press, 1982
 - 12) Paul Morral and Ilya Kolmanovsky, Turbocharger Modeling for Automotive Control Applications, SAE Technical Paper No.1999-01-0908