

## 고분자 전해질형 연료전지 자동차의 공기 시스템의 동적 모델링 및 분석

장현탁<sup>†</sup>

대전대학 자동차기계계열

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

HyunTak Jang<sup>†</sup>

Dept. of Automotive · Mechincal Engineering, Daecheon college  
San 6-7, Kwansan-Ri, Jupo-Myun, Boryung-Si, ChungNam

#### ABSTRACT

In this paper, we developed the dynamic model of a fuel cell system suitable for controller design and system operation. The transient phenomena captured in the model include the flow characteristics and inertia dynamics of the compressor, the intake manifold filling dynamics, oxygen partial pressures and membrane humidity on the fuel cell voltage. In the simulations, we paid attention to the transient behavior of stack voltage and compressor pressure, stoichiometric ratio. Simulation results are presented to demonstrate the model capability. For load current following, stack voltage dynamic characteristics are plotted to understand the Electro-chemistry involved with the fuel cell system. Compressor pressure and stoichiometric ratio are strongly coupled, and independent parameters may interfere with each other, dynamic response, undershoot and overshoot.

**주요기술용어** : PEM fuel cell dynamic model(고분자 전해질형 연료전지의 동적 모델), Compressor dynamic model(압축기 동적 모델), Humidifier(가습기), Load following(부하추종), Dynamic Simulation(동적 모사)

#### 1. 서 론

연료전지는 화학연료에 내재하고 있는 화학에

너지를 전기화학적 반응에 의한 자유에너지 변화를 전기에너지로 직접 변환하는 청정 발전 장치이다. 연료 전지는 전기화학 장치인 점에서 배터리와 원리는 같지만, 충전의 필요가 없이 외부에서 연료가 계속 공급되는 한 연속적으로 전기에

<sup>†</sup> Corresponding author : wslong@dcc.ac.kr

너지를 생산하는 측면에서 다르다.

고분자 전해질형 연료전지(Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC 또는 Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 수소 이온 전도성 고분자막을 전해질로 사용하는 연료전지로, 높은 전력밀도와 효율을 얻을 수 있으며, 부식문제가 없고, 작동온도가 60-80°C 정도로 낮아 자동차 용도에 적합한 장점이 있다. 이에 PEM 연료전지 자동차는 여러 자동차 업체들 간에 실용화 목표 시기를 발표하고, 경쟁적으로 개발에 박차를 가하고 있다. 최근 미국 환경보고서에 의하면, 수송 분야에서 방출되는 이산화 탄소는 온실효과 가스의 80%에 비율을 차지하며, 이산화탄소 배출 총량 중에서 수송분야는 32%에 해당한다.

연료전지 자동차는 경 부하일수록 효율이 높으며, 사용빈도수가 많은 부분부하 운전 모드일 경우에 전통적인 내연기관 자동차보다 효율이 약 2 배 정도 이다. 또한 수소를 연료로 사용하므로 도시의 배기가스 저감에 의한 환경 문제 및 화석 연료의 의존성을 줄일 수 있다.

그러나, 최소한 내연기관과 경쟁하려면, 연료전지는 내연기관과 동일한 수준의 부하 응답성, 시동성, 연료 인프라, 내구성, 소형화, 경량화, 비용 등 많은 요구조건을 충족해야 한다. 현재 수소를 연료로 사용하는 직접 수소(Direct Hydrogen) 연료전지 자동차는 수소 저장 시스템이 필요하다. 그리고 자동차용 연료로 수소를 대량으로 보급하기 위해서 공급체계의 정비에 많은 비용과 시간을 요구한다. 즉, 수소 연료 저장탱크의 용기재료나 충전 압력의 제한과 수소 인프라 부족으로 인한 현실적 대안으로 메탄올 및 가솔린을 개질하여 얻은 수소를 사용하는 메탄올 개질형 연료전지 자동차, 탄화수소 개질형 자동차를 발표하였다<sup>1)</sup>.

연료 전지의 출력전력의 응답성은 공기와 수소의 질량유량, 압력 비, 스택 온도, 그리고 막 습도 등 다중 시스템 변수에 의해 변동되는 복잡성을 가지고 있다. 반면에 자동차 운전 조건에서, 급격한 부하 변동이 있는 동적 조건에서 성능을 분석

하는 것은 제어기 설계에서 매우 유용하고 중요하다. 고분자 전해질 연료전지 시스템은 여러 연구 그룹들에 의해 다양한 수준으로 모델화 되어 왔다. 대부분의 논문은 정상상태 모델이며 단지 성능 예측, 부품의 용량 산정, 정적 최적화에만 사용할 수 있다. 또는 PEM 단위전지의 구성부품 설계에 적합한 2-3D차원의 열-물질 전달 모델로 적용범위가 제한적이며 복잡하고 이론적인 모델들이다. 한편, 자동차의 가감속 같은 급격한 외부부하에 대응하여 연료전지 시스템의 부하 추종 능력은 급기 시스템의 동 특성에 의해 심하게 변동되므로 이들 모델들이 통합되어야만 실용적이며 정밀하게 동적 거동을 분석 할 수 있다. 그런데, 연료전지의 많은 논문에도 불구하고, 제어에 적합한 동적 모델은 여전히 부족한 상태이며, 개척해야 할 제어 분야의 연구 과제 들이 많이 남아 있다.

본 논문에서, 급기 시스템과 연료전지 시스템과의 제어 지향적이며 반 경험적(semi-empirical) 동적 모델을 개발하였다. 셀 내부에서 발생하는 전기화학적 원리를 기초로 한 반 경험적 식에 셀 동특성을 추가하는 새로운 셀의 동적 모델을 시도 하였다. 원심압축기 동적 모델을 연료전지 시스템 동적 모델에 연결하고 통합하여, 연료전지 출력 전류의 변동에 따라 압축기 가변속 운전 모드로 일정한 이론반응 비( $SR_{th} = 2.0$ )를 유지하면서 과도 거동을 분석 하였다. 이들 모델들은 상용 Matlab/Simulink 도구를 통하여 전산모사 하였다. 설계한 동적 모델은 부분 부하와 정격에서 시스템-업(step-up) 또는 스텝-다운(step-down) 같은 전류부하 변동에 대하여 과도 응답성의 분석을 통하여 평가하였다.

본 연구 결과를 이용하여 가변 부하에 대한 급기 시스템의 제어, 연료전지 출력의 안정화 제어에 대한 기초적인 지침을 제공하려 한다. 또한, 실제 부하전류와 연료전지, 원심 압축기, 가습기 운전 파라미터의 함수 관계를 이용하여 전체 작동 범위에서 연료 전지의 출력 전압, 효율을 정확히 예측하는데 사용할 수 있다.

## 2. PEM 연료전지 스택모델

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 연료전지의 가역 일은 이동한 전자수  $z$  이 포함되어야 한다.

$$W_c = \Delta G = -zFE \quad (1)$$

여기서,  $\Delta G$  는 자유에너지 변화,  $z$  는 반응 연료의  $kmol$  당 이동한 전자수(2),  $E$  는 셀의 전위( $V$ ),  $F$  는 Faraday 상수(96,487 *Coulombs / mole*)

만약 반응물과 생성물이 표준상태라면,

$$\Delta G^\circ = -zFE_R^\circ \quad (2)$$

생산된 물( $H_2O$ )이 액체 상태이고, 물 분압을 1로 설정하면 표준상태 가역 전위는 다음으로 계산된다.

$$\begin{aligned} E_R^\circ &= -\Delta G / zF \\ &= -(-237,200J / 2 \times 96,487J / V) \\ &= 1.229V \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \cdot \ln \left[ \frac{a_{H_2O}}{a_{H_2} a_{O_2}^{1/2}} \right] \quad (4)$$

여기서,  $a$  는 반응물과 생성물의 활성도로 반응물 분압과 동일하다.

식(2)을 식(4)에 대입하고 정리하면, 셀 전압은 실제 반응물 분압의 함수로 주어지는 Nernst식을 얻을 수 있다.

$$E = E_R^\circ + \frac{RT_{fc}}{2F} \cdot \ln \left( \frac{p_{H_2} \cdot (p_{O_2})^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \quad (5)$$

여기서, 표준 상태 가역 전위  $E_R^\circ$  는 활동도가 1 일 때의 기준전위 연료전지의 작동온도에 따라 기준 전위에 차이가 생기므로, 온도의 변화의 영향을 고려해야 한다.

$$E^\circ = E_R^\circ + (T_{fc} - T_0) \left( \frac{\Delta S^\circ}{zF} \right) \quad (6)$$

여기서,  $T_{fc}$  는 셀 온도,  $T_0$  는 표준상태 온도(298.15 K),  $\Delta S^\circ$  는 표준 상태에서 엔탈피 변화

식(6)의 표준상태 엔탈피 변화는 거의 일정하므로 단지 기준 전위는 온도에 따라 변한다고 가정한다. 식(6)에  $E_R^\circ$ ,  $T_0$  값을 대입하고 정리하면,

$$E^\circ = \beta_1 + \beta_2 T_{fc} \quad (7a)$$

여기서,

$$\beta_1 = 1.229 - \frac{298.15 \Delta S^\circ}{zF} \quad (7b)$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta S^\circ}{zF} \quad (7c)$$

표준상태 엔트로피 변화에 대한 식(7c)의  $\beta_2$  값은  $-0.85 \times 10^{-3}$  (V/K) 이 된다.

식(7a)에 상수들을 대입하고, 앞에서 구한 Nernst 식 (5)에 결합하고 정리하면, 개회로 전압은 반응물의 스택온도, 수소 그리고 산소 분압의 함수로 주어지는 식이 유도된다<sup>3)</sup>.

$$\begin{aligned} E &= 1.299 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{fc} - 298.15) \\ &\quad + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} [\ln p_{H_2} + 0.5 \ln p_{O_2}] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $p_{H_2}$  는  $p_{O_2}$  는 cathode 산소 분압(atm) anode 수소 분압(atm),

그러나, 셀에 부하를 연결하면, PEM연료전지의 출력전압은 이론적으로 구한 개회로 출력 전압보다 분극전압(활성화 분극, 농도 분극, 그리고 전극, 촉매 층, 전해질 막의 저항 분극)을 뺀 값으로 표현된다.

$$V_{fc} = E - v_{act} - v_{conc} - v_{ohm} \quad (9)$$

활성화 분극은 계면에서 전기화학 반응이 일어나려면 활성화 장벽을 극복하는데 전위 손실이 발생한다. 활성화 분극은 연료전지 전극 모두에서 생긴다. 그러나, anode 측의 수소 산화 반응의 속도는 매우 빠르지만, cathode 측의 반응 속도는 anode에 비하여 상당히 느리다. 그러므로, 활성화

손실에 의한 전압 강하는 cathode 반응 조건에 좌우된다. 활성화 분극과 전류 밀도의 관계는 Tafel 식으로 표현된다.

$$v_{act} = a \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (10)$$

여기서,  $a$ 는 상수,  $i_0$ 은 평형 상태의 이온 교환 전류밀도,  $i$ 는 ( $i_{st}/A_{fc}$ ) 전류밀도

Tafel 식은  $i > i_0$  경우에만 성립하므로, 이와 유사한 함수로 근사화 할 수 있다<sup>6)</sup>.

$$v_{act} = v_0 + v_a (1 - e^{-c_1 i}) \quad (11)$$

여기서,  $v_0$ 은 영(zero) 전류 밀도에서 전압 강하,  $v_a$ , 그리고  $c_1$ 은 상수. 활성화 분극은 온도와 산소 분압에 강력히 종속 되어 있다. 식(11)의 기본 식의  $v_0, v_a$ , 그리고  $c_1$ , 산소 분압과 온도 변수는 실험 데이터를 이용하여 비선형 회귀 기법으로부터 결정한다.

한편, 저항 분극은 고분자 막의 이온 전달의 저항, 전극 저항, 그리고 전자를 전달하는 집진 판의 저항에 의한 것이다. 저항 분극에 의한 전압 강하는 전류 밀도에 비례한다.

$$v_{ohm} = i \cdot R_{ohm} \quad (12)$$

여기서,  $R_{ohm}$ 은 ( $\Omega \cdot cm^2$ ) 내부저항  
음 저항은 막 전도도  $\sigma_m$  관계로 표현된다.

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (13)$$

여기서,  $t_m$ 은 막 두께

그런데, 막  $\sigma_m$ 는 막 수분함량 전도도  $\lambda_m$ 과 온도의 함수이다<sup>10)</sup>.  $\lambda_m$  값은 0~14 범위에서 변동하며, 상대 습도 값의 0~100% 범위에 해당한다. 다양한 습도와 압력에 대한 막 전도도 값은 다음 식으로 계산한다.

$$\sigma_m = b_1 \exp\left(b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}}\right)\right) \quad (14)$$

여기서,  $b_1$ 는  $\lambda_m$  막 수분량의 함수,  $b_2$ 는 상수

$$b_1 = (b_{11} \lambda_m - b_{12}) \quad (15)$$

상수  $b_{11}, b_{12}$ , 그리고  $b_2$ 는 경험적으로 결정되는 상수이며 Nafion117의 공개된 문헌 값을 사용한다<sup>10)</sup>.

한편, 농도 분극 또는 농도 손실은 반응에서 소모되는 반응물의 농도 변화로 생긴다. 이들 손실은 고 전류 밀도 영역에서 급격한 전압 강하의 원인이 된다. 농도 손실로 생기는 전압 강하를 근사화 식은 다음과 같이 주어진다<sup>2)</sup>.

$$v_{conc} = i \left( c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \quad (16)$$

여기서,  $c_2, c_3$ , 그리고  $i_{max}$ 는 온도와 반응물 분압에 종속적이며, 경험적으로 결정되는 상수.

$i_{max}$ 는 급격한 전압 강하가 생기는 곳의 전류밀도의 변수 값이다.

정상상태, 연료 전지의 작동 전압은 개회로 전압에서 앞에서 구한 모든 손실에 관련한 전압 강하를 모두 결합하면, 다음과 같이 표현된다.

$$v_{fc,s} = E - \left[ v_0 + v_a (1 - e^{-c_1 i}) \right] - [i \cdot R_{ohm}] - \left[ i \left( c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \right] \quad (17)$$

식(17)의 전압 손실과 관련된 변수는 연료 전지 분극 곡선의 각종 상수는 비선형 회귀를 사용하여 결정한다. 그 결과로 얻은 회귀식, 그리고 기하학적 상수 및 물리적 상수들은 다음과 같이 정리된다<sup>2)</sup>.

$$v_0 = 0.279 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{fc} - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T_{fc} \left[ \ln\left(\frac{p_{ca} - p_{sat}}{1.013225}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{0.1173(p_{ca} - p_{sat})}{1.01325}\right) \right] \quad (18a)$$

$$v_a = \left( -1.618 \times 10^{-5} T_{fc} + 1.618 \times 10^{-2} \right) \left( \frac{p_{O2}}{0.1173} + p_{sat} \right)^2 + \left( 1.8 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.166 \right) \left( \frac{p_{O2}}{0.1173} + p_{sat} \right)^2 + \left( -5.8 \times 10^{-4} T_{fc} + 0.5736 \right)$$

(18b)

$$c_1 = 10$$

$$t_m = 0.01275$$

$$b_1 = 0.005139\lambda_m - 0.00326$$

$$b_2 = 350$$

(18c)

$$c_2 = \left(7.16 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.62\right) \left(\frac{PO_2}{0.1173} + p_{sat}\right) + \left(-1.45 \times 10^{-3} T_{fc} + 1.68\right) \text{ for } \left(\frac{PO_2}{0.1173} + p_{sat}\right) < 2 \text{ atm} \quad (18d)$$

$$c_2 = \left(8.6 \times 10^{-5} T_{fc} - 0.068\right) \left(\frac{PO_2}{0.1173} + p_{sat}\right) + \left(-1.6 \times 10^{-4} T_{fc} + 0.54\right) \text{ for } \left(\frac{PO_2}{0.1173} + p_{sat}\right) \geq 2 \text{ atm} \quad (18e)$$

$$c_3 = 2$$

$$i_{max} = 2.2$$

(18f)

셀의 동 특성을 모델링 하는데 전하 2중층 (charge double layer) 현상을 해석하는 것이 매우 중요하다. 전극과 PEM 계면에서는 전극의 이온 및 자유전자, PEM의 전해질 이온에 의하여 (+) 전하와 (-) 전하로 대전되는 현상이 일어난다. 이와 같은 전극과 PEM사이에 콘덴서 같은 전기적 구조를 나타내는 것을 전하 2중층이라 한다. 전류의 증가 또는 감소의 변동으로 인하여, 전하 2중층에서 농도 분극과 활성화 과 전압이 형성되는데 1차 지연이 존재한다. 연료전지 작동 전압의 동 특성 모델은 1차 지연에 관련된 시 상수 항을 포함하는 입력-출력 모델로 표현할 수 있다.

(19a)

$$\tau = CR_e \quad (19b)$$

은 셀의 전류밀도, 활성화 및 농도 분극전압으로부터 결정한다.

$$R_e = \frac{V_{act} + V_{conc}}{i} \quad (20)$$

전류는 외부 회로를 통해 이동한 전자의 이동 속도로 표현된다.

$$I_{fc} = F \frac{dn_{e^-}}{dt} \quad (21)$$

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

수소 소모량과 전기화학반응에 따라 생산되는 전류사이에는 Faraday 법칙의 화학 양론식이 성립한다.

$$W_{H2} = M_{H2} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{dn_{e^-}}{dt} \quad (22)$$

여기서,  $M_{H2}$ 는 ( $kg/kmol$ ) 수소의 몰 질량 식(21)을 식(22)에 대입하면,

$$W_{H2} = \frac{M_{H2}}{2F} I_{fc} \quad (23)$$

실제로 연료전지 들어가는 수소는 전기화학 반응을 보장하기 위해서 수소 이론 반응비 (stoichiometric ratio)는 약 1을 초과하며, 셀의 개수가  $N$ 인 스택에 대하여 수소 질량유량 식을 얻는다<sup>4)</sup>.

$$W_{H2} = SR_{H2} \cdot N \cdot \frac{M_{H2}}{2F} I_{fc} \quad (24)$$

수소 1몰 반응에 대하여 산소 1/2몰이 반응하므로, 수소 소모량과 유사한 방법으로 산소 소모량도 유도 할 수 있다. 만약 공기를 사용하면 공기 중의 산소 조성비를 고려하여 표현한다.

$$W_a = \frac{1}{2 \cdot 0.21} \frac{M_a}{2F} I_{fc} \quad (25)$$

실제로 연료전지에서 소모되는 산소는 반응을 보장하기 위해서 공기 이론 반응비가 1.5-2.0 이고, 셀의 개수가  $N$ 인 스택에 대하여 공기 질량유량 식을 얻는다.

$$W_a = SR_a \cdot N \cdot \frac{1}{2 \cdot 0.21} \frac{M_a}{2F} I_{fc} \quad (26)$$

일반적으로, 연료전지는 스택이 직렬로 연결되어 있으므로, 스택 전압은 이고, 스택전류  $I_{st}$ 는  $i \cdot A_{fc}$ 로 정의 한다. 따라서, 연료전지 시스템의 생산되는 전력은 다음 식으로 계산된다.

$$P_{fc} = n_{stack} \cdot V_{st} \cdot I_{st} \quad (27)$$

여기서,  $n_{stack}$  은 시스템에서 스택 수

### 3. 급기 시스템의 동적 모델

일반적인 압축기 시스템은 원심 압축기, 가습기, 흡기/배기 덕트 시스템, 압축기 하향의 플리넘(plenum), 배기구에 연결된 밸브로 구성되어 있다. 연료전지 스택의 cathode의 상향에 연결된 흡기 다기관, 하향에 연결된 회수 다기관에 밸브가 장착되어 있는 흡기 시스템은 간단한 압축 시스템과 매우 유사하다. Fig. 1은 직접수소 연료전지 시스템의 반응물을 공급하는 부시스템의 개략도를 보여준다<sup>2)</sup>.

Jensen and Kristensen이 제안한 압축기 모델링 방법을 사용하여, 무차원 헤드 파라미터를 정의한다<sup>12)</sup>.

압축기 모델은 두 부분으로 나뉘어진다. 첫째, 압축기를 통한 질량유량을 결정하는 정적 압축기 맵(map)이다. 열역학 식은 출구 공기 온도와 요구 동력을 계산하는데 사용한다. 둘째, 압축기와 모터의 관성으로 표현되며 압축기 속도로 정의한다. 결국에, 이 속도는 압축기 맵(map)에서 공기 질량유량 값을 구하는데 사용한다.

$$\Psi = \frac{c_p T_{c,in} \left[ \left( \frac{P_{c,out}}{P_{c,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{\frac{1}{2} U_c^2} \quad (28)$$

여기서,  $\gamma$ 는 공기의 비열 비(1.4)

압축기 깃의 팁 속  $U_c$ 도(m/s)는

$$U_c = \frac{\pi}{60} d_c N_c \quad (29)$$

여기서,  $d_c$ 는 압축기 지름(m)

압축기 정규화 된 유량  $\Phi$ 은 다음 식으로 정의한다.

$$\Phi = \frac{W_c}{\rho_a \frac{\pi}{4} d_c^2 U_c} \quad (30)$$

여기서,  $\rho_a$ 는 공기 밀도( $kg/m^3$ )

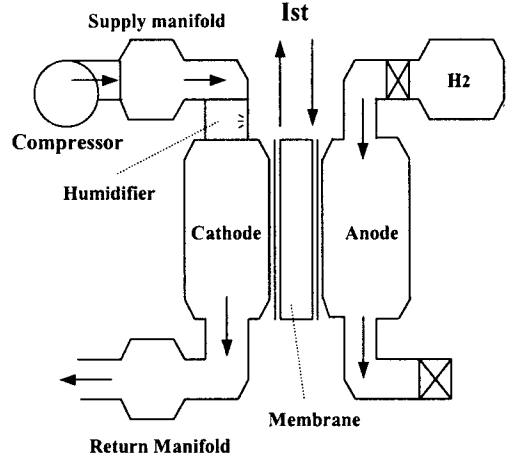


Fig. 1. Components in fuel cell reactant subsystem schematic

정규화 된(normalized) 압축기 질량유량  $\Phi$ 은 헤드  $\Psi$ 와 상관관계는 있으며 다음 식으로 정의된다.

$$\Phi = \Phi_{max} \left( 1 - \exp \left( -\beta \left( \frac{\Psi}{\Psi_{max}} - 1 \right) \right) \right) \quad (31)$$

여기서,  $\Phi_{max}$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_{max}$ 는 마하 수의 다항식 함수

$$\begin{aligned} \Phi_{max} &= k_4 M^4 + k_3 M^3 + k_2 M^2 + k_1 M + k_0 \\ \beta &= j_2 M^2 + j_1 M + j_0 \\ \Psi_{max} &= l_5 M^5 + l_4 M^4 + l_3 M^3 + l_2 M^2 + l_1 M + l_0 \end{aligned} \quad (32)$$

압축기 입구의 마하 수  $M$ 는

$$M = \frac{U_c}{\sqrt{\gamma R_a T_{c,in}}} \quad (33)$$

압축기의 공기 질량 유량은 식(30)을 정리하면 다음 식으로 표현된다.

$$W_c = \Phi \rho_a \frac{\pi}{4} d_c^2 U_c \quad (34)$$

압축기 모델에 사용한 기하학적 및 물리적 파라미터 값은 Table 1로 주어진다.

압축기 출구의 공기 온도는

Table 1 Compressor parameters.

Parameter	Value	Units
$R_a$	$2.869 \times 10^2$	$J/(kg \cdot K)$
$\rho_a$	1.23	$kg/m^3$
$d_c$	0.2286	$m$

Table 2 Compressor motor parameters.

Parameter	Value	Units
$k_t$	0.0153	$V/(rad/sec)$
$R_{cm}$	0.0225	$N \cdot m/A$
$k_v$	1.2	$\Omega$
$\eta_m$	98	%

$$T_{c,out} = T_{c,in} + \frac{T_{c,in}}{\eta_c} \left[ \left( \frac{P_{c,out}}{P_{c,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (35)$$

압축기 운전에 필요한 토크  $\tau_c$  는 열역학 식을 사용하여 계산한다.

$$\tau_c = \frac{c_p T_{atm}}{\omega_c \eta_c} \left[ \left( \frac{P_{c,out}}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_c \quad (36)$$

여기서,  $\tau_c$  은 압축기 구동 토크( $N \cdot m$ ),  $c_p$  는 공기의 정압 비열( $1004 J/kgK$ )

압축기의 동적 거동은 관성 계수가 포함된 압축기 속도 모델로 표현된다.

$$J_c \frac{d\omega_c}{dt} = (\tau_{cm} - \tau_c) \quad (37)$$

여기서,  $J_c$  는 압축기와 모터의 관성( $kgm^2$ ),  $\tau_{cm}$  는 압축기 모터의 토크 입력( $N \cdot m$ )

식(37)의 압축기 모터 토크는 정적 모터 식을 사용하여 계산된다.

$$\tau_m = \eta_m \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_c) \quad (38)$$

여기서,  $k_t$  는 토크 정수,  $R_{cm}$  는 전기자 저항,  $k_v$  는 역기전력 정수,  $\eta_m$  는 모터의 기계효율

압축기 모터의 기하학적 및 물리적 파라미터 값은 Table 2에 값으로 주어진다.

흡기 다기관 질량 변화율은 질량 보존 법칙을 적용하자.

$$\frac{dm_{sm}}{dt} = W_c - W_{ca,in} \quad (39)$$

여기서,  $m_{sm}$  은 흡기 다기관 체적에 저장되는

공기 질량,  $W_c$  은 각각 압축기 출구의 공기 질량유량,  $W_{ca,in}$  은 cathode에 들어가는 공기 질량유량 만약 공기 온도가 흡기 다기관에서 일정하고 흡기 온도  $T$ 와 같다면, 등온( $T = T_{in}$ )이고, 흡기 다기관의 필링(filling) 동력학 식은 에너지 보존 법칙과 이상기체 법칙을 적용하여 유도할 수 있다.

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{R_a T}{V_{sm}} (W_c - W_{ca,in}) \quad (40)$$

여기서,  $R_a$  는 공기 기체 상수,  $V_{sm}$  는 흡기 다기관 체적 동일한 방법으로, 회수 다기관의 압력 변화율을 유도할 수 있다.

$$\frac{dp_{rm}}{dt} = \frac{R_a T_{rm}}{V_{rm}} (W_{ca,out} - W_{rm,out}) \quad (41)$$

밸브를 통한 질량유량은 아 임계조건으로 가정하고, 노즐 비선형식으로 계산할 수 있다.

$$W_{rm,out} = k_v \sqrt{P_{ca} - P_{atm}} \quad (42)$$

여기서,  $k_v$  는 밸브상수

연료 전지 cathode측에 질량 보존 법칙을 적용하여 cathode측의 공기 질량유량의 동 특성을 표현할 수 있다. 즉, 앞에서 구한 압축기 흡기 다기관 질량유량에서, 연료전지의 요구 공기 질량유량, 회수 다기관의 질량유량을 뺀 값으로 나타낸다.

$$\left( \frac{V_{ca}}{R_a T} \right) \frac{dp_{ca}}{dt} = W_{ca,in} - \dot{m}_a - W_{rm,out} \quad (43)$$

이온 교환 막은 충분히 수분을 함유한 상태에서 서 양호한 이온 전도성을 나타내고 있다. 그 때문에 막의 수분 제어는 연료전지 운전에서 매우 중요하다. 일반적으로 반응물에 수분을 가습하는 방법

을 사용하는데, cathode에서는 전기화학 반응으로 항상 물이 생성되므로 과도한 가습은 수분이 응축하여 전극 내에서 범람(water flooding) 현상이 일어나 기체확산을 방해할 우려가 있다. 또 anode에서는 이온전도에 따라 고분자 막 속의 수분이 cathode 측에 이동하여 항상 수분이 소비되므로 충분히 가습하지 않으면 막이 건조되어 이온 전도성을 잃어버릴 우려가 있다. 막내의 물의 이동은 두 가지 주요한 원인으로 이동한다. 하나는 anode와 cathode의 전위차에 의해 이동하는 전기적 삼투압(electro-osmotic drag) 이고 다른 하나는 농도 구배에 의한 물의 역확산(back-diffusion)이다.

총 스택에서 막을 통한 수분이동에 대한 질량 유량은 다음식으로 계산할 수 있다<sup>10)</sup>.

$$W_{v,mb} = M_v A_{fc} N \left( n_d \frac{i}{F} - D_w \frac{(c_{v,ca} - c_{v,an})}{t_m} \right) \quad (44a)$$

여기서, 물이 완전히 수화된 막에 대해 막내의 전기장에 의해 이동하는 수소 이온 당 drag 되는 물 분자의 수는 2.5이며 water drag coefficient는 수분함량에 비례한다고 가정하면  $n_d$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n_d = 2.5 \lambda / 22 \quad (44b)$$

Anode, Cathode 막 표면의 물 농도는 각각

$\lambda_{an}, \lambda_{ca}$  의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} c_{v,ca} &= \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} \lambda_{an} \\ c_{v,an} &= \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} \lambda_{ca} \end{aligned} \quad (44c)$$

물확산 계수  $D_w$ 는 막 수분함량  $\lambda_m$ 의 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_w = 10^{-6} \exp \left[ 2416 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{273 + T_{fc}} \right) \right] \left( 2.563 - 0.33 \lambda_m + 0.0264 \lambda_m^2 - 0.000671 \lambda_m \right) \quad (44d)$$

Cathode에 공급되는 기체는 가습기의 온도에서 완전히 포화 상태이므로, 과포화 상태의 물 분율을 1-3까지 증가 시켰다.

$$a = x_w p_a / p_{sat} \quad (44e)$$

한편, 수분 함량은 물 활동도 의 식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \lambda_m &= 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36a^3 \quad \text{if } 0 < a \leq 1 \\ \lambda_m &= 14 + 1.4(a - 1) \quad \text{if } 1 < a \leq 3 \end{aligned} \quad (44f)$$

cathode 측이 막이 건조되는 것을 방지하기 위하여 스택에 들어가기 전에 가습기에서 요구하는 상대습도로 가습 되어야 한다. 가습기의 물 분사량은 건 공기의 요구상대 습도에서의 요구 수증기 질량유량에서 함유한 수증기 질량유량을 빼면 계산된다.

$$W_{v,inj} = 0.622 \frac{\phi_a^{des} p_{sat}}{p_{ca,in} - \phi_a^{des} p_{sat}} W_a - W_v \quad (45)$$

여기서,  $\phi_a^{des}$  요구 상대 습도

#### 4. 동적 전산모사

자동차용 연료전지 스택의 출력을 60kW(126V × 472A)로 예상하고, 셀의 특성을 0.6V ~ 0.7A/cm<sup>2</sup>으로 설정하면, 셀 수는 210, 셀 전극 면적은 675cm<sup>2</sup> 임의로 구성 한다. 전산 모사의

Table 3 Fuel cell system parameters

Fuel cell gross power	60kW
Fuel cell area	
Number of cells in stack	210
Voltage range	126-189V
Current range	0-472A
Operating temperature	353.15K
Initial fuel cell relative humidity	75%
Membrane dry density	0.002
Membrane dry equivalent weight	1.1 kg/mol
Membrane thickness	0.01275cm



Table 4 Compressor map regression coefficients

parameter	values	parameter	values
$k_4$	$-3.699 \times 10^{-5}$	$j_0$	2.444
$k_3$	$2.7803 \times 10^{-4}$	$l_5$	$-9.7 \times 10^{-3}$
$k_2$	$-5.362 \times 10^{-4}$	$l_4$	0.105
$k_1$	$-4.636 \times 10^{-5}$	$l_3$	-0.429
$k_0$	$2.211 \times 10^{-3}$	$l_2$	0.801
$j_2$	1.765	$l_1$	-0.683
$j_1$	-1.348	$l_0$	0.433

초기 조건에서, 공기 압축기의 입구의 공기의 온도는 25°C, 압력은 1 atm, 상대습도 50%로 가정하였다.

자동차 운전 조건 또는 부하 변동에 따른 연료 전지 스택과 급기 시스템의 동적 모델은 상용 Simulink/Matlab 도구를 사용하여

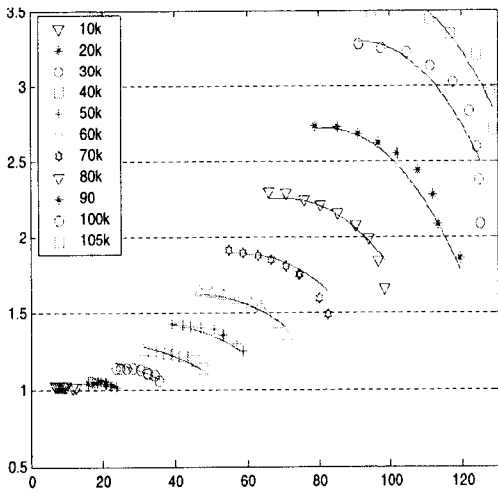


Fig. 2. Compressor pressure ratio as a function of mass flow and rotational speed

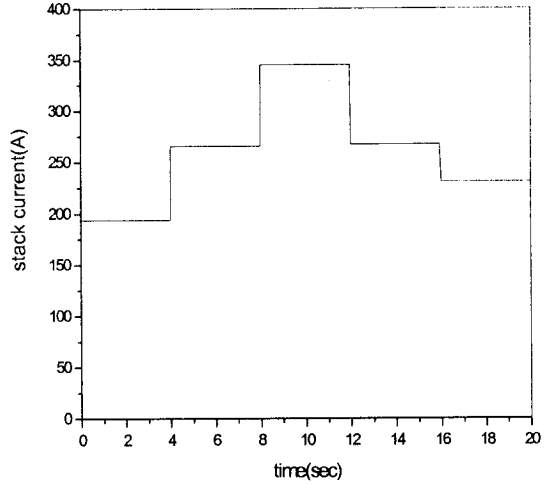


Fig. 3. Load current profile in a series of step changes input

관련 수식들을 프로그래밍 전산모사 하였다.

Table 3은 연료 전지 스택의 모델의 전산모사에 사용한 주요한 기하학적 물리적 파라미터 값으로 정리한 것이다.

Fig. 2는 Allied Signal사에서 설계하고 제작중인 공개된 압축기의 맵 데이터를 이산화 하고 정규화(normalized)하여 사용한다<sup>11)</sup>.

식(32)의  $k_i, j_i, l_i$ 는 그림 2의 압축기의 정규화된(normalized) 데이터로 비선형 회귀 커브 피팅(curve fitting)을 하여 얻은 계수이며 Table 4에 주어져 있다.

### 5. 결과

연료전지 자동차의 급기시스템의 동적 모사의 결과를 Fig. 3-9 보여준다. Fig. 3은 연료전지 시스템의 동적 응답을 예측하기 위하여 부하 전류의 연속적인 스텝 변화를 보여준다.

즉, 부하 전류는 t=4sec에서 270A로, t=8sec에서 350A로 연속적 스텝 증가(step-up) 한 후에, t=12sec 270A로, t=16sec에서 225A 로 스텝 다운(step-down) 하는 부하패턴으로 구성되어 있다.

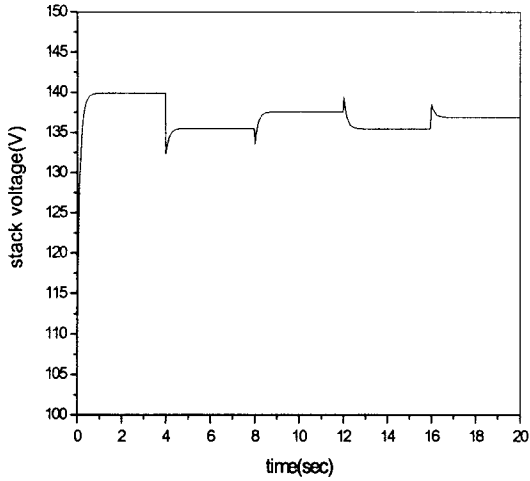


Fig. 4. Stack voltage reponse for a series step changes in load current

여기서, 부하 전류 270A는 최고 스택전류의 55%, 350A는 75%이며 정격, 225A는 48%에 각각 해당한다.

Fig. 4는 부하 전류의 연속적인 스텝 업(step-up), 그리고 스텝 다운(step-down)의 변동에 대하여 스택의 출력 전압을 보여준다. 급격한 부하 전류 증가에 스택 전압에 언더슈트(undershoot) 거동, 그리고 급격한 부하 전류 감

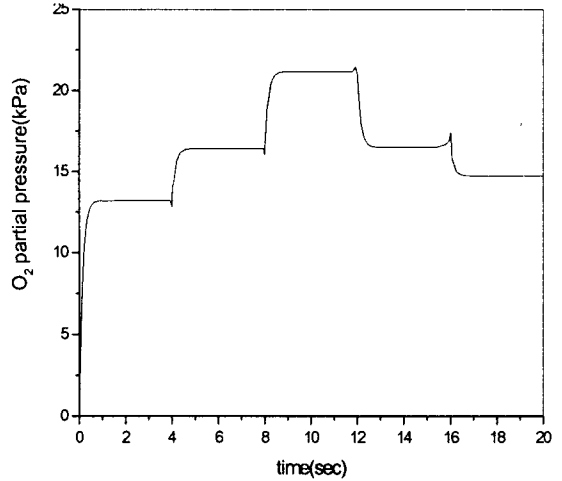


Fig. 6. Compressor pressure ratio transient response for load current changes

소에 스택 전압은 오버슈트(overshoot) 거동의 현상을 보여준다. 스택 전압은 부하 전류와 산소 분압에 직접적인 관계에 있다. 이것은 수소/산소의 전기화학 반응 중 생기는 활성화 과 전압과 농도와 전압의 동 특성으로 판단된다.

Fig. 5는 산소 분압의 과도 응답 특성을 보여준다. 이것은, 부하 전류의 연속적인 스텝 업 후에, 스텝 다운 패턴에 cathode에 공급해야 하는 요구

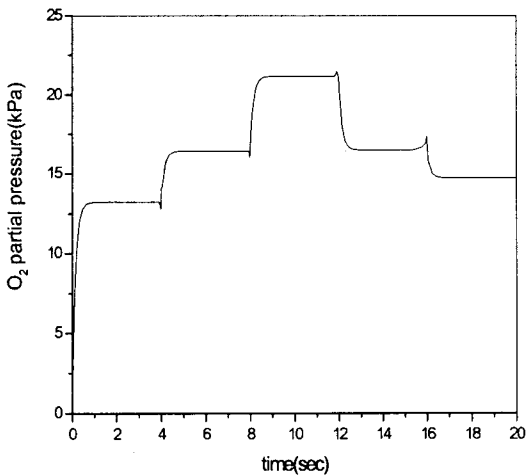


Fig. 5. Transient response in O<sub>2</sub> partial pressure

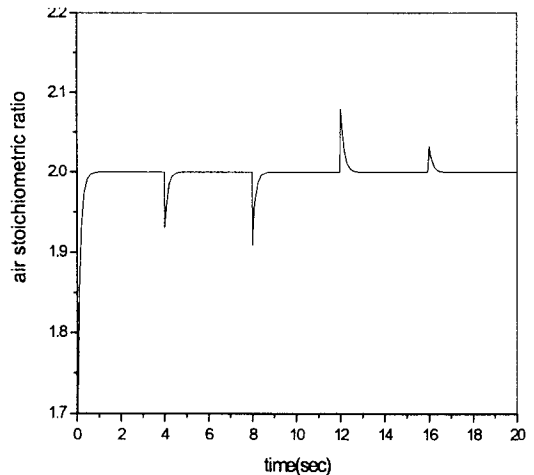


Fig. 7. Air stoichiometric ratio response for load current changes

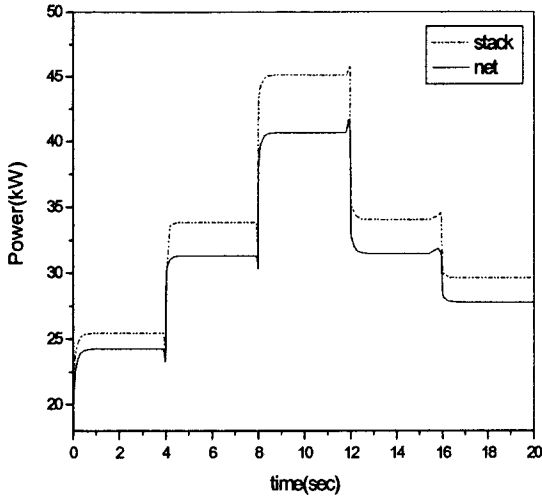


Fig. 8. Transient response of fuel cell stack system power and net power

산소 분압을 보여준다. 부하 전류의 갑작스러운 증가와 감소에, 수소/산소의 전기화학반응에 필요한 산소 분압의 결핍 및 과잉 현상을 보인 후 0.5sec 후에 안정화 되었다.

Fig. 6은 공기압축기의 압축 비의 과도 응답 특성을 보여준다. 스택 전력이 34kW부터 47kW까지 스텝 증가(step-up) 시에, 압축 비는 1.4부터 1.7까지 증가하면서 언더슈트 거동이 생기며, 반대로 압축 비가 감소하면 오버슈트가 생긴다.

Fig. 7은 공기 압축기의 최적의 공기 이론반응비(SR=2)의 과도 응답 특성을 보여준다. 부하 증가의 변화에, t=2sec, 8sec에서, 최적 이론반응비를 유지하지 못하고 공기가 결핍하며, t=12sec, 16sec에서는 과잉으로 공급된다. 따라서, 공기 압축기는 cathode에 최적 공기 이론반응비를 일정하게 유지 하는데 빠르고 강인한 가변속 제어 알고리즘을 요구한다.

Fig. 8은 연료전지 스택 발생 전력과 압축기 운전시 요구되는 동력으로 인한 손실 전력을 뺀 연료전지 시스템 순 출력의 보여주고 있으며, 공기 압축기의 전력 손실을 파악할 수 있다. 연료전지 스택의 발전 전력은 증가함에, 압축기의 손실 전력도 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 연료 전지

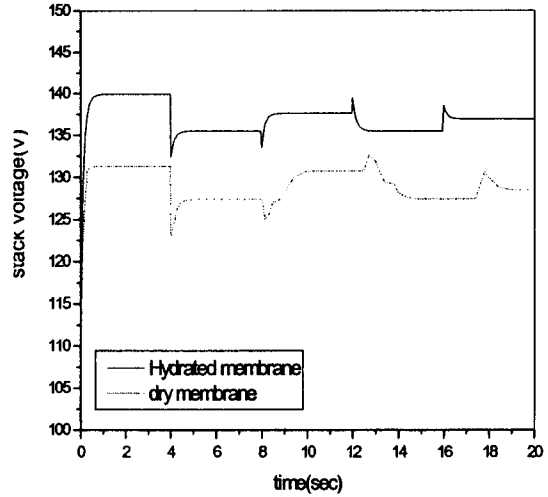


Fig. 9. Voltage response comparing fully humidified and drying membrane

스택의 동력이 47kW인 운전 점에서, 연료전지 시스템 순 최대동력은 약 40kW이며, 언더슈트와 오버슈트 같은 과도적 현상의 영향이 포함되어 있다.

Fig. 9는 100% 수분 함유량 막과 건조한 막의 전압 응답을 비교하여 나타낸다. 연료전지 출력 전압은 막의 수분 함유량에 따라 상당한 차이를 보여준다.

## 5. 결론

자동차의 다양한 운전 상태에 따라 급기 시스템의 과도 거동은 연료전지 자동차의 모델 지향 제어를 기반으로 하는 제어기 개발에 매우 중요하다. PEM연료전지의 동적 모델, 그리고 급기 시스템의 동적 모델이 각각 물리적 원리와 경험적 식을 결합하여 서로의 단점이 보완된 연료전지 자동차 시스템에 적용하였으며, 동적 응답의 결과 및 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 급기 시스템의 흡기 대기관 필링(filling) 및 유량 동특성, 압축기 관성 동력학, 반응물

산소분압과 막 습도를 포함 하는 동적 모델을 개발하여 연료전지 동적 모델에 통합하였다.

- 2) 급격한 부하 변동에 출력 전압의 응답성은 활성화 및 농도 과전압 뿐만 아니라 산소의 분압 및 유량의 결핍이나 과잉 같은 다중인자로부터 영향을 받는 복잡성을 가지고 있다.
- 3) 급격한 부하 전류 변동에 출력전압의 심한 감쇠나 스파크 같은 변동으로 인하여 셀의 손상을 주므로 안정적인 전력변환기의 연계가 필요하다.
- 4) 압축기는 cathode 에서 요구하는 최적 압력비와 이론 반응비 2를 일정하게 유지하는 가변속 제어 알고리즘을 설계하여, 공기 압축기의 부하 추종 성능 향상 및 손실 전력을 줄일 수 있다.

### 참 고 문 헌

- 1) S. Ramaswamy and R. M. Moore : "Fuel cell vehicles: a comprehensive approach to modeling and analysis", Int. Symposium on Automotive Electronics and Alternative Energy Vehicle, Nov., 2001, pp. 1-24, .
- 2) J. T Pukrushpan and H. Peng, A. G Stefanopoulou : "Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model", Proc. of the IMECE02, Paper no. 2002-DSC-32051, Nov., 2002.
- 3) J. C. Amphlett, et al : "Performance modeling of the ballard mark IV solid polymer electrolyte fuel cell", J. Electrochemical society, Vol. 142, No.1, 1998, pp. 1-8.
- 4) R. Barbir et al. : "Trade-off design analysis of operating pressure and temperature in PEM fuel cell systems", Proc. of the ASME- AES , AES-Vol. 39, 1999, pp.305-315.
- 5) M. Badami, C. Caldera : "Dynamic model of a load-following fuel cell vehicle: Impact of the air system," SAE Paper no.2002-01-0100
- 6) L. Guzzella, "Control oriented modeling of fuel cell based vehicles," NSF Workshop on the Integration of Modeling and Control for Automotive Systems", 1999.
- 7) J. M. Correa et al. : "An analysis of the dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells using an electrochemical model", The 27th Annual Con. Of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001, pp. 141-146.
- 8) G. Rizzoni, "Modeling and control of fuel cell systems for automotive application", Fuel Cell Workshop, April, 2003.
- 9) J. Padullé, G.W. Ault, "An Integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation", J. of Power Sources, vol. 86, 2000, pp.495-500.
- 10) T. V. Nguyen, R.E. White, "Water and heat management model for proton exchange membrane fuel cells", J. Electrochem. Society, Vol. 140, No. 8, 1993, pp. 2178-2185.
- 11) J. M. Cunningham et al., "Requirements for a flexible and realistic air supply model for incorporation into a fuel cell fuel cell vehicle(FCV) system simulation", SAE Paper No.1999-01-2912.
- 12) P. Morral and I. Kolmanovsky, "Turbocharger modeling for automotive control applications", SAE Paper No. 1999-01-0908.