

연료전지 모델링 및 공기이용률 제어에 관한 연구

송석홍 · 이원용*[†] · 김창수* · 박영필

연세대학교 기계공학과

*한국에너지기술연구원 연료전지연구센터

(2002년 10월 30일 접수 : 2003년 1월 2일 채택)

Fuel Cell Modeling and Load Controlling by the Variable Utilization of Airflow

S. H. Song, W. Y. Lee*[†], C. H. Kim*, and Y. P. Park

Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, 305-764, Korea

*Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research, Taejeon 305-343, Korea

(Received October 30, 2002; Accepted January 2, 2003)

초 록

일반적으로 연료전지 제어의 주 목표는 연료와 공기의 반응이 원활하게 이루어져 출력을 연속적이고 안정되게 얻어지도록 공정설비를 제어함에 있다. 연료전지의 과부하에 따른 성능저하 및 급격한 유량증가에 따른 양극간의 압력차로 인한 전극손상이 발생하지 않도록 하기위해, 연료전지의 제어조건을 고려한 동적모델링이 필요하다. 전극간 압력차이를 허용 범위 이하로 유지하며 급격한 부하요구가 발생하더라도 부하에 적합한 이용률 이상으로 부하가 걸리지 않도록 공기이용률 제어를 이용하였다. 10 kW 고분자 연료전지(PEMFC)의 전산모사를 통해 모델의 타당성을 검토하였고 제어성능을 수행하여 1초 내의 부하추종성능을 얻을 수 있었으며, 0.01 atm 내의 양극간 압력차를 유지시킬 수 있었다.

Abstract: A mathematical dynamic model of fuel cell was formulated in order to design the control system which will meet the control object. The control objective is set to regulate the airflow in the load change by utilization of airflow and the pressure difference between anode and cathode is maintained below a limit range. Simulation result of 10 kW polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) clearly demonstrates that response time need to be less than 1 seconds for the control requirements. Besides, pressure difference was allowed in pressure range less than 0.01 atm.

Key words : Mathematical dynamic modeling, Utilization of airflow, Pressure difference

1. 서 론

연료전지의 안정된 연속운전 및 빠른 부하 추종성을 만족시키기 위해 대상모델에 대한 동특성은 필수적인 요소이다. 이러한 특성은 대상공정에 대한 정확한 모델링을 통하여 이루어질 수 있으며, 시스템의 제어를 수행함에 있어 출발점이 된다. 일반적으로 연료전지 제어의 주 목표는 연료와 공기의 반응이 원활하게 이루어져 출력전류를 연속적이고 안정되게 얻어지도록 공정설비를 제어함에 있다. 연료전지에서 연료와 공기의 반응은 빠른 전기화학적 특성을 가지고 있는 반면, 공정설비는 상대적으로 느린 동특성을 가지고 있다. 이로 인하여 외부 부하의 빠른 증가에 대해 연료와 공기가 충분히 공급될 때까지 적은 유량 또는 낮은 이용률로 연료전지 전력이 출력될 수 밖에 없다. 즉, 연료전지 자체는 주어진 범위에서 외부 부하에 대응하여 낮은 전압과 높은 전류상태로 빠르게 요구동력을 출력하게

되지만, 공정설비에서는 시간지연으로 인해 적절한 수준의 공기와 연료를 공급하지 못하게 된다. 이로 인해 연료전지가 과부하로 구동되고 내부 반응가스는 확산 불량을 일으켜 전지성능의 저하를 초래하게 된다.

이를 방지하기 위해 주어진 공기량이나 연료량에서 부하에 적합한 이용률 이상으로 부하가 걸리지 않도록 운전해야 하며, 만약 성능저하가 발생한 경우에는 이용률을 감소시켜 성능저하의 가속화를 방지해야 한다. 즉, 공급유량을 증가시켜 출력을 보상해야 한다^{1,2)}. 출력을 보상시키기 위한 공급유량의 증가는 스택의 전극압력을 상승 시키게 되는데, 만일 일정한도 이상의 압력 차이가 발생하면 연료극과 공기극 내부의 미세기공을 통하여 가스가 새어 들어가 부분 반응하므로써 전지효율의 감소와 전극의 손상을 일으키게 될 수 있다. 특히 연료극의 반응에 사용되지 않은 수소를 순환시키도록 폐회로를 구성한 경우 실제반응에 이용되는 수소의 양은 공기의 양에 의해 결정되므로 공기극의 압력변동에 의해 양 전극간 압력차이가 급격히 발생하게 된다. 따라서 일정한도 이상의 압력차가 발생하지 않도록 전극간

[†]E-mail: wy822lee@kier.re.kr

압력차 제어가 요구된다. 그러므로 본 연구에서는 앞서 언급한 연료전지의 제어조건을 고려한 동적모델링을 통하여 전극간 압력차이를 허용범위 이하로 유지하며 급격한 부하요구가 발생하더라도 부하에 적합한 이용을 이상으로 부하가 걸리지 않도록 공기이용률 제어를 이용하여 10 kW 고분자 연료전지(PEMFC)의 전산모사를 통해 모델의 타당성 및 제어 성능을 수행하였다.

2. 연료전지 모델링

스택에서 발생시켜야 할 전압과 전류의 변동에 따라 연료극과 공기극에 보내야 할 수소와 공기의 양을 조절하는 것으로 요구되는 부하를 P watt라 하면 이때 필요한 수소와 공기의 양은 아래와 같다³⁾.

입의 부하변화에 따른 양 전극의 연료와 공기의 변화량은 물질수지식으로 부터 얻을 수 있다

$$N_{H_2} = \frac{P}{2\Phi\mathfrak{S}} = \frac{I}{2\mathfrak{S}\alpha}, \quad N_{Air} = \frac{I}{4\mathfrak{S}\beta\gamma}$$

where,

\mathfrak{S} : faraday constant (=96500C/mol)

Φ : cell voltage(V)

I : current

α, β : utilization of hydrogen and oxygen

γ : mole fraction of oxygen in air (=0.21)

$$\begin{aligned} \frac{dN_A}{dt} &= \frac{I_t}{2\mathfrak{S}\alpha} - \frac{I_t}{2\mathfrak{S}} - F_{A,out} \\ \frac{dN_C}{dt} &= \frac{I_t}{4\mathfrak{S}\beta\gamma} - \frac{I_t}{4\mathfrak{S}} - F_{C,out} \end{aligned} \quad (1)$$

where,

F_{out} : exit flow

I_t : total current

스택내의 연료와 공기는 기체상태이므로 전체 몰수는 압력으로 나타낼 수 있으며, 이때 스택의 온도는 별도의 냉각시스템에 의해 일정하게 유지된다고 본다면 (1)식을 연료 및 공기극에 대한 압력식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dP_A}{dt} &= \frac{RT_{cell}}{V_A} \left(\frac{I_t}{2\mathfrak{S}\alpha} - \frac{I_t}{2\mathfrak{S}} - F_{A,out} \right) \\ \frac{dP_C}{dt} &= \frac{RT_{cell}}{V_C} \left(\frac{I_t}{4\mathfrak{S}\beta\gamma} - \frac{I_t}{4\mathfrak{S}} - F_{C,out} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

where,

P : total pressure

V : total volume

이때 (2)식의 공기극에서 부하를 제어하기 위하여 공기 이용률을 변수로 놓고 테일러급수를 이용하여 선형화하면 아래와 같다.

$$\frac{dP_C}{dt} = \frac{RT_{cell}}{V_C} \left(\frac{I_{t,ss}}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}\gamma} + \frac{I_t - I_{t,ss}}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}\gamma} - I_{t,ss} \frac{\beta - \beta_{ss}}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}^2\gamma} - \frac{I_t}{4\mathfrak{S}} - F_{C,out} \right) \quad (3)$$

where,

$I_{t,ss}$: total current at steady

β_{ss} : utilization of

양 전극간 압력차는 연료극과 공기극의 압력식 (2), (3)으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dP_{AC}}{dt} &= \frac{RT_{cell}}{V_A} \left(\left(\frac{I}{2\mathfrak{S}\alpha} - \frac{I}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}\gamma} \right) I_t + I_{t,ss} \frac{\beta - \beta_{ss}}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}^2\gamma} \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{1}{2\mathfrak{S}} - \frac{1}{4\mathfrak{S}} \right) I_t - (F_{A,out} - F_{C,out}) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

where,

$P_{AC} = P_A - P_C$

$V_A = V_C$

모델식 (2),(3),(4)의 좌변항을 0으로 하여 이때의 정상상태 값을 도입하여 편차변수로 나타내면

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{P}_A}{dt} &= \frac{RT_{cell}}{V_A} \left(\frac{I_t - I_{t,ss}}{2\mathfrak{S}\alpha} - \frac{I_t - I_{t,ss}}{2\mathfrak{S}} - (F_{A,out} - F_{A,out,ss}) \right) \\ \frac{d\tilde{P}_C}{dt} &= \frac{RT_{cell}}{V_C} \left(\frac{I_t - I_{t,ss}}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}\gamma} - I_{t,ss} \frac{\beta - \beta_{ss}}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}^2\gamma} - \frac{I_t - I_{t,ss}}{4\mathfrak{S}} \right. \\ &\quad \left. - (F_{A,out} - F_{A,out,ss}) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{P}_{AC}}{dt} &= \frac{RT_{cell}}{V_A} \left(\left(\frac{I}{2\mathfrak{S}\alpha} - \frac{I}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}\gamma} \right) (I_t - I_{t,ss}) + I_{t,ss} \frac{\beta - \beta_{ss}}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}^2\gamma} \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{1}{2\mathfrak{S}} - \frac{1}{4\mathfrak{S}} \right) (I_t - I_{t,ss}) - (F_{A,out} - F_{A,out,ss}) \right. \\ &\quad \left. - (F_{C,out} - F_{C,out,ss}) \right) \end{aligned}$$

where,

$$\tilde{P}_A = P_A - P_{A,ss}$$

$$\tilde{P}_C = P_C - P_{C,ss}$$

$$\tilde{P}_{AC} = P_{AC} - P_{AC,ss}$$

(5)식의 편차변수 및 각각의 파라미터를 아래와 같이 놓고 정리하면,

$$\tilde{I} = I_t - I_{t,ss}, \quad \beta = \beta - \beta_{ss}, \quad \tilde{F}_A = F_{A,out} - F_{A,out,ss},$$

$$\tilde{F}_C = F_{C,out} - F_{C,out,ss}, \quad F_{AC} = \tilde{F}_A - \tilde{F}_C$$

$$\tau = \frac{V}{RT_{cell}}, \quad \Omega = \frac{1 - \alpha}{2\mathfrak{S}\alpha}, \quad \Phi = \frac{\beta_{ss}\gamma - 1}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}\gamma}, \quad \Psi = \frac{I_{t,ss}}{4\mathfrak{S}\beta_{ss}^2\gamma} \quad (6)$$

$$\tau \dot{\tilde{P}}_A = \Omega \tilde{I} - \tilde{F}_A$$

$$\tau \dot{\tilde{P}}_C = \Phi \tilde{I} - \Psi \beta - \tilde{F}_C$$

$$\tau \dot{\tilde{P}}_{AC} = (\Omega - \Phi) \tilde{I} + \Psi \beta - F_{AC}$$

(6)식의 전달함수를 구하기 위해 라플라스변환 하면 다음과

같다.

$$\begin{aligned}\tilde{P}_A(s) &= \frac{\Omega}{\tau s} \tilde{I}(s) - \frac{1}{\tau s} \tilde{F}_A(s) \\ \tilde{P}_C(s) &= \frac{\Phi}{\tau s} \tilde{I}(s) - \frac{\Psi}{\tau s} \beta(s) - \frac{1}{\tau s} \tilde{F}_C(s) \\ \tilde{P}_{AC}(s) &= \frac{(\Omega - \Phi)}{\tau s} \tilde{I}(s) + \frac{\Psi}{\tau s} \beta(s) - \frac{1}{\tau s} \tilde{F}_{AC}(s)\end{aligned}\quad (7)$$

(7)식의 연료극과 공기극의 압력조절은 각 전극의 출구유량을 조절하여 일정하게 유지하도록 한다면, 이때 시스템의 폐루프 전달함수의 block diagram은 그림 1과 같다

연료를 폐회로로 구성하여 스택에 공급할 경우 부하에 따라 연동되는 공기량에 따라 수소가 사용되므로 양 전극간 압력차는 공기극의 압력변동에 따라 변한다. 따라서 공기극의 출구유량을 조절하여 일정범위 이하의 압력으로 제어하도록 설계하였고 이때 시스템의 폐루프 전달함수의 block diagram은 그림 2와 같다.

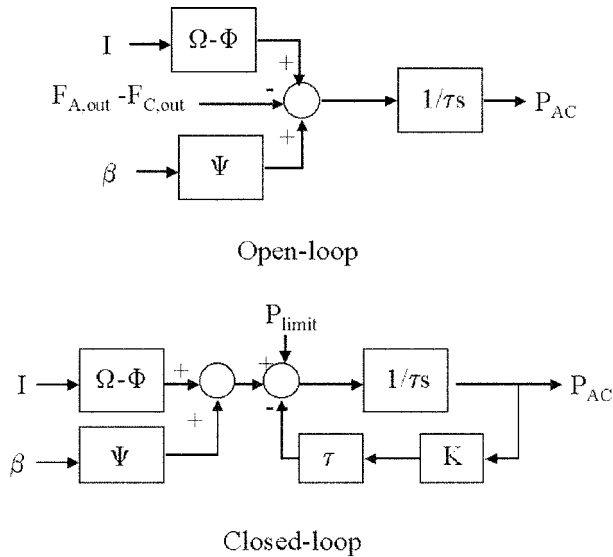


Fig. 2. Block diagram of pressure difference.

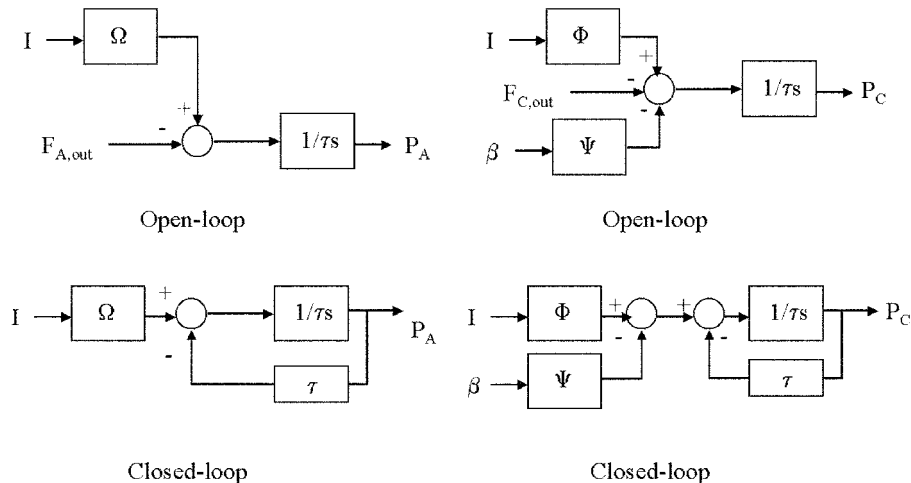


Fig. 1. Block diagram of anode and cathode pressure.

3. 제어 및 해석방법

측정된 전류와 유량으로 계산된 이용률과 설정된 이용률의 차이를 이용하여 설정이용률을 유지하기 위한 유량제어로서 주어진 공기량에서 부하에 적합한 이용률 이상으로 부하가 걸리지 않도록 제어하는 방법이다. 만약 성능저하가 발생한 경우에는 이용률을 낮게, 즉 공기량의 공급을 증가시켜 성능저하의 가속화를 방지해야 하며 이때 공기이용률을 이용하여 출력을 보상시킨다. 공기이용률은 출력전류에 의해 계산된 공기소모량(Q_{use})과 부하변동에 의해 요구되는 공급량(Q_{supply})과의 비율이므로 이때 변화율을 U_{air} 라 하고, 요구부하에 따른 전류변화율을 $U_{I,req}$ 라 하면 공기이용률과 출력전류의 변화율은 아래의 식과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{Q_{use}}{Q_{supply}} \right) = \frac{d\beta}{dt} = U_{air} \frac{dI_{req}}{dt} = U_{I,req} \quad (8)$$

그리고 요구부하에 대한 필요공기량은 다음과 같다.

$$U_{I,req} = 4\beta\gamma Q_{req} \quad (9)$$

전달함수를 구하기 위해 (8)식을 (9)식에 대입하여 라플라스 변환 하면 다음과 같다

$$I_{req}(s) = \frac{\Lambda}{s} Q_{req}(s) \quad (10)$$

where,

$$\Lambda = 4\beta\gamma$$

따라서 전달함수 $G(s) = \{I_{req}(s)/Q_{req}(s) = \Lambda/s\}$ 이 된다. 연료전지의 출력전류를 측정하여 요구부하와의 차이를 입구유량에 의해 조절한다면, 이때 시스템의 폐루프 전달함수의 block diagram은 그림 3과 같다. 여기서 k 는 PI제어기이며 H 는 측정 전류와 유량에 대한 변환 계수이다. 앞서 정의한 (8)식의 관계를 이용하여 요구부하에 대한 공기공급량 및 실제 반응에 소모된 공기사용량의 비율인 공기이용률에 대한 함수로 block diagram을 나타내면 그림 4와 같다.

연료전지 공정의 공기이용률 제어와 압력제어 모델식을

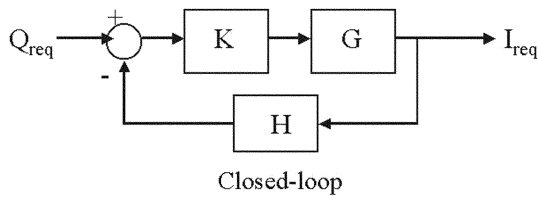


Fig. 3. Block diagram of control system.

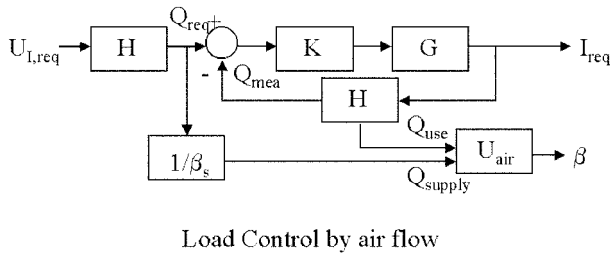


Fig. 4. Control strategy by utilization of airflow.

Table 1. System parameter.

Parameter	Value
Volume of anode or cathode (m^3) $V_A (= V_C)$	$3 \times 10^{-3} \times 2$
Current density (A/cm^2)	0.53
Area of electrode (cm^2)	300
Operate temperature ($^{\circ}C$) T_{cell}	45
Utilization (steady-state)	
α	0.75
β_{ss}	0.5

10 kW급 고분자연료전지(PEMFC)를 대상으로 MATLAB/SIMULINK 프로그램을 이용하여 해석하였다. 시스템 파라미터 값은 표 1과 같으며 부하변화에 따른 시스템의 동특성을 파악하기 위해 최대요구부하의 70%, 75%, 80%에 해당하는 부분부하를 20초 간격으로 5%씩 변화를 주었다. 시스템의 응답 요구사항으로 부분부하 변동에 따른 출력응답을 5초 이내로 추종하게 하며, 양 전극간 압력차를 0.01 atm 보다 낮게 유지되도록 하였다.

4. 결과 및 검토

연료전지모델을 이용하여 설계한 공기이용률제어 및 압력제어기로서 공정제어에 가장 많이 이용되는 비례적분제어기를 사용하였다. 일반적으로 비례적분제어기를 사용한 경우 최대응답값 및 응답속도에 따라 제어기의 게인이 달라지므로 주어진 시스템의 응답요구사항에 가장 적합한 게인을 구해야 한다.

본 연구에서는 모델식을 이용한 극배치법(Pole Placement, PP)을 사용하여 비례적분제어 게인을 구하고 이를 시행착오법(trial and error, TE)으로 구한 제어응답과 비교하였다.

그림 5는 최대요구부하의 70%, 75%, 80%에 해당하는 부하를 20초 간격으로 5%씩 부하를 변동시켰을 때의 연료전지출력에 대한 동적응답을 나타낸다. TE방법에 의한 응답의 경우 과도응답이 발생하여 부하변동시 시스템의 응답이 다소 불안정한

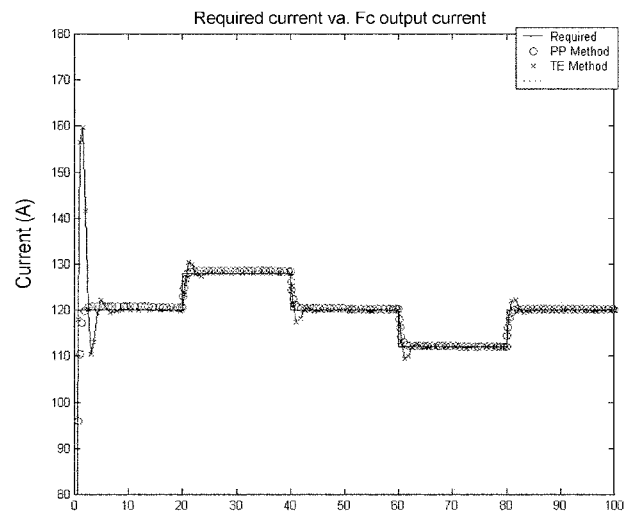


Fig. 5. Utilization of airflow control response in partial load change.

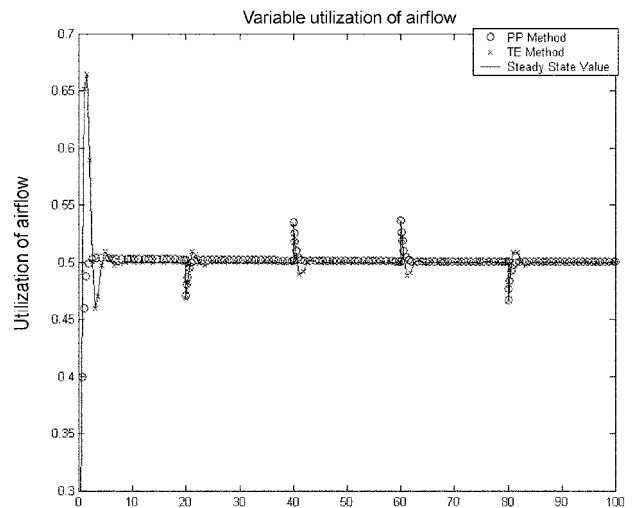


Fig. 6. Variation of utilization of airflow.

반면, 본 연구의 제어기 설정방법인 PP방법에 의한 응답은 비례게인, $K_P = 5$ 및 적분게인, $K_I = 0.1$ 일때 과도응답이 나타나지 않으며 요구부하에 대한 응답속도가 1.3초로 빠른 추종성을 보였다.

그림 6은 연료전지 출력의 부하추종에 따른 PP 및 TE방법에 의한 공기이용률 변화이다. TE방법에 비해 PP방법에 의한 응답 결과가 더 안정됨을 알 수 있다. PP방법에 의한 응답의 경우는 요구부하의 증가시 이용율의 순간적인 저하를 정상상태의 이용률인 0.5로 회복시키고 다시 부하가 감소하면 이용률의 증가를 정상상태 값으로 회복시킨다. 또한 정상상태 값으로의 회복이 1초 이내로 응답됨을 확인할 수 있었다.

그림 7은 PP 및 TE방법에 의한 유량제어시 연료극과 공기극의 압력변화 및 양 전극간 압력차이의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7(a)로 부터 부하증가시 공기극의 유량증가로 인한 압력상승을 볼 수 있다. 이때 연료극의 상대적 수소소모량을 높여 압력의 강하를 일으킨다. 반면 부하 감소시 공기극의 유량감소로 인한 압력강하는 연료극의 수소소모량을 낮추어 압력상승을 볼

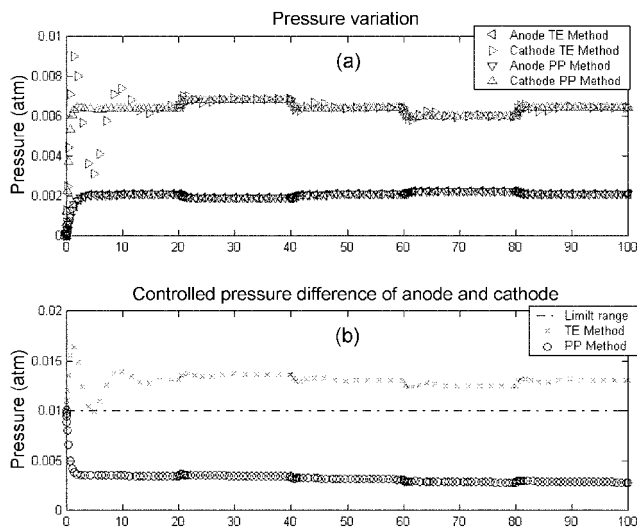


Fig. 7. (a) Pressure variation and (b) controlled pressure difference of anode and cathode.

수 있다. TE방법에 의한 응답이 PP방법에 비해 초기에 불안정한 oscillation이 발생함을 볼 수 있다.

그림 7(b)에서 TE방법에 의한 양 전극간 압력차이는 공기극의 불안정한 oscillation으로 인하여 압력제한치 이상의 응답이 나타난 반면, 본 연구의 제어기 설정방법인 PP방법에 의한 응답은 비례게인, $KP = 3$ 및 적분게인, $KI = 0.01$ 일때 초기 설정한 압력 제한치 0.01 atm 이하로 제어됨을 볼 수 있다.

본 연구에서는 연료전지의 수학적 모델링을 이용하여 제어모델을 설계하였으며 이를 통해 압력제어 및 공기이용률을 이용한 부하추종성능을 전산모사하였다. 이를 통해 실제 시스템의 압력 및 부하추종에 대한 가능성을 보였다. 하지만 실제 시스템 모델은 비선형성이 강하고 고려해야 할 변수가 많으며 시간에 따라 변하는 측정이 어려운 파라미터를 고려해야 하는 경우가 많다. 따라서 이러한 영향을 고려한 비선형제어 모델에 대한 연구

가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 연료전지의 입출력에 대한 물질수지를 이용하여 공기극과 연료극에 대한 압력식과 요구부하에 따른 공기이용률 식을 구했으며 이 식을 이용하여 공기이용률 제어와 압력 제어 모델식을 얻을 수 있었다. 제어모델식의 전산모사를 위해 10 kW 고분자 연료전지를 대상으로 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최대요구부하의 70%, 75%, 80%에 해당하는 부분부하 변화에 대해 본 연구의 제어방법인 PP방법을 이용하여 안정된 제어응답을 얻을 수 있었다.
2. PP방법을 통한 비례적분 제어게인을 사용하여 부분부하 증감소시에 공기이용률의 순간적인 변화를 1초 내에 정상상태로 회복하여 안정된 상태로 유지되는 것을 확인할 수 있었다.
3. 부분부하변동에 따른 연료극과 공기극의 양 전극간 압력차도 본 연구의 제어방법을 사용하여 압력차 제한값인 0.01 atm 이하로 제어됨을 확인하였다.

참고문헌

1. J. H. Lee and T. R. Lalk, Modeling fuel cell stack systems, *Journal of Power Sources*, **73**, 229 (1998).
2. J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System, *Proceedings of the American Control Conference*, Anchorage, AK, 3117 (2000).
3. J. H. Hirschenhofer, Fuel Cell Handbook, DOE/FETC-99/1076, 21 Nov. (1998).
4. 연료전지연구센터, 고분자 전해질 연료전지의 구성과 응용, 한국에너지기술연구원, 1, June (2001).
5. 5 kW급 고체고분자 연료전지 시스템개발에 관한 최종보고서, 산업자원부, 261.
6. T. H. Yang, G. G. Park, W. Y. Lee, and C. S. Kim, "Integration and Operation of 10kW PEMFC System for Hybrid Electric Vehicle," 1st European PEFC Forum proceeding, 469, July (2001).