연료전지 모델링 및 공기이용률 제어에 관한 연구
A fuel cell modeling and load controlling by the variable utilization of airflow

송석홍, 이원용*, 김창수*, 박영필
연세대학교, 한국에너지기술연구원*

1. 서론

연료전지의 안정된 연속운전과 빠른 부하 추종성을 만족시키기 위한 시스템을 설계하기 위해서는 동특성 분석이 필요하다. 이러한 특성은 대상공정에 대한 정확한 모델링을 통하여 이루어질 수 있으며, 이를 통해 적절한 제어기의 설계가 가능하다.

일반적으로 연료전지 제어의 주목표는 연료와 공기의 반응이 원활하게 이루어져 출력전류를 연속적이고 안정되게 얻어지도록 공정설비를 자동으로 조절하는 것이다. 연료전지에서 연료와 공기의 반응은 빠른 전기화학적인 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 이용율로 연료전지 전력이 출력될 수밖에 없다. 즉, 연료전지 자체는 주어진 범위에서 외부 부하에 대응하여 낮은 전압과 높은 전류상태로 빠르게 요구동력을 출력하게 되지만, 공정설비에서는 시간지연으로 인해 적정한 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 이용율 이상으로 부하가 걸리지 않도록 운전해야 하며, 만약 성능저하가 발생한 경우에는 이용률을 감소시켜 성능저하의 가속화를 방지해야 한다. 즉, 공급유량을 증가시켜 출력을 보상해야 한다. 출력을 보상시키기 위한 공급유량의 증가는 스택의 전극압력을 상승 시키게 된다. 또한 연료극의 반응에 사용되지 않은 수소를 순환시키도록 폐회로를 구성한 경우 실제반응에 이용되는 수소의 양은 반응공기의 양에 의해 결정되므로 공기극의 압력변동에 의해 양 전극간 압력차이가 발생할 수 있다. 따라서 일정한도 이상의 압력차가 발생하지 않도록 전극간 압력차이의 조절이 필요하다.

본 연구에서는 전극간 압력차이를 허용범위 이하로 유지하면서 급격한 외부 부하요구가 발생하더라도 부하에 적합한 가스 이용율 이상으로 전지 부하가 걸리지 않도록 하는 제어방법을 사용하였으며, 10kW고분자 연료전지(PEMFC)의 전산모사를 통해 모델의 타당성 및 제어 성능을 분석하였다.

2. 연료전지의 모델링

스택에서 발생시켜야 할 전압과 전류의 변동에 따라 연료극과 공기극에 보내야 할 수소와 공기의 양을 조절하는 것으로 요구되는 부하를 P(watt)라 하면, 임의 부하변화에 따른 양 전극의 연료와 공기의 변화량은 물질수지식에서 구할 수 있다.

$$\frac{dN_A}{dt} = \frac{I_t}{2\mathfrak{I}\alpha} - \frac{I_t}{2\mathfrak{I}} - F_{A,out}, \quad \frac{dN_C}{dt} = \frac{I_t}{2\mathfrak{I}\beta\gamma} - \frac{I_t}{2\mathfrak{I}} - F_{C,out}$$

where,
$\mathfrak{I}$: *cell voltage*(V), I_t : *total current*
α, β : *utilization of hydrogen and oxygen*
γ : *mole fraction of oxygen in air*$(=0.21)$
F_{out}: *exit flow*

(1)

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

$$\frac{dP_A}{dt} = \frac{RT_{cell}}{V_A}\left(\frac{I_t}{2\mathfrak{I}\alpha} - \frac{I_t}{2\mathfrak{I}} - F_{A,out}\right)$$
$$\frac{dP_C}{dt} = \frac{RT_{cell}}{V_C}\left(\frac{I_t}{2\mathfrak{I}\beta\gamma} - \frac{I_t}{2\mathfrak{I}} - F_{C,out}\right) \qquad (2)$$

where, P : *total pressure,* V : *total volume*

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

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

where,
$I_{t,ss}$: *total current at steady state*
β_{ss}: *utilization of oxygen at steady state*

양 전극간 압력차는 가스 압력식 (2), (3)으로부터 구할 수 있다

$$\frac{dP_{AC}}{dt} = \frac{RT_{cell}}{V_A}\left[\left(\frac{1}{2\mathfrak{I}\alpha} - \frac{1}{4\mathfrak{I}\beta_{ss}\gamma}\right)I_t + I_{t,ss}\frac{\beta-\beta_{ss}}{4\mathfrak{I}\beta_{ss}^2\gamma} - \left(\frac{1}{2\mathfrak{I}} - \frac{1}{4\mathfrak{I}}\right)I_t - (F_{A,out} - F_{C,out})\right] \qquad (4)$$

where, $P_{AC} = P_A - P_B$, $V_A = V_C$

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

$$\frac{d\tilde{P}_A}{dt} = \frac{RT_{cell}}{V_A}\left[\frac{I_t - I_{t,ss}}{2\Im\alpha} - \frac{I_t - I_{t,ss}}{2\Im} - (F_{A,out} - F_{A,out,ss})\right]$$

$$\frac{d\tilde{P}_C}{dt} = \frac{RT_{cell}}{V_C}\left[\frac{I_t - I_{t,ss}}{4\Im\beta_{ss}\gamma} - I_{t,ss}\frac{\beta - \beta_{ss}}{4\Im\beta_{ss}^2\gamma} - \frac{I_t - I_{t,,ss}}{4\Im} - (F_{C,out} - F_{C,out,ss})\right] \quad (5)$$

$$\frac{d\tilde{P}_{AC}}{dt} = \frac{RT_{cell}}{V_A}\left[\left(\frac{1}{2\Im\alpha} - \frac{1}{4\Im\beta_{ss}\gamma}\right)(I_t - I_{t,ss}) + I_{t,ss}\frac{\beta - \beta_{ss}}{4\Im\beta_{ss}^2\gamma} - \left(\frac{1}{2\Im} - \frac{1}{4\Im}\right)(I_t - I_{t,ss}) - (F_{A,out} - F_{A,out,ss}) - (F_{C,out} - F_{C,out,ss})\right]$$

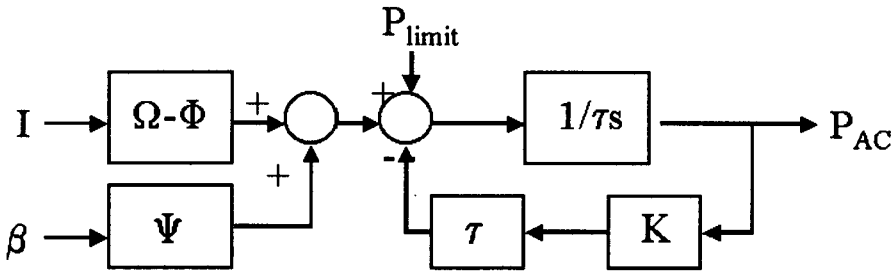
where, $\tilde{P}_A = P_A - P_{A,ss}$, $\tilde{P}_C = P_C - P_{C,ss}$, $\tilde{P}_{AC} = P_{AC} - P_{AC,ss}$

(5)식의 편차변수 및 각각의 파라미터를 아래와 같이 놓고 정리하고 전달함수를 구하기 위해 라플라스변환 하면 다음과 같다.

$$\tilde{I} = I_t - I_{t,ss}, \quad \tilde{\beta} = \beta - \beta_{ss}, \quad \tilde{F}_A = F_{A,out} - F_{A,out,ss},$$
$$\tilde{F}_C = F_{C,out} - F_{C,out,ss}, \quad F_{AC} = \tilde{F}_A - \tilde{F}_C,$$
$$\tau = \frac{V}{RT_{cell}}, \quad \Omega = \frac{1-\alpha}{2\Im\alpha}, \quad \Phi = \frac{\beta_{ss}\gamma - 1}{4\Im\beta_{ss}\gamma}, \quad \Psi = \frac{I_{t,ss}}{4\Im\beta_{ss}^2\gamma}$$

$$\tilde{P}_A(s) = \frac{\Omega}{\tau s}\tilde{I}(s) - \frac{1}{\tau s}\tilde{F}_A(s)$$
$$\tilde{P}_C(s) = \frac{\Phi}{\tau s}\tilde{I}(s) - \frac{\Psi}{\tau s}\tilde{\beta}(s) - \frac{1}{\tau s}\tilde{F}_C(s) \quad (6)$$
$$\tilde{P}_{AC}(s) = \frac{(\Omega - \Phi)}{\tau s}\tilde{I}(s) + \frac{\Psi}{\tau s}\tilde{\beta}(s) - \frac{1}{\tau s}F_{AC}(s)$$

(6)식의 연료극과 공기극의 압력조절은 각 전극의 출구유량을 조절하여 일정하게 유지하도록 한다. 연료를 폐회로로 구성하여 스택에 공급할 경우



Closed-loop

Fig.1 Block diagram for pressure difference

부하에 따라 연동되는 공기량에 따라 수소가 사용되므로 양 전극간 압력차는 공기극의 압력 변동에 따라 변한다. 따라서 공기극의 출구유량을 조절하여 일정범위 이하의 압력으로 제어하도록 설계하였고 이때 시스템 전달함수의 블록 다이아그램은 Fig. 1과 같다.

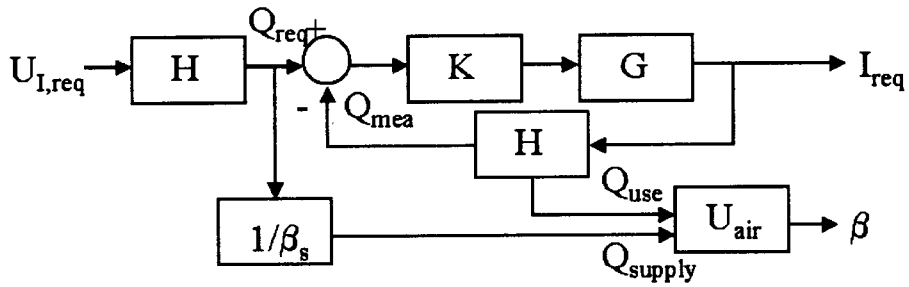
측정된 전류와 유량으로 계산된 이용률과 설정된 이용률의 차이를 이용하여 설정이용률을 유지하기 위한 제어로서 주어진 공기량에서 부하에 적합한 이용율 이상으로 부하가 걸리지 않도록 제어하는 방법이다. 만약 성능저하가 발생한 경우에는 이용율을 낮게, 즉 공기량의 공급을 증가시켜 성능저하의 가속화를 방지해야 하며 이때 공기이용율을 이용하여 출력을 보상시킨다.

공기이용률은 출력전류에 의해 계산된 공기소모량 (Q_{use})과 부하변동에 의해 요구되는 공급량(Q_{supply})과의 비율이므로 이때 변화율을 U_{air}라 하고, 요구부하에 따른 전류변화률을 $U_{I,req}$라면 공기이용률과 출력전류의 변화율은 다음식과 같다.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{Q_{use}}{Q_{supply}}\right)=\frac{d\beta}{dt}=U_{air},\quad \frac{dI_{req}}{dt}=U_{I,req}=4\mathfrak{I}\beta\gamma Q_{req} \qquad (7)$$

전달함수는 (7)식으로부터 라플라스변환 하여 전달함수를 구할 수 있다.

$$G(s)=\frac{I_{req}(s)}{Q_{req}(s)}=\frac{\Lambda}{s},\qquad where,\ \Lambda=4\mathfrak{I}\beta\gamma$$



Load Control by air flow

Fig.2 Air utilization control strategy

연료전지의 출력전류를 측정하여 요구부하와의 차이를 입구유량에 의해 조절한다. 앞서 정의한 (7)식의 관계를 이용하여 요구부하에 대한 공기공급량 및 실제 반응에 소모된 공기사용량의 비율을 이용한 공기이용률에 대한

함수로 block diagram을 나타내면 Fig. 2와 같다. 여기서, K는 PI제어기이며 H는 측정전류와 유량에 대한 변환계수이다.

3. 연료전지시스템의 제어성능모사

연료전지 공정의 연속운전 및 양 전극간 압력차 제어를 중심으로 구성한 모델식을 10kw급 고분자연료전지를 대상으로 해석했다. 부하 변화에 따른

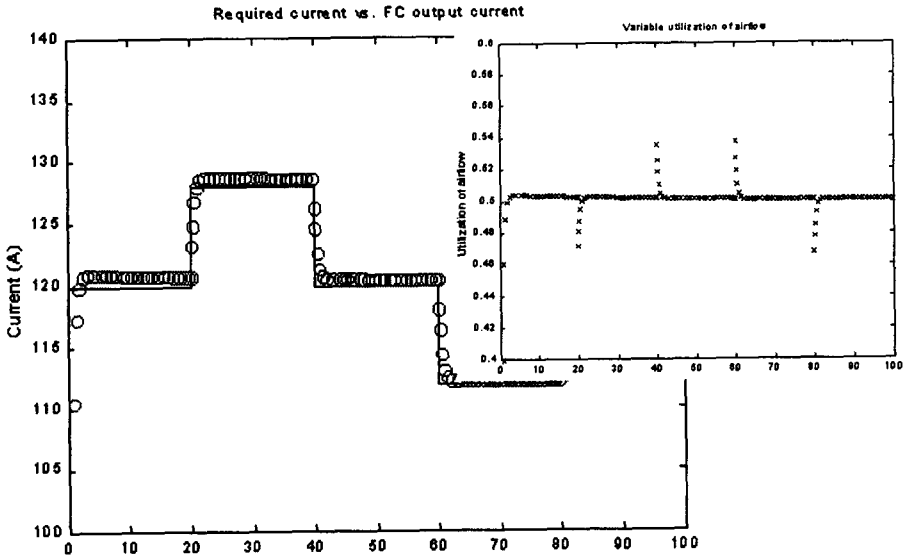


Fig. 3 Load response and variation of air utilization

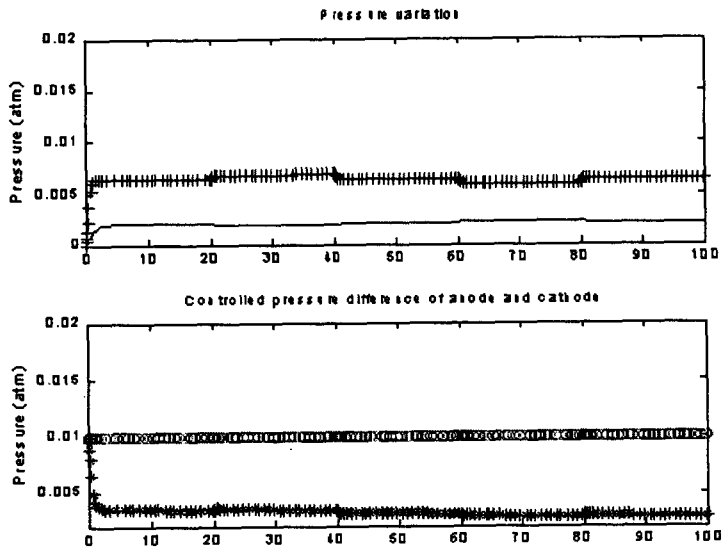


Fig. 4 (a) Pressure variation (b) controlled pressure difference between the anode and the cathode side

시스템의 동특성을 파악하기 위해 최대요구부하의 75%를 기준으로 부하를 20초 간격으로 5%씩 증감시켰다. Fig. 3과 Fig.4에서 알 수 있는 바와 같이 외부 부하변동에 따른 출력응답은 부하 크기와 증감에 따라 다소 차이가 있지만 부하가 증가할 경우 1초 이내로 추종하게 하며 양 전극간 압력차이를 0.01atm 보다 낮게 유지되었다.

4. 결론

1) 연료전지의 입출력에 대한 물질수지를 이용하여 공기극과 연료극에 대한 압력모델식을 얻을 수 있었으며, 부하변동에 따른 공기극의 유량만을 조절함으로서 공기이용률 제어 모델식을 얻을 수 있었다.
2) 10kw 고분자 연료전지의 전산모사에 있어(그림3. 참조) 최대요구부하의 70%, 75%, 80%에 해당하는 요구부하 변화에 대해 비례적분제어기를 사용하여 부하가 증가할 경우 정착시간(settling time) 1초 이내로 출력응답을 얻을 수 있었다
3) 부하변동에 따른 연료극과 공기극의 압력변동이 발생하더라도 양 전극간 압력차(그림4. 참조) 0.01atm 이하로 초기 제한치 이하의 안정된 압력을 얻을 수 있었다.

참고문헌

[1] 연료전지연구센터, 고분자 전해질 연료전지의 구성과 응용, 한국에너지기술연구원, pp. 4-1~29, June, 2001.
[2] J.H. Hirschenhofer, Fuel Cell Handbook, DOE/FETC-99/1076, pp. 2-1~27, November, 1998.
[3] 5kw급 고체고분자 연료전지 시스템개발에 관한 최종보고서, 산업자원부, pp. 261~301
[4] T. H. Yang , G. G. Park, W. Y. Lee, C. S. Kim, "Integration and Operation of 10kW PEMFC System for Hybride Electric Vehicle," 1st European PEFC Forum proceeding pp. 469-476, July, 2001.