

고분자 연료전지 발전시스템에 대한 비선형 관측기 설계

論 文
58-2-15

Nonlinear Observer Design for PEM Fuel Cell Systems

金應錫* · 金澈珍†
(Eung-Seok Kim · Cheol-Jin Kim)

Abstract - In this paper, the robust nonlinear observer will be developed for PEM fuel cell system. Nonlinear model of PEM fuel cell system is introduced to study the design problems of observer. Sliding mode observer is designed to estimate the cathode and anode pressures of PEMFC system. And a nonlinear state observer is also designed to estimate the other states such as supply manifold pressure, Oxygen pressure, Hydrogen pressure, return manifold pressure, etc. The validity of the proposed observer will be verified by using Lyapunov's stability analysis method.

Key Words : PEMFC, Sliding observer, Nonlinear observer, Lyapunov stability

1. 서 론

연료전지시스템에 대한 연구는 차량 혹은 발전소 등에 적용하기 위하여 활발히 진행되고 있다. 특히, 고분자 연료전지는 자동차 및 가정용 연료전지에 대하여 상대적으로 우수한 성능을 발휘할 수 있기 때문에 근래 들어 많은 연구결과들이 제시되고 있다[1,3]. 그러나 연료전지 모델링에 대한 수많은 연구결과들이 제시되고 있지만 연료전지 제어시스템 설계 및 관측기 설계를 위한 적절한 모델링에 대한 연구는 상대적으로 많지 않다. 실제 연료전지 시스템의 과도현상은 공기압축기 동특성 및 공기 유동, 애노드 및 캐소드 측의 기체 과급기 동특성, 멤브레인 내부 습도 등을 포함하고 있다. 이러한 변수들은 연료전지 스택전압에 영향을 주고 이로 인해 연료전지의 성능 및 발전 전력에도 영향을 미치게 된다 [1,3]. 참고문헌 [4]에서는 기체유동과 열유동을 고려한 PEMFC 모델을 제시하였다. 이 모델은 연료전지 셀의 성능을 계산하기 위하여 멤브레인 내부의 움저항, 수분발생 및 전류분포, 기체 공급 관 내부의 온도변화 등을고려하였다. 이 모델은 연료전지 셀의 성능을 분석하는데 효과적이다. 참고문헌 [5]에서는 연료전지의 애노드 측에서의 수소 압력을 추정하기위한 비선형 적응 관측기를 설계하였다. 수소 압력을 입력측에서 매우 느리게 변하는 파라미터로 간주하고 적응 관측기를 이용하여 추정하는 방법을 도입하였다. 이 방법은 PEMFC 전체 시스템에는 적용하기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 연료전지시스템의 과도상태 및 정상상태를 정확하게 제어하기 위하여 내부의 모든 상태를 관측할 수

있는 비선형 관측기를 설계하기로 한다. 참고문헌 [2]에서 제시한 축차관측기를 이용하여 캐소드 및 애노드 압력 추정기를 설계한다. 이를 이용하여 추정한 캐소드 및 애노드 압력을 이용하여 캐소드 내부의 산소압력과 애노드 내부의 수소압력을 추정하는 비선형 관측기를 설계하기로 한다. 제안한 관측기들의 타당성은 Lyapunov 안정도 해석법을 이용하여 검증하기로 한다.

2. 연료전지시스템 수학적 모델

본 논문에서의 연구대상인 연료전지시스템에 대한 개략도를 그림 1에 제시하였다. 여러 개로 구성된 연료전지 셀의 캐소드 및 애노드 각각의 부피들은 하나의 스택 내의 캐소드 및 애노드 부피로 간주하기로 한다.

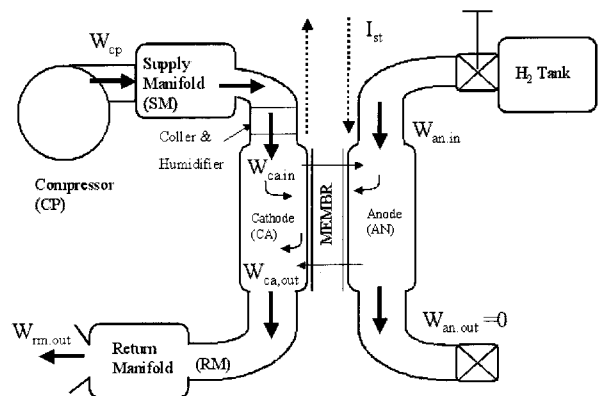


그림 1 연료전지 시스템 개략도 [1].

Fig. 1 Simplified fuel cell reactant supply system [1].

* 正 會 員 : 漢 拏 大 學 校 制 御 計 測 工 學 科 副 教 授 · 工 博

† 교신저자, 正會員 : 漢拏大學校 制御計測工學科 教授 · 工博

E-mail : cjkim@halla.ac.kr

接受日字 : 2008年 10月 11日

最終完了 : 2008年 12月 4日

2.1 캐소드 압력 모델

이 모델은 공기 압축기 동특성, 과급기(the supply manifold) 동특성 및 캐소드 동특성을 포함하고 있다. 캐소드 동특성은 질량보존의 법칙, 열역학 및 습공기(psychrometric) 특성 등을 이용하여 모델링하였으며, 참고 문헌[1]의 질량모델을 압력모델로 변환한 모델이다.

$$\frac{d\omega_{cp}}{dt} = -\eta_{cm} \frac{k_i k_v}{R_{cm} J_{cp}} \omega_{cp} + \eta_{cm} \frac{k_i}{R_{cm} J_{cp}} v_{cm} - \frac{c_p T_{atm} k_{cp}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \Phi \quad (1)$$

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = -\frac{\gamma R_a T_{sm} k_{sm,out}}{V_{sm}} p_{sm} + \frac{\gamma R_a T_{cp} k_{cp} \Phi}{V_{sm}} \omega_{cp} + \frac{\gamma R_a T_{sm} k_{sm,out}}{V_{sm}} p_{ca} \quad (2)$$

$$\frac{dp_{O_2}}{dt} = -\frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} M_{O_2} \frac{n}{4F} I_{st} - \frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} \left(\frac{x_{O_2,in} k_{ca,in}}{1+\omega_{ca,in}} + \frac{x_{O_2,out} k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}} \right) (p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca}) + \frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{x_{O_2,in} k_{ca,in}}{1+\omega_{ca,in}} p_{sm} + \frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{x_{O_2,out} k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}} p_{rm} \quad (3)$$

$$\frac{dp_{N_2}}{dt} = \frac{R_{N_2} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{(1-x_{O_2,in}) k_{ca,1}}{1+\omega_{ca,in}} p_{sm} + \frac{R_{N_2} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{(1-x_{O_2,out}) k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}} p_{rm} - \frac{R_{N_2} T_{ca}}{V_{ca}} \left[\frac{(1-x_{O_2,in}) k_{ca,1}}{1+\omega_{ca,in}} + \frac{(1-x_{O_2,out}) k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}} \right] (p_{N_2} + p_{O_2} + p_{v,ca}) \quad (4)$$

$$\frac{dp_{v,ca}}{dt} = \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{M_v n (1+2A_{fc} n_d)}{2F} I_{st} - \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{M_v A_{fc} n D_w}{t_m} [f(p_{v,ca}) p_{v,ca} - f(p_{v,an}) p_{v,an}] - \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \left[\frac{\omega_{ca,in} k_{ca,1}}{1+\omega_{ca,in}} + \frac{\omega_{ca,out} k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}} \right] (p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca}) + \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{\omega_{ca,in} k_{ca,1}}{1+\omega_{ca,in}} p_{sm} + \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{\omega_{ca,out} k_{ca,out}}{1+\omega_{ca,out}} p_{rm} \quad (5)$$

3. 비선형 관측기 설계

캐소드와 애노드 각각의 압력은 연료전지 스택의 전압에 직접적으로 영향을 끼친다. 또한 연료전지 발생 전력 및 효율에 미치는 영향도 크다. 그러나 캐소드 및 애노드 측 내부의 압력을 직접 측정하는 것은 매우 어렵다[1]. 이러한 문제는 비선형 관측기를 이용하여 해결할 수 있으며, 관측된 변수들은 제어기 설계에도 적절히 이용할 수 있다. 기체 과급기 압력을 1차 필터를 통과시키고, 필터링된 과급기 압력

을 슬라이딩 모드 관측기 설계에 이용하여 캐소드 및 애노드 압력을 추정한다. 추정된 캐소드 및 애노드 압력은 산소 및 수소 압력을 추정하기 위한 비선형 상태관측기 설계에 이용한다.

3.1 비선형 산소압력 관측기 설계(캐소드 압력 측정이 가능한 경우)

이제까지 캐소드 압력 p_{ca} 와 애노드 압력 p_{an} 에 대한 관측기를 설계하였다. 이 절에서는 관측 값들을 이용하여 캐소드 내의 산소압력을 추정할 수 있는 비선형 관측기를 설계하기로 한다. $y_1 = p_{ca}$, $x^T = [x_3 \ x_4 \ x_5] = [p_{O_2} \ p_{N_2} \ p_{v,ca}]$, 그리고 $u^T = [p_{sm} \ I_{st}]$ 로 정의하면, 식(3)~(5)는 다음과 같이 비선형 상태 공간 모델로 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{dx_3}{dt} = -a_{33} x_3 - a_{34} x_4 - a_{35} x_5 + a_{32} p_{sm} + a_{38} p_{rm} - b_{32} I_{st} \quad (6)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = -a_{44} x_4 - a_{43} x_3 - a_{45} x_5 + a_{42} p_{sm} + a_{48} p_{rm}$$

$$\frac{dx_5}{dt} = -(a_{55} + a_{555} f(x_5)) x_5 - a_{53} x_3 - a_{54} x_4 + a_{52} p_{sm} + a_{555} f(p_{v,an}) p_{v,an} + a_{58} p_{rm} + b_{52} I_{st}$$

$$x = A_1 x + d_1 + B_1 u \quad (7)$$

$$y_1 = C x$$

여기서 $A_1 \in R^{3 \times 3}$ 이고 $B_1 \in R^{3 \times 2}$ 이며 $C = [1 \ 1 \ 1]$ 이고 $d_1^T = [a_{38} p_{rm} \ a_{48} p_{rm} \ a_{555} f(p_{v,an}) p_{v,an} + a_{58} p_{rm}]$ 이다. 만일, $y_1 = x_3 + x_4 + x_5 = p_{ca}$ 를 정확하게 직접 측정할 수 있다면, 위의 상태공간 모델에 대하여 상태관측기를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}} = A_1 \hat{x} + \hat{d}_1 + B_1 u + \xi_1 + K(\hat{y}_1 - y_1) \quad (8)$$

$$\hat{y}_1 = C \hat{x}$$

여기서 관측기 이득벡터 $K(\in R^{3 \times 1})$ 는 요소들이 모두 음(negative)이며, $\xi_1 = \beta_1 C^T \xi(\hat{y}_1)$ 이고 $\xi(\hat{y}_1)$ 은 다음과 같다.

$$\xi_1(\hat{y}_1) = \begin{cases} 1, & \hat{y}_1 > \delta_1 \\ \hat{y}_1 / \delta_1, & -\delta_1 \leq \hat{y}_1 \leq \delta_1 \\ -1, & \hat{y}_1 < -\delta_1 \end{cases} \quad (9)$$

여기서 $\delta_1 (> 0)$ 은 설계 파라미터이다. 상태관측오차를 $\tilde{x} = \hat{x} - x$ 와 같이 정의하면 다음의 상태오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= A_c \tilde{x} + \tilde{d}_1 + \xi_1 \\ \tilde{y}_1 &= C \tilde{x} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $A_c = A_1 + KC$ 이고, $\|\tilde{d}_1\| (= \|\hat{d}_1 - d_1\|)$ 는 유계이며 그의 상한 $\lambda_d (> \|\tilde{d}_1\|)$ 은 아는 값이다. 행렬 P 의 고유치의 최소값과 최대값을 p_{\min} 과 p_{\max} 로 정의하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

정리 1 : 만일 $PA_c + A_c^T P = -Q$ 와 $3p_{\min}|\tilde{y}_1| \leq \|P\tilde{x}\| \leq 3p_{\max}|\tilde{y}_1|$ 을 만족하는 행렬 $P (= P^T > 0)$ 와 행렬 $Q (= Q^T > 0)$ 가 존재한다면, 식(8)의 상태관측기는 식(7)로 주어진 시스템의 관측오차시스템 식(10)의 점근적 안정도를 보장하고 관측오차의 지수함수적 수렴성을 보장한다.

증명:

$V = \tilde{x}^T P \tilde{x}$ 와 같이 정의하면, 1계 도함수는 다음과 같다.

$$\dot{V} \leq -\tilde{x}^T Q \tilde{x} + 6\lambda_d p_{\max}|\tilde{y}_1| - 6\frac{\beta_1 p_{\min}}{\delta_1}|\tilde{y}_1| \quad (11)$$

여기서 β_1 과 δ_1 은 설계 파라미터로서 부등식 $\beta_1/\delta_1 > p_{\max} \lambda_d / p_{\min}$ 을 만족한다. 이 관계를 이용해 위의 식(11)를 다시 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\tilde{x}^T Q \tilde{x} - 6p_{\min} \left\{ \frac{\beta_1}{\delta_1} - \frac{p_{\max} \lambda_d}{p_{\min}} \right\} |\tilde{y}_1| \\ &\leq -\frac{\lambda_{Q_{\min}}}{\lambda_{P_{\max}}} V \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 V, \dot{V} 는 지수함수적으로 안정하고, $\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, \tilde{y}_1$ 는 점근적인 빠르기로 '0'으로 수렴한다. 즉, 캐소드 압력 $p_{ca} (= y_1)$ 의 정확한 측정이 가능하다면 이를 이용해서 $x^T = [x_3 \ x_4 \ x_5] = [p_{O_2} \ p_{N_2} \ p_{v,ca}]$ 의 정확한 추정이 가능함을 알 수 있다. 그러나 실제로는 $y_1 (= p_{ca})$ 의 정확한 측정은 매우 어렵다[1]. 만일 $y_1 (= p_{ca})$ 을 별도의 관측기를 이용해 먼저 정확히 추정이 가능하다면 식(8)의 상태관측기는 다음과 같이 다시 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A_1 \hat{x} + \hat{d}_1 + B_1 u + \xi_1 + K(\hat{y}_1 - \tilde{y}_1) \\ \hat{y}_1 &= C \hat{x} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 \hat{y}_1 는 별도관측기를 이용한 추정치이다. $\tilde{y}_1 = \hat{y}_1 - y_1$ 으로 정의하고 식(10)의 상태오차방정식을 식(13)의 상태관측기를 이용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{x}} = A_c \tilde{x} + \tilde{d}_1 + \xi_1 - K \tilde{y}_1 \quad (14)$$

위의 식(14)을 이용하면 식(11)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{V} \leq -\lambda_{Q_{\min}} \|\tilde{x}\|^2 + 2\lambda_{PK_{\max}}|\tilde{y}_1| \|\tilde{x}\| \quad (15)$$

여기서 $\lambda_{PK_{\max}} (\geq \|PK\|)$ 는 상수이다. 위의 식(15)를 완전제곱꼴로 다시 정리하면

$$\dot{V} \leq -\lambda_{Q_{\min}} \left\{ \|\tilde{x}\| - \frac{\lambda_{PK_{\max}}|\tilde{y}_1|}{\lambda_{Q_{\min}}} \right\}^2 + \frac{\lambda_{PK_{\max}}^2}{\lambda_{Q_{\min}}} |\tilde{y}_1|^2 \quad (16)$$

이 된다. 여기서 만일 $|\tilde{y}_1| (\leq c_1)$ 가 유계임을 만족한다면,

$$\|\tilde{x}\| = 2 \frac{\lambda_{PK_{\max}}}{\lambda_{Q_{\min}}} |\tilde{y}_1|$$
 근방에서 유계이다. 따라서 다음 절에

서는 $y_1 (= p_{ca})$ 에 대해 $|\tilde{y}_1| (\leq c_1)$ 를 만족하는 관측기를 설계하여 이를 해결하고자 한다.

3.2 캐소드 압력 관측기 설계

p_{ca} 의 정확한 값을 알 수 있다면 식(13)의 상태관측기로부터 상태 $x^T = [x_3 \ x_4 \ x_5] = [p_{O_2} \ p_{N_2} \ p_{v,ca}]$ 에 대한 관측오차는 식(16)의 캐소드 압력을 추정하기 위하여 식(2)를 p_{ca} 에 관해 다음과 같이 정리하여 다시 쓰기로 한다.

$$p_{ca} = a_{ca,1} \frac{dp_{sm}}{dt} + p_{sm} - a_{ca,2} W_{cp} \quad (17)$$

여기서, $a_{ca,1} \left(= \frac{V_{sm}}{\gamma R_a T_{sm} k_{sm,out}} \right)$, $a_{ca,2} \left(= \frac{T_{cp}}{T_{sm} k_{sm,out}} \right)$ 는 값을 아는 파라미터이다. 과급기 압력 p_{sm} 과 공기압축기의 질량유량 $W_{cp} (= k_{cp} \Phi \omega_{cp})$ 또한 센서를 통해 측정함으로써 아는 변수들이다. 만일 p_{sm} 의 1계 도함수를 추정할 수 있다면 다음과 같이 캐소드압력 p_{ca} 에 대한 개루프 관측기를 설계할 수 있다.

$$\hat{p}_{ca} = a_{ca,1} \frac{d\hat{p}_{sm}}{dt} + \hat{p}_{sm} - a_{ca,2} W_{cp} \quad (18)$$

여기서 $\frac{d\hat{p}_{sm}}{dt}$ 는 p_{sm} 의 1계 도함수 $\frac{dp_{sm}}{dt}$ 의 추정치이다. 개루프 관측기 오차를 $\tilde{p}_{ca} = \hat{p}_{ca} - p_{ca}$ 로 정의하면, 위의 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{\tilde{p}}_{ca} = a_{ca,1} \frac{d\tilde{p}_{sm}}{dt} \quad (19)$$

위의 식(19)로부터 알 수 있듯이 관측오차 $\widetilde{p}_{\alpha} = \widehat{p}_{\alpha} - p_{\alpha}$ 의 시간에 따른 크기의 변화는 전적으로 $\frac{dp_{sm}}{dt}$ 의 추정치 $\frac{d\widehat{p}_{sm}}{dt}$ 의 안정도 및 수렴도에 의존한다. 이제 캐소드 압력 p_{α} 을 고이득관측기(High gain observer)를 이용하여 재구성하기로 한다.

$$p_{f,\alpha} = \frac{\mu_{f1}s + 1}{\mu_{f1}^2 s^2 + \mu_{f1}s + 1} p_{\alpha} \quad (20)$$

여기서 's'는 라플라스 연산자이고, $\mu_{f1} (\ll 1)$ 은 고이득관측기 이득이다. 고이득관측기 오차의 절대크기는 $O(\mu_{f1})$ 에 속한다[2][6]. 위의 식(20)에서 p_{α} 를 직접 사용할 수 없다. 따라서 식(17)을 이용하여 다음과 같이 다시 쓰기로 한다.

$$p_{f,\alpha} = \frac{a_{\alpha,1} \mu_{f1} s^2 + (\mu_{f1} + a_{\alpha,1})s + 1}{\mu_{f1}^2 s^2 + \mu_{f1}s + 1} p_{sm} - \frac{a_{\alpha,2}(\mu_{f1}s + 1)}{\mu_{f1}^2 s^2 + \mu_{f1}s + 1} W_{cp} \quad (21)$$

식(21)에서 분자의 s^2 항을 분리해서 다시 쓰면 아래와 같다.

$$p_{f,\alpha} = \frac{a_{\alpha,1}}{\mu_{f1}} p_{sm} + p_{f,sm} - W_{f,cp} \quad (22)$$

위의 식(22)를 이용하면 측정 가능한 p_{sm} 과 W_{cp} 만을 이용함으로써 p_{α} 를 추정할 수 있다. 위 식에서 관측기 오차 $\widetilde{p}_{f,\alpha} (= p_{f,\alpha} - p_{\alpha})$ 는 $O(\mu_{f1})$ 에 속하므로 필터 상수 μ_{f1} 을 충분히 작게 설계한다면 관측오차를 원하는 크기 이내로 줄일 수 있을 것이다. 즉, 실제 p_{α} 를 직접 이용할 수는 없지만 식(21)을 이용한다면 $O(\mu_{f1})$ 에 비례하는 오차범위 내의 값을 관측기 설계에 활용할 수 있음을 알 수 있다. 이론적으로는 고이득관측기 이득 μ_{f1} 을 작게 설계할수록 관측오차의 크기가 줄어들지만, 실제 시뮬레이션 혹은 마이컴을 이용한 실험을 수행할 경우에는 사용하는 컴퓨터의 계산범위를 넘기지 않도록 관측기 이득크기를 조절해야 하며 적절한 이득크기는 반복실험을 통해 찾을 수 있다. 이러한 문제는 참고 문헌 [2]와 [6]에서 제안한 축차관측기(Cascade Observer)를 이용하면 해결할 수 있다.

3.3 산소압력 관측기 설계(캐소드 압력 추정치를 이용하는 경우)

식(8)의 상태관측기를 $y_1 (= p_{\alpha})$ 대신에 식(21)의 $y_{f1} (= p_{f,\alpha})$ 를 이용하여 다시 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A_1 \hat{x} + \hat{d}_1 + B_1 u + \xi_1 + K(\hat{y}_1 - y_{f1}) \\ \hat{y}_1 &= C \hat{x} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 $K (\in R^{3 \times 1})$ 은 양의 상수로서 관측기이득이며, $\xi_1 = \beta_1 C^T \xi(\widetilde{y}_{f1})$, $\widetilde{y}_{f1} = \hat{y}_1 - y_{f1}$ 이고 $\xi(\widetilde{y}_{f1})$ 은 다음과 같다.

$$\xi(\widetilde{y}_{f1}) = \begin{cases} 1, & \widetilde{y}_{f1} > \delta_{f1} \\ \widetilde{y}_{f1}/\delta_{f1}, & -\delta_{f1} \leq \widetilde{y}_{f1} \leq \delta_{f1} \\ -1, & \widetilde{y}_{f1} < -\delta_{f1} \end{cases} \quad (24)$$

여기서 $\delta_{f1} (> 0)$ 은 설계 파라미터이다. 상태관측오차 $\widetilde{x} = \hat{x} - x$ 및 출력오차 $\widetilde{y}_1 = \hat{y}_1 - y_1$ 에 대해서 다음의 오차방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\widetilde{x}} = A_c \widetilde{x} + \widetilde{d}_1 + \xi_1 - K \widetilde{y}_{f1} \quad (25)$$

이때 $\widetilde{y}_{f1} = \hat{y}_1 - y_{f1}$, $y_{f1} = y_1 + c_{f1}$ 이므로 식(25)는

$$\dot{\widetilde{x}} = A_c \widetilde{x} + \widetilde{d}_1 + \xi_1 - K(\widetilde{y}_1 - c_{f1}) \quad (26)$$

로 다시 쓸 수 있다. 여기서 $c_{f1} \in O(\mu_{f1})$ 인 양의 상수이다.

정리 2 : 만일 $PA_c + A_c^T P = -Q$ 와 $3p_{\min} |\widetilde{y}_1| \leq \|P \widetilde{x}\| \leq 3p_{\max} |\widetilde{y}_1|$ 을 만족하는 행렬 $P (= P^T > 0)$ 와 행렬 $Q (= Q^T > 0)$ 가 존재한다면, 식(7)로 주어진 시스템에 대한 식(23)의 상태관측기는 관측오차시스템 식(25)의 관측오차의 잔여오차 집합 $E_R = \left\{ V, |\widetilde{x}| \mid V \leq \frac{4 \lambda_{PK_{\max}}^2 c_{f1}^2}{\lambda_{Q_{\min}}^2}, |\widetilde{x}| \leq \frac{2 \lambda_{PK_{\max}} \lambda_{P_{\max}}^{1/2}}{\lambda_{Q_{\min}}} c_{f1} \right\}$ 으로의 점근적 수렴성을 보장한다.

증명 : $V = \widetilde{x}^T P \widetilde{x}$ 와 같이 정의하면, 식(26)으로부터 1계 도함수는 다음과 같다.

$$\dot{V} \leq -\frac{\lambda_{Q_{\min}}}{2\lambda_{P_{\max}}} V - \frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} \|\widetilde{x}\|^2 + 2c_{f1} \lambda_{PK_{\max}} \|\widetilde{x}\| \quad (27)$$

여기서 $\lambda_{PK_{\max}} (\geq \|PK\|)$ 는 상수이다. 위의 식(27)을 완전 제곱꼴로 다시 정리하면

$$\dot{V} \leq -\frac{\lambda_{Q_{\min}}}{2\lambda_{P_{\max}}} V + \frac{2c_{f1}^2 \lambda_{PK_{\max}}^2}{\lambda_{Q_{\min}}} \quad (28)$$

와 같이 쓸 수 있다. 따라서 다음과 같이 잔여오차집합(residual error set)을 정의할 수 있다.

$$E_R = \left\{ V, \|\widetilde{x}\| \mid V \leq \frac{4 \lambda_{PK_{\max}}^2 c_{f1}^2}{\lambda_{Q_{\min}}^2}, \|\widetilde{x}\| \leq \frac{2 \lambda_{PK_{\max}} \lambda_{P_{\max}}^{1/2}}{\lambda_{Q_{\min}}} c_{f1} \right\} \quad (29)$$

위의 결과로부터 관측기오차는 결국 캐소드압력 p_{α} 에 대한 추정오차에 비례함을 알 수 있다. 이는 앞의 3.1절의 결과와도 일치함을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션

여기서는 식(1)~(5) 및 식(a-1)~(a-3)으로 주어진 연료전지 동특성모델에 대한 시뮬레이션 결과를 검토하기로 한다. 시뮬레이션에서 사용한 파라미터는 참고문헌 [1]과 [3]의 시뮬레이션에서 사용한 값을 이용하였다. 식(23)과 식(24)로 주어진 상태관측기의 설계 파라미터는 $\beta_1 = 100$, $\delta_{f1} = 0.001$, $K^T = [100 \ 100 \ 100]$ 으로 하였다. 식(20)과 식(21)의 고이득 관측기 설계 파라미터는 $\mu_{f1} = 0.001$ 로 하였다. 다음의 그림 2는 스택전압 변동을 나타내었다. 스택전압은 공기과급기 제어입력전압 변동과 비례하며 공기과급기 입력은 부하전류 변동에 비례하도록 제어된다. 스택동작온도 정규 값은 80°C로 가정했다.

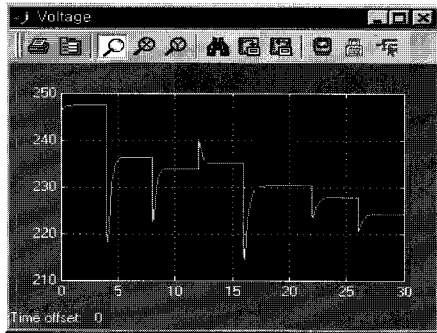


그림 2 스택전압[V].
Fig. 2 Stack Voltage[V].

그림 3은 캐소드 압력 p_{ca} 와 필터링된 캐소드 압력(고이득관측 캐소드압력) $p_{f,ca}$ 를 나타내고 있다. 그림 4는 $p_{f,ca}$ 와 p_{ca} 의 오차값을 나타내고 있다. 식(22)로 재구성된 고이득관측기로부터 얻은 $p_{f,ca}$ 와 실제 측정이 어려운 캐소드 압력 p_{ca} 와의 오차가 거의 없음을 위의 그림 3과 그림 4로부터 알 수 있다. 따라서 식(23)으로 주어진 캐소드 내 산소압력 관측기를 구현하기 위해서 실제 측정이 어려워 관측기 구현에 사용할 수 없는 캐소드 압력 p_{ca} 대신에 고이득관측 압력 $p_{f,ca}$ 를 이용함으로써 스택내부의 산소압력관측에 대한 가능성이 보임을 알 수 있다. 아래의 그림 5는 캐소드 내의 산소압력 p_{O_2} 에 대하여 식(23)~식(24)의 상태관측기를 실행하여 얻은 추정치와의 비교 결과이다. 아래의 결과로부터 캐소드 내 산소압력의 관측도 잘되고 있음을 볼 수 있다.

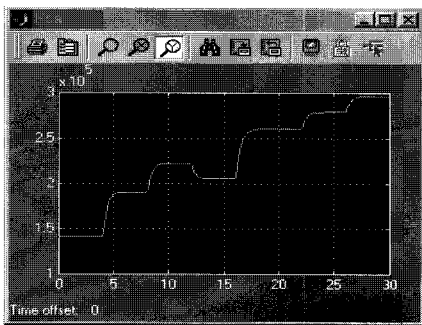


그림 3 캐소드 압력 p_{ca} 와 고이득 관측 값 $p_{f,ca}$ [Pa].
Fig. 3 Cathode pressure p_{ca} and high gain observer value $p_{f,ca}$ [Pa].

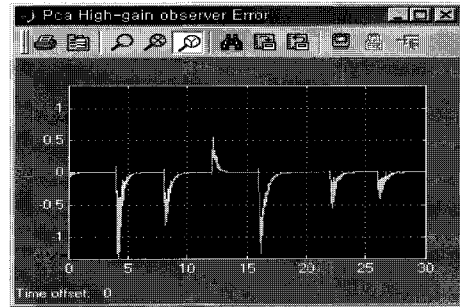


그림 4 고이득 관측오차 $p_{f,ca} - p_{ca}$ [Pa].
Fig. 4 High gain observation error $p_{f,ca} - p_{ca}$ [Pa].

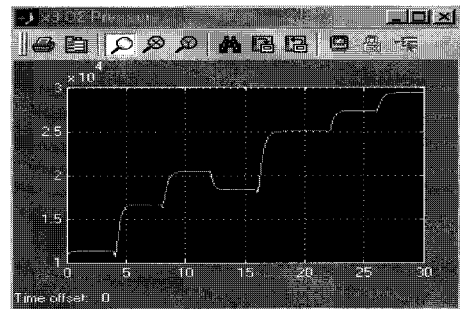


그림 5(a) 캐소드 산소압력 $x_3 (= p_{O_2})$ 와 추정치 $\hat{x}_3 = \hat{p}_{O_2}$ [Pa].
Fig. 5(a) O_2 pressure $x_3 (= p_{O_2})$ and estimates $\hat{x}_3 = \hat{p}_{O_2}$ [Pa].

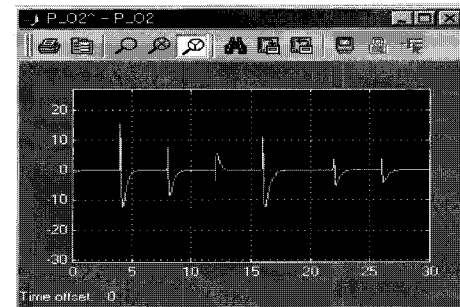


그림 5(b) 캐소드 산소압력 추정오차 $\tilde{x}_3 (= \tilde{p}_{O_2})$ [Pa].
Fig. 5(b) O_2 pressure estimation error $\tilde{x}_3 (= \tilde{p}_{O_2})$ [Pa].

5. 결론

본 논문에서는 고분자 연료전지 시스템에 대한 비선형 관측기 설계 문제를 다루었다. 고분자 연료전지 시스템의 비선형 모델을 관측기 설계에 적용하였다. 고이득관측기를 이용하여 캐소드 압력을 추정하였다. 비선형 상태관측기를 설계하여 캐소드 내 산소압력을 추정할 수 있음을 보였다. 제안한 관측기들의 타당성을 Lyapunov stability analysis를 이용하여 입증하였다. 애노드압력모델과 애노드압력 관측기 및 애노드 내의 수소압력 관측기의 설계기법에 대해서는 본 논문의 부록에 기술하였다. 캐소드 및 애노드 내부의 압력을 정확히 측정하는 것은 매우 어려운 문제이지만 연료전지 발전시스템 제어기의 성능 및 효율향상을 위해서 해결해야 할 문제이기도 하다. 본 논문에서 제시한 관측기를 이용할 경우 별도의 스택에 공급되는 산소 및 수소의 압력을 직접

측정하지 않더라도 비교적 정확히 관측할 수 있음을 알 수 있다. 향후 실제 시스템에 대한 적용시험을 통하여 실용화 가능성을 검토할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] J. T. Pukrushpan, H. Peng, and A. G. Stefanopoulou, "Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems," Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 126, pp.14-25, March 2004.
 [2] D. H. Kim, H. O. Wang, and E. S. Kim, "Cascade Observers for Nonlinear Systems and Application to Nonlinear Output Feedback Control," JSME International Journal, Vol.49, No.2, pp.463-472, June 2006.
 [3] J. T. Pukrushpanand, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, Control of Fuel Cell Power Systems, Springer, 2004.
 [4] K. Dannenberg, P. Ekdunge and G. Lindbergh, "Mathematical model of the PEMFC," Journal of Applied Electrochemistry, Vol.30, pp.1377-1387, 2000.
 [5] M. Arcak, H. Gorgun, L. M. Pedersen and S. Varigonda, "An Adaptive Observer Design for Fuel Cell Hydrogen Estimation," Proc. American Contr. Conf., Denver, Colorado, June 4-6, 2003, pp.2037-2042.
 [6] E. S. Kim, C. J. Kim and K. S. Eom, "Nonlinear Observer Design for PEM Fuel Cell Systems," Proc. of ICEMS 2007, Seoul, Oct. 8~11, 2007. pp.1835-1839.

부록 A-1. 애노드 압력 모델 및 상태관측기

이 모델은 캐소드 압력 모델과 매우 흡사하다. 여기서는 수소 저장탱크로부터 애노드 측에 순수한 수소가 공급되는 것으로 가정하고 모델링하였다[1].

$$\frac{dp_{sm,an}}{dt} = -\frac{R_{H_2} T_{sm,an} k_{sm,an,out}}{V_{sm,an}} p_{sm,an} + \frac{R_{H_2} T_{sm,an} k_{sm,an,out}}{V_{sm,an}} p_{an} \quad (a-1)$$

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = -\left(\frac{k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{H_2,out}\right) \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} p_{H_2} - \left(\frac{k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{H_2,out}\right) \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} p_{v,an} + k_{H_2,out} \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} (p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca}) \quad (a-2)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{R_H T_{an}}{V_{an}} M_{H_2} \frac{n}{2F} I_{st} + \frac{k_1}{1 + \omega_{an,in}} \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} p_{sm,an} \\ \frac{dp_{v,an}}{dt} = & -\left(\frac{\omega_{an,in} k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{v,an,out}\right) \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} p_{v,an} - \left(\frac{\omega_{an,in} k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{v,an,out}\right) \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} p_{H_2} \\ & + k_{v,an,out} \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} (p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca}) \\ & + \frac{\omega_{an,in} k_1}{1 + \omega_{an,in}} \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} p_{sm,an} \\ & + \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} M_v A_{fc} n D_w \left[f(p_{v,ca}) p_{v,ca} - f(p_{v,an}) p_{v,an} \right] \\ & - \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} \frac{M_v A_{fc} n n_d}{F} I_{st} \end{aligned} \quad (a-3)$$

여기서 $x_2^T = [x_6 \ x_7] = [p_{H_2} \ p_{v,an}]$ 와 $u_2^T = [p_{sm,an} \ I_{st}]$ 로 정의하고 상태공간모델 표현을 이용하면 식(a-1)~(a-3)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= A_2 x_2 + d_2 + B_2 u_2 \\ y_2 &= C_2 x_2 \end{aligned} \quad (a-4)$$

여기서 $d_2^T = [a_{6,345} p_{ca} \ a_{777} f(p_{v,ca}) p_{v,ca} + a_{7,345} p_{ca}]$ 이고, $A_2 \in R^{2 \times 2}$, $B_2 \in R^{2 \times 2}$, $C_2 = [1 \ 1]$ 이다. 산소압력 관측기 설계 문제를 다룰 때와 마찬가지로 애노드 압력 $y_2 (= p_{an})$ 를 정확히 알 수 있다면, 아래와 같이 비선형 수소압력 관측기를 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 &= A_2 \hat{x}_2 + \hat{d}_2 + B_2 u_2 + \xi_2 + K_2 (\hat{y}_2 - y_2) \\ \hat{y}_2 &= C_2 \hat{x}_2 \end{aligned} \quad (a-5)$$

여기서 $K_2 (\in R^{2 \times 1})$ 는 관측기 이득 행렬, $\hat{y}_2 = \hat{y}_2 - y_2$, $\xi_2 = \beta_2 C_2^T \xi(\hat{y}_2)$ 이고 $\xi(\hat{y}_2)$ 는 다음과 같다.

$$\xi(\hat{y}_2) = \begin{cases} -1, & \hat{y}_2 > \delta_2 \\ \hat{y}_2 / \delta_2, & -\delta_2 \leq \hat{y}_2 \leq \delta_2 \\ 1, & \hat{y}_2 < -\delta_2 \end{cases} \quad (a-6)$$

관측오차를 $\tilde{x}_2 = \hat{x}_2 - x_2$ 로 정의하면, 관측오차 방정식은

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_2 &= A_{e2} \tilde{x}_2 + \tilde{d}_2 + \xi_2 \\ \tilde{y}_2 &= C_2 \tilde{x}_2 \end{aligned} \quad (a-7)$$

와 같다. 여기서 $A_{e2} = A_2 + K_2 C_2$ 이고, $\|\tilde{d}_2\|$ 는 유계이며 그의 상한 $\lambda_{d2} (> \|\tilde{d}_2\|)$ 은 아는 값이다. 행렬 P 의 고유치의 최소값과 최대값을 p_{min} 과 p_{max} 로 정의하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

정리 A-1: 만일 $PA_{e2} + A_{e2}^T P = -Q$ 와 $3p_{min} |\tilde{y}_2| \leq \|P \tilde{x}_2\| \leq 3p_{max} |\tilde{y}_2|$ 를 만족하는 행렬 $P (= P^T > 0)$ 와 행렬 $Q (= Q^T > 0)$ 가 존재한다면, 식(a-5)의 상태관측기는 시스템 식(a-4)에 대한 관측오차시스템 식(a-7)의 점근적 안정도를 보장하고 관측오차의 지수함수적 수렴성을 보장한다.

증명: $V_2 = \tilde{x}_2^T P \tilde{x}_2$ 와 같이 정의하면, 그 1계 도함수는

$$\dot{V}_2 \leq -\tilde{x}_2^T Q \tilde{x}_2 + 6 \lambda_{d2} p_{max} |\tilde{y}_2| - 6 \frac{\beta_2 p_{min}}{\delta_2} |\tilde{y}_2| \quad (a-8)$$

이다. 여기서 β_2 와 δ_2 는 부등식 $\beta_2 / \delta_2 > p_{max} \lambda_{d2} / p_{min}$ 을 만족하는 설계파라미터이다. 이 관계를 이용해 위의 식(a-8)를 다시 정리하면 아래와 같다.

$$\dot{V}_2 \leq -\frac{\lambda_{Q_{min}}}{\lambda_{P_{max}}} V_2 \quad (a-9)$$

따라서 V_2 , \dot{V}_2 는 지수함수적으로 안정하고, \tilde{x}_2 , $\dot{\tilde{x}}_2$, \tilde{y}_2 는 점근적인 빠르기로 '0'으로 수렴한다. 즉, 애노드 압력 $p_{an} (= y_2)$ 의 정확한 측정이 가능하다면 이를 이용해서

$x_2^T = [x_7 \ x_8] = [p_{H_2} \ p_{v,an}]$ 의 정확한 추정이 가능함을 알 수 있다. 그러나 실제로는 $y_2 (= p_{an})$ 의 정확한 측정은 매우 어렵다[1].

부록 A-2. 애노드 압력 관측기 설계

식(a-1)을 p_{an} 에 관해 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p_{an} = a_{an,1} \frac{dp_{sm,an}}{dt} + p_{sm,an} \quad (a-10)$$

고이득관측기를 이용하여 위의 식(a-10)을 아래와 같이 재구성하기로 한다.

$$p_{f,an} = \frac{1}{\mu_{f_2}s + 1} p_{an} \quad (a-11)$$

$$= a_{an,1} \frac{1}{\mu_{f_2}s + 1} \frac{dp_{sm,an}}{dt} + \frac{1}{\mu_{f_2}s + 1} p_{sm,an}$$

여기서 's'는 라플라스 연산자이고, $\mu_{f_2} (\ll 1)$ 는 고이득관측기의 이득이다. 고이득관측기의 오차의 절대크기는 $O(\mu_{f_2})$ 에 속한다[2][6]. 위의 식(a-11)에서 p_{an} 혹은 $\frac{dp_{sm,an}}{dt}$ 를 직접 사용할 수 없으므로 식(a-10)을 이용하여 다음과 같이 다시 쓰기로 한다.

$$p_{f,an} = \frac{a_{an,1}}{\mu_f} p_{sm,an} + \frac{1 - (a_{an,1}/\mu_f)}{\mu_f s + 1} p_{sm,an} \quad (a-12)$$

$p_{f,sm,an} = \frac{1 - (a_{an,1}/\mu_f)}{\mu_f s + 1} p_{sm,an}$ 으로 정의하면, 위의 식을 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$p_{f,an} = \frac{a_{an,1}}{\mu_f} p_{sm,an} + p_{f,sm,an} \quad (a-13)$$

위의 식(a-13)을 이용하면 측정 가능한 $p_{sm,an}$ 만을 이용하여으로써 p_{an} 을 추정할 수 있다. 위 식에서 관측기 오차 $\widetilde{p}_{f,an} (= p_{f,an} - p_{an})$ 는 $O(\mu_{f_2})$ 에 속하므로 필터 상수 μ_{f_2} 을 충분히 작게 설계한다면 관측오차를 원하는 크기 이내로 줄일 수 있을 것이다.

부록 A-3 수소압력 관측기 설계(캐소드 압력 추정치를 이용하는 경우)

식(a-5)의 상태관측기를 $y_2 (= p_{an})$ 대신에 식(a-13)의 $y_{f_2} (= p_{f,an})$ 을 이용하여 다시 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\widehat{x}}_2 &= A_2 \widehat{x}_2 + \widehat{d}_2 + B_2 u_2 + \xi_2 + K_2 (\widehat{y}_2 - y_{f_2}) \\ \widehat{y}_2 &= C_2 \widehat{x}_2 \end{aligned} \quad (a-14)$$

여기서 $\xi_2 = \beta_2 C_2^T \xi(\widetilde{y}_{f_2})$, $\widetilde{y}_{f_2} = \widehat{y}_2 - y_{f_2}$ 이고 $\xi(\widetilde{y}_{f_2})$ 은 다음과 같다.

$$\xi(\widetilde{y}_{f_2}) = \begin{cases} \widetilde{1}, & \widetilde{y}_{f_2} > \delta_{f_2} \\ \widetilde{y}_{f_2} / \delta_{f_2}, & -\delta_{f_2} \leq \widetilde{y}_{f_2} \leq \delta_{f_2} \\ -1, & \widetilde{y}_{f_2} < -\delta_{f_2} \end{cases} \quad (a-15)$$

여기서 $\delta_{f_2} (> 0)$ 은 설계 파라미터이다. 상태관측오차 $\widetilde{x}_2 = \widehat{x}_2 - x_2$ 및 출력오차 $\widetilde{y}_2 = \widehat{y}_2 - y_2$ 에 대해서 다음의 오차방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\widetilde{x}}_2 = A_{c2} \widetilde{x}_2 + \widetilde{d}_2 + \xi_2 - K_2 \widetilde{y}_{f_2} \quad (a-16)$$

이때 $\widetilde{y}_{f_2} = \widehat{y}_2 - y_{f_2}$, $y_{f_2} = y_2 + c_{f_2}$ 이므로 식(25)는

$$\dot{\widetilde{x}}_2 = A_{c2} \widetilde{x}_2 + \widetilde{d}_2 + \xi_2 - K_2 (\widetilde{y}_2 - c_{f_2}) \quad (a-17)$$

로 다시 쓸 수 있다. 여기서 $c_{f_2} \in O(\mu_{f_2})$ 인 양의 상수이다.

정리A-2: 만일 $PA_{c2} + A_{c2}^T P = -Q$ 와 $3p_{\min} |\widetilde{y}_2| \leq \|P \widetilde{x}_2\| \leq 3p_{\max} |\widetilde{y}_2|$ 을 만족하는 행렬 $P (= P^T > 0)$ 와 행렬 $Q (= Q^T > 0)$ 가 존재한다면, 시스템 식(a-4)에 대한 상태관측기 식(a-14)는 관측오차시스템 식(a-16)의 관측오차의 잔여오차집합 $E_{R2} = \left\{ V_2, |\widetilde{x}_2| \mid V_2 \leq \frac{4 \lambda_{PK_{\max}}^2}{\lambda_{Q_{\min}}^2} c_{f_2}^2, |\widetilde{x}_2| \leq \frac{2 \lambda_{PK_{\max}} \lambda_{P_{\max}}^{1/2}}{\lambda_{Q_{\min}}} c_{f_2} \right\}$ 으로의 점근적 수렴성을 보장한다.

증명 : $V_2 = \widetilde{x}_2^T P \widetilde{x}_2$ 와 같이 정의하면, 식(a-17)로부터 그 1계 도함수는 다음과 같다.

$$\dot{V}_2 \leq -\frac{\lambda_{Q_{\min}}}{2\lambda_{P_{\max}}} V_2 - \frac{\lambda_{Q_{\min}}}{2} \|\widetilde{x}_2\|^2 + 2c_{f_2} \lambda_{PK_{\max}} \|\widetilde{x}_2\| \quad (a-18)$$

여기서 $\lambda_{PK_{\max}} (\geq \|PK_2\|)$ 는 상수이다. 위의 식(a-18)을 완전 제곱꼴로 다시 정리하면

$$\dot{V} \leq -\frac{\lambda_{Q_{\min}}}{2\lambda_{P_{\max}}} V + \frac{2c_{f_1}^2 \lambda_{PK_{\max}}^2}{\lambda_{Q_{\min}}} \quad (a-19)$$

와 같이 쓸 수 있다. 따라서 다음과 같이 잔여오차집합(residual error set)을 정의할 수 있다.

$$E_{R2} = \left\{ V_2, |\widetilde{x}_2| \mid V_2 \leq \frac{4 \lambda_{PK_{\max}}^2}{\lambda_{Q_{\min}}^2} c_{f_2}^2, |\widetilde{x}_2| \leq \frac{2 \lambda_{PK_{\max}} \lambda_{P_{\max}}^{1/2}}{\lambda_{Q_{\min}}} c_{f_2} \right\} \quad (a-20)$$

위의 결과로부터 관측기오차는 결국 애노드 압력 p_{an} 에 대한 추정오차에 비례함을 알 수 있다.

부록 B 상태공간모델 파라미터

$$a_{33} = a_{34} = a_{35} = a_{32} + a_{38}, \quad a_{32} = \frac{x_{O_2,in} k_{ca,1} R_{O_2} T_{ca}}{1 + \omega_{ca,in} V_{ca}},$$

$$a_{38} = \frac{x_{O_2,out} k_{ca,out} R_{O_2} T_{ca}}{1 + \omega_{ca,out} V_{ca}},$$

$$b_{32} = \frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} M_{O_2} \frac{n}{4F},$$

$$a_{43} = a_{44} = a_{45} = a_{42} + a_{48}, \quad a_{42} = \frac{(1 - x_{O_2, in})k_{ca,1} R_{N_2} T_{ca}}{1 + \omega_{ca, in} V_{ca}},$$

$$a_{48} = \frac{(1 - x_{O_2, out})k_{ca, out} R_{N_2} T_{ca}}{1 + \omega_{ca, out} V_{ca}},$$

$$a_{53} = a_{54} = a_{55} = a_{52} + a_{58}, \quad a_{52} = \frac{\omega_{ca, in} k_{ca,1} R_{v, ca} T_{ca}}{1 + \omega_{ca, in} V_{ca}},$$

$$a_{58} = \frac{\omega_{ca, out} k_{ca, out} R_{v, ca} T_{ca}}{1 + \omega_{ca, out} V_{ca}},$$

$$b_{52} = \frac{M_v n (1 + 2A_{fc} n_d) R_{v, ca} T_{ca}}{2F V_{ca}},$$

$$a_{555} = \frac{M_v A_{fc} n D_w R_{v, ca} T_{ca}}{t_m V_{ca}},$$

$$a_{66} = a_{67} = \left(\frac{k_1}{1 + \omega_{an, in}} + k_{H_2, out} \right) \frac{R_H T_{an}}{V_{an}},$$

$$a_{63} = a_{64} = a_{65} = \frac{k_{H_2, out} R_H T_{an}}{V_{an}},$$

$$b_{62} = \frac{R_H T_{an} M_{H_2} n}{V_{an} 2F}, \quad b_{63} = \frac{k_1 R_H T_{an}}{1 + \omega_{an, in} V_{an}},$$

$$a_{76} = a_{77} = \left(\frac{\omega_{an, in} k_1}{1 + \omega_{an, in}} + k_{v, an, out} \right) \frac{R_{v, an} T_{an}}{V_{an}},$$

$$a_{73} = a_{74} = a_{75} = \frac{k_{v, an, out} R_{v, an} T_{an}}{V_{an}},$$

$$b_{72} = \frac{M_v A_{fc} n n_d R_{v, an} T_{an}}{F V_{an}}, \quad a_{777} = \frac{R_{v, an} T_{an} M_v A_{fc} n D_w}{V_{an} t_m},$$

$$f(p_{v,i}) = \frac{p_{m, dry}}{M_{m, dry}} \frac{1.4}{p_{sat,i}} \begin{cases} \frac{17.81}{1.4} - \frac{39.85}{1.4} \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} + \frac{36}{1.4} \left(\frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} \right)^2 & 0 < \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} \leq 1 \\ 1 & 1 < \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} \leq 3 \end{cases}$$

v = Voltage (V)
x = Mass fraction or system state vector
y = Mole fraction or system measurements
 γ = Ratio of the specific heats of air
 η = Efficiency
 λ = Excess ratio or water content
 ρ = Density (kg/cm^3)
 τ = Torque (N-m)
 ϕ = Relative humidity
 ω = Rotational speed (rad/sec)
 k_t, k_v, R_{cm} = Motor constants
 η_{cm} = Motor mechanical efficiency

아랫첨자
act = Activation Loss
air = Air
an = Anode
ca = Cathode
conc = Concentration Loss
cp = Compressor
gen = Generated
in = Inlet
m = Membrane
membr = Across membrane
ohm = Ohmic loss
out = Outlet
rm = Return manifold
sm = Supply manifold
v = Vapor
w = Water

부록 C 기호정리

기호
 A_{fc} = Fuel cell active area (cm^2)
 A_T = Valve opening area (m^2)
 C_D = Throttle discharge coefficient
 C_p = Specific heat ($J kg^{-1} K^{-1}$)
 D_w = Membrane diffusion coefficient (cm^2/sec)
 E = Fuel cell open circuit voltage (V)
 F = Faraday's number (Coulombs)
 I = Stack current (A)
 J = Rotational inertia ($kg m^2$)
 M = Molecular Mass (kg/mol)
 P = Power (Watt)
 R = Gas constant or electrical resistance (Ω)
 T = Temperature (K)
 V = Volume (m^3)
 W = Mass flow rate (kg/sec)
 a = Water activity
 c = Water concentration (mol/cm^3)
 d_{cp} = Compressor diameter (m)
 i = Current density (A/cm^2)
 m = Mass (kg)
 n = Number of cells
 n_d = Electro-osmotic drag coefficient
 p = Pressure (P_a)
 t = time (sec)
 t_m = Membrane thickness (cm)
 u = System input

저 자 소 개



김응석 (金應錫)

1988년 2월 한양대 전기공학과 졸업.
 1990년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사).
 1993년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업 (박사).
 1994년~1999년 삼성종합기술원 전문연구원.
 1999년~현재 한라대학교 제어계측공학과 부교수/전기에너지 연구센터 센터장.
 Tel : (033) 760-1248
 Fax : (033) 760-1241
 E-mail : eskim@halla.ac.kr



김철진 (金澈珍)

1980, 한양대 공대 전기공학과 졸업.
 1983, 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사).
 1991, 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사).
 1991-1995, 생산기술연구원, KETI 제어기기 연구실장.
 1995-2009. 현재, 한라대학교 제어계측공학과 교수.
 2003-2009. 현재, 대한전기학회, 이사/평의원.
 Tel : (033) 760-1245
 Fax : (033) 760-1241
 E-mail : cjkim@halla.ac.kr