

고분자막전해질 연료전지의 열관리

유상석*, 김한석*, 이상민*, 이영덕*, 안국영*[†]

*한국기계연구원

Thermal Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Sangseok Yu*, Hanseok Kim*, Sangmin Lee*, Youngduk Lee*, Kookyoung Ahn*[†]

ABSTRACT

A dynamic system model of a proton exchange membrane fuel cell(PEMFC) has been developed. The PEMFC of this study has large active area with water cooling in order to simulate the performance of the commercially viable PEMFC system for the transportation. A PEMFC stack model is a transient thermal model which is respond to the dynamic change of the coolant temperature and the flow rate. The dynamic cooling system model has been developed to determine the coolant flow rate and the coolant temperature. Prior to the system level study, thermal management criteria have been set up and brought to the control command of the cooling system. Since the system model is designed to evaluate the effect of thermal management on the system performance, it is attempted to determine the proper control algorithm of the cooling system so that the PEMFC system is working on the thermal management criteria. As a result of simulation, feedback controlled cooling system consumes less power and produce more power comparing with that of conventionally controlled cooling system.

KEY WORDS : proton exchange membrane fuel cell system(PEMFC system, 고분자 막전해질 연료전지 시스템), cooling system(냉각시스템), thermal management (열관리), feedback control(피드백 제어)

Nomenclature

a : specific surface area of the agglomerates
A : area (cm²)
c : concentration (mole/cm³)
D : diffusivity (cm²/s)

F : Faraday's constant (C/mole)
 Δg_f^o : Gibb's free energy at STP (J/ mole)
h : heat transfer coefficient (W/m²s)
J : current density (A/cm²)
 \dot{m} : mass flow rate(kg/s)
 N_i : gas mole flux (mole/cm²s)
p : perimeter (m) or total pressure (atm)

[†]Corresponding author : kyahn@kimm.re.kr

- P : power (W)
- Δp : pressure difference (kPa)
- R : universal gas constant (J/molK)
- t : thickness (m)
- T : temperature (K)
- V : electric potential (V)
- x_i : mole fraction
- δ : Nafion[®] thickness on agglomerate (cm)
- η : Cathode overpotential (V)
- κ : electric conductivity (mho/cm)
- λ : water content
- v : stoichiometry flow coefficient

Subscripts and Superscripts

- act : active area
- A : anode side
- c : coolant
- C : cathode side
- cond : condenser
- eff : effective properties
- FC : fuel cell
- g : gas
- grill : radiator grill
- H₂ : hydrogen
- in : inlet
- mem : membrane
- N₂ : nitrogen
- o : outlet
- ON : oxygen mole fraction in air
- O₂ : oxygen
- rad : radiator
- w : water vapor

1. 서 론

연료전지 차량은 재생 연료와 초저공해라는 전 세계적 요구 조건을 만족하며 현재 활발한 연구개발이 진행 중이다. 특히 고분자 막 전해질 연료전지(Proton exchange membrane fuel cell, 이하 PEMFC)는 제작이 용이하고, 시동 시간이 빠르고, 출력밀도도 내연기관에 경쟁할 만하며, 효율이 우수하여 차량용으로 적합한 것으로 알려져 있다. 하

지만, 아직 PEMFC가 시장에 소개되기까지는 여러 부분에서의 기술적 진보가 필요한데, 이 중 시스템의 운용 측면에서는 특히 열관리와 물관리가 중요하다.

PEMFC의 전기화학반응은 Bernardi등과 Springer등에 의해 연구되었다¹⁻⁴. 공냉식 소형 연료전지의 정상상태 물관리 및 열관리 모델은 Nguyen 등과 Fuller등에 의해 연구되었다^{5,6}. 이들 연구자들은 소형 단전지의 정상상태 전기화학적 특성에 대해 주로 관심을 가지고 연구하였으며, Amphlett 등은 연료전지의 비정상 열적 거동을 해석할 수 있는 모델을 제안하였다⁷. Francesco 등은 막 전해질의 습증기 수송과 비정상 온도 응답에 대한 연료전지 스택 성능을 해석할 수 있는 모델을 제시하였다⁸. 하지만, 이 비정상 상태 해석 모델들은 실험식에 기초하여 일반성이 부족해 특정 연료전지에 대한 해석만 가능하고, 막 전해질의 저항 변화와 전기화학반응에 의한 손실을 제대로 예측하지 못했다. 한편, 시스템에 대한 연구 중 연료전지 차량 개발자들은 연료전지의 작동온도가 기존 내연기관보다 낮기 때문에 고 성능 냉각계통의 개발이 필요하다고 보고하였다^{9,10}.

본 연구에서는, 연료전지 시스템용 냉각계통을 해석할 수 있는 모델을 개발하는 것을 목표로 한다. 이를 위해, 비정상 운전시의 연료전지 스택의 성능을 평가할 수 있는 해석적 모델을 개발하고, 비정상 해석이 가능한 냉각 계통 모델을 개발하며 두개 모델을 통합한 모델을 개발해 연료전지 시스템의 냉각계통과 시스템 성능에 대한 연구를 수행한다. 냉각계통의 제어로직을 평가하기 위해 제어 로직의 기준 조건을 정하였으며, 스택과 냉각계통의 연계운전을 통해 냉각계통의 운전에 적절한 제어법을 결정하는 것이다.

2. 모델 접근법

2.1 개요

본 연구에서 개발하는 두 개의 중요 모델은 연료전지 스택 모델과 비정상에서 연료전지의 온도

Table 1 Specification of FC Stack

Parameters	Value
Fuel cell length(<i>l</i>)	0.196 (m)
Fuel cell width(<i>w</i>)	0.196 (m)
Catalyst layer thickness(<i>z_{act}</i>)	1.2910 ⁻⁵ (m)
Membrane thickness(<i>t_{mem}</i>)	1.0810 ⁻⁴ (m)
Characteristic length(<i>L</i>)	1 (mm)
Ratio of specific area to char. thickness of electrolyte (<i>d/a</i>)	6.5×10 ⁻¹⁰ (cm ²)
Fuel cell temperature(<i>T_{FC}</i>)	75 (°C)
Total pressure (<i>P_C, P_A</i>)	3 (atm)
Number of cells in FC stack	400
<i>n_{H2}, n_{O2}</i>	1.05, 2.0
Equivalent weight(<i>M_n</i>)	1100 (kg/kmol)
Dry density of membrane(<i>r_{dry}</i>)	2.0 (kg/m ³)
Charge transfer coefficient(<i>b</i>)	1.24

응답을 조절하는 냉각계통 모델이다. 연료전지 스택 모델은 다시 전기 화학 반응을 모사하기 위한 군집체에서의 전기화학 반응 모델(agglomerate structured electrochemical reaction model)과, 막 전해질에서의 습증기 수송을 모사하기 위한 습증기 수송 모델(water transport model), 그리고 비정상 온도 응답을 모사하는 열전달 모델로 구성되어 있다. 냉각계통은 방열판, 냉각팬, 냉각 펌프 등으로 구성하였다. 본 연구는 연료전지 시스템의 비정상 상태 온도 응답에 초점을 맞추기 때문에, 공기 공급계, 수소 공급계, 습도 공급계 등은 단순히 필요량을 공급해 줄 수 있다고 가정하였다. Table 1에서는 연료전지 스택의 사양을 찾을 수 있다.

2.2 연료전지 스택 모델

2.2.1 습증기 수송 모델

일반적으로 Nafion[®]계열 막전해질은 전기전도도가 막내에서의 습증기 농도에 매우 민감하므로, 막 전해질에서의 습증기의 농도를 적절히 관리하는 것이 연료전지의 성능에 매우 중요하다. 이러한 전해질 특성을 모사하기 위해, Springer 등은 막 전해질의 습증기 함유도(Water content, λ)는 양쪽

전극에서의 습증기 농도와와 관계에 의해 결정된다고 제안하였다³⁾. PEMFC의 막 내부에서의 양쪽 전극의 전압차에 의한 전기 삼투현상(electroosmotic force)은 습증기를 공기극 쪽으로 이동시키려 하며, 반대로 양 전극의 농도차에 의한 확산력은 습증기를 연료극 쪽으로 이동시키려 한다. 전기 삼투 구동력은 전기 삼투 계수(electro-osmotic drag coefficient)와 반응 수소 농도를 이용해 다음과 같이 표현한다.

$$N_{w,drag} = \frac{5}{22} \lambda \frac{J}{2F} \quad (1)$$

공기극에서는 양 전극의 습증기 농도차에 의한 역방향 확산이 발생되며 Fick의 1법칙에 의해:

$$N_{w,diff} = -\frac{\rho_{dry}}{M_m} D_\lambda \frac{d\lambda}{dz} \quad (2)$$

여기서 확산계수, D_λ ,는 온도와 습증기 함유도에 따라 변하는 계수로 Springer 등에서 찾을 수 있다³⁾. 습증기 수송 모델은 두 구동력은 종 보존 방정식에 적용하여 유도할 수 있다. 즉, 막 전해질 내에 반응이 없고 정상상태를 가정하면:

$$\frac{\rho_a}{M_m} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_\lambda \frac{\partial \lambda}{\partial z} \right) - \frac{5}{22} \frac{J}{2F} \frac{\partial \lambda}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

경계조건을 구하기 위해서는 계면에서의 습증기 함유도(water content, λ)를 알아야 한다. Springer 등에 따르면 전극과 촉매층 사이 계면의 습증기 함유도는 습증기 활성과 다음과 같은 관계가 있다³⁾.

$$0 < a < 1: \lambda = 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36a^3 \quad (4a)$$

$$1 < a \leq 3: \lambda = 14 + 1.4(a - 1) \quad (4b)$$

여기서 습증기 활성도(water activity)는 $a = (x_w p) / p_{sat}$ 으로 계산하였다. 습증기 활성이 결정되면 양쪽 전극에서의 경계조건이 정해진다. 그

리고, 막전해질의 전기 전도도와 전기저항은³⁾:

$$\sigma = \exp\left(1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right)(0.005139\lambda - 0.00326) \quad (5)$$

$$R_{mem} = \int_0^{t_{mem}} \frac{dz}{\sigma(\lambda)} \quad (6)$$

전극에서의 종 보존 방정식을 구성하기 위해 각종의 변화를 고려하면, 수소와 산소는 전기 화학 반응에 의해 소모되고, 질소는 소모되지 않는다. 연료극의 습증기는 막 전해질의 습증기 수송 방향이 공기극 쪽일 때 채널을 따라 계속 감소하게 되며, 공기극의 습증기량은 연료극에서 수송되는 습증기량과 반응에 의한 습증기 양이 존재하기 때문에 채널을 따라 계속 증가하게 된다.

$$\dot{m}_{H_2o} = \dot{m}_{H_2,in} - \dot{m}_{H_2,react} \quad (7a)$$

$$\dot{m}_{O_2o} = \dot{m}_{O_2,in} - \dot{m}_{O_2,react} \quad (7b)$$

$$\dot{m}_{N_2o} = \dot{m}_{N_2,in} \quad (7c)$$

$$\dot{m}_{wC,o} = \dot{m}_{wC,in} + \dot{m}_{w,memb}^{net} \quad (7d)$$

$$\dot{m}_{wA,o} = \dot{m}_{wA,in} - \dot{m}_{w,memb}^{net} \quad (7e)$$

식 7(a)에서 식 7(e)까지의 종 보존 방정식을 풀기 위해서는 채널 입구에서의 다음과 같은 경계조건이 필요하다.

$$\dot{m}_{H_2,in} = \nu_{H_2} \frac{J}{2F} A_{act} \bar{M}_{H_2} \quad (8a)$$

$$\dot{m}_{O_2,in} = \nu_{O_2} \frac{J}{4F} A_{act} \bar{M}_{O_2} \quad (8b)$$

$$\dot{m}_{N_2,in} = 3.76 \dot{m}_{O_2,in} \quad (8c)$$

$$\dot{m}_{wA,in} = \frac{x_{wA,in}}{1-x_{wA,in}} \nu_{H_2} \frac{J}{2F} A_{act} \bar{M}_w \quad (8d)$$

$$\dot{m}_{wC,in} = \frac{x_{wC,in}(x_{ON}+1)}{(1-x_{wC,in})x_{ON}} \nu_{O_2} \frac{J}{4F} A_{act} \bar{M}_w \quad (8e)$$

2.2.2 촉매층의 전기화학반응

전기화학반응은 Broka등이 제안한 균집체에서의 전기화학반응(agglomerate structured electro chemical reaction model) 모델을 적용하였다^{12,13)}.

촉매층에서의 전기화학 반응은 공기와 수소 이온이 확산에 의해 수송된 후 균집체에서 반응을 하는 것으로 모사할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} = \frac{4F}{\kappa_{eff}} \frac{1}{a \cdot c_{O_2}^\infty D_{eff} + \frac{1}{k_{react} E}} \quad (9)$$

여기서 반응계수 상수는 k_{react} 와 E 는 화학반응의 유효도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_{react} = \frac{A j_0}{4F} \exp\left(-\eta \frac{\beta F}{RT}\right) \quad (10)$$

$$E = \frac{\tanh \theta}{\theta}, \quad \theta = \sqrt{\frac{k_{react}}{c_{O_2}^\infty D_{eff}}} L \quad (11)$$

교환 전류 밀도 j_0 는 온도에 대한 함수로 표현하였다¹⁷⁾.

$$j_0 = 10^{28.157 - \frac{E_a}{2.303RT}} \quad (12)$$

식 (9)의 경계조건은 촉매와 가스 확산층 계면($z=0$)과 촉매와 막전해질 사이 계면($z=z_{act}$)에서:

$$z=0: \eta(0) = V_{CA} - V_{Nern} \quad (13)$$

$$z=z_{act}: \left. \frac{\partial \eta}{\partial z} \right|_{z=z_{act}} = 0 \quad (14)$$

여기서 $V_{CA} = V_{FC} + JR_{mem}$ 이고, JR_{mem} 은 공기극 전압 보정항이다.

2.2.3 전력과 열 생산

Nernst 전압은 이론적인 최대 일 이므로, 연료 전지가 실제 생산하는 전압은 막 전해질의 저항과 반응시의 비가역적 손실을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 스택전력을 계산하기 위해 스택을 단전지 간 변화를 무시한 단전지의 단순 반복이라 가정하였다.

$$V_{Nern} = -\frac{\Delta g_f^\circ}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) \quad (15)$$

$$V_{FC} = V_{Nern} - JR_{mem} - \eta_z = 0 \quad (16)$$

$$W_{cv} = n_{FC} V_{FC} J \quad (17)$$

2.2.4 연료전지 스택의 에너지 보존

연료전지의 열관리는 시스템 성능뿐 아니라 물 관리 및 내구성과도 직접 연결되기 때문에 매우 중요하다. Fig. 1은 에너지 보존에 대한 제어체적 해석으로 이를 식으로 표현하면:

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = \sum_{in} \dot{m} h_i - \sum_{out} \dot{m} h_o - W_{cv} - Q_c - Q_g \quad (18)$$

식 (18)의 PEMFC에서 가스로 전달되는 열량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{g,o} = T_{FC} + (T_{g,in} - T_{FC}) \exp\left(-\frac{hA_g}{\sum m_{g,i} c_{p,g}}\right) \quad (19)$$

$$Q_g = \sum \dot{m}_i \bar{c}_{p,g} (T_{g,o} - T_{g,in}) \quad (20)$$

2.3 냉각계통 모델링

2.3.1 연료전지에서 냉각수로의 열전달

연료전지에서 발생한 열은 각 단위전지를 통과하는 냉각수로 방출되므로, 냉각수 온도는 전지와 열교환에 의해 결정되고 방출 열 및 열전달량도 계산해 구할 수 있다.

$$T_{c,o} = T_{FC} + (T_{c,in} - T_{FC}) \exp\left(-\frac{hA_c}{\sum m_c c_{p,c}}\right) \quad (21)$$

$$Q_c = \dot{m}_c \bar{c}_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,in}) \quad (22)$$

식 (19)와 식 (21)의 열전달 계수 h 는 열전달 교체에서 찾을 수 있다¹⁴⁾. 공기나 연료의 경우 반응과 연결되어 있기 때문에 대부분 층류 유동 영역에서 운전되는데 비해, 냉각수는 난류일 수 있으므로, 난류 운전시는 Gnielinski 상관식을 사용하여 열전달 계수를 결정하였다¹⁴⁾.

2.3.2 방열기, 냉각팬, 냉각 펌프

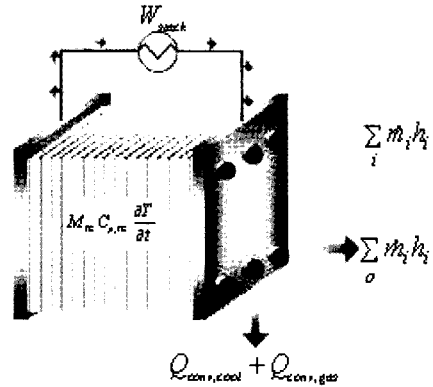


Fig. 1 Control Volume of the PEMFC stack for the Energy Conservation Analysis

방열기를 해석적으로 모델링하게 되면, 다양한 설계 인자에 대한 방열성을 조사할 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 Jung 등이 제안한 해석적 방열기 모델을 적용하여 방열량을 계산하였다¹⁵⁾.

냉각팬의 성능은 p-Q 곡선에 의해 표현되는데, 본 연구에서는 성능곡선을 구성하기 위해 팬 실험 결과를 이용한 경험식을 적용하였다¹⁶⁾.

$$\Delta p = A_1 Q^2 + A_2 Q \left(\frac{N}{2100}\right) + A_3 \left(\frac{N}{2100}\right)^2 \quad (\text{pa}) \quad (23)$$

여기서 Q (m^3/h)는 공기유량이고, $A_1 = -8.02 \times 10^{-6}$, $A_2 = -0.005231$, $A_3 = 327.8$ 이다. 방열기를 통과해 흐르는 공기유량 Q 는 성능곡선의 팬 회전수와 압력손실을 알 때 결정할 수 있다. 통상 차량의 엔진룸에는 방열판에 공기가 도달하기 전에 라디에이터 그릴, 에어컨 컨덴서, 방열기의 순으로 압력강하가 발생되고, 차량 운전시에는 램에어(Ram air)에 의한 압력 증가가 있다. 이러한 압력 손실을 구하기 위해 Ap¹⁶⁾이 제안한 실험식을 사용하였다.

$$\Delta p_{rise} = \Delta p_{grill} + \Delta p_{cond} + \Delta p_{rad} - \Delta p_{ram,air} \quad (24)$$

냉각수 펌프의 성능곡선은 냉각팬과 같은 방법으로 얻었으며, 실험 결과는 Engineered Machined

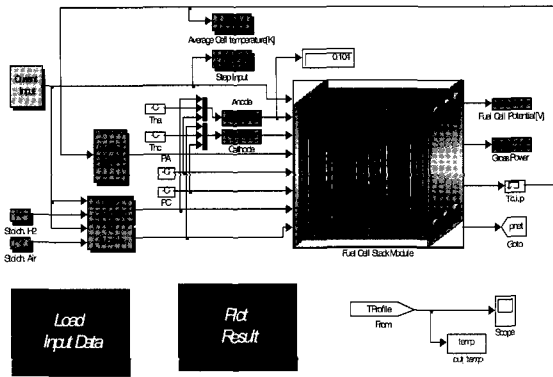


Fig. 2 Integration of the lumped transient fuel cell stack model with the thermal management system

Products Inc.(EMP)의 펌프 실험결과를 사용하였다. 냉각수의 압력손실은 방열판과 연료전지에서의 압력손실을 고려하여 구하였다.

$$\Delta p_{pump} = 99.74 \left(\frac{N_{new}}{3500} \right)^2 - 0.0002983 Q^2 \quad (\text{kpa}) \quad (25)$$

2.3.3 냉각팬과 펌프 운전 전략

Fig. 2는 Matlab/Simulink[®]을 이용해 구성한 시스템 모델을 보여준다. 본 연구에서는 차량용 냉각계통에 통상 사용되는 제어로직으로 제어한 경우와 피드백 제어를 한 경우 냉각시스템의 소요 전력 및 시스템 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해, 제어를 위한 기준값을 정해야 하는데, 냉각팬의 제어 기준값은 연료전지 스택의 온도를 사용하였다. Nafion[®] 막의 경우 충분한 습증기가 공급된다고 하더라도 353.15 K(80℃)이하에서 작동해야 내구성을 보장받는다. 하지만, 차량용은 부하변동이 심하기 때문에 본 연구에서는 5 K의 여유를 고려해 348.15 K(75℃)로 작동온도를 정했다.

Yu¹⁴⁾에 따르면, 연료전지 내부의 온도차가 커지면, 국부적으로 과열되는 지역과 건조해지는 지역이 존재하여, 성능이 저하되므로 연료전지 내부 온도차를 줄일 필요가 있음을 지적했는데, 본 연구에서는 Fig. 3에 보여지는 최적 냉각수 온도를 냉각

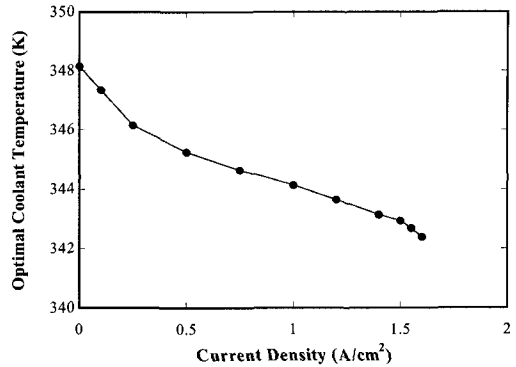


Fig. 3 Optimal coolant temperature over current densities¹⁷⁾

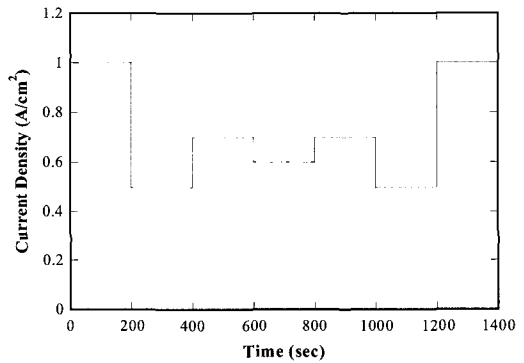


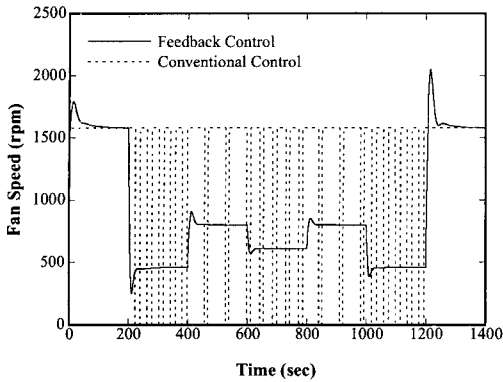
Fig. 4 Profile of the current density used in simulations

수 펌프 제어를 위한 기준값으로 사용했다.

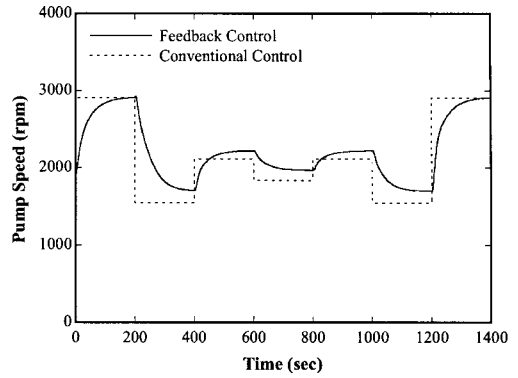
3. 결과 및 토론

개발된 해석 모델은 기존의 차량용 냉각계통에 사용되는 제어법과 피드백 제어법을 연료전지 시스템에 적용하여 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 기존 냉각계통의 냉각펌프는 부하변화에 대해 선형적으로 유량을 공급해주며, 냉 시동 시에는 thermostat을 작동시켜 유량을 by-pass 시킨다. 펌프를 피드백 컨트롤 하게 되면 모터 속도를 조절하여 냉각수 기준온도에 도달하기 위한 필요 유량을 공급한다.

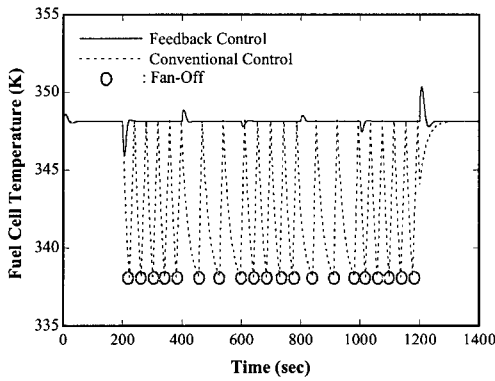
기존제어법을 사용하는 냉각팬은 PWM (Pulse Width Modulation)방식으로, 348.15 K에서 커지



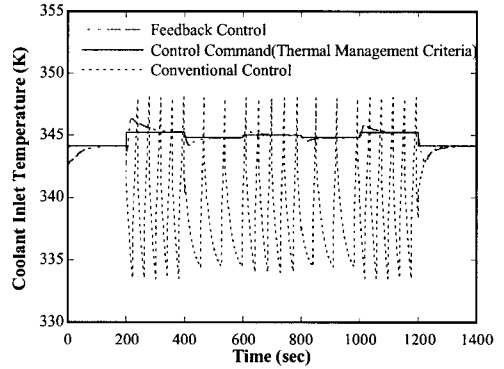
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5 Controlled fan speeds and the response of the fuel cell temperatures

Fig. 6 Comparison of pump speeds and coolant temperatures: feedback vs. conventional control

고, 338.15 K를 꺼지도록 설정했다. 피드백제어를 하는 경우, 팬 속도는 부하에 따라 변동되도록 제어 하였다. Fig. 4는 성능 해석에 사용된 입력 전류 밀도 변화로 시스템을 1400초 간 운전하였다.

3.1 팬 속도와 연료전지 작동 온도

Fig. 5는 연료전지 작동온도와 팬 속도 변화를 보여주는 것으로, Fig. 5 (a)의 점선은 기존 제어로직을 이용한 경우이다. 여기서, 팬의 운전시간은 부하에 따라서 변화하는 것이 관측되며, 또 온도가 작동점 이하로 떨어지면 팬이 꺼지는 것이 관측된다. 이에 비해 피드백 제어를 한 경우 부하 변동에 능동적으로 변화하며, 이로써 팬에서 공급되는 공

기량이 변화한다.

방열관은 냉각팬을 이용, 대기 중으로 필요한 열량을 방출함으로써 연료전지의 온도를 조절한다. Fig. 5 (b)는 부하 변동 시 연료전지 온도가 제어되는 것을 보여주고 있다. Fig. 5 (b)에서는 시간 0초에서 부하를 0에서 1(A/cm²)까지 급격하게 변화시킨 경우, 두 제어로직에 의한, 연료전지 온도의 응답을 보여준다. 피드백 제어된 연료전지 온도는 overshoot 이후 바로 목표 온도에서 도달하는데 비해, 기존 방식으로 제어하는 경우 연료전지 온도도 상승과 하락을 반복하는 모습이 관찰된다.

3.2 냉각수온도와 펌프 제어

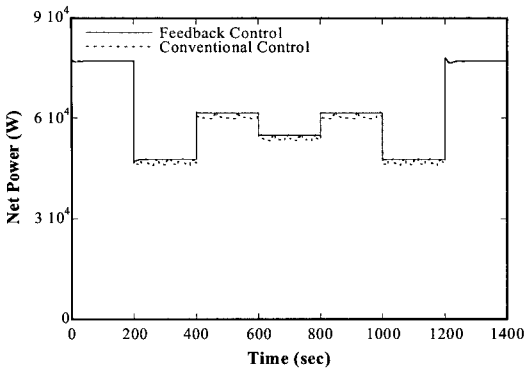


Fig. 7 Comparison of net power: feedback vs. conventional control

냉각수 펌프의 경우 기존제어는 부하에 선형적으로 유량을 변화시키는데 Fig. 6의 점선은 기존 제어에 의해 냉각수 유량이 부하변화에 동일하게 변하는 것이 관측된다. 피드백 제어는 냉각수의 기준 온도값을 가지고 있으므로, 이 기준온도와 현재 온도를 비교하여 유량을 제어하므로 부하 변동에 대해 선형적인 결과와는 다른 경향을 보인다.

냉각계통은 펌프와 팬이 조합하여 방열을 하므로, 기존 제어법을 사용하는 경우는 냉각수 온도도 연료전지의 작동온도를 따라서 변한다. 피드백 제어를 하는 경우에는 냉각수 온도가 Fig. 3에서 제안하는 온도를 기준값으로 운전되므로, 항상 기준값에 도달하려는 경향을 보여주고 있다.

3.3 유효전력 비교

이상의 두 가지 제어법을 비교해 볼 때 연료전지 시스템에서는 피드백 제어를 하는 것이 성능에 유리하다는 결과를 얻었다. 정량적인 결과를 비교하기 위해 부하 변화에 대한 유효 전력을 비교해 보았다. 유효 전력은 스택생산전력에 대한 냉각계통의 소모전력, 공기 공급계 소모 전력을 고려하여 계산하였다.

Fig. 7은 부하변화에 따른 유효 전력변화를 두 제어로직 별로 보여주고 있다. 그림에서 관측되듯이 최대 전류밀도($J=1 \text{ A/cm}^2$)로 운전 시에는 제어 로직에 의한 유효 전력변화에 차이가 없다. 기존

냉각계통의 제어로직은 선형 제어를 하지만 최대값과 최소값 사이의 선형적인 관계를 이용하므로, 두 제어로직에 의한 결과의 차이가 없는 것으로 보여진다. 하지만 부하가 감소함에 따라 기존 냉각계통의 제어로직을 적용하면 냉각계통의 소비전력이 더 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 연료전지의 작동온도가 변동하기 때문에 생산되는 전력이 달라져서 나타나는 변화와 기존 냉각계통의 제어 로직을 사용할 경우 냉각계통의 소비전력이 피드백 제어의 경우보다 크기 때문이다. 주어진 부하변동에 대한 피드백 제어로직 이용 시 에너지 이득을 계산하면 대략적인 이득을 예측할 수 있다. 즉, 주어진 Fig. 4의 부하변동에 대해 피드백 제어를 사용하는 경우, 기존 냉각계통 제어를 사용할 경우에 비해 시스템 유효전력이 1.2% 향상되며, 냉각계통 소모 전력만을 비교하면 주어진 연료전지 사양과 운전조건에서 기존 제어 로직 적용에 비해 약 60.4%의 에너지 이득이 얻을 것으로 예측된다.

4. 결 론

연료전지 시스템의 냉각계통 제어에 따른 시스템 성능을 해석 할 수 있는 모델을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열관리를 위해 연료전지 시스템의 작동온도를 재료의 내구성 및 동특성을 고려하여 348.15 K로 설정하였다. 냉각수 온도는 냉각에 소모된 전력과 이를 통한 시스템 유효전력 증가가 최대가 되는 지점을 이용하여 설정한 곡선을 사용하였다.
- 2) 냉각팬과 냉각수 펌프를 피드백 제어한 경우 기존 제어법에 의한 경우보다 온도제어에 유리하다는 결과를 얻었다. 즉, 주어진 부하변동에 대해서 피드백 제어를 하게 되면, 기존의 제어 로직을 사용하는 경우에 비해 시스템 유효전력이 1.2% 증가하며, 냉각계통 소비전력은 약 60% 감소하는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Bernardi, D.M., and Verbrugge, M.W., Mathematical Model of a Gas Diffusion Electrode Bonded to a Polymer Electrolyte, *AIChE Journal*, Vol. 37, No. 8, 1991, pp. 1151-1163.
- 2) Bernardi, D.M., and Verbrugge, M.W., A Mathematical Model of the Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cell, *J. of Electrochemical Society*, Vol. 139, No. 9, 1992, pp. 2477-2491.
- 3) Springer, T. E., Zawodzinski, T. A., and Gottesfeld, S., Polymer Electrolyte Fuel Cell Model, *J. of Electrochemical Society*, Vol. 138, No. 8, 1991, pp. 2334-2342.
- 4) Springer, T. E., Wilson, M. S., and Gottesfeld, S., Modeling of Experimental Diagnostics in Polymer Electrolyte Fuel Cells, *J. of Electrochemical Society*, Vol. 140, No. 12, 1993, pp. 3513-3526.
- 5) Fuller T. F., and Newman, J., Water and Thermal Management in Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cells, *J. of Electrochemical Society*, Vol. 140, No. 5, 1993, pp. 1218-1225.
- 6) Nguyen, T. V., and White, R. E., A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange Membrane Fuel Cells, *J. of Electrochemical Society*, Vol. 140, No. 8, 1993, pp. 2178-2186.
- 7) Amphlett, J. C., Mann, R. F., Peppley, B. A., Roberge, P. R., Rodrigues, A., A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power sources*, Vol. 61, 1996, pp.183-188.
- 8) Francesco, M. D., Arato, E., Start-up analysis for automotive PEM fuel cell systems, *Journal of Power Sources*, Vol. 108, 2002, pp.41-52.
- 9) Matthew H. Fronk, David L. Wetter, David A. Masten, and Andrew Bosco, PEM Fuel Cell System Solution for Transportation, 2000, SAE 2000-01-0373
- 10) James A. Adams, Woong-chul Yang, Keith A. Oglesby, and Kurt D. Osborne, The Development of Ford's P2000 Fuel Cell Vehicle, 2000, SAE 2000-01-1061
- 11) Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling, B. E., *The Properties of Gases & Liquids*, McGraw-Hill, New York, 1989, pp. 611-614.
- 12) Broka, K., and Ekdunge, P., Modeling the PEM Fuel Cell Cathode, *J. of Applied Electrochemistry*, Vol. 27, 1997, pp. 281-289.
- 13) Broka, K., and Ekdunge, P., Oxygen and Hydrogen Permeation Properties and Water Uptake of Nafion 117 Membrane and Recast Film for PEM Fuel Cell, *J. of Applied Electrochemistry*, Vol. 26, 1996, pp. 117-123.
- 14) Incropera, F.P., and DeWitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, JOHN WILEY & SONS, New York, Fourth Edition, 1996, pp. 420-450.
- 15) Jung, D., Assanis, D. N., Numerical Modeling of Cross Flow Compact Heat Exchanger with Louvered Fins using Thermal Resistance Concept, 2006, SAE 2006-01-0726.
- 16) Ap, N., Guerrero, P., and Jouanny, P., Influence of Fan System Electric Power on the Heat Performance of Engine Cooling Module, 2003, SAE 2003-01-0275.
- 17) Yu. S., Thermal modeling of the proton exchange membrane fuel cell, Ph.D. Dissertation, 2006, University of Michigan.