

막가습기와 공기극 재순환을 사용한 고분자 전해질 연료전지의 가습특성 해석

변수영* · 김범준* · 김민수*†

* 서울대학교 기계항공공학부

Study on PEM-Fuel-Cell Humidification System Consisting of Membrane Humidifier and Exhaust Air Recirculation Units

Su Young Byun*, Beom Jun Kim* and Min Soo Kim*†

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received Jul 28, 2009 ; Revised January 4, 2011 ; Accepted January 31, 2011)

Key Words : Humidification(가습), PEM Fuel Cell(고분자 전해질 연료전지), Membrane Humidifier(막가습기), Recirculation System(재순환 시스템)

초록: 고분자 전해질막 연료전지에서 공급 기체의 가습은 연료전지의 효율과 수명 향상 측면에서 필수적이다. 기존의 고분자 전해질막 연료전지의 가습 방법으로 물 분사나 막가습기, 엔탈피 휠 등이 사용되었다. 하지만, 이러한 외부 가습 방법은 시스템 부피를 크게 하고 고출력 구간에서 가습량이 부족한 단점이 있다. 가습 장치의 효율과 전체 연료전지 시스템 효율을 높이려면, 연료전지의 고온다습한 배출기체로부터 열과 수분을 회수할 필요가 있다. 본 연구에서는 연료전지의 고온다습한 배출공기를 재순환하여 공급공기를 1 차로 가습하고 소형의 막가습기로 2 차 가습하는 복합가습에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 그리고 최적의 가습 시스템 설계를 위한 새로운 방법을 제안하였다.

Abstract: The humidification of reactant gases is crucial for efficiently operating PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell systems and for improving the durability of these systems. The recycle of the energy and water vapor of exhaust gas improves the system performance especially in the case of automotive application. The available humidification methods are steam injection, nozzle spray, humidification by enthalpy wheel, membrane humidifier, etc. However, these methods do not satisfy certain requirements such as compact design, efficient operation and control. In this study, a hybrid humidification system consisting of a membrane humidifier and exhaust-air recirculation units was developed and the humidification performance of this hybrid humidifier was analyzed. Finally, a new practical method for optimal design of PEM-fuel-cell humidification system is proposed.

- 기호설명 -

F : 패러데이 상수
 I : 전류 [A]
 N : 무차원 몰유량
 n : 몰유량 [mol/s]
 P_{sat} : 포화 수증기 압력[bar]
 P : 압력 [bar]
 RH : 상대습도
 α : 재순환율

λ : 산소 과잉률
 ϕ : 막가습 효율
 Ω : 흡입공기의 산소에 대한 질소 비율
 π : 건공기 1 몰에 대한 포화수증기 몰비율

하첨자

amb : 외기
 cir : 재순환
 in : 연료전지 입구
 out : 연료전지 출구
1 : 고습공기 입구
2 : 고습공기 출구

† Corresponding Author, minskim@snu.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

- 3 : 저습공기 입구
4 : 저습공기 출구

1. 서 론

고분자 전해질 연료전지는 유해 배출가스가 없으며 이용 효율이 높아 차세대 동력원으로 각광받고 있다. 이미 2007년 최초의 양산형 연료전지 차량인 FCX가 발표된 이후 2008년부터 캘리포니아에서 리스판매를 실시하고 있다. 그러나, 가격 경쟁력을 확보하기 위해서는 아직 해결해야 할 문제가 많은 상황이다. 그 중의 하나가 가습과 관련된 사항이다. 연료전지가 높은 전력밀도를 얻기 위해서는 60°C 이상의 온도에서 운전이 되어야 하지만, 고분자 전해질의 건조에 따른 문제로 인해, 가습이 불가피하다.⁽¹⁾ 뿐만 아니라, 과도한 가습이 이루어 질 경우, 공급기체의 이동을 방해하여 성능의 저하를 초래할 수 있기 때문에, 적절한 수준의 가습량 조절이 필수적이다.⁽²⁾

이에 따라 여러 가지 가습방법과 제어방법들이 연구되고 있다. 노즐을 사용한 직접 스프레이 방법은 냉각수나 반응 후 생성된 물을 공급기체에 직접 분사하는데, 가습 효과가 작동 온도에 크게 영향을 받게 되며, 미세 액적의 기화에 필요한 공간 확보와 잠열의 공급이 필요하다. 가스 버블링 방법은 공급가스를 가열한 물에 통과시키는 것으로 압력 강하가 큰 문제점이 있어서, 소규모의 실험에 주로 사용되고 있다.⁽³⁾

재순환 가습 방법은 수소의 재사용에 의한 연료 이용 효율 향상의 방안으로 주로 사용되었으나, 공기 재순환의 경우는 가습량 증가 효과가 크다. 공기 가습에 필요한 수증기의 양이 수소 가습량의 약 5 배에 이르며, 직접 가습과 비교할 때, 잠열의 공급과 공간적 제약 측면에서 이점이 있기 때문이다. Yang 등⁽⁴⁾은 공기의 재순환 시스템을 연구하였는데, 전자기 펌프와 출구 밸브를 조절하여 공급기체의 양과 재순환 기체의 양을 조절함으로써, 외부가습 없는 상황에서 출구에서 일부 공기를 재순환시켜, 연료전지 입구에서 수분량을 안정화하고 입, 출구의 습도를 균일화하는 효과를 확인할 수 있었다. 그러나, 재순환 가습을 단독으로 사용할 경우, 배출가스 내의 질소가스 누적으로 인한 연료전지 출력 감소에 대한 우려로 인해 적용 범위가 크게 제한되는 문제점이 있다.

이에 반해 막가습기를 사용한 가습방법은 수증기만을 투과시키는 막을 사이에 두고, 양측에 물

또는 수증기를 다량 포함하고 있는 기체와 건조한 기체를 흐르게 하여, 습도의 차에 의해서 수증기가 이동하게 하는 것이다. 이 과정에서 열 및 물질 교환이 일어나서, 배출되는 수증기와 잠열을 재활용할 수 있게 된다. 이 때, 스프레이 가습 시에 발생하는 온도강하를 보상하기 위한 추가의 열 공급원의 제공 및 버블러를 활용한 가습 시에 발생하게 되는 압력 손실의 문제가 발생하지 않는 장점이 있다. 따라서, 차량용 고분자 전해질 연료전지 시스템에 많이 적용되고 있으며, 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 Nafion 막을 사용한 Gas to Gas 방식 또는 Liquid to Gas 방식의 가습 성능에 대한 이론적 및 실험적 해석^(5,6)을 바탕으로 가습기의 형상 및 크기 설계와 가습 시스템의 제어에 대한 연구가 주를 이루고 있다.^(7,8)

위에 나열한 가습방법들은 단독으로 사용할 경우, 공간활용도 및 배출 에너지의 사용 및 제어성의 관점에서 만족할 만한 결과를 얻기 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 막가습기와 공기 재순환 장치를 함께 사용하였을 경우, 가습 특성을 살펴보고, 실제 연료전지에 적용 하였을 때, 운전 영역에 따른 최적의 가습 방법을 고찰하고자 한다.

2. 가습장치 모델링 및 해석 방법

2.1 복합 가습 시스템 구성

Jung 등⁽⁹⁾은 막가습기만을 단독으로 사용할 경우, 가습을 위한 공간이 과다하기 때문에 물분사 가습 등을 포함한 여러가지 방식과 하이브리드 타입의 가습장치의 필요성을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 막가습기에 공기재순환 시스템을 하이브리드화하여 막가습기의 부피를 줄이고, 배출 연료 및 수분의 재사용함으로써 가습에 따르는 소요 에너지의 감소를 추구할 수 있는 방법을 연구하였다.

본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같은 가습시스템을 구성하였으며, 막가습기 주위의 유량변동을 Fig. 1(b)에 나타내었다. 연료전지 후단에서 배출되는 공기는 많은 양의 수분을 포함하고 있으며, 그 중의 일부는 재순환에 의해서 흡입되는 공기와 혼합되어 연료전지로 다시 공급된다. 나머지 공기는 막가습기를 통과해서 열 및 물질교환을 한 후에 시스템을 빠져나가게 된다.

이 때, 재순환율, 막가습 효율은 아래와 같이 정의한다.

$$\alpha = \frac{n_{cir}}{n_{out}}, \quad \phi = \frac{n_{4,H_2O} - n_{3,H_2O}}{n_{1,H_2O}} \quad (1)$$

연료전지 입구에서의 유량은 수증기의 경우 재순환되는 양과 막가습기를 통해 회수되는 양, 외부로부터 흡입되는 양의 합으로 표현되며, 질소와 산소는 재순환 되는 양과 외부로부터 흡입되는 양의 합으로 구할 수 있다.

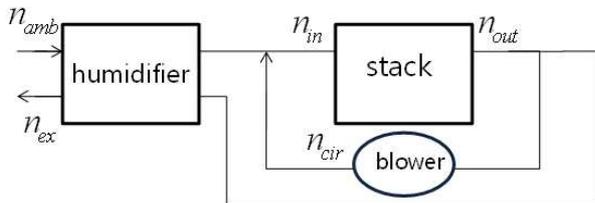
$$n_{in,H_2O} = n_{cir,H_2O} + n_{amb,H_2O} + n_{1,H_2O}\phi \quad (2)$$

$$n_{in,N_2} = n_{cir,N_2} + n_{amb,N_2} \quad (3)$$

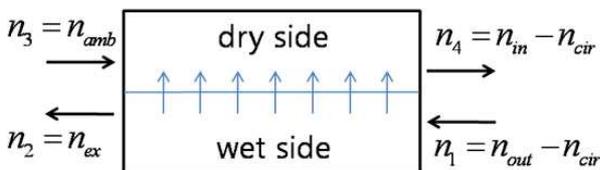
$$n_{in,O_2} = n_{cir,O_2} + n_{amb,O_2}$$

연료전지에 공급되는 산소의 유량은 산소 과잉률(λ)에 따라서 식 (4)로 나타낼 수 있고, 식 (1)~(3)을 사용하면 질소의 유량은 재순환율에 따라서 식 (5)와 같이 결정된다. 한편, 외부로부터 흡입되는 수증기의 양은 적어 무시하면, 연료전지에 공급되는 수증기의 유량은 재순환율과 막가습 효율의 값에 따라 다르게 표현된다. 재순환율과 막가습 효율이 낮은 경우, 연료전지 출구에서 수증기가 응축되지 않으며 입구에서의 수증기 유량은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있고, 재순환율 또는 막가습 효율이 큰 경우에는 연료전지 출구에서 수증기가 응축하여 일부 물로 배출되고, 액체와 분리된 포화 수증기는 가습시스템에서 재사용된다. 연료전지 입구에서의 수증기 유량은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_{in,O_2} = \frac{\lambda I}{4F} \quad (4)$$



(a) Membrane humidifier and air recirculation system



(b) Membrane humidifier

Fig. 1 Humidification system integrated with fuel cell stack

$$n_{in,N_2} = \frac{\Omega I (\lambda + \alpha - \lambda\alpha)}{4F (1 - \alpha)} \quad (5)$$

연료전지 출구 수증기 응축되지 않는 상태:

$$n_{in,H_2O} = \frac{I (\alpha + \phi - \alpha\phi)}{2F (1 - \alpha)(1 - \phi)} \quad (6)$$

연료전지 출구 수증기 응축 상태:

$$n_{in,H_2O} = \frac{\pi I}{4F} \left[(\Omega + 1)\lambda - 1 + \frac{\alpha\Omega}{1 - \alpha} \right] (\alpha + \phi - \alpha\phi) \quad (7)$$

여기에서 Ω 는 흡입공기의 산소에 대한 질소의 비율, π 는 건공기 1 몰에 대한 포화수증기의 몰비율이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 재순환율과 막가습 효율의 영향

Fig. 1 의 하이브리드 가습시스템에서 재순환율과 막가습 효율을 변화시키면서 가습효과를 살펴 보았다. 이 때, 공급되는 산소 과잉률(λ)을 일정하게 유지하였다.

재순환율과 막가습 효율의 변화에 따른 연료전지 공급공기의 상태를 산소 소모량을 기준으로 하여, 무차원화된 값(N)으로 표시하였다. 입구공기 중 무차원화된 질소, 수증기 유량의 값과 상대습도 값은 아래와 같이 표시된다.

$$N_{in,N_2} = \Omega \left(\lambda - 1 + \frac{1}{1 - \alpha} \right) \quad (8)$$

연료전지 출구 수증기 응축되지 않는 상태:

$$N_{in,H_2O} = \frac{2(\alpha + \phi - \alpha\phi)}{(1 - \alpha)(1 - \phi)} \quad (9)$$

$$RH_{in} = \frac{2(\alpha + \phi - \alpha\phi)}{A + \Omega(1 - \phi) + 2(\alpha + \phi - \alpha\phi)} \times \frac{P_{amb}}{P_{sat}} \quad (10)$$

$$A = [(1 + \Omega)\lambda - \Omega](1 - \alpha)(1 - \phi) \quad (11)$$

연료전지 출구 수증기 응축 상태:

$$N_{in,H_2O} = \pi \left[(\Omega + 1)\lambda - 1 + \frac{\alpha\Omega}{1 - \alpha} \right] (\alpha + \phi - \alpha\phi) \quad (12)$$

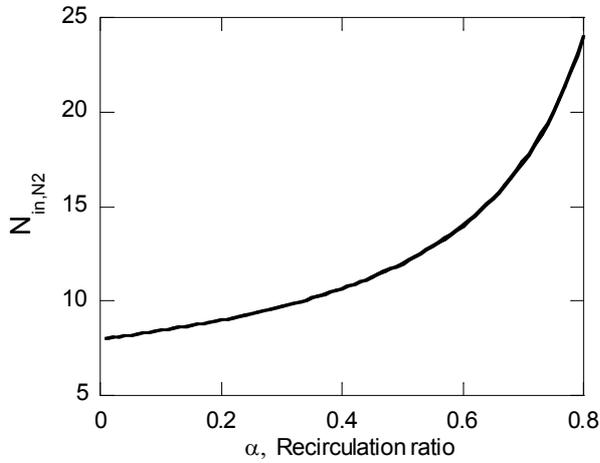


Fig. 2 Non-dimensional nitrogen flow rate

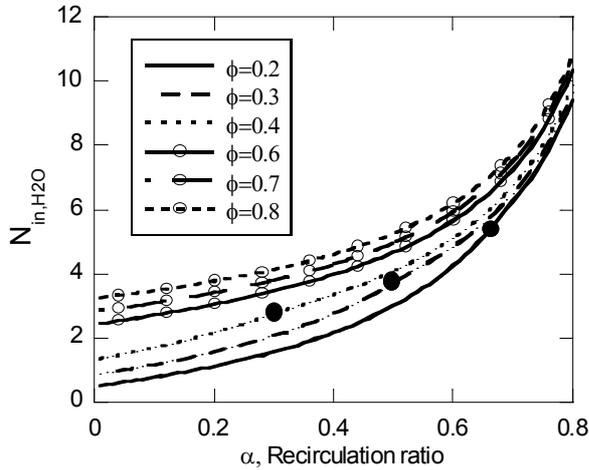


Fig. 3 Non-dimensional vapor flow rate

$$RH_{in} = \frac{B}{\lambda + \frac{\Omega(\lambda + \alpha - \lambda\alpha)}{(1-\alpha)} + B} \times \frac{P_{amb}}{P_{sat}} \quad (13)$$

$$B = \pi \left[(\Omega + 1)\lambda - 1 + \frac{\alpha\Omega}{1-\alpha} \right] (\alpha + \phi - \alpha\phi) \quad (14)$$

Fig. 2 에서 재순환율이 커질수록 재순환이 없는 상태에 비해 질소의 유량이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 재순환율 0.3 일 때, 질소유량은 20% 증가하며, 재순환율 0.5 일 때, 질소유량은 50% 증가하게 된다. 산소의 유량이 일정한 경우에, 질소 분압 증가에 따른 연료전지의 성능 감소를 고려하여 재순환율의 허용 범위를 한정할 수 있을 것이다.

Fig. 3 은 재순환율을 0.0 에서 0.8 까지 변화시켜 가면서, 막가습 효율이 낮은 범위($\phi = 0.2, 0.3, 0.4$)와 높은 범위($\phi = 0.6, 0.7, 0.8$)에서 스택 입구 가습

Table 1 Operating condition for PEM fuel cell

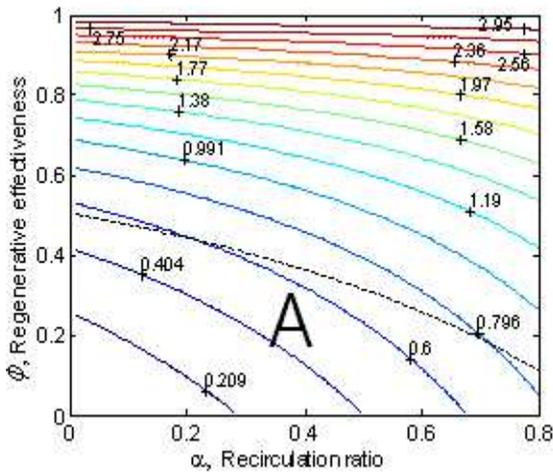
Parameter	T(°C)	P(bar)	λ	Ω
Value	70	1	2	3.76

량을 보여주고 있다. 막가습 효율이 높아서 연료전지 후단에서 포화상태에 도달하게 되는 경우에는 입구에서의 가습량도 포화상태에 가깝게 된다. 한편, 막가습 효율이 낮은 경우에는 막가습기에 의해 회수되는 수증기가 적기 때문에 재순환율이 낮은 때에는 연료전지 출구에서 불포화 상태가 되지만, 재순환율이 커짐에 따라 점차 출구에서 포화상태에 이르게 된다. 막가습 효율이 낮은 경우, 곡선상의 3 개의 점은 연료전지 출구에서 수증기 포화 상태가 되는 조건을 나타내는데, 막가습 효율이 0.2, 0.3, 0.4 로 증가함에 따라 재순환율이 0.7, 0.5, 0.3 으로 감소하게 된다. Fig. 3 으로부터 가습량은 재순환율이 적으면 막가습 효율의 영향을 크게 받지만, 재순환율이 커질수록 막가습 효율의 영향이 줄어들게 되는 것과 막가습 효율이 낮을수록 재순환의 효과가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

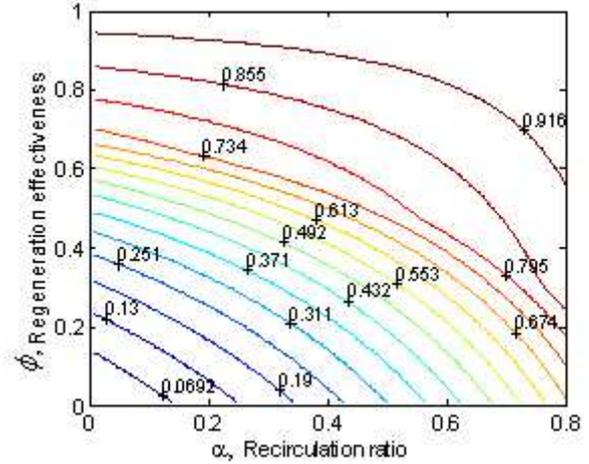
3.2 작동 조건의 변경

Table 1 에 나타낸 조건⁽⁹⁾을 기본 운전조건으로 하여, Fig. 4(a)에는 배출가스가 불포화 상태인 경우, Fig. 4(b)의 경우에는 배출가스가 포화 상태인 경우에 대해서 재순환율 및 막가습 효율에 따른 입구 공기 상대습도의 변화를 나타내었다. Fig. 4(a)에서는 재순환율과 막가습 효율이 낮아서, 입구 상대습도가 낮은 A 부분에서만 의미가 있으며, Fig. 4(b)에서는 재순환율 또는 막가습 효율이 높아서, 입구 상대습도가 높은 B 부분만 각각 의미가 있다. Fig. 4(c)에서는 각각의 유효한 부분만을 나타내었으며, 두 영역의 경계가 되는 부분은 출구에서의 상대습도가 1 이 되는 곳이다. 이 조건을 만족하는 관계는 연료전지 내부에서 공기극과 수소극 사이에 확산 및 전기삼투항력(Electro-osmotic drag)에 의한 수증기의 이동의 합이 0 이라고 가정할 때 아래의 식 (15)와 같이 구할 수 있다. 이 관계에 따라 식 (6), 식 (9)~(11) 또는 식 (7), 식 (12)~(14)의 적용여부가 결정된다.

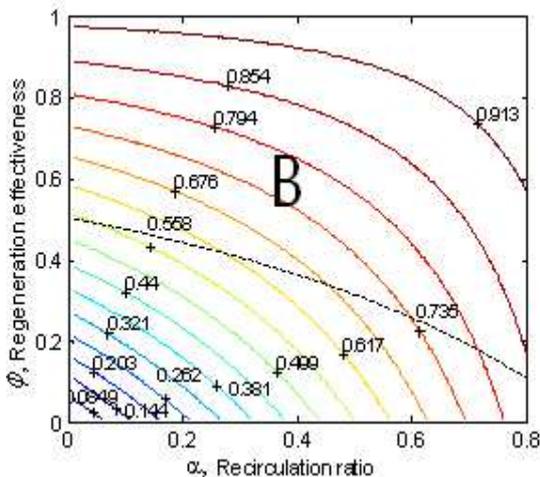
$$P_{sat}(T) = P_{out,H_2O} = \frac{2 \times P_{amb}}{(\Omega + 1)(\lambda - 1)(1 - \phi)(1 - \alpha) + \Omega(1 - \phi) + 2} \quad (15)$$



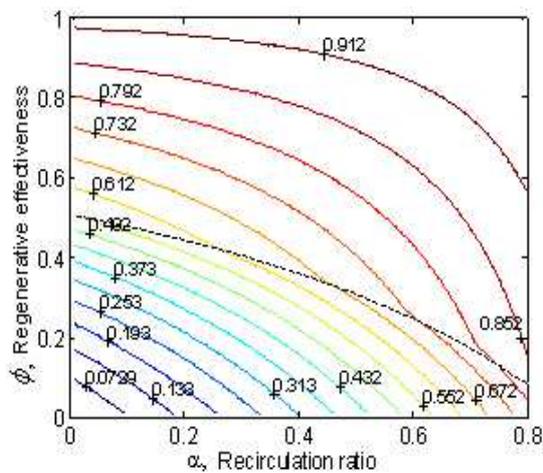
(a) Case1: unsaturated exhaust air with water vapor



(a) Contour of relative humidity at fuel cell inlet when the oxygen excess ratio is 3

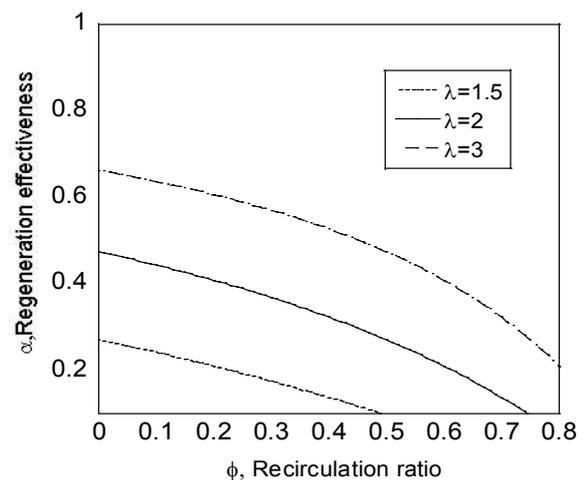


(b) Case2: saturated exhaust air with water vapor



(c) Combination of both cases

Fig. 4 Contour of relative humidity at fuel cell inlet (standard operating condition)



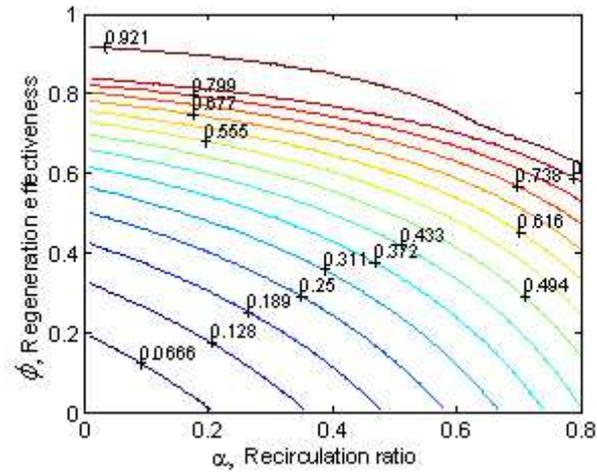
(b) Saturation lines

Fig. 5 Effect of oxygen excess ratio on humidifying performance

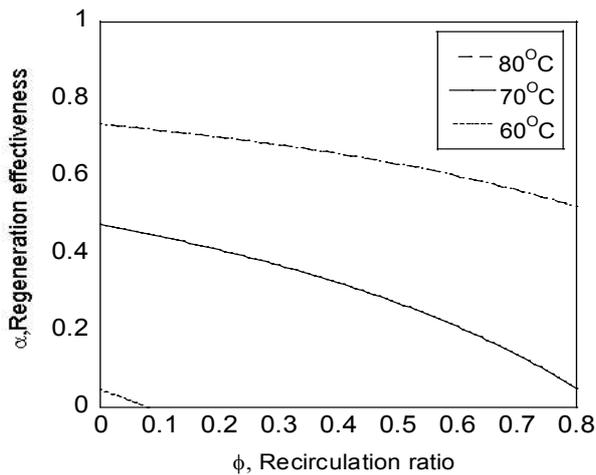
Fig. 4로부터 식 (15)의 스택 출구 공기가 포화 상태가 되는 조건은 재순환율이 증가할수록 막가습 효율이 작은 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

3.2.1 산소 과잉률의 효과

Fig. 5에서는 산소 과잉률이 3인 경우, 재순환율 및 막가습 효율의 변화에 따른 입구공기 상대습도의 영향을 살펴보았다. Fig. 5(a)는 산소 과잉률이 커지면, 기본운전 조건과 동일한 양의 수증기가 공급되어도 상대습도가 낮아지므로, 동일 상대습도 수준을 유지하기 위해서는 재순환율 및 막가습 효율이 높아야 한다는 것을 보여준다. Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이 산소 과잉률이 3이고, 재순환



(a) Contour of relative humidity at fuel cell inlet when the operating temperature is 80°C



(b) Saturation lines

Fig. 6 Effect of operating temperature on humidifying performance

을 하지 않을 경우, 출구에서 포화가 되려면 막가습 효율이 약 0.7 이 되어야 하고 기본 운전조건에 비해 막가습기의 크기가 커져야 한다.

3.2.2 작동온도의 효과

Fig. 6 에서는 연료전지의 작동온도가 80°C로 높아지는 경우, 재순환율 및 막가습 효율의 변화에 따른 입구공기 상대습도의 영향을 살펴보았다. 포화시 요구되는 가습량이 크게 증가하면서, 70°C에서 작동하는 경우에 비해, 동일 재순환율 및 막가습 효율일 때, 상대습도가 약 20~30% 감소하였다. 또한, 50% 이상으로 입구공기의 상대습도를 유지하기 위해서는 재순환이 없을 경우, 막가습 효율

을 0.7 이상으로 높이는 것이 필요하다. 또한, Fig. 6(b)에서 스택 출구에서 포화되는 조건은 일정 재순환율에서 더 큰 막가습효율이 필요함을 알 수 있다.

3.2.3 작동압력의 효과

Fig. 7 에서는 연료전지의 작동압력을 2 기압으로 높인 경우, 재순환율 및 막가습 효율의 변화에 따른 입구공기 상대습도의 영향을 나타내었다. 이때, 연료전지 출구의 수증기 응축에 기인하는 동일 습도 곡선상의 변곡점이 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 식 (5)를 통해, 가압을 함으로써 가습 시스템을 활용하지 않더라도 자체적으로 생성된 수증기를 사용하여 연료전지 출구에서 완전 가습이 이루어지는 것을 알 수 있다.

3.3 가습 시스템 설계에 적용

자동차용 가습시스템에 적용하는 것을 목표로 할 때, 제한된 가습공간 및 가습량에 따른 연료전지의 성능특성을 고려해야 한다. 공간의 활용 측면에 있어서 Huizing 등⁽¹⁰⁾의 막가습기의 해석을 응용할 수 있다. 저자는 잔류시간(residence time) 과 확산시간(diffusion time)의 개념을 도입하여 위의 비율이 일정한 값을 가질 때, 막가습기의 효율은 공간적인 제약 속에서 최적화되고, 이 값은 연료전지 스택의 작동온도 범위에서 약 0.6 이다. 또한, 연료전지의 성능특성을 고려할 때, 작동점은 연료전지 출구에서 포화되는 조건, 식 (5)로 나타내는 경계 보다 높은 습도를 유지해야 전해질막의 평균 수분함유량을 높여 이온이동저항을 낮추는데 유리하다고 할 수 있다.

Fig. 8 에서 위의 제한조건들을 고려한 작동범위를 나타내었다. 이 때, 60% 이하의 상대습도를 얻기 위해서는 재순환 없이, 막가습기만 사용하면 된다. 그 이상의 상대습도를 얻기 위해서는 막가습 효율을 0.6 으로 유지하면서, 재순환율을 조금씩 증가시키는 방법을 사용할 수 있다. 상대습도 67%의 경우, C 범위 (막가습 효율 0.6, 재순환율 0.1 ~ 막가습 효율 0.35, 재순환율 0.4) 에서 선택할 수 있을 것이다. 다만, Fig. 2 에서 나타낸 것과 같이 재순환율의 증가는 질소유량의 증가 및 연료전지 자체의 성능 저하를 초래할 수 있으므로, 적당한 가습 범위(재순환율 및 막가습기의 효율)를 선택하는 것이 필요하다.

Fig. 5 에서 알 수 있는 바와 같이 산소 과잉률이 클 경우, 막가습 효율 0.6 이하에서 재순환 없

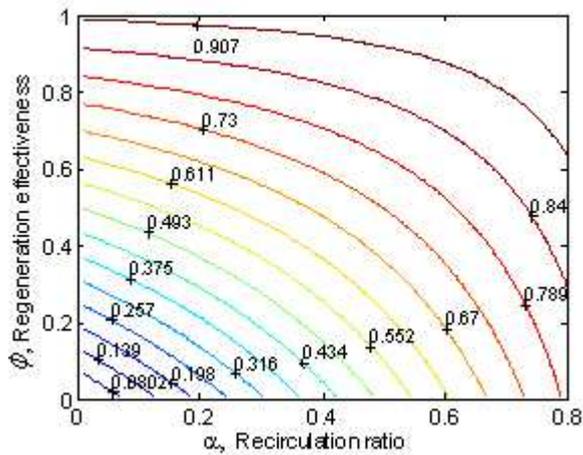


Fig. 7 Contour of relative humidity at fuel cell inlet when operating pressure is increased up to 2bar

이 얻을 수 있는 상대습도 값이 낮아진다. 따라서, 높은 습도를 얻기 위해서는 재순환에 의존하는 비율이 커지게 된다. 그러나, 기본 운전 조건에 비해 입출구의 습도 분포가 균일하고, 질소 농도의 증가가 상대적으로 적으며, 연료전지 스택의 성능 감소가 적기 때문에 재순환 가습을 사용하여 좋은 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 6 에서 80°C로 작동온도를 높이면 막가습 효율을 0.6 으로 유지하고, 재순환율을 0.3 까지 증가시켜도 35~45%의 낮은 상대습도를 얻게 된다. 따라서, 50% 이상의 가습이 요구되는 경우에는 추가 가습 방법이 필요하다.

작동압력을 높이면, 포화 수증기량이 감소하고, 연료전지 출구에서 완전가습이 이루어지는 것을 확인하였다. 연료전지 시스템의 출력을 높이기 위해서 산소 과잉률을 높이거나, 연료전지 작동온도를 올리는 과정에서 가습의 필요성이 증가하게 되고 Fig. 4(a)의 A 영역과 같은 불포화 영역이 커지게 된다. 한편, 가압을 하게 되면 연료전지 출구에서 불포화 영역이 사라지게 되고, 가습의 필요성이 감소하게 된다. 이 때, 필요 가습량이 상대적으로 적기 때문에 많은 경우, 회수된 물을 직접 가습하는 방법이 주로 사용된다.^(11~14)

4. 결론

차량용 고분자 전해질 연료전지를 위한 가습 시스템에서는 공간활용도가 좋고 배출되는 수증기를 효율적으로 사용하는 것이 중요하다. 따라서, 현재

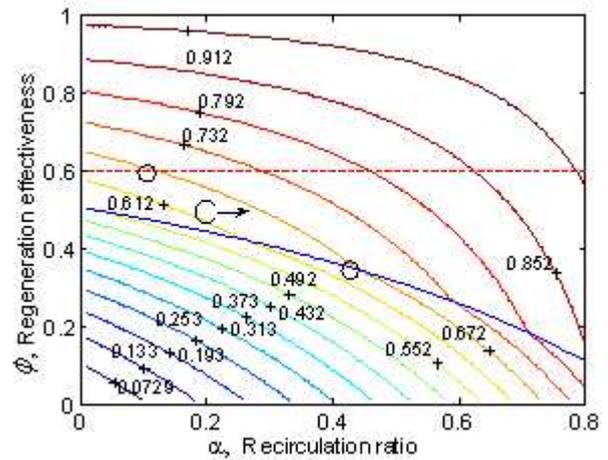


Fig. 8 Decision of design parameters under given constraints

가습용으로 사용되는 막가습기 및 공기 재순환 장치를 병행 사용하여, 막가습 효율과 재순환율에 따른 가습 특성을 분석하고 최적화 하였다.

막가습 효율과 재순환율의 증가에 따라 가습 성능은 좋아지게 된다. 막가습 효율 또는 재순환율 중 어느 하나를 고정시키고 나머지 하나를 증가시키면 초기에는 연료전지 출구 공기가 불포화 상태에 놓이게 되고, 가습성능의 증가속도가 빠르다. 그러나, 연료전지 출구에서 포화상태가 되면 가습 성능 증가속도가 정체된다. 연료전지 시스템의 성능을 향상시키기 위해서, 산소 과잉률을 증가시키거나, 작동온도를 높일 경우 가습부하가 증가하며 동시에 가습성능이 떨어지게 된다. 이에 반해 작동 압력을 증가시킬 경우, 가습부하가 감소하고 스택에서 생성된 물에 의해서 자체적으로 연료전지 후단의 포화상태를 유지할 수 있다.

최적의 가습 방법 선정과 관련하여, 공기 재순환에 따른 질소농도 증가와 연료전지 스택의 출력 감소가 허용되는 범위에서, 막가습기와 배출 공기 재순환을 병용하여 공기 가습시스템을 구성할 경우, 공간적 제약에 따른 막가습기의 크기를 줄이면서 재순환율을 조절하여 효과적으로 가습성능을 유지시킬 수 있게 된다.

후기

본 연구는 서울대학교 IAM, ERC, WCU 의 지원으로 이루어 졌으며, 교육과학기술부(NRL), 지식경제부 및 국토해양부의 지원에도 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Larminie, J. and Dicks, A., 2000, "Fuel Cell System Explained," John Wiley & Sons, Ltd., Toronto.
- (2) Zhang, L., Pan, M. and Quan, S., 2008, "Model Predictive Control of Water Management in PEMFC," *J. of Power Source*, Vol. 180, pp. 322~329.
- (3) Vasu, G., Tangirala, A. K., Viswanathan, B. and Dhathathreya, K. S., 2008, "Continuous Bubble Humidification and Control of Relative Humidity of H₂ for a PEMFC System," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 4640~4648.
- (4) Yang, T., Shi, P. and Du, C., 2006, "Study on Self-humidified PEMFC with Reactant Circulation," *Electrochimica Acta*, Vol. 51, pp. 5618~5625.
- (5) Cave, P., and Merida, W., 2008, "Water Flux in Membrane Fuel Cell Humidifiers: Flow Rate and Channel Location Effects," *J. of Power Sources*, Vol. 175, pp. 408~418.
- (6) Park, S.-K., Choe, S.-Y. and Choi, S.-H., 2008, "Dynamic Modeling and Analysis of a Shell-and-tube Type Gas-to-gas Membrane Humidifier for PEM Fuel Cell Application," *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 2273~2282.
- (7) Chen, D., Li, W. and Peng, H., 2008, "An Experimental Study and Model Validation of a Membrane Humidifier for PEM Fuel Cell Humidification Control," *J. of Power Sources*, Vol. 180, pp. 461~467.
- (8) Chen, D. and Peng, H., 2005, "A Thermodynamic Model of Membrane Humidifiers for PEM Fuel Cell Humidification Control," *J. of Dynamic System, Measurement, and Control*, Vol. 127, pp. 424~432.
- (9) Jung, S. H., Kim, S. L., Kim, M. S., Park, Y. and Lim, T. W., 2007, "Experimental Study of Gas Humidification with Injectors for Automotive PEM Fuel Cell Systems," *J. of Power Sources*, Vol. 170, pp. 324~333.
- (10) Huizing, R., Fowler, M., Merida, W. and Dean, J., 2008, "Design Methodology for Membrane-based Plate-and-frame Fuel Cell Humidifiers," *J. of Power Sources*, Vol. 180, pp. 265~275.
- (11) Thanapalan, K. K. T., Liu, G. P., Williams, J. G., Wang, B. and Rees, D., 2009, "Review and Analysis of Fuel Cell System Modeling and Control," *Int. J of Computer Aided Engineering and Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 145~ 157
- (12) Bao, C., Ouyang, M. and Yi, B., 2006, "Modeling and Control of Air Stream and Hydrogen Flow with Recirculation in a PEM fuel Cell System – I. Control-oriented Modeling," *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 31, pp. 1879~1896.
- (13) Vasu, G. and Tangirala, A. K., 2008, "Control of Air Flow Rate with Stack Voltage Measurement for a PEM Fuel Cell," *Int. Conf. on Fundamentals & Developments of Fuel Cells*, Nancy, France.
- (14) Pukrushpan, J. T., Peng, H. and Stefanopoulou, A. G., 2002, "Simulation and Analysis of Transient Fuel Cell System Performance Based on a Dynamic Reactant Flow Model," *Proc. of IMECE*, New Orleans, USA.