

고분자 전해질 연료전지 시스템의 효율향상을 위한 공기공급 최적화

주 건 업¹⁾ · 조 기 춘¹⁾ · 선 우 명 호^{*2)} · 최 서 호³⁾

한양대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 자동차공학과²⁾ · 현대기아자동차 환경기술연구소³⁾

Optimization of Air Supply for Increased Polymer Electrolyte Fuel Cell System Efficiency

Keonyup Chu¹⁾ · Kichun Jo¹⁾ · Myoung-ho Sunwoo^{*2)} · Seoho Choi³⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾Corporate Research & Development Division, Hyundai Motor Company & Kia Motors Corporation, Mabuk-dong,

Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-912, Korea

(Received 7 April 2010 / Accepted 9 October 2010)

Abstract : Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFCs) operate in wide-range changes in temperature, humidity, and electric current for automotive applications. In order to operate automotive PEFC efficiently, optimal air supply is required to adjust to these changes. This paper presents an air-supply optimization process that consists of experiments, modeling of the PEFC system, and optimization. The objective is to establish an air supply suitable for the required power for PEFC system and optimized with a Lagrange multiplier. Our simplified PEFC system model is used as a constraint for optimization problem. The result of this paper presents that efficient operation of PEFC system can be achieved by air-supply optimization.

Key words : PEFC(고분자전해질 연료전지), Model(모델), Air supply(공기공급), Optimization(최적화)

Nomenclature

A : area, cm²
P : power, W
RH : relative humidity
SR : stoichiometric ratio
i : current density, A/cm²

Subscripts

air : supplied air to fuel cell
fc : fuel cell
bl : blower
sys : fuel cell system with blower

1. 서론

고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Fuel Cell: PEFC)는 효율이 높고 공해물질을 배출하지 않기 때문에 향후 자동차에서 내연기관을 대체할 만한 차세대 에너지 변환장치 중 하나로 주목 받고 있다. 이러한 가능성 때문에 대부분의 주요 자동차 제조업체들은 하이브리드 자동차의 다음 후보로서 연료전지 자동차를 꼽고 있다. 연료전지 자동차의 핵심 기술인 고분자 전해질 연료전지에 대한 연구는 그 동안 전기화학, 재료 분야에서 많은 발전이 있었다. 그러나 고분자 전해질 연료전지가 자동차용 동력원으로 적용되기 위해서는 이러한 연구와 더불어 연료전지 시스템에 대한 최적 운전기술에 대한 개

*Corresponding author, E-mail: msunwoo@hanyang.ac.kr

발이 필수적이다.¹⁻³⁾ 특히 연료전지가 차량의 동력원으로 사용될 경우 요구 출력이 시시각각 변하기 때문에 이러한 환경에서는 최적인전에 대한 연구가 반드시 필요하다.

고분자 전해질 연료전지의 최적 운전은 온도, 습도, 공기 공급량에 의하여 결정된다. 고분자 전해질 연료전지는 수소이온의 전도도를 높이기 위하여 전해질 막을 적당한 가습상태로 유지해야 한다. 이를 위하여 전기 화학반응으로 생성된 물과 함께 추가적인 가습을 통하여 연료전지에 수분을 공급한다.

연료전지에 물을 과도하게 공급할 경우 유로 내에 액상의 물이 생성되어 유로를 막거나, 가스확산층(GDL)을 덮어 반응면적을 줄이게 된다. 결국 액상의 물이 공기 및 수소의 공급을 차단하여 연료전지의 성능저하 및 고장을 발생시킨다. 또한 저온에서는 액화된 물에 의하여 반응가스의 공급이 차단되는 경우가 빈번해 지기 때문에 반응가스를 원활하게 공급하기 위하여 일반적으로 큰 공기과급비로 운전하게 된다.¹⁻³⁾

그러나 연료전지의 원활한 공기공급을 위하여 Blower의 공기 송풍량을 과도하게 증가 시킬 경우 Blower의 전력소모가 커지게 되어 시스템 전체적으로 효율이 저하된다. 반면 Blower의 송풍량이 충분하지 않을 경우 연료전지로부터 물 배출이 원활히 이루어지지 않아 성능저하를 초래하게 된다.

따라서 이 연구는 연료전지에 요구되는 전기출력에 대하여 가장 효율이 높은 연료전지의 전류조건과 공기공급 유량을 찾는 것을 목표로 한다.

2. 공기 공급 최적화 과정

연료전지 공기공급 최적화는 Fig. 1과 같이 연료전지 실험과 Blower 데이터를 이용한 연료전지와 Blower 모델링, 최적화 평가함수 수립, 최적화의 과정을 거쳐 수행되었다.

연료전지에 요구되는 전력을 생성할 때 연료전지와 Blower등에서 소모되는 전력을 최소화 할 수 있도록 연료전지를 운전해야 한다. 그러나 소모되는 전력을 최소화하도록 평가함수를 선정할 경우, 최적화를 수행하기 위한 연료전지와 Blower에서 비가역적으로 발생되는 전력소모에 대하여 정확한 모델

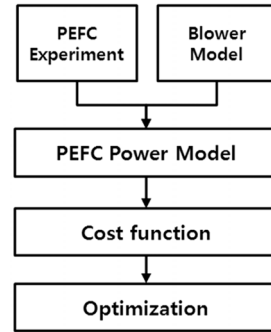


Fig. 1 Optimization process

이 반드시 필요하다. 그러나 이러한 비가역 반응에 대하여 정확한 모델을 만드는 것은 매우 복잡하고 많은 실험이 요구된다.

반면 최적화 평가함수를 연료전지의 소모 전류로 선정할 경우 비가역적인 전력소모에 대해 고려할 필요가 없게 되어 최적화 문제를 단순화 할 수 있다. 연료전지의 소모 전류는 연료전지에서 소모하는 수소와 정확히 비례하기 때문에 해당 출력 대비 최소 소모전류는 최소의 비가역적인 전력소모를 의미한다. 따라서 이 연구에서는 최적화 평가함수를 연료전지의 소모 전류로 설정하였고, 요구되는 시스템 출력 대비 수소 소모를 최소화 할 수 있도록 전류조건과 공기공급 유량을 최적화하였다.

3. 최적화를 위한 연료전지 모델링

3.1 연료전지 실험방법

실험장치는 Fig. 2와 같이 차량용 대면적 단위셀 3개가 적층되어 있는 스택을 운전할 수 있도록 설계되었다. 수소극 입구에 압력 제어기와 유량계(Mass Flow Meter: MFM)를 설치하여 수소를 절대압 2 bar를 넘지 않도록 무가습으로 공급하였다. 수소극 출구에는 Dead-end 운전 시 공기극에서 넘어오는 질소와 수소 채널에 쌓이는 액상의 물을 주기적으로 밖으로 배출시키기 위하여 솔레노이드 밸브를 설치하였다. 공기극의 경우 공기 공급유량제어를 위하여 MFC(Mass Flow Controller)를 설치하였으며 Bubbler 방식의 가습기와 습도계를 설치하여 연료전지의 습도를 유지하였다. 또한 각 단위셀간 온도차에 의한 성능차를 최소화 하기 위하여 연료전지 스택을 단열해주었다.

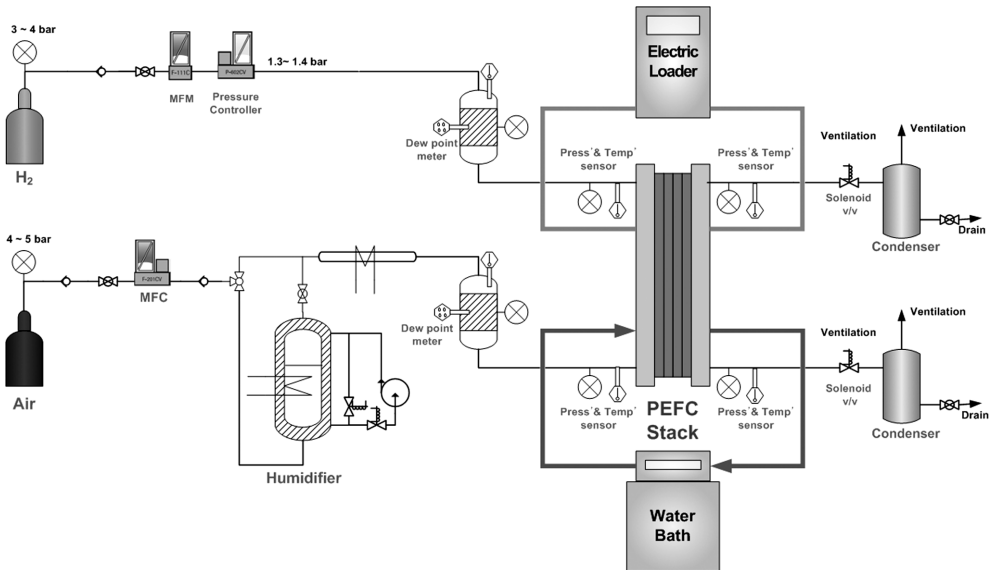


Fig. 2 Schematic diagram of PEFC test bench

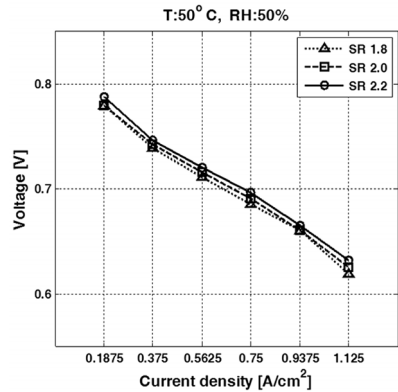
3.2 실험결과

연료전지 모델링을 위하여 Table 1과 같이 냉각수의 입구온도, 냉각수 입구온도에 대한 공기입구 상대습도(RH), 전류, 공기 과급비(SR)를 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

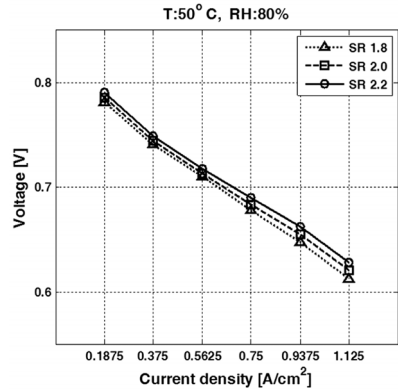
온도조건은 차량의 운전조건을 고려하여, 정상 온도조건인 65°C와 차량 정차 시 연료전지의 냉각을 고려하여 50°C로 선정하였다. 또한 전류 실험 구간은 연료전지 모델의 단순화를 위하여 주로 Ohmic loss가 지배적인 영역을 중심으로 수행하였다. 연료전지의 손상을 방지하기 위하여 각 셀의 전압이 0.4 V 미만일 경우 실험을 중단하였다. 65°C RH 50% 조건의 경우 1.125 A/cm² 영역에서 성능이 0.4 V 미만으로 나타났기 때문에 실험을 중단하였다. 이와 같은 성능저하는 연료전지의 전력소모가 커질수록 냉각수 온도가 65°C임에도 불구하고 연료전지가 대면적이고 단열처리 되어 내부온도가 65°C 이상으로

Table 1 Test conditions

Temperature [°C]	50, 65
RH [%]	50, 80
Current density [A/cm ²]	0.1875, 0.3750, 0.5625, 0.7500, 0.9375, 1.125
Air flow(SR)	1.8, 2.0, 2.2

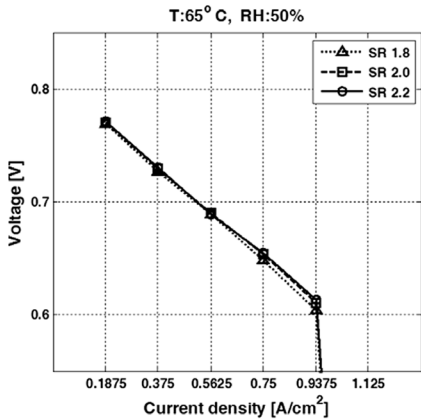


(a) Coolant inlet temperature: 50°C, RH: 50%

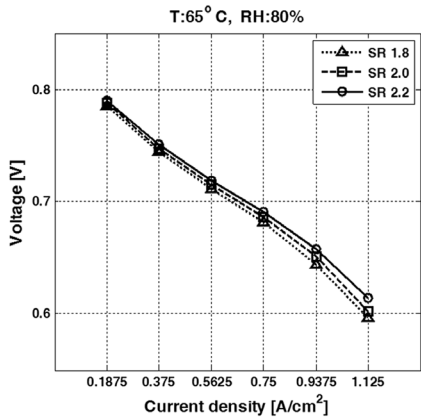


(b) Coolant inlet temperature: 50°C, RH: 80%

Fig. 3 Performance of PEFC at 50°C



(a) Coolant inlet temperature: 65°C, RH: 50%



(b) Coolant inlet temperature 65°C, RH: 80%

Fig. 4 Performance of PEFC at 65°C

올라가면서 MEA가 충분히 가습되지 않아 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 실험결과를 50°C와 65°C에서 각각 공기 과급비 1.8, 2.0, 2.2 순으로 보여주고 있다. 50°C에서는 RH의 영향이 많이 나타나지 않고 오히려 전류가 높을 경우에 RH 50%에서 RH 80% 보다 다소 좋은 성능을 보이고 있다. 낮은 온도에서는 RH에 의한 영향이 적은 것으로 판단할 수 있다. 반면 65°C에서는 RH 80%에서 연료전지 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

전체적으로 연료전지 자체의 성능은 과급비가 높은 경우 향상되는 것을 관찰할 수 있다. 과급비가 늘어날수록 연료전지의 성능이 향상되는 것은 과급된 공기에 의하여 채널에 생성된 물이 충분히 제거되

어 원활한 산소의 공급에 의한 것임을 유추할 수 있다. 다만 65°C, RH 50%와 같은 고온 건조한 운전조건에서는 과급비에 대한 영향을 현저하게 줄어듦을 알 수 있다. 그렇지만 차량에서 연료전지에 공기를 공급을 늘리게 되면 Blower를 구동을 위한 소모전력이 증가하고 MEA가 건조해 질 가능성이 높아지기 때문에 공기공급을 무한정 늘릴 수는 없다. 따라서 이 연구에서는 연료전지 운전을 위하여 연료전지와 Blower운전을 동시에 고려하였다.

3.3 연료전지 및 Blower 모델

실험 결과를 통하여 온도, 상대습도, 과급비가 일정할 경우 전류 증가에 따라 연료전지 출력 전압은 선형적으로 변화함을 관찰할 수 있다. 이러한 연료전지의 특성을 모사하기 위한 연료전지 전압 모델은 식 (1)과 같이 정의 되었다.^{3,4)}

$$V_{fc} = a_1 + a_2i + a_3\dot{m}_{air} \quad (1)$$

식 (2)는 식 (1)의 전압모델을 이용한 연료전지 전력모델이다.

$$P_{fc} = A(a_1 + a_2i + a_3\dot{m}_{air})i \quad (2)$$

식 (1)과 실험 데이터를 기반으로 최소자승법을 이용하여 Table 2와 같이 온도 습도에 따른 연료전지 모델 파라미터를 구하였다.

Blower는 일반적으로 공기공급을 증가시키면 Fig. 5와 같이 요구되는 전력이 비선형적으로 증가하게 된다. 이 연구에서는 Fig. 5와 같이 연료전지 차량의 Blower 데이터를 2차 다항식과 3차 다항식을 이용하여 fitting하였다. 2차에서도 비교적 정확한 fitting 결과를 보여줌을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 최적화 문제를 단순화하기 위하여 2차 모델을 사용하였다. 식 (3)은 Blower에 대한 2차 다항식 모델을 나타낸다.

Table 2 PEFC model parameters

온도	습도(RH)	a_1	a_2	a_3
50°C	50 %	0.8077	-0.2164	0.2547
	80 %	0.8135	-0.2478	0.3382
65°C	50 %	0.8096	-0.2511	0.1706
	80 %	0.8217	-0.2612	0.3254

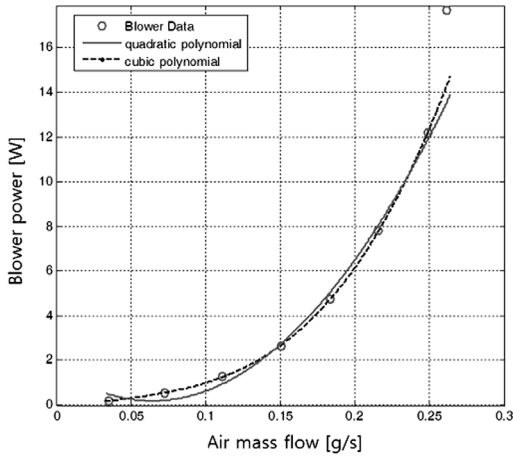


Fig. 5 Blower power

$$P_{bl} = b_0 + b_1 \dot{m}_{air} + b_2 \dot{m}_{air}^2 \quad (3)$$

4. 연료전지 전류 및 공기 공급유량 최적화

4.1 최적화 평가함수

이 연구의 최적화 목표는 요구 시스템 출력에 대하여 최소의 연료소모를 위한 공기 공급량과 연료전지 전류를 산출하는 것이다. 연료전지 전류 소모량은 연료전지의 수소소모량 즉 연료소모량에 비례하기 때문에 연료전지 전류 소모량을 최소화하는 조건으로 운전을 하게 되면 연료소모를 최소화 할 수 있다.

식 (4)는 최적화 평가함수와 최적화 제약조건을 나타내고 있다. 연료전지 시스템 출력 모델은 최적화 제약조건으로 이용된다. 연료전지 시스템 출력은 연료전지 스택의 출력과 공기공급을 위한 Blower의 소모 전력의 차를 의미한다.

Minimize

$$f(x_1, x_2) = i, \quad x_1 = i, \quad x_2 = \dot{m}_{air} \quad (4)$$

subject to

$$h(x_1, x_2) : P_{fc} - P_{bl} - P_{sys} = 0$$

식 (4)의 제약조건이 있는 최적화 문제를 풀기 위해서는 제약조건이 없는 최적화 문제로 변환하여야 한다. 다음과 같이 Lagrange multiplier λ 를 도입하여 제약조건을 제거하였다.⁵⁾

Minimize $F = f + \lambda h$

$$F = i + \lambda (P_{fc} + P_{bl} + P_{sys}) \quad (5)$$

4.2 Lagrange multiplier를 이용한 최적화

식 (5)의 F를 최소화하기 위해서는 우선 F의 일차 미분이 0이 되어야 한다. F의 일차 미분이 0이 되기 위해서는 각 변수에 대한 F의 편미분이 0이 되어야 한다. 다음 식 (6)-(8)은 F의 일차 편미분을 나타낸다.

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = 1 + \lambda A (a_1 + a_2 x_1 + a_3 x_2 + a_2 x_1) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_2} = -\lambda (b_1 + 2b_2 x_2 - A a_3 x_1) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = A x_1 (a_1 + a_2 x_1 + a_3 x_2) - b_0 - b_1 x_2 - b_2 x_2^2 - P_{sys} = 0 \quad (8)$$

식 (6)으로부터 $\lambda \neq 0$ 임을 확인할 수 있으므로 식 (7)로부터 유량과 전류의 관계를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$x_1 = \frac{b_1 + 2b_2 x_2}{A a_3} \quad (9)$$

식 (9)를 식 (7)에 대입하면 식 (10)과 같은 2차 방정식의 형태로 정리가 되고, 이것으로부터 최적해는 2개가 존재함을 알 수 있다.

$$x_2^2 \left(b_2 + \frac{4a_2 b_2^2}{A a_3^2} \right) + x_2 \left(\frac{2a_1 b_2}{a_3} + \frac{4a_2 b_1 b_2}{A a_3^2} \right) - b_0 - P_{sys} + \frac{a_1 b_1}{a_3} + \frac{a_2 b_1^2}{A a_3^2} = 0 \quad (10)$$

이때 F의 2차 미분이 양수인 경우에 F가 최소가 되므로 최적 조건을 만족하는 해는 식 (11)과 같이 정리된다.

$$x_2 = - \frac{2a_1 b_1 b_2 + A a_1 a_3 b_2}{A a_3^2 b_2 + 4a_2 b_2^2} - \frac{A a_3 \sqrt{J}}{A a_3^2 b_2 + 4a_2 b_2^2} \quad (11)$$

$$J = (A a_1^2 b_2^2 + 4P_{sys} a_2 b_2^2 + 4a_2 b_0 b_2^2 - a_2 b_1^2 b_2 + A P_{sys} a_3^2 b_2 + A a_3^2 b_0 b_2 - A a_1 a_3 b_1 b_2) / A$$

4.3 최적화 결과

Fig. 6-9는 각각 50°C-RH: 50% 50°C-RH: 80%, 65°C-RH: 50%, 65°C-RH: 80%에서 최적화 결과와 SR:1.8, SR: 2.0, SR: 2.2의 결과를 비교한 그림이다. x축은 연료전지와 Blower로 구성된 전체 시스템의 전류 밀도를 나타내며 y축은 전체 시스템의 전력 밀도를 나타낸다. 전류 밀도당 전력 밀도가 높을수록 전체시스템이 좋은 성능을 나타냄을 뜻한다.

Fig. 6을 살펴보면 시스템을 전류밀도 0.1875 - 0.375 A/cm²의 저전류 구간에서 운전할 경우 공기 공급량이 많을수록 전체 시스템 출력이 높게 형성되고 있다. 반면 0.5625 A/cm²와 같은 중전류 구간에서는 공기공급량에 따른 전체 시스템 출력 차이가 적게 나타나고 있다. 또한 0.75 - 0.9375 A/cm²와 같은 고전류 구간에서는 공기공급량이 적을수록 높은 시스템 출력을 보여주고 있다. 이러한 현상은 Fig. 5

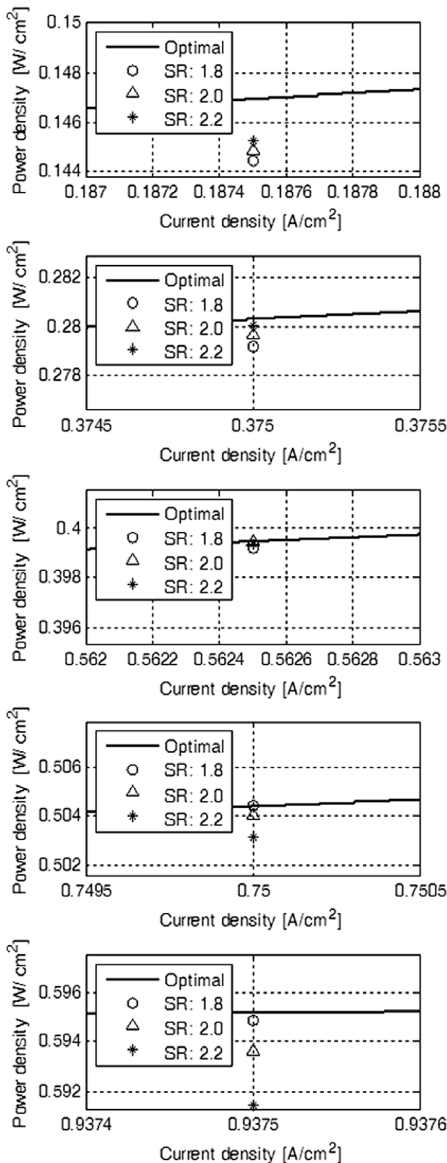


Fig. 6 Optimization result at 50°C, RH: 50%

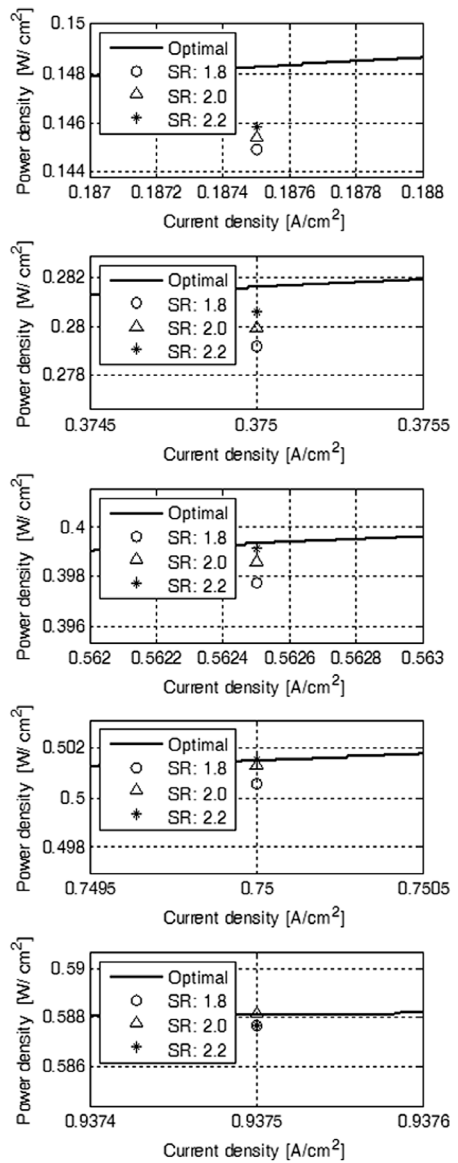


Fig. 7 Optimization result at 50°C, RH: 80%

에서와 같이 공기 공급이 많을수록 공기 공급 증가에 따른 Blower 소모전력 증가율이 커지기 때문에 발생한다. 특히 고전류 영역에서는 공기 과급에 따른 연료전지 성능향상 보다 Blower의 전력소모가 커지게 되기 때문에 오히려 공기공급량이 증가할수록 전체 시스템 출력은 감소하게 된다.

Fig. 7에서는 고전류 영역에서는 높은 습도의 영향으로 SR 1.8과 같은 너무 낮은 공기 과급비는 오히려

전체 시스템 성능을 저하시킴을 알 수 있다.

반면 Fig. 8과 같은 고온 건조한 운전의 경우 저전류에서는 과급비가 높은 것이 다소 좋은 성능을 나타내는데 비하여 고전류 영역에서는 낮은 과급비로 운전했을 경우 좋은 성능을 보여주고 있다.

Fig. 9와 같이 고온 다습한 운전의 경우 저전류 영역에서는 높은 과급비가 좋은 성능을 보여주고 있지만, 고전류 영역에서는 공기과급비가 SR 2.0 부근

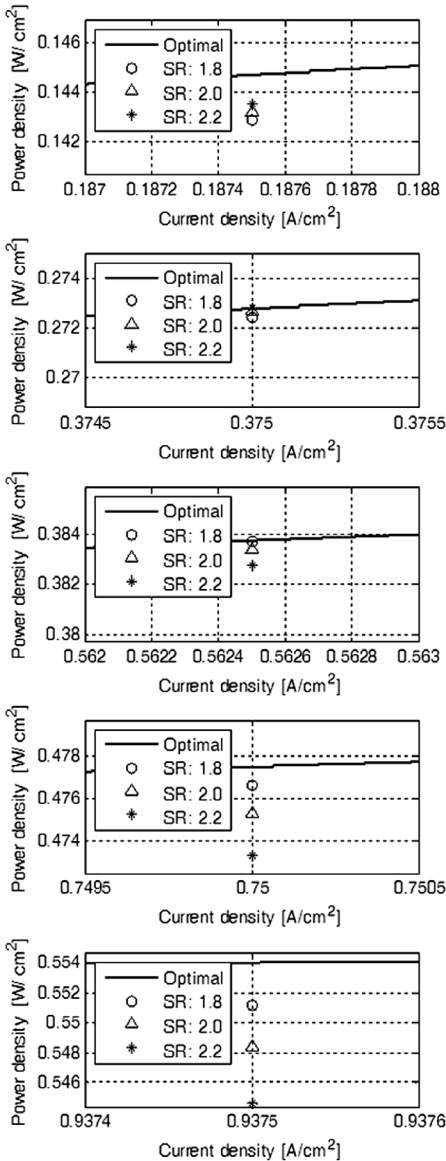


Fig. 8 Optimization result at 65°C, RH: 50%

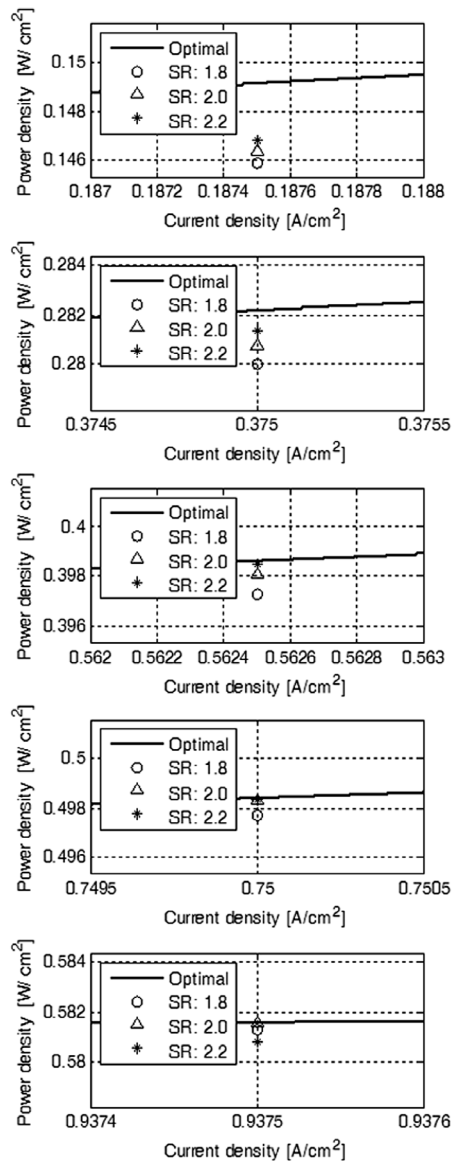


Fig. 9 Optimization result at 65°C, RH: 80%

에서 최적공기공급량이 형성됨을 확인할 수 있다. 따라서 차량 연료전지 시스템을 최적으로 운전하기 위해서는 고정된 공기 과급비가 아닌 각 운전영역에 적합한 공기과급비를 적용이 필수적이다.

5. 결론

이 연구에서는 고분자 전해질 연료전지와 Blower 로 이루어진 시스템의 요구 출력에 따른 공기공급 최적화 방법을 제시하였다.

공기공급 최적화를 수행하기 위하여 고분자 전해질 연료전지 실험결과를 바탕으로 고분자 전해질 연료전지 모델링을 수행하였고, Blower의 소모전력 데이터를 이용하여 유량에 따른 Blower의 소모전력 모델을 수립하였다. 제안된 고분자 전해질 연료전지 모델과 Blower 모델을 이용하여 최적화의 제약 조건을 정의하였고, Lagrange multiplier 방법을 적용하여 최적화를 수행하였다.

최적화 결과를 통하여 고정된 공기과급비 운전보다 온도, 습도, 전류에 따른 최적공기공급 운전 시 전체 시스템 효율이 향상됨을 확인할 수 있었다. 따라서 이 연구에서 제시된 공기공급량 최적화 기법을 적용한다면 연료전지자동차의 연비향상을 기대할 수 있다.

후 기

이 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원이 지원한 전략기술인력양성사업, 지식경제부의 지

원으로 수행한 에너지자원인력양성사업, 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(2006ETR11P091C)으로 수행된 연구 결과임

References

- 1) P. Costamagna and S. Srinivasan, "Quantum Jump in the PEMFC Science and Technology from the 1960s to the Year 2000: Part II. Engineering, Technology Development and Application Aspects," Journal of Power Sources, Vol.102, pp.253-269, 2001.
- 2) W.-C. Yang, "Fuel Cell Electric Vehicles: Recent Advances and Challenges - Review," Int. J. Automotive Technology, Vol.1, No.1, pp.9-16, 2000.
- 3) T. E. Springer, T. A. Zawodzinski and S. Gottesfeld, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model," Journal of Electrochemical Society, Vol.138, No.8, pp.2334-2342, 1991.
- 4) S. Choi, K. Chu, J. Ryu and M. Sunwoo, "Empirical Modeling of a Polymer Electrolyte Fuel Cell based on Water Transport Investigation and Current Interrupt Measurement," Int. J. Automotive Technology, Vol.10, No.6, pp.719-732, 2009.
- 5) A. D. Belegundu and T. R. Chandrupatla, Optimization Concepts and Applications in Engineering, pp.146-148, Prentice Hall, New Jersey, 1999.