

자동차용 연료전지 시스템의 가습모델과 열/물균형 유지방법

정 승 훈¹⁾, 윤 석 호²⁾, 김 민 수³⁾

Humidification model and heat/water balancing method of PEMFC system for automotive applications

Seung Hun Jung, Seok Ho Yoon, Min Soo Kim

Key words : PEMFC(고분자막 연료전지), FCEV(연료전지 자동차), Injector(인젝터), MEA(막전극결합체), Humidification(가습), APS(공기공급장치), FPS(연료공급장치), CCS(냉각장치), RH(상대습도)

Abstract : A PEMFC system model for FCEV was constructed and simulated numerically to examine the heat/water flow of the system and air/fuel humidification process for various operation conditions (ambient pressure /temperature/humidity, operating temperature, power load). We modeled PEMFC stack which can generate maximum electricity of about 80 kW. This stack consists of 400 unit cells and each unit cell has 250 cm² reacting area. Uniform current density and uniform operating voltage per each cell was assumed.

The results show the flow characteristics of heat and water at each component of PEMFC system in macro-scale. The capacity shortage of the radiator occurred when the ambient was hot (over 40 °C) and power level was high (over 50 kW). In spite of some heat release by evaporation of water in stack, heat unbalance reached to 20 kW approximately in such a severe operating condition. This heat unbalance could be recovered by auxiliary radiators or high speed cooling fan with additional cost. In cold environment, the capacity of radiator exceeded the net heat generation to be released, which may cause a problem to drop the operating temperature of stack. We dealt with this problem by regulating mass flow rate of coolant and radiator fan speed. Finally, water balance was not easily broken when we retrieved condensed and/or unused water.

Nomenclature

\bar{g}	: molar Gibbs free energy difference, J/mol
\bar{h}	: enthalpy difference, J/mol
\bar{s}	: entropy difference, J/mol.K
PEMFC	: proton exchange membrane fuel cell
FCEV	: fuel cell electric vehicle
MEA	: membrane electrodes assembly
APS	: air providing system
FPS	: fuel providing system
CCS	: cooling control system
OCV	: open circuit voltage
LPM	: liter per minute
LMTD	: log mean temperature difference
RH	: relative humidity

는데, 이를 위하여 연료전지에 공급되는 공기와 수소는 통상 외부에서 가습되어 투입된다. 외부 가습방법에는 water boiling, steam injection, gas-to-gas, liquid-to-gas 등 여러 가지 방법이 있는데 본 논문에서는 injector를 이용한 air/water blasting 방식에 대하여 연구를 수행하였다. 가습을 실시함에 있어서 PEMFC 시스템의 전체적인 수분관리가 중요한데, 이것은 PEMFC 시스템이 운전 중에 부수적으로 발생하는 물을 가습에 이용할 수 있으며 가습에 투입된 물과 발생된 물을 회수해서 재활용해야만 운전 중인 PEMFC 시스템이 수분부족으로 성능이 급격히 떨어지는 상황을 방지할 수 있기 때문이다. 또한 수분관리는 열관리와 분리해서 생각할 수 없는데 그 이유는 스택에서 발생하는 열을 충분히 방출시키지

1. 서론

PEMFC를 구성하는 MEA에서의 원활한 전기화학 반응을 위해서는 전해질 역할을 하는 고분자막이 충분히 젖은 상태를 유지해야 한다. 또한 적절한 가습을 통해서 고분자막의 열화를 방지할 수 있

- 1) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
E-mail : stratus@reflab.snu.ac.kr
Tel : (02)880-7545 교)3308
- 2) 서울대학교 공과대학 전기컴퓨터공학부
E-mail : metallaw@reflab.snu.ac.kr
Tel : (02)880-7545 교)3308
- 3) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
E-mail : minskim@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8362

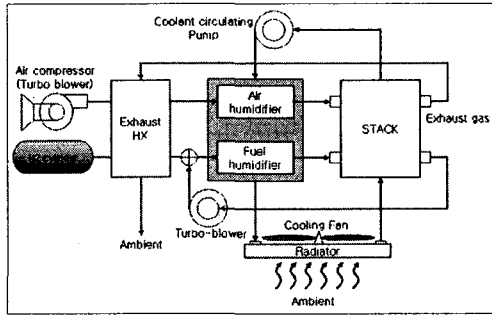


Fig. 1 Schematic diagram of PEMFC system

못할 경우 즉, 열균형이 깨지는 경우에 시스템의 온도가 상승하고 물의 포화온도의 상승으로 인해 물의 증발량이 커져 수분균형이 함께 깨지기 때문이다. 이러한 문제를 분석하기 위해서 80 kW급 자동차용 PEMFC 시스템을 거시적인 관점에서 수학적으로 모델링하고 여러 가지 외부환경 및 운전환경에 따라서 PEMFC 시스템의 열과 수분의 균형이 어떻게 달라지며 각 환경에서 공기와 수소에 대한 가습량은 어떻게 달라지는지 그 추이를 살펴보았다.

2. 자동차용 PEMFC 시스템과 구성요소

자동차용 PEMFC 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. 시스템은 크게 스택, 공기공급계(APS), 연료공급계(FPS), 냉각계(CCS)로 나눌 수 있다.

2.1 스택(STACK)

스택은 반응면적이 250 cm²인 단위셀 400개를 직렬연결한 것으로 모델링하였으며 모든 셀의 출력전압과 전류밀도는 균일하다고 가정하였다. 분리판은 비투과성으로서 cathode에서 생성된 물이 anode쪽으로 이동하지 않으며, 전기삼투현상(electro-osmotic drag)에 의해서 proton 1개가 고분자막을 투과할 때 물분자 1개를 cathode쪽으로 끌고 가는 것으로 가정하였다.

2.1.1 OCV (Open Circuit Voltage)

반응생성물이 수증기라고 가정할 경우에 OCV의 계산은 다음과 같다.

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$$

$$\bar{V}_{g_f} = (\bar{g})_{H_2O} - (\bar{g})_{H_2} - \frac{1}{2} (\bar{g})_{O_2}$$

$$\bar{V}_{g_f}(T) \bar{V}_{h_f}(T) - T \cdot \bar{V}_s(T)$$

$$OCV = \frac{-\bar{V}_{g_f}}{2F}$$

위의 OCV를 반응온도에 따라 계산하여 나타내어 보면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 온도의 증가에 따라 감소하는 추이를 보인다.

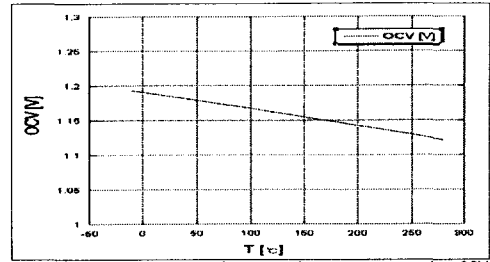


Fig. 2 The effect of operating temp. on the OCV

Table 1 Operating voltage parameters

i	current density	A/cm ²
$i_0(T)$	exchange current	A/cm ²
$i_l(T)$	limiting current	A/cm ²
F	96500	C
R	gas constant	J/mol·K
α	charge transfer coeff.	≈ 0.5
$r(T)$	internal resistance	Ω·cm ²
T	reacting temp.	K

2.1.2 전압손실(Voltage loss)

전압손실은 크게 ohmic loss, activation overvoltage, concentration loss 등으로 구분하였다.

$$R_1(T) = (i + i_n) \cdot r$$

$$R_2(T) = \frac{RT}{2\alpha F} \cdot \ln\left(\frac{i + i_n}{i_0}\right)$$

$$R_3(T) = -\frac{RT}{2F} \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right)$$

2.1.3 I-V 특성곡선

OCV와 전압손실을 고려하여 다음과 같이 실제 운전전압을 계산할 수 있으며 Fig. 3에 I-V 특성곡선이 도시되었다.

$$V = V_{OC}(T) - R_1(T) - R_2(T) - R_3(T)$$

운전온도의 증가에 따라서 OCV는 감소하나 내부저항도 감소하며 exchange current와 limiting current는 증가하므로 전체적인 운전전압의 향상을 보이게 된다. 같은 출력에 대해서 운전전압이 높을 경우에 전류밀도가 상대적으로 낮게 되는데 이는 연료소모량의 감소, 즉, 연비향상을 의미한다. Table 2는 시뮬레이션의 결과로서 운전온도에 따른 연료소비율을 나타낸 것이다. 운전온도가 높을수록 연비가 향상되는 것이 사실이나, 운전온도의 상승은 스택 재질의 수명에 영향을 미치므로 운전온도가 너무 높아져도 안된다.

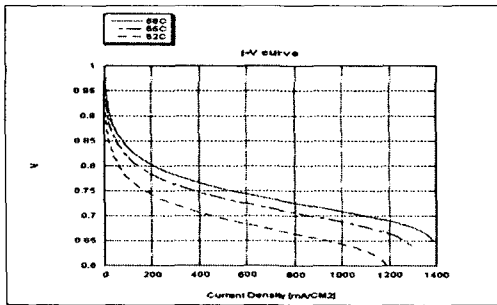


Fig. 3 I-V characteristic graphs of a unit cell at various operating temperature

Table 2 Modelled PEMFC system efficiency for various operating temperature

Operating Temp.	Power Load	Operating Voltage	Current Density	Fuel required	STACK Efficiency
62	40	0.587	684	1.064	44.65
65	40	0.642	624	0.972	48.85
68	40	0.668	599	0.933	50.79
°C	kW	V/Cell	mA/cm²	g/sec	%

* Ambient condition : 20°C, RH=0.5, stoichiometry=1.5

또한 전체 시스템의 열균형과 수분균형에도 영향을 미치므로 보통 65°C 전후로 유지한다.

2.2 공기공급시스템(APS)

APS에서는 우선 공기압축기(또는 터보블로어)가 대기의 공기를 계산된 압축비로 압축하여 폐열회수용 열교환기로 보내게 된다. 가압운전이 상압운전보다 출력이익이 크며 운전압축비 3정도에서 효과적임이 알려져 있으나, 여기서는 수분관리에 초점을 두었으므로 공기축이 1.11 bar, 수소축은 공기축의 1.1배로 유지하도록 초기값을 정하되, 스택출구에서의 습도가 기준치(RH 0.8) 이하로 떨어질 경우 압축비를 올리도록 설정하였다. 압축된 공기는 폐열회수 열교환기에서 배기가스로부터 열을 얻은 뒤에 가습챔버로 이동하게 되는데, 이 때 고온다습의 배기가스는 온도가 떨어지면서 응축수를 생성시키므로 회수하여 재활용해야 한다. 스택을 통과하여 데워진 냉각수는 라디에이터로 이동하기 전에 가습챔버를 둘러싸고 있는 물재킷(water jacket)을 지나면서 가습챔버의 온도를 상승시키게 한다. 이는 가습챔버

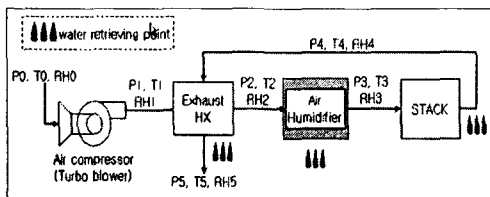


Fig. 4 Air Providing System (APS)

를 통과하는 기체의 온도를 상승시켜 더 많은 수분을 투입시키려는 목적에서이다. 가습챔버에서 수분의 분사가 이루어지는데 분사하고 남은 물은 회수되어 재활용하게 된다. 스택에 투입되는 공기의 필요 RH는 상대적으로 낮은 0.6으로 설정하였는데, 이것은 전기삼투현상으로 인해 수소극의 수분이 전류강도에 따라 공기극으로 이동하므로 스택내부를 통과하면서 포화온도가 상승하더라도 스택 출구에서 거의 RH 1.0 상태를 유지하기 때문이다. RH가 1.0을 초과하는 경우에 남은 물은 출구에서 회수되어 재활용된다.

2.3 연료공급시스템(FPS)

수소실린더에서 감압된 수소는 최대출력을 기준으로 한 유량이 스택에 공급되며 미반응한 수소는 터보블로어를 통해 재순환되게 한다. APS와 마찬가지로 실린더에서 나온 수소는 먼저 배기가스와의 열교환을 통해 열을 얻으며 배기가스의 온도가 떨어지면서 역시 응축수를 회수하게 된다. 터보블로어를 통해 재순환된 수소는 새로 투입되는 수소와 정압혼합을 하게 되는데 스택을 통과하면서 약간의 압력손실이 있으므로 터보블로어에서 이를 보상토록 한다. 혼합된 수소는 가습챔버로 이동되며 RH 1.0까지 가습되도록 한다. 수소축의 목표 습도를 높게 하는 이유는 스택을 통과하면서 전기삼투현상에 의해서 수분을 공기극에 빼앗기기 때문이다. 수소축 출구 RH가 너무 낮으면 고분자막에서 DRY-OUT에 의한 부분열화가 일어날 가능성이 크므로 수소축의 공급온도를 높여서(스택운전온도까지 올리면 이상적임) 되도록 많은 수분을 공급하는 것이 좋다.

2.3 냉각시스템(CCS)

CCS는 라디에이터와 냉각팬으로 구성되어 있다. 라디에이터는 2000 cc급 승용차용의 크기로서(640x500) louver fin이 부착된 8개의 port가 1개의 pass를 이루며 총 8개의 pass를 회전하는 serpentine모양의 컴팩트형 열교환기이다. 냉각수는 물이고 최대유량은 약 96 LPM이다. 시스템의 출력이 65 kW이고 외기온도가 40°C일 때 시물레이션으로 최대 45 kW의 방열능력을 보인다.

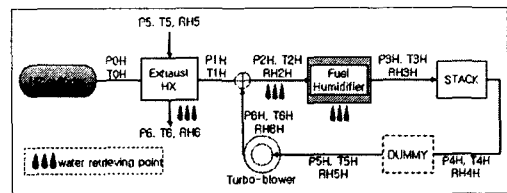


Fig. 5 Fuel Providing System (FPS)

Table 1 Size of the modelled radiator (unit: mm)

item	value	item	value
port width	40	port height	1.5
tube thickness	2	tube pitch	10
tube depth	40	tube length	500
fin depth	40	fin thickness	0.1
fin height	8	fin length	8.1
fin pitch	1.25	louver length	6.16
louver pitch	1.34	louver angle	40°

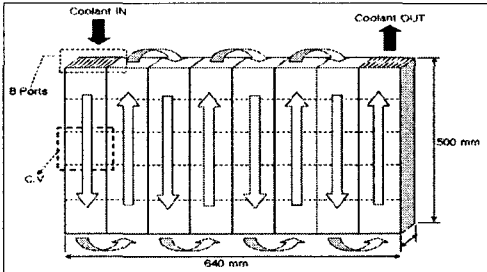


Fig. 6 Schematic diagram of the modelled radiator

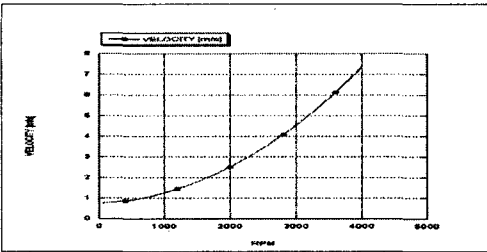


Fig. 7 Wind speed curve of the modelled cooling fan

냉각팬은 Fig. 7과 같은 특성을 갖는 모델을 이용하였는데 최대 4000 rpm에서 약 7.0 m/s의 풍속까지 발생시키는 것으로 설정하였다.

3. 시뮬레이션의 과정

3.1 공기와 수소의 흐름

우선 외기상태(온도/습도/압력)와 운전온도(62°C/65°C/68°C), 요구부하를 입력한다. 입력값을 토대로 OCV, internal resistance, limiting current, exchange current 등을 계산하여 운전전압과 전류밀도를 알아낸 다음, 필요한 공기와 수소의 유량을 결정한다. 공기의 등엔트로피 압축을 가정하면 토출온도와 압력, 습도를 알아낼 수 있다. 압축된 공기는 폐열회수 열교환기에서 간단한 LMTD법으로 배기가스와 열교환시켜 토출온도와 습도를 얻는다. 이 때 배기가스의 습도는 가정값을 사용한 후 나중에 계산값과 비교하여 수렴시킨다. 열교환을 마친 공기는 가슴챔버로 이동하며 요구습도(RH 0.6)와 비교하여 낮을 경우 소요량만큼의 물이 분사되도록 계산되고 가슴

을 마친 공기의 물성치를 알아낸다. 스택에 투입된 공기는 운전온도까지 가열되고 전류밀도에 따라 수소극에서 이동된 수분을 얻어 스택출구의 습도를 알아낸다. 수소는 투입공기와 열교환을 마친 배기가스와 다시 열교환을 하여 열을 얻은 후, 터보블로어를 통해 재순환된 수소와 정압혼합한다. 이 때 스택출구에서의 수소의 RH값을 가정한 후 나중에 계산된 값과 수렴시킨다. 혼합된 수소의 물성치를 알아낸 뒤 가슴챔버에서 RH 1.0까지 가슴시킨다. 가슴된 수소는 스택을 지나면서 전류밀도에 따라 공기극으로 수분을 잃고 건조되면서 스택을 빠져나오게 된다.

3.2 스택냉각과 열 및 물의 균형

운전상태인 스택의 효율과 출력을 고려하여 스택에서 발생하는 열량을 계산하고 가슴되어 공급되는 공기와 수소의 열량, 반응을 마치고 스택을 빠져나가는 배기가스의 열량, 증발열량 등을 종합하여 냉각수가 스택에서 흡수하여 빠져 나가야 하는 요구방열량을 계산한다. 라디에이터는 요구방열량과 외기조건이 고려되어 냉각수의 유량이 결정되며 냉각수가 최대유량에 도달할 때까지 냉각팬은 기본회전수를 유지한다. 냉각수 최대유량에서 방열량이 부족해지면 냉각팬의 속도를 올려서 라디에이터의 용량을 증가시킨다. 이렇게 하는 이유는 저출력운전, 또는 외기온도가 매우 낮은 상황에서의 운전에서는 라디에이터의 방열용량이 요구방열량보다 커서 스택의 운전온도가 오히려 떨어져 효율이 감소하는 것을 막아야 하기 때문이다. 열균형은 요구방열량에서 라디에이터 용량을 차감한 열량으로 평가하였다. 물균형은 투입공기에 포함된 수분, 전기화학반응으로 발생하는 물, 가슴수, 회수점에서 포집된 물, 전기삼투현상으로 이동된 물 등을 고려하여 평가된다.

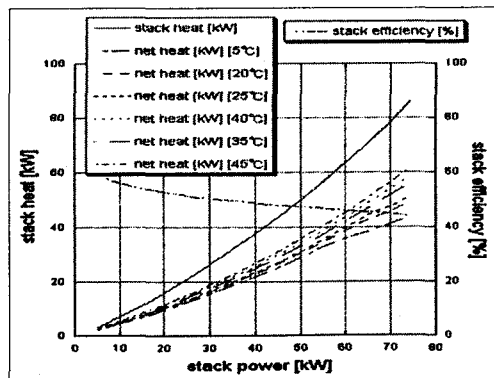


Fig. 8 Net heat to be released for various ambient temperature (operating temperature: 65°C)

4. 결과 및 고찰

4.1 스택발생열과 요구방열량

Fig. 8은 외기온도가 변할 때 스택 출력에 따른 스택발생열과 요구방열량을 비교한 것이다. 스택의 출력이 커짐에 따라서 스택발생열도 늘어나지만 실제 요구방열량의 증가량은 이보다 작음을 알 수 있는데 이것은 고온다습한 배기가스가 갖고 빠져나가는 열량이 출력에 따라서 커지기 때문이다. 외기온도가 올라감에 따라서 요구방열량도 올라가는 것은 스택에 투입되는 공기와 수소의 열량의 증가가 원인이다. 단위셀의 I-V 특성곡선에서 알 수 있는 것처럼 스택의 출력이 올라감에 따라서 운전전압이 떨어지므로 스택의 효율은 점점 떨어짐을 알 수 있다.

4.2 열균형(Heat Balance)

Fig. 9와 Fig. 10은 외기온도가 변할 때 스택의 출력에 따른 열균형도를 보여준다. 열균형도는 요구방열량에서 라디에이터의 용량과 라디에이터의 용량이 부족할 시에는 공기극에서 토출되는 액상의 물증발열을 차감한 것으로 계산하였다. 그래프에서 외기온도 35℃까지는 설계된 라디에이터와 물증발열로써 열균형을 맞추는 것을 알 수 있다. 또한, 고출력대에서는 냉각팬이 최대 rpm으로 작동함을 알 수 있다. 40℃와 45℃에서는 열의 불균형이 급증하는 것을 볼 수 있는데 이것은 발생열이 라디에이터의 최대용량과 물증발열을 초과했기 때문이다. 운전온도가 65℃이고 외기온도가 45℃, RH 0.9일 때 열의 불균형은 75 kW 출력에서 약 20 kW 초과로 나타났다. 동일 외기온도에서 RH가 높은 경우에서 열균형이 빨리 깨지는데 이것은 RH가 높을 경우가 스택에 투입되는 공기와 수소의 열량이 크기 때문이다. 외기온도가 낮고 저출력대에서는 열균형이 음수값을 보이는데 이것은 라디에이터가 최소용량으로 작동되더라도 요구방열량을 상회하기 때문이다. 이러한 상태로 계속 운전하면 스택의 운전온도가 떨어지는 문제가 발생하므로 냉각팬을 단속하거나, 유입공기를 차단하는 등의 대책을 강구해야 할 것이다.

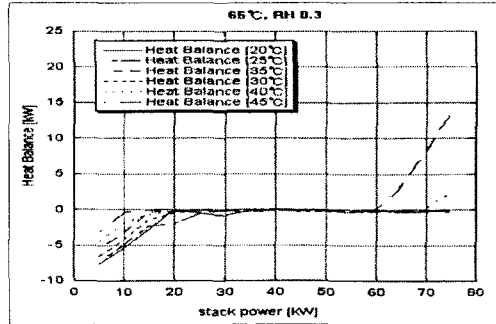


Fig. 9 Heat balance diagram for various ambient temperature (operating temperature: 65°C, RH: 0.3)

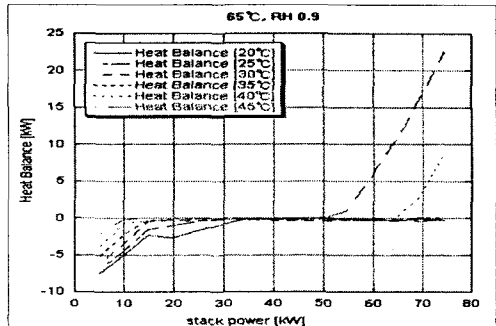


Fig. 10 Heat balance diagram for various ambient temperature (operating temperature: 65°C, RH: 0.9)

4.3 가습 분사량(Water Injection)

공기에 대한 가습량은 외기의 RH가 높을수록 줄어드는 것을 예상할 수 있는데 Fig. 11에서 보는 바와 같이 외기온도 25℃/RH 0.9 이상에서는 고출력에서 분사량이 감소하며 45℃/RH 0.9 정도에서는 물이 분사되지 않는다. 외기의 RH값이 공기 가습에 큰 영향을 주는 것과 달리 수소에 대해서는 큰 영향을 주지 않았다. 그러나 Fig. 12를 살펴보면 전반적으로 출력이 높아짐에 따라 물분사량이 줄어드는 것을 알 수 있는데 이것은 고출력대에서는 재순환되는 수소의 양이 새로 투입되는 쪽보다 작아서 혼합된 수소의 포화온도가 떨어진

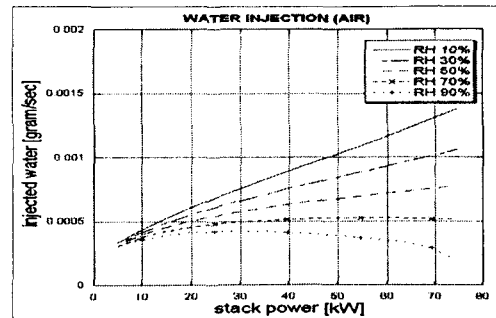


Fig. 11 A graph of water injection for various RH (Air-side, ambient temperature: 25°C)

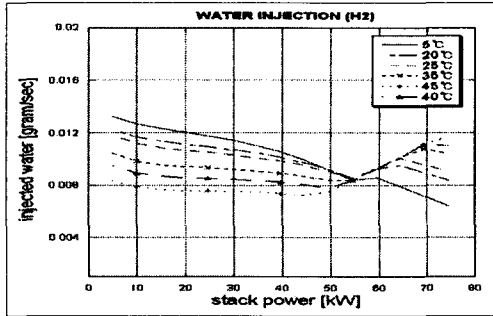


Fig. 12 A graph of water injection for various RH (Fuel-side, ambient temperature: 25°C)

것이 주된 원인이다. 물의 분사압이 높을수록 미립화(atomization) 효과가 좋아서 가슴에 유리하나, 분사에 소요되는 동력은 분사압에 비례하므로 분사압은 적당히 고려되어야 한다. 시뮬레이션에서 50 bar로 분사할 경우 약 100 W 정도가 소요되었다.

4.4 수분균형(Water Balance)

각 회수점에서 제대로 물이 회수되는 것을 가정할 경우, 외기온도가 25°C 이하에서는 수분균형이 출력에 따라서 완만하게 증가하는 모양을 보여 주었으며 30°C 정도에서는 증가하다가 감소하나, 수분균형이 0 이상을 유지하였다. 그러나 Fig. 13에서 보는 바와 같이 외기온도가 40°C 이상이 되면 고출력대로 넘어가면서 수분균형이 깨지게 됨을 알 수 있다. 배기가스쪽에 응축기를 설치하여 최대한 물을 회수해야 하나, 외기온도가 높을 경우에는 응축기의 열교환율이 100%라도 수분손실을 피할 수 없으므로 적당한 크기의 물탱크가 필요하다.

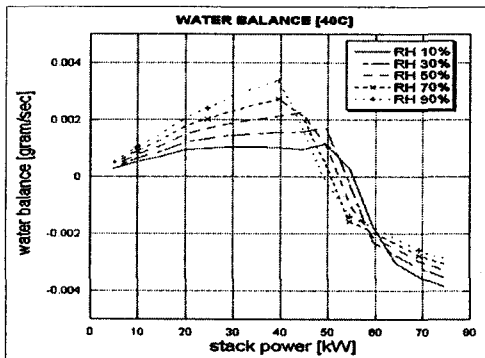


Fig. 13 A graph of water balance of the modelled PEMFC system (ambient temperature: 40°C)

5. 결론

시뮬레이터를 이용하여 운전환경의 변화에 따른 자동차용 PEMFC 시스템의 열 및 물균형의 추이를 살펴보았다. 열균형 유지는 라디에이터의 용량조절을 통해 많은 영역에서 가능하였으나, 가혹한 운전환경에서는 깨지게 되는 것을 알 수 있었으며 이것은 또한 물균형 파괴와 직결되었다. 연구에서 논의된 형식의 라디에이터(일반 자동차 크기)에서 약 25% 정도의 면적증설과 고성능 냉각팬 도입으로써 열의 불균형 문제가 개선될 수 있을 것으로 생각된다.

물균형은 각 회수점에서 응축수가 원활히 포집됨을 가정할 경우에 잘 유지되지만, 이것은 거시적 시스템의 관점에서 본 것이며, 실제로 이와 같은 형태의 스택을 고려할 경우에 수소극의 DRY-OUT이 문제가 될 수 있다. 즉, 시스템 전체적인 열 및 물균형이 유지되더라도 고분자막에서의 부분적인 열화가 발생되어 스택에 손상을 줄여지가 있다.

연구에서 물의 인젝션, 혼합 및 가슴과정은 고려되어 있지 않으므로 추가적인 연구를 진행할 필요가 있으며, 인젝션을 통해 시뮬레이션과 유사한 결과를 얻는다면 작은 동력으로 원하는 가슴효과를 얻을 수 있고 분사량 제어를 통해 습도 조절도 용이하므로 충분히 경제성이 있다고 판단한다.

References

- [1] Gu-Gon Park, Young-Jun Sohn, Sung-Dae Yim, Tae-Hyun Yang, Young-Gi Yoon, Won-Yong Lee and Chang-Soo Kim, 2004, "Influence of water behavior in the gas diffusion layer on the performance of PEMFC", The second international conference on the fuel cell science, engineering and technology June 14-16, 2004 Rochester, New York USA, pp. 1-5
- [2] Richard G. Compton, Giles H. W. Sanders, 1996, "Electrode Potentials", Oxford University Press, pp. 384-386
- [3] A. Weber, R. Darling, J. Meyers and J. Newman, 1996, "Mass transfer at two-phase and three phase interface", Hand book of Fuel Cell Vol. 1, Wiley press, pp.48-67
- [4] James Larminie, Andrew Dicks, 2003, "Fuel Cell System Explained", 2nd edition, Wiley press, Appendix 1-2
- [5] Arthur H. Lefebvre, 1989, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Co. pp. 105-150