가정용 연료전지 시스템의 전기 효율 향상을 위한 연료/공기 이용률 운전 최적화

석동훈¹ · 김민진^{2,3†} · 손영준^{2,3} · 이진호⁴

¹포스코에너지, ²한국에너지기술연구원 수소연료전지연구단, ³과학기술연합대학원대학교, ⁴연세대학교 기계공학과

Operational Optimization of Anodic/cathodic Utilization for a Residential Power Generation System to Improve System Power Efficiency

DONGHUN SEOK¹, MINJIN KIM^{2,3†}, YOUNG-JUN SOHN^{2,3}, JINHO LEE⁴

¹POSCO ENERGY, 13-9 Jukcheon-ri, Hunghae-eup, Buk-go, Pohang, Gyeongsangbuk-do, 791-941, Korea

²Hydrogen and fuel cell research center, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

³Department of Advanced Energy Technology, University of Science and Technology, 176 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

⁴Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 120-749, Korea

Abstract >> To obtain higher power efficiency of Residential Power Generation system(RPG), it is needed to operate system on optimized stoichiometric ratios of fuel and air. Stoichiometric ratios of fuel/air are closely related to efficiency of stack, reformer and power consumption of Balance Of Plant(BOP). In this paper, optimizing stoichiometric ratios of fuel/air are conducted through systematic experiments and modeling. Based on fundamental principles and experimental data, constraints are chosen. By implementing these optimum values of stoichiometric ratios, power efficiency of the system could be maximized.

Key words : Residential Power Generation(가정용 연료전지 시스템), Stoichiometric Ratio(과급률), Optimization(최적화), Power Efficiency(전기 효율), Modeling(모델링)

Nomenclature

a : anode outlet boundary
b : anode-membrane interface
c : cathode-membrane interface

d : cathode outlet boundary
A : active area, m²
ASR_m : area specific resistance, A/m²
a_w : relative humidity
BOP : Balance of Plant
D_H : hydraulic diameter, m
D : diffusion coefficient, m²/s
D_λ : water diffusivity in

[†]Corresponding author : minjin@kier.re.kr

[접수일 : 2013.8.1 수정일 : 2013.10.11 게재확정일 : 2013.10.31]

Copyright © 2013 KHNES

	membrane, m^2/s
E	: thermodynamic reversible potential, V
$EBOP$	: electrical Balance of Plant
eff_{con}	: efficiency of converter
eff_{inv}	: efficiency of inverter
F	: Faraday constant, C/mol
f	: pipe friction coefficient
j	: current density, A/m ²
j_0	: exchange current density, A/m ²
K_L	: minor loss factor
$MBOP$	: mechanical Balance of Plant
N	: number
n	: number of moles
NG	: natural gas
P	: pressure, Pa
ΔP	: pressure drop, Pa
R	: gas constant, J/mol·K
Re	: Reynold's number
RPG	: residential power generation system
T	: temperature, K
t	: thickness, m
U	: velocity of fluid, m/s
V	: electric potential, V
W	: power, W
W_e	: electric power, W
y_i	: experimental voltage
$\hat{y}_i$	: theoretical voltage
x	: partial pressure
α	: transfer coefficient
η	: efficiency
λ	: stoichiometric ratio
λ_w	: water content in membrane
ρ	: density of mixture, kg/m ³

σ	: ionic conductivity, S/m
ω_n	: molar ratio between heterogeneous gases

Superscripts

0	: reference condition
A	: anode
C	: cathode
eff	: effective

Subscripts

a	: anode
air	: air
BOP	: balance of plant
bur	: burner
c	: cathode
$cell$	: cell
ch	: channel
con	: constant
$coolant$	: coolant
$cross$	: loss from internal current and crossover
eff	: effective
H_2	: hydrogen
in	: inflow
m	: membrane
mix	: mixed
NG	: natural gas
O_2	: oxygen
ohm	: ohmic
$PrOx$	: preferential oxidation
rad	: radiator
ref	: reformer
sat	: saturated condition

<i>stack</i>	: stack
<i>therm</i>	: thermodynamic
H_2O	: water

1. 서 론

가정용 연료전지는 수소의 화학 에너지를 전기 에너지로 직접 변환시켜 전기와 열을 생산하는 고효율 무공해 발전 장치이다. 전 세계적으로 주거용과 무정전 전원 장치 수요의 증가로 2030년에는 100만대의 보급이 예상되는 등 수요가 폭발적으로 증가 할 것으로 예상 된다¹⁾.

연료전지는 단위 셀이나 스택만 고려 할 경우 재료나 설계적인 부분이 상당히 중요한 요소로 작용한다²⁾. 하지만 단위 셀에서 숏 스택, 풀 스택으로 갈수록, 또한 스택의 용량이 달라질수록 내부의 열 및 물 관리의 특성이 다양해지고 전류 분포 또한 달라진다. 이러한 이유 때문에 실제 필드 테스트 상황에서는 위와 같은 상황을 고려하지 않은 일률적인 운전은 시스템 효율의 저하를 가져온다. 또한 스택, 개질기, 주변장치와 밀접한 연관을 가지고 시스템이 운전되기 때문에 어느 한 부분의 성능이 바뀌면 운전 조건이 실시간 바뀌어야 최적의 효율을 낼 수 있다. 이처럼 실제 필드 테스트 상황에서는 운전 영향이 지배적이기 때문에 가정용 연료전지 업체의 대부분이 현재 시스템 운전 특성 최적화에 집중하고 있다. 하지만 제작사들이 자사 제품의 권익을 위해 제품에 대한 정보를 공유하지 않고 있기 때문에 운전 특성에 대한 정보를 문헌상에서 찾기 어렵고 또한 체계적인 연구가 이루어지고 있지 않는 실정이다.

상용화 전 단계에서 시동 및 응답 시간, 소비동력에 대한 연구가 Ferraro 등³⁾에 의하여 수행되었고 열 효율과 물 밸런스를 향상시키기 위한 연구도 Hubert 등⁴⁾에 의하여 수행되었다. 출력과 열 회수 효율을 최대화하기 위한 설계 기술과 유지 관리를 목적으로

한 실증 운전⁵⁾, 시스템 운전 중 파트 별 정보와 문제점을 파악하여 최적화 기반을 마련한 연구⁶⁾, 계절별 부하 변동을 반영한 경제적 운전 전략⁷⁾도 연구되었다. 그러나 가정용 연료전지 시스템의 수소 재순환 시 스택, 개질기, BOP 소비동력 등 전체 시스템을 대상으로 하여 연료와 공기 이용률의 최적 점을 선정하는 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 가정용 연료전지 통합시스템의 운전 최적화를 수행하였다. 이론 모델링과 실험을 기반으로 하여 전기 효율 향상을 위한 체계적인 접근 방법을 개발하였고, 가정용 연료전지 시스템의 시장 경쟁력 확보에 도움이 되고자 하였다. 실험의 수행은 한국에너지기술연구원에서 개발한 정격출력 1kW 가정용 연료전지 시스템을 이용하였다.

가정용 연료전지가 높은 전기 효율을 내기 위해서는 연료와 공기 이용률의 운전 최적화가 필요하다. 연료와 공기 이용률은 스택과 개질기의 효율 그리고 블로워의 소비동력과 밀접한 관련이 있기 때문에 시스템의 전기 효율과 직결된다. 일반적으로 이용률을 증가 시키면 삼상계면에서의 전기화학 반응이 원활해지고 유로 내부의 물 배출이 원활히 되는 등의 요인으로 인하여 스택의 성능이 향상된다. 하지만 그 증감 속도가 달라서 특정 지점 이상에서는 오히려 BOP의 기생전력을 증가시켜 시스템의 전기 효율의 감소를 가져온다. 따라서 전체 시스템의 성능 변화를 고려한 최적의 이용률로 운전하는 것이 전기 효율에 많은 영향을 미친다.

2. 연구 방법론 및 시스템 구성

2.1 연구 방법론

본 연구는 이론 모델링과 실험을 혼합한 하이브리드 모델링 기법으로 연구를 수행 하였다. 연구를 수행하기 위해 가정용 연료전지 시스템을 개발 하였고 스택과 개질기 그리고 주변장치 실험을 수행하였다.

Fig. 1 Conceptual Diagram of Research Methodology

또한 스택과 개질기의 이론 모델링 수립을 통하여 시스템의 조건마다 달리 최적화를 적용할 수 있는 기반을 마련하였다. 스택의 이론 모델링을 위한 매개 변수들 중에서 문헌상에서도 범위가 너무 광범위하여 참고하기 힘들고 또한 실험으로도 측정하기 힘든 수치들은 parameter estimation 기법을 사용하여 모델링을 수행하였다. 운전 최적화 기법을 수행하기 위하여 이론과 경험을 바탕으로 결정 변수, 목적 함수, 제약 조건을 선정하여 최적화 정형화를 수립하였고 Newton Method 기법을 도입하여 최적의 과급률(λ)을 도출하였다. Fig. 1은 연구방법론을 개략적인 모습으로 나타낸 것이다.

2.2 시스템 구성

시스템을 모델링하고 최적화를 수행하기 위한 구성도는 Fig. 2와 같다. 개질기 버너 전단에 연료 공급 장치와 공기 공급 장치를 장착하여 도시가스의 개질 반응이 적절한 온도와 유량 조건에서 일어날 수 있게 하였다. 또한 개질 반응에 이용하기 위해 NG 공급용 블로워와 초 순수를 공급하는 물 펌프를 장착하였다. 그리고 CO를 10ppm 미만으로 줄이기 위하여 선택적 산화반응기용 블로워를 장착하였다. 공기 공급계는 스택의 용량에 맞게 적절한 공기 블로워를 선정하여 장착하였고, 스택의 열관리와 배열의 회수를 위하여 물 펌프를 장착하였다. 그리고 스택에서

Fig. 2 Schematic Diagram of System P&ID

생산된 직류 전력을 교류로 변환하여 계통에 공급하기 위하여 DC/AC 인버터를 장착하였다. 시스템 구동 초기에 수전 전력을 주변 장치에 공급하고 일정 수준 이상의 전력을 생산하게 되면 스택에서 생산된 전력을 주변 장치에 공급하기 위해 DC/DC 컨버터를 이용하였다. 해석은 스택, 개질기 및 주변 장치들을 대상으로 하였으며, 스택은 이론 모델과 실험 모델을 결합한 하이브리드 모델링 기법을 사용하였다. 개질기 또한 화학양론 반응에 기반 한 실제 측정 자료를 바탕으로 해석을 수행하였다. 그리고 주변장치의 경우 주요 특성 방정식을 성능 실험 자료를 바탕으로 유도하였다.

3. 최적화 정형화 및 모델링

3.1 최적화 정형화

3.1.1 결정변수

해석을 수행하기 위한 최적화 정형화를 수립하였다. 최적화의 목적은 스택과 개질기 그리고 주변장치들의 성능과 상태에 따라 최고의 전기 효율을 낼 수 있는 과급률의 최적 점을 찾는 것이기 때문에 결정 변수를 anode와 cathode의 과급률로 두었다.

3.1.2 목적 함수

목적 함수는 시스템의 전기 효율로 선정하여 과급률에 따라 변화하는 전기 효율을 반영할 수 있게 시

Table 1 Constraint

lower bound	variable	upper bound
1.1	λ (anode)	1.5
1.2	λ (cathode)	3.0

스택 전기 효율 산정 식 (1)을 적용 하였다.

$$\eta = \frac{\left(W_{stack} - \frac{W_{BOP}}{eff_{con}} \right) \times eff_{inv}}{NG_{\in}} \quad (1)$$

3.1.3 제약 조건

제약 조건은 이론과 경험에 기반 하여 선정하였다. 연료전지의 주요 설계 변수 중의 하나인 과급률은 혼합 기체일 경우 anode는 1.1 - 1.5 사이에서 운전되고, cathode는 공기일 경우 2 이상으로 운전된다.

실험을 위해 설계한 시스템의 경우 anode와 cathode의 최소 점은 스택에서 필요로 하는 최소의 연료와 공기의 양 보다 약간 높은 수치에서 선정하였다. 최대 점은 anode의 경우 스택에서 미 반응된 가스들의 재순환 운전 시, 개질기 버너에서 필요한 연료량과 미 반응 수소의 발열량을 고려하여 선정하였다. Cathode의 경우 더 이상 과급률을 증가 시켜도 스택의 성능이 향상되지 않고 소비 동력만 늘어나는 시점을 제약 조건으로 선정하였다. Table 1에 제약조건을 나타내었다.

3.2 스택 모델링

3.2.1 플럭스 보존을 고려한 1-D 모델링

모델링을 위하여 설계된 스택의 셀 개수는 65 셀이며 활성화 면적은 130cm^2 인 셀을 사용 하였다. 스택의 모델링과 해석은 1-D 모델링을 기반으로 특성 플럭스인 전류 밀도 혹은 전하 플럭스 보존 개념을 적용하였다^{8,9)}.

3.2.2 스택 작동 전압

스택의 작동 전압은 식 (2), (3)과 같이 열역학적 예상 전압에 저항 손실과 활성화 손실, 농도 손실 그리고 내부 전류와 연료 교차를 고려하였다. 단 연료 교차는 변수들이 너무 많아 이론식으로 모델링하기 불가능하다고 판단되어 실험값을 반영하였다.

$$V = E_{therm} - \eta_{ohm} - \eta_c - \eta_{cross} \quad (2)$$

$$E_{therm} = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}} \quad (3)$$

3.2.2.1 활성화 손실과 농도 손실

활성화 손실과 농도 손실은 Butler-Volmer식을 단 순화한 Tafel 근사식을 이용하여 예측하였다⁸⁻¹⁰⁾. 식 (4), (5)를 통하여 활성화 손실에 농도의 변화를 고려 하였고 또한 식 (6)-(9)를 통하여 과급률에 따른 농도와 분압을 고려하였다.

$$\eta_a = \frac{RT}{2\alpha F} \ln \left[\frac{j}{j_0 p^A \left\{ x_{H_2}/a - t^A j RT / (2 F p^A D^{eff}) \right\}} \right] \quad (4)$$

$$\eta_c = \frac{RT}{4\alpha F} \ln \left[\frac{j}{j_0 p^C \left\{ x_{O_2}/d - t^C j RT / (4 F p^C D^{eff}) \right\}} \right] \quad (5)$$

$$x_{H_2}|b = x_{H_2}|a - t^A j RT / (2 F p^A / D^{eff}) \quad (6)$$

$$x_{O_2}|c = x_{O_2}|d - t^C j RT / (4 F p^C / D^{eff}) \quad (7)$$

$$x_{H_2}|a = \frac{\lambda_{H_2} - 1}{(1 + \omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \lambda_{H_2} - 1} \quad (8)$$

$$x_{O_2}|_d = \frac{\lambda_{O_2} - 1}{(1 + \omega_4)\lambda_{O_2} - 1} \quad (9)$$

3.2.2.2 저항 손실

전해질의 두께에 따른 전도도를 고려하여 면적 비저항을 도출한 후 전류 밀도와 면적 비저항의 함수로 막 저항 손실을 도출하였다.

$$ASR_m = \int_0^{t_m} \frac{1}{\sigma(z)} dz \quad (10)$$

$$\eta_{ohm} = j \times ASR_m \quad (11)$$

3.2.2.3 스택 채널 내부 압력 강하

과급률의 변화는 유량의 변화량이고 이는 압력 변화와 밀접한 관계가 있다. 따라서 스택 내부의 정확한 평균 압력을 구하기 위하여 실제 스택의 설계치에 Darcy-Weisbach 식을 적용하였다¹⁰⁾.

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot \frac{U^2}{2} + \sum K_L \cdot \rho \cdot \frac{U^2}{2} \quad (12)$$

Table 2 Bipolar Plate Information

1kW RPG Stack Bipolar Plate Specification	
Active area (cm ²)	130
Width (mm)	1.1
Depth (mm)	0.6
Rib width (mm)	0.9
Channel in a bundle	
1. anode	5
2. cathode	9
Channel length	
1. anode (m)	1.3
2. cathode (m)	0.722
Anode bending	8
Cathode bending	4

식 (12)와 같이 압력 강하는 수력직경 D_H , 채널의 길이 L , 가습된 혼합 가스의 밀도 ρ , 속도 U , 관 마찰계수 f , 부차적 손실계수 K_L 의 함수이다. 따라서 채널의 깊이와 넓이, 활성화 면적 등의 실제 스택의 설계 인자를 이용하여 압력 강하를 도출하였다. Table 2는 실험과 이론 적용에 사용된 양극 분리판의 세부 정보를 나타내었다.

3.2.2.4 나피온의 물 함량도와 확산도

실제 조건으로 쓰였던 상대 습도 a_w 를 이용하여 식 (13)과 같이 나피온의 물 함수율 λ_w 를 구하였고 식 (14)와 같이 나피온의 물 확산도 D_λ 를 도출하였다⁸⁾.

$$\lambda_w = 0.0043 + 17.81a_w - 39.85a_w^2 + 36a_w^3 \quad (13)$$

for $0 < a_w \leq 1$

$$D_\lambda = \exp \left[2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \times (2.563 - 0.33\lambda_w + 0.0264\lambda_w^2 - 0.000671\lambda_w^3) \times 10^{-6} \quad (14)$$

for $\lambda > 4$ (cm²/s)

3.2.2.5 Parameter Estimation

실제로 측정하기 힘들고 문헌상에서도 범위가 너무 넓어 참고하기 힘든 전해질의 전도도와 교환전류 밀도는 식 (15), (16)과 같이 실제 스택 실험값과 모델링 결과를 이용하여 최소자승법으로 도출하였다.

$$Min \sum_{i=1}^{16} (y_1 - \hat{y}_i)^2 \quad (15)$$

$$\hat{y}(V) = f(j_0, \alpha, x_i, z_i, \dots) \quad (16)$$

Fig. 3은 실제 실험을 통한 I-V 곡선과 parameter estimation 한 후의 I-V 모델링 곡선인데 두 곡선이 유사한 곡선으로 이루어져 모델링의 정확도를 검증하였다.

Fig. 3 Experimental data and modeling result

초기 저 전류밀도 구간에서 차이가 나는 것은 편의 위해 모델링 전반에 Tafel 근사식을 사용하였는데 저 전류밀도의 낮은 과전압 상태에서는 Tafel 근사식의 정확성이 떨어지게 된다. 따라서 저 전류밀도 구간에서의 구체적인 모델링을 위해서는 Butler-Volmer 식의 적용이 필요하나 변수가 너무 많아지기 때문에 모델링이 복잡하게 된다⁸⁾. 하지만 우리는 상대적으로 높은 전류밀도 영역에 관심을 가지고 있고 이 영역에서는 막 저항과 농도 손실에 의한 영향이 지배적으로 나타나기 때문에 Tafel 근사식을 활용한 모델로도 스택의 성능을 충분히 예측할 수 있다. 다행히 연료전지 시스템은 일반적으로 Tafel 근사식의 적용 범위 내에서 운전되기 때문에 저 전류밀도 영역에서의 실험 데이터와 모델 예측 결과의 차이는 걱정할 필요가 없다.

3.2.3 스택 모델 검증 및 민감도 분석

스택 모델의 검증을 위하여 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 4와 같이 과급률을 변화시켜가며 3개의 영역에서 민감도 분석이 진행되었다. IV 곡선으로 민감도를 분석한 결과 과급률의 변화에 의한 옴릭 저항 손실과 anode 활성 손실, 농도 손실은 변화가

Fig. 4 Sensitivity analysis of distribution for voltage losses with current density at $\lambda_a:1.1$, $\lambda_c:1.2$ (a), at $\lambda_a:1.25$, $\lambda_c:2.5$ (b), at $\lambda_a:1.5$, $\lambda_c:3.0$ (c)

적은 반면 cathode 활성 손실과 농도손실의 민감도는

상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 저 전류밀도 구간에서 고 전류밀도 구간으로 갈수록 과급률이 스택의 성능에 미치는 영향이 큰 것으로 확인되었다. 하지만 특정 지점 이상에서는 과급률을 높여도 눈에 띄는 스택의 성능 향상은 관찰되지 않았다. 오히려 이 영역에서 과급률의 증가는 BOP의 소비동력을 증가시켜 전체 시스템의 효율에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그리고 하한 제약 조건인 과급률 1.1/1.2(anode/cathode)에서 운전 시 2615A/m^2 이상의 구간에서 cathode 삼상계면의 산소 농도 부족으로 인해 스택의 운전이 불가능한 것으로 예측되었다. 이를 통해 스택의 안정적인 운전과 시스템 전체 효율을 높이기 위해 적절한 운전 전략이 필요한 것을 확인할 수 있다.

3.3 개질기 모델링

개질 과정은 탈황, 수증기 개질, 수성가스 전이반응, 선택적 산화반응 과정을 거쳐 최종적으로 스택으로 수소가 공급된다. 본 연구에서는 연료의 유입량과 수소의 생산량을 화학공정 과정과 그 반응에 기반 하여 산출 하였다.

3.3.1 연료의 유입량과 수소의 생산량

화학 공정 반응에 기반 하여 Fig. 5와 같이 연료의 유입량과 수소의 생산량을 산출 하였다. 개질기는 과급률의 변화에 따라 버너로 유입되는 연료와 공기의 양, 개질 반응기로 유입되는 연료의 양, 그리고 선택적 산화반응기로 유입되는 공기의 양을 발열량으로 환산하여 계산하였다. 또한 스택의 반응에 필요한 수소의 양과 미 반응 수소의 양을 계산 한 후 버너로 재순환되는 미 반응 가스들의 발열량을 고려하여 연료 유입량을 다시 계산 하였다. 위와 같은 과정을 통하여 Fig. 6과 같이 과급률에 따라 유입되는 연료의 발열량을 방정식으로 도출 하였다.

Fig. 5 Schematic diagram for determining feed rate of fuel

Fig. 6 Heating value at reformer according to stoichiometric ratio of fuel

3.4 BOP 모델링

과급률의 변화에 따라 주변장치의 소비동력이 바뀌기 때문에 기계 주변장치의 모델링을 수행하였다.

전기 주변장치의 경우 과급률의 변화와 관련이 적고 소비 동력이 거의 일정하기 때문에 효율 산정식에 상수로 반영 하였다. 기계 주변장치는 5가지 블로워와 4가지 물 펌프, 방열기, 기저 부하를 대상으로 수행 하였다. 블로워는 개질기로 연료를 공급하는 연료공급 블로워, 버너로 연료와 공기를 공급하는 연료공급 블로워와 공기공급 블로워, 선택적 산화기로 공기를 공급하는 블로워와 공기 공급계로 공기를 공급하는 공기 블로워를 대상으로 하였다. 그리고 물 펌프는 개질기로 초 순수를 공급하는 리포밍 물 펌프

Fig. 7 Power consumption of blower & pump in reformer (a), (c), burner (b), (e), PrOx (d), and cathode (f) according to stoichiometric ratio of NG (a), (b), air (d), (e), (f), and water (c), respectively

와 스택의 열 밸런스를 유지 시켜 주는 냉각 펌프, 배 열 회수와 온수를 공급하기 위한 물 펌프를 각각 대

상으로 하였다. 기저 부하와 방열기, 스택의 열 관리와 관련된 물 펌프들은 거의 일정 한 소비 동력을 유

지하기 때문에 상수로 두어도 무방하다고 판단되어 상수로 두어 해석의 편의를 도모 하였다. 식 (17), (18)은 해석에 사용된 기계 주변장치들의 소비동력의 합을 나타내었다.

$$W_{BOP} = W_{ref NG} + W_{Pr Ox air} + W_{bur Ng} + W_{bur air} + W_{ref H_2O} + W_c + W_{con} \quad (17)$$

$$W_{con} = W_{BASE} + W_{coolant} + W_{rad} \quad (18)$$

Fig. 7은 각각 단품들의 실제 유량에 따른 소비동력을 구하고 이차식을 유도 한 후 과급률에 따른 소비동력을 예측한 결과이다. 결과 과급률이 증가 할수록 개질기로 유입되는 연료의 양이 증가하여 블로워의 소비동력도 증가하였고 유입되는 연료의 양에 비례하여 선택적 산화반응기로 유입되는 공기의 유량과 버너로 공급되는 공기의 유량도 증가하여 소비동력이 증가함을 알 수 있었다. 하지만 과급률이 증가 할수록 스택에서 미 반응 되는 수소의 양이 증가하게 되고 미 반응 수소들이 버너로 재순환되기 때문에 버너로 공급되는 연료의량은 줄어들게 됨을 확인할 수 있었다. 개질기에 초순수를 공급 해주는 물

Fig. 9 Production of electric power from stack (a), consumption from BOP (b) according to cathodic stoichiometric ratio

Fig. 8 Comparison of power efficiency at various conditions and optimum point

Fig. 10 System efficiency according to cathodic stoichiometric ratio

펌프 역시 과급률에 따라 소비동력이 거의 선형적으로

Fig. 11 Production of electric power from stack (a), consumption of NG (b), consumption of electric power from BOP (c) according to anodic stoichiometric ratio

로 증가 하였다. 그리고 공기 공급계의 소비 동력은 과급률에 따라 최대 78W 까지 상승하면서 1kW RPG 전력 생산량에 최대 7.8%의 기생전력을 소비하는 것으로 나타났다. 이는 운전영역의 최적 점을 선정하는 것이 중요하다는 것과 공기 공급계가 전기 효율의 민감도에 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다. 거의 일정한 소비 동력을 유지하여 상수로 두어도 무방하다고 판단되었던 기저부하와 물 관리계 펌프, 방열기는 각각 25W, 25.44W, 30W로 두어 해석 하였다.

Fig. 12 System efficiency according to anodic stoichiometric ratio

Fig. 13 Sensitivity analysis distribution for voltage losses with current density according to stoichiometric ratio

4. 최적화 결과

연료전지의 주요 설계 변수 중의 하나인 과급률은 혼합 기체일 경우 보통 anode 는 1.1-1.5 사이에 cathode 가 공기일 경우 2 이상으로 운전⁹⁾ 되나, RPG는 고 전류 밀도보다 상대적으로 과급률에 대한 영향이 적은 $2,000\text{A/m}^2$ 의 저 전류 밀도에서 운전되기 때문에 과급률이 낮을수록 유리하다. 따라서 Fig. 8 과 같이 anode 는 1.17, cathode는 1.77에서 최적 점을 형성하였으며 일반적인 연료전지 시스템과 비교하여 최적 과급률이 상대적으로 다소 낮았다.

4.1 최적화 수행 후 Cathode 민감도 분석

Cathode 에서는 Fig. 10과 같이 최적 점을 형성하는 지점에 이르기 까지 과급률이 증가 할수록 스택의 전기 생산율이 주변장치의 소비동력 증가율 보다 크기 때문에 시스템의 전기 효율이 향상됨을 확인 할 수 있었다. 반면 최적 점을 형성하는 지점보다 과급률이 증가 할 경우 주변장치의 소비 동력 증가율이 스택의 전기 생산율 보다 커져 시스템의 전기 효율이 차츰 낮아 졌다. Fig. 9는 anode를 최적화 값으로 고정 시킨 후 cathode의 과급률을 변화 시켜 민감도를 분석한 결과이다.

4.2 최적화 수행 후 Anode 민감도 분석

Anode 에서는 Fig. 12 과 같이 최적 점을 형성하는 지점까지 과급률이 증가 할수록, 스택의 전기 생산율이 주변장치의 소비동력 증가율과 공급되는 연료 발열량의 증가율 보다 그 폭이 크기 때문에 효율이 향상 되었다. 반면 최적 점을 형성하는 지점보다 과급률이 증가 할 경우 주변장치의 소비동력의 증가율과 스택에 공급되는 미 반응 수소의량이 증가하기 때문에 전기 효율이 감소하였다. Fig. 11은 cathode를 최적화 값으로 고정 시킨 후 anode의 과급률을 변화

시켜 민감도를 분석한 결과이다.

4.3 최적화 후 스택 민감도 분석

최적화 수행 후 스택 민감도 분석을 수행했다. Fig. 13과 같이 최적점인 anode1.17, cathode 1.77 보다 과량의 유량을 흘려주게 되면 전압 손실은 조금 늘었지만 주변장치의 소비동력 증가율과 유입되는 연료 증가율의 폭이 커지기 때문에 전기 효율이 감소됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

기존의 스택 중심의 경험에 의존하는 운전 한계에서 벗어나, 실험과 이론 모델링을 통하여 전체 시스템의 전기 효율을 향상 시킬 수 있는 체계적인 접근 방법을 개발 하였다.

민감도 분석과 최적화를 수행 한 결과 저 전류 밀도 구간에서 운전 되는 가정용 연료전지 시스템의 성능 특성과 최적 운전 조건을 도출 할 수 있었고 기존의 다른 시스템 보다 적은 연료의 공급으로도 최적의 운전이 가능 하다는 것을 확인 하였다.

현재 가정용 연료전지는 스택의 내구성이 10년을 보증 할 수 있어야 하고, 주변장치, 개질기 또한 장기적인 내구성을 보증 할 수 있어야 한다. 하지만 각 구성 품들은 시간이 지남에 따라 성능이 저하된다. 이에 따라 스택의 전력 생산량, 주변장치의 소비동력, 개질기의 연료 유입량, 수소 생산량이 달라지기 때문에 항상 같은 운전 조건은 비효율적인 운전이 된다. 따라서 스택, 개질기, 주변장치의 성능저하 시 달라지는 최적 운전 지점을 반영 할 수 있어야 효율적인 운전 조건을 유지 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 접근 방법을 통하여 성능저하에 따른 최적 운전 지점을 반영 할 수 있게 되었다.

스택, 개질기, 단위장치의 성능저하 또는 각 구성

품들의 용량이나 종류, 사양 변경 시 운전 점을 필수적으로 달리 잡고 운전해야 효율적인 운전이 된다는 것을 확인하였다.

현재 국내 가정용 연료전지 시스템은 모니터링 사업을 거쳐 보급 사업이 진행 중이다. 이러한 시점에서 향후 상용화 시 시장 경쟁력에 도움이 될 것으로 기대 된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다. (B3-2413-01).

References

1. "Fuel cell technology white paper", Ministry of Knowledge Economy, Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning, Korea, p. 1-3.
2. J. Schneider, "An Automotive perspective on durability protocol challenges from single cells to fuel cell vehicle systems", Fuel Cells Durability and Performance, Florida, 2007.
3. M. Ferraro, F. Sergi, G. Brunaccini, G. Dispenza, L. Andaloro, V. Antonucci, "Demonstration and development of a polymer electrolyte fuel cell system for residential use", Journal of Power Sources, Vol. 193, No. 1, 2009, p. 342-348.
4. C. E. Hubert, P. Achard, R. Metkemeijer, "Study of a small heat and power PEM fuel cell system generator", Journal of Power Sources, Vol. 156, No. 1, 2006, p. 64-70.
5. H. Inaka, S. Sumi, K. Nishizaki, T. Tabata, A. Kataoka, H. Shinkai, "The development of effective heat and power use technology for residential in a PEFC co-generation system", Vol. 106, No. 1-2, Journal of Power Sources, 2002, p. 60-27.
6. P. König, A. Weber, N. Lewald, T. Aicher, L. Jörisen, E. Ivers-Tiffée, "Model-Aided Testing of a PEMFC CHP System", Fuel cells, Vol. 7, No. 1, 2007, p. 70-77.
7. M. Kim, S. Hwang, J. Lee, W. Lee, "A simulation based study on the economical operating strategies for a residential fuel cell system", Trans. Of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 20, No. 2, 2009, p. 104-115.
8. R. O'Hayre, S. W. Cha, W. Colella, F. B. Prinz, "Fuel cell fundamentals", Wiley, United Kingdom, 2005.
9. J. Larminie, A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained Se(Edi.)", Wiley, United Kingdom, 2003.
10. Barbir, Frano, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", Elsevier, USA, 2005.