

연료전지 고분자 막을 통한 열 및 물질 전달 특성을 반영한 공기측 BOP 핵심 요소 부품 운전 전략 설정

박규형¹⁾ · 엄석기²⁾한양대학교 일반대학원 융합기계공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

Operating Strategy Design for Air-Side BOP Components Considering Heat and Mass Transfer Characteristics through Polymer Electrolyte Membranes in Fuel Cells

Kyuhyung Park¹⁾ · Sukkee Um²⁾¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University Graduate School, Seoul 04763, Korea²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 10 November 2025 / Revised 10 December 2025 / Accepted 11 December 2025)

Abstract : A physics-based, system-level framework is developed to quantify air processing system (APS) strategies that govern internal fuel cell water management and overall systematic behavior. Air-side components are developed with coupled heat and mass transfer characteristics, including a fuel cell stack that involves condensation, a counter-flow membrane humidifier, and a centrifugal compressor. The stack model is validated against published experimental data. Furthermore, these numerical models are integrated on a piping and instrumental diagram to predict thermodynamic states. Subsequently, parametric studies were conducted on cathode pressure and stoichiometry ratio to determine the membrane-averaged relative humidity (RH), the channel outlet liquid fraction, and humidifier water supply relative to the required stack water mass flow rate. The results showed that a high-pressure/low-stoichiometry strategy could sustain membrane saturation even at low inlet RH, and could reduce humidification demand by 13%. This integrated framework could provide operating maps and design guidance to optimize APS water management.

Key words : Air-side BOP(공기측 BOP), Components(요소 부품), Operating strategy(운전 전략), Heat and mass transfer characteristics(열 및 물질전달 특성), Polymer electrolyte membrane fuel cells(고분자 전해질 연료전지)

Nomenclature

A	: area, m ²	i_{cell}	: cell current density, A/cm ²
C	: concentration, mol/m ³	J	: molar flux, mol/m ² ·s
CR	: capacity ratio, -	L	: channel length, m
c_p	: specific heat capacity, J/kg·K	M	: molecular weight, kg/mol
$c_{p,h}$: specific humidity capacity, 1/Pa	\dot{m}	: mass flow rate, kg/s
D	: diffusion coefficient, m ² /s	NTU	: number of transfer unit, -
F	: faraday constant, C/mol	n	: electro-osmotic drag coefficient, -
f	: fraction of mass flow rate, -	\dot{n}	: molar flow rate, mol/s
h	: convective mass transfer coefficient, m/s	P	: absolute pressure, bara
\hat{h}	: specific enthalpy, J/kg	RH	: relative humidity, -
		s	: liquid saturation state, -

*Corresponding author, E-mail: sukkeum@hanyang.ac.krThis is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

t	: thickness, m
U	: total transfer coefficient, $\text{kg/m}\cdot\text{s}^2$
WT	: net water transfer coefficient, -
x	: specific position, m
γ	: specific heat ratio, -
ε	: effectiveness, -
ζ	: stoichiometry ratio, -
η	: efficiency, -
λ	: water content, -
ν	: dynamic viscosity, m^2/s
ρ	: density, kg/m^3
ω	: impeller rotational speed, RPM

Subscripts

a	: anode channel
amb	: ambient air
back	: back diffusion
CL	: catalyst layer
Ch	: gas channel
c	: cathode channel
co	: counter flow configuration
comp	: compressor
drag	: electro-osmotic drag
dry	: dry state
FC	: fuel cells
GDL	: gas diffusion layer
gen	: generation
gw	: gas phase water
H_2	: hydrogen
ideal	: ideal state
in	: inlet
lw	: liquid phase water
max	: maximum
mem	: membrane
min	: minimum
O_2	: oxygen
out	: outlet
real	: real state
shell	: shell side
supply	: supply humidification
tube	: tube side
w	: water
0	: reference

1. 서론

수소전기차 상용화가 확대되는 가운데 공기공급계 (Air Processing System, APS) 운전전략은 출력 안정성과 내구성을 좌우하는 연료전지 내부 수분관리 지표와 직결된다. 이에 따라 연료전지 스택 운전은 고출력·고온·고압 추세로 이동 중이다. 또한 전략 변화에 따른 연료전지 내부 습도 변화와 시스템 관점에서 정량적 비교 요구가 대두되고 있다.

연료전지 스택 내부의 열역학적 상태량 해석은 복잡한 전달 특성을 포함한 연료전지 모델링¹⁾에서 출발하여 시스템 관점으로 확장²⁾되었다. 기존 문헌들은 각주어진 환경에서 APS 운전조건을 최적화하였으나, 연료전지 내부 전달 특성을 포함한 정량적 해석이 부재한다. 기존 문헌²⁾에서는 실험 데이터에 기반한 연료전지 스택과 압축기를 연동한 모델을 개발하여, APS 운전조건에 따른 연료전지 시스템 효율 평가를 통해 최적 운전조건을 제시하였다. 그러나, 내부 열 및 물질전달 현상을 고려하지 않아 구체적으로 연료전지 내부에 어떠한 물리적 현상이 발생하여 효율에 영향을 주었는지에 대한 해석이 부족하다. 다른 기존 문헌³⁾의 경우, 연료전지 스택 출력에 따라 시스템 효율 변화를 정량화 하여 시스템 기반의 최적화를 수행하였다. 그러나, 운전 압력 및 당량비 등 파라미터들을 고정하였기에 운전조건에 따라 변화하는 연료전지 셀 내부 물리적인 현상에 따른 성능 변화를 포함하지 못하였다.

본 연구는 기존 문헌들 APS의 주요한 구성요소(Balance of Plant, BOP) 모델을 물리적 이론에 기반하여 개발 및 검증 중을 수행한다. 더 나아가 이들을 Fig. 1의 시스템 P&ID (Piping and Instrumental Diagram) 기반 하에 통합하여 고압·저당량비 운전전략이 연료전지 내부 습도 변화와 시스템 관점에서 어떠한 이점이 있는지 정량적으로 비교 및 평가한다. 이를 통해, 운전 압력·당량비와 같은 파라미터에 따른 내부 열 및 물질전달 현상에 대한 기술이 가능하여 연료전지 및 시스템 효율 변화에 대한 심도 깊은 이해의 초석을 마련한다. 특히 본 논문은 연료전지 내부 고분자막의 평균 습도, 채널 액상 비율, 그리고 가습기의 가습 부담 비율을 동시에 확인할 수 있는 운전지도도를 제시한다.

논문 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 P&ID를 바탕으로 BOP 모델 개발과 내부 전달현상을 기술하였다. 3장에서는 스택 모델 검증을 제시하고, 압력과 당량비가 막의 RH(Relative Humidity), 출구 액상 비율, 가습 부담률에 미치는 영향을 비교하였다. 뿐만 아니라 고압·저당량비 운전전략이 어떠한 시스템 구성 방향성을 제시하는지 설명하였다. 4장에서는 본 연구의 결론과 시사점을 정리하였다.

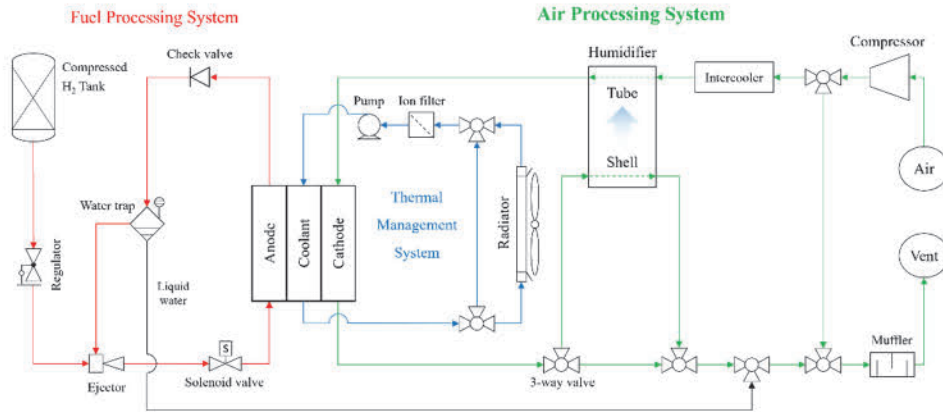


Fig. 1 Fuel cell system piping and instrumental diagram for vehicular application

2. 모델 개발

본 연구는 상용 수소전기차 공기공급계의 운전전략을 시스템 관점에서 비교 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 Top-

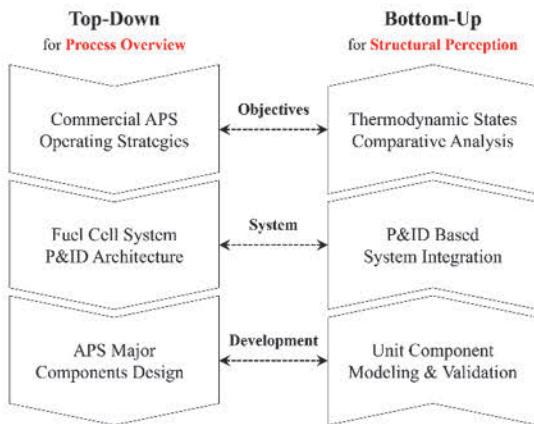


Fig. 2 Research flow chart based on top-down/bottom-up strategy

down/Bottom-up 형식으로 단계적 연구를 수행하였다. 연구목표인 상용 수소전기차 공기공급계 운전전략을 분석하기 위해 연료전지 시스템 P&ID의 구조를 통한 공기의 흐름 및 변화 이해를 선행한다. 이후 공기공급계의 주요한 구성요소들의 역할과 열역학적 구동원리를 반영하여 이론 모델 개발 및 검증을 수행한다. P&ID에 기반하여 구성요소들을 통합하고 상용 APS 운전전략에 따른 시스템 관점의 열역학적 변화를 비교 분석한다.

2.1 시스템 설계

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 연료전지 시스템 P&ID와 구성요소들의 작동원리를 도식화하였다. 수소공급계의 경우 연료전지 스택에서 미반응 수소와 물이 배출된다. 액체 물은 워터트랩에서 걸러지고 수소와 기체 물은 이젝터를 통해 연료전지 스택으로 재순환한다. 공기공급계의 경우 압축기를 통해 연료전지 스택으로 향하는 공기의 추진력을 얻고 가습기에서 습도를 공급받는다. 연료

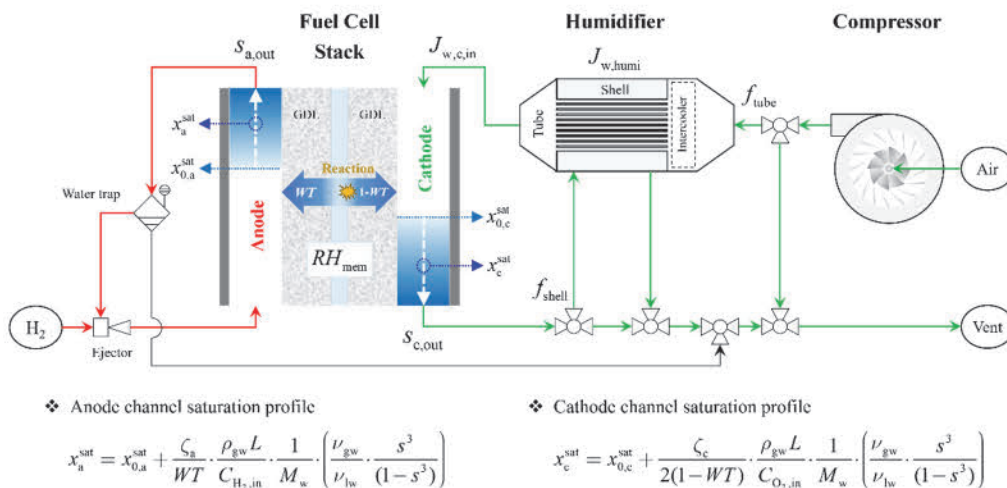


Fig. 3 Fuel cell system piping and instrumental diagram with detailed schematics of air processing system major components

전지 스택에서 발생하는 잔여 공기와 물은 일부 가슴기로 향해 물의 재사용 역할을 수행한 뒤 외부로 배출된다.

2.2 핵심 요소 부품

본 연구는 공기공급계의 운전전략을 해석하는 것을 목표로 하기 때문에 핵심 요소 부품을 공기측 BOP들로 한정한다. 연료전지 스택, 가슴기, 압축기에 대한 구동 원리를 이해하고 이를 반영한 열역학적 이론 모델을 개발하였다. 모델 재현성 확보를 위한 필수 파라미터에 대한 수치 정보는 Table 1에 나타내었다.

2.2.1 연료전지 스택

본 연료전지 스택 모델은 아래 가정들이 적용되었다.

- 정상상태
- 준 2차원 모델(유동방향; in-plane 1차원, 수직유동방향; through-plane 1차원)
- 반응에 의한 균일한 물 발생

연료전지는 분리판, 기체확산층, 촉매층, 고분자막으로 구성되며 내부에서는 동시 다발적 전달 현상이 발생한다. 본 연구에서는 복잡한 현상을 반영하되 시스템 관점 해석을 위해 준 2차원 모델을 개발하였다. Fig. 3에서 보이는 것과 같이 고분자막과 기체확산층에서는 수직유동방향 방향으로, 채널에서는 유동방향으로 해석을 수행한다.

연료전지에서 핵심이 되는 습도 해석을 위해 총 물전달계수(Net water transfer coefficient, WT)라는 개념을 정의⁴⁾ 하였다. WT 는 반응으로 발생한 물 중 Anode 채널로 향하는 비율을 의미하며, 전기삼투항력과 역확산 간의 균형을 통해 설명된다:

$$WT = \frac{J_{w,back} - J_{w,drag}}{J_{w,gen}} \quad (1)$$

$$J_{w,back} = \frac{\rho_{dry}}{M_{mem}} D_{\lambda} \frac{d\lambda}{dx} \quad (2)$$

$$J_{w,drag} = n_{drag} \frac{i_{cell}}{F} \quad (3)$$

여기서 J 는 물의 유속을, M_{mem} 는 고분자막의 이온교환기 등가 중량, λ 는 물 함유량, x 는 단위길이, i_{cell} 는 셀 전류 밀도, F 는 패러데이 상수를 의미한다. 아래 첨자 W 는 물, $Drag$ 와 $Bake$ 는 각각 전기삼투항력(Electro-osmotic drag), 역확산(Back diffusion)을 뜻한다.

역확산은 고분자막 내부 물 함유량 차이에 의해 물이 이동하는 현상이며 고분자막의 밀도(ρ_{dry}), 물 확산계수(D_{λ})에 의해 표현된다. 전기삼투항력은 물 분자가 수소

Table 1 Reference specification of the fuel cell system components for numerical utilization

Component	Parameter	Symbol	Value	Unit
Fuel cell stack	Active area	A	237	cm ²
	Channel length	L	30.00	mm
	Faraday constant	F	96485	C·mol ⁻¹
	Membrane density at dry state	ρ_{dry}	1980	kg·m ⁻³
	Equivalent weight of membrane	M_{mem}	1.1	kg·mol ⁻¹
	Membrane thickness	t_{mem}	0.02	mm
	Gas diffusion layer thickness	t_{GDL}	0.18	mm
	Electro-osmotic drag coefficient	n_{drag}	1.0	-
	Water diffusivity in membrane	D_{λ}	1.01×10^{-9}	m ² ·s ⁻¹
	Kinematic viscosity of gas phase water	ν_{gw}	1.19×10^{-5}	m ² ·s ⁻¹
Kinematic viscosity of gas phase water	ν_{hw}	8.93×10^{-7}	m ² ·s ⁻¹	
Humidifier	Water transfer area of humidifier	A_{humi}	2.74	m ²
	Specific humidity capacity	$c_{p,h}$	3.13×10^6	Pa ⁻¹
Compressor	Temperature of ambient air	$T_{comp,in}$	298.15	K
	Pressure of ambient air	P_{amb}	101,325	Pa
	Specific heat capacity of air	c_p	1.01×10^3	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
	Specific heat capacity ratio	γ	1.4	-

이온과 결합되어 고분자막을 통과하는 현상을 의미하며, 전기삼투항력계수(n_{drag})를 통해 계산된다.

전기화학 반응으로 촉매층에서 발생한 물은 다양한 메커니즘에 따라 채널로 이동한다. 기체확산층에서 농도차에 의해 확산이 일어나고, 채널 경계에서는 대류의 형태로 물이 전달된다:

$$J_{w,CL \rightarrow Ch} = \frac{C_{w,CL} - C_{w,Ch}}{\frac{t_{GDL}}{D_{GDL}^{eff}} + \frac{1}{h_{Ch}}} \quad (4)$$

여기서 C_w 는 물 농도를, t_{GDL} 는 기체확산층의 두께, D_{GDL}^{eff} 는 물 확산계수, h_{Ch} 는 대류 물전달계수를 의미한다. 아래 첨자 GDL와 Ch은 각각 기체확산층, 채널을 뜻한다.

연료전지의 보다 실제적인 습도를 예측하기 위해 응축수를 포함한 채널 내부 물 전달현상을 반영하였다. 전기화학반응으로 인한 균일한 물 유속 전달 조건하에 물 보존방정식에 따라 응축수 포화 개형은 아래와 같이 표현된다:

$$x_a^{sat} = x_{0,a}^{sat} + \frac{\zeta_a}{WT} \cdot \frac{\rho_{gw} L}{C_{H_2,in}} \cdot \frac{1}{M_w} \cdot \left(\frac{\nu_{gw}}{\nu_{hw}} \cdot \frac{s^3}{(1-s^3)} \right) \quad (5)$$

$$x_c^{sat} = x_{0,c}^{sat} + \frac{\zeta_c}{2(1-WT)} \cdot \frac{\rho_{gw} L}{C_{O_2,in}} \cdot \frac{1}{M_w} \cdot \left(\frac{\nu_{gw}}{\nu_{hw}} \cdot \frac{s^3}{(1-s^3)} \right) \quad (6)$$

채널 포화 개형은 채널 위치(x^{sat})에 대한 액체 부피 비율(S) 예측이 가능하다.

여기서 x_0^{sat} 는 응축 시작 지점, ζ 는 당량비, ρ_{gw} 는 기체 물의 밀도, L 은 채널 길이, C 는 반응물 농도를, ν_{gw} 와 ν_{hw} 는 각각 기체와 액체 물의 동점성계수를 의미한다.

연료전지 채널 내부 온도 변화는 냉각수 영향을 고려하여, 채널간 유동흐름 방향을 고려하여 선형적인 온도 변화가 발생한다고 가정하였다. 산화극 채널의 경우 냉각수 채널과 대향류 흐름을 보이기 때문에 채널 입출구의 온도가 냉각수와 반대이지만, 환원극 채널의 경우 냉각수 채널과 평행류 흐름을 가지고 있어 입구와 출구의 온도가 동일하다고 가정하였다. 고분자막의 온도는 연료전지 셀에서 가장 큰 열용량을 담당하는 냉각수 채널과 일치한다는 가정하에 결과를 도출하였다.

2.2.2 막 가습기

본 막 가습기 모델은 아래 가정들이 적용되었다.

- 정상상태
- 0차원 모델(입출구)
- 대향류 흐름구조
- 압력강하에 의한 가습성능 변화 무시

막 가습기는 연료전지 스택에 습도를 공급하여 스택의 성능 및 내구성을 향상시키는 역할을 수행한다. 본 연구에서는 상용 수소전기차에서 사용되는 대향류의 셀 튜브 구조 막 가습기를 채택하였다. 구동 원리는 연료전지 스택에서 배출되는 물을 재사용하여 농도차에 의해 가습이 이루어지며, 다음과 같이 식으로 표현된다.⁵⁾

$$J_{w,humi} = \varepsilon_{co} (\dot{m}c_{p,h})_{min} \Delta C_{w,in} \quad (7)$$

여기서 $J_{w,humi}$ 는 가습기의 가습 유속, ε_{co} 는 대향류 열교환기 유용도, \dot{m} 는 질량유량, $c_{p,h}$ 은 비습도 용량, $\Delta C_{w,in}$ 는 물 농도차이를 의미한다.

대향류 막 가습기는 열교환기의 유용도-전달 단위 수 (NTU) 열전달 이론을 모사하여 다음과 같이 계산된다⁶⁾:

$$\varepsilon_{co} = \begin{cases} \frac{1 - \exp[-NTU(1-CR)]}{1 - CR \cdot \exp[-NTU(1-CR)]} : CR < 1 \\ \frac{NTU}{1 + NTU} : CR = 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$NTU = \frac{U_{humi,w} A_{humi}}{(\dot{m}c_{p,h})_{min}} \quad (9)$$

$$CR = \frac{(\dot{m}c_{p,h})_{min}}{(\dot{m}c_{p,h})_{max}} \quad (10)$$

여기서 NTU 는 전달 단위 수, CR 는 용량 비율, $U_{humi,w}$ 는 가습기의 총 물 전달계수, A_{humi} 은 가습기의 물 전달 면적을 의미하며, 습도 용량의 최대 및 최소 값은 튜브와 셀 측의 습도 용량 크기에 따라 결정된다:

$$\dot{m}_{shell} = f_{shell} \dot{m}_{c,out} \quad (11)$$

$$\dot{m}_{tube,in} = f_{tube} \dot{m}_{comp,out} \quad (12)$$

여기서 f_{shell} 은 연료전지 환원극 채널 출구에서 가습기 셀 측으로 이동하는 질량유량의 비율, f_{tube} 은 압축기 출구에서 가습기 튜브 측으로 이동하는 질량유량의 비율

을 의미하며, 아래 첨자 Comp는 압축기를 뜻한다.

2.2.3 원심류형 압축기

원심류형 압축기는 공기를 고속으로 회전시켜 운동에너지를 만들어내는 임펠러(Impeller)와 공기의 운동에너지를 압력으로 변환하는 디퓨저(Diffuser)로 구분된다. 압축기 임펠러의 회전 운동 시 기계적 손실이 발생하여 모든 운동에너지를 압력으로 변환되지 않다는 효율 관점에서 다음과 같이 모델링을 수행하였다⁶⁾:

$$P_{\text{comp,out}} = P_{\text{amb}} \left(1 + \frac{\Delta \hat{h}_{\text{real}}}{c_p T_{\text{comp,in}}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (13)$$

$$\Delta \hat{h}_{\text{real}} = \eta(\dot{m}, \omega) \Delta \hat{h}_{\text{ideal}} \quad (14)$$

여기서 P 는 절대 압력, $\Delta \hat{h}$ 는 비 엔탈피 변화량, γ 는 비열비를 의미하며, η 는 압축기의 등엔트로피 효율로 공기의 질량유량(\dot{m})과 임펠러의 회전속도(ω)에 관한 식으로 계산된다. 아래 첨자 Amb는 외기, Real와 Ideal는 실제와 이상적인 값을 뜻한다.

3. 결과 및 토의

본 장에서는 개발한 연료전지 스택 모델을 검증하여 연료전지 내부 열역학적 상태량 예측 정확성을 입증한다. 본 연구의 목표인 최신 상용 수소전기차의 운전조건을 대입하여 공기공급계의 특성 변화 및 기존 운전전략과 비교 분석을 수행한다.

3.1 검증

연료전지 셀 내부 습도 분포의 정확성을 높이고자 2개의 검증이 수행되었다. Fig. 4(a)는 연료전지의 총 물 전달

계수(WT)로 반응으로 생성된 물 대비 Anode 채널로 이동한 물 비율을 의미한다. Cathode 채널 당량비 2가지 조건에 대해 검증을 수행하였으며, 두 케이스 모두 실험 데이터⁷⁾와 부합한 결과를 보인다. Fig. 4(b)는 연료전지 각 채널 출구에서 배출되는 물의 물 유량을 예측한 값과 실험 데이터를 비교한 결과로, 마찬가지로 좋은 정합성을 보인다.

3.2 연료전지 운전조건

수소전기차에 탑재되는 연료전지 운전조건은 세대가 거듭할수록 운전압력을 높이고, 운전 당량비를 낮추는 방향으로 향해 간다. 본 절에서는 이러한 운전조건 특성이 연료전지 셀 내부 습도 분포와 시스템 관점에서 의미하는 바를 해석한다. 본 연구에서 사용된 연료전지 운전조건 대표값은 Table 2에 기재하였다.

Table 2 Fuel cell operating conditions

Case	Parameters	Value	Unit
Common	Current density	2.0	A/cm ²
	Channel inlet temperature	343.15	K
	Coolant channel temperature difference	5	K
Reference	Channel inlet pressure	2.0	bara
	Cathode channel stoichiometry ratio	2.0	-
Preference ⁸⁾	Channel inlet pressure	2.5	bara
	Cathode channel stoichiometry ratio	1.2	-

3.2.1 운전 압력

Fig. 5는 연료전지 채널 입구 압력에 따른 연료전지 셀 내부 습도와 가습관리 전략을 표현하였다. Fig. 5(a)는 연료전지 Anode와 Cathode 채널 출구에서 배출되는 총 물 질량유량 대비 액체 물의 비율($f_{\text{LH}_2\text{O,out}}$)로, 채널 입구 압력이 상승함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 고정된 당량비 운전조건 하에 압력이 증가하면 채널의 유속은 감소하게 된다. 따라서 물이 채널 내에 체류하는 시간이 길어

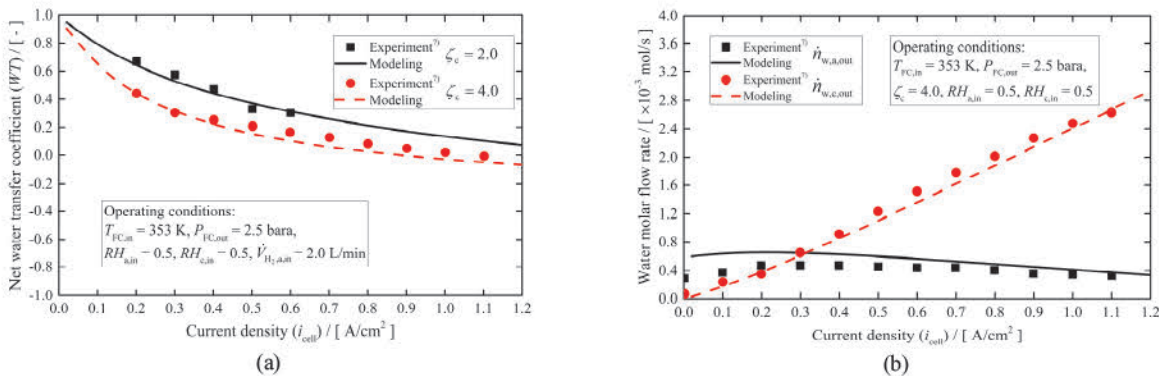


Fig. 4 Experimental validation of fuel cell stack (a) net water transfer coefficient, and (b) water molar flow rate at channel outlets

지게 되고, 이는 채널 내 포화를 촉진하여 출구에서 배출되는 액체 물이 증가하게 된다.

$$f_{lw,out} = \frac{\dot{m}_{lw,out}}{\dot{m}_{gw,out} + \dot{m}_{lw,out}} \quad (15)$$

where lw : Liquid phase water
gw : Gas phase water

Fig. 5(b)는 연료전지 고분자막의 평균 상대습도를 표현하였다. 고분자막의 습도는 연료전지 성능과 직결되는 이온전도성에 직접적인 영향을 주기 때문에 포화상태를 유지하는 것이 중요하다. 결과에 의하면 채널입구 압력이 증가함에 따라 고분자막의 평균 상대습도는 상승한다. 이는 고압으로 인한 채널 내 습도와 연료전지 셀 습도 상승으로 이어지기 때문이다. 고분자막의 평균 상대습도가 포화상태($RH_{mem} = 1.0$)이기 위해서는 채널입구 압력이 최소 2.05 bara가 요구된다.

Fig. 5(c)는 연료전지 Cathode 입구 물 질량유량 대비 가습기의 가습량 비율(f_{supply})을 표현하였다. 이는 연료전지

시스템 물관리에서 가습기의 중요도를 나타내는 값으로, 작아질수록 추가적인 가습 없이 외기의 습도만으로 연료전지 채널의 입구 습도를 감당하기에 충분하다는 것을 의미한다. Fig. 5(c)에서 보이는 것과 같이 $P_{FC,in} = 2.3$ bara일 때, 연료전지 Cathode 채널에 공급되는 습도는 가습기가 70 % 감당($f_{supply} = 0.7$)하며 나머지는 외기에서 공급받은 습도로 충당 가능하다. 결과에 따르면 채널 입구 압력이 증가함에 따라 가습기의 영향이 줄어드는 경향을 보인다. 이는 연료전지 채널입구의 고정된 상대습도에 의해 요구 농도는 동일하나, 고압 저속 유동으로 인해 채널 입구에서 요구되는 물 질량유량은 감소하기 때문이다.

$$f_{supply} = \frac{\dot{m}_{w,humi}}{\dot{m}_{w,c,in}} \quad (16)$$

3.2.2 운전 당량비

Fig. 6은 연료전지 Cathode 채널 당량비에 따른 연료전지 습도 변화와 가습기의 중요 비율을 그림으로 나타내었다. Fig. 6(a)는 연료전지 Anode와 Cathode 채널 출구에

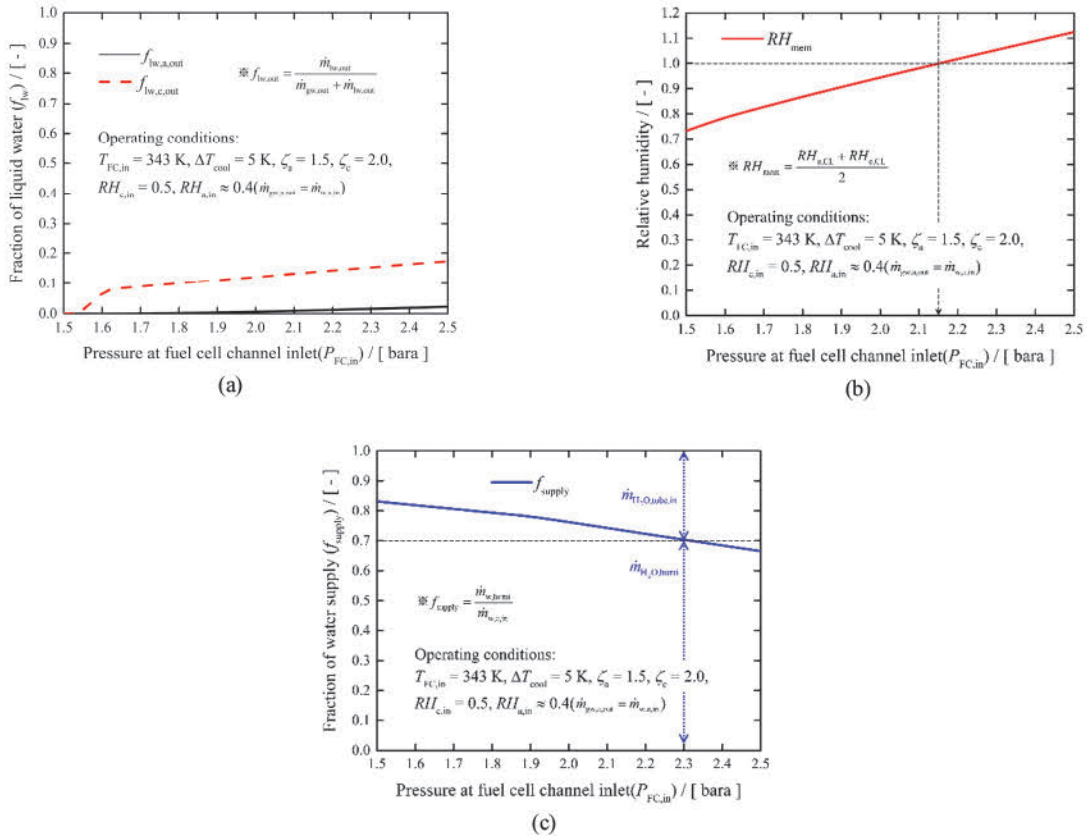


Fig. 5 Effects of operating pressure at fuel cell channel inlets: (a) fraction of liquid water flow rate, (b) mean relative humidity of membrane, (c) fraction of water supply from humidifier

서 배출되는 총 물 질량유량 대비 액체 물의 비율로, Cathode 채널 당량비가 상승함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이는 유량이 증가하면 채널 내 물의 체류시간이 감소하여 응축이 지연되기 때문이다. 당량비는 반응대비 실제 공급된 반응물의 비율로, 유량과 비례한다. 따라서, 채널 출구의 액체 비율은 당량비에 대해 반비례하는 특성을 갖는다.

Fig. 6(b)는 Cathode 채널 당량비에 따른 연료전지 고분자막의 평균 상대습도로, 감소하는 경향을 보인다. 이는 마찬가지로, 유량 증가로 인한 채널 내 물의 체류시간이 줄어들어 연료전지 셀 고분자막의 평균 상대습도가 낮아진다. 고분자막의 평균 상대습도를 포화상태($RH_{mem} = 1.0$)로 유지하기 위해서는 Cathode 채널 당량비가 1.8($\zeta_c = 1.8$)까지 줄어들어야 한다. 이는 낮은 당량비일수록 연료전지 내구 및 성능 보장을 위한 내부 습도를 유지하는데 유리함을 알 수 있다.

Fig. 5(c)는 연료전지 Cathode 입구 물 질량유량 대비 가습기의 가습량 비율로, 당량비에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 채널 입구로 향하는 유량이 증가함에 따라 고정된 상대습도 조건($RH_{c,in} = 0.5$) 하에 채널 입구에서 요

구되는 물의 질량유량이 증가하기 때문이다. 즉 가습기로부터 공급받는 가습량의 비율이 증가함을 뜻한다. $\zeta_c = 1.45$ 일 때, 연료전지 Cathode 채널 입구로 향하는 물 질량유량의 70%를 가습기에서 충당한다($f_{supply} = 0.7$). 이는 최신 운전전략인 낮은 당량비 운전일수록 가습기의 부담을 줄일 수 있음을 시사한다.

3.3 최적 가습관리 운전전략

본 절에서는 새롭게 제시되는 고압 저당량비 운전조건과 기존 운전조건 2가지 케이스에 대해 연료전지 셀 내부 습도 및 가습관리 전략에 어떠한 차이가 발생하는지 알아본다. Fig. 7(a)는 가습조건($RH_{c,in} = 0.2, 0.4, 0.6, \text{ and } 0.8$)에 따른 연료전지 고분자막의 평균 상대습도 변화를 표현하였다. 기존 운전 케이스(Reference case)의 경우, $RH_{c,in} = 0.2$ 조건에서는 고분자막이 포화상태에 이르지 못한다($RH_{mem} = 0.78$). 이는 낮은 운전 압력과 높은 당량비 조건으로 인해 비교적 빠른 유속이 형성되어 연료전지 내부 물의 체류 시간이 짧기 때문이다. 그러나, 최근 APS 운전전략(Preference case)의 경우 $RH_{c,in} = 0.2$ 조건에서도 고분자막이 충분히 포화상태($RH_{mem} = 1.34$)를 유지한다.

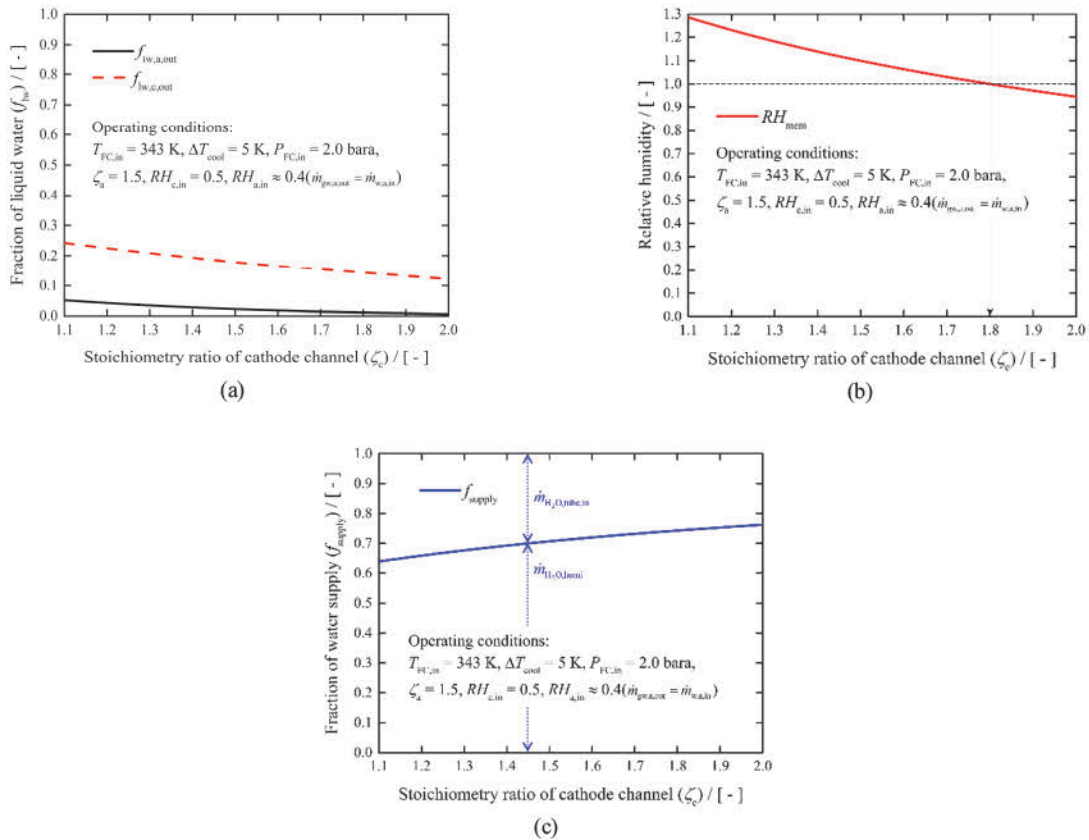


Fig. 6 Effects of stoichiometry ratio at fuel cell cathode channel: (a) fraction of liquid water flow rate, (b) mean relative humidity of membrane, (c) fraction of water supply from humidifier

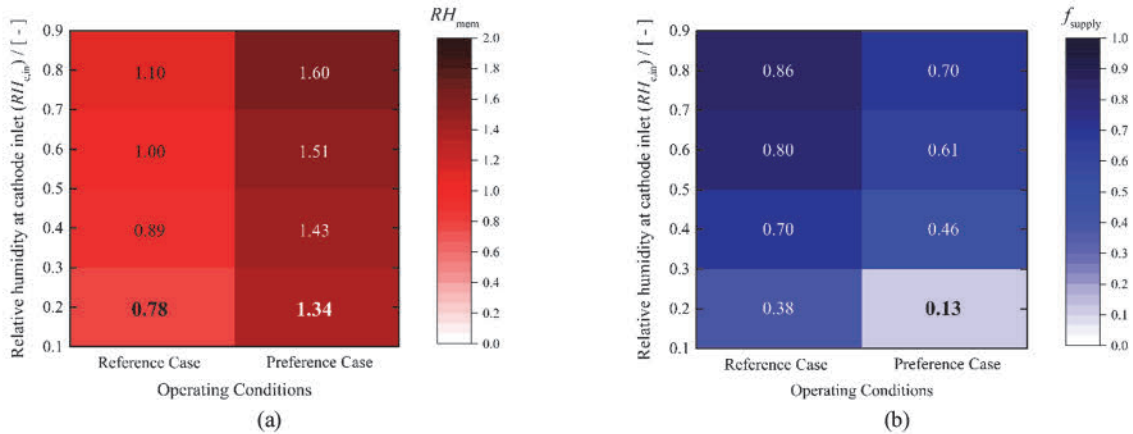


Fig. 7 Operating strategy effects: (a) mean relative humidity of membrane and (b) fraction of liquid water flow rate under 4 humidify conditions ($RH_{c,in} = 0.2, 0.4, 0.6, \text{ and } 0.8$)

즉 고압 저당량비 조건은 채널의 유량 및 유속을 줄여 물의 배출을 제한하고 연료전지 내부의 물을 보존하는 전략이다.

Fig. 7(b)는 가습조건에 따른 연료전지 입구의 물 질량 유량 대비 가습기 가습량의 비율을 나타내었다. 고압 저당량비 조건(Preference case)에서 $RH_{c,in} = 0.2$ 일 때, $f_{supply} = 0.13$ 로 가습기가 담당하는 연료전지 습도 요구량이 매우 작음을 알 수 있다. 이는 고압 저당량비 운전이 작은 채널 유속을 발생시켜 연료전지 채널 입구에서 요구하는 물 질량유량을 감소시키기 때문이다. 흥미로운 점은 연료전지 채널에서 요구하는 습도의 87%를 외기로 충당($1 - f_{supply} = 0.87$)함에도 불구하고, 연료전지 막의 포화상태 달성($RH_{mem} = 1.34$)이 가능하다는 것이다. 따라서 고압 저당량비 운전조건은 연료전지 내부 습도를 보장함과 동시에 낮은 유속으로 요구 물 질량유량을 줄임으로써 공기공급계에서 가습기의 필요를 재고하기 위한 전략이다.

4. 결론

- 1) 연료전지 스택, 막 가습기, 그리고 원심류형 압축기 모델을 통합하여 채널 내 포화 개형과 출구에서의 액상 비율 예측이 가능하다. 총 물 전달계수(WT)와 채널 출구의 물 질량유량 검증을 통해 셀 내부 열 및 물질 상태량 예측 타당성을 확보하였다.
- 2) 채널 입구 압력 상승시 출구의 액상 비율이 증가하고 막 평균 상대습도가 상승한다. 이는 고압 운전으로 유속이 감소하여 물의 체류시간이 증가하고 응축이 촉진되기 때문이다. 또한 동일한 입구 RH 목표 조건에서 요구 물 질량유량이 감소하여 가습기의 기여도는 상대적으로 축소된다.
- 3) 환원극 채널의 당량비 증가시 출구 액상 비율과 막 평

균 RH 모두 감소하는 경향을 보인다. 이는 유량 증가로 물의 체류시간이 단축되어 응축과 막 수화가 저해되기 때문이다. 동일한 입구 RH 목표 조건에서는 요구 물 질량유량이 증가하여 가습기 기여도는 확대된다.

- 4) 고압 저당량비 운전 전략(Preference case)은 낮은 입구 RH에서도 막 포화 상태 유지가 가능하여 가습기의 필요를 크게 낮출 수 있다. 따라서 외기 습도 활용도가 커지고 가습기 부담이 경감된다.

종합하면 공기공급계 가습관리 운전전략 최적화는 압력 상승과 당량비 저감을 축으로 한 운전지도 설계가 핵심이다. 다만 압력 상승에 따른 채널 내 액상 축적으로 인한 배수 성능을 함께 고려한 APS 운전전략 수립이 요구된다. 본 모델은 연료전지 내부 습도 변화와 시스템 가습분담 간 교환관계를 정량화하여 운전전략 설계와 BOP 사양 검토의 기초 자료로 활용 가능하다.

후 기

본 연구는 신재생에너지핵심기술사업인 민군 공동 활용을 위한 정격 100 kW급 이동형 수소연료 발전기 및 확장식 수소 공급장치 개발(2410011467) 과제와 물 흐름 제어 통한 PEMFC 성능 및 내구성 2배 이상 향상을 위한 혁신 기술 개발(2410002859) 과제와 200 kW 이상급 선박용 연료전지 파워팩 개발(2410010247) 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) T. E. Springer, T. A. Zawodzinski and S. Gottesfeld, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model," Journal of The Electrochemical Society, Vol.138, No.8, pp.2334-2342,

- 1991.
- 2) K. Chu, K. Jo, M. Sunwoo and S. Choi, "Optimization of Air Supply for Increased Polymer Electrolyte Fuel Cell System Efficiency," Transactions of KSAE, Vol.19, No.3, pp.44-51, 2011.
 - 3) C. Zheng, Y. Park, W. Lim and S. W. Cha, "Comparison of Rule-Based Power Management Strategy and Optimal Control Strategy in Fuel Cell Hybrid Vehicles," Transactions of KSAE, Vol.20, No.4, pp.103-108, 2012.
 - 4) K. Park, J. Oh, S. Park, J. Joo, K. Yang, J. Park and S. Um, "Thermodynamic Approach to Optimal Water Management for Fuel Cell Electric Vehicle," Journal of Hydrogen and New Energy, Vol.36, No.1, pp.18-30, 2025.
 - 5) J. Oh, A. J. Fix, D. Ziviani, J. E. Braun and D. M. Warsinger, "Design Optimization of Hollow Fiber Membranes for Passive Air Dehumidification in Drying Applications," Energy Conversion and Management, Vol.302, Paper No.118097, 2024.
 - 6) J. T. Gravdahl, F. Willems, B. d. Jager and O. Egeland, "Modeling of Surge in Free-Spool Centrifugal Compressors: Experimental Validation," Journal of Propulsion and Power, Vol.20, No.5, pp.849-857, 2004.
 - 7) H. Ito, T. Mimoto, S. Someya and T. Munakata, "Net Water Drag Coefficient During High Temperature Operation of Polymer Electrolyte Fuel Cells," Journal of The Electrochemical Society, Vol.168, No.12, Paper No.124505, 2021.
 - 8) B. M. Alves, P. Savignac and P. Leduc, "Energy Balance and Hydrogen Exhaust Emissions of the Second-Generation Toyota Mirai," International Journal of Hydrogen Energy, Vol.156, Paper No.150411, 2025.