

미세 기공층을 포함한 PEMFC의 상대 습도 변화 환경에서의 유동 분배 및 성능 분석

김충현¹ · 손종현² · 박성근¹ · 박주영¹ · 김영범^{3†}

¹한양대학교 대학원 융합기계공학과, ²스탠포드대학교 기계공학과, ³한양대학교 기계공학부

Analysis of Flow Distribution and Performance of Variable Relative Humidity Condition in PEMFC with Micro Porous Layer

CHUNGHYUN KIM¹, JONGHYUN SON², SUNGKEUN PARK¹, JUYOUNG PARK¹, YOUNG-BEOM KIM^{3†}

¹Department of Convergence Mechanical Engineering, Hanyang University Graduate School, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Building 530, 440 Escondido Mall, Stanford, CA 94305, USA
³Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

[†]Corresponding author : ybkim@hanyang.ac.kr

Received21 February, 2025Revised30 April, 2025Accepted4 June, 2025

Abstract >> This study analyzes and compares the performance of a micro porous layer (MPL) applied in the gas diffusion layer (GDL) of polymer electrolyte membrane fuel cells under various relative humidity conditions. To analyze the impact of relative humidity, other operating conditions were controlled, and the humidity was set to 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, and 100%. This study numerically simulates hydrophobic characteristics and capillary pressure, confirming that the integration of a MPL results in higher water removal characteristic than when only a GDL is present. Under high relative humidity of 100%, there was a 4.89% performance improvement with the MPL; however, under low relative humidity of 50%, the insufficient hydration within the cell led to a 3.93% performance decrease.

Key words : Micro porous layer(미세 기공층), Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질 연료전지), Relative humidity(상대 습도)

1. 서 론

화석 연료의 사용으로 인하여 지구의 평년 온도가 매년 상승하고 있으며 이는 국제적인 위기를 고조시 켜 이젠 지구온난화라는 표현보다 기후 위기라는 표 현을 더욱 자주 사용하고 있는 추세이다. 수소 에너 지원은 주 에너지원인 화석 연료와 달리 환경 오염 을 초래하지 않기 때문에 기후 위기를 완화하고 미 래 세대의 지속 가능한 발전을 위하여 수소가 핵심 에너지원으로 대체되어야 한다¹⁾.

수소를 에너지원으로 하여 전기화학적 반응을 통 해 전기로 변환하는 수소 연료전지는 전해질의 특성 에 따라 여러 종류로 분류하며 그중 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 높은 성능과 효율을 띄며 작동 온도가 40-90°C 수준으로 낮고 시동 특성이 빨라 다양한 범 위의 수송 장치에 적용하기 위한 연구가 활발히 진 행되고 있다²⁾.

PEMFC의 연구에서는 수소와 산소의 반응을 통해 생성된 물을 효과적으로 배출하여 셀 내의 반응물 공급 농도를 균일하게 유지함으로써 성능을 향상시 키는 방법들이 논의되고 있다³⁻⁶⁾. 셀 내의 균일한 반 응물 농도는 플러딩(flooding) 현상으로 인하여 전류 밀도가 0이 되는 dead zone을 줄여 더욱 높은 성능을 띄며 내구성도 상승하는 효과를 가져온다. 연료전지 내의 기체 확산층(gas diffusion layer, GDL)은 분리 판과 촉매층 사이에 위치하는데, 촉매층으로의 반응 물 공급을 원활하게 하고 생성되는 물을 유로의 출 구로 신속히 배출하여 PEMFC의 성능을 결정짓는 중요한 역할을 수행한다⁷⁾. 최근에는 GDL의 성능을 개 선하기 위하여 GDL과 촉매층 사이의 소수성(hydrophobic) 특성을 띄는 미세 기공층(micro porous layer, MPL)을 배치하여 물 배출 효과를 더욱 증대시키는 연구들을 볼 수 있다⁸⁻¹⁰⁾.

MPL을 적용하였을 때 물 배출 효과가 더욱 향상 되는 이유는 해당 층이 카본 블랙과 소수성 바인더 로 구성된 미세 다공 구조를 형성하여 생성된 물이 모세관 압력(capillary pressure)에 의해 보다 신속하 게 유로 방향으로 이동할 수 있도록 유도하기 때문 이다. 일반적으로 GDL은 약 200 µm 두께로 설계되 며 이는 반응 가스의 분산성과 생성된 물의 배출 경 로 확보, 전기전도성 및 기계적 지지 특성 간의 균형 을 고려한 결과로 알려져 있다. GDL이 지나치게 얇 을 경우 물 배출은 용이할 수 있으나 구조적 안정성 과 전류 수송 효율이 저하되고, 반대로 너무 두꺼울 경우 반응물 전달 저항이 증가하여 성능 저하로 이 어질 수 있다. 한편 MPL은 일반적으로 약 50 µm 수 준으로 형성되며 이는 산소 확산 저항과 수분 이동 저항 사이의 최적 균형점으로 보고되고 있다. 지나치 게 두꺼운 MPL은 산소 전달을 저해할 수 있고, 반대 로 너무 얇을 경우 균일한 물 배출이 어렵고 핀홀 발 생 가능성이 증가하므로 50 μm 내외의 두께가 물 관 리와 전극 안정성 측면에서 가장 이상적인 범위로 널리 채택된다.

그러나 과도한 물 배출 효과는 셀의 성능을 오히 려 저하시킬 수 있다. GDL에서의 과도한 물 배출은 촉매층과 전해질에서의 건조한 환경을 조성하고 막 전극 접합체에서의 수소 이온 전달 과정에서 osmosis drag를 방해하여 높은 저항을 가져오기 때문이다¹¹⁾. 이와 같은 GDL의 물 배출 효과를 상승시키기 위해 적용하는 MPL은 촉매층 및 전해질의 수화 환경을 고려하여 설계되어야 하지만 아직 이에 대한 연구가 미비한 상황이다. 본 연구에서는 다양한 습도 조건에 서 MPL을 적용한 셀과 MPL을 적용하지 않고 GDL 만을 단일층으로 적용한 셀을 비교 해석하여 물질 조성 및 성능을 수치적으로 분석하고자 한다.

2. 해석 형상 및 조건

2.1 PEMFC 모델 형상

본 연구에서는 MPL의 유무에 따른 성능 변화를 분석하기 위해 7×7 mm 크기의 단일 셀을 모사하여 해석을 진행하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 사형 유 로를 적용하여 정사각형 셀 형상에 전반적으로 균일 한 유동이 공급되도록 하였으며 GDL 단일층을 적용 한 대조군에서는 기체 확산층의 두께를 250 µm로



Fig. 1. Schematic of numerical domain, counter flow serpentine channel of PEMFC

설정하였다. 반면 MPL을 기체 확산층 위로 적용한 비교군에서는 GDL의 두께를 200 µm, MPL의 두께 를 50 µm로 설정하였다. GDL과 MPL의 두께는 관 련 문헌을 참조하여 일반적인 두께로 선정하였으며

Table 1. Geometrical description

Geometrical parameter		Value	Unit
MEA	Catalyst thickness	10	μm
	Membrane thickness	20	μm
Bare GDL	GDL thickness	250	μm
MPL-intergrated GDL	GDL thickness	200	μm
	MPL thickness	50	μm
Serpentine (anode and cathode)	Channel width	1	mm
	Channel height	1	mm
	Rib width	1	mm
	BP thickness	2	mm
Reaction area		7×7	mm ²

Table 2. Parameters used in	PEMFC and the equations
-----------------------------	-------------------------

두 대조군과 비교군의 셀 전체 두께는 동일하게 설 정하여 구조적 차이 이외의 물리적 요인으로 인한 영향을 최소화하였다. 해석에 적용되는 모든 형상 변 수는 Table 1에 표기하였다.

2.2 지배 방정식

수치 해석 방법으로 연료전지 반응을 모사할 때에 는 여러 가지 지배 방정식이 필요하다. 본 연구에서 는 연료전지 반응을 포함하는 3차원 열유동 해석을 위하여 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너 지 보존 방정식 등을 포함하여 계산한다. 각 지배 방 정식은 다음과 같은 식들로 표현되며 이 외에도 연 료전지 반응을 충분히 모사하기 위한 기체 및 액체 의 확산 방정식, 전하 보존 및 전달 방정식 등이 사용 된다. 연료전지 반응 모사에 필요한 식들은 Table 2 에 요약하였다.

Description	Value	Unit
Open circuit voltage	$V_{oc} = 1.229 - 0.8456 \times 10^{-3} \left(\left. T - 298.15 \right) + \frac{RT}{2F} ln \frac{P_{H_2}}{P_{O_2}^{0.5}} \right.$	V
Anode current density	$j_a = (1-s)j_{0,a} \text{exp}(\frac{\alpha_a F \eta_a}{RT}) - \text{exp}(-\frac{(1-\alpha_a) F \eta_a}{RT})$	A/m ³
Cathode current density	$j_c = (1-s)j_{0,c} \text{exp}(\frac{\alpha_c F \eta_c}{RT}) - \text{exp}(-\frac{(1-\alpha_c) F \eta_c}{RT})$	A/m ³
Effective gas diffusivity	$D_{eff,i} = \epsilon^{1.5} (1-s)^{1.5} D_i$	m ² /s
Water activity	$a = \frac{P_{H_2O}}{P_{sat}}$	-
Membrane water content	$\lambda(a) = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3, & 0 < a < 1\\ 14, & a = 1 \end{cases}$	-
Proton conductivity (membrane)	$\sigma_p = (0.005139\lambda - 0.00326) \exp{\left(1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})\right)}$	S/m
Capillary pressure	$P_{\cap} = rac{-2\sigma{ m cos} heta}{r_{eff}}$	Pa
Water phase change (condensation)	$S_l = g_{cond} = \gamma_{cond} (1-s) (\frac{P_{H_2O}}{P_{sat}} - 1)$	kg/m ³ s
Water phase change (evaporation)	$S_l = g_{evap} = \gamma_{evap} s \left(1 - \frac{P_{H_2O}}{P_{out}}\right)$	kg/m ³ s

2.2.1 질량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{\rho u}) = 0 \tag{1}$$

식 (1)의 ρ는 유체의 밀도이며 u는 유체의 속도를 의미한다. 질량 보존 방정식은 유체의 연속적인 운동 에 있어 제한된 체적 내에서 유입과 유출 과정에서 변화하는 질량의 총합이 생성되거나 소멸하는 질량 의 크기와 같음을 의미하며 연료전지 반응에서는 추 가적인 질량 생성 반응이 없기 때문에 우변의 값은 0이다.

2.2.2 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) - \nabla P \qquad (2)$$

식 (2)의 µ는 유체의 동점도, P는 압력을 의미한 다. 운동량 보존 방정식은 제한된 체적 내에서 유체 의 운동량 변화량을 나타내는 식으로, 외부로부터 가 해지는 힘에 의해 변화하는 운동량의 크기와 내부에 서 생성되거나 소멸하는 운동량의 크기는 일치함을 의미하며 연료전지 반응에서는 내부에서 생성되거나 소멸하는 운동량이 없으므로 우변의 값은 0이다.

2.2.3 에너지 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T)$$
(3)

식 (3)의 C_p는 비열, T는 온도, k는 열전도도를 의미한다. 에너지 보존 방정식은 제한된 체적 내에서 유체의 유입과 유출 과정에서 변화하는 에너지의 총 량은 내부 에너지의 변화량과 동일함을 나타내는 보 존 방정식이다.

2.2.4 전하 보존 방정식

$$0 = \nabla \cdot (\sigma_{eff,s} \nabla \phi_s) + S_s \tag{4}$$

$$0 = \nabla \cdot (\sigma_{eff,e} \nabla \phi_e) + S_e \tag{5}$$

식 (4), (5)의 σ_{eff} 는 전하 전달 과정에서 유효전 도도, ϕ 는 전위, 아래첨자 s와 e는 solid와 electrolyte를 의미한다. 이는 PEMFC model에서 두 가지 유 형의 전하 전달 수송 인자를 의미하며 solid 매개에 서 전달되는 전자와 electrolyte 매개에서 전달되는 proton이다. 이 식에서 source term은 전자와 이온으 로 인한 전류를 의미하며 전하의 흐름과 전류의 양 에는 전하 전달 과정에서 유효 전도도의 영향을 받 도록 모식되었다.

$$j_{c} = (1 - s_{w}) j_{c,0}^{ref} \frac{c_{O_{2}}}{c_{O_{2}}^{ref}} (-\exp(\frac{4\alpha_{c}F\eta_{act}^{c}}{RT}) + \exp(\frac{-4(1 - \alpha_{c})F\eta_{act}^{c}}{RT}))$$
(6)

식 (6)은 Butler-Volmer 식에 기반하여 본 연구의 연료전지 반응 해석을 모사하였으며 공기극에서의 전류 밀도 값은 반응물인 산소의 농도에 영향을 받 는 것을 알 수 있다.

2.3 해석 조건

본 연구의 MPL의 유무를 달리하는 형상에 대해 연료전지 반응 결과 열유동 특성 및 전기적 성능 변 화를 분석하기 위해 표와 같이 환원 전극 영역에서의 GDL 부분의 형태를 달리하여 해석을 진행하였다. 형태 이외의 운전 조건은 모두 동일하게 설정하였으며 다양한 상대 습도의 조건에서 물질 거동에 미치는 영향 을 확인하기 위해 상대 습도의 양은 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%로 나누어 해석을 진행하였다. 반응 물의 공급은 산화 전극 유로에는 수소와 증기 혼합 물로 이론적 전기화학 반응 유량(stoichiometry ratio, SR)의 1.5배를, 환원 전극 유로에는 공기와 증기 혼 합물로 이론적 SR의 2배를 공급하였다. 연료전지 반 응의 분위기는 1기압의 대기압 분위기로 진행하였다. 운전 온도는 65℃이고 전압 환경은 0.5 V로 설정하 였다. 이는 수송용 연료전지에 요구되는 빠른 부하 변동과 높은 부하 요구 조건을 충족할 수 있는 작동 환경이며 해당 조건에서 GDL 단일층과 MPL 적용층 의 물질 분포 양상 변화를 해석적으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PEMFC with GDL

Fig. 2는 GDL 단일층 PEMFC의 촉매층에서 액체 포화도를 나타낸다. 포화도는 0에서 1 사이의 값을 가지며 다공성 구조 내 기공 안에서 액체 물이 채워 져 있는 상태를 말한다. 셀 내부의 액체 포화도는 상 대 습도가 높은 환경일수록 상평형 과정에서 물에 대한 분압이 증가하여 높게 확인된다. 반응물이 공급 되는 입구 영역에 비해 생성물이 배출되는 출구 영 역은 더 높은 포화도를 보이며 유로 아래 영역보다 랜드부 아래 영역에서 물 배출이 잘 일어나지 않아 더 높은 포화도를 보인다.

Fig. 3은 MPL 적용층의 액체 포화도를 나타낸다. Fig. 2의 GDL 단일층과 동일하게 상대 습도가 높은 환경일수록 포화도가 증가하며 유로 영역 아래보다 랜드 영역 아래에서 포화도가 높게 확인되나 MPL 적용층의 경우 높은 물 배출 효과로 인하여 GDL 단 일층 셀과 달리 전반적으로 낮으며 균일한 포화도를 보인다. Fig. 4는 GDL 단일층 PEMFC의 촉매층에서 산소 농도 분포를 나타낸다. 산소 농도는 유로 입구 영역 에서 높고 출구 영역으로 갈수록 감소하는 형태를 보이며 가장자리 부분과 랜드 영역 아래에서 낮은 값을 보인다. 특히 상대 습도가 높은 경우일수록 랜 드 영역 아래에서의 산소 농도가 낮은데 이는 액체 포화도의 flooding 현상으로 인하여 해당 영역으로 산소 공급이 어렵기 때문이다.

Fig. 5는 MPL 적용층의 산소 농도 분포를 나타낸 다. Fig. 4의 GDL 단일층과 동일하게 유로 입구 영역 에서 출구 영역으로 감소하는 형태를 보이나 랜드 영역에서의 산소 농도가 GDL 단일층의 경우보다 높 게 나타나며 셀 내부에 전반적으로 높은 산소 농도 를 보인다. 이는 MPL 적용층에서 단일층보다 물 배 출이 더욱 잘 일어났기 때문에 산소 농도가 촉매층 전반에 공급될 수 있었다.

Fig. 6은 GDL 단일층 PEMFC의 촉매층에서의 전 류 밀도 분포를 나타낸다. 전류 밀도는 반응물의 공 급이 원활한 유로 영역 아래에서는 높게 나타나고 셀의 가장자리 영역으로 갈수록 반응물의 공급이 원 활하지 않아 낮은 전류 밀도를 보인다. 상대 습도가



Fig. 2. Water saturation contour at the interface between the cathode catalyst and the GDL of the only GDL model under 0.5 V condition with varied relative humidity (a) 50%, (b) 60%, (c) 70%, (d) 80%, (e) 90%, and (f) 100%



Fig. 3. Water saturation contour at the interface between the cathode catalyst and the MPL of the GDL with MPL model under 0.5 V condition with varied relative humidity (a) 50%, (b) 60%, (c) 70%, (d) 80%, (e) 90%, and (f) 100%



Fig. 4. Oxygen concentration contour at the interface between the cathode catalyst and the GDL of the only GDL model under 0.5 V condition with varied relative humidity (a) 50%, (b) 60%, (c) 70%, (d) 80%, (e) 90%, and (f) 100%

증가할수록 유로 영역 아래에서는 전류 밀도 분포가 상승하지만 랜드 영역 아래와 셀의 가장자리 영역 아래에서는 반응이 낮게 나타나는 부분이 증가한다.

랜드 영역 아래에서의 낮은 전류 밀도 분포는 상대 습도 환경이 높아짐에 따라 셀 내부 액체 포화도의 증가와 물 배출 저하로 인하여 Fig. 4와 같이 반응물



Fig. 5. Oxygen concentration contour at the interface between the cathode catalyst and the MPL of the GDL with MPL model under 0.5 V condition with varied relative humidity (a) 50%, (b) 60%, (c) 70%, (d) 80%, (e) 90%, and (f) 100%



Fig. 6. Current density contour at the interface between the cathode catalyst and the GDL of the only GDL model under 0.5 V condition with varied relative humidity (a) 50%, (b) 60%, (c) 70%, (d) 80%, (e) 90%, and (f) 100%

의 공급이 해당 영역까지 충분히 전달되지 않았기 때문이다.

Fig. 7은 MPL 적용층의 전류 밀도 분포를 나타낸

다. MPL 적용층의 전류 밀도 분포는 Fig. 6의 GDL 단일층에서의 전류 밀도 분포 양상과 차이를 보인다. 셀 전반적으로 전류 밀도가 고른 모습을 보이며 셀



Fig. 7. Current density contour at the interface between the cathode catalyst and the MPL of the GDL with MPL model under 0.5 V condition with varied relative humidity (a) 50%, (b) 60%, (c) 70%, (d) 80%, (e) 90%, and (f) 100%

가장자리 영역에서도 전류 밀도가 급격히 떨어지는 양상 없이 유로 영역과 비교적 균일한 전류 밀도 값 을 보인다. 이는 GDL 단일층과 달리 물 배출 효과가 좋은 MPL 층에서는 반응물의 공급이 셀 전반적으로 충분히 이루어졌음을 알 수 있다.

Fig. 8은 GDL 단일층과 MPL 적용층 셀에서의 상 대 습도에 따른 전류 밀도 값을 그래프로 나타낸 것 이다. 전류 밀도는 상대 습도가 증가할수록 높아지는 추세를 보이며 이는 셀 내 수분 함량(water content) 이 증가할수록 Table 2의 proton conductivity 식에 따라 수소 이온의 막전극 접합체의 전도 과정에서 요구되는 용존 수분 함량이 충족되어 전하 전달 저 항이 줄어들었기 때문으로 예상할 수 있다. 그리고 GDL 단일층에서는 상대 습도가 50%에서 90%로 증 가할 때 성능 또한 상승하는 모습을 보이지만 90%에 서 최고 성능인 1.222 A/cm²에 도달 후 100%의 습도 환경에서 1.204 A/cm²로 하락하는 결과를 나타낸다. 이는 높은 상대 습도에서 셀 내부에 계속해서 높아 진 액체 포화도가 낮은 물 배출을 가져와 Fig. 4와 같 이 반응물의 불균일한 공급으로 성능을 하락시켰기 때문이다. 이에 비해 MPL 적용층에서는 상대 습도



Fig. 8. Average current density distribution with different relative humidity

가 50%에서 100%로 증가할 때 성능 또한 동반하여 상승하는 모습을 보이며 이는 100%의 상대 습도 환 경에서도 MPL이 충분한 물 배출성을 가졌기 때문이 다. GDL 단일층 셀과 비교하였을 때에도 100%의 상 대 습도 환경에서 4.89% 더 높은 성능을 기록하였다. 하지만 50%의 상대 습도 환경에서는 오히려 GDL 단일층 셀보다 3.93% 낮은 성능을 기록하였는데 이 는 낮은 상대 습도 환경에서는 물 배출로 인한 성능 향상보다는 충분한 수분 함량으로 인한 수소 이온의 막전극 접합체를 통과할 때 발생하는 전하 전달 저 항의 감소로 인한 성능 향상이 더욱 주요한 영향으 로 자리 잡아 MPL 적용층 셀보다 GDL 단일층 셀에 서 높은 액체 포화도로 인한 성능이 향상하였기 때 문이다. 즉 MPL 적용층 셀은 GDL 단일층 셀보다 높 은 물 배출성을 가지며 촉매층의 낮은 액체 포화도 와 높은 반응물 균일도를 가져온다. 이러한 현상은 높은 상대 습도 환경에서는 충분한 반응 면적으로 인한 전반적인 전류 밀도 상승을 가져오나 낮은 상 대 습도 환경에서는 수소 이온의 전하 전달 과정에 서 전달 저항의 증가를 가져와 오히려 성능 하락을 발생시킬 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 연료전지의 물 배출 향상으로 성능 개선을 위하여 GDL보다 소수성 특성이 높은 MPL이 적용되고 있는 상황에서 다양한 상대 습도 조건에서 연료전지 반응을 모사하고 유동 특성을 분석하였다. 높은 상대 습도 조건에서는 MPL을 적용한 셀이 물 배출을 높이고 반응물의 균일한 공급을 가져와 성능 향상을 확인하였지만 낮은 상대 습도 조건에서는 과 도한 물 배출이 막전극 접합체를 지나는 수소 이온 의 전하 전달 과정에서 높은 저항으로 인하여 오히 려 MPL을 도입한 셀이 성능 하락을 가져온 것을 확 인하였다. 따라서 MPL을 도입하는 것은 셀이 구동 되는 상대 습도 조건에 따라 달라져야 함을 본 연구 를 통해 제시한다.

후 기

이 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원 으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030030190, 연료전지 시스템의 스마트 설계·제조·운전 오픈 플랫폼 개발).

References

1. B. Lee, H. Lee, C. Moon, S. Moon, and H. Lim, "Preliminary

economic analysis for H_2 transportation using liquid organic H_2 carrier to enter H_2 economy society in Korea", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 119-127, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.2.119.

- M. Song and K. Kim, "Numerical study on heat transfer of air-cooling PEMFC in HALE UAV", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 150-155, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.2.150.
- J. Son, S. Um, and Y. B. Kim, "Relationship between number of turns of serpentine structure with metal foam flow field and polymer electrolyte membrane fuel cell performance", Renewable Energy, Vol. 188, 2022, pp. 372-383, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.001.
- 4. D. Y. Jung, D. K. Song, J. S. Kim, S. H. Lee, G. W. Min, J. H. Son, and G. Y. Cho, "Numerical investigation of effects of obstacles in flow channels and depth of flow channels for PEMFCs", Sustainability, Vol. 16, No. 22, 2024, pp. 10144, doi: https://doi.org/10.3390/su162210144.
- J. Son, S. Um, and Y. B. Kim, "Effect of baffle pattern applied to cathode parallel channel on PEMFC performance", International Journal of Precision Engineering and Manucturing-Green Technology, Vol. 11, No. 1, 2024, pp. 145-159, doi: https://doi.org/10.1007/s40684-023-00534-3.
- J. Son and Y. B. Kim, "Numerical analysis on polymer electrolyte membrane fuel cell performance enhancement with novel selective-patterned gas diffusion layers", Renewable Energy, Vol. 195, 2002, pp. 455-465, doi: https://doi.org/10. 1016/j.renene.2022.06.008.
- J. H. Chun, K. T. Park, D. H. Jo, S. G. Kim, and S. H. Kim, "Numerical modeling and experimental study of the influence of GDL properties on performance in a PEMFC", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 2, 2011, pp. 1837-1845, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.036.
- M. Lou, L. Chen, K. Lu, and R. Lin, "An experimental study on PEMFC water management based on the synergistic interaction of flow field and MPL", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 69, 2024, pp. 1246-1254, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.153.
- M. Blanco and D. P. Wilkinson, "Investigation of the effect of microporous layers on water management in a proton exchange membrane fuel cell using novel diagnostic methods", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, No. 29, 2014, pp. 16390-16404, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhy dene.2014.07.147.
- D. Spernjak, R. Mukundan, R. L. Borup, L. G. Connolly, B. I. Zackin, V. De Andrade, M. Wojcik, D. Y. Parkinson, D. L. Jacobson, D. S. Hussey, K. L. More, T. Chan, A. Z. Weber, and I. V. Zenyuk, "Enhanced water management of polymer electrolyte fuel cells with additive-containing microporous layers", ACS Applied Energy Materials, Vol. 1, No. 11, 2018, pp.

6006-6017, doi: https://doi.org/10.1021/acsaem.8b01059.

 F. S. Nanadegani, E. N. Lay, and B. Sunden, "Effects of an MPL on water and thermal management in a PEMFC", International Journal of Energy Research, Vol. 43, 2019, pp. 274-296, doi: https://doi.org/10.1002/er.4262.