

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 3, 2025, pp. 239-248 DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.3.239

# PEMFC 공기극 Serpentine 유로의 Zigzag Turn 각도에 따른 성능 분석

박주영<sup>1</sup> · 김충현<sup>1</sup> · 박성근<sup>1</sup> · 김영범<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 일반대학원 융합기계공학과, <sup>2</sup>한양대학교 나노과학기술연구소

# Performance Analysis on the Zigzag Turn Angle of PEMFC Cathode Serpentine Flow Path

JUYOUNG PARK<sup>1</sup>, CHUNGHYEON KIM<sup>1</sup>, SUNGKEUN PARK<sup>1</sup>, YOUNGBEOM KIM<sup>1,2†</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : ybkim@hanyang.ac.kr

Received9 April, 2025Revised7 May, 2025Accepted4 June, 2025

Abstract >> Liquid water generated at the cathode catalyst layer in polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) blocks oxygen access, reducing cell performance. This study numerically investigates the effect of turn angle in zigzag flow fields, a key design factor. Larger turn angles enhance under-rib convection, improve water removal, and increase oxygen concentration, resulting in better performance based on current density. However, they also cause higher pressure drops, raising pumping power. To assess overall efficiency, net power density was introduced by considering pressure loss. The results show that increasing the turn angle improves both water management and energy efficiency, offering valuable insights for flow field design in PEMFCs.

Key words : Polymer electrolyte membrane fuel cell(양성자 교환막 연료전지), Zigzag flow field(지그재그 형상 유로), Turn angle(꺾임 각도), Liquid water(액상 물), Flow velocity(유동 속도), Net power(순 전력)

# 1. 서 론

최근 전 세계적으로 기후 변화와 지구온난화 문제 가 심각하게 대두됨에 따라 온실가스 배출 저감 및 지속 가능한 발전을 위한 친환경 에너지원에 대한 관심이 증대되고 있다. 기존의 화석연료 기반 에너지 시스템은 환경오염과 자원 고갈의 문제를 내포하고 있어 이에 대한 대안으로 태양광, 풍력, 수소 에너지 등 다양한 신재생 에너지원이 부상하고 있다. 이러한 맥락에서 연료전지는 높은 에너지 효율과 낮은 오염 물질 배출량을 갖는 차세대 에너지원으로 주목받고 있으며 특히 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 낮은 운전 온 도, 빠른 가동 특성 및 높은 전력밀도 등의 장점을 바 탕으로 다양한 분야에서 응용 가능성이 기대되고 있 다<sup>1</sup>. PEMFC는 공기극에서 산소를, 연료극에서 수소를 공급받아 전기화학적 반응을 통해 전기를 발생시키 는 장치이다. 연료극에서는 수소가 양성자와 전자로 분리되며 전자는 외부 회로를 통해 전기를 공급하고 양성자는 전해질막을 통과하여 공기극으로 이동한 다. 공기극에서는 산소와 양성자, 전자가 결합하여 물이 생성되는 반응이 일어난다. 이러한 과정에서 PEMFC는 연료의 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 높은 에너지 효율을 자랑하지만 동시에 다음과 같은 단점도 존재한다. 우선 촉매의 고가 및 내구성 문제, 수분 관리와 열 관리의 어려움이 대표 적인 단점으로 지적되고 있다. 특히 공기극의 설계와 관련하여 유동 및 질량 전달과 액상 물의 제거 문제 는 전지의 성능 저하에 중요한 영향을 미치는 요소 로 확인되고 있다<sup>2</sup>.

PEMFC의 기본 구조는 분리판, 기체 확산층(gas diffusion layer, GDL), 촉매층(catalyst layer), 고분자 전해질 막(membrane)으로 구성된다. 이 중 분리판은 전극 간 전기적 연결뿐만 아니라 연료 및 반응물의 분배, 생성된 물의 배출을 위한 유동을 만들어 내는 핵심적인 부품이다. 그러나 기존에 사용되던 유로 형 상들은 효율적인 반응물 전달 및 물 관리에 한계가 있다. 특히 공기극에서 액상 물의 축적으로 인한 산 소 공급 저해 문제가 해결되어야 할 문제점으로 자 주 대두되었다. 이러한 문제는 PEMFC의 출력 감소 및 장기 내구성 저하로 이어질 수 있어 유로 형상의 개선은 PEMFC 성능 최적화를 위한 핵심 과제로 인 식되고 있다.

최근 여러 연구에서는 분리판의 유로 형상을 개선 함으로써 기존의 반응물 전달 및 물 관리 문제를 해 결하려는 시도가 진행되고 있다. 기존 설계에서 발생 하던 액상 물의 침적 및 배출 불량 문제는 유로 내의 유동 속도와 방향 그리고 유로 형상의 변화 등을 통 해 완화될 수 있음이 제시되었다. 특히 공기극 유로 의 구조적 변형을 통해 산소 공급의 균일성을 높이 고 물 제거 효율을 향상시키는 방법들이 연구되었다. 이러한 연구 결과는 유로 디자인의 최적화가 PEMFC 의 전반적인 성능 및 내구성을 개선하는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다<sup>3-8)</sup>.

기존 선행 연구에서는 공기극 유로의 구조적 변경, 예를 들어 채널의 폭, 깊이 및 경로의 변화를 통해 유 동 특성과 물 제거 효율을 개선한 사례들이 보고되 고 있다. 이들 연구에서는 유로 내의 유동 재분배를 통해 액상 물의 제거를 촉진하고 그 결과 산소 농도 의 향상 및 전류밀도 증대를 확인하였다. 특히 일부 연구에서는 유로 내의 특정 형상 변화가 온도 균일도 에도 긍정적인 영향을 미친다는 것을 밝혀 PEMFC의 열 관리 문제에도 기여할 수 있음을 제시하였다. 이 러한 선행 연구의 결과는 기존의 유로 디자인으로 인한 문제점들을 해결할 수 있는 가능성을 보여주며 보다 혁신적인 구조 설계의 필요성을 부각시키고 있다.

선행 연구에서는 공기극 유로 디자인 변경이 유로 내의 유동 속도를 증가시켜 액상 물의 효과적인 제 거를 가능하게 하며 그 결과 산소 공급이 원활해지 고 전극 반응이 촉진된다는 원리를 제시하였다. 즉 유로 내 유동의 개선은 반응물 전달의 효율성을 극 대화하고 동시에 물 관리 문제를 해소함으로써 PEMFC 의 전반적인 성능을 향상시키는 핵심 요소로 작용한 다는 점을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 기존 선행 연구에서 제시한 문제 해결 원리를 더욱 강화하기 위하여 기존의 공기극 유 로 디자인에 zigzag 구조를 도입하고 이를 통해 유동 특성 및 PEMFC 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 구체적으로 zigzag 형상의 각도를 10°, 20°, 30° 로 조절하여 각 조건에서 유동 속도, 액상 물 제거 효 율, 산소 농도, 전류밀도 및 압력 강하량 등의 변화를 측정하였다.

또한 기존에 zigzag 구조 자체에 대한 연구는 진행 되었으나<sup>9,10)</sup> serpentine 구조에서 zigzag 유로의 핵심 적인 기하학적 변수인 꺾임 각도(turn angle)의 독립 적인 영향에 대해 체계적으로 분석한 연구는 부족하 였다. 이에 본 연구에서는 꺾임 각도의 영향만을 중 점적으로 평가함으로써 zigzag 구조의 성능 향상에 대한 근거를 제시하였다. 이러한 결과는 향후 PEMFC 의 설계 및 운전 전략 수립에 기초 자료로 활용되어 친환경 에너지원으로서 연료전지의 상용화 및 효율 적 운영에 기여할 것으로 판단된다.

# 2. 연구 방법

본 연구에서는 PEMFC 분리판에서 널리 사용되는 zigzag 유로의 성능을 보다 정밀하게 분석하기 위하 여 꺾임 각도를 주요 변수로 설정하고 그 영향을 평 가하였다. 이를 위하여 serpentine 구조를 기본 모델로 하여 zigzag flow field 형상을 적용하고 꺾임 각도를 10°, 20°, 30°로 변화시킨 총 네 가지 모델(serpentine, zigzag flow field turn angle 10°, 20°, 30°)을 비교 분 석하였다.

이러한 설계 변화를 통해 유동 특성, 액상 물의 분 포, 산소 공급 효율, 전류밀도 및 압력 강하에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고 꺾임 각도 조절이 PEMFC 성능에 미치는 효과를 규명하는 것이 본 연구의 핵 심 목표이다.

모델링은 computer aided design (CAD) 소프트웨 어(NX; Siemens Digital Industries Software, Plano, TX, USA)를 활용하여 3D 기하학적 구조를 생성하 였다. 이 과정에서 다공성 매질 내부의 미세한 물질 전달 특성을 보다 정밀하게 해석하기 위하여 112 mm<sup>2</sup> 면적의 모델을 139.9만 개의 격자로 제작하였 다. 열 및 물질 전달을 수행하는 모델은 ANSYS Fluent 2019 R1 (Ansys, Canonsburg, PA, USA)을 이 용한 computational fluid dynamics (CFD) 해석을 통 해 실행하였다. 또한 보다 정밀한 전기화학 반응을 모사하기 위하여 user defined function (UDF)을 추가 하여 3D 전산 해석을 보완하였다. 수렴 정도는 잔차 (residual)가 10<sup>-6</sup> 이하로 내려갔을 때 수렴되었다고 판단하였다. 이하 본 장에서는 이번 연구에서 사용된 기하학적 모델, 수학적 모델, 해석 조건 및 가정에 대 해 상세히 기술하고자 한다.

# 2.1 기하학적 형상

본 연구에서 사용된 4가지 유로 형상의 기하학적 모델 이미지는 Fig. 1에, 주요 설계 변수와 치수는 Table 1에 정리하였다.

PEMFC에서 널리 사용되는 serpentine 유로는 높 은 반응 균일성을 제공하며 비교적 안정적인 흐름을 유지할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이 구조는 유



Fig. 1. Geometry of serpentine & zigzag flow field

Parameter	Description	Value (mm)
Length	L	16
Width	W	7
Cathode/anode bipolar plate height	$H_{bp}$	1.5
Cathode/anode channel height	$H_{ch}$	1
Cathode/anode gas diffusion layer thickness	$H_{gdl}$	0.3
Cathode/anode catalyst layer thickness	$H_{cl}$	0.1
Membrane thickness	$H_{mem}$	0.2

 
 Table 1. Geometric parameter of serpentine channel and zigzag flow field PEMFCs

체의 흐름 경로가 길어 상대적으로 높은 압력 강하 가 발생하는 특성을 갖는다. 이에 따라 본 연구에서 는 zigzag 유로 형상의 꺾임 각도를 조절하여 압력 강하와 유체 흐름의 균일성 그리고 반응물 전달 특 성에 미치는 영향을 분석하였다.

Zigzag 유로 구조에서는 꺾임이 많아질수록 압력 강하가 증가하지만 동시에 유체의 속도가 증가하여 액상 물 제거 및 산소 전달 특성이 개선될 가능성이 있다.

각 모델의 주요 차이점은 꺾임 각도(θ) 변화에 있 으며 이를 10°, 20°, 30°로 설정하여 꺾임 각도가 증 가할수록 유체의 속도, 압력 분포, 산소 전달 특성이 어떻게 변화하는지를 분석하였다.

# 2.2 수치 해석 모델

본 연구에서는 PEMFC 내부의 유동 및 전기화학 반응을 정밀하게 모사하기 위하여 다음과 같은 지배 방정식을 적용하였다. PEMFC는 반응물인 산소 및 수소의 흐름과 확산, 전하의 이동, 전기화학적 반응 을 포함하는 복합적인 물리 시스템이므로 유체역학 적 방정식과 함께 전기화학 반응식이 고려되어야 한 다. 이번 연구에서 진행한 해석에 사용한 지배 방정 식은 다음과 같다.

## 2.2.1 질량 보존 방정식(continuity equation)

PEMFC 내부에서는 수소와 산소가 전기화학 반응 을 통해 소모되므로 일반적인 연속 방정식과 달리 source term (*S<sub>mass</sub>*)이 존재한다. 따라서 질량 보존 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (\rho v) = S_{mass} \tag{1}$$

여기서 ρ는 유체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>), ν는 유체 속도 벡터 (m/s), S<sub>mass</sub>는 PEMFC 내부에서 수소 및 산소가 전 기화학 반응으로 인하여 소멸되고 물이 생성되는 것 을 모사하는 질량항(kg/m<sup>3</sup>·s)이다.

# 2.2.2 운동량 보존 방정식(momentum conservation equation)

PEMFC 내 유체의 운동량 변화를 설명하는 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho(v \bullet \nabla)v = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + S_m \tag{2}$$

여기서 *P*는 압력(Pa), μ는 점성 계수(Pa·s), *S*<sub>m</sub>은 전기화학 반응 및 다공성 매질의 저항 효과를 고려 한 운동량(Pa·s)이다.

PEMFC 내부의 GDL과 전극에서는 다공성 매질 을 통한 흐름이 발생하며 이때 Darcy's law를 통해 추가적인 저항을 고려할 수 있다.

## 2.2.3 에너지 보존 방정식(energy conservation equation)

PEMFC 내부의 열전달은 산소 및 수소의 유동뿐 만 아니라 전기화학 반응으로 생성되는 반응열에 의 해 결정된다. 이를 반영한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C_p(v \bullet \nabla T) = \nabla \bullet (k \nabla T) + S_T \tag{3}$$

여기서  $C_p$ 는 정압 비열(J/kg·K), k는 열전도도 (W/m·K),  $S_T$ 는 전기화학 반응에 의하여 생성된 열 원 항(W/m<sup>3</sup>)이다.  $S_T$ 는 전극에서 발생하는 오믹 과전 압(ohmic overvoltage), 활성화 과전압(activation overvoltage), 물질 전달 과전압(concentration overvoltage)

등으로 인하여 형성되는 열을 포함하며 이는 전류밀 도와 전극 특성에 따라 변화한다.

#### 2.2.4 물질 보존 방정식(species conservation equation)

PEMFC 내에서 반응물(수소 및 산소)의 확산 및 대류 흐름을 반영하기 위하여 물질 보존 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \bullet (\rho X_i u) = \nabla \bullet (\rho D_{eff,i} \nabla X_i) + S_i \tag{4}$$

여기서 X<sub>i</sub>는 성분 i의 질량 분율, D<sub>eff,i</sub>는 성분 i의 유효 확산 계수(m<sup>2</sup>/s), S<sub>i</sub>는 전기화학 반응으로 인한 생성 또는 소멸 항(kg/m<sup>3</sup>·s), u는 유체 속도 벡터(m/s) 이다.

이 방정식은 대류와 확산, 전기화학 반응으로 인 한 성분 변화를 반영한다. PEMFC에서 반응물은 GDL을 통해 촉매층으로 확산되며 촉매층에서 전기 화학 반응이 일어나기 때문에 *s*<sup>i</sup> 항이 중요하게 작용 한다.

#### 2.2.5 전하 보존 방정식(charge conservation equation)

전극과 전해질 내부에서 전하가 이동하는 현상을 설명하기 위하여 전하 보존 방정식이 사용된다.

$$\nabla \cdot (\sigma_{eff,s} \nabla \phi_s) = S_{\phi_s} \tag{5}$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{eff,e} \nabla \phi_e) = S_{\phi_e} \tag{6}$$

여기서  $\sigma_{eff,s}$ 는 전자 전도도,  $\sigma_{eff,e}$ 는 이온 전도도,  $\phi_s$ 는 전자 전위,  $\phi_e$ 는 이온 전위,  $S_{\phi_s}$ 는 반응에 의하 여 생성된 전하량,  $S_{\phi_e}$ 는 반응에 의하여 생성된 이온 량이다.

PEMFC에서는 촉매층에서의 전기화학 반응으로 인해 전자가 생성되며 이 전자는 촉매층, GDL, 분리 판을 통해 이동한다. 또한 반응으로 인하여 분리된 양성자는 전해질을 통해 반대편 전극으로 이동하여 이온의 전위차를 만들어 낸다. 따라서 전극 및 전해 질의 전도도를 고려하여 해석을 수행해야 한다.

## 2.3 수치 해석 가정 및 조건

본 연구에서는 수치 해석의 복잡성을 줄이고 연료 전지 내부의 주요 유동 및 반응 특성을 효과적으로 모사하기 위하여 다음과 같은 가정을 설정하였다.

첫째, 층류이다. PEMFC의 유로 크기가 작고 Reynolds 수가 낮기 때문에 흐름을 층류로 가정할 수 있다.

둘째, 이상기체이다. 수소 및 산소는 PEMFC 작동 온도 및 압력에서 이상기체로 가정할 수 있다.

셋째, 비압축성이다. 낮은 압력 강하와 느린 유동 속도로 인하여 비압축성 유동을 가정할 수 있다.

넷째, 중력은 무시한다. 기체 흐름은 압력 구배와 반 응에 의하여 지배되므로 중력 효과를 무시할 수 있다.

다섯째, 정상 상태이다. 정상 상태에서 연료 및 산 화제 공급이 일정하다고 가정하여 시간에 의한 변화 항을 제거할 수 있다.

여섯째, 물질은 전해질 막을 통과할 수 없다. 전해 질 막을 통한 기체 및 전자 이동은 없으며 양성자만 이 막을 통과한다고 가정한다.

일곱째, two phase model을 적용한다. 기체 상태의 물과 액체 상태의 물을 서로 다른 상(phase)으로 계 산하였으며 측정된 온도가 포화 온도보다 높거나 압 력이 포화 압력보다 낮을 경우 액체 상태의 물은 기 체 상태의 물로 변환되고 반대의 경우에는 기체 상 태의 물이 액체 상태로 변환된다.

이러한 가정들은 연료전지의 주요 거동을 정확하 게 반영하면서도 계산 효율성을 높이기 위한 설정이 며 실제 PEMFC 작동 환경과 충분히 유사한 조건을 제공한다.

본 연구에서 적용한 물성치는 Table 2에, 사용한 작동 조건은 Table 3에 정리하였다. 이를 통해 연료 전지의 실제 운전 환경을 모사하고자 하였다. 작동 온도는 353.15 K로 설정하여 전해질의 전도도와 전 극 반응의 활성화 특성을 최적화하였으며 작동 압력 은 1 atm으로 유지하여 실험 및 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확보하였다.

또한 작동 전압은 0.5 V로 물질 전달 과전압이 발

Property	Value	Unit
GDL porosity <sup>12)</sup>	0.8	-
Catalyst layer porosity <sup>13)</sup>	0.2	-
Catalyst layer permeability <sup>14)</sup>	$10^{-13}$	$m^2$
Electrical conductivity of catalyst layer, GDL, bipolar plate <sup>15)</sup>	2,000, 5,000, and 20,000	S/m
Thermal conductivity of membrane, catalyst layer, GDL, bipolar plate <sup>12)</sup>	2, 8, 1.6, and 210	$W/(m \cdot K)$
Dry membrane density <sup>12</sup>	1,980	$kg/m^3$
Membrane equivalent weight <sup>12)</sup>	1,100	kg/kmol
Anode transfer coefficient <sup>16</sup> )	0.5	-
Cathode transfer coefficient <sup>16</sup>	1	-
Contact angle at GDL, catalyst layer <sup>17)</sup>	95/110	θ
Surface tenstion <sup>15)</sup>	0.0625	N/m

#### Table 2. Material properties and analysis parameters

Table 3. PEMFC working conditions

Description	Symbol	Value	Unit
Cell temperature	Т	353.15	K
Anode Pressure	$P_{an}$	1	atm
Cathode Pressure	$P_{cat}$	1	atm
Anode stoichiometry	$\xi_{an}$	1.5	$(1A/cm^2)$
Cathode stoichiometry	$\xi_{cat}$	2	기준)

생하는 영역에서 해석을 수행하였다. 공기극과 연료 극의 화학량론비는 각각 2.0과 1.5로 설정되었다. 이 조건은 연료전지 내부의 반응물 공급 상태를 조절하 여 산소와 수소의 적절한 농도 분포를 유도함으로써 효율적인 전기화학 반응을 가능하게 하고자 하는 목 적을 반영한다. Table 3에 제시된 이러한 작동 조건 은 향후 해석 및 최적화 과정에서 중요한 기준점으 로 활용될 것이다.

# 3. 결과 및 고찰

## 3.1 속도 분석

본 절에서는 공기극 GDL과 촉매층의 계면 영역에 서의 유동 특성을 분석하였다. 특히 through-plane 방







향 속도( $V_Z$ ) 분포와 rib 아래 영역으로의 우회 흐름 (bypass flow) 형성 여부에 초점을 맞추었다. 유로에 zigzag 형상을 도입하게 되면 유로 내 유동 경로가 크게 변경되며 이는 through-plane 방향 속도뿐만 아 니라 in-plane 방향 속도( $V_x$ ) 분포에도 직접적인 영 향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 2를 보면 serpentine 유로에서부터 zigzag 유로의 꺾임 각도가 10°, 20°, 30°로 증가함에 따라 꺾임이 있는 부분에서 through-plane 방향 속도가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 특히 채널에서 under-rib으로 유동이 진행될 때 는 GDL 방향으로 유동이 진행하기 위하여 수직 아 래 방향으로 속도가 증가하는 것을 볼 수 있고 under-rib에서 채널 방향으로 유동이 진행할 때는 다시 채널 쪽으로 유동이 상승하는 속도가 빨라지는 것을 관찰할 수 있다. 이를 통해 rib 아래를 통해 유동이 전달되는 우회 흐름이 활성화되는 현상이 관찰되었 으며 Fig. 3을 통해 조금 더 자세히 분석하였다. Under-rib 위치의 GDL에서 확인한 in-plane 가로 방 향의 속도 그래프를 살펴보면 serpentine < zigzag flow field turn angle이 10°<20°<30° 순으로 높은 속 도를 보이고 있다. 이는 곧 우회 흐름이 발생하여 GDL 내부로 유동이 더 깊이 침투하도록 만들 수 있 고 이를 통해 액상 물이 정체되기 쉬운 under-rib 영 역에서의 물 제거와 산소 공급이 개선되는 것을 기 대할 수 있다.

종합적으로 속도 분석 결과는 zigzag 유로 구조의 도입이 유체의 국부적, 전체적 유동 특성을 개선함을 명확히 보여준다. 특히 through-plane 방향의 가속 효 과와 under-rib 영역에서의 우회 흐름 강화는 산소 전 달, 액상 물 배출, 전류밀도 향상 등 후속 분석에서 다룰 성능 지표들과도 밀접한 관련이 있다.

## 3.2 Liquid water distribution 분석

전기화학 반응에 의하여 촉매층에서는 물이 생성 되는데 이때 적절하게 제거되지 못한 물은 반응 영 역을 막는 flooding 현상을 야기하여 해당 영역에는 산소가 잘 분배되지 못한다. 그 때문에 적절한 유로 설계를 통해서 대류를 만들어 액상 물을 채널 쪽으 로 잘 밀어내 배출하는 것이 중요하다. 따라서 본 연



Fig. 3. Velocity X (transverse direction) chart at cathode under rib GDL center line. x, 2.5 mm. z, -0.15 mm

구에서는 반응이 가장 활발하게 일어나 액상 물이 많이 생성되는 촉매층과 고분자 전해질 막의 계면에서 액상 물의 분포와 평균 농도를 면밀히 관찰하였다.

분석 결과 Fig. 4를 통해 확인할 수 있다시피 serpentine 구조에 비해 zigzag 유로 구조를 도입할 경우 꺾임 각도가 증가함에 따라 반응 영역에서 액상 물의 평균 농도가 낮아지는 경향이 나타나며 최대 5.61% 만큼 감소한 것을 확인하였다. 이는 앞 절에서 분석 한 대로 높은 속도의 유동이 액상 물을 전극 표면에서 신속하게 제거하는 효과를 가져왔고 전극 내 불필요 한 수분 축적을 최소화하는 역할을 함을 의미한다.

세부적으로 보면 각도가 증가할수록 유로 내부의 국부적인 가속 효과가 강화되어 물방울이 형성되기 전에 빠르게 유출되었을 것으로 예측할 수 있다. 이 러한 결과는 기존 선행 연구에서 제시된 바와 같이 유로 형상 변경이 물 제거 효율에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다는 실험적 근거와도 일치한다<sup>11)</sup>.

## 3.3 O2 mass fraction distribution 분석

공기극 촉매층과 고분자 전해질 막 계면에서의 산 소 질량 분율 분포는 전극 내에서 산소 전달 효율과 관련된 중요한 성능 지표로 작용한다. 본 연구에서는 각 유로 형상에 따른 산소 농도의 변화와 반응 면적 대비 평균값을 비교하였으며 분석 결과 zigzag 유로 구조의 꺾임 각도가 증가할수록 촉매층에 분포하는 산소 농도가 증가하는 경향이 관찰되었다. 특히 Fig. 5 를 통해 입구 바로 옆에 위치한 첫 번째 under-rib 영



Fig. 4. Liquid water volume fraction at cathode catalyst layer and membrane interface (a) serpentine. Zigzag flow field turn angle (b)  $10^{\circ}$ , (c)  $20^{\circ}$ , and (d)  $30^{\circ}$ 



Fig. 5.  $O_2$  mass fraction contour at cathode catalyst layer and membrane interface (a) serpentine. Zigzag flow field turn angle (b) 10°, (c) 20°, and (d) 30°

역에서 꺾임 각도가 커질수록 산소 농도가 비약적으 로 상승한 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 3에서 분 석한 under-rib에서의 in-plane 방향 속도 증가와 밀 접한 관련이 있다. 각도가 커짐에 따라 under-rib으로 의 우회 흐름이 강화되면서 산소가 rib 아래로 더욱 깊이 퍼질 수 있게 되었고 그로 인하여 촉매층 전체 에서 산소 농도가 향상되었다. 정량적으로 분석하면 꺾임 각도가 10°일 때 0.02305, 20°일 때 0.02499, 30°일 때 0.02697로 향상되었음을 확인하였다.

## 3.4 전류밀도 분석

전류밀도 분포를 분석한 결과 zigzag 유로의 꺾임 각도가 증가함에 따라 전류밀도가 일관되게 상승하 는 경향이 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 앞선 속도, 산 소 농도, 액상 물 분포 결과와도 데이터 정합성을 보 이는데 특히 under-rib 영역에서의 물 배출이 개선되고 산소 공급이 원활해지면서 국부적으로 전기화학 반 응이 활발해진 것이 주된 원인으로 분석된다. Fig. 6 의 컨투어를 보면 zigzag 유로 구조의 꺾임 영역 부 근을 따라 in-plane 방향의 under-rib 영역에서 전류 밀도가 현저히 높아지는 양상이 나타났다. 이는 각도 가 커질수록 우회 흐름이 강화되어 산소 농도가 증 가하고 액상 물이 제거되어 전극 활성 면적이 보다 높아졌기 때문이라고 볼 수 있다.

또한 3.3절에서 언급한 산소 농도의 상승이 전극 반응을 촉진하는 주요 요인으로 작용하여 전류 생성 이 활성화되는 결과로 이어졌다. 특히 유로 형상이



Fig. 6. Current density contour at cathode catalyst layer and membrane interface (a) serpentine. Zigzag flow field turn angle (b)  $10^{\circ}$ , (c)  $20^{\circ}$ , and (d)  $30^{\circ}$ 

단순할 때 발생하기 쉬운 under-rib 영역의 반응 정체 현상이 zigzag 유로 구조를 통해 상당 부분 해소되어 촉매층과 고분자 전해질 막 계면에서의 전류 생산이 보다 고르게 이루어진 점이 주목할 만하다. 이는 Fig. 6의 under-rib 영역 반응 세기를 통해 확인할 수 있 다. 종합적으로 이러한 결과는 zigzag 유로 꺾임 각 도가 커질수록 유동 특성, 산소 전달 및 액상 물 제거 가 복합적으로 개선되었다는 앞선 결론을 통해 뒷받 침할 수 있다.

## 3.5 압력 증가량 및 net power 분석

새로운 유로 구조를 설계하여 유동을 효과적으로 분산시키기 위해서는 필연적으로 압력 상승이 동반 될 수밖에 없다. 그러나 압력 상승은 곧 이를 유지하 기 위하여 추가적인 에너지가 투입됨을 의미하므로 반응물을 충분히 분포시킴으로써 얻을 수 있는 이득 과 압력 상승에 따른 에너지 손실을 종합적으로 고 려해야 한다. 그러므로 전류밀도가 높아짐으로써 향 상된 전력 생산량과 채널 구조 복잡화로 인하여 발 생하는 압력 손실을 각각 산정하여 Table 4에서 순 전력(net power)을 비교하였다. 압력 강하로 인한 손 실 전력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$W_{para} = \Delta P \times v_{inlet} \tag{7}$$

 $v_{inlet}$ 는 cathode로 들어가는 체적 유량,  $W_g$ 는 생성 되는 전력밀도에 전체 반응 면적을 고려한 값,  $W_{para}$ 

Description	serpentine	10°	20°	30°
Pressure drop (Pa)	29.5573	31.063	37.8688	51.5173
$v_{inlet}$ (m <sup>3</sup> /s)	$1.5026 \times 10^{-6}$			
$W_g$ (W)	0.7516	0.7628	0.7803	0.7921
$W_{para}$ (W)	$4.4413 \times 10^{-5}$	$4.6675 \times 10^{-5}$	$5.6902 \times 10^{-5}$	$7.7410 \times 10^{-5}$
Net power (W)	0.7516	0.7628	0.7802	0.7920

Table 4. Parasitic loss due to pressure drop and net power density of serpentine, zigzag flow field turn angle 10°, 20°, and 30°



Fig. 7. Pressure contour at cathode channel and GDL interface (a) serpentine. Zigzag flow field turn angle (b)  $10^\circ,$  (c)  $20^\circ,$  and (d)  $30^\circ$ 

는 압력 강하로 인한 손실 전력를 의미한다.

Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 zigzag 유로 꺾임의 각도가 커질수록 필요한 압력이 점진적으로 상승하 여 에너지 손실이 발생한다. 반면 앞서 분석한 바와 같이 전류밀도 또한 크게 향상되기 때문에 실제로는 전력 생산 증가분이 압력 유지에 소모되는 에너지보 다 훨씬 더 큰 결과를 보였다. Table 4에는 이러한 분 석을 통해 도출된 구체적인 수치가 요약되어 있으며 순 전력 관점에서 zigzag 유로 구조의 꺾임 각도를 향상시키는 것의 이점이 명확하게 드러나는 것을 확 인할 수 있다. 특히 serpentine 구조와 zigzag flow field turn 30°의 차이를 비교해 보면 순 전력의 상승률이 최대 5.38% 만큼 증가하여 꺾임 각도가 커질수록 PEMFC의 성능이 더 효율적인 것을 확인하였다.

# 4. 결 론

PEMFC의 serpentine 형상의 유로는 parallel, interdigitated 형상의 유로보다 물질 전달과 액상 물 배출 에서 장점이 있다고 알려져 있다. 본 연구는 그러한 serpentine 형상이 가진 구조적 장점을 극대화시키기 위하여 zigzag 유로 형상의 유로를 도입하였고 그중 에서도 꺾이는 각도인 꺾임 부분의 영향이 성능 향 상에 핵심적인 기하학적 변수라고 판단하였다.

본 연구에서는 zigzag 유로 꺾임의 각도에 따른 유 동 속도, 물질 전달 및 액상 물 배출 성능을 비교하였 고 이를 통해 전류밀도 향상에 대한 근거를 분석하 였다. 또한 복잡한 유로 형태의 특성상 같은 양의 반 응물을 주입하기 위한 압력이 높아질 수밖에 없는데 이를 고려한 순 전력을 비교함으로써 종합적인 성능 에 대한 분석을 진행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- Zigzag 유로의 꺾임 각도가 높아짐에 따라 GDL 과 촉매층 계면에서의 through-plane 방향 속도 가 높아졌다. 이는 액상 물의 배출과 반응물의 공급을 원활하게 만들어주는 효과를 보였다.
- 2) Zigzag 유로의 꺾임 각도가 커지면서 액상 물이 효과적으로 배출되어 기존에 serpentine 구조에 서는 반응물이 도달하지 못하거나 매우 적은 양의 산소만 존재하던 영역에도 산소가 풍부하 게 도달하게 되었다. 이로 인하여 물질 전달 문 제를 해결할 수 있었고 그 결과 전류밀도가 향 상되는 결과를 보였다.
- 3) Zigzag 유로의 꺾임 각도가 커짐에 따라 같은 양의 유동을 만들어주기 위한 필요 압력이 커 졌지만 여기서 발생하는 손실 전력을 고려하더 라도 꺾임 각도가 커질수록 순 전력에서 이득 을 볼 수 있다.

# 후 기

이 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원 으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20213030030190, 연료전지 시스템의 스 마트 설계·제조·운전 오픈 플랫폼 개발).

# References

- V. Mehta and J. S. Cooper, "Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing", Journal of Power Sources, Vol. 114, No. 1, 2003, pp. 32-53, doi: https://doi.org/10.1016 /S0378-7753(02)00542-6.
- S. Shimpalee, U. Beuscher, and J. W. Van Zee, "Analysis of GDL flooding effects on PEMFC performance", Electrochimica Acta, Vol. 52, No. 24, 2007, pp. 6748-6754, doi: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.04.115.
- B. Seo, S. Oh, and H. K. Suh, "Analysis of differential pressure performance and uniformity index according to flow field design and inlet flow rate in PEMFC", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 6, 2024, pp. 763-773, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.6.763.
- 4. J. H. Lee, M. Y. Lee, H. J. Kim, S. S. Lee, and D. H. Lee, "The effect of mixing region in mixed multiple serpentine flowfield to PEMFC performance", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 20, No. 4, 2009, pp. 265-273. Retrieved from https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId= NODE10598394.
- P. Ho-Van and O. Lim, "Natural TPMS porous architectures for flow-field patterns to improve mass transport in high current density operations of proton exchange membrane fuel cells", Applied Energy, Vol. 381, 2025, pp. 125126, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125126.
- X. Yang, Q. Xiang, D. Fang, S. Sun, J. Hao, F. Xie, and Z. Shao, "Simulation and experimental investigation of a novel chainshaped flow field for proton exchange membrane fuel cell", Energy Conversion and Management, Vol. 315, 2024, pp. 118797, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118797.
- 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 Manufacturing-Green Technology, Vol. 11, 2024, pp. 145-159, doi: https://doi.org/10.1007/s40684-023-00534-3.
- C. Wang, Z. Yu, W. Liu, Y. Qiao, D. Wang, B. Cui, and H. Gao, "Performance improvement for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) with different parallel flow fields by

optimizing ribs arrangement", Energy, Vol. 322, 2025, pp. 135585, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135585.

- E. Afshari, M. Ziaei-Rad, and M. M. Dehkordi, "Numerical investigation on a novel zigzag-shaped flow channel design for cooling plates of PEM fuel cells", Journal of the Energy Institute, Vol. 90, No. 5, 2017, pp. 752-763, doi: https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.07.002.
- Z. Liao, L. Wei, A. M. Dafalla, J. Guo, F. Jiang, "Analysis of the impact of flow field arrangement on the performance of PEMFC with zigzag-shaped channels", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 181, 2021, pp. 121900, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121900.
- X. Meng, H. Ren, J. Hao, and Z. Shao, "Design and experimental research of a novel droplet flow field in proton exchange membrane fuel cell", Chemical Engineering Journal, Vol. 450, Pt. 3, 2022, pp. 138276, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138276.
- Z. Zhang, W. Liu, and Y. Wang, "Three dimensional two-phase and non-isothermal numerical simulation of multi-channels PEMFC", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 1, 2019, pp. 379-388, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.149.
- Y. Cai, D. Wu, J. Sun, and B. Chen, "The effect of cathode channel blockages on the enhanced mass transfer and performance of PEMFC", Energy, Vol. 222, 2021, pp. 119951, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119951.
- S. Um, C. Y. Wang, and K. S. Chen, "Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 147, No. 12, 2000, pp. 4485, doi: http://doi.org/10.1149/1.1394090.
- X. G. Yang, Q. Ye, and P. Cheng, "Matching of water and temperature fields in proton exchange membrane fuel cells with non-uniform distributions", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 19, 2011, pp. 12524-12537, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.014.
- N. Khajeh-Hosseini-Dalasm, M. J. Kermani, D. G. Moghaddam, and J. M. Stockie, "A parametric study of cathode catalyst layer structural parameters on the performance of a PEM fuel cell", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 6, 2010, pp. 2417-2427, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.111.
- X. Wang, Z. Ni, Z. Yang, Y. Wang, and K. Han, "Optimization of PEMFC operating parameters considering water management by an integrated method of sensitivity analysis, multi-objective optimization and evaluation", Energy Conversion and Management, Vol. 321, 2024, pp. 119057, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119057.