



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

금속 폼 압축이 고분자 전해질
연료전지의 성능에 미치는 영향

Effect of Metal Foam Compression on
Performance of Polymer Electrolyte
Membrane Fuel Cell

울산대학교 대학원

화학공학과

조성훈

금속 폼 압축이 고분자전해질
연료전지의 성능에 미치는 영향

지도교수 김 준 범

이 논문을 공학석사 학위 논문으로
제출함

2022 년 06 월

울 산 대 학 교 대 학 원

화 학 공 학 과

조 성 훈

조성훈의 공학석사 학위 논문을 인준함

심사위원장 강 성 구 (인)

심사위원 김 준 범 (인)

심사위원 오 은 석 (인)

울 산 대 학 교 대 학 원

2022 년 8 월

감사의 글

오랜 실험실 생활 동안 다른 곳에서는 배울 수 없던 값진 경험을 하였습니다. 학부 과정에서부터 석사를 마칠 때까지 제가 하고자 했던 연구를 지원해주신 김준범 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 논문 심사를 맡아 주신 오은석 교수님, 강성구 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 첫 실험실 생활부터 지금까지 옆에서 가장 힘이 되어준 준섭이 형에게 감사하고, 언제나 후배를 챙겨주고 조언과 도움으로 실험실 생활을 견뎌 나가는 것에 큰 힘이 되어준 실험실 선배님들께 또한 감사드립니다. 석사 생활 동안 실험실에서 함께 고생한 기석이 형, 한중이 형, 치형이 형, 동언이, 승우, 준석이, 준희, 현우, 경민이, 지원이, 건우, 그리고 언제나 제가 버틸 수 있게 응원해주던 애진이와 제 동기들에게도 감사한 마음을 전합니다.

마지막으로 석사 생활을 무사히 마치도록 묵묵히 옆에서 지원해주신 아버지, 어머니, 동생에게 감사의 글을 전합니다.

2022년 05월 석사 과정을 마치며,

조 성 훈

국문 요약

온실 가스를 배출하지 않는 친환경 에너지원인 여러 종류의 연료전지 중에서, 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 높은 전력 밀도와 섭씨 100도 이하의 비교적 낮은 온도에서 작동하는 이점으로 주목받고 있다. 고분자 전해질 연료전지의 구성 요소 중에서 유로 분리판은 반응 유체를 전극 면적에 효율적으로 전달해야 한다. 정형화된 기존의 채널/립 형태로 제작된 분리판은 균일하지 않은 연료 분포와 재료에 가해지는 기계적 압력 차이의 단점이 제시되어 왔으며, 이를 극복하고 최적의 반응물 분배 장치를 찾으려는 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 금속 폼은 연료전지에 적용되었을 때, 균일한 연료 분포가 가능하고 가볍다는 장점 때문에 기존 연료전지 분리판의 대체제로 주목받는다.

금속 폼은 다양한 두께로 제작되며 연료전지의 스택 적용성을 고려할 때, 1 mm 이하의 얇은 두께로 연료전지에 적용해야 한다. 단, 대부분의 연구에서 금속 폼 압축이 연료전지의 성능에 미치는 영향을 고려하지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 금속 폼 압축 비율이 성능에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다. 높은 압축 비율의 금속 폼은 물질 전달 저항을 크게 감소시켜, 고전류밀도에서의 전압 손실을 최소화할 수 있었다. 또한 금속 폼의 형상에 의해 내부 유로에 걸리는 가스 압력의 영향을 분석하였다. 가압 조건의 사형 구조는 중전류밀도까지는 전압 손실이 금속 폼과 큰 차이가 없이 낮았으나, 유로 형상의 한계로 인해 고전류밀도에서는 가압 하에서도 전압 손실이 컸다. 전산 유체해석을 통하여 유로 입자의 시간에 따른 위치 추적을 수행하였다. 기존 사형 구조에 비해 구리 폼의 물질 전달 저항이 더 낮았으며, 입자의 50%가 탈출하는데 걸리는 시간이 구리 폼에서 62% 더 빨랐다.

Abstract

Among several types of fuel cells that do not emit greenhouse gas, polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) has attracted attention because it has high power density and operates at relatively low temperature of 100 °C or less. The flow distributor should transfer efficiently the reaction fluid to electrode region of fuel cell. Conventional bipolar plate manufactured in the form of ‘channels/lip’ design have disadvantages such as non-uniform fuel distribution and mechanical pressure difference. Therefore, numerous research has conducted to find optimal reactant distribution devices. Metal foam has drawn attention as a replacement for conventional fuel cell flow distributor because of possible uniform fuel distribution and light weight when applied to fuel cell.

The metal foam could be manufactured in various thicknesses but should be applied with thin thickness of 1 mm or less in consideration of fuel cell stack applicability. However, most studies do not consider the effect of metal foam compression on fuel cell performance. Therefore, the effect of metal foam compression ratio on fuel cell performance was conducted in this experiment. Mass transfer resistance was reduced significantly, and voltage loss was minimized in high current density region with high compression ratio metal foam. In addition, the effect of applied gas pressure on internal flow path with conventional serpentine flow field was analyzed. The voltage loss of pressurized serpentine flow field was small in medium current density, but it was increased in high current density region due to the limit of flow pattern shape. The location of air particles tracking over time was conducted with computational fluid dynamics. The mass transfer resistance of copper foam was lower than that of conventional serpentine structure, and it took 62% faster time to escape 50% air particles with copper foam.

목 차

감사의 글

국문요약

Abstract

목차

그림 목차

표 목차

1. 서론	1
1.1. 연료전지의 필요성	1
1.2. 고분자전해질 연료전지의 구조 및 한계	1
1.3. 금속 폼의 적용	5
2. 실험	8
2.1. 연료전지 제작 및 평가 방법	8
2.2. 구리 폼의 압축 및 평가 방법	12
2.3. CFD 해석을 위한 해석 도메인 제작	17
3. 실험결과	21
3.1. 금속 폼 압축에 대한 성능 변화	21
3.1.1. 금속 폼의 애노드 및 캐소드 적용 비교	21
3.1.2. 연료전지 분극 곡선 비교	23
3.2. 반응물 분배 장치에 걸리는 압력의 영향	27

3.2.1. 반응물 분배 장치의 압력 손실	27
3.2.2. 사형 구조의 가압과 구리 폼과의 비교	29
3.3. 반응물 분배 장치의 전산 해석	34
3.3.1. 구리 폼 압축에 대한 해석 매개변수 적용	34
3.3.2. 유로 형태에 대한 입자 체류 시간 분석	37
4. 결론	40
5. 참고문헌	42

그림 목차

- Figure 1. Schematic of a PEMFC and stack components.
- Figure 2. Two types of flow distributors in PEMFC. (a) Conventional serpentine and (b) copper foam.
- Figure 3. Flow chart of fuel cell test.
- Figure 4. The schematic diagram for copper foam pressing method.
- Figure 5. Pore size diameter of compressed copper foam measured with MIP.
- Figure 6. SEM images of each copper foam sample. Top view of (a) S1(0.8 to 0.5 mm), (b) S2(1.6 to 0.5 mm) and (c) S3(3.2 to 0.5 mm). Cross-sectional view of (d) S1(0.8 to 0.5 mm), (e) S2(1.6 to 0.5 mm) and (f) S3(3.2 to 0.5 mm).
- Figure 7. Computational domain and mesh images of CFD. (a) 5 channel serpentine design and (b) copper foam with 0.5 mm thickness.
- Figure 8. Polarization curve with copper foam.
- Figure 9. Fuel cell performance with copper foam at different compression ratio and serpentine design.
- Figure 10. Nyquist plot of copper foam with different compressed ratio. (a) 5A condition and (b) 30A condition.
- Figure 11. Pressure drops versus cathode inlet gas velocity.
- Figure 12. Cell performance of S3(3.2 mm) copper foam and serpentine design.
- Figure 13. Effects of applied additional pressure by BPR on fuel cell resistance. (a) Nyquist plot for 5A, (b) 30A condition and (c) differences on charge transfer resistance and ohmic resistance for each sample at 30A condition.
- Figure 14. Pressure distribution of each copper foam cases analyzed with CFD.
- Figure 15. Fuel cell performance difference with polarization curve. Effect of (a) foam compression and (b) flow distributor.
- Figure 16. Air particle track at specified time for two different fuel cell flow distributors. (a) 5 channel serpentine and (b) copper metal foam.
- Figure 17. The time needed to escape 50% of air particles in flow field.

표 목 차

Table 1. Standard condition of unit cell evaluation.

Table 2. Physical property of compressed foam.

Table 3. Physical value of each sample at operating temperature.

Table 4. The pressure difference between experiment and analysis.

1. 서론

1.1. 연료전지의 필요성

산업 혁명 이래, 인류의 에너지 사용량이 폭발적으로 증가하는 과정에서 배출된 이산화탄소 등과 같은 온실가스로 인하여 지구의 온도가 지속적으로 증가하고 있다. 견잡을 수 없는 기후 변화가 시작되는 시점을 의미하는 이른바 티핑 포인트(tipping point)의 도달을 막기 위하여 전세계적으로 온실가스 배출을 줄이고 친환경적인 에너지를 사용하려는 추세가 증가하고 있다. 기존의 주된 에너지원인 화석 연료를 사용한 내연기관은 매우 까다로운 환경 규제를 극복하는 과정에서 경쟁력을 잃고 있기 때문에, 그 대체제로 화석 연료를 사용하지 않는 신 에너지원이 고려되고 있다.

그 중에서도 수소 연료전지는 우주 상에서 가장 풍부한 원소인 수소를 반응 연료로 이용하여 산소와의 전기화학반응을 통하여 전기를 생산한다. 동작 중에 배출하는 오염원이 없고 전력 밀도가 높은 특성으로 인해 신 에너지 동력원으로 주목받고 있다. 많은 연료전지 중에서 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 섭씨 100도 이하의 비교적 낮은 온도에서 작동이 이루어지며, 전력 밀도 또한 높아 연료전지 중 가장 주목받고 있다[1].

1.2. 고분자 전해질 연료전지의 구조 및 한계

연료전지는 오랜 연구를 통하여 **Figure 1**에 표현된 형태의 가장 기초적인 구조가 확립되었다[2]. 그림에 표현된 바와 같이 하나의 단위 셀은 막전극접합체(Membrane Electrode Assembly, MEA), 기체확산층(Gas Diffusion Layer, GDL), 분리판(bipolar plate), 집전체(current collector)와 가스켓 등의 다양한 부품으로 이루어져 있다. 보다 높은 전력을 얻기 위해 앞서 언급한 단위 셀(unit cell)을 직렬로 연결한 스택(stack)의 형태로 제작된다. 고분자 전해질 연료전지에서는 상온의 수소와 산소(공기)를 사용하며 반응

면적에 효율적으로 기체를 전달하기 위해서 유체가 흐르는 분리판에 음각을 형성한다[3-6]. 음각으로 인해 유체가 흐르는 공간은 채널(channel)으로 불리며, 채널을 구분하는 분리판의 고체 벽면은 립(rib)으로 불린다. 이와 같은 채널/립 설계는 보편화된 분리판의 구조로서 연구되어 왔다. Heidary[7]는 채널 내부에 부분적인 블록을 형성하여 반응물의 over-rib convection을 향상시키고자 하였는데, 사용한 방법은 열 교환기의 열 전달 효율을 향상시키기 위한 방법으로 열 전달과 물질 전달의 상사성에 기인하여 해당 형상을 연료전지에 적용하였다. Han[8]은 유로의 형태를 파도 형태로 제작하여 촉매층으로의 반응물 확산을 증가시켰다고 보고하였다. Rahimi-Esbo[9]는 최적의 채널과 립 비율을 찾기 위해 사형 유로의 채널과 립 개수를 변경시켜 전산 해석을 수행하였다. Alizadeh[10]도 유사하게 채널의 수가 점차적으로 변화하는 cascade 타입의 사형 유로가 반응물 거동에 미치는 영향을 알아보려고 전산 해석을 수행하였다. Ghasabehi[11]는 평행 유로의 입구와 출구 매니폴드(manifold) 설계를 변경하였으며, 그 영향을 전산 해석으로 분석하여 전통적인 평행 유로보다 tapered 형태로 폭이 좁아지는 매니폴드로 설계하였을 때 더 높은 전력을 보였으며 차압이 감소하였다고 보고하였다. Azarafza[12]는 사형, 평행, 인터디지테이트, 블록, 금속 폼의 유로 형태를 전산 유체 역학의 유동장으로 설계하여 유로의 형상이 미치는 영향을 분석하였다. Atyabi[13]는 캐소드 유로에 벌집(honeycomb) 모양의 육각형 배플을 설계하였으며, 전산 유체 역학을 통하여 전통 구조보다 더욱 균일한 반응물 분포가 가능하다고 언급하였다. 이 외에도 전통적인 채널/립 유로의 설계를 일부 변경하여 그 영향을 분석한 연구가 계속적으로 수행되고 있다[14-16].

다만, 채널/립 설계의 본질적인 문제점으로 지적되는 부분인 립의 기체확산층에 가해지는 불균일한 압력으로, 변형이 일어난 기체확산층 부분에서 물질전달이 원활하지 않고 국부 지역에 물이 응축될 수 있어 반응 유체의 물질전달을 방해하고 기체확산층 재료의 기계적 내구성을 낮춘다. 또한 립이 차지하는 면적이 클수록 반응물 공급 효율이 감소하고 및 열 전달이 불균일해지며, 이는 높은 전류밀도 영역에서 연료전지의

내구성을 감소시키는데 큰 영향을 끼친다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 반응물 분배를 위한 장치(flow distributor)로서 채널/립 설계를 open cell 형태의 금속 폼으로 대체하려는 연구가 최근 활발히 진행 중이다.

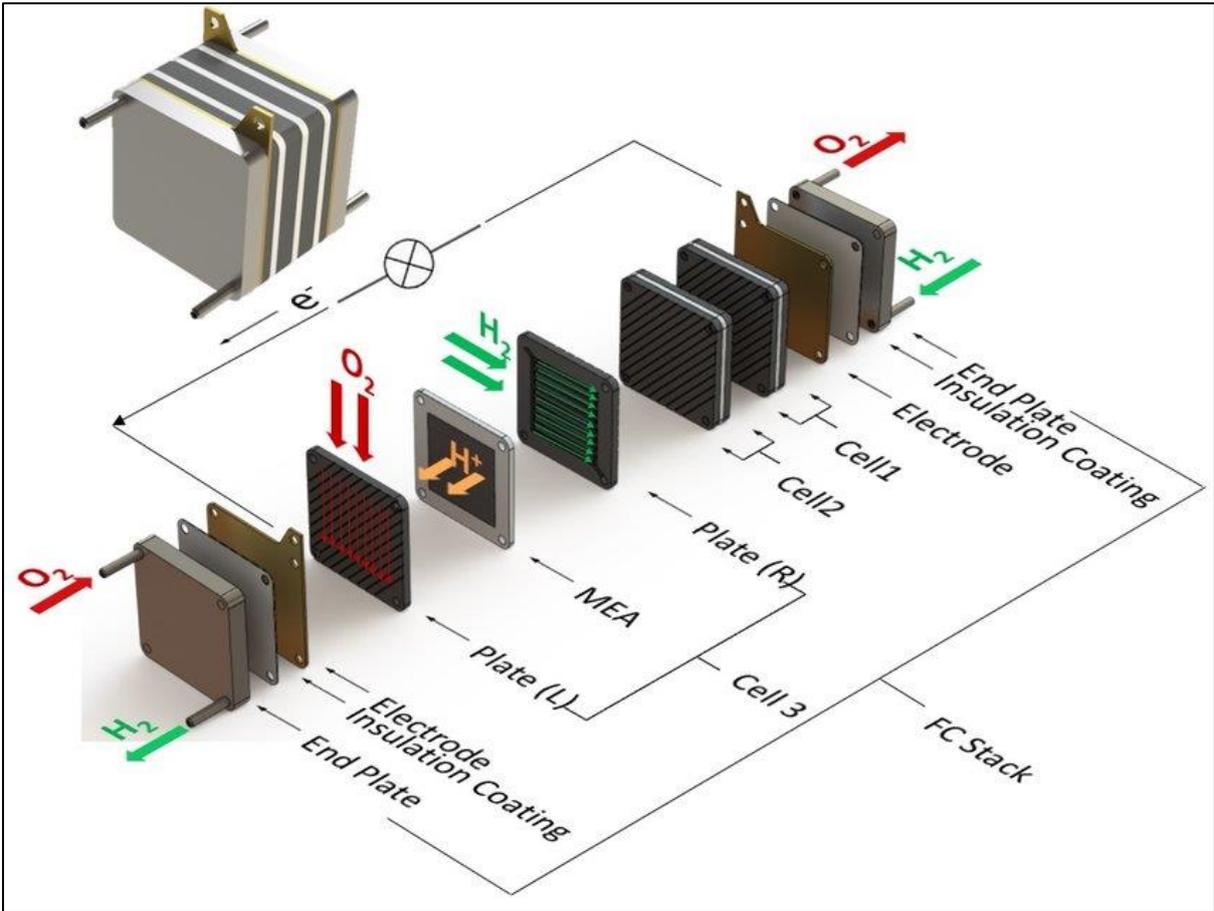


Figure 1. Schematic of a PEMFC and stack components[2].

1.3. 금속 폼의 적용

금속 폼은 높은 기공율(porosity)과 전기전도도, 기존의 그래파이트나 스테인리스 스틸보다 가벼운 무게로 연료전지의 반응물 분배를 위한 장치로서 매우 적절한 대체제로 고려된다. **Figure 2**에 전통적인 유리 형상 중 하나인 사형 구조와 그 대체제인 금속 폼의 형상을 표현하였다. 금속 폼은 재료의 특성 상, 연료전지의 높은 산성 운전 환경에 오래 노출될 경우 부식으로 인한 내구성 하락이 주요 문제점으로 지적되는데, 다양한 물질을 코팅하여 내부식성을 높이고자 한 연구가 진행되고 있다[17,18]. 또한 금속 폼이 연료전지 반응물 분배 장치로 고려되면서, 금속 폼의 기공율과 기공 크기, 금속 재료 등에 대한 영향을 비교한 연구가 수행되었다. Yuan[19]은 제작 방법에 따른 다공성 금속 폼의 재료를 리뷰하였으며, Tseng[20, 21]은 금속 폼의 코팅과 작동 조건(온도, 습도, 양론 비율 등)에 대한 연구를 수행하였다. Hossain[22]은 open-cathode에 금속 폼을 적용한 연구를 수행하였으며, Brett[23]은 채널/립과 금속 폼을 함께 사용한 하이브리드 설계를 수행하였으며 적용된 금속 폼의 물리적 특성을 X-ray CT 방법으로 확인하였다. Tan[24]은 금속 폼의 연료 전지 적용에 대한 전반적인 리뷰를 수행하였고, Kim[25]은 대면적의 스택에 금속 폼을 적용하여 이에 대한 성능과 저항 값을 분석하였다. 이 외에도 연료전지의 반응물 분배 장치로 금속 폼을 사용하여 기공 크기 및 밀도 등의 물리적 특성을 최적화하고 내부 거동을 분석하기 위하여 전산 유체 해석이나 중성자 사진법을 적용한 연구가 수행되었다[26-29].

많은 연구에서 연료전지의 반응물 분배 장치로 사용된 금속 폼은 0.5~1.0 mm 정도의 두께로 압축하여 사용한다. 대부분의 공간이 비어 있는 금속 폼은 구조를 지탱하는 지주(strut)가 형태를 보존하는 역할을 한다. 압축을 통하여 금속 폼의 두께가 변경될 때, 내부 구조가 변형되며 기계적 손상이 일어나며[30-34], 기공의 크기가 변하고 내부 공간이 줄어들게 된다. 다만, 대부분의 연구에서 금속 폼의 사용을 위한 압축은 크게

고려하지 않았으며 그에 따른 성능에 대한 영향도 구체적으로 나타내지 않았다. 따라서 본 연구에서는 연료전지의 기존 분리판을 대체하는 금속 폼을 기계적으로 압축할 때, 압축의 비율이 연료전지의 성능에 미치는 영향을 알아보려고 수행되었다. 또한 전산 해석 소프트웨어를 활용하여 금속 폼의 다공 특성을 나타내는 파라미터를 통하여 실험으로는 확인할 수 없는 연료의 내부 유동을 분석하였다.

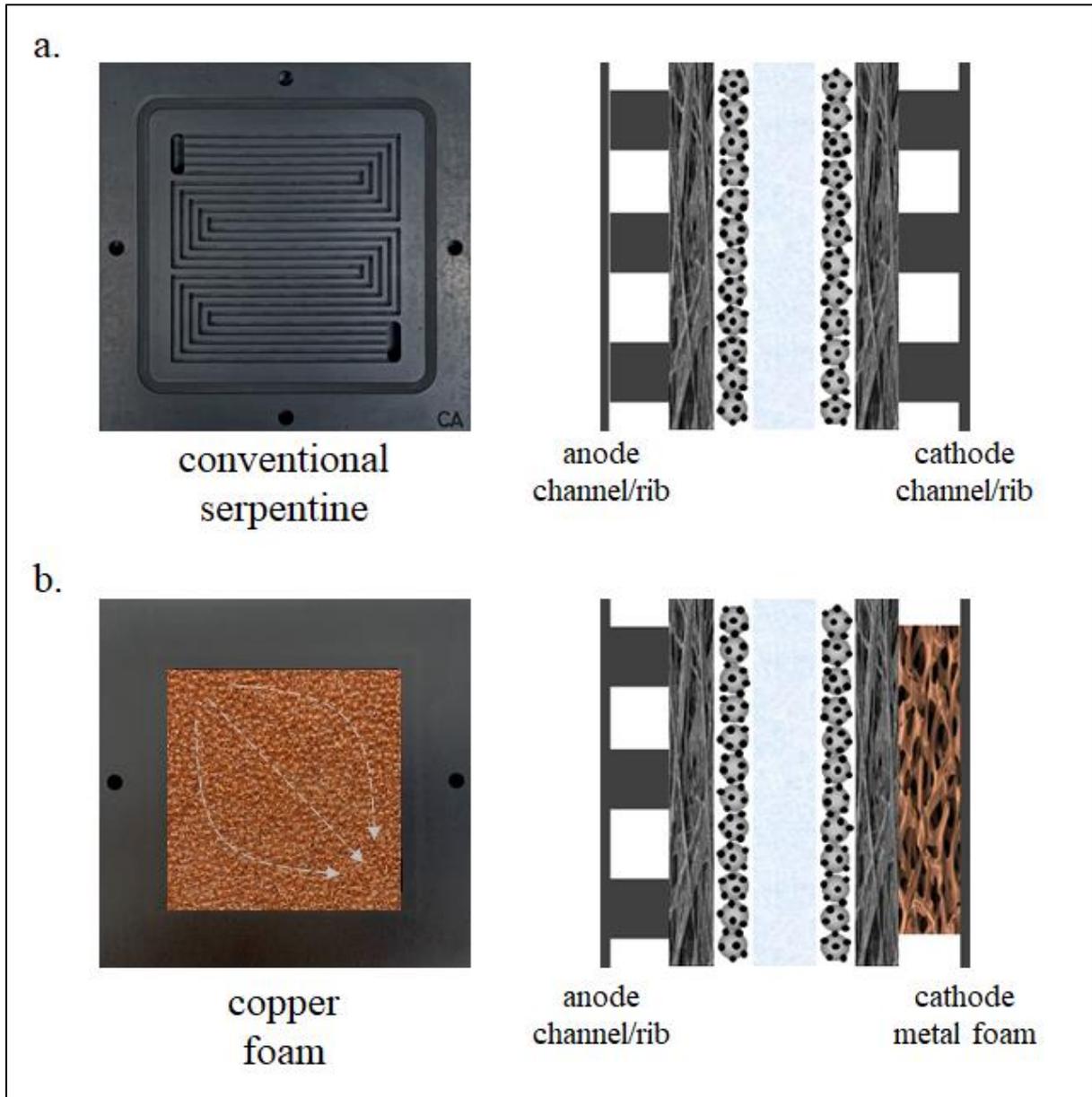


Figure 2. Two types of flow distributors in PEMFC. (a) Conventional serpentine and (b) copper foam.

2. 실험

2.1. 연료전지 제작 및 평가 방법

Gore 전해질 막을 사용하는 25 cm² 면적의 상용 MEA를 사용하여 단위 연료전지의 실험을 진행하였다. 반응물 분배 장치로 사용된 채널/립 설계 방식의 분리판은 다섯 채널의 유로를 갖는 사형 구조를 사용하였으며, 금속 폼은 E&COA의 구리 폼을 사용하였으며, 각각 0.8 mm, 1.6 mm의 두께를 갖고, 450 um의 셀 크기를 갖는다. **Table 1**에 연료전지 부품의 세부 내용을 포함하였다.

연료전지 실험을 위한 평가 시스템은 일련의 부품으로 구성된다. 가습기(bubble-type humidifier, CNL)를 통하여 반응 연료인 공기와 산소를 일정한 온도와 습도로 제어하며, 반응 연료의 유량을 제어하는 유량제어기(MFC, Kofloc)와 연료전지의 전류와 전압을 제어하는 전자부하기(electronic load, Prodigit)를 사용하였다. 계측 장비인 USB-6221(National Instruments)를 사용하여 모든 장비의 신호를 PC와 통신하여 제어하였으며, 계측 제어 프로그램인 LabVIEW(National Instruments)를 통하여 연료전지 활성화, 분극 곡선 측정과 같은 일련의 측정 프로토콜을 자동적으로 수행하였다.

단위전지 성능 측정을 위한 실험 과정은 **Figure 3**에 나타낸 것과 같이, 먼저 막전극접합체와 가스켓 등의 부품을 포함한 단위 셀을 조립한 뒤, 80 kgf.cm의 토크로 볼트와 너트를 체결하였다. 이후 앞서 언급한 평가 시스템에 연결하여 연료전지 활성화 과정(activation)을 30번의 사이클 동안 수행하였다. 각 사이클은 5분 주기로, 개회로전압(Open Circuit Voltage, OCV) → 0.4 V → OCV의 전압 사이클을 통하여 평가하고자 하는 연료전지가 충분한 습도를 유지하도록 하였다. 이후 IV-curve로 불리는 분극 곡선을 통하여 각 전류 밀도 영역에서 실험군의 전체적인 성능을 확인하였다. 이후, 두 가지 전기화학 분석 방법인 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)와 순환전압전류법(Cyclic Voltammetry, CV)을 WonATech의 GWPG 100HP로

수행하였다. 임피던스 분광법은 EIS는 0.1 Hz ~ 10 KHz 사이의 주파수 범위에서 5, 30A의 전류 조건에서 임피던스를 측정하였다. 순환전압전류법은 음극과 양극에 각각 수소와 불활성 기체인 질소를 100, 500 mL/min 공급하여 50 mV/s의 scan rate으로 전극 표면의 촉매에 대한 활성 면적을 측정하였다.

Table 1. Standard condition of unit cell evaluation.

Unit cell specification and test condition	Value
Unit cell	CNL cell
Active area(cm²)	25
Membrane	Gore
GDL	39BB
Pt loading of anode / cathode (mg/cm²)	0.4 / 0.4
Flow field	Serpentine Copper foam
Tightening torque (kg_rcm)	60
Temperature (°C)	65
Stoichiometry of Hydrogen	1.5
Stoichiometry of Air	2
Relative humidity of H₂ / Air (%)	85 / 85

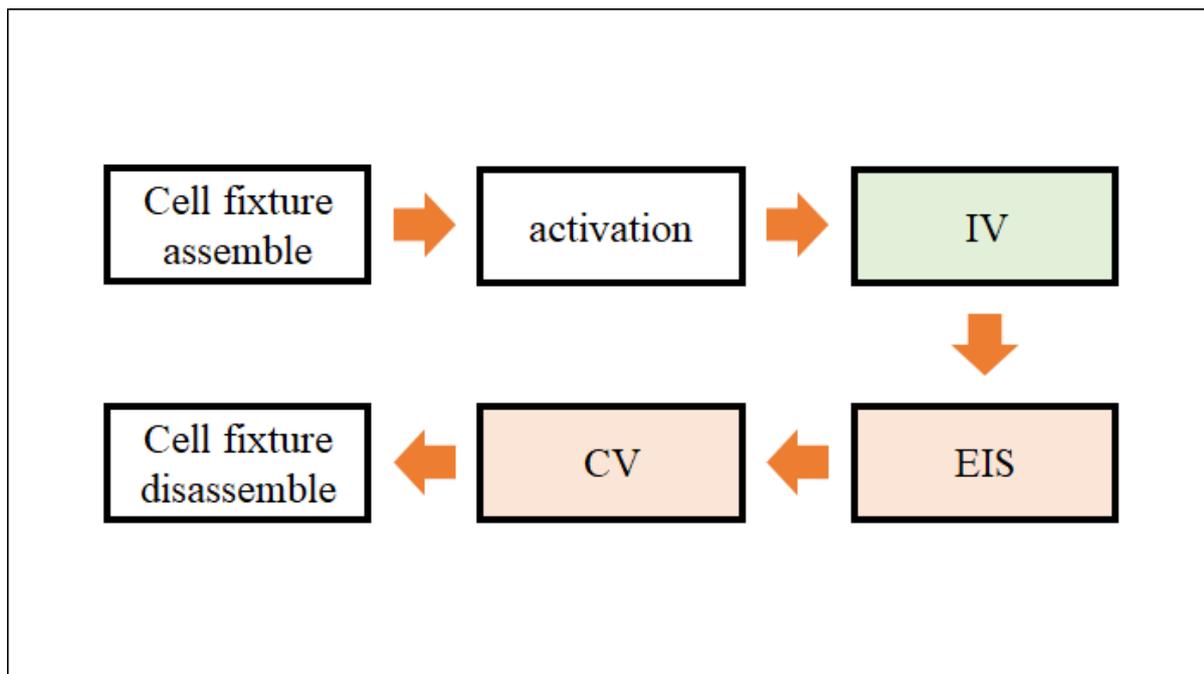


Figure 3. Flow chart of fuel cell test.

2.2. 금속 폼 압축 및 평가 방법

실험에 사용된 금속 폼은 E&COA사의 구리 폼으로 각각 0.8 mm, 1.6 mm의 두께를 갖고, 450 μm 의 셀 크기를 갖는다. 연료전지 적용을 위해 금속 폼을 0.5 mm의 일정한 두께로 압축하고자 프레스 머신을 사용하였다. **Figure 4**에 나타낸 것처럼, 0.8 mm와 1.6 mm의 두께를 갖는 구리 폼을 각각 실험군으로 사용하며, 1.6 mm 구리 폼을 두 번 겹쳐 3.2 mm의 실험군을 추가하였다. 따라서 0.8, 1.6, 3.2 mm의 총 세 가지 실험군의 구리 폼을 5 MPa의 압력으로 상온에서 1분 동안 압착하여 모두 일정한 0.5 mm의 두께로 제작하였다. 낮은 두께부터 각각의 시료를 S1, S2, S3로 표현하였다.

압축된 구리 폼의 기공 크기 변화를 분석하기 위해 두 가지 방법을 수행하였다. 첫 번째로 시료의 전체적인 기공률을 확인하기 위해 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)를 사용하여 각 시료에 대한 정량적 기공 크기와 기공율을 측정하였다. 수은압입법을 통하여 얻은 데이터를 **Figure 5**와 **Table 2**에 나타내었다. 표는 압축의 영향을 비교할 수 있는 물리적 특성인 압축 비율과 기공률, 기공 크기 및 단위 질량 당 부피를 포함한다. 압축 전의 시료 두께가 두꺼울수록 압축 비율이 증가하며, 그에 따라 내부의 빈 공간을 의미하는 기공률이 감소하였다. 또한 구리 폼 내부의 기공 크기는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 통하여 압축된 구리 폼의 정면과 단면을 촬영하여 압축으로 인한 기공의 변화를 확인하였으며 **Figure 6**에 촬영 사진을 나타내었다.

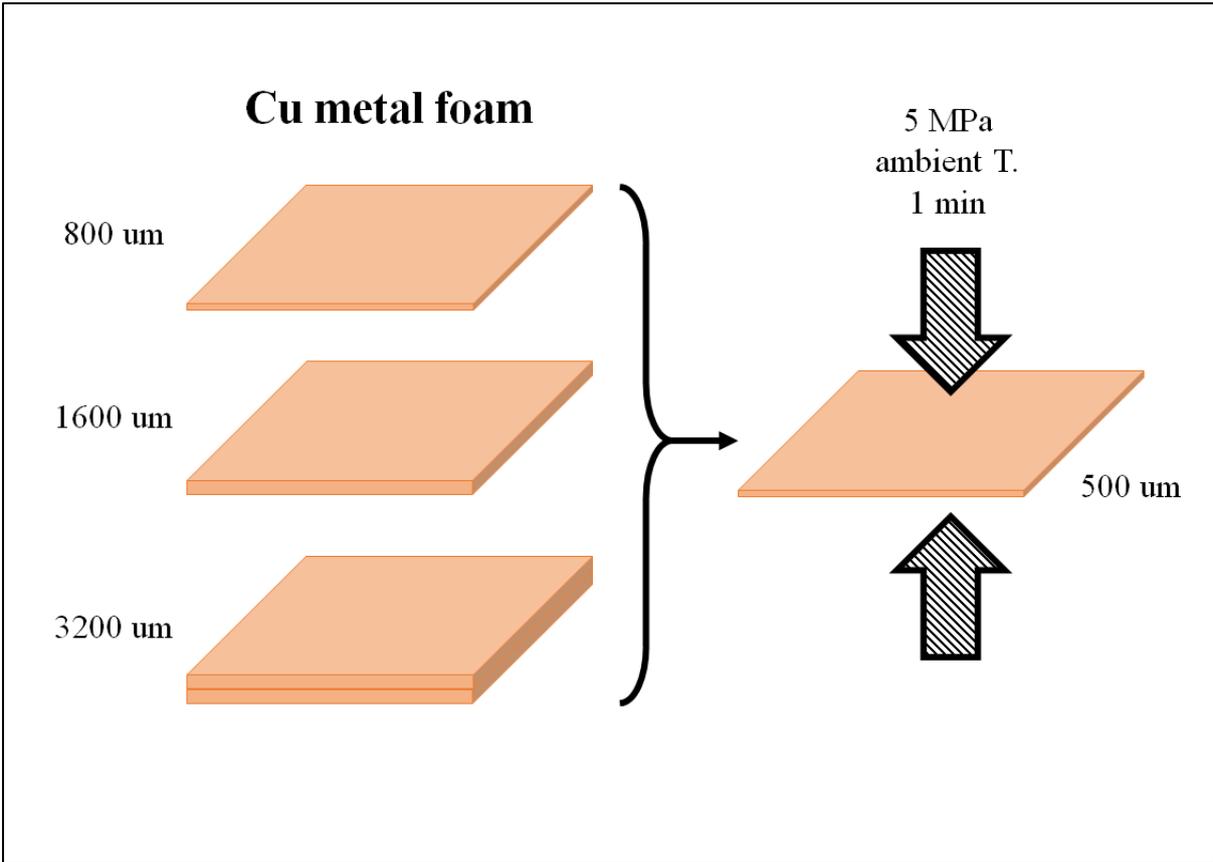


Figure 4. The schematic diagram for copper foam pressing method.

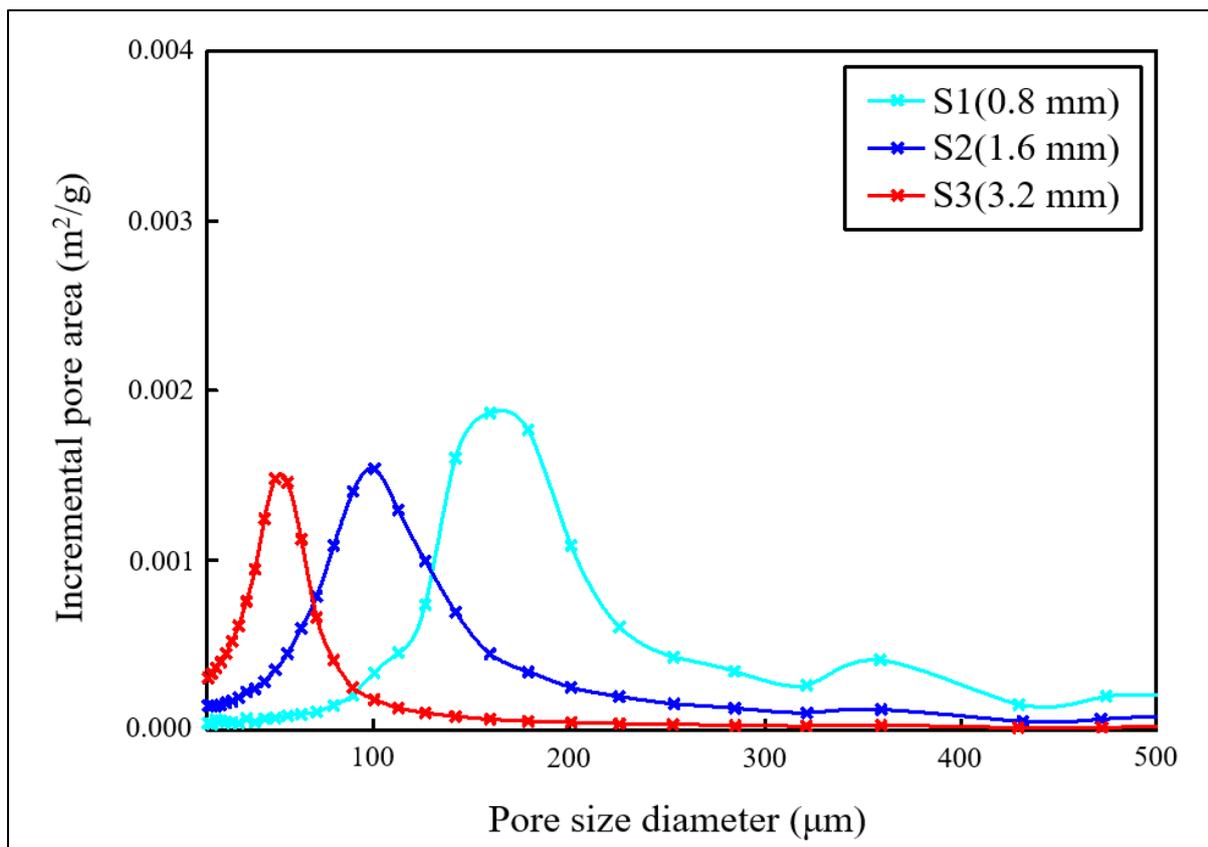


Figure 5. Pore size diameter of compressed copper foam measured with MIP.

Table 2. Physical property of compressed foam.

S#(Thickness)	C.R. (%)	Porosity (%)	Pore size (μm)	Volume (mL/g)
S1(0.8 mm)	37.50	78.12	74.6	0.6301
S2(1.6 mm)	68.75	72.75	59.5	0.4110
S3(3.2 mm)	84.38	58.07	23.6	0.1980

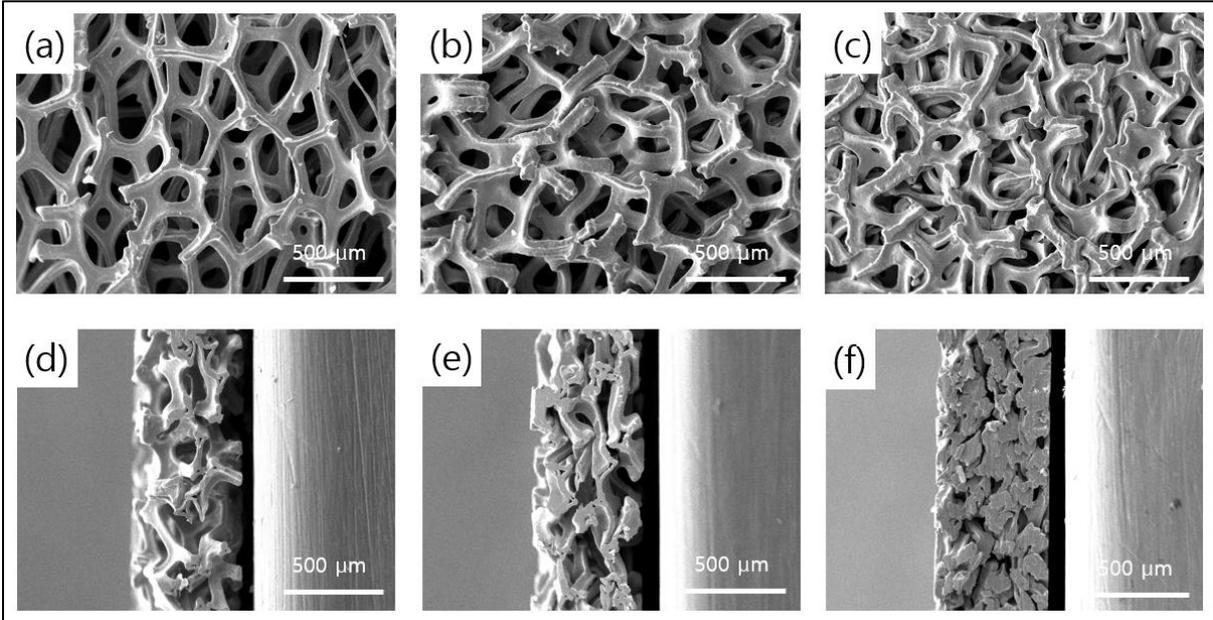


Figure 6. SEM images of each copper foam sample. Top view of (a) S1(0.8 to 0.5 mm), (b) S2(1.6 to 0.5 mm) and (c) S3(3.2 to 0.5 mm). Cross-sectional view of (d) S1(0.8 to 0.5 mm), (e) S2(1.6 to 0.5 mm) and (f) S3(3.2 to 0.5 mm).

2.3. CFD 해석을 위한 해석 도메인 제작

연료전지의 내부 유동을 시각적으로 분석하기 위하여 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)를 사용하여 연료전지 내부 유동장을 설계하고 유체의 흐름을 계산하였다. 5 채널의 사형 구조와 구리 폼 유동장이 해석 도메인으로 설정하였다. 시간에 따른 유체의 이동 경로를 추적하기 위하여, 전산 해석은 과도 상태 해석(transient-state), 층류 흐름(laminar flow), 비압축성 유동(incompressible flow) 조건에서 수행되었으며 열 전달과 중력은 고려하지 않았다. 반복 계산에서의 오차(residual)가 10^{-4} 이하일 때, 각 time-step에서 해석이 수렴되었다고 판단하도록 설정하였다. 해석의 수렴성을 증가시키기 위한 밀도의 감속완화계수를 0.8로 설정하였다. 유동 계산을 위한 유체는 공기로 설정하였으며, 이론적으로 2000 mA/cm^2 의 전류밀도를 출력할 수 있는 유량에 2배의 양론 비율을 적용한 유량을 유동장 입구에 경계 조건으로 입력하였다.

Figure 7에 유동 해석을 위한 도메인 형상을 표현하였다. **Figure 7(a)**는 5 채널의 사형 구조이고, **Figure 7(b)**는 0.5 mm 두께의 금속 폼을 위한 형상이다. 두 도메인 모두 경계층 해석을 위해 벽면에 3개의 격자 층을 적용하였다. 금속 폼은 원활한 해석을 위해 실제 구조를 표현하지 않고, 다공성 매질을 표현하는 매개변수인 점성 저항(viscous resistance), 관성 저항(inertial resistance)을 식 1과 같이 실험적으로 구하여 해석에 적용하여 금속 폼을 모사하였다.

$$\Delta P = \left(C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n \right) v^2 + \left(\frac{\mu}{\alpha} \Delta n \right) v \quad (\text{식 1})$$

식 1에서 ΔP 는 다공성 매질을 통과하는 입구와 출구 압력의 차이(Pa)이며, v 는 유체의 유속(m/s)이다. 2차 다항식의 각 계수항을 살펴보면, 2차항 계수 $\left(C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n \right)$ 에서 C_2 는 관성 저항(1/m)이며 ρ 는 유체의 밀도(kg/m^3), Δn 은 다공성 매질의 두께(m)이다. 1차항 계수

$(\frac{\mu}{\alpha} \Delta n)$ 에서 $\frac{1}{\alpha}$ 은 점성 저항($1/m^2$)이며 μ 는 유체의 점성 계수(Pa.s)이다. 매개변수를 계산하기 위하여 구리 폼을 연료전지 단위 셀에 적용하고 유속을 늘려가며 입구와 출구에 설치된 디지털 압력 측정계로 차압을 계산하였다. 유체의 물리량은 연료전지 운전 온도인 65 °C에 해당하는 값을 적용하였으며, 다공성 매질의 두께는 가로와 세로가 50 mm인 정사각형 형태의 구리폼의 대각선 길이인 70.7 mm로 계산되었다. 압축을 통한 해석 매개변수를 계산하였으며 각 시료에 대한 매개변수 값을 **Table 3**에 나타내었다.

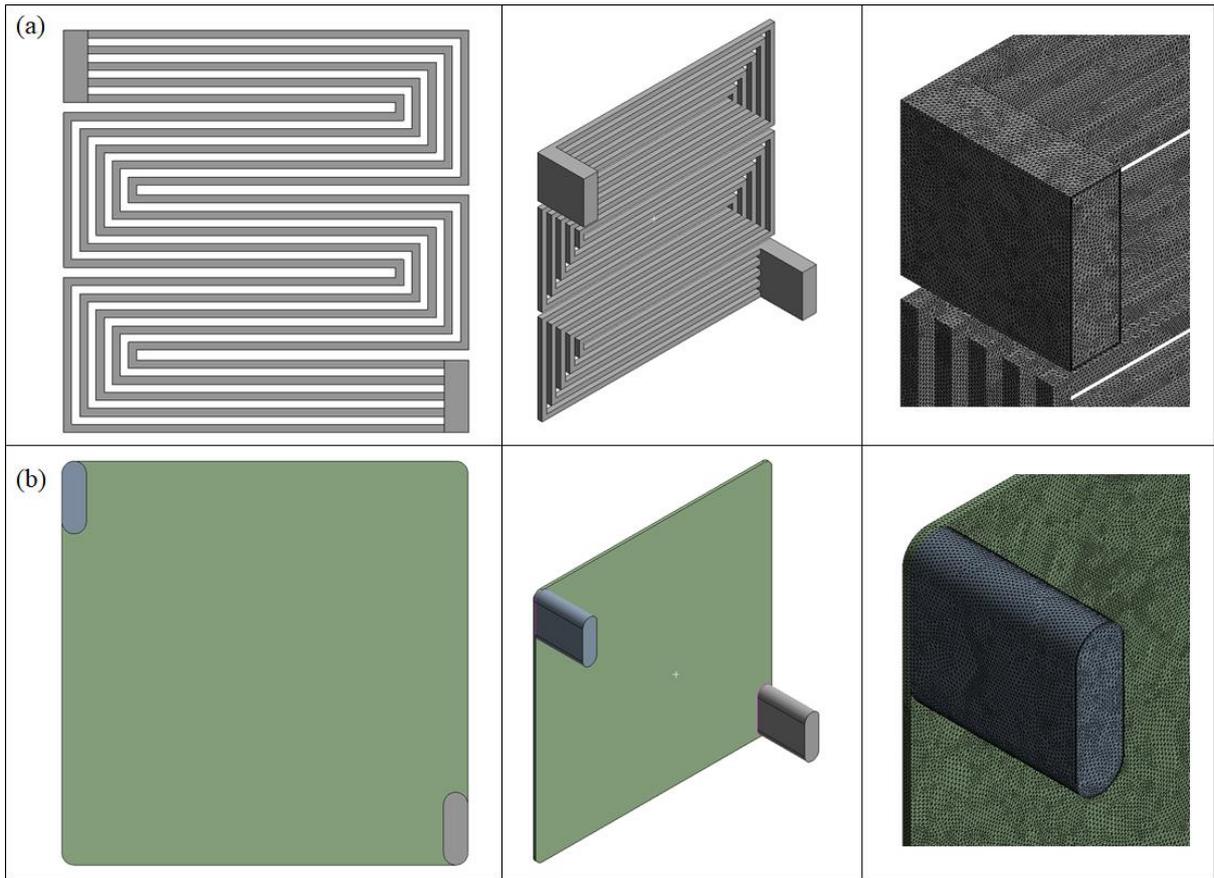


Figure 7. Computational domain and mesh images of CFD. (a) 5 channel serpentine design and (b) copper foam with 0.5 mm thickness.

Table 3. Physical value of each sample at operating temperature.

S#(Thickness)	Inertial resistance C_2 $\times 10^{-4}$ (1/m)	Viscous resistance $\frac{1}{\alpha}$ $\times 10^{-10}$ (1/m ²)	Air density at 65 °C (kg/m ³)	Air viscous coefficient at 65 °C $\times 10^5$ (Pa.s)
S1(0.8 mm)	1.56	0.248		
S2(1.6 mm)	0.642	1.15	0.95	2.06
S3(3.2 mm)	6.88	3.46		

3. 결과 및 고찰

3.1. 금속 폼 압축에 대한 성능 변화

3.1.1. 금속 폼의 애노드 및 캐소드 적용 비교

금속 폼 압축의 영향을 비교하기 전에, 금속 폼이 각각 애노드와 캐소드에 적용되었을 때의 분극 곡선을 비교하였다. **Figure 8** 에 나타낸 것과 같이, 캐소드에 구리 폼을 적용하였을 때와 애노드에 구리 폼을 적용하였을 때, 920 mA/cm^2 이상의 고전류밀도 영역부터 전압 프로파일의 차이를 보였다. 애노드 적용 시료는 전류밀도가 증가할수록 전압의 손실이 지속적으로 감소하여 최종적으로 1480 mA/cm^2 에서 0.3 V 의 전압이 측정된 반면, 캐소드 적용 시료는 920 mA/cm^2 까지는 애노드 적용 시료의 데이터와 거의 동일한 성능을 보이다가, 그 이상의 전류밀도부터 전압의 손실이 줄어 최종적으로 1800 mA/cm^2 에서 0.3 V 의 전압이 측정되었다. 연료전지의 고전류밀도 영역에서의 지배적 손실 영향은 반응물의 물질 전달 속도가 연료전지의 전기 화학 반응 속도를 따라가지 못해 일어나는데, 앞선 결과를 통하여 애노드의 수소 물질 전달 속도보다 캐소드의 공기(산소) 물질 전달 속도가 더욱 중요한 변수로써 작용함을 확인할 수 있다. 따라서 동일한 연료전지에서 효율적으로 전류를 얻기 위해서는 애노드의 수소 물질 전달보다 캐소드 방향에서 공기의 물질 전달 속도를 증가시키는 것이 더욱 중요하기에 본 연구에서는 모든 구리 폼을 캐소드 유로로 적용하여 그 영향을 비교하였다.

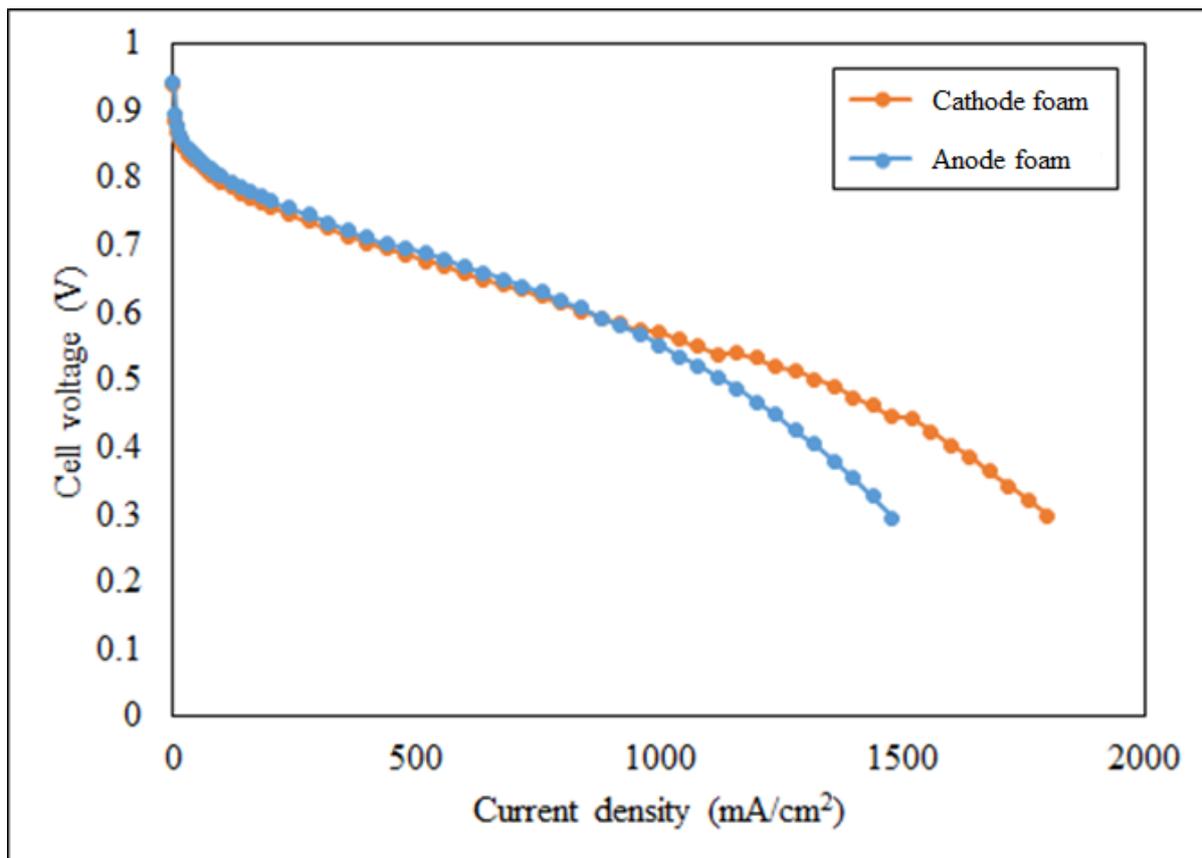


Figure 8. Polarization curve with copper foam.

3.1.2. 연료전지 분극 곡선 비교

구리 폼 압축에 대한 각 시료와 비교군으로 선택한 사형 구조(캐소드에 적용)의 분극 곡선을 **Figure 9**에 나타내었다. 모든 분극 곡선은 정전류 운전(galvanostatic mode)으로 수행되었으며 해당 전류밀도를 출력하는데 필요한 양론 유량의 실험 배수(애노드 1.5, 캐소드 2.0)만큼 반응 유체를 공급한 상태에서 측정하였다. 약 200 mA/cm^2 의 낮은 전류밀도 조건까지는 모두 동일한 전압 프로필을 보였다. 전류밀도가 높아질수록 사형 구조를 적용한 연료전지는 구리 폼을 적용한 연료전지보다 더 높은 전압 손실을 보이며 한계 조건인 셀 전압 0.4 V 에 도달하였을 때 전류밀도는 1200 mA/cm^2 에 미치지 못하였다. 구리 폼을 적용한 연료전지의 전압 프로필은 사형 구조의 분극 곡선과 달리, 고전류밀도 영역에서 물질 전달 저항(mass transfer resistance)로 인한 급격한 전압 손실이 보이지 않았다. S1은 구리 폼 시료 중에서 가장 낮은 성능을 보였는데, S2와 S3의 전압 프로필과 비교하였을 때 중전류밀도 영역의 오믹 저항(ohmic resistance)으로 인하여 저전류밀도-중전류밀도 영역을 잇는 그래프의 기울기가 S2와 S3보다 가파른 것을 확인할 수 있다. S2와 S3의 분극 곡선에서는 500 mA/cm^2 까지 동일한 전압 프로필을 보이다 점차 S2의 전압 손실이 커지는 것이 확인된다. 한계 조건이자 분극 곡선 종료 전압인 0.4 V 에서의 전류밀도는 S1, S2, S3가 각각 1600 , 2000 , 2300 mA/cm^2 으로 측정되었다.

분극 곡선을 통하여 캐소드에 적용된 금속 폼은 기존의 사형 구조 분리판에 비해 물질 전달 저항이 낮아 고전류밀도 영역에서의 전압 손실이 크지 않은 것을 확인하였다. 또한, 금속 폼의 압축 비율이 클수록 전하 이동에 따른 오믹 저항이 감소하는 것으로 판단하였다. 각 금속 폼을 적용한 연료전지의 저항 손실을 비교하기 위하여 임피던스 분광법을 통한 Nyquist plot을 **Figure 10**에 표현하였다. **Figure 10(a)**는 5 A (200 mA/cm^2) 조건에서 측정된 Nyquist plot이다. 저전류밀도 영역에서는 촉매의 활성화 반응으로 인한

손실(activation loss)이 지배적이기 때문에, 유로가 다른 모든 케이스에서 오믹 저항과 전하 전달 저항이 큰 차이를 보이지 않았지만 S1 의 오믹 저항이 약 $0.6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 상대적으로 가장 크며, 전하 전달 저항 또한 S1 이 가장 큰 것을 확인하였다. **Figure 10(b)**는 30 A(1200 mA/cm^2) 조건에서 측정된 것으로, 기존의 사형 구조의 반원이 **Figure 10(a)**의 반원에 비해 지름이 약 3 배 증가하였다. 이 결과는 전류가 증가할수록 활성화 손실이 감소하고 물질 전달 저항이 점차 커지는 것으로 해석할 수 있는데, 30 A 조건에서 구리 폼의 반원이 5A 조건의 반원의 크기와 큰 차이를 보이지 않는 것을 미루어 볼 때 기존의 사형 구조에서 금속 폼에 비하여 상대적으로 높은 물질 전달 저항이 발생함을 알 수 있다. 이러한 물질 전달 저항은 결국 셀 전체의 전압 손실을 야기하며, 연료전지가 더 높은 전력을 내지 못하게 하였다. 구리 폼은 압축 비율에 비례한 경향을 보여주고 있는데, 5 A 나 30 A 조건 모두 압축 비율이 증가할수록 물질 전달 저항이 감소하였다.

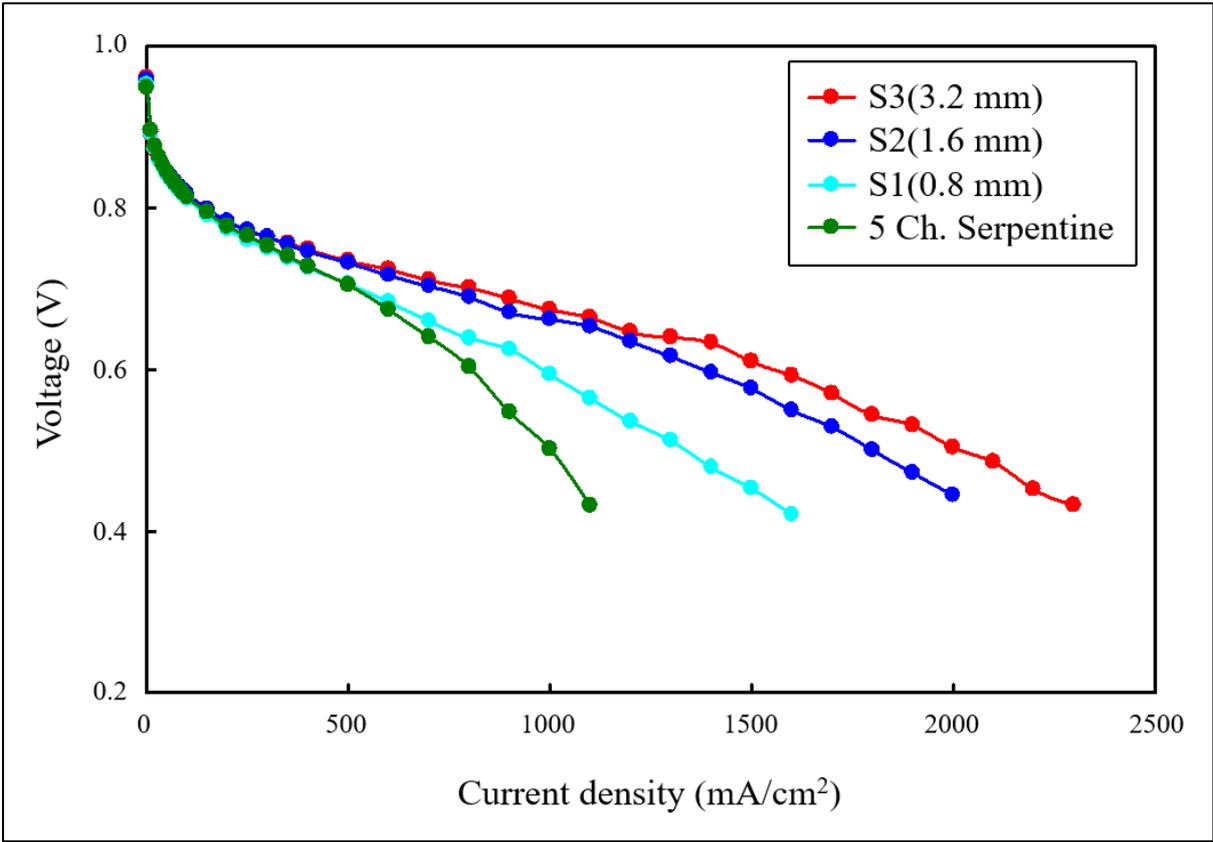


Figure 9. Fuel cell performance with copper foam at different compression ratio and serpentine design.

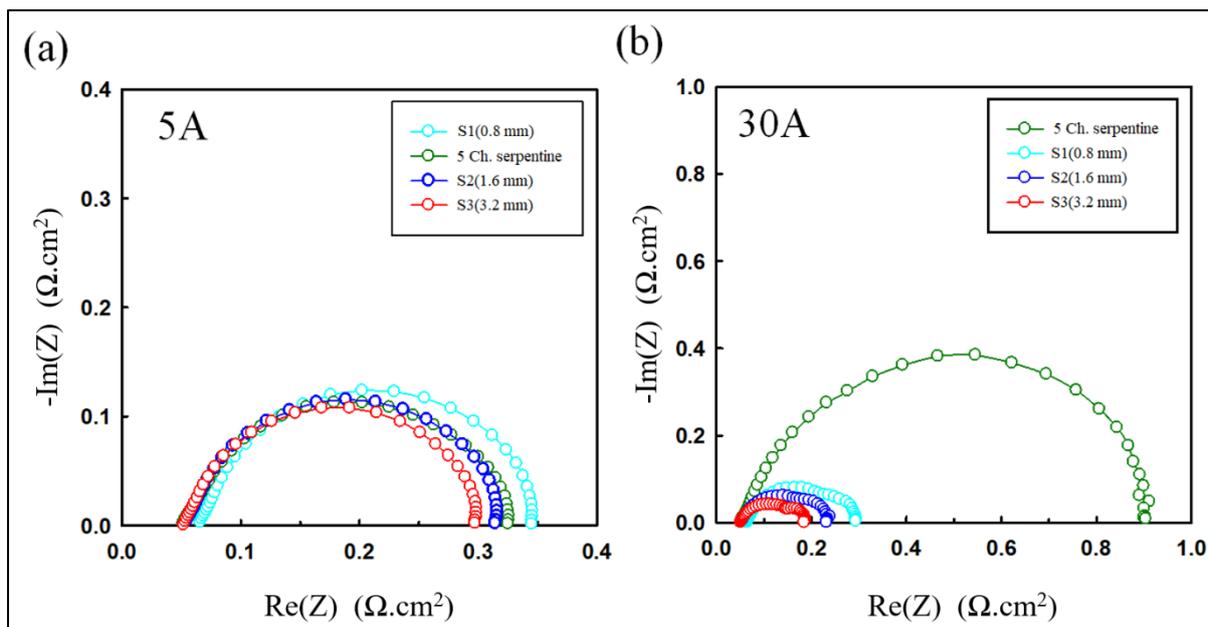


Figure 10. Nyquist plot of copper foam with different compressed ratio. (a) 5A condition and (b) 30A condition.

3.2. 반응물 분배 장치에 걸리는 압력의 영향

3.2.1. 반응물 분배 장치의 압력 손실

Figure 9에서 구리 폼과 사형 구조의 저전류밀도-중전류밀도 영역의 전압 프로파일에서 사형 구조와 S1의 프로파일은 거의 동일하며, 구리 폼의 압축 비율이 올라갈수록 전압 손실이 낮았다. Figure 11은 캐소드 입구에서 공급되는 공기 유속에 따른 압력 손실을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보이는 것처럼, 사형 구조에서 가장 낮은 입구와 출구의 차압을 보였으며 구리 폼 시료의 압축 비율이 100%에 가까워질수록 더욱 높게 측정되었다. 특히, S3의 경우에는 입구 유속이 1 m/s보다 빠를 때, 내부에 1 bar의 압력이 걸렸으며 같은 유속에서 S2의 차압보다 3배나 더 큰 압력이 내부 유로에 작용하였다.

사형 구조와 S1, S2의 압력 차이와 500 mA/cm² 부근 전류밀도 영역에서의 성능 차이는 유사한 경향성을 보인다. 반면에 가장 높은 압축 비율을 갖는 S3는 다른 모든 시료보다 상대적으로 큰 차압을 보이지만 저전류밀도-중전류밀도 영역에서는 큰 성능 차이를 보이지 않는다. 따라서 내부 유로에 걸리는 압력은 낮은 전류밀도에서 전압 손실을 완화시킬 수 있으나 압력에 정비례하지 않음을 확인하였다.

반응물 분배 장치의 내부에 걸리는 압력이 구리 폼 및 사형 구조의 성능에 미치는 영향을 보다 자세히 알아보기 위하여 사형 구조의 출구를 가압하여 S3와 유사한 압력 환경을 조성한 뒤, 동일한 실험을 수행하여 분극 곡선을 비교하였다.

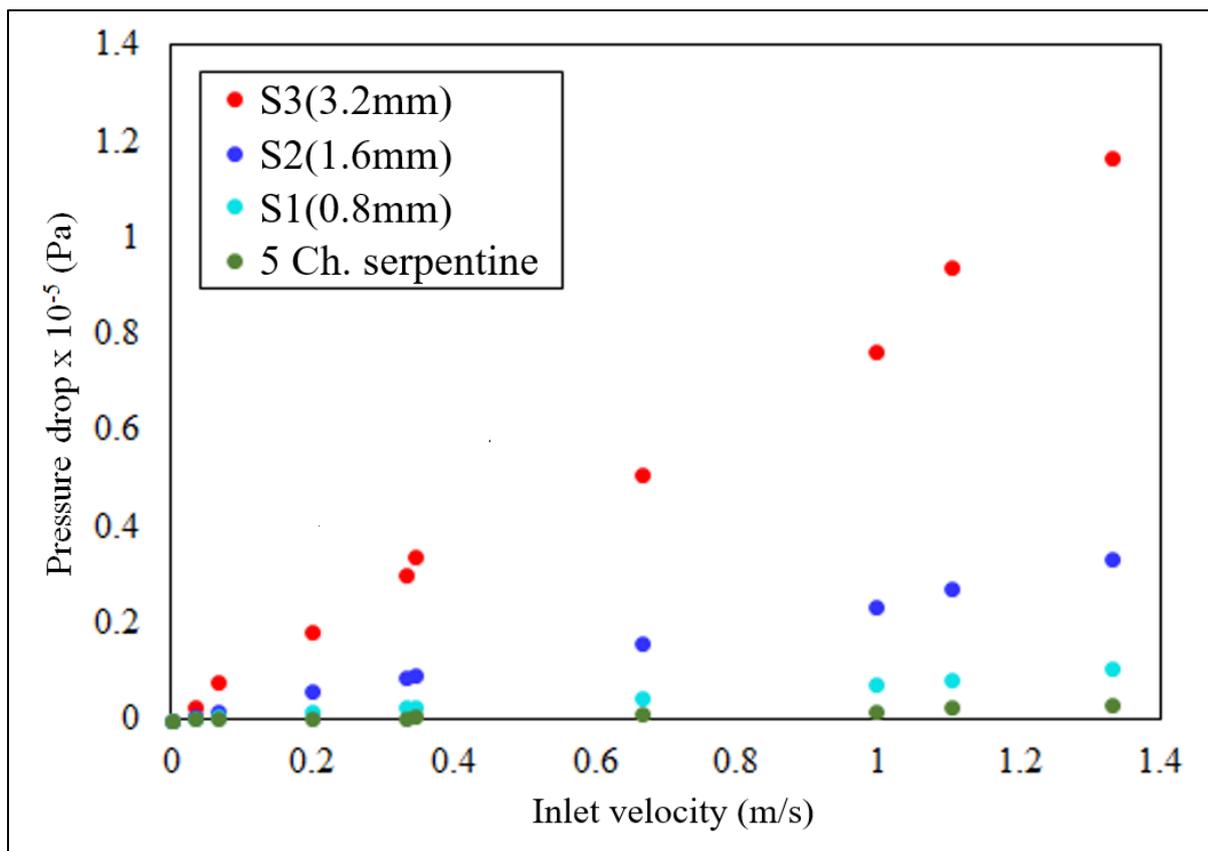


Figure 11. Pressure drops versus cathode inlet gas velocity.

3.2.2. 사형 구조의 가압과 구리 폼과의 비교

사형 구조의 성능 측정 시스템에 압력조절기(Back Pressure Regulator, BPR)를 추가하여 내부의 압력을 1 bar로 유지한 상태에서 동일한 성능 측정 방법으로 분극 곡선을 그렸으며 관련 데이터를 5 Ch. Serpentine(S3 P)로 표현하였다. **Figure 12**는 1 bar 가압 조건에서 실험한 5 채널 사형 구조와 가압을 하지 않은 사형 구조, 구리 폼 S3의 분극 곡선을 표현한 것이다. 가압 조건 하의 사형 구조 실험에서는 가압 유지를 위하여 모든 전류밀도 조건에서 2000 mA/cm²에 상응하는 양론에 실험 배수(애노드 1.5, 캐소드 2.0)를 곱한 유량을 분극 곡선 실험 내내 지속적으로 공급하였으며 이는 Figure 9에 해당하는 실험보다 더 많은 반응 유체가 공급됨을 의미한다. 가압 조건 하에서 실험된 사형 구조의 전압 프로파일은 모든 전류밀도 구간에서 가압하지 않은 사형 구조의 전압 프로파일보다 높은 셀 전압을 보였다. 또한 OCV부터 800 mA/cm²까지는 3.2 mm의 구리 폼을 사용한 S3보다도 높은 전압 프로파일을 보였는데, 이는 저전류밀도 영역에서도 반응 유체의 과공급으로 인한 성능 증가로 판단된다. 800 mA/cm²부터 셀 전압이 한계 전압에 도달할 때까지의 가압 조건 하의 사형 구조에 대한 전압 프로파일을 살펴보면, 역시 구리 폼을 사용한 S3과의 전압 손실로 인한 격차가 벌어지며 물질 전달 능력에 한계를 보이는 것을 확인하였다. 임피던스 분광법을 통하여 각 전류 영역에서의 손실을 자세히 분석하였으며 **Figure 13**에 Nyquist plot과 각 시료에 대한 저항 비교 그래프를 표현하였다. **Figure 13(a)**는 5 A(200 mA/cm²) 조건에서 측정되었으며, 가압 조건에 대한 오믹 저항이 가압하지 않은 사형 구조와 구리 폼의 오믹 저항보다 낮았다. **Figure 13(b)**는 30 A(1200 mA/cm²) 조건에서 수행되었는데, 가압 사형 구조의 전하 전달 저항이 일반 사형 구조보다 51% 낮은 값으로 측정되었다. 동일한 전류 조건에서 구리 폼의 전하 전달 저항은 일반 사형 구조보다 84% 낮았다. 전하 전달 저항은 고전류밀도 영역에서 더 많은 물이 전기화학 반응으로 인해 생성됨에 따른 전해질 막의 친수 비율이 증가함에 기인한다. 가압 조건과 구리 폼은 일반 사형 구조에 비해 유체 흐름에

방해되는 요소(압력, 유로 형태 등)를 포함하기 때문에 더 낮은 전하 전달 저항 값을 갖는 것으로 판단된다.

앞선 결과를 바탕으로 유로 형태에 상관없이 내부에 걸리는 압력의 증가를 통하여 중전류밀도 영역에서 연료전지의 오믹 저항이 감소하였다고 판단할 수 있다. 또한 전하 전달 손실과 물질 전달 저항은 금속 폼을 연료전지의 반응물 분배 장치로 사용했을 때 사형 구조의 물질 전달 저항보다 낮은 결과를 통하여, 압력과 반응물 분배 장치의 형태가 지배적인 영향을 끼친 것으로 사료된다. 분극 곡선을 통해 비교하면, **Figure 14**에 나타난 것처럼 각 전류밀도 구간에서의 지배적인 손실 영향으로 그 원인을 파악할 수 있다. **Figure 14(a)**에서는 압축 비율에 따른 S1과 S3의 분극 곡선을 볼 수 있는데, S1과 S3의 압축 비율은 각각 37.5%, 84.8%이다. 압축 비율의 증가는 곧 금속 폼 내부의 기공율을 감소시키고, 결과적으로 유로에 걸리는 압력을 증가시킨다. 따라서 중전류밀도 영역에서의 오믹 저항에 의한 전압 손실은 더 높은 압축 비율의 금속 폼을 사용하여 내부의 압력을 높임으로써 해결할 수 있었다. **Figure 14(b)**에서는 가압한 사형 구조와 S3의 분극 곡선이며, **Figure 14(a)**에서 언급한 성능 격차의 원인이었던 압력 차이를 가압 환경 조성을 통해 극복한 모습을 보였다. 단, 고전류밀도 영역에서의 물질 전달 저항에 의한 전압 손실은 유로 구조가 다른 태생적 한계로 인한 성능 차이에 기인한다고 판단할 수 있다.

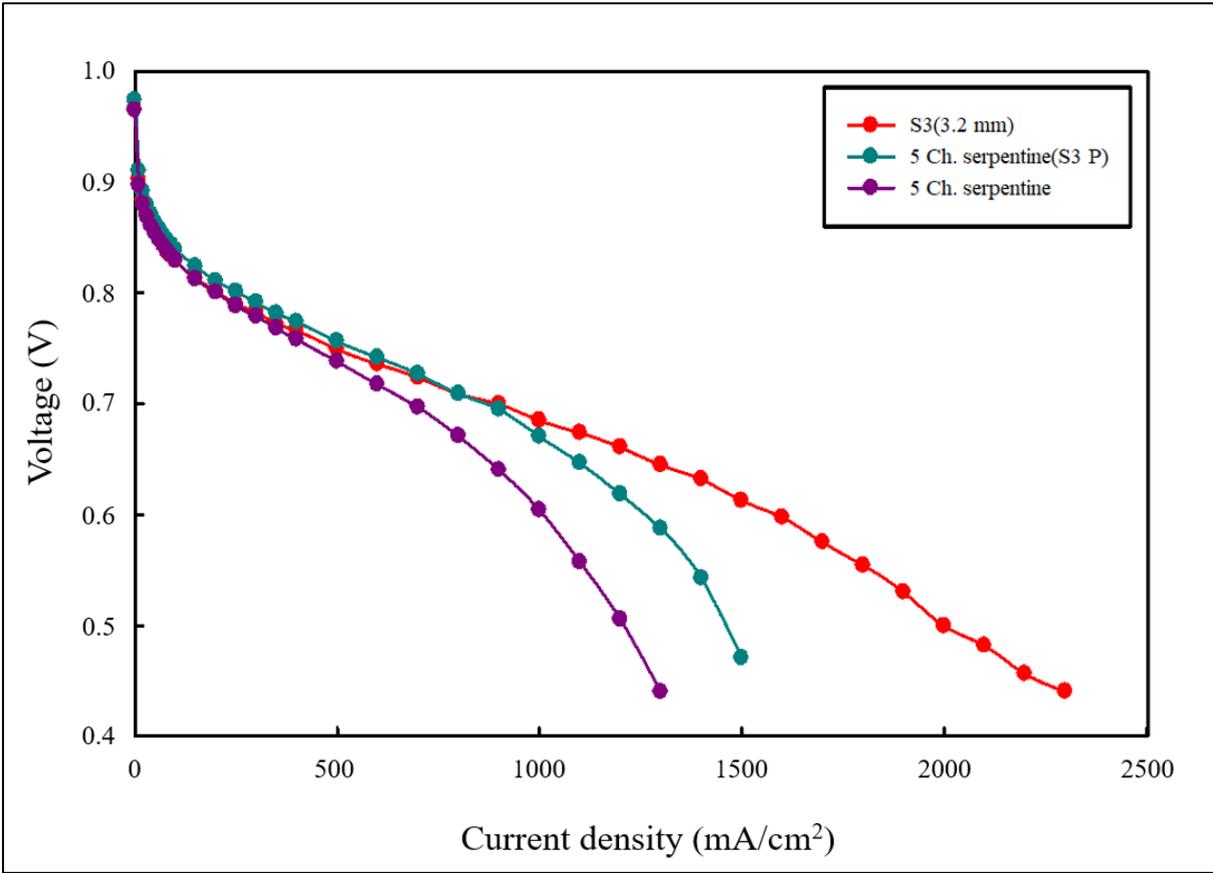


Figure 12. Cell performance of S3(3.2 mm) copper foam and serpentine design.

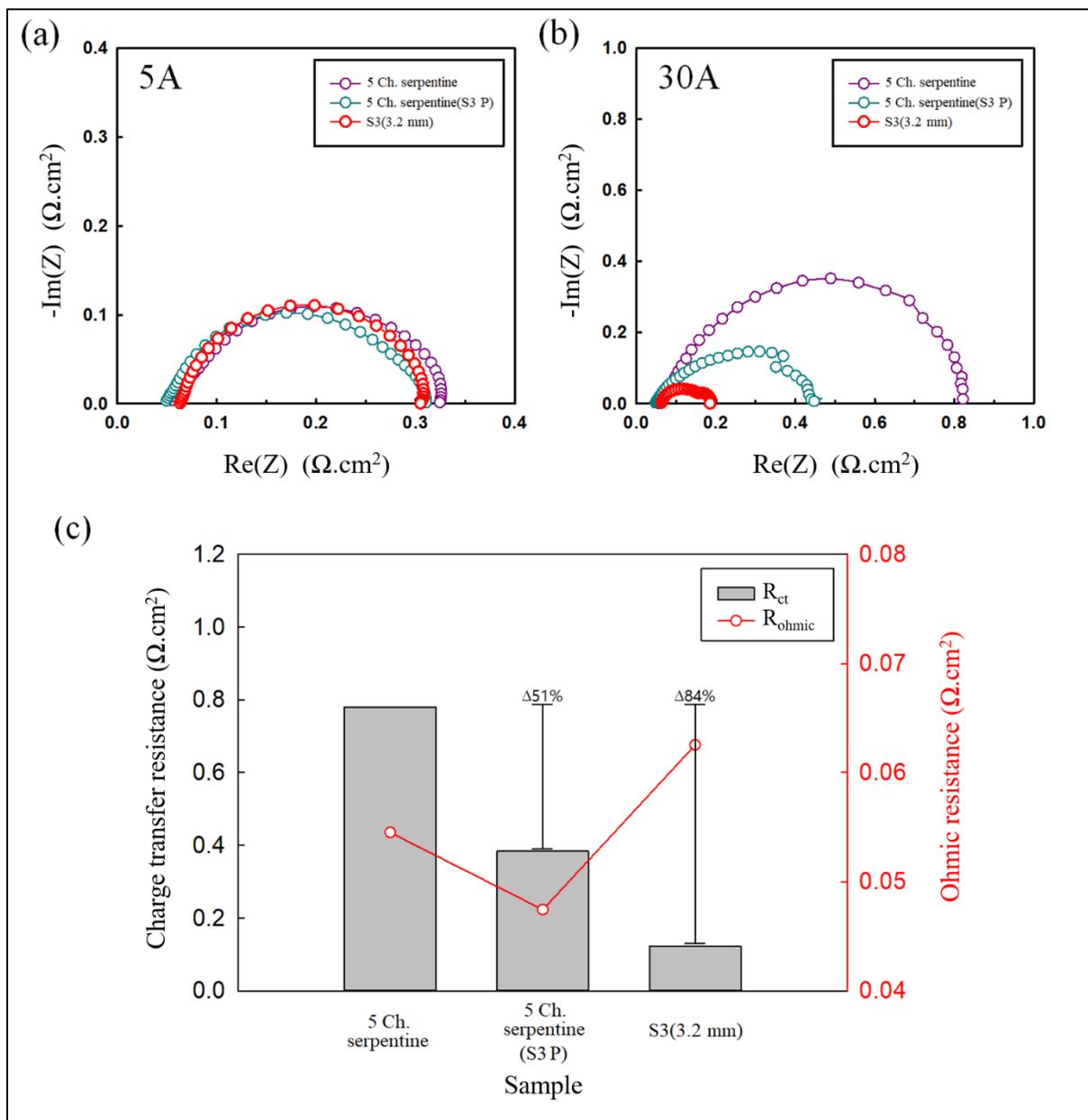


Figure 13. Effects of applied additional pressure by BPR on fuel cell resistance. (a) Nyquist plot for 5A, (b) 30A condition and (c) differences on charge transfer resistance and ohmic resistance for each sample at 30A condition.

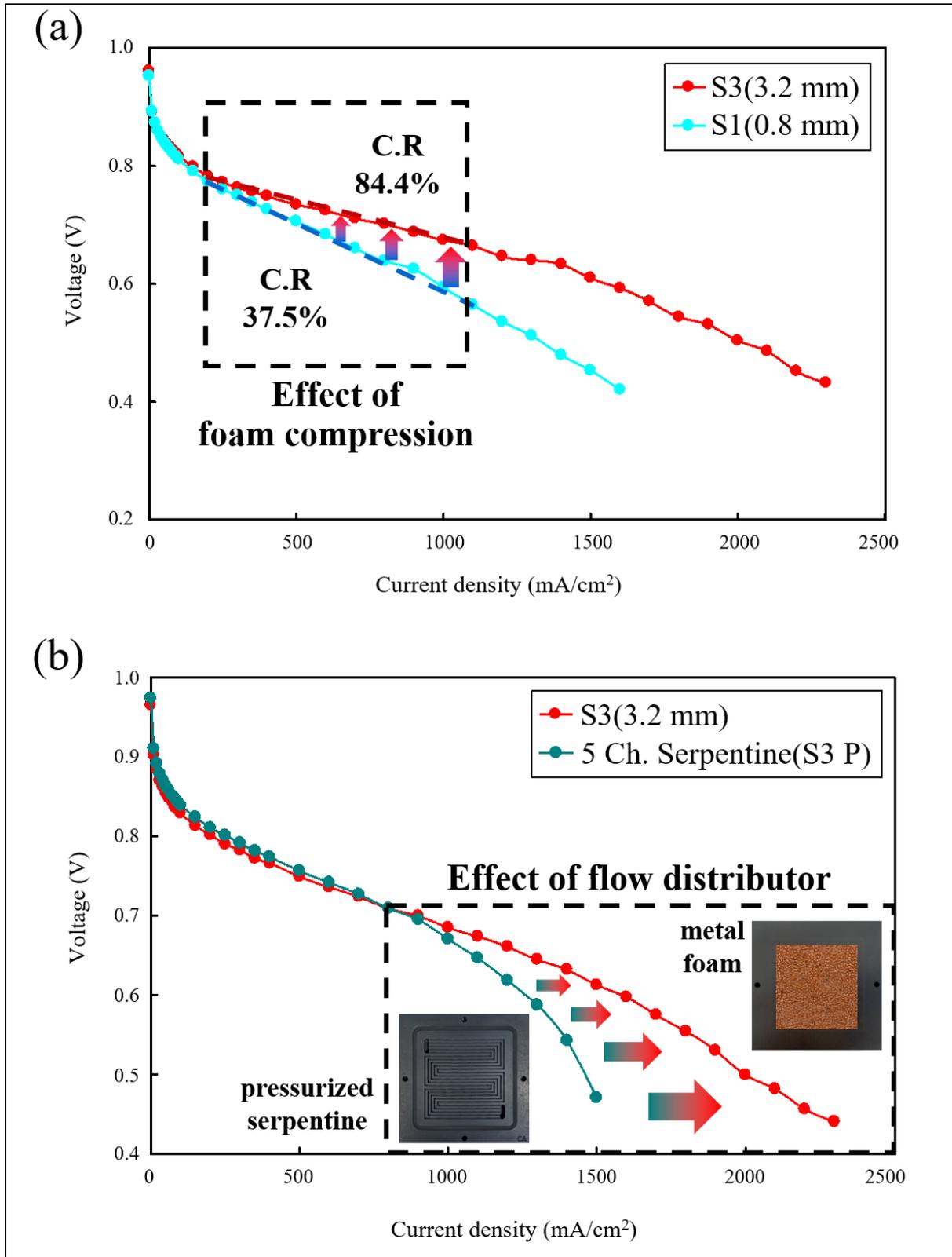


Figure 14. Fuel cell performance difference with polarization curve. Effect of (a) foam compression and (b) flow distributor.

3.3. 반응물 분배 장치의 전산 해석

3.3.1. 구리 폼 압축에 대한 해석 매개변수 적용

앞선 문단에서 구리 폼과 사형 구조에 대한 성능 평가를 수행하였다. 성능적인 차이는 1000 mA/cm^2 이상의 고전류밀도 영역에서 크게 나타났으며, 이는 전기화학으로 인한 산소의 반응 속도보다 촉매 활성 영역으로 공급되는 산소의 물질 전달 속도가 느려 발생하였다. 평가 시스템의 연료전지 실험 성능 평가를 통하여 정성적 결과를 확인하였으나, 내부의 유체 거동을 확인하는 것은 매우 어려운 작업이다. 따라서 유로를 달리하였을 때 내부 유체의 거동을 판단하기 위하여 전산 해석을 수행하여 입구로 공급된 입자가 출구로 나가는 시간을 측정하였다. 단, 본 해석은 연료전지의 전기화학 반응 및 열 전달, 습도, 중력, 기체확산층을 통한 반응물 확산 등의 부가적인 해석 요소를 고려하지 않고 유로를 통한 입자 추적만을 해석하였다.

먼저 해석을 위해 측정된 구리 폼 시료의 입구 유속에 대한 차압 데이터로 도출된 관성 저항 및 점성 저항의 값을 전산 해석에 적용하였다. 압축 비율에 따른 차압 해석 결과를 **Table 4**에 표현하였으며, S1의 오차가 8.35%로 가장 컸고, 나머지 시료의 해석 결과는 2% 내의 적은 오차를 보였다. **Figure 15**에 나타낸 것처럼 유동장 내에서의 압력 분포를 시각적으로 표현했을 때, 3개의 해석 모두 압력 차이를 제외한 분포는 동일하게 계산되었다.

Table 4. The pressure difference between experiment and analysis.

S#(Thickness)	Pressure results (Pa)		Error (%)
	Test	Analysis	
S1(0.8 mm)	10,840	11,745	8.35
S2(1.6 mm)	33,370	33,671	0.902
S3(3.2 mm)	116,420	114,287	1.87

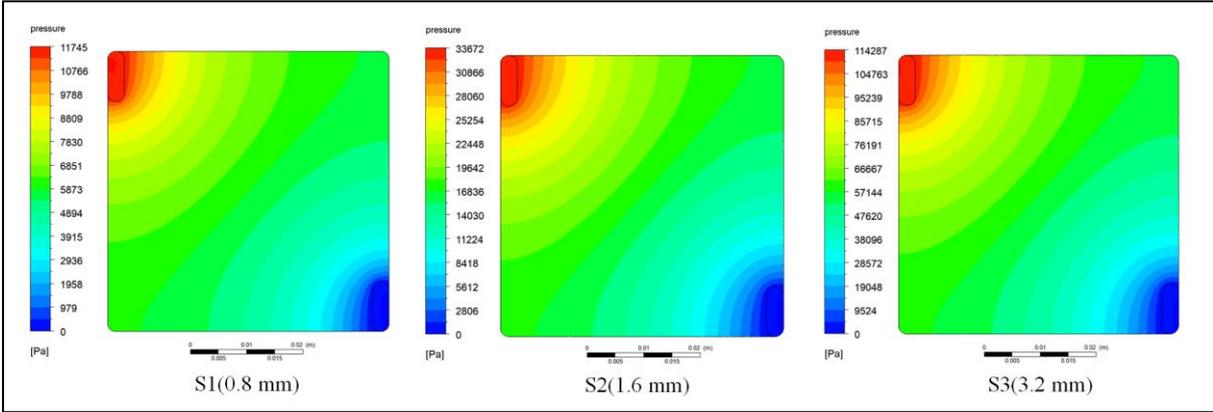


Figure 15. Pressure distribution of each copper foam cases analyzed with CFD.

3.3.2. 유로 형태에 대한 입자 체류 시간 분석

Figure 16에 각각의 유로 형태에 따라 입구 경계 조건으로 공급된 공기 입자가 어떻게 이동하는지를 표기된 시간 순으로 입자의 위치를 시각적으로 표현하였다. Figure 16(a)에는 5 채널의 사형 구조에 공급된 입자의 궤적으로 25 cm²의 반응 면적을 5개의 각 채널을 따라 이동하였다. 공기의 입구 공급 후 0.025 s의 시간이 경과되었을 때, 출구와 가장 가까운 입자는 사형 구조의 4개의 코너 중 마지막 코너를 지났으며 0.050 s가 경과하였을 때는 일부 입자가 출구 경계 조건을 통하여 탈출한 것을 확인하였다. Figure 16(b)에는 금속 폼에 공급된 입자의 위치를 표현하였으며, 0.025 s에서는 공기 입자가 금속 폼의 전체 면적을 부채꼴 형태로 훑으며 입구에서부터 출구까지의 직선 거리의 약 70~80%에 도달한 것을 확인할 수 있다. 0.050 s의 시간이 경과된 후에는 외곽 방향으로 퍼진 입자를 제외한 대부분의 입자가 출구 경계 조건으로 탈출하였다. 입구 경계 조건으로 들어온 입자의 50%가 출구 경계 조건으로 탈출하는데 소요되는 시간을 확인하기 위하여 Figure 17에 시간 별 유로에 존재하는 입자의 양을 표현하였다. 사형 구조와 금속 폼 모두 공기 입자가 출구로 나가기 시작하는 시간은 각각 0.033 s, 0.034 s로 거의 동일하였으며 사형 구조가 0.001 s 빨랐다. 반면에, 입자의 50%가 출구로 탈출한 최종 시간을 비교하면 사형 구조는 0.062 s, 금속 폼은 0.045 s가 소요되었다. 탈출 시작부터 50% 입자 탈출까지 걸리는 시간은 사형 구조가 0.029 s, 금속 폼은 0.011 s이며, 이는 사형 구조를 통과하는 50%의 입자가 금속 폼에 비하여 출구단까지 도달하는데 약 2.6배 더 많은 시간이 걸림을 의미한다. 앞선 해석이 연료전지의 전기화학 반응을 통한 공기 소모를 계산하지 않았다는 것을 고려할 때, 사형 구조의 물질 전달 저항이 금속 폼의 물질 전달 저항보다 크며, 이는 결국 고전류밀도 영역에서 빠른 전압 손실을 야기함으로 해석할 수 있다.

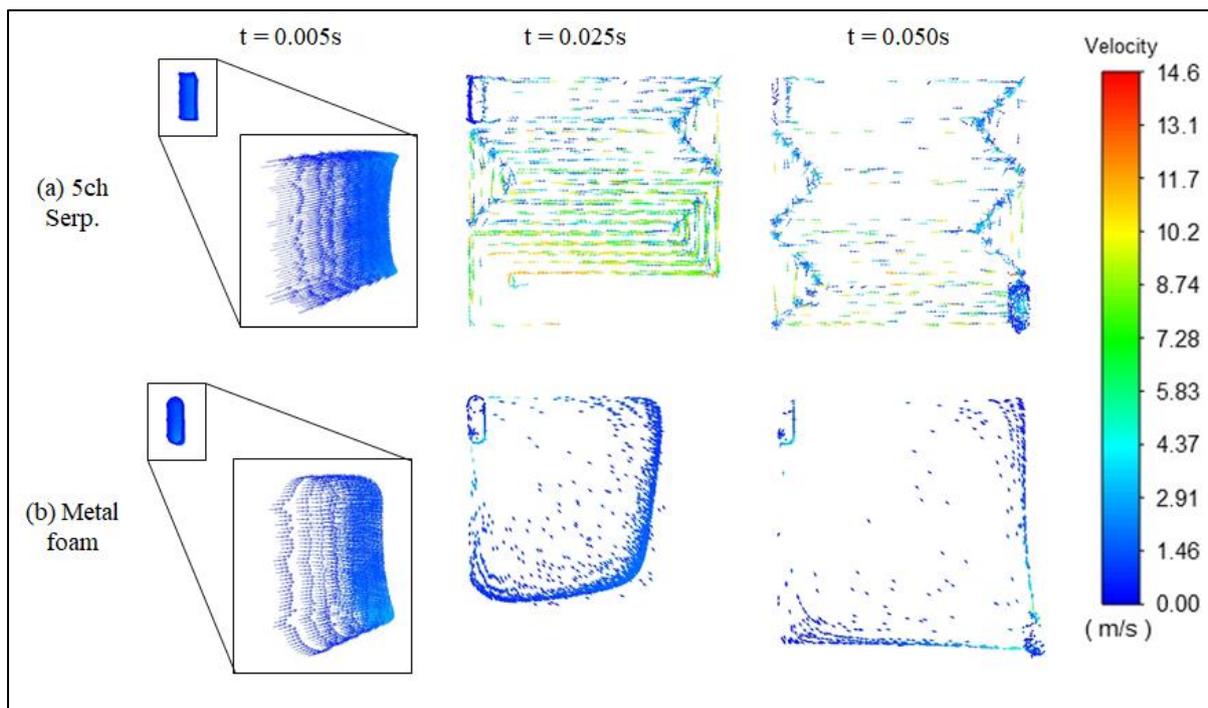


Figure 16. Air particle track at specified time for two different fuel cell flow distributors. (a) 5 channel serpentine and (b) copper metal foam.

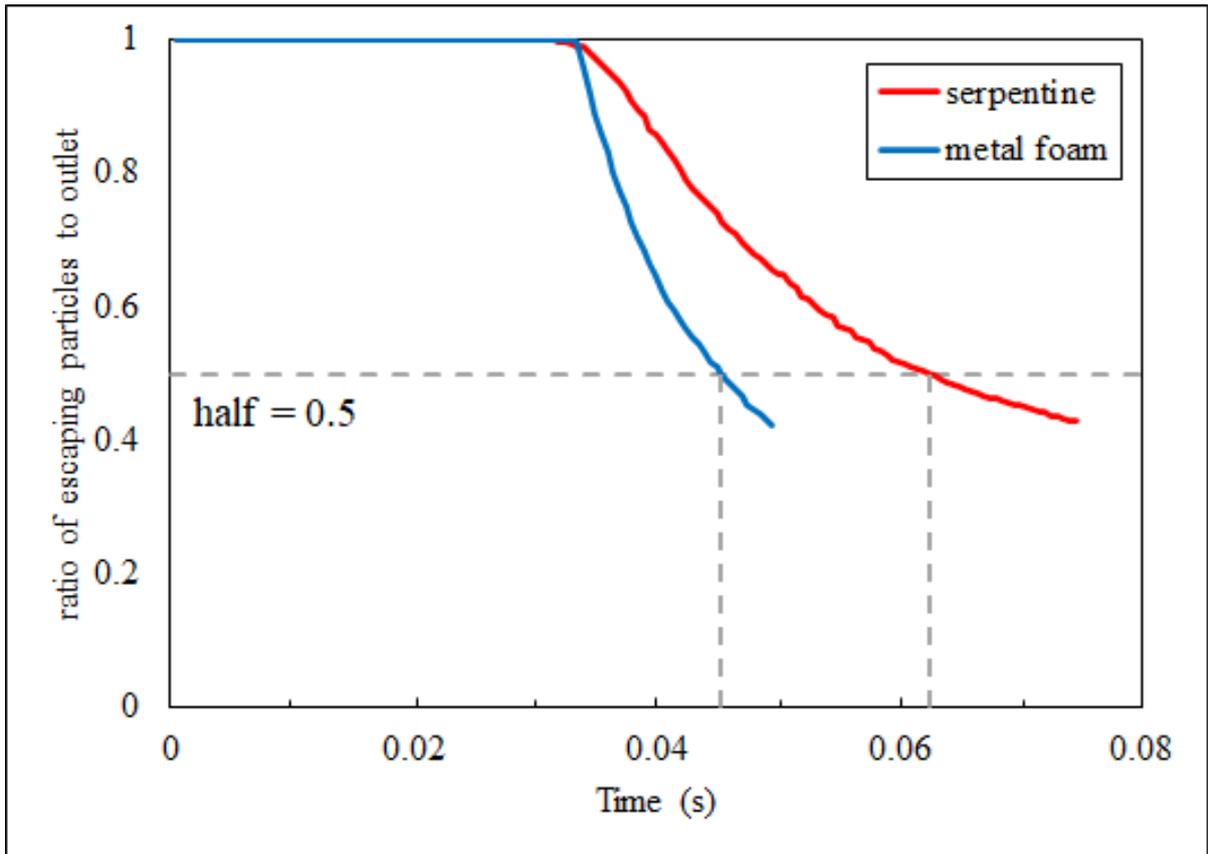


Figure 17. The time needed to escape 50% of air particles in flow field.

4. 결론

본 연구에서는 구리 금속 폼을 압축 비율을 달리 하여 연료전지의 반응물 분배 장치로 적용하였으며, 운전 과정에서 구리 폼의 압축 비율이 연료전지의 성능에 미치는 영향과 그 원인을 분석하기 위하여 실험과 전산 해석을 수행하였다. 금속 폼은 총 3 가지 압축 비율로 제작되었으며, 수소가 공급되는 애노드에 금속 폼을 적용하는 것보다 공기가 공급되는 캐소드에 적용하였을 때 고전류밀도 영역에서 더욱 낮은 전압 손실을 보였다. 이를 통하여 수소 산화 반응(Hydrogen Oxidation Reaction, HOR)보다 산소 환원 반응(Oxygen Reduction Reaction, ORR)이 이루어지는 캐소드에서 금속 폼이 효율적인 물질 전달을 가능하게 함을 확인하였다.

분극 곡선과 임피던스 분광법을 통하여 캐소드에 적용된 구리 폼과 사형 구조의 전압 손실 원인을 분석하였다. 200 mA/cm^2 보다 낮은 저전류밀도 영역에서는 촉매의 활성화 저항이 가장 지배적이기 때문에, 반응물 분배 장치만 달리한 모든 시료에서 분극 곡선의 전압 프로파일은 동일하였다. 전류밀도가 높아질수록 사형 구조의 전압 손실이 증가하였으며, 특히 물질 전달 저항이 지배적인 고전류밀도 영역에서 큰 전압 손실을 보였다. 반면에, 구리 폼을 적용한 세 실험 조건에서는 고전류밀도 영역에서도 물질 전달 저항으로 인한 전압 손실이 비교적 적었다. 특히 압축 비율에 따라서 물질 전달 저항의 차이를 보였는데, 높은 압축 비율의 구리 폼이 더욱 낮은 전압 손실을 갖는 것을 확인하였다. 가장 낮은 압축 비율의 구리 폼인 S1은 오믹 저항과 물질 전달 저항이 가장 크며, 임피던스 분광법을 통한 Nyquist plot을 비교하였을 때 압축 비율이 증가함에 따라 물질 전달 저항이 감소함을 확인하였다.

반응물 분배 장치에 따라 유로 내부에 걸리는 압력을 확인하였다. 반응물 공급 속도가 증가할수록 구리 폼의 압축 비율이 높을 때 더욱 높은 압력이 내부 유로에 걸렸다. 반면에 사형 구조는 구리 폼과 비교하였을 때 큰 압력이 걸리지 않았으며, 반응물 분배

장치의 압력 차이에 대한 경향과 분극 곡선을 비교할 때, 저전류밀도-중전류밀도 영역의 전압 손실이 압력에 연관된 것으로 판단하여 사형 구조의 내부 압력을 압력 조절기를 통하여 1 bar로 가압하여 실험하였다. 800 mA/cm²의 중전류밀도 영역까지는 가장 높은 압축 비율의 구리 폼인 S3보다도 가압 사형 조건이 낮은 전압 손실을 보였다. 더 높은 전류밀도 영역에서는 가압 사형 구조의 물질 전달 저항이 눈에 띄게 나타났는데, 가압하지 않은 사형 구조보다는 낮은 물질 전달 저항을 가졌지만, S3에 걸리는 압력과 동일한 압력을 가압한다고 해서 구리 폼의 고전류밀도 영역에서의 높은 성능을 따라잡지는 못하였다. 따라서 고전류밀도에서 지배적인 물질 전달 저항은 유로 형태에 큰 영향을 받는 것으로 해석하였다.

유로 내부의 공기 입자가 거동하는 모습을 분석하기 위하여 전산 해석을 추가적으로 수행하였다. 구리 폼의 압력 데이터로 산출된 관성 저항과 점성 저항의 해석 매개 변수를 구리 폼 해석 도메인의 설정에 적용하였다. 압축 비율에 따른 압력 분포의 해석 결과, 압력 분포는 실제 실험의 데이터와 큰 오차를 보이지 않았지만, 유로를 거치는 입자의 경로와 시간은 압축 비율에 관계없이 동일하게 계산되었다. 따라서 단순 유로 형태에 따른 입자의 위치를 시간적으로 비교하였다. 입구 경계 조건으로 공급된 공기 입자 중 출구 경계 조건으로 탈출하는 시간은 사형 구조와 구리 폼이 각각 0.033 s, 0.034 s로 거의 동일하였다. 보다 자세한 비교를 위하여 공급된 입자의 50%가 탈출하는데 걸리는 시간을 비교하였다. 사형 구조는 탈출 시작부터 50%의 입자가 탈출하는데 0.029 s의 시간이 걸렸다. 반면에, 구리 폼은 동일한 환경 조건에서 0.011 s의 시간이 걸렸으며 사형 구조와 비교하였을 때 약 62% 더 빨랐다. 이 말인 즉, 사형 구조의 유로 특징 상 입자가 이동하는데 걸리는 저항(즉, 물질 전달 저항)이 구리 폼보다 큼을 의미한다. 이를 실험 결과와 연관하면 고전류밀도 영역의 물질 전달 저항이 유로의 형태에 크게 영향을 받는다고 판단하였다.

5. 참고문헌

- [1] R. O'Hayre, S. W. Cha, W. Colella and F. B. Prinz, *Fuel Cell Fundamentals* 3rd ed, 275, Wiley (2016).
- [2] T. Sutharssan, D. Montalvao, Y. K. Chen, W. C. Wang, C. Pisac and H. Elemara, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 75 (2017) 440.
- [3] J. Wang and H. Wang, *Fuel Cells*, 12 (2012) 989.
- [4] X. Li and I. Sabir, *Int. J. Hydrogen Energy*, 30 (2005) 359.
- [5] J. Wu, X. Z. Yuan, J. J. Martin, H. Wang, J. Zhang, J. Shen, S. Wu and W. Merida, *J. Power Sources*, 184 (2008) 104.
- [6] M. Marappan, K. Palaniswamy, T. Velumani, B. C. Kim, R. Velayutham, P. Shivakumar and S. Sundaram, *Chem. Rec.*, 21 (2021) 663.
- [7] H. Heidary and M. J. Kermani, *Int. J. Hydrogen Energy*, 38 (2013) 5485.
- [8] S. H. Han, N. H. Choi and Y. D. Choi, *Int. J. Hydrogen Energy*, 39 (2014) 2628.
- [9] M. Rahimi-Esbo, A. A. Ranjbar, A. Ramiar, E. Alizadeh and M. Aghaei, *Int. J. Hydrogen Energy*, 41 (2016) 3023.
- [10] E. Alizadeh, M. Rahimi-Ebso, S. M. Rahgoshay, S. H. M. Saadat and M. Khorshidian, *Int. J. Hydrogen Energy*, 42 (2017) 14708.
- [11] M. Ghasabehi, M. Ashrafi and M. Shams, *Fuel*, 285 (2021) 119194.
- [12] A. Azarafza, M. S. Ismail, M. Rezakazemi and M. Pourkashanian, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 116 (2019) 109420.
- [13] S. A. Atyabi and E. Afshari, *J. Clean. Prod.*, 214 (2019) 738.
- [14] P. Wawdee, S. Limtrakul, T. Vatanatham and M. W. Fowler, *Int. J. Hydrogen Energy*, 40 (2015) 3739.
- [15] Y. Yin, X. Wang, X. Shangguan, J. Zhang and Y. Qin, *Int. J. Hydrogen Energy*, 43 (2018) 8048.
- [16] C. Y. Soong, W. M. Yan, C. Y. Tseng, H. C. Liu, F. Chen and H. S. Chu, *J. Power Sources*, 143 (2005) 36.
- [17] Y. H. Lee, S. M. Li, C. J. Tseng, C. Y. Su, S. C. Lin, and J. W. Jhuang, *Int. J. Hydrogen Energy*, 42 (2017) 22201.

- [18] Y. Xu, S. Ma, M. Fan, H. Zheng, Y. Chen, X. Song and J. Hao, *Materials*, 12 (2019) 3197.
- [19] W. Yuan, Y. Tang, X. Yang and Z. Wan, *Appl. Energy*, 94 (2012) 309.
- [20] C. J. Tseng, B. T. Tsai, Z. S. Liu, T. C. Cheng, W. C. Chang and S. K. Lo, *Energy Convers. Manag.*, 62 (2012) 14.
- [21] B. T. Tsai, C. J. Tseng, Z. S. Liu, C. H. Wang, C. I. Lee, C. C. Yang and S. K. Lo, *Int. J. Hydrogen Energy*, 37 (2012) 13060.
- [22] M. S. Hossain and B. Shabani, *J. Power Sources*, 295 (2015) 275.
- [23] A. Flya, D. Butcher, Q. Meyer, M. Whiteley, A. Spencer, C. Kim, P. R. Shearing, D. J. L. Brett, and R. Chen, *J. Power Sources*, 395 (2018) 171.
- [24] W. C. Tan, L. H. Saw, H. S. Thiam, J. Xuan, Z. Cai, and M. C. Yew, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 96 (2018) 181.
- [25] M. Kim, C. Kim, and Y. Sohn, *Fuel Cells*, 18 (2018) 123.
- [26] H. Liu, W. Yang, J. Tan, Y. An, and L. Cheng, *Energy Convers. Manag.*, 176 (2018) 99.
- [27] J. E. Park, W. Hwang, M. S. Lim, S. Kim, C. Y. Ahn, O. H. Kim, J. G. Shim, D. W. Lee, J. H. Lee, Y. H. Cho, and Y. E. Sung, *Int. J. Hydrogen Energy*, 44 (2019) 22074.
- [28] Y. Wu, J. I. S. Cho, M. Whiteley, L. Rasha, T. P. Neville, R. Ziesche, R. Xu, R. Owen, N. Kulkarni, J. Hack, M. Maier, N. Kardjilov, H. Markötter, I. Manke, F. R. Wang, P. R. Shearing, and D. J. L. Brett, *Int. J. Hydrogen Energy*, 45 (2020) 2195.
- [29] E. Afshari, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 139 (2020) 2423.
- [30] J. Chen, X. Li, W. Li, J. He, C. Li, S. Dai, J. Chen, and Y. Ren, *Adv. Eng. Mater.*, 19 (2017) 1600861.
- [31] J. Chen, S. Dai, C. Li, W. Li, and Y. Ren, *Materials*, 11 (2018) 1639.
- [32] Y. Amani, S. Dancette, E. Maire, J. Adrien, and J. Lachambre, *Materials*, 11 (2018) 1984.
- [33] N. Wang, E. Maire, X. Chen, J. Adrien, Y. Li, Y. Amani, L. Hu, and Y. Cheng, *Mater. Charact.*, 147 (2019) 11.
- [34] M. J. Kermani, M. Moein-Jahromi, M. R. Hasheminasab, L. Wei, J. Guo, and F. M. Jiang, *Int. J. Hydrogen Energy*, 47 (2022) 4772.