(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0031642
(43) 공개일자 2023년03월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01M 8/1009 (2016.01) *H01M 8/0258* (2016.01)
(52) CPC특허분류
H01M 8/1009 (2013.01)
H01M 8/0258 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0114100
(22) 출원일자 2021년08월27일
심사청구일자 2021년08월27일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
김광용
서울특별시 서초구 남부순환로 2311-12 (방배동, 방배아트힐아파트) 105동 701호
오지현
강원도 원주시 무실로55번길 65 (명륜동, 동성아파트) 103동 701호
(74) 대리인
이원희

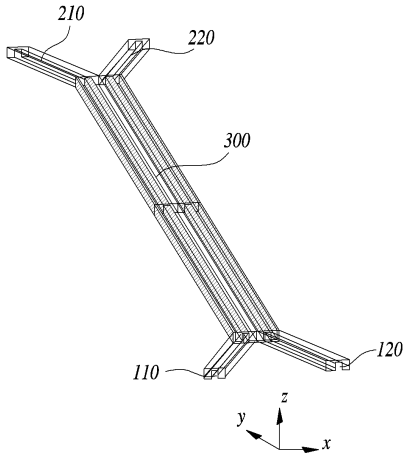
전체 청구항 수 : 총 14 항

(54) 발명의 명칭 **복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지**

(57) 요 약

본 발명은 마이크로 유체 연료전지 및 이의 성능 향상방법에 관한 것으로, 구체적으로는 연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널을 포함하는 마이크로 유체 연료전지에 있어서, 연료전지의 길이방향으로 일측에는 연료와 산화제가 각각 도입되는 연료 도입부 및 산화제 도입부를 포함하고, 타측에는 연료와 산화제가 각각 배출되는 연료 배출부 및 산화제 배출부를 포함하고, 상기 도입부와 배출부 사이에 배치되며, 각 도입부 및 배출부와 연결되고, 연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널;을 포함하고, 상기 마이크로 채널은 연료가 흐르는 연료 유동 채널 및 산화제가 흐르는 산화제 유동 채널을 포함하고, 상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각은 연료와 산화제가 접하는 계면과 이격된 위치에 상대적으로 작은 채널 높이를 갖는 영역인 브리지를 적어도 한개 포함하는, 마이크로 유체 연료전지 및 이의 성능 향상방법에 관한 것이다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H01M 2300/0005 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711126887
과제번호	2019R1A2C1007657
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	중견연구
연구과제명	막 없는 미세연료전지에 관한 신개념 연구
기 여 율	1/1
과제수행기관명	인하대학교
연구기간	2021.03.01 ~ 2022.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널을 포함하는 마이크로 유체 연료전지에 있어서,

연료전지의 길이방향으로 일측에는 연료와 산화제가 각각 도입되는 연료 도입부 및 산화제 도입부를 포함하고, 타측에는 연료와 산화제가 각각 배출되는 연료 배출부 및 산화제 배출부를 포함하고, 상기 도입부와 배출부 사이에 배치되며, 각 도입부 및 배출부와 연결되고, 연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널;을 포함하고,

상기 마이크로 채널은 연료가 흐르는 연료 유동 채널 및 산화제가 흐르는 산화제 유동 채널을 포함하고, 상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각은 연료와 산화제가 접하는 계면과 이격된 위치에 상대적으로 작은 채널 높이를 갖는 영역인 브리지를 적어도 한개 포함하는, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각은

상기 브리지 및 상기 계면 사이에 형성된 내측 채널; 및

상기 브리지 및 상기 계면과 대향하는 측면 사이에 형성된 외측 채널;을 포함하는, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 내측 채널의 폭은 상기 외측 채널의 폭보다 넓은, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 연료 유동 채널 또는 산화제 유동 채널의 높이에 대한 상기 브리지의 높이의 비는 0.5 내지 0.95인, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 마이크로 유체 연료전지는,

상기 마이크로 채널의 폭방향 일측에 구비된 제1 전극; 및

상기 마이크로 채널의 폭방향 타측에 구비된 제2 전극;을 더 포함하는 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 연료 유동 채널 또는 산화제 유동 채널의 높이에 대한 상기 브리지의 높이의 비는 0.5 내지 0.95인, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 마이크로 채널의 폭은 100㎛ 내지 1000㎛ 인, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각의 폭은 50㎛ 내지 500 ㎛인, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 브리지의 폭은 30㎛ 내지 80㎛인, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 내측 채널의 폭은 1 내지 85㎛ 인, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각의 높이는 30㎛ 내지 100 ㎛인, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 브리지의 높이는 5㎛ 내지 48 ㎛인, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 13

제1항에 있어서,

상기 브리지의 높이에 대한 폭의 비는 3 내지 10인, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지.

청구항 14

제1항에 따른 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지의 도입부로 연료와 산화제가 층류를 형성하도록 각각 도입하고, 배출부를 통하여 연료와 산화제가 층류를 유지하면서 각각 배출되도록 하는 것을 특징으로 하는, 마이크로 유체 연료전지의 성능 향상 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 최근 세계적으로 화석에너지의 고갈문제와 환경문제 등이 중국, 인도, 한국 등의 신흥소비대국의 등장과 중동지역, 남아메리카에서의 자원민족주의의 대두로 더욱 심화되고 있다. 그리고 2008년 3월에 원유가가 100달러를 넘어서면서 사상 초유의 고유가 시대가 도래하였다. 한정된 화석에너지 고갈에 대한 불안이 고조되고 있는 가운데, 2020년 세계 에너지 총 소비량은 15,064백만TOE로 2002년 대비 45% 가량 증가할 것으로 전망되기에, 친환경적이면서 충분한 부존자원이 확보된 신에너지 산업에 관심이 집중되고 있다.

[0005] 연료전지(Fuel Cell)란 연료의 산화에 의해서 생기는 에너지를 직접 전기에너지로 변화시키는 전지를 말한다. 1839년에 영국의 물리학자 Grove,William Robert가 묽은 황산 속에 넣은 아연과 진한 질산 속에 넣은 백금을 양극으로 하는 전지인 Grove 전지를 개발하였는데 이것이 현재의 연료전지의 시초가 되었다. 신에너지로서 기대되는 연료전지는 1960년대에 우주선에 상용화된 이후 자동차, 가정 난방 및 전력공급, 전자기기 등에도 상용화가 진행되었다. 이후 1990년대 환경오염 문제가 나타나면서 환경오염에 대한 부담을 줄일 수 있는 연구와 가솔린 엔진의 2배에 가까운 에너지 효율을 얻을 수 있는 에너지, 자동차용 전원이나 고정동력 장비의 보조전력 등을 중심으로 연구개발이 이루어지고 있다. 미국과 일본을 필두로 유럽뿐만 아니라 해외 자원에 대한 의존도가 높은 우리나라에서도 많은 연구가 진행되고 있다.

[0006] 연료전지는 교환막을 필수요소로 한다. 반응 온도가 높을수록 화학반응 효율이 증대되지만 교환막이 건조되면서 양성자 교환성이 낮아지게 되고 효율 또한 낮아지게 된다. 따라서 교환막을 수화상태로 유지해야 하는 구조적인 단점이 있다. 또한 교환막을 통해 연료가 역류하는 연료 역류현상(fuel crossover)도 큰 단점으로 지적되고 있다. 양성자 교환막은 매우 고가이며 연료전지 제작 시 공정이 복잡해진다.

[0007] 마이크로유체 연료전지(microfluidic fuel cell)는 미세유로에서 흐르는 유체들은 층류를 형성하여 잘 섞이지 않는다는 성질을 이용한다. 즉, 연료와 산화제 유체들을 각각 미세유로 내로 흐르게 하여 연료와 산화제의 액액계면(liquid-liquid interface)을 형성시키고, 이것이 양성자 교환막의 역할을 대신하게 한다. 따라서 교환막의 젖음유지(membrane humidification), 연료 역류현상(fuel crossover), 교환막의 파손 및 막힘 현상 등의 양성자 교환막 연료전지에서의 문제점들을 쉽게 해결할 수 있다. 또한 고가의 교환막을 사용하지 않기 때문에공정을 단순화 시킬 수 있으며 제작비용을 낮출 수 있다. 다만, 액액 경계면에서 확산에 따른 혼합에 의하여 연료전지의 성능이 저하되는 문제점이 있다.

[0009] 따라서, 신 에너지형태의 휴대용 전자기기 전력공급 장치의 개발을 위해 막을 사용하지 않는 마이크로유체 연료전지에 관한 연구가 필요하며 중요하다.

[0010] 마이크로유체 연료전지에 관한 구체적인 연구 중 대한민국 공개특허 제10-2016-0007718호는 마이크로 유체 연료전지에 관한 발명으로, 구체적으로는 연료와 산화제가 흐르도록 마이크로 채널을 구비한 기판; 그리고 상기 마이크로 채널을 덮도록 상기 기판상에 형성되며, 상기 마이크로 채널로 산화제 및 연료가 주입되는 산화제 주입구 및 연료 주입구가 형성된 커버부를 포함하며, 상기 마이크로 채널의 양측에는 상기 마이크로 채널의 길이 방향으로 제1 전극이 형성되고, 상기 마이크로 채널의 중앙측에는 양측의 제1 전극 사이에 상기 마이크로 채널의 길이 방향으로 제2 전극이 형성되며, 상기 마이크로 채널의 중앙 측으로 상기 산화제가 주입되도록 상기 산화제

주입구가 상기 커버부의 중앙측에 형성되는 동시에 상기 마이크로 채널의 양측으로 상기 연료가 주입되도록 상기 연료 주입구가 상기 산화제 주입구를 중심으로 상기 커버부의 양측에 형성되거나, 혹은 상기 마이크로 채널의 중앙 측으로 상기 연료가 주입되도록 상기 연료 주입구가 상기 커버부의 중앙측에 형성되는 동시에 상기 마이크로 채널의 양측으로 상기 산화제가 주입되도록 상기 산화제 주입구가 상기 연료 주입구를 중심으로 상기 커버부의 양측에 형성되는 구성을 갖는 마이크로 유체 연료전지를 개시하며, 상기와 같은 구성을 통하여 연료전지의 전력 밀도를 높일 수 있다고 언급하고 있다.

[0011] 또한, 대한민국 등록특허 제10-1897416호도 마이크로 유체 연료전지에 관한 발명으로, 구체적으로는 연료와 산화제가 주입되는 연료와 산화제가 흐르는 마이크로 채널을 포함하는 마이크로 유체 연료전지에 있어서, 연료와 산화제가 주입되는 연료 주입부 및 산화제 주입부가 마이크로 채널의 양 측면에, 상기 마이크로 채널의 일 말단을 기준으로 동일 거리에 서로 마주보며 위치하고, 상기 연료 주입부 및 산화제 주입부의 중심축은 상기 마이크로 채널의 중심축과 수직이 되도록 형성되고, 상기 마이크로 채널의 내부에는 상기 마이크로 채널의 일 말단을 기준으로 상기 연료 주입부 및 산화제 주입부와 동일 거리에 십자형의 구조물이 위치하는 것을 특징으로 하는 마이크로 유체 연료전지를 제공하고, 상기 기술은 주입부가 마이크로 채널의 중앙에 위치할 때 전력밀도가 개선되는 효과 있음을 언급하고 있다.

[0012] 또한, Journal of Power Sources 196: 4638-4645에서 Montesinos는 미세유체 연료전지의 성능 향상을 위해 마이크로 채널의 단면 형상을 연구하여, 구체적으로는 연료 교차(crossover)를 최소화하고 혼합영역을 줄임으로써 질량 수송 손실을 줄인 브리지(bridge) 구조를 갖는 미세유체 연료전지를 제안한 바 있다.

[0014] 전술한 바와 같이, 미세유체 연료전지의 성능 향상을 위해 다양한 전극 구조 및 유로 형상에 대한 연구가 진행되고 있으나 아직까지 양성자 교환막을 갖는 연료전지에 비해 낮은 전력 밀도(power density)가 낮아, 미세유체 연료전지의 응용을 제한하고 있다.

[0016] 이에 본 발명자들은 보다 개선된 전력 밀도를 갖는 미세유체 연료전지의 성능 향상을 위한 마이크로 채널의 단면 형상을 연구하던 중, 종래의 브리지 구조를 개선하여 복수의 브리지 구조를 가짐으로써, 향상된 전력밀도를 갖는 마이크로 유체 연료전지를 개발하고 본 발명을 완성하였다.

선행기술문헌

특허문헌

[0018] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허 제10-2016-0007718호

(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허 제10-1897416호

비특허문헌

[0019] (비특허문헌 0001) Journal of Power Sources 196: 4638-4645

발명의 내용

해결하려는 과제

[0020] 일 측면에서의 목적은

[0021] 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지를 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0023] 상기 목적을 달성하기 위하여,

[0024] 일 측면에서는,

[0025] 연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널을 포함하는 마이크로 유체 연료전지에 있어서,

[0026] 연료전지의 길이방향으로 일측에는 연료와 산화제가 각각 도입되는 연료 도입부 및 산화제 도입부를 포함하고, 타측에는 연료와 산화제가 각각 배출되는 연료 배출부 및 산화제 배출부를 포함하고, 상기 도입부와 배출부 사이에 배치되며, 각 도입부 및 배출부와 연결되고, 연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널;을 포함하고,

[0027] 상기 마이크로 채널은 연료가 흐르는 연료 유동 채널 및 산화제가 흐르는 산화제 유동 채널을 포함하고, 상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각은 연료와 산화제가 접하는 계면과 이격된 위치에 상대적으로 작은 채널 높이를 갖는 영역인 브리지를 적어도 한개 포함하는, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지가 제공된다.

[0029] 상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각은

[0030] 상기 브리지 및 상기 계면 사이에 형성된 내측 채널; 및

[0031] 상기 브리지 및 연료와 산화제가 접하는 계면과 마주하는 측면 사이에 형성된 외측 채널;을 포함하며, 바람직하게는 상기 내측 채널의 폭이 상기 외측 채널의 폭보다 넓을 수 있다.

[0033] 상기 연료 유동 채널 또는 산화제 유동 채널의 높이에 대한 상기 브리지의 높이의 비는 0.5 내지 0.95일 수 있다.

[0035] 상기 마이크로 유체 연료전지는,

[0036] 상기 마이크로 채널의 폭방향 일측에 구비된 제1 전극; 및

[0037] 상기 마이크로 채널의 폭방향 타측에 구비된 제2 전극;을 더 포함한다.

[0039] 상기 마이크로 채널의 폭은 100㎛ 내지 1000㎛ 일 수 있다.

[0040] 또한, 상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각의 폭은 50㎛ 내지 500㎛일 수 있다.

[0041] 또한, 상기 브리지의 폭은 30㎛ 내지 80㎛일 수 있다.

[0042] 또한, 상기 내측 채널의 폭은 1 내지 85㎛일 수 있다.

[0043] 또한, 상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각의 높이는 30㎛ 내지 100 ㎛일 수 있다.

[0045] 상기 브리지의 높이는 5㎛ 내지 48㎛일 수 있다.

[0047] 상기 브리지의 높이에 대한 폭의 비는 3 내지 10일 수 있다.

[0049] 다른 일 측면에서는,

[0050] 상기 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지의 도입부로 연료와 산화제가 층류를 형성하도록 각각 도입하고, 배출부를 통하여 연료와 산화제가 층류를 유지하면서 각각 배출되도록 하는 것을 특징으로 하는, 마

이크로 유체 연료전지의 성능 향상 방법이 제공된다.

발명의 효과

[0052] 본 발명은 마이크로 유체 연료전지의 마이크로 채널에 복수의 브리지 구조를 형성함으로써, 이온 전달을 향상시키고 연료와 산화제의 혼합영역이 감소됨에 따라 양성자의 수송이 활발히 이루어져 보다 높은 전류 생성을 할 수 있다. 또한, 옴 손실(ohmic loss)과 질량 수송 손실을 감소시킴으로써 연료전지의 성능을 보다 향상시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0054] 도 1은 일 실시 예에 따른 마이크로 유체 연료전지의 모식도이다.

도 2는 일 실시 예에 따른 마이크로 유체 연료전지의 마이크로 채널 및 이의 단면을 나타낸 모식도이다.

도 3은 비교 예에 따른 종래의 마이크로 유체 연료전지의 마이크로 채널 및 이의 단면을 나타낸 모식도이다.

도 4는 일 실시 예에 따른 마이크로 유체 연료전지의 내측 채널 및 외측 채널의 폭에 따른 전지의 분극곡선을 나타내는 그래프이다.

도 5는 일 실시 예에 따른 마이크로 유체 연료전지의 내측 채널 및 외측 채널의 폭에 따른 전지의 전력 밀도-전류 밀도 곡선을 나타내는 그래프이다.

도 6은 일 실시 예에 따른 마이크로 유체 연료전지의 브리지 높이에 따른 전력 밀도-전류 밀도 곡선을 나타내는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0055] 이하, 본 발명의 실시 예를 도면을 참조하여 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명은 이하의 특정 실시 형태에 한정되는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0056] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 이에 본 발명이 한정되지 않는다.

[0057] 명세서 및 청구범위 전체에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것일 뿐, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 배제하지 않는다.

[0058] 또한, 명세서 및 청구범위 전체에서, '혼합 영역' 또는 'mixing region'과 '연료 확산 영역' 또는 'fuel diffusion region'은 동일한 의미로 사용된다.

[0059] 또한, '도입부'는 '도입부 마이크로 채널'과 '배출부'는 '배출부 마이크로 채널'과 동일한 의미로 사용된다.

[0060] 또한, '채널'은 마이크로 유체 연료전지의 일 구성으로, 도입부를 통하여 각각 들어온 연료 및/또는 산화제가 흐르는 영역을 의미한다.

[0061] 또한, '채널의 폭'은 연료와 산화제가 흐르는 채널의 길이 방향에 대한 수직 방향으로의 채널 단면의 길이를 의미한다.

[0062] 또한, '채널의 높이'는 채널의 길이방향 및 채널의 폭과 수직하는 방향으로의, 채널의 바닥부(최하부)에서 채널의 최상부까지의 채널 단면의 길이이다.

[0063] 또한, '브리지'는 연료와 산화제가 동일 방향으로 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널의 바닥부 중 일부가 채널의 길이 방향으로 일정 높이로 융기된 부분을 의미한다.

[0064] 또한, '브리지의 폭'은 연료와 산화제가 흐르는 채널의 길이 방향에 대한 수직 방향으로의 브리지 단면의 길이를 의미하며,

[0065] 또한, '브리지의 높이'는 채널의 길이방향 및 채널의 폭과 수직하는 방향으로의, 브리지의 바닥부(채널의 바닥부에서 융기된 부분의 최하부)에서 채널의 최상부까지의 브리지 단면의 길이이다.

[0067] 또한, 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 본 명세서에서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0069] 이하, 본 발명을 상세히 설명한다.

[0071] 일 측면에서는,

[0072] 연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널을 포함하는 마이크로 유체 연료전지에 있어서,

[0073] 연료전지의 길이방향으로 일측에는 연료와 산화제가 각각 도입되는 연료 도입부 및 산화제 도입부를 포함하고, 타측에는 연료와 산화제가 각각 배출되는 연료 배출부 및 산화제 배출부를 포함하고, 상기 도입부와 배출부 사이에 배치되며, 각 도입부 및 배출부와 연결되고, 연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널;을 포함하고,

[0074] 상기 마이크로 채널은 연료가 흐르는 연료 유동 채널 및 산화제가 흐르는 산화제 유동 채널을 포함하고, 상기 연료 유동 채널 및 산화제 유동 채널 각각은 연료와 산화제가 접하는 계면과 이격된 위치에 상대적으로 작은 채널 높이를 갖는 영역인 브리지를 적어도 한개 포함하는, 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지가 제공된다.

[0076] 이하, 일 측면에 따른 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지를 도면을 참조하여 상세히 설명한다.

[0078] 도 1은 일 실시 예에 따른 마이크로 유체 연료전지의 모식도이다.

[0079] 도 2는 일 실시 예에 따른 마이크로 유체 연료전지의 마이크로 채널 및 이의 단면을 나타낸 모식도이다.

[0080] 도 3은 비교 예에 따른 종래의 마이크로 유체 연료전지의 마이크로 채널 및 이의 단면을 나타낸 모식도이다.

[0081] 도 1 및 2를 참조하면, 일 측면에 따른 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지는 연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널(300)을 포함하는 마이크로 유체 연료전지(1)로,

[0082] 연료전지의 길이방향으로 일측에는 연료와 산화제가 각각 도입되는 연료 도입부(110) 및 산화제 도입부(120)를 포함하고, 타측에는 연료와 산화제가 각각 배출되는 연료 배출부 및 산화제 배출부를 포함하고, 상기 연료와 산화제가 층류를 이루며 흐르는 마이크로 채널(300)을 포함하되, 상기 마이크로 채널(300)은 연료가 흐르는 연료 유동 채널(310) 및 산화제가 흐르는 산화제 유동 채널(320)을 포함한다.

[0084] 일 측면에 따른 마이크로 유체 연료전지(1)는 연료와 산화제가 연료전지의 마이크로 채널 일측으로 도입되어, 길이방향의 타측으로 배출되는 구조를 이루며, 도입부(110, 120)로 도입되는 연료와 산화제는 층류를 형성하며 유동하여, 마이크로 채(300)널 내에서 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)이 계면(300)을 형성하여 서로 분리되고, 형성된 액액 경계면이 양성자 교환막의 역할을 대체하므로 별도의 교환막을 구비하지 않는다.

[0086] 일 측면에 따른 마이크로 유체 연료전지(1)는 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320) 각각은 연료와 산화제가 접하는 계면(330)과 이격된 위치에 상대적으로 작은 채널 높이를 갖는 영역인 브리지(313, 323)를 적어도 한개 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0087] 종래의 경우 마이크로 유체 연료전지의 성능 개선을 위해 도 3에 도시된 바와 같이, 연료와 산화제가 접하는 계면에 브리지 구조를 갖는 마이크로 채널을 구비한 마이크로 유체 연료전지를 개시한 바 있다.

[0088] 일 측면에 따른 마이크로 유체 연료전지(1)는 종래와 달리 연료와 산화제가 접하는 계면(330)이 아닌 상기 계면과 이격된 위치에 브리지(313, 323)를 형성함으로써 이온 전달을 향상시키고 높은 전류 생성을 할 수 있다. 또한, 옴 손실(ohmic loss)과 질량 수송 손실을 감소시킴으로써 연료전지의 성능을 보다 향상시킬 수 있다.

[0090] 도 2를 참조하면, 일 측면에 따른 마이크로 유체 연료전지(1)의 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320) 각각은 상기 브리지(313,323) 및 상기 계면(330) 사이에 형성된 내측 채널(311, 321); 및 상기 브리지(341, 342) 및 연료와 산화제가 접하는 계면과 마주하는 측면(351, 352) 사이에 형성된 외측 채널(312, 322)을 포함한다.

[0091] 일례로, 도 2와 같이 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320) 각각은 한개의 브리지(313,323)를 포함하여 상기 연료 유동 채널(310)은 내측 채널(311), 외측 채널(312) 및 상기 내측 채널(311) 및 외측 채널(312) 사이에 형성된 브리지(313)로 이루어질 수 있고, 상기 산화제 유동 채널(320)은 내측 채널(321), 외측 채널(322) 및 상기 내측 채널(321) 및 외측 채널(322) 사이에 형성된 브리지(323)로 이루어질 수 있다.

[0093] 이때, 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)에 형성된 내측 채널(311, 321), 외측 채널(312, 322) 및 브리지(313,323)는 폭 방향의 길이가 모두 같을 수 있으나 바람직하게는 상기 내측 채널(311, 321)의 폭 또는 폭 방향 길이가 상기 외측 채널(312, 322)의 폭 또는 폭 방향의 길이보다 클 수 있다.

[0094] 즉, 상기 브리지(313,323)는 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)에서, 각각의 계면(330)보다 측면(351, 352)에 보다 가깝게 형성될 수 있고 이를 통해 마이크로 유체 연료전지의 전력 밀도를 보다 향상시킬 수 있다.

[0096] 또한, 이때, 상기 연료 유동 채널(310) 또는 산화제 유동 채널(320)의 높이에 대한 상기 브리지의 높이의 비는 0.5 내지 0.95일 수 있고, 보다 바람직하게는 0.7 내지 0.93일 수 있고, 보다 바람직하게는 0.85 내지 0.93일 수 있다.

[0098] 일 측면에 따른 마이크로 유체 연료전지(1)는 상기 브리지의 높이를 상기 범위로 조절함으로써, 전력 밀도를 보다 향상시킬 수 있다.

[0100] 일 측면에 따른 마이크로 유체 연료전지(1)는 상기 마이크로 채널의 폭방향 일측에 구비된 제1 전극; 및 상기 마이크로 채널의 폭방향 타측에 구비된 제2 전극;을 더 포함할 수 있다.

[0101] 구체적으로 상기 제1 전극은 상기 마이크로 채널(300)의 상기 연료 유동 채널(310)의 외측에 배치된 산화전극 또는 양극(anode)이고, 상기 제2 전극은 상기 마이크로 채널(300)의 상기 산화제 유동 채널(320)의 외측에 배치된 환원전극 또는 음극(cathode)일 수 있다.

[0102] 상기 제1 전극 및 제2 전극은 바람직하게는 다공성 전극일 수 있고, 이를 통해 질량 수송 손실을 최소화할 수 있다.

[0104] 한편, 상기 마이크로 채널(300)의 폭은 100㎛ 내지 1000㎛일 수 있고, 바람직하게는 200㎛ 내지 500㎛일 수 있다. 만약 상기 마이크로 채널(300)의 폭이 100 ㎛ 미만이면 중앙 유동 채널의 폭이 줄어들고 완전한 연료 및 산화제의 혼합이 일어날 수 있는 문제점이 있고, 1000㎛를 초과하면 연료전지의 성능이 저하되는 문제점이 있다.

[0106] 이때, 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)의 채널 폭은 서로 같거나 다를 수 있으나 바람직하

게는 같을 수 있다.

[0107] 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320) 각각의 채널 폭은 50㎛ 내지 500 ㎛일 수 있고 바람직하게는 100㎛ 내지 200㎛일 수 있다.

[0109] 또한, 상기 마이크로 채널(300)의 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)의 높이는 30㎛ 내지 100 ㎛일 수 있고 바람직하게는 서로 같을 수 있다.

[0110] 만약, 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)의 높이가 30㎛ 미만인 경우 산화제 및 연료가 혼합되는 혼합영역의 폭이 상대적으로 커져 분리된 확산 영역과 공핍 영역이 혼합되어 셀 성능이 저하되거나 작동이 멈추는 문제가 발생될 수 있고, 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)의 높이가 100㎛을 초과하는 경우, 혼합 영역이 증가하고 이온 수송이 더디게 되어 전력 밀도 및 전류 밀도가 감소하는 문제가 발생될 수 있다.

[0111]

[0112] 또한, 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)에 형성된 상기 브리지(313,323)의 폭은 30㎛ 내지 80㎛일 수 있고, 상기 내측 채널(311, 321)의 폭은 1 내지 85㎛일 수 있다. 또한, 상기 브리지(313, 323)의 높이는 5㎛ 내지 48 ㎛일 수 있다.

[0114] 또한, 상기 브리지의 높이에 대한 폭의 비는 3 내지 10일 수 있다. 만약 상기 폭의 비가 3 미만인 경우에는 공핍 영역과 연료 확산 영역을 감소시키는 효과가 줄어드는 문제점이 있고, 그 비가 10을 초과하는 경우에는 연료 전지의 성능이 저하되는 문제가 발생될 수 있다.

[0116] 일 측면에 따른 마이크로 유체 연료전지(1)는 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320) 각각의 연료와 산화제가 접하는 계면과 이격된 위치에 상기와 같은 브리지(313, 323)가 적어도 한개 형성된, 복수의 브리지 구조를 포함함으로써, 연료전지의 성능을 보다 향상시킬 수 있다.

[0118] 한편, 다른 일 측면에서는,

[0119] 상기 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지의 도입부로 연료와 산화제가 층류를 형성하도록 각각 도입하고, 배출부를 통하여 연료와 산화제가 층류를 유지하면서 각각 배출되도록 하는 것을 특징으로 하는, 마이크로 유체 연료전지의 성능 향상방법이 제공된다.

[0121] 일 측면에 따른 마이크로 유체 연료전지의 성능 향상방법은 상기 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지의 마이크로 채널의 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320) 각각에 브리지(313, 323)를 도입함으로써, 연료 전지의 성능 및 효율을 크게 개선시킬 수 있는 우수한 효과가 있다.

[0123] 이하, 실시 예 및 실험 예를 통하여 본 발명을 상세하게 설명한다.

[0124] 단, 하기 실시 예 및 실험 예는 본 발명을 예시하는 것일 뿐, 본 발명의 내용이 하기의 실시 예에 의해 한정되는 것은 아니다.

[0126] <실시 예>

[0127] 도 1 및 2에 도시된 바와 같이, 연료전지의 길이방향으로의 길이(L_0)가 10 ㎜이고, 높이가 50 ㎛이고, 폭이 300 ㎛인 마이크로 채널을 구비한 미세유체 연료전지를 형성하였다.

[0128] 구체적으로 상기 마이크로 채널(300)의 길이방향 일측에 3 ㎜의 폭을 갖는 연료 도입부(110) 및 산화제 도입부

(120)를 형성하고, 타측에 연료 배출부 및 산화제 배출부를 형성하였다.

[0129] 또한, 상기 마이크로 채널(300)의 폭 방향 일측에 폭 1 ㎜의 제1 다공성 전극(410)을 형성하고 타측에 폭 1 ㎜의 제2 다공성 전극(420)을 설치하여, 마이크로 유체 연료전지를 제작하였다.

[0131] 이때, 상기 상기 마이크로 채널(300), 상기 마이크로 채널(300)의 내측 채널, 브리지 및 외측 채널의 단면은 모두 직사각형 모양을 갖도록 하였다.

[0132] 구체적으로, 상기 마이크로 채널(300)은 각각이 50㎛의 높이 및 150㎛폭을 갖는 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)을 포함하고 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320) 각각은 계면으로부터 측면을 향해 순차적으로 내측 채널, 브리지 및 외측 채널을 형성하되 내측 채널 및 외측 채널의 폭을 아래의 표 1에서와 같이 달리 형성하였다. 이때 상기 브리지는 아래의 표 1의 높이를 가지며, 마이크로 채널의 바닥면으로부터 40㎛만큼 융기된 형태로 형성하였다.

표 1

[0133]

	W_I/W_r	W_B/W_r	W_O/W_r	h/H
실시예 1	1	1	1	0.2
실시예 2	1	0.7	1.3	0.2
실시예 3	1	1.3	0.7	0.2
실시예 4	1	1.6	0.4	0.2
실시예 5	0.7	1	0.3	0.2
실시예 6	1.3	1	0.7	0.2
실시예 7	0.7	1	1.3	0.2
실시예 8	0.4	1	1.6	0.2
실시예 9	1.3	0.7	1	0.2
실시예 10	0.7	1.3	1	0.2
실시예 11	0.4	1.6	1	0.2
실시예 12	1	1	1	0.5
실시예 13	1	1	1	0.8
실시예 14	1	1	1	0.9
실시예 15	1	1	1	0.95

[0134] (W_r= 50㎛, H=50㎛)

[0135] <비교 예 1>

[0136] 도 3에 도시된 바와 같이, 상기 실시 예 1에서, 상기 브리지를 아래와 같이 마이크로 채널의 중앙 즉, 상기 연료 유동 채널(310) 및 산화제 유동 채널(320)의 계면에 형성하는 것으로 달리하는 것을 제외하고 실시 예 1과 동일한 형태의 마이크로 유체 연료전지를 제작하였다.

[0137] 구체적으로, 상기 마이크로 채널(300)의 중앙에 10㎛의 높이 및 100㎛의 폭을 가지며, 마이크로 채널의 바닥면으로부터 40㎛만큼 융기된 형태의 브리지를 형성하고, 상기 브리지의 폭방향 일측에 50 ㎛의 높이 및 100㎛의 폭을 갖는 연료 유동 채널(310)을 형성하고 상기 브리지의 폭방향 타측에 50 ㎛의 높이 및 100㎛의 폭을 갖는 산화제 유동 채널(320)을 형성하였다.

[0139] 분석 방법

[0140] 이하의 실험에서 마이크로 유체 연료전지의 성능 평가를 위해 다분야 연성해석 상용 프로그램인 COMSOL(COMSOL Multiphysics®46)을 사용하여 마이크로 유체 연료전지 채널 내부 유동영역을 대상으로 전기화학적 유동을 모사하였다.

[0142] <실험 예 1>

[0143] 상기 분석 방법에 의한 분석 결과의 격자 의존성을 평가하기 위해 Richardson 외삽법을 기반으로 하는 GCI(Grid-convergence index) 분석을 수행하였으며, 0.6V의 셀 전압에서 마이크로 유체 연료전지(MMFC)의 전류에 대한 GCI 분석 결과를 아래의 표 2 및 도 4에 나타내었다.

[0145] 표 2 및 도 4에 나타난 바와 같이, 마이크로 유체 연료전지(MMFC)의 전류는 격자 노드의 수가 증가할수록 점차적으로 수렴하는 경향이 나타났다. 또한 N_1을 사용할 때 사용된 외삽 상대 오차는 0.131%이고 GCI는 0.163%로 작은 수치적 불확실성을 나타났으며 이로부터 N_1을 최적의 격자 시스템으로 결정하고 상기 격자 구조를 기반으로 추가 계산을 수행했습니다.

[0146] 아울러, 수치 결과를 검증하기 위해 단일 브리지를 갖는 비교 예 1의 마이크로 유체 연료전지에 대한 셀 전압 및 전력 밀도 대 전류 밀도의 분석 결과 곡선(numerical results)을 실제 실험 결과 데이터(experimental data)와 비교하였으며 그 결과를 도 5 및 도 6에 나타내었다. 이때 계산을 위해 연료와 산화제로 HCOOH 1000 mol/m^3와 $KMnO_4$ 144 mol/m_3을 사용하였다.

[0147] 도 5 및 도 6에 나타난 바와 같이, 분석 결과는 0.9V의 셀 전압에서 19.0%의 가장 높은 상대 오차, 0.7V에서 0.65%의 가장 낮은 상대 오차가 나타내었다.

[0148] 이를 통해 수치 분석 결과 값이 실제 실험 데이터와 거의 유사함을 확인하였다.

[0150] <실험 예 2> 단일 브리지 및 이중 브리지 구조에 따른 연료전지 성능 평가

[0151] 복수의 브리지 형성에 따른 연료전지 성능을 평가하기 위해, 비교 예 1 및 실시 예 1의 마이크로 유체 연료전지의 전력 밀도를 비교하고 그 결과를 도 7에 나타내었다.

[0153] 도 7에 나타난 바와 같이, 비교 예 1 및 실시 예 1의 마이크로 유체 연료전지의 최대 피크 전력 밀도는 각각 23.79mW/cm^2 및 31.88mW/cm^2로, 실시 예 1의 마이크로 유체 연료전지가 비교 예 1의 마이크로 유체 연료전지 보다 약 34%로 현저히 높은 최대 전력 밀도를 나타냄을 알 수 있다.

[0155] <실험 예 3> 브리지 형성 위치에 따른 연료전지 성능 평가

[0156] 브리지 형성 위치에 따른 연료전지 성능을 평가하기 위해 다분야 연성해석 상용 프로그램인 COMSOL(COMSOL Multiphysics®46)을 사용하여 실시 예의 연료전지에 동일한 유량(60 ㎕/min)의 연료 및 산화제를 주입함에 따른 음극의 전압변화 1.6 내지 0 V에 따른 전류밀도와 전력밀도를 측정하고, 그 결과를 도 8 내지 도 14에 나타내었다.

[0157] 도 8은 내측 채널의 폭을 50㎛으로 고정(W_I/W_r = 1.0으로 고정)하고, 서로 다른 W_O/W_r(또는 W_B/W_r)에 대한 전력밀도 곡선을 나타낸다.

[0158] 도 8에 나타난 바와 같이, 성능 변화는 크지 않았으나 W_O/W_r=1인 경우 및 W_O/W_r=1.3일 때의 최대 전력 밀도는 각각 31.88 mW/cm^2 및 35.11 mW/cm^2으로 W_O/W_r=1인 경우 대비 W_O/W_r=1.3일 때 약 10.0% 더 높은 최대 전력 밀도가 나타남을 알 수 있다.

[0159] 한편, W_B/W_r= 1.6(W_O/W_r=0.4)일때는 29.65mW/cm^2로, W_O/W_r=1인 경우 대비 약 7.0% 더 낮은 최대 전력 밀도가 나타났다. 이는 브리지의 폭(W_B)의 폭이 커질수록 이온의 이동에 대한 저항이 증가하여 연료전지의 성능이 다소 저하됨을 의미한다.

[0161] 도 9는 도 8의 채널의 도입부에서 5㎜ 떨어진 x-z 평면에서 연료(HCOOH)의 농도 등고선을 보여준다. 혼합 영역

의 두께는 큰 변화를 보이지 않지만 옴 손실은 좁은 채널의 너비와 외측 채널의 전극 주변 흐름 영역에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.

[0163] 도 10은 브리지의 폭을 50㎛으로 고정(W_B/W_r=1.0으로 고정)하고, 서로 다른 W_I/W_r(또는 W_O/W_r)에 대한 전력 밀도 곡선을 나타낸다.

[0164] 도 10에 나타난 바와 같이, 내측 채널의 폭(W_I) 및 외측 채널의 폭(W_O)을 변화시켰을 때, 브리지의 폭에 대한 내측 채널의 폭의 비(W_I/W_r)의 값이 커질수록 최대 전력 밀도가 커짐을 알 수 있으며 W_I/W_r=1.7일 때 37.75mW/cm^2로 W_I/W_r=1인 경우 대비 18%증가한 반면, W_I/W_r=0.4일 때 29.16mW/cm^2로 W_I/W_r=1인 경우 대비 8% 감소함을 알 수 있다.

[0166] 도 11은 도 10의 채널의 도입부에서 5mm 떨어진 x-z 평면에서 연료(HCOOH)의 농도 등고선을 보여준다. 도 11에 나타난 바와 같이, W_I가 감소함에 따라 혼합 영역의 두께가 증가하여 저항 손실이 증가하여 전력 밀도가 감소함을 알 수 있다. 혼합 영역은 W_I/W_r= 0.4 및 0.7에서 브리지 구조상의 채널까지 확장되었다. W_O의 증가는 양극 또는 음극 절반 채널에서 반응물의 수용을 보장하지만 두꺼워진 혼합 영역은 연료전지 전체 성능을 감소시킴을 알 수 있다. 즉, 일 측면에 따른 복수의 브리지 구조를 갖는 마이크로 유체 연료전지에서, 내측 채널의 폭(W_I)이 연료전지 성능에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다.

[0168] 도 12는 외측 채널의 폭을 50㎛으로 고정(W_O/W_r=1.0으로 고정)하고, 서로 다른 W_I/W_r(또는 W_B/W_r)에 대한 전력 밀도 곡선을 나타내고 도 13은 도 12의 채널의 도입부에서 5mm 떨어진 x-z 평면에서 연료(HCOOH)의 농도 등고선을 보여준다.

[0169] 도 12에 나타나 바와 같이, W_B/W_r=0.7(W_I/W_r=1.3)에서 최대 전력 밀도는 36.79mW/cm^2로 W_B/W_r=1인 경우보다 약 15% 높은 반면 W_B/W_r=1.6(W_I/W_r=0.4)은 W_B/W_r=1인 경우과 비교하여 최대 전력 밀도가 25.48mW/cm^2로 약 20% 정도 감소됨을 알 수 있다.

[0170] 또한 도 10 및 도 12에서 나타난 바와 같이, W_O를 변화시키는 경우와 비교하여 고정된 W_O을 사용하는 경우는 W_I/W_r=0.4-1.3 범위에서 최대 전력 밀도의 변동이 2배 이상 더 크게 나타남을 알 수 있다. 고정된 W_O을 사용하는 경우 W_I가 증가함에 따라 최대 전력 밀도가 커졌으며, 도 13에 나타난 바와 같이 혼합 영역 감소의 긍정적인 효과는 W_O를 변경한 이전의 경우와 유사하지만 W_O를 변경함에 따른 부정적인 영향(즉, 전극 주변 면적 감소)이 외측 채널에서 전극 사이의 거리를 늘리면 이전 경우에 비해 제거됨을 알 수 있다. 전극 사이의 거리가 늘어남에 따라 옴 손실을 줄일 수 있고 각 전극 주변의 공간을 증가시킴으로써 보다 많은 새로운 반응물을 수용할 수 있다.

[0172] <실험 예 4> 브리지의 높이에 따른 연료전지 성능 평가

[0173] 브리지의 높이에 따른 연료전지 성능을 평가하기 위해 다분야 연성해석 상용 프로그램인 COMSOL(COMSOL Multiphysics®46)을 사용하여 실시 예의 연료전지에 동일한 유량(60 ㎕/min)의 연료 및 산화제를 주입함에 따른 음극의 전압변화 1.6 내지 0 V에 따른 전류밀도와 전력밀도를 측정하고, 그 결과를 도 14 및 도 15에 나타내었다.

[0174] 도 14에 나타난 바와 같이, 브리지의 높이가 증가할수록 최대 전력 밀도가 증증가하여, h/H=0.9일 때 최대값을 나타냄을 알 수 있다. h/H=0.9일 때의 최대 전력밀도는 86.56mW/cm^2로 h/H=0.2일 때보다 약 171% 높음을 알 수 있다.

[0175] 이는 브리지의 높이가 증가함에 따라 더 많은 이온이 확산 혼합 영역을 통과하여 옴 손실이 낮아지기 때문인 것으로 볼 수 있다. 도 15는 연료 농도 등고선으로서, 도 15에 나타난 바와 같이, h가 증가함에 따라 혼합 영역의 두께가 감소하고 h/H가 작을수록 감소율이 더 높음을 알 수 있다.

[0176] 한편 h/H를 0.9을 초과하여 높이면 반응물이 활성 부위로 이동할 수 없기 때문에 성능이 저하된다. 즉, 브리지를 갖지 않는 채널(h/H=1)을 형성할 경우 마이크로 유체 연료전지의 성능이 급격히 감소함을 알 수 있다.

부호의 설명

[0178] 1: 마이크로 유체 연료전지

110: 연료 도입부

120: 산화제 도입부

210: 연료 배출부

220: 산화제 배출부

300: 마이크로 채널

310: 연료 유동 채널

320: 산화제 유동 채널

311, 321: 내측 채널

312, 322: 외측 채널

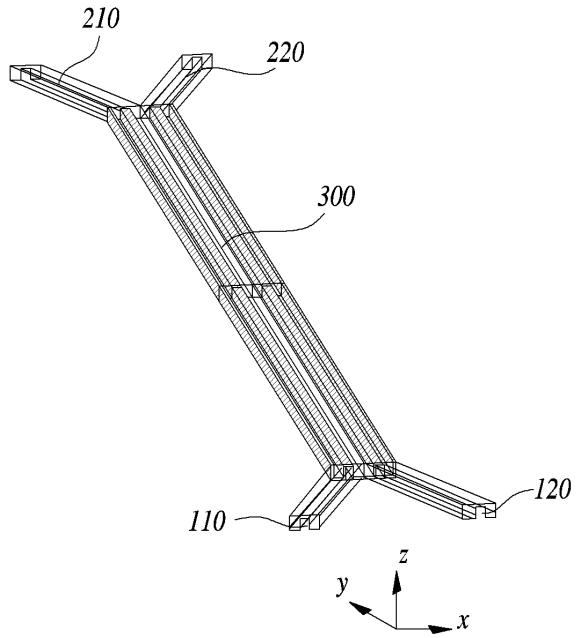
313, 323: 브리지

330: 계면

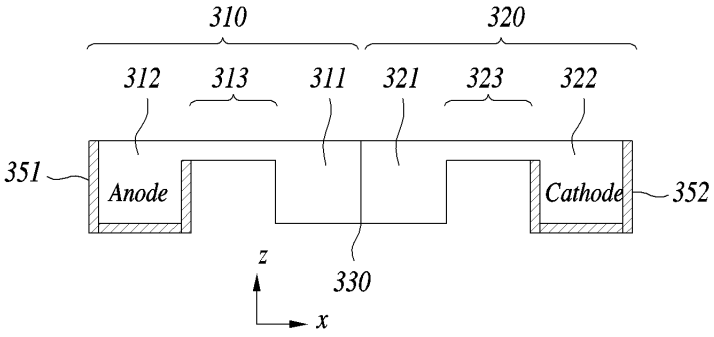
351, 352: 측면

도면

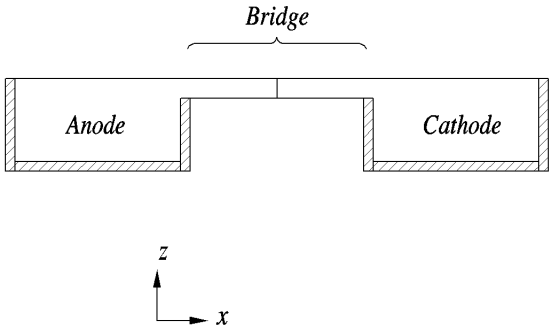
도면1


210
220
300
120
110
z
y
x

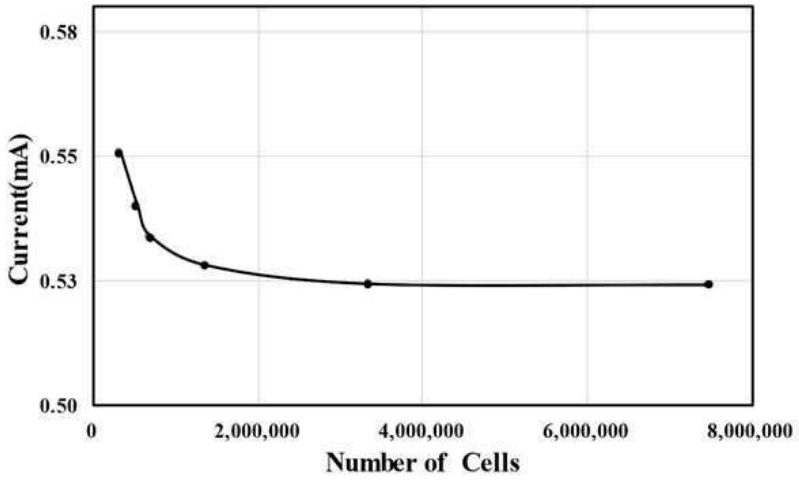
도면2


310
320
312
313
311
321
323
322
351
Anode
Cathode
352
330
z
x

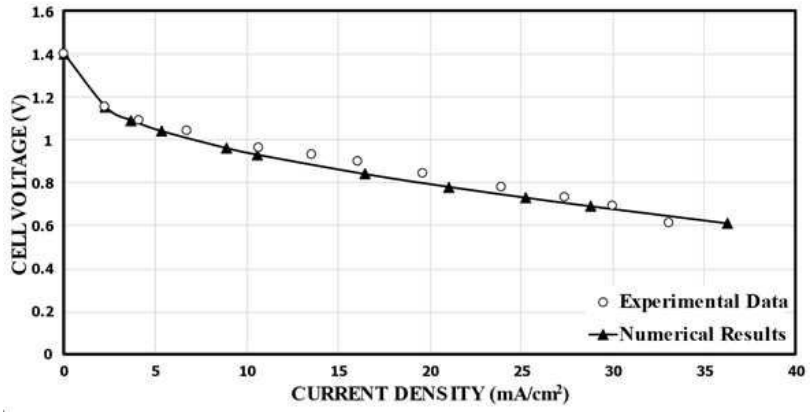
도면3


Bridge
Anode
Cathode
z
x

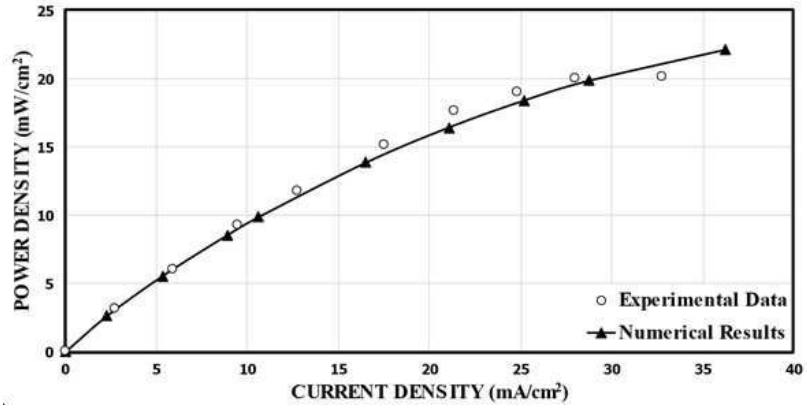
도면4


0.58
0.55
0.53
0.50
Current(mA)
0
2,000,000
4,000,000
6,000,000
8,000,000
Number of Cells

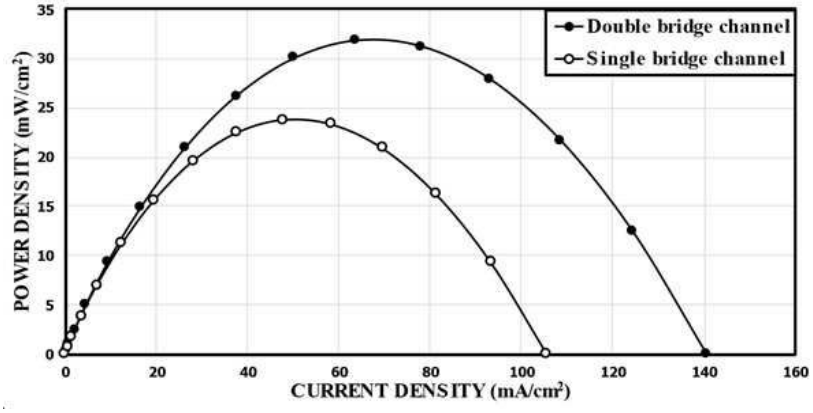
도면5


1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
CELL VOLTAGE (V)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
CURRENT DENSITY (mA/cm²)
Experimental Data
Numerical Results

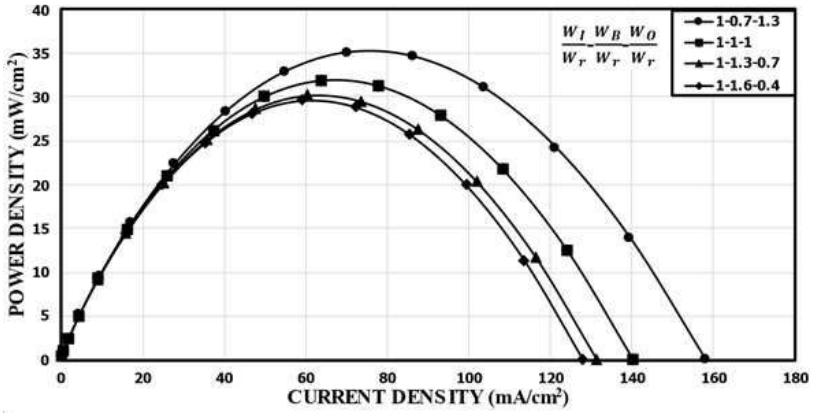
도면6


POWER DENSITY (mW/cm²)
CURRENT DENSITY (mA/cm²)
Experimental Data
Numerical Results

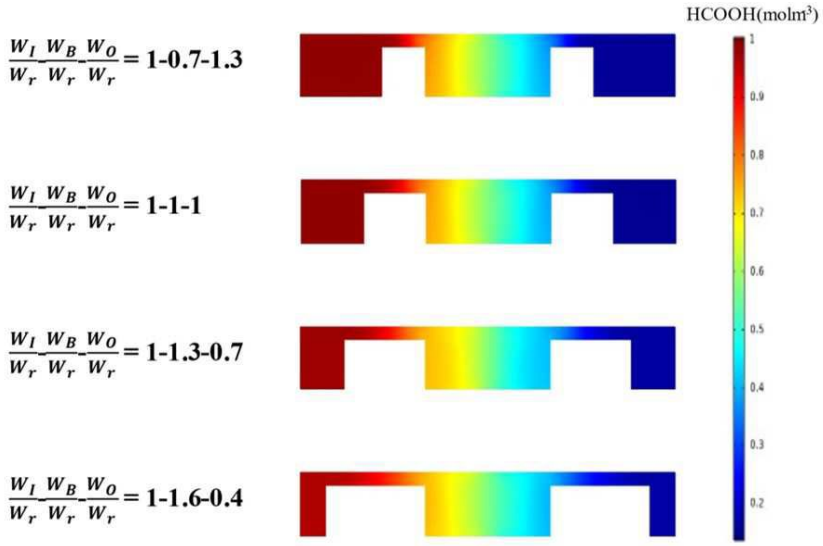
도면7


POWER DENSITY (mW/cm²)
CURRENT DENSITY (mA/cm²)
Double bridge channel
Single bridge channel

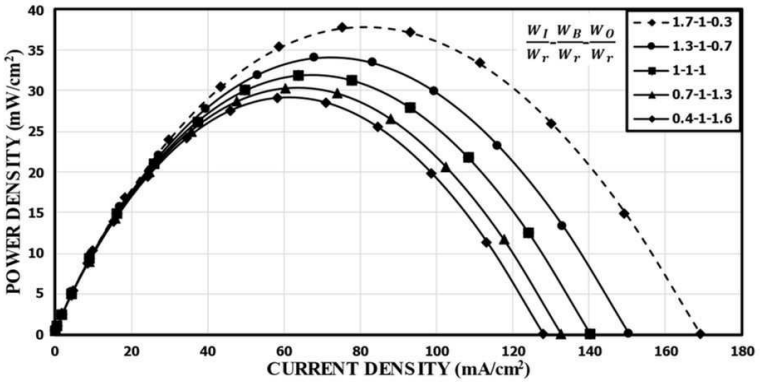
도면8


POWER DENSITY (mW/cm²)
CURRENT DENSITY (mA/cm²)
1-0.7-1.3
1-1-1
1-1.3-0.7
1-1.6-0.4

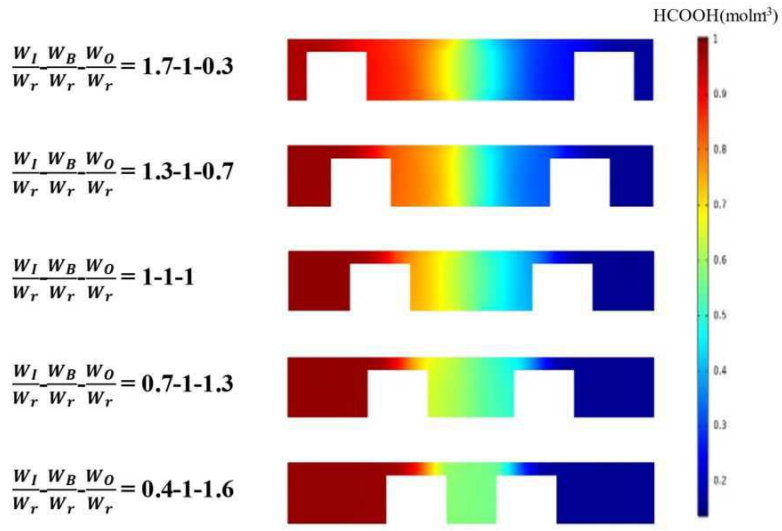
도면9



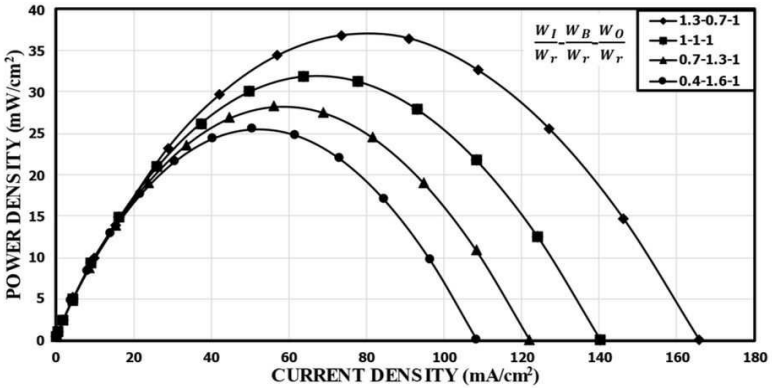
도면10



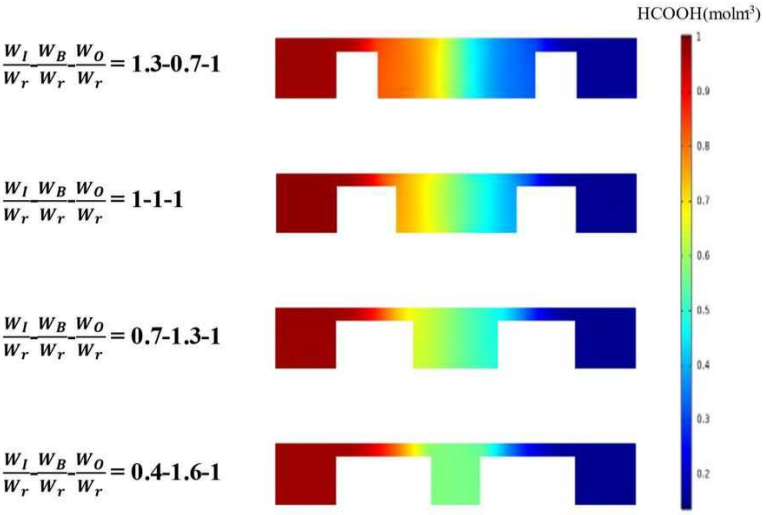
도면11



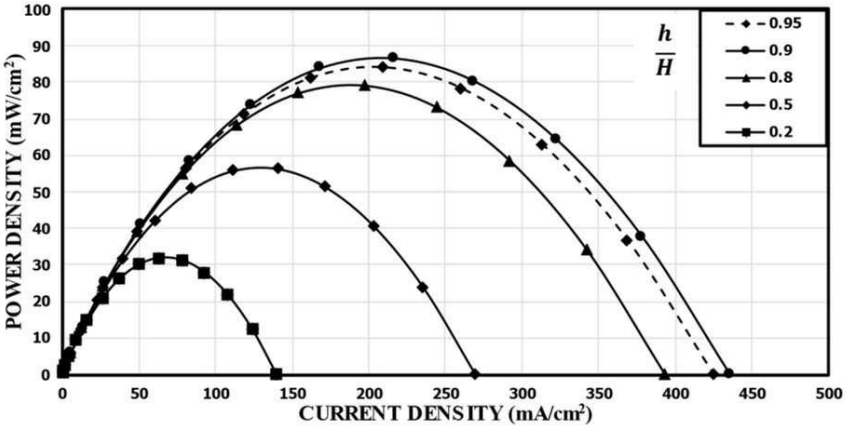
도면12



도면13



도면14



도면15

