Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 2, 2024, pp. 205~215
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.2.205

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

PEMFC 시스템 효율 향상을 위한 열 관리 설비 개발 및 연구

김재환[1] · 이지승[1] · 강인석[2] · 주현철[1†]

[1]인하대학교 대학원 기계공학과, [2]한국에너지기술연구원 성과확산실

Development and Research of Thermal Management Equipment for Efficiency Enhancement of PEMFC Systems

JAEHWAN KIM[1], JISEUNG LEE[1], INSEAK KANG[2], HYUNCHUL JU[1†]

[1]Department of Mechanical Engineering, Inha University Graduate School, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea.
[2]Technology Commercialization Team, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea.

[†]Corresponding author : hcju@inha.ac.kr

Received 13 March, 2024
Revised 5 April, 2024
Accepted 23 April, 2024

Abstract >> This study introduced a direct contact heat exchanger to enhance the efficiency of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) systems. According to previous research, 28% of the operating costs of fuel cell systems are attributed to heat exchanger devices, prompting the design of a direct contact heat exchanger to address this issue. Optimal configurations were determined through computational fluid dynamics analysis and experimental device fabrication, and the enhanced heat exchange performance of the heat exchanger was experimentally confirmed. Through this, the contribution of the direct contact heat exchanger to the heat management and efficiency enhancement of PEMFC systems was established.

Key words : Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질 연료전지), Balance of plant(주변 보조 설비), Heat exchanger(열교환기), Heat transfer(열전달), Air conditioning and refrigeration(공조 냉동)

1. 서 론

종래의 발전 설비는 대부분 화석연료를 통한 전력 생산 방식을 채택하고 있다. 그러나 지구온난화 등의 환경 문제로 인하여 최근 전 세계적으로 탄소 배출 감축을 위한 규제가 강화되면서 기존의 화력 발전 방식이 아닌 새로운 대안이 요구되고 있다[1,2]. 이러한 문제의 대안으로 Fig. 1(a)와 같이 수소를 이용한 발전 방식이 주목받고 있다[3]. 수소 연료전지 발전 방식은 종래의 화력 발전 대비 발전 효율이 우수하고[4] 발전 연료인 수소의 변환 과정에서 공해 물질을 생성하지 않기 때문에 친환경적이며 경제적이다[5-7].

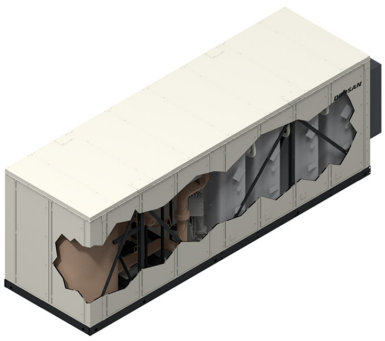
고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 수소 연료전지의 한 종류로 낮은 작동 온도에서 높은 전력밀도를 유지하며 빠른 가동과 정지 능력을 보인다[8]. 또한 PEMFC는

2024 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

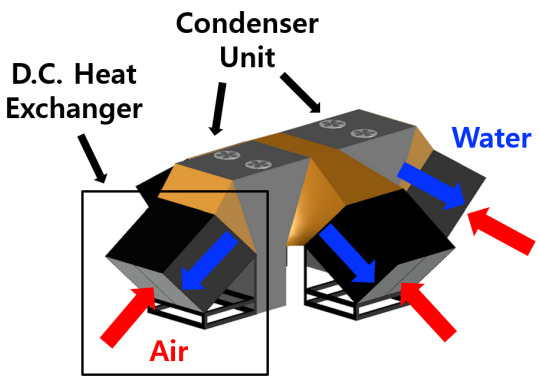
발전용으로 전력 효율성이 우수하여 발전용 전력 생산 비용도 크게 절감할 수 있다[9]. 이러한 특징으로 인해 PEMFC는 발전용 연료전지로 적합하다는 평가와 함께 전 세계적으로 활발한 연구 개발이 이루어지고 있다[10].

발전을 위해 요구되는 연료전지 시스템의 전력 생산 비용은 시스템을 구성하는 PEMFC의 셀 스택과 시스템을 구성하는 주변 보조 설비(balance of plant)의 운전 비용에 따라 결정된다. PEMFC 시스템을 통한 발전 설비에 있어서 중요한 점은 전력 생산에 필요한 생산 비용을 낮추어 전력 생산 측면에서 가격 경쟁력을 갖는 것이다. 위와 같은 가격 경쟁력을 위해 분산 발전용 연료전지 시스템 등과 같은 여러 가지 운전 시스템이 제시되었으며[11] 시스템 운전 및 공정 비용과 같은 문제에 대해서도 다양한 운전 방식이 제안되었다[12]. 또한 PEMFC 운전 시 중요한 이슈 중 하나는 바로 물과 열 관리 방식이다[13]. Fig. 2(a)와 같이 발전용 연료전지 시스템에서 전체 전력 생산비용의 28%가 열 관리 시스템 비용으로 소모되는 것으로 나타났다[14-17].

PEMFC 시스템에서는 열 관리 시스템의 효율 향상을 위한 다양한 시도들이 이루어졌다. 수소연료의 예열 방식은 PEMFC 시스템 효율을 높이는 방법 중 하나이다. PEMFC의 작동 온도로 수소연료를 예열하면 PEMFC가 최적의 성능을 유지하는 데 유리하기 때문에 PEMFC의 수소연료를 예열하는 것은 다수의 이점이 존재한다[18,19]. 예열 과정에서 유입 수소의 초기 온도를 효율적으로 높이기 위해 난기류 발생 장치가 고안되었다. 유입 수소 라인에 turbulator를 삽입하여 난기류를 발생시키고 라인 내부 수소의 열전달을 높임으로써 온도를 높이는 방식이다. 결과적으

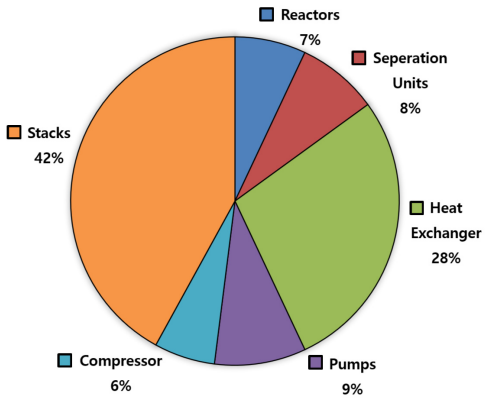


(a)

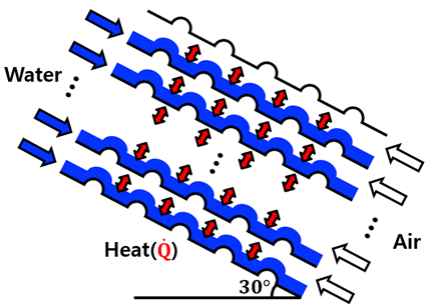


(b)

Fig. 1. (a) DOOSAN PEM fuel cell PureCell model M400 Hydrogen. (b) Schematic diagram of a PEMFC system with heat changer



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Percentage cost for unit and utilities in PEM fuel cell system. (b) Concept design of direct contact heat exchanger. $\dot{m}_{inlet}^{air}$ = ambient air, $\dot{m}_{outlet}^{air}$ = dry cooler inlet air, $\dot{m}_{inlet}^{water}$ = ground water

로 유입 수소의 예열에 필요한 열량을 낮춰 PEMFC의 열 관리 시스템 전체의 효율을 높였다[20].

이 외에도 PEMFC 스택에서 전기화학 반응에 의한 발열을 효율적으로 냉각시키기 위해 여러 가지 방식의 시도가 있었다. 유입 공기를 통한 냉각, 유입수를 통한 냉각, 상변화를 통한 냉각 등의 다양한 냉각 전략을 통하여 각각의 냉각 방법에 대한 장단점을 규명하고 이에 대한 열적 모델링을 통해 PEMFC의 열 관리 시스템에 대한 효율 향상이 이루어졌다[21].

본 연구에서는 열 관리 시스템의 구성 요소 중 하나인 열교환기의 효율 향상[22-25]을 위하여 Fig. 1(b)과 같은 형태의 direct-contact (DC) 열교환기(heat exchanger)를 고안하였다. 위에서 언급한 DC 열교환기는 Fig. 2(b)와 같이 다중 채널을 가진 유동판(flow plate) 내부에서 입구를 통해 유입되는 외부 공기를 상대적 일정한 온도를 갖는 지하수와 직접 접촉시키는 방식의 열교환기를 의미한다. 선행 연구에서 언급한 기존의 방식은 현재 설치된 발전용 PEMFC에 적용하기 어렵다는 점과 달리 DC 열교환기 방식은 현재 설치된 연료전지 발전소의 열 관리 시스템 외부에 DC 열교환기를 설치하여 바로 적용할 수 있다. 추가적으로 펌프에 사용되는 전력만을 투입하여 지하수를 통해 유입 공기에 대한 대량의 열 교환을 실외기 유입 전에 이룰 수 있다는 점에서 큰 가치가 있다.

본 연구에서는 DC 열교환기에 대하여 3차원 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 분석을 수행하였다. 또한 DC 열교환기에 사용되는 유동판의 요철 높이(h_p), 요철 간의 간격(L_p), 유동판 간의 간격(h_{ch}) 등과 같은 물리적 형상에 대한 parametric study를 진행하였다. 이를 토대로 최적의 열 교환 성능 변화 조건에서 DC 열교환기의 실험 모델을 제작 및 실증하였다.

2. CFD 모델

2.1 CFD 모델 가정

본 연구에서는 열교환기의 열 유동 과정을 상용 해석 프로그램인 ANSYS-FLUENT 패키지(ANSYS, Canonsburg, PA, USA)를 사용하였다. 효율적인 계산 속도를 확보하기 위하여 DC 열교환기의 열 유동 해석 모델에 적용된 가정은 다음과 같다.

1) 유동판 내부의 공기와 열원수는 열 이외의 물질 교환이 존재하지 않는다.

2) 유동판 내부의 공기와 열원수는 각각 층류(laminar flow)이다.

3) 열 관리 시스템에 필요한 열교환기는 5RT급 성능이 요구된다.

2.2 CFD 모델 형상과 경계 조건

본 연구에서는 DC 열교환기 방식으로 인한 열 교환 성능 향상을 분석하기 위하여 해석 조건에서 공기의 유량 및 유입 속도, 열원수의 유량 및 유입 속도를 일정하게 유지하였다. 또한 유동판의 기울기는 30° 기울어진 형태임을 고려하여 중력을 부여하였으며 길이와 너비 등도 일정한 값으로 고정하였다. 자세한 수치는 Table 1에 나타내었다. 입구로부터 유입되는 열원수의 온도는 15℃ (288.15 K)로 설정하였고 입구로부터 유입되는 공기의 온도는 -5℃ (268.15 K)로 설정하여 해석을 진행하였다.

Fig. 2(b)와 같이 DC 열교환기에서 열원수와 유입

Table 1. Description and operation condition of the flow plate in computational domain

Description	Value
Flow plate width (w_{ch})	0.5 m
Flow plate length (L_{ch})	1 m
Inlet air flow rate per flow plate ($\dot{m}_{inlet}^{air}$)	0.61321 CMM
Inlet air flow rate per flow plate ($\dot{m}_{inlet}^{air}$)	1.32729 m/s
Inlet water flow rate per flow plate ($\dot{m}_{inlet}^{air}$)	4.5597×10^{-6} LPM
Inlet water flow rate per flow plate ($\dot{m}_{inlet}^{air}$)	1.51992×10^{-2} m/s
Waveform landscape	5.52×10^{-2}
Angle of flow plate (θ_{ch})	30°

공기의 주요한 열 교환이 유동 방향과 수직하게 이루어진다는 점과 유입 공기 및 열원수의 열 유동이 유동판의 너비 방향에 대하여 영향성이 적은 환경임을 고려해 symmetric 조건을 적용하였다. 또한 채널 1개(유동판-유동판 사이)를 기준으로 유입 공기는 유입 공기 아래 지하수와의 열 교환과 유입 공기 상부 유동판과의 열 교환이 동시에 이루어지는 환경이다.

유입 공기 아래의 지하수와 하부 유동판 사이에는 열 교환이 이루어지고 있으며 유입 공기 상부의 유동판은 위에 흐르는 지하수와 열 교환이 이루어지고 있는 복합적인 환경이다. 이와 같은 복합적인 환경을 최대한 반영하여 해석의 정확도를 높이고 해석 시간을 단축시키고자 periodic 조건을 부여하였다. Fig. 3(a)는 위에서 설명한 해석 도메인의 이해를 돕기 위한 것이다. 추가적으로 해석 결과에 대한 신뢰성 확보를 위해 격자 의존성 시험을 진행하였으며 결과적으로 약 600만 개 이상으로 mesh를 구성하여 해석을 진행하였다. 시험 결과는 Fig. 3(b)에 나타내었다.

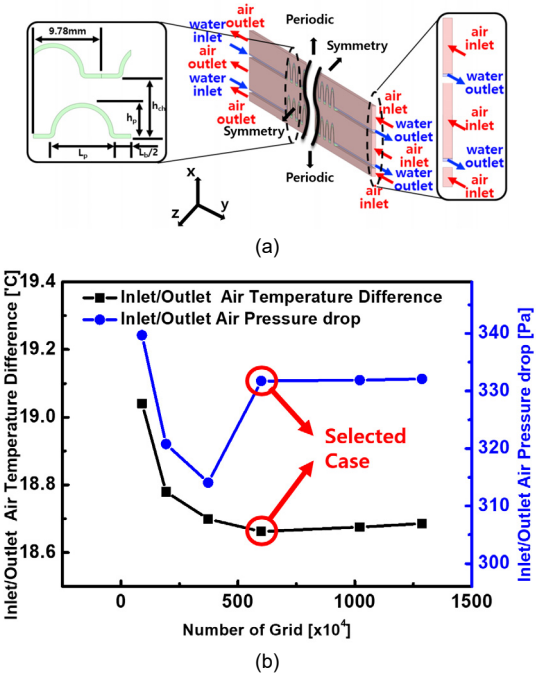


Fig. 3. (a) Heat exchange dynamics modeling and computational domain. (b) Grid independence of DC heat exchanger mesh

DC 열교환기 모델의 해석 환경을 토대로 유동판의 물리적 형상 변화를 통한 열교환기의 성능 변화를 확인하기 위해 parametric study를 진행하였다. 유동판의 물리적 형상 parameter는 유동판의 요철 높이(h_p), 요철 간의 간격(L_b), 유동판 간의 간격(h_{ch})으로 선정하였다. 위에서 언급한 parameter의 물리적 의미는 Fig. 4(a)에 나타내었다. 유동판의 요철 높이(h_p)의 경우 5, 6, 7 mm로 설정하였다. 요철 간의 간격(L_p)은 h_p+3.6, h_p+4.6, h_p+5.6, h_p+6.6 mm로 설정하였으며 유동판 간의 간격(h_{ch})은 5, 7, 9, 11 mm로 parameter를 설정하였다. 이를 통해 총 48개의 case를 확보하였으나 효율적인 결과 산출을 위하여 Fig. 4(b)와 같은 부분 요인 설계 과정을 적용하였고 최종적으로 24개의 case로 축소하였다. 선별한 case의 제원은 도표를 통하여 Table 2에 자세히 나타내었다. 24개의 case에 대한 CFD 해석을 통해 열 교환 성능 변화를 분석하였다. 실험 장치 구축을 위해 가장 최적의 열 교환 성능 향상이 나타나는 유동판 선정이 필요하였는데, 이를 위해 유동판의 물리적 형상에 대한 열 교환 성능 지표를 다양하게 산출하였으며 가장 우수한 case를 DC 열교환기 성능 실험에 적용하였다.

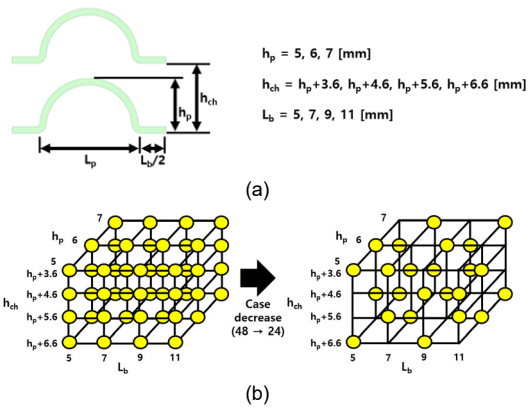


Fig. 4. Computational analysis conditions. (a) Defining flow plate parameter. (b) Case selection process

2.3 CFD 모델 해석 결과 및 분석 실험

위의 모델링을 통해 만든 DC 열교환기의 열 유동 해석 결과 온도 분포는 Fig. 5(a)와 같이 나타났다. 위의 열 유동 해석은 앞서 언급한 조건(공기 유입 온도 -5℃ [268.15 K], 열원수 유입 온도 15℃ [288.15 K])을 기반으로 수행되었다. 시뮬레이션 해석에 사용된 유동판은 가장 작은 case (h_p=5 mm, h_{ch}=h_p+3.6 mm, L_b=5 mm, L_p=9 mm)를 선정하였다. 공기가 유입되는 지점은 상대적으로 온도가 낮게 형성되었으며 열원수가 유입되는 지점에 가까울수록 온도가 높게 형성되는 것을 확인하였다. 또한 Fig. 5(b)의 속도 분포와 같이 공기가 유동판으로 유동할 때 공기의 main stream이 유동판 사이의 간격(h_{ch} - h_p)으로 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 요철(flow plate curve) 부분에서는 유동판 사이의 간격으로 흐르던 공기의 main stream 일부가 요철 부분으로 흘러들어가면서 각 요철 내부에 vortex flow가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Description of the flow plate cases

Case No.	h_p (mm)	h_{ch} (mm)	L_p (mm)
1	5	h_p + 3.6	5
2			7
3		h_p + 4.6	9
4			11
5		h_p + 5.6	7
6			11
7		h_p + 6.6	5
8			9
9	6	h_p + 3.6	5
10			9
11		h_p + 4.6	7
12			11
13		h_p + 5.6	5
14			9
15		h_p + 6.6	7
16			11
17	7	h_p + 3.6	7
18			11
19		h_p + 4.6	5
20			9
21		h_p + 5.6	7
22			9
23		h_p + 6.6	5
24			11

*Height of CS (h_p), interval of FP (h_{ch}), interval of CS (L_p)
CS, curved Surface; FP, flow plate

유동판의 물리적 형상에 대한 parametric study를 진행한 결과 열 교환 성능 지표에서 Table 3과 같이 나타났다. 이때 열 교환 성능 향상 지표에서 입출구 사이의 공기 측 압력 손실과 입출구 사이의 공기 온도 차에 대하여 가장 중점적으로 다루었다.

본 연구에서 다루는 DC 열교환기의 주된 목적은 PEMFC 시스템의 효율을 높일 수 있는 열 관리 시스템이다. 그렇기 때문에 DC 열교환기 출구 측의 공기 온도에 대한 적절한 평가 기준이 필요했다. 이러한 목적에 부합하고자 PEMFC 열 관리 시스템의 효율 향상을 위한 DC 열교환기의 평가 기준을 입출구 사이의 공기 온도 차로 선정하였다.

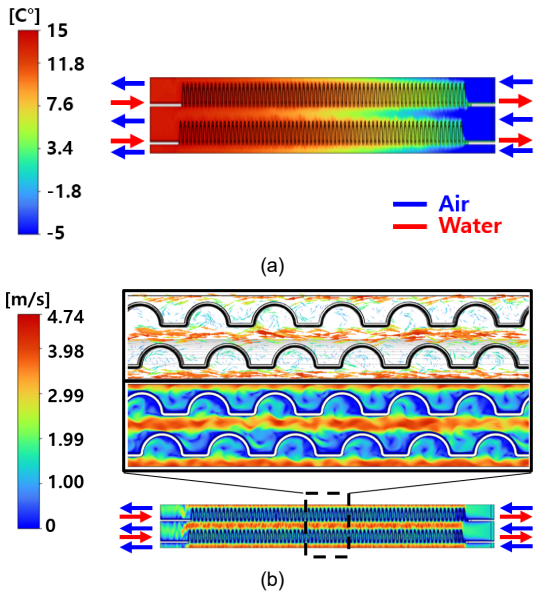


Fig. 5. Results of heat exchange dynamics modeling analysis. (a) Temperature distribution. (b) Velocity distribution at air T_{inlet} = -5℃ (268.15 K), water T_{inlet} = 15℃ (288.15 K)

또한 열교환기 출구 측의 공기가 PEMFC 시스템으로 원활히 유입되어야 하기 때문에 DC 열교환기는 입출구 사이에서 공기 측 압력 손실을 최소화하여 열 교환을 하는 것이 중요하다. 위에서 언급한 두 가지 지표, 즉 입출구 사이의 공기 온도 차와 입출구 사이의 공기 측 압력 손실을 기준으로 각 case의 성능 향상 정도를 평가하였으며 앞에서 설정한 유동판의 물리적 형상 parameter가 두 가지 지표와 갖는 상관관계를 분석하여 결과를 도출하였다.

Fig. 6에 나타낸 공기 속도 분포를 보면 요철의 높이(h_p) 7 mm인 case에서 유동판 사이의 간격(h_{ch})이 작아질수록 공기 유동의 흐름 방향 벡터가 커지고 유속 또한 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 유동판 사이의 간격(h_{ch})이 작아질수록 요철 내부의 vortex flow 유량이 증가하는 경향을 보였다.

Vortex flow가 발생되는 원인을 살펴보면 유동판 사이의 채널 내부는 유동이 좁아지는 구간과 넓어지는 구간으로 나뉘어져 있다. 공기의 main stream은

Table 3. Results of heat exchange dynamics parametric study case

Case No.	$\triangle P_{Air}$ [Pa]	$\triangle T_{Air}$ [°C]	$\triangle T_{Water}$ [°C]	U_{total} per channel [W]	U_{total} [kW]	h_{total} [W/°C·m^2]
1	26.88	18.38	12.15	231.102	24.497	21.938
2	25.59	18.40	12.24	232.814	24.678	23.097
3	24.52	17.24	11.34	240.671	22.864	18.526
4	23.25	17.27	11.35	240.883	22.884	18.994
5	24.52	16.04	10.53	246.867	21.231	15.119
6	22.03	16.29	10.81	253.432	21.795	16.980
7	23.25	14.70	9.75	252.025	19.658	12.585
8	21.93	15.11	9.91	256.161	19.981	14.172
9	21.68	18.13	12.03	255.315	24.255	21.674
10	18.55	18.30	12.10	256.800	24.396	24.198
11	22.97	16.82	11.16	261.637	22.501	17.489
12	20.43	16.89	11.19	262.340	22.561	19.189
13	22.98	15.42	10.21	263.915	20.585	13.745
14	21.80	15.63	10.33	267.017	20.827	15.217
15	21.24	14.40	9.52	266.586	19.194	12.669
16	19.54	14.67	9.71	271.907	19.577	14.440
17	16.29	17.93	11.88	278.517	23.952	22.323
18	10.80	18.18	12.05	282.502	24.295	25.450
19	20.65	16.52	10.98	283.819	22.138	16.694
20	19.69	16.62	10.94	282.785	22.057	17.888
21	20.17	15.23	10.11	283.108	20.384	14.304
22	19.99	15.45	10.19	285.348	20.545	15.187
23	20.22	14.01	9.26	278.657	18.670	11.719
24	18.59	14.33	9.45	284.375	19.053	13.553

*Air pressure drop between inlet & outlet ($\triangle P_{Air}$)
*Air temperature difference between inlet & outlet ($\triangle T_{Air}$)
*Water temperature difference between inlet & outlet ($\triangle T_{Water}$)
*Total heat-transfer (U_{total}), total heat-transfer coefficient (h_{total})

좁은 구간에서 넓은 구간으로 들어서면서 확산하게 된다. 이후 다시 좁은 구간으로 공기의 main stream이 유입될 때 온전히 유입되지 못하고 main stream 일부가 유동판과 충돌한다. 충돌한 공기의 main stream은 유동판의 요철 형상을 따라 흐르게 되면서 유동판 내부에서 vortex flow가 발생하게 된다. 이때 공기의 main stream의 유동폭이 좁은 경우 공기의 main stream이 유동판과 충돌하는 유량의 비율이 커지며 vortex flow의 유량도 증가하게 된다. 결국 동일한 유입 공기 유량 대비 vortex flow 유량이 증가하면서 열 교환량이 증가한 것으로 분석하였다. 따라서 결과적으로 입출구 사이의 공기 온도 차가 크게 발생하였다.

반대로 유동판 사이의 간격(h_{ch})이 큰 경우 공기의 main stream이 유동판과 충돌하는 유량 비율은 감소하게 된다. 결국 동일한 유입 공기 유량 대비 vortex flow 유량이 줄어들면서 열 교환량이 감소한 것으로 분석하였다. 따라서 결과적으로 입출구 사이의 공기 온도 차가 감소하였다. 이를 통해 유입 공기 유량 대비 vortex flow 유량이 유입 공기와 열원수 사이의 열 교환량에 영향을 미치는 주요한 요인이라고 분석하였다.

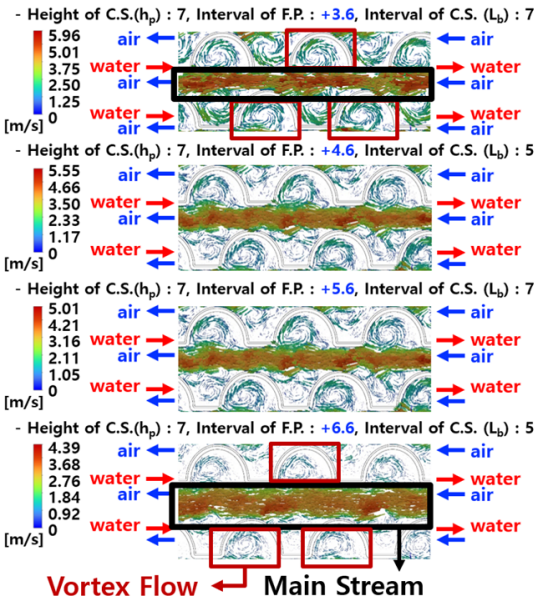


Fig. 6. Heat exchange dynamics analysis velocity according to height of curved surface (h_p) and interval of flow plate (h_{ch})

24개의 case를 위에서 언급한 두 가지 지표를 기준으로 Fig. 7과 같이 나타내었다. 요철의 높이(h_p)의 경우 요철의 높이가 높아질수록 vortex flow가 차지할 수 있는 공간이 커지면서 vortex flow 유량이 증가해 입출구 사이의 온도 차가 증가하는 것으로 나타났다. 유동판 사이의 간격(h_{ch})의 경우 유동판 사이의 간격이 좁아질수록 main stream과 요철부 간의 충돌하는 유량이 늘어나면서 vortex flow 유량이 증가하여 입출구 사이의 온도 차가 증가하는 것으로 나타났다. 마지막으로 요철 사이의 간격(L_b)의 경우 입출구 공기 온도 차에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나 요철부의 개수가 증가하면서 main stream과의 충돌 비율이 증가하여 입출구 사이의 압력손실이 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 Fig. 6을 통해 분석한 것과 같이 열 교환량과 vortex flow 유량의 상관관계가 존재한다는 것을 확인하였다.

Fig. 7의 열 유동 해석 결과 가장 최적의 유동판 형상인 18번의 case를 기반으로 실험 장비 구축을 제안하였다. 해당 구축안을 바탕으로 실험 장치의 작동 조건(난방 조건은 공기 7℃, 열원수 15℃, 냉방 조건은 공기 35℃, 열원수 15℃)을 비롯하여 다양한 외부 공기의 유입 온도에 따라 열 유동 해석을 추가적으로 수행하였다. 열 유동 해석을 진행하기에 앞서 동일한 작동 조건을 기준으로 Chezy, Manning 등 관련

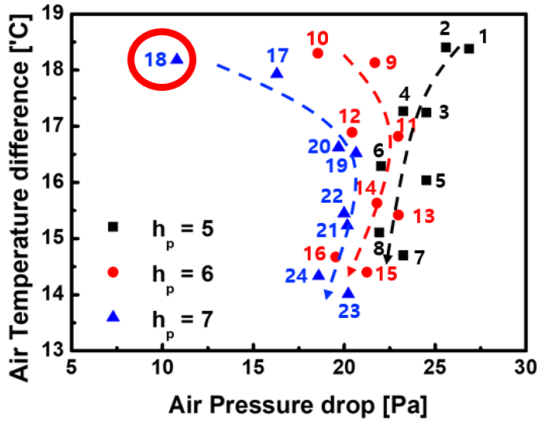


Fig. 7. Heat exchange dynamics analysis air side pressure drop & temperature difference correlation

수식을 사용하여 DC 열교환기의 열 교환 성능 결과(난방 조건은 공기 온도 차 2.5℃ 이상, 냉방 조건은 공기 온도 차 9℃ 이상)를 예측하였으며 열 유동 해석 결과는 기존에 예측된 입출구 사이의 외부 공기 온도차 대비 훨씬 더 높은 성능을 보였다. 18번 case에 대한 열 유동 해석 결과는 Table 4에 자세히 나타내었다.

3. 실험 모델

3.1 실험 모델 제작

실험 장치의 경우 Fig. 8(a)의 개념도를 토대로 Fig. 7의 18번 case 유동판 형상을 실물 제작하여 구성하였다. Fig. 8(b)를 통하여 이를 자세히 나타내었다.

3.2 실험 장치 결과

Fig. 8을 통하여 제작한 실험 장치를 다음의 작동 조건(난방 조건은 공기 7℃, 열원수 15℃, 냉방 조건은 공기 35℃, 열원수 15℃)을 적용하여 실험하였다. 실험 결과는 Table 5에 자세히 나타내었다.

Fig. 9을 살펴보면, DC 열교환기 기준 난방 조건은 열원수 유량 0.68 LPM, 공기 유량 0.0147 kg/s로 일정하게 유지하였을 때 입출구 사이의 공기 온도 차가 5.8℃로 CFD를 통한 열 유동 해석 결과인 7.3℃에 비하여 약 79.5% 공기 온도 차가 나타났다. 냉방 조건은 열원수 유량 0.68 LPM, 공기 유량 0.0134 kg/s로 일정하게 유지하였을 때 입출구 사이의 공기 온도 차가 14.4℃로 CFD를 통한 열 유동 해석 결과인 18.2℃에 비하여 약 79.1% 공기 온도 차가 나타났다. CFD 해석 결과에 비하여 다소 낮은 성능으로 나타났으나 앞서 예상했던 입출구 사이의 외부 공기

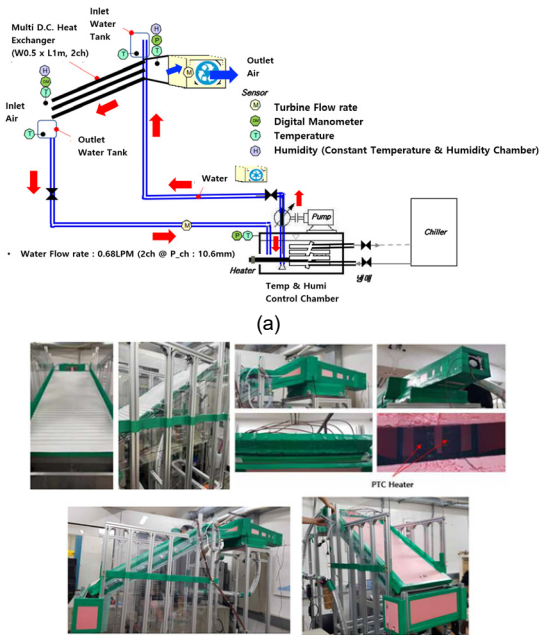


Fig. 8. (a) Configuration of experimental test devices. (b) Test bed of heat exchanger system experimental device

Table 4. Heat analysis results of various thermal flow conditions in case No.18

Inlet water temperature [℃]	Inlet air temperature [℃]	Predicted external air temperature [℃]		Pressure drop of air [Pa]	Temperature difference of water [℃]	U_{total} per channel [W]	U_{total} [kW]	h_{total} [W/℃·m^2]
		Initial object	Thermal flow analysis					
15	-5	7.2	17.87	10.02	12.70	297.713	25.603	26.569
	0	5.5	13.47	10.13	9.41	220.573	18.969	26.387
	5	3.7	9.03	10.30	6.20	145.322	12.498	26.226
	7	2.5	7.26	10.39	4.93	115.708	9.951	26.448
	25	4.8	9.19	11.28	5.91	138.383	11.901	25.594
	30	7.3	13.84	11.55	8.77	205.502	17.673	25.551
	35	9.9	18.56	11.94	11.50	269.521	23.179	25.406

온도 차(난방 조건은 공기 온도 차 2.5℃ 이상, 냉방 조건은 공기 온도 차 9℃ 이상)에 비하여 훨씬 더 높은 공기 온도 차가 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 발전용 PEMFC 시스템의 전력 생산 비용 절감을 위한 열 관리 시스템의 효율 향상을 목표로 하였으며 이를 위해 DC 열교환기를 고안하였다. DC 열교환기에 대한 CFD 시뮬레이션 해석과 실험 장치를 제작하였으며 각각의 결과를 통하여 DC 열교환기를 통환 열 교환 성능 향상 효과를 확인하였다.

1) DC 열교환기 CFD 시뮬레이션의 경우 직접 접촉 열 교환 방식을 통한 열 교환 성능 향상을 확인하였다. 또한 유동판의 물리적 형상에 따라 열 교환기의 성능이 달라지는 것을 확인하였으며 중요하게 고려하였던 입출구 사이의 공기 온도 차 지표, 입출구 사이의 공기 압력 손실 지표와 유동판의 물리적 형상 사이의 상관관계 또한 확인하였다.

2) DC 열교환기 실험의 경우 최적의 case 유동판을 실험 장치로 제작하여 DC 열교환기를 실험하였다. 실험 결과 기존의 목표였던 열교환기의 공기 온도 차 목표를 상회하는 성능 향상을 확인하였다.

결론적으로 본 연구에서는 DC 열교환기를 고안하여 CFD 모델을 완성하였고 이에 대한 열 유동 해석과 열교환기 유동판의 물리적 형상(유동판의 요철 높이[h_p], 요철 간의 간격[L_p], 유동판 간의 간격[h_{ch}])에 대한 parametric study를 진행하였다. 이를 통해 해당 DC 열교환기의 성능 향상 효과와 유동판의 물리적 형상에 대한 입출구 사이의 공기 온도 차 지표 및 입출구 사이의 공기 압력 손실 지표 사이의 상관관계를 확인하였다. 위 상관관계를 토대로 최적의 유동판 case를 선정하였고 실제 실험 모델로 제작하여 열 유동 실험을 진행하였다. 실험 결과는 CFD 해석 결과에 비하여 다소 낮은 성능으로 나타났으나 기존에 설정한 성능의 열교환기 목표를 크게 상회하였으며 DC 열교환기의 성능 향상을 확인하였다. 본 연구에서는 DC 열교환기 내부에서 흐르는 유동을 main stream 형태로 흐르는 사각관 내 유동으로 가정하여 레이놀즈 수를 계산한 결과 case 대부분의 유동이 층류와 천이 영역 사이에 분포해 있는 유동 형태(레이놀즈 수가 2,000에서 3,700 사이)로 나타났다. 레이놀즈 수가 난류(>10,000)로 구별하기에 다소 낮은 레이놀즈 수라 판단하였고 천이 영역의 경우 층류 유동으로 충분히 해석할 수 있다 판단하여 층류 유동 모델을 바탕으로 열 유동 해석을 진행하였다. 그러나 DC 열교환기 CFD 시뮬레이션 모델의 유동 중 발생하는 vortex flow를 고려하여 추후에는 난류와 물질 교환 등의 모델을 추가하여 CFD 모델을 개선할 필요가 있다. 또한 유동판의 자중에 의한 처짐, 열원수의 유동 분포 등과 같은 설계 변수를 추가하여 유동판의 물리적 형상 파라미터에 대한 최적화 연구도 추후 진행하고자 한다.

Table 5. Test performance of heat exchanger experiment results according to cooling and heating condition

Test condtion	Inlet / outlet water [℃]	Inlet water flow rate [LPM]	Inlet air temperature [dry / humid] [℃]	Inlet air flow rate [kg/s]
Cooling condition	15.2 / 20.6	0.68	35 / 24	0.0134
Heating condition	15.4 / 11.4	0.68	7 / 6	0.0147

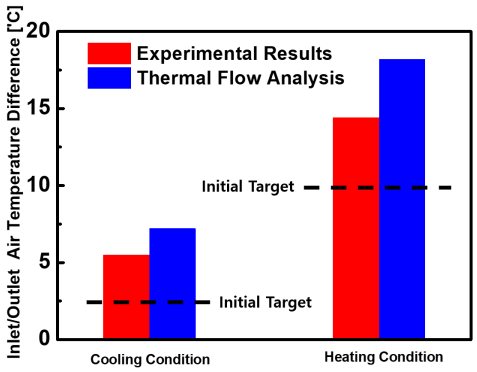


Fig. 9. Comparison of experiment results and thermal analysis results

후 기

본 연구는 2023년도 중소벤처기업부의 기술개발 사업 지원에 의하여 연구되었음(과제 번호: RS 2023-00222858).

References

1. S. Abuzant, S. Jemei, D. Hissel, L. Boulon, K. Agbossou, and F. Gustin, “A review of multi-stack PEM fuel cell systems: advantages, challenges and on-going applications in the industrial market”, In: 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference; 2017 Dec 11-14; Belfort. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 1-6, doi: https://doi.org/10.1109/VPPC.2017.8330971.
2. A. Alaswad, A. Omran, J. R. Sodre, T. Wilberforce, G. Pignatelli, M. Dassisti, A. Baroutaji, and A. G. Olabi, “Technical and commercial challenges of proton-exchange membrane (PEM) fuel cells”, Energies, Vol. 14, No. 1, 2021, pp. 144, doi: https://doi.org/10.3390/en14010144.
3. M. A. Abdelkareem, K. Elsaid, T. Wilberforce, M. Kamil, E. T. Sayed, and A. Olabi, “Environmental aspects of fuel cells: a review”, Science of The Total Environment, Vol. 752, 2021, pp. 141803, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141803.
4. M. Farooque and H. C. Maru, “Fuel cells-the clean and efficient power generators”, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 12, 2001, pp. 1819-1829, doi: https://doi.org/10.1109/5.975917.
5. L. B. Braga, J. L. Silveira, M. E. da Silva, E. B. Machin, D. T. Pedroso, and C. E. Tuna, “Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: technical, economical and ecological aspects”, Applied Thermal Engineering, Vol. 63, No. 1, 2014, pp. 354-361, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.053.
6. A. B. Stambouli, “Fuel cells: the expectations for an environmental-friendly and sustainable source of energy”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 9, 2011, pp. 4507-4520, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.100.
7. A. Midilli and I. Dincer, “Development of some exergetic parameters for PEM fuel cells for measuring environmental impact and sustainability”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 9, 2009, pp 3858-3872, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.066.
8. A. Baroutaji, A. Arjunan, J. Robinson, T. Wilberforce, M. A. Abdelkareem, and A. G. Olabi, “PEMFC poly-generation systems: developments, merits, and challenges”, Sustainability, Vol. 13, No. 21, 2021, pp. 11696, doi: https://doi.org/10.3390/su132111696.
9. G. R. Ashari, M. A. Ehyaei, A. Mozafari, F. Atabi, E. Hajidavalloo, and S. Shalbaf, “Exergy, economic, and environmental analysis of a PEM fuel cell power system to meet electrical and thermal energy needs of residential buildings”, Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, Vol. 9, No. 5, 2012, pp. 051001, doi: https://doi.org/10.1115/1.4006049.
10. R. Stropnik, M. Sekavčnik, A. M. Ferriz, and M. Mori, “Reducing environmental impacts of the ups system based on PEM fuel cell with circular economy”, Energy, Vol. 165, Pt. B, 2018, pp. 824-835, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.201.
11. T. E. Lipman, J. L. Edwards, and D. M. Kammen, “Fuel cell system economics: comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems”, Energy Policy, Vol. 32, No. 1, 2004, pp. 101-125, doi: https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00286-0.
12. S. K. Kamarudin, W. R. W. Daud, A. M. Som, M. S. Takriff, and A. W. Mohammad, “Technical design and economic evaluation of a PEM fuel cell system”, Journal of Power Sources, Vol. 157, No. 2, 2006, pp. 641-649, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.053.
13. B. Mei, P. Barnoon, D. Toghraie, C. H. Su, H. C. Nguyen, and A. Khan, “Energy, exergy, environmental and economic analyzes (4E) and multi-objective optimization of a PEM fuel cell equipped with coolant channels”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 157, 2022, pp. 112021, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112021.
14. J. Wang, H. Wang, and Y. Fan, “Techno-economic challenges of fuel cell commercialization”, Engineering, Vol. 4, No. 3, 2018, pp. 352-360, doi: https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.007.
15. Y. Wang, H. Yuan, A. Martinez, P. Hong, H. Xu, and F. R. Bockmiller, “Polymer electrolyte membrane fuel cell and hydrogen station networks for automobiles: status, technology, and perspectives”, Advances in Applied Energy, Vol. 2, 2021, pp. 100011, doi: https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100011.
16. Z. Li, Z. Zheng, L. Xu, and X. Lu, “A review of the applications of fuel cells in microgrids: opportunities and challenges”, BMC Energy, Vol. 1, 2019, pp. 8, doi: https://doi.org/10.1186/s42500-019-0008-3.
17. G. Bristowe and A. Smallbone, “The key techno-economic and manufacturing drivers for reducing the cost of power-to-gas and a hydrogen-enabled energy system”, Hydrogen, Vol. 2, No. 3, 2021, pp. 273-300, doi: https://doi.org/10.3390/hydrogen2030015.

18. L. F. Villalón-López, V. M. Ambriz-Díaz, C. Rubio-Maya, O. Chávez, and I. Y. Rosas, "Energy, exergy, exergoeconomic analysis, and optimization in a natural gas decompression station with a vortex tube and geothermal preheating", Sustainability, Vol. 16, No. 4, 2024, pp. 1669, doi: https://doi.org/10.3390/su16041669.
19. W. A. N. W. Mohamed and M. H. M. Kamil, "Hydrogen preheating through waste heat recovery of an open-cathode PEM fuel cell leading to power output improvement", Energy Conversion and Management, Vol. 124, 2016, pp. 543-555, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.046.
20. S. S. M. Ajarostaghi, M. Zaboli, B. Kiani, S. Saedodin, N. Karimi, and H. Javadi, "Hydrogen preheating in a PEMFC system employing a heat exchanger equipped with an innovative turbulator", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 85, 2022, pp. 36264-36282, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.204.
21. T. J. Bvumbe, P. Bujlo, I. Tolj, K. Mouton, G. Swart, S. Pasupathi, S. Pasupathi, and B. G. Pollet, "Review on management, mechanisms and modelling of thermal processes in PEMFC", Hydrogen and Fuel Cells, Vol. 1, No. 1, 2016, pp. 1-20, doi: https://doi.org/10.1515/hfc-2016-0001.
22. S. Y. Jeong, "An experimental study on the energy efficiency ratio of heat pump for air source", Journal of Korean Hydrogen and New Energy, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 838-844, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.838.
23. S.Y.Jeong, "An experimental study on the performance of cooling tower unit for mechanical draft", Journal of Korean Hydrogen and New Energy, Vol. 32, No. 6, 2021, pp. 642-648, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.6.642.
24 J. Woo, Y. Kim, and S. Yu, "Performance of fuel cell system for medium duty truck by cooling system configuration", Journal of Korean Hydrogen and New Energy, Vol. 32, No. 4, 2021, pp. 236-244, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.4.236.
25. J. Y. Park, T. Bui, S. Park, D. Lee, Y. Bae, Y. Kim, and S. M. Lee, "Fuel cell-based cogeneration system for greenhouse cooling and heating", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 667-672, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.667.