

분리판의 채널 높이에 따른 1 kWe 급 고체산화물 연료전지 스택 수치 해석

윤호원¹ · 김영진^{1†} · 이근우¹ · 김현진² · 윤경식² · 유지행²

¹한남대학교 기계공학과, ²한국에너지기술연구원 고온에너지전환연구실

Numerical Analysis in a 1 kWe SOFC Stack for Variation of the Channel Height in Separators

HAOYUAN YIN¹, YOUNG JIN KIM^{1†}, KUNWOO YI¹, HYEON JIN KIM², KYONG SIK YUN², JI HAENG YU²

¹Department of Mechanical Engineering, Hannam University, 70 Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34430, Korea

²High Temperature Energy Conversion Laboratory, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

[†]Corresponding author :
kimyj@hnu.kr

Received 19 July, 2022
Revised 30 August, 2022
Accepted 6 October, 2022

Abstract >> In this study, the flow uniformity was analyzed by performing numerical analysis on the 1 kWe internal manifold type solid oxide fuel cell stack according to the channel height of the separator. Also, it was examined by varying the fuel utilization rate and oxygen utilization rate. From the calculation results, we found that as the channel height of the separator decreased, the pressure drop increased exponentially. In addition, it was found that as the channel height of the separator decreased, the gas flow resistance inside the unit cell increased, and the flow resistance increased the pressure drop, thereby improving the flow uniformity inside the stack. Finally, the calculation results showed that as the fuel and oxygen utilization increased, the flow uniformity also improved.

Key words : Solid oxide fuel cell(고체산화물 연료전지), Stack(스택), Separator(분리판), Channel height(채널 높이), Flow uniformity(유동 균일도)

1. 서론

고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC)는 전기를 생산함에 있어서 가장 효율적이고 깨끗한 에너지 변환 장치로써 많은 관심을 받고 있다¹⁻³⁾. 이는 다른 연료전지에 비해 가장 높은 온도로 작동되어 에너지 변환을 수행함에 있어서 비가역 손실이 작기 때문이다. 하지만 SOFC는 아직 해결해야 할 문제들이 많은데, 그중 하나는 스택 가스 채널의 최적

화 문제이다^{4,5)}. 이상적으로는 스택을 구성하는 단위 셀들의 전류, 전압, 유량 그리고 온도가 동일하면 가장 이상적이라고 볼 수 있다. 하지만 현실에서는 불균일한 유량 분배, 열전달, 주변 환경 등 다양한 요인들로 인하여 각 단위셀의 전압, 유량, 온도가 불균일하다. SOFC 스택 내의 단위셀은 직렬로 연결되므로 각 단위셀에서 생성되는 전류는 동일하다. 즉, 각 단위셀에서 소비하는 산소와 수소의 양도 동일하다. 그러나 실제 SOFC 스택을 구성하는 가스 채널은 매니

폴드, 분리판, 전극의 다공성 미세 채널 등 복잡한 시스템을 이루며, 설계 및 제작이 부적절하면 전기화학 반응을 하는 활성화 표면(active area)으로의 가스 공급이 고르지 않게 분포될 수 있다. 예를 들어, SOFC 스택에서 각 단위셀에서 같은 양의 전류를 생성할 때, 어떤 단위셀은 부족한 가스 공급으로 인하여 한계전류밀도(limiting current density) 때문에 전압이 0 V 근처로 떨어지지만, 어떤 단위셀은 과잉 가스 공급으로 인하여 전압은 상대적으로 높게 나오지만 미반응 가스 배출로 인하여 연료의 낭비 및 스택의 효율을 크게 떨어뜨릴 수 있다. 결론적으로 SOFC 스택의 가스 채널에서의 최적화 및 유량 분배에 대한 연구는 SOFC 스택을 설계하고 제작하는 데 있어서 가장 우선시 되어야 하는 과제이다.

Kim 등⁶⁾은 내부 매니폴드형 SOFC 스택에서 매니폴드 분기관의 폭을 달리하면서 각 단위셀로 유입되는 유량 균일도에 대해 연구를 수행하였다. 그리고, Dong 등⁷⁾은 전기화학반응을 포함한 내부 매니폴드형 SOFC 스택에서의 열 및 유동 해석을 수행하였다. 또한, Jhung 등⁸⁾은 고분자막 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)에서 단위셀 채널 너비를 변화시키면서 스택의 유동 균일도에 대해 해석을 수행하였다. 그 외 해외에서도 연료전지 스택에서의 유동 균일도에 대한 많은 연구가 진행되었다⁹⁻¹¹⁾.

본고에서는 한국에너지기술연구원에서 개발하고 있는 내부 매니폴드형 1 kWe 급 SOFC 스택을 구성하고 있는 단위셀에서의 분리판 가스 유로 채널 높이를 달리하면서 각 단위셀로의 유동이 균일하게 공급되는지 전산 해석을 수행하였다. 특히 본 연구에서는 단위셀 유로의 채널 높이를 변화시키면서 각 단위셀로의 유량 분배가 균일한지에 대해 평가를 수행하였다.

2. 해석 방법

2.1 모델링

Fig. 1은 한국에너지기술연구원에서 개발하고 있는 1 kWe 급 내부 매니폴드형 SOFC 스택을 나타내었다. 반응유효면적이 100 mm×100 mm인 40장의 단위셀을 적층하였다. 유동 패턴은 Z-flow 형식을 띄며, 연료와 공기의 흐름은 십자류(cross flow) 형태를 가지도록 설계되었다. 유동은 입구 배관에서 공급된 가스가 입구 매니폴드에서 각 단위셀로 분배된 후 반대쪽 출구 매니폴드에서 모여서 배기되는 구조로 설계되었다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 SOFC 스택에서 각 단위셀의 가스 채널에서의 높이 변화에 따른 유량 분배가 어떻게 되는지를 확인하기 위하여 단순화된 모델을 사용하였다. 음극/전해질/양극 결합체의 너비와 치수, 그리고 집전체와 밀봉제의 너비는 Fig. 1과 같은 크기로 동일하게 적용되었으며, 단지 분리판의 유로 높이를 달리하여 스택의 높이가 변화되도록 모델링하였다. 이러한 단순화된 SOFC 스택 모델의 주요 파라미터를 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2는 본 해석을 수행하기 위한 분리판 채널 높이에 따른 1 kWe 급 고체산화물 연료전지 스택 유량 분배에 관한 simplified model을 나타내었다. 복잡한 유로 현상을 사각형 덕트 형태의 관으로 단순화하였

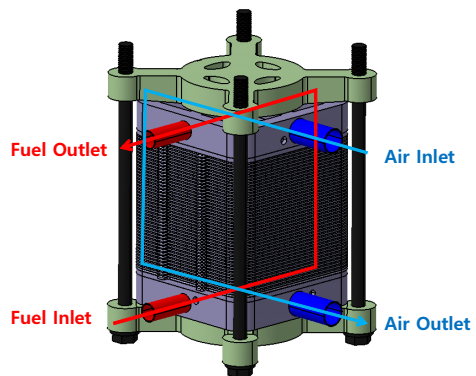


Fig. 1. Design of 1 kWe SOFC stack (40 cells)

고, 상부 및 하부 end plate와 좌우 매니폴드의 유로도 사각 덕트 형태로 단순화시켰다.

이러한 상기 모델에 대한 해석을 수행하기 위해서 본 연구에서는 상용 전산 유체 역학 프로그램인 ANSYS FLUENT¹²⁾를 사용하였다. 전산유체역학 해석을 수행하기 전 먼저 Fig. 3과 같이 해석 격자를 생성하였다. 해석 격자수는 각각의 모델에 따라 다르지만, 대략적

으로 약 7백 만 개 육면체 메쉬(mesh)를 만들어 격자를 생성하였다.

2.2 해석 방법 및 조건

고체산화물 연료전지 스택 유동 해석에서 사용된 지배 방정식은 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 사용하였으며, 특히 곡간부와 유량이 분배되고 다시 혼합되는 난류 현상에 대해 고려하기 위하여 k-ε 난류 모델을 사용하였다. 주요 가정 조건은 유동은 정상상태(steady-state)라고 가정하였으며, 유체는 비압축성 유체로 가정하였다. 또한, 부력의 영향을 무시하였으며, 작동압력은 1기압으로 설정하였다. 또한, 본 연구는 분리판 채널 높이에 따른 각 반응셀로의 유량 분배에 대한 영향을 평가하기 위함이므로 고체산화물 연료전지 내부에서 발생하는 전기화학반응과 열전달은 고려되지 않았다. 질량보존방정식과 운동량보존방정식, 그리고 k-ε 난류 모델에 사용되는

Table 1. Design parameters of 1 kWe SOFC stack

Variable	Value
Number of cells	40
Active area (mm×mm)	100×100
Anode manifold size (mm)	5
Cathode manifold size (mm)	5
Anode inlet/outlet pipe hydraulic diameter (mm)	17.05
Cathode inlet/outlet pipe hydraulic diameter (mm)	23.40
Anode gas channel height, H_{an} (mm)	0.375, 0.75, 1.50
Cathode gas channel height, H_{ca} (mm)	0.435, 0.87, 1.74

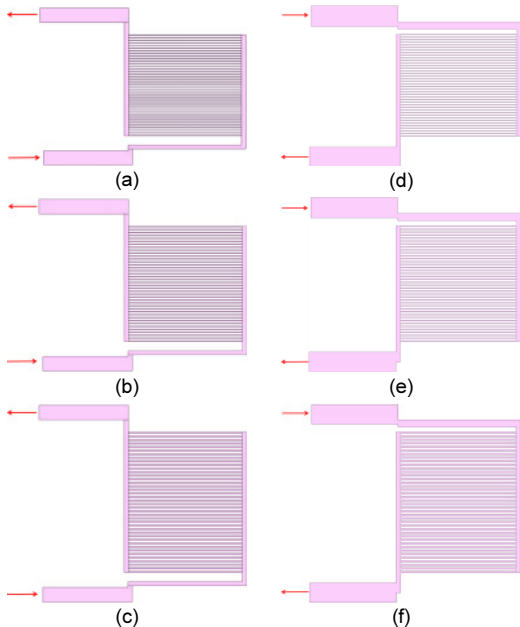


Fig. 2. Numerical models for SOFC stacks according to different anode and cathode of gas channel Heights: (a) $H_{an}=0.375$ mm, (b) $H_{an}=0.75$ mm, (c) $H_{an}=1.5$ mm, (d) $H_{ca}=0.435$ mm, (e) $H_{ca}=0.87$ mm, (f) $H_{ca}=1.74$ mm

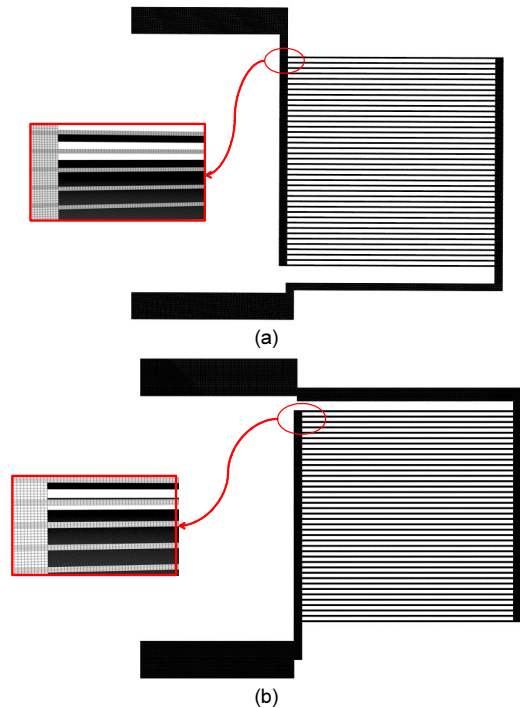


Fig. 3. Mesh generation for numerical analysis: (a) $H_{an}=0.75$ mm, (b) $H_{ca}=0.87$ mm

물성치는 1기압, 750°C의 일정한 값을 가지는 물성치를 사용하였다. 그리고 모든 벽면에서는 no-slip condition을 적용하였으며, 출구 조건은 pressure outlet 조건을 설정하였다.

반응면적이 100 mm×100 mm로 구성된 단위셀을 40장 적층하여 이루어진 고체산화물 연료전지 스택은 각 단위셀의 평균 출력은 25 W이며, 이 때 평균 인가 전류는 20 A로 운전 및 설계 사양을 설정하였다. 이러한 조건에서 각 연료 이용률과 산소 이용률에 따라 유량이 변할 것이므로 이러한 이용률에 따른 각 단위셀로의 유동 분배에 대해 살펴보기 위해서 Table 2와 같은 각 이용률에 따른 입구 질량 유량 조건을 설정하고 계산을 수행하였다. 이때 anode 측으로의 연료 조성은 100% 수소로 구성되었다고 가정하였으며, cathode 측 조성은 79% 질소와 21% 산소의 부피비율을 적용하여 계산을 수행하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

Fig. 4는 분리판 채널 높이에 따른 anode 측 연료 이용률 80%와 cathode 측 산소 이용률 30%에 대한 고체산화물 연료전지 스택 내부 압력 분포 계산 결과를 나타내었다. Anode와 cathode의 입구와 출구 위치가 반대이므로, anode인 경우는 아래에서 위로 올라갈수록 압력이 감소하고, cathode인 경우는 위에서 아래로 내려갈수록 압력이 감소함을 알 수 있다. 계산 결과에 대해 정리하면, 연료 이용률이 80%인 경우 anode 측 분리판의 채널 높이가 0.375 mm인 경우 압력강하량은 56 Pa로 계산되었으며, 0.75 mm인 경우는 11 Pa, 1.5 mm인 경우는 6 Pa로 압력강하량

이 계산되었다. 또한, cahtode 측은 산소 이용률이 30%인 경우 분리판 채널 높이가 0.435 mm인 경우 압력강하량은 131 Pa, 0.87 mm인 경우는 29 Pa, 1.74 mm인 경우는 17 Pa로 압력강하량이 계산되었다. 결과적으로, 분리판의 채널 높이가 2배, 4배 작아짐에 따라 압력 강하량은 기하급수적으로 증가함을 알 수 있었다.

본 연구에서 가장 중요한 분리판 채널 높이에 따른 유동 균일도를 분석하는 방법으로, 각각의 단위셀 가스 유로에서의 질량 유량의 차이를 쉽게 비교할 수 있도록 각 단위셀 가스 채널에서의 질량 유량을 다음과 같은 식으로 정규화(normalized)하였다.

$$\bar{m} = \frac{m_i}{m_{avg}} \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

여기서, \bar{m} 은 정규화된 각 단위셀의 질량 유량(normalized mass flow rate)을 나타내며, m_i 는 각 단위셀의 질량 유량을 나타내며, m_{avg} 는 평균 질량 유

Table 2. Boundary conditions for mass flow inlet

Anode		Cathode					
Fuel utilization U_f (%)	10	50	80	Oxygen utilization U_o (%)	10	30	50
Mass flow rate Q ($\times 10^{-5}$ kg/s)	8.92	1.66	1.04	Mass flow rate Q ($\times 10^{-5}$ kg/s)	33.2	11.1	6.63

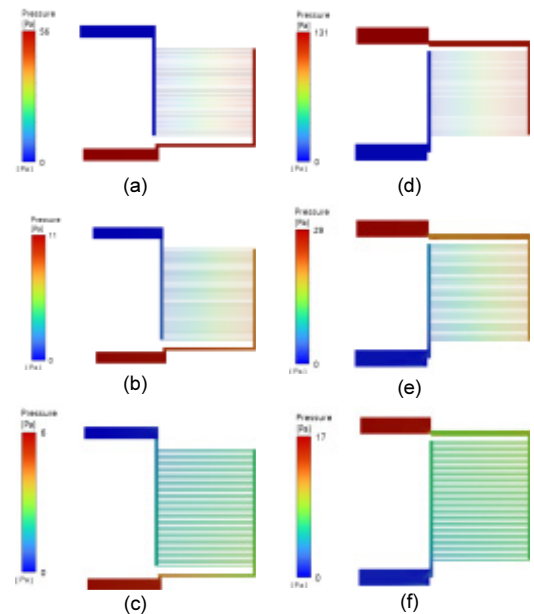


Fig. 4. Pressure contours of $U_f=80\%$ for anode flow and $U_o=30\%$ for cathode flow: (a) $H_{an}=0.375$ mm, (b) $H_{an}=0.75$ mm, (c) $H_{an}=1.5$ mm, (d) $H_{ca}=0.435$ mm, (e) $H_{ca}=0.87$ mm, (f) $H_{ca}=1.74$ mm

량을 나타내며, N 은 단위셀의 개수인 40을 의미한다.

상기 도입한 정규화된 각 단위셀의 질량 유량(\bar{m})은 1에 가까울수록 평균에 가깝다는 이야기가 되고, 1에 가까게 분포가 많이 되면 유량균일도 수준에서 좋다는 의미를 지니고 있다.

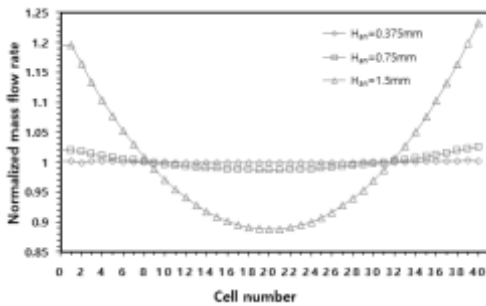
Fig. 5는 연료 이용률 80%와 산소 이용률 30%인 경우에 대한 각 단위셀에서의 정규화된 질량 유량을 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 분리판의 채널 높이가 증가함에 따라 각 정규화된 질량 유량은 1에서 벗어나고 있으며, 반대로 분리판의 채널 높이가 감소함에 따라 정규화된 질량 유량은 1에 가까게 분포함을 확인할 수 있었다.

각각의 단위셀로의 질량 유량을 자세히 살펴보면, 분리판의 채널 높이가 커짐에 따라 입구와 출구측에 가까운 단위셀의 질량 유량이 상대적으로 높고 중앙부의 질량 유량이 상대적으로 작은 결과를 나타내었다. 하지만 결과적으로는 분리판의 채널 높이가 작아짐에 따라 각 부분별 상대적인 질량 유량 차이는 감

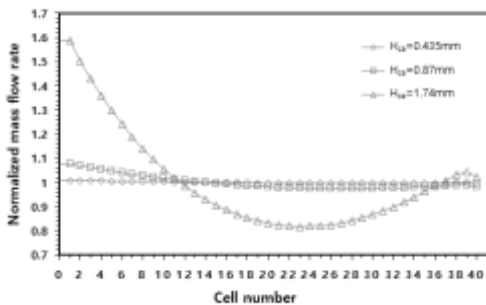
소하여 분리판의 채널 높이가 가장 작을 때는 거의 정규화된 질량 유량이 1의 값에 대부분 분포함을 확인할 수 있었다. 이는 단위셀 가스 채널 높이를 줄이면 단위셀 내부의 가스 유동 저항이 증가하고 유동 저항이 압력 차이를 증가시키므로 스택 내부의 가스 흐름이 더욱 고르게 분포됨을 알 수 있었다. 따라서, 결론적으로 분리판의 채널 높이가 작으면 작을수록 각 단위셀로의 유동균일도는 향상됨을 알 수 있었다.

그리고 각 연료이용률에 대한 각 단위 셀의 유량 분배 및 유량 균일도에 대한 통계치를 anode에 대해서는 Table 3에, cathode에 대해서는 Table 4에 정리하였다. Tables 3, 4에 나타난 Min.은 최소값, Max.는 최대값, Ave.는 평균값, Stdev.는 표준편차를 나타내었다. Tables 3, 4에서 각 단위셀로의 유동균일도를 평가하기 위해 가장 눈여겨 보아야 되는 값은 바로 표준편차인 Stdev. 값이다. 표준편차는 분리판의 채널 높이가 증가함에 따라 증가하고 연료 및 산소 이용률이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 즉, 표준편차인 Stdev.가 작을수록 유동균일도가 좋다고 말할 수 있으므로, 분리판의 채널높이가 작을수록 그리고 연료 및 산소 이용률이 클수록 유동 균일도는 향상됨을 확인할 수 있다.

Tables 3, 4에 대해 그래프로 분리판의 높이와 연료/산소 이용률에 따른 유동 균일도를 나타내기 위하여 다음과 같은 유량 균일도 지수(Flow Uniformity



(a)



(b)

Fig. 5. Normalized mass flow rate for each cell: (a) anode @ $U_f=80\%$, (b) cathode @ $U_o=30\%$

Table 3. Statistics of calculation results for anode flow

H_{an} (mm)	U_f (%)	Min. ($\times 10^{-7}$ kg/s)	Max. ($\times 10^{-7}$ kg/s)	Ave. ($\times 10^{-7}$ kg/s)	Stdev. ($\times 10^{-7}$ kg/s)
0.375	10	10.344	10.422	10.364	0.024
	50	2.069	2.079	2.072	0.003
	80	1.293	1.299	1.295	0.002
0.75	10	10.205	10.901	10.375	0.191
	50	2.046	2.129	2.073	0.024
	80	1.279	1.328	1.295	0.015
1.5	10	9.044	14.519	10.364	1.421
	50	1.839	2.587	2.073	0.217
	80	1.150	1.598	1.296	0.134

Index)를 도입하였다.

$$Flow\ uniformity\ Index[\%] = \frac{Stdev.}{Ave.} \times 100$$

상기 유량 균일도 지수는 퍼센트(%)로 표현되며, 유량 균일도 측면에서 0%에 가까울수록 좋다는 의미를 지니고 있다. 따라서 Fig. 6은 Tables 3, 4의 데이터를 사용하여 유량 균일도 지수를 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 anode와 cathode 모두 채널 높이가 작을수록 그리고 연료 및 산소 이용률이 클수록 유량 균일도 지수가 작아지므로, 유동 균일도 측면에서 채널 높이가 작을수록 그리고 연료/산소 이용률이 클수록 좋아진다고 말할 수 있다.

결과적으로 압력강화면에서는 분리판의 채널 높이가 작을수록 압력손실은 크지만, 전기화학반응을 해야 하는 단위셀로의 유량균일도 수준에서는 분리판의 채널 높이가 작을수록 그리고 연료 및 산소 이용률이 높을수록 각 단위셀로의 유량은 균일하게 공급될 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 분리판의 채널 높이에 따른 1 kWe 급 내부 매니폴드형 고체산화물 연료전지 스택에 대

하여 수치 해석을 수행하여 유동균일도를 분석하였다. Anode와 cathode의 분리판 채널 높이를 3가지로 달리하면서 각 연료 이용률과 산소 이용률을 변화시켜 가면서 유동 균일도를 살펴보았으며, 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고체산화물 연료전지 스택에서 분리판의 채널 높이가 작아짐에 따라 압력 강하량은 기하급수적으로 증가함을 알 수 있었다.
- 2) 고체산화물 연료전지 스택 내부 각 단위셀로 공급되는 유량은 분리판의 채널 높이가 작아짐에 따라 단위셀 내부의 가스 유동 저항이 증가하고 유동 저항이 압력 차이를 증가시켜 스택 내부의 유동 균일도가 향상됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 분리판의 채널 높이가 작아질수록 각 단위셀로의 유동 균일도는 증가하며, 그리고 연료 및 산소 이용률이 증가할수록 유동 균일도도 좋아진다는 것을 알 수 있었다.

Table 4. Statistics of calculation results for cathode flow

H _{ca} (mm)	U _o (%)	Min. (×10 ⁻⁷ kg/s)	Max. (×10 ⁻⁷ kg/s)	Ave. (×10 ⁻⁷ kg/s)	Stdev. (×10 ⁻⁷ kg/s)
0.435	10	81.649	84.592	82.900	0.808
	30	27.553	27.867	27.638	0.097
	50	16.542	16.686	16.583	0.042
0.87	10	73.546	97.566	82.900	6.484
	30	26.937	29.796	27.638	0.824
	50	16.220	17.572	16.582	0.373
1.74	10	48.081	183.812	82.900	35.538
	30	22.619	43.887	27.638	5.552
	50	13.660	24.452	16.583	2.891

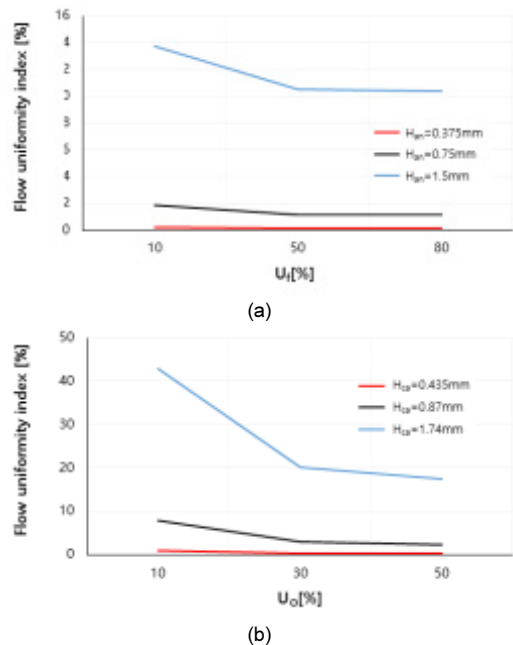


Fig. 6. Flow uniformity index: (a) anode, (b) cathode

후 기

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구이다(과제번호: 20213030030220, 과제명: 캐스케이드 스택을 활용한 10 kWe급 고효율 SOFC 시스템 기술개발).

References

1. Y. D. Lee, J. Y. Kim, D. J. Yoo, H. Ju, and H. Kim, "Review of research trend in fuel cell: analysis on fuel-cell-related technologies in electrode, electrolyte, separator plate, stack, system, balance of plant, and diagnosis areas", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 530-545, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.530>.
2. N. Park and H. Kim, "Analysis of R&D investment for hydrogen and fuel cell", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 21, No. 2, 2010, pp. 143-148. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO201027463260138.pdf>.
3. V. T. Giap, Y. D. Lee, Y. S. Kim, and K. Y. Ahn, "Techno-economic analysis of reversible solid oxide fuel cell system couple with waste steam", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 1, 2019, pp. 21-28, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.1.21>.
4. R. O'Hayre, S. W. Cha, W. Colella, and F. B. Prinz, "Fuel cell fundamentals", Wiley, USA, 2016, doi: <https://doi.org/10.1002/9781119191766>.
5. A. L. Dicks and D. A. J. Rand, "Fuel cell systems explained", Wiley, USA, 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/9781118706992>.
6. Y. J. Kim, H. Yin, H. J. Kim, K. S. Yun, and J. H. Yu, "Numerical analysis on the flow distribution in a 1 kWe SOFC stack of internal manifolds according to the variation of manifold sizes", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 33, No. 1, 2022, pp. 47-54, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.1.47>.
7. S. K. Dong, W. N. Jung, K. Rashid, and A. Kashimoto, "Design and numerical analysis of a planar anode-supported SOFC stack", *Renew. Energy*, Vol. 94, 2016, pp. 637-650, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.098>.
8. B. H. Jhung, Y. J. Sohn, and S. G. Kim, "Flow analysis in PEMFC stack for variation of channel width between cells", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 44, No. 4, 2020, pp. 265-271, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2020.44.4.265>.
9. K. Wang, D. Hissel, M. C. Pera, N. Steiner, D. Marra, M. Sorrentino, C. Pianese, M. Monteverde, P. Cardone, and J. Saarinene, "A review on solid oxide fuel cell models", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 12, 2011, pp. 7212-7228, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.051>.
10. M. A. Ashraf, K. Rashid, I. Rahimipetroudi, H. J. Kim, and S. K. Dong, "Analyzing different planar biogas-fueled SOFC stack designs and their effects on the flow uniformity", *Energy*, Vol. 190, 2020, pp. 116450, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116450>.
11. X. Wu, J. Jiang, W. Zhao, X. Li, and J. Li, "Two-dimensional temperature distribution estimation for a cross-flow planar solid oxide fuel cell stack", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 3, 2020, pp. 2257-2278, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.091>.
12. ANSYS, "ANSYS fluent user's guide", ANSYS, 2021. Retrieved from <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>.