

UPS 파워 팩 내부 연료전지의 냉각특성에 대한 수치 해석

송준석¹, 김병헌^{2*}

¹전남대학교 기계공학과, ²전남과학기술대학교 특수장비과

A Study on Numerical Analysis for Internal PEMFC Cooling of Power Pack for UPS

Jun-Seok Song¹, Byeong-Heon Kim^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University

²Division of Special equipment, Chunnam Techno University

요약 연료전지 배터리 하이브리드 UPS용 연료전지 파워 팩 내부에 설치한 연료전지의 화학반응에 의해 생성되는 열을 제거하는데 어려움이 있다. 열을 제거하지 못할 경우 연료전지의 내구성과 성능에 영향을 끼쳐 수명 단축의 원인이 된다. UPS용 연료전지 파워 팩 제작을 위하여 연료전지의 적절한 냉각 방법을 선정하고 제시하는 것이 본 연구의 목표이다. 냉각 방법 선정을 위해 냉각 성능에 영향을 주는 각각의 설계 인자를 변화시키면서 연구를 수행하였다. 전산해석은 상용프로그램인 COMSOL Multiphysics로 수행하였다. 먼저 연료전지 스택의 냉각 팬의 위치를 상단과 하단에 배치했을 때 1 kW급 연료전지 스택 표면온도를 비교하였으며, 각각의 위치에 따른 냉각 팬의 회전속도를 2,500, 3,000, 3,500, 4,000 RPM으로 변경하여 적절한 냉각 팬의 속도를 결정하였다. 또한 파워 팩 외부에서 내부로 들어오는 공기의 입구인 그릴의 타공면적을 달리하여 내부로 들어오는 공기의 유량이 냉각에 미치는 영향을 비교하였다. 본 연구는 UPS용 연료전지 파워 팩 내부 연료전지의 열관리 기술개발에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract Heat management is one of the most critical issues in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFCs) installed inside the fuel cell power pack of a fuel cell battery hybrid UPS. If the heat generated by the chemical reaction in the fuel cell is not rapidly removed, the durability and performance of the fuel cell may be affected, which may shorten its lifetime. Therefore, the objective of this study is to select and propose a proper cooling method for the fuel cells used in the fuel cell power pack of a UPS. In order to find the most appropriate cooling method, the various design factors affecting the cooling performance were studied. The numerical analysis was performed by a commercial program, i.e., COMSOL Multiphysics. Firstly, the surface temperature of the 1 kW class fuel cell stack with the cooling fans placed at the top was compared with the one with the cooling fans placed at the bottom. Various rotation speeds of the cooling fan, viz. 2,500, 3,000, 3,500, and 4,000 RPM, were tested to determine the proper cooling fan speed. In addition, the influence of the inhaled air flow rate was investigated by changing the porous area of the grille, which is the entrance of the air flowing from the outside to the inside of the power pack. As a result, it was found that for the operating conditions of the 1 kW class PEMFC to be acceptable, the cooling fan was required to have a minimum rotating speed of 3500 RPM to maintain the fuel cell surface temperature within an acceptable range. The results of this study can be effectively applied to the development of thermal management technology for the fuel cells inside the fuel cell power pack of a UPS.

Keywords : Cooling, CFD, Heat Transfer, PEMFC, Power Pack

*Corresponding Author : Byeong Heon Kim(Chunnam Techno University)

Tel: +82-62-360-5382 email: byounghean@nate.com

Received January 2, 2017

Revised (1st February 24, 2017, 2nd March 17, 2017)

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

Nomenclature

W	width
D	depth
H	height
RPM	revolution per minute
ρ	density, kg/m^3
u	velocity vector, m/s
U	velocity, m/s
μ	viscosity, $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$
c_p	specific heat, $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
k	thermal conductivity, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
\dot{q}	heat generation per unit volume, W/m^3
\dot{Q}	total heat generation, W
V_{cell}	cell voltage, V
I	cell current, A
n_{cell}	number of cell

1. 서론

최근 IT, 통신, 은행, 병원 등에서 정전 발생 시 전력 공급을 대신 할 수 있는 무정전 전원 장치(Uninterruptible Power Supply, UPS)의 개발이 증가하고 있다. 기존 UPS는 납축전지, 니켈 카드뮴 전지, Ni-MH 전지 등 2차 전지로 구성되어 있다. 하지만 이러한 2차 전지로 구성된 UPS는 높은 유지비용과 제한된 용량으로 짧은 백업 시간 등의 문제점이 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 연료전지를 추가한 배터리-연료전지 하이브리드 UPS의 개발이 진행되고 있다[1].

UPS 파워 팩에 사용하는 연료전지는 공냉식 연료전지를 주로 사용한다. 연료전지는 에너지 변환 과정에서 열이 발생한다. 파워 팩 내부 좁은 공간 내에서 열을 제거하지 못 할 경우 연료전지의 내구성 및 수명이 저하되어 시스템 전체의 효율이 감소된다[2-9].

본 연구에서는 현재 개발 중인 연료전지-배터리 하이브리드 UPS 시스템에서 연료전지의 주변장치(Balance of Plant, BOP)가 포함된 파워 팩 내부에 냉각 팬의 위치와 성능에 따른 강제 냉각 시 파워 팩 내부 유

체 유동을 분석하고 연료전지의 온도를 최적으로 유지하고자 한다.

2. 전산해석

2.1 해석모델

2.1.1 연료전지 파워 팩

본 연구에서는 2 kW급 연료전지-배터리 하이브리드 UPS 시스템의 연료전지 파워 팩의 냉각 특성에 대하여 수치해석을 진행하였다. 전산해석은 상용 유한요소법(Finite Element Method, FEM) 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics로 수행하였다. UPS 시스템은 Fig. 1과 같이 5 kWh급 Ni-MH 배터리 팩과 1 kW급 연료전지 파워팩 2개, 그리고 인버터로 구성되어 있다. 연료전지 파워 팩은 1 kW급 연료전지 스택과, BOP, 1 kW DC/DC 컨버터로 구성되어있고, Fig. 2와 같이 모델링 하였다.

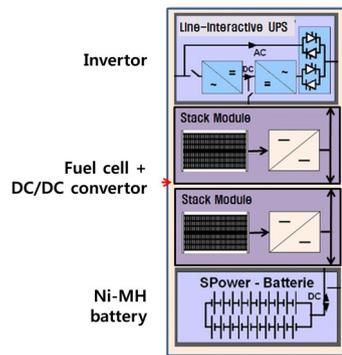


Fig. 1. Schematic diagram of UPS system

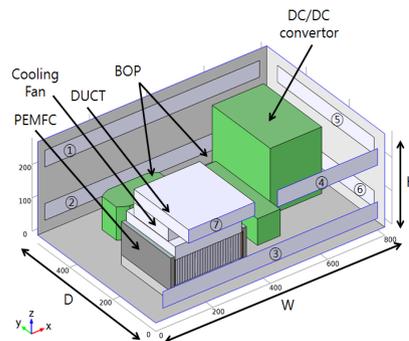


Fig. 2. 3D modeling of PEMFC power pack

연료전지에서 발생하는 고온의 열은 파워 팩 측면의 그릴을 통해 외부에서 공기가 유입되고, 연료전지의 냉각채널에서 열을 회수하여 냉각 팬과 덕트(Duct)를 통해 출구로 배출된다. 입구와 출구의 크기는 Table 1과 같다. 그 밖에 열은 파워 팩 외부 케이스를 통해 외부 공기와 대류 열전달에 의해 방출되는 구조이다.

Table 2. Geometrical parameters of PEMFC power pack

Parameters	Values [mm]
Power Pack housing	
Dimension, W × D × H	800 × 550 × 280
Inlet Dimension	
①	750 × 50
②	750 × 50
③	750 × 50
④	350 × 50
⑤	450 × 50
⑥	450 × 50
Outlet Dimension	
⑦	230 × 40

2.1.2 1kW급 연료전지 스택

UPS 시스템 운전 시 파워 팩 내부에서 발생하는 열은 연료전지에서 주로 발생된다. 연료전지에서 발생하는 열을 효과적으로 제거하지 못할 시 연료전지의 수명을 저하시키고, 성능도 낮아지게 된다. 연료전지 스택의 냉각은 하단에서 공기가 흘러 냉각채널에서 열전달을 통해 연료전지의 열을 외부로 배출한다. Fig. 3은 연료전지의 해석 모델이다. 연료전지 스택은 40개의 셀과 집전판, 엔드플레이트로 이루어져 있다. 냉각 채널 크기는 $4\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 이며, 한 개의 셀에 32개의 냉각채널로 이루어져 있다.

본 연구에서 연료전지의 열전달과 파워 팩 내부 유동에 관심이 있으므로 연료전지 각 구성품의 자세한 형상은 간략화 하였으며, 파워 팩의 냉각성능을 연료전지의 온도분포가 이론적 작동온도로 유지되는지에 따라 판단하였다[2].

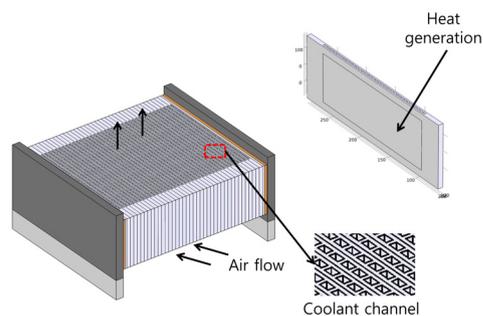


Fig. 3. 3D modeling of PEMFC stack

2.1.3 냉각 팬의 위치

본 연구에서 파워 팩 내 연료전지의 냉각에 사용되는 냉각 팬 위치를 각각 연료전지의 상단과 하단에 배치했을 때 냉각효과에 대해 해석을 진행하였다. 상단에 위치한 팬은 덕트를 통해서 냉각채널의 하단에서 공기를 흡입하여 출구 쪽 덕트를 통해 외부로 배출하는 형식이고, 하단에 위치한 팬은 하단에서 공기를 불어주어 덕트를 통과한 공기가 냉각채널을 지나 출구 쪽 덕트를 통해서 외부로 배출된다. 냉각 팬은 연료전지 스택의 면적을 고려하여 DELTA 社의 $120\text{mm} \times 120\text{mm}$ 크기의 DC 팬, 2개를 병렬로 사용하였다. 냉각 팬의 입력되는 전력에 따른 회전속도, 유량, 압력, 소음은 Table 2와 같다.

Table 3. Specification of cooling fan[10]

Input power [W]	Max. velocity [RPM]	Max. flow rate [m^3/s]	Max. gage pressure [Pa]	Noise [dB(A)]
3.36	2,500	0.0434	63	38.0
4.80	3,000	0.0515	90	44.0
6.48	3,500	0.062	112.58	47.0
8.64	4,000	0.070	150	51.0

2.2 지배방정식

파워 팩 내부에서 연료전지의 전기화학반응에 의해 열이 발생한다. 이 때 발생한 열은 연료전지의 고체영역에서 주변으로 전도 열전달이 발생하고, 파워 팩의 입구를 통해 들어와 출구로 배출되며 공기와 대류 열전달이 발생한다. 따라서 해석영역의 전도 및 대류 열전달에 의한 열 유동 해석을 위해서는 계산 영역의 고체영역과 유체영역의 물리적인 현상을 모두 고려하여야 한다. 해석

대상의 유체영역은 3차원, 정상상태, 비압축성유동으로 중력, 점성소산 및 복사 열전달 효과는 무시했다.

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \tag{1}$$

$$\rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \tag{2}$$

$$\rho C_p u \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \tag{3}$$

ρ 는 밀도, u 는 속도, p 는 압력 T 는 온도, μ 는 점성, C_p 는 비열, k 는 열전도도를 나타낸다. 식 (1)은 연속 방정식, 식 (2)는 운동량 방정식, 식 (3)은 에너지 방정식이다. 식(3)의 Q 는 열 생성항 (Source term)으로 화학반응이 일어나는 영역에서만 발생하고 나머지 영역에서는 무시된다.

2.3 가정 및 경계조건

연료전지는 수소와 산소의 전기화학 반응에 의해 전기에너지와 열에너지를 발생시킨다. 본 연구에서는 연료전지에서 열전달이 주요 목적이므로 연료전지의 자세한 모델링과 화학반응은 계산영역에 포함하지 않았다. Fig. 2에 나타난 것처럼 분리판과 분리판 사이에 1 mm 두께의 MEA와 GDL 조합을 삽입하였으며 실제 활성화 영역에서 열이 발생하도록 가정하였다. 연료전지에서 발생하는 열량은 다음 식과 같다[12].

$$Q = (E - V_{cell}) \cdot I \cdot A \cdot n_{cell} \tag{4}$$

식 (4)의 I 는 단위면적당 전류, V_{cell} 은 전압, n_{cell} 은 셀 수, E 는 기전력, A 는 활성화 면적을 나타낸다.

Fig. 4은 40개의 단위 셀(Unit cell)로 구성된 연료전지 스택을 상대습도 100%의 수소 35 l/min와 공기 135 l/min를 공급하여 얻은 데이터로, UPS 시스템에서 작동 조건인 전압 27 V, 전류 40 A에서 HHV(Higer Heating Value)값 1.482V를 적용하여 연료전지에서 발생하는 열량을 가정하였다. 이 때 생성되는 전기에너지는 1,080 W이며, 발생하는 열은 1,288 W로 발열부에서 균일하게 발생된다고 가정하였다.

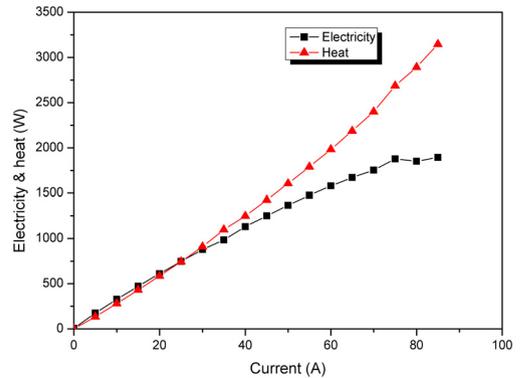


Fig. 4. Electricity and heat generation curve

공기는 파워 팩 측면 그릴(Grille)을 통해 외부 공기가 작은 면적을 통해 내부로 들어오기 때문에 수두손실에 따른 압력 경계조건을 사용하였다[11].

$$\Delta P = P_{out} - P_{in} = k_{grille} \frac{\rho U^2}{2} \tag{4}$$

위식의 ρ 는 공기의 밀도, U 는 속도, k_{grille} 은 수두손실 계수로서 그릴 전체 면적에 대한 유체입구 면적의 비인 개구비(Opening ratio, α)에 따라 Table 3과 같다. 본 연구에서는 α 가 0.25일 때에 대해서 연구를 진행하였다.

Table 4. Loss coefficient about opening ratio of grille[11]

α	k_{grille}	α	k_{grille}
0	∞	0.50	3.8
0.05	1000	0.55	2.8
0.10	250	0.60	2.0
0.15	85	0.65	1.5
0.20	52	0.70	1.1
0.25	30	0.75	0.78
0.30	17	0.80	0.53
0.35	11	0.85	0.35
0.40	7.7	0.90	0.08
0.45	5.5	1.0	0

파워 팩의 연료전지 냉각에 필요한 냉각 팬은 상용 DC 팬을 적용했다. 냉각 팬 2개를 사용하여 그릴을 통해 들어오는 공기를 외부로 내보낸다. 냉각 팬은 일정 유량으로 공기를 강제 순환하지 않고 주위 압력에 의해 순환 유량이 결정된다. 따라서 이러한 성질을 적용하기 위

해 경계조건은 압력과 유량과의 관계를 나타내는 제작사에서 제공하는 Fig. 3의 팬 특성곡선을 적용하였다.

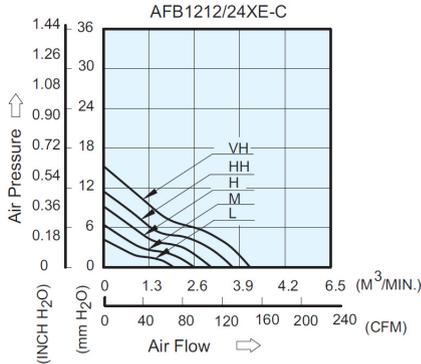


Fig. 5. Characteristic curve of applied cooling fan[11]

그 외 경계조건으로는 파워 팩과 내부 덕트의 벽면에서는 유체가 벽면을 통과하지 못하므로 속도의 수직성분을 벽면에서 속도의 수직성분은 0으로 설정하였고, 접촉 조건(no-slip condition)으로 인하여 정지하고 있는 벽면에서 접선 속도도 0으로 설정하였다. 출구 쪽의 경계조건은 대기압으로 계기압 0으로 설정하였다. 또한 파워 팩 외벽은 외부 대기공기와 자연대류현상이 발생하므로 Table 4의 자연대류 계수의 가장 혹한 조건인 $5 W/m \cdot K$ 을 적용하였다[13].

그리고 파워 팩 외부에서 내부로 들어오는 공기는 상온 $25^{\circ}C$ 이다.

3. 결과

3.1 냉각 팬 성능에 따른 냉각 특성 비교

Fig. 4에 나타낸 연료전지의 작동조건인 27 V, 40 A에서 발열량을 참고로 하여, 연료전지의 최적 운전 조건에 해당하는 온도를 유지할 수 있는 냉각 팬 선정을 위한 해석을 수행하였다. 냉각 팬은 2개를 병렬로 연결하여 연료전지의 상단에 위치시켜 하단에서 공기를 흡입하여 외부로 배출하는 방식이다. 냉각 팬의 속도가 2,500, 3,000, 3,500, 4,000 RPM 총 4가지의 속도일 때 온도분포에 대해 Fig. 6에 나타내었다. 냉각 팬의 속도가 2,500 RPM 일 때, 연료전지 하단은 냉각채널의 입구영역으로 온도가 낮은 공기의 영향으로 약 $60^{\circ}C$ 의 낮은 온도분포

를 보인 반면, 상단 표면에서는 $90^{\circ}C$ 이상의 높은 온도가 균일하게 분포하였다.

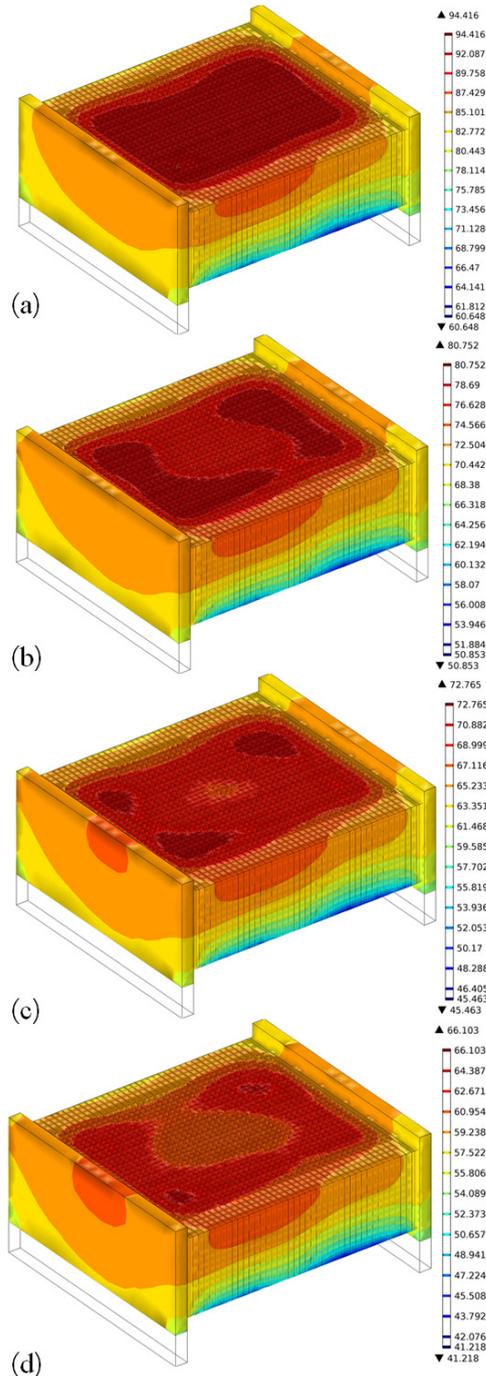


Fig. 6. Temperature distribution with cooling fan (a) 2,500 RPM, (b) 3,000 RPM, (c) 3,500 RPM, (d) 4,000 RPM

Fig. 7은 총 40개 cell로 구성된 41개의 분리판과 집전판, 그리고 엔드플레이트에서 최대, 최소, 평균 온도를 나타낸다. 순서는 엔드플레이트(1)-집전판(2)-분리판(3~43)-집전판(44)-엔드플레이트(45) 순이다. 각 셀의 평균 온도는 균일하게 나타났으나 저온영역에 비해 고온영역이 많아 평균온도가 높게 나타났다. 셀 별 평균온도가 80℃ 이상을 나타내어 연료전지의 작동 온도 조건을 만족하지 못하였다. 그리고 셀의 양 끝은 알루미늄 엔드플레이트로 냉각 팬의 덕트에 의해 공기 유동의 영향을 받지 못하여 대체적으로 균일한 온도분포를 나타낸다.

냉각팬의 속도가 3,000, 3,500, 4,000 RPM 일 때의 온도 분포는 2,500 RPM과 비슷한 열적 거동으로 연료전지 하단에 낮은 온도, 상단에 높은 온도 분포가 발생했다. 3,000 RPM 냉각 팬을 사용했을 때 평균온도는 약 75℃로 2,500 RPM과 비교시 약 10℃ 정도 감소되는 것을 확인 할 수 있었지만 셀 최고 온도 80℃ 나타내어 본 연구의 연료전지에는 사용하기 적합하지 않은 것으로 판단된다. 3,500, 4,000 RPM 사용했을 때 최고온도는 각각 73℃, 66℃, 평균온도 약 65℃, 60℃로 연료전지의 작동온도로 적합한 것을 확인할 수 있다.

3.2 냉각 팬 위치에 따른 냉각 특성 비교

Fig. 8, Fig. 9는 냉각 팬의 위치를 연료전지의 하단에 배치했을 때 팬의 속도가 각각 2,500, 3,000, 3,500, 4,000 RPM에서 연료전지의 온도분포와 각 셀의 최고온도, 최저온도, 평균온도를 나타낸다. 3.1절의 팬을 상단에 위치하였을 때와 유사한 열적 거동을 나타냈다. 냉각 채널의 입구로 들어가는 하단에서 주변 공기에 의해 낮은 온도 분포를 보인 반면, 출구와 가까운 상단에서는 냉각공기가 채널 내에서 가열이 되어 주변의 온도차가 크지 않아 열전달 성능이 감소하기 때문이다. 그리고 연료전지의 좌측에 비해 우측의 온도분포가 비교적 낮게 나타났다. 그 원인으로 좌측면에는 파워 팩의 제어 LCD가 설치되는 위치로 공기의 입구가 없기 때문에 공기의 유입과 흐름이 없는 반면 우측에는 좌측에 비하여 많은 유동이 발생하여 유체에 의해 열전달이 발생했기 때문이다.

2,500, 3,000 RPM의 냉각 팬을 사용할 경우 최고 온도가 연료전지의 작동온도를 벗어나 파워 팩에서 적용하기에는 부적합 함을 알 수 있다. 팬을 상단에 배치했을 때와 마찬가지로 연료전지를 적정온도로 유지하기 위해

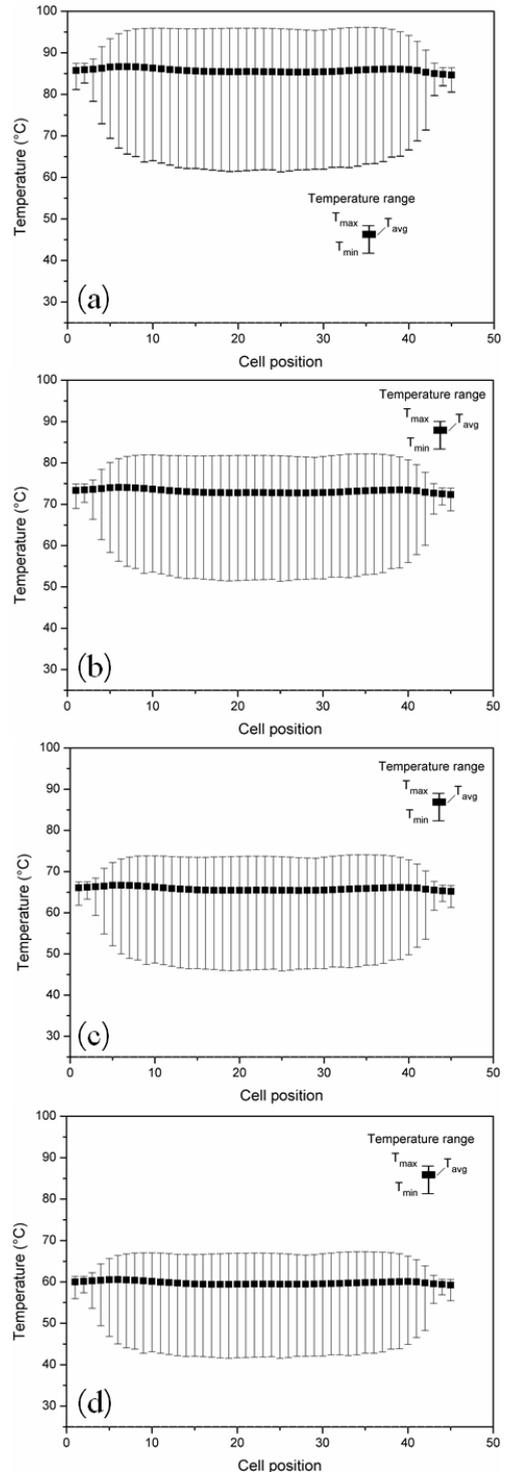


Fig. 7. Temperature distribution in 40-cell stack with cooling fan (a) 2,500 RPM, (b) 3,000 RPM, (c) 3,500 RPM, (d) 4,000 RPM

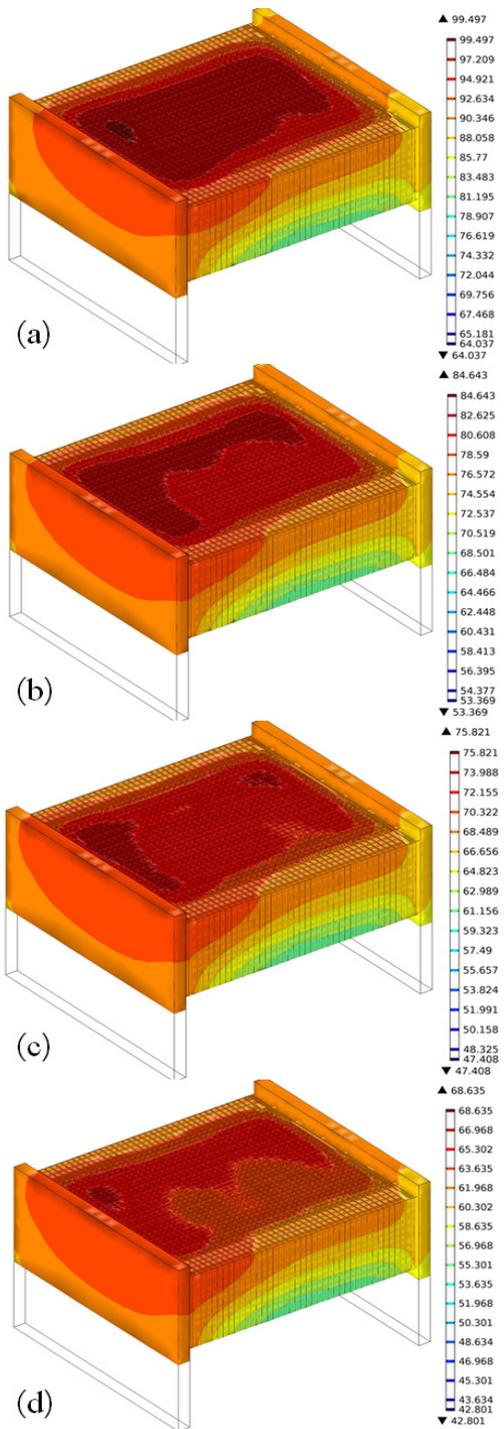


Fig. 8. Temperature distribuion with cooling fan (a) 2,500 RPM, (b) 3,000 RPM, (c) 3,500 RPM, (d) 4,000 RPM

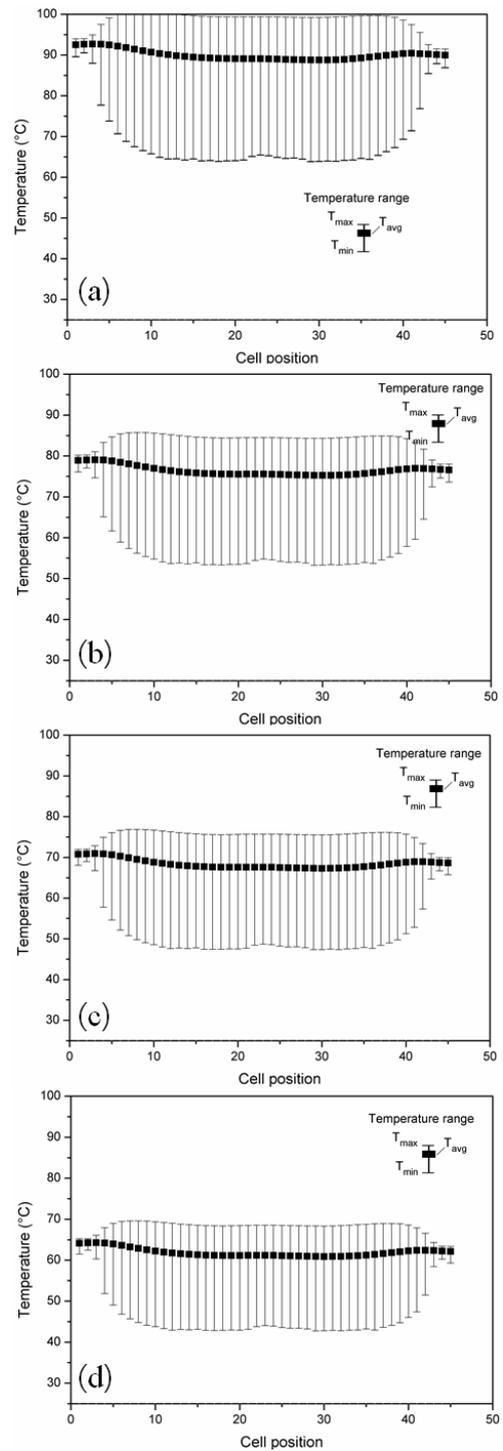


Fig. 9. Temperature distribution in 40-cell stack with cooling fan (a) 2,500 RPM, (b) 3,000 RPM, (c) 3,500 RPM, (d) 4,000 RPM

서는 팬 회전속도가 3,500 RPM 이상인 냉각 팬을 사용해야 될 것이다.

Fig. 10은 연료전지의 상단에 냉각팬을 배치했을 때와 하단에 배치했을 때 연료전지의 전체 평균 온도를 냉각 팬 회전 속도에 따라 비교하였다. 냉각 팬을 하단보다 상단에 배치했을 때 연료전지의 평균 온도가 좀 더 낮게 나타났으며, 회전 속도가 증가할수록 팬의 위치에 따른 연료전지의 평균 온도 차이는 줄어들었다. 그러므로 현재 개발 중인 UPS 시스템의 파워 팩에서는 냉각 팬의 속도는 3,500 RPM 이상, 그리고 팬의 위치는 연료전지의 상단에 배치했을 때 연료전지의 이론적인 작동온도를 유지할 수 있을 것이라 판단된다.

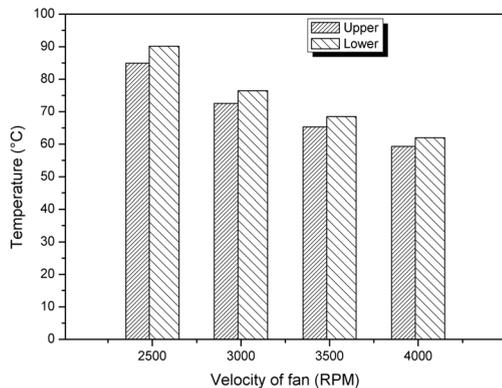


Fig. 10. Comparison of average temperature

4. 결론

본 연구에서는 연료전지-배터리 하이브리드 UPS용 연료전지 파워 팩에 대하여 연료전지의 냉각을 위한 연구를 진행하였다. UPS 시스템에서 작동되는 연료전지의 작동조건에 따른 발열량을 결정하였다. 전산해석은 상용 프로그램인 COMSOL Multiphysics로 수행했으며, 계산에 사용되는 격자의 수를 줄이기 위하여 불필요한 요소들은 형상을 간략하게 나타내었다. 파워 팩의 냉각은 냉각 팬을 이용한 강제냉각을 사용하기 때문에 실제 사용되는 상용 DC 팬을 경계조건으로 냉각 성능이 우수한 위치와 냉각에 적합한 사양을 선정하였다. 또한 외부에서 내부로 유입되는 입구영역인 그릴에 대하여 개구비에 따른 해석을 진행하였다.

이 연구를 통해 다음과 같은 결과를 도출할 수 있

었다.

1. 파워 팩 내부 연료전지는 수명과 내구성 향상을 위해 일반적인 PEMFC의 작동온도 범위의 60~80℃를 유지할 수 있는 냉각이 필수적이다.
2. 연료전지 표면 온도는 연료전지 하단의 경우 낮은 온도의 유체로 인해 열전달이 좋아 온도가 낮은 반면, 상단의 온도는 냉각 채널의 공기와 주변의 온도차가 크지 않아 높은 온도 분포를 나타낸다.
3. 현재 개발 중인 UPS 시스템의 연료전지 파워 팩에서 입구 그릴의 개구비가 0.25일 때, 회전속도가 3,500 RPM 이상인 냉각팬을 적용해야 연료전지를 이론적인 작동온도 범위로 유지할 수 있으며, 팬의 위치를 연료전지의 상단에 배치할 경우 냉각 효과가 더 우수했다.
4. 공기 입구인 그릴의 타공 면적을 증가시킬 경우 외부에서 파워 팩 내부로 유입되는 공기의 저항이 줄어들어 유량이 증가하여 냉각 성능이 향상되었으며, 냉각 팬의 속도를 증가시켜 냉각 하는 방법보다 소비전력 및 소음의 영향을 줄일 수 있다.

References

- [1] J. Ke, R. Xinbo, Y. Mengxiang, X. Min, "A Hybrid Fuel Cell Power System", *IEEE Transactions*, Vol. 56, pp. 1212-1222, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2008336>
- [2] F. Barbir, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", ELSEVIER, Burlington, 2005.
- [3] W. A. N. Mohamed, R. Atan, "Computational Analysis On Thermal Performance And Coolant Flow Of An Air-Cooled Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 15-36, 2010.
- [4] W. A. N. Mohamed, R. Atan, A. Ismail, "Heat Transfer Simulation of a Single Channel Air-Cooled Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack with Extended Cooling Surface", *International Conference on Science and Social Research*, pp. 91-96, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/cssr.2010.5773920>
- [5] J. Scholta, M. Messerschmidt, L. Jorissen, C. Hartnig, "Externally cooled high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 190, No. 1, pp. 83-85, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/jpowsour.2008.10.124>
- [6] K. P. Adzakpa, J. Ramousse, Y. Dube, H. Akremi, K. Agbossou, M. Dostie, A. Poulin, M. Fournier, "Transient air cooling thermal modeling of a PEM fuel cell",

Journal of Power Source, Vol. 179, No. 1, pp. 164-176, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.12.102>

- [7] C. Spitta, J. Mathiak, M. Kokupil, A. Heinzl, Coupling of a Small Scale hydrogen Generator and a PEM Fuel Cell, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2007.
- [8] S. T. Hwang, S. H. Cheon, J. S. Song, Y. H. Yun, B. H. Kim, X. Zhang, D. U. Kim, D. Hyun, B. S. Oh, "A Study to Improve PEMFC Performance by Using Electro Polishing and CrN Coating on Metal Bipolar Plate", *Transaction of KSAE*, Vol. 22, No. 4, pp. 65-71, 2014. DOI: <https://doi.org/10.7467/ksae.2014.22.4.065>
- [9] A. Faghri, Z. Guo, "Integration of Heat Pipe into Fuel Cell Technology", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 232-238, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630701755902>
- [10] www.nuritech21.com
- [11] R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand einhold, 1984.
- [12] S. Shahsavari, A. Desouza, M. Bahrami, E. Kjeang, "Thermal analysis of air-cooled PEM fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 18261-18271, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.075>
- [13] M. Matian, A. Marquis, N. Brandon, "Model based design and test of cooling plates for an air-cooled polymer electrolyte fuel cell stack", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 36, pp. 6051-6066, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.026>

송 준 석(Jun-Seok Song)

[정회원]



- 2015년 2월 : 전남대학교 일반대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2016년 6월 ~ 2016년 10월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2016년 11월 ~ 현재 : (주)원일기술연구소 수석연구원
- 2017년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 일반대학원 기계공학과(박사과정)

<관심분야>

고분자전해질연료전지, CFD

김 병 헌(Byeong-Heon Kim)

[종신회원]



- 2015년 8월 : 전남대학원 일반대학원 기계공학과 (기계공학석박사통합)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 전남과학대학교 특수장비과 교수

<관심분야>

연료전지자동차, 연료전지하이브리드시스템