

# 밀폐된 공간 내 공랭식 PEMFC의 자연대류 열전달에 대한 실험적 연구

이준식<sup>1</sup> · 김승곤<sup>1</sup> · 손영준<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>한국에너지기술연구원 연료전지연구실, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 신에너지기술학과

## An Experimental Study on the Natural Convection Heat Transfer of Air-cooling PEMFC in a Enclosure

JUNSIK LEE<sup>1</sup>, SEUNGGON KIM<sup>1</sup>, YOUNGJUN SOHN<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research, 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

<sup>2</sup>Advanced Energy Technology, Korea University of Science and Technology

**Abstract** >> This study presents an experiment investigation on natural convection heat transfer of air-cooling Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) in a enclosure system for unmanned aerial vehicles (UAVs). Considered are replacing fuel cell stack with Aluminum block for heat generating inside a enclosure chamber. The volume ratio of fuel cell stack and chamber for simulation to the actual size of aerial vehicle is 1 to 15. The parameters considered for experimental study are the environmental temperature range from 25°C to -60°C and the block heat input of 10 W, 20 W and 30 W. Effect of the thermal conductivity of the block and power level on heat transfer in the chamber are investigated. Experimental results illustrate the temperature rise at various locations inside the chamber as dependent upon heat input of fuel cell stack and environmental temperature. From the results, dimensionless correlation in natural convection was proposed with Nusselt number and Rayleigh number for designing air-cooling PEMFC powered high altitude long endurance (HALE) UAV.

**Key words** : Air-cooling(공랭), PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Natural convection(자연대류), Nusselt number (뉴셀 수), Rayleigh number(레이리 수), UAV(무인항공기)

### Nomenclature

A : surface area, m<sup>2</sup>

Gr : Grashof number

g : acceleration of gravity, m/s<sup>2</sup>

h : convective heat transfer coefficient, W/m<sup>2</sup> K

k : thermal conductivity, W/m K

L : characteristic length, m

Nu : Nusselt number

Pr : Prandtl number

Q : input energy, W

q : heat flux, W/m<sup>2</sup>

Ra : Rayleigh number

T : temperature, °C

α : thermal diffusivity, m<sup>2</sup>/s

β : thermal expansion coefficient, 1/K

<sup>†</sup>Corresponding author : yjsohn@kier.re.kr

Received: 2015.11.30 in revised form: 2016.1.9 Accepted: 2016.2.28

Copyright © 2016 KHNES

$\nu$  : coefficient of kinematic viscosity,  $m^2/s$

### Subscripts

i : inside of enclosure chamber

s : surface of Aluminum block

w : wall of enclosure chamber

## 1. 서 론

고고도 장기체공 무인기(HALE UAV)는 고도 18~20 Km 정도의 성층권에서 장기체공하면서 각종 관측, 통신 중계 및 정찰 등의 다양한 임무를 수행 할 수 있어, 국내에서 2001년도부터 스마트 무인기를 개발 하기 위한 연구가 진행되고 있다. 대부분의 무인기는 가솔린 기관이나 리튬 폴리머 배터리를 사용하여 동 력을 공급하였으나, 낮은 에너지 밀도로 운용시간이 짧아 장기적인 임무 수행에 부적합하다. 기존 엔진 및 배터리를 대체할 수 있는 동력원으로 고분자 전 해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)가 주목 받고 있다. PEMFC는 단위 중량 당 에너지밀도가 높고, 수소와 산소의 전기화학적 반응 을 이용하기 때문에 효율이 높으며, 구동부가 없어 소음이 적다. 이러한 특성으로 인해 연료전지 무인항 공기가 임무 수행에 매우 적합하다<sup>1-3)</sup>.

그러나 무인항공기의 동력원으로 사용되는 연료 전지는 고고도의 극한 환경에서 안정적인 성능을 발 휘해야한다. 특히 성층권으로 진입 시 고도상승에 의 한 온도, 습도, 압력 등과 같은 외부 환경 조건 변화 에 따른 내구성 문제가 존재한다. 이러한 환경조건에 서 연료전지 시스템을 장착한 비행체에 대한 연구가 진행되고 있지만 여전히 많은 후속 연구가 필요한 실정이다<sup>4,5)</sup>. 더욱이, 고분자 전해질 연료전지 스택의 적정 작동온도는 60~80°C인데, 운전과정 동안 발생 하는 열을 적절하게 제거하지 못하는 경우가 발생하 면 부품 손상 및 성능저하 문제가 발생한다. 이에 자

연대류를 이용하여 공기를 공급해서 냉각하는 공랭 식 PEMFC 스택 냉각에 관한 많은 연구들이 이루어 졌지만, 극한 환경의 고고도 작동조건에서의 연구는 부족한 상황이다<sup>6-8)</sup>.

이에 본 연구는 무인기 동체와 연료전지 스택을 모사하여, 극한 열환경에서 연료전지 스택에서 발생 되는 열에 대한 대류열전달 문제를 다루고자 하였다. 무인기 동체는 밀폐된 공간으로 가정하였다. 밀폐공 간에서의 대류열전달 문제와 관련하여, Bac<sup>9)</sup> 등은 원형 열원이 존재하는 밀폐된 사각 공동내의 자연대 류에 대한 열전달 실험 및 수치해석을 수행하였다. 원형 열원의 위치 및 온도 변화에 따른 Nusselt 수와 Grashof 수를 실험 결과와 수치해석 결과의 비교를 통해 타당성을 검증하였다. 열원이 존재하는 밀폐된 공간내의 자연 대류 문제에 대하여 다양한 Rayleigh 수에 따른 열전달 특성에 대해 수치해석 및 실험적 으로 많은 연구<sup>10,11)</sup>가 진행되어 왔다. 하지만 고고도 극한환경조건에서 밀폐된 공간에서의 자연대류 열전 달 현상에 대한 연구는 부족한 상황이다.

따라서 본 연구는 극한 환경에서의 대류열전달 문 제를 실험을 통하여, 고고도 무인항공기 연료전지 스택에서 발생하는 열에 대하여 고도상승에 따른 외부 온도변화와 무인항공기 동체 내 연료전지 스택 운전 시 온도변화에 대해 열환경 모사 실험을 통해 온도 데이터를 수집하고자 하였다. 특히, 연료전지 모사용 알루미늄 블록 히터의 발생열량을 달리하면서 시간 에 따른 밀폐공간 내부의 온도변화, 외부온도변화에 따른 밀폐공간에서의 열전달 특성을 알아보고자 하 였고, 정상상태에서 Nusselt 수, Rayleigh 수를 구하 고, 두 무차원수의 상관관계식을 구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 열환경 모사 실험장치

Fig. 1은 열환경 모사 실험장치의 개략도로서, 크

계 외부 열환경 모사를 위한 온도조절 챔버, 연료전지 모사용 알루미늄 블록, 무인기 동체 모사용 밀폐상자, 블록에 일정한 전압을 공급하는 전원 공급 장치, 그리고 열전대를 통해 각 부분의 온도를 기록하는 데이터 처리장치로 구성되어 있다.

온도조절 챔버(Test chamber: MHK-408SN)는 -70°C~100°C까지 ±0.5°C 범위 내에서 온도 조절이 가능하고, 육면체의 단열상자(Fig. 2)는 5 mm 두께의 아크릴로 제작하였으며, 전원은 DC Power Supply (NS-4050A)를 이용하여 실험조건에 맞는 전력을 공급한다. 시험부 각 부분의 온도는 밀폐상자에서 데이터 처리장치로 연결된 10개의 T-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 정확한 온도 측정을 위해 온도보정장치(FLUKE-725 Calibrator)와 항온조를 이용하여 보정을 하였으며, 오차는 ±0.05°C 이내이다. Table 1에 나타난 것처럼 열전대의 위치는 챔버내부, 단열상자 내·외부, 블록표면, 그리고 블록의 가장자리에서부터

일정한 간격으로 6개의 열전대를 설치하였다.

고고도 장기체공 무인기 기초설계를 바탕으로 무인기 동체와 연료전지의 부피의 비는 15:1로 사이즈를 결정하였으며, Fig. 2에서 보는바와 같이, 무인기 동체 내부 모사를 위한 육면체 단열밀폐상자는 425 mm × 400 mm × 300 mm로 5 mm 두께의 아크릴로 제작하였고, 연료전지 스택을 모사하기 위해 85 mm × 94 mm × 25 mm의 알루미늄 블록에 직경이 8 mm의 히터(DC 24 Volt, 20W) 두 개를 블록 가장자리에 삽입하여 발열체를 제작하였다. 하부로부터 전도에 의한 열손실 및 절연을 위해 Bakelite 재질의 4개 기둥으로 블록을 지지하게 하였다. 히터에 전류를 공급하여 시간경과에 따른 알루미늄 블록 및 챔버 내부의 온도변화를 측정하였다. 이 때, 알루미늄 블록 내부의 온도변화가 ± 0.2°C 이내 일 때를 정상상태로 간주하여 각 부분의 온도를 측정하였다.

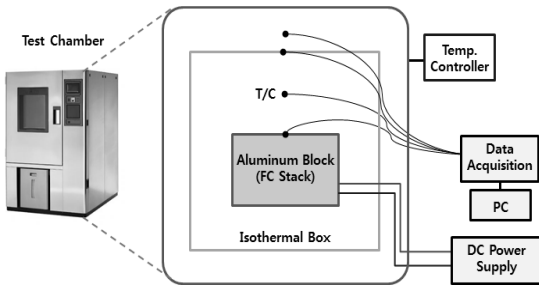


Fig. 1 Schematic of thermal experimental simulation

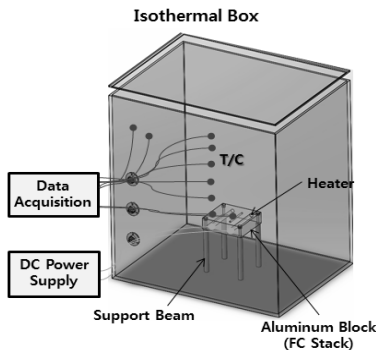


Fig. 2 Schematic diagram of isothermal box with an aluminum block and heaters

2.2 실험조건 및 방법

밀폐공간 내에 연료전지 스택 모사용 알루미늄 블록의 히터에 공급되는 전력은 10 W에서 30 W 사이로 발열량을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 챔버내 온도를 상온(25°C)으로 유지한 후 단계적으로 챔버의 온도를 -10°C 씩 변경하며 -60°C 까지 동일한 방법으로 실험을 수행하였고, 실험조건을 Table 2에 나

Table 1 Locations of each thermocouples

No.	Location	No.	Location
T0	Chamber inside	T5	50 mm above FC
T1	Wall Outside	T6	100 mm
T2	Wall Inside	T7	150 mm
T3	FC surface	T8	200 mm
T4	25 mm above FC	T9	250 mm

Table 2 Experimental conditions

Heating power [W]	Chamber operating Temperature [°C]
10, 20, 30	25, 0, -10, -20, -30, -40, -50, -60

타내었다.

알루미늄 블록의 열부하에 대한 열전달 계수는 식 (1)로 계산된다.

$$h = \frac{q}{A\Delta T} \quad (1)$$

여기서, 대류열전달 계수는 h는 블록 표면 측정점에서 온도 값과 단열상자 내부의 평균온도와와의 차 ΔT 및 블록의 총 표면적 A로부터 계산하였다.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2)$$

식 (2)는 Nu수의 정의로, k는 공기의 열전도율이고, L은 특성길이로써 본 연구에서는 블록으로부터의 높이로 정의하였다.

$$Ra = GrPr = \frac{g\beta(T_s - T)L}{\nu\alpha} \quad (3)$$

여기서, Gr은 Grashof 수, Pr은 Prandtl 수, g는 중력가속도, β는 공기의 팽창계수, Ts와 T 각각 벽면 및 공기의 온도, ν는 동점성계수, 그리고 α는 열확산 계수를 나타낸다. 계산에 사용된 공기의 물성치는 다음과 같은 막온도 식 (4)를 이용하여 구하였다.

$$T_f = \frac{T_w + T_i}{2} \quad (4)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열입력에 따른 열전달 특성

Fig. 3은 온도조절 챔버 내에서 일정한 온도 25°C (오차 ±0.1°C)에서 열입력에 따른 블록의 표면온도를 시간 변화에 따라 나타낸 것이다. 10 W, 20 W 그리고 30 W의 열입력 조건에서, 실험 시작부터 약 80

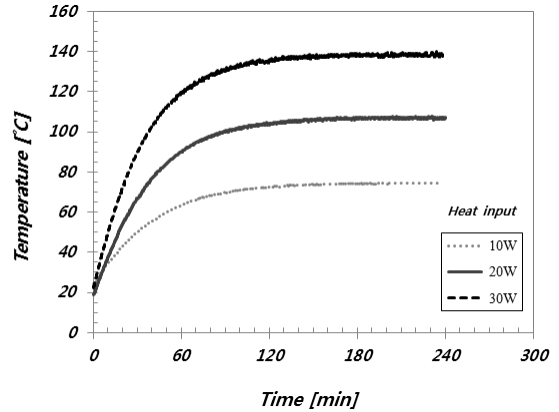


Fig. 3 Surface Temperature of the AL block as dependence on time at different heat input with environmental temperature of 25°C

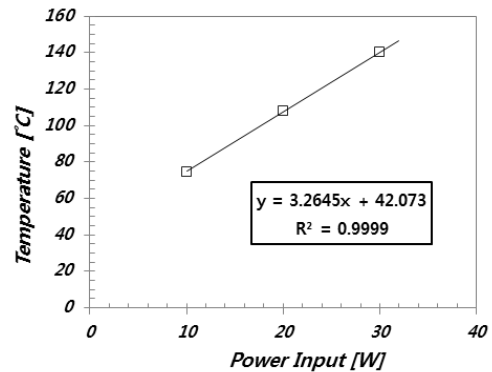


Fig. 4 Surface Temperature of AL block as dependence on different heat input with environmental temperature of 25°C

분까지는 빠르게 증가하다가 증가속도가 둔화되어 약 120분 후 블록의 표면온도가 정상상태에 도달한다. 이후 각각의 위치에서 온도를 기록하였다.

Fig. 4는 상온(25°C)에서 열입력에 따른 블록 표면의 최대 온도 상승 변화를 나타내었으며, 열입력이 30 W 일 때 최대 표면온도는 140°C로 나타났다. 열입력에 따른 최대온도가 완전 선형적이므로 본 실험 조건 10 W~30 W 사이의 열입력에 대한 블록표면 온도를 위 선형방정식으로 산출이 가능하다.

#### 3.2 외부 온도변화에 따른 열전달 특성

고고도 열환경 조건을 모사하기 위하여 상온에서

부터 성층권의 대기온도(-56°C)를 상회하는 -60°C까지 온도조절 챔버를 이용해 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 열환경 운전모드 시험조건으로 상온(25°C)

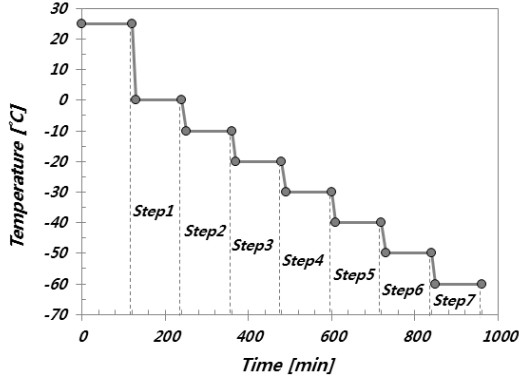


Fig. 5 Test chamber operating mode for thermo environmental simulation

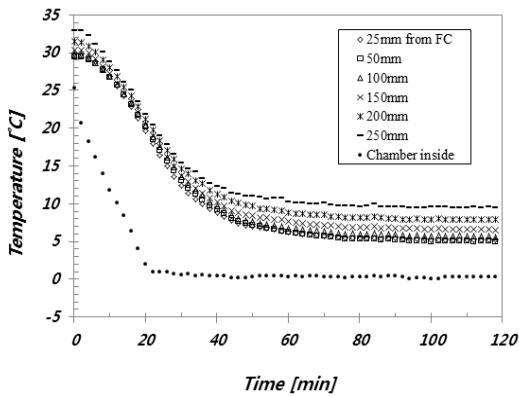


Fig. 6 Temperature distributions inside an isothermal box with time at step 1

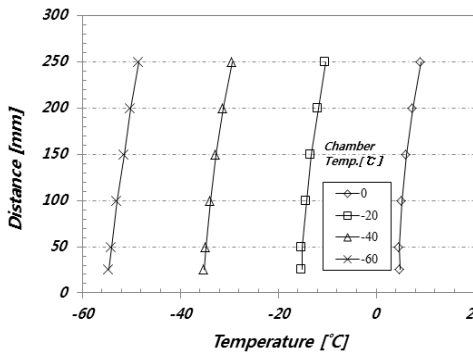


Fig. 7 Temperature distributions inside the isothermal box as dependence on environmental temperature at heat input of 30 W

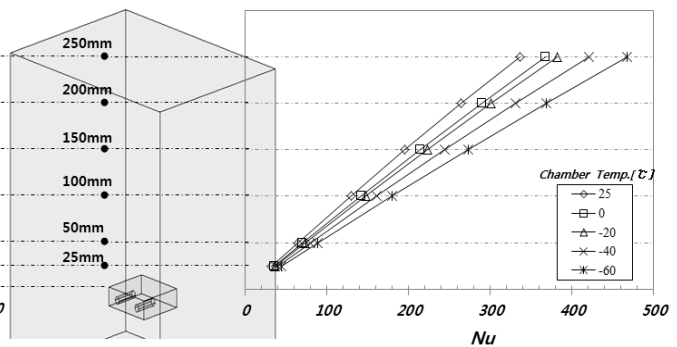


Fig. 8 Variation of Nu with locations inside the isothermal box as dependence on environmental temperature

에서 시작하여 -60°C까지 단계별로 -10°C씩 챔버 온도를 변경하며 실험을 수행하였다. 각 단계마다 약 10분 후 챔버 내부온도는 정상상태에 도달하였다. 외부온도변화에 따른 실험은 모두 열입력을 30 W로 고정하여 실험하였다.

Fig. 6은 실험모드 단계1(25°C~0°C)에서 밀폐공간 내부의 온도변화를 시간에 따라 나타내었다. 챔버내 온도는 약 20분 후 정상상태에 도달하고 이어 밀폐공간 내부의 온도 또한 약 50분 후 정상상태에 도달하였다. 여기서, 알루미늄 블록과 제일 인접한 25 mm 위치에서 온도보다 50 mm에 위치한 열전대의 온도가 가장 낮으며, 이후 부력의 영향으로 위쪽으로 상승할수록 온도는 증가하며, 같은 밀폐공간임에도 불구하고 약 4.5°C의 온도차이가 발생했다. 이는 밀폐공간 내 블록 표면에서 지속적인 열이 발생하여 자연대류에 의한 열전달이 지속적으로 이루어짐을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 열입력이 30 W 일 때 챔버의 온도를 변경하며 밀폐상자내부의 높이에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 각각의 위치에서 밀폐공간 내부의 온도가 정상상태에 도달 했을 때의 온도를 그래프로 나타내었다. 챔버의 온도가 낮아질수록 인접한 위치의 온도차는 더 커지는 것을 볼 수 있으며, 최대 6°C까지 온도차가 발생했다. Fig. 7의 온도 데이터를 바탕으로, Fig. 8은 정상상태 도달 후, 챔버의 온도변화(25°C,

0°C, -20°C, -40°C, -60°C)에 대해 단열밀폐상자 내부의 위치에 따른 Nusselt 수를 나타낸 것이다. 블록 표면에서부터 멀어짐에 따라, 그리고 챔버내부 온도가 낮아짐에 따라 Nu 수는 증가한다.

실험 데이터를 바탕으로 외부온도변화에 따른 Nusselt 수와 Rayleigh 수의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. Ra 수가 증가함에 따라 Nu 수도 증가하며, 외부의 온도가 감소함에 따라 Ra 수는 증가한다. 본 실험구간에서 Ra 수는  $3 \times 10^8 \sim 8 \times 10^9$ 이며, Nu 수는 약 25~470의 값을 나타내었다. Ra 수가 클수록 부력의 효과가 강해져 열전달계수가가 최고인 위치는 위로 상승하며, 외부온도가 낮을수록 그 부력의 효과는 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

한편, 자연대류 열전달에서는 Nu 수는 Ra 수의 함수로 나타낼 수 있으므로, 실험결과에 기초하여 Nu-Ra 수의 상관관계를 파악하고자 최소자승법으로 해석한 결과를 Table 3에 나타내었다.

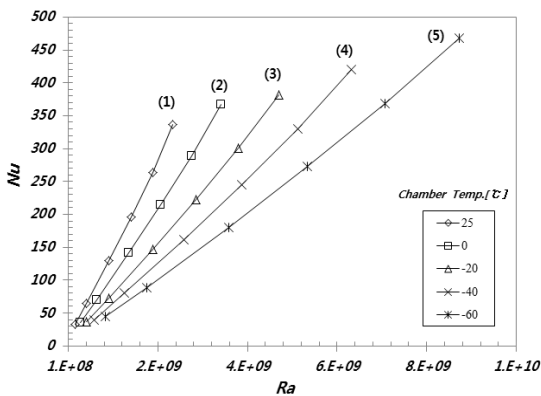


Fig. 9 Relation of Nu verse Ra as with environmental temperature

Table 3 Related correlation of Nu vs. Ra

Chamber Temp. [°C]	Correlations
(1) 25	$Nu = 9E-18Ra^2 + 1E-07Ra + 4.2553$
(2) 0	$Nu = 4E-18Ra^2 + 9E-08Ra + 2.8857$
(3) -20	$Nu = 2E-18Ra^2 + 7E-08Ra + 2.0177$
(4) -40	$Nu = 2E-18Ra^2 + 5E-08Ra + 2.8041$
(5) -60	$Nu = 9E-19Ra^2 + 5E-08Ra + 1.7125$

## 4. 결 론

본 연구는 밀폐공간에서의 자연대류 열전달 실험을 수행하여, 실험결과를 Nu 수와 Ra 수의 무차원 상관관계로 정리하였다. 본 실험 결과는 고고도 무인 기용 연료전지 스택의 열설계를 위한 기초 자료로 활용 가능할 것으로 사료되며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 밀폐공간 내부의 온도변화는 시간에 따라 증가하다가 약 120분 후 모든 실험에서 정상상태에 도달하고, 열입력에 따른 온도변화는 매우 선형적이다.
- 2) 실험 구간 내에서 열부하의 증가에 따라 열전달 계수는 선형적으로 증가하며, 이러한 결과는 부력의 영향으로 자연대류열전달이 증가하는 것으로 판단된다.
- 3) 밀폐공간 내 블록표면에서 멀어짐에 따라, 외부온도가 낮아짐에 따라 Nusselt 수는 증가하며, 실험 결과에 기초하여 밀폐공간에서 외부환경변화에 따른 Nu-Ra 수의 상관관계식을 최소자승법으로 정리하였다.
- 4) 향후 저온 및 저압 환경에서 실험을 진행할 예정이며, 기상청 라디오존데를 이용하여 실제 성층권에서 대류 열환경 실험을 수행하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 지원으로 이루어진 민군협력사업(13-DU-SP-01-MKE) 일환으로 수행되었습니다.

## References

1. O. Gonzalez-Espasandin, J. T. Leo, and E. Navarro-Arevalo, "Fuel Cells: A Real Option for Unmanned Aerial Vehicles Propulsion", The Scientific World

- Journal, 2014, pp. 1-12.
2. T. Kim, and S. Kwon, "Design and Development of a Fuel Cell-Powered Small Unmanned Aircraft", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pp. 615-622.
  3. M. Cha, M. Kim, Y. Sohn, and T. Yang, "Design, Control and Evaluation Methods of PEM Fuel Cell Unmanned Aerial Vehicle: A review", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 45, No. 4, 2014, pp. 405-418.
  4. S. Cho, M. Kim, Y. Sohn, and T. Yang, "Research trend and analysis of altitude and endurance for fuel cell unmanned aerial vehicles", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 4, 2014, pp. 397-404.
  5. D. Park, S. Kim, D. Kim, and T. Kim, "Performance Evaluation of Hydrogen Generator for Fuel Cell Unmanned Aircraft", *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 39, No. 7, 2011, 2011, pp. 627-633.
  6. S. Kang, B. Kim, and H. Kim, "Experimental Study on the Characteristics of Heat Exchanger of 1 kW PEMFC System for UAV", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 60, 2011, pp. 819-826.
  7. Y. Jee, Y. Sohn, G. Park, C. Kim, Y. Choi, and S. Cho, "Power System Development of Unmanned Aerial Vehicle using Proton Exchange Membrane Fuel Cell" *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 3, 2012, pp. 250~255.
  8. G. Romeo, F. Borello, G. Correa, and E. Cestino, "ENFICA-FC: Design of Transport Aircraft Powered by Fuel Cell & Flight Test of Zero Emission 2-seater Aircraft Powered by Fuel Cells Fueled by Hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, 2013, pp. 469-479.
  9. K. Bae, C. Yi, H. Jeong, and H. Chung, "A Study on Natural Convection in a Rectangular Enclosure with a Heating Source", *Proceeding of The KSME Spring Conference B*, 2000, pp. 296-303.
  10. Y. Ahn, H. Cho, and H. Yong, "A Finite Element Analysis of Conjugate Heat Transfer Inside a Cavity with a Heat Generating Conducting Body", *Trans. of The Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 33, No. 3, 2009, pp. 170-177.
  11. J. Lee, and M. Ha, "Numerical Simulation of Natural Convection in a Horizontal Enclosure with a Heat-generating Conducting Body", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, 2006, pp. 2684-2702.