

인버터 기동반의 열전달 예측을 위한 수치해석

김명수 · 김만석* · 최형권†

서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과

*서울과학기술대학교 산업대학원 기계공학과

†서울과학기술대학교 기계자동차공학과

A Numerical Analysis for the Heat Transfer Prediction of inverter system

Myoung Soo Kim, Man Seok Kim* and Hyoung Gwon Choi†

Department of Energy System, Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Industry and Engineering, Seoul National University of Science and Technology

†Department of Mechanical/Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Abstract

In the study, a numerical analysis is conducted to investigate the heat transfer characteristics of an inverter system inside a panel for three locations (bottom, middle and top). A conjugate heat transfer is simulated using a CFD (computational fluid dynamics) code since the heat transfer through the surrounding panel walls is important. It is shown that the heat flux through the left wall, which is important for the safety of the electronic equipment, is the biggest when the inverter is located at bottom. On the other hand, the heat flux through the left wall is negligible when the inverter at middle or top. It is also found that the heat flux to the surrounding walls is the lowest when the inverter is at middle.

Key Words : Inverter system, Computational Fluid Dynamics, Conjugated Heat Transfer, Heat Flux

1. 서 론

석유자원의 고갈과 온실가스 배출로 인한 기후의 변화로 친환경 고효율 제품에 대한 연구와 개발이 다양한 분야에서 진행되고 있다. 지구 온난화의 영향으로 지구의 평균 온도가 높아지는 이상고온 현상에 의해 냉방기기의 사용량은 해마다 증가하고 있다. 따라서, 한국전력공사는 여름철 전력 상승을 억제하기 위해 각종 규제와 다양한 지원 정책을 고안하여 예비전력운영의 안정성을 확보하려고 노력하고 있다.

한국전력공사의 전력수요관리 계획 중에서는 축냉설비, 가스냉방 등의 부하를 특별 관리하고 효율이 향상된 기기를 기업에서 구입하도록 권장하는 내용이 포함

되어 있다. 이러한 정책을 장려하기 위한 규정으로는 기기 설치 지원금, 요금 차별 등을 제시하고 있다.[1] 이와 같은 규정을 통해 고효율 유도전동기를 이용한 냉동기의 보급은 확대되고 있다. 기존 건물을 리모델링 공사를 하는 경우에는 제한된 기계실의 면적에 대해서 상대적으로 증가된 냉방부하를 처리하기 위한 고효율 냉동기 적용이 필수 사항이 되고 있다. 또한 최근에는 보다 효율적인 에너지 절약을 위하여 인버터 기동반의 보급이 증가되고 있다.

인버터 기동반은 내부의 전자부품간의 발열로 인하여 효율의 감소가 발생한다. 따라서, 인버터 내부의 방열에 대한 연구는 매우 중요하다. 인버터 내부의 방열 시스템과 비슷한 대류 열전달 문제의 수치해석 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 이재룡[2] 등은 발열 전도체가 존재하는 밀폐계 내부의 자연대류 현상에 대해서 수치해석 연구를 수행하였다. 그들은 온도 차의 증가에 따

†E-mail : hgchoi@snut.ac.kr

른 발열 전도체의 발열량 증가가 밀폐계 내부의 온도장에 미치는 영향을 확인하였으며, 발열체의 열전도계수 변화에 의한 유동 및 온도장 변화에 대해서 고찰하였다. 안영규[3] 등은 밀폐된 공동 내에 고체 열원이 존재하는 경우에 대해서 유한요소법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 그들은 다양한 레일리 수에 대해서 온도장 변화에 대한 결과를 분석하였으며, 레일리 수와 최대 열전달 계수의 위치에 대한 관계식을 도출하였다. 남평우[4] 등은 입구와 출구로 외부 공기가 자유롭게 드나들 수 있는 개방된 정사각형 공동 내 발열체가 존재하는 경우에 대해서 복사열전달을 고려한 수치해석을 수행하였다. 그들은 발열체의 열유속 값과 위치에 따른 공동 내 열유동 특성에 대해서 보고하였다.

김정현[5] 등은 환에 의한 강제대류를 통해 방열하는 태양광 발전용 인버터의 성능 평가를 수행하였다. 그들은 환의 수, 전열면적 등이 다른 4개의 방열 환을 사용하여 내부 온도 차와 발열량을 확인하고, 그 중에서 가장 성능이 뛰어난 방열 환을 선정하였다. 이진우[6]는 방열판과 냉각 환이 포함된 400 kW 급의 IGBT 인버터용 방열 시스템에 대해서 실험을 수행하였다. 그들은 방열판과 냉각 환의 특성을 바탕으로 인버터 내부의 온도가 반도체 소자의 사용 온도 조건에 적합한지를 확인하였다. 반도체 소자의 사용 온도 조건에 적합하지 않은 경우에는 방열판과 냉각 환을 다시 선정하여 확인하는 최적화 작업을 수행하였다. 구민예[7] 등은 상용 수치해석 프로그램인 Ansys Fluent를 이용하여 발전설비 인버터 방열 시스템 내부의 방열성능에 대해서 고찰하였다. 그들은 히트 싱크로 투입된 열량, 공기유량, 공기온도, 전열면적의 변화를 고려하여 방열 시스템의 방열성능에 대해서 해석을 수행하였다. 김정현[8] 등은 인버터 방열에 사용되는 히트 싱크의 방열성능을 평가하기 위하여 방열 핀의 개수와 타입을 변수로 두고 방열시스템 상판의 온도를 측정하는 실험을 하였다.

선행연구들은 간단한 형상에 대해서 열원이 존재하는 공동 내의 자연대류 현상에 대한 연구들과 인버터에서 내부에서 발생하는 열로 인한 성능 저하 및 수명 단축을 막기 위한 방열시스템에 대한 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 환이 설치된 산업용 인버터 기동반에서 인버터 판넬의 외부에 부착되어 있는 전자장비의 열 피로 파손을 막기 위해 인버터의 높이에 따른 기동반 내부의 복합열전달 해석을 수행한다. 해석 결과로부터 인버터 판넬 벽면의 온도와 벽면을 통한 외부와의 열유속을 예측하여 최적의 인버터 위치를 추정하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1. 지배방정식 및 상용코드

본 연구에서는 산업용 수치해석 프로그램인 ANSYS-Fluent를 사용하였다. 2차원 정상상태 난류유동으로 가정하였으며, 연속방정식과 Navier-Stokes 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 연속방정식 (Continuity equation)

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{on } \Omega_f \quad (1)$$

- 운동량방정식 (Momentum equation)

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \text{on } \Omega_f \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

- 에너지 방정식 (Energy equation)

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{on } \Omega_f \quad (3-a)$$

$$0 = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{S} \quad \text{on } \Omega_s \quad (3-b)$$

지배방정식의 해법을 위해서 ANSYS-Fluent에서 제공하는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 난류 모델은 Standard k-e 모델을 사용하였다. 환에 의한 강제대류에 의해 중력은 무시하였고, 인버터 판넬 내부의 온도차가 크지 않아서 복사열전달도 무시 하였다.

2.2. 형상 및 경계조건

실제 사용 모델의 형상을 Fig. 1(a)와 같이 2차원으로 단순화하여 모델링 하였다. 전체 계산 영역의 크기는 세로 4000 mm, 가로 4000 mm이고, 외기 온도조건은 20°C이다. 인버터 판넬의 크기는 가로 800 mm, 세로 2300 mm이며, 인버터의 크기는 가로 300 mm, 세로 800 mm이다. 본 연구에서는 인버터가 바닥면으로부터 떨어진 높이가 100 mm, 700 mm, 1400 mm인 3가지 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 인버터의 용량은 220 kW이다. 인버터의 발열량은 제품의 사양서에서 제시한 4214 W로 설정하였다. 상부에 설치된 환은 직경 이 140 mm이고 회전 수는 4200 rpm이다. Fig. 1(b)는 본 수치해석에서 사용한 경계조건을 정의

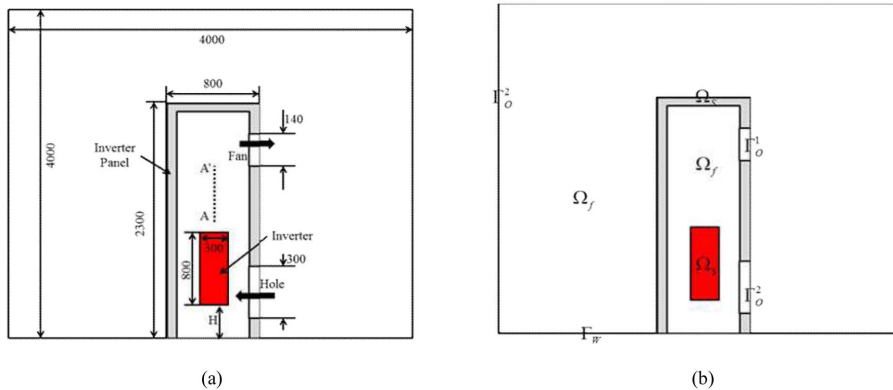


Fig. 1. Schematic of the inverter system (a) computational domains (b) boundary conditions.

한다. Ω_s 는 고체 영역을 나타내며, Ω_f 는 유체영역을 나타낸다. Γ_o^2 는 압력출구(pressure outlet) 경계조건을 나타낸다. Γ_o^1 는 팬을 지정하는 경계조건을 나타낸다. Γ_w 는 벽면의 접촉조건을 나타낸다.

2.3. 격자 의존도 테스트

본 해석에 사용된 격자는 사각형과 삼각형이 혼합된 격자구조이며, 격자계에 무관한 해를 구하기 위해 3가지 격자계(Grid)에 대해서 격자 의존도 테스트를 수행하였다. 모델링과 격자 생성은 상용 격자 생성 프로그램인 Ansys Design Modeler, Ansys Meshing을 사용하였다. 대표 격자의 크기는 각 30 mm, 20 mm, 15 mm이며, 격자의 수는 2만, 7만5천, 16만개이다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 대표 격자의 형상과 인버터의 상부 200 mm 위치에서 1200 mm 위치까지의 측정선 AA'를 나타낸다. Fig. 3은 측정선 AA'에서 3가지 격자계에 대한 속도 분포를 비교한 결과이다. 인버터 상단으로부터 0.2 m 떨어진 지점의 속도는 약 0.06 m/s이다. 0.6 m 떨어진 지점의 속도는 0.02 m/s로 속도가 줄어다가 상단의 위치로 이동하면서 다시 속도가 높아지는 것을 알 수 있다. Grid 2와 3의 속도 분포 결과에 대한 오차는 최대 8%이고, 평균적으로 5%이내이다. 따라서, 본 연구에서는 Grid 2를 이용하여 해석을 수행하였다.

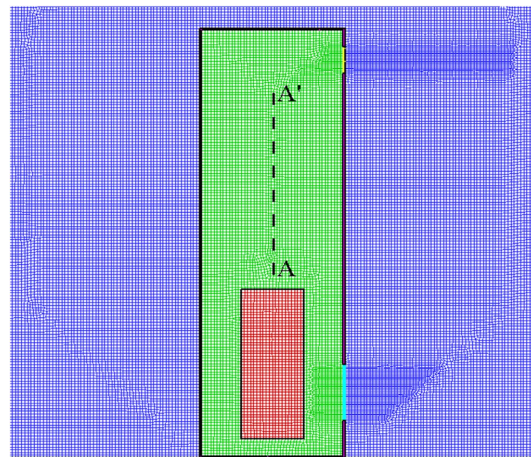


Fig. 2. Non-uniform mesh for the computational.

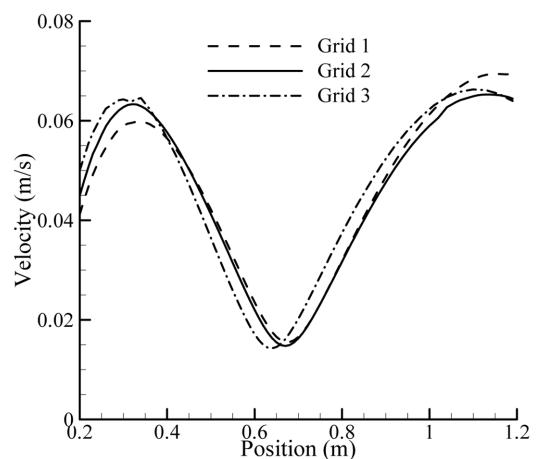
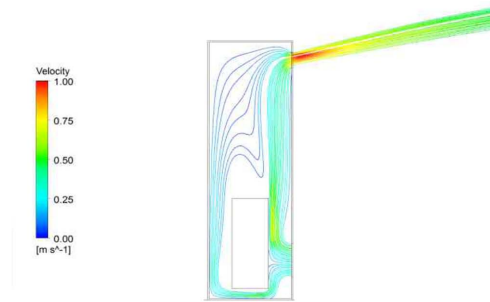


Fig. 3. Velocity profiles for three grid resolutions.

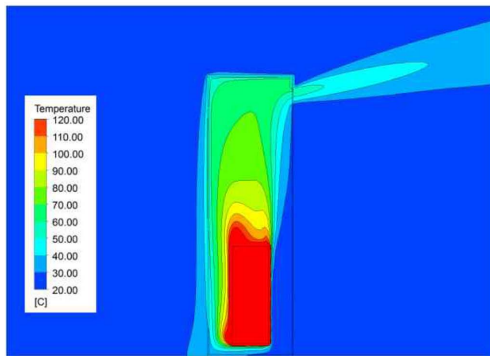
3. 수치 해석 결과

3.1. 인버터의 설치 높이에 따른 영향

본 연구에서는 인버터의 내부에서 발생된 열을 외부로 방출하는 방열시스템의 효율을 높이기 위해서 기존에 설치된 인버터의 방열시스템에 대한 수치해석을 수



(a) Streamlines contours



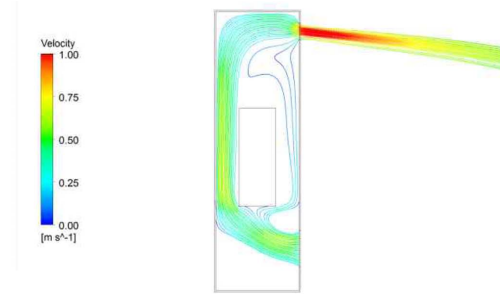
(b) Temperature contours

Fig. 4. Streamlines and temperature contours inside the inverter panel (Case1).

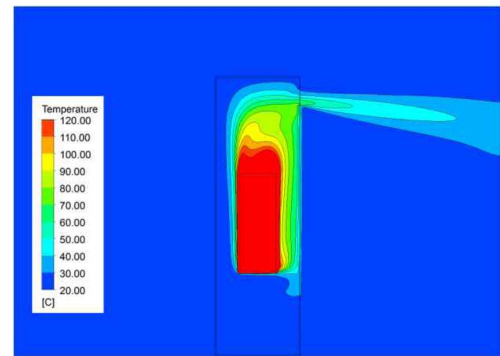
행하였다. Fig. 4는 바닥에서 위로 100 mm 떨어져 배치된 인버터의 경우에 팬넬 상부에 설치된 웬이 4200 rpm으로 회전할 때 인버터 팬넬 내, 외부의 유선 분포와 온도 분포를 보여준다.

인버터 팬넬 내부의 공기는 상부에 설치된 웬에 의해서 외부로 빠져나가고 외부의 차가운 공기는 오른쪽 아래의 구멍을 통하여 인버터 팬넬 내부로 들어오게 된다. 내부로 들어온 차가운 공기는 인버터와 열교환을 하고 다시 상부의 웬을 통해 밖으로 빠져나가게 된다. 아래 입구를 통해 유입된 상온의 공기는 인버터와 충돌 후에 일부는 인버터 하부로 일부는 측면을 통해 상부로 흐르게 된다. 유입된 공기는 인버터와의 열교환을 통해서 온도가 상승하게 되고, 뜨거워진 공기는 벽면을 따라 흐르며 벽면의 온도를 상승시키게 된다.

Fig. 5는 인버터가 바닥에서 위로 700 mm 떨어져 배치된 경우에 인버터 팬넬 내, 외부의 유선 분포와 온도 분포를 보여준다. Case 1의 경우와 달리 유입된 공기는 왼쪽 벽면과 인버터 하부에 충돌한 후에 유량이 인버터 좌우로 분배된다. Case1에 비하여 덜 뜨거워진 공기가 왼쪽 벽면을 따라 흐르므로, 주요 전기 기기들



(a) Streamlines contours



(b) Temperature contours

Fig. 5. Streamlines and temperature contours inside the inverter panel (Case2).

이 위치한 왼쪽 벽면 쪽으로의 열유속이 감소한다.

Fig. 6은 인버터가 바닥에서 위로 1400 mm 떨어져 배치된 경우에 인버터 팬넬 내, 외부의 유선 분포와 온도 분포를 보여준다. Case2의 경우와 같이 외부에서 유입된 상온의 공기가 인버터와의 열교환을 Case1에 비해서 덜한 상태로 왼쪽 벽을 따라 흐르게 된다. 따라서, 왼쪽 벽의 온도상승이 효과적으로 방지됨을 볼 수 있다.

3.2. 팬넬 좌측 벽의 온도/열유속 분포

인버터의 영향으로 뜨거워진 공기에 의해서 팬넬 내부의 온도는 상승하게 된다. 한편, 팬넬 왼쪽 벽의 외부 온도는 외부의 차가운 공기에 의해서 상대적으로 온도가 낮다. 따라서, 열은 왼쪽 벽을 통하여 전자장비들이 설치되어 있는 곳으로 이동하게 된다. Fig. 7은 인버터 팬넬 왼쪽 벽을 따라서의 온도 및 열유속 분포를 보여준다. Case1의 경우에 온도는 벽의 높이가 1.5 m인 지점까지 빠르게 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 웬에 의해서 팬넬 안쪽에 있는 뜨거운 공기가 상승하면서 약 1.5 m 높이까지의 벽의 온도를 높이게 된다. 이 때 온도가 높아진 벽은 전자장비가 설치된 외부

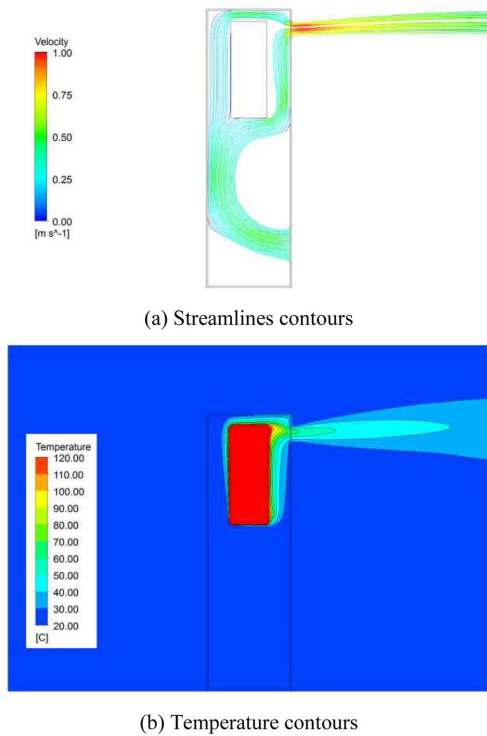


Fig. 6. Streamlines and temperature contours inside the inverter panel (Case3).

로 열을 방출하게 된다. 벽의 높이가 0.5 m ~ 1.5 m인 지점에서 온도가 급격하게 상승하고 열유속 분포도 마찬가지로 급격한 기울기로 높아지는 것을 볼 수 있다. 한편, 인버터의 바닥면의 높이가 0.7 m와 1.4 m일 때는 왼쪽 벽면에 통한 열의 방출은 Case1의 경우에 비하여

Table 1. Heat fluxes through the three walls and fan

	100mm	700mm	1400mm
Left Wall	23.9W	0.9W	0.7W
Top Wall	24.4W	3.7W	9.1W
Right Wall	19.4W	63.1W	9.3W
Air-temperature at Fan-Exit	49.89°C	48.78°C	50.75°C
Fan-Exit	3710W	3942W	3701W

Table 2. Mass flow rate through the fan

	100mm	700mm	1400mm
Mass flow rate	0.123kg/s	0.137kg/s	0.120kg/s

매우 작았다. 한편, Table 1는 인버터 판넬 주위를 통한 열유속과 팬을 통하여 토출된 공기의 온도를 나타낸다. Case 1의 경우는 왼쪽 벽을 통한 열유속이 가장 크며, 팬을 통한 토출열량은 Case 3의 경우와 거의 같다. Case 2는 왼쪽 벽을 통한 열유속은 작아서, 인버터 판넬 왼쪽에 설치된 전자장비의 열 피로 현상을 유발시킬 가능성이 적다. 반면에, 오른쪽 벽면을 통해서 많은 열량을 방출하여 실내 공기의 온도를 상승시킬 수 있다. Case 3은 왼쪽 및 오른쪽 벽을 통한 열유속이 가장 적어서, 판넬 벽을 통한 열전달을 최소화할 경우에 적용되어야 할 것으로 판단된다. 한편, Case 2의 경우에 팬을 통해 토출되는 공기온도가 가장 낮음에도 팬을 통한 열량방출이 가장 큰 것은 인버터가 유동손실이 적은 위치에 있어 팬을 통한 토출 유량이 크기 때문인 것으로 여겨진다. Table 2는 팬을 통하여 토출된 공기의 질량유동률을 나타낸다.

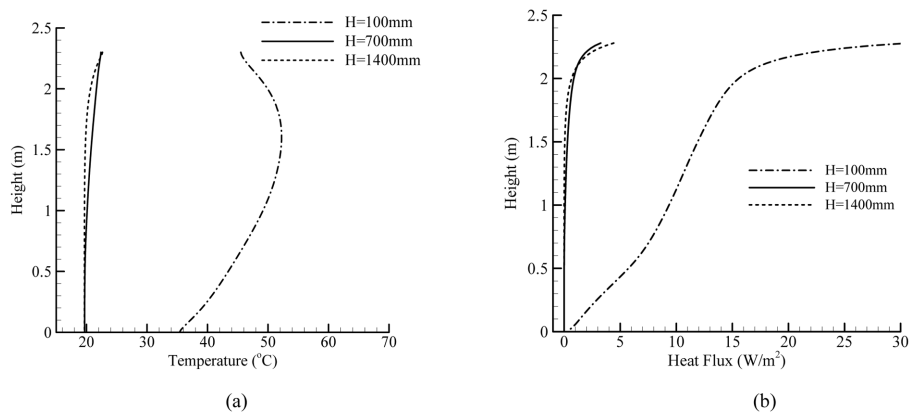


Fig. 7. (a) Temperature distribution along the left wall (b) Heat flux profiles for the three cases along the left wall.

4. 결 론

본 연구에서는 열원을 포함하는 인버터 판넬 내부에서 고온의 공기를 통한 외벽으로의 열전달을 예측하는 수치해석을 수행하였다. 고체와 유체의 열전달을 동시에 고려한 복합열전달 수치해석을 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 인버터의 위치가 낮은 경우($H = 100 \text{ mm}$)에는 인버터와의 열교환을 통해 온도가 상승한 공기가 벽면을 따라 흐르면서 벽면의 온도를 매우 높게 상승시킨다.

(2) 인버터의 위치가 중간($H = 700 \text{ mm}$) 또는 높을 때($H = 1400 \text{ mm}$), 왼쪽 벽면의 열유속은 낮은 경우($H = 100 \text{ mm}$)보다 매우 작다.

(3) 인버터의 위치가 중간인 경우에는 전체 벽면에 대한 열유속이 가장 작게 나타나기 때문에 가장 효율적이다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Korea Electric Power Corporation, "Handbook of Demand Side Management," 2013.
2. Lee, J. R., Ha, M. Y., "Numerical Simulation of Natural Convection in Horizontal Enclosure with Heat-Generating Conducting Body," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 29, pp.

441-252, 2005.

3. Ahn, Y. K., Choi, H. G., Yong, H. T., "A Finite Element Analysis of Conjugate Heat Transfer inside a Cavity with a Heat Generating Conducting Body," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 33, pp. 170-177, 2009.
4. Nam, P. W., Park, M. S., Park, C. W., "A Study on the Surface-Radiation Heat Transfer Characteristics in an Open Cavity with a Heat Source," Solar Energy, Vol. 12, pp. 70-83, 1992.
5. Kim, J. H., Lee, G. W., "Performance Evaluation of Swaged- and Extruded-type Heat Sinks used in Inverter for Solar Power Generation," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 37, pp. 933-940, 2013.
6. Lee, J. W., "Design of a Heat Dissipation System for the 400kW IGBT Inverter," The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 9, pp. 350-355, 2004.
7. Ku, M. Y., Kim, J. H., Kim, Q. M., Lee, S. K., Kang, H. Y., Lee, G. W., "Heat Release Performance of Heat Sink in Industrial Inverter," Proceedings of the KSME 2012 Fall Annual Meeting, pp. 2709-2714, 2012.
8. Kim, J. H., Ku, M. Y., Jo, H. S., Lee, G. W., "Performance Evaluation of Heat Sink used in the Inverter for Solar Power Generation," Proceedings of the KSME 2013 Spring Annual Meeting, pp. 264-265, 2013.

접수일: 2014년 6월 5일, 심사일: 2014년 6월 16일,
게재확정일: 2014년 6월 20일