

발열체와 부분 열림 수직벽을 갖는 사각 공간내 자연대류 특성 해석

심동식*, 강보선**, 차동진***, 주원종****

A Study on the Characteristics of Natural Convection in a Partially Opened Enclosure with a Heat Source

Dong Sik Shim, Bo Seon Kang, Dong Jin Cha, Won Jong Ju

Key Words: Holographic Interferometer(홀로그래피 간섭계), Natural Convection(자연 대류), Heater(발열체), Enclosure(사각 공간)

Abstract

Natural convection heat transfer in an enclosure with an opening in the right vertical wall and a heat source at the bottom surface is investigated using a holographic interferometric technique. The effects of the opening length, divider length attached to the top wall, and heater temperature on the temperature distribution are examined. The opening length as well as the divider length greatly affects the degree of inflow and outflow of air. With a small opening, the opening doesn't affect much the upward warm air flow resulting in the symmetric temperature distribution. On the other hand, with the increase of the opening length, the inward cold flow moves the upward flow to the left direction. With the increase of the divider length, temperature in the lower region of enclosure becomes higher for the small opening and lower for the large opening.

1. 서 론

수직벽의 일부가 개방되어 있고, 바닥에 열원이 존재하는 사각 공간내 자연대류 열전달에 관한 연구는, 실내 공간의 쾌적한 환경 구축을 위한 공기조화 시스템 등에 기초 자료로써 활용될 뿐만 아니라, 난방에 의해 소비되는 에너지 절약 측면에서도 매우 중요한 문제이다. 또한, 전자 장치 발열원의 냉각 범위, 태양열 집열관의 설계 및 건물내의 화재에 의해 확산되는 연기 유동의 제어 등에도 응용될 수 있다.

이와 관련된 연구로써, 김태국 등⁽¹⁾은 흡수, 방출 및 산란하는 매체가 충전된 공간에서의 자연대류-복사가 복합된 열전달을 수치 해석하였는데, 열림률의 증가에 따라 입구 주위의 유체 속

도가 증가하고 온도는 떨어지며 외부로부터 유입되는 공기의 양은 증가한다는 결과를 얻었다. 추병길 등⁽²⁾은 개구부를 갖는 사각공간 내에서의 열원에 의한 자연대류 열전달 현상을 수치 해석하여, 본 연구 결과와 유사한 온도장 분포를 구하였다. 손봉세⁽³⁾는 발열체와 개구부가 있는 공간내의 자연대류-복사 열전달에 대한 수치 해석적 연구를 수행하여, 개구부가 커짐에 따라 공기의 순환량도 증가하는 것을 확인하였다.

이중섭 등⁽⁴⁾은 밀면 전체가 고온으로 유지되고, 왼쪽 하부로 공기가 유입되어 오른쪽 상부로 공기가 유출되는 사각 공간내에서의 열전달 현상을 홀로그래피 간섭계를 이용하여 연구하였는데, 공간 내에 존재하는 격판에 의해 열전달이 둔화함을 나타내었다. 국외의 관련 연구로써, Myrum⁽⁵⁾은 바닥에 열원이 존재하고, 상부 중심이 부분 개방된 원통형 실험 체적 내에서의 자연대류에 관하여 해석하여, 개구부 주위에서의 온도가, 유입되는 유체에 의해 떨어지는 것을 확인하였다.

* 전남대 대학원 기계공학과, ** 전남대 자동차공학부

*** 대전산업대 건축설비공학과

**** 서울산업대 자동화공학과

이처럼 열원이 존재하는 사각 공간 내의 자연 대류 현상에 대한 수치 해석적 연구는 많이 진행되었지만, 실험적 연구는 많지 않은 편이다. 따라서, 본 연구에서는 수직벽의 상부 일부가 개방되어 있고, 수평 바닥면에 열원이 존재하는 경우의 자연대류 현상을 홀로그래피 간섭 시스템을 이용하여, 해석하였다. 특히, 개구부의 크기, 공간 내부에 존재하는 격판, 발열원의 온도가 열유동장에 미치는 영향을 비교, 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험 장치

Figure 1은 실험에 사용된 홀로그래피 간섭 시스템이다. 광원인 He-Ne 레이저에서 나온 빔은 가변 빔분할기(variable beamsplitter)에 의해 기준광과 물체광으로 분리되며, 40 배의 대물렌즈(microscope objective)와 지름이 $10\ \mu\text{m}$ 인 핀홀을 통과하게 하여, 빛이 지닌 노이즈를 제거하고 단면 전체에 걸쳐 고른 분포를 갖는 빔을 형성하였다. 핀홀 통과 후 확대되는 빔은 직경 $10\ \text{cm}$ 인 렌즈에 의하여 평행광으로 형성된다. 물체광은 실험 체적을 통과하여 홀로그래피 필름에 도달하고, 기준광은 필름 수직 방향과 약 23° 각도로 홀로그래피 필름에서 만나게 된다.

Figure 2의 실험 체적은 단열 효과가 좋은 두께 $10\ \text{mm}$ 의 베크라이트로 제작하였으며, 바닥면은 히터와의 직접 접촉으로 열전달이 클 것으로

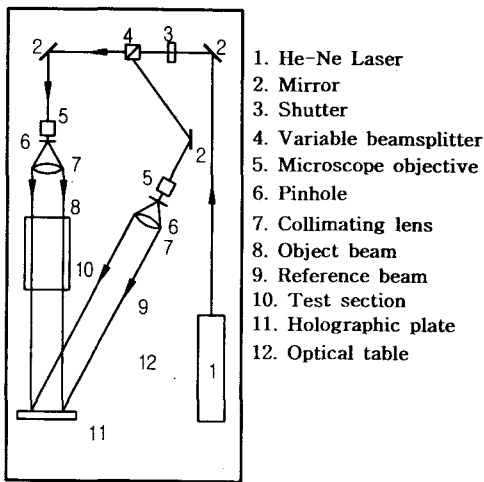


Fig. 1 Schematic diagram of the holographic interferometry system

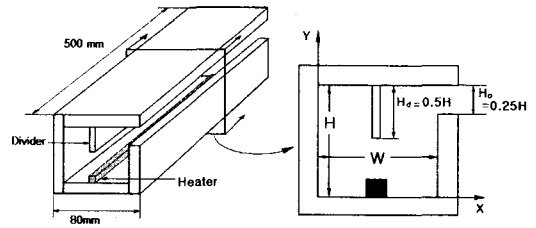


Fig. 2 Schematic diagram of the test section.

예상되어 단열효과가 더 좋은 세라믹보드를 사용하였다. 사각 공간의 높이 H 와 폭 W 는 모두 $60\ \text{mm}$ 이다. 우측 수직벽과 내부 공간에 설치되는 격판의 경우, 그 크기를 $0.25H$ 와 $0.5H$ 로 변화할 수 있게 하였다. 실험 체적의 길이는 2차원 유동장을 형성하기 위하여 $500\ \text{mm}$ 로 비교적 길게 제작하였다.

발열원은 열전도율이 높은 금속($12 \times 12\ \text{mm}$)의 중심에 구멍을 뚫고 직경 $6.25\ \text{mm}$ 인 원형 단면의 카트리지 히터를 삽입하여 하나의 히터 블록을 제작, 이용하였다. 발열원의 온도는 온도조절기와 교류용 전력조절기를 이용하여, 온도를 일정하게 유지하였다. 발열원의 온도 측정은 5개의 K형 열전대를 표면에 등 간격으로 부착하였으며, 정상 상태에 도달하여 지정한 온도로부터의 온도 변화는 $\pm 0.2\ ^\circ\text{C}$ 이내였다.

실험 체적 내부 공기 온도는 노출된 비드형 열전대를 좌측 수직벽의 $0.25H$, $0.5H$, $0.75H$ 높이와 우측 상판의 $0.75W$ 위치에서 내부로 삽입하며, 측정하였으며, CCD 카메라로 열전대 위치를 촬영하여 공간 내에서의 정확한 위치를 파악하였다. 열전대로부터의 모든 전기적 신호는 데이터 수집장치(HP34970A)를 통하여 컴퓨터에 저장되었다.

2.2 실험 방법 및 조건

홀로그램 간섭 사진은 이중 노출 방법을 이용하였으며, 노출 시간은 0.25 초, 정상 상태에 도달하는 시간은 최대 2 시간 정도였다. 빛에 노출된 홀로그램 필름은 화학적으로 처리한 후 재생 과정을 거친다. 재생된 프린지를 촬영하기 위하여 홀로그램 필름 뒤에 산란판을 위치시키고, 산란판에 형성된 간섭 무늬를, 일반 또는 CCD 카메라를 이용하여 근접 촬영하였다.

본 연구에서는 사각 공간 오른쪽 수직벽의 개구부 크기(H_0), 공간 내부에 존재하는 격판의 크

기(H_d), 발열원 온도 변화가 유동 및 온도장 형성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 실험 조건은 Table 1에 나타내었으며, 개구부와 격판 크기 변화의 경우에는 발열원 온도를 40°C로 유지하였고, 경우 7, 8에서는 발열원 온도 변화에 따른 영향을 살펴보고자 하였다. 히터 가열 전 공기의 온도는 모든 경우에 18°C였다. 자연 대류 특성을 나타내는 무차원 변수 Ra 수의 특성화 길이는 사각 공간의 한 변 길이를 사용하였다.

2.3 간섭 사진 해석

사각 공간내 특정 지점의 온도를 알면, 프린지 간섭 사진으로부터 공간 전체의 온도 분포를 파악할 수 있다. 프린지 간섭사진에서 획득할 수 있는 굴절률 n 과 밀도와의 관계식은 Gladstone-Dale 방정식⁽⁶⁾에서 다음과 같이 정의된다.

$$n-1 = K\rho \quad (1)$$

상수 K 는 Gladstone-Dale 상수이며, 공기의 경우 $K = 0.2266 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 이다. i 번째와 $i-1$ 번째의 프린지수를 N_i, N_{i-1} 라고 하고, 빛이 광축으로 이동하면서 발생한 위상차 ϕ 와의 관계식으로부터

$$N_i - N_{i-1} = K \frac{L}{\lambda} (\rho_i - \rho_{i-1}) \quad (2)$$

이 된다. 여기서 λ 는 레이저의 파장이고, L 은 광축 방향으로의 실험 체적의 길이이다. 또한, 기체를 이상기체로 가정하여, 이상기체상태방정식을 사용하면, 기체의 밀도를 온도로 바꿀 수 있으며, 최종적으로 다음과 같은 프린지 수와 온도와의 관계식을 얻을 수 있다.

Table 1 Test conditions.

Run	H_o (mm)	H_d (mm)	T_h (°C)	ΔT	Ra
1	15, 0.25H	0	40	22	6.54×10^9
2	30, 0.5H	0			
3	15, 0.25H	15, 0.25H			
4	30, 0.5H	15, 0.25H			
5	15, 0.25H	30, 0.5H			
6	30, 0.5H	30, 0.5H			
7	30, 0.5H	0	30	12	5.42×10^9
8			50	32	7.55×10^9

$$N_i - N_{i-1} = K \frac{L}{\lambda} \frac{PM}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i-1}} \right) \quad (3)$$

따라서, $i-1$ 번째 프린지에서 온도값을 알게 되면, 바로 인접한 프린지의 온도를 식 (3)를 이용하여 계산할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

격판 길이와 개구부 크기 변화가 공간 내 온도 분포에 미치는 영향을 Fig. 3의 프린지 간섭 사진이 정성적으로 보여 주고 있다. 전체적으로, 발열체 주변으로 상승하는 유동이 발생하고, 공기 온도 변화가 가장 심하여 가장 조밀한 프린지 간격을 보여 주고 있다. 또한, 개구부의 크기에 상관없이 개구부의 상부로 고온의 내부 공기가 유출되고 하부로 저온의 외부 공기가 유입되는 것을 알 수 있다.

개구부의 크기 변화에 따른 영향을 살펴 보면, 개구부의 크기가 0.25H인 경우에는 유입 공기 유동이 강하지 않아서 발열원 상부의 상승 유동이 방해받지 않고 상승하여 발열원을 중심으로 좌우 대칭적인 온도 분포를 보여 주고 있다. 반면에 개구부의 크기가 0.5H인 경우에는 유입 공기 유동이 강해져서, 발열원 상부의 상승 유동을 왼쪽으로 치우치게 하면서, 오른쪽 공간으로 발달하려는 상승 공기 유동을 방해하고 있다.

격판의 영향을 살펴 보면, 격판의 존재는 사각 공간 상부로 상승한 유동을 좌우로 분리하면서, 유출, 유입되는 공기 유동의 정도를 변화시키고 있다. 즉, 격판이 없는 경우에는 유입 유동이 강하다가, 격판 길이가 0.25H인 경우, 유출 유동이 유입 유동보다 강해지고, 격판 길이가 0.5H로 길어지게 되면, 유입 유동이 강해진다.

발열체의 온도를 30°C에서 50°C까지 변화시켰을 때, 사각 공간내 온도 분포를 Fig. 4에서 보여 주고 있다. 전체적으로, 발열체의 온도가 상승함으로써 인하여, 상승 공기의 속도도 증가하게 되고, 개구부로 유출되는 공기의 증가로 인하여 유입되는 공기도 많아지게 된다. 따라서, 발열체 상부의 상승 유동이 온도가 증가할수록 더욱 왼쪽으로 치우치게 되고, 발열체 상부의 상승 유동을 보충하기 위하여 공간 하부의 수평면 부근에서 발열체 중심으로 향하는 유동도 온도의 증가에 따라

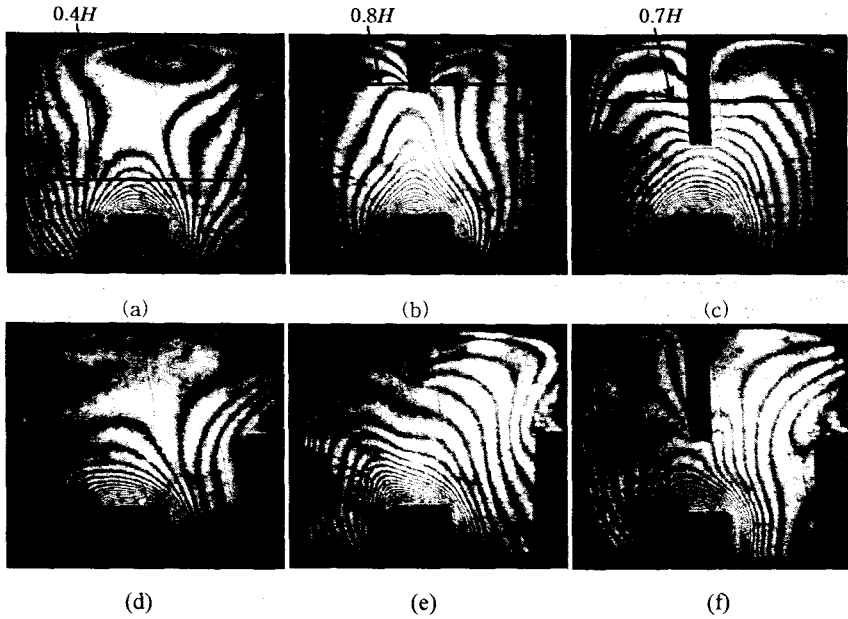


Fig. 3 Photographs of fringes showing the temperature distribution; (a) no divider, $H_o=0.25H$, (b) $H_d=0.25H$, $H_o=0.25H$, (c) $H_d=0.5H$, $H_o=0.25H$, (d) no divider, $H_o=0.5H$, (e) $H_d=0.25H$, $H_o=0.5H$, (f) $H_d=0.5H$, $H_o=0.5H$

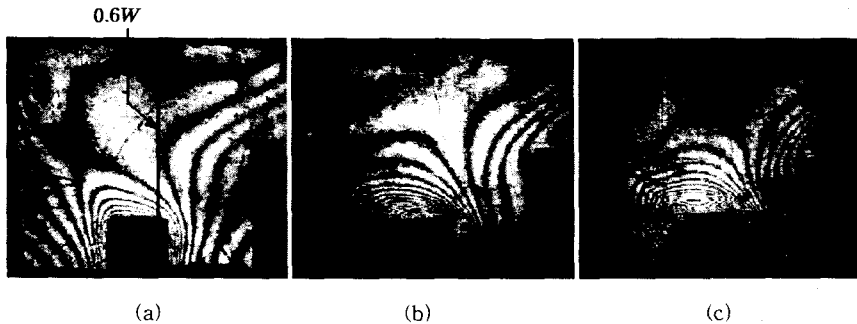


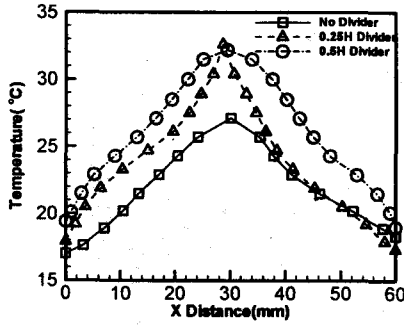
Fig. 4 Photographs of fringes showing the effect of heater temperature; (a) $T_h=30\text{ }^\circ\text{C}$, (b) $T_h=40\text{ }^\circ\text{C}$, (c) $T_h=50\text{ }^\circ\text{C}$.

더욱 강해짐을 알 수 있다.

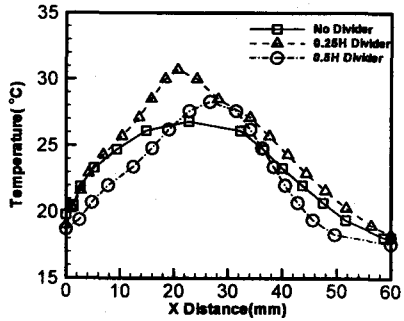
Figure 5는 개구부가 고정되었을 때, 격판 길이 변화의 영향을 보여 주는 그림이다. 온도는 사각 공간의 $0.4H$ 높이에서 수평 방향으로 이동하면서 만나는 프린지의 온도를 계산한 것이다.

개구부의 길이가 $0.25H$ 인 경우, 전체적으로 발열체 상부의 상승하는 유동이 방해받지 않고 공간 상부까지 이동하면서, 좌우 대칭적인 온도 분포를 보여 주고 있다. 공간의 왼쪽에서는 격판의 존재로 인하여, 고온 공기의 개구부로의 유출이 방해를 받으면서, 고온 공기가 왼쪽에 갈

히는 현상이 나타나기 때문에, 격판 길이가 길어 질수록 온도가 높게 나타난다. 반면에, 공간 오른쪽에서는 격판이 없거나, $0.25H$ 인 경우는 고온 공기가 유출되면서 낮은 온도를 나타내지만, 격판 길이가 $0.5H$ 가 되면 유입 유동이 더 강해져서 상승 유동이 더 이상 상부로 진행하지 못하기 때문에 오른쪽 하부의 온도가 높게 나타나고 있다. 개구부 길이가 $0.5H$ 가 되면, 발열체 상부 상승 유동이 개구부의 영향을 받아서 왼쪽으로 치우치게 된다. 따라서, 격판이 없거나, $0.25H$ 인 경우에는, 치우친 고온의 공기 유동으로 인하여



(a)



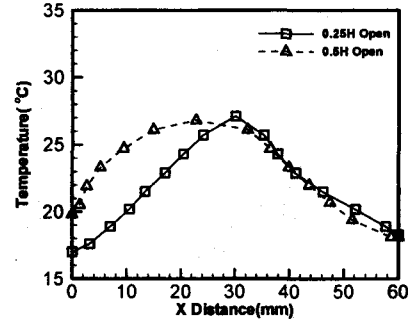
(b)

Fig. 5 Effect of the divider length on the horizontal temperature distribution at $y=0.4H$; (a) $H_o=0.25H$, (b) $H_o=0.5H$.

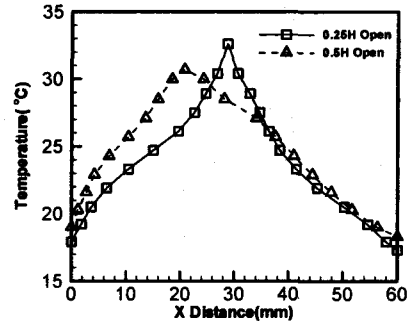
격판 길이가 $0.5H$ 인 경우보다 온도가 높게 나타난다. 반면에 공간 오른쪽에서는, 격판 길이가 $0.5H$ 인 경우, 유입 공기가 강하기 때문에, 공간 하부까지 영향을 미쳐서, 가장 낮은 온도를 나타내고 있다. 격판 길이가 고정되었을 때 개구부 길이의 영향을 Fig. 6에 나타내었다.

격판이 존재하지 않거나, 격판 길이가 $0.25H$ 인 경우는 개구부의 길이가 클수록, 발열체 상부의 상승 유동을 공간 왼쪽으로 이동시키기 때문에 공간 왼쪽의 온도가 높게 나타난다. 반면에, 격판 길이가 $0.5H$ 가 되면, 개구부가 클수록 유입되는 저온 공기의 양이 많아져 전 공간에서 낮은 온도를 나타내고 있다. 발열체 오른쪽 공간은 격판이 존재하지 않거나, 격판 길이가 $0.25H$ 인 경우에는, 유입 공기의 영향을 크게 받지 않기 때문에, 개구부의 크기와 무관하게 비슷한 온도를 나타내고 있으나, 격판 길이가 $0.5H$ 인 경우에는, 강해진 저온 유입 공기로 인하여 개구부가 큰 경우에 매우 낮은 온도를 보이고 있다.

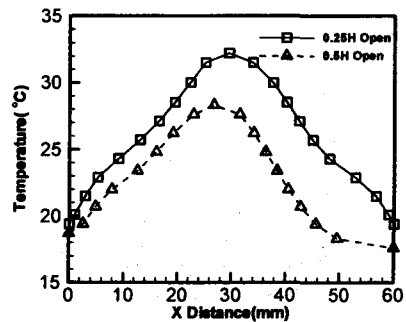
Figure 7은 격판 길이가 $0.25H$ 인 경우에는 $y=0.8H$, $0.5H$ 인 경우에는 $y=0.7H$ 에서, 수평으로



(a)



(b)

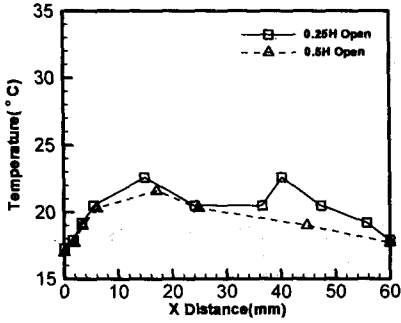


(c)

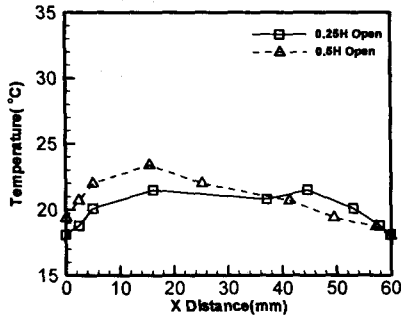
Fig. 6 Effect of the opening length on the horizontal temperature distribution at $y=0.4H$; (a) without divider, (b) $H_o=0.25H$, (c) $H_o=0.5H$.

이동하며 격판 좌우 공간의 온도 분포를 나타낸 것이다. 격판이 $0.25H$ 인 경우, 왼쪽 공간은 개구부의 크기와 무관하게 비슷한 온도를 갖고 있지만, 오른쪽 공간은 개구부가 큰 경우가 저온의 유입 공기로 인하여 온도가 더 낮게 나타난다.

하지만, 격판의 길이가 $0.5H$ 가 되면, 개구부가 클수록 상승하는 고온 공기가 왼쪽 공간에 갇히게 되어 왼쪽 공간에서는 온도가 더 높게 나타나고, 오른쪽 공간에서는 유입 공기의 영향으로



(a)



(b)

Fig. 7 Effect of the opening length on the horizontal temperature distribution; (a) $H_d=0.25H$, at $y=0.8H$, (b) $H_d=0.5H$, at $y=0.7H$.

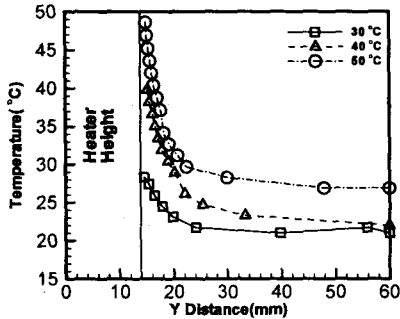


Fig. 8 Effect of heater temperature on the vertical temperature distribution at $x=0.6W$

더 낮게 나타나고 있다.

발열체의 온도를 변화시키면서, $x=0.6W$ 위치에서 발열체 상부에서부터 수직으로 이동하면서 계산된 공기 온도를 Fig. 8에 나타내었다. 발열체 표면 온도에서부터 약 10 mm 정도면 공간 중심의 균일한 온도에 도달함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 홀로그래피 간섭 시스템을 이용하여 사각 공간의 오른쪽 수직벽 상부 일부가 개방되어 있고, 하부 수평 바닥면에 발열체가 존재하는 경우, 개구부의 크기, 공간 내부에 존재하는 격판, 발열원의 온도가 열유동장에 미치는 영향을 비교, 분석하였다.

간섭 사진으로부터, 개구부의 상부를 통하여 공기가 유출되고 하부를 통하여 공기가 유입되는 것을 확인할 수 있었고, 개구부 크기가 작은 경우는 유입 공기 유동이 강하지 않아서 좌, 우 대칭적인 온도 분포를 보여 주며, 격판 길이가 커질수록 공간 하부에서 높은 온도를 나타내었다. 개구부 크기가 큰 경우에는 유입 공기 유동이 강해져서, 발열원 상부의 상승 유동을 왼쪽으로 치우치게 하면서, 격판 길이가 클수록 공간 하부에서 낮은 온도를 나타내었다.

후기

본 연구는 한국과학재단 국산 연구기기 활용 연구(98-1006-021-1) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Kim, T. K., Lee, H., 1988, "Effect of an Isotropic Scattering on Radiative Heat Transfer in Two-Dimensional Rectangular Enclosure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 1711~1721.
- (2) 추병길, 1997, "개구부를 갖는 사각공간내의 화재에 의하여 생성되는 연소가스 유동 및 성분 분석에 관한 연구," 전남대학교 박사학위 논문.
- (3) 손봉세, 1995, "발열체와 개구부가 있는 복합 공간내의 자연대류-복합열전달 연구," 건국대학교 박사학위 논문.
- (4) 이종섭, 광의섭, 정한식, 권순석, 1999, "좁은 환기 통로를 가진 사각공간내에서의 대류열전달에 관한 실험적 연구," *대한기계학회 춘계학술대회논문집 B*, pp. 594~599.
- (5) Myrum T. A., 1990, "Natural convection From a Heat Source in a Top-Vented Enclosure," *J. of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 632~639.
- (6) Vest, C. M., 1979, *Holographic Interferometry*, New York, John Wiley & Sons.