

가변 격판을 갖는 사각공간 내의 혼합대류에 대한 실험과 수치해석

이 광 성[†], 신 재 호, 이 중 섭, 정 한 식^{*}, 정 효 민^{*}
경상대학교 대학원, ^{*}경상대학교 수송기계공학부 · 해양산업연구소

An Experiment and Numerical Analysis of Mixed Convection in a Rectangular Space with Variable Partition

Kwang-Sung Lee[†], Jae-Ho Shin, Chung-Seub Yi, Han-Shik Chung^{*}, Hyo-Min Jeong^{*}

Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

^{*}Department of Transport Vehicle Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

(Received June 26, 2001; revision received October 25, 2001)

ABSTRACT: The laminar convection heat transfer in a ventilated space with various horizontal partitions was studied numerically and experimentally. The experimental results by holographic interferometer showed good agreements with the numerical results. For the numerical study, the governing equations were solved by using a finite volume method for $46.6 \leq Re \leq 1332$, $1460 \leq Gr \leq 11585$, $Pr = 0.71$ and the variations of partition lengths. The isotherms and velocity vectors have been represented for various parameters. As the length of partition increases, the convection heat transfer decreases. Based on the numerical data, a correlation was obtained for the dimensionless mean Nusselt number in terms of Gr/Re^2 . In the region of $Gr/Re^2 < 1$, the mean Nusselt number was very small, but in the region of $Gr/Re^2 \geq 1$, the mean Nusselt number was constant.

Key words: Partition(격판), Mixed convection heat transfer(혼합대류 열전달), Finite volume method(유한체적법), Holographic interferometer(홀로그래픽 간섭계)

기 호 설 명

b : 입구 간격	Lp : 격판 길이, X/b
C_p : 정압 비열 [kcal/kg · °C]	n : 벽면과의 수직 좌표
g : 중력 가속도 [m/s^2]	Nu : 국소 Nusselt 수
Gr : Grashof 수	\overline{Nu} : 평균 Nusselt 수
k : 열전도율 [W/mK]	Pr : Prandtl 수
L : 벽 길이 [m]	Re : Reynolds 수
	T : 온도 [°C]
	U : X방향 속도 [m/s]
	V : Y방향 속도 [m/s]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-646-4766; fax: +82-55-640-3188

E-mail address: lks815@naver.com

그리스 문자

- β : 열팽창계수 [K^{-1}]
- μ : 점성계수
- ν : 동점성계수
- ρ : 밀도 [kg/m^3]

1. 서론

산업의 고정밀화, 고밀도화 및 고속화에 부응하는 시점에서 사각공간 내의 유체유동과 열전달에 관한 연구는 지하생활공간의 개발과 청정실의 설계 등에 관계되어져서 공학적 연구가치가 대단히 높다. 특히 공간 내부 일부를 차단하는 격판이 설치된 경우는 건축 구조물의 특성에 따라 다양하게 설치되며 전자장비의 냉각효율의 향상을 위하여서도 많은 연구가 수행되고 있다.

그러므로 쾌적한 공간설계와 전자장비들의 냉각문제를 고려하여 제품의 품질향상을 확보하기 위해 청정한 환경조성이 필요하며 이런 관점에서 실내 공간의 공기유동에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다.⁽¹⁾ 이들의 유체유동이나 열전달 문제는 자연대류, 혼합대류, 그리고 강제대류를 다 같이 해석해야 그 특성을 파악할 수 있다.⁽²⁾ 특히 실내 공간의 일부를 차단하는 격판이 설치된 경우는 건축 구조물의 특성에 따라 다양하게 응용될 수 있으며 이러한 경우에는 실내 공기의 유동 형태를 예측하거나 모델링 실험을 수행한 것^(3,4) 과 오염물질의 측정 또는 거동을 추적하는 것^(5,6) 또는 오염물질별로 그의 생성과 거동^(7,8)에 대한 연구결과들도 찾을 수 있다. 그리고 사각공간에서 유출구의 형태 및 위치에 따른 혼합대류 열전달에 관한 것⁽⁹⁾과 사각형의 중횡비등을 변수로 자연대류, 강제대류, 혼합대류의 각각의 영역에 대하여 열전달계수의 상관식을 도출하였다.⁽¹⁰⁾

본 연구는 바닥면이 가열되는 사각공간 내에 설치된 격판의 길이가 사각공간 내의 혼합대류 열전달에 미치는 영향을 연구하기 위한 것으로서 사각공간 왼쪽면 하부로부터 공기가 유입하고 오른쪽 윗면으로 유출하는 경우에 대하여 혼합대류 열전달 특성을 Reynolds 수, Grashof 수의 영향과 격판의 길이를 변수로 하여 실험과 수치해석적인 연구를 통하여 서두에서 제기한 공간에서의 특성을 파악하고자 한다.

2. 수치해석

본 연구대상인 사각공간의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같다. 입구에서는 일정한 온도 T_{in} 과 속도 U_{in} 으로 공기가 유입되며 오른쪽 윗쪽으로 유출된다. 공기는 정상상태, 비압축성으로 가정한 2차원 층류 유동이며 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho U^2)}{\partial X} + \frac{\partial(\rho UV)}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho UV)}{\partial X} + \frac{\partial(\rho V^2)}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \rho g \beta \Delta T \tag{3}$$

$$\frac{\partial(UV)}{\partial X} + \frac{\partial(VT)}{\partial Y} = \frac{\nu}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \tag{4}$$

2.1 경계조건 및 수치계산법

온도 및 속도에 관한 수치계산의 경계조건은 다음과 같다.

가열면의 경우

$$T = T_w \tag{5}$$

이고 단열면의 경우

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \tag{6}$$

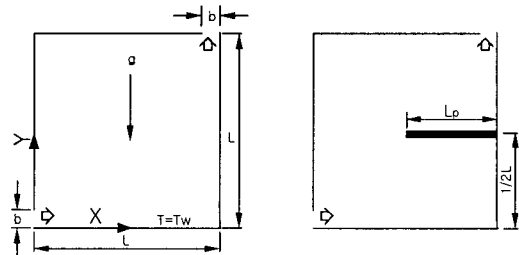


Fig. 1 Schematic diagram for the present study.

이며 n 은 가열면을 제외한 벽면과의 수직 좌표이다.

입구에서

$$U = U_{in} \quad (7)$$

이고 출구에서

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

이다. 그리고 실험 및 계산에 이용된 무차원수는 다음과 같다.

$$Gr = \frac{g\beta(T_w - T_{in})b^3}{\nu^2} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\rho b U_{in}}{\mu} \quad (11)$$

수치해석은 유한체적법(finite volume method)을 사용하였으며 대류항의 계산은 Hybrid scheme을 이용하였다. 격자계는 80×80 으로 엇물림 격자계(staggered grid system)를 사용하였고 압력항의 계산은 simple 알고리즘을 사용하였다. 해의 수렴판정은 입구의 운동량 및 유량으로 무차원화한 값을 기준으로 하여 각 방향의 연속방정식과 운동량방정식 결과의 오차가 0.1% 미만일 때를 수렴조건으로 하였다. 얻어진 결과로부터 국소 및 평균 Nusselt 수 계산은 다음과 같이 하였다.

$$Nu = \frac{hL}{k} = -\frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (12)$$

$$\overline{Nu} = \frac{1}{L} \int Nu \cdot dx \quad (13)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 및 수치계산의 비교

Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타내었다. 좌측 하부로 일정 유속과 온도를 가진 공기가 유입

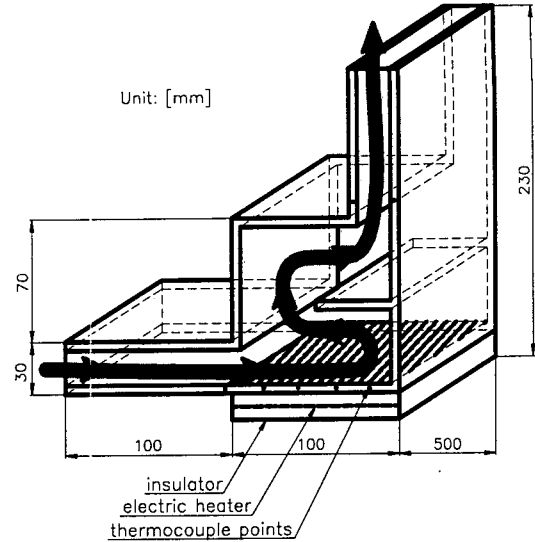
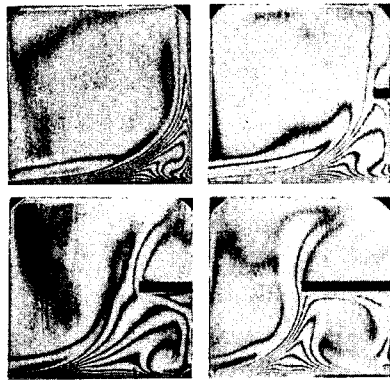


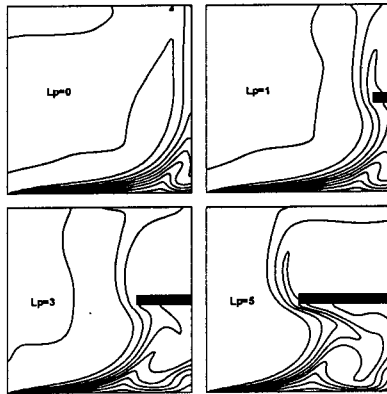
Fig. 2 Schematic diagram for experimental study.

하여 우측 상부로 유출되는 것으로서 홀로그래픽 간섭계에서 실험부의 정사각형 한 변의 길이는 100 mm이고 유입구 및 유출구의 폭과 길이는 각각 10 mm와 100 mm이며 두께 10 mm의 베크라이트로 Fig. 2와 같이 제작하였다. 시험부를 2차원화하기 위하여 광축 방향 길이는 500 mm로 하였으며 입출구 앞에 공기흐름의 발달을 주기 위해 100 mm로 하였다. 바닥의 표면온도가 원하는 온도에 도달할 때까지 전압조정기(AVR)로 연속적으로 전원을 공급하였고, 이때 바닥의 표면온도는 유입구 부분인 왼쪽과 오른쪽 부분의 온도 편차가 다소 발생하지만 그 차이는 2% 이내였고 바닥의 표면온도는 그 평균치로 하였다. 그리고 각 부분의 온도변화가 1°C 이내로 30분 이상 유지될 때를 정상상태로 하였으며 바닥 가열면을 비롯한 온도의 측정은 열전대로서 측정하였고 유입 유속은 열선 유속계로 측정하였다.

Fig. 3은 실험과 수치계산에 의한 등온선을 비교하였다. 본 실험 및 계산에 있어서는 유입속도가 0.3 m/s, 가열 바닥면과 유입 온도차가 20°C 인 경우로서 $Gr/Re^2 = 7.192 \times 10^{-2}$ 인 경우이다. 격판의 길이가 길어짐에 따라서 격판의 하부에는 큰 셀이 발생하여 이곳에서 유동이 정체함을 관찰할 수 있었고 수치계산에서도 잘 재현된다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Experimental results



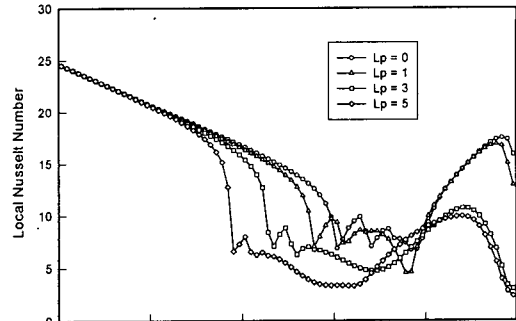
(b) Numerical results

Fig. 3 Isotherms for experimental and numerical results in case of $Re \approx 200$, $Gr = 2872$.

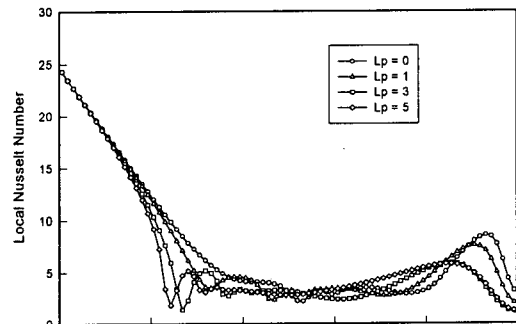
3.2 공간 내의 열유동 특성

공간 내의 온도차와 유동이 존재할 경우에는 그렇지 않은 경우에 비하여 아주 복잡한 유동현상이 나타나고 있다. 즉, 유속이 지배적인 유동장에서는 식(3)의 Y 방향의 식 중에서 우측 3항의 역할이 아주 미세한 경우, 즉 강제대류의 영향이 지배적이다. 그러나 유속이 상대적으로 작고 온도차의 영향이 커지면 자연대류의 영향이 지배적으로 된다. 따라서 이들 유속과 온도차의 영향을 동시에 고려할 수 있는 경우로서 Gr/Re^2 을 도입하며 일반적으로 $Gr/Re^2=1$ 을 기준으로 하여 자연대류 및 강제대류로 구분한다.⁽¹¹⁾

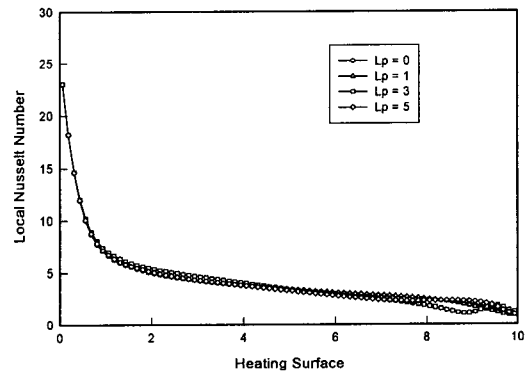
Fig. 4는 Gr/Re^2 의 값 변화에 따른 국소 Nusselt 수 분포를 나타내었다. 여기서 횡축 X 는 유입구 폭 b 로써 무차원화한 값을 나타낸다. (a)에



(a) $Gr/Re^2 = 8.227 \times 10^{-4}$



(b) $Gr/Re^2 = 9.141 \times 10^{-3}$



(c) $Gr/Re^2 = 5.3$

Fig. 4 The distributions of local Nusselt number at a heating surface in case of partition.

서 Gr/Re^2 의 값이 작을수록 열전달이 가열벽면을 따라서 아주 불규칙적인 현상을 하고 있다. 이것은 Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 격판의 길이가 증가하면 격판의 하부에는 재순환 영역이 발생하므로 벽면 근처에서 온도 기울기가 커지게 되기 때문이다. 특히 격판의 길이가 커질수록 최초로

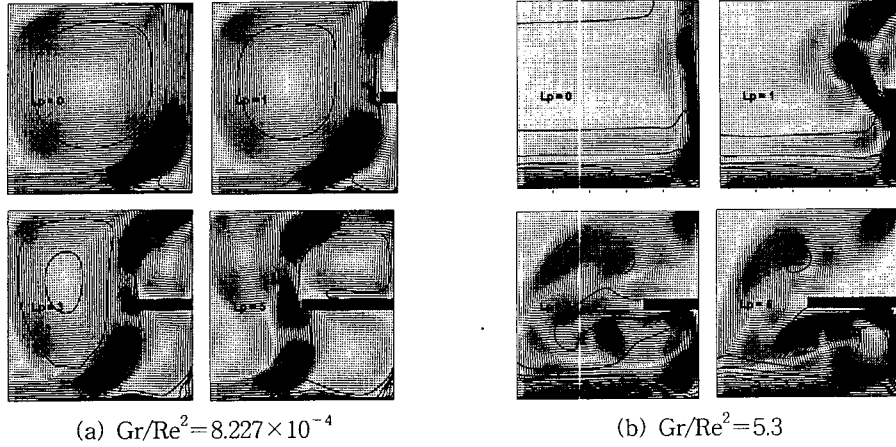


Fig. 5 Velocity vectors and isotherms for various dimensionless partition lengths.

열전달이 급격하게 감소하는 지점이 $X=6$ 근처에서 $X=3$ 으로서 이동하는 것을 알 수 있다. 이것은 이 근처에서 출구 쪽으로 향하려는 유동으로 인하여 가열 벽면으로부터 유동이 박리하는 지점과 일치한다. 그리고 $X=9$ 근처에서는 재차 열전달이 크게 증가하는 것을 보이고 있다. 이것은 격판 하부의 재순환영역에서의 유동이 재부착하는 지점과 일치한다.

Fig. 5는 사각공간 내에서 격판 길이 변수와 Gr/Re^2 의 값의 변수에 따른 속도 벡터와 등온선을 나타내었다. Fig. 5의 그림 (a)는 $Gr/Re^2=8.227 \times 10^{-4}$, (b)는 $Gr/Re^2=5.3$ 일 때 수치해석을 수행한 결과이다. 여기서 Reynolds 수가 크면 판성력에 의해 유동 전체가 곧바로 출구 쪽으로 유출되는 경향이 생겨 열전달 효과도 커진다. 이때

는 격판의 길이가 증가함에 따라서 격판 하부에는 큰 재순환 유동이 생겨서 가열면 전체에 걸쳐 등온선의 기울기가 커지게 된다. 그러나 유입 유속이 작아지면 그림 (b)와 같이 바닥면 근처에서 재부착되는 유동현상이 크게 감소함과 동시에 바닥면 전체를 통하여 Fig. 4의 (b)에서 (c)와 같이 균일한 열전달이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 격판의 길이에 대하여 Gr/Re^2 에 대한 사각공간 내의 평균 온도를 나타내고 있다. 여기서 중축의 사각공간 내의 평균 온도는 격판이 없는 것으로 무차원한 것이다. $Gr/Re^2 \geq 1$ 는 자연 대류로서 격판의 길이에 상관없이 일정한 온도를 나타내고 있다. $Gr/Re^2 \approx 0.1$ 일 때 격판이 증가할수록 사각공간 내의 온도가 증가하였고 최고점을 나타내었다.

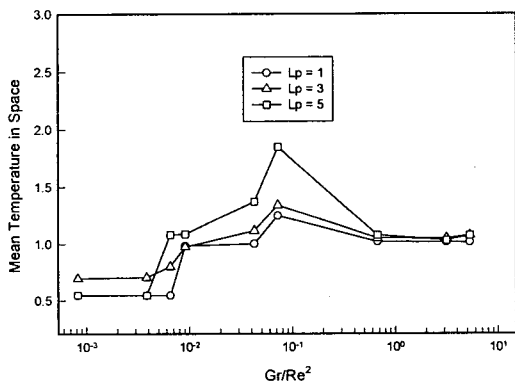


Fig. 6 The mean temperature in space versus Gr/Re^2 for various partition lengths.

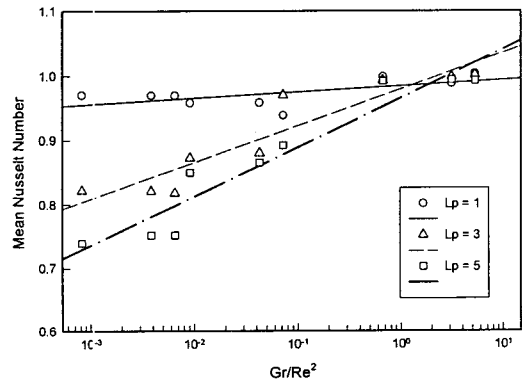


Fig. 7 The mean Nusselt number versus Gr/Re^2 for various partition lengths.

Table 1 Constants of equation (14)

Partition length Lp	Constants	
	a	b
1	0.984	0.027
3	0.977	0.058
5	0.966	0.075

Fig. 7은 격판이 없는 경우의 평균 Nusselt 수를 이용하여 무차원화한 값을 나타낸다. 여기서 평균 Nusselt 수는 $Gr/Re^2 < 1$ 의 강제대류영역에서 격판의 길이가 감소함에 따라 높게 나타나고 $Gr/Re^2 \geq 1$ 이면 격판이 없는 경우로 접근되어 나타났다. 평균 Nusselt 수와의 관계식은 다음 식 (5)와 같이 나타났으며 상호관계 상수들은 Table 1에 주어졌다. 식 중의 \overline{Nu}_0 는 격판이 없을 경우의 평균 Nusselt 수를 나타낸다.

$$\frac{\overline{Nu}}{\overline{Nu}_0} = a \cdot \left(\frac{Gr}{Re^2} \right)^b \quad (14)$$

4. 결 론

수평 격판을 가진 사각공간 내의 혼합대류에 대하여 실험과 수치해석을 연구한 결과는 다음과 같은 특성을 얻을 수 있었다.

- (1) 수치해석과 실험결과가 정성적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다.
- (2) Gr/Re^2 이 커지면 국소 Nusselt 수는 격판의 길이 변화에 대하여 상관없이 균일한 분포를 보였다.
- (3) $Gr/Re^2 = 0.1$ 부근에서는 격판의 길이가 증가됨에 따라서 사각공간 내의 온도가 크게 상승됨을 알 수 있었다.
- (4) 평균 Nusselt 수는 $Gr/Re^2 < 1$ 의 강제대류영역에서 격판의 길이가 감소함에 따라 높게 나타나고 $Gr/Re^2 \geq 1$ 이면 자연대류영역으로 격판이 없는 경우로 접근함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2001년 환경부 차세대 핵심 환경기술개발사업(2001-11203-3-0)의 연구비와 두뇌한국21 사업비 지원에 의해 연구되었으며 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Jeong, H. M., Chung, H. S. and Kim, K. K., 1997, The comparison study of radiative and convective heat transfer in a room air ventilation, Journal of the Korean Society of Marine Engineers, Vol. 21, No. 3, pp. 229-235.
2. Lee, C. J., Jeong, H. M., Chung, H. S. and Kwon, S. S., 1994, Convection heat transfer in a rectangular enclosure with slot ventilator, Proceedings of the KSME Autumn Annual Meeting(II), pp. 384-389.
3. Han, H., Kuehn, T. H., Ramsey, J. W., Liang, H. and Elayed, K., 1991, Proceeding 12th AIVC Conference, Vol. 13, pp. 1-8.
4. Elayed, K., Kuehn, T. H., Ramsey, J. W. and Xu, J., 1992, Proceeding, Institute of Environmental Sciences, pp. 54-57.
5. Xu, J., Liang, H. and Kuehn, T. H., 1994, Proceedings Roomvent '94, Vol. 2, pp. 213-227.
6. Joffe, M. A., 1996, ASHRE Journal February, pp. 42-49.
7. Kuehn, T. H., Yang, C. H. and Kulp, R. N., 1996, Proceeding indoor air, Japan, pp. 1-8.
8. Lee, S. H., Park, J. C. and Rhee, E. K., 1996, A study on the improvement of indoor air quality in apartment buildings, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 397-412.
9. Lee, J. C., Chung, H. S. and Kwon, S. S., 1995, Mixed convection heat transfer in a rectangular enclosure with various outlets, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 207-216.
10. Hideo, I., Takeyuki, F. and Masahiri, S., 1986, Mixed, forced and natural convective heat transfer in cavities heated from bottom surface, Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 249, pp. 862-866.
11. Lee, T. S., Lee, J. H. and Lee, J. S., 1993, Introduction to heat transfer, Hee Joong Dang, pp. 432-433.