

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.9.825

ISSN 1226-4881

사각공동내 자연대류에서 측면 단열벽에 의한 영향

허정환* · 정범진**

* 제주대학교 에너지 공학과

Effect of Adiabatic Sidewalls on Natural Convection in a Rectangular Cavity

Jeong-Hwan Heo* and Bum-Jin Chung**

* Dept. of Nuclear and Energy Engineering, Jeju Nat'l Univ.

(Received March 9, 2010 ; Revised July 21, 2010 ; Accepted July 21, 2010)

Key Words: Analogy(유사성), Adiabatic Wall(단열벽), Electroplating System(전기도금계), Limiting Current(한계전류), Rectangular Cavity(사각공동), Natural Convection(자연대류), Shear Stress(전단응력)

초록: 사각공동내 자연대류 열전달 실험에서, 단열벽에 의해 열전달이 저하가 관찰되는 영역을 실험적으로 그리고 수치해석적으로 평가하였다. Gr_H 수 1.53×10^7 부터 1.01×10^{10} 까지 변화시키며, 단열벽이 존재할 때와 그렇지 않을 때를 구분하여 열전달률을 측정하였다. FLUENT 실험의 결과를 예측할 수 있는지 확인하고 실험으로 수행하기 어려운 매우 좁은 영역에 대해 FLUENT를 수행하였다. 실험과 FLUENT의 결과를 다른 연구와 비교한 바 일치함을 보였다. 단열벽이 전체 열전달에 미치는 영향은 예상과 같이 단열벽 근처의 매우 좁은 영역에 국한하여 나타남을 확인하였다. 본 연구는 유사성(Analogy) 원리를 이용하여 열전달계를 전기도금계의 물질전달계로 모사하는 방법론을 개발하는 과정에서 실험을 효율화하고자 하는 방안을 강구하기 위하여 추진되었다. 본 연구를 통하여 단열벽간 거리(전극의 폭)를 매우 줄일 수 있는 이론적 근거를 확보하였다.

Abstract: In this study, we investigated the effects of adiabatic walls on natural convection in various rectangular cavities experimentally and numerically. Heat transfer rates were measured for cavities with and without adiabatic sidewalls by varying Grashof number from 1.53×10^7 to 1.01×10^{10} . Some typical test results were successfully simulated using FLUENT. In the case of very narrow cavities, where the adiabatic walls were very close to each other, it was difficult to perform experiments; therefore, FLUENT simulations were performed. The existing heat transfer correlations for rectangular cavities were well predicted by the experimental and numerical results. As expected, the effects of adiabatic walls were restricted to the very narrow region near the walls. This study was carried out during the development of an analogy experimental method in which heat-transfer systems are replaced with mass-transfer systems using copper sulfate electroplating systems. The results of this study provide theoretical background of handling adiabatic walls during the design of test facilities.

- 기호설명 -

A_H : H에 따른 종횡비 (H/D)
 A_W : W에 따른 종횡비 (W/D)
 C_b : 모액농도(kmole/m³)
 D : 공동의 폭 (m)
 D_m : 확산계수 (m²/s)
 F : 패러데이 상수 (Coulomb/kmole)
 g : 중력가속도 (m/s²)
 H : 공동의 높이 (m)
 h_h : 대류열전달계수 (W/m²·K)

h_m : 물질전달계수 (m/s)
 I_{lim} : 한계전류밀도 (A/m²)
 k : 전도계수 (W/m·K)
 n : 이온의 원자가
 T : 온도 (K)
 t_n : 전달계수
 W : 단열벽 사이의 거리 (m)
 x, y, z : 직각 좌표
 α : 열확산계수 (m²/s)
 β : 부력계수 (m³/K)
 ν : 동점성계수 (m²/s)
 ρ : 밀도 (kg/m³)
 Gr_H : Grashof number using H ($g\beta\Delta TH^3/\nu^2$)

† Corresponding Author, bjchung@jejunu.ac.kr

Nu	: Nusselt number
Nu_H	: Nusselt number using H ($h_h H/k$)
Nu_D	: Nusselt number using D ($h_h D/k$)
Pr	: Prandtl number (ν/α)
Ra	: Rayleigh number
Ra_H	: Rayleigh number using H ($g\beta\Delta TH^3/\alpha\nu$)
Ra_D	: Rayleigh number using D ($g\beta\Delta TD^3/\alpha\nu$)
Sc	: Schmidt number (ν/α)
Sh	: Sherwood number ($h_m D/k$)

1. 서론

사각공동(Rectangular cavity or enclosure)내에서의 자연대류(Natural convection)는 전자설비의 냉각, 태양열 집열기 및 원자로 설계 등 여러 공학 분야에서 중요한 물리적 현상이다.⁽¹⁾ 사각공동내 자연대류는 유체계를 둘러싸고 있는 고체벽면과 종합적인 열적 교환을 한다. 그러므로 기하학적 형태나 경계조건에 매우 민감하게 연관(Coupling)되어 있다. 이러한 이유로 사각공동내 자연대류 문제는 이론적·실험적 연구가 상당히 어렵고 제한적이다.⁽²⁾

사각공동내 자연대류 문제에서의 열전달은 Ra_H 와 A_H 와 A_W 의 변화에 따라 달라진다.⁽³⁾ 그 중 A_H 의 변화가 열전달에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 이루어진 반면, A_W 의 변화에 대해서는 많은 연구가 수행되지 않았다. Mallinso와 Davis는 사각공동내 자연대류 문제에서 단열벽 사이의 거

리(Width of cavity)는 전체 Nu_H 수에 큰 영향을 미치지 않는다고 발표한 바 있다.⁽⁴⁾ Drew 등은 A_W 의 변화는 열전달에 큰 영향을 미치지 않지만 단열벽 사이의 거리가 극단적으로 작아질 경우 단열벽(Adiabatic wall)에 의해 발생하는 전단응력(Shear stress)으로 전체 Nu_H 수에 영향을 미치게 된다고 밝혔다.⁽⁵⁾

본 연구의 목적은 전기도금계를 이용하여, Fig. 1과 같은 사각공동내 자연대류 열전달 실험을 모사할 때 단열벽에 의해 전단응력이 발생하는 영역을 실험적으로 확인하는 것이다. 이를 통하여 향후 사각공동을 이용한 자연대류 열전달 실험에서의 단열벽간 최소 이격거리에 대한 정보를 얻고자 하였다. 실험으로 수행하기 어려운 매우 좁은 단열벽에 대해서는 FLUENT를 이용한 전산모사(Computer Simulation)를 통해 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1 사각공동내에서 자연대류

사각공동내 자연대류 열전달은 무차원 변수 Ra , Pr , A_H , A_W 에 의해 지배된다.⁽⁴⁾ Catton은 사각공동내의 전체적 흐름을 다음과 같이 설명하였다. 사각공동의 가열벽(Hot wall) 부근의 유체는 온도가 증가함에 따라 밀도가 감소하므로 벽면을 따라 상승한다. 상승한 유체는 상단의 수평벽을 따라 냉각벽(Cold wall)으로 흐르고 냉각에 의한 밀도의 증가로 하강한다. 유체는 다시 하단의 수평벽을 따라 가열벽으로 이동하면서 결국 셀(Cell) 모양의 유동 특성을 갖는다. 이때, 가열되는 벽면의 상부와 냉각되는 벽면 하부의 모서리에서 상단과 하단의 수평 단열벽에 의해 유동이 더 이상 발달되지 못한다. 이로 인해 주흐름에 역행하게 되는 반류(Wake)가 발생하고 반류로 인해 와류(Eddy)가 형성되면서 또 다른 셀 유동이 생성된다. 이때, Ra 수가 증가함에 따라 측면 벽 경계층에서는 궁극적으로 난류로 천이되는 과정을 거치지만 중심부는 거의 정체상태가 된다.⁽⁶⁾

Ra_D 수가 작을 경우($Ra_D < 10^3$), 부력에 의해 구동되는 유동이 약하여 수평방향의 선형온도변화가 생기면서 열전달은 주로 유체를 가로지르는 전도에 의해 이루어진다. 이때 Nu_D 수는 1이 된다. Ra_D 수가 증가함에 따라 셀 모양의 유동은 강해지며, 측면 벽에 인접한 얇은 경계층 내로

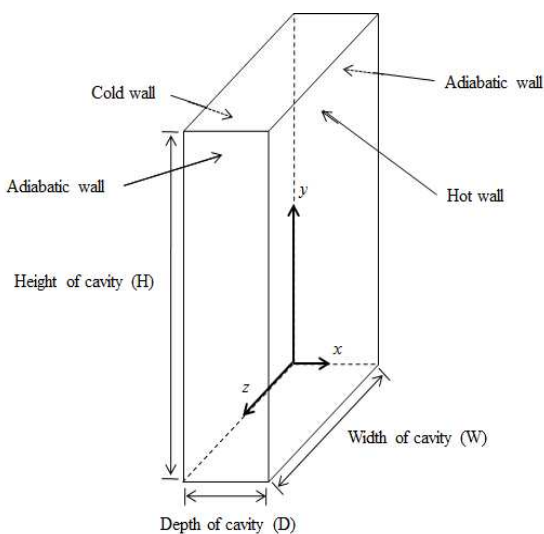


Fig. 1 Coordinate system for rectangular cavity enclosure

집중된다.⁽⁶⁾

Bejan에 의하면, A_H 가 무한이 커질 때 $A_H > Ra_H^{1/4}$ 의 영역이 되면 열원사이의 거리가 너무 좁아지게 되면서 수직으로 형성되는 경계층이 부딪치고 압축되면서 대류의 영향은 줄어들게 된다. 이 영역의 열전달은 전도가 지배적이며, Tall enclosure limit라 부른다. 이와는 반대로 A_H 가 매우 작아질 때 $A_H < Ra_H^{-1/4}$ 의 영역이 되면 공동(Cavity)은 매우 극단적으로 납작한 형태가 되면서 공동을 가로지르는 긴 수평적 유동이 형성된다. 이 영역의 열전달은 대류가 지배적이며, Shallow enclosure limit라 부른다.

이처럼 사각공동내에서의 자연대류는 A_H 의 변화에 강하게 의존한다. A_H 가 사각공동내에서의 열전달에 미치는 영향은 여러 학자들에 의해 연구되어 왔고, 여러 열전달 상관식이 제시되어 있다. Hsieh과 Wang⁽⁷⁾과 Seki⁽⁸⁾는 다양한 작동유체를 사용하여 열전달 상관식을 제시하였고, Markatos과 Pericleous⁽⁹⁾는 수치해석 기법을 이용하여 열전달 상관식을 제시하였다. Xaman⁽¹⁰⁾ 역시 수치해석 기법을 이용하여 열전달 상관식을 제시하였다. 또한 Catton⁽⁶⁾는 $Pr > 10^5$ 이하의 영역에서의 열전달 상관식을 제시하였고, M. Jacob⁽¹¹⁾은

$Ra_H^{-1/4} > A_H > Ra_H^{1/4}$ 영역에서의 열전달 상관식을 제시하였다(Table 1).

반면, 사각공동내의 자연대류에서 A_W 의 의존도는 A_H 에 비해 매우 낮다. Drew 등에 의하면 사각공동문제에서 단열벽의 영향을 고려한다면 유동패턴은 더욱 복잡해진다. 단열벽이 유동장에 영향을 미치기 때문이다.⁽⁵⁾ Mallinso와 Davis의 연구에 따르면 사각공동내 자연대류에서의 Nu_H 수는 단열벽의 영향을 고려하지 않은 공동에서의 Nu_H 수보다 항상 낮은 값을 보이고 그 차이는 매우 적어 무시할 수 있었다.⁽⁴⁾

사각공동내의 수직평판에서 자연대류가 발생할 때 대류영향은 공동의 중앙 가까이에서 강하게 나타나며 단열벽과 만나는 경우 대류영향이 줄어든다. 이러한 현상은 단열벽에서 생기는 마찰력에 의한 전단응력이 원인이 된다. 이러한 전단응력에 의한 영향은 전체 열전달량 중 무시할 만큼 매우 적다.⁽⁴⁾

2.2 열전달과 물질전달의 유사성(Analogy)

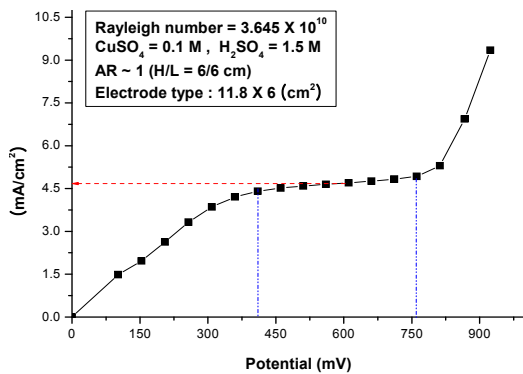
열전달과 물질전달시스템은 초기조건과 경계조건이 같으면 서로 유사하다고 잘 알려져 있다.

Table 1 Correlation according to author

Author	Range	Correlation
Hsieh and Wang ⁽⁷⁾	$1 \leq A_H \leq 20, Ra_H \leq 1.4 \times 10^7$	$Nu_H = 0.321 Ra_H^{0.241} A_H^{-0.095} Pr^{0.053}$
	$1 \leq A_H \leq 20, Ra_H > 1.4 \times 10^7$	$Nu_H = 0.321 Ra_H^{0.241} A_H^{-0.095} Pr^{0.053}$
Seki ⁽⁸⁾	$5 \leq A_H \leq 47.5, Ra_H(A_H)^3 > 4 \times 10^{12}$	$Nu_H = 0.093 Ra_H^{1/3}$
Markatos and Pericleous ⁽⁹⁾	$Ra_H^{-1/4} > A_H > Ra_H^{1/4}, 10^6 < Ra_H \leq 10^7$	$Nu_H = 0.082 Ra_H^{0.329}$
	$Ra_H^{-1/4} > A_H > Ra_H^{1/4}, 10^{12} < Ra_H \leq 10^{16}$	$Nu_H = 1.325 Ra_H^{0.245}$
Xaman ⁽¹⁰⁾	Laminar, $A_H = 20$	$Nu_H = 0.1731 Ra_H^{0.2617}$
	Laminar, $A_H = 40$	$Nu_H = 0.1865 Ra_H^{0.245}$
	Laminar, $A_H = 60$	$Nu_H = 0.1731 Ra_H^{0.2398}$
	Turbulent, $A_H = 20$	$Nu_H = 0.0857 Ra_H^{0.3033}$
	Turbulent, $A_H = 40$	$Nu_H = 0.0635 Ra_H^{0.323}$
	Turbulent, $A_H = 60$	$Nu_H = 0.054 Ra_H^{0.3335}$
Catton ⁽⁶⁾	$2 \leq A_H \leq 10$	$Nu_H = 0.22 \left(\frac{Pr}{(0.2 + Pr) Ra_H} \right)^{0.28} A_H^{-1/4}$
M. Jacob ⁽⁶⁾	$2.8 \times 10^3 < Ra_H < 2.8 \times 10^4$	$Nu_H = 0.196 Ra_H^{1/4} A_H^{-1/9}$
	$2.8 \times 10^4 \leq Ra_H \leq 1.55 \times 10^4$	$Nu_H = 0.072 Ra_H^{1/4} A_H^{-1/9}$

Table 2 Dimensionless groups for analogy systems

Heat transfer		Mass transfer	
Nusselt number	$\frac{h_h D}{k}$	Sherwood number	$\frac{h_m D}{k}$
Prandtl number	$\frac{\nu}{\alpha}$	Schmidt number	$\frac{\nu}{D_m}$
Rayleigh number	$\frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}$	Rayleigh number	$\frac{gH^3}{D_m\nu} \frac{\Delta\rho}{\rho}$

**Fig. 2** Typical limiting current curve

즉, 두 시스템은 상호전환이 가능하다. 이를 이용하면 열전달 문제를 물질전달 문제로 또 그 역으로 변환하여 취급할 수 있다. 이러한 물질전달계와 열전달 계의 무차원수 관계는 Table 2에 나타내었다.⁽¹²⁾ 물질전달을 이용하여 자연대류를 모사할 경우 열전달 실험에서 요구되는 장치의 높이를 1/50로 줄임으로써 비슷한 Ra_H 수를 얻을 수 있고 열전달 실험에서 수반되는 복사열전달효과를 제거할 수 있다.

2.3 전기도금계

본 연구에서는 화학성 안정성이 높고 물성치가 잘 알려져 있으며 비교적 높은 용해도를 갖는 구리도금계를 자연대류 열전달 모사에 사용하였다. 황산-황산구리(H_2SO_4 - $CuSO_4$) 수용액에 구리 전극을 사용하여 전압을 인가하면 양극에서 구리이온이 생성되어 음극으로 이동하고 음극 표면에서 전자를 얻어 석출(도금)된다. 이때 구리전극은 가열벽면(Heated wall)이 되고 전달된 구리이온의

양은 열전달량이 된다.⁽¹³⁾

전압을 인가하면 양극에서 구리이온이 생성되어 음극의 이동하여 석출 되는데 음극근처의 유체는 구리이온농도가 적어지기 때문에 부력이 발생하게 된다. 따라서 음극은 가열벽을 그리고 양극은 냉각벽을 모사한다.

전기도금계(Electroplating system)는 Levich⁽¹⁴⁾에 의해 정립되었고 Selman과 Tovas⁽¹⁵⁾에 의해 체계적으로 정리되어 현재까지 물질전달에 널리 이용된다. Chung,⁽¹³⁾ Kang⁽¹⁶⁾과, Ko⁽¹⁷⁾는 전기도금계를 이용하여 열전달 실험을 모사할 수 있음을 실험적·이론적으로 증명하였다. 유사성을 이용한 전기도금실험기법에 대한 보다 자세한 설명은 Chung⁽¹³⁾의 논문에 자세히 제시되어 있다.

2.4 한계전류기법

열전달계에서의 대류열전달계수는 벽면 온도와 벌크 유체온도의 함수로 주어진다. 한편 전기도금계를 이용하여 물질전달계수를 구할 때에는 음극표면에서의 구리이온의 농도를 알기 어렵다. 이와 같은 문제는 한계전류기법의 사용으로 인해 쉽게 해결될 수 있다.⁽¹³⁾

전기도금계에서 전극 사이에 인가된 전위차를 증가시키면 측정된 전류는 빠르게 증가하다가 더 이상 증가하지 않은 플레이트우(plateau) 영역에 도달하는데 이를 한계전류(Limiting current)라 한다(Fig. 2). 이는 구리이온이 음극에서 전자를 받아서 환원되는 과정이 모액에서 음극으로 이동하는 과정보다 훨씬 빠르기 때문에 발생하는 현상이다. 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이온 농도를 0으로 취급할 수 있기 때문에 식 (1)에서 물질전달계수(Mass transfer coefficient), h_m 은 모액 농도, C_b 와 한계전류 밀도(Limiting current density), I_{lim} 만으로 결정된다.

$$h_m = \frac{(1 - t_n) I_{lim}}{nFC_b} \quad (1)$$

3. 실험 방법

3.1 실험 장치

설계된 실험 장치와 시스템 회로는 Fig. 3에 나타내었다. 실험 장치는 아크릴로 제작된 수조이며 여기에 구리양극과 음극이 수직으로 세워진

Table 3 Test matrix

W (m)	0.005, 0.01, 0.03, 0.06, 0.12
H (m)	0.12 ~ 50
Ra_H	$2.99 \times 10^{10} \sim 2.11 \times 10^{13}$
Pr	1956 ~ 2094
Gr_H	$1.53 \times 10^7 \sim 1.01 \times 10^{10}$

Arrangement : Both open & close, Half open

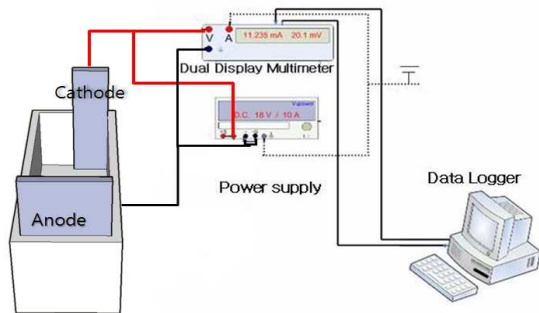


Fig. 3 The experiment equipment and system circuit

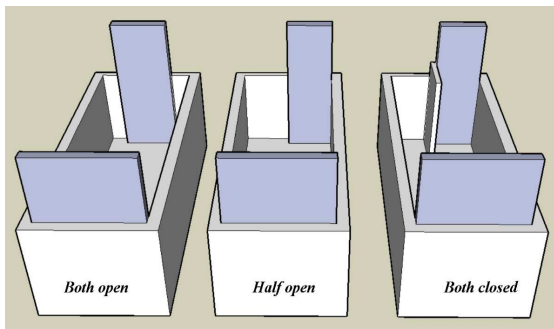


Fig. 4 Arrangements of cathode

다. Gr_H 수를 변화시키기 위해 음극구리의 높이를 조절하였다. 전원공급장치는 VüPOWER사의 DC Power supply-18B10을 이용하였고, 전압과 전류측정을 위하여 Fluke-45사의 Dual Display Multimeter를 사용하였다.

측면 단열벽에서의 전단응력에 의한 영향을 조사하기 위해 Fig. 4와 같이 측면 단열벽의 배열에 변화를 주었다. 음극전극 양 면이 단열벽과 닿아 있는 Both closed 배열과 음극전극의 한 면은 단열벽에 의해 닿아 있고 다른 한 면은 닿지 않은 Half open 배열, 마지막으로 음극전극의 양 면이 단열벽에 닿지 않는 Both open 배열 3가지이다.

Table 4 FLUENT simulation Test matrix

H (m)	0.12	0.50
W (m)	0.0001, 0.001, 0.003, 0.004, 0.005, 0.01, 0.03	0.005, 0.01, 0.03, 0.06, 0.12
Ra_H	2.91×10^{11}	2.11×10^{13}
Gr_H	1.39×10^8	1.01×10^{10}
Pr	2094	

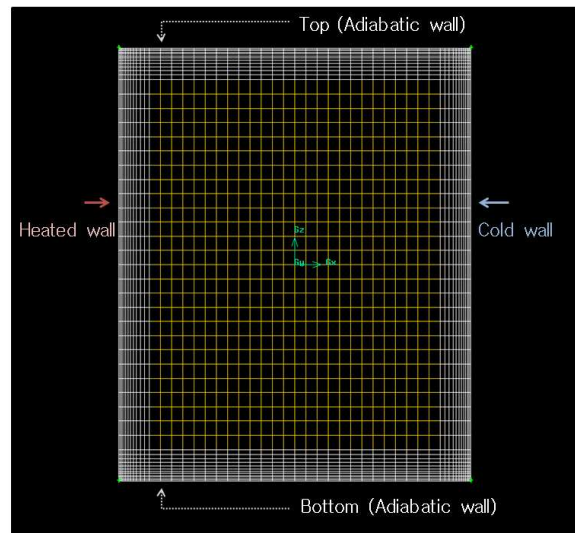


Fig. 5 Mesh model for numerical analysis

본 연구에서 자연대류는 음극에서 발생하는 현상이므로 음극의 크기는 고정하고 양극은 충분한 크기로 배치하여 전 영역에 충분한 구리이온이 공급될 수 있도록 하였다.⁽¹⁶⁾

3.2 실험범위

단열벽에서의 영향을 확인하기 위해 단열벽 사이의 거리를 0.005~0.12m까지 변화를 주었다. 단열벽 사이의 거리가 0.005m이하가 되면 실험장치의 제작이 어렵고 실험데이터의 측정 오차가 커지므로 실험을 수행하기가 어려워진다. 따라서 이 이하의 영역에 대해서는 수치해석적 방법을 이용하여 현상을 관찰하였다. Gr_H 수에 변화를 주기 위하여 전극판의 높이를 0.12~0.5m로 변화시켰고, $CuSO_4$ 를 0.01~0.1M로 변화시켰다. Table 3은 실험을 수행한 경우를 나타내었다.

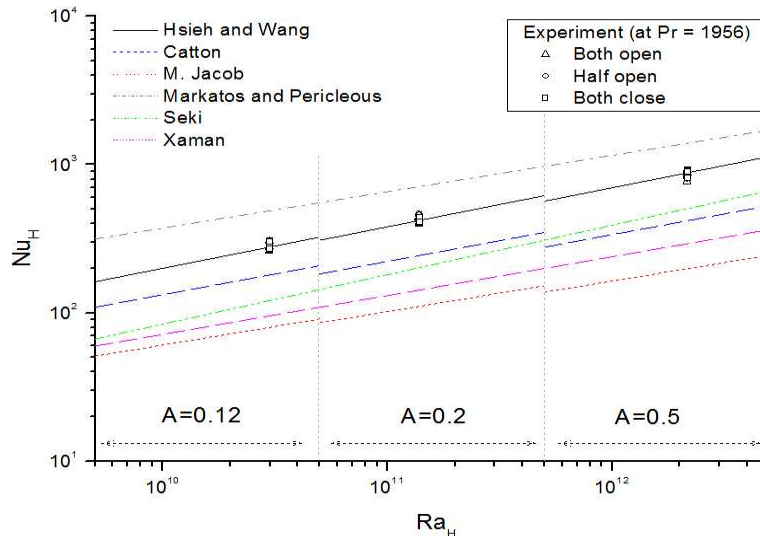


Fig. 6 Test results at Pr 1956

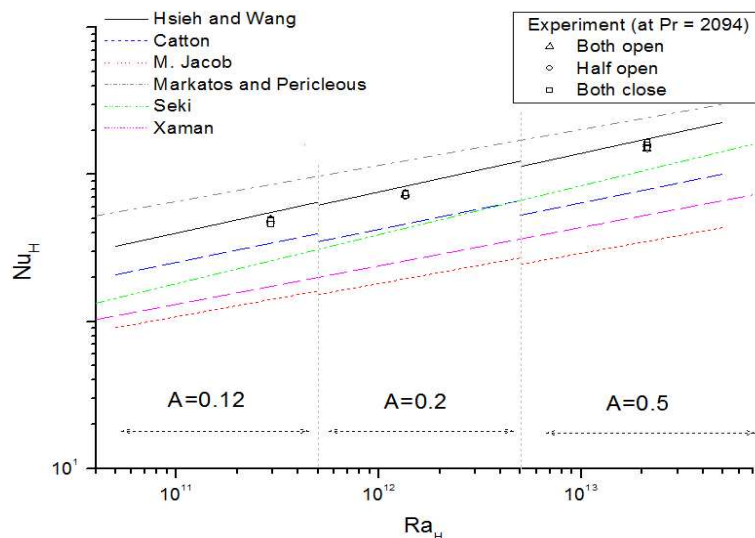


Fig. 7 Test results at Pr 2094

4. 수치해석 방법

Table 3에 따라 수행된 실험 데이터 결과를 검증하고 실험을 수행하기 어려운 단열벽 사이의 거리가 매우 좁은 영역에서의 현상을 확인하기 위해 FLUENT계산을 수행하였다.

Fig. 5는 시뮬레이션 모델을 측면에서 바라본 그림이다. 시뮬레이션은 3차원 모델로 설정하였다. x, y, z 축의 격자의 열을 각각 50개로 나누었다. 벽면으로부터 첫 번째 격자의 열은 $3 \times 10^{-4}m$ 이고, 첫 번째 격자의 열로부터 1.15배씩 간격을 증가시키면서 12개의 격자의 열을 형성하였으며, 나머지 26개 격자의 열은 등간격으로 구성하였

다. 생성된 격자수는 약 1.25×10^5 개이다. 수직관 내부 유체의 온도는 300K이며, 뜨거운 벽과 차가운 벽은 등온 경계조건으로 각각 400K, 200K을 주었다.

격자와 격자 사이 경계면에서의 일반 종속변수 값을 정하는 데에는 압력은 PRESTO!, Momentum과 Energy는 Second order upwind를 사용하였으며, 유동장계산시 연속방정식과 운동방정식을 연립하여 푸는 과정에서 발생하는 압력과 속도의 연계문제는 SIMPLE알고리즘을 사용하였다.

Table 4는 계산을 수행한 범위이다. 실험에서 구한 Nu_H 수와 FLUENT 계산으로 구한 Nu_H 수를 비교하였다. 여기서 H는 0.12m와 0.5m로, 이

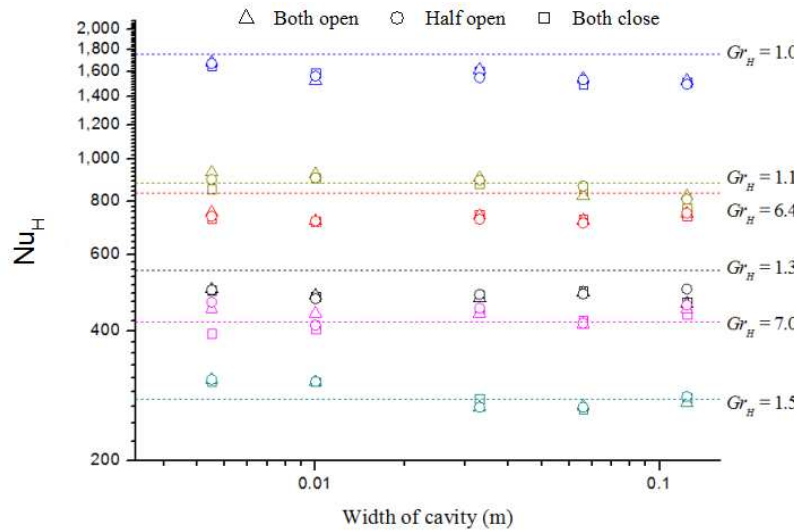


Fig. 8 Test results according to width of cavity

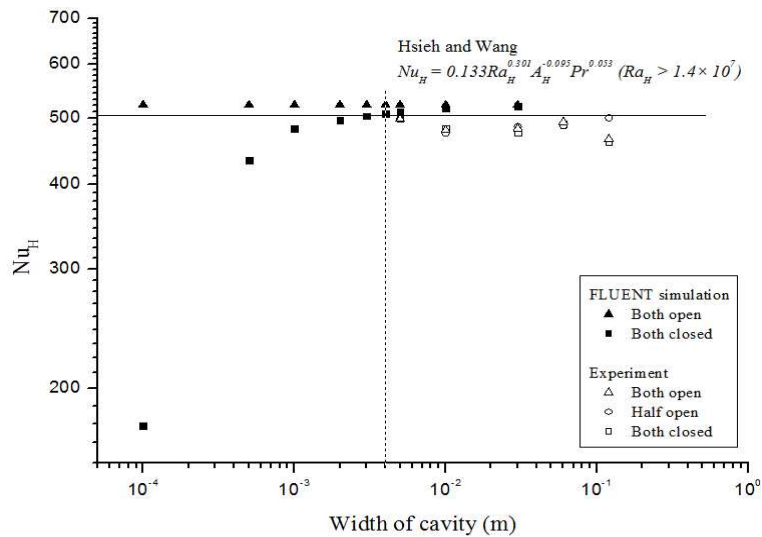


Fig. 9 Nu_H according to width of cavity at $Gr_H=1.39 \times 10^8$, $Pr=2094$, $H=0.12m$

때의 Gr_H 수는 1.39×10^8 , 1.01×10^{10} 에 해당하며, H가 0.12m일 경우는 층류이므로 층류모델을 사용하였으며, H가 0.5m일 경우는 난류이므로 k-epsilon모델을 사용하였다.

5. 결과

5.1 실험 결과

Fig. 6, 7은 Table 3의 Test matrix에 대한 실험결과를 각각 Pr 수 1956, 2094에 대해 나타낸 그래프이다. 그래프의 선은 Table 1에 제시한 사각공동내에서의 자연대류 열전달 상관식을 각각의 조건에 따라 사용하여 나타낸 것이다.

측정된 Nu_H 수와 제시한 사각공동내 자연대류

열전달 상관식을 비교한 결과 Hsieh 와 Wang의 열전달 상관식과 가장 일치하였고 다른 열전달 상관식과도 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 8은 단열벽 사이의 거리에 따른 Nu_H 수의 변화를 나타낸 그래프이다. 점선은 Fig. 6, 7에서 실험결과와 가장 일치한 Hsieh와 Wang의 열전달 상관식이다. 단열벽 사이의 거리가 0.005m ~ 0.12m일 때의 Nu_H 수는 열전달 상관식과 잘 일치하였고 단열벽간 거리가 줄어도 Nu_H 수의 변화는 관찰되지 않았다.

5.2 전산모사 결과

Fig. 9와 10은 공동의 높이가 각각 0.12m, 0.5m일 경우에 대해 단열벽 사이의 거리에 따른 Nu_H

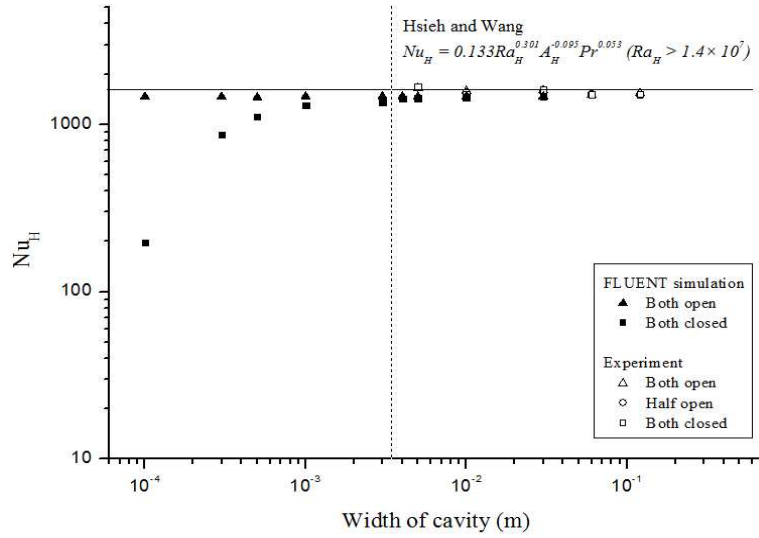


Fig. 10 Nu_H according to width of cavity at $Gr_H=1.01 \times 10^{10}$, $Pr=2094$, $H=0.50m$

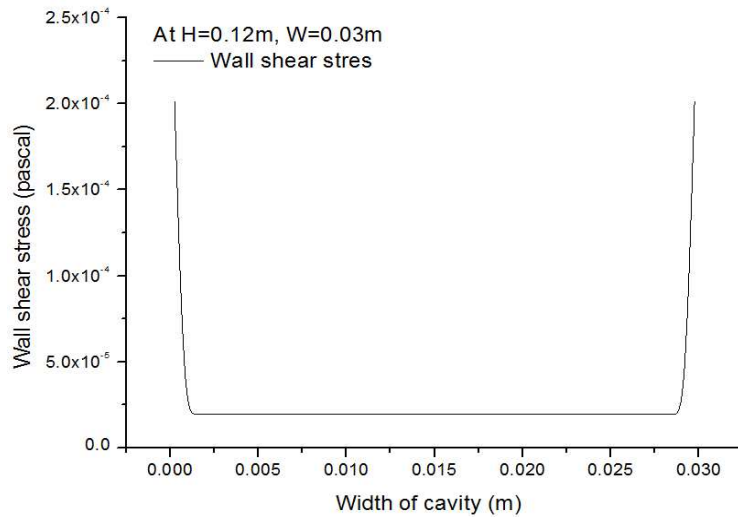


Fig. 11 Wall shear stress according to width of cavity at $Gr_H=1.39 \times 10^8$, $Pr=2094$, $H=0.12m$

수를 나타낸 그래프이다. 흰 점은 실험결과를 나타내며, 검은 점은 FLUENT 결과를 나타낸다. 그리고 삼각형은 Both open, 사각형은 Both close, 원형은 Half open을 각각 나타낸다.

공동의 높이가 0.12m일 경우, 실험에서 구한 Nu_H 수와 FLUENT에서 구한 Nu_H 수를 비교한 결과 단열벽 사이의 거리가 0.005m이상일 때, 실험결과와 FLUENT의 결과는 대체로 일치하였고 실험결과보다 약 8% 낮은 것으로 나타났다. 이와 마찬가지로 공동의 높이가 0.5m일 경우, 실험에서 구한 Nu_H 수와 FLUENT에서 구한 Nu_H 수를 비교한 결과 거의 일치하는 값을 보인다. 그러나

공동의 높이가 0.12m일 경우는 단열벽 사이의 거리가 0.005m이하, 공동의 높이가 0.5m일 경우는 단열벽 사이의 거리가 0.005m되는 영역에 대해 FLUENT의 결과를 살펴보면 Both open과 Both closed의 결과가 서로 달라지는 것이 확인된다. 단열벽이 존재할 경우와 존재하지 않는 경우의 차이가 나타나는 것이다. 이는 측면 단열벽으로 인한 전단응력으로 인하여 Nu_H 수가 급격히 감소하는 것이라 판단된다.

Fig. 11은 공동의 높이가 0.12m, 단열벽 사이의 거리가 너비가 0.03m일 경우, 전단응력을 나타낸 그래프이다. 벽면과 매우 인접한 영역에서 전단

응력이 급격히 상승함이 관찰된다.

FLUENT의 결과와 실험결과는 단열벽 사이의 거리가 0.01m이상일 경우에는 열전달 상관식과 대체로 일치하므로 단열벽에 의한 전단응력 영향이 나타나지 않는다고 판단된다. 반면 단열벽 사이의 거리가 0.005m이하가 되면 Both open과 Both colsed의 Nu_H 수가 달라져 단열벽에 의한 전단응력의 영향이 나타남을 알 수 있다.

5.3 불확실도 분석(Uncertainty analysis)

본 연구에서의 전기도급계를 이용한 실험에서서의 불확실도 방정식은 다음과 같다.

$$Nu_H = \frac{h_m H}{D_m} \Rightarrow Nu_H = f(h_m, H, D_m) \quad (2)$$

$$U_{Nu_H} = \left(\frac{\partial Nu}{\partial h_m} U_{h_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial H} U_H \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial D_m} U_{D_m} \right)^2 \quad (3)$$

전체 Nu_H 수에서 불확실도 분석을 수행한 결과, 불확실도(Uncertainty)는 ± 0.91 에서 9.06까지 분포하였으며, 불확실도비(Fractional Uncertainty)는 평균 0.7%의 값의 매우 높은 측정 정확도를 가졌다.

6. 결론

사각공동내의 가열벽면과 냉각벽면에서 발생하는 자연대류 열전달을 모사할 때, 가열벽면과 냉각벽면의 양 측면의 단열벽면에 의한 열전달 영향을 연구하였다. Gr_H 수를 1.53×10^7 부터 1.01×10^{10} 까지 변화시키며, 단열벽면의 유무에 따라 3가지 측면 단열벽 배열 조건에서 단열벽면 사이의 거리를 바꾸면서 Nu_H 수를 측정하였다. 열전달 실험은 상사성 원리를 이용하여 황산구리 수용액에 물질전달계로 변화하여 실험을 수행하였다. 실험으로 수행하기 어려운 매우 좁은 영역에 대해서는 FLUENT 계산만을 수행하였다. 실험의 결과로 얻은 Nu_H 수는 FLUENT를 이용하여 구한 Nu_H 수와 유사하였다.

실험의 결과는 기존에 알려진 Hsieh와 Wang의 열전달 상관식과 일치함을 확인하였다. 이는 물질전달 실험을 통해 열전달 실험을 대신할 수 있음을 다시 한 번 증명한다.

실험의 결과는 간단한 불확실도 분석결과 측정정밀도가 매우 높음을 확인하였다. 또는 실험의 결과는 FLUENT의 결과와도 8% 오차로 일치하여

실험과 수치해석의 결과가 일치함을 확인하였다.

실험으로 수행하기 어려운 좁은 단열벽에 대하여 FLUENT계산을 수행한 결과 단열벽간 거리가 0.005m이하에서 단열벽과 매우 근접한 영역에서 전단응력의 급격한 증가의 영향으로 Nu_H 수가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

이를 통하여 사각공동에 대한 자연대류 열전달 실험에서 단열벽간 거리를 줄일 수 있는 이론적 근거를 확보하였다. 이는 실험용액의 감소, 음극 크기의 감소, 측정전류의 감소에 따른 전자장비의 소용량화의 이론적 근거이며 실험장치를 구축하는데 있어서 경제성을 향상시킬 것이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부가 후원하고 한국연구재단이 지원한 원자력 연구개발 사업에 의해 수행되었다.(Grant code M20701010003-08M0101-00310)

참고문헌

- (1) Hsieh, S. S. and Wang, C. Y., 1994, "Experimental Study of Three-Dimensional Natural Convection in Enclosures with Different Working Fluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 2687~2698.
- (2) Ostrach, S., 1972. "Natural Convection in Enclosures," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 8, Chap. 3, Academic Press.
- (3) Batchelor, G. K., 1954, "Heat Transfer by Free Convection Across a Closed Cavity Between Vertical Boundaries at Different Temperature," *Q. Appl. Math.*, vol. 12, pp. 209~233.
- (4) Mallinson, G. D., and De Vahl Davis, G. 1977, "Three-Dimensional Natural Convection in a Box: A Numerical Study," *J. Fluid Mech.* 83, 1
- (5) Drew, T. B., Cokelet, G. R. and Hoopes, J. W., 1978, Vermeulen, *Advances in Chemical Engineering*, Vol. 10.
- (6) Catton, I., 1972, "Natural Convection in Enclosures," in Hartnett, J.P. and Irvine, T.F., Eds., *Advances in Heat Transfer*, Vol. 8, Academic Press, New York, pp. 161~227.
- (7) Hsieh, S. S. and Wang, C. Y., 1994, "Experimental Study of Three-Dimensional Natural Convection in Enclosures with Different Working Fluids," *Int. J.*

- Heat Mass Transfer*, Vol. 37, 99. 2687~2698.
- (8) Nobuhiro, S., Shoichiro, F. and Hideo, I., 1978, "Heat Transfer of Natural Convection in a Rectangular Cavity with Vertical Walls of Different Temperatures," *Bulletin of the JSME*, Vol. 21, No. 152, February, pp. 246~253
- (9) Markatos, N. C. and Pericleous, K. A., 1984, "Laminar and Turbulent Natural Convection in an Enclosed Cavity," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 755~772.
- (10) Xamanb, J., Alvarez, G., Liraa, L. and Estradac, C., 2005, "Numerical Study of Heat Transfer by Laminar and Turbulent Natural Convection in Tall Cavities of Façade Elements," *Energy and Buildings*, Vol. 37, Issue 7, pp. 787~794.
- (11) Jacob, M., 1949, *Heat Transfer*, Vol. 1, Wiley, New York.
- (12) Bejan, A., 1994, "Convection Heat Transfer," 2nd., John Wiley & Sons, INC, New York, pp. 466~514.
- (13) Ko, S.-H., Moon, D.-W. and Chung, B.-J., 2006, "Applications of Electroplating Method for Heat Transfer Studies Using Analogy Concept," *Nuclear engineering and technology*, Vol. 38. 251~258.
- (14) Levich, V. G., 1962, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood.
- (15) Selman, J. R. and Toviass, C. W., 1978, "Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique," *Adv. Chem. Eng.* Vol. 10, pp. 211~318
- (16) Kang, K.-U. and Chung, B.-J., 2010, "The Effects of the Anode Size and Position on the Limiting Currents of Natural Convection Mass Transfer Experiments in a Vertical Pipe," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 34, No. 1, pp.1~8.
- (17) Ko, B.-J. and Chung, B.-J., 2010, "Study on the Laminar Mixed Convection of Developing Flow in a Vertical Pipe, Vol. 34, No. 5, in progress.