

수직 원형관 내부에서 발생하는 자연대류 열전달에서 상·하단 마개의 영향

강경욱 · 정범진[†]

제주대학교 에너지공학과

(2011년 8월 18일 접수, 2011년 9월 15일 수정, 2011년 9월 15일 채택)

The Effects of Top and Bottom Lids on the Natural Convection Heat Transfer inside Vertical Cylinders

Gyeong-Uk Kang and Bum-Jin Chung[†]

Department of Nuclear and Energy Engineering, Institute for Nuclear Science and Technology, Jeju National University

(Received 18 August 2011, Revised 15 September 2011, Accepted 15 September 2011)

요 약

수직 원형관 내부의 자연대류 열전달 현상이 상·하단 마개 유무 그리고 마개의 가열 및 단열조건에 따라 어떻게 변화하는지 Ra_{Lw} 수 $9.26 \times 10^9 \sim 7.74 \times 10^{12}$ 의 범위에 대해 실험적으로 연구하였다. 유사성의 원리를 이용하여 열전달 실험을 대신하여 황산-황산구리 수용액의 전기도금계를 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 실험결과, 수직 원형관의 위와 아래가 열린 경우 자연대류 열전달은 기존의 수직평판에 대한 그것과 일치하였고 상·하단 마개의 영향 따른 열전달의 변화는 Krysa 등, Sedahmed 등과 Chung 등이 실험한 현상과 일치하였다. 구리 마개를 사용한 경우 측정된 열전달은 층류와 난류영역에서 원형관의 아래만 막혔을 때가 가장 높게 측정되었고 다음으로는 위와 아래가 모두 막힌 경우, 위만 막힌 경우 그리고 위와 아래가 모두 열린 경우의 순으로 열전달이 변화하였다. 한편, 아크릴 마개를 사용한 경우에는 그 경향은 비슷했지만 위와 아래가 모두 열린 경우가 위만 막힌 경우보다 열전달이 높았다. 구리 마개를 사용한 경우 아크릴 마개보다 열전달이 높았다. 이는 서로 다른 가열벽면에서 발생된 유동의 상호작용에 기인하였기 때문인 것으로 판단된다. 본 실험을 통하여 기존연구보다 확장한 유동영역과 기하구조에 대하여 열전달의 영향을 관찰하였고, 층류와 난류영역에 대한 자연대류 열전달 상관식을 제시하였다.

주요어 : 자연대류, 열전달, 물질전달, 수직 원형관, 유사성, 전기도금계

Abstract— The effects of top and bottom lids on the natural convection heat transfer phenomena inside vertical cylinders were investigated experimentally for Ra_{Lw} from 9.26×10^9 to 7.74×10^{12} . Using the concept of analogy between heat and mass transfer, a cupric acid-copper sulfate electroplating system was employed as mass transfer experiments replacing heat transfer experiments. The natural convection heat transfer of both-open cylinders in laminar and turbulent flows was in good agreement with the existing heat transfer correlations developed for vertical plates. The effects of top and bottom lids on the heat transfer rates were very similar to the studies of Krysa et al. and Sedahmed et al. and Chung et al. With the copper lids, the bottom-closed cavity showed the highest heat transfer rates and then followed both-closed, top-closed, both-open ones in both laminar and turbulent flows. However with the acryl lids, the similar trends were observed except that the heat transfer rates for both-open were higher than top-closed one. The use of the copper lids increased the heat transfer rates compared to the acryl lids due to the hydrodynamic interaction of the flows developed for the different heated faces. This study extended the ranges of flow conditions of the existing literatures and proposed the empirical correlations.

Key words : Natural Convection, Heat Transfer, Mass Transfer, Vertical Cylinder, Analogy, Electroplating system

[†]To whom corresponding should be addressed.

Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University
Tel : 064-754-3644; E-mail: bjchung@jejunu.ac.kr

1. 서 론

최근에 화학공학과 원자력공학 등 여러 공학 분야에서 피동냉각계통(Passive cooling system)의 사용이 증가함에 따라 다양한 기하구조적인 배열에서의 자연대류 열전달 현상에 대한 관심이 증가하고 있다. 수직 원형관 내부에서 발생하는 자연대류의 경우 공학적으로 관련된 실질적인 문제들은 위와 아래가 개방된 구조보다는 복잡한 구조적인 배열을 하고 있다. 이러한 배열에서의 자연대류는 서로 다른 가열벽면(Heated wall)에서 발생한 유동의 상호작용에 의해 열전달 현상이 달라진다 [1-2]. 원형관 내부의 기하구조는 위와 아래가 모두 열린 경우(Both-open), 아래만 막힌 경우(Bottom-closed cavity), 위만 막힌 경우(Top-closed cavity), 그리고 모두 막힌 경우(Both-closed cavity)의 네 가지의 배열로 나눌 수 있다.

위와 아래가 모두 열린 수직 원형관 내부의 자연대류 열전달 문제는 많은 학자들에 의하여 실험적, 수치적으로 연구되어 왔지만 닫힌 구조에 대해서는 발표된 연구가 매우 제한적이다. 기존연구들은 열전달과 물질전달 시스템간의 유사성(Analogy) 원리에 따라 구리 전기도금계(Electroplating system)를 이용하여 열전달 실험 대신에 물질전달 실험을 수행하기도 하였다 [1-4]. 물질전달에서는 음극(Cathode) 구리관이 열전달에서의 가열벽면을 모사한다. 기존연구에서는 구리관의 위 또는 아래를 구리 마개로 막아서 도금반응이 일어나게 한 경우를 활성공동(Active cavity)으로 나타내었고 이와 반대로 도금반응이 일어나지 않도록 한 경우에는 비활성공동(Inactive cavity)으로 나타내었다. Sedahmed 등 [1]은 활성마개로 위만 막힌 경우(Active top-closed cavity)와 아래만 막힌 경우(Active bottom-closed cavity)의 원형관을 사용하여 자연대류 실험을 수행하였고 아래가 막히면 위가 막혔을 때보다 열전달이 높아짐을 보였다. Somerscales와 Kassemi [3]도 아래만 막힌 원형관(Active bottom-closed cavity)을 사용하여 연구를 수행하였고 Krysa 등 [4]은 아래가 활성 및 비활성 마개로 막힌 두 가지 종류의 원형관(Active/inactive bottom-closed cavity)에 대해 연구하였다. 이 연구에서 그들은 구리 마개를 사용해서 원형관의 아래를 막은 경우, 바닥에서도 상승하는 유동이 관의 내벽을 따라 형성하는 경계층을 더욱 발달시키므로 열전달이 높아진다고 하였다. 기존연구들은 유동범위가 층류영역으로 한정되었고 원

형관 내부의 기하구조도 위만 막히거나 아래만 막힌 경우만이 고려되었다. 최근 Chung 등 [2]은 위와 아래를 아크릴 마개로 막은 원형관(Inactive closed cavity)에 대하여 층류에서부터 난류에 이르는 넓은 유동영역에서 원형관 내부의 다양한 기하구조에 따른 열전달의 변화를 실험적, 수치적으로 연구하였고 유동장과 온도분포를 통해 기하구조의 영향을 밝혀냈다.

본 연구에서는 층류영역과 난류영역을 포함하는 $9.26 \times 10^9 \leq Ra_{Lw} \leq 7.74 \times 10^{12}$ 의 범위에서 원형관의 위와 아래가 활성마개로 막힌 경우를 고려하였다. 원형관 내부의 기하구조는 위와 아래가 모두 열린 경우(Both-open), 아래만 막힌 경우(Active bottom-closed cavity), 위만 막힌 경우(Active top-closed cavity), 위아래 모두 막힌 경우(Active both-closed cavities)이다. 상사성 원리를 이용하여 열전달 실험을 대체하여 물질전달 실험을 수행하였다. 물질전달 실험방법론은 한계전류 측정기법을 이용하는 황산-황산구리(H_2SO_4 - $CuSO_4$) 수용액의 구리 전기도금계를 채택하였다.

2. 이론적 배경

2-1. 다양한 기하구조에서의 수직 원형관 내부의 자연대류

Bejan [5]은 원형관의 위와 아래가 모두 열려있는 수직 원형관 내부의 자연대류에서 가열벽면(Heated wall)을 따라 형성되는 열경계층(Thermal boundary layer)의 두께가 관의 내경보다 작을 경우 수직평판의 자연대류로 취급할 수 있음을 보인 바 있다. 이러한 경우 수직평판에 대해 개발된 자연대류의 열전달 상관식을 수직 원형관 내부의 자연대류에 적용할 수 있다. Kang과 Chung [6-7]은 수직 원형관 내부에서 발생하는 자연대류에 관한 실험적 연구를 수행하여 Le Fevre [8]와 Fouad [9]가 제시한 수직평판에서의 층류 및 난류 자연대류 상관식과 그들의 실험결과가 매우 일치하는 것을 확인했다. 이 연구에서 그들은 층류에서 난류로의 천이는 $Ra_H(Gr_HSc)$ 수 10^{12} 에서 발생한다고 하였다 [7]. 이것은 Gr_H 수의 약 10^9 에 해당한다.

$$\text{Le Fevre [8]} \quad Nu_H = 0.67 Ra_H^{0.25} \quad \text{at } Gr < 10^9$$

Laminar (1)

$$\text{Fouad [9]} \quad Nu_H = 0.31 Ra_H^{0.28} \quad \text{at } Gr > 10^9$$

Turbulent (2)

위와 아래가 모두 열려있는 자연대류 열전달 현상

에 대해서는 많은 연구가 수행된 반면, 마개의 영향에 대해서는 매우 제한적 연구만이 보고되었다 [1-4]. Table 1은 기존연구들을 요약한 것이다. Somerscales와 Kassemi [3]는 Ra_{Di} 수 $7.1 \times 10^7 \sim 6.9 \times 10^9$ 의 범위에 대해 아래가 구리 마개로 막힌 원형관(Active bottom-closed cavity)을 사용하여 연구를 수행하였다. 실험에 사용된 원형관은 내경이 0.0127 m~0.0381 m이고 높이가 0.00635 m~0.0762 m였다.

Krysa 등 [4]은 원형관의 내경을 0.0135 m로 고정하고 높이를 0.003 m~0.0381 m로 변화시키면서 자연대류 열전달의 변화를 관찰하였다. 활성 및 비활성 마개로 아래가 막힌 두 가지 종류의 원형관(Active bottom-closed, inactive bottom-closed cavities)을 고려하였다. (첫 번째는 원형관의 아래를 구리 마개로 사용하여 도금반응이 일어나도록 한 경우였고 두 번째는 구리 마개에 래커(Lacquer)를 칠하여 도금반응을 억제시킨 경우였다.) 구리 마개가 차지하는 열전달 면적을 고려해 주기 위하여 Weber 등 [10]이 제시한 관계식 (3)을 이용하여 특성길이 L_W (Surface area/perimeter projected onto a horizontal plane)를 정의하였다. 이 정의는 비활성 마개를 사용한 경우에도 공히 적용된다. 계산된 Ra_{Lw} 와 Ra_H 수의 범위는 $2 \times 10^7 \sim 1.2 \times 10^{10}$ 의 층류영역이었다.

$$L_W = \frac{\pi D_i H + \pi D_i^2 / 4}{\pi D_i} = H + \frac{D_i}{4} \quad (3)$$

실험결과, 원형관의 높이가 일정한 경우 원형관의 아래가 구리 마개로 막히게 되면 열전달이 향상된다는 사실을 보였다. 그들은 구리 마개로부터 상승하는 유동이 관의 내벽을 따라 상승하는 경계층을 더욱 발

달시키기 때문이라고 설명했다.

Sedahmed 등 [1]은 Ra_{Lw} 수 $1 \times 10^8 \sim 5.02 \times 10^9$ 의 층류영역에 대하여 위만 막힌 경우(Active top-closed cavity)와 아래만 막힌 경우(Active bottom-closed cavity)의 원형관을 사용하여 자연대류 현상을 실험적으로 연구하였다. 내경이 0.0172 m~0.041 m이고, 높이가 0.005 m~0.03 m의 원형관이 사용되었다. 실험결과, 아래가 막힐 경우의 열전달이 위가 막힐 때보다 높아진다는 사실을 밝혀냈다. 그들은 원형관의 바닥(Base wall)과 내벽(Side wall)에서 발생한 유동이 서로 상호작용하여 유동이 진동(Oscillatory flow)하기 때문에 열전달이 향상된다고 하였다.

Chung 등 [2]은 Ra_H 수 $1.08 \times 10^{10} \sim 2.11 \times 10^{13}$ 의 범위에 대하여 비활성 마개를 사용하여 위와 아래를 막은 4가지 경우에 대해 자연대류 열전달 현상을 실험적, 수치적으로 연구하였다. 원형관의 내경을 0.032 m로 고정하고 높이를 변화시키면서 열전달의 변화를 관찰하였다. 실험결과, 열전달은 아래가 막힌 경우가 가장 높았고, 그 다음으로 위와 아래가 모두 막힌 경우, 모두 열린 경우, 그리고 위만 막힌 경우의 순으로 열전달의 크기가 변하였다. 그들은 실험과 같은 조건에서 수치해석을 수행하여 원형관의 기하구조가 유동장과 온도장에 미치는 영향이 매우 크다는 사실을 밝혔다. 아래가 막히면 차가운 벽에 의해 식혀진 유체가 관의 아래로 빠져나가지 못해 아랫부분에 모여들어 가열벽면과 유체간의 온도차를 상승시킨다고 하였고 그 반대로 위가 막히면, 가열벽면에 의해 데워진 유체가 위로 빠져나가지 못하고 윗부분에 모여들어 온도차를 감소시킨다고 하였다.

Table 1. Natural convection mass transfer correlations proposed by previous studies [1-4].

Authors	Geometry	Correlations	
Somerscales & Kassemi [1]	Active bottom-closed	$Sh_{D_i} = 0.232 (D_i/H)^{0.191} Sc^{0.056} Ra_{D_i}^{0.28}$ (4)	
Krysa et al. [3]	Active bottom-closed	$Sh_{L_w} = 0.559 Ra_{L_w}^{0.265}$ (5)	
	Inactive bottom-closed	$Sh_H = 0.480 Ra_H^{0.265}$ (6)	
Sedahmed et al. [4]	Active bottom-closed	$Sh_{L_w} = 0.257 Ra_{L_w}^{0.333}$ (7)	
	Active top-closed	$Sh_{L_w} = 0.187 Ra_{L_w}^{0.297}$ (8)	
Chung et al. [2]		Laminar	Turbulent
	Inactive bottom-closed	$Sh_H = 0.84 Ra_H^{0.252}$ (9)	$Sh_H = 0.35 Ra_H^{0.281}$ (10)
	Inactive both-closed	$Sh_H = 0.77 Ra_H^{0.252}$ (11)	$Sh_H = 0.34 Ra_H^{0.281}$ (12)
	Inactive top-closed	$Sh_H = 0.61 Ra_H^{0.252}$ (13)	$Sh_H = 0.30 Ra_H^{0.281}$ (14)

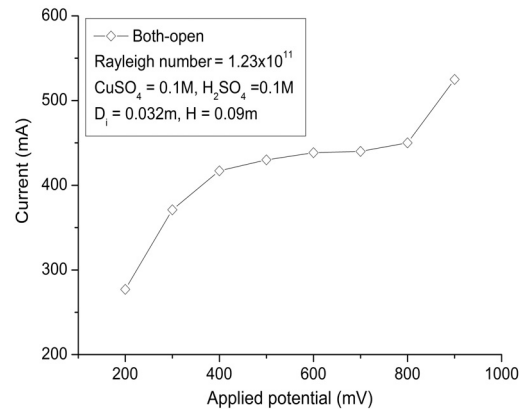
Table 2. Dimensionless group for analogy system.

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

2-2. 전기도금계를 이용한 상사 실험방법

열전달과 물질전달 시스템의 경계조건과 초기조건을 수학적으로 동일하게 해주면 열전달과 물질전달의 현상이나 거동은 서로 유사한 형태를 보인다. 이것은 물질전달 실험을 통하여 열전달 실험에서 나타나는 결과를 얻을 수 있으며 반대로 열전달 실험으로 물질전달 실험을 대체할 수 있다는 것을 의미한다. 즉 열전달과 물질전달은 수학적 취급방법이 유사하기 때문에 Table 2에 나타난 바와 같이 열전달과 물질전달에서 대응되는 무차원 수도 유사하다 [11].

본 연구에서는 물질전달 실험방법의 하나로서 황산-황산구리(H_2SO_4 - $CuSO_4$) 수용액의 구리 전기도금계(Copper electroplating system)를 채택하였다. 이 방법을 이용하면 물질전달계수(Mass transfer coefficient)를 빠르고 정확하게 측정할 수 있고 실험장치의 취급이 용이하다. 최근 들어 이 방법론을 적용하여 다양한 유동영역 및 기하구조에서의 대류열전달에 대한 많은 연구가 시도되고 있다. 황산-황산구리(H_2SO_4 - $CuSO_4$) 수용액에 구리전극을 사용하여 전압을 인가하면 양극에서 구리이온이 생성되어 음극으로 이동하고 음극 표면에서는 전자를 얻어 구리가 석출(도금)된다. 이때 구리전극은 가열벽면(Heated wall)이 역할을 하며 전달된 구리이온의 양은 열전달량이 된다 [6]. 전기도금계의 한계전류를 이용한 물질전달 연구는 Levich [12]에 의해 처음으로 시도되었다. Selman과 Tobias [13]는 여러 가지 조건에서 개발된 물질전달 상관식을 체계적으로 정립하였다. Ko 등 [14]은 수평평판에서의 강제대류와 수직벽면에서의 자연대류 열전달 현상에 대하여 전기도금계를 이용한 실험방법론을 적용하여 기존에 알려진 열전달 상관식을 예측할 수 있음을 검증한바 있다. Chung 등 [2,6,7,14,15]은 상사성 실험 방법론을 적용하여 수직 원형관 내·외부 자연대류 및 혼합대류 열전달 현상을 각각 물질전달 실험으로 모사할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

**Fig. 1.** Typical limiting current curves.

2-3. 한계전류기법

열전달계에서의 대류열전달계수는 열속(Heat flux)과 벽면 온도와 벌크 유체의 온도차의 비로 계산되며, 이와 유사하게 물질전달계에서의 대류물질전달계수도 계산된다. 그러나 전기도금계를 이용하여 물질전달계수를 구할 때에는 음극 표면에서의 구리이온 농도를 알기 어렵기 때문에 한계전류기법이 사용된다. Fig. 1은 Ra_H 수 1.23×10^{11} 에서 인가된 전압에 대해 측정되는 전형적인 전류곡선을 보여준다. 구리 전극 사이의 전위차가 증가할수록 두 전극 사이의 흐르는 전류가 증가하다가 전위차가 어느 한도를 넘게 되면 전류의 변화가 거의 나타나지 않는 상태가 된다. 이와 같이 전위차의 상승에 대하여 전류의 증가가 거의 없는 상태를 한계전류라 한다. 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이온 농도를 0으로 취급할 수 있다. 따라서 물질전달계수(Mass transfer coefficient), h_m 은 식 (15)에 따라 모액농도(Bulk concentration), C_b 와 한계전류밀도(Limiting current density), I_{lim} 만으로 구할 수 있다 [6-7].

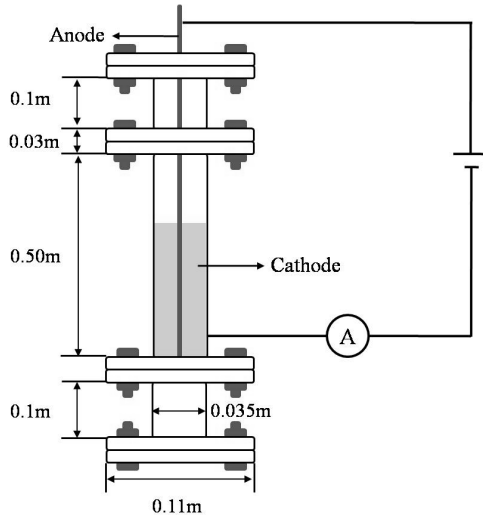
$$h_m = \frac{(1-t_n)I_{lim}}{nFC_b} \quad (15)$$

3. 실험장치 및 실험범위

Fig. 2는 실험장치와 그 회로를 개략적으로 나타낸 것이다. 실험장치는 아크릴로 제작된 수직 원형관이다. 이 원형관의 내부에는 필요한 높이의 음극 구리판이 안대기(Lining)가 되어 있으며 구리 안대기가 없는 아크릴 원형관이 상단과 하단에 아크릴로 제작된 플랜지로 연결되어 있다. 실험 측정부(Test section)의 외벽

Table 3. Test matrix for various geometrical cavities with active lids.

CuSO ₄ (M)	Sc	D _i (m)	H (m)	Ra _{Lw}	Geometry
0.1	2,094	0.032	0.05~0.4	9.26×10 ⁹ ~7.74×10 ¹²	Both-open, Bottom-closed, Top-closed, Both-closed

**Fig. 2.** Experimental apparatus and system circuit.

인 아크릴관은 높이 0.50 m, 내경 0.35 m이고 내부의 음극 구리관의 내경은 0.032 m이다. 음극 구리관의 내경과 같은 크기의 도금반응이 일어나는 구리 마개를 사용하여 원형관의 위 또는 아래를 막았다. 양극으로는 지름이 0.002 m의 구리봉을 사용하였다. 양극의 위치는 음극높이가 변해도 한계전류에 영향을 주지 않지만 양극의 높이가 음극의 높이보다 낮아서 음극을 마주보지 못하는 경우, 양극에서 생성된 구리이온이 음극표면에 골고루 전달되지 않으므로 한계전류가 낮게 측정될 수 있다 [6]. 따라서 음극 구리관보다 충분히 긴 양극 구리봉을 사용했으며 대류거동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 원형관의 정중앙에 위치시켰다. 전원공급장치는 VüPOWER사의 DC Power supply-IPS-18B10을 이용하였고, 전압과 전류측정 장치는 FLUKE사의 Dual Display Multimeter-45를 사용하였다.

Table 3는 실험범위를 나타낸다. 황산(H₂SO₄)의 농도는 1.5 M이고 황산구리(CuSO₄)의 농도는 0.1 M로 Sc 수를 2,094로 고정하였다. 내경이 0.032 m의 원형관에 대해 높이를 0.05 m~0.4 m로 변화시켰다. 이것은 Ra_{Lw} 수 9.26×10⁹~7.74×10¹²의 범위에 해당하고 층류와 난류를 포함하는 넓은 범위이며 기존연구에서 수행된 영역과 미흡한 영역까지도 포함한다. 원형관 내

부는 위와 아래가 모두 열린 경우(Both-open), 아래만 막힌 경우(Active bottom-closed cavity), 위만 막힌 경우(Active top-closed cavity), 그리고 모두 막힌 경우(Active both-closed cavity)의 기하구조로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 원형관의 위와 아래에 구리 마개를 사용하여 막았기 때문에 구리 마개가 차지하는 열전달 면적을 고려하였다. 따라서 Weber 등 [10]이 제시한 관계식 (3)을 이용하여 특성길이 L_w를 계산하였다. 무차원 수인 Ra_{Lw} 수와 Sh_{Lw} 수는 아래와 같이 계산된다.

$$Ra_{Lw} = Gr_{Lw} Sc = \frac{gL_w^3 \Delta\rho}{D\nu \rho} \quad (16)$$

$$Sh_{Lw} = \frac{h_m L_w}{D} \quad (17)$$

본 연구에서는 무차원 수가 계산되는데 필요한 물성치를 알기 위하여 Fenech와 Tobias [16]가 제시한 관계식 (18), (19), (20)를 사용하여 계산하였다. 이와 같은 물성치는 22°C에서 ± 5% 이내의 오차로 잘 맞는다고 알려져 있다.

$$\rho(\text{kg/m}^3) = (0.9978 + 0.06406M_{H_2SO_4} - 0.00167M_{H_2SO_4}^2 + 0.12755M_{CuSO_4} + 0.01820M_{CuSO_4}^2 - 0.00235M_{Glycerol} + 0.00353M_{Glycerol}^2) \times 10^{-3}. \quad (18)$$

$$\mu(\text{cp}) = 0.974 + 0.1235M_{H_2SO_4} - 0.0556M_{H_2SO_4}^2 + 0.5344M_{CuSO_4} + 0.5356M_{CuSO_4}^2 + 0.1475M_{Glycerol} + 0.2029M_{Glycerol}^2. \quad (19)$$

$$\mu D_{CuSO_4}(\text{m}^2/\text{s}) = (0.7633 + 0.00511M_{H_2SO_4} + 0.02044M_{CuSO_4} + 0.0653M_{Glycerol}) \times 10. \quad (20)$$

4. 결 과

4-1. 수직평판 자연대류 상관식과의 비교

본 실험의 결과를 검증하기 위하여 위와 아래가 모두 열린 수직 원형관에서 측정된 Sh_H 수를 2.1절의 수직평판에 대해 개발된 층류 및 난류 자연대류 열전

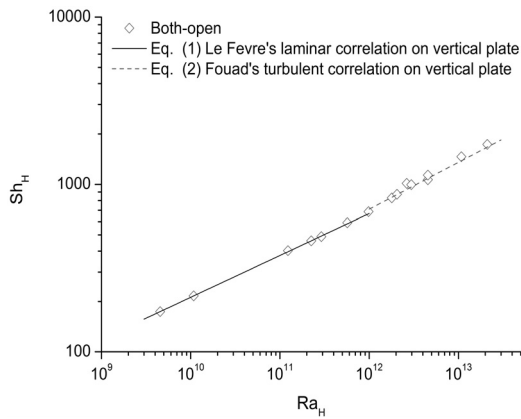


Fig. 3. Comparison of the results both-open cases with the existing correlation (1) and (2) developed on vertical plates.

달 상관식 (1), (2)와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 기존의 자연대류 열전달 상관식과 매우 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 자연대류 열경계층의 두께가 관의 내경보다 매우 얇아서 수직평판에서의 자연대류와 현상이 유사해지기 때문이다. Bejan [5]의 척도 관계식 (21)를 이용하여 열경계층 두께를 계산해 보면 Sc 수가 2,094일 때 0.0001 m로 관의 내경에 비해 매우 작은 크기임을 알 수 있다.

$$\delta \sim HRa_H^{-1/4} Sc^{1/2}, \quad \delta_T \sim \delta Sc^{-1/2} \quad (21)$$

4-2. 기하구조의 배열에 따른 영향

여러 가지 기하구조의 원형관에 대하여 원형관의 높이에 따라 측정된 열전달계수를 Fig. 4의 폐도형으로 나타내었다. 본 실험결과와 비교목적으로 Chung 등 [2]이 실험한 결과를 축을 같게 하고 개도형을 사용해 Fig. 5에 나타내었다. 두 연구의 차이점은 본 실험에서는 도금반응이 일어나는 구리 마개를 사용하여 원형관의 위와 아래를 막았고 Chung 등의 실험에서는 아크릴 마개를 사용하여 원형관의 위와 아래를 막아서 마개에서의 도금반응을 억제시킨 것이다. 막힌 구조를 표현하고 원형관 내부의 기하구조를 쉽게 구분하기 위해 일정한 규칙을 도형에 부여하였다. 도형의 수평으로 평평한 면이 닫힌 구조를 나타낸다. 따라서 삼각형은 아래만 닫힌 경우(Bottom-closed cavity), 역삼각형은 위만 막힌 경우(Top-closed cavity), 사각형은 위와 아래 모두 막힌 경우(Both-closed cavity)이고 마름모는 위와 아래가 모두 열린 경우(Both-open)

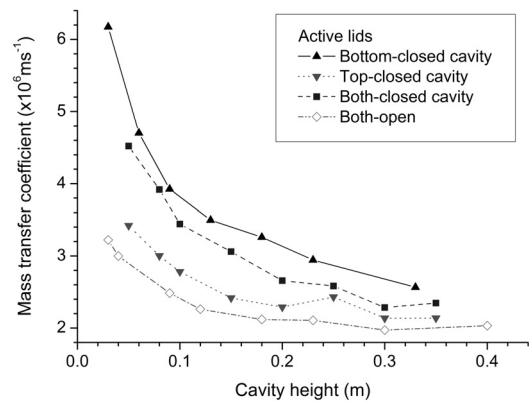


Fig. 4. Dependence of mass transfer coefficient on cavity height with/without active lids.

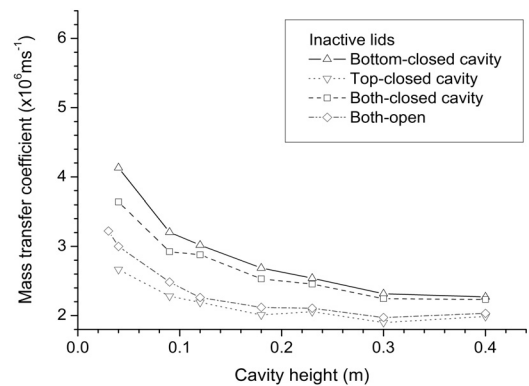


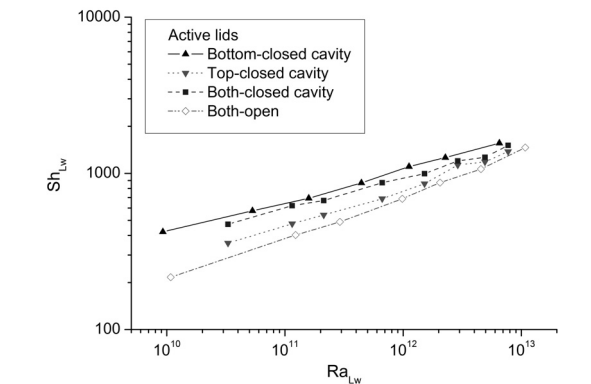
Fig. 5. Dependence of mass transfer coefficient on cavity height with/without inactive lids [2].

이다. Fig. 4와 5의 결과를 살펴보면, 활성마개(Active lids)를 채택한 경우 열전달계수가 높음을 알 수 있다. 질량전달계수를 산출하는 과정에서 단위면적으로 환산되었으므로 마개로 인한 면적의 증가로 인한 것이 아니다. 이는 마개에서 발생한 자연대류와 내벽에서 발생한 자연대류의 상호작용에 의한 상승작용으로 보아야 할 것이다. 열전달계수는 원형관의 높이가 증가할수록 감소하다가 높이가 약 0.3 m 이상부터는 일정해지는 것을 볼 수 있다. 원형관의 높이 0.3m를 Ra_{Lw} 수로 환산하면 4.93×10^{12} ($Gr_{Lw} = 2.3 \times 10^9$)에 해당하는 크기이므로 그 이상부터는 난류영역, 그 이하는 층류영역에 해당한다. 일반적으로 알려진 사실인 수직 원형관 내부의 자연대류 열전달 거동을 단순하게 표현한 관계식 (22)와 (23)을 살펴보면 층류의 경우 열전달계수는 가열벽면의 높이가 증가함에 따라 감소하지만, 난류가 되면 가열벽면의 높이가 증가해도 열전달계수에는 변화가 없음을 확인 할 수 있다.

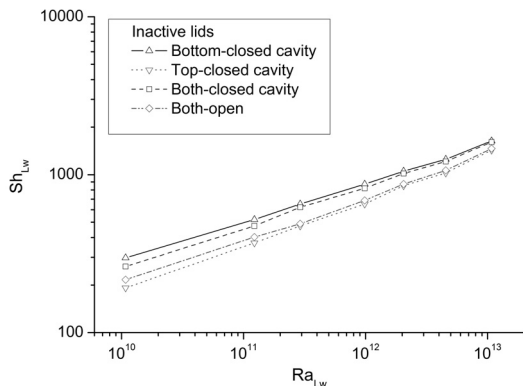
$$h_h H \sim (H^3)^{1/4} \rightarrow h_h \sim H^{-1/4} \quad \text{Laminar flow} \quad (22)$$

$$h_h H \sim (H^3)^{1/3} \rightarrow h_h \sim H^0 \quad \text{Turbulent flow} \quad (23)$$

Fig. 6의 (a)와 (b)에 다양한 원형관 내부의 기하구조에 대해 측정된 Sh_{Lw} 수를 나타내었다. Fig. 6의 (a)는 본 실험에서 측정한 결과로 구리 마개를 사용한 경우이고 Fig. 6의 (b)는 아크릴 마개를 사용한 Chung 등 [2]이 실험한 결과이다. (b)의 경우, 아래만 막혔을 때의 Sh_{Lw} 수가 가장 높고 그 다음으로 모두 막힌 경우, 모두 열린 경우 그리고 위만 막힌 경우의 순서로 열전달의 변화가 관찰됐다. 본 실험결과인 (a)의 경우 역시 아래가 막힌 경우의 Sh_{Lw} 수 가장 높고 다음으로 모두 막힌 경우였다. 그러나 비활성마개의 경우와 달리 다음으로 위만 막혔을 경우가 모두 열린 경우에 비해 Sh_{Lw} 수가 높게 측정되었다. 이는 물질전달에서 가열벽면을 모사하는 음극의 구리 마개에서 발생한



(a) Active lids (Sh_{Lw} : Both-open < top-closed < both-closed < bottom-closed)

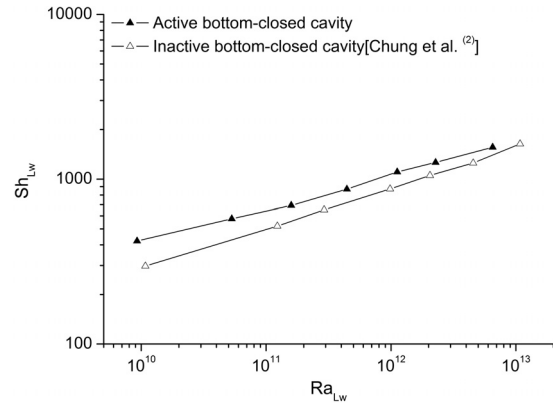


(b) Inactive lids (Sh_{Lw} : Top-closed < Both-open < Both-closed < Bottom-closed)

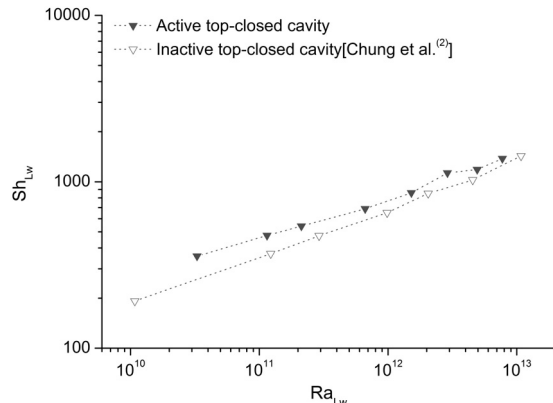
Fig. 6. Comparison of Sh_{Lw} on various geometrical cavities with active/inactive lids.

유동과 내벽에서 발생한 유동의 상호작용에 기인했기 때문이라 판단된다.

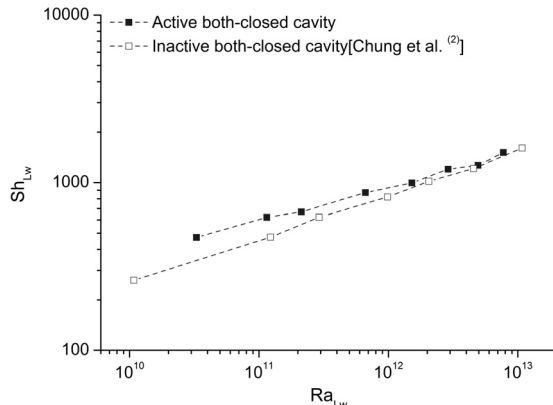
Fig. 7의 (a)는 구리 마개와 아크릴 마개를 사용해 원형관의 아래만 막힌 경우를 비교한 결과이다. 구리 마개로 아래를 막은 경우가 아크릴 마개로 막은 경우보다 열전달이 향상되는 것을 볼 수 있다. Wragg와 Loomba [17]에 의하면 수평으로 놓인 상향 원형관에서의 자연



(a) Bottom-closed cavity



(b) Top-closed cavity

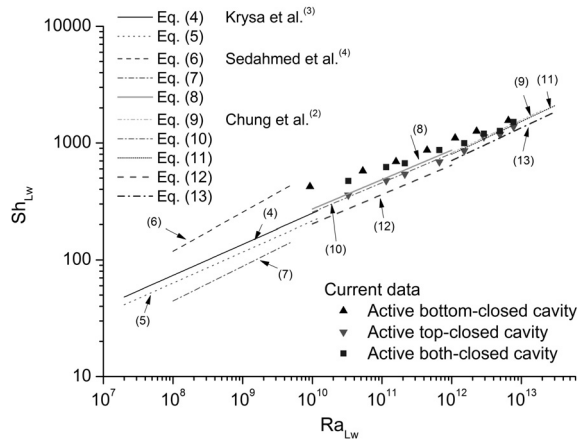


(c) Both-closed cavity

Fig. 7. Active vs. Inactive lids for each geometrical cavity.

Table 4. The empirical correlations based on the results.

Geometrical cavity	Laminar ($Ra_{Lw} < 10^{12}$)	Turbulent ($Ra_{Lw} > 10^{12}$)
Bottom-closed	$Sh_{Lw} = 0.65 Ra_{Lw}^{0.271}$	$Sh_{Lw} = 0.37 Ra_{Lw}^{0.285}$
Both-closed	$Sh_{Lw} = 0.59 Ra_{Lw}^{0.271}$	$Sh_{Lw} = 0.34 Ra_{Lw}^{0.285}$
Top-closed	$Sh_{Lw} = 0.47 Ra_{Lw}^{0.271}$	$Sh_{Lw} = 0.31 Ra_{Lw}^{0.285}$
Both-open	Same as vertical plates	

**Fig. 8.** Comparison of the results with the existing correlations.

대류는 $Ra_{Do}(Gr_{Do}Sc) > 3 \times 10^7$ 에서 난류가 발생한다고 하였다. 본 실험에서 구리 마개의 지름을 특성길이로 계산한 Ra_{Do} 수는 5.53×10^9 이다. 따라서 원형관의 아래가 구리 마개인 경우, 열전달 면적이 늘어날 뿐만 아니라 난류가 발생하기 때문에 이 유동은 가열벽면을 따라 발달하는 경계층에 영향을 미칠 것이다. 따라서 서로 다른 가열벽면에서 발생한 유동의 상호작용으로 열전달이 향상된 것으로 판단된다. 기존에 알려진 수평평판에서의 자연대류 열전달 현상은 가열벽면이 상향으로 놓일 경우, 표면으로부터 상승하는 고온의 유체는 주변으로부터 하강하는 찬 유체에 의해 대치되어 온도차가 증가하므로 하향으로 놓일 때보다 열전달이 훨씬 더 높아진다 [18]. Fig. 7의 (b)와 (c)는 원형관의 위만 막힌 경우와 아래만 막힌 경우이다. 마찬가지로 구리 마개로 막은 경우가 아크릴 마개로 막은 경우보다 열전달이 높았다. 이 역시 열전달 면적이 늘어났을 뿐만 아니라 상향과 하향의 원형관에서 발생하는 유동과 가열벽면에서 발생하는 유동이 상호작용하여 열전달 향상에 기인한 것으로 판단된다.

4.3. 기존의 자연대류 물질전달 상관식과의 비교

Fig. 8은 수직 원형관 내부의 다양한 기하구조에 대

한 기존의 자연대류 물질전달 상관식과 본 실험결과를 비교한 것이다. 비교결과, 본 실험의 결과는 기존의 상관식과 매우 유사한 경향을 보인다.

실험결과를 바탕으로 원형관에서의 자연대류 물질전달 상관식을 도출하였고 Table 4에 나타내었다.

5. 결론

수직 원형관의 자연대류 열전달에서 상·하단 마개의 영향을 실험적으로 측정하였다. 황산-황산구리(H_2SO_4 - $CuSO_4$) 수용액의 구리 전기도금계를 물질전달계로 채택하여 한계전류를 측정하였다. 내경이 0.032 m인 원형관에 대해 높이를 0.05 m~0.4 m로 변화시킴으로써 Ra_{Lw} 수 $9.26 \times 10^9 \sim 7.74 \times 10^{12}$ 의 범위에서 실험을 수행하였다. 활성마개인 구리 마개를 사용하였고 기하구조는 위와 아래가 모두 열린 경우, 아래만 막힌 경우, 위만 막힌 경우, 그리고 위와 아래가 모두 막힌 구조로 총 네 가지였다.

실험결과 위와 아래가 모두 열린 원형관에서 측정된 Sh_H 수는 열경계층 두께가 관의 직경에 비해 매우 얇았기 때문에 기존문헌의 수직평판에서의 자연대류 열전달 상관식과 일치하였다. 원형관의 네 가지 기하구조에서 활성마개(구리 마개)를 사용하여 측정된 Sh_{Lw} 수는 아래만 막혔을 때가 가장 높았고 다음으로 모두 막힌 경우, 위만 막힌 경우, 그리고 위와 아래가 모두 열린 경우의 순으로 열전달의 변화가 관찰되었다. 이는 Krysa 등과 Sedahmed 등의 결과와 일치하였다. 한편, 동일한 실험범위에서 비활성마개(아크릴 마개)를 사용한 Chung 등의 실험결과에서는 마찬가지로 아래만 막혔을 때가 가장 열전달이 높았고 다음으로 모두 막힌 경우가 나왔지만 다음으로 위와 아래가 모두 열린 경우의 열전달이 위만 막힌 경우보다 높게 측정되어 본 실험과 달랐다. 이는 원형관의 활성마개에서 발생한 유동과 내벽에서 발생한 유동의 상호작용 때문이며 활성마개를 이용한 경우가 비활성 마개를 이용한 경우보다 열전달이 항상 높았기 때문이다. 활성

마개는 원형관의 위 또는 아래에 수평으로 놓인 구리 원형관으로 Ra_{Do} 수는 5.53×10^9 의 난류에 해당하고 원형관의 높이가 일정한 경우 상향으로 놓였을 때가 하향으로 놓였을 때보다 열전달이 높게 측정되었다. 이는 기존에 알려진 상향 및 하향의 수평평판에서의 자연대류 열전달 현상과 일치한다. 또한, 활성마개에서도 상승하는 유동이 발생하고 이 유동은 벽면에서 상승하는 유동과 상호작용하기 때문에 비활성마개를 사용한 것보다 열전달이 향상된 것으로 판단된다.

본 연구에서는 활성마개를 사용하였고 수직 원형관 내부의 자연대류 열전달에 대한 기존의 연구보다 넓은 유동범위와 다양한 기하구조로 연구를 확장하였고 이와 공학적으로 관련한 실질적인 자연대류 열전달 문제에 있어서 열전달 현상을 예측할 수 있도록 상관식을 제안하였다.

기호설명

C_b	: 모액농도 (mol/m^3)
D_i	: 수직 원형관의 내경 (m)
D_m	: 확산계수 (m^2/s)
D_o	: 원형관의 지름 (m)
F	: 패러데이 상수 (96,485 C/mol)
g	: 중력가속도 ($9.8 m/s^2$)
h_h	: 대류열전달계수 ($W/m^2 \cdot K$)
h_m	: 물질전달계수 (m/s)
I	: 측정전류 (A)
I_{lim}	: 한계전류밀도 (A/m^2)
k	: 전도계수 ($W/m \cdot K$)
L_w	: 유효길이 ($(\pi D_i H + \pi D_i^2/4)/(\pi D_i)$)
n	: 이온의 원자가
t_n	: 전극반응에 참여한 이온의 분율
Nu_H	: Nusselt 수 ($h_h H/k$)
Pr	: Prandtl 수 (ν/α)
Ra_{Di}	: Rayleigh 수 ($Gr_{Di} Pr$)
Ra_H	: Rayleigh 수 ($Gr_H Pr$)
Ra_{Lw}	: Rayleigh 수 ($Gr_{Lw} Pr$)
Sc	: Schmidt 수 (ν/D_m)
Sh_{Do}	: Sherwood 수 ($h_m D_o/D_m$)
Sh_H	: Sherwood 수 ($h_m H/D_m$)
Sh_{Lw}	: Sherwood 수 ($h_m L_w/D_m$)

Greek symbols

α	: 열확산계수 (m^2/s)
β	: 부피팽창계수 (m^3/K)
δ	: 속도경계층두께 (m)
δ_T	: 열경계층두께 (m)
ν	: 동점성계수 (m^2/s)
μ	: 점성계수 (kg/ms)
ρ	: 밀도 (kg/m^3)

후 기

본 연구는 교육과학기술부가 후원하고 한국연구재단이 지원한 미래형 원자로 연구개발 사업(VHTR)에 의해 수행되었다(Grant code 2011-0349).

참고문헌

1. Sedahmed, G.H., Ahmed, A.M., El-Rafey, M.L., Hosney, A.Y., Ayob, E.A., Natural convection mass transfer inside cylindrical cavities of different orientation, *Journal of Applied Electrochemistry*, 1995, 25, 677-681.
2. Chung, B.J., Heo, J.H., Kim, M.H., Kang, G.U., The effect of top and bottom lids on natural convection inside a vertical cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54, 135-141.
3. Somerscales, E.F.C., Kassemi, M., Electrochemical mass transfer studies in open cavities, *Journal of Applied Electrochemistry*, 1985, 15, 405-413.
4. Krysa, J., Wragg, A.A., Thomas, D.M., Patrick, M.A., Free convective mass transfer in open upward-facing cylindrical cavities, *Chemical Engineering Journal*, 2000, 79, 179-186.
5. Bejan, A., 2003, *Convective Heat Transfer*, 3rd ed., John Wiley & Sons, INC, New York, pp. 185-222.
6. Kang, K.U., Chung, B.J., The effects of the anode size and position on the limiting currents of natural convection mass transfer experiments in a vertical pipe, *Transaction of the KSME(B)*, 2010, 34(1), 1-8.
7. Kang, G.U., Chung, B.J., The experimental study on transition criteria of natural convection inside a vertical pipe, *International Communication of Heat and Mass transfer*, 2011, 37(8), 1057-1063.
8. Le Fevre, E.J., "Laminar free convection from a vertical plane surface", 9th International Congress on Applied Mechanics, Brussels, 1956, 1-168.
9. Fouad, M.G. and Ibl, N., "Natural convection mass transfer at vertical electrodes under turbulent flow conditions", *Electrochimica Acta*, 1960, 3, 233-243.
10. Weber, M.E., Austraukas, P., Petsalis, S., Natural convection mass transfer to nonspherical objects at

- high Rayleigh number, Canadian Journal of Chemical Engineering, 1984, 62, 68-72.
11. Bejan, A., 1994, Convective Heat Transfer, 2nd ed., John Wiley & Sons, INC, New York, 466-514.
 12. Levich. V.G., 1962, Physicochemical Hydrodynamics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
 13. Selman, J.R., Tobias, C. W., 1978, *Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique*, Adv. Chem. Eng. 10, pp. 211-318.
 14. Ko, S.H., Moon, D.W., Chung, B.J., Applications of Electroplating Method for Heat Transfer Studies Using Analogy Concept, Nuclear engineering and Technology, 2006, 38, 251-258.
 15. Chae, M.S., Kang, G.U., Chung, B.J., The effect of pitch-to-diameter on natural convection heat transfer of two in-line horizontal cylinders, Transaction of the KSME(B), 2011, 35(4), pp. 417-424.
 16. Fenech, E.J., Tobias, C.W., Electrochim. Acta, 1960 2, p. 311.
 17. Wragg, A.A., Loomba, R.P., Free convection flow patterns at horizontal surfaces with ionic mass transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1970, 13, 439-442.
 18. Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 2003, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th ed., John Wiley & Sons, New York, 614-619.