

## 도관내 원형관의 자연대류 열전달에서 입구 및 출구 길이 효과

임철규 · 정범진<sup>†</sup>

제주대학교 에너지공학과

(2012년 2월 13일 접수, 2012년 3월 12일 수정, 2012년 3월 12일 채택)

## Influence of the Entrance and Exit Lengths on the Natural Convection Heat Transfer of a Cylinder in a Duct

Chul-Kyu Lim and Bum-Jin Chung<sup>†</sup>

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

(Received 13 February 2012, Revised 3 March 2012, Accepted 12 March 2012)

### 요 약

굴뚝내 수직 원형관의 자연대류에서 굴뚝의 입구길이, 출구길이, 그리고 굴뚝의 직경에 따른 열전달 변화를 실험적으로 연구하였다. 상사성을 이용하여 열전달 실험 대신 물질전달 실험을 수행하였다. 직경 0.054 m, 높이 0.03, 0.07, 0.10 m의 원형관에 대하여 굴뚝의 직경을 0.06 m에서 0.14 m까지, 높이를 0.30 m에서 1.10 m까지 변화시켰다. 이는  $Pr$  수 2,094,  $Ra_L$  수  $4.55 \times 10^9$ ,  $5.79 \times 10^{10}$ , 그리고  $1.69 \times 10^{11}$ 에 해당한다. 굴뚝이 없을 때, 수직 원형관의 열전달은 Le Ferve의 수직평판에 대한 층류 자연대류 상관식과 일치하였다. 출구길이를 증가시키며 실험한 결과, 열전달은 증가하다가 특정 출구길이 이상에서는 일정해 졌다. 반면, 입구길이를 증가시킬 때는 열전달은 감소하다가 특정 입구길이 이상에서는 일정해졌다. 굴뚝효과로 증가된 열전달은 굴뚝의 직경을 증가시킬수록 감소하다가 굴뚝이 없을 때와 같아졌다.

**주요어** : 굴뚝효과, 자연대류, 열전달, 물질전달, 수직 원형관, 상사성

**Abstract**— This work investigated the influence of the chimney dimensions(exit and entrance length, and diameter) on the heat transfer of a vertical cylinder in a duct. The measured mass transfer rates for the natural convection of vertical cylinder in a duct were presented for Prandlt number 2,094, Rayleigh number in the range of  $4.55 \times 10^9$ ,  $5.79 \times 10^{10}$ , and  $1.69 \times 10^{11}$ . Experiments were performed using a copper sulfate electroplating system to simulate heat transfer based upon the analogy concept. The diameter of the duct was varied from 0.06 m to 0.14 m, and the heights from 0.30 m to 1.10 m. Nusselt numbers measured at open channel condition agreed well with the existing laminar heat transfer correlations for vertical plate developed by Le Fèvre. The increase of the exit length enhanced the heat transfer up to a certain duct height but further increase does not affects the heat transfer. The heat transfer decreased with increasing the entrance length up to a certain duct height and was constant at further increase. The Nusselt number decreased with increasing the diameter of duct, until Nusselt number becomes similar to that at open channel beyond a certain diameter.

**Key words** : Chimney effect, Natural Convection, Heat Transfer, Mass Transfer, Vertical Cylinder, Analogy

- $C_b$  : 모액농도 ( $mol/m^3$ )  
 $D_h$  : 수직 원형관의 내경 ( $m$ )  
 $D_m$  : 확산계수 ( $m^2/s$ )  
 $D_t$  : 굴뚝의 직경 ( $m$ )

<sup>†</sup>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

- $F$  : 패러데이 상수 (96,485 C/mol)
- $Gr_L$  : Grashof number ( $g\beta\Delta TL_h^3/\nu^2$ )
- $g$  : 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 ( $A/m^2$ )
- $k$  : 열전도계수 ( $W/m\cdot K$ )
- $L_{entry}$  : 입구길이 (m)
- $L_{exit}$  : 출구길이 (m)
- $L_h$  : 수직 원형관의 높이 (m)
- $L_t$  : 굴뚝의 높이 (m)
- $Nu_b$  : Nusselt 수 ( $h_h b/k$ )
- $Nu_L$  : Nusselt 수 ( $h_h L_h/k$ )
- $Nu_0$  : 굴뚝이 없을 때의 Nusselt 수 ( $h_h L_h/k$ )
- $n$  : 이온의 원자가
- $t_n$  : 전극반응에 참여한 이온의 분율
- $Pr$  : Prandtl 수 ( $\nu/\alpha$ )
- $Ra_b$  : Rayleigh 수 ( $g\beta\Delta T b^3/\alpha\nu$ )
- $Ra_L$  : Rayleigh 수 ( $g\beta\Delta T L_h^3/\alpha\nu$ )
- $Sc$  : Schmidt 수 ( $\nu/D_m$ )
- $Sh_L$  : Sherwood 수 ( $h_m L/D_m$ )

Greek symbols

- $\alpha$  : 열확산계수 ( $m^2/s$ )
- $\beta$  : 부피팽창계수 ( $m^3/K$ )
- $\nu$  : 동점성계수 ( $m^2/s$ )
- $\mu$  : 점성계수 ( $kg/ms$ )
- $\rho$  : 밀도 ( $kg/m^3$ )

Subscripts

- $b$  : 채널의 간격 (m)
- $h$  : 가열부 길이 (m)
- $t$  : 시스템 전체 길이 (m)

1. 서 론

수직 원형관에서 자연대류 열전달을 향상시키는 한 가지 방법은 가열부에 굴뚝을 세우는 것이다. 이러한 굴뚝 내에서의 자연대류는 자연통풍장치, 각종 열교환기 그리고 신형원전설계에 채택되는 피동형 안

전계통 등 여러 공학적 장치에서 효과적이고 안정적인 열제거 수단으로 이용된다.

본래 굴뚝 내에서의 유동은 자연대류에 의해 구동된다. 그러나 가열부가 도관내에 위치하는 경우 도관 내 모든 높이(Elevation)에서 질량유량률이 같아야 하기 때문에, 하단에서 상승하는 유동은 곧 강제대류와 유사한 거동을 보인다 [1]. 열전달은 무차원 기하학적 인자(Dimensionless geometrical parameters)의 영향을 받는다(Fig. 1) : 팽창비  $D_t/D_h$ , 확장비  $L_t/L_h$ , 가열부의 종횡비  $L_h/D_h$ , 그리고 굴뚝 내 가열부의 위치. 최근의 굴뚝 시스템에 대한 열전달 연구는 열전달을 향상시키기 위하여 최적의 배열을 찾거나 기하구조 매개인자를 분석하여 표준 배열을 찾는 것을 목적으로 한다 [2]. 이러한 연구는 여러 학자들에 의해 수치적 [1~3,7,8,10,12~14]으로 그리고 실험적 [4~6,9,11]으로 수행되어 왔다. 그러나 굴뚝 내에 위치하는 가열부의 최적 위치에 대한 정교한 실험적 연구는 찾기 어렵다. 굴뚝효과에 대한 자연대류 열전달 실험을 하기 위해서는 실험장치가 매우 커야하고, 정상상태에 도달하는데 많은 시간이 필요하기 때문에 대부분의 이전 연구는 수치적으로 수행한 경우가 많았다. 또한, 대부분의 굴뚝효과에 대한 연구에서 확장비 ( $L_t/L_h$ )는 1.0~5.0으로 작았다.

본 연구에서는 굴뚝 내 수직 원형관의 열전달을 입구길이와 출구길이 그리고 굴뚝의 직경을 변화시키면서 실험적으로 측정하였다. 큰  $Ra_L$  수를 얻기 위하여, 유사성(Analogy)의 원리를 이용하여 열전달 실험을 수행하는 대신 물질전달 실험으로 대체하였다. 황산-황산구리( $H_2SO_4-CuSO_4$ ) 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 채택하였다. 수직관으로는 지름 0.054 m 이고, 높이는 0.03, 0.07 및 0.10 m인 3가지 음극 구

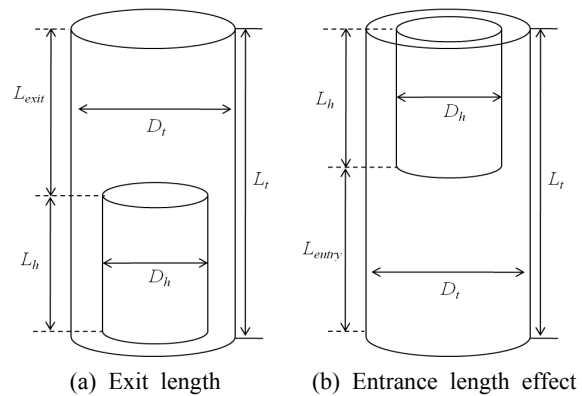


Fig. 1. Geometry of the problem.

리관을 사용하였다. 굴뚝 높이를 0.30~1.10 m로 그리고 직경을 0.06~0.14 m로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2-1. 수직 원형관 외부의 자연대류 열전달

수직 원형관 외부에서 발생하는 자연대류 열전달 현상과 상관식은 잘 알려져 있다. 층류 자연대류에 대해서는 Bejan [15]이 지배방정식으로부터 이론적으로 척도분석을 수행하여 변수간의 상관관계를 제시한 바 있다. 그는 자연대류에서 가열벽면을 따라 형성되는 열경계층 두께가 관의 직경보다 작을 경우, 수직 평판과 같이 취급할 수 있음을 보인 바 있다 [16]. Elenbass [17]도 원형관의 직경이 커지면 수직평판으로 간주할 수 있으며  $Nu_L$  수는  $Ra_L$  수의 함수임을 밝혔다. 그러므로 수직 원형관 외부에 대한 자연대류 열전달계수는 수직평판에 대해 개발된 자연대류 열전달 상관식으로 계산될 수 있다 [15]. 식 (1)은 잘 알려진 Le Fevre [18]의 수직평판에 대한 층류 자연대류 열전달 상관식이다.

$$\text{Le Fevre [18]} \quad Nu_H = 0.67 Ra_H^{0.25} \quad \text{at } Gr < 10^9 \\ \text{Laminar} \quad (1)$$

### 2-2. 출구길이 영향

단열 수직 확장부, 즉 굴뚝은 자연대류 열전달과 질량유량률을 향상시킨다 [3]. 굴뚝의 하단에 위치한 가열부는 플룸(Plume)을 발생시키고 유체는 굴뚝 내에서 가속된다. 유체가 가속되는 유효길이(Effective length,  $L_{exit}+L_h$ )는 가열부의 길이와 출구 길이를 합친 것만큼 이 된다. 따라서 굴뚝은 질량유량률을 증가시킨다.

굴뚝효과는 Haaland and Sparrow [1]에 의해 최초로 연구되었다. 그들은 수직의 굴뚝 입구에 열원을 위치시킨 조건에서 공기 자연대류 열전달을 수치적으로 연구하였다. 연구 결과, 열원은 열펌프의 역할을 하고, 굴뚝이 열전달을 향상시키는 것을 확인하였다. Fisher and Torrance [4]는 실험을 통해 수직 평판 열침원(Heat sink)으로 인해 열전달이 향상되는 것을 보고하였다. Kazansky 등 [5]은 굴뚝의 높이를 변화시키면서 굴뚝 내부에 놓인 수직 가열관의 공기 자연대류 열전달을 실험적, 수치적으로 연구하였다. 그들은 열전달률, 온도장, 유동장에 대해 상세히 제시하였고,

굴뚝 내에서 발생하는 유동을 시각화하여 사진을 제공하였다. 실험결과, 가열관은 펌핑 효과를 보이며 질량 유동률은 대체로 굴뚝의 높이가 증가할수록 증가함을 보고하였다. 그리고 굴뚝이 없는 경우보다 있는 경우가 최대 10배까지 열전달이 증가됨을 보였다.

Andreozzi 등 [2]과 Auletta 등 [6]은 열전달을 향상시키기 위한 최적의 배열을 찾는 연구를 수행하였다. Andreozzi 등 [2]은  $Ra_b$  수  $10^2 \sim 10^5$ 범위에서 등열속 조건하에 대칭적으로 가열된 채널-굴뚝 시스템에 대한 분석을 수행했다. 수치해석 결과를 질량유량률, 최대 벽온도, 그리고  $Ra_b$  수에 대한  $Nu_b$  수의 비로 나타내었다. 최적의 팽창비(Expansion ratio)는  $Ra_b$  수에 따라 달라지고, 최적의 확장비(Extension ratio)는 가열채널의 종횡비에 따라 달라짐을 보였다. 확장비가 4.0에서, 가열채널의 폭이 작은 경우, 굴뚝이 없는 경우보다 80% 열전달이 증가하였고, 채널의 폭이 큰 경우는 24% 증가하였다. Auletta 등 [6]은 열적 성능을 향상시킬 목적으로 배열에 대한 실험적 연구를 수행하였다.  $Ra_b$  수  $10^2 \sim 10^6$ 범위에서 등열속 및 대칭적으로 가열되는 수직 채널의 하류에 단열 연장부를 추가하여 그 효과를 실험적으로 분석하였다. 벽면 온도 분포를 측정함으로써 최적배열을 확인했다. 최대 열전달률이 향상된 배열은 연장부가 가열 채널 높이의 약 3배 정도이고, 최적의 팽창비가 약 2.0~3.0이었다.

굴뚝 내 유체의 가속은 굴뚝 내부의 압력강하를 야기한다 [3]. 굴뚝 하단에 가열부가 위치하기 때문에 입구는 대기 압력과 같다. 그리고 가열부 하단에서 상단으로 갈수록 압력은 낮아진다. 따라서 굴뚝의 높이가 높아질수록 굴뚝 내 압력은 더욱 낮아진다 [3,7,8]. 한편, 굴뚝내 압력이 낮아졌기 때문에 굴뚝 출구의 대기 압력이 상대적으로 높아져서 출구의 공기가 굴뚝 내부로 역류하는 하향유동(Down-flow)을 야기한다. 이는 굴뚝의 높이를 줄이는 효과를 가져 오기 때문에 전반적으로 열전달을 감소시키는 요인이 된다 [8].

Down-flow에 대한 연구는 Auletta and Manca [9]과 Andreozzi 등 [7]에 의해 수행되었다. Auletta and Manca [9]는  $Ra_b$  수  $10^2 \sim 10^6$ 범위의 채널-굴뚝 시스템에서의 유체 유동과 열전달의 거동을 밝히기 위해 시스템 내에서 발생하는 자연대류 열전달과 유체 흐름에 대해 실험적으로 연구하고 상관식을 제시하였다. 굴뚝 내 열전달은  $Ra_b$  수, 확장비, 그리고 팽창비에 의존함을 밝히고, 굴뚝 출구에서의 주기적인 하향

유동은 열전달을 감소시킨다고 보고하였다. 또한 이 하향유동은 확장비를 고정된 상태에서 팽창비가 커질수록 영역이 커지는 것을 확인하였다. 그리고 팽창비가 고정된 상태에서 확장비가 커질수록 열전달이 더 잘됨을 나타냈다. Andreozzi 등 [7]은  $Ra_L$  수  $10^4$  이하 층류영역에서 등열속 조건하에 대칭적으로 가열된 채널-굴뚝 시스템 내 공기 자연대류 열전달을 수치적으로 연구하였다. 그들은 확장비, 팽창비, 가열 채널의 종횡비 등을 바꾸어 가며, 최대 벽면온도, 질량유량률, 굴뚝 내 압력 분포 등을 나타내었다. 연구결과, 팽창비가 커질 때, 뜨거운 플룸이 출구로 분출될 때, 속도 차이로 인해 유입되는 하향유동 때문에 굴뚝효과가 감소함을 보였다.

2-3. 입구길이 영향

굴뚝 상단에 위치한 가열부는 부력을 발생시키고 부력을 받은 유체는 가열부 길이만큼만 가속된다. 즉, 출구길이 영향의 실험조건 보다 짧은 유효길이를 갖는다.

Campo 등 [10]과 Wirtz and Haag [11]은 채널의 상류에 단열 확장부를 부착하여 입구길이 영향에 대한 연구를 수행하였다. Campo 등 [10]은 등열속 조건하에  $Ra_b$  수 범위  $10^3 \sim 10^5$ 에 대해 수치적으로 연구하여 단열 확장부가 길어질수록 질량유량률은 감소함을 보고하였다. Wirtz and Haag [11]은 공기를 사용하여 수직 평판 채널의 상류에 부착한 단열 확장부를 전체 길이의 0, 60, 그리고 80%로 바꾸면서 실험을 수행했다. 실험결과, 팽창비가 매우 큰 경우, 단열 확장부의 존재를 인식하지 못하였고, 팽창비가 매우 작은 경우 단열 확장부는 평균  $Nu_b$  수를 감소시키며 그 영향이 컸다.

Campo 등 [12]과 Lee [13]는 채널의 상류 또는 하류에 단열 확장부가 부착된 등온 또는 등열속 조건하에 대칭적으로 가열된 수직 평판 채널에 대해 수치적으로 연구하였다. 연구결과, 하류방향으로의 단열 확장부를 가지는 것이 상류방향으로의 단열 확장부를 가질 때 보다 총 열전달과 질량유량률을 증가시키는 것을 확인했다. 그리고 하류방향에 단열확장부를 갖는 경우, 등온조건보다 등열속 조건에서 굴뚝효과로 열전달이 더 향상되는 것을 보였다.

2-4. 굴뚝 직경의 영향

Haaland and Sparrow [1]는 굴뚝의 높이가 일정할 때, 굴뚝의 직경이 넓으면 질량유량률은 더 감소한다

고 하였고, Asako 등<sup>(14)</sup>은 굴뚝 직경이 커질수록 굴뚝 내에서의 마찰에 의한 손실이 감소한다고 하였다.

굴뚝의 팽창비에 따라 굴뚝 벽면과의 마찰력이 증가해 질량유량률을 감소시키거나 유체에 대한 가속이 증가함으로써 질량유량률을 증가시킬 수도 있다.

Asako 등 [14], Auletta 등 [6], 그리고 Auletta and Manca [9]는 굴뚝의 팽창비에 대해서 수치적, 실험적으로 연구하였다. Asako 등 [14]은 열전달이 최대가 되는 최적의 굴뚝 직경을 구하기 위해, 굴뚝이 부착된 가열 튜브에서 발생하는 공기 자연대류 열전달률과 질량유량률을 수치적으로 연구하였다. 그는 굴뚝 높이에 비해서 직경이 매우 큰 경우, 굴뚝 효과는 감소한다고 하였다. 실험결과, 1.4~2.7의 최적의 팽창비는 확장비에 의존하고, 최적의 팽창비를 가진 굴뚝 내에서의 열전달률은 굴뚝이 없을 때 보다 2.5배 높음을 밝혔다. Auletta 등 [6]은 굴뚝의 높이는 고정하고, 직경을 증가시킬 때, 굴뚝 내 낮아진 압력은 회복된다는 결과를 보고했다. Auletta and Manca [9]는 굴뚝 내부의 각 층마다 다른 유체의 거동이 관찰됨을 확인했다. 낮은 확장비에서 채널의 직경보다 굴뚝의 직경이 큰 경우, 공기의 하향유동 때문에 열전달이 감소됨을 보였다.

3. 실험방법

3-1. 실험장치 및 실험범위

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 실험 장치는 아크릴로 제작된 수조에 아크릴 굴뚝이 수직으로 세워져있고, 그 내부 상단 또는 하단 중앙에 음극 구리관이 위치한다. 수조는  $0.18 \times 0.18 \times 1.4 \text{ m}^3$ 의 상부가 개방된 직육면체이다. 음극 구리관은 지름이  $0.054 \text{ m}$ 이고 높이

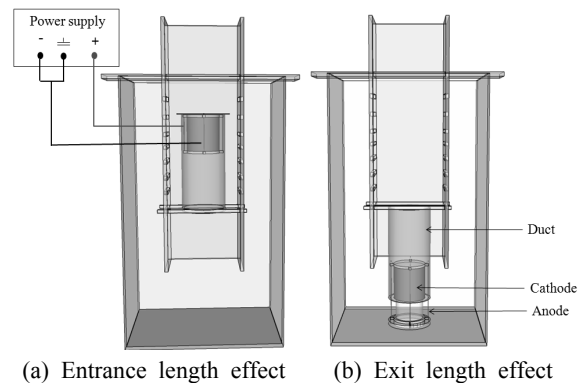


Fig. 2. Experimental apparatus and system circuit.

**Table 1.** Test matrix.

$Pr$	$D$ (m)	$H$ (m) ( $Ra_L$ )	Geometry	Height of duct (m) [Diameter of duct=0.06]	Diameter of duct (m) [Height of duct=0.50]
2,094	0.054	0.03 ( $4.55 \times 10^9$ ), 0.07 ( $5.79 \times 10^{10}$ ), 0.10 ( $1.69 \times 10^{11}$ )	Bare cathode	0	0
			Ducted cathode	0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00, 1.10	0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14

는 0.03, 0.07, 및 0.10 m인 3가지 관을 사용하였다. 양극은 지름 0.002 m, 높이 0.15 m의 구리봉으로 구리 이온이 고루 분포할 수 있도록 굴뚝 내벽에 4개를 부착시켰다. 굴뚝은 높이를 0.30~1.10 m까지, 지름을 0.06~0.14 m까지 변화시켰다. 전원공급장치는 VüPOWER사의 DC Power Supply-IPS-18B10이며, 전압과 전류측정 장치는 Fluke-45사의 Dual Display Multimeter이다. 황산( $H_2SO_4$ ) 1.5M을 황산구리( $CuSO_4$ ) 0.1M에 용해시켜 전기영동을 억제하였다.

Table 1에 실험범위를 나타내었다.  $Pr$  수를 2,094로 고정하였고, 3가지 음극 구리관은  $Ra_L$  수  $4.55 \times 10^9$ 에서  $1.69 \times 10^{11}$  범위에 해당한다. 기존 연구에 있어서 확장비가 1.0~5.0 정도였던 것에 비하여 본 연구의 확장비는 최고 36배에 이른다. 음극 실린더가 굴뚝 하단에 위치했을 때의 출구길이 영향과 굴뚝 상단에 위치했을 때의 입구길이 영향 그리고 굴뚝 직경의 영향에 대해 실험적으로 연구하였다.

본 실험의 결과는 실험범위에 제시된 각각의 경우에 대하여 5회 이상 반복실험을 수행하여 얻었다.

### 3-2. 전기도금계를 이용한 상사실험방법

열전달과 물질전달 시스템은 초기 및 경계조건이 같으면 수학적으로 서로 유사하다. 즉, 열전달 문제를 물질전달 문제로 또 그 역으로 상호전환이 가능하다. 이러한 물질전달계와 열전달계의 무차원수 관계는 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서는 황산-황산구리 ( $H_2SO_4$ - $CuSO_4$ ) 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 선택하였다. 전기도금계는 Levich [19]에 의해 정립되었고, Selman과 Tobias [20]에 의해 체계적으로 정리되어 현재까지 물질전달에 널리 이용된다. Chung 등 [22-28]은 이 방법론을 여러 가지 유동에 적용하여 기존에 알려진 열전달상관식을 예측할 수 있음을 검증한 바 있다. 전기도금계를 이용하여 열전달계를 모사할 경우, 높은  $Ra_L$  수를 작은 실험 장치에서 구현할 수 있으며 열 누설과 복사 열전달의 부가적인 영향을 원천적으로 없앨 수 있다.

**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 $\frac{h_c L}{k}$	Sherwood number $\frac{h_m L}{D}$
Rayleigh number $\frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu}$	Rayleigh number $\frac{gL^3 \Delta\rho}{D\nu\rho}$

전기도금계를 이용하여 물질전달계수를 구할 때, 음극 표면에서의 구리이온 농도를 알기 어렵기 때문에 한계전류기법을 이용한다 [21]. 전기도금계에서 전극 사이에 인가된 전위차를 증가시키면 전류가 증가하다가 더 이상 증가하지 않는 플레토우(Plateau) 영역이 나타나는데 이를 한계전류(Limiting current)라 한다. 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이온 농도를 0으로 취급할 수 있기 때문에 식 (2)에서 물질전달계수,  $h_m$ 은 모액농도,  $C_b$ 와 한계전류밀도,  $I_{lim}$ 만으로 구할 수 있다.

$$h_m = \frac{(1-t_m)I_{lim}}{nFC_b} \quad (2)$$

## 4. 결 과

### 4-1. 출구길이 영향

Fig. 3은 층류영역에서 출구길이 변화에 대한  $Nu_L/Nu_0$  값의 변화를 나타낸다. 폐도형은 굴뚝이 있을 때의 실험결과를, 개도형은 굴뚝이 없을 때의 실험결과를 나타낸다. 원형은 음극 원형관의 높이 0.03 m, 삼각형은 0.07 m, 사각형은 0.10 m로 각각 나타내었다. 입구길이는 0 m이다. 굴뚝이 없는 경우,  $Nu_L/Nu_0$  값은 Le Fevre [18] 수직평판 상관식과 일치하였다. Andreozzi 등 [2]이 보고한 바와 같이, 본 실험에서도 굴뚝이 있는 경우, 출구길이는 열전달을 향상시켰다. 그리고 출구길이가 길어질수록  $Nu_L/Nu_0$  값은 더욱 증가하는 경향을 보였다. 이는 출구길이가 길어질수록

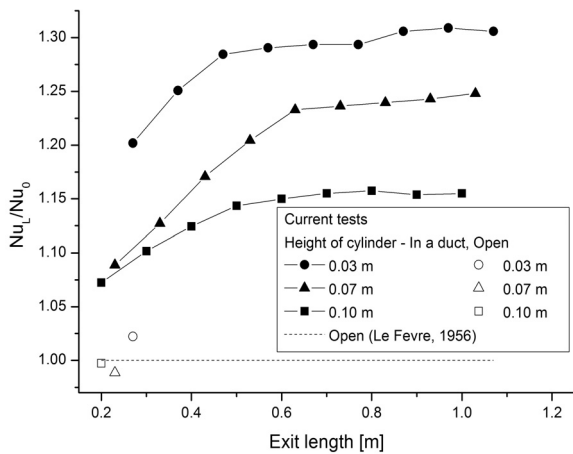


Fig. 3. Comparison between present experimental  $Nu_L/Nu_0$  number at each exit length.

록 데워진 공기(유체)의 가속 구간이 길어지고, 굴뚝의 존재로 열을 전달받은 유체가 퍼지지 않고 올라가기 때문이다. 한편 특정 출구길이를 넘어서면 출구길이 더 길어져도 열전달이 일정해진다. 이는 유체가 가속 받은 만큼 벽면과의 마찰력이 증가함으로써 마찰력에 의해 속도를 잃어버리는 효과와 하향유동 [12] 그리고 출구길이가 매우 길어질 때, 굴뚝내 공기의 온도분포가 균일해짐에 따라서 부력의 작용이 없어지는 효과 때문인 것으로 판단된다. 굴뚝의 존재는 굴뚝 내부의 압력을 낮춘다 [3]. 출구길이가 길어질수록 압력강하는 더욱 증가한다 [7]. 그래서 일정 높이 이상의 굴뚝에서는 굴뚝 상단 밖의 주변 압력이 상대적으로 높기 때문에 하향유동이 생긴다 [12]. 하향유동은 플룸의 온도를 감소시키므로 부력에 의한 가속이 더 이상 발생하지 않게 되므로 실제 유효길이를 줄어든게 하는 효과를 발생시킨다. 따라서 열전달을 증가시키는 실제 유효 길이와 열전달을 감소시키는 마찰력 그리고 하향유동이 힘의 평형을 이룬 것으로 판단된다. 높이 0.03, 0.07, 및 0.10 m를 비교하면 낮은 음극관을 채택한 경우가 보다 급격하게 플래투어로 상승함을 볼 수 있다. 이는 낮은 음극관의 경우 열 플룸의 온도가 상대적으로 낮기 때문에 보다 빨리 온도 분포가 균일해지는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 음극관 높이 0.03, 0.07, 그리고 0.10 m에 상응하는  $Ra_L$  수에 대한  $Nu_L$  수 변화를 종합적으로 보여준다. 굴뚝이 없는 경우  $Nu_L$  수는 수직평판 상관식과 잘 맞았다. 출구길이가 길어질수록  $Nu_L$  수 증가하는 경향이 확인된다.

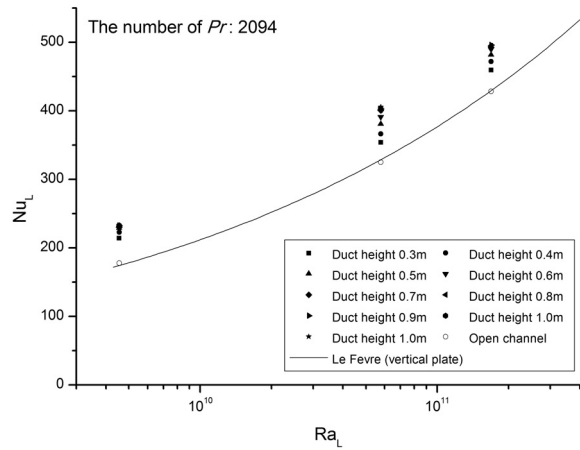


Fig. 4. The effects of exit length in laminar.

### 4-2. 입구길이 영향

Fig. 5는 층류영역에서 입구길이 변화에 대한  $Nu_L/Nu_0$  값의 변화를 나타낸다. 출구길이는 0 m이다. 입구길이 변화에 대한 실험결과는 출구길이 변화의 실험결과와는 반대이다. 입구길이는 열전달을 감소시켰다. 이는 유체의 구동력은 가열부의 높이에 따라 발생하나 단열 확장부의 존재로 인해 굴뚝 내부에 존재하는 유체의 양이 증가 하므로 질량유량률이 감소하기 때문이다. 출구길이 실험결과와 마찬가지로 입구길이가 특정길이를 초과하면 더 길어져도 열전달이 일정해지는 구간이 나타났다. 이는 상단에 위치한 음극 원형관에서 발생하는 구동력이 단열 확장부 내부에 존재하는 모든 유체를 끌어올리기에 그 힘이 부족하기 때문이다. 또한 단열 확장부 하단에서 유입되는 상향유동(Up-flow)도 고려된다. 단열 확장부 내부의 압력이 단열 확장부 입구 밖의 압력보다 낮아지기 때문에 하단에서 유체가 빨려 들어와 내부 유체를 밀어주는 효과가 발생되기 때문에 질량유동률을 감소시키는 힘과 증가시키는 힘이 평형을 이룬 것으로 판단된다.

Fig. 6은 음극관 높이 0.03, 0.07, 그리고 0.10 m에 상응하는  $Ra_L$  수에 대한  $Nu_L$  수 변화를 종합적으로 보여준다. 굴뚝이 없는 경우,  $Nu_L$  수는 수직평판 상관식과 잘 맞았다. 입구길이가 길어질수록  $Nu_L$  수가 감소하는 경향이 확인된다.

### 4-3. 굴뚝직경의 영향

Fig. 7은 굴뚝 직경에 대한  $Nu_L$  변화를 나타낸다. 음극은 굴뚝 하단에 위치시켰다. 굴뚝이 없는 경우

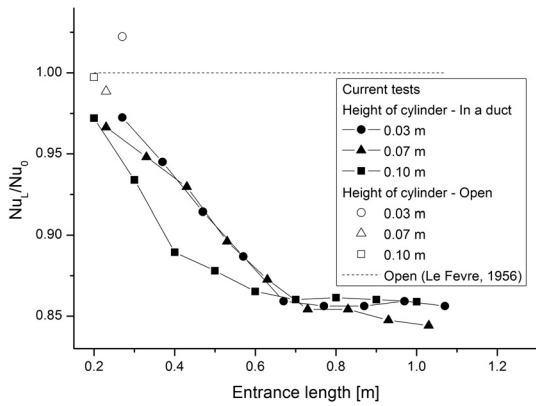


Fig. 5. Comparison between present experimental  $Nu_L/Nu_0$  number at each entrance length.

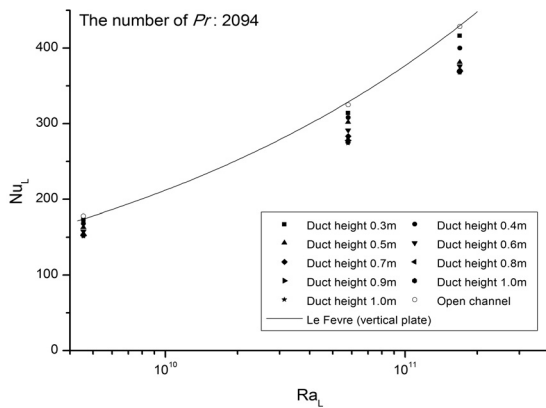


Fig. 6. The effects of entrance length in laminar.

$Nu_L$  수는 Le Fevre [18] 수직평판 상관식과 잘 맞았다. 굴뚝의 높이는 0.50 m로 고정하였고, 직경을 0.06 m에서 0.14 m까지 변화시키면서 실험하였다. 굴뚝의 직경이 작을 때 열전달이 가장 높았다. 이는 직경이 좁은 경우가 넓은 경우보다 부력에 의한 구동력의 영향을 받은 유체의 양이 줄어들기 때문이다. 굴뚝 직경이 커질수록,  $Nu_L$ 는 감소하다가 어느 일정 지름보다 커진 굴뚝에서부터는 굴뚝이 없는 것과 같았다. 이는 Auletta and Manca [9]의 연구 결과에서 낮은 확장비에서 채널의 직경보다 굴뚝의 직경이 큰 경우, 하향유동 때문에 열전달이 감소됨을 확인된다는 것으로 설명된다. 이는 Asako 등 [14]의 결과와 일치하였다.

### 5. 결 론

굴뚝 내부 수직 원형관의 자연대류 열전달 현상을 상사성을 이용하여 물질전달 실험으로 모사하고, 굴

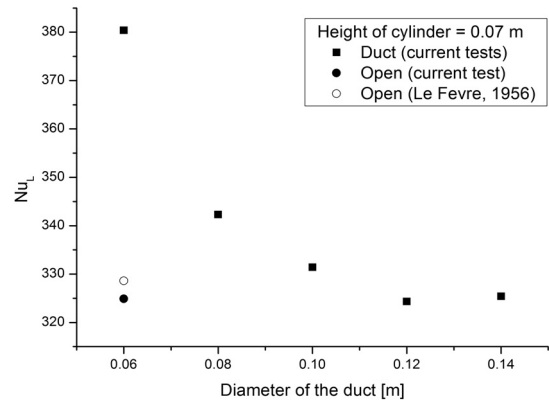


Fig. 7. The Nusselt number variation subject to diameter of ducts.

뚝의 출구길이, 입구길이, 그리고 굴뚝의 직경에 따른 열전달 변화를 실험적으로 측정하였다. 굴뚝의 직경을 0.06 m에서 0.14 m까지, 높이를 0.30 m에서 1.10 m까지 변화시키면서 직경이 0.054 m이고, 음극 원형관의 높이 0.03, 0.07, 그리고 0.10 m에 대해 실험을 수행하였다. 이는  $Pr$  수 2,094,  $Ra_L$  수  $4.55 \times 10^9$ ,  $5.79 \times 10^{10}$ , 그리고  $1.69 \times 10^{11}$ 에 해당한다.

굴뚝이 없는 경우,  $Nu_L$  수는 Le Fevre [18]의 수직 평판에 대한 층류 자연대류 상관식과 잘 맞았다. 출구길이를 증가시키며 실험한 결과, 굴뚝의 높이가 증가한 만큼 굴뚝 내부에서 가속되는 구간이 길어지기 때문에 열전달은 증가하다가 특정 출구 길이 이후부터는 굴뚝 벽면과의 마찰력 그리고 굴뚝 내부의 압력 강하로 인해 야기되는 하향유동 때문에 일정해졌다. 반면, 입구길이를 증가 시킬 때는, 음극 원형관이 굴뚝 출구에 위치하므로 구동력이 음극 원형관의 높이로 한정되고, 굴뚝 내부의 유체의 양이 증가되어 질량유량률이 감소하기 때문에 열전달이 감소하다가 특정 입구길이 이후부터는 굴뚝 입구에서 들어오는 상향유동이 굴뚝 내부의 유체를 붙여주는 효과를 가져와 일정해졌다. 굴뚝의 직경을 증가시키며 실험한 경우, 굴뚝의 존재는 굴뚝이 없는 경우보다 열전달을 향상시켰고, 직경을 증가할수록 열전달은 감소하다가 굴뚝이 없을 때와 같아졌다.

본 연구는 기존 연구의 확장비가 약 1.0~5.0였던 것에 비하여 1.0~36으로 범위를 확장함으로써 입구 및 출구길이가 매우 커지는 경우 열전달이 일정해지는 구간을 찾았다. 물질전달로 굴뚝효과 현상을 모사함으로써 작은 장치로 높은  $Ra_L$  수와 큰 확장비를 얻을 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부가 후원하고 한국연구재단이 지원한 미래형원자로시스템 기술개발사업중 피동 원자로공동냉각계통(RCCS) 성능향상 연구에 의해 수행되었다.

## 참고문헌

1. S. E. Haaland and E. M. Sparrow, Solutions for the channel plume and the parallel-walled chimney, *Numerical Heat Transfer*, 1983, 6, 155-172.
2. Assunta Andreozzi, Bernardo Buonomo, Oronzio Manca, Thermal management of a symmetrically heated channel-chimney system, *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48, 475-487.
3. Assunta Andreozzi, Antonio Campo, and Oronzio Manca., Compounded natural convection enhancement in a vertical parallel-plate channel, *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, 47, 742-748.
4. T. S. Fisher and K. E. Torrance, Experiments on chimney-enhanced free convection, *Journal of Heat Transfer*, 1999, 121, 603-609.
5. S. Kazansky, V. Dubovsky, G. Ziskind, R. Letan, Chimney-enhanced natural convection from a vertical plate: experiments and numerical simulations, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 497-512.
6. A. Auletta, O. Manca, B. Morrone, V. Naso, Heat transfer enhancement by the chimney effect in a vertical isoflux channel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, 44, 4345-4357.
7. Assunta Andreozzi, Bernardo Buonomo, Oronzio Manca, Numerical study of natural convection in vertical channels with adiabatic extensions downstream, *Numerical Heat Transfer*, 2005, 47, 741-762.
8. Assunta Andreozzi, Oronzio Manca, Thermal and fluid dynamic behavior of symmetrically heated vertical channels with auxiliary plate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, 22, 424-432.
9. Antonio Auletta and Oronzio Manca, Heat and fluid flow resulting from the chimney effect in a symmetrically heated vertical channel with adiabatic extensions, *International Journal of Thermal Sciences*, 2002, 41, 1101-1111.
10. A. Campo, O. Manca, and B. Morrone, Natural convection in vertical, parallel-plate channels with appended unheated entrances, *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 2005, 15, 183-204.
11. R. A. Wirtz and T. Haag, Effect of an unheated entry on natural convection between vertical parallel plates, *American Society of Mechanical Engineers*, 1985, 17, 1-8.
12. A. Campo, O. Manca, and B. Morrone, Numerical analysis of partially heated vertical parallel plates in natural convective cooling, *Numerical Heat Transfer*, 1999, 36, 129-151.
13. K. T. Lee, Natural convection in vertical parallel plates with an unheated entry or unheated exit, *Numerical Heat Transfer*, 1994, 25, 477-493.
14. Y. Asako, H. Nakamura, and M. Faghri, Natural convection in a vertical heated tube attached to a thermally insulated chimney of a different diameter, *Trans. ASME*, 1990, 112, 790-793.
15. Bejan, A., 1994, *Convective Heat Transfer*, 2nd ed., John Wiley & Sons, INC, New York, 466-514.
16. Bejan, A., 2003, *Convective Heat Transfer*, 3rd ed., John Wiley & Sons, INC, New York, 207-222.
17. Elenbass, W, The Dissipation of Heat by Free Convection from Vertical and Horizontal Cylinders, *Journal of Applied Physics*, 1948, 19, 1148-1154.
18. Le Fevre, E.J., Laminar free convection from a vertical plane surface", 9th International Congress on Applied Mechanics, Brussels, 1956, 1-168.
19. Levich. V.G., 1962, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
20. Selman, J.R., Tobias, C. W., 1978, *Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique*, *Adv. Chem. Eng.* 10, pp. 211-318.
21. Fenech, E. J. and Tobias, C. W., "Mass transfer by free convection at horizontal electrodes", *Electrochimica Acta*, 1960, 2, 311-325.
22. 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.
23. 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.
24. Ko, B. J and Chung, B. J., Study on the Laminar Mixed Convection of Developing Flow in a Vertical Pipe, *Trans. of the KSME(B)*, 2010, 34(5), 481-489.
25. 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.
26. Heo, J. H. and Chung, B. J., Visualization of Natural Convection Heat Transfer on a Horizontal Cylinder using the Copper Electroplating System, *Trans. of the KSME(B)*, 2011, 35(1), 43-51.
27. Lim, C. K., Heo, J. H. and Chung, B. J., Natural Convection Heat Transfer on Inclined Plates, *Trans. of the KSME(B)*, 2011, 35(7), 701-708.
28. Chae, M. S. and Chung, B. J., The Effect of Pitch-to-Diameter on Natural Convection Heat Transfer of Two Vertically Aligned Horizontal Cylinders, *Chemical Engineering Science*, 2011, 66, 5321-5329.