

엇갈리게 배열된 두 개의 수평관에서 수평 피치-직경비에 따른 자연대류 열전달 영향

채명선* · 허정환* · 정범진**

* 제주대학교 에너지공학과

Effect of Horizontal Pitch-to-Diameter Ratio on the Natural-Convection Heat Transfer of Two Staggered Cylinders

Myeong-Seon Chae*, Jeong-Hwan Heo* and Bum-Jin Chung**

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

(Received August 11, 2011 ; Revised December 29, 2011 ; Accepted February 3, 2012)

Key Words: Horizontal Cylinder(수평관), Staggered Cylinders(엇갈린 관), Natural Convection(자연대류), Analogy(상사성), Heat Transfer(열전달)

초록: 엇갈리게 배열된 두 개의 수평관의 수직 이격거리(P_v/D)와 수평 이격거리(P_h/D)를 변화시키며 자연대류 열전달을 실험적으로 측정하였다. 열/물질전달의 상사성을 이용하여 물질전달 실험을 수행하였고 난류영역까지 확장하였다. Pr 수 2,014, Ra_D 수 $1.5 \times 10^8 \sim 2.5 \times 10^{10}$, P_v/D 는 1.02~5, P_h/D 는 0~2 범위에서 수행하였다. 하단 수평관의 물질전달은 단일 수평관 상관식의 예측치와 일치하였다. 상단 수평관의 물질전달은 P_v/D 가 작을 때, 하단 수평관에서 상승하는 플룸의 예열영향(Preheating effect)으로 인해 감소하였고, P_h/D 가 증가하면 급격히 상승하였다. 그러나 P_v/D 가 클 때, 상단 수평관의 물질전달은 하단 수평관의 플룸 속도영향으로 인하여 단일 수평관보다 컸고, P_h/D 가 증가함에 따라 완만하게 감소하였다. P_h/D 가 매우 증가하여도 굴뚝효과(Chimney effect)와 측면유동효과(Side flow effect) 인하여 상단 수평관의 열전달이 하단 수평관의 열전달보다 크게 나타났다.

Abstract: This study measured the natural-convection heat transfer of two vertically staggered cylinders with varying vertical pitch-to-diameter (P_v/D) and horizontal pitch-to-diameter (P_h/D) ratios. The measured heat-transfer rates for the lower cylinder agreed well with the existing heat-transfer correlations for a single cylinder. At the smallest P_v/D , the rising plume from the lower cylinder provides the upper cylinder with a preheated flow, and the heat-transfer rates of the upper cylinder decrease, but increase very sensitively with P_h/D . However, at the largest P_v/D , the velocity effect dominates, and the heat-transfer rates of the upper cylinder are larger than that of a single cylinder, and decrease less sensitively with P_h/D . Even if P_h/D is increased, the heat-transfer rate of the upper cylinder is higher than that of the lower cylinder because of the chimney and side flow effects. This work expanded the flow ranges to turbulent flows. The cupric acid-copper sulfate (H_2SO_4 - $CuSO_4$) electroplating system was adopted for the measurements of the mass-transfer rates instead of the heat-transfer experiments based on the analogy concept. The measurements were made by varying P_v/D (1.02-5) and P_h/D (0-2) in both laminar and turbulent flows. The Rayleigh number ranged from 1.5×10^8 to 2.5×10^{10} , and the Prandtl number was 2,014.

- 기호설명 -

C_b : 모액농도 ($kmol/m^3$)
 D : 수평관의 직경 (m)
 D_m : 확산계수 (m^2/s)
 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 : 음극의 폭 (m)
 n : 이온의 원자가
 P : 구리관의 중심과 중심사이의 거리 (m)
 t_n : 전극반응에 참여한 이온의 분율

† Corresponding Author, bjchung@jejunu.ac.kr

- Nu_D : Nusselt 수 ($h_h D/k$)
 Nu_D^U : 상단 수평관의 Nusselt 수 ($h_h D/k$)
 Nu_D^L : 하단 수평관의 Nusselt 수 ($h_h D/k$)
 Pr : Prandtl 수 (ν/α)
 Rad : Rayleigh 수 ($Gr_D Pr$)
 Sc : Schmidt 수 (ν/D_m)
 Sh : Sherwood 수 ($h_m H/D_m$)

그리스문자

- α : 열확산계수 (m^2/s)
 β : 부피팽창계수 (m^3/K)
 θ : 편각
 ν : 동점성계수 (m^2/s)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)

1. 서론

수평으로 놓인 원형관 배열에서 발생하는 자연 대류 열전달 문제는 많은 학자들에 의하여 실험적으로, 수치적으로 연구되어 왔다.⁽¹⁾ 이러한 열전달 문제는 태양열 집열기, 냉각기, 열교환기, 가열기 등에 적용된다. 수평관 외부에서는 자연 대류에 의하여 상승하는 플룸(Plume)이 형성된다. 따라서 여러 개의 실린더의 배열에서는 플룸의 상호작용에 의해 상단에 위치한 실린더의 열전달이 달라진다. 열전달에 영향을 주는 중요한 인자는 직경을 특성길이로 한 Rad 수, 수평관 사이의 수직 및 수평 이격 거리 그리고 수평관의 개수이다.⁽²⁾

두 개의 수평관에서 수직 이격거리(P_v/D)와 수평 이격거리(P_h/D)에 따라 상단 수평관의 열전달이 달라진다.⁽³⁾ 상단 수평관과 하단 수평관의 P_v/D 가 작을 때, 상단 수평관은 하단 수평관의 예열영향(Preheating effect)을 받게 되어 하단 수평관보다 열전달이 낮아진다.⁽⁴⁾ 이때 P_h/D 가 증가하면 상단 수평관은 하단 수평관의 플룸의 예열영향으로부터 점차 벗어나게 되며, 하단 수평관의 열전달과 비슷해진다. 반면에 P_v/D 가 클 때, 하단 수평관으로부터의 플룸이 상단 수평관 자연대류에 초기 속도를 제공하므로 단일 수평관의 열전달보다 커진다. 그러므로 상단 수평관의 열전달은 하단 수평관의 열전달보다 크다. 이 때 P_h/D 가 증가하면 상단 수평관은 속도를 더해주는 플룸으로부터 벗어나게 되어, 열전달이 감소하여

하단 수평관의 열전달과 비슷해진다. 이에 반해 하단 수평관의 열전달은 상단 수평관과 P_v/D 또는 P_h/D 에 따라 영향을 받지 않으므로 단일 수평관의 열전달과 같다.⁽³⁾

Corcione⁽⁵⁾은 수평배열의 수평관에서 수평관의 개수 및 수직 이격거리에 따른 공기의 자연대류 열전달 연구를 수치적으로 수행하였다. 수평관의 개수를 2~6개였고, Rad 수는 $5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^5$ 였다. 두 수평관의 열전달률이 같아지는 거리를 임계거리(Critical distance)로 정의하고 그 이하에서는 하단 수평관의 플룸이 상단 수평관의 열전달을 감소시키고, 그 이상에서는 플룸의 영향으로 상단 수평관의 열전달이 상승한다고 하였다. 거리가 매우 멀어지면 강제대류 영향도 사라진다.

Sparrow and Niethammer⁽⁶⁾는 Pr 수가 0.7, Rad 수 $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ 의 범위에서 등온인 두 개의 수평관의 이격 거리를 변화시키며 상단 수평관의 열전달을 실험적으로 측정하였다. 하단 수평관의 영향을 주는 요소는 다음과 같다: 첫 번째는 예열영향이다. 따뜻한 플룸이 상단 수평관에 대하여 예열기 역할을 하므로 상단 수평관의 열전달이 감소하게 된다. 두 번째로 속도영향이다. 하단 수평관의 플룸이 상단 수평관의 초기 속도를 제공하므로 열전달이 상승하게 된다. 상단 수평관의 열전달은 피치-직경비가 3~4 이하에서 하단 수평관의 그것보다 작으나 피치-직경비에 따라 증가하다가 7~9 정도에서 더 이상 증가하지 않고 일정해짐을 보였다. Yuncu and Batta⁽⁴⁾ 수치적 연구도 P/D 2~9, Rad 수 2×10^4 와 2×10^5 에 대하여 수행한 결과가 일치하였다.

Chae and Chung⁽⁷⁾도 같은 기하구조에 대하여 상사방법을 이용하여 실험하였고, 수치적 방법을 이용하여 실험결과와 비교하였다. P/D 는 1.02~9, Pr 수는 2,014~8,334, Rad 수는 $7.3 \times 10^7 \sim 4.5 \times 10^{10}$ 였다. 실험결과 예열영향은 P/D 가 1.5이하에서 지배적이며, 속도영향은 1.5이상에서 지배적이었다. 이 수치는 Sparrow and Niethammer와 Yuncu and Batta 등의 연구와 달랐고, 수치계산을 통해 Pr 수의 영향임을 밝혔다. 또한 그들은 상단 수평관과 하단 수평관의 도금 패턴을 통하여 열전달을 시각화하였다.

Sadegh and Asheghi⁽⁸⁾와 Lieberman and Gebhart⁽⁹⁾는 여러 개의 수평관의 배열에서 이격 거리, 수평관의 개수에 따른 복합적인 열전달 현상에 대해 연구하였

Table 1 Natural convection heat transfer correlations on single horizontal cylinder

Authors	Criteria		Correlations
McAdams ⁽¹⁵⁾	Laminar	$10^4 < Ra_D < 10^9$	$Nu_D = 0.53 Ra_D^{1/4}$ (1)
	Turbulent	$10^9 < Ra_D < 10^{12}$	$Nu_D = 0.13 Ra_D^{1/3}$ (2)
Morgan ⁽¹⁶⁾	Laminar	$10^4 < Ra_D < 10^7$	$Nu_D = 0.480 Ra_D^{0.280}$ (3)
	Turbulent	$10^7 < Ra_D < 10^{12}$	$Nu_D = 0.125 Ra_D^{0.333}$ (4)
Churchill and Chu ⁽¹⁷⁾	$Ra_D \leq 10^{12}$		$Nu_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (5)
Smith and Wragg ⁽¹⁾	$10^6 < Ra_D < 10^9$		$Nu_D = 0.56 Ra_D^{0.25}$ (6)
Merk and Prins ⁽¹⁸⁾	$Pr \rightarrow \infty$		$Nu_D = 0.523 Ra_D^{1/4}$ (7)

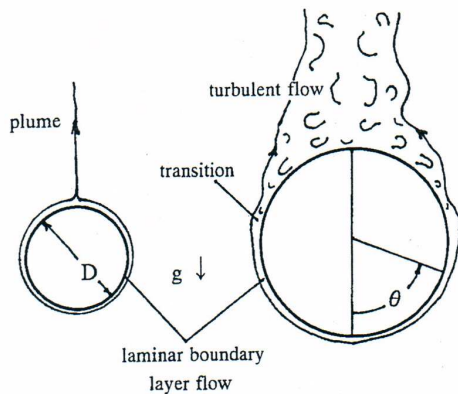


Fig. 1 Natural convection around cylinder⁽¹⁴⁾

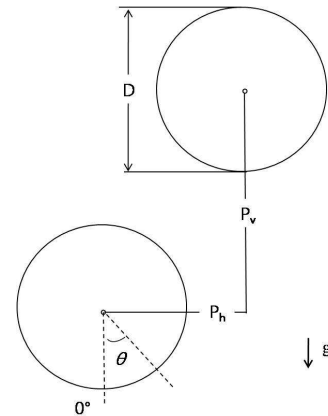


Fig. 2 Two staggered cylinders

으나 종합 열전달 실험이었기 때문에 두 개의 수평관의 P_v/D 와 P_h/D 에 따른 상단 수평관의 열전달의 변화를 현상학적으로 제시하지 못했다. Sparrow and Boessneck⁽³⁾은 나란히 배열된 두 개의 등온 수평관의 P_v/D 와 P_h/D 영향에 대해 실험을 수행하였다. 그러나 이 연구는 층류영역으로 한정되었다. Corcione⁽¹⁰⁾은 두 개의 수평관이 이루는 각도를 변화시키면서 수치적 연구를 수행하였으므로 P_v/D 에서 P_h/D 의 변화가 제한적이고 난류에 대한 결과가 부족하다. 난류범위에서의 자연대류 열전달 실험을 하기 위해서는 실험장치가 매우 커야 하는 어려움이 있고, 정상상태에 도달하는데 많은 시간이 필요하다.⁽¹¹⁾

본 연구에서는 큰 Ra 수를 얻기 위하여 열/물질전달의 유사성 개념을 이용하였으며,⁽¹²⁾ 열전달 실험 대체하여 물질전달 실험을 수행하였다. 물질전달 실험방법론은 황산-황산구리 수용액 ($H_2SO_4-CuSO_4$)에서 한계전류를 측정하는 기법을

채택하였다. Ra_D 수 범위는 층류영역과 난류영역에 각각 해당하는 1.5×10^8 와 2.5×10^{10} 이고, Pr 수는 2,014였고, 용액의 온도는 $22^\circ C$ 로 유지하였다. 나란히 배열(In-lined)되었을 때와 엇갈리게 배열(Staggered)되었을 때 상단 수평관의 열전달을 측정하기 위하여 층류영역에서 P_v/D 의 범위는 1.1~5이며, 난류영역에서 P_v/D 의 범위는 1.02~2이다. 층류 및 난류영역에서 P_h/D 의 범위는 0~2이다.

2. 수평관 외부의 자연대류 현상론

Fig. 1은 수평관 외부 자연대류에서 유체흐름을 나타낸 것이다. D 가 작을 경우 관의 하단에서 시작된 부력에 의한 유동은 상부로 진행하면서 층류 상태를 유지한다. D 가 커지면 관의 상단의 유동은 불안정성(Instability)이 증가하면서 결국 천이 및 난류로 진행한다. 국부 열전달은 θ 가 0° 일

때 가장 높고 판의 상단으로 갈수록 점점 감소하다가 천이지점부터 와류로 인하여 난류가 되면서 열전달은 다시 증가하기 시작한다.⁽¹³⁾

Kitamura 등⁽¹⁴⁾은 이러한 천이는 유동의 박리(Separation)가 발생하기 시작하는 지점이라고 하였다. 층류에서 박리는 θ 가 180° 일 때 발생한다. 난류가 되면 박리가 발생하기 시작하는 θ 의 지점은 점점 작아진다. 이 때, 천이와 난류영역은 수평관의 상단에서만 발생하며 그 영역의 크기는 총 면적의 1/3을 넘지 않는다. 단일 수평관 외부에서 발생하는 자연대류 열전달 연구는 실험적, 수치적으로 여러 학자들에 의하여 수행되었으며, 상관식으로 제시되었다^(1,15-18)(Table 1).

엇갈린 배열의 수평관에서 발생하는 자연대류 열전달 현상은 수직 및 수평으로 이격된 거리에 따라 변한다. Fig. 2는 엇갈리게 배열된 수평관을 나타낸다. 두 개의 외부 수평관 자연대류에서 하단 수평관의 열전달은 상단 수평관의 영향을 받지 않으며 단일 수평관의 그것과 같다.⁽⁴⁾ 이에 반해 상단 수평관의 열전달 현상은 P_v/D 와 P_h/D 에 따라 하단 수평관에서 발생한 플룸의 영향을 받는다. P_v/D 를 기준으로 비교해 보면, 작은 P_v/D 에서는 상단 수평관이 하단 수평관의 플룸으로부터 예열영향의 지배를 받게 되며, 큰 P_v/D 에서는 속도영향의 지배를 받게 된다. 한편, P_h/D 를 기준으로 비교해 볼 때, $P_h/D \leq 1$ 일 때, 상단 수평관은 하단 수평관의 플룸의 직접적인 영향을 받게 되다가 P_h/D 가 1보다 커지면 점차 하단 수평관의 플룸으로부터 벗어나게 되어 직접적인 영향을 받지 않게 된다.⁽³⁾

Corcione 등⁽¹⁰⁾은 두 개의 수평관이 수직으로 나란히 배열된 것을 중심으로 수평으로 기울어질 때의 층류 자연대류 열전달 연구를 수치적으로 수행하였다. 공기를 이용하여, P/D 가 1.4~10, 두 수평관 배열의 각도가 $0 \sim 90^\circ$ (From vertical)의 범위, Ra_D 수의 범위는 $10^3 \sim 10^7$ 이다. 그들은 계산결과를 통하여, 각도가 $10 \sim 15^\circ$ 이하의 지점에서는 예열영향과 속도영향이 지배적으로 발생함을 확인하였다. 일정한 각도에서 두 수평관의 이격거리가 증가하면 플룸간 중첩으로 인한 굴뚝효과(Chimney effect) 때문에 상단 수평관의 열전달이 증가하다가 감소하는 부분이 발생한다. 한편 그들의 실험은 배열의 기울기만을 변화한 실험이므로, 수평 및 수직 이격거리가 변할 때 발생하는

자연대류 열전달을 설명하기는 부족하다.

Sparrow and Boessneck⁽³⁾도 P_v/D 가 2~9, P_h/D 가 0~3의 범위, Ra_D 수의 범위 $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ 에 대하여 층류 자연대류 열전달 영향을 수치적으로 연구하였다. P_h/D 가 작을 경우, 하단 수평관의 플룸이 상단 수평관에 직접작용 하면서 예열영향과 속도영향이 나타났다. P_h/D 가 커지면 하단 수평관에서 발생한 플룸이 상단 수평관을 벗어나므로 이들 영향은 감소한다. 한편, 상단 수평관의 열전달은 측면유동(Horizontal flow) 때문에 하단 수평관에서 발생한 플룸의 영향에서 완전히 벗어난 경우에도 단일 수평관보다 조금 높았다.

3. 실험방법

3.1 열/물질전달의 유사성(Analogy) 실험방법

열/물질전달의 유사성(Analogy)이란 경계조건과 초기조건을 수학적으로 동일하게 해주면 열전달과 물질전달의 계통이나 거동이 수학적으로 같아지는 것을 말한다. 열/물질전달의 유사성 개념을 이용하면 열전달 실험은 물질전달 실험으로 대체될 수 있으며, 수학적 취급방법이 유사하기 때문에 Table 2와 같이 열전달과 물질전달에서 무차원수도 대응된다.

본 연구에서는 물질전달 실험방법론으로 황산-황산구리(H_2SO_4 - $CuSO_4$) 수용액의 한계전류기법을 이용하였다. 전기도금계의 한계전류를 이용한 물질전달연구는 Levich⁽¹⁹⁾에 의해 시도되었고, Selman and Tobias⁽²⁰⁾에 의해 여러 조건에서 개발된 물질전달 상관식을 체계적으로 정립하였다.

Chung,⁽¹²⁾ Kang⁽²¹⁾은 전기도금계를 이용하여 열전달 현상을 물질전달 실험으로 모사할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

Table 2 Dimensionless groups for analogy systems

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

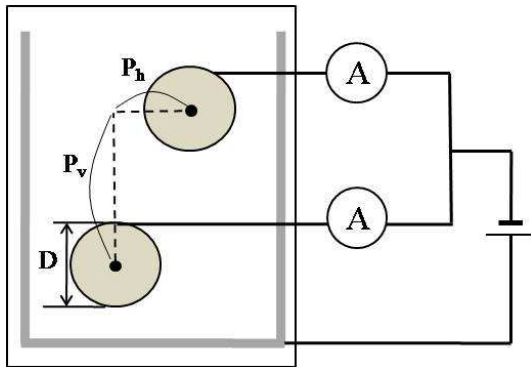


Fig. 3 The experimental equipment and system circuit

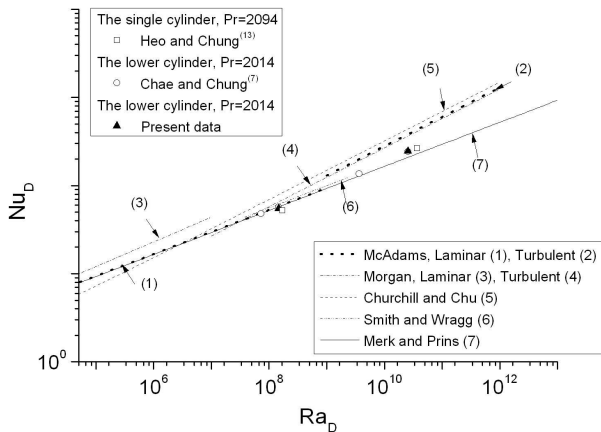


Fig. 4 Nusselt number of the lower cylinder compared with correlations for a single cylinder

열전달계에서 열전달량은 모액과 벽면의 온도차이와 열속에 의해 계산된다. 물질전달계에서 물질전달량은 마찬가지로 모액과 벽면의 농도차이에 의해 구해진다. 전기도금계를 이용한 물질전달계수를 구할 때 벽면의 농도를 측정하기는 매우 어렵다. 이는 한계전류기법을 이용하여 해결된다.⁽²²⁾ 황산-황산구리 수용액의 한계전류에 대한 보다 자세한 설명은 문헌에서 참고할 수 있다.^(7,13,21)

3.2 실험장치 및 실험범위

Fig. 3은 실험장치의 개략도이다. 아크릴로 제작되어 상단이 개방된 수조와 음극 구리관 두 개와 이를 둘러싼 양극판으로 구성되어 있다. 수조의 크기는 가로, 세로, 높이 각각 0.35 m, 0.12 m, 0.35 m이다. 음극 구리관의 직경은 0.012 m, 0.067 m이며 각각 2개씩 제작하였다. 양극판은 구리관을 충분히 감쌀 수 있도록 수조 안쪽의 양 옆에 설치하였다. 전원 공급장치는 VüPOWER사

Table 3 Test matrix

Pr	D (m) (Ra_D)	P_v/D	P_h/D
2014	0.067 (2.5×10^{10})	1.02, 1.1, 1.5, 2	0, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 2
	0.012 (1.5×10^8)	1.1, 1.8, 3, 5	0, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 2

의 DC Power supply-AK1205이며, 전압과 전류 측정장치는 HIOKI사의 Digital HITESTER 3804-50이다.

Table 3은 실험범위이다. 황산의 농도는 1.5M이고 황산구리의 농도는 0.05M로 Pr 수 2,014로 고정하였다. 음극 구리관의 직경은 0.012 m로써 Ra_D 수 1.5×10^8 이며 층류영역에 해당한다. 또한 직경 0.067 m로써 Ra_D 수 2.5×10^{10} 이며 난류영역에 해당한다. 층류영역에서 P_v/D 범위는 1.1~5이고, 난류영역에서 P_v/D 범위는 1.02~2 이다. 층류 및 난류영역에서의 P_h/D 범위는 0~2이다.

4. 결과

4.1 실험결과

Fig. 4는 본 실험에서의 하단 수평관에서 측정된 Nu_D 값과 기존문헌의 단일 수평관 상관식 및 실험결과의 Nu_D 값을 비교한 그래프이다. 폐도형은 본 실험을 통해 얻은 하단 수평관의 Nu_D 값을 나타내고, 개도형은 물질전달 실험을 통해 얻은 단일 수평관과 하단 수평관의 Nu_D 값이다.^(13,7) 그리고 각각의 선들은 Table 1에 제시된 단일 수평관에 대한 열전달 상관식이다.^(1,15-18) 층류영역에 해당하는 Ra_D 수 10^8 은 Churchill and Chu⁽¹⁷⁾를 제외한 나머지 상관식과 거의 일치했다. 난류영역에 해당하는 Ra_D 수 10^{10} 은 Merk and Prins⁽¹⁸⁾의 상관식과 비슷했다. 하단 수평관의 열전달은 상단 수평관에 영향을 받지 않으므로 단일 수평관의 열전달과 같았다.

Fig. 5는 층류영역에서 P_h/D 에 따른 상단 수평관과 하단 수평관의 Nu_D 값의 비를 나타낸 것이다. 폐도형은 본 실험의 결과로 Ra_D 수가 1.5×10^8 이며 P_v/D 가 1.1, 1.8, 3, 5일 때 P_h/D 를 0에서 2까지 변화시킨 것이다. 점선은 Ra_D 수 2×10^4 , 6×10^4 , 1×10^5 , 2×10^5 에서 나온 Nu_D 비의 결과를 평균한 Sparrow and Boessneck⁽³⁾의 결과이다. 두 수평관의

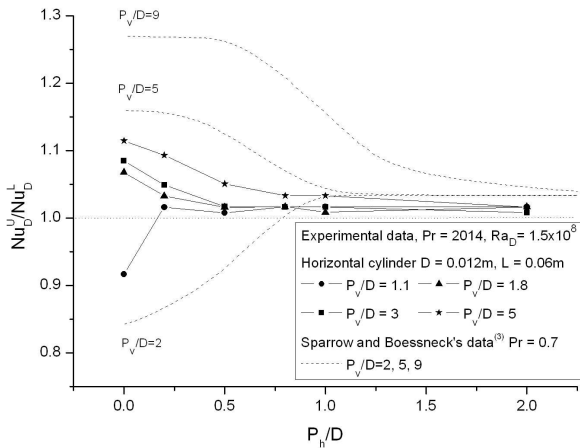


Fig. 5 Nu ratio as a function of horizontal Pitch-to-Diameter (Laminar)

수직 이격 거리가 매우 가까울 경우 상단 수평관과 하단 수평관이 나란히 배열되었을 때($P_h/D=0$), Nu_D^U 값은 하단 수평관의 Nu_D^L 값보다 낮았다가 P_h/D 가 증가하면서 점차 증가하다가 하단 수평관의 Nu_D^L 값과 비슷해진다. 이는 하단 수평관으로부터의 플룸이 상단 수평관의 열전달에 예열영향을 주기 때문이며 Sparrow and Niethammer⁽⁶⁾의 결과와 일치한다. P_h/D 가 증가함으로써 예열영향을 주는 플룸으로부터 벗어나면서 하단 수평관의 열전달과 비슷해짐을 보였다. 반면, 두 수평관의 수직 이격 거리가 멀 경우, P_h/D 가 0일 때 Nu_D^U 값은 하단 수평관의 Nu_D^L 값보다 높았다가 P_h/D 가 증가하면서 점차 감소하다가 하단 수평관의 Nu_D^L 값과 비슷해진다. 상단 수평관과 하단 수평관이 나란히 배열되었을 때($P_h/D=0$), 상단 수평관은 하단 수평관의 플룸으로부터 예열영향보다 속도영향을 지배적으로 받는다. 그러므로 상단 수평관은 자연대류와 강제대류가 결합된 혼합대류에 놓이게 되어 하단 수평관의 열전달보다 높다. P_h/D 가 증가하면서 점차 속도영향을 주는 플룸으로부터 벗어나게 되면서 상단 수평관의 열전달이 감소하게 되다가 하단 수평관의 열전달과 비슷해진다.

두 수평관의 거리가 매우 가까울 때, P_h/D 의 증가에 따른 Nu_D^U/Nu_D^L 값의 기울기는 매우 급격하고, 두 수평관의 거리가 멀 때, Nu_D^U/Nu_D^L 값의 기울기는 완만하다. 이는 하단에서 발생한 플룸의 너비가 상승 할수록 넓어지므로 P_v/D 가 클 때

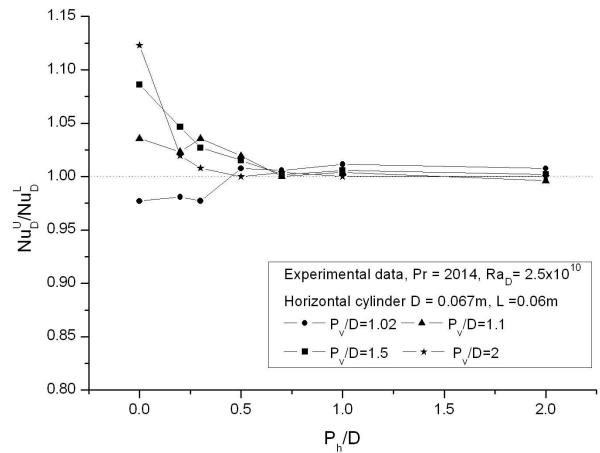
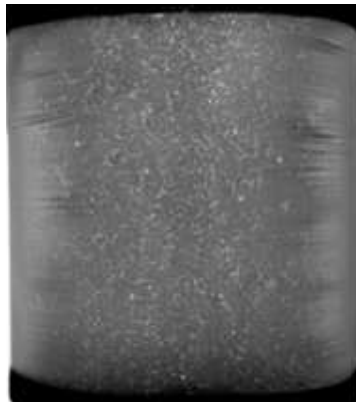
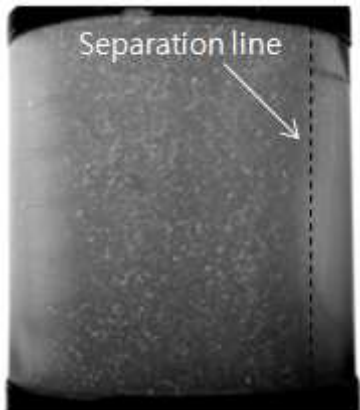


Fig. 6 Nu ratio as a function of horizontal Pitch-to-Diameter (Turbulent)

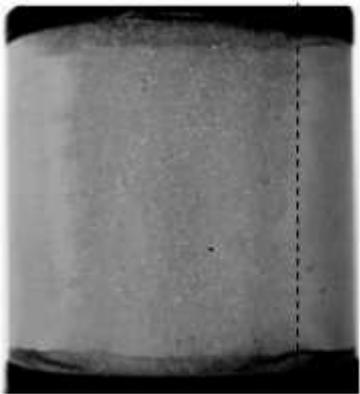
보다 작을 때, P_h/D 증가에 큰 영향을 보였다. Sparrow and Boessneck의 결과와 비교해볼 때, 본 실험의 결과보다 Nu_D^U/Nu_D^L 값의 기울기가 완만하다. 그 이유는 굴뚝효과로 설명된다. 굴뚝효과(Chimney effect)는 상승하는 플룸의 열경계층이 겹쳐지면서 더 이상 확산하지 않도록 하여 상승하는 유동을 가속하여 열전달을 상승시키고, 측면유동(Side flow)을 유발하는 것을 말한다. Pr 수가 0.7인 Sparrow and Boessneck에서는 Pr 수가 2,014인 본 실험에 비해 열경계층이 넓으므로 P_h/D 에 따른 굴뚝효과가 더 커지고 열전달 상승이 더 크다.

Fig. 5에서 P_h/D 가 2가 되었을 때, 상단 수평관과 하단 수평관의 Nu 비가 1보다 컸다. 그 이유는 앞에서 설명했듯이, 측면유동효과(Side flow effect)로 인해 상단 수평관에 가로지르는 강제대류가 가해지기 때문이다. 이는 Sparrow and Boessneck의 문헌에서 수평유동(Horizontal flow)과 같은 것이다.

Fig. 6은 난류영역에서 P_h/D 에 따른 상단 수평관과 하단 수평관의 Nu_D 값의 비를 나타낸 것이다. P_v/D 를 1.02, 1.1, 1.5, 2에서 P_h/D 를 0에서 2까지 변화시키며 실험하였다. 상단 수평관과 하단 수평관의 거리가 가까울 때, 즉 P_v/D 가 1.02일 경우 P_h/D 가 0일 때는 상단 수평관의 Nu_D^U 값이 하단 수평관의 Nu_D^L 값 보다 조금 낮았다. 층류영역과 비교하였을 때 예열영향으로 인한 Nu_D^U 값이 매우 낮지 않은 이유는 하단 수평관에서 발생하는 난류유동이 상단 수평관의 하단에 초기 속도를 제공함으로써 열전달 상승에 기여하기 때문이



(a) $P_h/D=0$ Upper, Lower



(b) $P_h/D=0.2$ Upper, Lower



(c) $P_h/D=0.5$ Upper, Lower



(d) $P_h/D=1$ Upper, Lower

Fig. 7 Plating pattern appeared on the two cylinders, top view, $P_v/D=1.5$ (Turbulent)

다.⁽¹²⁾ P_h/D 가 증가하면 상단 수평관의 열전달은 하단 수평관의 열전달과 비슷해졌다. 두 수평관의 거리가 멀 때, 즉 P_v/D 가 1.1, 1.5, 2일 경우, P_h/D 가 0일 때는 상단 수평관의 Nu_D^U 값이 하단 수평관의 Nu_D^L 값 보다 높다. 이는 하단 수평관에서 상승하는 난류유동의 속도영향과 와류로 인한 것으로 판단된다. 이에 층류영역에서의 Nu_D^U/Nu_D^L 값보다 높을 것으로 예상하였으나 비슷한 값을 보였다. 그 이유는 하단에서 상승하는 플룸의 방향과 상단 수평관에서 발생한 부력의 방향이 같으므로 오히려 열전달을 감소시키는 층류화(Laminarization)로 설명될 수 있다.^(7,23) 이는 다음 절에서 설명할 것이다.

층류영역에서는 P_h/D 가 1이상일 때 Nu_D^U/Nu_D^L 값이 1보다 높았으나 난류영역에서는 Nu_D^U/Nu_D^L 값이 1에 가까웠다. 이는 층류영역보다 난류영역에서 발생하는 플룸의 너비가 넓어서 상단 수평관이 넓은 플룸의 영향을 받기 때문이며 측면유동의 영향이 줄어든 것으로 판단된다.

4.2 국부열전달의 시각화

음극에 도금되는 구리의 양은 물질전달량에 비례하므로 상단 및 하단 수평관에 나타난 도금의 패턴을 확인함으로써 국부 열전달량을 확인할 수 있다. Fig. 7은 직경 0.067 m, Pr 수 2,014, P_v/D 가 1.5일 때, P_h/D 를 0, 0.2, 0.5, 1로 각각 변화했을 때, 상단 및 하단 수평관에 도금패턴을 위에서 본 사진이다. Fig. 7에서 상단에 진하게 도금된 것을 볼 수 있는데, 이는 천이와 난류 거동을 보여서 열전달이 증가한 영역이다. 표면으로부터 3차원 유동 박리(Three-dimensional flow separation)의 결과인 수평관의 축을 가로지르는 얇은 선(Thin line)을 관찰할 수 있다. 이는 Kitamura 등의 논문에서 설명된 것과 동일하다.⁽¹⁴⁾

Fig. 7(a)에서 하단 수평관에 비해 상단 수평관의 3차원 유동 박리에 의한 얇은 선이 짧으며 두 겹께 도금된 영역이 좁아진 것이 관찰된다. 이는 하단 수평관의 플룸이 상단 수평관 자연대류에 순방향 강제대류를 제공하여 혼합대류에서의 층류화가 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 층류화는 혼합자연대류에서 자연대류에 의해 상승하는 부력과 강제대류에서 상승하는 플룸의 방향이 동일할 때 난류생성이 감소하여 열전달이 감소하

는 현상이다.^(7,23)

Fig. 7(b)는 P_h/D 가 주어짐에 따라서 하단 플룸의 직접적인 영향을 많이 받는 쪽과 적게 받는 쪽의 비대칭이 관찰된다. 즉 하단 수평관에 가까운 쪽에서는 층류화 현상에 따라서 얇은 선이 반대쪽 보다 짧아진 것이 관찰된다. P_h/D 가 보다 증가하여 Fig. 7(c)는 이러한 비대칭이 보다 심화된 것이 관찰된다. 한편 P_h/D 가 매우 증가한 Fig. 7(d)에서는 플룸이 영향이 전반적으로 줄어들어서 양쪽의 비대칭성이 오히려 감소한 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(a-d)의 보조선은 상단 수평관에서 박리가 발생하는 지점이 하단 수평관과 위치 관계에 대해서 어떻게 변화하는지 보여주기 위해 평균적인 지점을 표시한 것이다. 두 수평관이 나란히 배열되었을 때($P_h/D=0$) 상단 수평관의 열전달이 높았다가 P_h/D 가 증가할수록 열전달이 감소했다. 이는 열전달 영향을 미치는 두 가지 요인으로 설명할 수 있다. 첫 번째는 하단 수평관에서 상승하는 플룸의 와류가 상단 수평관의 층류 경계층을 교란함으로써 유체의 속도와 운동량교환이 상승하여 상단 수평관의 측면에 도금이 더 잘되어 열전달이 증가한다. 두 번째는 층류화로 인한 열전달 감소이다.

5. 결론

두 개의 수평관이 엇갈리게 배열되었을 때 수직거리 또는 수평거리에 따른 자연대류 열전달의 변화를 실험적으로 연구하였다.

하단 수평관의 열전달은 상단 수평관의 영향을 받지 않으므로, 단일 수평관의 열전달과 같았다. 상단 수평관의 열전달은 하단 수평관과 P_v/D 그리고 P_h/D 에 따라 예열영향, 속도영향, 굴뚝효과, 측면유동효과에 의해 달라졌다.

P_v/D 가 작을 때, 상단 수평관의 열전달은 하단 수평관 플룸의 예열영향으로 인하여 단일 수평관의 열전달보다 낮았다. P_h/D 가 커지면 상단 수평관의 열전달은 증가하다가 하단 수평관의 열전달과 비슷해진다.

P_v/D 가 클 때, 속도영향으로 인해 상단 수평관의 열전달은 속도영향으로 인해 하단 수평관의 열전달 보다 매우 높았다. 이때, P_h/D 가 증가하면 상단 수평관의 열전달은 감소한다. P_h/D 가 1정도에서 상단 수평관이 하단 수평관 보다 높은 열전

달을 보인 것은 굴뚝효과와 이에 따른 측면 유동 효과에 기인한 것이라 판단된다.

본 연구에서는 열전달 실험을 수행하는 대신 전기도금계를 이용한 물질전달 실험으로 대체하였기 때문에 높은 Ra_D 수의 난류 영역까지 연구를 확대할 수 있었고 도금 패턴을 통하여 물질전달을 시각화 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부가 후원하고 한국연구재단이 지원한 미래형 원자로 연구개발 사업(SFR)의 지원에 의해 수행되었다.(Grant code 2011-0001865)

참고문헌

(1) Smith, A. F. J. and Wragg, A. A., 1974, "An Electrochemical Study of Mass Transfer in Free Convection at Vertical Arrays of Horizontal Cylinders," *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 4, No. 3, pp. 219~228.

(2) Marsters, G. F., 1972, "Arrays of Heated Horizontal Cylinders in Natural Convection," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, No. 5, pp. 921~933.

(3) Sparrow, E. M. and Boessneck, D. S., 1983, "Effect of Transverse Misalignment on Natural Convection From a Pair of Parallel, Vertically Stacked, Horizontal Cylinders," *J. Heat Transfer*, Vol. 105, No. 2, pp. 241~247

(4) Yuncu, H. and Batta, A., 1994, "Effect of Vertical Separation Distance on Laminar Natural Convection Heat Transfer over Two Vertically Spaced Equitemperature Horizontal Cylinders," *Applied Scientific Research*, Vol. 52, pp. 259~277.

(5) Corcione, M., 2005, "Correlating Equations for Free Convection Heat Transfer from Horizontal Isothermal Cylinders Set in a Vertical Array," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 17, pp. 3660~3673.

(6) Sparrow, E. M. and Niethammer, J. E., 1981, "Effect of Vertical Separation Distance and Cylinder-to-Cylinder Temperature Imbalance on

Natural Convection for a Pair of Horizontal Cylinders," *Trans. of the ASME*, Vol. 103, pp. 638~644.

(7) Chae, M. S. and Chung, B. J., 2011, "The Effect of Pitch-to-Diameter on Natural Convection Heat Transfer of Two Vertically Aligned Horizontal Cylinders," *Chemical Engineering Science*, Article in Press.

(8) Sadegh, M. and Asheghi, M., 1994, "Free Convection Heat Transfer From Arrays of Vertically Separated Horizontal Cylinders at Low Rayleigh Numbers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 1, pp. 103~109.

(9) Lieberman, J. and Gebhart, B., 1969, "Interactions in Natural Convection from an Array of Heated Elements, Experimental," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 12, No. 11, pp. 1385~1396.

(10) Corcione, M., Cianfrini, C., Habib, E. and Giudice, G. M. L., 2008, "Correlating Equations for Laminar Free Convection From Misaligned Horizontal Cylinders in Interacting Flow Fields," *J. Heat Transfer*, Vol. 130, No. 5

(11) Toshiyuki, M., Koji, S. and Kenzo, K., 2003, "Fluid Flow and Heat Transfer of Natural Convection around Large Horizontal Cylinders: Experiments with Air," *Heat Transfer-Asian Research*, Vol. 32, No. 4, pp. 293~305.

(12) Ko, S. H., Moon, K. W. and Chung, B. J., 2006, "Applications of Electroplating Method for Heat Transfer Studies Using Analogy Concept," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 38, pp. 251~258.

(13) Heo, J. H. and Chung B. J., 2011, "Visualization of Natural Convection Heat Transfer on a Horizontal Cylinder using the Copper Electroplating System," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 35, No. 1, pp.43~51.

(14) Kitamura, K., Kami-iwa, F. and Misumi, T., 1999, "Heat Transfer and Fluid Flow of Natural Convection Around Large Horizontal Cylinders," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, No. 22 pp. 4093~4106.

(15) McAdams, W. H., 1954, *Heat Transmission*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 175~177.

- (16) Morgan, V. T., 1975, "The Overall Convective Heat Transfer from Smooth Circular Cylinders, in: T. F. Irvine Jr, J. P. Hartnett (Eds.)," *Advance in Heat Transfer, Academic Press*, New York, Vol. 11, pp. 199~210.
- (17) Churchill, S. W. and Chu, H. S., 1974, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, No. 9, pp. 1049~1053.
- (18) Merk, H. L. and Prins, J. A., 1954, "Thermal Convection in Laminar Boundary layers I, II, III," *Appl. Sci. Res.*, Vol. 4, No. 11~24, pp. 195~206.
- (19) Levich, V. G., 1962, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- (20) Selman, J. R. and Tobias, C. W., 1978, "Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique," *Advances in Chemical Engineering*, ELSEVIER, Vol. 10, pp. 211~318.
- (21) 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," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 34, No. 1, pp. 1~8.
- (22) Fenech, E. J. and Tobias, C. W., 1960, "Mass Transfer by Free Convection At Horizontal Electrodes," *Electrochemical. Acta*, Vol. 2, No. 4, pp. 311~325.
- (23) Kim, W. S., Talbot, C., Chung, B. J. and Jackson, J. D., 2002, "Variable Property, Mixed Convection, Heat Transfer to Air Flowing in a Vertical Passage of Annular Cross Section : Part 1," *ChERD in UK (Chemical Engineering Research and Design)*, Vol. 80, No. 3, pp. 239~245.