

## 전기도금계를 이용한 수평관 외부 자연대류의 시각화<sup>§</sup>

허정환\* · 정범진\*\*

\* 제주대학교 에너지공학과

### Visualization of Natural Convection Heat Transfer on Horizontal Cylinder Using the Copper Electroplating System

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

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

(Received May 19, 2010 ; Revised September 16, 2010 ; Accepted November 23, 2010)

**Key Words:** Analogy(유사성), Electroplating System(전기도금계), Limiting Current(한계전류), Natural Convection(자연대류), Visualization(시각화)

**초록:** 수평관 외부에서 발생하는 자연대류 열전달 현상을 실험적으로 연구하였다. 연구의 목적은 구리 도금계를 채택한 유사성실험방법론이 적용가능한지 확인하는 것과 수평관의 지름과 각도에 따라 달라지는 국부열전달을 시각화하는 것이었다. 구리의 전기도금계를 사용하면 양극에서 생성된 구리이온은 대류와 확산을 통하여 음극으로 이동되어 환원되는데 이는 열전달을 모사하게 된다. 구리와 색깔이 다른 알루미늄을 음극으로 채택함으로써 각도에 따라 환원되어 석출된 구리의 양을 시각화 할 수 있었다. 수평관의 직경은 0.01m에서 0.15m이었고 이는  $Ra_D = 1.73 \times 10^7 \sim 5.69 \times 10^{11}$ 에 해당한다. 실험결과는 기존에 알려진 열전달 상관식과 일치하였다. 알루미늄 음극에 도금된 구리의 패턴은 Kitamura에 의해 액체 결정온도측정법으로 시각화한 결과와 매우 잘 일치 하였다.

**Abstract:** Natural convection heat transfer phenomena on a horizontal cylinder have been studied experimentally in order to investigate the applicability of analogy experimental methodology using a copper electroplating system and to visualize the local heat transfer rates depending on the angular position and the diameter of the horizontal cylinder. In the copper electroplating system, the copper ion produced at the anode moves by convection and diffusion to the cathode and reduces at the cathode, representing the heat transfer. By using aluminum cathode with a distinguishable color, the amount of copper plated could visualize the amount of heat transferred depending on the angular position of the cylinder. The diameter of the cylinder is varied from 0.01m to 0.15m, which correspond to Rayleigh numbers in the range of  $1.73 \times 10^7$  to  $5.69 \times 10^{11}$ . The test results are in good agreement with existing heat transfer correlations.

- 기호설명 -

$A_{Cu}$  : 구리의 원자량 (63.546 g/mol)  
 $C_b$  : 모액농도(kmole/m<sup>3</sup>)  
 $C_e$  : 전자의 전하량 ( $1.6 \times 10^{-19}C$ )  
 $D$  : 수평관의 직경 (m)  
 $D_m$  : 확산계수 (m<sup>2</sup>/s)  
 $F$  : 패러데이 상수 (96,485 Coulomb/mole)  
 $g$  : 중력가속도 (9.8 m/s<sup>2</sup>)

$q_w$  : 벽면의 열속 (W/m<sup>2</sup>)  
 $h_h$  : 대류열전달계수 (W/m<sup>2</sup>·K)  
 $h_m$  : 물질전달계수 (m/s)  
 $I$  : 측정전류 (mA)  
 $I_{lim}$  : 한계전류밀도 (A/m<sup>2</sup>)  
 $k$  : 전도계수 (W/m·K)  
 $L$  : 음극의 너비 (m)  
 $N_A$  : 아보가드로 수 ( $6.022 \times 10^{23}$  #/mol)  
 $n$  : 이온의 원자가

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 열공학부문 춘계 학술대회(2010. 5. 13.-14., 전북대) 발표논문임

† Corresponding Author, bjchung@jejunu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

#### 1. 서론

수평관 외부에서 발생하는 자연대류 열전달 문

제는 지난 50년간 많은 학자들에 의해 수치적, 실험적으로 연구되어 왔다. 이러한 열전달 문제는 태양열 집열기와 열교환기 등 여러 공학적인 문제에 적용된다.<sup>(1)</sup> 수평관 외부의 층류 자연대류는 가열되는 관으로부터 위로 상승하는 플룸(Plume)이 형성되고, 국부 열전달(Local heat transfer)은 관의 하단에서부터 시작하여 상단으로 종결되는 경계층의 발달에 의해 영향을 받는다. 국부 열전달은 관의 하단에서 최대가 되고 관의 상단에 가까워질수록 단조롭게 감소하며 0에 가까워진다. 이러한 열전달의 감소는 난류로의 천이가 일어날 수 있는 충분히 큰  $Ra_D$  수에서는 달리 나타난다.<sup>(2)</sup> 수평관 외부 자연대류에서의 층류와 난류의 유동현상은 큰 차이를 보이며, 이러한 차이는 층류에서 난류로의 천이지점을 따라 나타나기 시작한다.

수평관 외부 층류 자연대류 문제는 많은 학자들에 의해 연구되었다. Mahmoudi와 Adamiak<sup>(3)</sup>는 여러 학자들의 수치적 또는 실험적 연구를 조사하여 층류에서의 수평관 외부 자연대류에서의 국부 열전달의 변화를 제시하였고, Kuehn과 Goldstein,<sup>(4)</sup> Yamamoto 등<sup>(5)</sup>은 수치해석 방법으로  $Ra_D$  수 1 ~  $10^6$ 까지의 층류에서의 수평관 외부 자연대류 열전달을 연구를 수행하였다. 반면 난류의 문제는 실험장치의 한계로 인하여 많은 연구가 이루어지지 않았다.<sup>(6)</sup> 이러한 실험 조건에도 불구하고 Farouk와 Guceri,<sup>(7)</sup> Hattori<sup>(8)</sup> 등의 학자들에 의해  $Ra_D$  수  $10^{10}$ 까지의 영역에서 수치적 실험적 난류연구가 진행되었다. 이러한 몇몇 학자들의 연구에도 불구하고 수평관 외부 난류 자연대류 문제는 여전히 해결되지 않았다. 이러한 난류문제에서 주목할 부분은  $Ra_D$  수가 증가하면서 발생하는 층류에서 난류로의 천이부분이다. 수평관 외부 자연대류의 천이현상은 관에서 발생하는 박리현상(Separation)과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려졌다.<sup>(6)</sup>

본 연구의 목적은 전기도금계를 이용하여, 난류에서의 수평관 외부 자연대류 현상을 모사할 수 있는지 확인하고 이때 도금(Plating)현상을 이용하여 박리지점을 시각화(Visualization)하는 실험

기법을 제시하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 수평관 외부의 자연대류

수평관 외부 자연대류에서의 층류와 난류의 유동현상은 큰 차이를 보이며, 이러한 차이는 층류에서 난류로의 천이지점을 따라 나타나기 시작한다. Fig. 1은 수평관 외부 자연대류의 유체 흐름을 나타낸 그림이다.  $\theta$ 는 관의 편각(Angular position)으로,  $\theta$ 가  $0^\circ$ 의 지점은 관의 하단이고  $\theta$ 가  $180^\circ$ 인 지점은 관의 상단이다. 관의 직경( $D$ )이 작을 경우 관의 하단에서 시작된 부력에 의한 유동은 표면의 상류로 흐를 때까지 계속 층류이다. 층류에서의 국부 열전달량은  $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 지점에서 시작하여  $\theta$ 가  $180^\circ$ 인 지점에서 종결되는 경계층의 발달에 의해 영향을 받는다. Merk와 Prins<sup>(2)</sup>에 의하면  $\theta$ 에 따른 열전달 분포는  $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 지점에서 최대가 되고  $\theta$ 가  $180^\circ$ 에 가까워질수록 단조 감소하며 결과적으로 열전달량은 0에 가까워진다. 이러한 국부 열전달의 감소는 경계층 내에서 난류로의 천이가 일어날 수 있는 충분히 큰  $Ra_D$  수에서는 옳지 않다.  $D$ 가 점점 커지면서 관의 상단의 유동은 점점 불안정해지고 결국 천이부분을 지나 난류가 발생한다. 난류에서의 국부 열전달은  $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 지점에서 관의 상단으로 갈수록 점점 감소하다가 천이지점부터 발생하는 와류로 인하여 난류흐름이 되면서 열전달은 다시 증가하기 시작한다. 이러한 천이지점은 학자들마다 차이를 보인다. McAdams<sup>(9)</sup>는 난류로의 천이지점을  $Ra_D$  수  $10^9$ 으로 제시한 반면, Morgan<sup>(10)</sup>은  $Ra_D$  수

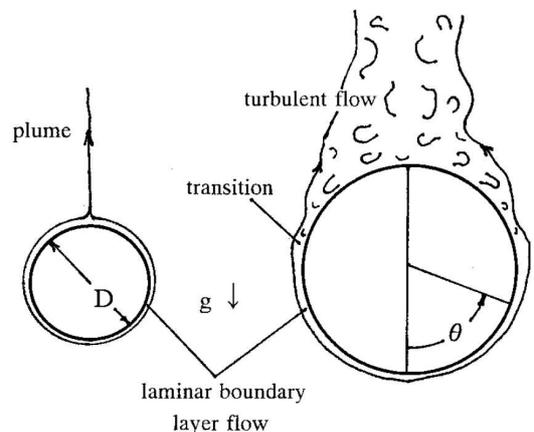
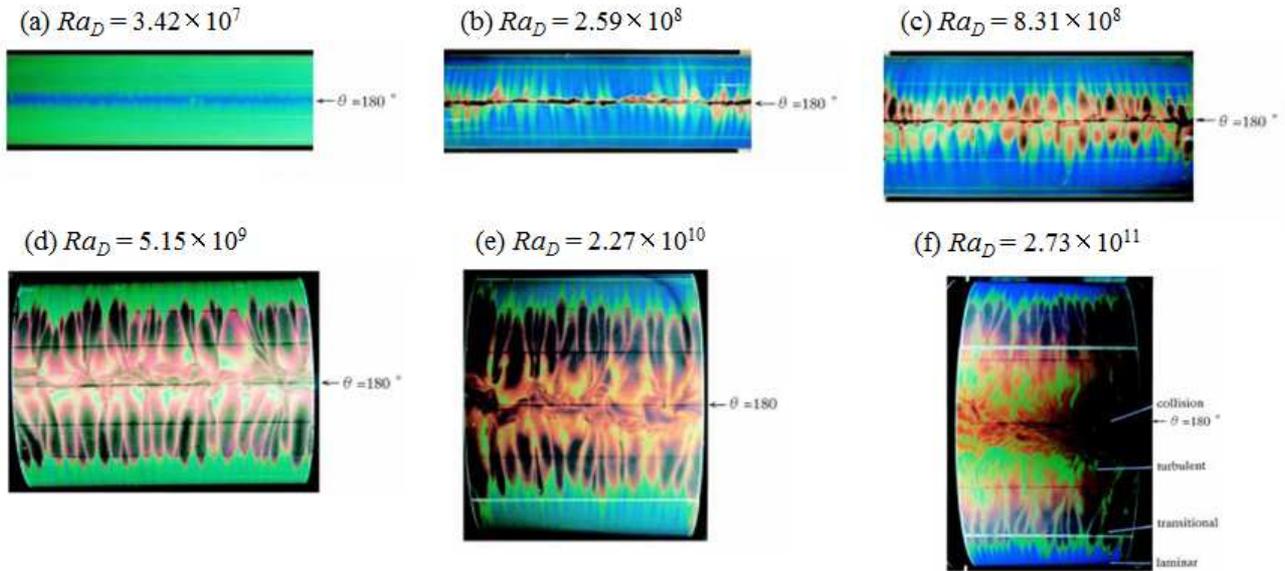


Fig. 1 Natural convection around cylinder<sup>(6)</sup>

**Table 1** Natural convection heat transfer correlations on a cylinder

Author	Correlation	Range
McAdams <sup>(9)</sup>	$Nu_D = 0.53 Ra_D^{1/4}$ (1)	Lamina, $10^4 < Ra_D < 10^9$
	$Nu_D = 0.13 Ra_D^{1/3}$ (2)	Turbulent, $10^9 < Ra_D < 10^{12}$
Morgan <sup>(10)</sup>	$Nu_D = 0.480 Ra_D^{0.280}$ (3)	Lamina, $10^4 < Ra_D < 10^7$
	$Nu_D = 0.125 Ra_D^{0.333}$ (4)	Turbulent, $10^7 < Ra_D < 10^{12}$
Merk and Prins <sup>(2)</sup>	$Nu_D = 0.523 Ra_D^{1/4}$ (5)	$Pr \rightarrow \infty$
Churchill and Chu <sup>(11)</sup>	$Nu_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (6)	$Ra_D \leq 10^{12}$



**Fig. 2** Visualized surface temperatures of cylinders<sup>(6)</sup>

$10^7$ 으로 제시하였다.

수평관 외부 자연대류에 대한 실험적·수치적 상관식은 McAdams,<sup>(9)</sup> Morgan,<sup>(10)</sup> 그리고 Churchill과 Chu<sup>(11)</sup> 등에 의해 다음은 형태로 같이 주어진다. 여기서  $C$ 와  $x$ 은 연구 범위 및 조건에 따라 달라진다.  $Ra_D$  수와  $Nu_D$  수는  $D$ 에 기초한다.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = C Ra_D^x \quad (1)$$

$C$ 와  $x$ 는 여러 열전달 데이터들에 의해 결정된다.  $C$ 의 경우 실험조건 및 방법에 따라 차이를 보이며,  $x$ 의 경우 일반적으로 층류의 경우 1/4를 사용하고 난류의 경우 1/3을 사용한다.<sup>(6)</sup> Morgan<sup>(10)</sup>은 기존의 열전달상관식들을 조사하여

$10^{10} < Ra_D < 10^{12}$ 에서 층류와 난류의 열전달상관식을 제시하였고, McAdams<sup>(9)</sup>는  $10^4 < Ra_D < 10^{12}$ 에서의 층류와 난류 열전달상관식을 제시하였다. Merk와 Prins<sup>(2)</sup>는 다양한  $Pr$  수에 따라 열전달상관식을 제시하였고, Churchill과 Chu<sup>(11)</sup>는 넓은 범위에서의  $Ra_D$  수에 대하여 상관식을 제시하였다(Table 1). Kitamura<sup>(6)</sup>에 의하면, 이러한 천이 기준은  $Ra_D$  수가 증가하면서 발생하는 박리현상과 관련된다. 천이기준을 결정하는 것은 박리가 발생하기 시작하는 지점으로 층류흐름에서 박리는  $\theta$ 가  $180^\circ$ 일 때 발생한다.  $Ra_D$  수가 점점 증가하여 난류흐름이 되면서 박리가 발생하기 시작하는  $\theta$ 의 지점은 점점 작아지며 결국  $\theta$ 가  $120^\circ$ 의 영역까지 이동하게 된다. 즉, 천이와 난류영역은

수평관의 상단에서만 발생하며 그 영역의 크기는 최대 총 면적의 1/3을 넘지 않는다.<sup>(6)</sup>

Kitamura<sup>(6)</sup>는 물을 이용하여 난류에서의 수평관 외부 자연대류 시각화 실험을 수행하였다. 시각화를 위하여 염료와 액체결정 온도측정법(Liquid crystal thermometry)이 이용되었다. Fig. 2는 Kitamura<sup>(6)</sup>가 제시한 수평관 주변의 온도를 시각화한 그림으로 수평관의 상단부분을 나타내고 있다. 그림에서 파랑색이 가장 높은 온도를, 검빨간색 또는 갈색이 가장 낮은 온도를, 그리고 녹색과 노란색은 그 중간의 온도를 나타낸다. 즉, 열전달율은 검빨간색 또는 갈색이 가장 높으며 파랑색이 가장 낮다. 그림에서 관찰되는 수평관을 가로지르는 얇은 선의 무늬는 박리(Separation)를 나타낸다. (a)의 경우는 층류흐름으로  $\theta$ 가 180°인 지점이 가장 낮은 열전달량을 관찰 되지만  $Ra_D$  수가 증가할수록 난류흐름이 되면서 박리의 시작 지점이 이동하는 현상이 관찰된다.

2.2 물질전달 방법

열전달과 물질전달시스템은 초기 및 경계조건이 같으면 서로 유사(Analogous)하기 때문에 열전달 문제를 물질전달 문제로 또 그 역으로 변환하여 취급할 수 있다. 이러한 물질전달계와 열전달계의 무차원수 관계는 Table 2에 나타내었다.<sup>(12)</sup>

본 연구에서는 화학성 안정성이 높고 물성치가 잘 알려져 있으며 비교적 높은 용해도를 갖는 구리도금계를 자연대류 열전달 모사에 사용하였다. 황산-황산구리(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-CuSO<sub>4</sub>) 수용액에 구리 전극을 사용하여 전압을 인가하면 양극에서 구리이온이 생성되어 음극으로 이동하고 음극 표면에서 전자를 얻어 도금(석출)된다. 음극근처의 유체는 구리의 석출로 인하여 구리이온의 농도가 낮아지

게 되므로 주변유체보다 밀도가 낮아지며 부력을 모사할 수 있게 된다. 따라서 자연대류를 모사할 때, 음극이 가열벽면(Heated wall)이 되고 전달된 구리이온의 양 즉, 전류는 열전달량이 된다.<sup>(13)</sup>

전기도금계는 Levich<sup>(14)</sup>에 의해 정립되었고 Selman과 Tobias<sup>(15)</sup>에 의해 체계적으로 정리되어 현재까지 물질전달에 널리 이용된다. Chung,<sup>(13)</sup> Kang<sup>(16)</sup>과, Ko<sup>(17)</sup>는 전기도금계를 이용하여 열전달 실험을 모사할 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 유사성을 이용한 전기도금실험기법에 대한 보다 자세한 설명은 Chung<sup>(13)</sup>의 논문에 제시되어 있다.

열전달계에서의 열전달계수는 벽면 온도와 평균 유체온도의 함수로 주어지며 물질전달계에서의 물질전달계수는 벽면 농도와 평균 유체농도의 함수로 주어진다. 한편 전기도금계를 이용하여 물질전달계수를 구할 때에는 음극표면에서의 구리이온의 농도를 알기 어렵다. 이와 같은 문제는 한계전류기법의 사용으로 인해 쉽게 해결될 수 있다.<sup>(13)</sup> 전기도금계에서 전극 사이에 인가된 전위차를 증가시키면 측정된 전류는 빠르게 증가하다가 더 이상 증가하지 않은 플레이트우(Plateau) 영역을 한계전류(Limiting current)라 한다(Fig. 3). 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이온 농도를 0으로 취급할 수 있기 때문에 식 (7)에서와 같이 물질전달계수(Mass transfer coefficient),  $h_m$ 은 모액 농도,  $C_b$ 와 한계전류 밀도(Limiting current density),  $I_{lim}$ 만으로 결정된다. 음극표면에서 구리이온 농도가 0이므로 열전달 문제의 등온(Constant temperature) 조건에 해당한다. 또한 평균유체와의 온도차이는  $Ra_D$ 수 계산에 포함되므로 별도로 고려하지 않을 수 있다.

Table 2 Dimensionless groups for analogy systems

Heat transfer		Mass transfer	
Nusselt number	$\frac{h_h D}{k}$	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	$\frac{gD^3 \Delta\rho}{D_m\nu \rho}$

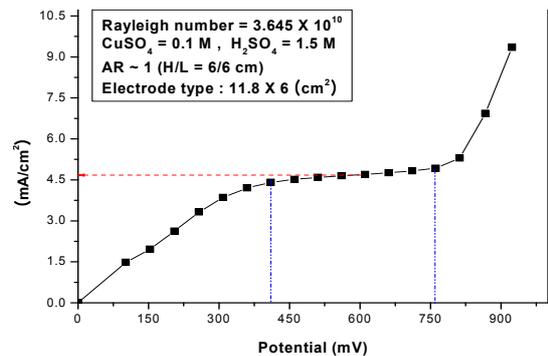


Fig. 3 Typical limiting current curve

$$h_m = \frac{(1 - t_n) I_{lim}}{n F C_b} \quad (7)$$

2.3 전기도금을 이용한 시각화 방법

전기도금계의 음극에서 구리가 도금되는 현상은 열전달계에서 열을 전달시키는 현상과 유사하며, 전기도금계에서 도금이 많이 되었다는 것은 열전달계에서는 열이 많이 전달되었다는 것으로 해석된다. 즉, 음극으로 도금된 양은 열전달량으로 생각할 수 있으며, 이러한 도금의 패턴을 통해 국부 열전달량의 패턴을 알 수 있다.

열전달계에서의 온도분포의 시각화를 위해서는 액체결정 온도측정법등의 고가의 장치가 필요한 반면, 전기도금계에서의 도금현상은 자연히 일어나는 현상으로 시각화를 위한 특별한 장치가 필요 없으며, 육안으로 도금패턴을 쉽게 관찰할 수 있다. 또한 액체결정 온도측정법과 달리 전류측정을 통하여 물질전달계수를 동시에 측정할 수 있다. 전기도금계에서 환원이 일어나는 음극으로 사용되는 물질은 전도율이 높은 물질이 사용되어야 함이 잘 알려져 있다. 한편, 음극은 구리이온의 환원이 이루어지므로 구리 이외의 다른 금속을 사용해도 무방할 것이다. 따라서 본 연구에서는 도금의 패턴의 시각화를 극대화하기 위하여 전도율이 높으며 도금될 구리와 구분 쉬운 알루미늄을 음극으로 대체하였다.

구리의 도금은 시간에 따른 전류의 값과 비례한다. 즉, 시간에 따른 전류의 변화량을 안다면, 구리의 석출된 두께를 계산할 수 있다. 식 (8)은 음극에 도금되는 금속의 두께( $H_p$ )를 계산하는 식

이다. 식 (8)의  $I$ 는 측정된 전류( $mA$ ),  $t$ 는 시간( $s$ ),  $A_{Cu}$ 는 구리의 원자량( $63.546 \text{ amu}$ ),  $C_e$ 는 전자의 전하량( $1.6 \times 10^{-19} C$ ),  $N_A$ 는 아보가드로 수( $6.022 \times 10^{23}$ ),  $\rho_{Cu}$ 는 구리의 밀도( $8.96 \times 10^6 \text{ g/cm}^3$ ),  $L$ 은 음극의 너비( $m$ ), 그리고  $D$ 는 음극의 직경( $m$ )을 각각 나타낸다.

$$H_p = \frac{I \times t \times A_{Cu}}{2\pi \times C_e \times N_A \times \rho_{Cu} \times L \times D} \quad (8)$$

Fig. 4는  $D$ 가  $0.034m$ 일 때,  $500mV$ 의 전압을 인가하면서 시간에 따른 전류의 변화량을 나타낸 그래프이다. 전기도금계에서 전류가 측정되는 현상은 양극에서 발생하는 구리이온의 이동 때문이다. 전기도금계에 전압을 인가하면 A부분과 같은 첨두치(Peak)가 발생하고 시간이 흐름에 따라 B부분과 같이 측정전류가 안정되는 현상을 보인다. A부분에서 측정된 전류는 대류에 의해 구리이온이 이동된 결과가 아니라, 음극 주변의 구리이온이 이동하여 발생한 전류이다. B부분은 음극 주변의 구리이온이 모두 흡수된 후 순수한 대류에 의하여 구리이온의 이동으로 발생한 전류이다. 즉, 대류에 의해 도금된 구리의 패턴을 확인하기 위해서는 A부분에서의 도금두께는 최소여야 하며, B부분에서의 도금이 많이 이루어지는 것이 바람직하다. 한편, B부분에 의한 도금이 두꺼울 경우 음극표면에 모두 구리가 도금되어 시각적 관찰이 어려워진다. 그러므로 도금패턴의 시각화를 위해서는 적정 도금두께를 얻기 위하여 측정시간을 최적화 하여야 한다.

3. 실험방법

설계된 실험 장치와 시스템 회로는 Fig. 5에 나타내었다. 실험 장치는 아크릴로 제작된 수조이며 수조의 중앙에 음극 수평관을 배열 한다. 양극의 방향성을 무시할 수 있게 양극은 음극을 감싸는 형태로 위치한다. 전원공급장치는 VüPOWER사의 DC Power supply-18B10을 이용하였고, 전압과 전류측정을 위하여 Fluke-45사의 Dual Display Multimeter를 사용하였다. 음극은 같은 크기의 구리와 알루미늄을 이용하여 각각의 한계전류와 도금된 구리의 두께 및 시각화를 비교하였다.

Table 3은 실험범위이다.  $Ra_D$  수의 범위는  $1.73 \times 10^7$ 부터  $5.69 \times 10^{11}$ 까지이다.  $Ra_D$  수의 변화를

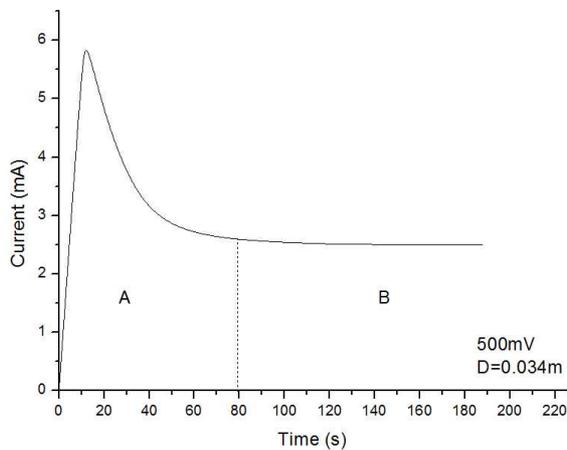


Fig. 4 Current according to time. (at increase the voltage of  $500mV$  and  $D= 0.034m$ )

위해 수평관의 길이는 0.05m로 하였고 이 길이는 열전달에 영향이 없는 길이로 한 것이다. 수평관의 지름(D)은 0.01m~0.15m까지 변화시켰고, CuSO<sub>4</sub>를 0.01M~0.1M까지 변화시켰다. 이는 Table 3에 나타낸 바와 같이 Ra<sub>D</sub> 수의 변화를 나타낸다.

4. 실험결과

Fig. 6는 물질전달의 실험결과를 수평관 외부 자연대류 상관식과 비교한 Ra<sub>D</sub> 수에 따른 Nu<sub>D</sub> 수의 그래프이다. 각 선은 Table 1에 제시된 수평관 외부 자연대류 상관식을 나타내며 흰점은 Kitamura<sup>(6)</sup>의 층류부터 난류까지의 실험데이터, 검은 점은 Table 3에 제시한 Test matrix에 따라 실험한 실험데이터를 나타낸다. 실험결과, Ra<sub>D</sub> 수 10<sup>9</sup>까지는 Churchill와 Chu의 상관식을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않고 일치함을 보였다. 그러나 Ra<sub>D</sub> 수 10<sup>9</sup>이상부터는 대부분의 상관식들과 약간의 차이를 보였고 Kitamura<sup>(6)</sup>의 실험결과와 거의 일치하였다.

Fig. 7은 실험에서 관찰된 음극에서의 구리 도금 패턴을 보여주는 그림이다. 도금패턴은 앞서 제시된 Fig. 2에서의 Kitamura<sup>(6)</sup>의 수평관 외부 자연대류 온도분포의 시각화와 매우 유사하였다. 모든 도금패턴에서는 박리(Separation)로 생각되는

Table 3 Test matrix

D (m)	CuSO <sub>4</sub>	Pr	Ra <sub>D</sub>
0.01	0.01 M	1956	1.73×10 <sup>7</sup>
0.034			6.79×10 <sup>8</sup>
0.06			3.73×10 <sup>9</sup>
0.067			5.20×10 <sup>9</sup>
0.08			8.84×10 <sup>9</sup>
0.1			1.73×10 <sup>10</sup>
0.15	0.1 M	2094	5.83×10 <sup>10</sup>
0.01			1.69×10 <sup>8</sup>
0.034			6.63×10 <sup>9</sup>
0.06			3.64×10 <sup>10</sup>
0.067			5.07×10 <sup>10</sup>
0.08			8.64×10 <sup>10</sup>
0.1	1.69×10 <sup>11</sup>		
0.15	5.69×10 <sup>11</sup>		

Fixed L=0.05m, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1.5M

수평관을 가로지르는 얇은 선들이 관찰되었다. 단, (a)의 경우 θ가 180°지점에서의 부분적인 박리가 관찰된다. (a)의 Ra<sub>D</sub> 수는 1.69×10<sup>8</sup>이다.

McAdams<sup>(9)</sup>가 제시한 난류로의 천이지점인 Ra<sub>D</sub> 수 10<sup>9</sup>으로 (a)의 경우 유동이 층류이기 때문에 이와 같은 결과가 관찰됐다고 생각된다.

Fig. 8는 Ra<sub>D</sub><sup>\*</sup> 수에 따른 박리의 시작 지점을 그래프로 나타낸 것이다. Ra<sub>D</sub><sup>\*</sup> 수는 수정된 Ra<sub>D</sub> 수로 Ra<sub>D</sub><sup>\*</sup>=Ra<sub>D</sub>Nu<sub>D</sub>이다. 그래프의 흰 점은 Kitamura가 제시한 데이터이며, 검은 점은 본 실험

Table 4 Plating thicknesses

Time (min)	Current (mA)	Diameter, D (m)	Cathode length, L (m)	Plating thickness (μm)
10	10	0.01	0.05	8.43
12	3	0.034	0.05	0.89
25	4	0.06	0.05	1.41
15	7	0.08	0.05	1.11
30	7	0.10	0.05	1.77
45	10	0.15	0.05	2.53

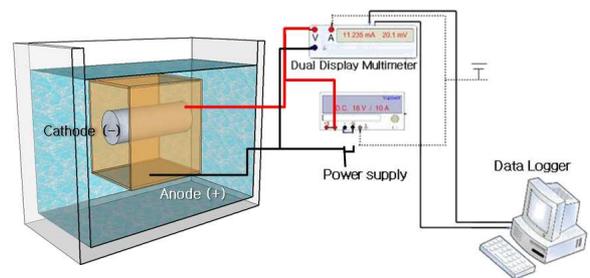


Fig. 5 Test facility and arrangements of cathode

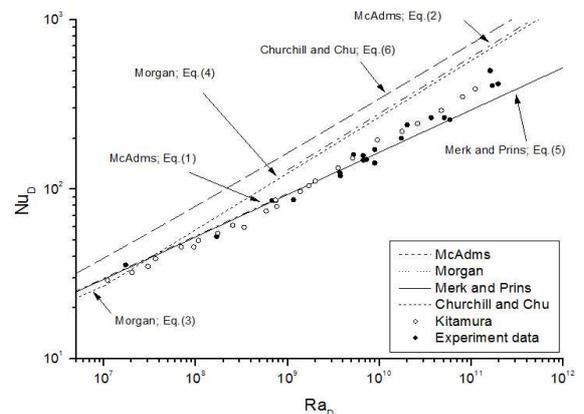


Fig. 6 Comparison of the results with the existing correlations

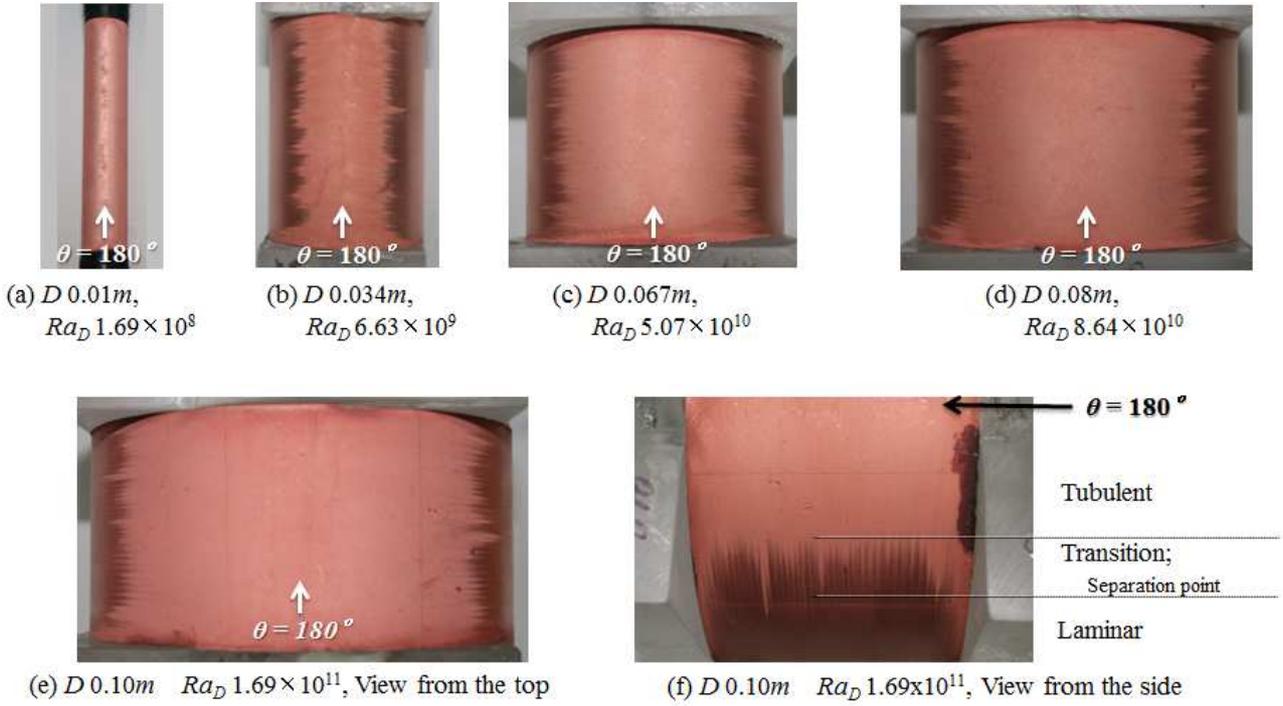


Fig. 8 Visualized results

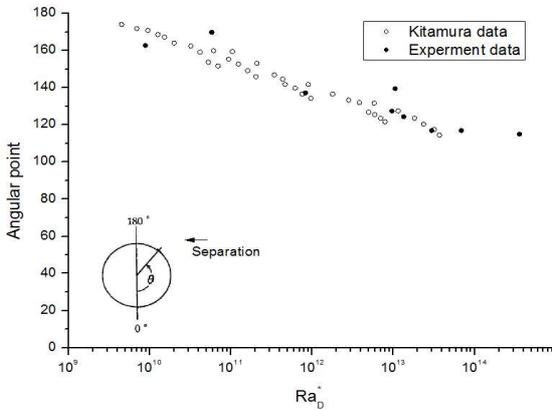


Fig. 7 Separation angles

험의 데이터이다. 실험결과 Kitamura의 실험과 거의 흡사한 결과를 보였다.  $Ra_D^*$  수가 커질수록 박리가 시작되는  $\theta$ 는 점점 줄어들다가 결국에는  $\theta$ 가  $120^\circ$  지점에서 더 이상 줄어들지 않고 일정해짐이 보인다. 이는 문헌에서 제시된 천이와 난류 지점이 전체 면적에 1/3을 넘지 않는다는 것과 상응한다. 유체를 공기로 사용한 Kitamura의 실험의 경우  $Ra_D=10^{14}$  이상의 영역에서는 실험을 수행하지 않았는데 이는 공기의 경우 높은  $Ra_D$ 를 얻기 위하여 실린더의 직경이 매우 커져야 하기 때문이다.

Table 4는  $CuSO_4$  0.1M일 때 실험을 수행하였을 때 음극에서 도금된 구리의 두께를 계산한 결과이다. 도금 두께의 최적화 하기 위해 욕안으로 도금 패턴을 경험적으로 확인하며 수행하였다. 실험에서 확인한 결과 욕안으로 도금패턴을 확인하기 위한 최소 도금 두께는 약  $1\mu m$ 였고 그 이하가 되었을 경우, 도금패턴이 희미하여 욕안으로 확인이 불가하였다.

$CuSO_4$  0.01M의 경우, 전류가 안정화 되는 시간이 길어 음극 주변의 구리이온에 의한 도금이 길어진다. 이러한 결과로 음극 전체에 구리가 도금이 되어 도금패턴은 희미해진다. 그러나 시각적 관찰은 가능하였고, 이 경우는 꼭 음극을 알루미늄으로 사용하지 않고 구리로 사용하더라도 무관하였다.

### 5. 결론

전기도금계를 이용하여 수평관에서 발생하는 자연대류 열전달을 모사할 때, 기존의 열전달 상관식을 구현할 수 있는지 확인하였고 알루미늄 음극을 채택하고 구리도금의 두께를 관찰함으로써 열전달량의 시각화를 연구하였다.  $Ra_D$  수를  $1.73 \times 10^7$  부터  $5.69 \times 10^{11}$  까지 변화시키며,  $Nu_D$  수

를 측정하였다.

실험결과, 측정된  $Nu_D$  수는 기존 상관식의 예측과 거의 일치하였다. 특히, Kitamura<sup>(6)</sup>의 상관식과 매우 일치하였다. 이를 통해 물질전달 실험이 수평관 자연대류 열전달 문제를 모사하는데 사용될 수 있음을 확인하였다.

수평관 난류 외부 자연대류 흐름에 관한 연구는 대규모의 실험장치를 요구함으로 인하여 현재까지 많은 연구가 수행되지 못하였다. 그러나 물질전달을 이용하여 수평관 자연대류를 모사한다면, 쉽게 난류모델을 모사할 수 있을 것이다.

전기도금 실험에서 관찰된 도금패턴은 Kitamura<sup>(6)</sup>가 제시한 열전달 시각화 결과와 매우 일치하였고, 시각화를 위한 추가 장비를 이용하지 않고 도금패턴을 통해 박리현상(Separation)의 시각적 변화를 쉽게 관찰할 수 있었다. 전기도금계를 이용한 시각화 방법은 고가의 장비를 이용하지 않고 간단하게 관찰할 수 있으며 매우 정밀한 물질전달량 측정과 동시에 수행될 수 있는 장점이 확인되었다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부가 후원하고 한국연구재단이 지원한 미래형 원자로 연구개발 사업(SFR)에 의해 수행되었다(Grant code 2010-0018309).

## 참고문헌

- (1) Reymond, O., Murray, D. B. and O'Donovan, T. S., 2008, "Natural Convection Heat Transfer from Two Horizontal Cylinders," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 32, Iss. 8, pp. 1702~1709
- (2) Merk, H. L. and Prins, j. A., 1953-54, "Thermal Convection in Laminar Boundary Layers I, II, and III," *Appl. sci. res.*, A4, 11~24, pp. 195~206, 207~221
- (3) Mahmoudi, S. R. and Adamiak, K., 2010, "The Effect of Corona Discharge on Free Convection Heat Transfer from a Horizontal Cylinder," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, Iss. 5, pp. 528~537
- (4) Kuehn, T.H. and Goldstein, R.J., 1980, "Numerical Solution to the Navier-Stokes Equations for Laminar Natural Convection About a Horizontal Isothermal Circular Cylinder," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 971~979.
- (5) Yamamoto, S., Niiyama, D. and Shin, B. R., 2004, "A Numerical Method For Natural Convection and Heat Conduction Around and in a Horizontal Circular Pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, Iss. 26, pp. 5781~5792
- (6) Kitamura, K., Kami-iwa, F. and Misumi, T., 1999, "Heat Transfer and Fluid Flow of Natural Convection Around Large Horizontal Cylinders," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42 Iss. 22, pp. 4093~4106
- (7) Farouk, B. and Guceri, S.I., 1982, "Natural Convection from a Horizontal Cylinder-Turbulent Regime," *Trans. ASME, J. Heat Transfer* Vol. 104 pp. 228~235.
- (8) Hattori, Y., 1996, "Turbulent Natural Convection Boundary Layer Around Horizontal Cylinder," *Proceedings of National Heat Transf. Conference of Japan (special issue)*, Vol. 33 pp. 853~854.
- (9) McAdams, W. H., 1954, Heat Transmission, 3rd ed., *McGraw-Hill*, New York, pp. 175~177.
- (10) Morgan, V.T., 1975, "The Overall Convective Heat Transfer from Smooth Circular Cylinders, in: T.F. Irvine Jr, J.P. Hartnett (Eds.)," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 11, Academic Press, New York, pp. 199~210.
- (11) Churchill, S.W. and Chu, H.S., 1974, "Correlation Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1049~1053.
- (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, pp. 251~258

- (14) Levich, V. G., 1962, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood.
- (15) Selman, J. R. and Tobias, 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," *Trans. of the KSME*, 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," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 34, No. 5. pp. 481~489.