

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.1.1

수직 원형관내 자연대류 물질전달실험에서 양극의 면적과 위치가
한계전류에 미치는 영향

강 경 옥*† · 정 범 진*

* 제주대학교 에너지공학과

The Effects of the Anode Size and Position on the Limiting Currents of
Natural Convection Mass Transfer Experiments in a Vertical Pipe

Kyoung-Uk Kang*† and Bum-Jin Chung*

* Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University

(Received August 18, 2009 ; Revised December 2, 2009 ; Accepted December 2, 2009)

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

초록: 수직 원형관내 자연대류에 의한 열전달량을 Gr_H 수 $2.1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^9$ 의 범위에 대해 측정하였다. 유사성 원리를 이용하여 열전달계를 물질전달계로 대체하였다. 본 연구에서 채택된 물질전달계는 황산-황산구리 수용액의 전기도금계였다. 본 실험의 결과를 층류 및 난류에 대한 수직평판에 대하여 개발된 자연대류 열전달상관식과 비교한 결과, 일치함을 확인하였다. 다만 Gr_H 수 10^9 이상의 난류 영역에서는 수직관내에서 경계층간 간섭의 영향으로 인하여 수직관에서의 실험결과가 수직평판보다 높게 나타났다. 이러한 일치는 유사성 실험의 유용성을 증명한다. 3가지 다른 형태의 양극과 6가지 다른 기하구조를 사용하여, 양극의 면적과 위치가 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 예상된 바와 같이 양극의 면적과 위치는 대부분의 경우 한계전류에 영향을 주지 않았다. 이러한 결과는 보다 복잡한 실험에 있어서 양극의 크기와 위치를 지정하는 이론적 근거로 활용될 것이다.

Abstract: Natural convection heat transfer rates in a vertical pipe were measured for Gr_H number from 2.1×10^6 to 1.2×10^9 . Using the analogy concept, heat transfer experiments were replaced by mass transfer experiments. A cupric acid - copper sulfate ($H_2SO_4-CuSO_4$) electroplating system was adopted as the mass transfer system and the mass transfer rates were measured. Comparison of the results with the existing laminar and turbulent natural convection heat transfer correlations on a vertical plate showed very good agreements except for the high Gr_H case, where the boundary layer inside the vertical pipe interferes. The agreements showed the usefulness of the analogy experiment method. Using 3 different anode size and 6 different geometrical configurations, the effects of the anode size and position were explored. As expected, the anode size and position do not affect the limiting currents for most cases. These results will be used as the experimental background for the positioning and sizing of the anodes for a more complex experiment.

- 기호설명 -

C_b : 모액농도(kmole/m³)
 D : 확산계수(m²/s)
 D_i : 음극 구리관 내경(m)
 F : 패러데이 상수(Coulomb/kmole)
 H : 음극 구리관 높이(m)
 h_m : 물질전달계수(m/s)

h_h : 대류열전달계수(W/m²°C)
 I_{lim} : 한계전류밀도(A/m²)
 k : 전도계수(W/m°C)
 n : 이온의 원자가
 t_n : 전달계수
 α : 열확산계수(m²/s)
 ν : 동점성계수(m²/s)
 δ : 경계층 두께(m)
 Gr_H : Grashof number($g\beta\Delta TH^3/\nu^2$)

† Corresponding Author, bjchung@jejunu.ac.kr

Nu_H	: Nusselt number($h_h H/k$)
Pr	: Prandtl number(ν/α)
Ra_H	: Rayleigh number($Gr_H Pr$)
Sc	: Schmidt number(ν/D)
Sh_H	: Sherwood number($h_m H/D$)

1. 서 론

기계공학과 원자력공학 분야에서의 피동냉각계통(Passive cooling system)의 사용이 증가함에 따라 자연대류 열전달에 대한 관심이 증가하고 있다. 자연대류 열전달 현상에 대해서는 많은 연구가 수행되고 있지만 높은 부력 효과를 요구하는 자연대류실험의 경우, 큰 Gr_H 수를 얻을 수 있는 대규모 실험장치가 요구되므로 실험적 연구가 어렵고 막대한 재원이 소요된다. 따라서 여전히 많은 연구가 해석적인 수단을 활용하여 수행되고 있다.

유사성(Analogy)의 원리를 이용하면, 열전달 현상은 물질전달 현상으로 또 그 역으로 변환이 가능하다.⁽¹⁾ 이러한 현상이 나타나는 이유는 물질전달계와 열전달계가 수학적으로 서로 동일한 형태의 지배방정식과 무차원수에 의해 지배되므로 유도되는 결과나 현상이 유사하기 때문이다. 물질전달계를 적절히 선택하면 열전달계에서 달성하기 어려운 고부력상황을 용이하게 달성할 수 있으므로 자연대류현상에 대한 실험적인 연구를 보다 수월하게 수행할 수 있다.

본 연구에서는 수직 원형관내 자연대류 열전달 현상을 유사성 원리를 이용하여 실험적으로 연구하였다. 황산-황산구리($H_2SO_4-CuSO_4$) 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 채택하였고 자연대류 물질전달계수를 측정하였다. 실험은 가열벽면을 모사하는 여러 가지 내경의 음극(Cathode)을 사용하여 음극높이 0.03m ~ 0.25m에 대해 수행되었다. 이를 열전달계로 환산하였을 경우 Gr_H 수는 $2.1 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^9$ 범위에 해당한다. 실험결과는 기존의 열전달 실험상관식과 비교되었다. 이러한 과정에서 양극(Anode)의 면적과 위치가 물질전달계수 측정에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 이는 향후 유사성 실험방법을 보다 복잡한 기하구조에 적용하고자 할 때, 양극의 면적과 위치를 조절하는 이론적 근거로 활용될 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 수직 원형관내 자연대류 열전달

자연대류 현상과 열전달상관식은 잘 알려져 있지만 다양한 기하구조에 대한 실험적 연구는 충분치 않다. 층류 자연대류 현상에 대해서는 Bejan 등이 지배방정식으로부터 이론적으로 척도분석을 수행하여 변수간의 상관관계를 제시한 바 있다. 수직평판에서의 층류 자연대류 열전달 상관식 (1)은 E. J. Lefevre⁽²⁾의 상관식이 잘 맞는 것으로 알려져 있으며, 난류 자연대류 상관식 (2)에 대해서는 M. G. Fouad⁽³⁾의 상관식이 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

$$Nu_{av} = 0.67(Gr_H Pr)^{0.25} \quad \text{at } Gr < 10^9 \quad (1)$$

$$Nu_{av} = 0.31(Gr_H Pr)^{0.28} \quad \text{at } Gr > 10^9 \quad (2)$$

수직 원형관내의 자연대류 열전달에 대한 연구에 대해서는 Holzbecher과 Steiff⁽⁴⁾가 내부에 열원이 있을 경우에 대하여, Rosen과 Hanratty⁽⁵⁾가 층류 자연대류 열전달 관한 연구 등에 대하여 연구한 바 있으며 Bejan⁽¹⁾은 수직 원형관내의 자연대류에서 가열벽면을 따라 형성되는 경계층(Boundary layer)이 관의 지름보다 작을 경우 수직평판의 자연대류로 취급할 수 있음을 보인 바 있다.

2.2 전기도금계를 이용한 유사성 실험방법

유사성(Analogy)은 주로 물질전달계와 열전달계의 지배방정식과 경계조건이 유사한 것으로 정의된다. 이를 이용하면 열전달 문제를 물질전달 문제로 또 그 역으로 변환하여 취급할 수 있다. 이러한 물질전달계와 열전달계의 무차원수 관계는 Table 1에 나타내었다.⁽¹⁾

Table 1 Dimensionless group for analogy systems

Heat transfer system	Mass transfer system
Prandtl number $\frac{\nu}{\alpha}$	Schmidt number $\frac{\nu}{D}$
Nusselt number $\frac{h_h H}{k}$	Sherwood number $\frac{h_m H}{D}$
Grashof number $\frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2}$	$\frac{gH^3}{\nu^2} \frac{\Delta\rho}{\rho}$
Rayleigh number $\frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}$	$\frac{gH^3}{D\nu} \frac{\Delta\rho}{\rho}$

황산-황산구리($H_2SO_4-CuSO_4$) 수용액에 구리전극을 사용하여 전압을 인가하면 양극에서 구리이온이 생성되어 음극으로 이동하고 음극표면에서 전자를 얻어 석출(도금)된다. 이때 구리전극은 가열벽면(Heated wall)이 되고 전달된 구리이온의 양은 열전달량이 된다.

전기도금계(Electroplating system)는 1940년경 Levich⁽⁶⁾의 회전디스크 전극에서 개발된 대류확산관계식과 자연대류에 대한 대류확산이론이 정립되면서부터 물질전달연구에 활발히 이용되기 시작하였다. 그 후 여러 가지 조건에서 개발된 물질전달 상관식을 Selman과 Tobias⁽⁷⁾가 체계적으로 정리하여 물질전달 연구분야에 공헌을 하였다. 전기도금계로 측정된 물질전달 상관식은 동일한 조건에서 측정된 열전달상관식과 유사하다는 주장에 따라 해석적으로 유도된 상관식을 검증하는 과정으로 이용되고 있다.⁽⁸⁾ Chung 등⁽⁹⁾은 수평평판에서의 강제대류와 수직벽면에서의 자연대류 열전달 현상에 관하여 전기도금계를 이용한 실험방법론을 적용하여 기존에 알려진 열전달상관식을 예측할 수 있음을 검증한 바 있다.

전기도금계를 이용하여 열전달계를 모사할 경우, 높은 Gr_H 수를 작은 실험장치에서 구현할 수 있고 열전달 실험에서 오차를 유발하게 되는 구조물을 통하여 환경으로의 열 누설(Heat leakage) 그리고 복사 열전달(Radiation heat transfer)의 부영향을 원천적으로 없앨 수 있다.

유사성을 이용한 실험기법에 대한 보다 자세한 설명은 Chung 등⁽⁹⁾의 논문에 제시되어 있다.

2.3 한계전류기법

열전달계에서의 대류열전달계수는 벽면 온도와 벌크 유체온도의 함수로 주어진다. 한편 전기도금계를 이용하여 물질전달계수를 구할 때에는 음극표면에서의 구리이온의 농도를 알기 어렵다. 이를 해결하기 위하여 한계전류기법이 도입된다.

전기도금계에서 전극 사이에 인가된 전위차를 증가시키면 전류가 증가하다가 더 이상 증가하지 않는 영역이 나타나는데 이를 한계전류(Limiting current)라 한다. 이는 구리이온이 음극에서 전자를 받아서 환원되는 과정이 모액에서 음극으로 이동하는 과정보다 훨씬 빠르기 때문에 발생하는 현상으로 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이온 농도를 0으로 취급할 수 있기 때문에 식

(3)에 따라 물질전달계수(Mass transfer coefficient), h_m 은 모액 농도 C_b 와 한계전류 밀도(Limiting current density), I_{lim} 만으로 계산된다.

한계전류는 인가된 전압에 대한 전류를 도시함으로써 찾아낼 수 있다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 한계전류곡선은 3개의 구간으로 나타난다. 인가전압에 비례하여 전류가 증가하는 영역이 처음 나타나고 인가전압을 증가시켜도 전류가 증가하지 않는 영역이 다음으로 나타나는데 이것이 한계전류 영역이다. 다음으로는 기체 환원 영역이다. 이 영역에서는 인가전압이 수소이온의 환원 포텐셜에 도달하게 됨에 따라 수소의 환원반응이 추가되면서 전류가 다시 상승하게 된다. 측정된 한계전류값을 식 (3)에 넣으면 물질전달계수를 얻을 수 있다.

여기서 전달계수(Transference number) t_n 은 황산 농도와 황산구리농도의 함수로 계산되는데, 석출된 구리이온 가운데 전기영동에 의하여 전극반응에 참여한 이온의 분율을 나타내며 이는 열전달계에서는 존재하지 않는 전달메커니즘이기 때문에 제외되어야 한다. 또한 전기도금계의 한계전류는 수소나 황산이온이 석출되지 않는 전압대에서 형성되기 때문에 SO_4^{2-} 와 H^+ 이온에 의한 영향은 나타나지 않는다.⁽⁹⁾

$$h_m = \frac{(1 - t_n)I_{lim}}{nFC_b} \quad (3)$$

실험 수행중 양극에서 음극으로 이동되는 구리의 양은 크지 않다. 그러나 실험이 장시간 진행되거나 구리가 음극에서 나뭇가지 형태로 석출(Dendritic deposit)되는 경우 실험의 오차를 유발하기 때문에 예비실험을 통하여 한계전류값을 구하고 그 근처에서 실험을 수행함으로써 실험의 오차를 최소화 하였다.

3. 실험장치

실험장치는 아크릴수지로 제작된 원형관이다. 원형관의 내부에는 필요한 높이의 구리관이 안대기(Lining)가 되어 있으며 이는 전기도금계의 음극 즉, 열전달계의 가열벽면(Heated wall) 역할을 한다. 구리 안대기가 없는 아크릴 원형관이 상단과 하단에 플랜지로 연결되어 있다. 실험 측정부

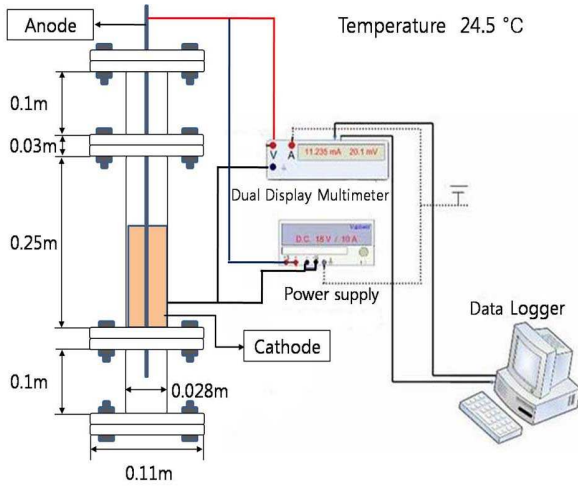


Fig. 1 The experiment equipment & system circuit

(Test section)의 외벽인 아크릴관은 높이 0.25m, 내경 0.028m이고 내부의 음극 구리관의 내경은 0.026m이다. 양극으로는 지름 0.002m 구리봉을 사용하였다. 설계된 실험장치와 시스템 회로를 Fig. 1에 나타내었다. 황산구리(CuSO₄) 농도를 0.1M로 하였으며 황산을 1.5M 용해시켜 전기영동으로 인한 효과를 억제하였다. 전원공급장치는 VüPOWER사의 DC Power supply-IPS-18B10을 이용하였고, 전압과 전류측정을 위하여 Fluke-45사의 Dual Display Multimeter를 사용하였다.

4. 실험범위

음극 구리관 높이 0.03m, 0.14m, 0.25m에 대하여 양극 구리봉의 개수를 1, 2, 3개 사용하여 측정을 수행함으로써 양극의 면적이 한계전류에 미치는 영향을 관찰하였다. 그리고 양극 구리봉을 실험 측정부내 여섯 가지 방법으로 위치시켜 양극위치의 효과를 살펴보았다. Table 2에는 양극면적과 위치에 대한 실험의 범위를 나타내었으며 Fig. 2에 음극 구리관 높이 0.03m에 대하여 양극 위치를 나타내었고, 음극 구리관의 높이 0.14m, 0.25m에 대해서도 동일한 실험을 수행하였다.

또한 수직 원형관내에서 발달하는 자연대류의 경계층이 겹치는 상황을 모사하기 위하여 동일한 실험조건에서 음극내경이 보다 작은 경우에 대해 실험을 수행하였다. 이는 Table 3에 나타내었으며, 이때 양극의 위치는 Fig. 2의 (a)와 같다.

Table 2 Test matrix for anode size & position

Size Position	D _i (m)	CuSO ₄	Height	Gr _H
0.002x(1,2,3)	0.026	0.1M	0.03m	2.1x10 ⁶
(a), (b), (c)			0.14m	2.2x10 ⁸
(d), (e), (f)			0.25m	1.2x10 ⁹

Table 3 Test matrix for cathode inner diameter

Inner diameter, D _i (m)	CuSO ₄	Height	Gr _H
0.011, 0.020, 0.026 0.032, 0.039	0.1M	0.03m	2.1x10 ⁶
		0.06m	1.7x10 ⁷
		0.14m	2.2x10 ⁸
		0.25m	1.2x10 ⁹

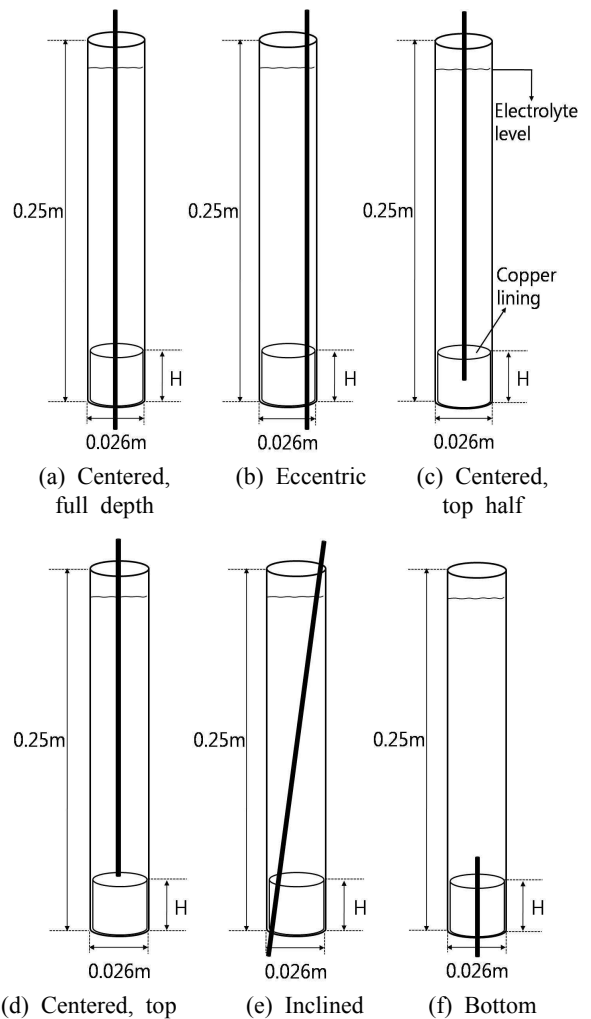


Fig. 2 Anode positions in test section

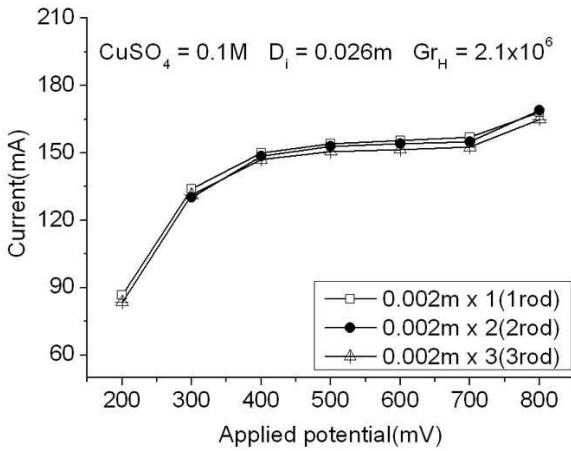


Fig. 3 Current curves for anode size (H=0.03m)

5. 실험결과

5.1 양극면적과 한계전류

음극높이 0.03m에 대하여 양극의 구리봉 1, 2, 3개를 인가전압을 증가시키면서 측정한 전류를 Fig. 3에 나타내었다. 실험결과 양극면적은 한계전류에 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며 이러한 경향은 음극높이 0.14m 및 0.25m의 경우에도 동일하게 나타났다. Table 4에는 한계전류생성 전압대와 한계전류를 나타내었다. 인가전압에 대한 측정전류 곡선은 동일하나 양극면적이 커지면 전압을 인가한 후, 전류가 안정화되는데 소요되는 시간이 짧아지고 한계전류플래토우가 빠르게 형성되었다. 따라서 적정크기 이상의 양극을 활용함으로써 실험에 소요되는 시간을 단축할 수 있음을 알 수 있었다.

5.2 양극위치와 한계전류

3가지 음극높이에 대하여 양극을 실험 측정부내 여섯 가지 방법으로 위치시키고 인가전압을 증가시키면서 측정한 전류를 Fig. 4~6에 각각 나타내었다. Table 5에는 한계전류생성 전압대와 한계전류 나타내었다. 양극위치가 (c)와 (d)의 경우를 제외하고는 전압 인가시 측정되는 전류에 큰 차이를 보이지 않았고 측정되는 한계전류는 거의 동일함을 알 수 있다. (c)와 (d)는 양극이 음극과 마주보는 길이가 음극보다 짧은 경우에 해당한다. 이러한 양극위치의 영향은 음극의 높이가 높아지는 경우, 즉 Gr_H 수의 크기가 큰 경우 더욱 뚜렷한 차이를 나타냈다. 이는 양극이 음극의 높

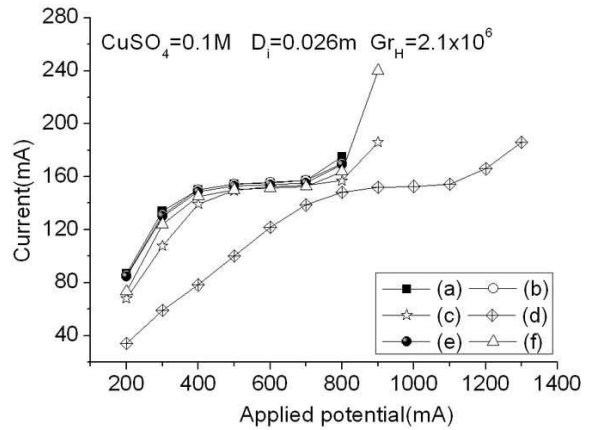


Fig. 4 Current curves for anode position (H=0.03m)

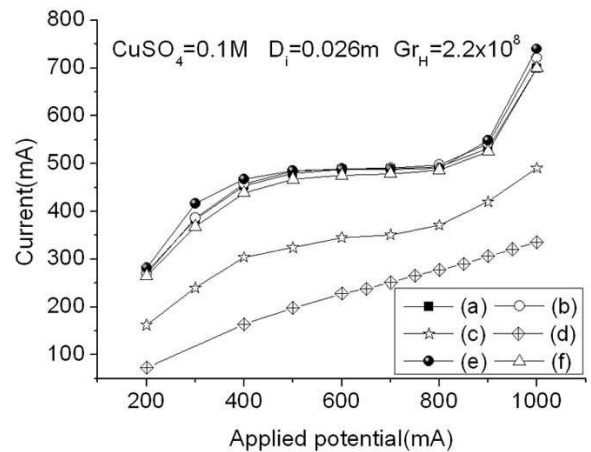


Fig. 5 Current curves for anode position (H=0.14m)

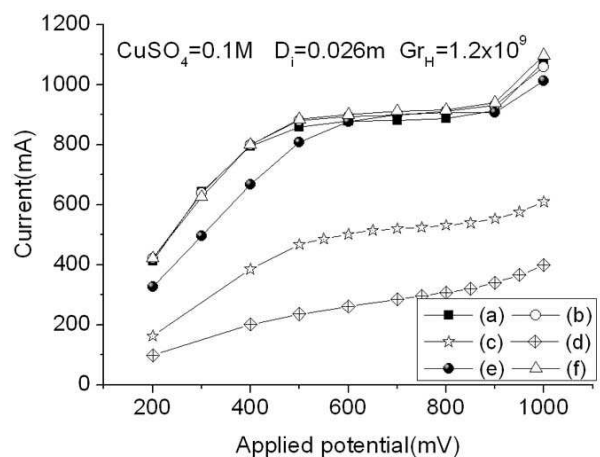


Fig. 6 Current curves for anode position (H=0.25m)

이보다 짧은 경우 높은 자연대류 구동력으로 인하여 자연대류의 속도가 증가하면서 양극에서 발생한 구리이온이 음극으로 전달되기 어려워짐을 의미한다.

Table 4 Limiting currents values & voltage for anode size

Anode size	H=0.03m		H=0.14m		H=0.25m	
	Voltage(mV)	Limiting current(mA)	Voltage(mV)	Limiting current(mA)	Voltage(mV)	Limiting current(mA)
0.002m						
x 1	400~600	154	400~600	506	700~900	888
x 2	500~700	154	400~600	502	600~800	895
x 3	500~700	152	500~700	503	600~800	896

Table 5 Limiting currents values & voltage for anode position

Anode position	H=0.03m		H=0.14m		H=0.25m	
	Voltage(mV)	Limiting current(mA)	Voltage(mV)	Limiting current(mA)	Voltage(mV)	Limiting current(mA)
0.002m x 1						
(a)	400~600	154	500~700	488	700~900	880
(b)	400~600	155	500~700	490	600~800	895
(c)	500~700	152	600~800	345	600~800	525
(d)	900~1100	153	-	-	-	-
(e)	400~600	153	500~700	488	500~700	876
(f)	500~700	152	600~800	479	500~700	885

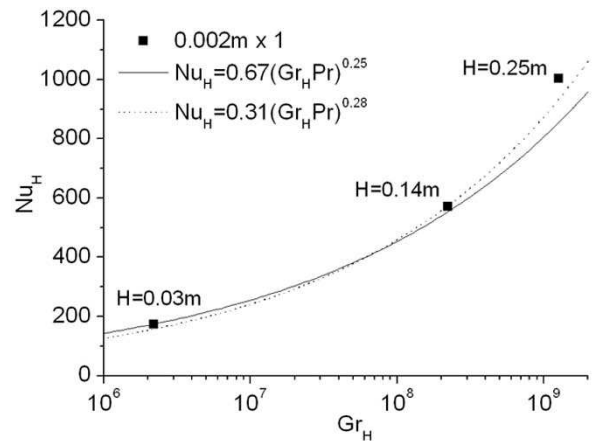
5.3 자연대류 열전달상관식과의 비교

본 실험을 통하여 측정된 Nu_H 수를 수직평판에서의 층류 및 난류 자연대류 열전달 상관식 (1), (2)와 비교하였다.^(2,3)

Fig. 7은 음극내경 0.026m, 양극 구리봉 두께 0.002m일 때 3가지 높이에 대하여 실험한 결과이다. 비교결과 Gr_H 수 10^6 , 10^8 에서 측정된 Nu_H 수는 층류 자연대류 열전달상관식과 유사하였고 Gr_H 수 10^9 이상에서는 난류 자연대류 상관식보다 약간 높게 측정되었다. 이 현상을 보다 자세히 살펴보기 위하여 동일한 실험조건에서 보다 작은 내경을 가지는 여러 가지 파이프에 대하여 실험을 수행한 것을 Fig. 8에 나타내었다.

난류영역에서 물질전달실험을 통하여 얻어진 열전달계수가 기존의 상관식보다 약간 높은 값을 보이는 것은 본 실험에서 채택된 유체의 높은 Schmidt 수에 기인한 것으로 판단된다. 또한 파이프 상단으로 진행하면서 발달하는 경계층의 상호작용에도 기인하는 것으로 판단된다.

Bejan⁽¹⁾이 층류 자연대류에 대하여 제시한 경계층 두께(δ)에 관한 척도 관계식(Scale relation) (4)를 이용하여 경계층 두께를 계산해보면 0.011m 파이프의 반경에 필적하는 수준의 크기정도(Order of Magnitude)임을 알 수 있다. 따라서 파이프의 상단으로 가면서 경계층의 간섭 영향도 포함된 것으로 판단된다.

**Fig. 7** Comparison of measured Nu_H with know natural convection heat transfer correlations ($D_f=0.026m$)

$$\delta = HRa_H^{-1/4} Pr^{1/2} \quad (4)$$

5.4 불확실도 분석(Uncertainty analysis)

본 연구에서 전기도금계를 사용한 측정에서의 불확실도 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$Nu_H = \frac{h_m H}{D_m} \Rightarrow Nu_H = f(h_m, H, D_m) \quad (5)$$

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

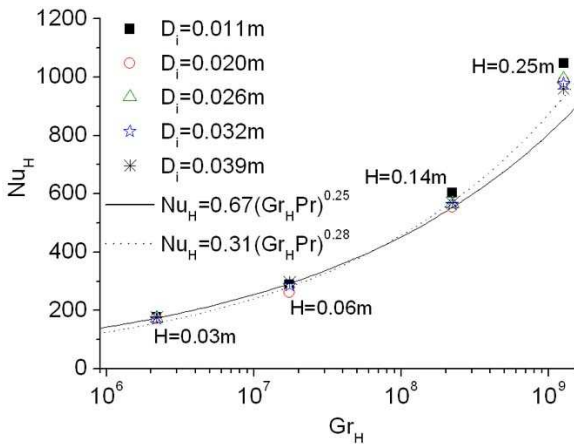


Fig. 8 Comparison of measured Nu_H with known natural convection heat transfer correlations (Various D_i)

음극높이 0.03m일 때 양극면적에 대하여 계산된 Nu_H 수의 불확실도(Uncertainty)와 불확실도비(Fractional uncertainty)는 3.07과 1.77%였고, 양극 위치에 대해서는 각각 3.06과 1.78%였다. 따라서 전기도금계에서의 측정된 값은 매우 정확한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 유사성(Analogy) 원리에 따라서, 전기도금계를 이용하여 수직 원형관내 자연대류 열전달 현상을 물질전달 실험으로 모사할 경우 양극면적과 위치가 한계전류에 미치는 영향을 평가하였다. 내경과 높이가 다른 여러 가지 음극을 사용하고 양극의 면적과 위치를 변화시키면서 한계전류를 측정하였다.

실험결과 양극면적은 한계전류에 영향을 주지 않았다. 그러나 양극면적이 커지면 구리이온의 생성이 용이하여 전압을 인가한 후, 전류가 안정화되는데 소요되는 시간이 짧아지고 한계전류플래토우가 빠르게 형성되는 것을 확인하였다. 따라서 적정크기 이상의 양극을 사용할 경우 실험을 효율적으로 수행할 수 있음을 확인하였다.

양극위치는 음극높이가 변해도 한계전류에 영향을 주지 않았지만 양극의 높이가 음극의 높이보다 낮아서 음극을 마주보지 못하는 경우, 한계전류가 낮게 측정되거나 한계전류가 형성되지 않음을 확인하였다. 특히 이러한 현상은 음극의 높이가 커서 자연대류 구동력이 높은 경우에 더욱

뚜렷이 나타났다. 5.2절의 결과를 통해 양극과 음극이 마주보는 면적이 일정하면 영향이 없는 것으로 판단된다.

본 실험에서 측정된 열전달 계수 Nu_H 수는 수직평판에서의 층류 자연대류 열전달 상관식과 일치하였으며 Gr_H 수 10^9 이상에서는 난류 자연대류 열전달 상관식보다 높게 측정되었다. 이 현상의 원인은 본 실험유체의 높은 Schmidt 수와 원형관에서의 얇은 경계층의 간섭효과 때문인 것으로 판단된다.

본 연구의 결과, 전기도금계를 이용한 유사성 실험(Analogy experiments)을 통하여 수직 원형관내 자연대류 열전달계가 모사됨을 확인하였다. 또한 실험을 수행할 때 양극의 면적과 위치가 한계전류에 미치는 영향이 거의 없음을 확인하였고 이를 통하여 향후 유사한 실험을 수행할 경우, 양극을 대류거동에 영향을 미치지 않는 영역에 위치시킴으로써 양극의 존재로 인한 실험의 오차를 최소화할 실험적 근거를 얻었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Bejan, A., 1994, Convection Heat Transfer, 2nd ed., John Wiley & Sons, INC, New York, pp. 466~514.
- (2) Lefevre, E. J., 1956, "Laminar Free Convection from a Vertical Plane Surface," 9th International Congress on Applied Mechanics, Brussels, pp. 1~168.
- (3) Fouad, M. G. and Ibl, N., 1960, "Natural Convection Mass Transfer at Vertical Electrodes Under Turbulent Flow Conditions," *Electrochimica Acta*, Vol. 3, pp. 233-243.
- (4) Holzbecher, M. and Steiff, A., 1995, "Laminar and Turbulent Free Convection in Vertical Cylinders with Internal Heat Generation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 15, pp. 2893~2093.
- (5) Rosen, E. M. and Hanratty, T. J., 1961, "Use

- of Boundary Layer Theory to Predict the Effect of Heat Transfer on the Laminar Flow Field in a Vertical Tube with a Constant Temperature Wall," *A. I. Ch. E. JI.* Vol. 7, pp. 112~123.
- (6) Levich, V. G., 1962, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood.
- (7) Selman, J. R. and Tobias, C. W., 1978, *Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique*, *Adv. Chem. Eng.* vol. 10, pp. 211~318.
- (8) Agar, J. N., 1947, *Diffusion and Convection at Electrodes*, *Discussion of Faraday Soc.*, 1, pp. 27~37.
- (9) Ko Sang-Hyuk, Moon Deok-Won and Chung Bum-Jin, 2006, "Applications of Electroplating Method for Heat Transfer Studies Using Analogy Concept," *Nuclear engineering and Technology*, Vol. 38, pp. 251~258.