

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.1.033

ISSN 1226-4881

높은 Pr 수의 유체를 사용한 수직 원형관 외부의 자연대류 실험[§]

강 경 옥*, 정 범 진**

* 제주대학교 에너지공학과

Experiments on Natural Convection on the Outer Surface of a Vertical Pipe by Using Fluids with High Pr Number

Gyeong-Uk Kang* and Bum-Jin Chung**

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

(Received May 19, 2010 ; Revised October 15, 2010 ; Accepted October 18, 2010)

Key Words: Natural Convection(자연대류), Curvature Effect(곡률효과), Boundary Layer(경계층), Vertical Pipe(수직 원형관), Analogy(유사성)

초록: 유사성 원리를 이용하여 매우 높은 Pr 수의 유체를 사용하여 수직 원형관 외부의 자연대류 열전달 현상을 실험적으로 연구하였다. 황산-황산구리 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 채택하였으며, 실험은 직경 0.005m~0.035m의 음극을 사용하여 Pr 수 2,094~4,173 그리고 Ra_H 수 1.4×10⁹~4×10¹³에서 열전달계수를 측정하였다. 층류에서 실험한 결과는 King, Jakob와 Linke, McAdams, Bottemanne의 수직 원형관 자연대류의 열전달 상관식에 일치하였고 난류에서는 수직평판 난류 자연대류 상관식인 Fouad의 상관식과 일치하였고 Pr 수에 대한 의존성이 나타났다. 실험을 통하여 도출한 층류 상관식은 Nu_H=0.55Ra_H^{0.25}, 난류 상관식은 Nu_H=0.12Ra_H^{0.28}Pr^{0.1}였다. 층류와 난류사이의 천이는 Ra_H 수 약 10¹²에서 발생하였다.

Abstract: In this study, we investigated the natural convection on the outer surface of a vertical pipe by performing mass transfer experiments using fluids with high Pr number using the concept of analogy between heat and mass transfer. A cupric acid-copper sulfate electroplating system was adopted as the mass transfer system. Tests were performed for Ra_H numbers from 1.4×10⁹ to 4×10¹³, Pr numbers from 2,094 to 4,173, and diameters from 0.005 m to 0.035 m. The test results for laminar flow conditions were in good agreement with the correlations reported by King, Jakob and Linke, McAdam, and Bottemanne, and those for turbulent conditions with the correlations presented by Fouad for a vertical plate and also proved the dependence on Pr numbers. The obtained correlations were Nu_H=0.55Ra_H^{0.25} for laminar and Nu_H=0.12Ra_H^{0.28}Pr^{0.1} for turbulent. The transition between laminar and turbulent occurs at Ra_H of about 10¹².

- 기호설명 -

C_b : 모액농도(kmole/m³)

D : 확산계수(m²/s)

D_o : 음극 구리관 직경(m)

Gr_H : Grashof number(gβΔTH³/ν²)

H : 음극 구리관 높이(m)

h_n : 대류열전달계수(W/m² °C)

h_m : 대류물질전달계수(m/s)

I_{lim} : 한계전류밀도(A/m²)

k : 전도계수(W/m °C)

Nu_H : Nusselt number(h_nH/k)

n : 이온의 원자가

Pr : Prandtl number(ν/α)

Ra_H : Rayleigh number(Gr_HPr)

Sc : Schmidt number(ν/D)

Sh_H : Sherwood number(h_mH/D)

U : Uncertainty

t_n : 전달계수

α : 열확산계수(m²/s)

ν : 동점성계수(m²/s)

§ 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

δ : 속도경계층 두께(m)

δ_T : 열경계층 두께(m)

1. 서 론

수직 원형관 외부(Outer surface of a vertical pipe)에서 발생하는 자연대류는 원형관의 종횡비(H/D_o)에 따라 열전달 특성이 달라지므로 많은 실험적, 이론적 연구가 수행되어 왔다. 원형관의 종횡비가 작은 경우에는, 열경계층(Thermal Boundary layer) 두께가 관의 직경에 비해 매우 얇아 수직평판으로 간주되어 해석되어 지고 있으며, 원형관의 종횡비가 큰 경우에는 곡률효과(Curvature effect)로 인해 수직평판과 다른 현상이 나타난다. 그러므로 수직 원형관 외부에 대한 자연대류는 두꺼운 관(Thick pipe)과 얇은 관(Thin pipe)으로 구분하여 해석되어 지고 있다. 이에 대한 기존연구는 이론적으로는 넓은 범위의 Pr 수에서 수행되었고 실험에서는 크기정도 1인 유체에 대해서만 수행되었다.

본 연구에서는 자연대류 열전달 현상을 유사성(Analogy) 원리를 이용하여 물질전달 실험으로 모사하고 높은 Pr 수에 대하여 수직 원형관 외부에서 나타나는 곡률효과와 Pr 수가 열전달에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였다. 황산-황산구리($H_2SO_4-CuSO_4$) 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 채택하였고 자연대류 물질전달계수를 측정하였다. 곡률효과에 대한 실험은 가열벽면을 모사하는 여러 가지 직경의 음극(Cathode)을 사용하여 음극높이 $0.02m \sim 0.28m$ 에 대해 수행하였다.

Pr 수가 열전달에 미치는 영향에 대해서는 예비 실험을 통해 수직평판 자연대류와 같은 현상이 나타나는 직경 $0.0285m$ 의 음극을 사용하였고 Pr 수를 $2,094 \sim 4,173$ 으로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 수직 원형관 외부의 자연대류 열전달

Bejan⁽¹⁾은 자연대류에서 가열벽면을 따라 형성되는 열경계층 두께가 관의 직경보다 작을 경우 수직평판의 자연대류로 취급할 수 있음을 보인 바 있다. Sparrow와 Gregg⁽²⁾는 수직평판으로 간주할 수 있는 판별조건이 종횡비와 Gr_H 수에 의해 결정됨을 밝혔고 Ede⁽³⁾은 이들의 연구결과를 확장하여 그 판별조건이 Pr 수에 의해서도 좌우된다고 하였다. Minkowycz와 Sparrow⁽⁴⁾는 Pr 수가 0.71인 공기에 대해 등온의 수직 원형관 외부의 자연대류 특성을 연구하여 수직 원형관이 수직평판과 같은 현상임을 실험을 통해 밝힌 바 있다. Elenbass⁽⁵⁾는 원형관의 직경이 커지면 수직평판으로 간주할 수 있으며 Nu_H 수는 Ra_H 수의 함수임을 밝혔다. 그러므로 수직 원형관 외부에 대한 자연대류 열전달계수는 수직평판에 대해 개발된 자연대류 열전달 상관식으로 계산될 수 있다.⁽¹⁾ 이에 대해서는 Table 1에서 보는 바와 같이 Pr 수가 크기정도 1인 유체에서 연구가 수행되었다.^(8~15)

Table 1은 수직 두꺼운 원형관(Vertical thick pipe)에 대한 자연대류 열전달 상관식을 나타낸다. 한편, 수직평판에서의 층류 자연대류 열전달 상관식 (1)은 Le Fevre⁽⁶⁾의 상관식이 잘 맞는 것

Table 1 The existing known heat transfer correlations on vertical thick pipe

Authors	$D_o(m)$	H/D_o	Pr	Ra_H	Correlation
Griffith & Davis ⁽⁸⁾	0.174	0.87 ~ 15.2	0.71	$10^7 \sim 10^9$	$Nu_H = 0.67 Ra_H^{0.25}$ (3)
King ⁽⁹⁾	-	-	0.71	$10^4 \sim 3.5 \times 10^7$	$Nu_H = 0.55 Ra_H^{0.25}$ (4)
Jakob & Linke ⁽¹⁰⁾	0.035	4.3	0.71	$10^4 \sim 10^8$	$Nu_H = 0.555 Ra_H^{0.25}$ (5)
Eigenson ⁽¹¹⁾	0.0024 ~ 0.058	50 ~ 140	0.71	$10^9 \sim 10^{10}$	$Nu_H = 0.48 Ra_H^{0.25}$ (6)
Touloukian et al. ⁽¹²⁾	0.0697	2.2 ~ 13.2	1	$2 \times 10^8 \sim 4 \times 10^{10}$	$Nu_H = 0.726 Ra_H^{0.25}$ (7)
McAdams ⁽¹³⁾	-	-	-	$10^4 \sim 10^9$	$Nu_H = 0.59 Ra_H^{0.25}$ (8)
				$Gr_H > 10_9$	$Nu_H = 0.13 Ra_H^{0.333}$ (9)
Hanesian & Kalish ⁽¹⁴⁾	0.0254	3.12	0.71	$10^6 \sim 10^8$	$Nu_H = 0.48 Ra_H^{0.23}$ (10)
Bottemanne ⁽¹⁵⁾	-	-	0.72	$8 \times 10^4 \sim 4 \times 10^7$	$Nu_H = 0.56 Ra_H^{0.25}$ (11)

Table 2 The existing known heat transfer correlations on vertical thin pipe

Authors	$D_o(m)$	H/D_o	Pr	Ra_H	Correlation
Griffith and Davis	0.174	0.87~15.2	0.71	$10^7 \sim 10^9$	$Nu_H = 0.0782 Ra_H^{0.357}$ (12)
Eigenson	0.0024~0.058	50~140	0.71	$10^{10} \sim 10^{11}$	$Nu_H = 0.148 Ra_H^{0.333}$ (13)
Touloukian et al.	0.0697	2.2~13.2	1	$4 \times 10^{10} \sim 9 \times 10^{11}$	$Nu_H = 0.0674 (Ra_H Pr^{0.29})^{1/3}$ (14)
Carne ⁽¹⁶⁾	0.047~0.076	8~127	0.71	$2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^8$	$Nu_H = 0.152 Ra_H^{0.38}$ (15)
Bober ⁽¹⁷⁾	0.02	94.1	0.71	$5 \times 10^9 \sim 3 \times 10^{10}$	$Nu_H = 0.13 Ra_H^{1/3}$ (16)

Table 3 Popiel's experiment values & results calculated by using the equation (18)

$D_o(m)$	$H(m)$	H/D_o	Pr	Ra_H	$Gr_L^{1/4}(D/H)$	$a + b/Pr^{0.5} + c/Pr^2$
0.011	0.6	58.8	0.71	$1.5 \times 10^8 \sim 1.1 \times 10^9$	2.21~12.2	69.5
0.021		29.5				
0.038		15.7				

으로 알려져 있으며, 난류 자연대류 상관식 (2)에 대해서는 Fouad⁽⁷⁾의 상관식이 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

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

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

Cebeci⁽¹⁸⁾와 Minkowycz와 Sparrow는 열경계층 두께가 관의 직경보다 두꺼운 경우 측면의 곡률이 경계층 발달에 영향을 끼쳐서 열전달률이 증가함을 보인바 있으며, Le Fevre와 Ede⁽¹⁹⁾는 원형관의 종횡비, Ra_H 수 및 Pr 수를 사용하여 층류 자연대류 열전달 상관식 (17)을 유도하였다. Table 2는 수직 얇은 원형관(Vertical thin pipe)에 대해 Ra_H 함수로 제시된 자연대류 열전달 상관식이다.^(16,17) Cebeci는 수치해석을 통하여 Pr 수 0.01~100에 대해 지배방정식을 풀고 곡률효과를 수치해로 나타내었다.

Popiel 등⁽²⁰⁾은 공기를 사용하여 층류 자연대류에서 Cebeci의 수치해의 유효성을 실험적으로 증명하였고 곡률효과가 관측되는 판별식 (18)과 상관식 (19)를 제시하였다.

$$Nu_H = \frac{4}{3} \left[\frac{7Ra_H Pr}{5(20+21Pr)} \right]^{0.25} + \frac{4(272+315Pr)}{35(64+63Pr)} \frac{H}{D} \quad (17)$$

$$Gr_H^{1/4} \frac{D}{H} \leq a + b/Pr^{0.5} + c/Pr^2 \quad (18)$$

판별식 (18)에 의하면, 우변이 좌변보다 클 경우 곡률효과가 나타나게 될 것이고 여기서, $a=11.474$, $b=48.92$, $c=-0.006085$ 이다. Table 3은 Popiel이 실험에 사용한 종횡비, Ra_H 수 및 Pr 수를 보여주며, 제시된 바와 같이 우변이 좌변보다 월등히 크다. 식 (19)은 C. O. Popiel이 제시한 상관식이다.

$$Nu_H = A Ra_H^n \quad (19)$$

$A=0.519+0.03454(H/D_o)+0.0008772(H/D_o)^2+8.855 \times 10^{-6}(H/D_o)^3$, $n=0.25-0.00253(H/D_o)+1.152 \times 10^{-5}(H/D_o)^2$ 이다.

본 연구에서는 Popiel이 제시한 판별식을 사용하여 우변이 좌변보다 클 경우를 만족시키는 조건에서 곡률효과에 대해 실험을 수행하였다. 또한, 그 반대인 조건에서 Pr 수가 열전달계수에 미치는 영향을 평가하였다.

2.2 전기도금계를 이용한 상사(Analogy)실험방법

두 개 이상의 과정이 동일한 형태이 무차원식에 의해서 지배된다면, 그 과정들은 유사성이라고 말한다.⁽²¹⁾ 이를 이용하면 열전달 문제를 물질전달 문제로 또 그 역으로 변환하여 취급할 수

있으므로 열전달 및 물질전달 상관식은 서로 교환이 가능하다. 이러한 물질전달계와 열전달계의 무차원수 관계는 Table 4에 나타내었다.

본 연구에서는 황산-황산구리(H₂SO₄-CuSO₄) 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 선택하였다. 전기도금계(Electroplating system)의 한계전류를 이용한 전달현상에 대한 연구는 Levich⁽²²⁾에 의해 처음으로 시도되었다. Agar⁽²³⁾는 전기도금계에서 물질전달 동일한 조건에서 열전달 상관식과 유사하다고 주장하였고, Selman과 Tobias⁽²⁴⁾는 여러 가지 조건에서 개발된 물질전달 상관식을 체계적으로 정리하였다. 전기도금계에서 물질전달현상은 Fenech와 Tobias⁽²⁵⁾가 한계전류방법에 의거 여러 조건의 변화가 있을 때 한계전류밀도 변화를 실험하였다. Ko 등⁽²⁶⁾은 수평평판에서의 강제대류와 수직벽면에서의 자연대류 열전달 현상에 관하여 전기도금계를 이용한 실험방법론을 적용하여 기존에 알려진 열전달 상관식을 예측할 수 있음을 검증한 바 있다. Kang, Ko와 Chung^(27,28)은 유사성 실험방법론을 적용하여 수직 원형관 내부의 자연대류와 혼합대류 열전달현상을 각각 물질전달실험으로 모사할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 유사성을 이용한 실험기법에 대한 보다 자세한 설명은 Ko 등⁽²⁶⁾과 Kang과 Chung⁽²⁷⁾의 논문에 제시되어 있다.

2.3 한계전류기법

열전달계에서의 대류열전달계수는 열속(Heat flux)과 벽면 온도와 벌크 유체의 온도차의 비로 계산되며, 이와 유사하게 물질전달계에서의 대류 물질전달계수도 계산된다. 그러나 전기도금계를 이용하여 물질전달계수를 구할 때에는 음극 표면에서의 구리이온 농도를 알기 어렵다. 그러므로 전기도금계에서는 물질전달계수를 구함에 있어서 한계전류기법을 이용한다.⁽²⁵⁾ 인가된 전압에 대해 측정된 전류를 Fig. 1에 도시하였다. 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 물질전달 계수(Mass transfer coefficient), h_m 은 식 (20)에 따

Table 4 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 $\frac{h_m H}{D}$
Rayleigh number $\frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}$	$\frac{gH^3}{D\nu} \frac{\Delta\rho}{\rho}$

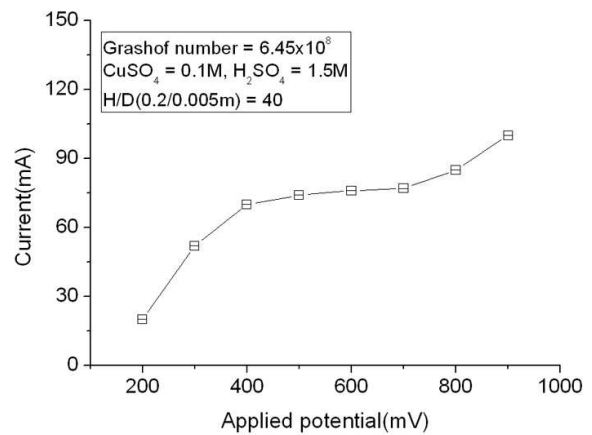


Fig. 1 Limiting current curves

라 모액농도(Bulk concentration), C_b 와 한계전류밀도(Limiting current density), I_{lim} 만으로 구할 수 있다.^(27,28)

$$h_m = \frac{(1-t_n)I_{lim}}{nFC_b} \tag{20}$$

여기서 F 는 Faraday 상수(96,487 C/mol), 전달계수(Transference number), t_n 은 석출된 구리이온 가운데 전기영동에 의하여 전극반응에 참여한 이온의 비율이다.

3. 실험장치 및 실험방법

설계된 실험장치 구성은 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 실험장치는 아크릴수지로 제작된 수조에 수직으로 세워진 양극 구리판과 음극 구리판으로 구성된다. 수조는 0.12m×0.12m×0.50m의 크기인 위가 뚫려있는 직육면체이다. 음극 구리판의 직경은 0.005m, 0.0095m, 0.0125m, 0.0285m, 0.035m이다. 양극은 음극과 마주보는 면적이 일정하면 한계전류는 양극에 따른 영향이 없으므로 충분한

Table 5 Test matrix for curvature effect

CuSO ₄ (M)	D _o (m)	H(m)	H/D _o	Ra _H	Gr _L ^{1/4} (D/H)	a + b/Pr ^{0.5} + c/Pr ²
0.1	0.005	0.02~0.28	8~56	1.1×10 ¹⁰ ~7.9×10 ¹²	3.4~5.9	12.54
	0.0095		2.1~29.5		6.5~13.5	
	0.0125		1.6~22.4		8.6~17.7	
	0.0285		0.7~9.8		20.9~40.4	
	0.035		0.6~8		25.6~49.6	

Table 6 Test matrix for Pr number effect

D _o (m)	CuSO ₄ (M)	Glycerol(M)	H(m)	Pr	Ra _H
0.0285	0.1	0	0.04~0.50	2,094	1.1×10 ¹⁰ ~2.1×10 ¹³
	0.15	0	0.04~0.48	2,183	1.6×10 ¹⁰ ~2.8×10 ¹³
	0.1	0.6	0.08~0.48	2,497	8.2×10 ¹⁰ ~1.8×10 ¹³
	0.1	1	0.08~0.48	3,058	9.9×10 ⁹ ~1.7×10 ¹³
	0.1	1.5	0.08~0.48	4,173	9.5×10 ⁹ ~4.0×10 ¹³

크기의 구리관을 사용하였다.⁽²⁷⁾ 음극은 큰 Gr_H 수가 필요한 경우에 활용하기 위하여 길이가 충분히 긴 구리관으로 제작하였다. 황산(H₂SO₄)을 1.5M 용해시켜 전기영동으로 인한 효과를 억제하였다. 전원공급장치는 VúPOWER사의 DC Power supply-IPS-18B10이며, 전압과 전류측정은 Fluke-45사의 Dual Display Multimeter이다. 황산-황산구리 수용액은 음극 구리관이 충분히 잠길 수 있을 정도로 수조의 상단면을 통해 채워 넣었다. 전극셀이 준비되면 한계전류측정 실험을 수행하고, 증가되는 전위차로 인하여 음극 표면에서 수소기체가 발생하면 실험을 종료하였다. 측정된 전위차, 전류와 같은 자료들은 컴퓨터에 저장하였다.

4. 실험범위

4.1 곡률효과

Table 5는 곡률효과에 대한 실험범위이다. 관의 직경과 높이의 비로 표시되는 종횡비는 관의 직경이 작고 높이가 클수록 높아진다. 따라서 음극의 직경 0.005m~0.035m에 대해 높이를 0.04m~0.36m로 증가시켜주었다. Pr 수는 2,094이며 Ra_H 수는 1.4×10⁹~7.9×10¹²이다. Popiel이 제시한 판별식 (18)으로 계산한 값을 Table 5에 실험범위와 함께 나타내었다. 직경이 0.005m, 0.0095m, 0.0125m일 경우 큰 차이는 없지만 우변이 좌변보다 크므로 곡률효과가 나타날 것으로 예상된다.

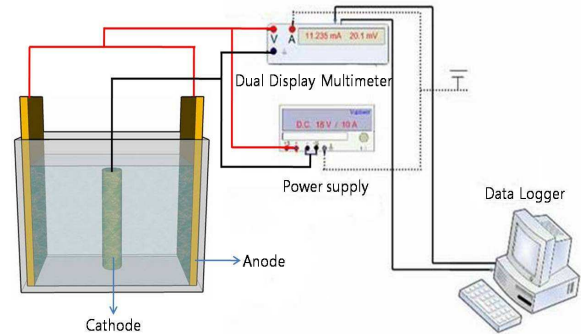


Fig. 2 The experiment equipment & system circuit

4.2 Pr 수의 영향

Table 6은 Pr 수 영향에 대한 실험범위이다. Pr 수 2,094~4,173에 대해 Ra_H 수의 범위는 9.5×10⁹~4×10¹³이다. 다양한 Pr 수를 만들기 위하여 황산구리(CuSO₄) 농도에 변화를 주었고, 글리세린(Glycerol)의 농도를 달리 첨가해 주었다. 관의 직경은 곡률효과가 무시될만한 크기의 0.0285m이며, 높이는 0.04m~0.50m이다.

본 연구에서는 무차원 수가 계산되는데 필요한 물성치를 알기위해 Fenech와 Tobias에 의해 제시된 관계식을 사용하였다. 이와 같은 물성치는 22℃에서 ±0.5%이내의 오차로 잘 맞는다고 알려져 있다.⁽²⁵⁾ 관계식 (21), (22), (23)을 사용하여 구한 물성치를 Table 7에 나타내었다.

Table 7 Various physical properties

Physical property		ρ	μ	D
CuSO ₄	Glycerol			
0.1M	+ 0M	1,103	1.28×10^{-3}	5.55×10^{-10}
0.15M	+ 0M	1,109	1.31×10^{-3}	5.43×10^{-10}
0.1M	+ 0.6M	1,103	1.44×10^{-3}	5.22×10^{-10}
0.1M	+ 1M	1,104	1.61×10^{-3}	4.79×10^{-10}
0.1M	+ 1.5M	1,107	1.93×10^{-3}	4.18×10^{-10}

$\cdot 1.343cp=1.283kg/m \cdot s$

$$\rho(kg/m^3) = (0.9978 + 0.06406M_{H_2SO_4} - 0.00167M_{H_2SO_4}^2 + 0.12755M_{CuSO_4} + 0.01820M_{CuSO_4}^2 - 0.00235M_{Glycerol} + 0.00353M_{Glycerol}^2) \times 10^{-3}. \quad (21)$$

$$\mu(cp) = 0.974 + 0.1235M_{H_2SO_4} - 0.0556M_{H_2SO_4}^2 + 0.5344M_{CuSO_4} + 0.5356M_{CuSO_4}^2 + 0.1475M_{Glycerol} + 0.2029M_{Glycerol}^2. \quad (22)$$

$$\mu D_{CuSO_4}(m^2/s) = (0.7633 + 0.00511M_{H_2SO_4} + 0.02044M_{CuSO_4} + 0.0653M_{Glycerol}) \times 10. \quad (23)$$

5. 실험결과

5.1 곡률효과

실험을 통하여 측정된 Nu_H 수를 2.1절의 수직 얇은 원형관(Vertical thin pipe)에 대한 자연대류 열전달 상관식 (12)~(19)와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 결과는 관의 직경 0.005m일 때 종횡비 2.1~29.5에 대해 실험을 수행한 결과이다. 비교결과, 곡률효과에 대한 열전달 상관식과 맞지 않았으며 Table 5에서 예상했던 바와 달리 곡률효과가 나타나지 않았다. 이 현상의 원인은 높은 Pr 수에 따른 열경계층 두께가 관의 직경보다 매우 얇기 때문인 것으로 판단된다. Bejan의 척도 관계식 (24)을 이용하여 열경계층 두께를 계산해 보면 Pr 수가 2,094일 때 0.0001m로 관의 직경에 비해 매우 작은 크기임을 알 수 있다. Fig. 3에서 열전달 상관식들마다 예측하는 Nu_H 수에 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 열전달에 영향을 미치는 원형관의 종횡비가 연구마다 서로 달랐기 때문인 것으로 판단된다.

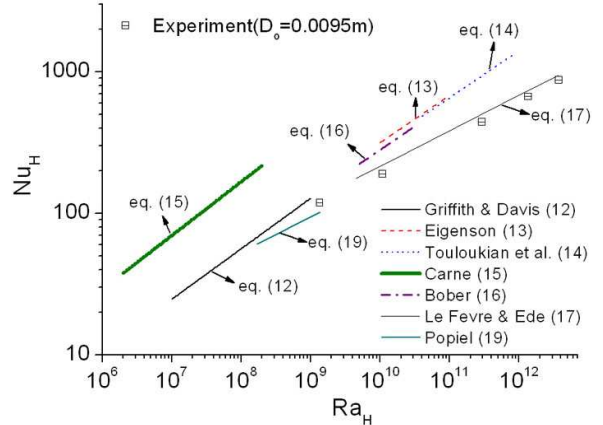
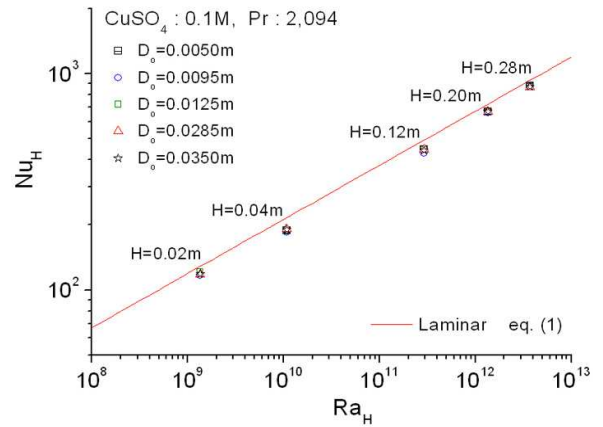
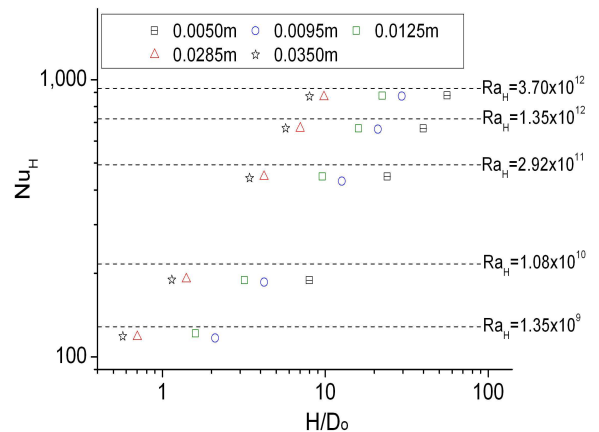


Fig. 3 Comparison of measured Nu_H with known natural convection heat transfer correlations for vertical thin pipe



(a) Nu_H vs. Ra_H for each diameter



(b) Nu_H vs. H/D_o for each Ra_H

Fig. 4 Comparison of measured Nu_H with known natural convection heat transfer correlation for vertical plate (Various D_o)

본 연구의 결과는 식 (17)로 나타난 Le Fevre와 Ede⁽¹⁹⁾의 결과와 유사함을 보이나 이는 우연일 뿐

중형비는 다르다.

$$\delta = HRa_H^{-1/4}Pr^{1/2}, \quad \delta_T = \delta Pr^{-1/2} \quad (24)$$

Fig. 4의 (a)와 (b)는 여러 가지 직경에 대해 측정된 Nu_H 수를 수직평판에서의 층류 자연대류 열전달 상관식 (1)과 비교한 결과이다. 비교결과, 수직평판에서의 층류 자연대류 상관식에 일치하였다. 이는 열경계층 두께가 관의 직경에 비해 매우 얇기 때문에 수직평판과 같은 현상이 나타나는 것으로서, Minkowycz와 Sparrow, Bejan 그리고 Elenbass의 연구결과를 뒷받침 해주는 근거이다.

5.2 Pr 수의 영향

여러 가지 Pr 수에 대해 실험한 결과를 수직

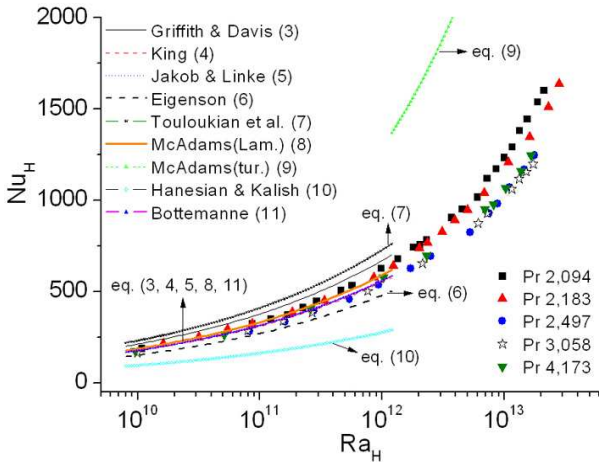


Fig. 5 Comparison of measured Nu_H with known natural convection heat transfer correlations for vertical thick pipe (Various Pr)

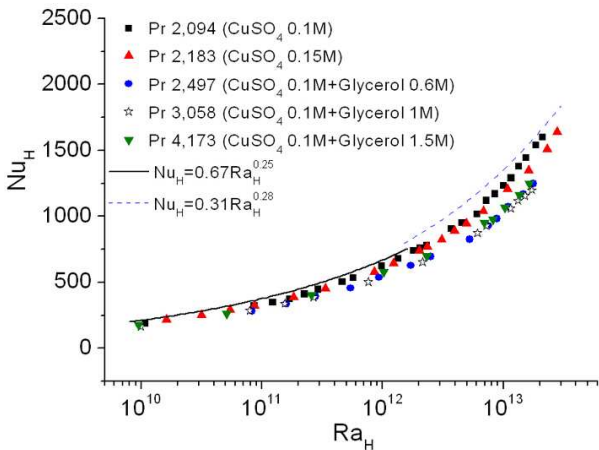
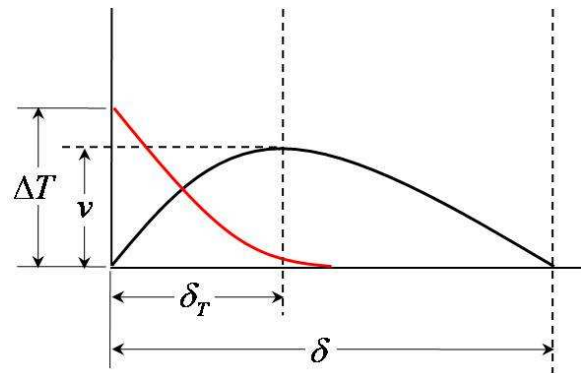
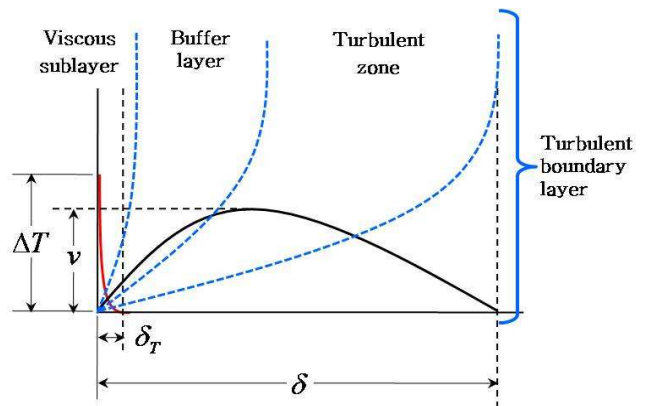


Fig. 6 Comparison of measured Nu_H with known natural convection heat transfer correlations for vertical plates (Various Pr)

두꺼운 원형관(Vertical thick pipe)과 수직평판에서의 자연대류 열전달 상관식과 비교하여 Fig. 5와 6에 각각 나타내었다. Fig. 5의 결과, Ra_H 수 $10^{10} \sim 10^{12}$ 에서 측정된 Nu_H 수는 King, Jakob와 Linke, McAdams, Bottemanne의 층류 자연대류 열전달 상관식에 대체로 일치하였고 Ra_H 수 10^{12} 이상에서는 McAdams의 난류 자연대류 상관식보다 상당히 낮게 측정되었다. 반면, Fig. 6에서 보는 바와 같이 실험 결과는 수직평판에서의 층류 및 난류 자연대류 상관식과는 매우 일치하였다. 그러나 Ra_H 수 10^{12} 이상인 난류영역에서 Pr 수가 2,183이상부터 Nu_H 수가 줄어드는 현상이 관찰되었다. 일반적으로 알려진 사실은 Pr 수가 매우 커지면 Pr 수의 영향이 나타나지 않아야 하는데 본 실험의 결과는 Pr 수가 증가함에 따라 Nu_H 수가 감소하는 현상이 나타났다. 이는 매우 큰 Pr 수에 의하여 열경계층이 난류경계층 내의 속도가 느린 층류저층(Laminar sublayer)내부에서 형성되기 때문에 이 영역에서는 대류보다 전도에 의한 열전달 영향이 커지기 때문인 것으로 판단



(a) Pr is moderately larger than 1



(b) Pr is extremely larger than 1

Fig. 7 Two length scales of the boundary layer along a heated vertical wall

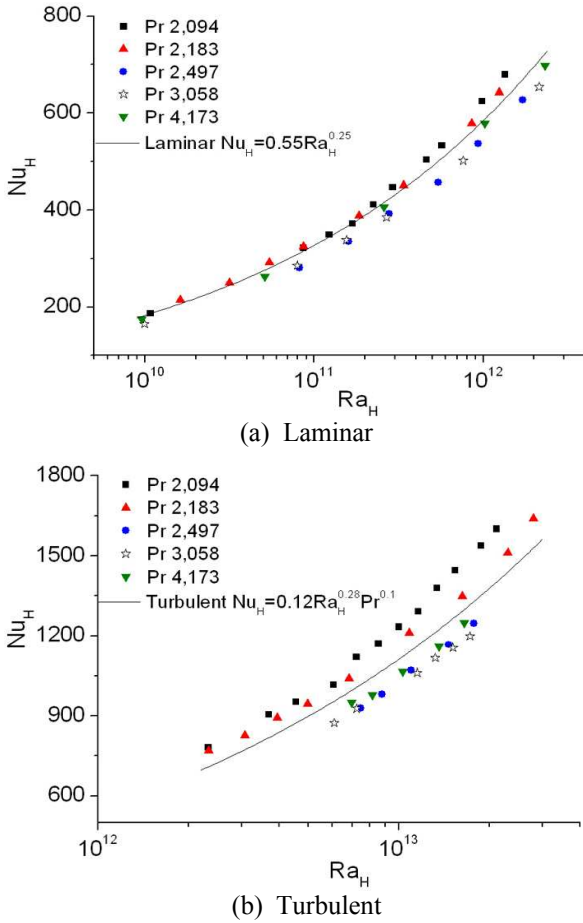


Fig. 8 The derived correlations from the results

된다. Pr 수가 적당한 크기일 경우와 매우 큰 크기일 경우 경계층의 길이척도를 Fig. 7 (a)와 (b)에 예시하였다. 이를 근거로 Fig. 8 (a)와 (b)에 수직 원형관 외부의 층류 및 난류 자연대류 상관식 (25)와 (26)을 도출하였다.

$$Nu_H = 0.55 Ra_H^{0.25} \quad \text{at } Ra_H < 10^{12} \quad (25)$$

$$Nu_H = 0.12 Ra_H^{0.28} Pr^{0.1} \quad \text{at } Ra_H > 10^{12} \quad (26)$$

5.3 Pr 불확실도 분석(Uncertainty analysis)

황산-황산구리 수용액의 전기도금계를 이용한 측정에서의 불확실도 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$Nu_H = \frac{h_m H}{D_m} \Rightarrow Nu_H = f(h_m, H, D_m) \quad (27)$$

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

음극높이 0.04m일 때 측정된 Nu_H 수의 불확실도

(Uncertainty)와 불확실도비(Fractional uncertainty)는 각각 3.34%와 1.79%였다. 따라서 전기도금계에서의 측정된 값은 매우 정확한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 자연대류 열전달 현상을 유사성 원리를 이용하여 물질전달 실험으로 모사하고 높은 Pr 수에 대하여 수직 원형관 외부에서 나타나는 곡률효과와 Pr 수가 열전달에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였다. 곡률효과에 대한 실험은 Pr 수 2,094에서 직경 0.005m~0.035m의 여러 가지 음극을 사용하여 Ra_H 수 $1.1 \times 10^{10} \sim 7.9 \times 10^{12}$ 에서 수행하였다. Pr 수가 열전달에 미치는 영향에 대해서는 곡률효과가 무시될만한 크기의 0.028m인 음극을 사용하였고 Pr 수 2,094~4,173과 Ra_H 수 $9.5 \times 10^9 \sim 4.0 \times 10^{13}$ 에서 실험을 수행하였다.

실험결과 곡률에 따른 Nu_H 수가 증가하는 현상은 확인되지 않았으며, 수직평판과 같은 현상이 나타났다. 이러한 현상의 원인은 본 실험에서 사용된 유체의 Pr 수가 1보다 매우 높기 때문에 열경계층 두께가 관의 직경에 비해 상당히 얇았기 때문인 것으로 판단된다.

실험에서 측정된 Nu_H 수는 King, Jakob와 Linke, McAdams, Bottemanne의 층류 자연대류 열전달 상관식과 비슷하였고 난류 자연대류 상관식 보다는 낮게 측정되었다. 알려진 것과 달리 본 실험에서 Pr 수가 증가함에 따라 Nu_H 수가 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 매우 큰 Pr 수에 의하여 열경계층이 난류경계층내의 속도가 느린 층류저층(Laminar sublayer)에서 형성되기 때문에 이 영역에서는 대류보다 전도에 의한 열전달 영향이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 본 실험에서 도출한 층류 상관식은 $Nu_H = 0.55 Ra_H^{0.25}$, 난류 상관식은 $Nu_H = 0.12 Ra_H^{0.28} Pr^{0.1}$ 였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Bejan, A., 2003, Convection Heat Transfer, 3rd ed., John Wiley & Sons, INC, New York, pp. 207~

- 222.
- (2) Sparrow, E. M. and Gregg, J. L., 1955, "Laminar Free Convection Heat Transfer from the Outer Surface of a Vertical Circular Cylinder," *Trans. ASME*, Vol. 78, pp. 1823~1829.
 - (3) Ede, A. J., 1976, "Advances in Free Convection," *Advance in Heat Transfer*, Vol. 4, pp. 1~64.
 - (4) Minkowycz, W. J. and Sparrow, E. M., 1974, "Local Nonsimilar Solution for Natural Convection on a Vertical Cylinder," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 96, pp. 178~183.
 - (5) Elenbass, W., 1948, "The Dissipation of Heat by Free Convection from Vertical and Horizontal Cylinders," *Journal of Applied Physics*, Vol. 19, pp. 1148~1154.
 - (6) Lefevre, E. J., 1956, "Laminar Free Convection From a Vertical Plane Surface," *9th International Congress on Applied Mechanics*, Brussels, pp.1~168.
 - (7) 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.
 - (8) Griffiths, E., and Davis, A. H., 1922, "The Transmission of Heat by Radiation and Convection," *DSIR Food Investigation Board Special Report*, London, Vol. 9.
 - (9) King, W. J., 1932, "The Basic Laws and Data of Teat Transmission," *Mechanical Engineering*, Vol. 54, pp. 347~353.
 - (10) Jakob, M. and Linke, W., "Warmeubergang Beim Verdampfen von Flussigkeiten an Senkrechten und Waagerechten Flaschen," Vol. 36, pp. 267~280.
 - (11) Eigenson, L. S., 1940, "Les Lois Gouvernam la Transmission de Chaleur aux Gaz Biatomique par les Parois Descylinder Verticaux Dans le cas de Convection Naturelle," *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, Vol. 26, pp. 440~444.
 - (12) Touloukian, Y. S., Hawkins, G. A., and Jakob, M., 1948, "Heat Transfer by Free Convection from Heated Vertical Surfaces to Liquids," *Trans. ASME*, Vol. 70, pp. 13~18.
 - (13) McAdams, W. H., 1954, *Heat Transmission*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
 - (14) Hanesian, D., and Kalish. R. L., 1970, "Heat Transfer by Natural Convection with Fluorocarbon Gases," *IEEE Trans. Parts, Mater. Package.*, Vol. 6, pp. 146~148.
 - (15) Bottemanne, F. A., 1972, "Experimental Results of Pure and Simultaneous Heat and Mass Transfer by Free Convection About a Vertical Cylinder," *Appl. Sci. Res.*, Vol. 25, pp. 372~382.
 - (16) Carne, E. B., 1937, "Heat Loss by Natural Convection from Vertical Cylinders," *Phil. Mag.*, Vol. 24, pp. 635~653.
 - (17) Bober, K., 2006, Natural Convection Heat Transfer from Vertical Cylinders, PhD Thesis, Poznan University of Technology, Poznan.
 - (18) Cebeci, T., 1974, "Laminar-Free-Convective-Heat Transfer from the Outer Surface of a Vertical Slender Circular Cylinder," in: *Proceedings of the 5th International Heat Transfer Conference*, vol. 3. Paper NC 1.4, Tokyo, pp. 15~19.
 - (19) E. J. Le Fevre and A. J. Ede, 1956, "Laminar Free Convection from the Outer Surface of a Vertical Circular Cylinder," in: *Proceedings of the 9th International Congress Applied Mechanics*, Vol. 4. Brussels, pp. 175~183.
 - (20) Pepiel, C. O., Wojtkowiak, J. and Bober, K., 2007, "Laminar Free Convective Heat Transfer from Isothermal Vertical Slender Cylinder," *Int. J. Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 32, pp. 607~613.
 - (21) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2003, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5rd ed., Wiley, New York, pp. 399~401.
 - (22) Levich., V. G., 1962, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood.
 - (23) Agar., J. N., 1947, "Diffusion and Convection at Electrodes," *Discussion of Faraday Soc.*, 1, pp. 27~37.
 - (24) Selman, J. R. and Tobias., C. W., 1978, "Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique," *Adv. Chem. Eng.* Vol. 10, pp. 211~318.
 - (25) Fenech, E. J. and Tobias, C. W., 1960, *Electrochim. Acta* 2, 311.
 - (26) 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, 251~258.

- (27) 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.

- (28) 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.