

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.5.481

수직관내 발달 유동의 층류혼합대류 연구

고 봉 진* · 정 범 진**†

* (주) 액트, ** 제주대학교 에너지공학과

Study on Laminar Mixed Convection of Developing Flow in Vertical Pipe

Bong-Jin Ko* and Bum-Jin Chung**†

* Atomic Creative Technology Co., Ltd

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

(Received September 2, 2009 ; Revised March 3, 2010 ; Accepted March 3, 2010)

Key Words: Analogy(유사성), Developing Flow(발달 유동), Electroplating System(전기도금계), Laminar(층류), Mixed Convection(혼합대류), Vertical Pipe(수직관)

초록: 수직관내 발달 유동의 층류혼합대류에 관한 본 연구는 Re 1,000에서 3,000, Gr_H 10^5 에서 10^8 , Pr 2,000에서 7,000 그리고 종횡비 1부터 7에 대한 범위에 대해서 수행되었다. 유사성(Analogy)의 원리를 이용하여 수직관내 발달 유동의 층류혼합대류 열전달계를 물질전달계로 모사하였다. 물질전달계로써 Nu 수는 기존의 문헌들의 그것들보다 상당히 큰 값이었는데, 이는 본 실험의 높은 Pr 수 때문이다. 본 연구에서의 종횡비는 완전발달 할 만큼 크지 않았기 때문에, 실험 결과는 긴 수직관내 혼합대류 유동보단 평행평판에서의 혼합대류 유동과 유사하였다. 본 연구의 결론으로서 낮은 종횡비와 Gr_H 수를 갖는 수직관내 발달 유동의 층류혼합대류 유동은 수직 평판에서의 층류혼합대류 유동과 유사한 거동을 보인다는 것이다. 그리고 종횡비와 Gr_H 수가 증가할 때 유체의 거동은 수직관내 완전발달 유동과 유사한 현상을 보였다.

Abstract: Experiments on laminar mixed convection in a vertical pipe were performed for the Re range 1,000-3,000, the Gr_H range 10^5 - 10^8 , the Pr range 2,000-7,000, and aspect ratio range 1-7. Using the analogy concept, heat transfer systems were simulated by mass transfer systems. A cupric acid-copper sulfate electroplating system was adopted as the mass transfer system, and the mass transfer rates were measured. The measured Nu values were far greater than those previously reported because of the large value of Pr in this experiment. As the aspect ratio in this study was not sufficiently large for the flow to be fully developed, the test results were similar to those for mixed convection on a vertical plate rather than that inside a long vertical pipe. It was concluded that the behavior of laminar mixed convection of a developing flow in a vertical pipe at a low aspect ratio and low Gr_H is similar to that of laminar mixed convection in the vertical plate. As the aspect ratio and Gr_H increase, the laminar mixed convection phenomena becomes similar to that observed in a fully developed flow in the vertical pipe.

- 기호설명 -

A : 종횡비(Aspect ratio) (H/D)
 C_b : 모액농도($kmole/m^3$)
 F : 패러데이 상수($Coulomb/kmole$)
 D : 음극 구리관 내경(m)
 h_m : 물질전달계수(m/s)
 H : 음극 구리관의 높이 (m)
 I_{lim} : 한계전류밀도(A/m^2)

n : 이온의 원자가
 t_n : 이온이 분율
 D_m : 확산계수(m/s^2)
 H : 음극 구리관 높이(m)
 Gr_D : Grashof number($\beta\Delta\rho gD^3/v^2$)
 Gr_H : Grashof number($\beta\Delta\rho gH^3/v^2$)
 Nu_D : Nusselt number(hD/k)
 Nu_H : Nusselt number(hH/k)
 Pr : Prandtl number(ν/α)
 Ra : Rayleigh number($GrPr$)

† Corresponding Author, bjchung@jejunu.ac.kr

- Re : Reynolds number(vD/μ)
- Sc : Schmidt number(ν/D)
- Sh : Sherwood number($h_m H/D$)
- U : 불확실도(Uncertainty)

1. 서 론

자연대류와 강제대류가 공존하는 혼합대류는 비교적 최근야 공학분야에서 관심을 받고 있다. 혼합대류는 운동량 및 열교환 메커니즘에 따라 층류와 난류로 구분되며 유동의 방향에 따라서 순부력 유동(Aiding flow, 자연대류와 강제대류가 같은 방향인 것), 역부력 유동(Opposing flow, 반대 방향인 것), 부력과 강제대류의 방향이 직각인 것으로 구분된다.

물질전달계(Mass transfer systems)와 열전달계(Heat transfer systems)는 동일한 수학적 지배방정식으로 지배되기 때문에 유도되는 현상은 매우 유사하며 유사한 무차원수로 기술될 수 있다. 그리고 적절한 물질전달계를 사용하면 고부력 현상을 용이하게 모사할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 유사성(Analogy)의 원리를 이용하여 수직관내 발달 유동의 층류혼합대류 열전달계를 물질전달계로 모사하였다. 물질전달계로써 황산-황산구리($H_2SO_4 - CuSO_4$) 수용액의 전기도 급계를 채택하여 물질전달계수를 측정하였다.

실험은 Gr_H 수 10^5 에서 10^8 , Re 수 1,000에서 3,000, Pr 수 2,000에서 7,000까지의 범위에서 수행되었다. 순부력과 역부력 유동에 대해 동일한 조건에서 실험을 수행하였고 그 결과를 수직관내 완전발달 유동의 혼합대류 그리고 수직평판에서의 혼합대류와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 혼합대류 열전달

강제대류는 외력(External force)에 의해 구동되며 자연대류는 부력과 같이 내력(Internal force)에 의해 구동된다. 혼합대류는 한 시스템 내에서 자연대류와 강제대류가 같이 존재할 때 발생한다. 자연대류의 지배인자는 무차원수인 Gr 수 혹은 Ra 수이다. Gr 수가 10^9 이하일 때는 층류로 보며 그 이상일 때는 난류로 본다. 강제대류의 지배 인자로는 Re 수를 사용하며, 일반적으로 2,300을 기준으로 하여 층류와 난류를 구분한다.

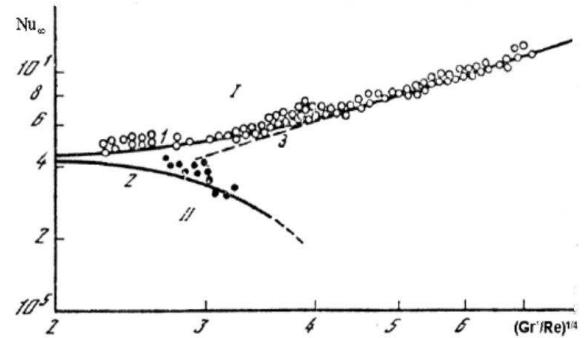


Fig. 1 Effect of buoyancy on the fully developed Nusselt number for laminar assisted flow in uniformly heated vertical cylinder tubes⁽¹⁾

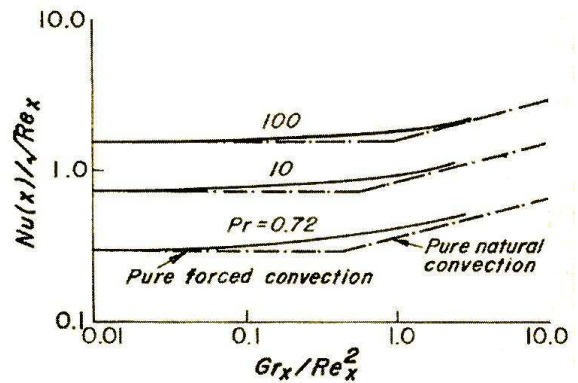


Fig. 2 Mixed convection phenomena on a vertical plate⁽²⁾

그러나 이 값은 항상 일정한 것은 아니며 유체의 성질, 기하학적 구조에 따라서 달라진다.

Fig. 1은 Hallman⁽¹⁾이 실험적 연구를 통해 제시한 수직관내 층류혼합대류의 열전달 현상을 나타낸다. 순부력 유동일때는 Re 수가 동일한 강제대류보다 열전달이 증가한다. 역부력 유동일때는 반대로 Re 수가 동일한 강제대류보다 열전달이 감소한다. 이는 순부력 유동인 경우 벽면 근처에서 유체의 속도가 부력과 강제대류에 의해 증가되기 때문이다. 역부력 유동인 경우 부력의 방향과 유동의 방향이 반대가 되어 속도가 감소되기 때문에 열전달은 감소한다.

Fig. 2는 Lloyd와 Sparrow⁽²⁾가 제시한 수직평판에서의 층류혼합대류 열전달 현상이다. 수직평판에서의 층류혼합대류의 경우 순부력 유동과 역부력 유동의 열전달이 동일함을 알 수 있다. Gr 수, Re 수, Pr 수가 증가할 때 열전달은 항상 증가한다.

2.2 문헌조사

Watzinger와 Johnson⁽³⁾은 차가운 벽면의 수직관을 따라서 따뜻한 유체를 위에서 아래로 흘려보내면서 실험을 수행하였다. 자연대류의 방향과 강제대류의 방향이 서로 같을 때 측정된 혼합대류의 Nu_D 수는 Re 수가 같은 강제대류의 Nu_D 수 보다 증가하였다. Zeldin과 Schmidt⁽⁴⁾는 수직관 내에서 발달되는 유체 거동에 대한 수치해석을 통하여 입구영역과 완전발달 영역의 속도분포를 구하였다. 이를 통하여 강제대류가 우세한 영역과 혼합대류가 우세한 영역을 Gr_D/Re 의 비로 나타내었다. Collins⁽⁵⁾는 수직관 내에서 순부력과 역부력 유동에서의 등온(Isothermal)과 균일열유속(Uniform heat flux) 상황에서의 혼합대류에 관한 실험을 수행하였다. 실험유체로는 물이 사용되었고, 실험결과는 Scheele 등⁽⁶⁾의 결과와 비교되었다. Hallman⁽¹⁾은 수직관내 층류 혼합대류 실험을 완전 발달된(Fully developed) 유동영역에서 순부력 유동과 역부력 유동에 대해 수행하였다. 실험유체로 물을 사용하였고, 실험범위는 Ra_D 수 20~10,000, Re 수 2,000 이하였다. 실험결과는 순부력 유동에서는 열전달이 순수 강제대류보다 증가하였고 역부력 유동에서는 10% 까지 열전달이 감소하였다. Weinberg는 높은 온도로 유지되는 벽면을 따라 물과 오일을 위로 흘려보내며 열전달을 측정하였다. Gr_D 수가 증가하면 열전달이 상승함을 관찰하였고 벽온도의 작은 변화가 유동을 쉽게 난류로 변화시킬 수 있음을 보였다. Martinelli⁽⁷⁾ 등은 순부력 유동의 결과를 기존 문헌들과 비교하고 종합하여 새로운 상관식을 도출하였다. 도출된 상관식에서 기존문헌의 자료는 오차범위 약 70% 이내에 포함되었다. Walter와 Daniele⁽⁸⁾은 수직관내 발달 유동의 순부력 유동에 관하여 속도와 열전달 분포를 관찰하였다. 실험범위는 Re 수 800에서 3,200까지이며, Gr_D 수 1.4×10^8 에서 3.9×10^8 였다. 실험결과는 $RePr(D/H)$ 가 2,000 근처에서 열전달이 최소가 되는 것으로 나타났다. 그리고 Gr_D 수가 증가할수록 열전달은 증가됨을 보였다.

Lloyd와 Sparrow⁽²⁾는 수직평판에서 층류혼합대류 범위 내에서 Pr 수의 영향에 대해서 조사하였다. 실험에 사용된 Pr 수 범위는 0.003에서 100까지였으며, 실험결과 Pr 수가 증가할수록 Nu_H 수가 증가함을 보였다. Brown⁽⁹⁾은 수치해석을 통해 수직평판에서 Pr 수 0.7, Gr/Re^2 가 0에

서 0.2에 대해 속도, 온도, 열전달량을 Pr 수와 Gr_H/Re^2 의 비로 나타내었다. Gryzgoridis⁽¹⁰⁾은 Pr 수 0.72에서 수직평판 순부력 유동의 국소 속도, 온도, 열전달량을 조사하였다. 기존문헌과 온도분포는 일치하였으나, 속도와 열전달량은 많은 차이를 보였다. 그리고 강제대류의 영향은 $0.1 < Gr_H/Re^2 < 3$ 인 범위 내에서 항상 열전달을 증가시킴을 보였다.

수직관내 혼합대류 현상에 대한 문헌의 조사결과, 부력의 영향으로 인하여 열전달이 변화함을 확인할 수 있었다. 한편 실험적 연구에 있어서는 순부력 유동실험이 역부력 유동 실험보다 많이 수행되었으며 순부력 유동에 대해서만 열전달상관식이 제시되고 있었다. 이는 역부력 유동인 경우 유동이 불안정하여 쉽게 층류에서 난류로 천이되므로 실험을 수행하기가 어렵기 때문으로 판단된다. 발달(Developing)유동에 대해서는 유동의 속도와 온도분포에 관한 연구가 수행되었으나, 순부력과 역부력 유동의 열전달의 비교를 한 연구는 아직까지 수행되지 않았다.

2.3 전기도금계를 이용한 유사성 실험방법

유사성(Analogy)은 물질전달계와 열전달계의 지배방정식이 유사하며, 경계조건이 동일하다면 해도 동일하게 나타남을 뜻한다. 이를 이용하면 열전달 문제를 물질전달 문제로 또 그 역으로 변환하여 취급할 수 있다.⁽¹¹⁾ Table 2는 열전달계와 물질전달계의 무차원수 관계를 나타낸 것이다. 열전달에서 Pr 수는 물질전달계에서 Sc 수로 Nu 수는 Sh 수로 사용되며, Gr 수는 두 계 모두에서 동일하게 사용된다. 이러한 무차원수 관계를 사용하여 열전달의 문제를 물질전달 문제로 변환하여 풀 수 있게 된다.

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 $\frac{h_c H}{k}$	Sherwood number $\frac{h_m H}{D}$
Grashof number $\frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2}$	$\frac{gH^3 \Delta\rho}{\nu^2 \rho}$

황산-황산구리($H_2SO_4-CuSO_4$) 수용액에 구리전극을 사용하여 전압을 인가하면 양극에서 구리이온이 생성되어 음극으로 이동하고 음극표면에서 전자를 얻어 석출(도금)된다. 이때 구리 이온의 이동이 열의 이동으로 모사되며 음극 구리전극은 가열벽면(Heated wall)이 된다. 왜냐하면 음극 근처의 황산구리 수용액은 구리이온 석출에 따라서 가벼워져 부력이 발생하기 때문이다.

전기도금계를 이용하여 물질전달계수를 구할 때에는 음극표면에서의 구리이온의 농도를 알기 어렵다. 이를 해결하기 위하여 한계전류법이 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 (1)에서 물질전달계수(Mass transfer coefficient), h_m 은 모액 농도 C_b 와 한계전류 밀도(Limiting current density), I_{lim} 만으로 결정된다.

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

전기도금계(Electroplating system)는 1940년경 Levich⁽¹²⁾의 회전디스크 전극에서 개발된 대류확산 관계식과 자연대류에 대한 대류확산이론이 정립되면서부터 물질전달연구에 이용되기 시작하였다. 그 후 Selman과 Tobias⁽¹³⁾가 물질전달 상관식을 체계적으로 정리하였으며, Zaki 등은⁽¹⁴⁾ 물질전달 실험에서 널리 이용되고 있음을 보고하였다. 전기도금계를 이용하여 측정된 물질전달 상관식은 동일한 조건에서 측정된 열전달상관식과 유사하기 때문에 해석적으로 유도된 상관식을 검증하는 과정에 종종 이용되어 왔다.⁽¹⁵⁾

전기도금계를 이용하여 열전달계를 모사할 경우, 높은 Gr_H 수를 작은 실험장치에서 구현할 수 있고 열 누설(Heat leakage)과 복사 열전달(Radiation heat transfer)의 영향에서 자유롭다. Chung⁽¹⁶⁾ 등은 유사성을 이용한 실험기법을 층류 강제대류 및 층류/난류 자연대류의 전형적인 열전달 문제에 적용하여 기지의 열전달상관식을 예측할 수 있음을 확인하였고 실험기법의 유용성을

입증한 바 있다.

3. 실험장치

실험장치는 크게 실험부와 자료측정부로 구분된다. Fig. 3은 본 실험장치의 개략도이다. 그림에서 왼편은 실험부에, 오른편은 자료측정부에 해당한다. 실험부는 수조에 들어있는 실험유체가 펌프를 통해서 유량계를 거쳐 시험부(Test section)로 들어가는 구조이다. 시험부를 통과한 유체는 다시 수조로 들어가서 실험을 하는 동안 순환한다. 실험을 하는 동안 펌프를 통과한 유체가 가열되지 않도록 수조에는 30L의 충분한 실험유체가 채워진다. 시험부에서 음극은 직경 0.032m인 구리관이 그리고 양극은 직경 0.002m인 구리봉이 사용된다. 음극 구리관은 가열벽을 모사하므로 Gr_H 수를 조절하는 역할을 하며 본 실험에서는 높이 0.04m부터 0.24m까지 사용되었다.

자료측정부에는 전압을 공급하는 VüPOWER사 IPS18B10모델 파워서플라이와 전압과 전류를 동시에 측정하는 Fluke사 45모델 듀얼 멀티미터가 설치되어 있다. 그리고 멀티미터에서 측정된 자료를 실시간 저장하기 위해서 컴퓨터가 연결되어 있다.

층류혼합대류 역부력 유동에서는 쉽게 난류로 천이되는 현상이 발생한다.⁽⁶⁾ 이를 방지하고 시험부에 진입하기 전에 유동을 안정화하기 위하여 본 실험에서는 Flow straightener를 수직관 내에 설치하였다. 이는 관의 직경을 줄여서 유체가 시험부에 도달하기 전에 층류에서 완전발달상태가 되게 하는 것이다. 이렇게 함으로써 유동의 섭동 발생을 억제하였다.

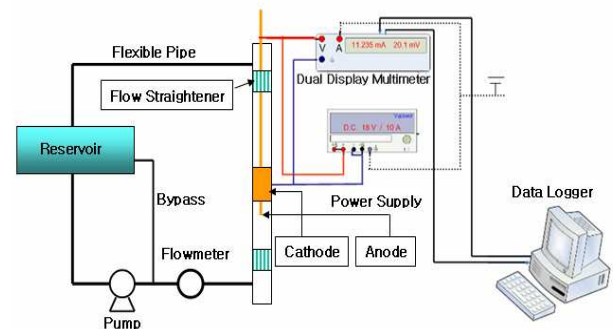


Fig. 3 The test rig & system circuit

4. 실험범위 결정

본 연구는 열전달 현상을 물질전달로 모사하는 것이기 때문에 비교대상인 열전달 연구가 필요하다. 비교대상 연구로는 완전발달 유동에서 순부력 유동에 관하여 실험이 수행된 Weinburg와 Watzinger와 Johnson의 연구를 선택하였다. 이들 문헌을 선택한 이유는 비교적 실험장치의 크기와 실험범위가 자세하게 알려졌기 때문이다. 해당 실험범위는 Table 2와 같다.

한편 대부분의 혼합대류에 관한 기존문헌에서 Gr 수의 길이 척도는 관의 지름(D)을 사용하였다. 이는 하나의 실험장치에 대해서는 유의미하지만 타 실험을 비교할 때에는 적절하지 않다. 왜냐하면 자연대류에 대한 구동력의 절대값은 높이에 민감한 함수이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 기존문헌의 Gr_D 수를 Gr_H 수로 변환하였고 Table 3에 나타내었다.

Table 4는 본 연구에서 수행된 실험범위를 나타내며, 기존문헌과의 차이점으로는 중형비가 1~7이며, 황산-황산구리 수용액을 사용하였기 때문에 Pr 수가 2,000 이상이다.

Table 2 Experimental range of selected literatures

	Fluid	Gr_D	Pr	Re	Nu_D
Weinberg	Oil	8×10^4	49	89 ~653	10~20
	Water		1.65	531 ~2700	20~25
Watzinger & Johnson	Water	8×10^6 ~ 1×10^8	4.4 ~2.5	1540 ~1675	30~60

Table 3 The value of changed Gr_H from Gr_D

	D (m)	H (m)	A (H/D)	Gr_D	Gr_H
Weinberg	0.128	16	126	8×10^4	6.5×10^8
Watzinger & Johnson	0.603	12	20	8×10^6 ~ 1×10^8	6×10^7 ~ 6×10^9

Table 4 Test matrix

Glycerol (M)	H (m)	A (H/D)	Pr	Re	Gr_H
1~2.3	0.04 ~0.24	1.2 ~7.5	2000 ~7000	1000 ~3000	1×10^5 ~ 1×10^8

실험유체에서 전기영동의 효과를 억제하기 위해 황산이 사용되며 농도는 1.5M로 하였다. 황산구리 농도는 낮은 Gr_H 수를 만들기 위해서 0.01M로 일정하게 유지되었다. Pr 수의 변화를 위해서 글리세린을 1M에서 2.3M까지의 5가지 농도로 변화시키며 첨가하였다. 순부력 유동과 역부력 유동 각각에 대하여 Re 수는 1,000, 2,000, 3,000의 3가지로 그리고 높이(H)는 0.04, 0.1, 0.16, 0.24m로 바꾸어 총 60가지 경우의 실험을 수행하였다.

5. 실험결과

5.1 기존문헌과의 비교

Fig. 4는 Re 수가 1,000일 때 본 실험의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 폐(Solid) 도형은 순부력 유동, 개(Open) 도형은 역부력 유동의 결과를 나타낸다.

순부력 유동과 역부력 유동에 대하여 측정된 Nu_D 수는 Gr_H/Re 이 증가할 때 모두 감소하는 경향을 보인다. Gr_H/Re 는 자연대류의 구동력과 강제

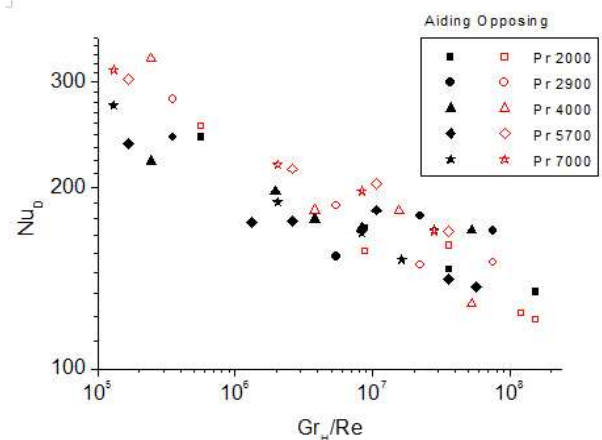


Fig. 4 Comparison between aiding flow and opposing flow at Re 1000

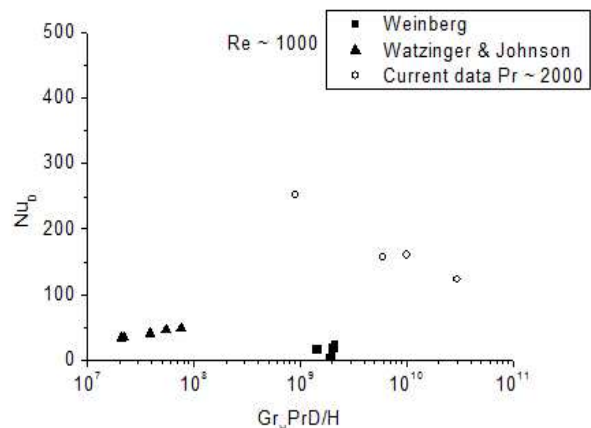


Fig. 5 Comparison between current data and literatures at Re 1000

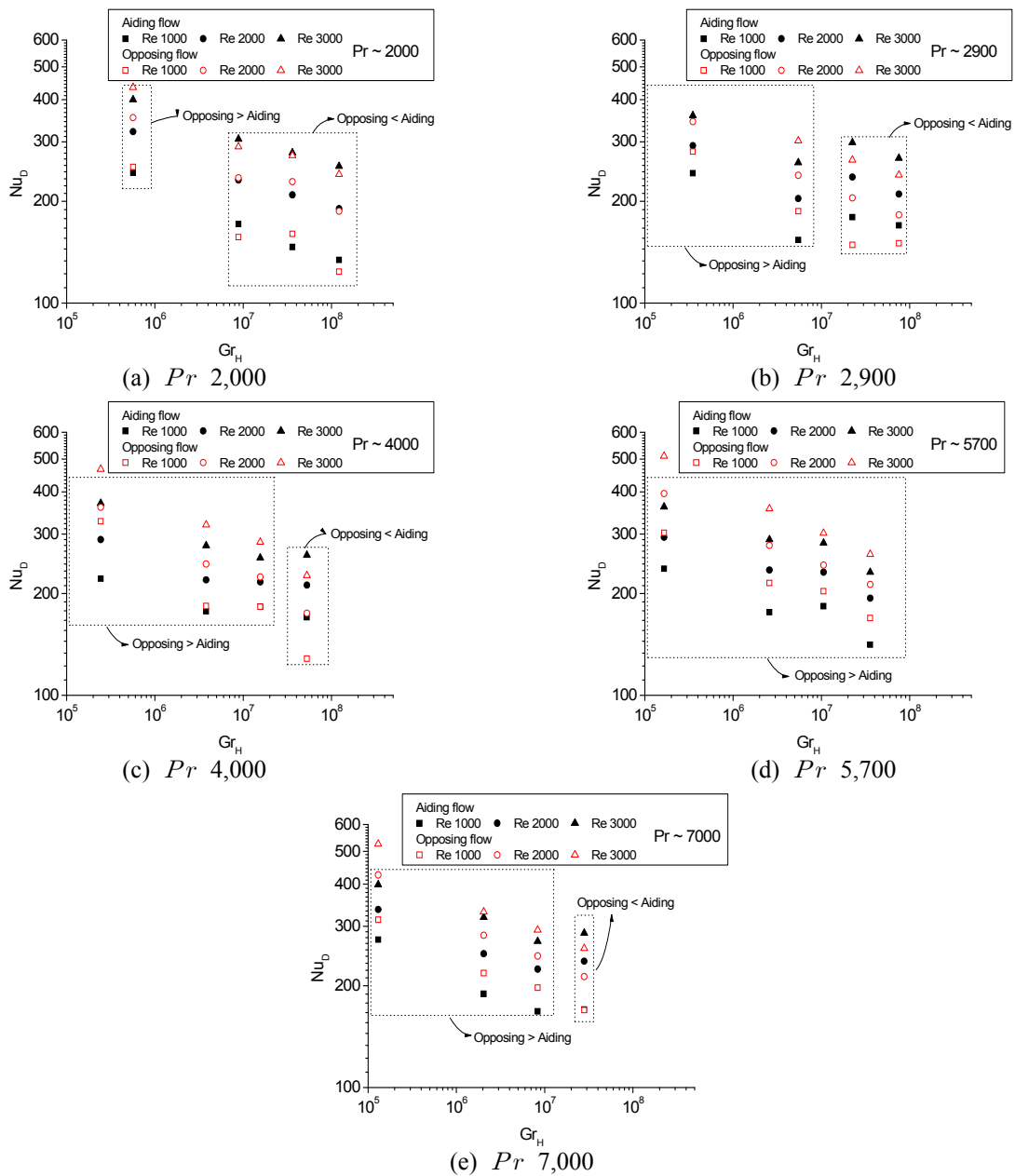


Fig. 6 The comparison between aiding flow and opposing flow data at each Pr

대류의 구동력의 비를 의미하며 이 값이 커지면 상대적으로 자연대류의 구동력이 증가하는 것이다. 낮은 Gr_H/Re 에서 역부력 유동의 열전달량이 순부력 유동보다 크지만 Gr_H/Re 가 증가하면 유사해지는 경향을 보인다. 이는 다른 Re 수에 대한 실험의 경우에도 위와 동일하게 나타났다. 기존문헌에서 완전 발달한 혼합대류는 Gr_H/Re 가 증가 할 때 순부력 유동 Nu_D 수는 증가하고, 역부력 유동 Nu_D 수는 감소한다. 한편 발달(Developing)유동의 경우는 거의 순부력과 역부력 유동이 동일한 값을 보였다.

Fig. 5는 Weinberg와 Watzinger와 Johnson의 결과와 비교한 것이다. 폐도형은 기존문헌의 결과이며, 개도형은 본 실험의 Pr 수 2,000일 때의 결과이다. 비교는 동일한 Re 수 1,000에서 수행된 순부력 유동의 결과이다.

실험의 결과가 기존문헌보다 Nu_D 수가 크게 나타났다. 또한 Weinberg와 Watzinger와 Johnson의 결과는 모두 $Gr_H Pr D/H$ 가 증가할 때 Nu_D 수가 증가하는데 반하여 본 실험의 결과는 감소하는 경향을 보였다. 이는 본 실험의 종횡비가 7 이하로 유

동이 완전발달(Fully developed)되지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 본 실험에서 사용한 유체의 Pr 수가 수천에 해당하는 매우 큰 값을 가지기 때문에 Nu_D 수가 크게 나타난 것으로 사료된다.

5.2 순부력과 역부력 유동 Nu 수 비교

Fig. 6은 실험결과를 여러 가지 Pr 수에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 폐도형은 순부력 유동의 결과를 나타내며, 개도형은 역부력 유동을 나타낸다. 그리고 사각형은 Re 수 1,000, 원은 Re 수 2,000, 삼각형은 Re 수 3,000을 각각 나타낸다. Fig. 6의 모든 경우에서 Gr_H 수 2×10^7 이상인 자료는 순부력 유동의 Nu_D 수가 역부력 유동의 것보다 크다. 그러나 Gr_H 수 2×10^7 이하에서는 그와 반대 현상이 나타난다. 이는 Gr_H 수가 2×10^7 보다 큰 경우 유동이 완전발달에 가까워지며 그 이하에서는 발달중(Developing)인 것으로 판단된다. 모든 실험은 정해진 높이 0.04, 0.1, 0.16, 0.24m에서 수행되었으며, 높이가 높아질수록 Gr_H 수가 증가되며 중형비는 커지기 때문에 유동은 완전발달에 가까워지는 것으로 판단된다.

(a)와 (b)인 경우 Gr_H 수 2×10^7 이하 자료는 높이가 0.04, 0.1m에서 수행된 것이며 이상에서는 0.16와 0.24m에서 수행된 것이다. (c), (d), (e)인 경우 Gr_H 수 2×10^7 이하 자료는 0.04, 0.1, 0.16m에서 실험이 수행된 결과이며 오직 0.24m에서만 수행된 결과만 Gr_H 수 2×10^7 이상이다.

5.3 수직평판의 혼합대류와 비교

수직관내 유동에서 열경계층이 완전발달하지 않은 경우 도관내 유동과 달리 기하구조에 영향을 적게 받을 것이므로 수직평판에서의 혼합대류와 가깝다고 보고 본 실험의 결과를 기존 수직평판의 문헌들과 결과를 비교하였다.

수직평판의 혼합대류의 결과와 비교하기 위해서 무차원수의 길이척도를 모두 관의 지름(D)에서 높이(H)로 바꾸었다. Fig. 7은 길이척도를 변경했을 때의 수치를 비교한 것이다. 그림에서 폐도형은 길이척도를 높이(H), 개도형은 길이척도를 관의 지름(D)로 했을 때 결과를 나타내며, 점선은 수직평판에서의 자연대류 상관식을 나타낸다.

Fig. 7에서 길이척도를 높이(H)로 한 결과는 Gr_H 수가 증가할 때 순부력과 역부력 유동에 관계없이 Nu_H 수가 증가하였고, 길이척도를 관의

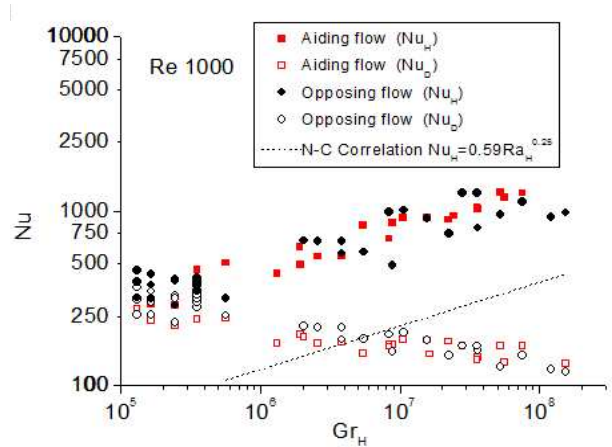


Fig. 7 The comparison between Nu_H and Nu_D

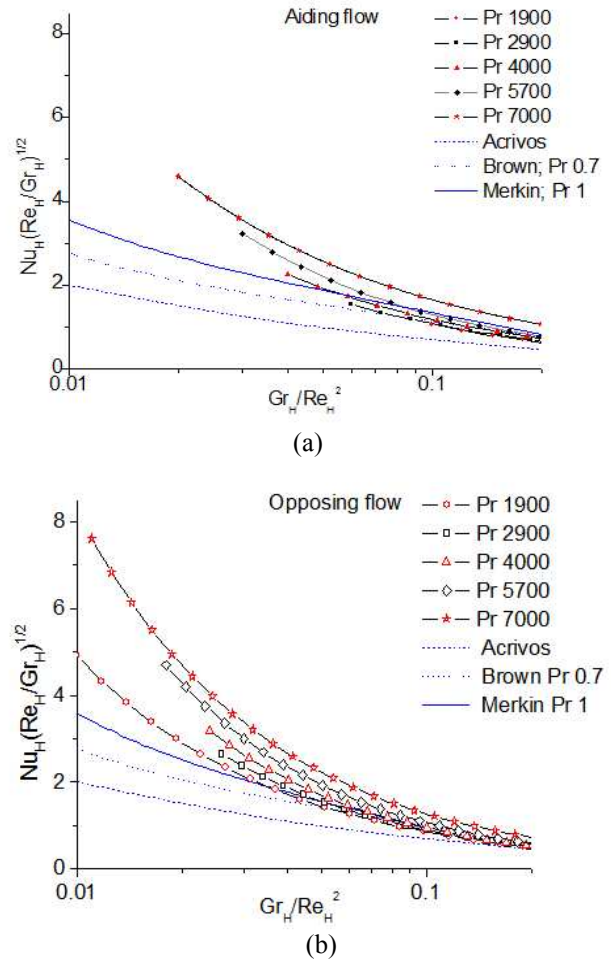


Fig. 8 The comparison between current data and literatures on a vertical plate : (a) Aiding flow, (b) Opposing flow

지름(D)으로 한 결과는 Nu_D 수는 감소함을 보인다. 그리고 길이척도 높이(H)로 했을 때 결과

는 기존 수직평판의 열전달 현상과 일치한다. 이는 Nu 수의 정의에서 Nu_H 수를 사용하면 식에 높이(H)를 포함하므로 Gr_H 수가 증가하면 당연히 Nu_H 수도 증가하기 때문이다.

Fig. 8은 실험결과를 수직평판의 혼합대류 문헌과 비교한 결과이다. 비교문헌에서의 자료는 정확한 Gr_H 수와 Re 수 대신 Gr_H/Re^2 비로만 제시되었기 때문에 본 실험 결과를 Gr_H/Re^2 로 하여 비교하였다. Fig. 8에서 (a)는 순부력 유동의 결과이며, (b)는 역부력 유동의 결과이다. Gr_H/Re^2 이 증가함에 따라 $Nu_H(Re_H/Gr_H)^{1/2}$ 가 체계적으로 감소하는 경향이 동일하게 나타난다. 또한 Pr 수가 클수록 $Nu_H(Re_H/Gr_H)^{1/2}$ 의 절대치가 높아지지만 Gr_H/Re^2 가 0.1 정도가 되면 수렴함을 보인다. 즉 이러한 결과는 본 실험의 결과가 수직평판에서의 혼합대류에 관한 기존 연구와 매우 잘 일치함을 보여준다.

5.4 불확실도 분석(Uncertainty analysis)

본 연구에서 전기구리도금계를 이용한 측정에서의 불확실도는 전통적인 자료 정리 방정식(Data reduction equation)을 이용하여 분석되었다. Nu_D 수가 최종적인 변수이며 이는 물질전달 계수 (h_m), 관지름 (D), 그리고 확산계수 (D_m)로 구성된다. 그러므로 자료 정리 방정식과 불확실도 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$Nu_D = \frac{h_m D}{D_m} \Rightarrow Nu = f(h_m, D, D_m)$$

$$U_{Nu_D}^2 = \left(\frac{\partial Nu}{\partial h_m} U_{h_m} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial D} U_D \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial D_m} U_{D_m} \right)^2 \quad (2)$$

각 변수 (U_{h_m} , U_D , U_{D_m})들의 불확실도는 눈금의 절반 값과 같은 기초적인 측정 오차와 더불어 자료 정리 방정식으로 다시 평가된다. 계산된 평균 Nu_D 수의 오차는 9.75이며 부분 불확실도(Fractional uncertainty)는 3.92%였다. 그러므로 전기구리도금계에서 수직관내 층류혼합대류는 매우 정확한 측정으로 판단된다.

6. 결 론

수직관내 발달 유동의 층류혼합대류 열전달 현상을 실험적으로 연구하였다. 유사성(Analogy) 원

리를 이용하여 열전달 실험을 전기도금계(Electroplating system)를 이용한 물질전달 실험으로 모사하였다.

Gr_H 수는 $10^5 \sim 10^8$ 였고 Re 수는 1,000, 2,000, 3,000, 그리고 Pr 수는 2,000~7,000에 대하여 실험이 수행되었다. 장치의 종횡비는 1~7 였다.

본 연구에서 측정된 Nu_D 는 Watzinger와 Johnson의 결과보다 높게 나타났다. 이는 본 연구에서 사용된 유체의 높은 Pr 수에 기인한다.

완전발달된 혼합대류에서는 순부력 유동의 경우 Nu_D 는 순수한 강제대류의 그것보다 증가하고 역부력 유동의 경우 그 반대로 나타나야 하지만 본 연구의 결과는 그렇지 않았다. 이는 본 연구의 종횡비가 최대 7에 불과하여 유동이 완전발달에 이르지 않은 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구의 결과를 수직평판에서의 혼합대류에 관한 기존 연구와 비교한 바, Gr_H/Re^2 이 증가함에 따라서 $Nu_H(Re_H/Gr_H)^{1/2}$ 이 감소하는 경향, $Nu_H(Re_H/Gr_H)^{1/2}$ 값의 Pr 수와의 상관관계가 동일한 경향을 보임을 확인할 수 있었다.

또한 본 실험의 결과를 Nu_D-Gr_H 곡선으로 나타낸 바, Gr_H 가 2×10^7 이하에서는 역부력 유동의 Nu_D 수가 순부력 유동의 그것보다 크게 나타났고 Gr_H 수가 2×10^7 이상에서는 일관되게 그 반대로 나타났다. 이는 Gr_H 수가 커지면 경계층이 성장하여 상호작용이 발생하므로 경계층이 서로 간섭을 하여 완전발달의 경우와 유사한 유체의 거동을 보였고, Gr_H 수가 일정수준 이하인 경우 경계층간 상호작용이 없으므로 수직평판에서의 유체의 거동과 유사해지는 것으로 판단된다.

결론적으로 발달중인 혼합대류 열전달 현상을 물질전달계로 모의하여 실험한 바, 종횡비가 낮고 Gr_H 수가 낮은 경우 수직평판에서의 혼합대류 거동과 유사한 거동이 나타났다. 그리고 종횡비와 Gr_H 수가 증가함에 따라 경계층이 발달하여 점차로 수직관의 완전발달 혼합대류 거동에 가까워지는 것을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Hallman, T. M., 1961, "Experimental Study of Combined Forced and Free Convection in a Vertical Tube," *NASA TN D-1104*, December.
- (2) Lloyd J. R. and Sparrow E. M. 1970, "Combined forced and free convection flow on vertical surfaces," *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 434.
- (3) Watzinger, A. and Johnson, D. G., 1939, "Warmeübertragung von Wasser an Rohrwand bei senkrechter Stromung im Übergangs-Gebiet Zwischen Laminarer und Turbuenter Stromung," *Forshung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, Vol. 10, pp. 182~196.
- (4) Zeldin, B. and Schmidt, F. W., 1971, "Developing Flow with Combined Forced-Free Convection in an Isothermal Vertical Tube," *Trans. ASME C, J. Heat Transfer*, vol. 94, pp. 211~223.
- (5) Collins, M. W., 1978, "Heat Transfer by Laminar Combined Convection in a Vertical Tube Predictions for Water," *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Toronto, pp. 25~30, Paper MC-5.
- (6) Scheele, G. F., Rosen, E. M., and Kabel, R. L., 1960, "Effect of Natural Convection on Transition to Turbulent Flow in Vertical Pipes," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 38, pp. 67~73.
- (7) Martinelli C. J. et. al., 1942, "Heat Transfer and Pressure Drop for a Fluid Flowing in the Viscous Region Through a Vertical Pipe," *The joint Symposium with the Heat Transfer Division of the American Society of Mechanical engineers*, Boston, pp. 493~530.
- (8) Walter G. and Daniele T. 2006, "Developing Upward Flow in a Uniformly Heated Circular Duct under Transitional Mixed Convection," *International Journal of Thermal sciences*, Vol. 45, pp. 932~937.
- (9) Brown A. 1973, "Combined Forced and Free Convection Laminar Flow over a Vertical Plate," *Thermodynamics and Fluid Mechanics Group*, Vol. 187, 12/73, pp. 191~197.
- (10) Gryzagoridis J. 1975, "Combined Free and Forced Convection from an Isothermal Vertical Plate," *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 911.
- (11) 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.
- (12) Levich V. G., 1962, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood.
- (13) Selmán J. R. and Tobias C. W., 1978, *Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique*, Adv. Chem. Eng. Vol. 10, pp. 211~318.
- (14) Zaki. M. M., I. Nirdosh and G. H. Sedahmed, 1997, "Forced Convection Mass Transfer inside Large Hemispherical Cavities Under Laminar Flow Conditions," *Chem. Eng. Comm.*, Vol. 159, pp. 161~171.
- (15) Agar J. N., 1947, *Diffusion and Convection at Electrodes*, Discussion of Faraday Soc., 1, pp. 27~37.
- (16) 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.