

경사진 평판에서의 자연대류 열전달[§]

임철규* · 허정환* · 정범진**

* 제주대학교 에너지공학과

Natural Convection Heat Transfer on Inclined Plates

Chul-Kyu Lim*, Jeong-Hwan Heo* and Bum-Jin Chung**

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

(Received December 15, 2010 ; Revised May 3, 2011 ; Accepted May 3, 2011)

Key Words: Natural Convection(자연대류), Inclined Plate(기울어진 평판), Upward Facing(상향), Downward Facing(하향), Analogy(유사성), Electroplating System(전기도금계)

초록: 기울어진 평판에서 발생하는 자연대류 열전달현상을 Ra_L 1.69×10^{11} 과 7.23×10^{12} 에 대하여 실험적으로 연구하였다. 유사성을 이용하여 열전달실험을 물질전달 실험으로 대체하였고 물질전달계로 전기도금계를 사용하였다. 평판의 기울기는 상향수평에서 하향수평까지 10° 씩 변화시켰다. 하향평판에서는 수직 벽면에 대한 자연대류 열전달 상관식에서 g 대신 $g \cos\theta$ 로 대체함으로써 열전달계수를 구할 수 있다는 기존의 이론과 일치하는 결과를 얻었다. 상향평판의 경우 경계층이 벽면을 따라 발달되는 경우와 벽면으로부터 박리되는 2가지 영역으로 구분되는데 박리에 따른 열전달 증가를 확인하였다. 아울러 도금패턴을 이용하여 박리지점을 시각화하였고 박리지점에 대한 분석이 수행되었다.

Abstract: Natural convection heat transfers on inclined flat plates were measured for Grashof numbers of 8.06×10^7 and 3.45×10^9 by using a copper sulfate electroplating system. The inclinations of the plates were varied from upward-facing horizontal to downward-facing horizontal. Test results for the downward-facing plate agree well with the existing theory that the Nusselt number can be calculated by replacing gravitational acceleration, g with $g \cos\theta$ in the heat transfer correlation for the vertical plate. The natural convection flows for the upward-facing plate follow two distinct flow regimes: boundary layer regime and flow separation regime. The copper plating pattern for the upward-facing plates clearly reveals the flow separation points.

- 기호설명 -

C_b : 모액농도 ($kmol/m^3$)
 D : 확산계수 (m^2/s)
 F : 패러데이 상수 (96,485 C/mol)
 h_h : 대류열전달계수 ($W/m^2 \cdot K$)
 h_m : 대류물질전달계수 (m/s)
 I_{lim} : 한계전류밀도 (A/m^2)
 k : 전도계수 ($W/m \cdot K$)
 L : 음극 구리판의 높이 (m)
 n : 이온의 원자가
 t_n : 전달계수

Gr_L : Grashof number ($g\beta\Delta TL^3/\nu^2$)
 Gr_C : Critical Grashof number ($g\beta\Delta TL_{crit}^3/\nu^2$)
 Nu_L : Nusselt number ($h_h L/k$)
 Pr : Prandtl number (ν/α)
 Ra_L : Rayleigh number ($g\beta\Delta TL^3/\alpha\nu$)
 Sc : Schmidt number (ν/D)
 Sh_L : Sherwood number ($h_m L/D$)

그리스문자

α : 열확산계수 (m^2/s)
 β : 부피팽창계수 (m^3/K)
 δ : 속도경계층 두께 (m)
 δ_T : 열경계층 두께 (m)
 ν : 동점성계수 (m^2/s)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

** Corresponding Author, bjchung@jejunu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

경사진 평판에서 발생하는 자연대류는 평판의 경사각(θ)에 따라 열전달 특성이 달라지며 여러 학자들에 의해 실험적으로 그리고 이론적으로 많은 연구가 수행되어 왔다.⁽¹⁻⁶⁾ 수직평판에서의 자연대류는 뜨거운 평판으로부터 유체가 가열되고, 부피가 팽창하면서 발생하는 부력에 의해 발생된다. 이때 부력에 의해 구동되는 유체의 유동은 중력과 반대 방향으로 상승한다. 한편 평판이 수직으로부터 경사지면, 유체의 이동방향과 중력방향이 정확히 일치하지 않는다. 또한 수직으로부터 기울어진 평판에서의 자연대류는 가열벽면이 위를 향하는지(UF: Upward Facing, 상향), 아래를 향하는지(DF: Downward Facing, 하향)에 따라서 현상이 달라진다. Fig. 1은 경사진 평판과 수평평판에서 부력에 의해 발생된 유동현상을 보여준다. 하향평판의 경우 경계층은 벽면을 따라 올라가면서 발달(Develop)된다. 다만 기울기가 수직이 아니기 때문에 수직으로부터 경사진 만큼 중력 가속도가 감소한다. Rich에 따르면 하향평판의 경우 Nu_L 수는 수직평판에서의 자연대류 열전달상관식의 Gr_L 수 정의에서 g 대신에 $g \cos\theta$ 를 대입하여 구할 수 있다고 하였다.⁽¹⁾ 이것은 기울어진 가열 평판의 하단 또는 냉각평판의 상단에서만 적용되며 상향평판의 경우에는 적용되지 않았다. 이는 평판을 따라 형성되는 경계층에 박리(Separation)가 발생하기 때문이다. 이로 인하여 상향평판의 경우는 하향평판보다 현상이 복잡해진다. 상향평판에서의 유동현상은 크게 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 유동이 벽면을 따라서 발달(Develop)하는 경우와 부력이 증가함에 따라서 불안정성(Instability)이 증가하고 벽면으로 부터 유

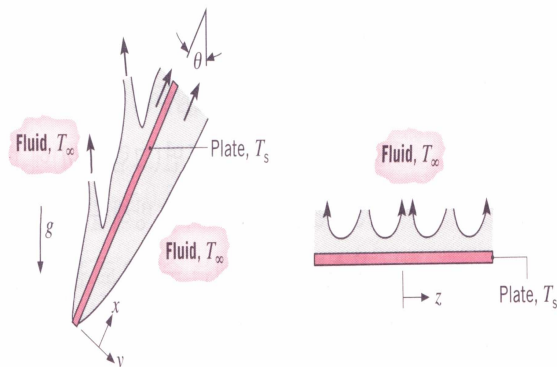


Fig. 1 Buoyancy-driven flow on an inclined plate⁽⁷⁾

동이 박리되어 이탈해 버리는 경우이다. 전자의 경우 열전달계수는 하향평판과 같은 반면, 후자의 경우에는 유체가 벽면을 이탈하여 상승해버리기 때문에 상향 수평평판의 열전달과 같다. 즉, 박리 이전에는 하향평판으로, 박리 이후에는 상향 수평평판으로 생각할 수 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 기울어진 평판에서의 상향면과 하향면에서의 열전달량을 Gr_L 수 8.06×10^7 과 3.45×10^9 범위에서 측정하였다. 이는 층류와 난류 영역에 해당한다. 높은 Gr_L 수의 난류영역에 대한 자연대류 열전달 문제는 빌딩단열, 대형 피동 냉각장치(Passive cooling system) 등의 공학 문제에 적용된다.

유사성(Analogy)의 원리를 이용하여 열전달 실험을 수행하는 대신 물질전달 실험으로 대체하였다. 황산-황산구리(H_2SO_4 - $CuSO_4$) 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 채택하였고, 음극(Cathode)의 높이 0.1m, 0.35m에 대해 경사각을 10° 간격으로 나누어 -90° (상향 수평평판)부터 90° (하향 수평평판)까지 실험을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 기울어진 평판에서의 자연대류 열전달

Vliet⁽²⁾은 물과 공기에 대하여 균일한 열속의 경사진 상향평판을 사용하여 국부열전달 계수를 측정하였다. 이때, Ra_L 수는 10^{16} 이었고, θ 를 수직($\theta=0^\circ$)에서부터 -60° 까지 변화시키면서 실험을 수행하였다. 실험결과, 층류영역에서는 Rich⁽¹⁾의 결과와 마찬가지로 수직평판에서의 자연대류 열전달상관식에서 Gr_L 수 정의에서 g 대신에 $g \cos\theta$ 를 대입하여 구한 Nu_L 값과 일치 하였고, 난류영역에서는 열전달계수가 평판의 기울기에 영향을 받지 않음을 보였다. Lloyd와 Sparrow⁽³⁾는 물을 이용하여 등온의 상향평판을 수직에서 -60° 까지 변화시키며 판의 경사각에 따른 유동 불안정성의 변화에 대하여 연구하였고 전기화학방법을 이용하여 자연대류 유동의 불안정성을 시각화 하였다. 실험결과, 수직으로부터의 경사각이 -14° 보다 큰 경우 파동형태(Wave motion)의 2차 유동이 먼저 발생하고 -17° 보다 작은 경우에는 와동형태(Vortex roll)의 2차 유동이 먼저 발생함을 밝혀냈다. Al-Arabi와 Sakr⁽⁴⁾는 상향평판을 사용하여 경사각을 수직에서 -80° 까지 변화시키면서 공기에

대해 Ra_L 수 $2 \times 10^4 \sim 10^{10}$ 범위에서 국부 및 평균 자연대류 열전달계수를 측정하였다. 실험결과, 각각의 유동영역에 대한 열전달상관식을 제시하였고, 난류영역에서 경사각에 따른 열전달 계수의 증가를 확인하였다. Fussey와 Warneford⁽⁵⁾는 경사진 하향평판으로부터 층류 및 난류 자연대류 연구를 하였다. 이들은 층류영역에서 기존의 연구 결과를 확장하였고 천이기준과 난류 상관식을 제시하였다. Fujii와 Imura⁽⁶⁾는 물에 대해 Pr 수 2~9 범위에서 상향과 하향의 모든 영역($\theta=90^\circ \sim 90^\circ$)에서 실험을 수행하였다. 그들은 유동의 패턴을 시각화 하였고 경사진 상향평판의 경우에 대해 열전달상관식을 제시하였다. 제시된 상관식은 임계 Gr_L 수에 도달하기 전의 거리까지는 경사진 하향평판과 마찬가지로 수직평판에 대한 열전달 상관식에서 Ra_L 또는 Gr_L 값을 구할 때 g 대신에 $g \cos\theta$ 를 넣어서 구하고 임계 Gr_L 수 이후의 길이에 대해서는 상향 수평 평판의 열전달상관식을

구하여 합쳐놓은 방식으로 상관식을 만들었다. Table 1은 여러 학자들이 제시한 기울어진 평판에 대한 자연대류 열전달상관식을 나타낸다.

2.2 임계 Gr_L 수

임계 Gr_L 수에 대해서는 학자마다 문헌마다 여러 가지 다른 의미의 정의를 사용한다. Vliet⁽²⁾과 Al-Arabi와 Sakr⁽⁴⁾는 난류로의 천이와 관련되는 구간을 임계 Gr_L 수로 정의 했고, Lloyd와 Sparrow⁽³⁾는 불안정성의 크기와 형태에 따라 임계 Gr_L 수를 정의했다. 한편, Fujii와 Imura⁽⁶⁾는 유동의 박리가 발생하는 지점을 임계 Gr_L 수로 정의했다. 본 연구에서는 Fujii와 Imura의 정의에 따라, 경사진 상향평판에서 벽면을 따라 발전하는 자연대류 유동이 특정 높이에서 박리가 일어날 때를 임계 Gr_L 수로 정의하였다. 박리가 발생하는 지점은 Gr_L 수 그리고 기울기와 관련된다. 임계 Gr_L 수 지점에서는 유동이 박리됨에 따라서

Table 1 Natural convection correlations

Author	Inclination	Range of Gr , Ra	Correlations			
E. J. Le Fevre	0°	$Gr < 10^9$	$Nu_L = 0.67 (GrPr)^{0.25}$	(1)		
Fouad	0°	$Gr > 10^9$	$Nu_L = 0.31 (GrPr)^{0.28}$	(2)		
Fujii and Imura	$-90^\circ \sim 0^\circ$	$Gr < 10^9$	$Nu_L = 0.16 [(GrPr)^{1/3} - (Gr_c Pr)^{1/3}] + 0.56 (Gr_c Pr \cos\theta)^{1/4}$	(3)		
		$Gr > 10^9$	$Nu_L = 0.13 [(GrPr)^{1/3} - (Gr_c Pr)^{1/3}] + 0.56 (Gr_c Pr \cos\theta)^{1/4}$	(4)		
	$0^\circ \sim +90^\circ$	$10^5 < Ra \cos\theta < 10^9$	$Nu_L = 0.56 (GrPr \cos\theta)^{1/4}$	(5)		
	-90°	$10^8 > Ra$	$Nu_L = 0.16 (GrPr)^{1/3}$	(6)		
$10^8 < Ra$		$Nu_L = 0.13 (GrPr)^{1/3}$	(7)			
Fouad	$+90^\circ$	$10^8 < Ra < 10^{11}$	$Nu_L = 0.58 (GrPr)^{1/5}$	(8)		
		Al-Arabi and Sakr	$-90^\circ \sim 0^\circ$	$10^5 \leq Ra \cos\theta \leq Gr_c Pr$	$Nu_L = 0.54 (GrPr \cos\theta)^{1/4}$	(9)
				$Gr_c Pr \leq Ra \leq 10^{10}$	$Nu_L = (0.1 + 0.05\theta/\pi) (GrPr)^{1/3}$	(10)
Vliet	$-90^\circ \sim 0^\circ$	$Ra \leq 10^{16}$	$Gr < 10^9$	$Nu_L = 0.6 (GrPr \cos\theta)^{0.2}$	(11)	
			$Gr > 10^9$	$Nu_L = 0.3 (GrPr \cos\theta)^{0.24}$	(12)	
Fussey and Warneford	$0^\circ \sim +90^\circ$	$Gr < 10^9$	$Nu_L = 0.592 (GrPr \cos\theta)^{1/5}$	(13)		
		$Gr > 10^9$	$Nu_L = 0.889 (GrPr \cos\theta)^{0.205}$	(14)		
McAdams	-90°	$10^4 \leq Ra \leq 10^7$	$Nu_L = 0.54 (GrPr)^{1/4}$	(15)		
		$10^7 \leq Ra \leq 10^{11}$	$Nu_L = 0.15 (GrPr)^{1/3}$	(16)		
	$+90^\circ$	$10^5 \leq Ra \leq 10^{10}$	$Nu_L = 0.27 (GrPr)^{1/4}$	(17)		

※(UF horizontal= -90° , DF horizontal= $+90^\circ$, 0° =Vertical)

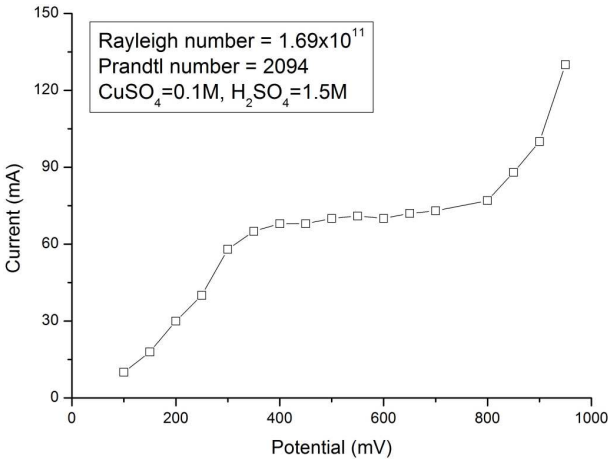


Fig. 2 Limiting current curves

가열되지 않은 신선한 유체가 벽면으로 유입되고 이에 따라 열전달이 크게 향상된다. 따라서 본 연구에서는 유동의 박리가 발생하는 지점이 의미 있는 임계 Gr_L 수가 된다고 보았다.

2.3 전기도금계를 이용한 상사실험방법

열전달과 물질전달 시스템은 초기 및 경계조건이 같으면 수학적으로 서로 유사(Analogous)하기 때문에 열전달 문제를 물질전달 문제로 또 그 역으로 변환할 수 있다. 이러한 물질전달계와 열전달계의 무차원수 관계는 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서는 황산-황산구리($H_2SO_4-CuSO_4$) 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 선택하였다. 전기도금계(Electroplating system)의 한계전류를 이용한 전달현상에 대한 연구는 여러 학자들에 의해 연구되었다.⁽⁸⁻¹¹⁾ Ko 등⁽¹²⁾은 수평평판에서의 강제대류와 수직벽면에서의 자연대류 열전달 현상에 관하여 전기도금계를 이용한 실험방법론을 적용하여 기존에 알려진 열전달상관식을 예측할 수 있음을 검증한 바 있다. 유사성을 이용한 실험기법에 대한 보다 자세한 설명은 Ko 등,⁽¹²⁾ Kang과 Chung⁽¹³⁾의 논문에 제시되어 있다.

2.4 한계전류기법

열전달계에서의 열전달계수는 벽면 온도와 평균 유체온도의 함수로 주어지며 물질전달계에서의 물질전달계수는 벽면 농도와 평균 유체농도의 함수로 주어진다. 본 실험은 열전달 문제의 등온벽면(Constant Wall Temperature) 조건에 해당한다. 한편 전기도금계를 이용하여 물질전달계수를 구할 때 음극표면에서의 구리이온의 농도를 알기

Table 2 Dimensionless group for analogy systems

Heat transfer system		Mass transfer system	
Prandtl number	$\frac{\nu}{\alpha}$	Schmidt number	$\frac{\nu}{D}$
Nusselt number	$\frac{h_c L}{k}$	Sherwood number	$\frac{h_m L}{D}$
Rayleigh number	$\frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu}$		$\frac{gL^3 \Delta\rho}{D\nu \rho}$

Table 3 Test matrix

$\theta(^{\circ})$	H (m)	Pr	Gr_L	Flow
-90°~90°	0.1	2094	8.06×10^7	Laminar
	0.35	2094	3.45×10^9	Turbulent

CuSO₄ 0.1M, H₂SO₄ 1.5M

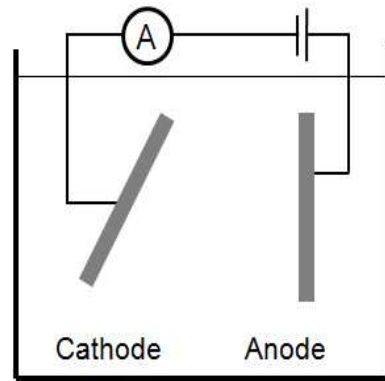


Fig. 3 The experimental apparatus and system circuit

어렵다. 이와 같은 문제는 한계전류기법을 사용하여 해결할 수 있다.⁽¹²⁾ 황산구리 수용액에 담겨진 구리 양극과 구리음극에 인가된 전압을 증가시키면서 측정된 전류를 Fig. 2에 도시하였다. 전기도금계에서 전극 사이에 인가된 전위차를 증가시키면 측정된 전류는 증가하다가 더 이상 증가하지 않는 플레이트우(Plateau) 영역에 도달하며 이때의 전류를 한계전류(Limiting current)라 한다. 이는 양극에서 발생된 구리이온이 음극으로 전달되는 속도보다 음극에서 구리이온이 전자를 얻어 환원되는 속도가 빨라짐에 따라서 발생하는 현상이며 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이

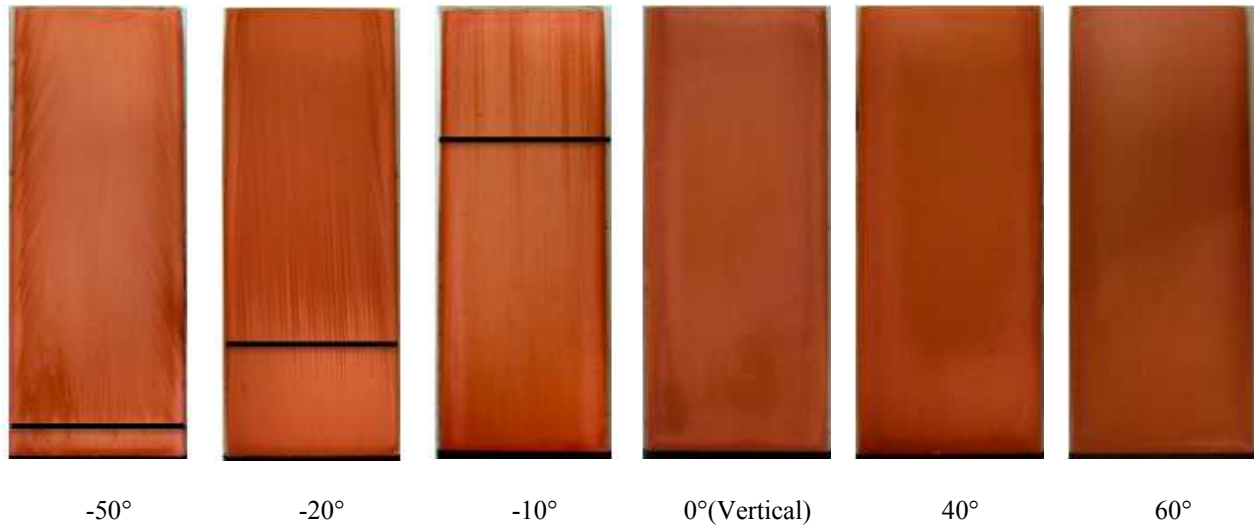


Fig. 4 Visualization of flow separation from upward and downward facing plate(0.1m).

온 농도를 0으로 취급할 수 있다. 따라서 물질전달계수(Mass transfer coefficient), h_m 은 식 (18)에 따라 모액농도(Bulk concentration), C_b 와 한계전류 밀도(Limiting current density), I_{lim} 만으로 구할 수 있다.^(13,14)

$$h_m = \frac{(1-t_n)I_{lim}}{nFC_b} \quad (18)$$

3. 실험장치 및 실험범위

실험 장치는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 아크릴로 제작된 수조내부에 수직으로 세워진 양극 구리판과 경사각을 변화시킬 수 있는 음극 구리판으로 구성되어 있다. 수조는 $0.6 \times 0.6 \times 0.1m^3$ 의 상부가 개방된 직육면체이며, 음극 구리판은 각각 $0.1 \times 0.03m^2$, $0.35 \times 0.03m^2$ 이다. 각도와 무관하게 충분한 구리이온을 공급하기 위하여 양극판을 음극판의 앞뒤로 음극 길이보다 충분히 높게 배치하였다. 전원공급장치는 VüPOWER사의 DC Power Supply-IPS-18B10이며, 전압과 전류측정 장치는 Fluke-45사의 Dual Display Multimeter이다. 황산(H_2SO_4)을 1.5M 용해시켜 전기영동(Electric migration)으로 인한 효과를 억제하였다. Table 3은 실험범위를 나타낸 것이다. Pr 수는 2094, 전극판의 높이는 0.1m와 0.35m로 이는 Gr_L 수 $8.06 \times 10^7 \sim 3.45 \times 10^9$, Ra_L 수 1.69×10^{11} 와 7.23×10^{12} 에 해당된다. θ 를 10° 간격으로 나누어 -90° 부터 90° 까지 각각 실험을 수행했다.

4. 실험결과

4.1 시각화

Fig. 4는 0.1m인 상·하향 평판에서 자연대류가 발생할 때 도금된 모습을 나타낸 것이다. 물질전달 실험에서 박리는 음극에 도금되는 패턴을 통하여 쉽게 관찰되었다. 상향평판에서는 수직을 제외한 전체영역에서 박리(Separation)지점이 관찰되었다. 수직으로부터 아주 작은 각이라도 경사지는 경우 박리지점을 확인할 수 있었다. -10° 와 -20° 사이에서 박리지점이 갑자기 판의 아랫방향으로 내려오는 것을 볼 수 있다. 이는 Lloyd와 Sparrow가 실험적으로 보였듯이 수직으로부터의 경사각이 -14° 보다 클 때는 파동형태(Wave motion)의 2차 유동이 나타나고 -17° 보다 작은 경우에는 와동형태(Vortex roll)의 2차 유동이 나타나는 것이 원인이라 생각된다⁽³⁾. 하향평판에서는 전체적으로 구리도금이 되었고 박리는 발생하지 않았다.

4.2 임계 Gr_L 수

Fig. 5는 상향평판일 때 수직(0°)으로부터의 음극판의 기울기에 따라 유체가 박리되는 지점을 측정하여 제시한 임계 Gr_L 값을 나타낸다. 박리가 일정한 높이에서 발생하는 것이 아니라 3차원으로 지그재그 형태로 나타난다. 따라서, 평판의 하단에서부터 가장 높이 올라간 지점을 최대(채워진 삼각형), 가장 낮은 곳의 지점을 최소(채워진 역삼각형), 그리고 판에 나타난 평균 박리지

점(개방된 마름모)으로 나타냈다. 상향 수평평판이 수직으로 세워지면서 임계 Gr_L 수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 임계지점의 위치는 기울어진 경사각에 영향을 받는다.

4.3 Inclined angle의 영향

Fig. 6은 0.1m 음극관을 사용하여 경사각을 상향 수평에서 수직, 그리고 하향 수평 까지 변화시키며 측정된 Nu_L 수를 나타낸다. $\theta = -90^\circ \sim 0^\circ$ 는 상향평판을, 0° 는 수직 평판을, $0^\circ \sim 90^\circ$ 는 하향평판을 각각 나타낸다. 비교 목적으로 기존의 열전달상관식을 나타내었다. 여기서 상향 열전달상관식은 채운점(Solid symbol)과 선으로, 하향 열전달상관식은 개방점(Open symbol)과 선으로 나타냈고, 수평상관식은 실선으로, 수직상관식은 점선

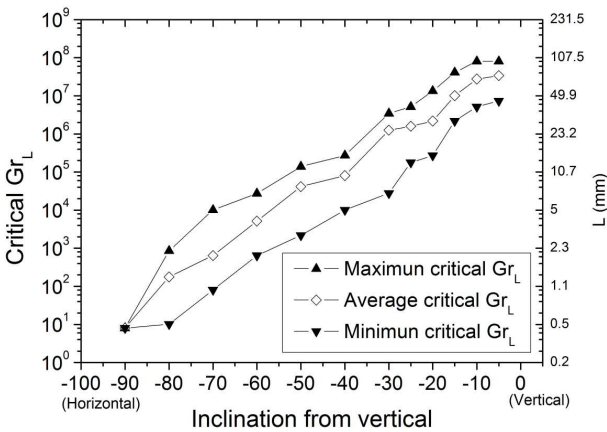


Fig. 5 Measured critical Gr_L for various inclinations

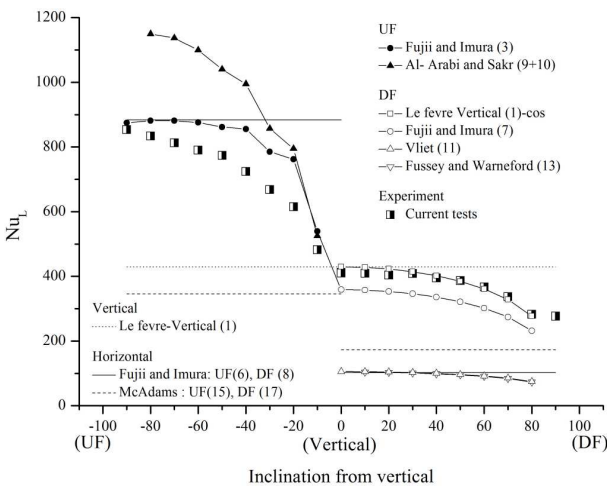


Fig. 6 A comparison between experiments and existing laminar heat transfer correlations

으로 나타냈다. 실험에서 측정된 Nu_L 수는 반채움사각형(Half closed square)으로 나타내었다. 측정된 Nu_L 값은 상향 수평평판에서 가장 높았고, 수직으로부터 하향 수평평판까지 기울일 때 감소하였으며, 하향 수평평판이 되면 가장 낮았다. 수직으로부터의 기울기가 증가할수록 Nu_L 값이 감소하는 이유는 기울이는 각도만큼 밀도변화에 의한 체적력(Body force)의 감소로 유동이 활발하지 못하여 대류 열전달이 미약해지기 때문이다.⁽⁷⁾ 실험결과 다른 열전달상관식과 유사한 거동을 보이고 있으나 절대값에는 약간의 차이를 보인다. 한편 본 실험에서 수직($\theta = 0^\circ$)인 경우에 대하여 측정된 Nu_L 값이 Le Fevre의 수직평면에서의 자연대류 열전달상관식 결과와 일치하였고 기울기에 따른 변화는 Le Fevre의 열전달상관식에서 Ra_L 내의 g 를 $g \cos\theta$ 로 대치하여 얻어지는 Nu_L 값과 일치했으며, 다른 상관식과는 달랐다. 상향평판의 경우, 전체적으로 경사각이 수직으로부터 수평으로 가면서 Nu_L 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fujii와 Imura의 상관식으로 구한 Nu_L 값과 Al-Arabi와 Sakr의 상관식으로 구한 Nu_L 값은 일치하지 않는다. 상향 수평평판에서 측정된 Nu_L 값은 기존의 Fujii와 Imura와 같은 조건에서 측정된 Nu_L 값과 비슷한 영역에 있음을 확인할 수 있다. Vliet, Fussey와 Waneford의 하향 평판에 대한 결과와는 차이가 있지만 각도에 따라 비슷한 경향을 보인다.

Fig. 7은 0.35m 음극관을 사용하여 Fig. 6과 같은 방식으로 경사각을 상향 수평에서 수직, 그리

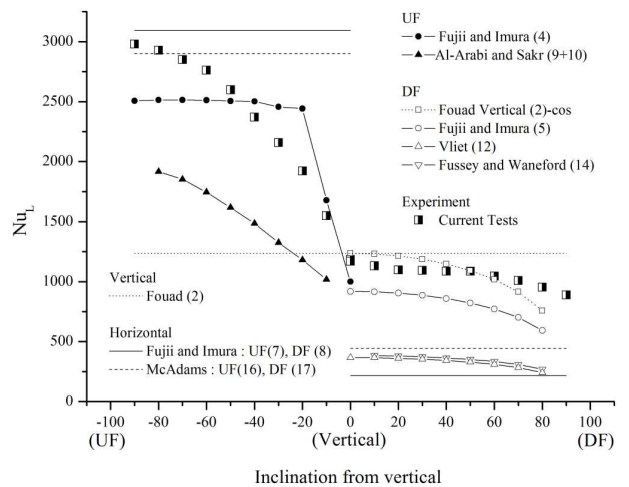


Fig. 7 A comparison between experiments and existing turbulent heat transfer correlations

고 하향 수평평판까지 변화시키며 측정된 Nu_L 값을 나타낸 것이다. 층류영역의 결과와 마찬가지로 Nu_L 값이 상향 수평평판에서 하향 수평평판까지 기울일 때 감소하였으며, 하향 수평평판이 되면 최저치를 보였다. 모든 열전달상관식에서 유사한 경향이 나타났다. 수직($\theta=0^\circ$)인 경우에 대하여 측정된 Nu_L 값이 Fouad의 수직 평면에서의 자연대류 열전달상관식의 결과와 같았다. 하향평판($\theta=0^\circ\sim 90^\circ$)에서 기울기에 따른 변화는 Fouad의 열전달상관식에서 Ra_L 수내의 g 를 $g \cos\theta$ 로 대치하여 수정한 상관식 결과와 일치했으며, 다른 상관식과는 달랐다. 상향평판의 경우, 전체적으로 경사각이 수직으로부터 감소함에 따라 Nu_L 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fujii와 Imura의 상관식으로 구한 Nu_L 값은 θ 가 0° 부터 -20° 까지는 급격하게 증가하다가 -30° 이후에는 완만하게 증가하고, Al-Arabi와 Sakr의 상관식으로 구한 Nu_L 값은 절대값에는 차이가 있으나 증가 패턴은 비슷한 양상을 보인다. 상향평판에서 측정된 Nu_L 값은 기존의 Fujii와 Imura, 그리고 McAdams가 같은 조건에서 측정된 Nu_L 값과 비슷한 영역에 있음을 확인할 수 있다. 본 실험의 결과는 기존의 문헌에서의 결과와 많은 차이를 보였다. 이러한 차이는 연구에 따라 사용된 유체와 가열평판의 차이, 학자들마다 정의하는 임계 Gr_L 수의 차이, 실험방법론의 차이에 기인하는 것으로 판단되며 기존 문헌끼리도 차이가 나는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과는 음극판이 수직인 경우($\theta=0^\circ$) 수직벽면에 대하여 측정된 자연대류 열전달상관식인 Fouad의 열전달상관식과 일치하며, 상향 수평평판일 경우에도 Fujii와 Imura, 그리고 McAdams와 같은 기하구조로서 측정된 Nu_L 수와 일치한다. 따라서 본 실험의 결과는 신뢰성이 있다고 판단된다.

5. 결론

경사진 벽면에서 발생하는 자연대류 열전달 현상을 실험적으로 연구하였다. 유사성의 원리를 이용하여 열전달 실험을 물질전달 실험으로 대체하였다. 황산구리 수용액의 구리 전기도금계를 채택하였으며 0.1m와 0.35m 높이의 음극판을 사용하여 상향평판, 수직, 하향평판에 이르는 여러

가지 평판 기울기에 대하여 물질전달을 측정하였다. 이때 Ra_L 수는 1.69×10^{11} 부터 7.23×10^{12} 에 해당한다. 음극에 도금된 구리의 패턴을 이용하여 박리지점을 성공적으로 시각화할 수 있었으며, 박리지점을 측정하여 임계 Gr_L 수를 제시하였다. 평판의 기울기에 따라 박리지점과 열전달량이 달라지는 것을 확인했다. 평판의 기울기가 수직평판일 때 측정된 Nu_L 수는 층류영역과 난류영역에서 Le Fevre와 Fouad의 수직 열전달상관식과 각각 일치하였다. 하향평판에 대해 수직벽면에서의 자연대류 열전달 상관식에서 Gr_L 수의 정의에서 g 대신 $g \cos\theta$ 를 대입하여 Nu_L 을 구할 수 있다는 기존의 사실이 실험적으로 확인되었다. 본 실험의 결과는 기존의 연구와 차이를 보였다. 그러나 기존 연구도 서로 일치하지 않음을 확인하였고 본 실험의 결과가 기존 수직평판, 수평 상향평판 및 수직하향평판에 대한 자연대류 열전달 상관식의 예측치와 일치함을 확인한 바, 본 실험결과가 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Rich, B. R., 1953, "An Investigation of Heat Transfer from an Inclined Flat Plate in Free Convection," *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs*, Vol. 75, pp. 489~449.
- (2) Vliet, G. C., 1967, "Natural Convection Local Heat Transfer on Constant Heat Flux Inclined Surfaces," *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs 91C*, pp. 511~516.
- (3) Lloyd, J. R. and Sparrow, E. M., 1970, "On the Instability of Natural Convection Flow on Inclined Plates," *J. Fluid Mech*, Vol. 42, pp. 465~470.
- (4) Al-Arabi, M. and Sakr, B., 1988, "Natural Convection Heat Transfer from Inclined

- Isothermal Plates," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 559~566.
- (5) Fussey, D. E. and Warneford, I. P., 1978, "Free Convection from a Downward Facing Inclined Flat Plate," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 119~126.
- (6) Fujii, T. and Imura, H., 1972, "Natural Convection Heat Transfer from a Plate with Arbitrary Inclination," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 755~767.
- (7) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2005, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6rd edn. Wiley, New York, pp. 574~577.
- (8) Levich, V. G., 1962, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood.
- (9) Agar, J. N., 1947, "Diffusion and Convection at Electrodes," *Discussion of Faraday Soc.*, Vol. 1, pp. 27~37.
- (10) Selman, J. R. and Tobias, C. W., 1978, "Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique," *Adv. Chem. Eng.* Vol. 10, pp. 211~318.
- (11) Fenech, E. J. and Tobias, C. W., *Electrochim. Acta* 2, pp. 311~325.
- (12) Ko, S. H., Moon, D. W and Chung, B. J., 1960, "Applications of Electroplating Method for Heat Transfer Studies Using Analogy Concept," *Nuclear engineering and Technology*, Vol. 38, pp. 251~258.
- (13) 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.
- (14) 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.