

수직평판의 거칠기가 자연대류 열전달에 미치는 영향

옥승민 · 정범진[†]

경희대학교 원자력공학과

(2014년 5월 8일 접수, 2014년 5월 21일 수정, 2014년 5월 21일 채택)

The Influence of the Surface Roughness on the Natural Convection on a Vertical Flat Plate

Seung-Min Ohk · Bum-Jin Chung[†]

Kyung Hee University

(Received 8 May 2014, Revised 21 May 2014, Accepted 21 May 2014)

요 약

수직평판의 거칠기에 따른 자연대류 열전달의 변화를 실험적으로 측정하였다. 열전달 실험을 대신하여 유사성에 기초한 물질전달로 모사하여 실험을 수행하였다. 또한 국부적인 열전달률을 알기 위해 Piecewise electrode를 채택하였다. Pr수는 2,014 그리고 높이(L)는 0.154m로 고정하고 매끈한 수직평판에 대해 실험을 수행한 결과 Le Fevre의 수직평판 상관식과 거의 일치하였다. 거칠기 정도를 $0.5R_z\mu\text{m} \sim 14.1R_z\mu\text{m}$ 로 변화시켰을 때 Nu_L 수는 거칠기 정도가 커지면서 증가하는 경향을 나타내었다. 실험 결과는 간단한 상관식으로 정리하였다.

주요어 : 수직평판, 자연대류, 거칠기, 유사성, 전기도금시스템, 열전달

Abstract - The influence of the surface roughness on the natural convection heat transfers of a vertical plate were measured experimentally. Mass transfer experiments instead of heat transfer experiment were performed based on the analogy. The piecewise electrodes were adopted to measure the local-average Nusselt number. Prandtl number was 2,014 and height of the plate was 0.154m The test results for a smooth surface showed similar heat transfer rate with the Le Fevre heat transfer correlation for a vertical plate. The Nusselt number increased with the roughness $R_z 0.5 \sim 14.1\mu\text{m}$. The test results were presented by a simple correlation.

Key words : Vertical plate, Natural convection, Analogy, Electroplating system, Heat transfer

1. 서 론

후쿠시마 원전사고 이후, 전원의 상실시에도 자연력에 의존하여 가동되는 피동냉각계통(Passive cooling system)의 채택이 증가하고 있다. 이에 따라서 자연대류 열전달에 대한 연구도 증가하고 있다. 특히, 원전과 같은 고부력 조건의 자연대류에 대해서

는 실험적인 연구가 많이 수행되지 않았다.

표면 거칠기에 따른 열전달에 관한 연구는 몇몇 학자들에 의하여 수행되어 왔지만 주로 강제대류에 대해 수행되었고, 자연대류에서는 난류영역에 한정되어 있다⁽¹⁻³⁾. 따라서 층류 자연대류 영역에서 수직평판의 거칠기 변화가 경계층 발달에 어떠한 영향을 미치고, 열전달 향상에 얼마나 기여하는지에 대한 연구가 필요하다.

수직평판에서 거칠기는 열전달 표면적을 향상시켜 열전달률을 증가시킨다. 그리고 거칠기의 영향은 경

[†]To whom corresponding should be addressed.

Department of Nuclear Engineering, Kyunghee University
Tel : 031-201-3893 E-mail : bjchung@khu.ac.kr

계층 두께가 가장 얇은 수직벽면의 유동의 시작부분 (Leading edge)에서 확연하게 나타난다⁽⁴⁾.

본 연구에서는 수직평판의 거칠기 정도에 따른 자연대류 열전달 현상을 측정하였다. 유사성(Analogy)의 원리를 이용하여 물질전달 실험으로 모사하였다. 물질전달계로 황산-황산구리($H_2SO_4-CuSO_4$) 수용액의 전기도금계를 채택하여 물질전달계수를 측정하였다. 가열벽면(Heated wall)으로 모사되는 음극(Cathode)의 전체높이는 0.154m이고 너비는 0.01m이다, 음극은 높이 0.003m의 5개 Piecewise electrode를 채택하여 국부평균(Local-average) Nu_L 값을 측정할 수 있도록 하였다 이때 Ra_L 수는 3.1×10^{11} 으로 층류 영역에 해당한다. Pr 수는 2,014로 고정하였으며, 표면 거칠기는 여러 가지 사포를 이용하여 변화를 주었다.

2. 이론적 배경

2-1. 직평판에서의 자연대류

자연대류는 온도차 또는 농도차에 의하여 발생하는 부력이 그 유체의 점성 및 확산을 극복할 때 나타난다. 이와 같이, 자연대류는 외력에 의해서 구동되는 것이 아니라 온도차 또는 농도차에 의해서 발생하는 유동이다. Fig. 1은 열전달계에서 온도차로 발생한 부력에 의해 유체의 순환(자연대류)이 일어나는 메커니즘을 나타낸다. T_0 인 가열벽 근처에서 유체가 가열되면 밀도가 감소하며 부력으로 인해 상승한다. 상승하여 확산된 유체는 T_∞ 인 냉각벽에 의해 냉각되고 압축된다. 따라서 밀도가 증가한 유체는 하강하게 된다. 이와 같이 풀(Pool)내에서 자연대류는 Heat engine cycle과 같이 순환하는 거동을 나타낸다.

수직평판 자연대류 열전달에서는 Gr_L 수 10^9 을 기준으로 층류($Gr_L < 10^9$)와 난류($Gr_L > 10^9$)로 구분할 수 있으며, 이에 대한 두 가지 열전달 상관식은 다음과 같다⁽⁵⁾.

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

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

2-2. 표면 거칠기에 따른 자연대류 열전달

수직평판에서 거칠기 영향에 따른 자연대류 열전달 연구는 많은 학자들에 의해서 수행되었다⁽⁶⁻¹¹⁾.

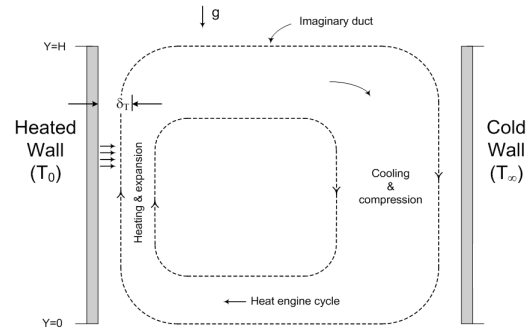


Fig. 1. Fluid circulation induced by temperature difference.

Yao⁽⁶⁾는 표면이 Sine과 형상인 수직판에서의 자연대류 열전달을 수치적으로 계산하였다. 표면의 거칠기를 변화시킨 결과 열전달률이 수직평판(Smooth plate) 보다 최대 두 배 정도 증가한다고 하였다. 또한 굴곡진 수직판(Rough plate)은 자연대류에서 조기에 천이상태를 야기 할 수 있다고 하였다. Fage와 Preston⁽⁷⁾은 표면의 거칠기 정도가 심할수록(Peak의 높이가 높을수록) 천이 지점이 수직판의 하단으로 이동한다고 하였다.

Tetsu Fujii 등⁽⁸⁾은 물과 Spindle oil에 대하여 Ra_L 수 1010~1015에서 수직 원형관 표면의 거칠기에 따른 열전달 실험을 수행하였다. 그 결과 난류상태에서 거칠기 정도에 따라 국부 열전달은 최대 10% 차이가 난다고 하였다.

Shakerin 등⁽⁹⁾은 Rectangular fin 형태로 거칠기 요소를 주어 Pr 수 0.7, Ra_L 수 $10^5 \sim 10^8$ 의 조건에서 층류 자연대류 열전달을 수치적 그리고 실험적으로 연구하였다. 염료를 물에 투입하여 유동을 시각화하였으며, 수직판의 상단에서는 거칠기 영향이 열전달 변화에 효과가 없다고 보고하였다. 또한 거칠기 효과를 주어 열전달 면적이 증가했음에도 불구하고 총 열전달률은 수직평판(Smooth plate)의 열전달률과 유사했다. 이는 Rectangular fin 사이에 Stagnant region이 존재하기 때문에 오히려 부분적으로 열전달을 감소시키기 때문이라고 보고하였다. Acharya와 Mehrotra⁽¹⁰⁾ 역시 Ribbed 기하구조에 대하여 Rib과 Rib 사이에 고여있는 영역(Dead region)이 존재하여 수직판보다 열전달이 감소한다고 하였다.

Dryden⁽¹¹⁾은 수직판에서 거칠기는 경계층을 불안정하게 만들어 총 열전달에 영향을 준다고 언급하였다.

Table 1. Dimensionless group for analogy system.

Heat transfer	Mass transfer
Prandtl No. $\frac{\nu}{\alpha}$	Schmidt No. $\frac{\nu}{D}$
Nusselt No. $\frac{h_m L}{k}$	Sherwood No. $\frac{h_m L}{D}$
Rayleigh No. $\frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu}$	Rayleigh No. $\frac{gL^3\Delta\rho}{D\nu\rho}$

2-3. 전기도금계를 이용한 유사성 실험방법

열전달과 물질전달 시스템은 초기 및 경계조건이 같으면 수학적으로 서로 유사(Analogous)하기 때문에 열전달 문제를 물질전달 문제로 변환할 수 있다. 이러한 물질전달계와 열전달계의 무차원수 관계는 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 황산-황산구리 (H₂SO₄-CuSO₄)수용액의 전기도금계를 물질전달계로 선택하였다.

전기도금계(Electroplating system)의 한계전류를 이용한 전달현상에 대한 연구는 Levich⁽¹²⁾에 의해 시도되었으며 Selman and Tobias⁽¹³⁾은 여러 조건에서의 물질전달 상관식을 체계적으로 정립했다. Chung⁽¹⁴⁾ 등은 수평평판에서의 강제대류와 수직벽면에서의 자연대류 열전달 현상에 관하여 전기도금계를 이용한 실험방법론을 적용하여 기존에 알려진 열전달 상관식을 예측할 수 있음을 검증하였다. 유사성을 이용한 실험기법에 대한 보다 자세한 설명은 Chung⁽¹⁴⁾ 과 Kang⁽¹⁵⁾의 논문에 제시되어 있다.

2-4. 한계전류기법

열전달계에서의 열전달계수를 구하기 위해 벽면 온도와 평균 유체온도를 알아야 된다. 마찬가지로 물질전달계에서의 물질전달계수를 구하기 위해선 벽면 농도와 평균 유체농도를 알아야 한다. 그러나 전기도금계에서 음극표면에서의 구리이온의 농도를 알기 어렵다. 이와 같은 문제는 한계전류기법을 사용하여 해결할 수 있다. 황산구리 수용액에 담겨진 구리 양극과 구리음극에 인가된 전압을 증가시키면서 측정된 전류를 Fig. 2에 나타내었다. 전기도금계에서 전극사이의 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 따라 발생하는 현상이며 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이온 농도를 0으로 취급할 수 있다. 따라서 물질전달계수(Mass coefficient), h_m은 식(3)에 따라 모액농도(Bulk concentration), C_b와 한계전류밀도(Limiting current), I_{lim}만으로 구할 수 있다⁽¹⁶⁾.

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

3. 실험

3-1. 실험장치 및 실험범위

Fig. 3은 실험장치와 그 회로의 개략도이다. 실험장치는 아크릴로 제작되었으며 양극평판과 음극평판이 마주보고 있는 형태이다. 음극판은 가로 0.01m 높이 0.03m의 구리판을 0.001m 간격으로 하여 세로 방향으로 5개를 부착하였고. 양극판은 가로 0.03m

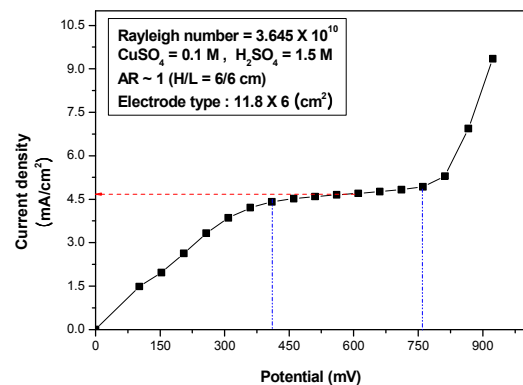


Fig. 2. Typical limiting current density curve.

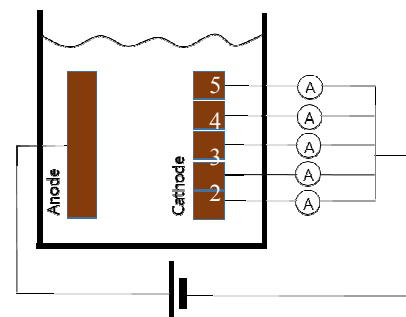


Fig. 3. The experimental equipments and system circuit.

Table 2. Test matrix for Roughness effect in natural convection.

Pr	L(m)	Electrodes	RaL	GrL	Rz(μm)
2,014	0.154	1	2.29×109 (1)	1.13×106	0.5, 1.5, 2.8, 8.5, 11.6, 14.1
		2	1.83×1010 (1~2)	6.09×106	
		3	6.18×1010 (1~3)	3.07×107	
		4	1.46×1011 (1~4)	7.47×107	
		5	2.86×1011 (1~5)	1.42×108	

H₂SO₄ 1.5M, CuSO₄ 0.05M

세로 0.1m의 구리판을 부착하였다. 각 시편에는 Fluke사의 15B Digital Multimeter를 연결하여 전류를 측정하였고, 전원공급장치는 VüPOWER사의 DC Power supply-18B10을 이용하였다.

본 연구에서는 사포를 이용해서 시편 표면에 거칠기를 주었으며, 거칠기를 나타내는 단위로 Rz를 채택하였다. Rz는 국제표준화기구(ISO) 단위로써 10점 평균 거칠기(The ten-point height parameter)이다. 거칠기 정도 측정을 위해 TAQ사의 SP-SP1560을 사용하였다. 기준길이는 10mm로 하였으며 거칠기 정도는 5회 측정한 평균값을 사용하였다.

Table 2는 실험범위를 나타낸다. Pr 수는 2,014로, 수직평판의 길이(L)는 0.154m로 고정하였다. Single electrode의 높이는 0.03m 이고, Single electrode의 숫자가 증가할수록 수직평판의 상단에 위치된다. Rz범위는 0.5μm ~ 14.1μm이다.

3-2. 거칠기 정도에 따른 시편의 표면

구리음극은 40#, 120#, 220#, 320# 및 400# 사포를 이용하여 거친 표면을 제작하였다. Fig. 4 (a)~(d)는 FE-SEM으로 촬영한 시편의 표면 사진이다. 5.0 kV의 가속된 전자선을 사용하였으며 WD(시편과 대물렌즈 사이거리)는 7.9mm에서 100배의 배율로 촬영하였다. Fig. 4(a)는 거칠기 정도가 매우 작으며, 매끈한 평면(Smooth plate)과 거의 유사하다. Rz가 증가할수록 거칠기의 정도가 증가한다.

4. 실험 결과 및 토의

Fig. 5는 RaL에 따른 Nu_L 수를 나타낸다. 각 Symbol은 거칠기 정도(Rz)를 의미하며, 가장 작은 거칠기 정도(Rz=0.5)에서의 Nu_L 수는 수직평판 상관식인 Le Fevre 상관식과 일치하였다. Rz가 증가할수록, 실험결과의 Nu_L 수는 Le Fevre 상관식보다 증가

하는 경향을 보였는데, 이는 거칠기 정도의 증가로 인해 열전달 면적이 증가했기 때문이라고 판단된다

Fig. 6은 5개로 구분한 음극에서 측정된 국부평균 Nu_x 수를 나타낸 것이다. 각 심볼은 거칠기 정도를 의미한다. 수직평판의 하단부에서 상단부로 갈수록 모든 Rz에서 국부평균 Nu_x수는 감소하였다. 이는 경계층이 시작되는 하단부의 유동의 시작부분(Leading edge)에서 경계층 두께가 매우 얇기 때문에 거칠기 효과가 두드러지게 나는 것이라 판단된다.

유동의 시작부분(Leading edge) 근처의 전극에서는 Rz에 따른 Nu_x 값 차이가 크고, 높은 Ra_x에서는 Rz에 따른 Nu_x 값 차이가 작았다. 이는 경계층이 얇은 하단부에서 Nux값은 거칠기 정도의 영향을 크게 받고, 경계층이 두꺼운 상단부에서는 표면 거칠기가 Nu_x값에 크게 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

Fig. 7은 거칠기 정도(Rz)에 따른 Nu_x를 나타낸 것이다. 각 심볼(Symbol)은 같은 Ra_x를 나타낸다. 여기서 x는 수직평판의 높이에 따른 위치를 나타낸다. 모든 Rz에서 Ra_x수 2.86×108 과 7.73×109에서 Nu_x값 차이는 상대적으로 나머지 Ra_x간의 Nu_x값 차이보다 컸다. 이는 수직평판 하단부에서는 경계층이 시작됨으로써 열전달이 상승하고, 상단부로 갈수록 열전달이 감소하기 때문이다. 또한 Rz가 증가할수록 Ra_x에 따른 Nu_x값 차이가 크게 나타났다. 이는 표면 거칠기가 경계층을 발전시키는 것을 방해함으로써 Nu_x값을 상승시키는데 기여하였기 때문이라고 판단된다. 또한 거칠기 정도가 커질수록 각 층에서 Nu_x 수는 증가하는데 이를 통해 거칠기를 증가시키면 열전달이 향상된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Ra_x수에 따른 실험의 국부 평균(Local-average) Nu_x 값과 그에 따른 실험적 상관식을 나타낸 것이다. 상관식에서 Ra_x를 고려함으로써 수직평판의 높이가 증가할수록 Nu_x 값이 감소함을 나타내었다. 그리고 Rz의 영향을 추가함으로써 거칠

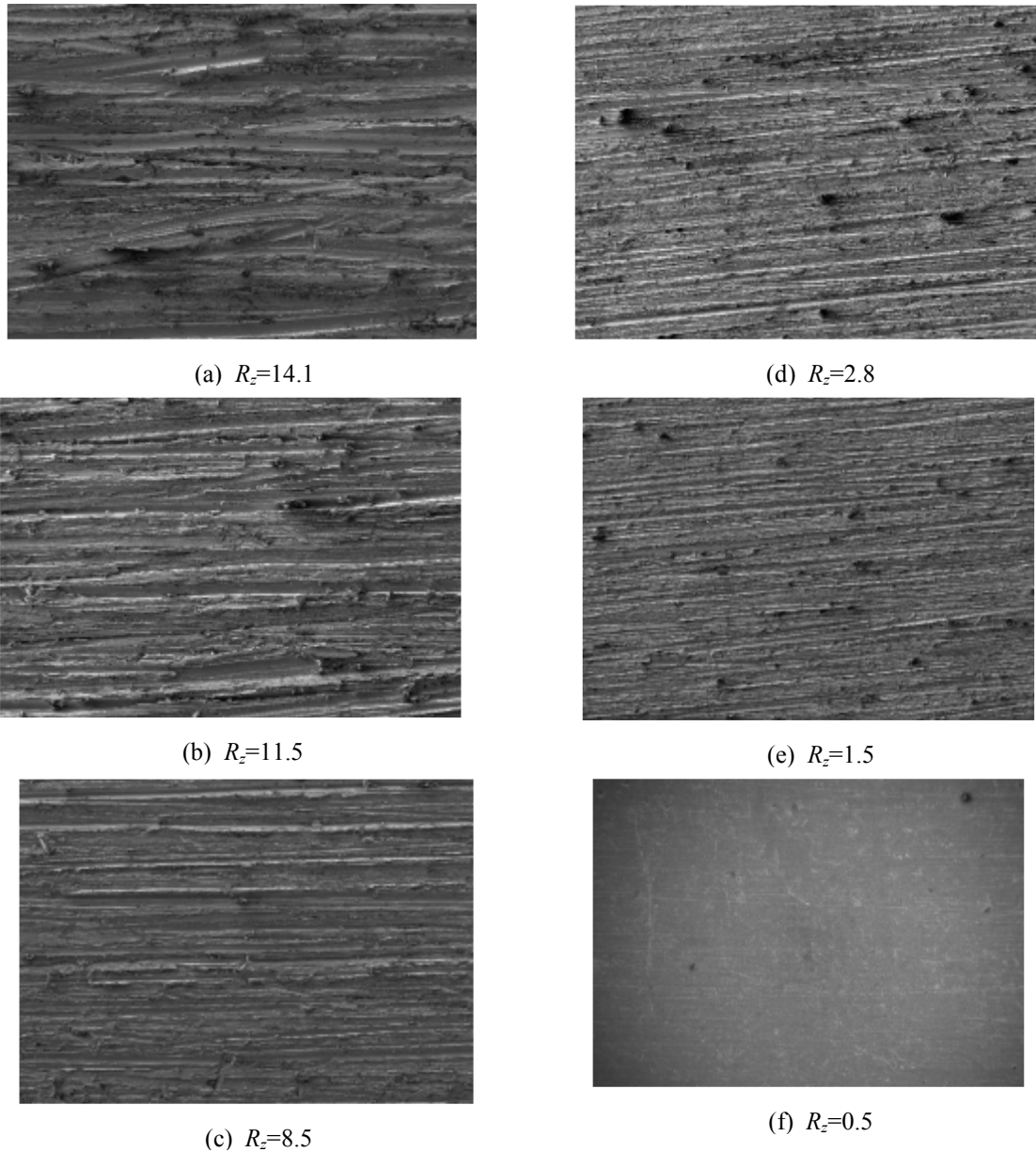


Fig. 4. Roughness state of specimen of copper.

기 정도가 클수록 Nu_x 값이 증가한다는 것을 나타내었다. 상관식은 식(4)과 같다. 실험결과와 상관식의 평균오차는 1.4%이고, 최대 오차는 2.7%이다

$$Nu = (330.76 + 2.32R_z)Ra^{-0.051} \quad (4)$$

5. 결론

수직평판의 표면에 거칠기 정도를 변화시키면서

자연대류 열전달을 실험적으로 연구하였다. 열과 물질전달의 유사성(Analogy)에 기초하여 열전달 실험을 물질전달 실험으로 대체하였고, 물질전달계로는 전기도금계를 채택하였다. 높이 0.154m의 수직평판을 5등분으로 나눈 Piecewise electrode를 채택하여 국부평균 Nu 값을 측정하였다. 이때 표면 거칠기는 R_z 0.5~14.1 μm 로 변화하여 실험하였다.

실험결과 거칠기 정도가 가장 작은 R_z 0.5 μm 의 수직평판(Rough plate)에서 측정된 열전달률은 Le Fevre의 수직평판(Flat plate)에 대한 자연대류 상관

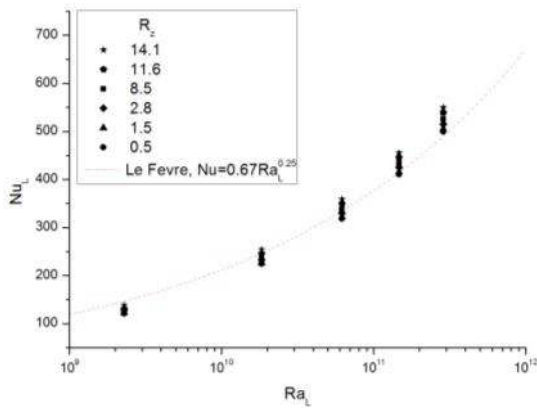


Fig. 5. Comparison test result with correlation.

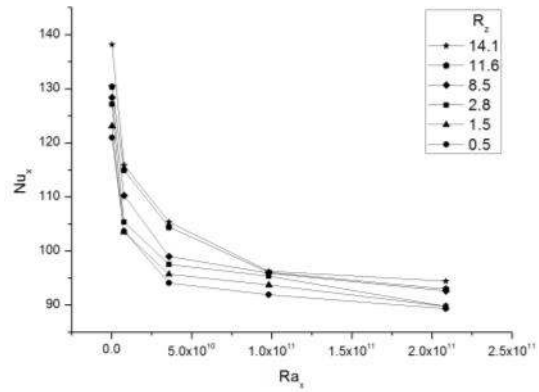


Fig. 6. Nusselt number depending on a length of the roughness effect.

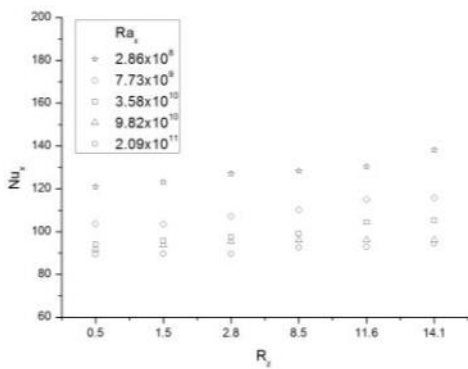


Fig. 7. Comparison the test result according to the roughness.

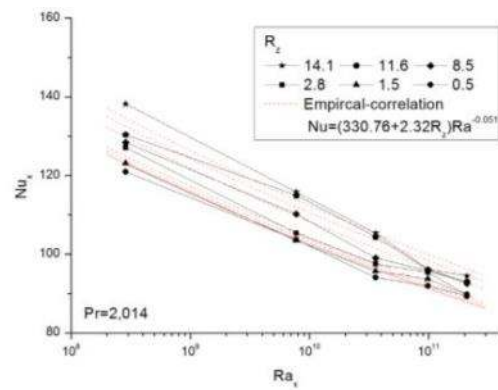


Fig. 8. Empirical correlation as Rax .

식과 유사하였다. 거칠기 정도를 높일수록 열전달률은 향상하였는데, 이는 거칠기 정도가 증가할수록 표면적이 증가했기 때문이다. 수직판의 국부평균 Nu 값을 확인한 결과, 유동의 시작부분(Leading edge)에서 거칠기 정도에 따른 열전달률 차이가 가장 컸다. 이는 유동의 시작부분에서 경계층의 두께가 매우 얇으므로 표면 거칠기의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 수직평판의 상단에서는 경계층의 두께가 증가함에 따라 거칠기에 따른 열전달률의 차이가 크지 않았다.

실험결과를 토대로, 수직평판의 높이와 거칠기 정도에 따른 실험 상관식을 개발하였다. 이는 실험결과와 약 1.4% 오차를 나타냈으며 실험결과와 거의 일치한다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로

한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No.20124030100080)입니다.

기호

- D_m : 확산계수 (m/s²)
- g : 중력가속도 (9.8 m/s²)
- Gr_L : Grashof 수
- h_h : 대류열전달계수 (W/m²·K)
- h_m : 물질전달계수 (m/s)
- : 열전도계수 (W/m·K)
- L : 수직판의 높이 (m)
- Nu_L : Nusselt 수 (hL/k)
- Nu_x : 국부 Nusselt 수 (hx/k)
- Pr : Prandtl 수
- Ra_L : Rayleigh 수
- Ra_x : 국부 Rayleigh 수
- R_z : 10점 평균 거칠기 (μm)

Greek symbols

- α : 열확산계수 (m^2/s)
 β : 부피팽창계수 ($1/\text{K}$)
 ν : 동점성계수 (m^2/s)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)

References

- Cheesewright, R., Turbulent natural convection from a vertical plane surface, *J. Heat Transfer*, 1968, 90, 1-8.
- Andreopoulos, J. and Wood, D. H., The response of a turbulent boundary layer to a short length of surface roughness, *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 118, 143-164.
- Ligrani, P. M., Moffat, R. J. and Kays. W. M., Artificial thickened turbulent boundary layers for studying heat transfer and skin friction on rough surfaces, *Journal of Fluids Engineering*, 1983, 105, 146-153.
- Mark W. Pinson and Ting Wang. Effects of leading-edge roughness on fluid flow and heat transfer in the transitional boundary layer over a flat plate, 1997, 40, 2813-2823.
- Bejan, A., *Convection Heat Transfer*, 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, INC, 1994, 466-514.
- Lun-Shin Yao, Natural convection along a vertical complex wavy surface, 2006, 49, 281-286.
- Fage, A and Preston, J. H., On transition from laminar to turbulent flow in the boundary layer, *Proceedings of the Royal Society of London*, 1941, 178, 201-227.
- Fujii, T., Fujii, M., and Takeushi, M., Influence of various surface roughness on the natural convection, 1973, 16, 629-640.
- Shakerin, S., Bohn, M., Loehrke, R. I., Natural convection in an enclosure with discrete roughness elements on a vertical heated wall, 1988, 31, 1423-1430.
- Acharya, S. and Mehrotra, A., Natural convection heat transfer in smooth and ribbed vertical channels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1993, 36, 236-241.
- Dryden, H. L., Review of published data on the effect of roughness on transition from laminar to turbulent flow, *Journal of the Aeronautical Science*, 1953, 20, 477-482.
- Levich. V. G., *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1962.
- Selman, J. R., Tobias, C. W., *Mass transfer Measurement by the Limiting Current Technique*, *Adv. Chem. Eng.*, 1978, 10, 211-318.
- Ko, S. H., Moon, K. W. and Chung, B. J., Applications of Electroplating Method for Heat Transfer Studies Using Analogy Concept, *Nuclear Engineering and Technology*, 2006, 38, 251-258.
- Kang, K. U. and Chung, B. J., The Effects of the Anode size and Position on the Limiting Currents of Natural Convection Mass Transfer Experiment in a Vertical Pipe, *Trans. of the KSME(B)*, 2010, 34, 1-8.
- Fenech, E. J. and Tobias, C. W., Mass transfer by free convection at horizontal electrode, *Electrochimica Acta*, 1960, 2, 311-325.