

수직 원형관내 자연대류 열전달에서 기하구조의 영향

옥승민·정범진[†]

경희대학교 원자력공학과

(2015년 2월 21일 접수, 2015년 3월 16일 수정, 2015년 3월 17일 채택)

Influence of the Geometry on the Natural Convection Heat Transfer inside a Vertical Cylinder

Seung-Min Ohk, Bum-Jin Chung[†]

Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University

(Received 21 February 2015, Revised 16 March 2015, Accepted 17 March 2015)

요 약

파이프의 길이(Length)와 직경(Diameter), 거칠기(Roughness)에 변화를 주면서 수직 원형관내 자연대류 열전달을 측정하였다. 고부력 조건에 대한 높은 Rayleigh수를 구현하기 위하여 상사성에 기초한 물질전달실험을 수행하였다. Pr 수는 2,014였다. 수직 원형관의 길이(L)는 0.1m, 0.3m, 0.5m였으며 이는 Gr 수 4.2×10^7 , 1.1×10^9 , 5.5×10^9 에 해당한다. 각 수직 원형관에 대하여 직경(D)을 0.005m, 0.01m, 0.03m로 변화시키면서 열전달을 측정하였다. 실험결과 모든 직경(D)에 대해서 높이(L) 0.1m에서의 열전달 계수는 Le Fevre의 수직평판에 대한 층류 자연대류 상관식과 일치하였다. 동일한 직경(D)에 대해서 길이(L)가 감소할수록 열전달이 증가하였다. 그리고 동일한 길이(L)에 대해서 직경(D)이 증가하였을 때는 열전달이 감소하였다. 파이프 내부 표면에 거칠기를 주어 일반 수직원형관과 열전달을 비교하였을 때, 층류영역에서는 열전달의 차이가 있었으나, 천이영역에서는 열전달 차이가 없었다.

주요어 : 수직원형관, 자연대류, 거칠기, 상사성, 전기도금시스템

Abstract - Natural convection heat transfer rates in vertical pipes were measured varying the diameter, length, and roughness of vertical cylinder. To achieve high Rayleigh number with relatively small test rig, mass transfer experiments instead of heat transfer were performed based on the analogy. Prandtl number was 2,014. The length of vertical cylinder was 0.1m, 0.3m, and 0.5m, which correspond to GrL 4.2×10^7 , 1.1×10^9 , and 5.5×10^9 . To each length of vertical cylinder, the heat transfer rates were measured varying the diameter 0.005m, 0.01m, and 0.03m. The heat transfer rate for a short length pipe(0.1m) agreed with the prediction from Le Fevre correlation developed for a vertical plate for all diameter. The heat transfer rate decreases as the diameter and the length of the pipe increases. The heat transfer rate inside of vertical cylinder is affected by roughness only for a laminar flow regime.

Key words : Vertical cylinder, Natural convection, Roughness, Analogy, Electroplating system

1. 서 론

후쿠시마 원전사고 이후 붕괴열 냉각을 위해 능동 기기 대신 자연력에 의해 구동되는 피동냉각계통(PCCS:

Passive Containment Cooling System)의 채택이 증가하고 있다[1]. 피동냉각기기는 자연력에 의해 구동되며 자연대류에 의해 구동되는 계통의 경우 가열량과 유로의 형상에 따라서 유도되는 유량이 상이하다. 따라서 자연대류 열전달에서 수직원형관의 종횡비(L/D)와 표면 거칠기에 의해 열전달이 달라진다. 직경이 작은 경우, 마찰에 의한 유량감소와 굴뚝효과로 인한 열

[†]To whom corresponding should be addressed.
Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University
Tel : 031-201-3893 E-mail: bjchung@khu.ac.kr

전달 증가가 발생한다. 또한 직경이 클 경우 내부에서 경계층의 상호작용이 없으므로 수직벽면에서의 자유 대류 현상과 유사하다.

이러한 현상학적 복잡성으로 인하여 자연대류 열전달 현상에 대한 실험적, 수치적 연구가 필요하다. 특히 원전과 같은 고부력 조건의 자연대류에 대해서는 실험적인 연구가 많이 수행되지 않았다. 고부력에서 자연대류 열전달 실험을 수행하기 위해서는 실규모의 장치가 필요하며 이에 많은 재원이 요구된다.

본 연구는 격납용기 내부의 열제거를 위하여 설치되는 자연대류 열교환기 파이프로 실험적으로 모사하였다. 파이프의 높이, 직경, 내부 표면 거칠기를 변화시키면서 열전달량을 실험적으로 측정하였다. 유사성(Analogy)의 원리를 이용하여 열전달 실험을 물질전달 실험으로 수행하였다. 물질전달계로는 황산-황산구리($H_2SO_4-CuSO_4$)수용액의 전기도금계를 채택하였다. 가열벽면으로 모사되는 음극수직원형관의 길이(L)는 0.1m, 0.3m, 0.5m이며 직경(D)을 0.005m, 0.01m, 0.03m로 변화하며 실험을 수행하였다. 이때 Gr_L 수는 4.2×10^7 , 1.1×10^9 , 5.5×10^9 에 해당한다. 거칠기 효과는 직경 0.03m의 수직원형관에 대해 거칠기 $14.1 \mu m$ 을 주어 수행하였다.

2. 이론적배경

2-1. 수직원형관 내부에서의 자연대류

수직원형관에서의 열전달 현상은 수직 채널(Channel)에서의 열전달 현상과 유사하다. 수직 채널에서 부력은 유동방향으로 상승하게 하는 작용을 한다. 따라서 경계층은 하단에서 시작하여 상단으로 발달한다. 짧은 길이 그리고 넓은 간격(작은L/D)의 경우에 각 표면에서 독립적인 경계층이 발달한다. 이때의 열전달은 오픈채널(Open channel)에서의 독립된 수직평판에서의 열전달과 같다. 그러나 큰 L/D의 경우에는 표면에서 발달하는 경계층이 중첩되어 수직평판에서의 열전달과 달라진다[2].

Bejan[3]은 열경계층(Thermal boundary layer)의 두께가 관의 직경보다 작은 경우, 수직 원형관에서의 자연대류는 수직평판에서의 자연대류와 동일하다고 하였다. Elenbass[4]는 원형관의 직경이 커지면 수직 평판으로 간주할 수 있다고 하였다. 또한 대칭적으로 가열되어있는 등온평판에 대해서 상관식을 제시 하였다(1).

$$\overline{Nu}_D = \frac{1}{24} Ra_D \left(\frac{D}{L} \right) \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{35}{Ra_D (D/L)} \right] \right\}^{3/4} \quad (1)$$

Bar-Cohen과 Rohsenow[5]은 완전 발달된 기체의 유동에 대하여 D/L의 모든 범위에서 적용할 수 있는 상관식(2)과 최적평판간격(3)을 제시하였다. 큰 D/L의 경우에는 표면에서 독립적으로 경계층 발달하며 작은 D/L에 대해서는 경계층이 만나게 되어 완전 발달한다고 하였다.

$$\overline{Nu}_D = \left[\frac{576}{(Ra_D D/L)^2} + \frac{2.87}{(Ra_D D/L)^{1/2}} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$D_{opt} = 2.71 (Ra_D / D^3 L)^{-1/4} \quad (3)$$

2-2. 표면 거칠기에 따른 자연대류 열전달

표면 거칠기 영향에 따른 자연대류 열전달 연구는 많은 학자들에 의해서 수행되었다. Ohk[6]은 수직평판의 표면 거칠기 정도를 달리하며 자연대류 열전달을 실험적으로 연구하였다. 물리적으로 거칠기를 주었으며 이를 정량화하여 거칠기가 증가할수록 열전달이 증가한다고 하였다. Yao[7]는 표면이 Sine파 형상인 수직판에서의 자연대류 열전달을 수치적으로 계산하였다. 표면을 변화시킨 결과 열전달률이 수직평판보다 최대 두배정도 높아진다고 하였다. Fage와 Preston[8]은 표면의 거칠기 정도가 심할수록 천이 지점이 수직판의 하단으로 이동한다고 하였다. Tetsu Fujii[9]등은 물과 Spindle oil에 대하여 Ra_L 수 $10^{10} \sim 10^{15}$ 에서 내부 수직 원형관 표면의 거칠기에 따른 열전달 실험을 수행하였으며 층류상태 이후 천이구간에서는 거칠기의 영향이 거의 없다고 보고하였다.

2-3. 유사성(Analogy)을 이용한 물질전달 방법

열전달과 물질전달 시스템은 초기 및 경계조건이 같으면 수학적으로 서로 유사(Analogous)하기 때문에 열전달 문제를 물질전달 문제로 변환할 수 있다. 이러한 물질전달계와 열전달계의 무차원수 관계를 Table. 1에 나타내었다.

본 연구에서는 황산-황산구리($H_2SO_4-CuSO_4$)수용액의 전기도금계를 물질전달계로 선택하였다. 전기도금계(Electroplating system)의 전달현상에 대한 연구는 Levich[10]에 의해 시도되었으며 Selman과 Tobias[11]는 여러 조건에서의 물질전달 상관식을 체계적으로

정립했다. Chung[12]등은 수평평판에서의 강제대류와 수직벽면에서의 자연대류 열전달 현상에 관하여 전기도금계를 이용한 실험방법론을 적용하여 기존에 알려진 열전달 상관식을 예측할 수 있음을 검증하였다. 유사성을 이용한 실험기법에 대해 보다 자세한 설명은 Chung[12]과 Kang[13]의 논문에서 제시되어 있다.

열전달계에서의 열전달계수를 구하기 위해 벽면 온도와 평균 유체온도를 알아야 한다. 마찬가지로 물질전달계에서의 물질전달계수를 구하기 위해선 벽면 농도와 평균 유체농도를 알아야 한다. 그러나 전기도금계에서 음극표면에서의 구리이온의 농도를 알기 어렵다. 이와 같은 문제는 한계전류기법을 사용하여 해결한다. 황산구리 수용액에 담겨진 구리 양극과 구리음극에 인가된 전압을 증가시키면서 측정된 전류를 Fig. 1에 나타내었다. 전기도금계에서 전극사이에 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

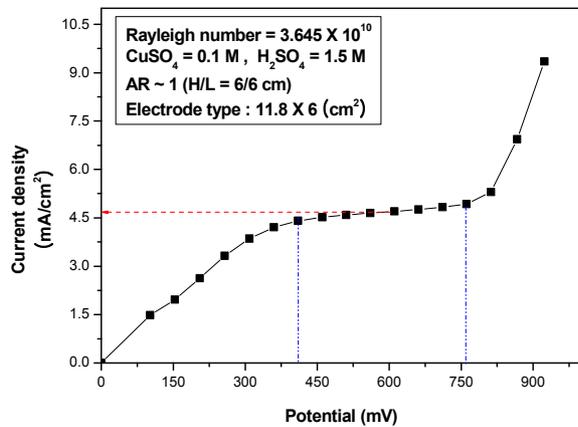


Fig. 1. Typical limiting current density curve.

Table 1. Dimensionless group for analogy system.

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

속도보다 음극에서 구리이온이 전자를 얻어 환원되는 속도가 빠르기 때문에 발생하는 현상이며 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이온 농도를 0으로 취급할 수 있다. 따라서 물질전달계수(Mass coefficient), h_m 은 식(3)에 따라 모액농도(Bulk concentration), C_b 와 한계전류밀도(Limiting current), I_{lim} 만으로 구할 수 있다[14].

$$h_m = \frac{(1 - tn)I_{lim}}{nFCb} \quad (3)$$

3. 실험

3-1. 실험장치 및 실험범위

Fig. 2는 실험장치와 회로의 개략도이다. 실험장치는 아크릴로 제작된 수조, 음극구리관과 양극봉으로 구성된다. 아크릴 수조의 크기는 0.3m×0.3m×0.9m이다. 가열벽면을 모사하는 음극구리관은 외부표면에 절연처리를 하였으며 상·하단에 아크릴 지지대를 설치하였다. 양극봉은 구리파이프 내부 중앙에 위치한다. 양극봉과 음극관을 수조 내부에 위치시켜 실험을 수행하였다. Fluke사의 15B Digital Multimeter를 연결하여 전류측정을 하였으며, 전원공급장치로 VüPOWER사의 DC Power supply-18B10을 사용하였다.

Table 2는 실험범위를 나타낸다. Pr 수는 2,014로 고정하였으며, 길이(L)는 0.1m, 0.3m, 0.5m이다. 각 길이(L)에 대해서 직경(D)을 0.005m, 0.01m, 0.03m로 변화하여 실험을 수행하였다. 또한 직경 0.03m에 대하여 거칠기 14.1 μ m를 준 경우에 대해서도 실험을 수행하였다. Fig. 3은 거칠기를 주지 않은 구리표면과 거칠기를 준 구리표면을 나타낸다.

Table 2. Test matrix for experiments in vertical pipe.

Pr	$L(m)$	Ra_L	Gr_L	$D(m)$
2,014	0.1	8.5×10^{10}	4.2×10^7	0.005, 0.01, 0.03
	0.3	2.3×10^{12}	1.1×10^9	
	0.5	1.1×10^{13}	5.3×10^9	

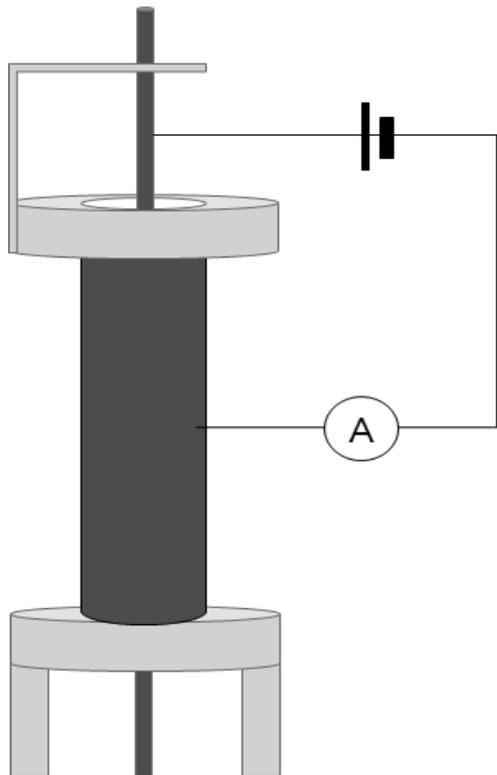
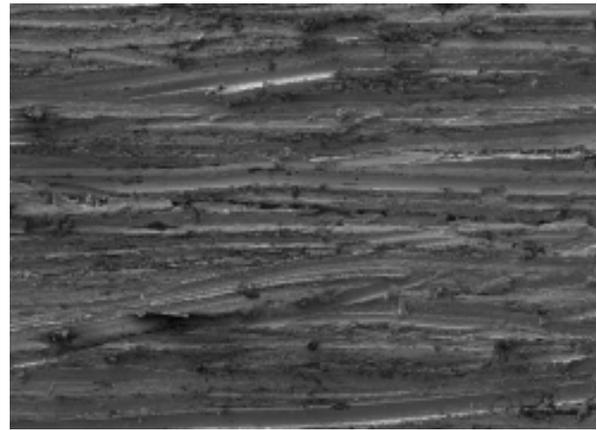


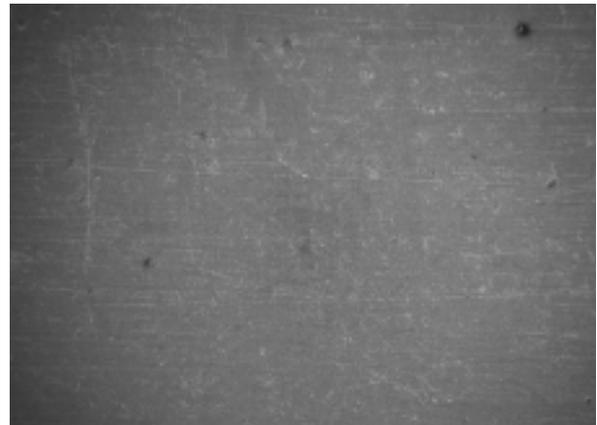
Fig. 2. Test apparatus.

4. 실험 결과 및 토의

Fig. 4는 수직 원형관에서 측정된 결과와 수직평판에 대한 자연대류 열전달 상관식으로부터 계산된 값을 비교한 그래프이다. Ra_L 수 10^{11} 이하에서 측정된 Nu_L 수는 직경(D)이 다른 경우에도 Le Fevre의 층류 자연대류 열전달 상관식(4)의 예측치와 일치하였다. 이는 높은 Pr 수로 인하여 열경계층이 얇게 형성되었고 열경계층간의 상호작용을 일으키기에는 열경계층의 발달길이(Developing length)가 충분하지 않았기 때문에 열경계층간 상호작용이 없는 단순한 수직 평판에서의 자연대류와 동일한 현상이 발생한 것으로 판단된다. 한편 수직 원형관의 길이(L)가 증가할수록 직경(D) 0.005m, 0.01m에서는 Nu_L 값이 증가하였다. 그러나 이



(a) Rough surface



(b) Plane surface

Fig. 3. Comparison of rough surface with plane surface for the copper plate.

러한 Nu_L 값의 향상이 직경(D) 0.03m 에서는 관찰되지 않았다. 이는 직경이 얇은 수직 원형관에서 길이가 증가하면서 열경계층이 충분히 발달하여 경계층간 상호작용을 통하여 굴뚝(Chimney) 효과가 발생한 것으로 이해된다. 한편 직경이 굵은 수직원형관의 경우에는 여전히 상호작용을 일으킬만큼 열경계층이 발달하지 않았음을 보여준다.

$$Nu_L = 0.67(Gr_L Pr)^{0.25} \text{ at } Gr < 10^9 \quad (4)$$

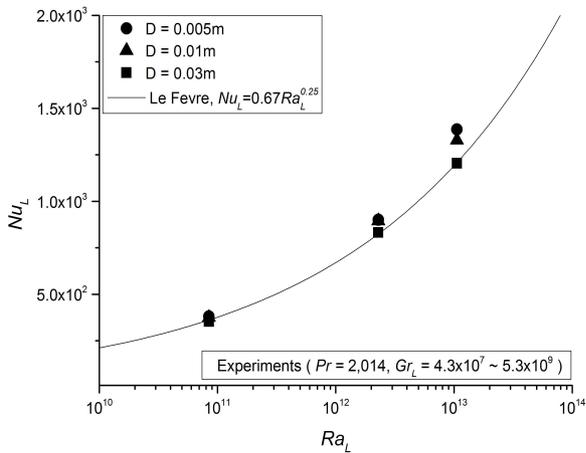


Fig. 4. Comparison test result with correlation.

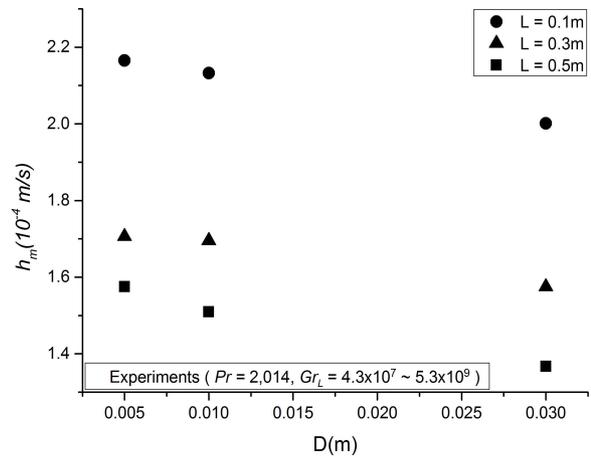


Fig. 6. h_m according to the diameter of vertical pipe.

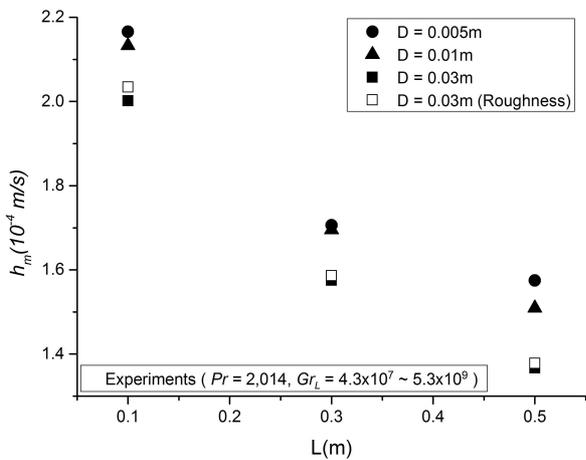


Fig. 5. h_m according to the length of vertical pipe.

Fig. 5는 직경이 다른 수직 원형관에 대해 길이에 따른 평균 물질전달 계수를 나타낸 그래프이다. 모든 직경(D)에서 가장 짧은 길이(L)인 0.1m의 물질전달계수가 가장 높고, 길이가 증가할수록 평균 물질전달계수가 감소하였다. 이는 경계층이 발달하기 시작하는 선단(Leading edge) 부분의 경계층이 매우 얇으므로 열전달이 매우 높고 이후 열경계층의 발달에 따라서 온도구배가 낮아지기 때문에 열전달면의 길이가 길어질수록 평균열전달능력은 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 5에서 채워지지 않은 사각심볼(Open square symbol)은 직경(D) 0.03m에 대하여 내부표면에 14.1 μm 의 거칠기 효과를 주었을 때 물질전달계수를 나타낸 것이다. 이 역시 파이프의 길이가 감소하면서 물질전달계수가 증가하였다. 거칠기를 효과를 주지 않은 동일한 직경의 파이프와 비교하였을 때, 물질전달계수

는 최대 3% 향상했다. 이는 거칠어진 표면이 열전달 표면적을 증가시켰기 때문이다. 또한 거칠기 유무에 대한 열전달 차이는 길이(L)가 가장 짧은 0.1m에서 가장 컸다. 이 역시 선단부분에서의 열전달 현상에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 직경(D)에 따른 물질전달 계수를 나타낸 것이다. 수직축을 물질전달계수로 한 것은 Nu_L 값으로 하는 경우 Nu_L 에 포함된 길이척도로 인하여 물질전달 효과를 보여주지 못하기 때문이다. 같은 길이(L)에서 직경(D)이 증가할수록 물질전달 계수가 감소하였다. 이는 파이프 내부에서 경계층이 중첩되면서 굴뚝효과를 야기한 것으로 판단된다. 굴뚝효과는 각 표면에서 발생한 경계층이 중첩되면서 마치 굴뚝과 같은 효과를 넘으로써 열플룸(Plume)이 퍼지지 않고 가속되어 내부벽면에서 열전달이 향상하는 것을 의미한다. 만약 직경이 더욱 감소하면 h_m 이 증가하다가 정점(Peak)을 나타내고 감소할 것으로 판단된다. 직경이 매우 작으면 굴뚝효과(Chimney effect)에 의한 열전달 증가보다 마찰에 의한 열전달 감소가 지배적이기 때문이다.

5. 결론

수직 원형관에서 직경(D)과 길이(L) 그리고 내부 표면 거칠기의 변화가 자연대류 열전달에 주는 영향을 실험적으로 연구하였다. 결과 물질전달의 유사성(Analogy)에 기초하여 열전달 실험을 물질전달 실험으로 대체하였으며, 물질전달계로는 전기도금계를 채택하였다. 길이(L) 0.1m, 0.3m, 0.5m의 수직 원형관의 평균 자연대류 열전달을 측정하였다. 이때 직경(D)을 0.005m,

0.01m, 0.03m로 변화시켰으며, 직경 0.03m의 원형관에 대해서는 내부 표면 거칠기(14.1 μ m)효과를 적용하였다.

실험결과 수직 원형관의 길이(L)가 0.1m인 경우, 직경에 무관하게 측정된 열전달률은 수직평판에 대한 실험식인 Le Fevre 상관식의 예측결과와 일치하였다. 이는 열경계층의 발달이 충분하지 않아 상호간섭이 없음을 나타낸다. 평균 열전달률의 경우, 동일한 직경(D)에 대해 수직원형관의 열전달계수는 길이(L)가 작을수록 높았다. 이는 경계층이 발달하기 시작하는 선단(Leading edge) 부분이 경계층이 매우 얇으므로 열전달에 지배적으로 기여하기 때문이다.

동일한 길이(L)의 수직 원형관에서 직경(D)이 감소함에 따라 열전달계수는 증가하였는데, 이는 직경(D)이 작아질수록 형성되는 경계층이 중첩됨에 따라 굴뚝 효과(Chimney effect)가 발생하였기 때문이다. 수직원형관에서 거칠기 효과에 따른 열전달은 길이(L)가 가장 짧은 0.1m에서 많이 향상되었다. 이는 경계층이 매우 얇은 부분에서 거칠기 효과가 열전달 변화에 영향을 주었기 때문이라고 판단된다. 반면 길이(L)가 0.3m과 0.5m일 때는 Gr_L 수가 10^9 이상인 천이구간으로써 표면 거칠기가 열전달 변화에 크게 기여하지 않았다.

본 연구는 원전 중대사고시의 격납용기 내부 냉각을 위한 피동냉각계를 설계할 때, 수직 원형관의 직경과 높이 그리고 표면 거칠기를 설계하는 현상학적 기초를 제공한다. 즉 자연대류의 유량을 극대화하기 위하여는 열경계층의 중첩이 요구되므로 열경계층의 충분한 발달길이를 확보해야 함을 알 수 있다 또한 이들이 굴뚝효과를 나타내기 위해서는 열경계층의 상호작용이 요구되는 바, 발달된 열경계층에 상응하는 직경이 요구됨을 알 수 있다. 반면 표면거칠기는 경계층의 선단 그리고 층류에 주로 나타나는 현상이기 때문에 자연대류 열전달에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부(MSIP)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구과제(NRF-2014M2B2A8A02030837)입니다.

기 호

D_m : 확산계수 (m^2/s)

g : 중력가속도 ($9.8 m/s^2$)
 Gr_L : Grashof 수
 h : 대류열전달계수 ($W/m^2 \cdot K$)
 h_m : 물질전달계수 (m/s)
 L : 수직파이프의 높이 (m)
 D : 수직파이프의 직경 (m)
 Nu_L : Nusselt 수 (hL/k)
 Nu_D : Nusselt 수 (hD/k)
 Pr : Prandtl 수 (ν/α)
 Ra_L : Rayleigh 수 ($g\beta\Delta TL^3/\alpha\nu$)
 Ra_D : Rayleigh 수 ($g\beta\Delta TD^3/\alpha\nu$)
 R_z : 10점 평균 거칠기 (μm)

Greek symbols

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

Reference

1. Development and Conceptual Design for Passive Containment Cooling System, Ministry of Trade, Industry & Energy, Korea Institute Energy Technology Evaluation and Planning, 2014
2. Frank P. Incopera, David, P Dewitt, Foundation of Heat Transfer 6th, 2011, pp. 572-575
3. Bejan., A., Convection Heat Transfer, 3rd ed., John Wiley & Sons, INC, New York, 2003, pp. 207-222
4. Elenbaas, W., Physica, 1942, 9, 1
5. Bar-Cohen, A., and W. M. Rohsenow, Journal of Heat Transfer, 1984, 106, 116
6. Ohk, S. M., Chung, B. J., The Influence of the Surface Roughness on the Natural Convection on a Vertical Flat Plate, Journal of Energy Engineering, 2014, 23, 2, pp. 21-27
7. Lun-Shin Yao, Natural convection along a vertical complex wavy surface, 2006, 49, pp. 281-286
8. 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, pp. 201-227
9. Fujii, T., Fujii, M., and Takeushi, M., Influence

- of various surface roughness on the natural convection, 1973, 16, pp. 629-640
10. Levich, V. G., Physicochemical Hydrodynamics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1962
 11. Selman, J. R., Tobias, C. W., Mass transfer Measurement by the Limiting Current Technique, Adv. Chem. Eng., 1978, 10, pp. 211-318
 12. 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, pp. 251-258
 13. 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, pp.1-8
 14. Fenech, E. J. and Tobias, C. W., Mass transfer by free convection at horizontal electrode, Electrochimica Acta, 1960, 2, 311-325