

히트펌프 조건의 원형관에서의 착상에 관한 연구

윤 신 혁, 조 금 남^{*†}, 하야세 가쿠^{**}

성균관대학교 대학원, ^{*}성균관대학교 기계공학부, ^{**}삼성전자 생활가전사업부

Frost Formation on a Cylinder under Heat Pump Condition

Shin-Hyuk Yoon, Keumnam Cho^{*†}, Gaku Hayase^{**}

Graduate school, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

^{*}School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

^{**}System Appliances Division, Samsung Electronics Co., Ltd, Suwon, 443-742, Korea

ABSTRACT: The present study measured frost pattern on a cylinder to propose empirical correlation equations for the local and average frost thickness, frost density and frost mass. The key parameters were diameter of the cylinders (7mm, 20mm), cooling surface temperature of the circular tube, absolute humidity of air, air temperature and air velocity. A 50% ethylene glycol aqueous solution was applied as a coolant.

The frost thicknesses at both front and rear were larger than those at the other parts, while they were increased as diameter of the cylinder was increased. The local frost thicknesses at high air velocity were more uniform than those at low air velocity. The values predicted by Kim et al.⁽⁴⁾ under the freezer condition showed larger by the maximum of 30~50% than the measured data under heat pump condition. The empirical correlations for the local and average frost thickness and frost mass were proposed. The correlation equations for the frost thickness and frost mass under the heat pump condition in the present study might predict more accurate than the other correlation equations. The proposed correlations might be applied for the freezer condition within the maximum 15% deviation from the previous correlations under freezer condition.

Key words: Frost(착상), Cylinder(원형관), Heat Pump(히트펌프)

기 호 설 명			
A	area (m ²)	T	temperature (°C)
D	diameter of circular tube (m)	t	time (min)
FO_D	Fourier number ($\alpha_a t/D^2$)	V_a	air velocity (m/s)
L	length of duct (mm)	w_a	absolute humidity (g/kg _{DA})
m_f	frost mass (g)		
Re_D	Reynolds number ($V_a D/\nu_a$)		
			그 리 스 문 자
		δ_f	local frost thickness (mm)
		$\bar{\delta}_f$	average frost thickness (mm)
		ν	dynamic viscosity (m ² /s)

† Corresponding author

Tel.: +82-31-290-7445; fax: +82-31-290-7923

E-mail address: keumnamcho@skku.edu

ρ_f	local frost density (kg /m ³)
θ	angle of circular tube (°)
Φ	relative humidity (%)

상첨자

*	dimensionless
-	average

하첨자

<i>a</i>	air
<i>al</i>	aluminium
<i>f</i>	frost
<i>ice</i>	ice condition at T _f
<i>i</i>	inlet
<i>tp</i>	triple point of water
<i>w</i>	wall of cooling surface

1. 서론

생활수준의 향상과 더불어 쾌적한 생활공간에 대한 요구가 증대됨에 따라 냉동 및 공기조화 관련 산업 발달 및 연구가 활발히 진행되고 있다. 히트펌프는 열을 저온에서 고온으로 이동시키는 것으로서 에너지 이용 효율이 높고, 환경 문제의 발생이 적어서 중요성이 증대되고 있고, 주위에 풍부한 열원을 이용하는 장점을 가지고 있으나 외기 온도가 저온으로 갈수록 효율은 급격히 떨어지고 실외 열교환기에 생기는 서리로 인한 효율감소 및 제상을 하기 위한 에너지 소비는 가장 큰 문제로 지적되고 있다.

지금까지의 히트 펌프 관련 연구^(1~3)에서 살펴볼 수 있듯이, 서리층 두께와 밀도가 서리의 열저항이나 열전도 계수에 큰 영향을 미치고, 운전인자에 따른 서리 물성치 변화는 열교환기를 설계하는데 있어서 중요한 요소로 작용하므로 서리층 두께와 서리층 밀도에 관한 예측이 필요하다. 하지만, Kim et al.⁽⁴⁾의 상관식은 냉장고에서의 착상 위주로 모사되었기 때문에 가정용 공조기의 히트펌프 증발기에 적용하는 경우 상당한 차이가 발생한다. 히트 펌프 실외기에서의 착상은 주로

겨울철 외기의 온도가 물의 어는점에 가깝고, 냉각면 표면이 냉장고보다 높은 영역이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 가정용 열펌프용 증발기 설계에 적용할 수 있는 기본적인 착상 특성 및 전열 성능 자료를 획득하고 기존 연구 결과와의 상관식을 비교 평가하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. Table 1은 본 연구의 실험 조건을 나타내고 있으며, 보다 자세한 실험 장치 구조 및 실험조건은 Yoon 등⁽⁵⁾에서 제시한 바 있다. 원형관에서 착상 실험을 위한 시험부는 Fig. 2와 같다. 항온 항습실내 아크릴 덕트를 설치하였고, 실험부 관찰을 위한 부분을 제외한 나머지를 단열처리하였다. 아크릴 덕트 중앙에 수평으로 설치된 원형관은 바깥지름 7mm와 20mm이고, 균일한 냉각면 온도를 얻기 위해 열전도율이 좋은 구리로 제작되었다. 서리 두께를 카메라로 측정하기 위해 외팔보 형태로 구성하였다. 서리층 표면 온도 측정을 위해 시험부 하단에 열전대를 시험부 상단에 IR thermometer를 설치하였다. data acquisition system에서 실험 데이터는 실험 시간 120분 동안 2초 간격으로 PC로 수집하였다.

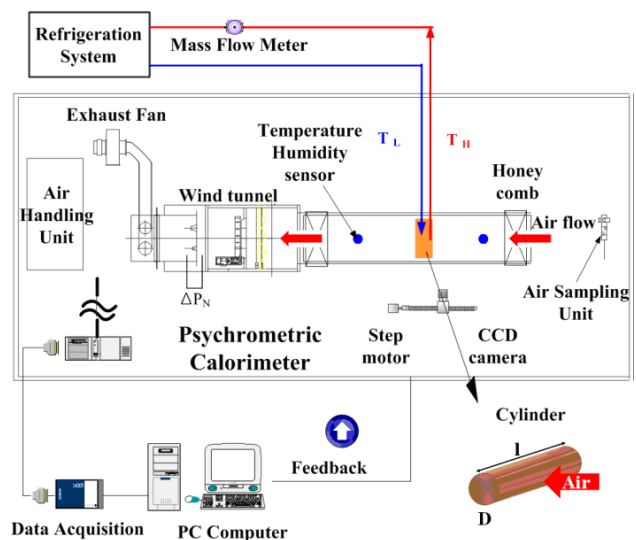


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions and parameters

Experimental conditions	Refrigerant flow rate (kg/min)	2.0
	Refrigerant	Ethylene glycol (50 wt %)
Experimental parameters	Diameter of circular tube (mm)	7, 20
	T _w (°C)	-15 ~ -5
	w _a (g/kg _{DA})	2.98 ~ 4.16
	T _a (°C)	0.32 ~ 7
	V _a (m/s)	1.0 ~ 2.5

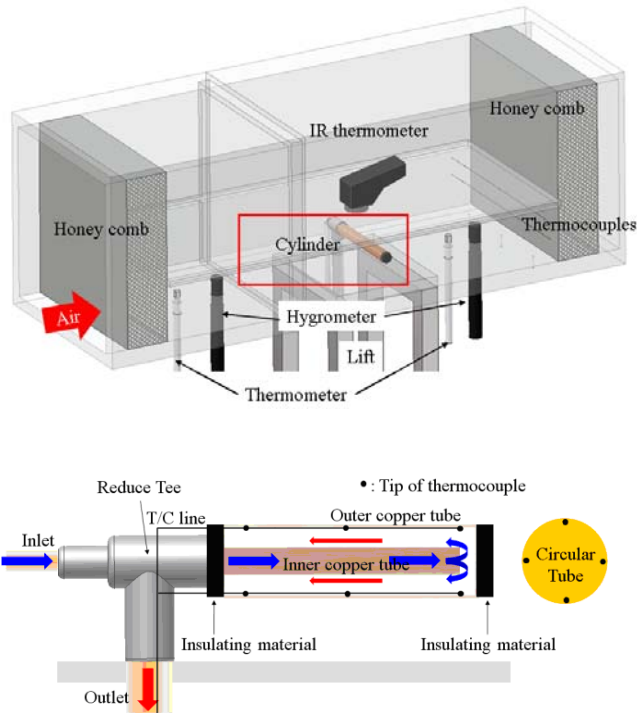


Fig. 2 Schematic diagram of the test section

2.2 실험결과 처리 방법

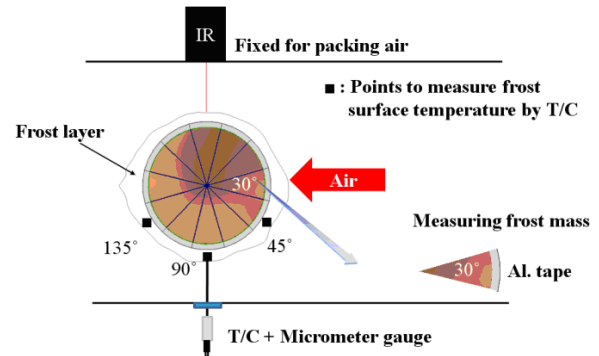
Fig. 3은 서리량 및 서리두께를 측정하는 방법을 나타내고 있다. Fig. 3(a)와 같이 서리량은 위치별(30°간격)로 부착된 알루미늄 테이프를 각 실험(30, 60, 90, 120분) 종료 후 미리 부착해 놓은 알루미늄 테이프를 서리가 떨어지지 않게 떼어낸 후 0.1mg까지 측정 가능한 정밀 전자저울을 사용하여 측정하였고, 서리 두께는 Fig. 3(b)와 같이 디지털 CCD Camera와 moving rail을 이용하여, 10

분 간격으로 원형관 측면을 촬영하여 측정하였다. 실험에 앞서 시험부 표면을 알코올을 사용하여 깨끗이 닦아낸 후, 질량이 측정된 알루미늄 테이프를 각 부분에 부착하였으며, 실험조건이 정상상태에 이르기 전에 착상이 생기는 것을 방지하기 위해 냉각면에 비닐랩을 부착한 후 칼로리미터 챔버 및 항온조를 가동하였다. 서리 두께와 질량으로부터 평판과 원형관에서의 서리 밀도는 다음과 같이 각각 계산하였다.

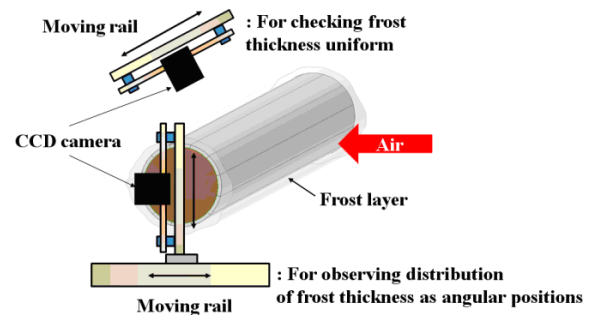
$$\rho_{f,m} = \frac{m_{f,m}}{\pi[(r + \delta_{f,m})^2 - r^2]L} \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 원형관 크기 및 각도에 따른 서리 두께를 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이, 지름 20mm 원형관의 경우는 90° 부근의 서리 두께가 0° 부근보다 7.3%, 180° 부근보다 7.1% 작았고, 지름 7mm 원형관의 경우는 90° 부근의 서리 두께가 0° 부근보다 6.5%, 180° 부근보다 4.2% 작았다.



(a) Frost temperature and mass



(b) Frost thickness

Fig. 3 Measuring method of the frost properties

이는 Mago and Sherif⁽⁷⁾ and Giedt⁽⁸⁾ 논문에서 언급한 것처럼, 원형관 전면부는 고습의 공기와 직접 충돌함에 따라 열 및 물질전달이 촉진되지만, 박리점 이후 둔화되고 후면부에서는 와류의 생성 및 성장으로 인해 서리층 두께가 다시 증가하고 있다는 것과 일치한다.

원형관 크기가 달라지더라도 동일한 Re 수에서는 착상의 패턴과 두께가 거의 달라지지 않았다. 이러한 현상은 Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 공기 유속이 증가할수록 완화되어, 각도별 차이가 줄어들었다.

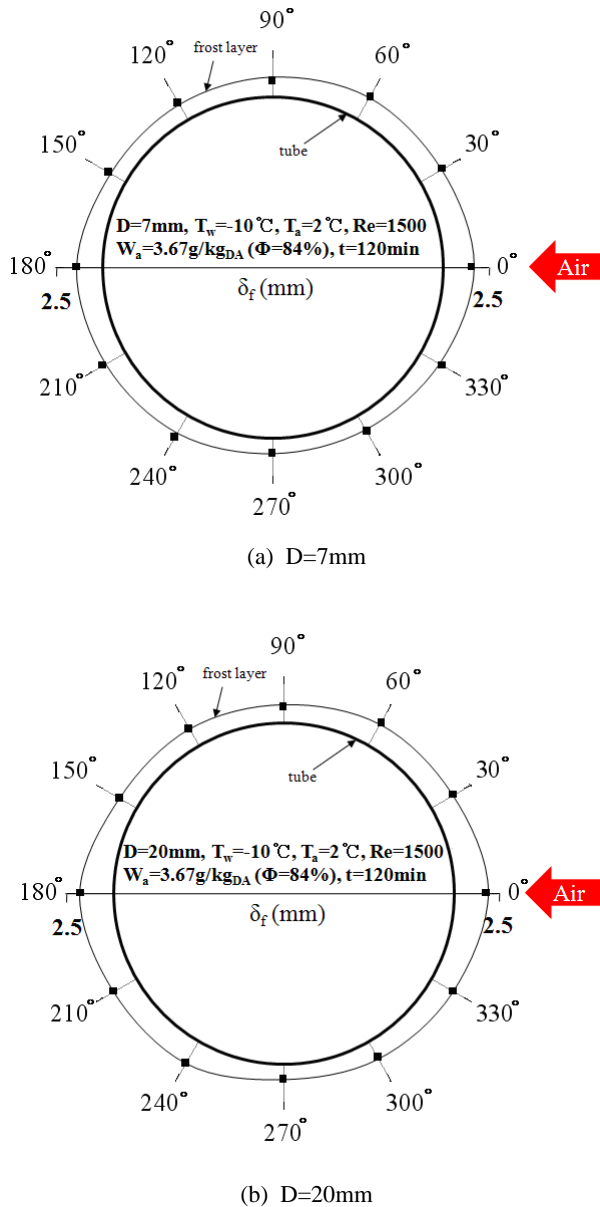


Figure 4 Frost thickness profile around the circular tube with different diameters

또한 공기 유속이 증가할수록 물 분자의 상변화에 따른 발열량이 쉽게 서리층에 흡수되고, 공기층과 서리층 경계에서의 습도를 상대적으로 낮아지므로, 서리 두께 및 질량이 증가하는 경향을 보였다.

대부분의 상관식들은 원형관의 각도에 따른 변화를 반영하지 않았고, 냉장고 조건에서의 서리 물성치를 다루었으므로, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 히트펌프 조건에서의 물성치와는 40%의 차이를 보였기 때문에, 기존의 Kim et al.⁽⁴⁾의 냉장고 상관식 모델링 기법을 활용해서 히트 펌프 조건에 맞도록 다음과 같이 변형하였다.

$$\overline{m}_{f,p} = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \rho_{f,p} \left[\left(\frac{D}{2} + \delta_{f,p} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] L d\theta \quad (2)$$

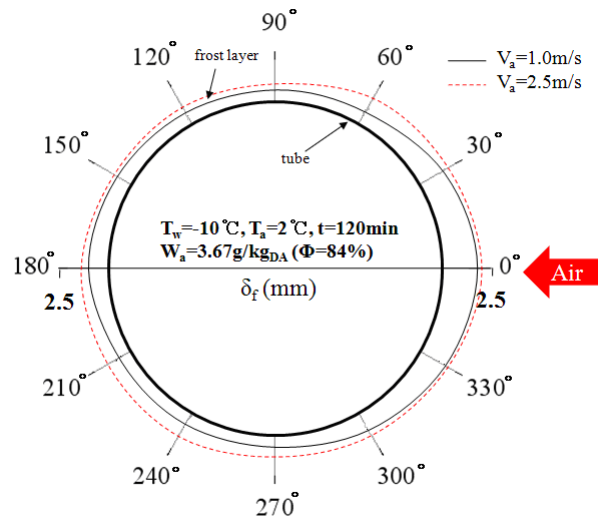


Figure 5 Effect of the air velocity on the frost thickness

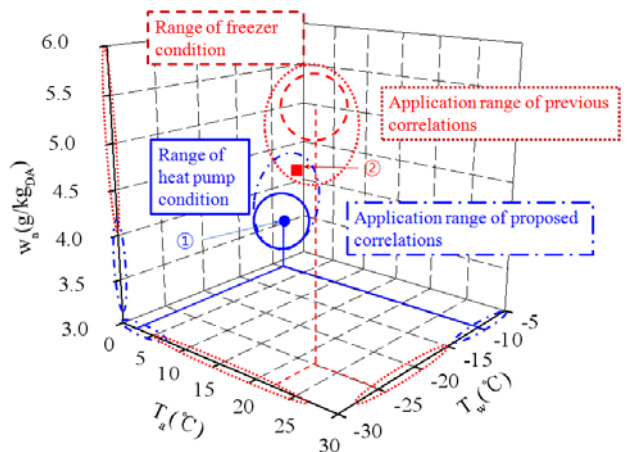


Figure 6 Application range of the proposed correlations

$$\overline{\delta_{f,p}} = \int_0^{2\pi} \delta_{f,p} d\theta \quad (3)$$

$$\delta_{f,p} = 2.255D(Re_D)^{3.958 \times 10^{-2}} (\theta^*)^{0.015} (FO_D)^{1.875} (w_{a,i})^{1.312} \times (T_a^*)^{-15.923} (T_w^*)^{-8.453} \quad (4)$$

$$\rho_{f,p} = 5.064 \times 10^{-3} (\rho_{ice}) (Re_D)^{0.308} (\theta^*)^{0.015} (FO_D)^{0.508} \times (w_{a,i})^{0.528} (T_a^*)^{10.001} (T_w^*)^{4.278} \quad (5)$$

$$Re_D = \frac{V_a D}{\nu_a}, \theta' = 1 + (|\theta - \pi| - \frac{\pi}{2})^2, T_w' = \frac{T_w}{T_{fp}}, T_a' = \frac{T_a}{T_{fp}}, FO_D = \frac{\alpha_a t}{D^2}$$

Fig. 7, 8은 무 차원 시간의 변화에 따른 평균 서리량에 대한 실험결과와 실험상관식의 결과를 비교하여 도시하였다. 착상 초기 서리 두께는 빠르게 증가하나, 시간이 경과할수록 느려져 포물선의 성장 곡선을 나타낸다. 제시된 서리 두께에 대한 상관식은 히트펌프 조건에서의 실험결과와 최대 5%이내에서 일치하며, 제시된 서리층 두께에 대한 무 차원 상관식은 상관식 도출을 위해 착상 인자의 범위를 확장한 영역에서의 실험 결과와 최대 15%이내에서 일치하였다.

4. 결론

본 연구의 결과는 다음과 같다.

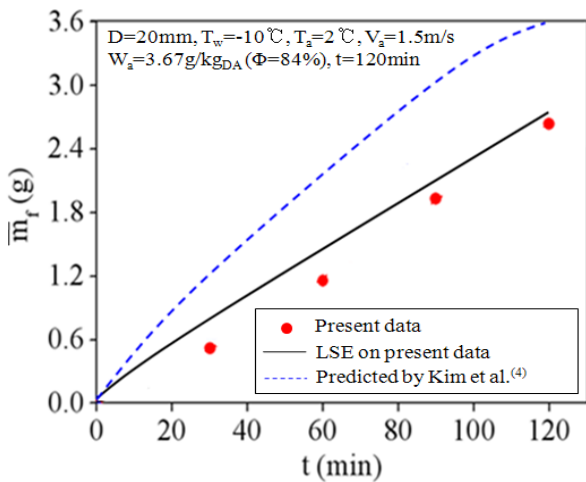


Figure 7 Comparison of the measured average frost mass with the predicted values by Kim et al.⁽⁴⁾ under heat pump condition

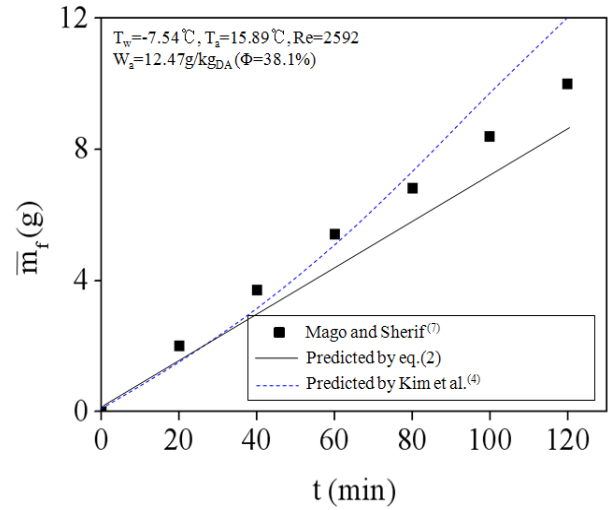


Figure 8 Comparison of the predicted frost mass by using eq.(2) with the values predicted by Kim et al.⁽⁴⁾ and data by Mago and Sherif⁽⁷⁾ under freezer condition

(1) 원형관 전면부 및 후면부의 서리 두께는 다른 부분에 비해 컸고, 원형관 크기가 달라지더라도 동일한 Re에서는 착상의 패턴과 두께가 거의 달라지지 않았다. 원형관 각도에 대한 서리의 두께는 공기유속이 증가할수록 균일해졌다.

(2) 기존의 냉장고 조건 상관식 예측값과 측정값은 30~50%차이가 났으며, 히트펌프 착상 조건의 서리 두께, 질량 및 밀도를 예측할 수 있는 실험식들을 제시하였다. 실험식의 적용 범위는 공기 유속 1.0~2.5m/s, 공기 온도 0.32~7℃, 절대습도 2.98~4.16g/kg_{DA}, 냉각면 온도 -15~-5℃이고, 본 연구의 데이터와는 5% 내에서 일치하였고, 기존 냉장고 조건 데이터와는 15% 이내에서 일치하였다.

후 기

이 논문은 성균관대학교 미래가전연구센터(SFARC), 2007년도 2 단계 두뇌한국(BK) 21 사업 및 한국에너지자원기술기획평가원의 인력양성사업의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kwon, J. T., Lim, H. J., Kwon, Y. C., Koyama, S., Kim, D. H. and Kondou, C., 2006. An experimental study on frosting of laminar air flow on a cold surface with local cooling. *Int. J. Refrigeration*, Vol. 29, pp. 754-760.
2. Senshu, T., Yasuda, H., Oguni, K. and Ishibane, K., 1990. Heat pump performance under frosting conditions : Part 1-Heat and mass transfer on cross-finned tube heat exchangers under frosting conditions, *ASHRAE Trans*, Vol. 96, pp. 3073-3080.
3. Shin, S. H., Cho, K. and Hayase, G., 2007, Effect of air velocity on frost formation of slit fin-and-tube heat exchanger under frosting condition, *Proceedings of the winter annual conference of the SAREK*, pp. 252-257.
4. Kim, J. S., Yang, D. K. and Lee, K. S., 2008 Dimensionless correlations of frost properties on a cold cylinder surface, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 51, pp. 3946-3952.
5. Yoon, S. H, Hayase, G., and Cho, K. N., Measurements of the Frost on a Flat Plate, *ICCHT 2008 conference*, pp. 189-196.
6. Moffat, R. J., 1985, Using uncertainty analysis in the planning of an experiment, *Trans. Of the ASME : J. Of Fluid Engineering*, Vol. 107, pp. 173-182.
7. Mago, P. J. and Sherif. S. A., 2003, Heat and mass transfer on a cylinder surface in cross flow under supersaturated frosting conditions, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 26, pp. 889-899.
8. Giedt, W. H., 1949, Investigation of variation of point unit heat transfer coefficient around a cylinder normal to an air stream, *ASME Transactions*, Vol. 75, pp. 375-381.