

튜브 직경이 풀핵비등 열전달에 미치는 영향

강 명 기*
(1999년 11월 12일 접수)

Effects of Tube Diameter on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer

Myeong-Gie Kang

Key Words: Pool Boiling(풀비등), Tube Diameter(튜브직경), Vertical Tube(수직튜브)

Abstract

A series of data sets for the heat transfer coefficient versus wall superheat has been obtained experimentally using various combinations of tube diameters (9.7~25.5mm), surface roughness (15.1~60.9nm), and tube orientations (horizontal and vertical) to obtain effects of tube diameters on nucleate pool boiling heat transfer for the saturated water at atmospheric pressure. In addition, the results are compared with the well known Cornwell and Houston's correlation for horizontal tubes to identify the deviation of the present experimental data from the correlation and the applicability of it to vertical tubes. The experimental results show that the heat transfer coefficient decreases as the tube diameter increases for both horizontal and vertical tubes and they are in good agreement with the Cornwell and Houston's correlation within $\pm 20\%$ scatter range.

기호설명

- C : 상수(Hahne와 Feurstein 상관식)
- C_{fb} : 상수(Cornwell 등의 상관식)
- D : 튜브 외경
- E : 공급 전압
- H : 튜브 길이 관련 무차원수(= L/D)
- h_b : 핵비등열전달계수
- h_{bc} : 수정된 핵비등열전달계수
- h_{fg} : 증발 잠열
- I : 공급 전류
- L : 튜브 길이
- n : 지수(Hahne와 Feurstein 상관식)
- Nu : Nusselt 수
- p : 유체의 압력
- p_c : 유체의 임계압력

- Pr : Prandtl 수
- q'' : 열유속
- Re_b : 비등 Reynolds 수
- t : 시간
- T_{sat} : 포화수 온도
- T_w : 튜브 표면 온도

그리스문자

- Δ : 차이
- ϵ : 평균 튜브 표면거칠기
- μ_f : 유체 점성계수

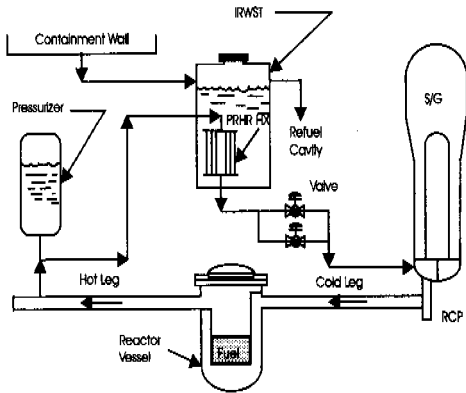
1. 서론

열교환기 설계에 있어서 가장 중요한 변수중의 하나인 튜브 외경에 대한 연구는 오랜 기간을 두고 꾸준히 연구되어 온 주제이다. 특히, 튜브가 정체된 유체 속에 잠겨져 있는 경우에 대한 연구는 대체적으로 50년대 이후부터 꾸준히 지속되

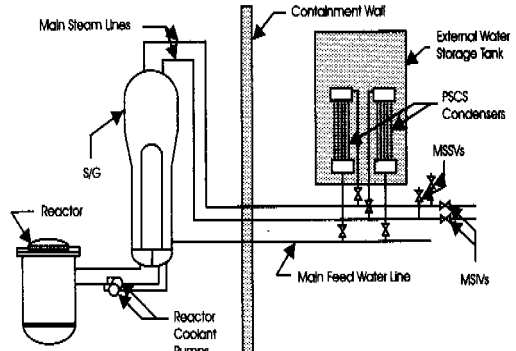
* 회원, 안동대학교 기계공학교육과

E-mail: mgkang@andong.ac.kr

TEL: (0571)850-5483 FAX: (0571)841-1624



(a) AP600 PRHRS



(b) KNGR PSCS

Fig. 1 Two passive residual heat removal systems for advanced light water reactors

어오고 있으며, 최근 들어 많은 관심을 보이고 있는 분야중의 하나가 전세계적으로 개발이 진행되고 있는 신형원자로(ALWR, advanced light water reactor)에 대한 적용을 염두에 둔 연구라 할 수 있겠다.^(1~3) 신형원자로의 주요 특징으로는 이전의 원자력발전소 안전계통에 적용되어 왔던 능동형(active) 개념을 지양하고 피동형(passive) 개념을 구현하는 것이라고 할 수 있다. 안전설비로 채택된 피동형 설비 중 가장 잘 알려진 것은 미국 Westinghouse 사 AP600에 설치되어 있는 피동 잔열제거계통 (PRHRS, passive residual heat removal system)⁽¹⁾과 한국형차세대원자로(KNGR, Korean next generation reactor)에 설치되어 있는 피동이차축응축계통 (PSCS, passive secondary condensing system)⁽²⁾이다. 각각의 설비들에 대한 개략적인 형상과 개요를 Fig. 1과 Table 1에 각각 나타내었다.

튜브를 이용한 핵비등열전달 실험에 대한 결과는 여러 연구가들에 의하여 조금씩 발표되어 왔지만, 튜브 직경 변화와 핵비등열전달계수 사이의 관계는 Cornwell 등⁽⁴⁾에 의하여 본격적으로 연구되었다. 비록, Chongrungrong 과 Sauer⁽⁵⁾가 냉매를 사용하여 실험한 결과를 이용하여 무차원 변수로서 조합한 상관식이 Cornwell 등의 결과에 선행하여 발표되었지만, 그 연구의 주 목적이 튜브 직경의 효과를 보기 위한 것이 아니었기 때문에 Cornwell 등⁽⁴⁾의 연구 결과를 튜브 직경 효과를 규명하기 위한 최초의 시도로 인정하는 것이 적절할 것이다. Cornwell과 Houston⁽⁶⁾은 Cornwell

Table 1 Major design parameters for AP600 PRHR and KNGR PSCS

Design Parameters		AP600 PRHR	KNGR PSCS
Location		Primary Side	Secondary Side
Fluid Condition		Subcooled Water	Saturated Steam
Heat Transfer Mechanisms	In	Single Phase Convection	Condensation
	Out	Natural Convection Subcooled Boiling Saturated Boiling	Natural Convection Subcooled Boiling Saturated Boiling
Tube Material		Stainless Steel	Stainless Steel
Tube Diameter, mm		19.1	50.8
Tube Length, mm		5,486.4	1,800
Tank Pressure		Containment Ambient Pressure	Atmospheric Pressure
Circulation Mode in the System		Single Phase Natural Circulation	Two Phase Natural Circulation

등이 제시한 상관식을 개선한 새로운 상관식을 발표하였으며, 그 적용 범위를 확장하였다. 주된 개선 사항으로는, Cornwell 등이 상수로 취급했던 사항들을 유체의 현재 압력(p)과 임계압력(p_c) 사이의 비율인 상대압력($p_r = p/p_c$)과 Prandtl 수 (Pr)를 이용하여 보다 상세하게 나타내었다. Cornwell 등의 연구 이전에 직경과 핵비등열전달 사이의 관계를 다루는 실험은 주로 백금선을 이용하여 이루어졌다.^(7,8) 이러한 백금선을 이용한 결과는 튜브에서 나타나는 현상들과 많은 차이가 있으므로 튜브 구조에 그 결과를 그대로 적용할 수는 없다.⁽⁶⁾ 기존에 발표된 결과들은 수평 구조에 대한 것이 전부이며, 표면 거칠기에 대한 정량적인

평가가 거의 이루어져 있지 않으므로 이것을 개선할 목적으로 Chun과 Kang⁽³⁾이 열유속(q''), 튜브 표면거칠기(ϵ), 튜브 외경(D), 그리고 표면과열도(ΔT) 사이의 관계를 연결하는 상관식을 수직 및 수평구조에 대하여 발표함으로써 튜브 구조에 대하여 주요 변수들이 풀비등열전달에 미치는 영향을 종합적으로 살펴보고 있다. 기존 연구들에 대한 주요 내용이 Table 2에 요약되어 있다.

현재까지의 결과를 살펴보면, 이 분야에 대한 연구가 상대적으로 적게 진행되어 왔으며, 아직까지 규명되지 않은 사항들이 많은 형편임을 알 수 있다. 특히, 튜브 표면거칠기와 설치 방향 등과 관련하여 튜브 직경이 풀비등열전달에 미치는 영향을 상세하게 살펴보고 주요 결과들간의 비교를 통해 적용성을 평가하는 것이 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 (1) 기존에 Chun과 Kang⁽³⁾이 개요적으로 발표한 튜브 직경과 비등열전달 사이의 관계를 수평 및 수직구조 각각에 대해 보다 상세하게 분석함으로써 기존의 연구 결과를 보완하고, (2) 수평구조에 대한 실험값을 이용하여 개발된 Cornwell과 Houston⁽⁶⁾의 상관식을 수평 및 수직 구조에 대한 실험결과와 상호 비교함으로써 그 적용성을 평가하고 수직구조까지 그 적용범위를 확장하는 것을 주요 목적으로 설정하였다. 이렇게 함으로써 보다 정확한 열교환기 설계 및 분석에 일조할 수 있을 것으로 생각한다.

2. 실험장치 및 과정

실험장치는 수조, 열교환기 모사용 튜브, 물 및 동력공급설비, 그리고 튜브 표면과 물의 온도를 측정하고 분석하는 설비로서 구성되어 있다. 수조는 스테인리스강으로 제작하였으며, 가로×세로×높이가 790×860×1000 mm의 크기를 가진다. 열교환기 튜브를 모사하기 위하여 니크롬선으로 구성된 전기 저항체를 내부에 장착한 스테인리스강 튜브를 사용하였으며, 튜브 표면의 온도를 측정하기 위하여 3~5 개의 지름이 1.5 mm 인 K-형식 열전대를 튜브 표면에 설치하였다.

실험과정에 대하여 간단하게 살펴보면, 대기압 상태 하에 있는 수조 내부에 높이가 730 mm 되도록 물을 채운 후 물에 포함되어 있는 공기 등을 제거하기 위하여 100 °C 포화상태에서 약

Table 2 Previous works about tube diameter effects on pool boiling heat transfer

Author	Remarks
Stralen and Sluyter (1969)	- platinum wires ($D=5\sim 200\mu\text{m}$) - liquid: water - orientation: horizontal - h_b decreases with increasing diameter
Hahne and Feurstein (1977)	- platinum wires ($D=50\sim 300\mu\text{m}$) - liquid: CO ₂ , R13, R23 - orientation: horizontal - correlation: $h_b = Cq''^n$ - C increases as the wire diameter increases (higher h_b for thicker wires) - n decreases for increasing diameters (smaller h_b for thicker wires) - An influence of diameter on n seems to cease for diameters $D > 0.3$ mm
Cornwell et al. (1982)	- tubes ($D=6\sim 32\text{mm}$) of several materials - liquid: water, refrigerants, and organics - orientation: horizontal - correlation: $Nu = C_b Re_b^{2/3}$, $Re_b = \frac{q'' D}{\mu_f h_{fg}}$ - h_b decreases with increasing diameter ($6 < D \leq 30\text{mm}$) - h_b increases slightly with diameter ($30\text{mm} < D$)
Cornwell and Houston (1994)	- tubes ($D=8\sim 50\text{mm}$) of several materials - liquid: water, refrigerants, and organics - orientation: horizontal - correlation: $Nu = AF(p) Re_b^{0.67} Pr^{0.4}$ $A = 9.7 p_c^{0.5}$, $F(p) = 1.8 p_r^{0.17} + 4 p_r^{1.2} + 10 p_r^{10}$, $p_r = p/p_c$ - improved Cornwell et al.'s correlation
Chun and Kang (1998)	- stainless steel tubes ($D=9.7\sim 25.4\text{mm}$) - liquid: water - orientation: horizontal and vertical - correlation: $h_b = 0.015 e^{0.084 \Delta T} T^{4.508} / D^{1.318}$ (horizontal) $h_b = 0.024 e^{0.672 \Delta T} T^{3.862} / D^{1.656}$ (vertical) - h_b decreases with increasing diameter

30 분간 가열하였다. 수조 내부가 포화온도에 이르면 열유속을 변화시키면서 열유속 변화에 따른 튜브 온도를 측정하였다. 하나의 열유속에 대한 측정이 끝나면 열유속을 변경하여 온도 측정 실험을 계속하였다.

전기적으로 가열한 튜브 표면에서의 열유속은 다음 식과 같이 공급전력을 열전달면적으로 나눔으로써 계산할 수 있다.

$$q'' = \frac{EI}{\pi DL} = h_b(T_w - T_{sat}) = h_b \Delta T \quad (1)$$

여기서, E 와 I 는 각각 공급한 전압(V 단위)과 전류(A 단위)이며, D 와 L 은 각각 튜브의 외경과 길이이다. 식 (1)에서 사용한 T_w 와 T_{sat} 는 각각 튜브 표면의 온도와 물의 포화온도를 나타내며, 측정값들을 산술적으로 평균한 값을 사용한다.

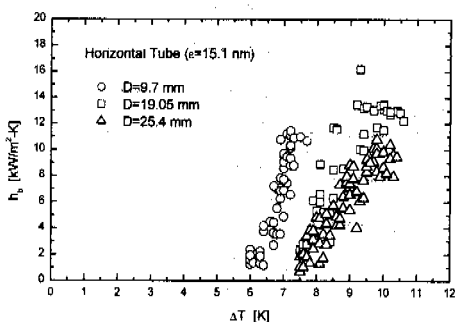
실험장치 및 과정, 그리고 실험값의 오차범위에 대한 상세한 소개는 강⁽⁹⁾의 논문에서 찾아볼 수 있으므로 본 고에서는 그에 대한 상세한 서술은 생략하였다.

3. 결과 및 고찰

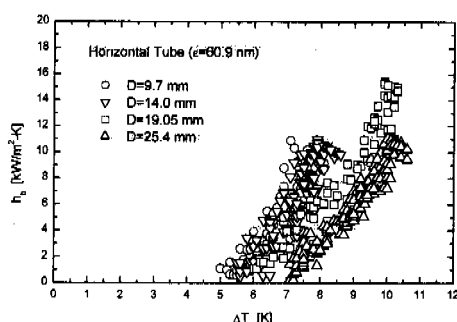
3.1 튜브외경이 열전달계수에 미치는 영향

대기압 조건하에 있는 포화수조 내부에 수평으로 설치한 튜브 표면에서의 핵비동열전달계수를 결정하기 위한 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)에는 표면이 매끈한 경우 ($\epsilon=15.1$ nm)에 대한 결과를, Fig. 2(b)에는 표면이 상대적으로 거친 경우($\epsilon=60.9$ nm)에 대한 결과를 나타내고 있으며, 튜브 외경은 9.7~25.4 mm의 범위 내에서 변화시켰다. 그림에 나타난 결과를 살펴보면 튜브 외경의 증가는 비동열전달계수의 감소를 초래하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이런 경향은 튜브 표면 상태와는 무관하게 거의 비슷하게 관찰되고 있다. 열전달계수 $h_b=8$ kW/m²-K인 경우에 대하여 서로 비교하여 보면, 매끈한 표면의 경우 튜브 외경이 9.7 mm와 25.4 mm일 때 표면과

열도 ΔT 의 값이 각각 7.0 K와 9.4 K로 2.4 K 정도의 차이가 있음을 알 수 있으며, 거친 표면의 경우 동일한 튜브 외경들에 대한 튜브과열도가 각각 7.4 K와 9.8 K로 매끈한 표면과 동일한 온도 차이를 가짐을 알 수 있다. 따라서, 설계에 필요한 비동열전달계수를 얻기 위해서는 튜브 직경이 증가함에 따라 더 높은 표면과열도가 필요하게 된다. 실제로 $h_b=8$ kW/m²-K이고 표면이 매끈한 경우 튜브 외경이 9.7 mm에서 25.4 mm로 162% 증가하면, 튜브 표면과열도는 7.0 K에서 9.4 K로 34% 정도 증가하게 되므로 동일 표면과열도에서는 비동열전달계수가 감소하는 결과를 초래하게 된다. 동일한 표면과열도에 대한 비동열전달계수의 크기를 비교하여 보면 양자간에 상당한 차이가 있음을 알 수 있는데, 거친 표면이고 표면과열도가 7.4 K인 경우 튜브 외경을 9.7 mm에서 25.4 mm로 증가하면 비동열전달계수 h_b 는 8 kW/m²-K에서 2 kW/m²-K로 감소하여 162% 외경 증가는 75%의 비동열전달계수 감소를 초래함을 알 수 있다. 수평 튜브 구조에서 외경의 증가에 따라 비동열전달계수가 감소하는 현상은 Chun과 Kang⁽³⁾ 그리고 Cornwell 등⁽⁴⁾이 주장한 것과 같이 튜브 상부에 형성되는 기포층(bubbly-layer)에 그 원인이 있는 것으로 생각되며, 단일 수평 튜브에서 기포층 형성에 의해 표면을 따라 열전도계수가 변화하는 것은 강⁽⁹⁾과 Gupta 등⁽¹⁰⁾에 의해 보고된 바 있다. 튜브의 직경이 증가하면 활성비동핵의 밀도는 동일한 반면 상대적으로 많은 기포가 생성된다. 그러나 수평 튜브 구조의 경우에 있어서는 기포 발생의 증가가 주변 액체 교란에 충분히 활용되지 않으므로 튜브 상부에 형성되



(a) Smooth surface ($\epsilon=15.1$ nm)



(b) Rough surface ($\epsilon=60.9$ nm)

Fig. 2 Heat transfer coefficient versus wall superheat for various horizontal tubes with different surface roughness

는 기포덩어리가 차지하는 부분이 점점 증가하는 것으로 추측된다. 기포 덩어리가 차지하는 면적이 증가하면 (1) 활성비등핵의 감소를 초래하고 (2) 주변 액체가 원활하게 가열면으로 접근하는 것을 방해하게 되므로, Fig. 2에 나타난 것과 같이 튜브 직경을 증가하게 되면 비등열전달계수가 감소하는 결과를 초래하는 것으로 생각된다.

만일 튜브를 수직으로 설치하면 비등열전달 특성이 수평으로 설치한 경우와 비교하여 상당 부분 차이가 나게 되므로 이에 대한 고려가 우선되어야 한다. 튜브를 수직으로 설치함으로써 고려해야 하는 여러 가지 변수들 중에서 가장 대표적인 것이 튜브 길이일 것으로 생각된다.⁽²⁾ 수직 구조에서 직경의 영향을 언급하고 있는 Chun과 Kang⁽³⁾의 논문에서는 그 일차적인 목적이 상관식 개발과 전체적인 경향 파악에 있었기에 수직 튜브 길이에 따른 열전달 특성에 대하여 따로 분석하고 있지 않다. 수직 튜브 길이와 비등열전달계

수 사이의 관계는 Kang⁽²⁾의 논문에서 비교적 상세하게 설명되고 있으며, 결과에 의하면 비등열전달계수(h_b)와 튜브 길이에 대한 무차원수 ($H=L/D$) 사이에는 $h_b \propto 1/H^{0.072}$ 의 관계가 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서, 수직으로 설치한 튜브의 열전달 특성에 가장 많은 영향을 줄 것으로 생각되는 튜브 길이의 영향을 먼저 보정한 다음 튜브 직경 변화에 따른 열전달 특성을 살펴보는 것이 적절할 것으로 생각되므로 우선 Kang⁽²⁾의 결과에 준해 전체 튜브를 동일한 H 를 갖는 조건으로 변경한 후, 실험값들을 서로 비교하는 방식을 채택하였다. Fig. 3은 각 튜브 외경별로 보정한 열전달계수(h_{bc})와 측정된 열전달계수(h_b) 사이의 관계를 나타내고 있다. 보정은 $D=19.05$ mm, $H=27.85$ 를 기준으로 Kang⁽²⁾이 제시한 실험적 상관식을 사용하여 이루어졌다.

수정된 비등열전달계수와 표면과열도 사이의 관계는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 표면이 매끈한 경우이며, Fig. 4(b)는 상대적으로 표면이 거친 경우에 대한 결과이다. 튜브를 수직으로 설치한 경우에도 수평으로 설치한 경우와 동일하게 튜브 외경이 증가하면 비등열전달계수가 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나, 튜브 표면거칠기가 튜브 직경 변화에 따른 열전달 특성에 미치는 영향이 수평구조에서는 거의 관찰되지 않음에 비해 수직 구조에서는 분명하게 나타나고 있는 것을 살펴볼 수 있다. 수정 열전달계수 $h_{bc}=8$ kW/m²-K인 경우에 대하여 서로 비교하여 보면, 매끈한 표면의 경우 튜브 외경이 9.7 mm와 25.4 mm일 때 표

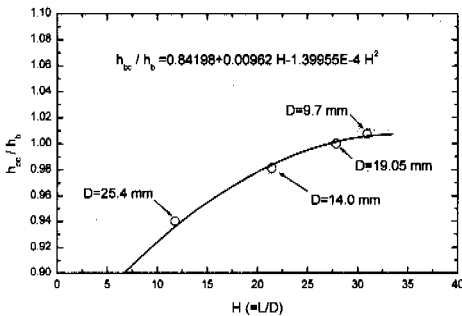
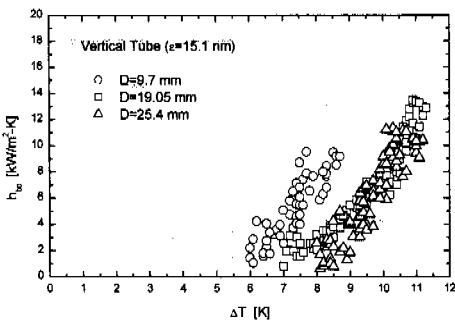
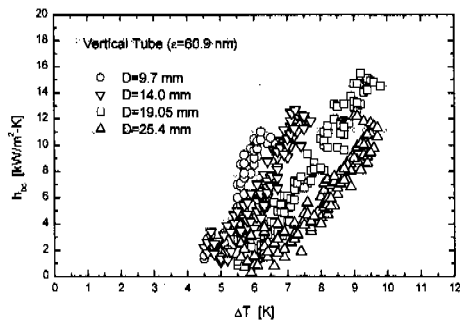


Fig. 3 h_{bc}/h_b versus H to include tube length effect



(a) Smooth surface ($\epsilon=15.1$ nm)



(b) Rough surface ($\epsilon=60.9$ nm)

Fig. 4 The corrected heat transfer coefficient versus wall superheat for various vertical tubes with different surface roughness

면과열도 ΔT 의 값이 각각 8.0 K와 10.5 K로 2.5 K 정도의 차이가 있음을 알 수 있으며, 거친 표면의 경우 동일한 튜브 외경들에 대한 튜브과열도가 각각 5.8 K와 9.2 K로 3.4 K 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서, 거친 표면의 경우 튜브 직경이 9.7 mm에서 25.4 mm로 162% 증가하면 튜브 표면과열도는 5.8 K에서 9.2 K로 59% 증가하여 동일조건인 수평튜브보다 15% 정도 더 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 튜브 외경이 증가할 때 튜브 표면에서의 비등열전달계수의 변화를 살펴보면 거친표면이고 튜브 과열도가 6.0 K인 경우 외경을 9.7 mm로부터 25.4 mm로 증가하면 수정 비등열전달계수 h_{bc} 는 10 $\text{kW/m}^2\text{-K}$ 에서 1.5 $\text{kW/m}^2\text{-K}$ 로 감소하여 162%의 외경 증가는 85%의 비등열전달계수의 감소를 초래하는 것을 알 수 있다. 수직구조에서 비등열전달 특성 중 두드러진 것은 기포 생성 및 이탈에 따른 주변 액체의 교란, 튜브 상부에서의 기포충과 빠른 유동류(convective flow)의 형성을 들 수 있다.⁽⁹⁾ 튜브 외경이 증가하게되면 더 많은 기포가 생성되므로 튜브 상부의 더 많은 영역에서 기포충을 형성하여 주변 액체의 접근을 방해하고, 더

빠른 유동류를 형성하여 기포가 충분히 성장하기 전에 표면에서 이탈하는 특성을 분명하게 나타낸다. 결국, 기포증가에 따라 주변 액체가 교란되고 이것이 열전달을 촉진하는 정도보다 기포충과 유동류 형성에 의해 열전달이 저하되는 정도가 튜브 외경의 증가에 수반하여 함께 증가하므로 수직 구조에서 튜브 외경의 증가는 열전달계수의 감소를 초래하는 것으로 생각된다. 이러한 효과는 튜브 표면이 거칠어 더 많은 기포가 생성되는 조건을 형성할 때 더욱 더 분명하게 나타나게 되는 것을 알 수 있다.

3.2 기존 상관식과의 비교

본 연구로부터 얻어진 실험값과 기존에 발표된 결과와의 일치 정도를 파악하기 위해 Cornwell과 Houston⁽⁶⁾이 발표한 상관식을 이용하여 계산한 핵비등열전달계수와 비교 분석하고 그 결과를 Fig. 5~ Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 5는 수평튜브의 각 직경과 표면거칠기별 실험값과 Cornwell과 Houston⁽⁶⁾이 제안한 상관식을 계산한 결과를 비등 열전달계수와 열유속의

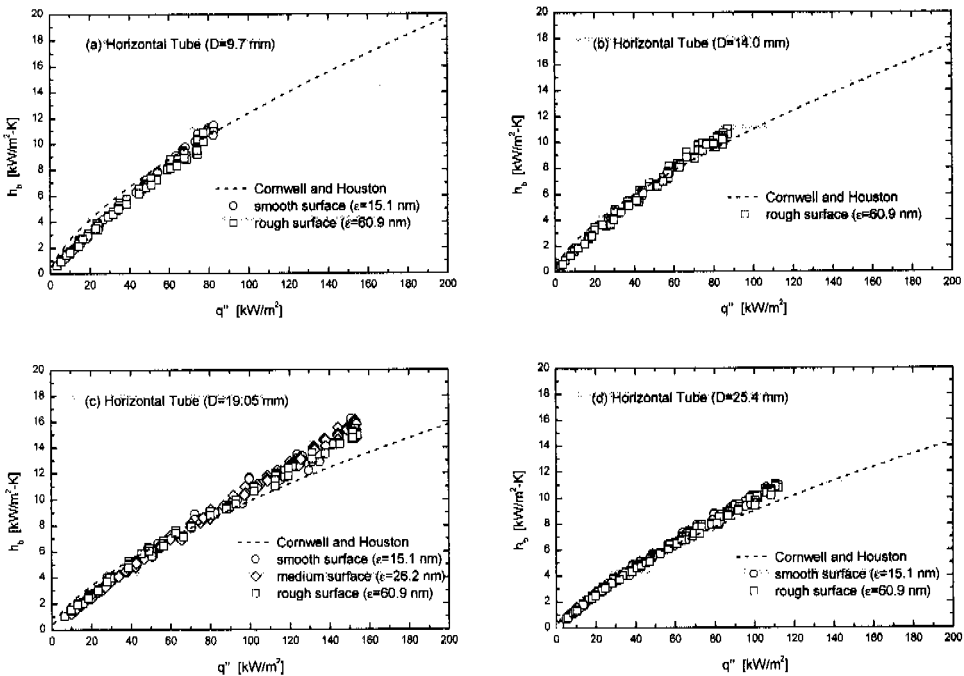


Fig. 5 Comparison of the present experimental data for horizontal tubes with Cornwell and Houston's empirical correlation

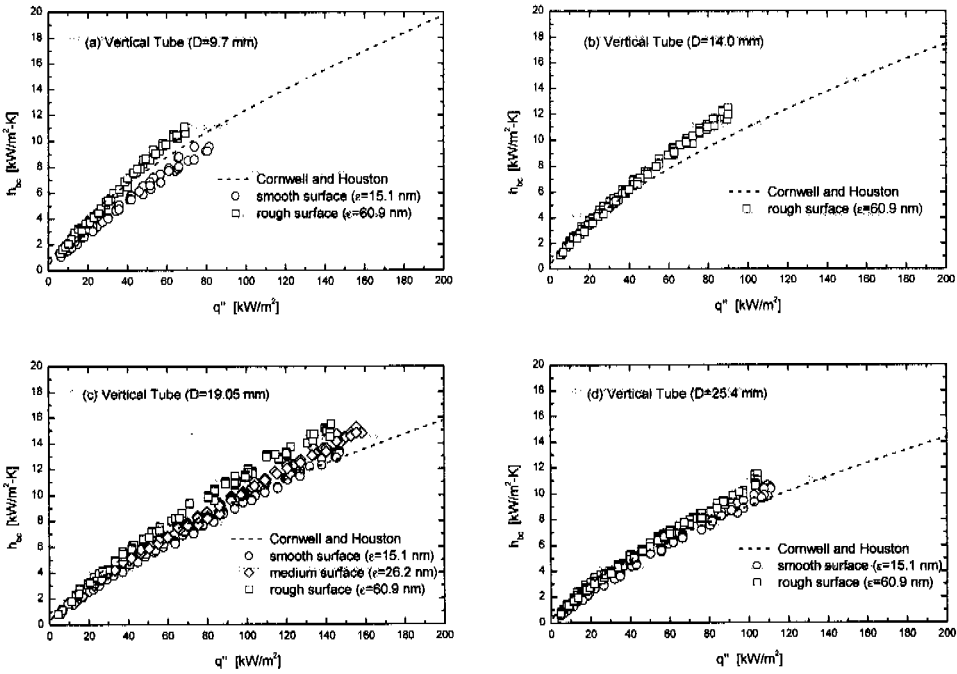


Fig. 6 Comparison of the present experimental data for vertical tubes with Cornwell and Houston's empirical correlation.

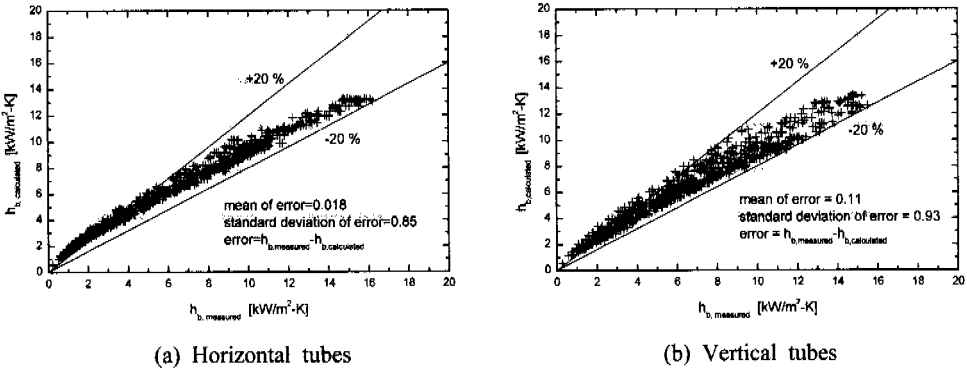


Fig. 7 Calculated heat transfer coefficient versus measured heat transfer coefficient

관계로서 나타낸 것이며, Fig. 6은 수직튜브에 대한 상호 비교를 나타낸 것이다. Fig. 6에는 Fig. 3을 이용하여 수정한 비등 열전달계수를 비교용으로 나타내었다. Cornwell과 Houston⁽⁶⁾의 상관식과 실험값을 서로 비교하여 보면, 수평 및 수직의 경우 모두 열유속이 증가하면서 상관식이 실험값을 약간 낮게 예측하고 있지만 전반적으로는 실험값을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 양자간에 다소간의 불일치가 발생하는 원인의 하나로

고려할 수 있는 것은 상관식에서 정량화하지 못한 튜브 표면거칠기에 따른 영향을 들 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 7은 Cornwell과 Houston⁽⁶⁾의 상관식을 사용하여 계산한 핵비등열전달계수와 실험에서 측정된 핵비등열전달계수 사이의 일치 정도를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 수평구조에 대한 것이고, Fig. 7(b)는 수직구조에 대한 것이다. 수직구조에

서 측정값으로 사용한 열전달계수값 $h_{b, measured}$ 는 Fig. 3을 이용하여 수정한 열전달계수를 사용하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 Cornwell과 Houston⁽⁶⁾이 개발한 상관식은 수평구조에 대한 것이며, 수직구조에 대해서는 아직까지 그 적용성이 검증된 바 없으므로 본 연구에서는 일차적으로 수평튜브 구조에 대해 상관식과 실험값을 서로 비교한 후, 수직튜브 구조에 대해 양자를 서로 비교해 봄으로써 그 적용성을 평가하였다. Fig. 7(a)와 7(b)에 나타낸 것과 같이 측정값과 계산값은 $\pm 20\%$ 범위 내에서 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 양자간의 차이를 계산한 값에 대한 표준편차는 수평구조에서 0.85, 수직구조에서 0.93을 나타내 수평구조에서 보다 잘 맞고 있지만 수직구조에서도 대체적으로 실험값과 잘 일치하고 있는 것으로 확인되었다.

4. 결론

튜브 직경이 핵비등열전달계수에 미치는 영향을 규명하고, 수평구조에 대해 개발된 Cornwell 과 Houston 상관식을 수직구조에 적용시 그 타당성을 검증하기 위하여 튜브외경 $D=9.7\sim 25.4$ mm, 튜브 길이 $L=300\sim 530.5$ mm, 표면거칠기 $\epsilon=15.1\sim 60.9$ nm 범위 내에서 실험 및 분석을 수행하였으며, 본 연구를 통하여 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 튜브 직경 증가는 수평 및 수직구조 모두에서 핵비등열전달계수의 감소를 초래하며, 그 영향 정도는 수직구조이면서 표면이 거친 경우에 가장 분명하게 나타난다.

(2) 수평 및 수직구조에 대해 얻어진 실험값은 Cornwell과 Houston의 상관식과 $\pm 20\%$ 범위 내에서 잘 일치하고 있다.

(3) 본 실험에서 사용한 주요 매개변수의 범위 내에서는 Cornwell과 Houston의 상관식을 수직구조에 확장하여 적용하여도 수용 가능한 오차범위 내에 들어오는 것을 확인하였다.

참고문헌

(1) Corletti M. M. and Hochreiter L. E., 1991,

"Advanced Light Water Reactor Passive Residual Heat Removal Heat Exchanger Test," *Proc. of the 1st JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering*, Tokyo, Japan, pp. 381 ~ 387.

(2) Kang M. G., 1998, "Experimental Investigation of Tube Length Effect On Nucleate Pool Boiling Heat Transfer," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 25, No. 4-5, pp. 295 ~ 304.

(3) Chun M. H. and Kang M. G., 1998, "Effects of Heat Exchanger Tube Parameters on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer," *Trans. ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 468 ~ 476.

(4) Cornwell K., Schuller R. B., and Einarsson J. G., 1982, "The Influence of Diameter on Nucleate Boiling Outside Tubes," *Proceedings of The Seventh International Heat Transfer Conference*, Munchen, Germany, Vol. 4, pp. 47 ~ 53.

(5) Chongrungreong S. and Sauer, Jr. H. J., 1980, "Nucleate Boiling Performance of Refrigerants and Refrigerant-Oil Mixtures," *Trans. ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 102, pp. 701 ~ 705.

(6) Cornwell K. and Houston S. D., 1994, "Nucleate Pool Boiling on Horizontal Tubes: a Convection-Based Correlation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, Suppl. 1, pp. 303 ~ 309.

(7) van Stralen S. J. D. and W. M. Sluyter, 1969, "Investigations on the Critical Heat Flux of Pure Liquids and Mixtures under Various Conditions," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 12, pp. 1353 ~ 1384.

(8) Hahne E. and Feurstein G., 1977, "Heat Transfer in Pool Boiling in the Thermodynamic Critical Region: Effect of Pressure and Geometry," In *Heat Transfer in Boiling* (Edited by Hahne E. and Grigull U.), Chap. 8, pp. 159 ~ 206.

(9) 강명기, 2000, "튜브설치방향이 폴비등열전달에 미치는 영향," *대한기계학회논문집 B권*, 제24권 제1호, pp. 143 ~ 151.

(10) Gupta A., Saini J. S., and Varma H. K., 1995, "Boiling Heat Transfer in Small Horizontal Tube Bundles at Low Cross-Flow Velocities," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 4, pp. 599 ~ 605.