

수직 동심 환형관 내부유동에서 과냉 유체의 비등 시작 열유속에 관한 표면 볼록 곡률의 영향

변 정 환* · 이 승 홍†

(2002년 2월 14일 접수, 2002년 7월 29일 심사완료)

Effect of Convex Surface Curvature on the Onset of Nucleate Boiling of Subcooled Fluid Flow in Vertical Concentric Annuli

Jung Hwan Byun and Sung Hong Lee

Key Words: Convex Surface Curvature(표면의 볼록 곡률), Onset of Nucleate Boiling(ONB, 핵비등의 시작), Wall Superheat(벽면의 과열도), Degree of Subcooling(과냉도), Reynolds Number(레이놀즈 수), Concentric Annulus(동심 환형관)

Abstract

An experimental study has been carried out to investigate the effect of the transverse convex surface curvature of core tubes on heat transfer in concentric annular tubes. Water is used as the working fluid. Three annuli having a different radius of the inner cores, $R_i=3.18\text{mm}$, 6.35mm , and 12.70mm with a fixed ratio of $R_i/R_o=0.5$ are used over a range of the Reynolds number between about 40,000 and 80,000. The inner cores are made of smooth stainless steel tubes and heated electrically to provide constant heat fluxes throughout the whole length of each test section. Experimental result shows that heat flux values on the onset of nucleate boiling of the smaller inner diameter model is much higher than that of the larger size test model.

기호설명

k_f : 유체의 열전도도	[W/m · K]	R_b : 기포의 반지름	[mm]
k_w : 관의 열전도도	[W/m · K]	R_i^* : 무차원화된 내관의 반지름	
L : 길이 방향의 위치	[cm]	R_i/R_o : 내관과 외관의 반경비	
Nu : Nusselt 수		T_f : 유체의 온도	[°C]
P, P_{abs} : 압력	[bar]	T_i : 관의 내부온도	[°C]
Pr : Prandtl 수		T_{sat} : 유체의 포화온도	[°C]
\dot{q} : 단위체적 당 열발생률	[W/m]	T_w : 관의 표면온도	[°C]
q, q''_{ONB} : 열유속	[W/m]	$\Delta T_{sat} : (T_w - T_{sat})$: 과열도	[°C]
Re : Reynolds 수		$\Delta T_{sub} : (T_{sat} - T_f)$: 과냉도	[°C]
		θ : 기포의 접촉각	[deg]
		λ_{fg} : 증발 잠열	[kJ/kg]
		ρ_g : 증기의 밀도	[kg/m ³]
		σ : 표면장력	[N/m]

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : sunghonglee@yahoo.com

TEL : (051)510-2312 FAX : (051)514-7640

* 부산대학교 대학원

1. 서론

비등에 있어서 잠열의 효과는 매우 중요하며, 잠열 외에도 액체-증기 상의 경계면에서 표면장력과 액체-증기의 밀도 차이에 비례하는 부력의 복합적인 효과들 때문에 비등 열전달계수와 열전달률은 상변화가 없을 때의 단상 대류열전달에 의한 것보다 훨씬 크고, 이 때문에 비등현상은 산업 전반에 걸쳐 많이 활용된다. Fig. 1은 풀(pool)비등과 강제대류 비등에 대한 가열 표면의 과열도(ΔT_{sat})와 열유속(q'')의 관계를 나타내는 비등곡선으로, 유체의 속도와 과냉 온도가 변화할 경우 비등곡선과 비등 시작점의 경향이 크게 달라짐을 개략적으로 보여 주고 있다.⁽¹⁾

비등의 시작점(onset of nucleate boiling, ONB), 즉 비등의 시발에 영향을 미치는 요인으로 유동 공간의 기하학적 형상과 유체의 온도, 속도, 압력 등의 시스템적인 요인과 유체의 물성에 기인한 요인, 고체면의 상태 등의 미시적인 요인 등이 알려져 있다.^(2~5)

Bergles & Rohsenow⁽⁴⁾는 물의 강제 대류 핵비등에서 액체의 열경계층 내에서 온도분포는 선형적이고, 가열 벽면에서 평형상태의 기포의 온도와 동일한 액체의 온도선까지의 거리가 기포의

임계반경과 같다고 가정하여, 핵비등의 시작점의 열유속(q''_{ONB})과 ΔT_{sat} 에 대해서 압력(P)의 영향을 고려한 다음의 실험식을 제안하였다.

$$(\Delta T_{sat})_{ONB} = 0.556 \left[\frac{q''_{ONB}}{1082 P^{1.156}} \right]^{0.463 P^{0.23}} \quad (1)$$

Davis⁽⁵⁾는 핵비등의 시작점의 열유속(q''_{ONB})에 대하여 Clausius-Clapeyron 방정식을 이용한 모델을 제시하였다. 식 (2)는 높은 압력이나 낮은 표면장력의 계에 대해서 유체의 물성치를 고려하면 유효하게 적용할 수 있을 것이다.

$$q''_{ONB} = \frac{k_f \lambda_{fg} \rho_g}{8 \sigma T_{sat}} [(T_w - T_{sat})_{ONB}]^2 \quad (2)$$

압력이 일정 할 경우에 식 (1)과 (2)는 ONB지점의 열유속 q''_{ONB} 는 $C (\Delta T_{sat})_{ONB}^n$ 형태

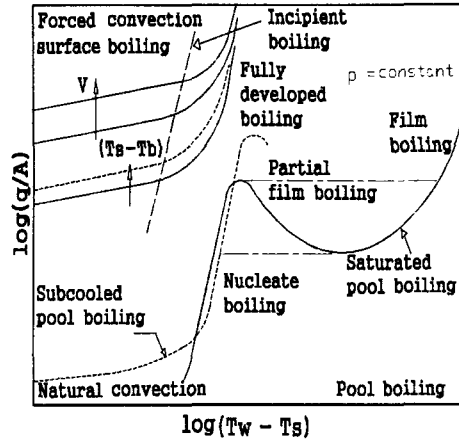


Fig. 1 Flow boiling and pool boiling curve

로 ΔT_{sat} 의 함수이다. 계수 C, n값은 차이가 있지만, Fig. 1의 log-log 좌표계에 표시된 강제대류 비등에서 비등 시작점(incipient boiling)을 표시한 점선으로 표시된 직선의 형태는 서로 유사하다.

Celata et al.⁽⁶⁾은 최근에 높은 유속과 과냉도의 실험에서 관 내부 유동에서 단상 액체유동과 액체-증기 2상유동의 압력강하(pressure drop)의 차이점을 이용하여 핵비등 시발점의 열유속을 측정하였다. 유속과 입구 과냉도가 증가하면 핵비등의 시발점(ONB)에서 열유속(q''_{ONB})은 증가한다고 하였고, 압력에는 크게 영향을 받지 않는다고 발표하였다.

Kim⁽⁷⁾은 원형 이중관 형상에서 난류와 열전달에 관한 연구에서 표면의 볼록곡률(surface convex curvature)의 영향으로 난류의 속도분포가 바뀌고, 곡률이 증가하면 난류의 대류 열전달계수도 증가한다고 제안했다. 공기에 대하여 실험한 Kim의 결론을 본 연구에서 포화온도 이하의 상태, 즉 과냉각 액체상태의 물을 환상 채널내에서 강제대류 상태로 가열하여 실험해 보고자 한다. 이 경우에 주로 액체(물) 상태에서 열전달이 일어날 것이고, 곡률의 영향을 예상할 수 있을 것이다.

최근 Lee^(8~10) 등은 환형관에서 실험을 수행한 결과, 난류영역에서 액체의 속도(Reynolds 수), 입구 과냉도(inlet subcooling)와 내관의 반경(R_i)이, 비등이 시작될 때의 열유속 q''_{ONB} 값에 영향을 미치는 변수로 확인하였으며, 필자와 공동 연구

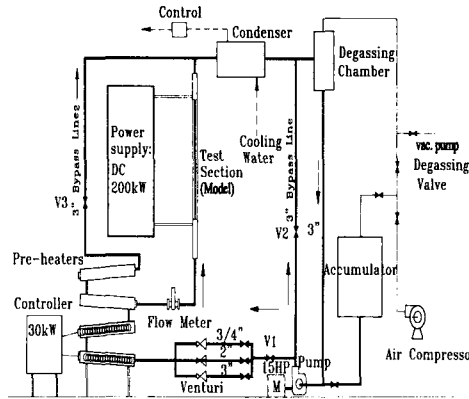


Fig. 2 Schematic diagram of heat transfer test loop

한 팀^(11,12)의 제안을 함께 표시하면, 다음과 같은 함수로 표시할 수 있을 것이다.

$$q''_{ONB} = F(Re, Pr, \Delta T_{sub}, R_i^*, R_i/R_o, R_b, \theta) \quad (3)$$

본 실험은 동심 환형관에서 강제대류 열전달 및 비등 열전달에 관한 실험자료 축적을 위해서 축방향의 온도분포를 조사하고, 완전히 발달된 난류유동에서 핵비등의 시발점(ONB)에서 열유속 (q''_{ONB})에 영향을 주는 요인들 중, 내관의 블록 골몰, 유체의 속도와 유체의 온도를 변화시켜 이들의 영향을 파악하는 것을 목적으로 실험을 수행하였다. 기포의 크기와 접촉각 등 미세 구조(R_b, θ)에 관한 연구는 더욱 정밀한 이론적,⁽¹¹⁾ 실험적 연구⁽¹²⁾가 좀 더 필요할 것이다. 본 연구에서 거시적인 파라미터인 내관의 반지름(R_i)이 서로 다른 3가지 실험 모델을 제작하여 골몰의 영향, Reynolds수, 유체의 입구과냉도 (ΔT_{sub})를 변화시켜서 실험한 결과를 통해 각각의 변수들이 핵비등 시발점에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 2는 물을 작동유체로 하는 강제 대류 열전달 실험에 사용한 실험 장치이다. 본 실험 장치는 직경 76.2mm의 스테인레스 강관과 연결구들로

Table 1 Test model specification

Test section	Model L	Model M	Model S
Inner tube diameter	25.4 mm	12.7mm	6.35 mm
Thickness of inner tube	1.6mm	1.65mm	1.24mm
Outer tube diameter	50.8 mm	25.4 mm	12.7 mm
Heating length	174 cm	98 cm	57 cm
Radius ratio (R_i/R_o)	0.5	0.5	0.5
Location of thermocouples	70, 110, 150cm	20, 40, 60, 80cm	L=35cm
Material of inner tube	SUS304	SUS316	SUS316

순환 루프 시스템을 이루며 11.2kW 전동기 구동 모터를 사용하는 원심펌프(1750 RPM)로 유체를 순환시킨다. 작동유체는 주순환관에 유량 계측장치, 예열장치, 시험부, 응축 열교환기와 기체 제거장치를 통과하여 펌프로 돌아오게 된다. 유량 계측장치로는 벤추리(venturi)관들과 연결된 수은 마노미터와 시험부 입구에 설치된 유량계(flow meter)를 통해 입구의 속도를 측정할 수 있다. 유량은 펌프의 출구 쪽에 설치된 주 순환관 쪽의 밸브와 바이패스 밸브, 그리고 예열장치 출구의 바이패스 밸브에 의해 조절할 수 있다. 시스템의 압력 유지 장치(accumulator)의 공기압을 조정함으로써 실험장치 및 실험 모델내의 압력을 제어한다. 예열장치에는 스테인레스강 케이스 4개중 2개의 내부에 설치된 15 kW 전기히터 2개를 사용하여 함께 30 kW 용량의 전기 가열장치를 이용하여 실험부(test section)의 온도 입구조건을 조정장치(controller)로 조절 할 수 있다.

실험 모델(test model)의 외관은 비등과정을 볼 수 있도록 내열유리(pyrex tube)를 사용하였고, 내관의 반지름이 서로 다른 3가지 크기의 환형관 test model을 제작하여 실험하였다. 내관의 표면온도를 측정하는 측정부의 위치는 난류유동에서 열적으로 완전발달된 유동상태를 만들기 위해, 입구에서 온도 측정위치까지 수력직경(De)의 10배 이상의 충분한 여유 길이⁽¹³⁾를 두었으며, 각 test model의 세부 사양과 열전대의 온도측정 위치

(test section 입구에서 높이, L)는 Table 1에 나타내었다. Model L에서 3곳, Model M에서 4곳, Model S에서 1곳에서 가열 벽면 내부의 온도를 측정하였다. Model L은 수력직경이 크기 때문에 모델의 길이가 다른 두 모델보다 길이가 크다. Reynolds수, 유체의 입구과냉도, 가열 표면의 곡률등이 핵비등 시발점의 열유속에 미치는 영향을 분석하기 위한 내관(시편)의 표면온도 측정부의 위치는 각각의 모델에 대해서 온도 측정할 지점 중에서 하류의 한(Model L, L=150cm, Model M, L=80cm, Model S, L=35cm) 곳의 온도를 기초로 하여 그 영향들을 평가하였다. 표면 곡률의 효과를 확인하기 위해서 환형 유로(annular flow channel)의 세 가지 모델을 제작하였으며, 유로의 내관과 외관의 비(Ri/Ro)는 일정하게 0.5를 유지하여, 3 가지 크기의 실험 모델에서 기하학적인 상사성을 유지하였다.

2.2 실험 방법

가열부의 반지름이 서로 다른 세 가지 모델에 대하여 Reynolds수 40,000, 80,000과 입구 과냉도 15℃, 30℃의 조건에서 실험을 수행하였다. 충압기(accumulator)내의 상부 가스의 압력은 대략 1.7 기압 정도를 유지한다. 실험을 수행하기 전, 작동 유체(물)속의 기체를 제거하기 위해 예열 장치와 웰-튜브 형식의 응축 열교환기를 이용하여 비등과 응축을 동시에 하는 작업을 반복하여, 기체가 기체 제거장치에 모이게 한 후, 탈기(degassing)

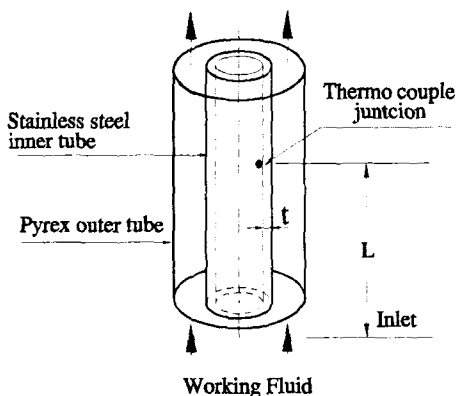


Fig. 3 Temperature measurement on test section

하여 정상 상태에서 실험에 들어간다.

환형 실험모델의 내부 가열관(stainless steel tube)은 Table 1에 상세히 기술한 두께(t)를 가진 원형관이고, 밀폐된 가열부 내부 벽면에서 온도(T_i)를 측정하였다. 원통좌표계에서 열원(\dot{q})이 있는 경우, 정상상태의 경계조건으로 밀폐된 내부 벽면에서 단열조건을 적용하면, 1차원 전도방정식 (4)를 이용하여 액체와 직접 접촉하는 가열관의 외부 표면의 온도(T_w)를 계산할 수 있다.⁽¹⁴⁾ 가열부 내부 벽면의 온도측정 방법은 Fig. 3과 같이 가열관 내부에 열전대를 고정하고, 가열관 내부 벽면에 접하는 부분은 전기 가열부의 전기적 간섭을 방지하기 위해 전기 절연수지(k=1.38W/mk)로 열전대의 접점을 얇게 코팅하였다.

$$T_w = T_i - \frac{\dot{q}}{2k_w} \left[\frac{1}{2} (r_o^2 - r_i^2) + r_i^2 \ln \frac{r_i}{r_o} \right] \quad (4)$$

유체의 온도는 시험부 입구와 출구에 설치된 열전대를 사용하여 측정하였다. 획득한 입구온도를 기준으로 시험부 입구의 과냉온도 평가에 사용하였다. 가열부 내부 벽면의 온도와 유체의 온도측정에 사용된 열전대는 T-type (OMEGA, TG-T-30Gage)이고, 열전대선의 공칭 크기는 0.86mm×1.19mm이다. 물의 온도는 입구, 출구 측정온도를 기준과 일정 열유속 조건으로 각 위치에서 평가한 온도를 사용하였다. 비등곡선은 각 실험 모델에서 선택된 하류의 한 곳의 표면온도와 포화온도를 기초로 하여 평가하였다. 물에 공급되는 전기공급은 내부관 양단에 있는 동봉을 통해 공급하는데 실험 모델에 최대 200 kW 전력의 공급이 가능하며 전압은 실험 모델의 내관 표면의 두 지점에서 측정하였다. 전압측정을 위한 단자를 스텐레스 내관(heater)의 표면에 설치하고 단자에서 구리선을 데이터 획득장치까지 연결해 전압을 측정하여 PC에 저장하였다. 전류의 세기는 전력 공급장치에서 출력되는 전류 값을 데이터 획득장치에서 측정하여 PC에 저장하였다.

3. 실험 결과

3.1 축방향의 온도분포

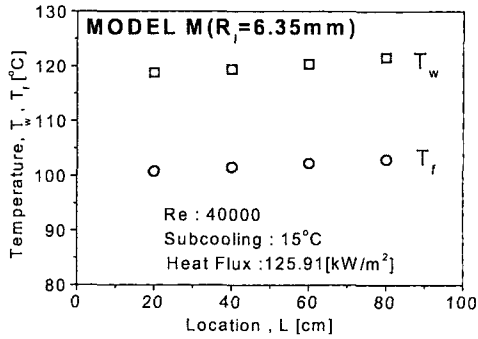


Fig. 4 Axial temperature distribution

Fig. 4은 Model M의 축방향 온도분포를 측정 한 예를 나타내고 있다. 가로 축은 실험 모델의 입구에서 길이를 나타내며, 세로 축은 스텐레스 강관의 표면온도와, 유체의 평균 온도를 나타내고 있다. Model M의 4가지 실험 조건 중에서 Reynolds수 40,000, 과냉도(subcooling) 15°C에서 실험결과를 보여주고 있다. 위 조건에서 핵비등 시발점에 근접한 열유속을 공급 하였을 때, 가열관의 외부 표면온도와 유체의 축방향의 온도분포를 보여주고 있다. 표면온도와 유체의 온도는 입구에서 출구(하류) 부분으로 갈수록 온도분포가 각각 선형적으로 상승함을 볼 수 있다. 표면온도와 유체온도의 차이가 일정함을 보여주며, 일정 열유속 시스템의 전형적인, 열적으로 충분히 발달된 상태의 강제대류 열전달 과정들을 확인 시켜 준다.

3.2 핵비등 시발(ONB)점의 열유속

Bowring⁽²⁾은 과냉 핵비등의 시발점에 대한 정의에 있어서 비등 시작전의 단상 액체영역의 강제대류(forced convection)열전달 선도와 완전발달 비등(fully developed boiling)영역의 열전달 선도의 교차점을 비등 시발시 열유속으로 제시 하였는데, 본 연구에서 이 방법을 이용하여 ONB점의 열유속 값 (q''_{ONB})을 찾았다. 이 때 가열 표면의 초과(과열)온도 ΔT_{sat} 값은 완전발달 비등영역에서 실제 측정된 $q'' \sim \Delta T_{sat}^n$ 비등곡선의 실험 데이터

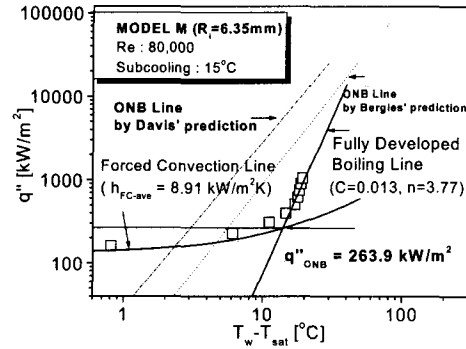


Fig. 5 Heat flux of the onset of nucleate boiling

Table 2 Heat flux and degree of wall superheat from experiments at ONB points

MODEL	Reynolds Number	Inlet subcooling ($T_{sat} - T_f$) _{inlet}			
		15°C		30°C	
		q''_{ONB}	$T_w - T_{sat}$	q''_{ONB}	$T_w - T_{sat}$
L	40000	78.1	2.54	239.1	4.15
	80000	147.4	3.86	290.4	6.78
M	40000	152.3	7.21	289.5	4.72
	80000	263.9	8.06	486.3	7.25
S	40000	138.6	10.21	276.2	10.10
	80000	383.0	11.78	599.4	10.74

분포와 q''_{ONB} 값의 수평선과 교차하는 점으로 결정 하였다. 비등영역에서 실험값을 대표하는 $q'' \sim \Delta T_{sat}^n$ 비등곡선에서 n값은 3.5 ~ 3.84범위 이고 평균값은 $n = 3.7$ 이다. Fig. 5는 Model M의 Reynolds수 80,000, 과냉도 15°C 경우, 단상액체의 대류 열전달선과 비등영역의 $q''_{FDB} = \Delta T_{sat}^n$ 연장선상의 교점을 적용한 예를 보여주고 있다.

본 연구는 가열부의 반지름이 서로 다른 3가지 모델에 대해서 Reynolds수와 실험모델 입구 기준의 유체의 과냉도(ΔT_{sub})를 변화시킨 12가지 실험조건에서 실험을 수행하였다. 각 실험조건에서 실험적인 방법으로 구한 비등 시발점에서 q''_{ONB}

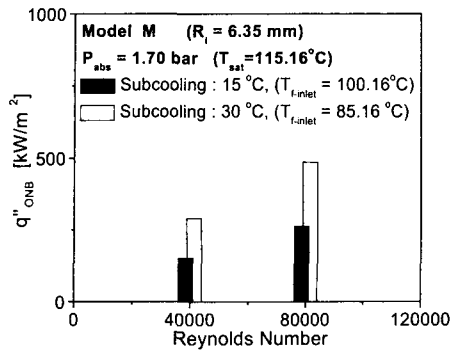


Fig. 6 q''_{ONB} vs. Reynolds number

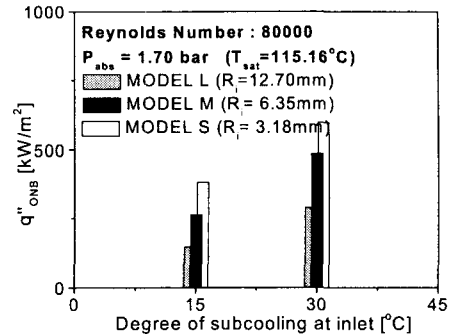


Fig. 7 q''_{ONB} vs. inlet subcooling

와 ΔT_{sat} 값들을 모두 Table 2 에 나타내었다.

실험된 Model L, Model S를 포함하여 세 가지 모두 Fig. 6에 보여준 Model M과 유사하게 Reynolds수가 증가하면 핵비등 시발점에서 열유속 값(q''_{ONB})의 증가를 확인 시켰다.

Fig. 7은 입구 과냉도의 변화에 따른 q''_{ONB} 값을 보여준다. Reynolds수가 80,000 인 경우에 입구 과냉도의 증가에 따른 q''_{ONB} 증가를 보여준다. 실험 결과를 살펴보면, 입구 과냉도가 증가하면 핵비등 시발점의 q''_{ONB} 은 실험범위 내에서 증가하는 경향을 나타내면서 Reynolds수와 시험부의 환형 유동관의 내관의 반지름(R_i)의 변화에 밀접한 영향을 받는 것을 알 수 있다.

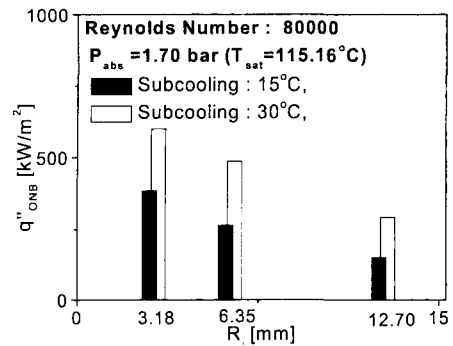


Fig. 8 q''_{ONB} vs. R_i at $Re=80,000$

3.3 표면의 곡률이 ONB에 미치는 영향

환형 유로(annular flow channel)의 내관/외관의 반경비가 0.5인 경우에, 관의 크기가 서로 다른 3 가지 모델에서 비등 시발점의 열유속을 실험적인 방법으로 찾은 Table 2 의 값들을 기초로 비교하였다. Fig. 8은 Reynolds수 80,000에서 시험부의 반지름(R_i) 변화에 따른 q''_{ONB} 를 나타내었고, Fig. 9는 입구 과냉도 30°C 경우에 시험부의 반지름(R_i)변화에 따른 q''_{ONB} 를 나타내었다.

실험 결과를 살펴보면 실험범위 내에서 Reynolds수와 유체의 입구 과냉도 조건이 동일할

때, Reynolds 수 80,000 인 경우에서 시험부 내관의 가열 표면의 곡률이 증가(내관의 반지름이 감소)함에 따라서 핵비등 시발점의 열유속값 (q''_{ONB})이 증가하는 경향을 나타내었다.

$Re=40,000$ 인 경우는 가장 크기가 작은 Model S와 중간 크기의 Model M에서 q''_{ONB} 의 차이는 뚜렷하지 아니 하였다.

실험 결과에 대한 불확실성(uncertainty)계산은 Kline 과 McClintock⁽¹⁵⁾이 제안한 방법을 이용하여 계산하였고,⁽¹⁴⁾ 속도는 $\pm 3\%$, 온도는 $\pm 0.95\%$, 열유속의 오차범위는 $\pm 1.46\%$ 이내로 평가 되었다.

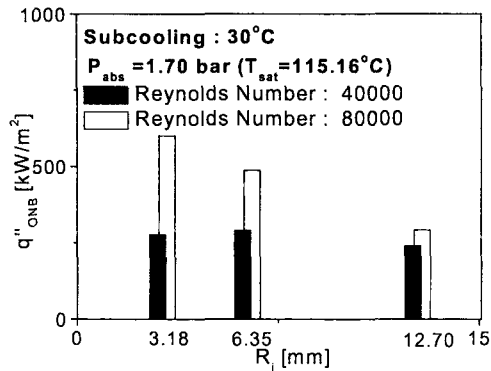


Fig. 9 q''_{ONB} vs. R_i at inlet subcooling 30°C

4. 결론

본 연구는 강제대류 과냉상태의 물이 내관과 외관의 반경비(R_i/R_o)가 0.5인 동심 이중관의 환형 유동 채널에서 내관이 가열되어 강제대류 열전달이 일어날 경우에, 비등 열전달 현상이 시작될 때 열유속(q''_{ONB})를 측정하였다. 3가지 크기의 실험모델에 대하여, Reynolds수 40,000~80,000 범위와 입구 과냉도 15~30°C 범위에서 실험하여 가열부 표면의 볼록 곡률(transverse convex surface curvature), Reynolds수, 유체의 입구 과냉도의 변화에 따른, 동심 환형관 수직상향 유로에서 과냉각 유체(물)의 핵비등에서 시발점(ONB point)의 열유속(q''_{ONB})에 미치는 영향에 대한 실험적인 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일한 Reynolds수와 유체의 입구 과냉도 조건에서 가열 표면의 곡률을 변화시켰을 때, 표면의 곡률이 증가하면 $Re=80,000$ 인 경우는 q''_{ONB} 값이 뚜렷이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 $Re=40,000$ 인 경우는 작은 모델 Model S 와 Model M 사이는 q''_{ONB} 값의 증가가 앞의 경우 처럼 뚜렷하지 아니하여 추가 연구가 필요하지만, 표면곡률의 영향은 확인되었다. 이는 참고문헌(11)의 이론적인 연구에서 표면곡률의 영향과 경향이 정성적으로는 비슷하다.

(2) 동일한 표면의 곡률과 유체의 입구 과냉도 조건에서 Reynolds수가 증가하면 q''_{ONB} 는 증가함을 확인하였다. 그리고, 동일한 표면의 곡률과 Reynolds수의 조건에서 유체의 입구 과냉도가 증가하면 q''_{ONB} 도 증가함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Rohsenow, W. M., and Hartnett, J. P., 1973, "Handbook of Heat Transfer," McGraw-Hill, 13-2.
- (2) Bowring, R. W., 1962, "Physical Model Based on Bubble Detachment and Calculation of Steam Voidage in the Subcooled Region of a Heated Channel," OECD Halden Reactor Project Report HPR-10.
- (3) Hsu, Y. Y., 1962, "On the Size Range of Active Nucleation Cavities on a Heating Surface," *J. Heat Transfer*, pp. 207~216.
- (4) Bergles, A. E., and Rohsenow, W. M., 1964, "The Determination of Forced-Convection Surface Boiling Heat Transfer," *J. Heat Transfer*, pp. 365~372.
- (5) Davis, E. J., and Anderson, G. H., 1966, "The Incipience of Nucleate Boiling in Forced Convection Flow," *J. AIChE*, Vol. 12, pp. 774~780.
- (6) Celata, G. P., Cumo, M., and Mariani, A., 1997, "Experimental Evaluation of the Onset of Subcooled Flow Boiling at High Liquid Velocity and Subcooling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 12, pp. 2879~2885.
- (7) Kim, M. W., 1996, "Effect of Transverse Convex Surface Curvature on Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer," Ph.D. Thesis, Univ. of Ottawa.
- (8) Lee, S. H., Kim, K. C., Song, J. H., Suk, H. C., and Park, J. H., 2000, "Effect of Transverse Convex Curvature on the Onset of Nuclear Boiling in the Concentric Annuli," *Proc. 4th JSME/KSME Thermal Engineering Conference*, Vol. 3, pp. 9~14.
- (9) Lee, S. H., and Kim, I. S., 2001, "Effect of Convex Surface Curvature on the Onset of

- Nuclear Boiling in the Concentric Annular Tubes," *Proc. 4th International on Multiphase Flow, icmf 711. pdf*.
- (10) Lee, S. H., and Kim, I. S., 2001 "Experimental Study on the Onset of Nucleate Boiling in Vertical Concentric Annular Tubes," *Proc. 5th ExHFT*, Vol. 1, pp. 279 ~ 284.
- (11) Kwon, S. Y., Lee, Y., and Kim, K. C., 1998, "Analytical Study on the Onset of Nucleate Boiling due to Transverse Convex Surface Curvature," *Proceedings of KSME*, pp. 188 ~ 193.
- (12) Lee, Y., 1998 University of Ottawa, Personal communication.
- (13) Incropera, F. P., and Dewitt, D. P., 1996, "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*," 2th Edition, John Wiley & Sons., pp. 378 ~ 380.
- (14) Byun, J. H., 2002, "Experimental Study on the Onset of Nucleate Boiling of Subcooled Fluid Flow in Vertical Concentric Annular Tubes," M.S. Thesis, Pusan National University.
- (15) Kline, S. J., and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3 ~ 8.