

수평관내 냉매의 과냉비등열전달에 관한 연구

김 중 현* · 김 철 환**

A Study on the Subcooled Boiling Heat Transfer in a Horizontal Tube

J. H. Kim · C. H. Kim

Key words : Subcooled boiling(과냉비등), Liquid bulk temperature(액혼합평균온도), Wall temperature fluctuation(벽온변동), Void fraction(보이드율), Critical heat flux(한계프럭스)

Abstract

A new reliable method to predict the axial vapor fraction distribution from the measured probability density of the liquid bulk temperature is suggested in this paper. And also the actual quality of the subcooled boiling flow is easily calculated from the liquid bulk temperature.

When the heat generating rate is reached to the CHF value, the sharp wall temperature increasing by the wall temperature fluctuation is occurred under the CHF condition. This paper presents the simple wall temperature fluctuation model of transition boiling by the repeating process of overheating and quenching, when the coalescent bubble passes slowly near the wall.

Experiments for the subcooled R-113 flow are carried out in the range of $(0.9399 \sim 4.461) \times 10^6$ kg/m²hr mass velocity and 10~30°C inlet subcooling condition.

Nomenclature

A	: 유로단면적	[m]	k	: 열전도율	[kcal/mhr°C]
C	: 비열	[kcal/kg°C]	L_{fg}	: 증발잠열	[kcal/kg]
C_{pl}	: 정압비열	[kcal/kg°C]	m_c	: 응축율	[kg/hr]
G	: 질량속도	[kg/m ² hr]	p	: 압력	[MPa]
H	: 유로폭	[m]	P_c	: 임계압력	[MPa]
i	: 엔탈피	[kcal/kg]	P_h	: 가열관둘레길이	[m]
			q	: 열유속	[kcal/m ² hr]
			q_b	: 기체냉매에 전달된 열유속	[kcal/m ² hr]

* 정회원, 한국선급

** 정회원, 한국해양대학교 대학원

q_L	: 액체냉매에 전달된 열유속 [kcal/m ² hr]
R	: 전열면의 두께 [m]
t	: 시간 [sec, hr]
T	: 온도 [°C]
T_c	: 임계온도 [°C]
T_{fb}	: 실제의 액체온도 [°C]
T_s	: 포화온도 [°C]
T_w	: 전열면 외표면온도 [°C]
ΔT_s	: 전열면 과열도 [°C]
ΔT_{sub}	: 과냉도 [°C]
v	: 비체적 [m ³ /kg]
x_{re}	: 실제건도
x_{eq}	: 열평형건도
y	: 벽면으로부터의 수직거리 [m]
z	: 가열개시점으로부터 축방향거리 [m]
α	: 보이드율 [%]
ρ	: 밀도 [kg/m ³]
τ_l	: 전열면의 냉각기간 [sec]
τ_v	: 전열면의 과냉기간 [sec]
μ	: 점성계수 [kg/mhr]
σ	: 표면장력 [kg/m]

첨 자

CHF	: 한계열유속상태
g	: 기상
in	: 실험관입구
λ	: 액상
MHF	: 최소열유속상태
quen	: 퀘칭
w	: 전열면

1. 서 론

증발관에 유입하는 과냉상태의 냉매는 포화증기와 과냉액이 공존하는 열역학적 비평형상태가 된다. 이러한 영역에서 실제의 보이드율 및 흐름양식(Flow Pattern), 국소열전달의 변화 및 비등곡선등에 관한 연구는 금후 대체냉매를 이용한 냉동시스템의 상세한 열설계를 위하여 매우 중요한 부분이다.

또한 최근에는 기존의 냉매인 프레온의 사용으

로 인한 지구차원의 환경과피를 방지하기 위하여 새로운 대체냉매의 개발, 흡수식 냉동기 등과 같은 다양한 형태의 냉동기기의 개발 및 냉동부하를 최소화 하기 위한 다각적인 노력이 진행되고 있다. 특히 프레온계열 냉매의 국제적 사용규제로 인하여 시급한 대체냉매의 국산화, 비등열전달, 응축열전달 및 액체 또는 기체상태의 단상열전달 등에 관한 기초적 실험자료의 축적과 이에 대응하는 새로운 형태의 냉동기기의 개발 및 종합적인 열설계를 위한 자료축적이 요구된다.

가열관에 과냉상태로 유입한 냉매는 전열관을 흐름에 따라 중심부의 액체온도가 포화온도에 도달하면 본격적인 핵비등이 지배적인 열전달(Nucleate Boiling Heat Transfer)이 이루어진다. Saha와 Zuber¹⁾는 과냉류가 균일히 가열되는 관내에 유입할 경우 열전달영역은 (1) 액단상류영역, (2) 고과냉도영역 및 (3) 저과냉도영역으로 구분하였다. 이들 연구자들은 액체온도가 상당히 상승하여 저과냉도 비등영역이 시작되는 정미의 기포발생점(Net Vapor Generation Point)에 관하여 연구하였다. 이들은 질량속도가 비교적 적은 경우에는 증기발생량과 응축량의 관계에 의하여, 질량속도가 큰 경우에는 전열면에서 발생된 증기포가 전열면을 활발히 이탈하지 못하므로, 수력학적 조건에 의하여 정미의 기포발생점이 결정된다고 하였다. 또한 Ahmad²⁾는 열유속을 과냉액과 포화증기에 전달되는 열유속으로 각각 나누어 증기의 응축량을 실험적으로 정리함으로써, 흐름방향의 단면평균 보이드율을 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 이와 같은 과냉비등류(Subcooled Boiling Flow)에 관하여 질량속도(Mass Velocity) 및 입구과냉도(Inlet Subcooling)의 변화에 따른 보이드율, 열평형건도와 실건도³⁾와의 관계를 이론적으로 검토하고, 또한 한계열유속 상태하에서 핵비등이탈과정(Depature from Nucleate Boiling) 즉 핵비등상태에서 막비등상태로의 천이과정에서 전열면 온도변동을 정량적으로 구하였다.

2. 실험장치

실험장치는 Photo 1에 보는 바와 같으며 액저장

탱크, 드라이어, 냉매 순환펌프, 유량계, 냉매 온도 조절기, 실험부, 액분리기, 응축기, 냉각수 순환펌프 및 냉각수탱크로 구성되어 있다.

실험냉매로 사용하는 R-113은 액저장탱크로부터 드라이어를 거쳐 냉매순환펌프에 흡입된 다음, 냉매 온도조절기에 유입되어 실험조건 소정의 입구과냉도로 정확히 조절되어 실험부에 유입한다. 실험부내의 가열관은 가열전원장치에 의하여 실험관 양단에 인가된 교류상태의 대전류저전압에 의하여 가열된다. 가열관 내벽에는 C-A 열전대를 부착하여 가열관의 내벽면 온도를 측정할 수 있도록 하였으며, 온도제어기에 의하여 전열관의 번아웃(Burn Out)을 방지하도록 되어 있다. 실험관을 유출한 기액이상류는 액체와 증기가 분리되어 액체는 액저장탱크로 환류되고, 증기는 응축기로 유입한다.

실험유체로는 R-113을 사용하였다. R-113은 증발잠열이 적기 때문에 과냉상태로부터 비교적 적은 가열량으로 기액이상류 상태를 실험할 수 있

으며, 포화액과 포화증기의 밀도비가 고압수증기와 비슷하여 각종 냉동분야의 열전달실험은 물론 원자로로심의 열전달상태를 모의하기 위한 실험에도 자주 쓰인다.

실험부의 상세는 Photo 2에 보이는 바와 같다. 가열관은 내경 7mm, 두께 0.5mm, 길이 400mm의 SUS304의 스테인레스관을 사용하였으며, 가열관의 양단에는 Copper단자를 설치하여 가열전원장치의 교류전류가 직접 통전되어 가열한다. 외관은 내경 18mm(수력학적 등가직경 $De=10mm$), 두께 2mm의 투명한 파이프렉스 유리관으로 실험부의 흐름을 관찰할 수 있도록 되어 있다. 실험부 유로의 전길이는 600mm이고 가열개시점까지의 입구구간은 200mm로, 흐름이 충분히 발달되도록 하였다. 입출구 압력은 각각의 입출구 플랜지에 직경 1mm의 압력공을 설치하여 각 위치의 절대압력을 정밀압력계로 측정하였다. 또한 실험부의 입출구 플랜지에는 실험냉매의 온도를 측정하기 위하여 C-A 열전대를 설치하였다.

가열 개시점으로부터 축방향 거리 $z=390mm$ ($z/De=39$)의 위치에 환봉형의 테프론 홀더에 선경 76 마이크론의 C-A 열전대 6개를 원주방향 등각도간격으로 설치한 후 가열관 내면에 밀착 삽입하여, 전열면 내부의 온도를 측정함으로써 전열면의 외부온도를 계산에 의하여 구할 수 있도록 하였다.

실험은 실험부 입구압력을 0.147MPa($T_s=59.1^\circ C$)로 유지하면서 입구과냉도 $\Delta T_{sub}=10^\circ C, 20^\circ C, 30^\circ C$, 질량유속 $G=9.399 \times 10^5, 1.851 \times 10^6, 4.461 \times 10^6 kg/m^2hr$ 의 범위 대하여 수행하였다. 실험부 입구압력인 0.147MPa에서 R-113의 기상과 액상의 밀도비는 1/153이고, 이 압력에 해당하는 증기압은 1.0MPa이며 이때 R-113의 증발잠열은 물의 약 7%에 해당된다.

실험을 수행하기 전에 계통내에 남아 있는 불응축가스로 인하여 응축기의 응축능력 저하와 실험부에서의 비등에 의한 영향을 방지하기 위하여 모든 실험루프내의 공기를 뽑아내었다. R-113은 실온($20^\circ C$)에서 포화압력이 약 0.5 MPa이기 때문에 진공펌프로써 응축기에 부착된 압력계(Compound Gage)의 눈금이 그 이하가 될 때까지 진공을

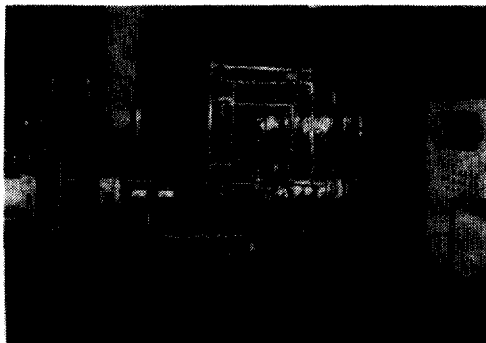


Photo 1 Experimental Apparatus

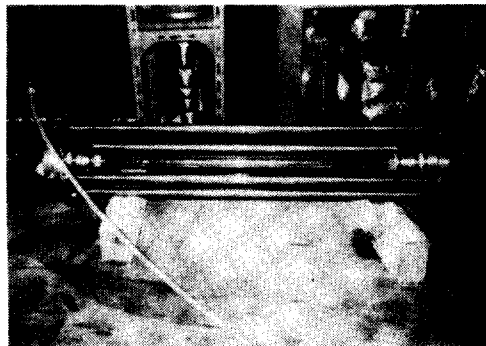


Photo 2 Test Section

형성시키고 냉매온도조절기에는 전원을 넣어 약 30분 정도의 예열을 하여 실험을 수행하기 위한 준비를 완료한다.

다음은 본 실험의 방법에 대하여 기술한다. 실험은 실험부 입구의 압력, 유량 및 온도를 소정의 값으로 일정히 유지하면서 가열관 양단에 가하는 전압을 단계적으로 미세하게 올려서 한계열유속상태까지 다다르게 하여 수행한다.

실험부 입구압력 조절은, 가열관의 열유속이 적으면 실험부 관내의 증기 발생량이 적기 때문에 실험부 출구에 설치된 밸브의 개폐량을 조절하여 입구압력을 조절하고, 가열관의 열유속이 커지면 증기발생량이 많아져 실험부 출구밸브의 개폐량 조절만으로는 입구 압력이 조절되지 않으므로 냉각수에 의한 응축기의 배압조절도 행하여야 한다. 한편 열유속을 지속적으로 한계열유속 전후까지 급증가 시키면 증기발생량이 커져 실험장치내의 압력이 심하게 맥동하게 되므로 이러한 유체역학적인 맥동을 제어하기 위하여 입출구밸브 및 냉매순환펌프 출구밸브를 충분히 교축하여 소정의 압력 및 질량속도로 유지한 상태에서 실험이 수행되도록 하였다.

실험부 입구의 유량조절은 유량계 전후에 부착되어 있는 밸브의 개폐량을 적절히 조절한 상태에서 냉매순환펌프 출구측에 설치된 바이패스 밸브의 개폐량을 조절하여 행한다. 그러나 유량변화와 실험장치 계통내의 압력변화는 밀접한 영향을 갖기 때문에 가열량 등의 실험조건이 변하면 유량과 압력을 동시에 조절하여 소정의 값이 되도록 한다.

실험유체의 온도조절은 냉매온도조절기의 예열기와 온도조절기에 의하여 조절된다. 냉매는 전기 가열식 예열기(출력 1kW, 2kW)에 의하여 가열되어 설정된 실험부 입구온도보다 약 2℃정도 낮은 온도로 일정하게 유지되어 실험부 입구에 설치된 온도조절기에 유입되며, 온도조절기에서는 전압조절기에 연결된 2개의 전기히터(1.2kW)에 의하여 실험유체의 설정온도 ±0.1℃범위로 유지되어 실험부에 유입된다.

3. 실험결과

이론해석 및 실험결과들의 전산처리를 위하여는 먼저 실험유체인 R-113냉매의 필요한 물성치들이 수식화되어야 한다. 본 논문에서 필요한 압력범위에 대하여 물성치들을 수식으로 정리하여 요약하면 다음과 같다.

(가) 포화온도[℃]

$$T_s = \sqrt{1793.5P - 949.36} + 17.383 \quad (1)$$

(나) 포화액의 엔탈피[kcal/kg]

$$i_l = -1.23P^2 + 8.82P + 102.43 \quad (2)$$

(다) 포화증기의 엔탈피[kcal/kg]

$$i_g = 3.7P + 141.5 \quad (3)$$

(라) 포화액의 밀도[kg/m³]

$$\rho_l = 1000 \times (-0.0023T_s + 1.621) \quad (4)$$

(마) 포화증기의 밀도[kg/m³]

$$\rho_g = 6.7P + 0.44 \quad (5)$$

(바) 포화액의 점성계수[kg/mhr]

$$\mu_l = 9.8 \times 3600 \times \left(\frac{9607.0}{(T_s + 81.67)} - 22.8 \right) + 1000000 \quad (6)$$

(사) 포화증기의 점성계수[kg/mhr]

$$\mu_g = 0.03528 \times (0.002T_s + 0.987) \quad (7)$$

(아) 포화액의 열전도율[kg/mhr℃]

$$k_l = -0.000271_s + 0.06 \quad (8)$$

(자) 포화액의 비열[kcal/kg℃]

$$C_{Pl} = 0.00045T_s + 0.207 \quad (9)$$

(차) 표면장력[kg/m]

$$\sigma_l = 0.006253 \times \left[\frac{214.1 - T_s}{287.25} \right]^{1.235} \quad (10)$$

3. 1 보이드율과 액혼합평균온도

증발관의 입구부에서 과냉상태의 냉매는 포화 증기와 과냉액이 공존하는 열역학적 비평형상태 하에서 증발이 진행된다. Saha와 Zuber¹⁾는 과냉류가 균일히 가열되는 관내에 유입할 경우 열전달 영역을 (1) 단상류 영역, (2) 고과냉도 영역, (3) 저과냉도 영역으로 구분하고 있다. 이들 연구자는 액체의 평균온도가 상당히 상승하여 저과냉도 영역이 시작되는 정미의 기포발생점(Net Vapor Generation Point)에 관하여, 질량속도가 비교적 적은 경우에는 증기 발생량과 응축량의 관계에 의하여, 큰 경우에는 전열면에서 발생된 증기포가 전열면을 활발히 이탈하지 못하면 보이드율이 증가하지 못하므로 증기포 이탈의 수력학적 조건에 의하여 정미의 기포발생점이 결정된다고 하였다. 저과냉도영역에서는 기포가 전열면으로부터 서서히 이탈하기 시작하여 전열면 근방의 보이드율은 실질적으로 증가하기 시작하여, 전열면에는 활발히 액체가 공급되므로 전열면 온도는 갑자기 낮아지면서 본격적인 핵비등이 이루어진다.

이론적으로는 열평형방정식에서 구할 수 있는 기액의 혼합평균온도가 포화온도에 도달한 위치에서부터 핵비등에 의한 기포의 발생도 가능하지만, 실제로는 전열면 근방에 과냉액층이 형성되어 과냉상태에서부터 증기포가 발생하게 되므로 열평형 온도 0의 위치에서는 이미 상당히 높은 보이드율을 갖게 된다.

Hino등⁴⁾은 과냉비등류의 실험에서 한계열유속(CHF)상태하에서 합체기포의 거동을 살피기 위하여, 선경 10미크론의 극세열전대 프로브를 직접 과냉류에 삽입, 응답보상회로를 구성하여 포화증기와 과냉액의 통과시간과 온도를 동시에 측정하여 분석함으로써 단면에서의 국소보이드율의 분포를 측정하고 있다⁵⁾.

Fig. 1은 질량속도 $4.461 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$, 증발관 입구과냉도(Inlet Subcooling)가 30°C 인 경우이며, Fig. 2는 동일한 질량속도에서 입구과냉도가 20°C 인 경우에 대하여, 본 실험과 동일한 유로폭(수력학적 반경) $H=5\text{mm}$ 를 기준으로 한 전열면으로부터의 무차원거리 y/H 를 바꾸어가면서 각 온도별 기액의 통과시간을 기준으로 한 온도 확률

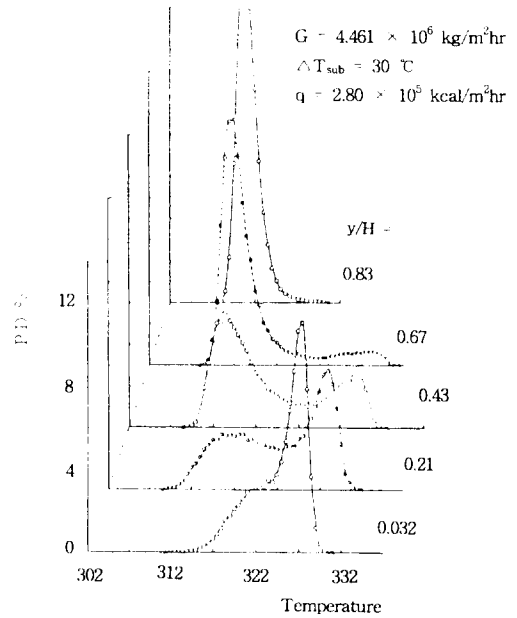


Fig. 1 Temperature Probability Density Distribution near the Wall($\Delta T_{sub}=30^\circ\text{C}$)

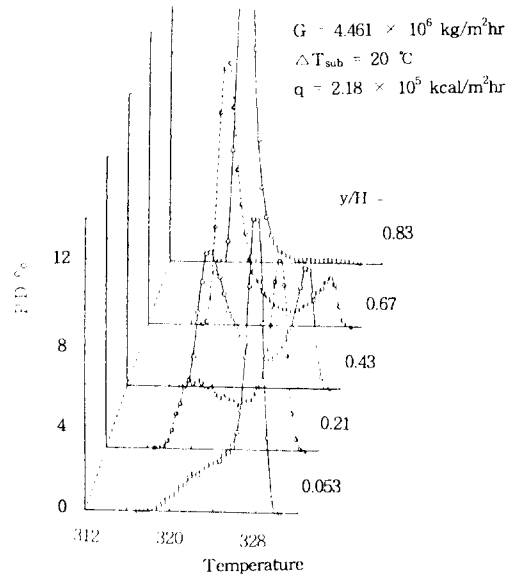


Fig. 2 Temperature Probability Density Distribution near the Wall($\Delta T_{sub}=20^\circ\text{C}$)

밀도분포(Temperature Probability Density)를 정리한 결과를 나타낸 것이다.

이들 그림에서 보는 바와 같이 $y/H=0.036$ 의 전열면 극히 근처에는 포화온도 근방에서 최대확률 밀도점이 나타나지만, 전열면으로부터 멀어질수

록 저온측에 또다른 최대확률밀도점이 나타남을 알 수 있다. 즉, 저온측의 온도분포는 액체 냉매류의 온도분포를 기본적으로 나타내며, 고온측의 온도분포는 증기류의 온도분포를 나타낸다. 따라서 고온측의 최대확률밀도점 온도가 포화온도와 거의 일치하는 바와 같이, 저온측의 최대확률밀도점 온도는 액체평균온도와 거의 일치한다고 간주하여도 무방하다. 이와 같은 관점에서 전 실험범위에 대하여 흐름방향의 측정위치인 $z=390\text{mm}$ 에서의 액상의 혼합평균온도 T_{lb} 를 실험식으로서 구할 수 있다⁵⁾.

이상과 같은 방법으로 과냉비등 냉매류에 대하여 액혼합평균온도를 구하면, 과냉액과 포화증기의 열역학적 비평형상태에서 임의점에서의 실제건도(Real Quality)는 다음과 같이 정리된다.

$$x_{re} = \frac{\frac{q P_h z}{GA} - C_{pl}(T_{lb} - T_{lbin})}{L_{fg} + C_{pl}(T_s - T_{lb})} \quad (11)$$

이에 비하여 기액이 열역학적 평형상태에 있다고 가정하였을 때의 열평형건도(Thermal Equilibrium Quality)는, 비등전열관에서 일반적으로 열유속을 q , 유체층의 원주방향길이를 P_h , 가열개시점으로부터 흐름방향의 거리를 z , 질량속도를 G , 가열개시점에 유입하는 냉매온도를 T_{lbin} , 증발잠열을 L_{fg} 라고 하면 열평형건도는 다음식과 같이 표현된다.

$$x_{eq} = \frac{\frac{q P_h z}{GA} - C_{pl}(T_s - T_{lbin})}{L_{fg}} \quad (12)$$

Fig. 3은 질량속도 $G=4.461 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{hr}$ 인 경우 입구과냉도 $\Delta T_{sub}=10, 20, 30^\circ\text{C}$ 를 파라미터로 하여 본 실험의 측정위치인 $z=390\text{mm}$ 에서 실제건도와 열평형건도를 열프릭스에 대하여 정리한 결과를 나타낸다. 또한 Fig. 4는 $G=9.399 \times 10^5 \text{kg/m}^2$ 인 경우를 나타낸다. 질량속도가 큰 Fig. 3의 경우에는 입구과냉도가 클수록 대부분의 실험범위에서 열평형건도는 음의 값의 범위에 해당되어 과냉상태하에서 핵비등이 진행되고 있음을 알 수 있으며, 비교적 질량속도가 적은 Fig. 4의 경우에는 가열량이 증가하면, 열평형건도가 0을

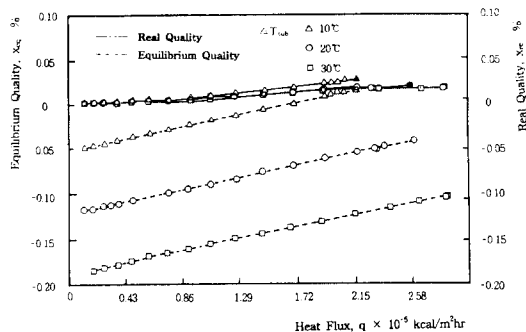


Fig. 3 Equilibrium & Real Quality to Heat Flux ($G=4.461 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{hr}$)

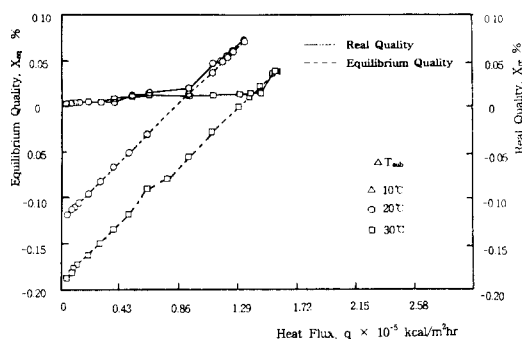


Fig. 4 Equilibrium & Real Quality to Heat Flux ($G=9.399 \times 10^5 \text{kg/m}^2\text{hr}$)

넘어 체적비등이 일어나 열평형건도와 실제건도가 일치함을 알 수 있다.

3.2 보이드율과 벽온변동

과냉비등류에 대하여 액상의 혼합평균온도로부터 실제건도 x_{re} 를 구하면 참고문헌 (3)에서 다음과 같이 단면평균 보이드율(Void Fraction)을 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{1 + s \frac{A_l}{A_g}} = \frac{x_{re}}{x_{re} s (1 - x_{re}) \frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (13)$$

기액의 속도비 s 에 관하여는 유동양식(Flow Pattern)의 판별, 고압 보일러, 냉동기 계통의 열설계와 관련하여 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔는데, 기본적으로는 기액의 밀도비에 의존함이 알려져 있다. 특히 Ahmad²⁾는 질량속도 $G=1.44 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{hr}$ 이상으로, 과냉비등류 및 포화비등류 모두에 적용할 수 있는 다음과 같은 실험식을 제시

하고 있다.

$$s = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.205} \left(\frac{GD_\epsilon}{\mu_l} \right)^{-0.016} \quad (14)$$

위식은 실제건도 x_{re} 가 비교적 낮은 경우에는 실제보다 약간 적은 값을 나타내지만 그 오차는 적을 뿐만 아니라 비교적 고건도영역까지 정도높게 적용이 된다⁷⁾.

Fig. 5는 $G=4.461 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{hr}$ 인 경우 입구과 냉도를 파라미터로 하여 $z=390\text{mm}$ 위치에서 추정된 단면보이드율을 나타낸다. 비교적 고열프릭스상태에서 단면평균 보이드율은 50%를 넘어 과냉비등류의 흐름상태는 발달한 기포류 또는 프릭류상태로 됨을 알 수 있다.

열유속이 증대되어 핵비등이 개시되면 전열면 표면과 냉매 사이의 열전달율이 급증하여 핵비등이 지배적인 열전달이 이루어진다. 더욱 열유속이 증대되면 비등곡선은 핵비등상태하에서 최고점에 도달하여 한계열유속(CHF)상태에 도달한다. 이와 같은 한계열유속상태에서는 전열면의 일정 위치에 주목하면, 전열면의 표면이 국부적으로 기상으로 뒤덮였을 동안에는 전열저항이 증가하여 전열면 온도상승이 일어나며 액상으로 뒤덮였을 동안에는 열전달율이 증가하여 온도하강이 일어난다. 결국 한계열유속상태에서는 이와 같이 국부적인 과열과 냉각이 되풀이되면서 막비등상태의 곡선으로 천이(Transition)를 일으킨다.

이와 같이 천이를 하는 과정에서는 전열관 양단에 인가되는 전력량으로부터 계산되는 한계열유

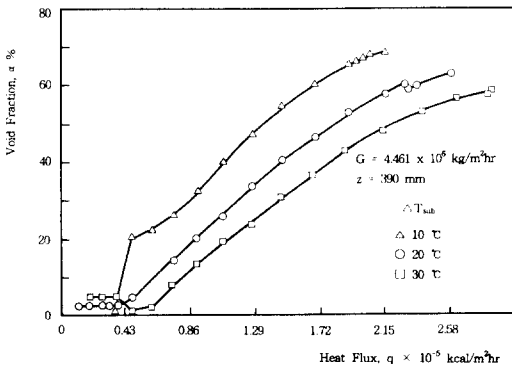


Fig. 5 Void Fraction to Heat Flux

속값을 q_{CHF} , 실제로 비등에 의하여 유체층으로 나가는 열유속을 q' 라고 하고, 전열벽을 통한 축방향의 열전도를 무시하면 전열면의 미소체적에 대한 열평형방정식은 아래식과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{CHF} = q' + \rho C_{pl} R \frac{dT_w}{dt} \quad (15)$$

먼저 합체기포가 통과하는 동안의 전열면 온도 상승기간 동안의 열유속값이 극소열유속값과 같다고 하면 위식의 해는 다음과 같다.

$$T_w - T_{wo} = \frac{q_{CHF}(1 - \frac{q_{MHF}}{q_{CHF}})}{\rho C_{pl} R} \tau_l \quad (16)$$

다음의 전열면의 냉각기간에 대하여는 일정한 냉각열프릭스 q_{QUEN} 을 유지한다고 하면 식(15)의 해는 다음과 같이 된다.

$$T_w - T_{wo} = \frac{q_{CHF}(1 - \frac{q_{QUEN}}{q_{CHF}})}{\rho C_{pl} R} \tau_l \quad (17)$$

Fig. 6은 질량속도가 커서 전열면 근방을 통과하는 합체기포⁵⁾의 통과시간 즉 액막소실기간이 긴 경우이며, Fig. 7은 질량속도가 작고 과냉도가 커서 합체기포의 통과주기가 짧은 경우를 각각 나타낸다.

이들 그림에서 한계열프릭스 근방에서 합체기포 통과중 전열면 온도의 상승폭은 6~10°C의 범위이며, 다음의 액상에 의하여 전열면이 냉각되는 온도폭은 1~2°C 정도로서, 정미의 온도상승폭은 5~8°C 정도이므로 수초동안 수십개의 합체기포의 통과만으로 전열면 온도는 수십도씩 상승하여 핵비등상태를 이탈함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 냉매 R-113을 이용한 수평관내의 강제대류 과냉비등류 열전달에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 증발관내의 실제 액온을 측정함으로써 실제의 건도와 보이드율을 추정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다.

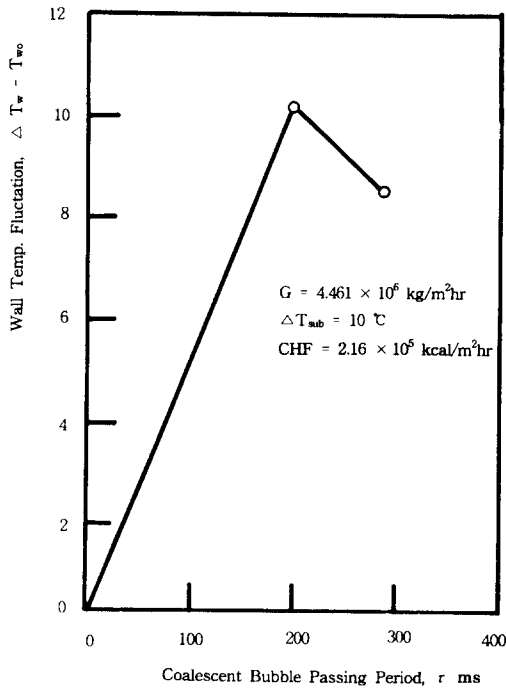


Fig. 6 Wall Temperature Fluctuation ($G = 4.461 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$)

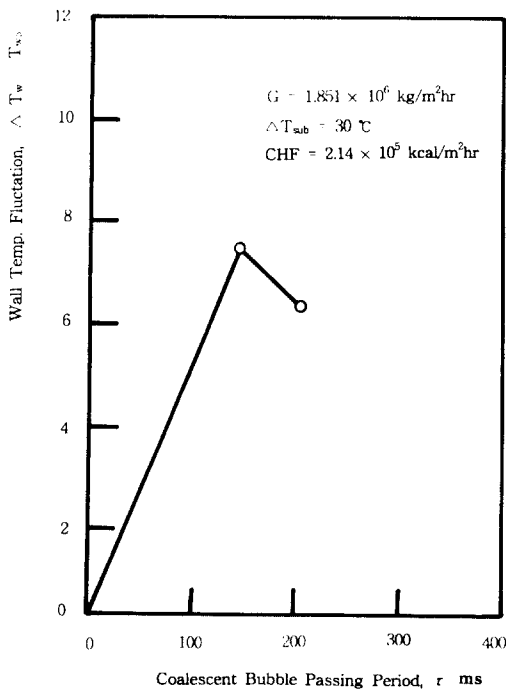


Fig. 7 Wall Temperature Fluctuation ($G = 1.851 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$)

(2) 과냉비등류에 관한 본 실험의 범위에서는 열 평형건도가 $-0.1 \sim 0$ 범위에서 실제적으로는 벽면 근방에 증기포층이 형성됨으로써 단면평균 보이드율은 $40 \sim 50\%$ 를 상회하여 액온이 높아져 포화 비등상태가 되면 냉매에 가하여진 열유속이 전부 증기발생에 소모되므로 단면평균 보이드율은 최대 80% 정도까지 더욱 급격히 상승한다.

(3) 본 실험범위에서 과열기간 동안의 온도변동 폭은 $6 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$, 냉각기간 동안의 온도변동 폭은 $1 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 로서, R-113냉매의 경우 한계열유속 상태에서 합체기포 통과에 의한 정미의 전열면 온도상승폭은 $5 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ 정도이다.

4. 참고문헌

- 1) P. Saha and N. Zuber ; Point of Net Vapor Generation and Vapor Void Fraction in Subcooled Boiling, 5th Int. Heat Transfer Conf., Tokyo, Vol. 4, pp. 175~179(1974).
- 2) S. Y. Ahamad ; Axial Distribution of Bulk Temperature and Void Fraction in a Heated Channel with Inlet Subcooling, Trans. of the ASME, Ser. C, Vol. 92, No. 4, pp. 595~609(1970).
- 3) 김종현, 김춘식, 김경근, 오철 ; 과냉 비등류의 실제 건도와 보이드율에 관한 연구, 한국박용기관학회지, 제17권, 제2호, pp. 110~117(1993. 4).
- 4) R. Hino and T. Ueda ; Studies on Heat Transfer and Flow Characteristics in Subcooled Flow Boiling(Part 1. Boiling Characteristics), Int. J. Multiphase Flow(1984).
- 5) 김경근, 김명환, 최순호, 권형정, 김종현 ; 유동 및 풀비등에 있어서 한계열플럭스 상태하의 천이기구, 한국박용기관학회지, 제13권, 제4호, pp. 300~313 (1989. 11).
- 6) M. P. Fiori and A. E. Bergles ; Model of Critical Heat Flux in Subcooled Flow Boiling, 4th International Heat Transfer Conference, Paris, Vol. 6, B6, 3(1970).
- 7) R. Hino and T. Ueda ; Studies on Heat Transfer and Flow Characteristics in Subcooled Flow Boiling(Part 2. Flow Characteristics), Int. J. Multiphase Flow(1984).