

【論文】

수직관내 二相流에 있어서 熱傳達에 관한 연구  
(보이드율을 중심으로)

A Study of Heat Transfer in Vertical Two Phase Flow  
- Concern with void fraction -

이 채 문\* 임 장 순\*\*  
C.M. Lee C.S. Yim

M.E. Salcudean\*\*\*

ABSTRACT

This study was to predict subcooled void fraction in water under low velocity (0.03 ~ 0.5 m/s) and low pressure. (1.53 Kg/cm<sup>2</sup> a)

The experiments were done to determine void fraction in a uniformly heated annular test section.

Some models from the literature were compared to the experimental results, but none gave consistently good predictions.

A method using an empirical factor was developed to predict the void fraction. This model was applied to the test results and found to be good for some ranges of flow velocities.

NOMENCLATURE

A	cross sectional area (m <sup>2</sup> )
C <sub>o</sub>	distribution factor
C <sub>p</sub>	specific heat (J/kg °C)
h	convective heat transfer coefficient (w/m <sup>2</sup> °C)
h <sub>fg</sub>	heat of vaporization (J/kg)
K <sub>c</sub>	condensation factor (w/m °C)
k <sub>l</sub>	thermal conductivity of liquid (w/m °C)
L	length of heated section (m)

m	mass flow (kg/s)
m <sub>s</sub>	mass of liquid converted to steam per unit length (kg/s)
N <sub>1</sub>	number of counts of 100% void fraction (counts)
N <sub>0</sub>	number of counts at 0% void frac- tion (counts)
N <sub>α</sub>	number of counts for readings of void (counts)
N <sub>q</sub>	number defined as eq. (9)
OSV	onset of significant void
P <sub>H</sub>	heated perimeter (m)
Pr	Prandtl number

\* 正會員: 仁荷大 大學院.

\*\* 正會員: 仁荷大 工大.

\*\*\* U.B.C. Canada.

q	local heat input (w)
$Q_b(z)$	heat absorbed by boiling per unit time per unit length (w/m)
$Q_c(Z)$	heat released by condensation per unit time per unit length (w/m)
$R_e$	Reynolds number
$T_b$	bulk temperature
$T_{in}$	inlet temperature (°C)
$T_{out cal}$	calculated outlet temperature (°C)
$T_{sat}$	saturation temperature (°C)
$\Delta T$	$(T_{sat} - T)$ (°C)
$\Delta T_b$	$(T_{sat} - T_b)$ (°C)
XEQ	equilibrium quality
XEQ (OSV)	equilibrium quality at OSV

**GREEK SYMBOLS**

$\rho_g$	gas density (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_l$	liquid density (kg/m <sup>3</sup> )
$\alpha$	void fraction
$\alpha_{osv}$	void fraction at onset of significant void
$\sigma$	surface tension (N/m)
$\mu_l$	viscosity of liquid (kg/ms)

**1. 서 론**

Subcool비등에서 보이드형성개시(Onset of Significant Void Formation: 이후 OSV로 표기)와 증기포 발생은 二相流流動의 열 전달에 중요한 영향을 미치는 因子로 알려지고 있으며 1,2,3,4,5) 또한 약 80 °C의 낮은 온도에서 작동하는 소용량의 자연대류 냉각형 원자로 1) 설계시 안정성과 효율을 고려할때 위의 두 因子는 매우 중대하게 작용한다.

Subcool 보이드에 대한 해석은 원자로의 개

발과 더불어 활발히 연구되고 있으나 적용압력 범위가 다르고 또한 실험조건이 다양하여 모든 구간에 적용될 수 있는 이론은 발표되고 있지 않으며 그중 많이 활용되고 있는 해석 모델들을 설명하면 다음과 같다.

Lehay<sup>6)</sup>는 높은 압력에 대한 subcool 비등 모델을 해석하는데 있어 기포 함유율의 증가가 Sahe and Zuber<sup>5)</sup>가 제시한 관계식으로 부터 결정되는 기포이탈시부터 시작된다고 가정하여 Zuber and Findlay<sup>7)</sup>에 의해 제시된 보이드율 관계식에서 상수  $C_0$ 가 1.1이 된다고 발표하였다. 液相과 氣相사이에서 미끄럼(slip)이 없다고 가정하여 OSV를 결정하는 방법을 제시한 Rouhani<sup>8)</sup>는 이어서 Zuber and Findlay가 제시한 관계식을 활용하여 증기포성장(vapour growth)에 대한 해석을 행하였다.<sup>2)</sup> OSV前에 傳熱面에 약간의 증기포가 형성된다고 가정하여 subcool 구역에서 보이드율을 설명하는 物理的인 모델을 제시한 Bowering<sup>3)</sup>은 OSV를 熱流束, 壓力 그리고 流速의 함수로 하여 실험적으로 구하였다. Lavy<sup>4)</sup>는 증기포 함유율을 Zuber and Findlay가 제시한 식으로 부터 구하여 강제대류 subcool비등에서 증기포이탈점과 보이드율 성장(voidefraction growth)을 해석하였다. 증기포발생점을 설명하는 모델이 Zuber 등<sup>5)</sup>에 의해서도 제시되었으며 또한 subcool 비등에서 보이드율을 해석한 Zuber 등<sup>9)</sup>은 가열면의 임의 부위에서 OSV는 流速이 느릴때는 流體의 熱的인 성질들이, 그리고 流速이 빠를 때는 流動의 動力學的조건들이 중요하게 작용한다고 추정하였다.

소용량 자연대류 냉각형 원자로란 최근 Canada에서 2-10MW급의 산업용 및 지역난방용, 실험용등의 용도로 개발한 소형 pool형 원자로로서 연료봉이 pool속에 잠겨 있어 이 연료봉 주위의 냉각을 약 80 °C정도의 저온에서 자

연대류만에 의해 이루어지게 하는 무인조정형으로 가장 안전한 소형 원자로로 평가되고 있다. (1,10,11)

소용량 자연대류 냉각형 원자로에서의 열전달 문제는 저온, 저압하에서 자연대류만에 의한 subcool비등 열전달 문제로 설계되었으므로 보이드올 및 증기포 발생은 이 문제를 해석하는데 가장 중요한 인자가 되며 또한 임계열유속(critical heat flux)을 결정하는데 큰 영향을 미친다.

따라서 본 연구에서는 소용량 자연대류 냉각형 원자로의 설계조건과 유사한 조건들 즉 낮은 온도, 낮은 유속과 낮은 압력에서 수직이중관내의 subcool비등에서 보이드올 및 증기포형성에 관한 문제를 실험적으로 규명하고 그 결과를 타 연구자들의 결과와 비교 검토하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험

### 2-1 실험장치

소용량 자연대류 냉각형 원자로의 설계조건과 동일한 조건들 즉 압력, 입구온도, 연료봉 길이 및 지름,流速등이 같고 또한 自然對流에 의한 냉각조건과 유사한 強制순환을 하는 폐순환 loop를 제작하여 여기에 test section을 장착, 관련 실험을 行하였다.

Fig.1은 流體의 순환계통을 나타내는 장치의 개념도이며 여기서 점선은 流體의 유동선을 표시한다. loop내의 유체순환은 원심펌프에 의해 유동되고, test section에 유입하는 流體의 온도는 loop에 설치된 예열기에 의해 조절된다. 장치의 압력은 저장탱크에 압력을 가함으로써 조정되며 순환회로내의 流體에 함유된 gas 제거는 loop에 설치된 수개의 gas 배출용 밸브를 열어주므로써 이루어진다. 流體의 유동은 test section 상류에 설치된 유속조절용 밸브의 개방도 조작에 의해 조절하였다.

Fig.2와 Fig.3에는 test section의

개념도와 사진을 표시하였다. test section의 主要部는 원자로의 연료봉에 해당하는 가열관과 주위의 流體를 流動시키는 공간으로 가열관 외부를 유리관으로 만들어 2중관 사이를 流體가 流動하게 하였다. 가열관은 원자로의 연료봉과 지름 및 길이가 같게 제작하였으며 재료는 넓은 온도범위에서 전기저항의 변화가 비교적 적은 Inconel 718 파이프를 사용하였다. 이 test section에 대한 제반 규격을 table 1에 기술했다.

전기적으로 가열하는데 필요한 전력은 64KVA

Table 1. Range of experimental operating condions

length of heater:	48 cm
inside diameter of annular:	13.1mm
outside diameter of annular:	22 mm
heat flux	: 29.7 ~ 118W/cm <sup>2</sup>
pressure	: 1.53 kg/cm <sup>2</sup> a
temperature	: 18 ~ 65 °C
velocity	: 0.03 ~ 0.5 m/s
mass velocity:	29 ~ 475 kg/s cm <sup>2</sup>

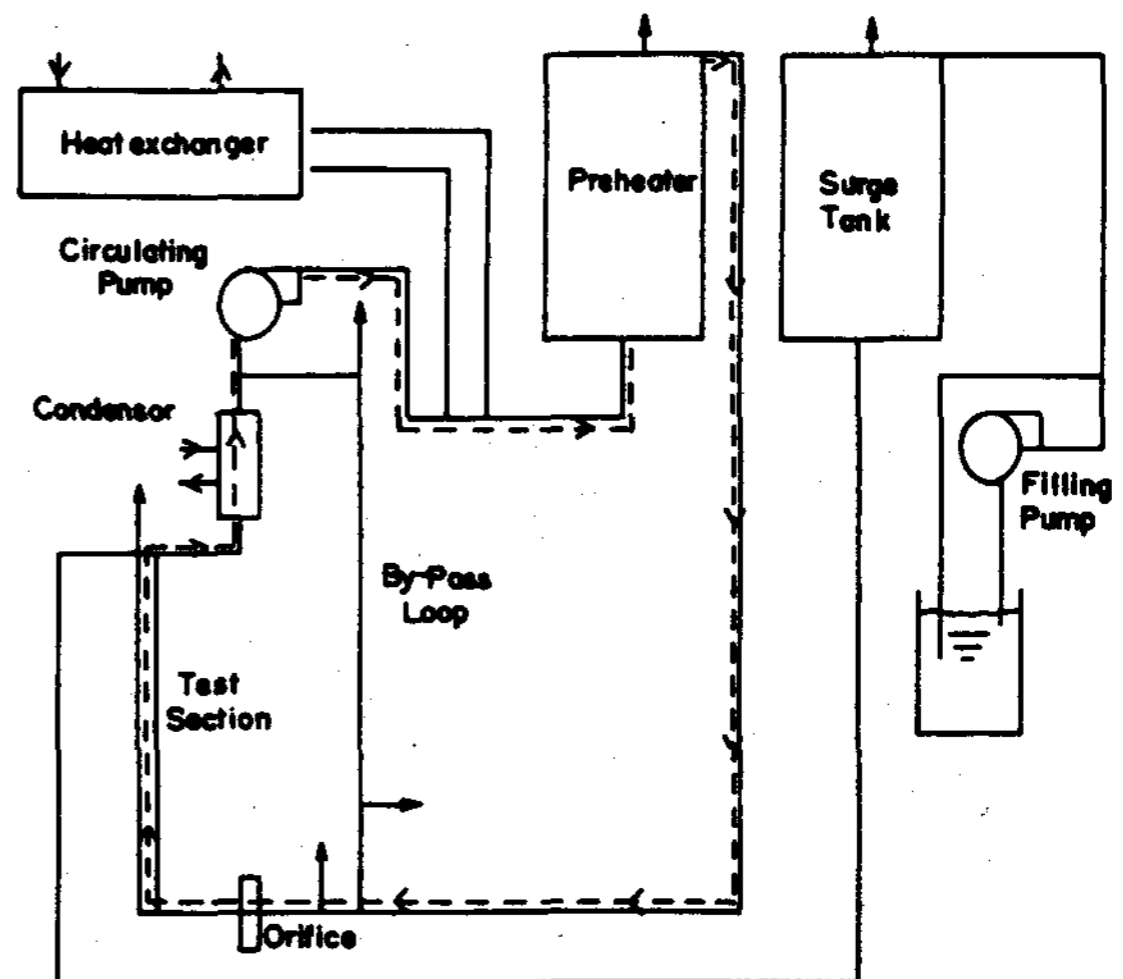


Fig.1 Schematic diagram of test loop

용량의 변압기를 사용, 공급하였으며, test-section 양단에 걸리는 전압은 0 ~ 32V 사이에서 변화시켰다.

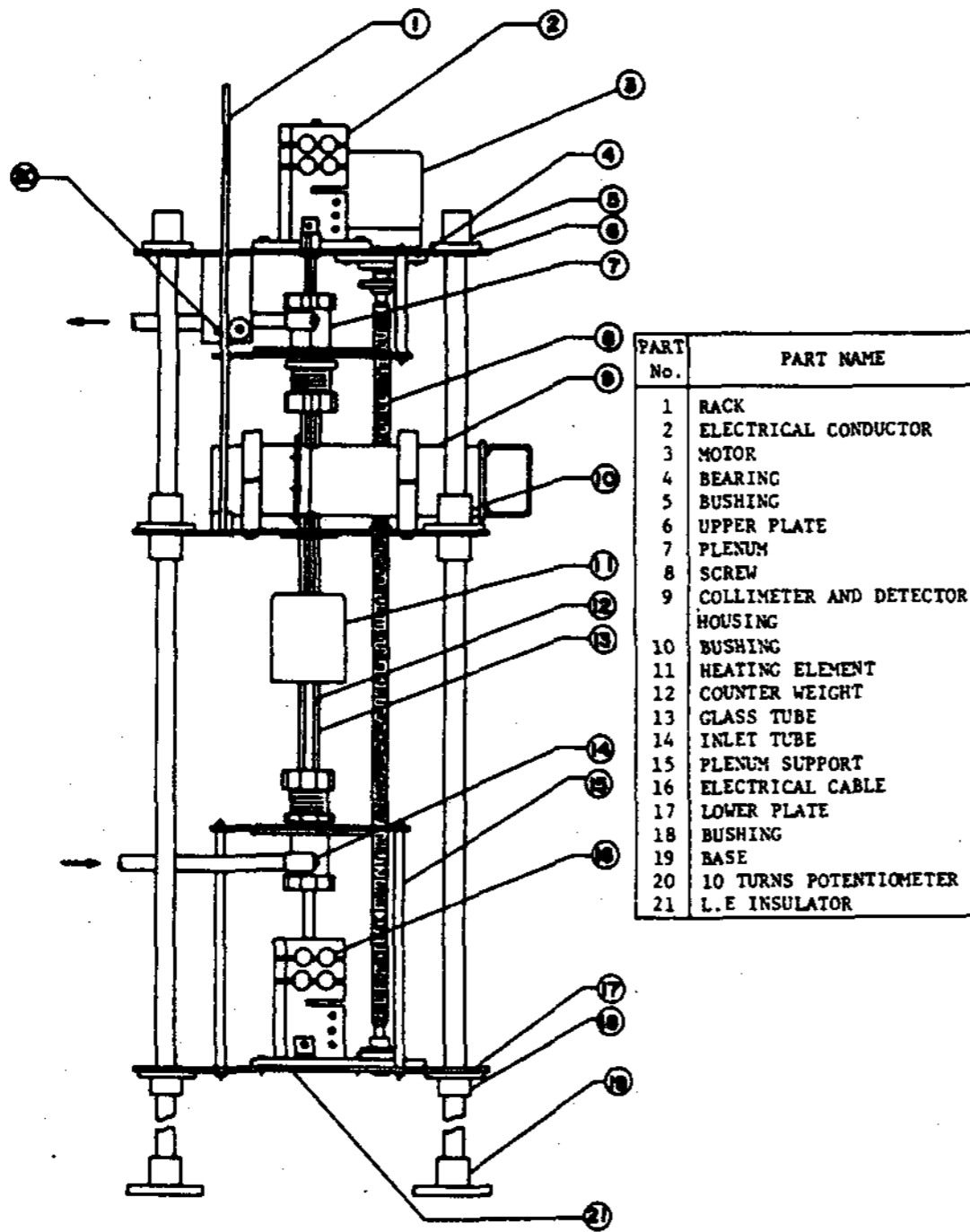


Fig.2 Schematic diagram of test section

2-2 실험 및 측정

실험을 하기 전에 loop내에 물을 가열 순환시켜 물속에 함유된 gas를 제거한후 물저장 탱크에 壓力을 가한다. loop에 장착된 예열기에서 온도를 조절하여 test section에 유입하는 물의 온도가 요구하는 온도가 되면 유속을 변화시키면서 실험을 시작한다. 실험은 가열기의 공급전력을 변화시킴에 따라 發生熱量을 변화시키며 각 지점에서 필요한 온도, 압력, 유속, 보이드율 등을 측정한다.

test section 입구와 출구에서의 물의 온도는 K형 열전대를 사용하여 측정하였다. 입구 온도 측정용 열전대는 관입구에 설치하였으나 출

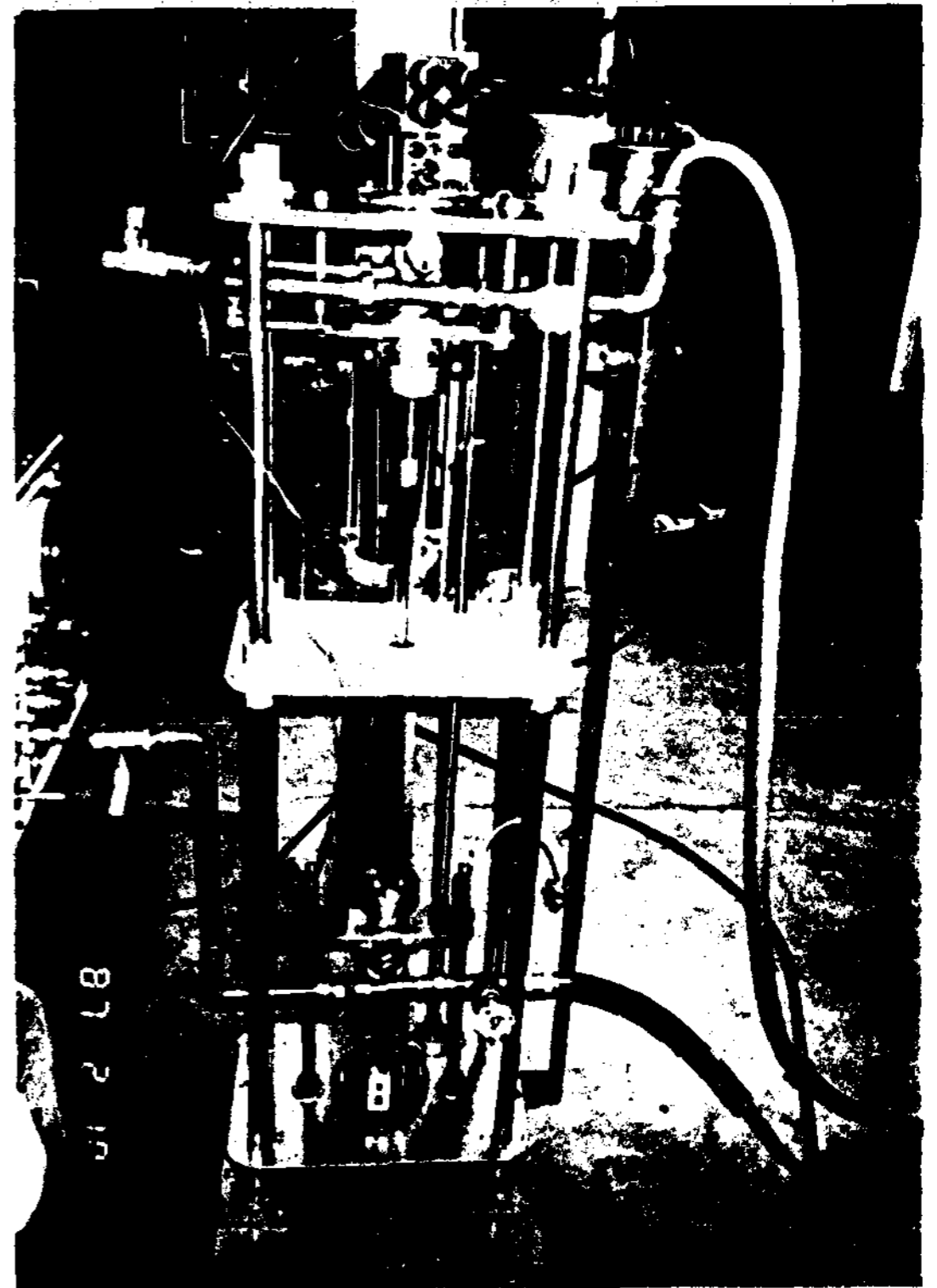


Fig.3 Photo. of test section

구온도 측정용 열전대는 관출구에서 30 cm 떨어진 하류에 설치하여 test section에서 발생한 기포가 소멸된후 流體의 온도가 감지되도록 하였다. 이들 열전대에서 감지된 온도는 1,000 배의 배율을 갖는 증폭기 (Analog-device AD521)로 보내 증폭시킨 후 data 처리 장치로 보내 처리하였다.

test section 내를 흐르는 流量의 측정은 流路에 orifice를 설치 여기서 발생한 차압을 적산 차압변화기 (Celesco p70)를 사용, 측정하여 다시 0-10Volts의 아나로그 신호로 변환 (Carrier demodulator model CD-10DC사용)시켜 data 처리장치로 보냈으며 실험이 행해진 유량에 대응하는 test section 내에서의 유속은 0.03~0.5m/sec의 범위였다.

test section 내의 압력은 test section 출구에 설치된 압력계(Bourdon식)를 사용하여 측정하고 또한 test section 각 부위에서의 기포함유율의 측정은 gamma densitometer를 사용하여 행하였다. gamma densitometer의 측정원리는 gamma ray가 물을 지날때보다 증기를 지날때 더 잘 통과한다는 것이다. Densitometer는 가열관을 측방향으로 상하 이동할 수 있는 좌대위에 설치되어 있어 필요한 위치의 기포함유율을 측정할 수 있게 하였으며 여기에 사용한 방사선 동위원소는 10 millicurie의 Cobalt 57이다. test section을 통과하여 복사된 동위원소는 반대편에 있는 Photomultiplier tube에서 감지하며 복사량에 해당하는 발생신호는 증폭기(ORTEC 452 spectroscopy amplifier)와 discriminator(ORTEC 450A single channel analyser) 및 counter(ORTEC 934D ratemeter)를 통과하여 analog신호로 전환한후 data처리장치로 보내 분석하였다.

각 실험조건들에 대하여 아래와 같은 실험순서 대로 실험이 행하여졌다.

1) loop내에 압력을 가하고 공기밸브를 열어 유체순환회로내의 gas를 제거하고 순환펌프를 작동시켜 流體를 순환시킨다.

2) 기포함유율을 결정하는데 있어 steam일 경우 최대치 100%, 물일 경우 최소 0%로 하기 위하여 test section을 流路로 부터 차단시켜 물을 빼고 측정된 값을 최대치 100% ( $N_1$ )로 잡는다. 이때 steam과 공기는 같은 투과율로 gamma ray가 통과한다고 가정하였다. 다시 test section에 물을 통과시키고 流路를 형성하여 이때 측정된 기포함유율을 0% ( $N_0$ )로 잡았다. 각 경우의 통계오차를 줄이기 위해 4,000회의 측정을 한후 평균값을 취하였다.

임의의 기포함유율( $N_\alpha$ )는 이 두값 사이에서 선형적으로 변하는 것으로 가정하였다.

따라서 기포체적함유율  $\alpha$ 는 12)

$$\alpha = \frac{N_\alpha - N_0}{N_1 - N_0} \dots\dots\dots(1)$$

3) loop내에 流體를 순환시키고 가열봉의 양단에 연결된 전선에 전류를 통하게 하여 加熱을 시작한다.

4) 입구온도를 예열기에 설치된 온도조절기를 사용하여 실험온도에 맞춘다.

각 실험조건을 위와같이 행하여 아래와 같은 인자들을 측정 또는 산정한다.

1) 질량유량: test section을 지나는 물의 질량유량(kg/s)

2) 유속: 포화온도에서의 액체의 밀도를 기준으로 test section을 통과하는 물의 속도(m/s)

3) 입·출구온도: test section 입구에서 물의 주류온도(bulk temperature) 및 출구에서 30 cm 떨어진 하류에서 측정된 물의 주류온도(°C)

4)  $T_{outcal}$  : 가열관 전체에서 방출된 열량을 근거로 하여 계산한 출구온도(°C)

$$\text{즉, } T_{outcal} = \frac{q/A R_H L}{m C_p} + T_{in} \dots\dots\dots(2)$$

5) 기포함유율: densitometer의 위치에서 측정된 증기초의 체적함유율(%)

6) 평형질(equilibrium quality; XEQ, densitometer의 위치에서 계산된 질(%))

$$XEQ = \frac{C_p(T_b - T_{sat})}{h_{fg}} \dots\dots\dots(3)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1 보이드율의 변화 및 보이드성장모델들에 대한 비교

OSV 以前의 熱流束 및 流速下에서 보이드율의 시간에 따른 변화를 고찰하기 위하여 각 실험 조건들에 대한 熱流束과 流速을 一定하게 한 상태에서 약 10시간동안 보이드율을 측정 한 결과 그 경향은 모든 경우가 거의 동일하게 나타났으며 그 한 경우를 Fig.4에 보여주었다. OSV 以前에서는 보이드율은 거의 변화하지 않고 약 5~8% 이내에서 일정한 값을 나타낸다.

이러한 경향은 과냉도의 변화에 따른 보이드율의 변화를 보여주는 Fig.5에서도 유사하게 나타난다. 즉, 평형질의 값이 OSV에 도달하기까지는 보이드율은 5~8%의 범위에서 거의 변화하지 않으나 OSV에 해당하는  $XEQ(OSV) = -1.50$  부터는 보이드율은 급히 증가하기 시작한다. 따라서 OSV 이전에는 비등과 응축사이에 평형상태가 유지되는 것이 예측되며 보이드율관계식에는 응축효과가 포함되어야 할 것으로 사료된다. 이러한 이론은 Lahey<sup>6)</sup>에 의해서도 제시되었으나 실험적인 연구에만 적용했을뿐 해석적인 방법에서는 명확히 하지 않았다.

一定한 熱流束下에서 流量의 변화에 따른 낮은 流速범위에서의 보이드율의 변화가 Fig.6에 주어졌다. OSV에 대한 천이 유속으로 0.07m/s가 측정되었으며 OSV 이전에는 보이드율이 5~8%의 값을 가지나 OSV에 도달한 후 즉 流速이 0.07m/s보다 적으면 보이드율의 증가는 현저하게 커진다. 이러한 현상은 모든 열유속에 OSV가 시작되는 流速이 약간씩 相異할뿐 거의 같게 나타났다.

Fig.7에는 流速의 변화에 따른 과냉도의 변화를 알아보기 위하여 종축에 流速, 횡축에는 과냉도를 포함하는 평형질(equilibrium quality)을 나타낸 것으로 一定熱流束下에서 subcool 溫度差는 流速에 대해 거의 직선적으로 변화하고 있음을 보여준다.

본 실험결과와 이전에 연구자들에 의해 발표된 결과를 비교하기 위하여 Fig.8~Fig.10

에 각각의 실험조건들에 대한 결과들을 보여주었다. 또한 Table 2에 각 연구자들의 실험조건들을 표기하였다. 비교결과로는 Lahey의 모델이 몇개의 실험조건에서의 결과들과 잘 일치하고 있으며 모든 실험범위에 대하여 만족하는 관계식은 없었다.

### 3-2 평형 모델

평형모델은 실험결과에 근거를 둔 것이다. OSV가 시작되기 전의 보이드율이 5~8%에서 거의 일정한 값을 갖는 것은 정미 증기포의

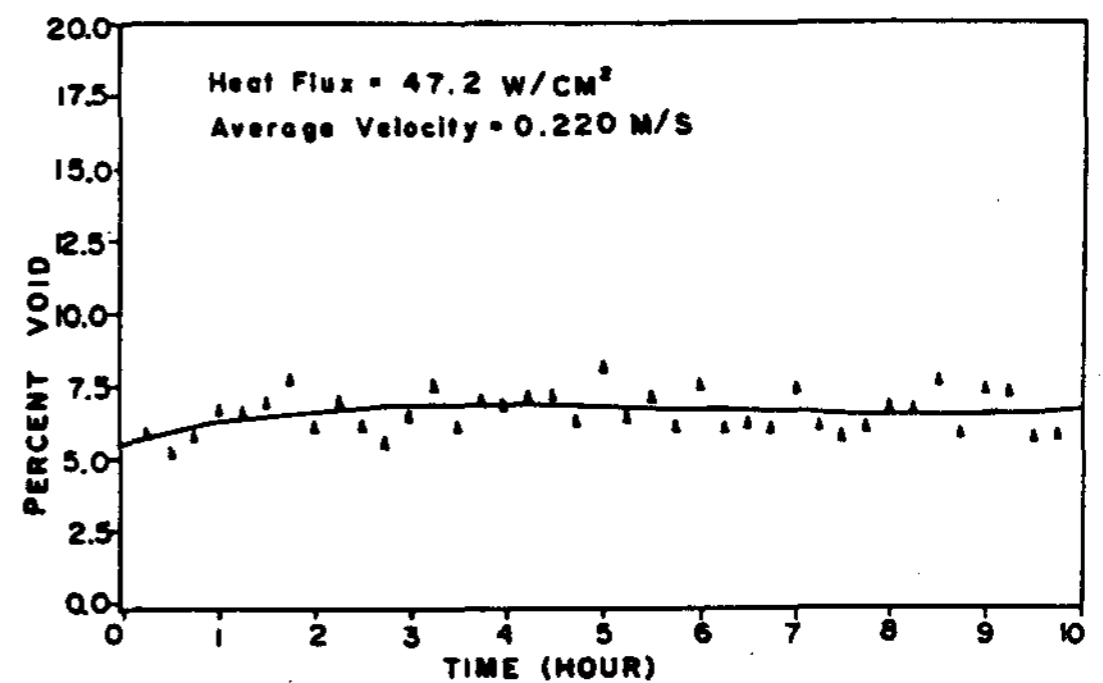


Fig.4 Void growth experiment

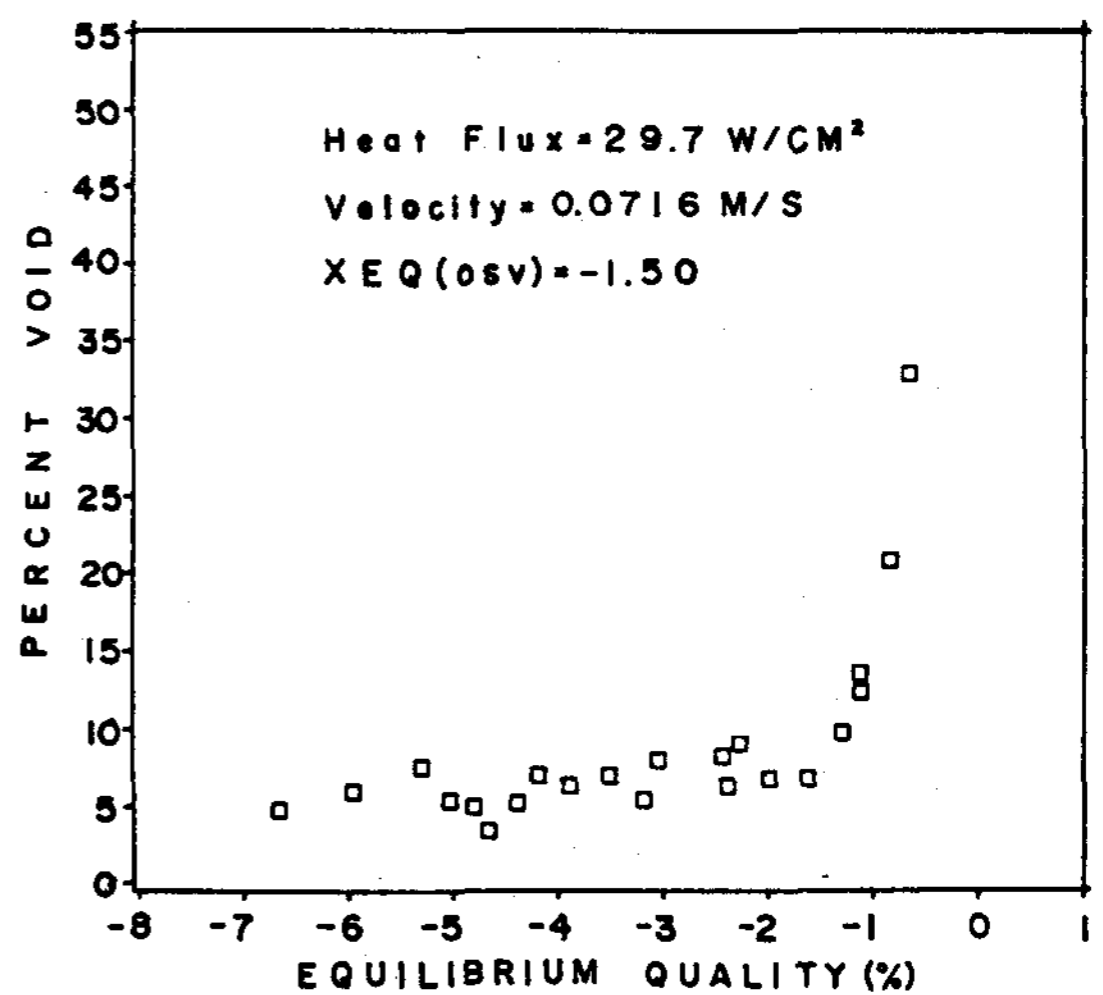


Fig.5 Low void region prior to OSV

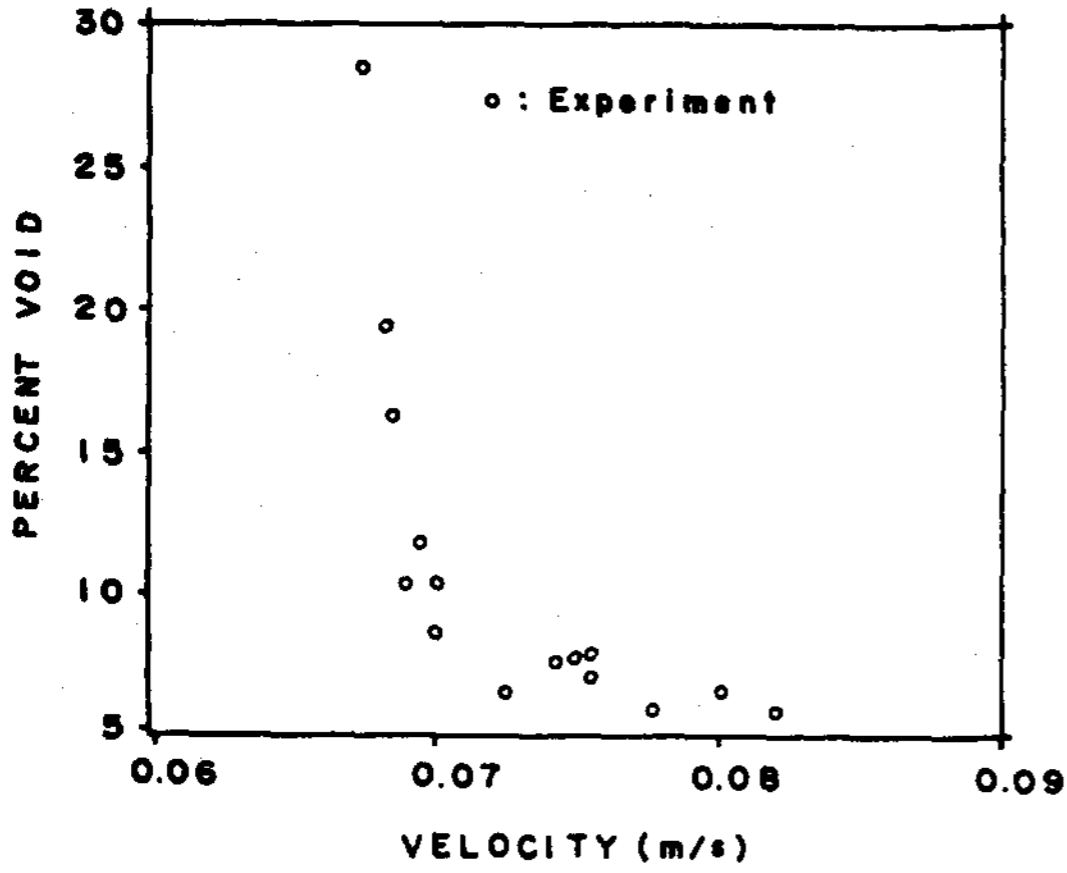


Fig. 6 Prediction of void growth with the velocity; heat flux=29.7 w/cm<sup>2</sup>

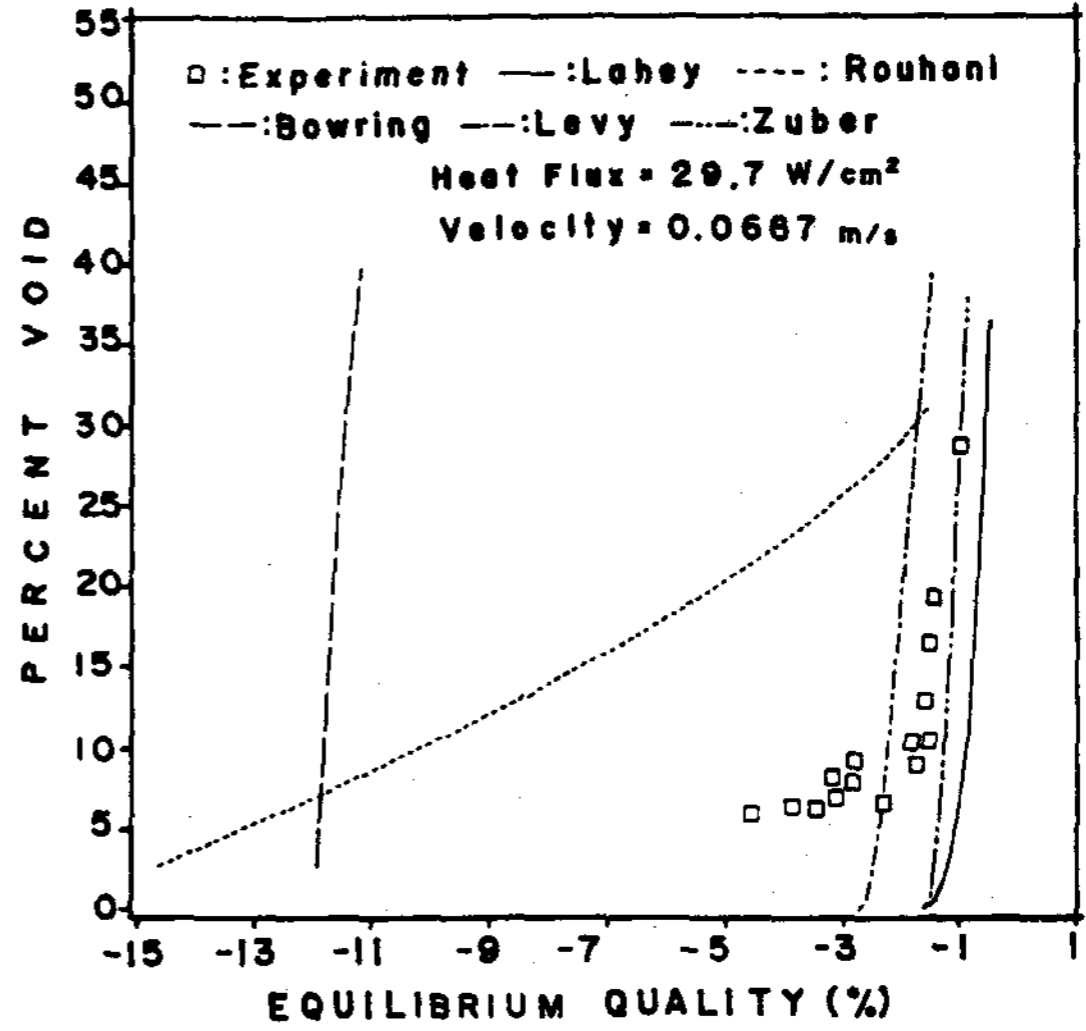


Fig. 8 Comparison of void growth models

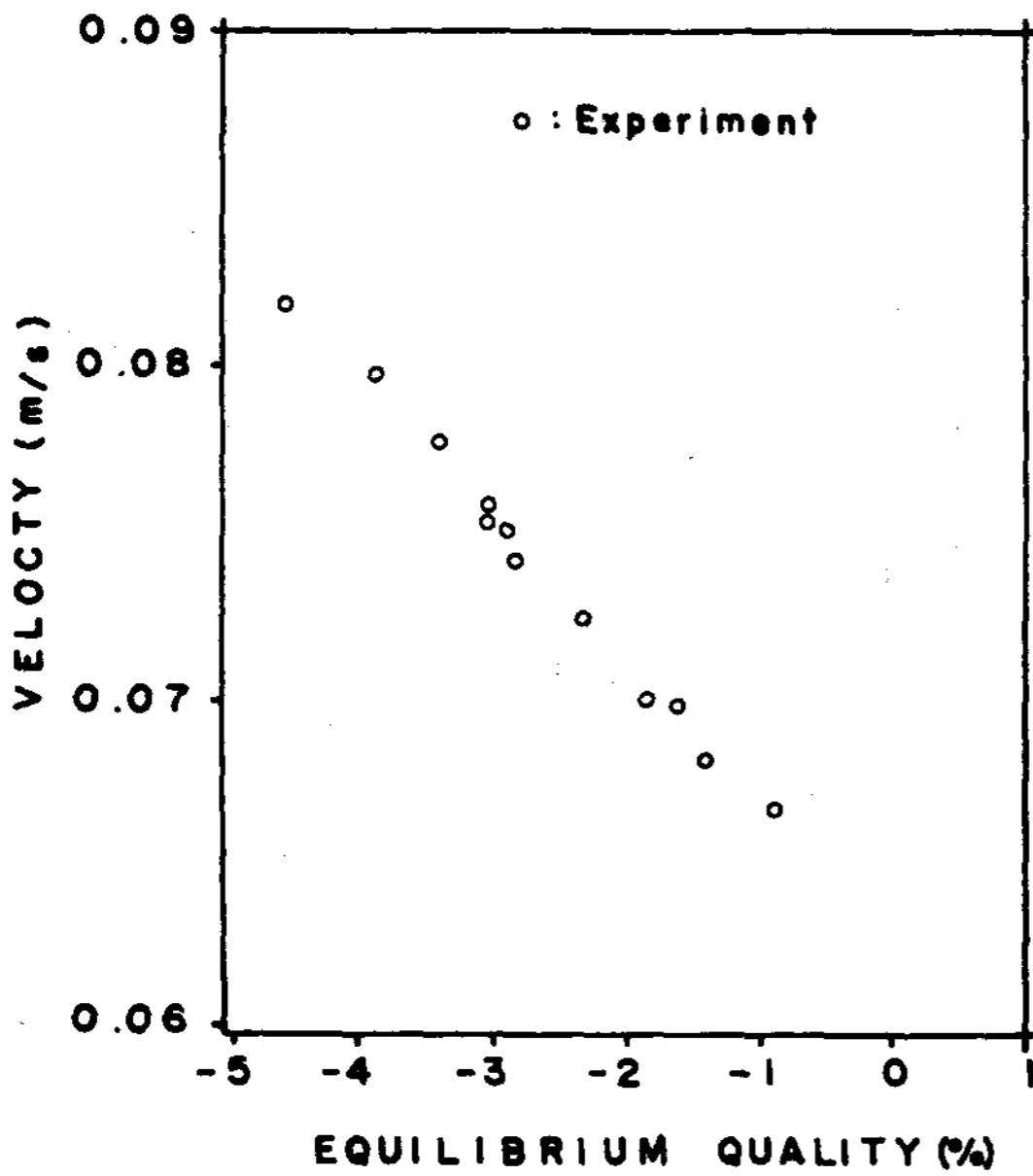


Fig. 7 Velocity vs equilibrium quality at low velocity; heat flux=29.7 w/cm<sup>2</sup>

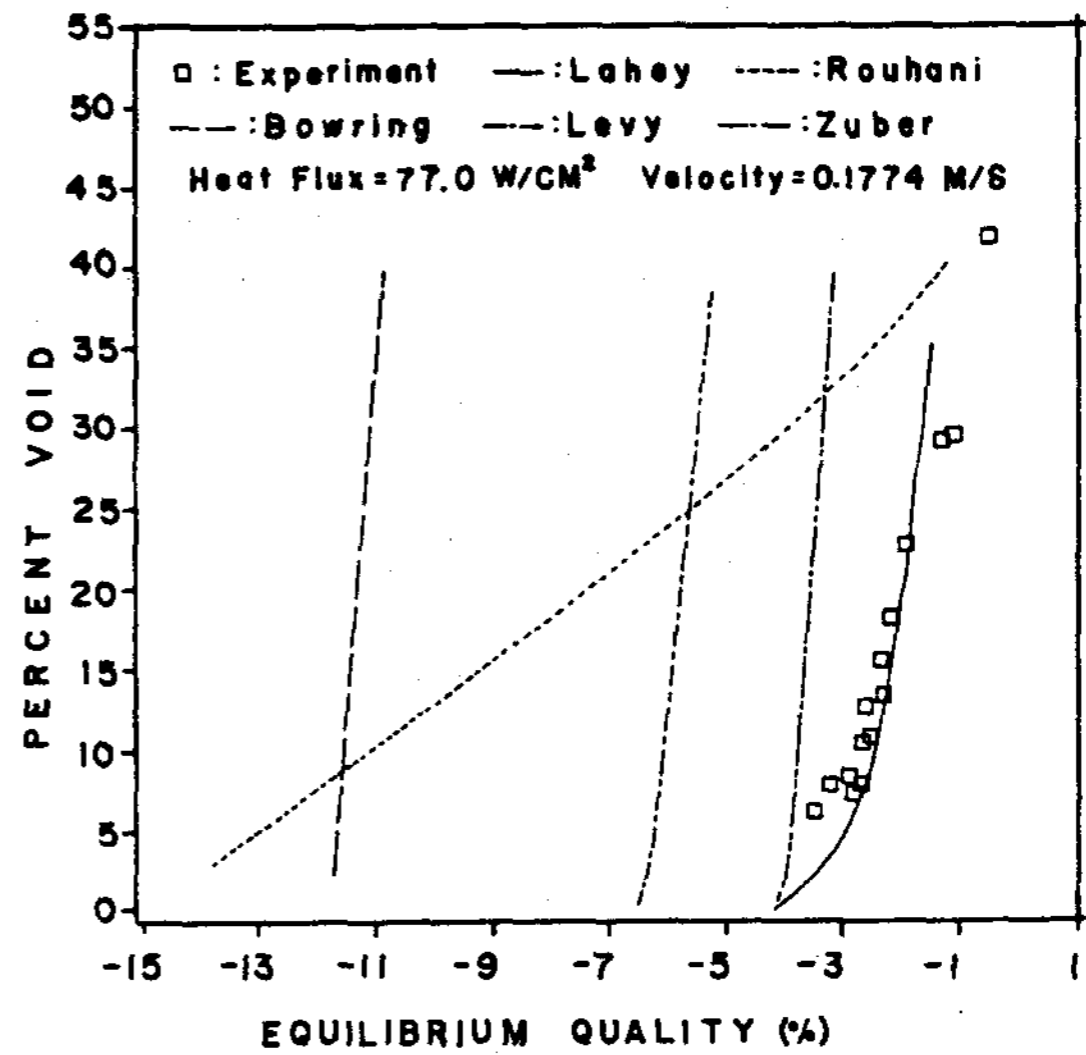


Fig. 9 Comparison of void growth models

생성이 거의 없다는 것을 의미한다. 이것은 증발과 응축 사이에 평형상태를 이룬다고 가정할 수 있다.

Rouhani<sup>8)</sup>는 증발과 응축이 따로따로 일어난다고 가정하여 보이드율이 거의 변화하지

않는 구역에 대한 응축계수를 구하고 이를 보이드 성장구역에 적용하였다.

Subcool 액체에서의 증기포의 응축은 발생 증기와 액체주류 사이의 熱傳達에서 큰 비중을 차지한다.

전열면과 액체사이의 열평형방정식은,

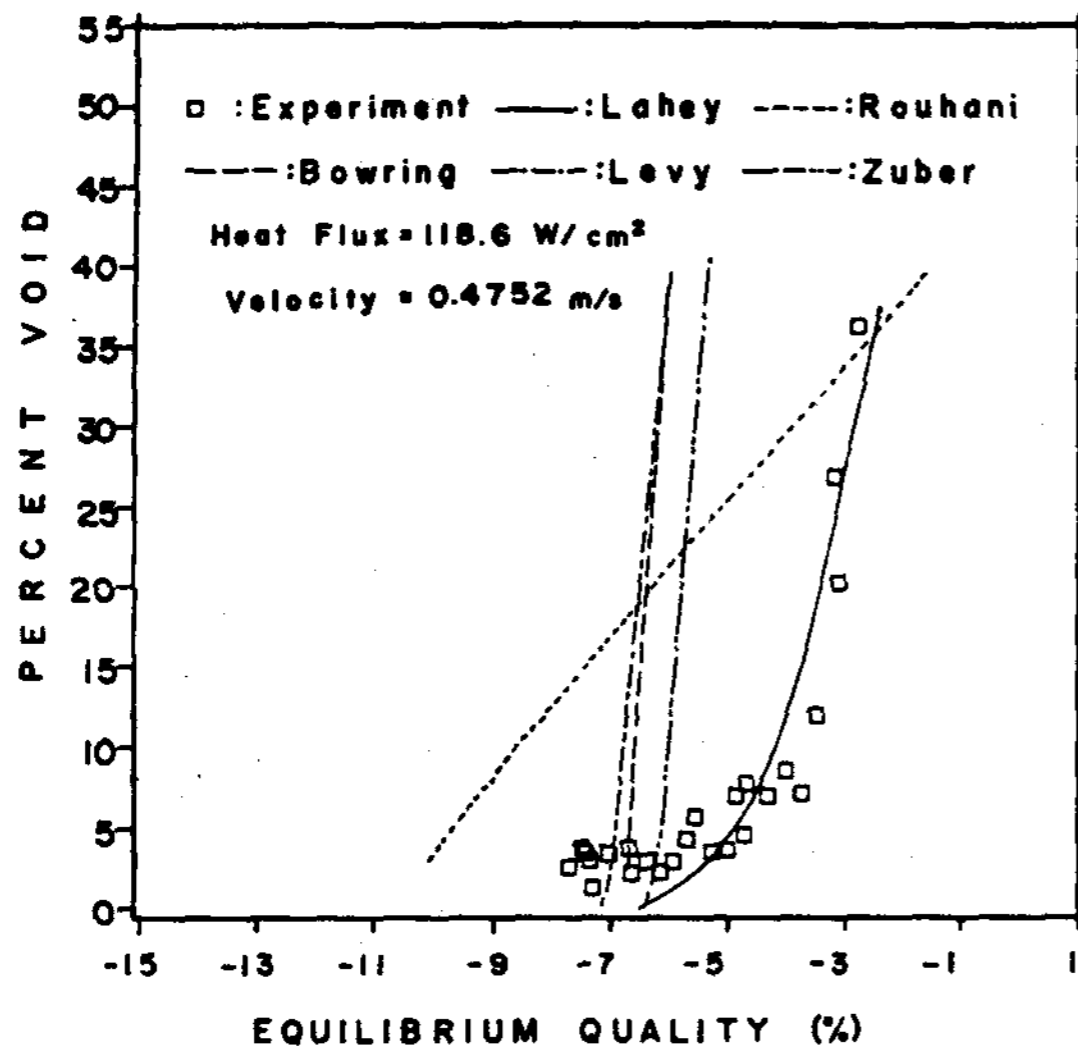


Fig.10 Comparison of void growth models

$$\frac{q}{A} = h\Delta T \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_{osv}}\right) + m_s h_{fg} + \frac{m_s}{\rho_g} C_p \rho_l \Delta T_b \dots\dots\dots(4)$$

여기서

첫째項은 단상(單相)열전달 효과를 第2項은 증기발생에 의한 熱傳達量을 第3項은 이탈기포 체적에 대신 채워지는 물을 가열하는 열량을 표시한다.

전열면(test section)의 단위길이, 단위 시간당 증기발생에 요하는 열량은

$$Q_b(Z) = m_s h_{fg} P_H \dots\dots\dots(5)$$

(4) 식의  $m_s$  에 대해 (5) 식을 代入하면

$$Q_b(Z) = \left\{ \frac{(q/A - h\Delta T(1 - \frac{\alpha}{\alpha_{osv}}))}{\rho_g h_{fg} + C_p \rho_l \Delta T_b} \right\} \rho_g h_{fg} P_H \dots\dots\dots(6)$$

Table 2 Range of applicability of void growth models considered from the literature

model	geometry	pressure (bar)	heat flux (w/cm <sup>2</sup> )**2)	mass velocity (kg/S m <sup>2</sup> )**2)
This Study	annular	1.4	29.7 - 118.0	29 - 475
Lahey (6)	annular	19 - 50	60 - 120	130 - 1450
Rouhani (2,8)	annular, rectangular channels, rod clusters	19 - 138	18 - 120	130 - 9080
Bowring (3)	all	1 - 140	0 - 200	0 - 200cm/s
Levy (4)	rectangular channels, annular	8 - 136	21 - 110	530 - 1440
Zuber et al (5,9)	rectangular channels, annular	1 - 49	2 - 121	400 - 1050



전열면에서 단위길이, 단위시간당 증기포의 응축에 의해 subcool 액체로 전달되는 熱量은

$$Q_c(Z) = K_c \Delta T_b \dots\dots\dots(7)$$

여기서  $K_c$ 는 응축계수로 壓力이 19bar보다 클때 Rouhani<sup>2)</sup>가 제시한 값은

$$K_c = 30 \frac{k_l}{P_r} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^2 A^{2/3} \alpha^{2/3} \frac{R_e}{N_q^{0.5}} \dots\dots\dots(8)$$

여기서

$$N_q = \frac{q/A \mu_l}{h_{fg}(\rho_l - \rho_g)\sigma} \dots\dots\dots(9)$$

본 연구에 이 가정을 적용하기 위하여서는 OSV 이전의 보이드율이 거의 변화하지 않는 구역에 대하여 적용된다.

증발과 응축 사이에 평형조건을 적용하면

$$Q_b(Z) = Q_c(Z), \quad \alpha < \alpha_{osv} \dots\dots\dots(10)$$

여기서 응축계수  $K_c$ 를 구하면

$$K_c = \left\{ \frac{q/A - h \Delta T (1 - \frac{\alpha}{\alpha_{osv}})}{\Delta T_b (\rho_g h_{fg} + C_p \rho_l \Delta T_b)} \right\} \rho_g h_{fg} P_H \dots\dots\dots(11)$$

이와 같이 구해진 응축계수를 도입하여 본 실험결과에 적용하면 Fig.11 ~ 14에 그려진 결과와 같다.

이 모델들은 본 실험범위에서 대략적으로 0.07 ~ 0.18m/s의 낮은 속도에서는보이드율을 설명하는데 잘 일치하나(Fig.11, 12) 빠른 속도(> 0.18m/s)에서는 그 결과가 실험점과 다른 값을 갖는다.(Fig.13, 14)

빠른 流速에서는 (>0.18 m/s) Winter-ton<sup>13)</sup>에 의해 밝혀진 바와 같이 속도의 증가에 따라 이탈기포의 크기는 작아진다. 기포의 크기가 적어지고 또한 합체가 거의 이루어지지 않으므로 응축율은 높을것이 예측되며 실험값과 편차가 크게 나타난다.

高速에서의 높은 응축율은 낮은 보이드율의 구역에서, 즉 보이드율의 변화가 거의 없는구역에 대해 유도된 응축계수  $k_c$ 를 적용하여 구한보이드율과는 많은 편차를 나타내고 있다.

또한, OSV 이후에는 증기포의 발생이 활발해져서 Fig.15에 나타난 바와 같이 기포가 활발히 생성되는 하류로 갈수록 증기포 발생에 요하

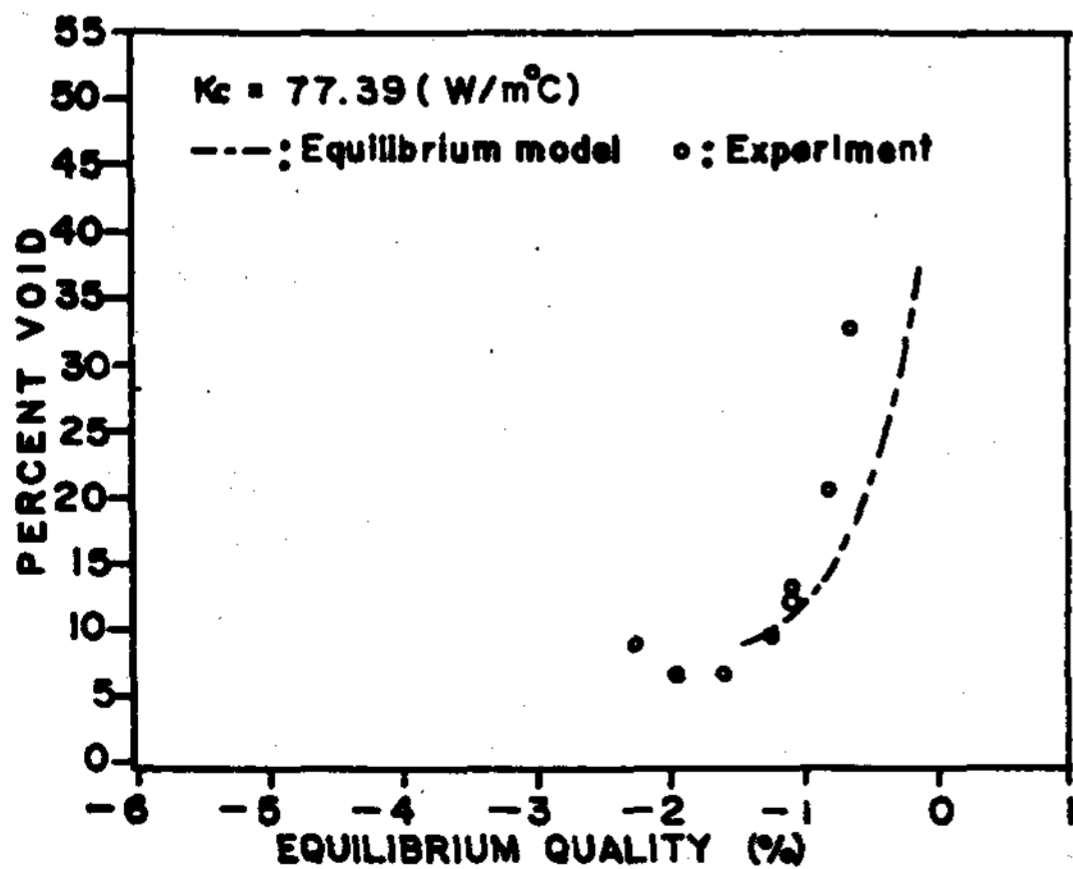


Fig.11 Prediction of void growth, with equilibrium model, of experiment: heat flux=29.7 W/cm<sup>2</sup>, velocity=0.0691m/s.

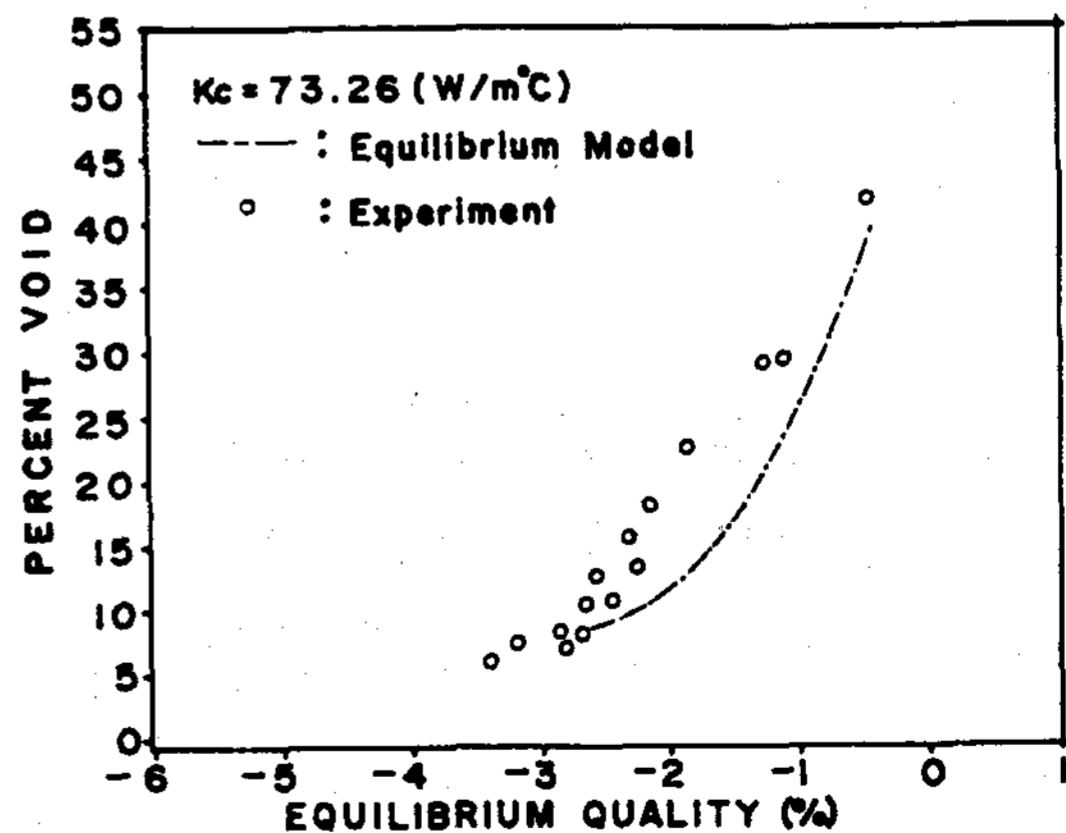


Fig.12 Prediction of void growth, with equilibrium model, of experiment: heat flux=77.0 W/cm<sup>2</sup>, velocity=0.177m/s

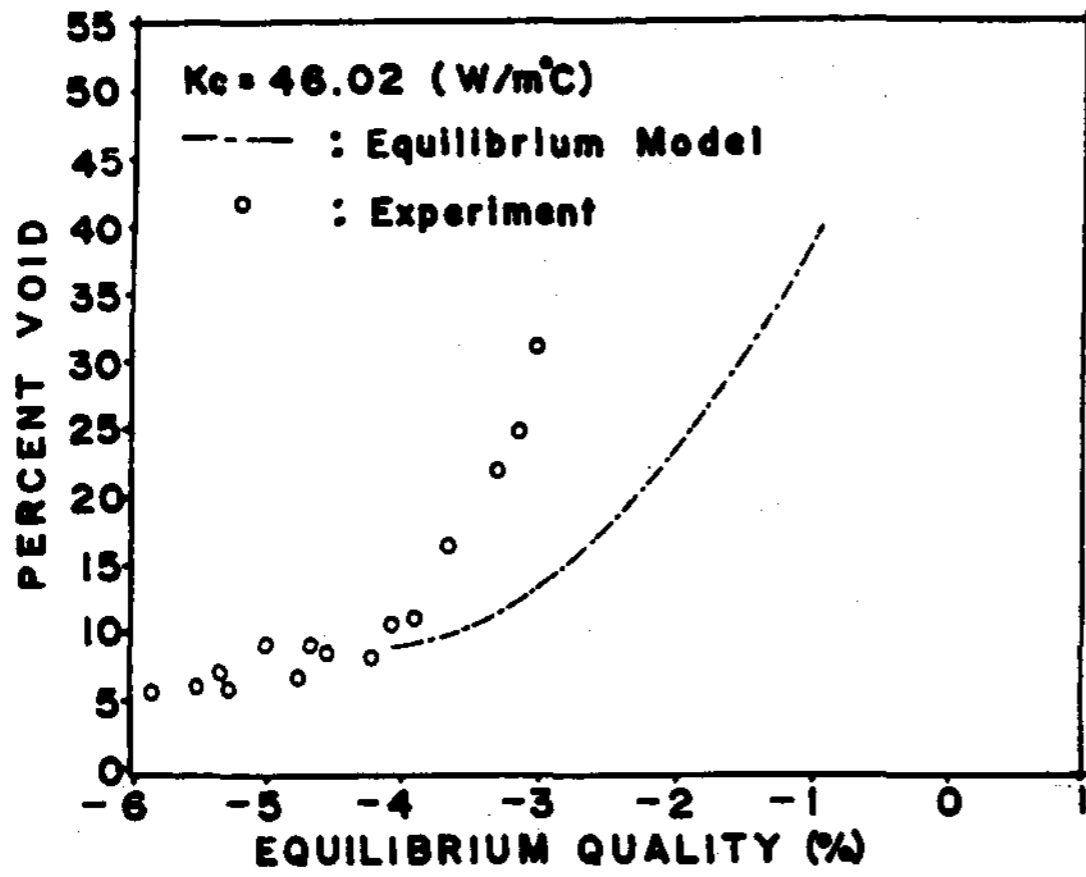


Fig. 13 Prediction of void growth, with equilibrium model, of experiment: heat flux=118.6 W/cm<sup>2</sup>, velocity=0.372m/s

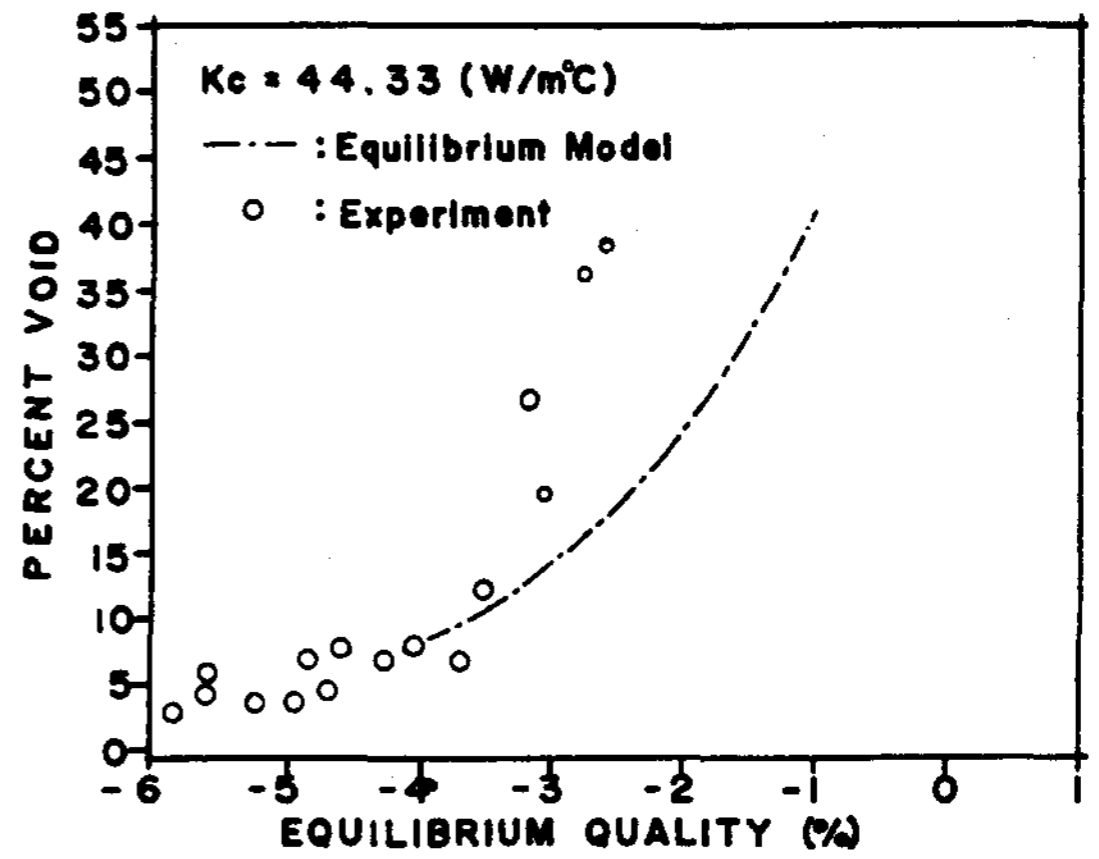


Fig. 14 Prediction of void growth, with equilibrium model, of experiment: heat flux=118.6 W/cm<sup>2</sup>, velocity=0.4752m/s

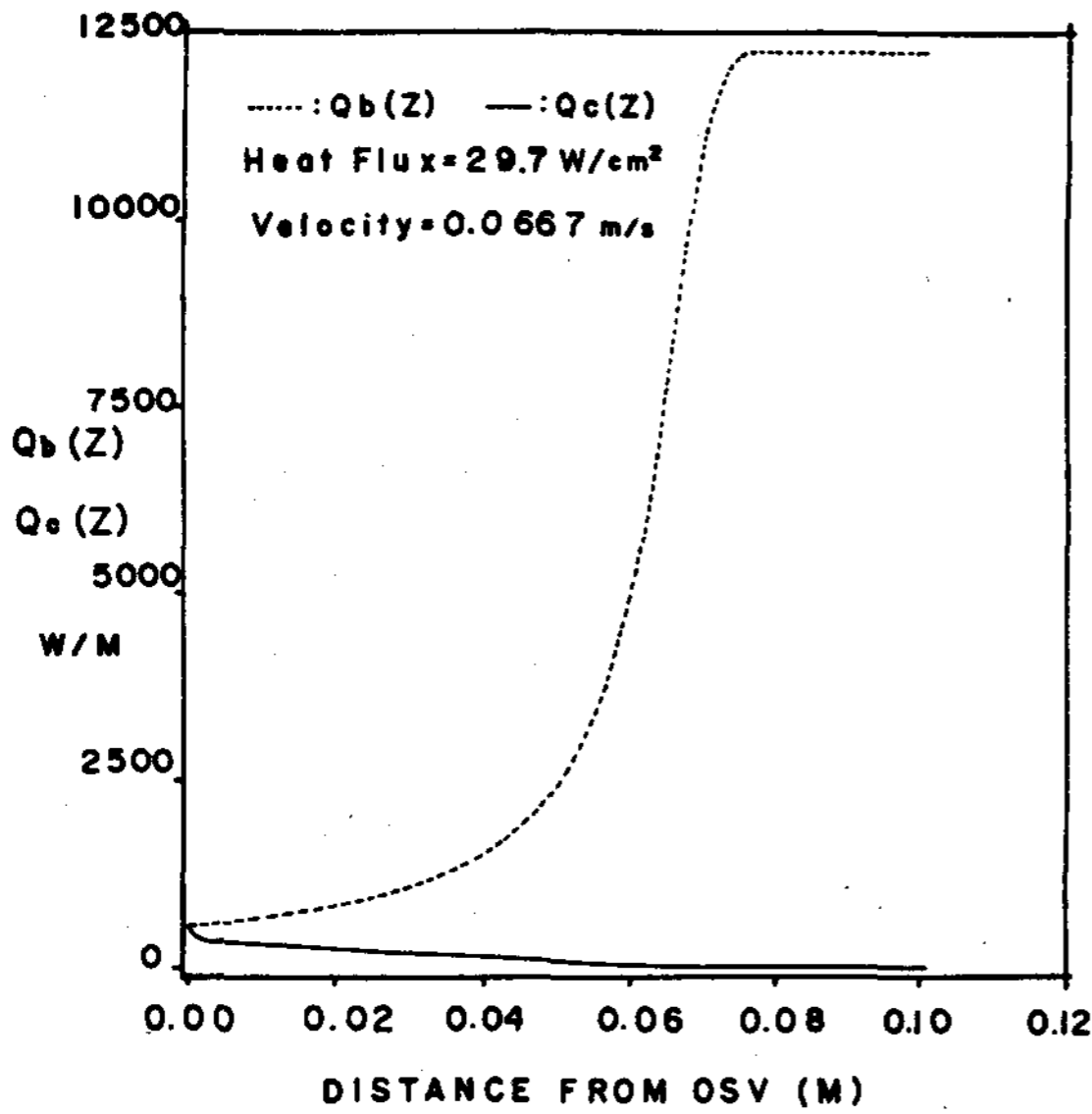


Fig. 15 Variation of  $Q_b(Z)$  and  $Q_c(Z)$  after OSV

는 熱量  $Q_b(Z)$ 는 커지는 반면 증기포의 응축에 의해 액체로 전달되는 熱量은 적은 값에서 거의 변화가 없다.

따라서 OSV 이후에는 응축효과를 고려하지 않

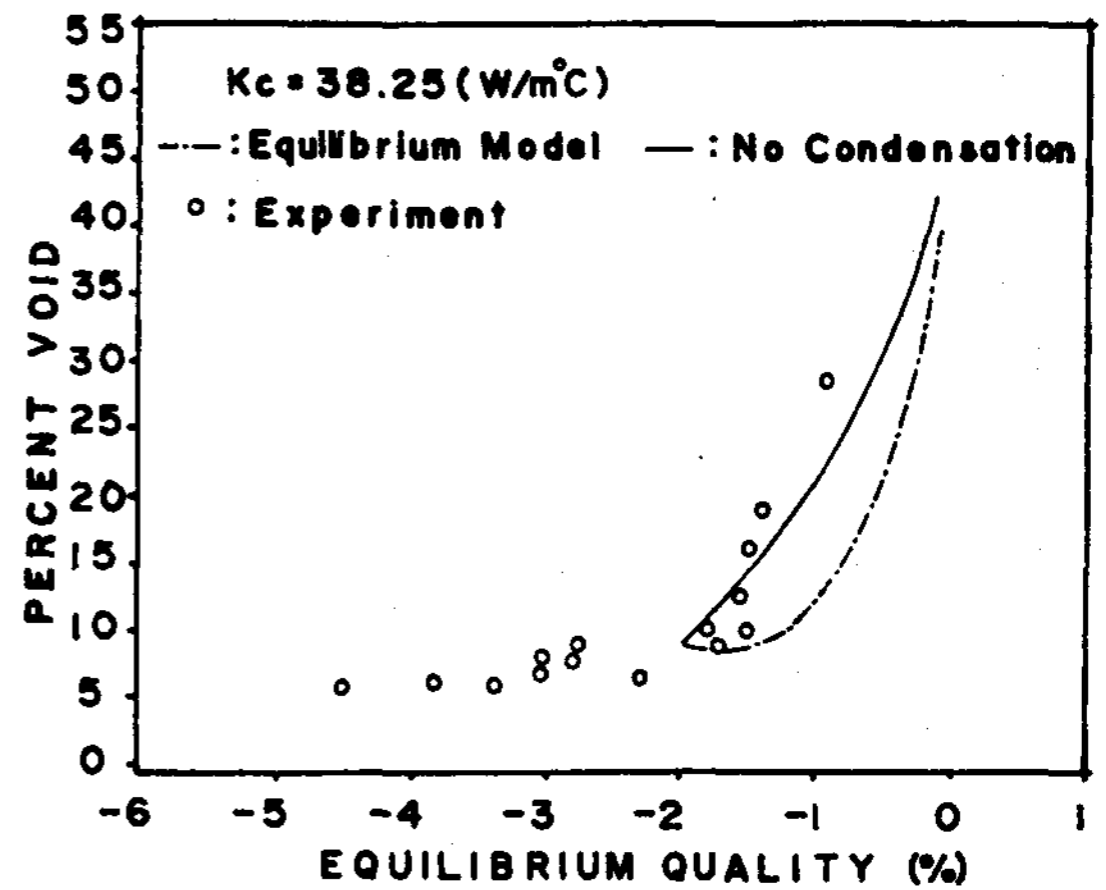


Fig. 16 Prediction of void growth, with the equilibrium model and a model assuming no condensation, of experiment: heat flux=29.7W/cm<sup>2</sup>, velocity=0.0660m/s

은 관계식이 실험 값과 더 잘 일치한다. 이러한 결과를 Fig. 16~18에 보여주었다.

Fig. 16~18에서 응축계수를 고려한 점선이 응축효과를 고려하지 않았을 때의 실선보다 실험

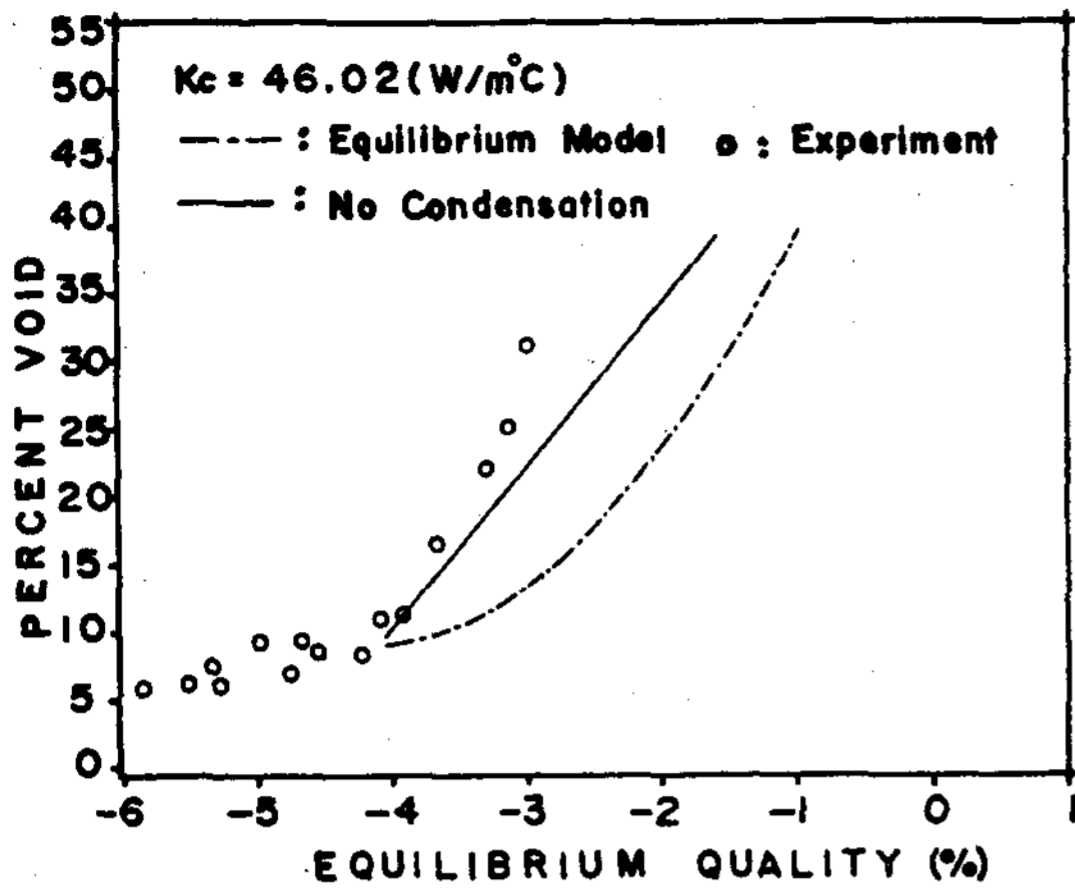


Fig.17 Prediction of void growth, with the equilibrium model and a model assuming no condensation, of experiment: heat flux=118.6w/cm<sup>2</sup>, velocity=0.3726m/s

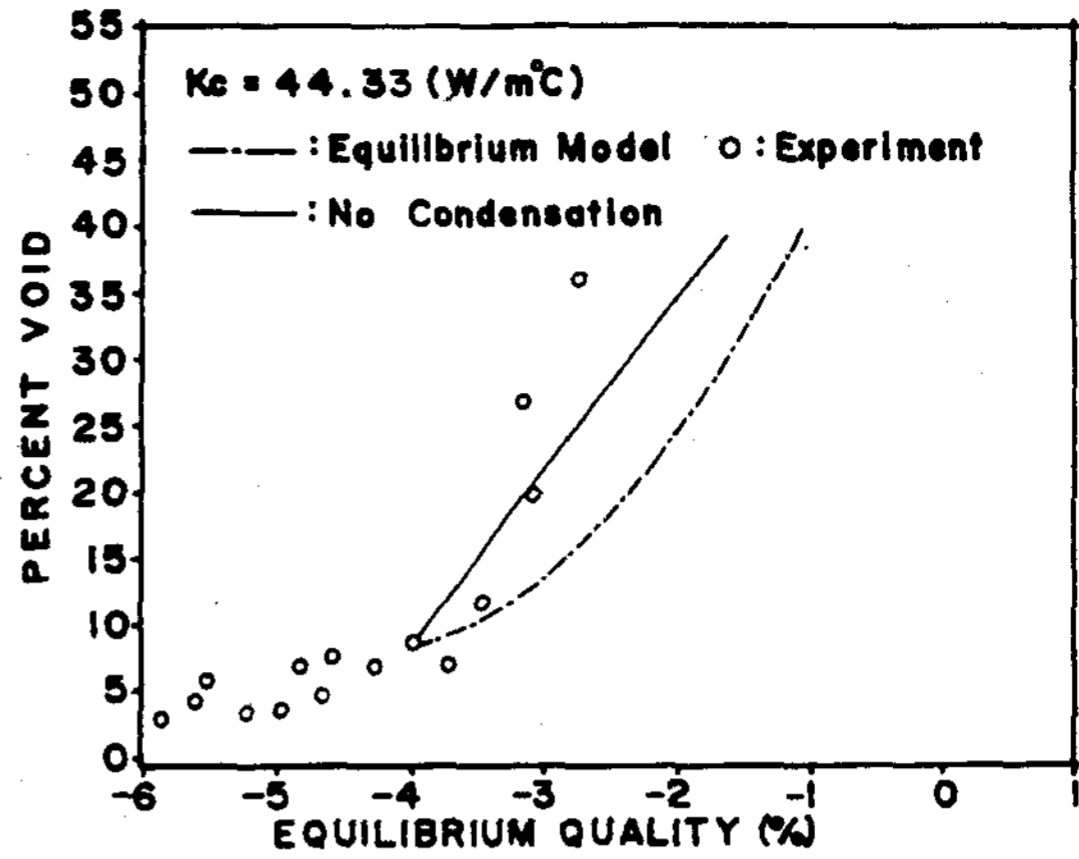


Fig.18 Prediction of void growth, with the equilibrium model and a model assuming no condensation, of experiment: heat flux=118.6W/cm<sup>2</sup>, velocity=0.4752m/s

점과 더 큰 차이를 보이고 있다.

### 3. 결 론

수직상승환상관에서 낮은 壓力(1.53kg/cm<sup>2</sup>a)과 낮은 流速(0.03~0.5m/s)의 조건에서 물에 대한 보이드율에 관한 실험을 행하여 이전의 연구자들의 결과와 비교하고 또 실험결과를 분석 검토한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

5개의 이전의 연구자들에 의한 subcool비 등에서 보이드율에 대한 해석 모델이 본 실험결과와 비교되었으나 전체 실험범위에서 일치하는 관계식은 없었다. 그러나 Rouhani가 제시한 응축과 비등을 분리하여 보이드율을 해석하는 방식은 가장 접근되는 방법으로 나타났다.

보이드율이 OSV에 도달하기 전에는 약 5~8%선에서 거의 변화가 없었다.

OSV이전의 낮은 보이드율을 갖는구역에서 응축과 비등이 평형을 이루는 이론을 근거로 한 보이드율 해석방법이 제시되었다. 이는 流速이 0.07m/s부터 0.15m/s의 범위에서 잘 일치하였다.

### REFERENCES

1. Hilborn J.W. and R.E. Kay, Up-rating The SLOWPOKE Reactor. Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario, April 1977.
2. Rouhani S.Z. and E. Axelsson, Calculation of Void Volume Fraction in the Subcooled and Quality Boiling Regions, Int. J. Heat and Mass Transfer, vol. 13, 1970.
3. Bowring R.W., Physical Model Based on Bubble Detachment and Calculations of Steam Voidage in Subcooled Region of a Heated Channel. HPR 10, 1962.
4. Levy S., Forced Convection Subcooled Boiling Prediction of Vapor Volumetric Fraction, Inst. J. Heat Mass Transfer Vol.10 1967.
5. Zuber N. and P. Saha, Point of Net Vapor Generation and Vapor Void Fraction in

- Subcooled Boiling. Georgia Institute of Technology, School of Mechanical Engineering, Atlanta, Georgia 1974.
6. Lahey R.T. Jr., A Mechanistic Subcooled Boiling Model. Sixth International Heat Transfer Conference, Toronto, Canada Vol.1 1978.
  7. Zuber N. and J.A. Findlay, Average Volumetric Concentration in Two Phase Flow Systems. J. of Heat Transfer, Nov. 1965.
  8. Rouhani S.Z., Calculation of Steam Volume Fraction in Subcooled Boiling, J. Heat Transfer 90 Feb. 1968.
  9. Zuber N. and P.G. Kroeger, An Analysis of the Effects of Various Parameters on the Average Void Fractions in Subcooled Boiling, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 11, 1968.
  10. Hilborn J.W. and J.S. Glen, Small Reactors for Low-Temperature Heating. Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario.
  11. Salcudean M., J.T. Rogers, Z. Abdullah and D. Poirier, Void Formation at Low Pressure and Low Flow rates, Proceedings of Tenth Canadian Congress of Applied Mechanics, University of Western Ontario, London Ont. Canada, June 1985.
  12. Chan A.M.C. Transient Two Phase Flow, P.H.D Thesis, McMaster University, 1982.
  13. Winterton R.H.S., Flow Boiling: Prediction of Boiling Departure, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27 1984.