

수직 환상유로에서 유량 공급이 없는 조건하의 임계열유속

Critical Heat Flux under Zero Flow Conditions in Vertical Annulus

천세영, 문상기, 안성민, 양선규, 정문기

한국원자력연구소
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로 사고시 노심의 건전성 확보를 위해서는 정체 유량시의 CHF 현상이 정확하게 파악되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 가열길이 긴 수직 환상유로를 사용하여, 압력이 0.57 ~ 15.01 MPa의 범위에서 영유속(Zero Flow) 조건하에서 압력 및 입구 미포화도가 CHF에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. CHF 실험자료는 같은 압력 조건에서 CHF 값이 입구 미포화도의 영향을 받는 것을 보여주었고, CHF는 항상 가열구간 상단부에서 발생하는 것을 관찰하였다. 실험 자료의 분석결과 CHF는 기존의 플러딩 기구에 의해 발생하는 것으로 나타났다. 실험자료의 관찰에서 가열구간 입구부분에 미포화 구간을 포함한 대향류를 가정하여 플러딩에 의한 경험식을 사용함으로써 CHF를 잘 예측할 수 있었다. 그러나, 기존의 포화상태의 물을 사용한 수직 원형관에 대한 플러딩식에 기반한 CHF 상관식으로 잘 예측이 되지 않는 것으로 나타났다.

Abstract

The understanding on the fundamental nature of CHF in the vertical annulus under zero flow condition is important for reactor safety. The CHF experiments under zero flow condition have been performed in ranges of pressure from 0.57 to 15.01 MPa and inlet subcooling from 85 to 413 kJ/kg, in order to understand the effects of pressure and inlet subcooling on CHF. For a fixed pressure, CHF was influenced by the inlet subcooling. All of the CHF in the present conditions have occurred at the top location of heated section. The correlation of CHF, derived from the Wallis flooding conditions and the considerations of inlet subcooling, shows to have good agreement with the CHF data. However, the flooding CHF correlation derived for saturated condition and at vertical tubes indicates a different characteristics from the present data.

1. 서 론

원전에서의 냉각재상실사고(LOCA)시 노심, Thermosyphon, Heat Pipe, 증기발생기 등과 관련하여 외부로부터 냉각재의 공급이 없는 경우의 임계열유속(CHF)은 중요한 열수력 현상이다. 원전의 LOCA 과정에서 노심은 저유량, 유동의 정체(Flow Stagnation), 역류(Flow Reversal) 등 여러 유동 상황을 경험한다. CHF는 원자로 노심의 건전성을 유지하는 데 가장 중요한 열수력 인자이기 때문에 여러 유동 상황시의 CHF 거동은 명확하게 파악되어야 한다.

수직 가열 유로에서 입구 유량이 없으면 CHF 발생기구는 수조비등(Pool Boiling) CHF 또는 플러딩(Flooding) 현상에 인한 것으로 생각할 수 있다. 유로의 크기가 커지면 CHF 발생기구는 수조비등의 것과 유사하게 될 것이다. 그러나 원자로 안전성 측면에서는 길이가 길고 좁은 유로에서의 CHF가 중요하다. 이 경우에 유동이 정체된 유로를 가열하면 대향류(Countercurrent Flow)를 형성

한다. 즉 수증기는 유로 가운데를 상향으로 흐르고, 액체는 중력에 의해 유로 벽을 따라 액막을 형성하면서 수증기와는 반대방향으로 흐른다. 이러한 유동 상황하에서는 플러딩 현상(수증기 속도의 증가에 따라 액체가 아래로 내려가지 못하게 되는 현상)이 CHF를 유발하는 것으로 생각되고 있다. Nejat[1], Chang 및 Yao[2], Mihima 및 Nishihara[3]는 실험대 하부를 막은 수직 원형관 유로에서의 CHF 실험결과가 Wallis의 대향류에 대한 플러딩 관계식[4]을 이용하여 유도한 CHF 상관식과 잘 일치하는 것을 보여주었다.

지금까지의 연구성과들은 압력 0.2 MPa이하에서 가열구간이 1.0 m이하의 짧은 유로에 대하여 수행한 실험에서 얻어진 것들이다. 그러나 가열길이가 긴 유로에서 고압조건에서 수행된 실험은 아직 없다. 따라서 본 연구는 가열길이가 긴 수직 환상유로를 사용하고 입구 유량의 공급이 없는 조건에서, 저압에서 고압까지 압력이 영유속 CHF에 미치는 영향을 조사하고, 또한 입구 미포화도가 플러딩 CHF 기구에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험은 한국원자력연구소의 RCS 열수력 Loop 장치에서 수행하였다. Loop에 대한 내용은 참고 문헌[5]에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다. 본 연구에 사용된 실험대는 환상유로부, 상부 및 하부 Plenum으로 구성되어 있으며, 상부 Plenum은 물/수증기 분리 탱크에 연결되어 있다. 환상유로부는 원형관 내부에 핵연료봉을 모의한 출력분포가 균일한 가열길이 1842 mm의 가열봉이 장전되어 있다. 가열봉에는 표면 온도를 측정하고 CHF를 검출하기 위해 Sheath 외경이 0.5 mm인 K-Type 비접지형 열전대 6개가 부착되어 있다. 실험대의 구조 및 열전대의 위치를 그림 1에 보여준다. 본 실험의 주요 측정변수인 압력, 온도 및 전력 측정의 불확실도(Uncertainty)는 Sensor 및 계측기기의 정도와 교정결과로부터 평가하였으며, 압력 및 온도에 대하여 각각 자료처리장치 지시치의 $\pm 0.3\%$ 및 0.6% 이하였다. 가열봉 전력 측정에 대한 불확실도는 $\pm 1.0\%$ 이하였다.

2.2 실험방법 및 조건

CHF 실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행된다. Loop의 유량, 실험대 입구 온도 및 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음, 순환펌프를 정지시키고 하부 Plenum의 상류측에 위치한 격리 밸브를 완전히 닫는다. 실험대의 가열봉에 전원을 공급하고 가열전력을 Step상태로 서서히 증가시키고 전력을 증가할 때마다 수십 분 동안 유지하여 정상상태를 확인한 후 다음 Step으로 증가시킨다. 투입 전력의 증가에 따라 상부 Plenum의 유체온도와 물/수증기 분리 탱크 연결배관의 유체온도는 포화온도에 도달한다. 만약 이들 온도가 포화온도에 도달하기 전에 전력을 갑작스럽게 올리거나 정상상태의 확인 없이 전력을 증가시키면 가열구간 전면에서 가열 봉 표면온도의 급격한 상승(즉 Dryout)이 발생하는 경우가 있었다. 이는 가열구간에서 발생한 수증기가 상부 Plenum의 미포화 액체에 의해 응축되고 한편 가열구간 내에서는 수증기가 생산됨으로 결국 수증기가 빠져나가지 못해 가열구간 전체가 Dryout에 이르기 때문이다. 정상상태를 유지하면서 계속 전력을 증가시키면 CHF가 발생한다. 이 때 CHF 검출기에 의해 전력공급을 80% 수준으로 낮추거나 Trip시킨다. CHF의 발생 판단조건은 가열봉 표면온도가 갑자기 지속적으로 상승하여, 표면 온도가 포화온도보다 100 K 이상 상승하면 CHF가 발생한 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 압력 0.57 ~ 15.01 MPa 및 가열구간 입구 미포화도 85 ~ 413 kJ/kg의 범위에서 실험을 수행하였다. 실험 수행중 상부, 하부 Plenum 및 물/수증기 분리 탱크의 압력 변동은 없었다. 입구 미포화도는 가열구간 하단의 유체온도와 하부 Plenum의 압력으로부터 구하였으며, 가열구간 하단의 유체온도는 가열봉에 전력이 투입되더라도 계속 미포화 상태를 유지하였다.

3. 실험결과 분석

Katto 및 Hirata[6]는 밑 부분이 막힌 원형관에서 CHF 실험을 수행하여 원형관의 길이가 길어도, 가열구간의 가운데 부분에서 CHF가 시작하며, 가열 길이가 작아짐에 따라 그 위치는 가열구간의 상단부로 이동하는 것을 관찰하였다. 그러나 본 실험에서는 가열봉 투입 전력의 증가에 따라

표면온도의 진동이 가열구간 상단부(T/C 1 또는 T/C 2)에서 시작하여, CHF 조건에 가까워짐에 따라 온도 진동의 폭이 커지고 결국 가열구간 상단부에서 CHF가 발생하였다. 그림 2는 본 실험의 전형적인 표면온도 거동을 보여주고 있다.

그림 3은 CHF 실험결과와 Zuber[7]의 수조 비등 CHF 상관식을 압력의 함수로 보여주고 있다. Zuber의 상관식은 포화 액체에 잠긴 무한 크기의 수평 상향 평판에 대한 것이다. 본 CHF 실험자료의 경우, 수조 비등에 비해 압력의 영향은 아주 작은 것으로 나타났고, CHF 값도 수조비등 CHF 값보다는 훨씬 작게 나타났다. 같은 압력 조건에서 입구 미포화도의 영향에 따라 CHF 값이 약간 흩어져 있는 것을 알 수 있다.

본 실험결과를 분석하기 위하여 CHF가 일어나기 직전의 유동상황을 그림 4와 같이 가열구간 입구부분에 미포화 구간을 포함한 수증기/물의 대향류로 가정하였다. 시험유로 입구에서 유량 공급이 없는 조건에서의 CHF에 대한 기존의 실험 및 이론적 연구는 대부분 계통이 포화상태 조건에서 수행되었다. 따라서 본 실험에서 수행된 입구 미포화도를 갖는 CHF 실험자료를 분석하기 위해서는 비등길이를 아는 것이 중요하다. 영유속에서 기포의 순생성(Net Vapor Generation) 지점 혹은 포화지점을 계산하기 위해 실험대의 하부에서 측정된 압력강하와 입구 미포화도를 이용하여 비등길이를 구하였다. 비등길이를 구하기 위해 마찰과 가속에 의한 압력강하는 중력에 의한 압력강하에 비해 무시할만하다는 가정을 사용하면 가열구간 하부에서의 압력강하는 다음과 같다.

$$\Delta P = \alpha(\rho_g - \rho_f)g(Z - Z_{sat}) + \rho_l g(Z - Z_{sat}) + \rho_l g Z_{sat} \quad (1)$$

여기서 Z 와 Z_{sat} 는 그림 4에 나타난 것처럼 각각 압력강하 측정부위의 거리 및 입구에서 포화지점까지의 수직 거리이다. 위 식을 다시 정리하면 다음과 같이 평균 기공율을 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\rho_l g Z + (\rho_l - \rho_f)g Z_{sat} - \Delta P}{\Delta \rho g (Z - Z_{sat})} \quad (2)$$

일정한 계통 압력하에서 입구 미포화도에 따른 압력강하 측정값은 그림 5와 같이 선형적으로 변하는 것으로 실험에서 관찰되었다. 그러므로 입구 미포화도가 영인 지점($Z_{sat} = 0$), 즉 가열구간 입구에서 유체가 포화 상태일 때의 압력강하를 외삽을 통하여 구할 수 있고, 그에 따른 가열구간 하부에서의 평균 기공율 α_o 를 식 (2)에서 구할 수 있다. 또한 기공율이 영인 상태($Z_{sat} = Z$), 즉 가열구간 하부가 단상 유체일 경우의 압력강하도 식 (1)로부터 쉽게 구할 수 있다.

강제순환의 미포화 비등에서와 마찬가지로 Z_{sat} 에서 Z 사이에서의 기공율이 선형적으로 변한다고 가정하면, 비등이 일어나는 부분인 Z_{sat} 에서 Z 사이에서의 평균 기공율은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\alpha = \alpha_o \left(1 - \frac{Z_{sat}}{Z}\right) \quad (3)$$

식 (2)와 (3)으로부터 실험에서 측정된 압력강하를 대입하면 기공율과 Z_{sat} 를 구할 수 있고, 비등길이는 전체 가열구간 길이에서 Z_{sat} 를 뺀 값이 된다.

Nejat[1]는 Wallis의 플러딩 관계식[4]과 질량보존식으로부터 영유속에서의 CHF를 유도하였다. 본 연구에서는 입구 미포화도의 영향을 고려하기 위해 위의 방법으로 구한 비등길이를 사용하였고, 수력학적 직경을 사용하여 플러딩에 의한 CHF 값을 평가하였다. 수직 원형관에서 물과 공기의 대향류에 대한 Wallis의 플러딩 관계식은 다음과 같다.

$$j_g^{*1/2} + m j_f^{*1/2} = C \quad (4)$$

물과 증기의 생성률의 절대값이 같으므로 질량보존과 에너지 보존식으로부터 플러딩 조건에서의 물과 증기의 겉보기 속도(Superficial Velocity)는 각각 다음과 같이 구해진다.

$$j_g = \frac{q_c A_{hb}}{\rho_g A_f h_{fg}} \quad (5)$$

$$j_f = \frac{q_c A_{hb}}{\rho_f A_f h_{fg}} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 식 (4)에 대입하면 다음과 같이 무차원화된 CHF를 얻을 수 있다.

$$q_{cl}^* = C^2 \frac{A_f}{A_{hb}} \left[\frac{\Delta \rho}{\rho_g} \right]^{1/2} \left[1 + m \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \right]^{-2} \quad (7)$$

위식에서 사용된 무차원화된 CHF q_{cl}^* 는 Nejat[1]에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$q_{cl}^* = \frac{q_c}{h_{fg} \rho_g (g D_{hy})^{1/2}} \quad (8)$$

Mishima[3]가 제안한 영유속에서의 플러딩에 의한 CHF 상관식에 비등길이를 적용하면 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$q_{c2}^* = \frac{A_f}{A_{hb}} \frac{C^2 \sqrt{D_{hv}^*}}{[1 + (\rho_g/\rho_f)^{1/4}]^2} \quad (9)$$

위 식에서 정의된 무차원변수들은 Nejat이 사용한 무차원변수와는 약간 다르며 다음과 같이 정의된다.

$$q_{c2}^* = q_c / (h_{fg} \sqrt{\lambda \rho_g g \Delta \rho}) \quad (10)$$

$$\lambda = \sqrt{\sigma / (g \Delta \rho)} \quad (11)$$

$$D_{hv}^* = D_{hv} / \lambda \quad (12)$$

그림 6은 실험에서 얻은 CHF에서의 무차원 겹보기 속도를 Wallis의 플러딩 관계식과 비교하고 있다. Wallis의 플러딩 관계식에 사용되는 상수값 C는 기하학적 형상에 따라 달라지며 보통 0.6 - 1.0 사이의 값을 가진다. 그러나 그림에 나타난 것처럼 본 실험에서 측정된 CHF 조건에서의 무차원화된 겹보기 속도들은 Wallis의 플러딩 관계식에 의한 값보다 큰 것으로 나타났다. 그림 7은 CHF 실험자료를 식 (7)의 형식으로 그린 것으로, 회귀분석에 따른 C의 값이 Wallis가 제안한 0.6에서 1사이의 값보다 크게 나타나고 있다. 이는 Wallis의 플러딩 관계식이 수직 원형관에 기반한 실험자료에 의해 구해졌기 때문에 기하학적 형상의 차이에 의한 것으로 생각된다. 그림 8은 Mishima에 의해 유도된 식 (9)를 그린 것으로 역시 C값은 1보다 크게 나타난다.

그림 6과 7에 나타난 것처럼 Nejat에 의한 무차원변수들을 이용하면 CHF 실험자료를 비교적 잘 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, Mishima 등의 무차원변수들은 압력에 대한 영향을 제대로 반영하지 못하는 것을 알 수 있다. 따라서 Nejat의 무차원변수를 이용하여 그림 7을 회귀분석하여 구해진 $C = 1.493$ 을 사용하여 CHF 실험자료를 예측한 결과, 평균오차와 RMS 오차가 각각 6.9 %와 10.5 %로 비교적 잘 예측됨을 알 수 있었다. 그림 9는 이러한 예측결과를 보여주고 있다. 그림에 나타난 것처럼 낮은 압력에서는 비교적 오차가 적지만, 높은 압력에서는 크게 예측되고 있다. 이러한 이유는 Wallis의 플러딩 관계식이 비교적 낮은 압력에서의 실험자료를 이용하였기 때문에 높은 압력에서는 잘 맞지 않은 것으로 생각된다.

4. 결 론

가열길이가 긴 수직 환상유로를 사용하고 압력 0.57 ~ 15.01 MPa의 범위에서 영유속에 대한 CHF 실험을 수행하여 압력 및 입구 미포화도가 기존의 플러딩 CHF 기구에 미치는 영향을 조사하였다. 본 CHF 실험자료는 수조 비등에 비해 압력의 영향은 아주 작은 것으로 나타났고, 같은 압력 조건에서 CHF 값이 입구 미포화도의 영향을 받는 것을 보여주었다. 또한 CHF는 항상 가열 구간 상단부에서 발생하는 것으로 관찰되었다. 실험자료의 관찰에서 가열구간 입구부분에 미포화 구간을 포함한 대향류로 가정하여 Wallis의 플러딩에 의한 경험식을 사용함으로써 CHF를 잘 예측할 수 있었다. 그러나, 기존의 포화상태의 물을 사용한 수직관에서의 영유속 CHF와는 다른 경향을 보였다. 또한 CHF 조건에서의 무차원화된 물 및 증기의 겹보기 속도는 Wallis의 플러딩 관계식에 의한 값보다 크게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구, 개발 과제 지원으로 이루어졌습니다.

기호설명

ΔF	실험대 하부에서의 압력강하	a	기공율
α_o	입구 미포화도가 영일 경우의 기공율	ρ	밀도
g	중력가속도	j	겹보기 속도
j^*	무차원 겹보기 속도	C	상수
q_c	CHF(임계열유속)	A_{hb}	비등 가열 면적

A_f	유동 면적	h_{fg}	Latent heat of vaporization
Z	실험대 하부 차압계 사이의 수직 거리	Z_{sat}	유체가 포화온도가 되는 수직 거리
$\Delta\rho$	물과 수증기의 밀도차 ($\rho_f - \rho_g$)	q_{cl}^*	Nejat의 무차원 임계열유속
q_{c2}^*	Mishima의 무차원 임계열유속	m	상수
D_{hy}	수력학적 직경	λ	Taylor instability length scale
σ	표면장력	P	계통 압력
ΔT_{in}	입구 미포화도	ϵ	예측 오차

하첨자

f	포화 액체	g	포화 증기
l	입구 미포화 액체	m	상수
sat	포화 상태		

참고문헌

- [1] Z. Nejat, "Effect of Density Ratio on Critical Heat Flux in Closed End Vertical Tubes," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. **7**. 321-327, (1981).
- [2] Y. Chang and S. C. Yao, "Critical Heat Flux of Narrow Vertical Annuli with Closed Bottoms," *J. Heat Transfer*, Transactions of the ASME, Vol. **105**, 192-195, (1983).
- [3] K. Mishima and H. Nishihara, "Effect of Channel Geometry on Critical Heat Flux for Low Pressure water," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. **30**, No. 6, 1169-1182, (1987).
- [4] G. B. Wallis, "One Dimensional Two-Phase Flow," McGraw-Hill, (1969).
- [5] S. Y. Chun et al. "Critical Heat Flux for Low Flow in Vertical Annulus under Various Pressure Conditions," *Proceeding of Korea Nuclear Society Spring Meeting*, Vol. 1, 386-391, (1997).
- [6] Y. Katto and T. Hirata, "Critical Heat Flux of Counter-Flow Boiling in a Uniformly Heated Vertical Tube with a Closed Bottom," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. **34**. No. 4/5, 993-1001, (1991).
- [7] N. Zuber et al., "The Hydrodynamic Crisis in Pool Boiling of Saturated and Subcooled Liquids," *International Developments in Heat Transfer*, 230-236, ASME, (1961).

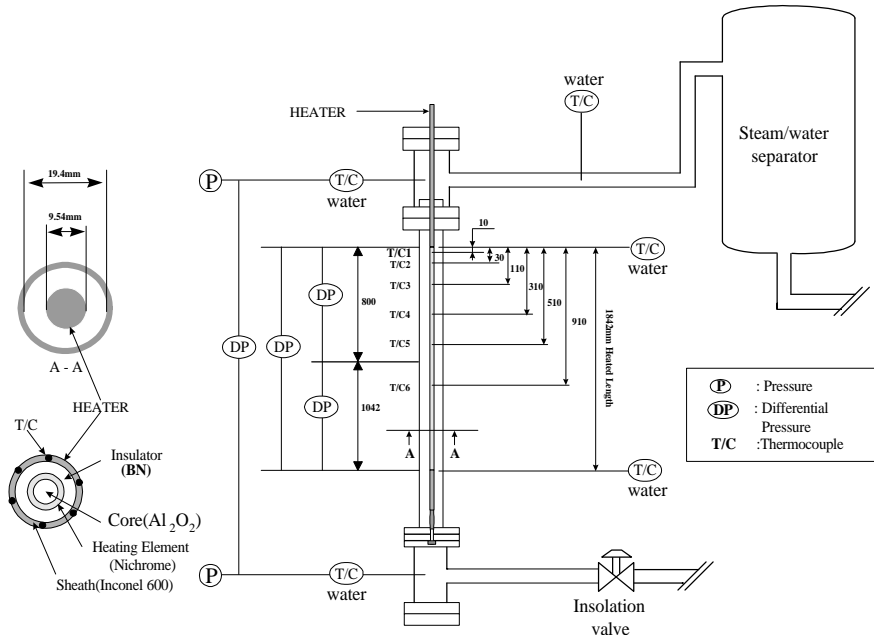


그림 1 시험대 구조 및 열전대 위치

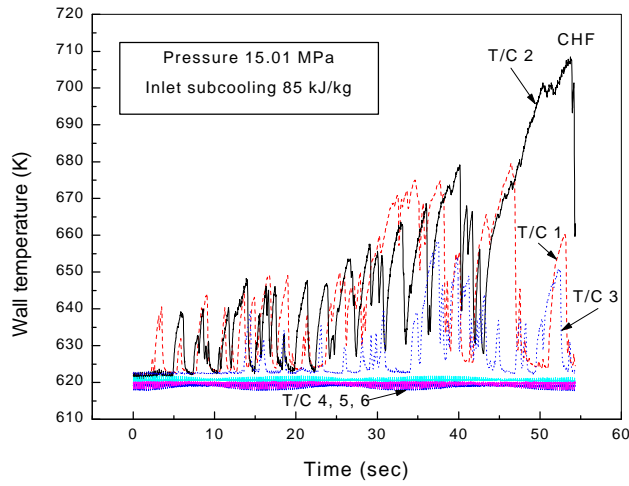


그림 2 영유속 CHF에서의 온도 변화

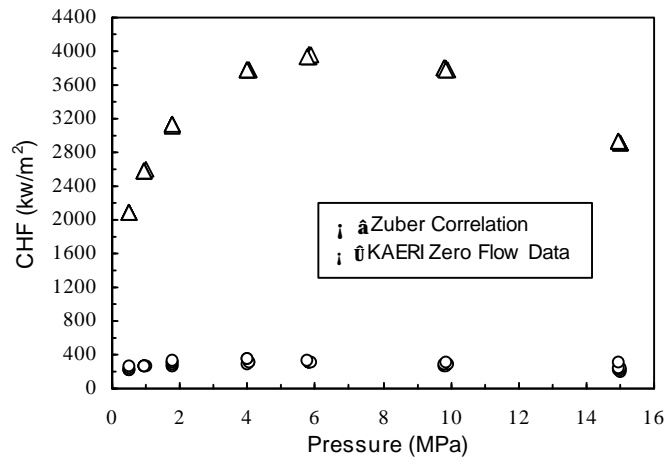


그림 3 CHF에 대한 압력의 영향

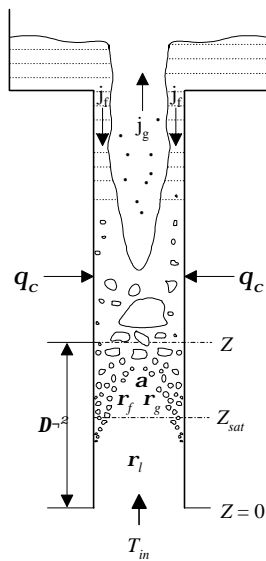


그림 4 비등길이를 구하기 위한 실험대 입구 개념도

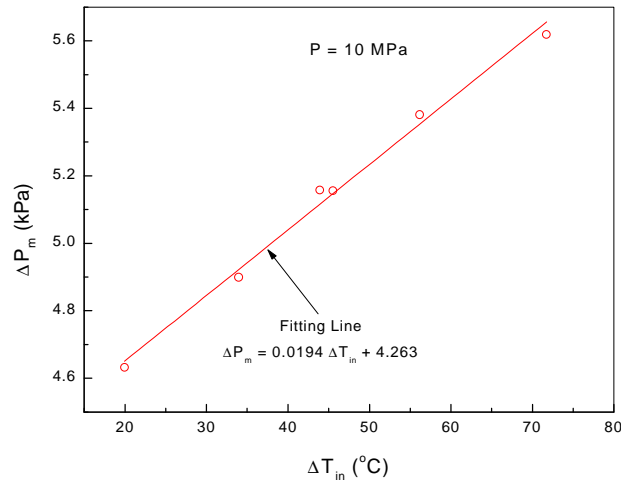


그림 5 입구 미포화도에 따른 실험대 하부 압력강하 측정값

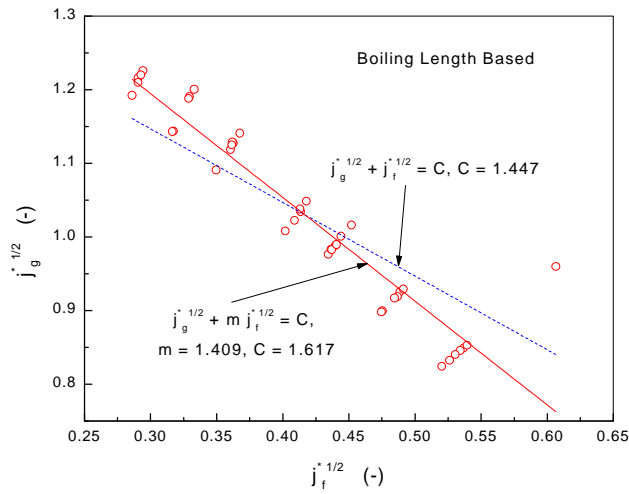


그림 6 CHF 조건에서의 물 및 증기의 무차원 곁보기 속도

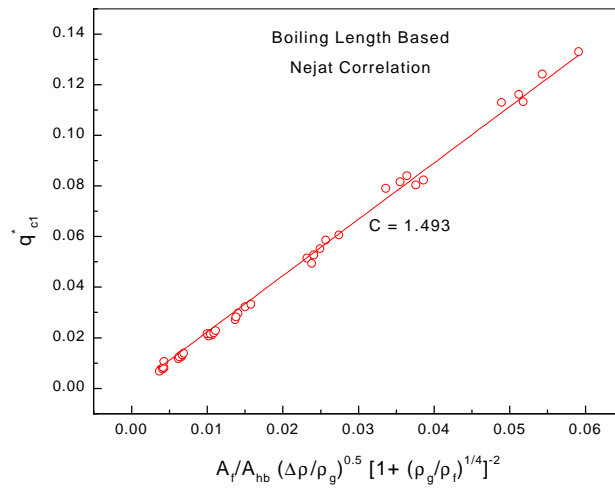


그림 7 CHF 조건에서 Nejat의 무차원변수

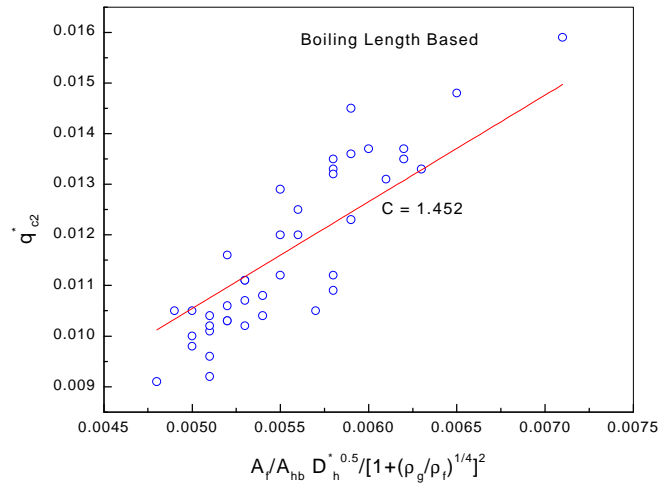


그림 8 CHF 조건에서 Mishima의 무차원변수

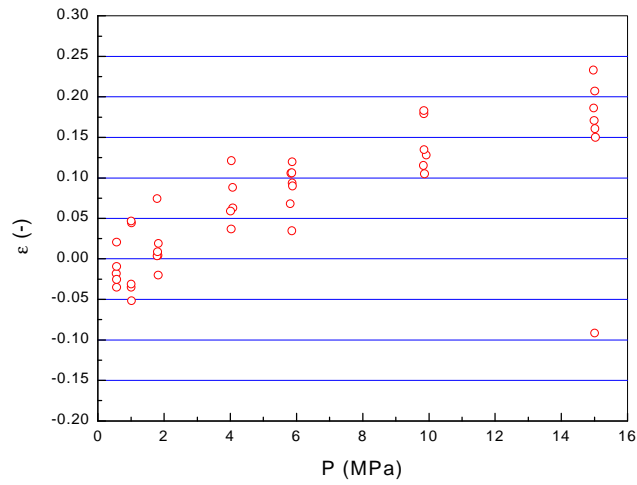


그림 9 Nejat의 무차원변수에 의해 예측된 CHF