

'98 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

새로운 국부 조건 가설을 도입한 임계열유속 예측 방안 연구

Prediction of Critical Heat Flux by a New Local Condition Hypothesis

임재혁, 전규동

한양대학교
서울특별시 성동구 행당동 17번지

심재우

단국대학교
서울특별시 용산구 한남동 8번지

Zhijian Deng

Columbia University
New York, NY 10027, USA

요 약

실제 국부 증기 건도(true local steam quality, X_l)를 이용한 새로운 국부 조건 가설의 모델로 균일 가열 수직 원형관에서의 임계열유속(Critical Heat Flux;CHF)을 예측하여 기존의 실험결과와 비교하였다. 이 모델은 기존의 국부 조건 가설의 모델에서 사용되는 열평형 건도를 대신하여 미포화 및 포화 비등 영역에서 CHF를 비교적 정확히 예측하였다. 실제 국부 증기 건도는 OSV(Onset of Significant Vaporization, X_{osv})에서의 건도와 출구에서의 열평형 건도(thermodynamic equilibrium quality, X)의 중속 변수이다. 여기서 출구 건도는 열평형식(Heat Balance)으로부터 구할 수 있으며 OSV의 건도는 Saha-Zuber 상관식[1]으로부터 구할 수 있다. 그 동안 균일 가열 수직 원형 관에서의 CHF 실험 상관식은 국부 조건 가설과 비국부 조건 가설로 나뉘어 개발되어 왔다. 본 예비 연구의 결과는 하나의 새로운 국부 조건 가설 모델로 전 세계 균일 가열 수직 원형 관에서의 CHF 실험 데이터에 대한 예측이 가능함을 보여준다.

ABSTRACT

Critical Heat Flux(CHF) was predicted for uniformly heated vertical round tube by a new local condition hypothesis which incorporates a local true steam quality. This model

successfully overcame the difficulties in predicted the subcooled and quality CHF by the thermodynamic equilibrium quality. The local true steam quality is a dependent variable of the thermodynamic equilibrium quality at the exit and the quality at the Onset of Significant Vaporization(OSV). The exit thermodynamic equilibrium quality was obtained from the heat balance, and the quality at OSV was obtained from the Saha-Zuber correlation. In the past CHF has been predicted by the experimental correlation based on local or non-local condition hypothesis. This preliminary study showed that all the available world data on uniform CHF could be predicted by the model based on the local condition hypothesis.

1. 서론

지난 50년간 균일 가열 수직 원형관내 강제 유동 비등(forced flow boiling)에서의 CHF 메커니즘을 이해하기 위한 수많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 CHF 현상이 발생하는 메커니즘은 매우 복잡해서 아직까지도 명확하게 CHF 발생 메커니즘을 규명하지 못하고 있다. 현재 CHF 메커니즘은 적어도 두 개의 물리적 메커니즘(subcooled and quality CHF)이 존재하는 것으로 가정되고 있다. 그러나 실제로는 각각의 유동 양식(flow regime) 또는 유동 형태(flow pattern)에 따라 CHF 메커니즘이 다른 것으로 보고되고 있다. 일반적으로 환상류 영역에서의 포화 비등에 대한 건조(dryout) 모델은 비교적 잘 개발된 것으로 알려져 있다. 이 모델에서 액적의 이탈 및 점착(droplet entrainment and deposition)은 질량 전달 과정을 표현하므로 이에 대한 좀더 정확한 이해가 필요하다. 그리고 어느 한 유동 양식에 대해 개발된 CHF 메커니즘의 모델은 다른 유동 양식에 적용되기 어렵고 또한 복잡해서 일반적으로 실제 열전달 기기에 사용하기가 어렵다. 결과적으로 대부분의 CHF 예측 모델은 실험 상관식에 기초를 두고 있다.

균일하게 가열되는 수직 원형 관에서의 CHF는 주로 실험 상관식에 의해 예측되어 왔다. 실험 상관식은 실험 자료를 근거로 주요 변수(압력(P), 관의 길이(L) 및 직경(D), 열 평형 건도(X), 질량 유속(G))를 이용하여 CHF를 예측하는 방법으로 국부 조건(local condition)과 비국부 조건(non-local condition) 상관식으로 나뉘어 개발되어 왔다. 비국부 조건 상관식은 열 평형 건도로서 입구 건도를 사용하는 입구 조건 상관식과 출구 건도를 사용하는 출구 조건 상관식으로 나뉜다. 반면에 국부 조건 상관식에서는 관 길이의 영향을 무시(일반적으로 $L/D > 60$ 일 때)하고 CHF를 CHF가 발생하는 위치에서의 국부 조건(국부 압력, 관의 직경, 국부 질량 유속, 국부 열 평형 건도)만의 함수로 정의한다.

현재까지 발표된 국부·비국부 조건 상관식의 수는 400여개 이상에 달한다. 이것은 각각의 상관식이 개발 당시 실험에 사용한 범위 내에서는 비교적 만족스러운 예측 결과를 보여주지만 그 이외의 범위에 적용되면 예측 성능이 저하되기 때문이다. 따라서 실험 조건이 변하면 그에 따른 또 다른 새로운 상관식이 개발되어 왔다. 또한 열 평형 건도를 CHF의 독립 변수(independent variable)로 사용하는 경우 치명적으로 문제가 발생할 수 있는 단점이 있다. 즉, 관내 유체의 평균 온도가 포화 상태에 이르기 전에 기포가 발생하는 미포화 비등(subcooled boiling) 영역에서 열 평형 건도는 음의 값을 갖는다. 열 평형 건도가 음의 값을 갖더라도 즉, 열 평형 상태(thermodynamic equilibrium state)가 아니더라도 관내에는 소량의 증기가 존재하게 된다. 따라서

이러한 영역에서는 열 평형 건도가 실제 증기 건도(0과 1사이의 값)를 정확히 나타낼 수 없고 결국 CHF를 예측함에 있어서 한계가 있다. 그 동안 많은 연구자들(Levy[2], Kroeger & Zuber[3])이 CHF가 발생하는 위치에서의 실제 증기 건도를 예측하려는 노력을 해왔으나 아직까지 만족할 만한 결과를 도출하지 못했다.

최근 콜럼비아 열전달연구소(HTRF)에서는 실제 증기 건도 예측 모델을 개발하였고 이 모델을 이용하여 구한 실제 증기 건도가 CHF를 예측함에 있어서 매우 중요한 변수임을 확인하였다. 그리고 국부 조건 가설을 바탕으로 이러한 실제 증기 건도를 이용하여 모든 유동 조건에 적용할 수 있는 비교적 정확한 새로운 국부 조건 상관식을 개발하였다[4]. 그러나 이것은 아직 개발 단계의 상관식이어서 일부 영역(저압 영역)에서는 그 예측 성능이 다소 저하된다.

2. 이론

미포화 상태의 유체가 균일하게 가열되는 수직 원형관으로 유입되어 온도가 상승하면 가열면에서 기포 핵이 생성된다. 이것을 핵비등 개시(Onset of Nucleate Boiling; ONB)라고 한다. 그러나 관내의 대부분의 유체는 여전히 미포화 상태이므로 기포들은 가열면을 이탈하기 전에 소멸되거나 이탈하더라도 관내를 흐르는 동안 소멸된다. ONB를 지나 유체가 하류로 계속 유동하면서 온도가 상승(미포화도가 감소)하면 기포는 소멸되지 않고 계속 성장하여 가열면을 이탈하게 된다. 이처럼 기포가 가열면을 이탈하여 순수한 증기(net vapor generation)로 존재하는 시점을 OSV(Onset of Significant Vaporization)라고 한다(Fig. 1).

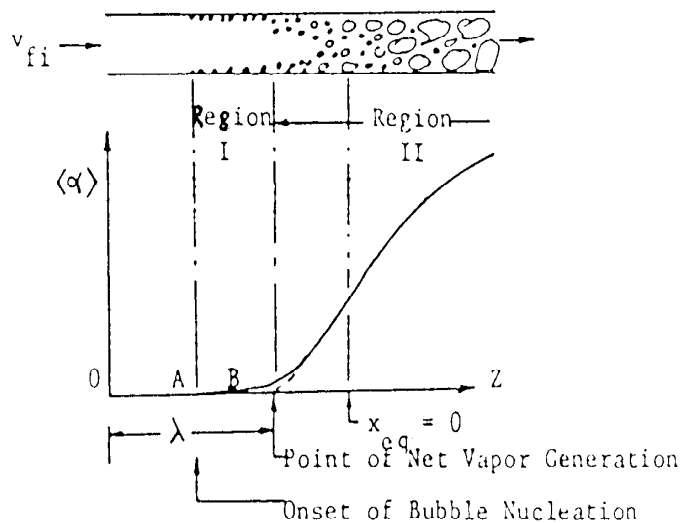


Fig.1 Vapor void fraction along the length of a heated channel[1]

특히 OSV를 지나 유체의 평균 온도가 포화 온도까지 상승하면 기포는 벽면뿐만 아니라 관내에서도 불규칙적으로 발생하게 된다(bulk or saturated boiling). 실제 증기 건도는 액체·기체 총 질

량유량에 대한 기체 질량유량의 비(0과 1사이의 값)로 정의된다.

$$X_t = \frac{\rho_g U_g A_g}{\rho_g U_g A_g + \rho_l U_l A_l}, \begin{cases} \rho : \text{밀도} \\ U : \text{속도} \\ A : \text{유동 단면적} \\ g : \text{기체 상태} \\ l : \text{액체 상태} \end{cases} \quad (1)$$

그러나 이러한 실제 증기 건도는 그 독립 변수들을 구하기가 복잡하고 어렵기 때문에 그 동안 열 평형 건도로 예측되어 왔다. 열 평형 건도는 실험을 통해 쉽게 측정 가능하며 기체·액체 혼합물의 평균 엔탈피와 포화 액체 엔탈피의 차를 잠열(heat of vaporization)로 나눈 값으로 정의된다.

$$X = \frac{h - h_{sat,l}}{\lambda}, \begin{cases} h_{sat,g} : \text{포화 기체 엔탈피} \\ h_{sat,l} : \text{포화 액체 엔탈피} \\ h : \text{기체·액체 혼합물의 평균 엔탈피} \\ \lambda = h_{sat,g} - h_{sat,l} : \text{잠열} \end{cases} \quad (2)$$

그러나 열 평형 건도가 음의 값을 갖는 경우에는 실제 증기 건도를 나타낼 수 없다. 따라서 모든 영역에서 정확한 실제 증기 건도를 구하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔고 최근 HTRF에서는 실제 증기 건도 모델을 다음과 같은 상미분 방정식(rate equation)의 형태로 개발하여 CHF 예측 연구를 수행하였다.

$$\frac{dX_t(z)}{dX(z)} = 1 + \frac{X_t(z) - X(z)}{(1 - X_t(z))X_{osv}(z)}, X_t = \begin{cases} 0 & \text{at } X = X_{osv} \text{ if } X_i < X_{osv} \\ 0 & \text{at } X = X_i \text{ if } X_{osv} < X_i < 0 \\ X & \text{at } X_i > 0 \end{cases} \quad (3)$$

균일 가열 수직 원형관에서 미포화 상태의 유체 유동은 비평형 균질 유동 모델(non-equilibrium homogeneous flow model)로 가정될 수 있다. 이 모델은 물리적으로는 액체와 기체를 균일하게 혼합된 상태의 유동(well-mixed single phase flow)으로 가정하나 열역학적으로는 비평형 상태로 본다. 여기서 X_i 는 입구 건도, X 는 가열면 축방향으로 임의의 위치(z)에서의 열 평형 건도, X_{osv} 는 OSV의 건도이다. X 는 열평형식(heat balance)으로부터 구할 수 있으며 X_{osv} 는 Saha-Zuber 상관식[1]으로부터 구할 수 있다.

$$q = -SG\lambda X_{osv}(z), \quad S = \begin{cases} 0.0065 & \text{if } Pe > 70000 \text{ (수력학적 조건)} \\ 455/Pe & \text{if } Pe < 70000 \text{ (열적인 조건)} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 S 는 Stanton 수(Stanton number), Pe 는 Peclet 수(Peclet number), q 는 가열면에 가해지는 열유속(heat flux)이다. Saha-Zuber는 3종류의 유체(water, freon-114, freon-22)와 다양한 압력(1~136 bar), 유로의 기하학적 형상에 대한 실험 결과로부터 기포 이탈(OSV) 조건을 Pe 와 S 의 상관 관계로 나타내었다(Fig. 2). 식 (4)는 다양한 압력과 유체의 종류, 유로의 형상에 적용하여 비

교적 정확히 OSV에서의 건도를 구할 수 있다[4].

Deng 등[4]은 이러한 실제 증기 건도 모델(식 (3))과 국부 조건 가설을 바탕으로 다음과 같은 새로운 CHF 국부 조건 상관식을 개발하였다.

$$q_c = \frac{\alpha}{\sqrt{D}} \exp(-\gamma \sqrt{GX_i(1 + X_i^2)^3}) \quad (5)$$

$$\alpha = 1.74 - 3.54 \left(\frac{P}{P_c} - 0.448 \right)^2 \quad (6)$$

$$\gamma = 0.059 + \frac{0.075}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{ -5.413 \frac{(\sigma + 0.4537)^2}{\sigma^2} \right\}, \quad \sigma = \ln\left(\frac{P}{P_c} \right) \quad (7)$$

여기서 P는 출구 압력, P_c는 유체의 임계 압력(물의 경우 221bar), α와 γ는 실험 매개 변수 (experimental parameter)로서 압력만의 함수이다.

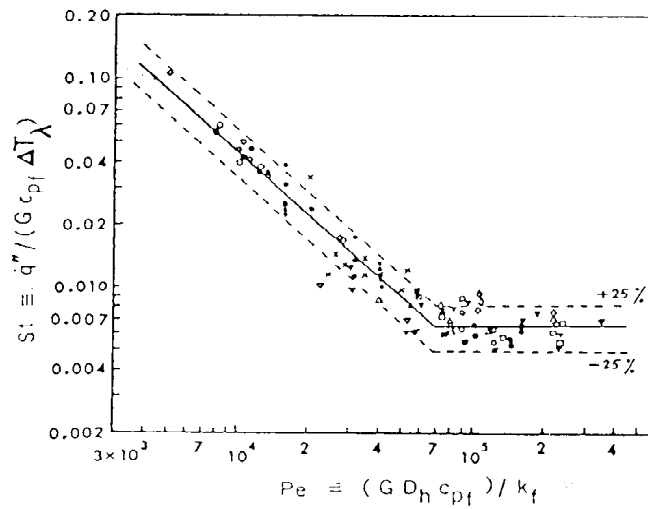


Fig. 2 Pe vs S at the point of net vaporization[1]

3. 결과 및 토론

핵비등 이탈(Departure from Nucleate Boiling; DNB)과 액체막 건조 모델은 가장 기본적인 CHF 메커니즘이다. 유동 양식은 기본적으로 유로에서의 거시적 조건(bulk conditions)을 나타내며, 따라

서 거시적 조건은 유동 양식이 변할 때 나타난다. 그러나 가열면 근처에서의 열 전달 과정(heat transfer process)은 유동 양식에 관계없이 미시적으로 계속 일어나고 또한 CHF는 모든 유동 양식에서 발생 가능하다. 결국 가열면 근처에서의 수력학적 상태(hydrodynamic state)를 기술할 수 있는 하나의 CHF 메커니즘으로 모든 유동 양식을 포괄할 수 있는 가능성이 있다.

그러나 본 연구의 목적은 그러한 하나의 CHF 메커니즘을 찾는 것이 아니라, CHF는 국부 조건만으로 예측 가능하다는 결과에 기초하여 다양한 유동 양식으로부터의 CHF 데이터를 상관시켜 하나의 통일된 CHF 모델(universal model)의 개발 가능성과 아울러 하나의 CHF 메커니즘의 존재 가능성에 대한 실험적 결과를 제시하는 것이다.

Table 1.은 본 연구에 사용한 실험 데이터 범위들을 나타내고 있다. Fig. 3 ~ Fig. 7에서는 CHF 실험 값과 CHF 예측 값을 $\sqrt{GX(1+X^2)^3}$ 에 대해 나타내었다. 본 연구 결과 미포화 비등과 포화 비등 영역, 그리고 모든 유동 양식에서 CHF는 국부 조건만으로 예측 가능함을 확인하게 되었다. 다양한 유동 조건에서 상관식에 의한 예측 값들은 기존의 실험 데이터와 비교적 정확히 일치하였다. 이 상관식은 국부 조건(질량유속, 직경, 실제 증기 건도)에서 두 개의 실험 변수(α , γ)만으로 결정된다. 여기서 두 개의 실험 변수는 단지 압력만의 함수이므로 기존의 다른 상관식들보다 매우 쉽게 사용할 수 있고 예측 성능 또한 비교적 정확하다. 또한 식 (3)으로부터 구해지는 실제 증기 건도는 국부 건도이면서도 상류의 영향(입구 미포화도가 CHF에 미치는 영향)을 고려하고 있으므로 가열면의 축방향으로 모든 위치에서의 값을 구할 수 있다. 그러나 이 상관식은 아직 개발 단계이므로 Fig. 5와 Fig. 6, 그리고 Fig. 7에서 보듯이 저압 영역에서는 예측 성능이 저하되지만 그 경향은 다른 그림들(높은 압력 영역)과 비슷함을 볼 수 있다. 이것은 더 많은 데이터를 분석하여 좀더 정확한 두 개의 실험 변수(α , γ)를 구하게 되면 저압 영역에서 뿐만 아니라 모든 영역에서도 정확한 CHF의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

Table 1. Experimental Data Source

	압력 (bar)	직경 (mm)	길이 (mm)	질량유속 (kg/m ² s)	입구 미포화도 (kJ/kg)	임계열유속 (MW/m ²)	데이터 수
Fig. 3[5]	66.17~ 73.41	4.6~ 37.34	215.9~ 3657.6	406.875~ 18580.63	11.63~ 943.13	0.912~ 9.4	792
Fig. 4[6]	70	10	2000~ 4996	189~ 2521.465	30.5~ 703.45	0.259~ 1.888	74
Fig. 5[6]	30	10	2000~ 4996	180~ 6358	71.9~ 481	0.283~ 3.795	84
Fig. 6[7]	1.07~ 9.51	6~ 12	300~ 1000	20~ 277	59~ 654	0.108~ 1.598	430
Fig. 7[5]	1.034~ 40.875	1~ 23.876	25.4~ 2499.36	9.494~ 15732.5	0~ 921.5	0.088~ 21.422	1159

본 연구는 CHF가 국부 조건만으로 비교적 정확히 예측될 수 있음을 확인하였고 또한 이 상관식은 전 영역에 적용될 수 있는 가능성에 그 의의가 있다. 그러므로 이 상관식을 바탕으로 좀더

정확한 α , γ 값을 구할 수 있다면 적어도 균일 가열 수직 원형 관에서의 물에 대한 하나의 통일된 CHF 국부 조건 상관식이 개발될 수 있을 것으로 사려된다.

4. 참고 문헌

1. Saha, P. and Zuber, N., 'Point of Net Vapor Generation and Vapor Void Fraction in Subcooled Boiling'. Proc. of the 5th International Heat Transfer Conference, Tokyo. Paper B4.7, 175-179(1974)
2. Levy, S. 'Forced convection subcooled boiling prediction of vapour volumetric fraction'. Int. J. Heat Mass Transfer, 10, 951-965(1967)
3. Kroeger, P.G., and Zuber, N. 'An Analysis of the Effects of Various Parameters on the Average Void Fractions in Subcooled Boiling'. Int. J. Heat Mass Transfer, 11, 211-233(1968)
4. Z. J. Deng, T. J. Dougherty, and B. W. Yang, 'Prediction of critical heat flux for uniformly heated tubes'. NURETH-8, VOL. 2(1997)
5. B. Thompson and R. V. Macbeth, 'Boiling water heat transfer-Burnout in uniformly heated round tubes: A compilation of world data with accurate correlation'. AEEW-R 356(1964), Table 1, 2, 3, 6, 15, 16
6. K. Becker, G. Strand, and C. Osterdahl, 'Round tube burnout data for flowing of water at pressures between 30 and 200 bar'. KTH-NEL-14(1971)
7. Hong Chae Kim, Won-Pil Baek and Soon Heung Chang, 'Critical Heat Flux of Water in Vertical Round Tubes at Low Pressure and Low Flow Conditions'. to appear in Nuclear Engineering and Design

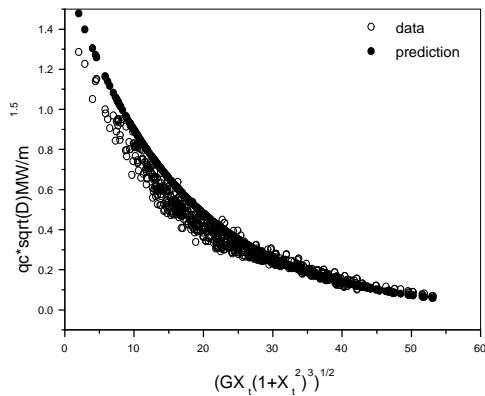


Fig. 3(L/D=47~98)[5]

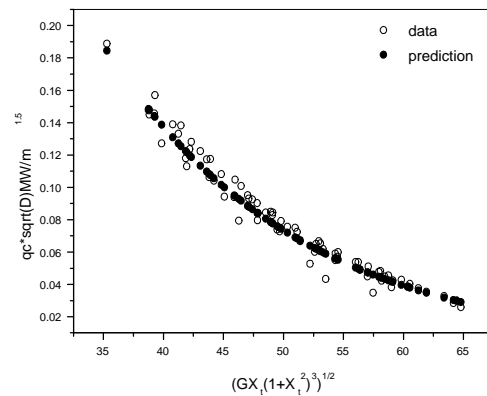


Fig. 4(200~500)[6]

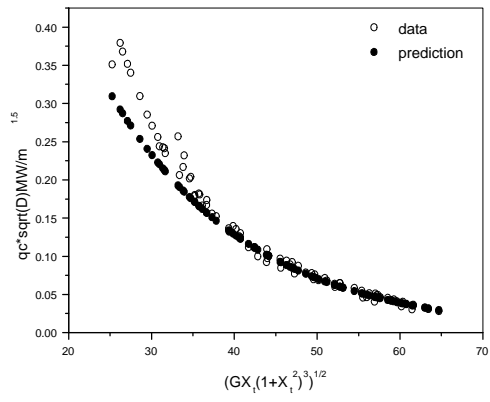


Fig. 5(L/D = 200~499.6)[6]

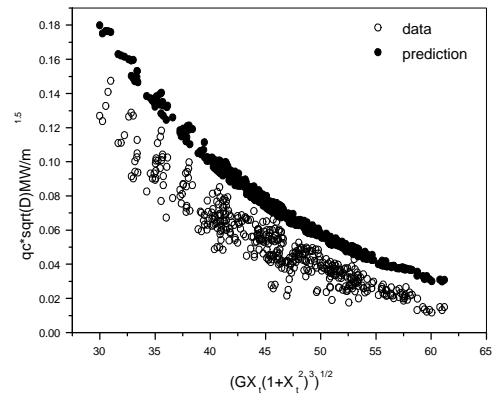


Fig. 6(L/D = 41.7~166.7)[7]

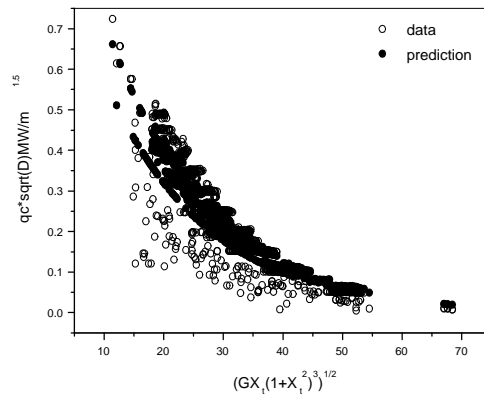


Fig. 7(L/D = 8.5~249.1)[5]