

《기술보고》

임계 열유속(CHF) 상관식 형태와 적용 방법에 따른 예측 오차 및 여유도

백원필 · 장순홍

한국과학기술원

대전광역시 유성구 구성동 373-1

황대현

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

(1995. 12. 4)

요 약

본 기술 보고는 임계 열유속(Critical Heat Flux: CHF)을 예측하기 위해 사용되고 있는 상관식의 형태와 적용 방법, 이에 따른 예측 오차와 여유도의 변화 등을 종합적으로 분석한다. CHF 현상에 대해서는 지난 반 세기 동안 발생 메커니즘, 예측 모델, 설계에의 적용 방법 등에 대한 연구가 광범위하게 수행되어 대부분의 운전 조건에 대해 신뢰할만한 예측 모델들이 확립되어 있다. 그러나 예측 모델의 이용에서 가장 중요한 기준이 되는 예측 오차의 의미가 잘못 이해되는 경우가 많으므로, 이 글에서는 예측 모델의 형태 및 적용 방법에 따라 예측 오차가 달라지는 원인을 명확하게 해석하고, 실제 계산을 통하여 예시하였다. 그리고 상관식 형태 및 이용 방법에 따라 임계 열유속비(Critical Heat Flux Ratio: CHF_R)와 임계 출력비(Critical Power Ratio: CPR)가 어떠한 관계를 갖는가를 논의하였다.

1. 서 론

임계 열유속(Critical Heat Flux: CHF) 현상은 “가열면의 열유속(Heat Flux) 또는 표면 온도(Surface Temperature)가 증가하거나 유량, 압력, 유체 온도 등 유동 조건이 변화할 때 가열면 부근의 유체 상태가 액상(Liquid Phase)에서 기상(Vapor Phase)으로 바뀌면서 가열면과 유체 사이의 비등 열전달계수가 급격하게 낮아지는 현상”[1]으로 정의할 수 있다. 원자로의 핵연료봉과 같이 가열면의 표면 열유속이 조절되는 시스템(Surface-Heat-Flux-Controlled System)에서는 CHF 현상의 발생이 표면 온도의 급격한 상승으로 이어지며, 경우에 따라서는 가열면 온도가 용융점에 도달하기도 한다. 한편 일반적인 열교환기와 같이 가열면

온도가 조절되는 시스템(Surface-Temperature-Controlled System)에서는 CHF 현상의 발생이 열유속의 비정상적인 감소를 유발한다.

이러한 임계 열유속은 물(경수 또는 중수), 액체 금속(Liquid Metal), 유기액체(Organic Liquid) 등 액체 냉각제를 사용하는 원자로의 열출력을 제한하는 핵심적인 현상이다. 수냉각로의 경우에는 정상 운전(Normal Operation) 또는 예상 운전 과도 상태(Anticipated Operational Occurrences: AOO)(ANS Condition I 및 II)에서 CHF가 발생하지 않도록(불확실성을 고려한 실제 계산에서는 최고온 연료봉에서 임계 열유속 조건이 발생할 확률이 5% 이하가 되도록 함) 설계되고 운전되어야 한다. 따라서 원자로 노심 열수력 설계 및 과도 상태 해석에서 가장 핵심이

되는 것이 이를 보장하는 것이다. 그보다 드문 사고(ANS Condition III 및 IV)에서는 CHF 발생이 허용되지만, 일단 CHF를 겪은 핵연료봉들은 피복재(Cladding)가 손상된 것으로 가정하여 방사선원 항(Source Term)을 계산한다. 수냉각로 설계에서 가장 극심한 제한 사고(Limiting Accident)로 고려되고 있는 대형 냉각재 상실사고(Loss-of-Coolant Accident: LOCA)의 경우, CHF 발생은 필연적이지만 냉각재 취출(Blowdown) 및 재관수(Reflood)시의 CHF 발생 조건(발생 시점 등)이 첨두 피복재 온도(Peak Cladding Temperature: PCT) 등 안전 변수들에 큰 영향을 미친다. 이 밖에도 임계 열유속은 증기 발생기 설계, 화력 발전소의 증기 보일러 설계, 핵융합로 냉각시스템 설계 등에서 중요하게 고려되고 있다.

열전달 기기의 설계에서 임계 열유속 조건을 고려하기 위해서는 예상되는 운전 조건에서 CHF를 예측할 수 있어야 한다. 따라서 지난 50여년간 임계 열유속 현상을 이해하고 신뢰할만한 예측 방법을 확립하기 위한 연구가 원자력계를 중심으로하여 광범위하게 수행되어 왔으며, 그 결과 원형관(Round Tube), 환상관(Annulus), 봉 다발(Rod Bundle) 등에 대한 수백여 가지의 예측 모델들이 개발되었다. 각 모델들은 저마다의 적용 범위와 예측 오차를 지니고 있는데, 모든 운전 영역(기하학적 형태 및 유동 변수)에 대해서 우수한 예측 성능을 보이는 모델은 개발되지 않았으며, 당분간 기대하기도 어렵다. 따라서 새로운 열수력 기기를 설계할 때는 임계 열유속에 대한 최적 예측 모델의 선정이 중요한 과제로 떠오른다.

사용될 예측 모델은 일반적으로 적용 범위와 예측 성능을 기준으로 선정된다. 우선, 고려되고 있는 유로의 형상(Channel Geometry) 및 크기, 유체의 종류, 압력, 유량, 엔탈피(입구 또는 국부) 등이 각 예측 모델 개발시 사용된 실험 데이터베이스의 범위에 포함되는가를 분석하면 사용 가능한 예측 모델들을 도출할 수 있다. 이들 중에서 어떤 모델이 가장 적합한 것인가는 주로 예측 성능이 결정한다. 해석의 신뢰도를 높이기 위해서는 가능하면 예측 오차(Prediction Error)가 작은 모델을 선정해야 하며, 비슷한 예측 오차를 보이는 모델 중에서는 계산이 간단한 모델들이 선호될 것이다.

그런데 CHF 예측 모델에 대한 예측 오차 평가에서는 통일된 방법이 사용되지 않고 있으며, 이로 인하

여 문헌에 제시된 예측 오차가 잘못 이해되는 경우가 있다. 이러한 점은 CHF 예측 모델의 유형 및 사용 방법이 다양한데서 기인하며, 따라서 이에 대한 정확한 이해가 요구된다. 이 글에서는 이러한 사항들을 전반적으로 다루며, 또한 CHF 여유(CHF Margin) 척도와 관련된 사항도 논의하고자 한다.

2. CHF 예측 모델과 오차

2.1. CHF 예측 모델의 종류

임계 열유속은 (가) 실험 상관식 (Empirical Correlations), (나) 표를 이용하는 방법 (Table Look-up Technique), (다) 이론적 또는 역학적 모델 (Theoretical or Mechanistic Models) 등 3 가지 방법에 의해 주로 예측된다. 실험 상관식은 주요 변수의 영향 분석 또는 무차원 해석 결과 등을 이용하여 일정한 상관식 함수 형태(일차 변수 또는 무차원 변수 사용)를 가정하고, 실험 데이터에 대한 회귀 분석 (Regression Analysis)을 수행하여 필요한 상관 상수들을 구한다. 임계 열유속 표는 넓은 영역에서의 CHF가 간단한 함수 형태로 표현되기 어려운 점에 착안하여, 독립 변수의 변화에 따른 CHF 값을 표의 형태로 제시한 것이다. 한편 역학적 모델은 CHF 발생시의 유체 거동을 구체적으로 분석하여 CHF 발생 조건을 결정하는 것으로서, 가정되는 메커니즘에 따라 여러 가지 모델들이 도출된다. 이상의 구분 방법은 CHF 모델이 어떠한 형태로 표현되는가에 따른 것이지만, 몇 가지 제한된 독립변수들을 이용하여 CHF를 예측한다는 점에서는 차이가 없다.

임계 열유속 연구에서 기본이 되는 균일 가열 수직 원형관(Uniformly Heated Vertical Round Tubes)에 대한 실험 데이터들은 보통 다음과 같은 변수 값들을 포함하고 있다.

$$D; L_h; P; G; \Delta h_i; q_c; X_c$$

여기서 D 는 관의 내경(Rod Diameter), L_h 는 가열 길이(Heated Length), P 는 압력(Pressure), G 는 질량 유속(Mass Flux), Δh_i 는 입구 미포화도(Inlet Subcooling), q_c 는 임계 열유속, X_c 는 임계 건도(Critical Quality)이다. 여기서 앞의 5 가지 변수($D, L_h, P, G,$

L_h, P, G, h_i)는 실험에서 제어되는 독립 변수 (Independent Variable)들이고, 뒤의 q_c 와 X_c 는 주어진 독립 변수에 따라 결정되는 종속 변수(Dependent Variable)이다. 이 밖에 가열면의 재질이나 표면 거칠기, 가열 방법 등도 CHF에 영향을 미칠 수 있으나, 그 영향이 위의 5 가지 변수에 비해 작고 또한 불명확하여 예측 모델에서는 거의 고려되지 않는다.

균일 가열 수직 원형관에서의 임계 열유속은 일반적으로 관 출구에서 발생하며, 5 가지 입구 조건의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$q_c = f_1(D : L_h; P : G : \Delta h_i \text{ 또는 } X_i) \quad (1)$$

(입구 조건 관점 A)

그런데 CHF 데이터에서 입구 미포화도와 임계 건도는 열평형식에 의해 다음 관계를 갖는다.

$$X_c = \frac{1}{h_{fg}} \left(\frac{4q_c L_h}{DG} - \Delta h_i \right) \quad (2)$$

또는

$$L_h = \frac{DG h_{fg}}{4} \cdot \frac{X_c - X_i}{q_c} \quad (3)$$

여기서 h_{fg} 는 액체의 기화열, X_i 는 입구 건도이다. 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 가열 길이를 소거하면 다음 형태의 상관식도 가능하다.

$$q_c = f_2(D, \frac{X - X_i}{q}, P, G, \Delta h_i \text{ 또는 } X_i) \quad (4)$$

(입구 조건 관점 B)

여기서는 반복 계산을 피하기 위해 q_c 및 X_c (계산될 값) 대신에 q 및 X (측정 값 또는 운전 값)가 일반적으로 사용된다.

한편 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 입구 미포화도 (또는 입구 건도)를 소거하면 임계 건도(출구 건도)를 사용한 상관식 형태를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$q_c = f_3(D, L_h, P, G, X_c) \quad (\text{출구 조건 관점})(5)$$

관의 직경에 비해 길이가 충분히 길 때는 동일한 출구 조건에서 관 길이가 CHF에 미치는 영향이 무시될 수 있고, 이 경우에는 식 (5)가 다음과 같은 형태로 근사된다.

$$q_c = f_4(D, P, G, X_c) \quad (\text{국부 조건 가설}) \quad (6)$$

그런데 임계 건도가 0보다 클 때, 임계 건도 X_c 와 비등 길이 L_B 간에는 다음 관계가 성립한다.

$$L_B = \frac{DG h_{fg} X_c}{4q_c} \quad (\text{비등 길이}) \quad (7)$$

따라서 국부 조건 가설에 따른 CHF 상관식은 다음과 같이 표현될 수도 있다.

$$q_c = f_5(D, L_B, P, G) \quad (8)$$

식 (6)과 (8)에서 q_c 를 소거하면 다음 형태의 식이 얻어진다.

$$X_c = f_6(D, L_B, P, G) \quad (9)$$

일반적으로 균일 가열 수직 원형관에 대한 실험 상관식은 실험 데이터에 대한 회귀 분석을 통해 식 (1), (4), (5), (6), (8), (9) 중 어느 한 형태로 개발된다. 이론적 모델도 본질적으로는 이와 같으며, 임계 열유속 표는 식 (6)의 형태로 제시된다. 여기서 어느 한 형태로 표현된 CHF 상관식에 열평형식을 대입하면 쉽게 다른 형태로 변환될 수 있다는 점을 주목할 필요가 있다. 입구 조건 상관식인 식 (1)에 식 (2)를 대입하면 출구 조건 상관식인 식 (5) 형태가 되고, 경우에 따라서는 가열 길이가 소거되어 국부 조건 상관식인 식 (6) 형태로 변환되기도 한다. 반대로 식 (5) 또는 (6)에 식 (2)를 대입하면 식 (1) 형태가 된다. 그리고 식 (6)과 식 (9)는 식 (7)을 이용하면 서로 변환 가능하다. 예를 들어 국부 조건 가설을 채택하고 CHF와 입구 미포화도와 선형 관계를 가정하여 개발된 Macbeth[2] 또는 Bowring[3] 상관식은 다음과 같이 두 가지 형태가 함께 제시되어 있다.

$$q_c = \frac{A' + DG \Delta h_i / 4}{C + L_h} \quad (10)$$

또는

$$q_c = \frac{A' - DG h_{fg} X_c / 4}{C} \quad (11)$$

여기서 A' 또는 C 는 관 직경, 질량 유속 및 압력만의 함수이다.

열유속 분포가 균일하지 않거나 유로 형태가 다른 경우에도 상관식 표현 방법은 매우 유사하며, 불균일한 열유속 분포의 영향이나 봉 다발에서의 부수로간의 유동 혼합 효과 등을 반영하기 위한 인자들이 추가로 도입된다. 참고로 표 1은 여러 가지 표현 방법에 따른 대표적인 상관식들을 예시하고 있다. 표에서 혼합 조건(준국부 조건) 상관식은 국부 조건 변수인 X_c 와 입구 조건 변수인 h_i (또는 X_i)를 함께 사용하여

표 1. 상관식 표현 방법에 따른 대표적 상관식

	구 분 표현 식	대표적 상관식
국부 조건	식 (5) KRB-1[4]	
	식 (6) CE-1[5], AECL 표[6], Biasi[7]	
	식 (8) Green[8]	
	식 (9) CISE-4[9]	
입구 조건	식 (1) Barnett[10], Bowring[3]*	
	식 (4) EPRI[11]	
혼합 조건 (준국부 조건)	-	W-3[12], PI-1[13]

주 * 국부 조건 형태도 함께 제시되어 있으나, 상관 계수들은 입구 조건 형태에 대해 결정되었으며, 또한 입구 조건 형태가 널리 사용되고 있음.

개발된 상관식 형태이다.

2.2. CHF 예측 방법과 오차

일반적으로 CHF 모델들은 그 모델 개발에 사용되었던 실험 데이터들에 대한 예측 성능과 함께 제시되어 있으며, 여기서 사용되는 가장 기초적인 변수는 실험 값에 대한 예측 값의 비(또는 예측 값에 대한 실험 값의 비)인 R 이다.

$$R_i = \frac{q_{c,cor,i}}{q_{c,exp,i}} = \frac{\text{상관식에 의해 예측된 CHF}}{\text{실험에서 측정된 CHF}} \quad (12)$$

이와 관련하여 다음 통계량들이 상관식의 예측 성능을 나타내는 지표로 사용된다.

$$\bar{R} \text{ (또는 } \mu) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \text{ (평균 예측비)} \quad (13)$$

$$S_R \text{ (또는 } \sigma_R) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (14)$$

(표준 편차)

여기서 평균 예측비 \bar{R} 가 1에 가깝고, 표준 편차 S_R 이 작을수록 바람직하다.

이와 함께 상대적인 예측 오차(Prediction Error)가 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\epsilon_i = \frac{q_{c,cor,i} - q_{c,exp,i}}{q_{c,exp,i}} = R_i - 1 \quad (15)$$

이와 관련된 주요 통계량은 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \text{ (평균 오차)} \quad (16)$$

$$|\bar{\epsilon}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\epsilon_i| \text{ (평균 절대 오차)} \quad (17)$$

$$\epsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} \text{ (RMS 오차)} \quad (18)$$

좋은 상관식일수록 평균 오차(Mean Error)는 0에 아주 가깝고, 평균 절대 오차 및 RMS 오차가 작을 것이다. 여기서 식 (14)로 정의되는 표준 편차와 식 (18)으로 정의되는 RMS 오차간의 차이를 명확히 해 둘 필요가 있다. 두 값은 \bar{R} 가 1일 때(즉 평균 오차가 0일 때)는 본질적으로 같지만, 그렇지 않은 경우에는 RMS 오차가 일반적으로 크다. 예를 들어 한 상관식이 실험 데이터를 일관성 있게 높게 예측한다면, RMS 오차가 표준 편차에 비해 훨씬 크게 나타난다.

이번에는 예측 방법에 따라 오차가 어떻게 달라지는가를 살펴 보자. 앞에서 논의한 바와 같이 균일 가열 원형관에서의 CHF 상관식(표 및 이론적 모델을 포함)에는 기본적으로 국부 조건 상관식과 입구 조건 상관식의 두 종류가 있다. 균일 가열관에 대한 열평형 형식을 사용하면 두 상관식 형태간에는 서로 변환 가능하며, 그 구체적인 예가 식 (10)과 (11)이다. 그러나 예측 오차는 표현 방식 및 사용 방법에 따라 크게 다르게 나타나는데[6, 14-16], 여기서는 이에 대해 논 의한다.

먼저 국부 조건 상관식인 식 (6)을 입구 조건 상관식인 식 (1) 형태로 변환하는 과정을 살펴 보자. 여기서 국부 조건 상관식에 사용된 임계 건도는 다음과 같다.

$$X_c = \frac{1}{h_{fg}} \left(\frac{4q_{c,exp}L_h}{DG} - \Delta h_i \right) \quad (19)$$

이 식을 식 (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$q_{c,cor} = f_4 \left[D, P, G, \frac{1}{h_{fg}} \left(\frac{4q_{c,exp}L_h}{DG} - \Delta h_i \right) \right] \quad (20)$$

여기서 $q_{c,exp}$ (실험 값)가 $q_{c,cor}$ (상관식에 의한 예측 값)와 같다고 가정하여 정리하면, 식 (1) 형태의 입구 조건 상관식이 얻어진다. 그러나 실험 값과 예측 값이 정확히 일치할 수는 없으므로, 동일한 것처럼 보이는 두 상관식이 실제로는 약간 다르며, 이것이 서로 다른 예측 오차를 보일 수 있는 근본 원인이다.

표 1에서도 알 수 있듯이 많은 CHF 예측 모델들은 국부 조건들을 주된 독립 변수로 하여 개발되어 왔다. 이러한 국부 조건(또는 준 국부 조건) 상관식을 사용한 CHF 예측에서는 국부 조건만을 상관식에 바로 대입하여 CHF를 예측하기도 하고(국부 조건 관점), 입구 조건으로부터 출발하여 열평형식을 함께 고려하면서 CHF가 일어나는 열유속을 반복 계산에 의해 찾기도 한다(입구 조건 관점). 두 방법은 Inasaka와 Nariai[14]에 의해 직접 대입 방법(Direct Substitution Method; DSM)과 열평형 방법(Heat Balance Condition Method; HBM)으로 각각 명명되었는데, 각 계산 절차를 그림 1에 도시하였다. 두 방법 중에서 실제 이용에 있어서는 직접 대입법이 보다 널리 사용되어 왔다.

두 방법에 따른 예측 오차의 차이는 유로 형상, 압력, 질량 유속, 입구 온도 등이 일정할 때, 건도와 열유속간의 관계를 나타낸 그림 2를 이용하여 설명하겠다. 그림에서 CHF 상관식 곡선(CHF Correlation Curve)은 임의의 국부 조건 상관식이 예측하는 CHF 값을 나타내며, 일반적으로 건도가 증가함에 따라 감소하는 함수이다. 열평형선(Heat Balance Line)은 열유속과 국부 엔탈피와의 관계를 나타낸 것으로서, 균일하게 가열되는 유로의 경우에는 직선으로 나타난다. 정상 운전 또는 준정상 운전 상태에서 열평형 관계는 항상 성립하므로, 주어진 조건에서 실험 데이터 또는 운전 조건은 열평형선 상에 위치한다.

이제 어떤 실험 데이터 베이스에 대한 국부 조건 상관식의 예측 오차를 생각해 보자. 임의의 개별 데이터에 대해 상관식은 CHF를 높게 예측할 수도 있고(A), 낮게 예측할 수도 있으며(B), 경우에 따라서는 정확하게 예측하기도 한다(C). 실험 데이터는 열평형선 상에 위치하므로, 실험에서 측정된 CHF 값은 각각 $q_{exp,A}$, $q_{exp,B}$, $q_{exp,C}$ 이다. 직접 대입법에서는 건도를 CHF 상관식에 직접 대입하여 CHF를 구하므로, 예측되는 CHF는 각각 $q_{cor,A,DSM}$, $q_{cor,B,DSM}$, $q_{cor,C,DSM}$ 이라 할 수 있다. 따라서 그림 2의 건도 X_A , X_B , X_C 에 대한 직접 대입법의 예측 절대 오차는 각각 $|q_{cor,A,DSM} - q_{exp,A}|$, $|q_{cor,B,DSM} - q_{exp,B}|$ 및 0이 될 것이다. 반면에 열평형 방법에서는 국부 조건 상관식과 열평형식을 동시에 만족시키는 열유속을 찾아내므로, 상관식 곡선과 열평형선이 교차하는 지점의 열유속을 CHF로 예측한다. 따라서 입구 조건이 같다면 예측되는 CHF

는 국부 건도에 관계 없이 $q_{cor,HBM}$ 으로 항상 같으며, 앞의 세 가지 경우에 대한 예측 절대 오차는 각각 $|q_{cor,HBM} - q_{exp,A}|$, $|q_{cor,HBM} - q_{exp,B}|$ 및 0이 된다. 그럼으로부터 예측 절대 오차에 대한 다음 관계가 항상 성립함을 알 수 있다.

$$|e|_{DSM,i} = \frac{|q_{c,DSM,i} - q_{c,exp,i}|}{q_{c,exp,i}} \geq \frac{|q_{c,HBM,i} - q_{c,exp,i}|}{q_{c,exp,i}} = |e|_{HBM,i} \quad (21)$$

즉, 같은 국부 조건 상관식을 사용했을 때 DSM의 예측 오차는 HBM의 예측 오차에 비해 항상 크다.

이상의 논의가 타당함을 입증하기 위해 KAIST의 CHF 데이터 베이스[17]를 사용하여 표 2에 제시된 Biasi 상관식[7], W-3 상관식[12] 및 Bowring 상관식[3]을 평가하였다. 이들은 수직 원형관에서의 CHF 예측에 사용되는 대표적인 상관식들이다. Biasi 상관식은 국부 조건 상관식이므로, 그림 1과 같이 직접 대입 방법과 열평형 방법을 적용하였다. W-3 상관식은 국부 조건 형태에 가까운 혼합 조건 상관식으로서, 직접 대입 방법에서는 실험 데이터의 D , L_n , P , G , h , X_c 를 상관식에 직접 대입하였고, 열평형 방법에서는 입구 조건과 열평형식만으로 CHF를 구하였다. Bowring 상관식은 참고 문헌 3에 입구 조건 변수 형태 및 국부 조건 변수 형태로 각각 제시되어 있는데, 이는 국부 조건 상관식만 주어졌을 경우의 열평형 방법 및 직접 대입 방법에 각각 대응된다. 예측 성능 평가에서는 적용 범위 안에 포함되는 실험 데이터들만을 이용하였으며, 그 결과가 표 3에 요약되어 있다. 표 3으로부터 국부 조건 상관식을 직접 대입 방법으로 사용하는 경우가 열평형 방법(또는 입구 조건 형태)으로 사용하는 경우에 비해 훨씬 큰 예측 오차를 보이는 것을 알 수 있다.

위와 같은 논의는 국부 조건(또는 준 국부 조건) 상관식에 대해서만 적용되며, CHF가 국부 건도의 감소 함수이기 때문에 성립한다. 만일 CHF가 국부 건도에 따라 증가한다면 오히려 HBM의 예측 오차를 줄이겠지만, 이러한 경우(수평관에서의 일부 유동 영역 등)는 극히 드물다. 만일 CHF 상관식이 국부 건도와 무관하게 주어져 있다면(입구 조건 상관식 등), DSM 및 HBM에 의한 예측 오차는 서로 같으며, 구분이 무의미하다.

표 2. 평가에 사용된 CHF 상관식

<p>Biasi 상관식[7]</p>	<p>$q_c = \text{The higer of } [q_{c, low-X}, q_{c, high-X}]$</p> <p>여기서 $q_{c, low-X} = \frac{1.883 \times 10^4}{(100D)^n (0.1G)^{1/6}} \left[\frac{f(P)}{(0.1G)^{1/6}} - X \right]$</p> <p>$q_{c, high-X} = \frac{3.78 \times 10^4 h(p)}{(100D)^n (0.1G)^{0.6}} (1 - X)$</p> <p>$n = \begin{cases} 0.4 & D \geq 0.01 \text{ m} \\ 0.6 & D < 0.01 \text{ m} \end{cases}$</p> <p>$f(P) = 0.7249 + 0.00099P e^{-0.00032P}$</p> <p>$h(P) = -1.159 + 0.00149P e^{-0.00019P} + \frac{0.0899P}{10 + (0.01P)^2}$</p>											
<p>W-3 상관식[12]</p>	<p>$q_c = 3154.6 [2.022 - 0.0000624P + (0.1722 - 0.0000143P) e^{(18.177 - 0.000599P)X_c}]$ $\times [(0.1484 - 1.596X_c + 0.1729X_c X_D)(0.0007373G) + 1.037]$ $\times (1.157 - 0.869X_c) \times (0.2664 + 0.8357 e^{-124.1D})$ $\times (0.8258 + 3.41 \times 10^{-4} \Delta h_i)$</p>											
<p>Bowring 상관식[3]</p>	<p>- 입구 조건 상관식 : $q_c = \frac{A' + 0.25DG\Delta h_i}{C + L_h}$</p> <p>- 국부 조건 상관식 : $q_c = \frac{A' - 0.25DGh_{fg}X}{C}$</p> <p>여기서 $A' = \frac{2.317(0.25 h_{fg} DG) F_1}{1 + 0.0143 F_2 D^{1/2} G}$; $C = \frac{0.077 F_3 DG}{1 + 0.347 F_4 (G/1356)^n}$</p> <p>$n = 2.0 - 0.5P_r$; $P_r = P/6895$</p> <table border="1" data-bbox="375 1381 1236 1634"> <thead> <tr> <th data-bbox="375 1381 875 1430">$P < 6895 \text{ kPa}$</th> <th data-bbox="875 1381 1236 1430">$P > 6895 \text{ kPa}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="375 1430 875 1489">$F_1 = [P_r^{18.942} e^{20.89(1-P_r)} + 0.917]/1.917$</td> <td data-bbox="875 1430 1236 1489">$F_1 = P_r^{-0.368} e^{0.648(1-P_r)}$</td> </tr> <tr> <td data-bbox="375 1489 875 1538">$F_1/F_2 = [P_r^{1.316} e^{2.444(1-P_r)} + 0.309]/1.309$</td> <td data-bbox="875 1489 1236 1538">$F_1/F_2 = P_r^{-0.448} e^{0.245(1-P_r)}$</td> </tr> <tr> <td data-bbox="375 1538 875 1577">$F_3 = [P_r^{17.023} e^{16.658(1-P_r)} + 0.6671]/1.667$</td> <td data-bbox="875 1538 1236 1577">$F_3 = P_r^{0.219}$</td> </tr> <tr> <td data-bbox="375 1577 875 1634">$F_4 = F_3 P_r^{1.649}$</td> <td data-bbox="875 1577 1236 1634">$F_4 = F_3 P_r^{1.649}$</td> </tr> </tbody> </table>		$P < 6895 \text{ kPa}$	$P > 6895 \text{ kPa}$	$F_1 = [P_r^{18.942} e^{20.89(1-P_r)} + 0.917]/1.917$	$F_1 = P_r^{-0.368} e^{0.648(1-P_r)}$	$F_1/F_2 = [P_r^{1.316} e^{2.444(1-P_r)} + 0.309]/1.309$	$F_1/F_2 = P_r^{-0.448} e^{0.245(1-P_r)}$	$F_3 = [P_r^{17.023} e^{16.658(1-P_r)} + 0.6671]/1.667$	$F_3 = P_r^{0.219}$	$F_4 = F_3 P_r^{1.649}$	$F_4 = F_3 P_r^{1.649}$
$P < 6895 \text{ kPa}$	$P > 6895 \text{ kPa}$											
$F_1 = [P_r^{18.942} e^{20.89(1-P_r)} + 0.917]/1.917$	$F_1 = P_r^{-0.368} e^{0.648(1-P_r)}$											
$F_1/F_2 = [P_r^{1.316} e^{2.444(1-P_r)} + 0.309]/1.309$	$F_1/F_2 = P_r^{-0.448} e^{0.245(1-P_r)}$											
$F_3 = [P_r^{17.023} e^{16.658(1-P_r)} + 0.6671]/1.667$	$F_3 = P_r^{0.219}$											
$F_4 = F_3 P_r^{1.649}$	$F_4 = F_3 P_r^{1.649}$											

표 3. 상관식의 사용 방법에 따른 예측 오차

상관식	사용방법	예측성능 (전체 데이터)			예측성능 ε _{RMS} < 1.0인 데이터)			절대오차(%)					
		n	\bar{R}	ε _{RMS}	n	\bar{R}	ε _{RMS}	<10%	<20%	<30%	<40%	<50%	<50%
		Biasi	직접 대입법	7,552	1.242	0.721	6,948	1.092	0.321	28.5	51.8	65.7	74.2
	열평형 방법	1,045	0.146	7,546	1,044	0.142	70.1	88.6	94.7	97.3	98.5	1.5	W-3
W-3	직접 대입법	1,245	1.098	0.348	1,239	1.091	0.223	44.9	71.1	84.1	91.7	95.3	4.7
	열평형 방법		1.026	0.255	1,020	0.078	89.4	97.8	98.6	99.0	99.2	0.8	1,240
Bowring	국부 조건식	8,438	1.012	0.844	7,944	0.893	0.651	27.3	48.1	60.3	68.0	73.6	26.4
	입구 조건식		1.001	0.102	8,346	1.001	0.100	80.3	94.7	98.0	99.1	99.7	0.3

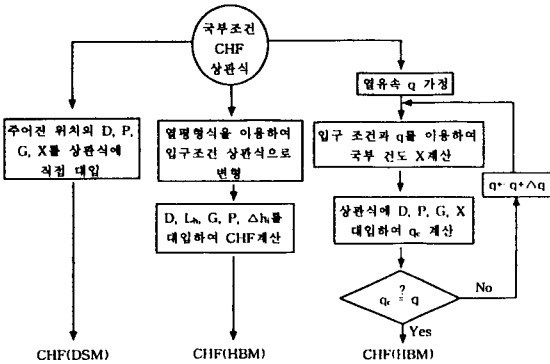


그림 1. 국부 조건 상관식을 이용한 CHF 예측 절차

3. CHF 여유도와와의 관계

3.1. CHF 여유도

임의의 열전달 기기에 대해 임계 열유속을 예측하는 목적은 1) 주어진 위치에서 임계 열유속 상태의 발생 여부를 결정하거나, 2) 임계 열유속 발생에 대한 여유도(현재의 운전 조건과 예측되는 임계 열유속 조건과의 차이)를 결정하기 위한 것이다. 과열 증기를 생산하는 증기발생기 등에서는 CHF 조건의 발생이 필연적이므로, CHF 예측은 그 위치를 정확히 예측함으로써 열수력 설계 계산을 합리적으로 하기 위한 것이다. 정상 운전 또는 과도 상태의 수냉각형 원자로에서는 CHF가 발생하면 핵연료봉이 파손이 유발될 가능성이 크므로, CHF 예측은 이에 대한 충분

한 여유도가 확보되어 있는지를 확인하는데 주로 이용된다.

임계 열유속에 대한 여유도(CHF Margin)을 나타내는 척도로는 임계 열유속비(Critical Heat Flux Ratio: CHF_R)와 임계 출력비(Critical Power Ratio: CPR)가 널리 이용되며, 다음과 같이 정의된다.

$$CHF_R = \frac{q_c}{q} = \frac{\text{상관식에 의해 예측되는 CHF}}{\text{주어진 위치에서의 실제 열유속}} \quad (22)$$

$$CPR = \frac{Q_c}{Q} = \frac{\text{상관식에 의해 예측되는 임계 출력}}{\text{주어진 유로에서의 실제 출력}} \quad (23)$$

CHF 상관식이 합리적인 예측을 한다고 가정하면, CHF_R 또는 CPR이 1.0일 경우 CHF 발생 확률은 50% 정도라고 할 수 있으며, 그 값들이 커질수록(예측되는 CHF 조건과 실제 운전 조건과의 차이가 커질수록) CHF의 발생 확률이 줄어든다. 여기서 CPR은 하나의 유로(워킹관, 환상관, 봉 다발 등) 전체를 생각하여 정의되는 척도이다. 그러나 CHF_R은 각 국부 위치에 대해 정의되는 값이므로, 전체 유로에서의 CHF 여유도를 나타내기 위해서는 모든 국부 위치에 대한 CHF_R 중에서의 최소값, 즉 최소 임계 열유속비(Minimum CHF_R: MCHF_R)가 척도로 사용된다. 뒤에서도 설명되겠지만, 하나의 동일한 유로에 대해 같은 CHF 상관식을 사용하더라도, 계산되는 MCHF_R과 CPR은 경우에 따라 크게 달라질 수 있음에 유의해야 한다.

3.2. 예측 방법과 CHF 여유도

두 개의 국부 조건 상관식 A, B가 있고, 두 상관식 모두 실험 데이터를 잘 예측하고 있다고 가정하자. 즉

$$\overline{\epsilon_A} \approx \overline{\epsilon_B} \approx 0 ; \epsilon_{RMS,A} \approx \epsilon_{RMS,B} \ll 1.0 \quad (24)$$

임의의 균일 가열관에서 상관식 적용 범위 내의 유동 조건이 형성되어 있을 때, CHF 여유도와 관련한 다음 사항들이 성립한다.

- 1) 직접 대입 방법에 의해 두 상관식이 계산해내는 최소 임계 열유속비(MCHFR)는 서로 크게 다를 수 있다.
- 2) 열평형 방법에 의해 두 상관식이 계산해내는 MCHFR은 거의 같다.
- 3) 직접 대입 방법에 의해 계산되는 MCHFR은 열평형 방법에 의해 계산되는 값보다 크다.
- 4) 열평형 방법에 의해 계산되는 MCHFR은 임계 출력비(CPR)와 같다.

위의 1) 항은 실험 데이터에 대해 유사한 예측 성능을 보이는 CHF 상관식들이라 하더라도 건도에 대한 의존도가 서로 다른 특성에 기인한다. CHF 여유도는 상관식 개발에 사용되었던 임계 건도보다 훨씬 낮은 건도의 운전 조건(CHF 발생 조건으로부터 멀리 떨어져 있음)에 대해 평가하는 것이므로, 국부 조건 상관식의 건도 의존도에 따라 DSM으로 계산되는 CHF가 크게 달라질 수 있다. 2) 항과 4) 항은 열평형 방법과 MCHFR 및 CPR의 정의로부터 명백해진다. 반면에 세 번째 항은 그림 3으로부터 쉽게 이해될 수 있다. 그림 2에서는 CHF 실험 데이터와 상관식에 의한 예측값을 비교하는 경우이므로 데이터가 두 선간의 교차점의 어느 쪽이든 위치할 수 있었지만, 그림 3에서는 CHF가 발생하지 않은 상태에서 여유도를 평가하는 것이므로, 운전 조건의 위치는 교차점보다 왼쪽에 있는 것이 일반적이다. 그림에서 직접 대입 방법이 예측하는 CHF는 열평형 방법보다 높고, 이는 곧 높은 CHF를 나타낸다.

그림 4는 몇 가지 상관식에 대해 직접 대입 방법과 열평형 방법이 예측하는 임계 열유속비를 비교하고 있다[16]. 여기서 Bowring 상관식으로는 입구 조건 상관식이 사용되었으므로, 계산되는 MCHFR과 CPR이 같다. 그러나 국부 조건 또는 준 국부조건 상관식

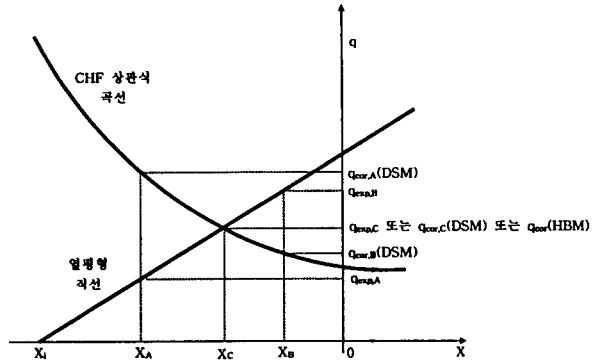


그림 2. 국부 조건 상관식에 대한 DSM과 HBM간 예측 오차 차이

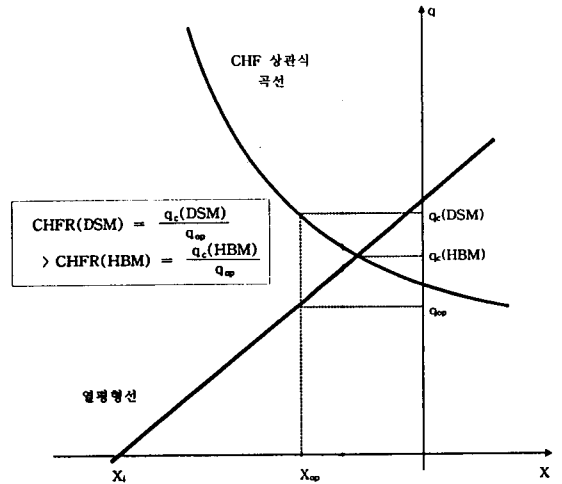


그림 3. 국부 조건 상관식에 대한 DSM과 HBM간 CHF 차이

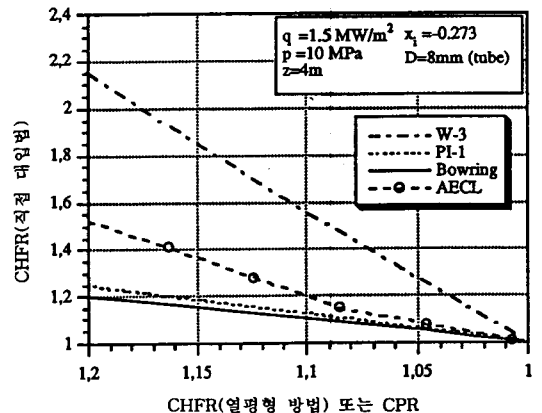


그림 4. 두 방법에 의해 계산되는 CHF의 비교

들에서는 MCHFR이 CPR보다 크게 나타나며, 같은 CPR에 대해 계산되는 MCHFR이 상관식마다 크게 다르다.

원자로 열설계 등에서 편의상 CHF를 CHF에 대한 안전 여유도의 척도로 사용하고는 있지만, 안전성 측면에서 보다 직접적인 의미를 갖는 것은 임계 출력 비라고 할 수 있다. 따라서 사용되고 있는 상관식에 대해 MCHFR과 CPR간의 관계를 파악하는 것은 중요하다. 직접 대입 방법으로 상관식 A가 MCHFR = 2.0을 계산한 운전 조건이 상관식 B가 MCHFR = 1.5를 계산한 운전 조건보다 반드시 더 큰 안전 여유를 갖는 것은 아니기 때문이다(그림 4 참조). 실제 노심에서 MCHFR과 CPR의 관계는 사용된 상관식에 대해 예상 운전 영역에서 노심 출력 변화에 대한 CHF 민감도 분석을 수행하면 대략적인 특성을 파악할 수 있다.

앞에서도 설명하였지만 DSM에 의한 MCHFR이 CPR보다 커지는 것은 CHF가 국부 건도에 대하여 감소하는 경향을 보이기 때문이다. 국부 조건 상관식은 임계 열유속과 건도 간의 열평형 관계가 성립하는 데이터들로부터 개발되었으나(즉 임계 건도가 사용됨), CHF 여유도 계산에서는 그보다 훨씬 낮은 운전 건도(X_{lim})가 사용되고, 이는 곧 CHF 예측값을 높이는 결과를 가져온다.

4. 논 의

4.1. 예측 성능 지표 및 상관식 선정

임의의 국부 조건 상관식은 어떤 방법으로 사용되는 것이 좋으며, 예측 성능을 나타내는 오차로서는 무엇이 적절한가를 생각해 보자. 정상 상태 또는 준정상 상태를 생각할 때, HBM은 보다 높은 예측 정확도를 보이며 또한 주어진 입구 조건에 대한 임계 출력과 직접적인 연관성을 지닌다. 따라서 CHF 안전 여유도 측면에서는 HBM 방법을 사용하는 것이 합리적이며, 예측 성능도 이를 기준으로 판단해야 한다는 견해들이 있다[16, 18].

그러나 HBM은 입구로부터의 열평형 관계를 세우기 어려워(과도 상태, 국부적인 높은 열유속 조건 등) 사용이 불가능하거나 DSM에 비해 훨씬 복잡한

계산을 수반하는 경우가 많다. 따라서 가압경수로의 노심 설계에서는 흔히 DSM에 의한 CHF 여유도를 사용하며, RELAP5나 CATHARE 등 일반적인 안전 해석 코드들은 CHF 예측에서 DSM 방법을 사용하고 있다. 그리고 과열 증기발생기나 보일러 설계 등에서와 같이 직접 대입법에 의해 CHF를 예측해야만 하는 경우도 있다.

상관식(또는 예측 모델) 개발자들은 상관식의 예측 성능을 좋게 보이기 위해 HBM에 의한 오차만을 CHF 예측 오차로 제시하는 경우가 있다. 그러나 국부 조건 상관식에 대해 단 하나의 CHF 예측 오차만 제시되어 있을 경우, 상관식 이용자(코드 개발자 포함)들은 이를 DSM에서의 오차로 이해할 가능성이 있다. 열전달계수 등 다른 열수력 변수들은 일반적으로 상관식에 국부 조건들을 직접 대입하여 계산하기 때문이다. 따라서 상관식 개발자는 DSM과 HBM에 대해 각각 예측 오차를 명확하게 제시하는 것이 바람직하다. 그리고 HBM에 의한 예측 오차는 임계 출력에 대한 예측 오차로 명확하게 기술하면 오해의 가능성이 줄어들 것이다.

만일 주어진 데이터베이스에 대해 여러 CHF 상관식들의 예측 성능을 평가하여 상관식간의 우열을 비교할 때에는 두 가지 방법을 모두 사용하는 것이 바람직하다. 특히 한 국부 조건 상관식의 DSM 예측 오차를 다른 입구 조건 상관식의 예측 오차(DSM과 HBM이 같음)와 직접 비교하는 것은 무의미함을 지적하고자 한다. 하나의 국부 조건 상관식과 다른 입구 조건 상관식의 예측 성능을 비교하려면 국부 조건 상관식을 HBM 방법으로 사용해야만 한다.

4.2. 실험 상관식과 적용 범위

이번에는 상관식의 적용 범위와 관련하여 유의할 사항을 논의한다. 실험 상관식들은 개발시 사용된 실험 데이터들의 변수 범위(즉 적용 범위: Applicable Range) 안에서는 비교적 만족스러운 예측 결과를 보여주므로, 원자로, 증기 보일러 등 열전달 기기의 설계시에 널리 이용되고 있다. 그러나 주요 운전 변수들이 임계 열유속에 미치는 영향은 매우 복잡하여, 단순한 형태의 상관식으로 CHF를 예측하는 데에는 한계가 있다. 운전 조건에 따라 주요 변수들이 CHF

에 미치는 영향이 달라지므로, 운전 조건에 따라 함수 형태가 달라져야 하고(예 : Biasi 상관식은 2 개로 이루어져 있음), 원래의 적용 범위를 벗어나면 상관식의 예측 성능을 보장할 수 없는 것이 일반적이다.

따라서 실험 상관식을 사용할 때는 적용 범위를 잘 확인하는 것이 매우 중요하며, 특별한 이유가 없는 한 이 범위 밖에서 사용되어서는 안된다. 회귀 분석에 의해 개발되는 상관식들은 데이터 베이스의 범위를 벗어나면 정확도가 급격히 떨어질 가능성이 있기 때문이다. 예를 들어 포화 상태의 CHF(주로 액체막 건조)에 대해 개발된 Biasi 상관식을 미포화 상태의 DNB에 적용할 경우 엉뚱한 계산 결과가 나타난다.

실험 상관식의 적용 범위와 관련하여 유의할 점이 있다. 적용 범위는 대개 직경, 길이, 압력, 질량 유속, 건조(또는 입구 미포화도) 등에 대해 개별적으로 제시되는데, 참고로 Biasi 상관식의 적용 범위는 다음과 같이 주어져 있다.

$$0.003 \text{ m} < D < 0.0375 \text{ m}$$

$$0.2 \text{ m} < L_h < 6.0 \text{ m}$$

$$0.27 \text{ MPa} < P < 14.0 \text{ MPa}$$

$$100 \text{ kg/m}^2\text{s} < G < 6000 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$1/(1 + \rho/\rho_g) < X < 1$$

이 경우 적용 범위는 가상적인 5 차원 공간으로 생각할 수 있다. 그러나 상관식 개발에 사용된 실험 데이터들이 이 5 차원 공간에 적절하게 분포되지 않고, 실험 데이터가 부족하거나 없는 영역이 있으리라는 것을 쉽게 짐작할 수 있다. 따라서 적용 범위 안에서도 일부 영역에서는 매우 부정확한 예측 결과를 보여줄 가능성에 유의해야 한다.

5. 결 론

지금까지 임계 열유속 예측 모델과 관련하여 사용되고 있는 상관식 형태, 국부 조건 상관식의 적용 방법에 따른 예측 오차의 변화, 임계 열유속 여유 척도와와의 관계, 상관식 정확도 평가 기준, 최적 상관식 선정 기준 등에 대해 종합적으로 논의하였다. 예측 모델의 형태 및 적용 방법에 따라 다르게 나타날 수 있는 예측 오차의 의미를 명확하게 해석함으로써, 상관식 예측 모델과 관련된 문헌들에 제시되어 있는 예측 오차의 의미를 제대로 이해하고 최적 상관식을 선정할 수 있는 기준을 제시하였다. 국부 조건 상관식을

사용할 때, 예측 오차와 CHF 여유도 관점에서는 HBM을 기준으로 하는 것이 바람직한 것으로 판단되지만, 실제 응용에서는 DSM이 보다 널리 사용되고 있으므로 상관식 적용 방법에 따라 평가 기준 등이 달라져야 한다.

상관식의 사용자들은 오차의 해석 및 상관식 선정에 있어서 주의를 기울여야 하며, 상관식 개발자들도 적용 범위 및 예측 오차에 관한 사항들을 명확하게 제시함으로써 최종 사용자들이 잘못된 판단을 내리지 않도록 할 책임이 있다.

참고문헌

1. J.G. Collier and J.R. Thome, *Convective Boiling and Condensation*, Clarendon Press, Oxford, pp. 488-534 (1994)
2. R.V. Macbeth, *Burnout Analysis-Part 4: Application of a Local Conditions Hypothesis to World Data for Uniformly Heated Round Tubes and Rectangular Channels*, AEEW-R267 (1963)
3. Bowring, R.W. (1972), A Simple But Accurate Round Tube Uniform Heat Flux, Dryout Correlation Over the Pressure Range 0.7-17 MN/m² (100-2500 psia), AEEW-R789
4. D.H. Hwang, Y.J. Yoo, J.R. Park and Y.J. Kim, Evaluation of the Thermal Margin in a KOFA-Loaded Core by a Multichannel Analysis Methodology, *J. KNS*, **27**, 518-531 (1995)
5. F.D. Lawrence et al., Critical heat flux in PWR fuel assemblies, *Proc. AIChE-ASME Heat Transfer Conf.* (Salt Lake City, Aug. 15-17, 1977)
6. D.C. Groeneveld, S.C. Cheng, and T. Doan, 1986 AECL-UO CHF look-up table, *Heat Transfer Eng.* **7**, 46-62 (1986)
7. L. Biasi et al., Studies on burnout. Part 3 - a new correlation for round ducts and uniform heating and its comparison with world data, *Energia Nucleare* **14**, 530-537 (1967)
8. W.J. Green and K.R. Lawther, A flow boiling burnout correlations for water and Freon-12, *Nucl. Eng. Des.*, **67**, 13-25 (1981)
9. G.P. Gaspari et al., A rod-centered subchannel an-

- alysis with turbulent (enthalpy) mixing for critical heat flux prediction in rod clusters cooled by boiling water, *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.* (Tokyo, September 3-7, 1974), CONF-740925 (1975)
10. P.G. Barnett, A Correlation of Burnout Data for Uniformly Heated Annuli and Its Use for Predicting Burnout in Uniformly Heated Rod Bundles, AEEW-R463 (1966)
 11. D.G. Reddy and C.F. Fighetti, Parametric Study of CHF Data, Vol. 2. A Generalized Subchannel CHF Correlation for PWR and BWR Fuel Assemblies, EPRI Report NP-2609 (1983)
 12. L.S. Tong, Prediction of departure from nucleate boiling for an axially non-uniform heat flux distribuion, *J. Nucl. Energy* 21, 241-248 (1967)
 13. R. Pernica and J. Cizek, Critical heat flux correlations for rod bundles over a wide range of conditions, *Proc. Int. Top. Mtg. Safety of Thermal Reactors* (Lagrange Park, 1991), pp. 712-719
 14. S.K. Moon, W.P. Baek, and S.H. Chang, Parametric trends analysis of the critical heat flux based on artificial neural network, *Nucl. Eng. Des.*, To Appear (1995)
 15. F. Inasaka and H. Nariai, Evaluation of subcooled critical heat flux correlations for tubes with and without internal twisted tapes, *Nucl. Eng. Des.*, To Appear (1995)
 16. P. Hejzlar and N.E. Todreas, Consideration of CHF margin prediction by subcooled or low-quality CHF correlations, *Nucl. Eng. Des.*, To Appear (1995)
 17. S.H. Chang et al., The KAIST CHF Data Bank, Internal Report KAIST-NUSCOL-9401 (May 1994)
 18. M.E. Nissley, A.J. Friedland, R.P. Knott, Considerations for comparing CHF correlations, *Proc. 2nd Int. Top. Mtg on NPP T/H and Oper.*, Tokyo (April 1986)