2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 노심 조건에 대한 CHF Look-up Table 방법론 평가

Assessment of the CHF Look-up Table Method for SMART Core Conditions

황대현, 유연종, 지성균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 노심 조건을 포함하는 정방형 집합체 CHF 실험 자료에 대하여 1995 AECL-IPPE CHF table 방법론을 적용하여 예측 성능을 평가하였다. 부수로 해석 코드 MATRA로 계산한 실험집합체 내의 국부 열수력장을 사용하여 CHF를 평가하였으며, HBM과 DSM에 의한 예측 성능을 비교하였다. 수로 길이(K_1)와 지지격자(K_3), 그리고 가열 길이(K_4)에 대한 보정 인자를 적용하였으며, 축방향 비균일 출력 분포의 경우에는 Tong F-factor와 Groeneveld의 K_5 인자를 적용하였다. 53 종류 실험집합체 3184 개 실험 자료에 대하여 분석하였으며, 수로 직경 및 지지격자에 대한 보정 인자의 타당성을 검토하였다. 분석 결과 전체 실험 자료에 대하여 HBM 및 DSM으로 평가한 P/M의 평균/표준 편차는 각각 1.022/0.079 및 1.069/0.245로 나타났다.

Abstract

The applicability of CHF look-up table method is assessed for the experimental CHF data with square-lattice rod bundles under various thermal-hydraulic conditions including SMART core conditions. The local thermal-hydraulic conditions inside the test bundles are calculated by the subchannel analysis code MATRA, and used for the evaluation of CHF with HBM and DSM. The geometrical correction factors for the channel diameter(K_1), the spacer grids(K_3), and the heated length(K_4) are applied to the CHF table. Tong's F-factor and Groeneveld's K_5 factor are employed to the test bundles with non-uniform axial power shapes. Total number of 3184 data points from 53 kinds of test bundles are evaluated in this study. As the result, the mean/standard deviation of P/M ratio by HBM and DSM are calculated as 1.022/0.079 and 1.069/0.245, respectively.

1. 서론

CHF lookup table은 도표 형태로 규격화된 자료를 사용하여 CHF를 예측하는 방법으로서, 러시아에서 처음으로 제안한 것으로 알려져 있다[1]. 1976년에 USSR Academy of Science에서 표준 CHF 도표를 발표한 이후, 추가적인 실험 자료 분석을 통하여 지금까지도 계속 수정된 CHF 도표가 발표되고 있으며, 이와는 독립적으로 카나다에서 1986년 Groeneveld 등이 CHF 도표 기법을 발표하였다[2]. 최근에 카나다와 러시아가 주축이 되어 원형관에 대하여 수행된 30000개 이상의 실험 자료를 바탕으로 1995 AECL-IPPE CHF table[3]을 발표하였다. CHF 도표는 전세계적으로 수행되었던 원형관에 대한 CHF 실험자료를 거의 망라하였기 때문에 적용 범위가 매우 넓으며, 추가적인 실험 자료가 확보되면 계속적으로 보완될 수 있는 장점이 있다. 도표 기법이 기본적으로 interpolation 방법으로만 적용 가능하다는 것을 단점으로 지적하는 경우도 있으나, 실제로 CHF 예측에 적용하는 경우 extrapolation이 필요한 경우는 거의 없다. 그러나 저압력 저유속 조건에서의 실험 자료는 여전히 부족한 상태이며, 특히 이 영역에서 CHF 현상은 미시적인 CHF 메카니즘과 거시적인 유동장 특성이 복합적으로 작용하여 나타나므로 실험 자료의 규격화가 어렵다. 그리고 핵융합로의 경우와 같이 과냉도가 크고 질량 유속이 매우 빠른 조건에서는 CHF 도표 기법의 예측 성능을 보완할 필요가 있다.

CHF 도표 기법은 매우 넓은 적용 범위에서 비교적 정확한 CHF 예측 성능을 보이므로 RELAP5나 CATHARE 등과 같은 사고 해석 코드에 사용되고 있다. Groeneveld의 1986 CHF 도표 기법은 기본적으로 직경이 8mm인 원형관에 대하여 표준화된 것이며, 이를 다양한 채널 기하 형태에 적용하기 위한 여러 가지 보정 인자들을 제시하고 있다. 이들 중에는 집합체에서의 열수력장 특성을 고려하기 위한 인자(bundle effect와 spacer grid effect)들이 포함되어 있으며, 신형원자로나 가압경수로 조건에서의 집합체 보정 방법론에 대한 연구도 있다[4,5]. 부수로 해석 코드를 사용하면 기본적으로 bundle effect를 고려하는 인자는 사용할 필요가 없다. Groeneveld 등[6]은 CHF 도표 기법을 부수로 해석 코드와 함께 적용하면서, 여러 가지 부수로 기하 형태(gap size, unheated wall, heater surface curvature 등)에 대한 보정 인자들을 제시하였으며, Chun 등[7]은 부수로 해석 코드를 사용하여 CHF 도표 기법이 정방형 및 비정방형 집합체에서의 CHF 예측에 적용될 수 있음을 보였다.

CHF 도표 기법과 같이 단순한 채널에 대하여 개발된 CHF 예측 모형을 환형관이나 봉 집합체와 같은 복잡한 기하 형태에 적용하는 것은 문제가 있다는 지적도 있다[8]. 이러한 지적은 원형관과 집합체에 대한 CHF 실험 결과 비교를 통하여 제시되었으며, 대체로 두 가지 점을 지적하고 있다. 하나는 CHF와 질량 유속 간의 관계가 서로 다르다는 것인데, 원형관과 집합체에서의 invert point (즉, 질량 유속 변화에 따라 CHF 크기가 증가하는 영역과 감소하는 영역의 경계지점)가 서로 크게 다르게 나타난다는 것이다. 그리고 다른 하나는 limiting critical quality (즉, 건도 변화에 대하여 CHF 변화가 거의 step 형태로 변하는 지점)가 서로 다르게 나타난다는 것이다. 그러나 이러한 발견들은 3~9 개의 가열봉을 사용하는 작은 규모의 집합체 실험 결과로부터 나타난 것이어서 Kirillov[1]의 지적과 같이 집합체의 영향을 제대로 반영하지 못한 결과일 수도 있다.

본 연구에서는 SMART 노심 운전 조건을 포함하는 정방형 집합체 CHF 실험 자료에 대하여 CHF table 기법의 예측 성능을 평가한 것이다. CHF는 부수로 해석 코드 MATRA로 계산한 국부 물성치를 사용하여 평가하였다.

2 집합체 CHF 실험 자료

2.1 실험집합체 기하 형태

본 분석에는 9 ~ 25 개의 봉으로 구성되고 정방형 격자 구조를 갖는 실험 집합체에 대한 CHF 실험 자료를 사용하였다. 이 실험 자료는 EPRI 보고서와 SIEMENS와의 공동 연구를 통하여 입수한 것으로서, SMART 노심에 대한 SR-1 국부 조건 CHF 상관식[9] 개발에 사용되었던 실험 자료를 포함하고 있다. 실험 집합체의 단면 형태는 그림 1에 제시하였다. 실험 자료는 축 방향 출력 분포와 혼합 날개 부착 여부에 따라 구분하였으며, 표 1과 표 2는 각각 축 방향 출력 분포가 균일한 경우와 비균일한 경우에 해당하는 실험집합체 기하 형태 및 실험 범위를 제시한 것이다. TS-512 ~ TS-517은 혼합 날개에 대한 정보가 없어서 지지격자 압력 손실 계수 자료로부터 혼합 날개 부착 여부를 추정하였다.

2.2 실험집합체 국부 열수력장 해석

CHF 발생 위치에서의 국부 열수력적 조건은 부수로 해석 코드인 MATRA로 계산하였다. 분석은 그림 1에 제시한 바와 같이 부수로 단위로 수행하였으며, 분석에 사용된 주요 열수력 모형은 표 3에 제시하였다. 축 방향 출력 분포가 균일한 경우 CHF는 거의 대부분 채널 출구에서 먼저 발생한다. 채널 출구 근처에 지지 격자가 있는 경우에는 난류의 영향으로 인하여 출구 지지 격자의 바로 상류에서 CHF가 먼저 발생할 수도 있으나, 본 분석에 사용된 실험 자료에서는 이러한 경우가 나타나지 않았다. 따라서 축 방향 균일 출력 분포 자료를 해석할 경우에는 채널 출구에서 계산된 국부 물성치를 사용하였다. 축 방향 출력 분포가 비균일한 경우에는 CHF 발생 위치를 미리 예측할 수 없으므로 고온 부수로의 모든 축 방향 위치에 대한 국부 물성치 자료를 분석에 사용하였다. 즉, 모든 축 방향 위치에서 CHF를 계산하여 CHFR이 최소값을 갖는 위치를 결정하였다.

3. 실험 자료 분석

3.1 축 방향 균일 출력 분포 실험 자료 분석

본 분석에서는 두 종류의 CHF table을 사용하였다. 1986 AECL CHF table[2]은 15000 여 개의 원형관에 대한 CHF 실험 자료로부터 개발된 것으로서, 압력은 1~200 bar 사이를 15개로 구분하였고, 질량 유속은 0~7500 kg/m^2/s을 14개로 구분하였으며, 국부 건도는 -0.5~1.0 사이를 21개로 구분하고 있다. 이에 비하여 1995 AECL-IPPE CHF table[3]은 30000 여 개의 실험 자료로부터 개발되었고, 압력은 1~200 bar 사이를 21개로, 질량 유속은 0~8000 kg/m^2/s을 20개로, 그리고 국부 건도는 -0.5~1.0 사이를 23개로 구분하여 CHF 예측 성능 및 적용 범위를 개선하였다. CHF table은 모두 8 mm 직경의 원형관에 대한 자료로 표준화 되어 있다. 따라서 직경이 이와 다른 채널에 적용할 경우 직경에 대한 보정 인자를 적용해야 하는데, 1986 CHF table의 경우 채널의 등가 가열 직경(d_{he})을 사용하여 아래와 같이 평가하였다[10].

$$K_1 = (8/d_{he})^{1/3} \quad , \text{for } 2 < d_{he} < 32 \text{ mm} \tag{1}$$

$$K_1 = 0.63 \qquad , \text{for } d_{he} > 32 \text{ mm}$$

이에 비하여 1995 CHF table에서는 등가 수력 직경(d_{hy})을 사용하였으며, 지수 항의 최적치도 1/2로 평가되었다.

$$K_1 = \left(8/d_{hy}\right)^{1/2} \qquad , \text{for } 3 < d_{hy} < 25 \text{ mm} \tag{2}$$

$$K_1 = 0.6 \qquad , \text{for } d_{hy} > 25 \text{ mm}$$

지지 격자의 영향을 보정하는 인자(K_3)와 가열 길이의 영향을 보정하는 인자(K_4)는 두 table에서 공통적으로 사용되며, 이는 각각 아래와 같이 표현된다.

$$K_3 = 1 + 1.5 \cdot K_{grid}^{\;0.5} \cdot \left(\frac{G}{1000}\right)^{0.2} \cdot \exp\left(-0.1 \times \frac{L_{sp}}{d_{hy}}\right) \tag{3}$$

$$K_4 = \exp\left(e^{2a} \cdot d_{hy} / L\right) \tag{4}$$

여기서, K_{grid}는 지지격자 압력 손실 계수이며, L_{sp}는 지지격자 간격을 나타낸다. 그리고 L은 가열 길이이며, a 는 homogeneous model을 사용하여 아래와 같이 평가한다.

$$a = c / \left[c + (1 - c)\, r_g / r_f \right] \tag{5}$$

이로부터 임의의 채널에 대한 CHF는 아래와 같이 계산하였다.

$$CHF = CHF_{D=8mm} \times K_1 \times K_3 \times K_4 \tag{6}$$

일반적인 국부조건 상관식을 적용하는 경우와 마찬가지로 CHF table을 적용하는 방법에는 HBM(Heat Balance Method)과 DSM(Direct Substitution Method)의 두 종류가 있다. 그림 2는 두 방법론의 차이를 설명하는 것인데, 그림의 “CHF line”은 압력, 유량이 일정한 조건에서 국부 건도 변화에 따라 (6)식으로 계산되는 CHF 변화를 나타낸 것이다. 그리고 “heat balance line”은 압력, 유량 및 입구 온도가 일정한 조건에서 임의의 채널 출력에 대한 국부 건도의 변화를 나타낸 것이다. 원형관과 같은 단일 수로의 경우 채널 출력 변화에 따라 질량 유속은 변하지 않으며, 국부 건도 변화는 단순한 에너지 보존식에 의해 평가될 수 있다. 그러나 집합체의 경우 고온 수로에서의 국부 물성치를 계산하려면 부수로해석 코드와 같은 열수력장 해석 코드가 필요하다. 그런데 모든 조건에서 부수로 해석 코드를 사용한 국부 건도 계산을 수행할 수는 없으므로, 본 분석에서는 고온 수로 엔탈피 상승과 집합체 평균 엔탈피 상승 간의 비율이 출력 준위에 관계없이 일정하게 유지된다는 가정을 도입하여 “heat balance line”을 평가하였다. HBM에 따르면 CHF의 크기는 CHF 평가에 사용된 국부 건도(X_1)와 평가된 CHF로 계산된 국부 건도(X_2)가 서로 같아지는 조건에서 결정된다(q_{HBM}). 이에 비하여 과도 상태와 같이 입구 조건과 국부 열수력 조건 간에 일대일 대응이 이루어지지 않는 경우에는 DSM을 사용하여 CHF를 평가해야 한다. 이 경우 실험으로부터 측정된 CHF 조건(q_{exp})에서 국부 건도는 X_2로 계산되며, 이 조건에서 CHF를 평가하면 DSM에 의한 CHF(q_{DSM})을 구할 수 있다. 사고 해석 코드에 사용되고 있는 CHF table 방법론은 DSM에 의해 CHF를 예측하고 있다. CHF 예측 오차는 두 방법론에서 서로 다르게 나타나는데, 그림 2에서 보듯이 국부 건도 증가에 대하여 CHF가 감소하는 특성을 나타내는 한 DSM에 의한 P/M 오차는 HBM에 의한 P/M 오차보다 항상 크게 평가된다.

축 방향 균일 출력 분포를 갖는 정방형 집합체 CHF 실험 자료에 대하여 CHF table 방법론을 적용하여

분석한 결과는 표 4에 제시하였다. 전반적으로 1986 CHF table과 1995 CHF table의 집합체에 대한 CHF 예측 성능은 유사하며, 1995 CHF table이 CHF를 약간 크게 예측하는 것으로 나타났다. 혼합 날개 유무에 따라 실험 자료를 구분하여 평가한 결과 현재 CHF table 방법론이 혼합 날개의 영향을 충분히 고려하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 혼합 날개의 영향은 국부 물성치 계산에 사용되는 부수로 해석 코드의 입력 자료(즉, 난류 혼합 인자)와, K_3 보정 인자에 포함되어 있는 지지 격자 압력 손실 계수로서 고려되고 있다. 그러나 분석 결과 혼합날개가 부착되어 있는 실험 집합체에 대한 P/M의 평균치는 혼합 날개가 없는 실험 집합체의 경우에 비하여 HBM은 약 4%, DSM은 약 12% 정도 작은 것으로 평가되었다. 따라서 혼합 날개로 인한 CHF 증가 효과를 제대로 반영할 수 있도록 보정 인자를 개선할 필요가 있다.

그림 3은 압력, 질량 유속 및 국부 건도에 대한 P/M 예측 경향을 보인 것이다. CHF table 방법론은 질량 유속이 낮은 조건(약 1000 $kg/m^2/s$ 이하)에서 CHF를 크게 예측하는 경향을 보였다. 그리고 혼합 날개가 없는 경우에는 질량 유속이 1000 ~ 2000 kg/m2/s 범위에서도 CHF를 크게 예측하는 경향을 나타내었다. 압력이 100 bar 이하로 낮은 조건과 국부 건도가 약 0.3 보다 큰 조건에서도 CHF를 크게 예측하는 경향을 보였다. HBM을 사용하는 경우 표 4에서 보듯이 CHF table 방법론은 집합체 CHF 실험 자료를 평균 오차 2% 이내, 표준 편차 약 8% 정도로서 상당히 정확한 예측 성능을 보이는 것으로 나타났다. 이는 임계 출력에 대한 오차와 같은 의미를 갖는데, 이를 DNBR 오차로 환산하면 2~3 배 정도 불확실도가 증가할 수 있다. HBM은 비교적 정확한 계산 결과를 보이지만 여러가지 출력 조건에서 국부 물성치를 계산해야 하므로 집합체와 같은 다수로 조건에 적용하려면 그만큼 많은 계산 시간이 소요되는 단점이 있다. 본 분석에서 사용한 것과 같이 고온 부수로 엔탈피 상승과 평균 엔탈피 상승 간의 비율이 일정하다는 가정을 도입할 수도 있으나 이는 부수로 국부 질량 유속의 변화를 고려하지 못하고 있으며 그만큼 계산 불확실도를 증가시킨다. 그리고 HBM은 정상상태 해석에만 적용 가능하다. 이에 비하여 DSM은 국부조건 CHF 상관식과 같은 개념이으로서 부수로 해석 코드와 함께 노심 분석에 적용 가능한 방법인데, one-sided tolerance limit 개념을 사용하면 DSM 적용 시 한계 DNBR은 1986 AECL CHF table의 경우 1.413 (=1.012 + 1.699*0.236), 1995 AECL-IPPE CHF table의 경우 1.521 (= 1.069 + 1.699*0.266)로 평가된다.

그림 4는 지지격자 간격에 대한 예측 경향을 나타낸 것이다. 그림에 표시된 점들은 각각의 실험 집합체 평균 P/M 값을 나타낸 것이다. 혼합 날개가 없는 경우에는 지지격자 간격에 관계없이 전반적으로 CHF를 크게 예측하는 경향을 보이는데 비하여, 혼합 날개가 있는 경우에는 지지격자 간격이 작은 경우 CHF를 낮게 예측하는 경향을 나타내었다. 이는 혼합 날개 간격 변화에 따름 난류 특성 변화 효과가 지지격자 보정 인자(K_3)에 제대로 반영되지 않은 결과로 예상되지만, 현재로서는 이 조건에 해당하는 실험 집합체가 한 개 (TS-28) 뿐이므로 결론을 내리기는 어렵다. 1995 AECL-IPPE CHF table은 채널의 등가 수력 직경(d_{hy})을 사용하여 보정 인자 K_1을 평가하는데, 그림 5에서 보듯이 등가 수력 직경이 작은 경우 CHF를 크게 예측하는 경향을 보였다. 그림 5에는 등가 가열 직경(d_{he})으로 K_1을 평가하는 1986 AECL CHF table의 예측 경향도 같이 나타내었다. 그림에서 보듯이 matrix 채널(혼합 날개가 부착된 경우 11.5~12.5 mm 사이, 혼합 날개가 없는 경우 12~14 mm 사이)에 대한 CHF 예측 경향은 두 table 방법론이 매우 유사한 결과를 나타내는데 비하여, guide tube 채널에서는 1995 CHF table이 CHF를 상대적으로 크게 평가하는 것을 알 수 있다. 이 결과에 의하면 1995 CHF table의 K_1 보정 인자에서 사용하는 $(8/d)^n$의 지수 n=0.5가 최적치보다 크게 평가된 것으로 판단된다.

3.2 축방향 비균일 출력 분포 실험 자료 분석

현재까지의 연구 결과에 따르면 CHF는 국부적인 물성치 특성에 의해 결정된다는 “국부 조건 가설”이 일

반적으로 받아들여지고 있다. 이 경우 국부 조건은 미시적인 관점에서 CHF 현상을 지배하는 조건을 의미하며 아직까지 이에 대한 이론은 완전히 정립되지 않은 상태이다. 이에 비하여 실제로 원자로 노심 설계 등에 사용되는 국부 조건 개념은 채널 단면에 대한 평균 물성치를 의미한다. 이러한 평균 물성치를 사용하여 CHF를 예측하는 경우 축 방향 출력 분포의 영향에 대한 보정이 필요하며, 이에 대하여 Tong의 F-factor 방법론[11]이 현재 가장 일반적으로 사용되고 있다. 출력 분포의 영향은 유동장 조건에 따라 달리 나타나는데, 일반적으로 국부적인 과냉도가 매우 큰 조건에서는 출력 분포의 영향이 거의 나타나지 않는데 비하여, 국부 건도가 높은 조건에서는 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

CHF table 방법론에서는 축 방향 출력 분포의 영향을 고려하기 위하여 Tong의 F-factor(F_{Tong}) 혹은 비등 길이 평균 열속을 사용한 보정 인자(F_{BLA})를 사용하고 있다[10]. 이러한 F-factor들은 각각 아래와 같이 표현된다.

$$F_{Tong} = \left[C \cdot \int_{z_{ONB}}^{z_C} q'' e^{-C(z_C - z)} dz \right] \Big/ \left[q''_{loc} \left\{ 1 - e^{-C(z_C - z_{ONB})} \right\} \right], \quad (7)$$

$$F_{BLA} = \left[\int_{z_b}^{z_C} q''(z) dz \right] \Big/ \left[q''_{loc} \left(z_C - z_b \right) \right]. \quad (8)$$

여기서,

$$C = 5.906 \times \left(1 - c_C \right)^{4.31} \Big/ \left(G/1356 \right)^{0.478}. \quad (9)$$

1986 AECL CHF table에 제시되어 있는 K_5 항은 F-factor의 역수와 같은 의미이다. 본 분석에는 1995 AECL-IPPE CHF table을 적용하였다. 축 방향 비균일 출력 분포를 갖는 실험 집합체들의 기하 형태 특성 자료는 표 2에 정리하였으며, 각 실험 집합체의 축 방향 출력 분포 형태는 그림 6에 제시하였다. 축 방향 비균일 출력 분포의 경우에도 HBM과 DSM의 두 가지 방법에 의해 CHF를 예측할 수 있다. 그러나 균일 출력 분포의 경우와 달리 CHF 발생 위치를 미리 알 수 없으므로 고온 수로의 축 방향 물성치 분포에 대한 정보를 모두 사용하여 CHF가 최초로 발생하는 위치를 예측해야 한다.

DSM으로 CHF를 평가할 경우 실험 조건에서 계산된 부수로 물성치를 사용하여 모든 축 방향 위치에서 CHF_{EU} (CHF at equivalent uniform heat flux condition)를 계산하고, 이로부터 축 방향 출력 분포 보정 인자(F_{NU})를 사용하여 CHF_{NU} (CHF at non-uniform heat flux condition)를 아래와 같이 계산한다.

$$CHF_{EU}\left(z\right) = CHF_{D=8mm}\left[P, G, c\left(z\right)\right] \times K_1 \times K_3 \times K_4 \quad (10)$$

$$CHF_{NU}\left(z\right) = CHF_{EU}\left(z\right) / F_{NU}\left(z\right) \quad (11)$$

CHF table로부터 계산되는 CHF_{EU}는 균일 출력 분포 조건에 대한 값인데 비하여, 출력 분포가 비균일한 경우에는 계산된 CHF 값이 채널 평균 CHF인지 아니면 국부 CHF 인지를 구분해야 할 필요가 있다. 이는 출력 분포 보정 인자의 개념에 따라 결정되는데, 예를 들면 F_{Tong}의 경우 "국부 조건 가설"에 근거하여 개발된 것이므로, F_{Tong}을 사용하여 평가한 CHF_{NU}는 국부 CHF를 나타낸다. F_{BLA}의 경우에는 이 보정 인자가 개발된 근거가 설명되어 있지는 않지만 F_{Tong}과 호환성이 있는 것으로 기술되어 있으므로, 이 인자를 사용하여 평가하는 CHF_{NU}는 국부 CHF로 볼 수 있다. 이에 따라 본 분석에서는 (11)식으로 계산되는 CHF를 국부 CHF로 가정하고 P/M을 평가하였다. DSM으로 평가한 P/M 계산 결과는 표 5에 정리하였는데, 출력 분포 보정 인자를 적용하는 경우 CHF table은 약 7% 정도 CHF를 크게 예측하며, 출력 분포 보정을 하지 않는 경우에는 약 20% 정도 CHF를 크게 예측하는 것으로 나타났다.

일반적으로 출력 분포 보정 인자는 국부 물성치의 함수, 즉 채널 열출력의 함수이므로 HBM을 적용하여 CHF를 계산하는 경우, CHF와 보정 인자 간의 비선형적 관계로 인하여 반복 계산이 필요하다. 본 분석에서

는 우선 DSM 방법으로 CHF 발생 예상 위치(z_{CHF})를 예측한 후, 이 위치에서의 CHF를 HBM으로 평가하였다. 이 위치에서의 국부 건도는 CHF 실험 조건에서 계산된 고온 수로의 엔탈피 상승과 집합체 평균 엔탈피 상승 간의 비율이 열 출력 반복 계산 과정에서 변하지 않는다는 가정을 사용하여 평가하였다. 임의의 출력에 대한 고온 수로의 국부 건도는 아래와 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$c(z) = c_{in} + f \times \{ c_{iso}(z) - c_{in} \} \tag{12}$$

여기서,

$$c_{iso}(z) = c_{in} + \frac{4}{d_{he} G h_{fg}} \int_0^z q''(z)\,dz \tag{13}$$

$$f \equiv \left[c(z_{CHF}) - c_{in} \right] \Big/ \left[c_{iso}(z_{CHF}) - c_{in} \right] \quad \text{, at measured CHF condition.} \tag{14}$$

임의의 건도 조건에서 CHF 예측치(CHF_P)는 아래와 같이 계산된다.

$$CHF_P(z_{CHF}) = CHF_{D=8mm}\left[P, G, c(z_{CHF}) \right] \times K_1 \times K_3 \times K_4 \big/ F_{NU}(z_{CHF}) \tag{15}$$

이 값은 국부 CHF이므로, 이 조건에 해당하는 채널 열 출력은 아래와 같다.

$$Q_P(z_{CHF}) = CHF_P(z_{CHF}) \times x_h L \big/ F_z(z_{CHF}) \tag{16}$$

그리고 동일한 국부 건도 조건에 대하여 heat balance를 만족시키는 채널 열 출력은 아래와 같이 계산된다.

$$Q_{Bal} = \left\{ \left[c(z_{CHF}) - c_{in} \right] \Big/ \left[4 \int_0^{z_C} F(z)\,dz \Big/ \left(d_{he} G h_{fg} \right) \right] \right\} \times x_h L \tag{17}$$

이로부터 CHF는 $Q_P = Q_{Bal}$ 조건에서 결정된다. 축 방향 비균일 출력 분포 실험 자료에 대하여 HBM 방법으로 평가한 P/M 통계량은 표 5에 정리하였다. 출력 분포 보정을 하는 경우 약 3% 정도 CHF를 크게 예측하며, 보정 인자를 적용하지 않는 경우에는 약 9% 정도 크게 예측하는 경향을 나타내었다. 그림 7은 축방향 비균일 출력 분포를 갖는 실험집합체에 대하여 출력 분포 보정 인자에 따른 CHF 예측 성능을 DSM과 HBM으로 구분하여 나타낸 것이며, 전반적으로 CHF table 방법론이 CHF를 약간 크게 예측하는 것을 알 수 있다. 그리고 DSM에 의한 CHF 발생 위치 예측 성능을 평가한 결과 최대 약 40% 정도의 예측 오차를 보이는 것으로 나타났다.

4. 결론

부수로 해석 코드를 사용하여 정방형 집합체 CHF 실험 자료에 대한 1995 AECL-IPPE CHF table 방법론의 예측 성능을 평가하였다. HBM 방법론을 적용할 경우 P/M의 평균 오차는 축방향 출력 분포가 균일한 경우 약 2%, 비균일한 경우 약 3% 정도로서 예측 성능이 좋은 것으로 나타났다. 이에 비하여 DSM을 적용할 경우 평균 오차는 약 7%, 표준 편차는 17~27% 정도인 것으로 평가되었다. 수로 등가 직경에 대한 보정 인자를 검토한 결과 guide tube 채널에서 CHF를 크게 예측하는 경향을 보였으며, 지지격자에 대한 보정 인자는 혼합 날개 영향 및 지지격자 간격에 따른 효과를 충분히 반영하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 전반적인 예측 정확도는 SMART 노심에 대한 사고 조건에서 CHF 예비 평가용으로 사용하기에 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] P.L. Kirillov & I.P. Smogalev, On the look-up tables for the critical heat flux in tubes (history and problems), NURETH-7, 2558-2582 (1995).

[2] D.C. Groeneveld, et. al., 1986 AECL-UO critical heat flux lookup table, Heat Transfer Engineering 7, 46-62 (1986).

[3] D.C. Groeneveld, et. al., The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes, Nuclear Engineering Design 163, 1-23 (1996).

[4] D.H. Hwang, et. al., Development of a bundle correction method and its application to predicting CHF in rod bundles, Nuclear Engineering Design 139, 205-220 (1993).

[5] M. Lee, A critical heat flux approach for square rod bundles using the 1995 Groeneveld CHF table and bundle data of heat transfer research facility, Nuclear Engineering Design 197, 357-374 (2000).

[6] Groeneveld, et. al., The effect of fuel subchannel geometry on CHF, NURETH-5, 683-690 (1992).

[7] T.H. Chun, et. al., Assessment of a tube-based bundle CHF prediction method using a subchannel code, Annals of Nuclear Energy 25, 1159-1168 (1998).

[8] I.L. Pioro, et. al., Some problems for bundle CHF prediction based on CHF measurements in simple flow geometries, Nuclear Engineering Design 201, 189-207 (2000).

[9] 황대현, 유연종, 지성균, SMART 노심 조건에 대한 국부조건 CHF 상관식 개발, 2000 춘계학술발표회논문집, 원자력학회 (2000).

[10] D.C. Groeneveld & L.K.H. Leung, Tabular approach for predicting critical heat flux and post-dryout heat transfer, NURETH-4, 109-114 (1989).

[11] L.S. Tong, Boiling crisis and critical heat flux, TID-25887 (1972).

표 1. 축방향 균일 출력 분포 정방형 집합체 CHF 실험 자료

TS	Bundle shape	Axial power profile	Grid spacing [mm]	Heated length [m]	Rod dia./ pitch [mm]	Mixing vane	Grid loss factor	TDC	# of data
156	TYP-5X5	Uniform	660	4.27	9.5/12.6	R	1.25	0.051	73
157	TYP-5X5	Uniform	660	2.44	9.5/12.6	R	1.25	0.051	78
158	THM-5X5	Uniform	660	2.44	9.5/12.6	R	1.25	0.051	68
160	TYP-5X5	Uniform	559	2.44	9.5/12.6	R	1.25	0.057	67
161	TYP-5X5	Uniform	559	4.27	9.5/12.6	R	1.25	0.057	70
13	THM-5X5	Uniform	534	3.0	10.8/14.3	P	1.35	0.040	88
20	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	S	0.75	0.030	61
28	TYP-5X5	Uniform	272	3.0	9.5/12.7	S	0.75	0.072	23
29	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	S	1.41	0.030	111
30	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	F1	1.52	0.035	100
31	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	1.40	0.040	97
33	TYP-5X5	Uniform	534	3.0	9.5/12.7	F1	1.35	0.035	102
37	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	1.40	0.055	99
38	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	1.17	0.055	95
39	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	F1	0.76	0.055	104
40	THM-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	1.25	0.055	77
41	THM-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	1.56	0.055	79
43	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	1.01	0.055	31
46	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	1.12	0.055	29
47	THM-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	1.16	0.055	49
48	THM-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	Swirl	1.49	0.055	49
515	THM-21	Uniform	381	1.83	10.7/14.3	-	1.73	0.050	54
516	THM-21	Uniform	381	1.83	10.7/14.3	-	1.91	0.050	56
3	THM-5X5	Uniform	534	3.0	10.8/14.3	None	0.88	0.010	90
7	TYP-5X5	Uniform	534	3.0	10.8/14.3	None	0.53	0.005	42
11	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	None	0.62	0.005	81
14	THM-5X5	Uniform	534	3.0	10.8/14.3	None	1.10	0.010	65
16	THM-5X5	Uniform	534	3.0	10.8/14.3	None	0.56	0.010	65
19	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	None	0.62	0.005	83
21	TYP-5X5	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	None	1.40	0.005	88
22	TYP-6X6	Uniform	545	3.0	9.5/12.7	None	1.30	0.005	78
512	TYP-21	Uniform	254	1.83	10.7/14.3	None	0.57	0.005	57
513	THM-21	Uniform	254	1.83	10.7/14.3	None	0.57	0.005	54
514	THM-21	Uniform	254	1.37	10.7/14.3	None	0.57	0.005	38

표 2. 축 방향 비균일 출력 분포 정방형 집합체 CHF 실험 자료

TS	Bundle shape	Axial power profile(*)	Grid spacing [mm]	Heated length [m]	Rod dia./ pitch [mm]	Mixing vane	Grid loss factor	TDC	# of data
108	TYP-4X4	Top-p(A)	508	2.44	10.7/14.1	L	1.20	0.062	29
109	TYP-3X3	Top-p(B)	508	4.27	12.7/16.7	L	1.20	0.062	33
114	TYP-4X4	Cosine(E)	660	2.44	10.7/14.1	L	1.20	0.051	27
124	TYP-4X4	Cosine (E) Top-	508	2.44	10.7/14.1	R	1.20	0.062	33
125	TYP-4X4	p(A)	508	2.44	10.7/14.1	R	0.68	0.062	33
127	TYP-4X4	Top-p(A)	559	2.44	10.7/14.1	R	0.68	0.057	35
131	TYP-4X4	Top-p(C)	660	4.27	10.7/14.1	R	1.40	0.051	35
132	TYP-4X4	Top-p(C)	508	4.27	10.7/14.1	R	1.40	0.062	36
133	TYP-4X4	Top-p(C)	660	4.27	10.7/14.1	R	1.40	0.051	38
134	TYP-4X4	Top-p(C)	813	4.27	10.7/14.1	R	1.40	0.046	38
139	THM-4X4	Top-p(C)	813	4.27	10.7/14.1	R	1.40	0.046	37
140	TYP-4X4	Top-p(A)	813	2.44	10.7/14.1	R	1.82	0.046	27
144	THM-4X4	Top-p(C)	660	4.27	10.7/14.1	L	1.60	0.051	38
145	TYP-4X4	Top-p(C)	660	4.27	10.7/14.1	L	1.85	0.051	41
146	THM-4X4	Top-p(C)	660	4.27	10.7/14.1	R	1.90	0.051	39
148	TYP-4X4	Top-p(C)	660	4.27	10.7/14.1	R	1.90	0.051	71
162	THM-5X5	Cosine (D)	559	4.27	9.5/12.6	R	1.25	0.057	69
164	TYP-5X5	Cosine (D)	559	4.27	9.5/12.6	R	1.25	0.057	74
517	TYP-21	Bottom-p(F)	254	1.83	10.7/14.3	None	0.57	0.005	50

(*) 출력 분포 형태는 그림 6에 제시.

표 3. 실험집합체 부수로 해석에 사용된 MATRA 코드 주요 인자

Parameter	Value
Subcooled boiling void fraction	Not used
Bulk boiling void fraction	Chexal-Lellouche model
Two-phase friction multiplier	Armand model
Single-phase turbulent friction factor	$0.184 \times Re^{-0.2}$
Crossflow resistance coefficient (K_{ij})	0.5
Turbulent momentum parameter (s/l)	0.5
Turbulent momentum factor	0
Turbulent mixing	Equal-mass-exchange model
Void drift	Not used
Solution algorithm	Implicit scheme

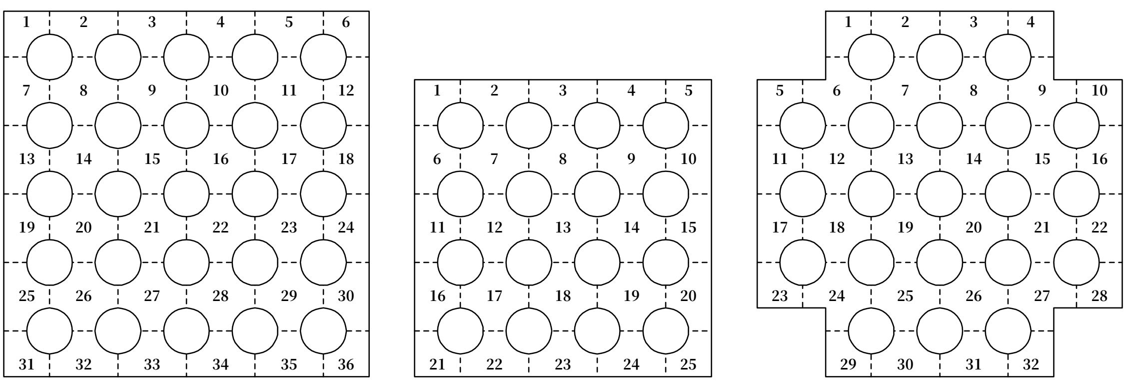
표 4. 축 방향 균일 출력 분포 자료 P/M 통계량 평가 결과

TS	Number of data	1986 AECL CHF Table				1995 AECL-IPPE CHF Table			
		HBM		DSM		HBM		DSM	
		Mean	s	Mean	s	Mean	s	Mean	s
TS-13	88	1.022	0.086	1.070	0.229	1.075	0.097	1.213	0.298
TS-20	61	0.942	0.044	0.833	0.132	0.935	0.051	0.832	0.148
TS-28	23	0.865	0.048	0.673	0.075	0.898	0.049	0.749	0.122
TS-29	111	1.020	0.080	1.084	0.265	1.022	0.075	1.085	0.264
TS-30	100	0.992	0.072	0.992	0.246	0.991	0.069	0.993	0.239
TS-31	97	0.972	0.090	0.951	0.304	0.978	0.085	0.986	0.321
TS-33	102	0.976	0.069	0.943	0.221	0.971	0.067	0.930	0.207
TS-37	99	1.002	0.096	1.044	0.326	1.001	0.088	1.054	0.360
TS-38	95	1.010	0.065	1.056	0.245	1.010	0.060	1.055	0.243
TS-39	104	1.004	0.073	1.031	0.264	1.003	0.066	1.029	0.250
TS-40	77	0.981	0.044	0.954	0.139	1.036	0.055	1.106	0.170
TS-41	79	0.956	0.055	0.883	0.165	1.010	0.056	1.031	0.172
TS-43	31	0.994	0.020	0.979	0.054	1.014	0.035	1.028	0.089
TS-46	29	0.954	0.021	0.872	0.058	0.976	0.032	0.933	0.092
TS-47	49	0.974	0.025	0.932	0.063	1.041	0.033	1.107	0.086
TS-48	49	0.945	0.018	0.852	0.053	1.008	0.044	1.014	0.114
TS-156	73	1.041	0.051	1.130	0.168	1.046	0.051	1.159	0.176
TS-157	78	0.990	0.041	0.981	0.120	0.991	0.049	0.972	0.124
TS-158	68	0.960	0.045	0.895	0.130	1.014	0.067	1.032	0.173
TS-160	67	0.984	0.032	0.947	0.100	0.983	0.045	0.946	0.125
TS-161	70	1.013	0.039	1.027	0.110	1.025	0.058	1.088	0.180
TS-515	54	0.960	0.073	0.907	0.162	1.012	0.091	1.019	0.201
TS-516	56	0.963	0.084	0.912	0.184	1.017	0.097	1.023	0.196
Mixing-vaned	**1660**	**0.987**	**0.071**	**0.976**	**0.222**	**1.006**	**0.074**	**1.029**	**0.236**
TS-3	90	1.085	0.100	1.265	0.305	1.135	0.100	1.422	0.380
TS-7	42	1.013	0.080	1.061	0.244	1.007	0.054	1.049	0.187
TS-11	81	0.976	0.060	0.941	0.185	0.978	0.058	0.951	0.174
TS-14	65	1.038	0.071	1.123	0.218	1.090	0.065	1.271	0.288
TS-16	65	1.088	0.095	1.265	0.254	1.142	0.082	1.434	0.325
TS-19	83	0.996	0.056	0.997	0.160	0.999	0.051	1.006	0.159
TS-21	88	1.001	0.065	1.009	0.188	1.004	0.064	1.014	0.195
TS-22	78	1.004	0.061	1.031	0.210	1.002	0.061	1.022	0.202
TS-512	57	1.076	0.083	1.224	0.228	1.068	0.080	1.202	0.238
TS-513	54	1.040	0.104	1.098	0.219	1.097	0.103	1.274	0.316
TS-514	38	0.983	0.076	0.971	0.145	1.048	0.070	1.120	0.151
No mixing-vaned	**741**	**1.028**	**0.087**	**1.090**	**0.247**	**1.050**	**0.094**	**1.157**	**0.305**
All data	**2401**	**0.999**	**0.078**	**1.012**	**0.236**	**1.019**	**0.083**	**1.069**	**0.266**

표 5. 축 방향 비균일 출력 분포 자료 P/M 통계량 평가 결과

TS	Number of data	1995 AECL-IPPE CHF Table					
		HBM			DSM		
		No correction	Tong's F model	Groeneveld's BLA model	No correction	Tong's F model	Groeneveld's BLA model
TS-108	29	1.076 [1] 0.032 [2]	1.049 0.042	1.066 0.041	1.149 0.085	1.088 0.069	1.132 0.098
TS-109	33	1.088 0.041	1.050 0.037	1.054 0.035	1.182 0.097	1.107 0.081	1.120 0.090
TS-114	27	1.082 0.040	1.034 0.037	1.066 0.042	1.161 0.098	1.066 0.071	1.136 0.103
TS-124	33	1.050 0.070	1.001 0.072	1.021 0.070	1.097 0.116	0.993 0.106	1.040 0.115
TS-125	33	1.039 0.042	1.011 0.035	1.034 0.045	1.084 0.091	1.021 0.073	1.075 0.097
TS-127	35	1.030 0.047	1.001 0.034	1.027 0.051	1.065 0.090	1.006 0.074	1.057 0.097
TS-131	35	1.098 0.047	1.040 0.038	1.024 0.050	1.234 0.114	1.100 0.103	1.058 0.119
TS-132	36	1.058 0.067	0.993 0.055	0.968 0.059	1.131 0.144	0.976 0.136	0.911 0.145
TS-133	38	0.988 0.105	0.937 0.101	0.915 0.107	0.969 0.292	0.838 0.293	0.794 0.321
TS-134	38	1.104 0.051	1.048 0.046	1.038 0.064	1.247 0.128	1.122 0.114	1.094 0.150
TS-139	37	1.063 0.055	1.019 0.050	1.013 0.054	1.159 0.152	1.054 0.129	1.040 0.140
TS-140	27	1.045 0.040	1.016 0.037	1.039 0.037	1.086 0.076	1.031 0.070	1.078 0.074
TS-144	38	1.065 0.042	1.022 0.042	1.018 0.048	1.161 0.119	1.053 0.102	1.043 0.123
TS-145	41	1.090 0.052	1.032 0.047	1.013 0.058	1.216 0.121	1.077 0.115	1.030 0.132
TS-146	39	1.120 0.063	1.076 0.064	1.073 0.078	1.295 0.177	1.184 0.167	1.185 0.207
TS-148	71	1.113 0.066	1.055 0.064	1.042 0.078	1.291 0.182	1.144 0.169	1.114 0.206
TS-162	69	1.087 0.059	1.024 0.061	1.007 0.081	1.207 0.151	1.052 0.147	1.006 0.206
TS-164	74	1.115 0.075	1.037 0.077	1.012 0.086	1.303 0.181	1.076 0.186	1.009 0.224
TS-517	50	1.182 0.111	1.079 0.072	1.098 0.078	1.461 0.288	1.224 0.189	1.280 0.221
All data	**783**	**1.085 0.076**	**1.030 0.066**	**1.027 0.077**	**1.203 0.195**	**1.071 0.166**	**1.062 0.199**

1) Mean of P/M, 2) Standard deviation of P/M



TS 3 - 48, TS 156 - 164　　**TS 108 - 148**　　**TS 512 - 517**

그림 1. CHF 실험 집합체 단면 형태

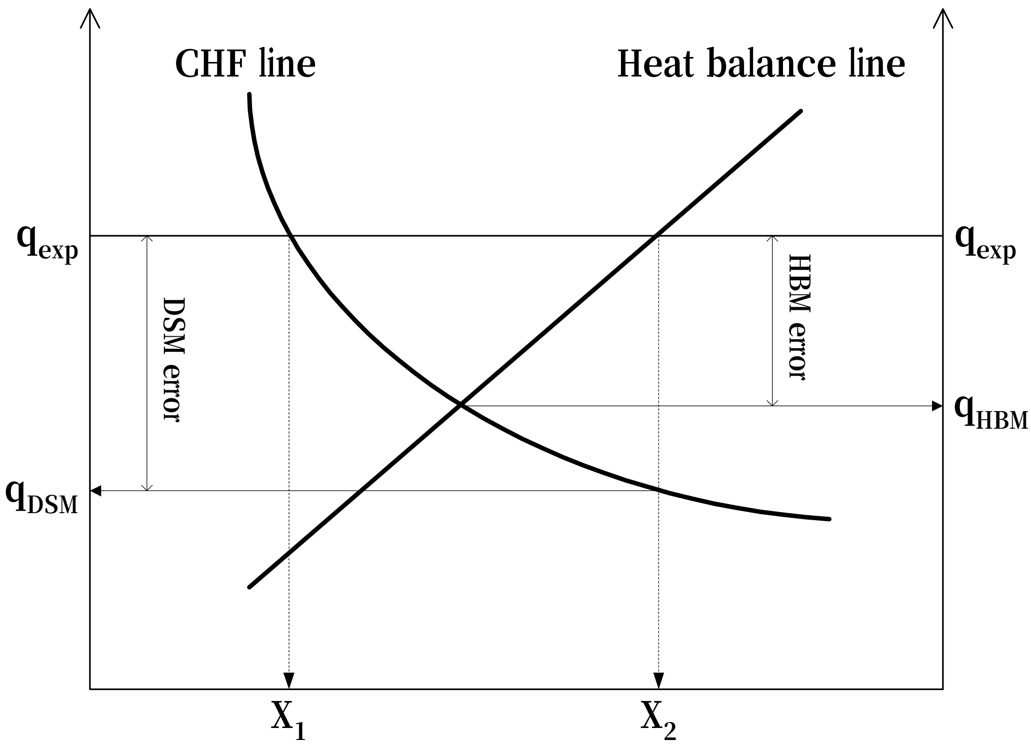


그림 2. CHF 예측 방법론 (HBM & DSM)

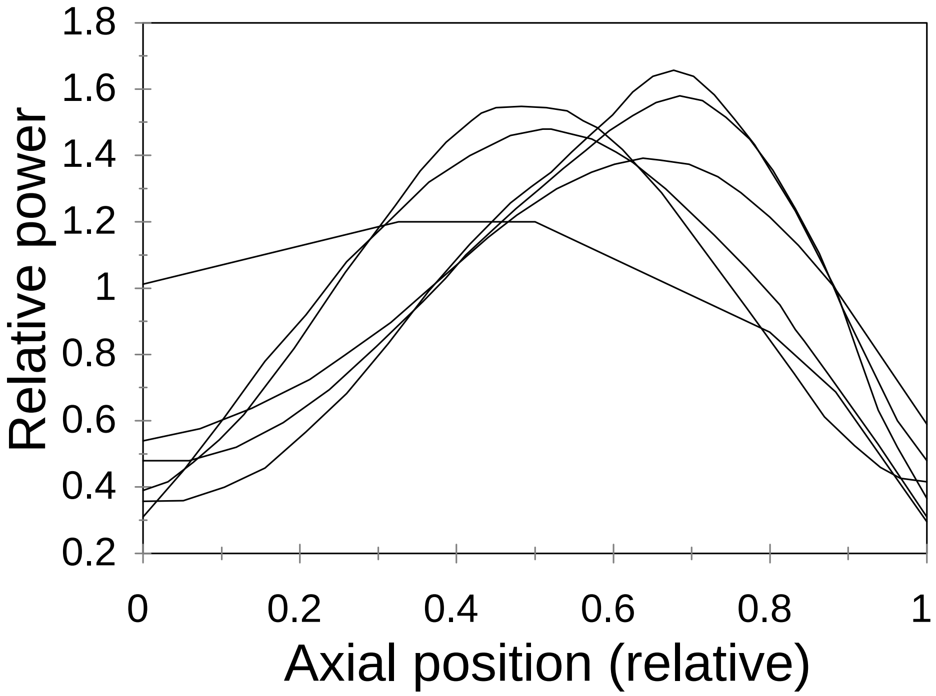


그림 6. 실험집합체의 축 방향 비균일 출력 분포 형태

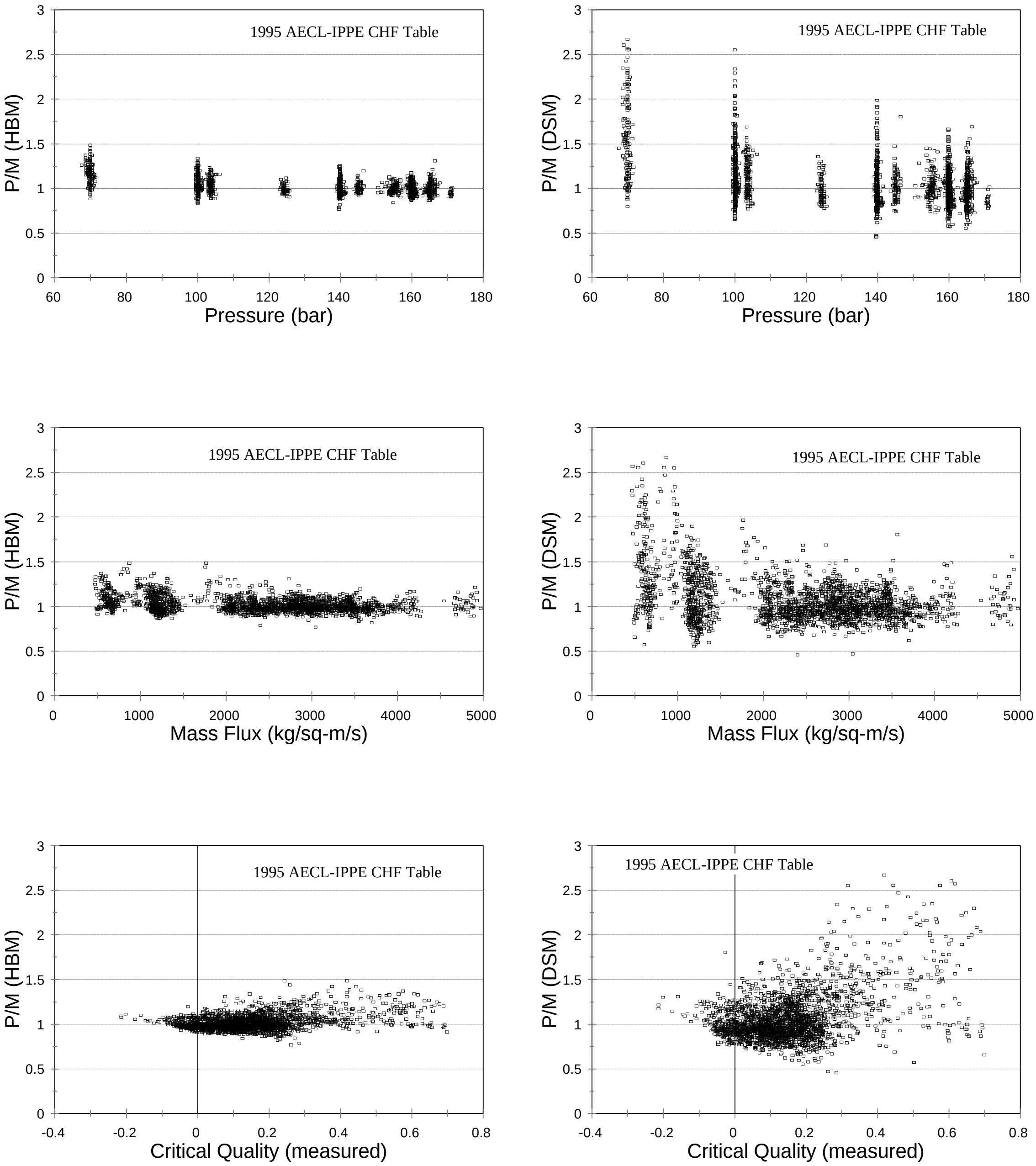


그림 3. 균일출력분포 실험 자료 P/M 분석 결과

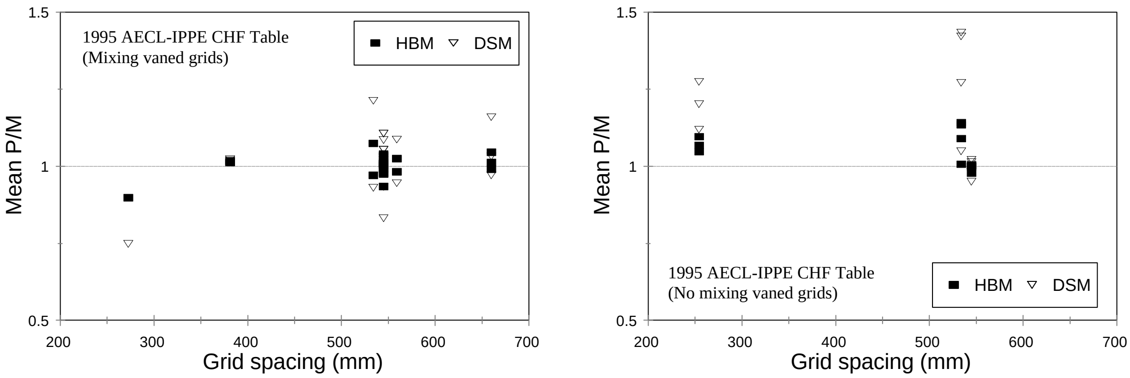


그림 4. 지지격자 간격에 대한 CHF 예측 경향

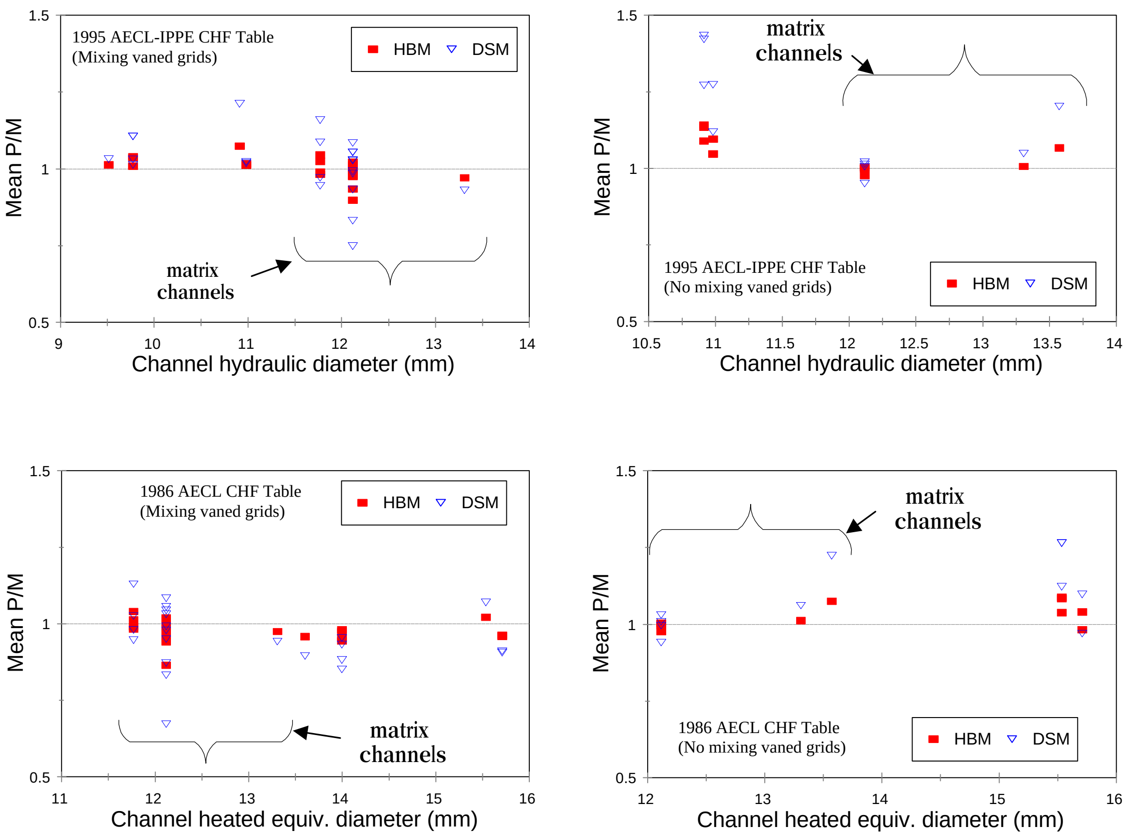


그림 5. 등가 직경에 대한 CHF 예측 경향

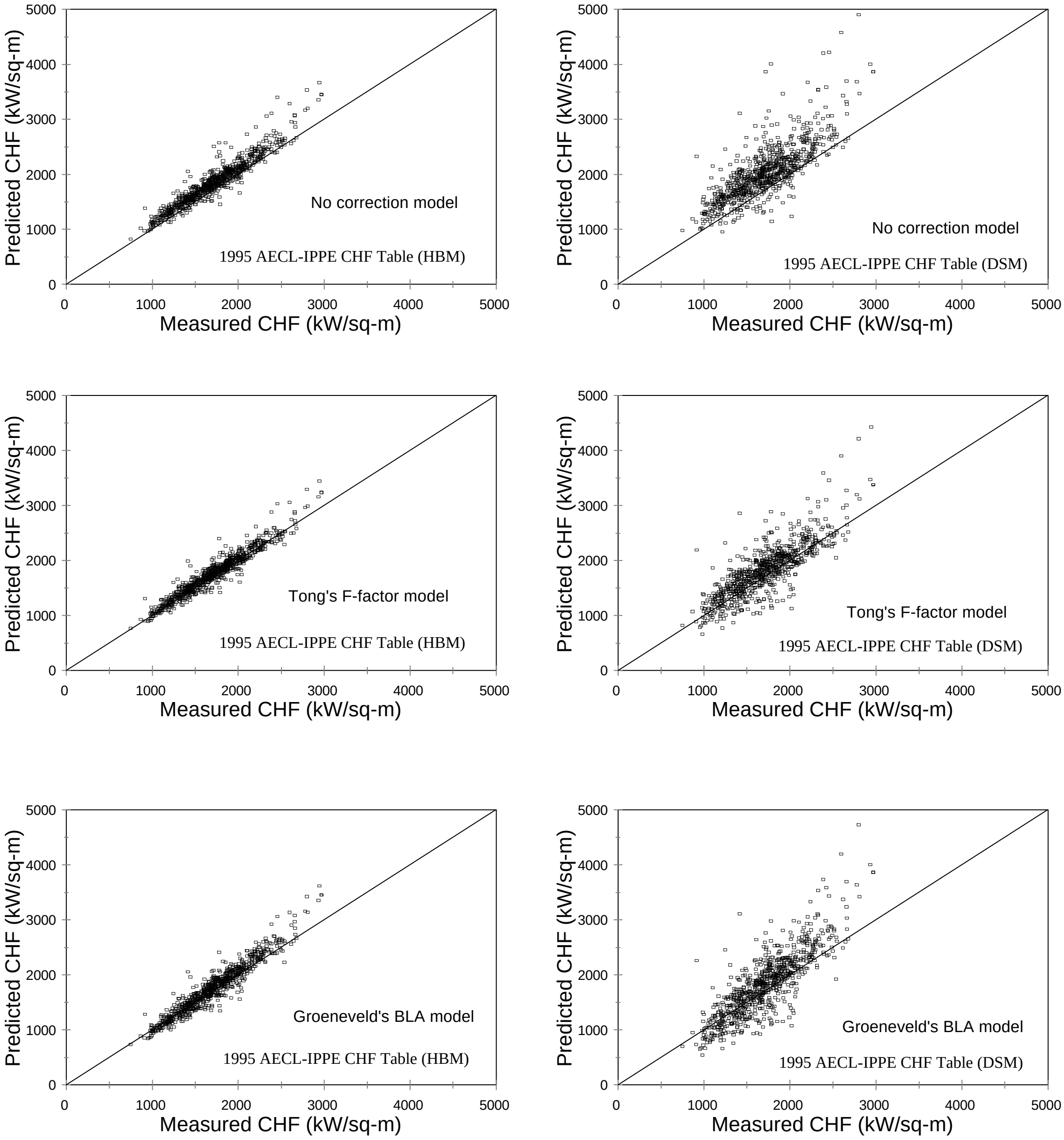


그림 7. 비균일 축방향 출력 분포 집합체 CHF 실험 자료 분석 결과