

정방형 및 비정방형 집합체 CHF Data Base 평가

Assessment of CHF Data Base for Square and Non-square Lattice Rod Bundles

황대현, 지성균, 장문희

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

정방형 및 비정방형 집합체에 대한 CHF data base를 구축하고 기존의 CHF 예측 모형을 사용하여 평가하였다. 집합체 CHF data base는 161 개의 정방형 실험집합체와 45 개의 비정방형 실험 집합체에 대한 12000 여 개의 실험 자료로 구성된다. 부수로 해석 코드 MATRA를 사용하여 정방형 집합체에 대한 국부 조건을 해석하였으며, 혼합 날개 유무에 따른 TDC 변화가 CHF 계산에 미치는 영향을 평가한 결과 P/M 계산치가 약 10% 정도 차이를 보였다. 정방형 집합체의 국부조건 실험 자료에 대하여 1995 AECL CHF Table을 적용한 결과, HBM으로 평가된 P/M의 평균 및 표준편차는 축방향 균일 분포의 경우 각각 1.003 및 0.116, 축방향 비균일 분포의 경우 각각 0.972 및 0.088로 나타났다.

Abstract

A CHF data base for rod bundles is constructed and assessed for square and non-square lattice rod bundles. The CHF data base consists of more than 12000 data points obtained from 161 square lattice bundles and 45 non-square lattice bundles. For the square lattice test bundles, the CHF table method is applied to predicting CHF based on the local thermal hydraulic conditions calculated by the subchannel analysis code MATRA. It reveals that the variation of TDC values from 0.005 to 0.05 changes the predicted CHF about 10%. The 1995 CHF table is applied to the local parameter CHF data base of square lattice rod bundles. As the result, the mean and the standard deviation of P/M for the data with uniform axial power shape are calculated as 1.003 and 0.116, respectively.

1. 서론

기존의 상용 경수로나 냉각재로서 물을 사용하는 대부분의 신형 원자로에서 CHF(Critical Heat Flux) 현상은 노심의 열출력 능력을 제한하는 가장 중요한 변수의 하나이며, 따라서 임의의 노심 조건에서 CHF ratio(CHFR), 즉 CHF와 국부 열속 간 비율을 정확하게 평가하는 것은 매우 중요하다. 원자로에 사용되는 핵연료 집합체의 형태는 매우 다양하며, 이로 인하여 봉 집합체에서의 CHF 현상도 원형관과 같은 단순 채널에 비하여 매우 복잡한 것으로 알려져 있다. 봉 집합체에서의 CHF 현상이 원형관과 다르게 나타나게 하는 변수는 매우 다양하다. 채널의 기하 형태 관점에서 보면 집합체에서는 냉각수와 접한 가열면의 곡률이 원형관과 서로 상반되며, 채널 단면 형태도 다르기 때문에 채널 내의 유동장 형태가 달라진다. 또한 집합체 채널 간에는 횡방향의 교차류가 있으며, 집합체 지지체에 사용되는 구조물로 인해 발생하는 난류 유동장도 CHF에 큰 영향을 준다. 그리고 집합체 채널의 비가열면이나 채널 간의 갭 크기 등이 CHF에 영향을 줄 수 있으며, 이러한 여러 가지 변수들이 CHF에 대하여 서로 비선형적인 관련성을 가지므로 집합체에서의 CHF 특성을 일반적으로 이해하기는 매우 어렵다. 그러나 집합체에 대한 일반화된 CHF 예측 모형은 새로운 원자로 노심 조건에 대한 열출력 성능을 예비 평가할 수 있도록 하는 중요한 도구를 제공할 수 있으므로 기존의 다양한 집합체 실험 자료를 바탕으로 광범위한 적용 영역을 갖는 CHF 상관식 개발에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 그 예로서 다양한 집합체에 대한 실험 자료를 평가하여 개발된 상관식들이 제시되고 있으며 [1,2], 또 한편으로는 원형관에 대하여 적용 범위가 매우 넓은 CHF table을 집합체 CHF 예측에 적용하는 연구도 수행되고 있다 [3-5].

CHF 국부적인 열수력 조건이 지배하는 현상으로 이해되고 있으므로, 집합체에 대한 CHF 예측 모형은 집합체 내의 국부 열수력장 해석 코드에 대하여 의존성을 갖는다. 이는 열수력장 해석 코드가 갖는 불확실도로 인한 것인데, 열수력장 해석 코드로 계산된 국부 물성치들은 실험 자료와 동일하게 취급되어 CHF 상관식 개발에 사용되므로 코드의 불확실도가 CHF 상관식의 특성에 직접적인 영향을 주게 된다. 이러한 코드 의존성 때문에 CHF 예측 모형 개발은 실제로 원자로 설계 해석에 사용할 코드와 연계하여 개발해야 한다. 한국원자력연구소에서는 여러 가지 부수로 해석 코드를 사용하여 국부조건 CHF 상관식들을 평가한 바 있으며 [6-9], 이를 통하여 다양한 형태의 집합체에 대한 CHF 실험 자료를 확보하고 있다. 본 연구는 그 동안 축적된 집합체 CHF 실험 자료의 내용을 소개하고 기존의 CHF 예측 모형을 사용하여 실험 자료를 평가한 것이다. 집합체 내의 국부 열수력장 해석은 한국원자력연구소에서 개발 중인 부수로 해석 코드 MATRA를 사용하여 수행하였다.

2. 집합체 CHF Data Base 구축

2.1 집합체 CHF 실험자료

집합체 실험 자료는 기하 형태에 따라 정방형 집합체와 비정방형 집합체의 두 부분으로 구분하였다. 정방형 집합체에 대한 CHF 실험 자료는 실험집합체 벽면의 영향을 고려하여 집합체 크기가 5x5 이상인 경우만 선택하였으며, 그 결과 161 종류의 실험집합체에 대하여 10160 개의 실험

험 자료를 수집하였다. 그리고 비정방형 집합체에 대하여 45 종류의 실험집합체에 대한 2145 개의 실험자료가 수집되었으며, 여기에는 실험집합체 배럴의 단면 형태가 원통형, 평행사변형, 그리고 육각형인 경우가 모두 포함되어 있다. 수집된 집합체 CHF 실험 자료의 특성은 표 1에 요약하였다. 실험 자료가 포함하고 있는 주요 열수력 변수 영역에서의 실험 자료 분포는 정방형과 비정방형 집합체에 대하여 각각 그림 1 및 그림 2에 제시하였다. 정방형 집합체에 대한 실험 자료는 가압 경수로 조건(즉, 압력은 140~170 bar, 질량유속은 1300~4000 kg/m²/s, 국부 건도는 -0.2~0.3, 등가 가열직경은 12~16 mm 정도)에 상당히 밀집되어 있음을 알 수 있다. 이 그림에서 등가 가열 직경 (D_{he})은 CHF가 발생하는 채널에 대한 것인데, 정방형 집합체의 경우 이는 모든 자료에서 10 mm 이상의 값을 갖는데 비하여 비정방형 집합체에 대한 실험 자료는 4 mm 이하의 작은 영역까지 분포하고 있다. 이는 비정방형 집합체의 경우 매우 조밀한 격자 구조를 갖는 실험 자료가 포함되어 있기 때문이다.

2.2 국부 조건 CHF Data Base 구축

집합체 CHF 실험은 실험에 사용되는 전원공급장치의 용량과 실험 비용 등의 제한으로 인하여 실제 원자로 노심에 장전되는 핵연료 집합체 전체를 모사하기 어렵다. 따라서 규모가 5x5 정도로 축소된 실험집합체에 대한 실험 자료로부터 원자로 적용을 위한 CHF 예측 모형을 개발하기 위하여 국부조건 개념의 CHF 예측 모형을 도입할 필요가 있다. 국부조건 CHF 예측 모형 개발에는 (1) CHF 현상이 주로 국부조건에 의해 지배된다는 것과, (2) 실험집합체 내의 열수력장 분포와 실제 원자로심의 열수력장을 적절히 해석할 수 있는 전산 코드를 사용할 수 있다는 전제 조건이 필요하다. 현재 가압경수로 노심에서의 CHF 해석은 대부분의 경우 부수로 해석 코드와 이로부터 개발된 국부조건 CHF 상관식을 통해 수행되고 있다. 국부조건 CHF data base의 구축은 이러한 국부조건 CHF 예측 모형 개발을 위하여 필수적이다.

본 연구에서는 SMART 노심 열수력장 해석에 적용되고 있는 부수로 해석 코드 MATRA[10]를 사용하여 국부조건 CHF data base를 구축하였다. MATRA는 COBRA-IV-I를 토대로 하여 IBM PC 및 HP Workstation에서 사용할 수 있도록 개발된 부수로 해석 코드로서 편리한 사용자 환경 제공 및 계산 정확도 향상을 위한 여러 가지 열수력 모형과 기능들이 추가되었다. 예를 들면 가변적인 축방향 노드 계산 기능, 국부 압력 조건을 사용한 물성치 계산 기능, 자유로운 단위 변환 체계, 물성치 계산 기능 보완 등이 MATRA 코드에 새로이 추가되었다. 그리고 CHF 예측 모형으로서 CHF table을, 포화 기포율 계산을 위하여 Chexal-Lellouch 모델을 추가하였으며, 수치 해법 안정성 향상을 위한 방법론 개선 내용도 적용하였다. MATRA 코드의 난류 혼합 모형은 기존의 동일질량 교환 모델과 함께 기포 이동을 고려한 동일 체적 교환 모형을 사용할 수 있도록 하였다[11].

그림 3은 실험 자료로부터 국부조건 CHF data base를 생산하는 과정을 보인 것이다. CHF 실험 자료는 실험집합체 입구 조건으로 표현되는데, 부수로 해석 코드를 사용하여 CHF 발생 위치에서의 국부 물성치를 계산한다. 이를 위하여 실험집합체를 3차원적으로 나누어 부수로 해석 코드의 기본 계산 단위를 구성하며, 코드에 사용되는 주요 열수력 모형들을 해석 대상 집합체의 열수력적 특성을 고려하여 선정한다. 부수로 해석 코드를 사용하여 실험집합체 내의 열수력장 분포가 계산되면 이로부터 CHF 발생 위치에서의 국부 열수력 조건을 알 수 있는데, 국부 조건 CHF data base는 국부조건 CHF 상관식 개발 방법론에 따라 결정된다. 경수로 노심 설계에 사용하는

CHF 상관식 개발에 주로 사용되는 방법론은 최소 DNBR 예측 위치에서의 국부 열수력 조건을 사용하는 것인데, 이 경우 상관식에 따라 최소 DNBR 위치가 달라질 수 있으므로 반복 계산이 필요하다. 만일 실험을 통해 측정된 CHF 발생 위치에서의 국부 조건을 사용하여 상관식을 개발하는 경우에는 이러한 반복 계산 과정이 불필요하다.

2.3 TDC 영향 평가

부수로 간의 난류혼합을 결정하는 TDC(Turbulent Diffusion Coefficient)는 부수로 해석 결과에 가장 크게 영향을 주는 인자의 하나로서, 이 값의 크기는 일반적으로 열혼합 실험을 통해 정량적으로 평가된다. 현재 수집된 집합체 CHF 실험 자료 중에는 적절한 TDC를 평가할 수 있는 열혼합 실험 자료가 없는 자료도 포함되어 있다. 그리고 열혼합 실험 자료로부터 TDC를 평가한 실험 집합체의 경우에도 단상 유동 조건에서 결정된 최적 TDC를 2상 유동 조건에도 그대로 적용하였다. 이처럼 동일 질량 교환 모형을 2상 유동 조건에 적용하는 경우에, 국부 건도가 높고 corner 채널에서 CHF가 발생하는 경우를 제외하면 이로 인하여 부수로 해석 코드의 예측 정확도가 크게 낮아지지 않는 것으로 나타났다[11]. 집합체 실험 자료의 상당 부분을 차지하는 EPRI 보고서 [12] 자료의 경우 TDC 값이 제시되어 있지 않으며, 이는 집합체 실험 자료에 대한 국부 조건 해석 과정에서 가장 큰 장애 요인이다. TDC는 혼합날개 특성이나 지지격자 간격 등에 따라 그 값이 큰 차이를 보이는 것으로 나타나는데, IFM(Intermediate Flow Mixer)이 부착되거나 지지격자 간격이 아주 작은 경우를 제외하면 일반적으로 혼합날개 부착 여부에 따라 0.005~0.05 정도의 값을 갖는 것으로 평가된다[13]. 본 연구에서는 정방향 집합체에 대하여 이러한 TDC 값의 차이가 CHF에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 난류혼합은 동일 질량 교환 모형을 사용하여 고려하였다. TDC의 영향은 실험집합체 단면에서 부수로 형태, 즉 등가 수력 직경이나 등가 가열 직경의 균일성 및 반경방향 출력 분포에 따라 다르게 나타난다. 본 분석에서는 5 종류의 CE 연료 형태 집합체와 1 종류의 crossed 형태 집합체에 대하여 TDC의 영향을 정량적으로 평가하였다. CHF는 CHF table[14]을 사용하여 HBM(Heat Balance Method)에 따라 계산하였으며, TDC는 0.005와 0.05의 두 조건에 대하여 평가하였다. 그림 4는 집합체 출구에서의 건도 분포를 나타낸 것인데, 그림의 수직 축은 집합체 평균 엔탈피 상승에 대한 각 채널의 엔탈피 상승비를 의미한다. 실험집합체의 축방향 출력 분포는 균일하며 봉출력 침두치는 1.02~1.21 사이에 있는데, 이 경우 TDC 변화에 따라 고온 채널의 엔탈피 상승은 15~25% 정도 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 지지격자에 혼합날개를 부착하면 혼합날개가 없는 경우에 비하여 고온 수로의 엔탈피 상승이 이 정도 크기로 낮아질 수 있음을 의미한다. 표 2는 CHF table을 사용하여 평가한 P/M 통계량을 정리한 것으로서, TDC가 0.005에서 0.05로 변함에 따라 P/M의 평균은 약 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

3. 집합체 CHF Data Base 평가

본 연구에서는 원형관에 대하여 광범위한 적용 범위를 갖는 CHF table 방법론을 사용하여 집합체 CHF data base를 평가하였다. AECL의 CHF lookup table 방법론에서는 원형관과 집합체 간의

기하형태 특성 차이를 고려하기 위한 보정 인자들이 사용되고 있다[15]. Lee는 EPRI 보고서에 기술되어 있는 집합체 실험 자료 평가를 통하여 CHF table에 대한 집합체 보정 인자를 제시하고 있다[4]. 이러한 보정 인자들은 기본적으로 실험집합체에 대한 국부 열수력장 해석을 수행하지 않고 CHF table을 적용하기 위하여 개발된 것이다. CHF는 국부 물성치에 의해 거의 결정되므로 집합체 보정 인자는 집합체 평균 물성치와 CHF 발생 위치에서의 국부 물성치 간의 차이가 CHF에 미치는 영향을 적절하게 고려할 수 있도록 설정되어야 한다. 그러나 집합체 내의 국부 열수력장 분포는 보정 인자로서 단순히 표현하기 어려운 경우가 많으며, 부수로 지배 방정식을 사용하여 유도한 집합체 보정 방법론[3]을 사용하는 경우에도 HBM을 사용하는 경우에만 적절한 오차 범위 내에서 CHF를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 실험 자료로부터 경험적으로 구한 집합체 보정 인자는 횡방향으로 완전히 개방된 수많은 채널로 구성되는 실제 원자로심 조건에 잘 적용될 수 있을지 확인하기 어렵다. 집합체 크기나 출력 분포의 변화 등이 국부 열수력장에 미치는 영향은 열수력장 해석 코드를 사용하여 적절하게 평가할 수 있으므로, 개방된 채널을 갖는 집합체에 대한 CHF 예측은 국부 열수력 조건에 근거 예측 방법론을 적용하는 것이 타당하다. 그러나 집합체가 횡방향으로 격리된 구조를 갖는 경우에는 적절한 집합체 보정 인자를 사용하여 부수로 해석을 대체하는 방법도 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 기존 가압경수로 노심에 주로 사용되는 정방향 집합체 실험 자료에 대하여 부수로 해석 코드에 근거한 국부 조건 해석 방법론을 적용하였다. 정방향 집합체의 경우 기존 경수로에 대하여 축적된 부수로 해석 경험을 바탕으로 실험집합체에 대한 국부 조건 data base를 구축하였다. 이에 비하여 비정방향 집합체에 대한 해석 경험과 실험 자료는 현재 충분하지 못하므로, 이에 대한 국부 조건 data base는 적절한 부수로 해석 모형이 수립된 이후에 얻을 수 있다. 본 연구에서는 비정방향 집합체 실험 자료는 집합체 평균 물성치에 근거한 예측 방법론을 적용하여 실험집합체의 기하 형태 특성이 P/M 예측 결과에 어떻게 나타나는지 평가하였다.

3.1 정방향 집합체 실험자료 평가

국부조건 상관식 개념으로 개발된 CHF table 방법론은 DSM과 HBM의 두 가지 방법으로 CHF 예측에 적용할 수 있다. 그림 5는 축방향 출력 분포가 균일한 경우 집합체에 대하여 DSM과 HBM을 적용하는 방법을 간략하게 보인 것이다. 그림에는 2 개의 열평형 선이 있는데 다른 조건이 동일한 경우 집합체 내에서는 채널 간의 열교환이 이루어지므로 주어진 열출력 조건(q_{exp})에서 개방 수로의 국부 건도(X)는 동일한 기하 형태를 갖는 폐쇄 수로의 국부 건도(X_{iso}) 보다 일반적으로 작다. DSM을 적용하는 경우에는 부수로 해석 코드로 계산된 개방 수로의 국부 건도를 사용하여 CHF를 예측한다. HBM을 적용하는 경우에는 열출력 변화에 따른 국부 건도 변화를 평가해야 하는데, 이는 주어진 조건에서 열출력만 변하는 경우 개방수로에서의 엔탈피 상승과 폐쇄수로에서의 엔탈피 상승 간의 비율이 항상 일정한 값을 유지한다는 가정으로부터 계산하였다. CHF table에 적용된 보정 인자는 채널 직경에 대한 보정 인자(K_1)와 간격 격자에 대한 보정 인자(K_3), 그리고 가열 길이에 대한 보정 인자(K_4)이며, K_1 은 고온 채널의 등가 수력 직경을 사용하여 평가하였다[14]. 정방향 집합체 실험 자료 중 147개 실험집합체에 대한 9115 개 실험 자료가 축방향 출력 분포가 균일한 경우에 해당하는데, 그림 6은 HBM과 DSM으로 평가한 각 실험집합체의 P/M 평균 및 표준 편차를 나타낸 것이다. 일부 CE-PWR 형태 실험집합체에 대하여 CHF를 지나

치게 크게 예측하는 경향을 보이는 경우도 있으나, HBM을 적용할 경우 전체 자료에 대한 CHF table 방법론의 CHF 예측 성능은 P/M의 평균 오차가 +0.3%, 표준편차가 11.6%로 나타났다. DSM을 적용할 경우에는 평균 및 표준 편차가 각각 1.023 및 0.323으로 평가되었다.

축방향 출력분포가 비균일한 경우 CHF 예측 방법은 그림 7에 개략적으로 제시하였다. 실험 자료 분석에는 CHF가 발생한 고온 채널의 축방향 열수력장 분포가 사용된다. DSM 방법론의 경우에는 모든 축방향 위치에서 DNBR을 평가한 후 최소 DNBR 위치에서 P/M을 결정한다. HBM 방법론의 경우 최소 DNBR 발생 위치는 DSM을 통해 평가된 위치를 그대로 적용하였으며, 그 위치에서 출력 변화에 따른 국부 물성치 변화는 균일 출력 분포 실험 자료 분석에 적용한 바와 마찬가지로 개방 수로와 폐쇄 수로 간의 엔탈피 상승 비율이 일정한 값을 유지한다는 가정으로부터 평가하였다. 평가에 사용된 정방향 실험집합체는 14 종류이며 축방향 출력 분포 형태는 그림 8에 제시하였다. 축방향 비균일 출력 분포에 대한 보정 인자로서 CHF table 방법론에서 제시하고 있는 K_5 [15]와 함께 Tong F-factor[16]와 이론적 모형으로부터 개발된 보정 함수[17]를 사용하여 실험 자료를 평가하였다. 표 3은 축방향 출력 분포 보정 함수에 따른 P/M의 통계량을 서로 비교한 것인데, 서로 비슷한 예측 성능을 보이는 것으로 나타났다. 그림 9는 정방향 집합체에 대하여 F_{NU} 를 사용하여 평가한 CHF 예측치와 실험치를 비교한 것인데, HBM 방법론을 적용할 경우 정방향 집합체 축방향 비균일 출력 분포 조건에 대하여 CHF table 방법론의 예측 정확도가 비교적 좋은 것으로 평가되었다.

3.2 비정방향 집합체 실험자료 평가

수집된 비정방향 집합체 CHF 실험 자료 중 원통형 가열봉 집합체에 대한 1140 개 실험 자료를 평가하였다. 실험집합체의 배럴 단면 형태는 육각형과 원통형, 그리고 평행사변형의 3 종류이며 축방향 출력 분포는 균일하다. 집합체 단면 평균 물성치를 사용하여 비정방향 집합체에 적용 가능한 기존의 4 가지 CHF 상관식[1,2,18,19]과 CHF table 방법론[14]의 CHF 예측 성능을 비교하였다. 표 4는 여러 가지 CHF 예측 모형으로 계산한 P/M의 통계량을 비교한 것인데, 여기서 P/M은 임계출력 비와 같은 의미를 가진다. 비정방향 집합체 실험집합체에 대한 자세한 정보는 참고문헌에 기술되어있다[20,21]. 실험 자료 평가 결과 집합체 형태에 따라 여러 가지 CHF 예측 모형의 CHF 예측 성능이 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. CHF table 방법론으로 P/M을 평가할 때 집합체 보정 인자는 적용하지 않았는데, 육각형과 원통형 집합체에서는 CHF를 크게 예측하는 경향이 뚜렷하게 나타난 데 비하여 평행사변형 집합체에서는 CHF를 낮게 예측하고 있다. 이러한 차이는 집합체 기하형태 특성이나 국부 물성치와 평균 물성치 간의 차이로 인해 발생하는 것으로 생각되며, 비정방향 집합체에서의 국부 열수력장 해석 결과를 검토해야 할 필요가 있으므로 본 연구에서는 이에 대한 정량적 평가를 생략하였다.

4. 결론

본 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 집합체에 대한 CHF data base를 구축하였다. 정방향 집합체 실험 자료는 147 개의 축방향 균일분포 실험집합체(9115 data points)와 14 개의 축방향 비균일 출력 분포 실험집합체(1045 data points)로 구성되며, 비정방향 집합체 실험 자료는 45 개의 원통형, 육각형 및 평행사변형 실험집합체로 구성되어 있다.

(2) 실험집합체 국부 물성치는 MATRA 코드로 평가하였다. TDC를 0.005에서 0.05까지 변화시킨 결과 국부 열수력 조건 변화에 따른 CHF의 P/M 예측치 변화는 약 10% 정도에 이르는 것으로 평가되었다.

(3) 정방향 집합체의 국부조건 실험 자료에 대하여 1995 AECL CHF Table을 적용한 결과, HBM으로 평가된 P/M의 평균 및 표준편차는 축방향 균일 분포의 경우 각각 1.003 및 0.116, 축방향 비균일 분포의 경우 각각 0.972 및 0.088로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Reddy D.G. & Fighetti C.F., A generalized subchannel CHF correlation for PWR and BWR fuel assemblies, EPRI-NP-2609 Vol.2 (1983).
- [2] Pernica R. & Cizek J., PI correlations for prediction of critical heat flux in LWR fuel assemblies, NURETH-5 paper 2B2, 227-234 (1992).
- [3] Hwang, D.H., et. al., Development of a bundle correction method and its application to predicting CHF in rod bundles, Nuclear Engineering Design 139, 205-220 (1993).
- [4] Lee M., 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).
- [5] Chun, T.H., et. al., Assessment of a tube-based bundle CHF prediction method using a subchannel code, Annals of Nuclear Energy 25, 1159-1168 (1998).
- [6] Hwang, D.H., et. al., Evaluation of thermal margin in a KOFA-loaded core by a multichannel analysis methodology, J. KNS 27, 518-531 (1995).
- [7] 황대현, HTP 핵연료 CHF 상관식 체제 개발, NFF-TH-001/95, 내부보고서 (1995).
- [8] 황대현, 신형로 노심 임계열속 해석체제 개발, RN1-711-004-P, 내부보고서 (1993).
- [9] 황대현, 유연종, 지성균, SMART 노심 조건에 대한 국부조건 CHF 상관식 개발, 2000 춘계학술발표회논문집, 원자력학회 (2000).
- [10] Yoo, Y.J., et al., Development of a subchannel analysis code MATRA applicable to PWRs and ALWRs, J. KNS 31, 314-327 (1999).
- [11] Hwang, D.H., et. al., Assessment of the interchannel mixing model with a subchannel analysis code for BWR and PWR conditions, Nuclear Engineering Design 199, 257-272 (2000).

- [12] Fighetti, C.F. & D.G. Reddy, Parametric study of CHF data Vol. 3, EPRI NP-2609 (1982).
- [13] 황대현, 외, 노심 열수력장 및 임계열속 해석 체제 개선, KAERI/RR-980/90 (1990).
- [14] D.C. Groeneveld, et. al., The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes, Nuclear Engineering Design 163, 1-23 (1996).
- [15] D.C. Groeneveld & L.K.H. Leung, Tabular approach for predicting critical heat flux and post-dryout heat transfer, NURETH-4, 109-114 (1989).
- [16] L.S. Tong, Boiling crisis and critical heat flux, TID-25887 (1972).
- [17] Hwang, D.H., et. al., A phenomenological approach to correcting DNB-type critical heat flux for non-uniform axial power shapes, Int. J. Heat Mass Transfer 44, 4483-4492 (2001).
- [18] Bowring R.W., A new mixed flow cluster dryout correlation for pressures in the range 0.6-15.5 MN/m² (90-2250 psia) - for use in a transient blowdown code, IMechE 175-182 (1977).
- [19] Donne M.D., CHF-KfK-3: A critical heat flux correlation for triangular arrays of rods with tight lattices, KfK-4826, Karlsruhe, Germany (1991).
- [20] 황대현, 비정방형 집합체에서의 임계 열속 특성 분석, KAERI/TR-1047/98, 기술보고서 (1998).
- [21] 황대현, 비정방형 7-봉 집합체 CHF 실험 자료 평가, KAERI/TR-1720/2001, 기술보고서 (2001).

표 1. 집합체 CHF Data Base 특성 자료

Parameter	Range
<u>Square lattice rod bundles</u>	
Number of TS	161
Number of data points	10160
Total number of rods	21 ~ 36
Number of heater rods	20 ~ 36
Rod pitch [mm]	12.3 ~ 14.7
Heater rod diameter [mm]	9.1 ~ 11.2
Unheated rod diameter [mm]	10.9 ~ 28.8
Rod to wall gap [mm]	1.8 ~ 4.5
Heated length [mm]	1200 ~ 4300
Grid spacing [mm]	203 ~ 660
Radial peaking factor	1.01 ~ 1.61
Axial power shapes	Uniform and non-uniform
<u>Non-square lattice rod bundles</u>	
Number of TS	45
Number of data points	2145
Barrel shape	Circular, parallelogram, hexagonal
Total number of rods	7 ~ 37
Spacer shape	Grid, wire wrap, helical fin
Heater rod diameter [mm]	6.4 ~ 19.8
Rod pitch [mm]	7.0 ~ 22.6
Heated length [mm]	400 ~ 2700

표 2. TDC가 CHF 계산 결과에 미치는 영향 평가 결과

집합체 ID	TDC=0.005			TDC=0.05		
	자료수	평균 P/M	표준편차	자료수	평균 P/M	표준편차
EPRI-008	69	1.090	0.209	77	1.152	0.225
EPRI-021	43	1.020	0.106	64	1.120	0.095
EPRI-029	49	1.134	0.129	59	1.240	0.087
EPRI-062	64	0.889	0.043	70	0.971	0.044
EPRI-070	104	0.976	0.043	109	1.078	0.055
EPRI-512	53	1.061	0.089	63	1.181	0.106
Total	382	1.019	0.139	442	1.116	0.142

표 3. 축방향 출력 분포 보정 인자에 따른 P/M 통계량 비교

	자료수	HBM		DSM	
		P/M 평균	표준편차	P/M 평균	표준편차
K_5 [Groeneveld]	1045	0.958	0.087	0.895	0.218
F_{Tong} [Tong]		0.963	0.081	0.912	0.196
F_{NU} [Hwang]		0.972	0.088	0.939	0.213

표 4. 비정방형 집합체에 대한 CHF 예측 모형 예측 성능 비교

	육각형(N=200)		원통형(N=444)		평행사변형(N=496)	
	P/M 평균	표준편차	P/M 평균	표준편차	P/M 평균	표준편차
Bowring 상관식	1.074	0.164	1.160	0.172	1.098	0.230
PI-3P 상관식	0.921	0.159	1.149	0.172	0.966	0.130
KfK-3 상관식	1.109	0.199	1.167	0.279	1.036	0.127
EPRI-1 상관식	0.950	0.110	0.985	0.159	0.815	0.109
CHF table	1.269	0.287	1.274	0.200	0.939	0.126

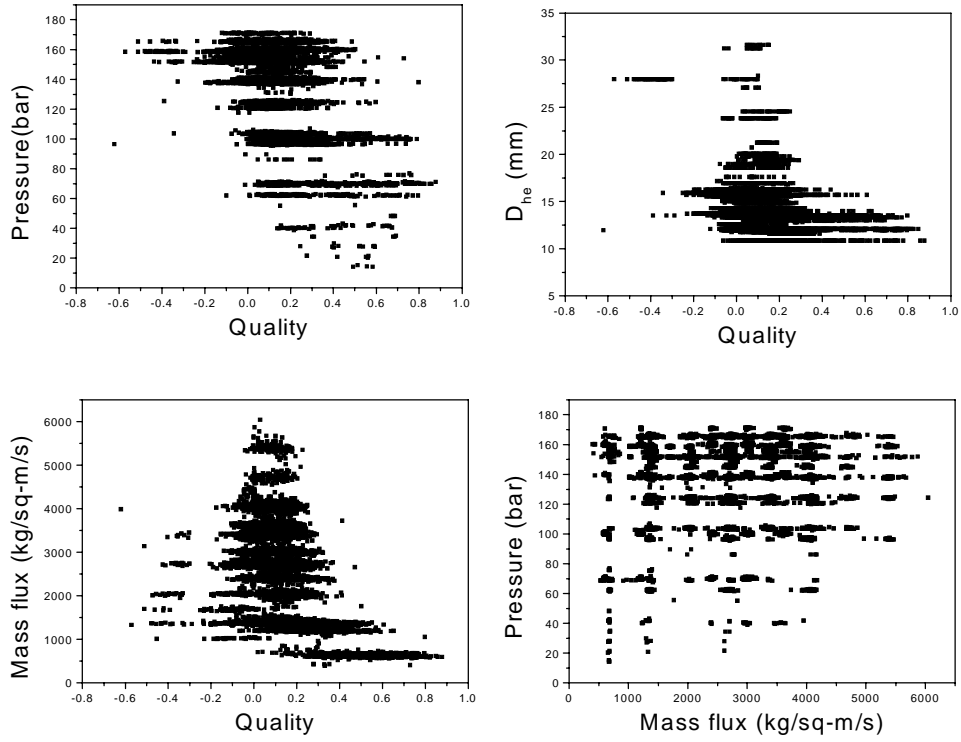


그림 1. 정방형 집합체 CHF 실험 자료의 주요 변수 영역

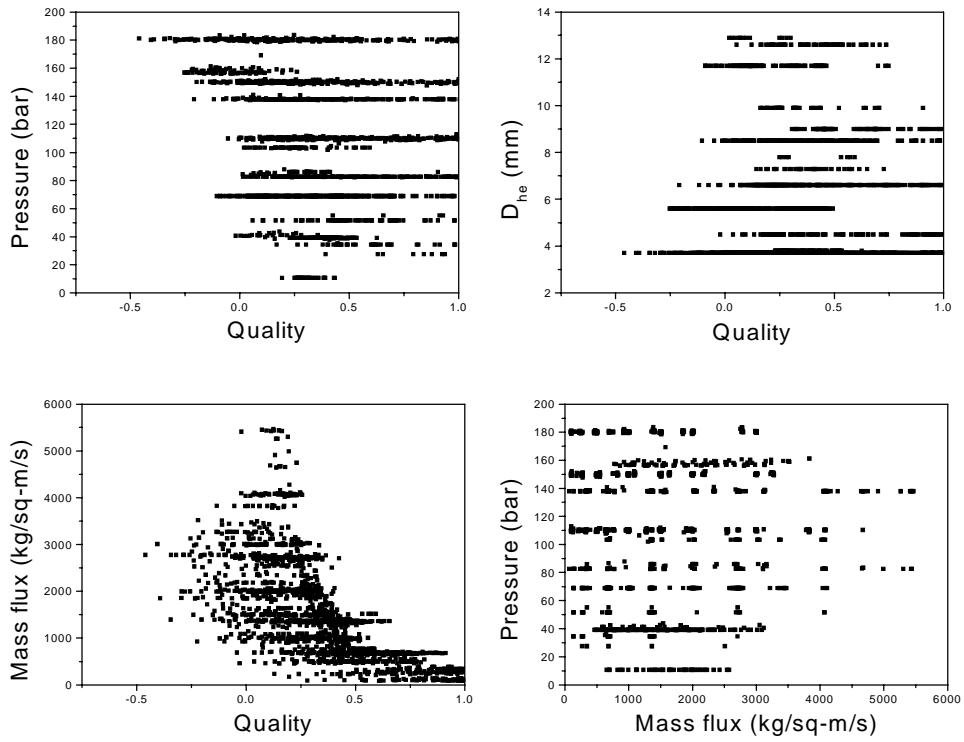


그림 2. 비정방형 집합체 CHF 실험 자료의 주요 변수 영역

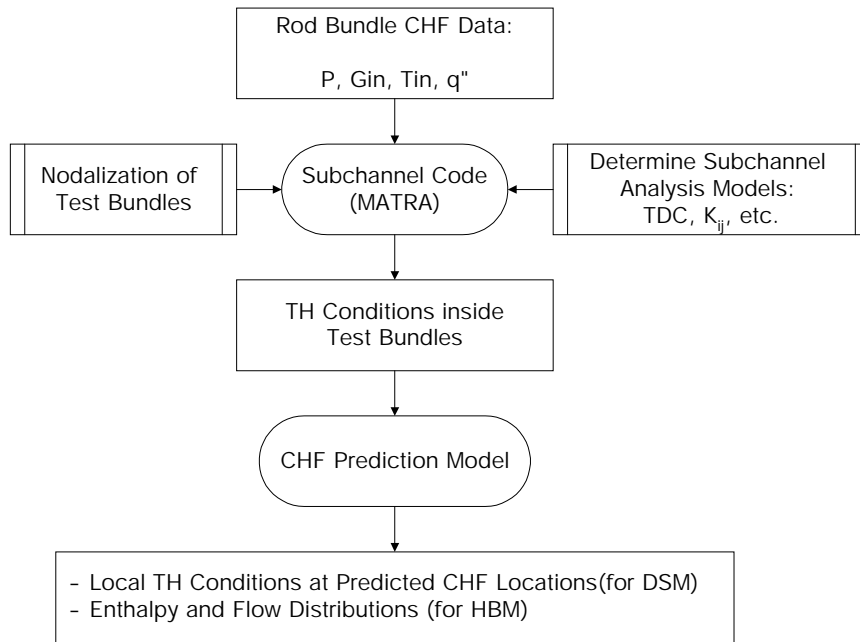


그림 3. 국부조건 CHF data base 생산 절차

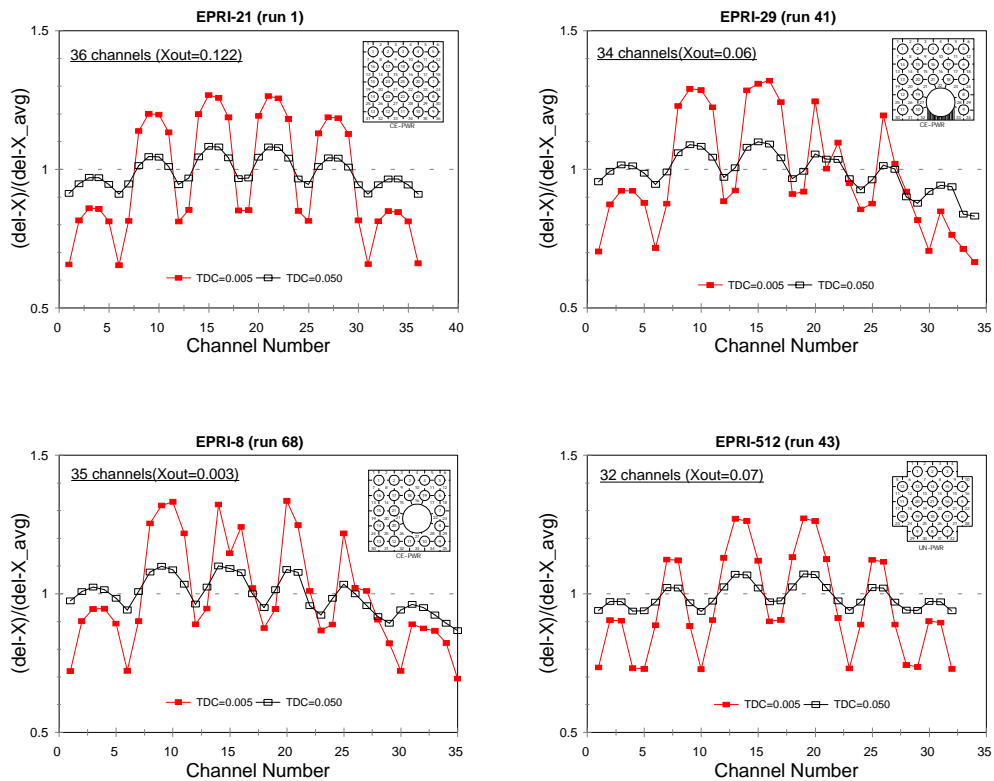


그림 4. TDC가 부수로 해석 결과에 미치는 영향 평가

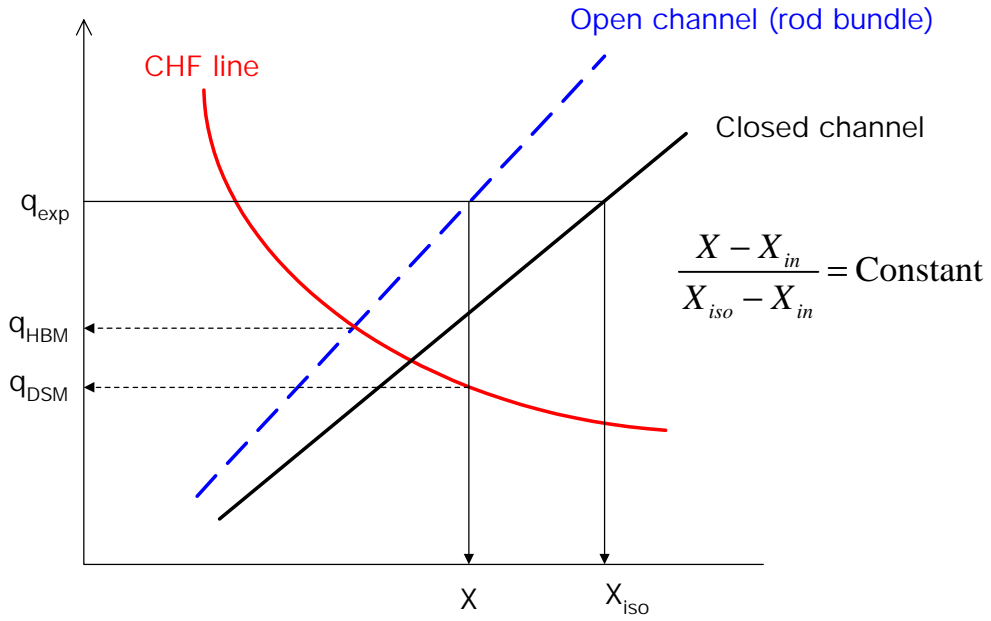


그림 5. 집합체 CHF 예측 방법론

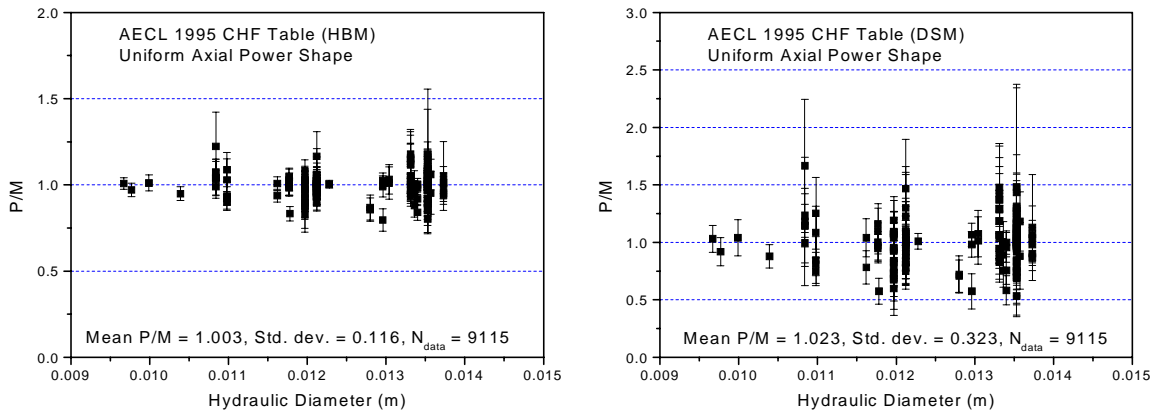


그림 6. 정방형 집합체 축방향 균일 출력 분포 실험자료 P/M 평가 결과

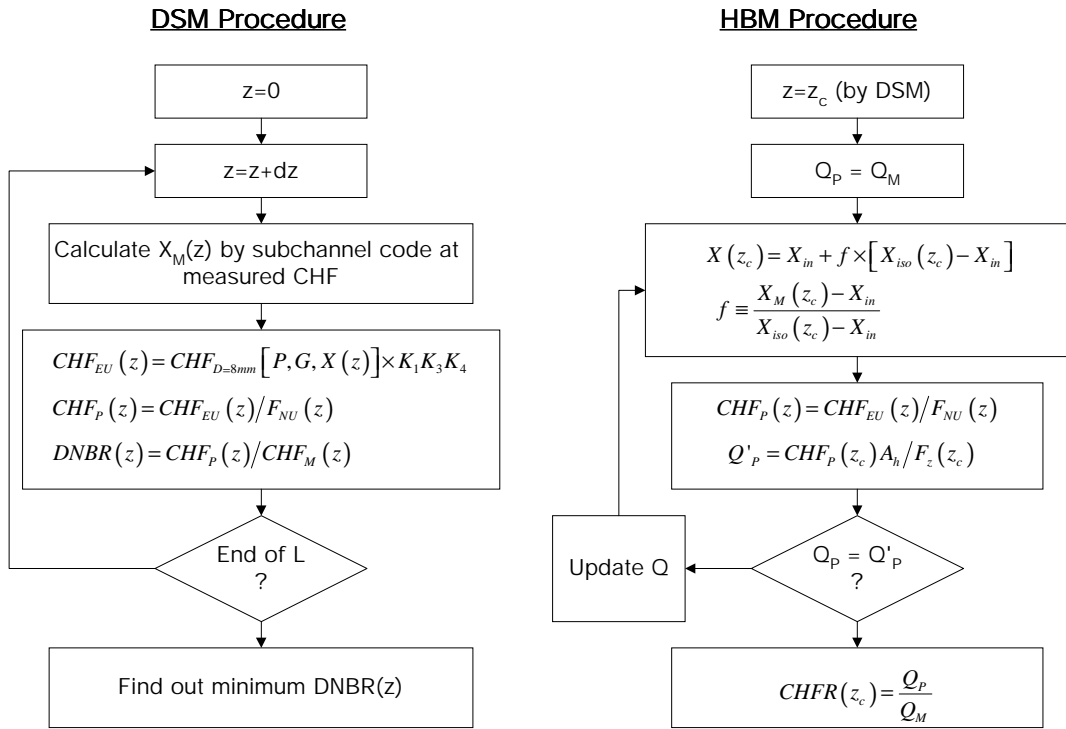


그림 7. 비균일 축방향 출력 분포 자료 분석 방법론

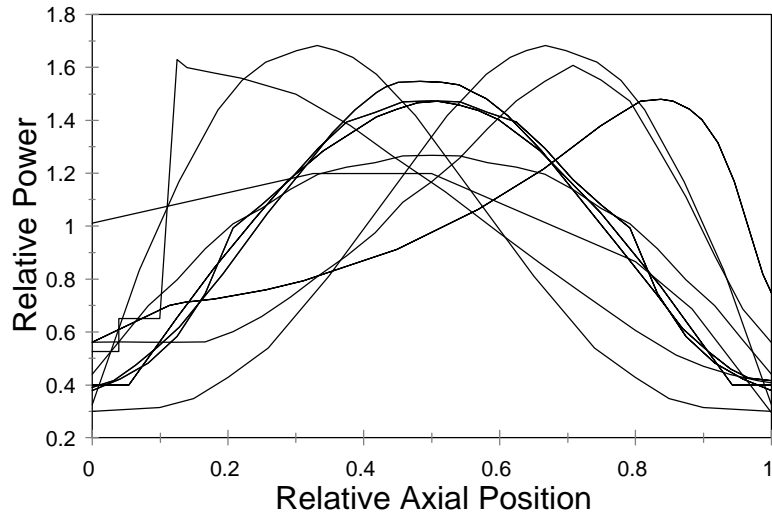


그림 8. 축방향 비균일 출력 분포 형태

그림 9. 정방형 집합체 축방향 비균일 출력 분포 실험자료 P/M 평가 결과

