

## 국부조건 CHF 상관식의 적용 방법론에 대한 고찰

### A Study on the Application Methods of Local Parameter CHF Correlations

황대현, 서경원, 지성균, 장문희

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

국부 조건 CHF 상관식의 두 가지 적용 방법론, HBM과 DSM에 대하여 검토하였다. 실험 자료 평가 및 상관식 비교, 원자로 열적 여유도 평가, 그리고 사고 해석 적용 등에 대하여 두 방법론의 특성을 검토하였고, 비가열면 효과에 대한 분석을 통하여 방법론의 효용성을 검토하였다. 검토 결과 두 가지 적용 방법론에 대한 정확한 이해와 적절한 선택적 사용이 필요한 것으로 나타났다.

#### Abstract

Two different application methods of local parameter CHF correlations, HBM(Heat Balance Method) and DSM (Direct Substitution Method) are investigated in this study. The characteristics of the two methods are examined in the aspects of; the assessment of experimental data and comparison of CHF correlations, the estimation of thermal margins, and the application to accident analyses. In addition, the effect of unheated wall on CHF is analyzed to investigate the usefulness of the methods. It reveals that the understanding and selective usage of the two methods is required for the correct analyses of CHF.

#### 1. 서론

개방형 핵연료 집합체를 사용하는 가압 경수로 노심에 대한 CHF(Critical Heat Flux) 해석에는 국부 조건 개념에 의해 개발된 CHF 상관식이 주로 사용되고 있다. CHF 상관식은 정상 운전 상태 및 과도 상태에 대한 원자로의 열적 여유도를 평가하고, 사고시 CHF 발생 시점을 예측하여 적절한 열전달 모드가 사고 해석에 적용될 수 있도록 한다.

국부 조건 CHF 상관식을 적용하는 방법이 두 가지로 나타나는 이유는 CHF 상관식이 국부 건도의 함수로 표현되기 때문이다. 입구 조건 CHF 상관식의 경우 CHF는 압력, 유량, 채널직경, 가열길이, 입구온도 등과 같이 CHF와 완전히 독립적인 변수들의 함수로 표현되므로 상관식 적용 방법은 한 가지 뿐이다. 이에 비하여 국부조건 상관식은 압력, 유량, 직경, 국부건도 등의 함수로 표현되는데, 이 때 채널의 국부 건도와 CHF는 그 채널에 대한 열평형식에 의해 서로 종속적인 관계를 갖는다. 따라서 국부조건 상관식은 (1) 상관식 변수들을 완전히 독립적인 변수로 취급하여 열평형식을 무시하고 CHF를 예측하거나, (2) 채널에 대한 열평형식과 CHF 상관식을 모두 만족시키면서 CHF를 예측하는 두 가지 방법으로 적용할 수 있다. 일반적으로 (1)의 방법을 DSM (Direct Substitution Method), (2)의 방법을 HBM (Heat Balance Method)라고 부른다.

본 논문에서 사용하는 여러가지 용어들의 개념을 그림 1과 함께 다음과 같이 정리하였다.

DSM과 HBM: DSM은 임의의 운전 조건 (즉, 채널 입구 온도, 유량, 압력, 열출력, 국부 건도)이 주어졌을 때, 국부 건도가 일정하게 유지되는 상태에서 CHF를 계산하는 방법이며, HBM은 채널 입구 조건이 일정하게 유지되는 상태에서 CHF 예측치가 그 채널의 열평형식을 만족시키는 새로운 운전 조건에서 CHF를 계산하는 방법이다.

DNBR과 CPR: 임의의 운전 조건( $q''_{op}$ )에서 DSM으로 계산한 CHF와 HBM으로 계산한 CHF를 각각  $q''_{DSM}$ 과  $q''_{HBM}$  이라하면, DNBR은  $q''_{DSM}/q''_{op}$ , CPR은  $q''_{HBM}/q''_{op}$ 로 정의된다.

CHF line과 HB line: CHF line은 임의의 운전 조건에서 국부 건도 변화에 따른 CHF 변화를 나타낸 것으로서 선 위의 각 지점에서 입구 온도는 서로 다르다. HB line은 임의의 운전 조건에서 일정한 입구 온도에 대한 열평형식을 나타낸 것으로서 입구 온도가 달라지면 HB line의 위치도 달라진다.

국부 조건 CHF 상관식을 적용하는 관점에서 보면, CHF에 대한 열적 여유도 평가와 CHF 발생 시점 평가는 서로 다른 면이 있다. 먼저 상관식의 오차가 없는 경우를 가정하면, 열적 여유도는 DSM 여유도 (DNBR)와 HBM 여유도 (CPR)로 구분되는데 비하여, CHF 발생 시점을 예측할 때는 DSM과 HBM 간에 아무런 차이가 없다. 만일 실제 경우와 같이 상관식의 예측 오차가 있는 경우에는, DSM 여유도와 HBM 여유도는 각각에 대한 P/M 통계량으로부터 결정되는 공차 한계 (Tolerance Limit)로부터 결정되며, 동일한 상관식과 data base를 사용하는 경우에도 각각의 방법에 따라 평가되는 열출력 여유도는 서로 다를 수 있다 (2.2절 참조). 한편 CHF 발생 시점은 DNBR 혹은 CPR이 각각에 대한 공차 한계와 같아지는 조건에서 결정된다. HBM은 과도 상태에 적용할 수 없으며, CHF 발생 시점은 CHF 예측치를 DSM에 의한 공차 한계만큼 감소시키는 방법으로 예측할 수도 있다.

국부조건 상관식을 적용하는 두 가지 방법에 대하여 많은 논의가 지금까지도 진행되고 있으며 [1] 국내에서도 두 방법론의 의미와 실험 자료 분석 결과에 나타나는 차이에 대하여 보고된 바 있다[2,3]. 본 논문에서는 두 방법론에 대하여 지금까지 논의된 주요 논점들을 검토하고 실제 원자로 설계 계산을 위한 올바른 적용 방법론을 제시하고자 하였다. 그리고 P/M의 통계량이나 열적 여유도와 같은 정량적인 관점 뿐만 아니라, 비가열면이 CHF에 미치는 영향 평가를 통하여 CHF 특성을 평가하는 도구로서 두 방법론이 갖는 효용성을 검토하였다.

## 2. 적용 방법론의 특성 검토

### 2.1 실험자료 평가 및 상관식 비교 관점

서로 다른 국부조건 CHF 상관식의 예측 성능을 비교하기 위하여 CHF 실험 자료를 평가하는 경우 적용해야하는 방법론에 대하여 검토하였다. 기존의 논의를 검토한 결과 HBM과 DSM 중 한 가지 방법만이 옳다고 주장하는 서로 상반된 의견도 있고 두 방법론이 모두 나름대로 의미가 있다는 의견[4]도 있다.

Celata[6]는 HBM 만이 유일하게 의미있는 방법이라는 의견을 제시하였는데, 그 이유는 CHF 실험 조건에서 만일 채널의 기하 형태 및 열수력 조건을 알고 있는데 CHF 크기를 모르는 경우에는 근본적으로 DSM을 적용할 수 없으며, 만일 CHF가 아닌 열출력 조건에서 DSM을 적용하는 경우에는 CHF 계산에 사용된 국부 건도와 CHF 조건에서 열평형식을 만족시키는 국부 건도가 서로 다르므로 모순이라는 것이다. Groeneveld[7]는 실험 자료를 평가할 때는 실제 CHF 실험 과정에서 조절된 변수를 우선적으로 고려해야 하는데, 실험 수행 시 입구 온도는 일정하게 유지하도록 조절하지만 국부 건도는 운전 조건에 따라 중속적으로 결정되는 것이므로 HBM을 적용하는 것이 타당하다고 주장하였다. 그리고 임의의 채널에 대하여 DSM으로 계산된 CHF 조건은 그 채널에서는 결코 일어날 수 없는 조건이라는 점을 지적하였다.

한편, 이와 반대로 Siman-Tov[8]는 오직 DSM 만이 올바른 평가 방법이라는 주장을 제시하였다. 그는 열적 여유도는 DSM이나 HBM 중 한가지를 선택하여 평가할 수 있지만 실험 자료 평가에는 DSM 만이 옳은 방법이라고 주장하였으며, 그 이유로서 (1) DSM은 동일한 열수력 조건에서 CHF의 실험 측정치와 예측치를 비교하는 것인데 비하여 HBM은 서로 다른 열수력 조건에서 CHF를 비교하는 것이며, (2) 특히 축방향 비균일 출력 분포 조건에 대하여 HBM을 적용하는 것은 국부적인 조건에 의해 결정되는 국부 CHF를 채널 전체에 반영함으로써 upstream effect를 부정확하게 평가하게 하며, (3) HBM의 오차가 DSM 오차보다 작은 것은 단순히 CHF와 국부 건도 간의 반비례 관계 때문에 나타난 결과이므로 이것이 HBM의 우수성을 의미하는 것은 아니며, (4) CHF는 국부적인 현상이지만 어느 정도는 상류 열수력 조건의 영향을 받을 수 있는데, HBM에서 국부 건도 대신에 채널 입구 열수력 조건을 사용하는 것이 이러한 상류 열수력 조건의 영향을 고려해 주는 것은 아니라는 점 등을 지적하였다.

본 저자의 의견으로는 국부 조건 상관식을 적용하는 경우에 DSM이 적절한 방법이지만 HBM을 사용하는 경우에도 동일한 입구 조건에 대한 CHF 예측 성능을 비교한다는 의미가 있다고 생각한다. Celata의 주장은 DSM과 HBM을 적용하는 배경에는 적절한 국부조건 상관식이 이미 있어야 한다는 전제 조건과 CHF 예측은 열출력을 포함하는 운전 조건에서 수행된다는 점을 간과한 것으로 보인다. 열출력이 주어지지 않은 임의의 조건에서 CHF를 계산할 수 있는 유일한 방법은 HBM이지만 실제로 이런 계산이 필요한 경우라면 국부조건 CHF 상관식을 사용할 필요성이 전혀 없다. 이런 계산에는 입구 조건 상관식을 사용해야 한다. 그리고 국부조건 상관식이 사용되는 기본 전제

조건은 CHF가 입구 조건과 무관하게 결정된다는 것이므로, CHF 조건에서 입구 온도가 반드시 유지되어야 할 필요는 없으며 국부 조건만이 일정하게 유지되면 충분하다. Groeneveld의 주장은 실험을 통해 측정되는 변수의 중요성을 지적한 것인데, 국부 조건 상관식을 개발하고 적용하는 경우에는 비록 국부 건도가 실험을 통해 정확히 측정되지는 않지만 측정되는 변수와 마찬가지로 중요도를 갖는 것으로 취급하고 있다. 국부 건도는 일반적으로 부수로 해석 코드로 계산하는데 국부 건도를 계산하는 과정에 개입될 수 있는 오차를 고려하여 상관식 불확실도 평가에 반영하고 있다. 열수력장 해석 코드의 특성에 따라 동일한 실험 조건에서도 국부 건도 계산치가 달라질 수 있으므로, 이러한 점을 고려하여 국부 조건 CHF 상관식은 항상 상관식 개발에 사용되었던 열수력장 해석 코드 및 이로부터 평가된 불확실도와 함께 일관성 있게 사용하도록 하고 있다. 그리고 DSM에 의한 CHF 조건이 그 채널에서 일어날 수 없다는 지적은 입구 온도를 일정하게 유지시킨다는 가정 하에서 성립하는 것으로서, 입구 온도를 고려하지 않으면 (즉, 입구 온도를 임의로 조절한다면) 그 채널에서 발생 가능한 조건이 될 수 있다.

결론적으로 실험 자료를 평가할 때는 DSM과 HBM을 모두 적용할 수 있으며 상관식의 정확도를 비교할 때도 두 가지 방법에 의해 평가된 오차를 모두 비교할 필요가 있다. 오차의 크기는 특정 변수에 대한 상관식의 민감도 크기에 따라 달라지며 DSM 오차가 항상 HBM 오차보다 크게 나타난다. 그러나 상관식의 정확도 비교를 통하여 적절한 설계 상관식을 선정하고자 하는 경우에는 설계 해석에 적용할 방법론에 따라서 판단해야 한다. 즉, 설계 해석에 DSM을 사용해야 한다면 상관식의 정확도도 마찬가지로 DSM 오차에 근거하여 비교할 필요가 있다.

## 2.2 원자로 열적 여유도 평가 관점

CHF에 대한 원자로 노심의 열적 여유도는 임의의 운전 조건으로부터 CHF 발생 조건까지의 거리를 정량화한 것이다. 열적 여유도의 종류는 DSM으로 평가되는 DNBR 여유도와 HBM에 의한 CPR 여유도가 있으며, 원자로형에 따라서 열출력 변화에 따른 원자로 유량 변화를 고려한 CPR 여유도를 사용하기도 한다. 기존 가압 경수로 노심에서는 주로 DNBR 여유도 개념을 사용하고 있는데, 이는 개방형 집합체로 구성되는 노심 해석 해석과 과도상태 해석에 용이하게 적용될 수 있는 장점이 있는 반면에 여유도의 정량적 크기가 상관식 특성에 따라 달라지는 단점이 있다. DNBR 여유도는 현재 운전 상태와 CHF 설계 한계치 간의 거리를 나타내는 상대치로서 의미가 있으나, 서로 다른 상관식으로 평가되는 열적 여유도를 비교하는 관점에서는 CPR 여유도로 나타내는 것이 편리하다.

CPR 여유도는 입구 조건이 유지되는 상태에 대한 열출력 여유도를 의미하는데, 국부조건 상관식을 사용하는 경우 (1) HBM을 적용하는 방법과 (2) 열출력을 단계적으로 증가시키면서 DSM으로 계산하는 방법으로 CPR 여유도를 평가할 수 있다. 상관식의 불확실도가 없는 경우에는 동일한 국부조건 상관식을 적용하면 이 두 가지 방법으로 평가되는 CPR 여유도가 서로 일치한다. 그러나 상관식 불확실도가 있는 경우에는 이들이 서로 차이를 나타낼 수 있는데, 본 절에서는 집합체 및 원형관에 대한 CHF 실험 자료를 사용하여 이 차이를 정량적으로 평가하였다. 열적 여유도 평가는 다음과 같이 수행되었다: (1) 동일한 실험 자료에 동일한 CHF 상관식을 적용하여 DSM 및

HBM에 의한 공차 한계 (Tolerance Limit)를 평가함. (2) 임의의 운전 조건 (압력, 유량, 입구온도, 그리고 열출력  $q''_{op}$ )에 대하여 HBM을 적용하여 CHF( $q''_{HBM}$ )를 계산함. (3) HBM 공차 한계 조건 ( $L_{HBM}$ )에 해당하는 CHF( $q''_{op,HBM}=q''_{HBM}/L_{HBM}$ )를 구함. (4)  $q''_{op,HBM}$  조건에서 DSM으로 CHF( $q''_{DSM}$ ) 및 DNBR( $=q''_{DSM}/q''_{op,HBM}$ ) 계산함. (5) DNBR과 DSM 공차 한계 ( $L_{DSM}$ ) 간의 비( $F_{DSM}=DNBR/L_{DSM}$ )를 계산함. 이 계산 과정은 HBM 공차 한계 조건에서 계산된 DNBR을 DSM 공차 한계와 비교하는 것으로서, 만일  $F_{DSM}>1$  이면 이는 DSM에 의한 열출력 여유도가 HBM에 의한 열출력 여유도보다 크다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 SMART 노심 해석을 위해 개발한 SR-1 국부조건 CHF 상관식[9]과 원형관에 대한 CHF look-up table[10]을 각각 집합체 및 원형관 CHF 실험 자료에 적용하여 방법론에 따른 열적 여유도 비교 평가를 수행하였다. 집합체 실험 자료는 SR-1 상관식 개발에 사용된 자료 중 축방향 출력 분포가 균일한 2378 개를 선정하였으며, HBM을 적용할 때는 열출력이 변하더라도 고온 채널과 평균 채널 간의 엔탈피 상승 비율은 일정하게 유지된다는 가정을 적용하였다. 원형관에 대한 실험 자료는 집합체 실험 자료와 유사한 범위에서 2800 개를 수집하였으며 1995 AECL CHF look-up table을 적용하여 분석하였다. 실험 자료에 대한 공차 한계 및  $F_{DSM}$ 의 통계량은 표 1에 제시하였다. 그림 2는 집합체 및 원형관 실험 자료에 대하여  $F_{DSM}$ 을 평가한 결과를 질량 유속에 대하여 나타낸 것이다. SR-1 상관식의 경우 운전 조건에 따라 DSM 여유도와 HBM 여유도가 11% 까지 차이날 수 있는 것으로 나타났다. 실제 SMART 노심 운전 조건에 대하여 1/8 노심 분석을 수행한 결과, 정상 운전 상태에서는 열출력 여유도 차이가 0.1%로 평가되었으나, 압력이 110 bar로 낮아진 조건에서는 HBM 여유도가 DSM 여유도보다 약 2% 정도 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이는 상관식의 전체 적용 범위 내에서 하나의 공차 한계만을 설정하는 경우에는 불가피하게 발생한다. 따라서 상관식을 개발하는 초기 단계에서 상관식 적용 방법을 미리 결정하고 이를 상관식 계수 최적화 및 공차 한계 평가 등에 일관성 있게 적용해야 할 필요가 있다.

## 2.3 사고 해석 관점

사고 해석에 과정에서 CHF 계산을 하는 목적은 (1) DNB 관련 Non-LOCA 사고 해석의 경우 CHF 해석은 사고 진행에 따른 열적 여유도 변화를 평가하기 위한 것인데, 열적 여유도 감소가 가장 크게 나타나는 조건에서 CHF 설계 기준 만족 여부를 평가하며, (2) 사고 해석 조건이 Post-CHF 영역까지 포함하는 경우에는 열전달 모드를 결정하기 위하여 CHF를 계산하며, REALP5와 같은 사고 해석 코드에서 사용하는 CHF look-up table 등이 이러한 목적으로 사용되고 있다.

과도 상태에서는 DSM을 적용하여 CHF를 계산해야한다. DNB 관련 사고 해석의 경우에는 최소 DNBR을 DSM 공차 한계와 비교하여 CHF 설계 기준 만족 여부를 평가할 수 있다. 그리고 Post-CHF 해석이 필요한 경우에는 사고 진행에 따라 계산된 DNBR이 DSM 공차 한계와 같아지는 조건을 CHF 발생 조건으로 결정할 수 있다. 이 경우에는 원자로 조건이 CHF 발생 조건과 같으므로 DSM과 HBM을 구별할 필요가 없다. 만일 상관식의 오차를 고려하여 공차 한계 조건에서 CHF가 발생하는 것으로 판단해야 할 필요가 있을 경우에는 공차 한계의 크기만큼 CHF 값을 감소시켜 예측하면 CHF 발생 조건에서 DSM과 HBM의 차이가 없다. 그러나 그림 1에서 보듯이

‘CHF line’을 HBM 공차 한계만큼 감소시킨 ‘reduced CHF line’을 적용하여 CHF 발생 조건을 예측하면 이는 HBM 공차 한계 조건과 일치하지 않는다. 그림 1에서  $q''_{op}$ 와  $q''_{HBM}$  간의 차이를 HBM 공차 한계라고 가정하면 그림에 나타난 조건에서 열속이  $q''_{op}$ 에 도달했을 때 CHF가 발생한다. 그러나 CHF를 HBM 공차 한계만큼 감소시켜 예측한 결과는 그림의 국부조건  $X_1$ 에 해당하는 열속 조건에서 CHF가 발생하는 것으로 나타나게 된다. 이 문제는 CHF를 예측할 때 DSM 공차 한계만큼 감소시켜야 해결되므로, DSM 오차에 대한 정보가 없으면 사고 진행에 따른 CHF 발생 조건을 정확히 예측할 수 없다. CHF look-up table 방법론에 대한 논문[10]에는 DSM 오차에 대한 평가 결과가 기술되어 있지 않으므로 사고 해석 코드에 CHF look-up table을 적용할 경우에는 DSM 오차 및 공차 한계에 대한 평가가 우선 수행되어야 한다.

### 3. 적용 방법론의 효용성 검토

#### 3.1 국부조건 CHF 상관식에 나타나는 비가열면 효과

집합체 내의 부수로와 같이 여러 개의 봉으로 구성되는 채널에 비가열면이 일부 존재하는 경우 동일 국부 조건에서는 비가열면이 없는 경우에 비하여 CHF가 감소하지만 동일 입구 조건에서는 CHF가 증가한다. 원자로에서는 계측기나 제어봉 삽입을 위한 안내관이나 손상 연료봉을 대체하는 교체봉 등과 같은 비가열봉이 사용되고 있으므로 이러한 비가열면 효과를 적절히 예측할 수 있어야 한다. 국부조건 CHF 상관식에서 비가열면 효과는 독립적인 보정 인자를 사용하거나[11], 상관식 변수로서 채널 수력직경 및 등가 가열직경을 도입하는 방법[12] 등으로 고려하고 있다. 그러나 실험 자료의 범위가 상당히 제한적이며 국부조건 관점에서 보면 비가열면 효과는 채널간의 열혼합 효과와 채널 내의 엔탈피 분포 효과 등이 복합적으로 작용하여 나타나므로 그림 3(a)에서 보듯이 동일한 국부 조건에서는 상관식에 따라 그 효과가 서로 다르게 나타날 수 있다. 그림 3은 CE형 연료 형태에 대한 5x5 CHF 실험 집합체에서 비가열봉의 개수를 증가시키면서 계산한 결과를 나타낸 것이며 분석 조건은 압력이 151.7 bar, 질량 유속이 3052 kg/m<sup>2</sup>/s, 입구온도가 295.8 °C, 그리고 평균 열속이 1100 kW/m<sup>2</sup>이다. 그림 3에서 보듯이 동일한 국부조건 상태에서는 비가열면이 증가하면 상관식에 따라서 CHF가 증가하거나 감소하는 것을 알 수 있다. 실제로 비가열면 효과 실험이 일정한 국부 조건에서 수행될 수 없으며, 국부조건 관점에서 보면 비가열면 효과가 채널 내의 국부적인 유동장 분포와 관련이 있어서 물리적으로 쉽게 이해하기 어려운 면이 있다. 이러한 이유로 인하여 비슷한 형태의 CHF 상관식간에도 (예를 들어 웨스팅하우스의 WRB-1 상관식[12]과 SIEMENS의 ERB-3 상관식[13]) 채널 유효 직경에 대한 상관식 계수의 부호가 서로 반대로 나타나기도 한다. 이는 비가열면의 특징은 채널 유효 직경으로만 표현되지만, 비가열면이 CHF에 미치는 영향은 채널 기하형태 뿐만 아니라 다른 여러가지 변수들을 통하여 복합적으로 나타나기 때문이다. 따라서 비가열면 효과를 DSM으로 평가할 경우에는 상관식 적용 범위를 벗어나지 않도록 유의해야 한다. 이에 비하여 HBM을 적용하는 경우에는 좀 더 쉽게 비가열면 효과를 설명할 수 있다. 그림 3(b)에서 보듯이 HBM을 적용하여 비가열면 효과를 평가한 결과 동일 입구 조건에서 비가열면이 증가함에 따라 CHF가 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

### 3.2 HBM 방법론을 사용한 비가열면 효과 분석

비가열면 효과를 HBM 방법으로 분석하기 위하여 우선 다음과 같은 두 가지 가정을 하였다. (1) 채널이 가열면과 비가열면으로 구성되어 있을 때 채널 내의 유량은 유로와 접한 면적에 비례하여 분배된다. 즉, 만일 채널을 구성하는 가열 둘레와 비가열 둘레가 각각 50%라면 채널 유량의 50%는 전혀 가열되지 않는다. (2) 비가열면과 무관하게 CHF 발생 조건에서의 국부 건도는 일정하다. 가정 (1)은 채널내 유동장의 균질도와 관련이 있고 가정 (2)는 CHF 발생 메커니즘과 관련이 있는데, 이 가정들에 대한 엄밀한 검증은 본 연구에서 수행되지 않았으나 부수로 형태가 대칭성을 가지고 있으며 건도가 낮은 조건에서 CHF가 발생하는 경우에는 이러한 가정이 어느 정도 타당한 것으로 판단된다.

동일한 입구 조건에서 채널에 비가열면이 있을 때 위의 가정에 따라 두 가지 한계 조건, 즉 완전 혼합의 경우와 혼합이 전혀 일어나지 않는 경우를 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 축방향 출력 분포가 균일하고 비가열면이 없는 채널의 CHF가  $q''_M$  이라고 가정하면 이 조건에서 출구 건도, 즉 임계 건도는 아래와 같이 계산된다.

$$\chi_M = \chi_{in} + \left( \frac{4L}{d_{hy}} \right) \left( \frac{q''_M}{Gh_{fg}} \right) \quad (1)$$

채널의 일부가 비가열면으로 구성되어 있고 채널 내에서 가열면 영역과 비가열면 영역 간의 열적인 혼합이 전혀 일어나지 않는 경우, 채널 출구 엔탈피 분포는 그림 4(a)와 같이 나타난다. 가정 (1)에 따라 가열면 영역과 비가열면 영역의 유로 면적은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{A_{f,Hot}}{A_{f,Cold}} = \frac{\xi_{heat}}{\xi_{wet} - \xi_{heat}} \quad (2)$$

이로부터,

$$A_{f,Hot} = A_f \left( \frac{d_{hy}}{d_{he}} \right) \quad (3)$$

$$A_{f,Cold} = A_f \left( 1 - \frac{d_{hy}}{d_{he}} \right) \quad (4)$$

이 된다. 가정 (2)에 의해서 CHF 발생 조건은  $\chi_{CW,h} = \chi_M$  이며

$$\chi_{CW,h} = \chi_{in} + \left( \frac{4L}{d_{hy}} \right) \left( \frac{q''_{CW}}{Gh_{fg}} \right) \quad (5)$$

이므로, 가열면이 있는 채널의 CHF는

$$q''_{CW} = q''_M \quad (6)$$

이 된다. 이 경우는 비가열면 효과가 가장 크게 나타난 결과로서 이로부터 결정되는 CHF 값은 비가열면이 있는 채널에서 발생 가능한 CHF의 최소값이다.

이와 반대로 채널 내에서 완전한 열혼합이 일어나는 경우에는 그림 4(b)에서 보듯이 비가열면이 있는 채널의 출구 건도가 아래와 같이 표현된다.

$$\chi_{CW} = \chi_{in} + \left( \frac{4L}{d_{he}} \right) \left( \frac{q''_{CW}}{Gh_{fg}} \right) \quad (7)$$

이 경우에 가정 (2)를 적용하면 비가열면이 있는 채널의 CHF 최대값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$q''_{CW} = q''_M \left( \frac{d_{he}}{d_{hy}} \right) \quad (8)$$

실제로 채널 내에서는 열혼합이 어느 정도 발생하는데, 가열면 영역과 비가열면 영역의 엔탈피 상승 비율을 열혼합 효율을 나타내는 인자로서 아래와 같이 정의하였다.

$$\varepsilon \equiv \frac{(\chi_{CW,c} - \chi_{in})}{(\chi_{CW,h} - \chi_{in})} \quad (9)$$

비가열면이 있는 채널이 두 개의 가상적인 채널, 즉 가열면 영역 채널과 비가열면 영역 채널로 구성되어 있다고 가정하고, 비가열면 영역 채널에 대한 정상 상태 에너지 보존식을 적용하면

$$GA_{f,Cold} \frac{\partial h}{\partial z} = w'(h_{Hot} - h_{Cold}) \quad (10)$$

이 되며, 엔탈피 변화를 선형으로 가정하고 난류 혼합( $w'$ )에 대한 관계식을 적용하면 아래와 같은 표현식을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\beta \cdot s \cdot L}{2A_f (1 - d_{hy}/d_{he})} \quad (11)$$

즉, 열혼합 효율은 채널 내의 난류혼합인자 및 채널 길이에 비례하고, 비가열면 영역의 크기에 반비례한다. 비가열면이 있는 채널의 평균 엔탈피 상승은

$$\chi_{CW} - \chi_{in} = \left( \frac{A_{f,Hot}}{A_f} \right) (\chi_{CW,h} - \chi_{in}) + \left( \frac{A_{f,Cold}}{A_f} \right) (\chi_{CW,c} - \chi_{in}) \quad (12)$$

로 표현되며, 열혼합 효율 인자의 정의식을 적용하면

$$\chi_{CW,h} = \chi_{in} + \left( \frac{4L}{d_{hy}} \right) \left( \frac{q''_{CW}}{Gh_{fg}} \right) \left[ 1 + \varepsilon \left( \frac{d_{he}}{d_{hy}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (13)$$



을 구할 수 있다. 가정 (2)에 의해 CHF 조건에서  $\chi_{CW,h} = \chi_M$  이므로, 이로부터 비가열면이 있는 채널의 CHF를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$q''_{CW} = q''_M \times \left[ 1 + \varepsilon \left( \frac{d_{he}}{d_{hy}} - 1 \right) \right] \quad (14)$$

이 식에서 열혼합이 전혀 없는 경우( $\varepsilon = 0$ )와 완전한 열혼합이 일어나는 경우( $\varepsilon = 1$ )의 CHF를 구할 수 있다.

그림 3(b)에서  $\varepsilon = 0.3$  인 경우에 대한 비가열면 효과를 기존 상관식과 함께 제시하였다. Doerffer[14]와 Groeneveld[15]의 결과는 환형 단일 수로에 대한 실험 결과로부터 도출된 것으로서 비슷한 방법으로 개발된 W3-R 상관식과 함께 비가열면 효과를 크게 평가하고 있다. 그림에서 보듯이 HBM을 사용하여 비가열면 효과를 분석한 결과 상관식이 달라도 서로 일관성 있는 결과를 나타내는 것으로 나타났다. 앞 장에서 검토한 바와 같이 경수로 노심 설계 해석에 HBM 방법론을 직접 적용하려면 상관식 개발 단계에서부터 고려해야 할 여러가지 사항들이 있다. 그러나 설계 변수의 변화에 따른 열적 여유도의 상대적인 변화등을 평가할 때는 HBM을 적용하는 것이 상당히 효과적일 수 있다. 본 연구에서 검토한 비가열면 효과의 경우, 채널의 비가열면이 증가하여 기존 국부조건 상관식의 적용 범위를 벗어나서 DSM을 적용할 수 없는 경우에도 HBM을 적용하면 ‘bounding analyses’가 가능하므로 열적 여유도의 변화를 상대적으로 평가할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- (1) 열적 여유도를 평가할 때 동일한 국부 조건 상관식을 사용하는 경우에도 HBM 방법론에 따른 열출력 여유도와 DSM 방법론에 따른 열출력 여유도가 서로 다르게 나타날 수 있다. 이는 모든 운전 조건에 대하여 하나의 설계 한계치를 적용하기 때문에 나타나는 불가피한 결과이며, 상관식을 개발하는 단계에서 상관식 적용 방법을 미리 고려하고 이를 설계 해석에 일관성 있게 적용해야 한다.
- (2) 사고 해석 코드에 국부 조건 상관식을 적용하는 경우 DSM 오차를 고려해야 한다.
- (3) 상관식 적용 방법론의 효율성 면에서 검토한 결과, HBM은 DSM에 비하여 비가열면의 효과를 물리적으로 더욱 이해하기 쉽게 보여주는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] A. Olekhnovitch, A. Teyssedou, P. Tye, On the round table discussion on reactor power margins published in Nuclear Engineering and Design 163 (1-2), Nuclear Engineering Design 216, 239-245 (2002).
- [2] 백원필, 장순흥, 황대현, CHF 상관식 형태와 적용 방법에 따른 예측 오차 및 여유도, J. KNS 29, 49-59 (1997).
- [3] 황대현, 유연중, 지성균, SMART 노심 조건에 대한 CHF look-up table 방법론 평가, 2001 춘계학술발표회논문집, 원자력학회 (2001).
- [4] P. Hejzlar, N.E. Todreas, Consideration of critical heat flux margin prediction by subcooled or low quality critical heat flux correlations, Nuclear Engineering Design 163, 215-223 (1996).
- [5] P. Hejzlar, N.E. Todreas, Response of Hejzlar and Todreas to contributors' letters and technical notes, Nuclear Engineering Design 163, 273-279 (1996).
- [6] G.P. Celata, On the application method of critical heat flux correlations, Nuclear Engineering Design 163, 241-242 (1996).
- [7] D.C. Groeneveld, Reply to the letter to the editor from Todreas and Hejzlar on the paper entitled "The 1995 CHF look-up table ...", Nuclear Engineering Design 163, 27-28 (1996).
- [8] M. Siman-Tov, Application of energy balance and direct substitution methods for thermal margins and data evaluation, Nuclear Engineering Design 163, 249-258 (1996).
- [9] 황대현, 유연중, 지성균, SMART 노심 조건에 대한 국부조건 CHF 상관식 개발, 2000 춘계학술발표회논문집, 원자력학회 (2000).
- [10] D.C. Groeneveld, et. al., The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes, Nuclear Engineering Design 163, 1-23 (1996).
- [11] L.S. Tong, Boiling crisis and critical heat flux, TID-25887 (1972).
- [12] F.E. Motley, et. al., New Westinghouse correlation WRB-1 for predicting critical heat flux in rod bundles with mixing vane grids, WCAP-8763, July (1976).
- [13] K. Mistelberger, et. al., The ERB-3 CHF correlation for PWR rod bundles, European Two Phase Flow Group Meeting, Rome, May 27-29 (1991).
- [14] S. Doerffer, et. al., A comparison of critical heat flux in tubes and annuli, Nuclear Engineering Design 149, 167-175 (1994).
- [15] D.C. Groeneveld, et. al., The effect of fuel subchannel geometry on CHF, NURETH-5, 683-690 (1992).

표 1. 집합체 및 원형관 CHF 실험 자료에 대한 통계량 평가 결과

	집합체 CHF 실험 자료	원형관 CHF 실험 자료
CHF 상관식	SR-1	1995 AECL CHF table
실험 자료 수	2378	2800
DSM		
P/M 평균	1.008	0.984
표준 편차	0.112	0.183
공차 한계	1.197	1.294
HBM		
P/M 평균	1.004	0.994
표준 편차	0.049	0.050
공차 한계	1.087	1.079
$F_{DSM}$		
평균 / 표준편차	1.00 / 0.027	1.01 / 0.089
최대값 / 최소값	1.05 / 0.89	1.47 / 0.84

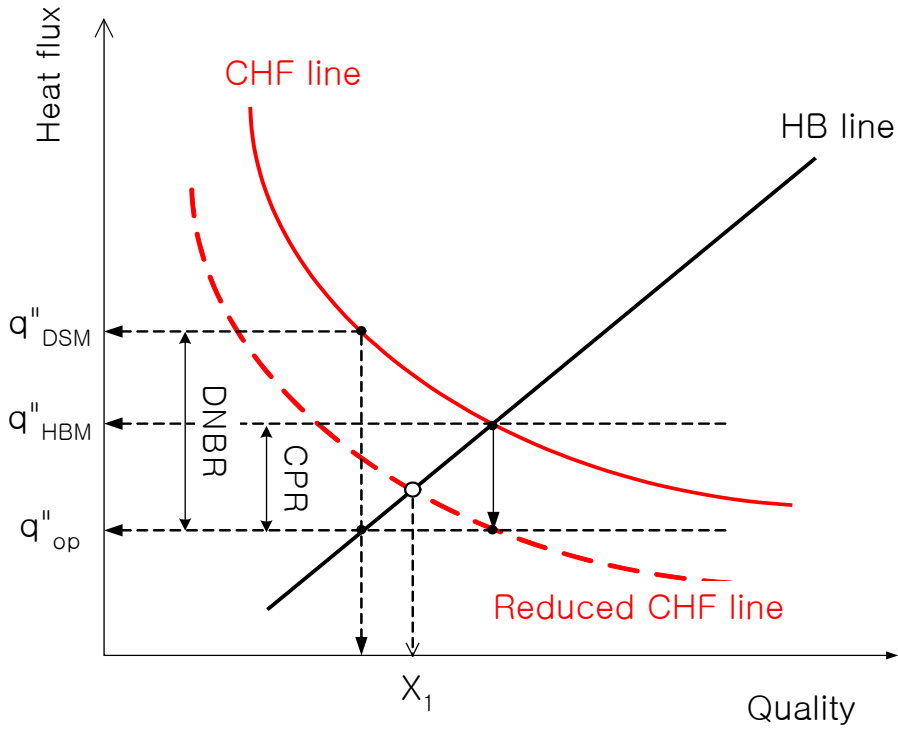


그림 1. 국부조건 CHF 상관식 적용 방법론 개념도

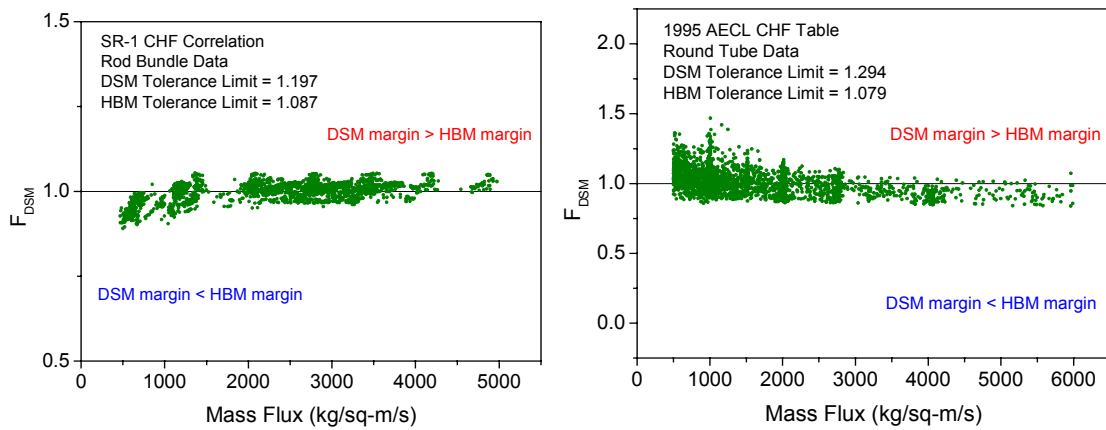
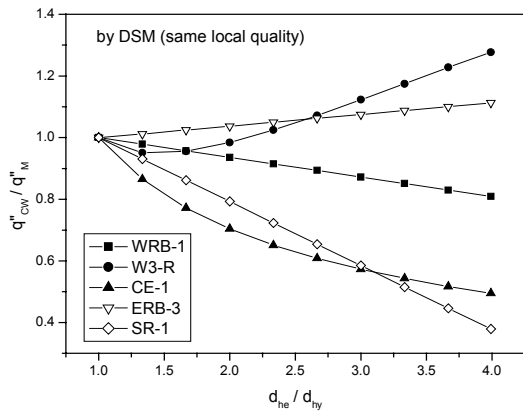
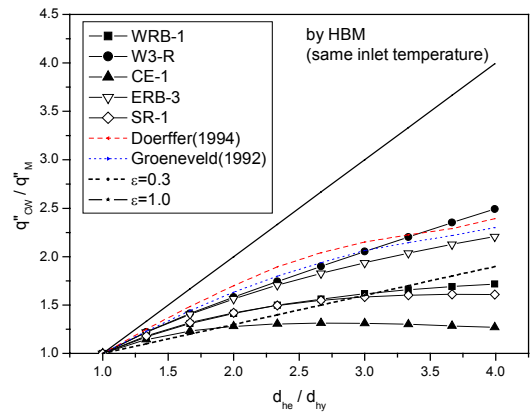


그림 2. DSM 여유도와 HBM 여유도 비교

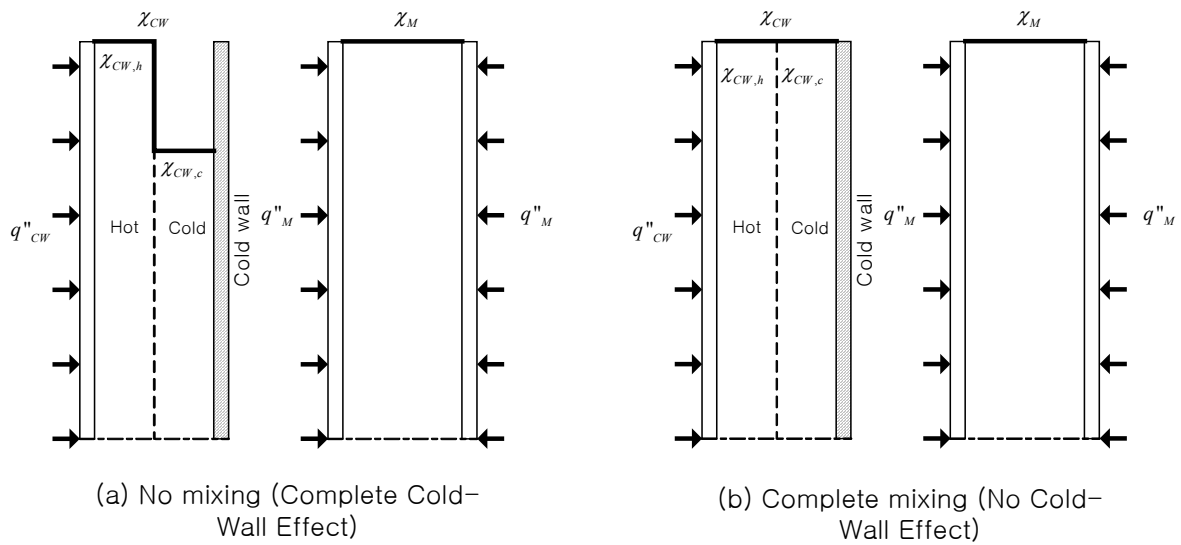


(a)



(b)

그림 3. DSM과 HBM에 따른 비가열면 효과



(a) No mixing (Complete Cold-Wall Effect)

(b) Complete mixing (No Cold-Wall Effect)

그림 4. HBM을 사용한 비가열면 효과 분석