

2001 춘계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## VIPRE 코드 KEPRI Version을 사용한 WRB-2 임계열유속 상관식 분석

### WRB-2 Critical Heat Flux Correlation Analysis Using KEPRI Version of VIPRE-01 Code

변충섭, 이재용

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요약

이 논문의 목적은 VIPRE-01 코드의 KEPRI HP-9000 Version에 적용된 WRB-2 임계 열유속 상관식의 95/95 상관식 한계 핵비등이탈률(DNBR)을 구하는 것이다. 본래 본 분석은 웨스팅하우스사에 의해 THINC 코드로 수행되어 1.17의 상관식 한계를 얻어내었고 이 값을 발전소 안전해석에 적용하여 왔다. 그리고, 1999년도에는 웨스팅하우스사에 의해 VIPRE 코드를 사용한 유사한 분석이 수행되었고 상관식 한계는 역시 1.17임이 확인되었다. 따라서 본 논문에서는 VIPRE 코드의 KEPRI version에 WRB-2를 이식하고 상관식 한계를 확인하여 KEPRI Version의 검증을 수행하는 데 초점이 맞추어 진다. 분석을 위해서 17×17 OFA 및 Vantage 5H 연료에 관한 684개의 실험자료가 사용되었다. 분석 결과, 측정 임계열유속과 코드가 예측한 임계열유속 비의 평균은 1.000이었고 총 표준편차는 0.079가 얻어졌으며 통계 처리에 의한 95/95 상관식 한계는 THINC의 결과와 동일하게 1.17을 얻어내었다.

#### Abstract

The purpose of this paper is to obtain the 95/95 Correlation limit Departure from Nucleate Boiling Ratio(DNBR) for WRB-2 Critical Heat Flux(CHF) correlation implemented in KEPRI HP-9000 version of VIPRE-01. The original analysis with THINC code was performed by Westinghouse and DNBR limit of 1.17 was applied to plant safety analysis. In 1999, Westinghouse performed the similar analysis with VIPRE-01 code and it was confirmed the current WRB-2 DNBR Limit of 1.17 was conservative. Therefore, this paper is focused on confirming WRB-2 correlation limit DNBR obtained by Westinghouse using KEPRI version of VIPRE-01. The WRB-2 CHF Correlation, implemented in KEPRI VIPRE-01 code, has been applied to 684 CHF data points defining a data base that represents 17×17 OFA and Vantage 5H fuel. The average and total standard deviation of measured-to-predicted CHF ratio are 1.000 and 0.079, respectively. A 95/95 Correlation limit DNBR of 1.17 which is identical with the THINC result is obtained by the statistical analysis.

## 1. 서론

VIPRE(Versatile Internals and Component Program for REactors) 코드는 원자력 발전소의 노심 열수력 설계에 적용하기 위하여 EPRI의 지원하에 Battele Pacific Northwest Lab.에서 개발되었다. VIPRE 코드는 원자로 보호계통의 설정치 기준을 정하기 위한 DNB 해석 및 과도상태 해석 시 DNBR 계산 그리고 몇몇 CONDITION IV non-LOCA 사고에서의 연료봉 중심 온도를 계산하는데 사용될 수 있다. 현재 VIPRE 코드는 원자로냉각재상실사고(LOCA)를 제외한 가압 경수로의 모든 과도상태에 대한 노심 열수력 해석 용 전산코드로서 미 규제기관의 승인을 받아 미국 내 여러 발전소(Commonwealth Edison, Duke Power Company, Texas Utilities, General Public Utilities, Toledo Edison 및 Northeast Utilities Service Company 등)에서 재장전 설계에 활용되고 있다.

VIPRE 코드에 대한 NRC의 인허가 심사 결론에 따르면, VIPRE 코드를 설계에 적용하기 위해서는 CHF 열전달 영역까지의 PWR 인허가 계산으로 국한하며 BWR 또는 CHF 이후의 열전달 영역까지 적용하기 위해서는 NRC의 사전 심사 및 승인이 있어야 한다. 그리고 정상 상태의 CHF 상관식은 적용 가능한 연료 집합체 형상, 격자 그리드 설계, 압력 및 냉각수 유량 영역 등에 대해 NRC가 심사한 상관식 한계 DNBR을 제공한 원자로 과도상태에 대해서 적용될 수 있다. 승인되지 않은 CHF 상관식을 사용하기 위해서는 상관식을 VIPRE에 장착 후 실험 Database에 의해 분석한 별도의 보고서를 작성하여 심사를 받아야 한다. VIPRE가 아닌 다른 열수력 코드에서 이미 사용한 상관식의 경우에는, 관련 실험 Database를 가지고 VIPRE-01이 같거나 보수적인 안전 한계치를 갖는 것을 보여야 한다. 그 밖에, VIPRE-01을 인허가 목적으로 사용하기 위해서는 VIPRE-01의 사용 의도, 모델링에 사용된 가정사항에 대한 정당성, 사용된 이상유동 모델 및 상관식, 열전달 상관식, CHF 상관식 및 DNBR Limit 그리고 Turblent Mixing Coefficient, slip ratio, grid loss coefficient 등과 같은 발전소 고유의 입력 자료등에 대한 설명이 포함된 별도의 보고서가 제출되어야 한다. 아울러, 과도해석을 위해서는 수치해석의 정확도 및 안정도를 확립할 수 있는 적절한 Time step이 선정되어야 한다. Levy 및 EPRI 모델과 같은 과냉 비등 모델을 사용할 경우에는 유속, Time step 및 축방향 노드 크기에 의해 결정되는 Courant Number가 1 이상이 되도록 Time step 크기를 정해야 한다.

KEPRI에서는 정부주도 중장기 과제 중 신 안전해석 기술개발 과제의 일환으로 RETRAN-VIPRE Non-LOCA 과도해석 방법론을 개발 중에 있다. 이 중 VIPRE를 이용한 노심열수력 설계 방법론을 웨스팅하우스 원전에 적용하고자 WRB-1 및 WRB-2를 EPRI의 VIPRE-01 코드에 이식한 KEPRI HP-9000 Version을 개발하였다.

본 논문은 VIPRE KEPRI HP-9000 Version에 검증의 일환으로 수행된 WRB-2 임계 열유속 상관식 분석 내용을 기술한다. 상관식 분석이라 함은 95/95 상관식 한계 핵비등이탈률(DNBR)을 구하는 것이다. 당초 WRB-2 상관식 분석은 상관식 개발사인 웨스팅하우스사에 의해 THINC 코드로 수행되어 1.17의 상관식 한계를 얻어내었고 이 값을 발전소 안전해석에 적용하여왔다. 그리고 1999년도에는 웨스팅하우스사에 의해 VIPRE 코드를 사용한 유사한 분석이 수행되었고 상관식 한계는 역시 1.17임이 확인되었다. 따라서 본 논문에서는 VIPRE 코드의 KEPRI version에 WRB-2를 이식하고 상관식 한계를 확인하여 KEPRI Version의 검증을 수행하는 데 초점이 맞추어 진다.

## 2. VIPRE 코드 개요

VIPRE는 부수로 열수력 코드인 COBRA 코드 계열로부터 개발되었다[1]. 따라서 VIPRE 코드에서 사용된 부수로 해석 개념은 COBRA-IIIIC의 방법과 대부분 동일하나 아래와 같은 새로운 특성이 추가되었다.

- 1) 임계 열유속 상관식, 이상유동 상관식 및 열전달 상관식의 선택 범위가 넓으며 사용자에게 의해 각 상관식을 추가할 수 있는 여지를 마련하였음
- 2) 원전연료, 전기 가열봉 및 벽체 등을 모사할 수 있는 일반화된 열전도 모델
- 3) 특정 최소 DNBR(MDNBR)을 얻어내기 위한 입력조건 예를 들어, 원자로 출력 또는 입력 유량 등에 대해 반복 계산을 수행 할 수 있는 능력
- 4) 다양한 운전조건을 입력으로 한꺼번에 해를 구할 수 있는 Stacked Case 해법
- 5) 전 노심을 모델하여 단번에 해를 구할 수 있는 Single-pass(또는 One-pass) 해법
- 6) 축 방향 노드 크기를 가변적으로 적용할 수 있는 능력

VIPRE 코드에서의 유체 엔탈피, 축방향 유량, 횡방향 유량 및 압력 강하 등은 질량, 축방향 및 횡방향 운동량 그리고 에너지 보존방정식으로부터 구해진다. VIPRE에서 유동장은 비압축성이고 균질하다고 가정하고 축방향 유동은 축방향 유량이 통과하는 Gap에 의해 모사되는데 gap 영역을 통과한 후의 유체는 방향에 관련 없다고 가정한다. Cross flow는 두 인접한 채널 사이에서만 존재하기 때문에 축 방향 경계조건을 줄 필요가 없다. VIPRE의 열전달 모델은 연료봉 내의 온도분포에 대한 방정식을 풀고 유체 에너지 방정식에 열원항을 제공한다. 그리고 채널 내에서의 열전달은 단상 대류 열전달부터 막비등 영역까지 전영역의 비등 상관식을 포함한다.

VIPRE는 두가지의 수치해석 방법을 제공한다. 그 하나는 COBRA-IIIIC에서 사용한 것과 유사한 상유동 해법(UPFLOW)이고 나머지 하나는 COBRA-WC에서 사용한 재순환 해법(RECIRC)이다. UFLOW 및 RECIRC는 모두 같은 유한요소 방정식을 반복적으로 풀고 같은 열전달 상관식, 표면에서의 마찰, 유체의 상태 및 이상유동을 사용하지만 유동장과 압력장을 푸는 수치해석 방법에 차이가 있다. 본질적으로는 두 방법 모두 거의 같은 결과를 제시하지만 역류 및 재순환 유동이 발생하는 노심 조건에서는 RECIRC 방법이 사용될 수 있다. PWR 분석에서는 두 방법 모두 사용 가능하며 거의 같은 결과를 제시한다.

DNB 여유도는 임계열유속 상관식에 의해 예측되는 임계열유속과 해당 노드에서의 국부 열유속의 비로 결정되는 핵비등이탈률 (DNB Ratio: DNBR)의 식으로 정량화 되는 데 VIPRE 코드에 의해 국부 유동조건(건도, 국부 유속, 국부 열유속) 등이 계산되어지고 VIPRE에 내재되어있는 임계열유속 상관식에 의해 해당조건에서의 임계열유속을 구하고 국부 열유속의 비에 의해 DNBR이 결정된다.

위에서 언급한 VIPRE 코드의 특징 중 특히 1)번은 VIPRE 코드의 범용성 및 유연성을 나타내 주는 것으로 VIPRE 코드를 사용하고자 하는 원자력 발전소에 큰 장점으로 작용하고 있다. 1)번의 특징 중 대부분 PWR의 인허가를 위한 설계를 위해서는 Non-LOCA 과도해석에 추가된 임계열유속 상관식을 사용하는 방식을 주로 사용한다. 이는 NRC에 의한 VIPRE 코드의 인허가 범위 문제

도 있겠지만, 이상유동 상관식 및 열전달 상관식을 새로이 추가하여 사용할 경우에는, 추가된 상관식에 의한 계산된 결과가 전체 계산 결과에 영향을 미치지 않기 때문에 보다 엄밀한 검증/확인이 필요한 반면, 임계열유속 상관식의 경우에는 기존 코드의 인허가 범위에 영향을 미치지 않기 때문이다. 이것이 VIPRE 코드가 주로 PWR의 Non-LOCA 과도해석을 위한 설계 코드로 사용되는 이유이다.

### 3. VIPRE 코드 개선 및 검증

VIPRE-01 코드 개선 시 요건으로 삼은 것은 개선된 내용이 1) VIPRE Manual 상에 기술되어 있는 기존의 VIPRE-01 MOD2의 모든 기능 요건을 만족해야 하며, 2) 개선에 따라 추가된 신규 Option을 사용되지 않는다면 코드 계산 결과에는 영향을 끼치지 말아야 한다는 것이다. 이 절에서는 웨스팅하우스 형 원전의 설계 적용을 위하여 WRB-1 및 WRB-2 CHF 상관식을 VIPRE-01 Mod 2에 추가하고 위의 요건 만족여부를 검증한 내용이 기술된다.

#### 3.1 VIPRE 코드 개선

WRB-1 상관식은  $14 \times 14$ ,  $15 \times 15$  및  $17 \times 17$  Optimized Fuel Assembly(OFA) 그리고  $15 \times 15$  및  $17 \times 17$  Low Parasitic(LOPAR) 연료에 적용 가능하다. 상관식은 22개의 실험 집합체와 1108개의 Data Points로부터 개발되었다[2]. WRB-2 상관식은  $17 \times 17$  Vantage 5 및 OFA 연료에 적용가능하며 11개의 실험 집합체에 대해 684개의 Data Points로부터 개발되었다[3].

두 임계 열유속 상관식은 grid의 기하학적 효과를 반영하여 개발된 바, 이전 Mixing Vane Grid로부터의 거리 효과를 나타내는 dg 및 Mixing Vane 그리드 간격을 나타내는 gsp가 그것이다. 본 효과의 계산 논리는 참고문헌 3에 대해 NRC의 질의/답변 과정에서 언급된 대로, “dg 값을 최대화하고 grid 위치 근처에서는 grid spacing 값으로 setting 한다”라는 논리를 구현하였다. WRB-2 상관식의 경우에는 Mixing Vane 그리드 사이에 IFM 그리드를 사용하므로 그리드 각각에 대해서 gsp 값을 별도로 계산하도록 하였다. 예를 들어, Mixing Vane의 Grid Spacing이 20 인치이고 그 중간에 IFM 그리드가 존재하는 경우, gsp는 10 인치로 계산된다.

#### 3.2 개선 VIPRE 코드 검증

변경된 코드에 대해서 기존 코드 체계의 불변성 및 추가된 CHF 상관식의 Logic 검증 분야로 나누어서 수행되었다. 전자의 경우에는, 신규로 도입된 Option이 사용되지 않는다면 코드가 변경되기 전의 결과와 동일하다는 것을 확인하는 방법으로 검증이 수행되었고, 후자의 경우, 추가된 CHF 상관식이 원하는 논리대로 적절히 Coding 되었는지는 수 계산 결과와 Code 예측 결과와의 비교를 통해, 그리고 상관식의 기존 Scheme을 그대로 구현하였는 지는 다음절의 상관식 분석을 통해 검증된다.

### 3.2.1 기존체계의 불변성 검증

VIPRE 코드 Manual에 언급되었고 배포 Package 내에 설치 검증을 위해 포함되어있는 출력파일인 "testcases\_hp9.out"의 결과 및 PWR 전노심 모델링 Case와 KEPRI Version에 의해 수행된 결과와 비교 검증하였다.

전자의 경우는 아래와 같은 6가지의 Case로 구성된다. 표 1에는 비교 검증 결과를 수록하였다. 표 1에서 보는 것과 같이 인쇄된 쪽수가 상이한 것 외에는 두 Version에 대해 동일하다. 여기서 인쇄된 쪽수가 다른 것은 KEPRI Version의 경우, 한전 고유의 로고를 넣는 등 분석결과와는 관련이 없는 개선을 수행한 결과가 반영된 것이다.

- o Case 0 : 1/8 core single pass hot bundle analysis test case
- o Case -1 : multiple case option test on 1/8 core model
- o Case 3 : gap conductance transient - single hot channel
- o Case 4 : supercritical pressure transient
- o Case 5 : bwr test case; 4 bundles plus 2 bypass channels
- o Case 6 : fuel thermal model test (all options)

표 1 KEPRI Version과 EPRI Version의 결과 비교

Case		비교 변수	Printed Page
Case 0	EPRI	MDNBR : 0.997	page 5
	KEPRI	MDNBR : 0.997	page 6
Case -1	1	EPRI	MDNBR : 0.979(epri)/0.915
		KEPRI	MDNBR : 0.979(epri)/0.915
	2	EPRI	MDNBR : 1.461(epri)/1.467
		KEPRI	MDNBR : 1.461(epri)/1.467
	3	EPRI	MDNBR : 1.461(epri)/1.467
		KEPRI	MDNBR : 1.461(epri)/1.467
Case 3	EPRI	Max. Temp. of Fuel Center line : 4689.4 F	
	KEPRI	Max. Temp. of Fuel Center line : 4689.4 F	
Case 4	EPRI	Linear heat rate : 21.1249(Btu/sec-ft) @Channel 4의 144"	
	KEPRI	Linear heat rate : 21.1249(Btu/sec-ft) @Channel 4의 144"	
Case 5	EPRI	Rod 표면 온도 : 540.7F @182.5" of Hollow tube 7	
	KEPRI	Rod 표면 온도 : 540.7F @182.5" of Hollow tube 7	
Case 6	EPRI	Rod 표면 온도 : 583.7 F @ cylindrical rod 3의 12 번째 node	
	KEPRI	Rod 표면 온도 : 583.7 F @ cylindrical rod 3의 12 번째 node	

후자를 통한 검증은 VIPRE User Manual에 있는 전형적인 PWR Full Core Modeling의 결과와 비교함으로써 수행하였다. 기존 Version에 의해 수행된 결과는 VIPRE User Manual Appendix B에 수록되어 있다[참고문헌 1의 Vol.2]. 표 2는 비교 검증결과를 보여준다. 표 2에서 보듯이 EPRI Vax Version에 비해 KEPRI HP version의 MDNBR 차이는 +0.002로 나타났다. 이는 Machine의

차이로 기인한다.

표 2 EPRI version과 KEPRI version 비교 검증 결과(PWR Full Core Model)

	MDNBR		차이(KEPRI-EPRI)
	EPRI(Vax version)	KEPRI(HP Version)	
Channel 97	4.128	4.130	0.002

### 3.2.2 수계산에 의한 WRB-1/WRB-2 CHF 상관식 검증

추가된 WRB-1/2 상관식이 의도대로 프로그램 되었는지를 수 계산 결과와의 비교를 통하여 검증하였다. 검증을 위해서는 5X5 Array 및 Mixing Vane Grid을 사용하는 Test Section인 A-6(WRB-2) 데이터 베이스를 사용하였다[3]. 이 데이터 베이스는 WRB-1을 개발할 당시에는 "A-3" 데이터 베이스로 명명되었다[2]. Full Section의 1/4를 모델링하였으며 6개의 Channel과 6개의 Rod로 구성된다.

수계산은 출력과일의 page4의 Channel 6에 대한 국부조건을 사용하였다. Channel 6는 MDNBR을 주는 채널이다. 여기에서 코드가 계산한 국부조건을 사용하여 검증한 이유는 코드가 계산하는 국부조건은 CHF 상관식에 의해 전혀 영향을 받지 않는 독립된 량이기 때문에 정당화 될 수 있다. 수 계산 결과와 코드 계산결과 사이의 최대 편차는 반올림하여 대략 0.0002로 의도대로 정확히 모델링 되었음을 알 수 있었다.

## 4. WRB-2 임계열유속 상관식 분석

### 4.1 방법론

WRB-2 상관식의 상관식 한계는 Owen의 One-side 허용한계 방법을 따라 구한다[4]. 일반적인 정의에 따르면 핵비등이탈률(DNBR)은 측정된 임계열유속과 코드에 의해 예측된 임계 열유속 비의 역수로 정의된다. 즉 식 (1)과 같이 표현된다.

$$DNBR = \frac{1}{\left(\frac{M}{P}\right)} \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 측정된 국부 임계 열유속 이고  $P$ 는 코드에 의해 예측된 임계 열유속이다. 각 자료

점(data point)으로부터 얻어진 M/P 비는 난변수(random variable)로 나타난다. 따라서, 실험 자료로부터 계산된 M/P는 어떤 M/P 모집단으로부터 추출된 임의의 표본을 구성한다. 통계적으로 정규분포를 가지는 모집단은 특정 신뢰도로 특정 한계 이상의 값을 가지는 변수의 한계값을 표현할 수 있다.

$$\text{One-sided lower tolerance limit} = \left(\frac{M}{P}\right)_{-K \times S} \quad (2)$$

여기서,  $\left(\frac{M}{P}\right)$ 는 표본의 대수 평균이고 S는 표본의 총 분산(실험 계열내 데이터의 합동분산과 실험 계열 간 평균분산의 제곱합의 제곱근으로 정의됨), 그리고 K는 모집단이 정규분포일 때 특정 신뢰도로 평가된 특정 one-sided tolerance factor이다.

따라서 95/95 상관식 한계 DNBR의 일반적 표현은 식 (3)에 의해 주어진다.

$$95/95 \text{ DNBR Limit} = \frac{1}{\left(\frac{M}{P}\right)_{-K_{95/95} \times S}} \quad (3)$$

여기서 표본의 표준 편차(S)는 실험 계열 내에서의 편차와 실험계열간의 편차를 모두 고려하여 얻어지며 총 편차는 두 편차 각각의 제곱 합의 제곱근으로 구해진다. 한편, Owen의 One-sided Tolerance Factor( $K_{95/95}$ )는 식 (4)에 의해 주어지는 자유도에 근거하여 통계역학 책의 표에서 얻어진다.

$$F_T = \frac{s_T^4}{\left(\frac{s_W^4}{N_T - k} + \frac{s_B^4}{k - 1}\right)} \quad (4)$$

여기서,  $s_W$ 는 실험 평균에 대한 실험 계열내의 편차,  $s_B$ 는 실험계열 평균의 편차이며  $s_T$ 는  $\sqrt{s_W^2 + s_B^2}$ 에 의해 주어진다. 그리고  $N_T$ 는 총 실험 데이터 수이고  $k$ 는 실험군의 수이다.

#### 4.2 데이터 베이스

상관식 한계분석을 위해 사용된 Data Base를 표 3에 제시하였다. 표 3에서 보듯이 연료봉 바깥 직경은 0.360 및 0.374 인치이며 연료봉 길이는 96 인치 혹은 168 인치이다. 사용된 축 방향 출력 분포는 그림 1에서와 같은 Cosine 모양을 사용한다. 그리고 5X5 전 채널을 모델링하였다.

표 3 WRB-2 실험 데이터 베이스

그룹	연료봉 길이(ft)	외 직경(in)	Gsp	축방향 출력분포	연료봉 배열 5X5
A-2	14	0.360	20	Cosine	Typical
A-3	14	0.360	20	Cosine	Typical
A-4	14	0.360	20	Cosine	Typical
A-5	14	0.360	20	Cosine	Thimble
A-6	8	0.374	22	Uniform	Typical
A-7	14	0.374	22	Uniform	Typical
A-8	14	0.374	22	Cosine	Typical
A-9	14	0.374	22	Cosine	Thimble
A-10	8	0.374	22	Uniform	Typical
A-11	8	0.374	22	Uniform	Thimble
A-12	14	0.374	22	Uniform	Typical

#### 4.3 통계 분석

4.2 절의 데이터 베이스에 대해 VIPRE 코드를 수행한 결과를 표 4에 제시하였다. THINC의 결과에 비해서도 거의 차이가 발생하지 않음을 볼 수 있다.

표 4 VIPRE 코드에 의해 계산된 M/P 통계량

Case	데이터 수	VIPRE-KEPRI		THINC (WCAP-10444-P-A)	
		평균	표준편차	평균	표준편차
A-2	51	0.979	0.073	0.9861	0.0758
A-3	31	1.010	0.063	1.0097	0.0680
A-4	63	0.987	0.083	0.9961	0.0946
A-5	38	0.979	0.053	0.9832	0.0599
A-6	67	1.038	0.077	1.0316	0.0897
A-7	71	1.012	0.063	1.0095	0.0664
A-8	74	0.991	0.078	0.9893	0.0822
A-9	70	0.977	0.079	0.9884	0.0775
A-10	78	1.011	0.078	1.0198	0.0810
A-11	68	1.014	0.095	1.0398	0.1062
A-12	73	0.988	0.080	0.9914	0.0823
총	684	1.000	0.079	1.0051	0.0847



본 M/P 모집단이 정규분포 가정을 만족할 수 있는 지는 D' 검정에 의해 확인할 수 있다[5]. 이 방법은 우선 모든 M/P를 오름차순으로 정렬한 상태에서 식 (5)에 의해 D' 값을 구한다.

$$D' = \frac{T}{S} = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{M}{P} \right)_i \times \left[ i - \frac{(N+1)}{2} \right]}{\sqrt{s^2(N-1)}} \quad (5)$$

여기서  $i$ 는 오름차순으로 정렬된 자료의 자료번호이고  $\left( \frac{M}{P} \right)_i$ 는  $i$  번째 자료의 M/P 값이며 N은 총 자료의 수(여기서는 684), 그리고 s는 자료의 표준편차에 해당한다.

정규분포 검정은 95% 신뢰 구간에서 유의수준 5%로 수행된다. 즉 주어진 표본수 N에 대해 D' 값이  $D'(0.025)$ 와  $D'(0.975)$  사이에 있는 경우, 표본은 정규분포를 따른다고 결정할 수 있다. WRB-2 통계량의 경우 D' 값은 5064.902이고  $D'(0.025)$ 는 5001.2 및  $D'(0.975)$ 는 5081.6으로 D' 값이 두 경계 사이에 있으므로 정규분포를 따른다는 결론을 얻었다.

임계열유속 상관식을 처음 개발할 경우라면, 위에서 수행한 정규분포 검정 이외에 일반 통계 역학 책에 나와 있는 F-검정, t-검정 및 3개 이상의 표본집단을 비교할 경우에는 ANOVA(Analysis of Variance)를 수행하여 기하학적 형상이 다름에도 불구하고 같은 모집단에서 추출됨을 가정할 수 있는지 검정을 수행하여야 한다. 그러나 본 논문에서는 분석이 기 수행된 데이터 베이스를 가지고 분석을 수행하므로 본 검정은 별도로 수행하지는 않았다.

#### 4.4 이산 분포도

사용되는 CHF 상관식이 제대로 개발되었는지 또는 부수로 코드에 제대로 프로그램되었는지를 그래프에 의해 육안으로 관찰할 수 있는 방법(Visual test)이 이산분포도(Scattered Plot)이다. 제대로 작업이 수행되었다면, M/P 통계량이 CHF 상관식의 입력변수에 대해 치우침(Bias)이나 잔류추이(Residual Trend)를 보이지 말아야 한다. 그림 2에서 5는 M/P Plot에 의한 Visual test 결과를 보여준다. 그림 2은 측정 임계열유속과 코드 예측 임계열유속의 이산분포도이다. 그림에서 보듯 모든 Data Point들은 잔류추이 및 치우침 없이 M=P인 직선 주위에 고르게 분포함을 볼 수 있다. 그림 3, 그림 4 및 그림 5는 각각 기준압력, 국부열유속 및 국부 증기질의 변화에 따른 M/P 값의 분포를 나타낸다. 마찬가지로, 모든 분포가 잔류 편차 및 치우침 없이 M/P = 1인 직선 주위에 고르게 분포함을 볼 수 있다.

#### 4.5 95/95 상관식 한계 DNBR

4.1의 방법론에 따라  $S = 0.0789$ ,  $F_T = 639$ 가 얻어졌다. 그리고 구해진 자유도 639에 대해 참고문헌 4로부터  $K_{95/95} = 1.749$ 가 되므로 식 (3) 및 표 4에 의해 95/95 상관식 한계 DNBR은

$$95/95 \text{ 상관식 한계 DNBR} = \frac{1}{\left(\frac{M}{P}\right)^{-K_{95/95}} \times S} = 1.16048713 \approx 1.17 \quad (6)$$

이 얻어진다. 이는 THINC에 의해 계산되어 열수력 설계에 쓰이고 있는 WRB-2 상관식 한계와 동일한 것으로 향후 VIPRE 코드에 의해 WRB-2 상관식을 사용하여 DNBR 분석을 수행할 시에도 동일한 값을 사용할 수 있다는 결론이다.

## 5. 결론

EPRI의 노심열수력 코드인 VIPRE-01에 웨스팅하우스 형 원전설계를 위하여 WRB-1 및 WRB-2 상관식을 추가하고 수 계산의 결과와 비교함으로써 검증을 수행하였다. 검증 결과 원래의 의도대로 충실히 프로그래밍 되었다는 결론을 얻었다. 개선된 VIPRE 코드의 첫 적용으로써 WRB-2 임계 열유속 상관식 Data Base를 가지고 상관식 분석을 실시하였다. 분석 결과, 모든 통계량(M/P)은 정규분포를 형성하였고 Visual Test 결과 잔류 추이 및 치우침 없이 M/P=1인 직선 주위에 고르게 분포함을 알 수 있었다. 향후 Non-LOCA 과도해석에서 쓰일 95/95 상관식 한계 DNBR은 THINC-IV 코드의 결과와 같이 1.17을 얻어내었다.

## 6. 후기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력 연구개발 중장기 과제 중 “원전 운전 과도해석 및 신 안전해석기술개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

1. EPRI NP-2511-CCM, "VIPRE-01: A Thermal-Hydraulic Code for Reactor Core," Volume 1,2,3,4 April 1987.
2. F. E. Motley, et al, "New Westinghouse Correlation WRB-1 for Predicting Critical Heat Flux in Rod Bundles with Mixing Vane Grids," WCAP-8762-P-A, 1978.
3. "Reference Core Report VANTAGE 5 Fuel Assembly," WCAP-10444-P-A, 1985.
4. Owen, D. B., Factors for One-Sided Tolerance Limits and for variables Sampling Plans, SCR-607, Sandia Corporation, March, 1963.
5. ANSI N15.15-1974, "American National Standard Assesment of the Assumption of Normality(Employing Individual Observed Values)," 1974.

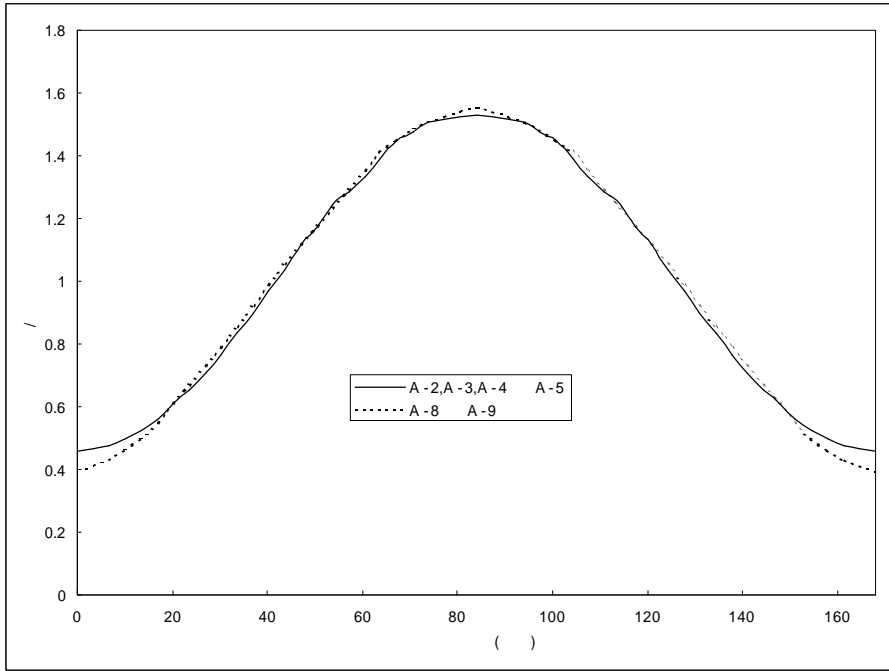


그림 1 WRB-2 분석에 사용된 축방향 출력분포

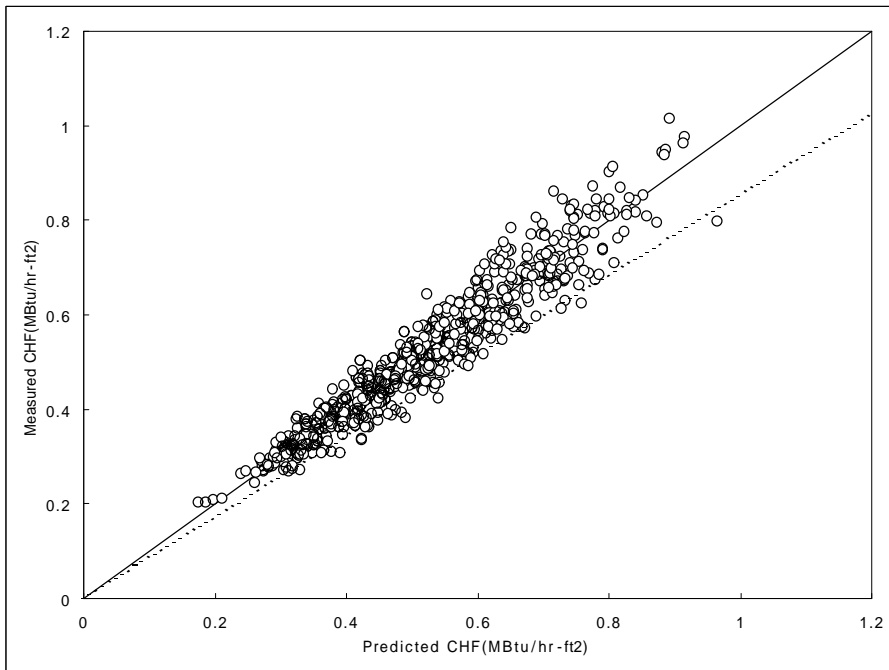


그림 2 WRB-2 상관식에 의한 측정 임계열유속 대 예측 임계열유속 분포

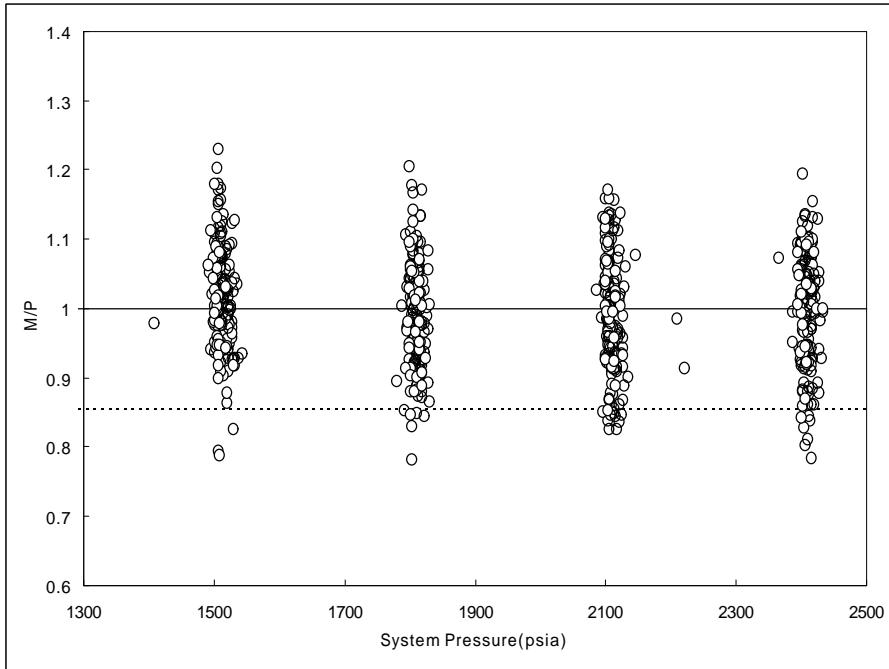


그림 3 WRB-2 상관식에 의한 계통 압력에 대한 M/P 분포

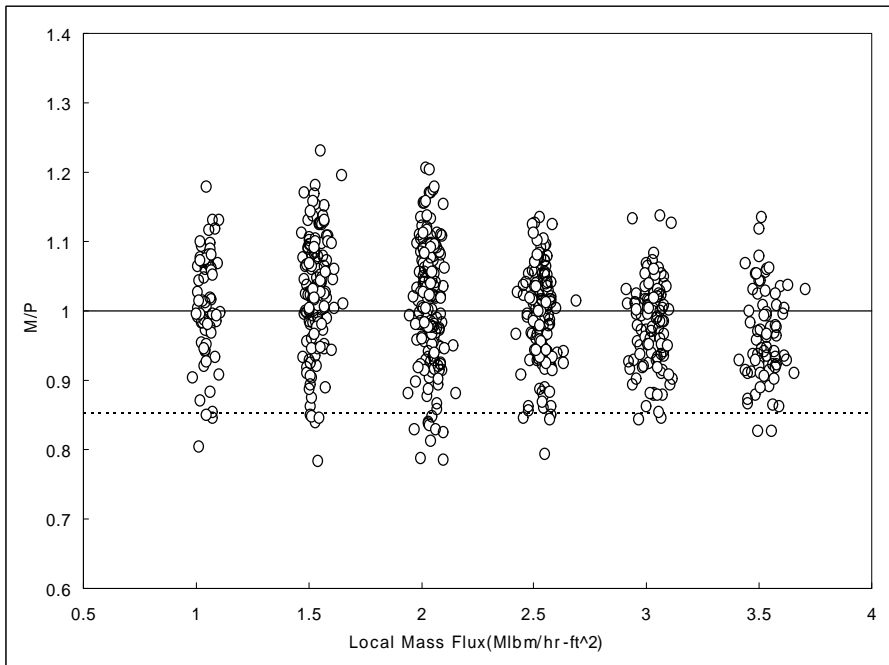


그림 4 WRB-2 상관식에 의한 국부열유속에 대한 M/P 분포

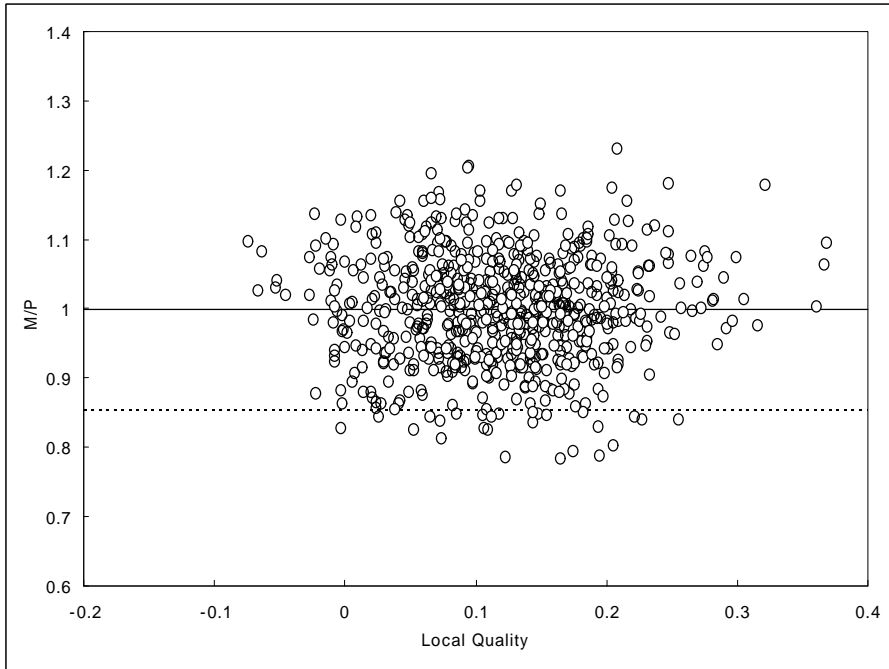


그림 5 WRB-2 상관식에 의한 국부증기질에 대한 M/P 분포