2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

부수로 해석 코드를 이용한 디지털 노심보호계통의 DNBR 계산

DNBR Calculation in Digital Core Protection System by a Subchannel Analysis Code

인왕기, 유연종, 황대현, 지성균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

부수로 열수력 해석 코드인 MATRA 를 이용하여 디지털 노심보호계통의 DNBR 계산 오차와 DNBR 여유도 변화를 평가하였다. 상용 디지털 가압경수로의 노심보호계통에서는 실시간 DNBR 계산을 위해 단순화된 그룹수로 해석 코드(CETOP)를 이용하고 있다. CETOP 은 DNBR 계산의 정확성과 보수성을 위해 상세 부수로 해석 코드와의 조정(tuning) 과정이 필요하지만 MATRA 는 별도의 조정 과정이 불필요하다. 국내 최초로 디지털 노심보호계통을 사용한 영광 3-4 호기의 다양한 운전조건에서 각각 MATRA 와 CETOP 을 이용한 DNBR 계산과 상세 부수로 해석 코드인 TORC 의 최적 DNBR 계산도 수행하였다. MATRA 의 DNBR 은 CETOP 의 DNBR 에 비해 오차의 절대평균이 감소하고(즉 보수성이 감소함) 표준편차는 다소 크게 나타났다. 대표적인 정상 운전조건에서 각각의 DNBR 계산 오차를 보정한 최소 DNBR 값은 MATRA 의 경우가 최소 1.8%, 최대 9.9%까지 증가하였다.

Abstract

The DNBR calculation uncertainty and DNBR margin were evaluated in digital core protection system by a thermal-hydraulic subchannel analysis code MATRA. A simplified thermal-hydraulic code CETOP is used to calculate on-line DNBR in core protection system at a digital PWR. The DNBR tuning process against a best-estimate subchannel analysis code is required for CETOP to ensure accurate and conservative DNBR calculation but not necessary for MATRA. The DNBR calculations by MATRA and CETOP were performed for a large number of operating conditions in Yonggwang nuclear units 3-4 where the digital core protection system is initially implemented in Korea. MATRA resulted in a less negative mean value (i.e., reduce the over-conservatism) and a somewhat larger standard deviation of the DNBR error. The uncertainty corrected minimum DNBR by MATRA was shown to be higher by 1.8% - 9.9% than the CETOP DNBR.

1. 개요

원자로에 장전되는 핵연료 다발은 대부분 삼각형 또는 사각형 배열의 연료 봉과 냉각수가 흐르는 부수로(subchannel)로 구성된다. 핵연료 다발에 대한 열수력 특성 분석은 대부분 부수로

해석을 통해 이루어지고 있다. 부수로 해석은 제어체적인 부수로내의 속도와 온도분포 등의 미세한 유동구조를 무시하고 부수로의 평균 유량과 유체온도를 계산하는 방식이다. ABB-CE 사는 설계에 필요한 많은 양의 DNBR 계산을 신속하게 수행하기 위해 그룹수로 해석 코드인 CETOP-D[1] 를 개발하였다. CETOP-D 코드는 인접한 부수로 사이의 횡류와 난류혼합 효과를 고려하기 위해 유체속도와 압력 및 엔탈피에 대한 전달계수(transport coefficient)를 사용하고 지배방정식의 해를 얻기 위해 'prediction-correction' 수치해법을 이용한다. CETOP-D DNBR 의 보수성을 위해 상세 부수로 해석 코드인 TORC[2]의 계산결과와 비교하여 결정된 고온수로 유량조정 인자를 사용한다. 또한 디지털 노심보호계통(CPC)과 노심감시계통(COLSS)에서의 실시간 DNBR 계산을 위해 CETOP-D 보다 더욱 단순화된 그룹수로 해석 코드인 CETOP[3]을 개발하였다. CETOP-D 는 운전조건에 따라 각 인자에 대한 전달계수를 계산하지만 CETOP 은 미리 계산된 일정한 전달계수를 사용한다. 즉, CETOP 의 전달계수를 조정하여 CETOP-D DNBR 과의 오차를 최소화 시킨다. 따라서 신뢰성 있는 CETOP 의 DNBR 계산을 위해서는 2 단계의 조정 작업이 필요하다. 한편, 한국원자력연구소가 개발중인 MATRA[4] 코드는 정상상태 및 과도상태에서의 노심 엔탈피와 유동분포를 계산하기 위한 부수로 열수력 해석 코드이다. 이 코드는 COBRA-IV-I 를 토대로 하여 다양한 기능과 모델을 개선하여 보다 편리한 사용자 환경을 제공하고 정확성을 향상시켰다.

디지털 노심보호 및 감시계통에 응용되고 있는 CETOP 은 넓은 범위의 운전조건에서 상세 부수로 해석코드에 비해 항상 보수성이 확보되도록 조정된다. 따라서 정상 운전조건에서 CETOP 을 이용한 실시간 DNBR 계산은 지나치게 보수적으로 이루어져 DNBR 여유도를 감소시키는 요인이 되고있다. DNBR 여유도의 증가는 원자로 정지여유도와 운전여유도의 증가를 뜻하며 나아가서 안전해석을 포함한 노심설계의 여유도를 증가시키고 설계절차의 단순화와 설계일정을 단축시킬 수 있는 이점이 있다. 특히 한국원자력연구소가 개발중인 일체형원자로인 SMART 는 무붕산 운전으로 인해 제어봉 삽입운전이 필수적이므로 기존 상용 가압경수로보다 많은 DNBR 여유도의 확보가 요구된다. 따라서 노심 DNBR 여유도 향상을 위해 노심 장전모형의 최적화와 노심입구 온도 강하, 노심출력분포 계산 모델과 DNBR 계산 모델의 개선 등 다각적인 노력이 이루지고 있다.

이 연구에서는 부수로 열수력 해석 코드인 MATRA 를 이용하여 디지털 노심보호계통의 DNBR 계산 오차와 DNBR 여유도 변화를 평가하였다. 영광 3-4 호기 디지털 노심보호계통의 운전범위에서 각각 MATRA 와 CETOP 를 이용한 DNBR 계산과 상세 부수로 해석 코드인 TORC 를 이용한 최적 DNBR 계산도 수행하였다.

2. 노심 DNBR 계산모델

CETOP 코드는 디지털 노심보호계통(CPC)에서 실시간으로 측정된 운전조건을 사용하여 최소 DNBR 을 계산하기 위해 개발되었다. 이 코드는 속도, 압력 및 엔탈피 각각에 대한 전달계수를 이용하여 그림 1 과 같은 1/8 노심의 최소 DNBR 을 계산한다. 즉, 고온다발의 1/8 과 나머지 1/8 노심은 각각 그림 1 의 수로 1, 2 로 나타낸 바와 같이 두개의 그룹수로 모델을 이용한다. 고온다발은 수로 2, 3, 4 의 3 개의 그룹수로로 구분된다. 고온다발 수로 2 는 수로 3 과 4 를 포함하고 있다. 수로 4 는 최소 DNBR 이 발생하는 단일 고온 부수로이고 수로 3 은 수로 4 에 인접한 부수로를 통합한 그룹수로를 의미한다. 수로 2 와 수로 3 과 같은 그룹수로 사이의 엔탈피와 운동량의 전달현상을 모델링하기 위해 아래와 같은 전달계수를 이용하여 질량, 운동량 그리고 에너지 보존 방정식을 나타낸다. 고온 부수로의 위치와 전달계수는 상세 부수로 해석 코드인 TORC 에 의해 결정된다.

$$N_H = \frac{H_I - H_J}{h_I - h_J}, \quad N_U = \frac{U_I - U_J}{u_I - u_J}, \quad N_P = \frac{P_I - P_J}{p_I - p_J} \qquad (1)$$

여기서 N_H, N_U와 N_P는 각각 엔탈피, 축방향 유속과 압력에 대한 전달계수를 뜻한다. 기호 H, U, P는 그룹수로 I, J 의 엔탈피, 유속, 압력을 나타내고 기호 h, u, p는 그룹수로의 경계 부수로(boundary subchannel)의 엔탈피, 유속, 압력을 각각 나타낸다. 상세 부수로 해석 코드인 TORC 와 비교결과 계산된 노심 유동 인자들(엔탈피, 유속, 압력 등)이 N_U와 N_P에 따라 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 N_H는 노심 운전조건, 특히 반경방향 출력분포의 영향을 크게 받는 것으로 평가되었다. 따라서 N_U와 N_P 값들은 주어진 노심의 모든 운전조건에서 상세 부수로 해석 코드인 TORC 를 사용하여 결정되며, N_H 값은 CETOP-D 의 경우 노심 운전조건에 따라 계산되고 CETOP 의 경우에는 조정인자(tuning factor)로 사용된다.

CETOP 코드의 다른 특징은 계산시간을 단축시키기 위해 기존의 반복적 수치해법이 아닌 'prediction-correction' 수치해법을 이용한 것이다. 하류에서의 인접수로 사이의 횡방향 속도를 가정하여 상류에서의 횡방향 압력강하를 예측함으로써 노심 축방향 각 위치에서 축방향 유량이 정확하게 결정될 수 있는 장점이 있다. 한편, 허용 가능한 모든 노심 운전조건에서 TORC 대비 CETOP 계산 DNBR 의 보수성을 유지하기 위해 고온다발 수로에 대한 입구유량 조정인자 및 전달계수를 사용하고 있다. 따라서 입구유량 조정인자와 전달계수를 결정하기 위한 별도의 작업이 필요하다.

MATRA(multichannel analyzer for steady states and transients in rod arrays) 코드는 정상 상태 및 과도 상태에서의 핵연료 집합체나 원자로 노심의 열수력 특성을 분석하기 위한 다수로 해석 코드로서, 기존의 CDC CYBER 용 COBRA-IV-I 를 토대로 하여 IBM PC 및 HP Workstation 에서 사용할 수 있도록 개발되어 가압 경수로 및 신형 원자로에 적용 가능한 부수로 해석 코드이다. MATRA 는 보다 편리한 사용자 환경을 제공하고 정확성을 향상시키기 위하여 코드 구조를 개선하고 다양한 기능들과 유동 모델들이 추가되었다. 정방형 집합체 노심에 대한 압력강하 모델과 적용범위가 넓은 기포율(void fraction) 모델이 추가되었고, 2 상유동 조건에서 횡방향 전달 현상의 정확성 제고를 위한 난류혼합 모델과 기포 이동 모델 등을 적용하였다. 입력과 출력 단위 선택 기능과 유체의 물성치 함수 사용기능 및 비균일 축방향 노드 선택 기능도 추가되었다.

그림 2 는 MATRA 코드의 영광 3-4 호기 부수로 해석 모델 예를 나타내는 것으로 노심 입구 유량 분포와 반경방향 출력분포 특성을 고려하여 결정된다. MATRA 코드는 1 단계 부수로 해석 코드로 노심평균 그룹수로 1 과 고온다발 수로 3, 수로 1 과 수로 3 사이의 중간수로(buffer channel) 2 그리고 고온다발 수로 내부의 수로들로 이루어진다. 고온다발 수로는 고온봉 주변의 고온 부수로 9 와 그 주변 부수로 5-8 및 통합 중간수로 4 로 이루어져 있다. 이러한 MATRA 부수로 해석 모델은 DNBR 계산의 정확성을 높이고 계산시간도 단축시킬 수 있도록 구성된다. MATRA 의 DNBR 계산시간은 PC(Pentium 800Mhz CPU, 512MB RAM)에서 약 0.5 초로 CETOP 보다는 느리지만 디지털 노심보호계통의 DNBR 계산간격(2 초) 보다는 빠르므로 실시간 노심 DNBR 계산이 가능한 것으로 판단된다.

3. DNBR 계산결과 및 고찰

부수로 해석 코드인 MATRA 를 이용한 디지털 노심보호계통의 실시간 DNBR 계산을 평가하기 위해 다양한 노심운전 조건에서 DNBR 계산을 수행하였다. 4 개의 그룹수로 해석 코드인 CETOP 과 부수로 해석 코드인 MATRA 를 각각 이용하여 DNBR 계산을 수행하였고 상세 부수로 해석 코드인 TORC 를 이용한 최적 DNBR 도 계산하였다. 표 1 은 DNBR 계산에 사용된 노심 운전조건으로 영광 3-4 호기의 디지털 노심보호계통(CPC)의 운전범위와 비슷하다. 노심 축방향 출력분포는 영광 3-4 호기 초기노심의 주요 연소도(BOC, MOC, EOC)에서 생산된 다양한 형태의 분포를 사용하였으며 반경반향 출력분포는 TORC 모델과 동일한 것을 이용하였다.

그림 3 은 TORC 의 최적 DNBR 에 대한 CETOP 과 MATRA 의 DNBR 계산결과를 비교

한 것이다. 포물선 형태의 축방향 출력분포가 나타나는 주기초(BOC)의 경우(그림 3, 위) DNBR 이 증가할수록 CETOP 과 MATRA 는 TORC 에 비해 최소 DNBR 을 점점 낮게 예측하는 것으로 나타났다. 특히 CETOP 의 최소 DNBR 은 TORC 결과에 비해 모든 조건에서 보수적으로 예측되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 TORC 에 대한 CETOP 의 2 단계 조정과정, 즉 광범위한 운전조건에서 CETOP 의 최소 DNBR 이 TORC 최소 DNBR 보다 항상 작도록 고온다발 수로의 유량 조정인자와 엔탈피 전달계수를 결정하였기 때문이다. MATRA 는 CETOP 과 같은 별도의 조정인자를 사용하지 않고도 TORC 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 최소 DNBR 이 2.5 보다 작은 경우 MATRA 의 DNBR 은 편심되지 않고 TORC 결과와 잘 일치하였다.

두 개의 출력첨두(power peaking) 인자가 노심의 상하부에 발생하는 주기중간(MOC)의 축방향 출력분포를 사용한 경우의 DNBR 비교결과도 그림 3(중앙)에 나타나 있다. CETOP 의 DNBR 은 BOC 에서와 같이 TORC 의 DNBR 에 비해 낮게 예측되었으며 DNBR 이 증가할수록 더욱 낮은 값을 나타내고 있다. 그러나 MATRA 의 DNBR 은 최소 DNBR 이 약 3.0 보다 작은 경우 TORC 결과와 잘 일치하였으나 그 이상에서는 DNBR 이 평균적으로 TORC 보다 낮게 예측되었고 편차도 증가하는 경향을 보이고 있다. 편평한 축방향 출력분포가 나타나는 주기말(EOC)의 경우(그림 3, 아래)에는 MOC 의 경우와 유사한 비교 결과를 보여주고 있다.

그림 4-6 은 주요 연소도(BOC, MOC, EOC)에서 CETOP 과 MATRA 각각의 TORC 에 대한 DNBR 오차 확률분포를 나타낸다. 여기서 CETOP 과 MATRA DNBR 의 오차는 아래와 같이 정의된다.

$$E = \frac{DNBR(CETOP\ or\ MATRA) - DNBR(TORC)}{DNBR(TORC)} \qquad (2)$$

주기초(BOC)의 경우(그림 4) 앞에서 이미 언급한 바와 같이 CETOP 과 MATRA 모두 TORC 에 DNBR 을 평균적으로 낮게 예측하므로 DNBR 오차평균(m)이 약 -5%로 나타났다. 확률분포는 정규분포(normal distribution)와 비슷하며 표준편차(s)는 MATRA 의 경우가 CETOP 에 비해 다소 크게 나타났다. 그림 5 는 주기중간(MOC)에서 CETOP 과 MATRA 의 DNBR 오차 확률분포를 나타낸다. CETOP 의 DNBR 오차분포는 정규분포에 가까운 형태를 나타내지만 MATRA 의 분포는 평균값을 중심으로 양쪽에서 최대 발생확률을 나타내는 비정규분포이다. DNBR 오차평균은 각각 –5.2%(CETOP)와 –2.9%(MATRA)이며 표준편차는 MATRA 의 경우가 CETOP 보다 2 배 이상 크게 나타났다. 그림 6 의 주기말(EOC)에서의 DNBR 오차 확률분포도 MOC 의 경우와 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

DNBR 계산오차의 확률분포에 대한 한방향(one-sided) 95/95 상한치(upper tolerance limit)와 하한치(lower tolerance limit)는 정규분포와 비정규분포의 각 경우에 대해 계산하였다. 정규분포의 경우 하한치와 상한치는 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$95/95\ 하한치 = m - K_{95/95}s \qquad (3)$$

$$95/95\ 상한치 = m + K_{95/95}s \qquad (4)$$

여기서 $K_{95/95}$ 는 한방향 제한치 인자이며 표본 개수가 무한대인 경우 1.645 의 값을 갖는다. 한편, 오차의 확률분포가 비정규분포인 경우의 상한치와 하한치는 non-parametric 기법[5]을 이용하여 결정하였다. Non-parametric 기법은 오차의 크기를 순서대로 나열하여 상한치와 하한치에 해당되는 위치를 결정하는 것이다. 즉 순위통계(order statistics)와 이항(binomial) 확률분포를 이용하여 상한치와 하한치를 결정할 수 있는 위치인자(L)가 다음과 같

이 얻어진다.

$$L = Np \pm K_{95/95}[Np(1-p)]^{1/2} \quad (5)$$

여기서 N은 표본 개수이고 p는 사건이 일어날 확률로 95/95 상한치의 경우 0.05 이다.

CETOP 의 DNBR 오차의 한방향 95/95 상한치는 확률분포가 모두 정규분포의 가능성이 있으므로 정규분포와 비정규분포의 상한치 중 보수적인 값으로 결정하였다. MATRA 의 경우에는 BOC 의 오차 확률분포만이 정규분포의 가능성이 있으므로 정규분포와 비정규분포의 상한치 중 보수적인 값으로 결정하였고 MOC 와 EOC 의 경우에는 비정규분포의 상한치를 사용하였다. CETOP 과 MATRA 의 DNBR 계산오차에 대한 각 통계인자는 표 2 에 정리되어 있다.

부수로 해석 코드인 MATRA 의 사용에 따른 DNBR 여유도의 변화를 평가하기 위해 대표적인 정상운전 조건에서 CETOP 과 MATRA 의 최소 DNBR 을 계산하였다. 이 계산에 사용된 운전조건은 디지털 노심보호계통의 열적여유도 평가조건과 동일하다. 즉, 노심출력은 100%, 노심유량은 105% (최소 측정유량 기대치), 압력은 2250 psi, 노심 입구온도는 564.5 °F, 고온봉 첨두출력(Fr)은 1.50 이다. 그림 7 은 본 계산에 사용된 주요 연소도의 대표적인 축방향 출력분포를 나타낸다. 상기 조건에서 계산된 최소 DNBR 은 앞에서 평가된 각각의 DNBR 계산오차의 상한치(표 2 참조)를 사용하여 보정한다. 그림 8 은 주요 연소도에서 계산된 최소 DNBR 의 변화를 나타낸다. 정상운전 조건에서 계산된 MATRA 의 최소 DNBR 은 모두 CETOP 의 결과보다 높게 예측되었다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 CETOP 은 DNBR 조정인자를 이용하여 모든 운전조건에서 항상 보수적인 DNBR 계산이 되도록 하였으므로 정상운전 조건에서는 다소 큰 보수성을 갖는 것으로 판단된다. 그러나 MATRA 는 별도의 조정인자를 사용하지 않고 적절한 부수로 해석모델을 구성하여 최적 DNBR 을 계산한다. 계산오차를 보정한 CETOP 과 MATRA 의 최소 DNBR 은 모두 TORC 로 계산된 최적 DNBR 보다 작지만 MATRA 가 CETOP 의 과도한 보수성을 현저하게 감소시키는 것을 알 수 있다. 각각의 DNBR 계산오차를 고려하여 보정한 최소 DNBR 은 MATRA 가 CETOP 에 비해 각각 1.8%(BOC), 7.5%(MOC)와 9.9%(EOC) 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결론

노심 부수로 해석 코드인 MATRA 를 이용한 디지털 노심보호계통의 실시간 DNBR 계산을 평가하기 위해 계산시간, DNBR 오차와 DNBR 여유도 변화를 분석하였다. 비교분석을 위해 상세 부수로 해석 코드인 TORC 와 단순 그룹수로 코드인 CETOP 을 이용한 DNBR 계산도 수행하였다. MATRA 의 DNBR 계산시간은 PC(Pentium 800Mhz CPU, 512MB RAM)에서 약 0.5 초로 CETOP 보다는 느리지만 상용 원자로 디지털 노심보호계통의 DNBR 계산간격(2 초) 보다는 빠르므로 실시간 노심 DNBR 계산이 가능한 것으로 판단된다. MATRA 의 DNBR 오차는 CETOP 의 DNBR 오차에 비해 평균값이 감소하고(즉 보수성이 감소함) 표준편차는 다소 크게 나타났다. MATRA 는 별도의 조정인자를 사용하지 않고 최적의 DNBR 을 계산하므로 CETOP 의 지나친 보수성을 줄일 수 있었다. 디지털 노심보호계통이 국내 처음으로 적용된 영광 3-4 호기의 대표적인 정상운전 조건에서 계산오차를 포함하여 평가한 노심 최소 DNBR 은 MATRA 의 경우가 CETOP 에 비해 각각 1.8%(BOC), 7.5%(MOC)와 9.9%(EOC) 증가하였다. 즉, MATRA 의 사용은 DNBR 계산시간을 증가시키지만 설계절차를 단순화시키고 DNBR 여유도를 향상시키는 이점이 있다. 따라서 향후 일체형원자로(SMART)의 디지털 노심보호계통과 MATRA 의 결합은 바람직할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Combustion Engineering Inc., "CETOP-D Code Structure and Modeling Methods for Arkansas Nuclear One – Unit 2," CEN-214(A), 1982.
[2] Combustion Engineering Inc., "TORC Code, A Computer Code for Determining the Thermal Margin of a Reactor Core," CENPSD-161, 1975.
[3] Chong Chiu, "Three-Dimensional Transport Coefficient Model and Prediction-Correction Numerical Method for Thermal Margin Analysis of PWR Cores," Nuclear Engineering and Design, 64, 103-115, 1981.
[4] 유연종, 황대현, "부수로 해석 코드 MATRA 개발," KAERI/TR-1033/98, 1998,
[5] R. E. Walpole and R. H. Myers, "Probability and Statistics for Engineers and Scientists 2ed," Macmillan Publishing Company, Inc., New York, 1978.

표 1. DNBR 계산 노심 운전조건

운전인자	단위	운전범위
노심 출력	% of rated	40 – 100
노심 입구온도	°F	500 – 590
노심 압력	psi	1800 – 2400
노심 유량	% design	90 – 120
노심 축방향 출력분포	ASI	-0.6 - +0.6

표 2. CETOP 과 MATRA 의 DNBR 계산오차에 대한 각 통계인자

연소도	코드	평균(m)	표준편차(s)	95/95 상한치
BOC	CETOP	-0.0539	0.0114	-0.031 (비정규분포)
	MATRA	-0.0507	0.0257	-0.0044 (비정규분포)
MOC	CETOP	-0.0518	0.0169	-0.024 (정규분포)
	MATRA	-0.0294	0.0449	0.0396 (비정규분포)
EOC	CETOP	-0.0531	0.0188	-0.0213 (비정규분포)
	MATRA	-0.0294	0.0439	0.0407 (비정규분포)

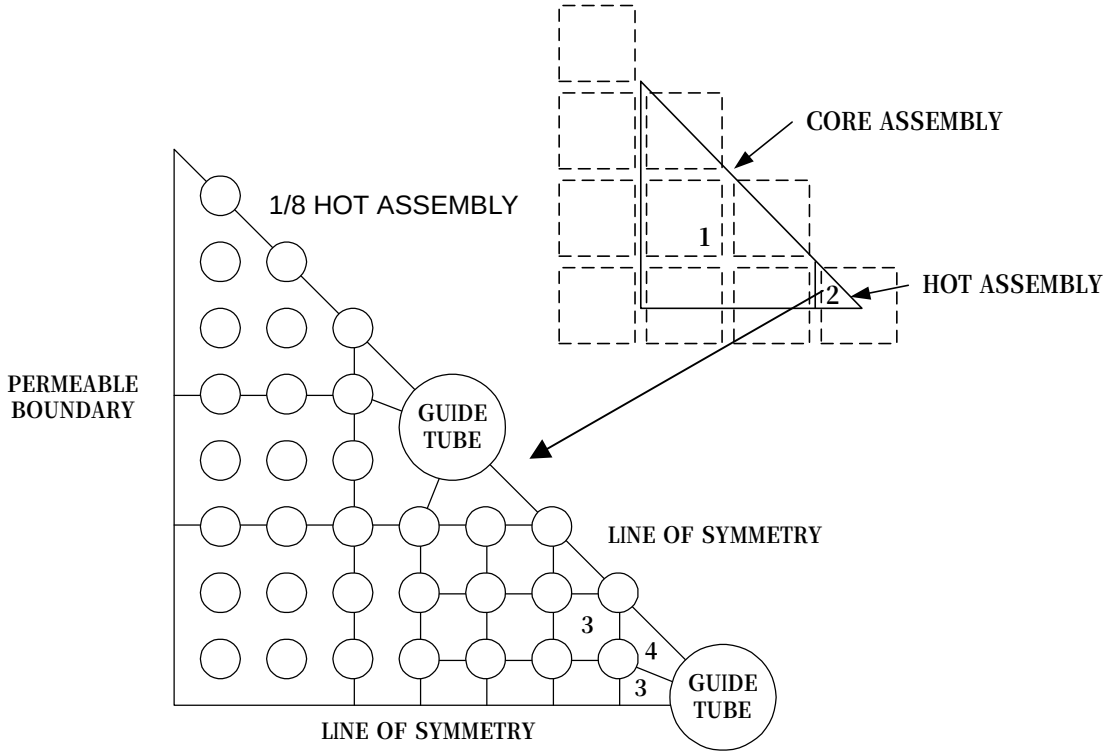

그림 1. CETOP 4 개 그룹수로 해석 모델

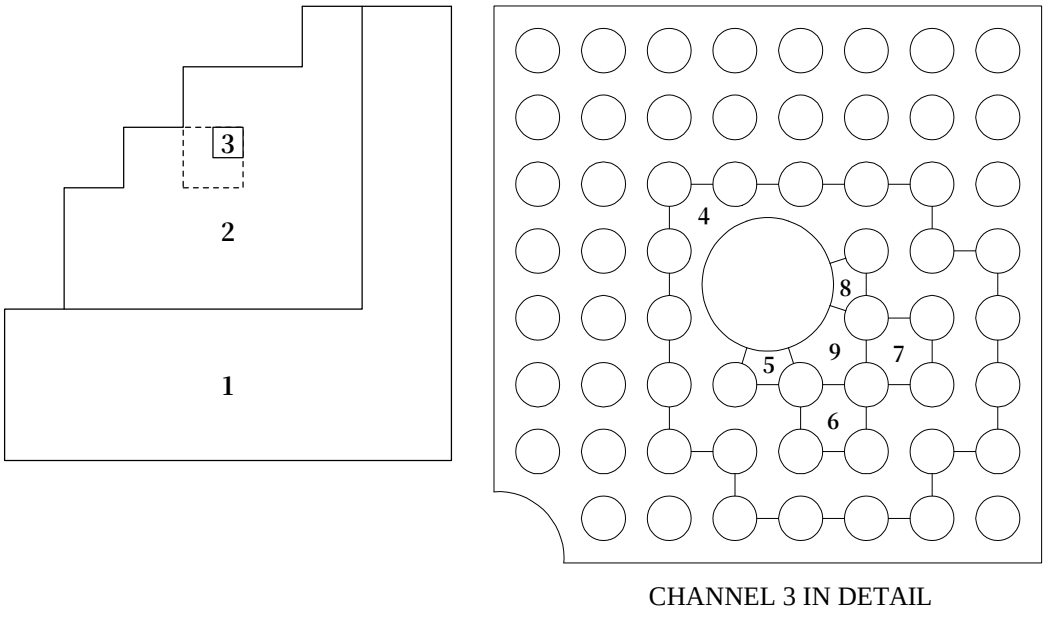

그림 2. MATRA 부수로 해석 모델 (영광 3-4 호기)

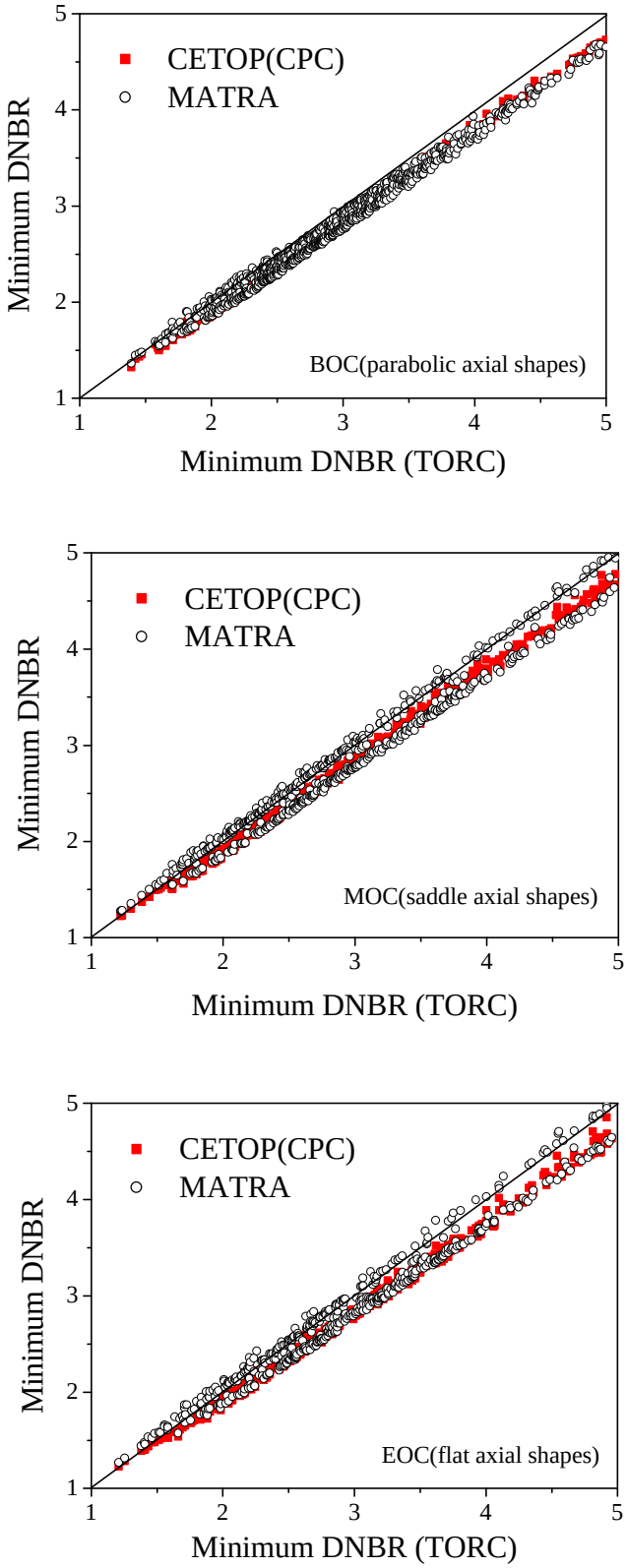

그림 3. 최소 DNBR 비교; (위) 주기초 - BOC, (중앙) 주기중간 - MOC, (아래) 주기말 - EOC

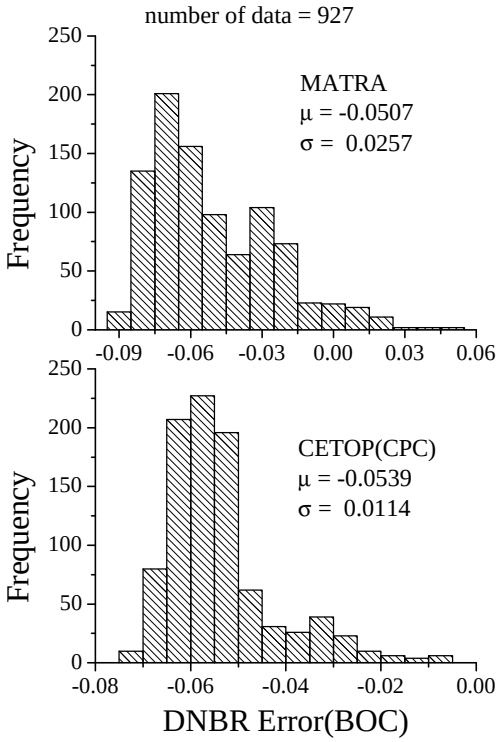

그림 4. DNBR 계산 오차 확률분포(BOC)

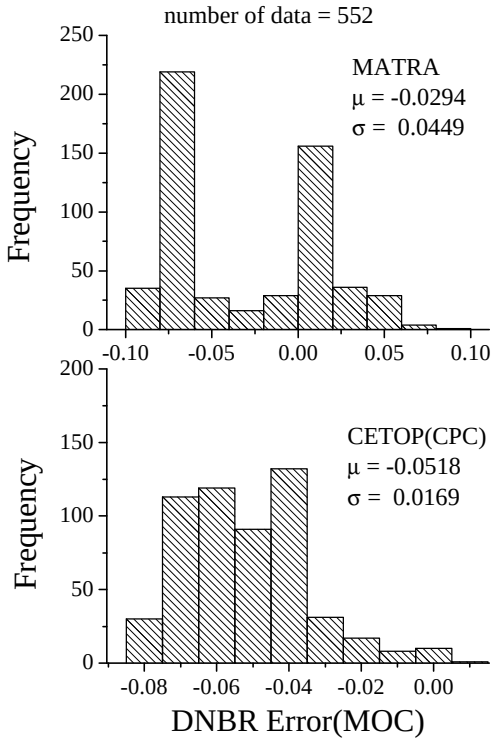

그림 5. DNBR 계산 오차 확률분포(MOC)

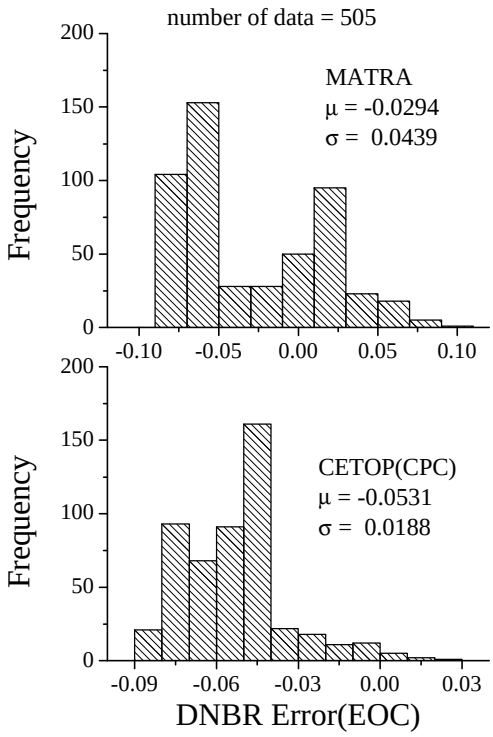

그림 6. DNBR 계산 오차 확률분포(EOC)

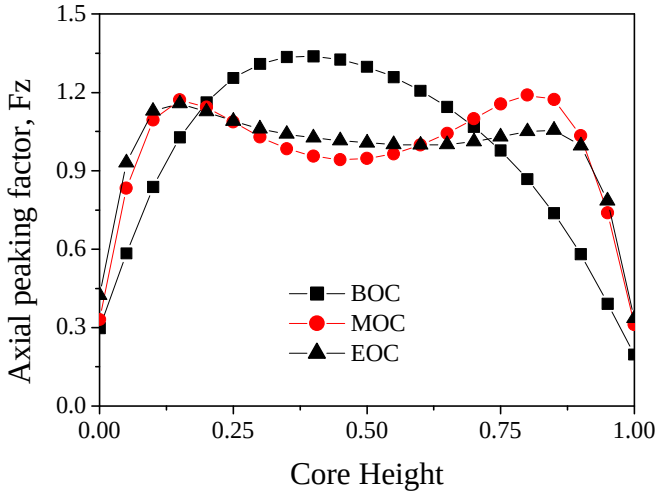

그림 7. DNBR 계산에 사용된 대표적인 축방향 출력분포

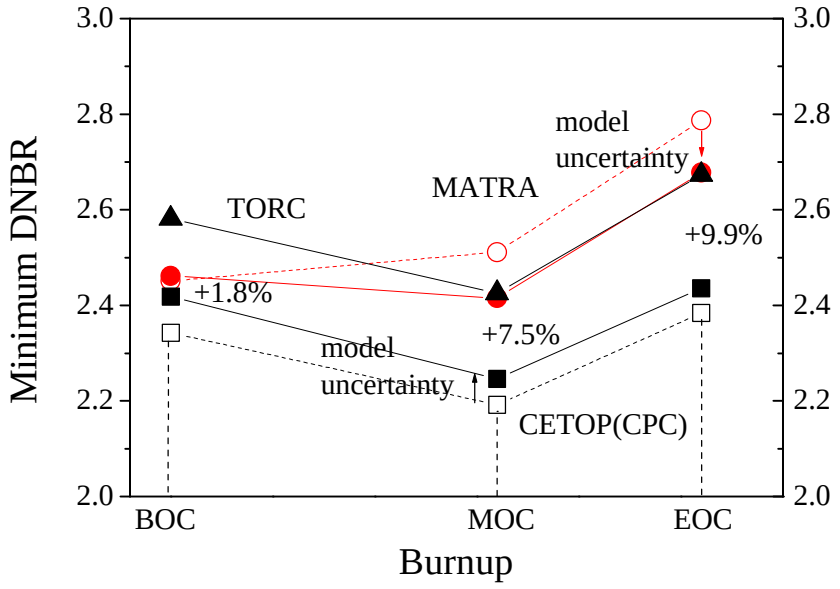

그림 8. 노심 최소 DNBR 변화 (영광 3-4 호기)