2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

개량형 디지털 노심보호계통의 DNBR 계산방법 평가

Evaluation of DNBR Calculation Methods for Advanced Digital Core Protection System

인왕기, 황대현
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150
박영호, 윤태영
한전원자력연료주식회사, 대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

가압경수로용 개량형 디지털 노심보호계통의 실시간 DNBR 계산방법을 결정하기 위해 부수로(subchannel) 해석방법과 그룹수로 해석방법을 비교-평가하였다. 부수로 해석방법은 부수로 해석코드인 MATRA 를 이용하였고 그룹수로 해석방법은 네(4)개 수로 해석코드인 CETOP-D 와 CETOP2 를 각각 사용하였다. CETOP2 는 가장 단순화된 노심 DNBR 계산방법으로 국내 표준원전의 노심보호연산기(CPC)에 사용되고 있다. 각 해석방법에 따른 DNBR 계산결과의 비교를 위해 기준 DNBR 계산은 상세설계 부수로 해석코드인 TORC 를 이용하였다. 영광 3-4 호기 디지털 노심보호계통의 허용 운전조건에서 각각의 DNBR 해석방법을 이용한 DNBR 계산 불확실도 및 DNBR 여유도 변화를 비교하였다. 아홉(9)개의 통합수로(lumping channel) 모델을 이용한 MATRA 코드는 DNBR 오차의 평균이 작으나 표준편차가 크게 나타났다. CETOP-D 와 CETOP2 의 경우 DNBR 오차의 평균이 보수적인 방향으로 크게 치우쳐져 있으며 표준편차는 MATRA 에 비해 작게 나타났다. 정상운전 조건에서의 DNBR 가용여유도(available margin)는 MATRA 와 CETOP-D 가 CETOP2 에 비해 현저히 증가하였다. DNBR 계산방법의 불확실도를 포함하여 평가된 CETOP2 대비 DNBR 유효여유도(net margin)의 증가량은 각각 2.5%-3.3%(CETOP-D)와 2.5%-9.8%(MATRA)이다.

Abstract

This study evaluated the on-line DNBR calculation methods for an advanced digital core protection system in PWR, i.e., subchannel analysis and group-channel analysis. The subchannel code MATRA and the four-channel codes CETOP-D and CETOP2 were used here. CETOP2 is most simplified DNBR analysis code which is implemented in core protection calculator in Korea standard nuclear power plants. The detailed subchannel code TORC was used as a reference calculation of DNBR. The DNBR uncertainty and margin were compared using allowable operating conditions at Yonggwang nuclear units 3-4. The MATRA code using a nine lumping-channel model resulted in smaller mean and larger standard deviation of the DNBR error distribution. CETOP-D and CETOP2 showed conservatively biased mean and relatively smaller standard deviation of the DNBR error distribution. MATRA and CETOP-D w.r.t CETOP2 showed significant increase of the DNBR available margin at normal operating condition. Taking account for the DNBR uncertainty, MATRA and CETOP-D over CETOP2 were estimated to increase the DNBR net margin by 2.5%-9.8% and 2.5%-3.3%, respectively.

1. 개요

가압경수로는 사용하는 원자로보호계통의 유형에 따라 아나로그 발전소와 디지털 발전소로 구

분된다. 국내원전의 경우 고리 1-4 호기와 영광 1-2 호기 등이 아나로그 발전소이며 영광 3-6 호기, 울진 3-6 호기 및 신고리 1-2 호기 등이 디지털 발전소이다. 아나로그 발전소는 원자로보호계통으로 과출력(overpower)/과온도(overtemperature) ΔT(OP ΔT/OT ΔT) 보호계통을 사용하고 있으며 디지털 발전소의 경우 컴퓨터를 이용한 실시간 노심보호연산기계통(CPCS)을 채택하고 있다. OP ΔT/OT ΔT 와 CPCS 는 모두 핵연료용융과 핵비등이탈(DNB) 현상으로부터 원자로를 안전하게 유지하기 위한 필수적인 원자로보호계통이다. 아나로그 노심보호계통인 OP ΔT/OT ΔT 는 측정된 노심압력, 노심 평균온도와 온도차이(ΔT) 및 노심 상하부 출력편차로부터 각각 과출력 ΔT 와 과온도 ΔT 의 트립 설정치를 아나로그 회로를 이용하여 계산하여 원자로정지 여부를 판정한다. CPCS 는 디지털 컴퓨터인 네(4)대의 노심보호연산기(core protection calculator)와 두(2)대의 제어봉연산기(control element assembly calculator)를 이용한 독립적인 네(4)개 채널로 구성되어 있다. 각 채널은 노심 운전조건에 대한 계측신호를 이용하여 핵비등이탈률(DNBR)과 선출력밀도(LPD)를 실시간으로 계산하여 각각의 설계제한치를 위반시 원자로정지 신호를 발생시킨다 (Fig. 1).

원전계측제어시스템개발사업의 일환으로 디지털 원자력발전소의 주요계통인 노심보호계통의 국산화를 목표로 개량형 디지털 노심보호계통의 개발을 계획하고 있다. 현재 미국 및 국내 디지털 원자력발전소에 운용중인 디지털 노심보호계통인 CPCS 에 대한 지금까지의 운전경험을 바탕으로 개선의 필요성이 제기되고 있으며 관련 핵심기술자립의 중요성도 증가하였다. 따라서 CPCS 의 기능개선 및 성능향상 방안을 수립하여 개량형 디지털 노심보호계통을 개발하고자 한다. CPCS 는 1970 년대초 당시 컴버스천 엔지니어링(CE)사에 의해 개발된 노심보호계통으로 컴퓨터와 단순화된 계산방법을 이용하여 노심 주요 운전인자에 대한 실시간 계산을 수행한다. 특히 원자로 주요 안전인자인 DNBR 계산은 가장 단순화된 그룹수로 해석방법을 사용하고 있다.

이 연구에서는 개량형 디지털 노심보호계통의 최적 DNBR 계산방법을 선택하기 위하여 부수로 해석방법과 그룹수로 해석방법을 비교하였다. 부수로 해석은 제어체적인 부수로내의 속도와 온도분포 등의 미세한 유동구조를 무시하고 부수로의 평균유량과 유체온도를 계산하는 방식이다. 그룹수로 해석방법은 노심을 4 개의 그룹수로로 정의하여 빠르고 보수적인 DNBR 계산을 수행한다. 즉 그룹수로 해석은 인접한 부수로 사이의 횡류와 난류혼합 효과를 고려하기 위해 유체속도와 압력 및 엔탈피에 대한 전달계수(transport coefficient)를 사용하고 지배 방정식의 해를 얻기 위해 'prediction-correction' 수치해법을 이용한다. 본 연구에 사용한 부수로 해석코드는 한국원자력연구소가 개발한 MATRA[1] 이고 그룹수로 해석코드는 최적 노심열수력 설계코드인 CETOP-D[2]이다. 기준 DNBR 계산을 위해 상세 부수로 해석코드 TORC[3]를 사용하였으며 MATRA 와 CETOP-D 와의 비교를 위해 CPCS 에서 이용하고 있는 단순화된 그룹수로 해석코드인 CETOP2[4]의 DNBR 계산도 수행하였다. 각각의 DNBR 계산방법을 이용하여 영광 3-4 호기 초기노심의 다양한 운전조건에서 DNBR 계산을 수행하였으며 각 경우의 DNBR 계산 불확실도와 DNBR 여유도를 평가하였다.

2. 노심 DNBR 계산방법

2.1 부수로 해석방법

가압경수로에 장전되는 핵연료다발은 사각형 봉다발로 연료봉 사이의 유로인 '부수로'를 통해 냉각수가 흐른다. 원자로 노심 열유동에 대한 특성분석은 일반적으로 부수로 해석방법을 이용하고 있다. 부수로 해석방법은 제어체적인 부수로내의 속도와 온도분포 등의 미세한 유동구조를 무시하고 부수로의 평균유량과 유체온도를 계산하는 방식이다. 현재 경수로심 열수력 설계에 사용되고 있는 부수로 해석코드는 웨스팅하우스사의 THINC-IV 와 CE 사의 TORC 이다. 기존 부수로 해석코드에 대한 특성비교는 참고문헌 [5]에 상세히 기술되어 있다. TORC 코드는 COBRA-IIIC 를 근간으로 개발되었으며 3 단계의 노심 부수로 해석모델을 사용하여 3 차원 상세 노심 열수력 분석

을 수행할 수 있다. 이 연구에서는 TORC 코드를 이용하여 기준 DNBR 을 계산하였다. 원자력연구소가 개발한 부수로 해석코드인 MATRA(multichannel analyzer for steady states and transients in rod arrays)는 COBRA-IV-I 를 기반으로 개발된 것으로 정상상태 및 과도상태에서의 노심 엔탈피와 유동분포를 계산하기 위한 부수로 해석코드이다. 이 코드는 유동 해석모델을 개선하여 정확성을 높이고 다양한 기능과 보다 편리한 사용자 환경을 구성하였다.

개량형 디지털 노심보호계통을 위한 최적 DNBR 해석방법을 평가하기 위해 MATRA 코드를 사용하였다. 빠르고 정확한 DNBR 계산을 위해 본 연구에서 사용한 부수로 해석모델은 Fig. 2 와 같다. 노심 입구 유량분포와 반경방향 출력분포를 고려하여 9 개의 통합수로 모델을 구성하였다. 전체 노심의 1/4 을 고온다발 수로 '3'과 인접한 두개의 통합수로 '1'과 '2'를 설정하였으며 고온다발 수로는 두개의 통합수로('3', '4')와 다섯개의 단일 부수로('5-9')로 구분하였다. 단일 부수로 '9'는 고온수로이며 수로 '5-8'은 고온수로와 인접한 단일 부수로이다.

2.2 그룹수로 해석방법

CE 사는 다양한 운전조건에서 노심 DNBR 을 빠르게 계산하기 위해 네개의 통합수로 모델을 이용한 단순화된 DNBR 계산코드 CETOP-D 를 개발하였다. CETOP-D 코드는 인접한 부수로 사이의 횡류와 난류혼합 효과를 고려하기 위해 유체속도와 압력 및 엔탈피에 대한 전달계수(transport coefficient)를 사용하고 지배 방정식의 해를 빠르게 얻기 위해 부수로 해석코드의 반복해법이 아닌 'prediction-correction' 수치해법을 이용한다. CETOP-D 계산 DNBR 의 보수성을 확보하기 위해 상세 부수로 해석코드인 TORC 의 계산결과와 비교하여 결정된 고온수로 유량조정 인자를 사용한다. 또한 디지털 노심보호계통(CPC)에서의 실시간 DNBR 계산을 위해 CETOP-D 보다 더욱 단순화된 그룹수로 해석코드인 CETOP2 를 개발하였다. CETOP-D 는 운전조건에 따라 각 인자에 대한 전달계수를 계산하지만 CETOP2 는 미리 계산된 일정한 전달계수를 사용한다. 즉, CETOP-D 는 고온수로 유량 조정인자를 사용하여 TORC 코드에 비해 보수적으로 조정되며 CETOP2 는 엔탈피 전달계수를 조정하여 CETOP-D DNBR 과의 오차를 최소화한다.

4-그룹수로 해석방법의 각 전달계수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 N_H, N_U와 N_P는 각각 엔탈피, 축방향 유속과 압력에 대한 전달계수를 뜻한다. 기호 H, U, P 는 통합수로 I, J 의 엔탈피, 유속, 압력을 나타내고 기호 h, u, p 는 통합수로 사이의 경계 부수로(boundary subchannel)의 엔탈피, 유속, 압력을 각각 나타낸다. 상세 부수로 해석코드인 TORC 와 비교결과 계산된 노심 유동 인자들(엔탈피, 유속, 압력 등)이 N_U와 N_P에 따라 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 N_H 는 노심 운전조건, 특히 반경방향 출력분포의 영향을 크게 받는 것으로 평가되었다. 따라서 N_U 와 N_P 값들은 주어진 노심의 모든 운전조건에서 상세 부수로 해석코드인 TORC 를 사용하여 결정되며, N_H 값은 CETOP-D 의 경우 노심 운전조건에 따라 계산되고 CETOP2 의 경우에는 조정인자로 사용된다.

Fig. 3 은 CETOP-D 코드의 4-그룹수로 해석모델을 나타내는 것으로 통합수로인 노심평균 수로와 고온다발 수로를 정의하고 고온다발 수로 내부는 최소 DNBR 의 발생을 가정한 고온수로 '4'와 주변의 통합수로 '3'으로 구분한다. 고온다발 내부의 통합수로 '2'와 '3' 사이에는 경계 부수로인 '2′'과 '2″'을 추가로 모델링하여 앞서 정의한 각 전달계수를 계산한다. 기존 CPCS 에 사용중인 CETOP2 코드의 경우 미리 결정된 전달계수를 사용하므로 별도의 경계 부수로를 정의하지 않는다.

3. DNBR 계산결과 및 고찰

부수로 해석코드와 그룹수로 해석코드를 이용하여 영광 3-4 호기 초기노심의 다양한 운전조건에서 DNBR 계산을 수행하였으며 각 경우의 DNBR 계산 불확실도와 DNBR 여유도를 평가하였다. 즉, 9 개의 부수로 해석모델을 이용한 MATRA 코드와 4-그룹수로 해석코드인 CETOP-D 와 CETOP2 를 각각 이용하여 DNBR 계산을 수행하고 3 단계 상세 부수로 해석코드 TORC 의 결과와 비교하여 각 경우의 DNBR 계산 불확실도를 결정하였다. 또한 정상운전 조건에서 노심 최소 DNBR 을 계산하고 불확실도를 고려하여 DNBR 계산방법에 따른 DNBR 여유도를 비교하였다. DNBR 의 계산오차는 아래와 같이 정의하였다.

$$\text{DNBR error} = \frac{DNBR(CETOP \ \ or \ \ MATRA) - DNBR(TORC)}{DNBR(TORC)} \tag{2}$$

Table 1 은 DNBR 계산에 사용된 노심 운전조건으로 영광 3-4 호기 디지털 노심보호계통(CPCS)의 허용 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. DNBR 여유도 평가를 위한 정상운전 조건은 각각 100%(출력), 564.5F(노심 입구온도), 2250psia(노심압력), 105%(노심유량), 1.50(고온봉 첨두출력)이며 노심 축방향 출력분포는 Fig. 4 와 같이 각 연소도의 대표적인 출력분포를 사용하였다.

Fig. 5 는 주요 연소도에서 각각의 DNBR 계산방법에 따른 DNBR 오차분포를 나타낸 것이다. BOC 의 경우 CETOP-D 와 CETOP2 는 물론이고 MATRA 도 TORC 에 비해 매우 보수적인 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. CETOP-D/CETOP2/MATRA 모두 TORC DNBR 에 비해 평균적으로 약 5% 낮은 DNBR 을 나타냈다. MOC 와 EOC 의 경우 MATRA DNBR 의 평균오차는 0 에 가깝지만 편차가 큰 것을 알 수 있으며 CETOP-D 와 CETOP2 는 BOC 의 경우와 같이 TORC 에 비하여 약 5%정도 보수적인 결과를 보이고 있다. 이는 앞에서 이미 언급한 바와 같이 MATRA 는 부수로 해석코드로 TORC 코드와의 조정작업이 불필요하지만 CETOP-D 와 CETOP2 는 보수적인 조정인자를 사용하기 때문이다. 그리고 MATRA DNBR 계산오차의 편차가 매우 큰 것은 본 계산에 사용한 DNB 상관식과 MATRA 코드의 특성을 보정하지 않았기 때문이다. 일반적으로 DNB 상관식은 부수로 해석코드로 계산된 국부조건을 이용하므로 사용하는 부수로 해석코드의 특성에 맞게 상관식의 계수를 조정해야 한다.

Figs. 6-8 은 각각 BOC, MOC, EOC 에서 DNBR 계산오차의 확률분포를 나타낸다. Fig. 6 에 도시한 BOC 에서의 오차 확률분포는 CETOP-D/CETOP2/MATRA 모두 DNBR 계산오차 평균(μ)이 약 –0.05 인 것을 보여주고 있다. CETOP-D 와 CETOP2 의 DNBR 오차범위는 –0.08~0.0 으로 어떠한 조건에서도 TORC DNBR 보다 작은(보수적인) 것을 확인할 수 있다. MATRA DNBR 의 오차범위는 –0.1 ~ +0.06 으로 다른 그룹수로 해석코드에 비해 매우 큰 것으로 나타났다. Fig. 7 은 MOC 에서의 DNBR 오차 확률분포를 비교한 것으로 CETOP-D 와 CETOP2 의 오차범위는 똑같이 –0.09~+0.01(μ =–0.05)이고 비슷한 확률분포를 나타내고 있다. 그러나 MATRA 의 경우 오차범위가 –0.1~+0.09 로 매우 넓고 평균값(약 –0.03)을 중심으로 양쪽에서 최대 발생확률을 나타내는 확률분포를 보이고 있다. EOC 에서의 DNBR 오차 확률분포(Fig. 8)도 MOC 의 경우와 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. Table 2 는 각각의 경우에 대한 DNBR 오차의 평균과 표준편차를 정리한 것이다.

DNBR 계산오차의 확률분포에 대한 한방향(one-sided) 95/95 상한치(upper tolerance limit)를 결정하기 위해 정규분포시험(normality test)를 수행하였다. 새로운 통계인자 D' 을 이용하여 정규분포시험을 수행하였다[6]. 즉, 시험 통계인자 D' 은 아래와 같이 정의된다.

$$D' = \frac{T}{S} \tag{3}$$

여기서 S 와 T 는 무작위 변수(random variable) x 에 대해 아래와 같이 정의된다.

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x}\right)^2 \tag{4}$$

$$T = \sum_{i=1}^{n} \left\{ i - (n+1)/2 \right\} x_i \tag{5}$$

x_i 는 크기 오름차순으로 정리된 샘플 데이터이며 n 은 샘플 데이터의 개수를 나타낸다. 데이터의 개수와 유의수준(level of significance)에 따라 정규분포 D' 값의 범위가 주어지고 식(3)에 의해 계산된 D' 값이 주어진 범위에 드는 경우 정규분포로 가정할 수 있다. 정규확률분포의 한방향 상한치는 다음과 같이 계산된다.

$$95/95 \text{ 상한치 } = \mu + K_{95/95}\sigma \tag{6}$$

오차의 확률분포가 비정규분포인 경우에는 non - parametric 기법[7]을 이용하여 상한치와 하한치를 결정한다. 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)를 다음과 같이 결정한다.

$$L = np \pm K_{95/95}\left[np(1-p)\right]^{1/2} \tag{7}$$

여기서 p 는 사건이 일어날 확률로 95/95 상한치의 경우 0.05 이며 $K_{95/95}$ 는 한방향 제한치 인자이며 샘플 데이터의 개수가 많은 경우 1.645 의 값을 갖는다.

Table 2 는 정규분포와 non - parametric 기법에 의한 DNBR 계산오차의 상한치를 함께 표시하였다. DNBR 오차 확률분포에 대한 D' 시험을 수행한 결과 모든 분포가 정규분포가 아닌 것으로 판명되었으나 DNBR 오차에 대한 보수적인 보정을 위해 여기서는 큰 값을 사용하였다.

DNBR 해석방법에 따른 DNBR 여유도의 변화를 평가하기 위해 대표적인 정상운전 조건에서 최소 DNBR 을 계산하였다. 상기조건에서 계산된 CETOP - D/CETOP2/MATRA 의 최소 DNBR 은 앞에서 평가된 각 DNBR 계산오차의 상한치를 사용하여 보정하였다. Fig. 9 는 주요 연소도에서 보정된 최소 DNBR 의 변화를 나타낸다. CETOP - D 는 CETOP2(CPC)에 비해 DNBR 여유도를 모든 연소도에서 약 3% 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 그룹수로 해석방법의 주요변수인 전달계수를 CETOP - D 는 운전조건에 따라 계산하지만 CETOP2 는 CETOP - D 와의 조정작업을 통해 미리 결정된 값을 사용하므로 CETOP2 의 불확실도와 보수성이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 CETOP - D 의 노심보호계통 적용은 불확실도 감소로 인한 DNBR 여유도의 증가와 별도의 전달계수 결정과정이 불필요하므로 설계절차를 단순화시키는 장점이 있는 것으로 평가된다. 한편, MATRA 는 BOC 에서 CETOP - D 와 비슷한 DNBR 여유도의 증가를 보이고 있으나 MOC 와 EOC 에서의 증가량은 각각 7.5% 와 9.8%로 현저히 증가하여 TORC 의 결과와 거의 비슷한 최소 DNBR 을 보이고 있다. 이는 본 연구에서 사용한 MATRA 의 부수로 해석모델이 BOC 의 경우 CETOP - D 와 같이 TORC 에 비해 보수적인 DNBR 이 계산되는 특성을 보였으나 MOC 와 EOC 에서는 MATRA 의 보수성이 감소하였기 때문이다(Fig. 5 참조). 따라서 MATRA 코드의 노심보호계통 적용을 위해서는 부수로 해석모델의 최적화가 필수적이며 반경방향 출력분포의 변화에 따른 부수로 해석모델의 보수성도 함께 고려해야 한다.

DNBR 계산시간은 CETOP-D 와 CETOP2 의 경우 Pentium-4 PC 에서 약 0.05 초이고 MATRA 는 약 0.5 초로 나타났다. 국내원전에 운용중인 디지털 노심보호계통(CPCS)의 DNBR 계산간격은 2 초이다. 그러나 DNBR 계산모듈의 입출력 처리시간 및 발전소 컴퓨터의 성능을 고려하면 실시간 DNBR 계산이 Pentium-4 PC 에서 약 0.2 초 이내로 완료되어야 할 것으로 보인다. 따라서 노심보호계통의 실시간 DNBR 계산요건을 만족시키기 위해서는 MATRA 코드의 경우 부수로 해석모델의 보수성 확보와 더불어 계산시간의 단축을 위한 수치해법의 개선 또는 발전소 컴퓨터의 성능향상이 요구된다.

4. 결론

가압경수로용 개량형 디지털 노심보호계통의 최적 DNBR 계산방법을 결정하기 위하여 부수로 해석코드 MATRA 와 최적 노심열수력 설계코드인 그룹수로 해석코드 CETOP-D 를 국내원전의 노심보호계통에서 이용하고 있는 단순화된 그룹수로 해석코드 CETOP2 와 비교하였다. 영광 3-4 호기 초기노심의 다양한 운전조건에서 DNBR 계산을 수행하여 DNBR 계산 불확실도와 DNBR 여유도를 평가하였다. MATRA 코드는 DNBR 오차의 평균이 작으나 표준편차가 크게 나타났으며 CETOP-D 와 CETOP2 의 경우 DNBR 오차의 평균이 보수적인 방향으로 크게 치우쳐져 있으며 표준편차는 MATRA 에 비해 작게 나타났다. DNBR 계산방법의 불확실도를 포함하여 평가된 CETOP2 대비 정상운전 조건에서의 DNBR 여유도의 증가량은 각각 2.5%-3.3%(CETOP-D)와 2.5%-9.8%(MATRA)이다. DNBR 계산시간은 CETOP-D 와 CETOP2 의 경우 Pentium 4 PC 에서 약 0.05 초이고 MATRA 는 약 0.5 초로 나타났다. MATRA 코드의 노심보호계통 적용을 위해서는 계산시간의 단축과 보수성을 확보하기 위한 부수로 해석방법의 수립이 필요하다. CETOP-D 방법은 기존 실시간 DNBR 계산방법에 비해 DNBR 여유도를 증가시키고 설계절차를 간소화시키며 DNBR 보수성 및 실시간 계산시간 요건도 만족하는 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업인 원전계측제어시스템개발사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

5. 참고문헌

[1] 유연종, 황대현, “부수로 해석 코드 MATRA 개발,” KAERI/TR-1033/98, 1998.
[2] Combustion Engineering Inc., “CETOP-D Code Structure and Modeling Methods for Arkansas Nuclear One – Unit 2,” CEN-214(A), 1982.
[3] Combustion Engineering Inc., “TORC Code, A Computer Code for Determining the Thermal Margin of a Reactor Core,” CENPSD-161, 1975.
[4] 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.
[5] 황대현, 서경원, 지성균, “SMART 노심 부수로 해석코드 체계 개발 및 평가,” KAERI/TR-2034/2002, 2002.
[6] ANSI, “Assessment of the Assumption of Normality,” ANSI N15.15, 1974.
[7] R. E. Walpole and R. H. Myers, “Probability and Statistics for Engineers and Scientists 2ed,” Macmillan Publishing Company, Inc., New York, 1978.

Table 1. DNBR 계산 노심 운전조건(영광 3 - 4 호기)

운전인자	단위	운전범위
노심 출력	% of rated power	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

Table 2. DNBR 계산오차에 대한 각 통계인자

연소도	해석코드	평균 (μ)	표준편차 (σ)	95/95 상한치	
				정규분포	비정규분포
BOC	CETOP2	- 0.0528	0.0113	- 0.0342	- 0.0300
	CETOP - D	- 0.0537	0.0108	- 0.0359	- 0.0374
	MATRA	- 0.0519	0.0243	- 0.0119	- 0.0096
MOC	CETOP2	- 0.0498	0.0169	- 0.0221	- 0.0213
	CETOP - D	- 0.0560	0.0180	- 0.0264	- 0.0321
	MATRA	- 0.0293	0.0440	0.0425	0.0322
EOC	CETOP2	- 0.0509	0.0187	- 0.0202	- 0.0193
	CETOP - D	- 0.0534	0.0185	- 0.0230	- 0.0300
	MATRA	- 0.0266	0.0429	0.0438	0.0312

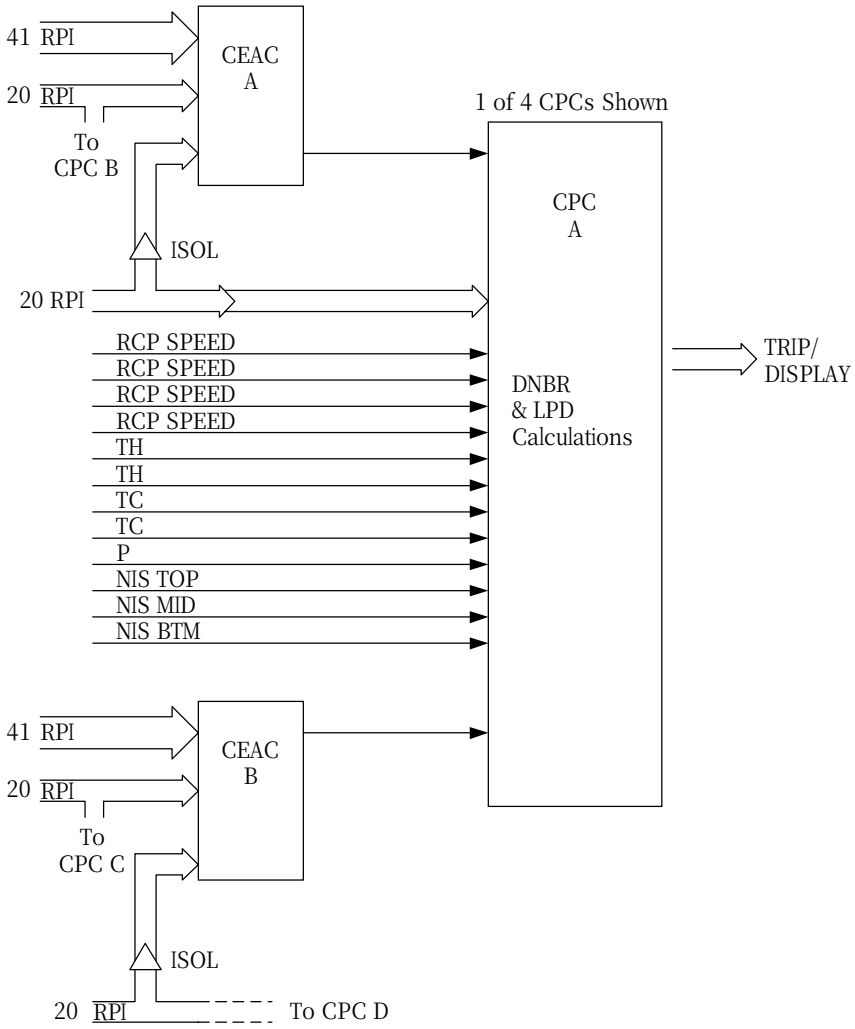

Fig. 1 디지털 노심보호계통 CPCS 의 개략도

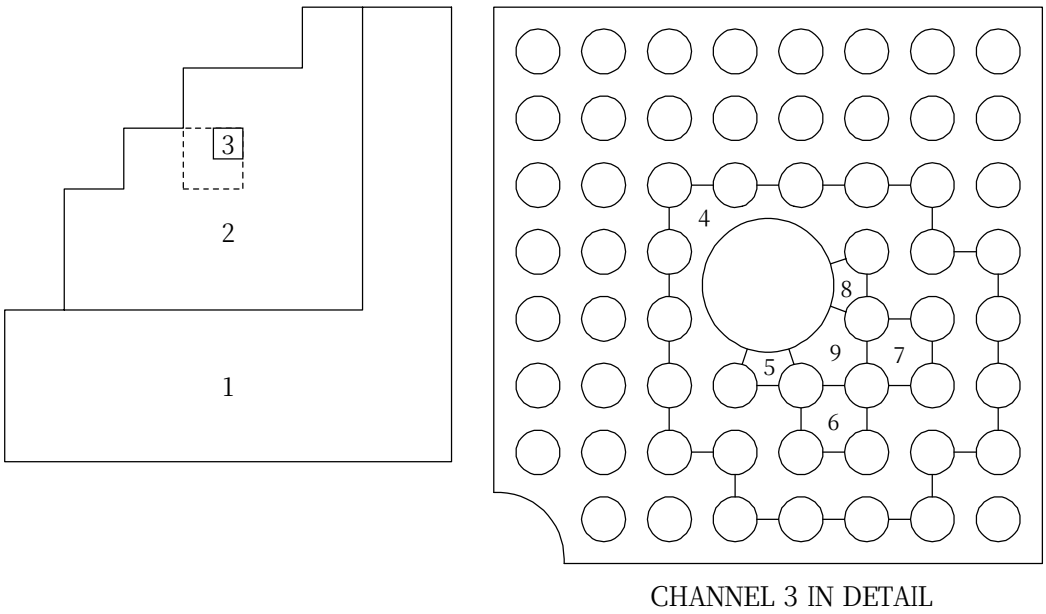

Fig. 2 MATRA 부수로 해석모델 (영광 3 - 4 호기)

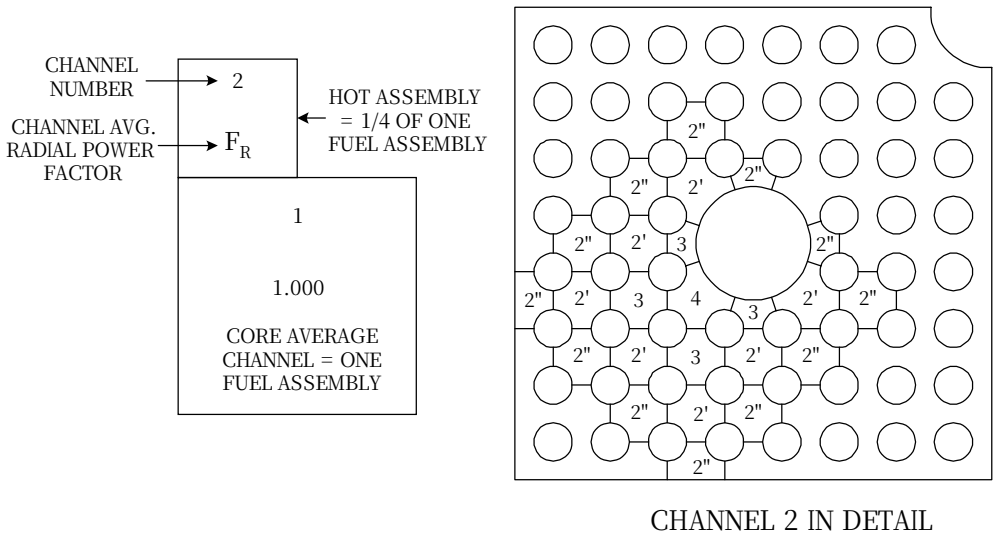

Fig. 3 CETOP D 4 - 그룹수로 해석모델

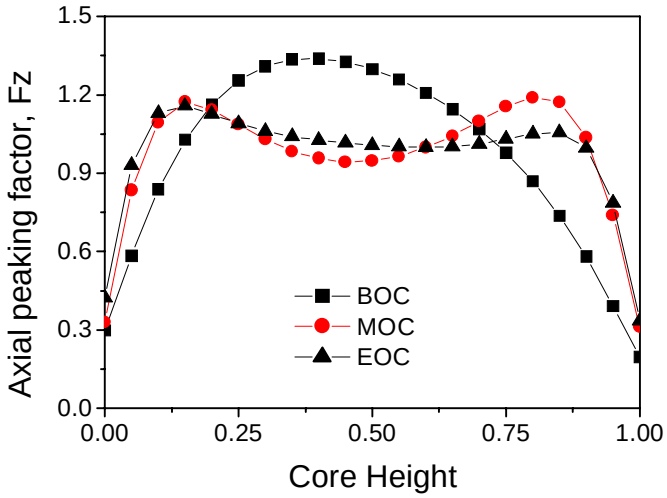

Fig. 4 DNBR 계산에 사용된 대표적인 축방향 출력분포

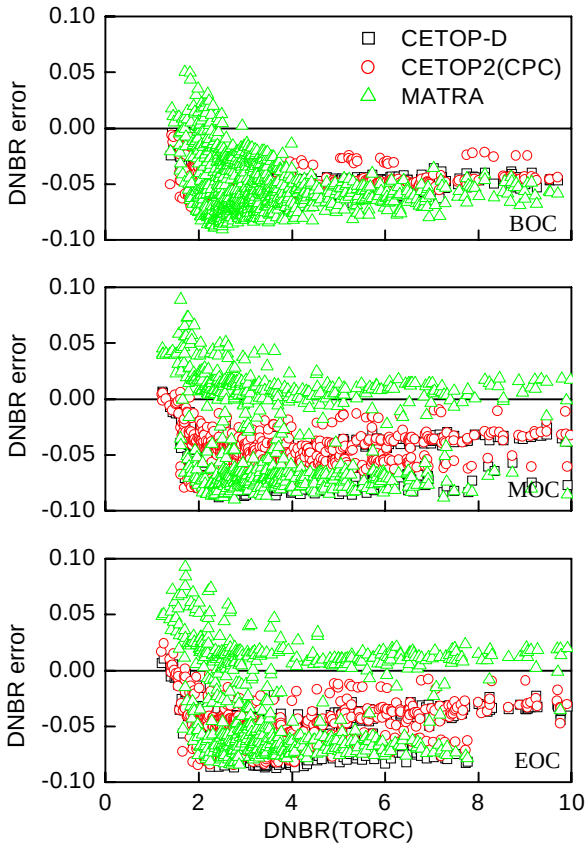

Fig. 5 DNBR 계산오차 분포

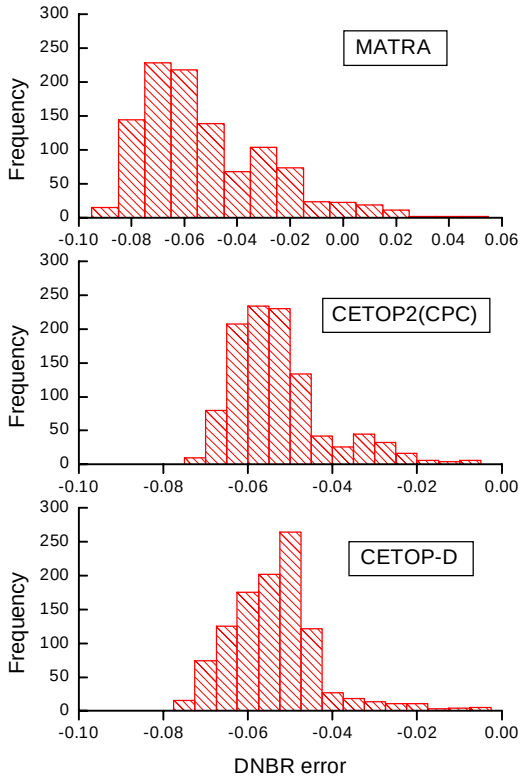

Fig. 6 DNBR 계산오차 확률분포(영광 3 - 4 호기 1 주기 BOC)

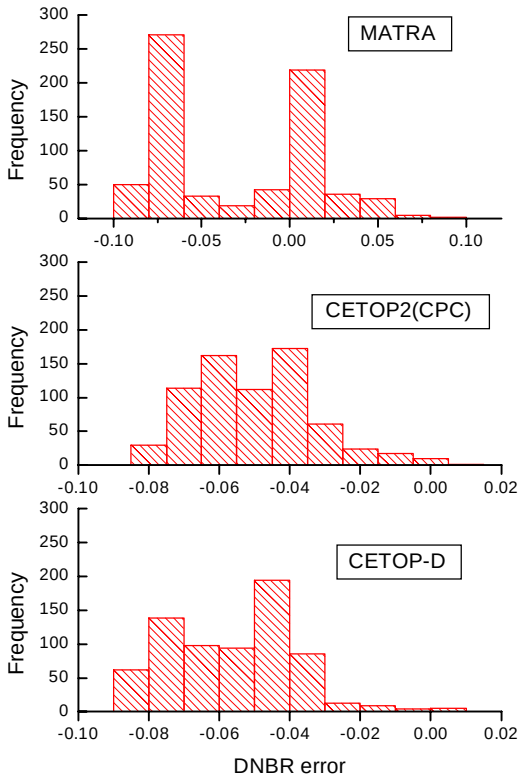

Fig. 7 DNBR 계산오차 확률분포(영광 3 - 4 호기 1 주기 MOC)

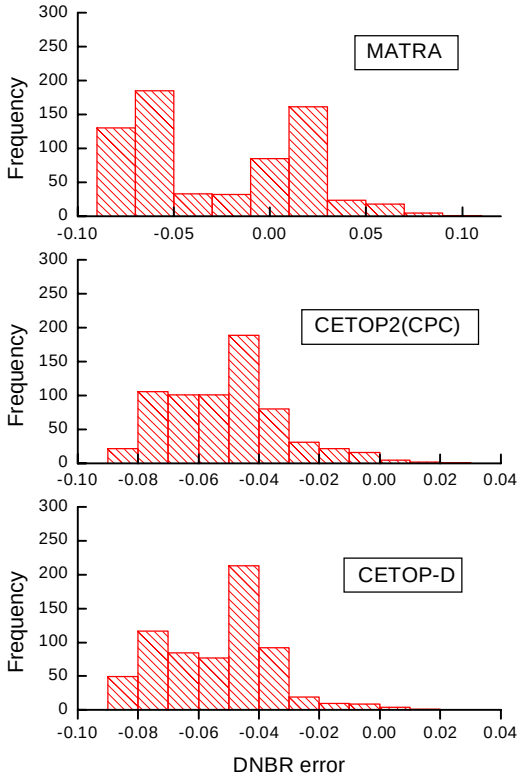

Fig. 8 DNBR 계산오차 확률분포(영광 3 - 4 호기 1 주기 EOC)

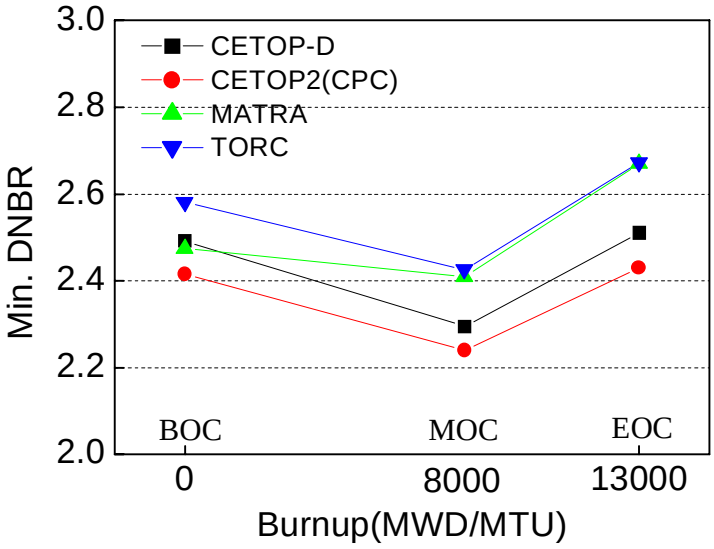

Fig. 9 노심 최소 DNBR 비교 (영광 3 - 4 호기 1 주기)