

다수로 해석 모델의 실시간 노심감시계통 적용 가능성 연구

Feasibility Study of Applying a Multi-channel Analysis Model to On-line Core Monitoring System

인왕기, 유연중, 황대현, 진태현

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

다수로 해석 모델의 실시간 노심감시계통 적용 가능성을 고찰하기 위해 단순 그룹수로 해석 모델과의 비교-분석을 수행하였다. 기존의 상용 디지털 가압경수로의 실시간 노심감시계통에서는 최소 DNBR의 실시간 계산을 위해 단순화된 그룹수로 해석 모델을 사용하고 있다. 이러한 단순 그룹수로 해석 모델을 다수로 해석 모델로 대체하는 경우 설계절차와 열적여유도 및 계산시간 등의 변화를 고찰하였다. 영광 3 호기 1 주기 정상운전 허용범위 이내의 다양한 운전조건에서 단순 그룹수로 해석 코드인 CETOP-D와 다수로 해석 코드인 MATRA를 비교하였다. DNBR 계산의 정확성과 보수성을 확보하기 위해 CETOP-D 코드는 상세 부수로 해석코드와의 사전 조정과정이 필요하지만 MATRA 코드는 이 과정이 생략된다. MATRA는 CETOP-D에 비해 DNBR 과출력 여유도를 2.5%-6% 증가시키는 것으로 평가되었다. MATRA의 DNBR 계산시간은 워크스테이션 HP9000에서 약 1초로 CETOP-D보다는 다소 느리지만 실시간 노심 DNBR 감시에는 충분히 빠른 편이다. 따라서 MATRA 다수로 해석 모델의 실시간 노심감시계통 적용이 가능한 것으로 판단된다.

Abstract

A feasibility study was performed to evaluate the effect of implementing a multi-channel analysis model in on-line core monitoring system. A simplified thermal-hydraulic model has been used in the on-line core monitoring system of digital PWR. The design procedure, core thermal margin and computation time were investigated in case of replacing the simplified model with the multi-channel analysis model. For the given ranges of limiting conditions for operation in Yonggwang Unit 3 Cycle 1, the minimum DNBR of the simplified thermal-hydraulic code CETOP-D was compared to that of the multi-channel analysis code MATRA. A CETOP-D tuning is additionally required to ensure the accurate and conservative DNBR calculation but the MATRA tuning is not necessary. MATRA appeared to increase the DNBR overpower margin from 2.5% to 6% over the CETOP-D margin. MATRA took approximately 1 second to compute DNBR on the HP9000 workstation system, which is longer than the DNBR computation time of CETOP-D. It is, however, fast enough to perform the on-line monitoring of DNBR. It can be therefore concluded that the application of the multi-channel analysis model MATRA in the on-line core monitoring system is feasible.

1. 개요

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

통해 이루어지고 있다. 부수로 해석은 제어체적인 부수로내의 속도와 온도분포 등의 미세한 유동 구조를 무시하고 부수로의 평균 유량과 유체온도를 계산하는 방식이다. ABB CE사는 빠르고 정확한 DNBR 계산을 위하여 단순 그룹수로 해석 모델을 바탕으로 하는 CETOP-D^[1] 코드를 개발하여 연광 3,4 호기 등 다수의 상용 디지털 가압경수로 열수력 설계에 적용하고 있다. CETOP-D 코드는 인접한 부수로 사이의 횡류와 난류혼합 효과를 고려하기 위해 전달계수(transport coefficients)를 사용하고 지배 방정식의 해를 실시간으로 얻기 위해 ‘prediction-correction’ 방법을 이용한다. 그리고 CETOP-D 코드 계산결과의 보수성을 위해 상세 부수로 해석 코드인 TORC^[2] 계산결과와 비교하여 결정된 보정인자를 사용한다. 또한 실시간 노심 최소 DNBR 계산을 위해 CETOP-D 모델보다 더욱 단순화된 그룹수로 해석 모델인 CETOP^[3]을 개발하여 디지털 실시간 노심감시시스템인 COLSS에 적용하고 있다. 한편, 한국원자력연구소가 개발중인 MATRA^[4] 코드는 부수로 해석을 바탕으로 정상 상태 및 과도상태에서의 노심 엔탈피와 유동분포를 계산하기 위한 열수력 부수로 해석 코드이다. 이 코드는 COBRA-IV-I를 토대로 하여 다양한 기능과 모델을 개선하여 보다 편리한 사용자 환경을 제공하고 정확도를 향상시켰다.

매우 단순화된 그룹수로 해석 코드인 CETOP을 이용한 디지털 노심감시시스템에서의 실시간 DNBR 계산은 정상 운전조건에서 지나치게 보수적으로 이루어져 궁극적으로 DNBR 여유도를 감소시키는 요인이 되고있다. 이는 광범위한 운전조건에서 CETOP 코드의 보수성을 확보하기 위해 고온다발 입구 유량 조정인자를 사용하기 때문이다. 충분한 DNBR 여유도의 확보는 운전여유도의 증가를 뜻하며 나아가서 안전해석을 포함한 노심설계의 여유도를 증가시키고 설계절차의 단순화와 설계일정의 단축을 가능케 한다. 특히 한국원자력연구소가 개발중인 일체형원자로인 SMART는 무봉산 운전으로 인해 제어봉 삽입운전이 필수적이므로 기존 상용 가압경수로보다 많은 DNBR 여유도의 확보가 요구된다. 따라서 DNBR 여유도 향상을 위해 노심 장전모형의 최적화와 노심입구 온도 강하, 노심출력분포 계산 모델과 DNBR 계산 모델의 개선 등 다각적인 노력이 이루어지고 있다. 무엇보다도 컴퓨터 성능의 눈부신 향상으로 인해 다소 복잡하지만 보다 정확한 노심출력분포와 DNBR 계산 모델의 실시간 적용 가능성이 높아졌다. 이 연구에서는 디지털 실시간 노심감시시스템의 그룹수로 해석 코드인 CETOP을 다수로 해석 코드인 MATRA로 대체하는 경우의 설계절차와 DNBR 여유도 및 계산시간 등을 평가하기 위해 CETOP과 유사한 CETOP-D와 MATRA를 비교-분석하였다.

2. 부수로 해석모델

CETOP-D는 노심을 단순화된 4개의 수로(channel)로 모델링하여 최소 DNBR을 신속하게 예측하기 위해 개발되었다. Figure 1은 4개의 수로 모델을 나타내는 것으로 수로 1은 노심평균 조건을 갖는 하나의 핵연료다발을 뜻하며 수로 2는 고온다발의 1/4 크기로 표시된다. 수로 1과 수로 2 사이에서는 횡류혼합만 고려되고 난류혼합은 수로 2 내부에서만 고려된다. 고온다발 수로 2는 수로 3과 4를 포함하고 있다. 수로 4는 최소 DNBR이 발생하는 단일의 고온 부수로이고 수로 3은 수로 4에 인접한 부수로들로 정의된다. 수로 2와 수로 3 사이의 엔탈피와 운동량 혼합을 보다 정확하게 계산하기 위해 경계 부수로(boundary subchannel; 수로 2', 2'')를 모델링하였다. 고온 부수로의 위치는 상세 부수로 해석코드인 TORC에 의해 결정된다. 이와 같이 반경방향으로 그룹화된 부수로 모델링을 이용한 노심 열수력 계산을 위해 3차원 전달계수(transport coefficient) 개념을 도입하였다. 즉 Fig. 1의 수로 2와 수로 3과 같이 그룹화된 부수로 사이의 엔탈피와 운동량의 전달현상을 모델링하기 위해 다음과 같이 정의된 전달계수를 이용하여 질량, 운동량 그리고 에너지 보존 방정식을 표현하였다.

$$N_H = \frac{H_I - H_J}{h_I - h_J} \quad (1)$$

$$N_U = \frac{U_I - U_J}{u_I - u_J} \quad (2)$$

$$N_P = \frac{P_I - P_J}{p_I - p_J} \quad (3)$$

여기서 N_H , N_U 와 N_P 는 각각 엔탈피, 축방향 유속과 압력에 대한 전달계수를 뜻한다. 기호 H , U , P 는 그룹수로 I, J 의 엔탈피, 유속, 압력을 나타내고 기호 h, u, p 는 그룹수로의 경계 부수로(boundary subchannel)의 엔탈피, 유속, 압력을 각각 나타낸다. 상세 부수로 해석코드인 TORC와 비교결과 계산된 노심 유동 인자들(엔탈피, 유속, 압력 등)이 N_U 와 N_P 에 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 TORC를 사용하여 결정될 수 있으나 N_H 값은 노심 운전조건에 따라 CETOP-D 자체적으로 계산된다. CETOP-D 코드의 다른 특징은 계산시간을 단축시키기 위해 기존의 반복적 수치해법이 아닌 'prediction-correction' 수치해법을 이용한 것이다. 하류에서의 인접수로 사이의 횡류 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-D 계산 DNBR의 보수성을 유지하기 위해 고온다발 수로에 대한 입구유량 조정인자를 사용하고 있다. 따라서 입구유량 조정인자를 결정하기 위한 별도의 과정이 필요하다.

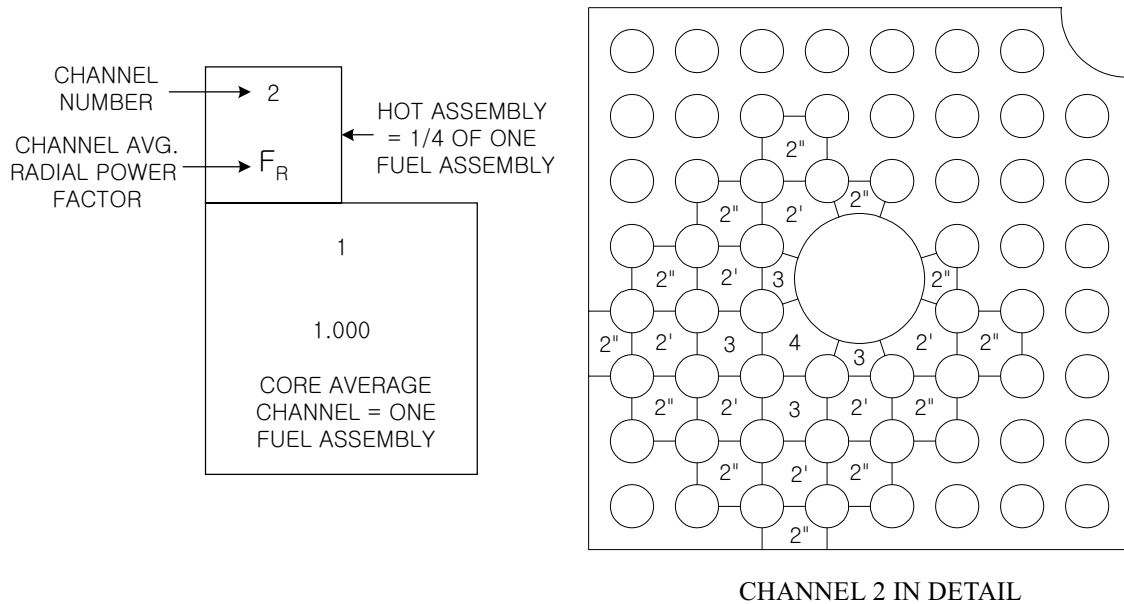


Fig. 1 CETOP-D 수로 모델

MATRA(Multichannel Analyzer for steady states and Transients in Rod Arrays)는 정상상태와 과도상태 시 핵연료다발 내부의 엔탈피와 유동분포를 예측하기 위한 부수로 해석코드이다. 이 코드는 기존의 부수로 해석 코드인 COBRA-IV-I의 일부 모델과 기능을 개선하여 정확성을 향상시키고 편리한 사용자 환경을 조성하였다. 비정방형 집합체 노심에 대한 압력강하 모델과 적용범위가 넓은 기포

율(void fraction) 모델이 추가되었고, 2 상유동 조건에서 횡방향 전달 현상의 정확성 제고를 위한 난류혼합 모델과 기포 이동 모델을 적용하였다. 입력과 출력 단위 선택 기능과 유체의 물성치 함수 사용기능 및 비균일 축방향 노드 선택 기능도 추가되었다. Figure 2는 노심유량 분포와 반경방향 출력분포 특성을 고려한 MATRA 코드의 다수로 해석 모델을 나타낸다. MATRA 코드는 1 단계 부수로 해석코드로 노심평균 그룹수로 1과 고온다발 수로 3, 수로 1과 수로 3 사이의 중간수로 (buffer channel) 2 그리고 고온다발 수로 내부의 수로들로 모델링 되었다. 고온다발 수로는 핫-핀 주변의 고온 부수로 9와 그 주변 부수로 5-8 및 그룹화된 중간수로 4로 이루어져 있다. 이러한 MATRA 수로 모델은 DNBR 계산의 정확성을 높이고 계산시간도 단축시킬 수 있도록 구성된 것이다.

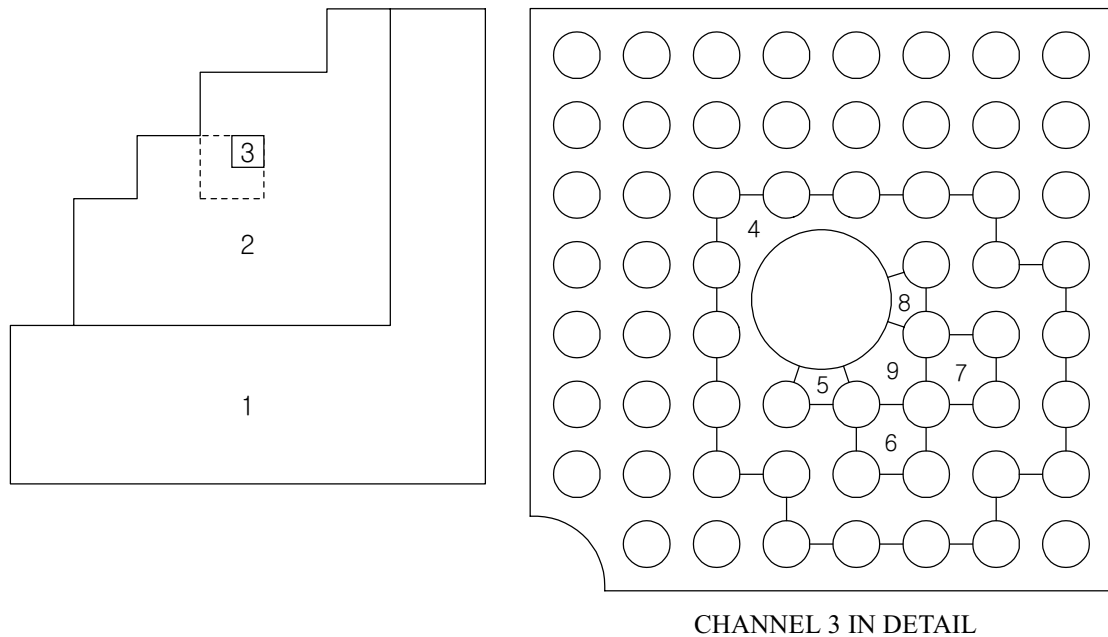


Fig. 2 MATRA 그룹 다수로 해석 모델

3. 결과 및 고찰

MATRA 다수로 해석 모델의 실시간 노심감시계통에의 적용 타당성을 평가하기 위해 다양한 노심운전 조건에서 DNBR 계산을 수행하였다. 상세 부수로 해석 코드인 TORC를 이용하여 기준 DNBR 계산을 수행하고 앞 절의 부수로 해석모델을 사용하여 각각 CETOP-D와 MATRA의 DNBR 계산을 실시하였다. CETOP-D의 경우 DNBR 계산의 정확성과 보수성을 확보하기 위한 별도의 고온수로 입구 유량조정 작업이 우선적으로 수행되었다. 디지털 상용 가압경수로의 일반적인 정상운전 조건(Table 1)에서 TORC와 CETOP-D 및 MATRA의 최소 DNBR 계산결과를 각각 비교하였다. 영광 3 호기 1 주기 노심의 주요 연소도(BOC, MOC, EOC)에서의 노심 축방향 출력분포와 일정한 반경방향 출력분포를 사용하여 DNBR 계산을 수행하였다.

Figure 3은 영광 3 호기 1 주기 노심의 주요 연소도에서 최소 DNBR 계산결과를 비교한 것이다. 모든 연소도에서 CETOP-D 최소 DNBR은 TORC 결과에 비해 매우 보수적으로 예측되는 것을 알 수 있다. 이는 TORC에 대한 CETOP-D 조정과정, 즉 광범위한 정상운전 조건에서 CETOP-D 최소

DNBR 이 TORC 최소 DNBR 보다 항상 작도록 CETOP-D 고온다발 수로의 유량을 줄였기 때문이다. 한편 MATRA 최소 DNBR 은 BOC 에서 CETOP-D 최소 DNBR 보다 다소 낮게 예측되었으나 MOC 와 EOC 에서는 TORC 결과에 더욱 근접하게 나타났다. 이는 CETOP-D 의 경우 기준 상세 부수로 해석 코드인 TORC 에 대해 사전 DNBR 계산 조정작업이 이루어진 반면, MATRA 의 경우에는 이러한 조정과정을 거치지 않은 것을 고려하면 MATRA 의 DNBR 계산이 매우 정확하다는 것을 보여준다. 즉, MATRA 는 노심 유량분포와 반경방향 출력분포 특성만을 고려한 그룹 다수로 모델을 이용하므로 상세 부수로 해석 모델에 비해 비교적 정확하고 빠른 DNBR 계산이 가능하다. 따라서 MATRA 코드의 이용에 있어서 노심 유량분포와 출력분포에 적합한 그룹 다수로 모델의 구성이 매우 중요하다.

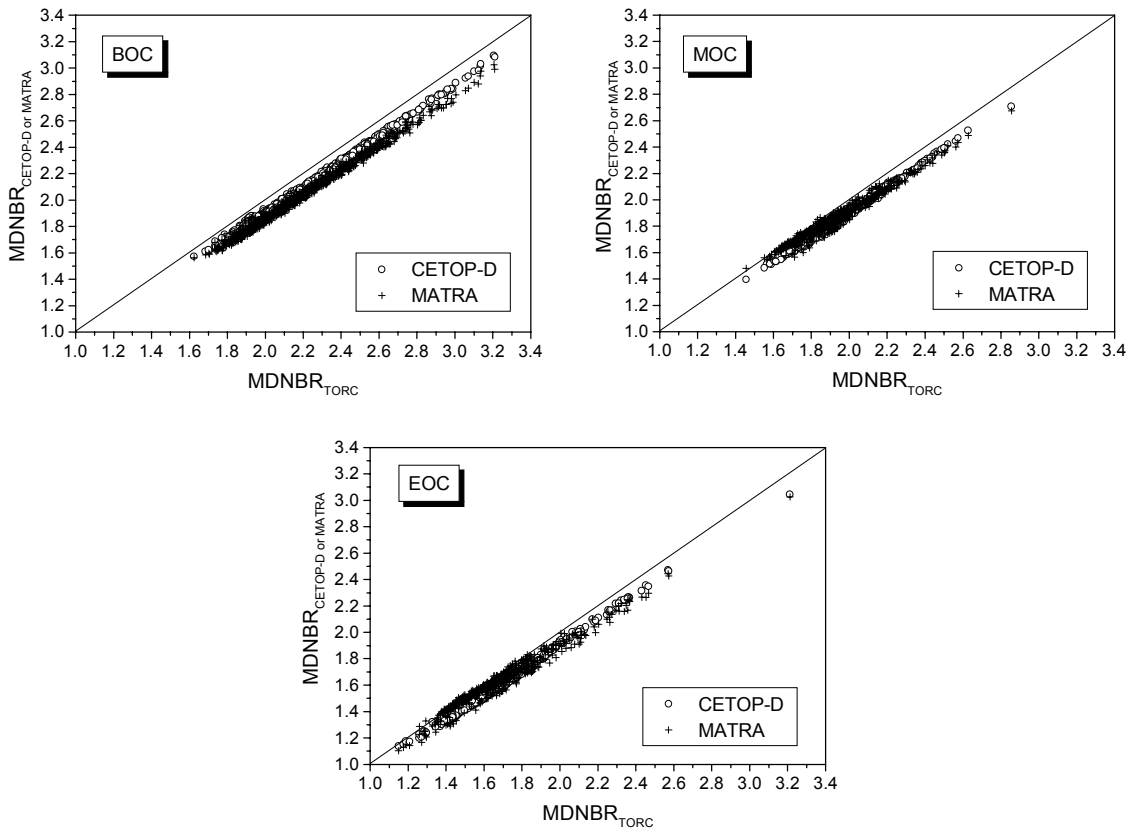


Fig. 3 MDNBR 비교 결과 (영광 3 호기 1 주기)

영광 3 호기 1 주기 BOC 와 EOC 에서의 CETOP-D 와 MATRA 각각의 TORC 에 대한 DNBR 오차 확률분포는 Fig. 4 와 같다. EOC 에서의 MATRA DNBR 오차 확률분포를 제외하고는 모두 Gaussian 분포를 나타내고 있다. BOC 의 MATRA DNBR 오차 평균은 CETOP-D 에 비해 약 2% 증가하였으나 EOC 에서는 약 2% 감소하였다. 각각의 연소도에서의 DNBR 평균오차와 표준편차 및 95% 확률과 95% 신뢰도의 상한치(upper tolerance limit)는 Table 2 와 같다. 95/95 상한치는 기준코드인 TORC 에 대한 CETOP-D 혹은 MATRA 로 계산된 DNBR 의 전반적인 예측경향을 나타내는 수치로서 열적여유도를 평가할 때 이를 고려해야 한다. BOC 에서는 CETOP-D 에 비해 MATRA DNBR 평균오차와 표준편차가 다소 커서 MATRA 의 DNBR 계산이 다소 보수적으로 나타났다. 즉 BOC 에서 CETOP-D 는 TORC 보다 약 3.9% 낮게 DNBR 을 예측하는데 비해 MATRA 는 약 5.3% 낮게 예측하고 있다. 그러나 MOC 와 EOC 에서는 MATRA DNBR 오차의 표준편차가 여전히 약간 크게 나

타났으나 평균오차가 감소하여 MATRA의 DNBR 계산 정확성이 향상된 것을 알 수 있다. CETOP-D DNBR 오차는 각각 -3.3%(MOC)와 -2.8%(EOC)이며 MATRA DNBR 오차는 0.1%와 2.4%로 나타났다. 이러한 CETOP-D와 MATRA 각각의 DNBR 계산 불확실도를 고려하여 대표적인 노심 정상운전 조건에서의 DNBR 과출력 여유도(overpower margin)를 비교하였다. MATRA의 DNBR 과출력 여유도는 CETOP-D에 비해 2.5%에서 6%까지 증가하는 것으로 나타났다. 이는 대표적인 노심 정상운전 조건에서의 CETOP-D DNBR 계산이 매우 보수적이고 노심출력 변화에 대한 CETOP-D DNBR의 민감도(sensitivity)가 크기 때문이다.

MATRA의 DNBR 계산시간은 워크스테이션 HP9000에서 약 1초로 CETOP-D보다는 다소 느리지만 영광 3/4 호기 등의 디지털 실시간 노심감시계통에서의 DNBR 계산이 30초마다 실행되는 것을 고려하면 실시간 노심 DNBR 감시에는 충분히 빠른 편이다. 또한 CETOP-D처럼 기준 상세설계 부수로 해석 코드를 이용한 DNBR 계산의 조정과정이 별도로 필요하지 않고 DNBR 과출력 여유도를 증가시킬 수 있으므로 MATRA 방법론의 실시간 노심감시계통 적용은 매우 유용할 것으로 판단된다. 그러나 MATRA를 CETOP-D의 대체모델로서 실시간 노심 DNBR 계산에 적용하기 위해서는 노심입구 유량분포 및 반경방향 출력분포의 변화를 고려한 그룹 다수로 모델의 일반적인 구성방안에 대한 추가의 연구가 필요하다.

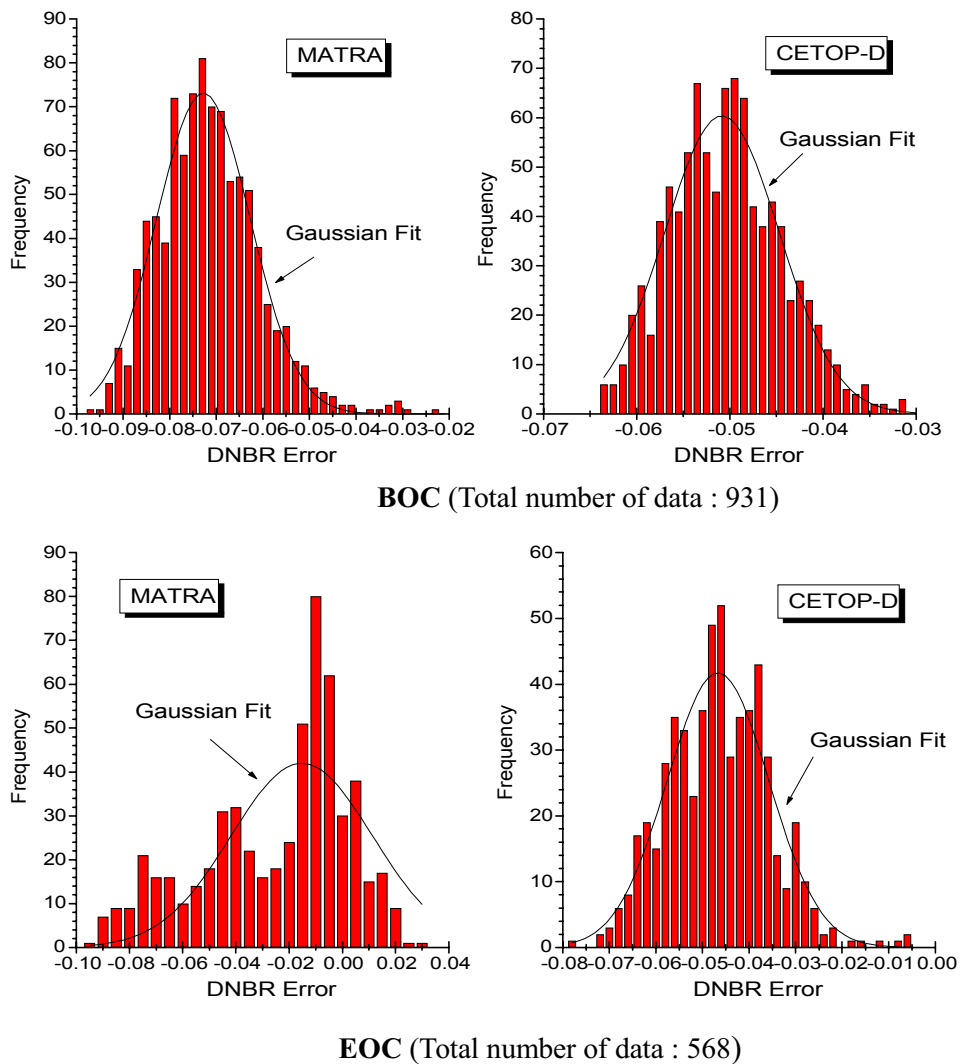


Fig. 4 MDNBR 오차 확률분포 (영광 3 호기 1 주기)

4. 결론

노심 열수력 코드인 MATRA 의 그룹 다수로 해석 모델을 CETOP-D 의 대체모델로서 실시간 노심 감시계통 적용 가능성을 진단하기 위해 단순 그룹수로 해석 모델인 CETOP-D 코드와의 비교-분석을 수행하였다. CETOP-D 는 전달계수 개념을 이용한 단순 그룹수로 모델로 DNBR 계산의 정확성과 보수성을 확보하기 위해 기준 상세 부수로 해석모델과의 최소 DNBR 조정과정이 별도로 필요하지만 그룹 다수로 해석모델을 이용한 MATRA 는 이와 같은 별도의 조정과정을 필요로 하지 않는다. 영광 3 호기 1 주기 정상운전 허용범위 이내의 다양한 운전조건에서 단순 그룹수로 해석 코드인 CETOP-D 와 다수로 해석 코드인 MATRA 를 비교하였다. MATRA 는 CETOP-D 에 비해 DNBR 과출력 여유도를 2.5%-6% 증가시키는 것으로 평가되었다. MATRA 의 DNBR 계산시간은 워크스테이션 HP9000 에서 약 1 초로 CETOP-D 보다는 다소 느리지만 실시간 노심 DNBR 감시에는 충분히 빠르다. 따라서 MATRA 의 실시간 노심감시계통 적용은 설계절차를 단순화하고 열적 여유도를 증가시킬 것으로 기대된다. 향후 노심입구 유량분포 및 반경방향 출력분포의 변화를 고려한 그룹 다수로 모델의 일반적인 구성방안이 마련되면 MATRA 의 실시간 노심감시계통에의 적용은 매우 유용할 것으로 판단된다.

기호설명

h	경계 부수로 엔탈피
H	그룹수로 엔탈피
p	경계 부수로 압력
P	그룹수로 압력
u	경계 부수로 축방향 유속
U	그룹수로 축방향 유속

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,

Table 1 DNBR 계산 노심 정상운전 조건

운전인자	단위	운전범위
노심 출력	% rated power	20 – 110
노심 입구온도	°C	288 – 300
노심 압력	MPa	13.8 – 15.9
노심 유량	% design	70 – 120
노심 축방향 출력분포	ASI	-0.3 - +0.3

Table 2 DNBR 계산 오차* 비교 (영광 3 호 1 주기)

연소도 (total # of data)	코드	평균 (μ)	표준편차 (σ)	95/95 상한치 ($\mu + K_{95/95}\sigma$)
BOC (931)	CETOP-D	-0.0502	0.0063	-0.0393
	MATRA	-0.0716	0.0107	-0.0531
MOC (583)	CETOP-D	-0.0486	0.0088	-0.0332
	MATRA	-0.0350	0.0207	0.0012
EOC (568)	CETOP-D	-0.0466	0.0108	-0.0276
	MATRA	-0.0249	0.0277	0.0239

* $MDNBR_{CETOP-D \text{ or } MATRA} / MDNBR_{TORC} - 1.0$