

'2003 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

On-line 노심 감시계통과 제어계통의 통합에 대한 예비 연구
A Preliminary Study of Combining the On-line Core Monitoring System
and Control System

이기복, 장진욱, 김영일
한국원자력연구소
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150 번지

나만균
조선대학교
501-759 광주광역시 동구 서석동 375 번지
magyna@chosun.ac.kr

이윤준
제주대학교
690-756 제주도 아라 1동 1 번지

요약

대부분의 상용 원자로는 안전한 운전을 위하여 노심에 부분적으로 설치된 노내계측기의 신호를 이용하여 온라인으로 3차원 출력분포를 평가한 후, 이를 바탕으로 노심선출력밀도(LPD)나 핵비등이탈률(DNBR)과 같은 안전제한치 또는 축방향 출력분포 인자(ASI or AO), 사분면 출력경사도와 같은 노심감시인자가 제한 조건을 만족하는 지 여부를 감시하고 있다. 원자로의 노심 제어계통은 정해진 운전 전략에 따라 원자로가 안전하게 운전되도록 계측된 발전소 자료들, 예를 들면 냉각재 입구온도, 제어봉 위치, 붕소농도, 냉각재 유량, 출력 준위 등등을 평가하여 노심보호감시 인자가 운전제한치내에 존재하도록 다음 단계의 운전 조건을 정하고 있다. 이 논문은 노심설계코드와 연계하여 온라인으로 작동하는 새로운 노심 감시계통과 원자로 제어계통을 통합하는 방법론과 모의 계산 결과에 대하여 기술하고 있다.

이 방법을 영광 3호기 노심에 대해 예비 검증계산을 수행한 결과, 노심 감시계통과 제어계통의 통합이 적절하게 작동하고 있음을 확인하였으며, 통합된 감시계통을 통하여 노심선출력밀도 생산용 노심 3차원 첨두출력값과 핵비등이탈률 계산용 가상고온봉 축방향 출력분포값이 최적계산값(best-estimated value)보다 보수적이면서 또한 기존 방법보다는 운전여유도를 크게 확보할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

Most commercial power reactors estimate the 3-D power or flux distribution for the safe operation by using some types of fixed or movable in-core detectors partially installed in the reactor. Based on the on-line power measurement information, the safety limits such as linear power density(LPD), departure from nuclear boiling ratio(DNBR) or the core monitoring parameters such as axial shape index(ASI) or axial offset(AO), quadrant tilt etc. are continuously monitored to ensure that they are not violated during operation. The control system of a power plant determines the next step conditions of reactor operation for the safety parameters be in operation limits through the controlled operation strategy based on the plant measured data such as inlet coolant temperature, control rod positions, soluble boron concentration, coolant flow rate, power level etc. This paper describes the combining method of the enhanced core monitoring system and the plant control system coupled with the core design computer code and the results of preliminary simulation test.

Based on the preliminary simulation results for the Yonggwang-3 nuclear power plant(YGN-3) Cycle-1 core, it is confirmed that the combining of the core monitoring system and the control system can be properly performed. Also through the combined core monitoring system, it is found that the three dimensional peaking factor to calculate the LPD and the pseudo hot-pin axial power distribution to calculate the DNBR show the more conservative values than those of the best-estimated core design code, and the developed methodology can secure the more operation margin than the conventional methodology.

1. 서론

상용 대형원자로는 원자로의 안전한 운전을 위하여 발전소 주요 기기 부품에 온도, 압력, 유량 등을 측정하는 계측기를 설치하고 있다. 발전소 감시계통은 이들 계측기로부터 측정된 발전소 운전 변수 자료를 수집하고 분석하여 기기의 건전성과 발전소의 운전 상태에 대한 정보를 제공한다. 특히 원자로 노심에는 기계적, 물리적 이유로 정해진 몇 개의 연료집합체에 노내계측기가 고정형이나 이동형으로 설치되어 노심 3차원 출력을 평가하고 이를 바탕으로 노심선출력밀도(LPD)나 핵비등이탈률(DNBR)과 같은 안전제한치 또는 축방향 출력분포인자(ASI or AO), 사분면 출력경사도(Quadrant Tilt)와 같은 노심감시인자가 제한 조건을 만족하는 지 여부를 감시하고 있다[1]. 노심 감시계통은 원자로 노심 상태를 효율적으로 감시하고, 운전원이 규정된 운전제한조건의 범위내에 노심 상태를 유지할 수 있도록 선출력밀도 여유도, 핵비등이탈률 여유도, 전 노심출력, 사분 출력 경사비, 축방향 출력편차 등 운전 변수를 지속적으로 계산하여 계산 값을 해당 운전제한치와 비교하여 경보를 제공한다. 운전 제한치들은 노내계측기 신호와 감시하는 노심 상태에 대해 생산된 상수를 이용하여 생산된

노심 3차원 출력분포로부터 계산된다.

원자로의 제어계통은 정해진 운전 전략에 따라 원자로가 안전하게 운전되도록 계측된 발전소 자료들, 예를 들면 냉각재 입구온도, 제어봉 위치, 붕소농도, 냉각재 유량, 출력 준위 등등을 평가하여 노심보호감시 인자가 운전제한치내에 존재하도록 다음 단계의 운전 조건을 정하고 있다. 참고문헌 [2]는 상용 대형 원자로와 같은 노심 출력 감시 방법(예: COLSS[3], CECOR)을 개선하여 온라인으로 연결된 노심 설계 코드 MASTER[4]로 감시 시점의 노심 상태에 적합하게 생산된 3차원 연결계수와 노내계측기 신호를 이용하여 노심감시 3차원 출력분포를 계산하는 방법 및 노심 운전 변수를 생산하는 방법을 기술하고 있다. 이 논문은 참고문헌 [2]에서 소개된 노심설계코드와 연계하여 온라인으로 작동하는 새로운 노심 감시 계통과 원자로 제어계통을 통합하는 방법론과 영광 3호기 1주기 노심을 대상으로 수행한 모의 예비 계산 결과에 대하여 기술하고 있다.

2. 노심 감시계통과 제어계통의 입출력

2.1 노심 감시계통의 입출력

현재 사용중인 영광 3호기의 노심 운전제한치 감시계통의 입력은 노심보호계통의 입력과 유사하나 좀 더 정확한 계측계통을 이용하여 일차측 뿐만 아니라 이차측의 운전 변수도 입력으로 사용한다. 표 1은 영광 3호기의 운전제한치 감시계통에서 사용하고 있는 입력 신호의 종류와 각 입력 신호의 수량과 기호를 보여주고 있다. 이들 입력 신호는 현재 원자로의 상태를 표시해주는 운전 변수들이다. 이 논문에서 개발중인 통합 전산 코드는 이들 입력 신호를 수집하여 노심 감시 프로그램 모듈에서 먼저 유효하다고 판단되는 각 운전 변수들의 평균값으로 노심의 현 상태를 대변하고 이들을 입력으로 노심 설계 코드(MASTER)의 입력 파일을 자동 생산하여 노심설계 코드를 자동으로 실행한다. 그림 1은 통합 노심 감시 제어 전산 계통의 흐름도를 보여준다. 그림 1에서 보는 바와 같이 노심감시 계통의 한 부분을 차지하는 노심 설계 코드는 냉각재 입구온도, 1차측 계통 압력, 제어봉 위치, 붕소농도, 냉각재 유량, 출력 준위등과 같은 주어진 노심 상태 변수들을 입력으로 중성자균형방정식을 풀어 계산된 노심의 출력 분포와 각종 노심 변수를 구하고 노심감시 프로그램에서 필요한 현 노심 상태에 부합되는 노심감시상수를 구한다. 노심감시상수들에는 참고문헌 [2]에서 소개된 바와 같이 3차원 연결계수(3DCC), 출력분율(PF), pin-to-node 인자(PN) 등이 있다.

측정된 노내계측기 신호는 신호처리과정을 거쳐 계측기 box의 출력으로 변환된다. 노심 감시 3차원 출력분포는 전체 핵연료집합체에서 계측 핵연료집합체의 계측된 box 출력을 이용하여 계측되지 않은 핵연료집합체의 출력을 구한다. 이 계산은 3DCC를 이용하여 전 노심에 대해 일괄적으로 수행된다. 계측기 box내의 출력분포는 MASTER의 계산 결과와 동일한 분포를 갖는다는 가정을 하면 출력분율(power fraction: PF)을 이용하여 모든 핵연료집합체의 자세한 축방향 출력분포를 쉽게 구할 수 있다. 각 핵연료집합체의 붕출력은 MASTER에서 조형함수를 이용한 붕출력 재구성법으로 계산된다. 한편 ECOMS에서는 붕출력 재구성법을 사용하지 않고 핵연료집합체내의 출력분포는 MASTER와 같다는 가정으로 각 핵연료집합체의 최고 출력 연료봉 출력은 pin-to-node 인자를 이용하여 구한다.

3차원 노심 핵연료집합체의 출력분포와 각 핵연료집합체의 최대 봉출력이 모두 구해지면 각 핵연료집합체의 첨두출력과 노심 전체의 첨두출력(F_q)을 구한다. 마찬가지로 각 축방향 평면별로 정규화된 출력분포에서 축방향별 평면의 $F_{xy}(z)$ 와 노심의 최대 F_{xy} 를 구하고 축방향으로 적분된 반경방향 출력분포에서 핵연료집합체의 반경방향 첨두 출력인자와 노심의 반경방향 첨두 출력인자(F_r)를 계산한다. 노심 3차원 출력분포에서 축방향 노심 평균 출력분포 $P1D(z)$ 를 구하고 이중 최대 축방향 출력값 F_z 를 구한다.

핵비등이탈률에 의한 운전 여유도 계산을 위해 ECOMS에서는 가상 고온봉의 축방향 출력분포 $HP1D(z)$ 를 노심 평균 축방향 출력분포 $P1D(z)$ 에 평면별 첨두출력값 $F_{xy}(z)$ 를 곱한 값으로 정의한다. 이 때 노심의 상하부 10% 영역에서 $F_{xy}(z)$ 가 F_{xy} 보다 큰 경우에는 F_{xy} 를 사용하고 그렇지 않은 경우는 계산된 $F_{xy}(z)$ 를 사용한다. 왜냐하면 노심 상하부 10% 영역은 노심 반사체와 인접한 노심 바깥 부분으로 상대 출력이 낮으면서 출력분포의 변화가 매우 커서 이 부분의 $F_{xy}(z)$ 는 신뢰성이 적고 과도한 보수성을 유발할 수 있기 때문이다. 이러한 계산 방식은 F_r 이 발생하는 고온봉의 출력보다 항상 보수적인 값을 제공하면서, 기존 CE형 상용 원자로에서 사용하는 노심운전제한치감시계통(COLSS)에서 계산하는 값보다 ($P1D(z) * \text{Max}(F_{xy})$) 운전여유도를 크게 확보할 수 있는 방식이다.

2.2 노심 제어계통의 입출력

노심감시프로그램에서 계산된 3차원 출력분포로부터 또한 노심선출력밀도(LPD)나 핵비등이탈률(DNBR)과 같은 안전제한치 또는 축방향 출력분포 인자(ASI or AO), 사분면 출력경사도(Quadrant Tilt)와 같은 노심감시인자들이 출력으로 생산되어 노심 제어계통으로 제공된다. 원자로의 노심 제어계통은 정해진 운전 전략에 따라 원자로가 안전하게 운전되도록 노심보호감시 인자가 운전제한치내에 존재하도록 그림 1에서 보는 바와 같은 절차에 의해 다음 단계의 운전 조건을 정하고 있다. 여기서 다음 단계(시간 $t+1$)의 노심 운전 조건은 현 상태(시간 t)에서 측정된 발전소 자료들, 예를 들면 냉각재 입구온도, 제어봉 위치, 붕소농도, 냉각재 유량, 출력 준위 등등과 노심감시 프로그램에서 평가된 노심보호감시 인자를 바탕으로 임시로 정해진 후 노심설계코드로 다음 단계의 노심보호감시 인자들을 평가하여 이들이 운전제한치내에 존재하도록 정하게 된다. 만약 노심보호감시 인자들이 운전제한치내에 존재하지 않으면 노심운전 조건을 변경하여 노심설계코드로 재평가하는 방식으로 반복계산에 의해 다음 단계의 노심운전 조건을 정하는 것이다. 대개 다음 단계의 노심운전조건은 출력, 제어봉 위치, 붕소농도, 냉각재 입구를 제어하여 정한다. 이러한 방식으로 노심설계코드와 연결되어 통합 노심감시제어계통은 노심운전을 진행한다.

3. 노심 감시제어 계통의 검증 계산

3.1 검증 계산 절차

이 논문에서 소개된 방법을 사용하여 영광 3호기 1주기 노심에 대해 검증 계산을 수행하였다. 그림 2는 영광 3호기 1주기 노심에서 노내계측기의 위치와 각 제어군의 위치를 보여준다. 그림 2와 같이 45개의 핵연료집합체에 40 cm 길이의 로듐 노내계측기가 축방향으로

5개가 설치되어 하나의 계측기 box는 각각 2개내지 3개의 축방향 노드를 포함하고 있다.

영광 3호기 1주기 노심에 대한 ECOMS의 노심 감시 3차원 출력분포, 첨두출력 인자 및 가상 고온봉 축방향 출력분포 계산을 검증하기 위해, 전노심(1/1Core) 평형 지는(Eq-Xe) 상태의 주기초(BOC), 주기중(MOC), 주기말(EOC)의 100% 출력준위에서 전제어봉이 완전인출(All Rods Out, ARO) 위치에 있을 때 노심 감시 계산을 수행하여 참고값인 4 nodes/FA MASTER 계산 결과와 비교하였다. 각 노내계측기의 측정 신호는 MASTER 4 nodes/FA 계산 결과로부터 각 노내계측기의 box 출력으로 모의하였다. ECOMS의 검증 계산은 노내계측기의 모의 신호가 오차가 없는 경우와 정규분포 오차(평균 0, $\sigma=10\%$, RMS Error=3%)를 갖는 경우에 대하여 시험 계산하였다.

노심 제어계통은 신경 회로망 이론이나 강인제어 논리에 의해 제어봉을 구동하는 운전 제어 전략 방법을 개발 중이다. 현 단계에서는 제어 전략 모듈과의 연결 루틴을 통해 입력 변수와 출력 변수가 정확하게 유통되고 있음을 확인하였다. 즉, 노심제어기로부터 노심설계코드의 입력을 자동 생산하여 연결 루틴을 통해 전달받은 다음 노심설계코드를 실행하고 그 출력인 운전 변수들을 노심제어기로 성공적으로 전달하여, 다음 단계의 원자로 운전 조건을 정하는 절차가 적절하게 작동하고 있음을 확인하였다..

3.2 검증 계산 결과 분석

표 2에 나와 있는 영광 3호기 1주기 전노심의 검증계산에서 MASTER 루틴을 포함한 수행시간은 PC-1.8 GHz WIN-OS 전산기에서 모두 약 4초가 소요되었으며, MASTER 루틴을 제외한 ECOMS의 노심 감시 3차원 출력 생산 계산 및 다른 계산의 총 소요시간은 약 0.5초 이내였다. ECOMS의 계산 시간의 대부분은 MASTER 루틴의 노심 감시 상수 생산에서 차지하고 있다. 따라서 ECOMS는 현재 상용화된 노심운전제한치감시계통에서 요구되는 노심 감시 출력 계산의 일회 수행 시간인 10초의 기능요건을 만족할 것으로 판단한다.

1) 노심 3차원 출력분포 비교

표 2는 ECOMS의 노심 3차원 출력분포 계산 결과와 각 첨두출력값을 MASTER의 기준 계산과 비교한 결과를 보여준다. 표 2에서 괄호안의 값은 MASTER 결과와의 차이를 나타낸다. 계측기 오차가 없는 경우 3차원 노드의 출력분포 오차는 0으로 ECOMS의 계산 결과는 MASTER의 출력분포를 그대로 재현하고 있어 ECOMS 방법론상의 내재된 오차는 없다. 따라서 노심 출력 분포 계산의 오차는 MASTER 코드의 출력분포 계산 오차에 의존한다. 또한 그림 3에서 보여주는 주기초 반경방향출력분포 비교에서 알 수 있는 것처럼 노내계측기 신호에 정규분포를 갖는 오차(RMS Error=3%)를 도입한 경우, 평가된 반경방향 출력분포 오차도 0.07%로 현저히 낮아진다.

2) 노심 3차원 첨두출력(Fq) 비교

ECOMS로 계산한 선출력밀도에 의한 운전제한치 감시를 위한 첨두출력값(Fq)을 비교하여 표 3에 수록하였다. 노내계측기 신호에 오차가 없다고 가정한 경우, ECOMS에서 계산한 Fq값은 MASTER의 3차원 봉출력에서 구한 값과 일치하며, 이 값은 최적계산된 값이다. 표 3에서 COLSS로 표시한 계산값은 축방향 노심의 10%-90% 길이에서 Fxy(z)의 노심 최대값

F_{xy} 에 축방향 노심 평균 출력의 최대값 F_z 를 곱한 값으로 현재 CE형 원자로의 디지털 노심운전제한치 감시계통 COLSS에서 사용하는 방법에 따른 값이다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 F_q 값 계산에서 COLSS 방법을 영광 3호기 1주기 노심에 적용하는 경우 지나친 보수성이 고려되어 운전여유도를 감소하게하는 반면 ECOMS의 값은 최적계산된 값보다 보수적이면서 COLSS 값보다 운전여유도를 크게 확보할 수 있다.

3) 가상 고온봉 축방향 출력분포 비교

그림 4는 핵비등이탈률 계산용 ECOMS의 가상 고온봉 축방향 출력분포를 노심 평균 축방향 출력분포, MASTER에서 최적계산된 F_r 연료봉의 축방향 출력분포와 COLSS 방법으로 계산된 가상 고온봉의 축방향 출력분포를 비교한 것이다. 모든 계산 경우에서 ECOMS의 가상 고온봉 출력분포는 MASTER에서 최적계산된 F_r 연료봉의 출력분포보다 보수적인 값을 보여주며, 또한 COLSS 방법에 의한 고온봉의 축방향 출력분포보다 운전여유도를 크게 확보할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

이 논문은 노심설계코드와 연계하여 온라인으로 작동하는 새로운 노심 감시계통과 원자로 제어계통을 통합하는 방법론과 모의 계산 결과에 대하여 기술하고 있다.

영광 3호기 노심에 대해 예비 검증계산을 수행한 결과, 노심 감시계통과 제어계통의 통합이 적절하게 작동하고 있음을 확인하였으며, 통합된 감시계통을 통하여 노심선출력밀도 생산용 노심 3차원 침투출력값과 핵비등이탈률계산용 가상고온봉축방향출력분포값이 최적계산값(best-estimated value)보다 보수적이면서 또한 기존 방법보다는 운전여유도를 크게 확보할 수 있는 방법임을 확인하였다. 노심 제어계통을 통한 운전 제어는 3차원 노심설계코드를 이용하고 있어 계산 시간이 많이 소요된다는 단점이 있어 원자로에 직접 이용하는 것보다 운전 전략 개발의 도구로 또는 운전원 지원 프로그램으로 사용할 수 있을 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구기반 확충사업의 일환으로 수행되었다.

References

- [1] W. B. Terney, J. L. Biffer, C. O. Dechand, A. Josson, and R. M. Versluis, "The C-E CECOR Fixed In-Core Detector Analysis System," Trans. Am. Nucl. Soc. 44, 542 (1983).
- [2] 이기복 외, "3차원 연결계수를 이용한 온라인 노심감시 3차원출력분포의 계산 방법," 한국원자력학회 2002 추계학술발표회논문집, 2002년 10월.
- [3] "Overview Description of the Core Operation Limit Supervisory System (COLSS)," CEN-312-P, Revision 01-P, ABB Combustion Engineering Inc. (Nov. 1986).
- [4] 조병오 외, "MASTER 2.1 User's Manual," KAERI/UM-6/00, 2000.

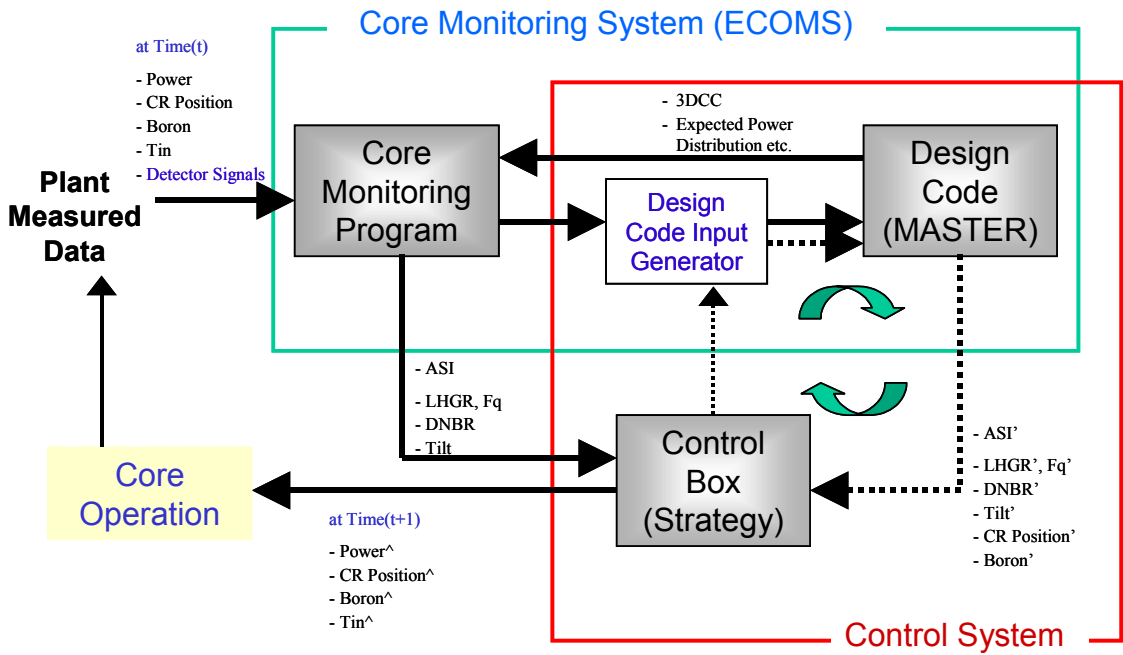


그림 1. 통합 노심 감시 제어 전산 계통의 흐름도

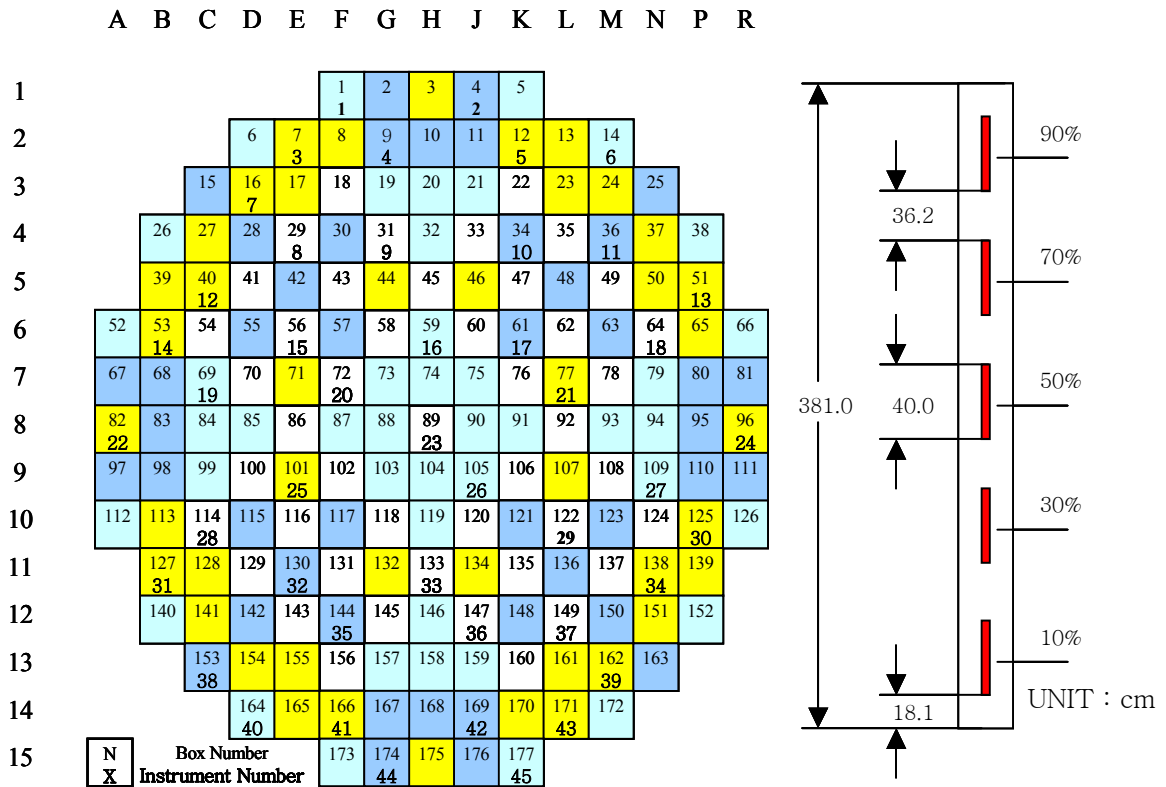


그림 2. 영광 3호기 1주기 노심의 노내계측기 위치

**Comparison of Radial FA Power
Distribution of YGN-3 Cy-1
at EOC, HFP, ARO,
3% RMS Signal Error Introduced**

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2					0.565 0.568 -0.003	0.767 0.753 0.013	0.853 0.840 0.013	0.767 0.757 0.010	0.565 0.561 0.004						
3			0.588 0.582 0.006	0.914 0.904 0.010	1.068 1.053 0.015	1.108 1.075 0.033	1.133 1.115 0.018	1.108 1.099 0.009	1.068 1.064 0.004	0.914 0.914 0.000	0.588 0.589 -0.001				
4		0.696 0.692 0.003	1.086 1.076 0.010	1.190 1.184 0.005	0.933 0.926 0.007	1.124 1.110 0.014	1.093 1.085 0.009	1.125 1.121 0.003	0.933 0.935 -0.002	1.190 1.193 -0.003	1.086 1.088 -0.002	0.696 0.696 -0.001			
5	0.588 0.588 0.000	1.086 1.087 -0.001	1.170 1.171 -0.001	0.957 0.966 -0.009	1.185 1.187 -0.001	0.953 0.950 0.003	1.130 1.130 0.000	0.953 0.957 -0.004	1.185 1.200 -0.015	0.957 0.962 -0.005	1.170 1.172 -0.002	1.086 1.087 -0.001	0.588 0.586 0.002		
6	0.914 0.914 0.000	1.190 1.194 -0.004	0.957 0.962 -0.005	1.193 1.204 -0.010	0.963 0.968 -0.005	1.251 1.257 -0.006	0.957 0.965 -0.008	1.251 1.259 -0.008	0.963 0.968 -0.005	1.193 1.198 -0.005	0.957 0.959 -0.002	1.190 1.190 -0.001	0.914 0.908 0.006		
7	0.565 0.563 0.003	1.068 1.064 -0.004	0.933 0.935 -0.002	1.185 1.193 -0.008	0.963 0.977 -0.014	1.197 1.205 -0.008	0.959 0.968 -0.009	1.136 1.162 -0.026	0.959 0.966 -0.007	1.197 1.195 0.002	0.963 0.965 -0.002	1.185 1.189 -0.004	0.933 0.938 -0.005	1.068 1.066 0.002	0.565 0.563 0.002
8	0.767 0.762 0.004	1.108 1.105 0.003	1.125 1.127 -0.003	0.953 0.956 -0.003	1.251 1.256 -0.005	0.959 0.957 0.001	1.140 1.144 -0.004	1.091 1.098 -0.007	1.140 1.142 -0.002	0.959 0.959 0.000	1.251 1.257 -0.006	0.953 0.955 -0.002	1.124 1.125 -0.001	1.108 1.106 0.003	0.767 0.762 0.005
9	0.853 0.844 0.009	1.133 1.127 0.006	1.093 1.091 0.002	1.130 1.129 0.001	0.957 0.957 0.000	1.136 1.135 0.001	1.091 1.090 0.001	0.950 0.946 0.004	1.091 1.084 0.007	1.136 1.132 0.004	0.957 0.957 0.001	1.130 1.130 0.001	1.093 1.092 0.001	1.133 1.129 0.004	0.853 0.843 0.010
10	0.767 0.761 0.006	1.108 1.102 0.006	1.125 1.119 0.006	0.953 0.949 0.004	1.251 1.246 0.005	0.959 0.958 0.001	1.140 1.139 0.006	1.091 1.085 0.006	1.140 1.120 0.021	0.959 0.952 0.007	1.251 1.246 0.005	0.953 0.951 0.002	1.124 1.122 0.002	1.108 1.108 0.000	0.767 0.764 0.003
11	0.565 0.562 0.004	1.068 1.062 0.006	0.933 0.924 0.009	1.185 1.180 0.005	0.963 0.960 -0.002	1.197 1.199 -0.002	0.959 0.962 -0.003	1.136 1.140 -0.004	0.959 0.956 0.003	1.197 1.193 0.004	0.963 0.958 0.005	1.185 1.182 0.003	0.933 0.933 0.000	1.068 1.075 -0.007	0.565 0.567 -0.001
12	0.914 0.914 0.000	1.190 1.186 0.003	0.957 0.955 0.002	1.193 1.189 0.004	0.963 0.969 -0.006	1.251 1.263 -0.012	0.957 0.975 -0.018	1.251 1.259 -0.008	0.963 0.964 -0.001	1.193 1.192 0.001	0.957 0.956 0.002	1.190 1.185 0.004	0.914 0.915 -0.001		
13	0.588 0.588 0.000	1.086 1.087 0.000	1.170 1.171 -0.002	0.957 0.962 -0.004	1.185 1.206 -0.020	0.953 0.963 -0.010	1.130 1.142 -0.012	0.953 0.961 -0.008	1.185 1.190 -0.005	0.957 0.959 -0.002	1.170 1.170 0.000	1.086 1.085 0.001	0.588 0.588 0.000		
14	0.696 0.698 -0.003	1.086 1.089 -0.003	1.190 1.194 -0.004	0.933 0.938 -0.005	1.124 1.131 -0.006	1.093 1.109 -0.006	1.125 1.099 -0.004	0.933 1.129 -0.003	1.190 0.936 -0.002	1.086 1.192 -0.002	1.086 1.088 -0.002	0.696 0.696 0.000			
15	0.588 0.589 -0.001	0.914 0.915 -0.001	1.068 1.065 0.003	1.108 1.109 -0.001	1.133 1.134 -0.001	1.108 1.107 0.002	1.068 1.072 -0.004	0.914 0.914 0.000	0.588 0.588 0.000						
16	0.565 0.564 0.002	0.767 0.765 0.002	0.853 0.854 -0.001	0.767 0.770 -0.003	0.565 0.577 -0.012										

< Comparison Result >

**** Power Peaking Factor**

Fq : The Predicted = 1.538 (6, 10, 6)
The Estimated = 1.598 (4, 6, 6)

Fr : The Predicted = 1.338 (6, 10)
The Estimated = 1.349 (8, 12)

Fz : The Predicted = 1.125 (6)
The Estimated = 1.131 (6)

Fxy : The Predicted = 1.409 (12, 8, 22)
The Estimated = 1.456 (4, 2, 5)

**** RMS Error(%)**

3D Nodewise Power Distribution = 0.154
2D Radial Power Distribution = 0.068
1D Axial Power Distribution = 0.033

A: The Predicted power
B: The Estimated power
C: Diff.(%) = (A-B)

그림 3. 통합 노심 감시 계통(ECOMS)의 반경방향 출력분포 비교

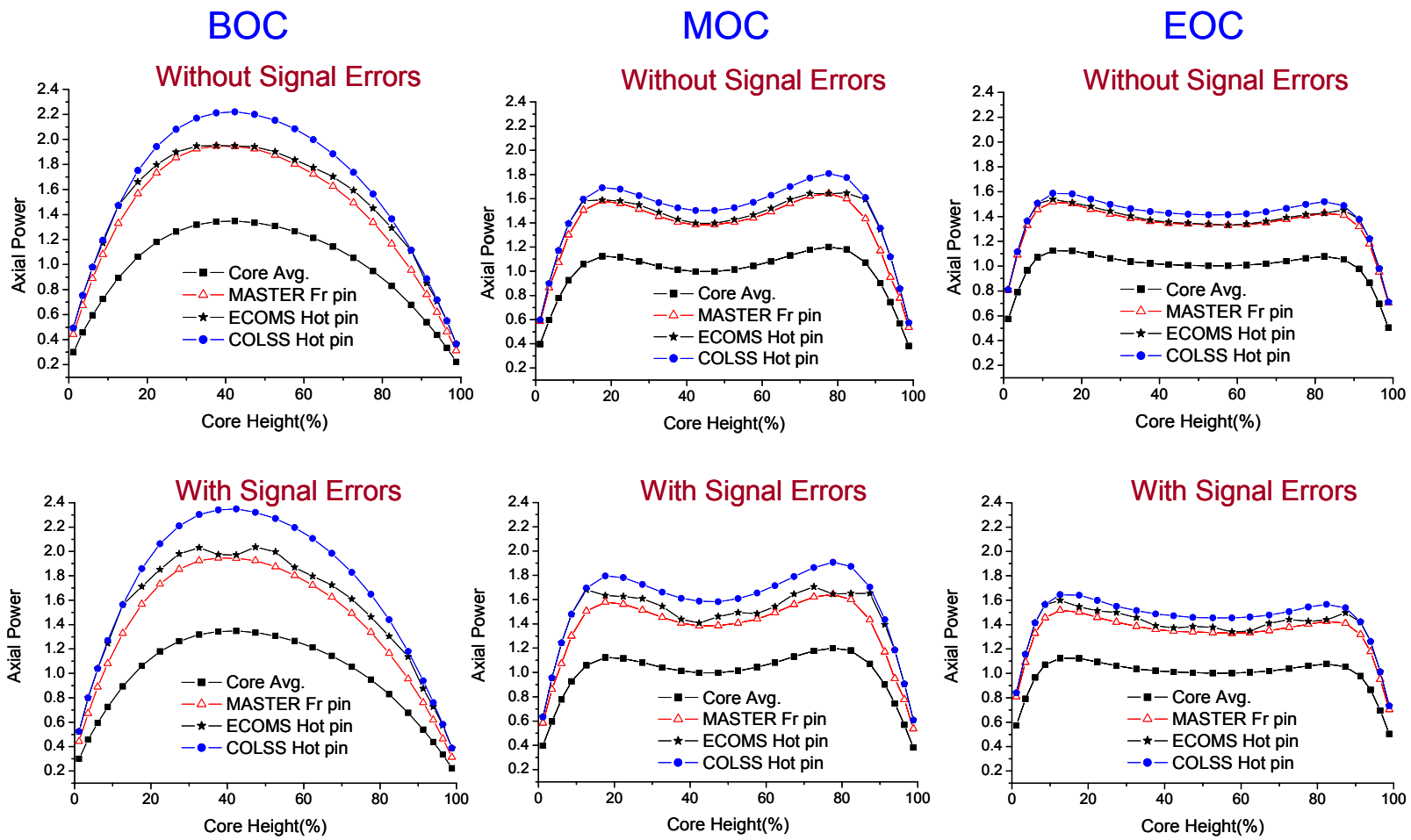


그림 4. 통합 노심 감시 계통(ECOMS)의 가상 고온봉 축방향 출력분포 비교

표 1. 영광3호기 운전제한치감시계통의 입력

신호	수량	기호
노내계측기	225	S(I,J), I=1-45, J=1-5
저온관온도	4	TC(i), i=1-4
고온관온도	2	TH(i), i=1-2
냉각재펌프속도	8	RPMA(i), RPMB(i), i=1-4
냉각재펌프차압	8	PDPA(i), PDPB(i), i=1-4
가압기압력	2	PPRIA, PPRIB
터빈첫째단압력	2	TFSPA, TFSPB
이차측증기압	2	PSEC(1), PSEC(2)
이차측 증기유량	4	SFLOW(i), i=1-4
주급수온도	2	FWTI(i), i=1-2
주급수 유량	2	FWFI(i), i=1-2
조절제어봉 그룹 위치	5	LREG(i), i=1-5
부분강제어봉 그룹 위치	2	LPSR(i), i=1-2
정지제어봉 그룹 위치	2	LSHUT(i), i=1-2
조절제어봉 그룹 편차	5	DEVRI(i), i=1-5
부분강제어봉 그룹 편차	2	DEVP(i), i=1-2
정지제어봉 그룹 편차	2	DEVSI(i), i=1-2

표 2. 통합 노심 감시 계통(ECOMS)의 여러 가지 침투출력 계산값 비교

Core State	Simulated Signal	3D Node Power RMS Error (%)	Peak Values(difference ^b)			
			Fq	Fr	Fz	Max. Fxy
BOC ARO, 100%	No Error	0.00	1.951(0.000)	1.442 (0.000)	1.348 (0.000)	1.647 (0.000)
	With Error ^a	0.14	2.036(0.085)	1.448(0.006)	1.348(0.000)	1.742(0.095)
MOC ARO, 100%	No Error	0.00	1.646 (0.000)	1.382 (0.000)	1.201 (0.000)	1.505 (0.000)
	With Error ^a	0.15	1.706(0.060)	1.385(0.003)	1.199(-0.002)	1.591(0.086)
EOC ARO, 100%	No Error	0.00	1.538 (0.000)	1.338 (0.000)	1.125 (0.000)	1.409 (0.000)
	With Error ^a	0.15	1.598(0.060)	1.349(0.011)	1.131(0.006)	1.456(0.047)

^a: Random Normal Distribution Error (mean=0, 3σ=10%, RMS Error=3%)

^b: Values in parenthesis are the difference with MASTER reference values.

표 3. 통합 노심 감시 계통(ECOMS)의 3차원 침투출력값 비교

Core State	Simulated Signal	Fq		
		MASTER	COLSS	ECOMS
BOC 100%, ARO	No Error	1.951	2.220	1.951
	With Error	1.951	2.348	2.036
MOC 100%, ARO	No Error	1.646	1.808	1.646
	With Error	1.646	1.907	1.706
EOC 100%, ARO	No Error	1.538	1.586	1.538
	With Error	1.538	1.646	1.598