

3차원 연결계수를 이용한 온라인 노심감시 3차원출력분포의 계산 방법

Methodology of On-line Generation of 3D Core Monitoring Power Distribution Using 3D Coupling Coefficients

이기복, 장진욱, 김영일

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

이 논문은 기존의 2차원 연결계수대신 3차원 연결계수를 사용하여 원자로 노심감시계통의 노심감시 3차원 출력분포를 생산하는 방법론과 모의 계산 결과에 대하여 기술한다.

3차원 연결계수와 침투 출력 계산을 위한 노심 감시 인자들은 노심 설계 코드인 MASTER와 온라인으로 연계하여 감시 시점의 노심 상태에 적합하게 생산되며, 이들을 이용하여 3차원 노심 감시 출력분포와 노심 침투출력값을 생산한다.

이 방법을 SMART 노심에 대해 검증계산을 수행한 결과, SCOMS가 노심 선출력밀도 생산용 노심 3차원 침투출력값과 핵비등이탈률계산용 가상 고온봉 축방향 출력분포에 대해 최적계산값(best-estimated value)보다 보수적이면서 또한 기존 방법보다는 운전여유도를 크게 확보할 수 있는 방법임을 보였다.

Abstract

This paper describes the methodology of core monitoring three dimensional (3D) power distribution using 3D coupling coefficients(3DCC) instead of two dimensional (2D) coupling coefficients currently used. The simulation results of the SMART core using the developed methodology are included.

The 3DCC and several core monitoring constants for peak power calculation are provided promptly through the core design code(MASTER) which is on-line coupled with core monitoring system. 3D power distribution and the several peaking factors are calculated using the in-core detector signals and core monitoring constants provided at real time.

Developed methodology is applied to the SMART core and the various core states are

simulated. Based on the simulation results, it is found that the three dimensional peaking factor to calculate the linear power density and the pseudo hot-pin axial power distribution to calculate the departure nucleate boiling ratio 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 노심의 안전성을 확보하기 위하여 운전중 원자로 노심 상태가 안전해석 그리고 저 핵비등이탈률(DNBR) 및 고 선출력밀도(LPD) 운전정지 설계시 가정된 초기조건보다 나쁘게 되지 않도록 운전 제한 조건을 규정한다. 노심감시계통은 원자로 노심 상태를 효율적으로 감시하고, 운전원이 규정된 운전제한조건의 범위내에 노심 상태를 유지할 수 있도록 노내계측기의 신호와 선출력밀도 여유도, 핵비등이탈률 여유도, 전 노심출력, 사분출력 경사비, 축방향 출력편차 등 운전제한치를 계속적으로 계산하여 계산 값을 해당 운전제한치와 비교하여 경보를 제공한다. 운전제한치들은 노내계측기 신호와 감시하는 노심 상태에 대해 생산된 상수를 이용하여 생산된 노심 3차원 출력분포와 노심 3차원 첨두출력계수(Fq), 평면 반경방향 첨두출력계수(Fxy), 반경방향 첨두출력계수(Fr), 축방향 첨두출력계수(Fz)에 기초하여 감시된다.

이 논문은 기존의 2차원 연결계수대신 3차원 연결계수를 사용하여 원자로 노심감시계통의 노심감시 3차원 출력분포를 생산하는 방법론과 모의 계산 결과에 대하여 기술한다. 3차원 연결계수와 첨두 출력 계산을 위한 노심 감시 인자들은 노심 설계 코드인 MASTER와 온라인으로 연계하여 감시 시점의 노심 상태에 적합하게 생산되며, 이들을 이용하여 3차원 노심 감시 출력분포와 노심 첨두출력값을 생산한다.

참고문헌 [1]은 상용 대형 원자로와 같은 노심 출력 감시 방법(예: COLSS, CECOR)에서 사용하는 2차원 연결계수와 축방향 연결계수를 사용하여 노심 감시 3차원 출력분포를 계산하는 방법을 소개하였다. 참고문헌 [1]의 방법 두가지 연결계수가 필요할 뿐만 아니라 2차원 반경방향 출력분포와 축방향 출력분포를 따로 계산해야 하는 번거로움이 있다. 이 논문은 참고문헌 [1]에서 제시한 방법의 단점을 제거하고 상용의 대형 원자로에도 적용할 수 있도록 3차원 연결계수를 이용하여 노심감시 3차원 출력분포를 계산하는 방법을 기술하고 있다. 또한 참고문헌 [1]에서 모의계산한 SMART 노심에 대해 동일 계산을 수행하여 SCOMS 코드에 응용된 이 방법의 적용 타당성을 보인다.

2. 3차원 노심 출력분포 계산 방법

2.1 반경방향 연료집합체 출력분포 계산

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 3차원 연결계수(3DCC)를 이용하

여 전 노심에 대해 일괄적으로 수행된다. 여기서 3DCC는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \langle 3DCC \rangle_{i,k} &= \sum_{j=1}^{N_i} \frac{P_{i,k}^j}{N_i P_{i,k}} \\ &= \frac{3}{\text{Box } ik} \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서, j는 그림 1에 나타내 바와 같이 핵연료집합체 i와 면을 인접한 주변 핵연료집합체 번호를, Ni는 인접한 j 집합체의 총 개수이다. 노심 중앙부의 핵연료집합체 box는 Ni가 6이 되나 반사체와 접한 노심 가장자리의 핵연료집합체 box에 대해서는 Ni가 3, 4, 5가 되게 된다. 3DCC는 노심 핵설계 코드인 MASTER의 계산에 의해 생산되어 제공한다. 미리 계산된 3DCC's가 제공되므로 예측되지 않은 핵연료집합체의 출력은 식(2.2)에 의해 구해진다.

$$N_{i,k} \langle 3DCC \rangle_{i,k} P_{i,k} - \sum_{j \in U} P_{j,k}^i = \sum_{l \in I} P_{l,k}^i \quad (2.2)$$

여기서 U는 예측되지 않은 핵연료집합체군을 I는 예측된 핵연료집합체군을 의미한다. 식 (2.2)은 예측되지 않은 모든 핵연료집합체의 box 출력에 적용되어 다음 행렬식으로 나타나는 연립방정식이 된다.

$$Ap = s \quad (2.3)$$

식 (2.3)로 주어진 행렬식을 풀면 전 노심의 모든 핵연료집합체의 box 출력을 알 수 있다.

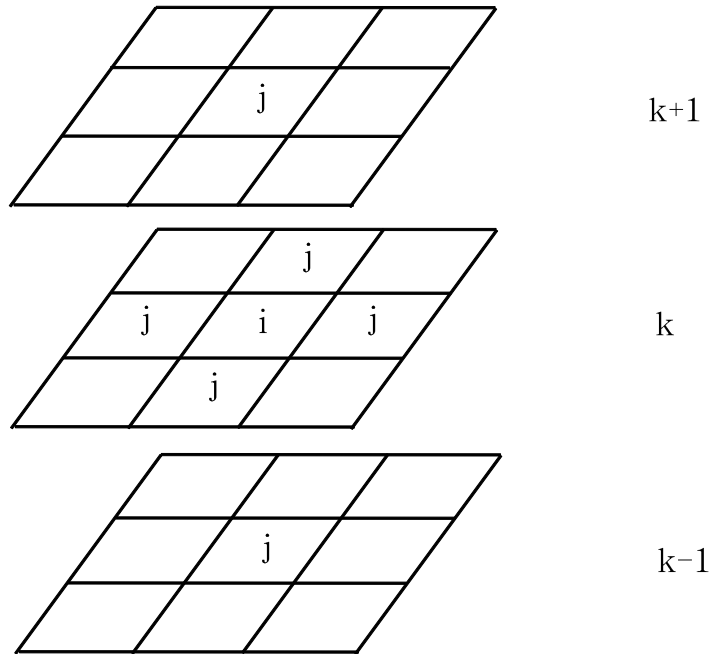


그림 1 3차원 연결계수 계산을 위한 핵연료집합체 box들

2.2 3차원 출력분포 합성

하나의 계측기 box는 핵연료집합체를 여러 개의 노드로 분할하더라도 반경방향으로는 하나의 핵연료집합체로 축방향으로는 노내계측기의 크기에 따라 1-4개의 노드를 포함하고 있다. 따라서 계측기 box내의 출력분포는 MASTER의 계산 결과와 동일한 분포를 갖는다는 가정을 하면 출력분률(power fraction: PF)을 이용하여 모든 핵연료집합체의 자세한 축방향 출력분포를 쉽게 구할 수 있다. PF는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \langle PF \rangle_{ikz} &= \frac{P_{ik}^z}{P_{ik}} \\ &= \frac{Box\ ik}{Box\ ik} \quad z \end{aligned} \quad (2.4)$$

식 (2.4)를 이용하면 각 노드의 출력은 다음과 같이 직접 구한다. 여기서 P_{ik}^z 는 ik 계측기 box에 속한 축방향 노드 z 의 출력으로 정의된다.

$$P_{ik}^z = \langle PF \rangle_{ikz} * P_{ik} \quad (2.5)$$

구해진 3차원 출력분포를 모두 합산하면 노심의 총 열출력이 된다. 그러나 이 값은 기준이 되는 2차측의 열평형방법으로 구한 노심 출력과 차이가 날 수 있으므로 사용하지 않으며 단지 참고값으로만 인식한다. 따라서 계산된 노심 3차원 출력분포는 상대적인 값으로 기준이 되는 노심 열출력으로 정규화하여야 절대적인 출력값이 된다.

2.3 연료봉 침투 출력 계산

각 핵연료집합체의 봉출력은 MASTER에서 조형함수를 이용한 봉출력 재구성법으로 계산된다. 한편 SCOMS에서는 봉출력 재구성법을 사용하지 않고 각 핵연료집합체의 최고 출력 연료봉 출력은 pin-to-box (PB_{ik}^z) 인자를 이용하여 구한다.

$$HP_{ik}^z = PB_{ik}^z * P_{ik}^z \quad (2.6)$$

여기서 HP_{ik}^z 는 ik box의 z 노드의 최대 봉출력이고, pin-to-box 인자는 box내의 평균 봉출력에 대한 최대 봉출력의 비로 정의되며 MASTER에서 계산되어 제공된다.

$$PB_{ik}^z = HP_{ik}^{z,M} / P_{ik}^{z,M} \quad (2.7)$$

$HP_{ik}^{z,M}$, $P_{ik}^{z,M}$ 는 MASTER에서 계산한 box의 최대 봉출력과 평균 봉출력을 나타낸다. 3차원 노심 핵연료집합체의 출력분포(P_{ik}^z)와 각 핵연료집합체의 최대 봉출력(HP_{ik}^z)이 모두 구해지면 각 핵연료집합체의 침투출력(F_{qi})과 노심 전체의 침투출력(F_q)을 구한다. 마찬가지로 각 축방향 평면별로 정규화된 출력분포에서 축방향별 $F_{xy}(z)$ 와 노심 상하부 10% 영역을 제외한 노심의 최대 F_{xy} 를 구하고, 축방향으로 적분된 출력분포에서 핵연료집합체의 반경방향 침투 출력인자(F_{ri})와 노심의 반경방향 침투 출력인자(F_r)를 계산한다. F_{ri} 와 F_r 을 구하기 위해서는 축방향으로 적분된 봉출력에 대한 정보가 필요하다. SCOMS에서는 PB_{ik}^z 와 유사한 개념으로 Fr-pin-to-box factor ($FrPB_{ik}^z$)를 정의하여 축방향으로 적분된 2차원 출력분포에서 반경방향 침투 출력인자 F_r 을 구한다.

$$FrPB_i = HP_i^M / p_i^M \quad (2.8)$$

HP_i^M , p_i^M 는 MASTER에서 계산한 축방향으로 적분되어 정규화된 반경방향 box의 최대 봉출력과 평균 봉출력을 나타낸다. 따라서 Fr 는 아래 식 (2.9)와 같이 구하고, Fr 은 HP_i^M 중 최대인 값이 된다.

$$HP_i = FrPB_i * p_i \quad (2.9)$$

노심 3차원 출력분포에서 축방향 노심 평균 출력분포 $P1D(z)$ 를 구하고 이중 최대 축방향 출력값 Fz 를 구한다.

SCOMS에서 계산된 Fq 는 3차원 출력분포로부터 구한 최적값으로 노심 선출력밀도 여유도 계산을 위해서는 계산 불확실도를 더하여 보수적인 값을 사용한다. 여기서는 10%의 계산 불확실도를 사용한다.

$$Fq(LPD) = Fq * 1.10 \quad (2.10)$$

핵비등이탈률에 의한 운전 여유도 계산을 위해 SCOMS에서는 가상 고온봉의 축방향 출력분포 $HP1D(z)$ 를 노심 평균 축방향 출력분포 $P1D(z)$ 에 평면별 첨두출력값 $Fxy(z)$ 를 곱한 값으로 정의한다. 이 때 노심의 상하부 10% 영역에서 $Fxy(z)$ 가 Fxy 보다 큰 경우에는 Fxy 를 사용하고 그렇지 않은 경우는 계산된 $Fxy(z)$ 를 사용한다. 왜냐하면 노심 상하부 10% 영역은 노심 반사체와 인접한 노심 바깥 부분으로 상대 출력이 낮으면서 출력분포의 변화가 매우 커서 이 부분의 $Fxy(z)$ 는 신뢰성이 적고 과도한 보수성을 유발할 수 있기 때문이다.

$$HP1D(z) = P1D(z) * Fxy(z) \quad (2.11)$$

이러한 계산 방식은 Fr 이 발생하는 고온봉의 출력보다 항상 보수적인 값을 제공하면서, 기존 CE형 상용 원자로에서 사용하는 노심운전제한치감시계통(COLSS)에서 계산하는 값보다 ($P1D(z) * \text{Max}(Fxy)$) 운전여유도를 크게 확보할 수 있는 방식이다.

3. 노심 감시 3차원 출력분포 검증 계산

3.1 검증 계산 절차

이 논문에서 소개된 방법을 사용하여 SMART 노심에 대해 검증 계산을 수행하였다. SMART 노심의 축방향 길이는 200.0 cm 이고 반사체 영역을 배제하고 20개의 축방향 노드로 이루어져 있다. 그림 2는 SMART 노심에서 노내계측기의 위치와 각 제어군의 위치를 보여준다. 각 제어군은 다소 복잡한 운전전략에 따라 60cm씩 중첩되어 삽입/인출된다. 그림 2에 표시한 바와 같이 21개의 핵연료집합체에 40 cm 길이의 노내계측기가 축방향으로 5개가 설치되어 하나의 계측기 box는 각각 4개의 축방향 노드를 포함하고 있다.

SMART 노심에 대한 SCOMS의 노심 감시 3차원 출력분포, 첨두출력 인자 및 가상 고온봉 축방향 출력분포 계산을 검증하기 위해, 표 1에 나와 있는 바와 같이 전노심(1/1Core) Eq-Xe 상태의 BOC(0 EFPD), MOC(510 EFPD), EOC(1020 EFPD)에서 20%, 60%, 100% 출력준위에서 제어봉이 임계 위치에 있을 때 노심 감시 계산을 수행하여 4 nodes/FA MASTER 계산 결과와 비교하였다. SMART 노심은 무봉산 노심으로 제어봉이 삽입되어

운전되므로 표 1에 나와 있는 바와 같이 제어봉이 삽입된 여러 가지 경우에 대해 시험하였다. 각 노내계측기의 측정 신호는 MASTER 4 nodes/FA 계산 결과로부터 각 노내계측기의 box 출력으로 모의하였다. SCOMS의 검증 계산은 계측기 오차를 배제하고 MASTER 계산 결과와 일치하는 일관된 체계(consistent system)로 이루어져, MASTER 계산 결과를 참고 값으로 SCOMS 노심 감시 출력 생산 방법론상에 내재된 오차를 검사할 수 있다.

3.2 검증 계산 결과 분석

표 1에 나와 있는 SMART 전노심의 검증계산에서 MASTER 루틴의 수행시간은 PC-1.8 GHz WIN-OS 전산기에서 약 3초가 소요되었으며, MASTER 루틴을 제외한 SCOMS의 노심 감시 3차원 출력 생산 계산 및 다른 계산의 총 소요시간은 약 0.3초 이내였다. SCOMS의 계산 시간의 대부분은 MASTER 루틴의 노심 감시 상수 생산에서 차지하고 있다. 따라서 SCOMS는 현재 상용화된 노심운전제한치감시계통에서 요구되는 노심 감시 출력 계산의 일회 수행 시간인 10초를 충분히 만족할 수 있으며, 제어봉이 삽입되어 운전되는 SMART 노심의 특성상 2배의 더 빠른 노심감시 주기가 요구되더라도 그 기능요건을 만족할 것으로 판단한다.

1) 노심 3차원 출력분포 비교

표 2는 SCOMS의 노심 3차원 출력분포 계산 결과와 각 첨두출력값을 MASTER의 기준 계산과 비교한 결과를 보여준다. 표 2에서 괄호안의 값은 MASTER 결과와의 차이를 나타낸다. 모든 계산 경우에 대해 3차원 노드의 출력분포 오차는 0으로 SCOMS의 계산 결과는 MASTER의 출력분포를 그대로 재현하고 있어 SCOMS 방법론상의 내재된 오차는 없다. 따라서 노심 출력 분포 계산의 오차는 MASTER 코드의 출력분포 계산 오차에 의존한다.

2) 노심 3차원 첨두출력(Fq) 비교

SCOM로 계산한 선출력밀도에 의한 운전제한치 감시를 위한 첨두출력값(Fq)을 비교하여 표 3에 수록하였다. SCOMS에서 계산한 Fq값은 MASTER의 3차원 봉출력에서 구한 값과 일치하며, 이 값은 최적계산된 값이다. SCOMS에서는 이 값에 10%의 계산 불확실도를 고려하여 보수적인 값을 사용하여 선출력밀도 계산에 사용한다. 표 3에서 COLSS로 표시한 계산값은 축방향 노심의 10%-90% 길이에서 $F_{xy}(z)$ 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 Fq값 계산에서 COLSS 방법을 SMART 노심에 적용하는 경우 지나친 보수성이 고려되어 운전여유도를 감소하게 하는 반면 SCOMS의 값은 최적계산된 값보다 보수적이면서 COLSS 값보다 운전여유도를 크게 확보할 수 있다.

3) 가상 고온봉 축방향 출력분포 비교

그림 3은 핵비등이탈률 계산용 SCOMS의 가상 고온봉 축방향 출력분포를 노심 평균 축방향 출력분포, MASTER에서 최적계산된 Fr 연료봉의 축방향 출력분포와 COLSS 방법으로 계산된 가상 고온봉의 축방향 출력분포를 비교한 것이다. 모든 계산 경우에서 SCOMS의

가상 고온봉 출력분포는 MASTER에서 최적계산된 Fr 연료봉의 출력분포보다 보수적인 값을 보여주며, 또한 COLSS 방법에 의한 고온봉의 축방향 출력분포보다 운전여유도를 크게 확보할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

이 논문은 기존의 2차원 연결계수대신 3차원 연결계수를 사용하여 원자로 노심감시계통의 노심감시 3차원 출력분포를 생산하는 방법론과 검증 계산 결과에 대하여 기술한다. 개발된 방법은 참고문헌 [1]에서 제시한 방법의 단점을 제거하고 상용의 대형 원자로에도 적용할 수 있도록 3차원 연결계수를 이용한다. 3차원 연결계수와 첨두 출력 계산을 위한 노심 감시 인자들은 노심 설계 코드인 MASTER와 온라인으로 연계하여 감시 시점의 노심 상태에 적합하게 생산되며, 이들을 이용하여 노심감시 3차원 출력분포와 노심 첨두출력값을 생산한다. 이 방법을 SMART 노심에 대해 검증 계산을 수행하여 노심 선출력밀도 생산용 노심 3차원 첨두출력값(Fq)과 핵비등이탈률 계산용 가상 고온봉 축방향 출력분포에 대해 최적계산값보다 보수가이면서 기존 방법(COLSS)보다 운전여유도를 크게 확보할 수 있음을 보였으며 계산 수행시간도 PC-1.8 GHz WIN-OS 전산기에서 4초이내로 현재 상용화된 노심운전제한치 감시계통에서 요구되는 노심 감시 출력 계산의 일회 수행 시간인 10초를 충분히 만족할 수 있어 상용의 노심감시계통에 응용가능한 방법임을 보였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

References

- [1] 이기복 외, “노심설계코드와 연계한 SMART 노심감시계통(SCOMS)의 온라인 노심 감시출력분포 생산,” 한국원자력학회 2002 춘계공동학술발표회논문집, 2002년 5월.
- [2] 이정찬, “SMART 기본설계 예비노심장전모형”, SMART-CA-CA110-71 Rev.00, 2000년 4월 9일.
- [3] 김궁구, “노심감시계통 기능설계 일반요건”, SMART-CA-DR130-03, 1999.02.12.
- [4] 조병오 외, “MASTER 2.1 User's Manual,” KAERI/UM-6/00, 2000.
- [5] 조병오 외, “Core On-line Monitoring and Protection Aid Surveillance System COMPASS for SMART”, KAERI/TR-1149/98, 1998.10.
- [6] 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).
- [7] “Overview Description of the Core Operation Limit Supervisory System (COLSS),” CEN-312-P, Revision 01-P, ABB Combustion Engineering Inc. (Nov. 1986).

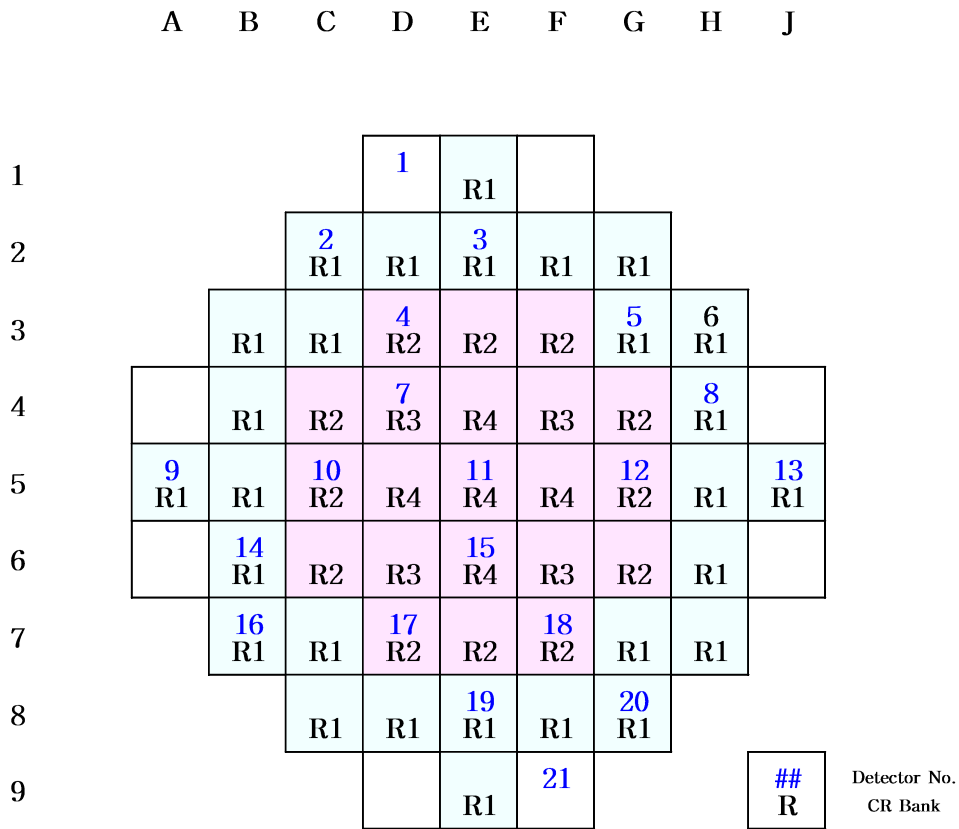


그림 2 SMART 노심의 노내계측기 위치와 제어군 모형

표 1 SMART 노심의 SCOMS 검증 계산 경우

Burnup	Power (%)	Bank Position(steps : 1 step=1 cm)					
		R1	R2	R3	R4	S1	S2
BOC Eq-Xe	100	200.000	191.795	131.801	71.806	200.000	200.000
	60	200.000	163.601	103.607	43.612	200.000	200.000
	20	196.190	136.195	76.200	40.005	200.000	200.000
MOC Eq-Xe	100	200.000	188.697	128.702	68.707	200.000	200.000
	60	200.000	154.203	94.209	40.005	200.000	200.000
	20	178.308	118.288	58.293	40.005	200.000	200.000
EOC Eq-Xe	100	200.000	200.000	190.297	130.302	200.000	200.000
	60	200.000	200.000	145.110	85.090	200.000	200.000
	20	200.000	172.999	113.005	53.010	200.000	200.000

표 2 노심 3차원 출력분포 비교

Burnup	Power(%)	3D Node Power Distribution RMS Error	Peak Value (Difference*)		
			Fr	Fz	Max(Fxy)
BOC	100	0.000	1.527 (0.000)	1.305 (0.000)	1.930 (0.000)
	60	0.000	1.628 (0.000)	1.315 (0.000)	2.344 (0.000)
	20	0.000	1.665 (0.000)	1.539 (0.000)	2.441 (0.000)
MOC	100	0.000	1.440 (0.000)	1.399 (0.000)	1.773 (0.000)
	60	0.000	1.528 (0.000)	1.466 (0.000)	2.182 (0.000)
	20	0.000	1.583 (0.000)	1.646 (0.000)	2.286 (0.000)
EOC	100	0.000	1.275 (0.000)	1.268 (0.000)	1.593 (0.000)
	60	0.000	1.285 (0.000)	1.201 (0.000)	1.657 (0.000)
	20	0.000	1.354 (0.000)	1.268 (0.000)	1.891 (0.000)

* 괄호안의 값은 MASTER 결과와의 차이

표 3 SCOMS의 3차원 첨두출력값 비교

Burnup	Power(%)	Fq			
		MASTER Calculation	COLSS	SCOMS Best-estimated	SCOMS 10% Uncertainty
BOC	100	1.899	2.519	1.899	2.089
	60	2.080	3.083	2.080	2.288
	20	2.477	3.758	2.477	2.725
MOC	100	1.959	2.480	1.959	2.155
	60	2.206	3.200	2.206	2.427
	20	2.610	3.764	2.610	2.871
EOC	100	1.931	2.020	1.931	2.124
	60	1.658	1.990	1.658	1.824
	20	1.869	2.397	1.869	2.056

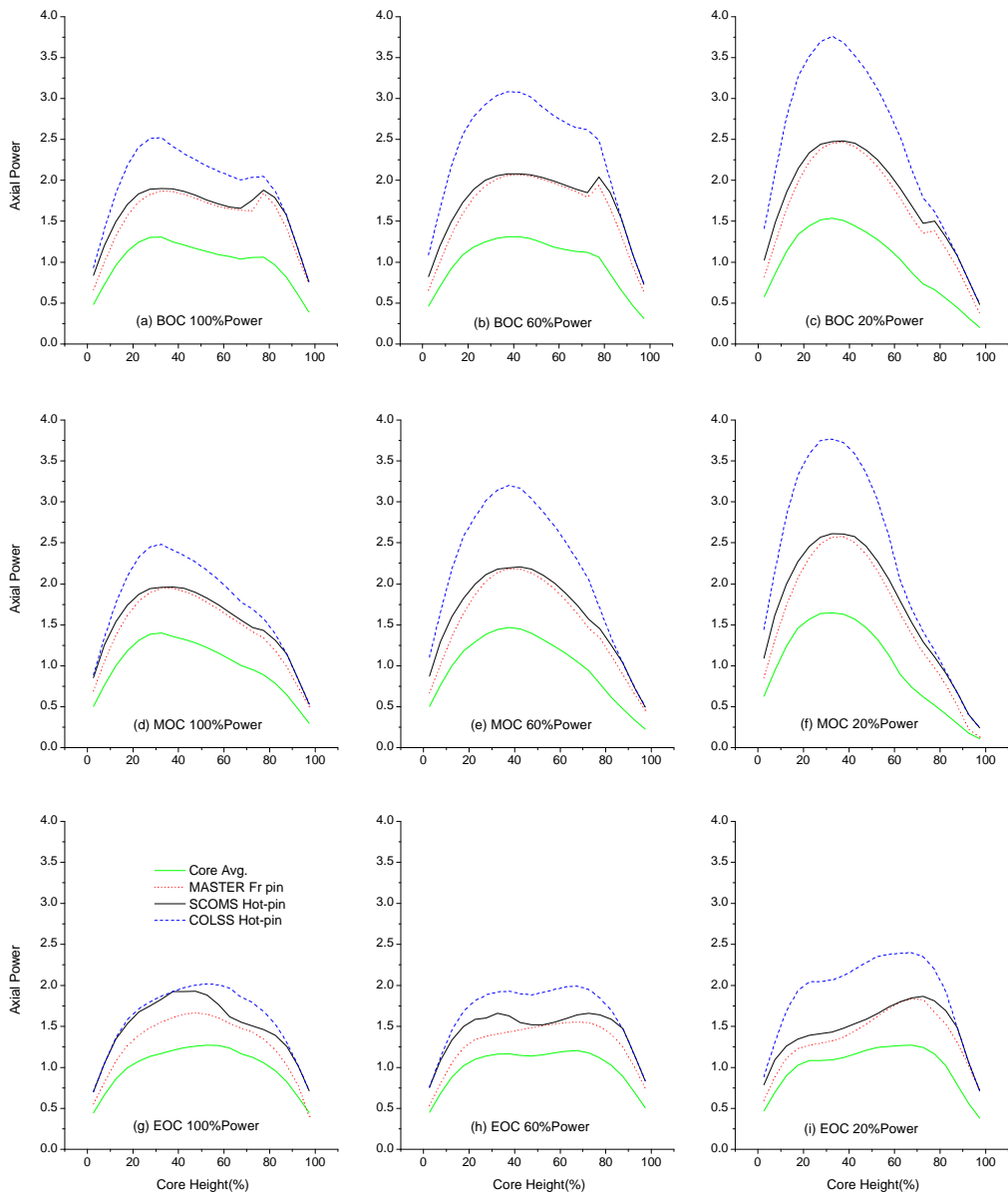


그림 3 SCOMS의 가상 고온봉 축방향 출력분포 비교