

'99준계학술발표회 논문집
한국원자력학회

무봉산 운전을 위한 빠른 예측 모듈의 개발

A Development of Fast Predictor Module for Soluble Boron Free Operation

장진욱, 이은철
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

최중인
경원대학교
경기도 성남시 수정구 복정동 산65

김순영, 김종경
한양대학교
서울특별시 성동구 행당동 17

김중구
한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105호

요약

반응도와 Axial Offset을 만족하는 제어봉의 위치를 빠른 시간에 탐색하여 예측 기능을 가지는 Fast Predictor Module for Soluble Boron Free Operation을 개발하였다. Mode K 기법을 적용하여 무봉산 노심의 제어 논리를 구성하였다. 일일 부하추종운전 모사 계산을 통하여 FPM-SBF의 예측 기능에 대한 검증을 수행하였다. 그 결과 무봉산 노심의 부하추종운전의 가능성을 확인하였으며, FPM-SBF가 출력분포 자동제어의 해결 방법이 될 수 있음을 보여준다.

Abstract

Fast Predictor Module for Soluble Boron Free Operation is developed, which predicts critical control banks positions for compensating reactivity effects and satisfying desired Axial Offset. Control logic is established by applying Mode K to SBF core. Through the simulation of daily load following operation a benchmark calculation for prediction FPM-SBF is performed. The results showed that load following operation for SBF core is feasible and imply that FPM-SBF can be a solution to automatic power shape control.

1. 서론

원자력 에너지의 활용범위가 증대됨에 따라 최근 다목적 중소형 원자로의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 봉산수를 사용하지 않는 노심 관리 기법이 적용되고 있다. 무봉산 노심의

출력제어는 제어봉만을 사용하는 것에 따른 비선형성의 증가로 인하여, 언제 어떤 제어군을 어느 만큼 움직일 것가를 수동으로 운전원이 결정하기에는 상당히 복잡하고 운전원의 실수를 유발시킬 수 있다. 무봉산 노심의 운전은 노심 예측기능으로 현재 및 앞으로의 노심 상태를 빠르게 인지할 수 있어야 하며 이를 바탕으로 자동제어가 가능할 수 있어야 한다. 따라서 노심 상태를 예측할 수 있는 FPM-SBF(Fast Predictor Module for Soluble Boron Free reactor)를 개발하였다. FPM-SBF는 현재의 노심 상태를 입력으로 1~2 시간 뒤의 노심 상태를 빠르게 예측한다. 또한 Mode K를 활용한 제어 논리에 의하여 반응도효과를 보상하고 출력분포를 유지할 수 있는 제어봉의 위치를 탐색할 수 있다. 설계된 SBF 노심에 대해 부하추종운전 모사 계산을 수행하여 MASTER 코드와의 비교를 통해 노심 예측 능력을 검증하였으며 무봉산 노심의 부하추종운전 가능성을 확인하였다.

2 분석 대상 무봉산 노심의 특성

본 연구에 적용된 무봉산 노심은 현재 Westinghouse사에서 개발 완료된 600MWe급의 AP600 원자로를 대상으로 하여 18개월 이상의 주기길이를 목표로 개념설계가 수행된 것이다. 무봉산 노심은 고온전출력 상태에서 핵연료 연소로 인한 장기적 반응도 제어에 제어봉을 과다 사용할 경우 축방향 출력분포를 심하게 변형시키므로, 노심 전 주기 동안 핵연료 연소로 인한 반응도 보상에 가연성독봉을 주로 사용하고 가급적 제어봉 사용을 억제하는 전략이 필요하다. 설계된 무봉산 노심은 농축 PYREX 독봉을 사용하며 3.0, 3.5, 4.0 w/o의 농축도를 가진 핵연료집합체로 구성되어 있다. 무봉산 노심에서 발생하는 축방향 출력분포의 노심 하단부 편중 현상을 제어하기 위하여 핵연료집합체는 가연성독봉을 축방향으로 zoning한 형태로 구성하고 있다. 노심의 장전모형은 그림 1과 같이 설계되어 있다.

제어봉 배열은 노심 중앙은 Fully Rodded 형태를, 노심 외곽은 Checkerboard 형태를 가진 Semi-Fully Rodded 형태로 그림 2와 같이 장전되어 있다. 제어봉의 재질은 잉여반응도 및 출력분포 제어용으로 Ag-In-Cd을, 원자로 정지용으로 B_4C 를 사용하고 있다. 연소도에 따른 임계 제어봉 위치는 그림 3에 나타낸 바와 같은데, RCB2 제어군은 EOC를 제외한 거의 전 주기동안 노심에 완전히 삽입되어 잉여반응도 제어를 담당하고 있으며 RCB1과 RCB3 제어군은 각각 노심의 하부 출력분포와 상부 출력분포 제어를 담당하고 있다. ARO 상태 및 제어봉이 삽입이 된 상태의 AO(Axial Offset)는 그림 4와 같은데 제어봉 삽입시 +2%~-10% 범위를 가지고 제어뒀을 알 수 있다.

3 무봉산 운전을 위한 빠른 예측 모듈

FPM-SBF는 현재의 노심 상태를 입력으로 1~2시간 이후의 노심 상태를 예측할 수 있으며, 출력제어를 위하여 적절한 구동 제어군 및 제어군의 위치를 탐색한다. FPM-SBF는 빠른 계산을 위하여 노심을 상반부와 하반부 두 노드로 기술하며 제논 및 요오드 수밀도 계산, 반응도(유효증배계수 변화) 계산, 제어봉 위치에 따른 AO 계산 및 제어봉 위치 탐색 알고리즘으로 구성되어 있다.

3.1 제논 및 요오드 수밀도 계산

FPM-SBF는 노심을 상반부와 하반부 2개의 노드로 구성하여 AO, 제논 수밀도의 AO(XAO), 요오드 수밀도의 AO(IAO), 출력준위, 노심 평균 제논 수밀도, 노심 평균 요오드 수밀도를 초기 조건으로 하여 부과된 시간 간격까지 각 노드의 출력준위, 제논 수밀도, 요오드 수밀도를 계산한다. 이 시간 간격동안 노심출력의 변화는 선형으로 가정한다. 제논의 미시 흡수단면적은 thermal group에 의해서만 제논의 변화에 영향을 미치는 것으로 가정하며, 중성자속에 의한 제논 변화의 영향도 thermal group만을 고려한다. 출력 변화에 따른 중성자 속의 변화와 핵분열에 의한 제논 및 요오드의 생성율은 출력에 비례하는 것으로 가정한다. 이러한 가정으로 제논 및 요오드의 수밀도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dN_{Xe,i}}{dt} = -(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} C_1 P_i) N_{Xe,i} + \lambda_I N_{I,i} + \gamma_{Xe} C_2 P_i \quad (1)$$

$$\frac{dN_{I,i}}{dt} = -\lambda_I N_{I,i} + \gamma_I C_2 P_i \quad (2)$$

여기서, $N_{Xe,i}$ 와 $N_{I,i}$ 는 제논과 요오드의 수밀도를 나타내며 i 는 노심하반부와 노심상반부의 2개의 노드로 구성된다. C_1 은 전출력에서의 노심 평균 열중성자속(ϕ_2)을 나타내고, C_2 는 전출력에서의 노심 평균 핵반응률($\Sigma_{f1}\phi_1 + \Sigma_{f2}\phi_2$)을 나타내는데 입력상수로 사용한다.

3.2 반응도 계산

반응도 즉 유효증배계수의 변화를 정확히 계산하려면 노심 상태가 달라질 때마다 노심 해석코드를 통하여 계산하여야 하나, 제어봉의 위치를 탐색할 수 있는 예측기능을 가지기 위해서는 빠른 계산을 필요로하므로 미리 계산된 자료를 이용하여 반응도 계산에 사용하도록 하였다. 반응도는 출력 결손, 제어군의 위치, 제논 재분포에 의한 영향으로 구분할 수 있다. 제어군의 위치에 대한 유효증배계수는 출력 준위, 제논 수밀도의 분포, 제어군간의 중첩 정도에 따라 달라진다. 제논 수밀도의 분포가 전출력 평형제논 상태로 고정되어 있다면 유효증배계수는 출력 준위와 제어군의 위치에 대한 함수로 나타낼 수 있다. 천이 상태의 제논 재분포에 의한 유효증배계수의 영향은 제어봉의 위치와는 독립적인 것으로 가정하였으며, 제논 수밀도의 변화량 만큼 유효증배계수가 선형으로 변화하도록 하였다. 부하추종운전중 n 개의 제어군이 필요하다면 유효증배계수는 다음과 같은 식으로 구한다.

$$K_{eff}^{t+1} = K_{eff}^t + \Delta f_{keff}(CR_1, CR_2, \dots, CR_n, P) + \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta N_{Xe}} (N_{Xe}^{t+1} - N_{Xe}^t) \quad (3)$$

$$\Delta f_{keff} = f_{keff}(CR_1, CR_2, \dots, CR_n, P)^{t+1} - f_{keff}(CR_1, CR_2, \dots, CR_n, P)^t \quad (4)$$

여기서, K_{eff}^{t+1} 는 time step $t+1$ 에서의 유효증배계수를 나타낸다. f_{keff} 는 제논의 효과를 제외한 출력준위와 제어봉위치에 대한 유효증배계수의 함수로 CR_k 는 k 번째 제어군의 위치, P 는 출력을 나타낸다. f_{keff} 는 제논을 전출력 평형제논 상태로 고정하여 출력준위 100%, 75%, 50%와 각 제어

군의 위치에 대하여 노심 해석코드를 통하여 계산된 자료를 사용한다. $f_{k,eff}$ 는 출력준위에 대하여 소구간별 보간법을, 제어군 위치에 대하여는 cubic spline 보간법을 사용하여 유효증배계수를 계산하도록 하였다. $\frac{\Delta K_{eff}}{\Delta N_{Xe}}$ 는 제논 변화량에 따른 유효증배계수의 변화량으로 입력상수로 주어진다.

3.3 제어봉 위치에 따른 AO 계산

반응도 계산에서와 마찬가지로 AO 계산에서도 빠른 계산을 위하여 AO에 영향을 주는 변수들에 대하여 노심 해석코드를 통하여 미리 계산된 자료를 이용하도록 하였다. AO의 변화는 출력준위, 제어군 위치, 제논 재분포에 의한 영향으로 구분할 수 있다. 반응도 계산에서와 마찬가지로 AO의 변화에서도 제논 수밀도의 분포가 전출력 평형제논 상태로 고정되어 있다면 AO는 출력준위와 제어군의 위치에 대한 함수로 나타낼 수 있다. 천이 상태의 제논 재분포에 의한 AO의 영향은 제어봉의 위치와는 독립적인 것으로 가정하였으며, XAO(Xenon Axial Offset) 개념을 도입하여 그 변화량에 비례하여 AO가 변화하도록 하였다. 부하추종운전중 n개의 제어군이 사용된다면 AO는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$AO^{t+1} = AO^t + \Delta f_{AO}(CR_1, CR_2, \dots, CR_n, P) + \frac{\Delta AO}{\Delta X} (X^{t+1} - X^t) \quad (5)$$

$$\Delta f_{AO} = f_{AO}(CR_1, CR_2, \dots, CR_n, P)^{t+1} - f_{AO}(CR_1, CR_2, \dots, CR_n, P)^t \quad (6)$$

여기서, AO^{t+1} 는 time step t+1에서의 AO를 나타낸다. f_{AO} 는 제논이 전출력 평형상태로 고정된 상태에서 출력준위와 제어봉 위치에 따른 AO의 영향을 나타내는 함수로 일반적인 함수의 형태나 보간법으로는 잘 나타낼 수 없다. 따라서 일반적인 다변수 함수에 대한 근사 추론의 가능성을 인정받고 있는 신경회로망(neural network)을 이용하여 f_{AO} 를 함수화하였다. AO 추론 신경회로망은 1개의 은닉층을 가진 다층 신경회로망으로 입력층은 제어군의 위치와 출력준위, 출력층은 AO로 구성되어 있다. AO 신경회로망의 학습은 일반적으로 사용되는 오류역전파(error back-propagation) 학습법보다 정확도가 높고 수렴성이 빠른 것으로 알려진 OLL 학습법(Optimization Layer by Layer-learning algorithm)을 사용하였다. X는 노심 상부와 하부의 제논 수밀도 차이를 나타내고, $\frac{\Delta AO}{\Delta X}$ 는 X의 변화량에 대한 AO의 변화량을 나타내는데 입력상수로 주어진다.

3.4 FPM-SBF의 계산 절차

FPM-SBF의 임계 제어봉 위치 탐색 절차는 다음의 과정에 의한다.

- 1) 노심 평균 출력, 평균 제논 수밀도, 평균 요오드 수밀도, AO, XAO, IAO를 초기조건으로 $t=t+\Delta t$ 시간의 제논 수밀도, 요오드 수밀도, XAO, IAO를 계산한다.
- 2) 출력 변화 및 제논 재분포에 따른 유효증배계수의 변화를 계산한다.
- 3) 제어군 구동 결정 논리에 의하여 구동할 제어군을 선택한다.
- 4) 선택한 제어군의 구동으로 노심의 임계를 유지할 수 있는지, 구동 범위가 제어 논리에 준한 제어군의 삽입 또는 인출 한계를 만족하는지 확인한다. 만족하지 않으면 제어 논리에 의하여 다

- 른 제어군을 결정한다. 조건을 만족하면 5)를 수행한다.
- 5) 결정된 구동제어군으로 임계를 만족하는 제어봉의 위치를 탐색한다.
 - 6) 임계 제어봉 위치 및 제논 수밀도로부터 AO를 계산한다.
 - 7) AO가 허용범위를 만족하는지 확인한다. 만약 만족하지 않으면 제어 논리에 의하여 제어군의 삽입, 인출 순서를 다르게 하여 4)를 수행한다. 조건을 만족하면 8)을 수행한다.
 - 8) time step이 최종 예측시간을 만족하면 계산을 끝낸다. 만족하지 않으면 9)를 수행한다.
 - 9) time step이 노심 초기조건을 update 해야 될 경우 이를 update하고 다음 time step의 계산을 수행한다.

4 제어 논리

무봉산 노심의 출력제어는 반응도 및 출력분포를 동시에 제어할 수 있어야 하므로 제어군 간의 중첩을 고정할 경우 출력분포의 제어는 원활히 이루어질 수 없다. 반응도 및 출력분포를 동시에 제어할 수 있는 제어기법중 Mode K 기법은 구동 제어군을 결정하는 논리가 명확하고 제어군간의 고정된 중첩을 사용하지 않으므로 무봉산 노심의 제어논리에 적절하다고 판단되어 기존 Mode K 기법에서 제어군 삽입 순서를 2종류로 추가한 방법으로 적용하였다.

본 연구에서 적용한 무봉산 노심은 연소도에 따른 잉여반응도 제어에 RCB1, RCB2, RCB3의 3개의 제어군이 사용된다. 부하추종운전에 추가로 사용할 수 있는 제어군은 LFB1, LFB2이다. 연소도에 따른 잉여반응도 제어에 사용되는 제어군은 별도로 두고 LFB1, LFB2만을 사용하여 부하추종운전을 하기에는 제어군의 사용이 제한적이다. 따라서 부하추종운전중에는 정지용 제어군을 제외한 모든 제어군을 사용하도록 하였다. 단 잉여반응도 제어를 주로 담당하는 RCB2의 제어군은 기본적인 삽입 순서에서 제외하여 RCB1, RCB3, LFB1, LFB2가 차례로 삽입이 되도록 결정하였으며 이 삽입 순서로 제어가 불가능할 경우에만 RCB2 제어군을 포함하여 제어군 결정 논리를 적용하도록 하였다.

Mode K의 구동 제어군 결정 논리는 ASI 편차(ASI-ESI)를 입력으로 하여 구동할 제어군을 결정한다. Mode K 논리에서 원자로 제어계통(RRS)은 모두 4 종류의 stage flag이라는 정보를 가지고 있는데, 이 flag들은 각각 FOS(Fixed Overlap Stage), ARS(ASI Restoring Stage), UARS(Urgent ARS), ORS(Overlap Restoring Stage) 상황을 나타낸다. (차세대원전에 적용된 Mode K 논리는 처음에 4 종류의 stage flag으로 개발되었으나 현재 UARS는 삭제되어 3 종류로 줄어들었다. 무봉산 노심에서는 4 종류의 stage flag을 사용하도록 하였다.) 무봉산 노심에서는 FOS, ARS, ORS가 기존의 Mode K와 동일하며 제어군 삽입 순서는 RCB1, RCB3, LFB1, LFB2이다. UARS에서는 RCB2 제어군을 포함하여 ARS가 다시 적용되도록 하였다.

5. 일일 부하추종운전중 노심 거동 분석

출력변동의 형태가 14-2-6-2hr, 100-50-100%P에 대하여 BOX(422 Mwd/Mtu), MOC(9197 Mwd/Mtu), EOC(15885 Mwd/Mtu)를 대상으로 일일 부하추종운전중의 노심 거동을 모사 계산하였다. 운전허용범위는 전출력 평형제논에서의 AO를 기준으로 $\pm 10\%$ 로 설정하였다. FPM-SBF에

필요한 전출력 평형제논 상태의 출력준위 및 제어봉 위치에 대한 유효증배계수와 AO에 대한 자료는 MASTER 코드를 사용하여 계산하였다. 모사 방법은 먼저 MASTER 코드의 결과로 초기조건을 설정하여 FPM-SBF로 2시간 동안의 임계 제어봉 위치를 탐색한 후 이 제어봉 위치를 MASTER 코드의 입력으로 주되 한 제어군은 MASTER 코드에서 임계를 찾도록 한다. MASTER의 2시간 계산이 진행되면 이 자료를 다시 FPM-SBF의 입력자료로 초기조건을 update하여 다음 2시간을 진행하여 24시간동안의 노심 거동을 모사 계산하는 절차를 취하였다. 계산 시간 간격은 SFM-SBF는 2.4분 MASTER 코드는 24분으로 설정하였으며 Stage Flag Setpoint는 S_0 부터 차례로 0.02, 2.0, 4.0, 10.0%로 두었다.

일일 부하추종운전중의 노심 거동 모사 계산 결과는 그림 5~7에 나타난 바와 같다. 출력을 감발하기 시작한 직후나 끝난 시점, 출력복귀 도중 또는 출력복귀가 끝난 직후와 같이 제논변화량에 대한 반응도의 변화가 큰 시점의 일부에서는 2시간 간격의 초기조건 update로는 적절한 예측을 할 수 없는 경우도 발생하며 이 경우에는 더 짧은 시간 간격의 초기조건 update가 필요한 것으로 나타났다. 그러나 전반적으로 FPM-SBF는 반응도와 출력분포를 동시에 만족하는 제어봉의 위치를 비교적 적절히 탐색하고, AO의 경향도 MASTER와 유사한 것으로 나타났다. FPM-SBF의 기능이 임계 제어봉의 위치나 AO의 정확한 계산이 아니라 빠른 계산 시간으로 그 경향을 예측하는 것이므로 그 목적은 만족하는 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 무봉산 노심은 Mode K의 구동 제어군 결정 논리를 적용한 제어 논리로 전출력 평형제논 상태의 AO를 기준으로 $\pm 10\%$ 이내에서 일일 부하추종운전이 가능한 것으로 나타났다.

6. 결론

무봉산 노심의 출력제어를 위하여 현재의 노심 상태를 입력으로 1~2시간 이후의 노심 상태를 예측하는 FPM-SBF를 개발하였으며, MASTER 코드와 병행하여 일일 부하추종운전 모사 계산을 수행하였다. 모사 계산 결과 FPM-SBF는 빠른 예측 기능을 적절히 수행할 수 있는 것으로 나타나 출력분포 자동제어에 하나의 해결 방법이 될 수 있는 것으로 판단된다. 또한 Mode K의 구동 제어군 결정 논리와 제어군의 구동 순서를 2가지로 다양화한 제어 논리로 전출력 평형제논 상태의 AO를 기준으로 $\pm 10\%$ 이내에서 일일 부하추종운전이 가능한 것으로 나타났다. FPM-SBF는 그 특성상 지속적으로 초기 입력자료를 update해야 하므로 on-line에 의한 실시간 노심해석코드와의 효율적인 연계가 이루어진다면 보다 적절한 노심 예측 기능을 수행할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 98 원자력 연구개발사업 중 한국원자력연구소에서 수행중인 신형원자로 고유노심 기술개발 과제에서 지원한 위탁과제로 수행되었음.

참고문헌

1. "무봉산 운전을 위한 운전방식의 개선 연구," KAERI/CM-097/96, 한국원자력연구소, 1996.

2. 오수열, "Mode K 기법에 의한 차세대 원전 일일 부하추종운전중 노심 거동," 한국원자력연구소, 1996.
3. 성승환, "신경회로망을 이용한 노심해석 기법 연구," 공학박사학위논문, 서울대학교, 1995.
4. "축방향 노심출력분포 감시계통 개발," KRC-87N-J07, 한국전력공사 기술연구원, 1990.
5. Jung In Choi, et al., "Automatic Reactor Power Control for a Pressurized Water Reactor," Nuclear Technology, Vol.102, No.2, 1993.
6. ABB-CE, "Soluble Boron Free Passive PWR Study Phase II Summary Report," November 29, 1989.

A	B	A	B	A	B	C
B	A	B	A	B	C	A
A	B	A	B	C	A	C
B	A	B	C	B	C	B
A	B	C	B	C	A	
B	C	A	C	A		
C	A	C	B			

Region Enrichment

A	3.0 w/o
B	3.5 w/o(B1+B2)
C	4.0 w/o(C1+C2)

그림 1 1주기 노심 장전 모형

1	9	8	3	9		7
9	5	7	8	6	7	
8	7	4	9	8		8
3	8	9	2		9	
9	6	8		6		
	7		9			
7		8				

<u>Index</u>	<u>Control Bank Name</u>	<u>Material</u>
1, 2, 3	RCB 1, 2, 3	Ag-In-Cd
4, 5	LFB 1, 2	Ag-In-Cd
6, 7, 8, 9	SDB 1, 2, 3, 4	B ₄ C

그림 2 제어봉의 재질 및 배열

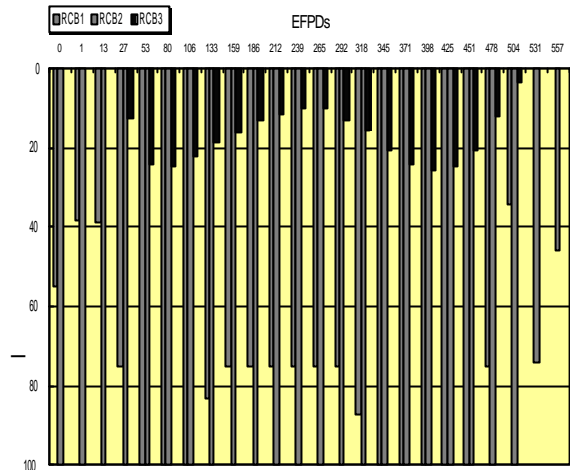


그림 3 연소도에 따른 임계 제어봉 위치

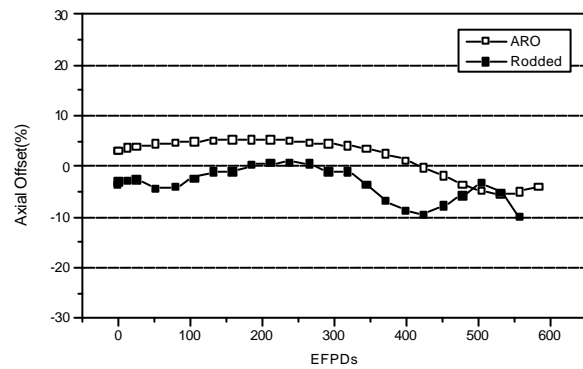


그림 4 연소도에 따른 AO 변화

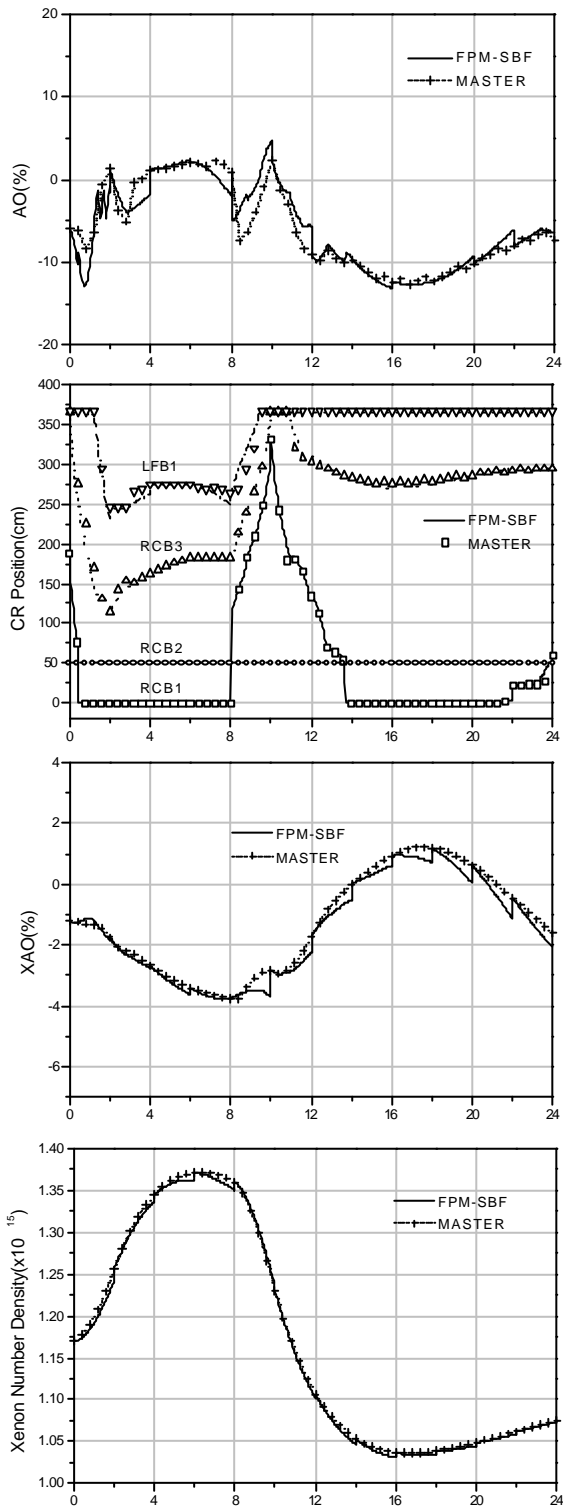


그림 5 부하추종운전중 노심 거동(BOX)

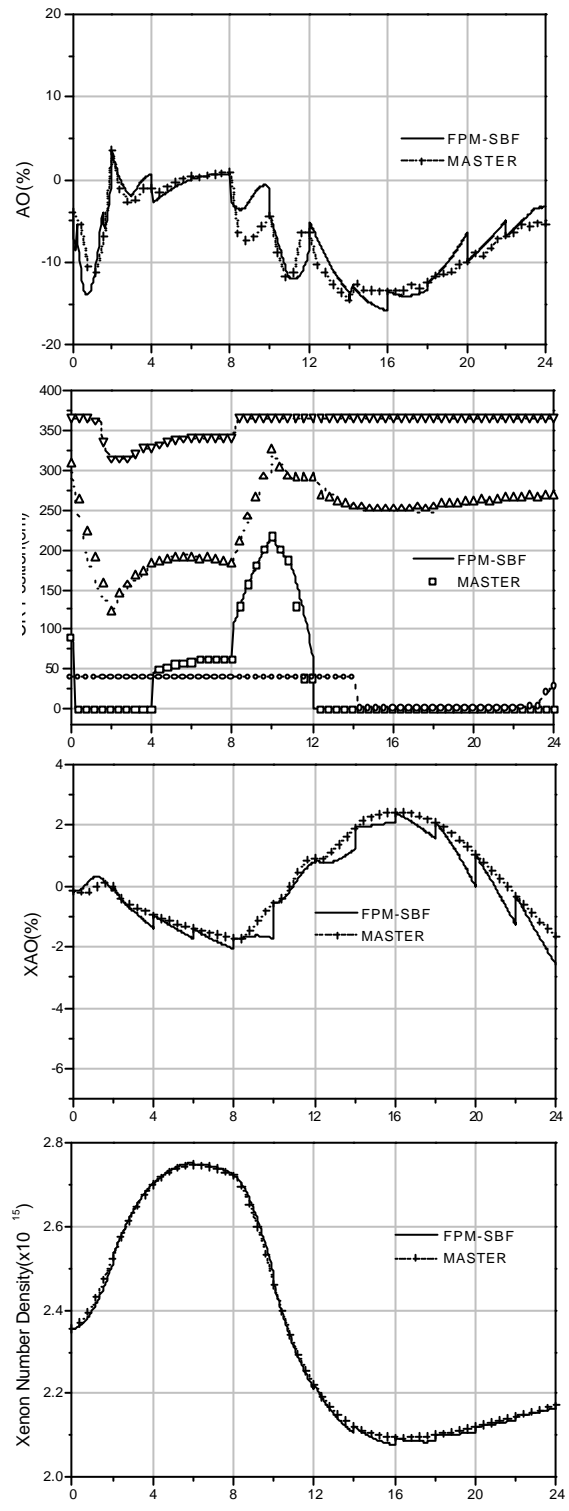


그림 6 부하추종운전중 노심 거동(MOC)

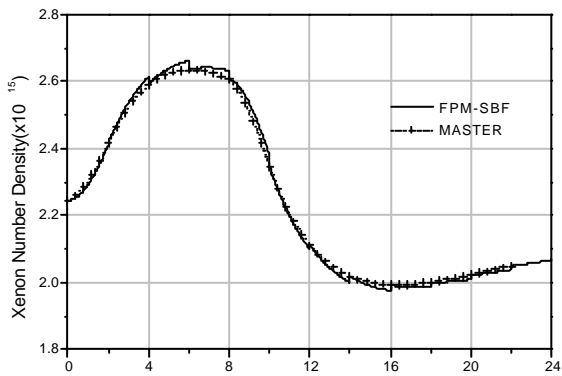
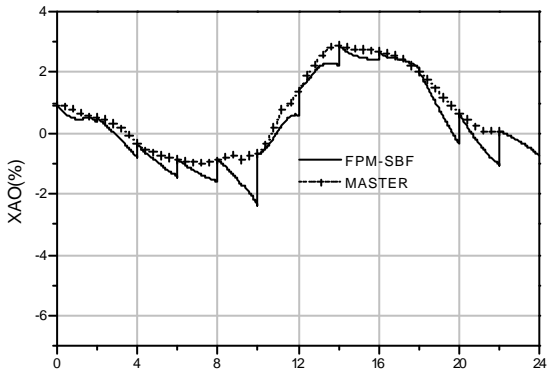
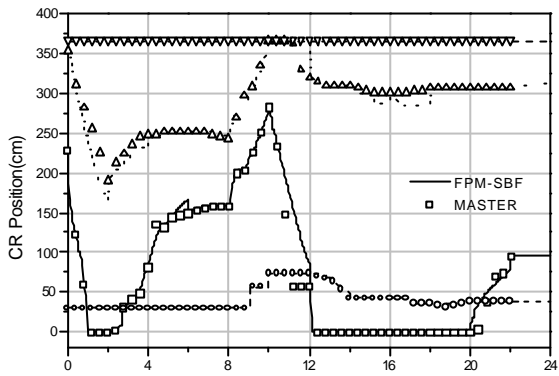
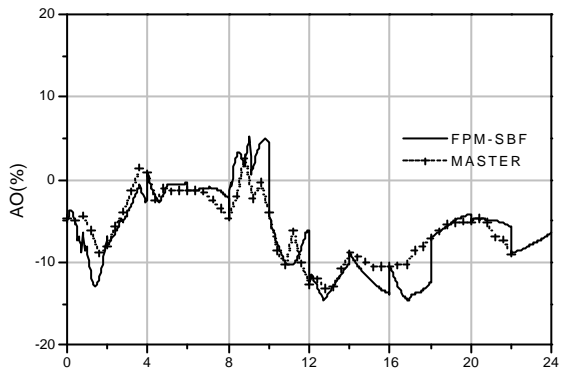


그림 7 부하추종운전중 노심 거동(EOC)