

차세대 원전의 Mode K 기법에 의한 일일 부하추종운전중 노심 거동

오 수 열 · 장 종 화
한국원자력연구소

요 약

원전의 常用 부하추종운전 능력을 위한 노심 제어기법인 Mode K를 개발하고, 이를 차세대 원전의 제1주기 주기초에 적용하여 일일 부하추종운전을 수행할 때의 노심 거동을 ONED94 전산코드로 모사 계산하였다. 계산 결과, 단순하면서도 유연한 형태의 봉산 농도 변화를 수용하면서 제어봉으로 출력분포 및 반응도를 동시에 제어하는 Mode K 제어 논리가 잘 작동하였으며, PbXb 운전에 비하여 액체 폐기물 생성량이 30%까지 감소하였다.

1. 서 론

일일 부하추종운전 능력은 차세대 원전에 부과된 설계 기본요건의 하나로서, 90%주기말까지 100-50 이하-100 %출력, 시간당 25%출력 변동률, 부분출력 유지시간 4~10 시간 형태의 운전이 가능할 것을 요구하고 있다[1]. 노심을 제외한 NSSS와 conventional island 설계 입장에서 보면 이 요건은 현재 가동중인 국내 경수로도 이미 만족하고 있는 정도의 요건이므로[2] 역시 관건은 노심 제어라 할 수 있다. 특히 단지 설계상 뿐이거나 실제로는 운전이 어려운 능력이 아닌 常用 운전 능력을 위해서는 새로운 노심 제어기법이 필요하다는 것이 필자들의 기본 인식이다.

이 논문에서 노심 제어기법이란 제어 논리와 운전 전략을 포함하는 용어로 사용한다. 제어 논리란 노심의 출력분포, 온도(즉 반응도) 등을 허용 범위 이내로 유지하는 데 사용되는 논리로서, 앞으로 좁은 의미에서 구동할 제어군의 선택, 구동 방향 및 속도를 정하는 논리, 즉 RRS (Reactor Regulating System)의 논리를 의미한다. 운전 전략이란, 같은 제어 논리를 사용하더라도, 어떤 운전 목표, 예를 들어 액체 폐기물 생성량을 최소화한다거나 신속 출력복귀 능력을 최대화한다는 목표를 달성하기 위한 RRS 이외의 노심 제어에 관련된 계통을 운전하는 방식을 의미하기로 한다¹⁾.

1) 보통 운전 전략이란 여기서 말하는 운전 목표를 의미하는 경우가 많다. 그러나 여기서는 운전 전략을 더

좁은 의미에서는 붕산수 또는 순수의 주입률 및 총량, 시점 등을 결정하는 방식에 초점을 맞추고 있다. 이러한 전략은 RRS 제어 논리가 제 기능을 발휘할 수 있는 요건을 구성하여야 하기 때문에 어떤 기법의 성패는 제어 논리와 전략의 전체적인 적절성으로 결정되는 것이다. 여기서 기술할 새로운 Mode K 기법²⁾의 핵심은, 제어 논리 면에서 자동 운전하는 RRS에 반응도가가 낮은 PSCEA (Part Strength Control Element Assembly)를 포함하였다는 점과 일정한 논리에 따라 개별 제어 구간간의 중첩이 변한다는 점이고, 전략 면에서는 붕산수 주입과 회석의 변환 횟수를 가능한 한 줄인다는 점과 부분출력 중의 붕산 회석률에 유연성이 있다는 점이다.

2. Mode K 기법

2.1. 상세 설계 요건

먼저 Mode K 노심 제어기법이 만족할 요건으로 다음 사항들을 도출하였다.

(1) 기본요건에서 정한 운전 중에 노심의 출력분포와 온도를 적절히 제어할 것. (2) 일일 운전에서 필요한 제어봉 삽입 조건 조성을 위한 출력 감발 시작 전의 어떠한 운전도 필요 없을 것. 전출력 정상상태 운전중 모든 제어봉은 완전 인출 상태임. (3) 제어봉은 자동 운전일 것. (4) 제어봉 구동 논리는 현 기본설계상 계측 가능한 노심 변수를 입력으로 할 것. (5) 붕산 농도 변화 양상이 단순하며, 주입·회석 운전의 변환 횟수가 적을 것³⁾.

두 번째 요건은 대부분의 시간에는 전출력으로 운전함을 가정한 것이다. 미리 어느 제어봉이 노심에 삽입되어 있는 조건에서 일일 부하추종운전을 시작할 경우에는 그 제어가 훨씬 쉽다. 그러나 보통 때도 항상 제어봉 삽입 상태를 유지하거나 또는 일일 운전 얼마 전에 제어봉을 미리 삽입해 놓기 위해 붕산을 회석하는 사전 운전은 바람직하지 않다. 다음 요건은 현재 CE의 설계에서는 수동 운전만 가능한 출력분포 제어용 PSCEA를 자동 RRS에 포함시켜 운전원의 부담을 줄이려는 의도이며 따라서 Mode K 논리가 출력분포까지도 고려해야 함을 뜻한다. 네 번째 요건은 Xe 분포 같은 on-line 노심 계산 도구의 결과를 제어 입력으로 사용하지 않는다는 의미로서, 비록 신뢰성있는 on-line 노심 계산 도구들이 개발되고 있으나 아직은 이들을 고려하지 않겠다는 것이

포괄적인 의미인 strategy가 아니고 tactics란 의미로 쓰고 있다. Westinghouse의 CAOC 운전중 SPINR을 예로 든다면, 출력복귀 능력 확보는 운전 목표이며 이를 위해 부분출력 운전중 제어봉을 가능한 한 깊이 유지할 수 있도록 붕산을 조절하는 것이 전략이라 하겠다.

- 2) 위의 필요를 충족하기 위해 새로 개발한 기법으로서, 종전의 출력분포 제어 전담용 heavy bank(HROD)를 사용하는 같은 이름의 기법^[3]과는 다른 것이나 명칭은 계속 Mode K로 하기로 정한 바 있다.
- 3) 적어도 현재의 상용 PWR 설계에서는 전출력 정상상태에서도 제어봉을 상당량 삽입한 채 있지 않는 한 일일 부하추종운전중 soluble boron free 운전은 물리적으로 불가능하다^[4].

다. 다섯 번 째는, 봉산 농도는 미세하게 조절할 수 있는 성질이 아니므로 개략적인 조절에 대해서도 RRS가 탄력적으로 노심을 상세 제어할 수 있어야 함을 뜻하며 동시에 운전원의 운전 부담을 줄인다는 목표를 표현한 것이다.

2.2. Mode K 제어 논리 및 봉산 주입·회석 운전전략

Mode K 기법의 RRS 제어 논리는 먼저, 기존 CE 설계의 RRS 논리와 같이, 노심 냉각재 평균 온도와 설정치간의 오차 신호로부터 제어봉 구동 방향과 속도를 결정한다. 여기에 새로 추가된 것이 구동 제어군 결정 논리인 데, 현재 ASI(Axial Shape Index)와 목표 ASI간의 차이를 입력으로 하여 구동할 제어군을 결정한다. 제어봉이 노심의 상반부에서 움직일 때와 하반부에서 움직일 때 각각 ASI의 변화 양상이 서로 반대가 된다는 노심의 물리적 특성이 이 결정의 근거가 된다. 따라서 기존의 고정된 제어군간 중첩 개념을 포기하여야 한다.

Mode K 논리에서는 ASI 차이의 크기에 따라 모두 4 가지의 stage flag을 가지는 데 이들은 FOS (Fixed Overlap Stage), ARS(ASI Restoring Stage), UARS(Urgent ASI Restoring Stage), ORS (Overlapping Restoring Stage)이며, 그림 1에 flag 변경 개념을 보였다[5]. FOS 상태에서는 모든 제어군을 그 때의 중첩을 유지한 채 동시에 구동하며, ARS일 때는 현재 노심에 삽입되어 있는 제어군 중에서 ASI를 목표치로 되돌릴 수 있는 한 제어군을 선택해 구동한다. UARS이면 상황에 따라 완전 인출 또는 완전 삽입된 제어군이 구동 제어군이 되어 신속한 ASI 회복을 피하게 된다. ORS에서는 기존 중첩을 회복하기 위해 하나 또는 그 이상의 제어군을 구동한다.

여기서 주목할 점은 Mode K 논리가 반응도 제어중에 부수적으로 ASI를 제어하는 개념이라는 점이다. 만일 ASI를 독립적인 회로로 제어한다면 경우에 따라서 ASI 제어용으로 구동된 반대 방향으로 반응도 제어를 위해 제어봉이 구동되면서 삽입·인출이 반복될 가능성이 있다. 한편 위의 설명에서 출력분포 제어를 구체적으로는 ASI 차이를 어떤 좁은 영역(band) 이내로 유지하는 것으로 취급하고 있으나 꼭 ASI 차이가 아니더라도 제어봉의 움직임과 물리적으로 관련을 가지는 다른 변수를 제어 대상으로 할 수도 있다는 점도 주목할만 하다.

봉산 주입·회석 운전 전략은 Mode K 논리대로 구동할 제어군이 가용하도록 하면서 앞의 설계 요건 5를 만족하여야 한다. 예를 들어 논리에 따라서 노심 하부의 제어군을 인출하여야 하는 데 반 이상 삽입되어 있는 제어군이 없다면 Mode K 논리는 차선책으로 그나마 가장 깊이 삽입된 제어군을 인출하도록 결정한다. 이 경우 ASI 제어가 만족스럽지 못할 것은 분명하므로 이러한 상황을 피하여야 하는 데, 이를 위해 적절한 주입·회석 운전 scenario를 미리 가져야 함은 Framatome의 Mode X나 KWU의 기법 등 다른 어떤 기법에서도 마찬가지이다.

Mode K 전략에서는 출력이 변동하는 동안에는 원칙적으로는 농도를 조절하지 않는다. 한편 일일 부하추중운전중 초점이 되는 시점은 주로 전출력 복귀 때이다. 이 때는 제어봉 인출이 필요할 뿐만 아니라 일반적으로 출력의 하부 편중이 심화되므로 부분출력 유지중에 충분히 제어봉을 삽입하고 있어야 하기 때문에 Mode K에서는 출력감발 후의 부분출력 유지중에 인출 가능한 제어봉이 있어도 봉산을 회석한다.

3. 일일 부하추중운전중 노심 거동 분석

3.1. 분석 대상 및 방법

분석 대상은 1,300 MWe급인 차세대 원전 제1주기 주기초(1,000 MWD/MTU)의 일일 부하추중운전으로 그 출력변동 형태는 그림 2와 같다. RRS는 2개의 PSCEA 제어군과 3개의 full strength 제어군으로 구성되며, 반응도가는 선행 제어군인 P2가 약 200 pcm, P1이 250 pcm이고 R3 300, R2 1000, R1 900 pcm 정도이다. 실제로 일일 부하추중운전에 R2까지 노심에 삽입되는 경우는 없으므로 P2~P1간, P1~R3간에서만 가변 중첩을 허용한다.

노심의 거동을 모사 계산하는 데 사용한 ONED94 코드는 노달 방법을 사용하는 1차원 유사 과도상태 코드로서 현재 국내 Westinghouse형 원전의 운전 지원용으로 사용되고 있는 ONED90을 CE형 노심에도 사용할 수 있도록 개선한 것이다[6,7]. 이 코드에 필요한 단면적 자료는 DIT-ROCS 체계[8]로 생산하였으며, 특정 노심 연소도에 대해 ROCS 계산치를 기준으로 tuning 절차를 거친 후 사용한다. 운전중 NSSS의 과도상태는 적절히 제어되고 있다고 가정하였으며, 축방향 20개 노드, 시간 간격은 2.4 또는 12분을 사용하였다.

3.2. 노심 거동

먼저 CE의 전통적 방식인 그림 3의 이틀에 걸친 PbXb 운전[9]을 보자. 이 운전은 반응도 제어는 봉산이 담당하고 PSCEA들을 수동으로 움직여 ASI를 목표 ASI (전출력 평형 ASI) $\pm 1\%$ 이내로 유지하는 방식으로 영광 3,4호기의 시운전시 수행한 바 있다[10]. ASI 유지가 운전 목표로서 선행 제어군을 노심의 반 이상 들어가지 않도록 하고 있다는 점을 볼 수 있다.

그림 4와 5는 ASI 변화 허용 폭을 늘리면서 Mode K 기법을 적용한 경우이다. 그림 1 stage flag들의 set point를 So부터 차례로 0.02, 2.0, 4.0, 5.0%로 하였을 경우로서, 그림 4는 50%출력 도달 후 반응도를 정확히 봉산 회석으로 제어한 경우이고 5는 회석률을 크게 하여 미리 회석한 경우이다. 우선 그림 4에서 봉산 농도 변화 형태가 단순해 진 것과 ASI 변화는 PbXb보다 훨씬 크

지만 F_z 값의 변화는 그리 심하지 않은 것을 볼 수 있다. 또 그림 5에서 여전히 Mode K 논리가 ASI를 허용 범위 안으로 잘 제어하고 있음을 보이고 있으며, 그림으로 보이지는 않았지만 과소 회석률의 경우도 그러하다. 과대 회석률을 택하면 신속 출력복귀 요청에 대응하기 쉽고, 반대로는 낮은 봉산 농도 상황에서도 부분출력 유지 시간이 충분히 길기 때문에 그 동안 충분히 회석하여 출력 복귀시의 상승률에 제약을 받지 않는다. 요컨대 봉산 회석률의 유연성을 얻고 있는 것이다.

그림 6은, 다음 날도 확실히 일일 운전을 한다고 생각하였을 때 ARO 상태를 유도할 이유가 없으므로, 전출력 복귀 후 P2를 충분히 이용한 경우로서 역시 Mode K의 유연함을 보여주는 것이다. PbXb와 비교하여 폐기물 생성량이 31%까지 크게 줄었음을 알 수 있다.

마지막으로 Xe 진동의 영향을 보자. 일일 부하추종운전중 출력복귀 동안에는 반응도 제한 효과와 Xe 재분포에 의한 효과가 더해지면서 출력 하부 편중 현상이 일어나는 데, ASI 차이의 허용 폭이 클 수록 그리고 연소가 진행될 수록 심화됨을 발견할 수 있었다. 따라서 주기말로 갈 수록 Mode K의 flag set point들이 작아야 한다.

4. 결론 및 향후 연구 방향

새로 개발한 노심 제어기법인 Mode K를 차세대 원전에 적용해 일일 부하추종운전을 모사 계산한 결과, PSCEA까지 포함한 RRS가 출력분포 및 반응도를 동시에 적절히 제어하였으며, 기존의 수동 운전에 의존하는 출력분포 제어 부담을 크게 줄임으로써 그 기법의 타당성을 보였다. 이러한 동시 제어를 통해 ASI 변화폭을 크게 주어도 제어 가능하므로 운전 여유도가 커진다는 의의도 찾을 수 있다. 또한 봉산 농도 조절 형태의 단순화와 함께 액체 폐기물 생성량의 감소를 달성하였으며, 다양한 봉산 주입·회석률 운전에 대해서 유연하게 대응할 수 있는 가능성을 보이고 있다. 그러나 한편으로는 이러한 유연성 때문에 오히려 운전원의 선택이 어려울 수도 있으므로 예측 기능을 가진 on-line 노심 계산기가 필요하다고 하겠다.

출력분포 제어의 대상으로 ASI가 아니고 다른 인자, 예를 들어 축방향 출력침투 계수를 사용하는 경우도 고려할 만하다. F_z 는 3차원 노심 감시계통에서 얻을 수 있는 값이고, 영광 3,4호기 등 CE형 노심에서 Tech.Spec.상 ASI 최대 허용치가 ± 0.27 에 이를 정도로 크기 때문에 이러한 제어 대상의 변경도 상당한 타당성을 갖는다고 하겠다.

한편 I&C 설계 분야 등과의 연계 및 노심을 포함한 NSSS 전체의 거동을 검토해야만 현실적 타당성을 획득할 수 있다고 보고 있으므로 simulator 등을 이용한 검증 작업도 계획중이다.

참고 문헌

1. “차세대 원자로 기술개발 (I) - 차세대 원자로 기술,” 제1권, 통상산업부·과학기술처, 1994.12.
2. 장종화 등, “가압경수로의 부하추종 운전” 제3장, KAERI/AR-386/93, 한국원자력연구소, 1993.12.
3. 황완 등, “원자력발전소 부하추종 기술 개발,” KAER/RR-1003/90, 과학기술처, 1991. 7.
4. 오수열, 구양현 “차세대 원전의 부하추종 운전 분석,” 제2장, N-410-N1-462-003, 한국원자력 연구소, 1994. 12.
5. 오수열, “Mode K 기법에 의한 차세대 원전의 제1주기 부하추종 운전,” (발간 예정)
6. 장종화 등, “노심관리용 1차원 코드 ONED90 개선,” KAERI/RR-1296/93, 한국원자력연구소, 1994. 2.
7. 송재승, “CE형 노심에 대한 ONED94 적용,” N-410-N1-462-001, 한국원자력연구소, 1994. 12.
8. “Nuclear Design Report for Yonggwang Unit 3, Cycle 1,” KAERI·ABB-CE.
9. “Operations Guideline for Power Operations for Yonggwang Nuclear Power Plant, Units 3 and 4,” Attachment G, 10487-SE-OG170-04, ABB-CE, April 1994.
10. 지성구, “Evaluation Report for Transient Related Tests of YGN 4,” Sec.2.7, 한국원자력 연구소, 1995. 9.

표 1. 일일 부하추종 운전중 액체 폐기물 생성량 (5% 주기초)

운전 방식	액체 폐기물 생성량			
	제1일 (liter)	감소량 (%)	3일간 (liter)	감소량 (%)
PbXb	24,460	-	73,070	-
Mode K				
- 정확 회석률 경우	20,510	16	59,150	19
- 과대 회석률 경우	20,500	16	-	-
- 출력복귀 후 P2 최대 이용 경우	18,280	25	50,580	31

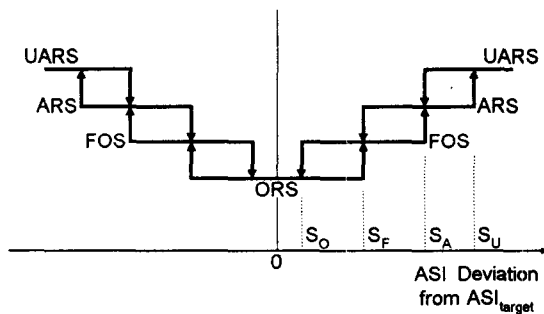


그림 1. Mode K RRS의 Stage Flag 전환 개념

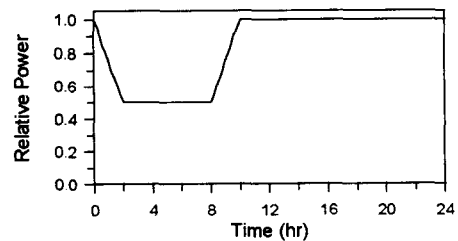


그림 2. 일일 부하추종 운전 형태

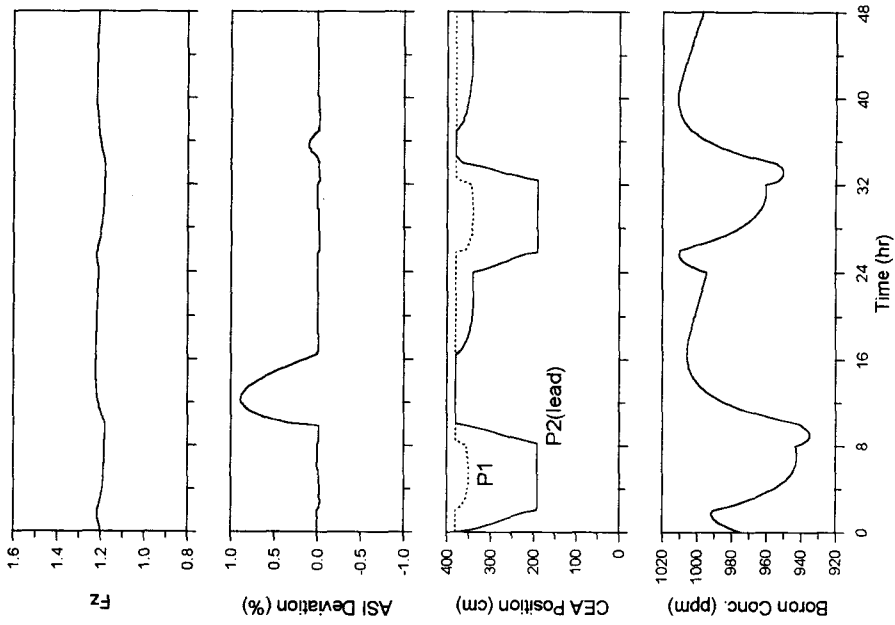


그림 3. PbXb 운전시 노심 거동

(정확 회석을 경우)

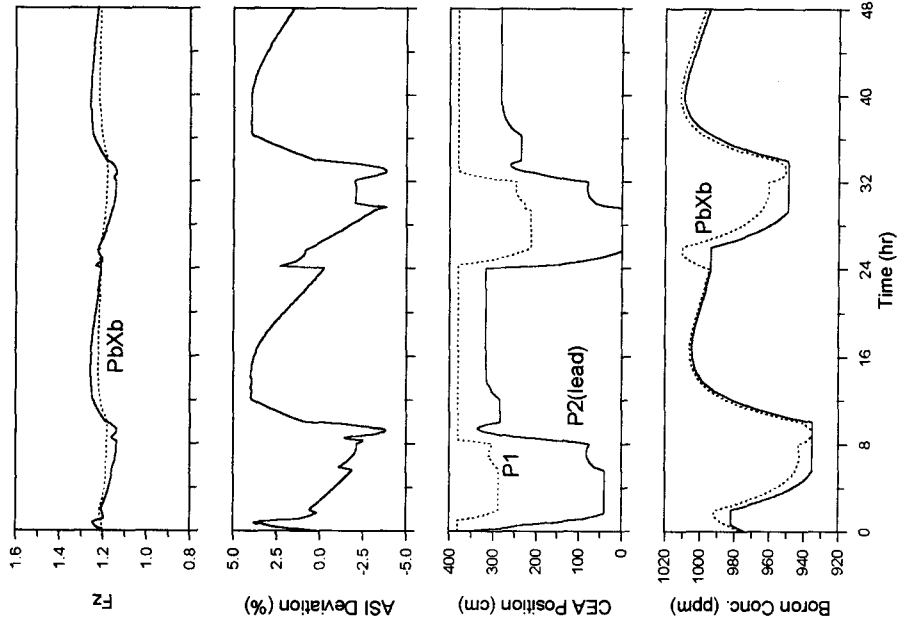


그림 4. Mode K 운전시 노심 거동

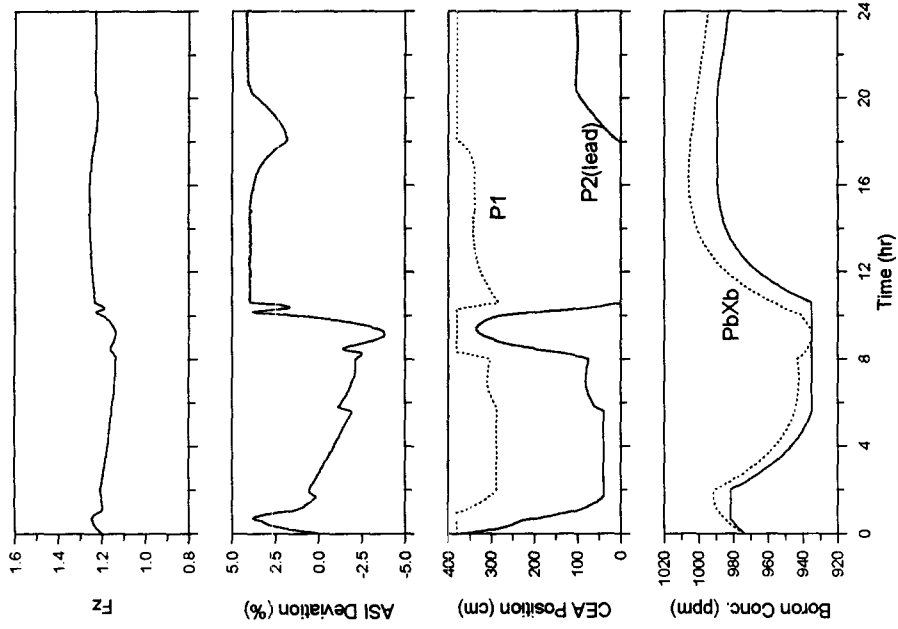


그림 6. Mode K 운전시 노심 거동
(출력복귀 후 P2 최대 이용 경우)

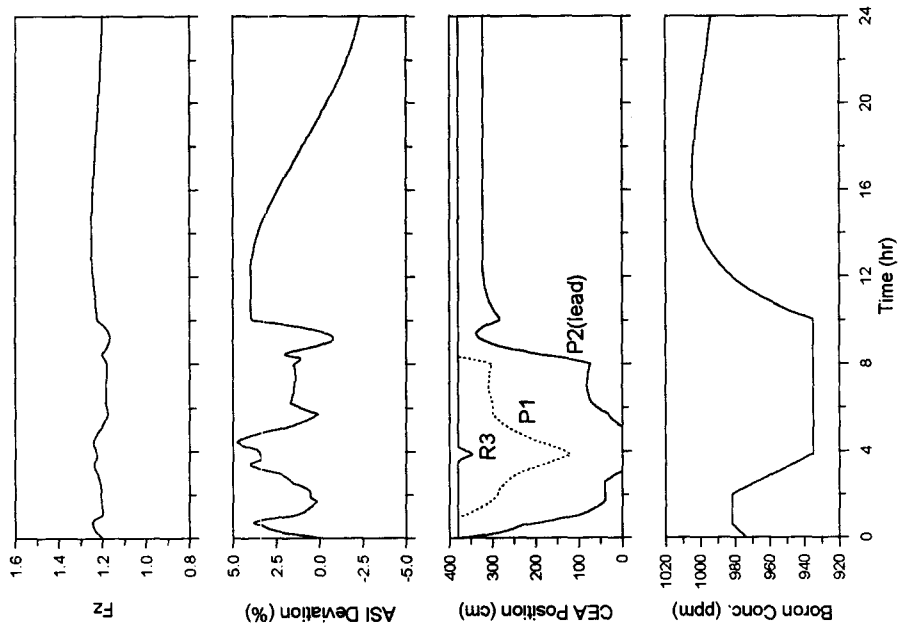


그림 5. Mode K 운전시 노심 거동
(과대 회석을 경우)