

무봉산 노심의 부하추중운전을 위한 출력제어기법 개발

장진욱, 이은철

서울대학교

최중인

경원대학교

요 약

무봉산 노심의 부하추중운전을 위하여 출력제어기법을 개발하였다. 무봉산 노심의 출력제어 논리는 출력 준위와 제어봉의 위치에 따라 제어군의 역할을 반응도 제어에 사용되는 제어군과 출력분포 제어에 사용되는 제어군으로 구분하여 8가지의 제어군 구동 형태를 가지며, ASI 편차를 입력으로 구동할 제어군이 결정된다. 무봉산 노심의 출력제어 논리를 적용하여 ONED94 코드로 일일 부하추중운전을 모사하였다. 모사 결과 주기초(0 MWD/MTU)와 주기중(7000 MWD/MTU)에는 ASI 편차 $\pm 10\%$ 내에서 부하추중운전이 가능하며, 85% 주기말(11000 MWD/MTU)에서는 $\pm 12\%$ 내에서 부하추중운전이 가능한 것으로 나타났다.

1. 서 론

무봉산 노심은 연소와 출력 증·감발에 따른 반응도를 수용성 보론 대신 가연성독봉과 제어봉만으로 제어하는 노심으로, 봉산 농도 조절 및 측정이 필요치 않고 운전중 생성되는 액체폐기물의 감소로 CVCS를 간소화 할 수 있으며 큰 부감속계 온도계수를 유지할 수 있어 운전의 유연성을 증진시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 증소형원자로의 적용 가능성에 대한 개념 연구가 진행되어 왔다. 그러나 무봉산 노심의 출력제어는 제어봉만을 사용하여 축방향 출력분포를 제어해야 하므로 기존의 봉산의 사용을 포함하는 출력제어기법과는 다른 제어기법이 필요하다. 본 연구는 무봉산 노심의 출력제어기법을 개발하고 무봉산 노심의 부하추중운전 가능성을 검토하고자 한다.

2. 무봉산 노심의 출력제어기법

2.1 분석 대상 무봉산 노심의 특성

출력제어기법이 적용된 무봉산 노심의 기본 원자로 형태는 Westinghouse의 AP600 노심을 바탕으로 설계된 것으로 1차계통의 열수력 특성과 안내관의 모양과 배치, 핵연료집합체와 핵연료봉의 pitch 등을 포함한 핵연료집합체의 모양은 AP600과 동일하나 핵연료 농축도, BP의 재질/개수/위치/농도, 제어봉의 재질/위치/개수의 설계를 기존 설계기술 범위내에서 변경함으로써 설계된 600MWe급 노심이다. 가연성독봉은 Gadolinium 일체형독봉이 사용되며 전출력운전에서 잉여반응도 제어를 위해 제어봉이 삽입된 상태에서

축방향 출력분포가 ASI 10%이내에 오도록 가연성독봉의 축방향 구성을 enrichment zoning과 BP rod number zoning 방법을 혼합한 형태로 구성되어 있다. 제어봉은 잉여반응도 및 출력분포 제어에 사용되는 제어군(B1, B2, B3)과 출력 조정 및 부하추종운전에 사용되는 제어군(LB1, LB2) 및 정지 제어군(SB1, SB2)으로 구성되어 있다.

2.2 무봉산 노심의 출력제어 목표와 설계 요건

무봉산 노심의 출력제어 목표는 100-50-100% 출력 변동에 대하여 14-2-6-2 시간동안 ASI 편차 $\pm 10\%$ 이내에서 80% 주기말 이후에도 부하추종운전이 가능하여야 하며, 제어봉의 수동 제어를 허용하되 일관된 제어 논리를 가져야 하는 것으로 설정하였다.

출력제어 목표를 달성하기 위하여 무봉산 노심의 출력제어기법에 필요한 설계 요건을 다음과 같이 도출하였다. 제어군 간의 고정된 중첩은 파기하며 제어군 간의 교차도 허용한다. 제어봉을 반응도 제어용과 출력분포 제어용으로 제어 용도에 따라 구분하되, 출력준위와 제어봉의 위치에 따라서 그 소속을 달리할 수 있도록 한다. 부하추종운전용 제어군(LB 1, 2)은 제어봉 삽입, 인출에 따른 출력분포의 관계가 단조롭도록 하기위하여 하나의 제어군으로 간주하여 동시에 작동한다. 일일 부하추종운전 시작전 전출력 정상상태운전에서 출력제어 조건 조성을 위해 미리 제어봉을 구동하는 것은 피한다.

2.3 출력제어 논리

무봉산 노심의 출력제어 출력 준위와 제어봉의 위치에 따라서 제어군의 역할을 구분하고 ASI 편차를 입력으로 구동할 제어군을 결정하는 논리를 가진다. 그림 1은 사용 가능한 모든 제어군의 동작 논리를 나타낸 것으로 S0에서 S5까지 좌에서 우로 갈수록 ASI의 편차가 클 때의 제어군 동작을 표시한 것이며 S6, S7은 추가적인 제어군 동작을 나타낸 것이다. 제어봉이 노심 상반부에서 움직일 때와 하반부에서 움직일 때 ASI의 변화가 달라지므로 I, II, III, IV와 같이 제어봉의 위치와 ASI 변화에 따라 구분하여 나타내었다. 무봉산 노심의 제어군 구동 형태는 이와같이 S0~S7까지 8가지의 stage flag으로 나뉘는데 이 중 ASI 편차의 크기에 따라 어느 한 flag만 ON 상태가 되고 나머지는 OFF가 된다. 단 출력 감소, 부분출력 유지, 출력 복귀 및 전출력 유지시로 출력준위에 따라 노심 상태를 구분하여 각각 사용되는 stage flag이 달라진다. 그림 2는 노심 상태별 stage flag 전환 개념도이다.

출력준위별 제어군 구동 논리는 다음과 같다. 출력 감소 중에는 S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7이 사용되는데 출력 분포의 편중이 심할수록 S0에서 S5 단계로 넘어간다. S0 상태는 Bank 1, 2, 3 중 출력분포를 ESI로 되돌리기 유리한 두 개의 제어봉이 선택되어 구동한다. S1과 S2는 구동되는 ASI 편차 범위는 동일하나 구동 제어군의 방향으로 구분된다. 즉, 제어군을 삽입해야 하는 경우에는 S1이 ON되어 부하추종운전용 제어군만 구동한다. 반대로 출력 감소 도중 제어군을 인출해야 하는 경우에는 S1 대신 S2가 ON되어 Bank 1, 2, 3 중 삽입되어 있는 제어군이 그 때의 중첩을 유지한 채 동시에 구동한다. S3는 Bank 1, 2, 3 중 노심에 삽입되어 있는 제어군 중에서 ASI를 목표치로 되돌릴 수 있는 어느 한 제어군을 선택하여 구동한다. S4에서는 Bank 1, 2, 3 중 S3에서 선택한 제어군의 다음 제어군이 구동 제어군으로 된다. S5는 출력 분포의 편중이 아주 심한 경우 사용되는 것으로 S4에서 선택한 제어군을 더욱 많이 구동시키기 위하여 부하추종운전용 제어군이 반대 방향으로 구동된다. S6과 S7은 출력 분포를 회복시킬 제어군이 원하는 노심

영역(상부 또는 하부)에 더 이상 없는 경우에 구동되는 것으로 출력 분포를 가능한한 적게 왜곡시키며 구동 제어군을 원하는 노심 영역에 위치하도록 한다. S6에서 Bank 1, 2, 3이 구동될 경우에는 역방향으로 구동되는 제어군이 현재 삽입 순서에서 서로 교차하지 않도록 제어군의 구동 한계가 주어진다. 그러나 부하추중운전용 제어군이 함께 사용되는 S7에서는 부하추중운전용 제어군은 Bank 1, 2, 3과 교차를 허용한다. S4, S5, S6, S7의 setpoint는 S₄로 동일하며 현재 제어봉의 위치와 편중된 출력 분포를 되돌릴 수 있는 능력에 따라 그 중 하나가 ON된다.

부분 출력 유지 중에는 S2, S3, S4, S5, S6, S7이 사용된다. 출력 감소시와는 다르게 S0와 S1이 사용되지 않는 이유는 부하추중운전용 제어군이 인출되는 것을 가능한한 방지하도록 하여 반응도 제어에 필요한 제어봉의 위치를 확보함과 동시에 출력 복귀시 출력분포 제어에 적절히 사용되려면 출력 복귀 직전 Bank 1, 2의 위치가 노심 중심부 근처에 있어야 하기 때문이다.

출력 복귀 및 전출력 유지 중에는 S0, S2, S3, S4, S5, S6, S7이 사용된다. 출력 복귀 중에는 출력 분포의 하부 편중이 심하므로 S5가 주로 사용된다. 그러나 S5에서 출력분포 제어 도중 하부로 편중된 출력 분포를 제어할 제어군(Bank 1, 2, 3 중 노심 하부에 위치한 제어군 중 삽입이 가능한 제어군)이 더 이상 없는 경우에는 S6 또는 S7이 사용된다. S6 또는 S7이 사용될 경우에는 출력 분포의 왜곡을 최대한 줄이기 위하여 S5가 구동되는 영역을 확장하여 사용하는데 그림 2에서 점선으로 표시한 부분이 S5의 확장된 구동 영역이다. 출력 복귀 후에 출력분포가 회복되면 목표 출력분포를 유지할 수 있게 S0 setpoint 범위내에 들어오도록 제어봉을 하나 또는 그 이상 구동한다.

3. 일일 부하추중운전 중의 무봉산 노심 거동

무봉산 노심의 일일 부하추중운전은 14-2-6-2 시간동안 100-50-100% 출력의 운전에 대하여 ONED94 코드를 사용하여 모사하였다. 모사 대상은 주기초(0 MWD/MTU), 주기중(7000 MWD/MTU), 85% 주기말(11000 MWD/MTU)로 앞으로 이들 연소도 시점을 BOC, MOC, EOC로 표기하기로 한다. BOC의 경우 실제 전출력 운전을 하기까지는 어느 정도 연소가 이루어지므로 엄밀하게 0 MWD/MTU가 될 수는 없으나 부하추중운전 모사에는 문제가 없는 것으로 판단되어 연소가 진행되지 않은 상태의 균정수 자료를 사용하였으며 MOC와 EOC에서는 그 연소도까지 전출력으로 운전한 것을 가정으로 하여 계산된 균정수 자료를 사용하여 모사하였다. 부하추중운전중 사용되는 제어군의 반응도가는 표 1과 같다.

그림 3~5는 각각 BOC, MOC, EOC에서의 부하추중운전중 2일 간의 노심 거동을 나타낸 것이다. BOC에서 stage별 setpoint는 S₀, S₁, S₃, S₄ 각각 0.2, 2, 4, 10%로, MOC와 EOC에서는 0.2, 4, 7, 10%로 설정하였다. BOC와 MOC의 경우 적용된 출력제어 논리가 ASI 편차 ±10% 이내로 제어하는 것으로 나타났다. 그러나 EOC에서는 부하추중운전 2일째 전출력복귀 후 노심 하부로 편중되는 출력분포를 제어할 제어군(Bank 1, 2)이 모두 삽입된 후에는 출력분포의 제어가 용이하지 않아 ASI 편차가 10%를 벗어나 12%에 이르는 것으로 나타났다. 축방향 침투출력계수는 BOC에서는 출력증가 도중에 큰 값을 보이며, MOC와 EOC에서는 부분출력 유지중 제어군의 위치가 모두 노심 상반부에 위치했을 때 가장 높게 나타났는데, 이 시점들은 출력분포제어가 용이하지 않은 부분들이다.

4. 결론 및 향후 연구 방향

무봉산 노심의 부하추중운전을 위하여 개발된 출력제어 기법은 ASI 편차를 입력으로 구동할 제어군을 결정하는 제어군 구동 논리를 가지며 노심 상태를 출력 감소, 부분출력 유지, 출력 복구 및 전출력 유지로 구분하여 노심 상태에 따라 제어군의 사용이 세분화된다. 무봉산 노심의 출력제어 기법을 적용하여 ONED94 코드로 무봉산 노심의 일일 부하추중운전을 모사하였다. 모사 결과 주기초(0 MWD/MTU)와 주기중(7000 MWD/MTU)에는 ASI 편차 $\pm 10\%$ 내에서 부하추중운전이 가능하며, 85% 주기말(11000 MWD/MTU)에서는 $\pm 12\%$ 내에서 부하추중운전이 가능한 것으로 나타났다. 개발된 무봉산 노심의 출력제어 기법은 노심 상태에 따라 일부 제어군이 수동 제어에 의존하는 형태이다. 특히 하나 이상의 제어군이 서로 다른 방향으로 구동되는 경우가 이에 해당하는데, 무봉산 노심의 최적 제어를 위해서는 수동 제어에 의존하는 부분을 향후 자동 제어로 대체하는 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. 오수열, "Mode K 기법에 의한 차세대 원전 일일 부하추중운전중 노심 거동," 한국원자력연구소, 1996.
2. 장종화 외, "가압경수로의 부하추중운전," KAERI/AR-386/93.
3. 이기봉 외, "User's Manual ACE/ONED (Version 1.0)," KAERI/TR-631/96, 1996.
4. Jung In Choi, et al., "Automatic Reactor Power Control for a Pressurized Water Reactor," Nuclear Technology, Vol.102, No.2, 1993.
5. ABB-CE, "Soluble Boron Free Passive PWR Study Phase II Summary Report," November 29, 1989.
6. ABB-CE, "Elimination of Soluble Boron for a New PWR Design," EPRI Project RP-2614-24, Final Report, September 1989.
7. ABB-CE, "Soluble Boron Free Passive PWR Study Phase II Summary Report," November 29, 1989.

표 1 제어군 반응도가

| 제어군 | 제어군 반응도가(pcm) | | |
|-------|-----------------|--------------------|---------------------|
| | BOC (0 MWD/MTU) | MOC (7000 MWD/MTU) | EOC (11000 MWD/MTU) |
| Bank1 | 650 | 470 | 440 |
| Bank2 | 560 | 610 | 640 |
| Bank3 | 280 | 430 | 530 |
| LB | 1400 | 1680 | 1920 |

주) $\Delta\rho = \frac{k_{ARO} - k}{k_{ARO} \cdot k}$ (반응도가는 ONED94의 균정수 자료로 계산한 것임)

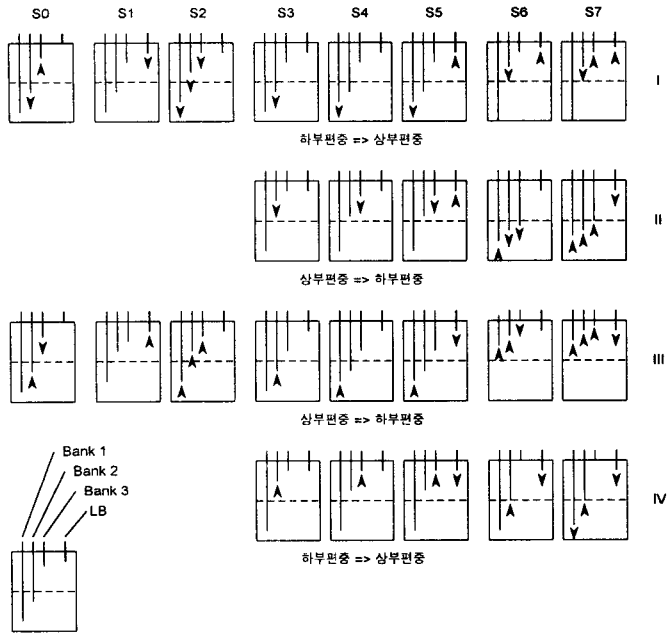


그림 1 Stage Flag 상황별 제어군 동작 논리

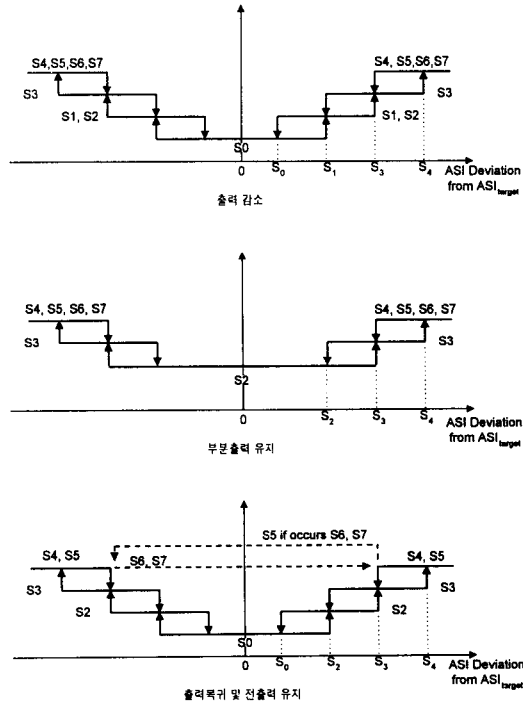


그림 2 노심 상태별 Stage Flag 전환 개념도

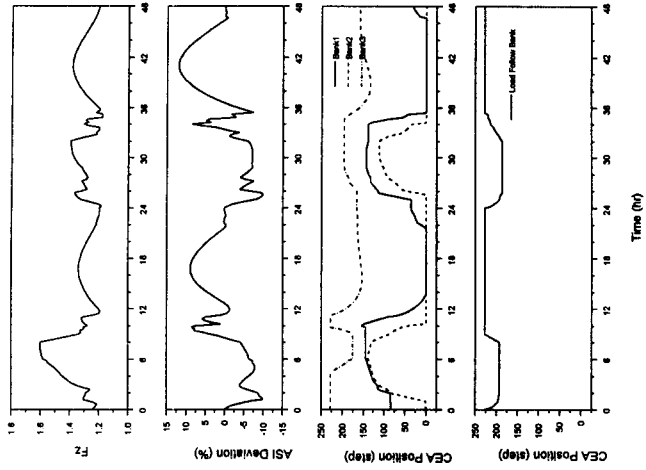


그림 5 EOC에서의 노심 거동

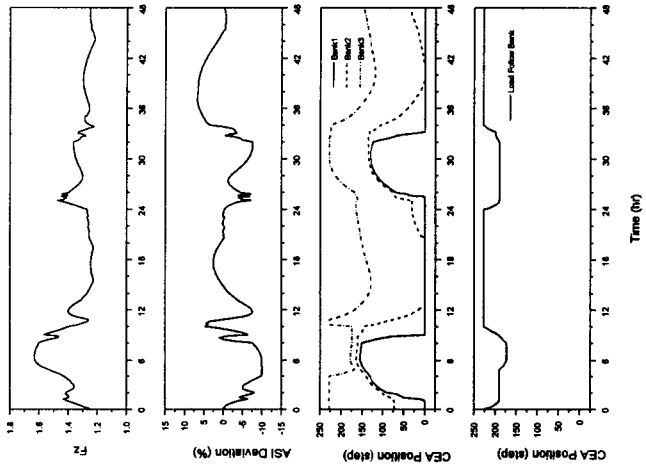


그림 4 MOC에서의 노심 거동

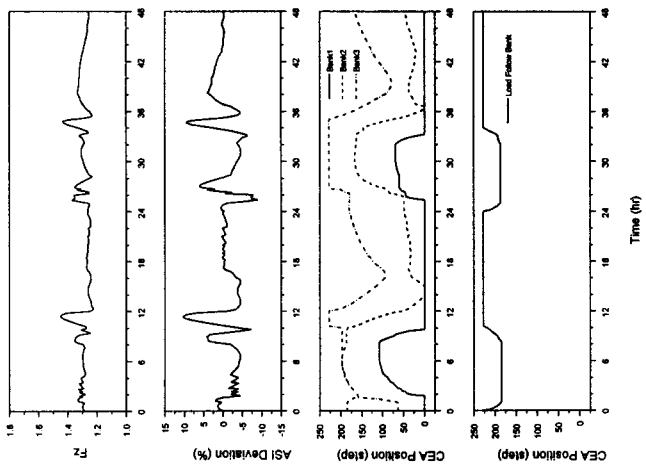


그림 3 BOC에서의 노심 거동