

MSHIM기법에 의한 차세대 원전의 일일부하추종운전 연구

유재운, 김종경
한양대학교

박용수
한국원전연료주식회사

요 약

차세대 원전 1주기 노심에 대해 MSHIM기법을 적용하여 100-50-100% 출력, 14-2-6-2시간 형태의 일일부하추종운전시 노심 거동을 ONED94 전산코드를 통해 모사하였다. 계산결과 1300MWe급 차세대 원전에서 단순한 제어봉 구동논리를 통해 부하추종운전중의 잉여반응도와 축방향 출력분포를 적절히 제어할 수 있었으며, 봉산수 조절없이 안전한계 범위내에서 일일부하추종운전이 가능하였다. 또한 MSHIM기법을 위한 차세대원전의 제어봉 배치를 변경 제시하였다.

1. 서론

가압경수로의 부하추종운전에 있어서 주된 관건은 터빈의 출력변화에 따른 잉여반응도와 축방향 출력분포 변화를 어떻게 적절히 제어하느냐에 있다. 이러한 제어수단으로 봉산수, 제어봉, 냉각재온도가 사용되는데, 이중 봉산수는 농도조절에 따라 축방향 출력분포에 미치는 영향이 극히 작기 때문에 기존의 부하추종운전 기법에서 잉여반응도 제어에 직·간접적인 수단으로 이용되어 왔다. 그러나 부하추종운전중 과도한 봉산수의 주입, 희석은 봉산수 조절 계통을 복잡하게 만들 뿐만 아니라 다량의 액체폐기물을 발생시키는 단점을 안고 있으며, 일반적으로 봉산은 운전원에 의해 수동으로 조절되기 때문에 운전원의 피폭을 증가시키게 된다. 이러한 문제점으로 인해 현재 개발되고 있는 부하추종운전 기법들에서는 봉산수 조절을 최소화할 것을 기본 전략으로 채택하고 있으며, EPRI-URD와 EUR에서는 부하추종운전중 봉산수 조절을 배제할 것을 제안하고 있다.

MSHIM(Mechanical Shim)기법은 Westinghouse가 개발하여 600MWe급 AP600에 적용하고 있는 부하추종운전 기법으로서 부하추종운전의 전체 과정에서 봉산수 조절을 배제하고 있다. 본 연구에서는 MSHIM기법을 제논의 불안정도가 큰 1300MWe급 차세대 원전에 적용하여 핵심계 관점에서 타당성을 검토하였다.

2. MSHIM 기법

2.1. 제어봉 구성

MSHIM기법을 위한 제어봉은 크게 노심의 잉여반응도 제어용 M Bank와 축방향 출력분포 제어용 AO Bank로 구성되어 있다. M Bank는 다시 M0, M1, M2, M3 Banks로 세분화 되어 있으며, 고정된 중첩을 가지고 구동된다. 정상운전중 노심에 완전히 삽입되어 있는 M0 Bank와 잉여

반응도 보상을 위해 최초 삽입되는 M1 Bank는 축방향 출력분포에 미치는 영향과 반경방향 출력 침투인자에 미치는 영향을 최소화 하기위해 Gray Rod(Ag-In-Cd봉 4개, Stainless Steel봉 20개)로 구성되어있으며, M0 Bank의 제어봉가와 중첩 크기는 노심의 잉여반응도의 변화에 적절히 대응할 수 있고 축방향 출력분포변화를 최소화할 수 있도록 결정된다. AO Bank는 다른 제어군보다 제어봉가를 월등히 크게하여 노심상부에서 움직일 때 축방향 출력분포 제어능력의 선형성을 유지하고 있다.

2.2. 운전영역 및 절차

MSHIM기법과 기존의 운전방식과의 가장 큰 차이점은 M0 Bank가 완전히 삽입되고 AO Bank가 노심의 상부에 약간 삽입된 상태에서 부하추종운전을 시작한다는 점이다. 그러기 위해 M0 Bank가 완전히 삽입된 상태에서 정상운전이 이루어져야 한다. 이것은 저출력 운전시 제어농도의 증가분을 기존에 봉산수를 회석하면서 보상하던 것을 M0 Bank로 대체하므로써 여분의 잉여반응도를 확보하기 위함이라고 할 수 있다.

MSHIM기법에서는 냉각재 평균온도의 변화를 기준으로 반응도조절용 M Bank의 구동방향과 범위를 결정하며, 각 시점에서의 AO값과 목표 AO값의 차이를 기준으로 AO Bank를 구동한다. 이때 목표 AO값(TAO_{LFO})은 정상운전중 AO값(TAO_{BASE})보다 10~15% 낮은 값을 사용하는데 이것은 상·하부로 치우친 출력분포를 동시에 적절히 제어하기 위해 AO Bank가 노심의 상반부에 충분히 삽입될 수 있도록 하기위함이다. 이렇게 목표 AO값을 하향조정하는 과정은 부하추종운전 1일전 24시간(Transition Day)동안 이루어진다.

3. 차세대 원전의 일일부하추종운전

3.1. 분석 대상 및 방법

본 연구에서 MSHIM기법을 적용한 차세대 원전은 1300MWe급 CE형 원전으로서 영광 3, 4호기와 동일한 핵연료집합체를 사용하며, 재장전주기 18~24개월, 10%~15%의 열적여유도 확보를 기본 설계 목표로 하고 있다. 부하추종운전과 관련하여 90% 주기말 까지 시간당 25%의 출력변동율을 가지고 100-50 이하-100% 출력, (12~16)-2-(4~10)-2시간형태의 일일부하추종운전이 가능할 것을 기본 설계 요건으로 하고 있다. MSHIM기법에 대한 실질적인 모사는 차세대원전 1주기 노심에 대해서 BOC(500MWD/MTU)와 EOC (16000MWD/MTU)에서 각각 수행되었으며, 한국원자력연구소에서 개발한 ONED94코드가 사용되었다.

ONED94 전산코드는 1차원 과도상태 해석용 노달코드로서 3차원 정상상태 해석 결과를 바탕으로 단면적을 생산한다. 본 연구에서는 한국원자력연구소에서 개발한 CASMO-3 /MASTER 전산코드체계를 사용하여 3차원 정상상태 해석이 수행되었으며, 각 연소단계에서 1차원으로 축약된 ONED94 단면적 라이브러리를 생산하기 위해 MASTER코드의 계산결과를 ONED94단면적 라이브러리 형식으로 변환해주는 MAS2ONED라는 연계코드를 개발하였다. 또한 3차원 계산결과를 1차원으로 축약하는 과정에서 발생하는 오차를 최소화하기위해 3차원 계산결과를 바탕으로 다양한 노심변수에 대해 적응계산과정이 수행되었다.

3.2. 제어봉운용 방안

봉산 농도 조절을 완전히 배제한 상태에서 부하추종운전이 이루어지기 위해서는 출력감발 후 저출력 운전시 제논농도의 증가에 따른 반응도 변화를 상쇄 시키기위해 제어봉을 인출하여야 하고 출력복귀시 인출할 수 있는 제어봉을 미리 확보하여야 하는데, 보통 처음에 출력감발을 위해 삽입한 제어봉을 완전히 인출해도 제논농도의 증가를 상쇄시킬-수 없다. 따라서 부하추종운전전에 미리 적당한 반응도가를 갖는 제어봉이 삽입되어 있어야한다. 결국 MSHIM기법의 제어봉구동논리가 다른 부하추종운전기법에 비해 단순한 반면에 각 제어군의 제어봉가를 결정하고 M Bank간 최적의 중첩크기를 찾아내는 것이 중요하다고 할 수 있다.

미리 삽입되어야할 제어봉가를 결정하기위해서는 일일부하추종운전중 잉여반응도의 변화양상을 정량적으로 검토할 필요가 있다. 그림 1에서 보는바와 미리 삽입되어야 할 최소한의 제어봉가는 330pcm 정도이고 출력복귀를 위한 여유를 저출력운전시 확보하고 AO Bank도 노심에 어느정도 삽입되어 있다는점, 그리고 제어봉가가 클수록 출력분포에 미치는 영향이 크다는 점을 고려하여, 기준 제어봉가를 500pcm 내외로 설정하였다.

기존에 차세대 원전에는 P2, P1 두 개의 PSCEA를 가지고 있지만 이들 제어봉가는 각각 500pcm에 크게 못미치는 양이고 두 개의 제어군을 하나의 제어군으로 활용할 때 다른 제어군을 할당할 위치가 부족해지기 때문에 PSCEA를 사용하지 않는 새로운 제어봉 배치를 결정하였다. 또한 CE형 원전에서는 4 Finger 또는 12 Finger형태의 제어봉을 사용하기 때문에 24 Finger형태를 갖는 Westinghouse형 원전의 Gray Rod 보다 제어봉가를 결정함에 있어서 유연성이 적다. 최종적으로 결정된 각 제어군의 제어봉가와 배치를 표 1과 그림 3에 나타내었다.

또한 반응도 제어용 M Bank의 중첩 크기가 결정되어야 하는데, M Bank의 중첩 크기를 변화시키고 M Bank만으로 잉여반응도만을 제어하면서 부하추종운전을 모사한 결과 중첩 크기가 노심 높이의 50%보다 작아질수록 출력분포에 미치는 영향이 작아지다가 어느 이상 줄일 경우 큰 차이가 없어지는데, 이 시점을 최적의 중첩 크기(33%)로 결정하였으며, 이값은 기존에 AP600에서 적용되던 중첩 크기와 동일하다.

3.3. 노심 거동

주기초와 주기말에서의 일일부하추종운전시 노심거동을 그림 4와 그림 5에 나타내었다. Transition Day 동안 AO값을 TAO_{BASE} 에서 TAO_{LFO} 에 일치시키기 위해서 단계적인 제어봉 구동이 이루어졌으며, 이때 TAO_{LFO} 값은 주기초의 경우 $TAO_{BASE}-10\%$ 를, 주기말에서는 제논의 축방향 불안정도가 큰 점을 고려하여 $TAO_{BASE}-12\%$ 로 설정하였다. 현재 부하추종운전중 차세대 원전의 축방향 출력분포 허용범위는 정해져있지 않으며, 일반적인 CE형 원전의 경우에 COLSS가동시 $\pm 28\%$ 로 설정되어 있지만 이 값은 노심의 안전에 대한 지표라고 볼수는 없고, 실제 적용시에는 50% 이상의 출력에서 ESI의 최대 $\pm 5\%$ 이내로 제한하고 있으며 $\pm 1\%$ 이내를 권장하고 있다. 하지만 이 역시 DNBR 및 LOCA를 고려한 제한조건은 아니다. 따라서 이러한 운전영역은 기존값보다 좀더 확대될 여지가 있으며, 그러한 연구가 현재 수행되고 있다. 더군다나 AO값을 AFDI로 환산할 경우에는 저출력에서 운전영역은 더욱더 확대될 수 있다.

CE형 원전의 경우 부하추종운전중 노심의 안전성 여부는 열수력 해석을 통해 DNBR 및 열적여유도를 계산하여 판단할 문제이지만 이것은 본 연구의 범위를 벗어나므로 여기에서는 제어봉이 삽입되었을때의 최대 반경방향 붕출력과 축방향 침두출력인자를 곱한 F_q 값을 기준으로 안전성여부를 판단하였다. 그림 4와 그림 5에 BOC와 EOC에 대해 일일부하추종운전중 F_q 값의 변화를 나

타내었으며, 일반적인 노심에서 F_0 값이 2.5에서 2.6사이임을 감안할 때 불확실도를 고려한다 해도 충분한 여유도가 있다고 판단된다.

3.4. M0 Bank삽입에 따른 영향

위에서 언급한 바와 같이 MSHIM기법을 적용하기 위해서는 M0 Bank를 노심에 완전히 삽입한 상태에서 정상운전이 이루어져야 한다. 이렇게 M0 Bank를 완전히 노심에 삽입한 상태에서 정상운전이 수행될 경우 노심의 반경방향 침투출력이 증가하고, Rod Shadowing Effect에 의해 주기길이와 주기연소도(Cycle Burnup)가 줄어들게 된다. 그림 3에 나타낸 것과 같이 최대 반경방향 침투출력(F_{xy})은 BOC에서 최대 9.2%정도의 증가를 보였으며, 주기말로 갈수록 그 차이는 줄어드는 경향을 나타냈다. 주기길이에서는 대략 30일정도(EFPD 기준)가 감소하고 1000MWD/MTU정도의 Burnup Penalty가 발생하였다.

4. 결론 및 향후 계획

본 연구를 통하여 차세대 원전에서 일정정도의 여유도를 가지고 MSHIM기법을 사용한 일일부하추종운전이 가능함을 입증하였다. MSHIM기법은 부하추종운전중 봉산을 사용하지 않고, 제어봉구동논리가 단순하여 액체폐기물 발생량이 없고 자동화작업에 용이한 반면에 하나의 제어군을 정상운전중 미리 삽입해줘야 하기 때문에 반경방향 침투출력이 증가하고 주기길이가 작아지는 단점들을 가지고 있다. 이러한 운전방식이 경제적인 이득이 있는가 하는 문제는 차후 실제 적용시 검토해봐야 할 문제이다.

또한 본 연구에서는 핵연료집합체의 설계변경을 피하기 위해 기존의 PSCEA자리에 B_4C 제어봉을 사용하였는데 이것은 반경방향 침투출력을 증가시키는 요인이 된다. 따라서 핵연료집합체의 제어봉 설계를 변경할 경우(예 : 24 Finger 형태의 Gray Rod)에는 반경방향 침투출력을 감소시킬 수 있으므로 지금보다 큰 운전여유도를 가지고 운전될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. T. Morita and W. R. Carlson, "MSHIM Load Follow Operation in the Westinghouse AP600 Plant Design," Proceedings of the Topical Meeting on the Next Generation of Nuclear Power Plants, 1991.
2. T. Morita, "MSHIM Load Follow Operation in the Westinghouse AP600," Westinghouse Commercial Nuclear Fuel Division, 1997.
3. 오수열 외, "차세대원전의 부하추종운전 분석," KAERI/TR-612/95, 한국원자력연구소, 1995.
4. 한국원자력연구소, "ACE/ONED User's Manual," KAERI/TR-631/96, 1996.
5. 장종화 외, "부하추종운전 설계기본요건 설정," KAERI/TR-590/95, 한국원자력연구소, 1995.

감사의 글 : 본 연구의 수행에 있어서 MASTER 전산코드를 실행시켜주신 한국원전연료주식회사 측에 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 한양대학교 부설 산업과학연구소의 지원금에 의한 것입니다.

표 1. 각 제어군별 제어봉가

단위 : pcm

제어봉	BOC	EOC
M0	492	663
M0+M1	887	1032
M0+M1+M2	1506	1695
AO	1295	1300

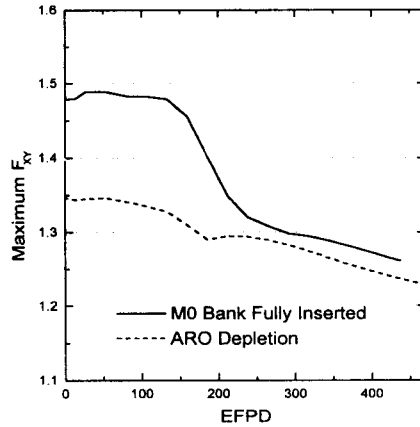
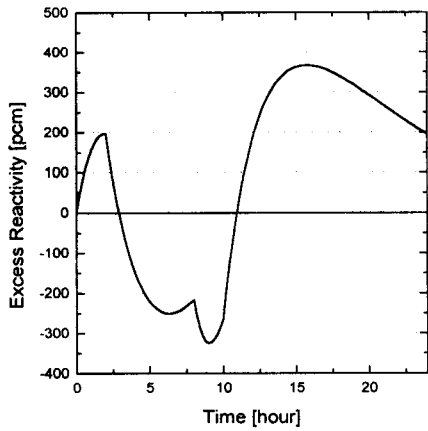


그림 1. 부하추종운전중 잉여반응도 변화

그림 2. M0 Bank삽입에 따른 F_{xy} 변화

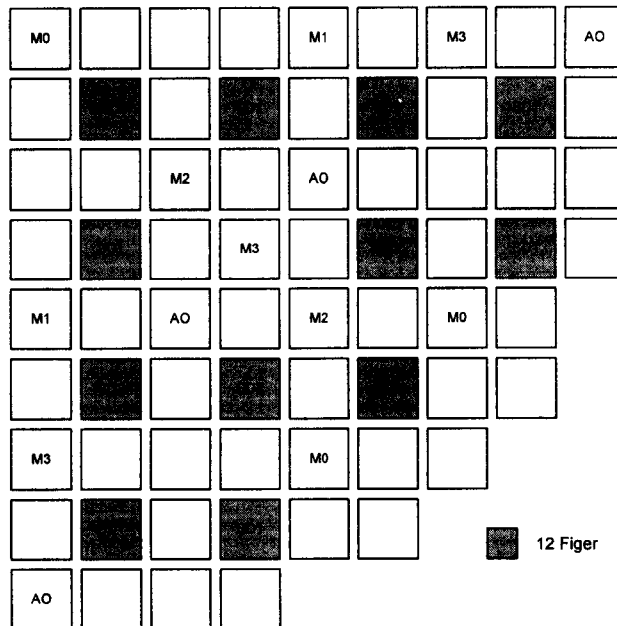


그림 3. MSHIM기법을 위한 제어봉 배치

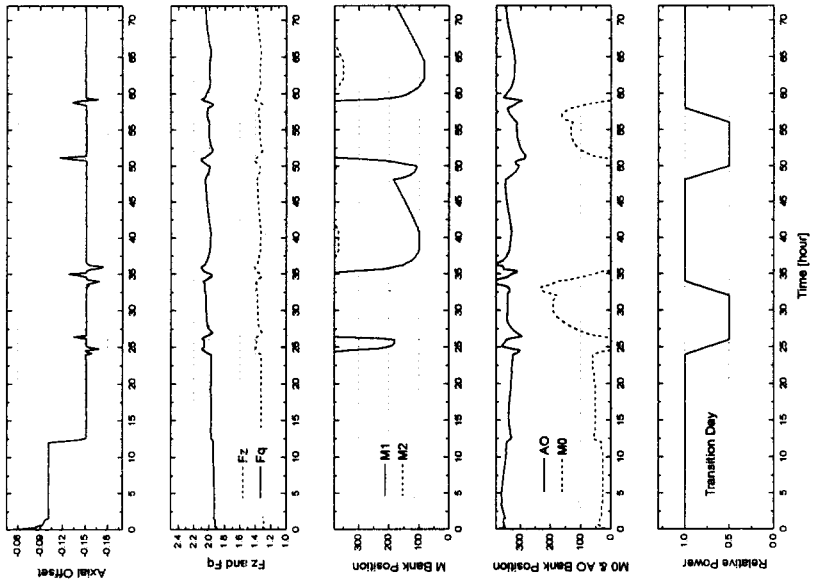


그림 4. MSHIM기법에 의한 일일부하추종운전(BOC)

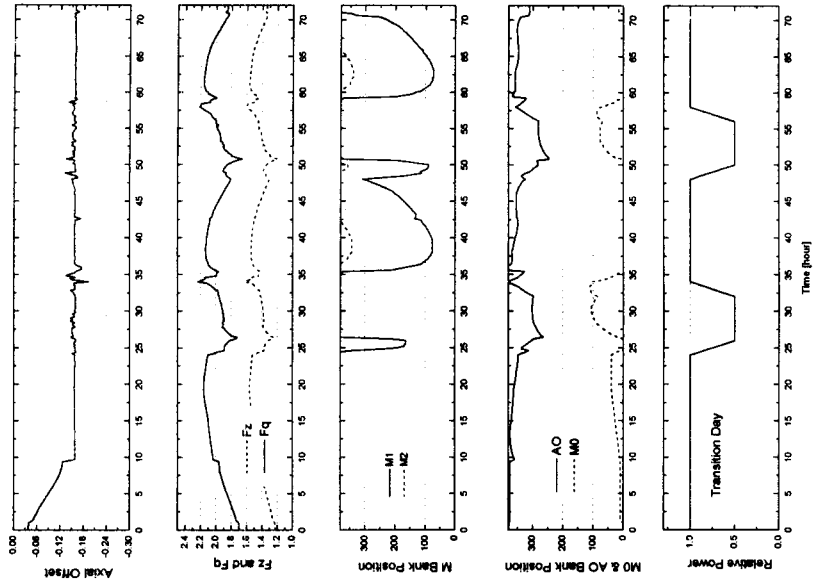


그림 5. MSHIM기법에 의한 일일부하추종운전(EOC)