

Mode K 기법을 적용한 차세대원전 부하추종운전의 운전여유도 평가기술 개발

장진욱, 이은철
서울대학교

최중인
경원대학교

유재운, 김종경, 전규동
한양대학교

요 약

차세대원전을 위한 새로운 운전여유도 평가체제를 정립하였다. 본 연구에서 개발된 운전여유도 평가체제는 노심감시 및 보호체제는 그대로 유지하되 부하추종운전시 운전여유도를 만족하는 운전허용범위를 P-ASI Diagram으로 나타내는 것이다. 새로운 운전여유도 평가 방법을 사용하여 Mode K 기법에 의한 차세대원전의 일일 부하추종운전에 대한 운전여유도 평가를 수행하였으며, 운전여유도를 만족하는 범위를 P-ASI Diagram으로 나타내었다. 본 연구에서 도출한 운전여유도와 ASI의 관계를 쉽게 파악할 수 있는 P-ASI Diagram이 COLSS와 병행된다면 운전유연성 증진 뿐만아니라 운전원의 입장에서도 더욱 용이한 부하추종운전을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서 론

국내 전력 공급에서 원자력에 의한 발전 비중은 꾸준히 증가하는 추세이다. 특히 차세대원전의 상업 운전 시기인 2006년도 이후에는, 국내 산업 기술의 발달과 국민 생활 수준의 향상으로 고품질의 전기가 요구되며 하루중 최대 전력 수요와 최소 수요간의 차이가 현재보다 더욱 심화될 것이다. 따라서 차세대 원전의 부하추종운전 능력은 운전 유연성 향상을 통한 타전력원과의 경쟁력 확보 측면에서도 매우 중요하다.

원전의 부하추종운전은 운전여유도를 만족하는 상태에서 운전이 되어야 한다. 이를 위하여 미리 설정한 노심 운전한계를 벗어나지 않도록 출력분포를 제어한다. ABB/CE형 원전은 3차원적 노내 계측계통의 온라인 계산에 근거한 디지털 감시/보호계통으로 운전여유도를 평가하는데 축방향 출력분포를 나타내는 지표인 ASI(Axial Shape Index)가 기술지침서의 허용범위인 ± 0.28 이내에만 있으면 부하추종운전이 허용된다. 그러나 실제로는 핵연료 선행조건지침(Fuel Pre-Conditioning Guideline)에 의해 출력 증감발을 및 ASI 편차를 0.01로 극히 제한적인 band내에서 유지하도록 하고 있다. 이러한 제한은 ABB/CE형 원전이 실제 부하추종운전을 하기에 상당한 제약을 초래하며 상용 부하추종 기술개발에 장애가 된다. 따라서 새로운 부하추종운전 기법을 위한 효율적인 운전여유도 평가 기술의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 차세대원전의 원자로 출력제어에 따른 운전여유도 평가 방법을 개발하고 그 평가체제를 구축하고자 한다.

2. 운전여유도 평가체제

2.1 운전여유도 평가 개념

원자로 출력제어는 노심을 안전한 상태로 유지하기 위하여 미리 정한 노심운전한계(LCO : Limiting Conditions for Operation)를 벗어나지 않도록 출력분포를 제어한다. Westinghouse형 원전의 경우 운전여유도에 대한 자료로서 축방향 출력분포를 대표하는 ΔI 를 지표로 하여, 노심 출력준위를 세로축으로 하고 ΔI 를 가로축으로 한 P- ΔI Diagram 상의 운전제한영역을 벗어나지 않도록 한다. ABB/CE형 원전의 경우에는 ΔI 를 지표로 하지 않고 노심감시 및 보호계통(COLSS/CPCS)에 의해 3차원 출력첨두계수를 직접 이용하여 운전을 제한하는 지표로 사용한다. 3차원 노심감시계통인 COLSS가 작동중인 경우 ASI가 0.28 이내에 들어오면 되는데 이는 COLSS가 운전여유도를 감시하여 노심이 안전한 상태에 있는지를 운전자에게 알려 주기 때문이다. 이는 운전 유연성이 증대된다는 장점을 가지나 운전자는 부하추종운전 도중 ASI가 허용범위 내에 있는지 뿐만아니라 ASI 허용범위 내에서도 COLSS Alarm이 작동할 수 있으므로 운전여유도가 어느 정도인지도 항상 파악하여야 한다. 따라서 부하추종운전중에는 COLSS의 운전여유도를 만족하는 ASI 허용범위를 미리 인지할 수 있는 지표가 필요하다.

ABB/CE형 원전의 부하추종운전에서 실제 운전절차상으로는 ASI가 $ESI \pm 0.01$ 로 유지하도록 제안하고 있는데 이를 만족하도록 부하추종운전을 하는 경우는 COLSS가 가지는 실시간 노심감시기능을 최대한 활용한 부하추종운전이라고 볼 수 없으며 실제 부하추종운전을 수행하기에는 지나치게 제한적이다. 따라서 운전유연성 증진을 위해서는 COLSS의 기능을 최대한 활용할 수 있어야 하며, ASI가 0.01과 0.28 사이에서 어느정도 ASI가 벗어나는 경우까지가 운전여유도를 만족하는지 운전자가 미리 인지할 수 있도록 COLSS에서 나타나는 운전여유도와 ASI의 관계를 도식화한 운전허용범위인 P-ASI Diagram이 요구된다. 본 연구의 운전여유도 평가체제는 노심감시 및 보호체제는 그대로 유지하되 부하추종운전시 운전여유도를 만족하는 운전허용범위를 P-ASI Diagram으로 나타내는 방법이다. 운전여유도를 만족하는 ASI 허용범위 설정을 위한 해석체계는 그림 1에 나타내었고, 그 절차는 다음과 같다.

- 잠정적으로 운전 가능한 ASI band를 설정한다.
- 주어진 ASI band에 대하여 부하추종운전 모사를 통하여 출력제어에 따른 노심출력분포를 생산한다.
- 생산된 출력분포를 사용하여 DNBR 및 LHR 제한치에 대한 운전여유도 계산을 수행한다.
- 주어진 ASI band에 대하여 운전여유도를 만족하면, ASI band를 넓혀 앞의 과정을 반복한다.
- 운전여유도를 만족하는 운전허용범위를 P-ASI Diagram으로 도식화한다.

2.2 운전여유도 평가를 위한 전산체제

운전여유도 평가를 위한 전산체제는 부하추종운전 모사를 통하여 축방향 출력분포를 생산하는 노심해석체제와 생산된 출력분포로 DNBR 및 LHR 제한치에 대한 운전여유도를 계산하는 운전여유도 계산체제로 구성되어있다. 노심해석체제는 CASMO-3/KINS-3/ONED94의 체계로 되어있다. 부하추종운전과 같은 천이상태 노심 특성이 주로 축방향 출력분포에 의해 결정되고 운전여유도 계산을 위해 다양한 노심 조건에서 방대한 양의 출력분포를 생산, 처리하기 위해 1차원 해석 코드인 ONED94를 사용하였다. ONED94의 단면적 라이브러리 생산을 위하여

CASMO-3/KINS-3 전산체계를 사용하였다. 운전여유도 계산체계는 CETOP-D와 본 연구에서 개발한 LFMARGIN으로 구성되어있다. CETOP-D는 Limit DNBR(1.3) 또는 Limit Quality(0.2)에 도달하는 DNB-OPM을 계산하고, LFMARGIN은 불확실성인자, ONED94의 출력분포 및 CETOP-D의 결과를 입력으로 운전여유도를 계산하여 운전허용범위를 나타낸다.

3. Mode K 기법에 의한 차세대원전의 부하추종운전중 운전여유도 평가

본 연구에서의 운전여유도 평가 방법으로 Mode K 기법에 의한 차세대원전(1주기)의 운전여유도 평가를 수행하였다. 차세대원전은 현재 설계가 진행중인 상태이므로 운전여유도 계산에 필요한 Penalty Parameter는 영광 3/4호기의 자료를 대신하였으며, 평면반경 출력첨두계수는 System80+의 자료(표 1)를 사용하였다. BOC(1000 MWD/MTU), IOC(6063 MWD/MTU), MOC(10080 MWD/MTU), EOC(16000 MWD/MTU)의 4가지 연소도에 대하여 대표적인 일일 부하추종주기인 14-2-6-2hr 100-50-100%P, 14-2-6-2hr 100-70-100%P, 12-3-6-3hr 100-50-100%P의 운전여유도를 평가하였고 전출력복귀후 P2 제어군을 최대로 이용한 운전과 신속출력복귀 운전도 분석 대상에 포함하였다. 각 조건별 운전허용범위는 표 2에 나타내었고, 연소도에 대한 운전허용범위를 그림 2~5와 같이 P-ASI Diagram으로 나타내었다.

분석결과 운전여유도가 가장 작은 값을 보이는 때는 전출력복귀후이며, 출력증감발 또는 부분출력 유지시에는 전출력운전보다 운전허용범위가 더 커지는 것으로 나타났다. 전출력복귀후 P2 제어군을 노심 하부로 삽입하여 최대로 이용하는 운전의 경우 P2 제어군을 노심 상부로 인출하는 방법보다 봉산의 조절량이 감소하나 다른 운전조건보다 ASI 허용범위가 좁아지는 것으로 나타났다. 평가에 사용된 모든 운전조건을 포함하여 운전여유도를 만족하는 운전허용범위를 나타내면 BOC, MOC, EOC에서는 $ESI \pm 0.12$ 이고 IOC에서는 $ESI \pm 0.03$ 이다. 그러나 IOC에서 운전허용범위가 좁게 나타나는 것은 전출력복귀후 P2 제어군을 노심 하부로 삽입하여 반응도 제어에 제어봉을 최대로 이용한 운전이 국한된 것이며, 그 원인은 현재 차세대원전의 설계가 진행중이어서 평면반경 출력첨두계수(F_{XY})를 System 80+의 자료로 대신한 것으로, P2 제어군 삽입시의 F_{XY} 값을 보수적인 계산을 위하여 P2와 P1 제어군이 동시에 삽입되었을 때의 F_{XY} 값인 1.63과 동일하게 사용한 것에 기인한다. 전출력복귀후 P2 제어군을 최대로 이용한 운전에서 P2 제어군 삽입시의 F_{XY} 에 대한 민감도 분석 결과 F_{XY} 가 작아짐에 따라 운전여유도를 만족하는 ASI 허용범위가 커지며, 이중 IOC에서의 변화 정도가 가장 크게 나타났다. 따라서 차세대원전의 설계를 정확히 고려하여 계산된 F_{XY} 값이 사용된다면 출력복귀후 P2 제어군을 최대로 이용한 운전의 ASI 허용범위가 본 연구에서 계산된 $ESI \pm 0.03$ 보다 커질 것이다. 또한 전출력복귀후 P2 제어군을 노심 하부로 깊이 삽입하여 P2 제어군을 반응도 보상에 최대로 이용하는 방법 대신 전출력복귀후 제어봉을 출력분포 제어에만 사용하여 P2 제어군을 노심 상부로 인출하는 운전을 한다면 운전허용범위는 IOC에서 $ESI \pm 0.09$ 이고 다른 연소도에서는 $ESI \pm 0.12$ 이상이 된다.

출력 증감발 또는 부분출력 유지중의 운전허용범위를 파악하기 위하여 Mode K 기법이 아닌 임의의 운전에 대하여 생산한 출력분포에 대하여 운전여유도 계산을 수행하였으며, 이를 포함하여(단, P2 제어군을 최대로 이용한 운전은 제외) 운전여유도를 만족하는 운전허용범위를 그림 6과 같이 P-ASI Diagram으로 나타내었다. 본 연구에서 사용된 운전여유도 평가 방법은 COLSS/CPCS를 그대로 활용하는 것을 전제로 한 것이다. 따라서 전출력에서는 COLSS의 운전허용범위보다 본 연구에서 제안된 운전허용범위가 좁다. 전출력이 아닐 때에는 P-ASI Diagram

에서 COLSS의 운전허용범위인 ± 0.28 과 본 연구에서 제안된 운전허용범위를 모두 만족하는 영역이 부하추종운전중 운전여유도를 만족하는 최종적인 운전허용범위가 된다. 또한 COLSS가 작동하지 않을 경우에는 ± 0.20 과 본 연구에서 제안된 운전허용범위를 모두 만족하는 영역이 최종적인 운전허용범위가 된다.

4. 결론 및 향후 연구 방향

차세대원전을 위한 새로운 운전여유도 평가체제를 정립하였다. 본 연구에서 개발된 운전여유도 평가체제는 노심감시 및 보호체제는 그대로 유지하되 부하추종운전시 운전여유도를 만족하는 운전허용범위를 P-ASI Diagram으로 나타내는 것이다. 새로운 운전여유도 평가 방법을 사용하여 Mode K 기법에 의한 차세대원전의 일일 부하추종운전에 대한 운전여유도 평가를 수행하였으며, 운전여유도를 만족하는 범위를 P-ASI Diagram으로 나타내었다.

부하추종운전중 COLSS는 운전원에게 현재 노심 상태에 대한 운전여유도와 ASI를 보여줌으로써 노심이 안전한 상태로 유지되는지를 파악할 수 있도록 한다. 그러나 ASI가 얼마나 더 벗어날 경우 운전여유도를 만족하지 않는지에 대한 정보는 부족하다. 따라서 본 연구에서 도출한 운전여유도와 ASI의 관계를 쉽게 파악할 수 있는 P-ASI Diagram이 COLSS와 병행된다면 운전유연성 증진 뿐만아니라 운전원의 입장에서도 더욱 용이한 부하추종운전을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

부하추종운전 모사를 통한 출력분포 생산은 부하추종운전이 가능한 여러 가지 부하추종운전 형태를 설정한 상태에서 수행한 것이나 모든 운전 조건을 포함하지는 않는다. 따라서 이를 보완할 수 있는 다양한 출력분포를 생산할 수 있는 방법에 대한 연구가 추후 필요하다.

참고 문헌

1. 황완 등, "원자력발전소 부하추종 기술 개발," KAERI/RR-796/88 (1989.5.), KAERI/RR-901/90(1990.6.), KAERI/RR-1003/90(1991.7.), 과학기술처.
2. 장중화 등, "가압경수로의 부하추종운전," KAERI/AR-386/93 (1993/12/), 한국원자력연구소.
3. 최중인 등, "한국 표준 원전의 부하추종을 위한 운전 기법," 한국 원자력학회지, 제24권 제2호, 183-192, 1992.6.
4. 오수열, "Mode K 기법에 의한 차세대 원전 일일 부하추종운전중 노심가동," Technical Report No.NDL-KNGR-01/96 Rev.0
5. "User's Manual ACE/ONED," KAERI/TR-631/96, 한국원자력연구소.
6. "CETOP-D Code Structure and Modeling Method for Arkansas Nuclear One-Unit 2," Combustion Engineering.
7. "Statistical Combination of System Parameter Uncertainties for YGN 3&4 Initial Core, KAERI/TR-227/91," 한국 원자력 연구소, Dec. 1991.

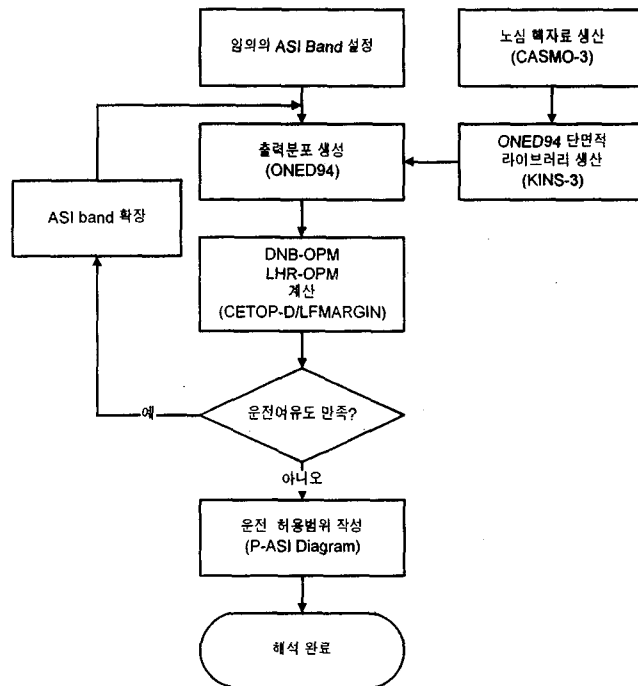


그림 1 원자로 출력제어에 따른 운전여유도 해석 체계

표 1 System80+의 평면반경 출력첨두계수

제어봉 배열	F_{XY}
ARO	1.55
Group P2	1.63
Group P2+P1	1.63
Group P2+P1+R3	1.79
Group P2+P1+R3+R2	1.87
Group P2+P1+R3+R2+R1	2.06

표 2 Mode K 운전중 운전여유도를 만족하는 운전허용범위 (단위 : ASI 편차)

운전 조건		BOC	IOC	MOC	EOC
14-2-6-2hr, 100-50-100%P		-	-	0.17	0.17
14-2-6-2hr, 100-70-100%P		-	-	0.15	0.16
12-3-6-3hr, 100-50-100%P		-	0.09	0.17	0.17
신속출력복귀		-	-	0.16	0.12
14-2-6-2hr,	1.55 *	-	0.13	0.17	-
100-50-100%P	1.59	0.15	0.09	0.15	-
P2 제어군 최대 이용	1.63	0.12	0.03	0.12	0.13

- 표기는 Mode K 운전중 운전여유도를 만족하지 않는 범위가 나타나지 않음을 나타냄

* P2 제어군 삽입시의 F_{XY}

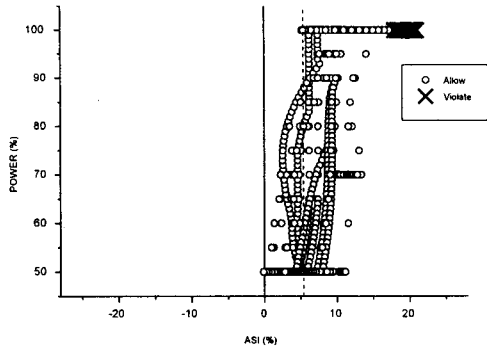


그림 2 P-ASI Diagram (Mode K 기법, BOC)

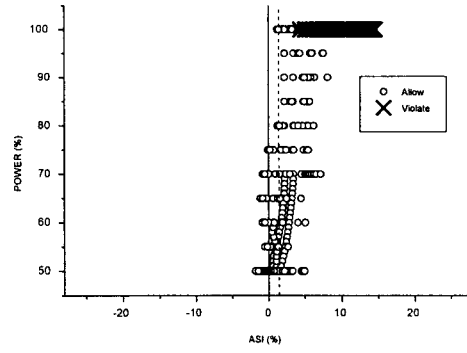


그림 3 P-ASI Diagram (Mode K 기법, IOC)

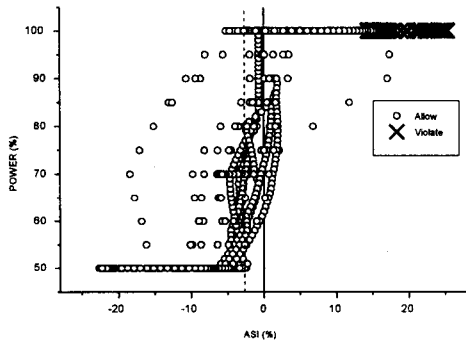


그림 4 P-ASI Diagram (Mode K 기법, MOC)

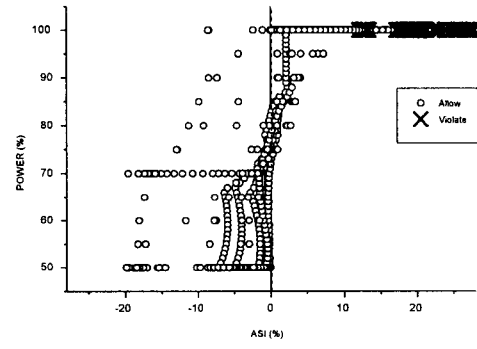


그림 5 P-ASI Diagram (Mode K 기법, EOC)

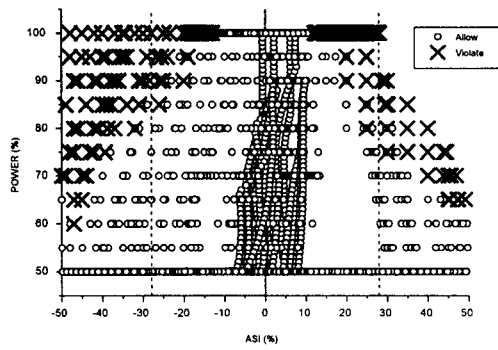


그림 6 P-ASI Diagram (전체 운전허용범위)