

차세대원자로 부하추종운전 방법 개선

이광호, 박문규, 최유선

한국전력공사 전력연구원

Improvement of Load Follow Control Logic for KNGR

Kwangho Lee, Moonghu Park, Yuseon Choi

Korea Electric Power Research Institute

요약

국내 원자력발전은 전체 전력공급의 40%이상을 차지하고 있으면서도 그 특성상 기저부하용으로만 사용되고 있다. 그러나 전기에너지의 효율적인 이용과 다양한 전력수요에 능동적으로 대처할 수 있도록 원전의 부하추종운전 능력이 더욱 중요하게 인식되고 있는 상황이다. G7과제의 하나인 차세대원자로(Korean Next Generation Reactor, KNGR)는 기본적인 요건으로 부하추종운전 능력을 갖도록 개발되고 있다. 여기에서는 기존에 개발된 부하추종운전 제어논리를 변경된 부하추종운전 기본요건에 맞도록 하고, 구동 제어군 특성의 극대화 및 온도불감대 출력분포 제어논리 등을 개선시킴으로써 주기초 및 주기중 뿐만아니라 90% 주기말에서도 ASI(Axial Shape Index)가 만족스럽게 제어됨을 확인하였다.

1. 서론

차세대원자로는 부하추종운전능력 확보를 중요한 기본 설계요건의 하나로 설정하여 개발되고 있다. 이를 위하여 차세대원자로 기술개발 (II) 단계 연구에서 Mode-K라는 부하추종운전 기법이 개발되어 주파수제어를 포함한 부하추종운전 성능을 ONED94라는 노심해석 전산코드를 이용하여 평가하였다[1,2,3]. 그러나 프랑스 Framatome 사의 SAF라는 원자력발전소 모사전산코드를 이용하여 계산한 결과, Mode-K를 이용한 부하추종운전시 출력분포의 변동폭이 매우 클 수 있음을 확인하였으며[4], 보다 효과적인 부하추종운전을 위해서는 Mode-K 제어논리의 개선이 필요함이 파악되었다. 한편 차세대원자로 기술개발 (II) 단계 연구에서 Mode-K 논리를 검증할 수 있는 KISPAC-1D라는 핵증기공급계통(NSSS) 성능해석코드가 개발되어 KNGR의 부하추종운전 능력을 평가하였으며, Mode-K 제어논리의 개선방향이 제시되었다[5]. 이 연구결과, 제어군간의 중첩을 확대하고 온도불감대내 출력분포 제어논리를 추가함으로써 만족스런 부하추종운전이 가능함이 확인되었다. 또한 Mode-K 논리에 기초한 KNGR의 부하추종운전 성능에 관한 다양한 평가결과, 기존 Mode-K 논리를 개선할 필요가 있음이 확인되었으며, 이를 위해 차세대원자로 기술개발 (III) 단계 연구의 일환으로 Mode-K 논리를 개선하고[6], 그 결과를 본 논문에서 수록하였다.

2. 차세대원자로 부하추종운전 요건 변경

일반적으로 부하추종운전은 1일 주기로 출력감발 및 증발을 반복하는 일일계획부하추종운전과 계통의 주파수변화에 따라서 수시로 출력을 변화시키는 주파수제어운전으로 구분할 수 있다. 당초 KNGR은 주파수제어운전을 포함한 부하추종운전 능력확보를 목표로 설계가 진행되었다. 그러나 주파수제어 운전 설계의 어려움과 낮은 필요성 때문에 차세대원자로 기술개발 (III) 단계에서는 일일부하추종운전만을 설계목표에 포함시키는 것으로 결정되었다.

넓은 의미에서의 부하추종운전은 신속출력복귀 운전, 계단식 출력변동, 전부하 상실

(Load Rejection) 등의 불시출력변동운전도 포함한다. 이러한 불시출력변동 운전은 NSSS 성능해석 분야에서 일일부하추종운전 설계와 관계없이 분석된다. 따라서 본 논문에서는 일일부하추종운전 중에 불시의 계단식 출력변동은 없는 것으로 가정한다. 그러나 일일부하추종 운전 중에 신속하게 전출력으로 복귀하는 것은 매우 중요한 요건이기 때문에 일일부하추종 운전 중 부분출력에서 전출력으로 복귀하는 것은 KNGR 부하추종운전의 일부분으로서 고려된다. 효율적인 부하추종운전을 위해 KNGR 설계에서는 다양한 관련 설계요건을 규정하고 있으며 그 일반요건은 다음과 같다.

- 제어봉의 제어는 자동으로 이루어져야 한다.
- 반응도 제어는 제어봉과 봉산을 이용하되 가능한 한 봉산 사용을 최소화해야 한다.
- 부하추종운전은 발전소 전수명 동안 가능해야 하며, 각 주기에서 90% 주기말까지 부하추종운전이 가능해야 한다.

표 1. KNGR 부하추종운전 설계요건

운전 구분	설 계 요 건
일일부하추종운전	<ul style="list-style-type: none"> o 24시간 주기로 100-50-100 %P 운전이 가능해야 한다. o 출력 증/감발시 변동률은 25%/hr 이상이어야 하며, 부분출력유지 시간은 4 ~ 10 시간으로 한다. 즉, (10 ~ 16)-2-(4 ~ 10)-2 형태의 운전이 가능해야 한다.
불시출력변동운전	<ul style="list-style-type: none"> o 원자료를 정지시키지 않고 전부하 상실을 수용해야 한다. o ±10%P 불시출력변동이 가능해야 한다. o 10분 이내에 20%P 증가 또는 감소가 가능해야 한다.

3. Mode-K 제어논리 개선

KNGR의 부하추종운전 성능을 평가한 결과, Mode-K 논리는 노심 연소도에 관계없이 전반적으로 노심의 출력(즉 노심 냉각재 평균온도)을 적절하게 제어하는 것으로 판단된다. 그러나 기존 Mode-K 제어논리는 주기중(연소도 12000 MWD/MTU)이후에는 출력분포를 만족스럽게 제어하지 못하는데, 이는 KNGR 노심설계의 특성과 제어논리의 한계에 기인한다. 따라서 KNGR의 부하추종운전 성능 향상을 위해서는 제어군의 반응도가를 최적화하거나 조절용 제어군간의 중첩을 확대하는 방안이 필요하며, 또한 Mode-K의 출력분포 제어능력 향상을 위해서는 P2와 P1의 구동을 보다 자유롭게 하여 출력분포 제어능력을 극대화하는 것과 온도불감대내의 출력분포 제어논리를 개선하는 것이 필요하다.

3.1 개선된 Mode-K 제어논리 Stage Flag

부하추종운전시 효과적인 출력분포 제어를 위해서는 노심 상태에 맞는 제어봉을 적절히 선택하여 구동하는 것이 관건이다. 노심의 출력분포는 아래와 같이 정의되는 ASI로 대표된다.

$$ASI = \frac{P_B - P_T}{P_B + P_T}$$

여기서 P_T , P_B 는 각각 노심 상/하부 출력을 의미한다.

Mode-K 논리는 구동할 제어봉을 선택하기 위해 소위 Stage Flag를 정의한다. Stage Flag는 목표 ASI와 현재 ASI의 차이 ($\Delta ASI = ASI - ASI_{target}$) 변화에 따라서 달라지며 구

동할 제어군 선택의 기준이 된다. Mode-K 논리에서는 전출력 평형상태의 ASI (ESI)를 목표 ASI로 설정한다. 기존 Mode-K 논리에서는 ORS (Overlap Restoring Stage), FOS ± (Fixed Overlap Stage), ARS ± (ASI Restoring Stage)로 정의되는 다섯 개의 Stage Flag가 사용되었다. 그러나 개선된 Mode-K 방법에서는 3개의 Stage Flag만을 사용하도록 단순화하였으며, 이들 Stage Flag의 전환 개념도를 그림 1에 제시하였다. ARS ± Stage Flag는 기존 제어논리에서처럼 출력분포가 기준분포에 비하여 하부나 상부로 치우쳐 있기 때문에 ASI 제어가 필요함을 의미한다. 새로운 제어논리에서는 기존의 FOS ±와 ORS Stage Flag를 SRS라 하여 하나의 Stage Flag로 통합하였다. SRS Stage Flag는 기본적으로 ASI 편차가 작은 상태를 나타내며 이 경우 제어군의 구성은 제어군의 위치를 미리 설정된 기준에 맞도록 복원하는 것이 목표이다. KNGR의 경우 ASI 제어를 위해서는 제어군의 노심내 삼입 정도가 P2, P1, R5 순서로 존재하는 것이 바람직하다. 그러나 개선된 Mode-K 논리에서는 ASI 제어의 효율성 극대화를 위하여 ASI 제어 과정에서 이들 순서가 바뀔 수 있다. 이러한 경우 SRS Stage Flag라면 제어군의 삼입순서를 P2, P1, R5 형태가 되도록 제어군을 구동한다. 또한 SRS Stage Flag에서는 기본적으로 P2와 P1 혹은 P1과 R5 사이에 55% 기준중첩을 유지하도록 하면서 제어군을 구동한다.

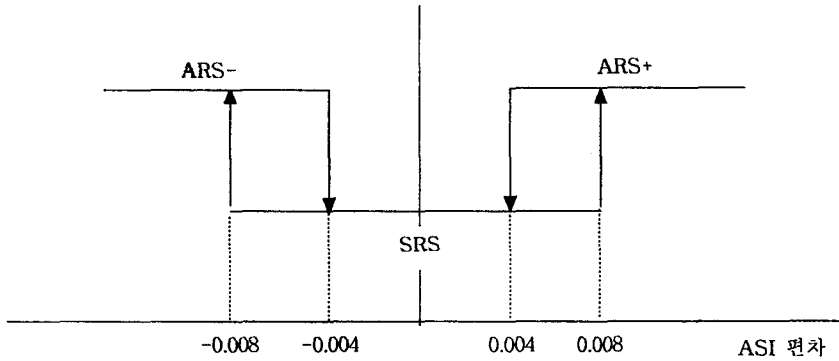


그림 1. 개선된 Mode-K Stage Flag 전환개념도

3.2 제어군 선택논리

Mode-K 기법은 제어군 구동방향, 위치, Δ ASI 정보를 종합적으로 고려하여 ASI를 효과적으로 제어할 수 있는 제어군을 선택한다. 만약 ASI를 원하는 방향으로 제어할 제어군이 적절한 위치에 없는 경우에는 제어군의 이동이 ASI에 미치는 역효과가 최소가 될 수 있도록 구동 제어군을 선택한다. 개선된 Mode-K 제어기법에서 제어군 선택 및 구동은 다음과 같은 기본원칙을 만족한다.

- 1) 제어용 제어군들 사이의 중첩은 고정되어 있으며, 삼입/인출 순서를 준수한다.
- 2) P2와 P1 사이 중첩과 P1과 R5 사이의 중첩은 운전 중에 변할 수 있다.
- 3) P2는 P1보다 높지 인출될 수 없다.
- 4) 각 제어군은 제어군 삼입한계를 만족한다.

기존 Mode-K 논리와 비교하여 새로운 논리에서는 R5 제어군이 P2나 P1보다 깊게 삼입되는 것을 허용한다. 이와 같은 수정은 보다 효과적인 ASI 제어를 위한 것이다. 기존 논리에서는 제어군의 삼입정도는 P2, P1, R5 순서를 유지하도록 하였다. 이러한 경우에는 P2나 P1을 인출하여 ASI 제어를 할 필요가 있을 때 P2, P1, R5 모두를 인출해야 하는 경우도 있

으며, 이는 ASI 제어관점에서 바람직하지 않다. 또한 기존 Mode-K 논리에서는 ASI에 역효과를 초래함에도 불구하고 P2, P1, R5 제어군을 동시에 삽입해야 되는 경우도 발생할 수 있다. 한편 새로운 논리에서도 P1은 P2보다 깊게 삽입될 수 없는데, 이러한 제약점은 ASI 제어관점에서 문제를 유발하지는 않는다. 이는 P2, P1 두 제어군이 완전히 중첩되어서 동시에 움직이는 경우에는 이들이 마치 하나의 독자적인 제어군처럼 작용하기 때문이다.

3.3 온도불감대 출력분포 제어논리

일일부하추중운전시 출력분포의 과도한 편중 현상은 주로 저출력에서 일어난다. 물론 저출력에서의 ASI 제어가 제대로 수행되지 않으면 전출력에서도 ASI 편차는 클 수 있다. 한편 저출력에서의 ASI 제어는 노심의 특성상 상당한 제어군의 이동을 요구하게 된다. 이러한 특성은 온도불감대 ASI 제어논리의 제한적인 ASI 제어능력을 고려할 때 저출력에서는 비교적 넓은 범위 ASI 제어를 하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 또한 전출력에서의 ASI는 반복적인 부하추중운전을 위해서 제논진동을 제어할 필요성이 있다. 따라서 전출력에서는 온도불감대 ASI 제어는 가능하면 좁은 범위에서 수행할 필요가 있다. 이러한 특성을 고려하여 본 연구에서 개발된 온도불감대 ASI 제어논리는 그림 2에서처럼 출력에 따라서 ASI 제어 설정치를 다르게 하는 개념을 취하였다. 그림에서 보듯이 90% 출력까지는 ASI를 ± 0.045 이내로 제어하는 것을 목표로 하며, 90%에서 전출력까지는 선형적으로 제어범위를 좁혀 100% 출력에서는 기존 Mode-K 논리의 제어목표와 같이 ± 0.008 이내로 제어하는 것이 목표이다.

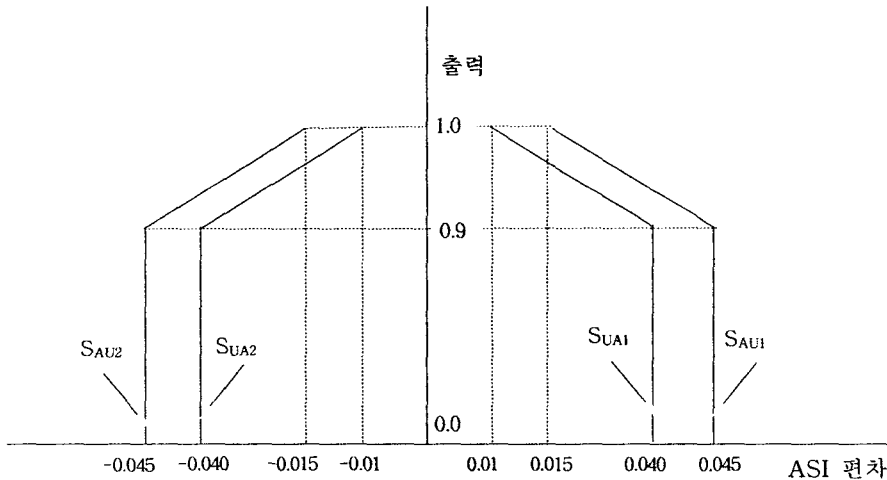


그림 2. 온도불감대 ASI 제어논리 ASI 편차 설정치

4. 일일부하추중운전 모사계산

ASI 제어논리가 개선되고 온도불감대 ASI 제어기법이 추가된 Mode-K 기법의 제어 성능을 평가하기 위하여 KNGR 평형노심을 대상으로 일일부하추중운전 모사계산을 수행하였다. 모사계산은 하루동안의 일일부하추중운전이고, 100-50-100 출력변동을 갖는 전형적인 일일부하추중 운전이며 출력변동율은 25%/hr이며 6시간 동안 50% 출력에서 유지하는 형태이다. 노심 연소도에 따른 제어 성능을 평가하기 위해서 주기초, 주기중, 90% 주기말에 대하여 수행하였다. 일반적으로 부하추중운전 중에 ASI 제어는 주기말에서 가장 힘들다. 주기

초와 주기중의 경우 기존 Mode-K 논리와 개선된 Mode-K간의 제어 성능의 차이는 미미하다. 따라서 본 논문에서는 90% 주기말에서만 기존 논리와 개선된 논리간의 비교를 수행하였다. 모든 모사계산은 KISPAC-1D 전산코드를 사용하였으며, 보론 시나리오는 ONED94 코드를 이용하여 얻어진 것을 기초로 사용하였다. 보론 농도는 출력이 변화하는 동안에는 일정하게 유지되며, 보론 농도의 변화는 모든 구간에서 선형적으로 바뀌는 것으로 가정하였다.

그림 3은 개선된 Mode-K 제어논리를 이용한 90% 주기말 일일부하추종 운전의 모사계산 결과이다. 여기에 나타난 것처럼 90% 주기말의 경우 온도불감대 제어논리가 ASI 제어에 매우 효과적임을 확인 할 수가 있으며, 전체적으로 개선된 Mode-K 기법은 90% 주기말의 경우에서 비교적 잘 ASI를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 또한 그림 4는 온도불감대 ASI 제어논리가 추가된 기존 Mode-K 기법을 이용한 90% 주기말 일일부하추종운전 결과이다. 이 경우 보론 시나리오는 그림 3의 경우와 같다. 저출력에서의 이와 같은 심한 출력분포의 상부편중은 심한 제논 진동을 유발하게 되며 따라서 전출력에서 출력분포의 비교적 큰 하부편중을 유발한다. 만약 온도불감대 제어논리가 없는 Mode-K 기법이라면 ASI 편차는 훨씬 커질 것은 자명하다.

5. 결론

KNGR의 부하추종운전 성능을 향상시키기 위하여 개발된 기존 Mode-K 기법의 문제점을 도출하고 제어논리를 개선하였다. 또한 개선된 Mode-K 논리의 일일부하추종운전 성능을 평가하기 위하여 NSSS 성능해석 코드인 KISPAC-1D를 이용하여 모사계산을 수행하였다. 기존 Mode-K 제어 논리의 개선은 주로 아래와 같은 관점에서 수행되었다.

- 독자적인 구동이 가능한 P2, P1 제어군의 특성을 극대화하여 ASI 제어능력을 향상시켰다.
- 온도불감대 제어논리를 추가함으로써 ASI 제어능력을 향상시켰고 제논 진동을 효과적으로 제어할 수 있도록 하였다.

KNGR 평형노심을 대상으로 일일부하추종운전에 대한 성능평가를 수행한 결과 다음과 같은 점을 확인할 수 있었다. 먼저 기존 논리와 개선된 논리 모두 주기초와 주기중 부하추종운전 중 성공적으로 노심출력과 ASI를 제어할 수 있다. 그러나 90% 주기말의 경우 기존 Mode-K 기법은 ASI를 적절히 제어하지 못한 반면 개선된 Mode-K 기법은 만족스러운 ASI 제어 성능을 발휘함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 오수열, "Mode-K Description and Nuclear Design Data for KNDR," NDL-07/98, KAERI (1998).
- [2] 오수열, "차세대 원전의 Mode-K 부하추종운전중 노심거동 분석 (평형주기 주기초)," Calculation Node No. NDL-28/98, KAERI (1998).
- [3] 오수열, "연계자료(부하추종운전 모사계산 (평형주기 주기중, 90% 주기말) 결과)," KAERI, NRD/ZZ-97051M (1998).
- [4] Framatome, "Results and Analyses of Mode-K Load Follow Transients Simulated with SAF", (1998).
- [5] 김용희, "차세대원자로 기술개발 (II) : KNDR 부하추종운전 성능분석 및 Mode-K 제어 기법 최적화", KEPRI, TR.95ZJ16.P1999.125 (1999).

[6] 박문규, 이광호. “부하추종운전 방법 개선 보고서”, KEPRI, TM.99NJ13.P2000.108 (2000).

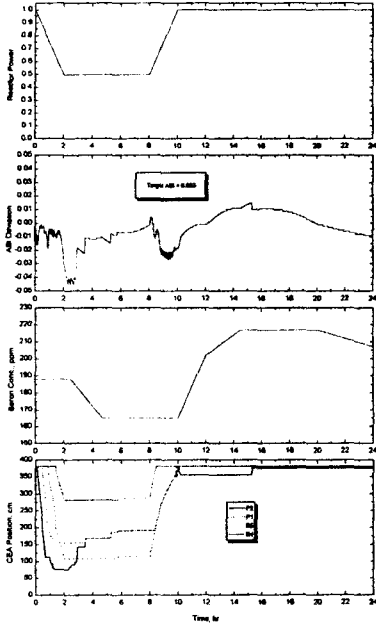


그림 3. 개선된 Mode-K 기법을 이용한 90% 주기말 일일부하추종운전 모사계산

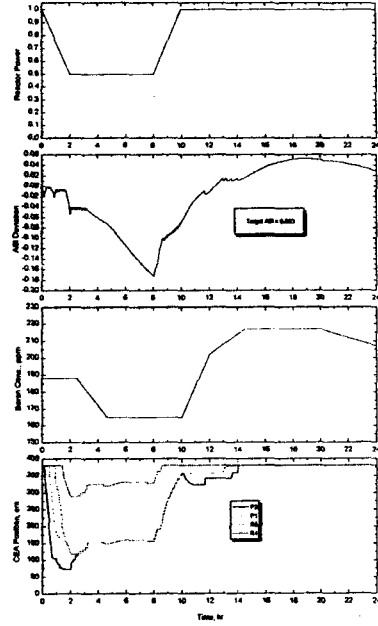


그림 4. 기존 Mode-K 기법을 이용한 90% 주기말 일일부하추종운전 모사계산