

## KNGR의 부하추종 운전 제어

김용희, 차균호  
한국전력공사 전력연구원

### Reactor Control Method for Load Follow Operation of KNGR

YongHee Kim, KuneHo Cha  
KEPRI

**Abstract** - 원자력발전 비율이 증가함에 따라 전기에너지의 효율적인 이용과 원자력발전의 경쟁력 제고를 위하여 원자력발전소(이하 원전)의 부하추종운전 필요성이 점점 커지고 있다. G7과제의 하나로 개발되고 있는 차세대원자로 (KNGR, Korean Next Generation Reactor)는 경쟁력 있는 원전의 설계를 위하여 "일일부하추종운전 능력의 확보"를 기본 성능요건의 하나로 하여 개발되고 있다. 그러나 수동으로 원자로출력분포를 제어하는 기존 원전의 제어방식으로는 상기목표를 충족시키기 어려워 원자로의 출력분포와 출력을 동시에 제어하는 새로운 자동 제어방식을 도입하였다. 본 논문에 기술된 제어방법은 원자로 출력분포 상태에 따른 비선형 제어방법이 적용되며 목표출력 부근에서의 Oscillatory Behavior 방식을 위해 설정된 Deadband 내에서의 다른 상태변수를 제어하기 위한 알고리즘도 포함된다. 개발된 제어방법의 성능을 확인하기 위해 원자로 증기공급계통 전체를 모델링한 성능분석 Simulator를 이용한 Numerical Simulation을 수행하였다. 일일부하추종운전은 100-50-100%P((10 ~ 16)-2-(10 ~ 4)-2 hr) power cycle over a 24-hour period, 주파수제어는 일반적인 Grid Follow에 대해 Simulation하였다.

의 동시 제어기법의 타당성을 확인하기 위해서는 원자로를 1차원으로 모사하는 시뮬레이터가 필요하다. 본 논문에는 이를 해결하기 위해 개발된 노달확장법(NEM, Nodal Expansion Method)을 이용한 1차원 원자로 동특성 모델을 이용하여 제어 기법의 주요 특성을 분석하고 모사계산을 수행하였다.

표 1. 각국의 원전 부하추종운전 현황

현황 기법	적용 발전소	특 성
ABB-CE	영광3/4, 울진 3/4, System80/80+	<ul style="list-style-type: none"> <li>o PSCEA (수동)</li> <li>o FSCEA (자동)</li> <li>o 보론 (수동)</li> </ul>
Mode-G	프랑스 PWR (900/1300 MWe)	<ul style="list-style-type: none"> <li>o G-Bank (반자동)</li> <li>o R-Bank (자동)</li> <li>o 보론 (수동)</li> </ul>
Mode-X	프랑스 N4 (1500 MWe)	<ul style="list-style-type: none"> <li>o X-Bank (자동)</li> <li>o 보론 (자동)</li> </ul>
MSHIM	기존 웨스팅하우스 원전/AP600	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MSHIM (자동)</li> <li>o 보론 (수동)</li> </ul>
KWU	독일 Konvoi 원전	<ul style="list-style-type: none"> <li>o D/L-Bank(자동)</li> <li>o 보론 (자동)</li> </ul>

## 1. 서 론

프랑스나 벨기에와 같이 원자력 발전 비중이 60%를 넘는 나라에서는 부하추종운전의 필요성을 매우 중요하게 인식하여 1970년대부터 부하추종운전 기술을 개발, 상용운전에 이미 적용하고 있다. 특히, 프랑스의 경우 미국 웨스팅하우스가 개발한 Mode-A 기법을 이용하여 부하추종운전을 시작한 이후 Framatome사가 자체 개발한 Mode-G 기법을 도입하여 주파수제어를 포함한 부하추종운전을 효과적으로 수행하고 있다. 표1은 선진각국의 원전 부하추종운전 현황이다.

미국 원전기술에 크게 의존하였던 국내 원전의 경우 실질적인 부하추종운전 능력을 갖추지 못했으며 과거 부하추종운전 능력 확보를 위한 연구가 수행된 바 있으나 연구결과가 실제적으로 원전 설계에 적용되지는 못했다. 국내 원전의 부하추종운전 성능 제고를 위해 후속원전인 KNGR은 부하추종운전능력 확보를 중요한 기본 설계요건의 하나로 설정하여 개발되고 있다. 일반적으로 원전의 부하추종운전 성능을 정확히 파악하기 위해서는 원자로의 거동뿐만 아니라 핵증기공급계통(NSSS)의 과도상태시 특성을 상세히 분석해야 한다. 한편 부하추종운전 기법의 타당성 검증은 위해서는 원자로를 포함한 핵증기공급계통의 제어 능력, 기기의 건전성, 발전소의 안전성 등 매우 넓은 설계범위에 대한 면밀한 해석이 필요하다. 이 중에서 원자로와 핵증기공급계통의 제어능력은 핵증기공급계통에 대한 성능분석을 통하여 확인되어야 한다. 지금까지의 원자로의 핵증기공급계통의 성능해석 프로그램은 단순한 1점 원자로 동특성모델(Point Kinetics Model)을 사용하기 때문에 원자로의 출력분포에 관한 정보를 계산할 수 없었다. 결과적으로 출력분포와 출력

## 2. 본 론

### 2.1 KNGR 부하추종운전 기법

부하추종운전은 터빈 출력 변화를 원자로출력 및 1.2차 계통이 적절히 수용하도록 하는 운전을 의미한다. 일반적으로 부하추종운전은 일일계획부하추종운전과 주파수제어운전으로 구분할 수 있다. 일일부하추종운전은 일정한 변동율로 출력을 50%까지 감발하여, 일정시간동안 유지하다가 다시 일정한 속도로 100% 출력으로 복귀하는 운전을 의미한다. 주말 부하추종운전은 이의 변형으로서 부분출력에 머무르는 시간이 상대적으로 길다. 주파수제어운전은 전력망의 주파수를 제어하기 위한 것으로서 원격 주파수제어(Remote Frequency Control)운전과 국부 주파수제어(Local Frequency Control)운전으로 구분할 수 있다. 원격 주파수제어 운전은 분 단위의 비교적 긴 주기를 갖는 주파수 변동을 제어하는 것으로서 일반적으로 급전요구에 따라서 터빈 출력을 변화시키는 형식을 취한다. 한편 국부 주파수제어 운전은 초 단위의 매우 빠른 주파수 변화를 제어하는 것이 목적이며, 일반적으로 터빈출력이 전력망의 주파수 변화에 자동적으로 응답할 수 있도록 Governor Free 운전을 통하여 이루어진다. 광의의 부하추종운전은 신속출력복귀 운전, 계단식 출력변동, 전부하 상실 (Load Rejection) 등의 불시출력변동운전도 포함한다. KNGR은 전부하 상실이 발생하면 RPCS (Reactor Power

Cutback System)이 작동하여 미리 설정된 제어군을 자유낙하시켜 원자로를 정지시키지 않고 출력을 급감발하도록 설계되었다.

## 2.2 KNGR의 부하추종운전 요건

효율적인 부하추종운전을 위해 KNGR은 다양한 관련 설계요건을 규정하고 있으며 일반요건은 다음과 같다.

표 1. KNGR의 부하추종운전 요건

운전모드	요건
일일부하 추종운전	o 100-50-100 %P [(10~16)-2-(10~4)-2hr] power cycle over a 24-hour period
Load Change	o 100% load rejection without reactor trip o ±10 %P step load change
Ramp Change	o ±5%/min load change

원자로의 부하추종운전 제어는 냉각재 평균온도와 출력분포를 나타내는 ASI (Axial Shape Index)를 동시에 자동으로 운전 허용범위 이내로 제어함을 목표로 한다. 냉각수내의 붕산 농도의 조절은 수동조작을 가정한다. 기본적으로 부하추종운전 제어논리는 다음과 같은 특성을 가진다.

않는다.

## 2.3 부하추종운전 제어 Stage Flag

부하추종운전시 제어 대상 변수는 원자로출력과 출력 분포이며, 제어 논리는 원자로 냉각재 온도차이 (Tavg-Tref)에 따라 제어봉의 구동방향과 속도를 결정한다. 이 제어군 선택 로직이 KNGR 부하추종 운전의 핵심이며, 효과적인 출력분포 제어를 위해서는 운전상황에 맞는 제어봉을 적절히 선택하여 구동하는 것이 관건이다. 원자로의 출력분포는 다음 식과 같이 정의되는 ASI (Axial Shape Index)로 대표된다.

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

여기서  $P_T$ ,  $P_B$  는 각각 원자로 상/하부 출력을 의미한다. ASI는 원자로의 중요한 안전성 감시 변수인 축방향 출력분포, 즉, 원자로 상/하부의 출력편차를 의미한다 ( $\Delta ASI \equiv ASI - \text{target ASI}$ ). 이는 기존 ABB-CE형 원전 제어시스템의 제어논리와 기본적으로 같으나 ASI 변화에 따라 구동할 제어군을 결정하는 차이가 있다. 구동할 제어군의 선택은 원자로의 상반부와 하반부에서 제어봉이 움직일 때 ASI의 변화양상이 서로 반대가 된다는 물리적 특성을 기반으로 한다. 출력분포 제어논리는 FOS± (Fixed Overlap Stage), ARS± (ASI Restoring Stage), ORS (Overlap Restoring Stage) 등 5가지 stage flag를 가지고 있으며, ASI편

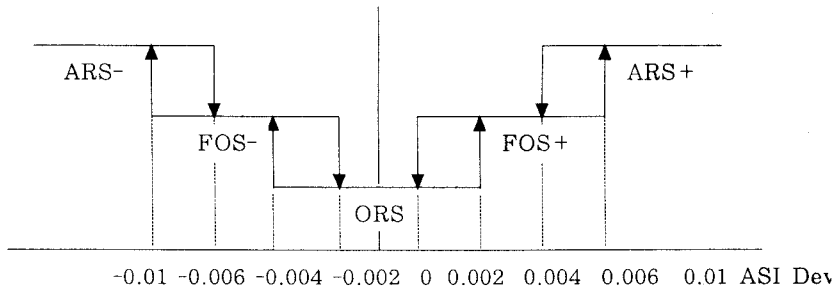


그림 1. ASI 제어를 위한 Stage Flag 변화

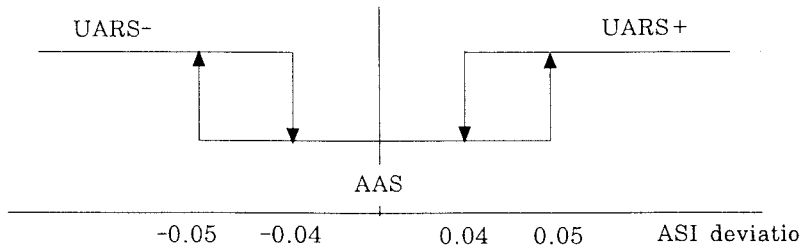


그림 2. 온도 불감대 영역내에서의 ASI 제어를 위한 Stage Flag 변화

- 주파수제어를 포함한 부하추종운전중에 원자로의 출력분포와 온도를 동시에 자동제어한다.
- 제어봉은 자동제어된다.
- 전출력 정상상태 운전시 제어봉은 완전 인출된 상태이다.
- 계측 가능한 변수(원자로 온도와 ASI)를 제어기의 입력으로 사용한다.
- 출력 제어수단으로서 제어봉과 붕산을 사용하되 붕산 사용은 최소화한다.
- 원자로 온도 제어가 출력분포 제어에 우선한다. 즉 원자로 온도가 온도불감대 내부에 있으면, 출력분포가 아무리 왜곡되더라도 출력분포 제어를 하지

차에 따라 어느 한 flag만이 ON 상태로 된다. 구동 제어군은 ON 상태의 flag와 미리 설정된 논리에 따라 선택/구동된다. 그림1.은 제어봉 구동 Stage Flag이며, 그림2.는 냉각재 온도차이(Tavg-Tref)가 불감대 영역에 존재할 경우의 구동 Stage Flag이다.

## 3. Simulation Results

그림3.은 부하추종운전 제어 모사에 사용된 전형적인 일일부하추종운전 형태이다. 그림4,5는 그림3의 출력 이력에 따른 주요 변수의 변화를 보여주고 있다.

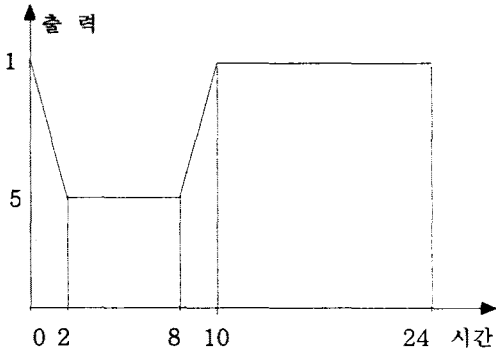


그림 3. 일일부하추종운전 터빈출력 형태

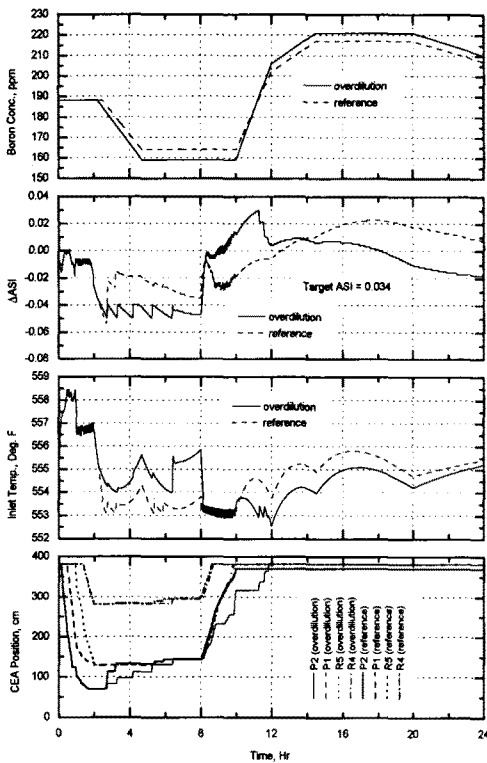


그림 4. 일일부하추종운전 제어 모사 결과

#### 4. Conclusions

본 논문은 KNGR의 부하추종운전 성능을 평가하고 개선점을 도출하기 위한 제어로직 개발 결과 및 모사계산 결과를 기술하고 있다. 모사계산은 100-50-100 형태의 일일부하추종운전과 국부 및 원격주파수제어운전과 일일부하추종운전을 동시에 하는 Grid Follow 운전을 대상으로 하였다. KNGR 부하추종운전에 대한 모사계산 결과를 일일부하추종운전 및 Grid Follow 운전시 모든 경우에 KNGR의 원자로 온도는 적절하게 제어됨을 확인하였다.

본 연구에서는 제어 기법의 유연성을 향상시키기 위하여 기존 제어논리에 온도불감대 제어논리를 추가하였다.

모사계산 결과 온도불감대 내에서의 효과적인 ASI 제어가 가능함이 확인되었고, 온도불감대 때문에 발생하는 기존 제어방법의 성능저하 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다.

원자력발전소 부하추종운전 성능은 원자로 제어기법 뿐만 아니라 핵중기공급계통 전체의 제어성능도 큰 영향을 미치므로 이의 설계 개선이 매우 중요하며, 잦은 출력변동에 대비한 기기 건전성 확보가 선행되어야 할 것이다.

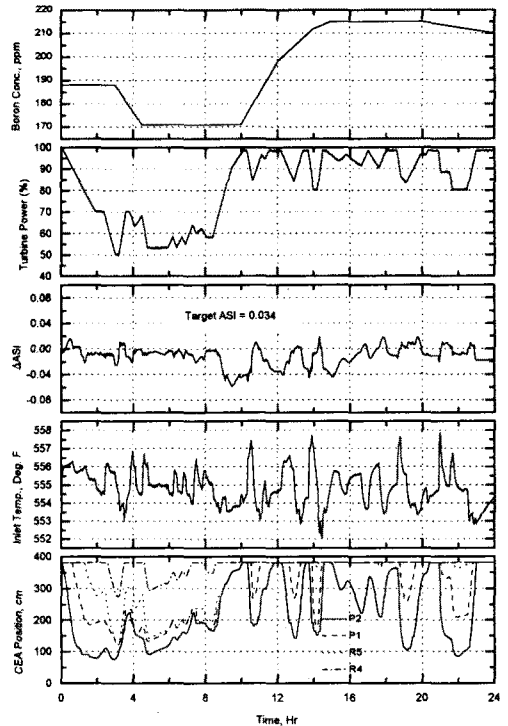


그림 5. Grid Follow 운전제어 모사 결과

#### (참고 문헌)

- [1] 석호천 외, 원자력발전소 부하추종 기술 개발, KAERI/RR-901/90, 과학기술처 (1990).
- [2] KNGR-SSAR, Chapter 4, KEPCO (1999).
- [3] Korean Utility Requirement Document, Rev. 0, KEPRI (1998).
- [4] 김용희, 일차원 원자로모델을 이용한 NSSS 성능해석 코드 KISPAC-1D 개발, TR.952J16.P1999.163, KEPRI (1999).
- [5] 오수열, Mode-K Description and Nuclear Design Data for KNGR, NDL-07/98, KAERI (1998).
- [6] 김용희, 차세대원자로 기술개발 (II)-KNGR 부하추종운전 성능분석 및 Mode-K 제어기법 최적화, KEPRI (1999).
- [7] 오수열, 차세대원전의 Mode-K 부하추종운전중 원자로기동 분석, KAERI (1998).
- [8] 오수열, KNGR 부하추종운전 모사계산, KAERI, (1998).