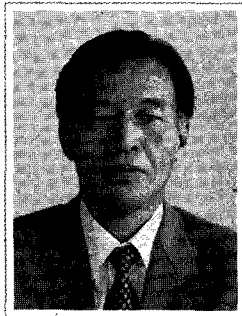


원전의 부하 추종성과 차세대 원전 개발

— KNGR의 부하 추종성 검토 —

박 용 집

금강-코리아(주) 연구소장



현 재 운영중인 한국 원전은 전력 생산 측면에서 경제성과 설비의 부하 추종성 측면에서 응동성 부족으로 기저 부하를 담당하고 있으나, 앞으로 원전의 구성비 증가 및 심야 주말·연휴와 같이 전력 수요의 감소시에 전력 계통 운영의 안정상 야기될 수 있는 원전의 계통·부하 추종 운전에 대비하고, 또한 금후 개발될 차세대 원전(KNGR)에서는 부하 추종 및 주파수 변화에 급응할 수 있는 운전상의 유연성을 부여하기 위하여 여

러 가지 제한적인 요인들을 검토하고 이들을 해결하는 과제의 방향을 제시함으로써 KNGR의 부하 추종성 개념 도입에 대한 체계적인 접근에 도움을 주고자 한다.

더욱이 KNGR의 기본 설계 개념은 한국 표준형 원전(KSNP/CE PWR Model)에 근간을 두고 있을 뿐만 아니라, KSNP의 부하 추종성 면에서 가장 현실적인 제약 요인으로 지목되고 있는 노심 출력(Axial Shape Index; ± 0.27) 범위는 일정 편차 제어(CAOC) 개념으로 설계되어 있어서 출력 편차 범위를 보다 확대시키는 이완 편차 제어(Relaxed Axial Offset Control) 개념으로 개선시키는 것이 가장 큰 과제이며, 아울러 출력 변화의 속응성을 부여하는 기법과 부수적으로 수반되는 설비의 피로도도와 마모성을 견지할 수 있는 계통의 내구성이 함께 검토되어야 한다.

검토 목적

- ① 부하 추종의 제한 요인 규명
- ② 원전 설비의 설계 변경 및 개선의 최적화
- ③ 원전의 운전상 유연성을 부여
- ④ 원전의 계통 부하 추종 및 주파수 제어에서 기여도 증진
- ⑤ 원전의 부하 추종 운전으로 인한 계통 전체의 경제성 제고

검토 방향

원전의 부하 추종에 대한 유연성을 갖도록 하기 위하여 다음과 같은 방향에 대하여 중점적인 조사가 필요하다.

- ① 부하 추종성에 있어서 프랑스 원전과 한국 원전의 비교
- ② 설계 변경 및 운전 방법 변경에 대한 가능성
- ③ 기기의 내구성 검토 및 개선 분야

- ④ 부하 추종 채택에 따른 향후 계획
- ⑤ 프랑스 부하 추종기술의 KNGR 원전에서의 적용

원자로 출력 분포에 의한 운전 범위 검토

1. Constant Axial Offset Control (CAOC)의 한계성

현재 한국 원전의 부하 추종면에서 가장 제약적인 요소는 원자로 증성자속 상하 편차의 과도한 제한 때문이라 하겠다.

이같은 이유는 부하 추종 운전중 원자로 축방향의 Xe 편차를 극소화 하자는 데 있으며, 이것은 원자로 운전중 다음과 같은 과도 현상 발생 및 사고시에도 최대의 안전 여유도를 유지하기 위함이다.

- ① LOCA 사고시에도 연료의 건전성 확인
- ② 과도 현상시 DNB 유지
- ③ 정상 운전중 선출력(kW/ft) 제한에 의한 연료봉 피복재의 건전성 유지
- ④ 과도 현상시 연료봉 용융 방지

그러나 CAOC 방법은 다음과 같은 단점이 있다.

- ① All Rod Out Mode 운전으로 저출력 운전시 전출력으로 회복이 쉽지 않음
- ② 지나치게 좁은 ΔI 운전 범위로 과도한 Safety Margin

- ③ 부하 추종상 운전의 유연성 제약
- ④ 기술 지침서의 과도한 제약

2. Relaxed Axial Offset Control (RAOC) 채택

CAOC 방법에 의한 원자로 노심 분포의 여러 가지 제약을 완화하고 과도한 Safety Margin을 최대한 사용함으로써 운전상 유연성을 갖도록 하기 위하여 다음과 같은 방법으로 운용된다.

- ① LOCA Limit를 최대한 활용
 - ② ΔI-Band를 확대 운용
 - ③ 과도한 과도 현상 혹은 사고 예견시에는 Axial Offset을 제한
 - ④ CAOC에 운용되는 기술지침서 상의 Xe 진동을 완화
- 그러므로 RAOC 방법의 운용은 다음과 같은 이점이 있다.

- ① 봉산 농도 제어 부담의 경감
- ② Spinning Reserve Capability를 증가
- ③ 제어봉의 과도한 Stepping 경감
- ④ EOL에 저출력으로부터 전출력 복귀가 가능
- ⑤ EOL까지 부하 추종이 가능
- ⑥ Tech Spec. 상의 요건 완화
- ⑦ 고출력에서도 In-Core/Ex-Core 교정이 용이
- ⑧ 운전상 유연성을 더욱 확대
- ⑨ 원전 구성비를 70% 이상 운용시 부하 추종 운전으로 경제성 제고

세부 추진 방향

1. Soft/Hard Ware

가. ΔI Band 확대에 따른 RAOC 해석

- ① Safety Limit
- ② Core Parameters
- ③ Fuel Management

나. Component와 System 적응성 해석

- ① CRDM의 피로 및 마모 한계성
- ② PZR 및 관련 배관의 열응력 해석
- ③ BTRS의 적응성 해석
- ④ RCS Volume과 Letdown Flow Rate 비교
- ⑤ 냉각재 저온도 운전에 따른 계통 적응 능력 해석

다. Control Rod Pattern의 재배치

- ① Bank Worth 연구
- ② Bank Overlapping과 Differential Worth 해석
- ③ Control Rod 삽입 한계
- ④ Rod Pattern의 재배치

2. Safety Analysis

가. 사고 해석 기준 재설정

- ① Uncontrolled Withdrawal of RCCA
- ② Rod Drop Accident
- ③ Inadvertent Boron Dilution
- ④ Steam Line Break
- ⑤ Rod Rejection Accident
- ⑥ Loss of Coolant Accident

나. NSSS의 초기 조건

원자로 출력이 부하 추종으로 인하여 Steady 상태에 있지 않고 과도 상태에 있을 때 대비한 재검토가 있어야 한다.

다. Safety Limit 재분석

- ① F_q^T
- ② F_{DH}^T

라. Rod Pattern 에 따른 사고 감소 재분석

- ① Uncontrolled Rod Bank Withdrawal
- ② Boron Dilution
- ③ Rod Drop
- ④ Rod Rejection
- ⑤ Steam Line Break & LOCA

3. Documentation

가. 기술 지침서 요건 변경

- ① Rx Protection Set Point
- ② 운전 제한 조건
- ③ Reactivity Control System 의 Malfunction
- ④ 원자로 냉각재 누설률 정기 점검
- ⑤ 원자로 냉각재 방사능 준위 정기 점검

나. 운전 절차서의 개선

- ① TBN Control Power 주기 점검 절차서
- ② Core Control 절차서
- ③ Ex-Core 계기 교정 절차서
- ④ 냉각재 방사능 감시 절차서
- ⑤ 냉각재 누설률 감시 절차서

다. Reactivity Control 절차서 개발

Control Rod/BTRS/RCS Temp Reduction에 의한 반응도 제어를 3가지 방법에 의하여 적절히 사용할 수 있도록 새로운 운전절차서 개발.

4. RAOC의 확인 과정

가. Demonstration

Reactivity Control을 위한 3-Element,

- ① Rod Control Methodology
- ② Boron Control With BTRS
- ③ Reduced Temperature Control

상기 3가지를 적절히 사용할 수 있는지에 대한 확인 절차가 필요하며, 특히 가상적인 사고에 대비하는 운전원의 능력 평가가 있어야 한다.

나. 발전 설비의 양립성 확인

발전 설비의 각종 Component 및 I&C 계통의 순응도 시험을 실시하여 잠재적인 문제를 도출한다.

다. 결과 평가

RAOC 운전 방법을 채택하기 이전 각종 확인 시험 과정을 거쳐서

- ① Man-Machine Interface
- ② 연속 부하 추종 운전시 제한 요인 등을 확인 및 평가함으로써 설비 개선의 최적화를 기할 수 있도록 한다.

5. 인허가 및 채택

확인 시험을 거쳐 RAOC 운전 방법의 체계화를 적립한 다음 Software/Hardware 변경에 따른 규제 기관의 인가를 얻는다.

부하 추종 능력 검토

1. 노심 관리

가. 연료 부하 추종 가능성

국내 원전의 침투 계수(DNBR, F_q^T , F_{DH}^T)와 연료봉의 선형 출력(kW/ft), 중성자 분포의 축방향 분포 등 설계치(Software)들은 현재 프랑스 원전과 같은 범주 내에 있으며, 연료봉(Pellet 및 Cladding)의 물리적 특성들도 같은 수준으로 평가되고 있다.

저부하 운전중 제어봉에 의한 전출력 복귀는 주기 말을 제외하고는 항상 가능하며 주기 말에는 붕산 농도 희석을 병행하여야 가능하다.

이 경우 2-Loop 계통이 3-Loop 계통보다 유리한 것은 Letdown Flow Rate와 냉각재 체적비가 크기 때문이다.

또한 주기 말에는 원자로 냉각재 온도(T_{in})를 보다 낮게 유지하거나 제어봉을 보다 깊게 삽입함으로써 중성자속의 분포를 보다 큰 편차로 유지하여 출력 증발률 및 전출력 복귀를 보다 용이하게 할 수 있다.

나. 제어봉의 모형

부하 추종시 빈번한 출력 변동 요구에 순응하기 위해서는 제어봉의 인출 움직임에도 불구하고 중성자 분포의 편차에 영향을 적게 주기 위해서 Bank-D군 Leading Bank의 전체 Worth를 약 500Pcm 이하로

낮추는 것이 유리하다. 또한 핵연료의 장전 모형 및 가연성 독물질(BP)의 구성 배치 분포에 따라서 Bank D Leading Bank의 위치 및 수량 조절이 필요하다.

또한 제어봉 삽입은 첨두 계수(F_q^T)의 설계치의 한계와 직접 유관하므로 출력 변동을 위한 제어봉의 삽입은 부하 추종 능력면에서 유연성을 갖도록 해야 한다. 그러나 이같은 문제는 첨두 계수의 분포도에 있어서 Safety Margin을 어느 정도 더 활용할 수 있느냐가 검토되어야 한다.

다. 노심 감시 계통

현재 노심을 감시하기 위한 Two-Sectional Ex-Core Monitor 설비로는 중성자속 분포를 정확히 알 수 없으므로 Multi-Section System의 도입에 의한 출력 분포와 주요 첨두 계수를 Real-Time Base로 추적할 수 있도록 하는 것이 바람직하다 (KNGR에서는 COLSS 이용).

2. 계통과 설비의 특징

가. 증기발생기 거동

부하 추종에 따른 증기의 유량 변동, 온도 변화 등이 수반되므로 이들과 관련이 있는 사항을 충분히 검토하여야 한다. 즉 유량 변동에 의한 증기발생기 Tube-Bundle의 진동, 온도 변화에 따른 열응력 증대에 따른 피로 현상 및 부식의 가속화 등이다.

나. 가압기 등의 열응력

부하 추종은 원자로 냉각재의 온도 변화와 압력 변화를 수반함으로써 다음과 같은 계통에 열응력에 의한 피로 현상이 증대되므로 이들의 운전 한계성을 사전에 파악하여 부하 추종 운전의 한계를 설정하여야 한다.

즉 가압기에 있어서 Spray Nozzle, Surge Line, 체적 제어 계통에서 Charging Line과 Letdown Line 등에 배관부에 설치되어 있는 Sleeving의 내구성 문제와 가압기 가열기의 수명 문제 등이 충분히 사전 검토되어야 하며, 또한 일차 계통 전체의 수명 기간의 가열/냉각에 따른 내구성 문제가 신중히 검토되어야 한다.

다. 제어봉 구동 장치 마모

부하 추종 운전시 제어봉의 빈번한 움직임은 다음과 같은 제어봉의 구동 장치 및 부속 기기의 기계적 마모 내지는 전기적 열화 현상을 초래하게 된다.

- ① Latching Device
- ② Control Rod Shaft
- ③ CEDM Guide Tube
- ④ Control Rod Thimble Tube
- ⑤ Control Rod Clad
- ⑥ Electrical Magnetic Assemblies

따라서 현재 원전의 제어봉 구동 장치의 내구성 범위 내에서 최적 운전 범위를 결정하기 위해서는 프랑스 원전의 Mode A 및 Mode G의 어느 범위로 할 것인지 면밀한 검토가 필요하지만, Mode A(일일 부하

추종)운전은 가능할 것으로 보인다.

라. 체적 제어 계통 능력

출력 변동을 제어봉에만 의존하다 보면 앞서 설명한 바와 같이 중성자 분포의 불균형에 의한 첨두 계수의 제한으로 냉각재 봉산 농도의 제어를 수반하지 않을 수 없다. 특히 핵연료 주기 말까지 부하 추종을 하기 위해서는 체적 제어 계통의 봉산 농도 조절 능력이 절대적이라고 할 수 있다. 이 때 축출수(Letdown)계통의 능력과 냉각재 전체 체적과 비가 클수록 유리하므로 일반적으로 2-Loop System이 3-Loop System보다 봉산 농도 조절 능력이 우수하다고 할 수 있다. 그러나 주기 말 운전에서는 저봉산 농도로 인한 다량의 폐기물 생성을 유발하게 되므로 봉산 농도를 온도 변화에 따라 조절할 수 있는 이온 수지 계통(BTRS) 도입이 부하 추종면에서 바람직하다고 하겠다.

마. 터빈 조속기 계통

출력 변동에 가장 민감한 터빈 조속기로서 우선 밸브의 기계적 내구성과 유압 계통의 건전성이 확신될 수 있어야 하며, 조속기의 주파수 대응 능력에 따라서 부하 추종 운전 능력이 좌우되고 있으므로 발전소별로 터빈 조속기의 특성을 파악토록 별도 시험 계획을 세워야 한다.

바. 제어 회로 계통 개편

원전의 부하 추종 측면에서 현재의 터빈 및 원자로 계통의 제어 회로 계통의 전반적인 재검토가 최소한

다음 분야에서는 이루어져야 한다.

- ① 제어봉 모형 변경에 따른 회로
- ② 제어봉 계통의 전기·전자 제어 회로
- ③ 주파수 입력에 따른 귀환 회로 신설
- ④ 가압기 수위 및 압력 제어 회로 개선
- ⑤ 증기발생기 수위 제어 개선
- ⑥ 냉각재 온도 프로그램 변경

3. 계통 운전 설계 특성

가. 운전 조정 범위 확장

㉠ Tavg Dead Band 확대

냉각재 평균 온도 Dead Band를 확대함으로써 다음과 같은 장점을 가져올 수 있다.

- ① 제어봉의 빈번한 인출/삽입을 억제
- ② 출력 분포의 변동을 최소화
- ③ 봉산 농도 제어 계통의 빈번한 운전을 완화

그러나 이상과 같은 운전은 다음과 같은 잠재적인 문제점을 내포하고 있다.

- ① 고출력에서 DNB Limit Margin 감소
- ② 저출력에서 증기발생기 배기 밸브 개방 가능성
- ③ 고출력에서 증기발생기의 습분 과다 및 터빈 손상
- ④ 저출력에서 평균 온도의 저하
- ⑤ 전출력 범위에서 기기의 과도한 온도 변화 영향

상기와 같은 문제점을 최소화하는 범위 내에서 Tavg Dead Band를 최대로 확장할 수 있는 범위를 결정하여야 한다.

㉡ 가압기 압력 및 수위 프로그램 현재 가압기의 압력과 수위 프로그램에는 Dead Band가 허용되지 않고 있으므로 부하 추종 운전시 압력 변화 및 수위 변화에 따라서 살수 계통 가열 계통 및 충전과 유출 계통의 빈번한 작동으로 인한 기기의 내구성 문제가 대두될 수 있으므로 가압기의 압력과 수위 프로그램에 Dead Band를 가미시킴으로써 이상의 문제를 완화시킬 수 있다. 이들의 최적 운전 범위 또한 여러 가지 운전 조건에서 검토되어야 하겠다.

㉢ 증기발생기 수위 제어 프로그램 부하 변동시 증기 유량 변동과 압력 변동은 증기발생기 수위 변동을 초래하게 되며, 이것은 곧 급수 제어 밸브의 빈번한 작동으로 인한 밸브의 고장을 유발할 수 있다. 따라서 현재의 수위 제어 프로그램에서 Dead Band를 삽입할 때 수위 제어 밸브의 신뢰도를 유지할 수 있으므로 수위의 상하 편차의 설정은 원자로의 안전성과 격납 용기의 설계 압력 터빈 보호 측면에서 검토되어야 한다.

㉣ Spin(출력 회복) 능력 검토 현재 제어봉의 삽입 한계 및 봉산 농도 조절 계통으로 저출력 운전시에 전원 계통(Grid System)의 긴급한 요구에 전출력으로 급응할 수 없다.

더욱이 주기 말 운전시에는 이같은 스핀 능력의 한계로 부하 추종성의 한계를 극복하기 위해서 다음과 같은 운전 방법이 검토되어야 한다.

- ① 냉각재 평균 온도의 감온 방법
- ② 중성자속 편차의 확장
- ③ 제어봉의 보다 깊은 삽입

그러나 이같은 방법의 개선에는 보다 신중한 검토가 뒤따라야 하겠다.

㉤ 반응도 제어 방법 변경

지금까지는 원자로 출력을 변동시킬 때 반응도 제어는 어느 한 가지 방법으로 시행토록 하고 있으나, 부하 추종 운전을 원활하게 하기 위해서는 여러 가지 방법(RCS Tavg, Control Rod Position, Boron Concentration)을 동시에 사용할 수 있는 방법을 강구하여야 하겠다.

이것은 운전원 개인의 판단에 맡기기보다는 전산 프로그램을 개발하는 것이 Man-Machine Interface를 줄이는 것이 될 것이다.

나. KSNP 제어 감도 연구

KSNP에서 다음과 같은 개별 제어 특성을 또한 검토하여야 한다.

- ① 출력 변동 한계 및 변동률
- ② 봉산 농도 조절 기능의 한계
- ③ 제어봉의 삽입 한계 및 Rod Worth의 변화
- ④ 냉각재 체적과 유출수 유량의 비
- ⑤ 냉각재 온도의 변화에 따른 계통 영향 및 출력 변동폭에 따른 회수

다. 사고 해석 재검토

현행 원자로 안전성 해석은 사고 초기 상태가 정격 출력 혹은 일정 출력 운전 상태를 가정하였으나, 부하 추종은 수시로 출력 변동이 있으므로 초기 조건(출력·온도·압력 가압기 및 증기발생기 수위 등)이 변동하는 상태에서 다음과 같은 사고 해석이 이루어져야 하겠다.

- ① Uncontrolled Rod Bank Withdrawal
- ② Uncontrolled Boron Dilution
- ③ Rod Drop
- ④ Rod Ejection
- ⑤ Steam Line Break & LOCA

라. 기술 지침서 재검토

현행 기술지침서(FSAR Chapter 16)들은 모두 CAOC 제어 방법을 전제로 한 내용이므로 다음과 같은 분야의 재검토가 이루어져야 한다.

- ① Protection Set Point
- ② Limiting Condition for Operation
- ③ Inoperability of System
- ④ Surveillance Test Requirement
- ⑤ Control Rod Insertion Limit
- ⑥ Shutdown Margin

마. 운전 절차서 변경

노심 제어 및 감시 계통에 해당하는 각종 절차서는 이 분야의 설계 변경 및 운전 방법의 개선으로 변경이 불가피할 것이다.

- ① 노심 관리 절차서
원자로 반응도 제어를 이제까지는

수동으로 한 가지 방법으로만 사용하였으나 Three Elements(Control Rod, Boron, RCS Temp)로 동시에 활용할 수 있도록 Computer Aided System의 개발이 필요하다.

㉠ 계기 교정 절차서

각종 제어 계통의 계기 교정을 이제까지는 정격 출력을 기준으로 하여 왔으나 출력 변동에 따라 저출력에서도 교정할 수 있어야 하며, 특히 Steady State보다는 Dynamic State에서 교정할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

㉡ 냉각재 방사능 준위 감시

출력 변동은 핵연료의 손상에 직접 영향을 줄 가능성이 있으므로 방사선 준위 감시는 현재의 시료 채취 방법보다는 On-line System으로 개선하는 것이 바람직하다.

㉢ 냉각재 누설률 감시

출력 변동으로 가압기 수위가 수시로 변화하므로 냉각재 누설의 진위를 발견하기 어렵게 되었다. 따라서 냉각재 누설률 측정 및 감시 설비를 강화하여야 하겠다.

㉣ 출력 편차 감시

부하 추종이 운전중 출력 편차에 의한 첨두 계수들의 변동을 계속 감시하여야 하므로 운전중 계속 감시할 수 있는 기능이 별도로 설치되어야 하며, 이것은 운전원의 인위적인 개별 감시보다는 전산 설비에 의존하는 것이 타당하겠다.

결 언

한전이 운영하는 모든 원자력발전소는 CAOC 개념하에서 주로 저 부하로 운전하도록 설계되어 있다. 그러나 원전 비중의 증대는 부하 추종성이 있는 원전의 운전 유연성을 요구하고 있으며, 이같이 전력 계통에 부응하기 위해서는 RAOC 운전 기법으로 전환하지 않으면 안 되겠다. 한국 원전은 RAOC 운전 기법을 채택할 때 프랑스형 원전 Mode A(Daily Load Follow Operation) 운전에는 무리가 없을 것으로 보여진다. 그러나 현재 한전의 원전 설비로서는 Mode G(Frequency Control) 및 Mode X(Grid Quick Response) 개념의 운전에는 제약 요소가 너무 많으므로 KNGR에서는 원전 운전의 유연성을 충분히 부여하는 방향으로 기존 원전의 설계 개념에서 탈피하여 세계 원전 경쟁의 우위를 확보해야 하겠다.

그러기 위해서는 한국의 전력 계통 실정에 맞는 원전을 개발해야 하겠으며, 이같은 부하 추종성 원전 개발은 현재의 전력 계통상 원전 구성비를 보다 증가시키므로써 전력 에너지 구성면에서 보다 경제성을 추구할 수 있는 방안이 될 수 있을 것이며, 또한 화석 연료에 의존하는 전력 에너지의 취약성으로부터 자유로워질 수 있을 것이다. ☉