

한국표준형원전 노심운전지원코드 개발

Development of a Core Operation Support Code for Korean Standard Nuclear Power Plants

신호철, 김용희, 김윤희, 박문규, 이창섭

한국전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

한국표준형원전(영광 3,4호기 및 울진 3,4호기)은 정지후 재기동시 노심의 축방향 출력분포제어가 어려워 운전제한 조건 충족을 위한 적절한 노심제어 방법을 제공하는 것이 매우 중요한 문제로 대두되어 왔다. 특히 주기중(MOL) 원자로를 재기동해야 하는 경우에는 심도깊은 노심상태의 이해와 운전기술 없이는 출력상승에 상당히 어려움을 겪게 된다. 원자로 운전은 제어봉 조작 및 붕소농도를 조절함으로써 이루어지는데 각각의 방법은 출력의 변화소곤 및 액체폐기물 발생량과 직결되어 있어 적절한 운전전략을 선택하는 것이 경제성 향상에 필수적이다. 이를 위해 노심상태의 변화추이 예측뿐만 아니라 제어봉의 조작과 붕소농도의 조절을 최적화한 재기동 전략을 계산/생산할 수 있는 도구를 운전원에게 제공함으로써 발전소의 불시정지 예방 및 기동(Startup)시간을 단축하여 발전소 이용률 향상에 기여할 수 있는 노심운전지원코드를 개발하였다

Abstract

As operation experience for Korean Standard Nuclear Plants (KSNP) is accumulated, axial power distribution control during power ascension is shown to be a hard-to-attack problem especially after middle of cycle(MOC). The situation would be worse if 18-month operation cycle is adopted for KSNP. This difficulty facilitates the development of the operation support code to provide accurate and fast core prediction during core power maneuvering. In addition, provision of power and ASI (Axial Shape Index) control strategy is particularly emphasized to reduce operator's heavy computational burden during transients. Thus, a core operation support code KROSS (KEPCO Reactor Operation Support System) is developed which can predict core dynamics and produce power ascension strategy.

1. 서 론

KSNP 노심의 안전운전을 위해 가장 기본적이고 중요한 운전변수는 축방향 출력분포를 나타내는 ASI (Axial Shape Index)이며 KSNP의 운전중 가장 많이 직면하는 어려움중의 하나가 ASI를 적절히 제어하는 것이다. 현재 숙련된 운전원이 노심 거동의 변화추이를 일반적인 절차서 및 경험에 따라 예측하고 있으나 실제 노심상태는 연소도 및 운전이력에 따라 다양하게 변하므로 경험

에만 의존하는 방법에는 한계가 있다. 그러나 실제 노심을 정확히 모사하는 전산코드의 정보를 기반으로 노심운전 전략을 결정하면 원전의 안전성 제고는 물론 불시정지방지를 통한 경제성 제고에 상당한 기여를 할 것으로 예상된다. 따라서 축방향 출력분포변화를 정확히 예측하고 최적 운전전략을 제공할 수 있는 노심운전지원코드를 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 본 론

2.1 노심거동 모델개발

1차원 노심 모사계산은 운전 조건의 변화에 따른 노심의 거동을 빠른 시간내에 정확히 예측하여 안전하고 효율적인 운전 자료를 제공함으로써 원자로 운전의 최적화를 도모하고자 하는데 그 목적이 있다. 노심 천이현상의 모사계산을 위해서는 노심 상태의 초기 조건을 실제 노심과 일치시켜야 하는데 특히, 직접적인 측정이 불가능한 노심내 제논분포의 초기 상태가 천이현상의 해석 결과에 커다란 영향을 미치게 된다. 초기 상태의 노심이 정확히 제논 평형상태에 있지 않는 경우 모사계산 이전에 있었던 적은 양의 제논 진동이 모사계산에 영향을 미쳐 모사계산의 오차가 누적되고 시간이 진행될수록 점점 커지게 되는데 노심의 시간에 따른 변화를 잘 예측하기 위해서는 비평형 제논분포를 모사 하는 초기화가 필수적이다. 기존의 ONED94는 모사 이전 평형 상태의 정보로 부터만 계산을 수행 하였는데 비평형 상태의 정보로 부터도 계산을 수행 할수 있도록 초기화 기능을 개발 하였다. 초기화된 비평형 상태의 정보로부터 정확한 노심모사계산을 수행하기 위하여 모사이전의 Xenon 진동을 등가 Xenon 특성식으로 나타내어 이로부터 비평형상태와 평형상태의 P, I, Xe 각각의 ASI 차이식을 유도하여 비평형상태의 I, Xe ASI를 유추하고, 이 유추된 ASI 값을 만족하는 비평형 상태의 I, Xe 축방향 분포를 초기화하고 이 초기화된 비평형 상태의 정보로부터 노심모사계산을 수행하면 정확한 노심의 거동을 예측할 수 있다.

영광3호기 80% Load Rejection Test와 95% Unit Load Transient Test에서 수집한 자료를 이용하여 검증 계산을 수행한 결과는 평형 상태의 정보로부터 모사 계산을 수행 했을 때의 RMS 오차 2%를 비평형 상태의 정보를 초기화한 정보로부터 계산하면 그 오차를 1% 이내로 줄일 수 있었다(그림 1, 그림 2 참조). 정확한 노심 모사는 원자로 운전의 최적화를 위한 운전원들의 의사 결정에 더 큰 지표가 될 수 있을 것이다.

2.2 정지후 최적 재기동 전략

원자력발전소 정지시 이용률 향상을 위하여 가능한 한 빨리 원자로를 재기동 하는 것이 바람직하다. 일반적으로 원자로의 정지후 재기동은 다음과 같은 이유로 제약을 받는다. 먼저 전출력 운전 중 원자로가 정지되면 노심내 제논농도는 크게 증가하여 약 8~10 시간후에 최대로 되었다가 다시 감소하기 시작한다. 따라서 빠른 시간내에 원자로를 재기동하기 위해서는 제논농도 변화에 따른 반응도를 보상해야 하는 어려움이 있다. 특히 봉산농도 회석이 어려운 주기말에서는 제논 반응도의 보상이 어려워 원자로를 재기동할 수 없는 시간이 존재할 수 있다.

원자로 재기동과 관련하여 또 다른 문제점은 축방향 출력분포의 제어이다. 현재 한국표준형 원전(KSNP)의 경우 재기동시 축방향 출력분포를 나타내는 $ASI = \frac{하부출력 - 상부출력}{하부출력 + 상부출력}$ 가 일정한 범위안에 존재하도록 제어하면서 출력을 증가시키도록 되어 있다. 한편 재장전 노심의 경우 낮은 출력에서는 축방향 연소도의 비균질성 때문에 출력분포가 극단적인 상부편중을 나타내며, 이는 저출력에서의 ASI 제어를 매우 어렵게 한다.

한편, 원자로의 출력 상승률은 기본적으로 FPG (Fuel Preconditioning Guideline)에 의해서 결정되며, 이에 따라서 전출력으로 복귀하기까지 요구되는 시간이 결정된다. KSNP의 경우 재기동시 노심의 출력상승률은 약 3%/hr ~ 5%/hr로서 유지된다. 결과적으로 일정한 출력상승률을 유지

하면서 재기동하는 경우 최단시간내에 전출력에 도달하기 위해서는 ASI 제어가 관건이 됨을 알 수 있다.

본 연구에서 개발된 재기동 전략의 주요한 특징 중의 하나는 저출력에서 ASI를 Preconditioning 한다는 점이다. ASI의 Preconditioning은 노심의 특성과 제어군 구동의 특성상 어떤 방법을 사용하더라도 운영절차서의 ASI 제어범위를 만족할 수 없는 경우에 이용되며, 저출력 제논진동을 이용하여 ASI를 원하는 범위내로 제어하는 것이다. 재기동시 저출력에서 제논진동이 발생하면 일시적으로 제논의 분포는 하부로 약간 편중되었다가 약 7시간후에 다시 상부편중이 시작된다. 따라서 상부편중이 시작되면, 일정한 출력준위를 유지하고 제어봉의 움직임이 없는 경우 봉산의 회석이나 주입시 노심출력은 언제나 하부편중을 시작하게 된다. 결과적으로 일정한 시간이 지나면 ASI는 자연스럽게 충분히 작아져서 원하는 범위 이내로 제어가 될 수 있다.

재기동시 ASI 제어논리는 정지후 어느 시점에서 재기동을 시작하는가에 따라서 달라진다. 여기서는 노심 연소도가 7700 MWD/MTU일 때의 재기동 과정을 다루었으며, 운전지원코드 모사계산 결과를 그림 3에 나타내었다. 이 경우 전출력 평형상태에서 ASI는 0.0202로서 출력분포가 약간 하부로 치우친 상태였다. 원자로 정지후 약 8시간후에 제논농도가 최대값에 이르며, 이 때 노심의 평균 ASI는 -0.791로서 출력분포가 상부로 크게 편중된 상태이다. 임계 상태에서 R5의 위치는 260 cm 이며, 이 때 ASI와 보론농도는 각각 -0.5224와 533.4 ppm 이다. 재기동시 ASI Preconditioning 방법을 적용하여 그림 3 같이 매우 만족스런 ASI 제어가 이루어졌음을 확인할 수 있다.

2.3 KROSS 개발

한국표준형 원전의 노심운전지원 코드개발 일환으로 사용자 접속부분(Graphical User's Interface)이 강화된 KROSS(Kepco Reactor Operation Support System)을 개발하였다. 이는 원자로 불시정지 후 재기동에 따르는 운전원의 부담을 경감하고, 운전원에게 노심 천이상태시 노심 특성 및 운전전략을 종합적이고 시각적으로 제공하는데 도움을 준다. 이전 ONED94에서는 Menu 및 Graphic기능을 제공하는 Fortran Graphic Package인 Interactor를 이용하여 개발한 GUI가 있으나, 이는 DOS모드에서 수행되어 사용에 불편이 있고 다양한 Graphic을 보여주는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 전산분야의 각종 응용소프트웨어를 이용하여 사용자 접속부분(GUI)을 구현함으로써 사용자의 편의성을 최대한 고려한 노심운전 지원 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 동일 윈도우 통합 환경하에서 노심분석모델 입력생산 및 계산결과 시각적 출력이 가능하도록 하였다. 또한 출력 계산결과 확인 후 재계산을 용이하게 할 수 있도록 하였다. 개발된 KROSS는 노심천이현상의 1차원 노심 모사계산을 수행하는 ONED94 모듈과 입력문 작성 및 시각적 출력을 수행하는 통합 Windows 모듈로 구성되어 있다. 각 모듈간 필요한 자료는 시스템 구성의 단순화를 위하여 별도의 데이터베이스 프로그램을 이용하지 않고 특정 파일명을 가진 텍스트 파일로 서로의 정보를 공유한다. 통합 Windows 모듈은 다양한 형태의 입력도구(Text box, List box, Graph 등)를 이용하여 손쉽게 ONED94 프로그램의 입력화일인 "cntl"을 만든다. ONED94 프로그램은 실행과정에서 GUI를 위하여 시간에 따른 출력,임계봉소농도, 부분강 및 조절 제어봉 위치, ASI, XE ASI, XE 반응도가 등이 수록된 "summary.dat"파일을 만든다. KROSS는 최적 운전전략을 자동 혹은 수동으로 수립하고 동일한 윈도우즈 환경에서 ONED94를 실행하고, 그 결과를 다양한 그래프 형태로 사용자에게 제공함으로써 재기동 및 노심운전 모사훈련에 도움을 준다.

3. 결 론

한국표준형 원전의 재기동시 축방향 출력편차(ASI)를 최적으로 제어하면서 단시간내에 출력을

상승시킬 수 있는 재기동 전략을 개발하였다. 재장전 노심의 정지시 저출력에서 축방향 출력분포는 상부로 크게 치우치며 과도한 제논농도의 변화가 수반되기 때문에 재기동시 저출력에서 적절한 ASI 제어가 매우 힘들다. 특히 조절용 제어군이 중첩된 상태로 삼입되거나 인출되어야 하기 때문에 ASI 제어가 더욱 힘들다. 새로운 ASI 제어논리는 기본적으로 제어봉과 붕산농도를 이용하여 출력과 ASI를 동시에 제어하는 방식으로서 저출력에서의 제논진동을 ASI 제어에 활용하는 (ASI 선행제어) 특징을 가진다. 뿐만 아니라 본 연구에서 제시한 재기동 논리는 제어봉을 효과적으로 활용하여 액체폐기물 발생량을 최소화 할 수 있는 방안을 제시하였다. 개발된 KSNP 최적 재기동 전략을 영광 4호기 4주기에 적용한 결과 전 연소도에 걸쳐서 매우 유연하고 단순한 보론농도 조절과 단순한 제어군의 구동을 이용하여 효과적으로 ASI를 제어할 수 있음을 확인하였다.

또한 사용자 접속기능이 강화된 KROSS는 최적 운전전략을 자동 혹은 수동으로 수립하고 동일한 윈도우즈 환경에서 ONED94를 실행하고, 그 결과를 다양한 그래프 형태로 사용자에게 제공함으로써 재기동 및 노심운전 모사훈련에 도움을 준다

참 고 문 헌

1. 장중화 등, "1차원 확산 코드 ONED90," KAERI/TR-353/93(1993)
2. 장중화 등, "노심관리용 1차원 ONED90 개선," KAERI/RR-1296/93(1994)
3. CPC/CEAC System Software Verification Test Report (June/6/1981)
4. Code Physics Validation for the CE PWR (Nov/12-16/1979)

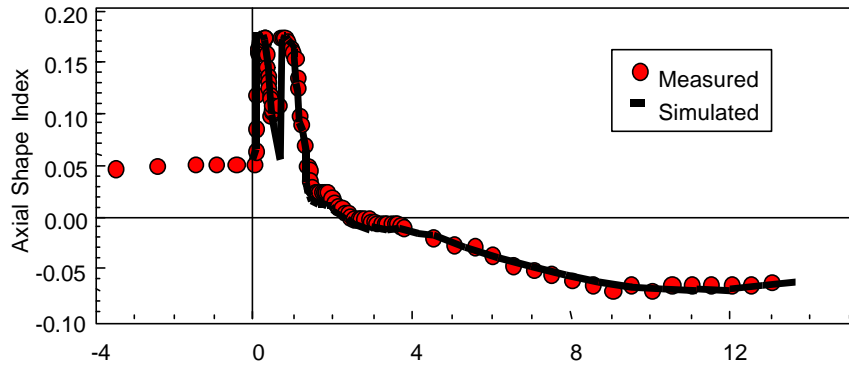


그림 1 ASI Simulation of Transient with Modified Xenon

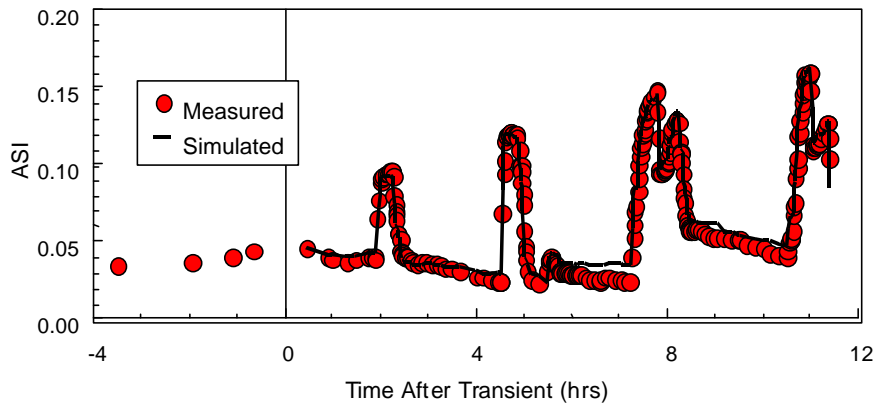


그림 2 ASI Simulation of Transient with Modified Xenon

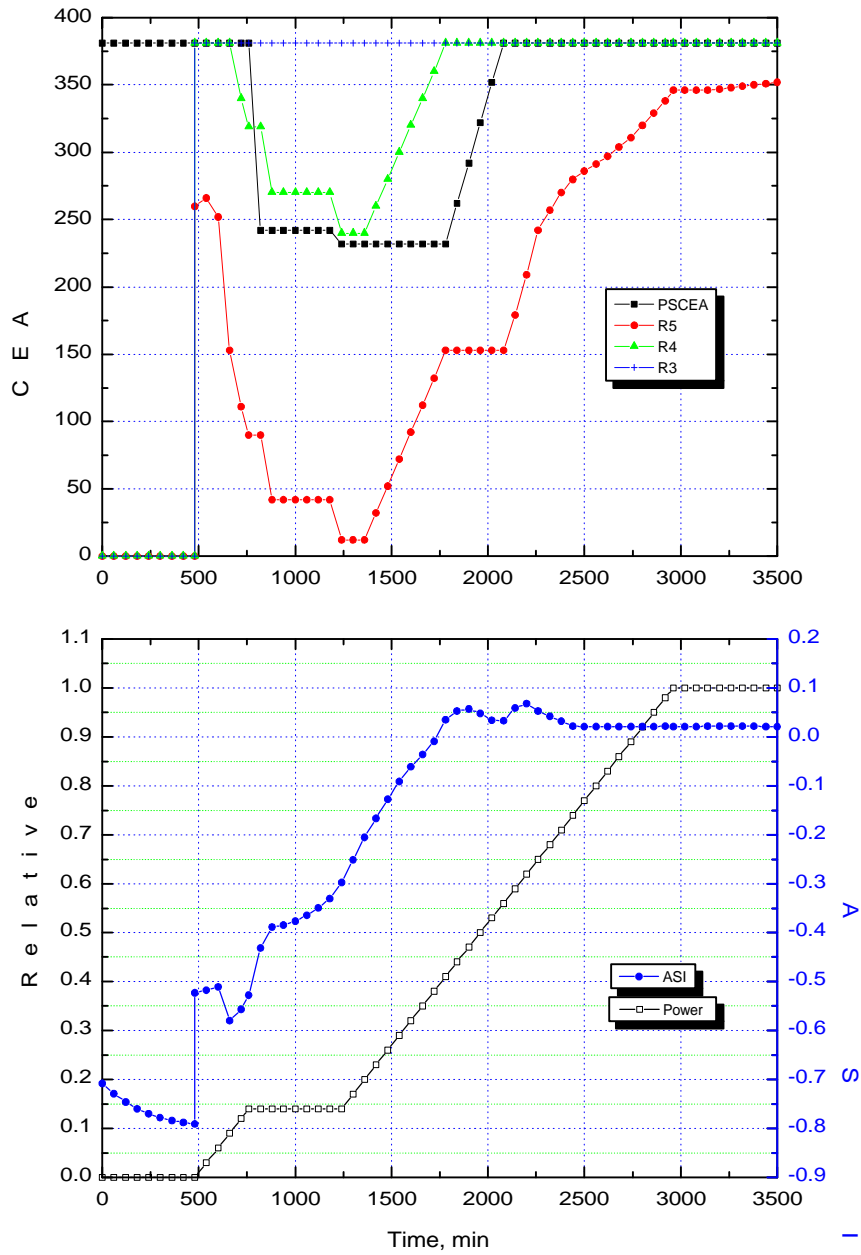


그림 3 영광 4호기 4주기 주기중 (7700 MWD/MTU) 재기동 모사계산



그림 4 KROSS 초기화면



그림 5 KROSS 자료 입력화면

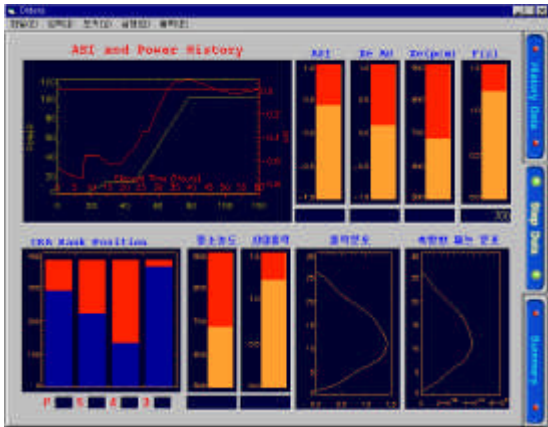


그림 6 KROSS 출력화면 I

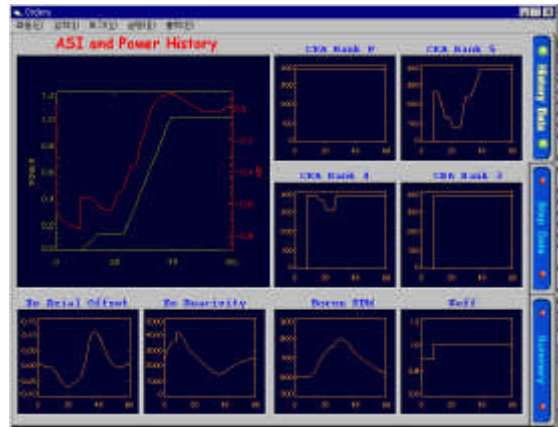


그림 7 KROSS 출력화면 II