

CANDU 6 원전분석기에서 원자로의 연소해석 및 운전중 핵연료교체 모사기능의 도입

박경석, 김현대, 안호준
고등기술연구원

요 약

원전분석기가 원자로의 연소해석 및 운전중 핵연료교체 모사를 수행함으로써 노심 핵연료 관리 실습을 할 수 있는 기능을 갖도록 하는 새로운 개념을 도입하였다. 이를 지원하기 위하여 시뮬레이션 결과의 효율적 display를 위한 3차원 가시화와 사용자와의 상호 교류 및 실시간 시뮬레이션을 위한 분산 프로세스 개념의 적용이 시도되었다.

1. 서론

원전 과도상태시 계통의 물리적 거동을 현실성 있게 고속으로 모사할 수 있는 원전분석기를 운전지원에 이용함으로써 운전원의 상황 판단능력 향상을 통한 원자력발전소의 안전성 및 운전성 향상에 기여할 수 있다.

CANDU 원자로에서의 핵연료 교체는 원자로의 정격 출력을 유지하고 있는 상태에서 수행된다. 이것은 핵연료 교체가 운전정지후 행해지는 대부분의 원자로와 다른 CANDU 원자로의 고유한 특징이다. 노심 각 구역에서 적절히 운전중 핵연료 교체를 함으로써 각 구역별 출력분포를 효과적으로 제어할 수 있다[1]. 본 연구의 목적은 CANDU 원전분석기의 구현을 위한 노력의 일환으로 초기노심으로 부터 핵연료교체가 수행되는 과정을 시뮬레이션하는 코드를 개발하여 사용자에게 원전분석기를 통하여 핵연료관리에 대한 명확한 인식을 주기 위함이다.

원자로 운전 에 따르는 노심내에 연소계산을 수행함으로써 CANDU 원자로 핵연료연소 특성을 파악할 수 있고 핵연료교체 모사를 수행함으로써 원전분석기가 노심 핵연료관리 기능을 할 수 있다. 또한 Server/Client 환경의 분산처리를 이용하여 시뮬레이션함으로써 시뮬레이션 결과의 효율적 display와 사용자와의 상호 교류 및 실시간 시뮬레이션 기능을 갖도록 한다[2]. 이러한 원전분석기 기능을 이용하여 원자로의 전체적인 이해를 도울 수 있다.

2. 모델의 구성

2.1 연소도 해석 모델

핵연료연소를 해석하기 위한 모델은 미시적 연소모델과 거시적 연소모델로 구분된다.

미시적 연소모델은 스펙트럼 계산으로부터 결과하는 미시적 핵단면적이 연소도와 온도의 함수로서 표시된다. 반면 거시적 연소 모델은 거시적 핵단면적이 연소도의 함수로서 표시되며 중성자확산방정식의 해에서 얻은 값을 가지고 연소도를 결정한다. 이 모델은 열유체 교환효가 고려되지 않고 정확도가 떨어지나 빠른 계산을 할 수 있다. 따라서 원전분석기를 위한 본 모델에서는 이 거시적 연소모델이 사용된다.

중성자속 분포와 연소도 계산은 서로 연계된다. 연소의 시간중속과 중성자속 분포의 변화에 대한 취급은 통상적으로 중성자 확산계산을 연소계산으로부터 분리하여 다룬다. 즉 중성자속이 일정하다고 가정할 수 있는 시간의 끝에서 새 핵단면적을 계산하고, 이를 가지고 중성자 확산 방정식을 풀어서 새 중성자속을 구한다. 매 시간간격마다 중성자속 계산을 위한 확산방정식을 풀어야 함으로 매우 빠른 계산방법이 사용되지 않으면 비효율적이다. 이런 이유로 계산영역의 대칭구조나 coarse mesh 방법이 많이 사용된다.

한 시점 t_i 에서 조사량 $\omega_k(t_i)$ ($= \omega_{ki}$)와 연소도 $\Omega_k(t_i)$, 그리고 중성자속 분포 ϕ_k 가 알려지면 이를 사용하여 연소계산은 시작된다. 이때 원자로에서 핵연료 교체가 요구되면 핵연료교체가 이루어질 채널이 입력된다. 시간간격 Δt_i 이 정해지면 각 핵연료다발의 시간 t_{i+1} 에서 새로운 조사량 $\omega_k(t_{i+1})$ 과 연소도 $\Omega_k(t_{i+1})$ 가 아래의 식 (1)과 (2)에 의하여 계산된다[1].

$$\omega_k(t_{i+1}) = \omega_k(t_i) + F_k(\omega_{ki}) \phi_k \Delta t_i, \quad (1)$$

$$\Omega_k(t_{i+1}) = \Omega_k(t_i) + H_k(\omega_{ki}) \phi_k \Delta t_i. \quad (2)$$

여기서 $F_k(\omega_{ki})$ 는 핵연료다발 k 의 시간 t_i 에서 F factor (fuel to cell flux ratio)이고, $H_k(\omega_{ki})$ 는 핵연료다발 k 의 시간 t_i 에서 H factor (bundle power to cell flux ratio)를 나타낸다. 그리고 조사량의 함수인 반응단면적은 CANDU 6의 격자물리 컴퓨터코드인 POWDERPUFS-V [3]에 의해 각 조사량별로 미리 계산되어 도표화된다.

다음 단계 연소계산을 위하여 시간 t_{i+1} 에서 각 핵연료다발에 대한 반응단면적은 미리 계산된 도표로부터 식 (3)과 같이 주어진 3-th order Lagrangian interpolation에 의하여 계산되고 이를 이용하여 각 핵연료다발 k 에 대한 새로운 중성자속분포 ϕ_k 와 임계도 k_{eff} 가 3차원 중성자확산 방정식을 풀므로써 계산된다.

$$X_k(x) = \prod_{n=1, n \neq k}^3 \frac{x - x_n}{x_k - x_n}. \quad (3)$$

여기서 $X_k(x)$ 는 핵반응단면적의 3 차 polynomial이고, $x = \Sigma(\omega)$ 는 조사량에 대한 함수로서 거시적 핵단면적을 표시한다. 상기한 계산은 요구된 연소시간까지 반복된다.

2.2 핵연료 교체모델

CANDU 원자로의 핵연료는 작은 다발형태로 12개가 한 채널 속에 들어가 있다. 한 채널의 핵연료 교체를 위해서는 채널 양 끝에 한쌍의 핵연료 교체기가 설치된다. 새 핵연료가 한쪽에서 삽입됨에 따라 오래된 핵연료를 밀어내고 사용된 핵연료는 반대편 핵연료 교체기

로 방출된다. 본 연구에서는 CANDU 6 원자로에서 사용하고 있는 전 평형상태 (pre-equilibrium)에서의 핵연료 교체법과 평형상태 (equilibrium)에서의 핵연료 교체법이 도입된다[1].

원자로가동 시작후 핵연료가 처음 교체될 때, 채널의 끝에 위치한 다발은 매우 낮은 연소도를 유지한채로 방출될 수 있다. 이러한 다발들은 연료비를 줄이기 위해서 재배치해서 사용할 필요가 있다. 본 연구에서 CANDU 6의 전 평형상태의 핵연료 교체법인 Eight Bundle Swing Fuelling Scheme이 코드에서 모델링 되었다. 전 평형상태를 지나 원자로가 평형상태에 이르면 Eight Bundle Shift Scheme에 의하여 핵연료는 교체되도록 한다.

3. 모델검증 결과

3.1 CANDU 6 연소도 해석

개발된 모델의 검증을 위하여 초기 핵연료 장전시부터 최초 핵연료 교체가 시작되는 시점까지와 그 이후 전평형 상태의 핵연료 교체에 관한 시뮬레이션을 실시하였다. 그림 1은 연소도 계산에 사용된 초기 노심모형이며 핵연료 교체채널 수동 pick-up을 위한 단면도이다. 그림에 A와 B로 표시된 부분에서 천연 우라늄을 기본 연료로 장착한 원자로의 노심 중앙부에 출력분포를 평탄화하기 위해 80개의 핵연료 채널에 2 다발 (8, 9번)씩 U-235가 0.52% 함유된 감손 핵연료로가 장착된다. 핵연료연소 모사를 위한 노심 모델은 계산의 정확성과 계산속도를 고려하여 CANDU-6 노심을 최대한 반영하는 방향으로 설정되었다. Mesh는 $28 \times 28 \times 12$ 로 나뉘어 지는데 x와 y방향은 핵연료격자의 크기를 가지며 z방향은 50cm로 균일하게하였다. 원자로 제어물질은 경수영역제어기와 조절봉 (Adjuster Rod)이 고려되었다. 조절봉은 완전히 삽입된 상태를 나타내었으며 경수영역제어기는 평균 42%가 채워진 상태를 모사하였다.

그림 2와 3은 노심 중앙 평면에서 초기노심 출력분포와 원자로가 운전됨에 따라 변하는 임계도의 변화를 나타내는 그림이다. 그림 2에 나타난 바와 같이 초기상태의 잉여반응도는 16mk정도였으며, 연소 초기에 약간 감소하여 전출력 운전후 약 5일 경과후 13.5mk정도를 나타낸후 다시 증가하기 시작한다. 이후 운전이 진행됨에 따라 35일경에 최대치인 23mk로 정점을 이루었으며, 점점 감소하기 시작하여 전출력운전 100후에는 2mk에 도달한다. 사용한 모델 및 데이터의 차이 때문에 이 결과를 FMDP 시뮬레이션[4]과 직접 비교할 수는 없다. 그러나 두 결과는 원자로 운전 초기 임계도가 약간 떨어졌다가 올라가는 부분을 제외하면 거의 유사한 경향을 보인다. 본 연구 결과와는 달리 FMDP 시뮬레이션에서는 초기 임계도의 감소 없이 계속상승하여 정점에 도달한다. 이는 본 모델 균정수 도표에서는 조사량 간격 0.1 n/kb가 사용된 반면, FMDP 시뮬레이션에서 사용된 균정수는 연소도 간격을 0.2 n/kb로 계산하여 연소초기에 반응도가 약간 감소하다가 증가하는 실제현상을 반영하지 못하고 있기 때문이다. 이와같은 결과는 이후 반응도 거동에 계속해서 영향을 미쳐 전체적인 잉여 반응도가 높게 나타났다. 한편 본 연구에서 Coarse Mesh 모델을 사용하는 원자로의 기하학적인 모델구성에서 차이도 결과에 영향을 미치고 있다. FMDP 핵연료교체 모사 과정에서 사용된 원자로 모델은 제어봉 안내관을 비롯한 각종 감지설비가 설치되어 있는 원자로를 상세히 모사하고 있다. 그러나 본 연구에서는 원전분석기를 위한 빠른 계산을 위해 원자로 모델에서 이러한 시설에 대한 고려를 제한하였다. 그리고 제어봉이 들어가 있는 Super

Cell 계산은 연소도에 의존하지 않는 것으로 가정하였으나 실제로는 Super Cell도 연소 상태에 따라 반복 계산되어 사용되어야 한다.

3.2 운전중 노심 핵연료 교체

본 연구에서는 사용자가 임의로 핵연료를 선택하여 교체를 실행할 수 있는 기능을 구성하였다. 연소도 해석프로그램의 실행 도중 사용자가 임의의 핵연료 교체를 요구하면 전 평형 상태에서는 8 bundle swing scheme에 의하고, 평형상태에서는 8 bundle shift scheme에 의해 핵연료교체가 시행된다.

핵연료 교체는 원자로의 연소가 진행됨에 따라 발생하는 반응도 손실을 보상하는 차원에서 이루어진다. 본 연구에서는 원자로의 잉여반응도가 약 4.5mk에 도달하는 전출력 운전후 95일부터 핵연료 교체를 수행하는 모사를 하였다. 그림 2는 원자로 가동 95일후부터 핵연료 교체를 수행하였을때와 교체를 하지않고 계속 연소시켰을때의 임계도의 변화를 비교하고 있다. 핵연료 교체가 이루어지면서 임계도변화에 양의 반응도 삽입효과가 나타나고 있어 본 모델의 적정성을 확인할 수 있다.

그림 4 ~ 7은 노심 중앙 평면상에 핵연료 연소도를 원자로 운전일수에따라 순차적으로 나타낸 것이다. 연소 초기 노심의 중심부에 연소도는 중앙부분으로 갈수록 높게 나타난다. 그러나 조절봉이 삽입되어있는 영역에는 연소도가 약간 낮아 진다. 운전시간이 경과함에 따라 노심내 전체적인 연소도는 빠르게 ~~증가~~하며 평탄화하는 경향을 보여주고 있다. 그림 6과 7은 핵연료 교체가 시행된지 각각 15일과 30일 경과한 뒤에 연소도를 나타낸 것이다. 이 그림들은 앞에 나타난 그림 4 및 5와는 달리 여러 부분에서 비균질성을 보여주고 있다. 이는 핵연료 교체로 인한 연소도의 변화를 반영한 결과이다.

그림 8 ~ 10은 원자로가 연소됨에 따른 출력분포를 나타내고 있다. 그림에 나타나듯이 증성자속분포는 원자로의 연소가 진행될수록 점점 평탄화됨을 알 수 있다. 그러나 새로운 핵연료가 교체되면서 국부적으로 출력분포의 침두가 발생한다. 그러므로 핵연료의 교체시 교체할 부분을 찾는 일이 매우 중요하다는 것을 감지할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 CANDU 6 원전분석기를 위한 새로운 개념으로서 핵연료 연소해석 및 운전중 핵연료 교체 모사기능을 위한 3차원 해석코드를 개발하였다. 이와 연계하여 원자로운전에 따르는 연소도 분포 및 출력분포를 3차원 Graphic으로 display하고 최대 다발출력 및 최대 채널 출력의 위치 등과 연소도를 구한다. 핵연료 교체는 사용자가 임의의 채널을 노심 모델 Graphic상에서 Cursor를 이용하여 선택함으로써 시뮬레이션 코드와 상호 정보교환에 의하여 시행된다. 이상과 같이 출력분포의 평탄화 정도, 연소도, 침두출력 등을 보고 핵연료 관리 모사를 할 수 있도록 하였다. 따라서 본 분석기를 통하여 사용자는 CANDU 원자로 핵연료연소 특성을 이해할 수 있고, 원자로 운전중 핵연료관리 문제를 쉽게 파악할 수 있으며, 운전원 핵연료교체 실습에 활용할 수 있어서 핵연료관리 운전성 향상에 도움이 될 수 있다.

핵연료의 교체를 위해서는 여러 가지 검사를 거쳐 교체가 필요한 채널을 자동으로 선택하는 기능이 필요하다. 그러나 현재의 코드는 사용자가 임의의 채널을 교체할 수 있는 기능만

을 보유하고 있어, 앞으로 이에대한 개선이 필요하다. 또한 시간평균 (Time Averaged)모델에 의한 연소해석 기능도 추가되어야함을 언급할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 월성1호기 Physics Design Manual.
- [2] S. K. Oh, et al., "Development of a Nuclear Plant Analyzer for Education and Operation Guide of the CANDU Nuclear Power Plant", KAERI/CM-153/96, 1997.
- [3] E.s.y. Tin and P.C. Loken, "POWDERPUFS-V Physics Manual", AECL, 1979.
- [4] S. K. Oh, "Report on CANDU-PWR Reactor Physics Design Study", 1979.

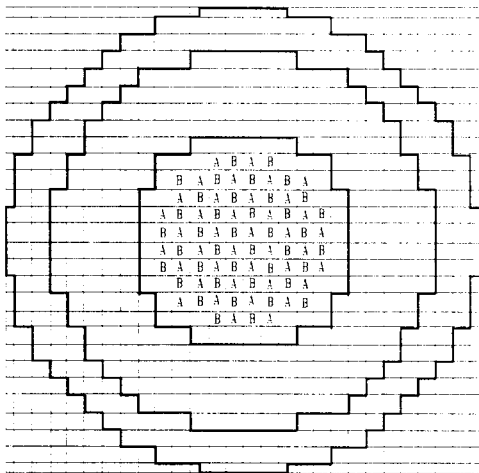


그림 1 CANDU 6 노심 모델

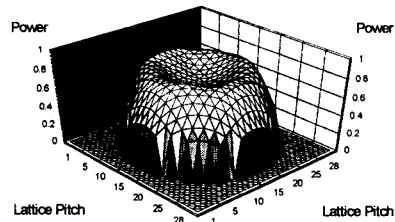


그림 3. 초기노심 출력 분포

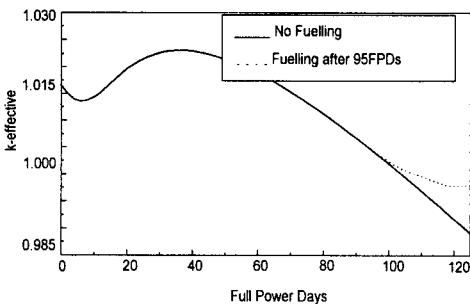


그림 2. 원자로 운전애 따른 반응도의 변화(핵연료 교체 유무에 따른 변화)

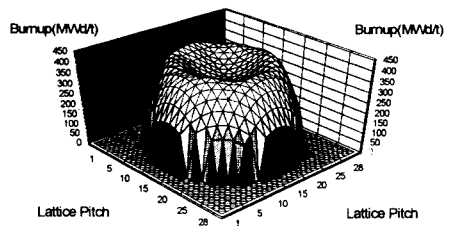


그림 4. 운전시간 경과에 따른 노심 연소도 분포(전출력운전 20일 경과)

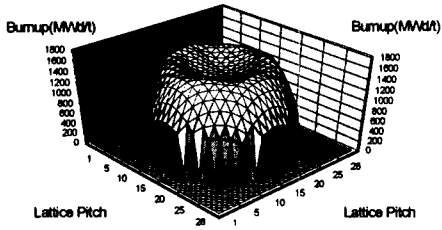


그림 5. 운전시간 경과에 따른 노심 연소도 분포(전출력운전 80일 경과)

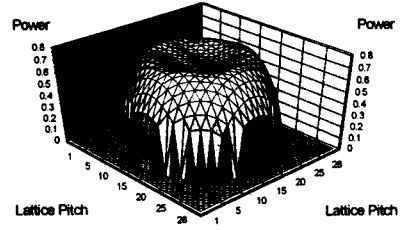


그림 8. 운전시간 경과에 따른 노심 출력 분포(전출력운전 80일 경과)

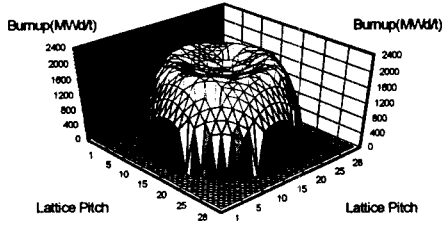


그림 6. 운전시간 경과에 따른 노심 연소도 분포(전출력운전 110일 경과)

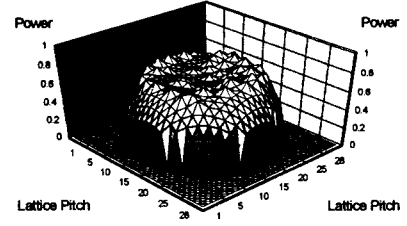


그림 9. 운전시간 경과에 따른 노심 출력 분포(전출력운전 110일 경과)

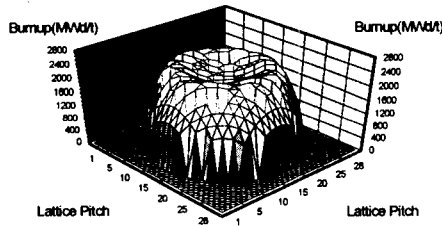


그림 7. 운전시간 경과에 따른 노심 연소도 분포(전출력운전 125일 경과)

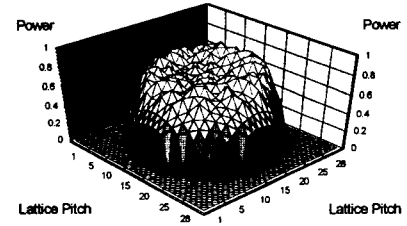


그림 10. 운전시간 경과에 따른 노심 출력 분포(전출력운전 125일 경과)