

## MCNP 선원항 평가법에 의한 SMART 압력용기 중성자 조사량 예비평가

김교윤, 김하용, 송재승

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

330MWt 출력의 신형 원자로인 SMART(System integrated Modular Advanced ReacTor)가 전기 생산뿐만 아니라 해수의 담수화를 위한 에너지 공급을 위해 한국원자력연구소에 의해 개발되고 있다. SMART의 원자로 압력용기에서의 중성자 조사량을 기존의 각분할법 코드 대신에 몬테칼로 수송 코드인 MCNP-4A를 이용하여 평가하였다. MCNP-4A에 의한 몬테칼로 모사는 각분할법에 비해 핵 단면적 자료, 선원항, 그리고 기하학적 모델링의 문제로부터 야기되는 불확실성을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 초기 개념 설계 단계에서 상세 노심 출력 분포 자료에 의존하지 않고 선원항을 평가할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 원자로 압력 용기 내부의 원자로 노심 및 다른 구조물을 포함하는 전체 원자로 구조에 대하여 몬테칼로 모사를 적용하였다. 1단계에서는 임계도 계산에 의해 선원항으로 이용되는 원자로 노심내의 열 출력 분포를 평가하고, 2단계에서는 노심내의 열 출력 분포를 고정 선원으로 이용하여 압력 용기에서의 중성자 조사량을 평가하였다. 그 결과 SMART 압력용기의 중성자 조사량은 규제 요건을 만족하는 것으로 나타났다.

### 1. 서론

SMART<sup>1</sup>는 전기 생산뿐만 아니라 해수의 담수화를 위한 에너지의 공급에 이용되는 330MWt 급의 신형 일체형 원자로이다. SMART는 안전성 증진을 위하여 원자로의 형태를 일체형으로 설정하고 있으며 따라서 가압기는 자기가압식 형태로 원자로 압력용기에 설치된다. 또한 SMART는 액체 폐기물을 줄이고 원자로 계통을 간단하게 하며 모듈화하기 위하여 무봉산 운전 개념을 채택하고 있다. 개념 설계 단계에서 SMART는 60년의 원자로 수명과 90%의 가동율을 고려하고 있다.

통상적으로 원자로 압력 용기에서의 속중성자 조사량은 노심 설계 과정에서 설정된 노심 장전 모형에 대한 상세 노심 출력 분포로부터 DORT<sup>2</sup>와 같은 각분할법 수송코드를 이용하여 평가되고 있지만, 이 경우 다균 에너지 핵단면적 자료, 기하학적 간략화, 각 의존성, 그리고 노심내 핵연료봉 출력 생산 등과 관련한 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불확실도를 줄이기 위하여 몬테칼로 모사에 의한 PWR의 원자로 압력용기 중성자 조사량의 평가가 수행된바 있으나<sup>3</sup>, 본 연구에서는 SMART의 1/8 노심의 전체 핵연료봉을 고정 선원으로 이용하는 MCNP 선원항 평가법을 도

입하였다. 이는 1/8 노심내의 핵연료 집합체별 핵연료봉 출력분포를 MCNP-4A<sup>4</sup>를 이용하여 생산하고 1/8 노심내 모든 핵연료봉 출력분포를 고정선원으로 이용하여 압력용기에서의 중성자 조사량을 MCNP-4A를 이용하여 평가하는 것이다. 이러한 MCNP-4A에 의한 몬테 칼로 모사는 초기 개념설계 단계에서는 상세 노심 출력 분포 자료에 의존하지 않고 선원항을 평가할 수 있는 장점이 있다.

## 2. SMART 노심의 핵연료봉 출력 분포 생산

SMART 노심은 KOFA<sup>5</sup> 설계를 근거로 일부 수정된 17x17 배열의 직육면체 형태의 핵연료 집합체 57개로 구성되어 있다. 개념 설계 단계에서 예비 평가된 노심 장전 모형은 그림 1에 제시하였다. SMART의 실제 노심 길이는 200cm이다. 본 연구에 사용한 수정된 KOFA의 단면도를 그림 2~그림 6에 제시하였다. 그림 2에는 32% B<sub>4</sub>C 심제어봉이 24개가 장전된 Type A가 나타나 있고, 그림 3에는 32% B<sub>4</sub>C 심제어봉이 20개가 장전된 Type B가 나타나 있는데 Type A와 Type B에는 Gd 독봉이 포함되지 않는다. 그림 4의 Type C에는 32% B<sub>4</sub>C 심제어봉이 24개와 1.8w/o의 U-235와 12 w/o의 Gd가 혼합된 독봉이 4개 장전된다. 그림 5와 그림 6의 Type D-1과 Type D-2에는 32% B<sub>4</sub>C 심제어봉이 24개와 1.8w/o의 U-235와 12 w/o의 Gd가 혼합된 독봉이 12개 장전된다. 그러나, Type D-2는 제어봉이 지지관에 삽입된 경우이고 Type D-1은 인출된 경우이다. 그리고 Type A ~ Type D의 일반 연료봉은 U-235의 농축도가 4.95w/o인 UO<sub>2</sub>가 이용되었다.

이러한 SMART 노심에서의 핵연료봉별 출력분포 계산은 MCNP-4A를 이용하여 수행하였다. 핵연료 집합체와 핵연료봉은 설계된 상태대로 MCNP-4A에서 모델링되었는데, 기하학적 모델링 과정에서의 복잡함을 피하기 위하여 사각 격자를 이용한 반복 구조가 적용되었으며, 1차 계산에서의 기하구조는 노심 원통까지의 1/8 노심 크기로 제한하였다. 본 해석에 이용된 핵단면적 자료는 노심의 온도를 고려하여 NJOY<sup>6</sup>를 이용하여 생산된 것으로 ENDF/B-VI<sup>7</sup>를 근거로 한 것이다<sup>8</sup>. 임계도 계산에 이용되는 KCODE와 비적 평가 계산자가 MCNP-4A 계산결과로부터 핵분열 반응율을 취하도록 이용되었다. 또한 MCTAL 파일 카드가 각각의 핵연료봉에 대한 봉 출력 분포를 생산하도록 이용되었다. 이런 MCTAL 파일로부터 1/8 노심 내의 2119 격자 셀중 1967개의 핵연료봉에 대한 정규화된 봉 출력 분포가 얻어진다.

## 3. SMART 압력 용기 중성자 조사량

SMART는 그림 7에 나타나 있는 바와 같이 노심, 노심지지 원통, 측면 차폐체, 원자로 압력 용기, 그리고 기타 내부 구조물로 구성되어 있다. 그림 7은 MCNP-4A 작업에서 직접 취한 SMART의 단면도와 크기이다. 압력 용기의 내면 및 외면에 대한 45 방위각 격자가 각 방위각 격자별 중성자 조사량을 평가하기 위하여 기하학적 모델링에 도입되었다. 그리고 속 중성자 조사량을 평가하기 위한 2차 기하학적 모델링에는 1차 해석용 모델이 포함된다. 따라서, 1차 모델링에 이용된

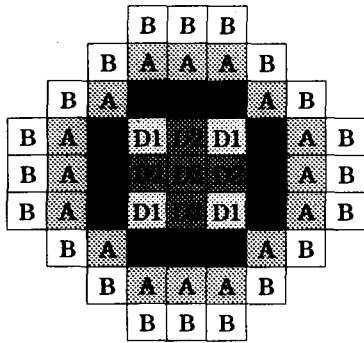


그림 1. 중성자조수량 평가를 위한 SMART의 예비 노심 장전 모형

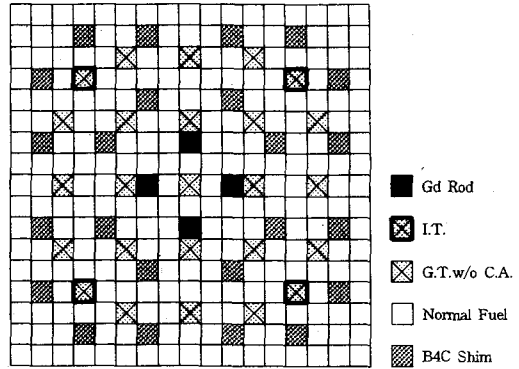


그림 4. 핵연료집합체 Type C

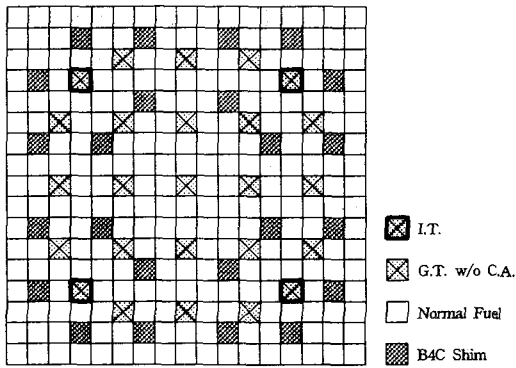


그림 2. 핵연료집합체 Type A

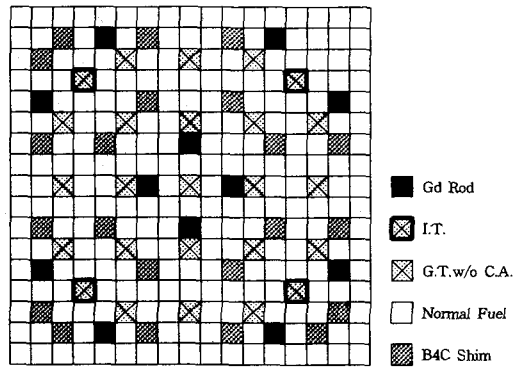


그림 5. 핵연료집합체 Type D-1

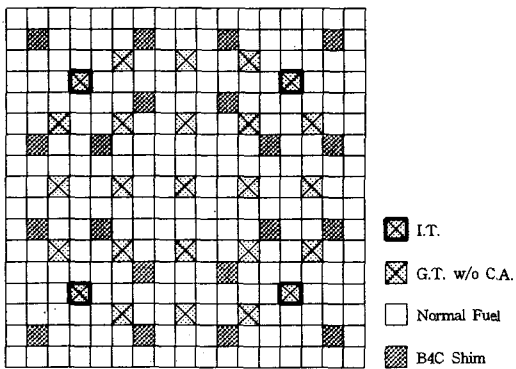


그림 3. 핵연료집합체 Type B

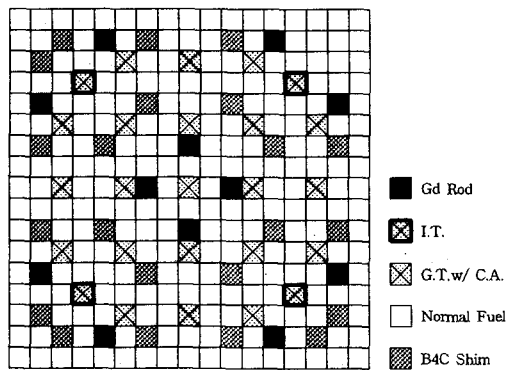


그림 6. 핵연료집합체 Type D-2

똑같은 면 번호와 셀 번호가 2차 모델에서도 반복되어 사용된다.

MCNP-4A의 1차 해석에서 생산된 정규화된 핵연료봉 출력 분포는 MCNP-4A의 2차 해석시 고정 선원으로 이용되었다. 1차 해석을 통하여 이미 선원항을 생산하였기 때문에 2차 해석에서는 KCODE 대신에 NONU 및 SDEF가 이용되었다. 여기서 NONU는 모든 선원 셀에서의 핵분열이 포획으로 취급될 수 있도록 이용된 것이다. 그리고 중성자 선원의 에너지 분포는 U-235의 Watt 핵분열 스펙트럼으로부터 임의의 선택된다. SMART 압력 용기의 내면 및 외면을 투과하는 속중성자 속이 F2 표면 계산자를 이용하여 평가되었다. SMART의 어느 위치에서도 1.0MeV 이하의 중성자는 속중성자속의 평가에 미치는 영향이 작기 때문에 1.0 MeV이하로 떨어지는 중성자 에너지의 모든 중성자 이력이 종료되도록 에너지 차단 카드가 이용되었다.

#### 4. 결과 및 토의

연계에 의한 몬테 칼로 해석법이 SMART의 중성자 조사량 평가에 성공적으로 적용되었다. 원자로 압력 용기의 내면 및 외면에서의 방위각 방향의 중성자 조사량이 표 1에 제시되었다. 1/8 노심을 고려한 원자로 압력 용기가 45개 격자(즉, 방위각별 1° 방위각)로 구분되었다. 60년의 수명 운전시 최대 중성자 조사량은 원자로 압력 용기 내면의 첫 번째 방위각 격자에서  $7.96387 \times 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 이것은 10CFR50.61<sup>9</sup>에서 규정한 제한 요건인  $1.0 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>보다 낮은 값이다. 본 연구에서 노심은 주기초의 상태라는 가정하에 핵연료봉 출력 분포가 계산된 것이다. 노심 해석에 의한 핵연료봉 상세 출력 분포의 사용이 가능하지 않은 초기 개념 설계 단계에서는 각분할 법과 같은 기존의 방법에 의한 중성자 조사량의 평가가 불가능하기 때문에 임계도, 선원항 및 중성자 조사량을 연계하여 해석할 수 있는 본 해석 방법이 매우 유용한 것으로 나타났다.

#### 5. 결론

몬테 칼로 모사에 의한 중성자 조사량 평가 방법이 노심과 원자로 압력 용기 내부 구조물을 포함한 전체 SMART 구조에 대하여 적용하였다. 임계도, 선원항, 그리고 속중성자 조사량과 같은 제반 평가를 포함하는 연계에 의한 몬테 칼로 해석 방법이 SMART에 대해 성공적으로 적용되었다. 또한, 본 연구 결과 SMART 압력용기에서의 중성자 조사량은 10CFR50.61에서 규정한 제한 요건을 만족하는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. J. K. Seo et al., "Advanced Integral Reactor(SMART) for Nuclear Desalination, "IAEA-SM-347/40, Proceedings of Symposium on Desalination of Seawater with Nuclear Energy, Taejon, Korea, May 1997.
2. W. A. Rhodes and R. L. Childs, "An Updated Version of the DOT4 One- and Two-Dimensional Neutron/Photon Transport Code," ORNL-5851, ORNL, 1982.

3. J. O. Kim, "Evaluation of PWR Type Reactor Vessel Neutron Fluence by Monte Carlo Simulation," Ph. D. Thesis, Hanyang University, 1997.
4. J. F. Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Ver. 4A," LA-12625-M, LANL, 1993.
5. "Fuel Design Report for 17x17 Assembly," KAERI/KWU, June 1987.
6. R. E. MacFarlane and D. W. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Ver. 91," LA-12740 -M, LANL, 1994.
7. P. F. Rose and C. L. Dunford, "ENDF-102, Data Formats and Procedures for Evaluated Nuclear Data File, ENDF-6," BNL-NCS-44945, 1990.
8. 김충섭, "MCNP-4A용 핵자료," 한국원자력연구소, 1998-2-16.
9. Nuclear Regulatory Commission, "Fracture Toughness Requirements for light Water reactor Vessel," 10CFR Part 50, 1994.

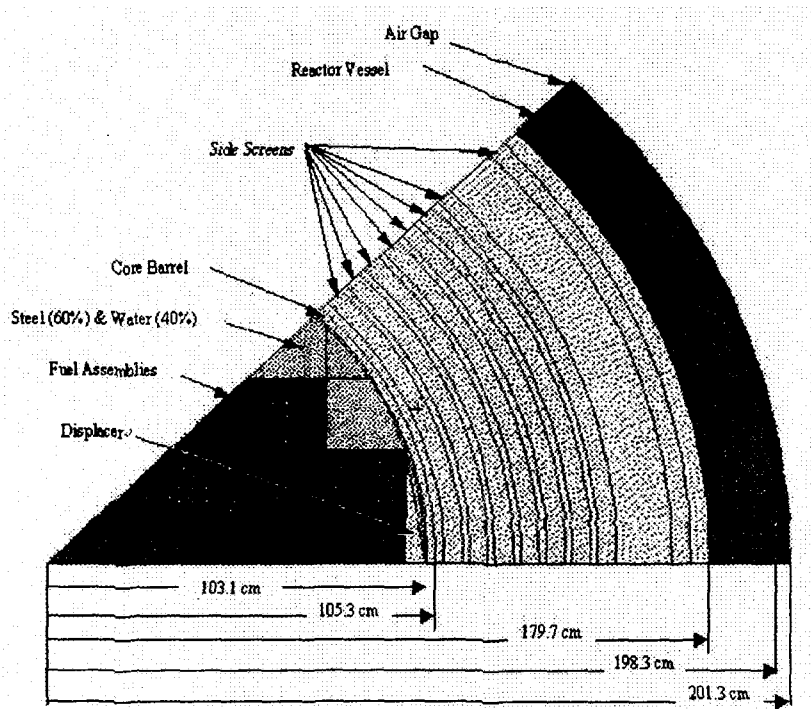


그림 7. 중성자 조사량 평가를 위한 SMART 압력용기 내부 구조에 대한 1/8크기의 MCNP-4A 모델

표 1. SMART 압력 용기에서의 중성자 조사량의 방위각 분포[n/cm]

방위각 $\theta(^{\circ})$	내경 표면	외경 표면
44.5	1.85756E+17	1.87124E+16
43.5	2.01549E+17	1.17179E+16
42.5	2.12181E+17	1.39098E+16
41.5	2.08318E+17	1.75574E+16
40.5	2.09175E+17	1.46099E+16
39.5	2.31352E+17	1.54895E+16
38.5	2.62778E+17	2.14414E+16
37.5	3.00807E+17	2.90902E+16
36.5	3.42087E+17	2.48374E+16
35.5	3.32286E+17	2.52356E+16
34.5	3.32973E+17	3.82379E+16
33.5	4.68651E+17	3.59642E+16
32.5	4.97511E+17	4.64222E+16
31.5	5.17743E+17	4.24657E+16
30.5	6.04924E+17	5.12082E+16
29.5	6.79647E+17	6.77837E+16
28.5	7.44666E+17	7.55873E+16
27.5	9.91499E+17	8.47687E+16
26.5	1.03567E+18	9.48651E+16
25.5	1.27730E+18	9.80520E+16
24.5	1.39892E+18	1.25304E+17
23.5	1.73549E+18	1.42918E+17
22.5	1.92525E+18	1.50466E+17
21.5	2.26352E+18	1.92287E+17
20.5	2.58471E+18	1.79122E+17
19.5	2.95695E+18	2.38860E+17
18.5	3.26405E+18	2.62885E+17
17.5	3.69292E+18	3.07280E+17
16.5	4.09616E+18	3.10962E+17
15.5	4.69915E+18	3.54743E+17
14.5	4.99020E+18	3.64483E+17
13.5	5.47964E+18	4.25646E+17
12.5	5.96480E+18	4.47836E+17
11.5	6.31104E+18	4.62319E+17
10.5	6.57164E+18	4.95658E+17
9.5	6.76837E+18	5.34729E+17
8.5	7.14624E+18	5.50949E+17
7.5	7.35299E+18	5.43896E+17
6.5	7.47490E+18	5.60399E+17
5.5	7.79327E+18	6.02839E+17
4.5	7.75048E+18	5.60707E+17
3.5	7.76206E+18	5.94227E+17
2.5	7.76559E+18	5.77830E+17
1.5	7.77894E+18	5.89028E+17
0.5	7.96387E+18	5.98087E+17
최대값	7.96387E+18	5.98087E+17

[주] 모든 값은 MCNP 계산 오차 10%이내의 값임.