2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

몬테칼로법에 의한 SMART 노심 연소이력 특성 해석

Monte Carlo Depletion Analysis of SMART Core by MCNAP Code

정종성, 심형진, 김창효
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

이정찬, 지성균
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 일체형원자로인 SMART 노심의 연소이력 특성을 노심 연소 몬테칼로 코드인 MCNAP 을 이용하여 해석하였으며, 그 결과를 확정론적 코드인 MASTER 해석결과와 비교하였다. 유효증배계수(k_{eff})의 경우 MCNAP 은 MASTER 보다 최대 약 600pcm 정도 높게 예측함을 알 수 있었고, 이 차이는 연소가 진행됨에 따라 작아짐을 확인할 수 있었다. 핵연료집합체별 상대출력에 있어서는 반경방향의 경우 최대 약 7.6%, 그리고 축방향의 경우 약 14.5% 정도의 차이를 보였으나, 이 값은 MCNAP 예측의 표준편차 내에 있음을 확인하였다.

Abstract

Depletion analysis of SMART, a small-sized advanced integral PWR under development by KAERI, is conducted using the Monte Carlo (MC) depletion analysis program, MCNAP. The results are compared with those of the CASMO-3/MASTER nuclear analysis. The difference between MASTER and MCNAP on k_{eff} prediction is observed about 600pcm at BOC, and becomes smaller as the core burnup increases. The maximum difference between two predictions on fuel assembly(FA) normalized power distribution is about 6.6% radially, and 14.5% axially but the differences are observed to lie within standard deviation of MC estimations.

1. 개요

SMART(System-Integrated Modular Advanced ReacTor) 원자로는 노심, 냉각재 펌프, 가압기, 증기발생기가 하나의 가압용기 내에 있는 일체형원자로로 전력생산과 해수 담수화를 목표로 하고 있다.[1] SMART 원자로는 기존의 가압경수로와는 달리 잉여 반응도의 보상을 위해 붕산을 쓰지 않는 대신 가연성흡수체(Al_2O_3-B_4C)만을 사용하며 노심 임계는 제어봉에 의해 유지가 된다. 이에 따라 노심 내 중성자속 분포 및 출력분포가 제어봉 삽입 없이 운전되고 있는 현행 경수로와 상이한 특징을 갖고 있다.

SMART 노심의 설계 해석은 주로 가압경수로의 설계방법론에 기초한 CASMO-3/MASTER (이하 MASTER) 전산체계[2]에 의해 수행되고 있다. 그러나 SMART 원자로와 같은 새로운 노심 설계 특성을 갖는 원자로의 경우 실측치가 전무한 상황이기 때문에 MASTER 의 핵특성 계산결과를 검증할 수 있는 수단이 없는 것이 현실이다. 때문에 이 연구에서는 MASTER 전산시스템의 SMART 노심 핵설계 계산결과에 대한 검증으로 연소해석용 몬테칼로 전산코드인 MCNAP[3] 을 이용하여 SMART 노심의 연소이력 특성을 해석하고, 그 결과를 MASTER 와 비교하며, 이를 토대로 MASTER 전산시스템 계산결과의 신뢰도를 검증하고자 한다.

2. SMART 노심 개요

(1) SMART 노심

SMART 노심은 유효반경 92cm, 유효높이 200cm의 열출력 330MW를 갖는 소형 원자로심이다. 노심은 총 57개의 핵연료집합체(FA)로 구성되어 있고, 각각의 핵연료집합체는 17×17 사각 배열 구조를 가지고 있다. <그림 1>과 <그림 2>는 각각 노심의 초기 장전모형과 핵연료집합체의 단면도를 나타낸다. 핵연료는 U-235가 4.95w/o 농축된 UO_2를 사용하며, 3년 동안 재장전 없이 운전된다. 노심 임계는 제어봉에 의해 유지되고, 제어봉흡수체 물질로 Ag-In-Cd 을 사용한다.

잉여 반응도의 제어는 현행 경수로의 붕산 대신 가연성흡수체를 사용하고, 가연성흡수체 물질로는 3년 동안의 효과적인 반응도 제어를 위해 Al_2O_3-B_4C (B-10 최대함량: 0.029 g/cm)봉을 사용하며, 부가적으로 Gd_2O_3/UO_2 봉(가돌리니아 함량: 4w/o)을 사용한다.

SMART 노심의 전출력 운전 중 핵연료의 노심 평균온도는 753.15。K 이며, 1차측 냉각재의 입, 출구 온도는 각각 270。C, 310。C 이고, 냉각재의 평균온도는 290。C 이다.

(2) MCNAP 모델링

MCNAP 코드는 몬테칼로 중성자 해석코드에 부프로그램(sub-routine)형태의 연소계산 모듈이

결합된 몬테칼로 연소계산 코드이다. 이는 기존의 몬테카를로 중성자 모사 코드와 연소계산 코드를 결합하여 사용하는 방법에 비해 우수한 사용자 편의성을 제공하며, 과다한 계산시간을 해결할 수 있는 병렬계산을 수행할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 MCNAP 은 각종 임계시설의 실험결과와 상용 원자로에 사용되는 가연성흡수체가 포함된 핵연료집합체의 연소계산 등을 통해 그 정확성에 대한 검증이 확인되었다.[3]

SMART 노심의 연소계산을 위해 노심은 1/8 대칭을 갖는다고 가정하였으며, 1/8 대칭면상에서의 조건은 반사경계조건(reflected boundary condition)을 사용하였다. 각 핵연료집합체는 연료봉 단위로 모사하였으며, 축방향의 반사체는 위 아래로 각각 30cm 까지 모사하였고, 반경방향으로는 배럴(barrel)까지 모사하였다. 노심 축방향 영역은 계산에 사용된 알파 워크스테이션의 메모리(RAM) 한계 때문에 5등분하였다. 또한 각 연소도마다 달라지는 핵연료온도 및 제어봉의 위치는 MASTER의 결과를 이용하였으며, 전출력 운전을 가정하였다.

MCNAP의 임계도 계산을 위해서 10,000개의 중성자를 하나의 세대(cycle)로 하여 총 600세대의 중성자를 모사하였다. 이중 200세대는 초기 중성자원의 분포를 결정하는데 이용하였다. 핵반응단면적 라이브러리는 ENDF/B-VI를 사용하였고, 각 핵연료봉의 온도에 해당하는 핵반응단면적 라이브러리는 300 1200。K을 100。K 간격으로 NJOY를 통해 생성하였으며, 연료봉온도 의존 단면적은 각 연료봉 셀의 온도와 가장 가까운 핵반응단면적으로부터 구하였다.

3. 결과

<표 1>은 연소도에 따른 노심의 유효증배계수의 변화를 나타낸다. 연소도 0일에서 MCNAP 은 MASTER 보다 약 600pcm 정도 높게 예측하고 있음을 볼 수 있고 그 차이는 연소가 진행됨에 따라 점점 작아짐을 알 수 있다. 연소도 0일에서 두 코드간의 유효증배계수가 큰 차이를 보이는 것은 이들이 사용하는 핵반응단면적이 다르기 때문으로 볼 수 있으며, 연소가 진행되면서 그 차이가 작아지는 것은 MCNAP 의 경우 핵연료봉을 축방향으로 세분하여 연소계산이 수행되지 않아 독물질(Xe, Sm 등)의 정확한 분포가 적용되지 않았기 때문이다. 따라서 축방향으로 10등분 혹은 20등분으로 세분하여 모사한다면 좀더 정확한 MCNAP 결과를 얻을 수 있을 것이다.

<표 2>는 연소가 진행되면서 노심 내에 생성되는 Xe-135와 Sm-149의 수밀도의 변화를 보여주고 있다. 핵분열에 의해 생성되는 주요 독물질의 생성량에 있어서 두 코드 모두 유사하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

연소도 0일과 90일에서 핵연료집합체의 상대출력을 각각 <그림 3>과 <그림 4>에 나타내었다. 연소도 0일에서 상대출력에 대한 두 코드간의 예측은 반경방향의 경우 최대 6.6%, 축방향의 경우 14.5%의 차이를 보이며, 연소도 90일에서는 각각 7.6%, 11.8%로서 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 MCNAP 의 1σ값은 연소도 0일에서 각각 0.092, 0.105, 그리고 연소도 90일에서 각각

0.053, 0.052로서 두 코드간의 차이는 MCNAP 예측의 표준편차(standard deviation) 내에 있음을 확인할 수 있다. 또한 <그림 5>는 연소도 0일에서 MCNAP 의 세대당 중성자수를 4배(40,000개)로 늘려서 예측한 결과를 보여준다. 일반적으로 σ값은 $1/\sqrt{N}$ (N: 중성자수)에 비례한다. 따라서 세대당 중성자수를 10,000개로 예측한 경우보다 σ값이 1/2로 감소함을 확인할 수 있다. 그러나 두 코드간의 차이는 세대당 중성자수를 10,000개로 모사한 경우와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 결론적으로 좀더 정확한 MCNAP 예측을 위해서는 충분한 중성자수를 모사하여야 한다고 할 수 있다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 실측치와 검증자료가 없는, 새로운 노심 설계 특성을 갖는 SMART 노심의 연소이력 특성을 연소기능을 갖춘 몬테칼로 코드인 MCNAP 을 이용하여 해석하였고, MCNAP 예측결과를 확정론적 코드인 MASTER 코드와 비교하였다.

연소에 따른 노심 반응도의 예측은 MCNAP 이 최대 약 600pcm 정도 높게 예측하였으나, 연소가 진행됨에 따라 MASTER 의 결과와 근접함을 알 수 있었다. 그리고 노심 내에 생성되는 Xe-135, Sm-149의 수밀도에 있어서는 두 코드 모두 유사한 생성량을 예측함을 볼 수 있었다. 또한 핵연료집합체별 상대출력은 연소도 0일에서 반경방향의 경우 최대 6.6%, 그리고 축방향의 경우 14.5%정도의 차이를 보였으나, 이 차이는 MCNAP 예측의 표준편차 내에 있음을 확인하였다.

본 연구에서 모사한 중성자의 수는 대략 4백만 개로 노심의 반응도를 예측하는데는 충분한 양이었으나, 핵연료집합체별 상대출력의 예측에 있어서는 표준편차가 최대 10% 정도로 상당히 크다고 할 수 있다. 또한 SMART 노심의 유효높이가 200cm임을 감안할 때 축방향을 5개의 영역으로 세분화하여 모사할 경우 연소계산의 불확실성은 커질 수가 있다. 향후 좀더 정확한 노심모델에 기초한 MCNAP 예측이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 수행하고 있는 중장기 연구사업의 일환으로 수행된 것입니다.

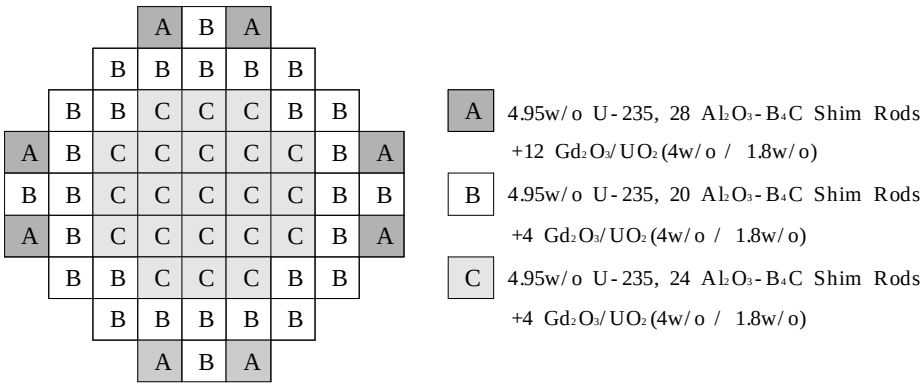
참고문헌

[1] Sung Quun Zee, et al., "Development of Core Design and Analysis Technology for Integral Reactor",”KAERI/RR-1885/98 (Mar. 1999).

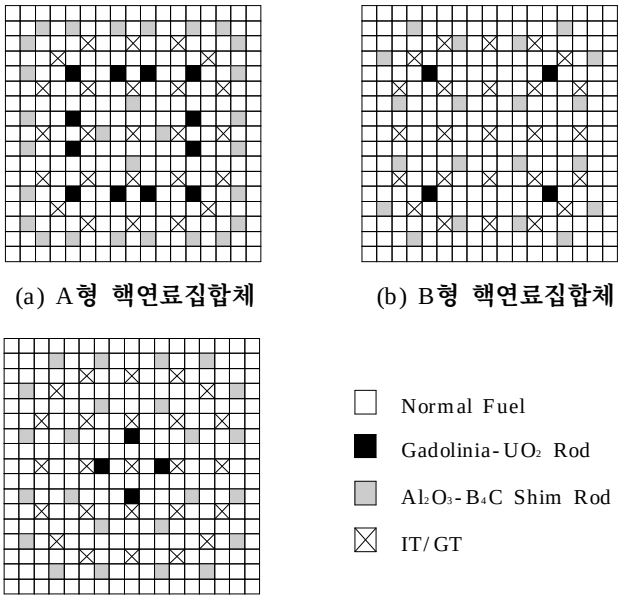
[2] Jae Seung Song, et al., "Verification and Uncertainty Evaluation of CASMO-3/MASTER Nuclear Analysis System", KAERI/TR-806/97 (Jan. 1997).

[3] Hyung Jin Shim, Chang Hyo Kim, Won Seok Park, and Hyung Kook Joo,“"Monte Carlo Depletion Analysis of a PWR with the MCNAP",”M&C99, Madrid, Spain (Sep. 1999).

[4] Jong Sung Chung, Hyung Jin Shim, Chang Hyo Kim, Chungchan Lee, and Sung Quun Zee, "Verification of SMART Neutronics Design Methodology by the MCNAP Monte Carlo Code", 2000 ANS/ENS Int. Meeting, Washington DC, USA (Nov. 2000).



<그림 1> SMART 노심 초기 장전 모형



(a) A형 핵연료집합체 (b) B형 핵연료집합체

(c) C형 핵연료집합체

<그림 2> 핵연료집합체의 단면도

<표 1> **연소도에 따른 노심 반응도 변화**

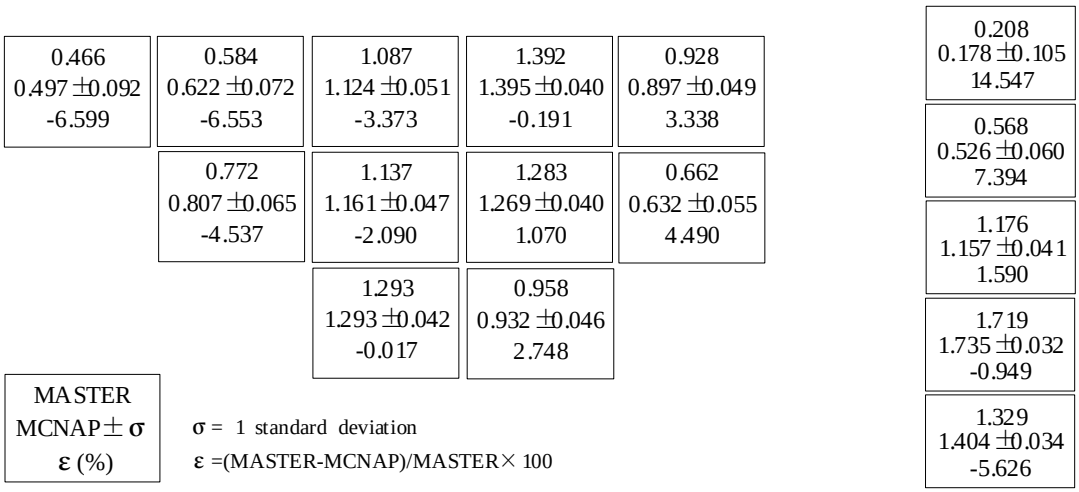
Burnup (Days)	MASTER	MCNAP±σ	Control Rod Position(cm)			
			R1	R2	R3	R4
0	1.000162[1)]	1.00641[1)]±0.00036[2)]	194.0	134.0	74.0	40.0
10	0.999844	1.00349±0.00034	200.0	191.0	131.0	71.0
30	1.000057	1.00383±0.00037	200.0	200.0	160.0	100.0
60	1.000151	1.00259±0.00038	200.0	200.0	160.0	100.0
90	1.000107	1.00186±0.00035	200.0	200.0	158.1	98.1

1) **유효증배계수**
2) σ=1 standard deviation

<표 2> **연소도에 따른 노심내** Xe-135, Sm-149**의 수밀도 변화**

Burnup (Days)	Xe-135		Sm-149	
	MASTER	MCNAP	MASTER	MCNAP
0	0	0	0	0
10	2.40754E-09[1)]	2.34158E-09	8.96473E-09	8.76957E-09
30	2.59512E-09	2.57324E-09	2.15089E-08	2.11588E-08
60	2.63291E-09	2.58100E-09	2.55845E-08	2.42613E-08
90	2.63645E-09	2.60662E-09	2.66029E-08	2.56264E-08

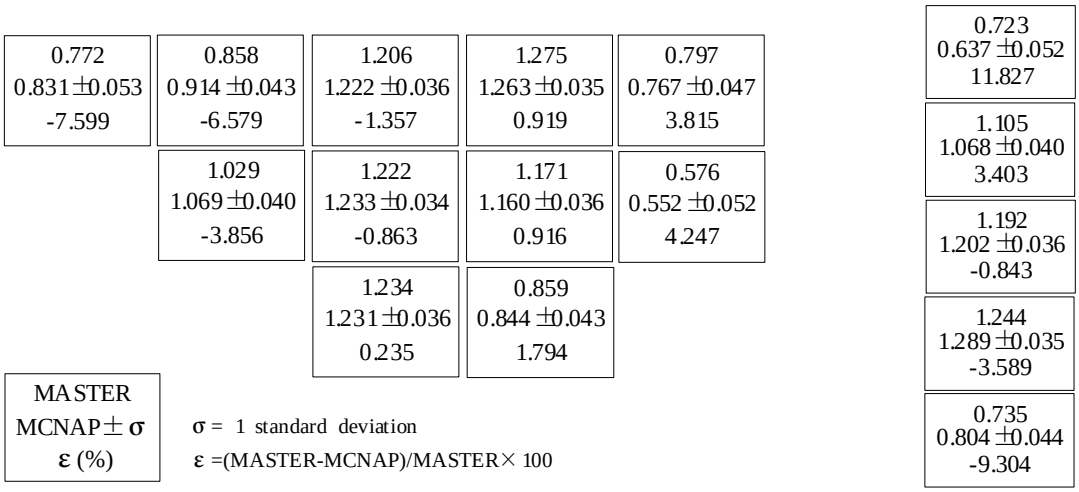
1) $\times 10^{24}$ number/cm^3



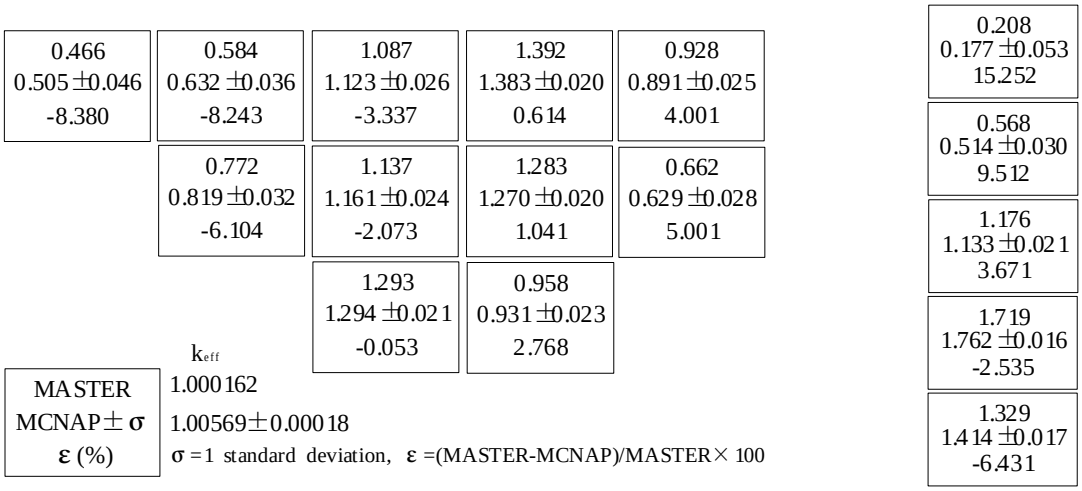
<반경방향>

<축방향>

<그림 3> **연소도 0일에서의 핵연료집합체별 상대출력**



<그림 4> 연소도 90일에서의 핵연료집합체별 상대출력



<그림 5> 연소도 0일에서의 핵연료집합체별 상대출력(세대당 중성자수=40000)