

'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

차세대 원자로 노심 핵특성 분석 및 차폐해석을 위한 몬테칼로 모사

Monte Carlo Simulation for Nuclear Characteristic Analysis and Shielding Analysis of Korean Next Generation Reactor

김종경, 신창호, 박성호, 한치영
한양대학교

요 약

원자로의 노심 핵특성 분석 및 노심외곽의 차폐해석에 몬테칼로 방법을 적용하고자 차세대 원자로 8주기 평형노심을 대상으로 MCNP 코드를 사용하여 노심 상대출력분포를 계산하였다. 노심 상대출력분포를 계산하기 위하여 차세대 원자로 노심을 1/8로 모델링 하였다. 각 핵연료 집합체는 실제 모습대로 MCNP 모델링을 수행하였으며, 축방향으로 10개 영역으로 나누어 계산을 수행하였다. MCNP 입력문의 물질자료는 CASMO 코드의 셀 계산을 통해 핵연료에 사용되는 핵종별 수밀도를 계산하였으며, 계산의 정확성을 위하여 차세대 원자로를 구성하는 물질에 대해서 NJOY 코드를 사용하여 KNGRXS(KNGR Cross Section)라는 핵자료를 생산하였다. MCNP 코드를 사용하여 상대출력분포 계산을 수행한 결과 유효증배계수(k_{eff})가 1.00358 ± 0.00094 로 계산되었고, 상대출력분포는 한전원전연료(주)에서 결과와 비교하여 RMS 오차 5.868%로 계산되었다.

Abstract

The calculation of core relative power distribution for Korean Next Generation Reactor(KNGR) 8 cycle, equilibrium cycle was performed to apply a Monte Carlo simulation to nuclear characteristic analysis and shielding analysis of reactor using MCNP code. KNGR core geometry was modeled on a three-dimensional representation of the one-eighth of the reactor in-vessel component for relative power distribution calculation. Each fuel assemblies were modeled explicitly, and fuel pins were divided into 10 segments. The number density of each nuclide in fuel were calculated using

CASMO code for material data of MCNP code input. For accurate calculation, new cross section library, named as KNGRXS(KNGR Cross Section), at the core temperature was generated by NJOY code. The results of relative power distribution calculation shows that the k_{eff} of KNGR 8 cycle core was converged to 1.00358 ± 0.00094 , and the relative power distribution of MCNP model was within 5.868% of RMS error, compared with the reference data of KNFC.

1. 서 론

몬테칼로 방법은 통계 및 확률론적 오차를 믿을 만한 범위까지 줄이기 위해 많은 전산시간이 소요되어야 하는 단점이 있지만, 보다 정확한 계산 및 신뢰성 있는 평가를 위하여 원자로심 해석 및 원자로 압력용기의 건전성 평가⁽¹⁾ 등의 연구에서는 몬테칼로 방법을 점차로 확대 이용하고 있는 추세이다. 특히, 몬테칼로 방법을 이용한 핵임계도 계산⁽²⁾은 원자력 실험시설의 핵임계도 안전성 평가 및 기존 노심해석코드를 사용하여 계산된 원자로 노심 출력분포 결과의 검증계산으로도 활용되고 있다. 더욱이 최근 전산환경의 급속한 발전으로 인하여 전산시간이 대폭 단축됨으로써 국·외적으로 몬테칼로 방법을 이용한 연구가 주목받고 있다.

기존의 노심해석코드들은 대부분 확산방정식의 노달방법을 이용하여 원자로심의 특성을 해석하고 있으며, 이를 바탕으로 원자로 노심설계 및 그 운용방안 연구가 진행되고 있다. 따라서 몬테칼로 방법에 의한 보다 정확한 원자로심의 특성해석은, 기존의 노심해석 코드에서 계산된 결과를 검증·보완하는 측면에서 그 필요성이 제시되고 있다.

따라서 본 연구에서는 노심 핵특성 분석 및 노심외곽의 차폐해석에 몬테칼로 방법을 적용하고자 차세대 원자로 8주기 평형노심을 대상으로 MCNP⁽³⁾ 코드를 사용하여 노심 상대출력분포를 계산하였다.

2. 차세대 원자로 MCNP 모델링

2.1. 기하학적 모델링

차세대 원자로는 ABB-CE System 80+를 기본 모델로하여 설계중인 3983 MWt의 출력을 가지는 가압형경수로이다. 이 원자로를 한국전력기술(주)에서 노심구조물을 한전원전연료(주)에서 노심설계를 하고 있다. 본 연구에서는 한국전력기술(주)와 한전원전연료(주)의 설계자료를 바탕으로 차세대 원자로의 MCNP 모델링을 수행하였다.

차세대 원자로심의 특성은 표 1과 같다. 차세대 원자로를 241개의 핵연료집합체로 이루어져 있

고, 하나의 핵연료집합체는 16×16 의 격자형 핵연료봉 236개와 5개의 안내관(Guide Tube)으로 이루어져 있다. 핵연료봉은 Zircaloy-4 재질의 관안에 펠렛 형태의 농축 UO_2 를 사용하고 있다. 핵연료집합체는 장전모형에 따라 가연성독봉인 $UO_2-Gd_2O_3$ 봉이 12 혹은 16개가 사용되고 있다. 그림 1은 차세대 원자로 8주기 노심에 사용될 핵연료 집합체의 형태를 나타낸 것이다. 표 2는 8주기 노심 각 핵연료집합체에 사용될 핵연료봉과 가연성독봉의 농축도와 개수를 나타낸 것이다.

차세대 원자로 노심 전체를 그대로 묘사하는 것은 실제로 불가능하므로 차세대 원자로심의 유효높이(active height)까지만 계산영역으로 하여 모델링 하였다. 그림 2와 같이 원자로심 전체의 형태를 원자로의 대칭성을 이용하여 원주방향으로는 1/8 모델링 하였고, 원자로 축방향으로는 유효높이 전체를 모델링을 하였다. 그림 3은 원자로심이 축방향 모델의 1/2만을 나타낸 것이다. 축방향의 경우에도 냉각수가 원자로의 하부에서 들어와 상부로 이동하므로 냉각수 온도 차이가 생기게 된다. 그러나 계산모델에서는 냉각수 온도를 상부와 하부의 평균온도로 가정하였다.

MCNP 코드에서는 만들어진 셀(cell, MCNP 모델링의 가장 기본단위)을 universe 셀로 지정하는 기능과 이를 격자셀에 채우는 기능이 있는데 이를 이용하여 각 봉들을 실제 수치대로 묘사하고 Universe 셀로 지정하였다. 그리고 이들을 핵연료집합체 격자 셀에 채워 넣어 핵연료집합체 셀을 만들었다. 이 때 핵연료 장전모형에 따라 핵연료봉의 농축도, 가연성독봉의 수를 결정하여 핵연료집합체의 종류에 따라 다시 몇가지의 universe 셀을 지정 하였다. 지정된 핵연료집합체는 핵연료 장전모형에 맞도록 새로운 universe 셀로 채워졌으며 채워진 구역을 원자로 축방향으로 10개로 나누어진 원자로심에 채우므로써 계산에 사용한 1/8 원자로심을 모델링 하였다.

원자로는 정상운전시 제어봉이 모두 인출된 상태(All Rod Out, ARO)이므로 안내관은 냉각수가 차 있다고 가정하였다. Baffle은 최외곽 핵연료집합체를 싸고 있으므로 그 형태와 크기를 정밀하게 모델링 하였다. 실제 원자로심의 아래쪽과 위쪽은 매우 복잡한 구조로되어 있어 구조물 전체를 정확히 묘사하기 힘들다. 따라서 이를 대체하는 반사체를 설치해야 하는데 10개의 구역으로 이루어진 원자로심의 아래쪽과 위쪽에 반사체가 있다고 가정하였다. 고리 1호기 최종안전성 분석 보고서에는 노심차폐 계산을 위하여 상부와 하부 구조물을 물과 강철로 균질화된 10 inch 이내의 반사체로 가정하고 있어 차세대 원자로의 MCNP 코드 모델링에서도 상부 반사체를 두께 4.445 cm의 Baffle, 13.8875 cm의 물, 그리고 6.6675 cm의 Barrel이 놓여 있다고 가정하였다. 1/8 원자로심의 전체 구조는 10개의 구역과 상부와 하부반사체를 Barrel, Downcomer, 압력용기가 차례로 싸고 있도록 모델링 하였다.

2.2. 물질자료 및 핵자료집 생산

MCNP 코드는 핵연료 연소도를 계산할 수 있는 능력을 가지고 있지 않다. 따라서 MCNP 코드 입력문에 사용될 물질자료를 연소도 계산이 가능한 코드를 사용하여 별도 계산을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 차세대 원자로 8주기 노심에 장전되는 핵연료집합체마다 연소도

에 따라서 CASMO⁽⁴⁾ 코드의 셀 계산을 통해 제논 평형 상태에서의 핵분열생성물을 고려한 핵종별 수밀도를 계산하였으며, 이를 MCNP 코드의 물질자료 입력에 사용하였다.

계산의 정확성을 위하여 본 연구에서는 차세대 원자로를 구성하는 물질에 대해서 ENDF/B-VI Release4와 NJOY⁽⁵⁾ 처리코드를 사용하여 새로운 핵자료집을 만들고, 이 핵자료집을 KNGRXS(KNGR Cross Section)이라고 명명하였다. 새로이 만들어진 핵자료집은 원자로를 구성하는 구조재에 대해서는 292.2 °C를, 냉각수에 대해서는 310.6 °C를, 핵연료봉 구성 물질에 대해서는 701.4°C에 대한 핵자료로 구성되어져 있다.

3. 노심 상대출력분포 계산

완성된 차세대 원자로의 MCNP 모델링을 이용하여 노심 상대출력분포 계산을 하였으며, 이는 8 주기 평형노심의 노심초기(BOC), ARO, HFP(Hot Full Power), 제논 평형 상태에서 수행하였다. MCNP 전산코드를 이용한 상대출력분포 계산의 정확성을 위하여 KCODE 한 주기 동안의 중성자 추출수를 5000, 총 실행 주기를 150, 초기 임계도를 1.0으로 가정하여 계산하였다.

차세대 원자로의 노심에서 발생하는 중성자 선원항을 계산하기 위하여 MCNP 코드의 임계도 계산을 수행한 결과 유효증배계수(k_{eff})가 1.00358 ± 0.00094 로 계산되었다. 그림 4는 KCODE 주기별 유효증배계수를 나타낸 것이다. MCNP 코드로 계산한 평형노심의 상대출력분포와 한전원전연료(주)에서 계산한 상대출력분포⁽⁶⁾를 비교하여 그림 5에 나타내었다. MCNP 코드로 계산한 차세대 원자로의 상대출력분포는 한전원전연료(주)에서 계산한 값에 비해 RMS(Root Mean Square) 오차 5.868%로 계산되었다.

4. 결론 및 향후 연구 계획

차세대 원자로 8 주기 평형노심의 상대출력분포를 MCNP 코드를 사용하여 계산한 결과, 유효증배계수가 1.00358 ± 0.00094 로 계산되었고, 상대출력분포는 한전원전연료(주)에서 계산한 상대출력분포와 비교하여 RMS 오차 5.868%로 계산되었다.

MCNP 코드를 사용하여 상대출력분포를 계산할 경우 핵연료봉별 출력분포를 계산할 수 있으므로 향후 연구에서는 MCNP 결과를 처리할 수 있는 프로그램을 개발하여 차세대 원자로 8 주기 노심의 핵특성분석을 수행하고, 이를 기존 노심해석코드를 이용한 노심 핵특성분석 결과와 비교함으로써 몬테칼로 방법의 적용 가능성을 평가할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서 서 계산된 노심 상대 출력분포를 중성자 선원항으로 이용하여 노심내부터 노심외곽까지 완전한 몬테칼로 모사를 통해 차폐해석을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. J. C. Wagner, A. Haghghat, and B. Petrovic, "Monte Carlo Transport Calculations and Analysis for Reactor Pressure Vessel Neutron Fluence," *Nuclear Technology*, **114**, 373(1996).
2. C. D. Harmon, II, R. D. Bush, J. F. Briesmeister, and R. A. Forster "Criticality Calculations with MCNP : A Primer," LA-12827-M, Los Alamos National Laboratory, 1994.
3. J. F. Briesmeister, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
4. M. Edenius and B. H. Forssen, "CASMO-3 A Fuel Assembly Burnup Program User's Manual, Version 4.4," STUDESVIK/NFA-89/3, 1989.
5. E. MacFarlane and D. W. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91," LA-12740-M, Los Alamos National Laboratory, 1994.
6. KEPCO Nuclear Fuel Company, "KNGR 18 - Month Multicycle Analysis," Internal Report N-411-FN-D301-0011, 1998.

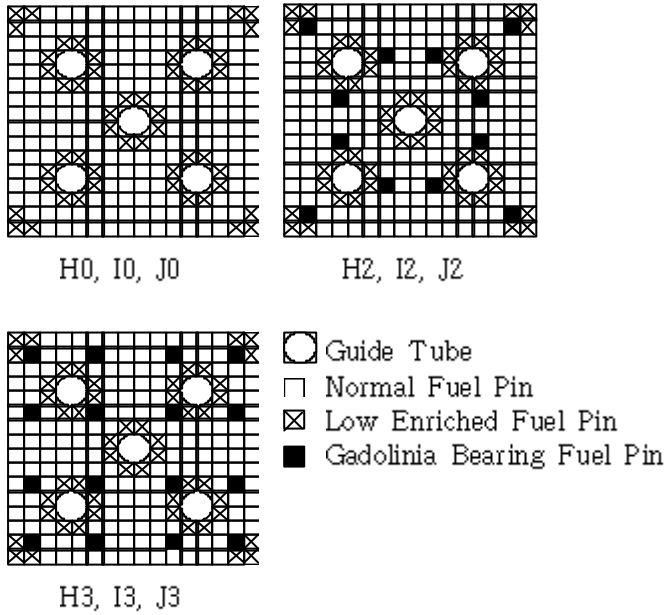


그림 1. 차세대 원자로 8주기 노심에 사용될 핵연료집합체

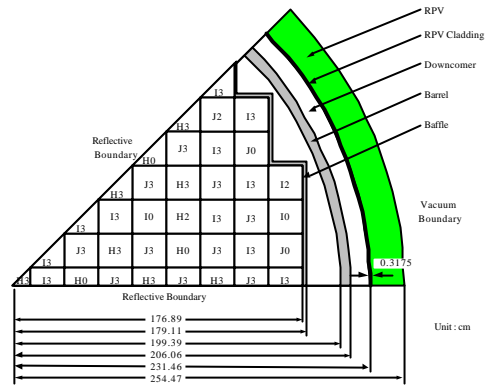


그림 2. 차세대 원자로 8주기 노심 장전모형

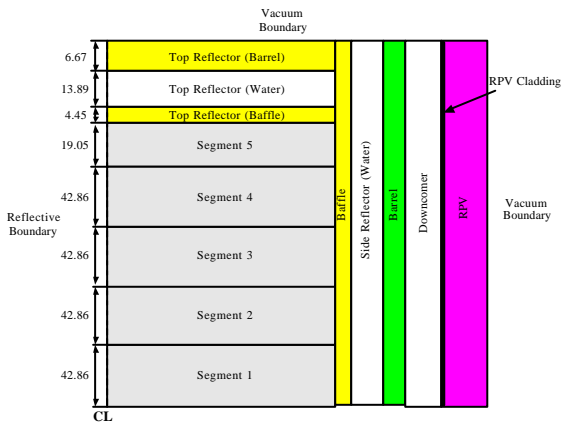


그림 3. 차세대 원자로 축방향 기하학적 구조의 MCNP 모델링

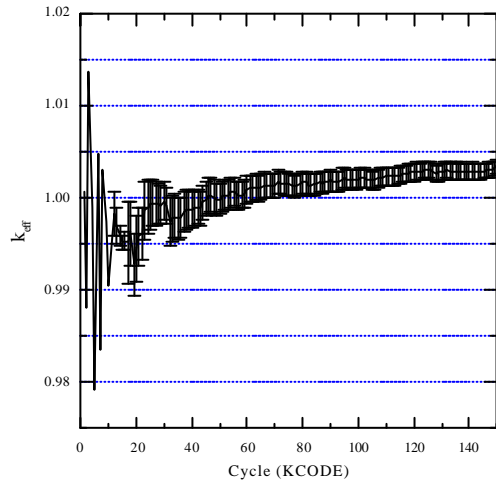


그림 4. 차세대 원자로 8주기 노심의 KCODE 주기별 유효증배계수

MCNP Design Error(%)*				0.369 0.401 -7.844																	
				0.678 0.748 -9.311		0.865 0.860 0.598		0.399 0.433 -7.811													
				1.106 1.078 2.630		1.281 1.176 8.951		0.954 1.007 -5.240		0.983 0.960 2.391											
				0.826 0.896 -7.853		1.311 1.271 3.191		1.007 1.049 -3.970		1.293 1.222 5.856		0.848 0.888 -4.483		0.458 0.428 6.928							
				1.050 1.122 -6.338		1.016 1.085 -6.365		1.344 1.267 6.975		1.039 1.103 -5.808		1.024 1.125 -8.978		1.174 1.126 4.289		0.748 0.690 8.488					
				1.173 1.157 1.395		1.372 1.259 8.987		0.848 0.885 -4.277		1.254 1.192 5.214		0.926 0.946 -2.074		1.274 1.226 3.883		1.033 1.054 -2.027		0.958 0.921 3.953			
				0.769 0.871 -11.696		1.119 1.109 0.899		1.183 1.096 7.911		1.255 1.159 8.327		0.874 0.898 -2.684		1.217 1.162 4.691		0.902 0.972 -7.195		1.233 1.160 6.334		1.233 1.160 -6.126	

* Error(%) = (MCNP-Design)/MCNP × 100
RMS Error(%) = 5.868

그림 5. BOC에서 MCNP로 계산한 차세대 원자로 8주기 상대출력분포

표 1. 차세대 원자로심 제원

Inlet Moderator Temperature	292.2 °C (558 °F)
Average Moderator Temperature	310.6 °C (591 °F)
Average Fuel Temperature	701.4 °C (1294.5 °F)
Active Core Height	381 cm
No. of Fuel Assemblies	241
Lattice in Assembly	16×16
Maximum Enrichment	5.0 w/o
Lead Rod Burnup	60000 MWD/T
Effective Core Diameter	365.8 cm
Fuel Assembly Pitch	20.88 cm
Fuel Rod Pitch	1.285 cm
Fuel Rod Diameter	0.826 cm
Clad I.D.	0.843 cm
Clad O.D.	0.970 cm
Pellet Theoretical Density	10.96 g/cm ³
Pellet Density (% Theoretical)	95.25 %

표 2 차세대 원자로 8주기 노심에 사용될 핵연료집합체 수

Fuel Assembly Type	No. of Fuel Assemblies	Fuel Rod Enrichment	No. of Fuel Rod Per Assembly	No. of Gd Shim Rods	Gd ₂ O ₃ Weight Percent
H0	16	47/42	236	-	-
H2	8	47/42	172/52	12	8
H3	33	47/42	168/52	16	8
I0	16	47/42	236	-	-
I2	8	47/42	172/52	12	8
I3	68	47/42	168/52	16	8
J0	16	47/42	236	-	-
J2	8	47/42	172/52	12	8
J3	68	47/42	168/52	16	8