

MCDEP 몬테칼로 연소 코드와 K-CORE 전산체제의
칼리머 노심 계산 결과 비교

Comparison of the KALIMER Core Calculation Results with the MCDEP
Monte Carlo Depletion Code and the K-CORE Computing System

이기복, 장진욱, 김강석, 김영일

한국원자력연구소

305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150 번지

요약

이 논문은 K-CORE 전산 체제로 계산된 KALIMER 노심 핵설계 결과를 MCDEP 코드를 이용하여 비교하고 분석한 것이다. KALIMER 노심의 R-Z 모델과 Hex-Z 모델에 대해 유효증배계수와 핵분열 출력 분포, 연소에 따른 주요 핵종의 수밀도 변화를 비교한 결과를 수록 하고 있다.

K-CORE 전산체제에 의한 연소 계산 결과가 몬테칼로 방법의 MCDEP와 비교하여 유효 증배계수는 약 700 pcm이내 핵분열률 분포와 핵분열출력 분포는 Driver Fuel 영역에서 2% 이내, 출력이 Driver Fuel 영역보다 1/10정도로 작은 Radial Blaket 영역에서 10% 이내로 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 유효증배계수는 연소도에 따라 약 500 pcm의 일률적인 차이를 보이고 있다. 이 같은 일률적 오차는 설계시 +500 pcm의 유효증배계수 biasing으로 조정가능한 것으로 판단되므로, Lumped Fission Product와 주요 핵종만을 취급하는 현재의 K-CORE 전산체제가 KALIMER 노심 설계에 개념설계상의 정확도를 유지하고 있음을 확인하였다.

Abstract

The results of KALIMER (Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) core design calculated by the K-CORE computing system are compared and analyzed with those of MCDEP calculation. The effective multiplication factor, flux distribution, fission power distribution and the number densities of the important nuclides effected from the depletion calculation for the R-Z model and Hex-Z model of KALIMER core are compared.

It is confirmed that the results of K-CORE system compared with those of MCDEP based on the Monte Carlo transport theory method agree well within 700 pcm for the effective multiplication factor estimation and also within 2% in the driver fuel region, within 10% in the radial blanket region for the reaction rate and the fission power density. The effective multiplication factors versus burnup show consistently about 500 pcm difference. This systematic error can be adjusted by biasing of calculation result. Thus, the K-CORE system for the core design of KALIMER by treating the lumped fission product and mainly important nuclides can be used as a core design tool keeping the necessary accuracy.

1. 서론

원자로 노심설계를 검증하기 위해서 가장 좋은 방법은 많은 실험을 통해 계산 결과를 검증하는 것이다. 한국원자력연구소에서 개발중인 액체금속로 KALIMER(Korea Advanced LIiquid MEtal Reactor)[1]는 금속연료에 소듐을 냉각재로 노심을 구성하여 한국원자력연구소 자체의 액체금속로 전산체제인 K-CORE 체제[2]를 사용하여 설계를 진행하고 있다. 설계시 고려하여야 하는 중요한 항목 중의 하나가 설계 결과의 정확도로서 이를 실험을 통해 확인하여야한다. 그러나 국내에는 금속연료를 사용하는 액체금속로 노심을 실험할 수 있는 시설이 없다. 또한 외국의 실험 사례도 적을 뿐만 아니라 실험 자료를 구입하는 비용이 막대하여(한 경우당 20만 달러 예상) 통계적으로 의미있는 검증 자료수를 확보하려면 막대한 비용이 소요될 것으로 보여 예산상의 어려움이 예상된다. 이러한 실험자료를 대체할 수 있는 방법으로, 가장 정확하다고 알려진 수송이론에 입각한 몬테칼로 방법의 계산 결과를 참고값으로 놓고 K-CORE의 계산 결과를 비교하여 K-CORE 전산체제의 정확도를 분석하는 것이다.

현재 노심 연소 계산이 가능한 몬테칼로 코드로 국외에서 개발된 것으로는 LANL (Los Alamos National Laboratory)에서 개발한 MONTEBURNS (Monte Carlo Burnup Code System) [3], INEL (Idaho National Laboratory)에서 개발한 MOCUP (MCNP-ORIGEN2 Coupled Utility Program) [4], MIT의 MCODE (MCNP-ORIGEN Depletion Program) [5], 미국의 AET (Advanced Energy Technology, Inc.)의 MCBURN (MCNP Monte Carlo Depletion Utility Program) [6], 스웨덴의 RIT (Royal Institute of Technology)에서 개발한 MCB(Monte-Carlo Continuous Energy Burnup Code) [7] 등이 있다. 이들은 대개 MCNP 코드와 ORIGEN2 코드를 연계하도록 개발된 코드이거나 몬테칼로 코드와 연소계산 모듈을 통합하여 개발된 코드들로, MCNP의 계산 결과로부터 1 군 중성자속을 계산하고 이를 바탕으로 연소계산을 수행하고 다시 연소상태의 새로운 수밀도를 계산하여 이를 MCNP의 입력으로 MCNP 계산을 하는 반복계산의 형태를 취하고 있다. 국내에서 개발된 코드로는 서울대학교에서 개발한 MCNAP [8]이 있는데 이 코드는 PC (Personal Computer) 기반의 C++ 언어로 작성되었으며 연소계산과 온도 궤환 효과의 고려가 가능하도록 개발되었다. 이외에 한국원자력연구소에서는 HYPER (Hybrid Power Extraction Reactor) 시스템 해석을 위하여

MONO(Monte-Carlo Origen Coupling) 코드를 개발하였으며, MCNP 코드와 지수행렬법(exponential matrix method)을 이용한 연소계산 모듈을 통합하여 사용자가 MCNP용 입력과 연소계산에 필요한 입력만을 통하여 자동으로 수행될 수 있도록 MCDEP (Monte Carlo Depletion Code Package) [9] 코드를 개발하였다.

이들 여러 코드중에서 MONTEBURNS 코드를 이용하여 KALIMER 핵설계 전산체제를 검증하려는 시도가 있었다[10]. 그러나 예비계산을 통해 MONTEBURNS 코드가 첫째 핵분열 생성 핵종 취급에 제한이 있어 MONTEBURNS 코드를 위한 핵분열생성물 단순 라이브러리 생산에 어려움이 있고, 둘째 연소가능 영역 설정에 제한이 있어 노심 모델링을 정확하게 수행할 수 없는 단점이 있는 것으로 밝혀졌다. 따라서 이 논문에서는 한국원자력연구소에서 개발한 MCDEP 코드를 사용하여 KALIMER 핵설계 결과를 비교 분석하였다. 왜냐하면 MCDEP 코드는 한국원자력연구소에서 자체 개발한 코드로 수정 보완이 용이하고, 행렬 지수 함수 방법을 사용하여 정확성과 계산 시간의 단축을 꾀할 수 있고, 노심 연소영역에 대한 제한이 없어 노심 모델링을 정확하게 할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

이 논문은 K-CORE 전산 체제로 계산된 KALIMER 노심 핵설계 결과를 MCDEP 코드를 이용하여 비교하고 분석한 것이다. KALIMER 노심의 R-Z 모델과 Hex-Z 모델에 대해 유효증배계수와 핵분열 출력 분포, 연소에 따른 주요 핵종의 수밀도 변화를 비교한 결과를 수록 하고 있다.

2. 계산체제와 방법론

2.1. K-CORE 계산체제

KALIMER의 노심 핵설계와 성능 분석을 위하여 구축된 K-CORE 핵설계 계산체제는 유효 단면적 생산, 중성자속 계산, 연소계산 모듈들로 구성되어 있다. 노심 계산에 사용되는 기본적인 다군 단면적 자료는 핵자료 파일인 JEF-2.2와 ENDF/B-VI를 핵자료 처리 NJOY 코드로 생산한다. 현재는 MATXS 라이브러리 형식으로 JEF-2.2핵자료 파일에 기초한 80군 KAFAX(KAERI FAsT XS)/F22 중성자 단면적 라이브러리와 ENDF/B-VI 핵자료 파일에 기초한 150군 KAFAX/E66 중성자 단면적 라이브러리를 마련하여 이용하고 있다. 이것들은 액체금속로용 균정수세트 KFS(Korean Fast Set)의 한 버전으로서 여러 온도에서의 무한희석단면적(infinite dilute cross section)과 Bondarenko 자기차폐인자(self-shielding factor)들을 수록하고 있다. 이후 물질조성에 따른 영역별 소수군 유효단면적은 유효단면적 생성모듈과 예비 처리된 다군 라이브러리를 이용하여 생산한다. 소수군 유효단면적은 먼저 각분할법에 기초한 수송이론 코드인 TWODANT로 집합체들의 중성자 스펙트럼을 계산하고 이를 가중함수로 이용하여 자기차폐 효과나 혹은 중성자 누설에 따른 스펙트럼을 보정하는 TRANSX 코드로 근축약 과정을 거쳐 온도에 따라 핵종별로 그리고 균질화된 영역별로 구한다.

준비된 소수군 유효단면적을 이용하여 R-Z 모델이나 Hex-Z 모델에 대하여 DIF3D 코드로 유한차분법이나 노달 근사법으로 중성자속을 구하고, 여러 가지 노심 해석 계산을 수행한다. K-CORE 전산체제에서는 필요에 따라 이러한 중성자속 계산방법외에 분할좌표근사

를 쓰는 수송이론계산도 사용한다. 연소계산은 REBUS-3 코드를 이용하여 비평형노심이나 평형 노심상태에 대하여 자동으로 수행한다. 한편, DIF3D에서 계산된 임계도, 중성자속, 수반 중성자속 (adjoint neutron flux) 등과 같은 정보를 이용하여 동특성 변수 생산 코드인 BETA-K 코드, 섭동이론 계산을 위한 PERT-K 코드, 붕출력 계산을 위한 RPIC 코드 등은 기타 노심 해석이나 혹은 타 분야와의 연계에 필요한 자료를 생산한다.

2.2. MCDEP 계산체제

MCDEP는 MCNP 코드에 지수행렬법을 사용하는 연소 계산 모듈과 예측-수정법 (predictor-corrector method), 평형 지는 계산 모듈, 중성자속 준위 평가 모듈과 비주류 핵 종제외법(minor nuclides exclusion method) 등의 모듈을 결합하여 자동연소 계산이 가능하도록 개발된 코드이다. 따라서 MCDEP는 MCNP 계산에 사용하는 라이브러리와 연소계산에 사용하는 라이브러리 두 가지를 같이 사용하고 있다. MCNP용 라이브러리는 NJOY를 사용하여 ENDF/B 라이브러리를 처리하여 구할 수 있다. 연소계산에 사용되는 라이브러리는 ORIGEN-2의 라이브러리와 같이 핵종 별로 1군 중성자단면적과 핵붕괴시 생성되는 핵분열 물질의 생성율을 포함하며, 반감기와 각종 핵붕괴에 따른 반응분율을 포함하고 있다. MCDEP의 입력으로 주어진 각 핵종별 1군 중성자단면적은 연소도 계산에 따라 지속적으로 수정된다. MCNP계산에 따라 특정연소에서 MCNP의 라이브러리에 포함되는 전 핵종을 수정할 수도 있으나 이러한 과정은 지나치게 과도한 전산시간을 필요로 하므로 비효율적이다. 따라서 연소계산에서 중요한 핵종에 대하여만 1군 단면적을 수정하고 나머지는 라이브러리에 포함되어 있는 값을 그대로 이용하는 비주류 핵종제외법을 이용한다.

MCDEP에서는 기본적인 MCNP 입력외에 연소 모듈을 제어하는 입력이 필요하다. 이 입력에는 MCNP의 실행파일명, ORIGEN-2 라이브러리 파일명, 출력밀도, 제논상태, 그리고 1군 단면적을 수정할 핵종 및 연소구간설정 등이 포함된다. 이러한 입력을 바탕으로 세부격자에서의 중성자속과 1군단면적을 계산할 핵종별 미시적 반응도를 출력할 Tally를 자동으로 준비하여 준비된 MCNP입력에 추가한 후 MCNP를 수행한다. MCNP 계산이 종료되면 계산 결과로부터 유효중배계수와 출력분포를 저장 및 계산을 하고 연소계산을 위하여 1군 단면적을 계산한다. 여기에서 구한 1군 단면적을 이용하여 ORIGEN-2의 단면적 라이브러리를 수정한 후 연소계산을 수행한다. 이때 입력으로 사용되는 출력밀도로부터 중성자속의 절대값을 계산하고 입력으로 주어지는 연소구간을 시간으로 환산하여 연소계산을 수행하여 새로운 혼합물을 계산한다. 이를 이용하여 MCNP 입력을 재구성한다. 연소계산 후 생성되는 수많은 핵종 중 MCNP의 라이브러리에 포함되는 모든 핵종을 MCNP의 새로운 입력에 포함한다. 연소구간을 충분히 길게 하도록 예측-수정법을 이용하여 연소후 생성 핵종들의 입자수를 계산한다. 이러한 과정을 계속해서 반복하여 연소계산을 수행한다.

3. 계산결과 비교

3.1. KALIMER 노심 R-Z Model 비교

K-CORE 전산체계에서 다군 단면적을 생산하는 과정에서 가중함수로 사용되는 노심 각 영역의 스펙트럼은 수송이론에 기초한 TWODANT 코드의 R-Z model로 계산한다. 따라서 검증계산의 하나로 KALIMER 노심 R-Z 모델에 대한 계산을 수행하여 유효증배계수를 비교하였다. 그림 1은 KALIMER R-Z 노심에 대한 MCNP 모델을 보여주며, 표 1은 계산 결과인 KALIMER R-Z 모델의 유효증배계수를 비교하여 보여준다. 노심의 각 영역은 설계 노심의 체적과 각 영역의 수밀도가 보존되도록 균질화되었다. MCNP 결과와 수송이론 코드인 TWODANT의 결과는 300 pcm 이내로 매우 잘 일치하고 있으나 확산이론에 기초한 DIF3D의 계산 결과는 중성자속의 균수에 따라 1500 pcm정도의 큰 차이를 보인다. 또한 온도에 따른 유효증배계수의 차이도 K-CORE 코드의 결과가 MCNP에 비해 크게 예측하는 것으로 나타났다.

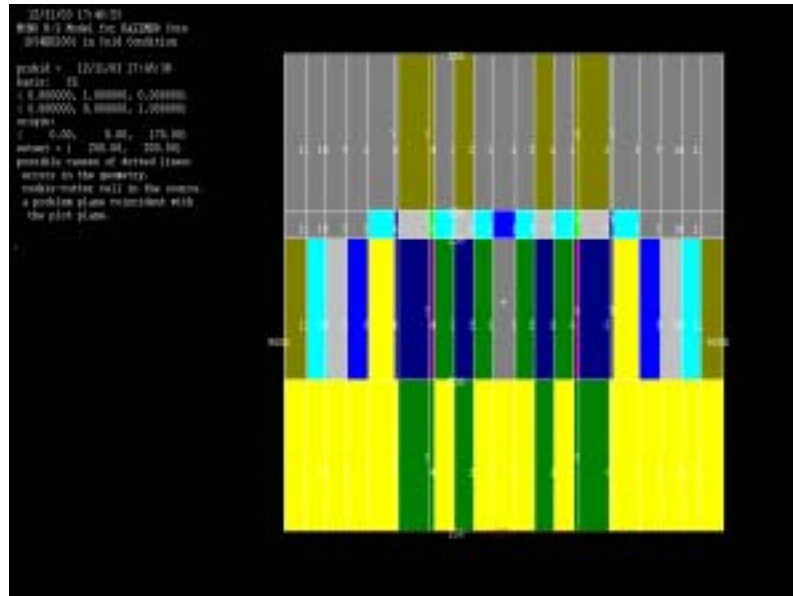


그림 1 KALIMER 노심에 대한 MCNP R-Z 모델링

표 1 KALIMER R-Z 모델의 유효증배계수 비교

Xs Database	Code	Cold	Hot	$\beta k = (C-H) * 100$
ENDF-VI	MCNP	0.97023	0.96704	0.319
	TWODANT	0.97302	0.96734	0.568
	DIF3D-150g	0.96376	0.95536	0.840
	DIF3D-80g	0.96690	0.95852	0.838
	DIF3D-9g	0.96193	0.95618	0.575
JEF2.2	MCNP	0.95888	0.95601	0.287
	TWODANT	0.95934	0.95344	0.590
	DIF3D-80g	0.94575	0.93982	0.593
	DIF3D-9g	0.94914	0.94318	0.596

3.2. KALIMER 노심 Hex-Z Model 비교

참고문헌 [10]은 MONTEBURNS 코드를 이용하여 수행한 K-CORE 전산체제의 검증 작업을 수록하고 있으며 계산 과정과 결과가 잘 나와 있다. 이 보고서는 MONTEBURNS 코드의 제약으로 노심을 축방향으로 두 영역으로 구분하여 연소계산을 수행하였다. 그러나 MCDEP의 모델링은 축방향으로 5개의 영역으로 구분하여 K-CORE의 노심 모델링과 동일하게 구성하였다. 또한 MONTEBURNS 코드는 JEF2.2 자료를 기초로 온도별 MCNP용 단면적 자료를 생산하여 검증계산에 사용하였으나 이 라이브러리에 대한 충분한 검증이 이루어지지 않았고 핵분열생성물 취급에 어려움이 있어, MCDEP에서는 검증된 상온(300K)의 ENDF-6 핵자료와 JEF2.2 핵자료를 이용하여 K-CORE 계산과 MCDEP 계산을 수행하여 비교하였다. 그림 2와 같은 KALIMER 노심의 모든 구성물의 온도를 상온으로 동일하게 가정하여 온도에 따른 오차를 배제하였다. 또한 비연소 연료로 구성된 초기 노심에 대한 연소계산을 수행하여 두 코드를 비교함으로써 주기초 핵분열 생성물에서 유발되는 오차를 배제하였다.

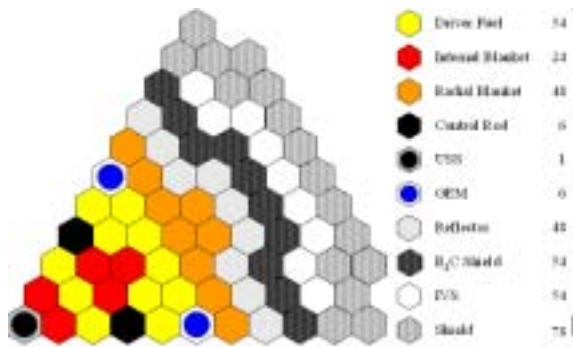


그림 2 KALIMER 노심의 구성



그림 3 KALIMER 노심의 MCNP모델

1) 유효증배계수 비교

그림 3은 KALIMER 노심에 대한 1/6 노심 구조의 3차원 MCNP 모델을 보여준다. K-CORE와 MCNP 코드의 계산은 동일한 온도의 ENDF-6 단면적 자료를 기본으로 계산하여 그 결과를 비교 분석하였다.

표 3은 연소도에 따른 유효증배계수의 변화를 보여준다. MCDEP 계산은 200만개의 sampling을 통해 계산되었으며 유효증배계수의 통계적 표준편차는 표 2에 명시되어 있는 것처럼 최대 0.00052이다. ENDF-6 핵자료를 이용한 경우와 JEF2.2 핵자료를 이용한 경우, 연소도에 따른 반응도 차이(Reactivity Swing)는 REBUS-3에서 700 pcm 정도로 큰 차이가 없었으나 유효증배계수값 자체는 ENDF-6를 사용한 경우가 일관되게 약 1300 pcm 큰 값을 보이고 있어 핵자료에 의한 차이가 약 1300 pcm 정도임을 보여준다. 동일한 핵자료를 사용한 REBUS-3과 MCDEP의 연소도에 따른 반응도 차이는 약 100 pcm의 차이를 보여 잘 일치하고 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 유효증배계수 차이는 최대 0.63%의 차이를 보이고 있다. 이러한 반응도 차이의 원인은 일반적으로 기하학적 모델링, 핵단면적 처리방법, 연소

계산 방법, 핵분열 생성물 취급 방법, 중성자 거동 해석방법의 차이 등에 기인한 것이나 여기서는 기하학적 모델링과 기초 핵자료가 같으므로 주로 중성자 확산 이론과 수송이론을 적용한 몬테칼로 방법의 차이에 기인한 것으로 볼 수 있다.

표 2 KALIMER HEX-Z Model의 연소도에 따른 유효증배계수 비교

BU (MWD/KgHM)	Days	REBUS-3 (JEF2.2)	REBUS-3 (ENDF-6)	MCDEP (ENDF-6)	MCDEP±STD	Diff.(%)
0.0	0.00	0.94855	0.96158	0.96772	0.00044	-0.63
3.0	116.25	0.94616	0.95918	0.96355	0.00052	-0.45
6.0	232.50	0.94418	0.95718	0.96273	0.00046	-0.58
9.0	348.75	0.94256	0.95551	0.95930	0.00047	-0.40
12.0	465.00	0.94124	0.95410	0.95937	0.00046	-0.55
Reac. Swing		0.00731	0.00748	0.00835		

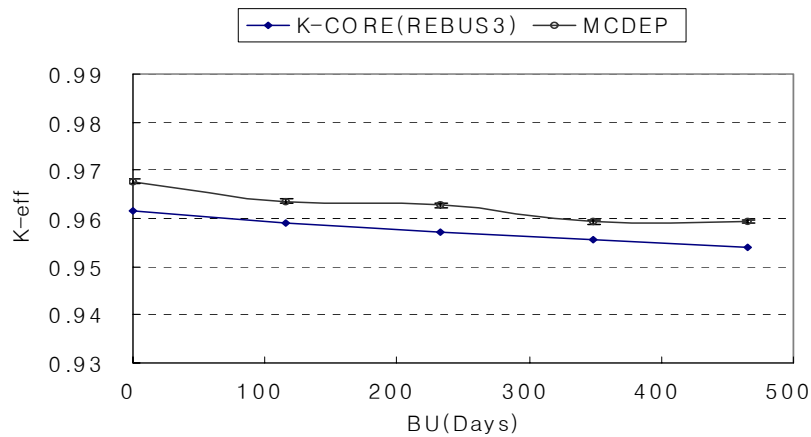


그림 4 KALIMER HEX-Z Model의 연소도에 따른 유효증배계수 변화

2) 중성자속 분포 비교

그림 5는 각각 K-CORE REBUS-3 코드 계산에 의한 주기초(BOC)에서의 중성자속(단위: 1015 n/cm²-sec) 분포를 보여주고 있으며, 그림 6은 MCDEP 계산 결과를 기준으로 REBUS-3의 결과를 비교한 중성자속 분포의 오차(%)를 보여준다. 또한 그림 7과 8은 주기말(465 Days, 12.0 MWD/KgHM)에서 계산한 값과 오차를 각각 보여준다. 전체적으로 약 +6% 내외의 유사한 결과를 보이고 있다. 상대적으로 중성자속의 크기가 작은 영역인 Radial Blanket에서 오차가 비교적 크게 나타나고 노심 중심부인 Internal Blanket과 Driver 영역에서 매우 잘 일치하고 있어 중성자속 분포는 전체적으로 매우 잘 일치하고 있다.



그림 5 KALIMER BOC 중성자속 분포
(REBUS 결과)



그림 6 KALIMER BOC 중성자속 분포
오차 (기준: MCDEP, 상대오차 %)



그림 7 KALIMER EOC 중성자속 분포
(REBUS 결과)



그림 8 KALIMER EOC 중성자속 분포
오차 (기준: MCDEP, 상대오차 %)

3) 핵분열 출력 분포 비교

그림 9는 BOC에서 K-CORE REBUS-3 계산에 의한 핵분열 출력밀도 (Fission Power Density, 단위: W/cc) 분포를 나타내고 있으며, 그림 10은 MCDEP의 출력밀도 계산 결과와 비교한 오차를 나타낸다. 마찬가지로 그림 11은 주기말에서 출력밀도 분포를 보여주고 그림 12는 MCDEP 결과를 기준으로 한 상대오차를 보여준다. 이 연구에서 MCNP 계산은 중성자에 의한 반응만 취급하도록 계산하였고 감마선에 대한 계산은 고려하지 않았다. 그러므로 MCDEP의 출력은 감마선에 의한 열은 고려하지 않고 핵분열률에 핵분열당 나오는 에너지를 곱하여 계산하므로 REBUS-3에서도 핵분열에 의한 출력만 고려하여 서로 비교하였다. 출력은 주로 Driver Fuel 영역에서 발생하며 이 영역의 출력은 Blanket 영역보다 약 10배의 크기를 가지고 있다. 그림 10과 그림 12에서 보는 바와 같이 상대적으로 큰 오차를 보이는 영역은 Radial Blanket 영역이다. 그러나 이 영역은 출력 자체가 매우 작아 상대적 오차가 크게 나타난 것이다. 그림 13은 EOC에서 핵분열률 분포를 비교한 것이다. 주기초에는 동일한 성분 물질이었지만 연소가 진행되면서 중성자속 분포가 달라져 구성 성분도 변화하게 된

다. 따라서 주기말에는 핵분열률 분포와 핵분열에 의한 출력 분포가 꼭 일치하지는 않게 된다. 그림 13은 EOC에서 핵분열률분포를 비교한 것으로 K-CORE REBUS-3의 결과와 MCDEP의 결과가 최대 6.4%의 오차 범위에서 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



그림 9 KALIMER BOC 핵분열 출력 분포 (REBUS 결과)



그림 10 KALIMER BOC 핵분열 출력 분포 오차 (기준: MCDEP, 상대오차 %)



그림 11 KALIMER EOC 핵분열 출력 분포 (REBUS 결과)



그림 12 KALIMER EOC 핵분열 출력 분포 오차 (기준: MCDEP, 상대오차 %)



그림 13 KALIMER EOC 핵분열률 분포 오차 (기준: MCDEP, 상대오차 %)

4) 연소도에 따른 핵종별 수밀도 변화 비교

REBUS-3는 연소가 진행되면서 생성되는 핵분열 생성물을 일괄적으로 가상의 단순 핵분열생성물로 취급하고 있다. 그러나 MCDEP는 연소에 따라 생성되는 거의 모든 핵종을 취급하고 있다. 예로서 주기말에 취급되는 핵종 수를 보면 REBUS-3이 34개인데 반해 MCDEP는 207개의 핵종을 취급하고 있다. 그림 14, 15, 16은 각각 그림 2에 표시된 핵연료 집합체중 Internal Blanket 영역의 (2,1) 집합체, Driver Fuel 영역의 (3,1) 집합체, Radial Blanket 영역의 (7,1) 집합체의 활성 노심 5개 축방향 노드중 가운데 노드의 연소도에 따른 핵종별 수밀도 변화를 나타낸 것이다. 연소에 따라 축적되거나, 감소되는 대표적 핵종인 Np-237, Pu-239, Pu-241, U-238, U-235에 대해 수밀도 변화를 비교하였다. REBUS-3의 결과와 MCDEP의 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 특별히 Radial Blanket 영역의 집합체에서 차이가 크게 나타나는 것으로 보이나 이것은 이 영역의 중성자속 차이가 상대적으로 크기 때문이다. 그러나 값 자체가 매우 작은 값이라 노심 계산에 큰 영향을 주지 않는다.

4. 결론

이 논문은 K-CORE 전산 체제로 계산된 KALIMER 노심 핵설계 결과를 MCDEP 코드를 이용하여 비교하고 분석하였다. K-CORE 전산체제에 의한 연소 계산 결과가 몬테칼로 방법의 MCDEP와 비교하여 유효증배계수는 약 700 pcm 이내 핵분열률분포와 출력분포는 Driver Fuel 영역에서 2% 이내, Radial Blanket 영역에서 10% 이내로 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 유효증배계수는 연소도에 따라 약 500 pcm의 일률적인 차이를 보이고 있다. 이 같은 일률적 오차는 설계시 +500 pcm의 유효증배계수 biasing으로 조정 가능하다. 따라서 Lumped Fission Product와 주요 핵종만을 취급하는 현재의 K-CORE 전산체제가 KALIMER 노심 설계에 개념설계상의 정확도를 유지하고 있다고 할 수 있다. 가능한 검증 계산의 수가 적어 통계적으로 의미있는 정확도 분석이 이루어지지 않았으나 이 연구를 통해 수립된 절차에 따라 향후 더 많은 검증계산이 이루어진다면 보다 더 정밀한 K-CORE 전산체제의 정확도가 분석될 것이다. 그러나 K-CORE 전산체제로 계산된 값은 표2와 3에서 확인한 바와 같이 핵 자료에 따라 큰 차이를 보이고 있어 향후 더 많은 분석과 실험에 의한 검증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기사업의 일환으로 수행되었다.

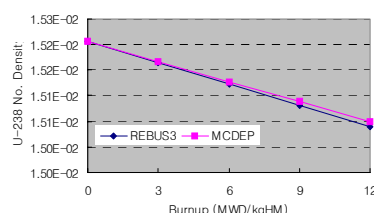
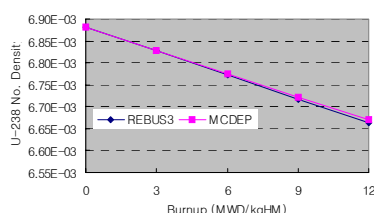
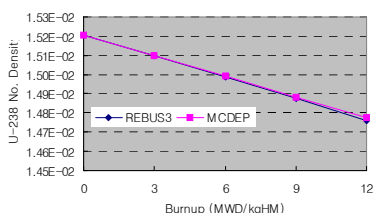
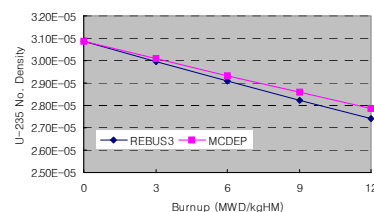
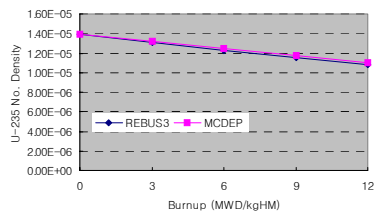
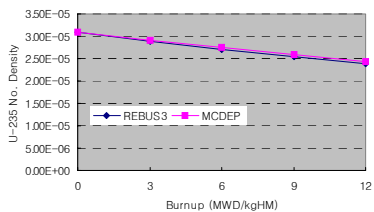
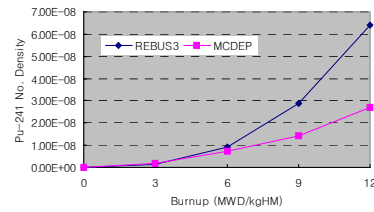
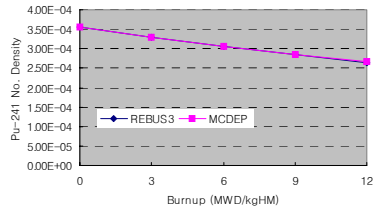
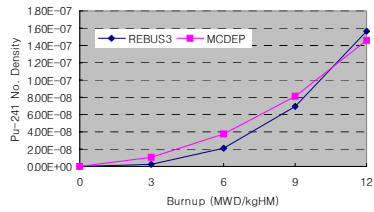
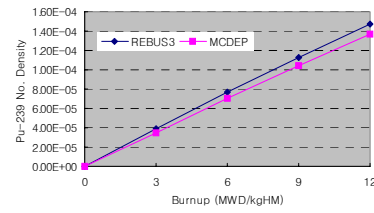
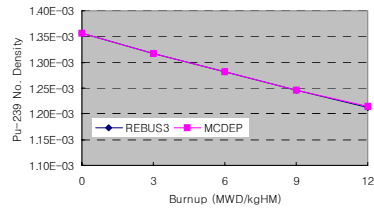
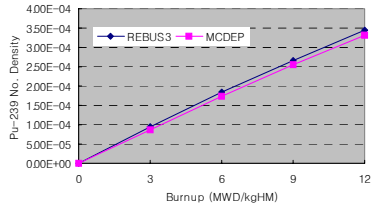
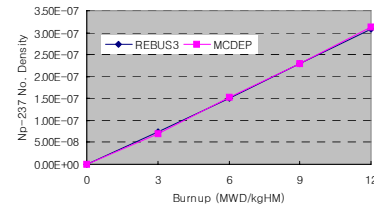
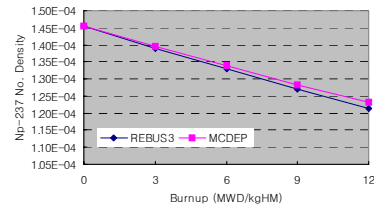
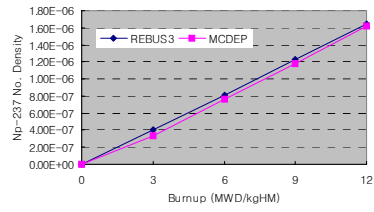


그림 14 Internal Blanket 중간 영역의 연소에 따른 수밀도 변화

그림 15 Driver 중간 영역의 연소에 따른 수밀도 변화

그림 16 Radial Blanket 중간 영역의 연소에 따른 수밀도 변화

References

- [1] 한도희 외, "KALIMER 개념설계보고서," KAERI/TR-2027/2002, 한국원자력연구소, 2002.
- [2] 김영일 외, "노심설계 기술개발," KAERI/RR-2218/2001, 한국원자력연구소, 2002.
- [3] H. R. Trellue, "Development of MONTEBURNS: a Code that Links MCNP and ORIGEN2 in an Automated Fashion for Burnup Calculations," LA-13514-T, Los Alamos National Laboratory, December 1998.
- [4] R. L. Moore, B. G. Schnitzler, C. A. Wemple, R. S. Babcock, and D. E. Wessol, "MOCUP: MCNP-ORIGEN2 Coupled Utility Program," INEL-95/0523, Idaho National Engineering Laboratory, September 1995.
- [5] Z. Xu, P. Hejzlar, M. J. Driscoll, and M. S. Kazimi, "An Improved MCNP-ORIGEN Depletion Program (MCODE) and Its Verification for High-Burnup Applications," Proceedings of the International Conference on the New Frontiers of Nuclear Technology: Reactor Physics, Safety and High-Performance Computing (PHYSOR 2002), Seoul, Korea, October 7-10, 2002.
- [6] "MCBURN: A MCNP Monte Carlo Depletion Utility Program," AET Inc., Cupertino, California, USA, 1999.
- [7] J. Cetnar, W. Gudowski, and J. Wallenius, "User Manual for Monte-Carlo Continuous Energy Burnup (MCB) Code Version 1C"
- [8] H. J. Shim, C. H. Kim, W. S. Park, and H. K. Joo, "Monte Carlo Depletion Analysis of a PWR with the MCNAP," Proceedings of the Mathematics and Computation on Reactor Physics and Environmental Analysis in Nuclear Applications (M&C'99), Madrid, Spain, September, 1999.
- [9] 김강석, 김교윤, 이정찬, 지성균, "몬테칼로 연소계산 코드 MCDEP의 개발," 한국원자력학회 2003 춘계학술발표회 논문집, 2003.
- [10] 김종경 외, "몬테칼로 코드를 활용한 KALIMER 핵설계 전산체제 검증," KAERI/CM-704/2002, 한국원자력연구소, 2003.