

표 참조 기법을 이용한 하나로의 MCNP/HELIOS 연소 계산 체제 개발

Development of MCNP/HELIOS Depletion Calculation System for HANARO  
Using the Table Lookup Method

서철교, 박상준, 이충성, 김현일

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

보다 정확한 하나로 노심 해석을 위하여 몬테 카를로 방법을 사용하는 연소 계산 체제를 개발하고 있다. 정상 상태에 대한 계산을 위하여 가장 널리 사용되는 MCNP를 사용하고, 연소 계산은 거시적 연소 방법인 표 참조 기법을 사용한다. 연소 계산에서 필요한 연소도에 따른 각 핵종의 수밀도에 대한 표는 HELIOS로 만든다.

2차원 하나로 핵연료 집합체에 대해 검증 계산을 하였다. MCNP/HELIOS 연소 계산 체제는 검증 표준에 대해 연소도에 따른 임계도 및 출력 분포가 서로 잘 일치한다.

하나로 전체 노심에 대한 MCNP/HELIOS 연소 계산 체제를 위하여 기존의 MCNP 모델을 새로 만들었다. 각 핵연료봉을 축방향 5 cm 단위로 구분하여 연소 가능 영역이 13,104개에 이르며 각각에 대하여 연소 이력을 추적할 수 있도록 하였다. 하나로의 가상 평형 노심의 각 연소 단계에 대하여 하나로 노심 관리 체제와 비교하여 만족스러운 결과를 얻었다.

하나로 전체 노심에 대한 표 참조 기법에 의한 연소 계산은 일반적인 연소 방법을 사용하는 계산보다 2배 이상의 빠른 계산을 수행할 수 있고, MCNP 출력 파일의 크기를 1/30 정도로 줄일 수 있다.

**Abstract**

*For the more accurate neutronic calculation in the core analysis of HANARO, the Monte Carlo depletion system is under development. Static calculation is done by MCNP code most widely used in this area, and the table lookup method is employed for the depletion calculation. The table required in this new system has the burnup dependent number densities of all isotopes considered, which are generated by HELIOS.*

*Two dimensional calculation of the HANARO fuel assembly is performed for the validation of the new system, and the calculated criticalities and power distributions according to the amount of burnup shows good agreement with the standards of verification.*

*The old MCNP model of HANARO is revised for the new MCNP/HELIOS depletion calculation system. In the new model a fuel rod is axially segmented every 5 cm, then total*

*13,104 fuel segments are traced individually in the depletion calculation. The calculated results for each burnup step of the equilibrium core of HANARO gives the satisfied results comparing with the current HANARO fuel management system.*

*In the case of HANARO, the depletion calculation by the table lookup method is twice as fast as the depletion calculation by the micro-depletion calculation usually used in the Monte Carlo depletion calculation and the output file size of MCNP is decreased to about 1/30.*

## 1. 개요

몬테 카를로(Monte Carlo) 방법은 중성자 및 감마선 수송 방정식을 근사없이 풀 수 있으므로 정확한 해를 기대할 수 있다. 정확한 해를 얻으려면 다른 방법에 비하여 많은 계산 시간이 필요하여 활용에 제한이 많다. 컴퓨터의 급격한 발전으로 원자로 노심 계산에서 점차 몬테 카를로 방법의 사용이 확대되고 있으며, 최근 몬테 카를로 방법을 이용한 연소 계산에 관심이 집중되고 있다.

국내 연구용 원자로인 하나로는 설계 단계부터 몬테 카를로 방법을 노심 계산에 활용해 오고 있다. 몬테 카를로 방법을 사용하는 MCNP[1]를 검증 표준으로 사용하여 성공적인 하나로 노심 설계를 할 수 있었다. MCNP 자체는 연소 계산 기능이 없기 때문에 MCNP를 이용한 노심 분석은 새 핵연료로 구성된 노심의 분석에 한정되었다. 하나로의 연소 계산은 WIMS[2]와 VENTURE[3]가 주된 코드인 HANAFMS[4]를 사용한다. HANAFMS는 중성자 에너지를 5개 군으로 나누어 미세 격자로 계산하지만 다양한 이용자의 요구 조건을 충분히 만족시키기 어렵다. 핵연료 또는 재료 조사 시험의 경우에는 기하학적인 구조가 복잡하기 때문에 노심 계산에 어려움이 많다. 몬테 카를로 방법의 전산 코드는 복잡한 기하학적인 구조를 비교적 쉽게 구현할 수 있으므로 몬테 카를로 방법을 이용한 연소 계산 체제가 필요하다.

몬테 카를로 방법을 이용한 여러 가지 연소 계산 체제가 개발되어 사용하고 있다. 하나로의 노심 해석에 대한 요구 조건을 충족시키면서 편리하게 사용할 수 있는 것은 없다. 연소 계산 체제의 구축은 이론적으로 어려운 작업이 아니므로 직접 구축해서 사용하도록 한다.

## 2. 연소 계산 방법

핵분열 생성물과 액티나이드(actinide) 계열 원소의 양, 중성자속, 출력 등은 상호 연관되어 있으며, 어떤 특정 시점에서 특정한 값을 가지고 있다. 이러한 시간 종속적인 문제는 어떤 시간 간격 동안의 물리량이 불변한다고 가정하여 문제를 푼다. 노심 연소를 모의하기 위하여 정상 상태의 계산을 먼저 하고 이 결과를 이용하여 어떤 특정한 시간 후의 원소의 양을 예측하는 연소 계산을 하는 방식이다. 몬테 카를로 방법을 이용한 연소 계산 체제는 정상 상태에 대한 계산만 몬테 카를로 방법을 이용하고 연소 계산은 다른 방법을

이용한다. 따라서 연소 계산 체제의 우월성은 정상 상태의 계산과 연소 계산을 어떻게 하느냐에 의해 결정된다.

하나로를 위한 몬테 카를로 연소 계산 체제에서는 다음과 같은 이유로 MCNP를 정상 상태에 대한 계산을 위한 전산 코드로 선택하였다.

- 1) 가장 많이 사용한다.
- 2) 여러 경우에 대해 잘 검증되어 있다.
- 3) 다양한 기능이 있다.
- 4) 필요한 핵자료가 잘 갖춰져 있다.
- 5) 중성자 및 감마선 계산이 가능하다.
- 6) 하나로 노심에 대해 검증이 많이 되어 있다.

정상 상태의 계산은 연소 노심의 실제 핵종을 잘 모의해야 정확해진다. 수많은 핵분열 생성물과 액티나이드 계열의 핵종을 모두 다룰 수는 없으므로 계산 결과에 영향을 주거나 관심 있는 핵종만을 선택한다. 어떤 핵종을 선택하여 연소 사슬을 구성하느냐에 따라 연소 계산뿐만 아니라 정상 상태 계산의 정확성이 결정되므로 몬테 카를로 연소 계산 체제에 있어서 매우 중요하다. 연소 계산 체제를 개발하면서 이러한 작업을 할 수도 있지만 WIMS, CASMO[5], HELIOS[6] 등과 같이 이미 잘 검증된 격자 상수 생산 코드의 연소 사슬을 이용하는 것이 편리하다.

연소 계산은 미시적 또는 거시적 방법으로 할 수 있다. 연소 계산 방법에 따라 계산 체제의 효율성에 많은 차이가 있을 수 있으며, 현실적인 적용 가능성 여부에 결정적인 영향을 줄 수 있다.

미시적 연소 계산은 연소 사슬을 구성하는 각 핵종의 반응 단면적과 중성자속을 계산한 후 연소 사슬에 대한 연립 미분방정식을 푸는 방식이다. MCNP 계산에서 각 연소 영역에 대한 각 핵종의 몇 가지 반응 단면적과 중성자속을 구하고, 연소 계산에서는 MCNP로 계산한 값과 요구 출력 조건으로 연소 사슬을 풀어 각 영역별 각 핵종의 수밀도를 구한다. 연소 계산에서 구한 각 핵종의 수밀도는 다음 단계의 MCNP 계산을 위해 필요한 입력을 만드는데 이용된다.

거시적 연소 계산은 표 참조 기법을 사용하는 것으로 미시적 연소 계산에 비하여 단순하다. MCNP 계산에서 각 연소 영역에 대한 각 핵종의 반응 단면적을 구하는 것이 아니라 각 연소 영역을 대표하는 값(핵연료의 경우는 출력, 핵연료가 아닌 부분에 대해서는 조사량)을 구한다. 연소 계산은 각 영역에 대한 출력으로 각 영역에 대한 연소도를 구한다. 다음 단계의 MCNP 계산을 위하여 해당 연소도에 맞는 각 핵종의 수밀도는 미리 만들어진 표에서 가져온다. 거시적 연소 계산에서 필요로 하는 연소도에 따른 각 핵종의 수밀도에 대한 표는 미리 만들어 놓아야 한다. 거시적 연소 계산에서 필요한 표는 대표되는 하나 또는 몇 개의 영역에 대하여 만들어지며 모든 연소 영역에 대하여 만들지 않는다. 모든 연소 영역에 대해 표를 만들었다고 하더라도 주변 조건이 변화하기 때문에 의미가 없고 미시적 연소 방법을 사용하는 것과 다름없이 복잡하다. 거시적 연소 방법은 원리적으로 미시적 연소 방법에 비하여 정확성이 떨어지지만 현실적으로 적용하기 편리하다. 거시적 연소 계산이 미시적 연소 계산과 같은 정확성을 가진다면 거시적 연소 계산 방법을 사용하는 것이 바람직하다.

### 3. 계산

#### 3.1 하나로 핵연료 집합체

표 참조 기법을 사용한 거시적 연소 방법의 정확성을 확인하기 위하여 2 차원 하나로 핵연료 집합체를 선택하여 비교해 보았다. 비교를 위한 표준은 HELIOS 계산이며 계산 모델은 그림 1과 같다. 거시적 연소 방법에서 필요한 표는 HELIOS를 이용하여 만들었으며 142개의 핵종이 고려되었다. MCNP/HELIOS 연소 계산을 위해 필요한 MCNP 모델은 HELIOS 모델과 같도록 하였다.

연소도에 따른 임계도 계산 결과를 그림 2에 비교하였다. 거시적 연소 방법에서 시간 간격을 충분히 크게 하여도 임계도 계산 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

출력 분포의 오차를 0~50 %U-235 연소도에 대해 비교하였다. 핵연료 집합체 내의 핵연료봉은 대칭성 때문에 그림 1과 같이 5 가지로 구분될 수 있고, 이 5 가지 핵연료봉의 출력에 대한 상대 오차를 그림 3에 나타내었다. 각 핵연료봉의 통계적 계산 오차가 약 0.5% 임을 고려하면 출력 분포도 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 하나로 핵연료 집합체에 대한 MCNP/HELIOS 연소 계산 방법은 적절하다고 판단된다.

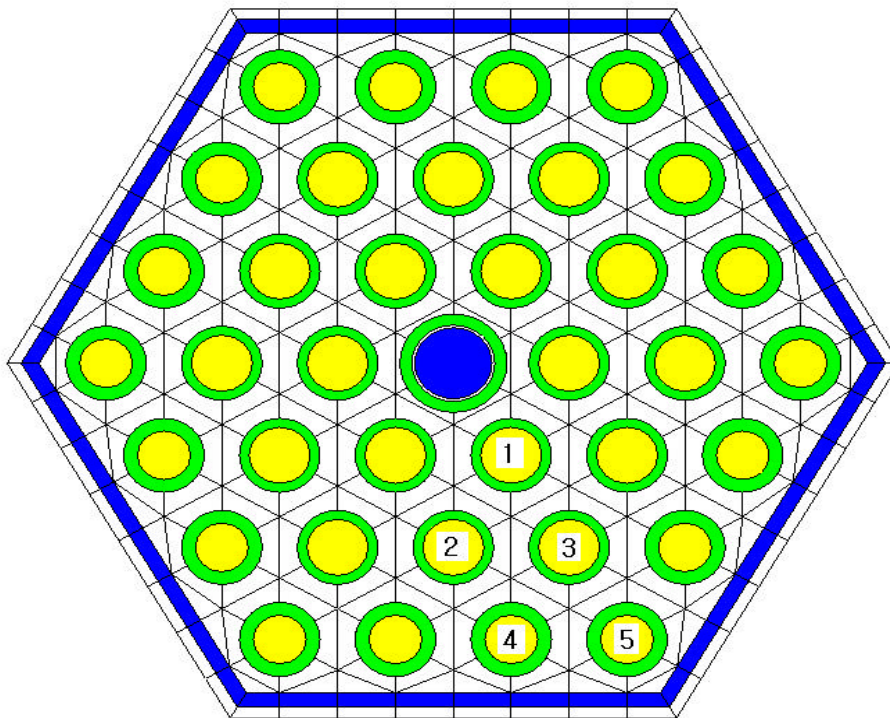


그림 1. 하나로 36봉 핵연료 집합체에 대한 HELIOS 모델

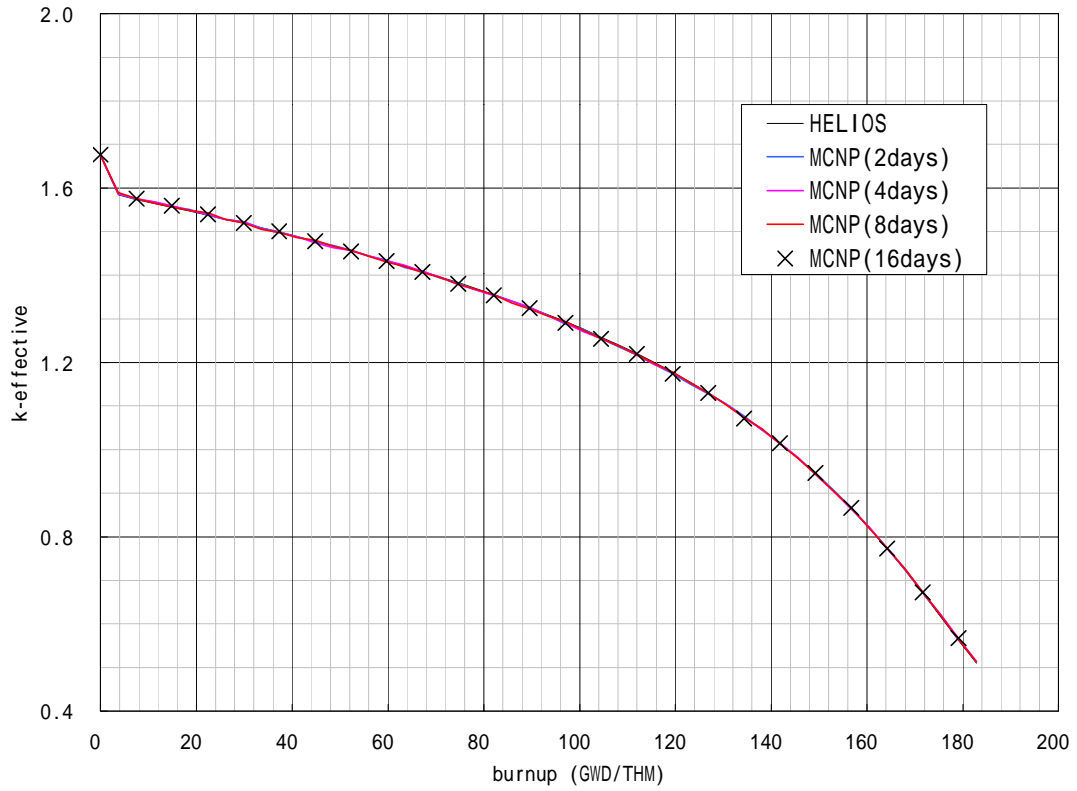


그림 2. 연소도에 따른 임계도 값의 비교

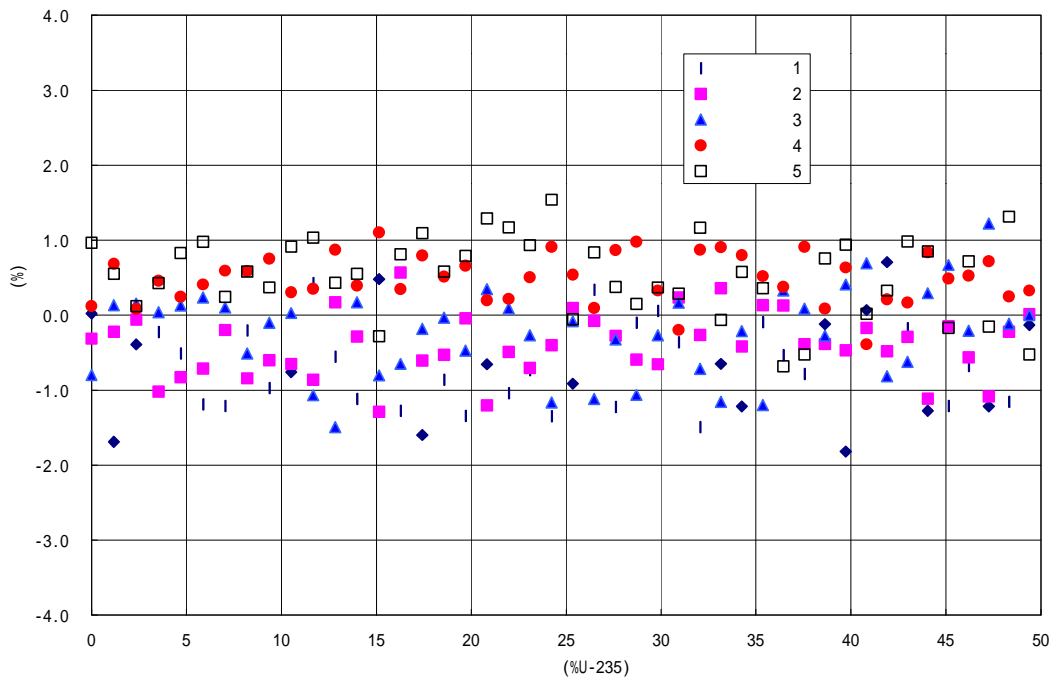


그림 3. 하나로 핵연료 집합체의 출력 분포에 대한 상대 오차

### 3.2 하나로 전체 노심

하나로 전체 노심에 대한 MCNP/HELIOS 연소 계산 체제를 구성하기 위하여 기존의 하나로 MCNP 모델을 새로 만들어야 한다. 기존의 하나로 모델은 기하학적으로 반복적인 구조(repeated structure geometry)를 가지고 있다. 이 반복적인 구조의 모델은 노심에 장전되는 핵연료 집합체를 하나만 먼저 모델하고 나머지는 구조가 같으므로 MCNP의 'LIKE m BUT' 카드를 사용하여 위치만 변화시키면서 복사해서 사용하므로 모델이 간단하다. 그러나 이런 방식의 모델은 어떤 핵연료 집합체의 특정한 부분에 특정한 물질을 독립적으로 부여할 수 없다. 새 핵연료 노심은 핵연료 부분이 같은 물질로 되어 있지만 연소 노심은 핵연료의 각 부분마다 다르다. 핵연료 부분에 대한 독립적인 물질의 부여가 가능하도록 기존의 하나로 모델을 수정해야 한다. 하나로 노심 관리를 위한 HANAFMS는 각 핵연료봉을 축방향 5 cm 단위로 구분하여 모델하고 있는데, HANAFMS의 연소도 분포를 MCNP/HELIOS 계산 체제에서 편리하게 이용할 수 있도록 MCNP 모델도 5 cm 단위로 구분하였다. 완전 장전 노심의 경우는 36봉 핵연료 집합체가 20개, 18봉 핵연료 집합체가 12개이므로 연소 가능 영역은 13,104개에 이른다. 그림 4에 새로운 MCNP 모델의 단면도를 나타내었는데 핵연료봉의 색상이 다른 것은 각각의 매질이 다른 것을 나타낸다. 그림 5에 MCNP 모델의 입면도를 나타내었으며 핵연료봉이 축방향으로 구분되어 있음을 알 수 있다.

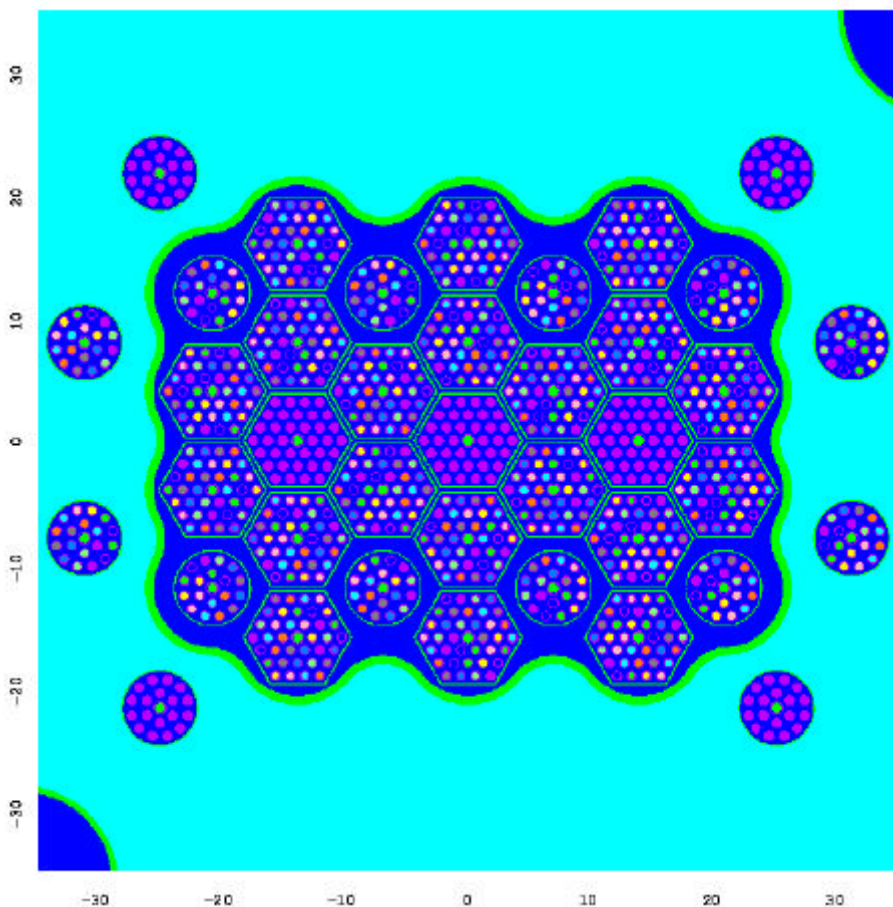


그림 4. 새로운 하나로 MCNP 모델의 단면도

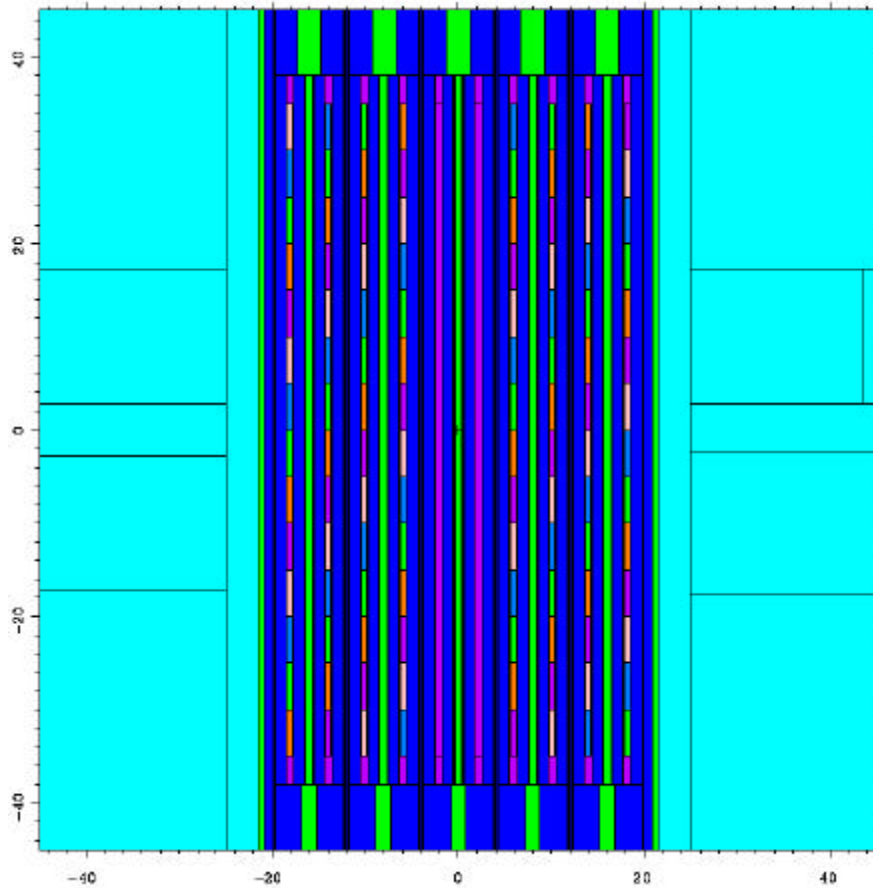


그림 5. 새로운 하나로 MCNP 모델의 입면도

MCNP/HELIOS 연소 계산 체제를 하나로 전체 노심에 적용해 보았다. 연소 노심에 대한 측정은 쉽지 않으므로 두 가지 가상 평형 노심에 대하여 계산된 HANAFMS 결과와 비교하였다. HANAFMS의 연소도 분포에 해당하는 각 핵연료봉에서의 각 핵종의 수밀도를 표 참조 기법으로 도출해내어 MCNP 입력을 만들어 계산하였다. MCNP 계산은 KCODE 모드에서 1,000만개의 선원을 사용하였다. 핵연료 집합체의 경우와는 달리 연속 계산을 하지 않고 각 연소 단계에 대한 HANAFMS의 연소도 분포를 이용하여 MCNP 입력을 만들었다. 자동적인 연속 계산을 할 수 있는 작업은 진행 중에 있다. 표 1에 각 노심 상태에 따른 임계도 값을 비교하였는데 5 mk 이내에 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. MCNP/HELIOS의 출력에 대한 계산 오차는 경우마다 조금씩 다르지만 비슷하다. 평형 노심 (A)의 제어봉 200 mm에 대한 MCNP/HELIOS의 통계적 계산 오차는 2.3~10.2%에 이르며 RMS Error(RMSE)는 3.6% 정도이다. 같은 노심 상태에 대해 HANAFMS와 MCNP/HELIOS의 선출력을 비교하여 보았다. 오차는 -26.5~32.8%에 이르며 RMSE는 7.3%이다. HANAFMS는 확산 이론을 사용하기 때문에 계산 오차가 있고, MCNP/HELIOS로 계산한 출력의 통계적 오차를 고려할 때 만족할 만한 수준이다. MCNP/HELIOS가 더욱 정확할 것으로 생각되므로 MCNP/HELIOS의 불확실도 평가는 실제 노심의 실험 자료와 비교해야 한다.

표 1. HANAFMS와 MCNP/HELIOS의 각 노심 상태에 따른 임계도값

노심 상태	제어봉 위치 (mm)	k-effective		반응도값 차이 (mk) {=(1/k <sub>1</sub> -1/k <sub>2</sub> )*1000}
		HANAFMS	MCNP/HELIOS	
평형 노심 (A)	200	0.995763	0.99603(±0.00024)	0.27
	250	1.012273	1.01141(±0.00024)	-0.84
	300	0.988431	0.99294(±0.00025)	4.59
	350	1.000330	0.99952(±0.00023)	-0.81
	400	1.004033	1.00243(±0.00022)	-1.59
	450	1.005547	1.00366(±0.00022)	-1.87
	500	1.006793	1.00560(±0.00022)	-1.18
	550	1.006899	1.00597(±0.00023)	-0.92
평형 노심 (B)	200	0.995958	0.99616(±0.00024)	0.20
	250	0.973178	0.97863(±0.00024)	5.72
	300	0.988667	0.99293(±0.00023)	4.34
	350	1.000547	0.99987(±0.00024)	-0.68
	400	1.004206	1.00220(±0.00022)	-1.99
	450	1.005667	1.00416(±0.00022)	-1.49
	500	1.006856	1.00547(±0.00021)	-1.37
	550	1.006904	1.00612(±0.00023)	-0.77

### 3.3 계산의 효율성

미시적 연소 방법을 사용하는 경우와 표 참조 기법을 사용하는 경우에 대해 계산의 효율성을 비교하였다. 비교 항목은 계산 시간, 필요한 메모리, 저장 용량이다. 어떤 연소 방법을 사용하든 계산 부하는 MCNP 계산에 집중되므로 MCNP 계산의 경우만 비교해 보면 된다. 계산은 MCNP4C를 사용하여 핵연료 집합체와 하나로 노심에 대하여 비교하여 표 2에 나타내었다.

표 2. 계산의 효율성 비교

비교 대상		계산 시간 (분)	Memory (MB)	출력 파일의 크기 (MB)
핵연료 집합체	미시적 연소	235.50	61	20
	거시적 연소	67.15	41	12
	비율	<b>3.5</b>	<b>1.5</b>	<b>1.7</b>
전체 노심	미시적 연소	2177.09	701	2,122
	거시적 연소	846.38	322	67
	비율	<b>2.6</b>	<b>2.2</b>	<b>31.7</b>



하나로 전체 노심을 계산하는 경우에 거시적 연소 모델이 2배 이상 빨리 계산할 수 있고 출력 파일의 크기도 현저하게 작다. 전체 노심에 대한 미시적 연소는 출력 파일의 크기가 너무 커서 아직은 적용하기 어렵다.

#### 4. 결론

보다 정확한 하나로 노심 해석을 수행하기 위하여 몬테 카를로 방법을 사용하는 연소 계산 체제를 개발하고 있다. 하나로 노심 해석을 위하여 어떤 방식으로 연소 계산 체제를 만들 것인가에 대해 알아보았다.

정상 상태에 대한 계산을 위한 몬테 카를로 전산 코드는, 노물리 분야에서 가장 널리 사용되고 있으며 하나로에서 오랫동안 사용해온 MCNP를 사용하도록 한다.

연소 계산은 미시적 또는 거시적 계산 방법을 사용할 수 있는데 어느 방법이 하나로에 유리한지 알아보았다. 핵연료 집합체에 대하여 임계도 및 출력 분포는 두 가지 방법이 서로 잘 일치하며 같은 정확성을 가지고 있다. 연소 방법에 따른 계산 효율 측면에서 거시적 연소 계산은 미시적 연소 방법을 사용하는 계산보다 2배 이상의 빠른 계산을 수행할 수 있고, MCNP 출력 파일의 크기를 1/30 정도로 줄일 수 있다. 따라서 하나로에서는 거시적 연소 방법을 사용하는 것이 효율적이다. 거시적 연소 계산에서 필요한 연소도에 따른 각 핵종의 수밀도에 대한 표를 만들기 위하여 HELIOS를 사용하였다.

이와 같은 하나로 노심에 대한 MCNP/HELIOS 연소 계산 체제를 수립하기 위하여 기존의 MCNP 모델을 새로 만들었다. 각 핵연료봉을 축방향 5 cm 단위로 구분하여 연소 가능 영역이 13,104개에 이르며 각각에 대하여 연소 이력을 추적할 수 있도록 하였다. 현재 각 연소 단계의 노심에 대한 계산이 가능하며, 자동적인 연속 계산을 할 수 있도록 하는 작업을 하고 있다. 가상의 평형 노심에 대해 HANAFMS와 MCNP/HELIOS 연소 계산 체제를 비교하여 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 하나로 실제 노심에 대한 MCNP/HELIOS 연소 계산 체제의 불확실도를 평가하기 위해서는 실험 자료와 비교 검증하는 작업이 남아 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

#### 참고 문헌

1. J. F. Briesmeister (Editor), "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," LA-12625-M, Los Alamos National Lab. 1993.

2. J. R. Askew et al., "A General Description of the Lattice Code WIMS," *J. Brit. Nucl. Energy Soc.*, 5, 564-585, 1966.
3. D. R. Vondy et al., "The BOLD VENTURE Computational System for Nuclear Reactor Core Analysis, Version III." ORNL-5711, 1981.
4. H. R. Kim et al., "The In-Core Fuel Management of the KMRR," KM-031-400-01/KM-031-RT-K045, Rev. 0, Technical Report, KAERI, 1993.
5. M. Edenius et al., "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program Methodology Version 4.4," STUDEVIK/NFA-89/2. 1989.
6. E. A. Villarino, R. J. J. Stamm'ler, A. A. Ferri, J. J. Casal, "HELIOS: Angularly Dependent Collision Probabilities," *Nucl. Sci. & Eng.*, 112, 16. 1992.