2004 춘계학술발표회 논문집
원자력학회

MCCARD 감마선 수송계산능 개발 및 검증

Development and Verification of MCCARD Gamma-Ray Transport Routine

한범석, 심형진, 김창효
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

서울대학교 노심핵설계연구실에서 개발된 MCCARD(Monte Carlo Code for Advanced Reactor Design)는 몬테칼로법에 의한 중성자 수송계산을 위한 전산코드로서 연소계산 모듈을 내장하고 있으며, 온도궤환효과에 대한 고려가 가능하다는 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 MCCARD의 중성자 모사과정에서 발생하는 감마선의 모사를 위한 수송계산능을 개발하고, 감마선의 거동에서 도출되는 핵특성인자에 대한 해석계산능을 개발하였다. 또한, 개발된 감마선 수송계산능에 대한 검증을 위해 SMART 원자로의 2차원 연료봉과 집합체를 대상으로 검증계산을 수행하였다. MCNP 계산결과와 비교해 볼 때, 계산오차가 몬테칼로 계산의 통계적 오차 수준 이내에 있음을 확인하였다.

Abstract

MCCARD, which is an abbreviation of Monte Carlo Code for Advanced Reactor Design, is developed at SNU and is designed exclusively for the neutron transport calculation. The MCCARD is capable of depletion analysis and taking into account the temperature feedback effect. Till now, the code does not have the ability of simulating gamma-ray transport behavior. In this study, however, a calculation module for the gamma-ray transport is designed and a capability of estimating gamma-ray contribution to the nuclear characteristics of a given system is added into MCCARD. For verifications of the gamma-ray transport module, benchmark calculations are performed through the SMART 2D pin cell and fuel assembly problems. They are compared with these of MCNP and it is demonstrated that two results agree with each other within the statistical deviations of the Monte Carlo calculations.

1. 서 론

몬테칼로 중성자 모사방법은 개별적인 중성자의 운동을 모사하여 그 결과들을 통계처

리함으로서 증배계수, 중성자속, 열출력 등과 같은 핵특성인자의 평균치와 그 계산의 오차를 구하는 방법이다. 이 방법은 3차원 수송방정식(transport equation)을 실제 풀지는 않지만, 3차원 수송방정식의 해를 구하는 비교적 정확한 방식에 해당된다. 즉, 몬테칼로 방법에서는 공간구조를 단순화시켜 물질 조성을 균질화 시킨다거나 근사적인 핵반응단면적 라이브러리를 사용하지 않고, 공간구조를 있는 그대로 모사하고 핵반응단면적을 에너지의 연속함수로 취급하기 때문에 3차원 수송방정식의 비교적 정확한 해를 구할 수 있다.

MCCARD(Monte Carlo Calculations for Advanced Reactor Design)[1]는 서울대학교 노심핵설계해석실에서 개발한 몬테칼로 중성자 해석 전산코드로서, 다양한 원자로 노심 구조물에 대해서 점 에너지 핵반응단면적 라이브러리(pointwise energy cross-section library)를 사용하여 정확한 핵특성인자를 계산한다. 특히, 코드 내에서 연소계산능을 내장하고 있고 온도궤환효과에 대한 고려가 가능하여 연소에 따른 원자로 노심거동에 대한 해석이 가능하다는 특징을 갖는다.

MCCARD는 현재까지 중성자의 거동에 대한 모사와 그로부터 도출되는 핵특성인자에 대한 해석 만이 가능하였으며, 중성자 모사과정에서 발생하는 감마선의 거동에 대한 모사는 불가능하였다. 본 연구에서는 MCCARD의 중성자 모사과정에서 발생하는 감마선의 거동을 모사하기 위한 수송계산능을 개발하고, 그로부터 도출되는 핵특성인자에 대한 해석계산능을 개발하였다. 또한, SMART 2차원 연료봉과 집합체 문제를 대상으로 MCNP[2] 계산결과와의 비교검증을 통해 감마선의 수송계산능과 해석계산능에 대한 검증을 수행하였다.

2. 중성자 모사과정에서의 감마선 생성

MCCARD의 감마선 생성과정은 개별적인 중성자 모사과정 중에 이루어진다. 즉, 중성자가 충돌할 핵종이 결정되고 그 다음에 중성자가 일으키는 핵반응의 종류가 결정되는데, 그사이에 감마선 생성과정이 모사되고 그 이후에 중성자 모사과정으로 되돌아오게 된다. 감마선 생성과정에서는 중성자가 충돌한 핵종을 대상으로 생산된 감마선의 가중치와 개수, 에너지와 방향 등을 결정하게 되고, 결정된 감마선에 대한 자료는 다른 메모리 공간(Gamma Bank)에 저장된다.

2.1 감마선의 가중치와 개수 결정

감마선은 중성자의 핵반응으로부터 생산되며, 생산된 감마선의 가중치는 중성자의 핵반응단면적과 감마선 생산단면적의 비율로 결정된다.[4]

$$W_r = W_n \frac{\sigma_r}{\sigma_T}$$

여기서, W_r= *gamma weight*

W_n= *neutron weight*

σ_r= *gamma production cross section*

σ_T= *total neutron cross section*

생산된 감마선의 가중치가 최소가중치(W^{min})보다 크면 분할법(splitting)에 의해 여러

개의 감마선이 생성되며, 최소가중치보다 작으면 러시안 룰렛(Russian roulette)에 의해 확률적으로 해당 감마선의 생사가 결정된다.

2.2 감마선생성 핵반응종류 결정

감마성을 생성하는 핵반응의 종류는 다음과 같은 난수에 의해서 확률적으로 결정된다. MCCARD의 감마선 생성과정에서 감마선을 생산하는 핵반응의 종류와 중성자 모사과정에서 중성자가 일으키는 핵반응의 종류 사이에는 연관성이 없다.

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sigma_i < \xi\sum_{i=1}^{N}\sigma_i \le \sum_{i=1}^{n}\sigma_i$$

여기서, ξ= *randum number on the interval (0,1)*

N= *number of gamma production reactions*

σ_i= *gamma production cross section for reaction i*

2.3 감마선의 에너지와 방향 결정

감마선을 생성하는 핵반응의 종류가 결정되면, 결정된 핵반응의 단면적자료에 의해서 감마선의 에너지와 방향을 결정하게 된다. 생성된 감마선의 방향 분포는 등방성이 아닐 경우에는 32개의 등간격 코사인(equiprobable cosine bins) 표로 제공되고, 감마선의 에너지 분포는 ENDF/B 형식에 따라서 테이블 스펙트럼(tabulated spectra) 분포나 이산(discrete line) 분포 형식으로 제공된다.

그림 1은 MCCARD의 감마선 생성과정을 그림으로 나타낸 것이다.

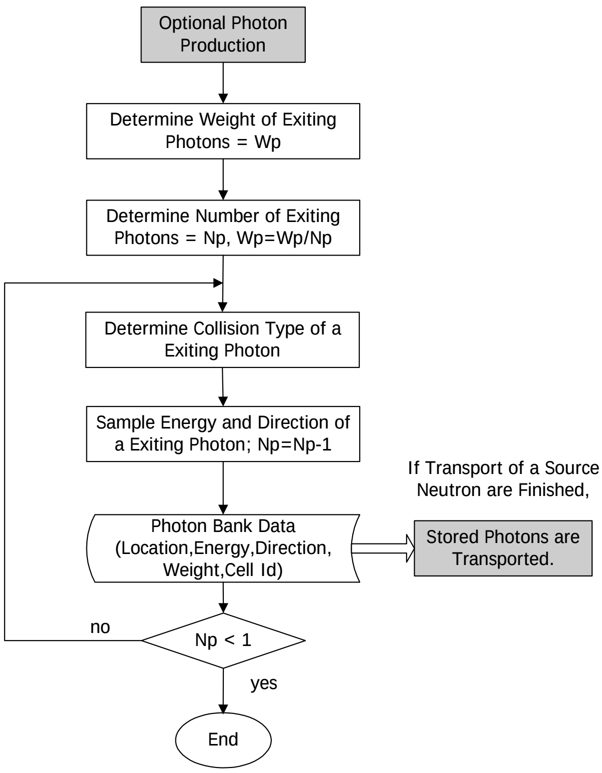

그림 1. Flowchart of Optional Photon Production

3. 감마선의 물질과의 반응

감마선이 핵연료물질이나 노심 구조물과 반응을 일으키는 유형은 크게 다음 네 가지로 구분된다. 즉, 산란반응으로 비간섭적 산란과 간섭적 산란이 있으며 흡수반응으로 광전효과와 쌍생성 반응이 있는데, 이들 네 가지 반응 중에서 하나의 반응이 다음식에 의해 확률적으로 결정된다.

$$\sum_{j=1}^{t-1}\left[\sigma_k^j(E)\right] < \xi\sigma_k^{tot}(E) \le \sum_{j=1}^{t}\left[\sigma_k^j(E)\right]$$

여기서, $\xi = random\ number\ on\ [0,1)$

$$\sigma_k^{tot}(E) = \sigma_k^{in}(E) + \sigma_k^{co}(E) + \sigma_k^{pe}(E) + \sigma_k^{pp}(E)$$

3.1 비간섭적 산란반응(Incoherent Scattering)

비간섭적 산란반응의 단면적은 Klein-Nishina 단면적과 비간섭 산란인자(incoherent scattering factor)의 곱으로 표현되며, 산란인자의 효과는 감마 진행방향으로의 Klein-Nishina 단면적을 감소시키는 역할을 한다.

$$\sigma^i(Z,\alpha,\mu)d\mu = I(Z,\nu)K(\alpha,\mu)d\mu$$

여기서, $K(\alpha,\mu)d\mu = \pi r_0^2\left(\frac{\alpha'}{\alpha}\right)^2\left(\frac{\alpha'}{\alpha}+\frac{\alpha}{\alpha'}+\mu^2-1\right)d\mu$

$$\alpha' = \frac{\alpha}{1+\alpha(1-\mu)}, \quad \mu = cos\theta$$

$$I(Z,\nu) = Incoherent\ scattering\ factor, \quad \nu = \kappa\alpha\sqrt{1-\mu}, \quad \kappa = 10^{-8}cm$$

비간섭적 산란반응 후 감마선의 에너지와 방향은 Klein-Nishina 단면적[5]을 통해서 일차적으로 결정되고, 결정된 에너지와 방향은 산란인자에 의해 최종적으로 선택되거나 거부된다. Klein-Nishina 단면적을 통해 일차적으로 감마선의 에너지와 방향을 결정할 때에는, 입사 감마선의 에너지가 1.5MeV보다 작은 경우에는 Kahn's method[6]를 사용하고 1.5MeV보다 큰 경우에는 Koblinger's method[7]를 사용하게 된다.

3.2 간섭적 산란반응(Coherent Scattering)

간섭적 산란반응의 단면적은 에너지와 무관한 Thomson 단면적과 간섭적 산란인자의 곱으로서 표현되며, 산란인자의 효과는 감마 반대방향으로의 Thomson 단면적을 감소시키는 역할을 한다.

$$\sigma^c(Z,\alpha,\mu)d\mu = C^2(Z,\nu)T(\mu)d\mu$$

여기서, $T(\mu)d\mu = \pi r_0^2(1+\mu^2)d\mu$

$$C^2(Z,\nu): Coherent\ scattering\ factor, \quad \nu = \kappa\alpha\sqrt{1-\mu}, \quad \kappa = 10^{-8}cm$$

간섭적 산란반응 후 감마선의 방향은 일차적으로 산란인자에 의해 결정되고, 결정된 방향은 Thomson 단면적에 의해 최종적으로 선택되거나 거부된다.

3.3 광전효과(Photoelectric Effect)

광전효과는 입사 감마선의 흡수반응과 그에 따른 fluorescent gamma-ray의 방출과 궤도전자의 방출(또는 여기)현상으로 이루어진다. 방출된 fluorescent gamma-ray의 에너지와 개수는 대상 핵종의 원자번호와 입사 감마선의 에너지에 따라서 확률적으로 결정된다. 이때 방출되는 감마선의 방향은 모두 등방성이다.

반응 핵종의 원자번호가 11 이하일 때에는 가능한 감마선의 에너지가 1KeV 이하이므로 더 이상의 감마선은 생성되지 않는다. 원자번호가 12와 30 사이일 때에는 에너지가 1KeV 이상인 감마선이 하나 발생할 수 있으며, 원자번호가 31 이상일 때에는 에너지가 1KeV 이상인 감마선이 두개 발생할 수 있다.[8]

3.4 쌍생성(Pair Production)

쌍생성의 문턱 에너지는 $1.022MeV \cong 2mc^2[1+(m/M)]$이며, 다음과 같이 모사된다.

쌍생성으로 생성된 전자-양전자 쌍의 운동에너지($=E-1.022MeV$)는 반응 위치에서 모두 흡수된다. 생성된 전자-양전자 쌍은 충돌위치에서 소멸되어 두개의 annihilation gamma-ray를 생성하고, 방출된 두개의 annihilation gamma-ray는 입사 감마선와 동일한 가중치를 갖으며 에너지는 0.511MeV를 갖는다. 첫번째 감마선은 등방성으로 방출되고, 두번째 감마선은 첫번째 감마선과는 정반대 방향으로 방출된다.[3]

그림 2는 MCCARD의 감마선수송 모사과정을 그림으로 나타낸 것이다.

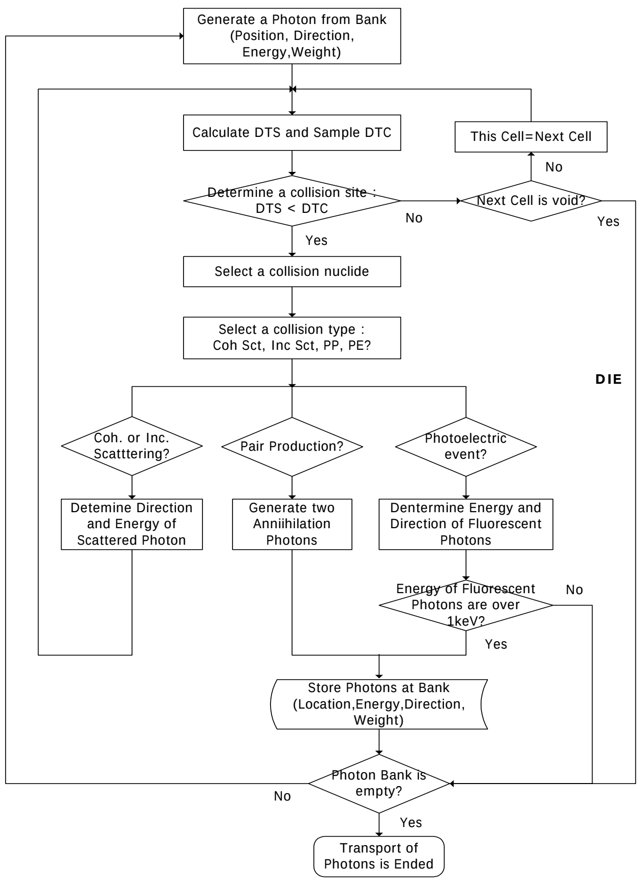

그림 2. Flowchart of Photon Transport

4. 궤도길이에 의한 에너지 계산

MCCARD에서 중성자 또는 감마선의 궤도길이에 의한 에너지 계산(track length estimate of energy deposition)은 다음 식으로 표현된다.[2]

$$F = \rho_a / \rho_m \int_V \int_t \int_E H(E)\Phi(r,E,t)dEdtdV / V$$

여기서, $\rho_a = atom\ density(atoms/barn\text{-}cm)$

$\rho_m = gram\ density(grams/cm^3)$

$H(E) = heating\ response(summed\ over\ nuclides\ in\ a\ material)$

에너지의 단위는 MeV/gm이고, MCCRAD에서는 heating response에 따라 아래와 같이 세가지 종류의 에너지 계산이 가능하다.

$$F_{1,2} = W \times T_l \times \sigma_T(E) \times H_{avg}(E) \times \rho_a / m$$

$$F_3 = W \times T_l \times \sigma_f(E) \times Q \times \rho_a / m$$

여기서, $W = particle\ weight$

$T_l = track\ length(cm) = transit\ time \times velocity$

$H_{avg}(E)$=average heating number(MeV/collisions)

$Q = fission\ Q\text{-}value(MeV)$

$m = cell\ mass(gm)$

여기서 F_1과 F_2는 중성자와 감마선의 궤도길이에 의한 에너지 계산이고, F_3는 중성자의 핵분열반응에 의한 에너지 계산을 뜻한다. F_1은 핵분열 파편과 핵분열 중성자의 의해 전달되는 에너지이고, F_2는 즉발 감마선과 포획 감마선에 의해 전달되는 에너지이다. F_3는 핵분열 에너지의 총량에서 핵분열생성물 붕괴에 의한 에너지를 뺀 값을 뜻한다.

표 1. Emitted and Recoverable Energies for Fission of U235

Form	Emitted Energy, MeV	Recoverable Energy, MeV	Remarks
Fission fragments	168	168	Neutron heating
Fission product decay			
- beta-rays	8	8	
- gamma-rays	7	7	
- neutrinos	12	-	
Prompt gamma-rays	7	7	Photon heating
Fission neutrons (kinetic energy)	5	5	Neutron heating
Capture gamma-rays	-	3-12	Photon heating
Total	207	198-207	
	Fission Heating: Total – Fission product decay		

* "Introduction to Nuclear Reactor Theory", John R. Lamarsh, p.104

5. 검증계산결과

MCCARD의 감마선 수송계산능 검증을 위해서 SMART 2차원 연료봉과 집합체 문제를 대상으로 검증계산을 수행하였다. 감마선 수송계산을 위한 반응단면적은 MCPLIB02[9]를 사용하였으며, 온도조건은 600K으로 가정하였다.

5.1 SMART 2차원 핵연료봉 문제

검증계산에 사용된 핵연료봉의 물질 조성은 4.95w/o UO2 연료이다. 계산에 사용된 중성자의 개수는 주기당 20,000이고, 전체 계산주기 수는 1,200이고 무시주기 수는 200이다. 표 2는 중성자와 감마선의 모사과정을 통해서 생산되거나 소멸되는 감마선의 가중치와 에너지의 평균값을 계산한 것이다. 표 3은 각 영역별 중성자속과 감마선속을 계산한 것이고, 표 4는 중성자의 핵분열반응에 의한 에너지와 중성자 또는 감마선의 궤적길이에 의한 에너지를 계산한 것이다. MCNP의 계산결과와 비교해보면, 최대오차가 대략 표준편차의 세배(=3σ)와 유사한 수준임을 알 수 있다.

표 4에서 알 수 있는 바와 같이 핵분열반응에 의해 발생된 에너지는 연료소자 영역에 96.9%, 피복재 영역에 0.9%, 냉각재 영역에 2.3% 정도의 에너지가 전달되는 것으로 계산되었다. 또한, 핵분열 에너지 중에서 중성자에 의해 전달되는 에너지는 93.9%이고, 감마선의 의해 전달되는 에너지는 6.1% 정도로 계산되었다.

표 2. Photon Creation and Loss(2D Pin Cell)

Photon Creation(per source particles)					Photon Loss(per source particles)				
weight	MCCARD	sd(%)	MCNP	error(%)	weight	MCCARD	sd(%)	MCNP	error(%)
from neutrons	6.572E+00	0.006	6.572E+00	0.011					
annihilation	4.464E-01	0.077	4.467E-01	-0.065					
1st fluorescence	6.677E+00	0.012	6.678E+00	-0.020	pair production	2.232E-01	0.077	2.234E-01	-0.067
2nd fluorescence	1.546E+00	0.027	1.547E+00	-0.064	photoelectric capture	1.502E+01	0.009	1.502E+01	-0.010
total	1.524E+01		1.524E+01	-0.013	total	1.524E+01		1.524E+01	-0.011
energy	MCCARD	sd(%)	MCNP	error(%)	energy	MCCARD	sd(%)	MCNP	error(%)
from neutrons	6.283E+00	0.015	6.283E+00	0.007	incoherent scattering	2.975E+00	0.024	2.977E+00	0.045
annihilation	2.281E-01	0.077	2.283E-01	-0.069	coherent scattering	3.154E-03	0.061		
1st fluorescence	4.700E-01	0.012	4.702E-01	-0.028	pair production	6.879E-01	0.085	6.883E-01	-0.056
2nd fluorescence	2.512E-02	0.027	2.513E-02	-0.055	photoelectric capture	3.340E+00	0.013	3.341E+00	-0.025
total	7.006E+00		7.006E+00	0.002	total	7.006E+00		7.006E+00	0.002

표 3. Track Length Estimate of Particle Flux(2D Pin Cell)

Region	Tally	MCCARD		MCNP		error(%)
		flux(1/cm^2)	sd(%)	flux(1/cm^2)	sd(%)	
Fuel	Neutron	1.403E-01	0.010	1.404E-01	0.010	-0.020
	Photon	8.236E-02	0.019	8.234E-02	0.020	0.018
Cladding	Neutron	1.406E-01	0.010	1.407E-01	0.010	-0.016
	Photon	8.163E-02	0.022	8.161E-02	0.020	0.025
Coolant	Neutron	1.406E-01	0.009	1.406E-01	0.010	-0.011
	Photon	8.198E-02	0.023	8.196E-02	0.020	0.024

표 4. Track Length Estimate of Energy Deposition(2D Pin Cell)

Region	Tally	Volume	MCCARD				MCNP		error of heating(%)
			heating(mev/g)	std dev(%)	energy(mev)	ratio(%)	heating(mev/g)	std dev(%)	
Track length estimate of fission heating[mev/gm]									
Fuel	fission	1.029E+03	1.010E-01	0.021	1.040E+02	98.1	1.010E-01	0.020	-0.005
Track length estimate of heating[mev/gm]									
Fuel	neutron	1.029E+03	9.465E-02	0.021	9.744E+01	96.9	9.466E-02	0.020	-0.005
	photon	1.029E+03	5.081E-03	0.020	5.231E+00		5.080E-03	0.020	0.009
Cladding	neutron	2.605E+02	7.454E-04	0.033	1.941E-01	0.9	7.460E-04	0.030	-0.092
	photon	2.605E+02	2.716E-03	0.029	7.073E-01		2.716E-03	0.030	0.010
Coolant	neutron	1.783E+02	1.084E-02	0.021	1.933E+00	2.3	1.085E-02	0.020	-0.076
	photon	1.783E+02	2.765E-03	0.030	4.930E-01		2.763E-03	0.030	0.068
Total	neutron				9.957E+01	93.9			
	photon				6.431E+00	6.1			

5.2 SMART 2차원 집합체 문제

검증계산에 사용된 SMART Type-C 집합체는 240개의 UO2 핵연료봉과 4개의 GAD 핵연료봉, 24개의 B4C 흡수봉과 21개의 안내관으로 구성되어 있다. 계산에 사용된 중성자의 개수는 주기당 30,000이고, 전체 계산주기 수는 1,200이고 무시주기 수는 200이다. 그림 3과 4는 핵연료소자 영역에서 중성자와 감마선의 궤적길이에 의한 에너지 계산을 나타낸 것이고, 그림 5는 중성자의 핵분열반응에 의한 에너지 계산을 나타낸 것이다. MCNP 계산결과와 비교해보면, 최대오차가 대략 표준편차의 세배(=3σ) 이하임을 알 수 있다.

그림 3과 4에서 계산된 영역별 에너지의 합을 구해보면, UO2 연료봉 영역에 전달되는 에너지에 비해서 GAD 연료봉 영역에 40%, B4C 흡수봉 영역에는 9%, 안내관 영역에 3% 정도의 에너지가 전달되는 것으로 계산되었다.

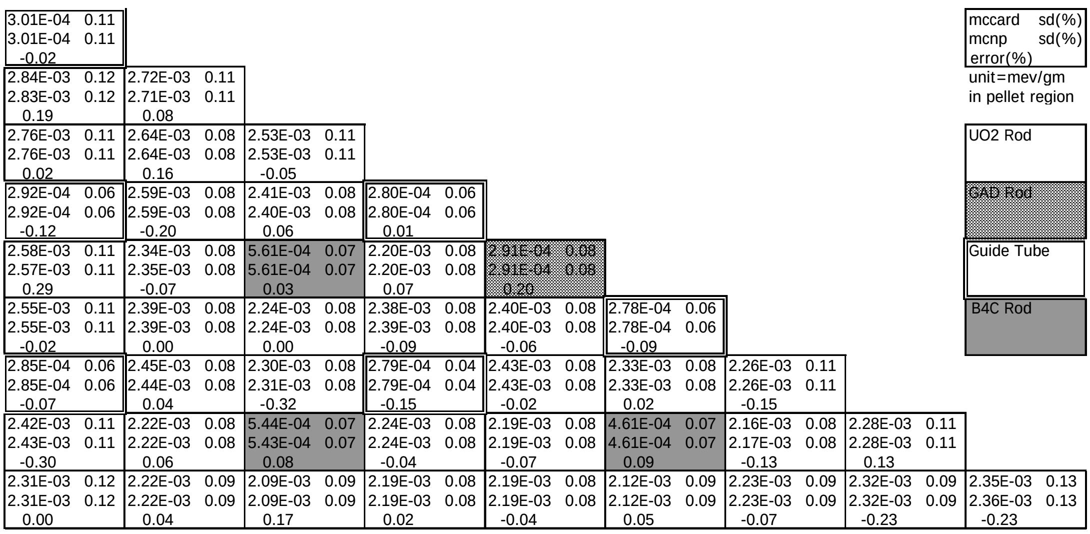

그림 3. Track Length Estimate of Heating for Neutron(2D Assembly)

7.04E-05 0.19 7.01E-05 0.19 0.31								
1.35E-04 0.10 1.35E-04 0.10 0.01	1.33E-04 0.09 1.33E-04 0.09 0.06							
1.33E-04 0.09 1.33E-04 0.09 0.13	1.32E-04 0.07 1.32E-04 0.07 0.00	1.28E-04 0.09 1.28E-04 0.09 -0.11						
6.80E-05 0.10 6.79E-05 0.10 0.15	1.30E-04 0.07 1.30E-04 0.07 -0.08	1.27E-04 0.07 1.27E-04 0.07 -0.05	6.43E-05 0.10 6.43E-05 0.10 0.04					
1.28E-04 0.09 1.29E-04 0.09 -0.08	1.27E-04 0.06 1.27E-04 0.06 0.08	6.05E-05 0.08 6.04E-05 0.08 0.08	1.21E-04 0.07 1.21E-04 0.07 -0.08	6.33E-05 0.10 6.33E-05 0.10 0.08				
1.27E-04 0.09 1.27E-04 0.09 -0.06	1.26E-04 0.06 1.26E-04 0.06 0.06	1.23E-04 0.06 1.23E-04 0.06 0.03	1.23E-04 0.06 1.23E-04 0.06 -0.09	1.21E-04 0.07 1.21E-04 0.07 -0.01	6.26E-05 0.10 6.28E-05 0.10 -0.22			
6.54E-05 0.10 6.53E-05 0.10 0.06	1.26E-04 0.07 1.26E-04 0.07 -0.08	1.24E-04 0.06 1.24E-04 0.06 0.04	6.40E-05 0.07 6.41E-05 0.07 -0.09	1.24E-04 0.06 1.24E-04 0.06 -0.10	1.23E-04 0.07 1.23E-04 0.07 -0.08	1.22E-04 0.09 1.22E-04 0.09 -0.42		
1.24E-04 0.09 1.24E-04 0.09 -0.02	1.23E-04 0.07 1.23E-04 0.07 -0.03	5.92E-05 0.08 5.92E-05 0.08 0.04	1.22E-04 0.06 1.22E-04 0.06 0.01	1.22E-04 0.06 1.22E-04 0.06 -0.16	5.86E-05 0.08 5.86E-05 0.08 -0.05	1.21E-04 0.07 1.22E-04 0.07 -0.27	1.21E-04 0.09 1.22E-04 0.09 -0.44	
1.23E-04 0.10 1.23E-04 0.10 -0.11	1.22E-04 0.07 1.22E-04 0.07 -0.01	1.20E-04 0.07 1.20E-04 0.07 -0.04	1.22E-04 0.07 1.22E-04 0.07 0.03	1.22E-04 0.07 1.22E-04 0.07 -0.22	1.20E-04 0.07 1.20E-04 0.07 -0.11	1.22E-04 0.07 1.22E-04 0.07 -0.01	1.23E-04 0.08 1.23E-04 0.08 -0.23	1.23E-04 0.11 1.23E-04 0.11 -0.03

mccard sd(%)
mcnp sd(%)
error(%)
unit=mev/gm
in pellet region

UO2 Rod
GAD Rod
Guide Tube
B4C Rod

그림 4. Track Length Estimate of Heating for Photon(2D Assembly)

3.03E-03 0.12 3.02E-03 0.12 0.19	2.90E-03 0.11 2.90E-03 0.11 0.08							
2.95E-03 0.11 2.95E-03 0.11 0.02	2.82E-03 0.08 2.81E-03 0.08 0.16	2.70E-03 0.11 2.70E-03 0.11 -0.05						
	2.76E-03 0.08 2.77E-03 0.08 -0.20	2.57E-03 0.08 2.57E-03 0.08 0.06						
2.75E-03 0.11 2.74E-03 0.11 0.29	2.50E-03 0.08 2.50E-03 0.08 -0.07		2.35E-03 0.08 2.35E-03 0.08 0.07	1.66E-04 0.08 1.65E-04 0.08 0.13				
2.72E-03 0.11 2.72E-03 0.11 -0.02	2.55E-03 0.08 2.55E-03 0.08 0.00	2.39E-03 0.08 2.39E-03 0.08 0.01	2.54E-03 0.08 2.55E-03 0.08 -0.09	2.56E-03 0.08 2.56E-03 0.08 -0.06				
	2.61E-03 0.08 2.61E-03 0.08 0.04	2.46E-03 0.08 2.46E-03 0.08 -0.32		2.59E-03 0.08 2.59E-03 0.08 -0.02	2.49E-03 0.08 2.49E-03 0.08 0.02	2.41E-03 0.11 2.42E-03 0.11 -0.15		
2.58E-03 0.11 2.59E-03 0.11 -0.30	2.37E-03 0.08 2.37E-03 0.08 0.06		2.39E-03 0.08 2.39E-03 0.08 -0.04	2.34E-03 0.08 2.34E-03 0.08 -0.07		2.31E-03 0.08 2.31E-03 0.08 -0.13	2.43E-03 0.11 2.43E-03 0.11 0.13	
2.46E-03 0.12 2.46E-03 0.12 0.00	2.37E-03 0.09 2.37E-03 0.09 0.04	2.23E-03 0.09 2.23E-03 0.09 0.17	2.34E-03 0.08 2.34E-03 0.08 0.02	2.34E-03 0.08 2.34E-03 0.08 -0.04	2.26E-03 0.09 2.26E-03 0.09 0.05	2.38E-03 0.09 2.38E-03 0.09 -0.07	2.47E-03 0.09 2.48E-03 0.09 -0.23	2.51E-03 0.13 2.52E-03 0.13 -0.23

mccard sd(%)
mcnp sd(%)
error(%)
unit=mev/gm
in pellet region

UO2 Rod
GAD Rod
Guide Tube
B4C Rod

그림 5. Track Length Estimate of Fission Heating(2D Assembly)

6. 결론 및 향후과제

이 연구에서는 MCCARD의 감마선 수송계산능을 개발하였으며, MCNP 계산결과와의 비교를 통해서 계산능을 검증하였다. MCCARD의 감마선 수송계산을 통해 중성자 모사과정에서 발생하는 감마선속(gamma flux)과 감마선의 궤적길이에 의한 에너지의 영역별 분포(track length estimate of energy deposition)를 계산할 수 있게 되었다. 이러한 계산을 통해서 핵분열반응에 의해 발생되는 에너지를 중성자와 감마선의 거동을 통해 전달되는 에너지의 공간분포로 보다 정확하게 기술할 수 있게 되었다. 즉, 핵분열 에너지를 중성자와 감마선의 기여분으로 구분하여 모사할 수 있게 되었고, 또한 연료소자 영역, 피복재 영역, 감속재 영역 등으로 나누어 계산할 수 있게 되었다.

그러나, MCCARD의 중성자 및 감마 수송계산을 통한 에너지의 영역별 분포계산에는 핵분열생성물의 붕괴에서 발생하는 지발베타선과 지발감마선에 의해 전달되는 에너지에

대한 고려는 불가능하다. 향후과제로서 이에 대한 보완을 진행할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Hyung Jin Shim, Chang Hyo Kim, etc, “Monte Carlo Depletion Analysis of a PWR with the MCNAP,” M&C 1999 Madrid, Spain, 1999.

[2] J. F. Briesmeister, “MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C”, LA-13709-M, December 2000.

[3] L. L. Carter and E. D. Cashwell, “Particle-Transport Simulation with the Monte Carlo Method”, TID-26607, 1975.

[4] R. C. Little and R. E. Seamon, “Neutron-Induced Photon Production in MCNP”, LA-UR-83-1123, May 1983.

[5] R. N. Blomquist and E. M. Gelbard, “An Assessment of Exiting Klein-Nishina Monte Carlo Sampling Methods”, *Nucl. Sci. and Eng.*, 83, 380-384, 1983.

[6] H. Kahn, “Applications of Monte Carlo,” AECU-3259, The RAND Corp., 1954.

[7] L. Koblinger, “Direct Sampling from the Klein-Nishina Distribution for Photon Energies Above 1.4MeV”, *Nucl. Sci. and Eng.*, 56, 218, 1975.

[8] C. J. Everette and E. D. Cashwell, “MCP Code Fluorescence-Routine Revision”, LA-5240-MS, May 1973.

[9] H. Grady Hughes, “Information on the MCPLIB02 Photon Library”, LANL internal memorandum X-6:HGH-93-77, January 1993.