

두꺼운 감마선 차폐체 문제에 대한 분산감소기법연구

윤 정 현, 최 병 일, 이 인 구
한국원자력연구소부설 원자력환경관리센터

조 규 성
한국과학기술원

요 약

확률론적 방법을 이용한 MCNP4A 전산코드를 이용하여 두꺼운 차폐체내에서 효과적인 분산감소기법에 대하여 가장 단순화된 모델을 이용하여 고찰하여 보았다. 등방점선원과 이를 둘러싼 반경 50cm의 납차폐체를 계산을 위한 모델로 사용하여 차폐체 내부 각 영역과 외부에서의 평균선속을 계산하였다. 분산감소기법으로는 구역분할법과 Exponential transform을 적용하여 각 구역에서의 분산의 변화를 비교하였다. 계산결과 두꺼운 차폐체문제에서는 exponential transform이 가장 효과적인 분산감소기법으로 나타났고 이때 구역분할법을 통하여서는 상대오차의 크기를 더욱 줄일 수 있었다.

1. 서 론

확률론적 방법을 이용한 방사선차폐해석 문제에서 계산결과값의 분산을 줄이는 것은 계산결과에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 필수적인 과정이다.[1] 특히 감마선이 두꺼운 차폐체를 통과하는 경우, 많은 수의 입자들이 차폐체 내부에서 대부분 감쇄되어 외부로의 방출이 극단적으로 감소하게 된다. 확률론적 방법을 이용한 계산을 수행할 때 통계적인 처리에 충분한 수의 입자가 차폐체 외부에서 수집되어야 하고 계산 결과 값의 분산을 최소화하기 위해서는 분산감소기법(Variance Reduction Technique)의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 사용후핵연료 수송용기(Spent fuel shipping cask)[2], 방사선시설의 핫셀(hot cell)등과 같은 매우 두꺼운 차폐체의 방사선문제를 일반화하여 감마선등방점선원(gamma-ray isotropic point source)과 반경 50cm 두께의 구형 납차폐체에 대한 차폐체내에서의 분산감소기법을 연구하기 위하여 몬테카를로 방법의 MCNP4A 전산코드를 사용하여 수행하였다.

본 연구의 목적은 확률론적 방법의 전산코드를 이용하여 두꺼운 차폐체에 대한 방사선차폐해석문제를 단순화하여 실제 해석을 수행하였을 때 계산시간과 분산을 최소화하는 일반적인 방법과 절차를 제시하여 보는 것이다

2. 감마방사선원

본 연구를 위하여 방사선원에 대한 몇 가지 조건을 설정하였다. 감마선동방접선원은 원자로에서 3주기 연소된 사용후핵연료에서 방출되는 감마선 에너지 스펙트럼을 그대로 가지는 것으로 가정하였고, 선원으로부터 방출되는 총 감마선의 세기는 100 ci, 즉 3.7×10^{12} photons/sec에 해당한다고 가정하였다. 특히 사용후핵연료로부터 방출되는 방사선원의 에너지구조에 대한 계산은, 사용후핵연료의 경우 많은 종류의 핵분열생성물과 초우라늄 원소가 생성되므로, 간단한 계산식에 의한 추정으로는 그 정확도를 기할 수가 없다. 이에 따라 사용후핵연료에서 방출되는 방사선원의 계산은 행렬지수법을 이용하여 각종 동위원소별 생성과 감손을 계산하는 ORIGEN-2[3] 전산코드를 사용하였다. 감마방사선원으로 대표되는 사용후핵연료의 조건은 PWR 17 x 17 배열 집합체로 37.5 MW/MTU의 평균출력(specific power)로서 연소된 총 연소도 40,000 MWD/MTU의 핵연료를 사용후핵연료 저장조에서 10 년동안 냉각한 것을 기준으로 하였으며 이 핵연료에서 나오는 에너지 스펙트럼은 그림 1에 나타내었다. 그림에서 나타낸 에너지 스펙트럼에서 각 에너지 영역에 대한 구분은 DLC-23/Cask library[4]의 핵단면적구조중 감마선 spectrum을 구분할 구조로 표시하였으며 가장 비중이 높게 나타난 에너지 영역은 0.5 MeV에서 1.25 MeV사이의 구간으로 나타났다.

3. 계산모델

분산감소기법을 위한 MCNP4A[5] 차폐계산시 감마방사선원과 이 선원을 둘러싼 모델의 형태는 구형을 이루고 있다. 구의 중심에 위치한 방사선원은 PWR 핵연료의 조성과 같은 UO_2 로 이루어진 점선원이 위치한 것으로 하여 선원영역에서의 자기차폐효과(self shielding effects)로 인한 영향을 무시할 수 있도록 하였다. 구의 반지름은 50 cm로 1 MeV 감마선에 대한 납의 반가층 1.2 cm의 40배 이상으로 설정하여 방사선원으로 부터의 입자들이 충분히 차폐되는 크기로 정하였다. 선원을 둘러싼 차폐체로는 일반적인 감마선차폐체로 가장 흔히 쓰이는 납을 선택하였고 영역 내에서의 감마선속과 분산의 변화를 수집(scoring)할 수 있도록 납영역은 1 MeV 감마선의 반가층의 3배정도인 3 cm

간격으로 18개의 임의구간으로 나누었다. 그림 2에는 본 연구를 위한 계산모델을 나타내었고 표 1에는 계산을 위한 조건들을 정리하여 나타내었다. 구의 외부영역에서의 입자가 가지는 중요도는 0으로 설정하여 구표면으로 부터 탈출한 입자들이 다시 구의 내부로 재입사되는 효과를 배제하였다.

본 연구에서는 계산모델내의 각 구간에서 면적당 평균입자선속을 수집할 수 있는 F2 tally를 사용하였다.

4. 분산감소기법(Variance Reduction Technique)

선원으로 방출되는 입자들의 분포는 그림 3과 같이 차폐체내를 방사적으로 퍼져 나가면서 입자의 갯수는 지수함수적으로 감소하게 되는 것이 가장 일반적인 현상이다. 그림에서 보듯이 선원에 가까운 영역 A와 선원으로부터 떨어진 영역 B에서 수집되는 입자의 갯수는 상당히 많은 차이가 나게 된다. 확률론적방법을 이용한 계산에서는 해당문제가 허용할 수 있는 상대오차내에서 계산에 걸리는 시간을 줄이는 것이 가장 합리적인 계산방법이라고 할 수 있다. MCNP4A 계산의 효율은 계산시간과 상대오차를 이용한 FOM(Figure of Merit)으로 표시 하는데 그 정의는 다음과 같다.

$$FOM = \frac{1}{R^2 T} \quad R : \text{relative error} \quad T : \text{calculation Time}$$

즉, 상대오차와 계산결과를 얻는데 걸리는 계산시간이 작게 되면 FOM의 크기가 증가하게 된다. 표 2에는 계산 결과에 포함된 상대오차의 크기와 이에 따른 통계적 의미들을 나타내었다. 상대오차와 계산시간을 합리적으로 줄이고 계산결과를 얻게 하는 기법을 분산감소기법이라고 하며 특히, 두꺼운 차폐체 문제에서는 올바른 분산감소기법을 사용하여 계산시간을 수백분의 일로까지 줄일 수 있게 된다. 실제로 MCNP4A 전산코드 내에서는 이런 점을 고려하여 여러가지 분산감소기법을 제공하고 있다. 분산감소기법을 올바르게 사용하기 위하여 문제의 특성과 분산감소기법의 특성을 잘 분석하여 적용하여야만 계산결과를 신뢰할 수 있다. 본 연구를 통해 차폐해석 문제를 확률론적인 해석 방법으로 풀기 위하여 MCNP4A내에서 제공하고 있는 여러가지 분산감소기법을 분석한 결과 다음 방법들에 의한 해석이 두꺼운 차폐체문제에 있어서 가장 합리적인 계산 결과를 도출하는 것으로 나타났다. 첫째, 영역분할(Zone splitting)에 의한 Importance Sampling 방법, 이 방법은 각 분할 영역당 차폐체를 통과한 후의 입자들의 중요도는 줄이고 입자들의 갯수는 늘이는 방법으로 수집되는 입자의 갯수를 증가시키는 방법이

다. 둘째, 결과의 방향에 기여하지 못하는 낮은 에너지의 입자를 제거하여 필요 없는 계산시간을 줄이는 Energy-cutoff 그리고 셋째, 선원으로부터 방출되는 입자들의 방향 벡터를 편향케하여 선원방향으로 되돌아가는 입자들에 의한 영향을 최대한 배제하는 exponential Transform 등이 있다.

5. 결과 및 고찰

MCNP4A로 계산한 구의 내부 각 영역과 외부에서의 단위 면적당 선속과 상대오차를 표 3에 나타내었고 이때 계산결과로 부터의 FOM 값들을 그림 4와 같은 형태로 그래프에 도시하여 나타내었다. 위의 결과를 고찰해보면 어떤 분산감소기법도 적용하지 않았을 경우에는 구의 중심에서 15cm 정도 떨어진 영역에서 계산결과들의 상대오차가 20%를 넘어 수용범위를 넘어서고 15cm 이상의 경우는 결과예측을 위한 자료가 수집되지 않는 것으로 나타났다. 분산감소기법중 영역분할에 의한 importance sampling 방법만을 적용하였을 경우는 구의 중심에서 15cm 구간까지는 상대오차가 수용범위를 이내에 드는 결과를 나타내며 15cm 이상에서는 통계적인 수치를 결정할 수 있는 자료가 수집되지 않는 것으로 나타났다. Exponential transform 분산감소기법만을 이용한 계산 결과는 40cm 까지는 수용범위이내의 상대오차를 포함하는 결과를 나타냈으며 그 이상에서는 오차가 크게 나타났다. 마지막으로 위의 두가지 분산감소기법을 함께 이용하여 계산한 결과는 40cm 이상에서까지 오차가 수용범위이내에 드는 것으로 나타났으며 FOM의 결과를 분석하여도 이상에 기술한 것과 유사한 추이를 보이는 것으로 나타났다. 결론적으로는 다음과 같은 결론을 유도할 수 있었다. 두꺼운 차폐체에서는 exponential transform 방법이 가장 효과적이며 영역분할에 의한 importance sampling을 함께 사용할 경우 FOM이 2배이상 증가하는 효과가 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] T. E. Booth, "A Sample Problem for Variance Reduction in MCNP." Los Alamos National Laboratory report LA-10363-MS 1985.
- [2] 강희영 등, "KSC-4 수송용기의 안전성분석보고서," KAERI/TR-137/89, 1989.
- [3] A.G. Croff, A Users Manual for the ORIGEN-2 Computer Code, ORNL/TM-7175, 1980.
- [4] G.W. Morison, E.A. Stracker, and R.H. Odegaden, "CASK : 40 Group Couple Neutron and Gamma-ray Cross Section Data" DLC-23/CASK, 1974.

- [5] MCNP-4A General Monte Carlo Code for Neutron and Particle Transport, LA-7396-M Rev. 2, Los Alamos Monte Carlo Group, Los Alamos National Laboratory, 1993.

⌘ 1. Computational Conditions

Contents	Conditions
Source	Gamma-ray point source 100 ci
Source energyspectrum	Equivalent to that of PWR spent fuel
Shielding material	Lead radius 50cm
No. of segment	18 segments of 3cm each
Tally type	F2 (averaged surface flux)

⌘ 2. Guidelines for Interpreting the Relative Error R

Range of R	Quality of the Tally
0.5 to 1	Garbage
0.2 to 0.5	Factor of a few
0.1 to 0.2	Questionable
< 0.10	Generally reliable except for point detector
< 0.05	Generally reliable for point detector

⌘ 3 Averaged Surface Fluxes and (Relative Errors) as a function of Radius Lead thickness

VRT(Variance Reduction Technique) Conditions	Radius Lead thickness (cm)			
	9	15	33	45
1. None of VRT	4.76E05 (0.1042)	4.53E03 (0.5897)	-*	-
2. Importance Sampling No Exponential Transf.	4.16E05 (0.0619)	3.65E03 (0.2494)	-	-
3. No Importance Sampling Exponential Transform	3.90E05 (0.0612)	3.12E03 (0.0681)	1.04E-01 (0.1636)	8.24E-06 (0.3393)
4. Importance Sampling Exponential Transform	4.19E05 (0.0408)	3.19E03 (0.0582)	1.31E-01 (0.1357)	1.89E-05 (0.1499)

* means no value scored

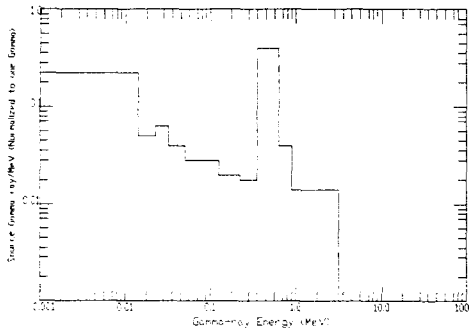


그림 1. Gamma-ray Normalized Spectrum

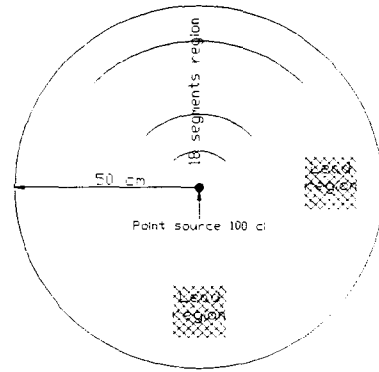


그림 2. Shielding Calculational Model

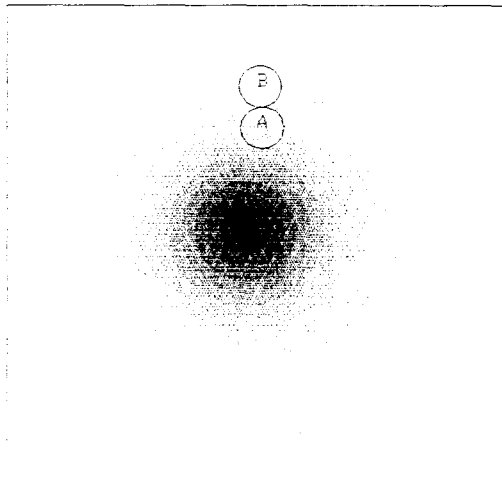


그림 3. Radial Distribution of Particles

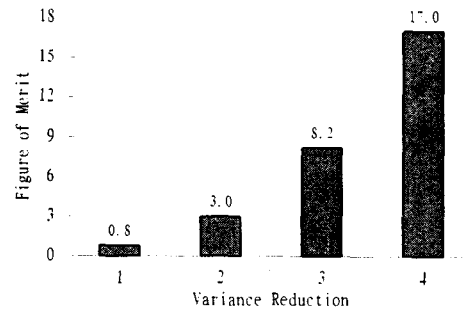


그림 4. FOM according to VRT