

‘2000 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 광자 수송용 Voxel 몬테칼로 코드 개발(I)

### Development of a Voxel Monte Carlo Code for Photon Transport(I)

박성호, 김종경

한양대학교  
서울 성동구 행당동 17

#### 요 약

CT 및 MRI 자료에 근거한 몬테칼로 계산을 수행하기 위해 광자 수송용 Voxel 몬테칼로 코드를 개발하였다. 물질자료는 National Institute of Standards and Technology(NIST)의 M.J.Berger 팀이 개발해 인터넷(physics.nist.gov/PhysRefData)에서 제공하는 자료를 사용하였으며, 광전효과, 콤프턴 산란, 전자 쌍생성을 모델링 하였다. Pentium-III 650MHz 환경에서 MS사의 Visual C++ 6.0을 사용하여 프로그래밍하였으며  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 의 물팬텀의 중앙에 단일에너지 광자 빔이 입사할 때 깊이에 따른 흡수선량을 계산하여 범용 몬테칼로 코드인 MCNP 4B의 결과와 비교하였다. 비교결과 10 MeV 입사시 최대 1.6 %의 오차를 보였다. 또한 물팬텀의 크기를  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 으로 고정시킨 뒤 Voxel의 크기를 1 cm, 0.5 cm, 0.25 cm로 각각 변화시키면서 물팬텀내에서의 흡수선량 분포를 계산한 결과 오차 2% 이내에서 상호 일치하는 것으로 나타났다.

#### Abstract

A Voxel Monte Carlo code was developed for photon transport calculation by employing CT and MRI data. The material data was obtained by internet provided by M.J.Berger in NIST, and the photoelectric effect, Compton scattering, and pair production were modeled. It was programmed under Pentium-III 650 MHz computer with MS Visual C++ 6.0. Mono energy photon was incident on  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  water phantom to calculate the depth dose

distributions and the results were compared with MCNP results. In the comparison, for 10 MeV incident photon the maximum discrepancy was 1.6 %. The depth dose distributions were also calculated by varying the voxel size from 1 to 0.25 cm. The results are well agreed each other.

## 1. 서 론

방사선 암치료시 방사선치료계획(Radiation Treatment Planning, RTP)은 방사선 치료의 성패를 결정짓는 중요한 작업이다. 최근 전산기의 발달로 인해 치료계획 시스템에 몬테칼로 방법을 적용하는 연구가 활발히 연구 중에 있으며 영상기술의 발달로 CT 및 MRI의 영상자료를 치료계획에 바로 사용 가능하도록 Voxel용 코드개발이 활발히 연구중에 있다. 이번 연구에서 방사선치료 계획에 사용 가능하도록 Voxel 광자 수송용 몬테칼로 코드 1단계를 개발하였다.

## 2. 광자수송용 Voxel 몬테칼로 코드의 특성

### 2.1 광자 반응자료

불과 몇 년전만 하더라도 문헌이나 범용 코드에 내장되어 있는 자료를 사용자가 별도 처리하여 연구에 사용하여야 하였으나 최근 몇 년간 인터넷의 발달로 인터넷에서 바로 원하는 자료의 수집이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 National Institute of Standards and Technology(NIST)의 M.J.Berger 팀이 개발해 인터넷([physics.nist.gov/PhysRefData](http://physics.nist.gov/PhysRefData))에서 제공하는 자료를 물질 자료로 사용하였다. 물팬텀내에서 광자의 감쇄계수를 그림 1에 도시하였다.

### 2.2 개발환경

Pentium-III 650MHz 환경에서 MS사의 Visual C++ 6.0을 사용하여 프로그래밍 하였다. 프로그램에 사용된 난수는 MS Visual C++ 컴파일러에서 제공하는 rand() 함수를 사용하였다. rand() 함수는 0~32767 까지의 정수값을 반환하므로 0~1까지의 실수로 반환하는 Random() 함수를 만들어서 사용하였다.

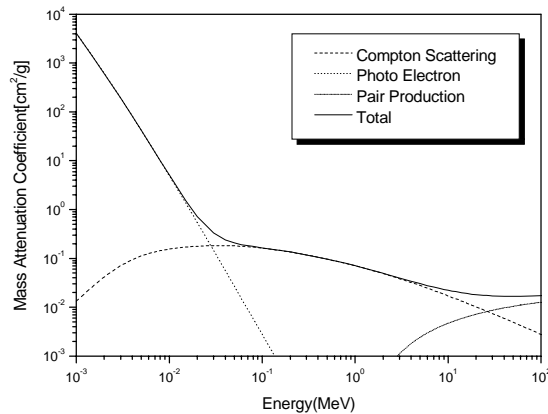


그림 1. 물 펠름에서 광자의 감쇄계수

### 2.3 광자 반응 모델링

방사선 치료에 사용되는 광자빔은 일반적으로 4 MV 이상의 고에너지 가속기가 사용되므로 고에너지 광자의 수송을 모델링 해야 한다. 이러한 측면에 초점을 맞추어 광자의 반응을 모델링 하였다.

#### - Rayleigh 산란현상

저에너지 부분에서는 광전효과에 비해 크게 적으며 1MeV 이상의 에너지에서는 콤프턴 산란에 비해 상당히 적다. 저에너지의 정확한 모델링이 필요한 경우를 제외하고는 Rayleigh 산란현상을 무시 하는 것이 일반적이므로[1] 본 연구에서도 무시하였다.

#### - 광전효과

광전효과가 발생하면 광자는 에너지를 모두 잃는 것으로 모델링 하였으며, 생성된 전자는 그 지점에서 모두 흡수된다는(커마 근사) 가정을 사용하였다. 추후 전자 수송에 대한 모듈이 추가 개발되면 광전효과로 발생한 전자의 추가 추적을 수행할 예정이다.

#### - 콤프턴 산란

산란후 광자의 에너지는 Klein-Nishina 식을 사용하여 샘플링 하였으며 1.4 MeV 이하의 입사 에너지를 가지는 경우 Kahn이 제시한 기법[2]을 사용하였고 1.4 MeV 이상의 경우 Koblinger가 제시한 기법[3]을 사용하였다.

#### - 전자 쌍생성

생성된 전자/양전자 쌍은 전자 쌍생성이 발생한 지점에서 흡수된다고 가정하였으며 다만 양전자의 소멸현상에 의한 소멸방사선은 0.511 MeV의 광자 2개를 발생시켜 계속 수송시켰다. 이 부분도 추후 전자수송에 대한 모듈이 추가 개발되면 전자/양전자도 추가로 추적할 예정이다.

### 2.4 에너지 흡수계산

몬테칼로 방법을 사용하는 코드에는 에너지 흡수를 계산하는 몇 가지 방법이 존재한다. 그중 물리적 현상과 마찬가지로 광자에서 생성된 전자가 물질과의 충돌에 의해 전자의 궤적을 따라 에너지를 물질에 퇴적시키는 방법이 사용되기도 한다. 그러나 이 방법은 신뢰할만한 통계적 오차값에 근접하기 위해 전산 시간이 많이 소요되기 때문에 그렇게 선호되는 기법은 아니다. 일반적으로 많이 사용되는 방법은 광자의 궤적(소위 track)을 사용해 에너지 흡수를 계산하는 방법이다. 이는 MCNP 코드[4]의 경우 에너지 흡수 계산을 위해 제공하는 F6 Tally 기법으로써 에너지 플루언스와 선형에너지 흡수계수의 곱으로 에너지 흡수를 계산하는 방법이다. 이를 수학적으로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{Response} = \int E \phi \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{mat} dE$$

이번 연구에서는 MCNP 코드와의 비교를 위해 MCNP의 F6 Tally 와 같은 기법을 사용하여 관심지점에서의 에너지 흡수를 계산하였다. 추후 2단계에서 몇가지 에너지 흡수 기법을 추가로 개발할 예정이다.

## 3. 벤치마킹

### 3.1 광자 수송코드 벤치마킹

이번 연도에 개발된 코드를 MCNP 4B와 벤치마킹 하였다.  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 의 물팬텀의 중앙에 단일에너지 광자 빔이 입사할 때 깊이에 따른 흡수선량을 계산하였다. 광자의 입사에너지는 1 MeV, 2 MeV, 3 MeV, 4 MeV, 5 MeV, 6 MeV, 7 MeV, 8 MeV, 9 MeV, 10 MeV로 하였으며 흡수선량을 계산하는 영역은 입사위치를 중심으로  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 의 정사각형을 설정하여 일정한 두께(1 cm)별로 흡수선량을 계산하였다. MCNP 계산시 광자 수송에 simple physics를 적용하였으며 제동복사광자 생성을 억제하는 옵션을 사용하였다. 계산결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 하단부가 1 MeV 광자 입사시이고 그림 상단부가 10 MeV 광자 입사시이다. 두 코드 계산결과와의 오차는

1 MeV의 경우 1% 미만이고 10 MeV의 경우 최대 1.6% 정도의 오차를 나타내는 것으로 계산되었다.

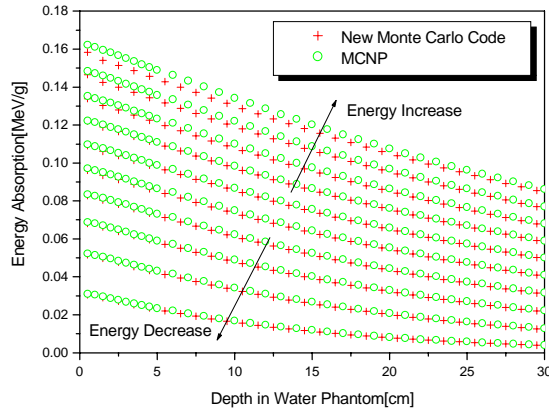


그림 2. 단일에너지 광자 입사시 물팬텀 내에서의 흡수선량분포

### 3.2 Voxel 크기 변화에 따른 흡수선량 분포계산 및 속도 비교

추후 2단계에서 개발되는 코드는 CT 또는 MRI를 사용함에 따라 Voxel의 크기를 변화 시켜야 된다. 따라서 Voxel의 크기를 변화시켜가면서 동일한 계산을 수행하여 계산의 결과가 Voxel의 크기와 관계없이 일치함을 평가하였다. 물팬텀의 크기를  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 로 고정시킨 뒤 Voxel의 크기를 1 cm, 0.5 cm, 0.25 cm로 변화시키면서 물팬텀내에서의 흡수선량 분포를 계산하여 비교하였다. 그림 3에서 보듯이 흡수선량 분포는 Voxel의 크기에 관계없이 일치함을 확인하였다.

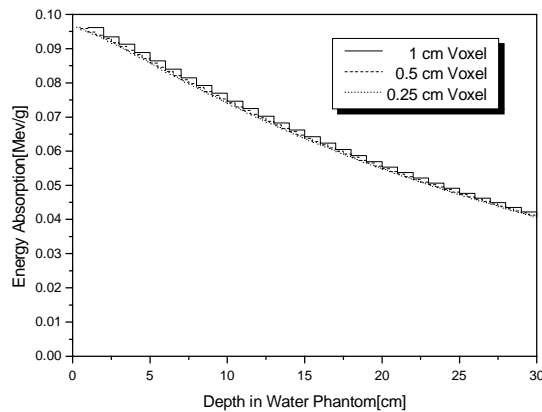


그림 3. 5 MeV 광자가 입사할 때 Voxel 크기 변화에 따른 흡수선량 분포

각각의 경우 100,000개의 이력을 주어 계산하였는데 각 계산의 Voxel 분할 수 및 계산 시간을 표 1에 정리하였다.

표 1. Voxel 크기 변화에 대한 계산시간

Voxel 크기	Mesh 수	계산시간(초)
1 cm	30×30×30	16
0.5 cm	60×60×60	30
0.25 cm	120×120×120	57
MCNP*	-	69

\* MCNP계산의 경우 HP C200에서 수행하였으며 1 cm 크기의 셀에서 계산하였다.

#### 4. 결 론

이번 연구를 통하여 고에너지 수송해석에 적합한 광자 수송용 몬테칼로 코드의 1단계 개발을 완료하였으며, 이는 CT 및 MRI 의 영상자료를 코드의 입력에 직접 사용 가능한 Voxel용 코드이다. 개발된 코드를 MCNP 계산과 비교한 결과 일치함을 보였으며, Voxel 크기 변화에 대한 영향이 계산결과에 미치는 영향이 없음을 확인하였다. 전자수송부분에 대한 보강, 에너지 흡수계산을 위한 tally 모듈의 개발 부분 보강, 비균질 매질내에서의 벤치마킹, CT 및 MRI 영상자료를 이용한 계산 등은 2단계 추가 연구에서 수행될 것이다.

감사의 글 : 이 연구는 한국과학기술평가원의 원자력기초연구 지원 프로그램에 의해 수행되었음

#### 참 고 문 헌

1. R.E. Faw, "Radiological Assessment," PTR Prentice-Hall, 1993.
2. H. Kahn, "Applocations of Monte Carlo," AEC-3259 The Rand Corporation, 1956.
3. L. Koblinger, "Direct Sampling from the Klein-Nishina Distribution for Photon Energies Above 1.4 MeV," Nucl. Sci. Eng., 56, 218(1975).
4. J.F. Briesmeister, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.