

전자빔 입사시 물의 깊이에 따른 흡수선량 분포 비교
: EGSnrc, EGS4, MCNP4C 및 MCNP4B 비교

A Comparison of Depth Dose Distributions for Electron Beams
Incident on Water by Using EGSnrc, EGS4, MCNP4C, and MCNP4B

김재천, 김종경, 박성호, 김용균

한양대학교

서울 성동구 행당동 17번지

요 약

EGSnrc, EGS4, MCNP4C 및 MCNP4B 전산코드를 이용하여 0.025 MeV부터 4 MeV 사이의 에너지를 갖는 전자빔(Broad Parallel Beam of Electron)이 물에 입사할 때 물의 깊이에 따른 흡수선량 분포(Depth Dose Distribution)를 계산하고 비교하였다. 물의 깊이에 따른 흡수선량 분포를 비교한 결과 EGSnrc, EGS4, MCNP4C 및 MCNP4B 전산코드는 평균적으로 2~3% 차이 내에서 서로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 물에서의 전자의 평균도달거리(Mean Range) 중간지점인 R_{50} 을 기준으로 MCNP계열의 코드들은 EGS계열의 코드에 비해 R_{50} 이내($Z/r_E < 0.5$)에서 상대적으로 낮게, R_{50} 이후($Z/r_E > 0.5$)에는 상대적으로 높게 흡수선량을 평가하는 것으로 나타났다. EGSnrc와 EGS4의 흡수선량 차이는 약 3%에 달하는 데 반해 ETRAN 모델을 기반으로 하는 MCNP4C와 MCNP4B 끼리는 흡수선량의 차이가 약 0.5%에 불과한 것으로 나타났다. 높은 입사 에너지를 갖는 전자빔에서는 EGSnrc 코드와 MCNP계열의 코드가 약 2% 이내로 잘 일치하는 반면 EGS4 코드의 경우 약 4.4%까지 차이가 나는 것으로 나타났다. 한편, 입사 에너지가 낮아질수록 MCNP계열의 코드들은 EGSnrc 계산결과와 비교하여 잘 맞지 않는 것으로 나타났고 25 keV에서 약 5%정도까지 차이가 나는 것으로 나타났다.

Abstract

Depth dose distributions for broad parallel beams of monoenergetic electrons of 0.025 to 4MeV, incident normally on water, using the EGSnrc, MCNP4C, and MCNP4B Monte Carlo code, are calculated and compared. The results of EGS4 carried out by Hanyang Univ. in 1993 were referred and compared each other. For the broad parallel beam, the absorbed doses at the water calculated by EGSnrc, EGS4, MCNP4C, and MCNP4B are agreed within 2 to 3% each other. MCNP4B/4C underestimated depth dose compared to the EGSnrc/EGS4 inner R_{50} and overestimated it outer R_{50} . These differences and tendency partially attributed to the different multiple scattering theories and Monte Carlo models for electron transport adopted in these codes. The difference between the

results of EGSnrc and EGS4 is about 3%, whereas the difference between MCNP4B and MCNP4C is very small within about 0.5%. There are some drastic changes in EGSnrc compared to MCNP4C. MCNP4C has a small change such as electron library and some transport options based on a Class I Monte Carlo Model whereas EGSnrc adopted new multiple scattering theory and new electron step algorithm such as PRESTA-II. At high energy electron beam, the results of EGSnrc agreed with MCNP4B/4C within 2% whereas the difference between EGSnrc and EGS4 is 4.4%. The difference between EGSnrc and MCNP4B/4C are increasing as incident energy decreases. The differences reaches about 5% at 25 keV.

서 론

평판형 물에 수직으로 입사하는 전자빔의 깊이에 따른 흡수선량 분포를 정확하게 계산하는 것은 대부분 물로 구성되어 있는 세포를 가진 인간에게 전자빔을 이용하여 방사선 치료를 수행하는 의료계에서는 매우 중요한 선결과제가 되어왔다. 흡수선량 분포를 정확하게 계산함으로써 방사선 치료에 따른 세포의 치료효과 및 주위세포에 미치는 방사선의 위해도를 정확하게 예측할 수 있다.

물의 깊이에 따른 전자빔의 흡수선량 분포 계산은 1991년 Cross와 Wong¹⁾, Berger 와 Seltzer²⁾, Roger와 Bielajew^{3,4)} 그리고 Prevo⁵⁾등이 각기 서로 다른 몬테칼로 코드를 이용하여 계산을 수행한 바 있으며 각 코드에서 사용하는 계산 알고리즘 및 사용된 Stopping Power 값에 따라 약간씩 상이한 결과를 보여주고 있다. 전자 및 광자 수송용 전산코드로는 National Bureau of Standards(NBS)에서 개발해온 ETRAN계열의 SANDYL, TIGER, CYLTRAN과 ACCEPT와 같은 Code Series가 있으며 Stanford Linear Accelerator Center(SLAC)을 통해 주도적으로 개발되어온 EGS계열의 Code Series들이 있다. EGS4 전산코드는 캐나다의 National Research Council Canada(NRCC)의 주도로 2000년도에 들어서 EGSnrc⁶⁾로 개선되었으며 Integrated TIGER Series(ITS) 전자 수송 모듈을 기반으로 하는 MCNP4B 역시 2000년도에 들어서 미국의 Los Alamos를 중심으로 MCNP4C로 새롭게 개선되었다.

EGS4는 전자의 Angular Deflection을 계산하기 위하여 Moliere Multiple-Scattering Theory를 사용하고 전자의 Collision Energy Loss에 대한 Class II Monte Carlo Model(이차전자의 생성을 정확하게 모사하는 모델)을 사용한다. 한편, EGSnrc는 EGS4와 같이 Class II Monte Carlo Model을 사용하지만 이외에도 새로운 Multiple Scattering Theory, 상대성 효과 및 Spin Effect를 포함하는 새로운 Electron Scattering Cross Section, 새로운 Electron-Step 알고리즘인 PRESTA-II 등을 포함하고 있어 전자/광자 수송에 대한 계산의 정확도가 향상되었다고 알려져 있다.

한편, ETRAN 모델을 기반으로 하는 MCNP4B와 MCNP4C는 EGS계열과는 달리 Angular Deflection을 위해 Goudsmit-Saunderson Multiple Scattering Theory를 사용하고 전자의 Collision Energy Loss시 이차전자의 생성을 실험적인 값으로 구하는 Class I Monte Carlo Model을 사용하고 있다. 한편, MCNP4C는 Stopping Power의 Density Effect Calculation이 가능해졌으며 기존의 Electron Cross Section 라이브러리 등이 개선되어 부분적으로 MCNP4B에 비해 계산의 정확성이 향상되었으리라 기대된다. 표 1은 2000년도에 들어 새롭게 개선된 EGSnrc 및 MCNP4C의 개선된 내용을 요약 정리하였다.

본 연구에서는 평판형 물에 수직으로 입사되는 전자빔의 흡수선량 분포를 2000년도를 기준으로 새로 개선된 EGSnrc 및 MCNP4C 계산 결과를 EGS4 및 MCNP4B 코드 계산 결과와 상호 비교하였다. EGSnrc, MCNP4C 및 MCNP4B 코드는 직접 계산을 수행하였으며 EGS4 전산코드 결과는 1993년 한양대에서 수행한 연구 보고서⁷⁾의 결과를 인용하였다.

표 1. EGSnrc 및 MCNP4C의 성능개선 내용

EGSnrc 성능개선 내용	MCNP4C 성능개선 내용
<ul style="list-style-type: none"> • Boundary Crossing Algorithm 개선 등 기존의 EGS4/PRESTA의 단점을 개선한 새로운 개념의 Electron Transport Algorithm을 도입. • Moliere Multiple Scattering Theory의 단점을 극복한 새로운 Multiple Scattering Theory가 도입되었으며 Cross Section에 Relativistic Spin Effect를 고려할 수 있도록 하였음. • Photo-electron의 Angular Distribution Sampling이 가능해짐. • Bremsstrahlung에 대한 Angular Sampling이 가능해짐. • 좀더 많은 NIST/ICRU 37 Stopping Power 값을 이용할 수 있도록 PEGS4 코드가 개선 됨. • 기존의 Random Number Generator를 업그레이드한 'luxury level'급 Random Number Generator를 제공함. 	<ul style="list-style-type: none"> • Electron Physics의 개선은 Integrated Tiger Series(ITS)를 근간으로 하고있음. • 기존의 ITS Series에 있던 Numerical Instability가 개선됨. • Stopping Power에 대한 Density Effect Calculation이 가능해짐. • Radiative Stopping Power, Bremsstrahlung Production, Impact Ionization같은 physics 부분이 개선되었음. • 기존의 'el' Electron Cross Section Library가 'el03'로 업그레이드 됨.

EGS 및 MCNP 코드를 이용한 모델링

EGSnrc 전산코드에는 특수한 계산목적에 알맞도록 정형화된 DOSRZnrc, FLURZnrc, CAVRZnrc, SPRRZnrc와 같은 NRC User Codes⁸⁾들이 있다. NRC User Codes 중 DOSRZnrc는 일반적인 Cylindrical Geometry 계산에 사용되는 프로그램으로서 흡수선량이나 매질내 Pulse Height Distribution을 구하는데 사용된다. 이번 연구에서는 EGSnrc내 DOSRZnrc 프로그램을 사용하여 25 keV부터 4 MeV사이의 10개의 단일 에너지를 갖는 전자빔을 평판형 물(Semi Infinite Water Slab) 표면에 수직방향으로 입사(Broad Parallel Normal Incident)한다고 가정하고 계산을 수행하였다.

MCNP4B 및 MCNP4C는 똑같은 Input을 사용하였으며 다만, MCNP4C에서 Electron Cross Section Library는 'el'에서 'el03'으로 수정하였으며 전자와 관련된 PHYS 카드 옵션중 새로 추가된 Substep 에서의 Bremsstrahlung Production 옵션을 적용하여 계산을 수행하였다. 한편, 선원량은 EGSnrc와 똑같이 25 keV부터 4 MeV사이에서 10개의 단일 에너지를 갖는 전자빔을 물에 수직으로 입사하도록 설정하여 계산을 수행하였다.

물은 각 에너지별 전자의 평균도달거리(Mean Range, r_E)를 24개로 일정하게 분할하였으며 각각의 실제 두께는 $0.025 \times r_E$ 로 하였다. 전자 및 광자의 Cuf-off 에너지는 1 keV로 하였으며 계산의 통계적 오차범위는 5% 이하로 수행하였다. 깊이 Z에서의 흡수선량 $J(Z/r_E, E)$ 를 구하기 위하여 DOSRZnrc에서는 IFULL카드를 Dose and Stoppers로 설정하여 해당 셀에서의 단위질량당 흡수선량을 구한 뒤 각 셀의 질량을 곱하여 흡수선량을 구하였으며 이와는 달리 MCNP4B와 MCNP4C에서는 *F8 Tally를 이용하여 해당 셀에서의 총 흡수선량을 직접 계산하였다. 또한 흡수선량 분포는 입사 전자의 에너지에 대한 전자의 r_E 의 비를 곱하여 무차원화 시켰으며 무차원화 된 흡수선량은 아래의 식과 같이 구하였다.

$$j(Z/r_E, E) = J(Z/r_E, E) \times r_E/E$$

그림 1은 전자빔에 의한 물에서의 흡수선량 분포를 구하기 위해 DOSRZnrc 코드로 작성한 평판형 물의 기하학적 구조를 나타내고 있다. 그림 1의 기하학적 형태는 입력자료의 기하학적 구조를 2차원으로 보여주는 EGSnrc의 previewRZ라는 프로그램을 이용하여 나타내었다. 그림 2에서 보는바와 같이 전자빔은 평판형 물의 표면에서 수직하는 방향으로 입사되도록 모델링 하였으며 Z-축으로 입사되는 전자빔의 에너지에 따라 물에서의 전자의 평균도달거리를 24개로 분할하여 깊이 이에 따른 물에서의 흡수선량을 계산하였다. 흡수선량은 그림 2에서 보는바와 같이 내부의 H₂O Detection Area에서의 흡수선량만을 고려하였으며 각 분할영역에서 매질의 Z축에 대한 깊이별 흡수선량의 평균값으로 계산하였다.

EGSnrc 계산결과에 사용된 모델에서는 진공상태에서 전자빔이 입사된다고 가정하였다. 물로 입사되는 전자빔은 진공상태가 아닌 공기 중에서 들어올 경우 물->공기->물로의 Double Back Scattering 효과³⁾가 존재하는데 흡수선량의 통계적인 불확실성과 비교하여 그 크기가 무시할만하다고 알려져 있어 이를 고려하지 않았다.

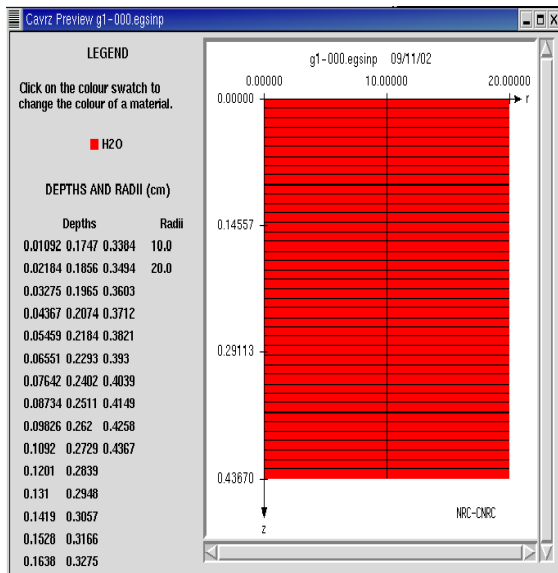


그림 1. EGSnrc 코드의 previewRZ를 이용하여 분 평판형 물의 기하학적 형태

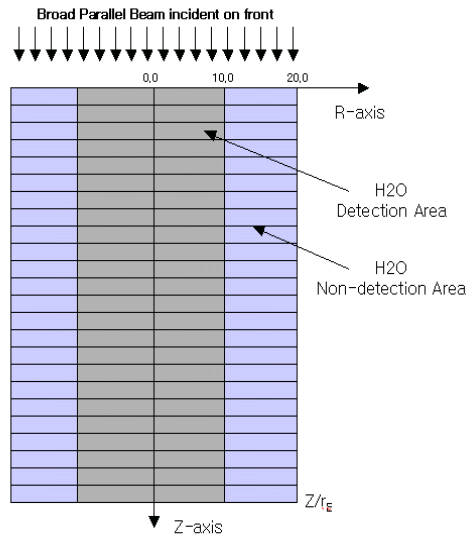


그림 2. 깊이에 따른 물의 흡수선량분포 계산을 위해 사용된 전자빔과 분할된 평판형 물의 기하학적 형태

물의 깊이에 따른 흡수선량 분포 계산 결과

EGSnrc, EGS4, MCNP4C 및 MCNP4B 전산코드를 이용하여 물의 깊이에 따른 흡수선량 분포를 비교한 결과 표 2에서 보는바와 같이 25 keV ~ 4 MeV 에너지 구간에서 각 코드간 흡수선량의 차이는 평균적으로 2~3%정도인 것으로 나타났다.

2. EGSnrc

RMS

입사에너지 (MeV) 전산코드	0.025	0.050	0.100	0.200	0.400	0.700	1.000	2.000	4.000	평균
EGS4	2.77%	2.09%	3.52%	2.36%	3.03%	3.13%	3.03%	2.74%	4.40%	3.01%
MCNP4B	4.92%	3.20%	2.27%	2.10%	2.58%	2.14%	2.29%	2.01%	1.41%	2.55%
MCNP4C	4.93%	3.24%	2.39%	1.92%	2.75%	2.03%	2.51%	2.12%	1.88%	2.64%

위에서 각 코드간 흡수선량 차이는 EGSnrc 전산코드 결과를 기준으로 각 전산 코드 결과들에 대한 RMS(Root Mean Square) 값을 구하였으며 식은 아래와 같다.

$$RMS = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{Value^i_{Other\ Codes} - Value^i_{EGSnrc}}{Value^i_{EGSnrc}} \right)^2}$$

그림 3, 5, 7, 9 및 11은 입사되는 전자빔의 에너지가 각각 25 keV 부터 4 MeV 일 때 물의 깊이에 따른 무차원화된 흡수선량 분포를 나타내고 있으며 그림 4, 6, 8, 10 및 12는 각 코드들의 상대적 편차와 계산결과의 경향을 좀더 정확하게 판단하기 위하여 EGSnrc 결과를 기준으로 흡수선량의 상대적 비율(Relative Difference)을 r_E 구간별로 나타낸 그림이며 계산에 사용된 식은 아래와 같다.

$$Relative\ Difference = \frac{j(Z/r_E, E)_{other} - j(Z/r_E, E)_{EGSnrc}}{j(Z/r_E, E)_{EGSnrc}}$$

물에서의 전자의 평균도달거리 r_E 의 중간지점인 R_{50} 을 기준으로 MCNP 계열의 코드들은 EGS계열의 코드에 비해 R_{50} 이내 ($Z/r_E < 0.5$)에서는 상대적으로 낮게 R_{50} 이후 ($Z/r_E > 0.5$)에서는 상대적으로 높게 흡수선량을 평가하는 것으로 나타났다. 각 코드에서 계산한 결과들이 이러한 차이와 경향을 보이는 이유는 각 코드들이 채택하고 있는 전자 수송 관련 Multiple Scattering 이론들과 Monte Carlo 모델들이 서로 다르기 때문이다.

EGSnrc와 EGS4의 흡수선량 차이는 약 3%에 달하는 데 반해 ETRAN 모델을 기반으로 하는 MCNP4C와 MCNP4B 끼리는 흡수선량의 차이가 약 0.5%에 불과한 것으로 나타났다. 이는 MCNP4C가 MCNP4B와 같은 Class I Monte Carlo Model을 기반으로 전자의 라이브리리와 Stopping Power의 Density Effect Calculation 정도가 가능해졌으나 그 외 큰 변동이 없는 반면 EGSnrc는 새로운 Multiple Scattering Theory와 Electron-Step 알고리즘인 PRESTA-II 등을 포함시키는 등 좀더 근본적인 개선이 이루어졌기 때문이다. 높은 입사 에너지를 갖는 전자빔에서는 EGSnrc 코드와 MCNP계열의 코드가 약 2% 이내로 잘 일치하는 반면 EGS4 코드의 경우 약 4.4%까지 차이가 나는 것으로 나타났다. 한편, 입사 에너지가 낮아질수록 MCNP계열의 코드들은 EGSnrc 계산결과와 비교하여 잘 맞지 않는 것으로 나타났고 25 keV에서 약 5%정도까지 차이가 나는 것으로 나타났다.

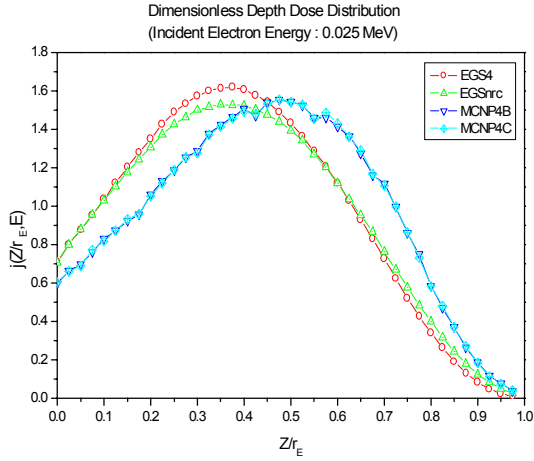


그림 3. 입사되는 전자빔이 0.025 MeV일 때 평판형 물의 무차원화된 흡수선량

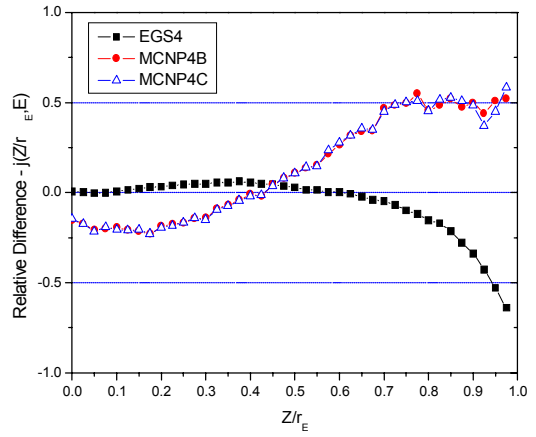


그림 4. EGSnrc 결과(0.025MeV)를 기준으로 각 코드의 상대적인 흡수선량 차이

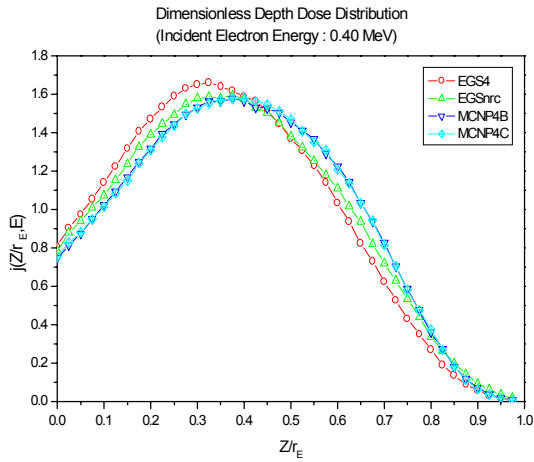


그림 5. 입사되는 전자빔이 0.4 MeV일 때 평판형 물의 무차원화된 흡수선량

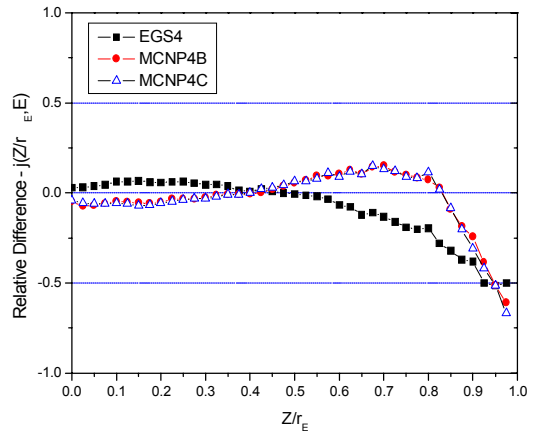


그림 6. EGSnrc 결과(0.4MeV)를 기준으로 각 코드의 상대적인 흡수선량 차이

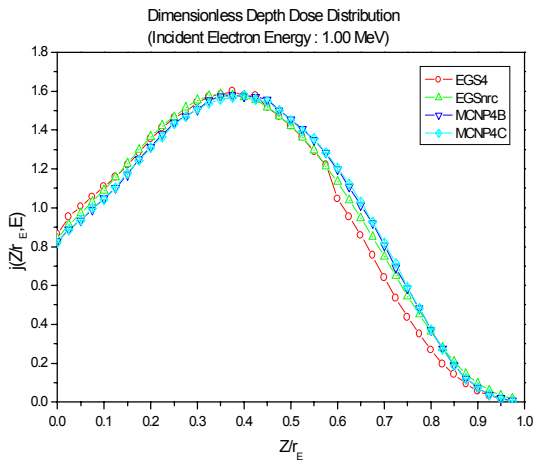


그림 7. 입사되는 전자빔이 1.0 MeV일 때 평판형 물의 무차원화된 흡수선량

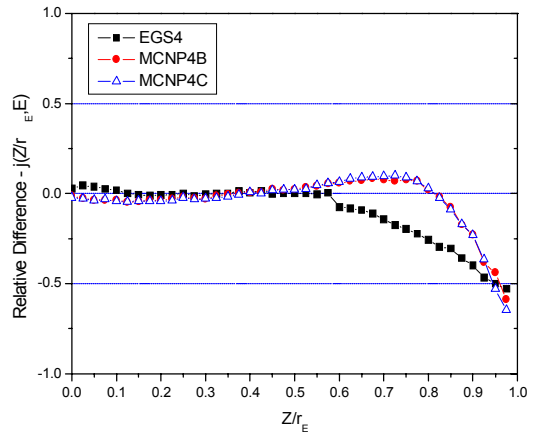


그림 8. EGSnrc 결과(1.0MeV)를 기준으로 각 코드의 상대적인 흡수선량 차이

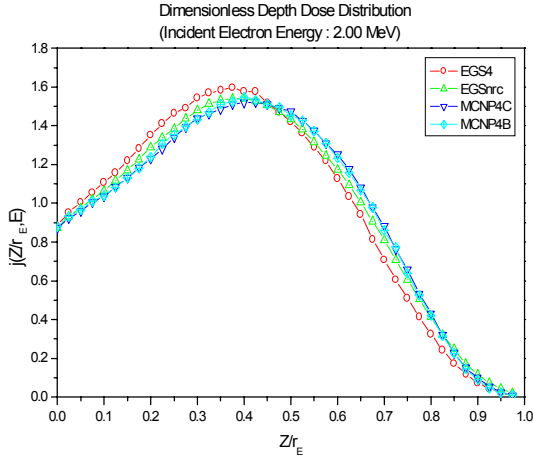


그림 9. 입사되는 전자빔이 2.0 MeV일 때 평판형 물의 무차원화된 흡수선량

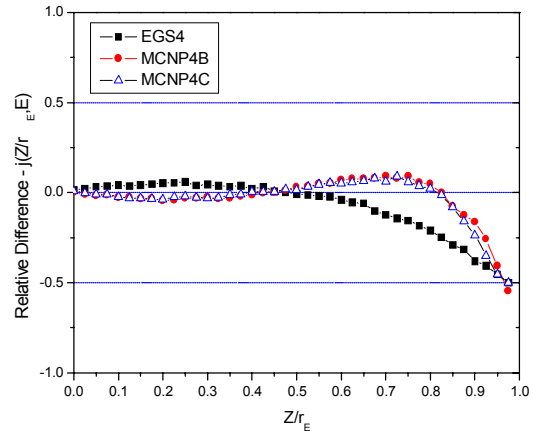


그림 10. EGSnrc 결과(2.0MeV)를 기준으로 각 코드의 상대적인 흡수선량 차이

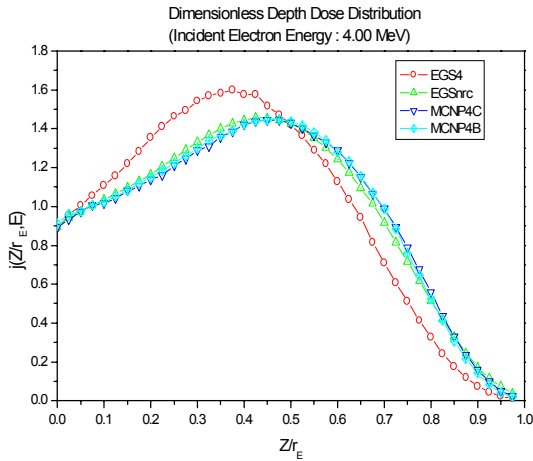


그림 11. 입사되는 전자빔이 4.0MeV일 때 평판형 물의 무차원화된 흡수선량

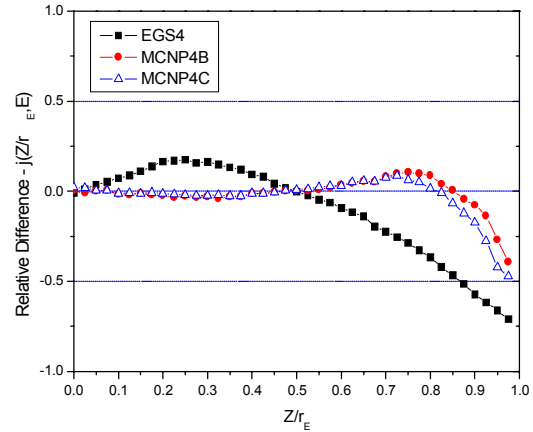


그림 12. EGSnrc 결과(4.0MeV)를 기준으로 각 코드의 상대적인 흡수선량 차이

고찰 및 결론

25 keV부터 4 MeV에 이르는 에너지를 가지는 전자빔이 평판형 물에 입사되었을 때 깊이에 따른 흡수선량 분포를 EGSnrc, MCNP4C 및 MCNP4B 전산코드를 이용하여 계산하였고 EGS4 전산코드의 결과는 인용하여 상호 비교하였다. MCNP 계열의 전산코드는 EGSnrc 전산코드에 비해 R_{50} 이내에서는 상대적으로 낮게, R_{50} 이후에서는 상대적으로 높게 흡수선량을 평가하고 있다. 계열간 코드 비교에서는 EGSnrc와 EGS4가 약 3%정도 차이가 나는 반면 MCNP4C와 MCNP4B간의 차이는 0.5%정도에 불과한 것으로 나타났다. 높은 에너지를 갖는 영역에서는 EGSnrc와 MCNP 계열의 코드들이 약 2% 이내로 잘 일치하였으나 EGS4의 경우 4.4%정도까지 차이가 났다. 낮은 에너지를 갖는 영역에서는 MCNP 계열의 계산 결과와 EGSnrc 계산결과가 잘 일치하지 않았으며 약 5%정도까지 차이가 났다.

각 전산코드의 특성을 좀더 상세히 비교하려면 이번에 실시한 Broad Parallel Beam에 의한 물 (Semi Infinite Water)에서의 깊이에 따른 흡수선량 분포 외에 Isotropic Point Source에 의한 물

(Infinite Water)에서의 반경에 따른 흡수선량 분포(Radial Dose Distribution)에 대한 계산을 수행하여 좀더 다양한 평가를 수행할 필요가 있다. 위와 같은 시뮬레이션을 통해 추가적인 흡수선량 분포 자료를 얻어 이를 각 전산코드의 계산자료와 상호 비교한다면 좀더 세밀하고 신뢰성 있는 평가를 수행할 수 있을 것이다.⁹⁾

감사의 글

이 연구는 원자력연구소 및 과학재단지정 방사선안전기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. W. G. Cross, P. Y. Wong, et. al., "Dose Distribution for Electrons and Beta Rays Incident Normally on Water", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 35, 1991
2. M. J. Berger and S. M. Seltzer, "Tables of Energy Deposition Distributions in Water Phantoms Irradiated by Point Monodirectional Electron Beams with Energies from 1 to 60 MeV and Applications to Broad Beams," Report NBSIR-82-2451, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1982
3. D. W. O. Rogers, "Fluence to Dose Equivalent Conversion Factors Calculated with EGS3 for Electrons from 100 keV to 20 GeV and Photons from 11keV to 20 GeV," Health Phys. 45, 891-914, 1984
4. A. F. Bielajew and D. W. O. Rogers, "PRESTA: the Parameter Reduced Electron-step Transport Algorithm for Electron Monte Carlo Transport," Nucl. Instrum. Methods, B18, 165-181, 1987
5. C. T. Prevo, "Electron Energy Deposition in Tissue," In: Proc. Department of Energy Workshop on Beta Measurements, Report PNL-SA-15004, Pacific Northwest Laboratory, Richland. WA, 1987
6. I. Kawrakow and D. W. O. Rogers, "EGSnrc Code System : Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport," PIRS-701, National Research Council of Canada, 2001
7. 김종경, 김종오, 신창호, 박성호, "안전해석용 전산시스템 개발과 응용연구," 한국원자력안전기술원 KINS/HR-055, 1993
8. D. W. O. Rogers, I. Kawrakow, J. P. Seuntjens and B. R. B. Walters, "NRC User Codes for EGSnrc : NRCC Report (Rev. A)," PIRS-702, National Research Council of Canada, 2001
9. Ruqing Wang and X. Allen Li, "Monte Carlo Dose Calculations of Beta-emitting Sources for Intravascular Brachytherapy: A Comparison between EGS4, EGSnrc, and MCNP," Med. Phys. 28(2), 2001