

GEANT4 저 에너지 전자기 물리 모델에 대한 비교 연구

박소현^{*,†}, 정원균^{*,†}, 서태석^{*,†}

^{*}가톨릭대학교 의공학교실, [†]가톨릭대학교 생체의공학연구소

2010년 5월 18일 접수 / 2010년 6월 21일 1차 수정 / 2010년 6월 22일 채택

Geant4 전산모사 toolkit은 버전에 따라 개선되거나 새로워진 물리적 모델을 제공한다. 최근 재 코드화 된 Geant4.9.3은 저 에너지 전자기 물리 모델에 대해 *Livermore* 데이터 삽입과 새로운 물리적 모델을 적용시키고, 코드를 수정하여 물리적 요소를 개선시켰다. 본 연구에서는 향후, 전자 또는 입자를 이용한 신뢰성 있는 전산모사를 위하여 Geant4.9.2와 9.3에 포함된 전자기 물리모델을 이용하여 물질 내부를 통과하는 입자의 저지능(Stopping power)과 CSDA (Continuously Slowing Down Approximation) range 데이터를 획득하였으며, 이 결과를 미국국립기술표준원(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 제공하는 각각의 데이터와 비교하여, Geant4.9.2에 대한 Geant4.9.3의 저 에너지 전자기 물리 모델의 개선 여부를 알아보려고 하였다.

중심어 : Geant4, 전자기 물리, 저지능, CSDA Range

1. 서론

전산 처리 기술의 발전과 더불어 방사선 응용 분야의 몬테칼로 (Monte Carlo) 방법은 다양한 전산 코드들을 통해 방사선의 발생, 물질과의 상호작용 등을 분석하는데 사용되고 있다. 이 방법은 경험적, 실험적 측정이 어려운 문제에 대해 또는 측정 결과에 대한 비교, 검증에 위해 주로 사용되는 것으로, 난수(random number)를 발생시켜 무작위적인 표본 추출로 전산화 하는 확률적 계산 방법으로써 방사선 방어, 측정 그리고 의료 분야에서 매우 유용하게 응용되고 있다[1]. 몬테칼로 전산모사는 빠른 전산 속도의 고려 뿐만 아니라 복잡한 구조에 대한 설정 및 물질의 구성성분에 대한 명확한 모델링이 이루어 져야 하며, 불균질 물질에서의 입자와 물질의 상호작용을 다루는 물리적 요소가 정확하게 설정 되어야 신뢰성 있는 전산모사 결과를 획득 할 수 있다. 최근에는 전산모사의 결과에 대한 정확성을 비롯하여 기하학적 구조 및 입자 그리고 입자의 이동경로의 가시화도 중요한 필요 요건이 되고 있다. 현재, 범용화된 몬테칼로 전산모사 코드 중 Geant4 (Geometry And Tracking)는 이러한 요소들을 적합하게 반영한 코드로써 초기 고 에너지 전산 모사를 목적으로 만들어졌지만 핵 물리를 비롯한 원자력, 산업, 의료 분야 등 사용범위가 점차 확대 되어 가고 있다[2,3].

Geant4는 물질과 이를 통과하는 다양한 종류의 입자들을 전산모사 하기 위해 개발 된 객체지향형(object-oriented)의 toolkit으로써 목적에 따라 유용하게 적용 할

수 있도록 여러 가지 기하학적 구조 및 입자 그리고 물리적 모델들을 제공하고 있다. Geant4를 이용한 신뢰성 있는 전산모사를 구현하기 위해서는 이러한 다양한 조건들을 적절히 이용하는 것이 중요하다.

현재까지 신뢰성 있는 전산모사를 위한 기본 연구들이 많이 되어오고 있으며 특히, Geant4의 새로운 버전에 대한 물리적 모델의 정확성 검증에 대한 연구와 적용된 물리적 모델에 따라 전산모사 결과에 미치는 영향에 대해 많은 연구가 있어왔다[4-6]. Geant4의 활용 범위가 확대 되어 감으로써 이러한 정확한 물리적 모델 적용에 대한 관심은 더욱 높아지고 있다. 또한, 방사선 응용, 의료 분야에서의 관심은 입자와 물질의 상호작용에서 나타나는 현상을 다루는 것으로 주로, 물질을 구성하는 원소의 껍질(Shell) 구조와의 물리적 현상을 이용한다. Geant4에서 제공하는 다양한 물리적 모델 중, 저 에너지 전자기 모델 (low energy electromagnetic physics model)은 250 eV 까지의 저 에너지를 가진 입자에 대해 광전효과(Photoelectric effect), 콤프턴 산란(Compton scattering), 레일리 산란(Rayleigh scattering), 제동복사(Bremsstrahlung), 이온화(Ionization) 그리고 감마 변환(Gamma conversion)에 관한 전자기 물리적 현상을 다루도록 코드화 되어있다.

최근(18, December, 2009) 재 코드화 된 Geant4.9.3은 저 에너지 전자기 물리 모델에 대해 Geant4.9.2의 Standard 전자기 물리를 유지하며, 편광(Polarized photon)과 물질이 반응하는 과정을 개선시키기 위해 *Livermore* 데이터를 포함 시켰다. 본 연구에서는 향후, 저 에너지 범위를 가진 입자의 신뢰성 있는 전산모사를 위하여 물질 내부를 통과하는 입자의 에너지 전달체계인

책임저자 : 서태석, suhsanta@catholic.ac.kr
서울시 서초구 반포동 505번지 가톨릭대학교 의과학 연구원 의공학 교실

저지능(Stopping power)과 CSDA(Continuously Slowing Down Approximation) range 데이터를 획득하였다. 저지능은 양성자가 물질 내를 투과할 때 단위 거리당 전달한 에너지이며, CSDA range는 특정 에너지를 가진 양성자의 처음 지점에서 모든 에너지를 소멸 할 때까지 이동한 실제 거리로써 식1에 의해 산출 될 수 있다.

$$\frac{Energy}{S_{tot}} = CSDA\ range \quad (식1)$$

식1)에서 S_{tot} 는 입자의 총 저지능 값을 의미하며, $Energy$ 는 입자의 초기 에너지를 의미한다. 전산모사를 통해 획득한 저지능과 CSDA range 결과는 미국국립기술 표준원 (National Institute of Standards and Technology, NIST)[7]에서 제공하는 데이터와 비교함으로써, Geant4.9.3의 9.2 버전에 대한 저 에너지 전자기 물리 모델의 개선여부를 알아보았다.

2. 전산모사 조건 설정

2.1 기하학적 구조의 형태 및 조건 설정

Geant4 전산 모사를 위한 조건으로 임의의 물질로 가득 채워진 정사각형 팬텀 중심에 0.01 MeV에서 1000

MeV 에너지 범위를 가진 전자, 알파입자, 양성자를 위치시켰다. 입자의 종류는 NIST에서 저지능과 CSDA range에 대한 정보를 제공해 주고 있는 입자들로 선정하였다 [8].

기하학적 구조의 형태와 조건은 3차원 공간 내에 크기가 4500 x 4500 x 4500 cm³ 인 정사각형 팬텀이 위치하도록 설계하였다. 또한, 팬텀 내부의 물질로써 ICRU 73의 데이터 값을 가지는 NIST에서 제공하고 있는 원소 중 원자번호를 고려한 8가지 원소와 인체 구성물질 3가지를 포함한 총 11가지 물질((베릴륨(Be,4), 알루미늄(Al,13), 철(Fe,26), 게르마늄(Ge,32), 은(Ag,47), 금(Au,79), 납(Pb,82), 우라늄(U,92), 물, 뼈 그리고 지방)을 선정하였다. Geant4 내부에서 각 물질의 설정은 *G4NistManager*를 이용하여 NIST에서 제공하는 동일한 조건을 가진 원소를 전산모사 코드에 직접 불러오도록 하였다. 순수 원소가 아닌 물, 뼈 그리고 지방에 대한 구성은 NIST에서 제공하고 있는 물질 구성원소의 값을 참고한 것으로 Table 1과 같다.

Table 1. The Composition of Human Materials.

Material	Composition					
	Atomic Material (Fraction by weight)					
Water	H(0.112)	O(0.888)				
Bone	H(0.064)	C(0.278)	N(0.027)	O(0.410)	Mg(0.002)	P(0.070)
	S(0.002)	Ca(0.147)				
Adipose Tissue	H(0.119)	C(0.637)	N(0.008)	O(0.232)	Na(0.001)	Mg(0.00002)
	P(0.0002)	S(0.0007)	Cl(0.0012)	K(0.0003)	Ca(0.00002)	Fe(0.00002)
	Zn(0.00002)					

2.2 물리적 모델 설정

Geant4.9.2와 9.3의 저 에너지 전자기 물리모델의 비교를 위하여 각 버전에서 제공하고 있는 물리적 모델을 적용하였다. Geant4.9.3의 저 에너지에 대한 전자기 모델은 기존의 Standard 전자기 물리 모델에 Livermore의 데이터를 적용시키고, 코드를 개선시킨 것이다. 두 버전의 Geant4 전자기 물리모델 코드에서는 입자들의 물질과의 상호작용에 영향을 주는 광전효과(Photo-electric effect), 콤프턴 산란(Compton scattering), 레일리 산란(Rayleigh scattering), 제동복사(Bremsstrahlung), 이온화(Ionization) 그리고 감마 변환(Gamma conversion) 등을 고려하였다. Geant4.9.3의 물리적 모델에서는 Livermore 데이터 뿐만 아니라, *G4UrbanMscModel93*, *G4WentzelVIModel*

그리고 *G4CoulombScattering*의 MSC(Multiple scattering) 물리 과정이 추가 된다. MSC는 실제 이동 거리(true step length)를 이용하는 입자의 에너지 손실과 산란을 계산하기 위해 Fig. 1과 같은 과정을 다루는 개선된 물리적 과정이다.

입자의 종류, 기하학적 구조 설정, 물리적 모델 적용을 통해 획득된 물, 뼈 그리고 지방 내에서의 입자들의 저지능과 CSDA range 의 전산모사 결과는 NIST의 데이터와 %차를 통해 비교하였으며, 원소 물질들 내에서의 데이터 비교는 %차로 나타낸 후, Geant4.9.2와 9.3의 결과 값의 차를 이용하여 저 에너지 전자기 물리모델의 개선 여부를 평가하였다.

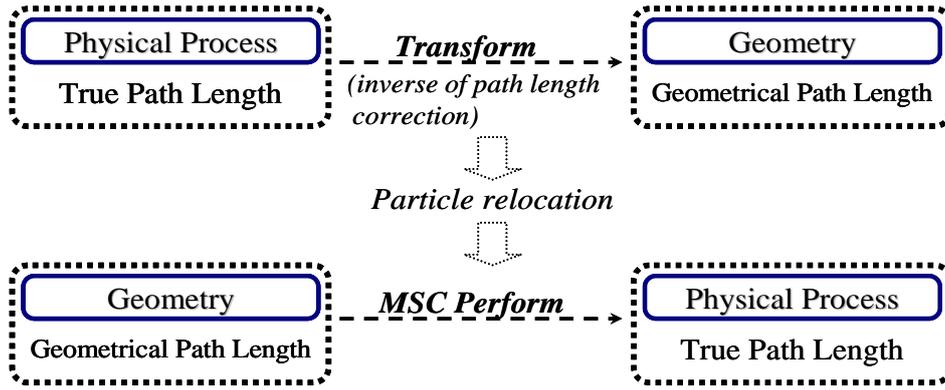


Fig. 1. This figure describes the MSC perform.

3. 결과

NIST 데이터를 기준으로 전자, 알파입자 그리고 양성자의 저지능과 CSDA range를 비교한 결과, 저 에너지 전자기 물리 모델에 대해 Geant4.9.3이 Geant4.9.2와 비교하여 NIST 데이터와의 일치성이 개선됨을 확인 할 수 있었다. 다음의 그래프는 각 Geant4 버전에 대한 입자들의 물, 뼈 그리고 지방에서의 NIST 데이터와의 저지능 %차를 나타낸다(Fig.2,3 and 4). 각 그래프 내의 A는 물, B는 뼈 그리고 C는 지방에서의 저지능 결과 데이터를 나타낸다. Fig.2는 전자에 대한 저지능 결과로서 물, 뼈 그리고 지방에서 9.3이 9.2와 비교하여 0.01 MeV에서 1000 MeV

의 에너지 범위 사이에서 약 5%에서 6% 개선 됨을 확인할 수 있다. 하지만, 1000 MeV에서는 뼈와 지방에 대해 9.3 버전이 9.2 버전과 비교하여 NIST 데이터와 각각 4%와 1%의 증가한 차를 나타냄을 알 수 있다. 이에 비해 알파 입자는 9.3 버전의 저지능 값이 9.2 버전의 저지능 값에 비해 3가지 물질에 대해 모든 에너지 영역에서 개선됨을 확인할 수 있다(Fig. 3). Fig. 4는 양성자에 대한 각 버전의 NIST 데이터와의 저지능 차를 나타낸 것으로써, 물, 뼈 그리고 지방에 대해 약 100 MeV 에너지 이상에서 9.3의 저지능이 9.2의 것과 비교하여 약 1% 증가한 차를 나타냄을 확인할 수 있다.

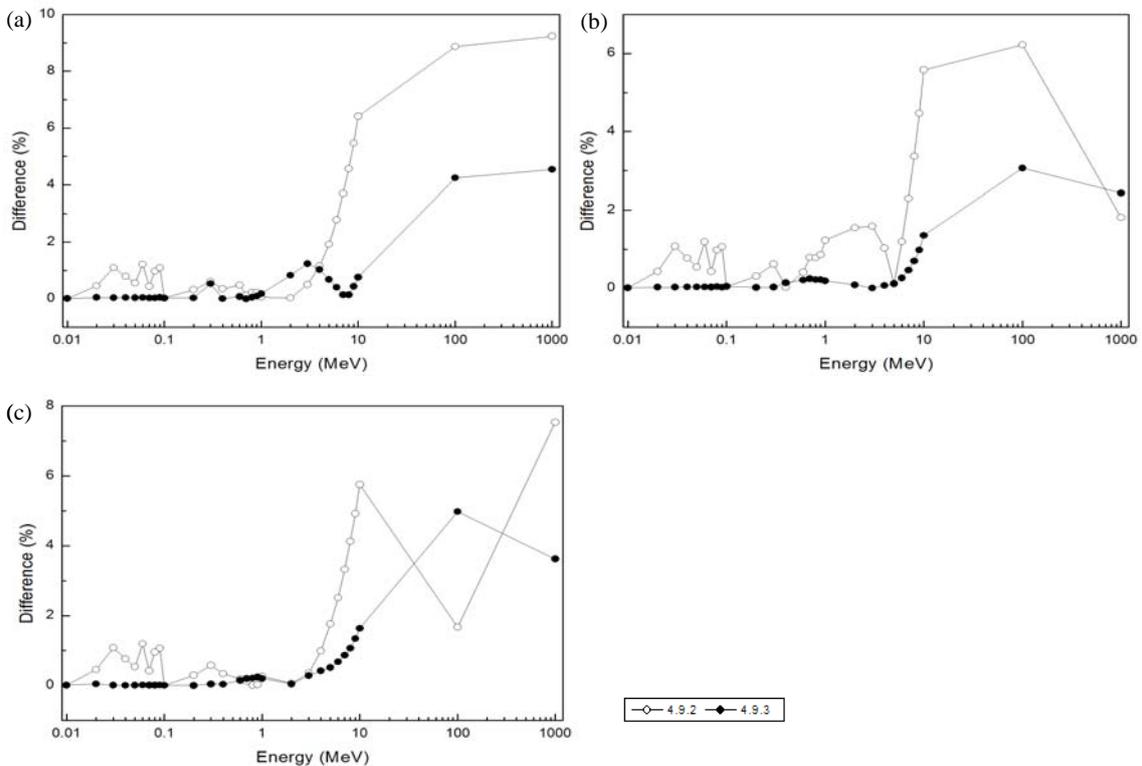


Fig. 2. The percent difference of stopping power for the electron in a) the water b) the bone and c) the adipose tissue. The value of vertical axis indicates the percent difference between stopping power of each version and NIST data on the low energy physics model.

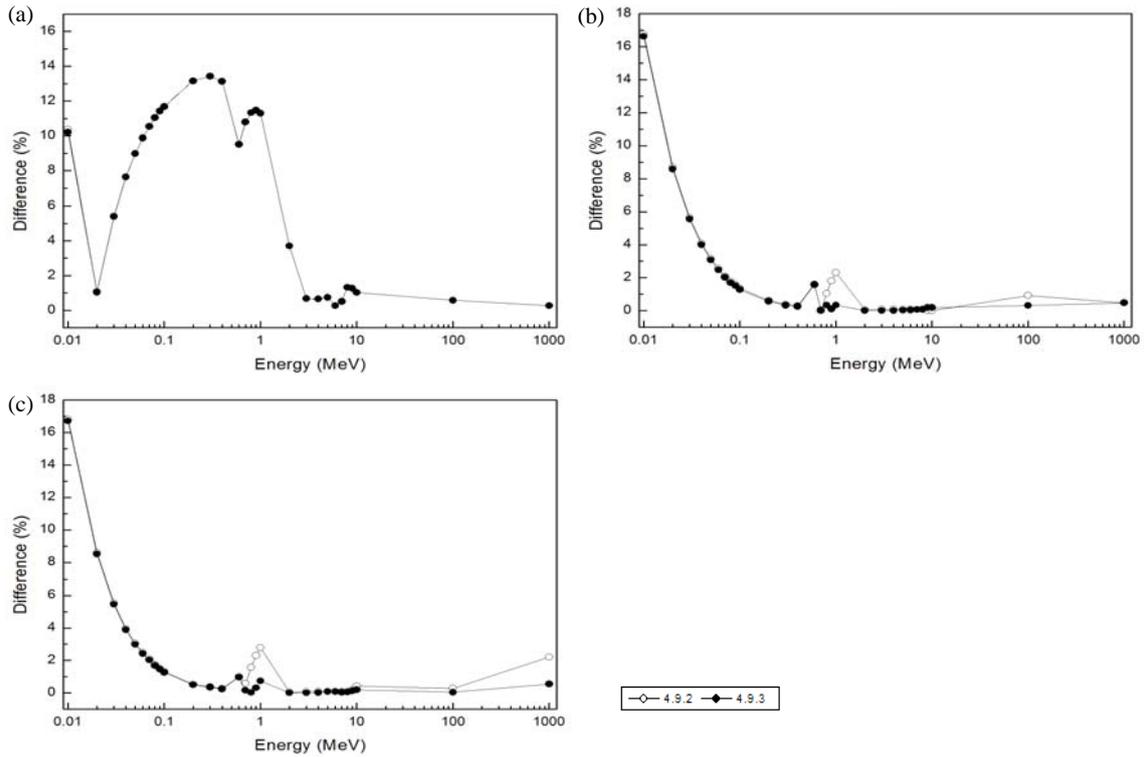


Fig. 3. The percent difference of stopping power for the alpha particle in a) the water b) the bone and c) the adipose tissue. The value of vertical axis indicates the percent difference between stopping power of each version and NIST data on the low energy physics model.

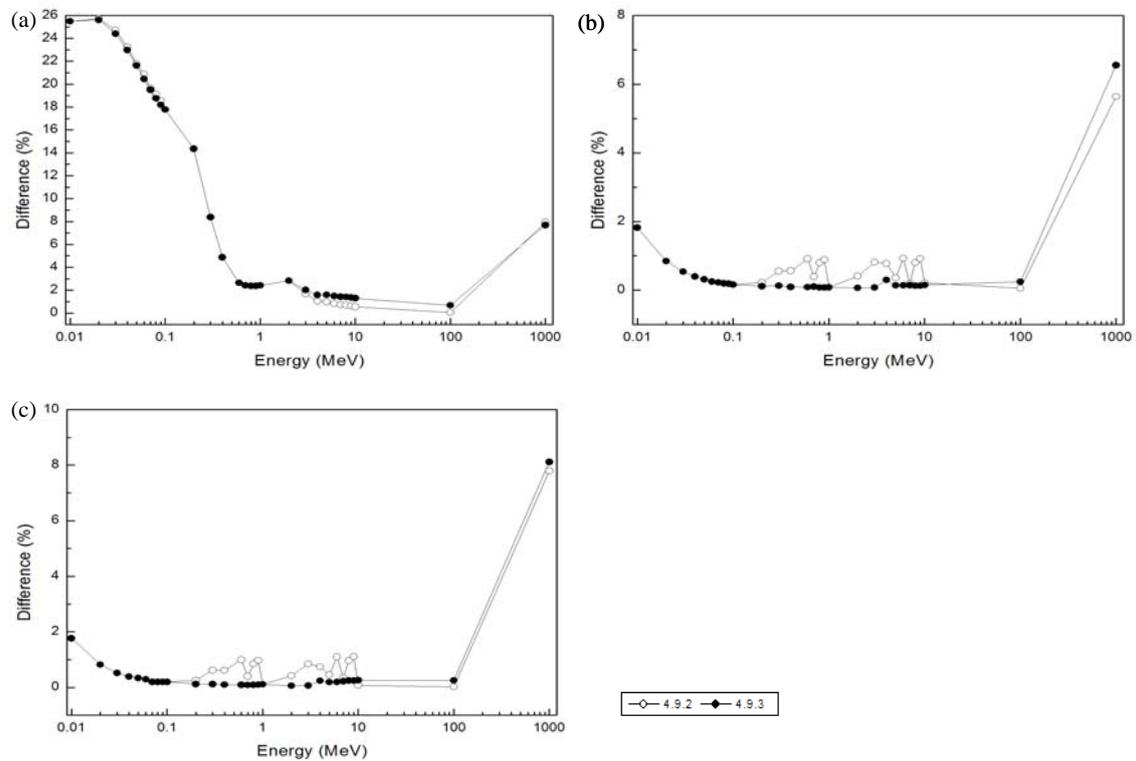


Fig. 4. The percent difference of stopping power for the proton in a) the water b) the bone and c) the adipose tissue. The value of vertical axis indicates the percent difference between stopping power of each version and NIST data on the low energy physics model.

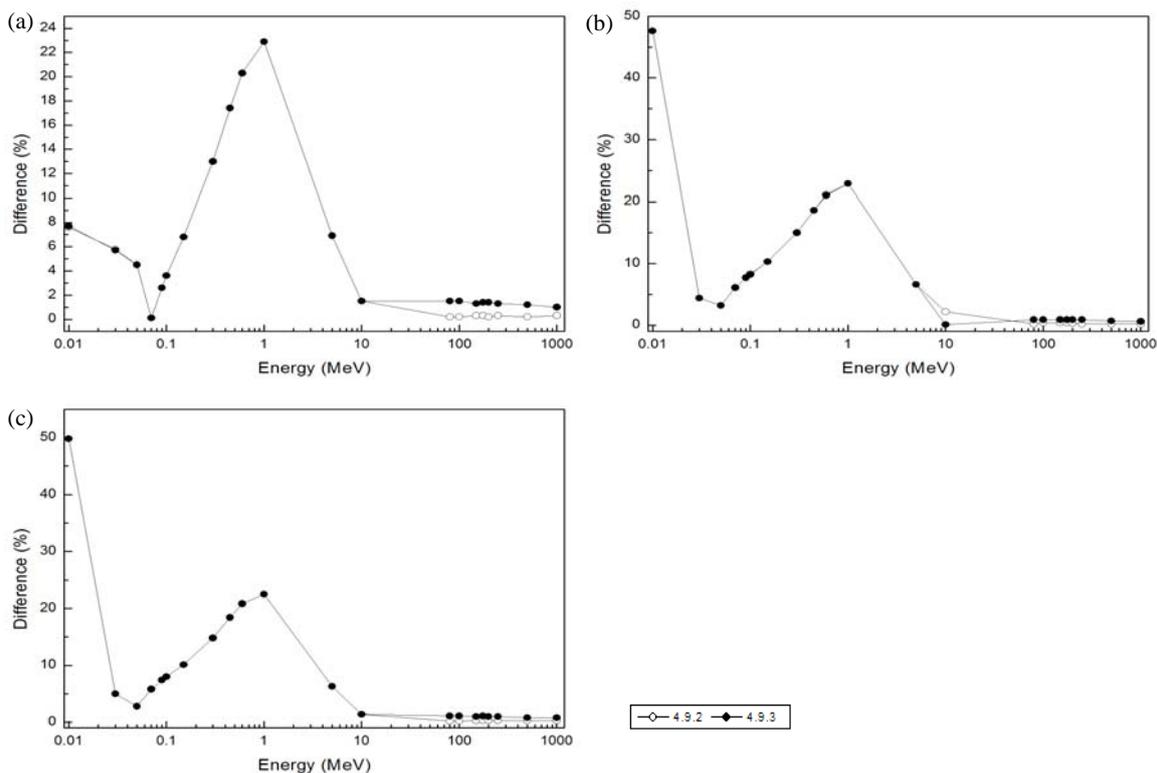


Fig. 5. The percent difference of CSDA range for the electron in a) the water b) the bone and c) the adipose tissue. The value of vertical axis indicates the percent difference between CSDA range of each version and NIST data on the low energy physics model.

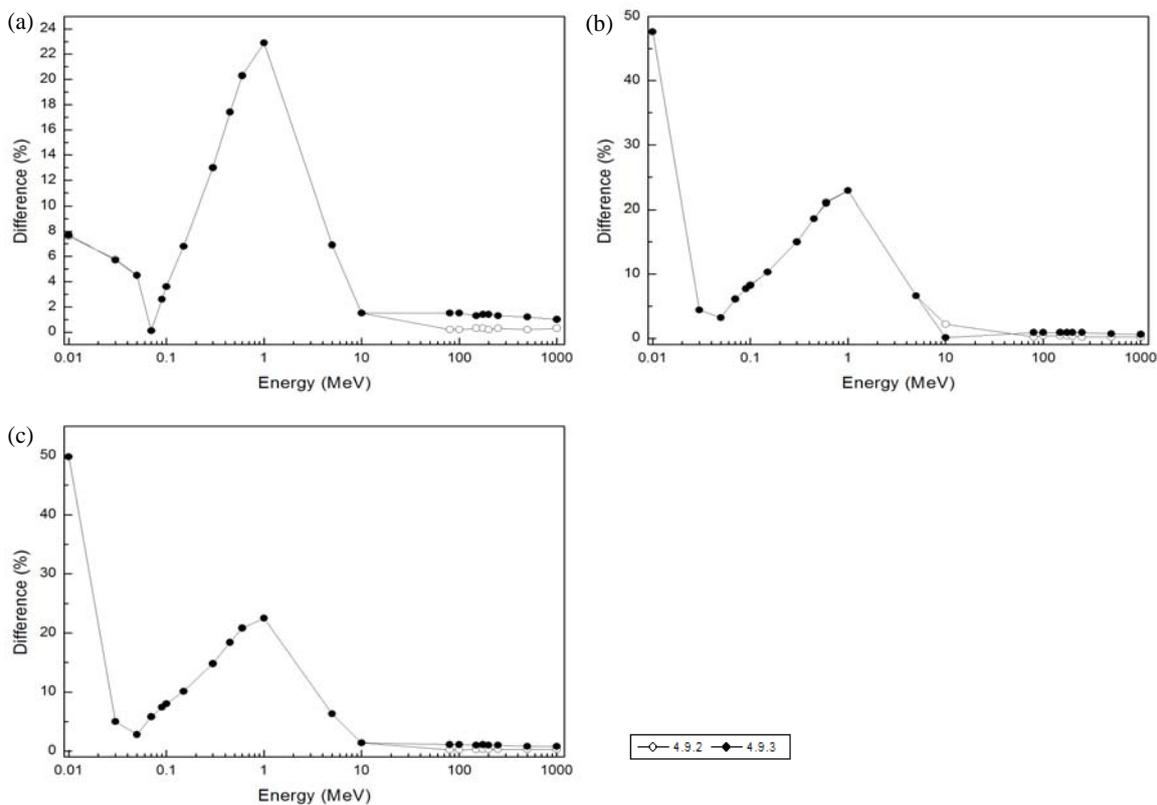


Fig. 6. The percent difference of CSDA range for the alpha particle in a) the water b) the bone and c) the adipose tissue. The value of vertical axis indicates the percent difference between CSDA range of each version and NIST data on the low energy physics model.

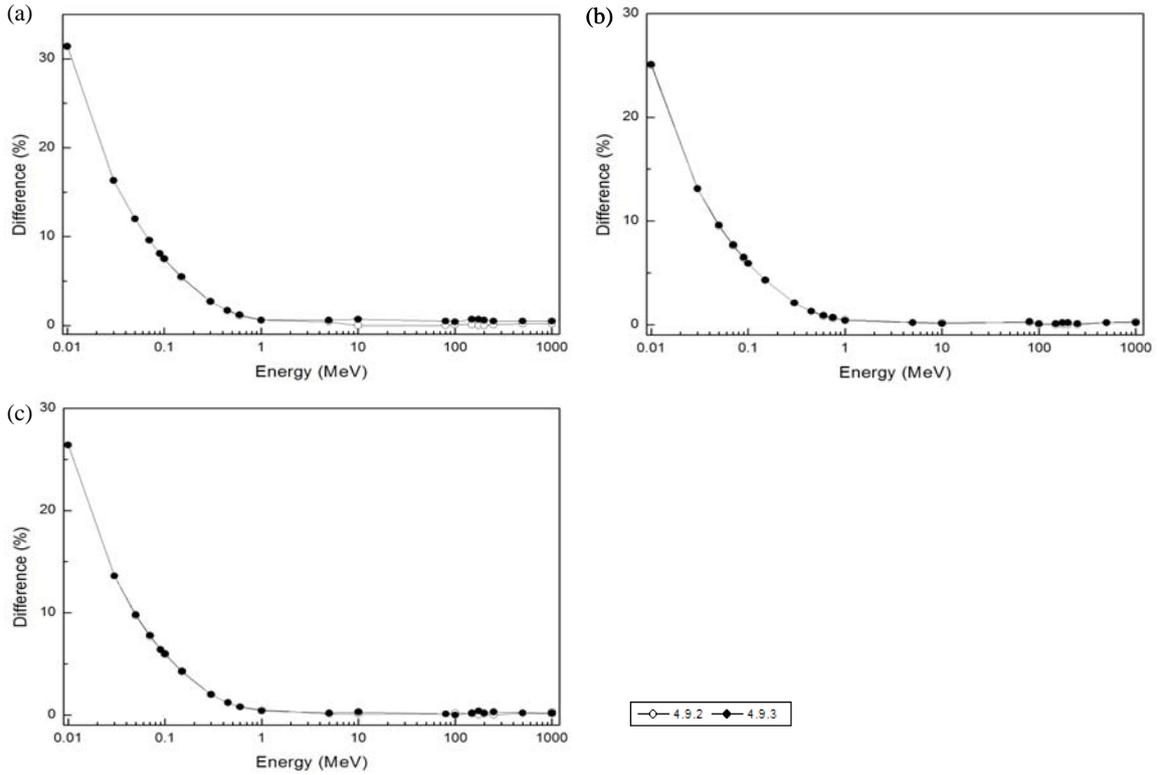


Fig. 7. The percent difference of CSDA range for the proton in a) the water b) the bone and c) the adipose tissue. The value of vertical axis indicates the percent difference between CSDA range of each version and NIST data on the low energy physics model.

Fig. 5부터 Fig. 7은 전자, 알파입자 그리고 양성자에 대한 각 버전의 CSDA range와 NIST의 CSDA range 데이터와의 차를 나타낸 그래프이다. 각 버전의 결과 사이에 비교적 일정한 차를 보여 주었던 저지능의 결과와는 다르게 전자와 알파입자의 CSDA range의 차가 본 연구에서 설정한 에너지 범위 내에서 불규칙한 경향을 나타냄을 확

인 할 수 있다. 또한, 약 400 MeV 이상의 에너지 영역에서는 9.2에 대한 9.3의 저 에너지 전자기 모델의 개선이 낮아짐을 확인 할 수 있다(Fig. 5 and 6). 반면, 양성자의 CSDA range 차는 9.2 버전과 9.3 버전에서 거의 일치하는 결과를 나타냄을 알 수 있다(Fig. 7).

Table 2. The Percent Difference of Stopping Power for Electron with Energy of 10 MeV, 100 MeV and 1000 MeV in the Atomic Materials. Values Indicate the Difference Between Percent Difference of Stopping Power of Version 9.3 and 9.2 on The Low Energy Physics Model.

Energy (MeV)	Atomic Material							
	Be	Al	Fe	Ge	Ag	Au	Pb	U
10	3.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	-3.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1000	12.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table 3. The Percent Difference of Stopping Power for Alpha Particle with Energy of 10 MeV, 100 MeV and 1000 MeV in the Atomic Materials. Values Indicate the Difference Between Percent Difference of Stopping Power of Version 9.3 and 9.2 on The Low Energy Physics Model.

Energy (MeV)	Atomic Material							
	Be	Al	Fe	Ge	Ag	Au	Pb	U
10	0.40	0.14	0.32	-0.34	0.29	0.69	1.77	0.80
100	0.07	1.00	1.18	1.53	1.35	1.63	2.71	3.23
1000	0.49	-0.08	-0.15	0.71	0.21	-0.05	0.67	-0.18

Table 4. The Percent Difference of Stopping Power for Proton with Energy of 10 MeV, 100 MeV and 1000 MeV in the Atomic Materials. Values Indicate the Difference Between Percent Difference of Stopping Power of Version 9.3 and 9.2 on The Low Energy Physics Model.

Energy (MeV)	Atomic Material							
	Be	Al	Fe	Ge	Ag	Au	Pb	U
10	-0.89	-0.27	-1.39	-2.52	-1.62	-4.17	0.89	0.46
100	-0.77	-0.52	-1.09	0.24	0.52	-2.08	0.77	-1.39
1000	0.39	0.15	-0.31	-0.59	0.51	0.08	0.39	0.08

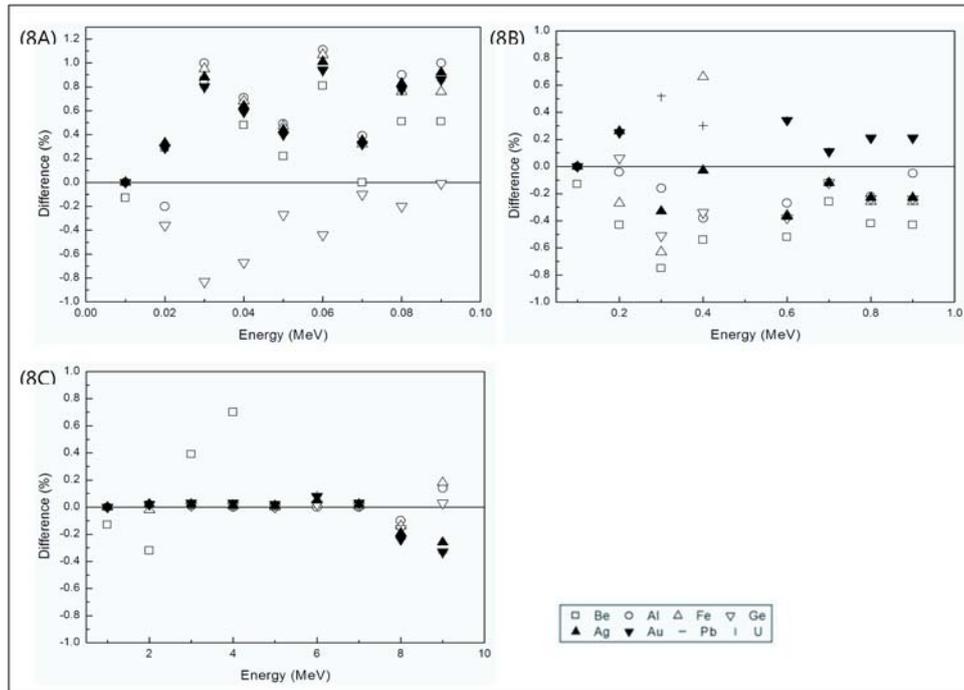


Fig. 8. The percent difference of stopping power for the electron in atomic materials (Be, Al, Fe, Ge, Ag, Au, Pb and U). The vertical axis indicates the difference between percent difference of stopping power of version 9.3 and 9.2 on the low energy physics model.

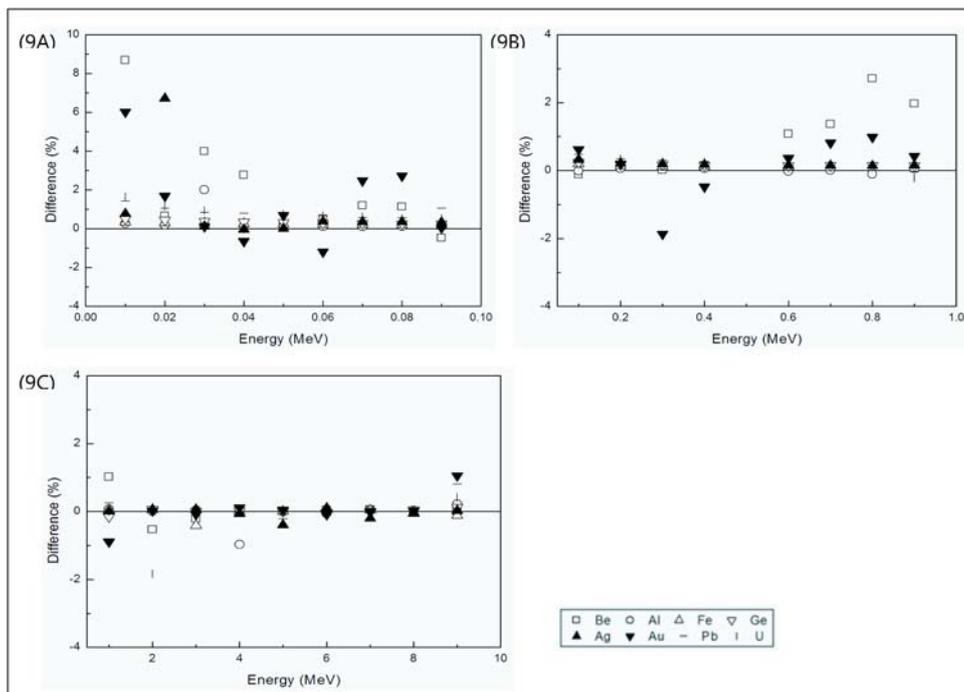


Fig. 9. The percent difference of stopping power for the alpha particle in atomic materials (Be, Al, Fe, Ge, Ag, Au, Pb and U). The vertical axis indicates the difference between percent difference of stopping power of version 9.3 and 9.2 on the low energy physics model.

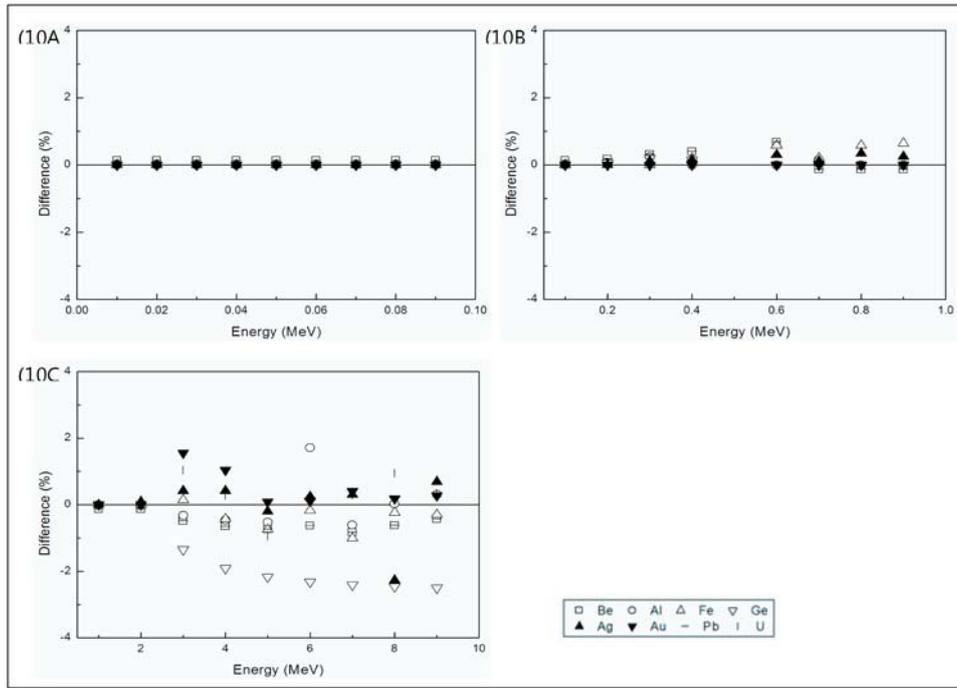


Fig. 10. The percent difference of stopping power for the proton in atomic materials (Be, Al, Fe, Ge, Ag, Au, Pb and U). The vertical axis indicates the difference between percent difference of stopping power of version 9.3 and 9.2 on the low energy physics model.

Table 5. The Percent Difference of CSDA Range for Electron with Energy from 0.01 MeV to 1000 MeV in the Atomic Materials. Values Indicate the Difference Between Percent Difference of CSDA Range of Version 9.3 and 9.2 on The Low Energy Physics Model.

Energy (MeV)	Atomic Material							
	Be	Al	Fe	Ge	Ag	Au	Pb	U
0.01	0.6	0.1	0.0	0.1	0.2	-0.7	0.6	-0.9
0.03	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.2	0.3	0.3
0.05	-0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	0.4	0.1	0.0
0.07	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.3
0.09	0.8	0.0	0.4	0.0	-0.3	0.0	0.0	0.4
0.10	-0.7	0.1	0.6	0.3	0.5	-0.3	-0.3	0.2
0.15	0.2	1.6	0.2	0.1	0.4	0.4	-0.3	0.4
0.30	0.1	0.3	0.5	0.7	1.6	0.6	1.7	0.6
0.45	1.9	0.0	1.5	1.5	-0.2	1.6	1.5	1.5
0.60	0.6	0.9	0.3	0.2	0.0	-1.2	2.9	-0.9
1.00	1.2	0.9	0.6	-3.5	0.9	0.7	0.2	2.2
5.00	0.2	1.2	0.2	1.5	-1.8	0.5	-2.3	-1.5
10.0	0.2	1.9	0.4	1.6	1.8	-3.4	1.8	-2.5
80.0	1.1	-0.6	0.7	0.5	1.0	0.4	1.4	1.5
100	0.9	-1.2	0.0	0.5	1.3	1.6	3.3	-1.6
150	-1.0	0.1	0.1	-2.1	-0.6	1.7	1.0	-3.0
175	0.7	0.3	-0.9	-2.2	1.0	-4.8	4.4	-2.2
200	0.6	0.8	1.9	0.2	-0.5	-4.6	1.3	-1.8
250	2.1	1.8	0.1	-1.6	0.9	-5.3	4.2	1.1
500	-1.1	0.5	-0.9	-1.8	-0.4	-6.8	0.4	-2.0
1000	-2.7	1.9	-1.7	0.2	-0.9	-7.7	2.4	-4.5

8가지 원소에 대한 저지능의 결과는 Fig. 8로부터 Fig. 10까지 나타내었으며 그래프의 a, b 그리고 c는 입자의 에너지 범위를 나누어 나타낸 것으로 저지능 결과를 보여 준다. 또한, 각 그림에 대해 Table 2, Table 3 그리고 Table 4를 이용하여 10 MeV, 100 MeV 그리고 1000 MeV 결과를 보여줌으로써, 0.01 MeV에서 1000 MeV 에

너지 범위를 가진 입자에 대한 저지능 결과를 모두 나타 내었다. 저지능의 %차가 양수를 나타내면, 저 에너지 전 자기 물리 모델에 대해 9.3 버전이 9.2 버전과 비교하여 개선 됨을 의미하며, 음수를 나타내면 9.3 버전이 9.2 버 전과 비교하여 NIST 데이터와의 비교에서 더 큰 차를 나 타냄을 의미한다. Fig. 8과 Table 2는 전자의 원소 물질

들에 대한 저지능 결과를 나타낸 것으로써, 0.1 MeV 영역까지는 게르마늄(Ge)을 제외한 원소들에 대해 9.3 버전의 개선된 결과를 확인 할 수 있으며, 나머지 에너지 영역과 비교하여 0.1 MeV에서부터 1.0 MeV의 에너지 영역에서는 각 원소들에 대해 9.2 버전이 NIST 데이터와 약 1% 내의 더 적은 차를 나타냄을 확인 할 수 있다.

알파입자의 원소 물질에 대한 저지능 결과는 9.3 버전

의 저 에너지 전자기 물리 모델이 9.2의 것과 비교하여 유지 또는 상당히 개선 됨을 확인 할 수 있다(Fig. 9, Table 3). 양성자 역시 1.0 MeV 에너지 영역에서는 두 버전의 차이가 없으나, 1.0 MeV 에너지 이상 영역에서 게르마늄(Ge)을 비롯한 낮은 원자 번호를 가진 원소들에 대해 9.2 버전의 물리적 모델이 약 3% 정도 더 정확도를 가짐을 확인 할 수 있다(Fig. 10, Table 4).

Table 6. The Percent Difference of CSDA Range for Alpha Particle with Energy from 0.01 MeV to 1000 MeV in the Atomic Materials. Values Indicate the Difference Between Percent Difference of CSDA Range of Version 9.3 and 9.2 on The Low Energy Physics Model.

Energy (MeV)	Atomic Material							
	Be	Al	Fe	Ge	Ag	Au	Pb	U
0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.4	0.7	0.7	0.7
80.0	0.9	0.7	1.9	3.5	7.8	13.6	-13.0	-13.1
100	1.0	0.9	-1.9	3.5	7.9	13.6	-13.1	-13.4
150	0.7	1.0	1.9	-3.8	-7.8	13.3	-12.8	-13.0
175	0.8	0.9	1.8	3.4	-7.7	-13.0	12.4	-12.6
200	0.8	0.8	1.8	3.4	7.5	12.7	12.1	-12.3
250	-0.9	0.7	-1.9	3.4	7.3	-12.3	7.8	2.1
500	-0.7	0.7	1.6	-3.0	6.5	10.7	-10.1	10.1
1000	0.4	-0.7	-1.6	-2.6	5.5	8.8	8.2	8.2

Table 7. The Percent Difference of CSDA Range for Proton with Energy from 0.01 MeV to 1000 MeV in the Atomic Materials. Values Indicate the Difference Between Percent Difference of CSDA Range of Version 9.3 and 9.2 on The Low Energy Physics Model.

Energy (MeV)	Atomic Material							
	Be	Al	Fe	Ge	Ag	Au	Pb	U
0.01	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.03	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.05	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.07	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.09	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.10	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.15	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.30	0.0	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.1
0.45	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.60	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.00	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5.00	0.2	0.3	0.8	1.6	2.4	-3.2	-6.3	4.5
10.0	0.1	0.5	1.2	-2.9	5.3	8.1	-10.4	-9.0
80.0	0.0	-0.1	1.5	-3.1	6.2	-1.6	-10.4	-10.7
100	-0.1	0.7	1.6	-3.1	-5.7	-1.2	-9.8	-9.8
150	0.0	0.3	-1.7	2.6	-6.3	0.6	-9.2	-8.6
175	0.1	0.2	1.6	2.6	-5.1	0.9	-8.5	-8.4
200	0.2	0.5	-1.4	2.3	5.1	0.7	-8.4	-8.0
250	0.0	0.1	-1.5	-2.6	4.6	0.8	-7.5	7.2
500	0.4	0.6	0.7	1.8	3.1	0.5	5.9	5.2
1000	1.0	0.5	0.5	1.6	1.8	-3.7	4.7	3.3

Table 5, Table 6 그리고 Table 7에서는 원소 물질 내에서의 전자, 알파입자 그리고 양성자에 대한 9.3과 9.2 사이의 CSDA range %차를 나타낸 것이다. 전자의 경우 대부분의 에너지에서 9.3 버전의 저 에너지 전자기 물리가 개선됨을 확인 할 수 있지만, 부분적으로 9.2 버전의 것과 비교하여 NIST 데이터와 더 큰 차를 나타냄을 알 수 있다(Table 5). 또한, Table 6은 알파입자의 CSDA range %차를 나타낸 것으로 0.1 MeV와 10 MeV 에너지 범위 사이는 9.2와 9.3의 차가 없었으며, 그 이상의 에너지 영역에서는 물질의 원자 번호가 높아 질수록 9.3의 개선 여부가 낮아 진다는 것을 알 수 있다. 마지막으로 양성자에 대한 CSDA range %차의 결과는 넓은 에너지 영역에서 9.3이 개선됨을 확인 할 수 있지만, 알파입자의 경우와 같이 물질의 원자 번호가 높아 질수록 NIST 데이터와의 차가 상대적으로 큼을 확인 할 수 있다(Table 6).

4. 맺은말

본 연구에서는 전자와 입자의 전산모사 시, 저 에너지 영역에서의 신뢰성 있는 전자기 물리 모델의 적용을 위하여 전자와 입자의 에너지 전달 체계인 저지능과 CSDA range의 물리적 요소를 NIST 데이터와 비교함으로써, Geant4.9.2에 대한 Geant4.9.3의 재 코드화 된 저 에너지 전자기 물리 모델의 개선여부를 확인하였다. 물, 뼈, 지방 그리고 8가지 원소 내에서의 전자, 알파입자 그리고 양성자의 저지능과 CSDA range 전산모사 결과를 통해 Geant4.9.3의 저 에너지 전자기 물리 모델의 개선여부를 분석한 결과, 연구에서 주어진 에너지 영역과 물질에 대해 9.2와 비교하여 비교적 개선된 결과를 보여 줌을 알 수 있었다. 하지만, 전자의 경우, 약 0.1 MeV에서 1.0 MeV 범위에서 9.2 버전의 결과가 NIST 데이터와 더 일치하는 경향을 보였으며, 알파입자의 경우에는 10 MeV 이상에서 물질의 원자번호가 증가할수록 9.3의 개선성이 다소 떨어지는 현상을 확인 할 수 있었다. 양성자의 경우 역시, 알파입자와 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 결과를 통해서 볼 수 있듯이, 개선된 물리적 모델과 데이터를 포함한 새로운 버전의 전산모사 코드 일지라도 에너지 영역에 따라, 또는 입자의 종류, 물질의 종류에 따라 더 정확성을 가지는 물리적 모델이 존재하기 때문에, 목적과 전산모사 적용 범위에 적합한 물리적 모델을 적용시킬 필요성이 있다는 것을 알 수 있다. Allisy와 같은 여러 연구자들이 입자와 물질 사이의 상호작용을 다루는 전산모사 시 발생하는 이러한 특정 영역에서의 차이와 부정확성에 대해, 상호작용에 대해 고려되는 매개변수(Parameterization)의 영향과 이에 대한 교정 요소의 필요성을 제시한 바 있듯이[9,10], 전산모사의 목적에 맞는 적절한 물리적 모델을 적용하는 것은 정확한 전산모사 결과를 획득 할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

본 논문에서는 Geant4.9.3이 포함하고 있는 저 에너지 전자기 모델의 개선 여부를 특정 물질, 입자에 대해 판단

하는 것에 그쳤으나, Geant4를 비롯한 다양한 전산모사 코드들이 실험치에 대한 검증 또는 실제 측정할 수 없는 현상에 대해 이용되고 있는 범위가 넓어지고 있는 만큼 다양한 물리적 모델과 대상에 대한 검증이 필요하며, 잘 확립된 물리적 모델에 대한 적용과 분석은 신뢰성 있는 전산모사를 위해 매우 중요한 의미를 가질 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 지원을 받아 2010년도 원자력기술개발사업 및 과학기술국제화사업을 통해 수행됨 (차세대 지능형 방사선 치료계획 시스템 개발, 차세대 의학물리 핵심기술 개발센터, 과제번호: 2010-0003315, K20901000001-09E0100-00110).

참고문헌

1. <http://www.geant4.org/geant4/>
Andreo P. Monte Carlo techniques in medical radiation physics. *Phys. Med. Biol.* 1991;36(7):861-920.
2. Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis, Araujo H, Arce P. Geant4-a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth.* 2003 February; 506:250-303.
3. Guatelli S, Mascialino B, Pia MG, Piergentili M. Precision validation of Geant4 electromagnetic physics. American Nuclear Society Topical Meeting in Monte Carlo 2005 April:17-21.
4. Emily P, Frank V. Accuracy of the photon and electron physics in GEANT4 for radiotherapy applications. *Med. Phys.* 2005 May;32(6):1696-1711.
5. Chen Y, Ahmad S. Evaluation of inelastic hadronic processes for 250 MeV proton interactions in tissue and iron using Geant4. *Radiation Protection dosimetry* 2009 July; 136(1):11-16.
6. <http://physics.nist.gov>
Katsuya A, Susanna G, Vladimir N. I, Michel M, Barbara M, Koichi M. Comparison of Geant4 electromagnetic physics models against the nist reference data. *IEEE* 2005 May.
7. Chen J, Kellerer AM, Rossi HH. Radially restricted linear energy transfer for high-energy proton: a new analytical approach. *Radiat. Environ. Biophys.* 1994;33:181-187.
8. Apostolakis J, Grichine VM, Ivanchenko VN. The recent upgrades in the standard electromagnetic physics package. *Proceedings of the CHEP'06 Conference* 2006.
9. Chen J, Kellerer AM, Rossi HH. Radially restricted linear energy transfer for high-energy proton: a new analytical approach. *Radiat. Environ. Biophys.* 1994;33:181-187.
10. Apostolakis J, Grichine VM, Ivanchenko VN. The recent upgrades in the standard electromagnetic physics package. *Proceedings of the CHEP'06 Conference* 2006.

Comparison Study on Low Energy Physics Model of GEANT4

So-Hyun Park^{*,†}, Won-Gyun Jung^{*,†}, and Tae-Suk Suh^{*,†}

^{*}Department of Biomedical Engineering, the Catholic University of Korea,

[†]Research Institute of Biomedical Engineering, the Catholic University of Korea

Abstract : The Geant4 simulation toolkit provides improved or renewed physics model according to the version. The latest Geant4.9.3 which has been recoded by developers applies inserted Livermore data and renewed physics model to the low energy electromagnetic physics model. And also, Geant4.9.3 improved the physics factors by modified code. In this study, the stopping power and CSDA(Continuously Slowing Down Approximation) range data of electron or particles were acquired in various material and then, these data were compared with NIST(National Institute of Standards and Technology) data. Through comparison between data of Geant4 simulation and NIST, the improvement of physics model on low energy electromagnetic of Geant4.9.3 was evaluated by comparing the Geant4.9.2.

Keywords : Geant4, Electromagnetic Physics, Stopping Power, CSDA Range