

양성자 치료 전산모사를 위한 Geant4 전자기 물리 모델 정확성 검증

*가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, †가톨릭대학교 생체의공학연구소,
‡국립암센터 양성자치료센터, §서울성모병원 방사선종양학과

박소현*† · 라정은‡ · 신정욱‡ · 박성용‡ · 윤세철§ · 정원균*† · 서태석*†

Geant4 toolkit은 전자기적 상호작용(electromagnetic interactions)에 대한 다양한 물리적 모델을 제공한다. 이러한 물리적 모델들에 대한 검증은 신뢰성 있는 Geant4 응용을 위해서 중요한 역할을 한다. 그러므로, 본 연구의 목적은 양성자 치료 전산모사를 위해 Geant4가 제공하는 물리적 모델 중 전자기 물리 모델의 정확성을 검증하는 것이다. 검증은 물, 뼈, 지방 그리고 원자번호가 다른 물질에 대해 양성자의 CSDA 비정(continuous slowing down approximation range)과 저지능(stopping power) 데이터를 미국 국립기술표준원(National Institute of Standards and Technology, NIST)의 데이터를 각각 비교하는 방법으로 이루어졌다. 물, 뼈 그리고 지방에 대해 0.01 MeV에서 10 GeV 범위의 입사 에너지의 CSDA 비정과 저지능 전산모사 결과와 NIST값을 비교한 결과, CSDA 비정의 평균 차는 각각 1.0%, 1.4% 그리고 1.4%를 나타내었고, 저지능에 대한 평균 차는 각각 0.7%, 1.0% 그리고 1.3%를 나타내었다. 또한, 각 물질에 대한 NIST 값과의 유의성을 분석하기 위해 kolmogorov-smirnov Goodness-of-Fit 통계분석 방법을 이용한 결과, 전자기 물리 모델의 전산모사 결과 데이터와 NIST 데이터 사이의 유의성을 나타내는 p-value가 유의 수준 0.05 이상 값을 가진다는 것을 확인 하였으며, 이를 통해 Geant4 전자기 물리 모델의 정확성을 검증할 수 있었다.

중심단어: 양성자 치료, Geant4, 전자기 물리, Kolmogorov-smirnov, 검증

서 론

물질을 통과하는 입자(particle)들의 전자기적 상호작용(electromagnetic interactions)에 대한 연구는 치료방사선 분야에서 중요한 역할을 한다. 하지만, 입자가 복잡한 구조를 투과하거나 불균질한 물질로 구성된 인체를 투과하며 일어나는 전자기적 상호작용은 실험적으로 측정·분석하는 것이 어렵기 때문에 여러 가지 변수들을 평가하기 위한 수학적 모델링인 몬테칼로(Monte Carlo) 방법이 이용된다.

몬테칼로 방법은 실험적 측정이 어려운 복잡한 문제에 대해 난수(random number)를 사용하여 분포함수로부터 확률변수를 표본 추출하는 방법으로서, 방사선 치료·진단 등 의학물리 분야에서 매우 유용하게 응용되고 있다.¹⁾ 현

재 의학물리 분야에서 많이 사용되고 있는 범용화 된 몬테칼로 전산모사 코드에는 MCNP (Monte Carlo N-particle Transport Code), EGS4 (Electron Gamma Shower) 그리고 Geant4 (GEometry And Tracking)가 있다. MCNP는 넓은 에너지 영역에서 광자, 전자 그리고 입자 등의 매질 내에서의 수송 체계를 예측 할 수 있으나 현재, 양성자의 매질과의 상호작용 시 발생하는 2차 중 입자(heavier particle) 생성이 가능하지 않기 때문에 양성자의 전산모사 응용에 제한이 있다.²⁾ EGS4는 전산모사 가능한 대상이 전자와 광자의 수송에 제한 되어 있어 양성자에 대한 전산모사 코드로는 부적합하다.³⁾ 반면, Geant4는 고 에너지 물리 실험을 모사하기 위해 개발된 코드로서 양성자에 대한 다양한 물리적 모델을 제공하고 있으므로 양성자의 수송체계를 계산하기에 적합한 전산모사 코드라 할 수 있다.⁴⁾ 본 연구에서는 양성자 치료의 전산모사에 적합한 Geant4 전산모사 코드를 대상으로 물리적 모델을 검증하였다.

Geant4는 물질을 통과하는 다양한 입자들을 전산모사 하기 위해 개발 된 객체 지향형(object-oriented)의 툴킷(toolkit)으로 입자와 물질과의 상호작용에 대한 다양한 물리적 모델을 제공하고 있다. 그러므로, 신뢰성 있는 전산모사를 하

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력연구개발 사업으로 지원받았음(연구과제 관리코드: 2009-0078361, 20090062478).

이 논문은 2009년 9월 10일 접수하여 2009년 10월 17일 채택되었음.
책임저자 : 서태석, (137-701) 서울시 서초구 반포동 505
가톨릭대학교 의과대학 의공학교실
Tel: 02)2258-7232, Fax: 02)532-1779
E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

기 위해서는 툴킷의 물리적 요소들이 정확성을 가져야 하며, 모든 물리적 모델에 대해 실험적으로 잘 확립된 데이터와 비교하여 이에 대한 정확성을 평가하는 것은 매우 중요하다. Cirrone과 Cuttone 등은 Geant3와 Geant4 5.2의 전자기 모델에 대한 정확성을 검증 하였으며,⁵⁾ Chauvie는 Geant4 (released 2003)의 낮은 에너지 전자기 물리 데이터 집(low energy electromagnetic package)에 대한 정확성을 검증하였다.⁶⁾ 이 외에도 Geant4의 다양한 버전에 대한 전자기 물리의 정확성 검증에 대한 연구가 있어 왔다.⁷⁾ 하지만, Geant4의 전자기 물리에 대한 검증은 물 또는 원자 번호에 따른 물질에 주로 집중되어 왔다.

본 연구에서는 새로운 버전의 Geant4 9.2 (Revision01)가 제공하고 있는 물리적 모델 중 양성자에 대한 전자기 물리의 정확성을 검증 하고자 물과 원자번호에 따른 물질뿐만 아니라 임상적 응용을 위해 뼈와 지방을 물질로 선정하여 양성자의 물질 내에서의 저지능(stopping power)과 CSDA 비정(continuous slowing down approximation range) 데이터를 전산모사 결과로 얻어서, NIST에서 제공하는 각각의 데이터와 비교하였다. NIST 데이터는 국제 방사선 단위 위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)의 데이터를 채택하고 있으며, Geant4 전자기 물리의 검증을 위해 많이 이용 되고 있다.⁸⁾ 또한, 물리적 모델에 대해 실험적으로 잘 확립된 데이터로서 의학물리 분야에서 일반적으로 많이 적용되고 있으므로 본 연구의 기준 데이터로 선정하였다.

재료 및 방법

1. Geant4 전자기 물리 모델

Geant4는 경 입자(leptons), 감마선(gamma-ray), 광자(optical photons), 중 입자(hadrons) 그리고 이온(ion)들의 전자기적 상호작용을 다루기 위한 물리적 모델들을 제공하며, 이는 가속기 실험에 필수적인 높은 에너지에 대한 물리적 모델과 원자효과와 공간 과학 그리고 임상적 응용에 필요한 낮은 에너지에 대한 물리적 모델 모두를 제공한다. 본 연구에서는 이러한 에너지 범위(1.0 keV~100 TeV)를 고려하여 Geant4의 전자기 물리에 포함 된 표준 데이터 집(standard package)과 낮은 에너지 데이터 집(low energy package)을 검증하였다.

1) **Standard package**: 표준 데이터 집은 1.0 keV에서 100 TeV 사이의 에너지 범위에서 전자기 상호작용을 묘사하기 위한 모델로서, 물질을 이루는 원자의 핵은 고정되어

있으며, 원자의 전자는 광전자 효과(photoelectric effect)의 경우를 제외하고 결합 에너지가 고려되지 않는 quasi-free 한 상태로 가정한다.

2) **Low energy package**: 낮은 에너지 데이터 집은 표준 데이터 집 보다 낮은 에너지 범위(250 eV 이하)에서의 전자기적 상호작용도 고려한다. 낮은 에너지 데이터 집은 중 입자와 이온에 의한 이온화 과정을 다루며, 에너지 범위와 참조로 하는 데이터에 따라서 다른 계산 모델을 적용시키고 있다. 에너지 범위에 따라서 2.0 MeV 이상의 높은 에너지 범위에서는 Bethe-Bloch 공식이 적용되고 있으며, 1.0 keV 미만인 낮은 에너지의 양성자에 대해서는 자유전자모델(free electron model)이 적용된다. 중간 에너지 범위에서는 ICRU와 Ziegler의 실험적 데이터를 참조하여 계산 모델을 적용시키고 있다. 그리고 Geant4 9.2에서는 참조하는 데이터에 따라 낮은 에너지 데이터 집은 다시 ICRU49, Ziegler77 그리고 Ziegler85로 나누어 사용자가 선택하여 사용할 수 있도록 구성 되어졌다.⁸⁾

2. 전산모사의 기하학적 형태 및 조건

Geant4 전산 모사를 위한 geometry 조건은 NIST의 실험 조건과 동일하게 구성하였다. NIST 실험 조건은 임의의 물질로 가득 채워진 정사각형 팬텀 중심에 1.0 keV에서 10 GeV 에너지 범위를 가진 양성자를 위치 시켰다.⁸⁾

본 연구에서도 3차원 공간 내에 크기가 4,500×4,500×4,500 cm³인 정사각형 팬텀이 위치하도록 설계하였다. 팬텀 내부 물질로 11가지 물질을 선정하였으며, 물질을 바꾸어 가며 각각의 저지능과 CSDA range를 전산모사 하였다. 팬텀 내부 물질로는 물을 비롯하여 베릴륨(Be-4), 알루미늄(Al-13), 철(Fe-26), 게르마늄(Ge-32), 은(Ag-47), 금(Au-79), 납(Pb-82) 그리고 우라늄(U-92)을 선정하였으며, 임상에 대한 적용을 고려하여 인체를 구성하는 뼈와 지방을 선정하였다. Geant4 전산모사 코드상의 물, 뼈 그리고 지방에 대한 구성 원소의

Table 1. Composition of the water, the bone and the adipose tissue.

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)	

Table 2. Stopping power of (a) the water (b) the bone and (c) the adipose tissue.

((%): percent difference, [g/cm²): difference)

(a)	Energy (MeV)	Reference (NIST)	Standard data	Low energy package data		
				ICRU49	Ziegler77	Ziegler85
Stopping power (MeV · cm ² /g)	0.001	1.77×10 ²	1.72×10 ² (3.0) [5.10]	1.78×10 ² (0.5) [8.99×10 ⁻¹]	1.75×10 ² (1.2) [2.10]	1.75×10 ² (1.2) [2.10]
	0.01	4.33×10 ²	4.43×10 ² (2.3) [1.04×10 ¹]	4.34×10 ² (0.3) [1.38]	4.43×10 ² (2.3) [1.04×10 ¹]	4.43×10 ² (2.3) [1.04×10 ¹]
	0.05	7.77×10 ²	7.46×10 ² (4.2) [3.10×10 ¹]	7.76×10 ² (0.1) [1.01]	7.61×10 ² (2.1) [1.60×10 ¹]	7.73×10 ² (0.5) [4.01]
	0.1	8.16×10 ²	8.23×10 ² (0.8) [6.55]	8.20×10 ² (0.5) [4.15]	8.21×10 ² (0.6) [5.15]	8.19×10 ² (0.4) [3.15]
	1	2.61×10 ²	2.70×10 ² (3.4) [9.30]	2.67×10 ² (2.4) [6.32]	2.70×10 ² (3.4) [9.30]	2.67×10 ² (2.4) [6.32]
	5	7.91×10 ¹	8.03×10 ¹ (1.5) [1.21]	8.02×10 ¹ (1.4) [1.09]	8.03×10 ¹ (1.5) [1.21]	8.03×10 ¹ (1.5) [1.21]
	10	4.57×10 ¹	4.62×10 ¹ (1.2) [5.70×10 ⁻¹]	4.51×10 ¹ (1.3) [5.63×10 ⁻¹]	4.60×10 ¹ (0.8) [3.70×10 ⁻¹]	4.60×10 ¹ (0.8) [3.70×10 ⁻¹]
	100	7.29	7.34 (0.7) [5.44×10 ⁻²]	7.31 (0.3) [2.05×10 ⁻²]	7.32 (0.5) [3.44×10 ⁻²]	7.32 (0.5) [3.44×10 ⁻²]
	1,000	2.21	2.22 (0.5) [1.13×10 ⁻²]	2.21 (0.0) [1.50×10 ⁻⁴]	2.22 (0.5) [1.13×10 ⁻²]	2.22 (0.5) [1.13×10 ⁻²]
	10,000	2.13	2.10 (1.2) [2.46×10 ⁻²]	2.12 (0.2) [4.62×10 ⁻³]	2.13 (0.3) [5.38×10 ⁻³]	2.12 (0.2) [4.62×10 ⁻³]

(b)	Energy (MeV)	Reference (NIST)	Standard data	Low energy package data		
				ICRU49	Ziegler77	Ziegler85
Stopping power (MeV · cm ² /g)	0.001	1.74×10 ²	1.76×10 ² (1.3) [2.24]	1.76×10 ² (1.3) [2.24]	1.76×10 ² (1.3) [2.24]	1.76×10 ² (1.3) [2.24]
	0.01	4.45×10 ²	4.30×10 ² (3.4) [1.47×10 ¹]	4.30×10 ² (3.4) [1.47×10 ¹]	4.30×10 ² (3.4) [1.47×10 ¹]	4.30×10 ² (3.4) [1.47×10 ¹]
	0.05	7.63×10 ²	7.85×10 ² (2.7) [2.13×10 ¹]	7.65×10 ² (0.2) [1.32×10 ¹]	7.75×10 ² (1.5) [1.13×10 ¹]	7.75×10 ² (1.5) [1.13×10 ¹]
	0.1	7.91×10 ²	8.10×10 ² (2.4) [1.91×10 ¹]	8.10×10 ² (2.4) [1.91×10 ¹]	8.10×10 ² (2.4) [1.91×10 ¹]	8.10×10 ² (2.4) [1.91×10 ¹]
	1	2.34×10 ²	2.38×10 ² (2.0) [4.58]	2.38×10 ² (2.0) [4.58]	2.38×10 ² (2.0) [4.58]	2.38×10 ² (2.0) [4.58]
	5	7.23×10 ¹	7.33×10 ¹ (1.5) [1.07]	7.33×10 ¹ (1.5) [1.07]	7.33×10 ¹ (1.5) [1.07]	7.33×10 ¹ (1.5) [1.07]
	10	4.20×10 ¹	4.25×10 ¹ (1.2) [5.06×10 ⁻¹]	4.23×10 ¹ (0.7) [3.06×10 ⁻¹]	4.25×10 ¹ (1.2) [5.06×10 ⁻¹]	4.25×10 ¹ (1.2) [5.06×10 ⁻¹]
	100	6.78	6.82 (0.6) [3.94×10 ⁻²]	6.82 (0.6) [3.94×10 ⁻²]	6.82 (0.6) [3.94×10 ⁻²]	6.82 (0.6) [3.94×10 ⁻²]
	1,000	2.05	2.07 (1.0) [2.08×10 ⁻²]	2.07 (1.0) [2.08×10 ⁻²]	2.07 (1.0) [2.08×10 ⁻²]	2.07 (1.0) [2.08×10 ⁻²]
	10,000	1.98	1.98 (0.1) [7.51×10 ⁻⁴]	1.98 (0.1) [7.51×10 ⁻⁴]	1.98 (0.1) [7.51×10 ⁻⁴]	1.98 (0.1) [7.51×10 ⁻⁴]

성분비는 NIST에서 제공하는 성분비(Table 1)와 동일하게 적용시켰다.

양성자의 위치는 NIST의 실험 조건과 동일 하도록 펜텀의 중심에 위치시켜 구성하였으며, 에너지 또한 1.0 keV부

터 10 GeV까지의 범위로 지정하였다.

3. 통계적 분석

Geant4 9.2 전산모사를 통해 얻어진 저지능과 CSDA rage

Table 2. Continued.

(c)	Energy (MeV)	Reference (NIST)	Standard data	Low energy package data		
				ICRU49	Ziegler77	Ziegler85
Stopping power (MeV · cm ² /g)	0.001	2.44×10 ²	2.49×10 ² (2.1) [5.33]	2.43×10 ² (0.2) [3.89×10 ⁻¹]	2.41×10 ² (1.0) [2.39]	2.42×10 ² (0.6) [1.39]
	0.01	6.05×10 ²	5.79×10 ² (4.5) [2.60×10 ¹]	6.06×10 ² (0.1) [5.60×10 ⁻¹]	5.98×10 ² (1.2) [7.44]	6.01×10 ² (0.7) [4.44]
	0.05	1.00×10 ³	9.39×10 ² (6.6) [6.19×10 ¹]	1.02×10 ³ (2.1) [2.10×10 ¹]	1.02×10 ³ (2.1) [2.10×10 ¹]	1.02×10 ³ (2.1) [2.10×10 ¹]
	0.1	1.01×10 ³	1.05×10 ³ (3.9) [4.08×10 ¹]	1.03×10 ³ (2.0) [2.00×10 ¹]	1.03×10 ³ (2.0) [2.00×10 ¹]	1.03×10 ³ (2.0) [2.00×10 ¹]
	1	2.76×10 ²	2.81×10 ² (1.9) [5.32]	2.81×10 ² (1.9) [5.32]	2.81×10 ² (1.9) [5.32]	2.81×10 ² (1.9) [5.32]
	5	8.26×10 ¹	8.31×10 ¹ (0.6) [4.96×10 ⁻¹]	8.31×10 ¹ (0.6) [4.96×10 ⁻¹]	8.31×10 ¹ (0.6) [4.96×10 ⁻¹]	8.31×10 ¹ (0.6) [4.96×10 ⁻¹]
	10	4.74×10 ¹	4.76×10 ¹ (0.4) [2.01×10 ⁻¹]	4.75×10 ¹ (0.2) [1.01×10 ⁻¹]	4.76×10 ¹ (0.4) [2.01×10 ⁻¹]	4.74×10 ¹ (0.0) [7.61×10 ⁻¹]
	100	7.50	7.51 (0.2) [1.34×10 ⁻²]	7.51 (0.2) [1.34×10 ⁻²]	7.52 (0.3) [2.34×10 ⁻²]	7.51 (0.2) [1.34×10 ⁻²]
	1,000	2.26	2.26 (0.3) [6.52×10 ⁻³]	2.26 (0.3) [6.52×10 ⁻³]	2.26 (0.3) [6.52×10 ⁻³]	2.26 (0.3) [6.52×10 ⁻³]
	10,000	2.16	2.15 (0.1) [3.08×10 ⁻³]	2.15 (0.1) [3.08×10 ⁻³]	2.15 (0.1) [3.08×10 ⁻³]	2.15 (0.1) [3.08×10 ⁻³]

데이터는 NIST의 PSTAR 데이터와 통계분석을 통해 비교하였다. 통계분석은 SPSS 프로그램(version 12.01, Chicago, IL)을 이용하였으며, 비모수(non-parameterized) 검정 방법인 2-sample kolmogorov-smirnov Goodness-of-Fit 테스트를 시행하였다. Kolmogorov-smirnov 통계 처리 방법은 두 비교 값들에 대한 분포차이를 비교, 분석하는 방법으로써 통계학적 유의성을 검정한다. Geant4 전자기 물리의 검증을 위해 유의 수준 α 를 0.05로 지정하였으며, 통계 분석 결과 값(p-value)이 0.05 이상이면 NIST 데이터와 Geant4 전산모사 결과 데이터가 통계적으로 유의적인 차이를 보이지 않고 가정 하였다.⁹⁾

결 과

양성자에 대한 Geant4 9.2의 전자기 모델 정확성을 검증하기 위해 양성자와 물질과의 저지능과 CSDA 비정의 전산모사 결과 데이터를 NIST 데이터와 비교한 결과, 물, 뼈 그리고 지방에 대한 저지능은 Table 2, Fig. 1과 같았다. Table 2는 양성자의 저지능 결과를 1.0 keV부터 10 GeV까지의 에너지 중 일부 에너지를 선택하여 수치적으로 나타낸 것으로 대괄호([])와 소괄호(()) 속의 값은 각각 모델의 전산모사 값과 NIST 값의 차와 백분율 차를 나타낸다. Table 2

에서 보듯이, 양성자의 1.0 keV부터 10 GeV까지의 입사 에너지 범위에서 저지능 결과 값은 모든 전자기 모델에 대해 약 0.0%에서 2.0%의 백분율 차를 나타냄을 알 수 있다. 하지만, 표준 데이터 집 모델의 경우 낮은 에너지 데이터 집 모델에 비해 낮은 입사 에너지 범위에서 큰 백분율 차를 나타내며, 특히, 지방에 대해 0.05 MeV에서 6.6%의 큰 백분율 차를 나타냄을 알 수 있다. Fig. 1은 실제 임상에서 이용되는 양성자의 입사 에너지 범위를 고려하여 나타낸 양성자의 입사 에너지에 대한 저지능 값에 관한 그래프이다. 양성자의 입사 에너지가 줄어들면서 대부분의 에너지를 물질에 전달하는 양성자의 물리적 특성을 내포하는 낮은 에너지 영역의 저지능에 대한 값과 낮은 입사 에너지 범위에서의 전산모사 결과와 NIST 값의 일치성을 확인하기 위해 2.0 MeV 이하의 에너지 범위를 확대하여 나타내었다. 비록, 입사 에너지에 대해 차이를 나타내는 저지능 값이 존재하지만, Table 2와 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 물, 뼈 그리고 지방에 대한 저지능은 NIST 데이터와 비교적 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

Table 3과 Fig. 2는 CSDA 비정에 대한 결과 값을 나타낸다. Table 3 역시 1.0 keV부터 10 GeV까지의 에너지 중 일부 에너지를 선택하여 CSDA 비정을 수치적으로 나타내었다. Table 3에서 보듯이 양성자의 입사 에너지 1.0 keV부터

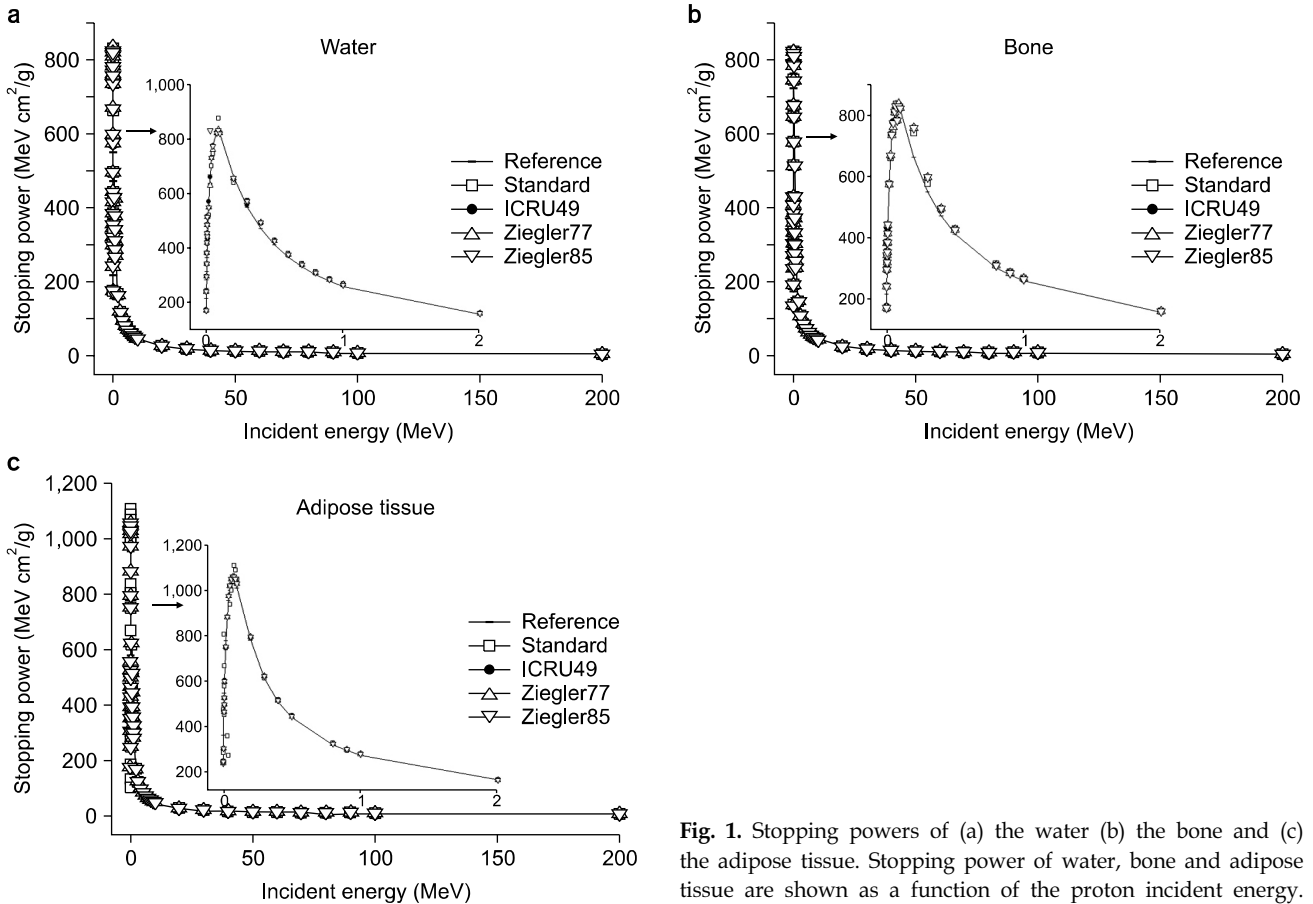


Fig. 1. Stopping powers of (a) the water (b) the bone and (c) the adipose tissue. Stopping power of water, bone and adipose tissue are shown as a function of the proton incident energy.

10 GeV까지의 범위에서 물, 뼈 그리고 지방의 CSDA 비정과 NIST 값의 차는 표준 데이터 집 모델과 낮은 에너지 데이터 집 모델 모두 약 0.0%에서 2.0%의 값을 나타낸다. 하지만, 표준 데이터 집 모델의 경우 뼈에 대한 백분율 차 값이 0.05 MeV 입사 에너지에서 3.3%, 0.09 MeV의 입사 에너지에서 3.5%를 나타내며, 지방에 대해서는 0.01 MeV의 입사 에너지에서 5.0%, 0.1 MeV에서 5.5%로 비교적 큰 백분율 차를 나타냄을 알 수 있다. 그리고 낮은 에너지 데이터 집 모델의 경우, 뼈에 대해 0.09 MeV의 입사 에너지에서 3.0%에서 3.5%의 차이 값을 나타냄을 알 수 있다. 하지만, Table 3에서도 알 수 있듯이, 대부분의 백분율 차가 약 1.0%를 내므로, CSDA 비정 전산모사 값과 NIST 값은 비교적 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

그리고 전산모사 결과 값과 NIST 값의 유의성을 알아보기 위해 Goodness-of-Fit 테스트를 통해 통계 처리한 결과 Table 4와 같았다. 물, 뼈 그리고 지방의 저지능과 CSDA 비정은 모두 유의 수준 0.05를 훨씬 넘는 p-value를 나타냄으로써, 전자기 모델과 NIST 값 사이에 유의성이 존재함을

확인 할 수 있었다.

다른 원자번호를 가진 원소들에 대해서도 1.0 keV부터 10 GeV까지의 에너지 범위에서 저지능과 CSDA 비정 데이터를 얻은 후, NIST 데이터와 통계 분석을 통해 비교한 결과 각각 Fig. 3, Fig. 4와 같은 통계 결과를 얻었으며, 원자번호에 따른 원소들 역시 모든 전자기 모델에 대해 유의 수준 0.05를 넘는 p-value를 가짐을 확인할 수 있었다.

고찰 및 결론

본 연구에서는 전산모사를 통해 얻은 양성자의 물질 내에서의 저지능과 CSDA 비정 데이터를 NIST 데이터와 비교하여 Geant4 9.2의 전자기 물리 모델에 대한 검증은 한 결과 전자기 물리에 포함 된 표준 데이터 집과 낮은 에너지 데이터 집 모두 NIST 데이터와 비교하여 0.05 이상의 p-value를 나타냄으로써, 신뢰성 있는 물리적 모델임을 검증 할 수 있었다. Geant4 9.2의 전자기 물리의 검증은 양성자 뿐만 아니라 광자, 전자 그리고 α 입자에 대해서도

Table 3. CSDA range of (a) the water (b) the bone and (c) the adipose tissue.

((%): percent difference, [g/cm²): difference)

(a)	Energy (MeV)	Reference (NIST)	Standard data	Low energy package data		
				ICRU49	Ziegler77	Ziegler85
CSDA range (g/cm ²)	0.01	3.60×10 ⁻⁵	3.68×10 ⁻⁵ (2.1) [7.78×10 ⁻⁷]	3.56×10 ⁻⁵ (1.1) [3.97×10 ⁻⁷]	3.68×10 ⁻⁵ (2.1) [7.78×10 ⁻⁷]	3.68×10 ⁻⁵ (2.1) [7.78×10 ⁻⁷]
	0.05	9.94×10 ⁻⁵	9.90×10 ⁻⁵ (0.3) [3.14×10 ⁻⁷]	9.93×10 ⁻⁵ (0.1) [3.67×10 ⁻⁸]	9.94×10 ⁻⁵ (0.1) [3.11×10 ⁻⁸]	9.92×10 ⁻⁵ (0.1) [1.39×10 ⁻⁷]
	0.09	1.49×10 ⁻⁴	1.49×10 ⁻⁴ (0.3) [5.00×10 ⁻⁷]	1.46×10 ⁻⁴ (1.9) [2.76×10 ⁻⁶]	1.48×10 ⁻⁴ (0.1) [3.45×10 ⁻⁸]	1.49×10 ⁻⁴ (0.2) [3.31×10 ⁻⁷]
	0.1	1.61×10 ⁻⁴	1.59×10 ⁻⁴ (1.1) [1.70×10 ⁻⁶]	1.59×10 ⁻⁴ (0.8) [1.32×10 ⁻⁶]	1.59×10 ⁻⁴ (0.9) [1.51×10 ⁻⁶]	1.59×10 ⁻⁴ (0.9) [1.51×10 ⁻⁶]
	1	2.46×10 ⁻³	2.40×10 ⁻³ (2.4) [5.80×10 ⁻⁵]	2.43×10 ⁻³ (1.2) [2.83×10 ⁻⁵]	2.46×10 ⁻³ (0.1) [6.40×10 ⁻⁷]	2.46×10 ⁻³ (0.1) [6.40×10 ⁻⁷]
	5	3.62×10 ⁻²	3.56×10 ⁻² (1.8) [6.30×10 ⁻⁴]	3.62×10 ⁻² (0.0) [7.71×10 ⁻⁷]	3.57×10 ⁻² (1.5) [5.29×10 ⁻⁴]	3.57×10 ⁻² (1.5) [5.29×10 ⁻⁴]
	10	1.23×10 ⁻¹	1.22×10 ⁻¹ (0.8) [1.00×10 ⁻³]	1.21×10 ⁻¹ (1.9) [2.28×10 ⁻³]	1.22×10 ⁻¹ (0.6) [7.07×10 ⁻⁴]	1.22×10 ⁻¹ (0.6) [7.07×10 ⁻⁴]
	100	7.72	7.76 (0.5) [4.20×10 ⁻²]	7.61 (1.5) [1.10×10 ⁻¹]	7.76 (0.6) [4.48×10 ⁻²]	7.72 (0.0) [0.00]
	1000	3.25×10 ²	3.26×10 ² (0.2) [7.38×10 ⁻¹]	3.23×10 ² (0.7) [2.26]	3.29×10 ² (1.0) [3.42]	3.29×10 ² (1.0) [3.42]
	10000	4.70×10 ³	4.68×10 ³ (0.4) [1.74×10 ⁻¹]	4.69×10 ³ (0.2) [7.35]	4.68×10 ³ (0.4) [1.74×10 ¹]	4.69×10 ³ (0.2) [7.35]
(b)	Energy (MeV)	Reference (NIST)	Standard data	Low energy package data		
				ICRU49	Ziegler77	Ziegler85
CSDA range (g/cm ²)	0.01	3.59×10 ⁻⁵	3.49×10 ⁻⁵ (3.0) [1.05×10 ⁻⁶]	3.58×10 ⁻⁵ (0.4) [1.57×10 ⁻⁷]	3.49×10 ⁻⁵ (3.0) [1.05×10 ⁻⁶]	3.55×10 ⁻⁵ (1.3) [4.50×10 ⁻⁷]
	0.05	9.91×10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁴ (3.3) [3.35×10 ⁻⁶]	1.01×10 ⁻⁴ (2.3) [2.31×10 ⁻⁶]	1.01×10 ⁻⁴ (2.3) [2.35×10 ⁻⁶]	1.01×10 ⁻⁴ (2.3) [2.35×10 ⁻⁶]
	0.09	1.50×10 ⁻⁴	1.55×10 ⁻⁴ (3.5) [5.34×10 ⁻⁶]	1.54×10 ⁻⁴ (3.0) [4.56×10 ⁻⁶]	1.55×10 ⁻⁴ (3.5) [5.34×10 ⁻⁶]	1.55×10 ⁻⁴ (3.5) [5.34×10 ⁻⁶]
	0.1	1.62×10 ⁻⁴	1.65×10 ⁻⁴ (2.0) [3.33×10 ⁻⁶]	1.64×10 ⁻⁴ (1.2) [1.97×10 ⁻⁶]	1.64×10 ⁻⁴ (1.4) [2.33×10 ⁻⁶]	1.64×10 ⁻⁴ (1.4) [2.33×10 ⁻⁶]
	1	2.71×10 ⁻³	2.73×10 ⁻³ (0.9) [2.45×10 ⁻⁵]	2.68×10 ⁻³ (1.1) [3.06×10 ⁻⁵]	2.73×10 ⁻³ (0.9) [2.45×10 ⁻⁵]	2.73×10 ⁻³ (0.9) [2.45×10 ⁻⁵]
	5	3.98×10 ⁻²	4.00×10 ⁻² (0.4) [1.77×10 ⁻⁴]	3.97×10 ⁻² (0.3) [1.19×10 ⁻⁴]	4.00×10 ⁻² (0.4) [1.77×10 ⁻⁴]	4.00×10 ⁻² (0.4) [1.77×10 ⁻⁴]
	10	1.35×10 ⁻¹	1.35×10 ⁻¹ (0.6) [8.67×10 ⁻⁴]	1.35×10 ⁻¹ (2.2) [2.94×10 ⁻³]	1.35×10 ⁻¹ (0.6) [8.67×10 ⁻⁴]	1.35×10 ⁻¹ (0.6) [8.67×10 ⁻⁴]
	100	8.32	8.41 (1.1) [8.88×10 ⁻²]	8.26 (1.2) [1.02×10 ⁻¹]	8.41 (1.1) [8.88×10 ⁻²]	8.41 (1.1) [8.88×10 ⁻²]
	1,000	5.06×10 ³	5.00×10 ³ (1.0) [3.19]	5.03×10 ³ (0.9) [2.96]	5.00×10 ³ (0.9) [3.19]	5.00×10 ³ (0.9) [3.19]
	10,000	4.63×10 ³	4.60×10 ³ (1.3) [6.26×10 ¹]	4.60×10 ³ (1.5) [7.34×10 ¹]	4.60×10 ³ (1.3) [6.26×10 ¹]	4.60×10 ³ (1.3) [6.26×10 ¹]

많이 연구되어져 왔으며, 신뢰성 역시 여러 연구에서 확인된 바 있다.¹⁰⁾ 하지만, Amako은 geant4 전산모사 시 1.0 MeV에서 5.0 MeV의 에너지 범위에서 정확하지 않은 매개 변수 (parameterization)로 인해 저지능의 기준 비교 데이터

와 전산모사 데이터 사이에 약 10%까지 차이가 발생할 수 있다고 보고하였으며,¹¹⁾ 이 문제에 대해 Allisy은 핵 저지능 (nuclear stopping power), Mott 교정(correction) 그리고 Bloch 교정 등 고려해야 할 교정 요소를 제시하였다.¹²⁾ 하지만,

Table 3. Continued.

(c)	Energy (MeV)	Reference (NIST)	Standard data	Low energy package data		
				ICRU49	Ziegler77	Ziegler85
CSDA Range (g/cm ²)	0.01	2.58×10 ⁻⁵	2.46×10 ⁻⁵ (5.0) [1.23×10 ⁻⁶]	2.53×10 ⁻⁵ (2.0) [5.08×10 ⁻⁷]	2.53×10 ⁻⁵ (2.1) [2.34×10 ⁻⁷]	2.53×10 ⁻⁵ (2.1) [5.34×10 ⁻⁷]
	0.05	7.32×10 ⁻⁵	7.12×10 ⁻⁵ (2.7) [1.95×10 ⁻⁶]	7.39×10 ⁻⁵ (1.0) [7.43×10 ⁻⁷]	7.11×10 ⁻⁵ (2.9) [2.05×10 ⁻⁶]	7.12×10 ⁻⁵ (2.7) [1.95×10 ⁻⁶]
	0.09	1.12×10 ⁻⁴	1.14×10 ⁻⁴ (1.7) [1.97×10 ⁻⁶]	1.13×10 ⁻⁴ (0.5) [5.62×10 ⁻⁷]	1.14×10 ⁻⁴ (1.7) [1.97×10 ⁻⁶]	1.13×10 ⁻⁴ (0.9) [9.70×10 ⁻⁷]
	0.1	1.22×10 ⁻⁴	1.29×10 ⁻⁴ (5.5) [7.03×10 ⁻⁶]	1.24×10 ⁻⁴ (1.4) [1.73×10 ⁻⁶]	1.25×10 ⁻⁴ (2.4) [3.03×10 ⁻⁶]	1.25×10 ⁻⁴ (2.4) [3.03×10 ⁻⁶]
	1	2.25×10 ⁻³	2.28×10 ⁻³ (1.0) [2.13×10 ⁻⁵]	2.25×10 ⁻³ (0.3) [7.74×10 ⁻⁶]	2.28×10 ⁻³ (1.0) [2.13×10 ⁻⁵]	2.28×10 ⁻³ (1.0) [2.13×10 ⁻⁵]
	5	3.45×10 ⁻²	3.46×10 ⁻² (0.5) [1.57×10 ⁻⁴]	3.44×10 ⁻² (0.2) [6.75×10 ⁻⁵]	3.46×10 ⁻² (0.5) [1.57×10 ⁻⁴]	3.46×10 ⁻² (0.5) [1.57×10 ⁻⁴]
	10	1.18×10 ⁻¹	1.19×10 ⁻¹ (0.7) [8.75×10 ⁻⁴]	1.17×10 ⁻¹ (1.1) [1.32×10 ⁻³]	1.19×10 ⁻¹ (0.7) [8.75×10 ⁻⁴]	1.19×10 ⁻¹ (0.7) [8.75×10 ⁻⁴]
	100	7.49	7.58 (1.2) [8.97×10 ⁻²]	7.40 (1.2) [8.88×10 ⁻²]	7.58 (1.2) [8.97×10 ⁻²]	7.58 (1.2) [8.97×10 ⁻²]
	1000	3.18×10 ²	3.22×10 ² (1.4) [4.53]	3.17×10 ² (0.3) [1.03]	3.22×10 ² (1.4) [4.53]	3.22×10 ² (1.4) [4.53]
	10000	4.63×10 ³	4.60×10 ³ (0.7) [3.03×10 ¹]	4.60×10 ³ (0.7) [3.05×10 ¹]	4.60×10 ³ (0.7) [3.08×10 ¹]	4.60×10 ³ (0.7) [3.08×10 ¹]

Table 4. Goodness-of-Fit test results concerning the stopping power and CSDA range of water, bone and adipose tissue. All the p-values obtained are higher than the confidence level set ($\alpha = 0.05$).

	Material	Standard energy	p-value		
			Low energy		
			ICRU49	Ziegler77	Ziegler85
Stopping power	Water	0.999	1	0.999	0.999
	Bone	0.999	1	0.990	0.990
	Adipose tissue	0.839	1	0.90	0.90
CSDA range	Water	1	1	1	1
	Bone	1	1	1	1
	Adipose tissue	1	1	1	1

양성자의 저지능은 이온의 저지능에 비해 이러한 교정 요소의 영향이 적을 뿐만 아니라, Apostolakis는 Geant4의 표준 데이터 집 전자기 물리에 이미 저지능의 차이를 발생시키는 요소들을 고려한 매개 변수들을 제공하고 있기 때문에 전산모사 시 에너지 범위에서 오는 저지능 값의 차이는 2% 내로 줄어들음을 보여 주었다.¹³⁾ 본 연구에서는 입사 에너지 1.0 MeV 이하의 에너지 범위에서 NIST 저지능 값과 전산모사 값 사이의 차이를 계산한 결과, 저밀도를 가진 물과 지방에 대해서 표준 데이터 집과 저 에너지 데이터 집 사이에 차이가 보였으며, 고밀도를 가진 뼈에 대해서는 두 데이터 집의 결과 값의 차이가 나타나지 않았다. Table

2에서 보듯이, low energy package에서 부분적으로 전산모사 저지능 데이터와 기존 데이터 사이에 백분율 차이가 4%까지 나는 결과도 있었지만, standard package와 low energy package 모델에 대해 저지능의 전산 모사 결과 값이 대부분 2.0% 내의 백분율 차를 나타냄을 확인 할 수 있으며, 백분율 차이가 아닌 단순한 저지능 데이터와 기존 데이터의 차(Table 2, [])를 보았을 때, 이는 매우 작은 값을 나타냄을 알 수 있기 때문에 양성자와 물질 사이의 상호작용에 대한 전산모사 시, 전자기 물리에 대해 앞서 Allisy와 Apostolakis가 언급하였던 핵 저지능, Mott 교정 등의 교정 요소를 적용하지 않아도 신뢰성 있는 전산모사 결과를 얻

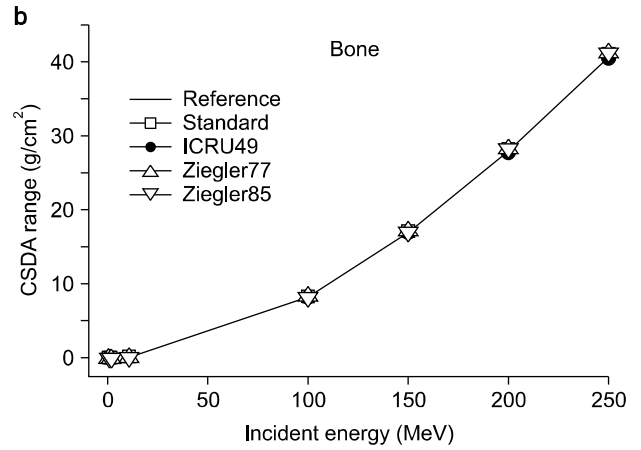
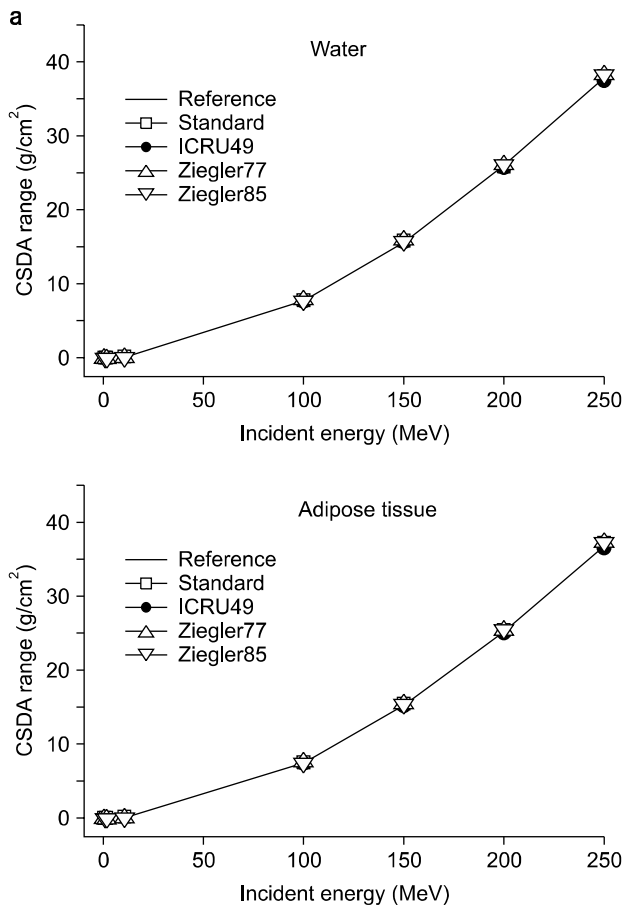


Fig. 2. CSDA ranges of (a) water (0.05~250 MeV), (b) bone (0.05~250 MeV), and (c) adipose tissue (0.05~250 MeV). CSDA ranges are shown as a function of the proton incident energy.

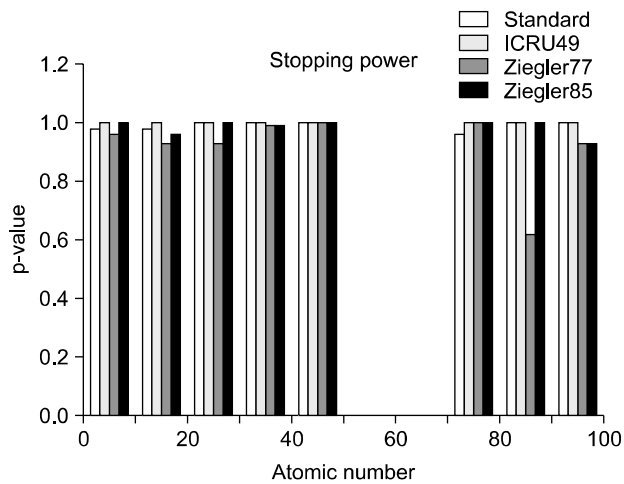


Fig. 3. Goodness-of-Fit test results of the stopping power plotted as a function of the atomic number of the selected elements. All the p-values obtained are higher than the confidence level set ($\alpha=0.05$).

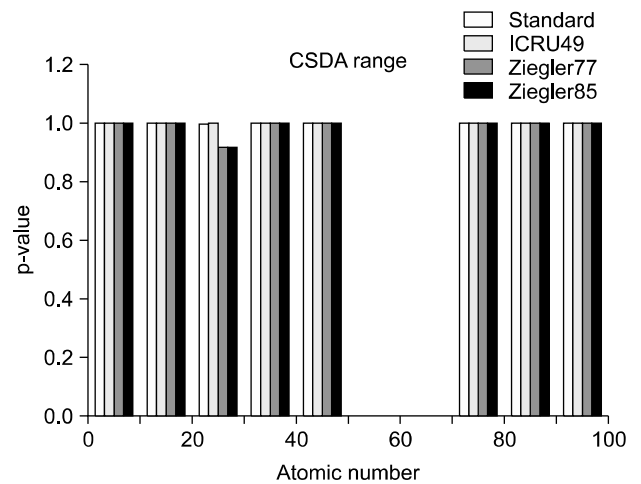


Fig. 4. Goodness-of-Fit test results of the CSDA range plotted as a function of the atomic number of the selected elements. All the p-values obtained are higher than the confidence level set ($\alpha=0.05$).

을 수 있는 가능성이 높아짐을 알 수 있었다.

그리고 결과 데이터들을 분석해 보면, 주로 낮은 에너지 범위의 입사 에너지에서 전산모사를 통한 각 전자기 물리 모델의 데이터와 기준 데이터 사이에 차가 발생 하며 특히, 표준 데이터 집에서 그 현상이 뚜렷함을 알 수 있다. 이것은 표준 데이터 집은 고려하는 입자의 에너지 범위가 1.0 keV로부터 100 TeV로서 250 eV 이하의 에너지 범위를 고려하는 낮은 에너지 데이터 집에 비해 1.0 keV 이하의 에너지를 가진 입자에 대해서는 고려가 되지 않기 때문이다. 또한 낮은 에너지 데이터 집 모델들 사이에서도 결과 데이터에 차이가 남을 알 수 있는데, 이 또한 어떤 데이터를 적용시키느냐에 따라 Geant4 9.2는 ICRU49, Ziegler77 그리고 Ziegler83으로 나누어 다른 데이터 값을 참조하여 전산모사 결과 값을 도출해 내기 때문이다. 하지만, 본 연구에서 기준 데이터로 사용한 NIST는 ICRU49를 참조하는 데이터이며, Ziegler 데이터 역시 물리 분야에서 신뢰성을 가진 권위 있는 데이터로 알려져 있다.¹⁴⁾ 또한, 본 연구에서도 확인할 수 있듯이, 입사 에너지에 따라 각 모델들의 전산모사 결과 값과 NIST 값과의 차를 나타내는 경향이 비슷하였으므로, Geant4 9.2에서 제공하는 전자기 물리 모델들 사이의 정확도 우위에 대한 평가는 할 수 없다. 그리고, 전산모사 결과와 기준 데이터간의 차는 대부분 소수점 이하에서 발생하는 지극히 적은 값으로서 양성자의 인체 내에서의 상호작용에 대한 분석 뿐 아니라, 양성자 치료와 관련된 수학적 계산에 대해서 Geant4 전자기 물리의 적용은 큰 오차를 발생시키지 않을 것이라 생각된다. 그러므로, Geant4의 전산 모사 시 어떤 물리적 모델을 사용 할 것인가에 대한 문제는 Geant4 응용목적에 따라 사용자의 선택에 달려 있다고 볼 수 있다. 하지만, Geant4가 제공하는 물리적 모델에 대한 검증은 전산모사 결과에 대해 신뢰성을 높일 수 있다는 중요한 의미를 가진다.

본 연구에서는 양성자에 대해서만 전자기 물리 모델의 검증을 하였으나 Geant4 전산모사에 대한 결과의 신뢰성과 사용자들에게 전산모사 시, 적절한 물리 모델을 선정할 수 있는 좀 더 폭넓은 참고자료로 활용 되기 위해서는 광자, 전자 그리고 α 입자에 대한 Geant4 9.2의 전자기 물리 모

델에 대한 검증도 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. **Andreo P**: Monte carlo techniques in medical radiation physics. Phys Med Biol 36:861-920 (1991)
2. **MCNPX (Monte Carlo N-Particle Code System) user's manual V2.4.0**: Los Alamos National Laboratory (2002)
3. **SLAC Report-265**: The EGS4 Code System, Stanford Linear Accelerator Center (1985)
4. **Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al**: Geant4—a simulation toolkit. Nucl Instrum Meth A 506:250-303 (2003)
5. **Cirrone P, Cuttone G, Donadio S, et al**: Precision validation of Geant4 electromagnetic physics. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record 1:482-485 (2003)
6. **Chauvie S, Guatelli S, Ivanchenko V, et al**: Geant4 low energy electromagnetic physics. American Nuclear society Topical Meeting in Monte Carlo, Chattanooga, TN (2005)
7. **Apostolakis J, Grichine VM, Ivanchenko VN, et al**: The recent upgrades in the “standard” electromagnetic physics package. CERN
8. **Katsuya Amako, Susanna Guatelli, Vladimir N, et al**: comparison of Geant4 electromagnetic physics models against the NIST reference data. IEEE Transactions on Nuclear Science. (2005)
9. **Mascialino B, Pia MG, Pfeiffer A, et al**: A toolkit for statistical comparison of data distributions, American Nuclear Society (2005)
10. **Dennis H. Wright, Tatsumi Koi, Gunter Folger, et al**: Recent developments and validations in Geant4 hadronic physics. International Conference on Calorimetry in High Energy Physics, Chicago, IL (2006)
11. **Cirrone GAP, Cuttone G, Guatelli S, et al**: Implementation of a new Monte Carlo - Geant4 simulation tool for the development of a proton therapy beam line and verification of the related dose distributions. IEEE Transactions on Nuclear Science 52:262-265 (2005)
12. **ICRU Report 49**: Stopping powers and ranges for protons and alpha particles (1993)
13. **Apostolakis J, Grichine VM, Ivanchenko VN, et al**: The recent upgrades in the standard electromagnetic physics package. Proceedings of the CHEP'06 Conference, Mumbai (2006)
14. **Guatelli S, Mascialino B, Pia MG, et al**: Precision validation of Geant4 electromagnetic physics. American Nuclear Society, LaGrange, IL (2005)

Precision Validation of Electromagnetic Physics in Geant4 Simulation for Proton Therapy

So-Hyun Park^{*†}, Jeong-Eun Rah[†], Jung Wook Shin[†], Sungyong Park[†],
Sei-Chul Yoon[§], Won-Gyun Jung^{*†}, Tae-Suk Suh^{*†}

^{*}Department of Biomedical Engineering, College of Medicine,

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

[†]Proton Therapy Center, National Cancer Center of Korea, Ilsan,

[§]Department of Oncology, Seoul St. Mary's Hospital, Seoul, Korea

Geant4 (GEometry ANd Tracking) provides various packages specialized in modeling electromagnetic interactions. The validation of Geant4 physics models is a significant issue for the applications of Geant4 based simulation in medical physics. The purpose of this study is to evaluate accuracy of Geant4 electromagnetic physics for proton therapy. The validation was performed both the Continuous slowing down approximation (CSDA) range and the stopping power. In each test, the reliability of the electromagnetic models in a selected group of materials was evaluated such as water, bone, adipose tissue and various atomic elements. Results of Geant4 simulation were compared with the National Institute of Standards and Technology (NIST) reference data. As results of comparison about water, bone and adipose tissue, average percent difference of CSDA range were presented 1.0%, 1.4% and 1.4%, respectively. Average percent difference of stopping power were presented 0.7%, 1.0% and 1.3%, respectively. The data were analyzed through the kolmogorov-smirnov Goodness-of-Fit statistical analysis test. All the results from electromagnetic models showed a good agreement with the reference data, where all the corresponding p-values are higher than the confidence level $\alpha=0.05$ set.

Key Words: Proton therapy, Geant4, Electromagnetic physics, Kolmogorov-smirnov, Validatio