

Original Article

GEANT4를 이용한 치료용 I-131 캡슐의 안정성 시뮬레이션

전북대학교병원 핵의학과¹, 서해대학교 방사선과²
정영환¹ · 김병철¹ · 심철민¹ · 서한경¹ · 권용주¹ · 한동현²

Safety Simulation of Therapeutic I-131 Capsule Using GEANT4

Yeong-Hwan Jeong¹, Byung-Cheol Kim¹, Cheol-Min Sim¹, Han-Kyung Seo¹, Yong-Ju Gwon¹ and Dong-Hyun Han²

¹Department of Nuclear Medicine, Chonbuk National University Hospital, Jeonju, Korea

²Department of Radiotechnology, Seohae College, Gunsan, Korea

Purpose Iodine (I-131) is one of the most widely used radioactive isotopes for therapeutic in the field of nuclear medicine. Therapeutic I-131 capsule is made out of lead to shield high energy radiation. Accurate dosimetry is necessarily required to perform safe and effective work for relative workers. The Monte Carlo method is known as a method to predict the absorbed dose distribution most accurately in radiation therapy and many researchers constantly attempt to apply this method to the dose calculation of radiotherapy recently. This paper aims to calculate distance dependent and activity dependent therapeutic I-131 capsule using GEANT4.

Materials and Methods Therapeutic capsules was implemented on the basis of the design drawings. The simulated dose was determined by generating of gamma rays of energy to more than 364 keV. The simulated dose from the capsule at the distance of 10 cm and 100 cm was measured and calculated in the model of water phantom. The simulated dose were separately calculated for each position of each detector.

Results According to the domestic regulation on radiation safety, the dose at 10 cm and 100 cm away from the surface of therapeutic I-131 capsule should not exceed 2.0 mSv/h and 0.02 mSv/h, respectively. The simulated doses turned out to be less than the limit, satisfying the domestic regulation.

Conclusion These simulation results may serve as useful data in the prediction of hands dose absorbed by I-131 capsule handling. GEANT4 is considered that it will be effectively used in order to check the radiation dose.

Key Words Thyroid cancer, Therapeutic I-131 capsule, GEANT4, Domestic regulations on radiation safety

서론

국내 갑상선암 환자의 발병률이 증가함에 따라 방사성요오드 치료가 필요한 환자가 증가하고 있다. 갑상선암은 방사성요오드 치료로 완치가 가능하고 생존율이 높아, 생존을 낮은

암과 달리 일단 발병한 환자는 계속 누적되는 경향을 보인다. 외과적 수술 후 방사성요오드 치료를 시행한 환자는 평생 추적관찰 대상이며 추적 중 재발하여도 다시 방사성요오드로 완치를 기대할 수 있다. 최근 국내의 갑상선암 환자가 늘어난 것이 발병률이 실제로 증가된 것 때문인지 또는 최근 널리 시행되는 갑상선 초음파의 도움으로 조기 발견되어 많아진 것인지는 논란이 있지만 어떤 이유이든 방사성요오드 치료가 필요한 환자는 앞으로도 증가 할 것이다.¹⁾ 핵의학과에서 방사선 피폭 관리 실태에 대한 조사연구에서 핵의학과 방사선 작업종사자의 최근 5년간 피폭선량을 보면 방사선사의 연간 피폭선량은

• Received: September 19, 2014. Accepted: October 21, 2014.
• Corresponding author: **Yeong Hwan Jeong**
Department of Nuclear Medicine, Chonbuk National University Hospital, 20, Geonji-ro, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 561-712, Korea
Tel: +82-63-250-2336, Fax: +82-63-250-1588
E-mail: lavare@hanmail.net

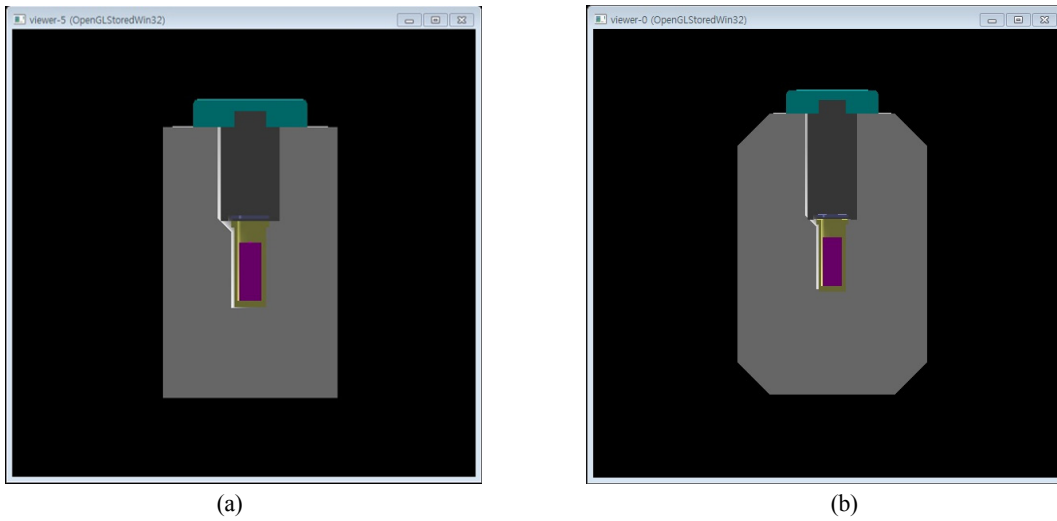


Fig. 1. The therapeutic capsule was based on the design drawing.
 (a) The cutting face of the therapeutic capsule of 1.1 GBq (b) The cutting face of the therapeutic capsule of 5.5 GBq

최소 0.53 mSv부터 최대 11.85 mSv로 높게 나타남을 알 수 있다.²⁾ 핵의학에 사용되는 방사선 선원과 작업종사자의 수적 증가, 근무시간이 점차 늘어남에 따라 개인별 방사선 피폭에 따른 심각성이 대두되고 있다.³⁾

최근 전산처리기술의 발전과 더불어 방사선 응용분야의 몬테카를로 방법이 다양한 전산코드들을 통해 방사선의 발생, 물질과의 상호작용과정 및 흡수선량을 통계적인 방법으로 계산하는데 사용되고 있다.⁴⁾ 의학물리 분야에서 광범위하게 이용되는 몬테카를로 기반의 시뮬레이션 프로그램에는 EGS (Electron Gamma Shower)와 MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Cord) 그리고 GENAT4 (GEometry AND Tracking)가 대표적이다. EGS와 MCNP 프로그램은 과거에 많은 연구를 통해 정확성이 확보되어 있는 장점이 있는 반면에 대중성이 떨어지는 프로그래밍 언어와 인터페이스의 사용으로 활용 측면에서 많은 제약이 따르고 있다.⁵⁾ GENAT4는 C++ 프로그래밍 언어를 기반으로 하는 객체 지향형 범용 몬테카를로 전산모사 킷으로서 최초에는 고에너지 입자물리 실험에 활용하기 위해 개발되었으나, 코드의 뛰어난 유연성과 함께 물질 내 입자들의 거동에 대한 사실적 모사, 복잡한 구조에 대한 모델링 능력, 물체 및 입자궤도에 대한 뛰어난 가시화 능력, 모든 사용자에게 공개된 코드로서 웹상에서 접근이 편리하다는 점 등 많은 장점들을 바탕으로 입자물리 뿐만 아니라 우주 과학, 의학 물리학, 방사선 방어 등 광범위한 분야에서 활용이 확대되고 있다.⁶⁾ 본 연구에서는 현재 핵의학 치료분야에서 널리 사용되고 있는 치료용 I-131 캡슐 용기를 몬테카를로 전산모사 킷인 GENAT4를 이용하여 캡슐의 내부 구조와 알약 형

태의 방사성 요오드를 사실적으로 모델링하고 364 keV 이상의 비교적 높은 에너지와 방출률을 가진 감마 방사선에 대한 용기의 방사선 차폐 능력을 국내 법적 허용치를 기준으로 비교하였다.

대상 및 방법

1. GEANT4 시뮬레이션 실행환경

GEANT4는 Windows, Linux, UNIX 세 종류의 운영체제에서 설치가 가능하게 제작되어 있다. 운영체제 마다 설치를 위해 기본적으로 요구되는 프로그램은 약간의 차이가 있다.⁷⁾ 본 연구에서는 Windows 운영체제에서 GEANT4 9.4.p01 버전을 이용하였다. 컴파일러는 Microsoft Visual Studio 2010 express가 사용되었다. 물리 라이브러리는 CLHEP 2.1.0.1 버전을 이용하였다. 저에너지 물리과정에 필요한 데이터는 G4EMLOW.6.19를 사용하였으며 전산모사에 사용된 컴퓨터는 Intel i5 계열의 CPU가 장착된 개인용 PC를 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시각화에는 GEANT4에 기본적으로 설정되어 있는 OpenGL 그래픽 드라이버를 이용하였다.

2. 치료용 캡슐용기의 기하학적 구조 모델링

치료용 I-131 캡슐용기는 투여용량별로 두께와 높이에 차이는 있지만 기본적인 구조는 내부에 알약 형태의 방사성요오드 선원이 있고, 선원을 감싸는 플라스틱용기, 플라스틱 용기

Table 1. Material, its elements and ratio, and density

Material	Element	Component ratio (%)	Density (g/cm ³)
PVC	H	0.0207	0.92
	C	0.2477	
	Cl	0.7314	
Robber	H	0.12	0.92
	C	0.88	
Lead	Pb	0.997	11.35
Air	N	0.7	0.00129
	O	0.3	

를 감싸는 형태의 납(Pb) 차폐물로 구성되어 있다. 방사성 요오드 선원을 외부로 꺼내기 용이하도록 중앙을 비운 항아리 모양의 공간에 납 차폐체가 연결된 플라스틱 뚜껑으로 이루어져 있다. 선원을 감싸는 플라스틱 용기는 선원에서 방출되는 베타선을 차폐하는 역할과 외부 납용기와 완충 작용을 하면서 선원을 고정하는 기능을 하고 있다. 차폐 용기와 차폐 뚜껑과 연결된 납은 순도 99.7%의 납으로 구성하였고 차폐체와 선원 용기 사이, 차폐체 외부는 공기로 구성하였다. 차폐용기와 다르게 알약 형태의 방사성요오드는 둥근 형태의 양쪽 끝부분의 정밀한 구형이 어려워 모델링 과정에서는 원기둥 형태로 단순화하여 구현하였다. 방사성요오드와 캡슐용기의 절단면을 국산 치료용 캡슐용기의 설계도면을 바탕으로 시각화하였다 (Fig. 1). 캡슐용기의 기하학적 구조(Geometry)를 구성하는 물질들의 조성 성분과 비율 그리고 밀도를 보여주고 있다 (Table 1).

3. 캡슐용기의 차폐계산의 기준

누설선량의 측정은 치료용 I-131 캡슐용기의 방사선 차폐 능력을 평가하는 것이므로 “방사선기기”의 관점으로 분석을 수행하였다. 원자력 안전위원회 고시 제 2012-40호 방사선 설계승인 및 검사에 관한 기준 항목에서, 방사선 기기의 구조기준 중 치료용 방사성 요오드 운반용기의 외형 및 사용목적 등을 고려하여 판단할 때 제 20조 휴대 개방형에 대한 구조기준을 적용시킬 수 있다.⁸⁾ 이에 대한 구조기준은 운반용기의 표면 방사선량은 시간당 2 mSv/h를 초과하지 아니하여야 하는데, 표면 방사선량이라 함은 특수공구를 사용하지 아니하고 제거될 수 있는 방사선기기의 외부 부착물이 완전히 제거된 상태에서 신체 접촉이 가능한 방사선기기의 표면으로부터 10 cm의 거리에서 측정된 방사선량을 말한다. 즉, 표면으로부터 10 cm 거리에서 2 mSv/h를 초과하지 아니하면서 100 cm 떨어진

Table 2. Emissivity of Iodine-131.

[37 MBq]

Decay radiation	Energy (keV)	Emission probability per decay (photons/decay)	Emissivity (photons/sec)
gamma	284.305	0.0612	2.264×10 ⁶
	364.489	0.8150	3.015×10 ⁷
	636.989	0.0716	2.649×10 ⁶
	722.911	0.0177	6.549×10 ⁵
합계		0.9655	3.572×10 ⁷

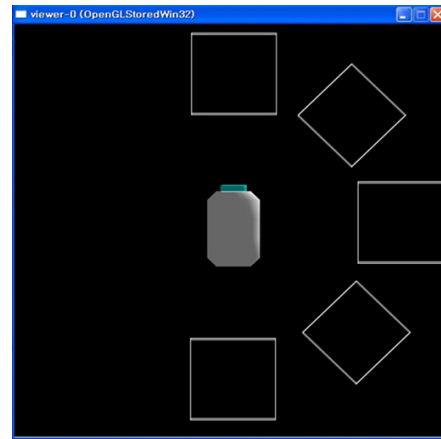


Fig. 2. Detector positions at the distance of 10 cm away from the surface of the therapeutic capsule of 5.5 GBq.

위치에서 방사선량은 0.02 mSv/h를 초과하지 않게 설계하여야 한다고 명시되어 있기 때문에 이를 기준으로 하여 안전성의 유무를 평가하였다.

4. 거리에 따른 용기별 누설선량의 측정

치료용 I-131 캡슐용기 외부에서의 방사선을 측정하기 위해 용기 둘레에 가상의 검출기(detector)를 구성하였으며 방사형으로 발생하는 방사선을 위치별로 측정하기 위해 용기표면에서 10 cm와 100 cm 거리에 10×10×10 cm³ 부피의 정육면체 상자 형태의 물 팬텀(phantom)을 상부, 측면, 하부, 상부측면, 하부측면 다섯 방향에 설치하였다(Fig. 2). 물 팬텀은 내부에 입사된 방사선의 에너지를 측정하여 흡수선량을 구할 수 있는 흡수체이면서 동시에 검출기의 기능을 한다. 실제 하나의 실험을 시행할 때는 그림과 같이 모든 검출기를 동시에 구성하지 않고 흡수체에 의한 물리적 영향을 배제하기 위해 하나의 흡수체를 두고 시뮬레이션 하는 방식으로 다섯 방향에서 따로 따로 계산하였다.

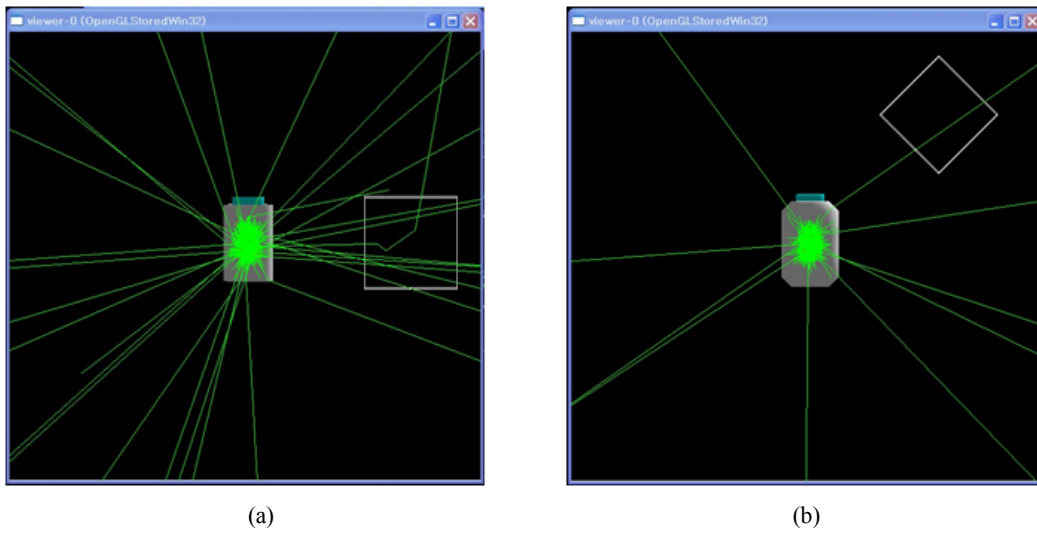


Fig. 3. Trajectory of gamma rays in Geant4 simulation.
 (a) The therapeutic capsule of 1.1 GBq, (b) The therapeutic capsule of 5.5 GBq

Table 3. Simulated dose rate at 10 cm and 100 cm away from the 1.11 GBq capsule surface

Position	Distance	10 cm (mSv/h) ≤ 2.0	100 cm (mSv/h) ≤ 0.02
Up		0.0114	0.00029
Upside		0.0110	0.00021
Lateral		0.0381	0.00099
Bottom side		0.0113	0.00018
Bottom		0.0131	0.00039

Table 4. Simulated dose rate at 10 cm and 100 cm away from the 5.55 GBq capsule surface

Position	Distance	10 cm (mSv/h) ≤ 2.0	100 cm (mSv/h) ≤ 0.02
Up		0.0232	0.00070
Upside		0.0167	0.00031
Lateral		0.0666	0.00188
Bottom side		0.0169	0.00031
Bottom		0.0170	0.00054

5. 누설선량의 계산

모든 에너지의 방사선에 대하여 시뮬레이션을 수행하는 것은 원칙적으로 불가능하다. 따라서 고려하고 있는 물리적 환경에 적합하게 시뮬레이션을 수행할 일정한수의 방사선을 선정해야한다(Table 2). 37 MBq (1 mCi)의 I-131은 한번 붕괴될 때에 284.3~722.9 keV의 에너지를 가진 감마선들이 대략 0.9665개 방출되고, 이는 초당 3.572×10^7 개의 감마선이 방출 확률에 따라 방출되는 것을 의미한다. 빔의 생성은 364.4 keV 이상에 에너지가 붕괴당 방출확률에 맞게 방출하도록 생성시켜 수행하였으며, 계산된 값을 법적 기준치와 비교할 수 있는 물리량으로 전환하기 위하여 초당 흡수선량(Gy/sec)으로 얻어진 데이터를 시간당 등가선량(mSv/hr)으로 변환하여 주었다. 계산이력은 결과의 정확성을 위해 4×10^9 회로 하였다.

결 과

시뮬레이션 과정 동안 알약형태의 I-131 선원에서 364 keV 이상의 에너지를 가진 3000개의 감마선을 방출시켰을 때 캡슐용기와 상호작용하여 산란되는 과정을 시각화 하였다(Fig. 3).

1.1 GBq과 5.5 GBq의 국산 캡슐용기 표면으로부터 10 cm에서의 누설선량은 다섯 방향에서 모두 법적 허용 기준인 2.0 mSv/h에 비해 현저히 낮은 값으로 나타났다. 100 cm에서의 누설선량 계산 결과도 10 cm거리에서와 마찬가지로 다섯 방향에서 모두 법적 기준치인 0.02 mSv/h 이하로 나타났다. 용기별 시뮬레이션 결과를 표로 정리하였다(Table 3, 4). 캡슐용기의 측면방향에서의 결과값들이 공통적으로 높게 계산되었는데, 이는 알약 형태의 방사성요오드가 세로 방향으로 세워져 있는 구조로 있으면서 감마선의 방출이 방사형으로 방출되기 때문인 것으로 추정된다.

결 론

핵의학 치료 영역에서 널리 이용되고 있는 고용량 방사성 요오드 치료를 위한 I-131의 이용은 암등록 통계자료와 동위 원소 협회의 방사선 이용 통계자료 등에서와 같이 그 사용빈도가 급격히 증가하고 있는 추세이다. 본 연구에서는 방사성 요오드 치료를 시행하고 있는 의료기관에서 널리 이용되고 있는 치료용 I-131 캡슐용기의 방사선 차폐능력과 안정성을 GEANT4 전사모사를 이용하여 평가하였다. 1.11 GBq 캡슐용기와 5.55 GBq 캡슐용기를 10 cm와 100 cm 거리에서 상부, 측면, 하부, 상부측면, 하부측면 다섯 방향에서 각각 1 kg에 물 팬텀을 위치시켜 물 팬텀 내부에 용기의 누설선량을 측정하였다. 전사모사를 시행한 결과, 두 용기가 모든 방향에서 법적 기준치인 표면으로부터 거리 10 cm에서 2 mSv/h 이하 그리고 100 cm에서 0.02 mSv/h 이하로 주어진 법적 기준치보다 현저히 낮은 선량이 방출되는 것으로 나타났다. 이와 같은 시뮬레이션 결과는 치료용 I-131 캡슐용기를 취급할 때 용기의 누설선량을 예측할 수 있는 유용한 기초자료가 될 수 있을 것이다.

요 약

국내 갑상선암 환자의 발병률이 증가함에 따라 방사성요오드 치료가 필요한 환자가 증가하고 있다. 방사성 요오드 치료에 이용되고 있는 캡슐용기들 중 1.1 GBq과 5.5 GBq의 국산제품에 설계도면을 바탕으로 차폐체를 구현한 후 366 keV 이상에 감마선들에 대하여 캡슐용기의 방사선 누설선량을 GEANT4 전사모사를 이용하여 평가하였다. 치료용 I-131 캡슐용기 누설선량을 측정하기 위해 각각의 용기에 대하여 용기 표면에서 10 cm 거리 및 100 cm 거리에서의 누설선량을 측정하였다. 용기표면에서 10 cm 거리와 100 cm 거리에서의 누설선량 측정은 방사형으로 발생하는 방사선을 위치별로 측정하기 위해 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ 부피의 정육면체 형태의 물 팬텀

(phantom)을 상부, 상부측면, 측면, 하부측면, 하부 다섯 방향에 설치하여 누설선량을 계산하였다. 용기별로 5개 방향에서 용기표면으로부터 10 cm, 100 cm 거리에서 전사모사를 수행한 결과 법적 허용기준인 10 cm 거리에서 2.0 mSv/h, 100 cm 거리에서 0.02 mSv/h 이하의 선량 규정과 비교하였을 때 법적기준치보다 현저히 낮은 누설선량이 방출되는 것을 확인하였다.

REFERENCES

1. 이동수, 정재민, 박민재 등: 우리나라에서 방사성요오드 치료 관리 최적화, *대한핵의학회지*. 2008;42(4):261-266.
2. 임창선, 김세현: 핵의학과에서 방사선 피폭관리 실태에 대한 조사 연구, *한국산학기술학회*. 2009;10(7):1760-1765.
3. 박준철, 표성재: 핵의학 종사자에서 손 부위의 외부 피폭선량 연구, *대한방사선과학회*. 2012;35(2):141-149.
4. 박소현, 정원균, 서태석: GEANT4 저 에너지 전자기 물리 모델에 대한 비교 연구, *대한방사선방어학회*. 2010;35(3):124-134.
5. 강상구, 안성환, 김종일: 몬테카를로 방법에 의한 6 MV 선형 가속기의 광자 흡수선량 분포 평가에 관한 연구, *대한방사선과학회*. 2011;42(1):43-50.
6. Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al: Geant4 Developments and Applications. *IEEE Trans. Nucl. Sci* 53(1): 270-278, (2006).
7. Geant4 Collaboration: Geant4 User's Guide for Application Developers. <http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation> (2008)
8. 원자력 안전위원회 고시: 제 2012-40호: 방사선 설계승인 및 검사에 관한 기준 항목 (2012).