

GEANT4를 이용한 ^{99m}Tc Generator 안전성 시뮬레이션

전북대학교 대학원 방사선과학기술학과

강상구 · 한동현 · 김종일

테크니슘(^{99m}Tc)은 현재 핵의학 분야에서 진단용 방사선원으로 가장 널리 쓰이고 있는 방사성 동위원소 중 하나이다. 일반적으로 테크니슘은 ^{99m}Tc Generator라 불리는 장치 안에서 모핵종인 ⁹⁹Mo의 붕괴를 통해 생산되는데, ⁹⁹Mo과 ^{99m}Tc에서 비교적 높은 방사선을 방출하기 때문에 이를 차폐하기 위하여 주로 납으로 제작되어 있다. 본 논문에서는 국내에서 비교적 사용 빈도가 높고 교정 방사능이 500 mCi인 일본 제품을 대상으로, 최대 방사능량 적제조건에서 차폐용기 표면으로부터 10 cm, 100 cm에서 각각 2.0 mSv/h, 0.02 mSv/h를 초과하지 않아야 한다는 국내 법적 제한치를 만족시키는지 여부를 GEANT4를 이용하여 시뮬레이션하였다. 계산 결과 용기 밖으로 방출되는 방사선량이 법적 기준치를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

중심단어: GEANT4, ^{99m}Tc Generator, 법적선량제한치

서 론

테크니슘(^{99m}Tc)은 체내 진단을 위해 투여되는 대표적인 방사성 동위원소로서 다양한 화합물 표지가 가능하여 뼈, 심장, 뇌, 간, 폐, 갑상선, 신장 등과 같은 거의 대부분의 인체 내부 장기에 집적할 수 있기 때문에, 전 세계적으로 핵의학적인 진단에 널리 이용되고 있다. 테크니슘은 국내에서 이용률이 가장 높은 핵종으로 현재 약 200여 개의 의료기관에서 사용되고 있으며, 사용횟수 기준으로 환자 진단 시 사용되는 방사성 동위원소의 80% 이상을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 과거 국내에서 사용되는 ^{99m}Tc Generator (이하 Generator)의 수요는 전량을 일본의 다이치(Daiichi), 미국의 듀퐁(Dupont), 영국의 애머샴(Amersham), 호주의 안스토(Ansto) 등과 같은 외국 기업 제품의 수입에 의존했지만, 현재는 국산화가 이루어져 UNITECH라는 명칭의 국산 장비가 의료기관과 연구소에 보급되고 있다. 방사성 동위원소 Generator의 개발과 이용에 있어 가장 중요한 요소는 방사선 안전 관리일 것이며, Generator의 기계적

강도와 방사선 차폐 능력을 고려하여 설계와 제작이 이루어지고 필요한 승인절차를 거쳐 시판되고 있다.

본 연구에서는 Generator의 차폐체가 내부의 폴리브덴(⁹⁹Mo)과 테크니슘에서 방출되는 감마선과 베타선을 충분히 차단하여 국내 법적 기준을 만족시키는지의 여부를 확인하고자 한다. 시뮬레이션 대상은 편의상 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 Generator 중 하나인 일본의 다이치사의 500 mCi용 Generator를 선택하였다.

이론적 배경 및 시뮬레이션

1. GEANT4 시뮬레이터

GEANT4(GEometry ANd Tracking)는 실제 실험 자료와 물리학 이론을 바탕으로 입사 입자(incident particle)와 물질 사이의 상호작용에 따른 입사 입자의 에너지, 운동량, 경로 등의 상태 변화와 새로이 생성된 2차 입자들(secondary particles)의 운동 상태 변화와 경로를 계산하고, 그 결과를 3차원 영상으로 보여주는 시뮬레이션 프로그램이다. 이 프로그램은 1970년대 유럽입자물리연구소(CERN)의 주도로 거대 강입자 충돌기(LHC: Large Hadron Collider)에서 높은 에너지를 가진 입자들의 충돌에 의해 생성되는 중입자, 경입자, 그리고 게이지 보존 등 2차 입자들의 물리적 행동을 시뮬레이션하기 위한 목적으로 개발되었다. GEANT4는 몬테칼로 방법을 기반으로 하고 있으며, 초기에는 포트란(Fortran) 언어로 구성되었으나, 후에 구성 언어를 C++로 변

이 논문은 2007년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. M20608520001-07B0852-00110연구).

이 논문은 2007년 11월 15일 접수하여 2008년 2월 18일 채택되었음.
책임저자 : 김종일, (561-756) 전라북도 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

전북대학교 방사선과학기술학과
Tel: 063)270-3435, Fax: 063)270-3434
E-mail: kimbo@chonbuk.ac.kr

환하여 객체 지향 프로그래밍 기술(OOT: Object Oriented Technology)을 기반으로 재구성되었다.²⁾

CERN의 주도하에 이루어지던 공동 연구는 점차 대규모 국제 공동 연구의 형태로 발전하여, 입자 및 핵물리학자와 컴퓨터 엔지니어들을 중심으로 활발한 공동 연구가 수행되어 현재에는 거의 모든 약(weak) 상호작용과 강(strong) 상호작용에 관한 물리 현상까지 시뮬레이션이 가능해져 거의 대부분의 양자역학적 충돌 현상에 대한 시뮬레이션을 수행할 수 있는 능력을 갖추었다. 현재에도 물리적 정확성과 시뮬레이션 환경의 지오메트리(Geometry) 구성 능력 그리고 3차원 시각화 기능을 향상시키는 연구가 중점적으로 이루어지고 있다. GEANT4는 고유의 목적이었던 입자 및 핵물리학 연구에서 점차 벗어나, 우주 과학, 가속기, 의료, 환경 방사선 모니터링, 방사선 차폐, DNA 구조 변화 등 광범위한 영역에서 다양한 용도로 활용되고 있다.³⁾ GEANT4는 개방 프로그램으로 인터넷을 통해 무료로 다운받아 사용할 수 있으며, Windows, Linux, SUN의 운영체제에서 호환이 가능하며, 시각화와 데이터 분석을 위한 프로그램 툴킷(toolkit) 또한 무료로 이용할 수 있다. 이러한 별도 소프트웨어를 연계하는 인터페이스 기능이 GEANT4 프로그램 내에 구성되어 있어 사용자 친화력이 우수하다.

GEANT4는 17개의 카테고리(category) 속에 약 2,000여 개의 클래스(class)로 구성되어 있으며, 사용자는 이들 클래스를 상속하여 사용하고자 하는 환경 구조에 따라 세분화한 사용자 정의 클래스를 구성하여 시뮬레이션을 수행한다. 기본적으로 기하학적 구조와 검출기 설정, 입자 생성, 그리고 물리적 상호작용을 설정하는 세 개의 필수 클래스를 구성하는 것을 기초로, 다양한 변수의 실험과 원하는 형태의 데이터 출력 등을 위한 추가적인 클래스를 구성하고 메인 클래스를 통해 구성된 클래스들의 연계시켜 시뮬레이션의 모든 과정을 관리하는 구조로 되어 있다.

본 연구에서 GEANT4.8.0.p01 버전으로 시뮬레이션을 수행했으며 사용된 컴퓨터는 Microsoft Windows Server 2003 Enterprise Edition sp2, Intel(R) Xeon(R) CPU 5150 @ 2.66 GHz, 6.00 GB RAM 사양의 Workstation이다. 물리적 반응에 관한 과정은 감마선과 전자선에 대한 물리적 과정을 기술하는 모델 중 가장 대표적인 모드인 표준 전자기 모델을 사용하였다. 시각화에는 GEANT4에 기본적으로 설정되어 있는 OpenGL 그래픽 드라이버를 이용하였다.

2. ^{99m}Tc 의 생성과정과 작용기전

^{99m}Tc 는 모핵종과 자핵종이 방사 평형을 이룬 상태에서

자핵종만을 화학적으로 분리하고 나면, 시간이 지나 다시 생성되는 자핵종을 얻는 소위 반복된 밀킹을 통해 생산되는데, Generator는 이러한 밀킹을 위한 장치라 할 수 있다. Generator는 모핵종인 ^{99}Mo 의 붕괴 과정에서 생성된 ^{99m}Tc 만을 분리하고 이를 체내 투여하여 진단용으로 사용하는데, ^{99m}Tc 의 농도가 최대치에 달하는 시간이 약 23시간이기 때문에 매일 밀킹이 가능하다. 의료용으로 많이 사용되고 있는 500 mCi Generator 하나에서 보통 5일 정도를 밀킹하여 사용한다. ^{99m}Tc 가 진단용 방사성 동위원소로 광범위하게 이용되는 이유는 일반적으로 다음과 같은 특징을 가지고 있기 때문이다.⁴⁾

1) 반감기(Half Life)가 6시간으로 다른 방사성 동위원소에 비해 짧기 때문에 체내 피폭량이 비교적 적다.

2) 방출되는 방사선의 에너지가 141 keV로 상대적으로 낮기 때문에, 체내 피폭량이 적은 반면 침투성이 우수하여 인체 조직에 정확하게 도달할 수 있으며, 감마카메라의 검출감도에 적합하여 진단 정확성이 높다.

3) 단일한 에너지를 가진 감마선을 방출하기 때문에 측정된 데이터의 분석이 용이하다.

4) 다양한 산화가(-1~+7)를 가져 진단 용도별 다양한 표지 화합물의 사용이 가능하여 신체의 거의 대부분의 장기에 집적되는 표지 화합물을 제조할 수 있기 때문에 광범위한 진단에 이용될 수 있다.

^{99m}Tc 의 모핵종인 ^{99}Mo 을 생산하는 방법은 크게 2가지가 있다. 하나는 ^{98}Mo 에 중성자를 조사하는 방법이며, 다른 하나는 농축 우라늄(^{235}U)을 원자로에서 핵분열시켜 생성되는 여러 핵종들 중 ^{99}Mo 을 분리하여 정제하는 피션 물리(fission moly) 방법이다. ^{98}Mo 에 중성자를 조사하는 방법은 비교적 표적의 제작, 중성자 조사, 그리고 분리정제가 간단하고, 폐기물의 방사선 준위가 낮아 폐기물 처리도 비교적 단순하여 경제적이다. 하지만 천연 몰리브덴을 그대로 사용할 경우 ^{98}Mo 의 자연 존재 비율이 24%로 낮으며 열중성자 영역에서의 중성자 흡수 단면적 또한 0.13 barn으로 매우 낮기 때문에, 조사 후 얻어지는 ^{99}Mo 의 단위 질량당 존재하는 방사능량의 비, 즉 비방사능이 최대 1 Ci $^{99}\text{Mo}/\text{g-Mo}$ 정도로 매우 낮다. 따라서 의료용으로 사용하기에는 거의 불가능하며, 이를 높이기 위한 여러 방법들을 고안하고 있지만 환자의 방사선 진단용으로 인체에 투여하기에는 여전히 비방사능이 낮다. 피션 물리 방법은 고준위 방사성 폐기물을 다룰 수 있는 핫셀이 필요하고, 폐기물 처리시설 및 표적의 조사에 적합한 원자로가 필요하다. 따라서 초기 시설투자가 많으나 비방사능이 $\sim 10^4$ Ci $^{99}\text{Mo}/\text{g-Mo}$ 으로 매우

높고 대량 생산이 가능하기 때문에, 현재 상업적 생산 방법으로 널리 이용되고 있다. 실제로 우리나라뿐만 아니라 전세계적으로 ^{99}Mo 은 피션 물리 방법을 이용하여 제조되고 있다.⁵⁾

Generator 내부에 ^{99}Mo 선원은 NaOH 용액과 서로 혼합된 형태로 존재한다. 이를 알루미늄에 흡착시키면 겔(gel) 상태의 $\text{Na}_2^{99}\text{MoO}_4$ 로 존재하게 되며, $\text{Na}_2^{99}\text{MoO}_4$ 는 시간이 경과함에 따라 붕괴하여 $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ 로 변이된다. 여기에 친화력 물질인 생리식염수(NaCl)를 주입하면 $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ 만 분리하여 추출할 수 있다.

^{99}Mo 은 베타붕괴를 하고 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 로 붕괴하고, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 는 핵이성체전이(IT: isomeric transition)에 의해 감마선을 방출하며 ^{99}Tc 로 다시 붕괴한다. ^{99}Tc 는 0.292 MeV(반감기 20만년)의 베타선을 방출하며 안정한 원소인 루테튬(^{99}Ru)이 된다. Fig. 1은 ^{99}Mo 의 베타 붕괴로부터 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 가 생성되는 과정과 안정한 핵종인 ^{99}Ru 이 되기까지의 일련의 생성 붕괴 과정을 나타낸 붕괴도이다. 진단 후 체내에서 긴 반감기를 가진 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 가 남아있게 되지만 비교적 낮은 에너지이고 배설을 통해 모두 배출되기 때문에 이로 인한 피해는 적다고 알려져 있다.

3. 차폐 계산 기준

Generator는 방사성 동위원소를 내장하기 위한 방사선 기기임과 동시에 방사성 동위원소를 운반하기 위한 용도로도 사용된다. 국내 원자력법에 따르면 “방사선기기”는 방사선 발생장치 또는 방사성 동위원소가 내장된 기기로 정의되며, 이 경우 방사선의 방출 특성에 영향을 미치는 모든 부속 장치를 포함하며, 운반 및 저장을 전용으로 하는 용기는

방사선기기로 간주하지 아니한다. 또한, “운반용기”는 방사성 동위원소를 완전히 포장하는데 필요한 부품의 집합체로 정의된다. 본 시뮬레이션의 목적은 방사선 차폐 능력을 평가하는 것이므로 “방사선기기”의 관점에 초점을 맞추어 분석을 수행하였다.

과학기술부 고시 제2005-28호의 제15조~제20조의 방사선 설계승인 및 검사에 관한 기준 항목에서, 방사선 기기의 구조기준 중 Generator의 외형 및 사용 목적 등을 고려하여 판단할 때 제 20조 휴대 개방형에 대한 구조기준을 적용시킬 수 있을 것이다. 이에 대한 구조기준은 다음과 같다.⁶⁾

1) 작업 수행에 필요한 방사선 이외에 불필요하게 방출되는 방사선은 필터나 콜리메이터 등을 이용하여 제거하거나 차단하여야 한다.

2) 제어기와 방사선 방출 부분이 분리되어 있는 경우에는 두 부분을 연결하는 케이블의 길이를 가능한 한 충분히 유지하여 방사선 피폭을 저감시켜야 한다.

3) 셔터를 닫거나 방사선원을 안전 위치로 이동한 후, 방사선기기의 표면 방사선량은 2 mSv/h를 초과하지 아니하여야 하며, 방사선기기의 표면으로부터 1 m 떨어진 위치에서의 방사선량은 0.02 mSv/h를 초과하지 않아야 한다.

4) 휴대가 용이한 방사선기기에는 방사선기기 자체나 보조 운반 장치에 장금 장치를 구비하여야 한다.

위와 같은 구조기준에 따르면, Generator의 표면 방사선량은 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 cm의 거리에서 2 mSv/h를 초과하지 아니하면서, 100 cm 떨어진 위치에서의 방사선량은 0.02 mSv/h를 초과하지 않게 설계하여야 한다고 명시되어 있기 때문에, 선량 평가 시 이를 적용하여 안전성의 유무를 평가할 수 있겠다. 또한 설계승인 시 안전성 평가 자료의 작성기준에 관한 항목인 제 31조에 언급되어 있는 조건, 즉 “방사선기기 외부 방사선량 평가 시 방사성 동위원소를 최대 적재하는 조건”을 만족시키기 위하여 Generator 내부의 방사선량이 최대가 되는 조건하에서 시뮬레이션을 수행하였다.

4. 기하학적 구조 모델링

Generator는 크게 선원용기, 차폐용기, 차폐뚜껑, 외부 플라스틱 용기로 구성되어 있다. 선원용기는 파이렉스 유리 재질의 유리관으로 내부에는 유리솜, 알루미늄(Al_2O_3), 유

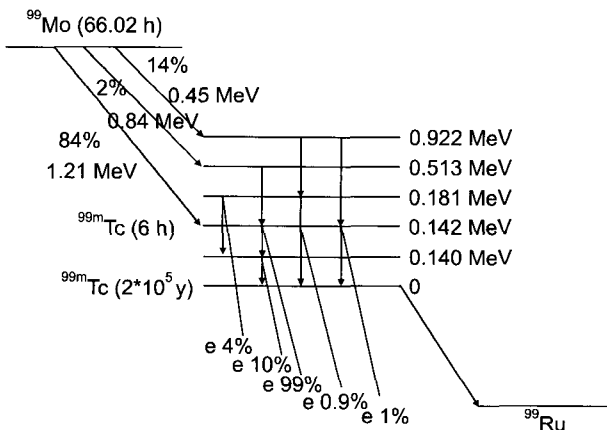


Fig. 1. Decay scheme of ^{99}Mo and $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

리 필터로 채워져 있다. 유리관은 위아래에 고무 뚜껑으로 밀봉되어 있고, 이를 알루미늄 덮개로 고정 시킨 형태를 가지고 있다. ^{99}Mo 선원을 내부 알루미늄에 흡착시켜 저장하고, 유리관의 위아래에 바늘(needle)을 꽂아 생리 식염수를 넣어 ^{99m}Tc 를 용출하여 Generator 외부로 생리식염수에 표지된 ^{99m}Tc 를 추출하여 사용하는 형태로 되어 있다(Fig. 2). 차폐용기는 선원용기를 담을 수 있게 중앙을 비운 항아리 모양을 하고 있으며, 99.7% 이상의 납(Pb)에 소량의 안티몬(Sb)을 혼합하여 제조하고 있다. 이 차폐용기 안에 선원을 넣고 위쪽으로 방출되는 방사선을 차폐시키기 위해 납으로 된 차폐 뚜껑으로 덮어 전체가 납으로 둘러싸인 형태로 차폐되어 있다. 외부 플라스틱 용기는 완충 작용과 Generator를 고정하는 역할을 한다. 국내외에서 생산되는 다양한 Generator가 비록 형태의 차이는 있지만 기본적인 구조면에서 보면 매우 유사하다.

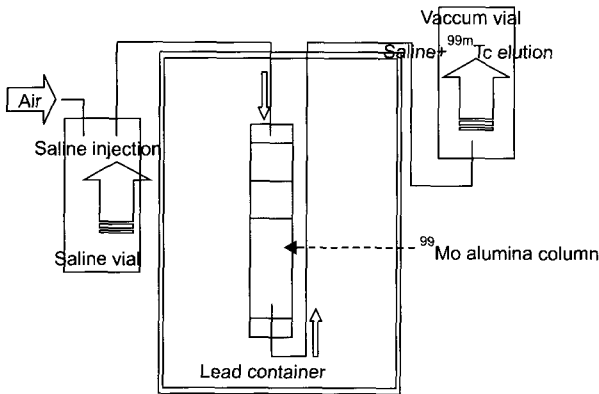


Fig. 2. A Schematic diagram eluted by passing physiological saline through the alumina column.

본 연구에서 목적으로 하는 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 먼저 Generator의 기하학적 구조를 정확히 구성하여야 한다. 이를 위해서는 설계 도면이 필요하지만 현실적으로 접근이 허용되지 않아, 실제 Generator를 정확히 실측하여 기하학적 구조를 완성하였다. 외부 플라스틱 용기는 붕괴 과정에서 방출되는 감마선에 비교적 영향이 적은 관계로 편이상 모델링에서 제외 시켰지만, 선원용기와 차폐용기는 실측을 통해 원형에 맞게 모델링하였다. 선원용기의 길이는 약 6 cm, 직경 약 1 cm의 파이렉스 재질의 유리관, 유리관 상하부의 고무마개와 알루미늄 덮개, 그리고 내부에 4 cm 영역을 알루미늄으로 구성하였다. 실제 알루미늄이 채워진 선원용기의 위쪽 부분 1 cm 영역에 ^{99}Mo 선원이 골고루

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

Material	Element	Component ratio	Density (g/cm ³)
pyrex_Glass	B	0.040	2.23
	O	0.540	
	Na	0.030	
	Al	0.010	
	Si	0.377	
Rubber	K	0.003	0.92
	H	0.12	
Alumina (Al ₂ O ₃)	C	0.88	3.965
	O	0.47075	
Lead+	Al	0.52925	11.35
	Pb	0.997	
Antimony	Sb	0.003	0.00129
	N	0.7	
Air	O	0.3	0.00129

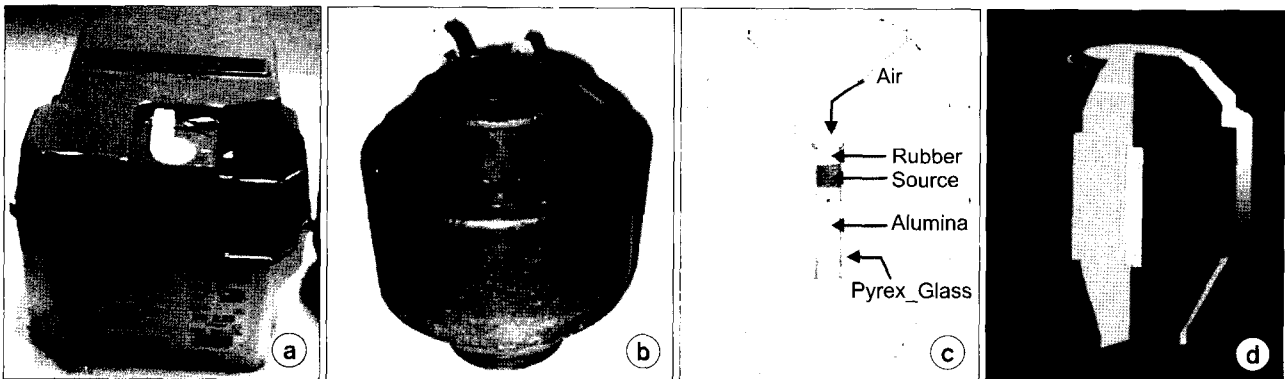


Fig. 3. Generator modeling process with GEANT4. (a) the Tc generator, (b) the inner shielding container, (c) the diagram of alumina column and shielding container, and (d) modeled source and shielding container with GEANT4.

흡착되어 있으므로 선원용기 내 방사선원은 ^{99}Mo 이 흡착되어 있는 영역 전체로서 실린더 모양의 체적 선원으로 가정하였다. Generator의 하부 지지대 바깥쪽 모서리에 안정된 고정을 위해 높이 0.7 cm 직경 1.2 cm의 반타원모양의 흡이 파여 있지만 이에 의한 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단되어 기술적 편의상 고려하지 않았다. 차폐체인 차폐용기와 차폐 뚜껑은 순도 99.7%의 납으로 구성하였고, 차폐체와 선원용기 사이 그리고 차폐체 외부는 공기로 구성하였다(Fig. 3). Table 1은 본 연구의 대상인 Generator의 기하학적 형태를 구성하는 물질들의 조성 성분과 비율 그리고 밀도를 보여주고 있다.

Generator의 기하학적 구조와 물질의 구성을 정의한 다음, 외부로 방출되는 방사선을 측정하기 위해서는 Generator 주변에 가상의 검출기를 구성하여야 한다. 방사선은 방사형으로 방출된다고 가정하고, 이를 검출하기 위하여 Generator 표면에서 10 cm 거리에 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ 부피의 정육면체 상자 형태의 물 팬텀을 Fig. 4와 같이 측면, 윗면, 아랫면, 위 측면, 아래 측면 등 다섯 곳에 설치하였다. 물 팬텀은 방사선 검출기의 역할과 함께 내부로 입사된 방사선이 팬텀에 전달하는 에너지를 측정하여 흡수선량을 구해주는 열량계 역할을 동시에 담당한다. 100 cm 거리에 대해서도 동일한 크기의 검출기를 동일한 방향에 설치하여 시뮬레이션을 수행하였다. 실제 시뮬레이션에 있어 Fig. 4와 같이 모든 검출기를 동시에 배치하지 않고 검출기를 하나씩만 설치하고 따로 따로 계산을 실행했다. 이는 방사선이 다

른 검출기를 구성하고 있는 물질과 상호작용하여 발생할 수 있는 비물리적 영향을 배제하기 위함이다.

차폐 계산 방법

차폐 능력을 계산하기 위해서는 다음과 같은 세 단계 과정이 필요하다. 먼저, 붕괴가 지속적으로 진행되고 있는 Generator 내부의 최대 방사능량을 알아야 할 것이다. 다음, 시뮬레이션을 수행할 방사선의 종류와 에너지를 결정해야 한다. 원칙적으로 임의의 방사성 동위원소에는 불연속 상태(discrete states)와 연속상태(continuous state)가 공존하기 때문에, 무한히 많은 에너지의 방사선이 방출될 수 있다. 따라서 모든 에너지의 방사선에 대하여 시뮬레이션을 수행하는 것은 원칙적으로 불가능하기 때문에, 고려하고 있는 물리적 환경에 적합하게 시뮬레이션을 수행할 일정한 수의 방사선을 선정하지 않을 수 없다. 마지막 단계는, 계산된 값을 법적 기준치와 비교할 수 있는 물리량으로 전환하는 작업이다.

먼저 본 연구에서는 다음과 같은 고찰을 통해 교정 방사능량(calibration activity)이 500 mCi인 Generator의 최대 방사능량을 2.2 Ci로 결정하였다. ^{99}Mo 와 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 은 일정한 시간이 흐른 후 일시평형(transient equilibrium) 상태를 이루어 방사능의 비와 원자수의 비가 일정해지는데, 임의의 시간(t)에서 모핵종(A)과 자핵종(B)의 방사능량은 각각 식 (1), (2)와 같은 형태로 쓸 수 있다.⁹⁾

$$\alpha_A = \lambda_A N_A = \lambda_A N_{A_0} e^{-\lambda_A t} \quad (1)$$

$$\alpha_B = \lambda_B N_B = \frac{\lambda_B \lambda_A N_{A_0}}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2)$$

위식에서 모핵종인 ^{99}Mo 의 붕괴상수는 0.0105 hr^{-1} 이고 자핵종인 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 의 붕괴상수는 0.1155 hr^{-1} 이다.⁹⁾ 위의 방사능량 계산식을 이용하여 시간 경과에 따른 방사능량 변화를 나타내면 Fig. 5와 같은 변화를 나타낸다. 최대 방사능량은 초기 방사능량의 약 1.6배가 됨을 알 수 있다. 한편, 국내에서는 생산시점에서 교정시점까지의 경과 시간을 총 105시간으로 정하고 있다. 따라서 교정 방사능량(calibration activity) 500 mCi에 해당하는 최대 방사능량은 105시간 후에 500 mCi가 되는 방사능량을 말한다. Fig. 6은 105시간이라는 교정 시점에서 500 mCi의 교정 방사능량을 만족하기 위한 초기 방사능량과 최대 방사능량을 나타내고 있다. 그

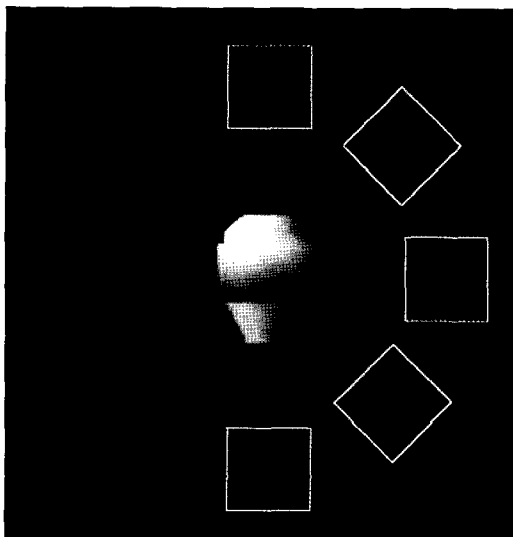


Fig. 4. Detecting positions at the distance of 10 cm away from the surface of the container.

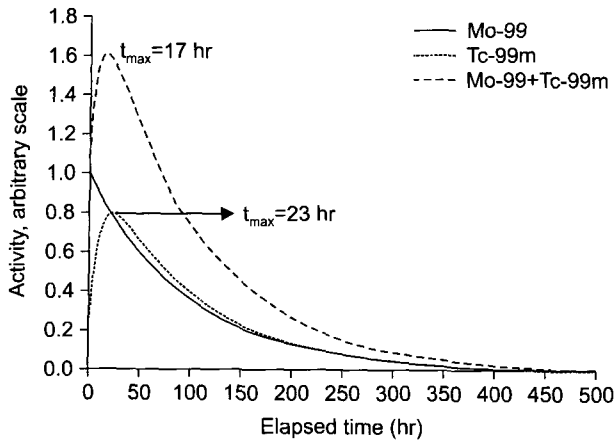


Fig. 5. Variation of activities as a function of time for ⁹⁹Mo-^{99m}Tc mixture.

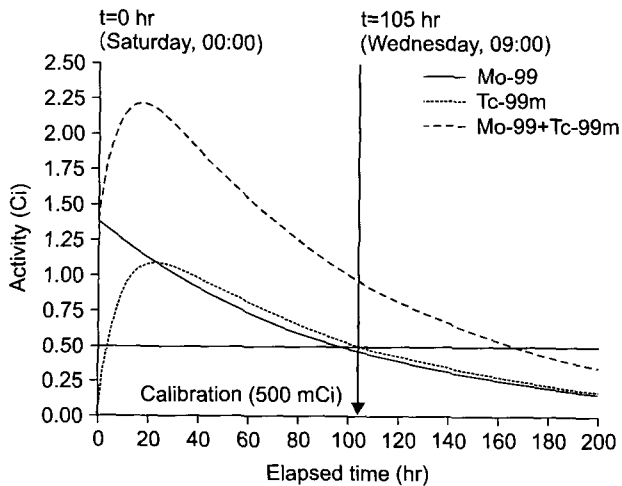


Fig. 6. Initial and maximum activities calculated for the calibration activity of 500 mCi.

림에서 볼 수 있는 것과 같이 최대 방사능량은 약 2.1935 Ci로 나타났는데, 편의상 2.2 Ci로 설정하였다.

다음, 시뮬레이션을 수행할 방사선으로 Table 2와 같이 베타선은 거의 방출률 100%를 구성하는 3 가지 에너지를 고려하였다. 감마선의 경우 2003년도 한국원자력연구원에서 수행한 “^{99m}Tc 차폐용기개발” 연구에서 고려한 것과 동일하게 5가지 에너지를 가진 감마선을 선정하였다.¹⁰⁾ 위의 연구에서 논의된 바와 같이, 이외의 에너지를 가진 감마선은 에너지와 방출률이 현저하게 낮아 무시될 수 있다. 한편, 위의 연구에서는 베타선에 의한 방사선량은 무시되었으나, 본 연구에서는 포함시켜 시뮬레이션을 진행했다.

Table 2. Selected radiation and its energy and intensity in this study.

Nuclide	Decay radiation	Energy (MeV)	Intensity (%)
⁹⁹ Mo	β-ray	0.4366	16.4
		0.8481	1.14
		1.2145	82.4
	γ-ray	0.1405	4.52
		0.1810	5.99
^{99m} Tc	γ-ray	0.3664	1.191
		0.7395	12.13
		0.7779	4.26
		0.1405	89.06

Table 3. Emissivity of ⁹⁹Mo-^{99m}Tc Equilibrium mixture (1 Ci).

Decay radiation	Energy (MeV)	Emission probability per decay (photons/decay)	Emissivity (photons/sec)
gamma	0.1405	0.9358	3.462×10 ¹⁰
	0.1810	0.0599	2.216×10 ⁹
	0.3664	0.0119	4.403×10 ⁸
	0.7395	0.1213	4.488×10 ⁹
	0.7779	0.0426	1.576×10 ⁹
	Total	1.1715	4.334×10 ¹⁰
beta -	0.4366	0.164	6.068×10 ⁹
	0.8481	0.0114	4.218×10 ⁸
	1.2145	0.824	3.0489×10 ¹⁰
	Total	0.9994	3.697×10 ¹⁰

시뮬레이션의 다음 단계는 방사능량을 고려하여 방사선의 종류와 에너지 별로 시뮬레이션을 수행할 횟수를 결정하는 것이다. 시뮬레이션은 한 번에 하나의 방사선에 대해 이루어지므로 방사능량에 의존하는 결과를 얻기 위해서는 각각의 방사선에 대한 상대적 시뮬레이션 횟수를 알아야 한다. 본 연구에서는 Table 3과 같이 1 Ci의 ⁹⁹Mo - ^{99m}Tc 혼합물이 평형을 이룰 때의 각 방사선의 초당 방출 개수를 상대적으로 결정하여 시뮬레이션을 수행하여 초당 흡수선량(Gy/sec)을 구하였다. 각 방사선 별로 수행한 시뮬레이션의 수는 앞에서 언급한 한국원자력연구원에서 사용한 자료와 동일하다.¹⁰⁾ 이번 연구에서 고려하는 Generator의 최대 방사능량이 2.2 Ci이므로 이와 같이 1 Ci를 기준으로 얻은 흡수선량에 2.2를 곱하여 최종 결과를 구하였다.

시뮬레이션의 마지막 단계는 위의 표에 나타난 바와 같이 방사선의 종류와 에너지에 따라 정해진 횟수에 시뮬레이션을 수행하고 이를 통해 선량당량(Sv)을 구하는 것이다.

GEANT4에서는 선량당량을 직접 제공하지 않고 팬텀에 흡수된 흡수선량을 그레이(Gy) 단위로 계산한다. 따라서 법적 안정성 여부를 판단하기 위해서는 그레이 단위를 과학기술부 고시에 명시되어 있는 법적 안정성 기준의 척도인 시버트(Sv) 단위로 변환시켜주는 과정이 필요하다. 시버트는 방사선 방어 목적에 사용되는 선량당량 단위로써, 방사선 피폭이 인체에 미치는 영향에 관한 객관적인 평가적으로 사용되며 일반적으로 식 (3)과 같은 형태로 정의된다.

$$H = D \cdot Q \cdot N \quad (3)$$

H : 선량당량(Sv), D : 흡수선량 (Gy), Q : 선질계수 N : 수정인자

여기서 선질계수는 방사선의 종류에 따른 값으로 감마선과 베타입자의 경우 1로 계산한다. 수정인자는 ICRP에서 외부선원일 경우 기준을 1로 정하고 있다. 따라서 시뮬레이션으로 구해진 그레이 단위를 시버트 단위로 변환하여도 무방하다고 볼 수 있다.

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

Position	Distance	
	10 cm (mSv/h) ≤ 2.0	100 cm (mSv/h) ≤ 0.02
Top	0.382	0.0109
Top side	0.237	0.0052
Side	0.147	0.0055
Bottom side	0.083	0.0043
Bottom	0.110	0.0064

연구 결과

Table 4는 시뮬레이션 결과를 정리한 것이다. 먼저 용기 표면으로부터 10 cm에서의 방사선량은 다섯 곳 모두에서 최대 측정값이 모두 법적 허용 기준인 2.0 mSv/h와 비교하여 충분히 낮은 값으로 나타났다. 윗부분에서의 측정값이 다른 위치의 수치보다 높게 나타난 이유는 ⁹⁹Mo이 용기 윗부분에 위치하여 있기 때문인 것으로 추정된다. 또한 100 cm에서의 방사선량 계산 결과도 다섯 방향에서 모두 법적 기준 값인 0.02 mSv/h 이하로 나타났다. 참고로 Fig. 7은 ⁹⁹Mo에서 방출되는 가장 높은 에너지인 0.7779 MeV 감마선과 ^{99m}Tc에서 방출되는 0.1405 MeV 감마선이 Generator를 구성하는 물질과 상호작용하여 산란되는 과정을 GEANT4를 통해 시각화된 영상이다.

이와 같은 계산결과를 바탕으로 ^{99m}Tc를 다루는 종사자의 피폭량과 안전성을 평가해 볼 수 있다. 작업자의 밀킹 작업이 Generator의 측면 부분과 위측면 사이에서 이루어진다고 가정하면, 두 부분의 선량의 합이 0.384 mSv/h인데 이는 최대방사선량인 2.2 Ci일 때의 선량이다. 처음 밀킹 시점은 ^{99m}Tc의 방사능량이 500 mCi인 교정 시점이고 일주일에 하나의 Generator를 5일 동안 사용하므로, 과도 평형 공식을 이용하여 처음 밀킹 시점에서 24시간이 지난 시점에서 5일 동안의 혼합 방사능량을 구하면 각각 0.95 Ci, 0.75 Ci, 0.56 Ci, 0.45 Ci, 0.37 Ci가 됨을 알 수 있다. Fig. 6의 그래프를 통해서도 쉽게 대략적인 혼합 방사능량의 확인이 가능하다. 그리고 한번의 밀킹에 대체적으로 3분 정도의 시간이 소요되고, 일주일에 5회 밀킹하여 사용하므로 연간

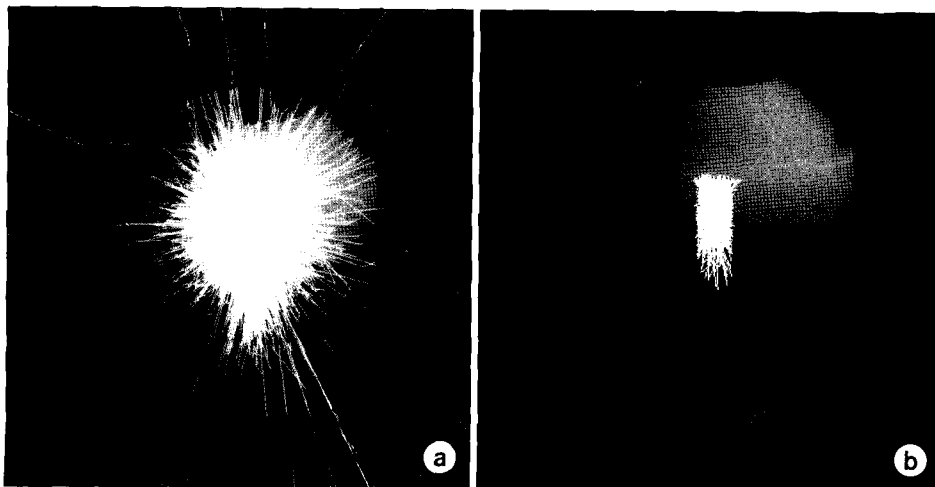


Fig. 7. GEANT4 images of the interactions between the generator and the gamma rays of (a) the highest energy of 0.7779 MeV from ⁹⁹Mo and (b) the energy of 0.1405 MeV from ^{99m}Tc.

250회(5회/주×50주/년)의 밀킹 작업을 수행한다고 가정할 수 있다.

밀킹 첫째 날 노출되는 방사선량을 구하면 첫째 날 Generator의 혼합 방사능량인 0.95 Ci를 기준으로 0.166 mSv/h가 됨을 알 수 있다. 하루 작업에 3분이 소요되므로 계산하면 첫째 날 밀킹 중에 8.3 μSv 의 선량에 노출된다. 이와 동일한 방법으로 5일(일주일) 동안의 피폭 선량을 계산하면 0.027 mSv가 되고 연간 피폭 선량은 1.35 mSv임을 알 수 있다. 따라서 500 mCi 소형 Generator를 이용한 밀킹 작업에서 종사자가 받을 수 있는 연간 피폭선량은 1.35 mSv로 예상할 수 있으며, 이는 방사선 작업종사자의 연간 허용 선량 한도인 50 mSv에 비해 매우 적은 수치임을 알 수 있다.

결 론

본 논문에서는 핵의학 진단 영역에서 널리 이용되고 있는 ^{99m}Tc -Generator의 방사선 차폐능력과 안정성을 입자 시뮬레이터인 GEANT4를 이용하여 평가해 보았다. 시뮬레이션 결과, 표면으로부터 거리 10 cm에서 2 mSv/h 이하 그리고 100 cm에서 0.02 mSv/h 이하로 주어진 법적 기준치보다 현저히 낮은 방사선량이 방출되는 것으로 나타나, 국내 법적 안전성 기준을 만족시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한 밀킹 작업 종사자가 밀킹 작업을 통해 받을 수 있는 연간 피폭선량도 1.35 mSv로 연간 허용 선량인 50 mSv에 비해 매우 낮은 것으로 나타났다. 하지만 향후 실험적 자료와

의 비교가 중요하다고 할 수 있다. 비록 GEANT4가 객관적 실험 자료와 첨단 물리학 이론을 바탕으로 만들어진 시뮬레이션 도구이지만, 아직 초기 응용 단계이며 객관적 정밀성이 정량적으로 충분히 분석되지 않았기 때문이다. 향후 실험적 방법을 이용한 측정 결과와의 비교가 GEANT4의 응용에 있어 중요한 의미를 가질 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. 채화목: 방사선이용실태조사. 한국방사성 동위원소협회, 서울 (2006), pp. 28-30
2. Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al: GEANT4 Developments and Applications. IEEE Trans Nucl Sci 53:270-278 (2006)
3. Pia MG: The GEANT4 Toolkit: simulation capabilities and application results. Nuclear Physics B(Proc. Suppl), 125:60-68 (2003)
4. 박성욱, 이만구, 유광렬 등: 핵의학영상기술학. 보문서원, 서울 (1998) pp.37-43
5. Cho DK, Kim MH: A Study for Process Technology of Tc-99m Production. The Kyung Hee J Laser Engineering 9:83-90 (1998)
6. 과학기술부고시 제 2005-28호: 방사선기기의 설계승인 및 검사에 관한 기준. 과학기술부(2005)
7. Peker LK: Nuclear Data Sheets Update for A = 99. Nuclear Data Sheets 73:1-80 (1994)
8. James ET: Atoms, Radiation, and Radiation protection. John Wiley&Sons, Germany (2004) pp.329-335
9. Ilse Z: Technetium-99m Pharmaceuticals. Springer, Berlin Heidelberg (2006) pp. 77-93
10. Ko BR: Development of Shield Containers for Tc-99m Generator. Korea atomic energy research institute (2003)

^{99m}Tc Generator Safety Simulation Based on GEANT4

Sang-Koo Kang, Dong-Hyun Han, Chong-Yeal Kim

Department of Radiation Science & Technology, Chonbuk National University

Technisium (^{99m}Tc) is one of the most widely used radioactive isotopes for diagnosis in nuclear medicine. In general, technisium is produced inside the so called ^{99m}Tc generator which is usually made out of lead to shield relatively high energy radiation from ^{99}Mo and its daughter nuclide ^{99m}Tc . In this paper, a GEANT4 simulation is carried out to test the safety of the ^{99m}Tc generator, taking the Daiichi product with radioactivity of 500 mCi as an example. According to the domestic regulation on radiation safety, the dose at 10 cm and 100 cm away from the surface of shielding container should not exceed 2.0 mSv/h and 0.02 mSv/h, respectively. The simulated dose turned out to be less than the limit, satisfying the domestic regulation.

Key Words: GEANT4, ^{99m}Tc Generator, Domestic regulations on radiation safety