

Geant4를 리용한 방사선CT장치의 특성량평가

강춘일, 리기성

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리는 원자력기술을 개발하고 원자력발전소를 건설하기 위한 문제를 자체의 기술, 자체의 힘으로 자력갱생하여 완성하여야 합니다.》(《김일성전집》 제62권 459페이지)

공업용CT는 금속과 같이 치밀한 재질로 된 대상물의 내부결함이나 물질의 내부변화 상태를 측정하는 CT로서 항공우주, 기계, 전자 등 여러 공업부문에 널리 리용되고있다. 특히 여러 나라들에서 기계설비들의 안전운영, 생산공정의 자동측정 등에 정밀도가 높은 공업용CT를 적극 개발리용하고있다.[2, 3]

본문에서는 섬광검출기뭉음을 리용한 γ -CT를 제작하는데서 제기되는 공간분해능을 비롯한 CT의 특성량들을 립자수송모의프로그램 Geant4의 모의계산을 통하여 평가하였다.

1. CT모의를 위한 Geant4클래스설계

공간분해능을 비롯한 CT의 특성량들을 몽떼카를로방법으로 평가하기 위하여서는 먼저 CT와 같은 기하학적모형을 작성하고 립자수송과정을 모의하여 검출기에 기록되는 립자의 에네르기와 세기 등을 평가하여야 한다.

Geant4는 C++언어를 리용하여 객체지향프로그램작성방법으로 립자들의 물질통과과정을 정확히 모의하기 위하여 개발한 검출기모의도구로서 거의 모든 에네르기구간에서 중성자, γ 선, 대전립자는 물론 각종 소립자들의 물질통과과정을 모의할수 있는 힘있는 몽떼카를로모의프로그램이다.[1]

Geant4는 기하정의, 물질정의, 물리적모형선택, 자리길모의, 사건처리, 실행조종과 관련된 수천개의 C++클래스들로 이루어지며 사용자는 이것들을 리용하여 모의계산을 진행하기 위한 사용자코드를 C++언어로 작성하여야 한다. Geant4는 각이한 에네르기구간에서 립자의 종류에 따르는 여러가지 물리적모형들을 포함하고있으므로 정확한 모의계산을 진행하기 위해서는 입사립자의 종류와 에네르기를 잘 고려하여 모형들을 선택하여야 한다.

모의조건은 다음과 같다.

검출기: CsI(1.4mm×2.6mm×4.0mm)

검출기수: 256개, 검출기간격: 0.2mm

원천: ^{137}Cs (661.7keV)

원천에서 검출기뭉음을 바라보는 각: 120°(원천과 검출기사이거리는 196mm)

1회회전각: 1°

부채속CT에서는 화상재구성을 위하여 360°의 회전이동을 보장해야 하므로 총회전걸음수는 360회로 된다.

시편: 4가지 물질(철, 알루미늄, 테플론, 폴리에틸렌)의 6가지 원기둥요소(총 24개)로 이루어진 원기둥시편

기하설계, 물질정의, 호상작용과정정의, 원천립자발생, 자료분석을 위해 사용자클래스들의 이름과 기능을 작성하였다.(표)

표. γ -CT 모의코드의 클래스들

사용자클래스	기초클래스	기능
DetectorConstruction	G4VUserDetectorConstruction	모의기하, 물질정의
PhysicsList	G4VUserPhysicsList	물리적과정정의
PrimaryGeneratorAction	G4VUserPrimaryGeneratorAction	원천립자발생
RunAction	G4UserRunAction	실행조종
SteppingAction	G4UserSteppingAction	호상작용과정계산
EventAction	G4UserEventAction	축적에너גיע산

Geant4에서는 Inventer, Qt, OpenGL을 비롯한 여러가지 그래픽체제들을 리용할수 있지만 Qt사용자대면부를 리용하였다.

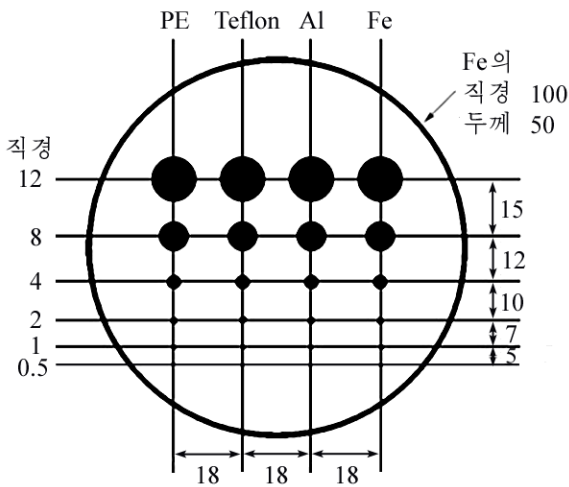


그림 1. 시편의 구조
수값의 단위는 mm임.

시편은 철, 알루미늄, 테플론, 폴리에틸렌으로 구성된 24개의 원기둥요소와 그것을 둘러싼 직경 100mm, 두께 1.6mm의 철원통으로 이루어진 원기둥시편이다.(그림 1)

수직방향에서의 분해능을 평가하지 않고 검출기의 높이가 2.6mm라는것을 고려하여 시편의 높이를 10mm로 설정하였으며 모의공간은 중심에 원천이 놓인 480mm×480mm×12mm 크기의 직6면체로 설정하였다.

Geant4에서 모의기하는 기하학적모양을 결정하는 기하모형(G4Box, G4Tubs 등)작성, 물질자료를 포함하는 론리모형(G4LogicalVolume)작성, 다른 기하모형과 연결하는 물리모형(G4VPhysicalVolume)작성 단계로 설계한다.

γ -CT모의에서는 γ 선과 물질과의 호상작용과정이 중요한 역할을 한다. γ 선과 물질과의 모든 호상작용과정들은 결음의 끝에서 일어나므로 이 과정들은 불연속과정으로서 G4VDiscreteProcess를 통하여 실행되며 물리적모형들은 G4VEmModel을 통하여 실행된다. 물리적과정에는 γ 선과 물질과의 호상작용과정들인 빛전기효과, 콤프톤산란, 쌍발생, 전자와 물질과의 호상작용과정들인 다중산란, 이온화, 제동복사, 양전자와 물질과의 호상작용과정들인 다중산란, 이온화, 제동복사, 쌍소멸과정들을 포함시켰다.

원천은 점원천을 리용하였는데 립자의 에너지는 ^{137}Cs 원천에서 나오는 661.7keV로 설정하였으며 CT검출기뒀음을 바라보는 립체각으로 편기시켜 발생시켰다.

CT의 회전에 따르는 기하변화는 Geant4의 마크로명령에 새로운 명령(rotAngle)을 추가하여 계산과정에 마크로화일을 통하여 직접 변화시킬수 있도록 하였다. Geant4의 마크로명령기능을 리용하면 코드를 수정하지 않고도 모의기하와 원천립자, 호상작용과정을 비롯한 모의조건들을 변화시키면서 계산을 동적으로 진행할수 있는 우점이 있다.

계산에서 γ 량자의 절단에너지는 20keV, 전자의 절단에너지는 50keV로 설정하였다. 100keV 전자들의 주행거리가 요드화나트륨에서 0.09mm이고 알루미늄에서 0.12mm

이라는것을 고려할 때 이 절단에너지들은 계산결과에 큰 영향을 주지 않는다고 볼수 있다.

CT모의에서는 검출기에 기록되는 립자의 개수만 기록하면 되지만 산란립자들의 영향을 분석할수 있도록 에너지스펙트럼형태로 자료를 보관하였다. 스펙트럼에서 매 통로의 에너지간격은 10keV로 설정하였다.

화일에는 256개의 검출기에 흡수되는 γ 선의 에너지스펙트럼이 표형태로 보관된다. 모의과정에 립자호상작용의 매 단계마다 UserSteppingAction함수가 호출되어 매개 검출기에 축적되는 에너지를 계산한다.

2. 계산결과 및 특성량평가

1) 모의계산

원천의 방사능에 따르는 재구성화상의 질을 평가하기 위하여 전체 립자수를 10^5 , 10^6 , 10^7 개로 설정하고 256개의 검출기에 흡수되는 γ 선의 에너지를 스펙트럼형태로 기록하였다. 시편의 회전은 $0 \sim 360^\circ$ 범위에서 1° 간격으로 진행하며 10^7 개 립자에 대한 모의시간은 2min 30s였다. 기록수에 따르는 모의결과는 그림 2와 같다.

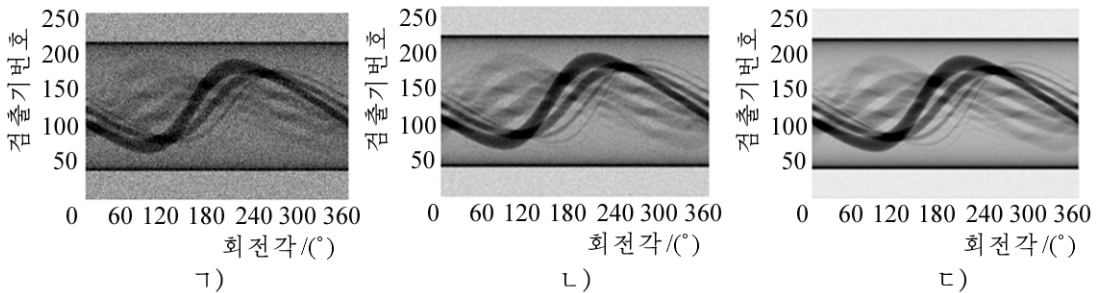


그림 2. 기록수에 따르는 모의결과

㉠-㉡)는 립자수가 각각 10^5 , 10^6 , 10^7 인 경우

이때 립자수에 따르는 검출기당 평균기록수는 각각 32.7, 327.4, 3 273.1개이며 상대 오차는 17.5, 5.5, 1.7%였다.

2) 화상재구성

화상재구성은 MATLAB의 화상처리도구에서 부채속화상재구성함수인 ifanbeam함수를 리용하여 러파역투영방법으로 진행하였다. 러파기는 고정값인 Ram-Lak러파기를 리용하였다. 모의자료에 기초하여 화상재구성을 위한 자료를 다음의 식에 의하여 계산한다.

$$P(s) = -\ln \frac{I(s)}{I(0)} = \int_0^s \mu(\eta) d\eta$$

여기서 $I(s)$ 는 시편을 통과하여 검출기에 기록된 기록수, $I(0)$ 은 시편을 통과하지 않은 상태에서의 기록수, $\mu(\eta)$ 는 시편매질에서의 흡수계수이다.

기록수에 따르는 화상재구성결과는 그림 3과 같다.

그림 3에서 립자수가 작을 때 밀도와 직경이 큰 Fe시편들만이 뚜렷하게 보이며 기록수가 증가할수록 밀도가 작은 시편들과 직경이 작은 시편들이 점차적으로 검출된다는것

을 알수 있다. 립자수가 $N=10^7$ 인 경우에 모든 Fe시편들이 검출되었으나 밀도가 작은 물질들의 0.5mm 시편들은 검출되지 않았다.

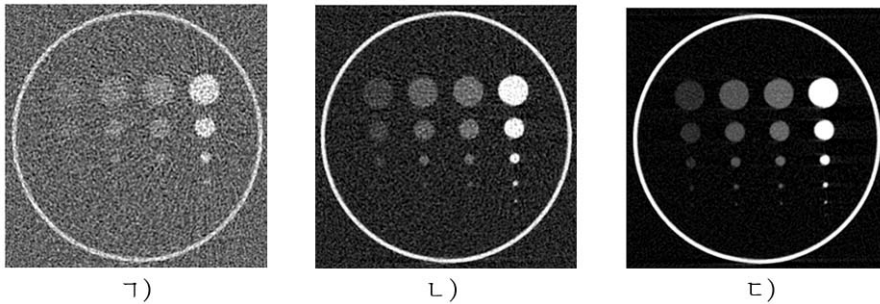


그림 3. 기록수에 따르는 화상재구성 결과
a)–c)는 그림 2와 같음.

3) 결과분석 및 특성량평가

흡수결수변화 표준시편에 리용된 4가지 물질들의 γ 선(661.7keV)에 대한 흡수결수는 다음과 같다.[4]

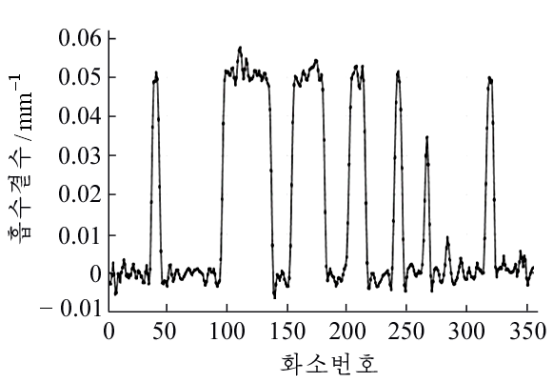


그림 4. 철시편들의 중심을 지나는
절단선에서의 흡수결수변화

$$\mu(\text{PE}) = 8.231 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$$

$$\mu(\text{Teflon}) = 1.328 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

$$\mu(\text{Al}) = 2.026 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

$$\mu(\text{Fe}) = 5.766 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

재구성화상에서 철시편들의 중심을 지나는 절단선에서의 흡수결수변화는 그림 4와 같다.

그림 4에서 보는바와 같이 0.5mm보다 큰 원기둥요소에서의 흡수결수들이 비교적 정확히 계산되었다는것을 알수 있다.

물질의 종류에 따르는 흡수결수의 변화는 직경이 12mm인 시편들의 중심선을 지나는 절단선에서의 흡수결수변화를 통하여 알수 있다.(그림 5)

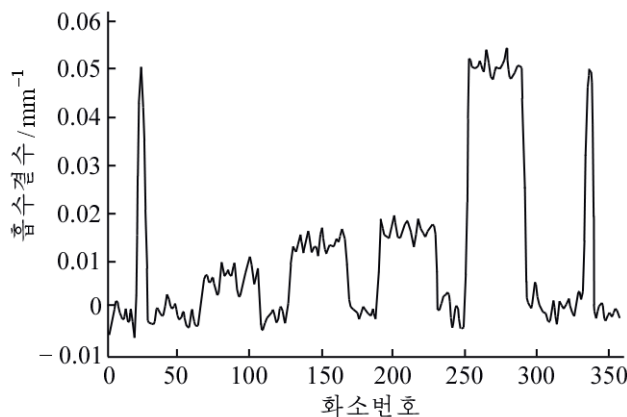


그림 5. 12mm 시편들의 중심선을 지나는 절단선에서의 흡수결수

재구성화상의 불확정도평가 재구성 화상의 불확정도는 다음식으로 평가할수 있다.

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_p} (\mu_j - \mu'_j)^2}{N_p}}$$

여기서 N_p 는 화상점들의 전체 개수, μ_j 는 재구성화상의 j 번째 점에서 흡수결수, μ'_j 는 시편화상의 j 번째 점에서 흡수결수이다. 전체 기록수로 계산한 결과는 $R=5.5 \cdot 10^{-3}$, 완전흡수붕우리자료로 계산한 결과는 $R=1.7 \cdot 10^{-2}$ 이다.

공간분해능평가 모의계산자료를 리용하여 제작하려는 γ -CT의 공간분해능을 평가하였다. 그림 1에서 밀도가 큰 철시편들의 중심을 지나는 절단선에서의 흡수결수변화로부터 1mm 직경의 철시편들의 흡수붕우리에 대응한 가우스함수의 반폭으로부터 결정되는 선평집합수를 계산하였다.(그림 6)

재구성화상과 시편의 크기를 비교하면 1개 화소에 0.29mm가 대응되며 가우스함수맞춤에 의한 공간분해능은 (1.20 ± 0.15) mm 였다. 이로부터 γ -CT의 공간분해능은 1.2mm정도라는것을 알수 있다.

측정시간평가 화상재구성 모의자료들을 리용하면 γ -CT의 분해능을 보장하기 위한 원천의 방사능을 계산할수 있으며 반대로 원천의 방사능이 주어진 경우 합리적인 측정시간을 결정할수 있다.

원천에서 검출기뒀음을 바라보는 립체각은 $\Omega = \frac{S}{R^2} \approx \frac{256 \cdot 1.6 \cdot 2.6}{196^2} \approx 0.03$ [sr]이다.

원천의 방사능이 $3.7 \cdot 10^9$ Bq 일 때 10^7 개의 립자가 검출기에 입사하는 시간은 $\frac{10^7}{3.7 \cdot 10^9 \cdot 0.03 / 4\pi} \approx 1.13$ s, 360개의 투영자료를 얻는데 걸리는 시간은 약 408s정도이다. 이로부터 회전이동시간과 측정대기시간, 측정자료 전송시간을 무시하면 그림 3의 c)와 같은 화상을 얻는데 약 7min이 걸린다.

이외에도 전체 기록수에 대한 화상재구성과 완전흡수붕우리기록수에 대한 화상재구성 결과를 분석하여 CT에서 산란선들의 영향을 알수 있다.

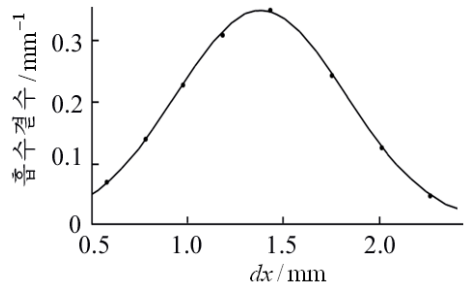


그림 6. 1mm 철시편에서 흡수결수(점)와 가우스함수맞춤(실선)변화

맺 는 말

여러가지 물질과 크기로 된 표준시편에 대한 Geant4모의계산을 진행하고 립자수에 따르는 재구성화상의 변화와 γ -CT특성량들을 평가하였다. 모의자료와 재구성화상분석을 통하여 256개의 CsI섬광검출기(1.4mm×2.6mm×4.0mm)를 리용한 CT장치의 공간분해능이 약 1.2mm이라는것을 계산하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Bieberle et al.; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A **572**, 668, 2007.
- [2] E. Milhoretto et al.; Applied Radiation and Isotopes, **68**, 951, 2010.
- [3] J. B. Kim et al.; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A **693**, 203, 2012.
- [4] L. Njeimana et al.; IEEE Transactions on Nuclear Science, **60**, 5, 3633, 2013.

주체110(2021)년 3월 5일 원고접수

Characteristics Evaluation of Radiation CT Device Using Geant4

Kang Chun Il, Ri Ki Song

We performed the Geant4 simulation calculation on the standard sample of various materials and sizes, and evaluated the changes of reconstructed images with the number of particles and the γ -CT characteristics. The spatial resolution of the CT device using 256 CsI scintillation detectors is about 1.2mm.

Keywords: γ -CT, Geant4