

폐 카운터 교정시 폐내 방사능의 균일분포 가정에 따른 측정오차의 평가

이태영, 이종일, 장시영, 김종수

한국원자력연구소

요 약

폐부하량 측정에 사용되는 폐 카운터의 교정시 폐내 방사능의 균일분포 가정은 폐부하량 측정결과에 영향을 줄 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 균일분포 가정에 따른 측정오차를 평가하기 위해 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 분포패턴에 따른 계측효율을 구해 이를 비교·분석하였다. 그결과 균일분포 패턴에 비해 17 keV에서 1.39배, 60 keV에서 1.14배, 185 keV에서 1.12배 까지 폐부하량이 과대평가되는 것으로 밝혀졌다. 균일분포를 가정하더라도 문제가 될 정도로 과대평가가 되지 않음을 알 수 있었다. 반면, 과소평가는 17 keV에서 50.2배, 60 keV에서 3.6배, 185 keV에서 2.7배 까지 나타나, 에너지가 작을수록 균일분포에 의한 교정에 문제의 심각성이 있는 것으로 보였다.

1. 서 론

흡입후 비교적 폐에 장기간 잔류하는 방사성물질(Type M, Type S)에 대해서는 폐계측에 의해 폐부하량을 측정하여 이의 섭취량을 평가할 수 있다. 이를 위해서는 측정에 사용되는 폐 카운터의 검출기를 교정하여야 한다. 폐부하량 측정에 사용되는 검출기의 교정은 폐내 침착한 방사능을 균일분포로 가정하여 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)팬텀[1] 또는 JAERI(Japan Atomic Energy Research Institute) 팬텀[2]을 사용하여 행해진다.

ICRP 66의 폐모델[3]에 따르면 폐를 4개의 영역, 즉 Extrathoracic(ET) 영역, Bronchial(BB) 영역, Bronchiolar(bb) 영역, Alveolar interstitial(AI) 영역으로 구분하고 있으며, 입자의 크기가 $1\mu\text{m}$ 인 방사성물질을 작업자가 흡입할 경우, 전체 흡입량 중에서 21.11%, 1.24%, 1.65%, 10.7%가 각 영역에 각각 침착되는 것으로 보고되어 있다. 또한 입자의 크기가 $5\mu\text{m}$ 인 경우에는 39.1%, 1.77%, 1.11%, 5.3%가 각 영역에 각각 침착되는 것으로 나타나 있다. 흡입한 방사성물질의 폐내 분포에 초점을 두어볼 때 흡입 입자의 크기, 호흡생리인자, 개인의 생리기능 등에 따라 방사능의 분포패턴이 서로 다를 수 있다.

실제적으로 폐내의 방사능이 균일분포를 하지 않음에도 불구하고 검출기의 교정이 균일분포 가정에 기반을 두어 수행되어지면, 이 가정으로 인해 발생하는 오차는 폐부하량 평가결과에 직접적인 영향을 주게된다. 따라서 본 연구에서는 Cristy 등에[4] 의해 개발된 팬텀과 한국원자력연구소(KAERI)에서 사용중인 폐 카운터의 검출기를 모형화하여 균일분포와 비균일분포에 대한 검출기의 계측효율을 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 구하였으며, 이로부터 얻은 결과를 비교·분석함으로써 폐내 방사능의 균일분포 가정에 따른 측정오차를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

팬텀모델

팬텀의 외관과 이의 내부 장기는 평면, 구, 원통형, 원뿔 등을 나타내는 방정식을 단독 또는 조합으로 사용함에 의해 수학적으로 묘사할 수 있다. 그러나 LLNL 팬텀과 JAERI 팬텀에 대해 이와 같은 자료가 주어지지 않아 도시메트리 계산에 널리 사용되고 있는 Cristy 등에 의해 개발된 팬텀이 사용되었다. 이 팬텀은 3 가지 부위, 즉 머리와 목부위, 몸통부위, 다리부위로 구분되어 있으나, 관심 장기는 폐이므로 몸통과 몸통내부에 위치한 장기만을 고려하였다.

본 계산에서 고려한 폐내 방사능 분포 패턴은 그림 1과 같으며, 검정색으로 나타낸 영역은 방사능이 균일하게 분포된 영역이고, 회색은 방사능이 분포하지 않은 영역을 의미한다.

검출기 모델

검출기 모델로는 KAERI에서 사용중인 폐 카운터의 검출기를 사용하였다. KAERI 폐 카운터의 검출시스템은 그림 2에서와 같이 4개의 검출기로 구성되어 있다. 검출기 1의 창면은 왼쪽 폐의 아랫부분, 검출기 2는 왼쪽 폐의 윗부분, 검출기 3은 오른쪽 폐의 아랫부분, 검출기 4는 오른쪽 폐의 윗부분을 투영하도록 되어 있다.

몬테칼로 시뮬레이션

계측효율은 폐내의 방사능 분포영역에서 발생시킨 입자가 검출기까지 도달하여 이의 에너지를 검출기에 부여함으로써 생성된 펄스를 에너지분포에 따라 계산함으로써 얻어진다. 이것은 고려한 기하학적 계산모델에서 볼츠만 수송방정식의 해를 구하는 일이다. 수송방정식의 해법에는 각분할법과 몬테칼로 방법 등이 있으나, 복잡한 기하학적 구조에서는 몬테칼로 방법이 주로 이용되고 있다. 몬테칼로 방법에 의한 수송해석 코드로 여러 종류가 개발되어 현재 사용중에 있으나, 가장 널리 사용하고 있는 것이 MCNP코드이다. MCNP(Monte Carlo Neutron and Photon Code) 코드는 사용자가 펄스과고 계산자(Tally)와 계산자 에너지 카드를 사용하면 방사선에 의해 검출기내에서 생성된 펄스의 에너지 분포를 계산해 준다[5]. 따라서 본 계산에 MCNP 4A 코드를 사용하였으며, 계산에서 고려한 에너지는 ^{239}Pu 의 측정에 사용되는 17 keV, ^{241}Am 의 60 keV, ^{235}U 의 185 keV이었다. 광전 피이크 계측효율을 얻기 위해 17 keV에 대해서는 15 keV ~ 17 keV, 60 keV는 59.8 keV ~ 60 keV, 185 keV는 185.4 keV ~ 185 keV 사이의 에너지에 의해 생성된 펄스만이 고려되었다. 폐내의 방사능분포 영역에서 발생시킨 입자수는 17 keV에 대해서는 80,000,000개, 60 keV와 185 keV는 4,000,000개 이었다.

3. 결과 및 고찰

계산모델과 폐내 방사능 분포패턴을 가지고 몬테칼로 시뮬레이션으로부터 얻은 각 검출기의 계측효율과 이들의 합으로 주어지는 계측효율은 표 1과 같다. 본 연구에서는 이들 값을 두가지 관점에서 검토하였다. 첫 번째는 합으로 주어지는 계측효율을 가지고 균일분포 가정에 따른 오차범위를 추정하였고, 두 번째는 폐부하량 측정에 각 검출기의 독립된 계측효율과 이들의 합으로 주어지는 계측효율중 어느것을 사용해야만이 균등분포에 따른 오차를 줄일 수 있는지를 살펴보았다.

얻어진 계측효율을 가지고 첫 번째 관점에서 분석한 결과, 표 2에서 보여주는 바와 같이 균일분포 패턴을 기준으로 할 경우 17 keV에서는 1.39배, 60 keV는 1.14배, 185 keV는 1.12배 까지 폐부하량이 과대 평가되는 것으로 밝혀졌다. 균일분포를 가정하더라도 문제가 될 정도로 과대 평가가 되지 않음을 알 수 있었다. 반면, 과소평가는 17 keV에서 50.2배, 60 keV에서 3.6배, 185 keV에서 2.7배 까지 나타나, 에너지가 작을수록 균일분포 가정에 의한 교정에 문제의 심각성이 있는 것으로 보였다. 또한 두 번째 관점에서 분석한 결과, 표 2에서 보여주는 바와 같이 합으로 주어지는 계측효율을 사용하면 균일분포 가정에 따른 오차를 다소 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구결과는 폐 카운터 교정시 균일분포에 기반을 둘 때 폐부하량 평가결과에 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 특히 문제는 17 keV에서 상당히 과소 평가되는 것으로 나타나, 이에 따른 방안이 마련되어야 할 것으로 보인다. 또한 각 검출기 계측효율의 합으로 주어지는 전 계측효율을 폐부하량 평가에 사용하면 폐 내 방사능의 균일분포 가정에 따른 오차를 다소 줄일 수 있는 것으로 나타나, 독립적으로 검출기의 교정을 수행하여야 하는지 또는 합으로 교정을 수행하여야 하는지에 대한 궁금증을 해결해 주는 방안을 본 연구결과로부터 얻게 되었다.

참고문헌

1. R.V. Griffith, P. N. Dean, A. L. Anderson, J. C. Fisher, "Fabrication of a tissue-equivalent torso phantom for intercalibration of *in vivo* transuranic-nuclide counting facilities," in : *Proc. IAEA international symposium on advances in radiation protection monitoring*, IAEA-SM-229/56, 493-504, IAEA, Vienna(1978).
2. T. Shirohani, "Realistic torso phantom for calibration of *in vivo* transuranic-nuclide counting facilities," *J. Nucl. Sci. Tec.* 25, 875-883(1988).
3. ICRP, *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24(1-3)(Oxford:Pergamon)(1994).
4. M. Cristy, K. F. Eckerman, "Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources," ORNL/TM-8381/V1(1987).
5. J. F. Briesmeister, MCNP 4A-Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code System. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; Report Number LA-7396(1993).

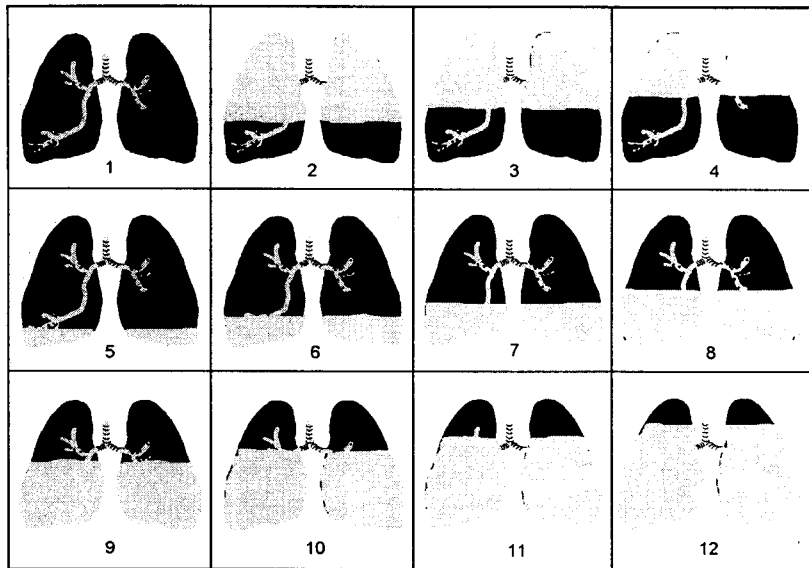


그림 1. Distributions used in the Monte Carlo simulations.

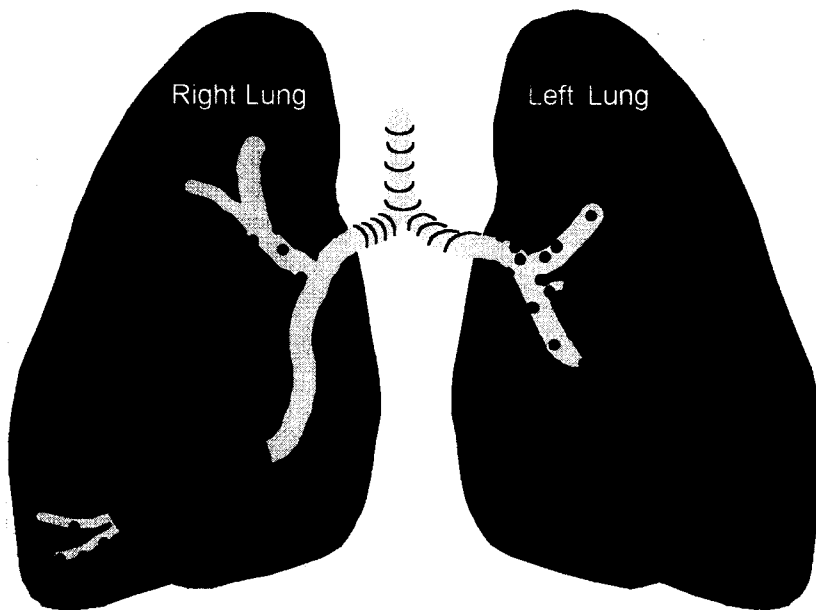


그림 2. Arrangement of the detectors over the lungs.

表 1. Counting efficiencies(counts/photon) of the 12 distributions in the lung using detector 1.

Pattern	Detector 1(bottom left)		
	17 keV	60 keV	185 keV
1	1.16×10^{-4}	2.46×10^{-3}	1.93×10^{-3}
2	2.07×10^{-4}	3.67×10^{-3}	2.72×10^{-3}
3	1.99×10^{-4}	3.55×10^{-3}	2.63×10^{-3}
4	1.67×10^{-4}	3.30×10^{-3}	2.49×10^{-3}
5	1.15×10^{-4}	2.45×10^{-3}	1.90×10^{-3}
6	8.94×10^{-5}	2.11×10^{-3}	1.70×10^{-3}
7	4.87×10^{-5}	1.64×10^{-3}	1.41×10^{-3}
8	1.52×10^{-5}	1.14×10^{-3}	1.09×10^{-3}
9	4.95×10^{-6}	8.07×10^{-4}	8.29×10^{-4}
10	1.59×10^{-6}	5.62×10^{-4}	6.55×10^{-4}
11	7.63×10^{-7}	4.00×10^{-4}	5.09×10^{-4}
12	2.25×10^{-7}	2.82×10^{-4}	3.84×10^{-4}
Pattern	Detector 2(top left)		
	17 keV	60 keV	185 keV
1	4.48×10^{-5}	1.95×10^{-3}	1.65×10^{-3}
2	1.10×10^{-5}	1.01×10^{-3}	1.04×10^{-3}
3	2.54×10^{-5}	1.36×10^{-3}	1.30×10^{-3}
4	4.20×10^{-5}	1.75×10^{-3}	1.53×10^{-3}
5	5.03×10^{-5}	2.13×10^{-3}	1.81×10^{-3}
6	5.96×10^{-5}	2.37×10^{-3}	1.90×10^{-3}
7	6.88×10^{-5}	2.55×10^{-3}	2.06×10^{-3}
8	6.56×10^{-5}	2.65×10^{-3}	2.05×10^{-3}
9	4.99×10^{-5}	2.38×10^{-3}	1.92×10^{-3}
10	2.29×10^{-5}	1.85×10^{-3}	1.59×10^{-3}
11	7.84×10^{-6}	1.33×10^{-3}	1.26×10^{-3}
12	3.01×10^{-6}	9.39×10^{-4}	9.59×10^{-4}
Pattern	Detector 3(bottom right)		
	17	60	185
1	1.17×10^{-4}	2.50×10^{-3}	1.96×10^{-3}
2	2.06×10^{-4}	3.64×10^{-3}	2.70×10^{-3}
3	1.97×10^{-4}	3.61×10^{-3}	2.65×10^{-3}
4	1.69×10^{-4}	3.28×10^{-3}	2.49×10^{-3}
5	1.15×10^{-4}	2.42×10^{-3}	1.91×10^{-3}
6	8.80×10^{-5}	2.12×10^{-3}	1.75×10^{-3}
7	4.85×10^{-5}	1.65×10^{-3}	1.42×10^{-3}
8	1.61×10^{-5}	1.13×10^{-3}	1.07×10^{-3}
9	5.16×10^{-6}	7.73×10^{-4}	8.17×10^{-4}
10	1.98×10^{-6}	5.53×10^{-4}	6.23×10^{-4}
11	8.00×10^{-7}	3.91×10^{-4}	4.91×10^{-4}
12	2.00×10^{-7}	2.92×10^{-4}	3.80×10^{-4}

☒ 1. (Cont.).

Pattern	Detector 4(top right)		
	17 keV	60 keV	185 keV
1	4.39×10^{-5}	1.92×10^{-3}	1.63×10^{-3}
2	9.63×10^{-6}	9.96×10^{-4}	1.04×10^{-3}
3	2.50×10^{-5}	1.36×10^{-3}	1.29×10^{-3}
4	4.20×10^{-5}	1.73×10^{-3}	1.54×10^{-3}
5	5.20×10^{-5}	2.15×10^{-3}	1.76×10^{-3}
6	5.95×10^{-5}	2.38×10^{-3}	1.92×10^{-3}
7	6.97×10^{-5}	2.56×10^{-3}	2.02×10^{-3}
8	6.64×10^{-5}	2.61×10^{-3}	2.07×10^{-3}
9	4.89×10^{-5}	2.32×10^{-3}	1.91×10^{-3}
10	2.11×10^{-5}	1.81×10^{-3}	1.58×10^{-3}
11	8.10×10^{-6}	1.32×10^{-3}	1.25×10^{-3}
12	2.96×10^{-6}	9.37×10^{-4}	9.62×10^{-4}
Pattern	Four-detector array(SUM)		
	17 keV	60 keV	185 keV
1	3.21×10^{-4}	8.83×10^{-3}	7.17×10^{-3}
2	4.34×10^{-4}	9.31×10^{-3}	7.50×10^{-3}
3	4.47×10^{-4}	9.87×10^{-3}	7.88×10^{-3}
4	4.21×10^{-4}	1.01×10^{-2}	8.05×10^{-3}
5	3.32×10^{-4}	9.14×10^{-3}	7.38×10^{-3}
6	2.97×10^{-4}	8.98×10^{-3}	7.28×10^{-3}
7	2.36×10^{-4}	8.40×10^{-3}	6.91×10^{-3}
8	1.63×10^{-4}	7.52×10^{-3}	6.28×10^{-3}
9	1.09×10^{-4}	6.29×10^{-3}	5.47×10^{-3}
10	4.75×10^{-5}	4.78×10^{-3}	4.45×10^{-3}
11	1.75×10^{-5}	3.43×10^{-3}	3.51×10^{-3}
12	6.40×10^{-6}	2.45×10^{-3}	2.68×10^{-3}

☒ 2. Factors by which the efficiency differs from that obtained from the pattern 1.

	Highest efficiency divided by pattern #1 efficiency		
	17 keV	60 keV	185 keV
Detector 1	1.78	1.49	1.41
Detector 2	1.54	1.36	1.25
Detector 3	1.76	1.46	1.38
Detector 4	1.59	1.36	1.27
Array(SUM)	1.39	1.14	1.12
	Pattern #1 efficiency divided by lowest efficiency		
	17 keV	60 keV	185 keV
Detector 1	516	8.72	5.03
Detector 2	14.9	2.08	1.72
Detector 3	585	8.56	5.16
Detector 4	14.8	2.05	1.69
Array(SUM)	50.2	3.60	2.68