

방사선비상시 내부피폭 신속 분류를 위한 휴대용 NaI 검출기의 계측효율 전산모사

하위호^{*†}, 유재룡^{*}, 윤석원^{*}, 박민정^{*}, 김종경[†]

^{*}한국원자력의학원 국가방사선비상진료센터, [†]한양대학교 원자력공학과

2015년 8월 28일 접수 / 2015년 11월 4일 1차 수정 / 2015년 11월 16일 2차 수정 / 2015년 11월 16일 채택

원자력사고 등의 방사선비상시 환경으로 누출된 방사성물질은 일반인의 내부피폭을 야기할 수 있다. 특히 감마선 방출핵종의 내부피폭의 경우 전신계수기가 널리 사용되지만 현장에서 신속히 내부피폭을 분류하는 용도로는 부적합하다. 본 연구에서는 휴대용 감마스펙트로메터를 비상시 내부피폭 신속분류에 적용하기 위하여 몬테카를로 전산모사 방법을 이용하여 NaI 검출기의 계측효율을 BOMAB 팬텀의 크기별로 평가하였다. 두 가지 측정 지오메트리에서 계측효율을 비교한 결과 앞은 모델에서의 계측효율이 서 있는 모델에 비해 약 1.1배 높은 계측효율을 나타내었다. 하지만 측정 지오메트리에 의한 계측효율 차이보다 신체크기에 따른 계측효율 차이가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 특히 신체크기가 작은 4세 팬텀의 경우 표준남성과 비교하면 약 2.4~3.1배의 높은 계측효율을 나타내어 신체크기가 상이한 일반인을 대상으로 내부피폭을 모니터링할 경우 반드시 계측효율에 대한 고려가 필요한 것으로 확인되었다.

중심어 : 방사선비상, 내부피폭, 감마핵종분석, NaI 검출기, 계측효율

1. 서론

원자력사고나 방사능테러 등의 방사선비상시 환경으로 방사성물질이 누출되게 되면 일반인의 내부피폭을 야기할 수 있다. 과거 발생한 체르노빌 원전사고와 후쿠시마 원전사고에서도 소아를 포함한 일반인의 내부피폭이 발생하였으며 관련 전문기관에서 내부피폭 측정 및 평가를 수행한 바 있다[1-3]. 그 외에도 방사능확산장치(radiological dispersal device, RDD)를 이용한 방사능테러 발생시에도 일반인의 내부피폭이 발생할 수 있으며 미국과 유럽에서는 이에 대비한 신속 내부피폭 검사방법 및 절차에 대한 연구를 진행 중에 있다[4-6]. 방사능확산장치의 경우 일반 산업체에서 널리 사용되는 감마선 방출핵종이 상대적으로 쉽게 사용될 수 있으며 대표적인 핵종으로는 Cs, Co, Ir 등이 있다[4-6].

감마선 방출핵종에 대한 내부피폭의 경우 일반적으로 전신계수기나 특정장기 모니터링장치를 이용하여 인체 외부로 방출되는 감마선을 직접 측정하는 방법이 널리 사용되고 있다. 일반적인 전신계수기는 무게와 부피가 크고 대부분 고정식으로 설치되어 비상시 현장에서의 적용에는 무리가 따른다. 그 대안으로 휴대용 감마스펙트로메터를 이용한 내부피폭 감시방법이 여러 연구그룹[5,6]에서 제시되었다. 이 경우 기존의 전신계수기에 비해 계측효율이 낮고 최소검출방사능(MDA)이 상대적으

로 높지만 현장에서 내부피폭을 신속히 분류하는 목적에는 잘 부합할 수 있다. 이러한 휴대용 감마스펙트로메터를 이용하여 인체의 내부피폭을 측정하기 위해서는 측정 지오메트리를 고려한 검출기 계측효율 교정이 요구된다. 특히 감마스펙트로메터의 계측효율은 측정 지오메트리를 반드시 고려할 필요가 있는데 일반적으로 전신계수기의 교정은 BOMAB (Bottle Mannikin Absorption) 팬텀이나 제작사에서 제공하는 물리적 인체모형팬텀을 이용하여 교정이 가능하다. 이 경우 종사자 내부피폭 모니터링을 위해서는 일반적으로 표준성인 크기의 BOMAB 팬텀이나 제작사에서 제공하는 물리적 인체모형팬텀을 이용하여 전신계수기 계측효율 교정을 수행한다. 하지만 신체크기가 다른 여성이나 소아를 대상으로 전신계수를 수행할 경우 신체크기에 대한 고려가 반드시 요구된다[6,7]. 따라서 전산모사를 이용한 신체크기별 전신계수기의 계측효율 연구[6-8]는 많이 진행된 바 있다. 하지만 휴대용 감마스펙트로메터를 이용하여 신체크기별 계측효율에 대한 평가는 아직까지 수행된 바는 없다.

따라서 본 연구에서는 휴대용 감마스펙트로메터를 방사선비상시 일반인을 대상으로 하는 내부피폭 모니터링 및 스크리닝에 적용하기 위하여 몬테카를로 전산모사 방법을 이용하여 휴대용 NaI 검출기의 계측효율을 BOMAB 팬텀의 크기별로 평가하였다.

책임저자 : 하위호, lovinn@kirams.re.kr
서울시 노원구 노원길 75

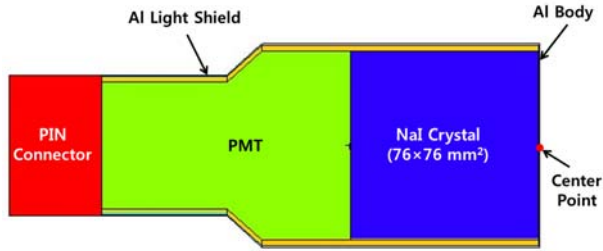


Fig. 1. Geometry modeling for NaI detector.

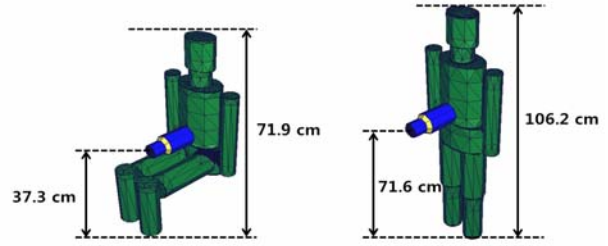


Fig. 2. Geometry modeling for reference 4-year old BOMAB phantom, sitting model(left) and standing model(right).

Table 1. Dimensions for Different Size BOMAB Phantoms.

Size of BOMAB phantom	Height (cm)	Full volume (cm ³)
4-year old	106.2	10.8
10-year old	142	22.2
Female	161	31.8
Male	170	45.1
95 th percentile male	184	57.3

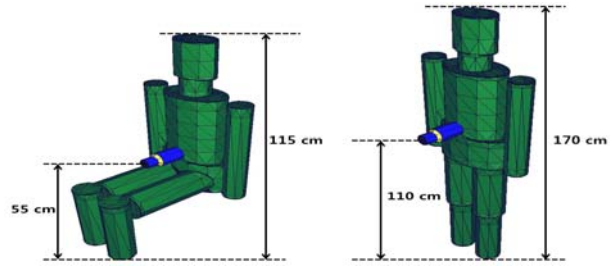


Fig. 3. Geometry modeling for reference male BOMAB phantom, sitting model(left) and standing model(right).

2. 재료 및 방법

2.1 지오메트리 모델링

본 연구에서는 Thermo사의 휴대용 NaI 검출기 (RIIDEYE-M-G3)를 사용하였다. NaI 크리스털의 크기는 직경 76 mm, 두께 76 mm, 밀도는 3.67 g·cm⁻³로 20 keV부터 3 MeV의 에너지 범위에서 감마선 측정이 가능하다. 몬테카를로 전산모사를 수행하기 위하여 제작사에서 제공하는 NaI 검출기 도면을 이용하여 NaI 검출기를 모델링하였다. 모델링된 NaI 검출기의 단면도는 Fig. 1과 같다.

BOMAB 팬텀은 인체크기를 반영하기 위하여 미국립 표준협회(ANSI)에서 제공하는 4세, 10세, 표준여성, 표준남성, 95% 백분위수 남성의 BOMAB 팬텀을 사용하였다[9]. 각 BOMAB 팬텀의 신체크기는 Table 1과 같다. 모든 BOMAB 팬텀은 10개의 실린더로 구성되어 있으며 머리, 가슴, 골반에 해당하는 타원형 실린더와 목, 팔, 허벅지, 종아리에 해당하는 원형 실린더로 각각 구성된다. BOMAB 팬텀의 지오메트리는 의자에 앉은 모델과 직립형으로 서 있는 모델을 신체크기별로 각각 모델링하였다.

NaI 검출기의 외부 측정단면 정중앙(Fig. 1의 center point)이 각각의 BOMAB 팬텀의 골반 실린더로부터 수직 위방향으로 10 cm, 가슴 실린더로부터 수평으로 1 cm 떨어지도록 위치시키고 팬텀내부에는 0.5 M HCl에 교정용 표준선원에 해당하는 혼합 감마선원(¹⁰⁹Cd, ¹³⁹Ce, ¹¹³Sn, ¹³⁷Cs, ⁸⁸Y, ⁶⁰Co)이 균질하게 분포하는 것으로 모델링하였다. Fig. 2와 Fig. 3에서는 4세 팬텀과 표준남성 팬텀의 지오메트리를 각각 나타내었다.

2.2. 신체크기별 계측효율 전산모사

휴대용 NaI 검출기의 계측효율 계산을 위하여 MCNPX v.2.7.0 전산코드를 사용하였다. BOMAB 팬텀 내부의 선원항은 혼합 감마선원에 해당되는 88.0, 165.9, 391.7, 661.7, 898.0, 1173.2, 1332.5, 1836.1 keV의 감마선 에너지가 방출되는 것으로 모사하였다. 검출기 내에서는 펄스파고를 계산하기 위하여 f8 tally를 적용하였으며 GEB (Gaussian energy broadening) 카드를 이용하여 NaI 검출기의 반치폭 ($FWHM = a + \sqrt{bE + cE^2}$, $a = -0.00715$, $b = 0.06482$, $c = -0.01$)이 고려된 에너지스펙트럼을 산출하였다. 이 때 감마선 에너지에 따른 관심구간(region of interest, ROI)별로 순피크 면적(net peak area)을 적용하여 계측효율을 계산하였다. 순피크 면적은 감마선 에너지별 관심구간의 총피크 면적에서 계단형 백그라운드 피크 면적을 차감하여 계산하였다. 계산결과 통계적 불확도가 5% 미만인 되도록 하기 위하여 각각의 지오메트리에서 10⁹개의 광자를 발생시켜 NaI 검출기의 계측효율을 계산하였다.

감마선 에너지별로 계산된 계측효율 값을 Origin Pro 8.6에서 제공하는 nonlinear curve fitting 기능을 이용하여 계측효율 곡선을 도출하였다. $\ln(\epsilon) = a + b \ln(E) + c \ln(E)^2 + d \ln(E)^3$ 의 감마선 에너지 E 와 계측효율 ϵ 에 관한 관계식을 적용한 curve fitting으로부터 도출된 계측효율 곡선을 지오메트리와 신체크기별로 산출하여 비교하였다.

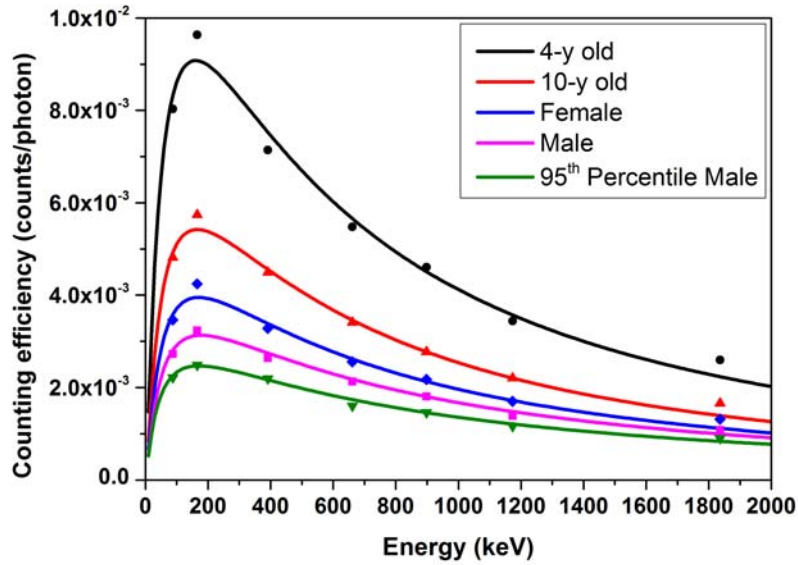


Fig. 4. Counting efficiency of NaI detector for sitting model with different size BOMAB phantoms.

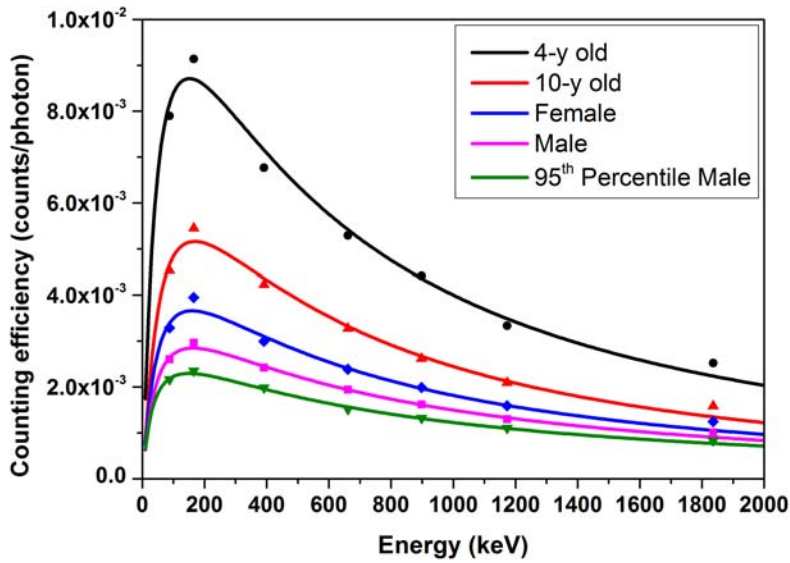


Fig. 5. Counting efficiency of NaI detector for standing model with different size BOMAB phantoms.

3. 결과 및 논의

Fig. 4와 Fig. 5는 의자에 앉은 모델과 직립형으로 서 있는 모델에 대해서 산출된 신체크기별 NaI 검출기의 계측효율 곡선을 각각 나타낸다. 신체크기가 낮은 BOMAB 팬텀에서 계측효율이 높게 나타났으며 신체크기가 높을수록 계측효율이 감소함을 확인할 수 있다. 이는 신체크기가 증가할수록 자기흡수(self absorption) 현상이 증가하고 NaI 검출기의 측정가능한 입체각 내에서 선원항 위치가 검출기로부터 멀어지게 되어 발생되는 것으로 판단

된다. 또한 의자에 앉은 모델에서의 계측효율은 각 신체크기별로 서 있는 모델보다 약 1.02~1.12배 높은 것으로 확인되었다. 이러한 현상 역시 의자에 앉은 모델의 경우 NaI 검출기의 측정가능한 입체각 내에 포함되는 선원항 위치가 서 있는 모델과 비교하여 더욱 근접한 지점에 있기 때문인 것으로 판단되었다.

각각의 지오메트리에서 평가된 계측효율을 종사자 내부피폭 모니터링에 일반적으로 적용되고 있는 표준남성에서의 계측효율에 대한 비율로 계산하여 비교하였다. 표준남성에 비해 작은 크기의 BOMAB 팬텀에서는 표준

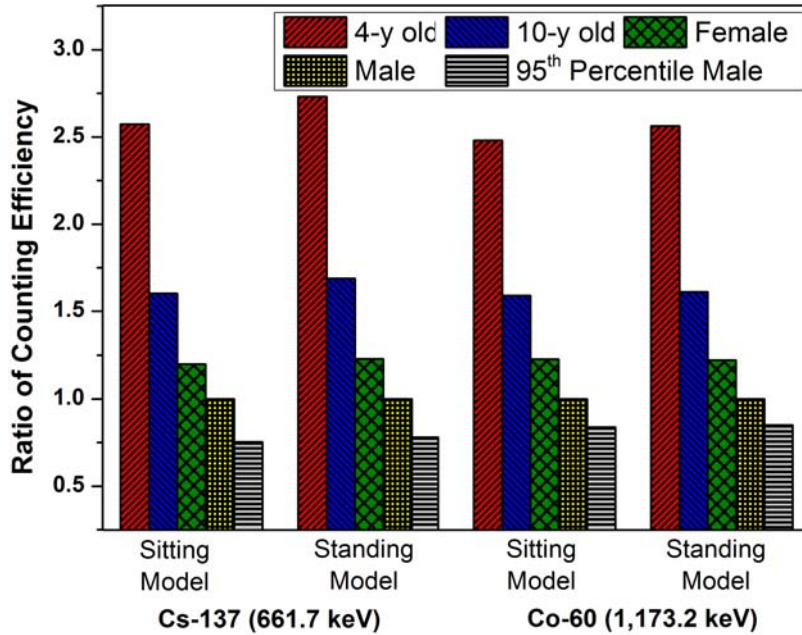


Fig. 6. Ratio of counting efficiency (different size BOMAB/reference male BOMAB) of ¹³⁷Cs and ⁶⁰Co for sitting and standing models.

남성에서의 계측효율과 비교하여 신체크기와 감마선에 너지에 따라 약 1.20~3.08 배 높은 계측효율을 나타내었고 반면 표준남성에 비해 큰 크기의 95% 백분위수의 남성 BOMAB 팬텀에서는 0.75~0.85 배 가량 낮은 계측효율을 보이는 것으로 나타났다. ¹³⁷Cs과 ⁶⁰Co에서 각 신체 크기별 계측효율과 표준남성에서의 계측효율에 대한 비율을 Fig. 6에 나타내었다.

특히 신체크기가 작은 4 세 팬텀의 경우 계측효율을 두 가지 지오메트리에서 표준남성에 대한 계측효율과 비교했을 때 2.41~3.08 배의 높은 계측효율로 나타나고 10 세 팬텀의 경우 1.54~1.84 배의 높은 계측효율이 나타나는 것을 확인하였다. 신체크기가 작은 소아에 대하여 표준남성의 계측효율을 적용할 경우 체내 방사능 측정시 최대 3 배 가량의 과대평가가 발생하며 4세 팬텀보다 크기가 작을 경우에는 더욱 높은 과대평가를 야기할 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 실제 방사선비상시 신체 크기가 상이한 일반인을 대상으로 내부피폭을 모니터링 할 경우에는 반드시 계측효율에 대한 고려가 요구된다.

향후 방사선비상시 보다 실질적이고 편리한 적용을 위하여 신체크기별 보정인자를 미리 산출하여 적용하는 방안이 마련될 필요가 있겠다. 이때 NaI 검출기 이외의 다양한 휴대용 감마스펙트로메터 뿐만 아니라 본 연구에서 고려하지 않은 신체크기에 대하여 추가적으로 반영할 필요가 있으며 미국립표준협회(ANSI)와 세계표준화기구(ISO)에서 제시하는 상대편중(relative bias), 상대정밀도(relative precision), 최소검출방사능 등의 바이오어세이 성능기준[10,11]을 만족하는 지에 대한 추가적인 연구가 진행될 필요가 있겠다.

4. 결론

본 연구에서는 방사선비상시 일반인을 대상으로 하는 내부피폭 모니터링 및 스크리닝을 위하여 몬테카를로 전산코드를 사용하여 두 가지 지오메트리에서 BOMAB 팬텀의 크기별로 휴대용 NaI 검출기의 계측효율을 평가해 보았다. 평가결과 두 가지 지오메트리에 따른 계측효율 차이보다 팬텀의 신체크기에 따른 계측효율 차이가 더욱 크게 나타났다. 특히 낮은 연령의 팬텀에서 가장 높은 계측효율을 보이는 것으로 확인되었다. 따라서 신체크기가 작은 소아에 대하여 직접 내부피폭을 모니터링할 경우에는 해당 신체크기에 적합한 감마스펙트로메터의 계측효율을 적용하는 것이 체내 방사능을 보다 정확하게 측정할 수 있다. 본 연구에서 평가된 계측효율에 대한 검증은 수행하기 위하여 추가적인 측정 실험에 기반한 유효성 평가가 요구되며 향후 방사선비상시 보다 실질적이고 편리한 적용을 위하여 신체크기별 보정인자를 미리 산출하여 적용하는 방안이 마련될 필요가 있겠다.

감사의 글:

본 연구는 한국원자력의학원에서 수행중인 방사선피폭환자 치료기술 개발(No. 50581-2015) 사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. International Atomic Energy Agency. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience. IAEA STI/PUB/1239. 2006.
2. Sugimoto A, Gilmour S, Tsubokura M, Nomura S,

- Kami M, Oikawa T, Kanazawa Y, Shibuya K. Assessment of the risk of medium-term internal contamination in Minamisoma city, Fukushima, Japan, after Fukushima Daiichi nuclear accident. *Environ Health Persp.* 2014;122:587-593.
3. Matsuda N, Kumagai A, Ohtsuru A, Morita N, Miura M, Yoshida M, Kudo T, Takamura N, Yamashita S. Assessment of internal exposure doses in Fukushima by a whole body counter within one month after the nuclear power plant accident. *Radiat Res.* 2013;179(6):663-668.
 4. Etherington G, Rothkamm K, Shutt AL, Youngman MJ. Triage, monitoring and dose assessment for people exposed to ionising radiation following a malevolent act. *Radiat Prot Dosim.* 2011;144(1-4): 534-539.
 5. Manger RP, Hertel NE, Burgett EA, Ansari A. Using handheld plastic scintillator detectors to triage individuals exposed to a radiological dispersal device. *Radiat Prot Dosim.* 2012;150(1):101-108.
 6. Palmer RC, Hertel NE, Ansari A, Manger RP, Freibert EJ. Evaluation of internal contamination levels after a radiological dispersal device incident using portal monitors. *Radiat Prot Dosim.* 2012;151(2):237-251.
 7. Ferreira FTC, Bogaerts R, Bebacq AL, Mihailescu CL, Vanhavere F. Study of the counting efficiency of a WBC setup by using a computational 3D human body library in sitting position based on polygonal mesh surfaces. *Health Phys.* 2014;106(4): 484- 493.
 8. Bolch WE, Hurtado JL, Lee C, Manger R, Burgett E, Hertel N, Dickerson W. Guidance on the use of handheld survey meters for radiological triage: Time- dependent detector count rates corresponding to 50, 250, and 500 mSv effective dose for adult males and adult females. *Health Phys.* 2012; 102(3):305-325.
 9. American National Standard Institute. American National Standard - Specifications for the bottle manikin absorption phantom. ANSI/HPS N13.35. 1999.
 10. International Organization for Standardization. Radiation Protection - Performance criteria for radiobioassay. ISO 28218. 2010.
 11. American National Standard Institute. American National Standard - Performance criteria for radiobioassay. ANSI/HPS N13.30. 2011.

Simulation of Counting Efficiencies of Portable NaI Detector for Rapid Screening of Internal Exposure in Radiation Emergencies

Wi-Ho Ha^{*†}, Jaeryong Yoo^{*}, Seokwon Yoon^{*}, Min Jung Pak^{*}, and Jong Kyoung Kim[†]

^{*}National Radiation Emergency Medical Center, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences,

[†]Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

Abstract - In case of radiation emergencies, radioactive materials released into environments can cause internal exposure of members of the public. Even though whole body counters are widely used for direct measurement of internally deposited radionuclides, those are not likely to be used at the field to rapidly screen internal exposure. In this study, we estimated the counting efficiencies of portable NaI detector for different size BOMAB phantoms using Monte Carlo transport code to apply handheld gamma spectrometers for rapid screening of internal exposure following radiological accidents. As a result of comparison for two counting geometries, counting efficiencies for sitting model were about 1.1 times higher than those for standing model. We found, however, that differences of counting efficiencies according to different size are higher than those according to counting geometry. Therefore, we concluded that when we assess internal exposure of small size people compared to the reference male, the body size should be considered to estimate more accurate radioactivity in the human body because counting efficiencies of 4-year old BOMAB phantom were about 2.4~3.1 times higher than those of reference male BOMAB phantom.

Keywords : Radiation emergency, Internal exposure, Gamma analysis, NaI detector, Counting efficiency