

A Study on the Performance Evaluation of Standard Gamma Irradiation System Using Monte Carlo Code

Won-Seok Park,¹ Seung-Uk Heo,² Jang-Oh Kim,³ Byung-In Min^{4,*}

¹The 85 Precision Standard Maintenance Depot, Air Force, Korea

²Department of Biomedical Engineering, Inje University

³Department of Emergency Management, Inje University

⁴Department of Nuclear Applied Engineering, Inje University

Received: March 07, 2018. Revised: April 15, 2018. Accepted: April 30, 2018

ABSTRACT

In this study, we compared the measured values of the effective beam size of standard gamma irradiator with the simulation results to provide a useful means to the effective beam area determination.

Results of the simulation and measured using ion chamber was distributed in a relative error of 4.5 ~ 7.3% of the case of air kerma rate. The size of the effective beam area is when the simulation was implemented in the horizontal direction 27cm, 21.6cm vertical direction, the measured result using a film was obtained similar results with the horizontal direction 26.5cm, 21.9cm vertical direction. The relative error in the horizontal direction is 1.85% and 1.38% vertical effective beam area was also similarly distributed around the field gamma rays.

As a result of the study, it was confirmed that the effectiveness of the simulation was sufficient for the gamma irradiation system. In particular, it is small relative errors in the effective beam size than the air kerma rate is considered to be due to the size of the beam is determined by geometric factors rather than the capacity of the standard source. A further study is needed to improve the reliability of the photon energy distribution diagram using simulation.

Keywords: Monte Carlo simulation, FLUKA, Gamma Irradiator, Effective radiation area

I. INTRODUCTION

교정용 표준기로 사용하는 감마선 조사장치(이하:감마선 조사장치)는 국제적 기준 및 국가 측정 표준대표기관에서 정하는 표준 감마선장을 제공한다. 감마선 조사장치에서 조사되는 기준 감마선장에 대한 공기 커마율을 측정하고 불확도를 산출하여 감마선 서베이미터 교정에 대한 소급성을 제공하는 국내외 기준에 부합하는 표준 장비이다.

감마선 서베이미터 측정치의 신뢰성을 보장하기 위해서 감마선 조사장치의 적합성 평가(이하 : 적

합성 평가)는 매우 중요하며, ISO 4037-1에 의거, 기계적/선량학적 성능평가를 실시한다.^[1]

선량학적 성능평가는 표준 감마선원의 직접적인 성능평가로써 Isodose Profile평가, 제어시스템의 timing error 평가, 산란성 영향 평가로 구성된다.^[2]

Isodose Profile 평가는 빔의 균질도와, 유효빔의 크기를 측정하는 것으로써 선량학적 성능평가에서 가장 중요한 부분이다. Isodose Profile 평가는 감마선 감광 필름을 사용하여 선원으로부터 1 m 지점에서 방사선장을 촬영하여 방사선장의 중심을 기준으로 수직면, 수평면의 유효빔 크기를 측정하며

* Corresponding Author: Byung-In Min

E-mail: rimbi@inje.ac.kr

Tel: +82-55-320-3910

유효빔 크기는 최대 공기 커마울을 기준으로 그 비율이 0.95 이상을 유지하는 영역을 의미한다.

감마선 계측장비의 교정은 반드시 유효빔 영역 내에 위치해야 국내외 기준 감마선장으로부터 소급성을 확보할 수 있기 때문에 계측장비의 크기와 비교해야 한다.

유효빔 크기의 측정은 감마선 감광 필름을 이용하여 방사선장의 촬영을 통해 이루어지기 때문에, 측정을 위한 장치 setting 시간과 이에 따른 부수적인 비용지출이 유발되어 주기적인 측정이 어렵다.

또한 필름의 편평도 및 필름 스캔으로 인한 영상정보 손실 등으로 정확한 유효빔 측정에 문제가 있을 수 있으며, 필름의 크기제한으로 인해 필름의 면적을 넘어설 것으로 예상되는 유효빔 크기의 실측에는 한계를 가진다.

본 논문은 감마선 조사장치의 적합성 평가에서 Isodose Profile 평가를 Monte Carlo code 중의 하나인 FLUKA code를 이용하여 유효빔 면적을 시뮬레이션 하여, 실측크기와 비교하였다.^[3] 시뮬레이션과 실측한 기준 감마선장을 비교하여 시뮬레이션에 대한 적합성을 입증하고 감마선 측정에 있어서 유효빔 결정의 유용한 수단을 제공하고자 의도하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 공기커마울 및 유효빔 실측

본 연구에서 사용하는 표준물질은 ISO에서 제시한 기준에 따라 137Cs 100Ci를 밀봉 표준선원으로 사용하였다.^[1] 표준선원은 감마선 조사장치 (COMERCER社, DIR-101)에 내장하여 별도의 제어장치를 사용하여 조작 가능하도록 제작되었다.

텅스텐, 니켈, 구리 합금으로 제작된 12° 집속기를 사용하여 산란 광자를 차폐하였고, 방사선 조사장 균질도, 유효빔 면적, 산란선 평가, 교정 장착대의 직진도 등은 한국표준과학연구원에서 적합성평가를 실시하여 국내외 기준에 적합한 것이 확인되었다. 공기커마울(Air kerma rate)은 감마선 조사장치의 측정 방법에 따라 EXRADIN社의 A4 이온전리함을

이용하여 측정하였다.^[4]

본 연구에서는 시뮬레이션의 유효성을 검증하기 위하여 실측한 공기커마울과 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 또한 유효빔 크기는 감마선 조사장치 설치 시 국가측정대표기관인 한국표준과학연구원 에서 시행한 적합성 평가 보고서의 수치를 활용하였다.

2. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해 표준선원의 용량은 인증서의 값을 사용하였다. 또한 감마선 조사장치의 아래 Fig 1의 제작 도면과 실측을 바탕으로 FLUKA GUI program인 FLAIR을 통해 Geometry 구성과 INPUT 구성을 하였다.^[5]

아래 Fig 2는 Fig 1을 바탕으로 모델링한 표준 감마선 조사장치의 Geometry이다.

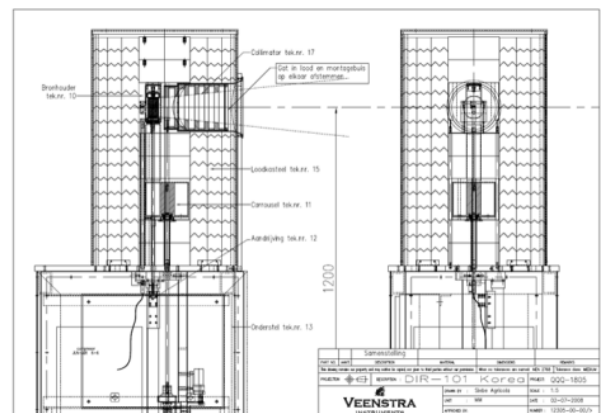
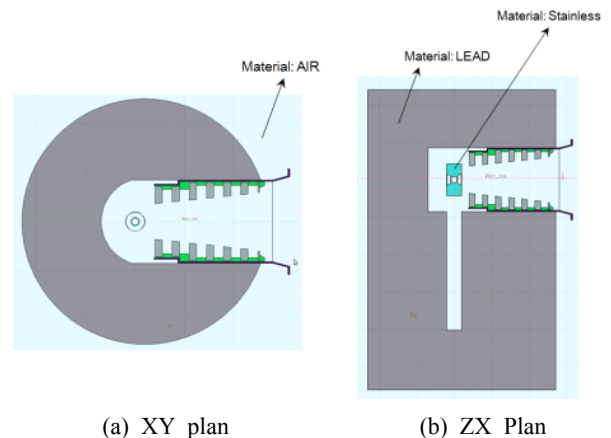
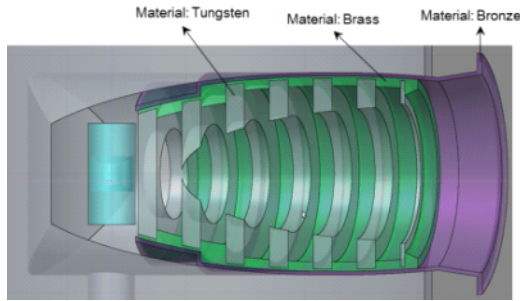


Fig 1. Cad Drawing.



(a) XY plan

(b) ZX Plan



(c) 3D plan

Fig 2. Geometry.

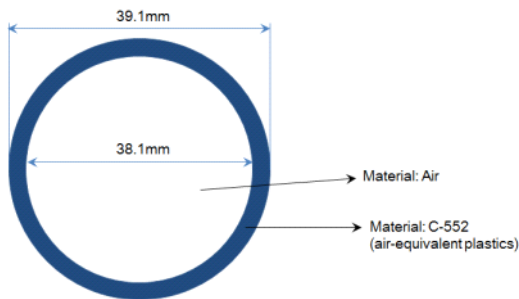


Fig 3. EXRADIN's A4 Ion chamber.

Air Kerma rate 측정을 위한 Ion-chamber는 Fig 3 과 같이 구성하였다. Fig 3의 EXRADIN 社의 A4 Ion chamber, spherical을 참조하여 모델링 하였다.^[6] 시뮬레이션의 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Simulation Condition

Division	Condition
Code Version	FLUKA 2011.2C.3
FLUKA default physics option	PRECISIO, BME
Scoring	Air Kerma Type→Region, Part→Dose
	Effective Area Type→XZY, Part→Photon
Beam	ISOTOPE
Source Term	HI-PROPE Z→55, A→137 (¹³⁷ CS)
	BEAMPOS CYIL-VOL

III. RESULT

1. Air Kerma rate

Air Kerma rate는 선원으로부터 각각 80 cm, 100

cm, 150 cm에서 실험과 시뮬레이션을 비교하였다.

Table 2. Comparison of Fluka and Experimental results (Air Kerma)

Detection distance (cm)	FLUKA	Experiment	Relative error (%)
	Dose (Gy/hr)	Dose (Gy/hr)	
80cm	0.446	0.466	4.5
100cm	0.307	0.298	2.9
150cm	0.123	0.132	7.3

Fig 4와 Table 2에서 확인 되듯이 상대오차가 최대 7.3%이내인 것으로 확인되며, 시뮬레이션 값이 실험값의 오차범위 내에 위치하는 것으로 확인되었다.

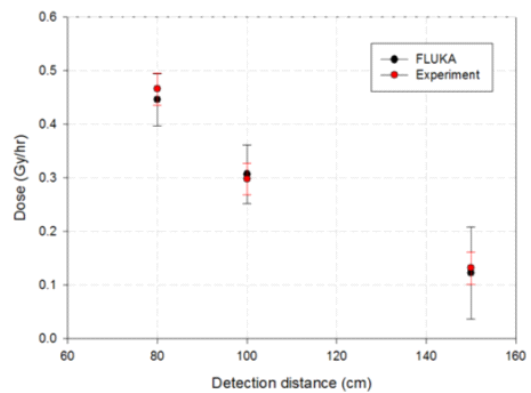


Fig 4. FLUKA vs Experiment Compare results(Air Kerma rate)

2. 유효빔 크기

유효빔 크기는 소스에서 1 m되는 지점에서의 방사선 장을 측정하여 수직, 수평면의 Beam profile을 계산 후 최대값의 95%되는 지점의 폭으로 정의 한다.

실험의 경우 30 cm × 30 cm 의 감마선 감광 필름을 이용하였고, 시뮬레이션의 경우 해당 지점의 광자 분포를 이용하여 계산하였다. 아래 Fig 5는 FLUKA로 계산된 선원으로부터 1 m지점의 광자 분포를 2D 그래프로 나타낸 것이다. Fig 5에서 Horizontal과 Vertical은 수평, 수직의 유효빔 크기를 구하기 위한 지점을 나타낸 것이다.

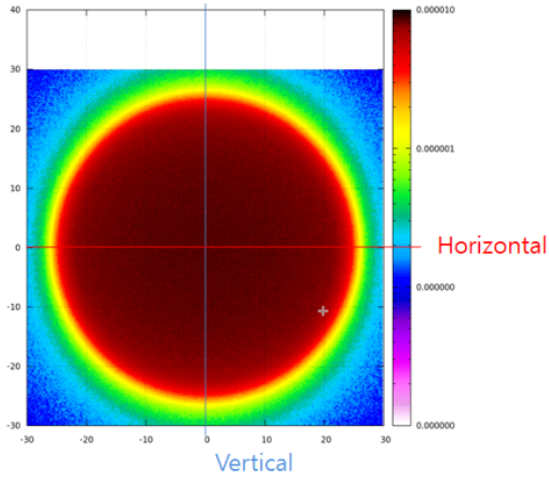


Fig 5. Photon Distribution at 1m.

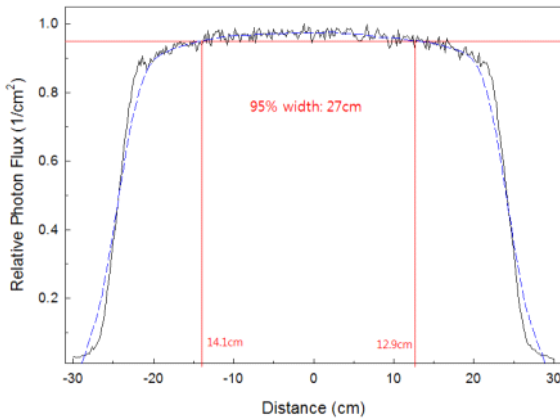


Fig 6. Horizontal Beam Profile.

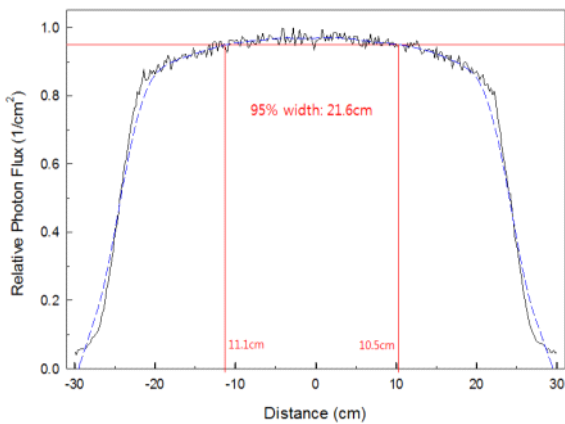


Fig 7. Vertical Beam Profile.

시뮬레이션의 유효빔 면적은 Fig 6에서 수평 유효빔 크기를, Fig 7에서 수직 유효빔 크기를 나타내었다.

빔 프로파일의 불균일로 인해 빔 프로파일이 최대가 되는 지점을 구하기 어려워 Sigma plot 12.5를 이용하여 빔 프로파일을 plotting하여 유효빔 크기를 구하였다.

Table 3. Comparison of Fluka and Experimental results (Beam Profile)

	FLUKA (cm)	Experiment (cm)
Horizontal Beam Profile	27 (14.1~12.9)	26.5 (13.2~13.3)
Vertical Beam Profile	21.6 (11.1~10.5)	21.9 (11.1~10.8)

Table 3은 실험과 시뮬레이션의 유효빔 크기를 비교한 것으로서 상대오차는 2%이내인 것을 알 수 있었다.

IV. DISCUSSION

해당 논문은 표준 감마선 조사장치의 성능 적합성 평가에서 Isodose Profile을 시뮬레이션을 통한 측정 가능성을 확인하기 위하여 실험과 비교한 논문이다.

실험과 시뮬레이션 모두 공기커마울과 유효빔 크기를 비교하였고, 상대오차 결과 각각 7.3% 이내, 2%이내인 것으로 나타났다.

Fluka의 유효성을 확인하기 위해 이온전리함으로 실측한 공기커마울과 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 조사장치에서 멀어질수록 광자밀도가 거리의 제곱에 비례하여 낮아지므로 상대오차가 4.88%에서 8.56%로 증가하나 7.3% 이내로 유효성은 입증되었다.

유효빔의 크기는 필름을 사용한 실측과 2%이내 오차로 시뮬레이션과 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 시뮬레이션을 이용한 유효빔 크기의 측정은 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

공기커마울보다 유효빔 측정에서 상대오차가 적은 것은 빔의 크기가 표준선원의 용량보다는 콜리메이터를 비롯한 조사장치의 기하학적인 요인으로

결정되기 때문인 것으로 보인다. 이것은 향후 연구에서 기하학적 요소를 더욱 정밀하게 구현한다면 정확도가 향상될 것을 의미한다.

감마선의 측정과 교정에 있어서 서베이미터는 표준 방사선장의 유효빔 영역내에 위치해야 한다.^[7] 감마선 서베이미터의 측정 범위가 낮아 표준선원으로부터 거리가 멀어지면 유효빔은 비례하여 커지므로 일반적인 휴대형 감마선 서베이미터의 크기를 감안하면 불확도의 정량적 평가에 있어서 중요한자로 고려하지 않고 있다.

그러나 군사용, 원전감시용 서베이미터와 같이 측정가능 범위가 10Sv/h에 이르거나 서베이미터의 크기가 대형인 경우에는 표준선원과 거리가 가까워지므로 유효빔 영역 또한 감소하며 불확도 결정에 있어 중요한 측정조건으로 고려하여야 한다.

시뮬레이션을 활용한 유효빔 영역의 측정은 필름을 사용한 평가방법에 비하여 시간과 비용 측면에서 효율적이고 필름크기와 같은 기하학적인 제약과 밀도측정과정이 생략되기 때문에 표준선원과 감마선 서베이미터의 1m이내의 기준거리에서 유효빔 측정에 유용한 것으로 분석되었다.

시뮬레이션을 이용한 광자분포 측정의 신뢰도를 향상시키기 위해서 향후 FLUKA 이외의 시뮬레이션 결과와 비교하는 실험을 추진하여야 할 것이다.

이와 같이 표준 방사선장에 대한 시뮬레이션의 유효성을 입증하는 연구를 통해 광자 에너지 분포 측정과 같이 실측이 불가능한 영역의 기초 연구자료로 활용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

V. CONCLUSION

시뮬레이션의 방법으로 Isodose Profile의 측정이 가능한 것으로 평가되었기 때문에 실험으로 측정하기 힘든 위치에서의 Isodose Profile의 평가가 가능할 것으로 분석 되었다.

또한 표준 감마선 조사기의 선원에 따른 Isodose Profile, 콜리메이터의 재질과 각도에 따른 Isodose Profile, 선원에 따른 Isodose Profile까지 예측할 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 감마선 조사장치의 시뮬레이션 결과의 신

뢰도 향상을 위한 연구가 필요할 것이다.

Reference

- [1] International Organization for Standardization, *X and gamma Reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters for determining their response as a function of photon energy, Part 1 : Characteristics of the radiations and their methods of production*, ISO 4037-1, 1996.
- [2] Jang-Jin Oh, Dae-Hyung Cho, Seung-jae Han, "Evaluation of Characteristics in the Reference Gamma Radiation Fields for testing for Personnel Dosimetry Performance," The Korean Association For Radiation Protection, vol 23, no 4, pp. 229-236, 1998.
- [3] A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fass`o, and J. Ranft, "FLUKA: a multi-particle transport code", CERN-2005-10 (2005), NFN/TC 05/11, SLAC-R-773.
- [4] Suck-ho Ha, Hyun-moon Kim, "Exposure Measuremint of Co-60 Gamma rays," The Korean Association For Radiation Protection, vol 16, no 2, pp. 7-16, 1991.
- [5] <http://www.fluka.org/flair/index.html>
- [6] <https://www.standardimaging.com/exradin/spherical-ion-chambers>
- [7] Suck-ho Ha, *Standard Calibration Procedure of Survey Meter for Gamma Radiation*, Korea Association of Standards & Testing Organization, Korea, pp. 1-20, 2016.

몬테카를로 코드를 활용한 표준 감마선 조사장치의 성능평가에 관한 연구

박원석,¹ 허승욱,² 김장오,³ 민병인^{4*}

¹공군 85정밀표준정비창

²인제대학교 의용공학부

³인제대학교 재난관리학부

⁴인제대학교 원자력응용공학부

요 약

본 연구는 표준 감마선 조사장치의 유효빔 크기를 실측과 시뮬레이션의 결과를 비교하여 유효빔 영역의 결정에 유용한 수단을 제공하고자 하였다

시뮬레이션과 전리함을 이용한 실측의 결과는 공기커마울의 경우는 상대오차 4.5~7.3% 범위에 분포하였다. 유효빔 영역의 크기는 시뮬레이션의 경우 수평 방향 27cm, 수직 방향 21.6cm로 구현되었고, 필름을 이용한 실측결과는 수평 방향 26.5cm, 수직 방향 21.9cm로 유사한 결과가 도출되었다. 수평방향의 상대오차는 1.85%, 수직 방향은 1.38% 이며 유효빔 영역도 감마선장을 중심으로 유사하게 분포하였다.

감마선 조사장치에 있어서 시뮬레이션의 유효성이 충분함을 확인하였다. 특히 공기커마울보다 유효빔 크기의 상대오차가 적은 것은 빔의 크기가 표준선원의 용량보다는 기하학적 요인으로 결정되기 때문인 것으로 판단된다. 향후 시뮬레이션을 이용한 광자 에너지 분포도의 신뢰성을 높이기 위한 연구가 필요 할 것이다.

중심단어: 몬테카를로, 플루카, 감마선조사장치, 유효빔 영역