

Design of a Radiation Spectroscopy Detector using a Spherical Scintillator and Development of a Radiation Source Position Tracking System

Seung-Jae Lee^{1,2*}

¹Department of Radiological Science, Dongseo University

²Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

Received: October 14, 2020. Revised: November 27, 2020. Accepted: November 30, 2020

ABSTRACT

A radiation spectroscopy detector using a spherical scintillator was designed, and a system was developed to track the position of a radiation source using several detectors. The position tracking algorithm was designed based on the theory that the number of radiations decreases according to the inverse square law of distance, and the position of the radiation source was calculated by measuring the number of radiations generated from the radiation sources at various positions. The radiation generated from the radiation source is detected by different coefficients in each detector, and the difference between these detected coefficients varies in proportion to the inverse square of the distance. Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE) simulation was performed to verify and evaluate the performance of the designed radiation source position tracking system, and radiation generated from radiation sources placed at different positions was counted with each detector. The number of measured radiations was tracked through the radiation source position tracking algorithm, and the error between the actual radiation source position and the position calculated by the algorithm was evaluated. The error between the position of the actual radiation source and the calculated position was measured as an average of 0.11% on the X-axis and 0.37% on the Y-axis, and it was verified that the position can be measured very accurately.

Keywords: Radiation spectroscopy detector, Spherical scintillator, Inverse square law of distance, Radiation source position tracking

I. INTRODUCTION

사람들이 운집하는 장소 또는 방사선원을 사용하는 시설에서 방사선원을 검출하기 위해서는 방사선의 유무를 검출하거나, 영상을 통해 방사선원의 위치를 추적한다.^[1-9] 방사선을 측정하는 시스템은 방사선의 유무의 감지는 가능하나, 방사선원이 어디에 위치하는지는 확인하기 어렵다. 방사선원의 위치를 확인하기 위해 영상화를 위해서 대부분 감마카메라를 사용하며, 콜리메이터는 영상화를 위해 필수적으로 사용된다. 그러나 콜리메이터를 사용할 경우 매우 낮은 민감도로 인해 방사선원의 위치를 영상화하기에는 많은 시간이 소요된다. 즉, 위치를

특정짓지 못하거나 많은 시간이 소요될 경우 사람들이 운집하는 장소에서의 방사선으로 인한 테러나, 방사선원을 사용하는 시설에서의 방사선원 누출로 인한 피해를 최소화하기에는 현실적으로 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 낮은 민감도와 영상화의 문제를 해결하기 위해 콜리메이터를 사용하지 않고 방사선원의 위치를 시각화하는 새로운 방법을 개발하였다.^[10] 이러한 방법은 여러 대의 방사선 스펙트로스코피를 사용하여 위치 추적 알고리즘을 적용하여 방사선원의 위치를 영상화하는 것이다. 방사선 스펙트로스코피는 콜리메이터를 사용하지 않으므로 민감도 측면에 장점을 보이며, 또한 위치 추적 방법을 통해 방사

* Corresponding Author: Seung-Jae Lee E-mail: sjlee@gdsu.dongseo.ac.kr Address: 47 Jurye-ro, Sasang-gu, Busan 47011, Republic of Korea

Tel: +82-51-320-2719

선원의 위치를 특정 지을 수 있으므로 영상화 측면의 문제를 해결할 수 있다. 그러나 현재 사용되는 방사선 스펙트로스코피 시스템은 원기둥 형태의 섬광체를 사용하여 방사선원의 위치가 변경될 때마다 섬광체에 입사하는 면적이 달라지므로 측정되는 위치의 정확도 측면에 오차가 발생한다.

본 연구에서는 방사선의 입사면적이 달라지는데서 발생하는 위치 오차를 감소시키기 위해 새로운 형태의 방사선 스펙트로스코피를 설계하였으며, 이전 시스템과의 위치 측정 결과를 비교 평가하였다. 모든 방향에서 동일한 입사면적을 갖도록 구(sphere) 형태의 섬광체를 사용한 방사선 스펙트로스코피를 설계하였으며, 각 방사선원 위치에서 획득된 데이터와 위치 추적 알고리즘을 사용하여 방사선원의 원래 위치와 알고리즘으로 계산된 위치를 비교하였다.

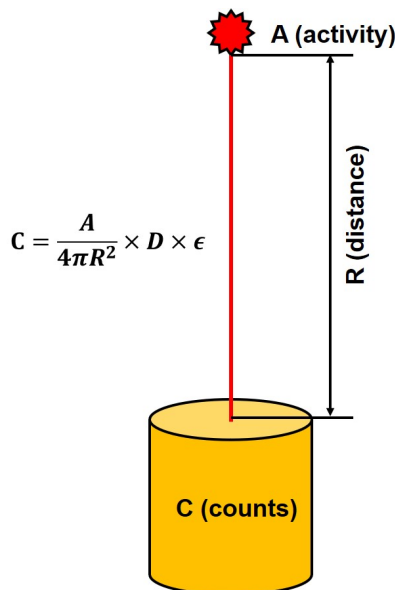


Fig. 1. Calculation of the number of radiation at distance R.

II. MATERIAL AND METHODS

방사선의 강도는 거리의 제곱에 반비례한다. Fig. 1과 같이 거리 R인 지점의 방사선원에서 발생한 방사선은 검출기 D에서 검출이 되며, 이는 Eq. (1)을 통해 계산된다.

$$C = \frac{A}{4\pi R^2} \times D \times \epsilon \quad (1)$$

여기서 C는 검출기 D에서 측정된 방사선 계수를 나타내고, A는 방사능, R은 방사선원과 검출기 간의 거리, ε은 검출기의 검출 효율을 나타낸다. A, D, ε이 일정하다면, 방사선의 계수는 거리에 따라 변경된다. 이러한 원리를 바탕으로 여러 개의 방사선 스펙트로스코피를 사용하여 방사선원의 위치를 추적할 수 있다. 그러나 방사선원의 위치에 따라 기존에 사용되는 원기둥 형태의 섬광체를 사용하는 검출기에서는 입사 면적이 달라질 수 있다. 입사면적이 달라지므로 측정되는 방사선의 계수가 변경되어 측정되는 방사선원의 위치 또한 정확하게 계산되지 않는다. 이를 보완하기 위해 Fig. 2와 같이 구(sphere) 형태의 섬광체를 사용한 검출기를 사용할 경우 방사선원의 위치에 상관없이 모두 동일한 입사 면적을 구현할 수 있다.

Fig. 3과 같이 방사선원이 위치하고 각 방사선 스펙트로스코피에서 방사선을 계수할 경우 이론적으로 측정되는 방사선원의 계수는 Eq. (2), (3), (4)를 통해 계산할 수 있다.

$$C1 = \frac{A}{4\pi(X^2 + Y^2)} \times D1 \times \epsilon \quad (2)$$

$$C2 = \frac{A}{4\pi((dR - X)^2 + Y^2)} \times D2 \times \epsilon \quad (3)$$

$$C3 = \frac{A}{4\pi((2dR - X)^2 + Y^2)} \times D3 \times \epsilon \quad (4)$$

여기서 C1, C2, C3는 각 방사선 스펙트로스코피에서 측정되는 방사선 계수를 나타내며, X와 Y는 검출기 D1을 기준으로 방사선원까지의 각 축의 거리를 나타낸다. 그리고 dR은 각 방사선 스펙트로스코피 간의 거리를 나타내므로 dR을 정하여 미지의 위치의 방사선원을 측정하면, 위 3개의 식을 통해

X, Y의 거리를 계산할 수 있다.

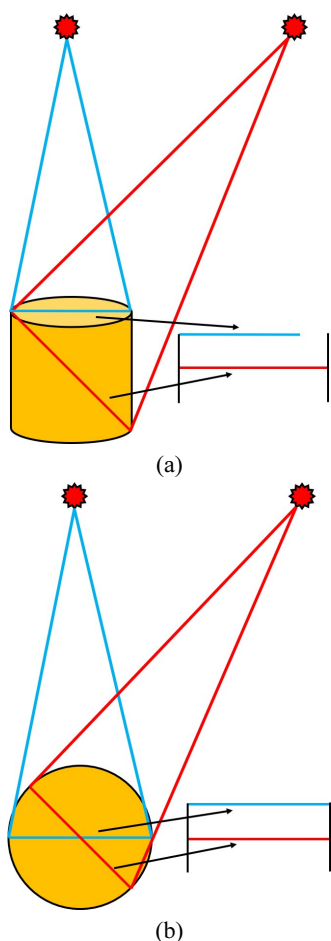


Fig. 2. Changes in the incident area by location of the radiation source according to the shape of the scintillator. (a) Incident area in the form of a cylinder, (b) incident area in the form of a sphere.

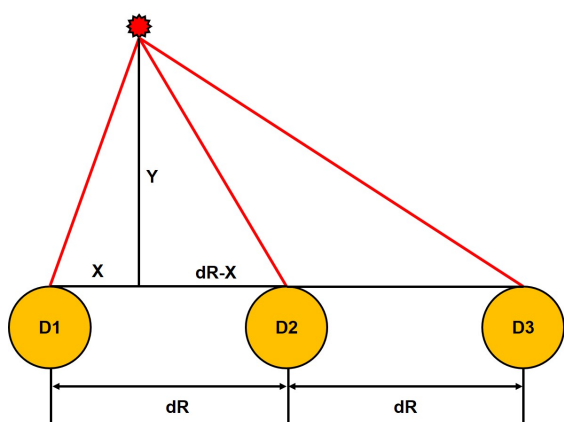


Fig. 3. The relationship between the positions of the three radiation spectroscopy detectors and the position of the radiation source.

위의 이론을 검증하기 위해 Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE)^[11,12] 시뮬레이션을 통해 방사선원의 위치를 측정하였다. 측정된 방사선의 계수를 사용하여 계산된 위치와 실제 방사선원의 위치를 비교 평가하였으며, 이전 연구에서 실시한 기존의 방사선 스펙트로스코피에서 사용하는 원기둥 형태의 섬광체를 사용한 경우와의 오차를 비교 평가하였다.

시뮬레이션에서 구현한 방사선 스펙트로스코피 검출기는 크기가 반지름 5 cm의 구(sphere) 형태의 NaI(Tl) 섬광체를 사용하였으며, Fig. 4와 같이 3개의 섬광체를 100 cm 간격으로 배치하여 방사선원의 계수를 측정하였다. 방사선원은 X축으로 50 cm, 100 cm, 150 cm, Y축으로 50 cm, 100 cm, 150 cm 지점으로 설정하여 총 9개의 위치에 지정하여 방사선 계수를 측정하였다.

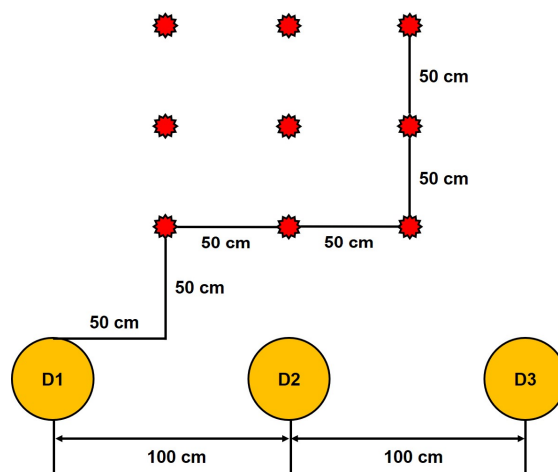


Fig. 4. Schematic of the location of the radiation source and radiation spectroscopy detectors for GATE simulation.

III. RESULT

GATE 시뮬레이션을 통해 각 방사선원의 위치에서 방출된 방사선을 세 개의 검출기에서 각각 측정하였으며, 측정된 방사선의 계수를 통해 위치 측정 알고리즘에 적용하여 방사선원의 위치를 계산하였다. 방사선원은 Cs-137을 모사하였으며, 각 검출기는 10%의 에너지 분해능으로 설정하여 방사선원의 에너지에 대한 계수를 측정하였다. 각 검출기에서

측정한 방사선 계수를 사용하여 위치 측정 알고리즘으로 계산된 위치와 실제 방사선원을 발생시킨 위치와의 오차를 측정하였으며, 이는 Table 1에 나타내었다. 각 방사선원의 위치에 대한 오차 계산은 10번의 측정된 데이터를 통해 평균하였으며, X축과 Y축에 대한 계산된 위치와 각 위치에서의 오차에 대한 부분으로 나타내었다. 오차는 시스템의 전체 관심영역에 대한 각 방사선원의 위치의 차이로 계산하였고, 관심영역은 검출기 D1과 D3의 거리로 설정하였다.

Table 1. The position and position error of the radiation source calculated by the position measurement algorithm

| X cal. position (cm) | | | | X error (%) | | | | average |
|----------------------|--------|--------|--------|-------------|------|------|------|---------|
| Y \ X | 50 | 100 | 150 | Y \ X | 50 | 100 | 150 | |
| 50 | 50.01 | 99.94 | 150.02 | 50 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.11 |
| 100 | 50.16 | 99.95 | 150.16 | 100 | 0.08 | 0.03 | 0.08 | |
| 150 | 49.22 | 99.89 | 149.30 | 150 | 0.39 | 0.06 | 0.35 | |
| Y cal. position (cm) | | | | Y error (%) | | | | average |
| Y \ X | 50 | 100 | 150 | Y \ X | 50 | 100 | 150 | |
| 50 | 49.22 | 49.76 | 49.26 | 50 | 0.39 | 0.12 | 0.37 | 0.37 |
| 100 | 98.58 | 99.60 | 99.69 | 100 | 0.71 | 0.20 | 0.16 | |
| 150 | 150.12 | 148.49 | 148.88 | 150 | 0.06 | 0.75 | 0.56 | |

X축의 오차를 보면 (50, 50) 위치에서 가장 작은 오차를 나타내었고, (50, 150) 위치에서 가장 큰 오차를 보였다. 이때의 오차들은 각각 0.01%, 0.39%이었다. 그리고 X축 위치에서 전체 오차 평균은 0.11%로 측정되었다. Y축의 오차는 (100, 50)에서 0.12%를 보여 가장 작은 오차를, (100, 150)에서 0.75%로 계산되어 가장 큰 오차를 보였다. Y축의 전체 오차 평균은 0.37%를 나타내었다.

Table 2는 원기둥 형태의 섬광체를 사용한 검출기로 측정한 X축과 Y축의 위치 측정값과 오차를 나타낸다.[10] 본 연구에서 사용한 구(sphere) 형태의 섬광체 검출기를 통해 측정된 위치에 대한 정확도가 X축으로는 약 85%, Y축으로는 약 86% 정도 향상된 것을 확인할 수 있다. 각 위치별 측정된 오차에서도 거의 모든 위치에서 측정의 정확도가 향상된 것을 확인할 수 있다.

Table 2. The position and position error of the radiation source calculated by the position measurement algorithm using the cylindrical scintillator detectors^[10]

| X cal. position (cm) | | | | X error (%) | | | | average |
|----------------------|--------|--------|--------|-------------|------|------|------|---------|
| Y \ X | 50 | 100 | 150 | Y \ X | 50 | 100 | 150 | |
| 50 | 49.63 | 98.36 | 149.81 | 50 | 0.19 | 0.82 | 0.10 | 0.73 |
| 100 | 52.23 | 100.98 | 153.07 | 100 | 1.11 | 0.49 | 1.54 | |
| 150 | 52.87 | 98.69 | 149.53 | 150 | 1.43 | 0.65 | 0.24 | |
| Y cal. position (cm) | | | | Y error (%) | | | | average |
| Y \ X | 50 | 100 | 150 | Y \ X | 50 | 100 | 150 | |
| 50 | 49.41 | 56.06 | 50.03 | 50 | 0.30 | 3.03 | 0.02 | 2.73 |
| 100 | 105.29 | 109.30 | 111.00 | 100 | 2.65 | 4.65 | 5.50 | |
| 150 | 146.45 | 161.11 | 147.84 | 150 | 1.78 | 5.55 | 1.08 | |

IV. DISCUSSION

구(sphere) 형태의 섬광체를 사용한 방사선 스펙트로스코피 검출기로 방사선원의 각 위치별 측정 결과는 X축 오차는 $0.11 \pm 0.11\%$, Y축 오차는 $0.37 \pm 0.26\%$ 보였다. 오차가 X축과 Y축 모두에서 1% 미만으로 나타났으며, 방사선원의 위치를 매우 정확히 판단할 수 있음을 확인할 수 있었다. 전체적으로 검출기와 방사선원의 거리가 멀어짐에 따라 측정되는 정확도는 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 검출기와 방사선원의 거리가 멀어짐에 따라 동일한 시간에 측정되는 방사선의 수가 감소하여 나타난 결과로 판단된다.

원기둥 형태의 섬광체를 사용하여 위치를 측정한 결과와 비교해보면, X축과 Y축 모두에서 보다 더 정확히 측정할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 그 결과는 약 85% 이상 향상됨을 확인하였다. 원기둥 형태일 경우 방사선원의 위치에 따라 섬광체에 입사하는 면적이 달라지므로 동일한 면적일 경우를 가정하여 계산할 경우 오차로 나타나고, Table 1, 2의 값이 차이가 나타난 것으로 판단된다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 구(sphere) 형태의 섬광체를 사용한 여러 대의 방사선 스펙트로스코피를 사용하여 방사선원의 위치를 추적하는 시스템을 개발하였다. 기존의 원기둥 형태의 섬광체를 사용할 경우 발생하는 방사선원의 입사면적이 달라짐으로 인해 나타날 수 있는 오차를 감소시킬 수 있는 구조이다. 구(sphere)의 형태일 경우 방사선원의 위치에 관계없이 방사선이 입사하는 면적은 동일하므로, 면적에 의해 측정되는 방사선 계수의 오차를 최소화시킬 수 있으며, 이는 전체적인 위치 측정의 정확도를 향상시킬 수 있었다. 방사선원 위치 측정 정확도가 원기둥의 형태에 비해 구(sphere)일 경우 약 85% 향상되었으며, 이는 X축과 Y축 모두에서 비슷한 향상으로 나타났다. 거리가 멀어짐에 따라 위치 측정의 정확도는 낮아졌으나, 이는 측정 시간을 증가시킴으로써 해결 가능한 부분으로 판단된다.

구(sphere) 형태의 방사선 검출기를 사용한 방사선 스펙트로스코피를 설계하였으며, 이를 여러 대 사용하여 방사선원의 위치를 추적하는 시스템을 개발하였다. 방사선은 거리의 역자승 법칙에 의해 감소되는 이론을 바탕으로 위치를 추적하는 알고리즘을 개발하였고, 이를 GATE 시뮬레이션을 통해 검증하였고, 그 결과 매우 높은 위치 측정 정확도로 나타났다. 본 시스템을 사람들이 운집하는 장소에 도입할 경우 콜리메이터를 사용하지 않으므로 매우 빠르게 방사선원의 위치를 추적하여 사람들의 빠른 대피를 유도할 수 있으며, 병원의 핵의학실 등 방사성 핵종을 사용하여 검사 및 실험하는 장소에서 사용할 경우 누출된 방사선원을 빠른 시간에 탐지할 수 있으므로 작업자의 방사선 피폭을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2020년도 동서대학교 "Dongseo Cluster Project" 지원에 의하여 이루어진 것임 (DSU-20200002).

Reference

- [1] C. H. Baek, H. I. Kim, J. Y. Hwang, S. J. An, K. H. Kim, S-W. Kwak, Y. H. Chung, "Large-angle pinhole gamma camera with depth-of-interaction detector for contamination monitoring," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 648, pp. S111-S115, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.12.080>
- [2] H. I. Kim, C. H. Baek, S. J. An, S. W. Kwak, Y. H. Chung, "Gamma camera with a two-layer diverging-slat collimator for radioisotope monitoring," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 698, pp. 90-93, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.09.049>
- [3] C. H. Baek, S. J. Lee, Y. Choi and Y. H. Chung, "Optimization of Large-Angle Pinhole Collimator for Environmental Monitoring System," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 57, No. 3, pp. 1404-1408, 2010. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2009.2039877>
- [4] D. Cester, G. Nebbia, L. Stevanato, G. Viesti, F. Neri, S. Petrucci, S. Selmi, C. Tintori, P. Peerani, A. Tomanin, "Special nuclear material detection with a mobile multi-detector system," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 663, pp. 55-63, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2011.10.011>
- [5] M. Gmar, O. Gal, C. Le Goaller, O. P. Ivanov, V. N. Potapov, V. E. Stepanov, F. Laine, and F. Lamadie, "Development of Coded-Aperture Imaging With a Compact Gamma Camera," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 51, No. 4, pp. 1682-1687, 2004. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2004.832608>
- [6] K. P. Ziock, W. W. Craig, L. Fabris, R. C. Lanza, S. Gallagher, B. K. P. Horn, and N. W. Madden, "Large Area Imaging Detector for Long-Range, Passive Detection of Fissile Material," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 51, No. 5, pp. 2238-2244, 2004. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2004.836117>
- [7] H. I. Kim, S. J. An, S. W. Kwak, Y. H. Chung, "Development of an All-in-one Gamma Camera/CCD System for Safeguard Verification," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 65, No. 12, pp. 2013-2016, 2014. <http://dx.doi.org/10.3938/jkps.65.2013>

- [8] W. J. Jo, H. I. Kim, S. J. An, C. Y. Lee, H. K. Song, H. S. Shin, S. K. Ahn, S. H. Park, Y. H. Chung, "Feasibility Study of a Gamma Camera for Monitoring Nuclear Materials in the PRIDE Facility," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 64, No. 9, pp. 1293-1297, 2014.
<http://dx.doi.org/10.3938/jkps.64.1293>
- [9] Y. S. Kim, J. H. Kim, H. S. Lee and C. H. Kim, "Position-Sensitive NaI(Tl) Detector Module for Large-Area Compton Camera," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 72, No. 1, pp. 26-32, 2018.
<http://dx.doi.org/10.3938/jkps.72.26>
- [10] S. J. Lee, C. H. Baek, "Positioning Method for Radiation Source Using Radiation Spectroscopy Detectors," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 77, No. 7, pp. 557-560, 2020.
<http://dx.doi.org/10.3938/jkps.77.557>
- [11] G. Santin, D. Strul, D. Lazaro, L. Simon, M. Krieguer, M. V. Martins, V. Breton and C. Morel, "GATE: a Geant4-based simulation platform for PET and SPECT integrating movement and time management," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 50, No. 5, pp. 1516-1521, 2003.
<http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2003.817974>
- [12] S. Jan, G. Santin, D. Strul, S. Staelens, et al., "GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT," *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 49, No. 19, pp. 4543-4561, 2004.
<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/49/19/007>

구형의 섬광체를 이용한 방사선 스펙트로스코피 검출기 설계 및 방사선원 위치 추적 시스템 개발

이승재^{1,2*}

¹동서대학교 방사선학과

²동서대학교 방사선보건환경연구센터

요 약

구(sphere)형의 섬광체를 사용한 방사선 스펙트로스코피 검출기를 설계하였고, 여러 대의 검출기를 사용하여 방사선원의 위치를 추적하는 시스템을 개발하였다. 방사선원의 위치 추적은 방사선의 수는 거리의 역자승 법칙에 따라 감소하는 이론을 바탕으로 위치 추적 알고리즘을 설계하였으며, 여러 위치의 방사선원에서 발생된 방사선의 수를 측정하여 알고리즘을 통해 위치를 계산하였다. 방사선원에서 발생하는 방사선은 각 검출기에서 서로 다른 계수로 검출되며, 이러한 검출되는 계수의 차이는 거리의 역자승에 비례하여 달라진다. 설계한 방사선원 위치 추적 시스템의 성능을 검증 및 평가하기 위해 Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE) 시뮬레이션을 실시하였으며, 서로 다른 위치에 놓이 방사선원에서 발생된 방사선을 각 검출기로 계수하였다. 측정된 방사선의 수는 방사선원 위치 추적 알고리즘을 통해 위치가 추적되었으며, 실제 방사선원의 위치와 알고리즘으로 계산된 위치와의 오차를 평가하였다. 실제 방사선원의 위치와 계산된 위치와의 오차는 평균 X축 0.11%, Y축 0.37%로 측정되었으며, 매우 정확하게 위치를 측정할 수 있음이 검증되었다.

중심단어: 방사선 스펙트로스코피, 구(sphere)형의 섬광체, 거리의 역자승 법칙, 방사선원 위치 추적

연구자 정보 이력

| | 성명 | 소속 | 직위 |
|--------|-----|-------------|----|
| (단독저자) | 이승재 | 동서대학교 방사선학과 | 교수 |