Journal of Radiation Industry 6 (3) : 245~249 (2012)

방사성동위원소 위치에 따른 산업용 SPECT 성능에 미치는 영향

문 진 호 · 김 종 범 · 정 성 희*

한국원자력연구원 동위원소이용기술개발부

Effect of Radioisotope Position on Performance of Industrial SPECT

Jinho Moon, Jongbum Kim and Sung-Hee Jung*

Radioisotope Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

Abstract - Demand of fluid flow visualization has increased in industrial processes, because medical imaging technology is highly developed. As a part of the industrial process imaging technology, industrial single photon emission computed tomography (SPECT) system was developed to measure the cross-sectional distribution of the process fluid. The SPECT consists of 36 NaI (Tl) detectors with the hexagonal configuration. Reconstructed images were acquired for various positions of radioactive source to estimate SPECT device performance. To evaluate the reliability of the experimental results, the Monte Carlo simulation results are compared with experimental results. In general, the experimental and simulation results were consistent. However, as the source position was getting far from the center of the reactor, the accuracy of reconstructed images was compromised. It seems to be due to the inconsistent spatial resolution of the collimators according to the source position.

Key words : Radioisotope, SPECT, Monte Carlo simulation

서 론

국내 정유 및 석유화학산업의 성장에 따라 이들 설비에 대한 가동 효율 향상 및 유지 보수가 주요 문제로 대두되고 있다. 이 문제 해결을 위하여 방사선을 이용한 공정진단 기술인 감마 스캔(정성희 등 2002), 방사성추적자 기술(문진호 등 2011), 감마선 단층촬영기술(Kim *et al*. 2012) 등이 산업현장에 적용되고 있다. 특히 최근에는 공정 내부 유체의 흐름을 영상화하려는 요구가 높아지고 있으며, 관련기술인 단일광자방출단층촬영(single photon emission computed tomography, SPECT) 기법을 이용하여 산업현장에 적용하려는 사례가 보고 되고 있다(Legoupil *et al*. 1996).

산업용 SPECT는 의료용 SPECT의 원리를 사용하였지만 계측 대상 및 방법에 의한 차이가 있다. 산업적으로 사용되는 방사성추적자의 에너지는 의료용 방사성추적자보다 상대적으로 높은데, 이는 산업현장에 흔히 볼 수 있는 철로 된 파이프나 두꺼운 내화물을 투과할 수

* Corresponding author: Sung-Hee Jung, Tel. +82-42-868-8057, Fax. +82-42-862-6980, E-mail. shjung3@kaeri.re.kr

있는 에너지가 필요하기 때문이다. 그리고 인체에 사용하는 것보다 높은 농도의 방사성추적자를 투입할 수 있어 검출 신호를 높일 수 있다. 산업용 SPECT는 의료용 SPECT보다 훨씬 적은 수의 검출기로부터 데이터를 수집할 수 밖에 없기 때문에 공간분해능이 상대적으로 좋지 않다. 반면 의료용 SPECT의 경우 인체 내부에 주입된 방사성동위원소가 인체 내 기관에 머물러 있어 감마카메라가 장착된 겐트리를 회전시켜 정확한 단층 영상을 얻을 수 있다. 그러나 이 방법은 산업현장에서 빠른 속도로 흐르는 유체에 대한 실험에는 적합하지 않다. 따라서 산업용 SPECT는 대상체 주위를 검출기로 둘러싼 형태의 구조를 갖는 특징이 있다.

본 연구에서는 반응기 내 유체의 유동 특성을 측정하기 위하여 36개의 NaI (Tl) 검출기로 구성된 산업용 SPECT 시스템을 개발하였고, 그 성능을 측정하기 위하여 직경 40 cm의 실린더형 반응기 내부에 방사성동위원소의 위치에 따른 복원 영상을 분석하였다. 또한 실험과 같은 조건으로 몬테칼로 전산모사를 수행하여 실험 결과와 비교 분석하였다.

재료 및 방법

1. Experimental set up

SPECT 시스템 구성에 앞서 영상의 화질을 떨어뜨리는 요인인 산란 감마선 및 전기적 노이즈를 제거하기 위하여 pulse height spectum의 포토피크에 해당되는 신호만을 선별 검출하였다. 이를 위하여 실험에 사용될 0.5 inch NaI (Tl) 검출기 (Ludlum, 44-62)를 portable MCA (ortec, Easy MCA 8K)에 연결하여 pulse height spectrum을 얻은 후 포토피크에 해당되는 채널에 맞추어 SCA의 threshold 값을 조절하였다. SPECT 실험에 사용될 방사성동위원소는 ^{68}Ga으로 주요 방출 감마선 에너지가 511 keV이므로, 511, 1,274 keV의 에너지를 갖는 감마선을 방출하는 ^{22}Na를 사용하여 pulse height spectrum을 측정한 후 threshold 값을 설정하였다 (Fig. 1). 실험에 사용된 방사선 검출기는 동일한 모델 일지라도 방사선에 대한 효율이 같지 않기 때문에 검출기 간의 상대효율을 측정하는 것이 중요하다. 각각의 검출기를 SCA를 연결하고 threshold 값을 설정한 후 선원으로부터 1.5 m 거리에 모든 검출기를 두고 300초간 계수하여 검출기 간의 상대효율을 측정하였다.

환자의 장기에 머물러 있는 방사성동위원소의 분포를 측정하는 의료용 SPECT와는 달리 유체의 흐름을 측정

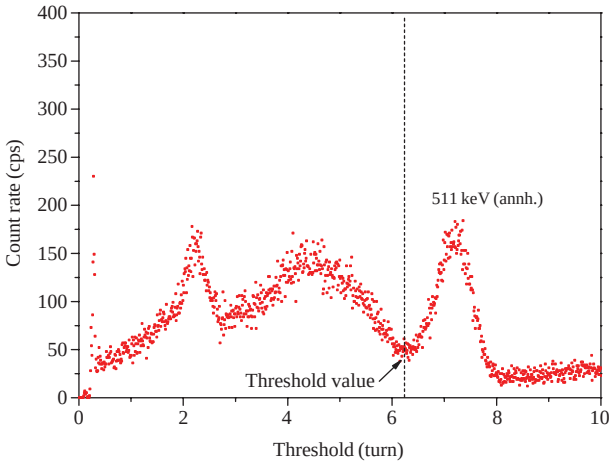

Fig. 1. Pulse height spectrum of ^{22}Na for threshold setting.

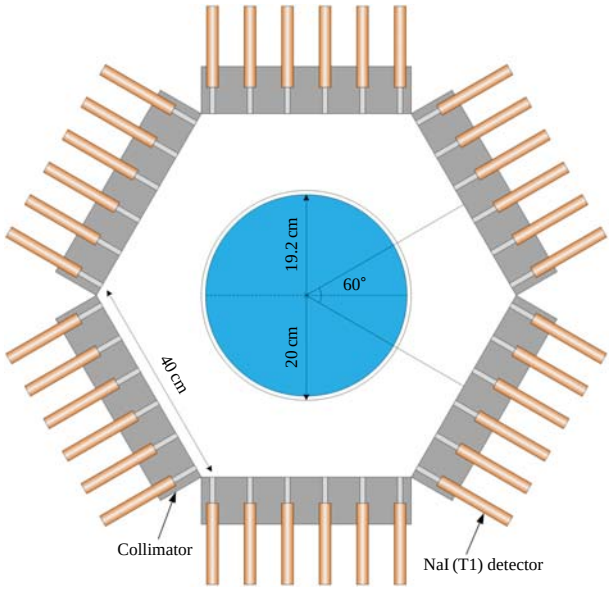

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental SPECT system.

하기 위하여 개발된 산업용 SPECT는 빠른 시간분해능을 갖도록 하기 위해 검출 시스템이 대상체 외곽을 둘러싸고 있는 구조를 갖는다. 한정된 방사선 검출기를 사용하여 최상의 성능을 제공하는 구조를 몬테칼로 전산모사를 통해 결정하였다. Fig. 2와 같이 육각형 구조로 총 36개의 방사선 검출기를 설치하고, 납으로 만든 콜리메이터로 외부 방사선 및 산란 감마선을 차폐하였다.

콜리메이터는 SPECT 장치의 공간분해능을 결정할 수 있는 중요한 요소로서 36개의 검출기를 사용하여 최적의 영상을 얻을 수 있도록 몬테칼로 전산모사를 통해 설계하였다. 반응기의 수평단면을 가로 지르는 중심선을 따라

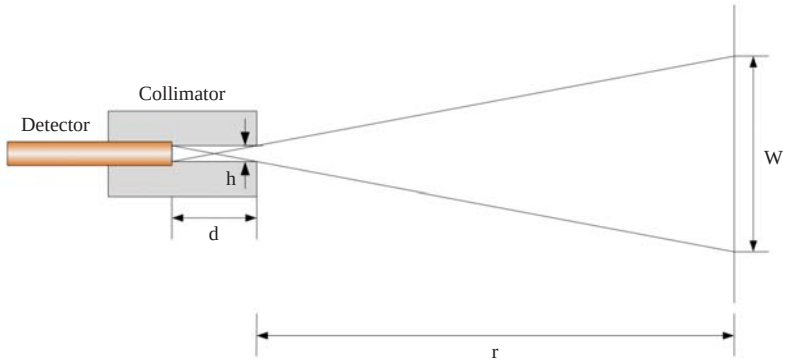

Fig. 3. Geometry of the industrial SPECT collimator.

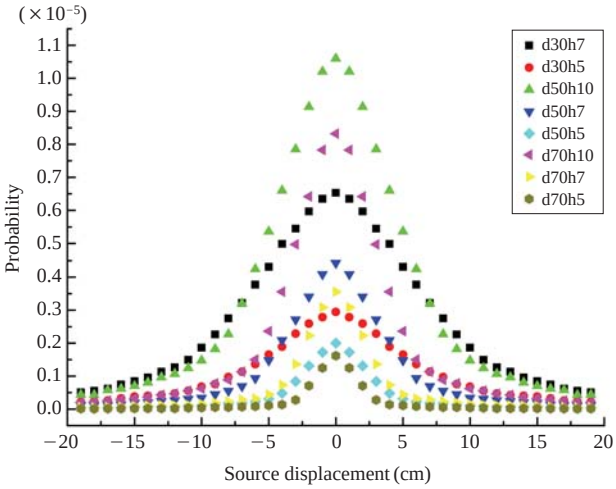

Fig. 4. Detection probability as varying collimator geometry (d: depth of collimator, h: hole size of collimator (mm).

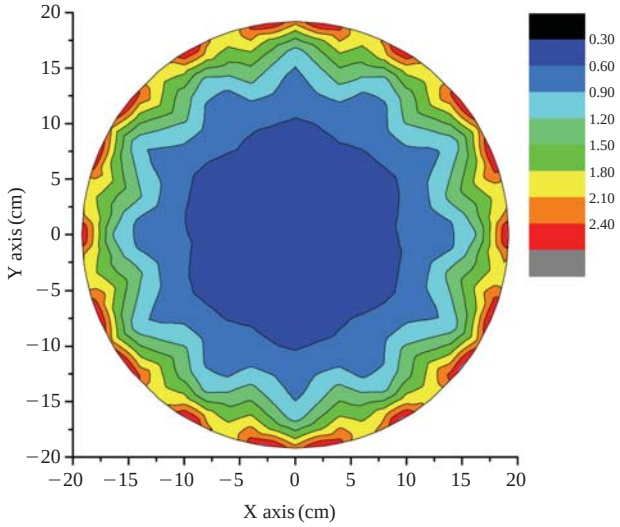

Fig. 5. Distribution of detection probability from sum of point source response functions.

움직이는 선원에 대한 검출확률을 측정하여 콜리메이터의 공간분해능을 구할 수 있다. 검출확률 프로파일의 반치폭(full width at half maximum: FWHM)을 공간분해능으로 볼 수 있으며, Equation 1을 만족해야 효율적으로 반응기의 모든 영역에서의 영상을 얻을 수 있다(IAEA 2008).

$$1 \leq \frac{\mathrm{FWHM_{col}} \times (\text{number of detector})}{(\text{diameter of reactor})} \leq 2 \qquad \text{Eq. 1}$$

콜리메이터의 공간분해능($\mathrm{FWHM_{col}}$)은 콜리메이터의 깊이(d)와 구멍크기(h) 그리고 선원과의 거리(r)에 의해 결정된다(Fig. 3). Equation 1을 만족하는 $\mathrm{FWHM_{col}}$은 구하기 위하여 콜리메이터의 깊이와 구멍크기 따른 검출확률을 몬테칼로 전산모사하여 Fig. 4에 나타내었다. 식(3)을 만족하는 조건 중 중심 검출확률이 가장 높은 조건을 선택하여 콜리메이터를 제작하였으며, 이때 $\mathrm{FWHM_{col}}$은 약 10 cm였다.

2. 영상 복원 방법 및 알고리즘 소개

검출기로부터 획득한 데이터를 바탕으로 영상을 복원하기 위하여 반복적 알고리즘(iterative algorithm)을 사용하였다. 이미지 맵을 N×N 픽셀을 가진 영상으로 복원할 때 픽셀 j의 방사성동위원소 농도를 x_j라 하고, i번째 검출기로 측정한 계수값을 y_i 두고, h_{ij}를 픽셀 j에서 방출된 감마선을 i번째 검출기에서 검출될 확률이라 할 때, 이들의 관계를 Equation 2와 같은 관계의 선형 방정식으로 표현할 수 있다. 반복적 알고리즘은 선형 연립방정식 해를 구하는 방식으로 영상을 복원하는 것이다.

$$y_i = \sum_{j=1}^{N^2} h_{ij} \times x_j \qquad \text{Eq. 2}$$

이 때 h_{ij}를 시스템 행렬이라 부르며 다음과 같은 방법으로 계산된다. 용기 내부의 각 픽셀의 위치에 점선원을 위치시키고, 외부의 검출기에 검출될 확률을 구하여

시스템 행렬 h_{ij}를 도출한다. 특히 특정 검출기에 대해 각 픽셀에 위치한 방사성동위원소에서 방출된 감마선이 검출될 확률을 표시한 것을 Point Source Response Function (PSRF)이라 하고, Fig. 2와 같이 육각형 구조로 배열된 모든 검출기의 PSRF의 합을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 용기 중심으로 갈수록 투과해야 할 물의 두께가 두꺼워져서 방사선 검출확률이 떨어지는 것을 알 수 있으며, 용기 벽으로 갈수록 검출기 배치 구조에 따른 불균일한 검출확률 분포를 보여준다.

영상 복원의 목적은 실험으로 측정한 값 y_i와 계산된 시스템 행렬 h_{ij}을 이용하여 x_j 값을 구해내는 것이며, 복원하는 방법은 크게 해석적인(analytic) 방법과 반복적인(iterative) 방법으로 나뉜다. 그러나 계측수가 픽셀의 개수보다 작은 조건에서는 해석적인 방법으로 영상을 복원했을 때 심각한 수준의 노이즈가 발생하는 단점이 있고(Childlow *et al*. 2003), 반복적인 방법 중의 하나인 Expectation maximization (EM) 방법이 다음과 같은 강점을 갖는다. EM 방법은 어떤 정보가 알려지지 않은 경우 가장 그럴 듯한 모델을 추정할 때 사용하는 반복 알고리즘으로써, 방사선 검출의 푸아송(Poisson) 특성이 그대로 보존될 뿐만 아니라 방사선의 감쇠, 산란 등과 같은 물리적 특성에 의해 야기되는 영상의 노이즈가 해석적인 방법보다 훨씬 작다. EM 알고리즘은 Expectation 단계와 Maximization 단계로 이루어져 있으며, Equation 3과 같이 표현된다(Lange and Carson 1984).

$$x_j^{(n+1)} = \frac{x_j^{(n)}}{\sum_i h_{ij}} \sum_i h_{ij} \frac{y_i}{\sum_k h_{ik} x_k^{(n)}} \qquad \text{Eq. 3}$$

$x_j^{(n)}$는 n번 반복 계산된 j번째 픽셀의 값이며, 이 값이 수렴할 때까지 계산은 반복된다.

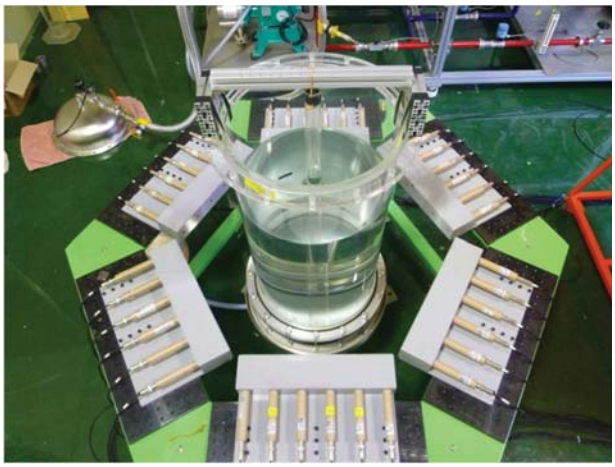

Fig. 6. Photograph of experimental set up and static phantom.

3. 실험방법

바닥이 막힌 내경 3 cm의 아크릴 배관에 $^{68}Ge/^{68}Ga$ 제너레이터로부터 용출한 ^{68}Ga 5.85 mCi를 물에 희석하여 static phantom을 제작하였다. 물을 가득 채운 실험용 반응기(직경 40 cm)를 대상으로 static phantom을 중심에서부터 반응기 벽 방향으로 2 cm씩 이동하면서 위치에 따른 단면분포를 측정하였다(Fig. 6). 각 위치마다 500초간 계수하여 통계 오차를 줄였으며, 실험과 같은 조건으로 몬테칼로 전산모사하여 단면분포 영상을 복원하여 실제 실험 결과와 비교 분석하였다.

결과 및 논의

각 검출기로부터 얻은 계수값에서 배경방사선을 제거하고, 검출기의 효율 및 선원의 감쇠시간을 보정한 후 EM 알고리즘으로 20번 반복 계산하여 영상을 복원하였

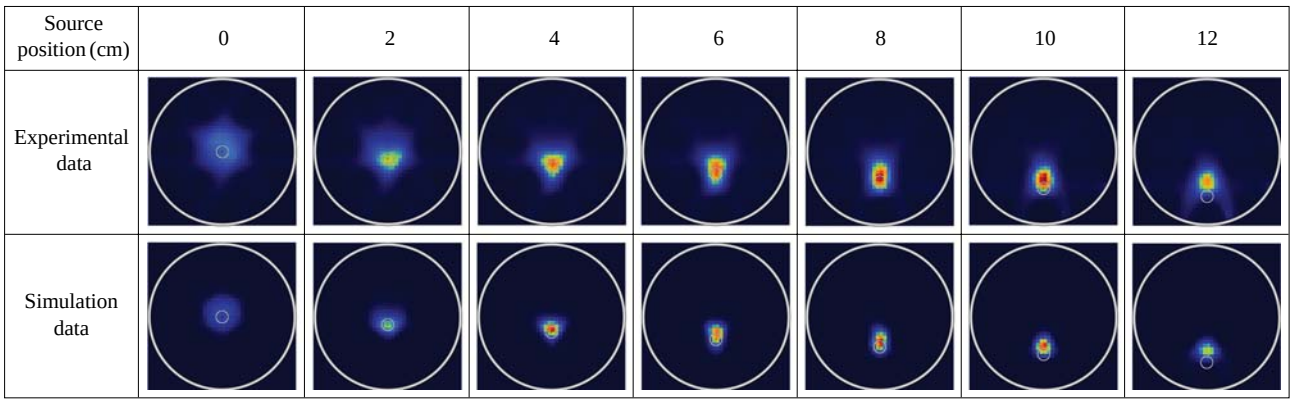

Fig. 7. Reconstructed images of experiments and simulations.

Table 1. Root mean square error (RMSE) between simulations and experiments

Source position (cm)	0	2	4	6	8	10	12
RMSE	0.087	0.069	0.062	0.057	0.047	0.040	0.048

Table 2. Position error between original sources and reconstructed images from experiments

Source position (cm)	0	2	4	6	8	10	12
Position error (cm)	2	1	0	0	1	2	4

다. Fig. 7에 실험 및 전산모사 결과를 바탕으로 복원한 영상과 방사성동위원소의 실제위치를 나타내었다. 복원 영상의 신뢰도를 확인하기 위하여 몬테칼로 전산모사 결과와의 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error)를 구하여 Table 1에 나타내었다. 몬테칼로 전산모사의 경우 실험과 동일한 조건으로 수행되었고, 계측 신호의 노이즈 및 포토 피크의 에너지 Gaussian broadening 등이 적용되지 않은 이상적인 상태임에도 불구하고 모든 영역에서 오차가 10% 미만으로 측정된 것으로 보아 실험 영상 복원이 성공적으로 이루어 진 것을 알 수 있다. 영상의 방사성동위원소가 반응기 중심에 위치한 경우 두꺼운 물의 두께로 인하여 방사성동위원소의 농도가 낮게 나타났으며, 방사성동위원소의 분포 또한 실제보다 넓게 관측되었다. Table 2에 static phantom과 실험으로부터 복원된 방사성동위원소 분포의 중심과의 차이를 나타내었다. Static phantom이 반응기의 벽에 가까워질수록 실제 방사성동위원소의 위치와 복원된 영상의 위치의 차이가 발생하였으며, 이는 각각의 검출기와 방사성동위원소의 위치의 거리(r)에 따라 콜리메이터의 공간분해능이 달라지게 되어 오차가 발생하는 것으로 보인다.

결 론

본 연구에서는 반응기 내 유체의 유동 특성을 측정하기 위한 산업용 SPECT 시스템을 개발하였고, 그 성능을 측정하기 위하여 반응기 내 방사성동위원소의 위치에 따른 복원 영상의 정확도를 분석하였다. 실제 실험뿐만 아니라 몬테칼로 전산모사도 수행하여 두 결과를 비교 분석하였다. 실제 실험과 몬테칼로 전산모사 결과는 오차가 10% 미만으로 측정된 것으로 보아 성공적으로 실험이 됐음을 알 수 있다. 그리고 방사성동위원소의 위치가 반응기 중심에서부터 10 cm까지는 정확한 영상을 도출하였으나 그 이후로는 실제 위치와 복원 영상의 차이가 발생하였다. 이는 검출기와 반응기 내부의 거리에 따라 콜리메이터의 공간분해능이 달라지게 되어 오차가 발생하는 것으로 보인다. 이를 보완하기 위하여 콜리메이터의 구멍 크기를 줄이고, 반응기와 검출기 사이의 간격을 늘려 거리에 따른 콜리메이터의 공간분해능 차이를 줄여야 한다. 그러나 콜리메이터의 구멍 크기를 줄이고, 거리를 늘리는 방법으로 위치의 정확성은 높아지지만 검출 확률의 감소로 이어지기에 빠른 속도로 움직이는 유체에 대한 측정은 적합하지 않으므로 상황에 맞는 SPECT시스템의 설계가 필요하다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

문진호, 김종범, 박장근, 정성희. 2011. 방사성동위원소를 이용한 정유설비 내 촉매유동 특성 및 수직밀도 분포 측정. 방사선산업학회지. **5**(4):317-323.

정성희, 김종범, 진준하. 2002. 감마선을 이용한 가동 중 증류탑 진단실험. 공업화학. **13**:19-24.

Childlow K and Moller T. 2003. Rapid emission tomography reconstruction. *Proceedings of the Third International Workshop on Volume Graphics 2003*, 15-26.

Hjertaker B, Johansen G and Jackson P. 2001. Level measurement and control strategies for subsea separators. *J. Electron. Imaging.* **10**:679-689.

IAEA. 2008. Industrial process gamma tomography. IAEA-TECDOC-1589 46-47.

Lange K and Carson R. 1984. EM reconstruction algorithms for emission and transmission tomography. *J. Comput. Assist. Tomogr.* **8**(2):306-316.

Legoupil S, Pascal G, Chambellan D and Bloyet D. 1996. Determination of the detection process in an experimental tomograph for industrial flow visualization using radioactive tracers. *IEEE Nucl. Sci.* **43**(2):751-760.

Manuscript Received: July 12, 2012
Revised: July 31, 2012
Revision Accepted: August 13, 2012