Journal of Radiation Industry 5 (4) : 325~330 (2011)

산업용 SPECT의 검출기 개수가 영상 해상도에 미치는 영향 평가

박장근[1,2] · 김찬형[1] · 김종범[2] · 문진호[2] · 정성희[2,*]

[1]한양대학교 원자력공학과, [2]한국원자력연구원 동위원소이용기술개발부

Effect of the Number of Detectors on Performance of Industrial SPECT

Jang Guen Park[1,2], Chan Hyeong Kim[1], Jong Bum Kim[2], Jinho Moon[2] and Sung-Hee Jung[2,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Hanyang University Seoul 133-791, Korea*
[2]*Radioisotope Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea*

Abstract - To predict the details of flow in industrial process unit, single photon emission computed tomography (SPECT) is a promising technique. Recently, industrial SPECT based on medical system has developed by researchers of the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) and Hanyang University. In the present study, to confirm the effect of the number of detectors on image quality, and determine the optimal number of detectors in industrial SPECT, industrial SPECT system with various geometries were evaluated by the Monte Carlo simulation. CsI (Tl) detectors (12 mm × 12 mm × 20 mm) with collimators (the geometric resolution of collimator R_g was 4 cm at the center of the 30 cm diameter cylindrical vessel object) were modeled in a hexagonal array, and the point sources of ^{99m}Tc, ^{68}Ga, and ^{137}Cs were simulated at the center of the cylindrical vessel object using the MCNPX code. Then, the reconstruction images of each geometry were reconstructed using the expectation maximization (EM) algorithm. In this study, the reciprocity theorem was used to improve computation time required for system matrix of the EM algorithm. The result shows that the resolution of the reconstructed image was significantly improved by increasing the number of detectors in industrial SPECT system and more than 60 detectors will be required for the resolution of the reconstructed image.

Key words : Industrial SPECT, Detector arrangement, Image resolution

서 론

산업공정 시스템의 규모가 커지고 구조가 더욱 복잡해짐에 따라 산업공정 내부에서 흐르는 다중상 유체의 분포를 정확하게 예측하는 것은 가동효율의 최적화, 생산품질의 향상 등에 필수적이다. 이를 위하여 유체역학 등의 이론을 기반으로 둔 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 산업공정 내부에서 흐르는 유체의 분포를 예측하고 있으나 이는 정확한 유체의 분포를 예측하는데 한계가 있을 뿐만 아니라 예측된 유체 분포라 할지라도 신뢰도가 낮다. 결국 국내 · 외에서 비파괴 검사를 통하여 산업공정 내부의 유체 흐름을 예측하고자 연구를 수행하고 있

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

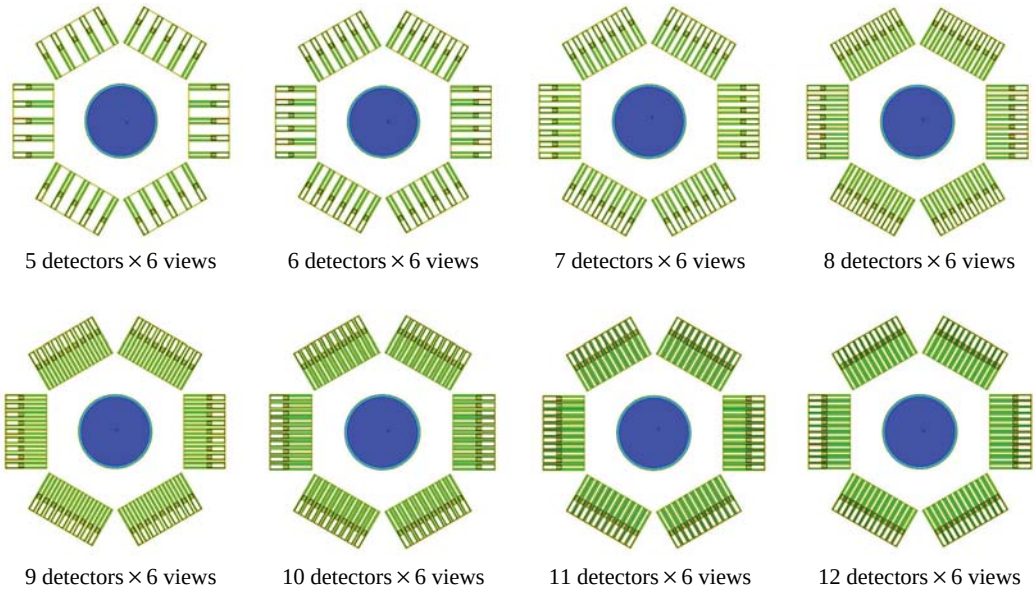

Fig. 1. Geometries of Industrial SPECT of 5 detectors × 6 views, 6 detectors × 6 views, 7 detectors × 6 views, 8 detectors × 6 views, 9 detectors × 6 views, 10 detectors × 6 views, 11 detectors × 6 views, and 12 detectors × 6 views modeled in the MCNPX code.

으며, 특히 한국원자력연구원 (Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)과 한양대학교에서는 감마선의 높은 투과력을 이용하여 인체 내 주입된 방사성의약품의 분포에 대한 정보를 얻을 수 있는 의료용 영상진단 기술인 단일광자전산화단층촬영법 (Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)의 원리를 기반으로 공정 내 유체 흐름 분포의 실시간 확인이 가능한 산업용 SPECT의 연구를 진행 중에 있다 (Attix 1986; Kimura 1990; Fashey 1992; Legoupil *et al.* 1996; Legoupil *et al.* 1997; Celler 1998; Wernick and Aarsvold 2004).

산업용 SPECT의 고해상도 영상 획득에 있어서 검출기 개수와 검출기 배치 형태는 매우 중요한 요소이다. 하지만 산업용 SPECT는 의학용 SPECT와는 달리 고에너지의 감마선을 효과적으로 차폐할 수 있도록 설계되어 사용할 수 있는 검출기 수와 배치 형태에 한계가 있다. 이에 한양대학교와 한국원자력연구원에서는 고에너지의 감마선을 효과적으로 차폐할 수 있도록 설계된 콜리메이터와 제한된 개수의 검출기로 고품질의 영상을 획득할 수 있도록 검출기 배열 방법에 대한 연구를 수행한 바 있다 (Park *et al.* 2008). 또한 산업용 SPECT의 영상 해상도를 크게 향상시키고자 제한된 공간 내에서 검출기 개수와 view를 추가하는 Double-layer기법을 제안하였으며 이는 실험을 통해 검증된 바 있다 (Park *et al.* 2010).

본 연구에서는 산업용 SPECT의 고해상도 영상 획득을 위하여 검출기 개수가 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향을 평가하고, 지름 30 cm 실린더 형 공정장치에 대하여 신뢰할 수 있는 영상을 획득하기 위해 요구되는 검출기 개수를 확인하고자 수행되었다.

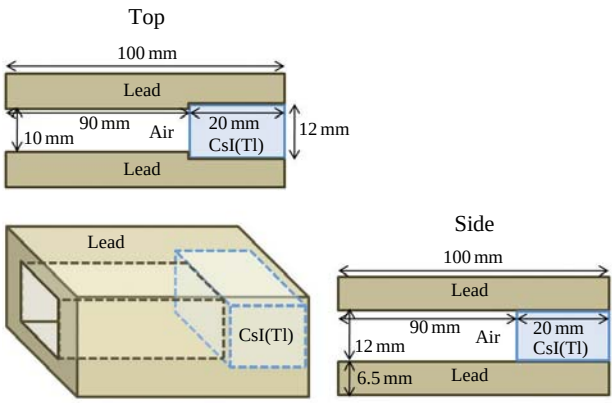

Fig. 2. Geometry of CsI (Tl) detector and collimator.

재료 및 방법

Fig. 1은 영상 재구성을 위한 시스템 행렬과 검출 데이터를 계산하기 위하여 MCNPX 코드를 통해 구현된 산업용 SPECT의 개념도이다 (Hendricks 2004). 본 연구에서 고려된 산업용 SPECT는 모두 육각형의 형태로 검출기가 배치되어 있으며, 5 계측기 × 6 views, 6 계측기 × 6 views, 7 계측기 × 6 views, 8 계측기 × 6 views, 9 계측기 ×

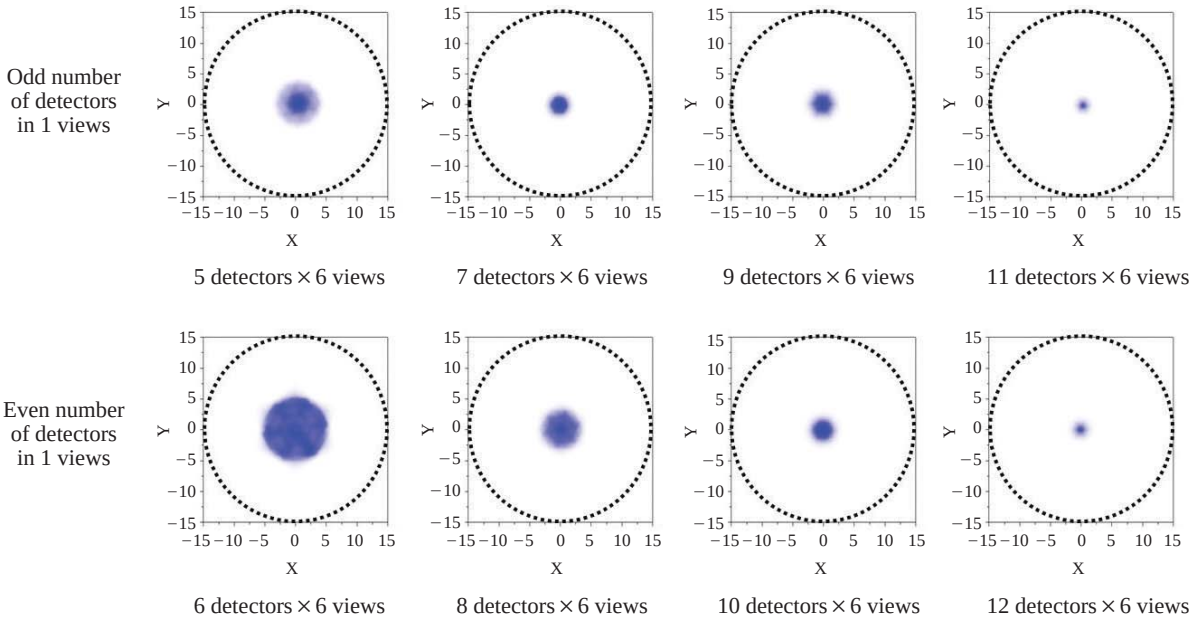

Fig. 3. Reconstructed images of ^{99m}Tc for industrial SPECT of different geometries.

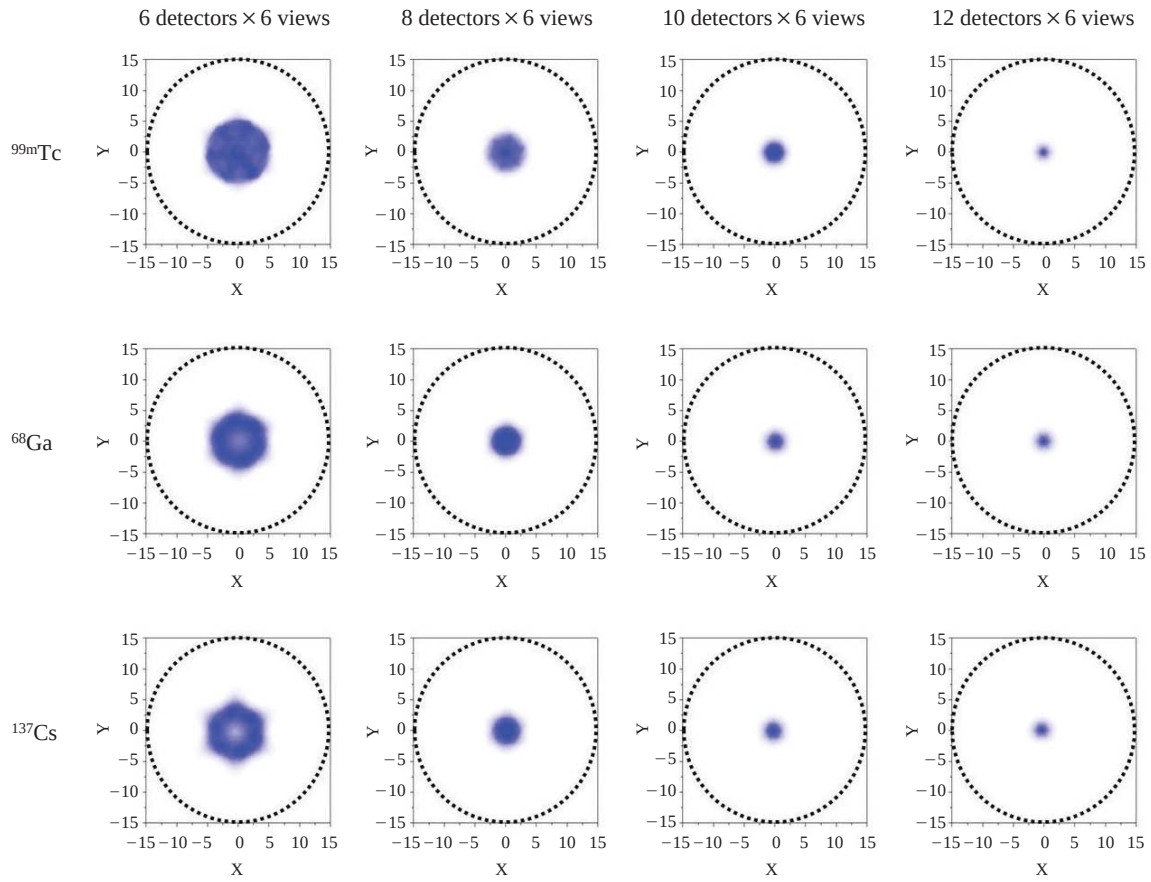

Fig. 4. Reconstructed images of ^{99m}Tc, ^{68}Ga, and ^{137}Cs point source for industrial SPECT of 6 detectors × 6 views, 8 detectors × 6 views, 10 detectors × 6 views, and 12 detectors × 6 views.

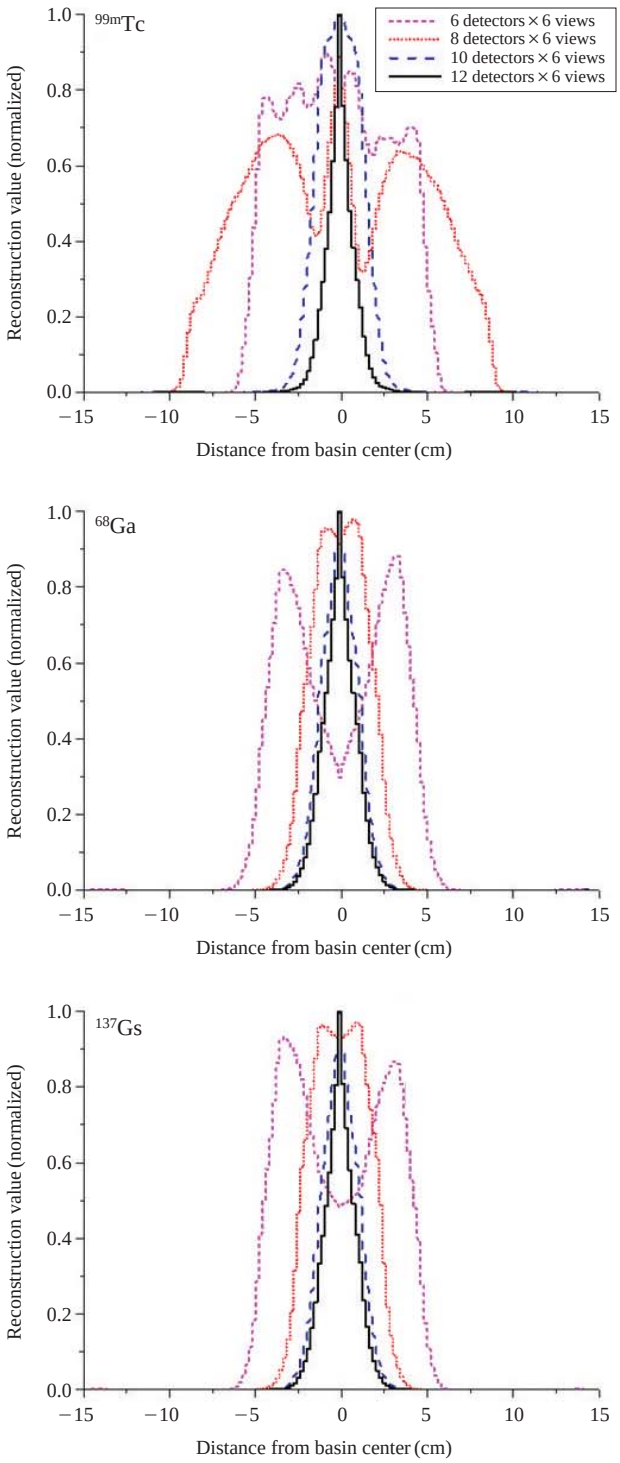

Fig. 5. Profiles of reconstructed images (at y=0) of a ^{99m}Tc, ^{68}Ga, ^{137}Cs source SPECT of 6 detectors × 6 views, 8 detectors × 6 views, 10 detectors × 6 views, and 12 detectors × 6 views.

6 views, 10 계측기 × 6 views, 11 계측기 × 6 views, 12 계측기 × 6 views가 각각 모델링 되었다. 산업용 SPECT의 중앙에 위치한 지름 30 cm의 실린더 형 공정장치의 내부 매질은 물로 고려되었다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 콜리메이터와 계측기의 개념도이다. 계측기는 12 mm × 12 mm × 20 mm의 CsI (Tl)가 사용되었으며, 콜리메이터는 기하학적 해상도 (geometric resolution of collimator, R_g)가 공정 장치 중심에서 약 4 cm가 되도록 고려하여 설계되었다. 기하학적 해상도 R_g는 Equation 1의 수식으로 표현되며, T는 콜리메이터의 깊이, D는 콜리메이터 홀의 너비, F는 콜리메이터에서부터 선원까지의 거리를 의미한다.

$$R_g(F)=\frac{D}{T}F \qquad \text{Eq. 1}$$

몬테칼로 전산모사를 통해 획득된 시스템 행렬과 검출 데이터는 산업용 SPECT의 영상을 획득하기 위한 영상 재구성시에 사용되었다. 영상 재구성에는 추정하여 얻은 기댓값 (Expectation)이 최대화 (Maximization) 되는 과정을 반복하여 최적의 파라미터를 구하는 EM (Expectation Maximization) 알고리즘 (Equation 2)이 사용되었다 (Moon 1996). EM 알고리즘 기반의 영상 재구성 시에는 영상 해상도를 결정하는 중요한 요소인 시스템 행렬이 요구되는데 고 해상도 영상을 획득하기 위해서는 공정 장치 내부의 수 많은 픽셀에 대하여 MCNPX 시뮬레이션을 수행하여야 하며, 이는 곧 시스템 행렬을 획득하는데 많은 계산 시간이 소요된다는 것을 의미한다. 최근 시스템 행렬의 계산 속도를 향상시키기 위하여 클러스터 등 고 성능의 컴퓨터가 사용되고 있지만 한 구조의 산업용 SPECT에 대한 시스템 행렬을 계산하는데 약 하루의 시간이 소요되며, 이는 다양한 구조의 산업용 SPECT에 대하여 계산을 수행할 경우에는 계산 시간이 기하급수적으로 늘어난다. 본 연구에서는 산업용 SPECT의 시스템 행렬 계산 속도 향상을 위하여 상반 정리 (Reciprocity theorem)를 적용하였다. 상반 정리는 몬테칼로 기법에 적용할 수 있는 기법으로서 무한하고 균질한 매질 내에서 선원과 검출기의 위치를 서로 바꾸어도 동일한 양의 방사선이 검출된다는 정리이며, 무한하고 균질한 매질이 아니더라도 검출기에서 에너지 창을 사용하여 주로 일차 방사선만을 검출할 경우에도 상반 정리의 적용이 가능하다. 한양대학교와 한국원자력연구원에서는 시스템 행렬을 계산하는데 있어서 기존의 방법과 상반 정리를 적용한 방법을 서로 비교한 바 있으며, 상반정리를 적용한 재구성 영상은 기존의 방법을 통해 계산된 재구성 영상과 큰 차이가 나지 않음에도 불구하고 계산 시간이 선원에 따라 약 500배 이상 향상되는 것을 확인

할 수 있었다(박 등 2010). EM 알고리즘을 통한 영상재구성은 MATLAB 프로그래밍을 통하여 수행하였으며, 반복 횟수는 30번으로 통일되었다.

$$f^{(n+1)}=\frac{f_j^{(n)}}{\sum_i h_{ij}}\sum_i h_{ij}\frac{g_i}{\sum_k h_{ik}f_k^{(n)}} \quad \text{Eq. 2}$$

본 연구에서 검출기 개수가 산업용 SPECT의 영상 해상도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 사용된 선원은 ^{99m}Tc (140 keV), ^{68}Ga (511 keV), ^{137}Cs (662 keV)이며, 에너지 창은 각각 선원이 방출하는 에너지의 ±10%인 126～154 keV, 460～562 keV, 596～728 keV로 적용되었다. 선원은 실린더 형 공정장치의 중앙에 있다고 가정되었다.

결과 및 논의

Fig. 3은 본 연구에서 몬테칼로 전산모사를 통해 모델링된 산업용 SPECT들의 재구성 영상으로 상단에는 1 view에 홀수 개 (5, 7, 9, 11개)의 계측기가 배치되어 있는 산업용 SPECT에 대한 재구성 영상, 하단에는 1 view에 짝수 개 (6, 8, 10, 12개)의 계측기가 배치되어 있는 산업용 SPECT의 재구성 영상이 나타나 있으며 선원은 ^{99m}Tc이 사용되었다. Fig. 3을 확인해보면 5 계측기×6 views와 7 계측기×6 views가 각각 6 계측기×6 views, 8 계측기×6 views에 비해서 계측기 수가 부족함에도 불구하고 재구성 영상의 해상도가 뛰어났으며, 이는 산업용 SPECT의 구조에서 원인을 알 수 있었다. 1 view에 홀수 개의 계측기가 배치되어 있는 산업용 SPECT는 계측기 배열 중앙에 계측기와 콜리메이터가 존재하여 중앙에 모사된 선원과 계측기가 조준경의 동일 선상 위에 있는 반면에 1 view에 짝수 개의 계측기가 배치되어 있는 산업용 SPECT는 계측기가 계측기 배열 중앙에 위치되어 있지 않았다. 본 경향은 타 선원에도 동일하게 나타났으며, 이는 결국 1 view에 홀수 개의 계측기가 배치되어 있는 산업용 SPECT는 선원이 중앙에 있는 경우에만 고 해상도의 영상을 제공하는 것을 의미하므로 본 연구에서는 1 view마다 짝수 개의 계측기가 배치되어 있는 산업용 SPECT만을 비교 대상으로 결정하였다.

Fig. 4는 1 view에 짝수 개의 계측기가 배치되어 있는 산업용 SPECT의 선원별 재구성 영상이다. 그림에서 볼 수 있듯이 계측기 수가 늘어남에 따라 영상의 해상도가 급격하게 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 6 계측기×6 views의 영상에서는 재구성 영상을 통하여 선원의 위치를 예측할 수 없었으나 10 계측기×6 views부터는 재구성 영상에서 선원의 위치를 정확하게 제공하였으며, 12 계측기×6 views는 MCNPX에서 모사된 점 선원을 영상에서 정확하게 재구성하였다.

Fig. 5는 재구성 영상의 프로파일들이다. 재구성 영상에서도 볼 수 있었듯이 6 계측기×6 views와 8 계측기×6 views의 경우에는 다수의 피크를 보여줌으로써 선원의 위치를 제대로 보여주지 않는다. 반면에 10 계측기×6 views부터는 오직 하나의 피크만을 나타내어 선원의 위치를 정확하게 보여주고 있다.

결 론

본 연구에서는 검출기 숫자가 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 8가지 구조에 대한 산업용 SPECT의 재구성 영상을 비교하였다. 연구 결과 검출기 개수가 증가할수록 재구성 영상의 해상도는 크게 향상 되는 것을 확인할 수 있었으며, 지름 30 cm의 실린더형 공정장치 내부의 선원을 예측하기 위해서는 총 60개 (10 계측기×6 views) 이상의 계측기가 요구된다는 것을 알 수 있었다. 또한 산업용 SPECT의 구조 최적화 연구에 있어서 선원과 검출기의 위치를 복합적으로 고려하여야 할 것을 알 수 있었다. 본 연구는 앞으로 실험을 통하여 검증될 예정이다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부의 원자력중장기연구개발사업 (연구과제 관리코드: 2011-0002265)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

박장근, 조성구, 서희, 김찬형, 정성희, 김종범, 문진호. 2010. 상반 정리 적용을 통한 산업용 SPECT 영상 재구성용 시스템 행렬 계산속도 향상 연구. 대한방사선방어학회 2010 추계학술발표회 논문요약집. pp. 124-125.

Attix FH. 1986. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. Wiley. pp. 55-59.

Celler A. 1998. Multiple line source array for SPECT transmission scan: simulation, phantom and patient studies. *J. Nucl. Med.* **39**:2183-2189.

Fashey FH. 1992. Sensitivity, resolution and image quality with a multi-head SPECT camera. *J. Nucl. Med.* **33**:1859.

Hendricks J. 2004. MCNPX User's Manual Version 2.5.e. LANL.

Kimura K. 1990. A new apparatus for brain imaging: four-head rotating gamma camera single-photon emission computed tomography. *J. Nucl. Med.* **31**:603-609.

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 Transactions on Nuclear Science* **43**(2):751-760.

Legoupil S, Pascal G, Chambellan D and Bloyet D. 1997. An experimental single photon emission computed tomograph method for dynamic 2D fluid flow analysis. *Applied Radiation and Isotopes* **48**:1507-1514.

Moon TK. 1996. The expectation-maximization algorithm. *IEEE Signal Processing Magazine* **13**:47-60.

Park JG, Kim CH, Min CH, Jeong JH, Kim JB, Moon JH and Jung S-H. 2010. Experimental test of double-layer method for industrial SPECT. *Nuclear Technology* **175**:113-117.

Park JG, Min CH, Kim CH, Kim JB and Jung SH. 2008. Development of an Industrial SPECT to Study Dynamic Behavior of Plant Process Flow. Trans. Korean Nucl. Soc. Autumn Meeting. Transactions of the Korean Nuclear Society (2008) (CD-ROM).

Wernick MN and Aarsvold JN. 2004. Emission Tomography: The Fundamentals of PET and SPECT. Elsevier Acadmic Press. pp. 153-168.

Manuscript Received: November 1, 2011
Revised: November 22, 2011
Revision Accepted: December 9, 2011