Journal of Radiation Industry 8(1) : 23~27(2014)

공정 내 기포가 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향

박장근 · 정성희* · 김종범 · 문진호 · 김찬형[1]

한국원자력연구원 동위원소이용기술개발부,
[1]한양대학교 원자력공학과

Influence of Void on Performance of Industrial SPECT System

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

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

Abstract - Industrial single photon emission computed tomography (SPECT) is an useful technique to investigate the dynamic behavior of process flow. In the present study, to evaluate the influence of a void on the performance of industrial SPECT, industrial SPECT with various radioisotope sources and gas holdups was modeled by the Monte Carlo simulation. The results are very encouraging; that is, the void little influences the performance of industrial SPECT, which means that industrial SPECT could be a suitable tool to investigate the dynamic characteristics of the flow in a water-air phase process.

Key words : Industrial SPECT, Inspection with gamma ray, Gamma Camera

서 론

산업공정 시스템에서 요구되는 화학반응의 메카니즘이 더욱 복잡해짐에 따라 공정 내부에서 흐르는 여러 유체의 분포를 정확하게 확인하거나 예측하는 것은 가동효율 최적화, 생산품질 향상 등에 큰 도움을 준다(Chaouki *et al*. 1997). 이를 위하여 전산유체역학 등의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 산업공정 내부의 유체 거동을 예측하고 있지만 이렇게 예측된 유체의 거동은 신뢰도가 매우 떨어지는 한계가 있다. 이러한 단점을 보완하고 보다 정확한 유체 거동의 확인을 위해 국내 · 외에서 방사선 기반의 비파괴 검사를 이용하여 산업공정 내부의 유체 거동을 직접적으로 측정하고자 연구를 수행하고 있다 (International Atomic Energy Agency 2008).

1997년도에 Legoupil은 공정 내 유체 거동을 실시간으로 확인하기 위하여 의료용 영상진단 기술인 단일광자전산화단층촬영법(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)의 원리를 이용할 것을 제안하였으며, 휴대용 SPECT를 개발한 바 있다(Legoupil *et al*. 1997). 하지만 개발된 휴대용 SPECT는 SPECT를 통한 유체 거동 확인의 가능성을 확인하였을 뿐 그 성능이 매우 좋지 않아 유체의 거동을 정확히 파악하는 데는 한계가 있었다. 이에 한국원자력연구원에서는 휴대용 SPECT를 개량한 산업용 SPECT를 개발하고, 산업용 SPECT의

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

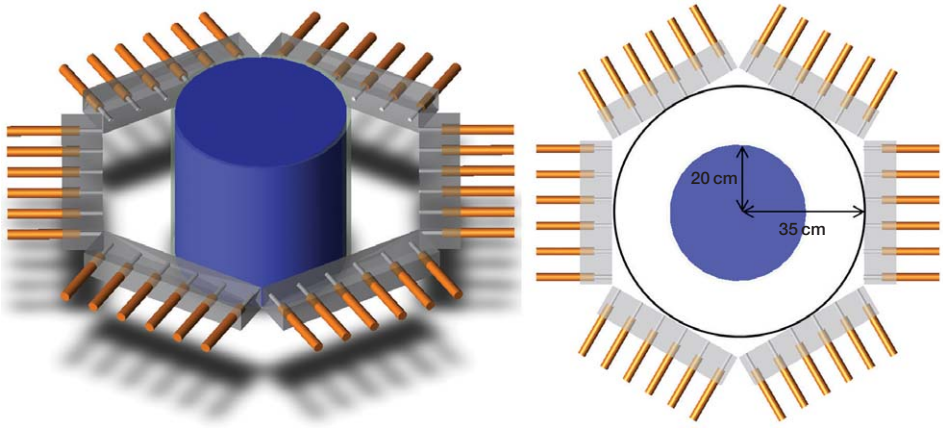

Fig. 1. Industrial SPECT modeled in the MCNPX code.

성능을 향상시키기 위하여 이중 적층법을 제안하였다. 제안된 이중 적층법은 시뮬레이션과 실험을 통해 산업용 SPECT가 선원이 다수 일 경우에 정확성이 떨어지는 재구성 영상을 제공하는 문제를 해결해주었다. 하지만 이러한 산업용 SPECT의 성능 평가는 실제로 산업 공정 내부에서 유체와 기체가 함께 흐르는 일이 매우 빈번함에도 불구하고 공정내에 물만이 존재하는 단일상 조건에서 이루어져왔다. 특히, 기포는 영상 재구성 시에 고려가 되지 않기 때문에 불순물로서 재구성 영상의 품질을 저하시킬 수 있는 원인이 될 수 있다.

본 연구는 공정 내부에 존재하는 기포가 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행되었다. 기포는 공정 내부에서 균일한 분포로 존재한다고 가정되었으며, MATLAB을 이용하여 구현되었다. 산업용 SPECT의 성능은 몬테칼로 전산모사를 이용한 방사선 수송해석과 영상 재구성 과정을 거쳐 획득된 영상으로 평가를 하였으며, NRMSE (normalized root-mean square error)값을 도입하여 기포가 산업용 SPECT에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

재료 및 방법

Fig. 1은 MCNPX 코드를 통해 구현된 산업용 SPECT의 개념도이다 (Wu *et al*. 2009; Pelowitz 2011). 산업용 SPECT는 총 6개의 검출기 배열이 육각형 형태로 배치되어 있으며, 한 개의 검출기 배열은 6개의 NaI (Tl) 검출기와 콜리메이터로 구성되어 있다. 검출기의 크기는 지름 1.25 cm, 길이 2.5 cm이며, 검출기가 원하는 영역에서부터 방출되는 감마선만을 선별적으로 검출하도록 하는 콜리메이터 구멍의 크기는 지름 1 cm, 깊이 5 cm이다.

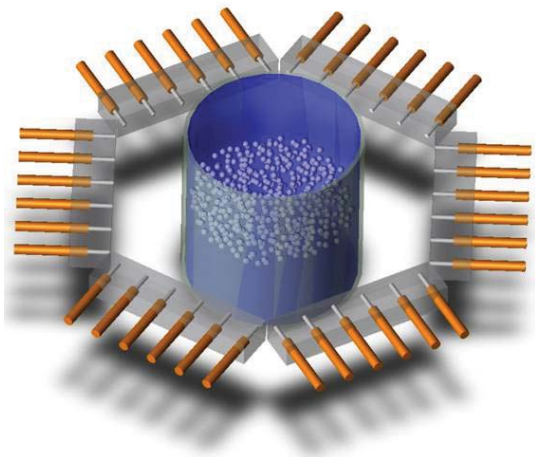

Fig. 2. Uniform void formation for gas holdup of 10% in object with industrial SPECT.

산업용 SPECT의 중앙에 위치한 지름 40 cm 원통형 검사 대상체의 내부 매질은 물로 고려되었다.

기포는 MATLAB을 이용하여 검사 대상체 내에서 균일한 분포를 갖도록 배치되었다. 난수를 발생시켜 기포의 위치를 결정하되, 다른 기포들의 위치와 겹친다면 다시 위치를 결정하고 겹치지 않는다면 해당 기포의 위치를 저장하였다. 기포의 위치를 결정하기 위한 과정은 미리 결정된 기포 체류량에 도달할 때까지 반복되도록 하였다. 기포의 지름은 MCNPX 코드가 구현할 수 있는 셀의 수를 감안하여 0.7 cm로 고정하였으며 기포 체류량은 1, 3, 5, 10, 15, 20%로 고려되었다. 또한, 기포의 밀도는 공기와 동일한 0.001205 g cm^{-3}로 설정되었다. Fig. 2는 기포 체류량이 10%로 고려되었을 경우에 대한 기포의 분포를 보여준다.

전산모사에 사용된 선원은 3 cm의 지름을 가지는 원

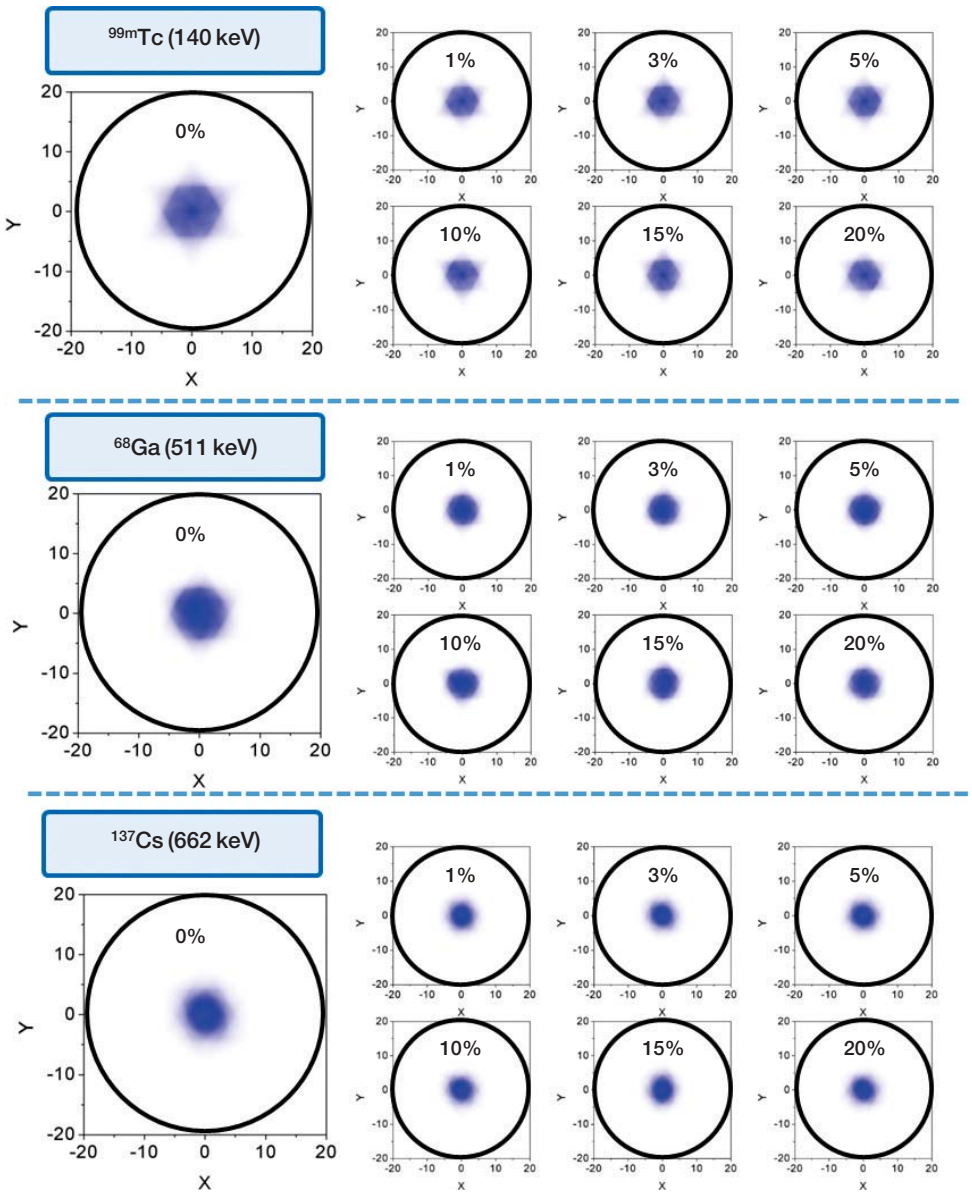

Fig. 3. Reconstructed images of radiation source with different gas holdups.

통형 ^{99m}Tc, ^{68}Ga, ^{137}Cs 선원이며, 모두 검사 대상체의 중심에 위치시켰다. ^{99m}Tc와 ^{137}Cs 선원은 각각 140 keV와 662 keV의 감마선을 방출하는 반면에, ^{68}Ga 선원은 양전자를 방출한다. 이 양전자는 물과 매우 짧은 거리 내에서 반응을 하여 511 keV의 소멸 감마선을 생성하기 때문에 본 연구에서는 ^{68}Ga 선원에서 511 keV의 감마선이 직접 방출된다고 가정을 하여 전산모사를 수행하였다. 또한, 산란된 방사선의 검출로 인한 성능 저하를 최소화시키기 위하여 에너지창을 선원이 방출하는 에너지의 ±10%로 설정하였다. 몬테칼로 전산모사는 MCNPX 2.7 코드를 이용하여 각 기포 체류량마다 10^9개의 감마선 입자에 대하여 수행되었다.

전산모사를 통해 획득된 데이터들은 추정하여 얻은 기댓값(Expectation)이 최대화(Maximization)되는 과정을 반복하여 최적의 값을 계산하는 ML-EM (maximum likehood-expectation maximization) 알고리즘기반의 영상 재구성에 사용되었다. ML-EM 알고리즘의 영상 재구성은 일반적으로 30～50번의 반복을 통하여 값을 획득하며, 본 연구에서는 30번의 반복을 통해 영상을 획득하였다 (Moon 1996; Wernick *et al*. 2004; Jung *et al*. 2012).

또한, 본 연구에서는 공정내 기포가 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여

Table 1. NRMSE values for different sources and gas holdup fractions.

	NRMSE						
	0% fraction	1% fraction	3% fraction	5% fraction	10% fraction	15% fraction	20% fraction
^{99m}Tc	0%	1.55%	2.33%	2.52%	2.70%	3.26%	3.58%
^{68}Ga	0%	0.66%	1.56%	1.84%	2.04%	2.21%	2.46%
^{137}Cs	0%	0.45%	1.47%	1.69%	1.98%	2.18%	2.38%

NRMSE (normalized root-mean square error)를 이용하였다 (Hyndman *et al*. 2006). 대조군과 실험군의 집합을 각각 A와 C라고 한다면 이들은 각각 식 1 같이 표현되고,

$$A=\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \text{ and } C=\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}, \tag{1}$$

이들 사이의 RMSE (root-mean squre error)는 다음과 같이 계산된다.

$$RMSE(A, C)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(a_i-c_i)^2}{n}}, \tag{2}$$

또한, NRMSE는 RMSE를 참고 값의 범위로 나눠준 값으로 식 3과 같이 표현된다.

$$NRMSE=\frac{RMSE}{a_{\max}-a_{\min}}. \tag{3}$$

즉, 낮은 NRMSE 값은 대조군과 실험군의 차이가 적다는 것을 의미한다.

결과 및 논의

Fig. 3은 본 연구에서 고려된 선원과 기포 체류량에 따른 산업용 SPECT의 재구성 영상들을 보여준다. 각 재구성 영상 내부의 백분율은 기포 체류량을 의미하며, 0%는 기포가 전혀 없이 물만이 존재하는 단일상 조건을 나타낸다. 본 연구에서는 기포 체류량 0%의 영상을 대조군으로, 1～20%의 영상을 실험군으로 두고 서로를 비교하여 공정내 기포가 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향을 평가하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 산업용 SPECT는 선원 종류와 기포 체류량에 관계없이 선원의 위치를 아주 잘 나타내 주는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 각 선원에 대하여 검사 대상체 내 1～20%의 기포 체류량 조건 하에서 획득된 영상과 물만이 존재하는 단일상 조건 (기포 체류량 0%) 하에서 획득된 영상을 비교하였을 때 서로 매우 비슷한 것을 볼 수 있었다.

Table 1은 공정 내 기포 체류량이 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향을 NRMSE를 이용하여 정량적으로 분석한 결과를 보여준다. 기포 체류량이 증가함에 따라 ^{99m}Tc (140 keV) 선원은 1.55%에서 3.58%까지, ^{68}Ga (511 keV) 선원은 0.66%에서 2.46%까지, ^{137}Cs (662 keV) 선원은 0.45%에서 2.38%까지 증가하였다. NRMSE 값들은 선원의 에너지가 증가할수록, 기포 체류량이 감소할수록 감소되는 경향을 보여주었으며, 이는 낮은 에너지의 감마선에 비해 높은 에너지의 감마선의 감쇠계수가 상대적으로 더 낮기 때문으로 확인되었다. 전체적으로, NRMSE 값들은 모두 4% 이내로 계산되었으며 이는 공정 내 균일하게 존재하는 기포가 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향은 매우 미미하다는 것을 의미한다.

결 론

본 연구에서는 공정내 존재하는 기포가 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 여러 선원과 기포 체류량에 대한 산업용 SPECT의 재구성 영상을 비교하였다. 연구 결과, 선원의 종류에 관계없이 공정내 기포 체류량이 20% 이하일 경우, 기포가 산업용 SPECT의 성능에 미치는 영향은 매우 적은 것을 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에서 고려된 기포 체류량과 선원에 대한 NRMSE 값이 모두 4% 이내인 것을 고려할 때 그 이상의 기포 체류량에 대해서도 산업용 SPECT가 기포에 대한 영향을 크게 받지 않을 것이라고 예상할 수 있었다. 이는 결국 공정 내부에서 흐르는 유체와 기체의 거동을 산업용 SPECT를 통해 확인할 수 있다는 것을 의미하며 앞으로 실험을 통하여 본 연구 결과를 검증할 예정이다.

사 사

본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 원자력연구개발사업으로부터 지원받아 수행되었습니다

(NRF-2012M2A2A6007040).

참 고 문 헌

Chaouki J, Larachi F and Dudukovic MP. 1997. Noninvasive tomographic and velocimetric monitoring of multiphase flows. *Ind. Eng. Chem. Res.* **36**:4476-4503.

Hyndman RJ and Koehler AB. 2006. Another look at measures of forecast accuracy. *Int. J. Forecast.* **22**:679-688.

International Atomic Energy Agency. 2008. Industrial Process Gamma Tomography: IAEA TECDOC-1589. 1st ed. Austria; IAEA.

Jung SH, Kim JB, Moon JH, Park JG, Kim CH and Kim HS. 2012. Study on the validation of the computer fluid dynamics modeling for a continuously flowing water vessel with the industrial SPECT using a radiotracer. *Appl. Radiat. Isot.* **70**:2471-2477.

Legoupil S, Pascal G, Chambellan D and Bloyet D. 1997. An experimental single photon emission computed tomograph Method for dynamic 2D fluid flow analysis. *Appl. Radiat. Isot.* **48**:1507-1514.

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

Park JG, Kim CH, Min CH, Jeong JH, Kim JB, Moon JH and Jung SH. 2011. Experimental test of double-layer method for industrial SPECT. *Nucl. Tech.* **175**:113-117.

Park JG, Seo H, Kim CH, Jung SH, Moon JH and Kim YS. 2011. "Double-layer" Method to improve image quality of industrial SPECT. *J. Instrum.* **6**:C12032.

Pelowitz DB. 2011. MCNPX^{TM} User's Manual Version 2.7.0. 1st ed. New Mexico; Los Alamos National Laboratory.

Wernick MN and Aarsvold JN. 2004. Emission Tomography: Thd Fundamentals of PET and SPECT. 1st ed. California; Elsevier Inc. 443-472.

Wu Y and FDS Team. 2009. CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation. *Fusion Eng. Des.* **84**: 1987-1992.

Manuscript Received: April 3, 2014
Revised: May 29, 2014
Revision Accepted: May 29, 2014