Journal of Radiation Industry 7 (2~3) : 115~119 (2013)

몬테칼로 전산모사를 이용한 감마선 투과계측 증류탑 진단기술의 타당성 연구

문진호 · 김종범 · 박장근 · 정성희*

한국원자력연구원 동위원소이용기술개발부

Feasibility Study of Gamma Ray Transmission Technique in Distillation Column Using Monte Carlo Simulation

Jinho Moon, Jongbum Kim, Jang Guen Park and Sung-Hee Jung*

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

Abstract - The density profile measurement technology by gamma transmission has been widely used to diagnose processes in the field of refinery and petrochemical industry. This technology can reveal a clue and position of abnormal phenomenon of industrial processes during their operation. In this paper, the feasibility of the gamma transmission technology for detecting changes in the amount of fluid in a distillation column was evaluated by using Monte Carlo simulations. The simulations assumed that ^{60}Co (1.17, 1.33 MeV) sources and NaI (Tl) detectors (Φ5 × 5 cm) are located in opposite sides of a column and it concurrently moves in vertical direction. To determine the dependency of a spatial resolution on aperture size of a collimator, the simulation model for a tray in a column were simulated with the aperture sizes of 1 and 2 cm. The thickness of the high density area including a tray and fluid was 7.6 cm in the simulation. The spatial resolution of the tray was 8.2 and 8.5 cm, respectively. As a result, it was revealed that the conventional density profile measurement technique is not able to show the deviation of liquid level on a tray in a column.

Key words : Monte Carlo simulation, Gamma-ray transmission measurement, Density profile measurement, Distillation column

서 론

1960년대 이후, 방사선 및 방사성동위원소를 이용한 산업공정 진단기술이 연구되어 왔으며, 라디오그래피(radiography)로 대표되는 비파괴검사 뿐만 아니라, 감마선 흡수에 의한 계측기술 등이 산업현장에 적용되기 시작하였다(Johnson *et al.* 1963). 특히, 방사선 응용기술은 정유 및 석유화학 산업 분야의 대표적 공정 구조물인 증류탑을 대상으로 한 가동 중 진단 등의 문제해결을 위해 널리 적용되고 있다. 방사성동위원소를 이용한 산업응용 계측기술은 크게 밀봉선원 이용기술과 개봉선원 이용기술로 구분된다. 밀봉선원을 이용한 방사선 계측기술로는 감마선 투과계측에 의한 밀도분포 측정기술과 특정단면에서 시간 평균의 밀도분포를 측정하는 감마선 단층촬영기술 등이 있다(정 등 2002; Kim *et al.* 2012). 또한 개봉선원을 이용한 방사선 계측기술로는 방사성추적자를 진단 대상 공정에 투입 후 공정의 체재시간분포를 측

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

정하여 공정의 가동효율 및 내부 유체의 혼합특성 등을 측정하는 기술과 특정 단면에서 시간에 따른 유체의 유동분포 변화를 탐지할 수 있는 산업용 단일광자방출촬영 (single photon emission computed tomography, SPECT) 등이 있다 (Legoupil *et al.* 1996; Kim *et al.* 2005). 이 중에서 감마선 투과계측에 의한 밀도분포 측정기술은 기술적용의 용이성과 저비용 등의 장점으로인해 관련 산업분야에 광범위하게 사용되고 있다. 감마선 투과계측에 의한 밀도분포 측정기술이 가장 빈번하게 적용되고 있는 증류탑의 경우 가동 목적에 따라 구조, 규모, 재질, 내부 유체의 상 등이 매우 다양하고, 장시간 가동에 따른 내부 이상현상의 발생 가능성이 상존한다. 감마선 투과계측에 의한 밀도분포 측정기술은 증류탑의 이상현상에 대한 문제를 직접적으로 해결하는 기술은 아니지만 예상되는 문제의 원인에 대한 증거와 정확한 위치를 제시하고, 사전에 문제해결을 위한 대안을 제시함으로써 공정의 가동 중지기간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만 증류탑 내부는 고온, 고압의 유체들로 채워져 있으며, 접근성이 매우 나쁜 단점이 있다. 또한 감마선 투과계측에 의한 밀도분포 측정기술 적용 시 수십 미터에 달하는 증류탑의 최상단에 방사선원과 방사선 검출기의 수직 이동을 위한 도르래가 설치되어야 하며, 방사선 피폭에 대한 위험도 상존하는 등 극단적인 실험 조건을 갖고 있다. 이와 같은 이유로 감마선 투과계측에 의한 밀도분포 측정기술을 매번 적용하는 것은 현실적으로 쉽지 않기 때문에 몬테칼로 전산모사를 이용하여 감마선 투과계측기술 적용 가능성을 평가하였다.

몬테칼로 기반 전산모사 코드는 방사선의 물질 내 거동을 정확하게 예측할 수 있으며, 방사선을 이용한 실험결과를 정밀하게 예측하는 것을 가능하게 한다 (Hoang *et al.* 2010). 본 연구에서는 특정 증류탑을 대상으로 내부 유체량의 변화감지를 위한 감마선 투과계측기술 적용 가능성을 몬테칼로 전산모사를 통하여 평가하였다. 이를 위하여 몬테칼로 방법을 사용하는 MCNPX를 이용하여 연구대상 증류탑의 관심영역에 대한 감마선 투과계측치를 계산하고, 감마선 투과계측 시스템의 최대해상도를 평가하였다.

재료 및 방법

감마선 투과계측에 의한 밀도분포 측정기술은 계측대상 공정의 양측에 방사선검출기와 방사선원을 각각 설치하고 외부 벽면을 따라 움직이면서 방사선원에서 발생한 감마선이 대상체에 의한 감쇠 정도를 평가하는 기술이다. 기본 원리는 식 (1)로 대표되는 Beer-Lambert 법칙에 근거를 두고 있다.

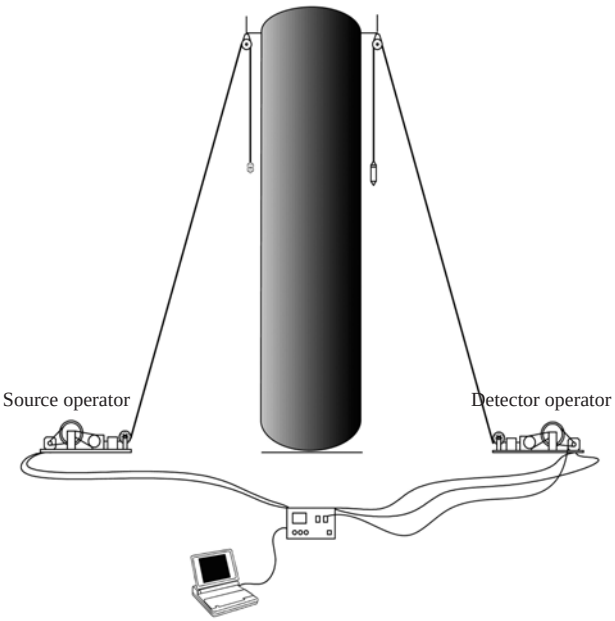

Fig. 1. Schematic diagram of the gamma scanning system.

$$I = I_0 \times e^{-(\mu/\rho)\rho t} \quad \text{식 (1)}$$

여기서 I는 I_0의 세기를 가진 방사선이 두께 t, 밀도 ρ인 매질을 통과한 후의 방사선 세기를 나타내며, μ/ρ는 주어진 방사선의 에너지와 매질에 의해 결정되는 질량감쇠계수이다. Fig. 1은 증류탑 진단을 위하여 설치된 감마 스캔 시스템을 보여준다 (김 등 2008). 지상으로부터 동일한 높이에 설치된 방사선원과 방사선 검출기를 일정한 간격으로 동시에 이동시키면서 해당 높이에서의 방사선 계측값을 평가한다. 증류탑 전반에 걸쳐 외벽과 보온재 등은 동일한 구성을 전산모사하였으며, 진단 실험을 통해 얻는 계측값의 변화는 증류탑 내부에 설치된 단 (tray)과 같은 구조물과 내부 유체의 존재 형태에 따른 밀도 차이에 기인한다. 또한, 증류탑 구조 도면과 해당 시설의 운전조건 등의 자료를 고려하여 전산모사 결과를 분석하였으며, 시설의 성능 및 물리적인 상태 등에 예측가능성을 확인하였다.

MCNPX 코드는 기존의 해석적 방법과 달리 방사선의 축적효과 (build-up effect)나 산란 감마선에 의한 영향 등이 고려되어 실제 계측과 매우 유사한 결과를 제공할 수 있다.

정유 및 석유화학공정에서 가동되는 증류탑은 목적에 따라 직경이 최대 약 10 m, 높이는 최대 100 m에 달하며, 내부에는 수십 개의 단이 반복 배치되어 있는 구조로 액

체상 물질과 기체상 물질 간의 물리적 접촉을 용이하게 만든 장치이다. 본 연구에서는 정유설비에서 실제 가동되고 있는 증류탑의 설계도를 기반으로 전산모사를 수행하였다. 증류탑 모델은 스테인레스 재질로 외경 400 cm, 두께 3.7 cm의 원통형이며, 내부에 수직으로 60 cm 간격으로 두께 0.6 cm인 다섯 개의 단이 위치하도록 구성되었고, 각 단에는 물이 7 cm 높이로 채워져 있는 것으로 가정하였다(Fig. 2).

방사선 선원으로는 ^{60}Co (1.17, 1.33 MeV)을 가정하였으며, 방사선 검출기는 직경 5 cm, 높이 5 cm의 NaI (Tl) 섬광 검출기로 가정하였다. 또한, 산란된 방사선으로 인한 공간해상도 저감효과를 최소화하기 위하여 방사선원과 검출기에 납 재질의 직경과 길이가 10 cm인 원통형 조준기를 설치하였다(Fig. 3). 대상 증류탑의 수직밀도분포를 얻기 위하여 계측구간 300 cm의 거리를 2.5 cm 간격으로 방사선원과 검출기를 평행하게 이동시키면서 총 120개 지점에 대하여 전사모사를 수행하였다. LabVIEW 프로그램을 기반으로, MCNPX 코드의 입력 파일을 자동으로 생성시키는 프로그램을 개발하였으며, 이를 사용해 120개 지점에 대한 전산모사를 수행하였다. 본 연구에서는 109개의 광자를 사용하였으며, 총 전산모사 시간은 16 노드의 컴퓨터 클러스터(Xeon 2.66 GHz)를 이용하여 약 120시간이 소요되었다. 또한, 콜리메이터의 직경에 따른 공간분해능 변화를 평가하기 위하여 콜리메이터 직경을 1, 2 cm의 조건으로 전산모사를 각각 수행하였으며, pulse height tally (F8 tally)를 사용하여 방사선검출기에서 신호를 평가하였다.

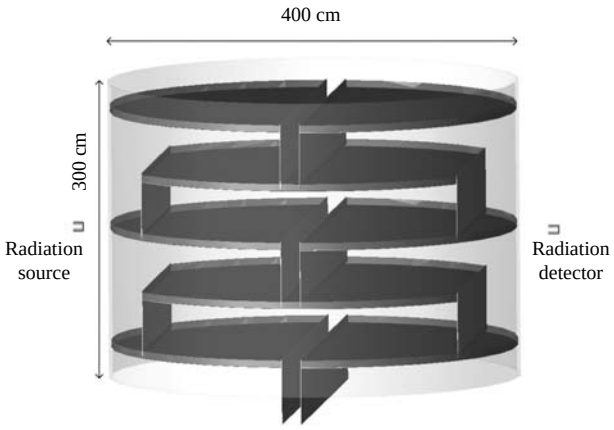

Fig. 2. Distillation column model for Monte Carlo simulation.

결과 및 논의

MCNPX 전산모사 결과는 선원에서 방출된 입자가 방사선검출기에서 검출될 상대적 확률로 나타나며, 초기 광자의 수인 10^9을 곱하여 계수값을 평가하였다. Fig. 4는 높이에 따른 투과 계수값과 전산모사에 사용된 증류탑을 보여준다. 높은 계수값을 나타내는 곳은 밀도가 낮은 기체상 영역으로 간주할 수 있으며, 낮은 계수값을 나타내는 곳은 내부 단의 액체상 영역을 나타낸다. 또한 콜리메이터가 작은 경우 전반적으로 계측값이 감소하였으며, 콜리메이터의 크기와 상관없이 증류탑 내부 단에 대하여 동일한 패턴의 계측결과가 반복적으로 나타났다. 한 구간을 보다 상세하게 표현한 Fig. 5에는 내부 단에 대한 계측 신호가 계측 최저점을 기준으로 아래 부분의 계측신호는 스테인레스 재질의 단에 의해 급격하게 계측값이 줄어들며, 윗 부분은 이보다 밀도가 낮은 물에 의한 계측신호로 아래 부분보다 퍼져있는 것을 확인하였

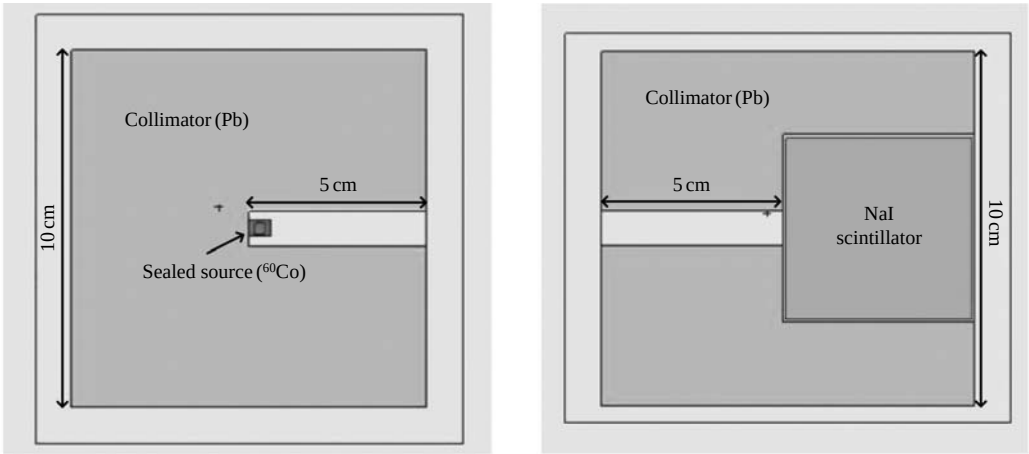

Fig. 3. Collimator design of source and detector.

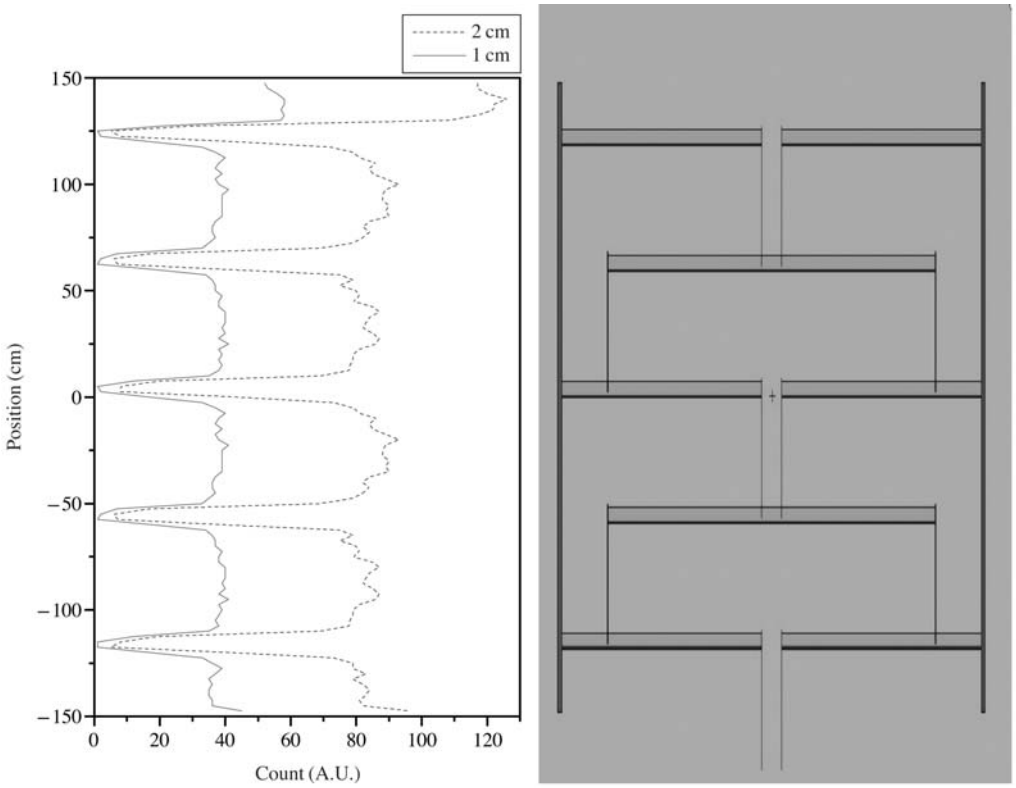

Fig. 4. Vertical gamma-ray transmittance of the column from MCNPX simulation.

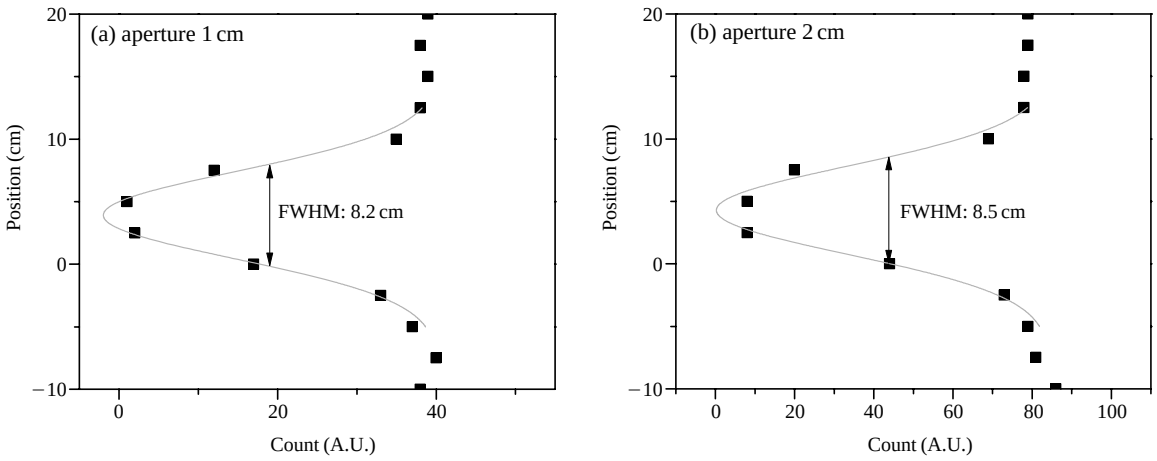

Fig. 5. Estimation of FWHM by gaussian fitting of vertical gamma-ray transmittance.

다. 이는 정상 가동 중인 실제 증류탑에 대한 진단 실험과 매우 유사한 결과를 보여주고 있다(정 등 2002). 콜리메이터 크기에 따른 공간분해능의 변화 정도를 평가하기 위하여 계측결과를 가우시안 피팅하여 반치폭(full width at half maximum, FWHM)을 각각 구하였다. 실제 단의 두께는 물의 두께를 합하여 7.6 cm였으나, 구경이 1 cm의 경우 반치폭이 8.2 cm, 2 cm의 경우 8.5 cm로 나타났다.

결 론

본 연구에서는 몬테칼로 전산모사 방법을 사용하여 감마선 투과계측에 의한 밀도분포 측정기술의 공간분해능

에 영향을 미치는 인자를 평가하였다. 정유 및 석유화학 산업에서 널리 쓰이는 증류탑을 대상으로 전산모사를 수행한 결과, 증류탑 내부 단의 위치가 정확히 예측되었다. 그리고 방사선원과 방사선검출기의 콜리메이터 크기를 변경하여 내부 단에 대한 공간분해능을 비교한 결과 구멍 크기에 따른 공간분해능의 차이는 크지 않았다. 몬테카를로 전산모사 기술은 방사성동위원소를 이용한 산업분야에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 원자력연구개발사업으로부터 지원받아 수행되었습니다 (No. 2012M2A26007040).

참 고 문 헌

김재호, 정성희, 김종범, 김진섭, 이나영, 이성식, 장석준. 2008. Gamma absorption technique를 이용한 trayed column의 가동 중 내부 밀도분포 측정에 의한 유체 유동상태 진단. 방사선방어학회지 **33**(1):35-40.

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

Hoang S, Yoo SH and Sun KM. 2011. Experimental validation of the backscattering gamma-ray spectra with the Monte Carlo code. *Nuclear Engineering and Technology* **43**(1): 13-18.

Johnson P, Bullock M and Whiston J. 1963. Some applications of radioisotopes in the chemical industry. *Chem. Ind.* **19**: 750-756.

Kim HS, Shin MS, Jang DS, Jung SH and Jin JH. 2005. Study of flow characteristics in a secondary clarifier by numerical simulation and radioisotope tracer technique. *Appl. Radiat. Isot.* **63**:519-526.

Kim JB, Jung SH, Moon JH, Park JG, Jin JH and Cho GS. 2012. Development of transportable gamma-ray tomographic system for industrial application. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* **693**:203-208.

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 Trans. Nucl. Sci*. **43**(2):751-760.

Manuscript Received: October 24, 2013
Revised: October 28, 2013
Revision Accepted: November 20, 2013