

산업공정반응기의 감마선 전산 단층촬영기술 개발

Development of Tomographic Scan Method for Industrial Plants

김종범*[†], 정성희*, 문진호*, 권택용*, 조규성**

Jong Bum Kim*[†], Sung Hee Jung*, Jin Ho Moon*, Taek-Yong Kwon* and Gyuseong Cho**

초 록 본 논문에서는 평행빔, 팬빔, 콘빔 등 기존의 정형화된 전산화 영상촬영장치로 측정이 불가능한 산업 공정에 전산화 단층 촬영기술을 적용하기 위하여 개별 검출기 설치, 감마선 조사기 및 선원유도관을 통한 단면계측방법을 제안하였다. 단면 복원을 위해 검출기 불균을 고려한 가중치 함수를 제안하고 통계적 기반의 반복적 알고리즘을 적용하였다. 그리고 이와 같은 검출 구조에 따른 측정 결과물을 예측하고 본 방법의 타당성을 검증하기 위하여 두 종류의 팬텀에 대해 Monte Carlo 전산모사를 수행하였으며 이중 한개의 모델에 대하여 동일 계측조건을 갖는 Lab. 규모 측정 실험을 수행하였다. 전산 모사 결과 photopeak 에너지만 선별하여 계측한 경우가 전에너지에 대해 계측한 경우에 비해 높은 통계적 오차에도 불구하고 보다 참값에 근접한 결과를 보였다. 또한 동일 모형에 대한 전산 모사 및 측정 실험의 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 이를 통하여 제안된 측정 기법의 유용성을 검증하였으며, 향후 석유화학시설의 설비 진단에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요용어: 방사성동위원소, 감마선, 전산화 단층 촬영기술, 산업공정, 감마선 조사기, 몬테칼로 전산모사

Abstract In this paper, a new tomographic scan method with fixed installed detectors and rotating source from gamma projector was presented to diagnose the industrial plants which were impossible to be examined by conventional tomographic systems. Weight matrix calculation method which was suitable for volumetric detector and statistical iterative reconstruction method were applied for reconstructing the simulation and experimental data. Monte Carlo simulations had been performed for two kinds of phantoms. Lab scale experiment with a same condition as one of phantoms, had been carried out. Simulation results showed that reconstruction from photopeak counting measurement gave the better results than from the gross counting measurement although photopeak counting measurement had large statistical errors. Experimental data showed the similar result as Monte Carlo simulation. Those results appeared to be promising for industrial tomographic applications, especially for petrochemical industries.

Keywords: Radioisotope, Gamma Ray, Tomographic Scan, Industrial Plant, Gamma Projector, Monte Carlo Simulation

1. 서 론

감마선은 높은 투과력으로 인해 대형 산업시설의 진단에 널리 활용되고 있다. 밀봉감마선을 이용한 중류탑 진단, 배관 진단기술[1-3], 방사성 추적자를

이용한 반응기 효율진단[4-7] 등이 그 활용 예이다. 또한 최근 감마선 전산화 단층촬영기술을 이용하여 산업공정을 진단하는 기술이 국내외의 여러 그룹에 의해 개발되고 있다[8-14]. 공업공정 진단을 위한 감마선 전산화 단층촬영기술의 연구 동향은 평행

범, 팬빔 등의 구조를 갖는 영상장치를 이용하여 실험실 또는 파일럿 규모의 공정 모사장치를 대상으로 하는 측정사례가 주를 이루며[11,12] 이에 비해 실제 공정에 대한 측정 사례는 많지 않은 편이다. 최근 전산화 단층 촬영기법을 실제 공정에 적용한 몇몇 사례가 보고되고 있다[17,18]. 이 중 몇 가지를 살펴보면 단일 검출기와 단일 선원을 갖는 평행빔형 감마영상장치를 통하여 배관 내부 퇴적층 검사를 실시한 사례가 보고된 바 있으며[18], IAEA의 기술보고서를 통하여 대형공정에 대해 개별 검출기를 설치하고 유도관을 통한 선원회전 방법 등이 제안된 바가 있다[17]. 이 중 개별 검출기설치 및 유도관을 통한 진단 방법은 기존의 전산화 단층 촬영방법으로 측정이 불가능한 조건을 가진 대형 시스템에 대한 대안기술이 될 수 있는 잠재성이 충분히 있다고 볼 수 있다. 그리고 이러한 계측 구조에서 감마선을 방출하는 밀봉방사성동위원소를 사용할 수 있으며, 방사성동위원소는 소형반응기의 경우 ^{137}Cs 선원을, 대형반응기의 경우 ^{60}Co 등을 사용할 수 있다. 또한 감마선 조사기를 이용하여 선원을 가이드 튜브 속으로 진행시키는 방법으로 기존 영상장치의 회전 구조를 대신할 수 있으며 이때 감마선 조사기는 위치 확인 및 제어가 가능하도록 구성할 수 있다. 기존 영상장치의 방사선검출시스템인 병렬형 검출기 장치는 배관 주변에 밀착된 구조로 설치된 개별 검출기들로 대체된다. 이때 검출기 설치하는 반응기 주변의 배관, 밸브 사다리 등과 같은 구조물을 피해 설치가 가능하며 검출기 설치 간격이 일정할 필요가 없다. 측정은 일정간격으로 선원을 진행시키며 각각의 선원위치에서 전체 검출기에 대한 투과감마선을 측정하여 기록하며 반응기 주위로 선원이 회전을 마치면 단층촬영을 위한 데이터의 획득을 종료한다. 이와 같은 방법으로 계측한 데이터는 특정 형태를 갖지 않으므로 FBP (filtered back projection)와 같은 변환 기반 이미지 복원 방식[14]으로 처리할 수 없으며 이를 위해 전용 가중치 함수 생성 프로그램 및 통계적 기법 [15,16]에 기반한 전용 단면 데이터 분석 프로그램을 사용한다. 이와 같은 방법을 통한 측정은 기존 방법에 비해 훨씬 작은 공간이 필요하므로 공간이 제한적인 대형 공정 진단에 유리하다. 또한 위치 표시 및 제어장치가 부착된 감마선 조사장치를 통한 선원 회전 방식과 공간 제약을 받지 않는 다수의 개별 검출기를 설치하는 방법을 선택함으로써

기존 방법의 기계적 복잡성을 줄일 수 있는 장점이 있다. 이를 통하여 기존의 전산 단층촬영장치로 진단이 불가능한 대형 플랜트에 대한 단면 영상진단을 할 수 있다.

2. 감마선 조사기를 이용한 전산화 단층기법의 적용 방법

Fig. 1은 IAEA 보고서에서 제안된 방법[17]에 대한 개념도이다. 검출기들은 공정장치 주변으로 위치를 지정하여 설치되며 선원은 공정장치 주변으로 설치된 선원 경로를 통하여 이동하게 된다. 선원 및 검출기는 차폐되지 않은 상태로 설치된다.

Fig. 2는 감마선 조사기를 이용한 계측 구성에 대한 개념도이다. 일반적으로 비파괴검사용으로 활용되는 감마선원은 점선원 형태의 구조를 가지며 튜브 형태의 유도관을 통과하도록 설계되어있다.

이와 같은 구조의 선원은 금속성 재질의 선원 캡슐에 보호되며 선원 캡슐에 의해 감마선 방출이 균등하지 않다. Fig. 3은 Monte Carlo 전산모사를 통해 계산된 선원에 대한 방위각의 선속 분포이다.

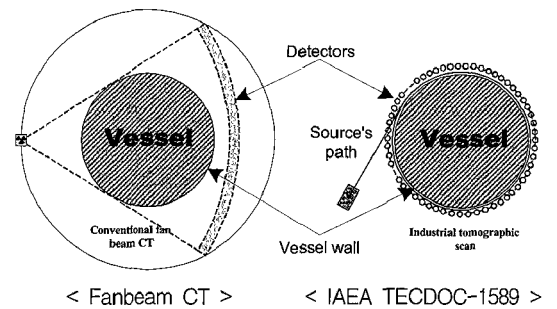


Fig. 1 Conventional fan beam CT geometry and industrial tomographic scan method

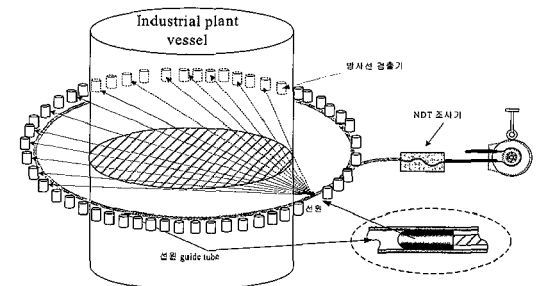


Fig. 2 Concept of scan method by using a gamma source projector

Monte Carlo 전산모사 결과에 의하면 선원 후면부에서 캡슐의 차폐로 인하여 flux가 감소하는 현상이 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 선원의 방출이 방위각에 따라 균일하지 않은 부분이 있는 경우 불균일한 선속을 갖는 범위내의 계측점을 데이터 분석에서 제외시키거나 Monte Carlo 전산모사값을 이용하여 보정한다.

전산화 단층촬영기법에 의한 단면 영상은 방사선 투과측정시 선감쇄계수의 형태로 나타나게 되며, 이를 위해 대상체가 없는 상태의 측정값과 대상체가 있는 상태의 측정 등 두가지의 측정 데이터가 필요하다. 단면 복원은 감쇄율 측정에 의한 다수의 lay-sum을 측정된 후 이미지 복원 프로그램을 통하여 이루어진다. Lay-sum은 선원과 검출기가 이루는 경로를 따라 선감쇄계수에 대한 선적분이라고 정의할 수 있다[14]. Lay-sum 측정은 검출기와 선원 간의 각 거리에 대해 대상체가 있는 경우와 없는 경우의 intensity 측정값의 비에 대하여 자연로그를 취하여 구한다. 여기서 i 번째 빔에 의해 대상체 없이 계측된 값을 I_i^0 , 대상체를 투과하여 계측된 값을 I_i 라 할 때 방사선 투과 방향(u)의 선감쇄계수의 2차원분포함수, 즉 $\mu(x, y)$ 에 대한 선적분을 lay-sum로 정의하며 식(1)과 같이 된다.

$$\ln(I_i^0 / I_i) = \int \mu(x, y) du \quad (1)$$

식(1)이 성립하는 경우는 선원과 검출기의 관계가 Beer-Lambert's law를 따르는 경우로 build up 영향이 없는 좁은 선속의 경우이다[14]. 그러나 본 논문에서와 같은 계측 조건은 검출기의 불림으로 인해 투과방사선의 경로가 넓은 선속되고 전에너지 계측시 build up의 영향이 크게 발생되기 때문에

식(1)을 따른다고 볼 수 없다. 이러한 관계식과 실제 계측과의 차이는 단면 영상복원 결과에 영향을 주게 된다. Build up factor 영향을 줄이기 위한 방법으로는 photopeak만 선별하여 계수하는 방법을 선택할 수 있으며 또한 넓은 선속에 대한 영향은 선속폭을 고려한 가중치 함수 생성방법을 이용하여 줄일 수 있다.

3. 이미지 복원 프로그램

전산화 단층촬영을 위한 이미지 복원 방법은 FBP와 같은 변환 기반의 해석적 방법과 반복적 계산 알고리즘으로 나눌 수 있다[14]. FBP 방법은 팬빔, 콘빔 등 정형화되어 있는 기존의 CT에서 널리 사용되고 있으며 반복적 계산 알고리즘은 PET, SPECT 등의 의료용 emission CT와 이에 대한 보정을 위한 선감쇠 측정용 알고리즘에 주로 사용된다[14]. 본 논문에서와 같은 불균등 스캔 데이터의 경우 FBP와 같은 변환기법 기반의 알고리즘보다 반복 기반의 알고리즘이 유리하며 측정 lay-sum수가 적은 경우에도 반복 기반의 알고리즘이 유리한 것으로 알려져 있다[14]. 반복 기반의 알고리즘은 대수적 기반과 통계적 기반의 알고리즘으로 나누어 지는데 방사선계수값이 적은 경우 통계적 기반의 알고리즘이 유리하다[19]. Lay-sum수에 있어서 현대 CT의 경우 10^6 정도[19]인데 비해 본 논문에서 계측된 lay-sum수는 최대 3,000개 정도이다. 본 논문에서 수행된 Monte Carlo 전산모사 결과에 의하면 ^{137}Cs 20 mCi의 선원을 사용하고 photopeak 에너지만 5초간 계측시 예상되는 최소계수값은 100 미만으로서 10% 이상의 통계적 오차를 갖는데 이는 통계적 기반의 알고리즘이 유리한 경우로 볼 수

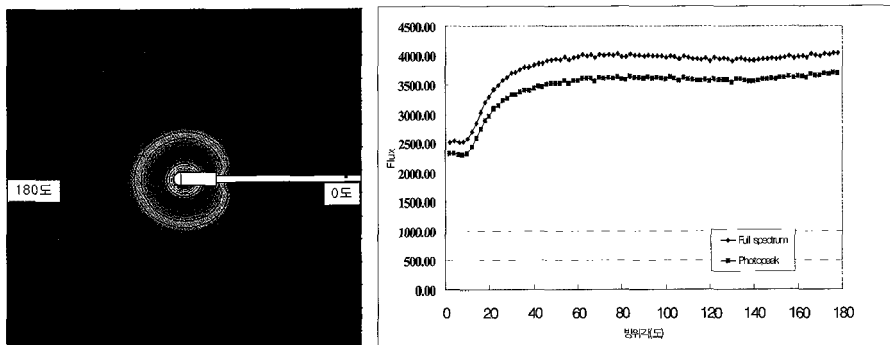


Fig. 3 Radial photon flux distribution of Co-60 source (Monte Carlo Simulation-photons/cm²)

있다[19]. 따라서 본 논문의 계측 구조에 적합한 복원 알고리즘은 통계적 기반의 반복적 계산 알고리즘[15,16]으로 결론지을 수 있다. 반복적 계산 알고리즘을 적용하기 위해서는 가중치 함수의 생성[15]이 필요하며 이를 위해 본 논문에의 계측 구조에 적합한 non-equidistance 데이터 처리가 가능한 가중치 함수 생성프로그램을 작성하였다.

가중치 함수는 반복적 계산 알고리즘에 사용되기 위한 방사선 빔 궤적과 해당 단면영상을 구성하는 화소와의 상호작용을 정의하는 함수라고 볼 수 있다. 2차원 단면 측정의 경우 가중치 함수를 계산하는 일반적인 방법은 측정 빔 궤적과 화소를 구성하는 box의 교차 길이로 구하는 방식 또는 빔 폭과 화소 box의 교차면적 등이 있다[15]. 본 연구에서와 같이 선험형검출기를 콜리메이션 없이 사용하는 경우 검출기에서 측정되는 빔 궤적은 넓은 선속의 형태가 되며 이를 고려한 가중치 함수는 교차 면적에 의한 방법이 좀 더 실제 계측 모델과 가깝다고 할 수 있다. 본 논문에서 적용할 가중치 함수로는 이러한 검출기의 불륨을 고려하여 빔 폭과 화소 box

의 교차 면적에 의한 방법과 더불어 불륨검출기에 대한 영향을 고려한 가중치 함수를 고안하였다. 우선 선원과 검출기의 좌표를 통하여 관심영역 내부의 각 화소에 대하여 빔의 지나간 궤적을 계산한다. Fig. 4와 같이 격자 스캐닝으로써 원을 그리는 영역을 관심영역이라 하며, 관심영역 내부에 있는 점선을 격자(grid)라 정의하였다. 여기까지는 면적에 의한 방법과 동일하다고 볼 수 있다.

다음으로 불륨검출기의 영향을 고려하기 위하여 교차 면적을 구성하는 빔을 Fig. 5와 같이 세분화하였다. 세분화된 경로를 통하는 빔에 대해서 한개의 검출기는 서로 다른 검출효율을 갖는다고 볼 수 있다. 하나의 검출기에서 검출되는 방사선 수는 각각 세부 경로로 들어온 방사선들에 대한 합이 된다.

Fig. 5에서와 같이 넓은 선속을 여러 개의 좁은 선속으로 나누어 생각할 수 있다. 빔의 부분 경로를 1부터 n까지이고 index를 k라 정의하고 각 경로에 대한 검출 효율은 Monte Carlo simulation을 통하여 구하고 이에 대한 검출 확률을 a_k 라 놓는다. 이미지 복원시 표시맵의 화소수를 N개로 설정

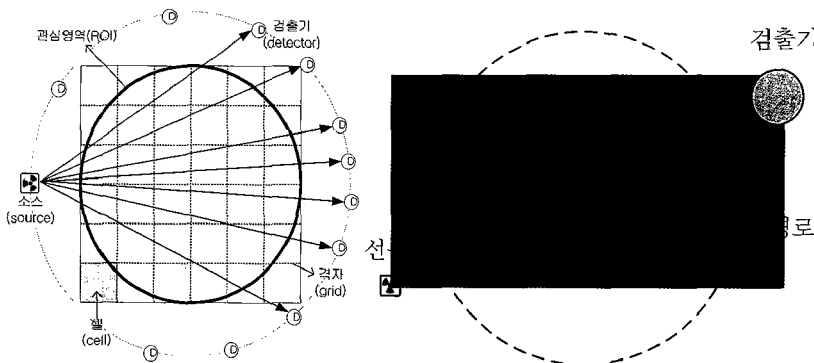


Fig. 4 Weight matrix calculation by beam passing length(left) and area(right)

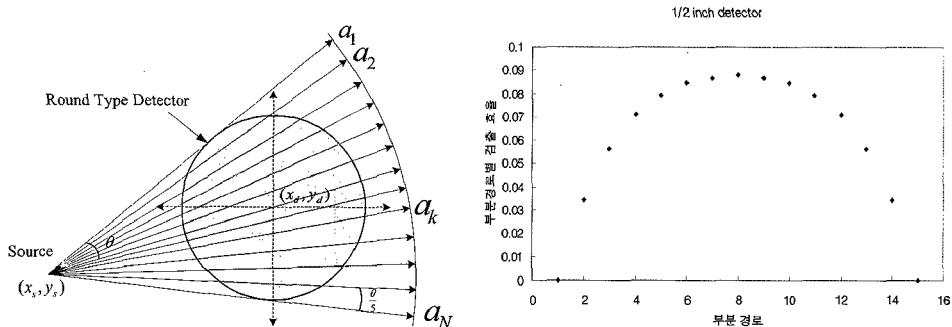


Fig. 5 Weight matrix weighted by detection efficiency from sub-route for volume detector

하고 화소 index를 j 라 정의하면 $j=1$ 에서 N 까지 정의되며 식(1)에서의 정의된 $\mu(x, y)$ 는 μ_j 로 쓸 수 있다. 이때 가중치 함수를 h_j 라 하면 측정된 값과의 관계는 식(2)와 같다.

$$I_i = I_i^0 e^{-\sum_{j=1}^N h_{ij} \mu_j} \quad (2)$$

식(2)를 I_i^0 로 나누고 자연로그를 취하면 식(3)이 된다.

$$\ln \frac{I_i}{I_i^0} = \sum_{j=1}^N h_{ij} \cdot \mu_j \quad (3)$$

가중치 함수는 Fig. 4와 같이 빔과 화소 box와의 교차길이 또는 교차면적 등의 기존방법[15]으로 구할 수 있으나 여기서는 Fig. 5와 같이 불륨검출기에 대한 세부경로를 통한 검출기에 대한 검출확률을 고려한 경우 가중치 함수는 식(4)와 같이 계산된다.

$$h_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n a_{ik}} \left[\sum_{k=1}^n a_{ik} h_{ijk} \right] = \frac{1}{\sum_{k=1}^n a_{ik}} (a_1 h_{i1} + a_2 h_{i2} + a_3 h_{i3} + \dots) \quad (4)$$

여기서 h_{ijk} 는 부분경로 k 에 해당하는 빔과 화소 box와의 교차길이로 정의된다.

관심영역에서 정의된 화소수(N)와 측정값은 일반

적으로 같지 않으므로 일반적인 역행렬을 이용한 방법으로는 해를 구할 수 없으며 식(5)과 같은 반복적 계산 알고리즘을 통해서 이미지 복원이 이루어진다. 반복적 계산 알고리즘에는 ART, SIRT, ILST, ML-EM, DSGA 등 다양한 알고리즘이 존재하며 본 논문에서는 통계적 기반의 반복적 기법중의 하나인 DSGA(diagonally scaled gradient ascent) 알고리즘에 대한 방법을 사용하였다[16,19].

$$\mu_j^{(n+1)} = \mu_j^{(n)} \frac{\sum_{i=1}^M (I_i^0 e^{-\sum_{k=1}^N h_{ik} \mu_j^{(n)}} \cdot h_{ij})}{\sum_{i=1}^M I_i \cdot h_{ij}} \quad (5)$$

4. Monte Carlo 전산모사 결과를 이용한 단면 복원

일반적으로 영상진단기법을 이용한 단면 측정에 있어서 하나의 선원 위치에서 측정되는 검출기의 개수가 결과물의 해상도를 결정하는 주된 요인이 된다. 따라서 가능한 많은 검출기를 사용하는 것이 좋은 결과물을 줄 수 있으나 현실적으로 사용되는 검출기 수에 따라 비용이 증가함으로 현장 여건에 따라 적절한 선택이 필요하다. 따라서 검출기 수 및 계측 조건에 대해 예상되는 결과물의 해상도에 예측이 필요하며 이는 Monte Carlo 전산모사를 통하여 얻을 수 있다. Fig. 6은 78 cm 외경 철제용기

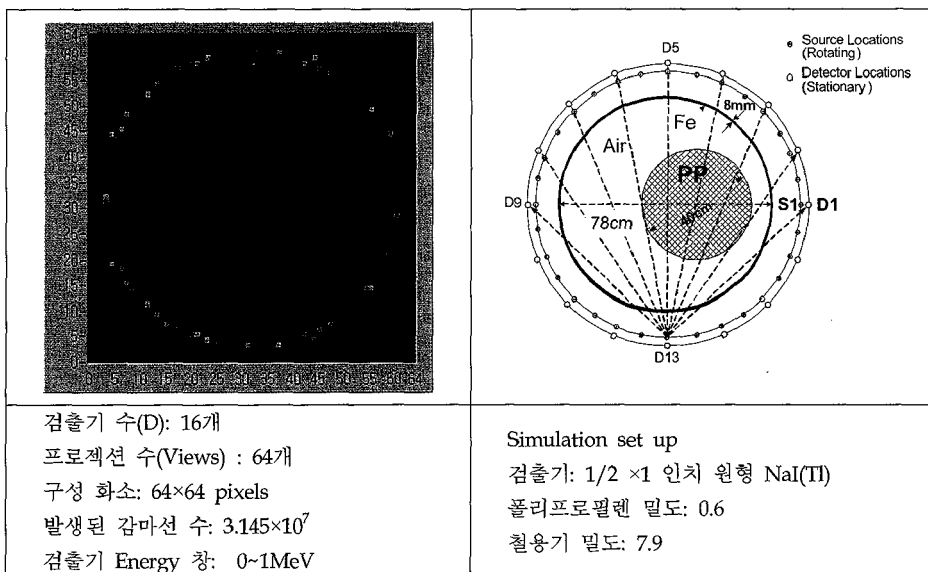


Fig. 6 Image reconstruction from Monte Carlo simulation data

내에 직경 40 cm의 폴리프로필렌이 포함된 구조에 대해 Monte Carlo 전산모사를 수행후 단면 복원을 실시한 결과이다. 선원은 ^{137}Cs 을 가정하였으며 1 mCi에서 1초간의 방사선 발생수를 가정하여 3.145×10^7 개의 감마선을 발생시켰다.

일반적으로 석유화학공정은 스테인레스 스틸 재질의 용기에 탄화수소계열의 물질이 포함된 경우가 많으며 Fig. 6의 철제용기 및 폴리프로필렌 팬텀을 이를 고려한 것이다. Fig. 7의 팬텀은 외경 78 cm 크기의 철제용기 내에 서로 다른 밀도 및 크기의 원주형 물체가 있는 형태로 되어있다. 이는 여러 계측 조건에 대한 해상도 및 콘트라스트를 예측하기 위한 것이다. 계측 조건은 검출기 수의 변화, 프로젝션 수 변화를 주었으며 각각에 대해 Monte Carlo simulation을 수행한 후 단면 이미지 복원을 하였다.

Fig. 8에서 보면 계측기 수 및 프로젝션 수의 증가에 따라 이미지가 향상되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 FBP와 같은 알고리즘의 경우 프로젝션

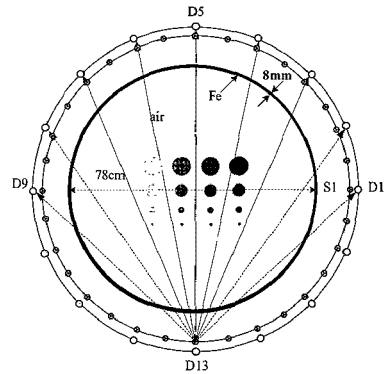


Fig. 7 Simulation set up

<p>계측수: 16D×32Views 구성 화소: 64×64 pixels 감마선 발생수: 3.145×10^7</p>	<p>계측수: 32D×32Views 구성 화소: 64×64 pixels 감마선 발생수: 3.145×10^7</p>
<p>계측수: 32D×64Views 구성 화소: 64×64 pixels 감마선 발생수: 3.145×10^7</p>	<p>계측수: 64D×64Views 구성 화소: 64×64 pixels 감마선 발생수: 3.145×10^7</p>

Fig. 8 Image reconstruction results from the different detector number(D) and projection number (full energy)

당 검출수와 프로젝션 수에서 어느 한쪽만 증가하는 경우 계측 수의 증가에도 불구하고 이미지의 향상이 특별히 증가하지 않는 경향이 있다[14]. Fig. 9는 10^9 개의 662 keV의 감마선 방출에 대해 Monte Carlo simulation 결과 중 ^{137}Cs 에 대해 photopeak에 대해서 이미지 복원을 한 결과(우)와 전에너지에 대한 결과(좌)를 비교한 것이다. Fig. 10은 위의 계측조건에 대해서 S1위치에서의 각 검출기에 검출된 방사선 수 및 이를 백분율로 표시한 푸아송 분포에 의한 통계적 상대오차이다(Fig 7, 9 및 식 (6) 참조).

$$\text{relative error(\%)} = 100 \times \frac{1}{\sqrt{\text{radiation counts}}} \quad (6)$$

적은 통계적 오차를 갖는 데이터를 확보하기 위해서는 전산모사의 경우 많은 photon emission을 발생시키는 것이 유리하나 계산시간이 증가되기 때문에 전에너지 계측에 대한 전산모사의 경우 3.145×10^7 개, photopeak 측정에 대한 전산모사의 경우 10^9 개로 한정하여 감마선 발생을 시켜 Monte Carlo 전산모사를 실시하였다.

Fig.10에서 64D×64view에 대한 전산모사 결과의 경우 “photopeak 계수/전에너지 계수값”은 700/20,000에서 15/3,000에서 정도이다. 이를 통해 계산된 build up factor는 28~200 정도이며 검출기의 입사되는 투과방사선은 대부분 산란방사선임을 알 수 있다. 가중치 함수 모델과 실제 방사선투과시 pixel과의 상호작용의 차이가 생길수록 이미지의 저하가 발생된다. 이 차이의 주요 원인 중의 하

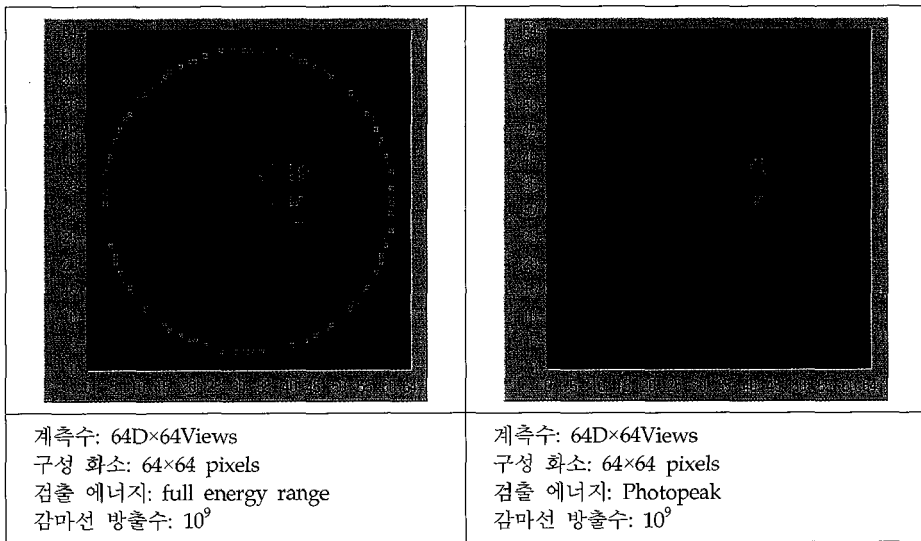


Fig. 9 Comparison of image reconstruction results of full energy range and photopeak

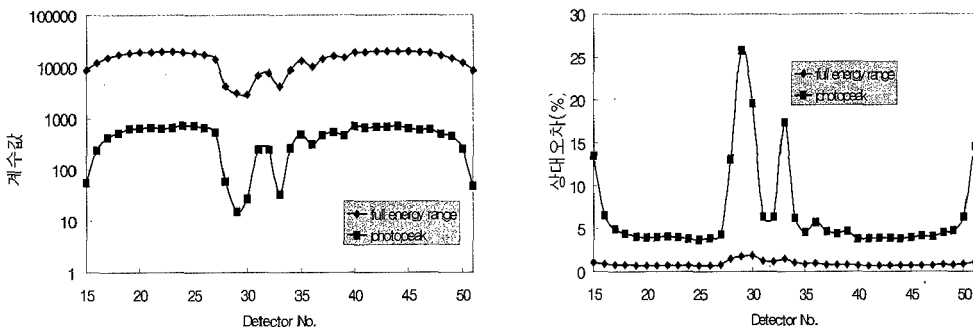


Fig. 10 Monte Carlo Simulation results and their relative errors (Counts recorded at each detector and a source at position S1 with 10^9 photon emissions)

나가 build up에 의한 영향이다. 전에너지 계측의 경우 높은 계수값으로 인해 낮은 통계오차를 갖고 photopeak 계측의 경우 낮은 계수값으로 인해 높은 통계오차가 생기지만 build up에 의한 영향을 배제할 수 있기 때문에 복원 결과의 향상을 기대할 수 있다. Fig. 9~11에서 photopeak 에너지만을 선별하여 계측한 경우가 전에너지에 대해 계측한 경우에 비해 높은 통계적 오차에도 불구하고 보다 참값에 근접한 결과를 보이고 있다. 이를 통하여 photopeak 에너지 선별계수와 검출기 불륨과 빔 경로에 대한 효율이 보정된 가중치 합수기법을 적용한 경우 복원 결과의 향상이 됨을 알 수 있다.

5. Lab. 규모 측정 실험

Fig. 6의 Monte Carlo 전산모사와 동일한 구조를 갖도록 계측시스템을 구성하여 Fig. 12와 같이 16개의 검출기 및 외경 78 cm의 용기를 이용하여 단면 측정 실험을 수행하였다. 방사선 검출기는

1/2 inch 직경과 1 inch 길이를 갖는 원통형의 NaI(Tl)를 사용하였으며 전에너지에 대해 계측하였다. 16개 검출기 중 대상체를 통과하는 경로를 가진 검출기는 한개의 view당 약 8~10개 정도가 된다. 전에너지 계수의 경우 Monte Carlo 전산모사 결과에 의하면 662 keV의 광자 10^9 개(^{137}Cs , 30mCi, 1초간) 발생시 전체 검출기중 최소계측값은 3,000 counts 정도이며 photopeak 계측시 10~20 counts이다. 따라서 Lab 규모 측정 실험에서 최소 1% 미만의 상대오차를 갖는 데이터를 확보하기 위해서는 최소 10,000 counts 값의 측정이 필요하다. 이러한 계측조건을 확보하기 위하여 ^{137}Cs 20mCi 선원을 선택하여 한개의 view당 5초간 계수하였다. 이때 방출되는 photon수는 약 3.145×10^9 개로 예상되는 최소계수값은 10,000 counts (3000count/초 \times (20 mCi/30 mCi) \times 5초)이다. Monte Carlo simulation(Fig. 6)에서 사용된 개수보다 약 100배 정도이며 전체 측정 시간은 선원 이동 시간을 포함하여 10분 정도이다.

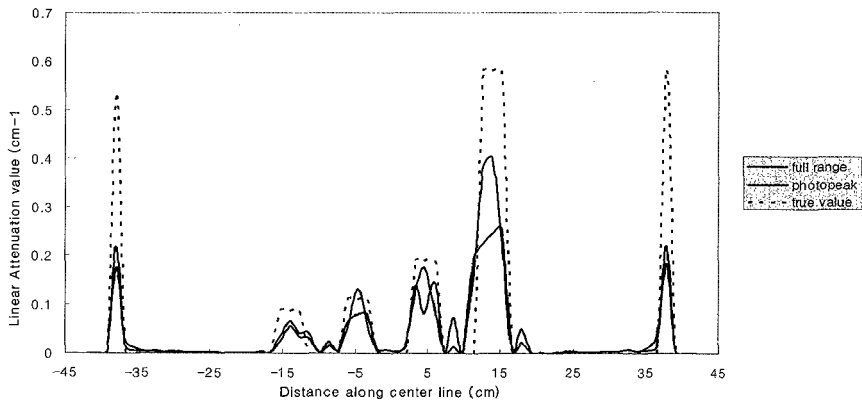
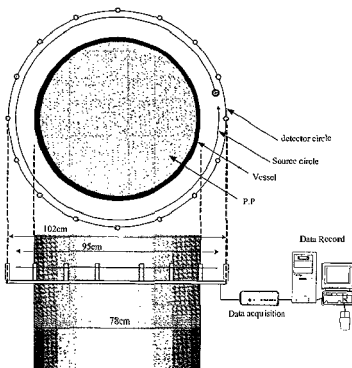


Fig. 11 Cross sectional value for image of Fig. 9 along the center line



Cs-137, 20 mCi, (7.5mm Φ \times 10mm length)
 Detector : NaI(Tl) (0.5 inch Φ , 1 inch length)
 Detector 개수: 16개
 계측시간 : 5초

Fig. 12 Lab scale experimental setup

Fig. 13의 결과는 Fig. 6에 도시된 Monte Carlo simulation 모형과 동일한 구조를 갖는 팬텀에 대한 실험결과이다. 격자 스캔으로 vessel 내에 위치한 원형 폴리프로필렌 팬텀의 윤곽을 성공적으로 구별할 수 있음을 보여준다. 이미지 복원에 사용된 pixel 수는 64×64 정도이며, ROI는 85 cm 정도이다.

Fig. 14는 빈 용기의 경우, vessel안에 폴리프로필렌 grain을 균일하게 채운 상태, 불균일하게 폴리프로필렌을 채운 상태에 대한 단면 측정 결과이다. 고정상 반응기 내부에 문제가 발생한 경우, 내부 충전물의 분포에 변화가 발생할 수 있으며 Fig. 14는 이러한 현상을 모사하기 위해 용기내에 불균일 분포

상태를 만든 후 측정한 결과이다. Fig. 14는 현재의 계측조건에서 용기 내부의 불균일 분포 등에 대한 정보가 충분히 얻어질 수 있음을 보여주고 있다.

6. 결론

철제용기에 포함된 두개의 다른 형태의 팬텀들에 대해 Monte Carlo 전산모사를 수행하였으며 첫번째 팬텀 모델에 대해 동일 구조에 대한 Lab규모 측정 실험을 수행하였다. 측정 실험을 통하여 Monte Carlo 전산모사의 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 두번째 팬텀 모델에 대한 전산모

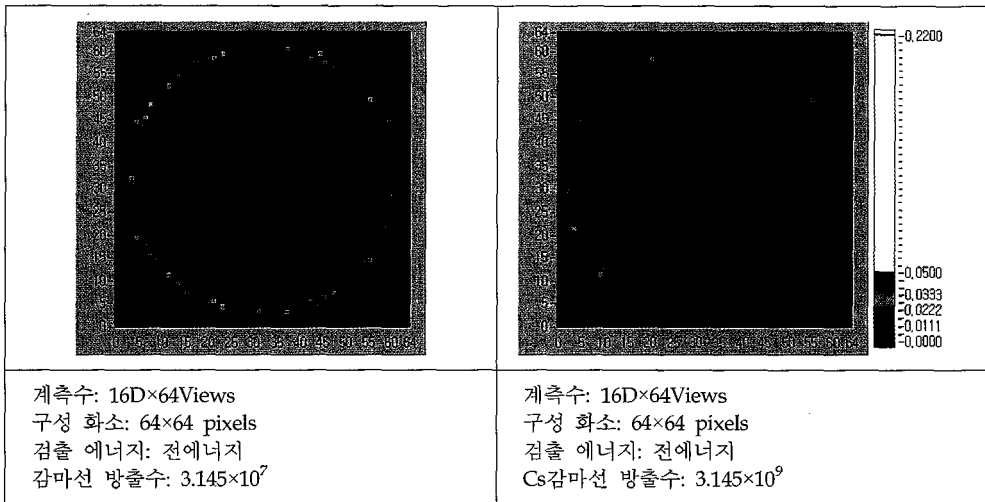


Fig. 13 Image reconstruction result from simulation data (left) and experimental data (right) for a Polypropylene phantom inside the vessel

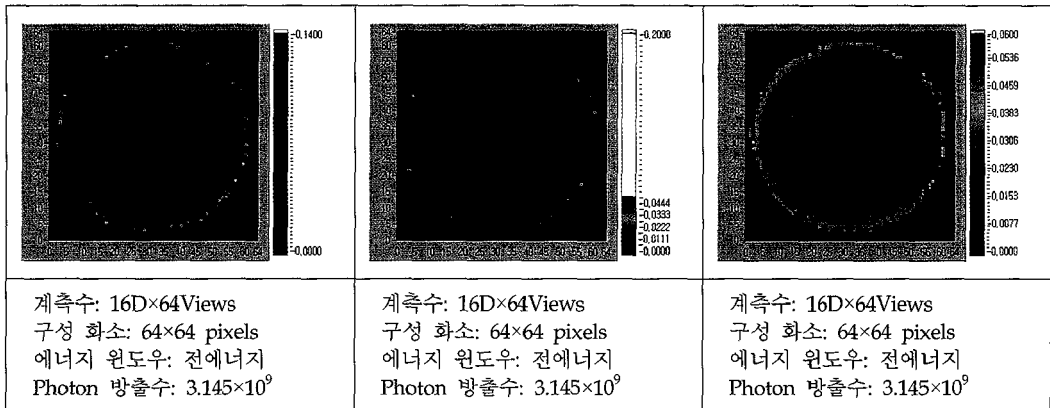


Fig. 14 Image reconstruction result from experimental data for the vessels which are empty(left), uniformly filled with PP(middle), non-uniformly filled with PP(right)n data (left) and experimental data (right) for a Polypropylene phantom inside the vessel

사 데이터에 대한 이미지 복원 결과를 통하여 photopeak 선별계수를 하고 검출기의 불림에 대한 영향을 고려한 가중치 함수기법을 적용하는 것이 전에너지 계측에 비해 좋은 결과를 주는 것을 알 수 있었다. 이는 본 연구에서 소개된 계측 구조를 갖는 시스템을 설계할 경우 photofaction(전에너지 면적 대비 photon peak 면적)이 큰 검출기가 효과적임을 의미한다. 두번째 팬텀 모델에 대한 실증 실험은 검출기 추가 구입의 필요 등의 현실적 문제로 인하여 수행되지 못했으나 첫번째 팬텀 모델에 대한 실증 실험 결과를 보아 Monte Carlo결과와 유사한 결과를 줄 것으로 사료된다. 일반적으로 산업공정장치는 설계 데이터 및 공정 매질에 대한 정보가 존재하며 이에 대해 가용한 검출기 종류 및 수량을 적용하여 Monte Carlo 전산모사를 수행하면 각 조건에서의 해상도 및 콘트라스트에 대한 예측이 가능하다. 이러한 전산모사의 결과를 토대로 현장 엔지니어가 요구하는 해상도를 가질 수 있도록 필요한 검출기 종류를 선정하거나 수량을 증감하는 등의 최소 비용에 대한 최적계측 구성을 선택할 수 있다. 본 논문에서 제안된 전산화 단층촬영 기법은 충전물의 유동이 적은 고정상 반응기, regenerated fluid catalyst cracking unit에서의 riser에 대한 refractory 내구성 진단, riser 및 regenerator 내의 촉매분포측정 등에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 내부 유동을 갖는 공정 반응기인 경우에도 평균적인 밀도 분포를 통하여 가동 상태의 정보를 얻을 수 있다. 예를 들어 버블 컬럼 등에서의 기체상 분포의 차이는 단면 밀도의 차이의 형태로 나타나지거나 밀도가 다른 다중상 유체분포가 있는 공정장치에서의 단면 밀도 측정을 통하여 각 상의 존재 비율을 계산할 수 있다. 이와 같은 가동 중 정보를 통하여 운전조건의 최적화와 이를 통한 설비효율의 향상을 이룰 수 있다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 방사선기술개발사업으로 지원받았습니다(연구과제 관리코드: 2010-005240).

참고문헌

[1] 정성희, 김종범, 진준하, "감마선을 이용한 가

- 동중 증류탑 진단 실험", 공업화학회지, 제 13 권 1호, pp. 19-24, (2002)
- [2] 김진섭, 정성희, 김종범, "밀봉감마선원(^{137}Cs)을 이용한 석유화학산업의 유체 이송배관내 가동중 이상진단기술", 공업화학회지, 제 16권 6호, pp. 794-799, (2005)
- [3] Jin-Seop Kim, Sung-Hee Jung and Jong-Bum Kim, "In-service identification of the heterogeneous zone in petrochemical pipelines by using sealed gamma-ray sources (^{60}Co , ^{137}Cs)," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 26, No. 3, pp. 169-173, (2006)
- [4] 김진섭, 정성희, 김종범, 김재호, 이나영, "투과 감마선 계측신호의 cross correlation기법 적용에 의한 다중상 유체의 유량 측정", 방사선방어학회지, 제 33권 1호, pp. 13-19, (2008)
- [5] 정성희, 진준하, 이면주, "방사성동위원소 추적자를 이용한 침적형 고정 미생물 반응조 진단", 대한환경공학회, 제 22권 6호, pp. 1149-1158, (2000)
- [6] 정성희, 김종범, 진준하, "협기성 슬러지 소하조의 청소후 방사성 추적자를 이용한 수리학적 성능 진단", 대한환경공학회, 제 23권 10호, pp. 1641-1648, (2001)
- [7] 김진섭, 정성희, 김종범, "방사성동위원소 추적자를 이용한 폐수처리시설의 응집조에서 유입수의 체류시간분포 분석", 비파괴검사학회지, 제 26권 1호, pp. 1-6, (2006)
- [8] Jongbum Kim, Sunghee Jung and Jinsup Kim, "A study on industrial gamma ray CT with a single source-detector pair," Nuclear Engineering and Technology, Vol. 38 No. 4, (2006)
- [9] Jongbum Kim, Sunghee Jung, Jinseop Kim, Nayoung Lee and Gyuseong Cho, "Study on the influence of the scattered radiation in the industrial transmission CT," Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 5, pp. 371-374, (2008)
- [10] S. Legoupil, "An experimental single photon emission computed tomograph method for dynamic 2D fluid flow analysis," Applied Radiation and Isotopes, Vol. 48, pp. 1507-

- 1514, (1997)
- [11] C. Boyer and B. Fanget, "Measurement of liquid flow distribution in trickle bed reactor of large diameter with a new gamma-ray tomographic system," *Chemical Engineering Science* Vol. 57, pp. 1079-1089, (2002)
- [12] G. A. Johansen, "Nuclear tomography methods in industry," *Nuclear Physics A* 752, pp. 696c - 705c, (2005)
- [13] U. Hampel, D. Hoppe, A. Bieberle and C. Zippe, "Measurement of fluid distributions in a rotating fluid coupling using high resolution gamma ray tomography," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130/ 091402-1~091402-8, (2008)
- [14] Avinash C. Kak and Malcolm Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, Electronic Copy IEEE Press, (1999)
- [15] Jeffrey A. Fessler, *Iterative Methods for Image Reconstruction*, ISBI Tutorial May 14, (2008)
- [16] Kenneth Lange, Mark Bahn and Roderick Little, "Theoretical study of some maximum likelihood algorithms for emission and transmission tomography," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. MI-6 No. 2, (1987)
- [17] IAEA, *Industrial Gamma Process Tomography*, TECDOC-1589, (2008)
- [18] Country Report from Indonesia, IAEA RCA Progress Review Meeting, Korea, (2008)
- [19] Ed. Sonka and Milan, *Handbook of Medical Imaging, Volume 2, Medical Image Processing and Analysis*, SPIE Press, (2001)