

## EM기반의 감마 CT 영상복원을 위한 가중치 함수 비교분석

### Comparative Analysis of the Weight Functions for the Reconstruction of a Gamma-ray CT based on the EM Technique

이나영\*<sup>†</sup>, 정성희\*, 김종범\*, 김진섭\*, 김재호\*

Nayoung Lee\*<sup>†</sup>, Sunghee Jung, Jongbum Kim, Jinsup Kim and Jaeho Kim

초 록 본 논문에서는 감마선을 이용하여 석유화학 공정설비 내부의 단면영상을 복원하였다. 감마 CT 영상 복원을 위해 5 mm $\varnothing$  감마선을 팬텀에 조사하여 NaI(Tl) 섬광검출기로 스캔하였으며 반복적인 영상복원 방법인 EM 기법으로 가중치 함수를 비교하였다. 감마 CT 영상이 정확히 복원되었는지 확인하기 위하여 3가지 가중치 함수에 대해 히스토그램의 명암값 분포를 비교하였다. 실험 결과를 통해 빔 면적에 의한 가중치 함수로 복원할 경우, 원 영상에 가장 가깝게 복원되는 것을 확인하였다.

주요용어: 산업용 감마 CT, 대형 공정진단 영상복원, EM알고리즘, 가중치 함수, 히스토그램

**Abstract** In this paper, we reconstructed the cross-sectional images of two phantoms simulating a petrochemical process from gamma radiation measurements. Three different weight functions for EM image reconstruction algorithm were built and compared with histograms representing the variance of the homogeneity of the phantom material. The radiation source, <sup>137</sup>Cs, collimated by a lead with 5 mm diameter aperture and the measurement was made with a lead shielded linch NaI detector. As a result, the method taking into account the beam area in each pixel for a weight function showed the best resolution among the three methods.

**Keywords:** Industrial Gamma-ray CT, Large Plant Diagnosis Image Reconstruction, EM(expectation maximization) Algorithm, Weight Function, Histogram

#### 1. 서론

X-선 CT(computed tomography)기술은 많은 계산량을 수행하는 방식으로 개발되어 왔으며, 1970 년대에 개발된 이래 의료분야에서 주로 사용되어 왔다. X-선은 제동복사선에 의한 연속 스펙트럼으로 가속장치의 최대 에너지 포인트에 비해 유효 에너지가 적으며 가속방법에 따라 수 MeV영역 대 까지 X-선 발생이 가능하다. 그러나 제동복사선에 의한 연속스펙트럼으로 가속장치의 최대 에너지

포인트에 비해 유효 에너지가 적다. 이에 비하여 감마선은 단일 에너지를 방출하기 때문에 같은 1 MeV 에너지라 하더라도 유효한 에너지가 더 높다고 할 수 있다. 감마선원은 Ir-192(0.316 MeV), Cs-137(0.662 MeV), Co-60(1.17, 1.33 MeV) 등 다양한 에너지대의 산업적으로 활용가능한 방사성동위원소가 존재하며 캡슐을 포함한 선원의 크기가 수 mm를 넘지 않는다. 방사성동위원소와 유효에너지가 비슷한 X-선 발생장치를 이용할 경우, 시스템의 대형화 및 비용의 상승을 가져온다. 따라서 방사성

동위원소를 감마선 방출체로 사용하는 경우, 고에너지 영역을 활용한 진단기술에서 X-선에 비해 상대적인 많은 장점이 있다고 사료된다. 이미 산업현장에서는 대형배관, 반응기, 컬럼 등의 경우, 감마스캐닝 등 감마선을 이용한 농도계측(densitometry) 기술이 널리 활용되고 있는바 본 논문에서는 해당 기술을 CT에 적용하여 대형 산업공정 내부의 단면 영상을 복원하는데 목적이 있다. 산업공정 설비는 다양하게 존재하나 우리나라의 주요 장치 산업인 석유화학 시설을 주 대상으로 선정하였다.

물체의 단면을 영상화하는 CT는 투영데이터(projection data) 수집과정과 영상복원(image reconstruction) 과정으로 이루어진다. 영상복원이란 시간의 차이를 가지고 있는 모든 연속된 투과영상으로부터 보고자하는 내부단면을 구성하는 모든 처리 과정을 말한다.

영상복원 알고리즘은 크게 변환(transform)기반의 방법과 반복적인(iterative)계산 방법으로 구분할 수 있다[3,8]. 변환기반의 방법에는 대표적으로 FT(Fourier transform), BP(back projection), FBP(filtered back projection) 등이 있다[7]. FT는 central slice 이론을 통하여 극 좌표계로 표현되므로 극 좌표계에서 직각 좌표계로 변환 시 보간(interpolation) 과정을 필요로 한다. 이로 인해 복원된 영상은 열화(degradation)를 수반한다. BP는 투영데이터를 얻은 방향 쪽으로 대상체가 있는 영역 내의 모든 픽셀에 투영데이터 값을 할당하는 방법이다. 여러 각도의 투영데이터가 있을 경우, 각 방향으로 BP를 수행하면서 픽셀 값을 더해 나가는 방법이다. 따라서 BP의 투영각(view) 수가 많을수록 영상의 질은 향상되지만, 투영각 수가 무한히 많아져도 원 영상으로 복원되기 어렵다. FBP는 계측데이터(measurement data)가 많은 경우, 반복적인 영상복원 방법보다 영상복원 시간이 단축되어 효율적이다. 그러나 계측데이터가 적은 경우, 간섭현상(artifact)이 발생하는 문제점이 있다. 반복적인 계산 방법에는 대표적으로 ART(algebraic reconstruction techniques), SIRT(simultaneous iterative reconstructive technique), EM(expectation maximization) 등이 있다[3]. ART는 투영법의 하나로 매 반복 단계마다 연립방정식을 이루는 각 평면상에 순차적인 투영을 통하여 모델변수를 갱신하는 방법이다. SIRT는 초기치의 한 점에서 모든 평면상에

투영하여 투영벡터들의 평균을 다음 단계의 초기치로 활용한다. 이러한 과정을 반복하면서 해를 구하는 과정으로 계측데이터가 적어도 간섭현상이 발생하지 않으나 계측데이터가 많을수록 연산시간이 커지는 문제점이 있다. EM알고리즘은 최소 대가함수(minimum cost function)를 만족하는 매개변수들의 최대 가능성(maximum likelihood)을 추정한다. 이는 정보가 직접적으로 얻어지지 않고 다른 관측 가능한 변수를 통해 획득할 수 있으므로, 관심의 대상이 되는 정보를 관측 가능한 변수의 공간을 통하여 추정하는 통계적 방법이다[9]. 여기서 매개변수들은 관측된 값들에서 다수 대 일(many-to-one) 대응관계의 분포를 갖는다. EM은 관측 가능한 변수의 공간에 일 대 일 대응으로 정보가 관계되어 있지 않더라도 원하는 정보를 추정할 수 있는 장점이 있다[9]. 따라서 본 논문에서는 감마 CT 영상복원을 위하여 반복적인 영상복원 방법 중 EM기법으로 가중치 함수를 비교분석한다. 감마 CT 영상이 정확히 복원되었는지 확인하기 위하여, 복원된 영상의 히스토그램(histogram) 분포를 비교하였다. 3가지 가중치 함수의 명암값 분포를 통해 빔 통과 면적에 의한 가중치 함수로 복원할 경우, 원 영상에 가장 가깝게 복원되는 것을 확인하였다.

## 2. 반복적인 영상복원 방법

일반적으로 의료영상에서는 많은 수의 계측데이터를 효율적으로 처리할 수 있는 변환기반의 방법이 사용된다. 그러나 변환기반의 방법을 실 규모의 현장에 적용할 경우, 공정설비에 부착된 파이프라인(pipe line), 플랫폼(platform), 제어장치 등으로 인해 계측이 불가능한 사각 지역이 발생할 수 있다[2]. 따라서 본 논문에서는 제한된 광선 합산법(ray-sum) 측정치와 불규칙한 데이터에 효과 있는 반복적인 계산에 의한 영상복원 방법을 사용하였다.

반복적인 계산에 의한 영상복원 방법은 Fig. 1과 같다. 먼저, 계측 대상체에 투과된 감마선의 광선 합산법을 측정된 후, 관심영역을 설정한다. 그리고 가중치 함수를 생성하여 선형방정식을 반복적으로 계산한다.

반복적인 영상복원 방법에는 대표적으로 ART, SIRT, EM 등이 있다[3].

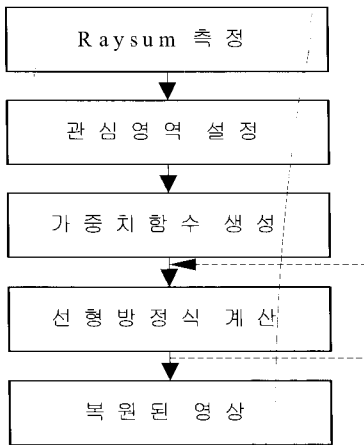


Fig. 1 Flow chart of the iterative reconstruction

ART는 계측된 투영데이터로부터 감쇠(attenuation) 계수를 표시하는 이미지맵의 픽셀을 변수로 설정한 후, 선형방정식으로 풀어나가는 방법이다.

검출기(detector)가 용기 외부에  $M$ 개 존재하고 내부 단면을  $N$ 개의 픽셀로 나누었을 경우,  $h_{ij}$ 는 가중치를 나타내며  $f_j$ 는 감쇠계수를 나타낸다. 그리고  $g_i$ 를 각 검출기에서 계측된 방사선 계수값이라 가정했을 때, 이들 간의 관계는 식 (1)과 같이 된다[1,7].

식 (1)에서  $i$ 는 1부터  $M$ ,  $j$ 는 1부터  $N$ 이다.

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1j} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{i1} & h_{i2} & h_{i3} & \dots & h_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

SIRT는 주어진 영역을 통과하는 모든 광선(ray)에 대한 보정값을 동시에 계산한다. 그리고 모든 영역에 대한 보정값이 계산되면 이를 각 영역에 대해 일시에 보정한다. 이러한 과정을 반복하여 오차를 줄여나가는 방법이다. 계측데이터가 적어도 간섭현상이 발생하지 않지만, 계측데이터가 많을수록 연산 시간이 커지는 문제점이 있다.

EM알고리즘이란, 숨겨진 정보를 포함하고 있는 문제에서 숨겨진 정보의 최적해를 찾아내는데

매우 유용한 알고리즘이다. 최상의 해결법으로 숨겨진 정보를 일단 추정(expectation)하여 얻어진 해로부터 이 추정치를 개선하기위해서 다시 이것을 이용하는 절차(maximization)를 해가 수렴할 때까지 번갈아 행하는 방법이다[12].

### 3. 가중치 함수

본 논문에서는 EM기반의 감마 CT 영상복원을 위하여 가중치 함수를 비교분석한다. 다양한 가중치 함수 중에서 가장 많이 사용되는 3가지 방법으로 감마 스캔을 통해 계측된 데이터의 시노그램과 시물레이션 영상의 시노그램을 비교하였다. 감마 CT 영상이 정확히 복원되었는지 확인하기 위해 복원된 영상의 히스토그램 분포를 비교분석하였다.

#### 3.1. 빔 통과 여부에 따른 가중치 함수

빔 통과 여부에 따른 가중치 함수는 빔이 통과했을 때만 가중치를 부여하는 방법으로 가장 간단하고 쉬운 방법이다. 가중치 함수( $h_{ij}$ )에서  $i$ 번째 빔이  $j$ 번째 픽셀을 통과하면 1, 그렇지 않으면 0으로 설정한다.

Fig. 2는 빔이 통과했을 때만 가중치를 1로 설정하는 방법을 보여준다.

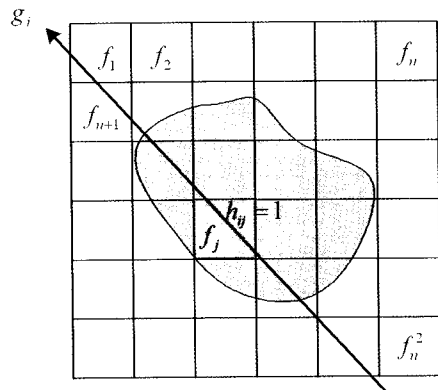


Fig. 2 Weight matrix value(0/1) determination by beam passage

Fig. 3은 물-기름-공기층을 가진 팬텀(phantom)을 보여준다.

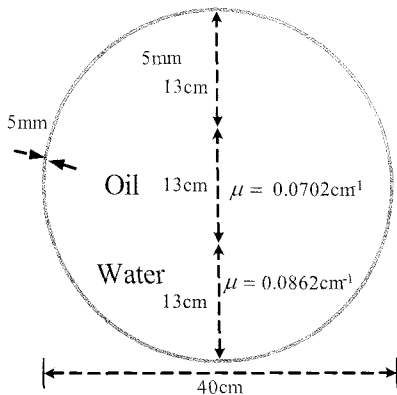


Fig. 3 Design of air/oil/water phantom

실험에서는 <sup>137</sup>Cs선원(20 mCi, gamma-energy: 0.662 Mev)과 5mm ∅ 구경, 45mm 깊이의 시준기(collimator)에 장착된 2×2 inch NaI(Tl) 섬광검출기(Eberline)를 사용하여 Table 1의 계측조건에서 Fig. 3의 팬텀이 잘 복원되는지 확인하기 위해 3가지 가중치 함수를 적용하여 복원된 영상을 비교하였다.

Table 1 Measurement conditions of the air/oil/water phantom

Gamma-ray source	<sup>137</sup> Cs (0.662 keV)
Threshold	500 keV
Maximum count	8000
Detector collimator aperture	10mm
Total number of ray-sums	1632 (32K × 51K)
Radiation detector	1 inch NaI(Tl)

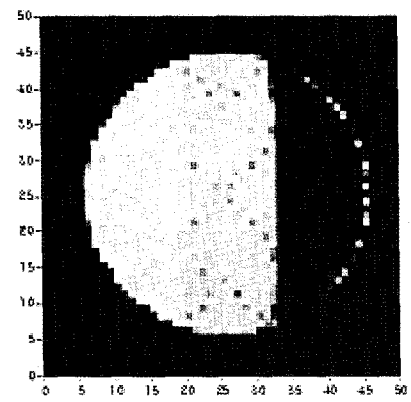


Fig. 4 Reconstructed image by beam passage weight function

Fig. 4는 Table 1의 계측조건에서 Fig. 3의 팬텀에 대해 빔이 통과했을 때만 가중치를 1로 설정하여 복원한 영상을 보여준다. 빔 통과 여부에 따른 가중치 함수는 빔 폭이 작고 영상 크기가 클 때, 적용 가능하다. 그러나 빔 폭이 크거나 영상 크기가 작으면 정량화 오차(quantification error)가 생겨 계단현상(aliasing)이 발생한다.

### 3.2. 빔 통과 길이기반의 가중치 함수

평행 빔(parallel beam)으로 Fig. 5에서 각  $\theta$ 만큼 회전한 후 원점으로부터  $s$  거리에서  $u$  방향으로 선적분한 값은 식 (2)와 같이 되며 이를 광선 합산법이라 부른다[7].

식 (2)에서  $\mu(x,y)$ 는 좌표지점에서의 선형 감쇠 계수(linear attenuation coefficient)를 나타낸다.

$$p(s,\theta) = \int \mu(x,y) du \tag{2}$$

그리고 이 식에서  $p(s,\theta)$ 는 식 (3)과 같이 직선으로 정의할 수 있다.

$$y = x \cdot \tan\theta + s \cdot \sec\theta \tag{3}$$

Fig. 5는 평행 빔 CT의 광선 합산법을 보여준다. 영상을 격자 형태로 균등 분할하여 가로축의 좌표를  $i$ , 세로축의 좌표를  $j$ 라 가정했을 때, 한 픽셀은 식 (4)와 같이 4개의 직선으로 표현할 수 있다. 식 (4)에서  $\delta$ 는 영상의 격자 간격을 나타내며,  $R$ 은 영상의 가로와 세로 길이를 나타낸다.

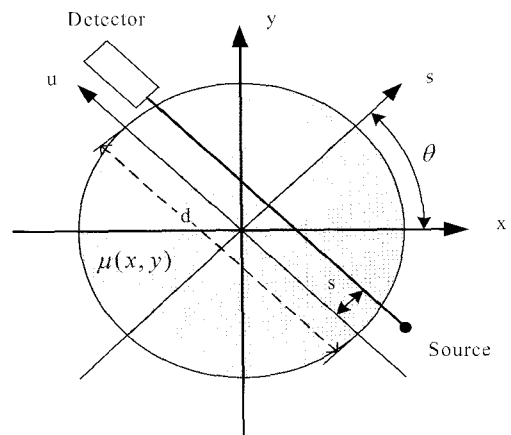


Fig. 5 Raysum of parallel beam CT

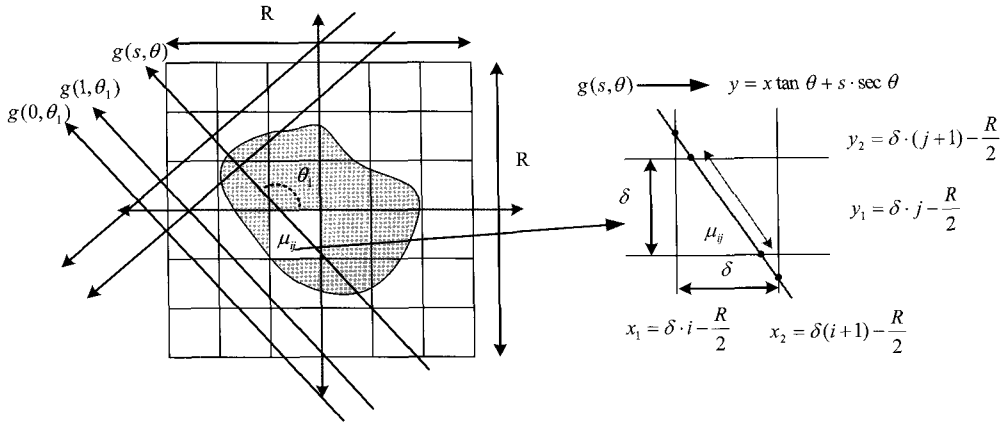


Fig. 6 Weight matrix determination on the basis of beam path-length in a pixel

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \delta \cdot j - \frac{R}{2} \\
 y_2 &= \delta \cdot (j+1) - \frac{R}{2} \\
 x_1 &= \delta \cdot i - \frac{R}{2} \\
 x_2 &= \delta \cdot (i+1) - \frac{R}{2}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Fig. 6은 한 픽셀을 구성하는 4개의 직선에 빔이 통과한 경우를 보여준다. Fig. 6과같이 빔이 한 픽셀을 구성하는 직선 4개 사이를 통과하였을 경우, 통과한 길이에 가중치를 부여한다.

Fig. 7은 Table 1의 계측조건에서 Fig. 3의 팬텀에 대해 빔이 통과했을 경우, 통과한 길이에 가중치를 부여하여 복원한 영상을 보여준다. 빔 통과 여부에 따른 가중치 함수에 비해 간섭현상이 적으며 빔의 폭이 작을수록 정확한 계측 결과를 가져온다.

### 3.3. 빔 통과 면적기반의 가중치 함수

람베르트(Lambert) 법칙에 따르는 감마선의 투과 계적을 만들기 위하여 시준기 구경은 작고 깊어야 한다. 이 경우, 산란이 최소화되지만 계측된 방사선 값은 줄어든다. 시준기의 구경을 5 mm라 가정했을 때, 빔의 너비도 5 mm로 볼 수 있다. 따라서 빔 계적이 일정 면적을 갖고 물체를 투과한다고 했을 때, 해당 픽셀을 통과한 면적에 가중치 함수를 적용하는 방법이다.

Fig. 8과 같이 일정한 빔 계적으로 물체에 투과 되었을 때, 해당 픽셀을 통과한 면적에 가중치를 부여한다.

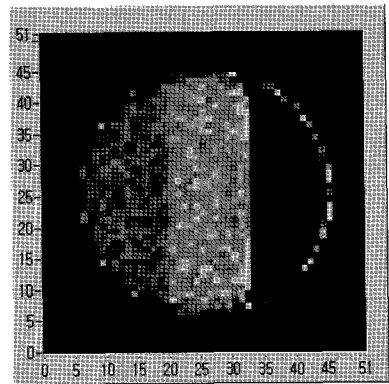


Fig. 7 Reconstructed image by beam path-length weight function

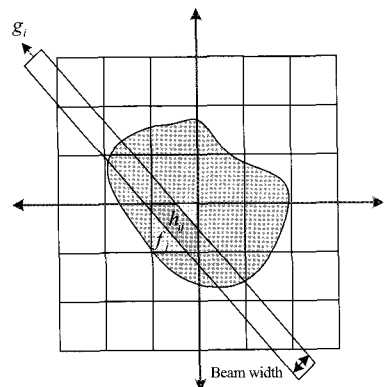


Fig. 8 Weight function determination by beam path-area on each pixel

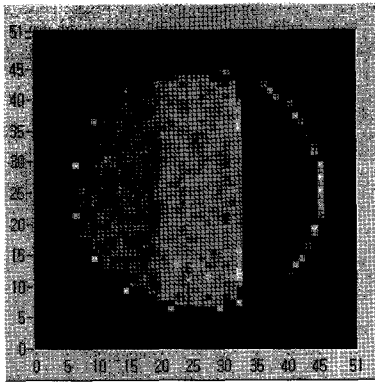


Fig. 9 Reconstructed image by beam path-area weight function

Fig. 9는 Table 1의 계측조건에서 물-기름-공기층을 가진 팬텀에 대해 빔이 통과했을 경우, 통과한 면적에 가중치 함수를 적용하여 복원된 감마 CT 영상을 보여준다.

#### 4. 실험 결과

본 논문에서는 고에너지 감마선을 사용하여 반복적인 영상복원 방법인 EM기법으로 3가지 가중치 함수에 따른 감마 CT의 영상복원 결과를 비교하였다.

실험을 위하여 Pentium 4, CPU 3 GHz 환경에서 LabVIEW 8.0을 사용하였으며 Fig. 10과 같이 평행 빔 구조를 갖는 단층 스캐너를 이용하였다.

CT 영상은 궁극적으로 선흡수계수의 정량적인 사상(mapping)이 되는데, 이는 일정한 각도에서 시험체를 방사선으로 주사한 뒤 시험체를 180° 회전시킬 때까지 일정한 각도로 회전시켜 각각의 위

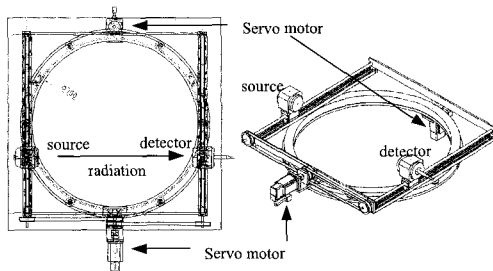


Fig. 10 Hardware configuration of the experiment

상 각도에서 시험체를 방사선으로 주사하는 과정을 반복함으로써 얻어지는 방사선의 강도 변화를 적합한 알고리즘으로 복원한 결과이다[11].

방사선 주사에 의한 시험체 단면의 CT 영상복원을 위해 다음과 같은 일련의 과정을 수행해야 한다. 먼저, 대상 물체에 대해  $x, y$  좌표로 표현되는 분포함수  $f(x, y)$ 를 상정한다. 실제로는 이 대상 물체 분포함수  $f(x, y)$ 를 구하기 위해 방사선 투과실험을 수행하여 시노그램을 얻은 후, 그로부터 영상  $\hat{f}(x, y)$ 을 복원해야 한다. 그러나 시노그램이 바르게 얻어졌는지 영상복원이 제대로 이루어졌는지 확인하기 위하여 대상 물체들에 대해 라돈변환 계산으로부터 시노그램을 얻었다. 그리고 시노그램으로부터 복원된 영상  $\hat{f}(x, y)$ 을 얻어 대상물체  $f(x, y)$ 와 비교하였다.

Table 2의 계측조건에서 Fig. 11의 팬텀이 잘 복원되는지 확인하기 위해 3가지 가중치 함수를 적용하여 복원된 영상을 비교하였다.

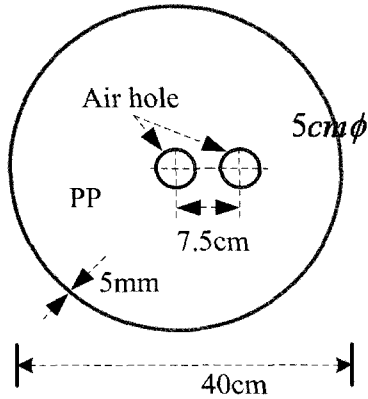
Table 2 Measurement conditions of the p,p phantom

Gamma-ray source	$^{137}\text{Cs}$ (0.662 keV)
Threshold	31 keV
Maximum count	10300
Detector collimator aperture	10mm
Total number of ray-sums	1632 (32K × 51K)
Radiation detector	1 inch NaI(Tl)

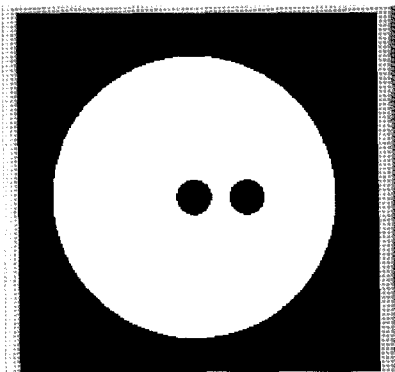
일반적으로 석유화학 시설에서 존재하는 반응기 및 배관은 내부에 탄화수소(hydrocarbon)계열의 유체, 기체의 흐름이 있다고 할 수 있다. 따라서 팬텀은 탄화수소계열인 석유(petroleum), 공기(air), 폴리프로필렌(polypropylene), 물(water) 등으로 구성되게 하였으며 크기를 40 cm로 정한 것은 현 시스템이 본격적인 시스템 개발을 위한 파일럿 시스템(pilot system) 성격의 CT이기 때문이다. 파일럿 규모의 CT는 영상복원 알고리즘 개발과 선원 에너지에 대한 평가 그리고 시준기 구조 및 계측방법에 대한 평가 등을 위해 개발하였다. 향후 대상체와 scanning gantry를 대형화시킬 경우, 높은 에너지의 감마선원을 사용하여 파일럿 시스템을 이용하여 실험한 요소들을 반영할 계획이다.

Fig. 11은 컴퓨터 시뮬레이션 영상에 필요한 가상의 측정체로서 (a)는 공기 홀과 폴리프로필렌으로 채워진 팬텀의 구성을 보여주며 (b)는 가상의 팬텀영상이다.

Fig. 12는 Fig. 10의 스캐너를 사용하여 계측된 데이터로부터 복원된 감마 CT 영상이 제대로 복원되었는지 확인하기 위해 팬텀영상의 시노그램을 생성하였다.



(a) Design of the p.p phantom



(b) P.P phantom image

Fig. 11 Imaginary object for computer simulation

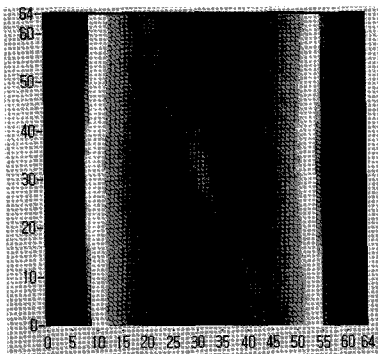
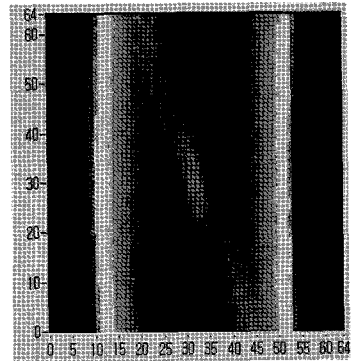
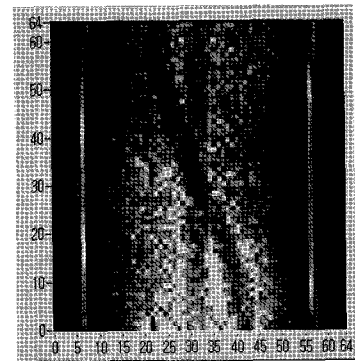


Fig. 12 Sinogram from the imaginary phantom

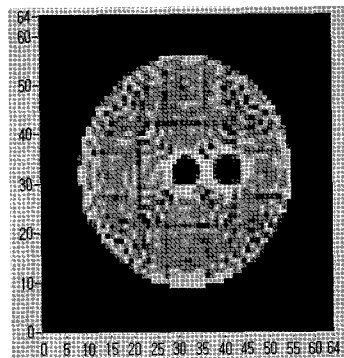
Fig. 13은 고에너지 감마선을 사용하여 EM기법으로 빔이 통과할 때만 가중치를 1로 설정해 복원한 영상을 보여준다. Fig. 13에서 (a)는 가중치 함수를 사용하여 계측된 데이터의 시노그램을 보여주며 (b)는 Fig. 12의 시노그램에서 Fig. 13 (a)의 시노그램을 뺀 영상이다. 그리고 (c)는 (a)의 계측된 데이터의 시노그램으로부터 복원된 영상을 보여준다.



(a) Sinogram of the measurement



(b) Deviation from the imaginary sinogram



(c) Reconstructed image from the measurement

Fig. 13 Reconstructed images from the beam-passage weight function method

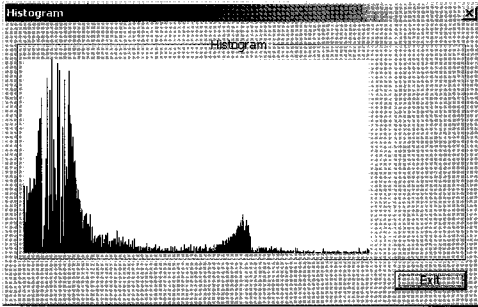
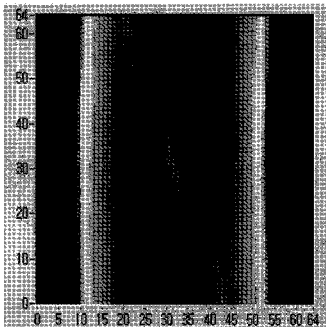
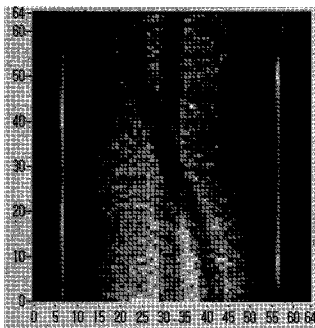


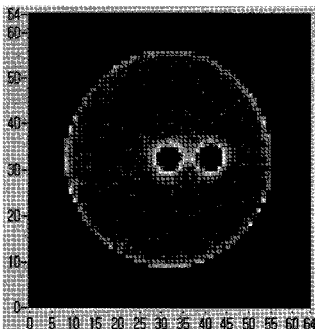
Fig. 14 Histogram result from the reconstructed image



(a) Sinogram of the measurement



(b) Deviation from the imaginary sinogram



(c) Reconstructed image from the measurement

Fig. 15 Reconstructed images from the beam path-length weight function method

복원된 영상의 명암값 분포를 측정하기 위해 히스토그램을 적용하여 3가지 방법의 가중치 함수로 복원된 영상을 비교분석하였다. 히스토그램은 픽셀이 가진 명암값에 대한 막대그래프로 픽셀이 가질 수 있는 명암값은  $x$ 축 상에 그려지며 각 명암값이 가진 빈도수는  $y$ 축 상에 그려진다.

Fig. 14는 빔이 통과할 때만 가중치를 적용하여 복원된 영상의 히스토그램으로 명암값의 평균(mean)은 132.303이고 분산(variance)은 1760.301이다.

Fig. 15는 빔이 통과한 길이에 가중치 함수를 적용하여 복원된 영상을 보여준다. Fig. 15에서 (a)는 가중치 함수를 사용하여 계측된 데이터의 시노그램을 보여주며, (b)는 Fig. 12의 시노그램에서 Fig. 15 (a)의 시노그램을 뺀 영상이다. 그리고 (c)는 계측된 데이터의 시노그램으로부터 복원된 영상을 보여준다.

Fig. 16은 빔이 통과한 길이에 가중치 함수를 적용하여 복원된 영상의 히스토그램으로 명암값의 평균은 115.303이고 분산은 1457.396이다.

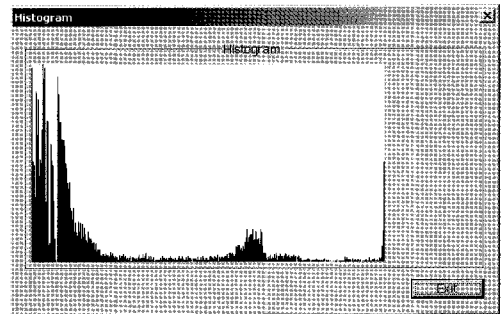
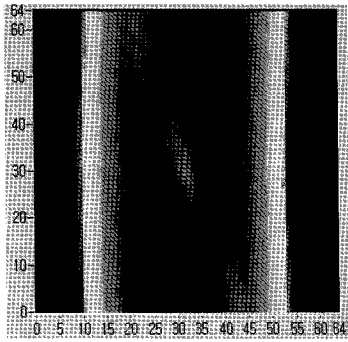


Fig. 16 Histogram result from the reconstructed image

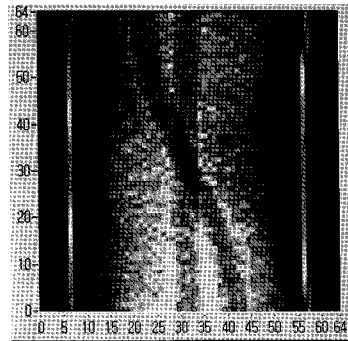
Fig. 17은 빔이 통과한 면적에 가중치 함수를 적용하여 복원한 영상을 보여준다. Fig. 17에서 (a)는 가중치 함수를 사용하여 계측된 데이터의 시노그램을 보여주며 (b)는 Fig. 12의 시노그램에서 Fig. 17 (a)의 시노그램을 뺀 영상이다. 그리고 (c)는 복원된 영상이다.

Fig. 18은 빔이 통과한 면적에 가중치 함수를 적용하여 복원된 영상의 히스토그램을 보여준다. 시각적으로는 빔이 통과한 길이에 가중치 함수를 적용하여 복원한 결과와 비슷하다. 그러나 명암값 평균이 112.725이고 분산이 1370.178로 3가지 가중치 함수 중에서 잡음이 가장 적은 것을 확인하였다.

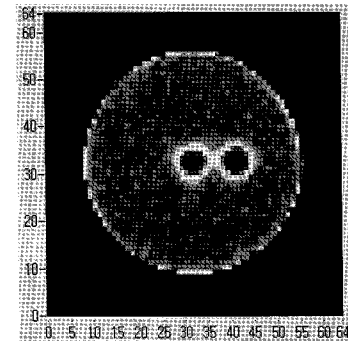




(a) Sinogram of the measurement



(b) Deviation from the imaginary sinogram



(c) Reconstructed image from the measurement

Fig. 17 Reconstructed images from the beam path-area weight function method

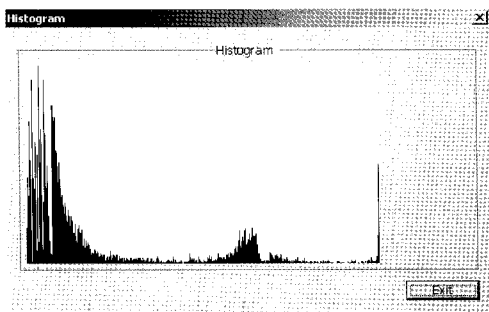


Fig. 18 Histogram result from the reconstructed image

### 5. 결론

본 논문에서는 대형 장치설비를 운영하는 정유/석유화학 산업에서의 가동 중인 공정내부의 단면영상을 복원하기 위해 감마선을 사용하여 반복적인 방법의 가중치 함수를 비교하였다. 빔 통과 여부에 따른 가중치 함수보다 빔 길이나 면적에 의한 가중치 함수로 복원할 경우, 시노그램의 비교편차가 감소함을 시각적으로 확인하였다. 실험 결과로부터 복원된 영상의 명암값 분포를 측정하기 위해 히스토그램을 적용하여 3가지 방법의 가중치 함수로 복원된 영상을 비교분석한 결과, 빔 면적에 의한 가중치 함수가 가장 원 영상에 가깝게 복원되는 것을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] J. B. Kim, S. H. Jung and J. S. Kim, "A study on an industrial CT by using a high energy gamma-ray," ICEE, Korea (2006)
- [2] J. B. Kim, S. H. Jung and J. S. Kim, "A study on industrial gamma-ray CT with a single source and detector pair," Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 38, No. 4, (2006)
- [3] J. B. Kim, S. H. Jung and J. S. Kim, "The comparison of the iterative and filtered back projection method for a gamma-ray CT," KNS Spring Conference, Korea (2006)
- [4] K. Lange and R. Carson, "EM reconstruction algorithms for emission and transmission tomography," Journal of Computer Assisted Tomography, Vol 8, No 2, pp. 306-316, (1984)
- [5] G. A. Johansen, "Gamma ray tomography software and image reconstruction," IAEA/RCA Regional Training Course on Industrial Process Gamma Tomography, Korea, (2004)

- [6] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, (1989)
- [7] A. Kak and M. Slaney, "Principles of Computerized Tomographic Imaging," Electric Copy. IEEE Press, (1999)
- [8] K. Anil, Jain, "Fundamentals of Digital Image Processing," Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp. 431-475, (1989)
- [9] 김성수, 강지혜, "새로운 고속 EM 알고리즘", 한국정보과학회논문지, Vol. 31, No. 10, pp. 575-587, (2004)
- [10] B. D. Cullity, "Elements of X-ray Diffraction," 2nd Ed. Addison-Wesley Pub. pp.33 3-31, (1978)
- [11] 김영환 외, "고에너지 방사선을 이용한 공업용 CT 시스템 개발", 한국원자력연구소 최종보고서, (2000)
- [12] 한학용, "패턴인식 개론 - MATLAB 실습을 통한 입체적학습", 한빛미디어, (2005)