Journal of Korea Multimedia Society Vol. 20, No. 6, June 2017(pp. 865-872)
https://doi.org/10.9717/kmms.2017.20.6.865

양전자 방출 단층 촬영기의 비행 시간 정보를 이용한 고속 영상재구성

이 남 용†

Fast Image Reconstruction for Positron Emission Tomography Using Time-Of-Flight Information

Nam-Yong Lee†

ABSTRACT

Recent advance in electronics and scintillators makes it possible to utilize the time-of-flight (TOF) information in improving image reconstruction of positron emission tomography(PET). In this paper, we propose a TOF-based fast image reconstruction method for PET. The proposed method uses the deconvolution of TOF data for each angle view and the rotational averaging of deconvolved images. Simulation results show an improved performance of the proposed method, as compared with filtered backprojection (FBP) method, TOF-FBP, and TOF version of expectation-maximization(EM) methods. Simulation results also show a great potentiality of the proposed method in limited angle tomography applications.

Key words: Positron Emission Tomography, Time-Of-Flight, Deconvolution

1. 서 론

양전자방출단층촬영기(Positron Emission Tomography, PET)는 양전자를 방출하는 방사성 동위원소를 결합한 의약품을 체내에 주입한 후에, 그 양전자의 방출위치를 인체 외부에서 검출기를 이용하여 추적한다. 이를 통해, 체내에 주입된 의약품의 체내에서의 활동을 조사함으로써 환자의 상태를 비침습적인 방법으로 조사할 수 있는데, 이러한 점을 이용하여 암, 심장 질환, 뇌 질환 및 뇌 기능 평가 등 여러 의학적 검사에 널리 사용되고 있다[1].

PET는 체내에 주입된 방사성 물질에서 방출된 양전자가 주위의 전자와 충돌하여 쌍소멸하면서 거의 180° 방향으로 방출되는 2개의 감마선을 관측하여, 양전자 분포에 대한 선적분에 해당하는 데이터를 얻고, 이를 이용하여 양전자 분포 영상을 계산한다. 구체적으로, 검출기 b_1, b_2가 동일한 양전자-전자 충돌에서 기인한 감마선을 시간 t_1, t_2에 검출하였다면, 해당 검출기 쌍 b_1, b_2을 연결하는 반응선(Line-Of-Response, LOR)상에 양전자가 하나 존재했다는 것을 의미하므로 양전자 분포의 해당 LOR에서의 선적분 값을 얻을 수 있다. 선적분 값에서 분포 영상을 계산하는 방법으로는 여현역투사(Filtered Backprojection, FBP) 또는 기댓값-최대화(Expectation - Maximization, EM) 방법 등이 널리 사용되고 있다[2].

※ Corresponding Author : Nam-Yong Lee, Address: (50834) 197 Inje-ro, Gimhae-Si, Gyeongsangnam-Do, Korea, TEL : +82-55-320-3860, FAX : +82-55-320-3254, E-mail : nylee@inje.ac.kr
Receipt date : Feb. 27, 2017, Revision date : May 4, 2017
Approval date : May 9, 2017

† Department of Applied Mathematics, Inje University
※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2015R1D1A1A01057520)

검출기에서 관측한 비행시간(Time-Of-Flight, TOF) $t=t_1-t_2$ 정보를 이용하여 해당 LOR에서의 양전자의 위치를 보다 정확히 추정하여 영상재구성을 향상시키는 방법은 PET의 개발초기부터 연구되었으나, 당시의 PET의 낮은 시간분해능으로는 실현하기 힘들었다. 그러나 수년 내에 활발히 보급될 것으로 예상되는 PET 기기는 100~300ps(pico second)의 시간분해능을 가져 방출이 벌어진 LOR상에서의 양전자의 위치를 15~45mm이내로 추적할 수 있을 것이고, 이를 이용한 영상재구성 향상을 기대할 수 있다[3].

TOF의 정확도 향상은 PET 영상재구성의 향상에 도움이 된다. 예를 들어, TOF 정보를 이용하여 PET 데이터의 감쇠보정에 대해 활발히 진행되고 있다[4,5]. 또한, TOF 정보를 이용한 여현역투사 TOF-FBP와 기댓값-최대화 TOF-EM 방법 등이 TOF 정보를 이용하지 않은 FBP, EM에 비해 향상된 영상재구성 결과를 제공한다는 연구결과도 보고되고 있다[6].

TOF 정보의 이용의 단점은 TOF 정보를 이용하는데 따른 계산량의 증가이다. 이 논문에서는 PET의 TOF 정보를 이용한 고속 영상재구성 방법을 제안한다. 제안된 방법은 TOF 정보를 효율적으로 이용하기 위해 각도별로 주어진 TOF 데이터에 대한 합성(Convolution)의 역변환에 해당하는 분해(Deconvolution)를 적용한 후에, 그렇게 하여 얻어진 영상들을 해당 각도만큼 회전시켜 합산하여 평균(Rotational Average)을 구하여 방식으로 영상을 재구성하는 방법이다. 이 논문에서는, 재구성 절차에 사용된 방법들을 고려하여 제안된 방법을 TOF-DRA로 명명하고자 한다.

이 논문에서는 FBP, TOF-FBP, TOF-EM과의 비교실험을 통해 제안한 방법 TOF-DRA의 우수성을 확인하였다. 특히, TOF-DRA은 직접법으로 반복법 TOF-EM에 비해 그 계산속도가 빠른 반면에, TOF-FBP와는 달리 데이터 손실이 발생한 경우에도 뛰어난 영상재구성을 보장한다는 점(각도제한 영상재구성(Limited Angle Tomography)의 응용에 탁월한 향상이 있음)을 모사실험을 통해 확인하였다.

2. 이 론

이 논문에서 제안하고자 하는 TOF 정보를 이용한 PET 영상재구성 방법은 2차원, 3차원 영상재구성에 모두 적용가능하나 설명의 편이를 위해 2차원에 한정한다. 또한, 주어진 PET 데이터는 연속변수에 적합하게 재배열되었고, 감쇠, 산란, 기하적 보정 등의 전처리 과정을 모두 완료한 것으로 가정한다. 그러나 관측의 부정확성에 의한 잡음의 영향은 고려할 것이다.

관측된 TOF 데이터 $m(\theta,u,t)$와 양전자 분포함수 $f(x,y)$의 관계는

$$m(\theta,u,t)=R_w f(\theta,u,t)+\varepsilon(\theta,u,t) \tag{1}$$

의 수학적 모델을 따른다고 가정한다. 여기서,

$$R_w f(\theta,u,t)=\int f(u e_\theta+s e_\theta^\perp)\, w(t-s)ds \tag{2}$$
$$e_\theta=(\cos\theta,\sin\theta),\ e_\theta^\perp(-\sin\theta,\cos\theta)$$

이고, w는 시간분해능의 정확도를 가리키는 시간확산함수(Time Spread Function, TSF)로

$$w(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}\exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right),\quad \sigma>0 \tag{3}$$

의 형태의 가우스 함수이고, $\varepsilon(\theta,u,t)$는 관측에서의 잡음을 표현한다고 가정한다. 한편, TOF 정보를 고려하지 않는 기존의 PET 데이터

$$M(\theta,u)=\int m(\theta,u,t)dt \tag{4}$$

와 양전자 분포함수 $f(x,y)$의 관계는 식 (1)을 t에 대해 양변을 적분하여

$$M(\theta,u)=Rf(\theta,u)+\int \varepsilon(\theta,u,t)dt \tag{5}$$

을 얻을 수 있다. 여기서, R은 Radon 변환[7]으로

$$Rf(\theta,u)=\int f(u e_\theta+s e_\theta^\perp)ds \tag{6}$$

로 정의된다.

PET 영상재구성에 널리 사용되어온 FBP는 다음과 같은 수학적 정리에 근거를 두고 있다[2].

$$\text{If}\quad G(\theta,\xi)=\int_{-\infty}^{\infty} Rf(\theta,s)\exp(-2\pi i\xi s)ds \tag{7}$$

$$\text{and}\quad F(\theta,u)=\int_{-\infty}^{\infty} G(\theta,\xi)|\xi|\exp(2\pi i\xi u)\,d\xi, \tag{8}$$

$$\text{then}\quad f(x,y)=\int_0^{\pi} F(\theta,x\cos\theta+y\sin\theta)d\theta. \tag{9}$$

여기서, 식 (7)의 과정을 푸리에 변환 그리고 식 (8)의 과정을 필터링이라 하고, 식 (9)의 과정을 역투사(Backprojection)라 한다. PET 데이터의 잡음을

억제하기 위해 FBP는 식 (8)의 과정에서 저주파 정보의 영향을 그대로 두고 고주파 정보의 영향을 억제하는 윈도우 함수를 사용한다. 만약, 식 (8)의 과정에서 아무런 윈도우 함수를 사용하지 않았다며 그것을 램프 필터링(Ramp Filtering)이라 한다.

TOF-FBP는 다음의 과정을 순차적으로 적용하여 영상을 재구성한다[6].

$$G^*(\theta,\xi,t)=\int_{-\infty}^{\infty} m(\theta,s,t)\exp(-2\pi i\xi s)ds \tag{10}$$

$$F^*(\theta,u,t)=\int_{-\infty}^{\infty} G^*(\theta,\xi,t)|\xi|H(\xi)\exp(2\pi i\xi u)d\xi \tag{11}$$

$$F^{\sharp}(\theta,u,s)=\int F^*(\theta,u,t)w(s-t)dt \tag{12}$$

$$f^*(x,y)=\int_0^{\pi} F^{\sharp}(\theta,x^*,y^*)d\theta, \quad x^*=x\cos\theta+y\sin\theta,\ y^*=-x\sin\theta+y\cos\theta \tag{13}$$

여기서, 식 (11)의 $H(\xi)$는 잡음을 억제하기 위한 윈도우 함수이다.

TOF-FBP는 FBP가 그러하듯이 데이터 손실이 있는 경우에는 사용하기 곤란하다는 단점이 있다. 또한, TOF-FBP을 기술하는 식 (10), (11), (12), (13)의 과정이 이상적인 상황, 즉, 식 (1)에서 관측 잡음이 없는 $m(\theta,u,t)=R_w f(\theta,u,t)$인 상황에 대해서도 정확한 영상재구성을 제공하지 않는다는 단점이 있다.

반복법인 TOF-EM는 현재 반복단계의 영상 f^n에서 다음 단계의 영상 f^{n+1}을 구하기 위해 다음의 절차를 순차적으로 진행한다[7]:

$$S^n(\theta,u,t)=\frac{m(\theta,u,t)}{R_w f^n(\theta,u,t)} \tag{14}$$

$$f^{n+1}(x,y)=f^n(x,y)\frac{R_w^* S^n(x,y)}{R_w^* \mathbf{1}(x,y)}. \tag{15}$$

여기서, R_w^*는 식 (2)에서 정의한 R_w의 수반변환(adjoint transform)이고, $\mathbf{1}$은 모든 θ,u,t에 대해 항상 1인 상수함수이다.

TOF-EM의 가장 큰 단점은 EM 반복법이 그러하듯이 영상재구성을 위해 많은 계산이 필요하다는 점에 있다. 특히, TOF 정보를 고려함에 따른 데이터의 증가는 더 많은 계산을 필요로 하는 문제가 있다.

이 논문에서 제안하고자 하는 TOF-DRA는 다음의 과정을 순차적으로 적용하여 영상을 재구성한다.

$$Z^*(\theta,u,\xi)=\frac{\overline{W(\xi)}Z(\theta,u,\xi)}{|W(\xi)|^2+\lambda^2},\quad Z(\theta,u,\xi)=\int m(\theta,u,t)\exp(-2\pi i\xi t)dt,\quad W(\xi)=\int w(t)\exp(-2\pi i\xi t)dt \tag{16}$$

$$g(\theta,u,s)=\int Z^*(\theta,u,\xi)\exp(2\pi i\xi s)d\xi \tag{17}$$

$$f^{\sharp}(x,y)=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} g(\theta,x^*,y^*)d\theta, \quad x^*=x\cos\theta+y\sin\theta,\ y^*=-x\sin\theta+y\cos\theta \tag{18}$$

여기서, 식 (16)는 Wiener 필터링 과정으로 $\lambda>0$는 잡음을 억제하기 위해 사용한다. 즉, 제안된 방법은 Wiener filtering에 의해 TSF에 의한 합성(Convolution) 역변환에 해당하는 분해(Deconvolution)(식 (16), (17)의 과정이 이를 수행한다)를 하고 식 (18)에 의해 주어진 영상 $g(\theta,x^*,y^*)$을 θ만큼 반대로 회전하여 합산평균(Rotational Average)을 구하여 영상을 재구성한다.

제안한 방법 TOF-DRA의 이론적 근거는 다음의 사실에 있다: 잡음이 없는 경우에는 식 (16)에서 $\lambda=0$으로 하여 식 (17)에서

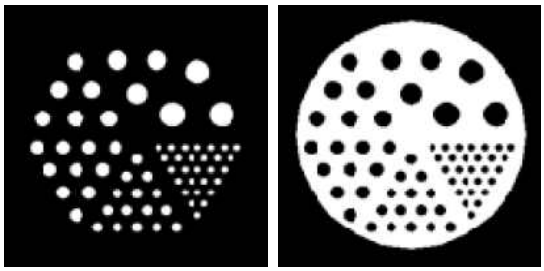
$$g(\theta,u,s)=f(ue_\theta+se_\theta^{\perp}) \tag{19}$$

을 얻을 수 있다. 이 경우에 식 (18)는 동일한 영상이 회전된 것들을 역회전하여 합산하는 과정이 되어, $f^{\sharp}=f$이 된다.

3. 실험결과

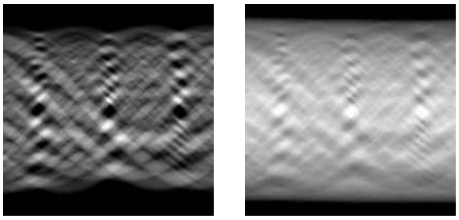
Fig. 1은 모사실험에 사용된 영상 $f(x,y)$로 그 크기는 201×201이다. 영상 $f(x,y)$의 화소의 크기는 $2\times2\,\mathrm{mm}^2$라고 가정하였다.

모사실험에서는 각도 θ의 수(N_a)를 200개(즉, 각



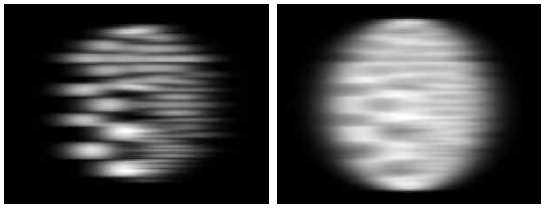
(a) Hot Rod(HR) (b) Cold Rod(CR)

Fig. 1. Test images $f(x,y)$ of size 201 × 20. Here images are presented in 2/3 size of the actual one.



(a) $M(\theta,u)$ of HR (b) $M(\theta,u)$of CR

Fig. 2. Sinogram $M(\theta,u)$ of test images, with N_a = 200 (horizontal direction), N_u = 201(vertical direction). Here images are presented in 1/2 size of the actual one.



(a) $m(0,u,t)$ of HR (b) $m(0,u,t)$ of CR

Fig. 3. TOF-Sinogram $m(\theta,u,t)$ of test image at $\theta=0$, with the temporal resolution = 300ps and N_u = 201(vertical direction). Here images are presented in 1/2 size of the actual one.

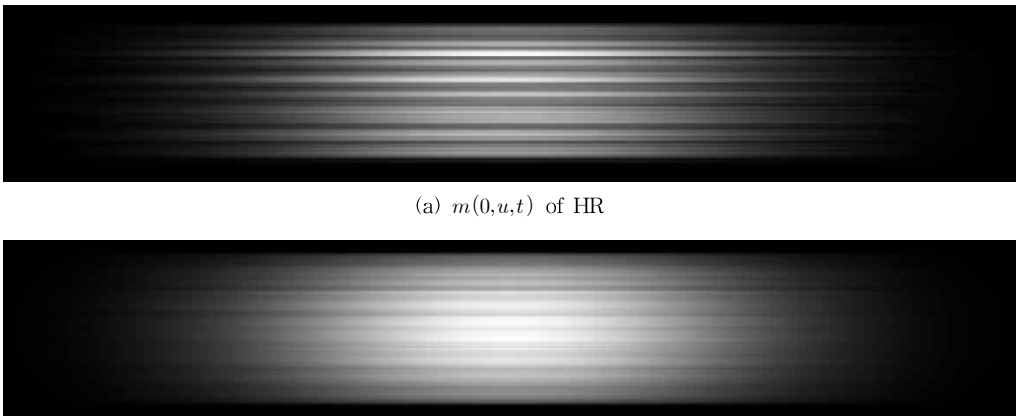
도를 0.9° 씩 변화시켜가며 관측)로, 그리고, 원점으로부터의 거리 u의 수(N_u)를 201개로 하였다. 또한, TOF 정확도를 가리키는 식 (3)의 시간확산함수 w가 시간분해능이 300ps와 3ns에 대응하는 것에 대해 모사실험을 진행하였으며, 관측환경의 불확실성을 모사하기 위해 $R_w f(\theta,u,t)$의 1%를 표준편차로 갖는 정규잡음을 식 (1)의 $\varepsilon(\theta,u,t)$에 대해 가정하였다.

Fig. 2는 Fig. 1의 테스트 영상들에 대한 데이터 $M(\theta,u)$을 보여주고 있다. 여기서, 가로축은 각도 θ를, 세로축은 원점으로부터의 거리 u를 표현한다.

Fig. 2의 $M(\theta,u)$은 TOF 정보를 모두 무시된 데이터이다. 이에 반해, Fig. 3과 Fig. 4의 TOF 데이터 $m(\theta,u,t)$은 $\theta=0$인 경우에 한해 TOF 정보를 보여주고 있다. Fig. 3과 Fig. 4에서 세로축은 원점으로부터의 거리 u를 표현하고 있다. 한편, 가로축은 시간 t를 표현하고 있는데 그 크기가 다른 이유는 Fig. 3의 경우는 식 (3)의 시간확산함수 w가 시간분해능이 300ps에 해당하는 것을 표현한 것이고, Fig. 4의 경우는 시간분해능이 3ns에 해당하는 것을 표현한 것으로 서로 시간축에서의 확산정도가 다르기 때문이다.

Fig. 2에서 $M(0,u)$는 첫 번째 열에 위치한 데이터이다. 그런데, (4)에 의해 이것은 $\int m(0,u,t)dt$와 동일하다. 즉, Fig. 3과 Fig 4.의 TOF 데이터 $m(0,u,t)$를 가로축으로 모두 합산한 것이 Fig. 2의 첫 번째 열에 위치한 데이터이다.

Fig. 3은 시간분해능이 300ps에 해당하는 것으로 TOF 데이터 $m(0,u,t)$에서 원영상 $f(x,y)$의 대략적인 정보를 확인할 수 있다. 그에 반해, 시간분해능이 3ns에 해당하는 TOF 데이터 $m(0,u,t)$를 보여주고 있는 Fig. 4에서는 원영상의 대략적인 모습을 파악하



(a) $m(0,u,t)$ of HR

(b) $m(0,u,t)$ of CR

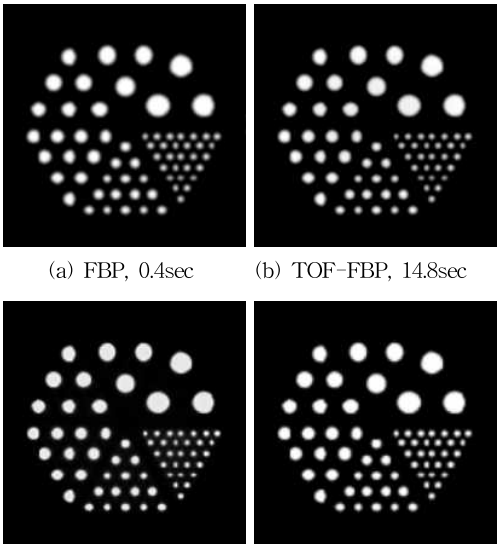
Fig. 4. TOF-Sinogram $m(\theta,u,t)$ of test image at $\theta=0$, with the temporal resolution = 3ns and N_u = 201(vertical direction). Here images are presented in 1/2 size of the actual one.

는 것이 어렵다.

TOF 정보를 고려하지 않고 영상재구성을 하는 FBP는 Fig. 2의 데이터를 이용하는데 반해, TOF 정보를 이용하여 영상재구성을 하는 TOF-FBP, TOF-DRA, TOF-EM은 Fig. 3과 Fig 4.의 TOF 데이터를 이용한다(Fig 3. 또는 Fig. 4의 데이터를 한 세트로 데이터를 각도의 수만큼, 즉, 200 세트를 가지고 영상재구성을 한다). 잡음의 영향을 억제하기 위해 FBP와 TOF-FBP의 경우에는 절단주파수를 0.5로 하는 Hanning 필터를 사용하였고, TOF-EM의 경우에는 반복횟수를 20회로 제한하여 반복이 진행해 가면서 잡음의 영향이 점차적으로 증가되는 것을 차단하였으며, TOF-DRA의 경우에는 λ를 잡음의 표준편차의 크기로 하였다. 이 모사실험은 듀얼 코어 2.8GHz 중앙연산처리기와 8GB 램을 장착한 컴퓨터에 GNU gcc 4.2.1.으로 컴파일한 C 프로그램을 이용하여 수행하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 시간분해능이 300ps에 해당하는 TOF 데이터(Fig. 3)를 이용한 영상재구성 결과이다. 구체적으로, Fig. 5는 Fig. 3(a)의 'Hot Rod'의 TOF 데이터를 사용한 비교모사실험의 결과영상들이다. Fig. 5에서 사용한 방법 뒤에 적은 숫자는 사용한 방법의 계산시간이다. Fig. 5의 결과에서 보듯이 계산속도의 면에서는 FBP가 가장 빠르고, TOF-FBP와 TOF-DRA가 비슷한 속도를, 그리고 TOF-EM가 가장 많은 계산을 필요로 함을 알 수 있다. Fig. 5의 영상재구성 결과로는 FBP, TOF-FBP, TOF-EM, TOF-DRA의 우열을 평가하기는 힘들다. 한편, Fig. 6은 Fig. 3(b)의 'Cold Rod'의 TOF 데이터를 사용한 비교모사실험의 결과영상들이다. FBP(Fig. 6(a))와 TOF-DRA(Fig. 6(d))의 결과에서는 우열을 평가하기 힘들었지만, TOF-FBP(Fig. 6(b))의 경우에는 영상재구성이 완전치 못함을 확인할 수 있고, TOF-EM(Fig. 6(c))의 경우는 더 나은 영상재구성 결과를 얻기 위해서는 반복횟수가 20회보다는 더 많이 필요함을 보여주고 있다. Fig 6(b)에서의 불안전한 영상재구성은 식 (10), (11), (12), (13)에서 기술한 TOF-FBP가 이상적인 상황에서도 완전한 영상재구성을 제공한다는 이론적 근거가 없음에 기인한다.

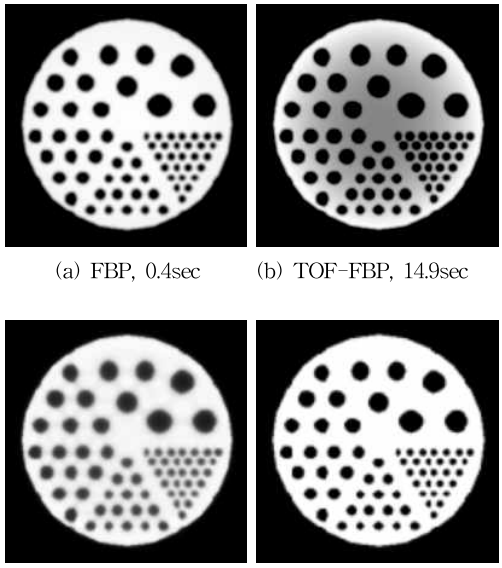
Fig. 7과 Fig. 8은 시간분해능이 3ns에 해당하는 TOF 데이터(Fig. 4)를 이용한 영상재구성 결과이다. 구체적으로, Fig. 7은 Fig. 4(a)의 'Hot Rod'의 TOF 데이터를 사용한 비교모사실험의 결과영상들이다. Fig. 7의 영상재구성 결과로는 FBP, TOF-FBP,



(a) FBP, 0.4sec (b) TOF-FBP, 14.8sec

(c) TOF-EM, 45.5sec (d) TOF-DRA, 14.2sec

Fig. 5. Reconstructed images from TOF-Sinogram data $m(\theta,u,t)$ of hot rod, with the temporal resolution = 300ps, N_a = 200, N_u = 201. Here images are presented in 2/3 size of the actual one.

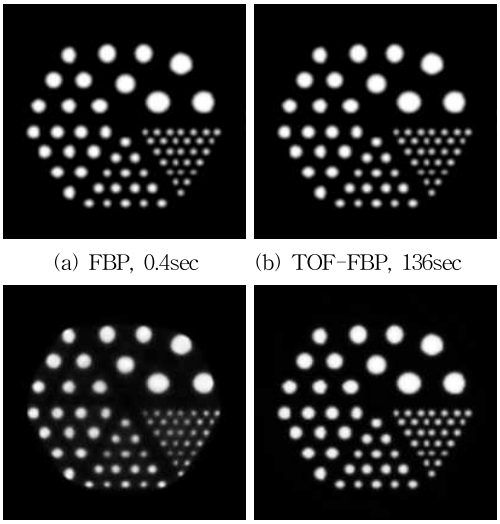


(a) FBP, 0.4sec (b) TOF-FBP, 14.9sec

(c) TOF-EM, 45.7sec (d) TOF-DRA, 14.2sec

Fig. 6. Reconstructed images from TOF-Sinogram data $m(\theta,u,t)$ of cold rod, with the temporal resolution = 300ps, N_a = 200, N_u = 201. Here images are presented in 2/3 size of the actual one.

TOF-EM, TOF-DRA의 우열을 평가하기는 힘들다. 한편, Fig. 8은 Fig. 4(b)의 'Cold Rod'의 TOF 데이터를 사용한 비교모사실험의 결과영상들이다. FBP (Fig. 8(a)), TOF-FBP(Fig. 8(b)), TOF-DRA(Fig. 8(d))의 결과에서는 우열을 평가하기 힘들었지만, TOF-EM(Fig. 8(c))의 경우는 더 나은 영상재구성 결과를 얻기 위해서는 반복횟수가 20회보다는 더 많이 필요함을 보여주고 있다. 특히, Fig. 6(c)의 경우와 비교해 볼 때 시간분해능이 떨어지는 데이터에 대해 TOF-EM을 적용하여 얻은 영상재구성 결과 Fig. 8(c)가 더 많은 반복횟수를 필요로 함을 확인할 수 있다.



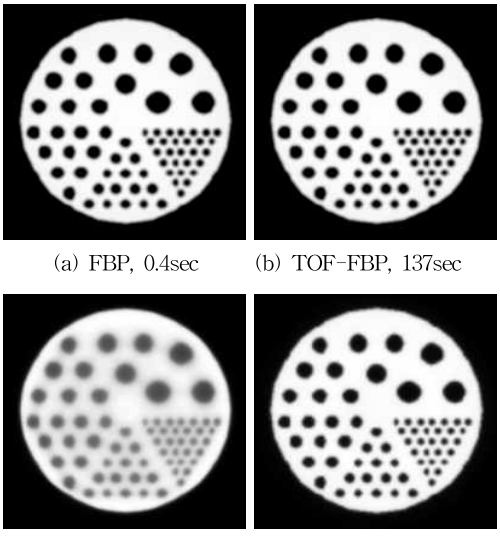
(a) FBP, 0.4sec (b) TOF-FBP, 136sec

(c) TOF-EM, 441sec (d) TOF-DRA, 129sec

Fig. 7. Reconstructed images from TOF-Sinogram data $m(\theta,u,t)$ of hot rod, with the temporal resolution = 3ns, N_a = 200, N_u = 201. Here images are presented in 2/3 size of the actual one.

TOF-FBP의 영상재구성 결과인 Fig. 6(b)와 Fig. 8(b)의 비교는 흥미로운 사실을 보여주고 있다. 시간분해능이 300ps인 TOF 데이터를 이용한 영상재구성 결과인 Fig. 6(b)이 시간분해능이 3ns인 TOF 데이터를 이용한 영상재구성 결과 Fig. 8(b)보다도 더 많은 왜곡현상을 보이는 것은 식 (10), (11), (12), (13)에서 기술한 TOF-FBP에 이론적인 문제가 있음을 보여주고 있다.

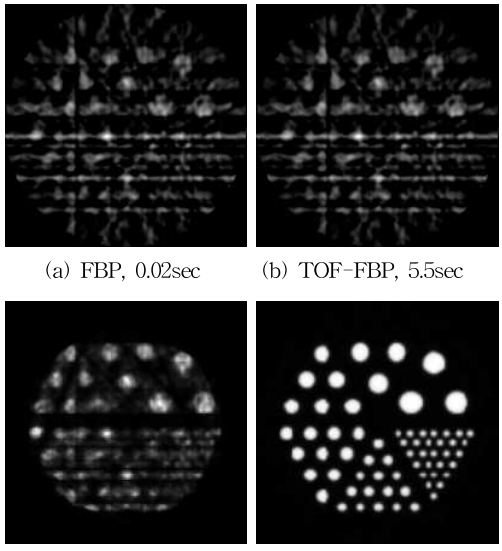
TOF 정보를 이용하여 얻은 수 있는 여러 장점 중에서 가장 널리 고려되었던 것은 감쇠보정[4,5,8,9,10]과 제한된 관측하에서의 영상재구성의 가능성[3]이다. 이 논문에서는 제안된 방법 TOF-DRA가 제한된 관측하에서도 효과적인 영상재구성을 제공함을



(a) FBP, 0.4sec (b) TOF-FBP, 137sec

(c) TOF-EM, 450sec (d) TOF-DRA, 131sec

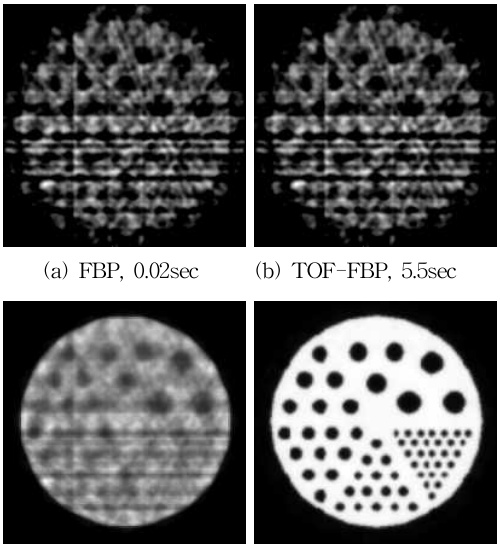
Fig. 8. Reconstructed images from TOF-Sinogram data $m(\theta,u,t)$ of cold rod, with the temporal resolution = 3ns, N_a = 200, N_u = 201. Here images are presented in 2/3 size of the actual one.



(a) FBP, 0.02sec (b) TOF-FBP, 5.5sec

(c) TOF-EM, 18sec (d) TOF-DRA, 5.2sec

Fig. 9. Reconstructed images from TOF-Sinogram data $m(\theta,u,t)$ of hot rod, with the temporal resolution = 3ns, N_a = 8, N_u = 201. Here images are presented in 2/3 size of the actual one.



(a) FBP, 0.02sec (b) TOF-FBP, 5.5sec

(c) TOF-EM, 18sec (d) TOF-DRA, 5.2sec

Fig. 10. Reconstructed images from TOF-Sinogram data $m(\theta,u,t)$ of cold rod, with the temporal resolution = 3ns, N_a = 8, N_u = 201. Here images are presented in 2/3 size of the actual one.

확인할 수 있는 모사실험을 다음과 같이 수행하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 시간분해능이 3ns에 해당하는 TOF 데이터를 8개 각도에서 관측한 것만을 가지고 영상재구성한 결과이다. Fig. 9는 8개 각도에서 관측된 'Hot Rod'의 TOF 데이터를 이용하여 영상재구성한 결과이고, Fig. 10은 8개 각도에서 관측된 'Cold Rod'의 TOF 데이터를 이용하여 영상재구성한 결과이다. FBP(Fig. 9(a), Fig. 10(a))와 TOF-FBP(Fig. 9(b), Fig. 10(b))의 결과는 제한된 관측각도에 의한 왜곡현상을 분명히 보여주고 있다. 특히, TOF-FBP의 경우에는 FBP의 경우와 비교해 보건데 TOF 정보를 이용하여 얻은 향상을 전혀 보여주지 못하고 있다. 한편, TOF-EM(Fig. 9(c), Fig. 10(c))의 결과는 TOF 정보를 이용하여 관측각도 제한에 따른 왜곡현상을 상당히 완화하였지만, 그 효과가 TOF-DRA(Fig. 9(d), Fig. 10(d))에 비해서는 부족함을 확인할 수 있다. 제안된 방법 TOF-DRA의 경우에는 관측각도 제한에 따른 왜곡현상을 거의 발견할 수 없다.

영상재구성의 결과에 대한 평가 기준으로 수행속도, 시각적 비교와 함께 RRMS(Relative Root Mean Square)를 이용하였다. 여기서, RRMS는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{RRMS} = \min_{a,b} \frac{\sum_v |f_v - a\tilde{f}_v - b|^2}{\sum_v |f_v|^2},$$

$$f_v\text{: 원영상, } \tilde{f}_v\text{: 재구성한 영상} \qquad (20)$$

모사실험의 RRMS 결과를 Table 1에 정리하였다. Table 2의 결과를 통해 제안된 방법 TOF-DRA가 기존의 방법들 FBP, TOF-FBP, TOF-EM에 비해 더 우수한 결과를 제공함을 알 수 있다.

4. 결 론

제안한 방법 TOF-DRA는 PET의 TOF 정보를 이용하여 향상된 영상재구성을 제공함을 비교모사실험을 통해 확인하였다. 또한, 직접법의 형태로 반복법인 TOF-EM에 비해 더 적은 계산을 통해 결과를 얻을 수 있지만 영상재구성 결과는 TOF-EM을 20회 반복한 결과에 비해서 더 우수한 결과를 얻을 수 있음을 비교모사실험을 통해 확인할 수 있었다.

제안한 방법 TOF-DRA는 FBP, TOF-FBP와는 다르게 램프 필터링((8)과 (11)의 과정)이 필요하지 않다. 그런 관계로 손실된 데이터를 사용해야하는 경우(예, 각도제한 영상재구성)에도 적용가능 하다. 비교모사실험의 결과에서 보듯이 관측각도의 수를 8개로 줄인 경우에도 제안된 방법은 관측각도를 200개

Table 1. RRMS Results

Phantom	TSF/N_a	FBP	TOF-FBP	TOF-EM	TOF-DRA
Hot Rods	300ps/200	0.012	0.012	0.012	0.012
	3ns/200	0.012	0.012	0.013	0.012
	3ns/8	0.132	0.131	0.089	0.013
Cold Rods	300ps/200	0.021	0.087	0.045	0.021
	3ns/200	0.021	0.031	0.051	0.021
	3ns/8	0.162	0.157	0.092	0.021

로 한 경우에 비해 결과가 크게 떨어지지 않음을 확인할 수 있었다.

제안된 방법 TOF-DRA는 TOF 정보를 이용한 영상재구성으로 관측에 필요한 방사능 피폭량의 감소를 유도할 수 있음을 보여주고 있다. 본 논문에서 제안한 영상재구성 방법이 감쇠보정과 저선량 방사능 피폭으로도 가능한 영상재구성 알고리즘의 개발에 기여할 수 있기를 기대한다.

REFERENCE

[1] A.C. Kak and M. Slaney, *Principles of Computerized Tomography Imaging*, IEEE Press, New York, 1987.

[2] F.H. Fahey, "Data Acquisition in PET Imaging," *Journal of Nuclear Medicine Technology*, Vol. 30, No. 2, pp. 39-49, 2002.

[3] S. Vandenberghe, E. Mikhaylova, E. D'Hoe, P. Mollet, and J.S. Karp, "Recent Developements in Time-of-flight PET," *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging,* Vol. 3, No. 3, pp. 1-30, 2016.

[4] M. Defrise, A. Rezaei, and J. Nuyts, "Time-of-flight PET Data Determine the Attenuation Sinogram up to a Constant," *Physics in Medicine and Biology,* Vol. 57, No. 4, pp. 885-899, 2012.

[5] N. Lee, "Iterative Attenuation Correction and Image Reconstruction Using Time-of-flight Positron Emission Tomography," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 19, No. 8, pp. 1371-1376, 2016.

[6] M. Conti, B. Bendriem, M. Casey, M. Chen, F. Kehren, C. Michel, et al., "First Experimental Results of Time-of-flight Reconstruction on an LSO PET Scanner," *Physics in Medicine and Biology,* Vol. 50, No. 19, pp. 4507-4526, 2005.

[7] F. Natterer, *The Mathematics of Computerized Tomography*, Society for Industrial and Applied Mathematic, Philadelphia, 2001.

[8] S. Surti, "Update on Time-of-flight PET Imaging," *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 56, No. 1, pp. 98-105, 2015.

[9] H. Davison H1, E. Voert, B. Galiza, P. Veit-Haibach, and G. Delso, "Incorporation of Time-of-flight Information Reduces Metal Artifacts in Simultaneous Positron Emission Tomography/Magnetic Resonance Imaging: A Simulation Study," *Investigative Radilogy,* Vol. 50, No 7, pp. 423-429, 2015.

[10] Y. Baker and Y. Li, "Attenuation Correction in Emission Tomography Using the Emission Data－a Review," *Medical Physics,* Vol. 43, No. 2, pp. 807-832, 2016.

이 남 용

1992년 9월～1997년 12월 Purdue Univeristy, Ph.D.

2002년 9월～현재 인제대학교 응용수학과 교수

관심분야 : 영상복원, 의료영상처리, 정보보호