

투과선량의 수치해석에 의한 전산화단층영상장치 X선의 에너지 분포결정

최 태진, 김 옥배, 서수지*

계명대학교 의과대학 치료방사선과학교실, 진단방사선과학교실*

초 록

광자선의 흡수계수교정과 차등 투과력이 관련된 연구에서 X선의 스펙트럼은 중요한 관심사이다. 본 연구에서는 전산화단층영상장치의 80, 120 kVp X선의 실험적 투과선량으로부터 수치해석을 통해 에너지스펙트럼을 구하였다. 투과선량은 직경 30 cm, 두께 5 mm 내지 92.3 mm 의 알루미늄 파이프필터의 중앙에 반도체검출기를 설치하고 10 mm 슬릿빔의 투과선량을 측정하였다. 스펙트럼재구성은 텅스텐타겟의 특성X선을 포함한 반복적 수치해석을 통해 에너지 구간별 스펙트럼을 구하였으며 에너지구간은 2 keV 로 하였다. 재구성한 에너지분포를 이용하여 계산된 투과선량과 측정투과선량의 비교는 두 광자에너지에서 모두 좋은 일치를 보였다. 에너지구간별 분할조사선량의 반복적 계산에 근거를 둔 수치해석은 흡수체의 감쇄된 선속으로부터 X선의 에너지스펙트럼을 매우 유용하게 결정할 수 있음을 보여주었다.

서 론

인체내 방사선의 흡수선량을 결정하기 위해서는 입사방사선의 에너지분포를 정량적으로 알 필요가 있다. 방사선의 에너지를 결정하는 일은 선량결정에 중요한 변수로 임상에서는 주로 심부선량분률, 조직-공개선량비 또는 반가중으로 에너지에 관련된 함수를 결정하는 일이 많다^{1,2)}.

광자선의 에너지분포와 물질의 특성에 의존하는 선속경화에 의한 영상보정, 흡수계수 보정, 유효에너지분석 등에는 에너지스펙트럼이 알려진 경우 정성적 또는 정량적 흡수선량 평가 용이 해진다^{3,4)}.

광자선의 에너지스펙트럼은 실험실에서 많이 이용되고 있는 다체널분석기와 흡수체의 방사선감쇄를 이용한 수치해석과 전자선에너지분포를 이용한 EGS4 시뮬레이션 등이 있다^{5,6)}.

이들중 반도체검출기에 의한 다체널분석은 가장 신뢰성이 있는 측정법이나 방사선임상에서 이용하기는 검출기의 저온유지성과 방사선장에 따른 선원과 검출기의 기하학적배치 등에 어려움이 있으며, 전자선에너지스펙트럼을 이용한 EGS4 코드에 의한 광자선스펙트럼은 전자입자류에서 선원표적과 콜리메-터, 흡수물질 및 검출기 등의 물리적특성과 기하학적 위치를 시뮬레이션하여 결정하게 되므로 스펙트럼을 결정하는 각 변수의 설정이 중요하다.

Baird⁷⁾ 와 Archer⁸⁾ 등은 다색선 X선이 투과성필터를 통과한 투과선량은 에너지스펙트럼에

의존하게 되므로 여러층의 필터를 투과한 선량감쇄를 통해 라프라스 변환을 시행하므로써 본래의 에너지스펙트럼을 유도할 수 있음을 밝힌 바 있다.

본 연구에서는 투과선량과 반복적 수치해석을 통해 전산화단층영상장치의 방사선에너지스펙트럼을 구하고, 흡수체에 의한 감쇄선량을 계산하여 실험오차범위에서 일치하는 값을 얻을 수 있음을 밝히고자 한다.

대상 및 방법

이론적 배경

방사선 선속내 전리형 검출기의 조사선량은 임의의 단면을 통과하는 광자의 에너지플루언스 $\Phi(E)$ 와 공기중 질량에너지흡수계수 $\mu_{en}(E)$ 의 곱으로 나타낼수 있다^{9,10,11)}. 즉

$$S = \Phi(E) \mu_{en}(E) \quad (1)$$

조사선량S 는 광자에너지 E 의 단위 플루언스에 의해 발생하는 선량계의 에너지반응 함수R(E)로부터 전에너지구간의 전리량을 적분하여 얻게 되면

$$S = \int \Phi(E) R(E) dE \quad (2)$$

이 된다.

선속내 흡수체 두께 (x) 가 있으면 무흡수체(0)일 때 플루언스의 에너지스펙트럼으로부터

$$\Phi(E)(x) = \Phi(E)(0) e^{-\mu(E)x} \quad (3)$$

와 같이 감쇄 되고, 조사선량 S 는 두께 x 에 따른 함수가 된다. 즉

$$S(x) = \int_0^m \Phi(E)(0) e^{-\mu(E)x} R(E)dE \quad (4)$$

가 된다. 상기식에서 $\mu(E)$ 는 광자에너지 E 에 대한 선흡수계수이며, 측정시 흡수체에서 전리량에 영향을 주는 산란광자는 없는 것으로 가정한다.

흡수체 두께(x) 를 통과한 상대적 선량비 T(x) 는

$$T(x) = S(x)/S(0) \quad (5)$$

과 같이 흡수체가 없는 선량에 대한 흡수체를 투과한 선량의 비로 나타낼 수 있으며,식4과 5로부터 전에너지 영역에서 흡수체 x를 통과한 선량비는

$$T(x) = \int_0^{\infty} F(E) e^{-\mu(E)x} dE \quad (6)$$

과 같이 들수 있다. 여기서 $F(E) = \Phi(E)(0) R(E) / S(0)$ 로 감쇄되지않은 선속의 총조사 선량에대한 에너지 E와 E+dE 사이의 광자에너지에 의한 조사선량의 비를 나타내며 분할조사선량분포가 된다.

상기식의 흡수체에 의한 감쇄선량비 T(x) 는 분할조사선량분포 F(E)를 전에너지영역에 대한 조사선량으로 적분하여 구하고, 두께변화에 따른 선량비는 측정선량과 비교될 수

있다^{11,12)}.

식 1의 광자스펙트럼 $\Phi(E)$ 은 흡수체의 두께를 함수로 한 에너지구간별 조사선량분포 $F(E)$ 로부터 구할 수 있게 된다.

$F(E)$ 의 수치해석은 연속x선의 스펙트럼 특성인 최대에너지의 1/3 에너지구간을 최대 조사선량으로 설정한 다음 최대에너지까지 각 에너지구간의 선량곡선에 대해 Prismoidal 정리를 이용한 Simpson's 적분을 통해 최저에서 최대에너지구간의 곡선영역을 얻었다.

임의의 흡수체 $x(i)$ 를 투과한 상대적 투과선량비 $T(i)$ 은 분할조사선량곡선에서 에너지구간 j 에서 Simpson's 적분으로 다음과 같이 얻는다. 즉

$$T_i = \Delta E/3 \sum a F(j) \exp(-u(j) x_i)$$

여기서 계수 a 는 에너지구간에 따라 다음과 같이 주어진다.

초지구간과 최종구간인 경우 $a=1$ 이며, 짝수 구간은 $a=4$, 홀수 구간은 $a=2$ 가 된다.

실험적 방법

실험에 이용된 전산화단층영상장치(SOMATOM-PLUS, siemens 사) 의 방사선에너지는 80, 120 kVp 이고, 부가필터는 0.2 mm Cu 이다. 흡수체를 투과한 감쇄선량측정은 Fig. 1 과 같이 필터폭 50 mm 인 파이프형 알루미늄 필터를 이용하였으며, 흡수체와 검출기간의 거리는 반경 15 cm 이며 산란선을 줄이기 위해 플라스틱지지체에 고정하였다.

감쇄선량은 흡수체 필터를 삽입하여 두께를 증가 및 감소시키면서 반복측정하여 평균치로 구하였다.

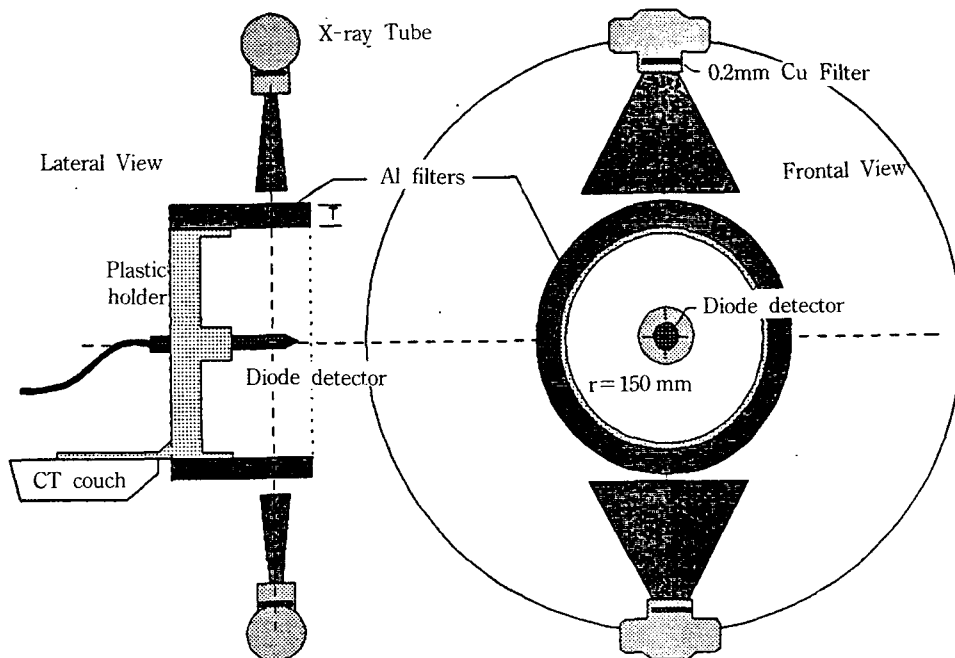


Fig. 1 Schematic diagram of CT x-ray beam alignment and Setup of Aluminium Filter on Plastic Jig

검출기는 전산화단층장치의 슬릿형 선속에 대해 유효측정위치를 결정하기 용이하고, 필터를 투과한 방사선의 출력이 낮은 방사선장에서 감도가 높고 검출효과가 큰 반도체 검출기 (전리용적 $0.25 \times 0.25 \times 0.04$ mm, Wellope)와 전위계(Capintec 192, USA)를 통해 이루어졌으며, 전산화단층영상장치의 선속은 폭 10 mm의 슬릿형이며, 검출기의 중심위치는 Fig.2와 같이 검출기를 1 mm 씩 이동하여 선폭의 선량분포를 얻어 결정되었다¹³⁾.

본 연구에서는 분할조사선량 $F(E)$ 를 10 keV에서 최대에너지까지 2 keV 구간으로 설정하고, 반복적 수치해석을 통해 구한 광자플루언스 스펙트럼으로부터 에너지구간의 조사선량이 흡수체를 투과한 선량비를 계산한 것과 측정된 것을 비교하여 $\pm 2\%$ 의 오차범위 내에서 일치하는 상대 분할조사선량을 구하였다¹³⁾.

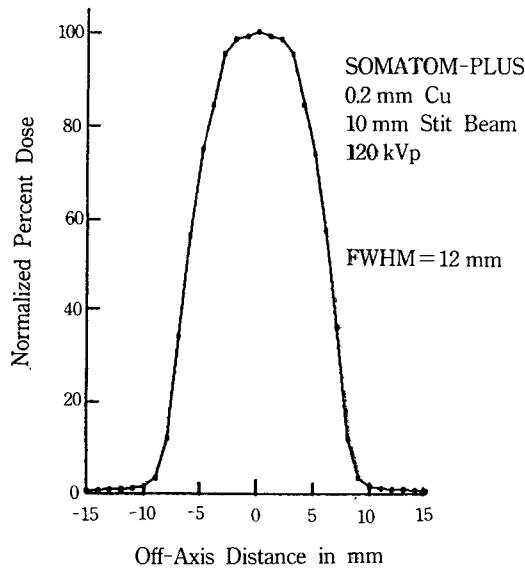


Fig. 2 Dose profile curve of CT slit beam

결 과

방사선에너지 80 kVp와 120 kVp X선을 방출하는 전산화단층영상장치의 부가필터는 0.2 mm Cu가 고정부착되어있고, 실험항 선폭은 10 mm 두께를 선정하였으며, 흡수체를 투과한 선량측정은 좁은 선폭의 선량측정에 유효한 반도체검출기를 이용하여 Fig. 2와 같은 선폭내 선량분포를 구하였다. 선폭내 선량분포 특성은 95% 선량범위가 6 mm로 비교적 평탄함을 보였고, FWHM은 12 mm였으며 조사면 가장자리는 급격한 선량감소를 보여 콜리메이터에 의한 방사선차폐가 양호한 것으로 나타났다. 따라서 슬릿빔의 방사선출력선량 측정은 검출기의 기하학적 유효위치의 결정이 용이한 반도체검출기를 통해 이루어졌다.

각 광자에너지스펙트럼 $\Phi(E)$ 에 의한 투과한 감쇄선량은 자체 제작한 환형 알루미늄 필터를 사용하여 얻었으며, 환형 알루미늄필터의 최소반경은 150 mm이고 최대 두께는 92.3 mm이었다.

투과선량 측정은 흡수체의 두께를 1.35 g/cm^2 에서 24.92 g/cm^2 까지 9 단계로 나누어 측정

하였으며, 투과선량비는 Fig. 3 과 같다.

부가필터 0.2 mm Cu를 사용한 실험장치의 반가층은 80 kVp X선에서 알루미늄반가층 6 mm, 120 kVp X선에서는 10 mm 를 각각 얻을 수 있었다. 특히 필터를 투과한 투과선량계수의 곡선은 지수함수적으로 감소함을 알 수 있었다.

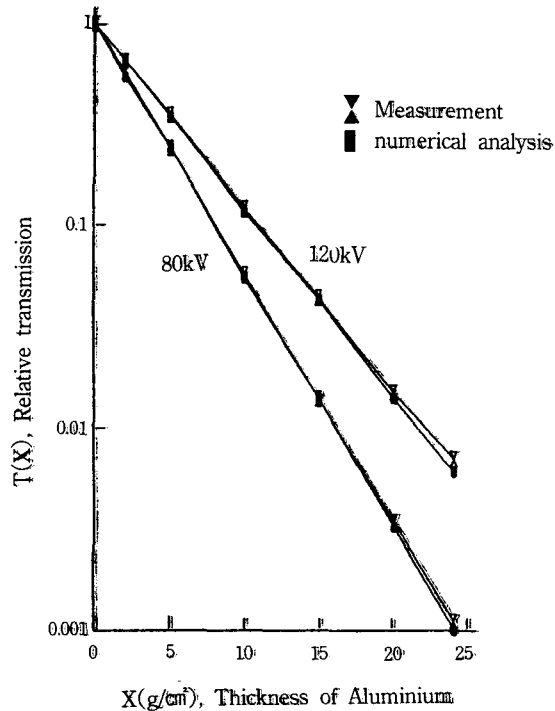


Fig. 3 Relative transmission $T(x)$ data as a function of thickness of the aluminium filter for a CT x-ray.

The mark (\blacktriangledown) is represented the measurement and the square mark (\blacksquare) is for fitted by numeric analysis.

투과선량비를 이용하여 80, 120 kVp X선의 에너지별 분할조사선량 $F(E)$ 은 실험 반복적 수치해석을 통해 Fig. 4 와 같이 구하였다. 반복적 수치해석은 에너지구간을 2 keV 간격으로 광자플루언스를 결정하고 질량에너지흡수계수를 이용해 조사선량으로 변환하고 최대조사선량의 에너지 영역을 중심으로 규격화하여 얻었다¹⁰⁾.

텅스텐타겟을 사용한 특성x선은 60 keV 와 69.3 keV 의 흡수단에 의한 조사선량영역이 잘 나타나 있으며(Fig. 4a, b), 60 keV 흡수가 69.3 keV 흡수단 보다 높게 나타났으며(Fig. 4a), 재구성 스펙트럼상의 최대 광자플루언스는 50-52 keV 구간에 있었다.

반복적 수치해석을 통해 결정한 방사선의 스펙트럼을 이용하여 흡수체를 투과한 투과선량비는 실험치와 비교한 결과 $\pm 2\%$ 이내에서 잘 일치함을 Fig. 3에서 알 수 있었다.

특히 알루미늄두께 15 g/cm²까지는 재구성한 스펙트럼에 의한 투과선량비와 실측선량비가 거의 일치하였으나, 흡수체 24 g/cm²에서는 수치해석에 의한 투과선량비가 실측선량에 비해 작게 나타났다.

투과선량의 수치해석에 의한 전산화단층영상장치 X선의 에너지분포결정

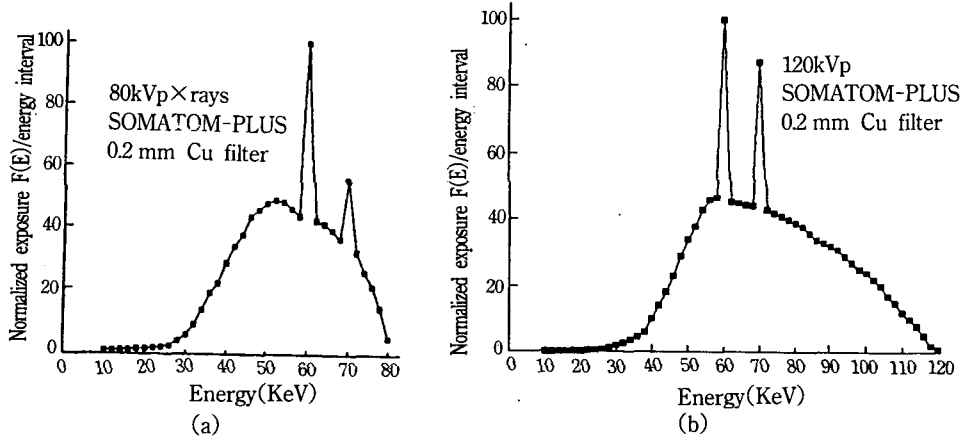


Fig. 4 Normalized exposure $F(E)$ as a function of an energy interval for 80 kVp (A), and 120 kVp (B) x-ray were created from the transmission data and numerical analysis of computed tomography unit (Somatom, Siemens).

Table 1. Compare the attenuated beam of computation to that of measurement in 120 kVp CT x-ray beam.

Absorber Thickness (g/cm^2)	Measurements (A)	Computations (B)	% differency (B-A)/A \times 100
0	1.000	1.000	0
1.4	0.704	0.706	0.3
2.6	0.525	0.521	-0.8
3.9	0.384	0.380	-1.0
6.5	0.216	0.210	-2.8
8.4	0.143	0.139	-2.8
10.6	0.09	0.087	-3.3
14.1	0.04	0.038	-5.0
24.9	0.008	0.007	-12.5

고 찰

방사선 에너지스펙트럼의 측정은 인체의 흡수선량이 조직의 전자밀도와 방사선에너지의 함수로 결정되고, 또한 흡수체의 투과력을 결정할 수 있으므로 방사선물리에서는 중요하고 관심이 높은 분야이다¹³⁾. 방사성물질의 에너지스펙트럼은 반도체검출기를 이용한 다채널 분석기에 의한 측정이 주로 이용되고 있으며, 분해능이 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 방사선노출시간이 수 msec 내지 수초로 장시간노출이 어려운 진료용 방사선장치에서는 다채널분석기에 의한 에너지스펙트럼의 측정의 흡수체의 투과력을 이용하여 분석하는 방법이 제시되어 왔다^{7,8)}.

흡수체를 투과한 감쇄선량은 에너지스펙트럼에 크게 의존하게 되므로 투과선량과 에너지별 광자플루언스관계는 라플라스역변환관계에 있으므로 여러층의 흡수체를 투과한

선량감쇄비로 에너지별 분할조사선량 $F(E)$ 을 구할 수 있다.

진단용 방사선장치의 투과력을 측정함에 있어서, 흡수체를 검출기로 부터 약 50 cm 이상 떨어진 위치에 설치하여 흡수체에서 발생한 산란선을 제거할 수 있거나, 전산화단층영상 장치의 경우 회전조사에 의하므로 흡수체와 검출기간의 거리에 상당한 제한을 받게 된다⁹⁾. 본 실험에서는 반경 15 cm 의 알루미늄 흡수체를 이용하여 투과선량을 측정하고, 반복적 수치해석을 통해 광자플루언스를 구한 다음 에너지별 분할조사선량을 얻었으며, 수치해석을 통한 에너지스펙트럼에 의한 투과선량과 실측선량을 비교한 결과 거의 일치하는 값을 얻을 수 있었다.

수치해석에 의한 에너지스펙트럼은 10 keV를 문턱에너지로 최대에너지까지 2 keV 영역의 광자수를 수치화하였다. 특히 본 연구의 장치는 부가 필터로 0.2 mm Cu를 부착한 관계로 저에너지영역의 흡수가 높은 것으로 나타났으며, 이것은 HE Johns 등이 X선속내 동필터의 영향을 밝힌 바, 29.2 keV 이하의 에너지영역에서 특히 흡수가 크게 나타난 것과 잘 일치함을 보였다⁹⁾.

본 실험에서 실측에 의한 투과선량비와 에너지스펙트럼으로부터 역으로 투과선량비를 구한 값과 비교한 결과 두께 15 g/cm²까지는 80 kVp 와 120 kVp 모두 거의 일치한 값을 보인 반면, 24 g/cm²의 두께에서 측정치와 일치하지 않는 것은 검출기와 필터의 거리가 가까와 산란선의 영향을 배제할 수는 없겠으나, 무엇보다 출력선량율이 상대적으로 매우 낮은 것이 오차의 주요 원인인 것으로 생각된다.

본 실험에서 분할조사선량 $F(E)$ 과 투과선량비의 관계는 라플라스변환에 근거를 두고 있으며, 재구성된 에너지스펙트럼을 이용하여 투과선량을 구해 비교한 결과 잘 일치하고 있어, 에너지스펙트럼이 요구되는 방사선장에서는 흡수체를 이용한 에너지스펙트럼의 재구성법이 많이 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

결 론

80 kVp 와 120 kVp를 방출하는 전산화단층영상장치의 방사선의 흡수체투과선량을 비교하여 각 에너지스펙트럼을 구하였으며, 재구성된 스펙트럼을 이용하여 역으로 흡수체에 대한 투과선량비를 구하여 비교한 결과 실측값과 잘 일치하였다.

투과선량은 임상방사선장에서 비교적 쉽게 구할 수 있으며, 위치해석이 용이하므로 에너지구간별 분할조사선량분포 재구성법은 인체조직의 흡수선량의 분석에 적절히 이용할 수 있을 것으로 확신한다.

참고문헌

1. R. Mohan, C. Chui : Differential pencil beam dose computation model for photons. Med Phys. 13(1) 64-73 : 1986
2. M. R. Sontag, J. R. Cunningham : The Equivalent Tissue-Air Ratio Method for Making Absorbed Dose Calculations in a Heterogeneous Medium. Radiology 129. 787-794 : 1978
3. 최태진 등 : 이중에너지광자선의 전산화단층촬영술을 이용한 정량적 골무 기물함량의 비교 분석. 대한치료방사선과학회지. 15(2). 153-158 : 1997

4. B. O. Roos, H. Skoldborn : Dual photon absorptiometry in lumbar vertebrae. 1. Theory and method. *Acta Radiologica Therapy Physics Biology*. 13. 266–280 : 1974
5. W. R. Nelson, T. M. Jenkins : *Computer Techniques in Radiation Transport and Dosimetry*. Plenum Press. NY, pp.173–210, 1980
6. T. R. Mackie, A. F. Bielajew et al : Generation of photon energy deposition kernels using the EGS Monte Carlo code. *Phys. Med. Biol.* Vol.33(1). 1–20 : 1988
7. L. C. Baird : X-ray spectra vs attenuation data : A theoretical analysis *Med.Phys.* 8, 319(1981)
8. B. R. Archer, L. K. Wagner : A Lalace transform pair model for spectral reconstruction. *Med.Phys.* 9, 844(1982)
9. H. E. Johns, J. R. Cunningham : *The Physics of Radiology*. 4th ed. Ch8. pp.270–289. Thomas. Springfield, Illinois 1983
10. B. R. Archer, L. K. Wagner : Determination of diagnostic x-ray spectra with characteristic radiation using attenuation analysis. *Med.Phys.* 15, 637(1988)
11. P. H. Huang, T. S. Chen, K. R. Kase : Reconstruction of diagnostic x-ray spectra by numerical analysis of transmission data. *Med.Phys.* 13(5), 707 : 1986
12. NSRDS-NBS29 : *Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients From 10 keV to 100 GeV*. NBS. 1969
13. 최태진, 김옥배 : Sensitivity variations with pre-irradiation dose to P-type semi-conductor for radiation dosimetry. *의학물리*, 제6권1호. 49–57, 1995.

Empirical Determination of a CT X-ray Spectra by Numerical Analysis using Transmission Data

Tae Jin Choi, Ph.D., Ok Bae Kim, M.D, Soo Jhi Suh, M.D.*
Department of Therapeutic Radiology,* Diagnostic Radiology School of Medicine,
Keimyung University Taegu, Korea

Abstract

The knowledge of x-ray spectra is highly desirable in some investigation involves the differential penetrating power and absorption coefficient correction of various photon beam. The transmission data were obtained from the 80 kVp and 120 kVp of CT x-ray beam with the aluminium filter which is designed in a 30 cm of diameter and pipe-typed filter was prepared from 5.0 mm upto 92.3 mm of thickness. To obtain the reconstructed spectra of CT x-ray, the investigator used the iterative numerical analysis which has been extended to include the tungsten characteristics from experimental transmission data with energy interval of 2 keV. Comparison of the calculated transmission data from the reconstructed spectra with that of measurement shows good agreement in both 80 kVp and 120 kVp x-ray beams. This numerical analysis based on iteratively calculation of fractional exposure per energy interval shows the high potential of usefulness of determination the x-ray spectra from the attenuated beam in diagnostic energy range.