

HVL Measurement of the Miniature X-Ray Tube Using Diode Detector

Ju-Hye Kim*, So-Hyeon An*, Yoon-Jin Oh*, Yoon-Seo Ji*,
Jang-Yong Huh*, Chang-Mu Kang[†], Hyunsuk Suh[†], Rena Lee[†]

*Department of Medical Science, Ewha Womans University, Seoul,

[†]Korea Institute of Science and Technology Information, [†]Department of Radiation Oncology,
School of Medicine, Ewha Womans University, Seoul, Korea

The X ray has been widely used in both diagnosis and treatment. Recently, a miniature X ray tube has been developed for radiotherapy. The miniature X ray tube is directly inserted into the body irradiated, so that X rays can be guided to a target at various incident angles according to collimator geometry and, thus, minimize patient dose. If such features of the miniature X ray tube can be applied to development of X ray imaging as well as radiation treatment, it is expected to open a new chapter in the field of diagnostic X ray. However, the miniature X ray tube requires an added filter and a collimator for diagnostic purpose because it was designed for radiotherapy. Therefore, a collimator and an added filter were manufactured for the miniature X ray tube, and mounted on. In this study, we evaluated beam characteristics of the miniature X ray tube for diagnostic X ray system and accuracy of measuring the HVL. We used the Si PIN Photodiode type Piranha detector (Piranha, RTI, Sweden) and estimated the HVL of the miniature X ray tube with added filter and without added filter. Through an another measurement using Al filter, we evaluated the accuracy of the HVL obtained from a direct measurement using the automatic HVL calculation function provided by the Piranha detector. As a result, the HVL of the miniature X ray tube was increased around 1.9 times with the added filter mounted on. So we demonstrated that the HVL was suitable for diagnostic X ray system. In the case that the added filter was not mounted on, the HVL obtained from use of the automatic HVL calculation function provided by Piranha detector was 50% higher than the HVL estimated using Al filter. Therefore, the HVL automatic measurement from the Piranha detector cannot be used for the HVL calculation. However, when the added filter was mounted on, the HVL automatic measurement value using the Piranha detector was approximately 15% lower than the estimated value using Al filter. It implies that the HVL automatic measurement can be used to estimate the HVL of the miniature X ray tube with the added filter mounted on without a more complicated measurement method using Al filter. It is expected that the automatic HVL measurement provided by the Piranha detector enables to make kV-X ray characterization easier.

Key Words: Miniature X ray tube, HVL, Added filter

서 론

최근 X선관이 소형화 되어 초소형 X선관이 개발되었다.

본 연구(논문)는 지식경제부의 사업원천기술개발사업(10035527)과, 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0024314).

이 논문은 2012년 9월 10일 접수하여 2012년 12월 3일 채택되었음.

책임저자 : 이레나, (158-710) 서울시 양천구 목 5동

이화여자대학교 목동병원 방사선종양학과

Tel: 02)2650-5337, Tel: 02)2654-0363

E-mail: renalee@ewha.ac.kr

EBT (Electronic Brachytherapy) 시스템을 기반으로 한 Xofig Inc. 에서 출시한 초소형 X선관(Axxent HDR X-ray source)도 그 중 하나이다. 이는 수술중 방사선 치료(Intra-Operative Radiation Therapy, IORT), 근접치료(Brachytherapy) 등 종양 치료를 목적으로 상용화된 장비로 지름 2.3 mm, 길이 1.5 cm의 초소형 X선관을 지름 5.5 mm의 유연한 카테터 안에 삽입하여 사용된다.¹⁻⁴⁾ 조사 목적 부위에 직접 X선관을 삽입하여 사용되므로 제작된 시준기에 따라 다양한 각도로 X선 조사가 가능하고, 검사 목적 외 환자의 피폭선량을 최소화한다. 그러나 개발된 초소형 X선관은 현재 종양 치료 용으로만 사용되고 있다. 초소형 X선관의 장점을 이용해서

영상 획득을 위해 사용된다면 의료 분야 및 그 외 다른 비파괴 검사 등에도 활용이 가능할 것으로 생각된다.^{3,4)}

일반적으로 일반촬영, 전산화 단층촬영(Computed Tomography, CT)과 같은 진단용 X선 시스템에는 보통 1~3 mm Al의 필터(added filter)가 장착되어있다. 이는 영상 획득에 불필요한 저에너지 X선을 최소화하여 환자에게 불필요한 선량 흡수를 방지하고, 환자에 조사되는 X선을 균일하게 하여 촬영 영상의 질을 향상시킨다.⁵⁾ 그러나 초소형 X선관은 본래 치료용으로 설계되었기 때문에 진단용 장비와 같은 시준기(collimator)와 저에너지 X선을 제거하기 위한 필터 등이 장착되어 있지 않다. 그렇기 때문에 본 연구실에서 영상 획득용으로 적합한 시준기와 필터를 자체 제작하였고(Table 1), 제작한 필터 적용에 따른 초소형 X선관의 특성을 반가층(Half Value Layer, HVL) 측정을 이용해 분석하고자 하였다. 반가층은 방사선의 강도를 처음 입사한 값의 반으로 줄이는데 필요한 물질의 두께로 정의되며, 단위는 보통 mm Al으로 나타낸다.^{5,6)}

본 연구에서는 5개의 실리콘 다이오드가 내장된 Si PIN photodiode type 검출기(Piranha, RTI, Sweden)⁷⁾를 사용하였다. 이 검출기는 관전압(kVp), 조사시간, 선량(air kerma), 선량률(air kerma rate), 반가층, X선 여과(X-ray filtration) 등을 측정할 수 있으며, 측정된 스펙트럼을 기반으로 선량을 계

산하여 반가층의 자동 측정이 가능하다(Table 2). 이러한 특징을 이용하여 초소형 X선관의 반가층을 측정하고, 알루미늄 필터를 사용해 측정의 정확성을 평가하였으며, 제작된 초소형 X선관용 필터의 적용에 따른 선질 향상을 확인하였다.

재료 및 방법

반가층을 계산하는 방법으로는 이온함(이온 전리함)을 이용한 감쇠 곡선을 측정하는 방법과 측정된 스펙트럼을 기반으로 선량을 계산하는 방법이 있다.^{1,2)} AAPM report TG 61 (2001)은 40~300 kV 범위의 X선 선량측정법에서 반가층을 측정하는 기본 프로토콜을 제공한다. 이에 따르면 반가층은 좁은 선속과 산란 효과를 무시한 상태에서 선량률을 측정하여 계산한다. 이때 선원과 검출기 사이에는 격막 물질이 존재하며, 선원에서 격막 물질과의 거리는 50 cm, 그리고 격막 물질과 검출기간 거리는 최소 50 cm 떨어져

Table 1. Thickness and materials of collimator and added filter which were used for the miniature X-ray tube beam control.

Thickness and material	
Collimator	2 mm Cu
Added filter	2 mm Al

Table 3. PTW-23342 chamber specification.

Volume	0.02 cm ³
Response	3 · 10 ⁻¹⁰ C/Gy
Leakage	±1 · 10 ⁻¹⁴ A
Polarizing voltage	max. 300 V
Cable leakage	1 · 10 ⁻¹² C/{Gy·cm}
Wall material	PE{CH ₂ }n
Membrane thickness	0.03 mm
Area density	2.5 mg/cm ²
Electrode	Graphite; 3 mm ∅
Range of temperature	10~40°C
Range of rel. humidity	20~70%
Ion collection time	150 V: 0.05 ms 300 V: 0.03 ms

Table 2. Piranha detector specification.

Measurement range			Error	
kVp	Rad/Flu	35~125 kVp	±1.5%	W/3 mm Al
	Dental	35~105 kVp		
	CT	45~155 kVp		
Exposure time	0.1 ms~2,000 s	±1% or 0.5 ms		
Dose	15 nGy~1,000 Gy	±5%		
	2 μR~100 kR	±5%		
Dose rate	15 nGy/s~450 mGy/s	±5% or ±0.7 nGy/s		Exposure time: over 20 ms
	1.7 μR/s~50 R/s	±5% or 0.8 μR/s		
	0.1 mR/min~3000 R/min	±5% or ±0.05 mR/min		
Total filter	1.5~38 mm Al	±10% or ±0.3 mm		60~120 kV HF/DC
HVL	1.2~14 mm Al	±10% or ±0.2 mm		60~120 kV HF/DC anode angle 13°

Table 4. NE-2571 chamber specification.

Sensitive Volume	0.69 cm ³
Sensitivity	4.6 R · nC ⁻¹ (46 Gy · μC ⁻¹) 275 R · min ⁻¹ · nA ⁻¹ (2.75 Gy · min ⁻¹ · nA ⁻¹)
Energy range for X and γ radiation	50 kV–300 kV (Without build-up cap) 0.3 MV–35 MV (With build-up cap) 2 MV–35 MV (In suitable phantom, measures absorbed dose to water)
Energy range for electrons (In suitable phantom)	5 MeV–35 MeV
Leakage current	Typical: 5×10 ⁻¹⁵ A Maximum: 1.5×10 ⁻¹⁴ A
Maximum Polarizing potential	400 V
Maximum exposure rate (or 99% collection efficiency)	10 kR · min ⁻¹ (continuous), 40 mR/Pulse (Pulsed) 100 Gy · min ⁻¹ (continuous), 0.4 mR/Pulse (Pulsed)

Table 5. Setting parameters for two ion chambers are summarized: NE-2571 chamber and PTW-23342 chamber (Liu *et al.*).

	Setting				
	Tube voltage peak (kVp)	Beam current (μA)	Source-chamber distance (cm)	Polarizing (V)	Charged collecting (s)
NE-2571	50	100	25	300	Over 100
PTW-23342	50	100	17.5	300	Over 100

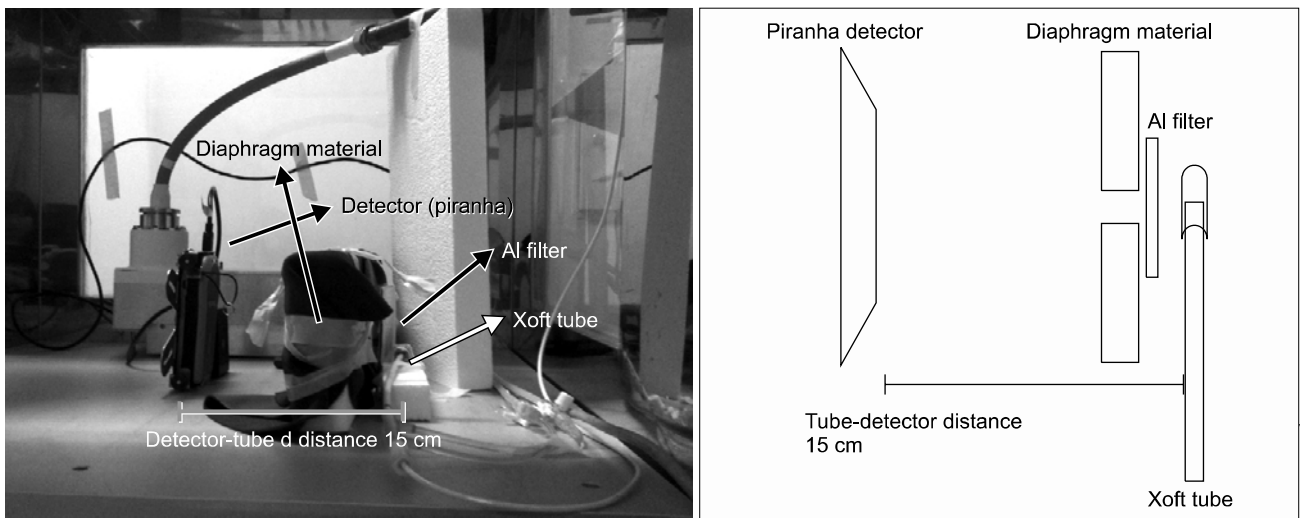


Fig. 1. Half value layer measurement.

진 곳에 위치시켜야 한다.⁶⁾

그러나 초소형 X선관의 특성상 X선관과 검출기를 100 cm 이상 띄우면 측정할 수 있는 선량 값이 너무 낮아지기 때문에 검출기에서 충분한 신호를 받아들이기 어렵다. Piranha 검출기는 조사면 크기(field size)가 20×40 mm, 최소 X선의 조사면(field)은 3×21 mm로, 신호를 감지할 수 있는 검출 영역이 매우 좁다. 따라서 X선관과 검출기 사이의 거

리가 멀어질수록 받아들일 수 있는 신호의 세기도 약해진다.^{1,2)} 이와 같은 이유로 이온함을 사용해 초소형 X선관의 반가층을 측정한 Liu 등은 NE-2571 이온함(Table 3)은 선원으로부터 25 cm, PTW-23342 이온함(Table 4)은 17.5 cm의 거리만큼 떨어져서 위치시켰다(Table 5).^{1,2)}

이를 참고로 해서^{1,2,6)} 본 연구에서는 초소형 X선관과 Piranha 검출기의 거리를 15 cm, 격막 물질과 Piranha 검출

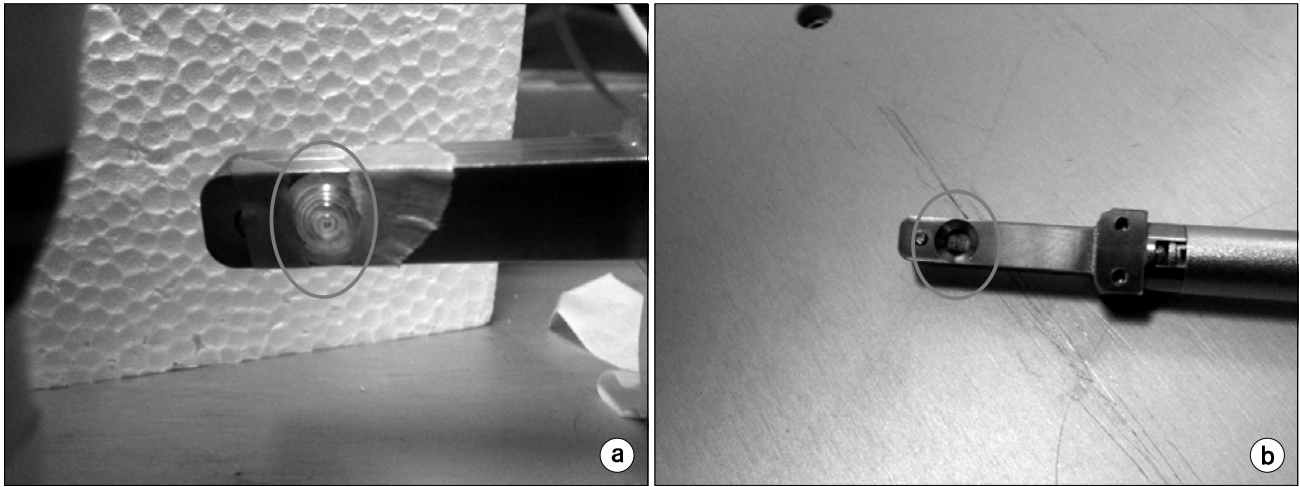


Fig. 2. A miniature X-ray tube sheathed in a Cu collimator (Xoft Axxent HDR X-ray source): (a) with an added filter mounted and (b) with an added filter detached.

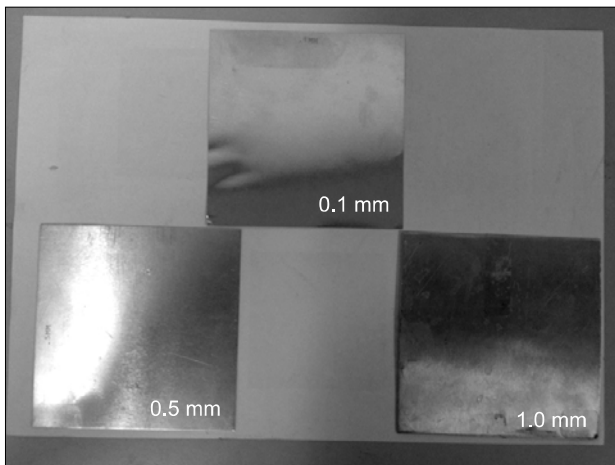


Fig. 3. Al filters of different thickness (0.1 mm, 0.5 mm, 1.0 mm) are depicted which were used for the HVL measurement. They were placed between the miniature X-ray tube and diaphragm materials, and were increased until the beam intensity detected reached the HVL of the miniature X-ray tube.

기의 거리는 10 cm로 설정하였다. 격막 물질 사이의 간격은 5 cm로 설정하고, 그 간격 사이로 X선이 나갈 수 있도록 설계하였다(Fig. 1). 본 연구에서 사용한 Xoft Inc.의 초소형 X선관은 최대 50 kV, 300 μ A까지 작동 가능하다.^{3,8)} 이에 따라 조사 조건은 50 kVp, 300 μ A로, 조사 시간은 10 초로 설정하였다.

초소형 X선관에 제작한 시준기만 장착한 상태, 또는 시준기와 필터를 함께 장착한 상태(Fig. 2)에서 Piranha 검출기를 이용하여 선량, 선량률을 측정하고, 자동으로 측정되

는 예상 반가층을 확인하였다. 그리고 초소형 X선관과 격막 물질 사이에 10×10 cm 크기의 알루미늄 6061 합금⁹⁾으로 제작된 알루미늄 필터(Fig. 3)를 놓고 두께를 변화시켜 가면서 두께별 알루미늄 필터에 의한 선량률 감소량 측정을 통해 실제 반가층을 측정하고, Piranha 검출기에서 자동으로 측정된 예상 반가층과 실제 측정값을 비교하였다.

결 과

Piranha 검출기의 반가층 예상 측정값은 시준기만 장착했을 때 1.10 mm Al, 시준기와 필터를 모두 장착했을 때 1.05 mm Al 값으로 나타났다. 필터의 장착 유무에 따라 약 0.05 mm Al (4%)의 차이를 보였다.

알루미늄 필터의 두께를 변화시켜 가면서 측정된 반가층은 시준기만 장착했을 때 0.7 mm Al, 시준기와 필터를 모두 장착했을 때 1.30 mm Al 값을 나타냈다. 필터의 장착 유무에 따라 1.23 mm Al의 차이를 보였으며, 필터를 장착하지 않았을 때 보다 장착했을 때 반가층이 약 1.9배 증가하였다.

시준기만 장착했을 때 Piranha 검출기로 제시된 예상 반가층과 알루미늄 필터로 두께를 변화시키며 얻어진 반가층의 차이는 약 0.4 mm Al로 나타났다. Piranha 검출기의 예상 측정값이 후자에 비해 1.57 배 높게 나타났다. 반면 시준기와 필터를 모두 장착했을 때는 측정값의 차가 약 0.25 mm Al로, 제시해준 예상 측정값이 실제 알루미늄 필터를 이용해 측정한 값보다 낮은 수치로 나타났다(Table 6).

Table 6. The HVL of the miniature X-ray tube were measured in two different conditions: With added filter and without added filter. The two different methods were employed to estimate the HVL: (a) the HVL were obtained directly from Piranha detector using the automatic HVL-calculation function provided by the Piranha detector and (b) the HVL was estimated with the Piranha detector changing Al filter thickness.

	Setting			Data	
	Tube voltage peak (kVp)	Beam current (μ A)	Exposure time (s)	(a) Piranha detector (mm Al)	(b) Al filter (mm Al)
Only using collimator	50	300	10	1.05	0.7
Using collimator and added filter	50	300	10	1.10	1.30

Table 7. The HVLs whose measurements were done without added filters are compared for two different detectors.

Detector	HVL (mm Al) at 50 kVp
PTW-23342 and NE-2571 chamber	0.52±0.09 mm Al ^{a)}
Piranha detector	0.7 mm Al ^{b)}

^{a)}Average value between PTW-23342 and NE-2571 using six miniature tubes. ^{b)}The added filter was not mounted on, and the HVL was calculated with the Piranha detector by changing Al filters.

고 찰

본 연구에서 사용한 Xoft Inc.의 초소형 X선관은 본래 목적이 진단용이 아닌 방사선 치료용으로 제작된 장비이기 때문에 일반적인 X선 진단 장비처럼 X선관의 필터가 존재하지 않는다. 따라서 초소형 X선관에 영상 획득용으로 제작된 시준기와 필터를 장착하고, 필터의 장착 여부에 따른 선질의 변화를 반가층 측정을 통해 확인하였다.

시준기와 필터를 모두 장착했을 때 실제 반가층 측정값은 50 kVp 조건에서 1.3 mm Al를 나타냈으며, 필터의 장착 유무에 따라 약 1.9배 증가함을 보였다. 이는 초소형 X선관에 필터를 사용함으로써 영상 획득에 불필요한 저에너지 X선이 제거되었기 때문으로 생각된다. 또한 Piranha 검출기에서 제시한 예상 반가층 측정값은 실제 알루미늄 필터를 사용해 측정된 값보다 1.04배 작게 나타났는데 이는 측정에 사용한 Piranha 검출기가 X선관에 텅스텐(W) 표적과 3 mm Al의 필터가 존재한다는 가정 하에서 교정된 검출기이기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 교정값은 실제 진단 장비의 선량 등 측정에는 영향을 주지 않지만, 본 연구에서 사용한 초소형 X선관은 영상 진단 목적으로 제작된 장비가 아니기 때문에 측정 결과에 영향을 받은 것으로 생각된다.

필터를 장착하지 않은 경우, 알루미늄 필터를 사용하여

측정한 반가층(0.7 mm Al)은 Liu 등의 PTW-23342 이온함과 NE-2571 이온함을 이용한 반가층(0.52±0.09 mm Al)에 비해서 다소 높은 값을 보였다(Table 7). 이는 본 연구에서 사용된 Piranha 검출기의 방사 면적(active area)과 알루미늄 필터-검출기간의 거리를 고려한 입체각(solid angle)이 Liu 등에 비해 더 크기 때문에 알루미늄 필터에서 발생한 산란선을 포함할 확률이 높기 때문으로 생각된다. 또한 초소형 X선관은 X선관마다 투과형 표적의 미세한 형태 차이가 존재하므로 빔 분포의 차이를 발생한다. Liu 등의 연구에서는 6개의 초소형 X선관을 사용한 후 평균치를 구하였으나, 본 연구에서는 1개의 X선관만 사용했기 때문에 X선관에 따른 오차가 측정에 포함된 것으로 예상된다. 따라서 다양한 초소형 X선관을 사용하여 반가층 측정을 한다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

결 론

본 연구에서는 진단용으로 사용하기 위한 초소형 X선관의 특성 평가를 수행하였고, 다이오드가 장착된 Piranha 검출기를 이용하여 반가층 측정의 가능성을 평가하였다. 본 연구에서 사용한 Piranha 검출기는 기존 초소형 X선관과 같이 필터가 없는 X선관에서는 자동으로 측정된 반가층 값을 신뢰하기 어려우나 진단용 필터를 적용했을 경우는 반가층 자동 측정값을 신뢰할 수 있으므로 kV-X선 장치의 특성 평가를 수월하게 수행할 것으로 기대된다.

또한 시준기와 필터를 적용한 초소형 X선관은 기존 X선관에 비해 선질이 향상됨을 확인하였으며, 이는 보건복지부령 349호(2006) “진단용 방사선 발생장치의 안전관리에 관한 규칙”¹⁰⁾에서 제시하는 반가층 기준에도 충족함을 확인하였다. 따라서 본 연구의 결과를 통해 진단 장비에 적합한 시준기, 필터를 적용한다면 방사선 치료용으로 제작된

초소형 X선 튜브를 진단용으로도 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Liu D, Poon E, Bazalova M, et al: Spectroscopic characterization of a novel electronic brachytherapy system. *Phys Med Biol* 53:61-75 (2008)
2. Derek MC Liu: Characteristic of novel electronic brachytherapy system. Medical Physics Unit McGill University, Montreal (2007)
3. 조성호, 김소영, 안소현, 임수미, 이레나: 치과 영상용 삽입형 초소형 X선관의 가능성 연구. *JKSR* 6(1):39-45 (2012)
4. 조성호, 김동영, 백광우, 이레나: 신개념 치과용 X선 영상장치 소개-강내형 X선관. *전자공학회 논문지*. 48(4):350-357 (2011)
5. Stewart C: *Radiologic Science for Technologists-Physics, Biology, and Protection*. 8th ed. Stewart C. Busong, ScD., FACR, FACMP. Mosby (2004)
6. AAPM TG-61: AAPM protocol for 40-300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology. *Med Phys*, C.M.Ma, chair. (2001)
7. Hourdakis CJ, Boziari A, Koumbouli E: The effect of a compression paddedle on energy response, calibration and measurement with mammographic dosimeters using ionization chambers and solid-state detectors. *Phys Med Biol* 54:1047-1059 (2009)
8. Emerging Technology Committee Report: Electronic Brachytherapy. Electronic brachytherapy working group, Evaluation subcommittee of ASTRO's emerging technology committee, USA, ASTRO, Catherine C. Park, MD (2008)
9. Sanders RE, Jr: Technology Innovation in Aluminum Products. *JOM* 53:21-25 (2001)
10. 진단용 방사선 발생장치의 안전관리에 관한 규칙. 보건복지부령 349호(2006)

다이오드 검출기를 이용한 초소형 X선관(Miniature X-ray Tube)의 반가층 측정

*이화여자대학교 의과학과, †한국과학기술정보연구원, ‡이화여자대학교 의과대학 이대목동병원 방사선종양학과

김주혜* · 안소현* · 오윤진* · 지윤서* · 허장용* · 강창무† · 서현숙‡ · 이레나‡

X선은 방사선 진단과 치료 분야에 있어서 다양하고 광범위하게 이용되고 있으며, 최근에는 방사선 치료용 초소형 X선관이 개발되었다. 초소형 X선관은 조사 목적 부위에 직접 삽입하여 사용되므로 제작 시준기에 따라 다양한 각도로 X선 조사가 가능하고, 검사 목적 외의 환자 피폭선량을 최소화한다. 이러한 초소형 X선관의 장점을 이용해서 X선 영상을 획득하는데 적용한다면 X선 진단 분야의 새로운 장을 열 것으로 기대된다. 하지만 초소형 X선관은 본래 치료용으로 설계되었기 때문에 진단용 장비에 적합한 시준기, 필터(added filter) 등이 필요하다. 따라서 자체 제작한 시준기와 필터를 적용하여 초소형 X선관의 빔 특성이 진단용에 적합한지 평가 하였고, 이를 위해서 다이오드 검출기를 이용하여 반가층을 측정하고 측정의 가능성을 평가하였다. 본 연구에서는 Si PIN Photodiode type인 Piranha 검출기(Piranha, RTI, Sweden)를 사용하여 필터 적용 유무에 따른 초소형 X선관의 반가층을 측정하고, 알루미늄 필터를 사용한 측정을 통하여 Piranha 검출기의 반가층 측정의 정확성을 평가하였다. 측정 결과에 따르면 초소형 X선관의 반가층은 필터의 장착에 따라 약 1.9배 증가하여 진단용 방사선 발생 장치의 적합성을 확인하였다. Piranha 검출기의 반가층 자동 측정값은 필터를 미장착한 경우에 실제 반가층 측정값에 비해 50% 높게 측정되어 적용이 불가능하나, 필터를 장착한 경우에는 실제 반가층 측정값과 약 15%의 차이로 감소되었다. 따라서 진단용 필터를 적용했을 경우는 Piranha 검출기의 반가층 자동측정이 가능하여 kV-X선 특성평가를 수월하게 수행할 것으로 기대된다.

중심단어: 초소형 X선관, 반가층, 필터