Original Article

PROGRESS in MEDICAL PHYSICS Vol. 26, No. 2, June, 2015
http://dx.doi.org/10.14316/pmp.2015.26.2.99

Development of Monitor Chamber Prototype and Basic Performance Testing

Mujin Lee, Heuijin Lim, Manwoo Lee, Jungyu Yi, Dong Joo Rhee, Sang Koo Kang, Dong Hyeok Jeong

Research Center, Dongnam Inst. of Radiological & Medical Sciences, Busan, Korea

The monitor chamber is a real time dosimetry device for the measurement and the control of radiation beam intensity of the linac system. The monitor chamber prototype was developed for monitoring and controlling radiation beam from the linac based radiation generator. The thin flexible printed circuit boards were used for electrodes of the two independent plane-parallel ionization chambers to minimize the attenuation of radiation beam. The dosimetric characteristics, saturation and linearity of the measured charge, were experimentally evaluated with the Co-60 gamma rays. The performance of the developed monitor chamber prototype was in an acceptable range and this study shows the possibility of the further development of the chamber with additional functions.

Key Words: Monitor chamber, Linac, Dosimetric characteristics

서 론

의료용 가속기와 같은 고출력 방사선 발생장치에서는 방출하는 방사선의 출력과 빔의 평탄도(Flatness)를 일정하게 유지하기 위하여 모니터링 시스템을 내장하고 있다.[1,2] 빔 모니터링 시스템은 모니터 전리함과 전하량 측정 장치 그리고 신호처리장치로 구성되어 있다.[1] 모니터링 시스템은 빔의 세기와 평탄도를 실시간으로 감시하고 빔 수송계의 제어 시스템과 연동하여 가속기의 안정한 작동을 유도할 뿐만 아니라 발생된 빔의 총량을 측정하여 방사선의 개폐를 결정하는데 중요한 역할을 수행한다. 모니터링 시스템에 의하여 결정되는 방사선량의 단위를 모니터 유니트(Monitor unit)라고 하며, 모니터 유니트의 수(Number of monitor units)는 방사선 발생장치에서 발생한 일정 시간 동안 조사된 방사선의 총량을 나타낸다.[2,3]

전자가속기의 경우에 진공도와 온도에 따라 영향을 받는 가속관과 고전압 펄스로 작동하는 마그네트론과 전자총 등 다양한 부품으로 구성되어 있기 때문에 각종 자동제어 장치를 내장하고 있음에도 방사선 발생중 출력의 변동이 발생할 수 있다. 따라서 이를 고려하여 일정 시간 동안 발생한 방사선량을 조사의 단위로 사용하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 특히 방사선치료기의 경우에 모니터 단위의 사용은 발생한 방사선의 총량이 초기에 정한 값에 도달하면 방사선을 즉시 중단시켜 과피폭을 방지하면서 환자에게 정확한 선량을 전달하기 위한 중요한 기능이라고 할 수 있다.[4] 이러한 이유로 모니터링 시스템의 핵심인 모니터 전리함은 독립적으로 작동하는 두 개의 전리함을 내장하고 있다.[4]

모니터 전리함은 방사선의 투과가 가능한 형태로 제작된 평행 평판형 전리함과 유사한 구조를 가지지만, 본래 목적을 달성하기 위해서는 개발시 여러 가지 조건을 고려해야 한다. 먼저 얇은 전극을 사용해야 하는데 그 이유는 전리함을 통과하는 방사선과 전극과의 상호작용 발생과 전극으로 인한 방사선의 감쇠를 최소화하기 위해서이다. 또한 모니터 전리함은 공기를 매질로 사용하는 검출기로서 포화, 선형성, 그리고 재현성과 같은 선량학적 특성들을 만족해야 정상적인 기능을 수행할 수 있다.[5] 따라서 모니터 전리함의 개발에 있어 전극 재료의 선정과 방사선 조사를 통한 선량학적 특성의 측정에 의한 성능 평가가 중요하다.

본 연구에서는 선형가속기의 모니터링 시스템을 제작하기 위한 기초 연구로서 모니터 전리함 시작품을 개발하였으며,

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (DIRAMS) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. 50495-2015 & 50496-2015).
Received 28 May 2015, Revised 12 June 2015, Accepted 13 June 2015
Correspondence: Dong Hyeok Jeong (physics7@empas.com)
Tel: 82-51-720-5813, Fax: 82-51-720-5826
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

방사선 조사 실험을 통하여 시작품의 선량학적 특성을 평가하였다. 모니터 전리함의 재현성과 선형성의 평가에서는 의료용 전자가속기에 대한 국제표준규격인 IEC-60977의 기준을 적용하였으며 또한 방사선치료용 전리함의 규격에 대한 IEC-60731에서 권고하는 평가 방법들을 일부 인용하였다.[6,7)]

본 논문에서는 개발한 모니터 전리함 시작품의 재료와 형태 그리고 방사선원을 이용하여 선량학적 특성을 시험한 결과를 보고하고자 한다. 본 연구를 통하여 가속기 모니터링 시스템 개발에 필요한 유용한 자료가 확보되기를 기대하며, 또한 모니터 전리함 시작품의 기능과 성능 보완을 위한 후속 연구가 추진되어야 할 것으로 본다.

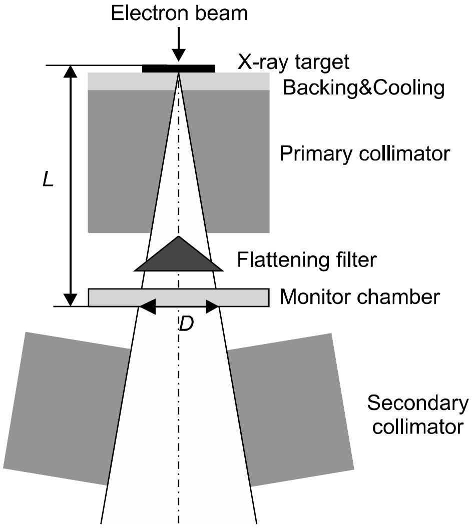

Fig. 1. Location of monitor chamber in the medical linac head.

재료 및 방법

1. 모니터 전리함의 제작

의료용 선형가속기에서 모니터 전리함은 편평화여과기(Flattening filter)와 이차콜리메이터(Secondary collimator)의 사이에 장착되어 표적에서 생성된 엑스선 또는 전자선의 출력을 실시간으로 측정한다. Fig. 1은 선형가속기의 X-선 발생 모드에서 헤드(Linac head)의 기본적 구조를 보여준다. 전자선 모드의 경우에 표적 또는 편평화여과기가 산란박(Scattering foil)으로 대체되며 모니터 전리함은 X-선과 유사한 형태로 작동한다.

모니터 전리함은 장착 위치에서 방사선의 세기를 측정하면서 조사면의 평탄성까지 검출해야 하므로 조사면을 충분히 포함할 수 있는 크기로 제작되어야 한다. 따라서 모니터 전리함의 최소 크기는, $D=(L/100)\sqrt{X^2+Y^2}$ [cm], 으로 구할 수 있는데, 여기서 D와 L은 각각 모니터 전리함의 직경과 표적에서 전리함의 하단 전극까지의 거리이다. 또한 X와 Y는 표적과 거리 100 cm에서 조사면 한 변의 크기이다. 일반적으로 X=40 cm, Y=40 cm이며, L은 약 15～20 cm이므로 D=8.5～11.3 cm 범위를 가진다.

표적에서 발생된 엑스선 광자들은 공기와의 상호작용으로 전자를 생성하고 전자는 진행 궤적을 따라 이온쌍을 생성하는데, 이 때 모니터 전리함 속에서 정지된 양・음이온들은 전기장에 의하여 각각 고압전극과 신호전극으로 분리되어 이동한다. 이 때 신호 전극은 증폭기 입력과 연결되어 시간에 따른 전류의 합 즉, 누적된 전하의 형태로 방사선량을 계측함으로써 총 방사선량을 결정할 수 있다.

Fig. 2는 모니터 전리함의 신호를 전리전류계(Electrometer)

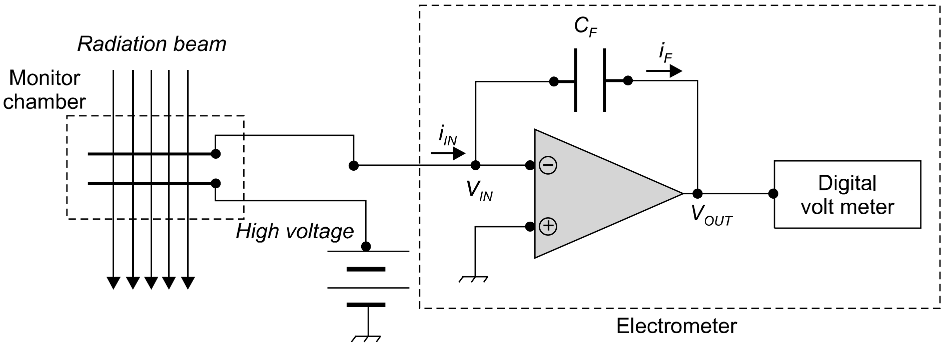

Fig. 2. Basic circuit for charge measurement using monitor chamber.

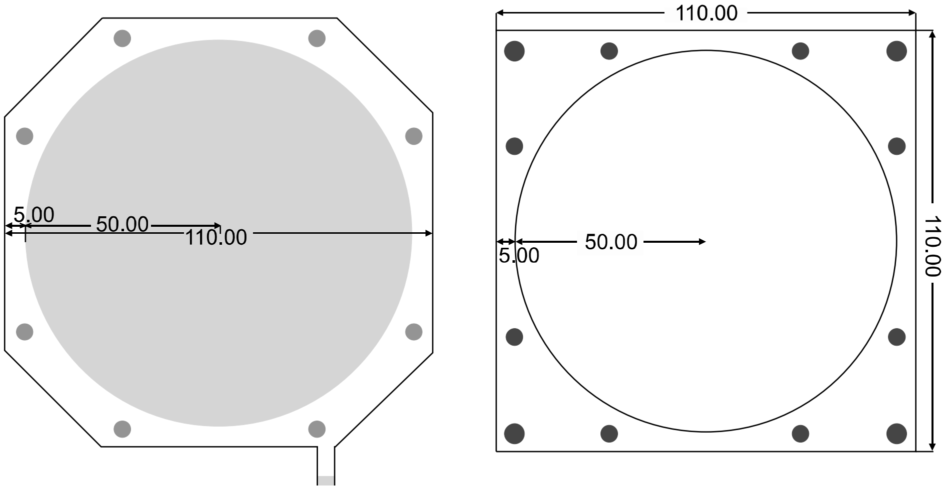

Fig. 3. Design of FPCB and base-plate for monitor chamber.

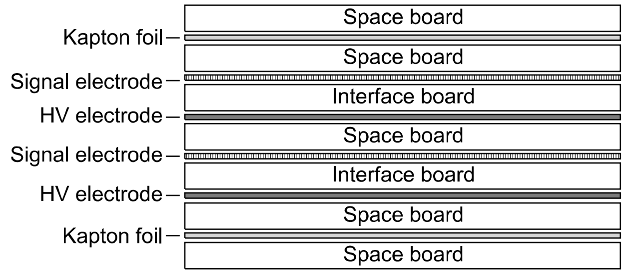

Fig. 4. Cross-sectional structure of the monitor chamber prototype.

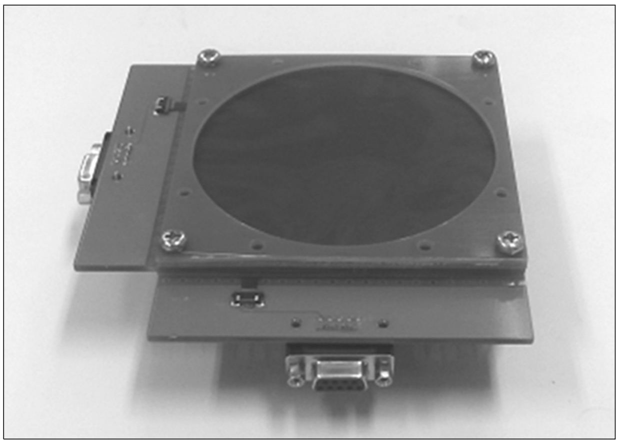

Fig. 5. Photography of the monitor chamber prototype.

로 측정하는 개념도를 보여준다. 이 그림에서 좌측은 모니터 전리함 그리고 우측은 전리전류계를 나타낸다. 전리전류계는 연산증폭기를 이용한 적분회로로 구성되며 전하의 수집을 위하여 전리함의 한쪽 극에는 분극전압(Polarization voltage)이 걸려있다. 연산증폭기가 부궤환(Negative feedback)으로 작동할 때 입력 전압(V_{IN})은 영에 가깝고 전리전류계는 전체가 접지 전위를 가지며 전리함의 양단에는 대부분의 분극전압이 걸리게 된다. 이 방식은 접지기준입력법(Ground referenced input)으로 알려져 있다.[8] 이 회로에서 출력전압은,

$$V_{OUT} = (-)\frac{1}{C_F}\int_{t_1}^{t_2} i_{IN}(t)\ dt,$$ 으로 주어진다.[9]

여기서 음의 부호는 반전 입력(Inverting input)의 출력을 의미하며, C_F는 부궤환 축전기의 용량이다. 전리전류계의 전하모드에서 V_{OUT}은 디지털 전압계에 의하여 전하량 단위로 표시된다. 본 논문의 결과에서는 제작된 모니터 전리함의 작동 시험으로서 시간에 따라 누적된 전하량의 측정 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 모니터 전리함을 구성하는 전극 재료로서 연성인쇄회로기판(Flexible printed circuit board: FPCB)을 사용하였다.[10] FPCB는 기존의 인쇄회로기판(Printed circuit board: PCB)와 동일한 기능을 하지만 보다 유연한 절연기판을 사용하고 있다는 점에서 최근 컴퓨터와 스마트폰과 같은 소형 전자기기에 널리 사용되고 있는 추세이다.[10] FPCB는 폴리마이드 필름(Polimide film)과 같은 절연체 위에 8～70 μm 정도의 구리박막이 접착된 형태를 가지고 있으며 기존의 PCB에서 페놀(Phenol) 또는 에폭시(Epoxy)를 절연체로 사용한 것보다 가벼우면서 유연성과 내열성이 우수하며 매우 섬세한 회로를 구성할 수 있는 것으로 알려져 있다.[10] 본 연구에서는 이러한 장점을 가진 FPCB를 사용하여 모니터 전리함의 전극을 제작하였다. Fig. 3은 제작에 사용된 모니터 전리함의 평면도를 보여준다. 이 그림에서 좌측은 전극으로 사용하기 위한 FPCB의 설계도이며 우측은 전극 사이에

삽입되는 절연체의 설계도이다.

본 연구에서는 이러한 설계를 기반으로 단순한 형태의 평행평판 형태(Plane parallel type)의 모니터 전리함을 제작하였다.

Fig. 4는 모니터 전리함 시작품의 단면 구조로서 두 개의 전리함을 형성하기 위한 전극(electrodes)과 절연기판(boards)의 배치를 보여준다. 이 때 전극은 두께 20 μm의 동박이 부착된 FPCB로 제작되었으며 전극 간에 삽입된 절연기판의 두께는 2 mm이다. 또한 상단과 하단에는 전극을 보호하기 위하여 두께 65 μm의 캡톤 박(Kapton foil)이 부착되어 있다. 또한 Fig. 5는 조립된 전극의 외형을 보여주며, 이 장치를 다시 알미늄 상자에 장착하여 시험용 시작품을 완성하였다.

2. 선량특성 시험

본 연구에서는 모니터 전리함의 시험을 위하여 의료용 전자가속기 기능에 대한 국제표준지침인 IEC-60977 (*Medical electron accelerators-Guidelines for functional performance characteristics*)과 방사선치료용 전리함에 대한 치침인 IEC-60731 (*Dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy*)을 참고하였다.[6,7] 먼저 IEC-60731에서는 전리함의 시험에 방사선 출력이 안정한 코발트-60 선원 또는 세슘-137 선원을 사용할 것을 권고하고 있다.[10] 본 연구에서는 이 권고에 따라 모니터 전리함의 시험에 동남권원자력의학원에 설치된 연구용 코발트 조사기를 이용하였다.

본 연구에서는 실험에 앞서 먼저 코발트-60 선원으로부터 100 cm 거리에 파머형 전리함(30013, PTW, Germany)을 설치하여 시험 방사선원 출력의 재현성을 측정하였다. 출력의 재현성은 모니터 전리함의 방사선 조사 실험 결과의 정밀도에 영향을 미칠 수 있다.

다음에는 Fig. 6과 같이 제작한 모니터 전리함을 코발트 조사기에 장착하고 전리전류계(6517B, Keithley, US)에 연결하여 분극전압을 인가하였다. 이 상태에서 방사선 조사에 따른 전리전류의 발생과 전리전류계 적분회로의 동작을 확인하기 위하여, 방사선 조사를 시행하고 시간에 따라 전리함에서 수집한 이온 전류를 전하모드에서 360초까지 측정하였다.

모니터 전리함은 기체 전리함으로서 분극전압에 따른 수집된 전하의 포화 특성을 가져야 한다. 따라서 이를 평가하기 위하여 전압을 0에서 500 V 범위에서 각 전압별로 60초 동안 3회씩 방사선을 조사하여 전하량을 측정하였다. 또한 이를 통하여 모니터 전리함에 적용될 고정된 분극전압을 결정하고 전압의 변동으로 인한 측정값의 변화를 ±20 V 범위에서 확인하였다.

전리함의 재현성과 선형성을 평가하기 위하여 10～150초까지 조사 시간에 따른 전하량을 5회씩 측정하였다. 이 때 선형성의 평가는 IEC-60731에서 권고하는 방법을 적용하였으며 본 논문의 결과에 제시한다.[7]

모니터 전리함은 비록 얇지만 다층 구조로 되어 있어 전리함 자체에 대한 방사선 투과 특성의 평가가 필요하다. 따라서 모니터 전리함으로 인한 감마선의 감쇠를 측정하기 위하여 선원과 100 cm 거리에 파머형 전리함을 설치하고 모니터 전리함의 유무에 따른 방사선의 투과인자(Transmission factor)를 측정하였다.

결　과

모니터 전리함을 시험하기 위한 코발트-60 선원의 출력 변화를 평가하기 위하여, 선원으로부터 100 cm 거리에서 파머형 전리함을 이용하여 10회 측정한 전하량의 평균과 표준편차는 12.6797 nC±0.0032 nC로 나타났다. 따라서 시험 방사선원은 0.03%의 변화를 가지는 매우 안정한 방사선원

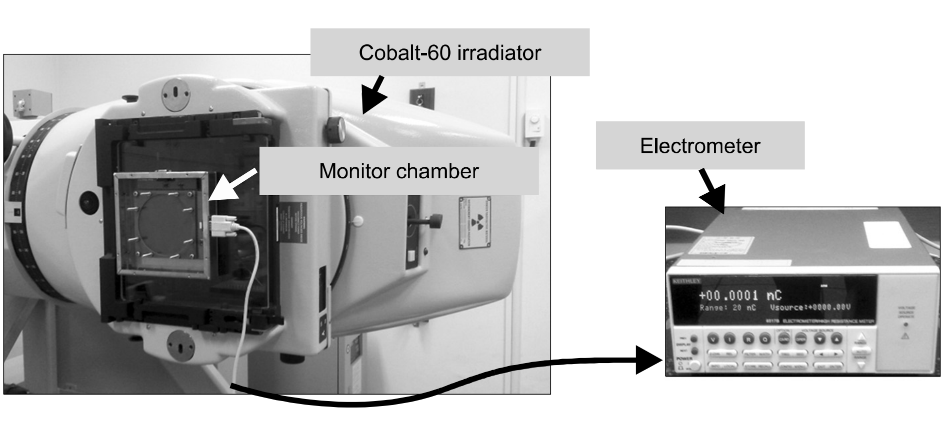

Fig. 6. Monitor chamber prototype testing using Cobalt-60 irradiator and electrometer.

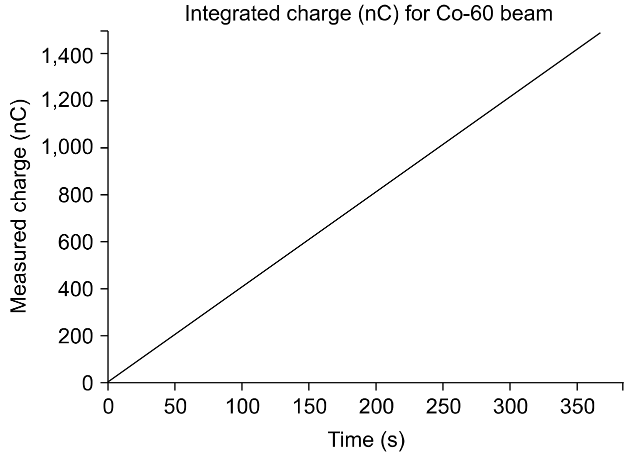

Fig. 7. Operation of integration circuit in the electrometer.

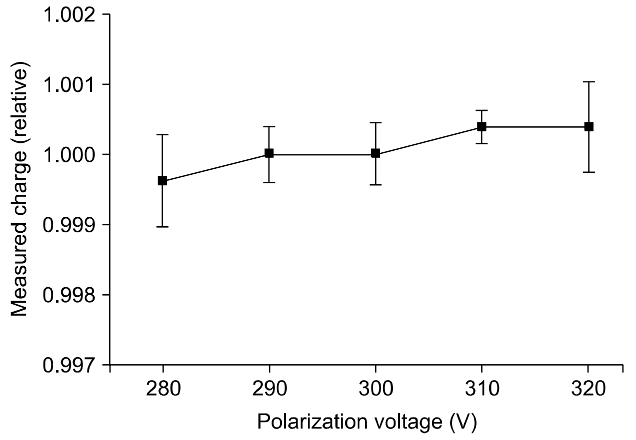

Fig. 9. Stability of measured charge around the 300 V.

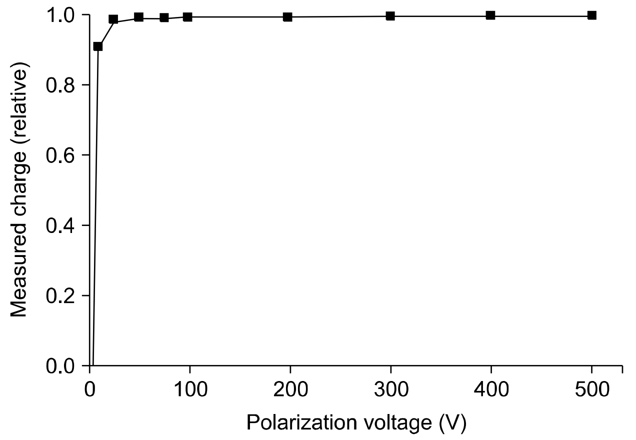

Fig. 8. Saturation characteristics for monitor chamber prototype.

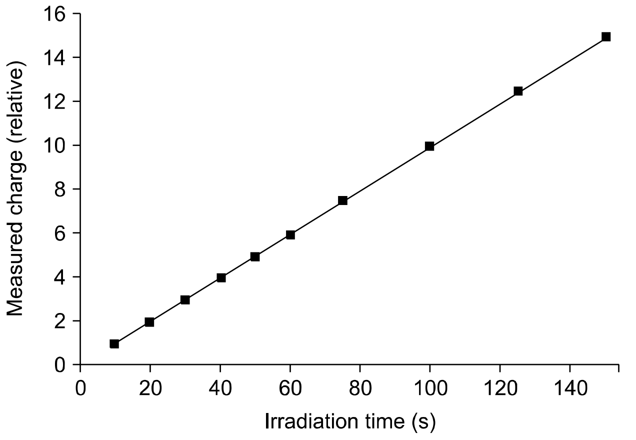

Fig. 10. Monitor chamber test for dose linearity.

임을 알 수 있었다.

Fig. 7은 코발트-60 선원을 이용하여 모니터 전리함에 방사선을 조사할 때 전리전류계의 적분회로를 통하여 측정한 누적된 전하량을 나타낸다. 이 때 총 측정시간은 360초 이며 약 1400 nC까지 측정한 결과를 보여준다.

Fig. 8은 분극전압에 따른 전하의 포화 특성을 측정한 결과이다. 이 결과는 각 전압에 대하여 60초씩 3회 측정한 값을 평균한 결과로서 300 V의 값에 대하여 상대적 값을 나타낸 결과이다. 대상 모니터 전리함은 25 V에서 약 98% 이상, 50 V에서 약 99% 그리고 100 V 이상에서 100%의 수집 효율을 보이고 있다.

Fig. 9는 분극전압 300 V를 모니터 전리함의 사용 기준 전압으로 결정하기 위하여 300 V를 기준으로 주변의 전압에 대하여 다시 측정한 결과이다. 이 결과를 분석할 때 300 V를 기준으로 분극전압 ±20 V의 변동은 최대 0.04%의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

이 그림에서 오차막대(Error bar)는 5회 측정의 표준편차(1 standard deviation)를 나타내며, 이 결과로부터 사용 전압 근처에서 모니터 전리함 측정값의 재현성을 상대 표준편차로 분석한 결과 0.02%~0.07% 범위를 보이는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 IEC-60977에서 권고하는 전자가속기의 방사선량 모니터링 시스템의 재현성 상한인 0.5% 이하를 만족한다.

Fig. 10은 조사시간에 대한 측정값의 선형성을 시험한 결과로서, 조사 시간 10초 동안 측정한 값에 대한 상대적 값으로 나타낸 것이다. 이 결과를 IEC-60731에서 선형성(또는 비선형성)을 평가하는 방법으로서 다음과 같은 식을 써서 계산하였다.[10)]

Table 1. Measured transmission factor for the monitor chamber in Co-60 gamma rays.

Open	With monitor chamber	Transmission factor
12.590 nC±0.025%	12.680 nC±0.025%	0.9929±0.035%

$$(Non)\ Linearity = 100 \times \frac{M_t \cdot (t_0/t) - M_{t_0}}{M_{t_0}}$$

위 식을 이용하여 선형성을 분석한 결과 0.01∼0.04% 범위를 보이는 것으로 나타났으며, 이 결과는 IEC-60977에서 권고하는 허용치인 2% 이내를 만족한다.[9]

모니터 전리함에 대한 투과인자(Transmission factor) 측정은 기준 전리함으로서 파머형 전리함을 사용하여 거리 100 cm에서 측정하였으며 그 결과를 Table 1에 나타냈다. 이 표에서와 같이 투과계수는 0.9930으로 측정되었는데, 이는 에너지 약 1.25 MeV인 감마선에서 모니터 전리함으로 인한 감쇠가 약 0.7%가 됨을 의미한다. 물론 감쇠가 적을수록 모니터 전리함으로서 좋은 조건이라고 할 수 있으므로 시작품의 성능 개선 측면에서 이 부분에 대한 연구도 필요하다고 할 수 있다.

토의 및 결론

본 연구에서는 선형가속기 기반의 방사선 발생장치에 사용할 수 있는 모니터 전리함 시작품을 개발하고 기초적인 성능평가를 수행하였다. 모니터 전리함의 전극으로 최근 사용이 증가되고 있는 연성회로기판(FPCB)을 사용하여 제작하였으며 완성된 시작품을 매우 안정한 코발트-60 선원을 이용하여 시험하였다. 이 때 시험전 측정한 코발트-60 방사선원의 방사선 출력 안정도는 0.03% (상대표준편차)로 평가되었다.

상용의 전리전류계를 이용하여 기본적인 적분회로의 정상 작동을 실험적으로 확인하였다. 전리함에 인가되는 분극전압에 따른 수집되는 전하량을 최대 500 V까지 측정한 결과 50 V 이상에서 거의 전하량의 포화가 발생함을 확인하였다. 또한 모니터 전리함의 분극전압을 300 V로 고정하여 사용할 때 ±20 V 변화에 대한 측정값의 변화를 평가한 결과 최대 ±0.04% 이내로 일정하였다.

모니터 전리함의 측정값 재현성은 0.07% 이내 그리고 시간의 증가에 따른 측정값의 선형성은 0.04% 이내로 평가되었는데, 이 값은 IEC-60977에서 권고하는 모니터링 시스템의 재현성 및 선형성의 허용치 0.5% 및 2.0% 보다 매우 낮다.[6]

코발트-60 감마선에서 모니터 전리함 세트의 투과인자는 0.9930으로 평가되었다. 만약 4 MV 이상의 고에너지 X-선에서 시험하는 경우에 투과인자는 보다 증가할 것으로 예상되지만, 현재 제작된 형태에서 전극과 보호 필름 등을 보다 얇은 재료로 변경하는 등의 재료 측면 최적화도 향후 연구에 반영되어야 할 것이다.

모니터 전리함의 역할은 잘 알려진 바와 같이 제어 시스템의 일부로서 방사선 발생장치에서 안정한 방사선이 방출될 수 있도록, 발생되는 방사선의 출력과 빔의 평탄성을 실시간으로 검출하여 가속기 제어장치에 신호를 전달하는 것이다. 따라서 이러한 기능을 모두 수행하도록 모니터 전리함을 제작할 경우에 방사선 검출 전극은 보다 복잡한 형태를 가지며, 게다가 각각의 전극에서 발생한 신호들은 모두 선량학적 특성을 만족해야 한다. 또한 각 전극들은 방사선의 출력과 조사면내 선량 분포에 영향이 거의 없도록 충분히 얇아야 한다는 점도 중요하다. 따라서 모니터 전리함의 개발에 있어 이러한 특성들을 모두 만족할 수 있는 전극의 재료를 선정하는 것은 중요한 요소라고 할 수 있다. 이러한 측면에서 본 연구에서 비록 단순한 형태로 시작품을 제작하였으나 최근 응용이 활발한 연성회로기판(FPCB)을 사용하여 선량학적 특성이 양호한 결과를 확인한 점은 향후 진보된 후속 연구의 추진을 위한 기반 연구로서 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다. 한편, 방사선 측정기의 전극재료로서 연성회로기판의 사용이 초기인 만큼 장기간의 특성 변화에 대한 연구도 필요하다고 할 수 있는데, 이러한 특성들이 양호한 경우에 연성회로기판은 모니터 전리함뿐만 아니라 임상용 소형 전리함이나 배열형 검출기(Array detector)의 전극 재료로서 활용 가능할 것으로 전망한다.

References

1. **Greene D, Williams PC**: Linear Accelerators for Radiation Therapy. 2nd ed, Taylor & Francis Group, New York (1997), pp. 94-107
2. **Podgorsak EB**: Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria (2003), pp. 125-126
3. **Khan FM**: The Physics of Radiation Therapy. 4th ed, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia (2010), pp. 162-163

4. **ICRP Ref-32/147/07**: Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation Therapy Technologies, International Commission on Radiological Protection, Ottawa, Canada (2009), pp. 51-51
5. **Shani G**: Radiation Dosimetry. 2nd ed, CRC Press, New York (2000): pp. 85-220
6. **IEC 60977**: Medical electrical equipment-Medical electron accelerators-Guidelines for functional performance characteristics. edition 2.0, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland (2008)
7. **IEC 60731**: Medical electrical equipment-Dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland (2011)
8. **ARPNSA Fact Sheet 24**: Specifying the polarity of the polarizing voltage of an ionisation chamber. Australian Radiation Profection and Nuclear Safety Agency (2011)
9. **Keithley 6517B-901-01**: Model 6517B Reference Manual. Rev. B, Keithley Instruments, Inc, Ohio (2009), pp. 93-93
10. **Macleod P**: A Review of Flexible Circuit Technology and its Applications. PRIME Faraday Partnership, Loughborough University, UK (2002): pp. 1-5

모니터 전리함 시작품 개발과 기초 성능 평가

동남권원자력의학원 연구센터

이무진 · 임희진 · 이만우 · 이준규 · 이동주 · 강상구 · 정동혁

모니터 전리함은 의료용 선형가속기에서 방출되는 방사선의 세기와 출력 제어를 위하여 사용된다. 본 연구에서는 가속기 기반 방사선 발생장치의 제어 시스템 개발에 사용하기 위하여 모니터 전리함 시작품을 개발하였다. 개발한 모니터 전리함은 평행 평판형 전리함 형태로서 독립적 작동이 가능한 두 개의 전리함으로 구성되어 있으며, 전극의 재료는 방사선의 감쇠를 최소화하기 위하여 얇은 연성인쇄회로기판이 사용되었다. 전리함의 시험을 위하여 코발트-60 방사선원을 이용하여 측정된 전하의 포화특성과 선형성과 같은 선량학적 특성을 평가하였다. 결과적으로 개발된 시작품이 기본 성능을 만족하며 추가 연구의 가능성을 확인하였다.

중심단어: 모니터 전리함, 선형가속기, 선량학적 특성