

고 에너지 광자선의 조사선량 측정 시 전리함의 스템효과 보정계수

박철우¹ · 이재승^{2,3} · 권대철⁴ · 차동수⁵ · 김진수⁶ · 김경근⁷

¹동의과학대학 방사선과 · ²한동대학교 선린의료원 방사선종양학과 · ³순천향대학교 물리학과 ·
⁴신흥대학 방사선과 · ⁵영남대학교병원 방사선종양학과 · ⁶차의과학대학 분당차병원
방사선종양학과 · ⁷대구산업정보대학 방사선과

Stem Effect Correction Factor of Ionization Chamber in Exposure Measurements of High Energy Photons

Cheol Woo Park¹ · Jae Seung Lee^{2,3} · Dae Chel Kweon⁴ ·
Dong Soo Cha⁵ · Jin Soo Kim⁶ · Kyoung Keun Kim⁷

¹Department of Radiological Technology, Dongeui Institute of Technology · ²Department of Radiation
Oncology, Good Samaritan Hospital · ³Department of Physics, Soonchunhyang University · ⁴Department
of Radiological Science, Shinheung College University · ⁵Department of Radiation Oncology, Yeungnam
University Hospital · ⁶Department of Radiation Oncology, Bundang-Cha University Hospital ·
⁷Department of Radiological Technology, Daegu Polytechnic College University

Abstract

Ionization chambers often exhibit a stem effect, caused by interactions of radiation with air near the chamber end, or with dielectric in the chamber stem or cable. In this study measured stem effect correction factor for length of ionization chamber from medical linear accelerator recommend to with the use of stem correction method. For a model of the Farmer-type chamber, were used to calculate the beam quality correction factor. These interactions contribute to the apparent measured exposure. Additionally, it needs to consider ionization chamber use of small volume and stem effect of cable by a large field. Linear accelerator generated photons energy and increased dose repeatedly measured by using stem correction method. Stem effect was dependence of the energy and increases with photon energy conditions improved of beam quality. In conclusion, stem effect correction factor was measured within 0.4% calculated according to the exposures stem length and also supposed to determined below 1% of another stem correction method.

Key Words : Ionization chamber, Stem effect, Correction factor, Linear accelerator

Received April 20, 2010, 1st Revised May 15, 2010,

Accepted May 25, 2010.

Corresponding Author: 이재승

(791-704) 경북 포항시 북구 대신동 74-1

한동대학교 선린의료원 방사선종양학과

Tel: 054) 245-6525 Fax: 054) 245-6533

E-mail: jslee0313@hanmail.net

I. 서론

일반적으로 종양의 효과적인 방사선 치료(radiation therapy)는 처방선량(prescription dose)을 약 $\pm 5\%$ 이내에서 선량 전달의 정확성을 유지하였는가에 달려있으며 5% 이내의 오차는 방사선생물학적 의미가 높은 것으로 알려져 있다.¹⁻² 장비의 교정 및 방사선 치료 계획(radiation treatment planning)의 작성 그리고 환자의 재현성을 고려한다면 대단히 엄격한 권고사항일 뿐만 아니라 처방선량의 정확도에 대한 한계치(marginal value)가 될 것이다. Table 1은 방사선 치료 환자의 어떤 기준점에 전달되는 처방선량의 전체적인 불확정도(uncertainty)가 약 5.6% 임을 보여 준다.³ 전체 불확정도에서 방사선 치료 선속 교정에 적합한 공인선량교정연구소(Accredited Dose Calibration Laboratory, ADCL)에서 Co⁶⁰ 감마선 교정계수(calibration factor)를 제공받은 전리함(ionization chamber)의 불확정도는 약 1.6%를 차지하고 있다.^{1,3}

일반적으로 전리함의 교정은 기하학적으로 규정된 조사면(field size)에서 전리함 스템(stem)의 일부 또는 전체가 포함되는 일정한 범위 안에서 이루어지지만 임상에서 측정은 기하학적으로 다른 조사면을 따라 전리함의 스템이 교정과 다른 범위 안에 포함된다. 이 때 스템의 중심부 공간에 존재하는 공기에서 발생하는 전자는 전기장이 없어 재결합하기 때문에 측정되지 않지만 금속 스템과 절연체로부터 방출된 전자는 중심전극

에 도달하여 전하를 감소시키는 스템 효과(stem effect)가 발생한다. 이러한 스템 효과는 보통 2 MV 이상의 고 에너지 광자(photon)에서 발생하며 조사면에 포함되는 스템 길이에 좌우되기 때문에 조사된 스템의 길이가 전리함 교정과 다른 기하학적 조건일 때는 언제나 교정이 필요하다 권고하고 있다.⁴⁻⁷ 그러나 임상에서 처방선량의 확인을 목적으로 시행하는 측정마다 반복적으로 스템 교정을 시행할 수 없을 뿐만 아니라 공인선량교정연구소(ADCL)나 지역 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 별도의 스템 효과에 대한 교정을 시행하지 않고 있다.

따라서 본 연구는 권고된 스템 교정 방법을 이용하여 의료용 선형가속기(Linear Accelerator, LINAC)에서 발생하는 고 에너지 광자를 대상으로 조사선량(exposure) 측정시 조사된 스템 길이에 따른 전리함의 스템효과 보정계수(stem effect correction factor, K_{stem})를 구하고자 하였다. 또한 선량증가두껍(build-up cap)을 사용하여 전리함의 감도체적(sensitivity volume)과 스템 근처의 공기를 제거하였을 때 스템효과 보정계수를 구하고 이를 조사선량 측정에 적용함으로써 정확도를 향상하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 이론적 근거

조사선량 측정(exposure measurement)은 공인선량교정연구소(ADCL)나 표준기술연구소(NIST)에서 선질에 대한 조사선량 교정계수(exposure calibration factor, N_c)가 주어진 골무형 전리함(thimble chamber)으로 측정한다. Fig. 1은 전리함을 이용한 조사선량 측정에 대한 기하학적 구조를 보여준다. 일정한 조사선량 조사 후 전위계(electrometer)에서 측정값 M 이 주어졌을 때 roentgen 단위로 전환된 조사선량(X)은

$$X = M \cdot N_c \cdot K_{T,P} \cdot K_s \cdot K_{stem} \quad (1)$$

여기서 $K_{T,P}$ 는 온도와 압력에 대한 보정계수(temperature and pressure correction factor)로서 밀봉된 전리함의 감도 체적 내에 공기의 밀도나 질량은 온도가 감소하거나 압력이 증가함에 따라 증가되기 때문에 표준기술연구소(NIST)의 교정 조건(압력 760 mmHg, 온

Table 1. Overall uncertainty^{a)} in dose delivered at a point in a patient

Step	Uncertainty (%)
Ionization Chamber Calibration	1.6
Calibration procedure	2.0
Dose calculation parameters and methods	3.0
Effective depth	2.0
SSD*	2.0
Wedges	2.0
Blocking trays	2.0
Cumulative	5.6

* Source to Surface Distance.

^{a)} 95% confidence interval.

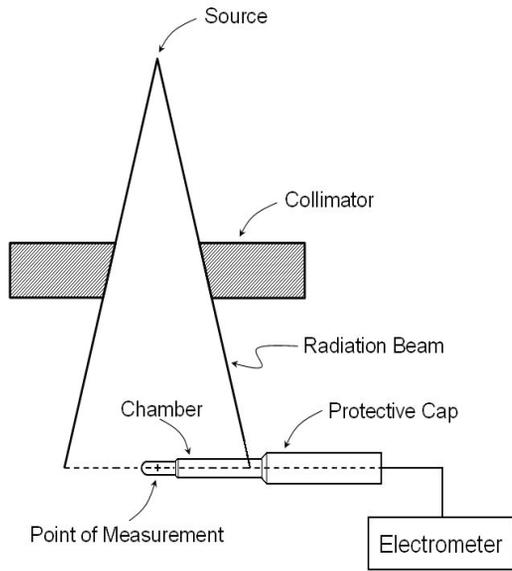


Fig. 1. Geometry of exposure measurements with a ionization chamber(Farmer type)

도 22°C)과 다른 조건에 대한 보정계수이다. P 를 밀리미터로 표시된 수은압력, t 를 섭씨온도라 할 때 온도와 압력에 대한 보정계수⁸는

$$K_{T,P} = \left(\frac{760}{P}\right) \times \left(\frac{273.2 + t}{273.2 + 22.0}\right) \quad (2)$$

또한 K_s 는 이온 재결합 보정계수(ion recombination correction factor)로서 수집전압(collection voltage)이 증가함에 따라 조사선량에 대한 포화전류(saturation current)에 근접하게 되어 이온 재결합이 감소하고 수집효율(collection efficiency)은 최대가 된다. 선형가속

기에 의하여 생성된 펄스화된 광자 선속 측정에서 전리함의 이온 재결합 보정계수는 두 개의 바이어스 전압(bias voltage) V_1 과 V_2 가 있을 때 $V_1 = 2V_2$ 로 하여 측정된 이온 수와 V_2 로 하여 측정된 이온 수의 비로 정의 하였다. 바이어스 전압 V_1 과 V_2 를 주었을 때 전위계에서 측정된 값을 각각 M_1 과 M_2 라 할 때 이온 재결합 보정계수^{9~11}는

$$K = \frac{1 - (V_1/V_2)^2}{(M_1/M_2) - (V_1/V_2)^2} \quad (3)$$

이온 재결합에 의한 전하의 손실은 1% 미만일 것을 권고하고 있다.¹¹

그리고 K_{stem} 은 스템효과 보정계수(stem effect correction factor)로서 조사선량 측정을 위하여 전리함의 축을 선속에 대하여 직각으로 위치시킬 때 조사면의 크기에 따라 전리함 스템이 범위 안에 포함된다. 이상적으로는 전리함의 관 벽에서 생성된 전자에 의한 전하량만을 수집해야 하나 실제적으로 전리함에 광자가 조사되면 스템으로부터 산란된 광자가 전리함에서 측정되는 이온화 전류를 증가시키게 된다. 이 값은 명백하게 조사선량에 기여하기 때문에 스템효과에 대한 보정이 반드시 필요하다. Fig. 2는 조사된 스템 길이의 함수로 정의된 스템효과의 교정 방법을 보여준다. 첫 번째 위치 (1)에서 측정값을 조사면에 대하여 스템 길이에 따른 전류량 I_{stem} 이라 하고 두 번째 위치 (2)에서 측정값을 스템이 포함되지 않은 전류량 $I_{nonstem}$ 이라 할 때 $I_{stem} - I_{nonstem}$ 은 스템에서 산란 광자에 의해 기인된

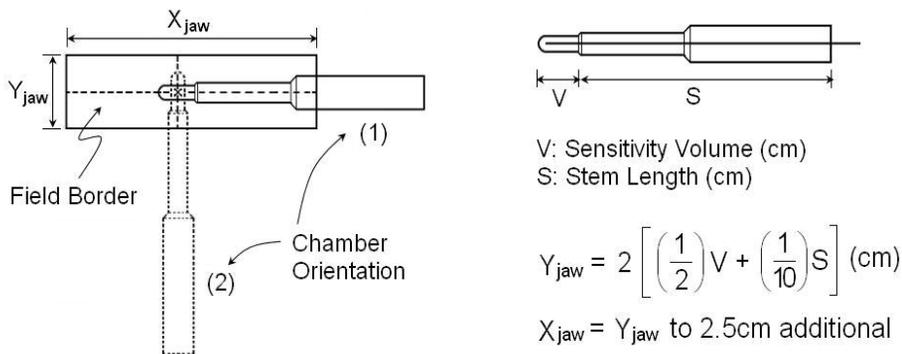


Fig. 2. Geometry of stem correction determination

전류량이므로 $I_{stem} - (I_{stem} - I_{nonstem})$ 은 결국 스템을 제외한 조사선량에 대한 전류량이 된다. 따라서 스템효과 보정계수(K_{stem})는 조사된 스템 길이에 따른 전류량(I_{stem})에 대하여 스템이 포함되지 않은 전류량($I_{nonstem}$)의 비라 할 수 있다. 따라서 스템효과 보정계수는

$$K_{stem} = \left(\frac{I_{stem} - (I_{stem} - I_{nonstem})}{I_{stem}} \right) = \left(\frac{I_{nonstem}}{I_{stem}} \right) \quad (4)$$

또한 조사선량을 측정할 때 전리함 전체 전류량에 대한 스템 효과에 기인된 전류량의 비율($K_{stem\ ratio}$)은

$$K_{stem\ ratio} = \left(\frac{I_{stem} - I_{nonstem}}{I_{stem}} \right) \times 100(\%) \quad (5)$$

이다.

2. 측정 장비

전리함(Farmer Chamber TM30010, PTW, Germany)은 감도 체적이 0.6 cm^3 (내경 6.1 mm, 길이 23 mm)이며 전리함의 케이블을 뺀 전장은 132.6 mm이다. 스템 및 이온 재결합으로 인한 이온 손실을 효율적으로 감소시키기 위하여 중심전극(central electrode)과 관 벽 사이에 다 수의 전기장(electric field)이 설치되어 있다. 이로 인하여 실험에 사용되어진 전리함의 극성효과(polarity effect)는 0.3% 미만이며, 식(3)에 의한 이온 재결합 보정계수(K_s)는 1.00이다. 전리함의 제원은 Table 2에서 나열하였다. 전위계(UNIDOS, PTW, Germany)는 수집전압(collective voltage)이 400 V이며 교정계수

(calibration factor, K_{elec})는 $1.00 \pm 0.5\%$ 이다. 또한 전리함과 전위계는 국제적 교정규약(calibration protocol)^{12~13}에 따라 표준기술연구소(NIST)에서 불확정도가 $\pm 1\%$ 미만으로 교정되었다. 측정에 사용되어진 방사선원은 선형가속기(ONCOR Imxpression, SIMENS, Germany)에서 방출되는 6 MV와 10 MV X-ray를 이용하였다.

3. 측정 방법

실험을 위하여 Fig. 1과 동일하게 조사선량 측정(exposure measurement) 방법에 따라 선형가속기의 선원(target)에서 전리함 중심까지의 거리를 100 cm로 하였다. 선속 중심과 전리함의 감도체적 중심을 정확하게 일치시키고 전리함 주변에 공기 이외의 방사선을 산란시킬 수 있는 다른 물질이 없도록 고밀도 스티로폼에 흠을 내어 전리함을 올려놓고 치료 테이블에서 20 cm 거리를 유지하도록 하였다. Fig. 2는 스템 교정에 대한 권고된 측정방법을 보여준다. 전리함의 교정 선속 Co^{60} 감마선은 단일 스펙트럼을 갖는 광자이지만 선형가속기의 X선은 평탄화 필터(flattening filter)로 인하여 중심부 선속이 약하고 빔 가장자리로 갈수록 강한 연속 스펙트럼을 갖기 때문에 스템의 약 10%를 포함할 것을 권고하고 있다.⁶ 따라서 Fig. 2의 (1)의 위치에서 전리함의 장축을 X축 방향으로 하고 감도체적(sensitivity volume)을 V, 스템의 전체 길이를 S라 할 때 Y축 방향의 조사면 길이는

Table 2. Specification of Farmer Type Ionization Chamber (PTW TM30010)

Topics	Specification
Measuring quantities	Absorbed dose to water, air
Nominal sensitivity volume	0.6 cm^3
Radius	3.05 mm
Length	23.0 mm
Material	0.335 mm PMMA, 0.09 mm graphite
Chamber voltage	400 V
Design	Fully guarded type
Central electrode	Al 99.98, diameter 1.1 mm
Build-up cap	PMMA, thickness 4.55 mm

$$Y_{jaw} = 2 \times \left(\frac{1}{2} V + \frac{1}{10} S \right) (cm) \quad (6)$$

이다. 실험에 사용되어진 전리함의 감도체적(V)은 2.6 cm이고 스템의 전체 길이(S)는 10.7 cm이므로 식 (6)에 의하여 Y축 방향의 조사면 길이는 약 5 cm가 된다. X축 방향의 조사면 길이는 Y축 방향의 조사면 길이 5 cm에서 2.5 cm씩 증가시켜 최대 조사면 길이 30 cm까지 측정하여 스템 길이에 따른 전류량(I_{stem})을 측정하였다. 또한 Fig. 2의 (2)의 위치에서 전리함을 90° 회전시켜 스템이 포함되지 않은 전류량($I_{nonstem}$)을 측정하였다. 측정은 6 MV와 10 MV X선에 대하여 선량증가 두껍(build-up cap)을 사용하지 않은 전리함과 사용한 전리함으로 구분하여 각각 측정하였으며 측정값의 정확성을 고려하기 위하여 각 조사면마다 100MU(monitor unit)의 조사선량을 5회씩 반복 측정하였다. 전위계에서 지시한 측정값들은 식(4)와 식(5)를 이용하여 스템효

과 보정계수(K_{stem})와 조사선량을 측정할 때 전리함 전체 전류량에 대하여 스템효과에 기인된 전류량의 비율($K_{stem ratio}$)을 구하였다.

III. 결 과

스템 교정 방법을 이용하여 의료용 선형가속기에서 발생하는 고 에너지 광자를 대상으로 조사선량 측정(exposure measurement)시 조사된 스템 길이에 따른 전리함의 스템효과 보정계수(stem effect correction factor, K_{stem})를 구한 결과는 다음과 같다.

1. 광자의 에너지에 따른 스템 효과 보정계수 (K_{stem})

Table 3과 Fig. 3은 선형가속기에서 발생하는 6 MV와 10 MV X선을 대상으로 공기 중에서 조사선량 100

Table 3. Stem correction factor versus length of stem exposed to 6 MV and 10 MV X-ray for a PTW Model 30010 Farmer type ionization chamber

Field size(cm)		Length of stem exposed (cm)	Stem effect correction factors							
			Not used build-up cap				Used build-up cap			
			6 MV ^{a)}		10 MV ^{b)}		6 MV ^{c)}		10 MV ^{d)}	
Y	X	K_{stem}	$K_{stem ratio}$ (%)	K_{stem}	$K_{stem ratio}$ (%)	K_{stem}	$K_{stem ratio}$ (%)	K_{stem}	$K_{stem ratio}$ (%)	
5.0	5.0	3.80	1.00036	0.04	1.00154	0.15	0.99994	0.01	0.99915	0.09
	7.5	5.05	0.99701	0.30	0.99761	0.24	0.99587	0.41	0.99822	0.18
	10.0	6.30	0.99644	0.36	0.99666	0.33	0.99664	0.34	0.99914	0.09
	12.5	7.55	0.99639	0.36	0.99682	0.32	0.99527	0.47	0.99822	0.34
	15.0	8.80	0.99647	0.35	0.99632	0.37	0.99662	0.34	0.99836	0.16
	17.5	10.05	0.99637	0.36	0.99695	0.30	0.99666	0.33	0.99835	0.17
	20.0	11.30	0.99626	0.37	0.99711	0.29	0.99599	0.40	0.99753	0.25
	22.5	12.55	0.99632	0.37	0.99770	0.23	0.99662	0.34	0.99829	0.17
	25.0	13.80	0.99677	0.32	0.99773	0.23	0.99735	0.27	0.99829	0.17
	27.5	15.05	0.99658	0.34	0.99829	0.17	0.99731	0.27	0.99913	0.09
	30.0	16.3	0.99605	0.40	0.99593	0.41	0.99866	0.13	0.99918	0.08

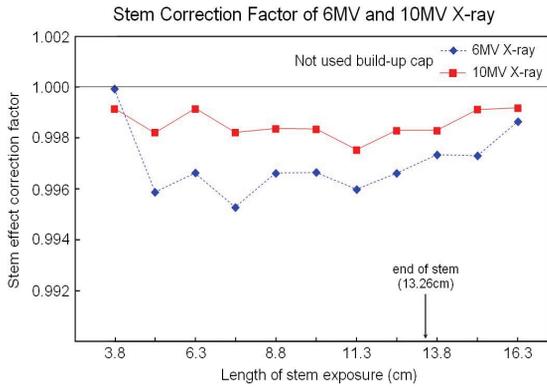
Uncertainty is a type A uncertainty about five times repeated measurements of stem exposed

a) Average of uncertainty is 2.36×10^{-2} (%)

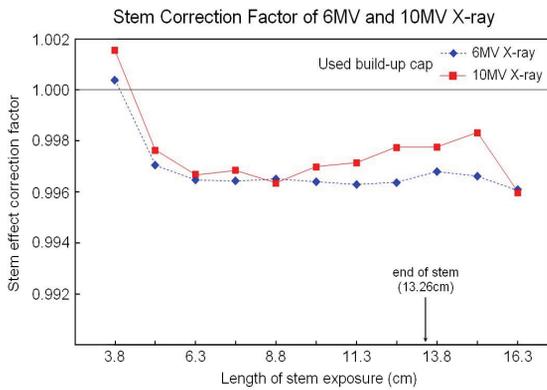
b) Average of uncertainty is 3.28×10^{-2} (%)

c) Average of uncertainty is 2.73×10^{-2} (%)

d) Average of uncertainty is 2.91×10^{-2} (%)



(a) Stem effect correction factor in the not used build-up cap



(b) Stem effect correction factor in the used build-up cap

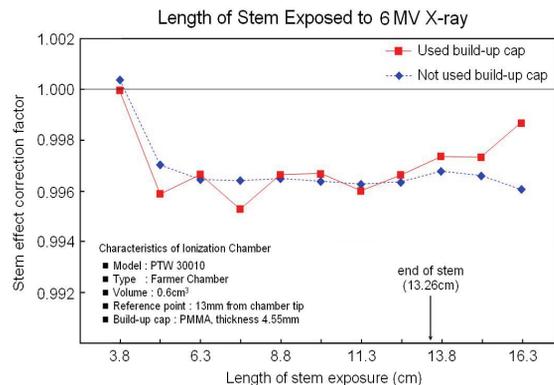
Fig. 3. Stem correction factor versus length of stem exposed to 6 MV and 10 MV X-ray for a PTW Model 30010 Farmer type ionization chamber

MU를 조사하였을 때 광자의 에너지에 따라서 조사된 스템 길이에 대한 함수 그래프를 보여준다. 10 MV X선의 경우 전리함 전체 전류량에 대한 스템 효과에 기인된 전류량의 비율($K_{stem\ ratio}$)이 평균적으로 선량증가두겹을 사용하지 않았을 때 약 0.25%였고 선량증가두겹을 사용하였을 때 약 0.16%였다. 이에 비하여 6 MV X선의 경우 약 0.32%와 0.30%를 나타내었다. 광자의 에너지에 따른 스템효과 보정계수(K_{stem})는 에너지 의존성을 갖고 있으며 에너지의 증가에 따라 조사된 스템에 의한 수집 전하량의 감소가 작았음을 알 수 있었다. 또한 스템의 끝 부분(end of stem)에서 불규칙한 특성을 보이긴 하지만 조사된 스템의 길이에 대한 스템효과 보

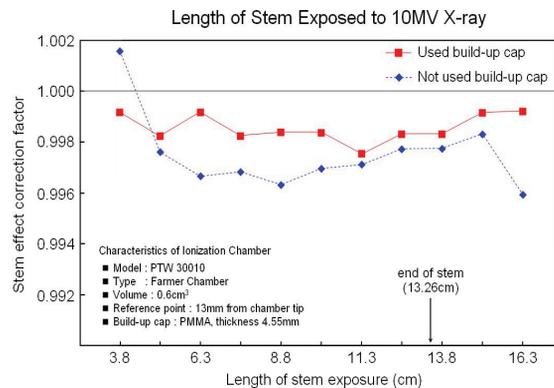
정계수도 에너지의 증가에 따라 변동 폭이 작아짐을 알 수 있었다.

2. 선량증가두겹(build-up cap)에 따른 스템 효과 보정계수(K_{stem})

Fig. 4는 동일 에너지에 대하여 선량증가두겹(build-up cap)의 사용에 따른 스템효과 보정계수(K_{stem})의 변동 추이를 보여준다. 선형가속기에서 발생하는 6 MV X선의 경우 스템의 끝 부분에서 불규칙한 특성을 제외하면 전리함 전체 전류량에 대한 스템효과에 기인된 전류량의 비율($K_{stem\ ratio}$)이 평균적으로 선량증가두겹을 사용하지 않았을 때 약 0.19%였고 사용하였을 때 약 0.17%로 선량증가두겹에 대한 의존성은 보이지 않았다. 그러나 10 MV X선은 스템이 시작되는 부분에서 스템의 끝 부분 영역에서 선량증가두겹의 사용에 따라 스템 누설을 보정하는 효과를 알 수 있었다.



(a) 6 MV X-ray



(b) 10 MV X-ray

Fig. 4. According to the used of build-up cap the stem effect correction factor in the 6 MV and 10 MV X-ray linear accelerator

IV. 고찰 및 결론

방사선 치료(radiation therapy)가 시작된 이래 약 5.6%의 전체 불확정도(uncertainty)를 최소화하기 위하여 방사선 치료 기기 및 방사선치료계획(radiation treatment planning, RTP) 시스템, 선량계측(dosimetry) 시스템, 환자의 고정용구(immobilizer) 등의 진보적 발전을 가져왔다. 그 중에서 선량계측 시스템의 중추적 역할은 전리함(ionization chamber)이 담당하고 있으나 전체 불확정도의 약 30%는 방사선 치료 선속 교정에 적합한 공인선량교정연구소(ADCL)에서 Co^{60} 감마선 교정계수(calibration factor)를 제공받은 전리함(ionization chamber)이 원인으로 발생하고 있다.^{1~3} 전리함은 복잡하고 측정 환경에 의하여 영향을 받기 때문에 다양한 보정계수를 가지고 있으며 전리함의 교정과 다른 기하학적 조사면(field size)에서 측정하는 경우 전리함 스템의 길이에 따라서 금속 스템과 절연체로부터 방출된 전자가 중심전극에 도달하여 전하를 감소시키는 스템효과(stem effect)로 인하여 스템 교정을 권고하고 있으나^{4~7} 임상에서 매 측정마다 교정을 받을 수 없을 뿐 만 아니라 공인선량교정연구소(ADCL)에서 별도의 스템 교정을 시행하지 않고 있다. 따라서 권고된 스템 교정 방법으로 선형가속기에서 발생하는 고 에너지 광자를 대상으로 에너지에 따른 전리함의 스템효과 보정계수(stem effect correction factor, K_{stem})와 선량증가두껍(build-up cap)의 사용에 따른 전리함의 스템효과 보정계수를 측정하고 이를 적용함으로써 전리함의 정확도를 향상하고자 하였다.

Adams⁵는 축전식 전리함(condenser ionization chamber)의 스템 누설에 대하여 언급하였고 전리함의 종류와 제조사에 따라 스템 효과의 교정은 최대 10% 정도로 클 수도 있다고 보고 하였으며 Ibbott⁶ 등은 여러 가지 전리함을 대상으로 스템 효과를 결정하기 위하여 Co^{60} 의 다양한 조사면에서 전리함과 TLD 캡슐을 비교한 연구에서 스템 효과에 의한 교정은 약 1% 이내에서 결정된다고 하였다.

본 연구에서 선형가속기에서 발생하는 광자를 대상으로 스템 효과 보정계수(stem effect correction factor)를 측정한 결과도 0.16%에서 0.41%까지 스템 누설을 알 수 있었으며 위 연구자들의 교정 선속이 아닌 임상적으로 보편화되어 있는 X선에서도 적용할 수 있음을 알았다. 또한 Fig. 3에서 광자의 에너지에 따른 스템

효과 보정계수(K_{stem})는 에너지의 증가에 따라 최대선량 지점이 깊이로 이동하므로 조사된 스템에 의한 수집 전하량의 감소가 작아지고 그로 인한 스템 효과가 감소함을 알 수 있었다. Fig. 4에서 동일 에너지의 조사선량을 조사하였을 때 선량증가두껍(build-up cap)의 사용에 따른 스템 효과 보정계수는 중 에너지(6 MV) X선의 경우 0.02%의 효율 증가를 보여 선량증가두껍의 의존성이 없음을 알 수 있었다. 그러나 고 에너지(10 MV) X선의 경우 스템이 존재하는 조사면에서 선량증가두껍의 사용에 따라 스템 효과를 개선할 수 있었다.

실험에 사용된 전리함은 과거 구조적 오류를 개선하기 위하여 중심전극(central electrode)과 관벽 사이에 다수의 전기장(electric field)들을 연결시켜 스템 및 이온 재결합으로 인한 이온 손실을 효율적으로 감소시켰기 때문에 위 연구자들보다 작은 스템 효과 보정계수를 측정할 수 있었다. 그러나 아직까지 스템 교정을 위한 별도의 연구가 시행되지 않고 있으며 현재 이를 위하여 Monte Carlo 기법을 이용한 모의 측정이 주를 이루고 있다. 방사선 치료에서 처방선량 검증은 목적으로 하는 측정 흡수선량(absorbed dose) 측정이 대부분이고 측정 깊이나 다양한 흡수체가 존재하기 때문에 향후 새로운 스템 교정 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. ICRU. Determination of absorbed dose in a patient by beams of X or Gamma rays in radiotherapy procedures. Report No. 24. Washington, DC: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1976.
2. ICRU. Use of computed in external beam radiotherapy procedures with high energy photons and electrons. Report No. 42. Washington, DC: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1988.
3. AAPM. Physical aspects of quality assurance in radiation therapy. Report No. 13. Colchester, VT: AIDC, 1984.
4. Kahn FM. The physics of radiation therapy. 4th ed. Baltimore; Lippincott Williams & Wilkins, 2009, 86~87.

5. Adams GD. On the use of thimble chambers in phantom. *Radiology*, 1962;78:77.
6. Ibbott GS. Stem corrections for ionization chamber. *Med. Phys.* 1975;2:328~330.
7. C. G. Orton and J. B. Seibert, *Radiology* 110, 732(1974).
8. AAPM. TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med. Phys.* 1999;26:1847.
9. Boag JW. The recombination correction for an ionization chamber exposed to pulsed radiation in a 'swept beam' technique. *Phys. Med. Biol.* 1982;27:201.
10. Almond PR. Use of a Victoreen 500 electrometer to determine ionization chamber collection efficiencies. *Med. Phys.* 1981;8:901.
11. Weinhaus MS, Meli A. Determining Pion the correction factor for recombination losses in an ionization chamber. *Med. Phys.* 1984;11:846~849.
12. IAEA. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. Technical reports series No. 398. Vienna: international Atomic Energy Agency, 2000
13. American Association of Physicists in Medicine Task Group 51. Protocol for clinical reference dosimetry of high energy photon beam. *Med. Phys.* 1999;26:1847~1870.