

Practical Output Dosimetry with Undefined N_{dw}^{Co-60} of Cylindrical Ionization Chamber for High Energy Photon Beams of Linear Accelerator

Young-Kee Oh*, Tae-Jin Choi[†], Ju-Young Song[†]

Departments of *Radiation Oncology, [†]Medical Engineering and Physics in Medicine, School of Medicine, Keimyung University, Daegu, [†]Department of Radiation Oncology, Chonnam National University Hospital, Gwangju, Korea

For the determination of absorbed dose to water from a linear accelerator photon beams, it needs a exposure calibration factor N_x or air kerma calibration factor N_k of air ionization chamber. We used the exposure calibration factor N_x to find the absorbed dose calibration factors of water in a reference source through the TG-21 and TRS-277 protocol. TG-21 used for determine the absorbed dose in accuracy, but it required complex calculations including the chamber dependent factors. The authors obtained the absorbed dose calibration factor N_{dw}^{Co-60} for reduce the complex calculations with unknown N_{dw} only with N_x or N_k calibration factor in a TM31010 (S/N 1055, 1057) ionization chambers. The results showed the uncertainty of calculated N_{dw} of IC-15 which was known the N_x and N_{dw} is within -0.6% in TG-21, but 1.0% in TRS-277. and TM31010 was compared the N_{dw} of SSDL to that of PSDL as shown the 0.4% , -2.8% uncertainty, respectively. The authors experimented with good agreement the calculated N_{dw} is reliable for cross check the discrepancy of the calibration factor with unknown that of TM31010 and IC-15 chamber.

Key Words: Exposure calculation factor N_x , Air kerma N_k , Absorbed dose calculation factor N_{dw}

서 론

최근 선형가속기는 고에너지광자선과 전자선을 선택조사할 수 있고 컴퓨터제어술과 선량전 산과학의 발달로 종양을 모양대로 치료하고, 세기조절로 치명장기에 도달하는 선량을 내용 선량이하로 제한하여 조사하는 데 까지 발전하게 되어, 임상에서는 거의 Co-60 감마선 치료기를 찾아볼 수 없게 되었다. 이는 곧 임상에서는 출력선량교정값의 교차점검이 쉽지 않음을 의미하게 된다.

방사선치료의 성적은 처방선량의 오차가 $\pm 5\%$ 를 초과해서는 좋은 예후를 기대할 수 없는 것으로 발표되고 있으며,^{1,2)} 방사선치료는 수술과 달리 영상을 통해 치료할 종양 체적(GTV, Gross Tumor Volume)을 결정하는 일부터 치료 선량계획과 환자의 고정과 방사선조사체위, 분할조사의 재

현상에 이르기까지 종양의 치료선량에 오차를 일으킬 수 있는 요인들이 산재해 있다. 따라서 선량계획의 모든 모니터단위(MU) 결정에 분모 변수인 출력선량의 오차는 전 치료기간에 지속적으로 전 치료환자에게 포함되므로 의학물리학자는 더욱 엄격하게 출력선량을 평가하여 오차가 $\pm 2\%$ 이내가 되도록 지원되어야 한다.³⁾

더욱이 최근 방사선치료는 다엽콜리메터를 이용한 세기조절방사선치료법에 의한 맞춤형 또는 종양 일체형 치료법이 활발히 진행되고 있으며, 세기조절치료는 지정조사면을 수많은 분할조사면으로 다시 나누어 조사하게 되므로 소형조사면의 연속으로 이루어지는 기하학적 특성을 가진다. 다엽콜리메터를 이용한 조직선량계획은 커널법의 콘볼루션에 근거한 선량분포이므로 측정된 선량분포와 비교하여 적합한 오차범위 내에서 확인되어야 사용할 수 있으므로 필수적으로 소형조사면의 중양과 가장자리와 조사면 밖의 수 cm까지 선량의 오차를 비교 하게 된다. 현재 수 mm의 단위로 조사면을 조사하는 방사선세기조절조사는 통상 사용되고 있는 표준전리함보다 규격이 훨씬 작은 원통형의 공동전리함을 요구하게 되며, 공동전리함에 의한 선량평가

이 논문은 2012년 6월 7일 접수하여 2012년 6월 13일 채택되었음.
 책임저자 : 최태진 (702-712) 대구시 중구 동산동 194
 계명대학교 의과대학 동산의료원 의공학교실
 Tel: 053)250-7666, Fax: 053)250-7984
 E-mail: tjchoi@dsmc.or.kr

는 교정계수와 선질에 따른 흡수선량의 변수를 안정적이고 정확 한 값을 적용하여야 이루어질 수 있음을 의미한다.

이 점에서 저자들은 선량프로토콜에 명시되지 않고, 물흡수선량교정인수(N_{dw}^{Co-60})가 정해지지 않은 원통형공동전리함을 사용하여 비교적 정확한 선량을 평가할 수 있는 출력선량평가용 프로그램을 개발하여 적용한 결과를 발표한다.

대상 및 방법

저자들은 TG-21 프로토콜에 근거하여 선형가속기의 선량평가를 해왔으나, 2007년부터 TG-51 선량프로토콜을 사용하여 선형가속기(Oncor, Siemens, German 와 Clinac iX, Varian, USA)의 출력선량을 평가하고 매년 2회 MD ANDERSON CANCER CENTER에서 시행하는 TLD 우송출력선량모니터링 프로그램에 참여하고 있다.

TG-21은 표준선량국에서 Co-60 감마선으로 선량증가두 겹을 썬워 공동전리함의 조사선 량을 측정하고 표준기온과 기압하에서 제공된 교정인수 N_x 를 임상에서 공동기체흡수선량 교정인수 N_{gas} 로 변환하여, 물흡수선량을 출력선량으로 결정하는 선량프로토콜이다.

TG-51은 TG-21의 복잡한 선량평가과정을 표준선원의 물 흡수선량교정인수 N_{dw}^{Co-60} 로 대체하고 방사선종류와 에너지에 따른 교정을 임상에서 구하게 함으로써 평가과정 중 에 생기는 수식상의 오차와 그래프해석의 오차 등을 크게 줄이게 하였다.

본 연구는 기존의 전리함이 TG-51에서 사용되는 물흡수선량교정인수를 갖지 않았을 때 Co-60 표준선원에 의한 조사

선량교정인수로부터 N_{dw} 를 구하는 프로그램을 구현하였다.

전리함은 분할조사면의 소형조사면에서도 전자평형을 유지할 수 있고 감도도 높아 조사면 바깥까지 선량프로파 일을 할 수 있는 규격의 기준공동전리함이 요구되므로 저자들은 IC-15 (0.13 cc, Wellofer, Sweden) 및 TM31010계열 (0.125 cc, PTW, German) 등을 기준전리함으로 사용하고 있으며, TM31010의 규격은 Fig. 1과 같다.

IC-15 공동전리함은 Table 1과 같이 반경은 0.3 cm, 공동 길이가 0.58 cm, 두께는 0.04 cm (0.07 g/cm^2)이고 구성분은 C-552이다. IC-15는 SSDL에서 시행한 Co-60 감마선에 대한 아크릴 5 cm 깊이에서 N_{dw} 를 결정하였고, 공기커마로부터

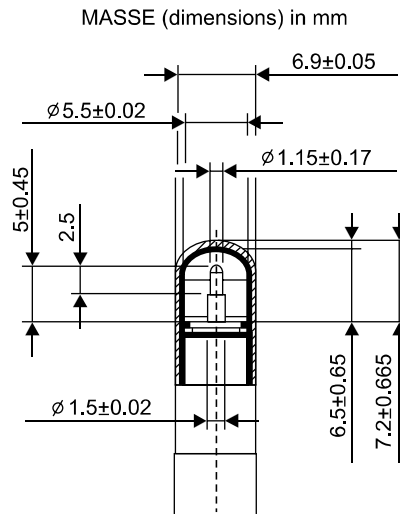


Fig. 1. Dimension of TM31010-1055 ionization chamber.

Table 1. The composition of % weight for chamber wall material C-552 of IC-15 series.

%	Element					Density
	H	C	O	F	Si	
Atomic No. %	26.86	45.81	0.31	26.81	0.15	1.76 g/cc
% mass	2.473	50.161	0.453	46.529	0.384	

Table 2. The dimensions of ionization chamber IC-15 and TM31010 are provided from the manufactures and SSDL for the exposure calibration factor (N_x) and air kerma calibration factor (N_k) of which Co-60 gamma ray.

Chamber type	SN	Inner radius (cm)	Chamber wall material	Wall thickness (g/cm^2)	Buildup material/ thick	Active volume length	N_x R/nc	N_k cGy/nC	T_0 ($^{\circ}\text{C}$)	P_0 (kPa)
IC-15	3,352	0.3	C-552	0.07	PMMA 0.35	0.58	26.86	(23.61)	22	101.33
TM31010	1,055	0.275	PMMA	0.078	PMMA 0.36	0.65	(31.36)	27.57	22	101.33
TM31010	1,057	0.275	PMMA	0.078	PMMA 0.36	0.65	(30.71)	26.99	22	101.33

조사선량교정 인수 N_x 를 변환하여 제공되었다.

공동전리함 TM31010은 Table 2와 같이 공동의 반경이 0.275 cm, 공동길이가 0.65 cm, 두께는 0.04 cm (0.078 g/cm^2) 이고 구성분은 PMMA이다.

TM31010은 향상된 제품의 수조스캐너에 장착될 수 있는 공동전리함이나, Co-60 감마선에 대한 에어커마 기체흡수선량교정인수 N_k 가 제공되어 N_k 로부터 물흡수선량교정 인수 N_{dw}^{Co-60} 를 유도하는 프로그램을 준비해 임상에 적용하였으며, 각 공동전리함의 선량교정인수는 Table 2와 같다.

조사선량교정인수 N_x 와 에어커마 교정인수 N_k 는 모두 SSDL 또는 NBS (National Bureau of Standard, 미국)에서 Co-60 감마선을 사용하여 제공하는 교정인수이며 산란선 교정인수는 제공하지 않는다. 본 연구자들은 Bragg-Gray 공동이론을 근거로한 TG-21 프로토콜의 실험적선량평가법을 적용하여 물흡수선량교정인수를 구하여 임상에 사용함으로써 비교적 안정된 선량평가를 지원하게 되었다.

공동전리함벽재질은 Bragg-Gray 공동이론에서 선량증가 두겹 재질과 규격결정에 중요한 변수로 평가된다. IC10계열 이온함은 벽재질이 C-552 Shonka로 공기등가물질로 구성되었으며, TM31010계열의 이온함은 PMMA (Polymer acrylic, 밀도 1.2 g/cm^3)이다. 두 계열의 선량증가두겹의 재질은 모두 PMMA이고 두겹의 두께는 각각 5.97 g/cm^3 과 0.43 g/cm^3 이다.

1. Bragg-Gray 공동이론의 배경

공기중 흡수선량과 물속의 한 점의 선량을 전자의 교란 없이 측정할 수 있는 방법은 존재하지 않는다. N_{dw}^{Co-60} 이 공급되지 않고 N_k 또는 N_x 가 제공된 경우 Bragg-Gray의 공동이론을 적용하여 N_{dw}^{Co-60} 을 구한다. Bragg-Gray 공동이론은 공동을 둘러싸고 있는 전리함 벽물질에 흡수된 에너지에 의해 발생된 전자에 의해 일어난 전리로부터 흡수선량을 구한다. 전리함에 적용된 Bragg-Gray 이론은 공동내 기체로 선량이 결정되고, 기체에 주어진 선량이 물질에 주는 선량으로 변환된다.^{4,5)} 이 공동이론의 직접응용은 전리함의 용적이 충분히 작아 주위 물질에 입사된 전자의 수나 분포가 공동이 없을 때와 같이 변화가 없어야 한다는 점을 전제로 하지만,⁶⁾ 공기중 선량을 측정하기 위해서는 2차전자의 평형을 위해 선량증가 두겹을 씌워야하고, 전리함 벽물질과 같거나 다른 경우 각 재질에 대한 질량저지능비와 흡수계수가 달라 보정이 이루어져야 한다.

Co-60 감마선에 대한 조사선량은 NBS에서 다양한 두께의 전리함 벽으로 된 구형 흑연 전리함으로 측정하여 확정

하고 있다.

조사선량 X 는

$$X = \frac{1}{k} J_{gas} \left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{gas}^{wall} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}^{wall} (\beta_{wall})^{-1} \prod_i K_i \quad (1)$$

으로 구한다. 여기서 X 는 조사선량(R), k 는 단위선량당 벽재질(흑연)의 단위질량당 생성된 전하($2.58 \times 10^{-4} \text{ Ckg}^{-1} \text{ R}^{-1}$)이며, J_{gas} 는 전리함내 기체의 단위질량당 전하로 단위는 C/kg 이다. 또 $\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{gas}^{wall}$ 는 코발트-60 감마선에 의해 전리함내 기체에서 방출된 2차전자에 대한 흑연 벽재질의 평균 한정에너지의 질량저지능비이다. $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}^{wall}$ 는 코발트-60 감마선을 조사했을 때 흑연 벽에 대한 기체의 평균 질량에너지흡수인수의 비를 의미한다.⁷⁾

β_{wall} 은 전리함 벽안에서 2차전자의 충돌로 커마에 미량 흡수된 선량 몫이고, 몫은 1.005이다.

$\prod_i K_i$ 는 공기에 함유된 수분량과 이온재결합손실, 전리함지지체 산란, 벽두께에 대한 보정 및 미세한 보정에 대한 각 인수(i)의 곱을 의미한다.

조사선량은 표준국에서 전리함이 제거되고 공기로 바꾸어 놓을 때 흑연전리함의 중앙 위치점에서 식(1)로 계산된 선량이다.

사용자의 전리함에 대한 교정인수는 흑연전리함이 놓인 동일 위치에 두고 식(1)의 알려진 선량에 의해 얻어진다. 즉, 사용자 전리함의 교정인수 N_x 는

$$N_x = X/M \quad (2)$$

이 되고, 여기서 M 은 쿨롱C 단위로 측정된 이온전하 값이다.

표준국에서 제공되는 교정인수는 기온 22°C , 표준 1기압으로 규격화되었으나, 이온재결합은 보정되지 않고 있으며, N_x 의 단위는 R/C이다.

공동전리함의 기체에 흡수된 선량은 전리함벽에서 생성된 전자가 공동내 머무는 전제하에서 생성된 전자의 초기 에너지로 알려져 있으며, 공동 기체의 교정흡수선량인수 N_k 는 조사선량으로부터 아래와 같이 구한다.

$$N_k = N_x k W/e / (1-g) \quad (3)$$

여기서 평균전리에너지 W/e 는 33.97 J/C , g 는 전자의 충돌저지선의 비율이며 0.003을 적용한다.

이온전리함내 기체의 선량은 기체의 단위 질량당 전하량에 직접 관계가 되므로 기체의 선량 D_{gas} (Gy)는

$$D_{gas} = J_{gas} (W/e) \quad (4)$$

로 주어진다. 여기서 W/e 는 전자의 전하에 의한 한 개의 전리쌍을 생성하는 데 소요되는 평균에너지의 몫으로 임상 광자에너지 영역에서는 일정하며, TG-21에서는 33.7 J/C를 적용하고 있다. 또 전하량을 측정하는 전위계의 감도가 전리함내 기체의 단위질량당 전하(J_{gas})에 직접적으로 연결되어 있으므로, 전위계의 판독값 M 으로 나눈 D_{gas} 의 몫은 전리함의 크기와 재질에 따라 일정하다. 이 몫이 공동-기체 교정인수 N_{gas} 이다. 즉,

$$N_{gas} = D_{gas} \cdot A_{ion} / M \quad (5)$$

와 같다. 여기서 A_{ion} 은 교정국에서 교정시 전리집적효율이다. 교정국에서 전리함과 전위계를 일체로 교정하여 공기중 선량인수 N_x 를 받게 되므로, 이온전리함의 기체내 교정계수 N_{gas} 로 변환할 필요가 생긴다. 이는 식 (1)~(5)를 이용하면,

$$N_{gas} = N_x \frac{k(W/e)A_{ion}A_{wall}\beta_{wall}}{\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{gas}^{wall} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{wall}^{air}} \quad (6)$$

와 같다. 여기서 A_{wall} 은 전리함 벽과 선량증가두겹 내에서 감쇠와 산란에 대해 보정한 인수이다. 전리함벽과 선량증가두겹의 재질이 다를 때, N_{gas} 는 이론에 바탕을 둔 실험식으로 구한다.

$$N_{gas} = N_x \frac{k(W/e)A_{ion}A_{wall}\beta_{wall}}{\alpha \left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{gas}^{wall} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{wall}^{air} + (1-\alpha) \left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{gas}^{blcap} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{blcap}^{air}} \quad (7)$$

여기서 α 는 전리함 벽에 전자에 의한 전리비율이고, $(1-\alpha)$ 는 선량증가두겹에서 전자에 의한 전리비율을 의미한다.

$\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{gas}^{blcap}$ 는 기체에 대한 선량증가두겹 재질의 평균질량 저지능비를 의미하고, $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{blcap}^{air}$ 는 선량증가두겹에 대한

공기의 평균질량에너지흡수계수를 나타낸다.

인체내 조직흡수선량은 선량증가두겹을 장착해 N_x 가 정해진 전리함의 선량증가두겹을 제거하고 물펜텀의 조사면

중심의 기준깊이(D_{max} 이나 전자평형이 이루어진 임의의 깊이)에 두고 물의 흡수선량을 정한다.

Co-60 감마선에 대한 물의 흡수선량인수 N_D 를 NBS에서 제공한다면 N_{Dw} 의 정의는

$$N_{Dw} = D_{water} / M_{raw} \quad (8)$$

로 주어지게 된다. 여기서 D_{water} 는 표준기관의 절대선량계에 의한 물흡수선량을 의미하며, 전리함이 물로 교체되고 전리함의 중심위치의 물흡수선량(Gy)을 의미하며, M_{raw} 은 이온재결합보정이 안된 전하량(C)이므로 이온재결합보정 A_{ion} 이 필요하다. 흡수선량교정계수는 공동-기체교정계수와는 다음의 관계가 있다. 즉,

$$N_{Dwater} = M' N_{gas} \cdot \left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{gas}^{wall} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{wall}^{water} / A_{repl} \cdot A_{ion} \quad (9)$$

M' 은 Co-60에 의한 공동의 기체전리량으로 기준온도, 표준기압으로 보정된 측정치(R/nC)이며, $\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{gas}^{wall}$ 은 공동 기체에 대한 전리함벽물질의 평균질량저지능비이며, $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{wall}^{water}$ 은 전리함벽재질에 대한 물의 평균질량에너지의 비를 나타낸다. A_{repl} 은 전리함벽의 감쇠 산란에 대한 보정항이다.

물재질내 한점의 조직흡수선량(D_{med})은 Spencer-Attix 식을 일반화하여 절삭 에너지 이상의 에너지에서 기체에 대한 물(med)의 평균질량저지능비를 이용하여 구한다. 물질의 흡수선량과 기체의 흡수선량간에는 다음의 관계가 있다.^{1,12)}

$$D_{med} / D_{gas} = \left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{gas}^{med} \quad (10)$$

N_{gas} 를 얻는 데 주의를 요하는 일 중에 하나는 표준국에서 N_x 만을 제공하고 나머지는 임상 물리학자가 개별적으로 이론을 배경으로 결정된다.

물흡수선량 D_{med} 는 기온기압보정을 한 전하량 M' 에 기체 질량저지능에 대한 물의 저지능의 비로 구하며, A_{wall} 은 물펜텀내 공동전리함의 대체에 의한 교란보정 P_{repl} 과 전리함벽에 의한 보정 P_{wall} 로 구한다.

$$D_{med} = M' \cdot N_{gas} \cdot \left(\frac{S}{\rho}\right)_{gas}^{water} \cdot P_{ion} \cdot P_{repl} \cdot P_{wall} \quad (11)$$

따라서 임상 현장에서 공동전리함벽 A_{ion} 과 A_{wall} 은 이온재결합보정과 공동전리함벽의 투과 및 산란보정으로 각각 1.00 미만의 값을 가지며 임상에서 각각 P_{ion} , P_{wall} 의 역수로

구한다. 전리량은 공동전리함의 규격사항과 전극전압에 따른 보정항으로 이온재결합에 대한 보정 P_{ion} 이 필요하다. 공동의 전극간 전압이 $V_2=V_1/2$ 일 때의 전하량 M_{raw}^L 에 대한 전압 V_1 에서 수집된 전하량(M_{raw}^H)과 비를 Q 라 두면, Co-60 감마선과 같이 출력선속이 연속형일 때 이온재결합보정인수 P_{ion} 는 실험적으로

$$P_{ion}=0.652+0.348Q \quad (12)$$

펄스형 선속에서는

$$P_{ion}=(1-V_1/V_2)/[M_{raw}^H/M_{raw}^L-(V_1/V_2)] \quad (13)$$

로 구할 수 있다.

전리함벽과 펜텀재질이 다를 때 2차전자의 투과감쇠와 산란에 대한 보정인수 P_{wall} 은

$$P_{wall}=\frac{\alpha^Q \cdot \left(\frac{S}{\rho}\right)_{gas}^{wall} \cdot \left(\frac{\rho_{en}}{\rho}\right)_{wall}^{water} + (1-\alpha^Q) \left(\frac{S}{\rho}\right)_{gas}^{water}}{\left(\frac{S}{\rho}\right)_{gas}^{water}} \quad (14)$$

로 주어진다. 여기서 α^Q 는 광자선에너지 Q 에 따라 결정되며 Co-60에서는 최적화한 함수로 얻을 수 있다.

전산화 순서는 Fig. 2와 같이 교정국에서 Co-60에 의한 공기교정선량인수 N_x 나, 공동전리함의 기체흡수선량교정인수 N_k 가 제공된 경우 임상에서 N_{dw}^{Co-60} 을 구하였으며, PSDL의 열량계에 의한 N_{dw}^{Co-60} 과 비교하였다.

임상에서 물흡수선량 D_{water} 은 $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 의 수조펜텀을 사용해 SSD법(선원-물표면 거리 100 cm 고정)이나 SAD법(선원-전리함의 유효점거리 100 cm)으로 측정한다. 공동전리함의 유효측정점은 공동반경의 0.6 r 지점이 깊이 10 cm가 되도록 하여 M_{raw} 를 얻는다. 출력선량결정에서 일정용적을 지닌 공동전리함내 공기의 밀도는 기압과 기온의 영향에 따라 달라지며 용적내 입자량은 밀도변화에 따라 변하게 되므로 측정전리량은 기온기압에 대한 보정이 필요하다. 기온기압보정인수 P_{TP} 는

$$P_{TP}=(273.15+T)/(273.15+T_0) \times P_0/P \quad (15)$$

과 같다. 여기서 T_0 는 기준온도로 22°C , P_0 는 기준기압 101.33 kPa을 의미 기압계는 현지기압으로 교정되었다. T 와 P 는 공동전리함의 내부온도와 기압을 각각 나타내며, 전리

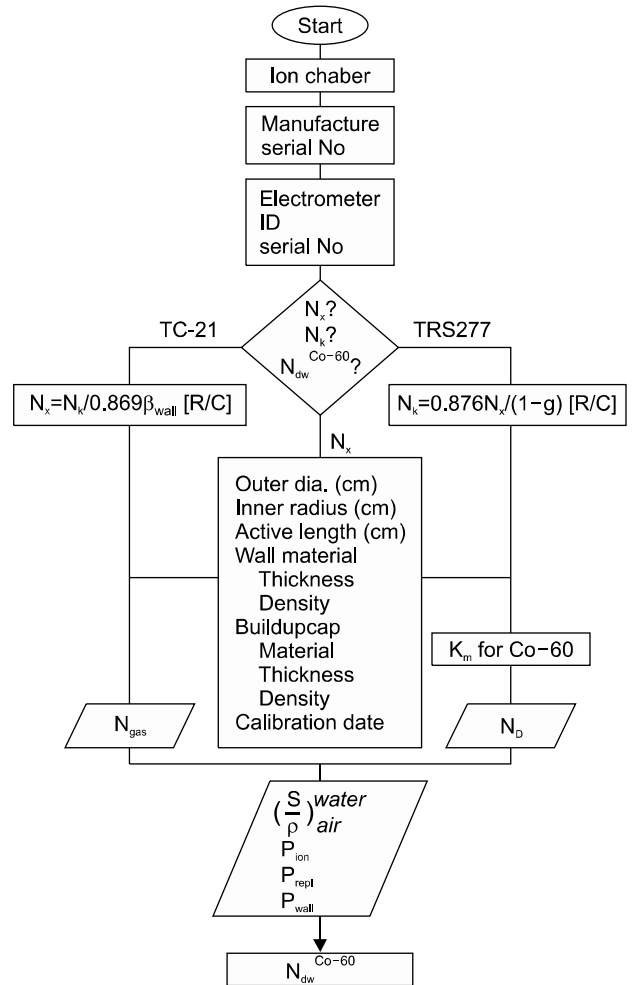


Fig. 2. Schematic process of N_{dw} determination from an exposure calibration factor.

함은 측정전 수조펜텀 속에서 온도평형을 이루기에 충분한 시간이 필요하며, 수조펜텀은 실온에 가까운 수온을 유지하게 하고 실온과 온도차가 적을수록 오차가 줄어든다.

결 과

TG-21 선량프로토콜은 Co-60 표준선원에 조사된 공동전리함의 기체흡수선량인수 N_{gas} 를 구한 다음 선형가속기의 모니터단위당 물흡수선량으로 출력선량인수를 결정하게 된다. 이 출력선량평가는 Bragg-Gray 공동이론에서 전리함의 선량증가두껍과 전리함벽재질에 의한 보정인수들의 정의에 입각한 적용들로 복잡한 과정을 수행하여 이루어지며, 선량프로토콜에 전리함의 특성이 등재되어 있지 않은 경우 등재된 유사한 전리함을 택하거나 정의되지 않은 산

란보정항은 1.00으로 두거나 실험식에 근거하여 보정계수를 구한다. 저자들은 조사선량교정인수와 물흡수선량교정인수가 정해져 있는 IC-15 공동전리함벽의 성분을 Table 1과 같이 조사하였다. IC-15 공동전리함의 벽재질 Shonka C-552의 구성성분이며, 각 원소의 중량비에 따라 전자수를 계산집계한 결과 3.02×10^{23} 개/cm³의 전자밀도를 보여 3.01×10^{23} 개/cm³인 공기와 등가물질을 확인하였다.

공동전리함은 국가표준국이나 2차표준선량연구소에서 N_x 또는 N_k 및 N_{dw}^{Co-60} 을 제공하지만 본원에서 사용하고 있는 TM31010 공동전리함은 Table 2와 같이 SSDL의 표준선원에 대한 N_k 가 주어져 있으나, N_{dw}^{Co-60} 는 제공되지 않은 검출기이다.

TM31010 규격은 Fig. 1과 같으며, 표준선원에 의한 물흡수선량교정인수 N_{dw}^{Co-60} 가 제공되지 않은 공동전리함에 대해 제공된 조사선량교정인수나 공기커마 기체흡수선량교정인수 N_k 로부터 Bragg-Gray 공동이론에 근거한 TG-21을 사용하여 식(3)을 통하여 변환하고 식(7)~(11)의 과정을 통해 Table 3과 같이 전리함벽재질에 의한 A_{wall} 과 질량저지능비, 질량에너지흡수인수비를 적용하여 기체흡수선량교정인수 N_{gas} 를 구하였으며, IC-15 공동전리함도 동일 방법으로 각 인수의 값을 사용하였다. TG-21의 N_{gas} 는 TRS-277에서

N_D 로 명명하고 있다. 표준선원 Co-60에 의한 물흡수선량 D_{water} 는 Table 4와 같이 각 전리함의 N_{gas} 에 기체에 대한 물의 질량저지능비와 전리함의 이온재결합보정, 공기벽의 물 교체에 의한 보정과 전리함벽과 공동의 질량저지능비를 이용하여 구하였다. 전리함벽에 대한 보정인수 P_{wall} 은 Table 5의 변수값을 적용하여 식(14)에 따라 구하였으며, IC-15는 공기등가물질의 벽재질로 0.989를 보였으며, TM31010은 PMMA로 1.002를 보였다.

각 공동전리함의 N_x 또는 N_k 는 Co-60 표준선원에 의한 교정인수이므로 Table 6과 같이 물흡수선량교정인수 N_{dw}^{Co-60} 를 결정할 수 있는 전산모듈을 Fig. 2와 같이 구현하였으며 선량결정과정을 단축하였다.

저자들은 식(7)에 있는 전리함벽재질에서 2차전자의 발생분량을 나타내는 α 를 로그함수로 Fitting 하여 벽두께 t (cm) 대한 함수로 $\alpha = K \log(100t)$ 를 구할 수 있게 하였다. 함수식에서 $K = -0.6t^2 + 2 \times 10^{-3}t + 0.6966$ 으로 Fitting 보정을 위한 항이며 t 의 영역은 0.025에서 5 g/cm²까지 유효하다.

N_{dw}^{Co-60} 을 결정하는 전산모듈은 IC-15 제작사에서 제공하는 표준선원에 대한 N_x 에서 N_{dw}^{Co-60} 을 유도하였다. 선량보증서의 물흡수선량교정인수를 비교한 결과 Table 6과 같이 TG-21 프로토콜은 -0.6% 오차를, TRS-277은 1.0% 높게

Table 3. The parameter of ionization chamber IC-15 and TM31010 for getting the N_{dw}^{Co-60} from the exposure calibration factor N_x or air kerma N_k with Co-60 gamma rays.

Chamber type	SN	A_{ion}	A_{wall}	α	$S/\rho)^w_a$	$u_{en}/\rho)^a_w$	$1-\alpha$	$S/\rho)^{cap}_a$	$u_{en}/\rho)^a_{cap}$	N_{gas} Gy/C
IC-15	3,352	0.995	0.988	0.57	1.000	1.000	0.43	1.103	0.925	2.288×10^8
TM31010	1,055	0.995	0.992	0.62	1.103	0.928	0.38	1.103	0.928	2.634×10^8
TM31010	1,057	0.995	0.992	0.62	1.103	0.928	0.38	1.103	0.928	2.587×10^8

Table 4. The used value of parameters for determining the N_{dw} in reference Co-60 source.

Chamber type	SN	N_{gas} Gy/C	$S/\rho)^{water}_{air}$	P_{ion}	P_{repl}	P_{wall}	N_{dw}^{Co-60} Gy/C	
							SSDL	PSDL
IC-15	3,352	2.288×10^8	1.133	0.995	0.992	0.989	2.561×10^8	-
TM31010	1,055	2.634×10^8	1.133	0.995	0.993	1.002	2.994×10^8	2.983×10^8
TM31010	1,057	2.587×10^8	1.133	0.995	0.993	1.002	2.931×10^8	3.013×10^8

Table 5. The used value of parameters for determining the P_{wall} correction factor.

Chamber type	SN	α	$S/\rho)^{wall}_{air}$	$u_{en}/\rho)^{water}_{wall}$	$1-\alpha$	$S/\rho)^{water}_{air}$	P_{wall}
IC-15	3,352	0.57	1.000	1.112	0.43	1.133	0.989
TM31010	1,055	0.62	1.103	1.031	0.38	1.133	1.002

Table 6. Determination of N_{dw} from the air kerma calibration factor N_k and the comparison of that of TG-21 to TRS-277 for finding the discrepancy of output dose of linear accelerator photon beams.

Cylindrical ionization chamber	Protocol					
	Calibration factors		TG-21		TRS-277	
	N_x	N_{dw}	N_{gas} (cGy/nC-22°C)	N_{dw}^{Co-60} (cGy/nC-22°C)	N_D (cGy/nC-22°C)	N_{dw}^{Co-60} (cGy/nC-22°C)
IC-15 3352	26.86	25.76	22.88	25.61	23.21	26.03
TM31010-1055	31.36 [†]	(29.94)	26.42	29.94	26.75	30.36
TM31010-1055*	(31.26)	29.833	26.38	29.84	26.745	30.26

*The N_{dw}^{Co-60} of this cylindrical ionization chamber was delivered from KPSDL and N_x value in the brackets was converted with TG-21 protocol. [†]This N_x was delivered from $N_k 2.757 \times 10^8$ Gy/C in courtesy by PTW (German) manufacture.

나타났으며, TG-21에 비해서는 1.6% 높게 나타났다.

동일한 방법으로 TM31010 공동전리함의 N_{dw} 가 제시되지 않아 N_k 로부터 N_x 를 구하여 각 각 프로토콜로 구한 결과 TG-21에 의한 N_{dw}^{Co-60} 는 SSDL의 교정인수와 동일함을 보인 반면 TRS-277에서는 1.4% 높게 나타났음을 알 수 있었으며, 한국표준원에서 교정 받은 값과 거의 동일한 교정인수를 얻은 반면 TRS-277은 1.4% 높게 나타났으며, SSDL과 KPSDL의 물흡수계수는 0.3%의 차이를 보였다.

N_{dw} 는 향후 TG-51 선량프로토콜에서 출력선량을 결정하는 중요변수로 이용되며, 방사선에너지에 따른 선량보정인수 K_Q 를 설정하는 것으로 물흡수선량을 정하고 모니터단위당 물흡수선량으로 정의되는 출력선량을 오차를 줄이는데 결정적 요인으로 작용할 것이다.

고찰

방사선치료성적과 예후는 종양치방선량과 조사된 선량의 오차가 큰 초과하지 않아야 기대할 수 있다.

일찍 Fletcher는 방사선종양 치료선량의 $\pm 5\%$ 범위 이내의 오차일 때 치유확률을 기대할 수 있다고 주장하였으며,¹⁾ IAEA의 ICRU 24에서도 상기 선량범위 이내의 정확성으로 선량을 평가하도록 권장하고 있으며,⁸⁾ AAPM Report 40에서는 선형가속기의 전반적인 성능보증 시방을 포함한 권장문서를 제공하고 있으며,⁹⁾ AAPM Report 86은 성능보증프로그램에서 RTOG가 표적선량의 5% 이내의 오차범위에서 도달되어야 한다고 제시하고 있다.¹⁰⁾ 표적병소에 처방선량의 오차가 5% 이내 있기 위해서는 표적에 도달하는 선량의 결정에 영향을 주는 단계별 오차는 이보다 훨씬 작아야 한다. 이 성능범위를 유지하기 위한 단계로는 선량계획 시뮬레이션, 종양일체형 조사면크기, 장기조직의 불균

질성 및 경계선량계산, 셀업오차 등이 있으며, 이외에도 선형가속기의 출력은 방사성물질의 출력선량과 달리 기온, 기압, 장비의 온도 등 선량모니터링에 영향을 주는 변화와 공급전원, 전과의 펄스폭과 높이, 인젝터의 타이밍 등 가속전자류의 최적화변동과 전자빔자장의 변화에 의한 선량분포의 비균등성 유발 등 장비의 안정성 변화에 영향을 주는 요인들과 종합되어 오차로 나타나게 된다. AAPM Report 142에서는 Report 40 (1994) 이후 MLC 기기오차와 방사선세기조절치료의 연속된 분할조사면의 선량오차 등 MLC를 이용한 새로운 치료기술법의 확산은 출력선량의 정확성을 유지할 수 있도록 매일 출력선량을 모니터하고 3%의 오차범위에 있는지 확인하고, 매월 1회 이상 2% 이내의 오차범위에서 교정되어야 한다고 밝히고 있다.^{11,12)}

표적선량을 결정하는 모든 치료계획에 포함되는 출력선량의 오차는 모든 선량계획에 영향을 주게 되므로 정확한 출력선량을 결정하도록 항상 강조되고 있다. 출력선량은 절대선량계에 교정한 외부 전리함을 이용한 조직흡수선량에 대한 선형가속기 자체의 전리함에서 제시하는 모니터단위의 비로 결정된다.

TG-21 선량프로토콜은 NBS나 SSDL에서 공동전리함에 선량증가두검을 씌워 Co-60 표준선원에 조사되어 결정된 조사선량교정계수 또는 공동기체흡수선량교정계수를 제공하게 된다.

임상에서는 N_x 나 N_k 를 이용하여 흡수선량을 구하기 위해서는 선량증가두검과 전리함벽재질에서 전자발생률과 선량증가두검에서 생성된 전자의 비율 및 이온재결합과 전자의 투과감쇠보정을 정하므로 보정항이 많아 복잡하고 에러를 일으키기 쉽다. 특히 TG-51은 교정기관에서 물흡수선량교정인수를 지원하는 경우 보정항을 줄이고, 방사선종류와 에너지에 따른 보정항 K_Q 를 정하므로 선량평가를 간편

화하게 되었다. 그러나 공동전리함의 향상이나 선량스캐니스템의 일체화에 따라 N_{dw} 교정인수가 정해지지 않은 공동전리함으로 절대선량평가를 할 때가 있다.

본 연구는 표준선원에 대한 N_{dw} 교정인수가 정해지지 않았으나, Co-60 표준선원에 의한 공동전리함의 N_x 또는 공기커마 교정인수 N_k 를 이용하여 N_{dw}^{Co-60} 을 결정할 수 있는지 TG-21 선량프로토콜과 TRS-277와 교차점검을 하였으며, 한국표준선량연구소의 도움으로 표준선원에 의한 일차표준선량계의 물흡수선량교정계수를 득하여 점검결과 SSDL의 N_{dw} 가 PSDL 표준선원의 N_{dw} 에 대해 0.4%와 -2.8% 오차가 있음을 발견하게 되었다.

저자들은 N_{dw} 가 정해지지 않은 공동전리함은 다소 복잡한 프로토콜이지만 Bragg-Gray 공동이론을 이용하여 구할 수 있음을 확인하고 선량평가결과이 불안정한 경우 프로토콜 점검시 교정계수에 대한 교차점검 등이 필요할 것으로 생각한다.

계산된 N_{dw} 에서 0.6%의 오차에는 TG-21 선량프로토콜에서 공동전리함마다 분극효과교정이 요구되며, 정상에서는 1.005 정도가 되는 것으로 알려져 있어 향후 연구가 필요할 것으로 생각된다.

특히 본 연구의 TM31010과 같이 어느 선량프로토콜에도 선량특성이 등재되지 않은 경우 중요결정인자를 구하는 방법은 이론에 근거하여 교정계수를 구한 다음 알려진 전리함에 적용하여 방법과 과정의 신뢰를 갖게 하는 것이다. 물론 N_{dw} 를 결정하는 가장 좋은 방법은 일차교정기관에서 절대선량계인 열량계의 선량에 비교한 물흡수선량인수를 사용하는 것이지만, 개별 변수의 활용과 선량오차의 원인탐색 등은 이론적실험식에 근거한 교정인수 평가가 필요하다고 생각되며, 본 연구와 같이 교정인수가 알려진 전리함과 교차점검을 통해 비교적 정확한 물흡수인수를 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 전산모듈은 향후 출력선량결정과 미지의 N_{dw} 를 점검하는 방법에 유효하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

결 론

본 연구는 임상에서 널리 사용되고 있는 원통형공동전리함이 표준선원에 대한 물흡수선량교정인수가 주어지지 않고 선량프로토콜에 등재되지 않은 검출기에 대해 SSDL에

서 제공한 표준선원의 조사선량교정인수로 TG-21 선량프로토콜을 이용하여 물흡수선량교정인수를 결정하는 프로그램을 개발하였다.

결정된 물흡수선량교정인수의 정확성을 평가하기 위하여 N_{dw} 를 갖고 있는 전리함의 N_x 로부터 구한 값을 비교한 결과 TG-21은 0.6% 오차내에서 일치하였으며, TRS-277은 1.0% 오차를 보였고, TG-21의 N_{dw} 에 비해 TRS-277은 1.6%의 차이를 보였으며, 일차교정기관의 교정인수에 비해 SSDL의 교정계수는 0.4%와 -2.8%를 보여 교정선량인수를 이용할 때 교차점검 및 신중한 점검이 요구되고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Fletcher GH: *Textbook of radiotherapy*. 3rd ed, Lea and Febiger, Philadelphia. (1981), p. 37
2. Task Group 21. A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 10:741-771 (1983)
3. AAPM Report No.86: Quality assurance for clinical trials. A primer for physicists. Medical Physics Publishing, Madison. (2004), pp.1-63
4. Johns HE, Cunningham JR: *The Physics of Radiology*. Thomas CC. 4th ed, Springfield, Illinois, USA. (1977), pp. 272-310
5. Kase KR, Bjarngard BE, Attix FH: The dosimetry of ionizing radiation. Vol II. Orland, Academic press. (1987), pp.169-175
6. Tome WA, Paltab JR: On the calculation of mean restricted collision stopping powers. *Med Phys* 25:758-772 (1998)
7. Nahum AE: Water/air mass stopping power ratios for megavoltage photon and electron beams. *Phys Med Biol* 23:24 (1978)
8. ICRU Report No.24: Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures. Washington, D.C, ICRU. (1976), pp. 1-55
9. AAPM Report TG-40: Comprehensive QA for radiation oncology: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40. *Med Phys* 21:581-618 (1994)
10. AAPM Report No.86: Quality assurance for clinical trials: A primer for physicists. Madison, Medical Physics Publishing. (2004), pp.1-63
11. Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators. *Med Phys* 36:4197-212 (2009)
12. Khan FM: *The Physics of Radiation Therapy*. 4th ed, Philadelphia. Baltimore. New York. London. Buenos Aires. Sydney. Tokyo, Lippincott Williams & Wilkins. (2009), pp.375-403

N_{dw}^{Co-60} 이 정의되지 않은 원통형 이온전리함을 이용한 고에너지 광자선의 임상적 출력선량 결정

계명대학교 의과대학 *방사선종양학교실, †의공학교실, ‡전남대학교병원 방사선종양학과

오영기* · 최태진† · 송주영‡

선형가속기의 출력선량의 평가는 표준선원에 의한 조사선량교정인수 N_x 나 공기커마교정인수 N_k 또는 더 나아가 물흡수선량교정인수를 가진 공동전리함을 이용하여 이루어지며, 선량프로토콜에 따라 교정인수가 다르다. N_x 를 사용하는 TG-21 프로토콜은 Bragg-Gray 공동이론에 근거하여 기체흡수교정인수를 구하고 공동전리함의 내경과 벽재질과 두께, 공동길이 등에 따라 보정인수가 정해지므로 다소 복잡한 계산절차를 가지므로 누적오차가 발생할 수 있다. TG-51은 물흡수선량교정인수를 이용하므로써 복잡한 절차를 크게 줄여 계산오차를 피할 수 있게 되었다. 대개 1차표준국에서는 N_x 나 N_k 및 N_{dw}^{Co-60} 을 제공하여 왔으므로, N_{dw} 가 정해지지 않은 TM31010 계열의 공동전리함에 대해 N_x 또는 N_k 로 TG-21을 이용하여 N_{dw} 를 결정하는 프로그램을 준비했으며, 기존 N_x 와 N_{dw} 가 제공된 IC-15 전리함의 것과 비교하여 좋은 일치결과를 얻었다. 반면에 TM31010은 이차표준국(SSDL, Secondary Standard Dosimetry Laboratory)에서 제공된 N_k 로 N_{dw} 를 구한 결과 우송형 열형광소자(TLD, Thermo Luminescence Device)에 의한 출력선량모니터 결과 불안정한 결과를 계기로 한국표준과학연구원의 1차 표준선량시험(PSDL)의 교정인수와 비교한 결과 0.4%와 -2.8%로 각각 나타나 SSDL의 교정인수와 차이를 보여, N_{dw} 가 정해져 있지 않거나 평가선량이 의심스러운 때는 선량프로토콜의 절차에 과한 세밀한 검토와 전리함의 교정계수에 대한 교차점검이 필요함을 알았다.

중심단어: 조사선량 교정인수 N_x , 공기커마 N_k , 물흡수선량교정인수 N_{dw}