

고에너지 전자선에 대한 표준측정법간의 비교¹⁾

인하대학교 의과대학 방사선종양학교실*

가톨릭대학교 강남성모병원 의공학교실[†], 치료방사선과학교실[‡]

경기대학교 물리학과[§], 원자력병원 방사선종양학과^{||}

연세대학교 의과대학 치료방사선과학교실[¶]

박성용*[§], 서태석[†], 김희남[‡], 신동오[§], 지영훈^{§,||}

권수일[§], 이길동[§], 추성실[¶], 최보영[†], 노준규*

팬텀내에 삽입되는 전리함은 전자 플루언스의 교란을 최소화하는 기하학적 구조를 갖는 것이 바람직한데 평행평판형 전리함은 다른 어떤 전리함보다도 이러한 조건을 잘 만족시킨다. 이러한 이유로 IAEA 표준측정법에서는 표면 평균 에너지가 10 MeV 이하인 전자선 측정시 평행평판형 전리함의 사용을 권고하고 있으나 일반적으로 편이상 원통형 전리함을 많이 사용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 네 가지 다른 표준 측정법 즉 1)원통형 전리함을 사용한 IAEA 표준 측정법 2)원통형 전리함을 사용한 TG-21 표준 측정법 3)평행평판형 전리함을 사용한 Markus 측정법 4)평행평판형 전리함을 원통형 전리함에 대하여 교정한 TG 39 측정법을 사용하여 서로 다른 측정법과 전리함의 차이에 의한 선량 값의 변화를 알아보고자 한다. Siemens KD-2 선형가속기에서 발생하는 고에너지 전자선(6,9,12,15,18 MeV)을 이용하여 3차원 전산화 물팬텀과 0.125 cc 전리함을 사용하여 각 에너지별로 10x10 cm² cone size의 심부선량백분율을 구하였다. 고체 물팬텀내에서 Farmer type 0.6 cc 원통형 전리함을 사용하여 IAEA 표준 측정법과 TG-21 표준 측정법에 의해서 각 에너지별로 흡수선량을 측정하였다. 평행평판형 전리함(Markus Chamber)을 사용하여 Markus 측정법에 의해서 각 에너지별로 흡수선량을 측정하였다. 전자선 에너지 18 MeV를 사용하여 원통형 전리함에 대한 평행평판형 전리함의 교정계수를 얻고 TG 39 측정법에 의해서 각 에너지별로 흡수선량을 측정하였다. Cone size는 10x10 cm² 이었고 측정점의 깊이는 d_{max} 이었다. IAEA 표준 측정법과 TG 21 표준 측정법은 18 MeV에 대하여 0.9 %의 차이가 나타났고 그 외의 에너지 영역에서 0.7 %이내로 비교적 잘 일치하였다. Markus 측정법과 TG 39 측정법은 18 MeV와 6 MeV에 대하여 각각 ±0.8 %의 차이가 나타났고 그 외의 에너지 영역에서 0.5 %이내로 잘 일치하였다. 원통형 전리함과 평행평판형 전리함을 이용한 측정법간의 차이는 18 MeV에서 1.6 %까지 나타나므로 주의가 요하며 TG 39 측정법에서 제시한 다른 측정방법을 사용하여 측정을 하여 교정계수를 얻을 필요가 있을 것으로 생각된다.

중심 단어: IAEA, TG 21, Markus, TG 39 측정법, 평행평판형 전리함, 원통형 전리함

서 론

고에너지 전자선은 1947년 베타트론의 발명 후에 처음으로 사용되었고 1950년 초기에 몇 개의 기관이 베타트론 혹은 독자적으로 선형 가속기를 이용하여 환자들을 치료하였다. 1970년대 이후 선형가속기의

발달로 많은 방사선 치료기관에서 고에너지 전자선을 이용하여 환자를 치료하고 있다. 고에너지 전자선에 대한 기본적인 물리적 성질과 선량측정은 초기에 간단한 경우는 정립이 되어있지만 세부적인 임상에서의 선량측정은 광자선의 잘 알려진 물리적 성질과 선량측정방법에 비해 다소 뒤떨어져있고 전자선을 이용한 치료가 증가함에 따라 임상에서의 선량측정방법 개선과 연구가 필요한 실정이다.

1. 이 연구는 '보건의료기술연구 개발사업 연구비'지원에 의하여 이루어진 것임.

고에너지 전자선의 흡수선량을 결정하기 위한 측정방법은 미국의학물리학회(AAPM)¹⁾, 국제원자력기구(IAEA)²⁾, 북유럽임상물리학회(NACP)³⁾, 영국병원물리협회(HPA)⁴⁾, 국제방사선단위위원회(ICRU)⁵⁾, 일본의학물리학회(JARP)⁶⁾, 독일의학물리학회(DIN)⁷⁾ 등에서 광자선과 더불어 규정하고 있다. 미국의학물리학회에서는 1983년에 발표된 초기 표준측정법(TG 21)이후에 고에너지 전자선에 관하여 1991년도에 개정된 보고서(TG 25)⁸⁾를 발표하였고, 1994년도에는 고에너지 전자선의 선량측정에 평행평판형 전리함의 사용과 교정방법에 대한 보고서(TG 39)⁹⁾를 발표하였다.

또한 국제원자력기구에서는 1987년에 표준측정법을 발표하였고 1997년에는 '고에너지 전자선과 광자선에서의 평행평판형 전리함의 사용'이란 보고서¹⁰⁾를 발표하였다.

고에너지 전자선의 선량교정은 전자선 플루언스의 교란을 최소화하고 유효측정점이 불확실할 때 그리고 평균 표면에너지가 10 MeV 이하인 경우에 평행평판형 전리함의 사용을 권고하고있으나 일반적으로 편의상 원통형 전리함을 많이 사용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 네 가지 다른 표준 측정법 즉, 1)원통형 전리함을 사용한 IAEA 표준측정법 2)

원통형 전리함을 사용한 TG-21 표준측정법 3)평행평판형 전리함을 사용한 Markus 측정법¹¹⁾ 4)평행평판형 전리함을 원통형 전리함에 대하여 교정한 TG 39 측정법을 사용하여 서로 다른 측정법과 전리함의 구조 차이에 의한 선량 값의 변화를 알아보고자 한다.

재료 및 방법

고에너지 전자선은 선형가속기(Siemens KD-2, 미국)에서 발생하는 6,9,12,15,18 MeV 전자선을 사용하였고 3차원 전산화 물팬텀(PTW MP3S, 독일)과 0.125 cc 전리함(PTW 31002, 독일)을 사용하여 각 에너지별로 10x10 cm² cone의 깊이 이온화곡선을 얻고 흡수 선량곡선으로 변환하였다.

전리함의 교정을 위해 2차 표준측정기관인 식품의약품안전청으로부터 0.6 cc Farmer type 전리함(PTW 30001, 독일)과 전기계(PTW Unidos, 독일)에 대한 교정계수를 얻었으며, 평행평판형 전리함(PTW 23343, Markus chamber 0.055 cc, 독일)과 전기계(PTW Unidos, 독일)에 대한 물과 공기에 대한 흡수선량 교정계수는 독일 Georg-August-Universitat Göttingen으로부터 얻었고, 교정시 선원은 전자선

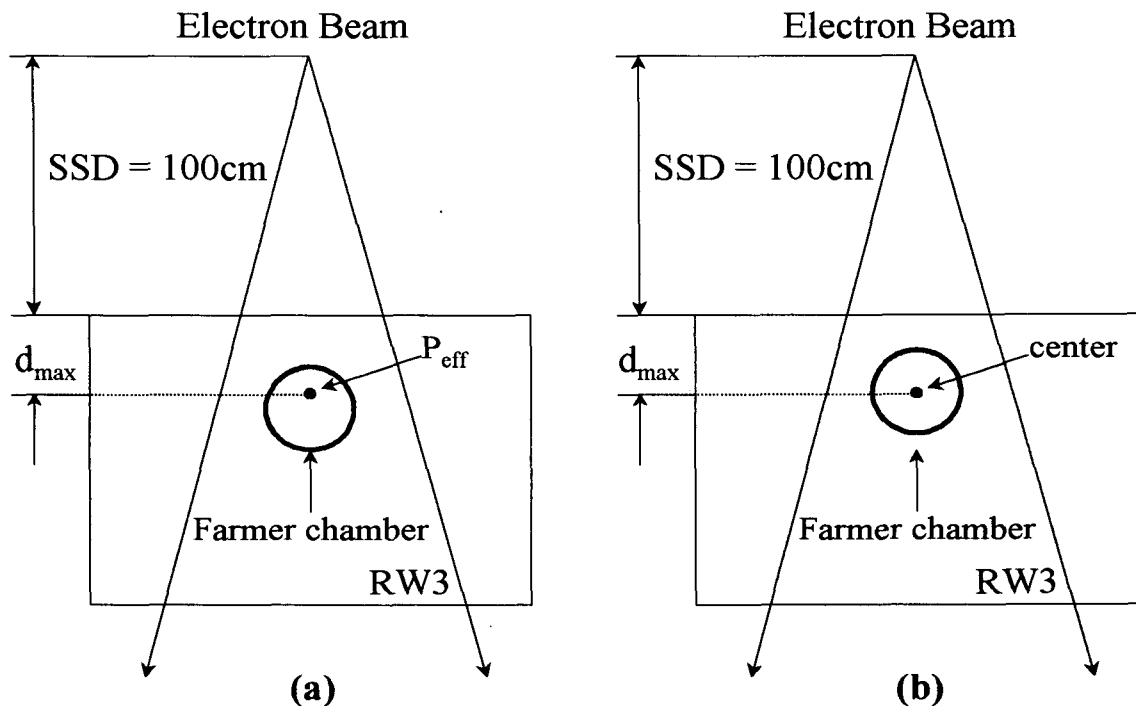


Figure 1. Experimental setup for (a) IAEA protocol and (b) TG 21.

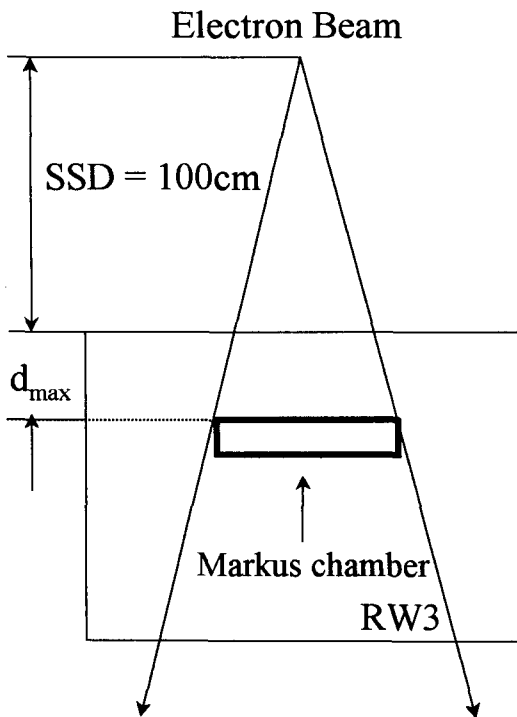


Figure 2. Experimental setup for Markus Protocol.

에너지 18 MeV(Siemens Betatron), 팬텀은 PMMA, 조사면의 크기는 10x10 cm², 그리고 측정점의 깊이는 표면에서 15.20 mm이었다.

본 연구에서 측정매질은 물등가고체팬텀(PTW RW3, 독일)을 사용하였고 측정전 하루동안 치료실에 놓아둠으로서 치료실 환경과 평형을 이루도록 하였다.

모든 측정법 및 에너지에 대하여 선원 표면간 거리는 100 cm으로 하였고 팬텀 표면에서 조사면의 크기는 10x10 cm²가 되게 하였다. 측정깊이는 모든 측정법에 대하여 선량 최대 지점(d_{max})에서 측정하였다. 전자선 측정에서 극성효과는 중요한 인자이므로 각 전리함에 대하여 (+)방향과 (-)방향의 전압을 걸어 측정한 값의 평균측정치를 사용하였다. 이때 인가전압은 400V이었다. 이온재결합 보정계수는 두 전압방법(two voltage technique)에 의하여 원통형전리함은 인가 전압 400V에서 측정한 값과 200V에서 측정한 값의 비를 통하여 얻었으며 평행평판형 전리함은 인가 전압 300V에서 측정한 값과 150V에서 측정한 값의 비를 통하여 얻었다.

원통형 전리함을 이용한 IAEA 표준측정법에서는 측정점이 전리함의 중심점에 오도록 하고 방사선원에 수직이 되도록 하였으며 측정점의 위치를 중심점으로부터 0.5r(r=전리함의 내경)만큼 이동시켰다.(그림1(a))

원통형 전리함을 이용한 TG 21 표준측정법에서는 유효측정점의 위치를 전리함의 중심축에 오도록

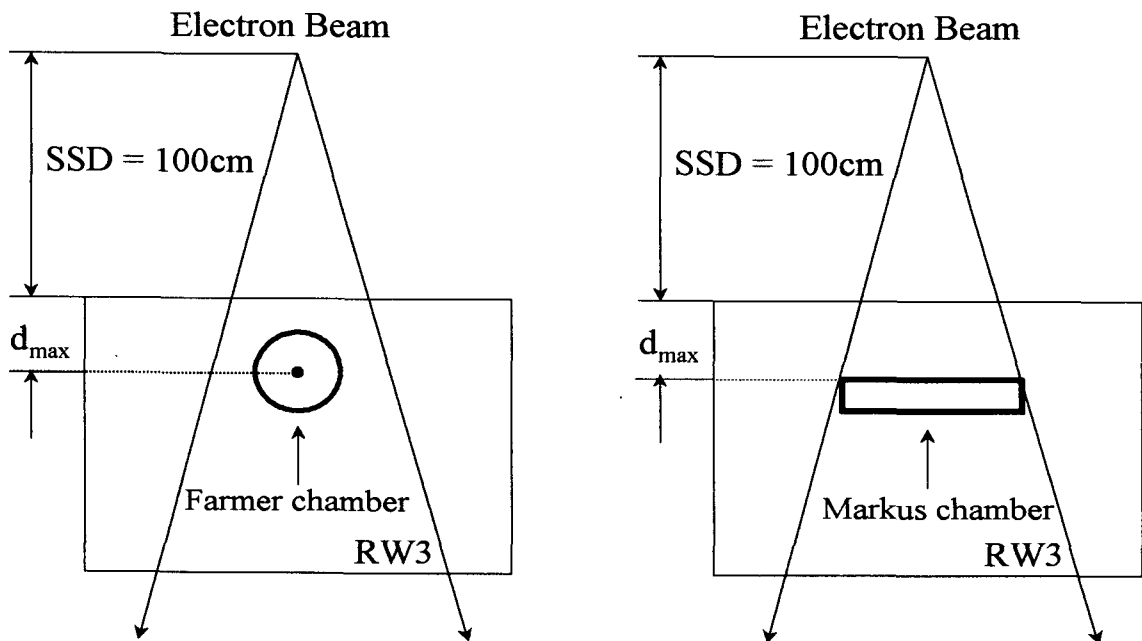


Figure 3. Experimental setup for TG 39 report.

하고 중심점에서 측정을 하였다(그림1(b)).

평행평판형 전리함을 사용한 Markus 측정법에서는 유효측정점이 전리함의 전면에 위치하도록 하여 측정을 하였다.(그림2). TG 39측정법에서는 표준기관으로부터 얻은 원통형 전리함의 교정계수를 이용하여 평행평판형에 대한 교정계수를 구하였다. 이때 전자선 에너지는 18 MeV를 사용하였고, 원통형 전리함의 측정점 위치는 전리함의 중심점에 오도록 하였고, 평행평판형 전리함의 측정점을 전리함의 전면에 위치하도록 하여 측정을 하였다(그림3).

각 표준측정법의 수식체계

IAEA 표준측정법

공기흡수선량 교정계수 N_D 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_D = N_k (1-g) k_{att} k_m \quad (1)$$

여기서 N_k 는 공기커마 교정계수, g 는 이차 하전입자의 에너지중 제동복사선으로 손실되는 손실률로서 ^{60}Co 에서 g 값은 0.003이다.

만약 표준기관으로부터 조사선량교정계수 N_x 를 얻었다면 다음의 식으로부터 얻을 수 있다. 조사선량 교정계수 N_x 와 공기커마 교정계수 N_k 의 관계는

$$N_x = N_k(1-g)/(W/e) \quad (2)$$

따라서

$$N_k = N_x \cdot (W/e) \cdot \frac{1}{1-g} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다.

또한 k_{att} 는 전리함 벽에서 검교정용 방사선의 감쇠에 대한 보정계수이고, k_m 은 검교정용 방사선에서 전리함 벽과 선량증가 두겹물질의 공기 비등가성에 대한 보정계수로서

$$k_m = \alpha S_{air.wall} (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{wall.air} + (1-\alpha)S_{air.cap} \cdot (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{cap.air} \quad (4)$$

여기서 $S_{air.wall}$ 은 전리함 벽물질에 대한 공기의 평균 저지능비, $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{cap.air}$ 은 공기에 대한 선량증가두 겹 물질의 평균질량에너지 흡수계수비, 그리고 α 는 전리함 벽에서 생긴 전자에 의한 공동 속의 이온화 비율이다.

유효 측정점(P_{eff})에서 물의 흡수선량 D_w 는

$$D_w(P_{eff}) = M_u N_D S_{w,air} P_u P_{cel} h_m \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 M_u 는 온도, 기압, 습도, 극성, 그리고 이온재결합손실을 보정한 전기계의 값으로서 기준값이에 전리함의 내반경계수 f 를 더한 지점에서 측정된 값이고, 전자선에서의 f 는 0.5이다. N_D 는 공기흡수선량 교정계수이고, $S_{w,air}$ 는 공기에 대한 물의 평균저지능비이고 저지능비는 Spencer-Attix type이다. P_u 는 Bragg-Gray의 식에 대한 보정계수로서 전리함 벽이 물과 같지 않고 전리함 벽과 공동에 의해서 전리함의 부피만큼 물이 전리함으로 대체됨에 따라 일어나는 전자 플루언스의 변화에 대한 보정계수이며 P_{cel} 은 중심 전극 물질에 대한 보정계수이다. h_m 은 매질이 물이 아닌 경우에 적용하는 계수로서 측정점에서 매질에 대한 물의 전자 플루언스 비로서 나타낸다.

TG 21 표준측정법

Loevinger에 의해 개발된 식에 의해서, 전리함내의 가스에 대한 선량을 온도, 기압, 그리고 이온수집 효율이 보정된 전기계값으로 나눈 공기흡수선량계수 N_{gas} 는 다음과 같이 주어진다.

$$N_{gas} = D_{gas} A_{ion} M^{-1} \quad (6)$$

여기서 D_{gas} 는 공동내 가스에서의 평균흡수선량, M 은 온도와 기압이 보정된 전기계 지시값, 그리고 A_{ion} 은 교정기관에서 교정시 이온수집효율이다.

N_{gas} / A_{ion} 은 전리함에 대하여 일정하고, N_{gas} 는 표준기관으로부터 얻은 조사선량 교정계수 값 N_x 으로부터 다음의 식에 의해 얻어질 수 있다.

$$N_{gas} = N_x \frac{k(W/e)A_{wall}A_{ion}\beta_{wall}}{\alpha(\bar{L}/\rho)_{gas}^{wall}(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{wall}^{air}} \quad (7)$$

여기서 k 는 단위 조사당 단위 질량당 공기에서 생성된 전하량($2.58 \times 10^{-4} \text{Ckg}^{-1}\text{R}^{-1}$)이며, W/e 는 공기에서 생성된 이온쌍당 전자전하당 소요된 평균에너지, A_{wall} 은 전리함 벽과 선량 증가두껍에서 일차 광자선의 감쇠와 산란에 대한 보정계수, β_{wall} 은 흡수선량과 충돌커마와의비, $(\bar{L}/\rho)_{gas}^{wall}$ 은 전리함의 공동에서의 가스와 전리함벽 물질과의 평균충돌질량저지능비, $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{wall}^{air}$ 은 공기와 전리함벽 물질과의 평균질량에너지흡수계수의 비, α 는 전리함 벽에서 발생하는 조사에 의한 전리비율이다.

선량 최대지점(d_{max})에서 물의 흡수선량은

$$D_w(d_{max}) = M N_{gas} (\bar{L}/\rho)_{gas}^{med} P_{ion} P_{wall} P_{repl} \cdot (\bar{S}/\rho)_{med}^{water} \Phi_{med}^{water} \quad (8)$$

으로 나타낼 수 있다.

여기서 M 은 선량최대지점에서 온도, 기압, 그리고 극성이 보정된 전기계값, P_{ion} 은 이온재결합손실에 대한 보정계수, P_{wall} 은 전리함벽 물질과 측정매질의 차이에 대한 보정계수, P_{repl} 은 팬텀물질이 전리함 벽 및 공기로 대체됨에 따른 광자와 전자 플루언스 변화에 대한 보정계수, $(\bar{S}/\rho)_{med}^{water}$ 은 매질에 대한 물의 평균비제한질량충돌저지능비, 그리고 Φ_{med}^{water} 은 선량 최대지점에서 매질에 대한 물의 전자플루언스비이다.

Markus 고에너지 전자선 측정법

선량최대지점에서 물에 대한 흡수선량은 다음과 같이 주어진다.

$$D_w = M N_a S_{w,a}(E_r) k_s \quad (9)$$

여기서 M 은 선량최대지점에서 온도, 기압, 그리고 극성이 보정된 전기계값, N_a 는 교정기관에서 고에너지 전자선을 이용하여 측정해서 얻은 공기에 대한 흡수선량교정계수이며, 이 값은 교정시 전자선 에너

지와 무관하다. $S_{w,a}(E_r)$ 은 측정깊이에서 공기에 대한 물의 질량저지능비이고 k_s 는 이온재결합 보정계수이다.

TG 39 측정법

교정된 원통형 전리함을 이용하여 평행평판형 전리함의 교정계수 N_{gas}^{pp} 를 구하는데는 i) 팬텀내의 선량최대지점에서 고에너지 전자선을 이용한 교정방법, ii) 공기 중에서 ^{60}Co 선원을 이용한 교정방법, iii) 팬텀내의 깊이 $d = 5 \text{ g/cm}^2$ 에서 ^{60}Co 를 이용한 교정방법, iv) 팬텀내의 선량최대지점에서 ^{60}Co 선원을 이용한 교정방법 등 네 가지 방법이 있다. 방법 ii)와 iv)은 본질적으로는 동일한 방법이며, 단지 후방산란계수와 관계가 있다.

본 연구에서는 Markus 측정법에서 사용한 N_a 값이 고에너지 전자선 에너지 18 MeV를 사용하여 얻었으므로 첫 번째 방법을 사용하였다.

평행평판형 전리함의 공기흡수선량계수는 다음과 같이 주어진다.

$$N_{gas}^{pp} = (M N_{gas} P_{ion} P_{repl})^{cyl} / (M P_{ion})^{pp} \quad (10)$$

여기서 cyl 은 원통형 전리함, pp 는 평행평판형 전리함을 의미한다. M 은 온도, 기압, 그리고 극성이 보정된 표시값, N_{gas} 는 공기흡수선량교정계수, P_{ion} 은 이온재결합보정계수, 그리고 P_{repl} 은 팬텀물질이 원통형 전리함의 공동으로 대체됨에 따른 보정계수이다. P_{repl} 은 고에너지 전자선의 경우 1.000이다. N_{gas}^{pp} 를 구할 때의 선원인 전자선의 에너지는 가능하면 커야 하며 보통 18 MeV 이상이다.

선량최대지점에서 물에 대한 흡수선량은

$$D_w(d_{max}) = M N_{gas}^{pp} (\bar{L}/\rho)_{gas}^{med} P_{ion} P_{repl} \cdot (\bar{S}/\rho)_{med}^{water} \Phi_{med}^{water} \quad (11)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 M 은 온도, 기압, 그리고 극성이 보정된 표시값, N_{gas}^{pp} 는 평행평판형 전리함의 공기흡수선량교정계수, P_{ion} 은 이온재결합보정계수, 그리고 P_{repl} 은 팬텀물질이 원통형 전리함의 공동으로 대체됨에 따른 보정계수이다. $(\bar{S}/\rho)_{med}^{water}$ 은

Table 1. Characteristics of various electron beams.

Energy	d_{\max} (mm)	R_{50} (mm)	R_p (mm)	E_0 (MeV)	$E_{p,0}$ (MeV)	E_z (MeV)
6 MeV	12	23.47	29.83	5.47	6.29	3.26
9 MeV	20	35.29	43.88	8.22	9.02	4.47
12 MeV	25	47.22	56.69	11.00	11.52	6.15
15 MeV	25	60.39	74.33	14.07	14.95	9.34
18 MeV	20	70.91	85.35	16.52	17.10	12.65

Table 2. Absorbed dose intercomparison for IAEA and TG 21 Protocol.

Energy	$\frac{N_D}{N_{gas}}$	$\frac{M_u}{M \cdot P_{ion}}$	$\frac{S_{w,air}}{(\bar{L}/\rho)_{air}^{med} (\bar{S}/\rho)_{med}^{water}}$	$\frac{P_u}{P_{wall}}$	P_{cel}	$\frac{D_{IAEA}}{D_{TG21}}$
6 MeV	1.004	1.004	0.995	0.996	1.008	1.007
9 MeV	1.004	0.998	0.995	0.996	1.008	1.002
12 MeV	1.004	0.999	0.998	0.996	1.008	1.005
15 MeV	1.004	0.997	0.996	1.000	1.008	1.005
18 MeV	1.004	0.997	0.997	1.000	1.008	1.009

매질에 대한 물의 평균비제한질량층등저지능비이고 Φ_{med}^{water} 은 선량최대지점에서 매질에 대한 물의 전자 플루언스비이다.

결과 및 고찰

전자선 에너지 6, 9, 12, 15, 그리고 18 MeV로 부터 얻은 깊이이온화 곡선에 적절한 질량저지능비를 적용하여 흡수선량곡선으로 변환하였다. 흡수선량곡선으로부터 d_{\max} (선량최대지점), R_{50} (선량백분율이 50%인 지점의 깊이), R_p (전자선의 실비정), E_0 (표면에서의 평균에너지), $E_{p,0}$ (표면에서의 최빈에너지), 그리고 E_z (깊이 z 에서의 평균에너지)를 TG 21에 의해서 구하여 표1에 나타냈다. 표1에 있는 표면에서의 평균에너지 E_0 는 $E_0(\text{MeV}) = 2.33 \times R_{50}$ 식에 의해서 구하였고 표면에서의 최빈에너지 $E_{p,0}$ 는 $E_{p,0}(\text{MeV}) = 0.22 + 1.98R_p + 0.0025R_p^2$ 식에 의해서 구하였다. 또한 깊이 z 에서의 평균에너지 E_z 는 $E_z(\text{MeV}) = E_0(1 - z/R_p)$ 식에 의해서 구하였다.

IAEA와 TG 21의 비교

IAEA 표준측정법의 N_D 와 TG 21의 N_{gas} 를 비교하였다.(표2) N_D 값이 N_{gas} 값보다 0.4 %높게 나타났는데 주요한 원인은 두 측정법간에 사용한 (W/e)값의 차이와 선량증가두겹의 공기 비등가성에 대한 보정계수(k_m)에 의한 것으로 생각된다. TG 21에서 사용한 (W/e)값은 건조한 공기대신 순환공기(ambient air)에 대한 값으로 IAEA에서 사용한 건조한 공기에서의 값보다 0.8 %낮은 값이다. 선량증가두겹의 공기 비등가성에 대한 보정계수 k_m 값은 질량저지능비와 질량에너지 흡수계수를 포함하는데 TG 21에서는 Berger와 Seltzer⁵⁾에 의한 이론 식에 대한 저지능비를 사용하고 있고 IAEA에서는 Andreo¹²⁾등에 의한 몬테카를로 방법에 의해 계산된 값을 사용하므로 차이가 있다.

N_D 와 N_{gas} 값의 또 한가지 차이점은 N_{gas} 계산시 β_{wall} 을 포함하는데 있다. Attix¹³⁾와 Rogers¹⁴⁾ 등이 지적했듯이 β_{wall} 은 이미 A_{wall} 결정시 포함되어 있다. 참고로 ^{60}Co 에 대하여 β_{wall} 의 값은 1.005이다.

식(5)와 식(8)을 사용하여 IAEA 와 TG 21의 흡수선량을 비교하였다.

Table 3. Absorbed dose intercomparison for Markus and TG 39 protocol.

Energy	$\frac{N_a}{N_{gas}^{pp}}$	$\frac{M_u}{M \cdot P_{ion}}$	$\frac{S_{w,air}}{(\bar{L}/\rho)_{air}^{water}}$	$\frac{D_{Markus}}{D_{TG39}}$
6 MeV	0.996	0.998	0.998	0.992
9 MeV	0.996	0.998	1.000	0.995
12 MeV	0.996	1.004	1.000	1.001
15 MeV	0.996	1.006	0.999	1.003
18 MeV	0.996	1.010	0.999	1.008

Table 4. Absorbed dose intercomparison for four different protocols normalized IAEA protocol.

Protocol	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV	18 MeV
IAEA	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TG 21	0.993	0.998	0.995	0.995	0.991
MARCUS	0.997	0.994	0.995	0.998	0.992
TG 39	1.005	0.999	0.994	0.995	0.984
Average	0.999±0.005	0.998±0.003	0.996±0.003	0.997±0.002	0.992±0.007

$$\frac{D_w^{IAEA}(d_0)}{D_w^{TG21}(d_0)} = \frac{M_u}{MP_{ion}} \frac{N_D}{N_{gas}} \frac{(S_{w,air})_u}{(\bar{L}/\rho)_{air}^{med} (\bar{S}/\rho)_{med}^{water}} \cdot \frac{P_u}{P_{wall} P_{repl}} \frac{P_{cel}}{1} \frac{h_m}{\Phi_{plastic}^{water}} \quad (12)$$

IAEA의 M_u 값과 TG 21의 M 과 P_{ion} 의 값은 깊이 ($d_0+0.5r$)와 d_0 에서 측정된 심부선량백분율의 비로써 나타낼 수 있다. 즉

$$\frac{M_u}{M \cdot P_{ion}} = \frac{\%DD(d_0 + 0.5r)}{\%DD(d_0)} \quad (13)$$

측정깊이의 차이는 교란보정계수 P_u 와 P_{repl} 에 영향을 준다. P_u 는 전리함벽 보정계수와 플루언스 보정계수 등 두 가지 인자를 포함하는데 전리함 벽이 얇은 경우 두 측정법에서 P_{wall} 은 1로 가정하고 있다. 또한 두 측정법은 d_{max} 에서 선량교정을 하도록 권고하고 있으므로 $P_{gr} = 1$ 이다. 그러므로 IAEA의 P_u 와 TG 21의 P_{repl} 은 동등하고 전자선에 대하여 단지 플루언스 보정계수 P_n 만을 고려한다. 원통형 전리함의 경우 P_n 은 에너지와 전리함의 직경에 관계하며 그 값은 문헌에 나와있다. P_u/P_{repl} 의 차이는 두 측정법에

서 E_z 를 결정하는데 다른 방법을 사용하고 있기 때문이다. TG 21의 E_z 는 식 $E_z(\text{MeV}) = E_0(1 - z/R_p)$ 으로부터 얻는데 반하여 IAEA에서는 TG 21에서 사용한 식은 E_0 가 10 MeV이하이거나 고에너지중 깊이가 얇은 경우에 사용할 것을 권고하고 있다. IAEA에서는 Andreo등이 몬테카를로 방법을 사용해서 얻은 물에서 z/R_p 의 함수로서 E_z/E_0 의 값을 구한 값으로부터 E_z 를 구할 것을 권고하고 있다. 본 연구에서는 두 측정법에서 P_u/P_{repl} 의 차이가 0.4 % 이내로 나타났다. 차이질량저지능비의 는 평균 0.4 %로 나타났다는데 이는 두 측정법에서 적용하는 E_0 의 차이에 의한 것으로 생각된다. IAEA에서는 중심전극의 물질이 알루미늄으로 되어있는 경우 전리함의 반응은 중심전극이 공기등가물질로 된 것보다 약 0.8 %¹⁵⁾ 증가하므로 이에 대한 보정을 하도록 권고하지만 TG 21에서는 그러한 언급이 없다. 본 연구에서는 선원이 전자선이고 중심전극의 반경이 0.5 mm이므로 $P_{cel} = 1.008$ 로 하였다. 따라서 전체적으로 IAEA와 TG 21에서 흡수선량의 차이는 +0.2% - +0.9%로 나타났으며 평균 0.6%의 차이로 잘 일치하였다.

Markus와 TG 39 측정법 비교

Markus측정법의 N_a 와 TG 39의 N_{gas}^{pp} 를 비교하

였다.(표3) N_{gas}^{pp} 의 값이 N_a 값보다 0.4% 높게 평가되었는데 이는 측정시 불확정도에 의한 것으로 생각된다. 두 측정법에서 가장 큰 차이는 측정깊이에서 공기에 대한 물의 저지능비를 산출하는 방법에 있다. Markus 측정법에서는 표면에서의 에너지는 다음의 식으로부터 얻어진다.

$$E_{p,0} = 1.947R_p + 0.48 \quad (14)$$

깊이 z 에서의 평균에너지 $E_r(z)$ 는 $= E_{p,0} - 1.947z^{11}$ 로 주어지고 측정깊이에서 공기에 대한 물의 저지능비는 다음 식^{16),17)}으로부터 얻을 수 있다.

$$S_{w,a}(E_r) = 0.867 + 3.56/\{E_r(z) + 13.3\} \quad (15)$$

여기서 $E_r(z)$ 는 MeV단위로 주어진다. 두 측정법에서 저지능비의 차이는 6 MeV에서 0.2%, 18MeV에서 1%의 차이가 나며 에너지가 증가할수록 두 측정법에서 저지능비의 차이가 커짐을 알 수 있다. 결과적으로 Markus 측정법과 TG 39 측정법에서 흡수선량의 차이는 6 MeV에서는 -0.8%, 9 MeV에서는 -0.5%, 12 MeV에서는 +0.1%, 15 MeV에서는 +0.3%, 그리고 18 MeV에서는 +0.8%의 차이가 나타났다.

네 가지 측정법의 비교

IAEA에 정규화한 다른 측정법의 상대흡수선량 비교를 표4에 나타냈다.(표4) TG 39 측정법의 6 MeV를 제외한 모든 에너지 영역에서 IAEA가 다른 측정법에 비해 높게 평가되었다. 18 MeV에서는 측정법간의 차이가 평균 0.8%로 나타난 반면에 15 MeV 이하의 에너지 영역에서는 측정법간의 차이가 0.4% 이내로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

결 론

전자선 에너지 6, 9, 12, 15, 18 MeV에 대하여 IAEA, TG 21, Markus, 그리고 TG 39 측정법을 적용하여 선량계산을 하였고 측정법간에 비교를 하였다. 원통형 전리함을 이용한 IAEA와 TG 21측정법은 18 MeV에 대하여 최대차이 0.9%를 보였고 그

외의 에너지 영역에서 0.7% 이내로 잘 일치하였다. 평행평판형 전리함을 이용한 Markus와 TG 39 측정법은 6 MeV와 18 MeV 에서 각각 -0.8 %와 +0.8%의 차이를 보였고 그 외의 에너지 영역에서 0.5%이내로 잘 일치하였다. 그러나 원통형 전리함과 평행평판형 전리함을 이용한 측정법간의 차이는 18 MeV에서 1.6 %까지 나타나므로 주의를 요하며 TG 39 측정법에서 제시한 다른 측정방법을 사용하여 측정을 하여 교정계수를 얻을 필요가 있을 것으로 생각된다.

평행평판형 전리함의 유효 측정점은 전면에 위치하고 교란 보정계수는 1이 되므로 표면 평균에너지가 10 MeV 이하인 전자선을 측정하거나 유효 측정점이 확실하지 않은 경우와 또한 교란 보정을 줄이고자 할 때 원통형 전리함에 비해 상대적으로 불확정도를 줄임으로서 정확한 측정값을 얻을 수 있을 것으로 생각되나 평행평판형 전리함의 단점인 빔의 입사각도에 따라 측정값이 달라 질 수 있으므로 측정전 선형가속기의 정도관리가 요구된다고 사료된다.

참고 문헌

1. Task Group 21, AAPM Radiation Therapy Committee: A protocol for the determination of absorbed dose from high energy photon and electron beams. Med. Phys. 10:741(1983)
2. IAEA(International Atomic Energy Agency): *Absorbed Dose Determination in Photon and Electron beams*. An International Code of Practice, Technical Report Series No.277, IAEA, Vienna (1987)
3. Nordic Association of Clinical Physics: *Procedures in External Radiation Therapy Dosimetry with Electron and Photon Beams with Maximum Energies Between 1 and 50 MeV*". Acta Radiol. Oncol. Radiat. Phys. Biol. 19:55(1980)
4. Hospital Physicists Association: *A Practical Guide to Electron Dosimetry 5-35 MeV*, HPA Rep. Series No.4, London(1971)
5. International Commission on Radiation Units and

- Measurements: *Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV*, ICRU Report 35, Bethesda, Maryland (1984)
6. 日本醫學放射線學會物理部會編: 放射線治療における 高エネルギー - X線 および 電子線の 吸収線量の 標準 測定法, 通商産業研究社, 東京(1986)
 7. DIN 6800/2: Dosismethode β verfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung, Ionisationsdosimetrie(1990)
 8. Task Group 25, AAPM: Clinical electron-beams dosimetry, *Med. Phys.* **18**:73(1991)
 9. Task Group 39, AAPM: The calibration and use of plane-parallel ionization chambers for dosimetry of electron beams: An extension of the 1983 protocol. *Med. Phys.* **21**:1251(1994)
 10. IAEA(International Atomic Energy Agency): *The Use of Plane Parallel Ionization Chambers in High Energy Electron and Photon Beams*. An International Code of Practice, Technical Report Series No. 381, IAEA, Vienna(1997)
 11. Markus B., Kasten G.: *Strahlentherapie* **159**: 567(1983)
 12. Andreo P., Nahum A.E., Brahme A.: Chamber-dependent wall correction factors in dosimetry. *Phys. Med. Biol.* **31**:1189(1986)
 13. Attix F.H.: A simple derivation of N_{gas} , a correction in A_{wall} , and other comments on the AAPM Task Group 21 Protocol. *Med. Phys.* **11**:725(1984)
 14. Rogers D.W.O., Bielajew A.F., Nahum A.E.: Ion chamber response and A_{wall} correction factors in Co beam by Monte Carlo simulation. *Phys. Med. Biol.* **30**:429(1985)
 15. Kristensen M.: Measured influence of the central electrode diameter and material on the response of graphite ionization chamber to Co-60 gamma-rays. *Phys. Med. Biol.* **28**:1269 (1983)
 16. DGMP Report No.6: *Praktische Dosimetrie von Elektronenstrahlung und ultraharter Röntgenstrahlung, Anleitung zur Dosimetrie von Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern* (1989)
 17. Trier O.: *Kohlrausch, Prakt. Physik* 23. Auflage, Stuttgart(1985)

Comparison of Dosimetry Protocols in High Energy Electron Beams

Sung Y. Park^{*,§}, Tae S. Suh[†], Hoe N. Kim[‡], Dong O. Shin[§],
Young H. Ji^{§,||}, Soo I. Kwon[§], Kil D. Lee[§], Sung S. Chu[¶],
Bo Y. Choi[†], John JK. Loh^{*}

*Dept. of Radiation Oncology, College of Medicine, Inha University**

Dept. of Biomedical Engineering, College of Medicine, Catholic University[†]

Dept. of Therapeutic Radiology, College of Medicine, Catholic University[‡]

Dept. of Physics, College of Sciences, Kyonggi University[§]

Dept. of Radiation Oncology, Korea Cancer Center Hospital^{||}

Dept. of Radiation Oncology, College of Medicine, Yonsei University[¶]

Any detector inserted into a phantom should have such a geometry that it caused as small as possible perturbation of the electron fluence. Plane parallel chambers meet this requirement better than other chambers of configurations. IAEA protocol recommends the use of plane parallel chambers for this reason. However, the cylindrical chambers are widely used for convenient. The purpose of this study is to evaluate the absorbed dose due to the differences of four different dosimetry protocols such as IAEA protocol using cylindrical chamber, TG 21 protocol using cylindrical chamber, Markus protocol using plane parallel chamber, and TG 39 report for the calibration of plane parallel chamber in electron beams. Depth-ionization measurements for the electron beams of nominal energy 6, 9, 12, 15, and 18 MeV from Siemens accelerator with a 10x10 cm² field size were made using a radiation field analyser with 0.125 cc ion chamber. Dosimetric measurements by IAEA and TG 21 protocol were made with a farmer type ionization chamber in solid water for each electron energy, respectively. Dosimetric measurements by Markus protocol were made with a plane parallel ionization chamber in solid water for each electron energy, respectively. The cavity-gas calibration factor for the plane parallel chamber was obtained with the use of 18 MeV electron beam as guided by TG 39 report. Dosimetric measurements by TG 39 were performed with a plane parallel ionization chamber in solid water for each electron energy, respectively. For all the energies and protocols, measurements were made along the central axis of the distance of 100 cm (SSD = 100 cm) with 10x10 cm² field size at the depth of d_{max} for each electron beam, respectively. In the case of 18 MeV, the discrepancy of 0.9 % between IAEA and TG 21 was found and the two protocols were agreed within 0.7 % for other energies. In the case of 18 MeV and 6 MeV, the discrepancies of ± 0.8 % between Markus and TG 39 was found, respectively and the two protocols were agreed within 0.5 % for other energies. Since the discrepancy of 1.6 % between cylindrical and plane parallel chamber was found for 18 MeV, it is suggested to get the calibration factor using other method as guided by TG 39.

Key Words : IAEA, AAPM TG 21, Markus, AAPM TG 39 protocol. plane parallel chamber, cylindrical chamber