

평행평판형이온함의 교차교정 시 전자선 선질에 따른 흡수선량 결정에 대한 연구

*국립암센터 양성자치료센터, †경희대학교 의학전문대학원 방사선종양학교실,
‡가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

라정은* · 신동오[†] · 박소현[‡] · 정호진* · 황의중* · 안성환* · 임영경*
김동욱* · 윤명근* · 신동호* · 이세병* · 서태석[‡] · 박성용*

물 흡수선량표준을 기반으로 하는 선량측정 프로토콜에서는 전자선의 선질결정 지표는 R_{50} 이며, 선량측정의 정확성을 향상시키기 위하여 전자선의 기준 에너지가 $R_{50} > 7 \text{ g/cm}^2$ ($E \geq 16 \text{ MeV}$)인 고에너지 전자선에서 표준기관에 소급성이 있는 원통형이온함의 물흡수선량교정계수를 이용한 평행평판형이온함의 교차교정을 권고하고 있다. 그러나 이러한 조건을 만족하는 고에너지 전자선은 모든 치료기관에서 보유하기가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 평행평판형이온함의 교차교정 시 16 MeV 이상의 고 에너지 전자선뿐 아니라 12 MeV 이하의 전자선 에너지에서 얻은 평행평판형이온함의 교정계수를 이용하여 선량차이를 각각 비교하였다. 전자선 선량측정은 PTW 30013, Wellhofer FC65G의 Farmer형 원통형이온함과 PTW 34001, Wellhofer PPC40의 Roos형 평행평판형이온함을 이용하였으며 물팬텀내 기준깊이 $z_{ref} = 0.6R_{50} - 0.1$ (cm)에 원통형이온함과 평행평판형이온함을 같은 위치에 놓고 교차교정을 실시하였다. 교차교정 선질 20 MeV에서 결정된 교정계수를 적용한 물 흡수선량과 전자선에너지 12, 16 MeV에서의 물 흡수선량 차이는 0.2% 이내로 비교적 잘 일치하는 연구결과를 보였다. 그러므로 교차교정 선질 차이에 의한 흡수선량 값 상호 비교한 결과는 측정 불확도내에서 잘 일치하고 있어 각 기관에서 보유하고 있는 의료용가속기의 최고 전자선 선질에서의 교차교정도 유효하다고 사료된다.

중심단어: 전자선, 물흡수선량 교정계수, 평행평판형이온함, 교차교정, 선질지표

서 론

물 흡수선량을 표준으로 하는 새로운 개념의 고에너지 광자선 및 전자선에 대한 선량측정 프로토콜 IAEA (International Atomic Energy Agency) TRS-398에서는 10 MeV ($R_{50} \leq 4 \text{ g/cm}^2$)이하의 저에너지 전자선에 대해 필수적으로 평행평판형이온함(plane-parallel ionization chamber)을 사용하여 선량측정 할 것을 권고하고 있다.¹⁾ 또한 전자선 선량측정의 정확성을 향상시키기 위하여 고에너지 전자선에서 원통형이온함(cylindrical ionization chamber)을 기준으로 평행평판형이온함을 교차교정(cross-calibration)하여 사용할 것을 권고하고 있다.¹⁾ 그러나 교차교정방법에 의한 평행평판

형이온함의 사용은 추가적인 측정단계와 복잡한 수식으로 인하여 측정 시 오차가 발생할 가능성이 매우 커 현재 임상에서는 선량측정에 많이 이용되지 못하고 있다. 평행평판형이온함의 교차교정 선질(beam quality)에 대해 16 MeV 이상($R_{50} > 7 \text{ g/cm}^2$)의 고에너지 전자선에서 교정할 것을 권고하고 있으나 방사선 치료기관의 선형가속기 중에는 16

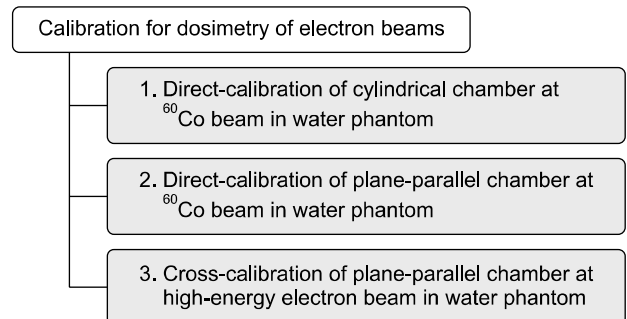


Fig. 1. Diagram of the calibration for dosimetry of electron beams using ionization chamber.

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0078361).
이 논문은 2009년 5월 20일 접수하여 2009년 6월 9일 채택되었음.
책임저자 : 박성용, (410-769) 경기도 고양시 일산동구 마두1동 809 국립암센터 양성자치료센터
Tel: 031)920-1728, Fax: 031)920-0149
E-mail: cool_park@ncc.re.kr

MeV 이상의 고에너지 전자선을 보유하고 있지 않은 경우도 있어 프로토콜에서 권고하고 있는 모든 사항을 따라 선량 측정하는 것이 쉽지 않다. 또한 최근 들어 수술 중 (intraoperative) 방사선치료를 위해 개발된 이동형(mobile) 선형가속기의 경우 전통적인 선형가속기에 비해 일반적으로 전자선 4, 6, 9 그리고 12 MeV의 낮은 에너지를 이용한다. 따라서 본 연구에서는 전자선 선량측정절차 및 교차교정선질에 대해 선량측정 프로토콜의 권고안을 만족시키지 못할 경우 실제 임상에서 쉽게 이용할 수 있도록 전자선의 선량측정 방법에 대한 대안의 제시하고 자 한다. 이를 위해서 Fig. 1과 같이 IAEA TRS-398 선량측정 프로토콜에 의해 전자선 물 흡수선량결정 시 ^{60}Co 감마선에서 직접 결정된 교정계수(calibration coefficient)를 제공받은 평행평판형이온함으로 측정된 선량과 원통형이온함을 기준으로 고 에너지 전자선에서 교차교정방법에 의해 결정된 교정계수

를 적용하여 측정된 선량 그리고 원통형이온함으로 측정된 선량측정 결과를 상호 비교하였으며 평행평판형이온함의 교차교정 시 16 MeV 이상의 고 에너지 전자선뿐 아니라 6, 9, 12 MeV의 전자선 에너지에서 얻은 평행평판형이온함의 교정계수를 이용하여 선량결과를 각각 비교분석하였다.

재료 및 방법

Table 1에는 본 연구에서 사용된 3종류의 선형가속기에서 방출되는 전자선 에너지, 전자선의 선질 지표인 R_{50} 그리고 각 전자선 에너지의 기준깊이 z_{ref} ($z_{ref}=0.6R_{50}-0.1$ cm) 을 나타내었다. 여기서 R_{50} 은 팬텀 표면에서 조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 일 때 최대 물 흡수선량의 50%가 되는 깊이이다. Table 2에는 전자선 물 흡수선량 측정에 사용된 원통형이온함과 평행평판형이온함에 대한 물흡수선량 교정계수와 물리적인 특성을 나타내었으며 이때 모든 이온함은 국내 2차 표준기관인 식품의약품안전청(Korea Food & Drug Administration, KFDA)의 ^{60}Co 감마선에서의 물 흡수선량 표준에 소급성이 있는 물흡수선량 교정계수 값이다. 이때 전자선의 물 흡수선량은 IAEA TRS-398의 프로토콜에 따라 기준깊이에서 아래 식에 의해 결정된다.¹⁾

$$D_W = M_Q N_{D,W}^{60\text{Co}} k_{Q,Q_0} \quad (1)$$

여기서, M_Q 은 이온함의 측정치로 온도와 기압, 극성효과(polarity effect), 그리고 이온재결합(ion recombination)과 같은 물리량을 모두 보정한 값이다. $N_{D,W}^{60\text{Co}}$ 은 ^{60}Co 감마선에서 이온함의 물 흡수선량교정계수이며 k_{Q,Q_0} 는 기준선질 Q_0 와 실제 사용자의 선질 Q 사이의 차이를 보정하는 정수이다. 이때 선질보정정수 k_{Q,Q_0} 는 다음과 같은 식에 의해 이론적으로 계산된다.¹⁾

Table 1. Physical characteristics of electron beams used in this study.

Linac model	Energy (MeV)	R_{50} (cm)	z_{ref} (cm)
Varian CL 2100C	6	2.27	1.26
	9	3.47	1.98
	12	4.84	2.80
	16	6.46	3.78
	20	8.23	4.84
Varian Clinac iX	6	2.31	1.29
	9	3.53	2.02
	12	4.97	2.88
	16	6.62	3.87
	20	8.33	4.90
Siemens Mevatron	5	2.11	1.17
	7	2.81	1.59
	8	3.30	1.88
	10	4.19	2.41
	12	4.77	2.92
	14	5.43	3.31

Table 2. Characteristics and $N_{D,W}$ calibration coefficient of ionization chamber types used in this study.

Cylindrical chamber	$N_{D,W}$ (Gy/nc)	Vol. (cm ³)	Length (mm)	Radius (mm)	Wall material	Electrode material
PTW TN30013	0.0534	0.6	23.0	3.0	PMMA	Al
PTW 30013	0.0541					
Wellhofer FC65G	0.0482	0.67	23.0	3.1	Graphite	Al
PTW 31002	0.2866	0.13	6.5	2.8	PMMA	Al
Plane-parallel chamber (Roos type)	$N_{D,W}$ (Gy/nc)	Material	Window thick. (mm)	Electrode spacing (mm)	Collecting electrode dia. (mm)	Guard ring width (mm)
PTW 34001	0.08701	PMMA	1.0	2.0	16	4.0
Wellhofer PPC 40	0.08680					

$$k_{Q,Q_0} = \frac{(s_{w,air})_Q}{(s_{w,air})_{Q_0}} \frac{P_Q}{P_{Q_0}} = \frac{(s_{w,air})_Q}{(s_{w,air})_{Q_0}} \frac{(P_{wall}P_{cav}P_{cel}P_{dis})_{Q_0}}{(P_{wall}P_{cav}P_{cel}P_{dis})_Q} \quad (2)$$

$s_{w,air}$ 는 물에 대한 공기의 저지능비이며, 교란보정정수 P

는 이온함의 벽물질과 측정매질에 대한 반응차이를 보정하는 정수 P_{wall} 과 이온함의 공기공동(air cavity)과 측정매질 사이의 산란선 영향으로 인한 전자플루언스 차이를 보정하는 정수 P_{cav} , 원통형이온함 중심전극의 영향에 대한 보정

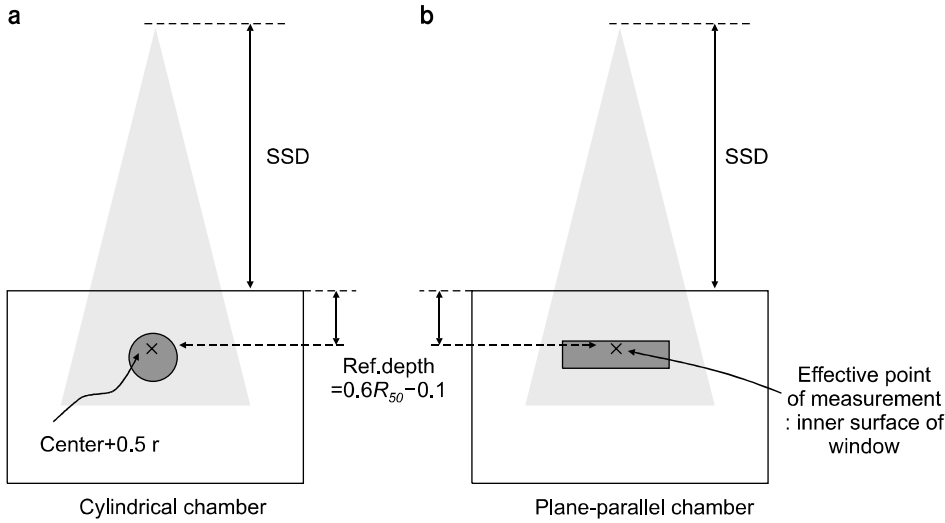


Fig. 2. Experimental set-up of cross-calibration method for the electron beam dose measurement. (a) Cylindrical chamber (b) plane-parallel chamber.

Table 3. Estimated relative standard uncertainty in the determination of absorbed dose to water at the reference depth in ^{60}Co beam and high-energy electron beams using the $N_{D,W}$ calibration formalism based on a cylindrical chamber calibration in a ^{60}Co beam.

	Cylindrical chamber	Plane-parallel chamber	
	Electron beam $R_{50} > 4 \text{ g/cm}^2$	Direct calibration ^a (^{60}Co beam)	Cross-calibration ^b (Electron beam)
Step 1: Ion chamber calibration coefficient ^a			
Combined uncertainty	0.8	0.8	1.4
Step 2 : Beam measurements			
-Long-term stability of ion chamber	0.3	0.4	0.4
-Establishment of reference conditions	0.4	0.6	0.6
-Ion chamber reading relative to beam monitor unit	0.6	0.6	0.6
-Correction for influence quantities	0.4	0.5	0.5
Combined uncertainty	0.9	1.1	1.1
Step 3: Beam quality correction			
Calculated k_{Q,Q_0}			
- $s_{w,air}$	0.5	0.5	0.2
-Assignment of $s_{w,air}$ to electron beam quality	0.2	0.2	0.3
- W_{air}/r relative to ^{60}Co for electron beam quality	0.5	0.5	0.3
- P_{wall}	0.7	1.5	0.3
- P_{cav}	0.5	0.1	-
- P_{cel}	0.2	-	-
- P_{dis}	0.4	0.3	0.2
Combined uncertainty	1.2	1.7	0.6
Combined uncertainty in D_W	1.7	2.1	1.9

^aThe calibration coefficient provided by KFDA, ^bThe plane-parallel chamber is cross-calibrated in a high-energy electron beam against a cylindrical chamber calibrated in a ^{60}Co beam.

정수 P_{cel} 그리고 이온함의 중심이 유효측정점(effective point of measurement)이라고 간주할 때 물의 용적이 공동으로 대체되는 효과를 보정하는 정수 P_{dis} 로 나눌 수 있다.

사용자의 선질 Q 에서 기준 원통형이온함에 대한 평행평판형이온함의 교차교정에서 평행평판형 이온함의 교정계수는 다음의 식으로 나타낸다.¹⁾

$$N_{D,W;Q_{cross}}^{pp} = \frac{M_{Q_{cross}}^{cyl}}{M_{Q_{cross}}^{pp}} N_{D,W;60Co}^{cyl} k_{Q_{cross}, Q}^{cyl} \quad (3)$$

여기서, $M_{Q_{cross}}^{cyl}$ 와 $M_{Q_{cross}}^{pp}$ 는 교차교정선질 Q_{cross} 에서 측정 대상은 아니지만 선량측정에 영향을 주는 모든 물리량을 보정한 원통형이온함과 평행평판형이온함의 측정치이다.

$N_{D,W;60Co}^{cyl}$ 는 기준 이온함으로 사용되는 원통형이온함에 대한 ^{60}Co 감마선에서의 물 흡수선량교정계수이며 $k_{Q_{cross}, Q}^{cyl}$ 는 원통형이온함에 대한 선질보정정수이다. Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 교차교정방법은 각 전자선 에너지에 해당되는 기준깊이에 기준이 되는 원통형이온함과 평행평판형이온함의 유효측정점을 위치시켜 측정을 하게 된다.

본 연구에서는 식 (1)에 의해 TRS-398의 프로토콜에 따라 교정기관에서 ^{60}Co 감마선의 물 흡수선량 교정계수를 획득한 원통형이온함과 평행평판형이온함을 이용하여 전자선의 물 흡수선량을 결정하였으며, 이 결과를 식 (3)에 따라 고에너지 전자선에서 원통형이온함을 기준으로 교차교정하여 평행평판형이온함의 교정계수를 산출한 후 물 흡수선량의 결과와 상호 비교하였다. 또한 교차교정 선질에 따라 평행평판형이온함의 교정계수 및 선량의 차이를 평가하기 위해 선량측정 프로토콜에서 권고하고 있는 교차교정 선질 $R_{50} > 7 \text{ g/cm}^2$ 인 고에너지 전자선에서 교차교정 후 결정된 선량과 $R_{50} \leq 7 \text{ g/cm}^2$ 의 교차교정 선질에서 결정된 선량 그리고 다른 모델의 선형가속기의 교차교정 선질에서 교정된 선량을 측정하여 각각 비교 분석하였다.

결 과

1. 불확도 평가

Table 3에는 물 흡수선량 결정시 평가된 표준불확도를 나타내었으며 모든 불확도는 ISO 기준안에 따라 표현하였다.²⁾ $N_{D,W}$ 교정계수에 대한 불확도는 2차 표준기관인 KFDA의 교정 성적서에 기재된 불확도로 원통형이온함, 평행평판형이온함 모두 0.8%이며 고 에너지 전자선에서 평행평판형이온함을 교차교정한 경우에는 1.4%로 평가되었다. 또

한 전자선 측정 시 평가된 합성불확도는 사용된 이온전리함의 장기간 안정성에 관한 불확도, 측정 절차상의 불확도, 모니터 단위(monitor unit)와 관련된 이온함의 판독치의 불확도, 온도와 기압, 극성효과, 이온재결합과 같은 물리량 보정에 대한 불확도를 모두 합한 것으로 원통형이온함과 평행평판형이온함 각각 0.9%와 1.1%로 평가하였다. 마지막으로 선질 보정정수 k_{Q,Q_0} 에 대한 불확도로 앞에서 언급한 대로 선질보정정수 결정에 필요한 물에 대한 공기의 저지능비 $s_{w,air}$ 와 전체 교란보정정수 P_Q 에 대한 불확도를 모두 포함하였으며 이는 IAEA TRS-398에서 평가된 결과를 사용하였다.¹⁾ 이 모든 불확도 요소를 합성한 결과 원통형이온함은 1.7%로 평가되었으며 평행평판형이온함의 경우 ^{60}Co 감마선에서 교정계수를 산출할 때에는 2.1%였고 고 에너지 전자선에서 교차교정방법으로 교정계수를 산출했을 때에는 1.9%로 평가되었다.

2. 교정방법에 따른 선량차이

Fig. 3에는 평행평판형이온함의 교정방법에 따라 Varian CL 2100C 선형가속기에서 방출되는 전자선의 물 흡수선량과 원통형이온함으로 측정된 선량을 비교하여 나타내었다. 전자선 에너지 20 MeV에서 Farmer형의 TN30013 원통형이온함을 기준으로 교차교정된 34001 평행평판형이온함으로 측정된 선량과 교정기관의 ^{60}Co 감마선에서 결정된 교정계

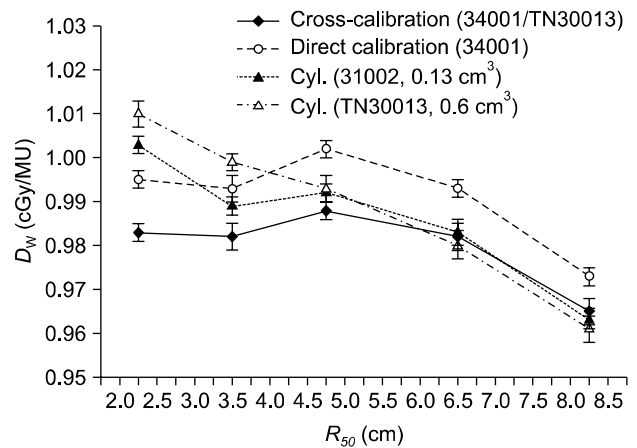


Fig. 3. Comparison of doses determined using direct calibrations of the cylindrical chambers with ionization volume 0.6 cm³ (PTW TN30013) and 0.13 cm³ (PTW 31002), in terms of absorbed dose to water in ^{60}Co beam and cross-calibration methods for electron beam energies. The plane-parallel chamber is cross-calibrated against the cylindrical chamber in 20 MeV electron beam. The error bars represent the standard deviation of five measurements.

수를 적용한 물 흡수선량은 1.5%정도의 차이를 보였고, TN30013 원통형이온함으로 결정된 선량과의 차이는 저에너지 전자선에서 2.7%까지 보였으나 고에너지 전자선일수록 0.5%이내로 비교적 잘 일치하였으며 0.13 cm³의 체적을 가지는 PTW 31002 원통형이온함과 선량차이는 2.0%정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Varian Clinac iX 선형가속기의 전자선에 대한 선량측정은 FC65G의 원통형이온함/34001의 평행평판형이온함 그리고 30013의 원통형이온함/PPC 40의 평행평판형이온함으로 두 그룹으로 나눠 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내

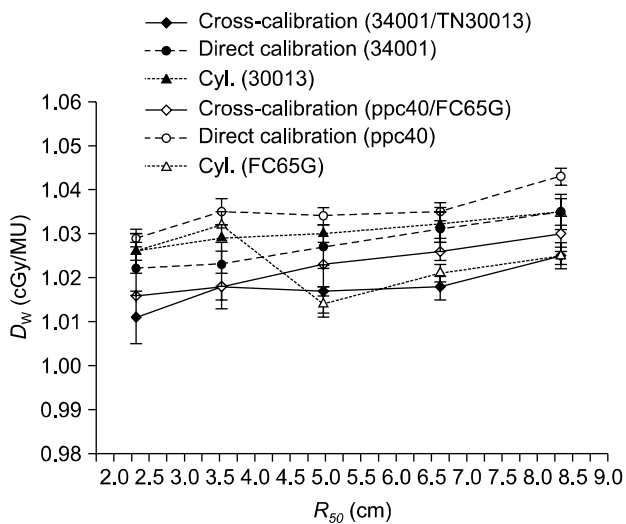


Fig. 4. Comparison of doses determined using direct calibrations of the Farmer type chambers in terms of absorbed dose to water in ⁶⁰Co beam and cross-calibration methods for electron beam energies. The Roos type plane-parallel chambers (PTW 34001, Wellhofer ppc40) are cross-calibrated against the Farmer chambers (PTW 30013, Wellhofer FC65G) in 20 MeV electron beam. The error bars represent the standard deviation of five measurements.

었다. 각각의 평행평판형이온함은 20 MeV 전자선에서 원통형이온함을 기준으로 교차교정을 하였으며, 교정기관으로부터 ⁶⁰Co 감마선으로 직접 교정계수를 제공받아 계산한 선량과는 FC65G/34001 이온함에서는 2.0%정도 차이를 보였고 30013/PPC 40 이온함에서는 1.0%정도의 차이를 보였다. 또한 6, 9 MeV의 저 에너지 전자선에서는 두 그룹 모두에서 원통형이온함으로 측정된 선량과 교차교정된 평행평판형이온함으로 측정된 선량이 1.5%정도의 차이를 보였다.

3. 평행평판형이온함의 교차교정 시 교차교정 선질에 따른 선량차이

Table 4는 선형가속기 Varian CL 2100C에서 방출되는 전자선에너지 6, 9, 12, 16, 20 MeV를 교차교정 선질로 선택하여 기존 원통형이온함 TN30013에 대해 평행평판형이온함 34001을 교차교정하였을 때 각각의 해당 선질에 대해 계산된 평행평판형이온함의 교정계수를 나타낸 것이며 이 계수를 적용하여 결정된 물 흡수선량을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 교차교정 선질 20 MeV에서 결정된 교정계수를 적용한 물 흡수선량과 전자선에너지 12, 16 MeV에서의 물 흡수선량 차이는 0.2% 이내로 비교적 잘 일치하였다.

Fig. 6와 Fig. 7에는 선형가속기 Varian Clinac iX의 전자선에너지 12, 16 그리고 20 MeV에 대해 FC65G 원통이온함과 30013 원통이온함을 기준으로 하여 PPC 40와 34001의 평행평판형이온함의 교정계수를 산출하고 물 흡수선량을 결정한 결과를 각각 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 두 평행평판형이온함 모두 교차교정 선질 20 MeV일 때와 12 MeV일 때 물 흡수선량의 차이는 0.5% 이내로 잘 일치하였다.

Fig. 8에는 선형가속기 Siemens Mevatron에서 방출되는 5,

Table 4. Comparison results of electron beam dosimetry using plane-parallel chambers cross-calibrated in electron beam of quality 20, 16, 12, 9 MeV and 6 MeV.

Nominal energy (MeV)	Calibration quality (Q_0)									
	20 MeV		16 MeV		12 MeV		9 MeV		6 MeV	
	N_{D, W_0}	k_{Q, Q_0}	N_{D, W_0}	k_{Q, Q_0}	N_{D, W_0}	k_{Q, Q_0}	N_{D, W_0}	k_{Q, Q_0}	N_{D, W_0}	k_{Q, Q_0}
6		1.055		1.043		1.029		1.016		1.000
9		1.039		1.027		1.013		1.000		0.984
12	0.0774	1.023	0.0783	1.013	0.0793	1.000	0.0813	0.987	0.0838	0.971
16		1.012		1.000		0.987		0.974		0.959
20		1.000		0.988		0.975		0.963		0.947

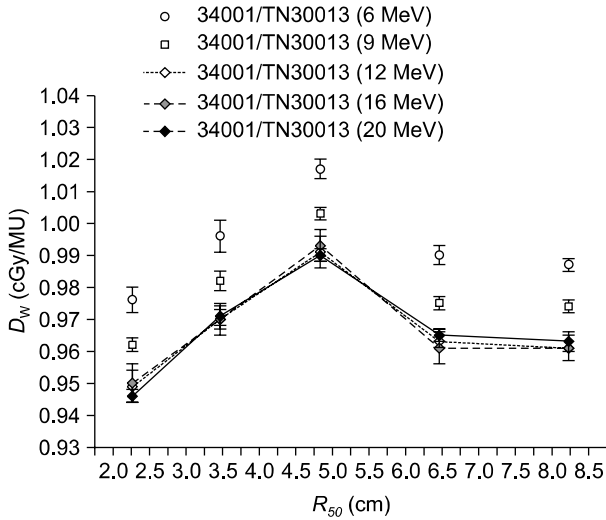


Fig. 5. Comparison of absorbed doses in electron beams at reference depths recommended in TRS-398 for plane-parallel chamber of the Roos-type PTW 34001. The dose determinations are made with plane-parallel chamber cross-calibrated in 6, 9, 12, 16, 20 MeV electron beam against the Farmer type PTW TN30013 chamber having $N_{D,W}$ calibrations in ^{60}Co beam. The error bars represent the standard deviation of five measurements.

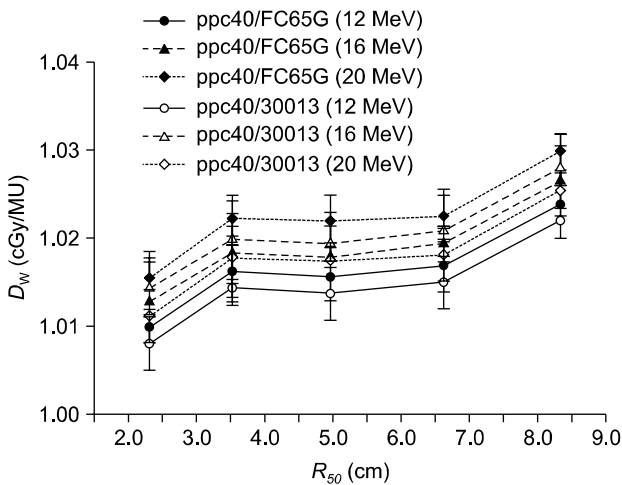


Fig. 6. Comparison of absorbed doses in electron beams at reference depths recommended in TRS-398 for plane-parallel chamber of the Roos-type Wellhofer ppc 40. The dose determinations are made with plane-parallel chamber cross-calibrated in 12, 16, 20 MeV electron beams against the Farmer type Wellhofer FC65G and PTW 30013 chambers having $N_{D,W}$ calibrations in ^{60}Co beam. The error bars represent the standard deviation of five measurements.

7, 8, 10, 12, 14 MeV의 전자선에너지에 대해 가장 높은 전자선에너지 14 MeV에서 TN30013의 원통형이온함과 교차

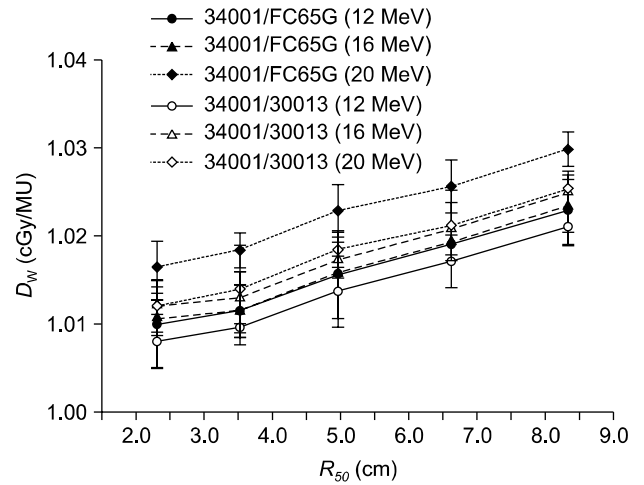


Fig. 7. Comparison of absorbed doses in electron beams at reference depths recommended in TRS-398 for plane-parallel chamber of the Roos-type PTW 34001. The dose determinations are made with plane-parallel chamber cross-calibrated in 12, 16, 20 MeV electron beams against the Farmer type Wellhofer FC65G and PTW 30013 chambers having $N_{D,W}$ calibrations in ^{60}Co beam. The error bars represent the standard deviation of five measurements.

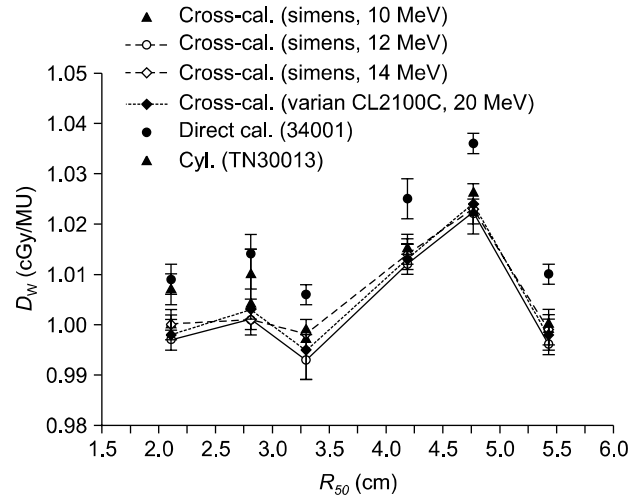


Fig. 8. Comparison of absorbed doses determined using the PTW TN30013 cylindrical chamber to the PTW 34001 plane-parallel chamber for various electron beam energies. The plane-parallel chamber are cross-calibrated against the PTW TN30013 chamber in 10, 12, 14 MeV (Siemens Mevatron) and 20 MeV (Varian CL2100C) electron beams. The error bars represent the standard deviation of five measurements.

교정하여 34001 평행평판형이온함의 교정계수를 산출해 결정된 물 흡수선량과 교차교정 선질 12, 10 MeV에서 결

정된 교정계수를 적용한 결과, 교정기관에서 ^{60}Co 감마선의 평행평판형이온함의 교정계수를 직접 이용한 선량, 원통형이온함으로 측정된 선량, 그리고 동일 이온함으로 선형가속기 Varian CL 2100C의 20 MeV에서 교차교정에 의해 교정계수를 결정하고 계산된 선량과의 차이를 나타내었고 그 결과 교차교정 선질을 선형가속기 Varian CL 2100C의 전자선에너지 20 MeV를 사용했을 때와 Siemens Mevatron의 전자선에너지 14 MeV로 사용했을 때 선량차이는 모든 전자선에너지에서 0.2% 이내에서 잘 일치하였으며 전자선에너지 12 MeV와 비교했을 때도 0.3% 이내 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 그러나 교정기관에서 원통형이온함과 평행평판형이온함에 대해 ^{60}Co 감마선에서 직접 교정계수를 부여받아 측정된 선량은 교차교정했을 때의 결과와 1.0% 정도의 차이를 보였다.

고찰 및 결론

본 연구에서는 평행평판형이온함을 이용한 전자선 선량 측정은 교정기관의 ^{60}Co 감마선에서 평행평판형이온함의 교정계수를 받아 선량결정을 한 경우와 선형가속기의 고에너지 전자선에서 원통형이온함을 기준으로 교차교정에 의해 산출된 교정계수를 적용하여 계산된 선량과는 최대 $\pm 2.0\%$ 정도의 차이를 보였다. IAEA TRS-398 선량측정 프로토콜에서는 평행평판형이온함에 대한 교차교정방법이 원통형이온함을 기준으로 하는 측정 절차가 더 복잡함에도 불구하고 ^{60}Co 감마선에 대한 선질보정정수 k_Q, Q_0 결정에 필요한 P_{wall} 보정정수의 불확도가 1.5%로 다른 측정 파라미터에 비해 상대적으로 크다는 이유를 들어 고에너지 전자선에서 교차교정을 할 것을 권고하고 있다.¹⁾ 실제 전자선의 물 흡수선량 결정시 측정전체의 합성불확도를 평가해 본 결과 ^{60}Co 감마선에서 교정계수를 산출할 때 불확도는 2.1%로 고에너지 전자선에서 교차교정방법으로 교정계수를 산출하여 선량결정을 했을 때 1.9%와 비교해서 큰 것을 알 수 있었다(Table 3). 여기서 Fig. 9에서 나타난 것과 같이 사전연구들에 의하면 ^{60}Co 감마선에서 평행평판형이온함의 교란보정정수 P_{wall} 값에 대한 논란의 여지는 여전히 남아있다.³⁻⁹⁾ 물 흡수선량표준에 토대를 두고 있는 선량측정 프로토콜 IAEA TRS-398과 AAPM TG-51 사이에도 같은 Roos형 평행평판형이온함에 대한 P_{wall} 값은 0.7% 정도의 차이를 보이며 Markus형 이온함의 경우는 1.2%까지 차이를 보이고 있다.^{1,3)} AAPM TG-51 선량측정 프로토콜에서 제안한 P_{wall} 값은 EGS4 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 계산한

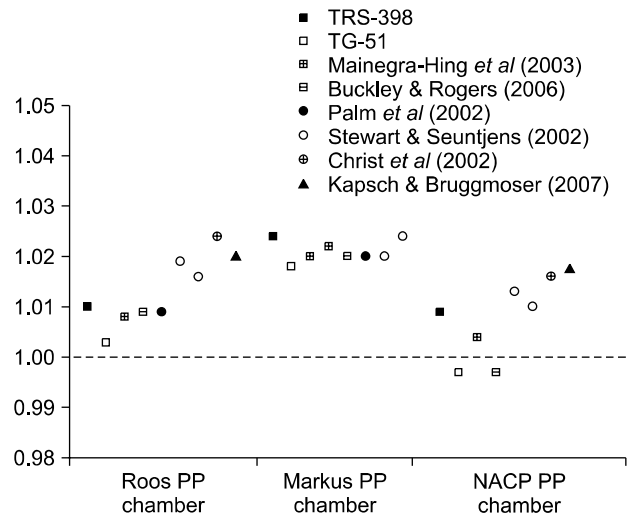


Fig. 9. Comparison of present P_{wall} values with previous Monte-carlo calculations and experimental data from literature.

것으로 EGSnrc 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 계산된 P_{wall} 값을 제시한 Mainegra-Hing 등(2003)의 결과와 최근의 Buckley와 Rogers (2006)의 연구결과와는 Roos형 평행평판형이온함의 경우 각각 0.6% 정도의 차이를 보였다.³⁻⁵⁾

또한 TRS-398에서는 평행평판형이온함의 교차교정 시 $R_{50} > 7.0 \text{ g/cm}^2$ ($E \geq 16 \text{ MeV}$)의 고에너지 전자선에서 실시할 것을 권고하고 있다.¹⁾ 이는 평행평판형이온함의 교차교정 시 기준이 되는 원통형이온함의 공동교란(cavity perturbation) 효과를 최소화하기 위해 깊이-선량 분포(depth-dose distribution)의 평평한 영역(plateau region)에 두 이온함을 위치시키기 위함이다. 그러나 본 연구에서는 TRS-398의 수식을 적용하여 16 MeV, 20 MeV의 전자선 에너지뿐만 아니라 12 MeV 전자선 에너지에 대해서도 교차교정을 실시했을 때도 선량차이는 모든 전자선에너지에서 0.5% 이내 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 일부 선형가속기 Siemens Mevatron의 경우 방출되는 가장 높은 전자선에너지는 14 MeV의 고수술 중 방사선치료를 위해 개발된 이동형(mobile) 선형가속기의 경우 일반적으로 최고에너지가 12 MeV이어서 평행평판형이온함의 교정방법으로 프로토콜에서 권고하고 있는 교차교정 선질로 16 MeV이상의 고에너지 전자선의 기준조건을 만족할 수 없으며 앞에서 언급한 것처럼 ^{60}Co 감마선의 평행평판형이온함에 대한 P_{wall} 의 불완전한 값 때문에 교정기관에서 부여받은 ^{60}Co 감마선의 교정계수를 사용하는 것도 어려운 실정이다. 이에 동일 이온함으로 선형가속기 Varian CL 2100C의 20 MeV에서 교

차교정에 의해 교정계수를 결정하여 계산된 선량과 Siemens Mevatron의 전자선에너지 14 MeV로 사용했을 때 선량차이를 비교해 본 결과 모든 전자선에너지에서 0.2% 이내에 잘 일치하였으며 전자선에너지 12 MeV의 선질에서 교차교정했을 때와도 0.3% 이내 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 연구결과를 종합해 볼 때 TRS-398과 같은 물 흡수선량 표준체계를 바탕으로 하는 프로토콜을 사용하여 전자선 선량측정 시 비록 추가적인 측정단계가 요구되더라도 ^{60}Co 감마선에 대해 평행평판형이온함의 P_{wall} 값이 좀 더 분명하게 제시될 때까지는 고에너지 전자선에서 원통형이온함을 기준으로 교차교정하여 선량측정을 해야 하며 이때 프로토콜에서 권고하고 있는 교차교정 선질인 16 MeV 이상의 고에너지 전자선을 갖고 있지 않은 경우라면 그 보다 낮은 전자선에너지인 14 MeV 또는 12 MeV의 선질에서 평행평판형이온함의 교정계수를 산출하더라도 물 흡수선량을 결정에는 큰 영향이 없을 것으로 보인다. 다만 본 연구는 Roos형 평행평판형이온함에 대한 결과이므로 추후 Makus형이나 NACP형과 같은 다양한 평행평판형이온함에 대해서도 교차교정선질 차이에 대한 연구를 진행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. IAEA report Series no 398: *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water*, International Atomic Energy Agency, Vienna, MD (2001)
2. ISO (International Organization for Standardization): *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. 2nd ed. Geneva, ISO (1995)
3. Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, et al: AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 26:1847-1870 (1999)
4. Mainegra-Hing E, Kawrakow I, Rogers DWO: Calculations for plane-parallel ion chamber in ^{60}Co beams using the EGSnrc Monte Carlo code. *Med Phys* 30:179-189 (2003)
5. Buckley LA, Rogers DWO: Wall correction factors P_{wall} for parallel-plate ionization chambers. *Med Phys* 33:1788-1796 (2006)
6. Palm A, Mattsson O, Andreo P: Calibration of plane-parallel chambers and determination of P_{wall} for the NACP and Roos chambers for ^{60}Co -ray beams. *Phys Med Biol* 45:971-981 (2000)
7. Stewart KJ, Seuntjens JP: Comparing calibration methods of electron beams using plane-parallel chambers with absorbed-dose to water based protocols. *Med Phys* 29:284-289 (2002)
8. Christ G, Dohm OS, Bruggmoser G, Schule E: The use of plane-parallel chambers in electron dosimetry without any cross-calibration. *Phys Med Biol* 47:N121-N126 (2002)
9. Kapsch RP, Bruggmoser G, Christ G, et al: Experimental determination of P_{Co} perturbation factors for plane-parallel chambers. *Phys Med Biol* 52:7167-7181 (2007)

Study on Absorbed Dose Determination of Electron Beam Quality for Cross-calibration with Plane-parallel Ionization Chamber

Jeong-Eun Rah*, Dong-Oh Shin[†], So-Hyun Park[‡], Hojin Jeong*, Ui-Jung Hwang*,
Sung Hwan Ahn*, Young Kyung Lim*, Dong Wook Kim*, Myonggeun Yoon*, Dong Ho Shin*,
Se Byeong Lee*, Tae-Suk Suh[‡], Sung Yong Park*

*Proton Therapy Center, National Cancer Center, [†]Department of Radiation Oncology,
School of Medicine, Kyung Hee University, [‡]Department of Biomedical Engineering,
The Catholic University of Korea, Seoul, Korea

Absorbed dose to water based protocols recommended that plane-parallel chambers be calibrated against calibrated cylindrical chambers in a high energy electron beam with $R_{50} > 7 \text{ g/cm}^2$ ($E \geq 16 \text{ MeV}$). However, such high-energy electron beams are not available at all radiotherapy centers. In this study, we are compared the absorbed dose to water determined according to cross-calibration method in a high energy electron beam of 16 MeV and in electron beam energies of 12 MeV below the cross-calibration quality remark. Absorbed dose were performed for PTW 30013, Wellhofer FC65G Farmer type cylindrical chamber and for PTW 34001, Wellhofer PPC40 Roos type plane-parallel chamber. The cylindrical and the plane-parallel chamber to be calibrated are compared by alternately positioning each at reference depth, $z_{ref} = 0.6R_{50} - 0.1$ in water phantom. The D_W of plane-parallel chamber are derived using across-calibration method at high-energy electron beams of 16, 20 MeV. Then a good agreement is obtained the D_W of plane-parallel chamber in 12 MeV. The agreement between 20 MeV and 12 MeV are within 0.2% for IAEA TRS-398.

Key Words: Electron beam, Absorbed dose to water calibration coefficient, Plane-parallel ionization chamber, Cross-calibration, Beam quality