

고 에너지 전자선에 대한 공기커마와 물 흡수선량에 기반한 프로토콜간의 비교

국립암센터 양성자치료센터*, 경희대학교 의과대학 방사선종양학교실†

박창현*† · 박성용* · 신동오†

흡수선량 측정의 정확성을 향상시키기 위하여 기존의 공기커마 혹은 조사선량 표준에서 물 흡수선량 표준으로 선량측정의 패러다임이 변화하고 있다. 본 연구는 기존의 프로토콜에서 물 흡수선량 기반의 프로토콜로의 전환을 모색하는 입장에서 현재 임상에서 널리 사용하고 있는 IAEA TRS-277과 물 흡수선량 표준에 토대를 두고 있는 IAEA TRS-398 및 AAPM TG-51 프로토콜에 대하여 동일한 기준깊이에서 물 흡수선량을 측정하여 상호 비교하였다. Varian 2100 C/D 선형가속기로부터의 세 종류의 전자선 에너지에 대해 PTW 30002 원통형 이온함과 Markus 및 Roos 평행평판형 이온함을 사용하여 측정하였고 ^{60}Co 에서의 공기커마 및 물 흡수선량 교정정수는 식품의약품안전청으로부터 받아 사용하였다. 공기커마 표준에 기반한 프로토콜과 물 흡수선량 표준에 기반한 프로토콜간에는 2% 이내의 차이를 보임으로써 사용자 기관에서는 자체적인 확인을 거쳐 공기커마 기반의 프로토콜에서 물 흡수선량 기반 프로토콜로의 전환을 적극 검토해 볼 필요가 있다. 물 흡수선량 기반의 프로토콜간에는 원통형 이온함의 경우 0.5% 이내에서 잘 일치하였고 평행평판형 이온함의 경우에도 고 에너지 전자선을 이용한 교차 교정을 하면 0.7% 이내에서 잘 일치하였다. 사용한 모든 프로토콜과 전자선 에너지에 대해 원통형 이온함과 평행평판형 이온함간에는 2% 이내의 차이를 보였으나 선량측정의 정확성을 향상시키기 위해 물 흡수선량 표준에 기반한 프로토콜의 권고에 따라서 하한에너지 이하의 전자선의 경우는 원통형 이온함 대신에 평행평판형 이온함을 사용함이 타당하다고 사료된다.

중심단어 : 프로토콜, IAEA TRS-277, IAEA TRS-398, AAPM TG-51

서 론

방사선치료기기에 대한 출력선량을 정확히 교정하는 일은 방사선 치료의 성패를 가르는 중요한 일들 중의 하나이다. 이에 고 에너지 광자선 및 전자선 등을 정확히 교정하기 위해서 이론 및 실험적으로 보다 정교한 선량측정법이 필요하게 되었고, 선량측정법의 지속적인 발전과 함께 선량측정의 물리적 기초, 기준 조건 및 실행 방법 등을 규정한 다양한 프로토콜들이 세계의 여러 기관에서 발표되었다. 지난 20여 년 동안 1980년과 1981년에 NACP(Nordic Association of Clinical Physics)^{1,2)}, 1983년에 HPA (Hospital Physicists' Association)³⁾, 역시 1983년에 AAPM (American Association of Physicists in Medicine) TG-21⁴⁾, 1984년에 ICRU (International Commission on Radiation Units and Mea-

surements) Report 35), 역시 1984년에 SEFM (Sociedad Espanola de Fisica Medica) 84-1⁶⁾, 1986년에 NCS (Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie) Report NCS-2⁷⁾, 1987년에 SEFM 87-1⁸⁾, 1987년과 1997년에 IAEA (International Atomic Energy Agency) TRS-277⁹⁾, 1988년에 AIFB(Associazione Italiana di Fisica Biomedica)¹⁰⁾, 1989년에 NCS Report NCS-5¹¹⁾, 1994년에 AAPM TG-39¹²⁾, 1996년에 IPEMB (Institute of Physics and Engineering in Medicine and Biology)^{13,14)}, 그리고 1997년에 IAEA TRS-381¹⁵⁾ 등 선량측정 프로토콜들이 잇달아 발표되었는데, 이 중 특히 IAEA와 AAPM의 프로토콜들은 국내외에서 여전히 널리 사용되고 있다. 이 프로토콜들은 표준 기관으로부터 제공되는 이온함의 공기커마(air kerma) 또는 조사선량(exposure) 교정정수를 사용하도록 하고 있다.

그런데 최근 들어 세계의 일차표준기관들은 선량측정 표준으로서 공기커마 또는 조사선량보다 물 흡수선량을 선호하게 되었는데, 그 이유는 물 흡수선량 표준이 임상에서 관심 있는 물리량인 만큼 공기커마 또는 조사선량 기반 표준에 비해 물 흡수선량 표준으로 사용함으로써 선량측정에 관한 수

이 논문은 2003년 11월 1일 접수하여, 2003년 11월 21일 채택됨.
 책임저자: 박성용, (412-769)경기도 고양시 일산구 마두 1동 809
 국립암센터 양성자치료센터
 Tel : 031)920-1728, E-mail : cool_park@ncc.re.kr

식체계가 간단해질 뿐만 아니라 선량 측정에 있어서의 불확도도 감소되기 때문이었다. 이미 10여년 전부터 영국과 독일에서는 물 흡수선량 기반의 프로토콜을 제안했으나¹⁶⁻¹⁹⁾ 물 흡수선량 기반의 프로토콜이 본격적으로 도입된 것은 1999년에 AAPM TG-51²⁰⁾, 2000년에 IAEA TRS-398²¹⁾이 발표되면서부터였다. 이 프로토콜들은 표준기관으로부터 제공되는 이온함의 물 흡수선량 교정정수를 사용하도록 하고 있다.

이전에도 여러 연구자들에 의해 프로토콜들간의 비교 연구가 진행되어 왔지만 물 흡수선량 기반의 새로운 세대의 프로토콜들이 등장하면서 물 흡수선량 기반의 프로토콜과 이전의 공기커마 기반의 프로토콜간의 비교 및 물 흡수선량 프로토콜간의 비교가 활발하게 이루어졌다. 그러나 국내에서는 아직 공기커마 기반의 프로토콜과 물 흡수선량 기반의 프로토콜 또는 물 흡수선량 기반의 프로토콜간의, 측정을 통한 체계적인 비교가 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 공기커마 기반의 프로토콜로써 IAEA TRS-277을 사용하고 물 흡수선량 기반의 프로토콜로써 IAEA TRS-398과 AAPM TG-51을 사용하였다. 국내 병원에서 사용하고 있는 프로토콜은 대부분 이 세 프로토콜 중의 하나일 것으로서 프로토콜을 공기커마 기반의 프로토콜에서 물 흡수선량 기반의 프로토콜로 바꾸려는 의학물리학자들을 위해 유용한 정보를 제공하고자 하였다. 전자선에 대해 동일한 기준깊이에서의 물 흡수선량을 측정하여 물 흡수선량 기반의 프로토콜과 공기커마 기반의 프로토콜을 비교했고 물 흡수선량 프로토콜간의 상호 비교도 병행하였다. 아울러 프로토콜들에 의하면 원통형 이온함과 달리 평행평판형 이온함은 모든 에너지의 전자선에 대해 사용할 수 있음에도 불구하고 평행평판형 이온함을 구비하지 못하고 있거나 구비하고 있더라도 까다로운 사용법으

로 인해 사용을 꺼리고 있는 국내 임상 현실에서 평행평판형 이온함을 평가하는 데 주목하였다.

재료 및 방법

1. 전자선 및 이온함

물 흡수선량은 선형가속기 2100 C/D (Varian Associates Inc., 미국)에서 방출되는 세 종류의 명목상 전자선 에너지(6, 9와 12 MeV)에 대해 측정을 수행하였다. TRS-277과 TRS-398에서는 각각 5 MeV와 10 MeV 에너지 이하에서 평행평판형 이온함의 사용을 권고하고 있어 6, 9와 12 MeV 에너지의 전자선을 선택하였다.

사용된 세 종류의 전자선 에너지에 대한 물리적인 특성은 Table 1에 나타내었다. 전자선의 선질은 IAEA TRS-277의 경우 팬텀 표면에서의 평균에너지 E_0 로 나타내고, IAEA TRS-398과 AAPM TG-51에서는 최대선량이 50%로 감소하는 깊이 R_{50} 으로 나타낸다. E_0 는 $E_0 = 2.33 R_{50}$ (MeV/cm)의 식에 의해 실제적으로 R_{50} 으로부터 구하므로, E_0 와 R_{50} 은 선형적인 비례 관계를 갖는다. IAEA TRS-398과 AAPM TG-51에서의 기준 깊이는 R_{50} 으로부터 $0.6 R_{50} - 0.1$ (cm)로써 주어지고 IAEA TRS-277에서의 기준 깊이는 최대선량 깊이 R_{100} 으로써 주어진다. R_{50} 및 R_{100} 은 깊이선량곡선으로부터 구했는데 깊이선량곡선은 3차원 주사 물팬텀시스템 (IBA, 독일)의 원통형 이온함을 사용하여 정격치료거리 100 cm와 조사면의 크기 10 cm×10 cm에 대해 측정하였다.

이온함은 원통형 이온함인 PTW 30002, 평행평판형 이온함인 Markus 이온함과 Roos 이온함을 사용하였다. 세 이온

Table 1. Characteristics of the electron beams used in this study

명목상 전자선 에너지	선량반가 깊이 (R_{50})	표면에서의 평균에너지 ($E_0 = 2.33 R_{50}$ MeV/cm)	TRS-398, TG-51에서의 기준 깊이 ($d_{ref} = 0.6 R_{50} - 0.1$)	TRS-277에서의 기준 깊이 (최대선량깊이 (R_{100}))
6 MeV	2.30 cm	5.36 MeV	1.28 cm	1.20 cm
9 MeV	3.55 cm	8.27 MeV	2.03 cm	2.00 cm
12 MeV	4.95 cm	11.5 MeV	2.87 cm	2.80 cm

Table 2. Characteristics of the ionization chambers used in this study (from IAEA TRS-39821)

이온함 (제조사/모델)	벽 또는 창				수집 전극	
	물질	두께	부피	내직경 또는 간격	물질	직경
PTW 30002	흑연	79 mg/cm ² (0.45 mm)	0.60 cc	6.1 mm	흑연	1.0 mm
Markus	흑연으로 감싼 폴리스티렌	2.3 mg/cm ² (방수캡 포함시 102 mg/cm ² (0.9 mm))	0.055 cc	2.0 mm	아크릴	5.3 mm
Roos	흑연으로 감싼 아크릴	118 mg/cm ² (1 mm)	0.35 cc	2.0 mm	아크릴	16 mm

함의 특성은 Table 2에 나타내었다.

2. 프로토콜

선량측정 프로토콜은 공기커마 기반 프로토콜로써 IAEA TRS-277을 사용하였고, 물 흡수선량 기반 프로토콜로써 IAEA TRS-398과 AAPM TG-51을 사용하였다. 세 프로토콜간의 주요한 특징은 Table 3에 나타내었다.

이온함의 공기커마 혹은 물 흡수선량 교정정수들은 국내 이차표준기관인 식품의약품안전청(KFDA; Korea Food & Drug Administration)으로부터 얻었다. 본 연구에서 사용한 이온함들에 대한 교정정수는 Table 4에 나타낸 바와 같다.

3. 측정을 통한 비교

1) 프로토콜간의 비교

프로토콜간의 비교는 물 흡수선량 측정을 통하여 물 흡수선량 기반의 프로토콜들(AIEA TRS-398, AAPM TG-51) 간에 그리고 공기커마 기반의 프로토콜(AIEA TRS-277)과

물 흡수선량 기반의 프로토콜들(AIEA TRS-398, AAPM TG-51)간에 수행했다.

세 종류의 명목상 전자선 에너지(6, 9와 12 MeV) 에 대하여 동일한 기준 깊이에서 물 흡수선량을 측정함으로써 프로토콜들을 비교하였다. 기준 깊이가 IAEA TRS-277에서는 최대선량깊이, R_{100} 이고 IAEA TRS-398과 AAPM TG-51에서는 $d_{ref} = 0.6 R_{50} - 0.1$ (cm)로써 차이가 있지만 본 연구에서는 IAEA TRS-277의 경우에도 IAEA TRS-398, AAPM TG-51에서의와 같은 기준 깊이에서 측정을 하였다. 공기커마 기반의 프로토콜과 물 흡수선량 기반의 프로토콜간에 서로 다른 기준 깊이를 그대로 사용한다면 한 쪽 프로토콜에 의한 기준 깊이의 선량을 깊이선량곡선의 데이터를 사용하여 다른 쪽 프로토콜에 의한 기준 깊이의 선량으로 변환해 주어야 하는데 이 과정에서 불확도가 증가하게 된다.

2. 원통형 이온함과 평행평판형 이온함간의 비교

원통형 이온함 PTW 30002와 평행평판형 이온함인 Mark-

Table 3. Comparison of IAEA TRS-277, IAEA TRS-398 and AAPM TG-51

프로토콜	TRS-277	TRS-398	TG-51
에너지 범위	5-50 MeV	3-50 MeV	4-50 MeV
선질 지표	팬텀 표면에서의 E_0	R_{50}	R_{50}
팬텀 물질	$E_0 \geq 10$ MeV일 때 물	$R_{50} \geq 4$ g/cm ² 일 때 물	
	$E_0 < 10$ MeV일 때 물 또는 플라스틱	$R_{50} < 4$ g/cm ² 일 때 물 또는 플라스틱	물
이온함 유형	$E_0 \leq 5$ MeV일 때 평행평판형	$R_{50} < 4$ g/cm ² 일 때 평행평판형	$R_{50} \leq 2.6$ cm 일 때 평행평판형
	$5 \text{ MeV} \leq E_0 < 10$ MeV일 때 평행평판형 또는 원통형	$R_{50} \geq 4$ g/cm ² 일 때 평행평판형 또는 원통형	$R_{50} > 2.6$ cm 일 때 평행평판형 또는 원통형
	$E_0 \geq 10$ MeV일 때 원통형		
기준 깊이	R_{100}	$0.6 R_{50} - 0.1$ cm	
이온함 기준점 (측정점)	평행평판형 이온함의 경우 장 안쪽 표면 상의 중심 원통형 이온함의 경우 이온함 축 상의 공동 부피 중심		
이온함 기준점의 위치(유효측정점)	평행평판형 이온함의 경우 기준 깊이(Z_{ref})		기준 깊이(d_{ref})
수식체계	$D_{w,Q} = M_Q N_{D,air} (S_{w,air})_Q P_Q P_{cel}$ $= M_Q N_K (1-g) k_{att} k_m (S_{w,air})_Q P_Q P_{cel}$		$D_{w,Q} = M_Q N_{D,w} k_Q$ (TRS-398) $= M_Q N_{D,w} P_{Q,gr} k'_{R_{50}} k_{ecal}$ (TG-51)
	<ul style="list-style-type: none"> • M_Q: 영향인자들에 대해 보정한 이온함의 지시값 • $N_{D,air}$: 공기 흡수선량 교정정수 • N_K: 공기커마 교정정수 • $(S_{w,air})_Q P_Q P_{cel}$: $N_{D,air}$ 일때의 선질변환계수 • $(1-g) k_{att} k_m (S_{w,air})_Q P_Q P_{cel}$: N_K 일때의 선질 변환계수 	<ul style="list-style-type: none"> • M_Q: 영향 인자들에 대해 보정한 이온함의 지시값 • $N_{D,w}$: 물 흡수선량 교정정수 • k_Q: TRS-398에서의 선질변환계수 • $P_{Q,gr} k'_{R_{50}} k_{ecal}$: TG-51에서의 선질변환계수 	

us, Roos간에 각 프로토콜과 에너지에 따른 물 흡수선량을 비교하였다. 또한 측정 과정에서 극성효과 및 이온재결합효과도 비교하였다.

원통형 이온함 및 평행평판형 이온함을 사용하는 방법은 각 프로토콜에서 권고하고 있는 절차에 따랐다. 원통형 이온함의 경우 유효측정점을 AAPM TG-51에 따른 측정에서는 기준 깊이로 두었고 IAEA TRS-277과 TRS-398에 따른 측정에서는 기준 깊이보다 이온함 직경의 0.5배 만큼 더 들어간 깊이로 두었다. AAPM TG-51에서는 원통형 이온함의 유효측정점을 기준 깊이에 두는 대신 경사도보정계수 $P_{Q,gr}$ 를 사용하는데 $M_Q P_{Q,gr}$ 은 기준 깊이보다 이온함 직경의 0.5배 만큼 더 들어간 깊이에서 측정된 M_Q 값과 수치적으로 같아서 실제적으로는 AAPM TG-51과 IAEA TRS-277, TRS-398간에 유효측정점의 차이에 의한, 기준 깊이에서의 물 흡수선량 값의 차이는 없다.

3. 평행평판형 이온함에 대한 ^{60}Co 교정과 20 MeV 전자선에서의 교차 교정간의 비교

세 프로토콜 모두 평행평판형 이온함을 ^{60}Co 감마선에서 직접 교정하는 것보다는 ^{60}Co 감마선에서 교정한 원통형 이온함에 대해 고 에너지 전자선에서 교차 교정하는 것을 권고하고 있다. 이는 평행평판형 이온함의 경우 ^{60}Co 감마선에서

벽보정계수 p_{wall} , 공 선질변환계수를 결정하는 데에 있어서의 문제에 주로 기인한다²¹⁾.

두 가지 교정 방법간에 실제로 얼마나 차이가 나는 지를 알아보기 위해 Markus, Roos 두 종류의 평행평판형 이온함에 대해 ^{60}Co 감마선에서 교정받아 얻은 교정정수를 사용하여 물 흡수선량을 구하고 ^{60}Co 감마선에서 교정받은 PTW 30002 원통형 이온함에 대해 20 MeV 에너지의 전자선에서 교정하여 얻은 교정정수를 사용하여 물 흡수선량을 구해 서로를 비교하였다.

결과 및 고찰

1. 프로토콜간의 비교

1) 물 흡수선량 기반의 프로토콜과 공기커마 기반의 프로토콜간의 비교

동일한 기준 깊이에서 물 흡수선량을 측정하여 물 흡수선량 기반의 프로토콜(IAEA TRS-398, AAPM TG-51)과 공기커마 기반의 프로토콜(TRS-277)간에 비교한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Roos 이온함은 식품의약품안전청으로부터 받은 공기커마 교정정수 N_k 가 없어서 제외했다. 공기커마 기반의 프로토콜과 물 흡수선량 기반의 프로토콜간의 물 흡수

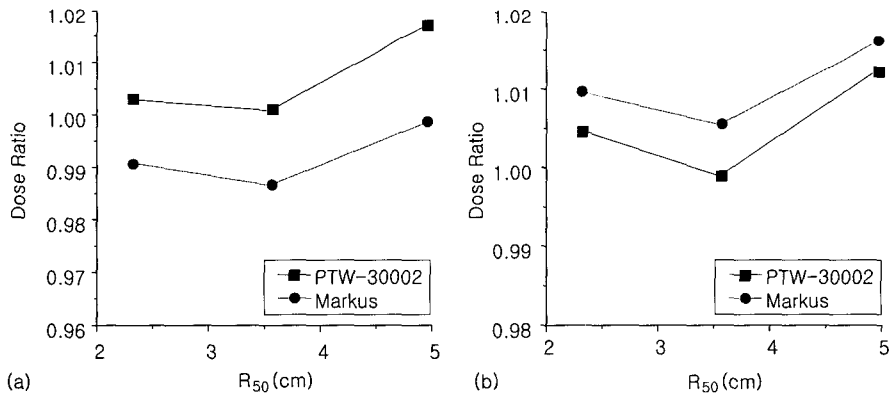


Fig. 1. Ratio of absorbed dose to water values obtained with (a) IAEA TRS-398 and IAEA TRS-277, (b) AAPM TG-51 and IAEA TRS-277 using ^{60}Co calibration factors for PTW 30002 and Markus chambers.

Table 4. Calibration factors in ^{60}Co for the ionization chambers used in this study

교정정수	PTW 30002	Markus	Roos
공기커마 교정정수(N_k)	4.783×10^{-2} Gy/nC	5.207×10^{-1} Gy/nC	-
교정 불확도	$\pm 1.1\%$	$\pm 1.1\%$	-
물 흡수선량 교정정수($N_{D,w}$)	5.264×10^{-2} Gy/nC	5.714×10^{-1} Gy/nC	8.336×10^{-2} Gy/nC
교정 불확도	$\pm 0.9\%$	$\pm 2.8\%$	$\pm 2.2\%$

선량 비를 비교함에 있어서 광자선 및 전자선에 대해 에너지에 따른 경향을 지적하기도 하는데, 본 연구에서는 뚜렷한 경향을 찾을 수는 없었다.

IAEA TRS-398과 TRS-277를 비교해보면 PTW 30002 이온함의 경우 IAEA TRS-398에 따른 물 흡수선량 값이 TRS-277에 따른 물 흡수선량 값에 비해 최대 1.7% 더 큰 데 반해 Markus 이온함의 경우 반대로 IAEA TRS-277에 따른 물 흡수선량 값이 TRS-398에 따른 물 흡수선량 값에 비해 최대 1.4% 더 크다. 한편 AAPM TG-51과 IAEA TRS-277를 비교해보면 PTW 30002 이온함의 경우 최대 1.2%, Markus 이온함의 경우 최대 1.6%까지 전반적으로 AAPM TG-51에 따른 물 흡수선량 값이 IAEA TRS-277에 따른 물 흡수선량 값보다 크다.

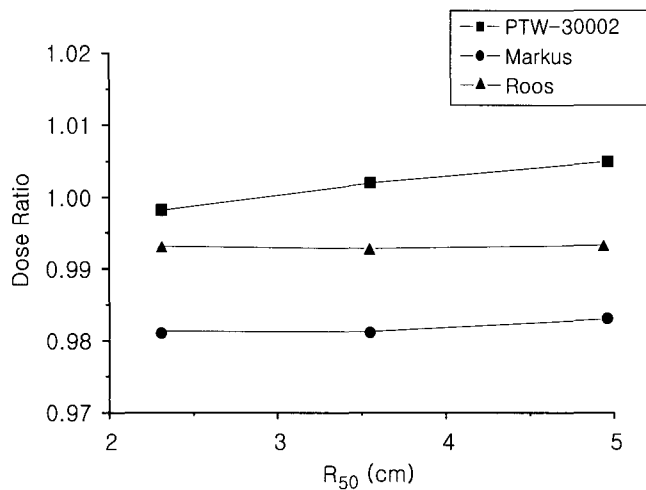


Fig. 2. Ratio of absorbed dose to water values obtained with IAEA TRS-398 and AAPM TG-51 using ⁶⁰Co calibration factors for all chambers.

2) 물 흡수선량 기반의 프로토콜간의 비교

동일한 기준 깊이에서 물 흡수선량을 측정하여 물 흡수선량 기반의 프로토콜(IAEA TRS-398, AAPM TG-51)간에 비교한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

IAEA TRS-398과 AAPM TG-51을 비교해보면 PTW 30002 이온함의 경우 0.5%까지 IAEA TRS-398에 따른 물 흡수선량 값이 AAPM TG-51에 따른 물 흡수선량 값보다 크기도 하지만 평행평관형 이온함의 경우 Markus 이온함은 최대 1.9%, Roos 이온함은 0.7% AAPM TG-51에 따른 물 흡수선량 값이 IAEA TRS-398에 따른 물 흡수선량 값보다 크다.

본 연구에서는 보정하지 않은 측정값은 같지만 프로토콜에 따라 다른 보정계수, 선질변환계수, 교정정수를 적용함으로써 물 흡수선량의 차이가 생기는데, 보정계수의 프로토콜간 차이는 물 흡수선량의 차이에 거의 영향을 미치지 않아 공기커마 기반의 프로토콜과 물 흡수선량 기반의 프로토콜을 비교한 경우 그 차이는 공기커마 교정정수와 물 흡수선량 교정정수간의 차이와 선질변환계수의 차이에 거의 기인한다고 할 수 있고 물 흡수선량 기반의 프로토콜간의 차이는 선질변환계수의 차이에 거의 전적으로 기인한다고 할 수 있다. 공기커마 교정정수와 물 흡수선량 교정정수간의 차이는 본 연구에서 $N_{D,w}/N_k$ 의 비가 PTW 30002 이온함의 경우 1.101, Markus 이온함의 경우 1.097로써 9% 이상 차이가 난다. 프로토콜과 에너지 및 이온함의 종류에 따른 선질변환계수를 Table 5, 6에 나타내었는데, TRS-398/TRS-277의 선질변환계수의 비는 0.901-0.924로써 최대 11%까지 차이가 나고, TG-51/TRS-277의 선질변환계수의 비는 0.907-0.929로써 최대 10%까지 차이가 난다. 이러한 보정계수의 차이와 선질변환계수의 차이는 물 흡수선량을 구할 때 서로 상당히 상쇄되어 최종적인 물 흡수선량의 차이는 위의 결과와 같이 2%

Table 5. Beam quality conversion factors and the data used to calculate them for IAEA TRS-277 for the three beams and three chamber types of this study

프로토콜	이온함 유형	k_{attk_m}	p_{cel}	전자선 에너지(MeV)	$(S_{w,air})_Q$	p_u	$D_{w,Q}/M_Q N_{D,air}$	$D_{w,Q}/M_Q N_k$
	PTW 30002	0.982	1.000	6	1.088	0.952	1.036	1.014
				9	1.077	0.956	1.030	1.008
				12	1.048	0.962	1.008	0.987
TRS-277	Markus	0.985	-	6	1.088	0.952	1.036	1.017
				9	1.077	0.956	1.030	1.011
				12	1.048	0.962	1.008	0.990
	Roos	-	-	6	1.088	0.952	1.036	1.033
				9	1.077	0.956	1.030	1.027
				12	1.048	0.962	1.008	1.005

Table 6. Beam quality conversion factors and the data used to calculate them for IAEA TRS-398 and AAPM TG-51 for the three beams and three chamber types of this study

프로토콜	이온함 유형	전자선 에너지 (MeV)	$D_{w,Q}/M_Q N_{D,w}$	프로토콜	이온함 유형	k_{cal}	전자선 에너지 (MeV)	$k'_{R_{50}}$	$D_{w,Q}/M_Q N_{D,w} P_{Q,gr}$
TRS-398	PTW 30002	6	0.924	TG-51	PTW 30002	0.900	6	1.028	0.926
		9	0.917				9	1.017	0.915
		12	0.912				12	1.008	0.908
	Markus	6	0.922		Markus		6	1.038	0.939
		9	0.913				9	1.028	0.930
		12	0.904				12	1.016	0.920
Roos	6	0.940	Roos	6	1.050	0.946			
	9	0.925		9	1.033	0.931			
	12	0.912		12	1.019	0.919			

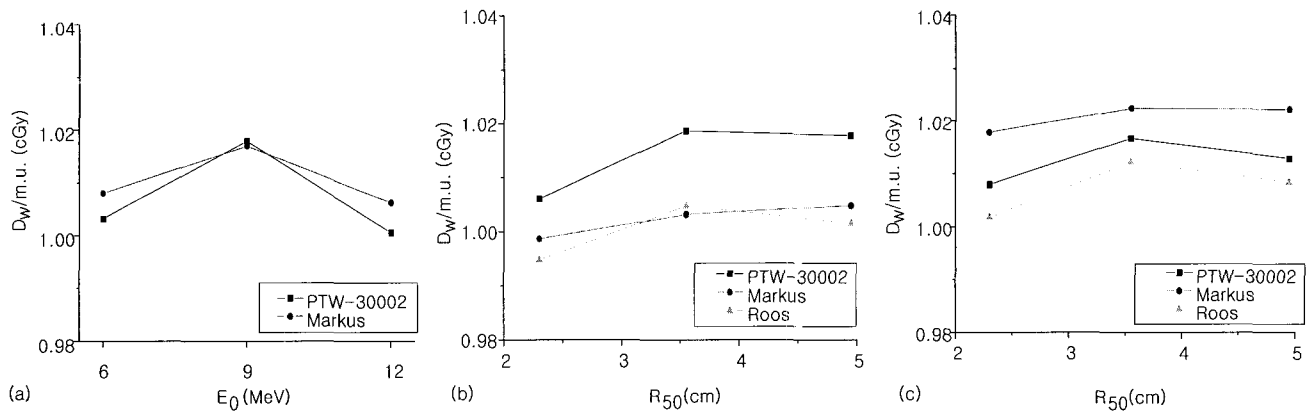


Fig. 3. Absorbed dose to water values obtained with (a) IAEA TRS-277, (b) IAEA TRS-398 and (c) AAPM TG-51 using ^{60}Co calibration factors.

이내의 차이로 줄어든다. 선질변환계수의 TRS-398/TG-51의 비는 0.981-1.005로써 이러한 선질변환계수의 차이가 거의 그대로 물 흡수선량의 차이에 반영되어 위의 결과와 같이 IAEA TRS-398과 AAPM TG-51간에 물 흡수선량이 2% 이내의 차이를 보이게 된다.

2. 원통형 이온함과 평행평판형 이온함간의 비교

이온함 종류별로 프로토콜에 따른 물 흡수선량을 Fig. 3에, 원통형 이온함과 평행평판형 이온함간의 물 흡수선량의 비를 Table 7에 나타내었다. PTW 30002/Markus의 비는 최대 1.5%의 차이를 보였고 PTW 30002/Roos의 비는 최대 1.6%의 차이를 보였다. IAEA TRS-398에 대해서는 원통형 이온함의 물 흡수선량이 평행평판형 이온함의 물 흡수선량보다 모두 큰데 반해, AAPM TG-51에 대해서는 원통형 이온함 PTW 30002의 물 흡수선량이 Roos 이온함에 비해서 더 크지만 Markus 이온함에 비해서는 더 작다.

Table 7. Ratios of absorbed dose to water values obtained with the three protocols using ^{60}Co calibration factors

프로토콜	전자선 에너지 (MeV)	PTW 30002/ Markus	PTW 30002/ Roos
TRS-277	6	0.995	-
	9	1.001	-
	12	0.994	-
TRS-398	6	1.007	1.011
	9	1.015	1.014
	12	1.013	1.016
TG-51	6	0.990	1.006
	9	0.994	1.005
	12	0.991	1.004

한편 원통형 이온함과 평행평판형 이온함은 각각의 특징에 따라 보정계수도 차이가 나는데 Table 8이 20 MeV 전자선 에너지에서 서로를 비교한 결과이다. 평행평판형 이온함, 특히 Markus 이온함은 극성효과보정계수가 0.4%까지

Table 8. Polarity correction factors and recombination correction factors for the three protocols and three chamber types of this study

이온함 유형	극성효과보정계수			이온재결합보정계수		
	TRS-277	TRS-398	TG-51	TRS-277	TRS-398	TG-51
PTW 30002	-	1.000		1.013		1.014
Markus	-	0.996		1.005		1.005
Roos	-	1.000		1.006		1.006

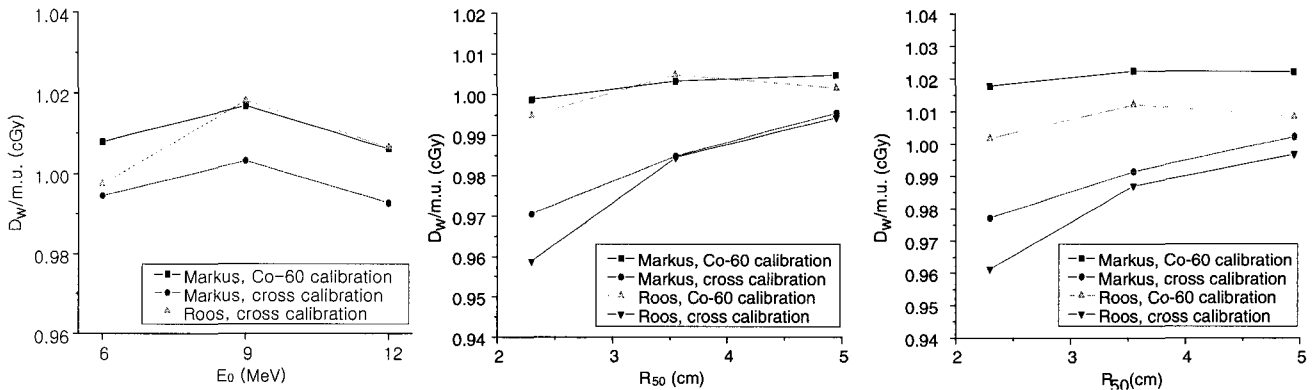


Fig. 4. Absorbed dose to water values obtained with (a) IAEA TRS-277, (b) IAEA TRS-398 and (c) AAPM TG-51 using ⁶⁰Co calibration factors and cross calibration factors for the plane parallel chambers.

Table 9. Ratios of absorbed dose to water values obtained with three protocols using ⁶⁰Co calibration factors and cross calibration factors for the plane parallel chambers

이온함 유형	전자선 에너지 (MeV)	⁶⁰ Co 교정			교차 교정		
		TRS-398/ TRS-277	TG-51/ TRS-277	TRS-398/ TG-51	TRS-398/ TRS-277	TG-51/ TRS-277	TRS-398/ TG-51
Markus	6	0.991	1.010	0.981	0.976	0.983	0.993
	9	0.987	1.006	0.981	0.982	0.988	0.993
	12	0.999	1.016	0.983	1.003	1.010	0.993
Roos	6	-	-	0.993	0.961	0.964	0.997
	9	-	-	0.993	0.967	0.969	0.997
	12	-	-	0.993	0.988	0.990	0.997

작다. 원통형 이온함인 PTW 30002 이온함은 이온재결합보정계수가 1.3%로서 평행평판형 이온함의 경우보다 꽤 큰데 이는 원통형 이온함의 특정 영역에 존재하는 낮은 전기장 때문이다²²⁾.

3. 평행평판형 이온함에 대한 ⁶⁰Co 교정과 20 MeV 전자선에서의 교차 교정간의 비교

평행평판형 이온함에 대해 ⁶⁰Co 감마선 교정정수를 사용하여 물 흡수선량을 구하고 ⁶⁰Co 감마선 교정정수를 받은 PTW 30002 원통형 이온함에 대해 20 MeV 에너지의 전자선에서 교정하여 얻은 교정정수를 사용하여 물 흡수선량을

구한 각각의 결과를 Fig. 4에 서로를 비교한 결과를 Table 9에 나타내었다. 교차 교정에 의한 교정정수를 사용하여 구한 물 흡수선량이 ⁶⁰Co 감마선 교정정수를 사용하여 구한 물 흡수선량보다 모든 경우에 대해 작다. 본 연구의 결과만으로는 평행평판형 이온함에 있어서 고 에너지 전자선에서 교차 교정을 하여 얻은 교정정수를 사용함으로써 ⁶⁰Co 감마선에서 교정하여 얻은 교정정수를 사용한 것보다 나은 결과를 얻었다고 볼 수는 없다. 실제로 박성용 등²³⁾에 따르면 AAPM TG-39와 IAEA TRS-381에 따른 고 에너지 전자선에서의 팬텀 내 교정, ⁶⁰Co 감마선에서의 팬텀 내 교정, ⁶⁰Co 감마선에서의 공기중 교정에 대해 교정정수는 ±0.6% 이내에서 일

치하였다.

한 가지 주목할 만한 것은 IAEA TRS-398과 AAPM TG-51에 따른 물 흡수선량의 비가 교차 교정에 의한 교정정수를 사용한 경우 ^{60}Co 감마선 교정정수를 사용한 경우에 비해 더 1에 근접한다는 것이다. 위에서 물 흡수선량 기반의 프로토콜간의 차이는 선질변환계수의 차이에 거의 전적으로 기인하므로 IAEA TRS-398과 AAPM TG-51에 대해 고 에너지 전자선을 이용하여 교차 교정한 교정정수를 사용하면 두 프로토콜간의 선질변환계수에 의한 차이가 상쇄되어 물 흡수선량의 차이는 더 줄어들 수 있다.

4. 가정과 근사 그리고 불확도

공기커마 기반의 프로토콜에 비해 물 흡수선량 기반의 프로토콜의 경우 수식체계가 많이 단순해졌다고는 하지만 여전히 다양한 보정계수 및 선질변환 계수를 필요로 한다. 프로토콜들을 적용하는 데 있어서 현실적으로 그러한 계수 값들은 대부분 각 프로토콜에서 제시한 표에서 찾아서 사용하게 되는데 표에 제시된 값들이라는 것이 개별 사용자의 조건을 일일이 반영할 수는 없는 것이어서 실제로는 어느 정도의 가정과 근사를 하게 된다. 본 연구에서 사용한 대부분의 선질변환계수의 값들도 내삽 또는 외삽에 의한 값이다. 또한 IAEA TRS-398에서는 $E_0 \geq 10 \text{ MeV}$ 일 때 원통형 이온함의 사용을 허용하기 때문에 PTW 30002 이온함의 경우 명목상 에너지 6 MeV ($E_0 = 5.36 \text{ MeV}$)와 9 MeV ($E_0 = 8.27 \text{ MeV}$)의 전자선에 대해서는 IAEA TRS-398의 표에 선질변환계수가 제시되어 있지 않아 $k_Q = [(S_{w,air})_Q(W_{air})_Q D_Q] / [(S_{w,air})_{Q_0}(W_{air})_{Q_0} D_{Q_0}] \approx [(S_{w,air})_Q D_Q] / [(S_{w,air})_{Q_0} D_{Q_0}]$ 로써 계산에 의한 값을 사용할 수밖에 없었다. 한편 팬텀의 경우도 본 연구에서는 모든 전자선 에너지에 대해 플라스틱 팬텀을 사용했는데 IAEA TRS-277과 TRS-398에서는 에너지에 따른 제한이 있고, AAPM TG-51에서는 아예 플라스틱 팬텀을 사용할 수 없다. 전자선 에너지에 따른 이온함 및 팬텀 사용 제한의 타당성에 대해서는 별도의 연구가 필요하리라 여겨진다. 이 밖에도 측정의 준비와 수행에 있어서의 오차, 측정 장비의 문제, 그리고 수식 계산에 있어서의 오차 등에 의해 불확도가 증가하게 된다. 또한 중요한 것이 표준기관으로부터 얻은 교정정수 값 자체의 불확도로써 이는 동일한 이온함에 대해서도 표준기관에 따라 값이 달라지는 데에 따른 불확도와 하나의 표준기관에서 그 교정정수 값의 재현성에 따른 불확도를 아우른다^{23, 24)}.

결론

최근 흡수선량의 정확성을 향상시키기 위하여 공기커마 표준에서 물 흡수선량 표준으로 표준기관의 교정 체계 및 임상에서 전환하고 있다. 동일한 기준 깊이에서 물 흡수선량을 측정하여 공기커마 기반의 프로토콜(TRS-277)과 물 흡수선량 기반의 프로토콜(IAEA TRS-398, AAPM TG-51)간에 상호 비교한 결과 2% 이내에서 일치하였다. 이는 두 표준간의 차이를 확인하기 위하여 사용된 이온함들에 대한 두 종류의 교정정수와 물등가고체팬텀의 불확도를 고려한다면 공기커마 기반의 프로토콜에서 물 흡수선량 기반의 프로토콜로의 전환이 타당성이 있음을 보여주는 결과이다. 그러나 공기커마 기반의 프로토콜에서 물 흡수선량 기반의 프로토콜로 전환하여 사용시 표준간의 차이 및 사용자 기관의 전자선 에너지 및 이온함에 대하여 상호 비교한 후 물 흡수선량에 기반한 프로토콜로 변환하여야 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

물 흡수선량 기반의 프로토콜(IAEA TRS-398, AAPM TG-51)간에 ^{60}Co 감마선을 이용한 교정정수를 사용하면 물 흡수선량은 원통형 이온함의 경우 0.5% 이내에서 일치한다. 평행평판형 이온함의 경우 2% 이내에서 일치하지만, 고 에너지 전자선을 이용하여 교차 교정한 경우에는 IAEA TRS-398과 AAPM TG-51간의 선질변환계수의 차이가 상쇄되어 물 흡수선량의 차이는 더 줄어들 수 있다.

원통형 이온함과 평행평판형 이온함간에 물 흡수선량 상호 비교에서 모든 경우에 대해 2% 이내에서 잘 일치하였으나 물 흡수선량 표준에 토대를 두고 있는 프로토콜에서 권고하고 있는 전자선 하한에너지 이하에서는 원통형 이온함 대신에 평행평판형 이온함을 사용함으로써 선량측정의 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력중장기 연구개발사업(M20330010001-03A0724-00110)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. NACP(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* 19:55-79

- (1980)
2. NACP(Nordic Association of Clinical Physics): Supplement to the recommendations of the Nordic Association of Clinical Physics: electron beams with mean energies at the phantom surface below 15 MeV. *Acta Radiol Oncol* 20:401-415 (1981)
 3. HPA(Hospital Physicists' Association): Revised Code of Practice for the dosimetry of 2 to 25 MV x-ray, and of caesium-137 and cobalt-60 gamma-ray beams. *Phys Med Biol* 28:1097-1104 (1983)
 4. Schulz RJ, Almond PR, Cunningham JR, Holt JG, Loevinger R, Suntharalingam N, Wright KA, Nath R. and Lempert GD: Task Group 21: a protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 10:741-771 (1983)
 5. ICRU(International Commission on Radiation Units and Measurements): Radiation dosimetry: electron beams with energies between 1 and 50 MeV. ICRU Report 35 (ICRU, Bethesda, MD) (1984)
 6. SEFM(Sociedad Espanola de Fisica Medica): Procedimientos recomendados para la dosimetria de fotones y electrones de energias comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en radioterapia de haces externos. SEFM 84-1 (SEFM, Madrid) (1984)
 7. NCS(Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie): Code of practice for the dosimetry of high-energy photons beams. Report NCS-2 (NCS, Delft) (1986)
 8. SEFM(Sociedad Espanola de Fisica Medica): Suplemento al Documento 84-1: procedimientos recomendados para la dosimetria de fotones y electrones de energias comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en radioterapia de haces externos. SEFM 87-1 (SEFM, Madrid) (1987)
 9. Andreo P, Cunningham JC, Hohlfeld K and Svensson H: Absorbed dose determination in photon and electron beams. An international Code of Practice IAEA Technical Report Series no. 277 (IAEA, Vienna) (1987, 2nd edition in 1997)
 10. AIFB(Associazione Italiana di Fisica Biomedica): Protocollo per la dosimetria di base nella radioterapia con fasci di fotoni ed elettroni con Emax fra 1 e 40 MeV. *Fisica Biomedica* 6 (2) (1988)
 11. NCS(Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie): Code of Practice for the dosimetry of high-energy electron beams. Report NCS-5 (NCS, Amsterdam) (1989)
 12. Almond PR, Attix FH, Humphries LJ, Kubo H, Nath R, Goetsch S and Rogers DWO: Task Group 39: the calibration and use of plane-parallel ionization chambers for dosimetry of electron beams: an extension of the 1983 protocol. *Med Phys* 21:1251-1260 (1994)
 13. IPEMB(Institute of Physics and Engineering in Medicine and Biology): The IPEMB code of practice for electron dosimetry for radiotherapy beams of initial energy from 2 to 50 MeV based on air kerma calibration. *Phys Med Biol* 41:2557-2603 (1996)
 14. IPEMB(Institute of Physics and Engineering in Medicine and Biology): The IPEMB code of practice for the determination of absorbed dose for x-rays below 300 kV generating potential (0.035 mm Al.4 mm Cu; 10.300 kV generating potential). *Phys Med Biol* 41:2605-2625 (1996)
 15. Almond PR, Andreo P, Mattsson O, Nahum AE and Roos M: The use of plane-parallel ionization chambers in high-energy electron and photon beams. An international Code of Practice for dosimetry IAEA Technical Report Series no. 381 (IAEA, Vienna) (1997)
 16. Hohlfeld K: The standard DIN 6800: procedures for absorbed dose determination in radiology by the ionization method (IAEA-SM-298/91). *Dosimetry in Radiotherapy* (Vienna, 1987) vol. 1 (IAEA, Vienna) pp13-22 (1988)
 17. Burns JE, Dale JWG, Dusautoy AR, Owen B and Pritchard O: New calibration service for high-energy X-irradiation at NPL (IAEA-SM-298/91). *Dosimetry in Radiotherapy* (Vienna, 1987) vol. 2 pp125-132 (1988)
 18. IPSM(Institute of Physical Sciences in Medicine): Code of practice for high-energy photon therapy dosimetry based on the NPL absorbed dose calibration service. *Phys Med Biol* 35:1355-1360 (1990)
 19. DIN(Deutsches Institut fur Normung): Dosismessverfahren nach der Sonden-methode fur Photonen-und Elektronenstrahlung-Ionisationsdosimetrie (DIN, Berlin) (1997)
 20. Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, Hanson WF, Huq MS, Nath R. and Rogers DWO: Task Group 51: protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 26: 1847-1870 (1999)
 21. Andreo P, Burns DT, Hohlfeld K, Huq MS, Kanai T, Laitano F, Smyth V. and Vynckier S: Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international Code of Practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. IAEA Technical Reports Series no. 398 (IAEA, Vienna)

- (2000)
22. Palmans H, Nafaa L, de Patoul N, Denis J-M, Tomsej M. and Vynckier S: A dosimetry study comparing NCS report-5, IAEA TRS-381, AAPM TG-51 and IAEA TRS-398 in three clinical electron beam energies. *Phys Med Biol* 48:1091-1107 (2003)
23. Park Sung Y, Suh Tae S, Shin Dong O, et al.: Determinations of $N_{\text{gas}}^{\text{pp}}$ and N_{D}^{pp} for plane-parallel chamber. *JJMP(日本放射線醫學物理)* 20:159-171 (2000)
24. Shortt K, Shobe J and Domen S: Comparison of dosimetry calibration factors at the NRCC and the NIST. *Med Phys* 27:1644-54 (2000)
25. Shortt K, Ross C, Seuntjens J, Delaunay F, Ostrowsky A, Gross P. and Leroy E: Comparison of dosimetric standards of Canada and France for photons at ^{60}Co and higher energies. *Phys Med Biol* 46:2119-42 (2001)

Comparison of Air Kerma-based and Absorbed Dose to Water-based Protocols in the Dosimetry of High Energy Electron Beams

Chang-hyun Park*[†], Sung Yong Park*, and Dong Oh Shin[†]

*Center for Proton Therapy, National Cancer Center

[†]Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Kyunghee University

A few years ago, a proposal was made to change the dosimetry from the air kerma-based reference dosimetry to the absorbed dose-based reference dosimetry for all radiotherapy beams of ionizing radiation to improve the accuracy of dosimetry. Here, we present a dosimetry study in which the two most widespread absorbed dose-based protocols (IAEA TRS-398 and AAPM TG-51) were compared with an air kerma-based protocol (IAEA TRS-277) by measuring the absorbed dose in the same reference depth. Measurements were performed in three clinical electron beam energies using a PTW 30002 cylindrical chamber, and Markus and Roos plane-parallel chambers. ^{60}Co calibration factors were obtained from the KFDA. The absorbed dose differences between the air kerma-based and absorbed dose-based protocols were within 2.0% for all chambers in all beams. The results thus show that the obtained absolute dose values will be not significantly altered by changing from the air kerma-based dosimetry to the absorbed dose-based dosimetry. It was also shown that absorbed dose values between the absorbed dose-based protocols agreed by deviations of less than 0.5% for a cylindrical chamber and less than 0.7% for plane-parallel chambers using cross-calibration factors. Although the use of a cylindrical chamber and plane-parallel chambers resulted in a difference of less than 2% for all situations investigated here, to reduce errors, the plane-parallel chambers are recommended for electron energies in which the use of cylindrical chamber is not permitted in each protocol.

Key Words : Protocols, IAEA TRS-277, IAEA TRS-398, AAPM TG-51