

Determination of Beam Quality Correction Factors for the PTW-Markus Chamber for Electron Beam Qualities $R_{50}=1.0$ and 1.4 g/cm^2

Me Young Kim*, Dong Joo Rhee*, Young Min Moon[†], Dong Hyeok Jeong*

*Medical Radiation Physics Laboratory, [†]Department of Radiation Oncology,
Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences, Busan, Korea

The Markus ionization chamber® is a small plane parallel ionization chamber widely used in clinical electron beam dosimetry. Plane parallel chambers were recommended for low energy electron dosimetry with the beam quality at $R_{50} < 4.0 \text{ g/cm}^2$ ($\bar{E} \approx 10 \text{ MeV}$) according to TRS-398 protocol. However, the quality correction factors (k_{Q,Q_0}) of the Markus chamber was not presented in TRS-398 protocol for electron beam quality at $R_{50} < 2.0 \text{ g/cm}^2$ ($\bar{E} \approx 4 \text{ MeV}$). In this study, the k_{Q,Q_0} factors of the Markus chambers (PTW-34045) for beam qualities at $R_{50}=1.0, 1.4, 2.0, 2.5, 3.0$, and 5.0 g/cm^2 were determined by Monte Carlo calculations (DOSRZnrc/EGSnrc) and the dosimetric formalism of quality correction factor. The derived k_{Q,Q_0} values were evaluated using the produced data based on TRS-398 and TG-51 protocols and known values for the Markus chamber.

Key Words: Markus chamber, Quality correction factor, Electron dosimetry

서 론

전자선 방사선치료는 피부 속 일정 깊이 이내에 에너지를 전달하는 전자선의 특성을 이용한 것으로서 주로 표재성 종양의 치료에 적합하다.^{1,2)} 치료용 전자선은 평균에너지 4 MeV에서 20 MeV 사이에서 사용되고 있으며, 이러한 전자들의 물속에서 실비정(Practical range)은 약 2~10 cm 범위이다. 일반적으로 전자선치료가 적용되는 깊이는 깊이선량을 80% 이상인 깊이로서, 명목 에너지(Nominal energy)로 4 MeV인 경우에 약 1.3 cm, 20 MeV인 경우에 약 7 cm이다.^{1,2)}

전자선에 대한 인체 조직내 흡수선량은 조직 등가 물질인 물(water) 속 측정을 통하여 결정하며, 현행 방사선치료에서는 국제원자력기구(IAEA; International Atomic Energy

Agency) 또는 미국의학물리학회(AAPM; American Association of Physicist in Medicine)에서 발간한 측정 프로토콜을 적용하고 있다. 현재 국내에서 널리 사용 중인 측정 프로토콜은 TRS-398 (IAEA, 2000)이며, 이 프로토콜은 물흡수선량교정계수를 기반으로 하며 기준 선질과 사용자의 선질의 차이를 보정하는 선질보정인자(Quality correction factor, k_{Q,Q_0})를 적용하여 흡수선량을 결정한다.³⁾ AAPM TG-51 (1999) 프로토콜은 TRS-398과 유사한 수식체계를 가지나 적용되는 보정 인자들의 차이로 인해 전자선의 경우 약 1%~2% 차이를 보인다.^{4,5)}

TRS-398에서는 $R_{50} < 4 \text{ g/cm}^2$ (약 10 MeV 이하)인 경우에 평행 평판형 전리함(Plane parallel ionization chamber)의 사용을 권고하고 있으며, 다양한 상용 전리함에 대하여 $R_{50} \geq 1 \text{ g/cm}^2$ (약 2.3 MeV 이상)에 대해 k_{Q,Q_0} 를 제시하고 있다. 평행평판형 전리함의 일종인 마커스 전리함(Markus, PTW Germany)은 소형 전리함으로서 직경 0.5 cm의 입사 창을 가지며 체적이 작아(약 0.05 cm^3) 전자선 선량 측정에 널리 사용되고 있다.⁶⁾ 그렇지만 마커스 전리함은 가드(Guard) 전극이 좁아서 공동 주변에서 산란된 전자들이 공동으로 쉽게 유입됨으로써 에너지에 의존하는 공동 보정(Cavity correction)을 필요로 한다.^{7,8)} 따라서 마커스 전리함은 가드 전극이 우수한 전리함들(Well-guarded chambers)에 비하여 보

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (DIRAMS) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. 50495-2015).

Received 3 September 2015, Revised 18 September 2015, Accepted 19 September 2015

Correspondence: Dong Hyeok Jeong (physics7@empas.com)

Tel: 82-51-720-5813, Fax: 82-51-720-5826

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

정이 어려운 단점을 가지고 있다.⁸⁾ 이러한 이유로 인해 TRS-398과 TG-51에서는 $R_{50} < 2 \text{ g/cm}^2$ (약 4 MeV)에 대해서 마커스 전리함에 대한 k_{Q,Q_0} 를 제공하지 않고 있다. 이러한 점은 전자선치료에서 $R_{50} = 2 \text{ g/cm}^2$ 이상의 선질을 사용하기 때문에 임상적 측면에서 큰 문제는 없다. 단지, 수술중 방사선치료(Intraoperative radiotherapy)의 경우에 3 MeV 영역의 전자선이 사용되므로 $R_{50} < 2 \text{ g/cm}^2$ 인 경우에 해당된다.⁹⁾

산업 분야의 경우에 재료, 물성 및 반도체 연구 또는 환경 정화의 목적으로 약 2 MeV 또는 그 이하 에너지의 선형가속기가 사용되고 있으며 대부분의 경우에 시료에 전달되는 선량 측정이 요구된다.¹⁰⁾ 치료용 선형가속기를 개발하는 경우에도 빔의 진단과 성능의 모니터링을 위하여 낮은 에너지에서도 선량 측정이 필요하다.¹¹⁾ 따라서 TRS-398의 보완과 이용을 확대하는 차원에서 $R_{50} < 2 \text{ g/cm}^2$ 선질에 대한 k_{Q,Q_0} 를 구하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 몬테칼로 계산과 TRS-398의 계산체계를 이용하여 전자선 선질 $R_{50} = 1.0, 1.4, 2.0, 2.5, 3.0, 5.0 \text{ g/cm}^2$ 에 대하여 마커스 전리함(PTW-M34045, Germany)에 대한 k_{Q,Q_0} 를 결정하였다. 이 때 $R_{50} > 2.0 \text{ g/cm}^2$ 에 대한 계산은 TRS-398에 k_{Q,Q_0} 가 주어져 있으므로 본 연구의 방법을 간접적으로 검증하기 위해 수행하였다. 또한 본 연구에서 중요한 $R_{50} < 2.0 \text{ g/cm}^2$ 영역에서 k_{Q,Q_0} 의 검증은 어렵지만 TRS-398 및 TG-51 프로토콜의 자료들 그리고 알려진 자료들과 비교하여 근사적으로 평가하였다. 본 연구에서 수행한 방법과 결과는 다양한 전자선 이용 분야에 활용할 수 있지만 특히 가속기 개발 분야와 프로토콜 연구 분야에서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 본다.

재료 및 방법

TRS-398 프로토콜에 의하면 선질보정인자 k_{Q,Q_0} 는 다음과 같이 정의된다.³⁾

$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} \quad (1)$$

여기서, $N_{D,w,Q} = D_{w,Q}/M_Q$ 으로 결정되며 측정 대상의 선질 Q 에 대한 물흡수선량교정계수이다. 여기서 $D_{w,Q}$ 와 M_Q 는 각각 선질 Q 에서 물속 흡수선량과 전리함으로 수집한 전하이다. 이 식에서 N_{D,w,Q_0} 는 교정기관에서 결정한 전리함의 기준 방사선 선질 Q_0 에 대한 물흡수선량교정계수이다. 이 때 Q_0 는 Co-60 감마선을 나타낸다. 따라서 k_{Q,Q_0} 는

N_{D,w,Q_0} 를 $N_{D,w,Q}$ 로 변환하는 역할을 한다.

1. Monte Carlo 계산

물질속 전자평형 상태에서 전리함으로 수집한 전하 M 은 공동의 흡수선량(D_{air})과, $D_{air} = M(W/e)/(\rho V)$ 와 같이 관계한다. 여기서 (W/e) 는 이온쌍생성에 소요된 에너지, ρV 는 공기의 밀도와 체적으로서 두 곱은 공동의 질량과 같다. 이 관계들을 이용하면 k_{Q,Q_0} 는 다음과 같이 표현된다.

$$k_{Q,Q_0} = \frac{[D_w/D_{air}]_Q}{[D_w/D_{air}]_{Q_0}} \quad (2)$$

여기서 D_w 와 D_{air} 는 선질 Q 에서 물속의 흡수선량과 전리함 공동의 흡수선량으로서 실험적으로 결정하기 어려운 양이지만 몬테칼로(Monte Carlo) 계산 등을 이용하여 계산으로 결정할 수 있다.^{5,8)} 본 연구에서는 DOSRZ/EGSnrc¹²⁾를 사용하여 입사에너지 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 6.0, 12.0 MeV에 대하여 k_{Q,Q_0} 를 계산하였다.

팬텀표면에서 전자선의 평균에너지 $E_0 \approx 2.33 R_{50}$ 관계로부터, 계산 대상은 $R_{50} = 0.86$ 과 2.58 g/cm^2 에 해당한다.³⁾ 여기서 $R_{50} = 2.0 \text{ g/cm}^2$ 이상에 대한 계산된 k_{Q,Q_0} 는 기존의 TRS-398에도 수록되어 있으므로 계산 결과의 비교와 검증을 위한 것이다.

본 계산에서는 몬테칼로 계산의 단순화와 실용적 측면에서 단일에너지 전자선을 사용하였다. 따라서 실제 가속기 빔과 차이가 있을 수 있으나 본 연구에서 4 MeV 이하에서 k_{Q,Q_0} 를 근사적으로 결정하고자 하기 때문에 단일에너지의 적용은 큰 문제가 없을 것이다. 향후 계산 결과의 정확성을 높이기 위해서는 치료용 선형가속기로부터 계산 또는 측정으로 구한 에너지 스펙트럼을 적용해야 할 것이다.

본 몬테칼로 계산에서 사용한 마커스 전리함(M34045, PTW, Germany)의 물리적 특성 및 기하학적 구조는 Table 1과 같다. PTW-M34045 모델은 Advanced Markus chamber®로 알려져 있으며, 기존의 PTW-M23343 모델(Classical Markus chamber)과 외형은 유사하나, 전극의 간격을 좁혀 체적을 0.05 cm^3 에서 0.02 cm^3 로 줄이고 보호 전극을 0.01 cm 에서 0.2 cm 로 확장하여 선량학적 특성을 개선시킨 것으로 알려져 있다.¹³⁾

2. 선량학적 계산

TRS-398에서는 다음과 같은 수식체계를 기반으로 다양한 전리함에 대하여 선질의 함수로서 k_{Q,Q_0} 를 결정한다.³⁾

Table 1. Composition and physical characteristics of PTW-Markus chamber (Model M34045).

Components	Materials	Density (g/cm ³)	Thickness	
			mm	mg/cm ²
Waterproof cap	PMMA	1.19	0.87	104
Air gap	Air	0.0012	0.40	0.048
Outer electrode	Polyethylene	1.06	0.03	3.18
Air cavity	Air	0.0012	1.00	0.12
Inner electrode	Polyethylene	1.06	0.03	0.048
Chamber body	PMMA	1.19	12.54	1,492

$$k_{Q,Q_0} \simeq \frac{[s_{w,air} P_Q]_Q}{[s_{w,air} P_Q]_{Q_0}} \quad (3)$$

여기서 $s_{w,air}$ 는 물과 공기의 저지능비(stopping power ratio)이며, P_Q 는 전리함의 형태와 물질에 의존하는 전체보정 계수(overall correction factor)이다. 따라서 각 선질에 대하여 $s_{w,air}$ 와 P_Q 가 알려져 있는 경우에 이 식을 이용하여 k_{Q,Q_0} 를 직접 계산할 수 있다. 먼저 전자선의 저지능비는 R_{50} 의 함수로서 측정 기준 깊이(z_{ref})에서 다음과 같이 주어진다.³⁾

$$s_{w,air}(z_{ref}) = 1.253 - 0.1487(R_{50})^{0.214} \quad (4)$$

이 식은 BURNS 등(1996)의 연구를 TRS-398에서 활용하기 위하여 맞춤식으로 나타난 것과 같으며, $R_{50}=1 \sim 20$ g/cm² 범위에 대하여 적용할 수 있다.¹⁴⁾ 이 때 z_{ref} 는 k_{Q,Q_0} 가 적용되는 기준 깊이로서, $z_{ref}=0.6R_{50}-0.1$ 와 같다.

다음에 결정할 인자는 전체보정계수(P_Q)이다. $P_Q = p_{cav}p_{dis}p_{wall}p_{cel}$ 로 표현되며, 여기서 p_{cav} 는 공동보정(cavity correction), p_{dis} 는 변위보정(displacement correction), p_{wall} 은 벽보정(wall correction), p_{cel} 은 중심극 보정(central electrode correction)이다.³⁾ 평행평판형 전리함인 경우에, $p_{dis}=1$, $p_{wall}=1$, $p_{cel}=1$ 이며, 또한 Well guarded 전리함이면 $p_{cav}=1$ 로 놓을 수 있다. 앞서 언급하였듯이 마커스 전리함의 경우에 Guarded가 좁은 전리함으로서 p_{cav} 는 1이 아니며 별도의 보정이 필요하다.

본 연구에서는 (3)식의 계산에 평행 평판형 전리함에 대하여 다른 TRS-381 프로토콜(IAEA 1995)에 제시된 마커스 전리함에 대한 P_Q 계산식을 이용하였다.¹⁵⁾ 이 때 Co-60에 대한 $s_{w,air}$ 와 P_Q 또한 TRS-381에 주어진 값을 사용하였다. 이와 같은 TRS-381의 자료들을 기반으로 본 연구에서

사용한 k_{Q,Q_0} 식은 다음과 같다.

$$k_{Q,Q_0}^{TRS-381} = \frac{(s_{w,air})_{R_{50}} P_Q^{TRS-381}}{[s_{w,air} P_{wall}]_{Co-60}} = 0.8747 \times s_{w,air}^Q (1 - 0.039 e^{-0.35 \cdot R_{50}}) \quad (5)$$

이 식에서 괄호 속의 양은 $P_Q^{TRS-381}$ 와 같은데, TRS-381에서 전자선 에너지의 함수로 제시된 식을 본 연구에서 $E_{zref}=1.23R_{50}$ 의 관계를 이용하여 R_{50} 의 함수로 변경한 것이다.³⁾ 또한 상수 $0.8747=1/(s_{w,air}P_{wall})=1/(1.133 \cdot 1.009)$ 로서 Co-60에 대한 값이다. 이 계산의 결과와 분석은 논문의 결과에서 제시한다.

3. TRS-398 자료 외삽

본 연구에서 앞의 두 방법으로 결정한 k_{Q,Q_0} 는 적절히 비교 또는 검증되어야 한다. 이 때 $R_{50} \geq 2$ g/cm²인 경우에는 TRS-398에서 자료가 주어져 있기 때문에 이를 기준으로 비교할 수 있다. 그렇지만 $R_{50} < 2$ g/cm²인 경우에 대해서는 참고할 자료가 없다. 본 연구에서는 근사적 측면에서 TRS-398에서 마커스 전리함 계산에 사용된 수식을 이용하여, 외삽 방법으로 $R_{50} < 2$ g/cm²에 대한 값을 결정하고 앞의 계산 결과와 근사적으로 비교하였다. 이 계산에 사용된 식은 다음과 같다.³⁾

$$k_{Q,Q_0}^{TRS-398} = \frac{(s_{w,air})_Q P_Q^{TRS-398}}{[s_{w,air} P_{wall}]_{Co-60}} = 0.8747 \times s_{w,air}^Q (1 - 0.037 e^{-0.27 \cdot R_{50}}) \quad (6)$$

이 식은 (5)식과 유사하나 $P_Q^{TRS-398}$ 에서 차이를 가진다. 그렇지만, TRS-398에서 평행평판형 전리함에 대한 k_{Q,Q_0} 계산시 TRS-381의 값들이 사용되었음을 명시하고 있기 때문에 (5)식과 (6)식은 큰 차이가 없다. 이 식에서 상수 0.8747은 (5)식에서와 같다.

4. TG-51 자료 외삽

마커스 전리함에 대해 k_{Q,Q_0} 에 대한 자료를 좀 더 확보하기 위해 AAPM TG-51 프로토콜을 참조하였다. 전자선에 대한 선질보정인자만을 고려할 때 TG-51 프로토콜은 TRS-398과 다음과 같이 관계한다.^{3,4)}

$$k_{Q,Q_0} = k_Q^{TG-51} = P_{gr}^Q k'_Q k_{cal} \quad (7)$$

여기서 P_{gr}^Q 은 유효 측정점의 보정, k'_Q 은 전자선에 대한 선질보정인자, 그리고 k_{cal} 은 광자선-전자선 변환인자이며 이 때 기준 전자선 선질은 $R_{50}^{ref} = 7.5 \text{ g/cm}^2$ 이다.⁴⁾

평행 평판형 전리함인 경우에 $P_{gr}^Q = 1$ 이며, PTW-M23343 (Cassical Markus) 모델인 경우에, $k_{cal} = 0.905$ 로 주어진다.⁴⁾ TG-51에서는 Well guarded 전리함 일부에 대하여 $k'_Q(R_{50})$ 계산식을 제공하지만, 마커스 전리함에 대해서는 그래프를 통해 경향만을 보여주고 있다. 본 연구에서는 그래프로부터 값을 읽어 (7)식에 대입하여 k_{Q,Q_0} 를 구하고 다음과 같은 맞춤식을 구하였다.

$$k_{Q,Q_0}^{TG-51} = A + B e^{-C R_{50}} \quad (8)$$

여기서, $A=0.7879$, $B=0.1672$, $C=0.0460$ 와 같다. 이 계산의 결과는 논문의 결과에서 제시한다.

5. IBA-PPC-05 자료

마지막으로 IBA 사의 마커스형 전리함인 PPC-05 모델에 대한 알려진 자료를 참고하였다. PPC-05 모델은 기본 기하학적 형태는 PTW-마커스 전리함과 유사하지만, 전극 간격이 0.6 mm로 좁고, 몸체(body)가 C-552 (Air-equivalent plastic)로 구성되어있다는 점에서 다르다. 그렇지만, IBA의 기

술문서에서 유일하게 PPC-05 마커스 전리함에 대하여 $R_{50} = 1.0$ 과 1.4 g/cm^2 의 자료를 제시하고 있기 때문에 본 연구의 결과와 비교할 수 있다.¹⁶⁾ 본 연구에서는 PPC-05 전리함에 대한 k_{Q,Q_0} 를 편리하게 결정하고 다른 자료와 비교하기 위하여 다음과 같은 맞춤식을 구하였다.

$$k_{Q,Q_0}^{IBA-Markus} = A + B e^{-C R_{50}} \quad (9)$$

여기서, $A=0.8872$, $B=0.0957$, $C=0.2862$ 와 같다. 본 연구에서 다루는 선질 영역에서 k_{Q,Q_0} 값들이 선질에 따라 직선에 가깝기 때문에 (8)식 또는 (9)식과 같은 1차 지수함수적 맞춤식은 초기 자료들과 0.2% 이내로 잘 일치한다.

본 논문의 결과에서는 먼저 몬테칼로 계산결과로부터 결정된 k_{Q,Q_0} 값들을 제시하고, 선량학적 계산결과와 TRS-398 및 TG-51 자료를 이용하여 외삽한 결과 등 다양한 방법으로 구해진 k_{Q,Q_0} 값들을 제시하고 상호 비교하였다.

결 과

TRS-398 선질인자(k_{Q,Q_0})를 결정하기 위한 몬테칼로 계산의 결과는 Table 2와 같다. 여기서 D_w 와 D_{air} 는 각각 물속 z_{ref} 에서 선량과 전리함 공동의 흡수선량으로서 (2)식을 구성하는 인자들과 같다. 전자선에 대한 계산에서 D_w 는 전자 히스토리 10^7 , D_{air} 는 10^8 이 사용되었으며, Co-60 계산에서 D_w 와 D_{air} 는 각각 10^9 과 2×10^9 이 사용되었다. 이 표에서 u (%)는 계산의 불확도(uncertainty)를 의미하며 u_c 는 D_w 와 D_{air} 에 대한 합성불확도(combined uncertainty)를 나타낸다. 가장 높은 히스토리를 적용했음에도 Co-60에 대한 D_{air} 의 불확도는 1.4%로서 높으며, 이로 인해 (2)식으로 계산한 k_{Q,Q_0} 의 최종 불확도는 약 1.5%로 평가된다.

Fig. 1은 Table 1의 결과를 (2)식에 적용하여 계산한 마커

Table 2. Monte Carlo calculated dose values for the Markus ionization chamber (PTW-M34045) to calculate electron beam quality correction factors.

Electron energy (MeV)	D_w (Gy/fluence)	u (%)	D_{air} (Gy/fluence)	u (%)	D_w/D_{air}	u_c (%)
2.0	4.8108×10^{-10}	0.4	4.3360×10^{-10}	0.5	1.1095	0.6
2.5	4.7168×10^{-10}	0.4	4.2600×10^{-10}	0.5	1.1072	0.6
3.0	4.6817×10^{-10}	0.4	4.1830×10^{-10}	0.5	1.1192	0.6
3.5	4.5670×10^{-10}	0.4	4.1360×10^{-10}	0.5	1.1042	0.6
4.0	4.4660×10^{-10}	0.4	4.0680×10^{-10}	0.5	1.0978	0.6
6.0	4.1730×10^{-10}	0.4	3.7640×10^{-10}	0.5	1.1087	0.6
12.0	3.6550×10^{-10}	0.4	3.4430×10^{-10}	0.5	1.0616	0.6
Co-60	4.1240×10^{-12}	0.3	3.4750×10^{-12}	1.4	1.1868	1.4

스 전리함의 k_{Q,Q_0} 를 보여준다. 이 그림에서 오차는 합성불확도를 나타낸다. 이와 같은 몬테칼로 계산 결과는 통계적 특성에 의하여 요동(fluctuation)을 보이는데, 이 결과를 다른 결과들과 비교하기 위하여 다음과 같은 맞춤식을 구하였다.

$$k_{Q,Q_0}^{MC} = A + B e^{-C R_{50}} \quad (10)$$

여기서, $A = -1.3216$, $B = 2.2685$, $C = 0.004164$ 이다.

Fig. 2는 다양한 방법으로 결정한 마커스 전리함의 k_{Q,Q_0} 를 보여준다. 본 결과는 $R_{50}=1.0 \sim 5.0 \text{ g/cm}^2$ 에 대한 것으로서 본 연구에서 관심을 가지는 값은 $R_{50}=1.0$ 과 1.4 g/cm^2 에 대한 k_{Q,Q_0} 이다.

TRS-398에 제시된 $R_{50}=2.0 \text{ g/cm}^2$ 이상인 선질을 기준으로 (4)식으로 주어지는 몬테칼로 계산 결과와 비교한 결과 최대 -0.4% ($R_{50}=2.5 \text{ g/cm}^2$)의 차이 이내에서 일치하고 있으며, 선량학적 수식체계로부터 결정된 (5)식으로 계산한 결과와는 0.3% ($R_{50}=5.0 \text{ g/cm}^2$)이내로 일치하는 것으로 나타

났다.

TRS-398 자료를 기반으로 $R_{50} < 2.0 \text{ g/cm}^2$ 에 대한 외삽값을 얻기 위하여 수립된 (6)식의 계산 결과는 $R_{50} \geq 2.0 \text{ g/cm}^2$ 에서 TRS-398과 잘 일치하고 있다. 마찬가지로 TG-51 자료를 기반으로 수립된 (7)식의 계산 결과는 최대 2.0% ($R_{50}=3.0 \text{ g/cm}^2$)의 차이를 보이고 있다. 이는 프로토콜간의 차이에 관한 문제로 보여지며, Andreo 등(2001)의 연구에서와 같이 Markus 전리함에서 TG-51 프로토콜이 TRS-398보다 약 1.7% 높게 평가하고 있다고 보인 것과 유사한 결과이다.

IBA PPC-05 전리함의 결과는 최대 1.7% ($R_{50}=3.0 \text{ g/cm}^2$) 높게 나타났으며 이는 IBA PPC-05 전리함이 마커스 형태를 취하고 있지만 내부 구성과 재질의 차이로 보인다. 이는 TRS-398에서 마커스 형태의 전리함에 대해 동일한 k_{Q,Q_0} 를 적용하고 있다는 점에 있어서 향후 프로토콜의 보완이 필요하다고 할 수 있다. 이와 같은 결과들을 토대로 전자선

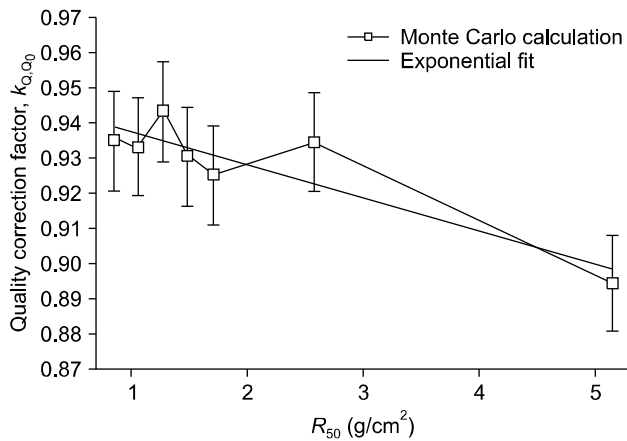


Fig. 1. Monte Carlo calculated quality correction factors for electron beams with mean energies between 2 and 12 MeV.

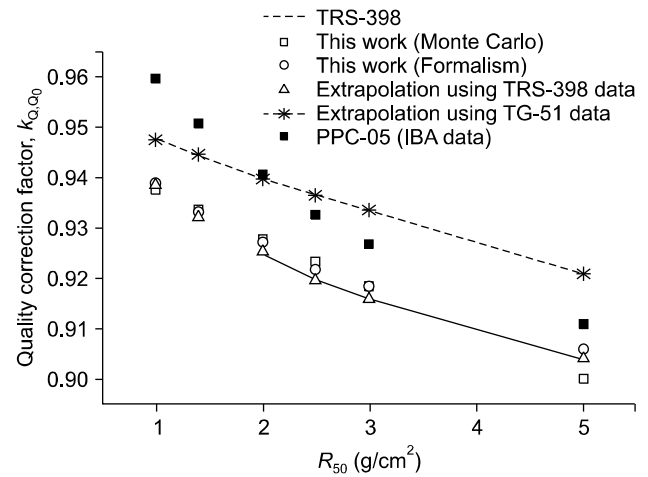


Fig. 2. Determined quality correction factors for Markus type ionization chamber for electron beams with beam qualities $R_{50}=1.0 \sim 5.0 \text{ g/cm}^2$.

Table 3. Determined k_{Q,Q_0} for Markus chamber for electron beam qualities $R_{50} < 2 \text{ g/cm}^2$.

Beam quality, $R_{50} \text{ (g/cm}^2\text{)}$	1.0	1.4
Monte Carlo calculation (Eq. 10), k_{Q,Q_0}^{MC}	0.938	0.934
Dosimetric formalism (Eq. 5)	0.939 / 0.1%*	0.933 / -0.1%
Extrapolation from TRS-398 (Eq. 6)	0.939 / 0.1%	0.932 / -0.2%
Extrapolation from TG-51 (Eq. 8)	0.948 / 1.1%	0.945 / 1.2%
IBA-PPC-05 (Eq. 9 & Ref. 16)	0.960 / 2.3%	0.951 / 1.8%

*percentage difference: $100 \times (k_{Q,Q_0} - k_{Q,Q_0}^{MC}) / k_{Q,Q_0}^{MC}$.

선질 $R_{50} < 2.0 \text{ g/cm}^2$ 에서 Markus 전리함에 대한 k_{Q,Q_0} 의 평가 결과를 Table 3과 같이 정리하였다.

토의 및 결론

본 연구에서는 TRS-398 프로토콜에서 제시되지 않은 PTW-Markus 전리함의 저에너지 영역($R_{50} < 2.0 \text{ g/cm}^2$)에서 선질보정인자(k_{Q,Q_0})를 구하였다. 몬테칼로 계산과 선량학적 계산을 수행하였으며 계산 결과의 검증이 어렵기 때문에 k_{Q,Q_0} 값이 알려진 선질 영역($R_{50} = 2.0 \sim 5.0 \text{ g/cm}^2$)에 대해서 동일한 방법으로 k_{Q,Q_0} 를 구하여 알려진 값과 비교하였다. 또한 기존의 TRS-398과 TG-51과 같이 수식체계가 유사한 프로토콜의 자료들을 기반으로 외삽하여 생성한 값들과도 비교하였다. 또한 마커스 전리함과 유사한 형태를 가지는 IBA-PPC-05에 대한 알려진 k_{Q,Q_0} 자료와도 비교하였다.

본 연구에서 수행한 몬테칼로 계산 및 선량학적 계산 결과는 기존의 알려진 TRS-398의 자료와 0.4% 이내로 일치하였다. 또한 TRS-398에서 제시되지 않은 선질, $R_{50} = 1.0$ 과 1.4 g/cm^2 에 대하여 몬테칼로 계산으로 구한 k_{Q,Q_0} 값은 선량학적 계산 및 자료 외삽의 방법으로 구한 값들과 -0.1% 에서 $+1.2\%$ 범위에서 차이를 보였다. 가장 높은 차이를 보인 것은 TG-51과의 비교 결과인데, 이 결과는 Andreo 등 (2001)의 연구에서 전자선에서 마커스 전리함에 대하여 TG-51과 TRS-398 프로토콜을 비교한 결과, TG-51/TRS-398 = 1.017로서, TG-51이 약 1.7% 높게 평가된 것과 유사하다.¹⁷⁾

한편, IBA-PPC-05 마커스 전리함에 대한 IBA사에서 제공하는 k_{Q,Q_0} 값들과 몬테칼로 계산 결과를 비교한 결과 $R_{50} = 2.0 \sim 5.0 \text{ g/cm}^2$ 에서 0.9%~1.4% 범위의 차이를 보였으며, $R_{50} < 2.0 \text{ g/cm}^2$ 에서는 최대 2.3% 높은 값을 보였다. 이때 TRS-398에서 자료가 제시된 $R_{50} = 2.0 \sim 5.0 \text{ g/cm}^2$ 영역의 경우에 PPC-05 전리함의 k_{Q,Q_0} 는 마찬가지로 0.8%~1.7% 높게 평가되고 있었다. PPC-05 전리함의 경우에 마커스형 전리함으로 분류되나 내부 물질의 종류와 형태가 상이한 점과 앞서(방법 및 재료) 언급한 바와 같이 가드 전극(guard electrode)이 적절하지 않은 특성들로 인해 k_{Q,Q_0} 값에 차이를 보인 것으로 본다. 이와 같이 상용의 마커스형 전리함 상호 간에서도 차이가 발생할 수 있음을 고려할 때 TRS-398 프로토콜에서 마커스 전리함에 대하여 하나의 k_{Q,Q_0} 를 제공하고 있다는 점은 향후 보완되어야 할 점이다.

이와 같은 결과들을 고려할 때 $R_{50} < 2.0 \text{ g/cm}^2$ 또는 평균 에너지 약 4 MeV 이하에서 마커스 전리함의 사용은 2% 또는 그 이상의 편차를 유발할 수 있다. 그렇지만 서론에서

언급한 바와 같이, 이러한 저에너지 전자선은 일부 수술중 방사선치료 등에서 사용되고 있지만,⁹⁾ 일반적인 방사선치료 분야보다 산업분야 또는 가속기 연구 분야에서 널리 활용되며 현재 TRS-398과 같은 선량학적 기반의 우수한 측정 프로토콜이 없기 때문에 본 연구 결과는 경우에 따라 유용할 수 있다. 향후, 다른 종류의 마커스 전리함에 대해서도 연구할 필요가 있다고 보며, 또한 전자 가속기 시설 등에서 $R_{50} < 2.0 \text{ g/cm}^2$ 에 대한 실험이 가능한 경우에 정밀한 실험을 통하여 선질보정인자를 결정하는 연구도 필요하다고 생각한다.

References

1. Khan FM: The physics of Radiation Therapy 4th ed., Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia(2010), pp. 264-314.
2. Klevenhagen SC: The physics of Electron Beam Therapy, Adam Higer Ltd. England(1985), pp. 67-88.
3. IAEA TRS-398: Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed dose to Water. Technical Report Series No. 398, Vienna, 2000
4. AAPM TG-51: AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. Med Phys 26(9):1847-1870(1999)
5. Muir BR, Rogers DWO: Monte Carlo calculations of electron beam quality conversion factors for several ion chamber types. Med Phys 41(11), 111701-15(2014)
6. Shani G: Radiation Dosimetry 2nd ed. CRC Press, Net York (2000), pp. 117-118
7. NPL Report DQL-R001: Characterisation of two new ionisation chamber types for use in reference electron dosimetry in the UK. National Physical Laboratory, United Kingdom, 2004.
8. Zink K, Wulff J: Beam quality corrections for parallel-plate ion chambers in electron reference dosimetry. Phys Med Biol 57(7): 1831-1854(2012)
9. Mihailescu D, Borcia C: Monte Carlo Simulation of the Electron Beams Produced by a Linear Accelerator for Intraoperative Radiation Therapy. Romanian Reports in Physics 66(1): pp 61-74(2014)
10. IAEA TECDOC-1386: Emerging applications of radiation processing. International Atomic Energy Agency, Vienna (2004)
11. Kim Sw, Kang SK, Rhee DJ et al.: Measurement of Electron Beam Output for the Prototype Compact Linac. Progress in Medical Physics 26(1): pp. 1-5(2015)
12. Rogers DWO, Kawrakow I, Seuntjens JP, Walters BRB, Mainegra-Hing E: NRC User Codes for EGSnrc, NRCC Report PIRS-702, National Research Council of Canada, 2005
13. PTW Freiburg: Information on PTW Markus Chambers Type 23343 and Type 34045. PTW Technical Note D273.200.0/2. Germany(2005)

14. Burns DT, Ding GX, Rogers DWO: R50 as a beam quality specifier for selecting stopping-power ratios and reference depths for electron dosimetry, Med Phys 23(3): 383-388(1996)
15. IAEA TRS-381: The use of plane parallel ionization chambers in high-energy electron and photon beams. An International code of practice for dosimetry. Technical Report Series No. 381, Vienna, 1997
16. IBA Dosimetry: P-Codes of Practice Absolute Dosimetry. IBA Dosimetry GmbH, Germany. (2012), pp. 17-22
17. Huq MS, Andreo P, Song H: Comparison of the IAEA TRS-398 and AAPM TG-51 absorbed dose to water protocols in the dosimetry of high-energy photon and electron beams. Phys Med Biol 46: 2985-3006 (2001)

전자선 선질 $R_{50}=1.0$ 과 1.4 g/cm^2 에 대한 PTW-Markus 전리함의 선질보정인자 결정에 관한 연구

동남권원자력의학원 *연구센터, [†]방사선종양학과

김미영* · 이동주* · 문영민[†] · 정동혁*

마커스 전리함은 치료용 전자선의 흡수선량 측정에 널리 사용되는 소형 평행 평판형 전리함이다. 특히 TRS-398 프로토콜에서는 $R_{50} < 4.0 \text{ g/cm}^2$ (약 10 MeV 이하)에서 평행 평판형 전리함의 사용을 권고하고 있다. 그러나 TRS-398 프로토콜에서 $R_{50} < 2.0 \text{ g/cm}^2$ (약 4 MeV 이하)에 대한 선질보정인자(k_{Q,Q_0})가 없어 낮은 에너지에 대한 선량측정이 필요한 경우에 마커스 전리함을 사용할 수 없다. 본 연구에서는 몬테칼로 계산(DOSRZnrc/EGSnrc)과 선량학적 계산을 이용하여 전자선 선질 $R_{50}=1.0, 1.4, 2.0, 2.5, 3.0, 5.0 \text{ g/cm}^2$ 에 대하여 마커스 전리함(PTW-M34045)에 대한 k_{Q,Q_0} 를 결정하였다. 본 연구에서는 결정된 k_{Q,Q_0} 에 대해 TRS-398 및 TG-51 프로토콜의 자료와 알려진 자료들을 이용하여 평가하였다.

중심단어: 마커스 전리함, 선질보정인자, 전자선 측정