

몬테칼로 계산을 이용한 평판형 전리함의 고에너지 전자선에 대한 선질보정인자 결정

— Determination of Quality Correction Factors for a Plane-Parallel Chamber in High Energy Electron Beams using Monte Carlo Calculation —

원광대학병원 방사선종양학과 · 원광보건대학 방사선과¹⁾

정동혁 · 이정옥¹⁾

— 국문초록 —

국제원자력기구의 TRS-398 측정 프로토콜을 임상에 적용하기 위해서는 사용하는 빔과 전리함에 대한 선질 보정인자가 필요하다. 본 연구에서는 몬테칼로 계산코드(DOSRZnrc/EGSnrc)를 사용하여 상용 평판형 전리함에 대한 고에너지 전자선(4~20 MeV)에서의 선질보정인자를 계산하였다. 계산결과를 프로토콜에서 제시하는 값과 비교한 결과 5~20 MeV에서 약 1% 이내로 일치하였으며 4 MeV의 경우에는 약 1.9% 차이를 보였다. 본 연구 방법은 선질보정인자를 독립적으로 결정하는 방법의 하나로서 프로토콜에서 주어진 값들의 확인이 필요하거나 또는 새로운 모델의 전리함을 사용하는 경우에 응용될 수 있다.

중심 단어 : 선질보정인자, 전자선 측정, 몬테칼로 계산

I. 서 론

방사선치료에서 치료 장치에 대한 출력을 정확하게 평가하는 것은 정도관리에 있어 필수 요소이며, 방사선 사고의 방지는 물론 치료성적의 향상에 있어서도 매우 중요하다. 장치의 출력은 일반적으로 물속 기준 깊이에서 일정 시간 동안 조사된 선원에 대한 흡수선량으로 주어진다. 대부분의 방사선치료 기관에서는 IAEA(국제원자력기구)나 AAPM(미국의학물리학회)과 같은 국제적 전문기관에서 발행한 측정 프로토콜을 적용하여 흡수선량을 평가

하고 장비의 출력교정에 반영하고 있다¹⁻⁴⁾. 이러한 측정 프로토콜은 불확정성을 최소화하면서 임상적 적용에 있어 보다 쉽게 흡수선량을 결정할 수 있는 방향으로 지속적으로 보완되어 왔다¹⁻⁴⁾. 최근 발표된 IAEA의 TRS-398 (Technical Report Series No. 398, 2000) 프로토콜³⁾의 경우에 Co-60 감마선에 대한 전리함의 물흡수선량교정계수(Calibration factor in terms of absorbed dose to water)와 전리함과 측정 선질(Beam quality)에 의존하는 선질보정인자(Quality correction factor) 만으로 흡수선량을 쉽게 결정할 수 있다. 그렇지만 이러한 프로토콜의 임상적 적용에 있어서 문제가 되는 점들 중의 하나는 보유했던 전리함에 대한 선질보정인자가 프로토콜에 명시되어 있지 않은 경우에는 그 전리함의 사용이 어렵다는 것이다. 예를 들어, TRS-398의 전자선 측정의 경우에 몇 가지 상용 전리함에 대한 선질보정인자가 수록되어 있으나 새로운 모델의 전리함을 구입하거나 또는 새로운 형태의 전리함을 개발하는 경우에는 이 프로토콜을 직접 적용할

* 이 논문은 2007년 12월 18일 접수되어 2008년 3월 5일 채택 됨.
- 이 연구는 2007학년도 원광보건대학 교내연구비 지원에 의해 수행되었음.
책임저자: 이정옥, (570-750) 전라북도 익산시 신용동 344-2
원광보건대학 방사선과
TEL : 063-840-1232, FAX : 063-840-1239
E-mail : jolee@wkhc.ac.kr

수 없다. 따라서 특정 전리함에 대한 선질보정인자를 독립적으로 구하기 위한 연구가 필요하며 이를 통하여 보다 다양한 전리함에 대하여 측정 프로토콜을 적용할 수 있다. 물론 TRS-398에는 선질보정인자에 대한 수학적 정의가 명시되어 있으나, 전리함의 구조나 물질에 의존하는 인자들이 충분히 알려져 있지 않은 경우가 많기 때문에 직접 계산하는 것은 어렵다. 이러한 배경과 함께 본 연구에서는 전자선 측정에 널리 사용하는 상용의 평판형 전리함(PPC-40, Scanditronix-wellhofer, Germany)에 대하여 몬테칼로 계산을 이용하여 선질보정인자를 구하였다. 몬테칼로 계산은 사전에 설정된 기하학적 구조 속에서 다수의 방사선 입자들에 대한 미시적 상호작용들을 계산하고 이를 통하여 관심의 물리량을 얻는 통계적 계산법으로서 방사선분야에서 주요 연구 도구로서 널리 활용되고 있다.

다음의 방법 및 재료에서는 선질보정인자의 수학적 정의와 몬테칼로 계산을 통하여 이를 결정하기 위한 과정을 기술하였으며, 결과 및 결론에서는 선질보정인자의 최종 계산결과를 관련 계산값들과 함께 제시하고 오차의 평가와 본 연구의 응용방안 등을 논의하였다.

II. 방법 및 재료

TRS-398 프로토콜에 의하면 물속 깊이 z_{ref} 에서의 흡수선량은 다음과 같다³⁾.

$$D = MN_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 M 은 전기계로 측정된 전리함 공동의 전하, N_{D,w,Q_0} 는 전리함의 물흡수선량교정계수, 그리고 k_{Q,Q_0} 는 선질보정인자이다. 위 식에서 하첨자 Q_0 는 기준 선질 즉, Co-60 감마선을 의미한다. 여기서 선질보정인자 k_{Q,Q_0} 는 개념적으로 다음과 같이 정의된다.

$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $N_{D,w,Q}$ 는 측정 선질 Q 에 대한 물흡수선량교정계수이다. 따라서 k_{Q,Q_0} 의 개념적 정의는 기준선질 Q_0 에 대한 N_{D,w,Q_0} 를 측정선질 Q 에 대한 $N_{D,w,Q}$ 로 변환시키는 역할을 하는 인자이다. 이 때 기준선원에 대한 N_{D,w,Q_0} 는 물속 기준 깊이에서 흡수선량과 그 위치에 전리함을 삽입했을 경우에 측정되는 공동의 전하로부터,

$$N_{D,w,Q_0} = \frac{D_{w,Q_0}}{M_{Q_0}} \dots\dots\dots (3)$$

와 같이 결정되므로, 이에 따라 위식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_{Q,Q_0} = \frac{(D_{w,Q}/M_Q)}{(D_{w,Q_0}/M_{Q_0})} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $D_{w,Q}$ 와 D_{w,Q_0} 는 측정선질 Q 와 Q_0 에 대한 물속 기준깊이의 흡수선량이며, M_Q 와 M_{Q_0} 는 각 선질에 대한 전리함 공동의 전하이다. 공동의 전하는 공동의 흡수선량이 주어지는 경우에 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_Q = D_{cav,Q} \cdot \frac{1}{(W/e)} \cdot (\rho V)_{cav} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 $D_{cav,Q}$ 는 선질 Q 에 대한 공동의 흡수선량, $(\rho V)_{cav}$ 는 공기의 밀도와 공동의 체적의 곱으로서 공동의 질량과 같다. 또한 (W/e) 는 단위 이온쌍 생성에 필요한 에너지로서 공기의 경우에 선질에 거의 의존하지 않으며 TRS-398에서는 전자선 및 광자선에 대하여 동일하게 $W/e = 33.97 \text{ J/C}$ 를 적용한다. 따라서 (4)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_{Q,Q_0} = \frac{D_{w,Q}}{D_{w,Q_0}} \frac{D_{cav,Q_0}}{D_{cav,Q}} \dots\dots\dots (6)$$

본 연구에서는 몬테칼로 계산을 이용하여 (6)식의 값들을 계산하고 k_{Q,Q_0} 를 결정하였다. 이 관계식은 광자선과 전자선에 적용할 수 있으나 본 연구에서는 방사선치료 영역의 고에너지 전자선에 대하여 적용하였다. Fig. 1에 k_{Q,Q_0} 결정을 위해 필요한 인자들의 정의를 기하학적 구조와 함께 나타냈다.

이 그림에서 z_c 는 Q_0 에 대한 전리함의 교정 기준 깊이로서 $z_c = 5 \text{ g/cm}^2$ 와 같으며, z_{ref} 는 TRS-398에서 권고하는 선질 Q 에 대한 측정 깊이이다. 본 연구에서 z_{ref} 는 TRS-398에 명시된 깊이로서 다음과 같다.

$$z_{ref} = 0.6R_{50} - 0.1 \dots\dots\dots (7)$$

이 때 R_{50} 은 흡수선량이 최대선량의 50%를 가지는 물속 깊이이다. 본 연구에서는 먼저 각 선질에 따른 깊이선량률을 몬테칼로 계산으로 계산하고 이를 통하여 R_{50} 을

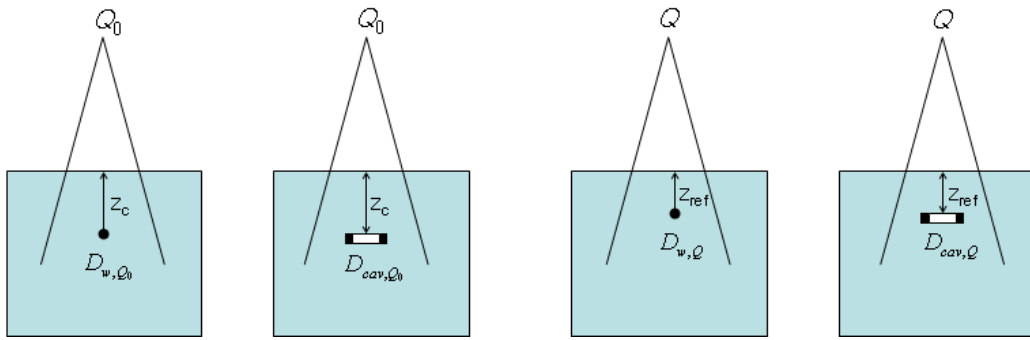


Fig. 1. Calculation geometry for determining the quality correction factor in TRS-398 protocol for a radiation quality Q

결정하였다. 이 때 대상 선질은 4, 5, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 20 MeV로서 대부분 방사선치료에 사용되는 범위이다. 몬테칼로 계산에서 이들 에너지는 팬텀 표면에 입사하는 전자의 에너지와 같다.

본 연구에서 대상 전리함은 앞서 언급한 바와 같이 전자선 측정에 널리 사용되는 PPC-40 모델(Scanditronix-wellhofer, Germany)의 평판형 전리함이다. PPC-40 전리함은 Roos형 전리함으로서 PMMA(Polymethyl methacrylate) 재료를 사용하며 흑연(graphite)으로 도포된 전극을 사용한다. PPC-40에 대한 선질보정인자는 TRS-398에서 Roos형 전리함과 같으므로⁵⁾ 본 연구의 결과를 TRS-398에 제시된 값과 직접 비교할 수 있다.

본 연구에서 사용한 몬테칼로 계산코드는 캐나다의 NRCC(National Research Council of Canada) 연구소에서 최근 발표한 DOSRZnrc/EGSnrc⁶⁾를 사용하였다. 이 코드는 원통형 기하학적 구조에서 계산하도록 되어 있는데, 본 연구에서와 같이 평판형 전리함과 같은 원통 형태의 장치를 모델링하기에 매우 적합하다. 참고로 DOSRZnrc/EGSnrc 코드에서 몬테칼로 계산을 위한 주 코드(main code)는 EGSnrc⁷⁾인데, 이 코드는 미국 스텐포드 가속기 연구소(SLAC)에서 개발한 EGS4(Electron Gamma Shower 4)⁸⁾를 캐나다 NRCC 연구소에서 더욱 보완하고 발전시킨 것이다.

몬테칼로 계산에서 물과 공동의 흡수선량을 계산하기 위한 입자 히스토리는 Co-60 감마선의 경우에 각각 2×10^8 과 5×10^8 , 전자선의 경우에 각각 5×10^6 과 10^7 을 입력하였다. 공동 흡수선량의 계산에서 높은 히스토리가 필요한 이유는 공동내 상호작용의 발생이 물보다 적기 때문에 평균값의 통계적 요동을 줄이기 위함이다. 이와 같은 히스토리 조건에서 (6)식의 계산에 필요한 인자의 통

계적 불확정성은 $\pm 0.5\%$ 이하를 가진다.

본 논문의 결과에서는 먼저 각 선질에 따른 깊이선량을 곡선과 이로부터 결정된 R_{50} 과 z_{ref} 값들을 나타내었으며, 이어서 Fig. 1의 기하학적 구조를 적용하여 계산한 (6)식의 인자들과 이로부터 결정된 k_{Q,Q_0} 를 나타냈다.

III. 결 과

Fig. 2는 대상 전자선 에너지들에 대한 깊이선량률 곡선을 보여준다. 각 곡선은 최대선량에 대하여 100%로 규격화하여 나타낸 것이다. 이 그래프에서 점선은 깊이선량이 50%인 위치를 의미하며 점선과 각 곡선이 만나는 지점의 깊이가 R_{50} 과 같다. 그래프로부터 결정한 R_{50} 과 (7)식으로 주어지는 z_{ref} 를 Table 1에 나타냈다. 앞서 언급하

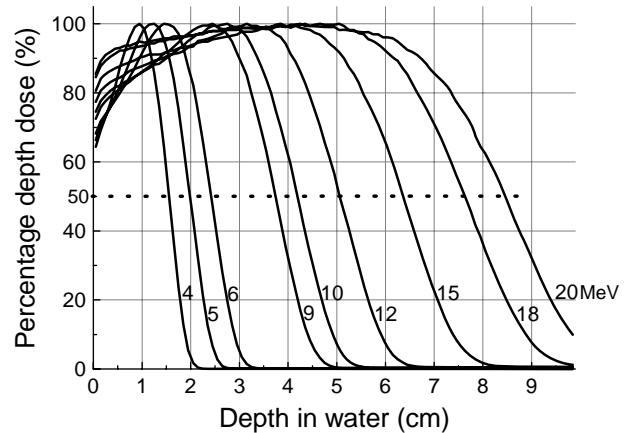


Fig. 2. Percentage depth dose curves calculated with Monte Carlo code for electron beam qualities in this study

였듯이 z_{ref} 는 선질에 의존하는 측정 기준깊이로서 몬테칼로 계산에서도 측정과 동일하게 적용되었다. Table 2에는

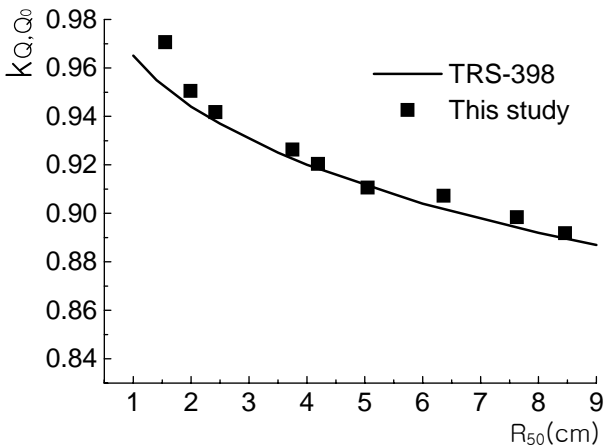


Fig. 3. Comparison of quality correction factors in TRS-398 and this study

Table 1. Estimated R_{50} and z_{ref} from depth dose curves in this study

Energy(MeV)	R_{50} (cm)	z_{ref} (cm)
4	1.55	0.83
5	1.99	1.09
6	2.42	1.35
9	3.75	2.15
10	4.19	2.41
12	5.05	2.93
15	6.36	3.72
18	7.63	4.48
20	8.46	4.98
Co-60	$z_c = 5$ cm	

Fig. 1에서 적용된 기하학적 구조에 대한 몬테칼로 계산의 결과와 이를 통하여 결정된 선질보정인자를 나타냈다. 또한 Fig. 3에는 본 연구에서 결정한 선질보정인자와 TRS-398 프로토콜에 제시된 선질보정인자와 비교한 결과이다. 동일한 전리함에 대한 두 결과는 $R_{50} = 1.55$ cm(4 MeV)의 경우 1.9% 차이를 보인 것을 제외하고는 대상 선질범위에서 1% 이내로 일치함을 알 수 있다.

IV. 결 론

새로운 선량측정 프로토콜인 TRS-398은 정확하면서 간결한 측정기준이지만 선질보정인자가 알려지지 않은 경우에는 프로토콜의 적용이 어렵다. 이에 본 연구에서는 몬테칼로 계산을 이용하여 평판형 전리함의 선질보정인자를 독립적으로 계산하고 TRS-398에 제시된 값과 비교하여 보았다. 계산결과 5~20 MeV 범위에서 1% 이내로 일치하였으며 4 MeV의 경우에도 1.9%의 차이를 보였다. 4 MeV의 경우에 다른 에너지들과 동일한 히스토리 조건에서 얻어진 결과이므로 현재 차이의 원인을 정확히 분석하기 어렵다. 또한 TRS-398에서는 선질보정인자 유도과정의 복잡성과 자료의 부족 등으로 인하여 평판형전리함에 대한 불확정도를 $\pm 1.7\%$ 로 평가하고 있는 점으로 미루어 정확한 분석에도 한계가 있을 것으로 생각한다. 따라서 비록 단편적 결과이지만, 본 연구의 방법을 취하여 선질보정인자를 구할 경우에 4 MeV 이상의 에너지에서 TRS-398에 근접하는 값을 얻을 수 있다고 결론을 내리고자 한다. 물

Table 2. Dose parameters, quality correction factors and percentage difference between Monte Carlo calculation and TRS-398 protocol

Energy(MeV)	$D_{W,Q}$ (Gy/fluence)	$D_{cav,Q}$ (Gy/fluence)	k_{Q,Q_0}^{MC}	$k_{Q,Q_0}^{TRS-398}$	Diff. (%)
Co-60	4.138×10^{-12}	3.633×10^{-12}	1.000	1.000	-
4	4.410×10^{-10}	3.989×10^{-10}	0.9706	0.9523	1.9
5	4.231×10^{-10}	3.908×10^{-10}	0.9505	0.9442	0.7
6	4.132×10^{-10}	3.852×10^{-10}	0.9418	0.9381	0.4
9	3.833×10^{-10}	3.633×10^{-10}	0.9263	0.9225	0.4
10	3.777×10^{-10}	3.603×10^{-10}	0.9204	0.9185	0.2
12	3.631×10^{-10}	3.501×10^{-10}	0.9106	0.9116	-0.1
15	3.498×10^{-10}	3.385×10^{-10}	0.9073	0.9011	0.7
18	3.348×10^{-10}	3.272×10^{-10}	0.8984	0.8924	0.7

20	3.284×10^{-10}	3.233×10^{-10}	0.8918	0.8897	0.2
----	-------------------------	-------------------------	--------	--------	-----

본 다른 평판형 전리함이나 원통형 전리함에 대해서도 본 계산이 타당한지의 여부를 확인할 필요가 있다고 생각하며 추후에 시도해 볼 계획이다. 이를 통하여 계산결과의 정확성이 확인된다면 본 연구 방법은 알려진 선질보정인자의 객관적 확인이 필요하거나 새로운 모델의 전리함을 구입한 경우 또는 전리함을 개발하는 경우에 적용할 수 있을 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

1. IAEA: Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams: An International Code of Practice. Technical Report Series No. 277. 2nd ed, Vienna, 1997
2. IAEA: 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
3. IAEA: 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. Radiation Therapy Committee Task Group No. 51: Protocol for Clinical Dosimetry of High-Energy Photon and Electron Beams. AAPM Report 67: Med Phys, 26, 1847-1870, 1999
5. IAEA: Implementation of the International Code of Practice on Dosimetry in Radiotherapy(TRS-398): Review of testing results, IAEA-TECDOC-1455, Vienna, 2005
6. 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
7. Kawrakow I, Rogers DWO: The EGSnrc Code

• Abstract

Determination of Quality Correction Factors for a Plane-Parallel Chamber in High Energy Electron Beams using Monte Carlo Calculation

Dong-Hyeok Jeong · Jeong-Ok Lee¹⁾

Department of Radiation Oncology, Wonkwang University Hospital

¹⁾*Department of Radiotechnology, Wonkwang Health Science College*

The quality correction factor for used beam and qualities is strongly required for clinical dosimetry by TRS-398 protocol of IAEA. In this study the quality correction factors for a commercial plane-parallel ionization chamber in high energy electron beams were calculated by Monte Carlo code(DOSRZnrc/EGSnrc). In comparison of quality correction factor, the difference between this study and TRS-398 were within 1% in 5-20 MeV. In case of 4 MeV the difference was 1.9%. As an independent method of determination of quality correction factor this study can be applied to evaluate values in the protocol or calculate the factor for a new chamber.

Key Words : Quality Correction Factor, Electron Dosimetry, Monte Carlo

System, NRCC Report PIRS-701, National Research Council of Canada, 2006

8. SLAC: The EGS4 Code System, Stanford Linear Accelerator Center Report-265, 1985