

□ 기술 보고서 □

고에너지 광자선에 대한 TRS-398 선질보정인자의 직접 계산

원광대학교병원, *단국대학교병원, †울지대학교병원, ‡동아대학교병원,
§전북대학교병원, ||충남대학교병원 방사선종양학과

정동혁 · 신고철* · 오영기† · 김정기† · 김진기§ · 김기환||

IAEA TRS-398 프로토콜의 임상적 적용을 위하여 고에너지 광자선에 대한 선질보정인자를 직접 계산으로 결정하였다. 본 계산은 상용의 원통형 전리함 모델 7종(A12, IC70, N23333, N30001, N30006, NE2571, PR06C/G)에 대하여 수행되었다. 본 계산결과와 TRS-398의 자료를 비교할 때 대부분의 전리함 및 선질에서 ±0.3% 이내(최대 ±0.4%)로 일치하였다.

중심단어: TRS-398 프로토콜, 선질보정인자, 광자선 측정

서 론

최근 IAEA의 TRS-398 (2000)¹⁾ 및 AAPM의 TG-51 (1999)²⁾의 발표와 함께 물흡수선량에 기반한 새로운 측정법에 대한 관심이 증가되고 있다. 아울러 한국식품의약품안전청에서도 현재 Co-60 감마선에 대한 물흡수선량의 교정체계를 마련하고 있어서 국내에서도 새로운 측정법을 쉽게 적용할 수 있게 되었다. TRS-398은 지금까지 사용되어 왔던 TRS-277 (1987)³⁾의 새로운 버전으로서, 다양한 전리함에 대하여 다루고 있으며 광자선의 선질변수를 종전과 같은 $TPR_{20,10}$ 으로 명시하기 때문에, 각 기관에서 기존의 측정법을 변경하는 경우에 대부분 이 프로토콜을 채택할 것으로 예상된다. TRS-398을 적용하는 사용자는 전리함의 물흡수선량교정계수(N_{D,w,Q_0})와 선질보정인자(quality correction factor; k_{Q,Q_0})만을 사용하여 물속 기준점의 흡수선량을 쉽게 결정할 수 있다. 이때 k_{Q,Q_0} 는 사용자가 결정해야 하는 보정인자로서 가장 중요한 인자로 인식된다. k_{Q,Q_0} 는 기준선질과 사용자의 선질의 차이를 보정하는 인자인데 수학적으로는 복잡한 형태를 가진다. TRS-398 프로토콜에서는

k_{Q,Q_0} 의 결정과정에 적용된 각 인자들에 대하여 비교적 자세히 설명하고 있으나 계산과정에 적용된 상세한 수치 자료는 제시하지 않고 있다. 따라서 각 기관에서 TRS-398을 도입하는 경우에 사용하는 전리함과 선질에 의존하는 k_{Q,Q_0} 에 대하여 객관적 평가를 수행하는 것이 타당하다. 이에 본 연구에서는 국내에 널리 사용되는 7종의 상용 전리함에 대하여 TRS-398에서 제시한 수학적 체계를 준수하면서, 각각의 인자들을 적용하여 직접 계산의 방법으로 고에너지 광자선에 대한 k_{Q,Q_0} 를 구하였다. 이 절차는 단지 TRS-398에서 제시된 값을 재확인하는 차원으로 생각할 수 있으나, 새로운 전리함을 개발하거나 프로토콜에 제시되지 않은 새로운 전리함을 구입하는 경우에 또는 학회차원에서 표준 측정법을 개발하는 경우에 필요한 과정이라고도 할 수 있다.

본 보고서에서는 계산에 사용된 수치를 모두 상세히 제시하여 임상 의학물리학자 또는 측정 실무자들이 쉽게 참고하고 토의할 수 있도록 하였다. 본 계산에서는 대부분 TRS-398에 제시된 수식과 자료를 사용하였는데, 이때 자료가 부족하거나 획득이 어려운 경우에는 TRS-277의 자료를 사용하였으며 일부자료는 주관적 해석으로 결정하였다. 따라서 새로운 전리함에 대한 계산을 수행하거나 또는 프로토콜을 연구 개발하는 경우에는 각 자료들의 적용에 대한 보다 상세한 검토가 요구된다. 아울러 독자들 중에서 연구의 목적으로 본 보고서에서 다루지 않은 전리함에 대한 k_{Q,Q_0} 의 계산결과가 필요한 경우에는 한국의학물리학회 를 통하여 본 보고서의 저자들에게 요청할 수 있다.

본 보고서는 한국의학물리학회 지원에 의하여 작성되었음. 한국식품의약품안전청의 자료를 일부 참조하였음.

이 논문은 2006년 1월 2일 접수하여 2006년 3월 15일 채택되었음.

책임저자: 정동혁, (570-711) 전북 익산시 신용동 344-2

원광대학교병원 방사선종양학과

Tel: 063)850-1526, Fax: 063)850-1528

E-mail: physics@wmc.wonkwang.ac.kr

대상 및 계산방법

본 계산에 적용된 전리함의 목록은 Table 1과 같다. 대상 전리함들은 상용의 원통형전리함들로서 국내의 많은 기관에서 기준 전리함으로 사용되고 있다. 이 표에서 전리함 구성물질에 대한 자료들은 TRS-398 원문에서 취해졌다. 다음은 k_{Q,Q_0} 를 정의와 함께 각 인자들에 대하여 설명하고 본 계산에 적용된 수치자료들에 대하여 제시한다.

k_{Q,Q_0} 는 기준선질과 사용자 선질의 차이를 보정하는 인자로서 다음과 같이 정의된다.¹⁾

$$k_{Q,Q_0} = \frac{[(W/e) s_{w,air} p_{cav} p_{dis} p_{wall} p_{cel}]_Q}{[(W/e) s_{w,air} p_{cav} p_{dis} p_{wall} p_{cel}]_{Q_0}} \quad (1)$$

여기서,

W/e : 공기 중에서 이온쌍 생성에 소요된 에너지

$s_{w,air}$: 물과 공기의 제한적 질량저지능의 비

p_{cav} : 전리함 공동에서 전자의 산란이 물과 다른 점을 보정하는 인자

p_{dis} : 기준 측정점이 공동의 중심으로 정의됨에 따라 유효 측정점의 차이를 보정

p_{wall} : 전리함의 벽과 방수슬리브가 물과 다른 것을 보정

p_{cel} : 중심전극에 의한 반응의 차이를 보정한다.

위 식에서 분모는 Co-60 감마선에 대한 항이고 분자는 임의의 광자선 선질에 대한 항이다. 위 식에서 W/e 는 대부분의 광자선 선질에서 $W/e=33.97$ J/C로서 일정하며, p_{cav} 는 측정깊이에서 전자평형이 만족되는 경우에 $p_{cav}=1$ 로 취할 수 있다. 따라서 k_{Q,Q_0} 는 근사적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

Table 1. Cylindrical ionization chambers used in this calculation.¹⁾

Chamber model	Cavity radius (cm)	Wall		Central electrode material
		Material	Thickness (g/cm ²)	
Exradin A12	0.31	C-552	0.088	C-552
Wellhöfer IC70	0.31	Graphite	0.068	Aluminium
PTW N23333	0.31	PMMA	0.053	Aluminium
PTW N30001	0.31	PMMA	0.045	Aluminium
PTW N30006	0.31	PMMA	0.057	Aluminium
NE 2571	0.31	Graphite	0.065	Aluminium
Capintec PR06C/G	0.32	C-552	0.050	C-552

$$k_{Q,Q_0} \approx \frac{[s_{w,air} p_{dis} p_{wall} p_{cel}]_Q}{[s_{w,air} p_{dis} p_{wall} p_{cel}]_{Q_0}} \quad (2)$$

본 계산에서는 이 식에 각 인자들을 직접 대입하여 k_{Q,Q_0} 를 결정하였다. 본 계산에 사용된 각 인자들에 대하여 설명하면 다음과 같다.

$s_{w,air}$ 의 경우에 TRS-398에서는 ICRU-37⁴⁾의 저지능 자료를 사용한 Andreo의 계산결과⁵⁾를 사용하였다고 제시하고 있는데, 본 계산에서는 실용적 측면에서 Andreo가 제안한 다음과 같은 다항식⁶⁾을 사용하였다.

$$s_{w,air}=1.3614-1.2963Q+2.5302Q^2+1.6896Q^3 \quad (3)$$

여기서 Q 는 $TPR_{20,10}$ 과 같다. 이 식으로 계산한 결과는 원래 자료와 $\pm 0.15\%$ 로 일치하며 Medina 등⁷⁾의 연구에서도 사용된 바 있다. 이때 TRS-398의 저지능 자료는 TRS-277의 자료와 거의 차이가 없음이 Andreo 등⁸⁾ 그리고 Araki와 Kubo⁹⁾에 의하여 논의된 바 있다. Andreo 등⁸⁾은 저지능 자료에 있어서 고에너지 영역에서 두 프로토콜 간의 약간의 차이를 보이고 있다고 언급한 바 있는데, 본 연구에서 조사한 결과 $TPR_{20,10}=0.76$ (약 15 MV) 이상의 선질에서 TRS-277의 자료보다 약 0.2~0.3% 낮은 것으로 나타났다.

p_{dis} 는 Johansson 등^{10,11)}의 측정으로부터 구해진 다음 식을 사용하였다.

$$p_{dis}=1-\delta \gamma_{cyl} \quad (4)$$

여기서 γ_{cyl} 은 mm 단위의 공동의 반경이며 δ 는 선질의 함수이다. δ 에 관한 Johansson의 자료^{10,11)}는 선질변수를 MV로 취하고 있으므로, 본 계산에서는 Johansson의 자료에 기초하면서 선질변수를 $TPR_{20,10}$ 로 변환한 TRS-277 (전산작업지)의 자료를 사용하였다. 그러나 이 자료에는 $TPR_{20,10}$ 이 0.57 이하인 경우와 0.80 이상인 경우에 δ 값이 주어지지 않으므로 본 계산에서는 두 경우에 대하여 각각 δ 가 일정한 것으로 가정하였다. Table 2에 본 계산에서 사용한 δ 를 제시하였다.

p_{wall} 은 다음과 같이 주어진다¹⁾.

$$p_{wall} = \frac{\alpha s_{wall,air} (\mu_{en}/\rho)_{wall}^w + \tau s_{sleeve,air} (\mu_{en}/\rho)_{sleeve}^w + (1-\alpha-\tau) s_{w,air}}{s_{w,air}} \quad (5)$$

Table 2. δ as a function of photon beam quality for calculation of displacement correction factor.^{3,11)}

Quality ($TPR_{20,10}$)	Co-60	≤ 0.57	0.67	0.73	$0.80 \leq$
δ	0.004	0.004	0.0031	0.0024	0.0025

Table 3. Stopping power ratio and energy absorption coefficient for wall corrections, where $s_{w,air}$ is calculated with Andreo's formula,⁶⁾ other data are taken from a TRS-277 protocol.³⁾

$TPR_{20,10}$	Water $\rho = 1.00 \text{ g/cm}^3$	C-552 $\rho = 1.76 \text{ g/cm}^3$		Graphite $\rho = 1.69 \text{ g/cm}^3$		PMMA $\rho = 1.19 \text{ g/cm}^3$	
	$S_{w,air}$	$S_{med,air}$	$(\mu_{en}/\rho)_{med}^w$	$S_{med,air}$	$(\mu_{en}/\rho)_{med}^w$	$S_{med,air}$	$(\mu_{en}/\rho)_{med}^w$
0.50	1.135	0.997	1.110	1.008	1.114	1.105	1.031
0.53	1.134	0.997	1.110	1.007	1.114	1.104	1.031
0.56	1.132	0.995	1.110	1.003	1.113	1.102	1.030
0.59	1.130	0.992	1.110	1.000	1.113	1.099	1.030
0.62	1.128	0.990	1.110	0.996	1.113	1.096	1.031
0.65	1.124	0.986	1.110	0.992	1.114	1.091	1.031
0.68	1.119	0.983	1.109	0.987	1.115	1.087	1.032
0.70	1.114	0.980	1.108	0.984	1.115	1.084	1.033
0.72	1.109	0.976	1.107	0.979	1.117	1.079	1.035
0.74	1.103	0.970	1.105	0.973	1.119	1.073	1.038
0.76	1.096	0.964	1.103	0.967	1.121	1.066	1.041
0.78	1.088	0.956	1.100	0.959	1.125	1.057	1.045
0.80	1.079	0.948	1.096	0.950	1.130	1.047	1.051
0.82	1.068	0.939	1.093	0.941	1.134	1.037	1.056
0.84	1.056	0.929	1.089	0.932	1.139	1.027	1.062
Co-60	1.133	0.995	1.110	1.002	1.113	1.102	1.030

여기서,

- α : 공동에 수집된 전하 중 전리함벽으로부터 발생한 비율
- τ : 공동에 수집된 전하 중 방수슬리브로부터 발생한 비율
- $S_{w,air}$: 물과 공기의 질량저지능의 비
- $S_{wall,air}$: 전리함벽 물질과 공기의 질량저지능의 비
- $(\mu_{en}/\rho)_{wall}^w$: 물과 전리함벽 물질의 질량에너지흡수계수의 비
- $(\mu_{en}/\rho)_{steeve}^w$: 물과 방수슬리브 물질의 질량에너지흡수계수의 비이다.

이 식의 계산에 사용된 물질에 대한 자료는 Table 3과 같다. 이 표에서 $S_{w,air}$ 는 (3)식으로 계산한 값이며, $S_{med,air}$ 와 $(\mu_{en}/\rho)_{med}^w$ 는 각각 Andreo¹²⁾와 Cunningham²⁾에 의하여 보고된 값으로서 이 두 자료는 TRS-277에서 사용한 자료와 동일하다. TRS-398에서는 $(\mu_{en}/\rho)_{med}^w$ 의 경우에 TRS-277의 자료 그리고 $S_{med,air}$ 의 경우에 Andreo⁵⁾가 계산한 자료를 적용하였다고 언급하고 있다. 따라서 p_{wall} 의 계산에 적용된 $S_{med,air}$ 에 있어서 본 계산과 TRS-398과 차이가 있으나 앞에서 논의한 바와 같이 저지능 자료의 차이로 인한 영향은 극히 적을 것으로 생각한다.

TRS-398에서는 Co-60 감마선에 대하여 α 와 τ 를 다음과 같이 결정한다.¹⁾

$$\alpha = (1 - e^{-11.88t_w}) \tag{6}$$

$$\tau = e^{-11.88t_w}(1 - e^{-11.88t_s}) \tag{7}$$

Table 4. Fraction of electrons originating in chamber wall.^{3,13)}

$TPR_{20,10}$	Thickness (g/cm^2)				
	0.04	0.1	0.2	0.4	0.55
0.500	0.449	0.698	0.886	0.992	1.000
0.640	0.280	0.535	0.690	0.870	0.945
0.665	0.240	0.430	0.595	0.752	0.845
0.690	0.210	0.360	0.530	0.680	0.780
0.706	0.195	0.320	0.475	0.630	0.730
0.722	0.180	0.295	0.440	0.600	0.690
0.743	0.160	0.260	0.390	0.540	0.630
0.796	0.120	0.190	0.300	0.430	0.520
0.810	0.110	0.170	0.260	0.390	0.470
0.825	0.105	0.160	0.240	0.360	0.440
0.840	0.100	0.150	0.230	0.340	0.420

여기서 t_w 와 t_s 는 g/cm^2 단위의 전리함벽과 방수슬리브의 두께이다. 본 계산에서도 이와 동일한 식을 사용하였으며, 이때 방수슬리브는 TRS-398에서 가정한 것과 같이 0.5 mm의 PMMA 즉, $t_w=0.0595 \text{ g/cm}^2$ 를 적용하였다.

TRS-398에서 Co-60 이외의 광자선 선질에 대한 α 값은 Lempert 등¹³⁾의 연구결과에 기초한 자료를 사용하였다고 언급하고 있으므로, 본 계산에서도 Lempert 등의 자료를 수치로 나타낸 TRS-277 (전산작업지)³⁾의 값을 사용하였다.

본 계산에 사용된 α 값들을 Table 4에 제시하였다. τ 에 대하여 TRS-398에서는 특별한 언급이 없으나, 본 계산에서는 방수슬리브의 효과를 연구했던 Hanson과 Tinoco¹⁴⁾의 표현을 이용하여 다음과 같이 τ 를 결정하였다.

$$\tau = \alpha_{tor} - \alpha \quad (8)$$

여기서 α_{tor} 는 전리함벽과 방수슬리브의 두께를 합한 전체 두께에 대한 공동의 전리비이다. 본 계산에서는 Table 4의 자료로부터 먼저 α_{tor} 를 구하고 (8)식을 사용하여 τ 를 구하였다.

p_{cel} 의 경우에 TRS-398에서는 Ma와 Nahum¹⁵⁾의 연구를 인용하면서, 직경 1 mm인 알루미늄 중심전극인 경우에 Co-60 감마선에서 0.7% 그리고 $TPR_{20,10}=0.58$ 과 0.80인 광자선 선질에서 각각 0.75%와 0.43%의 반응의 증가가 있음을 언급하고, 각 선질범위에서 p_{cel} 의 선형적 변화를 가정하고 p_{cel} 을 결정하였다고 진술하고 있다. 따라서 본 계산에서도 이와 유사한 방법으로 알루미늄 중심전극을 사용하는 전리함에 대하여, Co-60의 경우에 $p_{cel}=0.993$ 을 적용하고, 다른 광자선 선질의 경우에 다음과 같이 p_{cel} 을 결정하였다.

$$p_{cel} = 0.9926 + \frac{0.9957 - 0.9926}{0.80 - 0.58} (TPR_{20,10} - 0.58) \quad (9)$$

이때 중심전극이 플라스틱(C-552 등)나 흑연(Graphite)인 전리함의 경우에 $p_{cel}=1$ 로 취하였다.

본 계산에서는 이와 같은 방법으로 k_{Q,Q_0} 를 구하였는데, 일괄적 수치계산을 위하여 포트란 프로그램을 사용하였다. 이때 수치만으로 주어진 값들의 연산에서는 대부분 선형내삽을 취하였으며 단지 두께의 함수로 α 와 τ 를 결정하는 연산에서는 지수함수적 내삽을 취하였다. 이는 Lempert 등¹³⁾의 연구에서 10 MV 이하의 선질에서 두께에 따라 α 값이 다소 지수함수적 증가 형태를 가지기 때문이

다. 물론 $x \ll 1$ 인 경우에 $e^x \approx 1+x$ 이며, 본 계산에서 x 가 0.05~0.15인 점으로 미루어 모든 선질에서 선형내삽과의 차이는 적을 것이다.

결 과

결과에서는 먼저 k_{Q,Q_0} 결정의 기초자료로서 본 계산을 통하여 구한 Co-60 기준선원에 대한 계산 결과를 제시하였으며, 다음에 모든 선질에 대하여 계산에 적용된 인자들을 제시하고 최종적으로 k_{Q,Q_0} 의 계산결과를 제시하였다. 이때 Co-60에 대한 계산결과와 k_{Q,Q_0} 의 계산결과는 TRS-398에 주어져 있으므로, 각 계산의 결과를 이와 비교하도록 하였다.

Table 5는 Co-60 기준선원에 대하여 계산한 p_{dis} , p_{wall} , p_{cel} , $S_{w,air}P_Q$ 의 결과를 보여준다. 여기서 $P_Q = p_{cav}p_{dis}p_{wall}p_{cel}$ 이다. 이 표에서와 같이 본 계산의 결과는 모든 대상 전리함에 대하여 TRS-398의 원문에 제시된 값과 대부분 일치함을 알 수 있다. 이 표에서 차이를 보이는 값을 “*”로 표시하였는데 모두 0.1% 이내로 일치한다.

Table 6은 본 계산에서 다루는 모든 전리함 및 선질에 대하여 k_{Q,Q_0} 를 구하기 위하여 결정된 p_{dis} , p_{wall} , p_{cel} 의 값들을 보여준다. 이 표에서 α 와 τ 는 p_{wall} 의 계산에 적용된 값들이다. 현재 이 계산 결과는 적절한 기준자료가 없어 비교할 수 없으며 단지 이 값들로부터 결정되는 k_{Q,Q_0} 만을 TRS-398 원문에 제시된 값과 비교할 수 있다.

Table 7은 본 보고서의 최종 결과로서 대상 전리함에 대한 k_{Q,Q_0} 를 보여준다. 이 표에서 %Diff.는 TRS-398 원문에 제시된 값과 본 계산결과와의 차이를 백분율로 나타낸 값이다. 이 표에 제시된 바와 같이 본 계산의 결과는 Exradin

Table 5. Comparison of published (TRS-398) and calculated correction factors for Co-60 beam quality, where symbols (*) denote different values from TRS-398.

Chamber model	p_{dis}		p_{wall}		p_{cel}		$S_{w,air}P_Q$	
	TRS-398	Cal.	TRS-398	Cal.	TRS-398	Cal.	TRS-398	Cal.
Exradin A12	0.988	0.988	0.984	0.984	1.000	1.000	1.101	1.101
Wellhöfer IC70	0.988	0.988	0.991	0.992*	0.993	0.993	1.102	1.102
PTW N23333	0.988	0.988	1.001	1.001	0.993	0.993	1.113	1.113
PTW N30001	0.988	0.988	1.001	1.001	0.993	0.993	1.113	1.113
PTW N30006	0.988	0.988	1.001	1.001	0.993	0.993	1.112	1.113*
NE 2571	0.987	0.988*	0.992	0.992	0.993	0.993	1.102	1.102
Capintec PR06C/G	0.987	0.987	0.989	0.989	1.000	1.000	1.107	1.106*

Table 6. Calculated chamber dependent factors for k_{Q, Q_0} calculation.

TPR _{20,10}	Exradin A12					Wellhöfer IC70					PTW N23333					PTW N30001				
	P_{dis}	α	τ	P_{wall}	P_{cat}	P_{dis}	α	τ	P_{wall}	P_{cat}	P_{dis}	α	τ	P_{wall}	P_{cat}	P_{dis}	α	τ	P_{wall}	P_{cat}
0.50	0.988	0.638	0.143	0.985	1.000	0.988	0.550	0.194	0.995	0.991	0.988	0.493	0.225	1.003	0.991	0.988	0.465	0.240	1.003	0.991
0.53	0.988	0.602	0.140	0.986	1.000	0.988	0.514	0.194	0.995	0.992	0.988	0.456	0.226	1.003	0.992	0.988	0.428	0.241	1.002	0.992
0.56	0.988	0.566	0.138	0.987	1.000	0.988	0.477	0.194	0.994	0.992	0.988	0.420	0.227	1.002	0.992	0.988	0.392	0.242	1.002	0.992
0.59	0.988	0.530	0.136	0.987	1.000	0.988	0.441	0.194	0.994	0.993	0.988	0.383	0.228	1.001	0.993	0.988	0.356	0.243	1.001	0.993
0.62	0.989	0.494	0.135	0.987	1.000	0.989	0.404	0.194	0.993	0.993	0.989	0.347	0.229	1.001	0.993	0.989	0.320	0.245	1.001	0.993
0.65	0.990	0.435	0.128	0.989	1.000	0.990	0.353	0.179	0.994	0.994	0.990	0.302	0.208	1.000	0.994	0.990	0.278	0.221	1.000	0.994
0.68	0.991	0.347	0.113	0.991	1.000	0.991	0.288	0.140	0.996	0.994	0.991	0.251	0.155	1.001	0.994	0.991	0.233	0.162	1.001	0.994
0.70	0.991	0.302	0.101	0.993	1.000	0.991	0.255	0.118	0.997	0.994	0.991	0.224	0.128	1.002	0.994	0.991	0.209	0.132	1.002	0.994
0.72	0.992	0.270	0.090	0.994	1.000	0.992	0.229	0.104	0.998	0.995	0.992	0.202	0.111	1.002	0.995	0.992	0.190	0.114	1.002	0.995
0.74	0.993	0.240	0.081	0.994	1.000	0.993	0.204	0.092	0.998	0.995	0.993	0.181	0.098	1.003	0.995	0.993	0.170	0.100	1.003	0.995
0.76	0.992	0.216	0.074	0.994	1.000	0.992	0.184	0.083	0.999	0.995	0.992	0.163	0.087	1.003	0.995	0.992	0.153	0.089	1.003	0.995
0.78	0.992	0.192	0.068	0.995	1.000	0.992	0.164	0.074	1.000	0.995	0.992	0.146	0.077	1.003	0.995	0.992	0.137	0.078	1.003	0.995
0.80	0.992	0.168	0.060	0.995	1.000	0.992	0.145	0.064	1.001	0.996	0.992	0.129	0.066	1.004	0.996	0.992	0.122	0.066	1.004	0.996
0.82	0.992	0.150	0.049	0.995	1.000	0.992	0.130	0.053	1.001	0.996	0.992	0.117	0.055	1.004	0.996	0.992	0.111	0.056	1.004	0.996
0.84	0.992	0.138	0.045	0.996	1.000	0.992	0.121	0.048	1.002	0.996	0.992	0.109	0.049	1.005	0.996	0.992	0.103	0.049	1.005	0.996

Table 6-1.

TPR _{20,10}	PTW N30006					NE 2571					Capintec PR06C/G				
	P_{dis}	α	τ	P_{wall}	P_{cat}	P_{dis}	α	τ	P_{wall}	P_{cat}	P_{dis}	α	τ	P_{wall}	P_{cat}
0.50	0.988	0.508	0.217	1.003	0.991	0.988	0.538	0.200	0.995	0.991	0.987	0.482	0.231	0.989	1.000
0.53	0.988	0.471	0.218	1.003	0.992	0.988	0.502	0.201	0.995	0.992	0.987	0.446	0.232	0.990	1.000
0.56	0.988	0.435	0.219	1.002	0.992	0.988	0.465	0.201	0.994	0.992	0.987	0.409	0.233	0.991	1.000
0.59	0.988	0.398	0.220	1.001	0.993	0.988	0.429	0.201	0.994	0.993	0.988	0.373	0.234	0.991	1.000
0.62	0.989	0.361	0.221	1.001	0.993	0.989	0.392	0.202	0.994	0.993	0.989	0.336	0.235	0.992	1.000
0.65	0.990	0.315	0.201	1.000	0.994	0.990	0.342	0.185	0.994	0.994	0.990	0.293	0.213	0.992	1.000
0.68	0.991	0.260	0.152	1.001	0.994	0.991	0.280	0.144	0.996	0.994	0.990	0.244	0.158	0.994	1.000
0.70	0.991	0.232	0.125	1.002	0.994	0.991	0.248	0.120	0.997	0.994	0.991	0.219	0.129	0.995	1.000
0.72	0.992	0.209	0.109	1.002	0.995	0.992	0.223	0.105	0.998	0.995	0.992	0.197	0.112	0.996	1.000
0.74	0.993	0.187	0.096	1.003	0.995	0.993	0.199	0.093	0.999	0.995	0.992	0.177	0.099	0.996	1.000
0.76	0.992	0.169	0.086	1.003	0.995	0.992	0.180	0.084	0.999	0.995	0.992	0.159	0.088	0.996	1.000
0.78	0.992	0.151	0.076	1.003	0.995	0.992	0.161	0.074	1.000	0.995	0.992	0.143	0.077	0.996	1.000
0.80	0.992	0.133	0.065	1.004	0.996	0.992	0.141	0.064	1.001	0.996	0.992	0.126	0.066	0.997	1.000
0.82	0.992	0.120	0.054	1.004	0.996	0.992	0.127	0.053	1.001	0.996	0.992	0.115	0.055	0.997	1.000
0.84	0.992	0.112	0.049	1.005	0.996	0.992	0.118	0.048	1.002	0.996	0.992	0.107	0.049	0.997	1.000

Table 7. Comparison of published (TRS-398) and calculated k_{Q,Q_0} for various beam qualities.

TPR ₃₀₁₀	Exradin A12		Wellhöfer IC70		PTW N23333		PTW N30001		PTW N30006		NE 2571		Capintec PR06C/G	
	TRS-398	Cal. (%Diff.)	TRS-398	Cal. (%Diff.)	TRS-398	Cal. (%Diff.)	TRS-398	Cal. (%Diff.)	TRS-398	Cal. (%Diff.)	TRS-398	Cal. (%Diff.)	TRS-398	Cal. (%Diff.)
0.50	1.001	1.002 (+0.1)	1.004	1.001 (-0.3)	1.004	1.001 (-0.3)	1.004	1.001 (-0.3)	1.002	1.001 (-0.1)	1.005	1.003 (-0.2)	1.001	1.001 (0.0)
0.53	1.001	1.003 (+0.2)	1.003	1.001 (-0.2)	1.003	1.001 (-0.2)	1.003	1.001 (-0.2)	1.002	1.001 (-0.1)	1.004	1.003 (-0.1)	1.001	1.002 (+0.1)
0.56	1.000	1.002 (+0.2)	1.001	1.001 (0.0)	1.001	0.999 (-0.2)	1.001	0.999 (-0.2)	1.002	0.999 (-0.3)	1.002	1.000 (-0.2)	1.000	1.001 (+0.1)
0.59	1.000	1.001 (+0.1)	1.000	1.000 (0.0)	0.999	0.997 (-0.2)	0.999	0.997 (-0.2)	0.999	0.997 (-0.2)	1.000	0.999 (-0.1)	0.998	1.000 (+0.2)
0.62	0.999	1.001 (+0.2)	0.998	0.999 (+0.1)	0.997	0.997 (0.0)	0.997	0.997 (0.0)	0.997	0.997 (0.0)	0.998	0.999 (+0.1)	0.998	1.000 (+0.2)
0.65	0.997	0.999 (+0.2)	0.996	0.997 (+0.1)	0.994	0.994 (0.0)	0.994	0.994 (0.0)	0.994	0.994 (0.0)	0.994	0.994 (0.0)	0.995	0.998 (+0.3)
0.68	0.994	0.998 (+0.4)	0.993	0.996 (+0.3)	0.990	0.991 (+0.1)	0.990	0.991 (+0.1)	0.990	0.991 (+0.1)	0.993	0.995 (+0.2)	0.992	0.996 (+0.4)
0.70	0.992	0.996 (+0.4)	0.991	0.993 (+0.2)	0.988	0.989 (+0.1)	0.988	0.989 (+0.1)	0.988	0.989 (+0.1)	0.991	0.993 (+0.2)	0.990	0.993 (+0.3)
0.72	0.990	0.993 (+0.3)	0.988	0.991 (+0.3)	0.985	0.986 (+0.1)	0.985	0.986 (+0.1)	0.984	0.986 (+0.2)	0.989	0.990 (+0.1)	0.988	0.990 (+0.2)
0.74	0.986	0.988 (+0.2)	0.985	0.987 (+0.2)	0.981	0.982 (+0.1)	0.981	0.982 (+0.1)	0.980	0.982 (+0.2)	0.986	0.986 (0.0)	0.984	0.985 (+0.1)
0.76	0.981	0.982 (+0.1)	0.981	0.981 (0.0)	0.976	0.976 (0.0)	0.976	0.976 (0.0)	0.976	0.976 (0.0)	0.975	0.975 (0.0)	0.980	0.979 (-0.1)
0.78	0.974	0.975 (+0.1)	0.974	0.975 (+0.1)	0.969	0.969 (0.0)	0.969	0.969 (0.0)	0.969	0.969 (0.0)	0.968	0.969 (0.0)	0.972	0.972 (0.0)
0.80	0.966	0.967 (+0.1)	0.967	0.968 (+0.1)	0.962	0.962 (0.0)	0.962	0.962 (0.0)	0.960	0.962 (+0.2)	0.960	0.968 (-0.1)	0.965	0.964 (-0.1)
0.82	0.957	0.958 (+0.1)	0.959	0.959 (0.0)	0.955	0.953 (-0.2)	0.955	0.953 (-0.2)	0.952	0.953 (+0.1)	0.952	0.959 (-0.2)	0.958	0.955 (-0.3)
0.84	0.944	0.948 (+0.4)	0.946	0.949 (+0.3)	0.943	0.943 (0.0)	0.943	0.943 (0.0)	0.940	0.943 (+0.3)	0.940	0.949 (0.0)	0.944	0.944 (0.0)

A12 및 Capintec PR06C/G 전리함에서 부분적으로 +0.4%의 차이를 보이고 있는 것을 제외하고는 대부분 ±0.3% 이내로 일치함을 알 수 있다.

토 의

TRS-398에 제시된 k_{Q,Q_0} 와 본 계산결과와의 작은 차이들은 본 보고서에서 사용된 값들이 TRS-398의 개발자들이 사용한 값들과 약간의 차이를 가지기 때문이다. 이 때 TRS-398에서는 각 인자의 계산에 인용된 문헌들만을 제시할 뿐 실제 수치를 제시하지 않고 있으므로 계산에 사용된 인자들을 분리하여 차이를 분석하기 어렵다. 단지 (2) 식에서 Co-60에 대한 $[s_{w,air} p_{dis} p_{wall} p_{cel}]_{Q_0}$ 의 세부 인자들이 TRS-398 원문에 주어진 값들과 잘 일치하는 것으로 나타났으므로, $[s_{w,air} p_{dis} p_{wall} p_{cel}]_{Q_0}$ 의 계산에서 작은 차이가 있는 것으로 추정할 수 있다. 이때 p_{dis} , p_{cel} 인자의 결정 시 주어진 자료에 대하여 단순한 선형내삽을 취한 점 그리고 p_{wall} 결정 시 저지능비와 α 의 자료들에 대하여 TRS-277의 자료를 사용한 점을 지적할 수 있다. 그렇지만 이를 통하여 특정 전리함 및 특정 선질에서 발생하는 ±0.1~±0.4% 범위의 차이들을 설명하기는 어렵다. 따라서 추후 보다 정확한 자료가 확보되는 경우에 재계산을 수행하여 비교해야 할 것이다. 그렇지만 현재의 계산체계가 TRS-398에 제시된 k_{Q,Q_0} 값을 ±0.4% 이내로 정확하게 예측한다는 점은 중요하다.

본 보고서에서 다루지 않은 전리함들에 대해서도 오차 범위에서 k_{Q,Q_0} 를 구할 수 있을 것으로 생각한다. 새로 개발된 전리함의 경우에 본 계산뿐만 아니라 추가적으로 기준 전리함을 이용한 실험 또는 몬테칼로 계산으로 재확인하는 것이 필요하다. 이는 Andreo¹⁶⁾가 TRS-398을 개발하는 과정에서 Fricke 선량계를 이용하여 다양한 전리함과 선질에 대한 k_{Q,Q_0} 를 평가했던 것과 같다.

본 계산은 향후 고에너지 전자선에 대해서도 수행되어야 할 것이다. 현재 국내에서도 TRS-398 프로토콜에 대한 관심이 높다고 보여지므로 본 연구자들은 관련 연구가 수행되는 대로 결과를 보고할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 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. IAEA, Vienna (2000)
2. **TG-51**: AAPM's TG-51 protocols for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 26:1847-1870 (1999)
 3. **TRS-277**: *Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams: An International Code of Practice*. Technical Report Series No. 277. 2nd ed. IAEA, Vienna (1997)
 4. **ICRU Report-37**: *Stopping Powers for Electrons and Positrons*. ICRU Bethesda, MD (1984)
 5. **Andreo P**: Improved Calculations of Stopping-power Ratios and Their Correlation with the Quality of Therapeutic Photon Beams. *Measurement Assurance in Dosimetry* (Proc. Symp. Vienna, 1993) IAEA, Vienna (1994), pp. 335-359
 6. **Andreo P**: On the beam quality specification of high-energy photons for radiotherapy dosimetry. *Med Phys* 27:434-440 (2000)
 7. **Medina AL, Teijeiro A, Salvador F, et al**: Comparison between TG-51 and TRS-398: electron contamination effect on photon beam-quality specification. *Phys Med Biol* 49:17-32 (2004)
 8. **Andreo P, Hyq MS, Westermarck M, et al**: Protocols for the dosimetry of high energy photon and electron beams: a comparison of the IAEA TRS-398 and previous international Codes of Practice. *Phys Med Biol* 47:3033-3053 (2002)
 9. **Araki F, Kubo HD**: Comparison of high-energy photon and electron dosimetry for various dosimetry protocols. *Med Phys* 29:857-868 (2002)
 10. **Johansson KA, Mattsson LO, Lindborg L, Svensson H**: *Absorbed Dose Determination with Ionization Chambers in Electron and Photon Beams Having Energies between 1 and 50 MeV*. National and International Standardization of Radiation Dosimetry (Proc. Symp. Atlanta, 1977), Vol 2, IAEA, Vienna (1978), pp. 243-270
 11. **Shani G**: *Radiation Dosimetry*. 2nd ed, CRC Press, London (2000), pp. 160-160
 12. **Andred P, Nahum A, Brahme A**: Chamber-dependent wall correction factors in dosimetry. *Phys Med Biol* 31:1189-1199 (1986)
 13. **Lempert GD, Nath R, Schulz RJ**: Fraction of ionization from electrons arising in the wall of an ionization chamber. *Med Phys* 10:1-3 (1982)
 14. **Hanson WF, Tinoco JAD**: Effects of plastic protective caps on the calibration of therapy beams in water. *Med Phys* 12: 243-247 (1985)
 15. **Ma CM, Nahum AE**: Effect of the size and composition of the central electrode on the response of cylindrical ionization chambers in high-energy photon and electron beams. *Phys Med Biol* 38:267-290 (1993)
 16. **Andreo P**: A comparison between calculated and experimental k_Q photon beam quality correction factors. *Phys Med Biol* 45:L25-L38 (2000)

Technical Report

Direct Calculation of TRS-398 Quality Correction Factors for High Energy Photons

Dong Hyeok Jeong, Kyo Chul Shin*, Young Kee Oh[†], Jeung Kee Kim[‡], Jhin Kee Kim[§], Ki Hwan Kim^{||}

Department of Radiation Oncology, Wonkwang University Hospital, *Dankook University Hospital, [†]Eulji University Hospital, [‡]Dong-A University Hospital, [§]Chonbuk National University Hospital, ^{||}Chungnam National University Hospital

In order to apply the TRS-398 dosimetry protocol developed by IAEA we directly calculated the quality correction factors for high energy photons. The calculations were performed for seven commercial cylindrical chambers (A12, IC70, N23333, N30001, N30006, NE2571, PR06C/G). In comparison with quality correction factors given by TRS-398 our results were in good agreement within $\pm 0.3\%$ (maximum $\pm 0.4\%$) for all chambers and photon qualities.

Key Words : TRS-398 protocol, Quality correction factor, Photon dosimetry