

## kV X-선에서 원통형전리함의 선질인자 결정에 관한 연구: IAEA 프로토콜 고찰과 N23333, N30001 전리함에 대한 몬테칼로 계산 및 측정

\*원광대학교 의과대학 방사선종양학교실, 원광의과학연구소, †군산대학교 물리학과,  
‡한국식품의약품안전청 방사선표준과, §포천중문의과대학교 분당차병원 방사선종양학과

이강규\* · 정동혁† · 임천일† · 장세경§ · 문성득\*

본 연구에서는 kV X-선에 대하여 원통형전리함의 선질인자를 몬테칼로 계산과 측정으로 결정하였다. 대상 X-선은 KFDA에 설치되어 있으며 에너지스펙트럼과 선질이 명시된 60~300 kV 범위의 X-선(ISO-4037)이었으며, 전리함은 PTW N23333과 N30001이었다. 이론적 계산과 몬테칼로 계산으로 구한 공기커마와 공동의 흡수선량으로부터 IAEA 프로토콜의  $k_a$  와  $k_{Q, Q_0}$  인자를 결정하였다. 두 전리함의 반응 범위는 80~250 kV 영역에서 모두  $\pm 3\sim 4\%$ 를 보였으나, N30001 전리함의 경우에 110~300 kV 영역에서  $\pm 1.7\%$ 로서 평탄한 특성을 보였다. 본 연구로부터 kV X-선에 대한 선량평가에 대하여 고찰할 수 있었으며, 프로토콜의 적용을 위하여 에너지의존성의 평가가 중요함을 알 수 있었다.

**중심단어:** kV X-선, IAEA 프로토콜, 선질인자

### 서 론

방사선량의 계측에 있어서 측정기의 에너지에 따른 반응 또는 에너지의존성을 조사하는 것은 프로토콜을 개발하거나 적용하는 데 있어서 중요하다. 전리함의 경우에 에너지의존성은 공동속 전하의 수집과 전자평형을 위한 벽(wall)의 물질이 공기와 다르기 때문에 나타난다.<sup>1,2)</sup> 특히 원통형 전리함(Farmer형 전리함)의 경우에 전리함 벽의 물질, 밀도, 두께, 형태 등에 의하여 전리함의 에너지의존성은 다양한 경향을 보일 수 있다. 특히 광전효과가 지배적인 관전압 100 kV 이하의 X-선의 경우에 벽에 의한 플루언스의 급격한 감쇠로 인하여 전리함의 반응이 급격하게 낮아지는 특성을 가진다.<sup>3)</sup> 이러한 특성으로 인하여 kV X-선 측정에는 넓은 에너지 영역에 걸쳐서 반응이 평탄한 전리함의 사용해야 하며, 특히 저에너지 X-선(약 100 kV 이하) 측정의 경우에는 얇은 창을 가지는 평판형전리함의 사용이 권고되고

있다.<sup>1,4)</sup> 최근 상용화된 원통형전리함(Farmer type chamber)의 경우에 체적이 작아 공간적 분해능이 높으며 전기적 특성이 안정하기 때문에 방사선치료분야 고에너지 방사선측정에 널리 사용되고 있는데, 무엇보다도 에너지의존성이 낮도록 설계되었기 때문이다.<sup>5)</sup> PTW사의 자료<sup>6)</sup>에 의하면 N30001과 N30006 전리함(PTW co., 독일)의 경우에 30 kV~50 MV 범위까지 사용 가능영역으로 정하고 있으며, 문헌<sup>7)</sup>에 의하면 N23323과 N30001 전리함의 경우에 광자에너지 40~150 keV 범위에서 반응(kerma/reading)이 Co-60 감마선보다 2~3% 낮으며, N31002과 N31003의 경우에는 3~4% 낮은 것으로 제시하고 있다. 이 자료들은 비록 단일에너지 광자에 대한 값들이지만 낮은 에너지 X-선에서 원통형전리함의 에너지의존성이 비교적 낮음을 알 수 있다.

한편, 국내 이차표준기관인 식품의약품안전청(KFDA)에서는 1999년 kV 영역 X-선에 대한 교정체계를 도입하여, 장치의 전기적 특성과 X-선의 선질평가를 완료하고 현재 전리함의 조사선량 또는 공기커마교정계수를 제공하고 있다. KFDA에서는 국제표준화기구(ISO)에서 1996년 발표한 ISO-4037계열<sup>8)</sup>의 X-선을 표준선원으로 사용하고 있는데, 선질변수(여과기, HVL, 평균에너지)가 상세히 명시되어 있으며, 도식을 통하여 에너지스펙트럼에 대한 정보가 제공되므로, 추후 몬테칼로 계산과 같은 이론을 병행한 연구가 가능하며 또한 프로토콜을 개발하거나 적용하는 연구에 활

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-003-E00162).

이 논문은 2005년 5월 18일 접수하여 2005년 6월 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

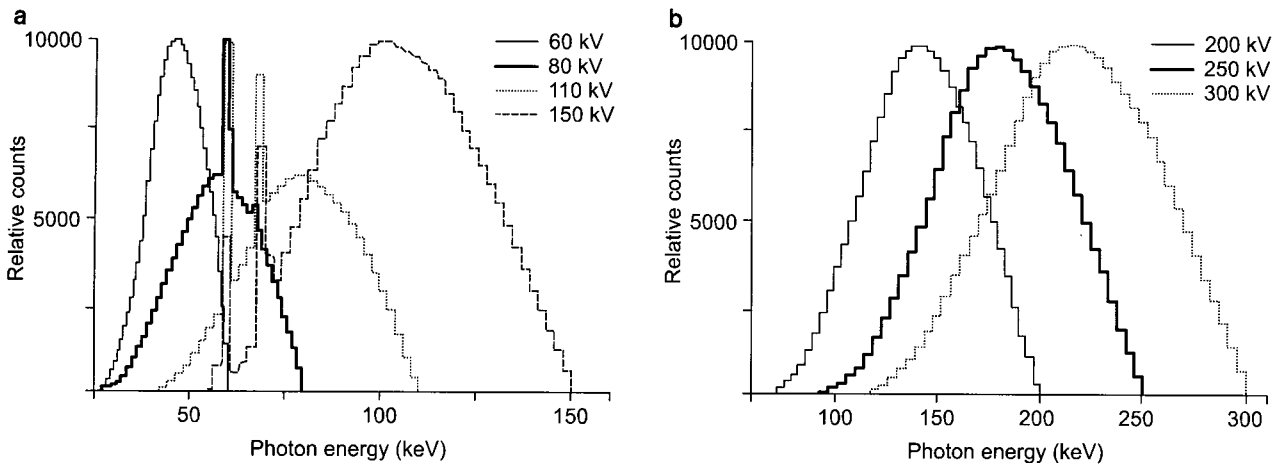


Fig. 1. Energy spectra of ISO-4037 X-rays used in this study.

용도가 높을 것으로 생각한다.

이러한 배경과 함께 본 연구에서는 60~300 kV 영역 X-선에 대하여 몬테칼로 계산을 이용하여 PTW N23333 전리함과 N30001 전리함에 대한 에너지의존성을 조사하였는데, 보다 실용적 접근을 위하여 IAEA TRS-277<sup>9)</sup>과 TRS-398<sup>10)</sup> 프로토콜에 도입된  $k_u$ 와  $k_{Q,Q_0}$ 와 같은 선질인자(quality factor)를 구하도록 하였다. 본 연구에서 사용하는 X-선 선원은 앞서 제시한 ISO-4037<sup>8)</sup>의 60, 80, 110, 150, 200, 250, 300 kV X-선(wide spectrum series)으로서 일반적으로 정의하는 중에너지 X-선 영역보다 확장된 선질에 해당한다. 따라서 본 연구는 표준기관에 마련된 kV 영역 X-선 교정체계를 이용하여 국제적 프로토콜에 대하여 고찰할 수 있으며 실제 적용도 가능할 수 있음을 검토하기 위하여 수행된 측면이 있다.

kV 영역 X-선에 대한 국제적 프로토콜은 IAEA TRS-277,<sup>9)</sup> TRS-398,<sup>10)</sup> AAPM TG-61,<sup>11)</sup> IPEMB,<sup>12,13)</sup> IPSM 등<sup>14)</sup> 다양하지만 대부분 방사선치료 또는 방사선생물학 분야의 흡수선량 측정을 위한 절차서이며, 진단방사선 영역 X-선에 대해서는 현재 체계화된 국제적 프로토콜이 없다. 따라서 본 연구의 결과를 진단방사선 영역의 선량측정에 적용하는 것은 추후 검토되어야 한다. 그렇지만, 최근 Omrane 등(2003)<sup>15)</sup>은 진단용 X-선 발생장치에 대한 몬테칼로 계산을 통하여, 관전압 70~150 kV 범위에서 물표면의 흡수선량을 구하고 IAEA TRS-277<sup>9)</sup> 및 AAPM TG-61<sup>11)</sup> 프로토콜의 결과와 비교하였는데, 대부분의 결과가 0.8% 이내(최대 1.2%)로 일치함을 보였다. 이 결과는 진단 방사선용 X-선에 대해서도 물 또는 인체 표면선량의 측정에 kV 치료용

프로토콜의 수식체계가 적용될 수 있음을 보여준다.

다음의 재료 및 방법에서는 선질의 명시와 함께 본 연구에서 사용한 에너지스펙트럼에 대하여 제시하고, IAEA 수식체계를 이용하여 전리함의 에너지의존성, 선질인자, 몬테칼로 계산 및 측정에 대하여 설명하였다. 결과에서는 계산된 선질인자에 대하여 도표로 제시하고 결과를 논의하였으며, 결론에서는 연구결과를 정리하고 연구방향에 대하여 토의하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 선질명시

IAEA TRS-277 프로토콜에서는 관전압 100~300 kV에서 발생하는 X-선 또는 HVL (half value layer; 반가층)이 2 mmAl~3 mmCu 범위인 X-선을 중에너지 X-선으로 명시하며 이보다 낮은 경우에는 저에너지 X-선으로 명시한다.<sup>9)</sup> TRS-398의 경우에는 관전압 80 kV 이상 및 HVL 2 mmAl 이상인 X-선을 중에너지 X-선, 이보다 낮은 경우에는 저에너지 X-선으로 명시한다.<sup>10)</sup> 이와 같이 선질의 명시는 프로토콜에 따라 다를 수 있다. 여기서 관전압보다 HVL에 의한 선질의 명시가 보다 중요한데, 그 이유는 프로토콜들에서 수식체계의 인자들을 모두 HVL의 함수로 제시하고 있기 때문이다. 이 때 관전압은 명목상의 선질 지표로 사용된다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 X-선(ISO-4037)의 에너지스펙트럼을 보여준다. ISO-4037 문헌에서 이 스펙트럼들은 그래프의 형태로 제공되는데, 본 연구에서 디지털이저를 사용하여 약 1.2~3.5 keV 간격으로 곡선을 읽어 수치로 변

Table 1. Quality parameters for ISO-4037 X-rays in this study.

Tube potential kV	Additional filtration		HVL mmCu	Mean energy keV
	mmCu	mmSn		
60	0.3		0.18	45
80	0.5		0.35	57
110	2.0		0.96	79
150		1.0	1.86	104
200		2.0	3.08	137
250		4.0	4.22	173
300		6.5	5.20	208

환한 후 계산에 사용하였다. 수치로 변환시킨 에너지스펙트럼에 대하여 평균에너지만을 계산할 때 Table 1의 값과 ±3% 이내로 일치함을 알 수 있었다. 각 에너지스펙트럼에 대하여 선량계산에 이용된 자료를 Table 1에 제시하였다.

## 2. 에너지의존성

전리함의 에너지의존성은 단위 측정값에 대한 공기커마 또는 물-흡수선량으로 표현할 수 있다. 즉, 공기 중 기준점에서  $K_{air}/M$  또는 물 속 기준깊이에서  $D_w/M$ 의 에너지에 따른 변화를 조사함으로써 전리함의 에너지의존성을 평가할 수 있다. 여기서  $K_{air}$ 는 공기 중 기준점에서의 공기커마,  $D_w$ 는 물 속 기준깊이에서의 흡수선량이며,  $M$ 은 전리함을 삽입할 경우에 전기계로 측정된 공동의 전하량이다. 만약  $M$ 의 결정을 특정한 기준조건(선질, 거리, 조사면, 대기조건 등)에서 정의하면  $K_{air}/M$ 는 전리함의 공기커마교정계수( $N_K$ )와 같으며,  $D_w/M$ 은 물흡수선량교정계수( $N_{D,w,Q_0}$ )와 같다. 여기서 수식 표현은 IAEA 프로토콜에서와 같다. 이와 같이 전리함의 에너지의존성은 실험적 방법으로 결정할 수 있지만, 중에너지 영역의 모든 선질에 대하여 전리함의  $N_K$ 와  $N_{D,w,Q_0}$ 를 결정하는 것은 어려우며 실용적이지 못하다. 이와 관련하여 프로토콜들(IAEA, AAPM TG-61, IPEMB 등)에서는<sup>9-12)</sup> 여러 측면에서 에너지에 대한 보정을 다루고 있는데, 일반적으로 엄격한 보정은 어렵기 때문에 측정선질 영역에서 전리함의 반응이 평탄한 전리함을 사용하여 불확정성을 줄이도록 권고하고 있다. IAEA TRS-398<sup>10)</sup>의 경우에는 두 선질에 대한 교정계수를 얻고 지수함수적 내삽을 취하여 결정하도록 하고 있는데, 이는 보다 적극적인 에너지에 대한 보정으로 생각한다. 이와 관련하여 IAEA 프로토

콜에서 다루는 내용을 좀더 자세히 정리하면 다음과 같다.

## 3. IAEA 프로토콜

TRS-277 프로토콜에서 중에너지 X-선에 대하여 물 속 기준 깊이에서 흡수선량은 다음과 같이 결정한다.<sup>9)</sup>

$$D_w = M_u N_K k_u \left( \frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air}^w P_u \quad (1)$$

여기서  $M_u$ 는 측정된 전하량,  $N_K$ 는 공기커마교정계수,  $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air}^w$ 는 물과 공기의 질량에너지흡수계수 비, 그리고  $P_u$ 는 교란보정인자이다. 여기서  $k_u$ 는 측정선질과 표준선질과의 차이를 보정하는 선질인자(quality factor)이다. 프로토콜에서는  $k_u$ 의 결정은 어렵기 때문에 70~250 kV 관전압(또는 HVL 2 mmAl~3 mmCu) 범위에서 전리함의 반응이 ±2% 이내인 전리함인 경우에 실용적으로  $k_u=1$ 로 취할 수 있도록 하고 있다. (1)식에서  $M_u N_K k_u = K_{air}$ 와 같은데, 이때  $K_{air}$ 는 전리함 공동의 중심에서 공기커마이다. 임의 선질 Q에 대한 공기커마교정계수가  $N_{K,Q}$ 이면,  $K_{air} = M_u N_{K,Q} = M_u N_K k_u$ 이므로  $K_u$ 는 다음과 같이 정의됨을 알 수 있다.

$$k_u = \frac{N_{K,Q}}{N_K} \quad (2)$$

본 연구에서는 대상 선질 7종에 대하여  $k_u$  인자를 몬테칼로 계산으로 구하고 또한 표준기관(KFDA)을 통하여 직접 측정을 수행하였는데, 이 때 전리함은 N23333 (S/N 1913)과 N30001 (S/N 0252)이며, 측정선질은 80, 150, 200 kV이었다. 결과의 평가에서는 기준선질( $Q_0$ )을 150 kV (1.86 mmCu)로 정하도록 하였으며 나머지는 일반적 평가대상 선질로 간주하였다. 이는 고에너지 X-선의 경우에 Co-60을 표준선원으로 채택하는 것과 차이가 있다. kV X-선의 경우에는 다양한 선질의 표준선원이 있으므로 연구 또는 측정에 따라 적절한 표준선원( $Q_0$ )을 결정할 수 있다.

IAEA TRS-398 프로토콜에서 기준깊이에서 흡수선량은 다음과 같이 결정한다.<sup>10)</sup>

$$D_w = M N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0} \quad (3)$$

여기서  $N_{D,w,Q_0}$ 는 표준선원에 대한 전리함의 물흡수선량 교정계수이며,  $k_{Q,Q_0}$ 는 측정선원과 표준선원의 차이를 보정하는 선질인자(quality factor)로서 다음과 같이 정의된다.<sup>10)</sup>

$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} \quad (4)$$

이와 같이 실험적 방법으로  $k_{Q,Q_0}$ 를 결정할 수 있지만,  $k_u$ 와 마찬가지로 실용적이지 못하므로 TRS-398에서는 두 선질에 대한  $N_{D,w,Q}$ 를 구하고, HVL을 변수로 내삽하여  $k_{Q,Q_0}$ 를 결정하도록 하고 있다. 이와 같이 IAEA 프로토콜에서 전리함의 에너지의존성을 보정하기 위하여  $k_u$  또는  $k_{Q,Q_0}$ 의 결정을 권고하지만 (2)식과 (4)식은 사용자가 실험을 통하여 직접 결정할 수 없으며 표준기관에서만 결정할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이론적 계산과 몬테칼로 계산을 이용하여 대상 전리함에 대한  $k_u$ 를 구하고 이로부터  $k_{Q,Q_0}$ 를 결정하였는데, 이 때  $k_{Q,Q_0}$ 는 TRS-277 프로토콜의 수식체계를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$k_{Q,Q_0} = \frac{\left[ k_u \left( \frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air}^w P_u \right]_Q}{\left[ \left( \frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air}^w P_u \right]_{Q_0}} \quad (5)$$

이와 같이  $k_{Q,Q_0}$ 를 결정하는 이유는 본 연구의 몬테칼로 계산이  $k_u$ 의 결정에 대해서만 수행되었기 때문이며, 또한 현재  $N_{D,w,Q_0}$ 에 대한 교정체계가 없으므로 실험적으로도 결정이 어렵기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 단지 수식 체계만으로  $k_{Q,Q_0}$ 를 결정하고 이로부터 물 흡수선량에 대한 전리함의 에너지의존성을 근사적으로 조사하였다.

4. 몬테칼로 계산

본 연구에서 수치계산과 몬테칼로 계산으로  $k_u$ 를 결정

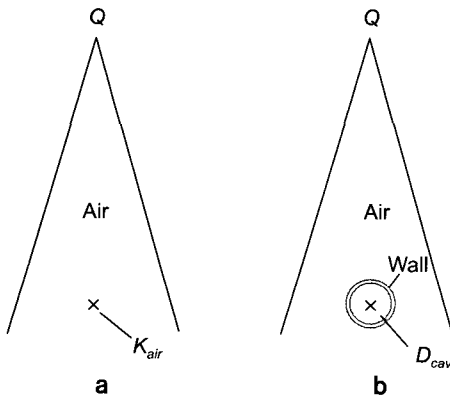


Fig. 2. Geometrical description of air kerma and cavity dose for determination of ionization chamber response in terms of air kerma.

하기 위한 기하학적 구조는 Fig. 2와 같다. 이 그림에서  $K_{air}$ 는 에너지 스펙트럼이 주어지는 경우에 다음과 같다.<sup>1)</sup>

$$K_{air} = \int_0^{E_{max}} \frac{d\phi}{dE} E \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) dE \quad (6)$$

여기서  $d\phi/dE$ 는 단위 에너지 간격당의 입자 플루언스,  $E$ 는 광자 에너지,  $\mu_{tr}/\rho$ 는 공기의 질량에너지전달계수이다. 이 식의 계산에서 먼저 에너지스펙트럼이 불연속적인 형태인  $\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \dots$ 로 주어지므로, (6)식의 적분을 합으로 취하여 계산하였으며, 합의 계산결과를 총플루언스 ( $\sum_i \Delta\phi_i$ )로 나누어 단위 플루언스 당의 공기커마(Gy/fluence)를 구하였다. 여기서  $\Delta\phi_i$ 는 에너지스펙트럼에서  $i$ 번째 에너지구간에 대한 광자 플루언스이다. 이 계산에서  $\mu_{tr}$ 은 문헌<sup>2)</sup>에 수록된  $\mu_{en}$ (에너지흡수계수)에 대한 자료를 사용하여 계산하였는데, 그 이유는 중에너지 X-선 영역에서 이차 전자들의 제동복사는 무시되어,  $\mu_{tr} \approx \mu_{en}$ 가 되기 때문이다.<sup>1,11)</sup>

Fig. 2b에서 공동의 흡수선량  $D_{cav}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>1,10)</sup>

$$D_{cav} = \frac{M}{\rho V} \left( \frac{\bar{W}}{e} \right) \quad (7)$$

여기서  $M$ 은 공동에 흡수된 평균적 전하량,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $V$ 는 공동의 체적, 그리고  $(\bar{W}/e)$ 는 단위 이온쌍생성에 필요한 에너지(=33.97 J/C)이다.  $D_{cav}$ 는 전리함 벽의 물질과 형태에 의존하므로 직접 계산이 어렵기 때문에 본 연구에서는 Fig. 2b와 같은 기하학적 구조에 대한 몬테칼로 계산을 수행하여  $D_{cav}$ 를 구하였다. Fig. 2b의 기하학적 구조에 입력된 전리함인 PTW N23333과 N30001의 상세한 형태는 Fig. 3과 같으며, 적용 물질과 형태는 Table 2에 제시하였다. 이 때 몬테칼로 계산코드는 EGS4를 기반으로 개발된 DOSRZ이다.<sup>16)</sup> 이 코드는 원통형 기하구조만을 다루지만 다양한 선원 형태를 지원하는 장점을 가지고 있다. 특히 본

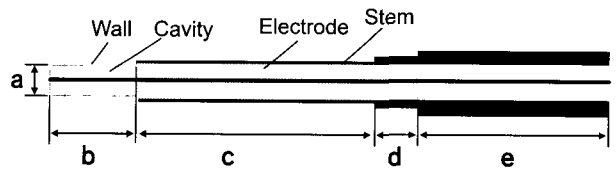


Fig. 3. Geometry of the cylindrical ionization chamber used in this Monte Carlo calculation. The materials and dimensions are shown in Table 2.

Table 2. Materials and dimensions of chamber elements for Monte Carlo study.

	Cavity (volume)	Wall (thickness)	Electrode radius	Stem (inside)	a	b	c	d	e
N23333	air (0.6 cm <sup>3</sup> )	PMMA (0.053 g/cm <sup>2</sup> )	Al (0.05 cm)	Al (PMMA)	0.61	2.054	5.5	1.0	4.4
N30001	air (0.6 cm <sup>3</sup> )	PMMA (0.045 g/cm <sup>2</sup> )	Al (0.05 cm)	Al (PMMA)	0.61	2.054	5.5	1.0	4.4

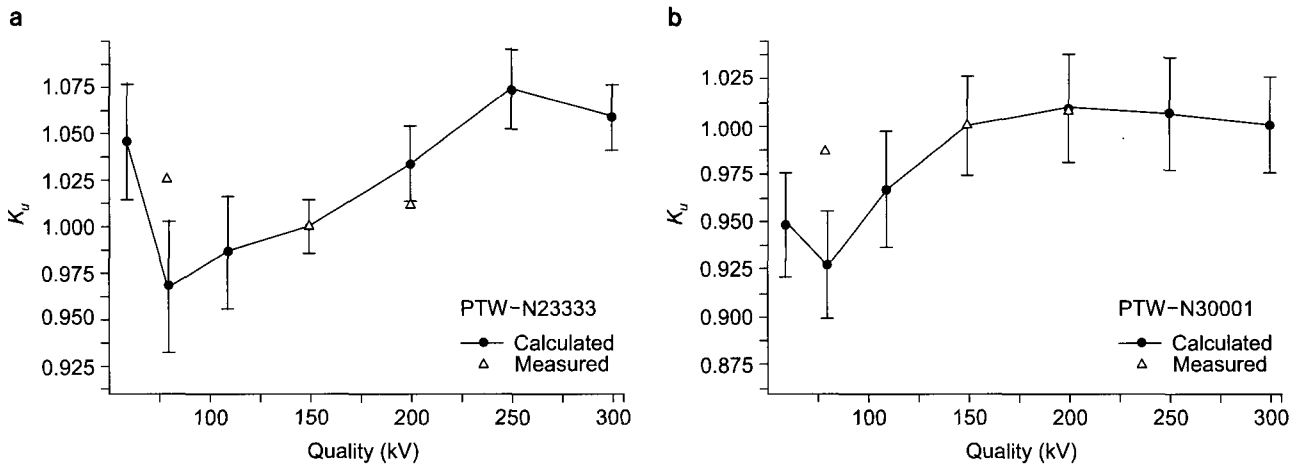


Fig. 4. Calculated and measured quality factors (TRS-277) in terms of air kerma for ISO-4037 X-ray qualities.

연구에서 원통형 전리함에 대한 계산을 수행하기 때문에 실제와 거의 유사한 형태를 입력할 수 있다. 이 계산에서 선원전리함간 거리는 100 cm이며, 조사면의 크기는 10×10 cm<sup>2</sup>로서 교정 시 기준조건과 동일하다. 계산은 주어진 7종의 X-선 선질에 대하여 각각 수행되었는데, 하나의 선질에 대하여 1억의 history를 부여하였다. 이 계산에서 높은 history가 소요되는 이유는 조사면의 크기에 비하여 계산 체적(공동)이 매우 작기 때문에 공동에 도달하는 광자수가 적기 때문이다. 이러한 조건에서 공동의 흡수선량에 대한 통계적 불확정성은 약 ±1.0~2.5% 범위를 가지며, 계산시간은 개인용 컴퓨터(Pentium IV-1.2 GHz)에서 60 kV의 경우에 2시간, 300 kV의 경우에는 약 11시간이 소요된다. 전리함의 공동에 대한 몬테칼로 계산결과는 단위 플루언스당의 흡수선량(Gy/fluence)으로 주어지며, 이 단위는 앞에서 계산한 공기커마의 경우와 동일하다. (6)과 (7)식으로부터  $K_{air}/M$ 를 결정하고, 이를 (4)식에 대입하면  $k_u$ 는 다음과 같다.

$$k_u = \frac{(K_{air}/D_{cav})_Q}{(K_{air}/D_{cav})_{Q_0}} \quad (8)$$

이 식은 Nahum<sup>17)</sup>이 몬테칼로 계산을 이용하여 물 흡수선량

에 대한 전리함의 반응을 연구할 때 사용한 식과 유사하다. 다음의 결과에서는 몬테칼로 계산과 (8)식으로 결정한  $k_u$ 와 (5)식으로 결정한  $k_{Q,Q_0}$ 를 측정값과 함께 제시하였으며, 이 과정에서 결정된 환산인자들도 함께 제시하였다.

### 결 과

Fig. 4는 두 전리함에 대하여 계산하고 측정된 TRS-277 프로토콜의  $k_u$  인자를 보여준다. 여기서 계산값은 수치연산과 몬테칼로 계산결과를 (8)식에 대입하여 계산한 결과이며, 측정값은 80, 150, 200 kV 선질에 대하여 교정한  $N_k$ 를 (2)식에 대입하여 구한 결과이다. 이 그림에서 모든 결과는 150 kV에 대하여 일반화되어 있으며, 그림에 나타난 오차는 몬테칼로 계산결과의 불확정도를 나타낸다. 이 그림에서 N23333 전리함의 경우에 계산된  $k_u$ 인자는 80 kV 이하에서 높으며 80 kV 이상에서 250 kV까지 증가하는 경향을 보인다. 80 kV 이하에서  $k_u$  값이 높은 이유는 광전효과가 지배적인 50 keV 이하 영역의 광자들이 전리함 벽에 흡수되어 공동의 선량

( $D_{cav}$ )이 낮기 때문이다. N30001 전리함의 경우에도 유사한 경향을 보이는데, 80 kV에서 150 kV까지 증가하다가 그 이상에서 평탄한 경향을 보임을 알 수 있다. 이 때 측정값은 N23333 전리함의 경우에 80 kV에서 5.7% 높으며, 200 kV의 경우에는 3.3% 낮은 것으로 나타났다. N30001 전리함의 경우에는 80 kV에서 5.9% 높으며 200 kV에서는 0.5% 이내로 일치하는 것으로 나타났다.

TRS-277에서는 전리함의 에너지에 대한 반응보정으로  $k_u$  인자를 도입하고 있으며, 보정을 생략하기 위해서 70~250 kV 영역에서 반응범위가  $\pm 2\%$  이내인 전리함의 사용을 권고하고 있다.<sup>9)</sup> 본 연구에서는 대상 전리함의 반응범위를 조사하기 위하여  $k_u$ 의 계산값으로부터 일반적인 평탄도(flatness)의 계산방법을 도입하여 다음과 같이 평탄도 R을 계산하였다.

$$R = \frac{k_{u,max} - k_{u,min}}{k_{u,max} + k_{u,min}} \times 100 \quad (9)$$

R의 계산은 80~250 kV (TRS-277 평가영역)와 110~300 kV(일반적 중에너지 영역)에 대하여 수행하였으며 그 결과를 Table 3에 수록하였다. 이 표에서와 같이 80~250 kV 범

Table 3. Determined R values as an index of chamber response for two cylindrical ionization chambers in quality regions of 80~250 kV and 110~300 kV.

	R (80~250 kV)	R (110~300 kV)
N23333	$\pm 3.2\%$	$\pm 3.6\%$
N30001	$\pm 4.1\%$	$\pm 1.7\%$

위에 대한 R은 N23333과 N30001 전리함 각각  $\pm 3.2\%$ 와  $\pm 4.1\%$ 로 나타났으며, 110~300 kV 범위에서는 각각  $\pm 3.6\%$ 와  $\pm 1.7\%$ 로 나타났다. 이로부터 N30001 전리함의 경우에 중에너지 X-선 영역에서 보다 평탄한 반응을 보임을 알 수 있다. 측정값의 경우에 세가지 선질에 대한 값들이므로 통계적으로 다루기는 어렵지만 두 전리함 모두  $\pm 1.5\%$  이하로서 전리함의 반응은 비교적 평탄한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 계산과 측정으로 구한 두 전리함에 대한  $k_{Q,Q_0}$  인자를 보여준다. 이 인자의 계산은 (5)식을 통하여 수행되었는데, 이 식의 계산에서 각 인자들은 HVL (mmCu)의 함수로 주어지는 TRS-277의 값들을 사용하였다. 이 때 계산에 적용되는 기준깊이는 물 속 2 cm에 대한 자료인데, 이는 TRS-277의 경우에  $z_{ref}=0, 2, 5$  cm로서 명시하지만, TRS-398에서는 물 속 2 cm 깊이만을 기준깊이로 명시하기 때문이다.  $P_u$ 의 경우에는 TRS-277에서  $z_{ref}=5$  cm에 대한 값만 제시하며 더 이상의 자료가 없으므로 이 깊이의 값을 그대로 적용하였다. 다른 경우로서 250 kV (4.22 mmCu)와 300 kV (5.2 mmCu)의 경우에 TRS-277에서 HVL 3.37 mmCu 보다 높은 선질에 대한  $(\mu_{en}/\rho)_{air}^w$ 와  $P_u$ 의 값을 제공하지 않으므로, 본 계산에서는 근사적으로 선형 외삽하여 적용하였다. Table 4에  $k_{Q,Q_0}$ 의 계산에 사용된 인자들을 제시하였다. 이와 같이 계산된  $k_{Q,Q_0}$ 는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 두 전리함 모두  $k_u$ 와 유사한 경향을 보이며, 측정값의 경우에도 동일한 경향을 보이고 있다. N30001 전리함의 경우에 200 kV에서 계산값과 측정값이 서로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 4, 5와 Table 4에서 표기된 오차는 계

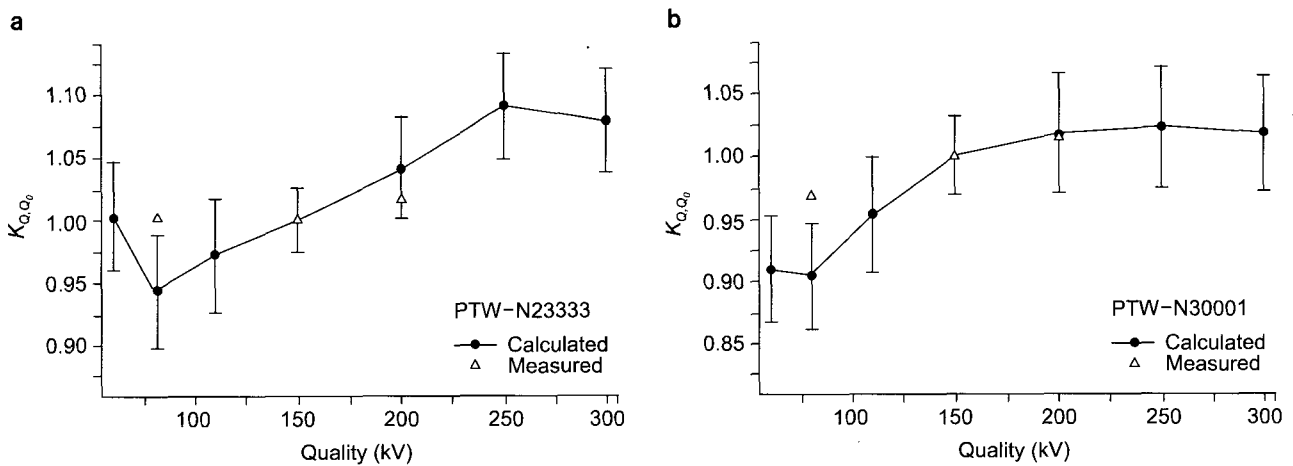


Fig. 5. Calculated and measured quality factors (TRS-398) in terms of absorbed dose in water for ISO-4037 X-ray qualities.

Table 4. Dose conversion parameters in TRS-277 protocol for ISO-4037 X-ray qualities and two cylindrical ionization chambers.

Tube potential kV	HVL mmCu	$(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air}^w$	$P_u$	$k_u(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air}^w P_u$	
				N23333	N30001
60	0.18	1.0204±0.004	1.030±0.021	1.099±0.039	0.996±0.035
80	0.35	1.0384±0.004	1.030±0.021	1.035±0.042	0.991±0.036
110	0.96	1.0584±0.004	1.020±0.021	1.065±0.041	1.044±0.039
150	1.86	1.0791±0.004	1.016±0.020	1.096±0.027	1.096±0.034
200	3.08	1.0941±0.004	1.010±0.020	1.142±0.032	1.115±0.039
250	4.22	1.1030±0.004	1.010±0.020	1.196±0.035	1.121±0.040
300	5.20	1.1050±0.004	1.010±0.020	1.182±0.032	1.117±0.036

산에 사용된 인자들의 불확정도(1σ)에 대한 통계적으로 합으로서 ±4.2%~4.9% 범위를 가진다. 이 값은 앞서 결정된  $k_u$ 에 대한 불확정도와 TRS-277에서 제시하는  $(\mu_{en}/\rho)_{air}^w$ 와  $P_u$ 에 대한 불확정도(±0.4%와 ±2.0%)의 통계적 합과 같다.

이와 같이 나타난  $k_u$ 와 이로부터 결정된  $k_{Q,Q_0}$ 에 있어서 측정값과 계산값의 차이는 몬테칼로 계산의 기하학적 구조에서 전리함 끝부분이 실제와 차이를 가지기 때문으로 생각한다. 실제 전리함의 끝부분은 원추형으로 되어있으므로 전체 길이가 계산의 경우보다 길다. 따라서 광자 플루언스의 기여가 보다 높으며, 결과적으로  $M$ 이 높게 측정되어  $k_u$ 가 계산값보다 낮게 나타난 것으로 보인다( $k_u$ 는  $M$ 에 반비례함, 식 (7)과 (8) 참조). 이러한 해석은 80 kV 이하의 계산결과에서는 일치하지 않는데, 계산결과를 참고하면 80 kV 영역의 경우에 에너지의 작은 변화에 대하여  $k_u$ 가 급격하게 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 계산에 사용된 에너지분포가 실제와 차이가 있다고 생각되지만, 실제 X-선 장치의 에너지스펙트럼도 전기적 특성의 미소한 변화에 따라 기준값과 차이를 보일 수 있으므로, 80 kV 영역의 선량 측정은 높은 불확정성을 가진다고 할 수 있다.

두 전리함 사이의 계산결과와 차이는 벽의 두께 차이 때문으로 생각한다. 두 전리함에 대한 두께의 차이는 0.008 g/cm<sup>2</sup>인데, 이러한 차이는 광자의 경우에 벽물질인 PMMA에 대한 감쇠계수  $\mu/\rho \approx 0.2$  cm<sup>2</sup>/g를 적용할 때 감쇠율의 차이가 약 0.2% 정도로 계산되므로 무시할 수 있다. 그렇지만 벽에서 발생한 수~수십 keV 이차전자들은 약 10<sup>-4</sup>~10<sup>-3</sup> cm 정도의 비정을 가지므로 작은 두께의 차이에 대하여 공동으로 유입되는 특성이 다를 수 있다. 이때 보다 정

량적인 분석은 에너지흡수계수와 발생하는 이차전자의 에너지 등을 다루어야 하므로 어렵다. 그렇지만 두 전리함에 대하여 벽의 두께의 차이가 전자의 비정 근처를 가진다면, 벽이 두꺼운 전리함의 경우에 공동에 유입되는 전자의 수는 보다 적을 것이다. Fig. 4a와 b에서 계산결과만을 비교하는 경우와 두꺼운 벽을 가지는 N23333 전리함의 경우에 공동으로 유입되는 전자가 적어  $k_u$ 가 높게 나타난 것으로 보인다.

### 결론

본 연구에서는 국내 표준기관의 kV X-선 영역 교정체계의 마련과 함께 kV X-선의 선량측정을 위한 기초적 연구로서, 몬테칼로 계산과 측정을 통하여 PTW-N23333 전리함과 N30001 전리함에 대한 선질인자,  $k_u$  및  $k_{Q,Q_0}$ 를 결정하였다. 공기커마에 대한 전리함의 반응을 나타내는  $k_u$  인자는 N23333 전리함의 경우에 80 kV에서 250 kV까지 증가하는 경향을 보였으며, N30001 전리함의 경우에는 80 kV에서 150 kV까지 증가하며 그 이상에서는 평탄한 특성을 보였다. 80 kV 이하에서는 두 전리함 모두 증가하는 경향을 보였다. 관전압 70~250 kV 범위에서  $k_u$ 의 평탄도를 조사한 결과 계산값의 경우에 두 전리함 모두 TRS-277에서 권고하는 ±2%를 초과하는 것으로 나타났는데, 측정값의 경우에는 두 전리함 모두 약 ±1.2%로서 반응은 비교적 평탄한 것으로 나타났다. 이러한 차이는 80 kV에서  $k_u$  인자의 계산값이 급격하게 감소하였지만, 측정값은 평탄한 특성을 보였기 때문이다. 따라서 실제 80 kV X-선의 경우에 저에너지 광자의 비율이 주어진 에너지스펙트럼 자료보다 높을

것으로 예상된다. 이처럼 낮은 에너지에서는 전리함의 반응이 급격할 수 있으므로, TRS-277의 경우에는 100 kV 이상, TRS-398의 경우에는 80 kV 이상에서 원통형전리함의 사용을 권고하고 있다고 생각한다. 이러한 관점을 적용하여 110~300 kV X-선에 대하여  $k_u$ 의 평탄도를 조사한 결과, N30001 전리함의 경우에  $\pm 1.7\%$ 로서 측정결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 계산을 통하여 N30001 전리함은 110 kV 이상에서 에너지의존성이 낮음을 알 수 있다. 물론 동일한 모델의 전리함에서도 상이한 특성이 발생할 수 있으므로 추후 다양한 전리함들에 대하여 연구를 수행해야 할 것이다.

한편, 최근 발표된 IAEA TRS-398 프로토콜의 경우에 보정인자를  $N_D, w, Q_0$ 에 포함시켜 물 흡수선량을 직접 구할 수 있도록 하고 있는데, 이러한 경우에 측정값의 불확정도를 2.0~3.4%까지 줄일 수 있지만, 현재 국내 교정체계가 마련되어 있지 않기 때문에 현재 적용은 어렵다. TRS-277의 경우에 중에너지 X-선 측정의 최종 불확정도를 단지 수%로 언급하고 있으며, 100 kV에서는  $\pm 10\%$ 에 이를 수 있다고 제시하고 있는데,<sup>9)</sup> 이는  $N_K$  기반 프로토콜의 경우에 물 흡수선량의 환산을 위하여 다양한 보정인자의 결정이 요구되기 때문이다. 그렇지만  $N_K$  기반 프로토콜의 사용이 편리한 경우도 있는데, AAPM TG-61 프로토콜<sup>11)</sup>의 경우에는 공기 방법(In-air Method)을 통하여 공기 중에서 측정된 커마를 이용하여 물뿐만 아니라 조직 등가물질들(연조직, 폐, 뼈)에 대한 표면선량을 환산하도록 되어있다. 이 때 TG-61에서는 최종 불확정도를  $\pm 4.7\%$ 로 평가하고 있는데, 만약 측정값의 불확정도를 이 수준까지 허용한다면 TG-61 프로토콜의 적용이 보다 편리할 수 있다. 그렇지만 전리함과 선질에 의존하는 변수들이 모두 결정된 경우에 적용가능 하며, 전리함의 에너지의존성과 스텝효과 보정은 모두 사용자가 결정하도록 하고 있으므로, 사전에 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 TRS-277 프로토콜<sup>9)</sup>의 적용을 위한 인자들을 구하는 과정에서  $(\mu_{en}/\rho)_{air}^w$ 의 경우에 HVL 3.37 mmCu 이상에 대한 자료가 없으며,  $P_u$ 의 경우에 길이 2 cm와 다양한 전리함에 대한 자료가 부족함을 알 수 있었다. 따라서 자료수집과 연구를 통하여 프로토콜에 대한 부분적 보완이 필요하다고 할 수 있다. 이처럼 현재 낮은 에너지 X-선에서 흡수선량 결정을 위한 프로토콜들이 보고되어 있으나, 전리함에 의존하는 보정인자들이 아직 충분히 알려져 있지 않기 때문에 직접 적용을 위해서는 현재 많은 연

구가 요구된다. 이러한 측면에서 본 연구에서 수행한 두 종류의 전리함에 대한 선질인자의 결정의 과정은 단편적이지만 IAEA 프로토콜의 적용을 위한 적절한 시도라고 생각한다. 특히 본 연구에서 수행한 몬테칼로 계산은 전리함의 에너지의존성을 근사적으로 조사하기에 적절한 방법으로 생각한다. 그렇지만 기하학적 조건이 복잡하고 많은 계산시간이 소요되기 때문에 다양한 전리함과 선질에 대한 연구 또는 실제측정을 위해서는 측정을 통한 연구가 보다 실용적인 것으로 생각한다. 이 때 표준기관에서 하나의 전리함에 대하여 세가지 선질에 대해서만 교정계수를 제공하므로 개별적인 연구수행은 어렵다고 본다. 따라서 관련학회 또는 표준기관의 차원에서 연구를 수행하여 전리함들의 에너지의존성뿐만 아니라 관련 인자들을 결정함으로써 현재 연구가 활발하지 않은 낮은 에너지 X-선 측정분야의 기술향상에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

## 참 고 문 헌

1. Attix FH: *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. John Wiley & Sons, New York. (1986), pp. 304-331
2. Khan FM: *The Physics of Radiation Therapy*. 3rd ed, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, (2003), pp. 81-82
3. Johns HE, Cunningham JR: *The Physics of Radiology*. 4th ed, Thomas, Springfield (1983), pp. 239-240
4. KSMP: 방사선량의 표준측정법. 한국의학물리학회 (1991) pp. 5-6
5. Aird EGA, Farmer FT: The design of a thimble chamber for the Farmer dosimeter. *Phys Med Biol* 17:169-174 (1972)
6. [http://www.ptw.de/ptw\\_html/index.htm](http://www.ptw.de/ptw_html/index.htm) (PTW product catalog)
7. Shani G: *Radiation Dosimetry*. 2nd ed, CRC Press, London (2000), pp. 204-208
8. ISO-4037: X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy (part 1). International Standardization Organization, Geneva (1996) pp. 6-24
9. TRS-277: Absorbed dose determination in photon and E-lectron beams: An international code of practice. Technical report series No. 277. 2nd ed, IAEA, Vienna (1997)
10. 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)
11. TG-61: AAPM protocol for 40-300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology. *Med Phys* 28:868-893 (2001)
12. IPEMB: 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 HVL); 10-300 kV generating potential. *Phys Med Biol* 41:2605-2625 (1996)
13. Peixoto JGP, Andreo P: Determination of absorbed dose



- to water in reference conditions for radiotherapy kilovoltage x-rays between 10 and 300 kV: a comparison of the data in the IAEA, IPEMB, DIN, and NCS dosimetry protocols. Phys Med Biol 45:563-575 (2000)
14. **IPSM**: Report of the IPSM working party on low- and medium-energy x-ray dosimetry. Phys Med Biol 36:1027-1038 (1991)
  15. **Omrane LB, Verhaegen F, Chahed N, Mtimet S**: An investigation of entrance surface dose calculations for diagnostic radiology using Monte Carlo simulations and radiotherapy dosimetry formalisms. Phys Med Biol 48:1809-1824 (2003)
  16. **SLAC Report-265**: The EGS4 code system. Stanford Linear Accelerator Center, Stanford (1985)
  17. **Nahum AE**: Simulation of Dosimeter Response and Interface Effects. In: Jenkins TM, Nelson W, Rindi A: Monte Carlo Transport of Electrons and Photons. Plenum Press, New York (1988), pp. 25-26

## Determination of Quality Factors for Cylindrical Ionization Chambers in kV X-rays: Review of IAEA Dosimetry Protocol and Monte Carlo Calculations and Measurements for N23333 and N30001 Chambers

Kang Kyoo Lee\*, Dong Hyeok Jeong<sup>†</sup>, Chunil Lim<sup>†</sup>, Sei Kyung Chang<sup>§</sup>, Sun Rock Moon\*

\*Department of Radiation Oncology, Wonkwang University School of Medicine, Wonkwang Medical Science Research Center, Iksan, Korea, <sup>†</sup>Department of Physics, Kunsan National University, <sup>‡</sup>Radiation Standards Division, Korea Food and Drug Administration, <sup>§</sup>Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Pochun CHA University Bundang CHA General Hospital

The quality factors for cylindrical ionization chambers for kV X-rays were determined by Monte Carlo calculation and measurement. In this study, the X-rays of 60~300 kV beam (ISO-4037) installed in KFDA and specified in energy spectra and beam qualities, and the chambers of PTW N23333 and N30001 were investigated. In calculations, the  $k_u$  and  $k_{Q,Q_0}$  in IAEA dosimetry protocols were determined from the air kerma and the cavity dose obtained by theoretical and Monte Carlo calculations. It is shown that the N30001 chamber has a flat response of  $\pm 1.7\%$  in 110~300 kV region, while the response range of two chambers were shown to  $\pm 3\sim 4\%$  in 80~250 kV region. From this work we have discussed dosimetry protocol for the kV X-rays and we have found that the estimation of energy dependency is more important to apply dosimetry protocol for kV X-rays.

**Key Words** : kV X-rays, IAEA protocol, Quality factor