

Evaluation of Characteristics in the Reference Gamma Radiation Fields for testing of Personnel Dosimetry Performance

Jang-Jin Oh, Dae-Hyung Cho, Seung-jae Han, Seong-Ho Na, Dew-hey Lee, Byung-Soo Lee, Jae-Shik Jun*, Ha-Seok Chai* and Chul-Young Yi*

Korea Institute of Nuclear Safety, Taejon 305-600, Korea

*Department of Physics Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea

개인선량 평가의 성능검증을 위한 기준급 감마선장의 특성 평가

오장진 · 조대형 · 한승재 · 나성호 · 이두희 · 이병수 · 전재식* · 채하석* · 이철영*

한국원자력안전기술원, *충남대학교 물리학과

(1998년 9월 30일 접수, 1998년 12월 18일 채택)

Abstract - In order to establish a testing system for personnel dosimetry performance, the radiation fields from photons, beta particles and neutrons are required. In recent, Korea Institute of Nuclear Safety(KINS) established the reference radiation fields except neutrons and tested a variety of their properties. As a result of the test, the reference beams were shown to meet satisfactorily not only the standards of the International Organization for Standardization(ISO), but also the standard levels of the developed countries which are intercomparable with the international traceability. This paper describes the reference beam of gamma radiation. The self-designed and established reference radiation fields were investigated and analyzed by ISO and other international standards. The secondary photon contribution and the beam uniformity of the gamma radiation field were measured and evaluated to fulfill those requirements suggested by the ISO-4037. The measured air kerma rate for the ^{137}Cs and ^{60}Co gamma fields was $0.1891 \sim 23.4967 \mu\text{Gy/s}$ and $0.5844 \sim 15.9954 \mu\text{Gy/s}$ respectively. The uncertainty with 95 % confidence level of the measured air kerma rate was determined to be less than 2.5 % which is comparable to the international reference gamma radiation fields. It was found that the evaluated air kerma calibration factors of Exradin ionization chamber were in good agreement within 0.9 % and 0.03 % with those given by PTB and NIST, respectively. The gamma radiation fields installed at KINS can maintain traceability systems in Korea, Germany and United State.

Key Words : performance test, reference radiation fields, gamma radiation fields, air kerma

요약 - 개인 피폭선량 평가의 검증체계를 확립함에 있어서 기본적으로 갖추어야 할 방사선장은 감마선, X-선, 베타선 및 중성자이다. 금년에 한국원자력안전기술원에서는 중성자를 제외한 방사선장을 위한 기준조사장치(빔)를 확보하였다. 이 기준조사빔이 국제적으로 소급할 수 있는 방사선장의 역할을 수행할 수 있도록 하기 위하여 국제 표준기구규정 및 선진국의 표준규격 등의 기준과 요구조건에 충족되도록 하였다. 본 논문은 감마선장에 대한 기준조사장치에 관한 것으로서의 기어도 및 방사선장의 균질도를 평가하였고, 이를 국제 기준과 비교한 결과 국내 및 국제 기준을 잘 만족하고 있는 것으로 평가되었다. 또한, 측정된 공기커마율은 ^{137}Cs 선원에 대하여 $0.1891 \sim 23.4967 \mu\text{Gy/s}$, ^{60}Co 선원에 대해서는 $0.5844 \sim 15.9954 \mu\text{Gy/s}$ 의 값으로 결정하였으며, 공기커마율이 가지는 불확도는 95 % 신뢰도 범위에서 2.5 % 이내로 결정되었다. 측정된 공기커마율의 신뢰성을 검증하기 위하여 전리함의 교정정수를 독일 PTB의 교정정수에 대하여 재평가한 결과 교정정수가 가지는 불확도(1.2%) 범위내에서 일치하고 있었으며, 미국의 측정값과 비교한 결과 0.03 % 범위 내에서 일치하고 있음이 판명되었다. 그러므로 한국원자력안전기술원에 설치된 감마선장은 국내의 표준 소급체계를 유지하고 있을 뿐만 아니라 미국 및 독일의 소급체계를 확보하게 되었고, 국내 및 국제 기준 방사선장으로 활용 가능하게 되었다.

중심어 : 성능검사, 기준방사선장, 감마선장, 공기커마

서론

방사선의 기본물리량으로는 에너지 플루언스, 커마, 흡수선량 등이 있고 방호량으로서 등가선량 등이 있는데 이 중에 등가선량은 방사선에 의한 위해의 척도로 오랫동안 중요한 값으로 사용되어 왔고 그 값은 목적에 따라 다양한 기준에 의해 결정되었다. 이에 따라 1985년 이후 국제방사선단위 및 측정위원회(ICRU)에서는 보고서 39, 43, 47을 통하여 외부전리방사선을 보다 보편적으로 측정하기 위한 보수적이고도 충분한 평가방법을 제시하였다[1,2,3]. 또한, 외부 방사선에 의한 유효선량을 평가하기 위하여 주위선량당량, 방향성선량당량 및 개인선량 당량등 실제로 측정이 가능한 실용량을 제시하였고, 일상적으로 적용되는 개인방사선 감시에 대한 기술치침도 제시하였다. 이러한 개인 감시용 실용량은 인위적으로 조직등가 재료로 만들어진 ICRU 구에 의하여 정의되어야 하며 이것은 ICRU 보고서 35에 자세히 정의 되어있다[4]. 그러나 실제로 조직과 동일한 등가물질인 ICRU 구를 제작하는 것은 매우 어려운 일이다, 더욱이 평행하고 광범위하며 동질인 방사선장을 갖춘 확장정렬장에서 계측되어야 하는 실용량은 ICRU 조직등가구의 깊이 10mm에서 계측된 선량만으로 결정하는 것은 더욱 어렵다. 그러나 실용량은 ICRU에서 제시하고 있는 물리량을 사용하여 산출하는 것이 국제적인 추세이며 이 산출을 위해서는 기준에 적합한 방사선장의 구축이 필수적이다.

한국원자력안전기술원(KINS)에서는 개인선량계 검증체계 구축을 위한 국제 수준의 개념 정립 및 개인 방사선 피폭 관리의 정밀 정확성 정립과 선량 평가 검증 체계의 확립을 위하여 기본적으로 기준급 방사선장의 설치를 완료하였으며, 이 방사선장들이 국제적으로 선량평가 검증의 기준방사선장으로서의 소급 비교할 수 있는 방사선장의 역할을 할 수 있는 기반을 마련하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였으며 이에 따라 방사선장의 특성 및 공기커마울을 결정하였다.

- ▶ 국제 기준 및 국내의 표준기관에서 정하는 기준에 적합한 방사선장이 설치되어있는지 여부를 평가하였고,
- ▶ 기준급 감마선장에 대한 공기커마울 결정 및 결정된 공기커마울의 불확도를 정량적으로 해석하므로써 기준량의 신뢰성을 제고하였으며,
- ▶ 국내의 표준기관 및 기준기관과 상호비교를 통하여 국내 및 국제 소급성을 확보하도록

하였다.

재료 및 방법

감마선 조사실 및 선원

국가 방사선 방호 체계확립 및 개인선량계 판독 성능검증을 위하여 KINS에서는 ISO 4307 및 ANSI N13.11이 권장하는 감마선원의 기준에 준하여 740GBq(20 Ci) 및 111GBq(3 Ci)급의 ^{137}Cs 과 111GBq(3 Ci) 급의 ^{60}Co 감마선원을 도입하여 조사장치를 제작 설치하였다[5,6,7,8]. KINS에서 운영하고 있는 방사선 조사실은 감마선 조사실, X-선 조사실 및 베타선 조사실로 구성되어있으며, 감마선 조사실과 X-선 조사실은 폭 7 m 길이 9 m 이며, 베타선 조사실은 폭 3.5 m 길이 4.0 m이고 지면에서 천장까지의 높이는 3.2 m이다. 조사실의 내벽 및 외벽은 조사실 외부 및 원격조정실의 방사선 작업자와 일반인의 피폭을 최소화하기 위하여 50 cm 의 벽돌과 콘크리트 벽으로 차폐하여 누설선량을 최소화하였다. 그림 1은 KINS에 설치된 방사선 조사실의 배치도를 나타내고 있다.

이 방사선 조사장실의 조건은 국내에서 기준 방사선 조사실의 기준에 따라 설계된 것이며[9], 방사선 조사실의 환경조건을 유지하기 위하여 방사선 조사실에 별도의 공조 시스템을 설치하여 온도와 습도를 항상 일정하게 유지 할 수 있도록 하였음은 물론 전기적 잡음 신호를 제거하기 위하여 별도의 접지시설과 전압 안정장치를 사용하였다.

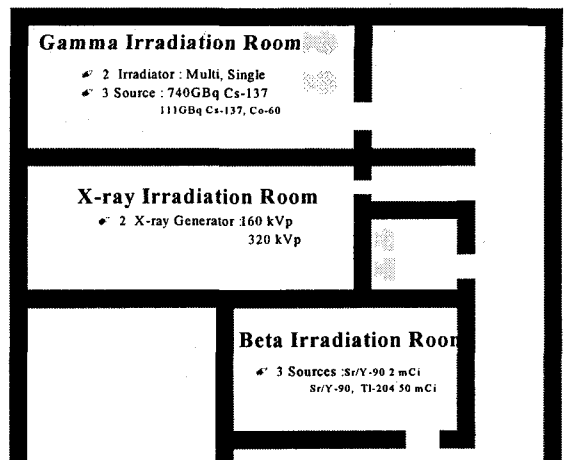
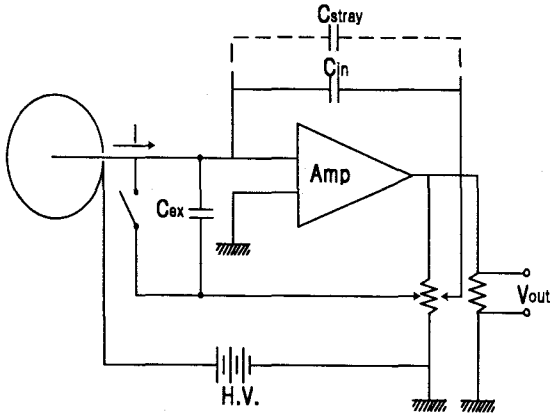


Fig. 1. Layout of irradiation rooms constructed at KINS.



(a) Equivalent circuit for measurement of ionization current induced from radiation.

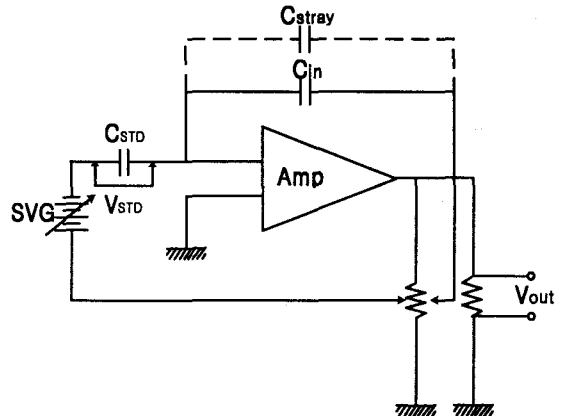
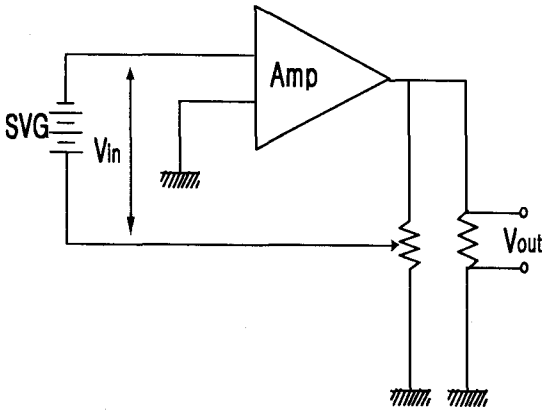


Fig. 3. Circuit for measurement of internal capacitance.



(b) Circuit for measurement of K_v

Fig. 2. Equivalent circuit for ionization current measurement and electrometer calibration.

전류측정 장치

본 연구에서는 전리함에 감마선에 의하여 생성된 전리전류로부터 공기 커마를 측정하기 위하여 저전류 측정장치로서 피드백 형태의 Keithley 6517 일렉트로메타를 사용하였으며, 측정 시스템의 등가 회로는 그림 2 와 같다. 그림 2(a)에서 C_{in} 는 내부전기용량, C_{ex} 는 외부전기용량, C_{stray} 는 회로 내에 존재하는 표류전기용량을 나타내며 측정 시스템의 모두 합한 총전기용량을 C_{tot} 라고 하면 전리전류 i 는 다음 식으로 간단히 표현된다.

$$i = C_{tot} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{1}$$

여기서 $\Delta V/\Delta t$ 는 축전기의 양단에 인가되는 단위 시간당 전압 변동율을 의미하며 C_{tot} 는 회로에 걸리는 전기용량을 의미한다. 따라서 정확한 전류 값을 측정하기 위해서는 C_{tot} 및 ΔV 에 대한 교정을 수행하는 것이 필요하다. ΔV 값을 교정하기 위하여 우선 회로를 그림 2(b)와 같이 구성하고 표준전원공급장치(SVG)를 사용하여 일정한 전압을 공급하면 출력에 대한 보정인자 K_v 는 다음과 같이 결정된다.

$$K_v = \frac{V_{in}}{V_{out}} \tag{2}$$

이 보정인자 K_v 는 전리전류 측정시 출력값에 직접 보정되어 사용되는 값이다. 또한, 회로내부에 연결되어 있는 C_{in} 와 C_{stray} 는 분리하여 측정이 불가능하므로 그림 3과 같은 회로를 구성하여 C_{in} 와 C_{stray} 를 동시에 측정하였다. 그림 3에서 입력에 용량이 C_{STD} 인 기준콘덴서를 통하여 표준 전압을 공급하면 입력단과 출력단에 동일한 전하가 축적되게 되므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Q = C_{STD} \cdot V_{STD} = (C_{in} + C_{stray}) \cdot V_{out} \tag{3}$$

측정 장치에 대한 교정 및 보정이 완료된 후,

Table 1. Air kerma rate for ¹³⁷Cs gamma source(740 GBq) of KINS as of Apr. 9. 1998.

Beam size at 1m SCD (m)	∅20cm		∅30cm	
	Air kerma (μ Gy/s)	SD(%)	Air kerma (μ Gy/s)	SD(%)
0.75	22.7848	0.04	23.4967	0.22
1.00	13.0748	0.10	13.4766	0.15
1.50	5.7880	0.17	5.9723	0.17
2.00	3.2467	0.40	3.3478	0.43
2.50	2.0758	0.54	2.1411	0.61
3.00	1.4335	0.60	1.4898	0.62
3.50	1.0577	0.45	1.0963	0.60
3.75	0.9231	0.68	0.9554	0.69

Table 2. Air kerma rate for ¹³⁷Cs gamma source(111 GBq) of KINS as of Apr. 29. 1998.

Beam size at 1m SCD (m)	∅20cm		∅30cm	
	Air kerma (μ Gy/s)	SD(%)	Air kerma (μ Gy/s)	SD(%)
0.75	4.5277	0.36	4.7813	0.87
1.00	2.5477	0.02	2.6817	0.75
1.50	1.1118	0.20	1.1747	0.17
2.00	0.6095	0.30	0.6836	0.36
2.50	0.4001	0.24	0.4144	0.55
3.00	0.2849	0.58	0.2894	0.03
3.50	0.2087	0.23	0.2114	0.71
3.75	0.1891	0.71	0.1989	0.46

Table 3. Air kerma rate for ⁶⁰Co gamma source(111 GBq) of KINS as of Apr. 29. 1998

Beam size at 1m SCD (m)	∅20cm		∅30cm	
	Air kerma (μ Gy/s)	SD(%)	Air kerma (μ Gy/s)	SD(%)
0.75	15.0630	0.15	15.9954	0.11
1.00	8.4650	0.40	8.9627	0.29
1.50	3.7282	0.52	3.9628	0.77
2.00	2.0718	0.70	2.2198	0.86
2.50	1.3225	0.39	1.4052	0.93
3.00	0.9143	0.46	0.9884	0.18
3.50	0.6769	0.62	0.7215	0.35
3.75	0.5884	0.87	0.6330	0.39

Table 4. Scattered radiation contribution for ¹³⁷Cs(740GBq) gamma irradiation field.

Beam size at 1m SCD (m)	∅20cm		∅30cm			
	primary (μ Gy/s)	scattered (μ Gy/s)	S/P ratio (%)			
			primary (μ Gy/s)	scattered (μ Gy/s)	S/P ratio (%)	
1.50	5.7880	0.0359	0.6	5.9723	0.1228	2.1
2.50	2.0758	0.0161	0.8	2.1411	0.0444	2.1
3.50	1.0577	0.0149	1.4	1.0963	0.0248	2.3

실제 전리 전류를 측정하기 위하여 (1) 식은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$i = C_{tot} \cdot \frac{\Delta V \cdot K_v}{\Delta t} \quad (4)$$

또한, 전류 모드 또는 외부 피드백 단자에 표준 저항을 사용하면 전리 전류를 측정할 경우에는 일렉트로메타 또는 외부 피드백 소자로 사용되는 소자를 표준기관에 교정 받은 후 사용하여야 한다.

전리함

본 연구에서 감마선장의 공기 커마율을 결정하기 위하여 Exradin A - 3 전리함을 독일의 국가 표준기관인 PTB에서 교정하였다. Exradin A-3

전리함을 측정위치에 그림 2(a)와 같은 구조로 설치하고 전리함에 의하여 포집되는 전리전류(전하량)를 측정하였다. 이때 전리함에서 포집되는 전리전류(전하량)를 M_{TPH} 라고 하고 PTB에서 교정된 공기 커마 교정인자를 N_k 라고 하면 공기 커마 K_{air} 는 다음 식으로 결정된다.

$$K_{air} = N_k \cdot M_{TPH} \quad (5)$$

여기서 M_{TPH} 는 Exradin A-3 전리함에 포집된 전리전류(전하량) M 에 온도 및 기압의 환경보정인자가 고려된(기준온도 : $T_0=293.15$ °C, 기준기압 : $P_0=1013.25$ hPa, T, P 는 전리 전류 측

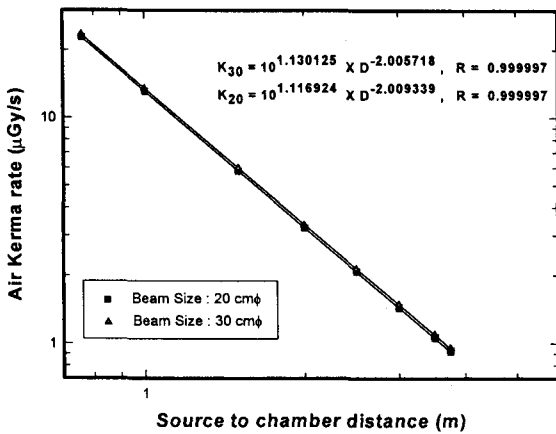


Fig. 4. Air kerma rate for ¹³⁷Cs gamma source (740 GBq) of KINS (Reference date : Apr. 9. 1998).

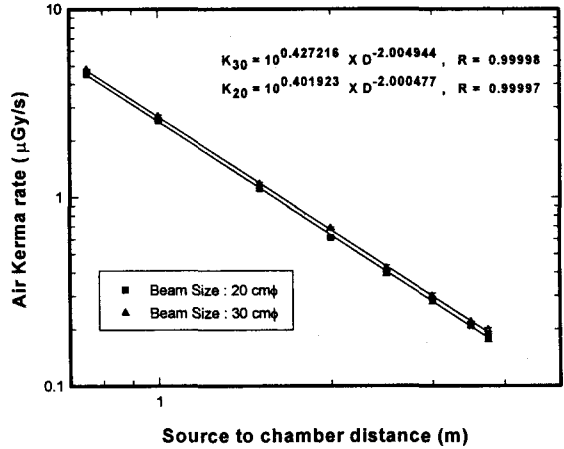


Fig. 6. Air kerma rate for ¹³⁷Cs gamma source (111 GBq) of KINS(Reference date : Apr. 29. 1998).

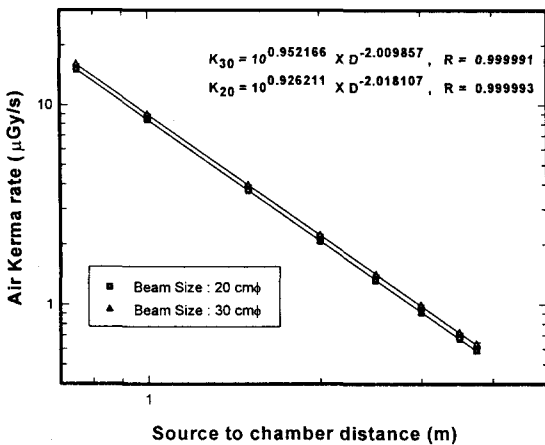


Fig. 5. Air kerma rate for ⁶⁰Co gamma source (111 GBq) of KINS(Reference date : Apr. 29. 1998).

정 당시의 온도와 기압) 값이다.

실험 및 결과

공기 커마율 결정

본 연구에서 Keithley 6517 일렉트로메타의 $C_{in} + C_{stray}$ 를 평가한 결과(100.15 pF ± 0.01%), PTB에서 교정된 전리함 및 전리함 교정 값을 식 5 에 적용하여 감마선장의 공기커마율을 측정하였다. 표 1, 2, 3 에는 측정된 각 감마선원

에 대한 공기 커마율과 상대오차(1σ)를 함께 표시하였다. 측정이 수행되지 않은 위치에서의 공기 커마율을 평가하기 위하여 거리에 따른 공기커마율의 관계를 그래프로 표시하였으며, 그 결과를 그림 4, 5, 6에 표시하였다. 그림 4, 5, 6에서 직선 방정식과 측정 결과와의 상관계수가 0.9999 이상으로 평가되었으므로 본 연구의 측정 결과와 그래프로 표시한 방법은 매우 적합한 방법인 것으로 판단된다. 그림에서 표시한 K_{20} K_{30} 는 방사선장의 크기가 $\phi=20$ cm, 30 cm(선원으로부터 1 m인 지점에서의 방사선장의 크기가 직경 20 cm, 30 cm 가 되도록 제작된 빔 콜리메이터의 크기를 의미함)인 경우의 거리에 따른 공기 커마율 방정식을 나타내고 있는 것이며, D 는 선원으로부터 측정기까지의 거리를 나타내고 있다. D 의 범위는 $1m \leq D \leq 3.75m$ 이고 거리 D 의 지수가 -2.0에 근접하고 있음은 측정 결과가 선원과 측정위치 사이의 거리에 역자승 법칙을 잘 만족하고 있음을 나타내고 있다.

균질도 평가

방사선 조사장 균질도에 대하여 ISO는 어떤 측정 위치에서 방사선장의 범위 내에서의 공기커마율의 변화가 5 % 이내이어야 한다고 규정하고 있으며, 국내의 기준은 2 %이내이어야 한다고 규정하고 있다.

본 연구에서는 ¹³⁷Cs 및 ⁶⁰Co 감마선장에 대하여

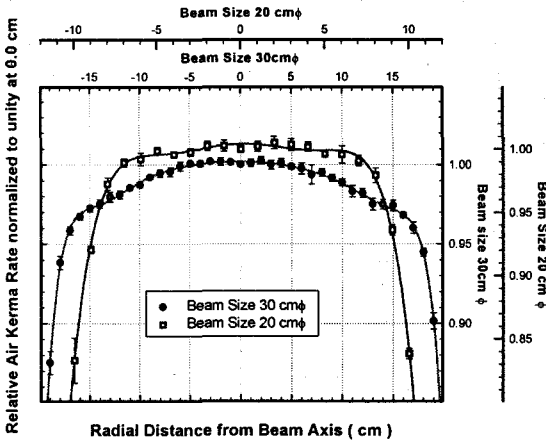


Fig. 7. The Radial non uniformity for ¹³⁷Cs(740 GBq) gamma-ray field of KINS.

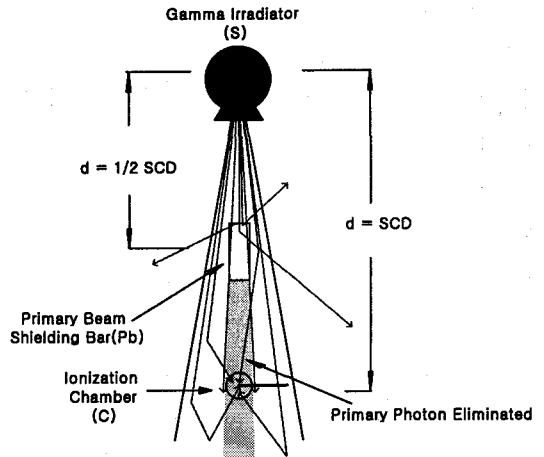


Fig. 8. Installation layout of shadow cone to measure scattered radiation contribution.

선원으로부터 거리 1 m에서 전리함을 이용하여 빔의 중심에서 1 cm 간격으로 좌우 15 cm 지점까지 전리 전류를 측정하여 감마선장의 균질도를 평가하였다. 그림 7은 740 GBq인 ¹³⁷Cs 감마선원의 균질도 평가 결과를 나타낸 것이며, 그림에서 $\phi = 30$ cm 인 감마선장은 균질도가 2% 미만으로 유지되는 영역이 직경 26cm로 평가되었으며, 5% 미만으로 유지되는 영역은 직경 30 cm 이상인 것으로 판명되었다. 또한, $\phi = 20$ cm 인 감마선장에 대한 균질도는 직경 20 cm 범위에서 1%미만으로 국내 및 국제 기준을 만족하는 영역의 크기가 직경 20 cm 이상인 것으로 평가되었다. 또한, 111GBq 급의 ¹³⁷Cs 및 ⁶⁰Co 감마선 조사장치에 대한 균질도 평가결과 역시 740 GBq의 ¹³⁷Cs 감마선장과 동일한 성능을 나타내고 있다.

산란선 평가

국내 및 국제 기준에서 정하는 규정에 따라 감마선 빔의 산란선대 일차선의 비가 5% 내에 있는지 확인하기 위하여 전리함에 입사되는 일차선을 차단하기 위한 납으로 구성된 차폐봉을 제작, 설치하여 산란선의 기여를 측정하였다. 일차선을 차단할 목적으로 납의 두께를 10 cm, 검출기의 직경 2 cm 를 완전히 가리도록 하기 위하여 지름을 2 cm 로 방사선 차폐봉을 제작하여 그림 8 과 같이 전리함과 선원의 중간위치에 설치하여 산란선을 평가하였다.

본 연구에서는 ¹³⁷Cs 및 ⁶⁰Co 감마선장에 대하여 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m 로 선원과 전리함간의 거리

를 변화시켜가면서 산란선 기여도를 평가하였으며 740 GBq의 ¹³⁷Cs 감마선장에 대한 산란선 기여도를 표 4 에 나타내었다. 표 4 에서 산란선에 의한 전리전류는 수 fA 의 수준으로서 본 연구에서 사용된 측정기의 측정 최저한계에 이르고 있는 수준일 뿐 만 아니라 이 방사선장의 1 차선 측정을 위한 전리전류 값이 가지는 측정오차는 약 0.8% 로 결정되어 거리변화에 따른 산란선의 기여가 증가함을 확신할 수 없다. 다만, 방사선장의 크기가 증가함에 따라 산란선의 기여가 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 설치된 방사선장에는 후방산란에 의한 산란선의 기여는 무시할 수 있을 정도이며 방사선장의 입체각의 증가에 따라 산란선의 기여가 증가되고 있음을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로부터 모든 광자선에 대해 ISO 의 산란선 기여도 기준인 5% 이내를 만족하고 있을 뿐만 아니라 국내의 기준방사선장으로서의 기준인 산란선의 기여도 5% 이하를 아주 잘 만족하고 있는 것으로 나타났으므로 이 방사선장이 기준급 방사선장에서 요구하는 모든 조건을 만족하고 있음이 밝혀졌다.

불확도 평가

본 연구에서 결정된 각각의 감마선장에서의 불확도를 평가하기 위하여 불확도에 기여되는 항목에 따라 계통오차와 우연오차로 분류하고 있으며 이 두 오차의 합을 불확도로 표현하고 있다. 본 연구에서는 공기 커마율의 불확도를 2σ로 표현하

였으며 그 관계는 다음과 같다.

$$U = \pm \sqrt{(tv)^2 + 1.13 \sum_j (x_j)^2} \quad (6)$$

식 7에서 U 는 측정의 불확도이고, tv 는 우연오차, x_j 는 계통오차를 나타내고 있다. 또한, 본 연구에서는 측정결과로부터 회귀방정식을 유추하여 전체의 공기커마율을 결정하였으므로 회귀방정식에 포함된 불확도는 측정값 n 개를 대상으로 한 선형 회귀 방정식에 따라 계산된 값과 측정값의 차이를 계산값에 대한 백분율로 표시하였다. 이 결과로부터 전체 불확도는 측정에 의하여 발생된 측정의 불확도 즉 식 6에 의하여 평가된 불확도와 내삽 방정식의 불확도의 제곱 합의 제곱근으로 표현하며 본 연구에서는 다음의 식으로 계산하였다.

Table 5. Source of error involved in the measured air kerma rate for 740GBq ^{137}Cs gamma ray fields of KINS.

Item	Uncertainties
$t(n = 10, 95\% \text{ confidence level})$	2.3
$v(\text{relative standard error of the mean})$	
Beam size $\phi 20\text{cm}$ at 1 m	max. 0.68%
Beam size $\phi 30\text{cm}$ at 1 m	max. 0.69%
x_j (Systematic uncertainty)	
Calibration Factor	1.3 %
Voltage	0.1 %
Capacitance	0.01 %
Time	0.1 %
Temperature	0.1 %
Pressure	0.1 %

Table 6. Total Uncertainty(%) of KINS gamma ray fields.

Item	740GBq ^{137}Cs		111GBq ^{137}Cs		111GBq ^{60}Co	
	$\phi 20\text{cm}$	$\phi 30\text{cm}$	$\phi 20\text{cm}$	$\phi 30\text{cm}$	$\phi 20\text{cm}$	$\phi 30\text{cm}$
Random	0.68	0.69	0.71	0.87	0.87	0.93
Systematic	1.955		1.955		1.955	
Fitting Eq.	0.42	0.24	0.45	0.30	0.32	0.43
Total	1.94	1.72	2.07	2.00	2.01	2.06
Expression	2.50		2.50		2.50	

$$\text{total uncertainty} = \pm \sqrt{U^2 + \frac{\sum_i (R_i)^2}{n-1}} \quad (7)$$

이와 같은 절차를 활용하여 본 연구에서 결정된 공기커마율에 기여되는 항목별 불확도는 740GBq ^{137}Cs 감마선장에 대하여 표 5에 나타내었다. 표 5에서 t 값은 측정회수가 10회인 경우에 t -분포에서 제시한 값을 사용하였으며 x_j 측정기 또는 각종 상수들이 가지고 있는 불확도의 범위를 나타내고 있다. 이와 같은 방법으로 결정된 세기가 740GBq인 ^{137}Cs 감마선장, 111GBq급의 ^{137}Cs 및 ^{60}Co 감마선장에 대한 불확도의 평가 결과를 표 6에 나타내었다. 표 6에 나타난 불확도는 95%의 신뢰도로 표현한 값이며 불확도의 최대값은 2.12%로 표시할 수 있으며 최종적으로 KINS의 감마선장에 대한 공기 커마율의 불확도는 2.5%로 결정하였다.

상호 비교 및 평가

본 연구에서 설치된 기준급 감마선장에 대하여 국제 및 국내 기준과 방사선장의 특성을 상호 비교하였다. 표 7에는 본 연구에서 설치된 감마선장의 조건과 국내 및 국제 기준이 요구하고 있는 방사선장의 특성을 상호 비교한 결과이다. 표 7에서도 보는 바와 같이 KINS에 설치된 방사선장은 국내 및 국제 기준을 매우 잘 만족하고 있음이 확인되었다.

또한, 본 연구에서 측정된 결과를 검증하기 위하여 측정된 감마선장에서의 Exradin A-3 및 A-4 전리함을 교정하였다. 측정의 신뢰성을 검증하기 위하여 PTB에서 교정되어 본 연구에서 선량을 측정에 사용된 A-3 전리함의 교정정수를 산출하였으며 이 결과를 독일 PTB의 교정정수와 상호 비교한 결과 그 차이가 0.1% 미만으로 PTB의 교정정수가 가지는 불확도의 범위 내에서 일치하

Table 7. Comparison result for the characteristics of reference gamma ray field against the Korean and international criteria.

Item	KINS	KRISS criterion	ISO criterion	NIST criterion
Scattered radiation contribution	2.5 %	5 %	5 %	5 %
Radial non-uniformity	2.0 %	2 %	5 %	5 %

고 있었다. A-4 전리함에 대하여는 독일 PTB 및 미국 NIST의 교정정수와 각각 0.9%와 0.03%의 차이를 나타내고 있다. 이 값은 KINS의 교정정수가 가지는 불확도 및 각각의 기관이 가지는 교정정수의 불확도(KINS : 3.2%, PTB : 1.3%, NIST : 1.0%) 범위 내에 잘 일치하고 있는 것으로 판단된다.

결론

본 연구를 통하여 KINS에 설치된 방사선장의 국제기준 적합성 평가, 공기커마 결정 및 공기커마 결정에 수반되는 불확도를 정량적으로 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 평가된 방사선장의 크기, 균질도 및 산란선 기여도 평가 결과 본 연구에서 설치된 감마선장이 국내 및 국제 기준을 잘 만족하고 있을 뿐만 아니라 국제 비교 평가를 위한 기준조사 및 상호비교 프로그램 등에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 기준급 감마선장의 공기커마는 740GBq ^{137}Cs 감마선원의 경우 방사선장의 크기 및 거리에 따라 $0.9231 \mu\text{Gy/s} \sim 23.4967 \mu\text{Gy/s}$ (1998. 4. 9일 기준)로 결정되었으며, 111GBq ^{137}Cs 감마선원의 경우 방사선장의 크기 및 거리에 따라 $0.1891 \mu\text{Gy/s} \sim 4.7813 \mu\text{Gy/s}$ (1998. 4. 29일 기준)로 결정되었고, 111GBq ^{60}Co 감마선원의 경우 방사선장의 크기 및 거리에 따라 $0.5884 \mu\text{Gy/s} \sim 15.9954 \mu\text{Gy/s}$ (1998. 4. 29일 기준)로 결정되었으며 불확도(2σ)는 모든 감마선장에 대하여 2.5%이하로 표시하였다.

3. 본 연구에서 결정된 공기 커마율의 신뢰성을 검증하기 위하여 본 측정에 결정된 A-3 전리함의 교정정수를 독일의 PTB의 교정정수와 상호 비교하였으며, A-4 전리함의 교정정수를 PTB 및 NIST의 교정정수를 상호 비교한 결과 최대 0.9% 범위 내에서 일치하고 있었다. 이를 바탕으로 하여 KINS의 방사선장이 국내 소급체계를 유지하고 있음은 물론 독일 및 미국 등과 국제 소급체계를 유지하고 있음이 판명 확인되었다.

4. 본 연구에서 설치되고 평가된 감마선장은 국내에서 국가표준 소급체계를 유지하고 있을 뿐만 아니라 미국 및 독일의 표준기관에 대하여 소급체계를 유지할 수 있게 되었다

5. KINS의 기준급 방사선장은 개인선량계 성능 검사의 기준조사는 물론 실용량 평가를 위한 기준 방사선장으로 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단

된다.

참고문헌

1. International Commission on Radiation Units and Measurements, *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*, ICRU Report 39, ICRU, Bethesda, MD(1985).
2. International Commission on Radiation Units and Measurements, *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources-part 2*, ICRU Report 43, ICRU, Bethesda, MD(1988).
3. International Commission on Radiation Units and Measurements, *Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations*, ICRU Report 47, ICRU, Bethesda, MD(1992).
4. 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).
5. International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1 : Characteristics of the radiations and their methods of production*, Revision of ISO 4037 : 1979, ISO/DIS 4037-1(1994).
6. American National Standards Institute, *American National Standard for Dosimetry - Personnel Dosimetry Performance - Criteria for Testing*, ANSI N13.11(1993).
7. National Institute of Standards and Technology, *Criteria for the Operation of Federally-Owned Secondary Calibration Laboratories (Ionizing Radiation)*, NIST SP 812(1991).
8. Japan Standards Association, *Methods of Calibration for Radiation Exposure Meters*, JIS Z 4511(1985).
9. 황선태, 하석호, 김원식, 김현문, 전리함형선량계의 표준교정절차, KASTO 88 - 26 - 103 - 042, 한국측정기기교정협회(1988).