

Effective Doses in the Radial Gamma Radiation Field near a Point Source: Gender Difference and Deviation from the Personal Dose Equivalent

Jai-Kwon Chang, Jai-Ki Lee

Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

점선원 감마선장에서 유효선량의 성별차 및 개인선량당량과의 차이

장재권 · 이재기

한양대학교 원자력공학과

Abstract - The individual dose equivalent, H_p , effective dose, E , and gender specific effective dose, E^m and E^f , were evaluated using the male and female phantoms of MIRD type located in the radial gamma radiation field near a point source. The point sources were placed at the distances of 15, 40 and 100 cm in front of the body at different heights. Two radionuclides, ^{137}Cs and ^{131}I , were selected for the illustrative examples. In terms of the gender specific effective doses, E^f is higher than E^m with a few exceptions, e.g. the case where the point source is at the height of reproductive organs, but the differences from the sex-averaged values are not significant enough to justify use of gender specific dose conversion factors for the radial gamma field. The ratios H_p/E were in the range of 1 to 3 depending on the source and dosimeter positions when the dosimeter is worn on the front surface of the torso covering from chest to lower abdomen, but varied from 0.34 to 6.5 in extreme cases. When it is assumed that the typical handling procedure of radioactive source material and the typical dosimeter position (on the chest) be respected, the dosimeters calibrated against the broad parallel field appear to provide estimates with acceptable errors for the effective dose of workers exposed to radial broad gamma field around a point source.

Key words : point source, effective dose, personal dose equivalent, gender specific, dosimeter, MIRD, MCNP

요약 - 점선원 주위에 형성되는 방사상의 감마선장에서 개인선량당량 H_p , 유효선량 E , 성별 유효선량 E^m 과 E^f 를 MIRD형 남녀 모의 피폭체를 이용하여 평가하였다. 선원은 신체의 전방 각각 15, 40 및 100 cm 거리의 여러 높이에 있는 것으로 하였고 방사성 핵종으로는 시범적으로 ^{137}Cs 과 ^{131}I 을 선정하였다.

성별 유효선량에서는 일부 예외적인 경우-예를 들면 선원이 생식선 앞에 위치할 때-를 제외하고는 대체로 여성의 경우가 크게 나타났으나, 남녀 평균값과의 차이는 크지않아 방사상 감마선장에서 성별 유효선량환산인자를 사용할 필요성은 없었다. 선량계를 가슴에서 하복부까지의 몸통 전방에 착용할 경우에는 H_p/E 의 비가 약1~3의 범위에 있었고 극단적인 경우는 0.34에서 6.5까지 큰 편차를 보였다. 그러나 일반적인 방사선원 취급방법과 선량계 착용위치(흉곽 전방)를 가정하고, 선량계가 넓고 평행한 방사선장에서 유효선량에 대해 교정된다면 평행하지는 않지만 넓은 범인 방사상 감마선장에 대해서는 용인할 수 있는 오차의 범위에서 유효선량 평가치를 제공할 수 있을 것으로 나타났다.

중심어 : 점선원, 유효선량, 개인선량당량, 성별, 선량계, MIRD, MCNP

서 론

ICRP의 1977년 권고[1]에서 도입된 유효선량은 방사선에 피폭한 개인의 신체내 각 장기 및 조직의 등가선량이 차이가 있고, 동일 등가선량에서도 각 조직이 처하는 위험이 다르기 때문에 피폭한 사람의 위험을 간단하지만 종합적으로 제시할 목적으로 정의된 양이다. 이를 위해 ICRP는 각 조직의 등가선량에 해당 조직의 상대적 방사선 위험계수로부터 도출된 조직가중치를 가중하여 합하는 방법으로 유효선량을 산출토록 하였다.

그런데 넓은 평행빔과 같은 단순한 방사선장에서도 체내 각 장기의 선량을 선량계로 직접 측정하는 것은 비현실적이기 때문에 공기커마와 같이 방사선장에서 측정 가능한 양과 몬테칼로 기법 등 정밀한 방사선 수송계산으로 얻는 조직등가선량 또는 유효선량을 관계짓는 환산계수를 사용해야 한다. 사람의 체내 각 조직의 등가선량은 피폭하는 방사선의 선질 뿐만 아니라 방사선장의 균질성, 방사선이 인체로 입사하는 방향에 따라라도 달라짐은 필연적이다. 그러나 실제 피폭상황에서 발생할 수 있는 다양한 방사선장에 대해 따로 이러한 환산계수를 정의할 수는 없기 때문에 ICRP는 가장 단순한 평행한 넓은 빔을 기준 방사선장으로 하여 여러 에너지의 광자에 대한 환산계수들을 ICRP 74[2]에서 제공하고 있다.

한편, 개인선량계를 이용한 측정을 위해서는 ICRU[3,4]가 실용량을 정의하고 있다. 즉, 정렬되고 확장된 방사선장에 놓인 ICRU 표준 모의피폭체[4] 내부의 지정된 위치에서의 선량당량을 주위 선량당량과 방향성선량당량으로 정의하여 방사선장 측정에 적용토록 하였으며, 인체의 표면 지정

깊이에서의 선량당량을 개인선량당량으로 하여 개인감시 측정에 적용토록 하고 있다.

그렇지만 실제 방사선장은 평행한 넓은 빔처럼 균질하지 않다. 비균질인 방사선장에 노출될 때에는 개인선량계가 있는 위치의 피폭이 그 사람의 피폭을 대표하지 못할 경우도 예상된다. 실제에서 흔하게 이루어지는 것처럼 작은 선원을 근접하여 취급할 경우에는 주된 방사선장이 선원을 중심으로 한 방사상이 되고 거리에 따라 기하학적 감소도 커진다. 이러한 조건에서 피폭한 경우 선원 종류나 위치에 따라 유효선량이 어떻게 변동하며 선량계의 지시치가 유효선량과 얼마나 근접할 것인가는 실질적인 측면에서 관점의 대상이다.

Reece등[5]은 MIRD[6]형 모의피폭체와 MCNP[7] 코드를 이용하여 평행한 넓은 빔이 신장축과 직교하지 않는 방향으로 입사하는 경우와 몇 가지 특정 에너지 광자를 내는 점선원이 인체 근처의 서로 다른 위치에 있을 때 유효선량의 변화를 평가한 바 있다. 그런데 이 문제에서 특별히 관심 있는 것은 작업자가 착용하는 개인선량계가 넓은 평행빔이 신장축과 직교하여 입사되는 것이 아닌 피폭 상황에서 유효선량을 얼마나 근접하게 표현할 수 있는냐는 의문인데 Reece등의 결과는 이에 대한 평가를 제공하지 않았다.

근래에는 불균형이 심한 피폭상황에서 보다 나은 유효선량 평가치를 얻기 위해 복수선량계를 사용하는 데에 대한 지침도 개발되고 있다[8,9]. 그러나 이러한 지침은 신체의 다른 부위에 착용하는 복수의 선량계 지시치에 해당 선량계에 인접한 장기들의 조직가중치를 배분하여 산정한 선량계가중치를 적용하는 비교적 단순한 방법에 근거하고 있다. 중요한 것은 비균질 방사선장에 피

폭하는 경우 선량계 지시가 유효선량과 어떠한 관계에 있는가에 대한 보다 상세한 정보가 필요하다는 점이다.

따라서 여기서는 실제로 취급하는 대표적 감마 핵종을 선택하여 이로 인한 점선원 방사선장에서 유효선량이 남녀간의 체격, 장기 특성, 조직가중치 적용의 차이로 인해 얼마나 영향을 받으며, 통상 신체의 전면에 작용하는 개인선량계로 측정하는 개인선량당량과 제한치인 선량한도를 표현할 유효선량의 차이를 다양한 선원 위치에 대해 평가하고자 하였다.

유효선량 및 개인선량당량 평가방법

인형 모의피폭체 모델 및 계산수단

유효선량을 산출하기 위해서는 실제 인체에 준하는 인형피폭체 모델이 필요하다. 인형 모의피폭체로는 MIRD5형 남성 모의피폭체(ADAM: 질량 70 kg, 신장 170 cm, 몸통의 폭 40 cm과 두께 20 cm)와 Cristy와 Eckerman[11]등이 만든 여성 모의피폭체(EVA: 질량 57 kg, 신장 160 cm, 몸통의 폭 34.5 cm과 두께 19.6 cm)를 사용하였다. 장기의 등가선량을 평가하기 위해 총 28개의 체적이 정의되었는데 이처럼 많은 체적이 사용된 것은 신체의 여러 위치에 분산되어있는 골수의 표현에 다수의 체적이 소요되기 때문이다. 계산수단은 일반목적 몬테칼로 코드인 MCNP4A를 사용했고, 감마선 단면적 자료는 ENDF[12]의 데이터를 사용하였다.

유효선량과 성별 유효선량

인형 모의피폭체와 MCNP를 이용한 계산결과는 커마 근사에 의한 장기선량(흡수선량)을 제공한다. 여기서 다루는 감마선의 경우에는 방사선가중치가 1.0이므로 이 흡수선량 값은 곧 장기의 등가선량이 된다. 이 선량을 유효선량으로 환산하기 위해서는 조직가중치가 적용되는데 ICRP 60[10]에서는 12개 주요 개별 장기와 10개의 나머지 장기에 대한 조직가중치 w_T 를 권고하고 있다. 그러나 남성의 경우 위원회에서 권고하고 있는 장기 중 일부 장기가 없기 때문에 유방에 대한 가중치는 남성의 경우 0으로 여성의 경우 0.1, 나머지 장기에서 남성의 경우 자궁이 없기 때문에 9개

장기에 대해 가중치를 할당하였다. 유효선량은 ICRP 74에서 제시하고 있는 아래 식에 의해 계산하였다.

$$E = w_{\text{breast}} H_{\text{breast}}^f + \sum_{T \neq \text{breast}} w_T \left[\frac{H_T^m + H_T^f}{2} \right]$$

여기서 H_T 는 조직등가선량이며 상첨자 f와 m은 각각 여성과 남성을 의미한다.

성별 유효선량은 남성과 여성 모의피폭체에서 계산된 장기의 등가선량에 위의 조직가중치 남성의 경우 0.95 여성의 경우 1.05를 할당하여 남성 유효선량(E^m)과 여성유효선량(E^f)을 평가하였다. 즉,

$$E^m = \sum_{T \neq \text{breast}} w_T H_T^m$$

$$E^f = 0.1 H_{\text{breast}}^f + \sum_{T \neq \text{breast}} w_T H_T^f$$

남성의 경우 난소와 자궁이 없으므로 이들 조직에 대한 장기선량 H_T^m 값이 0이다.

피폭모델 및 개인선량계의 모사

불균일한 방사선장에서의 피폭에 대한 대표적인 경우로서 전형적인 방사선 취급 작업인 점선원(또는 작은 선원)을 근접하여 다루는 상황을 가정하였다. 방사선원으로는 흔히 사용되는 ^{137}Cs 과 ^{131}I 핵종의 점선원을 시범적으로 선택하였는데 이는 연구의 목적이 핵종별 잠재위해를 평가하는 것이 아니라 방사상의 방사선장에서의 피폭이 기준 방사선장인 넓고 평행한 방사선장과의 차이를 고찰하기 위한 것이기 때문이다. 매봉피당 ^{137}Cs 은 0.85 개의 662 keV 감마선을 방출하고 ^{131}I 의 주요 감마 에너지는 364(81%), 637(7.3%), 284(6.1%), 80.2(2.6%), 723(1.8%) keV이다. 점선원은 인체 전방부 표면으로부터 15, 40 또는 100 cm 거리에 위치하는 것을 가정하였다. 각각의 거리에 대해 그림 1의 Z축 5cm(대략 배꼽 높이)에서부터 155cm(머리 위 65cm 높이)의 범위에서 10 cm 간격의 높이와 인체의 발바닥 높이에 해당하는 -80 cm에 선원이 위치하고 있는 17가지 상황에 대한 계산을 수행하였다. 상단 또는 하단의 선원 위치는 통상 점선원을 취급하는 형태는 아니

지만 방사선작업장에 따라서는 방사성 액체를 함유한 배관이 머리 위나 발밑을 지나는 경우가 있는데 이런 상황에서 선량계의 읽음 값이 유효선량과 차이가 커질 것으로 예상되기 때문에 그 차이의 정도를 살펴보기 위해 설정한 것이다.

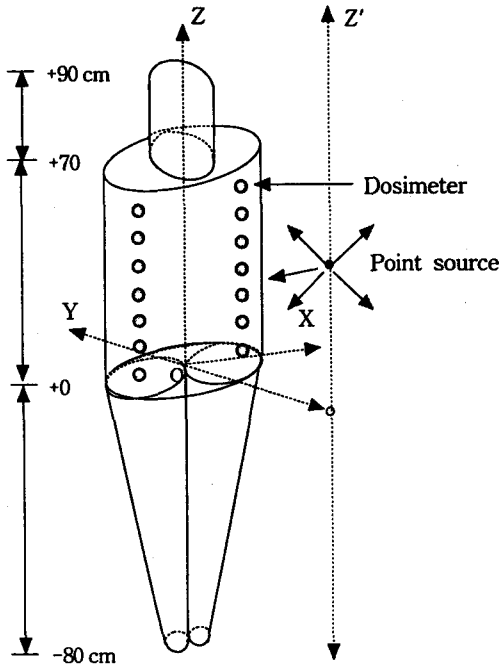


Fig.1. Illustration of the geometrical arrangement used for the calculation of effective doses and dosimeter responses due to a point isotropic source. Three cases of source-to-body surface are selected: 15, 40 and 100cm. For each case of source-to-body surface distance, the point source is placed on Z' axis at 17 different positions: $z' = -80, 5, 15, 25, \dots, 155$ cm. Dosimeters are placed on the front surface of trunk at the points of $x = \pm 10$ cm, $y = -8.66$ cm and $z = 5, 15, 25, \dots, 65$ cm.

인체 외부에 착용하는 개인 선량계를 모사함에 있어서 평행빔과는 달리 점선원의 경우 입사각에 따라 선량계의 응답에 영향을 줄 수 있으므로 전방 2π 방향에 대해서는 등방성인 반경 2cm의 반구형태의 이상적 선량계를 신체의 전면 표면에 배치하였다. 선량계는 그림1과 같이 남성 모의피폭체의 전방부의 좌우($x = \pm 10, y = -8.66$)에 Z축상의 5

~65cm의 범위에서 10cm 높이별로 몸통위 14곳에 위치시켰다. 남성 모의피폭체에 대해서만 평가한 것이 남성 방사선작업자가 많다는 것을 근거로 하는 것은 아니며, 다만 이 계산의 목적이 예시적 성격이며 또 여성 모의피폭체의 경우에 유방으로 인해 가슴 부위에 착용하는 선량계가 선원과의 거리차를 초래하기 때문이다.

결과 및 논의

점선원 방사선장에서의 유효선량, 성별 유효선량

표 1과 2는 각각 ^{137}Cs 과 ^{131}I 점선원의 위치에 따른 유효선량 E, 성별 유효선량 E^m 및 E^f 의 계산결과와 그 비를 보여주고 있다.

유효선량의 경 E^m/E^f 우, 높이에 따라서는 선원이 위, 폐, 결장등 조직가중치가 큰 장기들이 밀집한 기준면 상부 35cm 정도의 높이에 있을 때가 가장 크고 양단으로 멀리 떨어질수록 감소한다. 선원과 인체와의 거리관계에서는 기하학적 감쇠에 따라 전반적으로 가까운 거리에 점선원이 있을 때 유효선량이 크게 나타나는 것은 예상하는 바이지만, 선원의 높이가 115cm 이상에서는 40cm 거리의 선원에 의한 유효선량값이 15cm 거리의 선원보다 큰 역전현상을 보여주고 있는데 이는 15cm 거리의 경우 입사각의 영향으로 중요 장기가 인체에 의해 자체차폐를 받기 때문으로 판단된다.

성별 유효선량은 전체적으로 여성의 유효선량값이 남성보다 큰 값을 보여주고 있다. 이러한 이유는 조직가중치 적용에서 남성(0.95)보다 여성(1.05)의 값이 크고 남성에 비해 여성의 몸통 두께가 얇기 때문에 방사선의 인체에 의한 자체차폐가 적기 때문이다. 다만, 15cm 거리의 몸통위 5cm 높이에 선원이 위치하고 있는 경우 남성의 유효선량값이 여성에 비해 약간 큰 결과를 보여주고 있는데 이는 유효선량에 기여도가 큰 남성의 생식기가 이 부근에 근접한 곳에 위치하고 있기 때문이다.

선원이 85~95cm 높이에 놓인 경우 남성의 유효선량값이 큰 결과를 나타내고 있는데 이러한 이유는 남성과 여성의 신장의 차이에 따른 방사선의 인체내 입사각의 차이에 따라 주요 장기들의 인체에 의한 자체 차폐효과가 여성이 더 크기 때문으로 해석된다. 남성과 여성의 신장차이에서

Table 1. Differences in effective dose, male and female effective dose as a function of point source location for ¹³⁷Cs(unit:10⁻¹⁷Sv/per photon emitted^{a)}).

Source height (cm)	Source-to-body surface distance(cm)											
	15				40				100			
	E	E ^m	E ^f	M/F ^{b)}	E	E ^m	E ^f	M/F	E	E ^m	E ^f	M/F
-80	0.89	0.54	1.24	0.43	0.98	0.67	1.29	0.52	0.76	0.58	9.35	0.61
5	21.5	22.4	20.2	1.10	7.51	7.45	7.58	0.98	1.91	1.87	1.95	0.95
15	23.4	21.6	25.1	0.86	8.13	7.76	8.51	0.91	1.96	1.87	2.05	0.91
25	24.3	21.0	27.6	0.76	8.45	7.82	9.08	0.86	2.00	1.92	2.08	0.92
35	24.5	20.6	28.5	0.72	8.44	7.68	9.20	0.83	2.00	1.91	2.10	0.91
45	23.4	18.8	28.0	0.67	8.02	7.23	8.80	0.82	1.95	1.85	2.04	0.90
55	19.9	16.5	23.3	0.70	7.27	6.59	7.95	0.83	1.89	1.81	1.97	0.91
65	15.7	14.3	17.1	0.83	6.39	5.88	6.88	0.85	1.80	1.70	1.90	0.89
75	11.6	11.6	11.6	1.00	5.35	5.02	5.69	0.88	1.70	1.62	1.77	0.91
85	7.65	7.87	7.43	1.05	4.35	4.11	4.59	0.89	1.58	1.50	1.66	0.90
95	4.84	4.94	4.72	1.04	3.48	3.32	3.63	0.91	1.45	1.38	1.50	0.92
105	3.12	3.11	3.12	0.99	2.73	2.63	2.81	0.93	1.34	1.26	1.41	0.89
115	2.09	2.03	2.16	0.93	2.13	2.05	2.20	0.93	1.19	1.14	1.22	0.93
125	1.47	1.39	1.56	0.89	1.67	1.60	1.74	0.92	1.08	1.02	1.14	0.90
135	1.07	0.99	1.14	0.87	1.36	1.30	1.41	0.92	0.96	0.92	1.00	0.92
145	0.85	0.74	0.91	0.82	1.10	1.06	1.14	0.92	0.84	0.81	0.91	0.89
155	0.66	0.58	0.73	0.79	0.88	0.84	0.91	0.92	0.77	0.75	0.81	0.92

a) Dose per unit activity(Bq) may be calculated by multiplying the numbers by the total gamma yield(0.85).

b) E^m/E^f.

Table 2. Differences in effective dose, male and female effective dose as a function of point source location for ¹³¹I(unit:10⁻¹⁷Sv/per photon emitted^{a)}).

Source height (cm)	Source-to-body surface distance(cm)											
	15				40				100			
	E	E ^m	E ^f	M/F ^{b)}	E	E ^m	E ^f	M/F	E	E ^m	E ^f	M/F
-80	0.48	0.31	0.66	0.46	0.52	0.38	0.66	0.57	0.43	0.34	0.53	0.64
5	12.5	13.4	11.7	1.14	4.42	4.38	4.46	0.98	1.15	1.12	1.18	0.95
15	13.6	12.6	14.6	0.86	4.80	4.60	5.01	0.91	1.17	1.14	1.20	0.95
25	14.2	12.1	16.2	0.74	5.00	4.65	5.35	0.86	1.19	1.15	1.24	0.93
35	14.4	11.9	16.8	0.70	4.96	4.54	5.38	0.84	1.20	1.14	1.25	0.91
45	13.5	10.8	16.2	0.66	4.71	4.23	5.18	0.81	1.17	1.11	1.22	0.91
55	11.4	9.43	13.5	0.69	4.27	3.89	4.67	0.83	1.11	1.06	1.16	0.91
65	9.03	8.23	9.84	0.83	3.70	3.40	3.99	0.85	1.06	1.01	1.12	0.90
75	6.58	6.61	6.57	1.00	3.09	2.90	3.30	0.87	0.99	0.95	1.03	0.92
85	4.24	4.40	4.04	1.08	2.51	2.37	2.66	0.89	0.93	0.89	0.97	0.92
95	2.60	2.67	2.53	1.05	1.96	1.86	2.04	0.91	0.84	0.81	0.96	0.83
105	1.65	1.65	1.65	1.00	1.51	1.46	1.57	0.92	0.77	0.74	0.81	0.91
115	1.08	1.05	1.12	0.93	1.18	1.13	1.23	0.91	0.70	0.67	0.74	0.91
125	0.76	0.72	0.78	0.91	0.92	0.88	0.96	0.92	0.61	0.58	0.64	0.92
135	0.55	0.51	0.60	0.83	0.72	0.70	0.75	0.93	0.55	0.53	0.57	0.92
145	0.42	0.38	0.47	0.80	0.57	0.55	0.60	0.91	0.48	0.47	0.50	0.95
155	0.33	0.29	0.37	0.77	0.46	0.45	0.48	0.92	0.43	0.42	0.45	0.95

a) Dose per unit activity(Bq) may be calculated by multiplying the number by the total gamma yield(0.99).

b) E^m/E^f.

예상할 수 있듯이 인체의 발바닥 높이에 선원이 놓여있는 경우 다른 위치에 비해 여성과 남성의 유효선량값의 차이가 상대적으로 큰 결과를 보여주고 있다.

그러나 선원이 바닥에 있는 것처럼 극단적인 경우를 제외하고는 남녀를 평균한 유효선량 E에 대한 성별 유효선량 E^m 나 E^f 의 편차가 20% 이내이며 특히 일반적인 피폭 위치인 몸통 전방에 선원이 있는 경우에는 10% 이내에 있어 방사상 방사선장에서도 ICRP의 성별차 없는 단일 유효선량 사용은 무리가 없는 것으로 평가된다.

유효선량과 개인선량당량의 비교

그림 2는 신체 표면으로부터 40 cm에 있는 ^{137}Cs 과 ^{131}I 의 점선원에 대해 선량계의 위치에 따라 계산된 개인선량당량과 유효선량의 비 H_p/E 를 보여주고 있다. 선원의 거리에 따른 H_p/E 는 ^{137}Cs 선원의 경우 0.67~3.85의 범위를, ^{131}I 선원의 경우 0.65~4.04의 범위에 분포하고 있다. H_p/E 는 거리가 가까운 15 cm에서는 더욱 확대되어 0.34에서 6.5까지 이른다. 핵종간에도 방사선의 투과력 차이에 의해 차이가 발생한다.

몸통(0~70 cm) 부위의 높이에 선원이 위치하고 있는 경우 선원과 동일한 높이에 놓여있는 선량계에서 평가된 H_p/E 의 값이 가장 크게 나타나는 것은 자연스런 현상이다. 선원이 몸통의 하부에 위치하고 있을 때는 상부에 위치한 선량계에서, 선원이 상부에 위치하고 있을 때는 하부에 위치한 선량계에서 H_p/E 가 1이하가 되는 결과를 보여주고 있는데 ^{137}Cs 의 경우, 0.34 ^{131}I 의 경우 0.35 최소값의 결과를 얻었다.

한편, 동일한 모의피폭체와 MCNP 코드를 이용하여 현재 선량평가 체계에서 이용되고 있는 AP(Antero-posterior) 방향의 평행빔에 대해 ^{137}Cs 과 ^{131}I 의 H_p/E 를 계산한 결과 선량계의 위치에 따라 1.12~1.22 범위에 있었다. 평행빔에서 이와 같은 차이를 보이는 이유는 통계적인 원인도 있고, 유효선량은 일정하나 신체부위에 따른 후방산란의 차이로 인하여 선량계의 지시치인 개인선량당량이 다소 변동하기 때문이다. 이 결과는 평행빔의 경우 실용량 도입목적에 적합하게 과소평가를 피하면서 지나친 과대평가 없이 개인선량당량이 유효선량을 대체하여 사용할 수 있음을 시사한다. 그러나 위에서 보듯이 방사상

의 점선원 방사선장에서는 감시량인 개인선량당량과 방호량인 유효선량 사이에 무시하지 못할 차이가 발생할 수 있다.

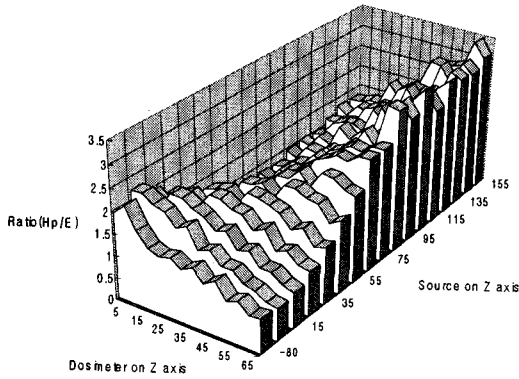
이를 보다 가시화하기 위해 그림2의 분포를 등고도표로 재구성한 것이 그림3과 그림4이다. 다만, 그림3, 4에서는 선량계가 넓고 평행한 빔에 대해 교정되는 점을 고려하여 위에서 계산한 평행 방사선장에서의 H_p/E 의 값의 평균치 1.17을 나눔으로써 현행 선량계 교정체계에 대해 정규화한 값으로 나타내었다. 즉, 그림3, 4의 값의 크기는 이론적인 유효선량(E)에 대한 실측될 유효선량(E_r)의 비값을 의미한다. 그림3과 그림4를 주의 깊게 관찰하면 다음과 같은 경향을 발견할 수 있다.

첫째, 여기서 시험한 방사상 방사선장의 경우 많은 경우에 E_r/E 값이 1 이상이다. 즉, 선량계로 측정되는 선량이 실제 종사자의 유효선량을 과대평가한다. 방사선방호 목적상 과소평가보다는 과대평가가 무난하지만 지나친 과대평가는 유익한 방사선 사용을 불합리하게 제약하는 부작용을 초래하므로 외부피폭을 측정하는 선량계의 과대피폭 용인 수준은 100%를 넘지 않을 것이다. 반대로 과소평가의 경우에는 개인선량계 성능요건[13]의 기준인 50% 수준으로 볼 수 있다.

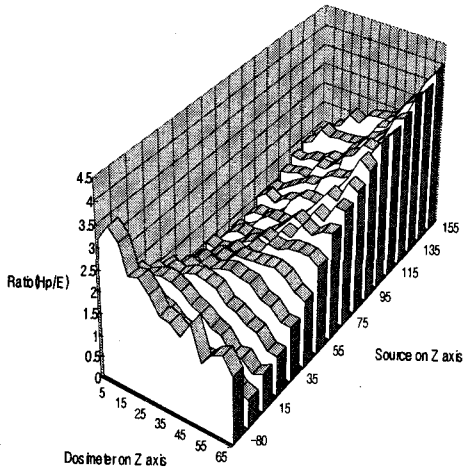
둘째로 통상 개인선량계를 착용하는 위치인 가슴부는 그림1의 좌표계에서는 Z축의 45 cm 부근인데 그림3과 그림4에서 이 높이가 심한 과대평가를 대체로 피해가는 위치라는 점이다. 일반적인 취급에서 방사성물질의 높이가 복부의 전방인 높이 25 cm 내외라고 볼 때 E_r/E 값은 1.5 이내이다. 물론 그림에서 보듯이 선원이 이러한 위치에만 있다고 볼 때는 선량계를 보다 높은 60 cm 이상의 위치에 두면 E_r/E 값을 1에 가깝게 근접시킬 수 있다. 그러나 선원이 보다 높은 위치로 또, 신체에 가깝게 근접하는 경우에는 높은 위치의 선량계는 심각한 과대평가를 하게 된다.

셋째, 만약 45 cm 부근 높이의 선량계 E_r/E 값이 1~2 사이에 유지할 수 있다면 이상적인 선량계가 아닌 실제 선량계의 E_r 값이 선량계의 방향 의존성으로 인해 수십 % 감소할 것을 예상할 때 실제 E_r/E 값은 보다 1에 근접하게 될 것으로 예상된다.

따라서 평행하지는 않지만 넓은 범인 점선원 부근에서의 방사상 감마 방사선장에 대해서는 일반적인 취급상황과 개인선량계 착용방식이 용인할 수 있는 수준으로 유효선량에 대한 평가를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 이러한 결론을 일반화하기 위해서는 여기서 다루지 않은 감마선 에너지가 매우 낮거나 매우 높은 경우에 대한 보완적인 평가가 필요하다.



(a)



(b)

Fig. 2. Ratio of the reading from a dosimeter in front of the body, H_p , to effective dose, E , for a point source at 40 cm in front of the body. (a) ^{137}Cs (b) ^{131}I .

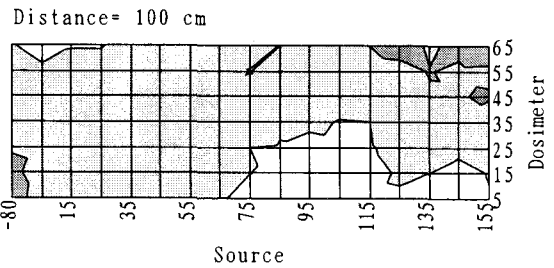
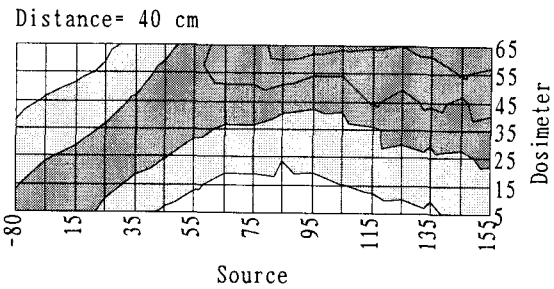
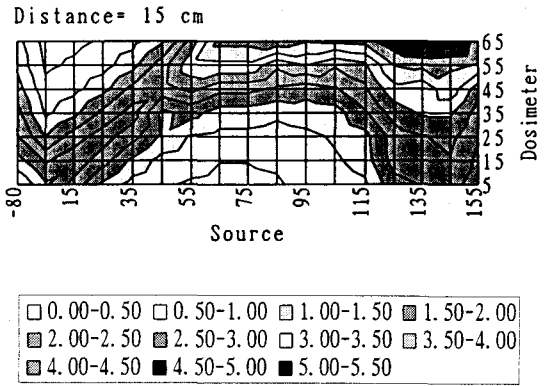


Fig. 3. Variation of the ratio E_r/E_w with locations of the source(^{137}Cs) and of the dosimeter. The numbers on scale represent the heights from the bottom of body trunk in cm. Source-to-body surface distances: (a) 15cm, (b) 40cm (c) 100cm.

결론

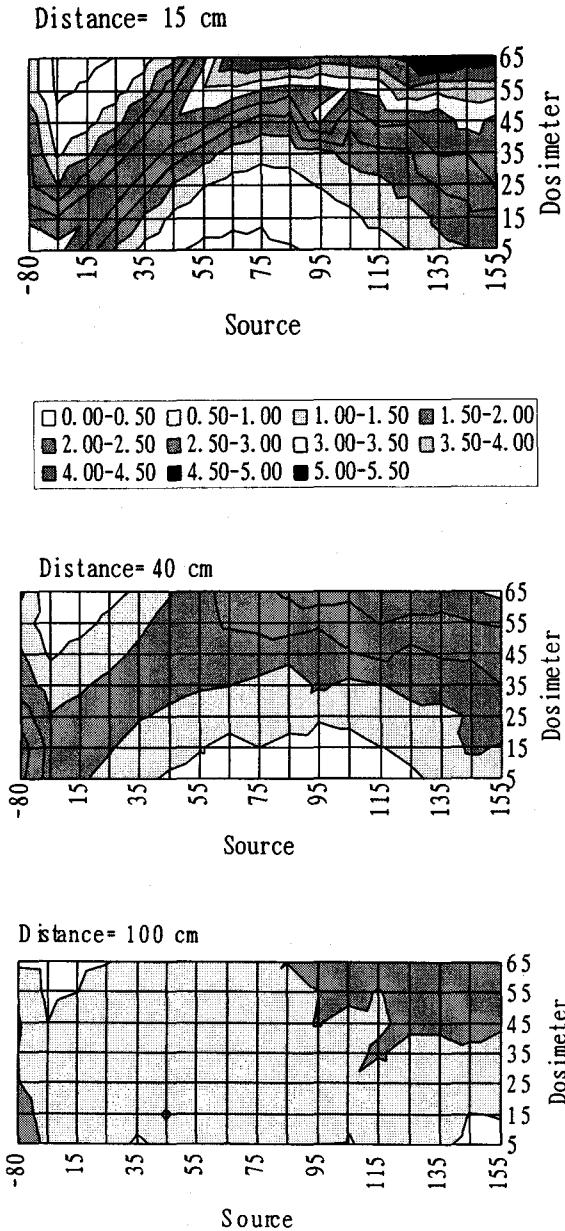


Fig. 4. Variation of the ratio E_r/E with locations of the source(^{131}I) and of the dosimeter. The numbers on scale represent the heights from the bottom of body trunk in cm. Source-to-body surface distances: (a) 15 cm, (b) 40 cm (c)100 cm.

남성과 여성 인형모의피복체 전방부에 놓여있는 점선원에 의한 방사상의 감마 방사선장에 대한 개인선량당량, 유효선량과 성별유효선량을 MCNP4A 코드를 이용하여 계산하여 넓고 평행한 기준 방사선장이 아닌 피복환경에서 남녀의 유효선량의 성별차를 살펴보고, 또 개인선량계로 합리적인 범위 내에서 유효선량을 측정할 수 있는가를 살펴보았다.

성별 유효선량은 여성의 유효선량값이 남성에 비해 대체적으로 큰 결과를 보여주고 있는데 이는 조직가중치의 값이 여성이 크고 남성에 비해 몸통의 두께가 얇기 때문에 인체에 의한 방사선의 자체차폐가 작기 때문으로 해석된다. 또한 남성과 여성의 체격의 차이에 따라 주요 장기의 인체내 위치가 다르기 때문에 조사환경에 따라 성별 유효선량은 많은 차이가 발생할 개연성은 있으나 본 연구에서 다른 감마 점선원에 의한 방사상 방사선장에서는 유의한 차이는 발생하지 않아 ICRP의 남녀 평균 한 유효선량의 적용이 가능하였다.

여기서 고려한 점선원의 위치에 따른 개인선량당량과 유효선량의 비 H_p/E 는 ^{137}Cs 선원의 경우 0.34~6.5, ^{131}I 선원의 경우 0.35~5.74 범위의 결과를 얻었다. 선원의 거리가 인체에 근접하거나 몸통으로부터 멀리 떨어진 높이일수록 H_p/E 값이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이 결과는 점선원에 대한 선량계와 인체의 입사각 차이, 감마선 에너지에 따른 투과력 차이, 유효선량에 기여도가 큰 개별장기의 인체내 위치에 따른 인체와 선량계의 선량응답 차이에서 기인한다.

선량계 읽음값을 넓고 평행한 방사선장에서의 유효선량에 대해 교정하여 얻게될 유효선량 평가치 E_r 과 이론적인 유효선량 E 의 비값 E_r/E 는 점선원과 선량계의 위치에 따라 변동한다. 그러나 일반적으로 점선원을 취급하는 방식(복부 전면 40 cm 이상 이격)과 선량계 착용방식(흉부 전면에 착용)을 가정하고 경사지게 입사하는 방사선에 대한 실용 선량계의 방향의존성을 감안할 때 1~1.5 범위에 있을 것으로 평가되어 평행하지는 않지만 넓은 범인 방사상 감마선장에 대해서는 유효선량 평가를 위한 복수선량계는

필요하지 않은 것으로 나타났다.

본 연구는 두 종류의 대표적인 감마 방출핵종의 단순한 점선원의 방사선장만을 고려하였으나 향후에는 다양한 피폭시나리오-예를들어 특별히 고에너지 감마선을 내는 핵종, 선형 또는 면적 선원 등-에 대한 연구가 흥미있을 것이다. 이러한 연구 결과들은 비균질 방사선장에 대한 선량 평가 방법의 개선이나 복수선량계의 도입을 위한 기준설정 및 알고리즘개발에 요긴한 정보가 될 것이다.

참 고 문 헌

1. International Commission on Radiological Protection, *Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26, Pergamon Press (1977).
2. International Commission on Radiological Protection, *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation*, ICRP Publication 74, Pergamon Press(1996).
3. International Commission on Radiation Units and Measurement, *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Source*, ICRU Report 39 (1985).
4. International Commission on Radiation Units and Measurement, *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Source-Part 2*, ICRU Report 43 (1988).
5. W. D. Reece, J. W. Poston and X. G. Xu, "Determining the Effective Dose Equivalent for External Photon Radiation: Calculational Results for Beam and Point Source Geometries", *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol 55, No 1, 5-21 (1994).
6. W. S. Snyder, M. R. Ford, G. G. Warner, *Estimates of Specific Absorbed Fraction for Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom*, Society of Nuclear Medicine, New York, MIRD Pamphlet No. 5. Revised (1978).
7. LANL Group X-6, *MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4A*, LA-12625-M (1993).
8. Health Physics Society, *An American National Standard-Criteria for Performing Multiple Dosimetry*, HPS, N13.41, 7-20(1997).
9. National Council on Radiation Units and Measurements, *Use of Personal Monitors to Estimate Effective Dose Equivalent and Effective Dose to Workers for External Exposure to Low-LET Radiation*, Bethesda, MD:NCRP; Report No 122 (1995).
10. International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press (1990).
11. M. Cristy, *Mathematical Phantoms for Use in Reassessment of Radiation Dose to Japanese Atomic-Bomb Survivors*, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-9487 (1985).
12. J. H. Hubbell, W. J. Veigele, E. A. Briggs, R. T. Brown, D. T. Cromer and R. J. Howerton, "Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections," *J. Phys. Chem., Ref. Data* 4, 471 (1975).
13. ANSI, *American National Standards for Dosimetry-Personal Dosimetry Performance - Criteria for Testing*, ANSI N13.11(1993).