

방사선 작업종사자의 피폭선량 개인모니터링을 위한 선량계착용 및 평가방법

Method of Wearing Dosimeter and Dose Estimation
for Personal Monitoring of Radiation Workers

김태욱*, 김경덕, 윤철환, 허영희, 한재문

한수원(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

방사선작업자의 방사선방호를 위해 작업자의 방사선피폭관리시 개인선량계를 이용한 개인모니터링이 매우 중요하다. 방사선작업시 여러 개의 선량계를 착용하고 그 중 가장 큰 값을 피폭선량으로 선택하면 방사선작업자의 피폭선량이 과소평가 되는 것을 막을 수 있다. 반면 여러 개의 선량계를 착용하는 방법은 비용과 시간이 많이 들고 복잡하다. 따라서 균일 방사선장이나 예상되는 피폭선량이 선량한도에 못 미치는 방사선작업의 경우에는 1개의 선량계를 착용하는 것이 바람직하다. 또한, 예상되는 피폭선량이 적은 불균일 방사선장의 경우 2개 이상의 선량계를 착용하여 피폭선량을 정확히 평가하여야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 불균일 방사선장의 경우 방사선작업자가 선량계의 착용방법에 따른 피폭선량을 비교하기 위하여 선량계를 1개 착용하였을 때와 2개 이상을 착용하였을 때에 각 착용방법에 따른 측정값이나 평가결과가 실제 피폭선량과 어떠한 차이를 나타내는지 지금까지의 연구결과들을 비교하고 적합한 방안을 고찰하였다.

Abstract

For radiation protection of workers, individual monitoring using personal dosimeter is important for management of effective dose. On the contrary, if using several dosimeters for radiation monitoring and adopting maximum dose of dosimeters, we can avoid the underestimation, but this approach is costly, time consuming and complex. So in the uniform and low radiation field, it is desirable to wear one dosimeter. For the accurate individual dose evaluation, it is appropriate to use more than one dosimeters. In this study, various radiation doses were evaluated in nonuniform radiation field by varying the dosimeter wearing ways to compute the dose between wearing one dosimeter and wearing two dosimeters through the results of other countries.

서론

방사선이 인간에 미치는 위해에 대해서는 끊임없이 논란이 계속되어오고 있지만, 방사선은 태고로부터 자연에 존재해 왔으며, 각종 기기 및 질병 진단, 암 치료, 식품처리, 연구 등 인간의 생활에 없어서는 안될 중요한 요소임에는 틀림이 없다.

원자력 및 방사선이용이 활성화되고 인간의 삶의 질이 높아짐에 따라 이러한 방사선이용이 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 점점 높아져 가고 있다. 국제방사선방호위원회는 히로시마 나가사키 원폭투하 및 체르노빌 사고에 따른 지속적인 역학조사를 수행해오고 있으며 그 연구결과를 바탕으로 새로운 권고사항을 지속적으로 발표하고 있다. 이러한 권고사항들의 주요 내용은 내부피폭 반영, 개인피폭 선량한도 설정, 개인모니터링방법 제시, 방사선피폭, 사고방지 방법 등에 관한 것이다.

인위적인 피폭으로 인하여 방사선피폭을 받는 작업자의 방사선방호를 위해서는 인간과 인간환경의 안전을 확보하면서 방사선을 유효하게 이용한다는 방사선방호목표에 따라 관리기관 및 규제기관이 정상 및 사고시 방사선방호 및 관리를 수행하도록 하고 있으며 이를 위해서는 선원모니터링 뿐 아니라 개인모니터링이 매우 중요하다. ICRP 60에서는 직업피폭자는 선량이 지속적으로 낮거나 승무원의 경우와 같이 일정 값을 초과하는 것을 명확히 방지할 수 있는 경우 이외에는 개인모니터링을 수행하도록 권고하고 있다¹⁾. 여기서 '선량이 지속적으로 낮은 경우'란 판단의 문제이며 개개인보다는 작업 그룹에 적용되는 것이다.

방사선작업그룹에 대한 개인모니터링 방법은 기술적인 요인과 산업체 특성에 따라 달라진다. 이러한 결정에 영향을 미치는 기술적 요인으로는 선량한도와 관련된 예상피폭량, 선량의 변화 가능성, 측정 및 해석방법의 복잡성 등을 들 수 있다.

일반적으로 작업그룹은 개인모니터링이 분명히 필요한 그룹, 필요할 가능성이 있는 그룹, 필요하지 않은 그룹 등 세 개의 그룹으로 구분하는 것이 편리하다. 개인의 연간유효선량이 5 ~ 10 mSv 범위이면 규정 값을 초과할 가능성이 있으면 그 그룹에 대하여 개인모니터링을 실시하여 그 선량을 평가하여야 한다. ICRP 75에 따르면 모든 구성원이 1 mSv 이하의 연간유효선량을 받을 경우 그 그룹에 대한 개인모니터링은 수행할 필요가 없다. 중간 그룹에 대해서는 모니터링 하는 것이 바람직 하지만 고 피폭 그룹에 비하면 덜 중요하다²⁾.

개인모니터링 프로그램은 선량계의 종류와 그 착용방법도 포함하여 결정하여야 한다. 감마선 및 베타선과 같이 투과성 방사선 및 비투과성 방사선이 함께 존재할 때는 두 가지를 함께 측정할 수 있는 선량계를 착용하여야 한다. 복잡하고 불균일 방사선장에서는 2개 이상의 선량계를 착용할 필요가 있다. 특히 방사선원에 근접하여 취급하여야 하는 작업의 경우에는 손에도 선량계를 착용하여야 한다.

방사선작업시 여러 개의 선량계를 착용하고 그 중 가장 큰 값을 피폭선량으로 선택하면 방사선작업자의 피폭선량이 과소평가 되는 것을 막을 수 있다. 그러나 이에 따른 불이익도 발생된다. 우선 여러 개의 선량계를 착용하는 방법은 비용과 시간이 많이 들고 복잡하다. 또한, 여러 개의 선량계에서 측정된 값 중 최대값을 작업자의 피폭선량으로 환산하는 방법은 작업자의 피폭선량이 너무 보수적으로 평가될 수 있다. 또한 피폭선량이 과대 평가됨으로 인하여 피폭선량에 따른 위해도 평가의 불확실도를 증가시킨다. 따라서 균일 방사선장이나 예상되는 피폭선량이 선량한도에 못 미치는 방사선작업의 경우에는 1개의 선량계를 착용하는 것이 바람직하나 예상되는 피폭선량이 선량한도에 근접하는 불균일 방사선장의 경우 2개 이상의 선량계를 착용하여 피폭선량을 정확히 평가하여야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 예상되는 피폭선량이 선량한도에 근접하는 불균일 방사선장의 경우 방사선작업자가 선량계의 착용방법에 따른 피폭선량을 평가하기 위하여 선량계를 1개 착용하였을 때와 2개 이상을 착용하였을 때에 각 착용방법에 따른 측정값이나 평가결과가 실제 피폭선량과 어떠한 차

이를 나타내는지 외국의 연구결과를 통하여 바람직한 선량평가방안을 고찰하였다.

본론

앞에서 언급한 바와 같이 예상되는 피폭선량이 선량한도에 못 미치는 방사선작업의 경우에 2개 이상의 선량계를 착용하게 되면 피폭선량은 정확히 평가할 수 있지만 비용과 시간이 많이 들고 복잡해지는 등 불이익이 동반되므로 단일 선량계를 착용하는 것이 바람직하다. 그러나 피폭선량이 선량한도에 근접하는 불균일 방사선장의 경우 선량계를 단일로 가슴에 착용하면 방사선이 뒤에서 입사되는 경우에는 피폭선량이 과소평가 될 수 있으므로 이 때는 2개 이상의 선량계를 착용하여 피폭선량을 정확히 평가하여야 할 필요가 있다.

현재 국내에서는 방사선준위가 높고 불균일 방사선장에서 작업할 때는 2개 이상의 선량계를 착용하도록 하고 있으나 여러 개의 선량계에서 측정된 값 중 최대값을 작업자의 피폭선량으로 환산하고 있어 실제 피폭선량에 비하여 과대평가 되는 경향이 있었다. 따라서 방사선준위가 높고 불균일 방사선장에서 작업할 때 선량계 착용 및 평가방법을 빠른 시일 내에 결정하여야 방사선작업자의 올바른 피폭선량평가를 하고 필요 이상의 보수적 조치에 따라 잘못되었던 평가도 시정하여야 한다.

선량계를 1 개 착용할 경우에는 선량계의 착용위치와 방사선이 입사되는 방향에 따라 측정값과 실제 피폭선량에는 차이가 발생된다. Reece 등은 가슴과 등에 각각 선량계를 착용하였을 때 측정값과 실제선량값의 차이를 비교하기 위하여 MCNP를 이용하여 Cristy-Eckerman 팬텀 위의 480 개의 지점을 선정하여 측정값과 피폭선량값의 비교를 수행하였다. 표 1에 앞과 뒤로 평행한 빔을 조사했을 때 가슴 및 등에 착용한 선량계에 측정된 값과 피폭선량값의 비율을 나타내었다³⁾.

표 1. 가슴과 등에 설치한 선량계에 평행한 빔을 조사했을 때의 측정값과 피폭선량값 비율

조사 형태	1 MeV		0.3 MeV		0.08 MeV	
	가슴	등	가슴	등	가슴	등
앞→뒤	1.23	0.45	1.25	0.32	1.14	0.12
뒤→앞	0.56	1.37	0.39	1.54	0.17	1.34

※ 앞→뒤 : 앞에서 뒤로 방사선을 조사한 경우
 뒤→앞 : 뒤에서 앞으로 방사선을 조사한 경우

표 1의 결과와 같이 방사선이 앞에서 입사되었을 때는 등에 선량계를 착용한 경우 에너지별로 0.12 ~ 0.45 정도 과소평가 되는 것으로 또 방사선이 뒤에서 입사되었을 때는 가슴에 선량계를 착용한 경우 에너지별로 0.17 ~ 0.56 정도 과소평가 되는 것으로 나타나, 이 경우 단지 가슴 또는 등에 1 개의 선량계만 착용하면 방사선이 반대 방향에서 입사될 경우 측정 선량값과 실제 선량값에 많은 오차를 있을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 작업장의 방사선준위가 높은 경우에는 선량계를 2개 이상 착용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

이때 선량계를 가슴과 등에 각각 착용하였을 때 평가된 선량값과 실제 피폭된 선량값을 비교하기 위하여 다음과 같이 선량평가 알고리즘을 채택하였다.

$$H_E' = \frac{H_E(\text{가}) + H_E(\text{등})}{2} \quad (1)$$

$$H_E' = \frac{H_E(\text{가}) + H_E(\text{등})}{2} + \frac{H_E(\text{가}) + H_E(\text{등})}{2} \quad (2)$$

표 2에 선량계를 가슴과 등에 각각 착용하였을 때 식 (1) 및 식 (2)의 선량평가 알고리즘에 따른 평가값과 실제 피폭선량값의 비율 값을 나타내었다.

표 2. 선량계를 가슴과 등에 각각 착용하였을 때 선량평가 알고리즘에 따른 평가값과 피폭선량값의 비율

조사 형태	1 MeV			0.3 MeV			0.08 MeV		
	단일	(1)*	(2)*	단일	(1)*	(2)*	단일	(1)*	(2)*
앞→뒤	1.23	0.87	1.05	1.25	0.79	1.02	1.14	0.63	0.89
뒤→앞	0.56	0.97	1.17	0.39	0.96	1.25	0.17	0.76	1.05

* 식 (1)의 알고리즘을 채택한 경우

* 식 (2)의 알고리즘을 채택한 경우

표 2와 같이 선량계를 가슴과 등에 각각 착용하면 선량평가 알고리즘에 따라 값이 다르기는 하지만 1개의 선량계를 가슴에 착용한 경우에 비하여 실제 피폭선량의 값에 매우 근접함을 알 수 있다.

Kim의 논문에 의하면 두 개의 선량계를 가슴과 등에 착용하면 증기발생기 교체 작업의 경우 작업자의 모든 위치를 고려했을 때 과소평가의 비율이 4% 이하에 도달한다고 밝히고 있다⁵⁾.

이러한 2 개의 선량계를 가슴과 등에 착용하여 선량을 평가하기 위한 알고리즘에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있으며 Kim의 경우에는 식 (3)의 알고리즘⁶⁾

$$H_E' = 0.58 \times H_E(\text{가}) + 0.42 \times H_E(\text{등}) \quad (3)$$

미국의 경우에는 식 (2)의 알고리즘을 제시하고 있다⁷⁾.

식 (3)의 알고리즘을 사용한 Kim의 연구결과인 앞과 뒤로 평행한 빔을 조사했을 때 가슴에 착용한 선량계와 가슴 및 등에 각각 선량계를 착용하고 측정된 값과 피폭선량값의 비율을 계산하면 표 3과 같다.

표 3. 가슴에 착용한 선량계와 가슴 및 등에 각각 선량계를 착용하고 식 (3)의 알고리즘을 사용한 경우 측정된 값과 피폭선량값의 비율

조사 형태	1 MeV		0.3 MeV		0.08 MeV	
	단일*	(3)*	단일*	(3)*	단일*	(3)*
앞→뒤	1.00	0.90	1.00	0.90	1.00	0.90
뒤→앞	0.50	0.91	0.31	0.93	0.16	0.87

* 가슴에 선량계를 착용했을 때

* 가슴과 등에 선량계를 착용하고 식 (3)의 알고리즘을 채택한 경우

표 3과 같이 식(3)의 선량평가 알고리즘을 채택한 경우 선량계 착용지점과 반대방향에서 입사되는 방사선에 대하여 실제 피폭선량에 매우 근접하게 나타나는 것을 알 수 있다.

따라서 위에 덧붙여 국소적으로 피폭을 받을 수 있는 경우의 피폭선량 방법도 고려해 볼 필요

가 있다. 아울러 아직 우리 나라에서는 계획정비기간 등 고선량지역이나 불균일 방사선장에서는 복수선량계를 착용하도록 하고 있지만 측정된 선량값을 이용하여 개인선량을 평가하는 방법은 아직 결정하지 못했다. 따라서 복수선량계를 사용한 피폭선량 평가방법을 확립하는 것이 시급하다. 이를 위해서는 복수선량계 착용방법과 선량평가 알고리즘을 병행하여 개발하여야 하는데 현재까지 가장 많이 논의되고 있는 복수선량계 착용방법은 앞에서 살펴본 바와 같이 앞뒤로 착용하는 것이다. 이를 위해 표 4에 가슴 및 등에 각각 선량계를 착용하였을 때 피폭선량 평가방법에 식 (1), (2), (3)의 알고리즘 및 NCRP의 알고리즘을 적용하였을 때 각 선량평가 알고리즘에 따른 평가선량값과 실제 피폭선량 값의 차이를 비교하여 보았다⁸⁾.

조사 형태	알고리즘	1 MeV		0.3 MeV		0.08 MeV	
		단일*	복수 [‡]	단일*	복수 [‡]	단일*	복수 [‡]
앞→뒤	(1)	1.23	0.87	1.25	0.79	1.14	0.63
	(2)	1.23	1.05	1.25	1.02	1.14	0.89
	(3)	1.00	0.90	1.00	0.90	1.00	0.90
	(4)	1.23	0.93	1.25	0.85	1.15	0.69
뒤→앞	(1)	0.56	0.97	0.39	0.96	0.17	0.76
	(2)	0.56	1.17	0.39	1.25	0.17	1.05
	(3)	0.50	0.91	0.31	0.93	0.16	0.87
	(4)	0.57	1.00	0.38	0.98	0.18	0.77

* 단일 선량계를 가슴에 착용했을 때

[‡] 가슴과 등에 각각 선량계를 착용하고 각 알고리즘에 따른 선량평가방법을 채택한 경우

(4) NCRP 알고리즘 : $H_E' = 0.55 \times H_E(\text{가}) + 0.5 \times H_E(\text{등})$

표 4의 결과와 같이 가슴과 등에 선량계를 착용한 경우 평가선량값은 실제 피폭선량에 비하여 1 MeV에서 0.87 ~ 1.17, 0.3 MeV에서 0.79 ~ 1.25, 0.08 MeV에서 0.63 ~ 1.05 의 분포를 보였다. 이는 단일 선량계를 착용했을 때 1 MeV에서 0.50 ~ 1.23, 0.3 MeV에서 0.32 ~ 1.25, 0.08 MeV에서 0.16 ~ 1.14 의 분포를 나타내는 것에 비하여 오차가 매우 줄어든 것이다. 반면 각 알고리즘에 따른 차이는 그리 크지 않았으며 이러한 선량평가 방법 및 알고리즘을 사용하여도 큰 차이는 없는 것으로 생각된다. 따라서 불균일 방사선장에서의 복수선량계를 착용하는 방법 및 선량평가 알고리즘이 개발되기 전까지는 국가기준으로 볼 수 있는 NCRP의 알고리즘을 시험적으로 사용할 수도 있다고 본다.

한편 일본 법령에서는 전신 불균등피폭의 경우 머리, 흉부, 복부에 각각 선량계를 착용하여 식 (4)의 알고리즘에 따라 평가하도록 하고 있다.

$$\text{유효선량} = 0.08 \times H_{\text{머리}} + 0.44 H_{\text{흉부}} + 0.45 H_{\text{복부}} + 0.03 H_{\text{머리, 흉부, 복부중 최대값}} \quad (4)$$

따라서 앞으로 고선량지역이나 불균일 방사선장에서 개인 피폭선량 모니터링을 위한 복수선량계를 착용방법 및 선량평가 알고리즘을 개발하기 위해서는 전방 및 후방 선량계 착용방법 뿐 아니라 상부 하부 등 다양한 착용 방법에 대한 연구를 하여야 할 것이며, 이를 위하여 MCNP를 이용한 선량 계산 및 표준 방사선장을 이용한 실험을 병행할 예정이다.

결론

예상되는 피폭선량이 선량한도에 못 미치는 방사선작업의 경우에 2개 이상의 선량계를 착용하게 되면 피폭선량은 정확히 평가할 수 있지만 비용과 시간이 많이 들고 복잡해지는 등 불이익이 동반되므로 단일 선량계를 착용하는 것이 바람직하다.

그러나 불균일 방사선장에서 작업할 때 단지 가슴 또는 등에 1 개의 선량계만 착용하면 방사선이 반대 방향에서 입사될 경우 측정 선량값과 실제 선량값에 많은 오차를 있을 수 있다. 따라서 작업장의 방사선준위가 높은 불균일 방사선장에서는 선량계를 2개 이상 착용하는 것이 바람직하다.

현재 국내에서는 방사선준위가 높고 불균일 방사선장에서 작업할 때는 복수선량계를 착용하도록 하고 있지만 측정된 선량값을 이용하여 개인선량을 평가하는 방법은 아직 결정하지 못했다. 따라서 복수선량계를 사용한 피폭선량 평가방법을 조속히 확립하는 것이 중요하다고 생각된다. 따라서 앞으로 고선량지역이나 불균일 방사선장에서 복수선량계를 착용하는 방법과 선량평가 알고리즘을 개발하기 위하여 MCNP를 이용한 선량 계산 및 표준 방사선장을 이용한 실험을 병행하는 것이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- 1). International Commission on Radiological Protection, " 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," Oxford, England, Pergamon Press, ICRP Publication 60, pp. 60~61, 1990.
- 2). International Commission on Radiological Protection, " General Principles for the Radiation Protection for Workers," Oxford, England, Pergamon Press, ICRP Publication 75, p. 44, 1997.
- 3). W. D. Reece, J. W. Poston Sr, 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, pp. 5~21 (1994).
- 4). W. D. Reece and X. G. Xu, " Determining Effective Dose Equivalent for External Photon Radiation : Assessing Effective Dose Equivalent from Personal Dosimeter Readings, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 69, No. 3, pp. 167~168 (1997).
- 5). C. H. Kim and W. D. Reece, " Monte Carlo Simulation of Single and Two-dosimeter Approaches in a Steam Generator Channel Head," Nuclear Science Center, Texas A&M University, 2001 - http://www.rpi.edu/~kimc/papers/Web_SONGS_Paper/SONG_paper_in_PDF.pdf.
- 6). C. H. Kim, " Use of Two Dosimeters for Better Estimation of Effective Dose," Texas A&M University, Ph. D. Dissertation, 1998.
- 7). Nuclear Regulatory Commission, Federal Register Vol. 67, No. 181, 58826, 2002.
- 8). National Council on Radiation Protection and Measurement, " 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 122, 1995.