

Design of a TL Personal Dosimeter Identifiable PA Exposure and Development of Its Dose Evaluation Algorithm

J. W. Kwon · H. K. Kim* · J. S. Yang* · J. L. Kim* and J. K. Lee

Dept. of Nuclear Engineering Hanyang University

*Korea Atomic Energy Research Institute

후방피폭선량계측이 가능한 TL 개인선량계의 설계 및 선량평가 알고리즘 개발

권정완 · 김현기* · 양정선* · 김장렬* · 이재기

한양대학교 원자력공학과, *한국원자력연구소

(2003년 12월 22일 접수, 2004년 8월 18일 채택)

Abstract - A single-dosimeter worn on the anterior surface of body of a worker was found to provide significant underestimation of dose to the worker when radiation comes from behind of the human body. Recently, several researchers suggested that this kind of underestimation can be corrected to a certain extent by using an extra dosimeter on the back. But this multiple dosimetry also has the disadvantages like overestimation, lowering work efficiency or cost burden. In this study, a single dosimeter introducing asymmetric filters enabled to identify PA exposure was designed by monte-carlo simulation and experiments and its dose evaluation algorithm for AP-PA mixed radiation field was established. This algorithm was applicable to penetrating radiation which had the effective energy more than 100 keV. Besides, the dosimeter and algorithm in this study were possible to be applied to near PA exposure.

Key words : thermoluminescence dosimeter, personal dosimeter, CaSO_4 , personal dose equivalent, angular dependence

요약 - 인체의 전면에 착용하는 단일선량계는 비균질 방사선장에서 작업자의 피폭을 대표하지 못할 수 있으며 특히 방사선이 인체의 후면에서 입사되는 경우 유효선량을 심각하게 저평가 하는 것으로 알려져 있다. 몇몇의 선행연구자들은 비균질 방사선장에서 인체의 후면에 추가의 선량계를 착용하는 복수의 선량계를 이용하는 선량평가를 제안하고 있으나 복수의 선량계를 이용한 선량평가는 과대평가 내지 작업의 효율성 저하 및 비용부담의 문제를 안고 있다. 본 연구는 AP와 PA 방향으로 입사하는 방사선에 대하여 두 개의 TL 소자가 서로 상반되는 반응도를 보이도록 필터를 설계함으로써 단일선량계 사용의 결점을 보완하고 그 활용도를 높이고자 하였다. 즉 빔의 입사 방향에 대한 정보를 제공하는 필터를 몬테칼로 계산과 실험을 통해 도입하고 이 결과를 기반으로 PA 입사에 대한 새로운 선량평가 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 광자의 유효에너지가 100 keV 이상으로 입사방사선의 인체투과율이 상당한 경우에 적용 가능하다. 또한 정확히 후방입사가 아닌 기타 방향의 후방피폭의 경우에도 본 연구에서 수립된 알고리즘의 적용 가능성을 확인하였다.

중심어 : 열형광선량계, 개인선량계, CaSO_4 , 개인선량당량, 방향의존성

서 론

국제방사선단위측정위원회(ICRU)[1-2]는 개인 감시 목적의 실용량으로 정렬 확장된 방사선장에서 인체 표면으로부터 일정 깊이에서의 선량값인 개인선량당량($H_p(d)$)을 권고하고 있으며 이 양은 팬텀에 부착된 선량계를 이용하여 측정 할 수 있는 양이다. 따라서 열형광선량계를 비롯한 대부분의 개인선량계는 심부선량 $H_p(10)$ 과 피부선량 $H_p(0.07)$ 측정을 목적으로 설계되고 교정된다.

현재 개인 선량계를 이용한 선량평가 체계는 방사선이 정면 또는 정면으로부터 정해진 각도 범위에서 입사(AP 피폭)함을 가정하고, 인체를 대표하는 위치에 착용된 선량계의 판독값은 유효 선량을 보수적으로 대표하도록 규정하고 있다. 그러나 선원의 기하학적 형태, 선원에 대한 작업자의 방향 및 거리 그리고 산란 방사선에 의한 초기 방사선장의 스펙트럼 변화, 작업자의 움직임 등으로 작업자는 비균질·비등방 방사선장에 노출 될 수 있다. 따라서 개인선량계로 평가된 값이 작업자의 피폭을 대표하지 못하는 경우가 발생하며 특히 방사선이 인체의 후면에서 입사하는 경우 인체에 의한 차폐효과로 그 심각성은 더욱 커진다.

Lakshmanan과 김찬형등의 연구자[3-5]들은 기존의 단일선량계 착용을 통한 선량평가의 문제점을 지적하면서 비균질 방사선장에서 인체의 후면에 추가의 선량계를 착용하는 복수의 선량계를 이용하는 선량평가를 제안하고 있으며 원전 내 증기발생기 수실 내부와 같은 비균질의 고에너지 광자 방사선장에서 복수의 선량계를 사용하는 것은 특별한 일이 아니다[5-6]. 그러나 복수선량계를 이용한 선량평가는 과대평가 내지 작업의 효율성 저하 및 비용부담의 문제를 안고 있다.

본 연구에서는 빔의 후방입사에 의한 피폭의 경우 단일선량계의 심각한 과소평가 문제를 해결하기 위해 $CaSO_4:Dy,P$ 열형광물질을 이용한 개인선량계를 설계하고자 하였다. बै지 설계를 기반으로 후방피폭의 기여분을 판단하고 후방입사에 의한 피폭이 상당 부분을 차지할 때에는 별도의 알고리즘을 통해 선량평가를 수행함으로써 기존의 단일선량계를 사용한 선량평가 체계의 응용범위를 확대하고자 하였다.

재료 및 방법

TL소자

KCT-300(KAERI $CaSO_4:Dy,P$ TLD)은 $CaSO_4:Dy$ 열형광물질에 기반한 TL 소자로 재원은 표1과 같으며 자세한 선량계적 특성은 참고문헌[7-8]을 참고할 수 있다.

Table 1. Resources of KCT-300.

TL material	Composition	Geometry
CaSO ₄ :Dy,P KCT-300	CaSO ₄ :Dy + P 10 mol %	Diameter - 4.5 mm
	Ca: 27.91 wt %	Thickness - 0.4 mm
	S: 22.33 wt %	
	O: 47.38 wt %	Density - 1.965 g/cm ³
	P: 2.16 wt % Dy: 0.23 wt %	

방사선원

배지설계의 대상이 되는 방사선은 투과력이 강한 ^{137}Cs 선원과 ANSI N13.11[9]에서 제공하는 X-선장 중 H150으로 한정하였다. 방사선 작업이 이루어지는 환경을 고려할 때 수 십 keV 이하의 X-선에 의한 피폭은 주로 빔의 정면방향 입사에 기인하지만 원자력발전소의 증기발생기 수실이나 U튜브 구역은 주요 선원항이 ^{58}Co , ^{60}Co 그리고 ^{137}Cs 과 같이 고에너지 감마선을 방출하는 핵종으로 후방피폭의 우려가 높은 환경이다[10]. 이들 고에너지 감마선으로 형성되는 실제 작업환경에서의 스펙트럼은 주변물체와 산란하여 보다 낮은 에너지 영역으로 이동하게 된다. 따라서 ^{137}Cs 에서 방출되는 감마선의 경우 이러한 작업환경에서의 스펙트럼의 평균에너지로, 그리고 H150은 예상될 수 있는 또 다른 한 형태의 스펙트럼으로 간주하는 것은 충분한 타당성을 지닌다.

팬텀 및 선량환산인자

ANSI N13.11[9]에서 개인선량계 교정용으로 권고하는 $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ 크기의 PMMA (polymethyl methacrylate) 팬텀을 사용하였다. 이 경우 방사선의 입사 방향에 따른 선량환산인자, 즉 PMMA 팬텀 10 mm와 0.07 mm 깊이에서의 심부선량 환산인자와 피부선량 환산인자는 표2와 같다. 본 연구에 사용된 H150과 ^{137}Cs 선원에 대한 AP 방향에서의 선량환산인자 값은 ANSI 13.11[9]에서 제공되는 값을 이용하였으나 PA 방향에서의 선량

Table 2. Conversion factors($H_p(d)/K_a$) of PMMA slab phantom.

Source	Conversion factor	AP ($\alpha=0^\circ$)	PA ($\alpha=180^\circ$)
H150	$H_p(10)/K_{air}$	1.71	0.51
	$H_p(0.07)/K_{air}$	1.60	0.38
Cs	$H_p(10)/K_{air}$	1.21	0.61
	$H_p(0.07)/K_{air}$	1.21	0.55

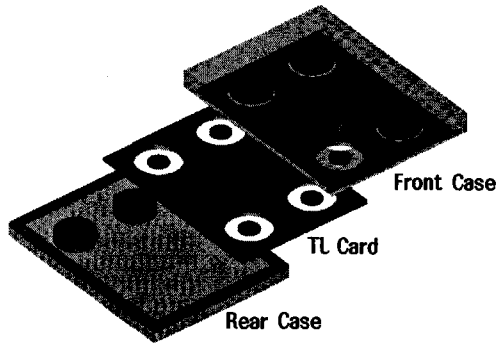


Fig. 1. The TL badge designed by MCNP4C for simulation of dosimeter response.

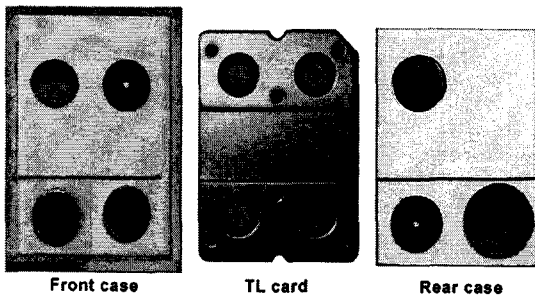


Fig. 2. The proto-type TL badge fabricated in this study for experiment to confirm the specification of filters.

환산인자는 Grosswendts[11-13]의 단일에너지 광자에 대한 선량환산인자 값을 기초로 하여 cubic spline 보간법과 외삽을 통해 획득하였다.

몬테칼로 시뮬레이션과 실험

적절한 필터의 재질, 두께 및 조합을 결정하기 위한 실험은 많은 시간과 비용을 초래하므로 그림1과 같이 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 선량계를 구성하고 변수의 변화에 따른 선량계의 반응 자료를 획득하였다. MCNP4C코드[14]를 ENDF/B-VI 단면적과 함께 이용하였으며 유의한 수준

의 계산결과를 획득하기 위해 최대 8×10^7 의 history를 사용하였다. TL 감응의 계상에는 TL 출력이 선량계의 흡수선량에 비례한다는 가정 하에 커마 근사를 이용하는 F6 계산자(tally)를 사용하였다.

몬테칼로 모사에 의한 계산결과를 바탕으로 그림2와 같은 원형 TL 카드와 बै지 케이스를 제작하였다. TL 카드는 상용 Harshaw TLD 카드에 KCT-300 소자를 넣어 제작하였고, बै지 케이스는 ABS 플라스틱을 이용하였다. 제작된 원형 बै지 케이스를 한국원자력연구소의 교정용 방사선장에 노출시킴으로써 조사실험을 수행하였다.

결과 및 분석

KCT-300PB와 후방피폭 탐지영역의 도입

Kim 등은 베타와 광자의 혼합 방사선장에서 선량평가를 위해 KCT-300 소자를 이용하는 개인선량계인 KCT-300PB를 개발하였다[15-16]. KCT-300PB는 세 개의 영역, 즉 open window, 에너지 정보(energy information), 그리고 에너지 보상영역(energy compensation area)으로 구성되어 있으며 각 영역은 전방으로부터 빔이 입사되는 경우의 선량평가에 필요한 정보 획득을 위한 필터를 장착하고 있다. 여기에 100 keV 이상의 에너지를 가진 광자의 후방입사에 의한 피폭이 전체 피폭의 일정부분 이상을 차지할 때 후방으로부터의 피폭여부를 평가할 목적으로 새로운 개념의 영역인 후방피폭 탐지영역을 도입하였다[17-18]. 이 영역의 도입으로 बै지는 그림3과 같이 총 4개의 영역으로 구성되고 각 영역은 빔이 전방으로 입사할 경우에 지니는 고유한 역할과 함께 후방입사 시의 새로운 역할을 부가적으로 수행하게 된다. 각 영역 필터의 자세한 재원은 표3과 같다.

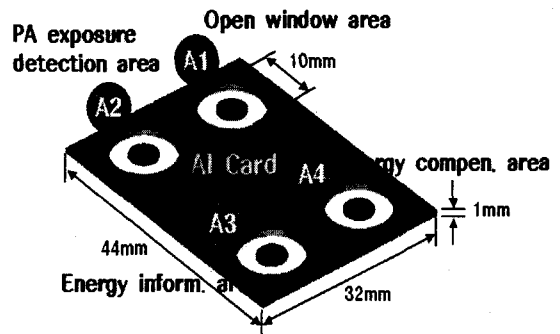


Fig. 3. Modified KCT-300PB card in this study.

Table 3. Final specification of filters for four areas used on TL badge of this study.

Area	Front side filters	Rear side filters
Open window area(A1)	• None	• 0.7 mm ABS
PA exposure detection area(A2)	• 2.2 mm ABS • 0.3 mm Cu($\Phi=10$ mm) with a hole of diameter 15 mm	• 0.5 mm ABS • 4.0 mm Pb($\Phi=10$ mm)
Energy information area(A3)	• 0.9 mm ABS • 1.2 mm Cu($\Phi=10$ mm) hole($\Phi=1.3$ mm) with 60° angle of taper	• 2.5 mm ABS • 1 mm Cu($\Phi=10$ mm) hole($\Phi=1.5$ mm) with 60° angle of taper
Energy compensation area(A4)	• 3.7 mm ABS • 0.9 mm Pb($\Phi=10$ mm) hole($\Phi=1.3$ mm) with 60° angle of taper • 0.2 mm Al($\Phi=10$ mm)	• 2.5 mm ABS • 1 mm Cu($\Phi=13$ mm)

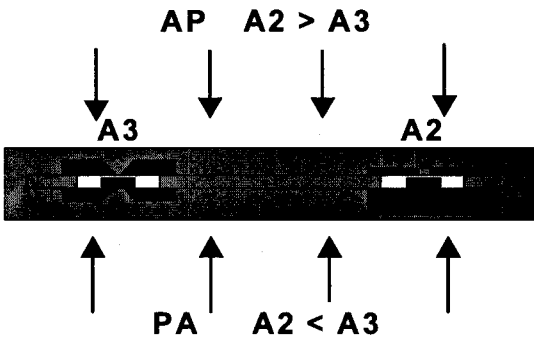


Fig. 4. Asymmetric filter design of A2 and A3 to change the response when radiation comes from AP or PA direction.

후방피폭 탐지를 위한 필터설계

후방피폭 탐지영역은 본 연구에서 가장 중점을 두고 설계한 영역으로 에너지 정보영역의 반응도와 연계하여 100 keV 이상 광자에 의한 후방피폭 여부를 결정하며 그 원리는 간단하다. 그림4와 같이 빔의 입사방향(AP 또는 PA)에 따라 A2와 A3 영역의 반응도가 서로 상반되도록 필터의 재질과 두께를 조합하여 두 영역에 배치함으로써 후방피폭 여부를 결정할 수 있다. 즉, 빔이 AP 방향으로 입사하면 전면 필터의 두께가 얇은 A2 영역의 반응도가 A3 영역의 반응도보다 큰 반면 PA 방향으로 빔이 입사할 경우에는 반대의 현상이 나타날 것이다.

A3 영역의 전면에 설치되어 있는 1.2mm 두께의 구리필터보다 얇은 구리 필터를 A2 영역의 전면 배치하고 A3 영역의 후면에 설치되어 있는 1mm 두께의 구리필터보다 두꺼운 납 필터를 A2 영역의 후면에 배치함으로써 설계의 기본개념을 만족시키고자 하였다.

그러나 ^{137}Cs 에서 방출되는 강투과성 감마선에 의한 AP 피폭의 분율이 높아질수록 A2와 A3 영역의 반응도는 거의 같은 수준에 이르게 되며 이러한 현상은 이 두 영역의 반응도를 이용한 후방피폭 기여 여부의 결정을 곤란하게 하는 요인이 된다. 따라서 A2 영역의 후면필터 설계 시에는 ^{137}Cs 감마선에 의한 순수 AP 피폭과 AP-PA 혼합피폭을 구분할 수 있는 필터의 설계가 그 요인이 된다. 결국 A2 영역의 후면에 설치될 납 필터의 두께가 설계요건의 만족여부를 결정하므로 A2 영역의 전면에는 앞서 결정된 구리필터를 두고 후면의 납 필터($\Phi=10$ mm) 두께를 2mm에서 4mm 까지 증가시키면서 AP와 PA 피폭의 최대 혼합비율 3:1에서의 A2와 A3 영역의 반응도를 비교함으로써 납의 적합한 두께를 결정하고자 하였다. 그림5에 도시된 바대로 H150의 경우 납의 두께가 2mm일 경우에도 A2/A3의 비는 충분히 낮은 값을 보이는 반면 ^{137}Cs 감마선은 납의 두께가 증가함에 따라 A2/A3의 비는 감소하여 납의 두께가 4mm에 이르면 0.92를 나타내었다. 경험에 비추어 보건데 H150 X-선과 ^{137}Cs 감마선이

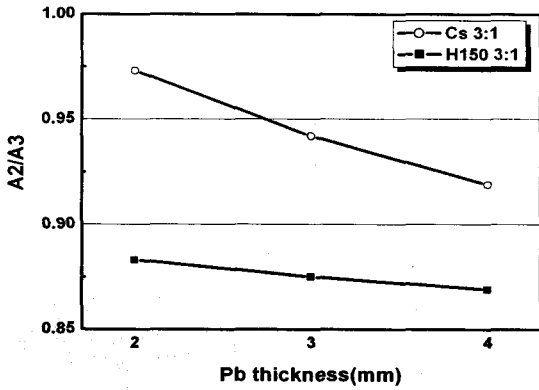


Fig. 5. A2/A3 ratio to determine the thickness of Pb filter in the A2 area for AP-PA(3:1) mixed field.

순수하게 AP방향으로만 입사할 때 A2/A3 비는 0.97 이상의 값을 보이므로 3mm 이상의 두께의 납을 A2 영역의 후면필터로 설치하면 순수 AP 피폭과 AP-PA 혼합피폭을 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 목적의 충분히 안정된 A2/A3 비를 제공하기 위하여 4mm 납 필터를 선택하였다.

선량평가 알고리즘

선량평가는 사전에 교정된 자료를 이용하여 후방피폭의 기여 여부, 에너지 및 AP-PA의 혼합비율을 구분한 후 이에 해당하는 선량환산인자를 적용함으로써 선량을 평가하는 경험적인 방법으로 수행된다. 따라서 설계된 선량계를 팬텀의 전·후면에 부착한 후 H150과 ¹³⁷Cs 감마선장에 조사시킴으로써 표4의 굵은 글씨에 해당하는 기초 자료를 획득하였다. 이 반응도를 이용하여 ANSI N13.11에서 제시하는 혼합 방사선장의 혼합비율을 근거로 최대 3:1의 비율로 AP와 PA 피폭모드를 혼합하여 각 광자 방사선장에서 AP-PA 혼합피폭의 경우 예상되는 반응도 결과를 표 4에 제시하였다. 또한 입사 광자의 선질과 AP-PA 혼합피폭에서의 혼합비율 결정을 위해 각 방사선장의 특성을 내포한 서로 다른 영역의 비 또는 곱의비를 양산하여 함께 제시하였다. 부여된 선량에 따른 각 영역에서의 TL 반응도 값은 정면방향에서의 10.62 mSv ¹³⁷Cs에 등가한 선량으로 나타내었으며 표에서 혼합비(mixed ratio) 1.00:0.00은 순수하게 AP 방향으로만 조사한 것,

Table 4. Summary of theoretical responses of the TL elements exposed to photon radiation fields at having different energies of 117 and 662 keV. A1, A2, A3, and A4 represent the TLD read out of the 4 badge areas in mSv. D and S represent the actual deep and shallow dose delivered during exposure. All results are relative to ¹³⁷Cs photon. The related quantities for different AP-PA mixed fractions are also included.

Ave.E [keV]	Mixed ratio (AP:PA)		Cs equivalent responses (mSv)				CFD ^a	CFS ^b	Response ratios ^c			
			A1	A2	A3	A4			A1/D	S/D	R1	R2
H150 [117]	1.00	0.00	40.45	29.77	28.54	13.30	2.70	0.95	1.04	4.31	1.30	0.61
	1.00	0.33	56.72	32.71	36.76	20.23	2.84	0.90	0.89	4.32	1.95	1.07
	1.00	0.50	64.88	34.18	40.89	23.71	2.89	0.88	0.84	4.34	2.27	1.32
	1.00	1.00	89.31	38.60	53.25	34.13	2.98	0.85	0.72	4.39	3.19	2.05
	0.50	1.00	138.16	47.42	77.96	54.96	3.07	0.81	0.61	4.46	4.79	3.38
	0.33	1.00	187.01	56.24	102.67	75.79	3.12	0.80	0.55	4.49	6.07	4.48
	0.00	1.00	14.57	2.63	7.37	6.21	3.26	0.75	0.36	4.64	15.50	13.07
Cs [662]	1.00	0.00	10.62	10.62	10.62	10.62	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.00	0.33	13.93	12.84	13.69	13.45	0.98	0.98	0.94	1.05	1.21	1.08
	1.00	0.50	15.52	13.91	15.18	14.81	0.98	0.97	0.92	1.07	1.30	1.12
	1.00	1.00	20.42	17.19	19.73	18.99	0.97	0.95	0.87	1.11	1.51	1.19
	0.50	1.00	30.47	23.93	29.07	27.58	0.96	0.93	0.82	1.16	1.78	1.27
	0.33	1.00	40.40	30.59	38.29	36.06	0.95	0.93	0.80	1.18	1.95	1.32
	0.00	1.00	5.00	3.35	4.65	4.28	0.93	0.90	0.72	1.26	2.63	1.49

^aCFD: conversion factor from the response at A1 to the deep dose

^bCFS: conversion factor from deep dose to shallow dose

^cR1=A2/A3, R2=(A1xA1)/(A3xA4), R3=(A1xA3)/(A2xA2), R4=(A1xA4)/(A2xA2)

그리고 0.00:1.00은 PA 방향으로만 조사한 경우를 표시한다.

표4에서 볼 수 있듯이 방사선이 AP 방향으로 입사할 경우 A2 영역의 반응도가 A3 영역의 반응도보다 크고 각 영역의 반응도는 $A1 > A2 > A3 > A4$ 의 순서를 보인다. 이에 반해 PA 피폭이 AP 피폭에 대하여 최소한 1/3 이상 포함되면 $A1 > A3 > A4 > A2$ 순으로 A2와 A3 영역의 반응도가 역전됨을 알 수 있다. 따라서 설계목적에서와 같이 A2/A3의 비는 후방피폭 여부를 결정하는 지표가 된다.

선량평가는 그림6과 같이 후방피폭의 기여 여부에 따라 독립적인 알고리즘을 통해 수행되지만 선량계의 반응도에 선량환산인자의 적용으로 이루어지는 선량평가의 방법은 두 경우 모두 동일하다. 그러나 PA 방향 입사의 경우 A4 영역의 반응도는 입사 광자의 에너지가 낮아질수록 급격히 감소하므로 A4의 반응도보다 크고 안정된 A1 영역의 반응도를 이용하여 $H_p(d)$ 를 평가한다. 즉 PA 방향 입사 시 $R2(A1 \times A1 / (A3 \times A4))$ 의 반응도 비를 이용한 에너지 구분하고, R3, R4의 비를 이용하여 AP-PA 혼합비율의 결정하여 각 방사선장에 해당하는 선량환산인자(A1/D)를 A1 반응도에 적용함으로써 $H_p(d)$ 를 평가하게 된다(표4 참고).

표4에서 보듯이 ^{137}Cs 감마선에 의한 피폭의 경우 순수 PA 피폭 그리고 AP-PA 혼합피폭의 경우에 심부선량과 피부선량 환산인자는 0.98 ~ 0.90 범위의 값을 지닌다. 따라서 ^{137}Cs 감마선에 의한 후방피폭 기여분이 존재하면 AP-PA 혼합피폭

비율을 구별하지 않고 순수 PA 피폭 그리고 AP-PA 혼합피폭에 해당하는 환산인자의 평균값, 즉 심부선량은 0.96, 피부선량은 0.94를 적용하더라도 $\pm 3\%$ 오차범위에서 관심있는 깊이에서의 선량을 평가할 수 있다. H150의 경우 PA 피폭의 기여분이 높아질수록 선량환산인자는 ^{137}Cs 보다 많은 차이를 보이지만 AP 피폭에 대한 PA 피폭의 혼합비율이 0.5 이하, 0.5~2 그리고 순수 PA 피폭의 경우로 단순화 할 수 있다. 간소화된 선량환산인자를 표6에 제시하였으며 이의 적용은 본 연구의 큰 장점으로 선량평가 알고리즘을 단순화하는 결과를 낳는다.

Table 5. Simplified dose conversion factors for AP-PA mixed mode.

Ave. E [keV]	Mixed ratio		CFD (A1/D)	CFS (S/D)
	AP	PA		
H150 [119]	1.00	0.33	2.86	0.89
	1.00	0.50		
	1.00	1.00	3.06	0.82
	0.50	1.00		
	0.33	1.00		
0.00	1.00	3.26	0.75	
Cs [662]	1.00	0.33	0.96	0.94
	1.00	0.50		
	1.00	1.00		
	0.50	1.00		
	0.33	1.00		
0.00	1.00			

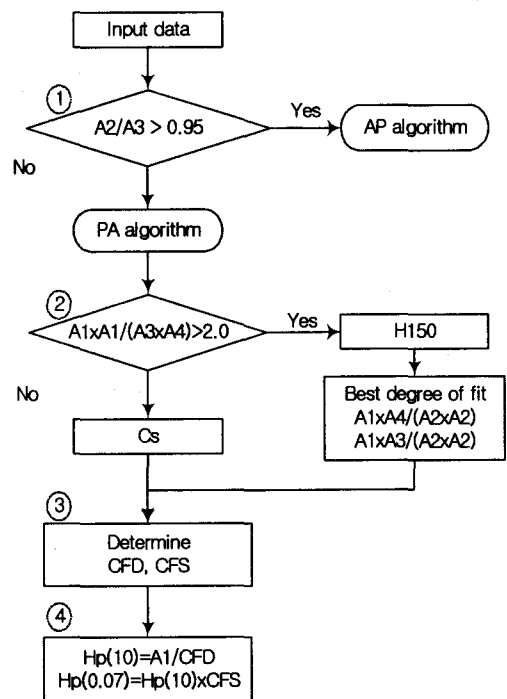


Fig. 6. Dose evaluation algorithm for PA or AP-PA mixed irradiation mode.

결론 및 논의

일반적으로 단일선량계를 사용한 선량평가에 있어서 방사선이 인체의 후면에서 입사되는 경우 유효선량을 심각하게 저평가 하는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 MCNP4C 코드를 사용한 이론적 맷지 설계와 실험적인 검증을 통해 이러한 결점을 극복한 단일선량계를 이용한 선량평가 체제를 제시하고 후방 피폭의 기여분이 존재

할 때의 선량평가 알고리즘을 수립하였다.

KCT-300 소자의 बै지를 설계하는 과정에서 빔의 입사방향에 대한 정보를 제공하는 필터를 도입하여 빔의 입사 여부에 따라 A2와 A3 영역의 반응도가 서로 상반되도록 함으로써 후방피폭 기여분의 유무를 판단할 수 있었다. 또한 빔의 후방 입사에 의한 피폭이 확인되면 입사방사선의 에너지 및 AP-PA 피폭의 혼합비율을 구분하여 적절한 선량환산인자를 적용하는 선량평가 알고리즘을 개인선량평가에 적용함으로써 적어도 ANSI에서 제공하는 H150 또는 고에너지 감마선과 같은 투과력이 강한 방사선이 인체의 후면으로부터 입사되는 경우 단일선량계의 사용으로도 보수적으로 유효선량을 평가하였다. 개인선량계의 요건을 권고하는 IEC 또는 ANSI 등의 기관에서 선량계의 방향의존성에 관한 요건을 점차 강화하고 있는 시점에서 본 연구를 통해 개발된 선량계 및 선량평가 알고리즘은 정렬 확장된 방사선장에서의 피폭상황뿐 아니라 현장에서 접할 수 있는 비균질·비등방의 고에너지 방사선장에서의 실용량 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 이를 통해 현재 제기되고 있는 복수선량계 사용에 따른 비용부담 및 불편해소에 일익을 담당할 것이다.

본 연구는 고에너지 광자 방사선의 전면과 후방입사에 의한 혼합피폭 시의 선량평가에 역점을 두었으나 수 십 keV 에너지 광자를 포함하는 선량계의 설계와 선량평가 알고리즘이 수립될 때 그 활용의 폭은 보다 확대될 것이다.

참고문헌

- ICRU, *Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations*, International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 47(1992)
- ICRU, *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*, International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 51(1993)
- A. R. Lakshmanan, R. K. Kher and S. J. Supe "Estimation of dose equivalent using individual dosimeter," *Radiat. Prot. Dosim.*, 35, 4, 247-252(1991)
- C. H. Kim, "Use of two dosimeters for better estimation of effective dose," College station, TX: Texas A&M University(1998)
- C. H. Kim, W. D. Reece and J. W. Poston, "Development of a two-dosimeter algorithm for better estimation of effective dose equivalent and effective dose," *Radiat. Prot. Dosim.* 81,101-112(1999)
- C. G. Hudson, "The need for dosimetry multibadging at nuclear power plants," *Radiat. Prot. Mgt.* January, 43-49(1984)
- 김두영, 양정선, 김장렬, 이정일, 김봉환, 장시영, "신 TL 물질 CaSO₄:Dy,P(KCT-300) 소자의 개발," 2001 한국원자력학회 춘계학술발표회(2001)
- 양정선, 김두영, 김장렬, 이정일, 남영미, 장시영, "CaSO₄:Dy 분말의 제조 및 TL 특성," 2001 한국원자력학회 춘계학술발표회(2001)
- ANSI, *Criteria for Performing Multiple Dosimetry*, American National Standards Institute, HPS N13.41(1997)
- 이춘식, 김현기, 이춘익, 이재기, "몬테카를로 모사에 의한 증기발생기 수실 작업자의 유효선량평가," 대한방사선방어학회 추계학술발표회, 154-158(1999)
- B. Grosswendt, "The angular dependence and irradiation geometry factor for the dose equivalents for photons in slab phantoms of tissue equivalent material and PMMA," *Radiat. Prot. Dosim.* 35(4),221-235(1990)
- B. Grosswendt, "Conversion coefficients for calibrating individual dosimeters in terms of dose equivalents defined in an ICRU tissue cube and PMMA slab," *Radiat. Prot. Dosim.* 32(4),219-231(1990)
- ICRP, *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation*, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 74, Pergamon Press(1996)
- Judith F. Briesmeister, *MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4C*, Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M(2000)
- 김현기, 권정완, 이재기, 김장렬, "광자방사선장에서 H_p(10) 측정을 위한 TLD 필터설계," 대한방사선방어학회 2002 춘계학술발표회 및 심포지움(2002)
- H. K. Kim, J. W. Kwon, J. K. Lee, J. L.

- Kim, "Design of a Personnel Dosimetry badge system for a new TL Material $\text{CaSO}_4: \text{Dy, P}$," *Proc. of the 1st Asian and Oceanic Congress for Radiation Protection*, October 20-24, Seoul, Korea(2002)
17. 권정완, 김현기, 이재기, 김장렬, "비등방광자 방사선장에서 개인선량측정을 위한 TL배지의 계산을 통한 필터설계," 대한방사선방어학회 2002 춘계학술발표회 및 심포지움(2002)
18. J. W. Kwon, H. K. Kim, J. K. Lee, J. L. Kim, "Feasibility Study of Reducing Errors in the Personal Dose Equivalent from Abnormal Exposure Directions by Use of Asymmetric Filters in a TLD Badge," *Proc. of the 1st Asian and Oceanic Congress for Radiation Protection*, October 20-24, Seoul, Korea(2002)