'98 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Panasonic UD-809P 알비도 선량계를 이용한 중성자 선량평가 알고리즘 개선

Improvement of Neutron Dose Calculation Algorithm Using Panasonic UD-809P Type Albedo TLD

손중권, 신상운, 김화, 조찬희, 송명재

전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

영광4호기 원자로 건물내에 물팬텀을 설치한 후 Panasonic UD-809P 알비도 선량계를 부착하여 조사시켰다. 측정된 선량계의 각 소자의 반응값을 이용하여 Panasonic TLD System User's Manual에서 권고하는 선량평가 알고리즘으로 속중성자, 초열중성자, 열중성자에 대한 중성자 선량을 평가하였으며 열중성자 분율이 높은 지역에서의 속중성자에 대한 중성자선량 평가는 문제가 있는 것으로 나타났다. 이는 이론적인 열중성자의 알비도 성분이 실제 측정된 총 알비도 성분보다 클 경우 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 원자력발전소의 실제 선장에서 속중성자로 인한 중성자 선량을 평가하기 위해 새로운 중성자 선량평가 방법을 제시하였다.

Abstract

Panasonic UD-809P type albedo TLD mounted on a water phantom were used to measure neutron personal dose equivalent in a Korean nuclear power plant. From the measured TL readings, personal dose equivalents from thermal, epithermal and fast neutrons were evaluated by using a method adopted in a neutron dose calculation algorithm for Panasonic UD-809P type albedo TLD, which was recommended in a Panasonic TLD System User's Manual. The results showed that personal dose equivalent for fast neutrons could not be adequately evaluated in a field with high thermal neutron fraction. This seems to be related to the incomplete incidence of albedo thermal neutrons to the TLD. In order to calculate the personal dose equivalent from fast neutrons in the field condition to be encountered in a nuclear power plant, new method for the neutron dose calculation algorithm were suggested. For a known energy spectrum, it is very easy and simple to use this method for the evaluation of neutron personal dose equivalent.

1. 서론

1980년 이래 원전 작업자 중성자 선량평가의 정밀도를 높이기 위한 많은 노력이 기울어 졌으며

[1] 또한 국제방사선방호위원회에서 연간선량한도와 방사선 가중치에 대한 권고기준을 개정한 이래 알비도 중성자 선량계에 대한 연구가 증가되고 있다. 알비도 중성자 선량계는 인체에 입사하는 속중성자가 되튀어 발생하는 열중성자 및 초열중성자를 측정할 수 있으므로 중성자선량은 적절한 중성자 선량평가 알고리즘에 의해 평가될 수 있다.

중성자 선량을 계산하기 위해서는 중성자의 TL 반응이 에너지별로 알려져야 하지만 이에 관한 데이터는 알려져 있지 않다. 따라서 BMS로 측정된 실제 작업선장에서 선량계를 직접 교정하는 방법이 많은 관심을 끌고 있다.[3-5] 직접 교정법(in-situ calibration)으로 알비도 선량계를 교정하면 정밀도가 높아질 뿐만 아니라 다른 교정법의 효용성을 평가할 수 있다.

Panasonic UD-809P 알비도 선량계는 한국의 원전에서 사용하는 중성자 선량계중 하나로서 40×40×30 cm^3의 물팬텀에 부착하여 영광4호기 원자로 건물내에서 조사시험이 수행되었다.[6]

Panasonic TLD system User's Manual에서 제시한 선량평가 방법의 효용성을 평가하기 위하여 American Arizona Nuclear Power Plant와 영광4호기에서 측정된 TL 반응을 이용하여 중성자 선량을 계산하였다. 계산 결과 Panasonic사에서 제시한 중성자 선량평가 방법은 한계가 있었으므로 본 논문에서는 새로운 중성자 선량평가 방법을 제시하였다.

2. Panasonic UD-809P 중성자 선량계[7]

Panasonic UD-809P 중성자 선량계는 ABS 수지로 채워진 카드뮴 틀 내에 3개의 $^{6}Li_2{}^{10}B_4O_7(Cu)$ 형광소자와 1개의 $^{7}Li_2{}^{11}B_4O_7(Cu)$ 형광소자가 들어 있다. $^{7}Li_2{}^{11}B_4O_7(Cu)$는 감마 선량 측정에 사용되며, 세 개의 $^{6}Li_2{}^{10}B_4O_7(Cu)$ 형광소자는 각각 속중성자, 초열중성자, 열중성자에 의한 중성자 선량 측정에 사용된다. 각 소자의 입사창 이외의 구역으로 중성자가 들어가는 것을 막기 위하여 배지는 입사창을 제외하고는 0.7 mm 두께의 Cd 층으로 차폐되었다. 측정값의 차이에 따라 각 소자의 전면과 후면은 서로 다른 차폐창을 가진다. 표 1은 Panasonic UD-809P 선량계의 각 영역별 형광체 특성과 차폐조건을 보여준다.

표 1. Panasonic UD-809P 중성자 알비도 선량계의 형광소자 조성 및 차폐체

Element	Phosphor	Front Shield		Back Shield	
		Material	Thickness	Material	Thickness
E1	$^{7}Li_2{}^{11}B_4O_7(Cu)$	Cadmium	0.7 cm	Cadmium	0.7 cm
E2	$^{6}Li_2{}^{10}B_4O_7(Cu)$	Tin	0.7 cm	Cadmium	0.7 cm
E3	$^{6}Li_2{}^{10}B_4O_7(Cu)$	Cadmium	0.7 cm	Cadmium	0.7 cm
E4	$^{6}Li_2{}^{10}B_4O_7(Cu)$	cadmium	0.7 cm	Tin	0.7 cm

3. Panasonic사의 중성자 선량평가 알고리즘

Panasonic TLD User's Manual에서 권고하는 UD-809P 알비도 선량계의 중성자 선량 알고리즘은 1982년 H. Ishiguru와 S. Takeda에 의해 1982년에 개발되었다.[8] 이 방법은 중성자를 열중성자와 초열중성자, 속중성자로 구분하여 중성자 선량을 구하는 방법인데, 예를 들어 ^{252}Cf의 경우 다음 식으로부터 열중성자 선량과 초열중성자 선량 및 속중성자 선량을 구할 수 있다.

$$H_{PNth} = 0.033\,(L2 - L3) \quad \text{----------} \quad (1)$$

$$H_{PNep} = 0.011\,((L3-L1) - 0.16\,(L2-L3) - 0.20\,(L4-L3)) \quad \text{------} \quad (2)$$

$$H_{PNf} = 2.4\,((L4-L3) - 0.8(L2-L3) - 0.19(L3-L1)) \quad \text{----------} \quad (3)$$

여기서 H_{PNth}와 H_{PNep}, H_{PNf}는 각각 열중성자와 초열중성자, 속중성자로 인한 mrem 단위의 중성자 선량을 의미한다.

그러나 위의 방법은 교정 방사선장에 대해서는 상당히 정확한 결과를 보여주지만 교정 방사선장과 실제 원자력발전소의 중성자 선장은 큰 차이가 있다. 따라서 위에서 사용한 방법의 적합성은 원자력발전소에서 측정한 중성자 스펙트럼에 대해 면밀히 검토되어야 한다. 이를 위해 원자력발전소에서 조사시킨 선량계와 위의 식을 이용해 중성자선량을 구하였다.[9,10] 표 2와 표 3은 American Arizona nuclear power plant에서 UD-809 선량계로 측정한 판독값과 위 식을 이용하여 계산한 중성자선량을 보여준다. 표 4는 영광4호기에서 측정한 중성자 스펙트럼과 선량계 판독값으로부터 계산한 중성자선량을 보여준다.

표 2. American Arizona Nuclear Power Plant에서 측정한 TL 판독결과

위 치*	Element 1 (mR)	Element 2 (mR)	Element 3 (mR)	Element 4 (mR)
1	331	2733	1979	3962
2	46	362	235	465
3	574	5762	4509	8615
4	67	452	265	474
5	106	1199	627	1037
6	163	1414	790	1400
7	116	961	497	855
8	5	53	30	50
9	9	51	29	55
10	17	45	45	79

표 3. American Arizona NPP에서의 중성자선량 계산결과

위치	Personal Dose Equivalent (mrem)				Delivered Dose* (mrem)	Ratio (Total/ D. Dose)
	Thermal	Epithermal	Fast	Total		
1	24.88	12.44	2560.03	2597	286	9.08
2	4.19	1.35	221.98	228	37	6.16
3	41.35	32.05	5654.28	5728	650	8.81
4	6.17	1.39	52.27	60	43	1.39
5	18.88	3.82	-351.82	-329	110	-2.99
6	20.59	4.46	-19.99	5	136	0.04
7	15.31	2.59	-205.42	-188	85	-2.21
8	0.76	0.19	-7.56	-70	5	-14.0
9	0.73	0.12	11.04	12	5	2.40
10	0.92	0.18	15.07	16	6.5	2.46

표 4. Panasonic UD-809 선량계와 BMS를 이용한 영광 4호기의 중성자선량 평가결과

위 치	Personal Dose Equivalent (mSv)				BMS Dose* (mSv)	Ratio (Total/BMS)
	Thermal	Epithermal	Fast	Total		
144C	3.66E-06	4.18E-07	-1.02E-04	-9.83E-05	6.97E-05	-1.41
144D	4.65E-09	1.18E-08	3.83E-07	3.99E-07	3.47E-07	1.15
144E	2.84E-06	4.74E-07	8.14E-05	8.47E-05	8.53E-05	0.99
122D	5.24E-08	2.32E-09	-2.32E-06	-2.26E-06	1.45E-07	-15.6

표 3에서 알 수 있는 바와 같이 몇 개 지점에서 Panasonic사에서 제시한 알고리즘으로 계산한 선량과 전달된 선량 사이에는 큰 차이가 보였다. 표 3에서 나타난 이러한 차이는 sensitivity factor에 관련된 불확실성 때문인 것으로 판단되지만, 여러 경우에 이 차이를 논리적으로 설명할 방법이 없다. 만약 속중성자가 존재한다면 어떠한 경우든지 L4는 식 3의 0.8×L2보다 커야 하지만 표 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 L4는 종종 0.8×L2보다 작다.

이러한 현상은 영광 4호기에서 측정한 자료에서도 동일하게 나타나는데, 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 144D와 144E의 경우에는 TL 반응값을 이용하여 계산으로 구한 중성자선량과 중성자 스펙트럼으로부터 계산한 중성자선량이 유사하지만 122D와 144C의 경우에는 중성자선량의 계산결과가 음이 되고 만다. 이와 같이 음이 되는 이유는 궁극적으로 속중성자 선량을 제대로 평가하지 못하기 때문인데, 식 3의 (L4 - L3)가 [0.8 (L2 - L3) - 0.19 (L3 -L1)] 이하일 경우 이러한 현상이 나타난다. 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 열중성자의 알비도 성분이 L4에 기여하는 비율이 이론적인 값보다 낮기 때문으로 추정되며, E4 소자는 알비도 열중성자를 측정하고 열중성자에 높은 감도를 가지고 있기 때문에 알비도 열중성자를 조금이라도 측정하지 못하게 되면 L4는 상당히 감소하게 된다. L4의 이 감소는 속중성자로 인한 중성자선량에 직접적으로 영향을 미친다. 표 4에서 122D의 열중성자 분율이 다른 세지점보다 큰 것과 같이, 이와 같은 상황은 열중성자 분율이 큰 경우 나타나는 것으로 판단된다. 자료가 충분치 않아 중성자선량이 음의 값을 나타내는 명확한 이유를 찾을 수는 없지만, 중성자 분율이 L4에 미치는 효과는 명백하다.

4. 중성자 선량평가 알고리즘의 개선

위에서 살펴본 바와 같이, Panasonic사의 알고리즘은 열중성자 분율이 높은 중성자 선장에서 속중성자로 인한 중성자선량을 구할 때 본질적인 문제점을 보인다. 따라서 알비도 열중성자의 손실을 보상할 새로운 방법을 사용하는 것이 바람직하다. 이를 해결할 수 있는 한가지 방법이 입사 열중성자에 대한 알비도 열중성자의 비를 나타내는 a_{tt}라는 새로운 값을 도입하는 것이다. Panasonic사의 알고리즘에서는 알비도 분율이 0.8이었지만, 선량계를 착용하는 geometry 때문에 0.8보다는 작을 것 같다. UD-809P 선량계의 착용 geometry에 대한 실제의 a_{tt} 값을 구하는 것이 가능하다면 음의 중성자선량이 발생할 가능성이 제거될 것이다.

또 다른 방법은 속중성자와 초열중성자를 함께 취급하는 방법으로 이와 같이 하면 열중성자에 의한 알비도 열중성자의 상실이 속중성자에 의한 전체 알비도 열중성자보다 크지 않는 한 속중성자에 의한 판독값이 전체적으로 상실될 수는 없다. 설사 알비도 열중성자의 상실에 의한 E4 판독값의 감소가 발생할 지라도 전달된 선량의 속중성자에 대한 감도를 조절함으로써 보상할 수 있다. 논문에서는 후자의 방법을 선택하였다.

4.1 선량계 소자와 중성자의 반응 모델

이를 위하여 중성자를 열중성자와 속중성자로만 구분하였다. 열중성자는 0.5 eV 이하의 중성자로 가

정하였으며 속중성자는 0.5 eV 이상의 중성자로 가정하였다. 이와 같이 가정하면 Panasonic UD-809 선량계의 각 형광 소자는 다음과 같은 방사선과 반응을 일으키게 된다.

E1 : $^{7}Li_{2}{}^{11}B_{4}O_{7}(Cu)$로 된 E1은 감마선과만 반응을 일으킨다.
E2 : 입사하는 열중성자와 속중성자중의 초열중성자 및 속중성자로 인해 인체로부터 반사되는 초열중성자 성분과 반응한다.
E3 : 입사하는 속중성자중의 초열중성자와 속중성자로 인해 인체로부터 반사되는 초열중성자 성분과 반응한다.
E4 : 입사하는 속중성자로 인해 발생되는 모든 성분과 열중성자의 알비도 성분과 반응한다.

열중성자는 Cd 차폐창에 흡수되기 때문에 E3와 E4에서는 측정되지 않고 알비도 열중성자는 후방에 있는 Cd 차폐창 때문에 E2와 E2에서 측정되지 않는다. ^{6}Li와 ^{10}B는 저에너지 중성자에만 높은 감도를 가지고 있기 때문에 $^{6}Li_{2}{}^{10}B_{4}O_{7}(Cu)$에 의한 속중성자 측정효율은 매우 낮다. 입사 속중성자는 인체 내에서 감소되고 반사되는 알비도 중성자(초열중성자 및 열중성자)는 E4에 의해 측정된다. 그림 1에서 3은 입사하는 중성자 성분과 각 형광소자와의 반응을 도식적으로 보여준다.

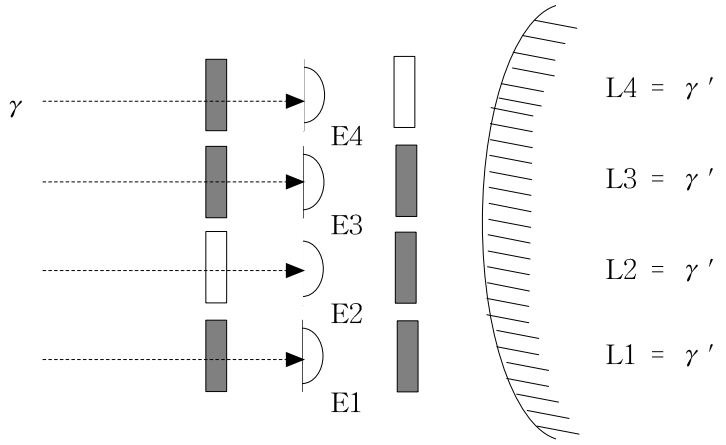

그림 1. 감마선만 입사하는 경우

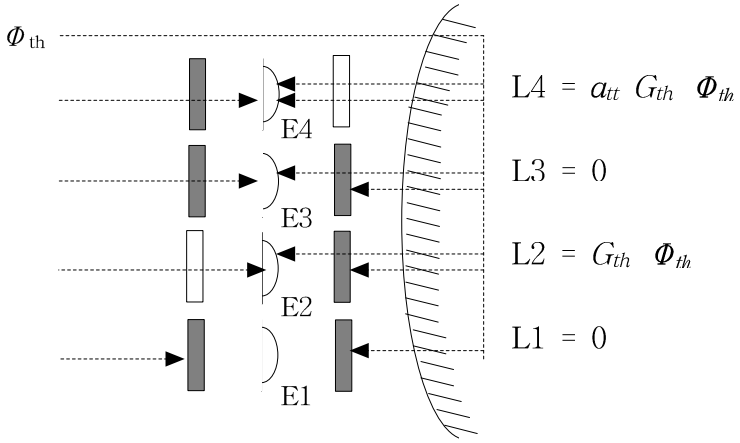

그림 2. 열중성자 성분만 입사하는 경우

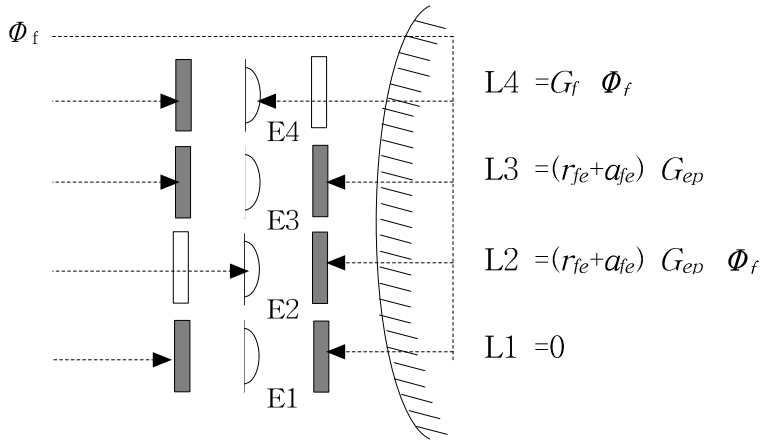

그림 3. 속중성자 성분만 입사하는 경우

4.2 중성자 선량평가 알고리즘

그림 1에서 3에 나와 있는 반응 모델로부터 각각의 형광 소자에 대한 반응도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L1 = \gamma' \quad \text{---------- (4)}$$

$$L2 = G_{th}\,\Phi_{th} + G_{ep}\,(r_{fe}+a_{fe})\,\Phi_f + \gamma' \quad \text{---------- (5)}$$

$$L3 = G_{ep}\,(r_{fe}+a_{fe})\,\Phi_f + \gamma' \quad \text{---------- (6)}$$

$$L4 = a_{tt}\,G_{th}\,\Phi_{th} + G_f\,\Phi_f + \gamma' \quad \text{---------- (7)}$$

여기서 γ' : Cd나 Sn 차폐창을 통과하는 감마 성분

Φ_{th} : 입사 열중성자속, n/cm^2

Φ_f : 입사 속중성자속, n/cm^2

G_{th} : 열중성자에 대한 $^6Li_2{}^{10}B_4O_7$(Cu) 형광체의 감도, mR-cm^2

G_f : 속중성자로 인해 발생되는 모든 형태의 중성자들에 대한 $Li_2{}^{10}B_4O_7$(Cu) 형광체의 평균 감도, mR-cm^2

G_{ep} : 초열중성자에 대한 $^6Li_2{}^{10}B_4O_7$(Cu) 형광체의 감도, mR-cm^2

r_{fe} : 입사 속중성자속에서 초열중성자 성분의 비율

a_{fe} : 입사 속중성자로 인한 알비도 초열중성자의 비율

a_{tt} : 입사 열중성자로 인한 알비도 열중성자의 비율

위 식에서 G_f는 속중성자에 대한 감도를 의미하는 것이 아니며, 입사 속중성자에 포함되어 있는 초열중성자와 속중성자로 인해 발생되는 알비도 열중성자 및 알비도 초열중성자와의 반응을 속중성자속으로 나타낸 평균 반응도라 할 수 있다. 따라서 G_f는 각각의 중성자 스펙트럼에 대한 in-situ calibration을 통해 직접 구하여야 한다.

위의 수식들로부터 열중성자 성분과 속중성자 성분에 대한 TL 반응도를 평가해 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{th}\,\Phi_{th} = L2 - L3 \quad \text{---------- (8)}$$

$$G_f\,\Phi_f = (L4 - L1) - a_{tt}\,(L2 - L3) \quad \text{---------- (9)}$$

위의 수식들에서 $^{6}Li_2{}^{10}B_4O_7(Cu)$ 소자의 열중성자와 속중성자에 대한 감도는 단위 중성자 플루언스에 의한 반응도로 정의되며 식 8과 9로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_{th} = \frac{L2 - L3}{\Phi_{th}} \quad \text{----------} \quad (10)$$

$$G_f = \frac{(L4 - L1) - a_{tt}(L2 - L3)}{\Phi_f} \quad \text{----------} \quad (11)$$

따라서 단위 personal dose equivalent에 대한 TL 반응도를 열중성자와 속중성자의 sensitivity factor로 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{Nth} = \frac{L2 - L3}{CF_{th}\,\Phi_{th}} = \frac{L2 - L3}{H_{PNth}} \quad \text{----------} \quad (12)$$

$$H_{Nf} = \frac{(L4-L1)-a_{tt}(L2-L3)}{CF_f\,\Phi_f} = \frac{(L4-L1)-a_{tt}(L2-L3)}{H_{PNf}} \quad \text{------} \quad (13)$$

여기서 H_{Nth} : 열중성자에 대한 $^{6}Li_2{}^{10}B_4O_7(Cu)$ 형광체의 sensitivity factor, mR/mSv

H_{Nf} : 속중성자에 대한 $^{6}Li_2{}^{10}B_4O_7(Cu)$ 형광체의 sensitivity factor, mR/mSv

CF_{th} : 열중성자의 personal dose equivalent 환산인자, mSv cm^2

CF_f : 속중성자의 personal dose equivalent 환산인자, mSv cm^2

단위 TL 반응도에 대한 personal dose equivalent를 열중성자와 속중성자의 열중성자와 속중성자의 교정인자로 정의하면 다음과 같이 sensitivity factor의 역으로 표현할 수 있다.

$$C_{HNth} = \frac{1}{H_{Nth}} = \frac{H_{PNth}}{L2-L3} \quad \text{----------} \quad (14)$$

$$C_{HNf} = \frac{1}{H_{Nf}} = \frac{H_{PNf}}{(L4-L1)-a_{tt}(L2-L3)} \quad \text{----------} \quad (15)$$

작업장에서 측정된 TL 반응도로부터 교정인자를 정의할 수 있다면 열중성자와 속중성자에 대한 neutron personal dose equivalent는 다음과 같이 정의된다.

$$H_{PNth} = C_{HNth}(L2 - L3) \quad \text{----------} \quad (16)$$

$$H_{PNf} = C_{HNf}[(L4 - L1) - a_{tt}(L2 - L3)] \quad \text{----------} \quad (17)$$

$$H_{PNwd} = H_{PNth} + H_{PNf} \quad \text{----------} \quad (18)$$

여기서 H_{PNth}과 H_{PNf}, H_{PNwb}는 각각 열중성자 선량과 속중성자 선량 및 총 중성자 선량을 의미한다.

5. 결론

Panasonic TLD User's Manual에서 권고하는 UD-809P 알비도 중성자 선량계의 중성자 선량평가 알고리즘은 원자력발전소에서 사용하기에는 심각한 문제점을 내포하고 있다. 열중성자속 분율이

높은 중성자선장의 경우, 주로 속중성자 분율의 과소평가 되기 때문에 중성자선량이 음이 되는 경우가 발생한다. 이는 E4의 알비도 열중성자 상실에 의해 야기되는 것으로 판단된다.

가능한 E4의 알비도 열중성자의 모든 상실을 보상하기 위해 새로운 방법을 본 논문에서 제시하였다. 이 새로운 방법에서 중성자는 두 가지 그룹, 즉 열중성자와 속중성자로 나뉘어지며, Panasonic UD-809P 중성자 선량계 필터중 한가지인 Cd의 cutoff 에너지로 구분하였다. 설계의 관점에서 보면 E4는 입사하는 속중성자, 입사 속중성자중 반사되는 알비도 열중성자, 입사 열중성자중 반사되는 알비도 열중성자와 반응한다. 따라서 E4의 반응으로부터 알비도 열중성자 성분을 빼냄으로써 속중성자 성분을 분별할 수 있다.

실제 작업선장에서 열중성자와 속중성자에 대한 교정인자를 평가하여 개선된 알고리즘의 적합성을 평가 중에 있으며 적합성이 입증되면 Panasonic UD-809P 알비도 선량계를 이용하여 원전 작업 종사자의 중성자 피폭량을 보다 정확하게 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. G.W.R. Endres, J.M. Aldrich, L.W. Brackenbush et al., "Neutron Dosimetry at Commercial Nuclear Plants. Final Report of Subtask A: Reactor Containment Measurements", PNL--3585 (Washington: Pacific Northwest Labs), 1981
2. International Commission on Radiological Protection, "Recommendations of International Commission on Radiological protection", ICRP publication 60 (Oxford: Pergamon), 1990
3. L. Lindborg, D. Bartlett et al., "Determination of Neutron and Photon Dose Equivalent at Workplaces in Nuclear Facilities in Sweden, A joint SSI-EURADOS Comparison Exercise", Radia. Prot. Dosi. 61, 89-100, 1995
4. D.T. Bartlett, A.R. Britcher et. al., "Neutron Spectra, Radiological Quantities and Instrument and Dosimeter Responses at A Magnox Reactor and A Fuel Reprocessing Installation", Radia. Prot. Dosi. 44, 233-238, 1992
5. M. Matzkw, H. Kluge and M. Luszik-Bhadra, "Directional Information on Neutron Fields", Radia. Prot. Dosi. 70, 261-264, 1997
6. Sangwoon Shin, Hua Jin, Joongkwon Son, "Method for Correcting the Calibration Factor Used In The TLD dose Calculation Algorithm", to be published, 1998
7. "TL Badge Technical Data of Panasonic TLD System", E-BDG/TD-2, SCADA Engineering Co., Ltd., pp 67-78
8. H. Ishiguro and S. Takeda, "On Development of Automatic Read Dosimeter Using $Li_2B_4O_7(Cu)$ Elements (II)", Health Phys., 17, p. 27, 1982
9. J. K. Son, S. W. Shin, C. H. Cho and Jin Hua, "Neutron Spectrum Mapping inside Reactor Containment Building of Younggwang Nuclear Power Plant", TM. 96NS11.R1998.147, Korea Electric Power Research Institute, 1998
10. Ronald M. Thurlow, "Neutron Dosimetry Using a Panasonic Thermoluminescent Dosimeter", Submitted in Partial Fulfillment for the Degree of Masters of Science in Radiological Sciences University of Lowell, p. 74, 1984