

비상 베타선량계의 에너지에 따른 피부 선량평가 알고리즘 개발

조천형 · 이원근
경희대학교

김중수 · 윤석철
한국원자력연구소

- 요약 -

열형광 선량계(TLD)를 사용한 피부 선량평가는 베타선의 에너지를 구분함으로 정확히 평가된다. 이는 차폐체에 의한 감쇄효과를 이용하는 방법으로 본 논문에서는 7개의 두께가 다른 알루미늄 차폐체를 사용하였고, TLD로는 미국 Teledyne Isotopes사의 LiF₇ 선량계를 채택하였다. 비상 베타 선량계의 베타선에 대한 특성실험을 위해 한국 원자력연구소가 확보 하고 있는 PTB 표준선원인 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y (E_{max}=2.27MeV, E_{avg}=0.8MeV), ²⁰⁴Tl (E_{max}=0.76MeV, E_{avg}=0.26MeV), ¹⁴⁷Pm (E_{max}=0.225MeV, E_{avg}=0.06MeV)에 대한 조사를 하였다. 이런 결과로 비상 베타 선량계의 표준 베타선원에 대한 보정계수와 소자별 반응비를 구할 수 있었고, 이것을 이용하여 미지의 베타선원에 대하여 정확한 선량평가를 하기위한 알고리즘을 개발하였다.

1. 서론

1979년 3월의 TMI 사고 이후, 제염작업에 참가하였던 작업자들이 착용한 개인 선량계의 선량평가 과정에서 기존의 개인 선량계가 극단적인 에너지 의존성을 보이고, 부적절한 베타보정계수를 사용해 왔음이 드러났다.^[1] 이러한 TLD의 에너지의존성은 베타입자의 낮은 투과능력 때문에 TLD내에서 불균일한 에너지 분포를 일으키게 된다. 이런 불균일한 에너지 분포는 입사된 에너지에 따라 변하게 되므로, 베타선이 조사된 TLD의 선량평가는 베타선의 에너지 분포를 정확히 고

려할 때만이 이루어질 수 있다. [2][3][4]

이러한 관점에서 비상 베타 선량계는 7개의 두께가 다른 알루미늄 차폐체를 사용하여 베타선을 에너지 별로 감쇄시켜서 에너지에 따른 베타 보정계수를 도출해 냄으로써 베타 선량평가를 보다 정확히 할 수 있게 하였다.

2. 비상 베타 선량계의 설계

2.1 배경이론

베타선에 대한 물질 내에서의 감쇄는 일반적으로 알파선보다 복잡한 내용을 갖는다. 하전입자인 점에서 알파입자와 근본적으로 유사 하지만, 거의 일직선으로 진행되는 알파선에 비해 베타선은 보다 복잡한 지그재그 운동을 하게 된다. 그러나, 베타선의 비 이온화 역시 매질 속에서 진행되는 거리에 따라 지수적으로 감소한다는 사실이 알려져 있고, 이에 따라 베타입자의 어떤 매질에 대한 투과 능력은 통상 그 매질 내에서의 비정으로 정의하게 된다.^[5] 대표적인 실험식 Kartz and Penfold식을 이용하여 베타선의 최대비정을 구할 수 있는데 그 식은 다음과 같다.

$$R_{max} \cdot \rho [g/cm^2] = 0.412 E^{1.265 - 0.0954 \ln E_{max}} \text{ ----- (1)}$$

여기서, R_{max} : 최대비정 [cm]

ρ : 매질의 비중 [g/cm^3]

E_{max} : 베타선의 최대 에너지 [MeV] (단, $E_{max} < 2.5MeV$)

이식을 이용하여 베타선의 에너지를 순차적으로 차폐 하기 위한 알루미늄 차폐체($\rho = 2.7g/cm^3$)의 두께를 구할 수 있었다.

2.2 비상 베타 선량계의 특성

비상 베타 선량계는 7개의 두께가 다른 알루미늄 차폐체를 사용하여, 베타선을 에너지별로 감쇄 시킴으로서 에너지에 따른 베타 선량평가를 보다 정확히 할 수 있게 하였다. 각 차폐체 밑에는 열형광 선량계를 놓게 되며, 이 한단위의 차폐체와 열형광 선량계를 통틀어 소자(element)라 부른다. 즉 비상 베타 선량계는 7개의 소자로 구성된다. 그림 1에는 비상 베타 선량계의 모양 및 크기를 나타내었다.

비상 베타 선량계에 사용되는 열형광 선량계의 크기는 두께가 0.13mm이고 지름이 12.5mm이다.

Teledyne Isotope사에서 제조한 LiF₇ 성분의 선량계로서, 베타선과 저에너지 X-선 검출에 주로 사용되며, 검출범위는 30mR~10⁵R이다.

차폐체로서는 알루미늄을 사용하였으며, 에너지별로 감쇄에 필요한 차폐체의 두께계산은 식(1)을 사용하여 이루어졌다. 표 1은 이러한 계산의 결과로 구해진 차폐체의 두께별 차폐되는 에너지를 나타내었다.

2.3 선량계 특성 실험

TLD 판독장치로는 미국 Teledyne Isotopes사의 TLD7300시스템을 사용하였으며, 판독기의 교정을 위해 가열주기 기록장치를 이용하여 가열주기의 재현성 여부를 확인함으로써 장치의 정상작동을 확인하였다. 또한, 특성실험에 사용되는 TLD의 반응도 차이를 보정 하기 위해 국가 제 2차 표준 선장이 확보되어 있는 한국 원자력 연구소(KAERI) 방사선 조사선장에서 ¹³⁷Cs선원으로 기준량(1R)을 조사시키고 판독하는 과정을 반복함으로써 선량계 보정 계수(DCF)를 도출 하였다.

PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)2차 표준 베타 선원(⁹⁰Sr/⁹⁰Y, ²⁰⁴Tl, ¹⁴⁷Pm)에 비상 베타 선량계를 각각 1rad 씩 조사시켜 베타선원에 대한 특성 실험을 실시하였다. 표 2에는 PTB 2차 표준 베타선원의 연조직 표면에서의 선량율을 나타내었다.^[6]

3. 에너지 특성에 따른 베타 선량평가 알고리즘

알지못하는 베타선원에 대한 피부선량 평가는 “베타보정계수”에 1번소자(2.7mg/cm² 차폐체 사용)의 반응값을 곱해 줌으로써 구할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$D_s [\text{rad at } 7\text{mg/cm}^2] = CF_\beta \times TLD_{1st. el.} [\text{digit}] \text{ -----(2)}$$

여기서, CF_β : 베타선에 대한 보정 계수 [rad/digit]

D_s : 열형광 선량계에 조사된 피부 7mg/cm² 깊이에서의 베타선량 [rad]

$TLD_{1st. el.}$: 가장 얇은 차폐체 사용 소자의 반응값 [digit]

베타 보정 계수를 구하기 위해서는 각 표준 베타선원에 대하여 선원별 보정계수를 구하여야 한다. 이 값은 각 표준선원이 저마다 다른 평균에너지와 최대에너지를 가지므로 조사 선원에 따라서 다른 값을 가지게 되며, 선원의 강도가 약할수록 큰 값의 보정계수를, 강도가 클수록 작은 보정계수를 갖는다. 또 같은 베타 보정 선원에 대하여 소자별로 차폐체의 두께가 다름으로 해서 TLD 반응정도가 달라진다. 이 반응 정도를 1번소자의 반응값 대 다른 소자의 반응값의 비로 정의하여

그림 2와 같은 베타 보정계수 대 소자반응비 곡선이나 이 곡선을 fitting한 식에 대입 함으로써 에너지별 보정계수를 구한다. 그리고, 이 값들을 다시 평균하여 종합적이고 정밀한 베타 보정계수를 구하여, 최종적으로 이 값을 다시 1번소자의 반응값에 곱함으로써 에너지에 따른 베타선량을 구할 수 있게 된다.

4. 결과 및 고찰

^{137}Cs 선원으로 일정량(1R)의 방사선을 조사하여 반응성이 우수한 TLD를 선별하기 위한 선량계 보정계수(DCF)를 도출하였다.

그림 3에 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{204}Tl , ^{147}Pm 각각의 선원에 대하여 1rad씩 조사시켰을 때 차폐체의 두께 별 반응값을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 선원은 차폐체의 두께가 증가 함에 따라 정밀 베타 선량계의 반응값은 점차 감소하였다. 그러나, 1, 2번 소자의 반응값이 거의 같게 나타나 두 영역에서의 차폐체에 의한 감쇄효과가 없는 것으로 사료된다. ^{204}Tl 선원에서는 1, 2, 3번 소자에서 반응값을 보였고 4번소자 부터는 반응값이 background level로 감소하였다. 이는 베타선의 에너지가 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 에 비해 작기 때문인 것으로 판단된다. ^{147}Pm 선원에서는 1번소자에서만 반응을 나타내었다. 이것은 에너지가 매우 약함으로 인해 $54\text{mg}/\text{cm}^2$ 의 차폐체를 투과하지 못한 것으로 보인다. 이를 통하여 각 선원에 대한 1번소자의 반응값에 대한 다른 소자의 반응값 비($R_{2,3,4}$)를 도출해 내었고, 이를 linear fitting하여 표 3과 같은 에너지에 따른 베타선량 평가를 위한 소자별 보정계수 전환식을 구할 수 있었다.

5. 결 론

두께가 다른 알루미늄 차폐체를 이용하여 표준 베타선원에서 실시한 특성 실험을 통해 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{147}Pm , ^{204}Tl 선원에 대한 보정계수와 에너지별 보정계수식을 도출해 냄으로써, 미지의 베타 선원에 대하여 에너지에 따른 정확한 선량평가 알고리즘을 개발하였다.

따라서, 본 연구에서 개발한 선량계는 선량평가 알고리즘을 적용하여 비상시 대응 선량계로 사용할 수 있다.

앞으로 고에너지 영역에 대한 보정계수 전환식을 얻기 위한 천연 우라늄과 같은 비교적 높은 에너지를 갖는 선원의 선량계 특성 실험과 현장에 적용할 수 있는 혼합 베타선장에서의 선량평가 알고리즘에 대한 검증이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] S. Sherbini, S. W. Porter, " A review of the current deficiencies in personnel beta dosimetry, with recommendations", NUREG/CR-3296, 1983
- [2] R. I. Scherpelz, L. A. Rathbun, G. W. R. Endres, D. W. Murphy, "A passive multi-element beta dosimeter", PNL-SA-11048, 1983
- [3] R. I. Scherpelz, L. A. Rathbun, G. W. R. Endres, "The use of multi-element beta dosimeters for measuring dose rates in the TMI-2 containment building", PNL-SA-1714, 1983
- [4] R. I. Scherpelz, G. W. R. Endres, P. L. Roberson, "The application of a multi-element beta dosimeter", PNL-SA-10670, 1983
- [5] Heman Cember, "Introduction to health physics", Pergamon Press, 1983
- [6] 과학기술처, " 방사선 방어 및 측정기술 개발", KERI/RR-1328/93, 1993

알루미늄의 두께(mm) [소자번호]	mass thickness (mg/cm ²)	차폐되는 에너지 (MeV)
2.70 [7]	742.5	1.62
2.00 [6]	540	1.25
1.5 [5]	405	0.99
0.70 [4]	202.5	0.58
0.3 [3]	81	0.31
0.2 [2]	54	0.24
0.01 [1]	2.7	0.041

표 1. 차폐체의 두께별 차폐 에너지

선원	방사능 (MBq)	선량을 (μ Gy/sec)
¹⁴⁷ Pm	518	0.358
²⁰⁴ Tl	18.5	0.263
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	74	2.841
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	1,850	566.3
		78.27
		28.00

표 2. PTB 표준선원의 연조직 표면에서의 선량을

소자별 반응비 [소자번호]	보정계수식
R ₂ =[2]/[1]	CF=2.11195-0.36523×R ₂
R ₃ =[3]/[1]	CF=2.36716-0.47221×R ₃
R ₄ =[4]/[1]	CF=1.89754-0.41223×R ₄

※ CF : 에너지별 보정계수
R : 소자별 반응비

표 3. 소자별 반응비를 이용한 보정계수 전환식

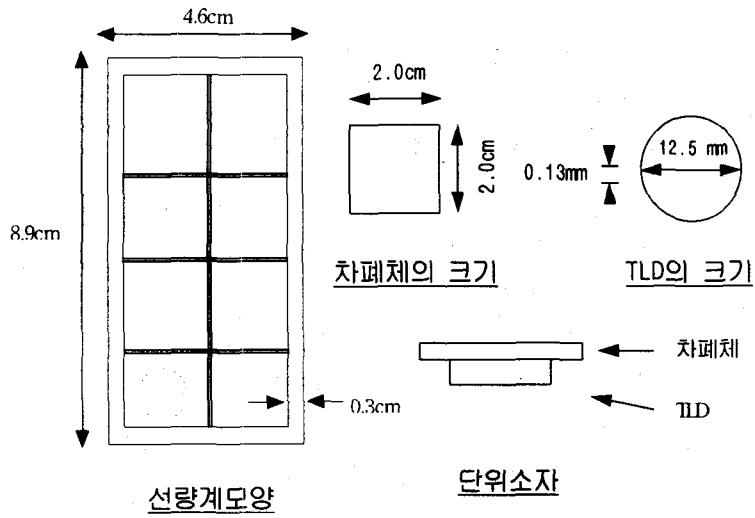


그림 1. 비상 베타 선량계의 모양 및 크기

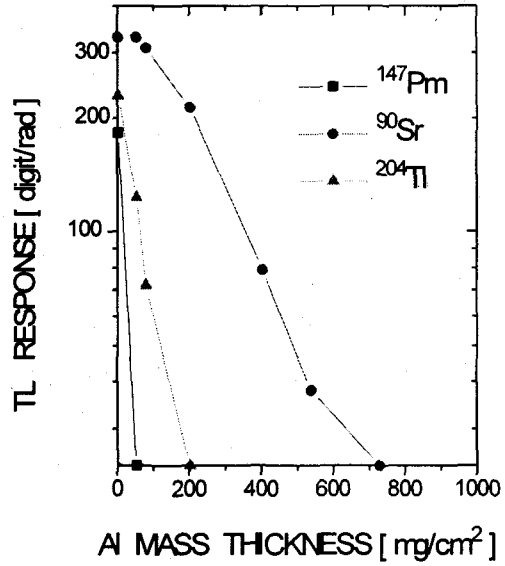
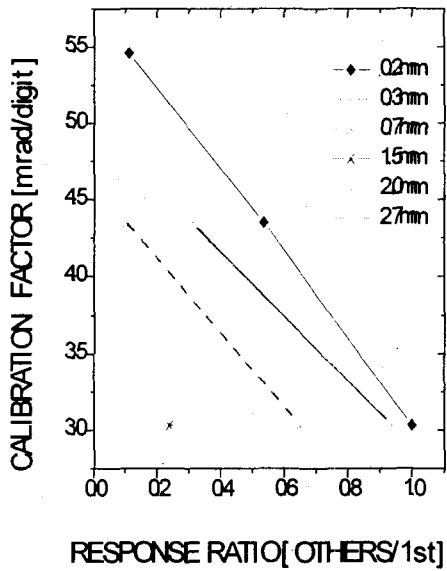


그림 2 표준 베타선원에 대한 보정계수와 반응비 그림 3 선량계의 베타 선원에 대한 반응