

사고시 대응 정밀 베타선량계 개발

이 원 근

경희대학교 공과대학 원자력공학과

Development of Precise Beta Dosimeter

Won-Keun Lee

Dept. of Nuclear. Eng., Kyung Hee Univ.

Abstract

The use of thermoluminescent dosimeters (TLDs) for beta dosimetry has been encumbered by the energy-dependent responses of TLDs to beta radiation. This energy-dependent response is due to the low penetrating ability of beta particles. Thus the determination of the beta dose imparted to an exposed TLD chip can be accurately determined only if the energy distribution of beta radiation is correctly accounted for. So precise beta dosimeter used TLD chips place under several aluminum filters of varying thicknesses and developed to correctly determine doses due to radiation fields where the beta energy distribution is unknown.

1. 서 론

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 TLD (Thermoluminescent Dosimeter)의 극단적인 에너지의존성은 베타입자의 낮은 투과능력에서 기인하고, 이는 TLD내에서 불균일한 에너지 분포를 일으키게 된다. 따라서 TLD를 이용한 베타선의 선량평가는 베타선의 에너지 분포를 정확히 고려할 때 이루어질 수 있다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

본 연구에서는 7개의 두께가 다른 알루미늄 차폐체를 사용하여 베타선을 에너지 별로 감쇄시키는 사고시 대응 정밀 베타선량계를 설계·제작하여, 에너지에 따른 베타 보정계수를 도출해 냄으로써 보다 정확한 베타 선량평가를 할 수 있게 하였다.

2. 본 론

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 비이온화 역시 매질 속에서 진행되는 거리에 따라 지수적으로 감소한다는 사실이 알려져 있고, 이에 따라 베타입자의 어떤 매질에 대한 투과 능력은 통상 그 매질 내에서의 비정도로 정의하게 된다.⁽⁵⁾ 대표적인 실험식 Kartz and Penfold식을 이용하여 베타선의 최대비정을 구할 수 있는데 그 식은 다음과 같다.

$$R_{max} \cdot \rho = 0.412 E^{1.265 - 0.0964 \ln E_{max}} \quad (1)$$

여기서, R_{max} : 최대비정 [cm]
 ρ : 매질의 비중 [g/cm^3]

E_{max} : 베타선의 최대 에너지 [MeV] (단, $E_{max} < 2.5 MeV$)
 이식을 이용하여 베타선의 에너지를 순차적으로 차폐하기 위한 알루미늄 차폐체 ($\rho = 2.7 g/cm^3$)의 두께를 구할 수 있었다.

2.2 사고시 대응 정밀 베타선량계의 설계

사고시 대응 정밀 베타선량계는 7개의 두께가 다른 알루미늄 차폐체를 사용하여, 베타선을 에너지별로 감쇄시킴으로써 에너지에 따른 베타 선량평가를 보다 정확히 할 수 있게 하였다. 각 차폐체 밑에는 열형광 선량계를 놓게 되며, 이 한 단위의 차폐체와 열형광 선량계를 통틀어 소자(element)라 부른다. 즉 사고시 대응 정밀 베타선량계는 7개의 소자로 구성된다. 그림 1에는 사고시 대응 정밀 베타선량계의 모양 및 크기를 나타내었다.

사고시 대응 정밀 베타선량계에 사용되는 열형광 선량계의 크기는 두께가 0.13mm이고 지름이 12.5mm이다. Teledyne Isotope사에서 제조한 LiF_7 성분의 선량계로서, 베타선과 저 에너지 X-선 검출에 주로 사용되며, 검출범위는 30mR ~ 10⁵R이다.

차폐체로서는 알루미늄을 사용하였으며, 에너지별로 감

색에 필요한 차폐체의 두께계산은 식(1)을 사용하여 이루어졌으며, 표 1에 각 소자별 차폐되는 베타입자의 에너지를 나타내었다.

2.3 선량계 특성 실험

판독장치로는 미국 Teledyne Isotopes사의 TLD7300시스템을 사용하였으며, 판독기의 교정을 위해 가열주기 기록장치를 이용하여 가열주기의 재현성 여부를 확인함으로써 장치의 정상작동을 확인하였다. 감마선에 대한 특성실험은 제작된 사고시 대응 정밀 베타선량계를 국가 제 2차 표준 선량이 확보되어 있는 한국 원자력 연구소(KAERI) 방사선 조사선장에서 ^{137}Cs 선원에 기준량(1R)을 조사시킴으로써 실시하였다. 이로부터 감마선에 대한 선량계 보정계수를 구할 수 있었으며, 이에 대한 결과를 그림 2에 나타내었다.

베타선원에 대한 선량계 특성실험 또한 한국원자력연구소의 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 2차 표준 베타 선원($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{204}Tl , ^{147}Pm)에 선량계를 각각 1rad씩 조사시켜 실시하였으며, 이 결과를 그림 3과 4에 나타내었다. 그림 4를 fitting하여 에너지에 따른 베타 보정계수 전환식을 구할 수 있었고, 이를 표 2에 나타내었다.

2.4 에너지 특성에 따른 베타 선량평가 알고리즘

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

$$D_s = CF_\beta \times \text{TLD}_{\text{1st}} \quad (2)$$

여기서,

CF_β : 베타선에 대한 보정 계수 [rad/digit]

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

TLD_{1st} : 가장 얇은 차폐체 사용소자의 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 3과 같은 베타 보정계수 대 소자반응비 곡선이나 이 곡선을 fitting하여 표 1에 표시한 것과 같은 보정계수 전환식에 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.

3. 결 론

두께가 다른 알루미늄 차폐체를 이용하여 에너지에 따른 베타선량평가를 할 수 있는 사고시 대응 정밀 베타선량계를 설계·제작하였으며 표준 베타선원에서 실시한 선량계 특성실험을 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.

앞으로 고에너지 영역에 대한 보정계수 전환식을 얻기 위한 천연 우라늄과 같은 비교적 높은 에너지를 갖는 선원의 선량계 특성 실험과 작업현장에서 선량평가 알고리즘에 대한 검증이 이루어져야 할 것이다.

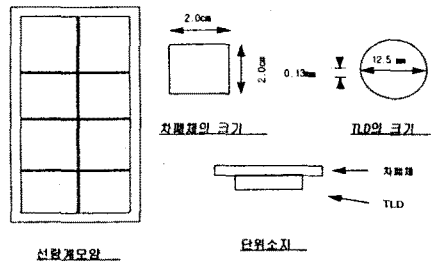


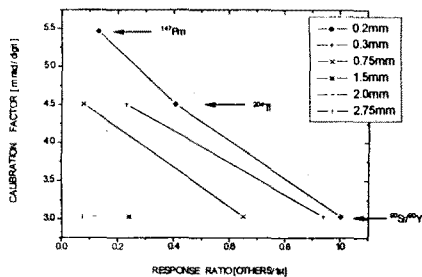
그림 1. 비상 베타 선량계의 모양 및 크기

(각 차폐체 밑에 열형광선량계(TLD)를 두고, 이를 단위소자로 하여 7개의 소자로 구성된다.)

표 1. 소자별 차폐 에너지

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

(식 (1)을 이용하여 계산한 각 소자에 사용된 차폐체에 의하여 차폐되는 베타입자의 에너지)



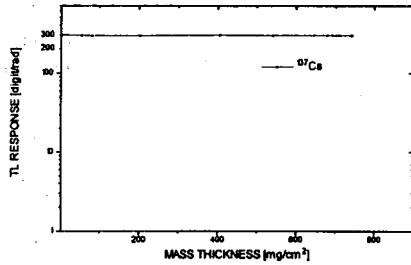


그림 2. 선량계의 감마선원에 대한 반응

(감마선의 특성에서 예상할 수 있는 바와같이 모든 차폐체를 통과하여 모든 소자에서 거의 같은 반응값을 나타내었다.)

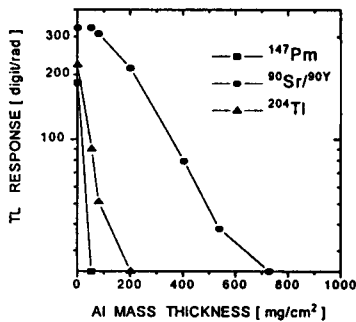


그림 3. 선량계의 베타선원에 대한 반응

(선량계를 PTB 2차 표준선원에 조사시켰을때의 반응값으로서 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 선원은 7번소자에서 ^{204}Tl 과 ^{147}Pm 선원은 각각 4번과 2번 소자에서 베타 입자를 모두 차폐하였다.)

표 2. 소자별 반응비를 이용한 보정계수 전환식

소자별 반응비 [소자번호]	보정계수식
$R_2=[2]/[1]$	$CF=2.11195-0.36523 \times R_2$
$R_3=[3]/[1]$	$CF=2.36716-0.47221 \times R_3$
$R_4=[4]/[1]$	$CF=1.89754-0.41223 \times R_4$

※ CF : 에너지별 보정계수

(그림 3을 fitting하여 구한 식으로 미지선원에 선량계를 조사시켜서 얻어진 반응비를 R_n 에 대입하여 넣으면 에너지별 베타보정계수를 구할 수 있게 되고 이를 평균하면 전체적인 베타 보정계수를 구할 수 있게된다.)

참 고 문 헌

[1] S. Sherbini, S. W. Porter, " A review of the current deficiencies in personnel beta dosimetry, with recommendations", NUREG/CR-3296, p.5~27, 1983

[2] R. I. Scherpelz, L. A. Rathbun, G. W. R. Endres, D.W.Murphy, "A passive multi-element beta dosimeter", PNL-SA -11048, p.3~8, 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, p.3~40, 1983
 [4] R. I. Scherpelz, G. W. R. Endres, P. L. Roberson, "The application of a multi-element beta dosimeter", PNL -SA-10670, p.2~11, 1983
 [5] Heman Cember, "Introduction to health physics", Pergamon Press, 1983, p.99~ 100