

## Calculation of Man-made Radiation Exposure Rate from NaI Spectrum

M. S. Lee

Dept of physics, Chongju University

### Nal 스펙트럼으로부터 인공방사선 조사선량의 계산

이모성

청주대학교 물리학과

(2001년 4월 10일 접수, 2001년 5월 25일 채택)

**Abstract** - The energy band method for NaI spectrum calculates only the exposure rate due to natural radiation because it calculates exposure rate using energy spectrum of 1300 ~ 3000keV. However, the total energy method includes in its calculation the exposure rate due to man-made radiation because it uses the energy spectrum of 150 ~ 3400keV. Therefore, the resulting difference of extracting the exposure rate calculated by the energy band method from the exposure rate calculated by the total energy method is apparently the exposure rate due to man-made radiation.

In this study, we measured the NaI spectrum during the period of significant changes of the exposure rate in the area without a man-made radiation. As the results, we found the exposure rates calculated by those two methods are equal within the statistical variation of  $\pm 0.3 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$ . Consequently, if the difference between the exposure rates calculated by the two methods exists, it may be due to the man-made radiation exposure rate.

*Key words* : NaI(Tl) detector, exposure rate, man-made radiation, total energy method, energy band method

**요약** - NaI 스펙트럼으로부터 조사선량을 계산하는 에너지대 방법은 1300 ~ 3000keV 영역의 에너지 스펙트럼을 사용하여 조사선량을 계산하기 때문에 자연방사선만의 조사선량이 계산되지 않지만, 총에너지 방법은 150~3400keV 영역의 에너지 스펙트럼을 사용하기 때문에 인공방사선의 조사선량도 포함하여 계산한다. 따라서 총에너지 방법에 의한 조사선량과 에너지대 방법에 의한 조사선량의 차이는 인공방사선에 의한 조사선량이 될 것이다.

본 연구에서는 인공방사선이 없는 지역에서 단지 기상요인에 의해서 조사선량 변동이 심한 기간 동안 NaI 검출기로 스펙트럼을 측정하였다. 이와 같이 측정한 스펙트럼에 대해서 두 방법으로 계산한 조사선량률들은 통계적 변동  $\pm 0.3 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  이내에서 잘 일치하였다. 결과적으로 두 방법에 의해 계산된 조사선량값이 차이가 있다면 그것은 인공방사선에 의한 조사선량으로 해석할 수 있을 것이다.

중심어 : NaI(Tl) 검출기, 조사선량률, 인공방사선, 총에너지 방법, 에너지대 방법

### 서 론

Grasty[1]는 원자력 발전소에서 유출되는  $^{41}\text{Ar}$ 의 조사선량을 계산하기 위해 3" X 3" NaI 스펙트럼을 이용하였다. NaI 스펙트럼에서  $^{41}\text{Ar}$ 로부터 방출되는 1293keV 감마선 피크는 자연방사선의

주 변동 요인인 라돈 붕괴생성물 중  $^{214}\text{Bi}$ 로부터 방출되는 1764keV 감마선 피크 보다 낮은 에너지 스펙트럼에 위치하고 있기 때문에 1764keV 감마선의 콤프턴산란 영향을 받는다. 이 영향을 줄이기 위해 Grasty는 자연방사선장에서 1764keV 피크 영역의 계수에 대한 1293keV 피크영역의 계수와

그 비를 구하고, 이 비로부터 벗어나는 값을  $^{41}\text{Ar}$ 에 의한 방사선으로 간주하였다. 그런데 이 1293keV 피크영역의 계수에는  $^{214}\text{Bi}$ 으로부터 방출되는 방사선 이외에도  $^{40}\text{K}$ 과  $^{232}\text{Th}$  계열의 붕괴 생성물에 의한 방사선이 포함되고, 1764keV 피크영역의 계수에는  $^{232}\text{Th}$  계열의 붕괴 생성물에 의한 방사선이 포함되므로 그 비가 지역마다 다르게 되어 일반적으로 사용할 수 없는 문제점이 있다. 또한 인공방사선에 의한 조사선량을 계산하기 위해 각각의 인공방사성 핵종에 대해 조사선량을 교정하여야 하는 불편함도 존재한다.

NaI 스펙트럼으로부터 조사선량을 계산할 수 있는 총에너지 방법과 에너지대 방법[2]은 사용하는 스펙트럼의 영역이 다르다. 즉 총에너지 방법은 150~3400keV 영역의 에너지 스펙트럼을 이용하나, 에너지대 방법은 1320~1600keV, 1620~1900keV, 2480~2750 keV 영역의 에너지 스펙트럼만을 사용한다. 따라서 150~3400keV 영역의 에너지 스펙트럼 중 에너지대 방법에서 사용하지 않는 스펙트럼에서 자연 방사선과 관련이 없는 변동까지 총에너지 방법은 조사선량에 반영할 수 있으나 에너지대 방법에서는 반영하지 않게 된다. 인공방사선이 존재하지 않는 경우에 이 두 방법에 의한 조사선량은 방사선 계측의 통계적 변동 이내에서 일치해야 한다. 두 방법에 의한 조사선량의 차이가 통계적 변동 범위를 벗어나는 정도라면 그 차이는 인공방사선에 의한 조사선량이 될 것이다.

이 방법은 Grasty 방법과는 달리 인공방사선 전체의 조사선량을 평가하게 되며, 에너지대 방법에서  $^{238}\text{U}$  계열의 조사선량 뿐만 아니라  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량 기여도 고려하기 때문에 일반적으로 사용될 수 있는 장점이 있다.

따라서 이 연구에서는 총에너지 방법과 에너지대 방법을 사용하여 인공방사선의 조사선량을 계산하는 방법을 검토하였다. 이들 방법은 환경방사선으로부터 자연방사선의 변동을 제거하기 때문에 보다 낮은 수준의 인공방사선까지 탐지할 수 있도록 한다. 이 방법은 에너지 구분 없이 측정하는 GM계수관형 선량계 또는 가압전리함 검출기에 의한 방사선 감시보다 방사선 이상준위의 식별능

력이 10배 이상 민감하기 때문에, 신속한 방사선 비상대응 대책을 수립하는데 크게 도움이 될 것으로 생각된다.

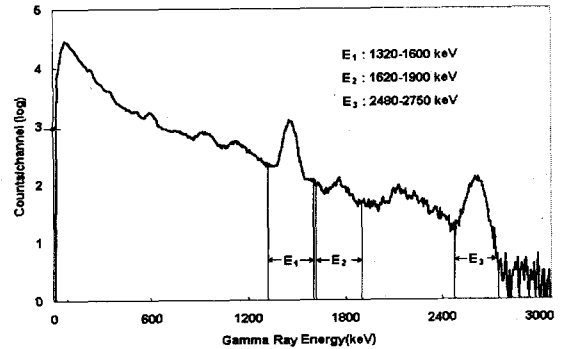


Fig. 1. Typical NaI spectrum of environmental radiation and energy bands used in Energy Band Method.

## 원 리

150keV 이상의 감마선 에너지에 대해 공기에 대한 NaI 물질의 감마선 흡수계수 비는 거의 일정하다[3]. 따라서 150keV 이상의 NaI 스펙트럼에서 총 에너지는 조사선량에 비례한다는 것이 총에너지 방법의 원리가 된다. 이 방법에서는 150~3400keV 영역의 에너지 스펙트럼을 사용한다. 따라서 이 방법은 자연방사선이나 인공방사선을 구별하지 않고 150~3400keV 영역의 감마선 조사선량을 계산한다.

한편 에너지대 방법에서는 자연방사선이 주로  $^{40}\text{K}$  및  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 붕괴 생성물들로부터 방출되는 방사선과 우주선으로 이루어졌다는 사실을 이용한다. 즉 인공방사선이 없을 때, 우주선을 제외한 자연방사선의 조사선량은  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  및  $^{232}\text{Th}$  계열 조사선량의 합이 된다. 각각의 계열이 환경 중에서 방사선 평형을 이루고 있다면 각 계열의 조사선량은 NaI 스펙트럼에서 각 계열을 대표하는 감마선 피크에 비례한다. 에너지대 방법에서는  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열을 대표하는 감마선 피크를 그림 1에서 보는 바와 같이 각각 그들이 붕괴 생성물인  $^{214}\text{Bi}$  및  $^{208}\text{Tl}$ 으로부터 방출되는 1764과 2614keV 피크로 하고 있다. NaI 검출기는 분해능이 좋지 않고 또한 환경 중의 스펙트럼을 측정하는 경우에 온도에 따른 파고 이동으로 피크 면적을 정확하게 계산하는 것이 어렵다. 따라서 피크 면적을 이용하기보다는 피크를 둘러싸는 계수 전

체를 사용한다. 우주선 기여를 제거한 각 계열 대표 피크 영역 1320~1600keV, 1620~1900keV, 2480~2750 keV의 총에너지 즉 피크영역의 계수  $x$  에너지를 각각  $E_1, E_2, E_3$ 라고 하고  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  및  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량을  $K, U, T$  라고 하면

$$K = aE_1 + bE_2 + cE_3 \quad (1)$$

$$U = dE_2 + eE_3 \quad (2)$$

$$T = fE_3 \quad (3)$$

라고 쓸 수 있다. 이들 세 영역의 에너지를 사용하여 조사선량을 계산할 수 있는 계수  $a \sim f$  는 표준 선원을 이용하거나 혹은 여러 지역에서 측정 한 스펙트럼을 이용하여 구하여 진다[4]. 따라서 이 방법은 자연방사선에 의한 조사선량만을 계산 하도록 고안된 것이다.

결국 이 두 방법의 차이는 총에너지 방법이 자연방사선이나 인공방사선을 구별하지 않고 그에 의한 조사선량을 계산하나, 에너지대 방법은 자연 방사선만의 조사선량을 계산하도록 고안되었다는 것이다. 따라서 인공방사선이 존재하지 않는 경우에 두 방법에 의한 조사선량은 일치하여야 할 것이다. 인공방사선이 존재할 경우에 두 방법에 의한 조사선량은 차이가 생길 것이며, 존재하는 방사선의 에너지에 따라 인공방사선의 조사선량을 계산하는 방법이 달라지게 된다.

인공방사선의 에너지가 150~1300keV의 범위 인 경우라면, 총에너지 방법으로 계산되는 조사선량에는 이 인공방사선에 의한 조사선량이 포함되나 에너지대 방법에선 포함되지 않을 것이기 때문에 인공방사선에 의한 조사선량은 단순히 총에너지 방법에 의해 계산되는 조사선량에서 에너지대 방법으로 계산되는 조사선량을 뺀 값이 될 것이다.

반면, 인공방사선의 에너지가 1300~1600keV 범위에 있다면, 이 방사선이  $^{40}\text{K}$ 의 1460keV 피크에 영향을 주게 된다. 이 경우에 인공 방사선 스펙트럼과  $^{40}\text{K}$ 로부터 방출되는 감마선의 스펙트럼이 다를 것이기 때문에 에너지대 방법으로 계산되는 조사선량은 신뢰할 수 없는 것이 될 것이다. 그렇지만 에너지대 방법으로 계산되는

$^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량을 이용하여  $^{40}\text{K}$ 의 조사선량을 구하여 자연방사선만에 의한 조사선량을 구할 수 있다. 일반적으로 강우 같이 환경 방사선의 변동을 크게 만드는 경우에도  $^{40}\text{K}$ 과  $^{232}\text{Th}$  계열 조사선량의 변동은 적은 것으로 알려져 있다 [5]. 따라서 평상시  $^{40}\text{K}$ 과  $^{232}\text{Th}$  계열 조사선량의 비를 사용하여 계산된  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량로부터 인공방사선이 포함되지 않은  $^{40}\text{K}$ 만 의한 조사선량을 계산하는 것이 가능하다. 이렇게 계산된  $^{40}\text{K}$ 에 의한 조사선량과  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량으로부터 인공방사선이 포함된 스펙트럼에서 자연방사선만에 의한 조사선량을 구할 수 있게 된다. 결과적으로 인공 방사선에 의한 조사선량은 총에너지 방법으로 계산된 조사선량에서 에너지대 방법으로 계산한  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량과  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량으로부터 계산된  $^{40}\text{K}$ 의 조사선량을 뺀 값이 된다.

인공방사선의 에너지가 1600keV 이상이라면 총에너지 방법과 에너지대 방법을 이용하여 인공방사선에 의한 조사선량을 계산하는 것이 곤란하다. 이 경우에 에너지대 방법으로 계산되는  $^{40}\text{K}$ 에 의한 조사선량 뿐만 아니라  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  계열의 조사선량에도 인공방사선에 의한 영향이 포함된다.

## 결과 및 고찰

자연방사선이 변동하는 경우에 측정된 NaI 스펙트럼에서 총에너지 방법과 에너지대 방법에 의해 계산된 조사선량이 일치하는지 여부를 확인하기 위해 청주지역의 한 농가에 3" X 3" NaI 검출기로 측정 한 스펙트럼에 적용하여 보았다. 이 스펙트럼은 검출기가 지면을 향하도록 하여 지상 1 m 높이에 설치하고, 검출기의 온도변화를 줄이기 위해서 검출기가 직접 직사광선에 노출되지 않도록 해서 측정 한 것이다. 스펙트럼은 1999년 5월부터 2000년 12월까지 19개월 동안 30분 간격으로 연속 측정 한 것이다.

스펙트럼으로부터 조사선량을 계산한 결과 측정기간 내내 강우 등 특별한 자연방사선 변동요인이 발생하지 않는 경우 조사선량이나 스펙트럼의 모양, 채널별 계수는 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 강우시에는 단시간내에 조사선량이 상당한 양으로 증가하였는데 이런 증가의 원인은 강우시

측정된 스펙트럼에서 라돈 붕괴 생성물인  $^{214}\text{Bi}$  및  $^{214}\text{Pb}$ 에서 방출되는 감마선의 피크가 증가하는 것을 볼 때 대기중의 라돈 및 그 붕괴 생성물이 강우에 의해서 씻겨워져 지표면에 많이 침적되는 현상인 rainout effect 때문인 것으로 판단된다. 이에 대한 근거로 강우가 있었던 1999년 9월 10일에 측정된 스펙트럼에서 강우가 없었을 때 측정된 스펙트럼의 평균을 뺀, 즉 강우에 의한 영향을 나타내는 감마선 스펙트럼을 그림 2에 나타내었다. 이 스펙트럼에는 라돈의 붕괴 생성물인  $^{214}\text{Bi}$ 에서 방출되는 609, 768, 1120, 1238, 1509, 1764, 2204, 2447keV와  $^{214}\text{Pb}$ 에서 방출되는 295, 352keV 피크 등만이 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다. 이런 스펙트럼은 강우가 있을 때마다 어김없이 나타났다.

그림 3은 1999년 6월 15일 ~ 6월 29일까지 측정된 스펙트럼으로부터 총에너지 방법으로 계산한 조사선량률(위)과 총에너지 방법 및 에너지대 방법으로 계산한 조사선량률의 차(아래)를 나타낸 것이다. 이들 스펙트럼 측정기간 중 6월 16일과 23일에 강우가 있었으며 그 때마다 조사선량률이 평상시 보다  $2\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$  이상 증가하였다. 이 기간 중 총에너지 방법과 에너지대 방법에 의한 조사선량률의 차를 그림의 아래에 표시하였는데, 조사선량률은  $7.0\sim 9.6\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ 까지 변화하였으며 강우가 없었을 때 조사선량률 변동의 표준편차는  $0.07\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ 이었다. 한편 강우를 포함한 기간 중 총에너지 방법과 에너지대 방법에 의한 조사선량률 차의 표준편차는  $0.06\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ 였으며 차이가 가장 크게 나는 것이  $0.22\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ 이었다. 따라서 두 방법에 의한 조사선량률은 조사선량률 측정의 통계적 변동 이내에서 일치한다고 할 수 있으며 그 차이가 조사선량률 측정의 통계적 변동 보다 크다면 인공방사선에 의한 것일 수밖에 없다.

총 조사선량률에 의한 인공방사선의 감시인 경우에 이 그림의 자료를 사용한다면 강우에 의한 조사선량률 증가가 발생할 수 있으므로 방사선 이상에 대한 식별 준위를 강우에 의한 방사선 증가를 고려하여 통상적인 방사선준위보다  $3\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$  이상 높게 설정하여야 할 것이다. 그런데 총에너지 방법과 에너지대 방법에 의한 조사선량률은 강우가 있었을 때에도 조사선량률 측정의 통계적 변동 이내에서 일치하므로 통계적 변동의 상한을 방사선 이상에 대한 식별준위로 설정할 수 있다. 이

연구에서 조사된 스펙트럼을 예로 든다면 총 조사선량률 기준일 경우 방사선 이상에 대한 식별준위가 평상준위 +  $3\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$  정도될 것이나, 총에너지 방법과 에너지대 방법에 의한 조사선량률 차를 기준으로 할 경우에 그 준위는 총 조사선량률 기준의 1/10 인 대략  $0.3\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$ 가 된다. 따라서 훨씬 낮은 양의 인공방사선 이상까지도 쉽게 파악할 수 있게 된다.

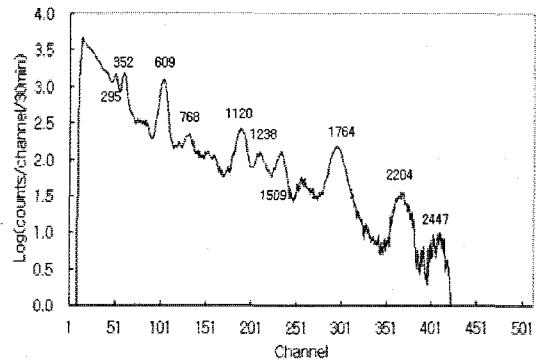


Fig. 2. A gamma-ray spectrum due to radon products during periods of rain.

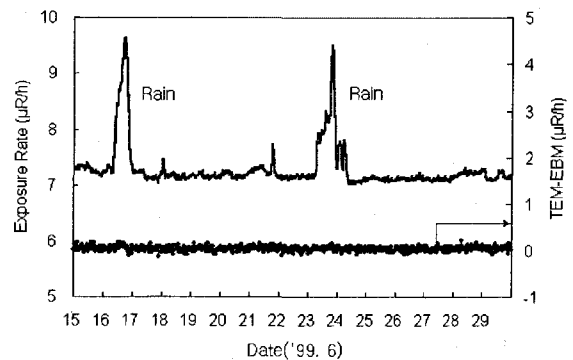


Fig. 3. Exposure rate during '99. 6. 15 ~ 6. 29(upper) and the difference between exposure rate calculated by the Total Energy Method and the Energy Band Method(lower).

## 결론

에너지대 방법은 1300~3000keV 영역의 에너지 스펙트럼을 사용하여 조사선량률 계산하기 때문에 1300 keV 이하의 인공방사선이 존재한다고 하더라도 자연방사선 만의 조사선량률 계산한다.

이에 반해 총에너지 방법은 150~3400keV 영역의 에너지 스펙트럼을 사용하기 때문에 인공방사선까지도 포함하여 조사선량을 계산한다. 따라서 총에너지 방법에 의한 조사선량과 에너지대 방법에 의한 조사선량의 차이를 인공방사선에 의한 조사선량으로 할 수 있음을 확인하였다.

조사선량률 변동이 심한 기간 동안 측정된 스펙트럼에 대해 두 방법에 의해 계산된 조사선량률의 차이는  $\pm 0.22 \mu\text{R} \cdot \text{h}^{-1}$  이내에서 일치하였으며, 두 방법에 의한 조사선량률 사이의 차이가 이 값보다 크다면 그것은 인공방사선에 의한 영향일 것이다. 따라서 이들의 차이는 인공방사선에 의한 조사선량률 기여분을 나타내게 될 것이며, 인공방사선 식별준위로 사용할 수 있음을 확인하였다. 이 식별준위는 총 조사선량률을 기준으로 한 식별준위보다 1/10 정도 더 낮은 값이다.

이 방법은 GM계수관형이나 전리함형의 조사선량률계로 직접 조사선량률을 측정하는 것 보다 더 민감하며, 변동되는 감마선의 에너지에 대한 정보를 제공하는 잇점이 있다. 또한 경우에 기인하는 라돈 붕괴생성물의 효과도 인공방사선으로부터 분리될 수 있다.

## 참고문헌

1. NCRP Report No.50, "Environmental Radiation Measurements, 18-21(1976).
2. H. L. Beck, W. J. Condon and W. H. Lowder, "Spectrometric Techniques for Measuring Environmental Gamma Radiation", HASL-150, (1964).
3. J.H.Hubbel, "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20MeV", Int. J. Appl. Radiat. Instr. 33. 1209-1290(1982).
4. 이모성, "NaI(Tl) 검출기 스펙트럼으로부터 조사선량률의 계산", 산업과학연구 15-2, 443-451(1997).
5. 片瀬彬 "環境ガンマ線強度の降雨による変動とレインアウト・ウォッシュアウトモデル", 日本原子力學會, 77-86(1981).