

스펙트럼 조사선량 변환인자를 이용한 방사성폐기물의 감마핵종분석 방법에 대한 적용성 평가

지영용, 홍대석, 강일식, 김태국, 류우석
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
yvji@kaeri.re.kr

1. 서론

비파괴분석을 통한 방사성물질의 감마핵종분석 방법으로는 고분해능의 검출기와 적절한 차폐 그리고 고유한 보정기술을 필요로 하는 감마 스캐닝 방법과 ISOCS(in-situ object counting system) 방법 등이 활용되지만, 이 방법들은 그들의 정확도에 비해 측정시간과 비용적인 측면에서 다소 불리한 면이 있으며, 이에 따라 실제 적용하기에 보다 간단한 측정방법이 요구되고 있다.

방사성물질로부터의 선량을 측정하여 그로부터 감마핵종을 분석해 내는 선량 대 방사능(Dose to Cure, DTC) 변환 방법은 이론적인 계산과 연계하여 간단히 방사성물질 내 감마핵종들에 대한 방사능의 합리적인 추정을 가능하게 한다[1, 2]. 이 DTC 변환 방법은 선량을 측정 시스템의 기하학적 배열과 방사성물질 내 감마핵종들의 구성 및 공간적인 분포 등의 주어진 조건하에서 측정된 선량은 감마핵종들의 방사능에 비례한다는 사실에 기초하고 있다. 그러나 DTC 변환 방법은 감마핵종들의 공간적인 분포와 선량에 기여하는 감마핵종들의 존재비에 대한 평가에서 기인하는 큰 오차로 인해 그 사용이 제한되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 DTC 변환 방법의 오차를 줄이기 위하여 감마핵종들의 공간분포 등 측정에 영향을 주는 인자들을 평가하였으며, 방사성물질 내 감마핵종들의 존재비에 대한 평가를 위해 기존의 폐기물 유형별 시료 채취 방식 대신에 스펙트럼 조사선량 변환인자 방식을 제시하고자 한다.

2. 선량 대 방사능 변환 방법

일반적으로 측정된 선량을 주어진 조건하에서 방사성폐기물 내 감마핵종들의 방사능에 비례하기 때문에 감마핵종들의 존재비가 알려진다면 다음과 같이 감마핵종들의 방사능 추정이 가능해 진다.

$$A = \frac{D}{\sum d_i f_i} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$A_i = A f_i \quad \dots \dots \dots (2)$$

여기서, A(mCi)는 폐기물 내 감마핵종들에 대한 총방사능, A_i(mCi)는 폐기물 내 개별 감마핵종에 대한 방사능, D(mR/h)는 폐기물로부터의 조사선량을, f_i는 폐기물 내 존재하는 감마핵종들의 상대적 존재비 그리고 d_i(mR/h/mCi)는 각 핵종들에 대한 단위 방사능당 선량율로써 Monte Carlo 시뮬레이션 등의 이론적인 계산과정을 통해 얻어진다.

DTC 변환 방법을 보다 실용적인 사용이 가능하게 하기 위하여 선량을 측정 상에서 여러 가지 가정 및 제한 등이 수반되며, 이 가정 및 제한들이 DTC 변환 방법에서의 오차에 대한 근원이 된다. 따라서 선량을 측정에 영향을 주는 인자 즉, 방사성물질 내의 밀도변화와 핵종들의 공간분포들 등에 대한 평가가 필요하며, 이 영향들을 최소화할 수 있는 선량을 측정위치 및 방법을 결정해야 한다.

본 적용성 평가에서는 MCNP 코드를 이용하여 200 리터 방사성폐기물 드럼 내 감마핵종들의 hot spot을 가정하였으며 이를 반경방향으로 변화시켜가며 선량을 측정위치 별로 hot spot의 영향을 계산하였다. 그 결과 드럼의 전후좌우 4면으로부터 각각 2R(R=30cm : 드럼 반경) 떨어진 곳에서의 계산 결과들에 대한 기하평균 값이 hot spot에 대한 영향이 가장 작았다. 그리고 측방향에 대한 hot spot의 영향을 보정하기 위해서는 드럼의 윗면과 바닥에서의 선량을 측정이 필요하며, 이로부터 200 리터 방사성폐기물 드럼에 대하여 선량 대 방사능 변환 방법을 적용하는 경우 드럼 중앙으로부터 반경방향 4 지점 그리고 드럼 상하 표면에서의 선량율들에 대한 기하평균 값이 드럼 내 핵종들의 hot spot에 의한 영향을 최소화할 수 있는 선량을 측정방법으로 결정되었다.

3. 스펙트럼 조사선량 변환인자

여러 논문에서 제시된 DTC 변환 방법은 방사성폐기물로부터의 선량을 측정과 방사성폐기물 내 감마 핵종들의 상대적 존재비 측정이 서로 다른 측정 메커니즘으로 이루어진다. 즉, 선량을 측정하여 그로부터 DTC 변환 과정을 거쳐 최종 감마핵종을 평가하려는 대상 폐기물과 감마핵종들의 존재비를 측정하려는 대상이 서로 다른 폐기물이다. 일반적으로 원전 발생 폐기물의 감마핵종 존재비를 측정하는 방법은 폐기물 유형별로 대표시료를 채취하여 분석하거나 유형별 물질수지 등을 이용한 이론적 평가를 이용한다. 이런 이유로 실제 측정 대상 폐기물 내 감마핵종들의 상대적 존재비는 간접 측정에서 얻은 비교 데이터와 서로 상이할 수 있다. 따라서 방사성폐기물로부터의 선량을 측정과 상대적 존재비 측정을 동시에 할 수 있는 방법이 필요하며, 이는 환경방사능 분야에서 널리 이용되고 있는 스펙트럼 조사선량 변환인자(spectrum to dose conversion factor)[3]를 활용함으로써 현실화 될 수 있다.

일반적으로 조사선량은 스펙트럼 조사선량 변환인자를 이용하여 감마선 계측시간(T_c) 동안의 펄스 파고 스펙트럼(pulse height spectrum)으로부터 다음과 같은 방법으로 얻을 수 있다.

$$\dot{X} = \frac{1}{T_c} \int_{E_0}^{E_1} N(E)G(E)dE \quad \dots \dots \dots (3)$$

여기서 $N(E)$ 는 펄스 파고 스펙트럼에서 단위 에너지 폭당 계수(counts/keV), E_0 및 E_1 는 펄스파고 스펙트럼에서 최소 및 최대 에너지 그리고 $G(E)$ 는 주어진 계측 환경에서 스펙트럼 조사선량 변환인자($\mu R/h/cps$)로써 검출기의 반응함수(response function)와 관련되며, 이는 여러 종류의 입사 감마 에너지에 대하여 MCNP 코드 등의 이론적인 계산으로 구할 수 있다.

본 평가에서는 그림 1의 (a)와 같이 200 리터 드럼 중앙으로부터 약 90 cm 떨어진 지점에서 3" $\phi \times$ 3" NaI(Tl) 검출기에 대한 반응함수를 MCNP 코드를 이용하여 입사 감마에너지 50 keV에서 3 MeV까지 계산하였다. 이때 감마 선원은 드럼의 중앙에 위치한다고 가정하였다. 그 결과로부터 스펙트럼 조사선량 변환인자를 (b)와 같이 입사 감마에너지의 함수로서 표현할 수 있었다. 이 결과를 식 (3)에 대입하면 측정된 펄스 파고 스펙트럼으로부터 조사선량을 계산할 수 있다.

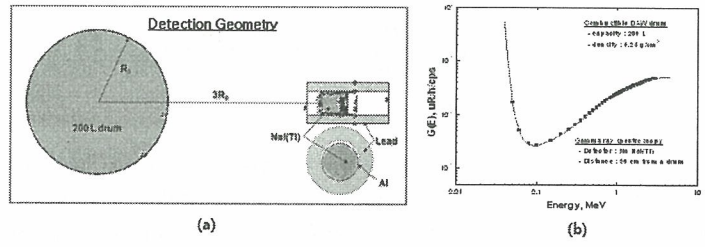


그림 1. NaI(Tl) 검출기의 반응함수를 계산하기 위한 측정 시스템 배열
(a)와 그로부터 계산된 스펙트럼 조사선량 변환인자 (b)

이상과 같이 스펙트럼 조사선량 변환인자를 이용할 경우, 선량을 값은 측정된 펄스 파고 스펙트럼으로부터 계산될 수 있으며 폐기물 내 감마핵종 존재비 또한 측정된 펄스 파고 스펙트럼 상에서 구분이 가능하다. 따라서 서로 다른 측정 메커니즘에서 기인된 오차로 인해 그 사용이 제한되어 왔던 DTC 변환 방법은 스펙트럼 조사선량 변환인자를 이용할 경우 그에 대한 측정 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] S.R. Gedeon, "Basic for Dose Rate to Curie Assay Method", WHC-SD-WM-RPT-267, 1996
 [2] R.S. Howell, "Guidance on Dose Rate Measurement for Use in Dose-to-curie Conversion", 2000
 [3] J.S. Jun, C.Y. Yi, H.S. Chai and H. Cho, "Calculation of Spectrum to Dose Conversion Factors for a NaI(Tl) Scintillation Detector Using the Response Matrix", J. Korean Physics Society, vol. 28, no. 6, pp. 716~726