

방사성폐기물드럼 비파괴 감마핵종 분석장치(TGS)의 교정 및 유효성 평가

이영주, 조문형, 강기두

한국수력원자력(주) 한수원중앙연구원, 대전시 유성구 유성대로 1312번길 70

ramsess55@khnp.co.kr

1. 서론

국내 원자력발전소의 운영중에 발생하는 방사성폐기물 영구처분을 위해서는 드럼내 핵종재고량을 평가해야 하며 포장물에 포함되어 있는 방사성 핵종을 규명하여야 한다[1]. 한국수력원자력(주)에서는 영구처분 목적으로 CANBERRA사(社)의 핵종분석장치를 도입하여 잡고체 폐기물 드럼(200L 및 320L)에 대한 감마핵종 재고량 평가를 수행하고 있다. 본 시스템은 고분해능 감마선 분광기법을 이용하여 드럼을 파괴하지 않고 투사 및 방출계측을 통해 3차원 이미지 재건과 함께 감마핵종 판별 및 비방사능을 측정할 수 있으며 드럼밀도에 따라 TGS (Tomographic Gamma Scanner) 및 SGS (Segmented Gamma Scanner) 두 가지 측정모드로 구성된다. TGS 모드는 중간 밀도 (1 kg/l 이하)의 드럼 분석에 적합하고 SGS 모드는 밀도가 1 kg/l 이상 이거나 표면선량률이 6 mSv/h 이상인 드럼분석에 적합하다. 본 논문에서는 TGS 모드에 대한 교정방법에 대해 기술하고 교정결과와 유효성을 평가하였다.

2. 본론

2.1 직접 측정교정

교정은 시스템을 이용한 직접측정교정과 이를 이용한 계산교정으로 구분할 수 있다. 교정선원에 포함된 핵종의 수가 제한되어 있기 때문에 실제 폐기물 드럼내에 존재하는 다양한 핵종에 대한 교정상수를 얻기 위해서는 반드시 계산교정(외삽 혹은 내삽계산) 필요하다. TGS 모드에서 감마핵종에 대한 정량 분석은 식1)과 같다[2].

$$A = C(E) \sum_{j=1}^n TGS_j(E) \quad (1)$$

A : 핵종에 대한 방사능

TGS_j(E): voxel j에서 감마 에너지 방출이미지

C(E) : 교정상수

교정선원을 교정용 표준드럼에 정해진 위치에

장입하고 드럼을 회전시켜 매질내 방사능분포를 균일하게 한 상태에서 투사 및 방출 측정(총 16개 층/드럼)을 통해 voxel grid(100개의 측정구역/1개 층)의 TGS_j가 합산된 TGS number (이하 M(E))를 산출하였다. 측정시간은 1개 층에 대해 112.5 초씩, 드럼당 3600초 동안 수행하였다. 교정선원은 봉선원 형태로 ²⁴¹Am, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co 핵종이 봉 형태로 되어 있으며, 외경 9.53 mm, 길이 813 mm, 두께 0.89 mm의 알루미늄 튜브에 도포되어 있고 교정선원 삽입관은 드럼의 반경방향으로 서로 다른 반지름상에 분포되어 있다.

2.2 계산교정

교정선원에 포함된 감마선 에너지와 일반 분석대상 핵종(¹⁴⁴Ce, ⁵¹Cr, ¹²⁵Sb, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ^{110M}Ag, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co)에 대한 교정상수를 계산하였다.

2.2.1 교정선원의 감마 에너지 교정상수 산출

측정을 통해 결정된 M(E), 불확도와 교정선원의 방사능(uCi)을 이용하여 교정상수 및 불확도를 식2) 및 식3)을 이용하여 에너지 별로 계산하였다.

$$C(E) = \frac{A}{M(E)} \quad (2)$$

A : 교정선원의 방사능(uCi)

M(E) : TGS Number

$$\sigma_c(E) = C(E) \sqrt{\left(\frac{\sigma_M(E)}{M(E)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2} \quad (3)$$

$\sigma_c(E)$: 교정상수(C(E)) 불확도

$\sigma_M(E)$: M(E)의 불확도

$\sigma(A)$: 교정선원(핵종)의 불확도

2.2.2 교정상수 확장

교정선원에 포함되지 않은 감마선 에너지(일반 분석핵종)에 대한 교정상수 계산을 위해 식4)에 따라 비례계수를 계산하였다. 비례계수는 교정선원에 포함된 에너지에 해당하는 검출기 고유효율과 확

장하고자 하는 에너지에서의 고유효율과의 비율을 의미한다.

$$SF(E_1) = \frac{\epsilon_{ISOCs}(E_1)}{\epsilon_{ISOCs}(276keV)} \quad (4)$$

$\epsilon_{ISOCs}(E_1)$: 확장대상 에너지에서 고유효율
 $\epsilon_{ISOCs}(276keV)$: 교정선원 에너지에서 고유효율

또한 교정상수의 확장을 위해서 교정선원의 방사능과 방출률을 이용하여 초당 붕괴되는 1개의 감마선 (gps, gamma/second)에 해당하는 M(E)를 식 5)를 이용하여 계산하였다.

$$\frac{M(E)}{gps} = \frac{M(E)}{A \cdot I_r(E)} \quad (5)$$

$I_r(E)$: 교정선원 감마선 에너지(E)의 방출률

식4)에 계산한 비례계수와 식5)에서 계산한 결과를 이용하여 분석대상핵종의 감마 에너지에 대한 M(E)/gps를 식6)을 이용하여 계산한 후 최종 일반 분석핵종에 대한 교정상수 및 불확도를 식7) 및 식 8)을 이용하여 계산하였다.

$$\left[\frac{M(E_1)}{gps} \right]_N = \frac{M(276keV)}{gps} \times SF(E_1) \quad (6)$$

$$C_{NE} = \frac{1}{(M(E)/gps)_N} \times \frac{1}{I_{N_r}(E)} \quad (7)$$

$$\sigma_{Nc}(E) = C_{NE}(E) \sqrt{\left(\frac{\sigma_c(E)}{C(E)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2} \quad (8)$$

C_{NE} : 일반 분석핵종의 교정상수

$I_{N_r}(E)$: 일반 분석핵종 에너지(E)의 방출률

$\sigma_{Nc}(E)$: 교정상수(C_{NE})에 대한 불확도

2.3 교정결과

각 측정구조별 효율 산출결과를 그림 6에 나타내었다. NOW(Near Open Wide) 및 FON(Far Open Narrow) 구조에서 200L 및 300L 드럼의 측정효율은 거의 유사하였으며, NOW구조가 FON 구조보다 효율이 높게 측정되었다. 이는 측정구조상 NOW 구조가 FON 보다 검출기와 측정대상체(드럼)의 거리가 더 가깝기 때문이다. FON 구조는 NOW구조보다 고 선량 드럼측정에 이용되기 때문에, 교정을 위해 동일 교정선원을 측정하는 것을 고려하면 효율의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

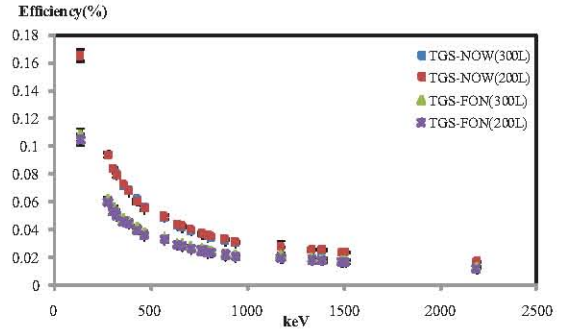


Fig 1. The efficiency result of each gamma energy.

2.4 교정결과 검증

교정선원을 표준 드럼(Foam drum, 0.02kg/l)에 삽입하여 측정구조별로 측정하여 선원 인증서 값과 비교한 결과 최대 8%(0.92)로 성능기준인 ± 10%(0.1)이내 임을 확인할 수 있었다(표1).

Table 1. Verification Result of TGS-NOW.

Nuclides	TGS-NOW		TGS-FON	
	200L Meas/ Ref	320L Meas/ Ref	200L Meas/ Ref	320L Meas/ Ref
⁶⁰ Co	0.95	1.04	0.95	1.04
¹³³ Ba	0.94	0.98	0.94	0.98
¹³⁷ Cs	0.92	0.98	0.92	0.98

(측정 데이터 취득 : 2011. 10월)

3. 결론

본 논문에서는 드럼핵종분석장치의 교정방법에 대해 분석하고 교정결과와 유효성을 평가하였다. 교정선원에 포함된 핵종의 수가 제한되어 있기 때문에 직접 측정을 통해 선원핵종에 대한 교정상수를 산출하고, 이렇게 산출된 결과와 비례계수를 이용하여 분석대상 핵종에 대한 교정상수를 계산하였다. 또한 교정결과와 유효성 검증을 위해서 교정선원을 표준드럼에 삽입하여 측정된 결과 선원인증서상 방사능 대비 0.92 ~ 1.04의 범위였으며, 이는 장비 성능기준인 ±10 %이하를 만족하는 결과이다.

4. 참고문헌

- [1] Acceptance Criteria for LILRW, Notice of the Minister of Education, Science and Technology No 2009-37(2009), MEST.
- [2] Nuclear Instrument and Method in Physics Research A Vol 579, pp.375-379(2007).