

'95 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

표면선량을 이용한 방사성폐기물 드럼내 핵종평가

강덕원, 신상운, 박경록  
한국전력공사

요 약

방사성폐기물 드럼내에 포함되어 있는 방사성 핵종의 양이 핵종분석장치로 측정할 수 있는 검출 하한치 이하이거나, 혹은 너무 높아 불감시간이 크게 증가될 경우에는 순수 Ge 검출기를 장착한 핵종분석장치로는 분석이 불가능하게 되므로 본 연구에서는 표면선량율과 Scaling Factor를 이용하여 드럼속에 포함되어 있는 핵종들의 양을 평가하는 방법을 제시하였으며, 불균일성이 높을 경우의 가능한 평가방법을 알아보기 위하여 점선원을 이용한 실험을 실시하였다. 그 결과 비균질 드럼에 대해서는 점선원을 이용한 자료를 이용하는 것이 합리적이고 기하학적 산술평군을 취함으로써 보다 정확도가 증가됨을 알 수 있었다. 그러나 그 오차범위는 -25%~5.5%로서 실제보다 상당히 낮게 평가되는 경향이 있으므로 적절한 비균질성 보정인자를 적용할 필요가 있는 것으로 생각된다.

1. 서론

원자력시설에서 발생된 방사성폐기물을 영구처분장에 영구처분시키기 위해서는 드럼내에 포함되어 있는 핵종들의 방사능량을 정확하게 알고 있어야 한다. 이를 위하여 현재 여러가지 방법들이 제안되고 있고 한국전력공사에서도 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물 드럼의 영구처분에 대비하여 드럼내에 포함된 핵종을 분석할 수 있는 핵종분석장치의 개발이 이루어지고 있다.

그러나 현재 개발중인 핵종분석장치는 드럼내에 포함된 방사성핵종들중에서 Cs-137과 Co-60의 스펙트럼을 여러 지점에서 측정하여 선원의 위치를 판별한 후, 이를 이용하여 Cs-137이나 Co-60의 방사능 농도를 분석하고 분석한 결과와 각 핵종간의 Scaling Factor로

부터 각각의 핵종들에 대한 방사능량을 평가하도록 되어 있다. 따라서 방사능량이 너무 낮아 Cs-137과 Co-60의 스펙트럼 분석이 곤란하거나, 또는 방사능량이 너무 높아 순수 Ge 검출기로 스펙트럼을 분석할 수 없을 경우에는 핵종분석이 불가능하게 된다.

따라서 본 논문에서는 현재 개발중인 핵종분석장치로 분석이 불가능한 방사능량이 너무 낮거나 높은 경우, 드럼의 표면선량율을 이용하여 방사성폐기물 드럼내에 함유된 핵종들의 양을 분석하는 방법에 대해 살펴보았다.

## 2. 표면선량율과 방사능량

방사성폐기물 드럼 표면의 선량율은 드럼내에 포함된 방사성핵종의 종류와 양에 따라 선형적으로 변화하게 된다. 즉 A, B, C ... 라는 핵종이 드럼내에 각각 1mCi씩 포함되어 있을 경우의 평균 선량율을  $D_A, D_B, D_C \dots$  mR/hr·mCi라고 하면 A, B, C ... 핵종이 각각  $A_A, A_B, A_C \dots$  mCi씩 포함되어 있는 방사성폐기물 드럼의 평균 표면선량율( $D_S$ )은 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$D_S = D_A \cdot A_A + D_B \cdot A_B + D_C \cdot A_C + \dots \quad \text{----- (1)}$$

따라서 각 핵종별 존재비(Scaling Factor)와 각 핵종별 단위 방사능당 평균 표면선량율을 알고 있다면 평균 표면선량율로부터 드럼내에 포함된 단위 방사능당의 평균 표면선량율을 평가하여 드럼내에 포함되어 있는 방사성핵종들의 총 방사능량을 쉽게 평가할 수 있다.

즉 폐기물 드럼내에 1 mCi가 균일하게 분포되어 있다고 가정하였을 경우의 평균 표면선량율( $D_{1mCi}$ )은 Scaling Factor,  $S_A, S_B, S_C \dots$ 와 핵종별 단위 선량율,  $D_A, D_B, D_C \dots$ 로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{1mCi} = D_A \cdot S_A + D_B \cdot S_B + D_C \cdot S_C + \dots \quad \text{----- (2)}$$

$$\text{여기서 } S_A + S_B + S_C + \dots = 1.0$$

한편 실제로 측정된 표면선량율( $D_S$ )은 방사성폐기물 드럼내에 분포된 Geometry가 동일하다고 가정하면 드럼내에 포함된 방사성핵종의 총량에 비례하게 되므로 총방사능량( $A_t$ )은

$$A_t = D_S / D_{1mCi} \text{ (mCi)} \quad \text{----- (3)}$$

가 되고, 이로부터 각 핵종별 방사능량  $A_A, A_B, A_C \dots$  를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_A = A_t / S_A, \quad A_B = A_t / S_B, \quad A_C = A_t / S_C, \dots \quad \text{----- (4)}$$

### 3. 드럼의 평균 표면선량율

드럼내에 들어있는 방사성핵종들은 시멘트 고화체와 같이 폐기물의 조성이 거의 균일하게 배합되어 있다고 하더라도 국부적으로 불균일하게 분포되어 있으며, 잡고체 드럼과 같이 드럼속에 들어가는 폐기물의 발생원이 다양할 경우에는 드럼내의 핵종 분포가 지극히 불균일하게 된다. 따라서 드럼의 표면선량율로부터 드럼 속에 들어있는 핵종의 양을 정확하게 평가하기 위해서는 어느 지점에서 측정된 표면선량율을 적용하여야 할 것인지가 문제점으로 대두된다. 또 드럼내의 불균일성이 심할 경우에는 위치에 따라 선량율이 커다란 차이를 나타내므로 표면선량율을 어떻게 평가하느냐에 따라 커다란 오차를 나타내게 된다.

따라서 드럼을 여러 Segment로 분할하여 평균선량율을 구하는 것이 가장 합리적이겠으나 Segment를 너무 많이 분할하게 되면 특별한 자동 분석장비를 개발하지 않는 한 현장에서 실제로 적용하는데 여러가지 곤란한 점들이 수반되므로 측정지점을 최소화시키는 것이 바람직하다. 특히 선량율이 높은 폐수지 드럼이나 폐필터 드럼의 경우에는 드럼내 핵종분포가 거의 균일하므로 불균일성으로 인한 문제는 주로 방사능량이 너무 낮아 핵종분석장치로 측정이 곤란한 잡고체 드럼에서 발생된다. 그러나 방사성폐기물의 영구처분 측면에서 불 때 방사능량을 평가하는 과정에서 발생하는 오차는 크게 문제가 되지 않으므로, 분석의 정확성과 현실성을 고려하여 측정지점을 최소화시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 수평방향에 대해 전후좌우, 수직방향에 대해 상·중·하 등 12개 지점을 이용하여 평균 표면선량율을 평가하였다.

드럼의 평균선량율은 기하학적 평균과 기하학적 산술평균을 이용하여 평가하였는데, 우선 수평방향의 기하학적 평균선량율을 구한 후에 수평방향의 기하학적 평균 선량율로부터 수직방향의 기하학적 평균선량율과 산술적 평균선량율을 각각 평가하였다. 즉, 수평방향의 기하학적 평균선량율( $D_{hg}$ )은 드럼의 수평단면을  $\chi$  ( $\chi$ 는 우수)등분 하였다고 하였을 때

$$D_{hg} = \frac{1}{n} \{ \sqrt{D_1 \times D_{n+1}} + \sqrt{D_2 \times D_{n+2}} + \sqrt{D_3 \times D_{n+3}} + \dots \} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 아래첨자 1과  $n+1$ , 2와  $n+2$ , 3과  $n+3$  등은 수평단면을  $\chi$  개로 분할하였을 때 서로 마주보는 지점을 의미하고  $D_1, D_{n+1}, \dots$  등은 각 지점의 중심점에서 측정된 표면선량율이며,  $n$ 은  $\chi/2$ 로서 마주보는 지점들을 몇개까지 취하였는가를 나타낸다.

수직방향의 경우 수평방향과는 달리 대칭되는 수평면이 없기 때문에 수평방향에 대해 구한 모든 기하학적 평균값들로부터 다음과 같이 기하학적 평균 표면선량율( $D_g$ )을 구하였다.

$$D_g = \sqrt[m]{D_{hg1} \times D_{hg2} \times \dots \times D_{hgm}} \quad (6)$$

여기서  $m$ 은 수직방향으로 분할한 갯수이고,  $D_{hg1}, D_{hg2}, \dots, D_{hgm}$ 은 각각의 수직 분할면에서

수평방향으로 구한 기하학적 평균 표면선량을 의미한다.

#### 4. 실험방법

평균 표면선량을 이용하여 폐기물 드럼내에 포함되어 있는 방사성폐기물의 핵종별 농도를 구하기 위해서는 폐기물 드럼내에 포함되어 있는 핵종들의 비, 즉 Scaling Factor와 핵종별 단위 표면선량을 평가하여야 하는데, Scaling Factor 값은 발전소의 운전특성과 방사성 폐기물 처리시스템의 성능특성, 계통내 측정자료 등을 토대로 평가하는 프로그램이 개발되었다. 또 핵종별 단위 표면선량은 모의 드럼을 제작하여 실제로 표면선량을 측정하는 방법과 몬테칼로 방법이나 일반적인 차폐코드를 이용하여 표면선량을 계산한 후 이를 이용하는 방법이 있는데, 본 연구에서는 일차적으로 모의 드럼을 제작한 후 모의드럼내에 설치한 점선원의 위치에 따라 표면선량이 어떻게 변화되는지를 살펴봄으로써 비균질 드럼내에 포함된 방사능량을 정확하게 평가할 수 있을 것인지에 대해 검토해 보았다.

모의드럼으로서는 발전소에서 사용하는 높이가 약 90cm이고 직경이 60cm인 DOT-17H 55 gallon 탄소강 드럼에 목재와 모래를 채운 두개의 드럼을 제작하여 사용하였는데, 목재의 경우 밀도는 0.68이었으며 모래의 경우에는 1.75였다. 점선원으로는 32.7 mCi의 Co-60과 81.4 mCi의 Cs-137 선원을 이용하였다. 표면선량은 방사방향으로 3등분하고, 축방향으로 4등분하여 각각의 중심점에서 Model automess 6150AD-t 텔리미터를 이용하여 측정하였다.

균질드럼의 경우 위 절에서 소개한 기하학적 선량률 평가방법을 이용하더라도 오차가 그리 크지 않을 것이므로 본 실험에서는 우선 비균질 드럼만을 대상으로 하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

표면선량을 이용하여 드럼내에 포함된 핵종들의 방사능분석이 가능할 것인지를 규명하기 위해서는 핵종별 단위 표면선량을 평가하여야 하는데, 단위 표면선량은 균일 드럼을 제작하여 측정하거나 차폐코드를 이용하여 평가할 수 있는데 일차적인 타당성 검토작업의 일환으로서 드럼의 중심부에 점선원을 설치하여 측정한 표면선량의 값들로부터 기하학적 평균 표면선량을 구하여 이용하였다. 표 1은 드럼의 중심부에 점선원을 설치하여 측정한 수직방향의 상부와 중심부 및 하부에서의 표면선량을 보여준다.

한편 목재 드럼의 경우에는 드럼의 가장자리로부터 15cm되는 지점에 구멍을 뚫고 각각 상부로부터 22cm, 44cm 및 66cm 되는 지점에 점선원을 설치하여 표면선량을 구하였으며, 모래드럼의 경우에는 드럼의 가장자리로부터 10cm되는 지점에 구멍을 뚫고 상부로부터 각각 22cm, 44cm 및 66cm 되는 지점에 점선원을 설치하여 표면선량을 측정하였는데, 그 결과는

표 2와 같다.

표 1. 드럼 중심부에 점선원을 설치하였을 경우의 표면선량율

드럼의 종류	측정 위치	표면선량율 (mR/hr)		
		Co-60	Cs-137	Co + Cs
목재드럼 (d = 0.68)	상 부	120	46	170
	중 부	290	108	367
	하 부	118	44.5	164
모래드럼 (d = 1.75)	상 부	45	12	55
	중 부	130	41	173
	하 부	44.5	12	58

표 2. 선원이 불균일하게 분포된 경우의 표면선량율

드럼 종류	선원 위치 (cm)	선원 종류	표면선량율 (mR/hr)											
			상 부				중 심 부				하 부			
			전	좌	후	우	전	좌	후	우	전	좌	후	우
모래	r=20 h=75	Co-60	815	54	16.7	67	340	33	12	46	31.5	7.5	3.6	11
		Cs-137	780	15.4	3.8	20	160	10	2.4	12.5	10.2	1.6	0.5	2.1
		Co+Cs	1890	78.2	19.3	91	640	51.8	15.3	59.2	42.2	8.5	3.8	13
	r=20 h=45	Co-60	224	25.6	9.5	30.3	781	62.3	18.4	71.6	216	32.7	12.1	36.2
		Cs-137	71.5	5.3	1.9	9.2	680	18	4	26	90	5.9	2.2	10.5
		Co+Cs	297	31.9	13.1	40.9	1590	71.7	21.6	100	341	36.3	12.5	41.2
	r=20 h=15	Co-60	16.4	5.4	2.6	8.4	202	27.9	10.1	37.3	814	64.9	18.1	88.7
		Cs-137	7.6	1.2	0.6	2.3	102	6.5	2.1	13.9	720	12.2	3.9	28.8
		Co+Cs	37.5	8.1	3.6	10.7	350	40.7	12.4	54.7	1550	72.2	24.7	115
목재	r=15 h=75	Co-60	866	176	85.3	172	480	135	67.7	141	77.7	40.2	27.4	42.0
		Cs-137	452	73.5	31.5	69.0	177	44.8	23.2	45.2	26.5	12.5	7.5	12.5
		Co+Cs	1260	265	111	259	636	192	86.4	205	103	52.7	27.7	52.2
	r=15 h=45	Co-60	260	85.1	50.6	78.4	970	187	86.5	197	302	112	59.3	111
		Cs-137	114	38.2	18.3	37.5	436	70.5	36.3	70.3	106	39.0	19.5	36.6
		Co+Cs	346	127	68.0	147	1270	260	114	290	392	136	73.4	140
	r=15 h=15	Co-60	62.3	29.0	22.0	38.5	326	109	60.8	118	1080	185	86	220
		Cs-137	21	12.2	9.7	11	160	38.3	23.7	41.9	422	71	33.2	75.8
		Co+Cs	80.8	46.5	31.9	46.4	480	144	86.7	203	1480	249	117	346

주) r, h는 선원이 위치한 드럼내의 높이 및 반경강이를 의미함.

위의 표 1로부터 평가한 단위 방사능당 평균 표면선량율이 표 3에 나와 있으며, 표 3의 단위 방사능당 표면선량율과 표 2로부터 구한 기하학적 평균을 이용하여 드럼내에 들어있는 방사성핵종의 농도를 평가한 결과가 표 4에 나와 있다. 여기서 Co-60과 Cs-137이 혼합된 경우의 Scaling Factor는 각각 0.287과 0.713이다.

표 3. 단위 방사능당 평균 표면선량을

(단위 : mR/hr · mCi)

평가방법	목재 드럼			모래 드럼		
	Co-60	Cs-137	Co + Cs	Co-60	Cs-137	Co + Cs
측정값	4.897	0.743	1.935	1.953	0.222	0.719
Microshield (점선원)	5.266	1.611	2.660	1.008	0.153	0.398
Microshield (균질선원)	8.547	2.827	4.469	4.508	1.188	2.141

표 4. 불균일 드럼내의 방사능량 평가결과

드럼 종류	선원 위치	기하학적 평균						기하학적 산술평균					
		Co-60		Cs-137		Co+Cs		Co-60		Cs-137		Co+Cs	
		방사 능량	오차 (%)	방사 능량	오차 (%)	방사 능량	오차 (%)	방사 능량	오차 (%)	방사 능량	오차 (%)	방사 능량	오차 (%)
목재	r=15, h=75	24.2	-26	54.9	-33	79.5	-30	29.0	-11	73.3	-10	101.1	-11
	r=15, h=45	29.1	-11	74.6	-8.3	91.3	-20	31.4	-4.0	81.4	0	107.9	-5.4
	r=15, h=15	21.3	-35	53.5	-34	69.6	-39	28.3	-14	71.6	-12	101.8	-11
모래	r=20, h=75	18.2	-44	47.0	-42	69.1	-39	25.6	-22	80.3	-1.4	105.0	-8.0
	r=20, h=45	27.1	-17	70.2	-14	97.6	-14	29.5	-9.7	85.9	5.5	109.5	-4.0
	r=20, h=15	15.0	-54	42.2	-48	61.1	-46	24.6	-25	74.9	-7.9	97.5	-15

표 4로부터 수평방향과 수직방향에 대해 모두 기하학적 평균을 사용하는 것보다는 수평방향에 대해서는 기하학적 평균을 사용하고 수직방향에 대해서는 산술평균을 취하는 것이 보다 현실적임을 알 수 있는데, 이는 일단 수평방향에 대해 기하학적 평균을 취함으로써 불균일성으로 인한 영향을 보정해주게 되면 보정된 선량율이 수평방향의 평균선량, 즉 선원이 중심에 있을 때의 조건으로 보정한 선량율을 의미하기는 하지만 선원이 불균일하게 분포되어 있을 경우 수직방향의 편차가 커지게 되므로 수직방향에 대해서는 산술적평균을 취하는 것이 더 합리적이었지 않나 생각된다. 그러나 단위 방사능당의 표면선량율을 수직방향에 대해 산술적 평균을 취하여 구하게 되면 기하학적 산술평균을 취하더라도 그 값은 실제보다 크게 낮아지게 된다.

한편 앞에서 제시한 방법론에 따라 드럼내에 포함되어 있는 핵종을 분석해 본 결과에 따

르면 발생오차가 비균질성의 정도, 즉 단위 방사능당 평균 표면선량을 평가하기 위해 가정하였던 조건과 얼마나 차이가 나는지에 따라 달라지고 드럼내에 들어있는 물질들의 감쇄 정도가 클수록 증가되게 된다. 따라서 드럼내에 핵종이 고르게 분포되어 있지 않은 경우에 오차범위를 최소화시키기 위해서는 적절한 비균질성 인자를 정의하여 불균일성으로 인해 발생하는 과소평가량을 보정해 주어야 할 필요가 있다. 이를 위해서 기하학적 평균에 대한 산술적 평균의 비나 단위 방사능당 평균표면선량을 측정시의 표준편차에 대한 실측결과의 표준편차비 등 몇가지 가능한 방안들의 가능성에 대해 검토하고 있다. 그러나 현재 개발되어 이용중인 핵종분석장치들의 측정오차가 핵종분포가 균일하지 않은 경우  $\pm 50\%$ 까지 이르는 점을 고려해 볼 때 기하학적 산술평균을 이용하는 방법도 충분히 적용가능한 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 결론

방사성폐기물 드럼내에 포함되어 있는 방사성 핵종의 양이 핵종분석장치로 측정할 수 있는 검출 하한치 이하이거나, 혹은 너무 높아 불감시간이 크게 증가될 경우에는 순수 Ge 검출기를 장착한 핵종분석장치로는 분석이 불가능하게 된다. 그러나 방사성폐기물의 영구처분을 위해서는 처분할 폐기물드럼속에 포함되어 있는 방사성핵종들의 양을 알 수 있어야 하므로 본 연구에서는 표면선량율과 Scaling Factor를 이용하여 드럼속에 포함되어 있는 핵종들의 양을 평가하는 방법을 제시하였으며, 불균일성이 높을 경우의 가능한 평가방법을 알아보기 위하여 점선원을 이용한 실험을 실시하였다. 그 결과 비균질 드럼에 대해서는 점선원을 이용한 자료를 이용하는 것이 합리적이고 기하학적 산술평균을 취함으로써 보다 정확도를 올릴수 있음을 알 수 있었다. 그러나 그 오차범위는  $-25\% \sim 5.5\%$ 로서 실제보다 상당히 낮게 평가되는 경향이 있으므로 적절한 비균질성 보정인자를 적용할 필요가 있는 것으로 생각되며, 비균질성만 적절하게 보정된다면 표면선량율을 이용한 방법으로도 정확하게 드럼내에 포함되어 있는 핵종 분석이 가능할 것으로 생각된다.