

모핵종인 U-238과 같은 우라늄계 원소들과 동일한 방사능을 가지나, 핵연료를 제조하기 위한 농축과정(Gas Diffusion) 과정에서 U-235의 농축도가 증가함에 따라 U-234의 농축도도 함께 증가하므로 이에 따른 고려가 필요하다. 일례로, 4.5w/o의 U-235 농축도를 가지는 우라늄의 경우, 전체 우라늄에 의한 방사능에서 U-234에 의한 방사능이 차지하는 비는 80%이상이며 U-238의 방사능이 차지하는 비는 10%정도이다.

또한 U-235의 농축도를 알고 있다면, 다음 식을 사용하여 우라늄의 비방사능 값을 계산할 수도 있다.[2]

$$S.A_{uranium} = 0.4 + 0.38f_{235} + 0.0034f_{235}^2$$

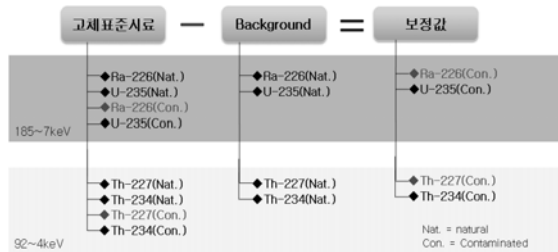


그림 2 고체표준시료의 백그라운드 보정방법

계측기의 에너지 및 효율보정을 위해서는, 제조 후 1년이 경과된 핵연료(U₃O₈)를 사용하여 450ml Marinelli 용기 타입의 표준시료를 제작하여 에너지 및 효율보정을 하였으며, 고체표준시료의 매질은 시멘트와 모래를 혼합한 Mortar(밀도 1.6~1.8g/cm³), 액체 표준시료의 매질은 2%질산용액(밀도 1.01g/cm³)로 제작하였다. 액체시료와는 달리, 고체표준시료의 경우는 매질인 시멘트 및 모래에 함유되어있는 자연계의 우라늄 및 라듐, 토륨 등에 의한 간섭이 예상되므로 [그림2]와 같은 백그라운드 보정 방법을 적용하였다.

또한 계측시 감마선이 매질을 통과하며 흡수되는 Self-absorption 효과를 고려하기 위하여 자기흡수보정식을 사용하였으며, 이에 따라 계산된 감마선의 에너지 및 밀도에 따른 자기흡수보정인자(K)는 다음과 같다.[3]

$$K_{235} = 1.0376 + 0.08314 \times \rho - 0.11605 \times \rho^2$$

$$K_{238} = 1.4046 - 0.40122 \times \rho - 0.00298 \times \rho^2$$

결과 및 고찰

표준시료가 함유하고 있는 우라늄 동위원소 농도에

대한 ICP-MS 측정결과와 HPGe γ -Spectrometry 측정결과 및 MDA값은 [표1]과 같다.

표 1 표준시료 γ -Spectrometry 측정값

표준시료	핵종	밀도 (g/cm ³)	기대값 (Bq/g)	ICP-MS (Bq/g)	γ 측정값 (Bq/g)	MDA (Bq/g)
U#1 (고체)	U ₂₃₅	1.60	0.0425	0.0428	0.0438	0.000539
	U ₂₃₈		0.1403	0.1412	0.1151	0.008764
U#2 (고체)	U ₂₃₅	1.67	0.0064	0.0065	0.0089	0.000510
	U ₂₃₈		0.1396	0.1415	0.1017	0.007884
U#3 (고체)	U ₂₃₅	1.66	0.3319	0.3162	0.2971	0.000349
	U ₂₃₈		1.0950	1.0431	0.9168	0.007358
U#4 (고체)	U ₂₃₅	1.78	0.3230	0.3130	0.3322	0.000696
	U ₂₃₈		1.0657	1.0326	1.0376	0.013889
U#5 (고체)	U ₂₃₅	1.77	0.2168	0.2065	0.2152	0.000581
	U ₂₃₈		0.7154	0.6814	0.6947	0.013011
U#6 (액체)	U ₂₃₅	1.01	0.0135	0.0140	0.0141	0.000581
	U ₂₃₈		0.1028	0.1070	0.0958	0.005295

U-235 방사능 농도 측정의 경우, 기댓값보다 보수적으로 측정되었으나, U-238은 시료의 방사능 농도가 낮을수록 더 과소평가되는 경향을 보였으며, 이는 Th-234 감마선의 낮은 에너지와 분율로 인한 불확정성에서 기인된다고 여겨진다.

결론

이상의 연구를 통해 HPGe γ -Spectrometry를 이용하여 Marinelli 용기에 담겨진 시료에 함유되어있는 우라늄에 의한 방사능의 총 양을 계산하는 방법을 개발하였다.

표준시료에 대한 ICP-MS와의 교차분석결과 방사능 농도가 낮은 시료에 대해서 U-238이 과소 평가되는 경향을 보이고 있으며, 따라서 시료 내 오염 우라늄의 농축도를 알고 있다면, U-235의 방사능 농도를 기준으로 우라늄 전체의 방사능 농도를 유도하는 방법이 더 보수적이며 합리적인 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Journal of Env. Rad., Use of HPGe γ -ray spectrometry to assess the isotopic composition of uranium in soil, (2003).
2. NRC, 10 CFR 20 Appendix B
3. KINS, 방사성핵종 표준분석법, (G-009)