

# 고순도 반도체(HPGe) 감마분광시스템을 이용한 토양 중 우라늄 방사능 분석

이완로, 김희령, 정근호, 조영현, 강문자, 이창우, 최근식  
한국원자력연구원

2010년 5월 28일 접수 / 2010년 6월 28일 1차수정 / 2010년 6월 29일 채택

고순도 반도체 감마분광시스템을 이용하여 토양 시료를 파괴하지 않고 화학 전처리 단계가 필요없는 우라늄 방사능 분석 기술을 개발하였다. 본 논문에서 제시한 방법을 이용한 분석결과와 기존에 일반적으로 사용하는 알파분광분석법(Alpha Spectrometry)의 결과를 비교하였다. 비교결과 불확도 범위 내에서 비슷한 측정값을 보였다. 따라서 본 논문에서 제시한 방법은 토양시료의 우라늄 분석에 이용될 수 있을 것이다.

중심어: 우라늄 방사능, 고순도 반도체 감마분광시스템, 우라늄 동위원소 비

## 1. 서론

일반적으로 환경 중 토양 시료에 대한 우라늄 방사능 농도는 전통적으로 alpha spectrometry, ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry), neutron activation analysis 등의 방법으로 분석한다. 세 가지 방법 중에서 가장 일반적으로 사용되는 것은 알파분광분석기(alpha spectrometry)[1]. 위에서 설명한 방법들은 저준위 극미량 시료의 정확한 분석에 매우 유용한 방법이나, 측정시간 및 비용, 고가의 장비와 고도의 분석 기술이 필요하다. 특히 복잡한 단계의 화학적 전처리나 특수 장비가 필요하고 그 경우 시료를 녹이거나 파괴해야 한다[2,3]. 따라서 시료를 직접 분석하지 못하고, 변형하기 때문에 시료의 재현성 유지에 어려움이 발생한다. 만일 특이한 분석결과 획득 시 시료의 변형으로 다시 동일한 조건에서 재분석할 수 없는 문제점이 존재한다. 물론 시료의 균질성이 확보된 다량의 동일 시료가 있다면 문제가 없지만, 대부분의 경우는 시료의 양이 제한적이기 때문에 재분석 시 문제가 발생한다.

HPGe 감마분광시스템을 이용한 우라늄 방사능 분석 기술은 몇몇 연구자들이 시도하였으나, 시료의 특성에 따라서 적용 방식이 상이했다[4,5]. 주로 P-type의 HPGe 감마분광분석 시스템을 이용하여 우라늄 방사능 농도를 구했다. 그러나 이 경우 저에너지에서 효율의 급격한 감소로 정확한 방사능 농도 결정에 어려움이 발생한다. 또한 효율이 상대적으로 N-type에 비해 낮아서 검출한계가 높은 단점이 존재한다.

본 논문에서는 N-type HPGe 감마분광시스템을 기반

으로 시료의 특별한 전처리가 필요 없이 분석할 수 있는 기술을 개발하였다. 또한 이를 기존의 방법과 비교하여 그 유용성을 제시하였다.

## 2. 실험 및 방법

N-type HPGe 감마분광시스템을 이용하여 우라늄 방사능 농도를 분석하기 위해서는 우라늄의 일반적인 붕괴 특성을 정확히 알아야하며, 그림 1 ~ 3에서는  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  및  $^{235}\text{U}$  붕괴과정을 보여주고 있다. 그림에서 보면 다양한 붕괴과정을 통해서 많은 종류의 알파, 베타, 그리고 감마선이 방출된다. 이 중에서 N-type HPGe 감마분광시스템을 이용한 우라늄 방사능 농도 분석 시 감마방출에너지를 이용한다.

표 1과 2에서는 우라늄 방사능 농도에 사용되는 감마 에너지 및 방출률을 정리하여 요약하였다[6,7]. 감마에너지를 이용하여 우라늄 농도를 구하기 위해서는 기본적으로 방사평형을 이용해야 한다. 그림 1 ~ 3에서 표시된 반감기 등을 고려할 경우 밀봉하여 3주 이상 시료를 보관했을 경우,  $^{224}\text{Ra}$ 과 딸핵종인  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ 가 방사평형을 이룬다. 만일 인위적인 행위가 없었다고 가정하면 그 모핵종인  $^{228}\text{Ac}$ 와  $^{232}\text{Th}$ 역시 평형을 이루게 된다. 같은 원리로  $^{238}\text{U}$ 과  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ 도 평형을 이루게 된다. 이 방사평형을 이용하여  $^{238}\text{U}$ 과  $^{235}\text{U}$ 의 방사능 및 농도비를 계산하였다. 감마분광시스템의 에너지 및 효율교정을 위해서는 Amersham사에서 제작한 8개의 혼합감마선원을 이용하였다. 감마선에너지 범위는 59 keV에서 1836 keV로 총 10개의 단일감마선이 방출되고, 시료용기는 원통형으로 알루미늄 미니캔을 이용하여 완전히 밀봉하였다. 시료용기의 용량은 150 cm<sup>3</sup> 이고 토양시료는 100 g 이용하였다.

책임저자 : 이완로, petor@kaeri.re.kr  
대전시 유성구 덕진동 150번지

<sup>90</sup> Th	<sup>232</sup> Th 1.41x10 <sup>10</sup> y		<sup>228</sup> Th (RdTh) 1.913y		
<sup>89</sup> Ac	↓ α(γ)	<sup>228</sup> Ac (MsTh <sub>2</sub> ) 6.13h	↗ β ↓ α(γ) (γ)		
<sup>88</sup> Ra	<sup>228</sup> Ra (MsTh <sub>1</sub> ) 5.76y	↗ β	<sup>224</sup> Ra (ThX) 3.66d		
<sup>87</sup> Fr			↓ α(γ)		
<sup>86</sup> Rn			<sup>220</sup> Rn (Ta) 55.6s		
<sup>85</sup> At			↓ α(γ)		
<sup>84</sup> Po			<sup>216</sup> Po (ThA) 0.15s		<sup>212</sup> Po (ThC') 3.06x10 <sup>-7</sup> s
<sup>83</sup> Bi			↓ α	<sup>212</sup> Bi (ThC) 60.60m	↗ β, γ ↓ α
<sup>82</sup> Pb			<sup>212</sup> Pb (ThB) 10.64h	↗ β ↓ α (γ) (36.0%)	<sup>208</sup> Pb (ThD) (安定)
<sup>81</sup> Tl				<sup>208</sup> Tl (ThC'') 3.053m	↗ β, γ

Fig. 1. Decay of thorium series(4n).

<sup>92</sup> U	<sup>238</sup> U 4.468x10 <sup>9</sup> y		<sup>234</sup> U 2.45x10 <sup>5</sup> y			
<sup>91</sup> Pa	↓ α(γ)	<sup>234m</sup> Pa (UX <sub>2</sub> ) 1.175m	↗ β ↓ α (γ) (γ)			
		↓				
		<sup>234</sup> Pa (UZ) 6.75h				
<sup>90</sup> Th	<sup>234</sup> Th (UX <sub>1</sub> ) 24.10d	↗ β(γ)	<sup>230</sup> Th (Io) 8.0x10 <sup>4</sup> y			
<sup>89</sup> Ac			↓ α(γ)			
<sup>88</sup> Ra			<sup>226</sup> Ra (Ra) 1.6x10 <sup>3</sup> y			
<sup>87</sup> Fr			↓ α(γ)			
<sup>86</sup> Rn			<sup>222</sup> Rn 3.824d	<sup>218</sup> Rn 3.5x10 <sup>-2</sup> s		
<sup>85</sup> At			↓ α(γ)	<sup>218</sup> At 1.5~2.0s	↗ β ↓ α (γ)	
<sup>84</sup> Po			<sup>218</sup> Po (RaA) 3.05m	↗ β ↓ α	<sup>214</sup> Po (RaC') 1.64x10 <sup>-4</sup> s	<sup>210</sup> Po (RaF) 138.4d
<sup>83</sup> Bi			↓ α(γ)	<sup>214</sup> Bi (RaC) 19.7m	↗ β ↓ α (γ)	<sup>210</sup> Bi (RaE) 5.912d
<sup>82</sup> Pb			<sup>214</sup> Pb (RaB) 26.2m	↗ β ↓ α (γ)	<sup>210</sup> Pb (RaD) 22.3y	↗ β ↓ α (γ)
						<sup>206</sup> Pb (RaG) (安定)
<sup>81</sup> Tl				<sup>210</sup> Tl (RaC'') 1.30m	↗ β ↓ α (γ)	<sup>206</sup> Tl (RaE'') 4.20m
						↗ β
<sup>80</sup> Hg				<sup>206</sup> Hg 6.1m	↗ β(γ)	

Fig. 2. Decay of uranium series(4n+2).

<sup>92</sup> U	<sup>235</sup> U (AcU) 7.038x10 <sup>8</sup> y				
<sup>91</sup> Pa	↓α(γ)	<sup>231</sup> Pa (Pa) 3.28x10 <sup>4</sup> y			
<sup>90</sup> Th	<sup>231</sup> Th (UY) 25.52d	↗β ↓α (γ) (γ)	<sup>227</sup> Th (RdAc) 18.718d		
<sup>89</sup> Ac		<sup>227</sup> Ac (Ac) 21.773y	↗β ↓α (98.62%) (γ)		
<sup>88</sup> Ra		↓α (1.39%)	<sup>223</sup> Ra (AcX) 11.435d		
<sup>87</sup> Fr		<sup>223</sup> Fr (AcK) 21.8m	↗β ↓α (γ) (γ)		
<sup>86</sup> Rn		↓α (5x10 <sup>-3</sup> %)	<sup>219</sup> Rn (An) 3.96s		
<sup>85</sup> At		<sup>219</sup> At 0.9m	↗β ↓α (~3%) (γ)	<sup>215</sup> At 1.0x10 <sup>-4</sup> s	
<sup>84</sup> Po		↓α (~97%)	<sup>215</sup> Po (AcA) 1.78x10 <sup>-3</sup> s	↗β ↓α (2.3x10 <sup>-4</sup> %)	<sup>211</sup> Po (AcC') 0.516s
<sup>83</sup> Bi		<sup>215</sup> Bi 7.4m	↗β ↓α (99%)	<sup>211</sup> Bi (AcC) 2.15m	↗β ↓α (~0.28%) (γ)
<sup>82</sup> Pb			<sup>211</sup> Pb (AcB) 36.1m	↗β ↓α (γ) (99%)	<sup>207</sup> Pb (AcD) (安定)
<sup>81</sup> Tl				<sup>207</sup> Tl (AcC'') 4.77m	↗β (γ)

Fig. 3. Decay of actinium series(4n+3).

Table 1. Gamma-Emission Energy and Yield of Radionuclides used for Calculation of <sup>235</sup>U Activity.

<sup>235</sup> U		<sup>226</sup> Ra		<sup>214</sup> Bi		<sup>214</sup> Pb	
energy (keV)	yield (%)	energy (keV)	yield (%)	energy (keV)	yield (%)	energy (keV)	yield (%)
185.7	37.6	186.2	3.59	609.3	46.1	351.9	37.6
143.76	10.76			1764.5	15.4		
				1120.3	15.1	295.2	19.3

Table 2. Gamma-Emission Energy and Yield of Radionuclides used for Calculation of <sup>238</sup>U Activity.

<sup>234</sup> Th		<sup>232</sup> Th		<sup>228</sup> Ac		<sup>227</sup> Th	
energy (keV)	yield (%)						
63.39	4.8	63.9	0.26	338.3	11.27	93.93	1.4
92.38	2.81			911.25	25.8		
92.80	2.77			968.97	15.8		

2.1 <sup>235</sup>U의 방사능

감마분광시스템을 이용하여 <sup>235</sup>U 방사능을 구하기 위해서는 185.7 keV의 에너지를 측정하는 것이 가장 좋다. 그런데 표 1에서 보듯이 <sup>226</sup>Ra에서 나오는 186.2 keV의 에너지와 겹쳐서 과대평가 된다. 따라서 <sup>235</sup>U는 다음과 같은 방법을 이용하여 구할 수 있다. 식(1)에서 보였듯이 에너지 186 keV 근처에서의 계수율은 <sup>235</sup>U과 <sup>226</sup>Ra의 합한 값이다.

$$C(186) = C[^{235}U, 185.7] + C[^{226}Ra, 186.2] \quad (1)$$

$$A(^{226}Ra) = A(^{214}Pb, 295.2) \quad (2)$$

식(2)를 변경하면, 다음과 같다.

$$\frac{C(^{226}Ra, 186.2)}{\varepsilon(186.2) \times P_r(186.2)} = A(^{214}Pb, 295.2) \quad (3)$$

$$C(^{226}Ra, 186.2) = A(^{214}Pb, 295.2) \times \varepsilon(186.2) \times P_r(186.2)$$

식(3)을 식(1)에 대입하여 정리하면, 다음과 같다.

$$C(^{235}U, 185.7) = C(186) - A(^{214}Pb, 295.2) \times \varepsilon(186.2) \times P_r(186.2) \quad (4)$$

$$A(^{235}U) = \frac{C(^{235}U)}{\varepsilon(185.7) \times P_r(185.7)} \quad (5)$$

여기서,  $C[^{235}U, 185.7]$ 의 의미는 185.7 keV에서 <sup>235</sup>U의 순계수율(#/sec)이다. 뒤에 나오는 모든  $C[x]$ 값은  $x$  핵종의 순계수율을 의미한다. 또  $\varepsilon(186.2)$ ,  $P_r(186.2)$ 는 각각 효율 및 방출률을 의미한다.

시료를 밀봉하여 3주 이상 방사평형 시키면 <sup>226</sup>Ra과 <sup>214</sup>Pb의 방사능은 같아진다. 따라서 식(2)를 이용할 수가 있다. 식(4)를 통해서 순수하게 <sup>235</sup>U에 의해서 기여한 계수율만을 구하고, 이것을 효율과 방출률을 이용하여 최종적으로 <sup>235</sup>U의 방사능 농도를 구한다. 예를 들어  $A(^{214}Pb, 295.2)$  경우는 감마분광시스템에서 <sup>214</sup>Pb 방사능 농도를 구할 때 295.2 keV의 단일피크를 이용한 것이 아니라 여러 방출에너지 중 겹치는 피크는 제외하고 여러 에너지 피크를 이용하여 방사능을 구하고 이를 방출률에 비례하는 가중평균을 이용하였다. 본 논문에서는 대표적인 에너지 하나만을 표기하였다.

2.2 <sup>238</sup>U의 방사능 농도 계산

감마분광시스템을 이용하여 <sup>238</sup>U의 방사능을 구하는 여러 방법이 있으며, 약간 복잡하다. 먼저 <sup>234m</sup>Pa에서 나오는 1001.03 keV를 이용해서 구할 수 있다. 이 경우는 방출률이 너무 낮아서 <sup>238</sup>U의 농축되었던 시료의 분석은 가능하나, 일반 환경시료에는 적용하기 힘들다. 따라서 일반적으로는 <sup>234</sup>Th에서 방출되는 63.39 keV와 92.8 keV

를 이용하여 분석이 가능하다. 표 2에서 보면 63.39 keV의 경우도 <sup>232</sup>Th에서 방출되는 63.9 keV와 겹쳐지기 때문에 <sup>235</sup>U 구하는 방법과 같이 추가된 부분을 차감해야 한다.

$$C(63) = C[^{234}Th, 63.39] + C[^{232}Th, 63.9] \quad (6)$$

$$C(^{232}Th, 63.9) = A(^{228}Ac, 332.32) \times \varepsilon(63.9) \times P_r(63.9) \quad (7)$$

여기서, 방사능 <sup>232</sup>Th과 <sup>228</sup>Ac는 방사능이 같은데 그 이유는 방사평형 때문이다.

식(7)을 식(6)에 대입하여 정리하면,

$$C(^{234}Th, 63.39) = C(63) - A(^{228}Ac, 332.32) \times \varepsilon(63.9) \times P_r(63.9) \quad (8)$$

$$A(^{234}Th) = \frac{C[^{234}Th, 63.39]}{P_r(63.39) \times \varepsilon(63.39)} = A(^{238}U) \quad (9)$$

92.8 keV를 이용하여 구하는 방법은 위와 거의 비슷하며 식(10)과 (11)로 표현할 수 있다. 93 keV에서의 계수율은 세 가지 핵종에 의해서 합산된 값인데, 그 핵종은 <sup>234</sup>Th의 92.38 keV와 92.8 keV 및 <sup>227</sup>Th의 93.93 keV를 의미한다.

$$C(93) = C[^{234}Th, 92.38] + C[^{234}Th, 92.8] + C[^{227}Th, 93.93] \quad (10)$$

$$C[^{234}Th, 92.38] = \frac{\varepsilon(92.38) \times P_r(92.38)}{\varepsilon(92.8) \times P_r(92.8)} \times C[^{234}Th, 92.8] \quad (11)$$

표 1에서의 방출율과 그림 4의 효율 값을 적용하면 식(12)와 같이 정리된다.

$$C[^{234}Th, 92.38] = \frac{2.81}{2.77} \times C[^{234}Th, 92.8] = 1.014 \times C[^{234}Th, 92.8] \quad (12)$$

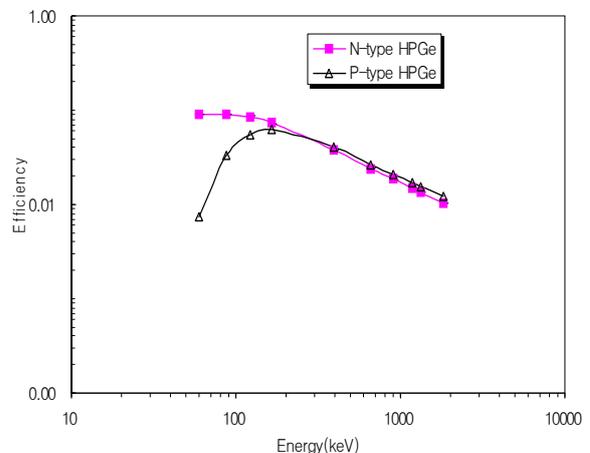


Fig. 4. Comparison between efficiency of P-type and N-type HPGe.

여기서 에너지가 거의 비슷하기 때문에 N-type HPGe 검출기에서 효율은 거의 같고( $\epsilon(92.38) \cong \epsilon(92.8)$ ), 또한  $C[{}^{234}\text{Th}, 92.8]$ 의 계수율을  $x$ 로 표현하여 다시 식(12)를 정리하면 식(13)처럼 표현할 수 있다.

$$C[{}^{234}\text{Th}, 92.38] = 1.014x \quad (13)$$

마찬가지로  ${}^{235}\text{U}$ 과  ${}^{227}\text{Th}$ 의 방사평형을 이용하여 정리하면, 식(14)와 같이 표현된다.

$$\frac{C({}^{227}\text{Th}, 93.93)}{\epsilon(93.93) \times P_r(93.93)} = 0.9862 \times A({}^{235}\text{U}, 185.7)$$

$$C({}^{227}\text{Th}, 93.93) = 0.9862 \times A({}^{235}\text{U}, 185.7) \times \epsilon(93.93) \times P_r(93.93) \quad (14)$$

여기서 0.9862의 의미는 그림 3에 보여주고 있듯이  ${}^{235}\text{U}$ 에서  ${}^{227}\text{Th}$ 으로 붕괴 될 때  ${}^{227}\text{Ac}$ 에서  ${}^{227}\text{Th}$ 으로 베타 붕괴하는 비율을 의미한다.

식(14)과 식(13)을 식(10)에 대입하여 정리하면 아래의 식(15)과 같이 표현된다.

$$C[93] = 1.014x + x + 0.9862 \times \text{Pr}(93.93) \times A({}^{235}\text{U}, 185.7) \times \epsilon({}^{237}\text{Th}, 93.93) \quad (15)$$

식(15)에서  $C[93]$ ,  $\text{Pr}(93.93)$ ,  $A({}^{235}\text{U}, 185.7)$ ,  $\epsilon({}^{237}\text{Th}, 93.93)$  값들은 측정에 따라 알려진 값이기 때문에 최종적으로  $x$ 인  $C[{}^{234}\text{Th}, 92.8]$ 값을 구할 수 있다.

또한  ${}^{238}\text{U}$ 와  ${}^{234}\text{Th}$ 의 방사평형으로  ${}^{234}\text{Th}$ 의 방사능을 구하면  ${}^{238}\text{U}$  방사능을 구할 수 있다. 따라서 식(16)에 의해서  ${}^{238}\text{U}$  방사능을 구할 수 있다.

$$A({}^{234}\text{Th}) = \frac{C[{}^{234}\text{Th}, 92.8]}{P_r(92.8) \times \epsilon(92.8)} = A({}^{238}\text{U}) \quad (16)$$

${}^{238}\text{U}$  방사능은 식(9)과 식(16)을 이용하여 구할 수 있다. 이렇게 구한 결과값을 평균하여 최종적으로  ${}^{238}\text{U}$  방사능을 구했다.  ${}^{238}\text{U}$  방사능을  ${}^{234}\text{Th}$ 의 92 keV에너지 영역에서 구할 경우는 표 2에서 보였듯이 92.38 keV와 92.80 keV를 구분하지 않고 합해서 구한 후 반으로 나눠줘서 구하는 경우가 있다. 그럴 경우 92.38 keV와 92.80 keV의 방출률 차이로 인한 차이 및  ${}^{227}\text{Th}$ 의 93.93 keV에서 기인한 차이 때문에 실제 값과 다른 경우가 종종 발생한다. 따라서 위에서 제시한 방법으로 구하는 것이 차이를 줄이는 방법이다.

### 3. 결과 및 논의

${}^{238}\text{U}$  방사능 분석을 위해서는 앞에서 언급했듯이 63

keV 방출 감마선과 92 keV 방출 감마선이 이용되는데 P-type의 경우에는 저에너지에서 효율이 급격히 변한다. 그림 4에 나와 있듯이 효율의 변화가 N-type에 비해서 매우 심하다.  ${}^{238}\text{U}$  방사능 186 keV 근처에서 방출되는 감마선을 이용하기 때문에 P-type 및 N-type 모두 검출기 가능하다. 주변 환경이 다른 지역에서 채취한 토양을 N-type 감마분광검출기를 이용하여 분석하고, 동일한 시료를 알파핵종분석기로 분석하여 비교 검증하였다.

#### 3.1 ${}^{235}\text{U}$ 의 방사능 결정

먼저  ${}^{214}\text{Pb}$ ,  ${}^{214}\text{Bi}$  및 경우에 따라서는  ${}^{210}\text{Pb}$ 의 방사능을 분석하여  ${}^{226}\text{Ra}$  방사능 농도를 구한다. P-type의 경우에는  ${}^{210}\text{Pb}$ 의 방사능은 구하기가 매우 어려웠다. 왜냐하면  ${}^{210}\text{Pb}$ 의 방출에너지가 46 keV 근처인데 이 경우 앞에서 언급했듯이 효율의 변화가 급격하게 변하기 때문에 정확한 효율을 구할 수 없기 때문이다. 본 논문에서 사용한 N-type검출기를 이용하여 두 핵종의 방사능 농도를 구하고 이것을 평균하여  ${}^{226}\text{Ra}$  방사능을 구했다. N-type 검출기로  ${}^{210}\text{Pb}$ 의 방사능을 구할 수 있었지만, 공기 중에 포함된  ${}^{210}\text{Pb}$ 가 증가되어 순수 토양 속에 포함된  ${}^{210}\text{Pb}$ 의 농도를 알 수 없었다. 따라서 측정하여 참고만 하고 본 논문에서는 이용하지 않았다. 위에서 구한 방사능 농도를 식(3)에 대입하여 185 keV에서  ${}^{226}\text{Ra}$ 에 의한 계수율을 구하고 식(4) 및 식(5)를 통해서  ${}^{235}\text{U}$  방사능을 구했다. 표 3에서  ${}^{235}\text{U}$  방사능을 보여주고 있다.

#### 3.2 ${}^{238}\text{U}$ 의 방사능 결정 및 알파분광법과의 비교

${}^{238}\text{U}$  방사능은  ${}^{234}\text{Th}$ 과의 방사평형을 이용하였다.  ${}^{234}\text{Th}$ 의 농도는 63 keV 근처에서 방출되는 감마선을 직접 측정하여 방사능을 결정하였다. 식(6)에서 보면 63 keV 근처에서  ${}^{234}\text{Th}$ 과  ${}^{232}\text{Th}$ 이 거의 같은 에너지를 방출하기 때문에  ${}^{232}\text{Th}$ 의 기여분을 제거하여 줘야 한다. 그것은  ${}^{228}\text{Ac}$  방사능을 측정하여 기여분을 식(8)과 같이 제거하였다. 최종적으로는 식(9)를 이용하여  ${}^{238}\text{U}$  농도를 구하였다. 이렇게 구한 결과값들이 불확도는 95% 신뢰구간에서 대략 8 ~ 13% 정도이기 때문에 93 keV에서 다시 한 번 계산하였다. 식(15) 및 식(16)을 이용하여 계산하였고 앞서 언급했듯이 겹치는 부분은 식(10)을 이용해서 제거하였다. 이렇게 구한 결과값을 63 keV에서 구한 값과 비교하여 최종적으로 방사능을 계산하였다. 표 3에서는 이렇게 구한 결과값을 보여주고 있다. 표 3에서 보면 세 가지 시료에서 알파분광결과와 비교했을 때  ${}^{235}\text{U}$ 의 경우는 최대 15%였고,  ${}^{238}\text{U}$ 의 경우는 13.2%였다. 95%에서 불확도가 최대 13%정도임을 고려하면 매우 좋은 결과임을 알 수 있었다. 다만 일반 환경시료이기 때문에 방사능이 매우 낮아서 24시간 측정해도 계수치가 적고 그래서 생기는 불확도로 판단이 되며, 아울러 다중핵종 표준선원을 이용한 효율교정에 의한 불확도가 대략 3% 정도 이상이기 때문에 그것에 의한 영향도 크다고 할 수 있다. 추후에는 IAEA에서 제공하는 비교적 높은 선원을 이용했을 경우 알파분광으로 구한 결과값과 차이도 줄어들 것으로 판단되며 또한 불확도도 많이 줄어들 것으로 판단된다.

**Table 3.** Comparison between Results of Gamma and Alpha Spectrometric Analysis for <sup>235</sup>U and <sup>238</sup>U Activity.

Sample	Gamma		Alpha		Difference (%)	
	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)	<sup>238</sup> U	<sup>235</sup> U
A	20.5	1.1	17.8	1.3	13.2	-15.0
B	24.8	1.2	24.7	1.3	0.4	-8.3
C	27.8	1.3	30.4	1.2	-9.4	7.7

**3.3 우라늄 농도비 및 자연백그라운드와 비교**

위에서 구한 <sup>235</sup>U와 <sup>238</sup>U 방사능 값을 이용해서 농도비를 구했다. 표 4에서 보던 0.72 ~ 0.83% <sup>235</sup>U 농도를 보였고, 99.17 ~ 99.28% <sup>238</sup>U 농도를 보여 자연비임을 알 수 있었다. 토양 중의 우라늄 농도는 기존의 백그라운드 측정 결과[8]과 비교하였으며, 이는 최근 3년간의 <sup>235</sup>U와 <sup>238</sup>U의 농도 범위인 0.610 ~ 1.92와 17.0 ~ 45.5 Bq · kg<sup>-1</sup> 이내였다.

**Table 4.** Isotope Composition of Uranium.

Sample index	Uranium (%)	
	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U
A	0.83	99.17
B	0.75	99.25
C	0.72	99.28

**4. 결 론**

본 논문에서는 고순도 반도체 감마분광시스템을 이용하여 토양 시료의 우라늄 방사능 분석기술을 개발하였다. 제시한 방법을 이용한 분석결과와 기존에 일반적으로 사용하는 알파분광분석(Alpha Spectrometry) 결과를 비교했을 경우 방법론이 타당함을 알 수 있었다. 또한 방사능 농도비등을 통해서 자연방사능 비임을 알 수 있었고, 우라늄 농도는 통상적인 변동 범위 이내임을 확인하였다. 따라서 전처리없이 경제적으로 신속 분석이 필요한 곳에서 제시된 방법이 다양하게 이용될 수 있을 것이다. 다만 방사능이 낮은 일반토양을 분석함으로써 불확도 및 알파

분광기와의 비교에서 차이가 비교적 큰 것으로 판단되어 고농도 IAEA 시료 등을 구입하여 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다. 또한 방사평형을 이용하기 때문에 완벽한 밀봉이 이루어지지 않을 경우에는 실제값과 차이를 보일 수 있다.

**감사의 글**

본 연구는 교육과학기술부가 주관하는 원자력연구기반 확충사업의 일환으로 수행하였습니다.

**참고문헌**

1. IVolchok HL, Planque GDe. EML Procedures Manual, HASL-300. U. S. DOE, 1982.
2. 일본 과학기술청. 우라늄 분석법. 방사능 분석 시리즈 14, 소화 57년.
3. 한국원자력연구원. 원자력시설 주변 환경방사선평가. KAERI/RR-2723/2006, 2006.
4. Papachristodoulou CA, Assimakopoulos PA, Patronis NE, Ioannides KG. Use of HPGe r-ray spectrometry to assess the isotopic composition of uranium in soils. JER. 2003;64:195-203.
5. Jopshi SR. Nuclear spectrometric determination of uranium isotopes without use of radiochemical yield monitors. NIM Physics Research, 1987;A254: 49-354.
6. Firestone RB, Shirley VS. Table of Isotopes. 8th ed. New York; Wiley-Interscience, 1996.
7. <http://ie.lbl.gov/education/isotope.htm>.
8. 한국원자력연구원. 원자력시설 주변환경방사선평가. KAERI/RR-2979/2008, 2008.

**Uranium Activity Analysis of Soil Sample Using HPGe Gamma Spectrometer**

Wanno Lee, Hee Reyoung Kim, Kun Ho Chung, Young Hyun Cho, Mun Ja Kang, Chang Woo Lee, and Geun Sik Choi

Korea Atomic Energy Research Institute

**Abstract** - Using N-type HPGe gamma spectrometer, uranium analysis technique of soil sample is developed where the chemical preprocessing is not a necessity. The results of uranium activities using the method presented in this paper were compared with those results with conventional alpha spectrometer and two results were similar from within uncertainty range. Therefore, this new method will be applied in uranium activity analysis of soil sample.

**Keywords** : Uranium activity, HPGe gamma spectrometry, Isotope ratio of uranium