

# 첼렌코프광과 액체섬광계수법을 이용한 $^{89}\text{Sr}$ 및 $^{90}\text{Sr}$ 분석에 대한 연구

이명호\* · 조영현 · 정근호 · 최근식 · 이창우  
한국 원자력 연구소 원자력환경연구팀  
(2001. 10. 5 접수)

## A Study on the Analysis of $^{89}\text{Sr}$ and $^{90}\text{Sr}$ with Cerenkov Radiation and Liquid Scintillation Counting Method

Myung-Ho Lee\*, Geun-Ho Chung, Young-Hyun Cho, Geun-Sik Choi and Chang-Woo Lee  
Korea Atomic Energy Research Institute, P.O. Box 150, Yusong, Taejeon 305-600 Korea  
(Received Oct. 5, 2001)

**요약** : 추출크로마토그래피와 액체섬광계수기를 이용하여 기존의 방사성 스트론튬 분석법 단점을 해결하는 신속하고 신뢰성 있는  $^{89}\text{Sr}$ 과  $^{90}\text{Sr}$  분석법을 개발하였다. 옥살산 공침 혹은 양이온 교환수지로 방해원소를 제거한 후 Sr-spec 컬럼을 사용하여 스트론튬만을 순수분리한 후, 액체섬광계수기를 사용하여  $^{89}\text{Sr}$ 에서 방출하는 첼렌코프광을 측정하였고, spectrum unfolding 방법으로  $^{90}\text{Sr}$ 을 정량하였다. 본 연구에서 개발된 방사성 스트론튬 분석법을 환경 표준시료 (IAEA-375, Soil) 및 액체 폐기물 시료에 적용하여 분석법의 유효성을 검증하였다.

**Abstract** : An accurate and simple analytical technique for  $^{89}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Sr}$ , overcoming the demerits of the conventional method, has been developed with extraction chromatography and liquid scintillation counting. The Sr fraction was separated from hindrance elements with oxalate coprecipitation or cation exchange resin and purified with Sr-Spec column. With liquid scintillation counter,  $^{89}\text{Sr}$  was measured by Cerenkov radiation method, and  $^{90}\text{Sr}$  was measured by spectrum unfolding method. The developed radioactive strontium separation method was validated by application to the IAEA-reference material (IAEA-375, Soil) and radioactive waste samples.

**Key words** :  $^{89}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Sr}$ , Cerenkov radiation, liquid scintillation counting

### 1. 서 론

방사성 스트론튬 ( $^{89}\text{Sr}$ : 반감기; 52.7일,  $^{90}\text{Sr}$ : 반감기; 27.7년)은  $^{235}\text{U}$ 의 핵분열 생성물로써  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우 생성비가 약 5.8 % 정도로  $^{137}\text{Cs}$ 와 함께 높은 핵분열 생성비를 갖는 방사성 핵종이다. 또한 비록 아주 적은 양이지만  $^{238}\text{U}$ 의 자발붕괴(spontaneous fission)에 의해

환경중에 축적되기도 한다. 순수한 베타방출체인 방사성 스트론튬은 칼슘과 유사한 화학적 성질로 인해서 환경으로 유출시 물, 토양 및 농작물을 통한 먹이사슬을 거쳐서 인체로 쉽게 유입될 수 있으며, 인체 유입시 뼈에 쉽게 침적되어 장기간 (생물학적 반감기; 약 50년)동안 방사성 독성을 유발한다. 인체에 대해 높은 방사성 독성을 지니는 방사성 스트론튬은  $^{137}\text{Cs}$  (반감기; 30년)와 더불어 중요한 환경감시대상 방사성 핵종 가운데 하나이다. 환경중 존재하는  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 농도 분포는 대부분 과거 핵무기 실험 및 체르노빌 원전사

\* Corresponding author  
Phone : +82+(0)42-868-2324 Fax : +82+(0)42-863-1289  
E-mail : mhlee1@kaeri.re.kr

고로 인한 방사성 낙진에 의해 생성되었다. 그러나, 원자력발전이나 핵연료 재처리 시설의 가동 및 고준위 폐기물 저장소에서 사고등으로 인해 방사능 물질이 환경으로 유출될 경우, 신속하고 정확하게 방사성 스트론튬을 정량하는 것은 매우 중요하다. 따라서, 원자력 시설 운영시 외부환경으로 유출될 가능성이 있는 방사성 스트론튬에 대한 감시가 꾸준히 실시되어 안전성을 확보할 필요가 있다.

고전적으로 스트론튬을 정량하는데 가장 많이 사용되는 분석법은 발연질산을 이용하여 용해도 차이로 칼슘과 스트론튬을 분리하는 침전법이다<sup>1</sup>. 그러나 이방법은 유독한 발연질산의 사용으로 분석자의 건강을 해칠 뿐만 아니라 취급상의 어려움이 따른다. 이러한 단점을 보완하여 TBP를 이용한 용매 추출법<sup>2</sup>, 및 양이온 교환법<sup>3</sup>등이 발연질산법 대안으로 사용되나 독성이 강한 유기폐액(용매추출법)이 생성되며, 분석조작이 복잡하고 번거로운(양이온교환법) 단점이 있다. 따라서, 본 연구는 기존 분석법의 단점을 보완한 새로운 방사성 스트론튬 분석법 개발에 목적이 있다. 토양 및 물시료에 대하여 옥살산 공침으로 철등의 매트릭스 성분과 칼륨 및 세슘등의 1가 양이온들을 제거한후<sup>4</sup> 추출크로마토그래피로 스트론튬만을 순수분리 하였고<sup>5,6</sup>, 물시료의 경우 양이온 교환수지를 사용하여 시료를 농축하고 음이온들을 제거한 후, 추출크로마토그래피로 스트론튬을 순수 분리하여 액체섬광계수기로 방사성 스트론튬을 정량하는 신속한 스트론튬 분석법을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 방사성 스트론튬 분석법의 타당성을 검증하기 위해 토양등의 환경시료와 원자력 발전소에서 방출하는 액체 폐기물 시료에 적용하여 신뢰도를 확보하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 시약 및 기구

스트론튬의 순수분리를 위해 Eichrom (Darien,IL,USA)사의 Sr-spec 컬럼을 사용하였고 모든 시약은 GR급 시약을 사용하였다. 증류수는 Milli-Q2 water purification system을 이용하여 정제한 후 사용하였고, Amersham에서 생산되는 <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y 및 <sup>89</sup>Sr 동위원소를 사용하였다. 액체섬광계수기는 Packard사의 극저준위 Tri-Carb 2770 TR로 방사성 스트론튬을 측정하였다. 섬광체로는 Packard사의 Ultima Gold LLT를 사용했으며, 전체 부피가 20 mL인 low diffusion 폴리에틸렌 용기를 사

용하여 스트론튬 동위원소에서 방출되는 베타선을 측정하였다.

### 2.2 실험방법

토양 및 물시료에 대한 방사성 스트론튬의 분석절차를 Fig. 1에 나타내었다.

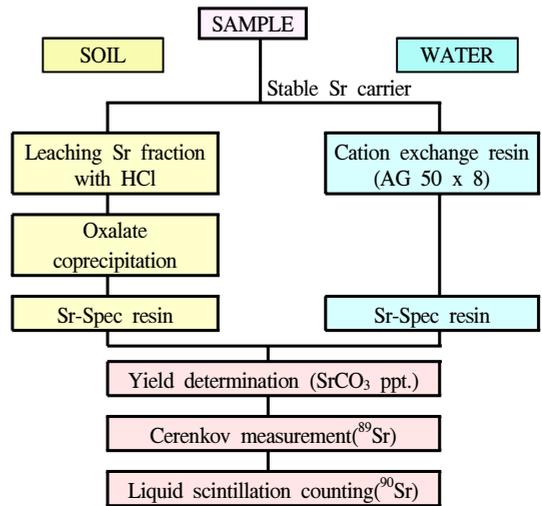


Fig 1. Analytical procedure for determination of strontium isotopes.

#### 2.2.1 토양시료에 대한 방사성 스트론튬 정량

토양시료 50 g을 전기기로 넣고 550°C에서 20시간 이상 회화시켜 유기물을 제거한 후 500 mL 비이커에 회화된 시료를 옮기고 안정 스트론튬 추적자 50 mg과 9 M HCl 250 mL를 첨가한 후, hotplate에서 가열하면서 교반하여 스트론튬 성분을 토양 매트릭스로부터 추출하였다. 여과지(Whatman No. 3)를 사용하여 용액을 거르고, 토양을 HCl을 사용하여 동일한 과정으로 추출한 후 여과하여 여과액은 합하였다. 여과액에 40 g의 옥살산을 첨가하여 녹인 후 암모니아수로 pH를 4로 조정하여 스트론튬 성분을 옥살산에 공침시켰다. 칼슘 및 스트론튬은 옥살산에 쉽게 공침되나 철이온은 공침되지 않아서 스트론튬과 분리가 된다. 스트론튬이 공침된 침전물을 농질산이나 발연질산을 사용하여 옥살산을 분해한 후 증발건고하였다. 만일 옥살산 분해가 불완전하면 침전물을 다시 전기기로 넣고 550°C로 회화시켜 유기성분을 완벽히 제거하였다.

회화물을 6 M HNO<sub>3</sub> 10 mL에 녹인 후 시료매질로

부터 스트론튬만을 분리하기 위해 6 M HNO<sub>3</sub>으로 전처리한 Sr-spec 컬럼에 통과시켰다. 6 M HNO<sub>3</sub> 20 mL을 사용하여 컬럼을 세척하여 칼슘 및 이트륨등의 방해원소를 제거하였다. 증류수 20 mL를 사용하여 Sr-spec 컬럼에 흡착된 스트론튬을 용출하였다. 포화 탄산 암모늄 2 mL을 Sr이 함유된 용출용액에 첨가한 후 암모니아수 (25 %)로 pH를 9로 조절하여 스트론튬 카보네트 침전을 만들어서 Sr의 화학수율을 결정하였다. 0.1 M HCl 10 mL을 사용하여 침전물을 녹여 폴리에틸렌 용기 (20 mL)로 옮긴 후 액체섬광계수기를 사용하여 <sup>89</sup>Sr의 Cerenkov광<sup>7,8</sup>을 측정하였다. <sup>89</sup>Sr 측정을 한 후 스트론튬이 함유된 폴리에틸렌 용기에 액체섬광체 (Ultima Gold LLT, Packard Instrument) 10 mL를 가한 후 액체섬광계수기내에 내장된 spectrum unfolding 기법<sup>9,10</sup>을 사용하여 <sup>90</sup>Sr을 정량하였다.

2.2.2 방사성 폐기물시료에 대한 방사성 스트론튬 정량  
방사성 폐기물 시료 300 mL을 500 mL 비이커로 옮기고 안정 스트론튬 담체 50 mg를 첨가한 후 증발건고 시켰다. 0.1 M HNO<sub>3</sub>를 사용하여 건고물을 녹인 후 0.1 M HNO<sub>3</sub>로 전처리한 양이온 교환수지 컬럼 (AG 50 x 8, cation exchange resin, ϕ:1 cm, h:10 cm)에 통과시켰다. 0.1 M HNO<sub>3</sub> 50 mL를 사용하여 컬럼을 세정하고 6 M HNO<sub>3</sub>를 사용하여 스트론튬 성분을 용출하였다. 시료매질로부터 스트론튬만을 순수분리하기 위해 6 M HNO<sub>3</sub>으로 전처리한 Sr-spec 컬럼에 용리액을 통과시켰다. 이하 조작은 토양시료 분석절차와 동일하게 분석하였다.

### 2.2.3 표준 quench correlation 곡선 작성

Quench level에 따른 계측효율을 측정하기 위해서는 일련의 표준 quench set을 준비하고 각각에 대한 SIS (spectral index of the sample)와 quench parameter를 미리 구하여야 한다. <sup>89</sup>Sr 표준용액 5 mL (123.26 Bq/mL)를 취하여 20 mL 테프론 비이커에 넣고 증발건고 한 후, 0.1 M HCl 6 mL를 가해 건고물을 녹였다. 칼라 quenching agent인 철이온 (Fe<sup>3+</sup>)을 0에서 2.5 mg까지 순차적으로 첨가한 액체섬광계수용 폴리에틸렌 용기 (5개)에 일정량 <sup>89</sup>Sr 표준용액 (123.2 Bq/mL)을 1 mL씩을 가한후 0.1 M HCl를 사용하여 전체 부피가 10 mL 되도록 <sup>89</sup>Sr quenching 시료를 조제한 후 quench indicator를 SIS로 고정시켜 'count standard'

data mode에서 <sup>89</sup>Sr quenching 곡선을 작성하였다<sup>11</sup>.

Spectrum unfolding 기법으로 <sup>90</sup>Sr을 측정하기 위해 <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y 표준용액 1 mL (214 Bq/mL)를 취하여 50 mL 테프론 비이커에 넣고 증발건고 한 후 6 M HNO<sub>3</sub> 용액 10 mL을 가하여 녹였다. 6 M HNO<sub>3</sub> 용액으로 전처리한 Sr-spec column에 표준시료를 흡착시켰다. 6 M HNO<sub>3</sub> 30 mL로 컬럼을 충분히 세정하였다. Sr-spec column을 통과한 용액과 세정액은 <sup>90</sup>Y만이 함유되어 있으므로 합하여 증발건고한 후 소량의 0.1 M HCl를 사용하여 건고물을 녹였다. Quenching agent로 가장 많이 사용되는 nitromethane을 0에서 600 μL까지 순차적으로 첨가된 <sup>90</sup>Y quench set 용기에 <sup>90</sup>Y 일정량을 취하여 <sup>90</sup>Y quench 시료를 조제한 후, quench indicator를 tSIE (transformed spectral index of external standard)로 고정하여 'Count Standard' data mode상에서 <sup>90</sup>Y quenching 곡선을 작성하였다<sup>11</sup>. Sr-spec 컬럼에 흡착된 스트론튬은 증류수 10 mL를 사용하여 용출시킨후 <sup>90</sup>Y과 동일하게 표준 <sup>90</sup>Sr quenching 곡선을 작성하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 <sup>89</sup>Sr, <sup>90</sup>Sr 및 <sup>90</sup>Y quenching 곡선

첼렌코프광 측정에 있어서 external quench standard (<sup>133</sup>Ba)가 Cerenkov 광자를 방출하지 않으므로 quenching parameter로 사용하는 것은 불가능하다. 또한 Cerenkov 측정에서 chemical quenching은 고려할 필요가 없으므로 color quenching에 대한 효율곡선만을 작성하면 된다<sup>8</sup>. <sup>89</sup>Sr 표준용액을 사용한 <sup>89</sup>Sr의 quench correlation 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. Fe<sup>3+</sup>가 존재하지 않을때는

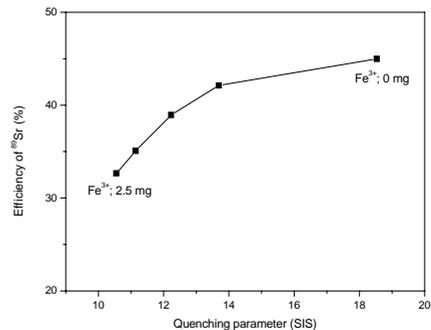


Fig. 2. Quench correlation curve of <sup>89</sup>Sr for Cerenkov counting.

color quenching이 없어서 <sup>89</sup>Sr 효율이 최대 (45.0 %)가 되며 철이온 농도가 증가함에 따라 칼라 quenching이 증가되므로 SIS 및 <sup>89</sup>Sr 측정효율이 감소되었다.

표준용액으로 조제한 <sup>90</sup>Sr 및 <sup>90</sup>Y의 quench set으로부터 얻은 quench correlation 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. Quench parameter로는 <sup>133</sup>Ba의 감마방사능을 external quench standard monitoring 선원으로 사용하는 tSIE를 사용하여 각 스펙트럼 index에 대한 계측효율을 구하였다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 nitromethane양이 증가할수록 quench level은 증가하여 계측효율이 감소됨을 알 수 있었다. 또한 계측효율과 SIS값은 tSIE값에 비례하여 증가됨을 알 수 있었다. 첨가한 nitromethane이 제로일 경우 즉, quenching이 일어나지 않을 경우 <sup>90</sup>Sr 최대 계측효율은 63.23 %였고, <sup>90</sup>Y은 84.72 %였다.

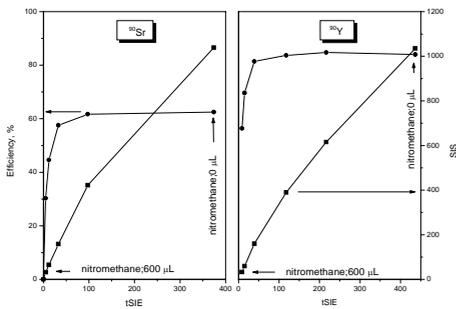


Fig 3. Quench correlation curve of <sup>90</sup>Sr and <sup>90</sup>Y for liquid scintillation counting.

3.2 표준 용액에 대한 <sup>89</sup>Sr와 <sup>90</sup>Sr 농도측정

첼렌코프광 및 액체섬광 측정법의 정확도 및 신뢰도

를 살펴보기 위하여 표준 <sup>89</sup>Sr 및 <sup>90</sup>Sr (<sup>90</sup>Y이 제거된) 용액을 사용하여 다양한 <sup>89</sup>Sr과 <sup>90</sup>Sr의 방사능 농도비를 갖는 모의시료를 만들어서 <sup>89</sup>Sr의 첼렌코프광을 측정한다. 다음 액체섬광체를 첨가한 액체섬광용 계측시료를 만들어서 spectrum unfolding 방법으로 <sup>90</sup>Sr을 측정하여 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 첼렌코프 방법으로 측정된 <sup>89</sup>Sr 농도값은 <sup>90</sup>Sr의 방사능 농도와 관계없이 표준 <sup>89</sup>Sr 농도값에 근접하는 결과가 측정되었다. 그러나 spectrum unfolding 방법으로 측정된 <sup>90</sup>Sr의 방사능 농도는 <sup>89</sup>Sr의 방사능농도가 증가함에 따라 표준용액의 <sup>90</sup>Sr 농도보다 높게 측정되었다. 이러한 결과는 <sup>90</sup>Sr 방사능 농도 산출시 <sup>89</sup>Sr가 기여한 것으로 사료된다. 즉 <sup>89</sup>Sr과 <sup>90</sup>Sr의 방출에너지 (<sup>89</sup>Sr; 1.46 MeV, <sup>90</sup>Sr; 0.54 MeV) 차이가 <sup>90</sup>Sr과 <sup>90</sup>Y (2.27 MeV)의 경우보다 적어서 두 핵종 (<sup>89</sup>Sr, <sup>90</sup>Sr)의 spectrum의 겹침이 심하여 상대적으로 방출에너지가 작은 <sup>90</sup>Sr에 대한 spectrum 분리가 용이치 않아서 <sup>90</sup>Sr이 과대평가 되었다고 사료된다.

첼렌코프 방법으로 측정된 <sup>89</sup>Sr의 농도가 높게 (50 Bq 이상) 측정될 경우 spectrum unfolding 방법에 의한 <sup>90</sup>Sr 스펙트럼 분석방법은 부정확한 방법이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 Sr-Spec 수치에서 분리된 <sup>90</sup>Sr 성분을 곧바로 측정하는 대신에 시료를 2주간 이상 방치하여 <sup>90</sup>Sr과 <sup>90</sup>Y이 방사평형에 도달하게 한후 액체섬광계수기를 사용하여 spectrum unfolding 방법으로 <sup>90</sup>Y을 측정하였으며, 또한 방사평형에 도달된 시료에 대하여 Sr-Spec 수치를 사용하여 <sup>90</sup>Y만을 선택적으로 추출하여 가스비례검출기로 <sup>90</sup>Y을 측정하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 액체섬광계수기 (LSC) 및 가스비례검출기 (GPC)를 사용하여 <sup>90</sup>Y 측정에 의한 <sup>90</sup>Sr 농도값은 <sup>89</sup>Sr의 방사능 농도의 증가에 관계없이 표준 <sup>89</sup>Sr 농도값에 근접하게 측정되었다. 그러나

Table 1. Determination of <sup>89</sup>Sr and <sup>90</sup>Sr in mixed <sup>89</sup>Sr and <sup>90</sup>Sr standard sources

Added (Bq)		Activity ratio <sup>89</sup> Sr : <sup>90</sup> Sr	Measured (Bq)	
<sup>89</sup> Sr(Bq)	<sup>90</sup> Sr(Bq)		<sup>89</sup> Sr(Bq)	<sup>90</sup> Sr(Bq)
12.3	346.6	1 : 28.2	14.1 ± 1.9	351.1 ± 9.4
12.3	182.3	1 : 14.8	13.6 ± 1.0	191.1 ± 6.2
12.3	24.3	1 : 2.0	12.0 ± 0.9	25.5 ± 2.1
12.3	12.1	1 : 1.0	11.6 ± 1.2	12.9 ± 0.7
0	12.1	0 : 12.1	-	11.8 ± 1.2
61.7	24.3	2.5 : 1	57.4 ± 6.2	39.7 ± 4.1
123.3	24.3	5.1 : 1	125.2 ± 9.1	87.4 ± 6.9
246.6	24.3	10.1 : 1	237.2 ± 12.4	168.4 ± 12.9
493.2	24.3	20.3 : 1	498.2 ± 20.2	325.3 ± 20.4

Table 2. Determination of  $^{90}\text{Sr}$  in mixed  $^{89}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Sr}$  standard sources after two weeks standing

Added (Bq)		$^{90}\text{Sr}$ with LSC without chemical separation	$^{90}\text{Y}$ with GPC after chemical separation
$^{89}\text{Sr}$ (Bq)	$^{90}\text{Sr}$ (Bq)		
61.7	12.1	13.4 ± 2.1	11.7 ± 1.5
123.3	24.3	25.8 ± 5.4	26.2 ± 3.7
246.6	91.2	94.7 ± 6.4	93.2 ± 7.5
493.2	173.3	179.5 ± 8.2	169.8 ± 7.9

Table 3. Determination of  $^{89}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in IAEA-375 soil and liquid waste samples

Sample number	Liquid scintillation counting		Gas proportional counting	
	$^{89}\text{Sr}$ (Bq/L)	$^{90}\text{Sr}$ (Bq/L)	$^{89}\text{Sr}$ (Bq/L)	$^{90}\text{Sr}$ (Bq/L)
IAEA-375	-	88.9±5.9 <sup>a</sup>	-	83.3±7.0 <sup>a</sup>
Y1 <sup>b</sup>	0.94±0.12	8.5±1.2	0.99±0.0	6.9±1.2
Y2 <sup>b</sup>	0.87±0.13	8.3±1.4	0.15±0.02	8.6±1.8
W1 <sup>c</sup>	-	0.33±0.05	-	0.30±0.07
W2 <sup>c</sup>	-	0.35±0.07	-	0.29±0.01
K1 <sup>d</sup>	0.08±0.01	0.62±0.09	-	0.54±0.08
K2 <sup>d</sup>	0.13±0.07	0.67±0.15	0.07±0.01	0.68±0.11

a:Bq/kg, b:Youngkwang N.P., c:Welsung N.P., d:Kori N.P.

가스비례검출기를 사용한  $^{90}\text{Sr}$  정량법은  $^{90}\text{Y}$ 을 순수분리하기 위해 가격이 비싼 Sr-Spec 수지를 사용하거나 철공침에 의한  $^{90}\text{Y}$  순수분리 단계가 필요하다는 등의 단점을 내포한다. 따라서 화학적인  $^{90}\text{Sr}$ 과  $^{90}\text{Y}$  순수분리 단계가 필요없는 액체섬광계수기를 이용한 spectrum unfolding 방법이 좀더 경제적인  $^{90}\text{Sr}$  정량법으로 사료된다.

측정시간을 100분으로 설정할 경우 액체시료 300 mL에 대한 검출한계치 (lower limit of detection)는 Currie식<sup>12</sup>으로 계산하였다. 셀렌코프광으로 측정된  $^{89}\text{Sr}$ 의 검출한계치는 0.0906 Bq/L (백그라운드; 2.49 cpm, 계측효율; 0.45)로 계산되었고, 액체섬광계수로 측정된  $^{90}\text{Sr}$ 의 검출한계치는 0.0912 Bq/L (백그라운드; 4.94 cpm, 계측효율; 0.63)로 산출되어  $^{89}\text{Sr}$ 와  $^{90}\text{Sr}$ 의 검출한계치는 비슷한 수치를 나타내었으나 가스비례 검출기의 검출한계치 (17.22 mBq/시료)보다는 상당히 높은 수치이다. 또한  $^{89}\text{Sr}$  및  $^{90}\text{Sr}$ 에 대한 계측 민감도 (counting sensitivity)도 각각 813.2와 803.4로 비교적 높은 FM (figure of merit,  $\text{Eff}^2/\text{B}$ )을 보여 주었다.

### 3.3 환경시료 분석결과

본 연구에서 개발된  $^{89}\text{Sr}$  및  $^{90}\text{Sr}$  분석법을 실제 환경시료에 적용하여 방사성 스트론튬의 농도를 측정하였다. IAEA-375 표준물질과 원자력발전소에서 방출되는 액체폐기물 시료를 대상으로  $^{89}\text{Sr}$  및  $^{90}\text{Sr}$  방사능

농도를 정량하여 그 결과를 Table 3에 나타내었다. IAEA-375 표준물질은 1990년 러시아의 스타리비스코프지역에서 채취한 토양시료<sup>13</sup>로  $^{90}\text{Sr}$  뿐만 아니라  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  및  $^{106}\text{Ru}$  등의 방사능을 상당히 함유하고 있는 토양시료로 개발된 분석법의 신뢰도 평가에 사용되고 있다. IAEA-375 표준물질에서  $^{89}\text{Sr}$ 는 검출되지 않았고, 화학분리 후 spectrum unfolding으로 측정된  $^{90}\text{Sr}$  방사능 농도값 (88.9 Bq/kg)은 IAEA QC 분석팀에서 보고된<sup>13</sup> 95 % 신뢰구간 (79-90 Bq/kg) 범위에 포함되는 수치였고 가스비례 검출기로 측정된  $^{90}\text{Sr}$ 도 비슷한 농도값 (83.3 Bq/kg)을 나타내었다. 영광원자력

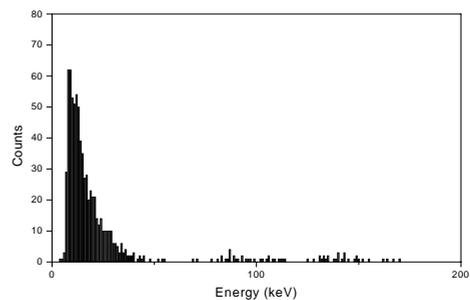


Fig 4. Typical spectrum of  $^{89}\text{Sr}$  in Y-1 sample with Cerenkov counting.

발전소에서 채취한 액체 폐기물 시료(Y1)에 대하여 LSC를 이용하여 첼렌코프 방법으로 측정된  $^{89}\text{Sr}$  스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었고, spectrum unfolding으로 측정된  $^{90}\text{Sr}$  스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. 액체 폐기물 시료 (Y; 영광원자력발전소, W; 월성원자력발전소, K; 고리원자력발전소)에 대한  $^{89}\text{Sr}$  및  $^{90}\text{Sr}$  방사능 농도값은 발연질산으로 화학분리후 가스비례계수기로 측정된 고전적인 발연질산법과 비슷한 결과치를 나타내었다. 그러나 기존의 방사성 스트론튬 분석법은 분석절차가 복잡하고 전문성이 요구되었으나 본 연구에서 개발된  $^{89}\text{Sr}$ 과  $^{90}\text{Sr}$  분석법은 Sr-spec 컬럼을 사용하여 스트론튬만을 쉽게 순수분리 할수 있었고, 액체섬광계수기로 직접  $^{89}\text{Sr}$  및  $^{90}\text{Sr}$  방사능을 측정하여 기존의  $^{90}\text{Y}$  측정을 위한 방치기간 (2-4주)을 단축할 수 있는 신속하고 정확한 분석법으로 사료된다.

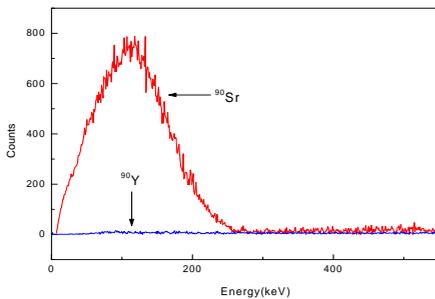


Fig 5. Typical spectra of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Y}$  in Y-1 sample with liquid scintillation counting.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Sr-Spec 수지와 액체섬광계수기를 이용하여 신속하고 신뢰성 있는  $^{89}\text{Sr}$ 과  $^{90}\text{Sr}$  분석법을 개발하였다.  $^{89}\text{Sr}$  및  $^{90}\text{Sr}$  표준용액 및 IAEA 표준물질에 대하여 본 연구에서 개발된 분석법을 사용하여  $^{89}\text{Sr}$  및  $^{90}\text{Sr}$  농도를 측정된 결과 신뢰성 있는 결과가 산출되었다. 첼렌코프광으로 측정된  $^{89}\text{Sr}$ 의 검출한계치는 27.19 mBq/시료로 계산되었고, 액체섬광계수로 측정된  $^{90}\text{Sr}$ 의 검출한계치는 27.35 mBq/시료로 산출되었다.  $^{89}\text{Sr}$  및  $^{90}\text{Sr}$ 에 대한 계측 민감도는 각각 813.2와 803.4

로 비교적 높은 FM을 보여 주었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술 연구부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

1. A. S. Goldin, R. J. Velten, G. W. Frishkorn, *Anal. Chem.*, **31**, 1490-1492 (1959).
2. H. O. Fourie, J. P. Ghijsels, *Health Phys.*, **17**, 685-689 (1969).
3. N. A. Chieco, D. C. Bogen, E. O. Knutson (Eds), *EmL Procedures Manual*, 27th ed., U.S. Department of Energy, New York. 1992.
4. J. Moreno, N. Vajda, P. R. Danesi, J. J. Larosa, E. Zeiller, M. Sinojmeri, *J. Radioanal. Nucl. Chem., Art.*, **226**, 279-284 (1994).
5. E. P. Horwitz, M. L. Dietz, D. M. Nelson, J. J. Larosa, W. D. Fairman, *Analyt. Chim. Acta*, **238**, 263-267 (1990).
6. E. P. Horwitz, R. Chiarizia, M. L. Dietz, H. Diamond, *Analyt. Chim. Acta*, **281**, 361-372 (1993).
7. K. Walter, N. Trautmann, G. Herrmann, *Radiochim. Acta*, **62**, 207-212 (1993).
8. C. Poletiko, R. Lemerchier, B. Leiba, P. Llug, *J. Radioanal. Nucl. Chem., Art.*, **178**, 131-141 (1994).
9. M. J. Kessler (Ed), *Liquid Scintillation Analysis*. Science and Technology, Packard Instrument Co., 1989.
10. K. H. Hong, Y. H. Cho, M. H. Lee, G. S. Choi, C. W. Lee, *Appl. Radiat. Isot.*, **54**, 299-305 (2001).
11. M. F. LAnnunziata, *Tri-Carb LSC Application Note*, CIA-003, Packard Instrument Company, 1997.
12. L. A. Currie, *Anal. Chem.*, **40**, 586-593 (1968).
13. Z. Radecki, M. Campbell, K. I. Burns, *Radionuclides and Trace Elements in Soil*, IAEA-375 Reference Material, Vienna, 1991.