

Performance Test of the Ultralow Background Gamma-Ray Measurement System

Won-Woo Na and Young-Gil Lee
Korea Atomic Energy Research Institute

극저준위 백그라운드 감마선 측정시스템의 성능시험

나원우 · 이영길
한국원자력연구소

Abstract—Ultralow background gamma-ray measurement system was installed to measure and analyze gamma-rays emitted from environmental and swipe samples. The background reduction techniques applied on this system are the passive shielding to surround the HPGe detector, an active external antic cosmic shield to shield cosmic-rays and the nitrogen gas supply to minimize the introduction of ubiquitous radon decay nuclei. The performance test result showed that the system background at energies between 50 keV and 2 MeV is reduced about 10^{-2} order and the MDA is so low as to be suitable for the environmental sample analysis. But it is appeared that the neutron produced by cosmic-ray increases the background at low energy region.

Key words : Ultralow background gamma-ray measurement system, Anticoincident, Environmental sample, Cosmic-ray

요약—환경시료 및 Swipe시료에서 방출되는 감마선을 측정·분석하기 위하여 극저준위 백그라운드 감마선 측정시스템을 설치하였다. 본 측정시스템은 백그라운드를 저감하기 위해 극저방사능 물질로 구성된 수동적 차폐방법, 우주선 영향을 차단하기 위한 역동시 측정법, 그리고 공기중 방사성 핵종인 라돈가스를 시스템 내부에서 제거하는 방법 등을 적용하고 있다. 적용된 백그라운드 저감법에 대한 성능시험 결과, 실험실 조건의 백그라운드 준위가 관심 대상 에너지 영역(50 keV~2 MeV)에서 10^{-2} order 정도로 저감되었다. 그리고 미신고 핵활동을 탐지하기 위한 관심 대상 핵종의 감마선 에너지 영역에서 평가된 시스템의 최소검출한(MDA)값은 환경시료 분석에 적합한 것으로 평가되었다. 그러나 저에너지 영역에서는 여전히 우주선에 의한 중성자 영향이 백그라운드 요인으로 작용하고 있는 것으로 분석되었다.

중심어 : 극저준위 백그라운드 감마선 측정시스템, 역동시, 환경시료, 우주선

서 론

국제원자력기구(IAEA)는 신고된 또는 미신고된 핵시설 내에서의 미신고 핵활동을 적시에 탐지하기

위한 보장조치 방안으로서 강화된 보장조치 프로그램인 Programme '93+2[1]를 마련하여 회원국들의 적극적인 참여를 기다리고 있다. 이 프로그램은 핵시설 주변의 환경시료와 시설내의 Swipe시료를 측정·분

석하여 미신고 핵활동을 조기에 탐지하는 검증방안을 포함하고 있다. 이런 국제원자력기구의 강화된 보장 조치 방안에 적극적으로 대처하고, 국가보장조치를 성공적으로 수행하기 위한 방안으로 극저준위 백그라운드 감마선 측정시스템을 구축하였다. 환경시료 내에 존재하는 극미량의 감마선 방출 핵종에서 방출된 극저준위 감마선을 정확히 측정·분석하는데 영향을 미칠 수 있는 백그라운드 요인은 크게 검출기 자체와 측정시스템에 포함되어 있는 방사성물질에 의한 것, 주위환경의 방사능에 의한 것, 그리고 우주선이 발생시키는 방사능에 의한 것으로 분류된다. 본 시험은 측정시스템 성능에 영향을 미칠 수 있는 시스템 인자(delay time, coincidence time)를 적절히 설정하고, 시스템에 적용된 백그라운드 저감법들에 의한 백그라운드 저감률을 각각 평가하여 향후 본 시스템의 개선을 위한 자료로 활용하고자 한다.

측정 시스템 분석

가. 시스템 구성

핵시설 주변의 환경시료 또는 Swipe시료 내에 존재하는 극미량의 방사성 핵종에서 방출된 극저준위 감마선을 정확히 측정·분석하기 위해서는 측정시스템의 백그라운드 준위를 매우 낮게 유지해야 한다. 이 시스템의 백그라운드 준위는 일반적인 측정시스템에 비해 수십 분의 1 이하로 유지될 수 있어야 한다 [2]. 현재, 구축되어 있는 그림 1의 측정시스템은 여러 가지 백그라운드 요인을 고려하여 시스템의 백그라운드 준위를 최대한 저감할 수 있도록 그림 2와 같이 구성되었다.

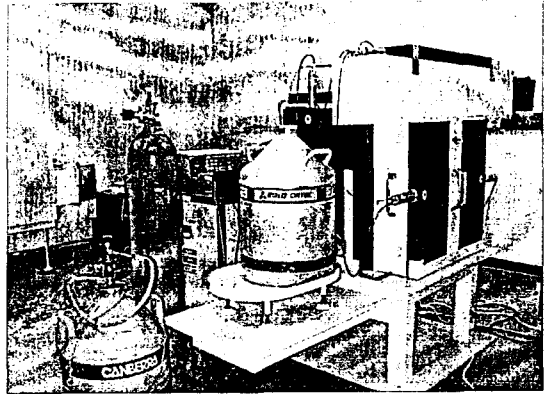


Fig. 1. 극저준위 백그라운드 감마선 측정시스템

① 검출기

극미량의 방사성 물질을 갖는 시료에서 방출되는 극저준위 감마선을 정확히 측정·분석하기 위한 검출기는 최적의 검출효율을 갖는 것이어야 한다. 본 측정시스템에 적용된 검출기는 에너지 분해능과 효율이 좋은 고순도게르마늄(제조회사: EG&G ORTEC, Model: GEM-60210, 상대효율: 60%, Energy res. at 122 keV: 1.0 keV FWHM, Energy res. at 1.33 MeV: 1.95 keV FWHM) 검출기이다. 표 1[3, 4]에서 보논바와 같이 검출기 제작에 사용된 재료 자체가 시스템의 백그라운드 요인이 될 수 있으므로 본 측정시스템은 방사능 농도가 낮은 재료로 제작된 고순도게르마늄 검출기를 적용하고 있다. 그리고 고순도게르마늄 검출기의 전치증폭기에 사용된 전자부품(resistors, circuit boards, etc)내에도 표 2[3, 4]에서 보논바와 같이 U, Th의 자핵종(^{214}Bi , ^{208}Tl)과 ^{40}K 등의 방사성물질이 백그라운드 요인으로 존재하고 있다. 그러므로 본 측정시스템은 전치증폭기를 검출기 다이오우드에서 20cm 이상 이격된 수동적 차폐체 외부에 설치하여, 그 사이를 차폐체(납)로 차단함으로써 전치증폭기에 의한 백그라운드를 차단하고 있다.

Table 1. HPGe 검출기 재료내 존재하는 방사성 핵종 농도[3, 4]

Radionuclide Concentration in dpm/kg			
Materials	²⁰⁸ Tl	²¹⁴ Pb	⁴⁰ K
Aluminium	7 to 200	<4 to 2,000	<20 to 1,000
Beryllium	10	700	<1,000
Copper	<0.3	<0.8 to 3	<10
Copper(Grade 101)	<0.03	<0.05	<0.5
Copper(OFHC)	<0.3	<0.8 to 10	<10
Epoxy	50 to 4,000	80 to 53,000	<1,000 to 72,000
Grease, High Vacuum	<1	<7	<8
Indium	<1	<3	<20
Lead	<0.02	<0.04	<0.1
Molecular Sieve	400 to 500	1,000 to 3,000	8,000 to 9,000
Aylar, Aluminized	100	200	<2,000
Oil, Cutting	<0.4	<3	<20
Plastic, Tubing	4	<4	<800
Printed Circuit Board	2,000	4,000	4,000
Quarz	6 to 60	<20 to 1,000	<200
Reflector Materials	<0.1 to 100	<0.7 to 200	<5 to 300
Rubber, Sponge	50 to 200	80 to 1,200	<400 to 2,000
Silica, Fused	<20	<10	<100
Silicone, Goam	20	50	<200
Sodium Iodide(Tl)	<3	<4	<30
Solder	<0.3	<0.8	<10
Steel, Stainless	<2	<6	<200
Steel, Pre WW II	<0.5	<0.9	<10
Teflon	<0.3	<1 to 7	<20
Wire, Teflon Coated	<4	<1	<20

② 수동적 차폐체

측정시스템의 검출부를 감싸고 있는, 방사능 농도가 낮은 수동적 차폐체는 외부에서 입사하는 백그라운드 방사선을 차폐하는 역할을 한다[5, 6]. 측정시스템에 적용된 차폐체(제조회사 : FAST ComTec)는 외부의 저방사능 납(130mm low activity Pb<50 Bq/kg)과 내부의 극저방사능 납(20mm very low activity Pb<10 Bq/kg)으로 구성되었다. 그러나 극저방사능 납에도 방사성 동위원소인 ²¹⁰Pb와 ²¹⁰Bi가 항상 존재하고 있다[7]. ²¹⁰Bi에서 방출된 베타선은 납 원자핵과 상호작용하면서 제동방사선을 지속적으로 방출하게 된다. 이 방사선은 저에너지 영역(1 MeV 이하)의 백그라운드 연속부분(background continuum)에 큰 영향을 끼치므로 극저방사능 납 안쪽에 극저방사능 구리(4mm electrolytic copper)를 그림 2와 같이 설치하였다.

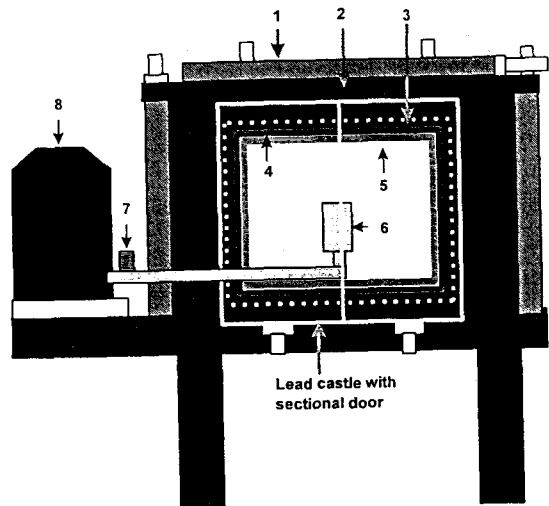


Table 2. HPGe 검출기 부품내 존재하는 방사성 핵종 농도 [3,4]

Radionuclide Concentration in dpm/kg			
Materials	²⁰⁸ Tl	²¹⁴ Pb	⁴⁰ K
Capacitors	0.005 to 0.09	0.03 to 0.6	<0.7 to 6
Diodes	0.002	<0.01 to 0.02	3 to 4
Inductors	0.2	0.3	1.5
Mumetal Shields	<0.02	10	22
O-Rings	<0.03	<0.05 to 0.5	<2
Resistors	0.003 to 0.2	0.01 to 0.3	<0.3 to 8
Transistors	0.004	0.01 to 0.02	<0.2 to 0.3

1. Cosmic shield (plastic scintillation detector)
2. Low background lead shield (<50 Bq/kg, thickness : 130 mm)
3. Ultra-low background lead shield (<10 Bq/kg, thickness : 20 mm)
4. Ultra-low background copper shield (thickness : 4 mm)
5. Plexiglass (thickness : 4 mm)
6. HPGe detector
7. Preamplifier
8. Dewar

Fig. 2. 극저준위 백그라운드 감마선 측정시스템 구조

③ 능동적 차폐체

우주선이 측정시스템의 백그라운드에 영향을 미치는 것은 크게 Minimum ionizing particles(뮤온)과 Nucleonic component(중성자, 양성자, 광자 등) 등에 의한 것으로 구분된다[2, 8]. 특히 뮤온은 측정 시스템을 통과하면서 수동적 차폐체와 상호작용하여 백그라운드인 2차 방사선(고에너지 전자, 제동방사선, 소멸감마선 및 X-선)을 방출시키거나, 검출기 재료를 이온화 또는 여기 시킴으로서 백그라운드를 높이고 있다. 그리고 양성자, 중성자 및 광자 등은 공기중의 입자들과 상호작용하면서 다량의 중성자를 발생시킨다. 이렇게 생성된 중성자들은 공기중 입자들과 상호작용하면서 사라지기도 하지만, 일부의 중성자들은 측정시스템을 통과하면서 매질과 상호작용하여 백그라운드 방사선을 지속적으로 방출시킨다[2, 9]. 측정 시스템을 동굴 또는 터널 등의 지하(수심 15m 이상)에 설치하면 평균자유행정이 작은 뮤온에 의한 백그라운드 영향은 무시할 수 있는 준위까지 저감된다고 알려져 있다[10]. 그러나 뮤온의 영향을 차단하기 위해 지하 1층에 설치된 본 측정시스템은 뮤온에 의한 직·간접적인 백그라운드 영향을 완전 배제할 수 없으므로 그림 2와 같이 플라스틱 섬광검출기(제조회사: Bicron, Model: BC408 plastic scintillator)로 측정시스템 둘레를 감쌌다. 이때, 섬광검출기와 고순도게르마늄 검출기에 동시에 검출된 신호는 우주선에 의한 것이므로 이 신호가 출력되지 않도록 측정회로는 구성되었다.

④ 공기중 라돈가스 제거

우리 주변의 토양과 암석 등에 항상 존재하고 있는 장 반감기 핵종인 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th 들은 안정된 상태가 되기 위한 방사붕괴를 하면서 기체 방사성 핵종인 라돈(^{222}Rn , ^{219}Rn , ^{220}Rn)을 지속적으로 생성하고 있다. 방출된 라돈 핵종중 ^{219}Rn 는 반감기가 매우 짧기 때문에 이로 인한 백그라운드 영향은 무시할 수 있지만, 실험실 조건의 공기중에 항상 존재하고 있는 다른 라돈 핵종(^{222}Rn , ^{220}Rn)들의 붕괴시 방출된 딸 핵종들은 측정시스템의 백그라운드 요인으로 작용한다[2, 11]. 그러므로 측정시스템내의 공기를 시스템 밖으로

불어내기 위한 질소가스 공급장치를 설치하여 외부 공기가 시스템 내부로 유입되는 것을 방지할 수 있도록 하였다.

나. 측정회로 구성

그림 3과 같이 구성된 측정시스템의 고순도게르마늄 검출기에서 수집된 감마선 신호는 전치증폭기, 증폭기 그리고 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 거쳐 디지털 신호로 변환된 후, MPA/PC 시스템으로 보내져 분석된다. ADC에서 입력되는 신호를 수집·분석하는 MPA/PC(제조회사: FAST ComTec)는 신호를 취득하는 하드웨어(MPA/PC adapter card, ADC bus box) 부분과 MPA/WIN 소프트웨어 부분으로 구분된다. MPA/WIN 소프트웨어는 MPA/PC 하드웨어를 조절하는 MPA/PC Manager와 수집된 자료를 컴퓨터 모니터상에 나타내고 분석하는 MPA/PC MDI(Multi Display Interface)로 구성되었다.

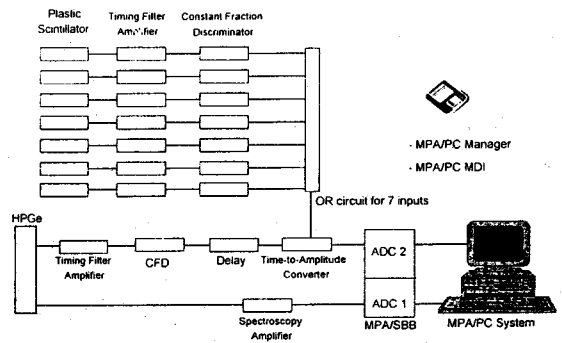


Fig. 3. 극저준위 백그라운드 감마선 측정시스템의 회로구성

다. 역동시 측정

본 측정시스템은 고순도게르마늄 검출기에 검출된 감마선 신호들중 플라스틱 섬광검출기에도 동시에 검출된 우주선에 의한 신호를 제거하는 역동시(anti-coincidence) 측정회로로 구성되었다. 시동신호(start pulse)로 입력되는 플라스틱 섬광검출기의 논리신호와 약 200 ns 정도 지연된 후 정지신호(stop pulse)로 입력되는 고순도게르마늄 검출기의 논리신호가 일정한 시간간격(coincidence time window) 내에서 시

간대 진폭교환기(TAC)에 입력되면 두 논리신호는 동시신호로 인식된다. 그리고 뮤온에 의해 생성된 방사성핵종들은 대개 2 μ s 정도의 Lifetime을 갖고 있으므로 뮤온에 의한 신호가 두 검출기에 시간적으로 동시에 검출될 수 있도록 시간간격(coincidence time window)을 조절하여 이 영향을 제거해야 한다.

역동시 측정을 위해 Coincidence time window를 너무 좁게 설정할 경우에는 동시사건이 완전히 제거되지 않는 반면에, 시간간격을 너무 넓게 설정할 경우에는 우주선에 의한 동시사건 외에도 시료에서 방출된 감마선들이 두 검출기에 동시에 검출되어 동시사건으로 인식되며, 그 결과 선원에 의한 감마선 신호가 측정된 감마선 스펙트럼에서 제거될 수 있다. 그러나 시료측정에 있어서 후자의 영향은 매우 작기 때문에 보다 안전하게 우주선에 의한 백그라운드 영향을 제거할 수 있도록 측정시스템의 Coincidence time window를 16.10 μ s로 설정하였다. 이와 같은 역동시 측정법에 의해 수집된 감마선 스펙트럼에는 우주선에 의한 백그라운드 영향이 많이 제거되므로 시료에 의한 감마선 신호들이 대부분을 차지한다.

성능시험 및 평가

본 시험에서는 시스템에 적용된 각각의 백그라운드

저감법에 의한 백그라운드 저감률을 평가한 후 전체의 백그라운드 저감률이 시스템 운영목적에 만족하는지 여부를 평가하였다.

가. 외부 방사선 차폐효과

측정시스템의 수동적 차폐체는 주위환경의 방사능에 의한 백그라운드 영향을 차단하기 위한 목적으로 설치되어 있으며 다음과 같이 차폐효과를 평가하였다. 주위환경의 방사선이 시스템내로 입사할 수 있도록 측정시스템의 Sample holder 문을 열고 실험실 조건의 백그라운드를 측정하여 그림 4와 같은 감마선 스펙트럼을 얻었다. 스펙트럼상에 존재하는 감마선 피크들은 자연에 존재하는 우라늄계열 핵종(^{214}Pb : 295, 352 keV, ^{214}Bi : 609, 1120, 1236, 1765, 2204 keV), 토륨계열 핵종(^{212}Pb : 238 keV, ^{208}Tl : 583, 1591, 2102, 2615 keV, ^{228}Ac : 911, 968 keV, ^{212}Bi : 727 keV) 그리고 구조물질 등에 있는 장수명 자연방사성 핵종인 ^{40}K (1461 keV) 등에 기인한 것이다. 그리고 우주선에 의한 소멸 감마선(511 keV)과 뮤온에 의한 콤프턴효과 등의 백그라운드 방사선이 저에너지 영역에서 측정되었다[8].

그림 4에서 보는바와 같이 주위환경의 자연방사선은 시스템의 백그라운드에 큰 영향을 끼치고 있다. 그러므로 주위환경의 자연방사선 영향을 차단할 수 있

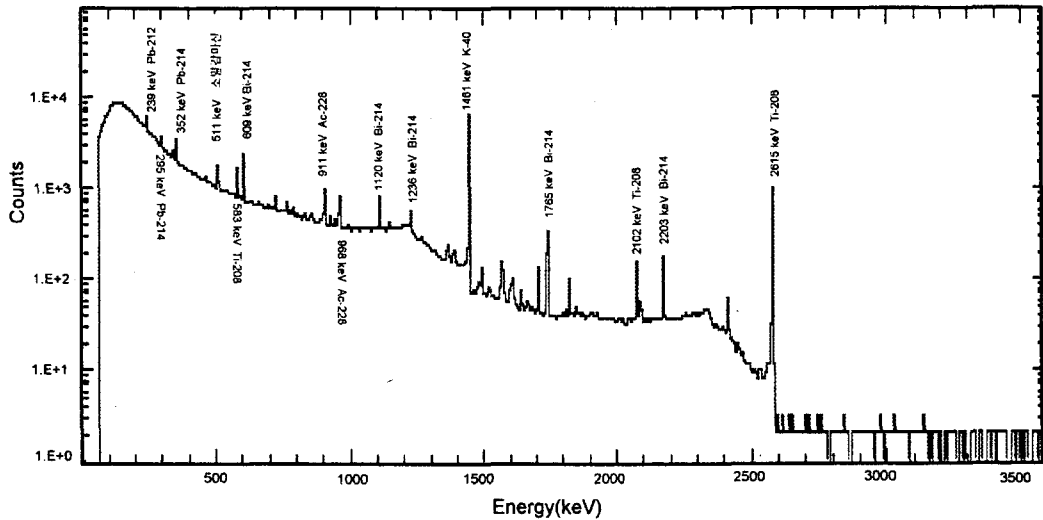


Fig. 4. 실험실 조건의 백그라운드 감마선 스펙트럼 (측정시간 : 10만초)

도록 수동적 차폐체인 납으로 검출기 둘레를 차폐하여 그림 5(b)의 백그라운드 감마선 스펙트럼을 얻었다. 이들 두 스펙트럼을 분석한 결과, 실험실 조건에서 측정된 다수의 자연방사성 핵종들의 감마선이 측정되지 않거나 상대적으로 적게 측정되는 것이 확인되었으며, 이로부터 본 측정시스템에 적용된 수동적 차폐체가 실험실 조건의 자연방사선을 크게 저감시키고 있는 것으로 평가되었다.

나. 우주선 차폐효과

주위환경의 자연방사선을 차폐하고 계측한 그림 5(b)의 감마선 스펙트럼에 나타난 백그라운드 영향은 환경시료의 극저준위 감마선을 측정하는데 있어서 무시할 수 없을 정도이다. 이런 우주선에 의한 백그라운드 요인을 제거하기 위해 차폐체 외부에 설치된 섬광검출기를 이용하여 역동시 측정을 한 백그라운드 감마선 스펙트럼은 그림 5(c)와 같다. 이 그림에서 보는바와 같이 저에너지 영역에서의 백그라운드 저감효과는 수동적 차폐만을 이용한 저감효과에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 따라서 측정시스템에 적용된 우주선 차폐법은 저에너지 영역에서의 우주선을 적절히 차폐하고 있는 것으로 평가되었다. 그러나 그림 5(c)의 스펙트럼상에는 아직도 공기중 라돈 딸 핵종인 ^{214}Pb , ^{214}Bi 들의 방사붕괴에 의한 몇몇

감마선들(295, 352, 609, 1120 keV)과 소멸감마선(511 keV)이 여전히 중요한 백그라운드 요인으로 작용하고 있다.

다. 공기중 라돈가스 제거 효과

그림 5(c)의 백그라운드 감마선 스펙트럼상에는 여전히 측정시스템내에 존재하는 공기중 라돈 딸 핵종들에 의한 백그라운드 요인이 존재하고 있다. 공기중 라돈 핵종(^{222}Rn , ^{220}Rn)은 곧 알파 붕괴하여 ^{218}Po , ^{216}Po 핵종으로 바뀌어 Sample holder내에 달라붙게 되며, 이들은 알파선이나 베타선을 지속적으로 방출하면서 안정된 핵종인 ^{208}Pb , ^{206}Pb 핵종으로 전환된다 [11]. 라돈 핵종의 붕괴과정에서 방출된 많은 알파선, 베타선, 감마선들은 중요한 시스템 백그라운드 요인 이므로, 이를 제거하기 위해서 측정시간 동안 질소가스를 3ℓ/hr의 유량으로 Sample holder 내로 공급하여 내부의 라돈가스를 밖으로 밀어낼 수 있도록 하였다. 그림 6은 저에너지 영역에 대해 이런 측정조건하의 감마선 스펙트럼과 라돈가스를 제거하기 전의 감마선 스펙트럼을 보여주고 있다. 두 스펙트럼의 비교에서 보는바와 같이 라돈가스를 제거한 측정조건하에서 얻어진 그림 6(b)의 감마선 스펙트럼상에는 라돈가스에 의한 감마선들(295, 352, 609, 1120 keV)은 거의 제거되었다. 따라서 본 측정시스템은 라돈에 의한 백그라운드 영향을 거의 받지 않는 것으로 평가되었다.

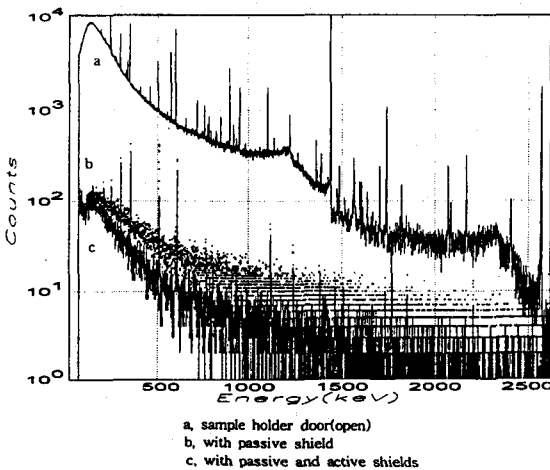


그림 5. 차폐조건에 따른 백그라운드 감마선 스펙트럼

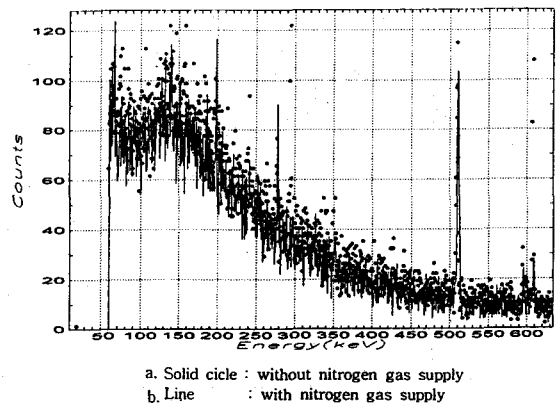


그림 6. 라돈가스 영향에 의한 백그라운드 감마선 스펙트럼 비교

라. 백그라운드 저감률 평가

환경시료를 측정·분석하여 원자력 시설의 미신고 핵활동을 탐지하는데 사용될 수 있는 관심 대상 감마선 에너지 영역은 50 keV~2.5 MeV 사이이다. 현재, 본 측정시스템에 적용된 백그라운드 저감법에 의한 백그라운드 저감률은 이 에너지 영역에서 10^{-2} order 정도인 것으로 평가되었다. 환경시료 측정시 백그라운드의 구성 성분은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 관심 대상 핵종 감마선보다 높은 에너지를 갖는 감마선의 콤프톤 산란 및 이와 관련된 신호들에 의한 백그라운드로서 시료와 동시에 측정되고 시료에 따라 달라질 수 있는 백그라운드 요인이다. 둘째는 자연방사능과 측정시스템에 따라 나타나는 감마선 백그라운드로서 항상 측정에 관여하는 시스템의 백그라운드 요인이다[11].

현재, 후자의 백그라운드 조건하에서 미신고 핵활동을 탐지하기 위한 모니터 핵종으로 사용될 수 있는 ^{137}Cs 감마선(662 keV) 피크 영역의 백그라운드 계수율(cps)은 2.4×10^3 이하로 매우 낮게 유지되고 있다. 그리고 이와 같은 백그라운드 조건하에서 10만초 동안 10%의 최대허용오차 한도 내에서 시료를 측정했을 경우에 얻을 수 있는 ^{137}Cs 감마선(662 keV) 계수율(cps)의 최소검출하한(MDA) 값은 5.2×10^3 정도인 것으로 평가되었다. 즉, 1,000초 동안 5개 이상의 ^{137}Cs 감마선(662 keV) 신호가 검출될 수 있을 정도로 시스템의 백그라운드 준위가 낮은 것으로 평가되었다.

결론

핵시설 주변의 환경시료내에 존재하는 감마선 방출 핵종은 매우 극미량이기 때문에 이를 측정·분석하기 위해서는 측정시스템의 백그라운드 준위를 자연방사능 준위 이하로 낮게 유지해야 한다. 현재, 이를 위해 측정시스템에 적용된 백그라운드 저감법은 측정시스템의 백그라운드 준위를 실험실 조건의 백그라운드 준위에 비해 10^2 order 정도로 매우 낮게 유지하고 있는 것으로 평가되었다. 따라서 본 측정 시스템은

환경시료내에 존재하는 관심 대상 핵종에서 방출되는 극저준위 감마선을 측정·분석할 수 있는 것으로 평가되었다. 그러나 현재의 조건하에서 얻어진 백그라운드 감마선 스펙트럼의 저에너지 영역에는 우주선에 의한 중성자 영향이 존재하고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 우주선에 의한 중성자 영향을 차단할 수 있는 중성자 차폐법을 적용한다면 저에너지 영역에서의 시스템 민감도는 향상될 것이다.

참고 문헌

1. IAEA, "Strengthening the Effectiveness and Improving the Efficiency of the Safeguards System : Programme 93+2", GOV/COM.24/INF/1, IAEA, (1996).
2. J.H.Reeves and R.J.Arthur, "Bulk Environmental Samples Analyzed with Anticomic-Shielded Ultralow-Background Germanium Detector Systems", PNL-SA-14316, Pacific Northwest Laboratory, (1987).
3. J.H.Reeves, R.L.Brodzinski, "An Ultralow Background Germanium Gamma-Ray Spectrometer Using Superclean Materials and Cosmic Ray Anticoincidence", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-31. 1, pp 697-700 (1984).
4. J. Verplanke, "Low Level Gamma Spectroscopy : low, lower, lowest", Nucl. Instrum. Methods Phys. Research, A312, pp 174-182 (1992).
5. R.J.Arthur, H.H.Reeves, and H.S.Miley, "Use of Low-Background Germanium Detectors to Preselect High-Radiopurity Materials Intended for Constructing Advanced Ultralow-Level Detectors", IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 35, 1, pp 582-585 (1988).
6. W.H.Zimmer and S.E.Wagner, "Measurement Techniques for Characterizing and Using Low Background Germanium Detectors", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 223, pp 412-415 (1984)

7. R.L.Brodzinski, H.S.Miley, J.H.Reeves and F.T. Avignone, "Further Reduction of Radioactive Backgrounds in Ultrasensitive Germanium Spectrometers", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A292, pp 337-342 (1990).
8. F.T.Avignone and R.L.Brodzinski, "Theoretical and Experimental Investigation of Cosmogenic Radioisotope Production in Germanium", Nucl. Phys. B, 28A, pp 280-285 (1992).
9. J.H.Reeves, R.J.Arthur, "Anticomic-Shielded Ultralow-Background Germanium Detector Systems for Analysis of Bulk Environmental Samples", J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles. Vol. 193, 1, pp 61-70 (1995).
10. Y.Bourlat, J.C.Millies, and L.D.Abt, "Measurement of Low-Level radioactivity in the Modane Underground Laboratory", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res, A339, pp 309-317 (1994).
11. 박종묵 등, "방사선 환경 감시기술 고도화", KAERI-NEMAC/RR-172/96, 한국원자력연구소-원자력환경관리센터 (1996).