

안전조치 사찰을 위한 휴대형 HPGe 검출기 시제품 성능평가 실험

곽성우*, 안길훈*, 박일진*, Young Soo Ham[†], Jonathan Dreyer[†]

*한국원자력통계기술원, [†]Lawrence Livermore National Laboratory

2013년 12월 20일 접수 / 2014년 1월 16일 1차 수정 / 2014년 1월 20일 채택

IAEA는 핵물질 계량 관리 검사를 위해 다양한 방사선 검출기를 사용하고 있다. 주로 HPGe, NaI(Tl), CZT 등이 사용되며, 정확한 측정이 요구되는 검사에는 고분해능 HPGe 검출기 활용도가 높다. HPGe 검출기는 추가적인 냉각장치로 인하여 부피가 크고 무거우며, 사용하기 전에 충분히 냉각시켜야 하기 때문에 측정의 준비 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 가볍고 짧은 사용 전 냉각이 요구되는 휴대형 HPGe가 개발되었다. 본 논문은 개발된 휴대형 HPGe 검출기 시제품을 실제 IAEA 사찰 현장에 적용하여 얻은 성능평가 결과를 기술한다. 휴대형 HPGe로 얻은 방사선 스펙트럼은 핵물질 종류와 농축도에 따라 다른 특징을 보였고, 또한 ²³⁵U과 ²³⁸U의 붕괴 계열에서 방출되는 감마선 및 우라늄의 특성 x-선 차이도 확인할 수 있었다. 그리고 휴대형 HPGe 검출기 시제품으로 측정된 농축도는 핵물질 종류에 따라 실제값과 9 ~ 27%의 상대적 오차를 보였다. 휴대형이라는 소형 검출기의 한계 때문에 일부 핵물질은 IAEA에서 요구하는 정확도를 만족시키지 못하는 경우도 있었지만 향후 추가적인 연구의 수행으로 이러한 문제점은 해결 가능할 것으로 판단된다. 본 논문은 새로운 휴대형 HPGe 검출기를 안전조치에 적용한 사례와 측정된 스펙트럼을 농축도 분석 코드로 분석한 결과를 다룬다. 따라서 국내 원자력시설의 우라늄 농축도 검증을 위한 IAEA 안전조치 사찰 결과를 분석한 논문이 별로 발표되지 않은 상황에서, 본 논문은 안전조치 검사 결과 분석에도 유익할 것으로 판단된다. 개발된 방사선 검출기의 개선 사항도 함께 논의하였으므로 향후 관련 분야 방사선 검출기 개발에도 기여할 것으로 예상된다.

중심어: 휴대형 고순도 게르마늄 검출기, 핵물질, 안전조치 검사, 핵비확산, 우라늄, 농축도

1. 서론

1975년 11월 14일에 발효된 한·IAEA 안전조치협정에 의해 국내 원자력활동에 수반되는 핵물질, 장비, 시설, 기술 및 이들에 의해서 파생되는 핵물질등에 대해 IAEA 안전조치 사찰을 받고 있다[1]. 국내 원자력 활동에 대한 안전조치 검사 시, 계량 관리 검증 방법으로써 방사선 검출기 이용은 주요한 수단 중 하나이다. 핵물질 검증을 위해 사용되는 방사선 검출기로는 HPGe, NaI(Tl), CZT가 있고, 검증 방법 또는 정확도에 따라 적당한 검출기가 선택된다. 최근에는 비록 고가이지만 섬광검출기 중에서 우수한 검출기적 특성(광 방출율, 반응 효율, 붕괴 시간) 때문에 NaI(Tl) 대신에 LaBr₃(Ce)를 사용하는 추세이다. 그럼에도 불구하고 정확한 측정 결과를 요구하는 검사에는 분해능이 우수한 HPGe 검출기 사용이 대세이다. 그러나 반도체 물질 Ge의 물리적 특성상 사용 중 냉각이 필수적이고, 또한 장비의 안정화를 위해 채택하고 있는 냉각 방식에 따라, 최소 6~10시간의 사용 전 냉각이 필요하다[1].

그래서 검사 계획의 통보 후 2시간 만에 수행되어야 하는 단기통보검사의 경우에는 장시간의 사용 전 냉각 시간이 요구되는 기존의 HPGe 검출기는 사용할 수 없다. 또한 최근에 들어서 많은 관심을 받고 있는 기계식 뿐만 아니라 기존의 휴대형 질소냉각 방식의 검출기의 무게도 약 30 kg 정도로 알려져 있다[2]. 이 무게는 IAEA 안전조치 사찰관 혼자서 장비를 취급하기가 불편하다는 문제점이 있다(좀 더 정확히, HPGe 검출기 크기에 따라 약간의 무게 차이가 있음). 따라서 이러한 문제점(장시간의 사전 냉각 시간과 장비 무게)을 해결하기 위해 새로운 휴대형 HPGe 검출기 시제품(PHDs Co., 미국)이 개발되었다. 개발된 검출기의 성능 및 현장 적용성을 평가하기 위해 한국원자력통계기술원과 미국 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)은 한전원자력연료(주)(KNF) IAEA 물자재고검사(PIV, Physical Inventory Verification)에 참여하였다. 본 논문은 개발된 휴대형 HPGe 시제품을 이용하여 KNF의 PIV를 수행한 방법, 분석 결과, 그리고 장비의 문제점 및 개선 사항을 기술한다.

교신저자: 곽성우, swkwak@kinac.re.kr
대전시 유성구 유성대로 1534(화암동 58-3번지)

1) 개인적 접촉
2) 개인적 접촉



Fig. 1. Portable hand-held HPGe prototype.

2. 재료 및 방법

2.1. 휴대형 HPGe 검출기 시제품 사양

개발된 휴대형 HPGe는 Fig. 1과 같이 HPGe 검출기, 신호 처리 및 냉각 장치, 그리고 휴대형 PC로 구성되어 있다[2]. HPGe 검출기의 실질적 크기는 직경 20.0 mm x 길이 10.0 mm 이고, 유효 체적은 직경 10.0 mm x 길이 10.0 mm이다. 전치증폭기, 증폭기, MCA (Multi-Channel Analyzer)를 비롯한 모든 신호처리 장치와 냉각 장치는 Fig. 1의 연두색 몸체 내부에 장착되어 있다. 신호처리 장치와 휴대형 PC는 USB 통신을 한다. 122 keV에서 FWHM은 0.850 keV이고 무게는 약 3 kg이다. 현재 안전조치 핵사찰에서 사용되고 있는 유효 직경 50.0 mm x 길이 30.0 mm 제품의 FWHM (약 0.750 keV)에 비해 에너지 분해능이 약간 높지만, 안전조치 검사 목적을 달성하기에는 충분하다. 약 30 kg 이상 되는 기존 제품에 비해 새로 개발된 제품은 3 kg으로 가볍고, 사용 전 냉각시간도 30 분으로 기존 제품에 비해 훨씬 짧다. 백그라운드 방사선을 줄이기 위한 검출기 콜리메이터를 사용했다. 콜리메이터는 구성하는 재료의 두께는 구리 2.0 mm, 납 10.0 mm, 스텐리스 3.0 mm이고 검출기 길이를 고려하여 길이는 60.0 mm로 하였다.

2.2. 이산화우라늄(UO₂) 분말(Powder) 측정

UO₂ 분말에 안전조치 검사는 대량 결손 검증(Method H+B), 부분 결손 검증(Method F+B), 혹은 미량 결손 검증(D+B) 방법을 적용한다[3]. 사찰관에 의해 측정된 UO₂ 분말의 ²³⁵U 농축도와 질량이 원자력 사업자가 신고한 값과 일치하는지 여부를 검사한다. 여기서 미량 결손 검증을 위한 Method D 검증 방법은 파괴 분석(Destructive Assay)이므로 본 논문에서는 논의하지 않는다. 다른 검증 방법과 사용하는 Method B은 저울을 이용하여 무게를 측정하는 것을 의미한다[4]. UO₂ 분말에 대한 대량 결손 검증(Method H)은 비파괴검사장비(방사선 검출기등)로 농축도를 측정해서 시설 운영자가 제공한 농축도와 비교한다. 반면에 부분결손 검증(Method F)는 저울로 측정된

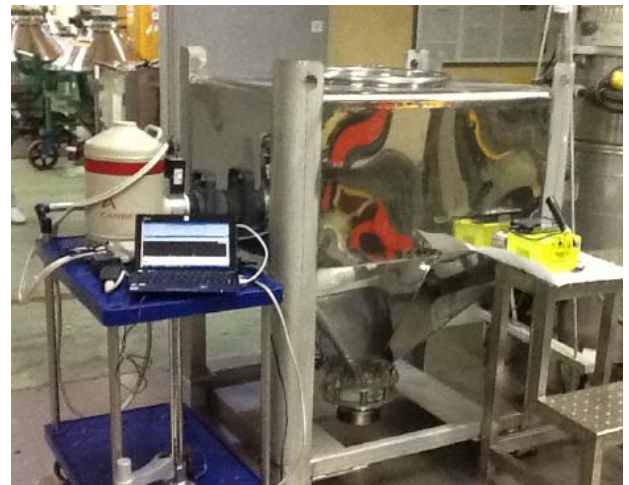


Fig. 2. Measurement of UO₂ powder enrichment using IAEA IMCG and portable hand-held HPGe.

핵물질 전체 무게와 비파괴 장비로 측정된 우라늄 농축도를 이용하여 측정된 ²³⁵U 질량과, 시설자가 제공한 ²³⁵U 질량과 비교해서 사찰대상 핵물질의 부분결손 여부를 검증한다.

이와 같이 핵물질 농축도는 안전조치 검사를 위한 필수 기초 자료이다. 농축도 측정을 위해 측정 대상 물질의 종류 그리고 요구되는 정확도에 따라 중성자 검출기, HPGe, NaI(Tl), CZT 혹은 LaBr₃(Ce)에 기반한 방사선 검출기를 사용한다. UO₂ 분말에 대한 계량관리 검증은 부분 결손 검증을 필요로 하므로 IAEA는 IMCA³⁾와 HPGe로 이루어진 IMCG⁴⁾를 사용한다. Method H에서 요구하는 최대 15% 불확도를 달성하기 위해 측정 시간은 300 초로 설정하였다. IMCA에 장착되어 있는 MGA (Multi-Group Analysis) 우라늄 농축도 평가 코드는 HPGe에 의해 측정된 우라늄 스펙트럼을 분석해서 ²³⁸U에 대한 ²³⁵U의 상대적 존재량을 결정한다[5]. Fig. 2는 IAEA의 IMCG 장비와 휴대형 HPGe 시제품으로 용기속에 들어 있는 저

3) IAEA 장비 코드명

4) IAEA 장비 코드명

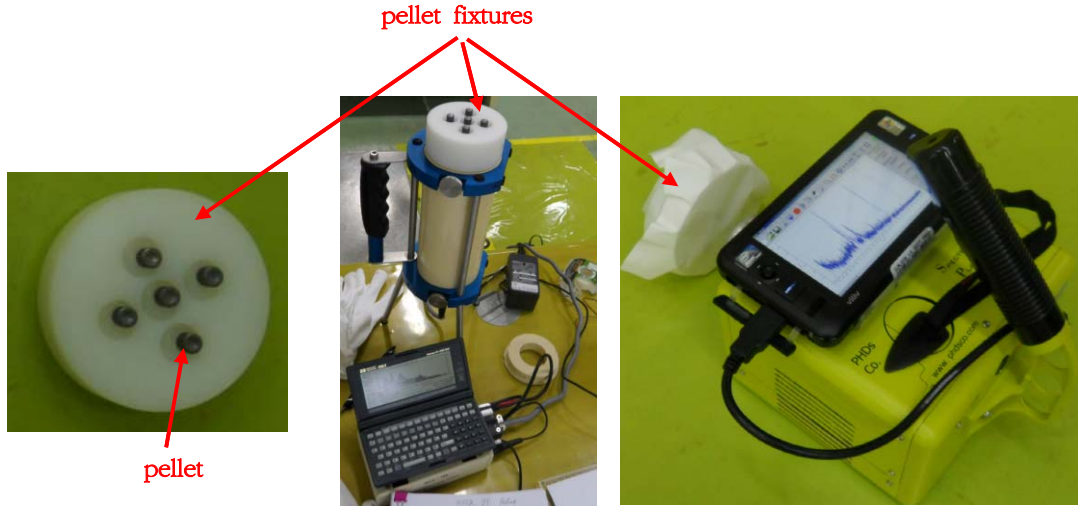


Fig. 3. Measurement of UO_2 pellets enrichment using IAEA IMCL (center) and portable hand-held HPGe (right).



Fig. 4. Measurement of UF_6 cylinder enrichment using IAEA IMCG, KINAC IMCG and portable hand-held HPGe.

농축 UO_2 분말 농축도를 측정하는 사진이다. 초음파 두께 측정 장치 (ULTG, Ultrasonic Thickness Gauge)로 용기 두께를 측정할 결과 약 1.9 mm인 것으로 나타났다. 현재 IAEA에서 사용하는 IMCG는 질소 냉각 방식을 사용하고 있고, Fig. 2에서 알 수 있듯이 IAEA가 사용하는 장비가 무게와 부피에 있어서 상대적으로 휴대형 HPGe에 비해 상당히 큼을 알 수 있다.

2.3. 이산화우라늄(UO_2) 소결체(pellet) 측정

UO_2 소결체에 대한 대량 결손 검증과 부분 결손 검증을 위해 $LaBr_3(Ce)$ 검출기를 이용하는 IMCL로 UO_2 소결체 농축도를 측정하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 폴리에틸렌으로 제작된 소결체 측정 틀을 이용하였다. 소결체 측정 틀은 폴리에틸렌으로 제작되었고 5개의 소결체를 올려놓고, 소결체에서 방출되는 방사선을 $LaBr_3(Ce)$ 검출기로 측정하였다. 휴대형 HPGe 시제품의 옆면에 HPGe 검출기가 부착되어 있기 때문에 Fig.3에서와 같은 형태로 소결체 검증을 수행하였다. IMCL⁵⁾ 신호처리 장치에 장착

되어 있는 스펙트럼 분석 코드에 의해서 측정된 방사선 스펙트럼은 분석하고 ^{235}U 농축도를 결정하였다.

2.4. 육불화우라늄(UF_6) 실린더(Cylinder)

UF_6 에 대한 대량 결손 검증과 부분 결손 검증을 위해 IMCG 검출기가 사용된다. IMCG는 HPGe 검출기를 이용하여 우라늄에서 방출되는 방사선 스펙트럼을 측정하고, 초음파 두께 측정 장치로 실린더 용기 두께를 측정하여 스펙트럼 왜곡을 보정해 준다. 두께 측정 결과, 실린더의 두께는 약 12.8 mm 이었다. 측정 시간은 300 초이다. Fig. 4는 UF_6 측정에 사용되는 IMCG와 본 논문의 시제품을 보여준다. Fig. 4의 왼쪽 사진은 기존에 사용하고 있는 KINAC(Korea Institute of Nuclear Non-proliferation and Control)와 IAEA의 IMCG이고, 오른쪽 사진은 휴대형 HPGe 시제품으로 측정하는 모습이다.

5) IAEA 장비 코드명



Fig. 5. Measurement of natural UO_2 powder enrichment using portable hand-held HPGe.

2.5. 천연 이산화우라늄(Natural UO_2) 분말 (Powder)

드럼 속에 들어 있는 천연 농축도(0.72%)를 가진 우라늄 분말에 대해 대량 결손 검증과 부분 결손 검증을 수행하기 위해 Fig. 5와 같이 휴대형 HPGe 시제품을 드럼의 중간에 위치시켜서 드럼 내의 농축도를 측정하였다. 측정된 스펙트럼으로 농축도를 결정하는 방법은 앞에서 언급

한 바와 같은 방식으로 수행하였다.

3. 결과 및 논의

계량관리 검증 대상에서 방출되는 방사선을 새롭게 개발된 휴대형 HPGe 검출기 시제품으로 측정하였다. 수집된 방사선 스펙트럼은 Ortec사의 MGA++ (Multi-Group Analysis, Pu과 우라늄 농축도 분석 코드)로 분석하였다 [6]. Fig. 6은 4.65% 농축도를 가진 UO_2 분말 용기 주변에서 측정된 방사선 스펙트럼이다. 그리고 Fig. 7은 UO_2 소결체(5개), Fig. 8은 UF_6 실린더, 그리고 Fig. 9는 천연 UO_2 분말을 측정된 스펙트럼이다. 5개 소결체 각각의 농축도는 평균 4.65%이고 소결체 1개당 무게는 약 5.2g이다. 핵물질 종류에 따른 방사선 스펙트럼 특성을 분석하여, 스펙트럼의 각 피크(peak)에 피크를 발생시키는 x-선 혹은 감마선 방출 모핵종을 표시하였다. 모든 4종류 핵물질의 고에너지 영역에서 ^{238}U 의 붕괴계열 핵종중 하나인 ^{234m}Pa 에 의한 감마선 766 keV와 1,002 keV가 나타났다. UF_6 실린더만 제외하고 나머지 3종류 핵물질의 60 ~ 120 keV 영역에서 ^{235}U , ^{238}U 그리고 그것들의 붕괴계열 핵종에서 기인한 다양한 방사선을 확인할 수 있었다.

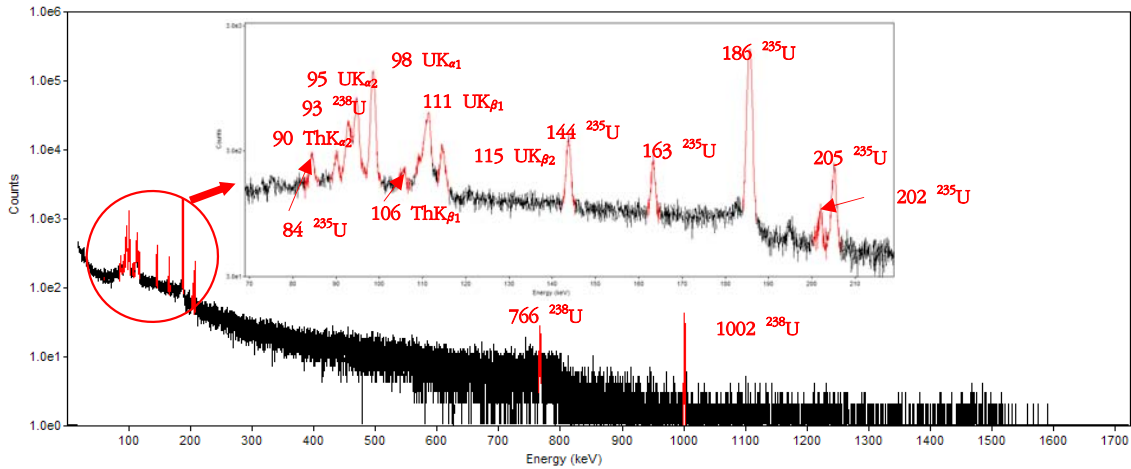


Fig. 6. Spectrum of 4.65% UO_2 powder.

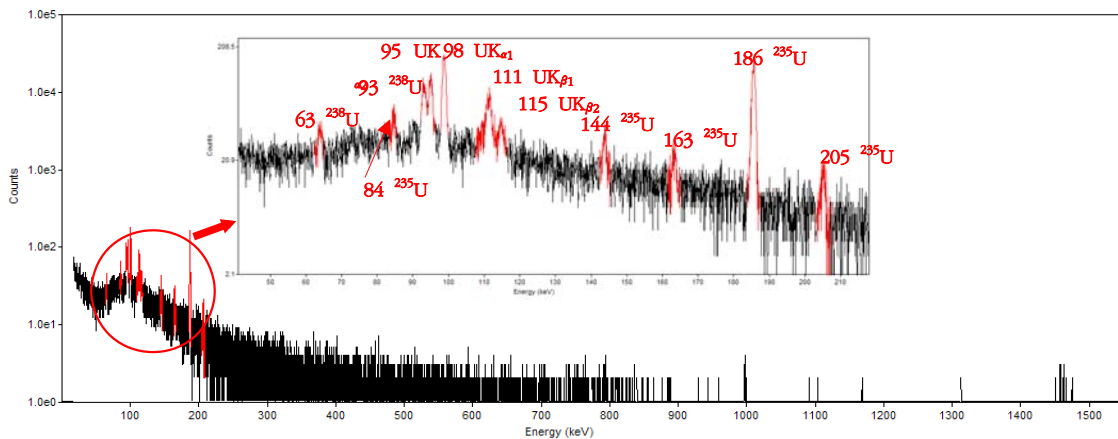


Fig. 7. Spectrum of 4.65% pellets.

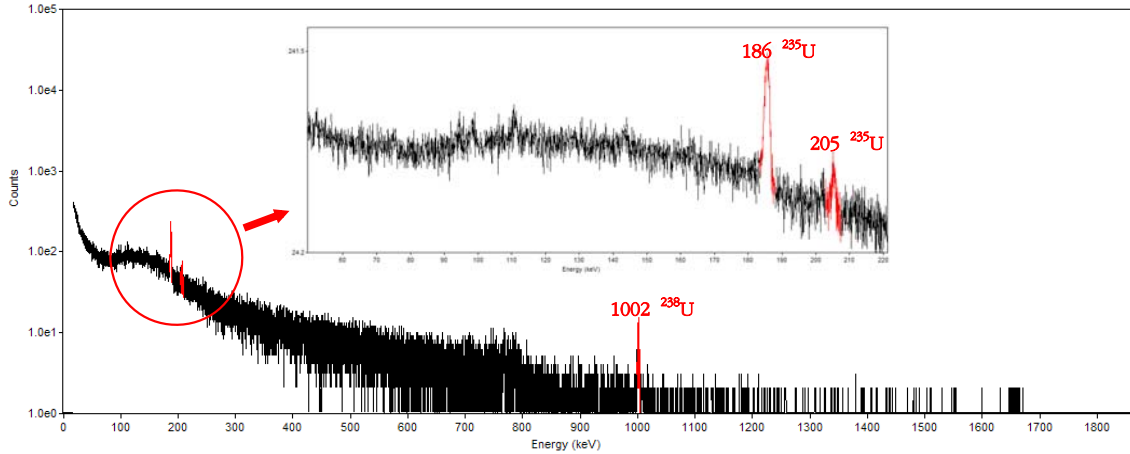


Fig. 8. Spectrum of 4.10% UF₆.

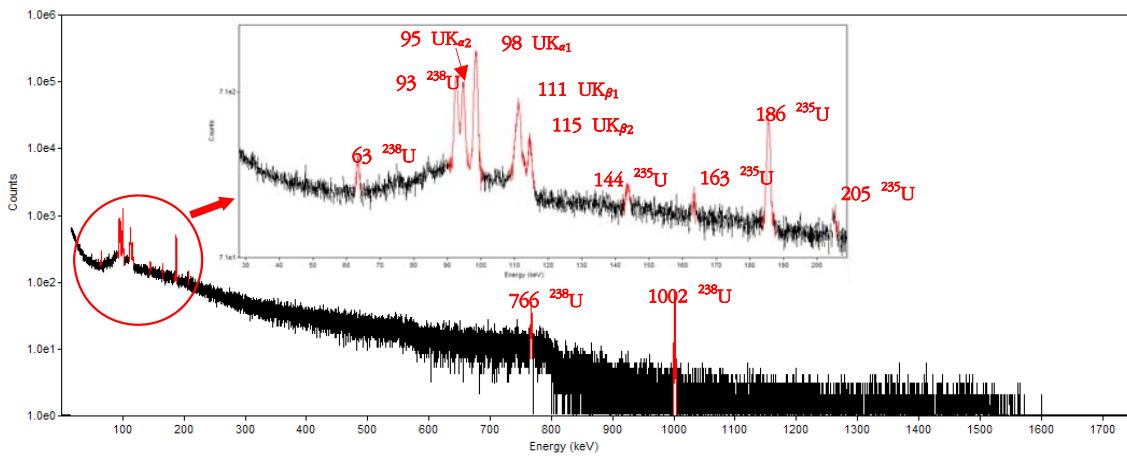


Fig. 9. Spectrum of natural UO₂ powder.

Table 1. Comparison of the Real and Measured Enrichment*.

Nuclear Material Type	Real Enrichment(%)	IAEA		Portable Hand-held HPGe	
		Measured Enrichment(%)	Relative Error(%)	Measured Enrichment(%)	Relative Error(%)
UO ₂ Powder	4.65	4.128	12.6	5.9	26.6
UO ₂ Pellet	4.65	4.486	3.7	5.5	18.7
UF ₆ Cylinder	4.10	3.703	10.7	not Measurable	-
Natural UO ₂ Powder	0.72	0.699	3.0	0.66	8.9

* Measurement Time : 300 second

스펙트럼에서 확인된 방사선을 직접 방출하는 붕괴계열 핵종의 모핵종으로 정리해 보면, 84, 144, 163, 186, 202, 205 keV 감마선은 ²³⁵U에서 발생되고, 63, 93, 766, 1,002 keV 감마선은 ²³⁸U에 기인하다. 95, 98, 111, 115 keV는 우라늄 원소의 특성 x-선(characteristic x-ray), 그리고 90과 106 keV는 토륨 원소의 특성 x-선이다. 특히 ²³¹Th은 ²³⁵U의 방사성붕괴에 의해 발생된 핵종으로 ²³⁵U 농축도를 결정하기 위해 사용된다. 반면에 ²³⁴Th은 ²³⁸U의 붕괴계열 핵종중 하나로 ²³⁸U 양을 예측하는데 이용된다. 4.65%와 0.72%(천연) UO₂ 분말을 비교하였을 때, 4.65% 분말은 ²³⁵U의 붕괴 생성물, ²³¹Th에 의한 방사선(144,

163, 186, 205 keV)의 계수가 큰 반면에, 0.72% 천연 분말은 ²³⁴Th 방사선 피크가 높았다. 또한 우라늄 물질의 특성 x-선도 천연 우라늄에서 많이 방출됨이 확인되었다. UF₆ 실린더의 두께는 약 12.8 mm로 두껍기 때문에, 60 ~ 120 keV 영역에 존재하는 저에너지 감마선이 투과를 못해 다른 핵물질에서 검출되는 피크가 확인되지 않았다. MGA++로 얻어진 핵물질의 스펙트럼을 분석하여 각 핵물질의 농축도를 결정하였다. MGA++는 Ge 검출기로 수집된 스펙트럼 분석을 위한 패키지 소프트웨어로써, 분석 대상에 따라 사용하는 MGA, MGAHI, 그리고 U235 코드로 구성되어 있다[6]. MGA는 100 keV까지 에너지 영

역을 사용하여 Pu 농축도를 분석한다. MGAHI는 두꺼운 차폐체내에 들어 있는 Pu 분석용으로써 0.2 ~ 1.0 MeV 영역을 사용한다. U235는 우라늄 분석을 위해 사용되며, 0 ~ 300 keV 에너지 영역을 이용한다.

본 성능평가 실험에서 수집된 스펙트럼을 MGA++ U235로 분석하였는데, 각 샘플 용기 두께에 따른 감쇄 영향은 고려하지 않았다. Table 1에서 실제 농축도는 KNF가 제공한 값이고, 측정 농축도는 IAEA 장비와 본 논문에서 다루고 있는 휴대형 HPGe 시제품으로 측정된 스펙트럼을 MGA++ U235로 분석한 결과이다. Table 1에서 알 수 있듯이 실제 값과 측정치 사이의 상대적 오차는 IAEA 장비는 3 ~ 13%이고, 휴대형 HPGe의 시제품은 9 ~ 27%인 것으로 나타났다. IAEA 계량관리 검증 방법에 의하면 대량 결손 검증은 15%, 그리고 부분결손 검증은 5% 불확도를 요구하고 있다. 일부의 측정 결과는 IAEA 국제목표치(international target values)를 만족시키지 못했는데, 그 주요 원인은 검출 효율의 문제인 것으로 판단된다. 새로 개발된 HPGe 검출기의 유효 체적은 직경 10.0 mm x 길이 10.0 mm 이기 때문에 동일 측정 시간에 대해 대면적을 가지는 IAEA 검출기 보다 계수율이 작다. 특히 용기 두께가 두꺼운 UF₆ 실린더인 경우에는 120 keV 이하의 저에너지 감마선이 투과하지 못하므로 계수되는 감마선이 작아서 농축도를 분석하기에 충분한 정보를 가진 스펙트럼을 얻지 못하였다.

4. 결론

IAEA 안전조치 검사를 위해 취급과 사용이 용이한 휴대형 HPGe 검출기가 개발되었다. 개발된 검출기에 대한 성능테스트를 수행하기 위해 KNF의 UO₂ 분말, 소결체, UF₆ 실린더, 그리고 천연우라늄 드럼 검증에 활용하였다. 샘플에 대한 측정 조건은 IAEA 사찰 조건과 동일하게 하였다. 성능 평가를 위한 현장 테스트 결과, 핵물질 종류에 따른 고유한 방사선 스펙트럼 피크를 파악할 수 있었다. 그리고 핵물질 형태와 용기에 따른 휴대형 HPGe 검출기는 약 9 ~ 27% 정도의 상대 오차를 가지는 것으로 나타났다. 일부 핵물질에 대해서 IAEA 국제목표치를 만족시키지 못한 것은 작은 검출기 체적으로 인한 낮은 계수율 때문인 것으로 생각된다. 따라서 새로운 휴대형 HPGe 검출기가 실제 안전조치 검사 현장에서 사용되기 위해서는 우선적으로 측정 계수 통계치를 향상시킬 필요가 있다. 검출기 성능향상을 위해서는 검출기 체적과 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 증가, 그리고 용기 두께 보정이 필요하다. 그 중 검출기 체적 증가는 측정 계수율도 향상시키지만 또한 더 큰 냉각장치를 요구하므로 무게와 부피를 증가시켜 휴대형의 장점을 감소시킬 것 이므로 이에 대한 최적화가 고려되어야 한다. 그리고 측정 정확도 향상을 위해 측정 시간을 증가시킬 수도 있다. 실제로 측정 시간을 증가시켰을 때 측정 정확도는 크게 향상됨을 확인하였다. 예로써, UO₂ 소결체를 100초 동안 측정하였을 경우에는 MGA 분석 불가 수준으로 감마선 피크가 불분

명 하였다. 그러나 측정시간을 300초, 600초로 증가시킴에 따라 피크가 주변방사선에 비해 선명해 지면서 농축도의 상대적 오차도 18.7%, 13.5%로 점점 감소함을 보였다.

이번 성능평가 테스트를 통해 본 연구에서 다루고 있는 휴대형 HPGe 검출기에 대한 몇 가지 개선 사항이 발견되었다. 첫째, gain 조절 기능 추가이다. 현재 제품은 gain 조절 기능을 가지고 있지 않으므로 다양한 분석에 제약이 많았다. 특히 gain이 조절되지 않아서 농축도 분석 소프트웨어 MGA와의 연계성에 어려움이 있었다. 둘째 낮은 검출 효율이다. 낮은 검출 효율의 가장 큰 원인은 작은 크기의 HPGe 때문이다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 검출 효율 향상을 위한 HPGe 검출기 크기 증가는 전체 시스템의 부피와 무게 증가를 유발하므로 신중한 검토가 선행되어야 한다. 셋째는 시스템 안정성의 문제이다. 장 시간 연속적으로 사용할 때 장비가 중단되는 경우가 종종 발생하였다. 중단 후 장치의 온도가 주변에 비해 상대적으로 뜨거운 것으로 보아 동작 중단의 원인은 불완전한 냉각장치가 원인인 것으로 보였다. 특히 두껍게 차폐된 물질을 측정하기 위해서 장시간을 측정이 필요한데, 이런 경우에는 장시간의 안정적 측정은 필수적이다.

이러한 어려움에도 불구하고 본 논문에서 다루고 있는 휴대형 HPGe는 장비가 작고 가볍고 또 사용이 편리하기 때문에 실용화되었을 경우에는 안전조치 검사의 효율성 제고에 많은 기여를 할 것으로 판단된다. 또한 국내 원자력시설의 우라늄 농축도 검증을 위한 IAEA 안전조치 사찰 결과를 분석한 논문이 별로 발표되지 않은 상황에서, 안전조치 검사 결과 분석에 관한 본 논문은 농축도 코드를 이용한 분석방법 향상에도 도움을 줄 것으로 예상된다. 그리고 휴대의 용이성 때문에 근래에 국제적 우려가 높아지고 있는 방사능 테러 탐지용으로도 사용 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국방사선안전재단의 원자력안전연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 최관규, 김재광, 김정수, 김종숙, 서형민, 이나영, 이혜영, 임동혁, 장성순, 정진호, 조성연, 태재웅, 형상철. 원자력통제:안전조치·수출입통제·물리적방호. 한국원자력통제기술원. 2013:103.
2. J. Dreyer, M. Burks, Spectroscopic portable germanium (SPG) user guide. LLNL-TM-639382. LLNL. 2013:3-5.
3. 최관규, 김재광, 김정수, 김종숙, 서형민, 이나영, 이혜영, 임동혁, 장성순, 정진호, 조성연, 태재웅, 형상철, 원자력통제:안전조치·수출입통제·물리적방호 별책부록. 한국원자력통제기술원. 2013:132-139.
4. Safeguards Manual : Accountancy Verification Methods and C/S Measures, SMI 4.5 Annex 3. IAEA. 2003.

5. Delynn Clark, U235:A gamma ray analysis code for uranium isotope determination, UCRL-ID-125727, LLNL, 1996:3-7.
6. ORTEC, MGA++ V1.06 Safeguards Software (<http://www.ortec-online.com>).

Performance Test of Portable Hand-Held HPGe Detector Prototype for Safeguard Inspection

Sung-Woo Kwak*, Gil Hoon Ahn*, Iljin Park*, Young Soo Ham†, and Jonathan Dreyer†

*Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, †Lawrence Livermore National Laboratory

Abstract - IAEA has employed various types of radiation detectors - HPGe, NaI, CZT - for accountancy of nuclear material. Among them, HPGe has been mainly used in verification activities required for high accuracy. Due to its essential cooling component(a liquid-nitrogen cooling or a mechanical cooling system), it is large and heavy and needs long cooling time before use. New hand-held portable HPGe has been developed to address such problems. This paper deals with results of performance evaluation test of the new hand-held portable HPGe prototype which was used during IAEA's inspection activities. Radioactive spectra obtained with the new portable HPGe showed different characteristics depending on types and enrichments of nuclear materials inspected. Also, Gamma-rays from daughter radioisotopes in the decay series of ^{235}U and ^{238}U and characteristic x-rays from uranium were able to be remarkably separated from other peaks in the spectra. A relative error of enrichment measured by the new portable HPGe was in the range of 9 to 27%. The enrichment measurement results didn't meet partially requirement of IAEA because of a small size of a radiation sensing material. This problem might be solved through a further study.

This paper discusses how to determine enrichment of nuclear material as well as how to apply the new hand-held portable HPGe to safeguard inspection. There have been few papers to deal with IAEA inspection activity in Korea to verify accountancy of nuclear material in national nuclear facilities. This paper would contribute to analyzing results of safeguards inspection. Also, it is expected that things discussed about further improvement of a radiation detector would make contribution to development of a radiation detector in the related field.

Keywords : Portable HPGe detector, Nuclear material, Safeguard inspection, Nuclear non-proliferation, Uranium, Enrichment