Journal of Radiation Industry 15 (4) : 213 ~ 222 (2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.213

미신고지역의 환경 방사선 검출을 위한 전개형 검출기 개발

김기윤[1] · 김동영[1] · 이 준[1] · 서지혜[2] · 김명수[1,*]

[1]한국원자력통제기술원, [2]한국원자력환경공단

Development of Deployable Detector for Environmental Radiation Detection in Unknown Areas

Giyoon Kim[1], Dong Yeong Kim[1], Jun Lee[1], Jihye Seo[2] and Myungsoo Kim[1,*]

[1]*Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, 1418 Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34101, Republic of Korea*

[2]*Korea Radioactive Waste Agency, 174 Gajeongro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea*

Abstract - For the denuclearization, nuclear activities must be reported and the reported documents must be confirmed through nuclear disarmament verification process. Sampling from undeclared area is an essential task of the verification to obtain information about the concealment of nuclear material. However, it is not possible to get the environmental radioactivity information of undeclared areas, so the safety of workers for sampling cannot be guaranteed. Therefore, before collecting samples, it is necessary to secure the information about radioactivity of the sampling region through the radiation measurement. In this study, we propose a compact gamma detection probe that can be transported by drones and distributed over a wide area in a short period of time. A plastic scintillator was applied to reduce weight and increase efficiency. In addition, the total weight and power consumption of the probe were optimized by applying a measurement method that counts photons generated from the scintillator. The performance of the probe was evaluated under the same dose conditions as the actual measurement environment. It was confirmed that the probe developed in this study exceeded more than twice the count value of background radiation at 25 meters. In addition, it was confirmed that the count value increased at a linear rate as the dose rate. As a result, it is possible to estimate the dose rate from the measured count value.

Key words : Small gamma-ray detector, SiPM, Plastic scintillator, Denuclearization, Verification, Environmental radiation measurement

서 론

한반도의 완전한 비핵화를 위해서는 국제사회에서 인증하는 방법으로 핵 활동에 대해 신고를 하고, 신고된 내용이 맞는지 여부를 사찰을 통해 검증하는 과정을 거쳐야 한다. 대상국의 의도와 관계없이 신고서 작성과정에서 보유하고 있는 핵물질의 수량과 과거 핵 활동의 내역이 왜곡되거나 훼손될 수 있다. 따라서 완전하고 돌이킬 수 없는 비핵화를 위해서는 신고서에 대한 검증과 함께 핵 활동이 의심되는 미신고 내역에 대한 검증도 필요하다(소 등 1996; Blix 1992; Carlson 2019).

주변국의 사찰에 있어서 대한민국은 지리적, 언어적 이점

* Corresponding author: Myungsoo Kim, Tel. +82-42-860-9786, Fax. +82-42-861-8819, E-mail. myungsookim@kinac.re.kr

을 통해 조속한 사찰 지원, 분석 시설 지원 등의 중요한 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해, 대상지역 내에 은닉된 핵물질의 위치와 종류를 탐지하고 현장에서 분석하기 위한 고도화된 방사선 계측 기술 확보가 필수적이다. 게다가 명확한 방사선량 정보가 확보되지 않은 미지의 지역에서 채취 업무는 작업자의 방사선 피폭 위험성이 높기 때문에, 핵 활동이 의심되는 미신고지역의 환경 방사능 정보를 얻는 것이 중요하다. 또한, 비핵화 시나리오별로 차이가 있을 수 있으나 시료의 채취 및 운반을 위해 주어지는 시간은 제한될 가능성이 높기 때문에, 넓은 지역을 빠르고 정확하게 스캔할 수 있는 계측 기술이 필요하다. 지역 방사능 정보는 시간의 흐름에 따라 변화할 수 있으므로 임무수행시간 동안 지속적인 방사선량 측정을 통해, 채취 작업 시 발생하는 위험을 줄이고 최적의 채취 장소를 선정해야 한다 (Miller 2013).

본 연구에서는 미지의 지역 환경 방사선 검출을 위한 프로브 형태의 소형 감마선 계측기를 제안한다. 미신고지역은 전기, 수도, 인터넷 등의 사회적 기반시설이 부재할 가능성이 매우 높을 뿐만 아니라 사찰 대상국 관계자들이 비협조적일 것으로 사료된다. 사찰에 사용되는 소형 감마선 계측기는 의심 지역에 설치된 자체 내부망을 통해 관제센터와 통신을 해야 하고, 자체 배터리를 이용하여 전기 공급이 없는 지역에서도 장시간 계측을 수행해야 한다. 또한, 우선적으로 $200 \times 200\ m^2$가량의 넓은 지역 방사선량을 측정하여 안전한 작업환경을 확보해야 한다. 미신고지역에서 위험지역(방사선 관리구역)의 경계는 사고 및 대테러 매뉴얼에서 정의하는 시간당 100 μSv 이상인 수준으로 정하고 (Lee and Song 2020), 소형 계측기는 수십 m 밖에서 해당 수준의 방사선량을 측정할 수 있는 성능으로 제작되어야 한다. 또한, 작업 중에 발생하는 방사선량의 변화를 감지하여 작업자가 미신고지역 안에 있는 동안 안전하게 작업할 수 있도록 돕는다. 따라서 배터리로 운영됨에도 6시간 이상 동작할 수 있도록 저전력 설계가 반영되어야 한다.

소형 방사선 계측기는 다양한 분야에서 사용되고 있다. 2015년 의료용으로 개발된 프로브 시스템은 수술 및 진단 시 국소부위의 계측을 위해 개발되었으며, 소형화 및 실시간 영상 획득을 위한 기술이 적용되었다. 하지만 제한적인 공간분해능과 낮은 계수 효율로 인해, 영상 구현에는 많은 시간이 소요된다(신 등 2015; Park and Joo 2015).

2010년 영국의 National Nuclear Laboratory (NNL)는 원자력 발전소의 사고에 대응하기 위해서 구 형태의 소형 감마 프로브인 RadBallTM을 개발하였다. 그러나 계측 장치가 방사선에 노출된 이후 optical-CT scanner를 이용해 영상화를 거친 후에 데이터를 분석할 수 있다는 사용상의 불편함이 있을 뿐 아니라 검출기 외부에 조준기 설치가 필수이기 때문에 개별 검출기의 무게가 증가한다는 단점이 있다 (Oldham *et al*. 2010). 이러한 운영 방식은 고 방사능 지역에 전개되어 오염되는 경우 회수하지 못하므로 데이터 획득이 불가능하며, 회수가 가능하더라도 실시간 데이터 분석이 불가능하므로, 본 연구의 목적에 부합하지 않는다. 또한, 유사한 기술로 방사선 맵핑을 위해 헬리콥터를 이용하여 계측 로봇을 전개하는 연구가 있다. 이 방법의 경우 1회 비행으로 하나의 로봇을 전개하는 방법이므로 넓은 지역을 빠르게 스캔하지 못하며, 스캔된 지역에서 지속적인 모니터링은 불가능하다 (Rose *et al*. 2011). 이스라엘의 Nuclear Research Center-Negev 연구팀은 환경 방사선을 모니터링하기 위한 전개형 스테이션 개발연구를 수행했다. 개발된 스테이션은 원자력 발전소 주변의 루틴 혹은 사고 시의 환경 방사선 계측을 위해 개발되었다 (Vax *et al*. 2008). 스테이션의 크기, 중량, 탑재된 센서, 통신 등을 고려할 때, 사찰 지역과 같이 사회적 기반시설이 없는 지역에서 사용할 수 없으며, 가방 형태로 제작이 되었기 때문에 사람이 직접 설치해야만 한다. 즉, 작업자가 채취 지역에 진입하기 전에 환경 방사능 정보를 수집하기 위한 목적으로 활용할 수 없다.

CAEN SyS에서 개발한 GAMON 드론을 이용하여 방사성 물질이 누출된 위험지역을 찾는 방법이 있다. 그러나 드론의 제한적인 운영시간으로 인해 센서 운반 외에 지속적인 모니터링과 정확한 위치 추정에 사용하기에 무리가 있다.

본 연구에서는 넓은 지역의 방사선량 정보를 빠르고 지속적으로 수집할 수 있는 소형 프로브 형태의 검출기 시스템을 개발하였다. 다수의 소형 프로브를 드론을 통해 운반 및 전개하여 주변의 환경방사선을 측정하고, 측정된 데이터를 관제센터로 전송하는 기능을 수행한다. CsI (Tl) 섬광체와 플라스틱 섬광체를 이용하여 각각 스펙트럼 분석과 계수를 통한 지역 방사능 정보를 수집하고 추정한다. 프로브의 계측 센서는 두 섬광체 모두 Silicon Photomultiplier (SiPM)을 사용하여 데이터를 획득한다. 또한, GPS와 무선 모듈 등의 부가적인 모듈을 통해 정보 수집 및 전달 기능 수행이 가능하며, 프로브는 배터리를 이용하여 무선으로 운용된다.

본 논문에서는 미신고지역의 위험 경계수준인 100 $\mu Sv \cdot hr^{-1}$의 선량률을 기준으로 실제 사찰 환경과 동일한 실험실 조건을 맞추어 제작된 프로브를 테스트하고, 성능을 검증한다.

재료 및 방법

사람이 작업을 시작하기 전에 작업 가능 여부를 검증해야 하기 때문에, 프로브를 무인항공체인 드론을 이용하여 전개하고 지역의 방사능 정보를 수집한다. 드론을 통해 운반하므로 프로브 설계에 있어서 무게와 부피는 중요한 설계 요소에 해당한다. 또한, 설계 시 넓은 지역에서의 높은 방사

선 계측 효율을 획득하기 위해 충분한 Geometric Detection Efficiency (GDE)가 확보되어야 한다. 일반적으로 GDE를 결정하는 데 중요한 요소는 센서의 크기와 방사선원 간 거리이다 (Knoll 2010). 이외에도 프로브는 충분한 배터리, 낙하충격에 대비한 낙하산, 정확한 GPS를 획득하기 위한 설계가 고려되어야 한다.

1. 감마 검출 프로브

감마선 분광분석을 위한 섬광체는 CsI (Tl), NaI (Tl), GAGG (Ce), LYSO 등이 사용된다. 성능적인 부분에서 본다면 GAGG (Ce)과 LYSO가 가장 적합하다 (Yamamoto and Ogata 2014; 박 등 2015). 하지만 본 프로브가 계측하는 환경 조건은 야외이며, 드론을 통해 운반되고, 계측 후에 회수 여부가 불확실하다. 따라서 섬광체의 질량과 경제성에 대한 고려가 필수적이다. NaI (Tl)의 경우 경제성 질량 등의 특성은 본 연구의 조건을 만족하지만, 물리적인 충격에 대한 내구가 약하고, 흡수 에너지당 광 발생률이 낮다는 단점이 있다 (Yamamoto and Ogata 2014). 따라서 본 연구팀은 내구성, 발생광량, 경제성 등을 고려하여 CsI (Tl)과 플라스틱 섬광체를 이용해서 두 종류의 프로브를 제작하였다. CsI (Tl)과 플라스틱 섬광체가 적용된 두 종류의 프로브는 각각 추가정보 획득용 프로브와 메인 전개 프로브로 활용한다.

CsI (Tl)은 플라스틱 대비 비교적 높은 Z-number를 갖고 있으므로 광전효과로 인해 감마선의 에너지 정보를 얻을 수 있다는 장점을 갖는다. 다만 물질의 밀도가 높아 부피가 커지면 무게가 크게 증가할 뿐만 아니라 필수로 동반되는 Multi-Channel Analyzer (MCA) 회로로 인해 구조가 복잡해지고 전력 소모가 증가한다. 따라서 CsI (Tl)은 본 연구에서 활용하려는 넓은 공간을 빠르게 스캔하기 위한 메인 프로브에 적용하기에는 부적절하다.

밀도가 낮은 플라스틱 섬광체는 높은 무게 대비 부피의 비로 충분한 GDE를 확보하면서도 가볍기 때문에 드론을 통한 대량 수송에 적합하다. 다만, 플라스틱 섬광체는 높은 에너지의 감마선에 대해 광전효과가 일어나지 않으므로 에너지 스펙트럼을 얻기에는 적합하지 않다 (Knoll 2010). 따라서 플라스틱 섬광체에서 발생하는 광 신호를 계수하는 계측 방법을 적용한다. 계수 방법의 경우 MCA보다 회로의 구성이 간결하여 무게가 가볍고 전력 소모가 낮다는 장점이 있다. 감마선원의 종류를 알 수 없다는 한계가 있으나, 넓은 지역의 초기 환경 방사능 측정은 충분히 가능하다. 따라서 본 연구에서는 플라스틱 섬광체를 이용하여 계수 방식의 정보를 취급하는 프로브를 메인 프로브로 활용한다. 프로브에 적용한 플라스틱 섬광체는 425 nm 파장의 빛을 출력하며 밀도는 1.023 $g \cdot cm^{-3}$이다. 지름과 높이 모두 1 inch로 제작하여 질량은 13 g 정도이다.

방사선에 의해 섬광체에서 발생한 가시광선은 광센서와 반응하여 전기적 신호로 변환된다 (Knoll 2010). 따라서 섬광체와 센서가 결합되는 센서 모듈은 완벽하게 차광이 되어 외부의 빛이 들어가지 않는 설계가 필수적이며, 광량이 매우 낮으므로 광증배관 (Photo-Multiplier Tube, PMT)이나 광증배소자 (Silicon Photo-Multiplier, SiPM)와 같은 센서를 사용하여 신호를 얻는다. 본 연구의 측정 환경은 고립된 환경에서 무선통신과 배터리를 사용하기 때문에 PMT와 같이 부피가 크고 전력소모량이 높은 센서는 사용할 수 없다. 따라서 SiPM을 이용하여 섬광체에서 발생한 가시광선을 측정한다. 실험에는 KETEK사의 SiPM을 사용했으며, Fig. 1은 제작된 센서 모듈이다. 지름과 높이가 모두 1 inch인 플라스틱 섬광체에 SiPM을 결합하였으며, refractive index가 낮은 테플론 테이프를 이용해 최대한 공기층이 없도록 섬광체와 결합하여 내부의 빛이 빠져나가는 것을 막음으로써 집광 효율을 높이고자 했다. SiPM에서 측정된 가시광 신호는 내장되어 있는 전처리기 (preamplifier)와 비교기 (comparator)를 통과해서 디지털 펄스로 출력된다.

Fig. 2는 센서 모듈의 전체 신호 수집 회로도이다. 플라스틱 섬광체 센서 모듈에서 넘어오는 신호가 디지털 펄스 방식이므로 기본적인 형태의 계수기 (counter)를 적용하였다. 계수기는 외부 클럭에 동기화되는 방식이 아니므로, 발생하는 펄스의 폭을 이용해 신호의 중첩 여부를 판단한다.

Fig. 1. The plastic scintillator and SiPM sensor module used in the probe.

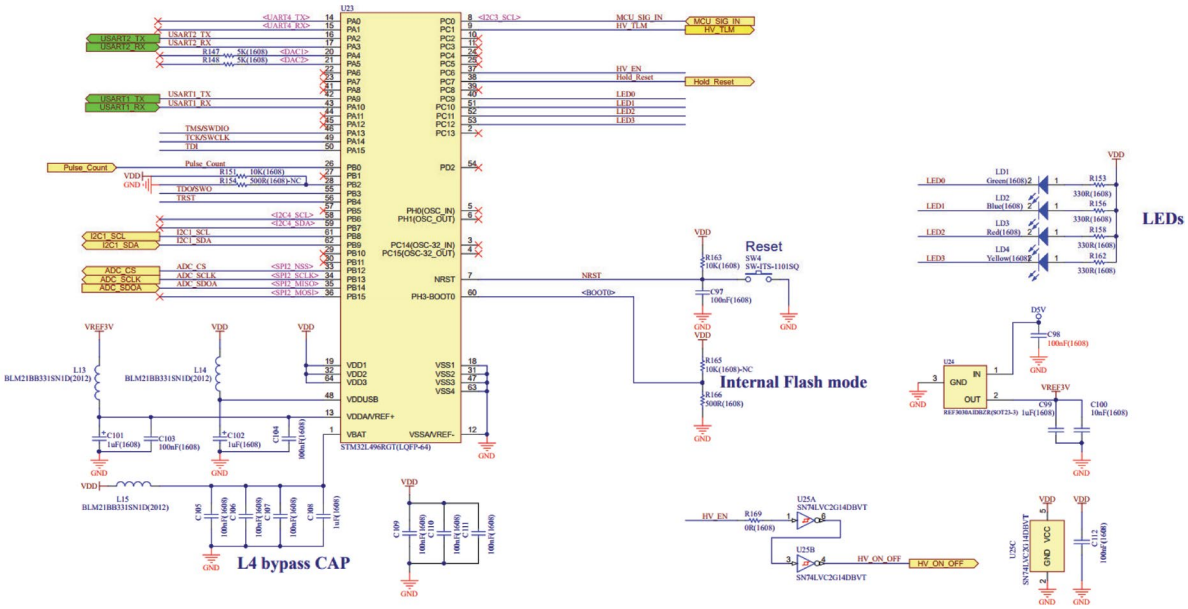

Fig. 2. Circuit diagram for sensor module control and output signal collection.

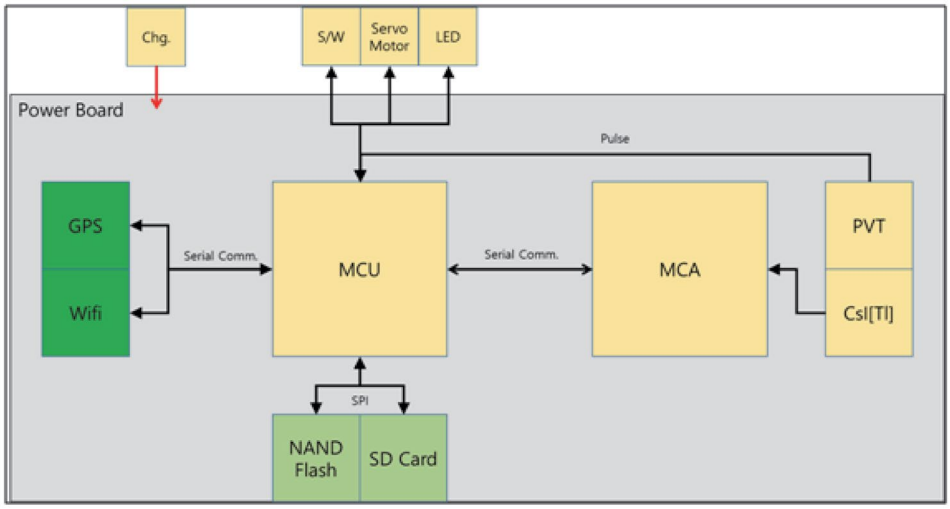

Fig. 3. Signal flow diagram of the probe signal processing module.

신호처리 모듈은 총 7장의 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)으로 구성되며, 각 PCB가 수행하는 역할은 다음과 같다. 그리고 각 PCB는 Fig. 3과 같이 연결된다.

- 센서 구동 PCB: (1) MCA PCB, (2) Mount PCB
- 인터페이스 PCB: (3) Ext. U&I PCB
- 컨트롤러 PCB: (4) Power PCB, (5) MOD PCB, (6) IO PCB, (7) Main PCB

(1) MCA PCB는 CsI (Tl) 섬광체가 적용된 프로브에만 설치되어 동작하고, 메인 프로브인 플라스틱 섬광체가 적용된 프로브에는 계수기가 활성화되어 디지털신호를 계수한다. (2) Mount PCB는 섬광체 센서 모듈이 결합되는 PCB이다. (3) 인터페이스 PCB의 역할은 외부 커넥터와 연결, 스위치 컨넥터, 상태표시 LED, 서보 모터 연결 컨넥터 및 구동 릴레이, 배터리 저전압 모니터링이다. 컨트롤러 PCB는 Power, MOD, IO, Main PCB로 구분된다. (4) Power PCB는 LiPo 배터리에서 발생하는 3.7 V의 전압을 5 V와 3.3 V 등 센서와 신호처리 모듈에서 필요한 전압으로 변압하여 분배한다. (5) MOD PCB는 외부와 통신을 위한 Wi-Fi 모듈을 제어하는 역할을 한다. 프로브에는 XPico사의 Wi-Fi 모듈을 적용했다. (6) IO PCB는 각 모듈과 PCB의 전기적 연결 및 전원 스위치 역할을 한다. 마지막으로 (7) Main PCB는 통신과 전원을

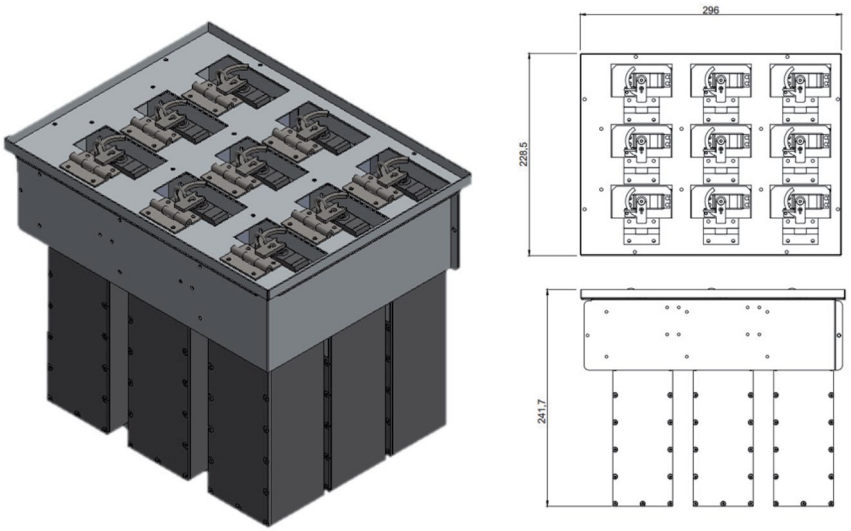

Fig. 4. Schematic of the probe holder frame for drone mounting.

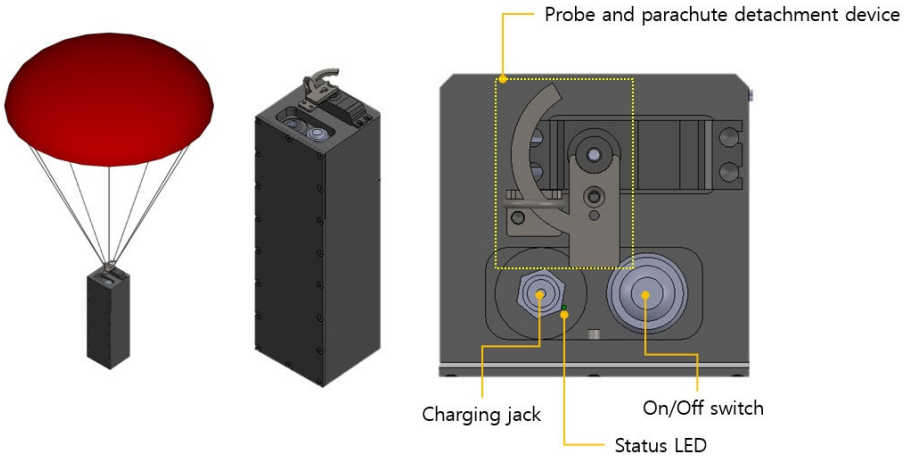

Fig. 5. Top structure of the probe and the rotational hook to separate from the holder frame and parachute.

제어하고 MCA와 계수기에서 출력하는 데이터를 기록하고 제어하는 역할과 GPS 모듈을 통해 취득한 위치정보를 처리하고 외부 시리얼 통신을 담당한다. 동일한 시스템으로 플라스틱 섬광체 센서 모듈과 CsI (Tl) 섬광체 센서 모듈에 모두 적용할 수 있으므로 앞으로 양산에 더 용이할 것으로 사료된다.

서포트 모듈은 홀더 프레임, 회전 고리, 낙하산으로 구성되어 있다. 프로브 홀더 프레임은 Fig. 4와 같이 최대 9개의 프로브를 연결할 수 있다. 각각의 프로브는 거치와 분리를 위한 회전 고리를 통해 홀더 프레임에 거치되며, 해당 고리가 회전하여 홀더 프레임에서 분리된다. 고리의 회전을 담당하는 서보 모터와 컨트롤러는 각각의 프로브 상단에 자리잡고 있다. 따라서 홀더 프레임에는 어떠한 구동 관련 모듈이나 컨트롤 관련 모듈이 없는 구조이다. 홀더 프레임에서 프로브 전개를 위한 분리작업을 수행한다면, 홀더 프레임에 별도의 통신 모듈 컨트롤 모듈이 필수적이고, 이로 인해 전체 시스템의 무게가 증가하고 홀더 프레임에서 소모하는 전력 수급에 대한 문제도 함께 발생한다. 이러한 문제를 피하고 단순한 구조를 적용하기 위해 모두 개별 프로브에서 컨트롤 하는 구조로 설계하였다.

프로브가 자유낙하를 하는 동안 충분한 감속을 위해 낙하산을 이용한다. 프로브가 지면에 도달한 후에도 낙하산이 장착되어 있으면, 바람이나 혹은 다른 간섭으로 인해 측정에 영향을 줄 수 있다. 따라서 홀더 프레임과 분리를 위해 제작한 회전 고리는 프로브가 지면에 도달한 후에 낙하산 분리에도 사용한다. Fig. 5는 펼쳐진 낙하산과 전개를 위한 홀더 프레임 분리 및 낙하산 분리를 위한 회전 고리를 나타낸다.

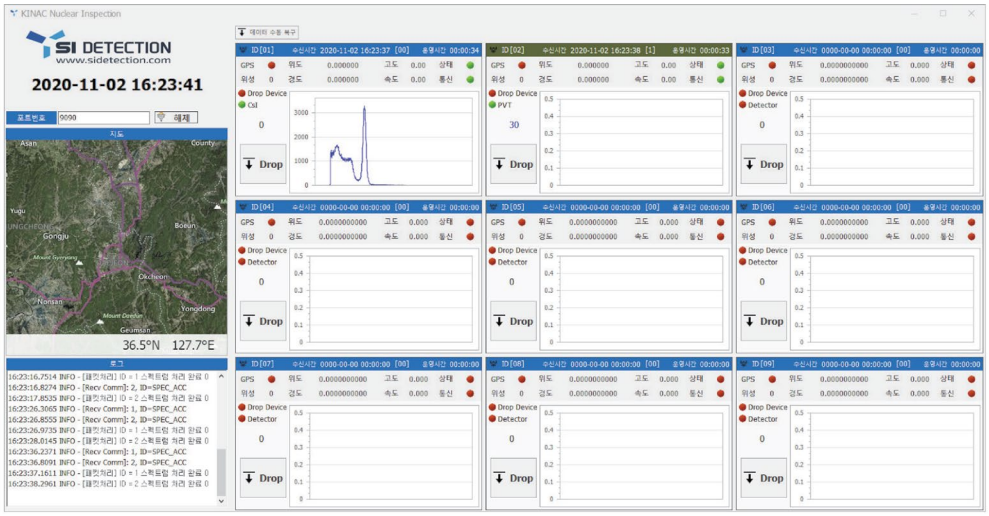

Fig. 6. GUI-based software for probe control and data acquisition.

Table 1. The dose rate according to the distance of the ^{137}Cs source in the laboratory and the actual measured distance for sampling environment

Distance (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Effective distance (m)	2.895	5.789	8.684	11.58	14.47	17.37	20.26	23.16	26.05	28.95
Dose rate (μSv·h^{-1})	11.93	2.98	1.33	0.75	0.48	0.33	0.24	0.19	0.15	0.12
Distance (m)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
Effective distance (m)	31.84	34.74	37.63	40.53	43.42	46.31	49.21	52.10	55.00	57.89
Dose rate (μSv·h^{-1})	0.099	0.083	0.071	0.061	0.053	0.047	0.041	0.037	0.033	0.030
Distance (m)	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
Effective distance (m)	60.79	63.68	66.58	69.47	72.37	75.26	78.16	81.05	83.95	86.84
Dose rate (μSv·h^{-1})	0.027	0.025	0.023	0.021	0.019	0.018	0.016	0.015	0.014	0.013

2. 소프트웨어 및 프로브 동작

본 연구에서 개발한 관제프로그램은 Fig. 6과 같이 제작되었다. 하나의 드론을 통해 수송 가능한 프로브 수는 총 9개이며, 본 관제프로그램도 9개의 프로브를 제어하고, 데이터를 수집하여 GUI 및 텍스트로 표현할 수 있도록 설계되었다. 프로브에 낙하 명령을 송신하고 상태, 위치, CsI (Tl)의 경우 스펙트럼 그리고 플라스틱 섬광체의 경우 계수 값을 수신해서 9개 창에 각각 나타낸다. 또한, 관제프로그램을 통해 통신 정보 및 프로브 시스템의 운용 기록을 실시간으로 확인하여 프로브의 성능을 모니터링하고 유지 관리할 수 있도록 설계했다.

프로브의 구동은 주 펌웨어에서 각 모듈의 초기화를 시작으로 전체 프로세스가 진행된다. 먼저, 주 펌웨어에서 MCA, GPS, Communication의 전원을 켜고 PC와 연결 및 통신 상태를 확인한다. 이 단계 후에 각 프로브에 낙하 명령을 전달하면, 프로브와 PC의 GPS 초기화 및 시간 동기화 작업을 수행한다. 그다음 프로브의 상단에 있는 스텝 모터가 동작하여 프로브를 홀더 프레임으로부터 분리한다. 프로브는 낙하산을 통해 감속하고 지면에 떨어진 후, 스텝모터를 한 번 더 작동시켜 낙하산을 분리한다. 이후 CsI (Tl) 섬광체는 MCA의 절전모드를 해제하고 계측을 시작하고, 플라스틱 섬광체는 계수기를 활성화하고 계측을 시작하며 관제프로그램은 측정된 데이터를 모니터상에 나타내고 데이터를 저장 및 관리한다.

3. 실험셋업

프로브의 성능 검증을 위해 선량률에 따른 계수 값의 변화를 측정하였다. 현재 실험실 조건에서 사용한 선원은 ^{137}Cs 체크선원으로 activity는 37.88 μCi이다. 선원과 프로브의 거리는 10 cm부터 3 m까지 10 cm 간격으로 증가시키며 측정한다. 이 경우 Table 1과 같이 선량률은 최대 11.93 μSv·h^{-1}에서 최소 0.013 μSv·h^{-1}를 나타낸다. 본 실험실 셋업과 실제 필드의

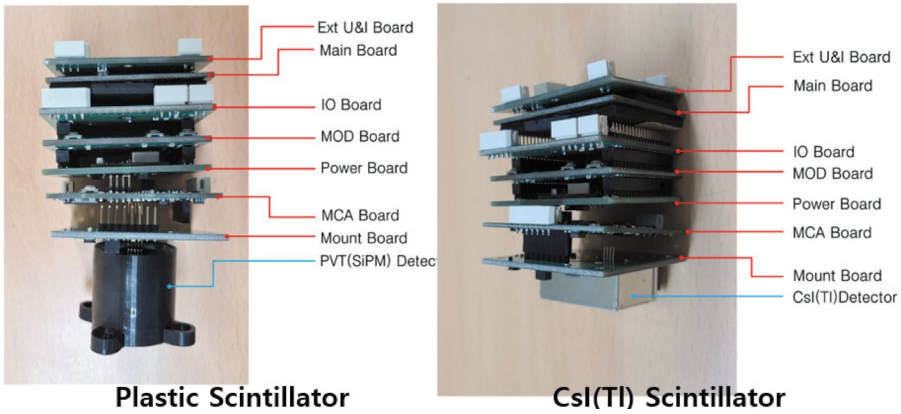

Fig. 7. Inside of the probe with electronic components assembled (left: plastic scintillator, right: CsI (Tl) scintillator).

계측 조건을 비교하기 위해 다음 수식을 이용하였다.

$$H_T = \frac{\alpha \times 0.3238}{r^2} \times 9.73 \times 10^{-3}$$

수식에서 α는 체크 선원의 방사능(activity)이고, r은 선원과 프로브 사이 거리이다. 실험실 조건에서 10 cm의 거리에 체크 선원이 있는 경우 위 수식으로 구한 선량률은 11.93 $\mu Sv \cdot h^{-1}$ 이고 이 선량률은 방사선관리구역의 경계(100 $\mu Sv \cdot h^{-1}$)에서 2.895 m 떨어진 지점에 프로브가 위치하여 계측하는 조건과 같으며, 3 m 거리에서 선량률은 0.013 $\mu Sv \cdot h^{-1}$이고 방사선관리구역의 경계(100 $\mu Sv \cdot h^{-1}$)에서 86.84 m 떨어진 지점에 프로브가 위치하여 계측하는 조건과 같다.

100 × 100 m^2 넓이의 지역에 개발한 9개의 프로브를 정사각형 형태로 배치하는 경우를 가정하면, 프로브 사이의 간격은 25 m가 된다. 또한, 200 × 200 m^2 넓이의 지역에 동일한 형태로 배치하면, 프로브 사이의 간격은 50 m이다. 만약 두 경우에서 프로브와 프로브 사이에 선원이 존재한다고 가정하면, 프로브와 선원 사이 거리는 각각 12.5 m와 25 m가 된다. 이 거리를 실험실에서 셋업하면, 각각 0.4 m와 0.8 m에서 선원을 측정할 때와 같은 선량 조건이다.

결 과

1. 하드웨어 시스템

플라스틱 섬광체와 CsI (Tl) 섬광체를 이용하여 제작한 프로브의 센서 모듈과 신호처리 모듈은 Fig. 7과 같다. 2장에서 기술한 PCB를 각각 수직으로 적층하여 측면으로 넓어지지 않도록 제작했다. 플라스틱 섬광체를 적용한 프로브에는 MCA 보드 대신 커넥터 역할을 하는 PCB 보드가 포함되었다.

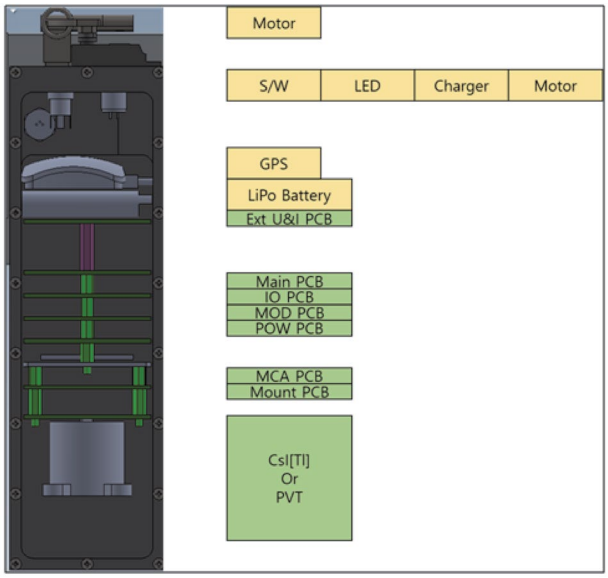

Fig. 8. Structural diagram of probe internal parts.

센서 모듈과 신호처리 모듈은 프로브 내부에서는 Fig. 8과 같이 조립된다. 섬광체 모듈 아래에는 충격 완충장치가 위치하여, 낙하산의 감속 효과와 함께 낙하로 인해 프로브가 받는 스트레스를 최소화한다. 신호처리 모듈 위쪽으로 배터리와 GPS가 탑재되며, 홀더 프레임과 결합하는 고리를 제어하는 모터와 충전 커넥터 그리고 상태표시 LED가 위치한다.

Fig. 9는 Fig. 8의 설계를 기반으로 Fig. 7을 하우징에 조립하여 완성한 프로브를 나타낸다. 제작이 완료된 프로브는 Fig. 9의 (c)와 같은 구조로 내부에 조립되며, Fig. 9(b)의 외형 케이스는 방수 처리가 되어 결합되는 형식이다. 또한, 섬광체와 센서 모듈이 하우징과 완전하게 밀착되어 빈 공간이 생기지 않도록 공간을 채워주었다. 이를 통해 전개 시 발생하는 충격을 흡수하고, 이동 및 전개 과정에서 센서 모듈부터

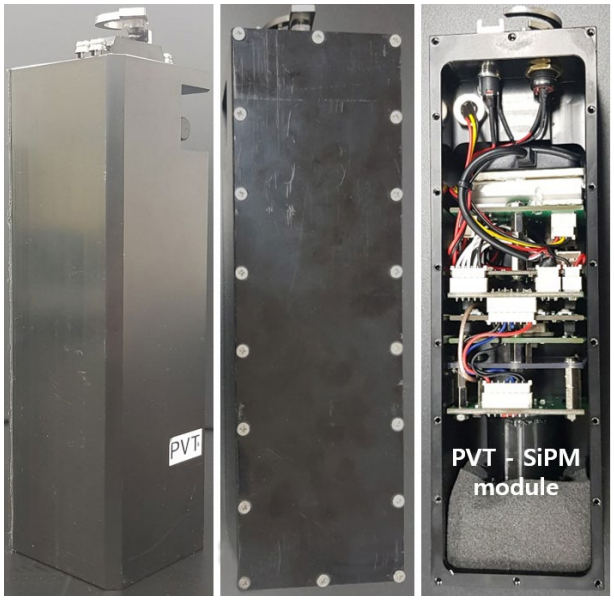

Fig. 9. (a) the rear side of the completely assembled probe; (b) the waterproof case (open); (c) the internal structure of the probe.

GPS 모듈까지 커넥터들의 결속을 보호하도록 제작하였다.

홀더 프레임과 결속 및 분리를 담당하는 회전 고리와 그 동작은 Fig. 10에 나타나 있으며, 홀더 프레임과 결속 상태는 Fig. 11에 나타나 있다. Fig. 10의 (a)와 Fig. 11의 (a)처럼 고리가 홀더 프레임의 경첩 부분에 걸린 상태로 결합된다. 낙하 명령과 동시에 반 시계 방향으로 고리가 돌면서, Fig. 10의 (b)위치로 회전하고, Fig. 11의 (b)처럼 경첩에 걸린 부분이 빠지면서 프로브가 분리된다. 낙하하는 동안 낙하산에 매달려 있으므로 Fig. 10의 (b)와 같은 위치에서 고정되어 지면에 도달할 때까지 낙하산과 결합되어 있다. 낙하 완료 후, Fig. 10의 (c)와 같이 낙하산의 분리를 위해 반 시계 방향으로 고리가 더 돌아간 후에 측정을 시작한다.

2. 프로브 성능평가

메인 프로브인 플라스틱 섬광체를 적용한 프로브의 측정 결과는 Fig. 12에 나타나 있다. Effective distance는 실험실 셋업을 실제 측정 환경으로 환산한 거리를 나타낸다. 본 결과는 계측값에서 백그라운드 값을 제거한 결과이며, 백그라

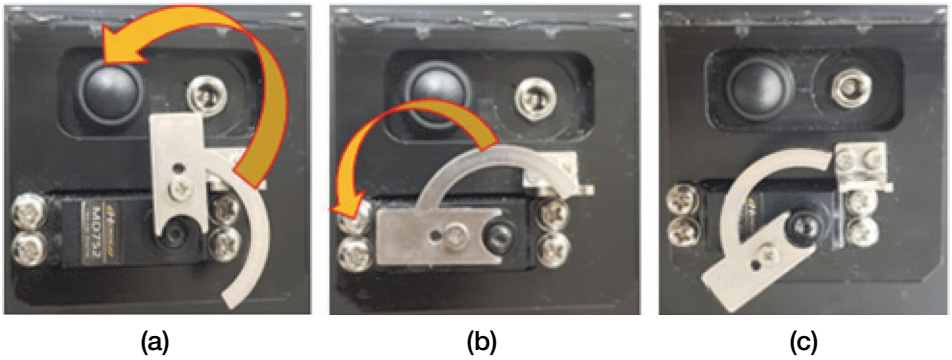

Fig. 10. (a) a hook position for engagement with the holder frame; (b) a hook position for disengaging from the holder frame in response to a drop command; (c) a hook position in the measurement state after detechment of the parachute.

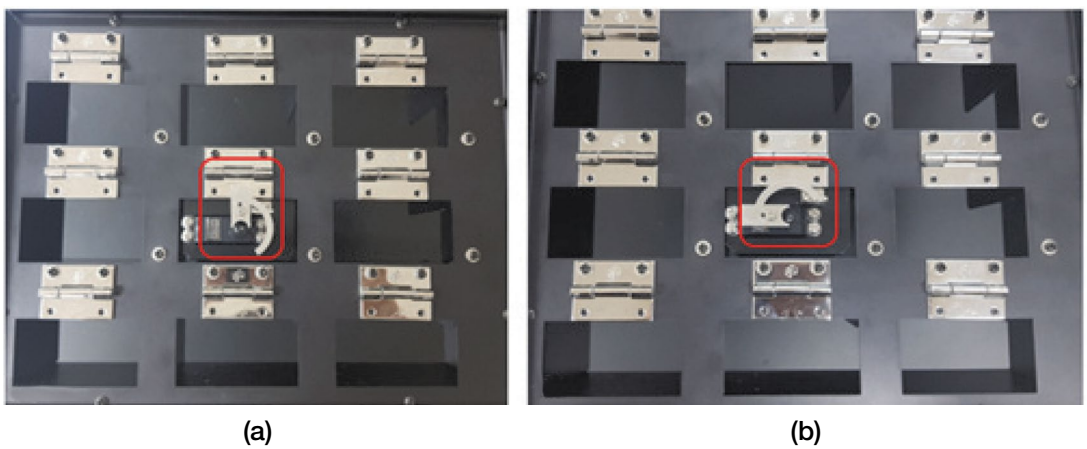

Fig. 11. (a) engaged with the holder frame; (b) separated from the holder frame.

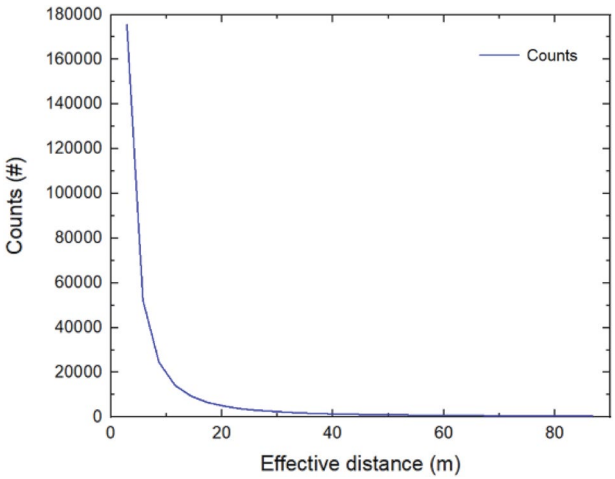

Fig. 12. Measurement result of the plastic scintillator (counting value according to distance).

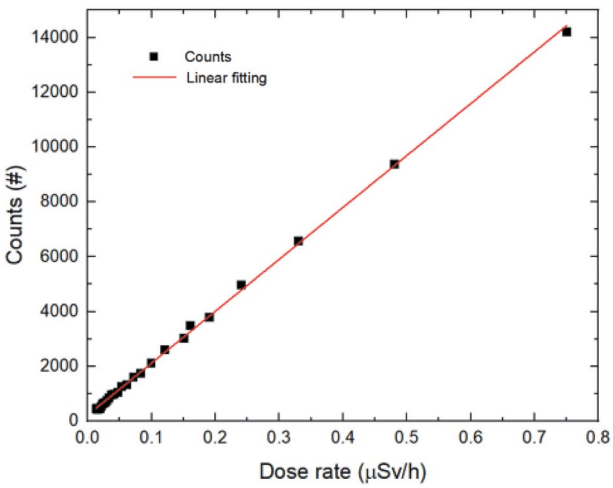

Fig. 13. Linearity of counting value according to dose rate.

운드 값은 1,251을 나타내었다. 또한, $100 \times 100\ m^2$ 지역에 전개된 프로브 중간에 선원이 위치하는 12.5 m 거리의 경우 선량률은 0.64 $\mu Sv \cdot h^{-1}$이며, 실험실 조건에서는 0.40 m이다. 이때, 백그라운드 값을 제거한 계수 값은 14,214를 나타내었다. 또한, $200 \times 200\ m^2$ 지역에 전개된 프로브 중간에 선원이 위치하는 25 m 거리의 경우 선량률은 0.16 $\mu Sv \cdot h^{-1}$이며, 실험실 조건에서 0.80 m정도이다. 이때, 백그라운드 값을 제거한 계수 값은 3,792를 나타내었다.

고 찰

실험에서 계측한 결과는 미신고지역의 위험 경계수준이 100 $\mu Sv \cdot h^{-1}$의 선량률을 갖는 지역에서 각각 12.5 m와 25 m 떨어진 지점에서 계측하는 프로브의 성능을 나타낸다. 25 m의 먼 거리의 경우에도 배경 방사선 대비 3배의 측정치를 보여주기 때문에 실제 지역 방사선량을 측정하는 데 있어서 충분한 감도를 갖고 있는 것으로 판단할 수 있다.

프로브를 통해 측정되는 방사선량 정보의 선형성을 판단하기 위해 선원과 프로브의 거리를 변화시키며 측정하였다. Fig. 13의 결과는 선원의 세기에 따른 계수 값의 변화 추이를 나타낸다. 매우 낮은 선량률(0.01 $\mu Sv \cdot h^{-1}$)로부터 실제 사찰조건 기준 12.5 m의 선량률(0.75 $\mu Sv \cdot h^{-1}$)까지 측정값의 선형성이 충분히 확보됨을 그래프로 확인할 수 있다. 결과적으로 실제 측정환경에서 12.5 m 이상의 거리에 위치하는 사찰을 위한 넓은 시료 채취대상 지역의 환경 방사능을 평가하기에 적절한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 플라스틱 섬광체를 이용해서 감마선을 계수 방식으로 계측하였다. 따라서 플라스틱 섬광체를 감마 계측에 적용하는 경우 시스템의 효율을 구하기 위해 다음 수식을 이용하였다(Knoll 2010; 김과 주 2014).

$$\Phi = \frac{\alpha \times 3.7 \times 10^{10} \times y}{4 \times \pi \times r^2}$$

$$PDE = \frac{D}{N} \times 100$$

PDE를 구하는 수식에서 D는 검출된 광자의 수이고, N은 섬광체에 입사하는 광자의 수이다. N을 구하기 위해서 섬광체 표면에 도달하는 fluence rate를 계산하였다. α는 실험에서 사용한 체크선원의 세기이고, y는 ^{137}Cs의 붕괴당 광효율을 나타낸다. α는 Ci 단위이므로 3.7×10^{10} Bq을 곱하여 계수 값으로 단위를 변환하였다. ^{137}Cs의 경우 95% 확률로 ^{137m}Ba로 붕괴하고, ^{137m}Ba는 0.662 MeV의 감마선을 방출한다. 따라서 최종적으로 ^{137}Cs의 감마선 방출 효율 y는 85.1%이다(Delacroix *et al*. 2002). 그리고 r은 체크선원과 섬광체 표면 사이의 거리이다. 공기 중에 흡수 혹은 산란은 영향이 매우 적으므로, 고려하지 않고 계산하였다. 이를 통해 각 거리에서 검출기 표면에 도달하는 광자의 수를 구하여, 본 프로브의 감마선 검출 효율을 계산하였다. 본 연구의 측정조건에서 최대 선량률은 11.93 $\mu Sv \cdot h^{-1}$이었다. 이때, 감마선 검출 효율은 최대인 61.24%를 나타내었다. 배경 방사선 대비 2배의 계수 값을 나타내는 0.15 $\mu Sv \cdot h^{-1}$ 선량률 조건에서 13.37%의 검출 효율을 나타내었다.

결 론

핵사찰 프로세스에서 미신고지역의 시료 채취는 핵물질의 은폐 정보를 획득할 수 있는 필수적인 업무이다. 그런데 미신고지역은 일반적으로 환경 방사능 정보가 없으므로 작업자의 안전을 보장할 수 없다. 따라서 시료 채취 업무 수행을 위한

작업자 투입 전, 환경 방사선 계측을 통해 채취 지역의 방사능 정보 확보가 필수적이다. 또한, 지역 내 은폐되어 있는 핵물질의 위치를 모른 채로 지역을 탐지 및 채취하는 것은 효율성이 떨어지므로 지역 내 핵물질 위치 탐지 또한 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 미신고지역의 방사능 정보 및 핵물질 위치정보 획득을 위한 전개형 프로브를 개발하였다.

제작된 프로브는 드론으로 공중수송되기 때문에 낙하에서 발생하는 물리적 스트레스를 최소화하기 위한 낙하산과 내·외부 충격 흡수 설계를 적용하였다. 대형 드론의 적재중량인 8 kg 미만의 중량을 맞추기 위해 각 프로브의 무게는 720 g을 넘지 않도록 제작하였다. 프로브의 무게를 최소화하면서 GDE를 극대화하기 위해 플라스틱 섬광체를 적용하였으며, 카운트방식을 적용하여 스펙트럼을 얻는 시스템 대비 전력 소모를 크게 낮추어 배터리 효율을 높일 수 있었다.

성능을 보면, 25 m의 거리에서도 배경방사선 대비 3배 정도의 높은 감도를 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, 선량률의 증가에 따라 계수 값의 선형적인 증가가 관찰되었다. 따라서 계수 값을 이용하여 시간당 선량의 유추가 가능한 것을 확인할 수 있다. 다만, 스펙트럼 확인이 아니라 계수를 하는 방법이므로 선원에 대한 정보를 얻는 것은 불가능하기 때문에 장비의 운영에 있어서, 플라스틱 섬광체가 적용된 프로브를 일차적으로 활용하여 넓은 지역에서의 정보를 취득하고, 측정 중 선원의 종류를 파악해야 할 필요성이 있는 경우에만 추가적으로 CsI (Tl) 섬광체 프로브가 투입되어 더 정확한 정보를 얻는 형태로 전체 시스템을 운영한다.

본 연구에서 개발한 측정 시스템 및 관제 시스템은 방사선량 계측 외에도 다양한 분야에서 그 활용 가치를 충분히 나타낼 것으로 사료된다. 특히, 군사작전을 위한 인력 투입 전 지역의 정보를 얻거나 작전이 이루어지는 동안, 지속적인 주변 관찰 등에 사용되며 국방 분야에 적용이 가능할 것으로 사료된다. 또한, 사고나 테러로 인해 방사성 물질로 지역이 오염되는 경우에 작업 인력을 투입하기 전에 빠르게 프로브를 전개하고 지역 방사능 정보를 입수하여 초기 대응을 통한 골든타임 확보에 활용 가치가 매우 높을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1905010).

참 고 문 헌

김정호, 주관식. 2014. 플라스틱 섬광체를 이용한 방사선 검출기의 검출 효율을 높이기 위한 섬광체 연마 기술 연구. 전기전자학회논문지. **18**(4):456-462.

박혜민, 김정호, 김동성, 주관식. 2015. 감마선 분광분석을 위한 실리콘 광 증배소자 기반 Ce: GAGG 섬광검출기의 분광특성 연구. 방사선방어학회지. **40**(2):73.

소동섭, 곽은호, 신장수, 백대현. 1996. 프로그램 93+ 2 IAEA 보장조치 강화방안과 그 대책. 1996 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회. 463-468

신상훈, 유욱재, 장경원, 조승현, 이봉수. 2015. 감마선 분포 측정을 위한 섬광필름 기반의 감마 영상 검출기 제작 및 성능평가. 센서학회지. **24**(3):202-207.

Blix H. 1992. Verification of nuclear non-proliferation: Securing the future. *IAEA Bulletin* **34**(1):2-5.

Carlson J. 2019. Verification of DPRK Nuclear Disarmament: The Pros and Cons of Non-Nuclear-Weapon States (specifically, the ROK) Participating in This Verification Program. *J-PAND* **2**(2):535-554.

Delacroix D, Guerre JP, Leblanc P and Hickman C. 2002. Radionuclide and radiation protection data handbook 2002. *Radiation Protection Dosimetry* **98**(1):1-168.

Knoll GF. 2010. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons.

Lee DJ and Song CG. 2020. A Study on Improvement of Damage Impact Range Assessment for Field-Based Response Against Chemical Terrorism and Accidents. *JCIT* **10**(8):127-136.

Miller KA. 2013. Verification Technologies for the International Nuclear Nonproliferation Regime (No. LA-UR-13-22697). Los Alamos National Lab. (LANL), Los Alamos, NM (United States), Presentation for LANL's Science of Signatures Advanced Studies Program.

Oldham M, Clift C, Thomas A, Farfan E, Foley T, Jannik T, ... and Stanley S. 2010. Initial experience with optical-CT scanning of RadBall Dosimeters. *JPCS* **250**(1):012079. IOP Publishing.

Park H and Joo K. 2015. Development of a Wireless Gamma-ray probe for Diagnosing and Evaluation of its Effectiveness. *Journal of IEIE* **52**(2):173-181.

Rose M, McCabe B and Kochersberger K. 2011. Development of a helicopter deployable robotic system for survey and ground sampling. In Infotech@ Aerospace 2011 (p. 1557).

Vax E, Sarusi B, Sheinfeld M, Levinson S, Brandys I, Sattinger D, ... and Tirosh D. 2008. ERMS-Environmental Radiation Monitoring System.

Yamamoto S and Ogata Y. 2014. A compact and high efficiency GAGG well counter for radiocesium concentration measurements. *Nucl. Instrum. Methods A* **753**:19-23.

Received: 29 September 2021
Revised: 23 December 2021
Revision accepted: 23 December 2021