

무인기를 이용한 광역부지 환경방사선측정 기술 현황 및 현장 적용 연구⁺

(Technical Status of Environmental Radiation Monitoring using a UAV and Its Field Application to the Aerial Survey)

지 영 용^{1)*}, 민 병 일²⁾, 서 경 석²⁾, 정 성 엽²⁾, 김 경 표³⁾, 박 진 호⁴⁾

(Young-Yong Ji, Byung Il Min, Kyung-Suk Suh, Sungyeop Joung, Kyoung-Pyo Kim, and Jin-Ho Park)

요 약 후쿠시마 원전사고의 교훈으로 사고단계별 다양한 방사선 탐사 수단을 이용하여 포괄적인 환경방사선을 측정하는 것이 효율적인 사고대응과 위험관리를 위하여 바람직하다. 본 연구에서는 드론 등의 무인기를 이용한 환경방사선 탐사 기술 현황으로 분광분석이 가능한 고분해능의 방사선 검출기 2대를 활용한 환경방사선 탐사시스템을 개발하고, 이를 무인기에 장착하여 직접 사고현장에 적용함으로써 그 성능을 평가하였다. 최종적으로 다양한 비행고도에서의 탐사결과를 지상 1m 높이에서의 선량률로 환산하기 위한 보정인자를 도출함으로써 성공적인 현장 적용성 평가 결과를 도출할 수 있었다.

핵심주제어: 무인기, 드론, 환경방사선측정, 방사선검출기, 항공탐사

Abstract According to lessons learned from an accident of Fukushima Daiichi nuclear power plant, it is advisable to make a comprehensive radiation survey by the accident phase for efficient response and risk management using diverse survey platforms. This study focuses on the technical status of environmental radiation monitoring using a UAV (Unmanned aerial vehicle) and the performance test of developed aerial survey system based on two detectors with an high energy resolution through the field application to contaminated areas. Finally, the performance of aerial survey at diverse flight heights was successfully achieved by introducing the correction factor to represent the results into ambient dose rate at 1m above the ground.

Keywords: UAV, Drone, Environmental radiation measurement, Radiation detector, Airborne survey

* Corresponding Author: yyji@kaeri.re.kr

+ 이 논문은 2020년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을(NRF-2020M2A8A4025462) 받아 수행된 연구임.
Manuscript received September 14, 2020 / accepted September 26, 2020

1) 한국원자력연구원 환경안전평가연구부, 제1저자, 교신저자
2) 한국원자력연구원 환경안전평가연구부, 공동저자
3) 한국원자력연구원 국제전략부, 공동저자
4) 한국원자력연구원 원자력안전연구소, 공동저자

1. 서 론

후쿠시마 원전사고의 교훈으로 방사능재난 발생시 효율적인 상황관리를 위하여 환경방사선측정과 같은 현장 대응의 중요성이 커지고 있다. 일반적으로 효율적인 대응을 위해서는 사고단계별로 적용 가능한 다양한 탐사플랫폼을 이용하여

포괄적인 환경방사선조사를 수행하는 것이 바람직하다. 특히, 비상시 환경방사선 탐사는 사고 및 확산 예상지역으로의 신속한 공간분석이 수반되어야 하며, 선량률 중심의 정보획득에서 핵종 및 방사능 농도 변화에 기반한 탐사기술의 필요성이 제기되고 있다 (Ji et al., 2018).

현재 드론 등의 무인기 산업은 국내외적으로 급성장하고 있으며, 정부의 육성정책과 함께 많은 분야에서 활용성이 높아지고 있다. 원자력산업 분야에서도 급격히 발전하고 있는 정보통신기술과 융합하여 무인기를 활용한 방사선측정기술 등의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 사고시 사람이 접근하기 곤란하거나 광역 오염부지에 대한 신속한 방사능 평가가 필요한 경우를 대비하여 무인기를 활용한 공중방사선탐사 (Aerial radiological survey)의 수요가 날로 증가하고 있는 실정이다. 통상적으로 무인기를 이용한 방사선 측정은 사고 초기 신속한 대응을 위하여 공기중 방사성핵종과 농도를 평가하고 광역 오염지역에 대한 방사능오염 지도를 작성함으로써 적절한 방재대책을 수립할 수 있도록 의사결정을 지원하는 데 일차적인 목적이 있다 (Sanada et al, 2016; Ochi et al., 2017; Azami et al., 2018; Kim et al., 2019).

본 연구에서는 무인기를 활용한 광역부지 환경방사선 측정기술을 확보하기 위하여 소형 분광분석 (Spectrometry) 기반의 방사선계측시스템을 개발하고, 이를 드론 등 무인기에 장착 가능하도록 구조화함으로써 공중방사선 탐사 시스템을 구축하였다. 여기에 GPS (Global positioning system) 및 레이저 고도계를 이용하여 측정 위치정보를 동기화하였으며, 또한 무인기를 활용한 항공탐사에서 지상과의 원활한 데이터통신을 위하여 블루투스 (Bluetooth) 기반의 인터페이스를 적용하였다. 최종적으로 개발된 항공탐사시스템을 상용 드론 (Matrice 600)에 장착하여 국내 특정 부지에서의 공간감마선량률 (Ambient dose rate) 평가를 수행하였다. 그리고 실제 사고현장과 같은 고 방사성오염 지역에서의 적용성 평가를 위하여 일본 JAEA (Japan Atomic Energy Agency)의 무인헬기 (Yamaha RMAX)를 이용하여 후쿠시마원전 주변에서의 항공탐사 실험을 수행하였다.

2. 시스템 구성 및 실험

2.1 다목적 환경방사선탐사시스템

현재 국내외적으로 활용되고 있는 이동식 환경방사선 탐사시스템은 백팩형, 차량 거치형, 무인기 장착형 등 다양한 형태로 제작되고 있다. 방사선검출기 또한 간단한 기체충전형 GM (Geiger muler) 계수관에서부터 분광분석으로 핵종판별이 가능한 고분해능의 LaBr₃(Ce) 섬광검출기까지 종류가 다양하다. 이때, 방사선계측기의 종류 및 탐사수단 등에 따른 측정결과들의 일관성을 유지하는 것이 반드시 필요하며, 이를 위해서는 종류별로 탐사절차 및 결과보정 방안 등이 수립되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 결과보정의 단순화를 위하여 Fig 1과 같이 하나의 방사선검출부를 구성하여 구조변경 없이 백팩, 차량 및 무인기 등에 활용할 수 있는 다목적 환경방사선 탐사시스템 (Multipurpose system for environmental radiation survey: MSERS)을 제작하였다 (Ji et al., 2019).



Fig. 1 Application of Multipurpose System for Environmental Radiation Survey

본 시스템에는 현장 방사선측정에서 충분한 계수효율을 얻기 위해, 직경 2인치 크기의 고분해능 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 섬광검출기 2개를 구성하였다. 그리고 검출기 신호처리를 위한 다중채널분석기 (Multichannel analyzer: MCA) 2개를 각각 연결하였으며, 방사선에너지 3MeV 까지 측정이 가능하도록 증폭기 이득 (Gain)을 조절하였다. 검출부의 인가전압은 일반 소형 배터리를 이용하여 운영이 가능하도록 구성하였다. 최종적으로 다목적 환경방사선탐사시스템은 상용 드론 등 무인기 장착 및 운영이 가능하도록 구성되기 때문에 경량화하는 것이 필요하며, 일반 산업용 드론에 적재할 수 있는 6kg 이하의 무게를 유지하였다.

2.2 항공탐사용 시스템 최적화

일반적으로 무인기를 이용한 이동측정에서는 위치기반 정보수집이 필요하며, 특히 항공탐사에서는 GPS 뿐만 아니라 지표면으로부터의 비행높이를 측정할 수 있는 고도계가 동반되어야 한다. 일반적으로 GPS로 부터 얻을 수 있는 고도정보는 해발고도이기 때문에, 본 연구에서는 지표면으로 부터의 비행고도 정보를 얻기 위한 레이저 고도계를 장착하였다. 사고대응 관점에서 볼 때, 비행고도에서의 선량률보다 지상 1m 높이에서의 방사선량률과 같은 현장 정보수집이 필요하므로 레이저 고도계의 역할은 무인기의 탐사고도를 측정함으로써 해당 고도에서의 측정결과를 지상 1m 높이에서의 결과로 환산하는데 활용된다.

또한 무인기를 이용한 항공탐사에서 측정결과들은 지상에서 제어하는 PC에 실시간 수집되어야 하고 무인기에 장착된 방사선측정시스템의 제어도 가능해야 한다. 이를 위해 본 시스템에서는 블루투스 통신을 이용한 제어방식을 사용하였다. 그러나 상용 블루투스 장치만을 사용할 경우, 대부분 모노폴 (Monopole) 안테나로써 지상으로부터 멀리 떨어진 무인기까지의 신호가 약해 데이터 손실이 크게 발생하는 단점이 있다. 일반적으로 블루투스 장치의 통신거리는 약 1km 내외로 알려져 있지만, 실제 무인기 등에

연결하여 사용할 경우, 구조물에 의한 간섭과 블루투스 안테나의 방향성 문제 등으로 인하여 접속이 끊기는 경우가 발생하였다.

모노폴 안테나의 길이를 증가시켜도 지상 PC까지의 신호 손실은 대단히 많았으며, 이는 해당 안테나의 길이가 증가하면 그 길이의 수직방향으로의 신호는 강해지나 상대적으로 안테나 길이방향으로의 세기는 약해지는 특징 때문으로 판단된다. 이를 위해, 본 다목적 환경방사선 탐사시스템에서는 지상 PC에 패치 (Patch) 안테나와 신호증폭기 (Signal booster)를 연결하여 무인기를 이용한 항공탐사시 지상에서의 데이터 손실을 최소화하였다. 이상과 같은 무인기활용 항공 탐사시스템의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of Aerial Survey System Based on a UAV

Item	Specifications
Radiation	2“ ϕ x2” $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ detector, 2EA MCA, 1024ch, 30~3,000keV
Position	GPS (Latitude, longitude) Laser altimeter (flight height)
Remote control	Bluetooth (1km range) Patch antenna, signal booster
Others	Internal battery Total weight: below 6kg

2.3 항공탐사결과 해석기술

무인기를 활용하여 광역부지에 대한 환경방사선탐사를 수행함으로써 지표면에서의 방사선량률 정보를 얻을 수 있다. 또한 무인기의 이동경로에 따른 위치기반 정보를 획득함으로써 오염지도와 같은 측정결과와 공간적인 시각화가 가능하다 (IAEA 1991; IAEA 2003; Kim et al., 2019). 이를 위해서는 분광분석형 검출기로부터 측정된 계수율로부터 선량률을 환산하기 위한 알고리즘이 필요하며, 이를 선량환산인자 (Dose conversion factor)라고 표현한다.

본 연구에서는 다목적 환경방사선탐사시스템에 대하여 몬테칼로 (Monte Carlo) 계산기반의 선량 환산인자 (Ji et al., 2014; Tsuda et al.,

2017)를 Fig. 2와 같이 유도하였다. 이때, 여러 에너지의 방사선을 검출기 축에 대하여 수직방향으로 입사시켜 두 LaBr₃(Ce) 검출기에 대한 반응함수를 도출함으로써 방사선에너지별 선량을 환산인자 값을 유도하였다. 이 환산인자의 단위는 nGy/h/cps로 실제 무인기를 활용한 항공탐사에서 측정된 계수율 (Cps)에 적용함으로써 식 (1)과 같이 방사선량률 (nGy/h) 정보를 얻을 수 있게 된다.

$$\dot{X} = \int n(E)G(E)dE \quad (1)$$

여기서, \dot{X} 는 공간감마선량률, E 는 방사선에너지, 그리고 $n(E)$ 및 $G(E)$ 는 방사선에너지별 계수율 및 선량률 환산인자를 각각 의미한다.

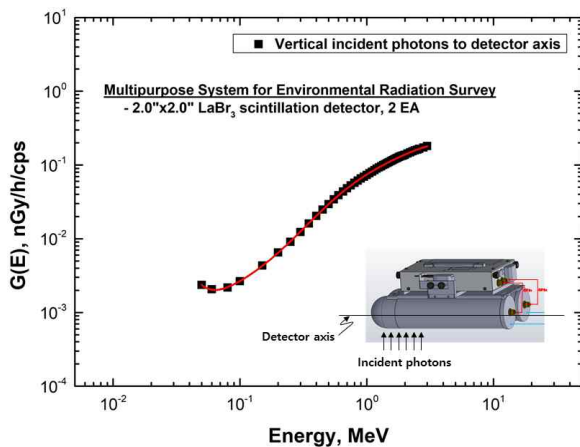


Fig. 2 Dose Conversion Factor of a MSERS

무인기 비행고도에서의 방사선량률 값은 방사선방호 관점에서 지상 1m 높이에서의 결과로 보정되어야 한다. 즉, 지표면으로부터 비행고도까지 방사선 감쇄 (Attenuation)에 대한 보정이 필요하다. 이를 위해서는 Fig. 3과 같이 일정한 평지 상공에서 고도별 정지비행 (Hovering)을 수행하여 방사선 에너지스펙트럼을 측정하고, 이로부터 고도별 방사선량률을 계산한다. 이렇게 도출된 선량률 값들을 도식화하여 고도에 대한 지수적 감쇄 형태로 회귀분석 (Regression analysis) 함으로써 고도 보정인자를 도출하게 된다.

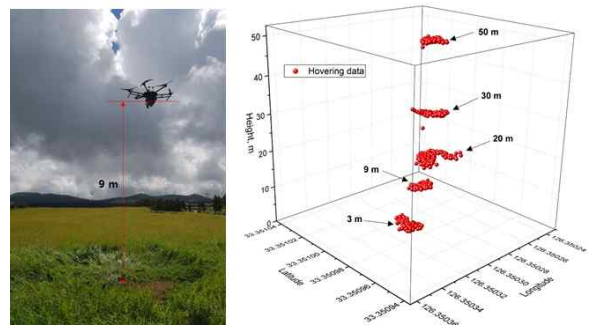


Fig. 3 Hovering at 3, 9, 20, 30, and 50m Heights above the Flat Land

3. 실험결과

3.1 국내 항공탐사 성능실험

개발된 다목적 환경방사선탐사시스템의 성능 평가를 위하여 드론을 활용한 항공탐사를 수행하고, 이로부터 선량률 평가의 적절성을 확인해 보았다. 먼저, 제주지역의 넓은 녹지에서 항공탐사를 수행하였으며, 이 지역을 선정한 이유는 공간감마선량률이 타 지역에 비해 비교적 낮고 ¹³⁷Cs이 낮은 농도지만 지표면에 분포하고 있기 때문이다. 본 실험을 위해서 적재중량이 10 kg 정도인 산업용 드론 (Matrics 600)에 다목적 환경방사선탐사시스템을 장착하였으며, 안전한 비행시간 확보를 위해 약 15분 비행후 지상에서 배터리를 교환하여 재 비행하는 방법을 활용하였다.

먼저 정지비행을 통하여 고도별 선량률을 측정하고 이로부터 항공탐사결과를 지상 1m 높이에서의 값으로 환산하기 위한 고도보정인자를 도출하였다. Fig. 4와 같이, 고도별로 측정된 선량률 값을 도식화하여 고도에 따른 지수함수로 회귀분석함으로써 지상 1m 높이에서의 상대적 선량률 값을 얻을 수 있었다. 즉, 지표면으로부터의 고도가 20m일 때, 해당 고도에서의 선량률 값은 1m 높이에 대하여 약 0.891 수준이었으며, 이 값이 해당 비행고도에서의 보정인자에 해당한다.

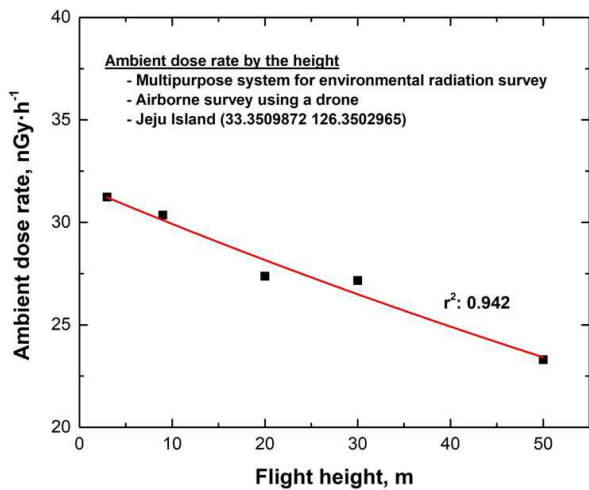


Fig. 4 Measured Dose Rates by Flight Height using a Drone

고도 보정인자를 도출한 이후, 정지비행 지점 근처 약 200x150m²의 탐사영역을 지정하여 비행고도 20m를 유지하면서 10km/h의 속도로 항공탐사를 수행하였다. 이때, 사전에 비행궤도를 설정하였으며, 7개의 비행경로를 이동하면서 2초 간격으로 방사선 에너지 스펙트럼을 측정하여 기록하였다. 그 결과를 Fig. 5(a)에 나타내었으며, 최종 지상 1m 높이로 환산했을 때의 선량률은 약 27.9±9.7nGy/h로 평가되었다. Fig. 5(b)는 측정결과에 대한 빈도그래프로서 왼쪽의 y축은 상대빈도 (Relative Frequency: RF) 그리고 오른쪽의 y축은 누적상대빈도 (Cumulative RF: CRF)를 각각 의미한다. 빈도그래프에서 보듯이, 항공탐사를 통한 측정결과는 평균값을 중심으로 정규분포에 가까운 형태를 보임을 알 수 있다.

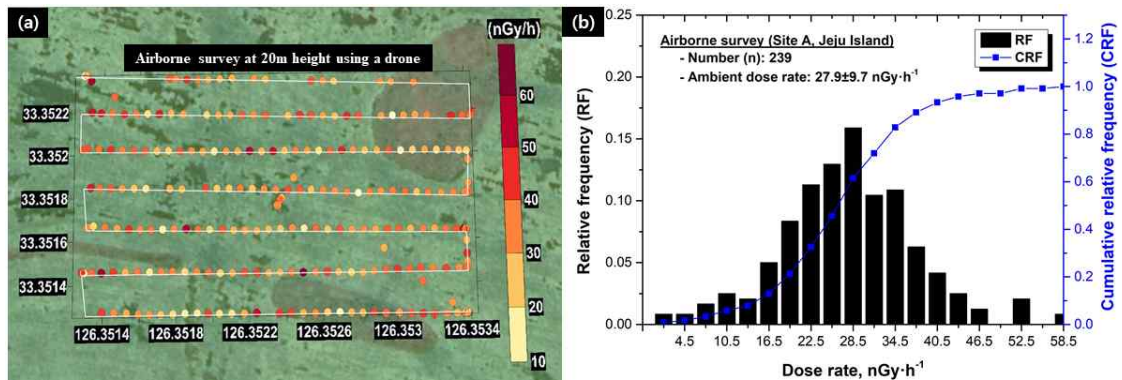


Fig. 5 Airborne Survey Result at 20m Height using a UAV in Site A of Jeju Island; Dose Rate according to the Flight Lines (a) and Frequency Histogram (b)

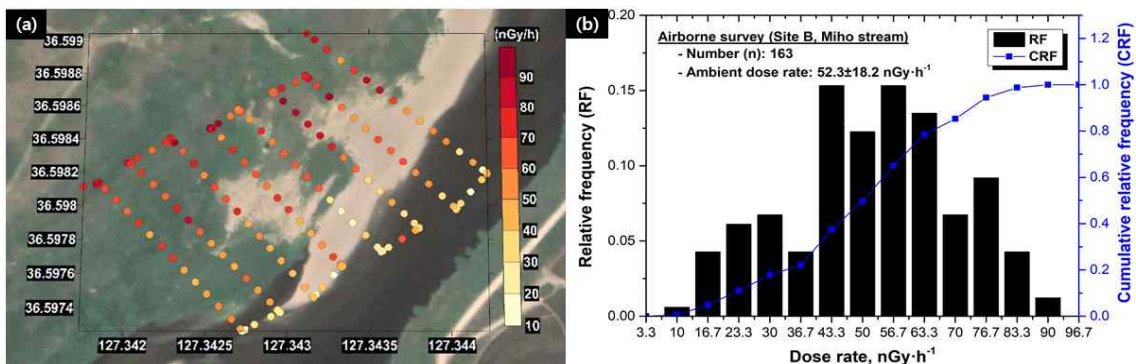


Fig. 6 Airborne Survey Result at 20m Height using a UAV in Site B of Miho Stream; Dose Rate according to the Flight Lines (a) and Frequency Histogram (b)

이번에는 평지가 아닌 하천주변 언덕과 모래 퇴적층이 혼재하는 지역에서 항공탐사를 수행하였다. 청주 미호천 부근 임의의 지역을 선정하였으며, 항공탐사를 통한 탐사지역 내의 하천 및 모래 퇴적층 등 물질 조성별로 선량률 평가 결과가 달라지는지를 검토하였다. 통상적으로 천연방사성핵종들은 지각을 구성하는 토양층에 널리 분포되어 있으며, 하천 바닥을 구성하는 퇴적층에서도 다양한 천연방사성핵종들이 분포한다. 그러나 하천의 수심이 차폐역할을 하기 때문에 선량률은 토양층 위에서 높고 하천에서는 낮아진다.

Fig. 6(a)에 약 100x150m²의 탐사영역을 8개의 비행경로를 이동하면서 측정된 결과를 나타내었다. 제주지역에서의 항공탐사와 동일한 드론을 사용하였으며, 비행고도 20m에서 10km/h의 속도로 항공탐사를 수행하였다. 그러나 실제 레이저 고도계로 기록된 비행고도는 탐사영역 내 여러 지형이 존재하기 때문에 평균적으로 23.3±1.6m의 높이를 보였다. 따라서 다양한 비행고도에서 측정된 공간감마선량률 값들에 고도 보정인자를 적용하여 최종적으로 지상 1m 높이에서의 선량률로 환산하였으며, 그 결과 약 52.3±18.2nGy/h로 평가되었다. 그러나 Fig. 6(b)의 빈도그래프에서 보듯이, 측정된 선량률분포가 정규분포 형태를 보이고는 있으나, 최대 빈도가 평균값을 중심으로 좌우에 존재하였으며, 이는 해당 탐사지역 내 토양, 퇴적층 및 하천 등 다양한 물질 구성으로 선량률 분포가 일정하지 않고 다양한 분포를 보이는 것을 의미한다.

3.2 후쿠시마 원전주변 항공탐사

방사선 사고대응 환경방사선탐사의 기술적 목표는 사고단계별로 다양한 시공간에서 환경방사선을 측정하고 이로부터 사고현장에서의 선량률 및 방사능 등을 평가하는 것이다. 이를 위해서는 측정관련 요소기술 개발뿐만 아니라 이를 활용한 환경방사선탐사시스템 및 분석기술 등을 현장에 직접 적용함으로써 그 성능을 파악하고 보완하기 위한 오염지역 현장 실측이 무엇보다 중요하다. 2018년 국내 환경방사선탐사관련 연

구개발 기술의 사고현장 적용성 평가를 통한 기술검증과 방사선사고 오염지역에서의 현장대응 능력 고취 및 기술향상을 목적으로 한국원자력연구원 (Korea Atomic Energy Research Institute: KAERI)과 일본 JAEA간 방사선방호 및 환경감시기술 분야에서 협력을 위한 실행약정 (Implementing arrangement)을 체결하였다. 이를 근거로 2019년 10월 일본 JAEA와의 공동 실험을 통하여 후쿠시마 원전 주변 고 방사선량률 부지에서의 무인기를 이용한 항공탐사를 수행하였다.

이번에 선정된 항공탐사부지는 후쿠시마원전 주변 오염지도에서 보듯이 (Fig. 7), 고 오염지역인 Site G에서 수행되었다. 해당 지역은 후쿠시마원전으로부터 서쪽으로 약 4km 부근에 위치하고 있으며, 현재 귀한제한구역 (Difficult-To-Return)으로 지정되어 사람의 출입이 엄격히 관리되고 있다. 2018년 11월 일본 JAEA에서 해당지역의 공간감마선량률을 측정 한 바에 따르면, 약 5,000에서 10,000nGy/h의 수준을 보이고 있다.

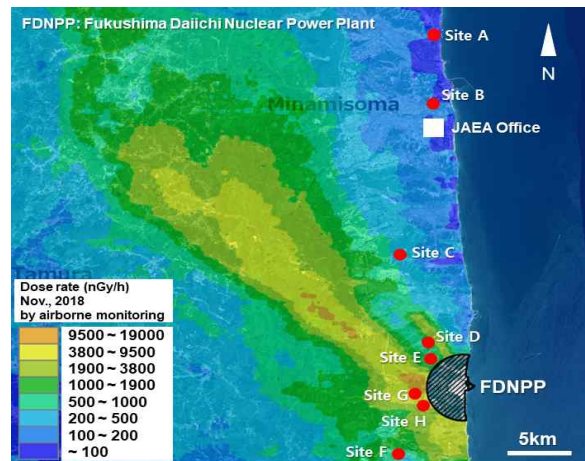


Fig. 7 Site G for Airborne Survey around the FDNPP

후쿠시마원전 주변에서의 항공탐사를 위해 JAEA 측에서 제공한 무인헬기 (R-MAX YAMAHA)에 다목적 환경방사선탐사시스템을 Fig. 8과 같이 장착하였다. 해당 무인헬기는 약 30kg의 적재중량을 가지며, 한 번의 연료 주입

으로 약 1시간 동안 비행이 가능하다. 무인기를 이용한 특정 광역부지의 항공탐사를 위해서는 비행고도 설정이 중요하다. 본 부지는 고 농도의 방사성오염으로 인해 충분한 높이에서도 탐사가 가능하기 때문에 일본 자국 내에서의 허가 등을 고려하여 기존 JAEA에서 수행하고 있는 40m의 고도조건을 유지하였다.



Fig. 8 Unmanned Helicopter with a MSERS

항공탐사를 수행하기에 앞서 Site G 내의 평탄한 지점 상공에서 고도 보정인자 도출을 위하여 고도별 정지비행을 수행하였다. 다양한 고도 (1, 5, 10, 20, 30, 40, 50 및 80m)에서 5분 간격으로 방사선 에너지스펙트럼을 측정하여 이로부터 고도별 공간감마선량률을 획득하였다. 이를 Fig. 9와 같이 도식화하여 지수함수로 회귀분석함으로써 지상 1m 높이에 대한 선량률의 고도 보정인자를 도출하였다. 그 결과 비행고도가 40m일 때, 지상 1m 높이에서의 선량률에 대한 비율은 약 0.51 정도가 된다.

본 연구에서는 사고시 신속 대응을 위하여 다양한 비행속도에 따른 오염지역에서의 선량률 평가결과가 어떠한 영향이 있는지를 판단하고자 하였다. 이를 위해 사전에 설정된 비행경로를 2, 3, 및 5m/s의 속도로 비행하면서 측정된 결과를 비교하였다. Fig. 10에 비행속도에 따른 항공탐사 결과를 나타내었으며, 경로상에서 측정된 공간감마선량률은 지상 1m 높이로 환산된 결과이다. 그림에서 보듯이, Site G에서의 공간감마선량률은 약 6,000에서 8,500nGy/h 범위로 평가되었으며, 이는 앞서 2018년 11월 JAEA측에서 평가한 결과와 유사한 수준이다. 주요오염원이 방사성세슘 (Cs-137)으로 반감기가 30년 정도이므로

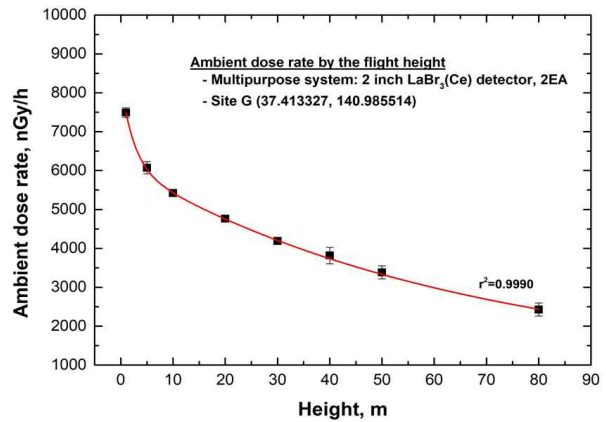


Fig. 9 Measured Dose Rates by Flight Height in Site G using a Unmanned Helicopter

선량률의 변화는 거의 없는 것으로 판단할 수 있었다. 그리고 비행속도별 변화 역시 없는 것으로 동일한 평가를 얻을 수 있었다.

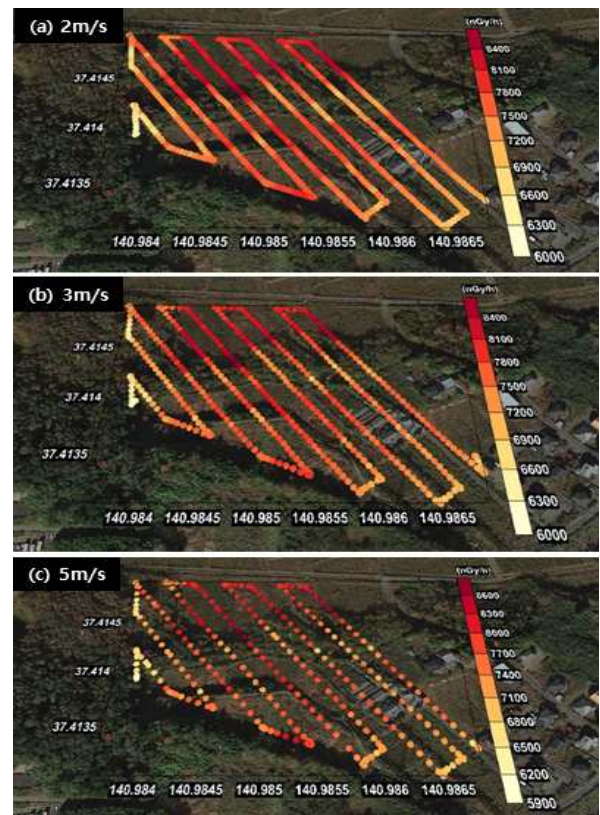


Fig. 10 Airborne Survey Results in Site G: Flight Speed of 2 (a), 3 (b), and 5m/s (c)

4. 결 론

본 연구에서는 고분해능 LaBr₃(Ce) 섬광검출기 2개를 활용한 분광분석 기반의 다목적 환경방사선탐사시스템을 제작하였으며, 이를 드론 등 무인기에 장착함으로써 항공탐사를 수행하기 위한 시스템을 구축하였다. 해당 다목적 탐사장비는 무인헬기에서부터 산업용 드론 등 다양한 탐사 수단에 대한 활용성을 높이고자 무게를 6kg 이하로 제작하여 무인기 장착시 적재중량의 여유도를 확보하였다. GPS 및 레이저 고도계 등을 장착하여 항공탐사에서 위치정보가 동기화된 방사선량률을 측정할 수 있도록 하였다. 그리고 지상과의 원활한 통신을 위하여 블루투스 및 안테나의 성능을 보완함으로써 약 1km까지 안정적인 데이터 송수신이 가능하도록 설계하였다. 최종적으로 다목적 환경방사선탐사시스템을 무인기에 장착하여 국내 저선량지역 및 일본 후쿠시마 원전 부지 주변의 고선량지역까지 항공탐사를 수행함으로써 현장 적용성 평가를 완료하였다.

References

Azami, K., Ootagaki, T., Ishida, M., and Sanada, Y. (2018). Characteristics of Radiocesium Contamination of Dry Riverbeds Due to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident Assessed by Airborne Radiation Monitoring, *Landscape and Ecological Engineering*, 14, 3-15.

IAEA (1991). *Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying*, IAEA Technical Reports Series, No. 323.

IAEA (2003). *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data*, IAEA-TECDOC-1363.

Ji, Y.-Y., Chung, K. H., Lee, W., Park, D. W., and Kang, M. J. (2014). Feasibility on the Spectrometric Determination of the Individual Dose Rate for Detected Gamma

Nuclides using the Dose Rate Spectroscopy, *Radiation Physics and Chemistry*, 97, 172-177.

Ji, Y.-Y., Chung, K. H., and Lee, W. (2018). *JAEA R&D Review for the Response of Fukushima Nuclear Accident: Environmental Radiation Survey*, KAERI/AR-1177/2018.

Ji, Y.-Y., Chung, K. H., and Kang, M. J. (2019). *Development of the Multipurpose System for Environmental Radiation Survey and Its Field Application*, KAERI/TR-7812/2019.

Kim, B.-J., Sasaki, M., and Sanada, Y. (2019). Comparison of the Fukushima Radioactive Mapping by Two Different Aerial Radiation Monitoring System, *Progress in Nuclear Science and Technology*, 6, 130-133.

Ochi, K., Sasaki, M., Ishida, M., Hamamoto, S., Nishimura, T., and Sanada, Y. (2017). Estimation of the Vertical Distribution of Radiocesium in Soil on the Basis of the Characteristics of Gamma-Ray Spectra Obtained via Aerial Radiation Monitoring Using an Unmanned Helicopter, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14, 926, <https://doi.org/10.3390/ijerph14080926>.

Sanada, Y., Orita, T., and Torii, T. (2016). Temporal Variation of Dose Rate Distribution around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station using Unmanned Helicopter, *Applied Radiation and Isotopes*, 118, 308-316.

Tsuda, S., and Saito, K. (2017). Spectrum-Dose Conversion Operator of NaI(Tl) and CsI(Tl) Scintillation Detectors for Air Dose Rate Measurement in Contaminated Environments, *Journal of Environmental Radioactivity*, 166, 419-426.



지 영 용 (Young-Yong Ji)

- 공주대학교 물리교육과 이학 박사
- (현재) 한국원자력연구원 환경 안전평가연구부 책임연구원
- 관심분야: 방사선검출기, 방사능분석



박 진 호 (Jin-Ho Park)

- 한국과학기술원 기계공학과 공학 박사
- (현재) 한국원자력연구원 원자력안전연구소 소장
- 관심분야: 기계구조, 안전진단



민 병 일 (Byung Il Min)

- 성균관대학교 토목공학과 공학박사
- (현재) 한국원자력연구원 환경 안전평가연구부 책임연구원
- 관심분야: 해양방사능, 확산모델



서 경 석 (Kyung-Suk Suh)

- 성균관대학교 토목공학과 공학 박사
- (현재) 한국원자력연구원 환경 안전평가연구부 부장
- 관심분야: 해양확산, 핵종 토양침적



정 성 엽 (Sungyeop Joung)

- 한국과학기술원 원자력및양자공학과 공학박사
- (현재) 한국원자력연구원 환경 안전평가연구부 선임연구원
- 관심분야: 계측장비, 분석알고리즘



김 경 표 (Kyoung-Pyo Kim)

- 건국대학교 산업공학과 공학박사
- (현재) 한국원자력연구원 국제전략부 부장
- 관심분야: 데이터베이스, 네트워크