

## &lt;원저&gt;

저선량과 고선량 측정구간 변환이 가능한 모바일 방사선 측정시스템  
개발 및 평가이홍연<sup>1,2)</sup>·한상준<sup>1)</sup>·김보길<sup>1)</sup>·이건주<sup>1)</sup>·김석현<sup>1)</sup>·김정훈<sup>2)</sup><sup>1)</sup>주식회사 알엠텍·<sup>2)</sup>부산가톨릭대학교

## Development and Evaluation of a Mobile Environmental Radiation Measurement System That Can Switch between Low and High Dose Measurement Sections

Hong-Yeon Lee<sup>1,2)</sup>·Sang-Jun Han<sup>1)</sup>·Bo-Gil Kim<sup>1)</sup>·Geon-Ju Lee<sup>1)</sup>·Seok-Hyeon Kim<sup>1)</sup>·Jeong-Hun Kim<sup>2)</sup><sup>1)</sup>RMTEC Co., Ltd.<sup>2)</sup>Catholic University of Pusan

**Abstract** This study is to develop a mobile type environmental radiation measurement system for emergency response or environmental radiation monitoring of local governments near nuclear facilities. A mobile radiation measurement system can monitor radiation by field beyond the spatial constraints of a fixed environmental radiation monitor. If installed in local government infrastructure such as public transportation, environmental radiation can be monitored without additional manpower and measurement work. In addition, it is designed to enable monitoring and measurement of radiation from low to high doses as well as the environment in preparation for radioactive disasters such as nuclear power plant accidents. It is expected that this system will be utilized not only in normal times but also in the event of a radiation accident to improve the disaster prevention capabilities of local governments.

**Key Words :** Radiation Measurement System, Radiation Doserate, NaI(Tl) Detector, GM Counter, Environmental Radiation, Radiation Emergency, Wide-Range

**중심 단어 :** 방사선 측정 시스템, 방사선량률, NaI(Tl) 검출기, GM 계수관, 환경방사선, 방사선 비상, 광역 범위

## I. 서론

국내·외 방사선 측정 및 그 기술 분야가 빠르게 성장하면서 방사선 측정은 여러 분야에서 활용되어 원자력 및 방사선 산업뿐만 아니라 보안·검색, 환경 모니터링 등 다양한 산업 분야까지 응용 및 활용성이 확장되고 있다. 이 중에서 방사선 모니터링은 방사선 사고로부터 주민을 보호하기 위한 측정기술이며 이는 방사능방재분야에 매우 중요한 기술이다[1,2]. 국내에서 운영 중인 환경방사선 모니터링 시스템(Environment Radiation Monitoring System; ERMS)

은 전리함(혹은 가압 전리함) 또는 NaI(Tl) 검출기를 활용하여 방사선을 측정하고 있다[3]. 전리함의 경우, 방사선량 측정이 가능한 다른 검출기에 비해 보다 정확한 방사선량률에 대한 측정이 가능하나 방사선의 에너지, 핵종 별 방사능 분석은 사실상 불가능하다. 통상적으로 방사선 비상 대응과 효과적인 주민보호 조치를 위해서는 최우선적으로 획득해야 하는 정보가 원자력관계시설 사고로부터 방출되는 방사선원의 규모임을 고려해 볼 때, 전리함 기반의 환경방사선 감시체계로는 정확한 방사선원 평가에 어려움이 있다. 또한, 고정형 환경방사선 감시기의 경우, 지속적인 방사선 모

This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation Of Nuclear Safety(KoFONS) using the financial resource granted by the Nuclear Safety and Security Commission(NSSC) of the Republic of Korea. (No. 2003019)

Corresponding author: Bo-Gil Kim, RMTEC CO., LTD., 404, 25, Hanamsandancheonbyeonjwa-ro, Gwangsan-gu, Kwangju, 62215, Republic of Korea / Tel: +82-62-236-6740 / E-mail: bg1123@rmtec.co.kr

Received 17 December 2021; Revised 30 December 2021; Accepted 19 January 2022

Copyright ©2022 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

니터링이 가능하지만 해당 지점에 국한되는 공간적 한계가 있다. 이를 보완하고자 다수의 지점에 설치되고 있으나, 이는 설치 공간 확보와 경제적인 비용 측면에서 매우 부담이 되는 실정이다.

그렇기 때문에 상대적으로 저렴하고, 선량 측정과 감마선 핵종 판별이 가능한 NaI(Tl) 검출기를 활용하여 방사선 모니터링 장비가 개발되어 활용되고 있으며, 고선량 구역에서 운영이 힘든 특성을 극복하기 위해 추가적인 검출기와 결합하여 사용되고 있다.

또한, 원자력관계시설 사고 사례를 근거로 방사선 측정의 관점에서 살펴보면, 후쿠시마 원전 사고 후 측정된 선량 정보는 원전 반경 20 km 이내에서 최대선량률은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 약 0.14 mSv/h로 측정되었다. 프랑스 방사선방호 및 원자력 안전 연구기관인 IRSN(Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire)에서 발간한 후쿠시마 원전사고 관련 보고서에 의하면, 원전사고 시 방출되는 주요 감마 핵종들은 아래 Table 1과 같으며, 원전사고 시 방출되는 감마 핵종은 약 0.1 MeV의 저에너지에서부터 약 2 MeV의 고에너지 수준이 될 것으로 판단되어, 위와 같은 현황에 대한 내용이 고려된 시스템의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 NaI(Tl) 검출기와 GM(Geiger-Muller) 계수관을 이용한 저선량과 고선량 측정이 가능한 모바일 방사선 측정 시스템 개발을 목적으로 한다. 고정형 환경방사선 감시기의 공간적 한계를 극복하는 현장맞춤형 방사선모니터링이 가능하고, 방사선량 및 핵종 판별이 가능하여 방사선사고 시 실효적인 방사능 방재 시스템으로 활용될 것으로 기대된다.

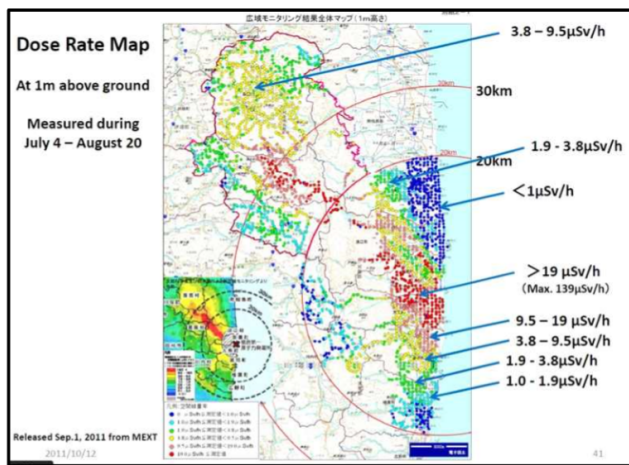


Fig. 1. Dose rate range around the nuclear power plant measured after Fukushima nuclear accident

Table 1. Major gamma nuclides emitted during a nuclear accident

Nuclide	Isotope	Half-life	Gamma energy (keV (%))
43% Cesium	Cs-134	2,062 year	605 (97.6) 796 (85.4)
	Cs-136	13.16 day	819 (99.7) 1,084 (80.0)
	Cs-137	30.17 year	662 (85.2)
17% Iodine-131	I-131	8.04 day	364 (81.2) 637 (7.3)
	Te-132	78.2 hour	228 (88.2)
13% Tellurium-132/ Iodine-132	I-132	2.3 hour	668 (98.7) 773 (76.2)
	Ru-103	39.26 day	497 (91) 610 (5.7)
10.5% Ruthenium-103/ Rhodium-103	Ba-140	12.75 day	537 (24.4) 163 (6.2)
	La-140	1.68 day	1,596 (95.4) 487 (44.3)
4% Niobium-95	Nb-95	35.02 day	766 (99.8)

## II. 대상 및 방법

### 1. 방사선측정을 위한 검출부 설계

#### 1) NaI(Tl) 검출기

NaI(Tl) 검출기는 NaI(Tl) 섬광 결정과 광전자 증배관이 결합된 형태로 감마선 검출 감도와 개발 비용 측면에서 우수하여 환경 감시용 검출기에 많이 활용된다[4]. 국내·외 이동형 방사선 감시 시스템 동향에서도 살펴보면 NaI(Tl) 검출기가 많이 사용되고 있는 것을 확인할 수 있다[5]. 측정된 에너지 스펙트럼으로부터 선량률을 계산하는 분광분석 기반의 조사선량률 결정 방법은 인공 감마 핵종의 기여를 직접 확인하고 평가할 수 있다는 장점 때문에 환경 방사선 감시기에 많이 사용되고 있다. 감마선에 대한 검출 효율이 높으며, 공간선량률과 감마선 스펙트럼 분석이 가능하여 본 연구 목적과 가장 부합한다. 하지만, 검출기 특성상 조해성이 있어 습기, 기계적, 열적 충격에 약하기 때문에 운영 중 발생할 수 있는 갑작스러운 충격과 외부 습기에 의한 성능 저하, 장비 고장 등을 주의해야 한다[6-8]. 또한, 측정 범위의 경우 NaI(Tl) 검출기는 일반적으로 환경수준에서 저선량까지 측정하는데 사용되므로, 방사선 비상시 사용 여부에 대해서 고려한 설계가 바탕이 되어야 한다[8]. 따라서 외부의 충격과 습기로부터 보호하기 위해 밀봉 가능한 하우징을 제작하고, GM 계수관과 연동 가능하도록 설계하였다.

2) GM 계수관

일반적으로 방사선 측정 목적으로 주변의 방사선의 세기나 주변 오염 등을 측정할 때에는 베타선과 감마선을 모두 측정할 수 있고 고선량까지 측정이 가능한 GM 계수관이 많이 사용되고 있다. 기체 전리형 방사선 검출기로서, 휴대용 측정기 등에 적합하여 방사선 관리 현장에서 사용되는 대다수의 실용 측정기들이 주로 GM 계수관을 사용한다. 또한, 방사선량의 세기를 알 수 없거나 높은 방사선량 지역에서 작업을 할 경우에 사용되기 때문에 방사선 사고 또는 비상시 사용에 용이하다[10]. 따라서, 본 연구 시스템에서 NaI(Tl) 검출기의 단점을 보완하고, 고선량의 방사선량 측정을 위해 Fig. 2와 같이 GM 계수관을 추가적으로 설계하였다.

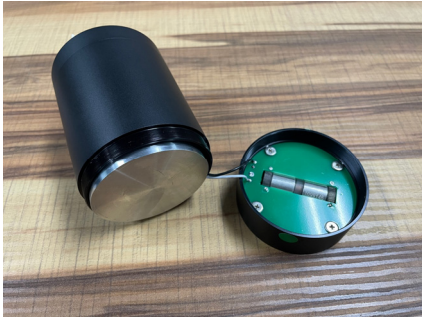


Fig. 2. Manufactured radiation detection unit (interlocking NaI(Tl) detector and GM counter)

3) 저선량과 고선량 측정 구간 전환

사용된 NaI(Tl) 검출기의 특성으로 고선량 구간에서는 과도한 방사선 계수로 인해 포화상태(Saturation)에 이르러 정상 동작이 불가능하다. 설계된 방사선측정기에 실제 방사선을 조사하였을 때, Fig. 3과 같이 150  $\mu$  Sv/h 이상부터 포화상태가 되어 급격히 측정오차가 커지는 경향을 보였으며, 해당 구간 이후부터는 GM 계수관을 활용하여 방사선량을 측정할 수 있도록 설계하였다[11].

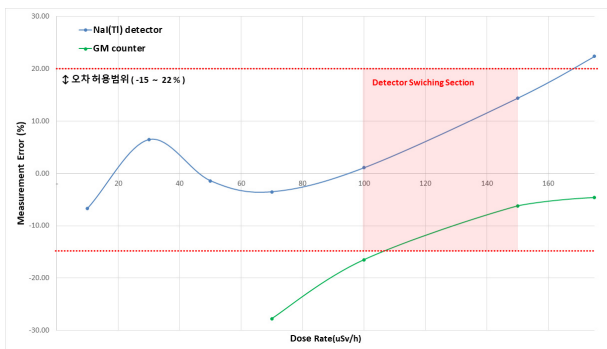


Fig. 3. Radiation dose-rate measurement error

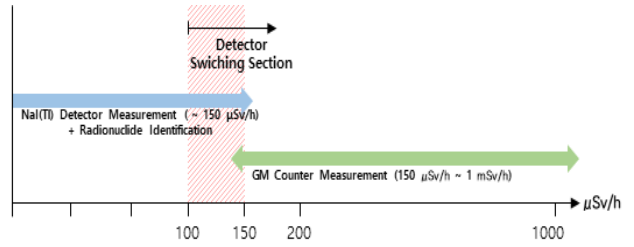


Fig. 4. Detector switching section

2. 전자·제어부 설계

감마선 측정을 위한 검출기 테스트 후 선정된 센서에 최적화된 증폭기, 고전압 공급 장치, MCA(Multichannel Analyzer) 등을 설계하였다. NaI(Tl) 검출기와 GM 계수관을 이용한 감마선 핵종판별 및 일반 환경 수준에서부터 고선량까지의 방사선량률 측정 장비를 위하여 신호처리 회로부와 데이터 획득 회로부를 설계하였다. 신호처리 회로부는 프리앰프 회로, 증폭회로 및 정형 증폭회로 그리고 피크 검출 회로 등으로 구성하였다. 데이터 획득 회로부에는 ADC(Analog to Digital Converter)회로, 로직회로 그리고 DSP(Digital Signal Processor)와 통신을 포함한 디지털 회로 등을 설계하였다.

Table 2. Composition of the electronic part of the radiation (activity) measurement module

Contents	Specification
Detector	NaI(Tl) Scintillation detector, GM Counter
Detector Circuit	Detector and amplifier circuit are designed in an integrated form
MCA	1 channel, 1ADC 1,024 channel
MCU	ARM core 32 bit RISC
FPGA	Collect ADC data and generate packets
ADC channel	ADC speed : 50 ~60 MHz Voltage : 3.3 V
HV supply	+ 500 V
Communication	RS-232

NaI(Tl) 검출기의 SiPM(Silicon Photo Multiplier)에 온도 보상 바이어스생성기(Temperature Compensated Bias Generator; TCBG)를 이용하여 전압을 바이어스하면 NaI(Tl) 검출기에서 발생한 광자의 에너지에 비례하는 전압 신호가 발생되고 전치 증폭기(Pre-Amplifier; PA), 가변 증폭회로(Variable Gain Amplifier; VGA), 정형 증폭회로(Shaping Amplifier; SA)를 거쳐 증폭된 신호를 피크 검출 회로(Peak

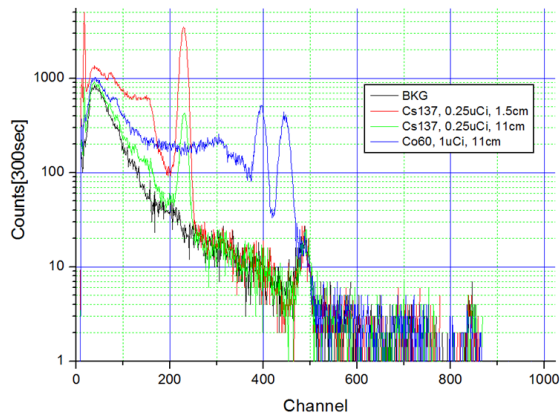




**Table 4.** Radiation dose rate measurement results

Detector	Reference Dose Rate ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Measurement Value ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Measurement Error (%)
NaI(Tl)	4	4.37	-9.3
	8	8.04	-0.5
	10	10.02	-0.2
	20	19.30	3.5
	40	38.35	4.1
	80	79.50	0.6
GM Tube	200	203.5	-1.8
	400	407.6	-1.9
	800	796.3	0.5
	2,000	1,907	4.7
	4,000	3,816	4.6
	8,000	7,907	1.2
	20,000	20,348	-1.7

리벨로 측정된 감마선 스펙트럼이며, 이를 활용하여 가까이 이웃한 두 피크를 분해할 수 있는 능력을 나타내는 감마선 분광분석의 성능지표인 에너지 분해능(Energy resolution)을 계산하였다. Cs-137의 경우, 662 keV의 에너지 분해능이 6.5%, Co-60의 1,332 keV Peak는 4.1% 수준으로 나타났다으며, 이는 상용 방사선 측정 제품의 주요 성능지표인 Cs-137의 분해능 < 7% 이내의 값이다.



**Fig. 7.** Gamma-ray source measurement spectrum by distance using NaI(Tl) detector

**Table 5.** NaI(Tl) detector energy resolution of gamma-ray source measured by distance

Gamma Source	Energy(keV)	Centroid (channel)	FWHM (channel)	Resolution (%)	Distance (cm)
Cs-137	662	229.34	14.28	6.2	11
		228.31	14.88	6.5	1.5
Co-60	1173	393.89	19.33	4.9	11
	1332	445.11	18.26	4.1	11

### 3. 모바일 형태로 적용 가능성 예비실험

본 연구 시스템이 현장에서 모바일 형태로 적용 가능한지 예비실험을 위해 한빛 원전이 위치한 영광군의 한 운수업체 협조를 받아 원자력발전소 주변까지 운행하는 버스에 제작한 방사선 측정 모듈을 탑재하였다. 실시간으로 측정된 방사선 데이터가 실제 버스 운행과 함께 노선위에 표출되었으며, Fig. 8~10과 같이 방사능 선원을 이용하여 임의의 방사선 이벤트를 발생시켰을 때, 실시간으로 지도상에 표출되는 것을 확인하였다.



**Fig. 8.** Radiation measurement module on-site measurement



Fig. 9. Event using radiation check source (137Cs Disk source)



Fig. 10. Display of vehicle movement path equipped with radiation measurement module and generate event

#### IV. 고찰

NaI(Tl) 검출기와 GM 계수관을 이용하여 저선량에서부터 고선량까지 측정과 핵종판별이 가능한 모바일 형태의 방사선 측정 시스템을 개발하였다. 이러한 모바일 형태의 방사선 측정 기술에 대한 연구가 국내·외 활발히 수행되고 있으며, 특히, 드론이나 무인기에 방사선 측정 시스템을 결합한 연구 등이 수행되고 있다. 이러한 연구 사례와 비교해 보면 본 연구에서 제작한 방사선 측정 시스템과 사용된 검출기(센서)나 활용도 등의 차이는 있으나, 방사선 측정기와 스마트 기술을 결합하여 보다 첨단화된 기술을 현장에 적용시키기 위해 노력한 결과임을 알 수 있다[16]. 제4차 산업혁명에 도래함에 따라 사물인터넷과 빅데이터, AI 인공지능과 결합된 제품들이 상용화되고 있다. 본 연구에서 제작된 방사선 측정 시스템을 이용하여 측정된 정보를 빅데이터로 활용하고 이를 기반으로 인공지능과 연계할 수 있는 방안에 대해서 고려해 봐야 할 것이다[17].

또한, 실제 차량에 탑재하여 현장 적용 실험한 결과와 같이 방사선측정기에서 수집된 데이터는 Embedded PC 프로그램을 통해 서버 프로그램으로 실시간 전송되며, NaI(Tl) 검출기와 MCA를 통해 측정된 채널 별 계수의 감마선 스펙트럼, 방사선 계수에 따른 방사선량과 GPS를 통한 좌표 정보가 서버 프로그램 및 데이터베이스에 저장되었다. 다만, 전송되는 각 좌표의 방사선 측정 정보와 지도에 표출하는

렌더링(Rendering)으로 인해 다소 부하가 걸리므로, 이를 방지하기 위해 서버 프로그램에서는 10초 간격으로 수집된 데이터를 표출하도록 설계되었으며, 측정 위치에 따른 보다 세밀한 방사선 정보를 표출하기 위해서는 서버 프로그램의 사양과 데이터 처리에 대한 부분의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

#### V. 결론

방사선은 인체의 오감으로 느낄 수 없기 때문에 방사선측정기에 대한 의존이 매우 강하며, 방사선측정기는 정확한 방사선량 측정이 매우 중요하다. 개발된 방사선 측정 시스템을 이용하여 저선량에서 고선량까지 측정 구간 모두 국가 표준규격에서 요구하는 방사선 측정에 대한 측정오차 범위 내의 결과를 보였고, 이는 설계한 바와 같이 NaI(Tl) 검출기와 GM 계수관이 유효한 측정 구간 전환이 제대로 이루어진 것으로 볼 수 있다. 또한, 고선량 측정이 불가능한 NaI(Tl) 검출기의 단점과 에너지 구별이 되지 않기 때문에 핵종판별이 불가능한 GM 계수관의 단점을 상호 보완하는 방사선 측정 시스템이라고 할 수 있다. 원자력시설 등의 사고 시 주민 보호 조치를 위해 최우선적으로 획득해야 하는 정보가 주변 방사선량 수치와 방출되는 방사선원의 규모임을 고려해 볼 때, 주민 보호 조치에 있어서 제작된 방사선 측정 시스템은 유효하게 사용될 것으로 판단된다.

후쿠시마 원전사고 이후 방사선(능)에 대한 국민의 관심과 안전에 대한 요구가 증가함에 따라 방사선(능) 측정기술의 발전뿐만 아니라, 국민의 안심과 지속적인 홍보가 동반되어야 한다.

원자력시설이 위치한 지역의 대중교통 노선버스에 해당 시스템을 탑재하여 버스의 운행 주기에 따라 모니터링되는 방사선정보가 보다 쉽게 지역 주민이 다가갈 수 있는 방재 시스템으로 홍보 및 원자력시설이 위치한 지자체의 추가적인 인력투입과 경제적 예산을 절약하고 방사능 방재역량을 강화할 수 있는 시스템으로 활용되길 기대한다.

#### REFERENCES

- [1] Knoll GF. Radiation detection and measurement, John Wiley & Sons; 2010.
- [2] Ahmed SN. Physics and engineering of radiation detection, Academic Press; 2007.

- [3] Korea Institute of Nuclear Safety(KINS). Environmental Radioactivity Survey in Korea; 2020.
- [4] Lee JM, Kim YG, Park GS, Kim JM, Lee GS, Jeong JH. Development of a Spectrum Analysis Software for Multipurpose Gamma-ray Detectors. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2010;33(1): 51-9.
- [5] Lee GJ. Development of a Vehicle-mounted Large Area Radioactive Contamination Measurement Equipment [master's thesis]. Chosun University; 2019.
- [6] Jee YY, Lee WR, Choi SD, Jung GH, Kang MJ, Choi GS, et al. Determinations of the Exposure Rate Using a NaI(Tl) Detector of the Environmental Radiation Monitor. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*. 2013;11(3):245-51.
- [7] Lee JH, Cho YH, Lee YH, Lim IC, Kim YG, et al. Research for realization of platform of portable radiation detector using NaI(Tl) Scintillator. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*. 2012;16(10):2323-8.
- [8] Lee MS. Calculation of Man-made Radiation Exposure Rate from NaI Spectrum. *Journal of Radiation Protection and Research*. 2001;26(2):113-7.
- [9] Ko SJ. Impact of Fukushima nuclear accident on establishing nuclear safety and security commission in Korea [master's thesis]. Jeonbuk National University; 2015.
- [10] Lee HY, Lee JH, Lee SH. Design of Tester Apparatus for 48 Channel GM Tube Sensor. *Journal of IKEEE*. 2016;20(3):310-3.
- [11] Ra ST, Lee JH, Lee SH. Design of Wide-Range radiation measurement system using GM Tube and NaI(Tl) Detector. *Journal of IKEEE*. 2017;21(2): 146-9.
- [12] Kim HJ, Park DS, Lee SB. The Wireless Radiation Measurement Using Embedded System. *Journal of the Korean Society of Radiology*. 2008;2(1):11-6.
- [13] Lee BJ, Jang SY. Development of Radiation Measuring System using Wireless Communication. *Journal of Radiation Protection and Research*. 1995;20(2):85-95.
- [14] Kim HG, Hong YH, Jeong YS, Kim JH, Park SY. Development of a Portable Detection System for Simultaneous Measurements of Neutrons and Gamma Rays. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2020;43(6):481-7.
- [15] KS C IEC60846-1. Radiation protection instrumentation-Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation-Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors; 2019.
- [16] Ji YY, Min BI, Seo KS, Jung SY, Kim GP, Park JH. Technical Status of Environmental Radiation Monitoring using a UAV and Its Field Application to the Aerial Survey. *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*. 2020;25(5):31-9.
- [17] Park JH, Ok YS. The Analysis of Patent Trends and Radiation Convergence Technology. *Journal of the Korean Society of Radiology*. 2019;13(5): 785-90.

구분	성명	소속	직위
제1저자	이홍연	부산가톨릭대학교 방사선학과, (주)알엠택	박사 대학원생 / 대표이사
공동저자	한상준	(주)알엠택	연구원 / 이사
공동저자	이건주	(주)알엠택	연구원 / 과장
공동저자	김석현	(주)알엠택	연구원 / 대리
공동저자	김정훈	부산가톨릭대학교 방사선학과	교수
교신저자	김보길	(주)알엠택	연구원 / 과장