JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(4) : 325-332 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.325

원자력 시설 주변 방사선량 감시를 위한 양방향 이동형 방사선 측정 시스템 개발

이홍연[1], 김보길[1,*], 주한영[2], 김재욱[2], 최진식[2], 문주현[2]

[1](주)알엠택, [2]단국대학교 에너지공학과

Development of a Two-way Mobile Radiation Measurement System for Monitoring Radiation around Nuclear Facility

Hong Yeon Lee[1], Bo Gil Kim[1,*], Han Young Joo[2], Jae Wook Kim[2], Jin Sik Choi[2] and Joo Hyun Moon[2]

[1]RMTEC Co., Ltd., 25, Hanamsandancheonbyeonjwa-ro, Gwangsan-gu, Gwangju 62215, Republic of Korea
[2]Department of Energy Engineering, Dankook University, 119, Dandae-ro, Dongnam-gu, Cheonan 31116, Republic of Korea

Abstract To protect local residents and environment from radioactive material that might be released from nuclear energy facilities, regulatory agencies, nuclear operator, and local governments have checked the radioactivity concentration and radiation dose rate and analyzed the samples taken in the environment neighboring them, according to the Nuclear Safety and Security Commission Notice No. 2019-10 (Standards for Radiation Protection, etc.). This study aims to develop a mobile environmental radiation monitoring system that could be installed on public transportation vehicles, for the successful development. A mobile two-way radiation measurement system was developed, and performance evaluation was performed by installing a system on public transportation in the area around the nuclear power plant to perform performance evaluation. As a result of the performance evaluation, it was confirmed that the mobile two-way radiation detection system worked properly.

Key words: Mobile Radiation Measurements, Two-way communication, Public transport, Performance evaluation

1. 서 론

동일본 대지진과 후쿠시마 원자력발전소 사고 이후, 원자력 시설에서의 비정상적 방사성 물질 누출사고에 대비한 실효적 대응체계 구축을 위해 중앙정부, 지방자치단체 및 원자력 사업자는 많은 시간과 예산을 투입하고 있다[1]. '원자력시설 등의 방호 및 방사능방재대책법'에 따라 국내 방사능 재난 대응체계를 구축하고 있으며, 후쿠시마 원자력발전소 사고에 대한 분석을 통해 기존의 미비점들을 개선하고자 노력하고 있다.

사고 발생 시 상황을 신속히 파악 및 대응하고자 국내·외에서는 원자력 시설과 국토에 대한 실시간 환경방사선 감시를 위한 감시망을 운영 중이다. 국내의 경우 약 322기의 고정형 환경방사선감시시스템(Environmental Radiation Monitoring System, ERMS)과 차량에 방사선 측정기를 탑재한 이동형 시스템을 운영하고 있다[2].

원자력발전소 또는 연구 시설이 소재하고 있는 지방자치단체에서 운영 중인 원자력 시설 감시망은 지역 현장의 대

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Bo Gil Kim
Tel. +82-62-236-6740 Fax. +82-62-236-6741 E-mail. bg1123@rmtec.co.kr
Received 21 September 2022 **Revised** 11 November 2022 **Accepted** 21 November 2022

내외적 환경 특성을 반영하고, 지역 주민들에 대하여 원자력 시설에 대한 수용성 증대를 기대할 수 있다. 하지만 일부 이동이 가능한 차량형 측정 장비를 제외한 대부분의 운영 장비들이 고정형 시스템으로, 원자력 시설 지역 전방위를 커버할 수 없는 한계 역시 가지고 있다. 또한, 사고 상황에서는 선량뿐만 아니라 방출 핵종 정보 역시 필요하지만, 현재 시스템 대부분은 고정된 위치에서 방사선량률만 측정하고 있다.

지자체의 효과적인 환경방사선 감시를 위해서는 기존 인프라와 연계하여 감시역량을 극대화할 수 있도록 최신 기술(빅데이터, 인공지능, 사물인터넷)을 활용한다면 비용 효과적인 시스템 구축을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 광범위한 원자력 시설 주변 지역을 효과적으로 감시하기 위하여, 지역 내 대중교통(노선버스)과 IoT (Internet of Things) 기술을 결합한 양방향 이동형 방사선(능) 측정시스템을 개발하여 원자력 시설 주변에 대한 효과적인 감시시스템을 구축하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 이동형 방사선 측정 모듈 설계

2.1.1. 방사선 측정 검출부 개념 설계

일반적으로 감마선 방출 핵종 측정에 많이 활용되는 검출부는 고순도 Ge 검출기 (HPGe), NaI (Tl), CdZnTe (CZT)이다. 하지만 HPGe의 경우 경제성, 관리 측면에서 부적합하며, CZT는 경제성 측면에서 부적합하다고 판단, 본 연구에서는 NaI (Tl)를 이용하여 검출기를 구성하고자 하였다.

하지만 NaI (Tl) 검출기를 단독으로 운용할 경우 특정 선량 이상에서는 측정이 어려운 것을 확인, 이를 극복하고자 GM 계측기를 동시에 측정에 활용하고자 하였다. 저선량 구간에서는 NaI (Tl)를 활용하여 선량과 방사선 정보를 획득하고 고선량 구간에서는 GM을 이용하여 방사선량을 측정할 수 있도록 측정부를 구성하고자 하였다.

2.1.2. 전자부 설계

감마선 측정을 위해 측정부에 최적화된 증폭기, 고전압 (High Voltage, HV) 모듈, 다중채널분석기 (Multi-Channel Analysis, MCA) 등을 설계하였으며, Table 1과 같이 구성하였다.

검출기 Photomultiplier tube (PMT)에 고전압 (High voltage)을 인가하면 검출기에 입사된 방사선의 세기에 비례하는 전하 신호가 발생한다. 이렇게 발생된 신호는 전하 민감형 프리앰프 (Charge sensitive preamplifier)에서 1차 증폭을 거치게 된다. 이후 아날로그 보드의 증폭회로 (Amplifier)와 가변 증폭회로 (Variable gain amplifier), 정형 증폭회로 (Shaping amplifier)를 통과하면서 증폭된 신호는 피크 검출 회로 (Peak detector)에서 방사선 피크를 검출하도록

Table 1. Configuration of electronics for gamma nuclide analysis

Division	Contents	Note
Radiation detector	– NaI detector (low dose measurement + nuclide discrimination) – GM counter (high dose measurement)	
Detector circuit	• The detector and amplifier circuit are designed in an integrated form.	
Multi-channel analyzer	• 1 channel, 1 ADC • 1,024 channel	
Micro controller unit	• ARM core • 32-bit RISC architecture	System control
FPGA	• Collect ADC data and generate packets	
ADC channel	• ADC speed: 50~60 MHz • Voltage: 3.3 V	
High voltage supply	• +1,500 V	
Communication	• Ethernet, Wireless	

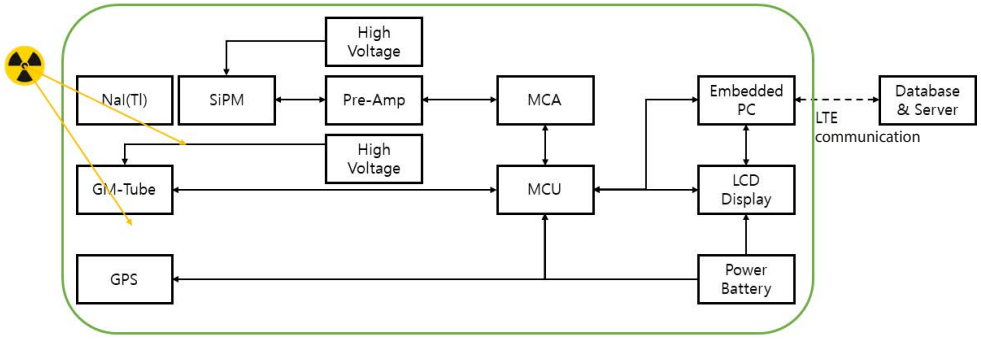

Fig. 1. Schematic diagram of electronics for radiation measurement.

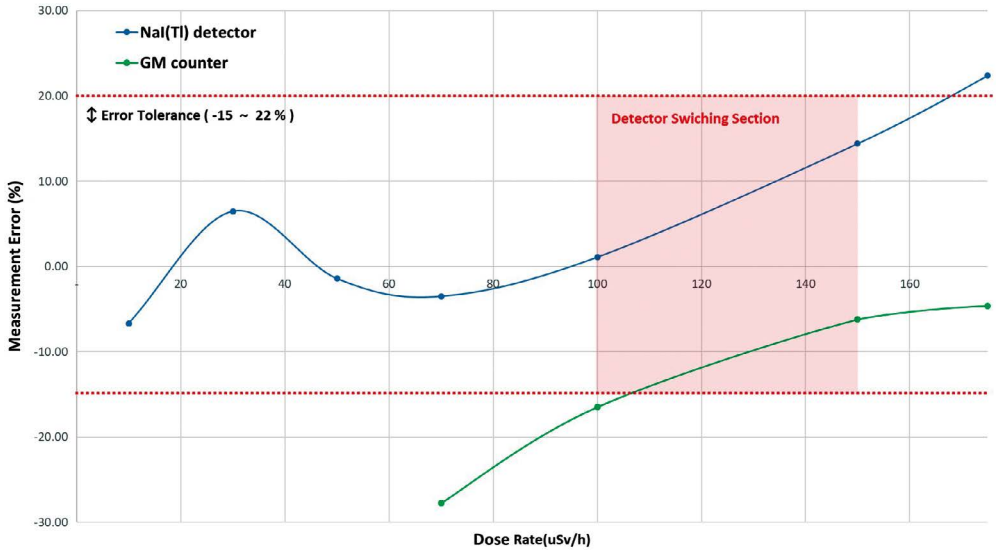

Fig. 2. Dose-rate error of measurement module due to dose increase.

설계하였다. Fig. 1은 설계된 전자 회로부를 나타낸 개념 설계도이다.

2.1.2.1. 검출기 저/고선량 측정 구간 전환 설정

설계된 NaI (Tl) 검출기는 특성상, 고선량 구간에서 측정할 경우 과도한 방사선 계수로 인해 계측기가 포화상태(Saturation)에 이르러 정상 동작이 불가능하기 때문에 고선량 측정이 가능한 추가적인 검출기 설계가 필요하다. 이러한 방사선 검출기의 특성을 파악하기 위해 공인된 표준 방사선조사 및 교정기관에서 기준 방사선량을 측정하는 실험을 수행하였다.

실험 결과, 150 μSv h^{-1} 이상 측정 구간에서 포화 현상이 발생하여 측정오차가 급격히 증가하는 경향을 확인하였으며, 고선량 측정을 위해 추가적인 검출기으로 GM 계수관

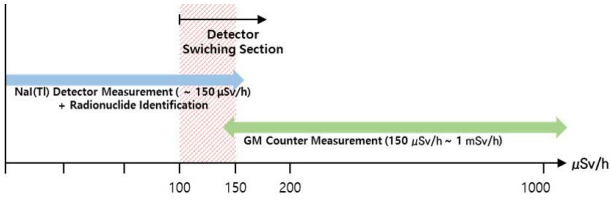

Fig. 3. Detector switching point according to radiation dose rate.

을 설계하였다.

두 검출기 모두 150 μSv h^{-1} 구간까지는 허용 오차 범위 내 결과를 보이며, 해당 방사선량을 검출기 전환(Switching) 구간으로 설정하였다.

Fig. 3과 같이 모든 측정 구간에서 두 검출기 모두 제어부로 측정된 데이터를 전송하지만, 일반 환경 준위에서부터 150 μSv h^{-1}까지는 NaI (Tl) 검출기 측정값이 표출되고,

그 이상부터 GM 계수관 측정값을 표출하도록 설계하였다.

2.1.3. 통신 및 제어부 설계

본 연구에서는 측정된 방사선 및 위치 정보를 실시간으로 별도의 서버로 전송하도록 하고 있다. 이를 위해 신호처리 및 통합 제어가 가능한 통신 회로를 설계하였다. IEEE 802.15.4 WPA 기반의 ZigBee 통신방식을 적용한 통신 회로를 설계하였으며, 검출한 신호의 측정값과 기기 조작 및 결과 모두 단일 플랫폼에서 처리 가능하며, 개발 후 다수의 장비를 원격지에서 제어 및 감시하기 수월할 것으로 예상한다.

방사선 측정기에서 측정된 방사선량률을 현장에서 전시하고 서버로 전송하기 위하여 내장형 PC와 확장 보드를 설계하였다. 전원 공급이 어려운 환경에서는 방사선량을 측정할 수 있도록 배터리 및 충전 회로를 내장하였다. 버스가 운영 중일 때는 충전과 측정을 동시에 수행하며, 버스가 차고지에 들어갔을 때도 방사선량 데이터를 지속해서 측정하도록 하였다. 측정 데이터의 전송을 위한 무선통신은 LTE 모뎀을 사용한다. 다음과 같이 확장 보드를 제작하여 내장형 PC에 장착하였으며, 검출기, 디스플레이, LTE 모뎀에 연결하였다.

2.2. 측정 데이터 처리 소프트웨어 개발

측정 데이터를 처리하기 위하여 소프트웨어를 함께 개발하였다. 프로그램은 서버 프로그램, 데이터베이스, 클라이언트 프로그램으로 구성하였다. 방사선 측정 모듈에서 측정된 방사선 정보, 측정시간, 위치 정보는 패킷으로 조합되어 내장형 PC에서 서버로 자동 전송된다. 반대로 중앙에서 측정 모듈로 데이터를 전송할 수 있도록 하였다. 현재 상황 정보 및 행동 대처요령에 관한 정보를 전달할 수 있도록 하였다.

Figs. 5, 6은 프로그램의 메인화면과 ^{137}Cs를 검출 모듈로 측정한 스펙트럼 모습이다. 프로그램에서는 측정 일자, 측정 장비 또는 관심 지역으로 설정된 지점에 대한 방사선(능) 측정 데이터에 대한 검색도 가능하도록 구성하였다.

측정 준위에 대한 경보설정에 대한 기준을 별도로 지정

Fig. 4. Radiation measurement module prototype.

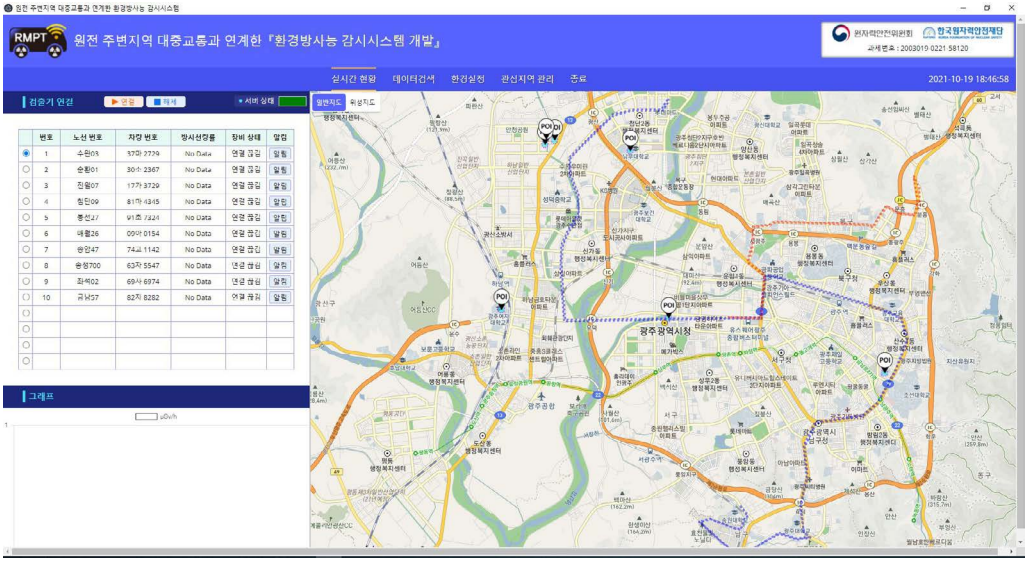

Fig. 5. Main screen of development client program.

Table 2. Alarm setting standards according to the level of the measured radiation dose rate [3]

Measurement level	Set value	Note
● Normal level	Average value less than 0.0973 μSv h^{-1} (10 μR h^{-1})	Normal fluctuation range due to natural phenomena, etc.
● Ambient level	Average over 0.0973 μSv h^{-1} (10 μR h^{-1})	The purpose of early detection of radiation abnormalities, identification of the cause
● Warning level	Exceeds 0.973 μSv h^{-1} (100 μR h^{-1})	Food intake restriction recommendations
● Emergency level	Exceeds 973 μSv h^{-1} (100 μR h^{-1})	Evacuation

Fig. 6. Gamma-ray spectrum measured with NaI (Tl) detector.

하였다. 기준치는 한국원자력안전기술원에서 운영 중인 국가 환경방사선 자동감시망 기준을 따르도록 하였다. 자세한 경보설정 기준은 Table 2를 따르도록 하였다.

3. 이동형 검출기 성능 평가

3.1. 이동형 검출기 예비성능 평가

개발된 측정 장비는 버스에 장착하여 운영할 계획이다. 도로를 주행하는 특성상 과속방지턱 또는 요철과 같은 큰 진동 또는 지속적인 진동에 노출될 수 있다. 이에 실제 현장 성능 평가에 앞서 성능 기준에 따라서 성능 평가를 수행하였다[4]. 운행 중 발생할 수 있는 진동 때문에 방사선 측정 장비 성능에 영향이 없어야 하므로 국가표준 시험규격에 의한 성능시험을 수행하였다. 시험은 해당 규격시험

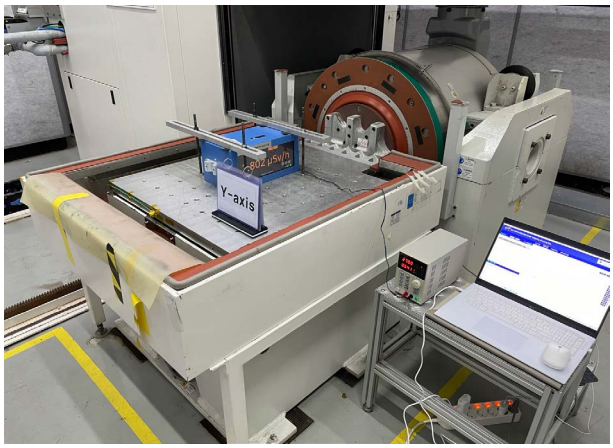

Fig . 7. Vibration test of radiation measuring equipment.

의 내용을 토대로 X, Y, Z축에 대해 차량 운행 중 발생할 수 있는 가혹한 환경조건의 진동을 Fig. 7과 같은 조건에서 발

Fig. 8. Radiation measurement performance check during vibration test

Fig. 9. Mounting inside the bus of the mobile detector.

생시켰고, 방사선 체크선원을 이용하여 방사선량을 측정하였다. 진동시험 동안 측정된 방사선량률은 최소 3.5 μSv h^{-1}, 최대 4.2 μSv h^{-1}, 표준편차 0.142 수준으로 평균값인 3.9 μSv h^{-1}과 비교하여 ±10% 이내 오차범위를 보였다. 또한, 장비 외형 및 내부 케이블, 나사 결합상태 등의 이상이 없었고, 장비 성능 저하 등의 영향은 없는 것으로 확인하였다.

3.2. 이동형 검출기 현장 성능 평가

현장 성능 평가를 위해 실제 버스에 방사선 측정 모듈을 설치하여 성능 테스트를 수행하였다. 현장 성능 테스트를 수행한 지역은 현재 한빛 원자력발전소가 위치한 영광 지역을 대상으로 수행하였다.

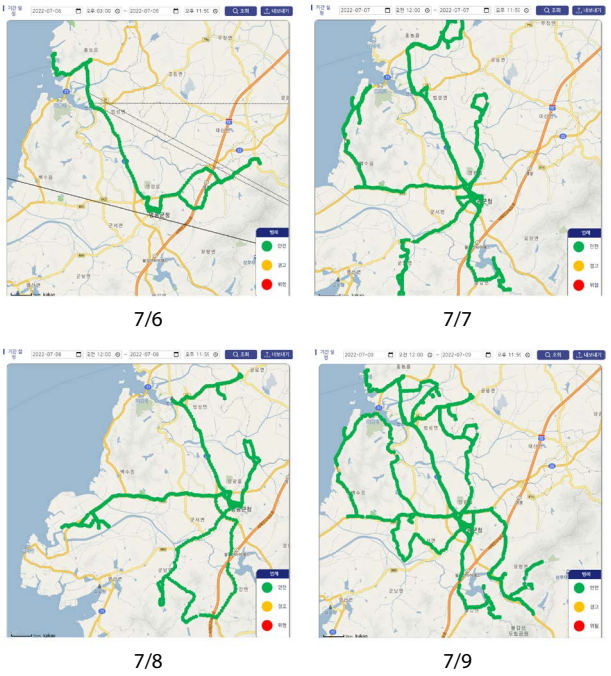

Fig. 10. 7.6~7/9 Measurement result.

영광 지역 시내버스 업체의 협조를 통해 한빛 원자력발전소 주변과 영광군 내를 통과하는 시내버스에 측정 장비를 Fig. 9와 같이 설치하여 현장 성능 평가를 수행하였다. 측정은 7월 6일부터 9일 총 나흘 동안 수행하였다. 측정한 방사선량 정보를 위치 정보를 이용하여 Fig. 10에 표시하였다.

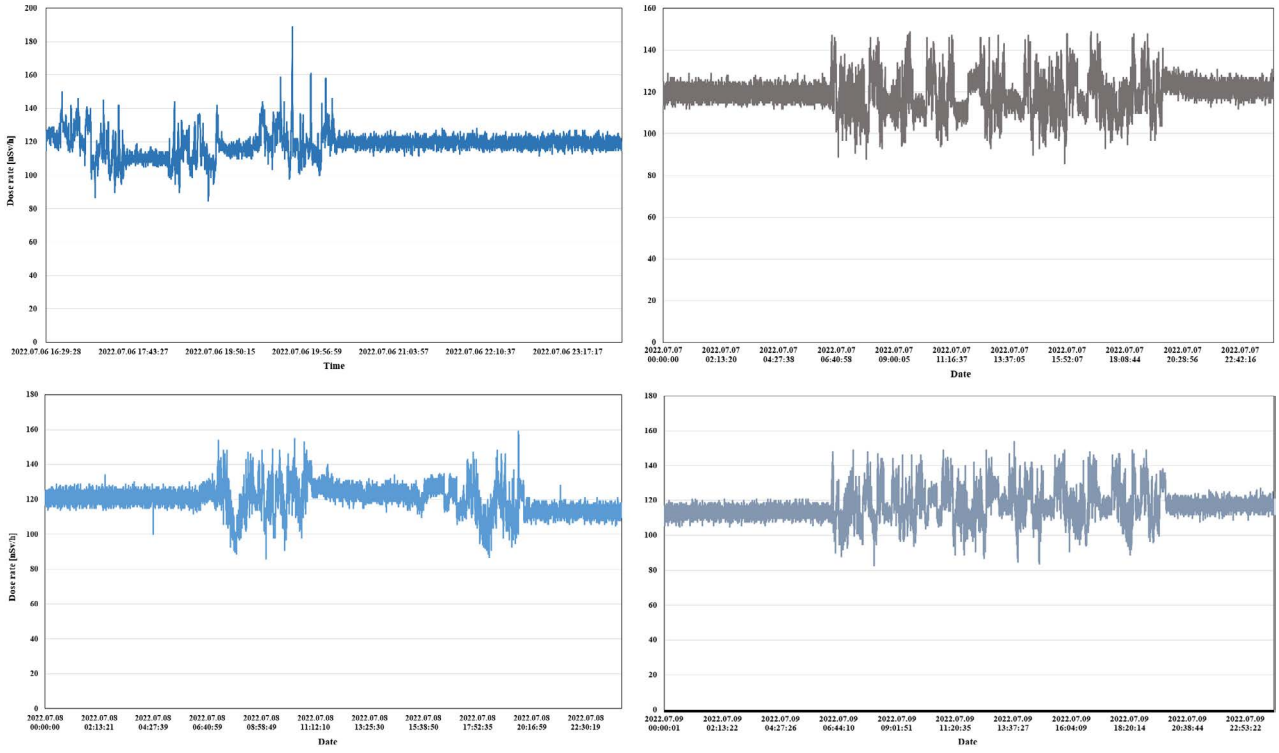

Fig. 11. Trends in radiation dose rate measurements.

Table 3. Radiation dose rate measurements (nSv h^{-1})

Date	7/6	7/7	7/8	7/9
Average	118.4	119.0	120.1	116.8
Maximum	189.0	149.0	159.0	154.0
Minimum	85.0	86.0	86.0	8/3.0
Deviation	7.3	7.4	7.5	8.2

측정 기간 측정 모듈을 장착한 버스는 한빛 원자력발전소 주변을 포함한 영광군 지역을 운행하면서 방사선량 정보를 수집하였다. 일자별 평균, 최소, 최대, 표준편차는 Table 3에 정리하였으며, Fig. 11에 그래프로 정리하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 사물인터넷 기술과 방사선 측정기술을 결합한 이동형 방사선 측정시스템을 개발하고 그 성능을 평가하였다. 방사선 측정시스템은 NaI (Tl)과 GM 계수관을 결합, 측정하여 방사선량, 방사선 에너지, 위치 정보를 서버와 양방향 통신을 수행하도록 하였다.

개발한 계측 시스템의 성능 평가를 위해 실제 지자체의 협조를 통해 버스에 시스템을 장착, 원자력발전소 주변과 인근 지역을 순회하며 측정 모듈의 성능 검증을 수행하였으며 정상적인 측정 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구를 이용하여 향후 원자력 관계시설의 주변 환경 감시에 활용하여 감시 능력 향상과 방사능 방재역량 강화 및 주민 수용성 증대에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 논문은 원자력안전위원회 재원으로, 원자력안전연구사업(No. 2003019-0322)에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Nuclear Safety And Security Commission. 2020. The 2nd National Radioactive Disaster Prevention Plan (2020-2024). https://www.

nssc.go.kr/
2. Integrated Environmental Radiation Monitoring Network. 2019. Introduction of IERNet. https://iernet.kins.re.kr/
3. Lee DM. 2005. Criteria for setting the alarm level of the national environmental radiation monitoring network. *Radioisotope Journal* **20**(4):47-56.
4. Environmental testing - Part 2-6: Tests - Test Fc: Vibration (sinusoidal). KS C IEC 60068-2-6.