Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 3, pp. 209-215, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.3.209

Original article

방사선 작업종사자 안전을 위한 실시간 능동형 안전관리 플랫폼과 데이터 수집 디바이스 개발 연구

박길순[1] · 배기훈[1] · 김용권[1] · 서원기[2,*]

[1](주)뉴케어 기술연구소, [2](주)넥스트코어테크놀로지

Development of a Real-Time Active Safety Management Platform and Data Collection Device for the Safety of Radiation Workers

Kilsoon Park[1], Kihun Bae[1], Yongkwon Kim[1], and Won Ki Seo[2,*]

[1]Technology Research Institute of Nucare, 41, Uiryodanji-gil, Osong-eup, Heungdeok-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, 28161, Republic of Korea
[2]Nextcore Technology, #A RM610, 128, Beobwon-ro, Songpa-gu, Seoul 05854, Republic of Korea

ABSTRACT Radiation work always carries the risk of radiation exposure, so regulatory agencies manage it through licensing when high exposure is expected. However, due to passive management methods using TLD, etc., there are cases where risk management is done after an incident occurs or the incident is covered up. In this study, we developed a system to manage the location of radiation work and the risk of workers in real time through a safety management platform and a location-based personal dosimeter. The safety platform server receives data from the developed personal dosimeter in real time and manages risks in three steps for each worker using location and dose rate, and can predict risks and generate alarms in real time. The personal dosimeter transmits the location and dose rate of the worker in real time using GPS and LTE communication. The developed safety management platform and personal dosimeter were verified through a field test to receive real-time data of the location and dose rate data of the worker, and the risk management function according to the individual dose rate was verified.

Key words: Radiation, Location tracking, Management platform, Real-time monitoring, SiPM

1. 서 론

방사선은 의료, 산업, 연구 등 다양한 분야에서 사용되며, 방사선 작업종사자는 방사선 위험에 항상 노출되어 있다. 방사선 노출은 암, 유전적 손상, 기타 건강 문제를 일으킬 수 있어 위험 관리가 필수적이다. 하지만 현행 방사선 작업종사자 위험 관리는 열형광선량계 등을 이용한 수동적인 관리시스템이 주를 이루고 있어 방사선에 노출된 후 위험이 확인되거나 발생된 위험을 은폐하려는 경우가 발생하고 있다. 특히 고선량을 사용하는 방사선 비파괴검사 분야에서 이러한 문제가 종종 발생하고 있다. 그러므로 방사선 작업종사자의 위험 요소를 관리할 수 있는 실시간 능동형 시스템 도입이 필요하다.

현행 작업종사자의 방사선 피폭을 측정하기 위해 사용되는 개인선량계는 열형광선량계(TLD: Thermoluminescence Dosimeter)[1]와 같은 법정 선량계와 실시간으로 선량률을 측정하고 피폭 위험을 알려주는 자동선량계(ADR: Automated Dosimetry Record) 등이 있다. 방사선 비파과검사(NDT: Non-Destructive Testing) 작업의 경우 TLD는 법적으로 반드시 착용해야 하지만 실시간으로 선량을 모니터링 할 수 있는 개인선량계는 작업 그룹 내 1개만 사용해도 되기 때문에 작업종사자별 실시간 피폭 현황을 확인하는 것이 어렵다[2]. 특히 TLD의 경우 피폭량을 확인하는데 일정한 시간이 걸리기 때문에 사후 조치만 가능하다는 한계가 있다.

본 연구에서는 실시간 작업종사자 안전관리를 위한 플랫폼을 구축하고 데이터 단말기로서 위치기반의 개인선량계를 개발하여 방사선 피폭 위험을 실시간으로 능동 관리할 수 있는 시스템에 대한 연구를 수행하였다.

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Won Ki Seo
Tel: +82-70-5015-2313, Fax: +82-70-5015-2313, E-mail: all@next-core.co.kr
Received 2 September 2024 **Revised** 24 September 2024 **Accepted** 25 September 2024

2. 재료 및 방법

2.1. 개발 시스템의 구조

방사선 작업종사자의 안전을 실시간으로 모니터링하고 관리하기 위한 시스템은 크게 2가지로 구성된다. 첫째, 실시간으로 작업종사자의 피폭 선량과 위치 데이터를 수신하여 위험요소를 관리하고 작업 위치와 개인별 피폭 선량을 관리할 수 있는 관제 플랫폼이다. 둘째, 데이터 수집 디바이스로 실시간으로 데이터를 전송하고 선량률을 모니터링하기 위한 위치기반 개인선량계이다.

안전관리 플랫폼은 LTE (Long Term Evolution) 또는 Wi-Fi 모듈을 이용하여 실시간으로 데이터를 수신한 후 위치데이터와 개인별 피폭 선량을 저장하고 현재의 작업 위험 정도를 모니터링하도록 개발되었다. Fig. 1은 개발시스템의 전제적인 구성을 나타낸 것으로 그림에서 Device n은 개발된 개인선량계를 의미하며, GPS (Global Positioning System)를 이용하여 수집한 작업종사자의 위치 정보와 선량률 정보를 설정된 시간 마다 자동으로 플랫폼 서버에 전송한다. 서버에서 수신한 데이터는 데이터베이스에 저장되며, 안전관리 플랫폼을 통해 작업종사자의 위치와 개별 피폭 선량을 관리한다. 작업종사자의 위험은 3단계로 구분하여 위험이 증가하면 관리자와 개인에게 경보를 발생시켜 즉시 인지할 수 있도록 하였다.

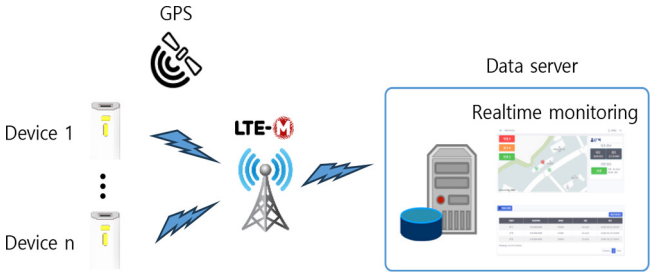

Fig. 1. System structure

2.2. 위치 기반 개인선량계 개발

일반적인 개인선량계는 실시간으로 선량률을 측정하며, 사용자가 설정한 선량률 경보 기준값을 초과할 경우 경보를 발생시켜 위험을 감지할 수 있도록 한다. 개발된 시스템은 방사선 작업이 수행되는 위치 정보를 기반으로 방사선 작업이 승인된 장소에서 실시되는지를 실시간으로 모니터링하며, 작업종사자 안전에 문제가 발생할 경우 즉시 조치를 취할 수 있도록 설계되었다.

개발된 개인선량계의 전체적인 전자회로 블록은 Fig. 2와 같다. 전원 모듈은 리튬이온 배터리를 사용하였으며 내부에 충전회로와 함께 아날로그와 디지털 회로가 사용할 수 있는 전원을 생성한다. 아날로그 회로는 SiPM (Silicon Photomultiplier)을 구동하기 위한 전압 및 신호처리 모듈로 구성되어 있으며, CsI(Tl)과 반응한 방사선 신호를 로직 신호로 변환하여 디지털 회로로 전송한다. 디지털 회로는 제어 및 데이터 수집을 위한 MCU (Micro control unit)와 주변 장치로 구성된다. 주변 장치로는 위치 정보 수집을 위한 GPS, 무선 통신을 위한 LTE와 Wi-Fi 모듈, 시스템 안정화는 위한 온도센서, 디스플레이 모듈, 설정을 위한 키패드 등이 있다. MCU 프로그램은 방사선 데이터를 이용하여 선량률을 계산하고 무선으로 선량률 정보와 위치 정보를 플랫폼 서버로 전송하는 것이 주된 역할이다. 키패드는 기준값 설정이나 단위 변경을 위해 사용되며, LCD (Liquid Crystal Display)는 선량률 표시와 경보 발생시 소리와 함께 화면이 변화되도록 설계하였다. 개발된 개인선량계는 작업종사자가 주머니에 넣을 수 있는 크기로 제작하였다(Fig. 3).

작업종사자 안전관리를 위한 위치기반 개인선량계는 장비 ID,

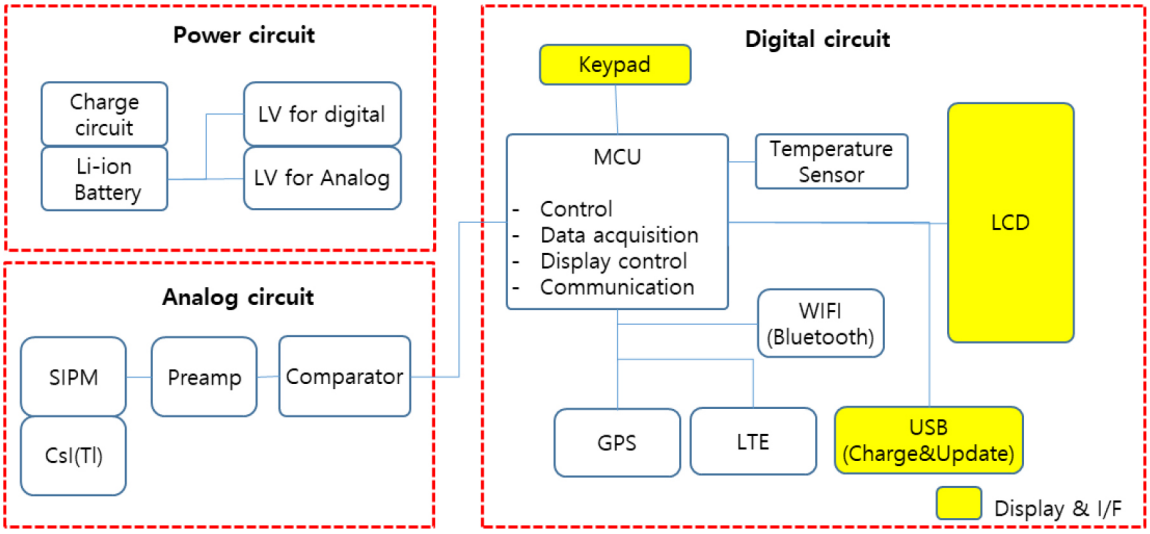

Fig. 2. Block diagram for the device that consists of a power module, an analog module, and a digital module

Fig. 3. Development personal dosimeter

계수율, 선량률, GPS 데이터를 생성하여 LTE 통신으로 서버에 전송한다. Fig. 4은 데이터 패킷의 형태와 실제 데이터의 예를 나타낸 것으로서 패킷 디코딩을 통해 선량률과 작업종사자 위치 정보를 획득할 수 있다.

본 연구에서는 방사선 검출을 위해서 SiPM 광센서와 CsI(Tl) 섬광체를 사용하였다. SiPM이나 PIN의 경우 섬광체 없이 사용하는 경우 1 μSv h^{-1} 이하의 선량률을 측정하는데 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 낮은 선량까지 측정하기 위해 CsI(Tl) 섬광체를 결합하여 사용하였으며[5,6], SiPM과 CsI(Tl)은 일체형으로 패키징 할 수 있도록 설계하고 패키징 구조물은 3D 프린터를 이용하여 제작하였다. Table 1은 장비 사양을 나타낸 것으로 방사선 센서 모듈은 6×6 mm의 SiPM과 CsI(Tl) 섬광체를 사용하였으며 장비 크기는 62 mm×117.5 mm이고 무게는 188 g으로서 휴대가 편리하도록 제작하였다. Fig. 5는 검출기 모듈과 장비에 장착한 사진을 나타낸 것으로 왼쪽에 섬광체와 SiPM을 나타낸 것이며 오른쪽에는 빛이 들어가지 않도록 최종 패키징한 사진이다. SiPM을 포함하는 검출기 회로 부분은 외부의 전자파 영향을 받지 않도록 PCB의 상단과 하단 층에 별도의 접지층을 추가하여 설계하였다.

2.3. 관제 플랫폼 개발

방사선 작업 시 안전관리의 핵심은 방사선 작업종사자별 피폭 선량과 위험을 관리하는 것이다. 이를 위해 방사선 작업 현장에서의 선량률 정보와 작업종사자의 현재 위치를 파악하는 것이 우선적으로 선행되어야 한다. 방사선작업종사자 안전관리 플랫폼에서는 작업 지역 내에서 개인선량계 및 GPS를 통해 수집된 작업종사자 위치정보를 디지털 매핑을 통해 표시한다. 매핑 알고리즘은 2D 또는 3D-BIM (Building Information Modeling)을 통해 WebGL (Web Graphics Library) 기반으로 디지털 맵으로 구현하였다. 이를 통해 작업 현장의 실시간 상황을 직관적으로 파악할 수 있다.

개인별 표준상태와 임계상태 관리를 위해서 개인별 선량률 분석 및 패턴 추출 방법으로 피어슨 계수 상관 분석 방법(Pearson Correlation Analysis method)과 상관계수 함수 추정

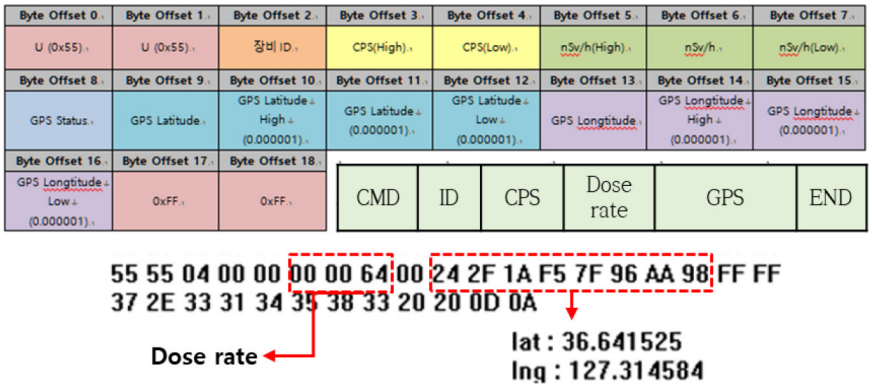

Fig. 4. Packet structure

Table 1. Specifications for Worker Location-Based Personal Dosimeter

Items	Contents	Items	Contents
Detector	SIPM: 6×6 mm^2 CsI(Tl): 6×6×3 mm^3	Communication	LTE CAT.M1 Wi-Fi, BTE
Operation time	Over 8h	Locator	GPS
Power	Li-ion USB charging	Unit	cps, dose rate (μSv/year, μSv/h)
Display	0.9inch LCD	Button	Power & data transfer
Size	62×117.5 mm^2	Weight	188 g

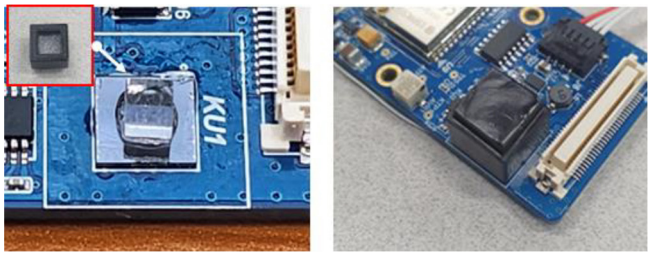

Fig. 5. SiPM and CsI(Tl) detector packaging and mounting board photos

방법론(Correlation coefficient functional method)을 적용하고 B-Spline 함수 추정을 통한 연관 관계 분석과 학습 알고리즘을 적용하여 개인별 선량 피폭 패턴을 저장하고 관리할 수 있는 데이터 관리 시스템을 구축하였다. Fig. 6는 방사선 작업종사자 피폭 예측 알고리즘과 이를 이용한 분석의 예를 나타낸 것으로 작업종사자의 위치를 파악하고 선량 위험 수준을 매핑한다. 작업종사자의 위치에서 노출 위험이 최대치에 도달하면 알람이 전송되며, 이 패턴은 데이터베이스에 저장된다. 향후 데이터베이스에 저장된 위험 패턴과 유사한 상황이 발생하면 사전에 알람을 전송할 수 있어 예방적 안전관리가 가능하다.

작업종사자 안전 관리 플랫폼은 Fig. 7과 같이 구조적으로는 방사선 작업 구역과 서버 플랫폼으로 구성되어 있으며 기능적으로는 측정과 분석, 최적화로 구분할 수 있다. 측정기능은 개발된 개인선량계를 이용하여 작업종사자의 피폭 선량과 위치 정보를 수집하고 무선 통신을 통해 서버에 전송한다. 플랫폼 영역에서는 DBMS (Database Management System) 모듈을 통해 수집데이터, 위치데이터, 장비 정보, 선량률 등을 저장한다. 서비스 모듈에서는 관련 데이터를 이용하여 작업종사자 위치 추적, 피폭 선량 추적, 통계 데이터 생성, 지도와의 매핑 기능을 수행한다. 최적화 기능은 수집된 데이터를 이용하여 작업종사자 위험 정도를 관리하고 시각적으로 실시간 관제할 수 있는 정보를 제공한다. 이를 통해 관리자는 즉각적인 의사결정을 내릴 수 있으며, 작업장사자의 안전을 보다 효과적으로 확보할 수 있다.

3. 결 과

개인선량계는 성능 검증을 위해 ^{137}Cs 교정 선원과 교정된 선량계를 이용하여 계수율과 선량률 시험을 수행하였다. Table 2는 교정선원을 이용하여 측정된 계수율과 선량률을 나타낸 것으로, 이 데이터를 이용하여 선량률 교정을 수행하였고, 현장 시험

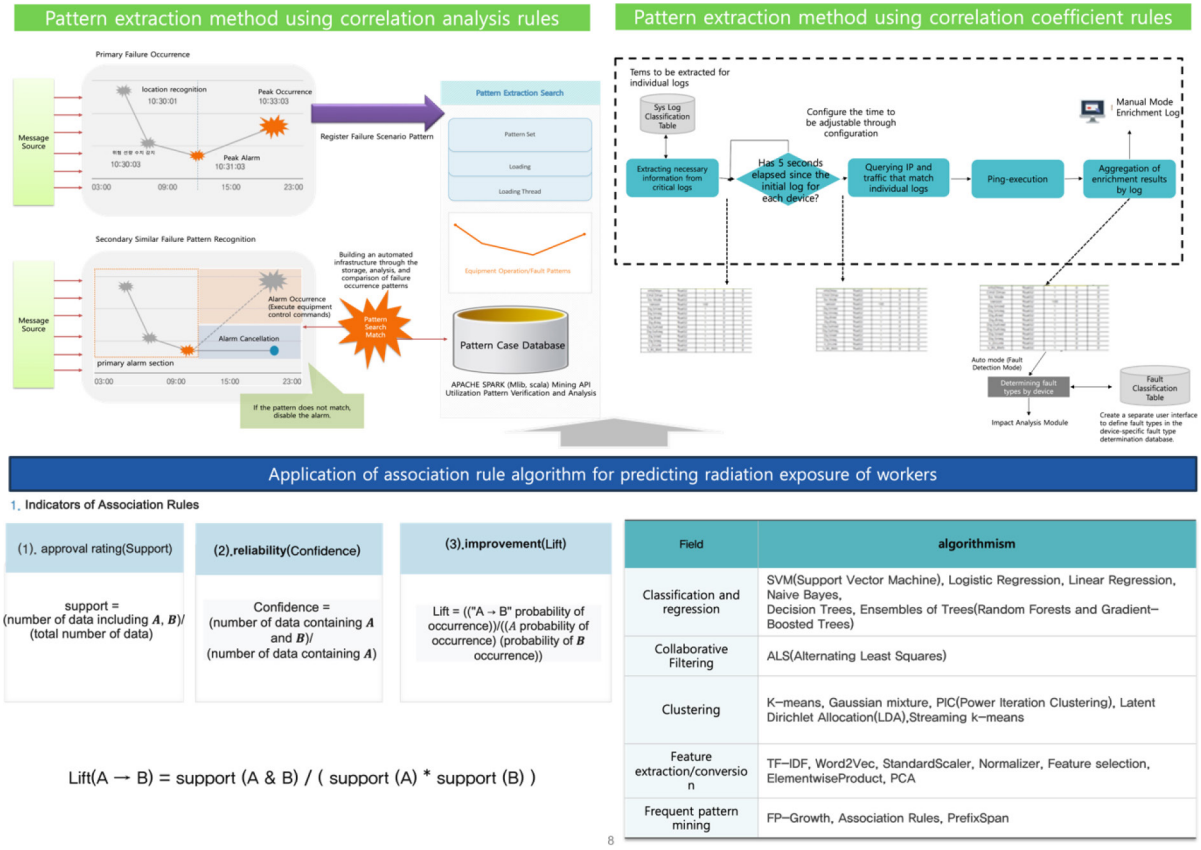

Fig. 6. Applying radiation exposure dose learning and mapping algorithms

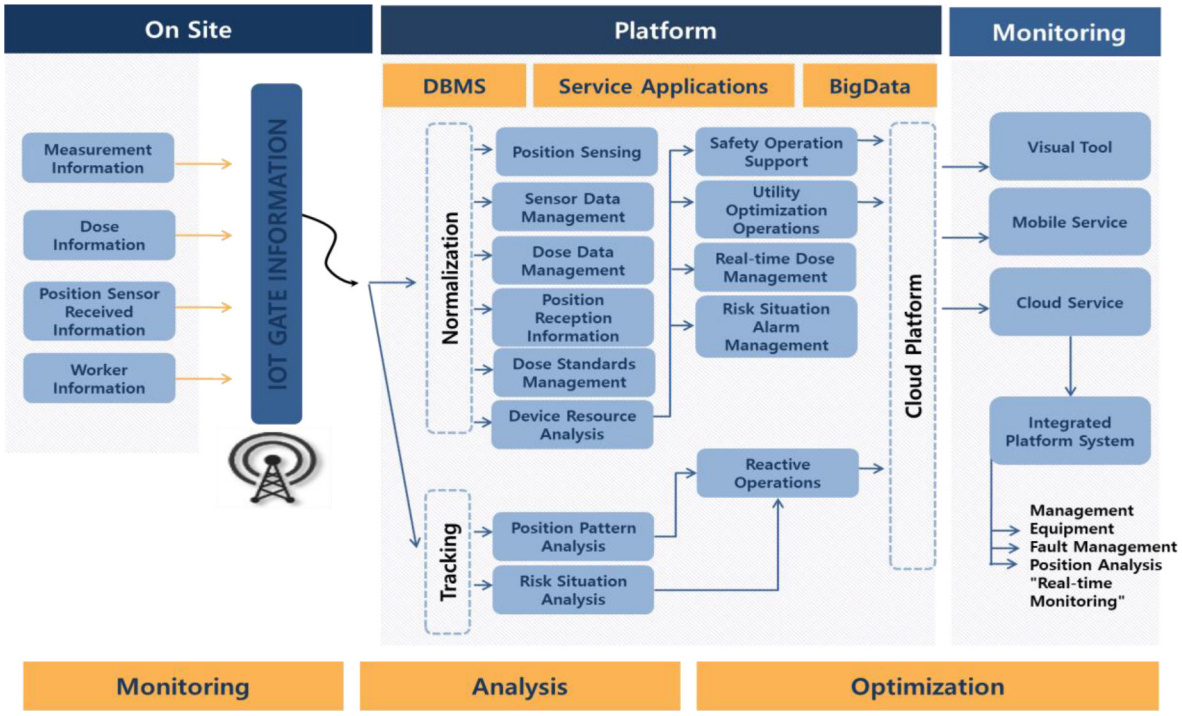

Fig. 7. Overall configuration of the digital twin-based radiation safety management platform

Table 2. Relationship between dose rate and counting rate

Average count rate	μSv h^{-1}
1.32	0.16
97.80	6.56
238.96	9.42
414.71	12.34
2699.43	46.52
5511.47	95.48

을 통해 작업종사자 위치 정보와 측정된 선량률이 정상적으로 서버에 전송되는 지 검증하였다.

안전관리 플랫폼은 LTE 통신를 통해 수신한 장비 패킷 정보를 해석하여 저장하고, 작업종사자와 장비를 연동하여 개인선량계를 통해 측정된 선량률 정보와 GPS 정보를 사용자에 매핑하였다. Fig. 8은 구현된 관제 프로그램을 보여준다. 상단 맵 화면에서는 GPS 정보를 이용하여 작업종사자 위치를 지도상에 표시하고 선량률의 위험 정도에 따라 작업종사자들의 상태는 3단계로 구분하여 시각적으로 표현함으로써, 위험정보를 직관적으로 파악할 수 있도록 하였다. 하단 화면은 작업종사자 현황과 상세정보를 제공하는 화면으로서 작업종사자의 연락처, 장비 ID, 선량률 및 위치를 표시하여 개인별로 관리할 수 있도록 구현하였다. 관제 플랫폼과 개인선량계의 성능 검증을 위해 현장 시험을 수행하였다. 데이터가 정상적으로 수신되는 것을 확인하였으며, 선량률의 변화에 따라 위험 구간이 적절히 관리되는 것을 검증하였다. 이를 통해 개발된 시스템이 실제 작업 환경에서 효과적으로 작동함을 입증하였다.

4. 고 찰

방사선 작업은 작업종사자의 피폭 위험을 동반하고 있으며 특히 방사선 비파괴검사와 같이 고선량을 사용하는 작업의 경우 고 피폭 가능성이 매우 높다. 그러나 기존의 수동적인 관리 방식으로 인해 피폭 사실이 시간이 지난 후에 야 확인되거나, 심각한 경우 발생한 사고를 은폐하려는 시도가 있어왔다. 이는 작업종사자의 건강과 안전을 심각하게 위협할 뿐만 아니라, 방사선 안전 관리의 신뢰성을 저하시키는 요인이 되어왔다. 본 연구에서는 안전관리 플랫폼과 위치기반 개인선량계 개발을 통해 방사선 위험 관리를 실시간으로 할 수 있는 체계를 개발하였다. 개발된 시스템의 기능과 구조를 향후 방사선 작업의 위치와 작업종사자의 위험을 관리할 수 있는 실시간 능동적인 관리 시스템 구축에 필요한 기초 자료로 활용하고자 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 작업종사자 피폭이 예상되는 작업에 대해서 수동적 관리방식 넘어 실시간으로 작업종사자의 위험을 관리하고 모니터링할 수 있는 시스템을 개발하고 그 기능을 검증하였

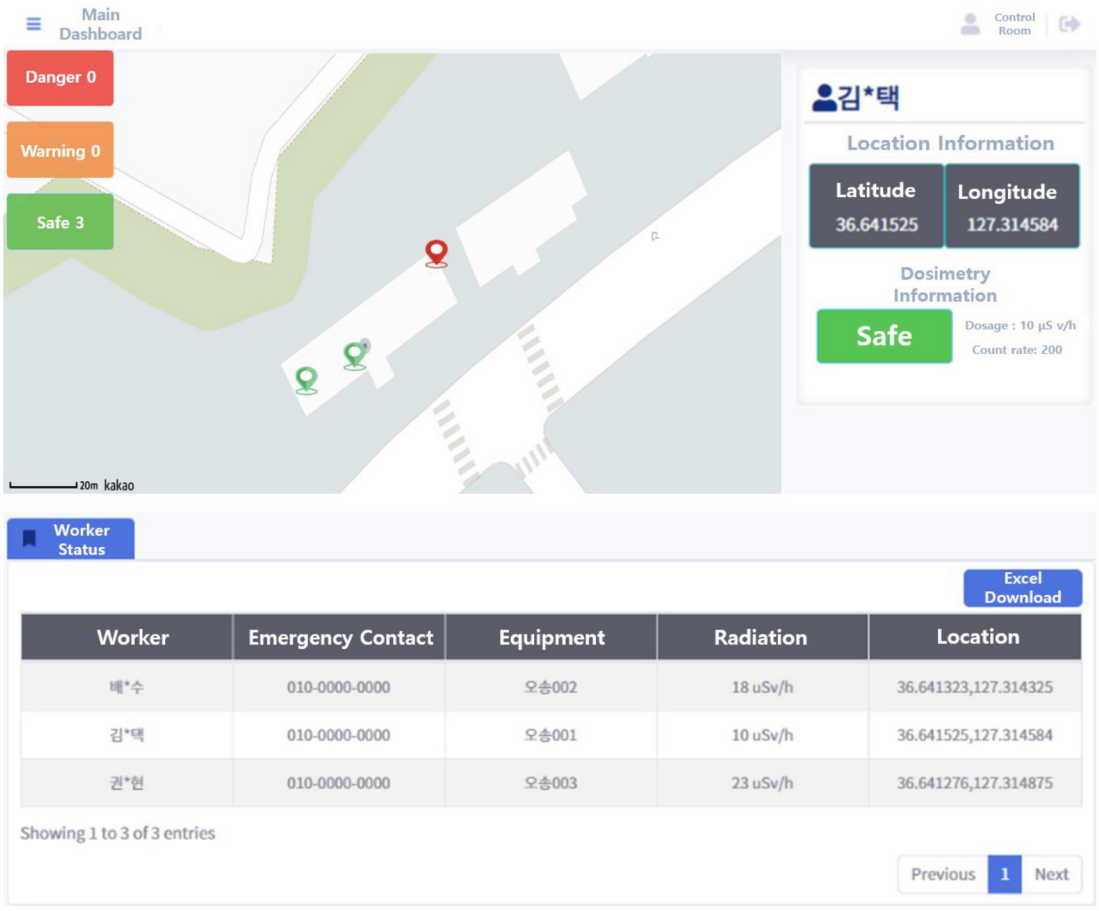

Fig. 8. GPS location mapping and individual dose rate management

다. 개발된 시스템을 통해 허가 받은 방사선 작업 위치를 모니터링하고 작업종사자의 방사선 피폭 위험을 실시간으로 관리할 수 있는 안전관리 플랫폼과, 이에 필요한 데이터를 수집하기 위한 위치 기반 개인선량계 설계하여 기능적인 유효성을 확인하였다.

개인선량계는 SiPM와 CsI(Tl) 섬광체를 검출기 모듈로 사용하였으며 GPS와 LET 모듈을 통해 작업종사자의 위치와 선량률을 실시간으로 서버에 전송할 수 있도록 개발하였다. 안전관리 플랫폼은 웹 기반으로 구현되어 관리자가 작업종사자의 위치와 선량률의 실시간 변화 및 위험 정보를 표시하고 필요시 위험 경보를 발령할 수 있도록 구현하였다. 개발된 안전관리 플랫폼과 개인선량계는 현장 시험을 통해 검증되었다. 작업종사자의 위치와 선량률 데이터가 실시간으로 전송되고 선량률에 따라 단계별로 위험을 관리할 수 있음을 확인하였다. 개발된 시스템은 방사선 안전 규정 준수를 강화하고, 작업종사자의 건강을 보호하는데 기여할 것으로 기대된다.

향후 추가적인 연구를 통해 방사선 비파괴검사분야 뿐만 아니라 방사선 위험이 있는 관리구역이나 병원 등에도 적용할 수 있도록 시스템을 개선할 것이며, 또한 UWB (Ultra-wide beam) 기술을 이용한 실내 위치 측위 기술을 도입하여 건물내에서도 작업종사자의 정확히 추적할 수 있는 연구를 진행할 계획이다. 이를 통해 다양한 환경에서 작업종사자의 방사선 피폭 위험을 더욱 효과적으로 관리하고 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 연구 성과와 향후 계획은 방사선 작업 환경의 안전성을 크게 향상시키고, 작업종사자의 건강과 복지를 증진시키는 데 중요한 역할을 할 것이다.

사 사

본 연구는 2022년도 중소벤처기업부의 기술개발사업[S3324625]과 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구임(No. 20224B10300090).

참고문헌

1. https://www.nea.gov.sg/our-services/radiation-safety/radiation-protection-services.
2. Enforcement Decree of the Atomic Energy Safety Act, Equipment Standards for Permitting Production of Radioisotopes, etc.
3. Qingxi Yang, Qiaokun Kang, Qingyang Huang, Zenghui Cui, Yu Bai

and Huanan Wei, Linear correlation analysis of ammunition storage environment based on Pearson correlation analysis. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1948/1/012064.
4. Joseph Lee Rodgers & W. Alan Nicewander, Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient. https://doi.org/10.1080/00031305.1988.10475524.
5. P. Buzhan, A. Karakash, Yu. Teverovskiy, Silicon Photomultiplier and CsI(Tl) scintillator in application to portable H*(10) dosimeter, https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.067.
6. Sapna Kumari C, Thrishank H S, Design and Development Of Scintillation Based Gamma Dosimeter Using SIPM Detector. https://doi.org/10.1109/MysuruCon55714.2022.9972694.