

원자력 비상 방재 방호 기술 개발 현황

- 대피 차량 탑재 이동식 방사선 모니터링 시스템

UNIST

김희령, 이현민, 신승훈

목차

CONTENTS

CHAPTER/1. 연구 배경

CHAPTER/2. 대피 차량 탑재 이동식 선량 모니터링 시스템

CHAPTER/3. 차량 탑재 이동식 토양 방사능 모니터링 시스템

CHAPTER/4. 결론 및 향후 계획

1. 연구 배경

- ▶ 방사능 복합재난 발생 시 대기 중으로 누출된 방사성핵종에 의해 방사선 피폭 야기

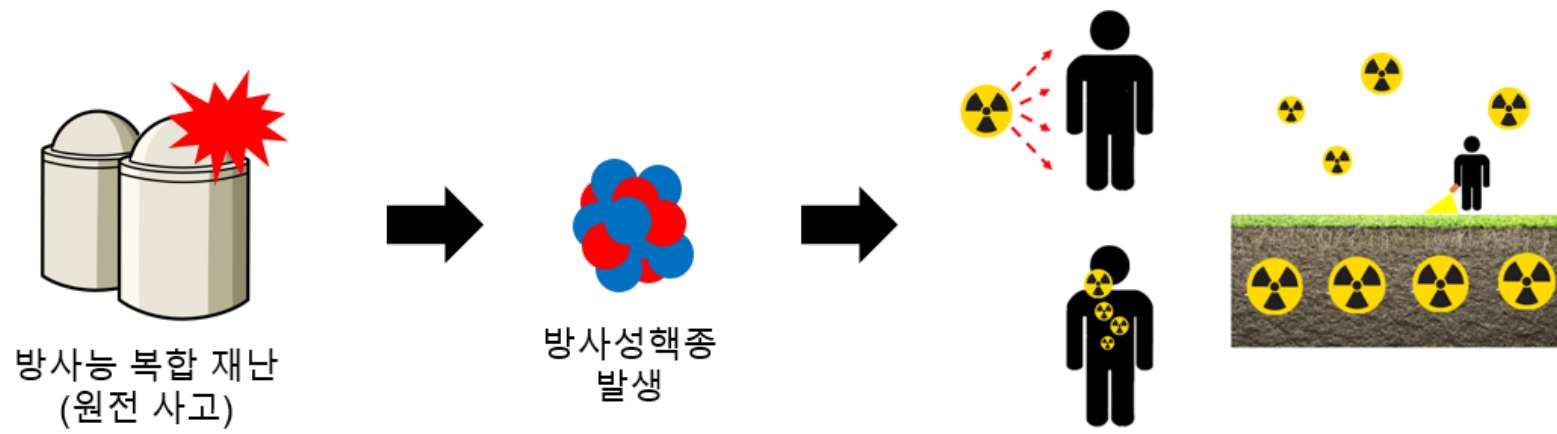
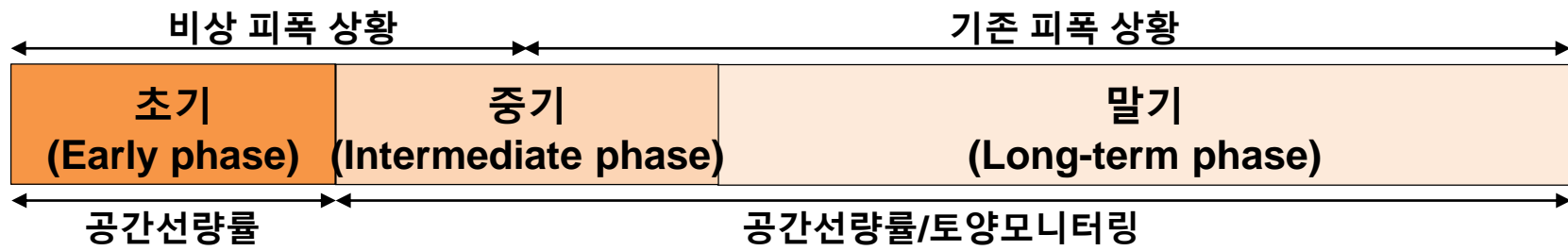


그림 1. 방사능 복합 재난에 의한 방사선 피폭 과정

- ▶ 원자력 사고의 3단계



1. 연구 배경

- ▶ 인근 지역 주민은 비상 대피 계획에 따라 차량을 이용하여 대피
- ▶ 대피 과정에서 주민들을 대상으로 외부 피폭 관리 필요
- ▶ 대피 경로 내 방사성오염에 의한 위험 지역 파악 및 즉각 대응 필요
- ▶ **대피 차량 탑재 이동식 방사선 모니터링 시스템 개발**
 - 사고 초기 대피 과정: 주변 공간선량률
 - 사고 중기/환경 복원 단계: 주변 공간선량률 및 침적 토양 모니터링

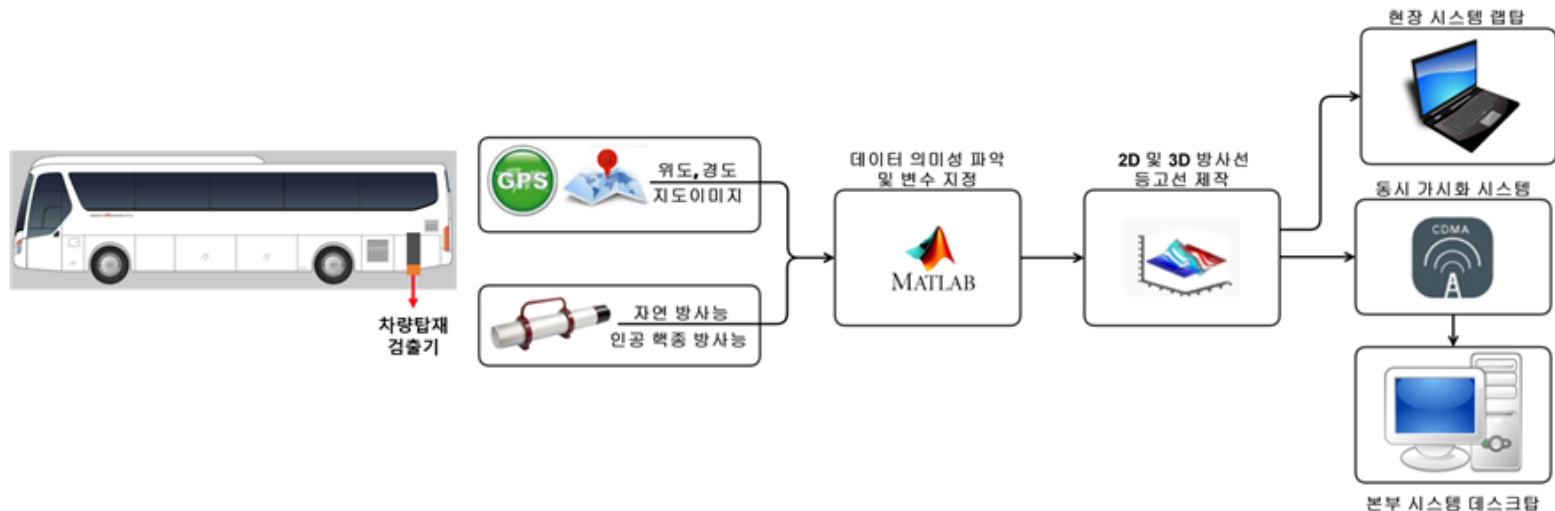


그림 2. 이동식 모니터링 시스템 구축 개념 모식도

2. 대피 차량 탑재 이동식 선량 모니터링 시스템

- ▶ 대피 과정 주민 대상 외부 피폭 관리를 위한 대피 차량 탑재 이동식 방사선 모니터링 시스템 개발
 - 대상: 감마선 및 엑스선
 - 대피 과정에서 이동하는 차량 내부의 공간선량률 (이동 속도 미보정)
→ 대피 차량내 주민이 받는 피폭선량
 - 대피 과정에서 이동하는 차량 주변의 공간선량률 (이동 속도 보정)
→ 대피 경로 상의 공간 (공기, 토양) 중의 방사성오염에 의한 선량
 - 이동식 검출기의 경우, 차량 이동 속도에 따른 검출 선량 차이 발생
→ 속도에 따른 보정 필요
- ▶ 이동식 모니터링 시스템 속도 보정
 - 이동 속도 증가에 따라 검출기에 도달하는 방사선의 수가 상대적으로 감소
 - 측정 지점의 방사능 및 선량을 명확히 검출하기 위하여 속도에 따른 보정
 - 이동 속도에 따른 검출기 선량 변화 도출 기연구 사례 기반

2. 대피 차량 탑재 이동식 선량 모니터링 시스템

▶ 이동식 모니터링 시스템 속도 보정 기연구 사례

- 측정 대상: 토양 침적 감마선
- 검출기: NaI(Tl) + PVT
- 선원: Co-60, 핫스팟 크기별로 실험 수행
- 차량 스캐닝(이동) 속도/핫스팟 크기에 따른 선량률 평가

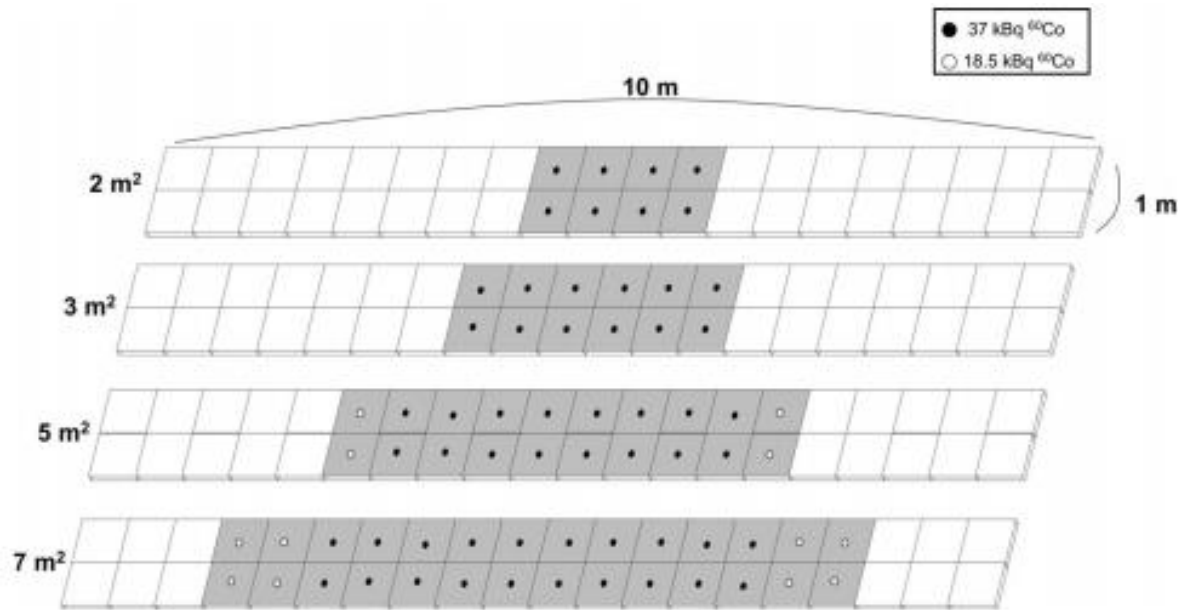


그림 3. 핫스팟 크기별 선원 배치¹⁾

¹⁾S. Park, C. Lee, H. R. Kim, Applicability of a mobile in situ gamma detector with different scan speeds for evaluating hotspots in decommissioning sites, Journal of Korean Physics Society, 2022.

2. 대피 차량 탑재 이동식 선량 모니터링 시스템

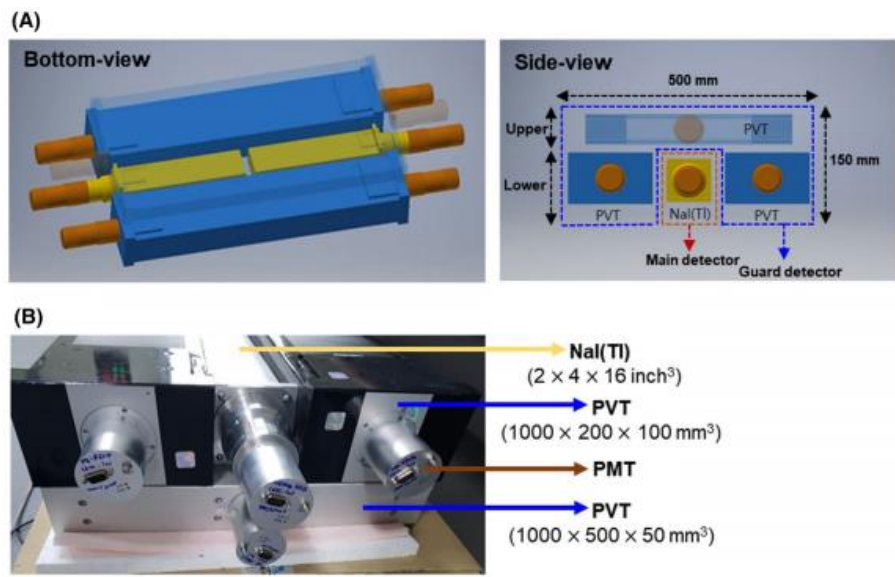


그림 4. 차량 탑재 감마선 검출기의 기하학적 구조^{1, 2)}

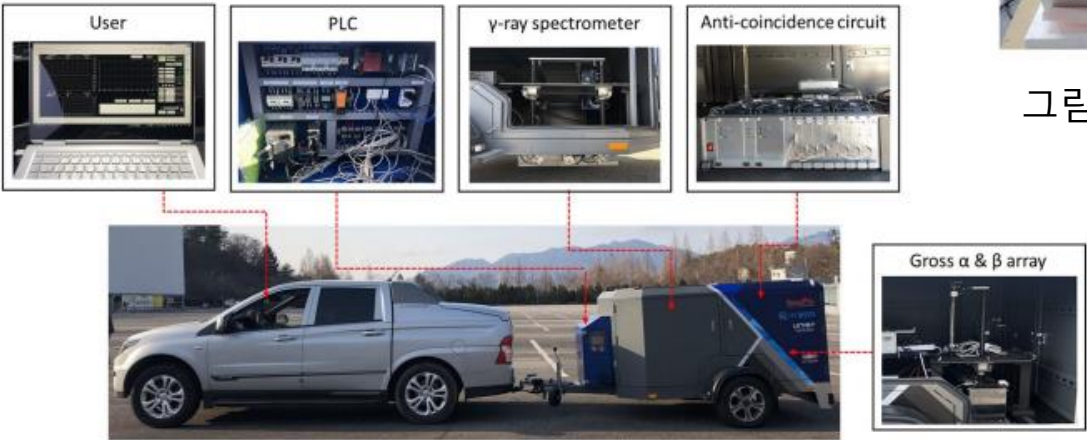


그림 5. 이동식 모니터링 시스템 전체 구조¹⁾

¹⁾S. Park, C. Lee, H. R. Kim, Applicability of a mobile in situ gamma detector with different scan speeds for evaluating hotspots in decommissioning sites, Journal of Korean Physics Society, 2022.

²⁾C. Lee, S. Park, H. R. Kim, Development of mobile scanning system for effective in-situ spatial prediction of radioactive contamination at decommissioning sites, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A, 2020.

7 / 23 방사능 재난 대피시설 방호기술 개발 | UNIST

2. 대피 차량 탑재 이동식 선량 모니터링 시스템

- 직접 측정법 기반 지점별 선량률 측정
 - 핫스팟 크기별($2 \sim 7 \text{ m}^2$)로 0.5 m 씩 이동시켜 측정
 - 핫스팟 크기에 따른 선량률 분포 도출
- 대칭적인 분포

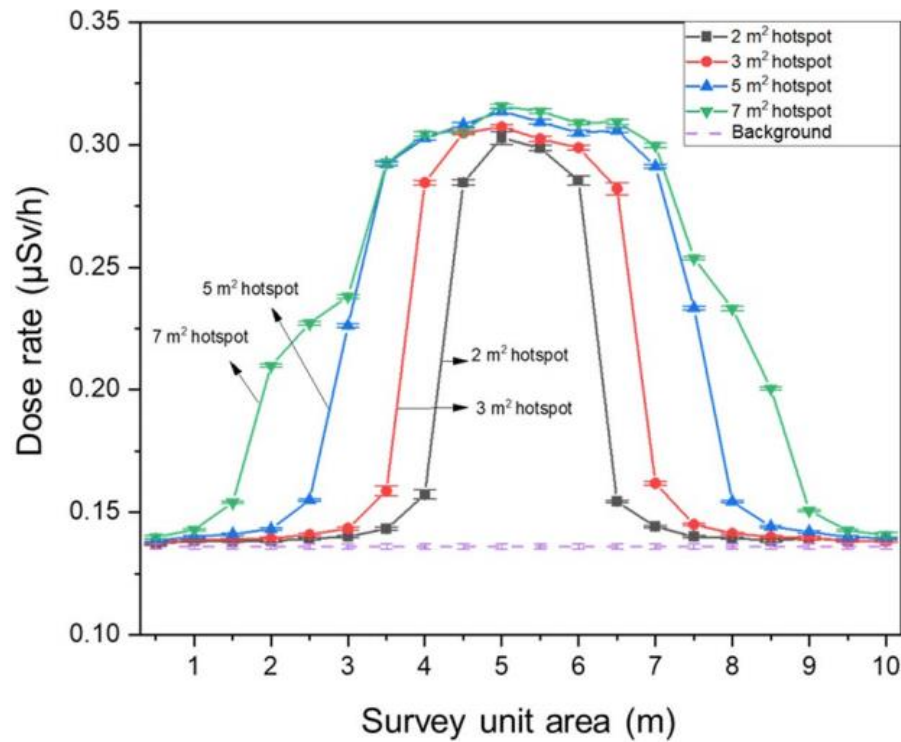


그림 6. 측정 지점별 선량률¹⁾

¹⁾S. Park, C. Lee, H. R. Kim, Applicability of a mobile in situ gamma detector with different scan speeds for evaluating hotspots in decommissioning sites, Journal of Korean Physics Society, 2022.

2. 대피 차량 탑재 이동식 선량 모니터링 시스템

- 스캐닝 속도에 따른 선량률 측정
 - 스캐닝 속도/핫스팟 크기별 최대/평균 선량률 도출
- 속도가 증가함에 따라 측정되는 선량률 감소

“차량 이동 속도에 따른 선량률 감소를 보정한 이동 경로 내 선량 분포 데이터 획득”

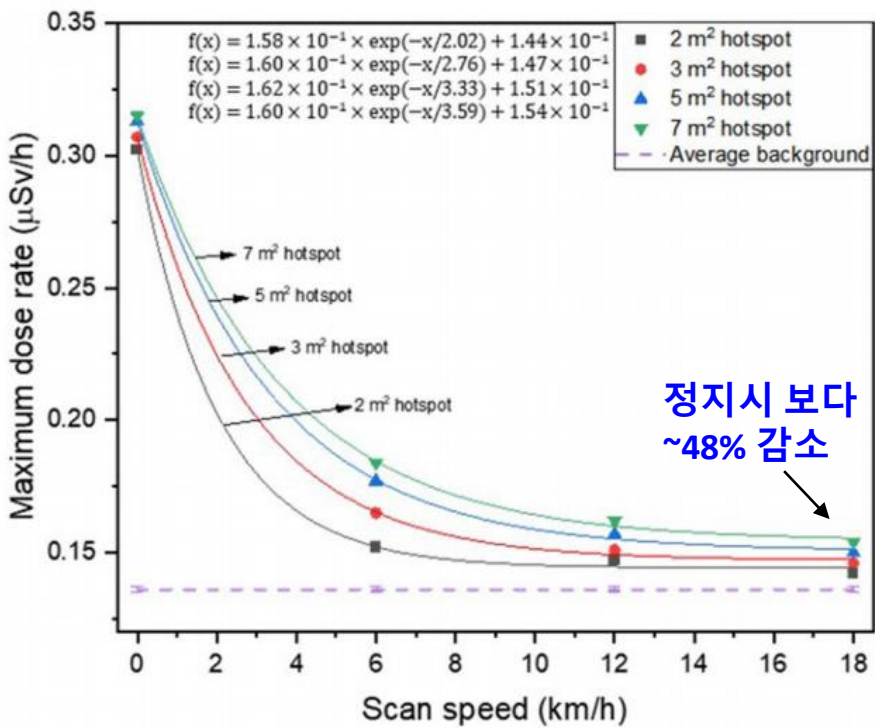


그림 7. 스캐닝 속도/핫스팟 크기별 최대 선량률¹⁾

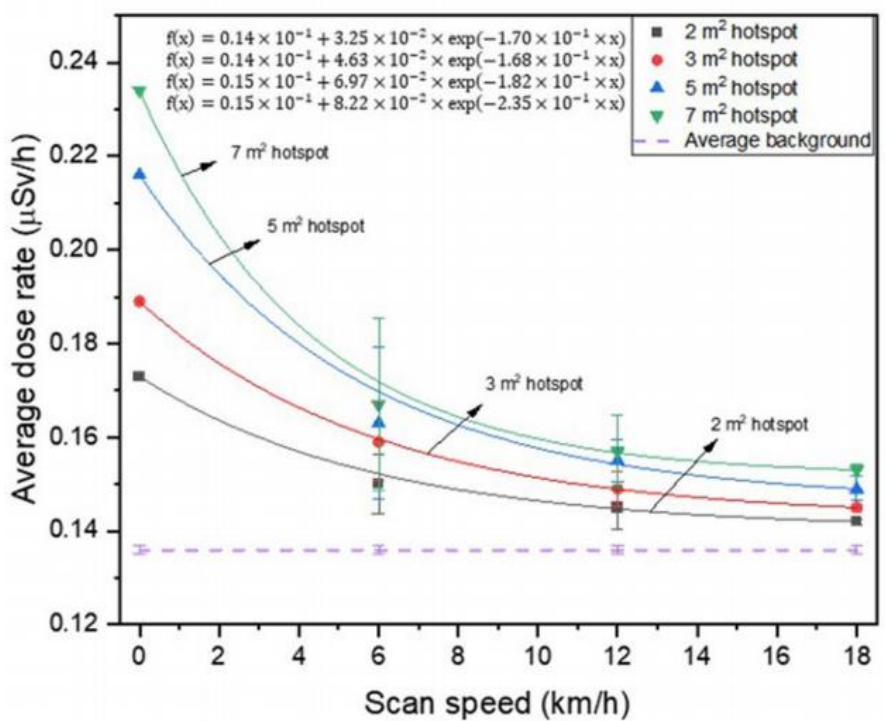


그림 8. 스캐닝 속도/핫스팟 크기별 평균 선량률¹⁾

2. 대피 차량 탑재 이동식 선량 모니터링 시스템

▶ 차량 이동 속도 보정

● 차량 이동 속도 보정 방법론

- 고방사선장 내 차량 이동에 따른 선량 측정값 변화 추이 도출 필요 → 실험적 모사 한계
- MCNP 시뮬레이션 활용
- MCNP 기반 토양 핫스팟에 대한 차량 이동 속도별 검출 효율 변화에 관한 기연구 사례^{3, 4)}
- 이동 속도에 따른 위치 변화를 이용
- 위치에 따라 입체각 및 거리 변화 → 상대적인 방사선 선량이 다름

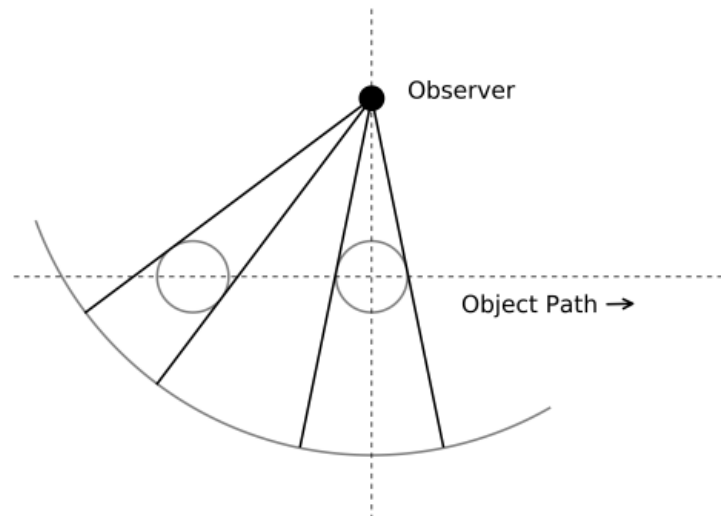


그림 9. 입체각 변화⁴⁾

³⁾T. Alecksen, R. Whicker, Scan MDCs for GPS-based Gamma Radiation Surveys, Health Physics Society, 2016.

⁴⁾J. T. Falkner, Minimum detectable activity as a function of detector speed, Doctoral Thesis, Texas A&M University, 2018.

2. 대피 차량 탑재 이동식 선량 모니터링 시스템

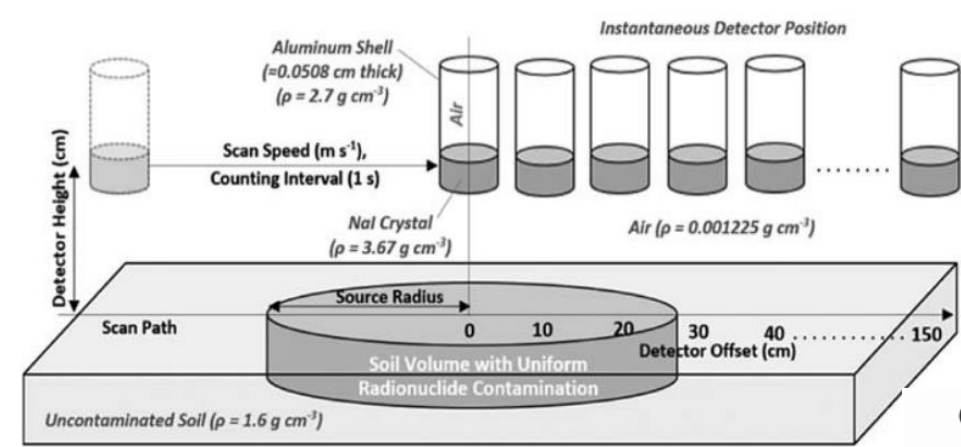


그림 10. 시뮬레이션 모식도^{3, 4)}

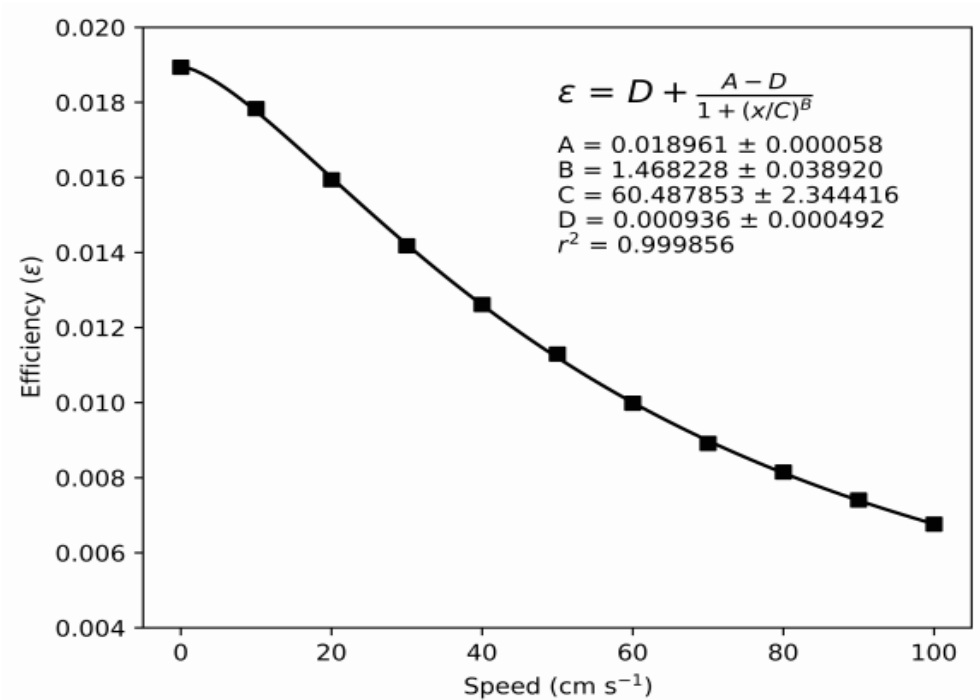


그림 11. 속도에 따른 MCNP 시뮬레이션 검출 효율 변화^{3, 4)}

³⁾T. Alecksen, R. Whicker, Scan MDCs for GPS-based Gamma Radiation Surveys, Health Physics Society, 2016.

⁴⁾J. T. Falkner, Minimum detectable activity as a function of detector speed, Doctoral Thesis, Texas A&M University, 2018.

2023 방사능 재난 대피시설 방호기술 개발 | UNIST

2. 대피 차량 탑재 이동식 선량 모니터링 시스템

- 차량 이동 속도 보정 방법론 적용 시뮬레이션(안)
 - 원통형 오염 토양 → 반구형 오염 공기
 - 선원: 사고 시 주요 방출 핵종 대상 (Cs, I, Xe, Kr)
 - MCNP 기반 공기 핫스팟에 대한 차량 이동 속도별 검출효율/선량률 도출

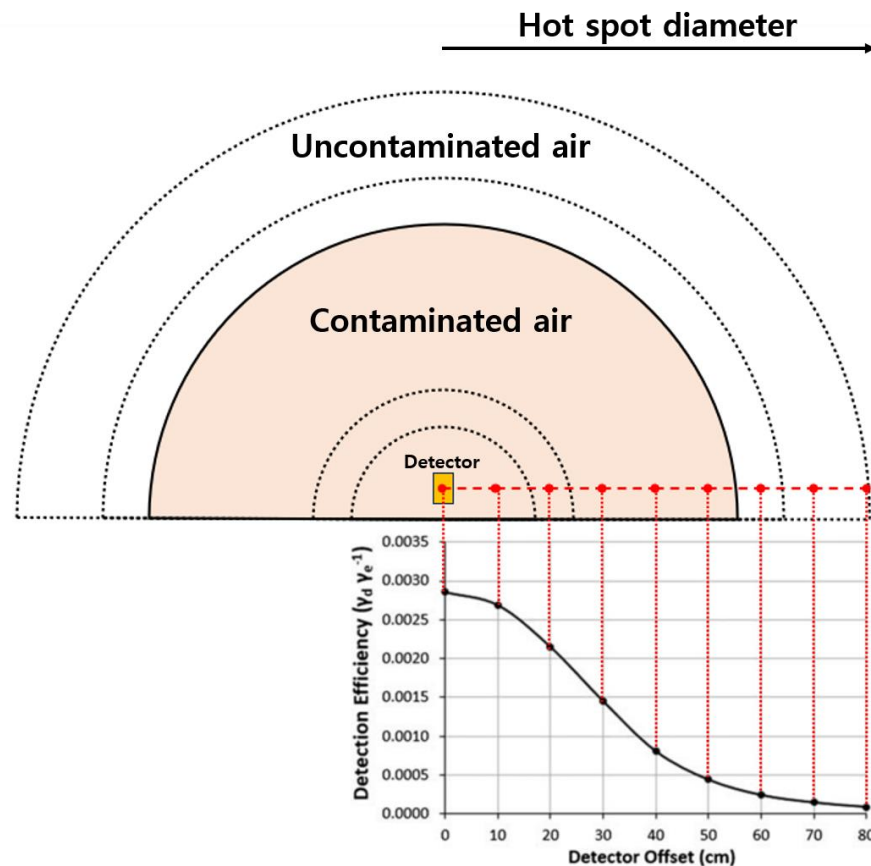


그림 12. 시뮬레이션 예상 모식도

3. 차량 탑재 이동식 토양 방사능 모니터링 시스템

- ▶ 사고 초기 단계 이후 토양 침적 방사능 농도 모니터링을 위한 차량 탑재 이동식 검출기
 - 대상: 감마선 및 엑스선
 - 이동식 검출기의 경우, 차량 이동 속도에 따른 검출 효율 고려 → 속도에 따른 보정
 - 차량 이동 속도를 보정한 토양 침적 방사능 농도
 - Scan MDC 기반 환경방사능 및 인공방사성핵종에 의한 방사능 구분

$$Scan\ MDA\ [\frac{Bq}{m^2}] = \frac{1.38\sqrt{N_{bi}}}{i\sqrt{p}\epsilon A}$$

$$i = \frac{0.5}{v}$$

ϵ : 검출기의 검출효율

N_b : 측정된 총 백그라운드 계수

N_{bi} : 측정 구간 i 동안 측정된 총 백그라운드 계수

p : 측정사의 효율 (차량 탑재용의 경우 1)

$$Static\ MDA\ [Bq/m^2] = \frac{3 + 4.65\sqrt{N_b}}{\epsilon A}$$

A : 검출기 유효면적 [m^2]

i : 측정 구간

v : 스캐닝 속도 [m/s]

3. 차량 탑재 이동식 토양 방사능 모니터링 시스템

▶ 차량 이동 속도 보정

- 랩스케일 차량 이동 속도 보정 장치 활용 기초 실험
- 목표 최대 속도: 50 km/hr
- Pneumatic linear actuator: 에어실린더를 활용하여 고속으로 선원을 이동

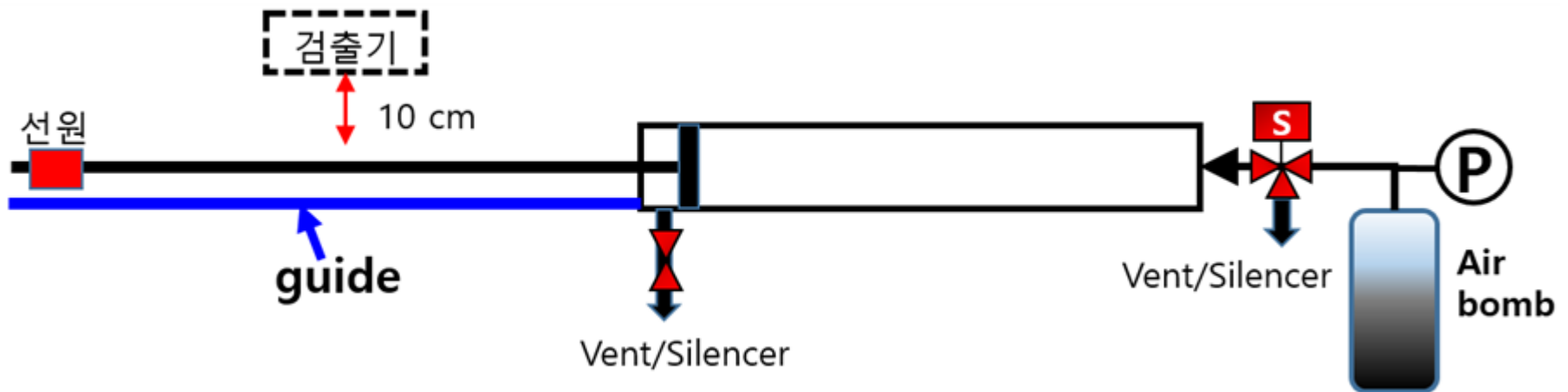


그림 13. 차량 이동 속도 보정 실험 장치 개략도

- 대피 차량 이동 현장 모사 실험 연계

3. 차량 탑재 이동식 토양 방사능 모니터링 시스템

▶ 시뮬레이션 기반 Scan MDC 추정

- 이동식 검출기의 환경방사능 및 인공방사성핵종에 의한 방사능 구분
- MCNP6 시뮬레이션 활용
- 3 inch NaI(Tl) 검출기
- I-131 및 Cs-137 방사성핵종을 기준으로 계산 수행
- 국내 원자력이용시설 (원자력발전소 등) 주변 환경방사능 준위를 바탕으로 시뮬레이션 수행

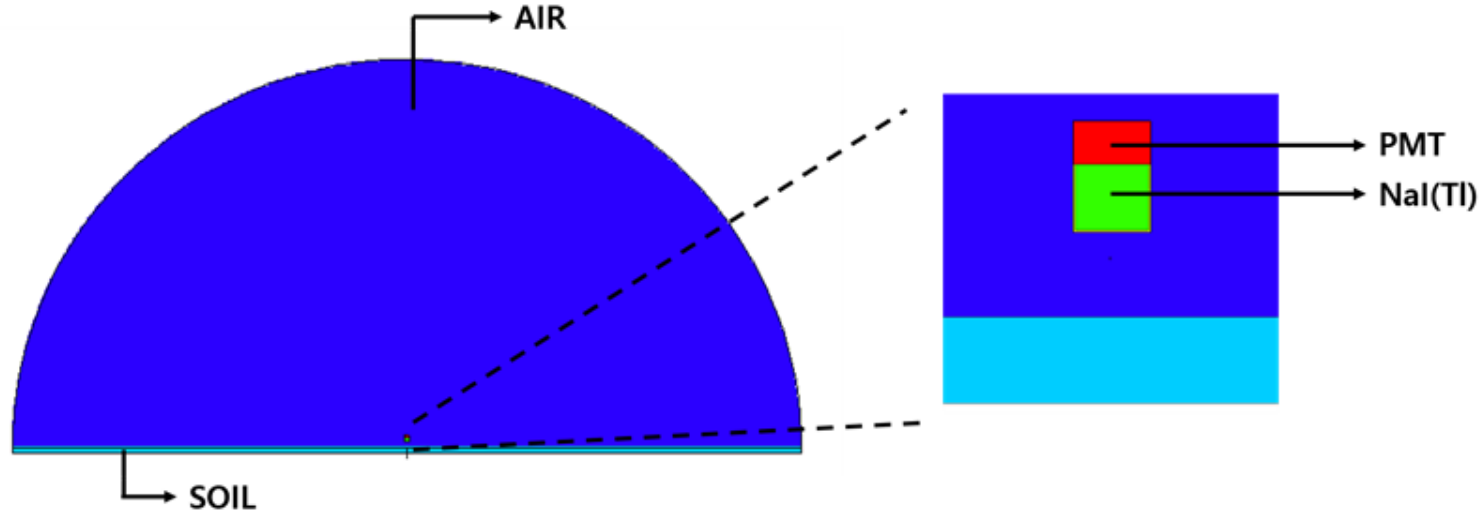


그림 14. 몬테칼로 시뮬레이션 셋업

3. 차량 탑재 이동식 토양 방사능 모니터링 시스템

▶ 시뮬레이션 기반 Scan MDC 추정

- 국내 연평균 자연방사선 피폭선량: 3 mSv
- 비상피폭상황에 대한 최소 참조준위: 20 mSv

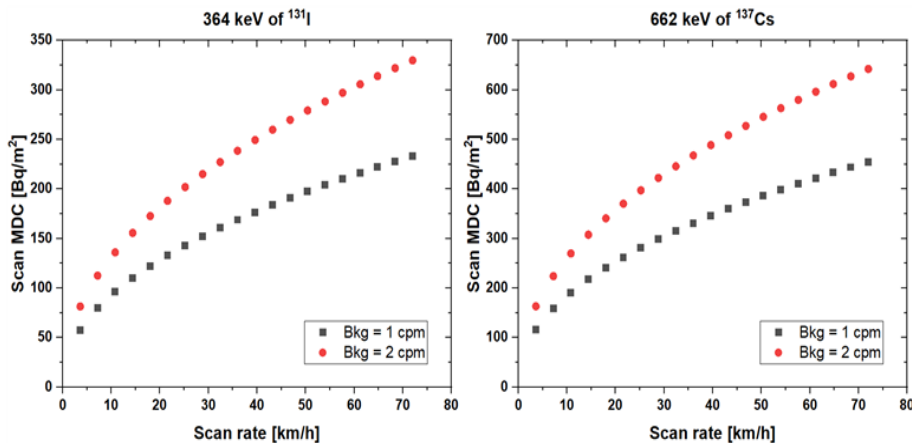


그림 15. 일반상황을 가정하여 추정된 scan MDC

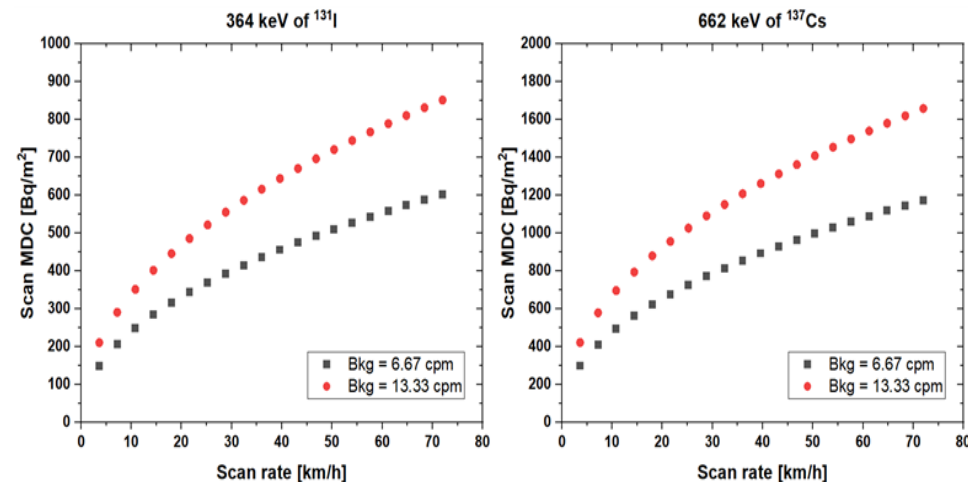


그림 16. 비상피폭상황을 가정하여 추정된 scan MDC

→ “스캔 속도가 50 km/h 일 때, I-131 및 Cs-137의 scan MDC가 각각 720 Bq/m² 및 1408 Bq/m²로서 비상상황시 오염 여부를 충분히 판단할 수 있을 것으로 예상(시뮬레이션에 의한 이상적인 수치)”

3. 차량 탑재 이동식 토양 방사능 모니터링 시스템

▶ 차량 이동 속도 보정 함수 도출을 위한 검출기 기초 시험

- 차량 이동 속도 보정 함수 도출 사전 테스트용 검출기
- 검출기: 3 inch NaI(Tl) (NERMS, 네오시스코리아)
- 주요 기능: 실시간 선량률, 선량률 매핑, 핵종 분석

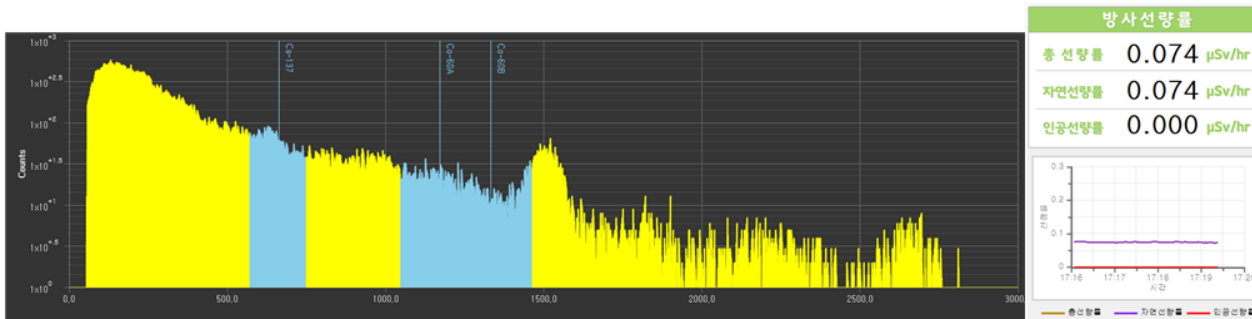


그림 17. 백그라운드 모니터링

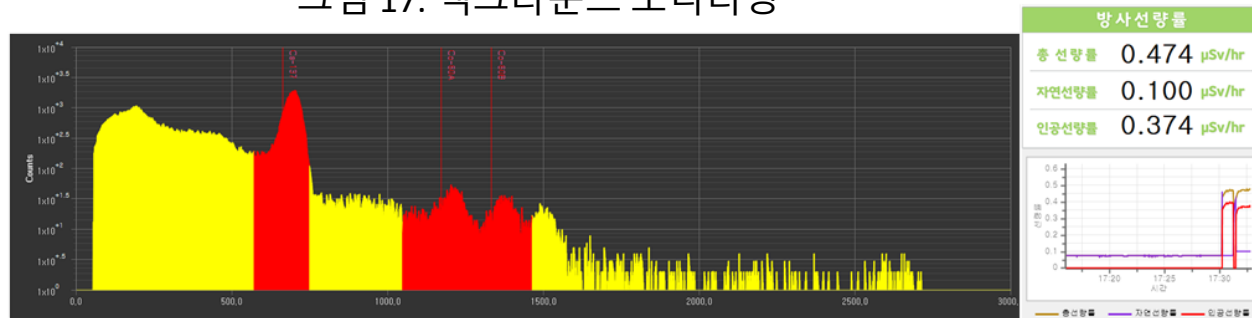
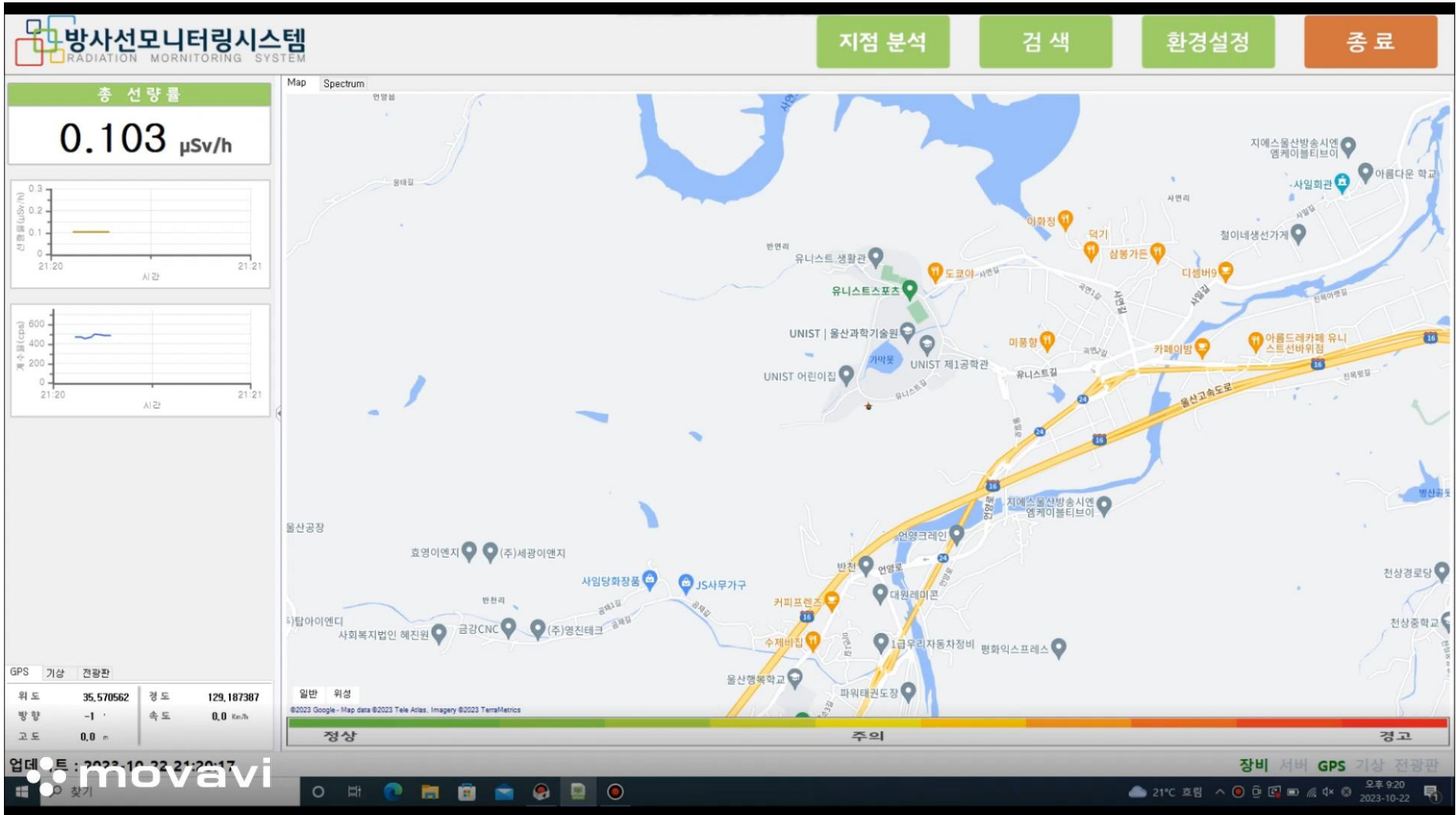


그림 18. Cs-137 + Co-60 모니터링



<3 inch NaI(Tl) (NERMS)>

3. 차량 탑재 이동식 토양 방사능 모니터링 시스템



4. 결론 및 향후 계획

- ▶ 방사능 복합 재난 발생 시 방사선 피폭 야기
- ▶ 사고 초기: 주민 대피 과정에서 고방사선장 회피를 통한 피폭 최소화 및 피폭 선량 관리·감시 필요
 - 대피 과정에서 대부분의 주민들은 차량 이용
- ▶ 사고 중기: 사고 현장 주변 공간선량 및 토양 침적 방사능 모니터링
 - 대피 차량을 직접 활용한 주변 방사선량률 모니터링 효율 증대
- ▶ 속도 보정 대피 차량 탑재 이동식 방사선 모니터링 시스템 개발
 - 차량 이동 속도에 따라 차량 탑재 계측기의 계측 선량률의 변화 발생
 - 차량 이동 속도에 따른 측정 지점의 정확한 공간선량/방사능 농도 파악
 - ➔ 공간선량 (공기)과 방사능 농도 (토양)의 속도 보정 인자 도출
 - ➔ 속도 보정 인자를 적용한 이동식 방사선 모니터링 시스템 설계 제작

속도 보정 차량 탑재 이동식 방사선 모니터링 시스템 제작 (안)

• 이동식 선량계 시제품 개발(안)

- 측정대상: 감마선 및 엑스선
- 계측기 종류: GM tube
- 선량률 범위: $0.1 \mu\text{Sv/h} \sim 1 \text{ mSv/h}$
- 측정 에너지 범위: $20 \text{ keV} \sim 2 \text{ MeV}$
- 측정 불확도 / 선형성: $\pm 20\%$ / $\pm 15\%$ 이내
- 현장-본부데이터 송수신 및 최대 1일의 측정데이터 기록/관리
- 규격: $200(\text{W}) * 280(\text{D}) * 60(\text{H}) \text{ mm}$ 이내 / 5 kg 이내
- 차량 내부 공간선량률 실시간 디스플레이
- 스마트폰 어플리케이션 연동
- 차량 이동 속도에 따른 선량률 감소를 보정한 이동 경로 내 선량 분포 데이터 획득

• 이동식 검출기 시제품 개발(안)

- 측정 대상: 감마선 및 엑스선
- 검출기 종류: 2 inch NaI(Tl) 또는 3 inch NaI(Tl)
- 선량률 감시 범위: $0.1 \mu\text{Sv/h} \sim 1 \text{ mSv/h}$
- 필수 감시 에너지 범위: $20 \text{ keV} \sim 3 \text{ MeV}$
- 불확도: $\pm 10\%$ 이내
- 선형도: $\pm 5\%$ 이내
- 표시: 유효선량률, 조사선량률, 계수율
- GPS 기반 위치 추적
- K-40 peak 활용 자동 교정 방식
- 선량률, scan MDC 및 시간별 유효선량률 변화 그래프 디스플레이
- 차량 속도계 및 검출기로의 실시간 속도 데이터 전송
- 방사선 검출 응답시간: 수초 이내
- 본부-현장 통신 활용 모니터링 데이터 저장 및 전송
- 차량 이동 속도에 따른 방사능 농도를 보정한 측정값 도출



감사합니다.
