



[UCI]I804:24011-200000279063



2020년 2월 석사학위 논문

차량탑재형 대면적 방사능오염측정장비 개발

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 건 주



차량탑재형 대면적 방사능오염측정장비 개발

Development of a Vehicle-mounted Large Area Radioactive Contamination Measurement Equipment

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원 원자력공학과 이 건 주



차량탑재형 대면적 방사능오염측정장비 개발

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함 2019년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 건 주

조선대학교 대학원

2019년 11월

위원	원장	조선대학교	교수	김 진 원	(인)
위	원	조선대학교	교수	나 만 균	(인)
위	원	조선대학교	교수	송 종 순	(인)

이건주의 석사학위논문을 인준함





목 차

ABSTRACT i
제1장 서론 ······ 1 제1절 연구 배경 ····· 1 제2절 연구 목표 ···· 2
제2장 시스템 현황 조사 ~~~~ 3
제1절 국내외 상용화 이동형 방사능 모니터링 시스템 현황3
제3장 방사선검출기 선정
제4장 측정시스템 설계
제1절 방사선 검출부 설계
제2절 수동차폐
1. 납차폐체
2. MCNP 방법론을 이용한 최적의 납두께 선정
제5장 MCA 개발
제1절 MCA
제2절 NaI(Tl) 분해능 측정 및 Plastic 검출기 실험
제3절 선량교정
제4절 능동차폐
 역동시계수회로 ····································
2. 역동시계수회로 백그라운드 저감화 비율 측정(기구물 장착) 37
제6장 결론 및 제안
참고문헌



표 목차

표	1.	국외 상용화 이동형 방사능 오염 모니터링 시스템 기능	
표	2.	국내 이동형 오염 모니터링 시스템	7
표	3.	상용화 이동형 방사능 모니터링 시스템 내 검출기	
표	4.	NaI(Tl) 및 PVT 섬광검출기 스펙	16



그림 29.	검출부 내부 3D 도면	39
그림 30.	검출부가 장착된 기구물 모습(안)	39
그림 31.	차량에 탑재된 모습(안)	40



ABSTRACT

Development of a Vehicle-mounted Large Area Radioactive Contamination Measurement Equipment

Geonju LEE

Advisor : Prof. Jongsoon Song, Ph.D. Department of Nuclear Engineering Graduate School of Chosun University

The Gyeongju Radioactive Waste Disposal Site has been in operation since August 2015, and low and intermediate-level radioactive wastes are being transferred from nuclear power plants and radio-isotope wastes generated radiation facilities in Korea.

Therefore, it is important to ensure the safety of the vehicles transporting wastes, and in particular, it is necessary to establish a method for rapidly and accurately detecting radioactive contamination on the accident path immediately after an accident that the wastes are dropped on the ground. After the decommissioning Kori nuclear power plant 1 of Korea, it is necessary to measure and evaluate the residual radioactivity of the site for decommissioning nuclear facilities in order to determine whether they meet the site reuse criteria (NSSC notice No. 2016-33). Conclusively, an equipment for rapidly and accurately capable of measuring the residual radioactivity on the ground is required for ensuring the radiation safety.

However, the equipment for measuring the residual radioactivity on the ground is not developed at present in Korea, a vehicle-mounted large area radioactive contamination measurement equipment (active area : 412cm²) that can be manufactured in large area and capable of measuring radiation dose rate and gamma nuclide of Co-60, Cs-137 is designed and developed in this study.



제1장 서론

제1절 연구 배경

경주 방사성폐기물처분장은 2015년 8월부터 본격 운영된 이래로, 각 원전 및 RI폐기물발생시설 등에서 중·저준위 방사성폐기물이 이송되고 있다. 이에 따라 방 사성폐기물 (이하'방폐물') 이송 시 운반차량에 대한 안전성 확보가 중요하며, 특 히 방폐물이 육상경로에 낙하하는 등의 사고가 일어난 직후, 해당 경로에 대한 신속/정밀한 방사능 오염을 탐지를 할 수 있는 방안을 구축해야 한다.

또한, 고리 1호기 해체 후 부지 해제를 위해 부지 재이용 기준 (원안위 고시 2016-33호)을 만족하는지 판단하기 위해서는 원자력시설 해체 부지의 잔류 방사능 측정 및 평가가 반드시 필요하다. 따라서 정확하게 부지 잔류 방사능을 측정할 수 있는 장비가 필요하다.

현재 이러한 장비는 구축되어 있지 않은 실정이기에, 대면적으로 제작 가능하고 방사선량 측정 및 Cs-137, Co-60 등 감마핵종에 대한 핵종분석이 가능한 기능을 탑재한 신속함과 정확함의 목적을 동시에 달성할 수 있는 측정장비 개발이 시급 하다.



제2절 연구 목표

기존에 개발된 대면적 방사능오염측정장비 중 핵종판별에 가장 유리한 검출기 는 분해능이 가장 우수한 HPGe검출기이다. 하지만, 이 검출기는 사용시 냉각이 필요하기 때문에 시스템의 볼륨이 커지며 냉각시간으로 인한 측정지연 등의 문제 가 있고 센서특성에 따라 대면적으로 제작하는데 한계가 있어, 바닥면에 대해 신 속/정밀한 방사능 오염을 탐지를 할 수 있는 차량탑재형 대면적 방사능오염측정 장비의 계측센서로써 목적달성에 부적합하다.

따라서, 본 연구에서는 대면적으로 제작이 가능하고 Co-60, Cs-137 등 감마핵종 판별을 할 수 있으며 냉각이 필요없어 신속한 측정이 가능한 장점을 가진 섬광검 출기를 적용해 장비를 개발한다. 선량측정에 이용된 검출기인 NaI(TI)섬광검출기 의 MCA(다중채널분석기)를 개발하여 선형성 테스트 및 이에 따른 선량 교정인자 를 통해 선량교정을 진행하고 check source를 통해 MCA의 성능지표인 분해능을 평가한다.

또한, 우주선에 의한 자연방사선을 차폐하기위해 Monte Carlo 방법론을 통하여 수동차폐 방법인 최적의 납두께를 선정하고, NaI(Tl) 섬광검출기를 주검출기, Plastic 섬광검출기를 가드검출기로 선정하여 역동시계수회로로 능동차폐를 적용한 다. 이에 따른 백그라운드 저감화 비율은 check source를 통해 실제 계측하여 전체 측정시스템을 검증하고자 한다.

제2장 시스템 현황 조사

제1절 국내외 상용화 이동형 방사능 모니터링 시스템 현황

국내외 개발 중인 혹은 상용화 이동형 방사능 오염 탐지 시스템에 대한 선행 기술을 조사하고, 오염탐지 시스템의 목적 및 용도에 따른 모니터링 시스템 구성 요소를 파악하였다.

현재 바닥면에 대해 탐지를 할 수 있는 국내 상용화가 완료된 이동형 방사능 오염 모니터링 시스템은 존재하지 않은 것을 확인하였고, 국외 상용화 시스템의 경우 감마선량률을 측정 시스템이 개발 되어 있으나 방사성오염과 핵종 분석의 동시 진행은 불가능하였다. 표. 1에 미국 NAT-USA Inc. 사를 비롯한 주요 국외 시장 내 현재 개발 되어있는 상용화 모니터링 시스템을 나타냈다. [1][2][3]

	78	NAT-U	JSA Inc.	PICO En	virotec Inc.	VF
	ΤĊ	MSS	VRDS	IRIS	SIRIS	FloorScan
	감마					\bigcirc
	오염측정	-	-	-	-	\bigcirc
	감마	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	
	선량률측정	0	0	0	0	-
וכ	핵종판별	\bigcirc	0	-	-	-
이니	핵종별					
구	방사능 오염	-	-	-	-	-
성	측정					
0	유무선	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
	전송기능	0	U	0	0	\bigcirc
	방사능					
	오염 맵핑	\bigcirc	0	\bigcirc	0	0
	프로그램					

표 1. 국외 상용화 이동형 방사능 오염 모니터링 시스템 기능



 \bigcirc NAT-USA Inc.

미국의 NAT-USA Inc. 사의 Mobile Survey System (MSS)과 Vehicle Radiation Det ector System with Plastic Scintillators (VRDS)는 영하 15 ℃ 에서 50 ℃ 의 기온 범위 내 범용과 감마공간선량률과 감마 핵종 판별이 가능하다. 그러나, 본 연구에 서 개발 하고자 하는 것과 같은 바닥면의 고도에 따른 오염의 판별이 불가능하 며, 백그라운드 저감 장치가 없다. 또한, 운용 가능 시간의 경우 최대 24시간으로 넓은 구역의 탐지 시 용이하나 실시간 알람 기능을 사용할 경우 12시간으로 운용 가능 시간이 크게 감소한다.



그림 1. NAT-USA, Mobile Survey System



○ PICO Envirotec Inc.

캐나다의 PICO Envirotec Inc. 사의 Integrated Radiation Information System (IRIS) 와 Stand off Integrated Radiation Information System (SIRIS)는 영하 20 °C 에서 5 0°C 환경에서 감마공간선량률의 측정이 가능하나 핵종 판별 및 기여도 측정이 불가능하다. 또한 연속 운용 가능 시간이 최대 3시간으로 탐지 필요 구역이 넓어 질 경우 사용에 제한이 있다.





그림 2. PICO Envirotec, Integrated Radiation Information System



 \bigcirc VF

체코의 VF 사의 Floor Contamination Monitor (FloorScan)는 NAT-USA Inc. 사와 PICO Envirotec Inc. 사의 시스템과 비교하여 상대적으로 제한된 영하 10°C 에서 40°C 환경 내 베타-감마 동시 오염 측정이 가능하나, 그 기능이 표면 오염 탐지에 국한되어 있으며 차량 등 대형 장비에 탑재하여 넓은 구역을 측정하지 않고 실험 실 혹은 작업실 등 비교적 소형 구획의 조사에 활용된다. 크기 무게 등과 같은 휴대성은 타 시스템에 비하여 높으나 탐지 가능 면적이 525 cm² 으로 현저히 제 한되어 있어 공간 오염 측정에의 활용이 어려움이 있다.



FloorScan-1050 monitor

그림 3. VF, Floor Contamination Monitor



○ 국내

국내의 경우 앞서 언급한 바와 같이 상용화 단계에 도달한 시스템은 존재하지 않으나 lab-scale로 제한되어 있는 시스템의 개발 및 수입 운용의 케이스가 존재한 다. 표 2에 국내 이동형 오염 모니터링 시스템 연구에 관한 내용을 요약하였다.

표 2. 국내 이동형 오염 모니터링 시스템

			하드	웨어			소프트	트웨어	
기관명	과제명	센 서	전 치 증 폭 기	전 자 부	통 신 기 술	Dat aba se	Co nto ur	핵 종 분 석	효 율 보 정
남부	PDA 기반 블루투스	수	수	수	개	_	_	_	_
대학교	방사선 측정 장치 개발	입	입	입	발				
	플라스틱 섬광체								
제주	광섬유 결합 원격 측정	수	수	수	개	_	_	_	_
대학교	방사선 선량계 모형	입	입	입	발				
	시험								
	자연 백그라운드								
	최소화 시스템과 차량								
	이동형감마핵종 분석								
한국	시스템	~	~	~]	-11		~	~
원자력	방사선오염 감시기용	히	히	히	비	비	-	히	히
연구원	스마트 센서 개발	н	н	н	근	근		н	н
	방사능 수치 오염 지도								
	작성을 위한 방사선								
	계측 시스템 연구								

남부대학교의 2008년 수행된 PDA 기반 블루투스 이용 무선 통신 방사선 측정 장치 개발과 제주대학교의 2009년 이루어진 플라스틱 섬광체 광섬유 결합 원격 측정 방사선 선량계 모형 성능 시험 연구에서 통신 기술의 개발이 이루어졌다. 그러나 방사선 센서, 전치 증폭기, 전자부 등의 핵심 부품이 수입에 의존하였으며 핵종 분석이 불가능하다. 또한, 한국원자력연구원 (KAERI)에서 백그라운드 최소화 시스템과 차량 이동형 감마핵종분석 시스템 연구, 방사선 오염 감시기용 스마트 센서 개발 (2013년), 방 사능 수치 오염 지도 작성을 위한 방사선 계측 시스템 연구 (2012년)를 진행한 경 험이 있다. 그러나 주요 하드웨어인 방사선 센서, 전치 증폭기, 전자부 부품이 수 입을 통하여 공급되었으며 유무선 통신 기술과 데이터베이스 처리 기술만이 자체 개발 되어 기술 자립도가 낮다. 핵종 분석과 효율 보정 기능까지 제한적으로 적 용 되어있으나 자체 개발이 아닌 해외 제작품을 활용하였다.

해당 이동형 방사능 모니터링 시스템의 국내 상용화 사례가 미비함에 따라 미 국 NAT-USA Inc. 사를 비롯한 주요 해외 3개사의 시스템을 기반하여 사용되는 검출기의 종류와 그 기술을 조사하였다. 추가로 방사능 모니터링 통합 시스템을 운용하지는 않으나 검출기의 제작을 수행하는 Bubble Technology Industries Inc. 사 를 비롯한 4개 사를 함께 조사하였으며 이를 표 3에 나타내었다.

제조사	NAT- In	USA c.	Pl Env I	ICO irotec nc.	VF	Bubble Technology Industries Inc.	ORTEC	Thermo Scienti fic Inc.	Nucsafe Inc.
모델명	MSS	VR DS	IRIS	SIRIS	Floor Scan	FlexSpec Mobile	Detective _200	Mobile Matrix ARIS	Portable Radiation Detecion Kit

표 3. 상용화 이동형 방사능 모니터링 시스템 내 검출기



제조사	NAT-U	SA Inc.	PI0 Envirot	CO tec Inc.	VF	Bubble Techno logy Industri es Inc.	ORTEC	Thermo Scienti fic Inc.	Nucsaf e Inc.
감마선 검출	NaI(TI) 크기 8x72 인치 및 플라스 틱신틸 레이터 2개입	NaI(TI) 크기 8x72 인치 및 플라스 틱신틸 레이터 2개입	NaI(TI) 4 리터 (2x2L)	NaI(TI) 8 리터 (2x4L)	플라 스틱 신틸 터	NaI(TI) 2x4x16 인치 4 개입	HPGe 지름:1.1 인치, 높이 1.2 인치 4 개입	Nal(TI) 크기 N/A 2 개입 플라스틱 신틸레이 터(형광 체) 7 리터, 2 개입	NaI(TI) 2x4x16 인치 4 개입
무선 기능	User Datagra m Protocol (UDP) Local Area Network (LAN)	User Datagra m Protocol (UDP) Local Area Network (LAN)	무선 통신	무선 통신	N/A	제어, 모니터링 : 보안 Wi-Fi 3G/4G 데이터 통신 (옵션)	컴퓨터 무선 연결: Wi-Fi (이동 통신 가능)	무선통신 , 위성, 900메가 헤르츠 망사형 또사형 비트워크 감능	컴퓨터 무선 연결: Wi-Fi (이동 통신 음선 가능)



제조사	NAT-U	SA Inc.	PIC Envi In	CO rotec .c.	VF	Bubble Technology Industries Inc.	ORTEC	Thermo Scienti fic Inc.	Nucsafe Inc.
전력 옵션	차량 배터리 ; 예비 배터리	차량 배터리 ; 예비 배터리	외 장 배 터 리	외 장 배 터 리	내장 배터 리 (AA 건전 지)	차량 배터리; 육상전력, 추가 전력 (옵션); 배터리팩과 충전기 (옵션)	차량 배터리; 육상전, 추력 (옵션); 주비비리 (옵션)	차량 배터리; 육상 전력; 예비 배터리	차량 배터리; 육상 전력; 외장 배터리
배터리 가동 시간	24시간 (알람 기능 적용시 12 시간)	24시간 (알람 기능 적용시 12 시간)	N/A	외 장배 리 3 시 간	N/A	배터리팩 옵션 사용시 4시간; 추가 배터리 옵션 가능	(검지기 가 식은 상태에 세) 내부 배터리 로 3시간	기본 예비 배터리 사용시 2시간; 추가옵 선선택 가능	(무선 연결의 종류에 따라) 8~20 시간

제조사	NAT Ir	-USA nc.	PIC Envi In	CO rotec .c.	VF	Bubble Technology Industries Inc.	ORTEC	Thermo Scienti fic Inc.	Nucsafe Inc.
운용 온도	5 ° F ~ 122 ° F	5 ° F ~ 122 ° F	-4 ° F ~ +122 ° F	-22 ° F ~ +122 ° F	+14 °F~ +104 °F	-4 °F~ +131 °F	+14 ° F ~ +122 ° F	N/A	-4 °F~ +122 °F
운용 상대 습도	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0 에서 93 % (104 °F에서)	0 에서 100 % (122 °F에서)	N/A	0 에서 100% 불응축식

추가로 조사를 수행한 캐나다의 Bubble Technology Industries Inc. 사를 비롯한 4 개 사의 검출기 중 미국 Nucsafe Inc. 사의 Portable Radiation Detecion Kit만이 타 업체의 제품과 비교하여 20시간이라는 장시간 운용 기능을 보유했다. 타 3사 제 품의 경우 최장 4시간 기기 운용 가능으로 넓은 지역에 대한 탐색이 필요할 경우 사용에 제약이 있다. 미국 Thermo Scientific Inc. 사의 Mobile Matrix ARIS 제품의 경우 타 3사의 제품이 평균 영하 20 °C에서 50 °C 환경에 감지 가능함에 비하여 상대적으로 좁은 구간인 영하 10 °C에서 50 °C 조건 하에서 원활한 탐지 수행이 가능하다. 이에 따라 기온이 낮은 지방에 대한 조사 수행 시 용이 하지 않을 수 있다.

위 현존 방사능 오염 모니터링 시스템 및 검출기를 조사하고 해당 자료를 바탕 으로 최고 수준 보유 업체를 파악하였다.

제3장 방사선검출기 선정

국내외에서 사용중인 검출기는 매우 많은 종류가 존재한다. 하지만 목적과 부합 되고 현장에서 잔류 및 공간방사능 측정을 위한 시스템으로 검출하한값을 저감시 킬 수 있는 현장 측정 적용에 용이한 기술의 개발이 시급한 실정이다.

방사능측정 시에 주로 사용되는 대표적인 검출기인 HPGe, NaI(TI), 플라스틱 섬 광 검출기 등의 감마선 측정 시험(분해능, 검출 효율 등)을 통하여 감마선 검출효 율이 우수하고 장비의 현장 운용성 및 크기 등을 고려하여 핵종 분석용 검출기인 대용적 NaI(TI) 검출기를 주 검출기로, 효율이 우수하며 다양한 형태로 배치가 가 능한 보조 검출기로 대용적 플라스틱 검출기를 선정하였다.

감마선 분광분석에 주로 사용되는 검출기는 고순도게르마늄 반도체검출기와 Nal(Tl) 섬광검출기가 있다. 고순도게르마늄 반도체검출기는 현존하는 검출기 중 분해능이 가장 우수하여 감마선을 방출 하는 핵종에 대해서 정량 및 정성분석이 유리하다는 장점이 있다. 하지만 고순도게르마늄반도체의 특성 상 열잡음 현상을 해결하기 위해 액체질소 또는 전기냉각을 해주어야 한다는 단점이 있어 시스템의 볼륨이 커지고 냉각시간이 길기 때문에 상시냉각을 시키지 않는 이상 즉각적으로 야외에서 계측기를 사용하기에 큰 어려움이 있다.

반면에, NaI(TI) 섬광검출기는 고순도게르마늄 반도체검출기에 비해 분해능이 떨어진다는 단점을 가지고 있지만 고순도게르마늄 반도체검출기와 달리 검출기 냉각이 필요 없고, 목적에 따라 섬광체의 모양과 크기를 비교적 자유롭게 만들 수 있어 3x3, 2x4x16, 4x4x16 inch 등 대면적으로 제작할 수 있다는 장점을 가지 고 있다. 또한, 냉각장치가 없어 휴대성이 좋기 때문에 야외에서 사용하기에 유리 한 특징을 가지고 있다. 이러한 특징 때문에 한국원자력안전기술원, 한국원자력연 구원, 울산시청, 울진군청, 경주시청, 부산시청, 민간환경감시기구 등의 차량에 탑 재된 환경 방사선 감시시스템은 NaI(TI) 섬광검출기를 사용하고 있다.



또한, Plastic 섬광검출기는 주로 Radiation Portal Monitor에 사용되며, NaI(TI) 섬 광검출기와 마찬가지로 감마선을 측정할 수 있고 대면적으로 제작이 가능하기 때 문에 본 연구에서는 자연방사선에 대한 영향을 줄일 수 있는 가드검출기로 사용 하였다. Plastic 및 NaI(TI) 섬광검출기의 경우 미국의 Saint-Gobain사, 중국의 Epic-c rystal사, 우크라이나의 Amerys사 등에서 판매하고 있으며, 본 연구에는 Amerys사 의 검출기를 사용하였다.





그림 4. 2x4x16 inch NaI(Tl) 섬광검출기







그림 5. 1000x500x50 mm Plastic 섬광검출기







표

그림 6. 1000x200x100 mm Plastic 섬광검출기



표 4. NaI(Tl) 및 PVT 섬광검출기 스펙

구 분	NaI(TI)	PVT
Density $[g/cm^3]$	3.67	1.032
Melting point [K]	924	-
Thermal expansion coefficient $[c^{-1}]$	47.4×10 ⁻⁶	7.8×10 ⁻⁵
Wavelength of emission max [nm]	415	423-434
Refractiv index @emission max	1.85	1.58
Primary decay time [ns]	250	1.8-4.0
Light yield [#/keV]	38	38-68



제4장 측정 시스템 설계

제1절 방사선 검출부 설계

방폐물이 육상경로에 낙하하는 등의 사고가 일어난 육상경로에 대한 탐지와 더 불어 원자력발전소 가동, 중저준위 방사성폐기물 처분 시설 운영 및 중대사고로 인해 발생할 수 있는 토양의 방사능 오염과 관련하여 잔류 방사능 측정 시 결과 의 정확도를 향상시키기 위하여 검출하한값을 낮출 수 있는 저준위 측정 기술의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 감마선의 백그라운드를 줄이기 위해 수동차폐방 법인 납차폐체와 능동차폐방법인 역동시계수회로 검출 시스템을 기본 바탕으로 설계했다. 측정 시스템의 무게 등을 고려하여 무거운 납 차폐체를 최소한으로 사 용을 함으로써 기동력을 증진시키고 주 검출기에서 발생한 감마선을 보조 검출기 를 이용하여 측정한 후에 전자회로 장치를 이용하여 제거함으로써 핵종 분석용 주 검출기에서의 백그라운드를 저감시켜 검출 하한값을 낮출 수 있도록 설계하였 다. 설계한 감마선 검출 시스템의 개념도는 아래 그림 7 과 같다.



그림 7. 감마선 검출 시스템 개념도







그림 9. 1000x200x100 mm Plastic 섬광검출기 Drawing



CHOSUN UNIVERSIT

그림 10. 1000x500x50 mm Plastic 섬광검출기 Drawing

위 개념도와 같이 2x4x16 inch NaI(TI) 검출기 2개를 중앙에 배치하여 주검출기 로 사용하고, Plastic 검출기로 삼면을 감싸 가드검출기로 사용하였다. Plastic 섬광 검출기는 NaI(TI) 검출기 2개 길이를 고려하여, 가로 1000 mm의 길이로 제작하였 으며, 양옆면의 경우 윗면의 500 mm Plastic 검출기를 감싸기 위해 1000x200x100 mm 검출기 2개를 배치하였다. 또한, 기구물이 커질수록 납차폐체의 크기를 더 크 게 설계해야한다. 크기가 커지면 무게도 늘어나기 때문에 이를 보다 최적화하기 위해 3개의 Plastic 검출기 모두 14-pin base의 PMT가 검출기 안쪽으로 삽입되어 1 4-pin만 노출되는 형태로 설계하였다.



제2절 수동차폐

1. 납차폐체

○ 방사선 감쇠계수(Radiation Attenuation Coefficient)

방사선은 공기를 포함한 모든 매질을 통과할 때 매질 내에 있는 원소들과 상호 작용(산란 또는 흡수)을 하면서 에너지를 잃거나 소멸된다. 이와 같이 방사선이 에너지를 잃는 정도를 감쇠계수라 한다. 방사선이 직선으로 매질을 투과하는 경 우에 방사선의 초기방사능(강도)을 A₀ 라고 하고 매질의 방사선 감쇠계수를 μ 라 하면 매질을 길이 t 만큼 통과했을 때 방사선의 방사능 A(t) 는 A(t) = A₀e-μt 이다. μ는 방사선의 에너지 크기에 따라 달라진다. t는 방사선이 투과하는 물질 의 두께, 단위면적당 질량/mol수/원자수 등으로 나타낼 수 있는데 각각에 해당하 는 감쇠계수는 선 감쇠계수, 질량/mol/원자 감쇠계수로 부른다.

- 납의 밀도 : 11.34 g/cm³

납은 밀도가 높고 원자 번호가 높기 때문에 감마선을 효과적으로 감쇠시킬 수 있다. 지각방사선, 우주방사선 등으로 인한 외부 자연방사선(백그라운드)의 카운트 를 방지하여 계측 시간을 줄이고 검출의 하한을 개선하므로 방사능분석 성능을 향상시킨다.

2. MCNP 방법론을 이용한 최적의 납두께 선정

방사선 검출부는 크게 두 개의 모듈로 독립적인 수행이 가능하도록 설계를 하 였다. 하나는 감마방사선에 대한 검출을 위해 NaI(TI) 검출기를 주 검출기로 선택 하고, 백그라운드 및 주변의 차폐물에 의한 후방산란 (Back scattering)을 최소화 하기 위해 Plastic 대용적 검출기 3개를 이용하여 Guard 검출기를 선정하였다. 설 계한 검출부 주위에 납차폐에 대한 후방산란 영향을 확인하기 위해서 몬테칼로 전산모사 수행 프로그램인 MCNPX로 시뮬레이션을 실시했다.



측정할 부분인 검출부 하단부분을 제외한 3면을 납 차폐하고, Plastic 검출기와 NaI(TI)검출기 사이를 차폐하여 시뮬레이션 했다. 바닥면으로부터의 거리는 10 cm 로 설정하였고, 핵종은 Co-60 및 Cs-137 점선원 및 면선원, 위치는 2개의 NaI(TI) 검출기 중앙에 오도록 설계하여 납 두께는 0, 10, 15, 20, 25 mm로 가변을 하며 결과를 나타내었다. Geometry는 아래와 같으며, 검출기 도면을 참고하여 설계하였 다.

> MCNPX Coding Geometry (for ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs analysis)



<3D Visualization (Vised X22S Program)>



그림 11. MCNPX에 사용할 검출기 구조 설계

아래 그림은 Scatter를 최소화할 수 있는 감마선을 검출하기 위한 검출기 주변 납차폐체 설계를 위한 몬테카를로 시뮬레이션 결과이며, 시뮬레이션 결과는 아래 와 같이 정리하였다.



그림 12. Photon Energy Spectrum Cs-137 volume source





그림 13. Photon Energy Spectrum Co-60 volume source

- 아스팔트의 광범위한 오염(체적선원)을 가정하고 NaI(TI) 검출기의 단위 면적 당 광자수(#/cm²)를 평가한 결과 좌, 우측 검출기 내 도달한 광자의 숫자는 거의 유사한 경향을 나타내었으며,
 - 납 차폐체가 없는 검출기 구조에 비해 10 mm 두께의 납 차폐체의 사용 한 결과 후방 산란 peak에 기인한 산란선이 제거가 가능한 것으로 판단 된다.
 - 또한, 15 mm 이상 납 차폐체 사용의 경우 큰 차이를 나타내지 않았다.
- 특정위치에 Hot region(점선원) 으로 가정하고 NaI(TI) 검출기의 단위 면적당 광자수(#/cm²)를 설정한 결과 설정한 점 선원의 위치에 의존해서 가까운 쪽 의 NaI(TI) 검출기 내 도달하는 감마선의 Flux 분포가 높은 것으로 나타내었 으며,
 - 10 mm 납 차폐체의 사용으로도 후방산란 peak로 기인한 산란선 제거효 과가 있다.
 - 또한, 점 선원으로부터 원거리에 위치한 NaI(TI) 검출기의 경우, 산란 영향이 더 높은 것으로 확인하였다.

위와 같이 검출기 주변에 0, 10, 15, 20 및 25 mm로 가변을 하여 납 차폐를 하 였을 경우를 분석한 결과 납 차폐체를 10 mm 정도로 설치하는 것으로 결정하였 다.



제5장 MCA 개발

제1절 MCA

M.C.A(Multi Channel Analyzer) 다중채널 분석기는 파고분석기의 일종으로서 방 사선의 에너지·스펙트럼 측정 등에 사용한다. 즉 검출기로부터 출력신호의 펄스 파고분포를 구하는 것으로 각 입력펄스를 그 파고치에 따라 몇 개의 채널로 선별 하여 각 채널마다의 계수치를 구하는 장치이다.

개발 MCA의 사양 및 Preamp 사양은 아래와 같다.

MCA(Multi Channel Analyzer) 사양

- 3U 서브랙 타입
- ADC 분해능 : 1024채널
- Resolution : < 7.5% @ 662KeV, Cs-137
- Shaping Time : 1µs
- High-voltage : 0 1200V, 가변
- Gain, LLD, ULD 가변 설정
- 최종 설정값 자동 저장(비휘발성 메모리)
- 전원, 통신상태, Incoming rate등을 확인 할 수 있는 Indicator
- 통신 방식 : TCP/IP , 외부 신호 입력 및 출력 포트
- START/STOP, Coincidence Input / Output
- 파라미터(TCP 정보 등) 설정용 통신 RS232 통신 포트
- SHV, BNC, Preamp Power(±12V)

Preamplifier 사양

- B14A PMT Socket 인터페이스
- Detector signal : SMA Connector
- Power : DSUB9 male (±12V)





그림 14. MCA보드가 장착되는 3U Rack

MCA는 Rack type으로써, PMT가 1000x500x50 mm Plastic 검출기 1개의 양쪽에 2개, 1000x200x100 mm 검출기 2개의 각각 양쪽에 2개, NaI(Tl) 검출기 2개의 각 1 개로 총 8개의 PMT가 있으며 따라서 총 8개의 MCA가 필요하다. 차량에 장착될 길이를 여유롭게 고려하여 PMT와 결합될 HV divider 등이 포함되어있는 Preamp 소켓에 Shaping amplifier까지 내장하고 3U Rack에 장착될 MCA보드에 주증폭기(A mplifier)를 내장함으로써 케이블 길이에 의한 노이즈를 최소화 시켰다.





그림 15. 3U Rack에 장착된 MCA 보드 8개



그림 16. Preamp 소켓



제2절 NaI(TI) 분해능 측정 및 Plastic 검출기 실험

개발 MCA는 아래와 같이 Cs-137 체크소스를 이용하여 검출기 중앙 및 중앙에 서 10 cm 높이에서 측정하여 검증하였다. 그 결과 검출기 제작사의 인증서와 동 등이상의 분해능을 나타내었다.



그림 17. NaI(Tl) 섬광검출기 분해능 측정





그림 18. NaI(TI) 섬광검출기 제작사 인증서



Plastic 검출기도 동일하게 실험이 진행되었으며, 제작사 인증서와 비교하여 마 찬가지로 검증하였다.





그림 19. 1000x500x50 mm Plastic 검출기 실험







그림 20. 1000x200x100 mm Plastic 검출기 실험



제3절 선량교정

방사선검출기로 검출된 계수율을 토대로 선량률을 환산하기 위해서는 교정시설 에서 선형성 테스트를 진행했다. 교정시설에서 선량범위별로 검출기에 조사시켜 계수율을 구하고 이를 토대로 Origin 프로그램을 사용하여 Lorentz fitting 함수를 구해 적용하게 된다. Lorentz fitting 함수는 펌웨어에서 측정된 계수율을 선량률로 환산하게 된다. 아래 이미지는 소프트웨어에서 Lorentz fitting 함수의 factor를 설정 하는 부분이다. Lorentz fitting 함수는 전 구간에 적용이 되지 않아 낮은 영역과 높은 영역을 구분하여 적용한다.

HV 조정		680			Set HV (V)	Read HV
게인 조정	1	0,400	1		Set VGA Gain (V)	Read VGA
LLD/ULD	-	0,050	1	4,900	Set Analog Level Disc, (V)	Read Analog LLD & ULL
LLD/ULD	-	80		2950	Set Digital Level Disc, (keV)	Read Digital LLD & ULD
AX + B	*	1,000	-	0,00	Set HV Calibration Factor	Read HV Cal, Factor
AX + B		1,000	-	0,00	Set LLD Calibration Factor	
AX + B	8	1,000		0,00	Set VGA Calibration Factor	
				1,000	001 20 64	Head 교성 상수
				5 6 7 1,000	001 # 3 3 7	Head 교상 상수
Fitting C	Curve		Mid	cps 🗧 12000	Set Calibration Factor	Read Calibration Factor
Fitting C 2nd order 홍계수율법	Curve Lore	ıtz der) (Mid 1)71.4	cps : 12000 율법 (Lorentz Low)	Set Calibration Factor	Head 교정 중수 Read Calibration Factor TYPE : DATA Only
Fitting C 2nd order 유 승계수율법 C0 문 3.33	Curve Lore (2nd O	ıtz der) fi yt	Mid 1) 1) 1)	cps : 12000 출범 (Lorentz Low) -7,36826E+0	Set Calibration Factor	Head 보험 영수 Read Calibration Factor TYPE : DATA Only Read Realtime DATA
Fitting C 2nd order 출계수율법 20 : 3,33 21 : 1,48	Curve Lore (2nd 0) 300E-2 1566E-4	ıtz der) 4 yt	Mid b계수 D	cps : 12000 출법 (Lorentz Low) -7,36826E+0 9,61226E+5	Set Calibration Factor	Read Calibration Factor TYPE : DATA Only Read Realtime DATA Read Period DATA
Fitting C 2nd order 홍계수율법 20 : 3,33 21 : 1,48 22 : 8,69	Curve Lore (2nd O 300E-2 1566E-4 928E-9	ntz der) (a xo	Mid h74 D D D D D D D	cps : 12000 출범 (Lorentz Low) -7,36826E+0 9,61226E+5 1,975E+4	Set Clear Spectrum Set RTC time	Read Calibration Factor TYPE : DATA Only Read Realtime DATA Read Period DATA Read Temp. Sensors
Fitting C 2nd order	Curve Lore (2nd O 300E-2 1566E-4 928E-9	ntz der) f a xu w	Mid 10/14/14 10/14/14 10/14 10/14/14 10/14 10/14/14 10/14/14 10/14 10/14 10/14 10/14 10/14	cps : 12000 書世 (Lorentz Low) -7.36825E+0 9.61226E+5 1.97575E+4 2.89152E+4 世 (Lorentz High)	Set Clear Spectrum Set Clear Spectrum Operation Mode Tank Post	Read Calibration Factor TYPE CALIBRATION Factor TYPE DATA Only Read Realtime DATA Read Period DATA Read Temp. Sensors Read RTC time
Fitting C 2nd order 흥계수출법 C03,33 C11.48 C28.62	Curve Lore (2nd O 1300E-2 1566E-4 928E-9	ntz der) 4 a xx w #	Mid 10개수 미니미미미 이 이 이 이 이 이 이 이 이 이 이 이 이 이 이 이 이	cps : 12000 喜世 (Lorentz Low) -7.36825E+0 9.61226E+5 1.97575E+4 2.89152E+4 喜世 (Lorentz High) -6.28846E+0	Set Clear Spectrum Set Clear Spectrum Set RTC time Operation Mode Tank Post Set Operation Mode	Read Calibration Factor TYPE : DATA Only Read Realtime DATA Read Period DATA Read Temp, Sensors Read RTC time Read Operationi Mode
Fitting (2nd order	Curve Lore (2nd O 1300E - 2 1566E - 4 928E - 9	ntz der) i a xxx y0 a	Mid 9/1 ← 1/1	cps : 12000 喜世 (Lorentz Low) -7.36825E+0 9.61226E+5 1.97575E+4 2.69152E+4 曾世 (Lorentz High) -6.28846E+0 1.92234E+6	Set Clear Spectrum Set Clear Spectrum Set RTC time Operation Mode Tank Post Set Operation Mode	Read Calibration Factor TYPE : DATA Only Read Realtime DATA Read Period DATA Read Temp, Sensors Read RTC time Read Operationi Mode
Fitting (2nd order 을게수을법 C03,33 C11,48 C28,69	Curve Lore (2nd O 1300E-2 1566E-4 928E-9	ntz der) 1 a xx w g0 a xc	Mid 0 7 4 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	cps : 12000 营世 (Lorentz Low) -7.36825E+0 9.61226E+5 1.97575E+4 2.69152E+4 营世 (Lorentz High) -6.28846E+0 1.92234E+6 3.15643E+4	Set Clear Spectrum Set Clear Spectrum Set RTC time Operation Mode Tank Post Set Operation Mode	Read Calibration Factor TYPE DATA Only Read Realtime DATA Read Period DATA Read Temp, Sensors Read RTC time Read Operationi Mode

그림 21. Lorentz fitting 함수 factor 설정

[역 · 2015 RATEC+RETEN-KM	6.00 µSv/	2.(v/h 4.(00 uSv/h 00 μSv/h 00 μSv/h	1.97 1 4.00 4 5.92 1	p\$w/h 1.01 u\$w/h 1.00 p\$w/h 1.00	5 0 1.010 4	(
2019:04:06 Calification 1: (23.7 ± 0.2) ℃ Calification 1: (33.7 ± 0.2) ℃ Calification 1: (33.7 ± 0.2) ℃ Calification 2: (33.7 ± 0.2) ℃ Calification	oran h2A	vin 4.(00 µSv/h 00 µSv/h	4.00	µSv/h 1.00 µSv/h 1.01	4	(
(237 ± 02) 전 (247 ± 14 44 ~ (14) 보 월 지 월 지 (16, CP-T-0))에 부위 국가수정보준의표기 취상(KIOSSO도부터 37(0) 유지적 표준가 웹 · 사용) 전다. 분별 표준관에 별된 지역 제 제 제 지 또 할 수 1 기 년도 제 지 적 외 · 사용 ·		6.0	00 µSv/h	5.92 ;	µSv/h 1.01	4	(
의 소금생 "4. 스류바 서비의 또 절정권 위· (ACP-T-OI)에 특위 국가수정표준 대표기 해KRUSSS도부터 2010 유가직 표준가뿐 사용속에 사용되었다. 분량 표준경에 명제 기관 세· 전체 및 전 · 전 · 전 · 전 · 전 · 전 · 전 · 전 · 전 · 전							
"역스 전에 사이템 전체이 관광 경계가 (ACC)~TO-D)가 속해 갖가는 정표 준비 전가 연결 준 대표가 하나는 정도 SSU 문부대 응상 비원 전체							
Bed 표준 상태 명4 기관 43월 시 또 동식 기기 번호 43월 지 24 전 43월 12월 12월 14 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12							
기년 세계계식 및 음식 기가 먼고 적가 급객 프로카란 exition System 이스 면 370 MBq UIC CA-072 2039.00.00 연구로 순위에 연구 범 월월 "요정권 제주·환호 61 명 월 "요정권 제주·환호							
eration System 이스 연 370 MB4 UR-CA-072 2019.00.00 선각로 순취역 연구 점 특별 112 명권 제공 정관 주 동 : 별권 112 명권 제공 장관 -							
· 전철 '고급 전자' 왕조 23 명성 '교정 전자' 왕조 스마가							
adri adri alla							
지정자 순표 (M/ 명) 위 위: 기술북입자 (철,부) 성 명: 박제익 (사·원) 성 명: 박제익 (사·원)							
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	도(U) = 상태 - : 방사선량의 인자 : 1.20 5	대합성표준 (의 참값을 구 5v/Gy. 끝	봉확도(u _c) *하기 위해	× 포함인자 네 측정기의	i(k) 측정값에 잡히	₹ \$L.	

교정결과 경기도 화성시 서우동 삼성1코4길 15 전화 : 031-613-0975, Fax: 031-613-09

1. 교정결과

성적서 번호 : 2019~2685 페이지 : (2) / (2)

NOL45

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2 2 2 E O

1. 의 회 자

기 본 명 : (주)알옘택 주 소 : 광주광역시 광산구 하남산단치변과

성시 서우동 삼성1로4길 15 13-0975. Fax: 031-613-0976

교정성적서

성격서 변호 : 2019-2685 페이지 : (1) / (2)

KOLAS

그림 22. KOLAS 인증기관 교정성적서



제4절 능동차폐

1. 역동시계수회로

일반적으로 백그라운드 저감을 위해 주 검출기 주위에 두꺼운 납 차폐체 등을 배치하여 주위의 감마선을 차폐한다. 이 경우 차폐체로 인한 산란 감마선의 영향 에 따른 백그라운드 증가는 물론 차폐체의 크기와 무게로 인해 현장 측정 적용에 어려움이 따른다. 그러므로 본 연구에서는 차량을 이용한 현장 측정 시 방사능에 대한 측정 결과의 정확도를 향상시키기 위해 대면적 백그라운드 저감용 측정 기 술을 적용하였다. 정확한 측정과 분석에 의한 신뢰도 향상 및 현장 적용에 용이 한 백그라운드 저감용 검출기 설계를 위해 주 검출기(NaI 검출기)의 주위와 상부 에 보조 검출기(Plastic 검출기)를 배치하고, 주 검출기에서의 산란된 감마선을 보 조 검출기에서 다시 검출한 후에 역동시계수 (anti-coincidence)를 이용하여 동시에 생성된 신호를 주 검출기 신호에 기록되지 않는 방법으로 백그라운드를 효과적으 로 제거하도록 설계하였다.



그림 23. 백그라운드 저감용 검출 시스템의 회로처리 장치 구성



먼저, 차량탑재형 기구물에 장착하기 전에 실험실에서 아래 그림과 같이 바닥면 이 하늘을 향하도록 검출기를 배치하여 Co-60 1 μCi 체크소스로 역동시계수회로 를 테스트하였다.





그림 24. 역동시계수회로 테스트 검출기 구성

이 결과 아래 그림과 같이 100 keV 미만의 채널에서 Co-60 1 μCi 체크소스로 측정한 경우 약 7.8 %, 선원없이 백그라운드를 계측한 경우 약 10.7 % 가량 카운 트 감소되는 것을 확인하였다.



그림 25. 역동시계수회로 테스트 결과

2. 역동시계수회로 백그라운드 저감화 비율 측정(기구물 장착)

실험실 역동시계수회로 테스트를 마친 MCA로 차량 탑재형으로 설계되어 높낮 이 조절이 가능하며 설계한대로 납 차폐가 되어있는 기구물에 장착하여 테스트를 해보았다.



그림 26. 검출부 기구물 3D도면



그림 27. 검출부 실제 기구물



실험 대상핵종, 거리, 채널수는 아래와 같다.

- 대상핵종: Co-60, Cs-137
- 거리: NaI(Tl) 섬광검출기의 밑면으로부터 10 cm
- 채널: 최대채널 3 MeV





그림 28. 역동시계수회로 테스트(기구물장착)

시스템 역동시회로 적용/전후 raw data를 이용하여 역동시회로 적용 전/후 스펙 트럼(각각의 경우 백그라운드 스펙트럼 포함)을 이용해 저감화비율을 계산한 결 과, 기구물에 장착한 저감화비율은 100 keV 미만의 채널에서 Co-60 1 μCi 체크소 스로 측정한 경우 약 10 %로써, 그림 25 처럼 검출기만 놓고 측정한 것에 비해 약 1 % 정도 높게 더 좋은 결과가 도출됐다.



그림 29. 검출부 내부 3D 도면



그림 30. 검출부가 장착된 기구물 모습(안)





그림 31. 차량에 탑재된 모습(안)



제6장 결론 및 제안

본 연구에서는 차량탑재형 대면적 방사능오염측정장비를 개발하였다. 국내외 상 용화 이동형 방사능 모니터링 시스템 현황 및 사례들을 조사하였고, 상황 적용성 이 우수한 검출기를 선정하였다. 이에 따라, 대면적에 맞는 방사선 검출부를 설계 하기 위해 적절한 납차폐체의 두께를 몬테카를로방법론을 이용한 프로그램인 MC NPX를 통해 도출했으며 MCA(다중채널분석기)를 개발하여 핵종분석을 위한 지표 인 분해능을 측정하고 선량교정을 진행하였다. 또한, 검출하한 성능을 향상시킬 수 있도록 수동차폐 방법인 납 차폐체 외에 능동차폐방법인 역동시계수회로를 이 용해 100 keV 미만의 채널에서 Co-60 1 μCi 체크소스로 측정한 경우 약 10 %의 백그라운드 저감화 비율을 확인하였다. 백그라운드를 저감할 시 방사선량이 높은 지역에서 더 정확하게 바닥면의 오염을 측정할 수 있으며, 환경 및 극저준위 수 준에서는 검출하한을 낮추어 더 정밀한 측정이 가능하다.

위 연구를 바탕으로 현재의 국내외 이동형 방사능 모니터링 시스템의 한계점인 감마공간선량률 측정기능 외에 추가적으로 바닥면에 대한 방사능오염측정을 하는 데 있어 바닥면적 기준 약 412 cm² 의 Active area를 갖는 대면적검출기로 더 넓 은 지역을 신속/정확하게 측정할 수 있음을 확인하였다. 또한, 해당 모듈에 알파/ 베타 검출기를 추가로 장착해 알파,베타,감마선을 모두 측정하는 것이 가능할 것 으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 차량탑재형 대면적 검출시스템을 이용해 상용화하여 생방 법에 적용되는 공정 방사성물질 감시, 핵연료물질 가공시설 등의 제품 공정에서 발생하는 오염의 신속 정밀한 탐지, 원자력관계시설 방사능 재난 시 환경방사능 신속 측정, 분석 수단, 원자력관계시설 운영 중 방사선안전관리를 위한 오염 모니 터링 절차 개선 등에 유용하게 활용이 가능할 것으로 사료된다.



참고문헌

- Knoll, G.. Radiation Detection and Measurements. 3rd ed., John Wiley & Sons, N ew York, USA, 2000
- [2] Amcrys,Ltd, Product data sheet (www.amcrys.com)
- [3] ENVINET Gmbh, MONA-MOBILE SPECTROSCOPIC RADIATION DETECTION SYSTEM catalogues (www.envinet.com)
- [4] NAT-USA, "Mobile Survey System" catalogues (www.nats-usa.com)
- [5] PICO Envirotec, SIRIS / IRIS catalogues (picoenvirotec.com)
- [6] VF, Floor Contamination Monitor catalogues (www.vfnuclear.com)
- [7] 육종철, 오병훈, 김영균. "방사선 에너지 분석을 위한 MCA시스템 제작에 관한 연구", 방사선방어학회, (1987).
- [8] 강병위, 이관엽. "방사능재난시 환경방사선 모니터링 개선에 대한 고찰", 한국원자력학회, (2003).
- [9] 삼창기업, 방사선 스펙트럼분석기능의 환경방사선 감시시스템 개발, 과학기술부, (2004).
- [10] AIRES와 GEANT를 이용한 대면적 플라스틱 섬광체 검출기의 우주 방사선 하전입자 전산모사, 대한방사선방어학회 Apr. 23, pp.232 - 233, (2009).
- [11] 한국원자력안전기술원, 원자력발전소 제염·해체 안전성 평가 방법 개발, (2004).
- [12] 지영용, 이완호, 최상도, 정근호, 강문자, 최근식."환경방사선감시기의 NaI(TI)를
 이용한 조사선량률 결정방법", JNFCW(korean) Vil.11 No.3 pp. 245-251, (2013).
- [13] 이응로, 4" × 4" × 16" NaI(Tl) 섬광검출기를이용한 차량기반지각방사선탐사 에대한연구, (2015).
- [14] 한국원자력연구원, 원자력시설 DD&R 기술 개발, (2017).
- [15] 홍성준, 차량탑재 NaI 검출기를 이용한 토양방사능의 in-situ 측정방법, (2018).
- [16] 서울대학교 원자력정책센터 (https://atomic.snu.ac.kr)
- [17] 연합뉴스, 서울시 노원구 월계동 아스팔트 오염 여부 확인, (2011).
- [18] 원자력용어사전, 한국원자력산업회의, (2011).
- [19] 원자력이용시설 해체완료 후 부지 및 잔존건물 재이용을 위한 기준, 원자력 안전위원회고시 제2016-33호
- [20] 한국원자력환경공단, 중저준위 방폐물 처분시설 운영현황 (www.korad.or.kr)