

# 플라스틱 Scintillator와 NaI(Tl) 검출기를 이용한 다수의 방사선원 위치를 3차원으로 판별하는 측정시스템 개발

## Development of 3D Radiation Position Identification System of Multiple Radiation Sources using Plastic Scintillator and NaI(Tl) Detector

곽 동 훈\*, 고 태 영\*, 이 승 호\*\*★

Dong-Hoon Kwak\*, Tae-Young Ko\*, Seung-Ho Lee\*\*★

### Abstract

In this paper, we develop a measurement system that uses 3D Scintillator and NaI(Tl) Detector to 3-dimensionally identify the location of multiple radiation sources in moving vehicle loads. The radiation measurement system consists of radiation measurement (plastic scintillator), 2-channel Pulse Counter Board, nuclide analysis (NaI(Tl) detector) and 1 channel MCA Board. The source locator algorithm calculates the coordinate value of the ratio of the CPS value( $1/r^2$ ) of the source according to the angle( $\theta$ ) in inverse proportion to the square of the distance( $X, Y$ ) through the SVM classification. The coordinate values are input every predetermined period of the spectrum, and after analyzing the spectrum per unit cycle, the position of the nuclide at the time is calculated by determining whether or not the nuclide is present in the remaining part except for the background area. As a result of the position discrimination test, the error within the international standard of  $\pm 1m$  was shown. Thus, the utility of the proposed system has been demonstrated.

### 요 약

본 논문에서는 플라스틱 Scintillator와 NaI(Tl) 검출기를 이용하여 움직이는 차량 적재물에 존재하는 다수의 방사선원 위치를 3차원으로 판별하는 측정시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 방사선량 측정용 플라스틱 Scintillator, 2채널 펄스 카운터, 핵종 분석용 NaI(Tl) 검출기 및 1채널 MCA Board 등으로 구성된다. 방사선원 위치판별 알고리즘은 방사선량의 거리의 자승에 반비례한 특성( $1/r^2$ )과 장치와의 각도( $\theta$ )에 따른 보상을 통해 계산된 방사선원의 CPS 값의 비율을 SVM 분류를 통하여 방사선원의 위치( $X, Y$ )를 구할 수 있다. (Z) 좌표 값은 단위 시간당 움직이는 대상체의 속도에 따라 정해지게 되며 이는 단위주기당 백그라운드 스펙트럼을 제외한 순수 핵종의 스펙트럼을 분석한 후 핵종 유무 판별을 진행한 뒤 해당 핵종의 위치를 판별하게 된다. 본 논문에서 제안한 시스템의 위치 판별 실험 결과  $\pm 1m$  이내의 국제표준오차를 나타내었다. 따라서 본 논문에서 제안한 시스템의 유효성이 입증되었다.

*Key words : Plastic Scintillator, NaI(Tl) Detector, SVM Classification, Radiation, Location Determination*

\* Dept. Electronic Engineering, Hanbat National University  
\*\* Dept. Electronics&Control Engineering, Hanbat National University  
★ Corresponding author

E-mail : shlee@cad.hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1137

Manuscript received Aug. 29, 2018; revised Sep. 14, 2018; accepted Sep. 14, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### I. 서론

일본 후쿠시마 원전사고 이후에 수입되는 방사성 물질과 산업 방사성 물질에 대한 검사의 중요성이 크게 대두됨에 따라, 공항과 항만에서의 움직임은 대상체에 대하여 짧은 시간에 방사선의 측정, 핵종 분석, 위치 판별 시스템에 대한 수요가 증가하고 있는 실정이다[1]. 현재 국내 항공·항만, 원자력 발전소, 산업 폐기물 처리장에 설치 운영 중인 설치된 방사선 측정기의 현황은 대부분 고가의 수입 제품으로 국산화의 필요성이 크게 대두되고 있다 [2]. 본 논문에서는 플라스틱 Scintillator와 NaI(Tl) 검출기를 이용하여 움직이는 차량 적재물에 존재하는 다수의 방사선원 위치를 3차원으로 판별하는 측정시스템 개발을 목표로 한다.

### II. 본론

#### 1. 방사선원 3차원 위치판별 측정 시스템을 위한 시스템 블록도

방사선원의 3차원 위치판별을 위한 시스템 블록도는 그림 1과 같이 방사선 측정(플라스틱 Scintillator), 2채널 Pulse Counter Board, 핵종분석(NaI(Tl) 검출기), 1채널 MCA Board 등으로 구성된다.

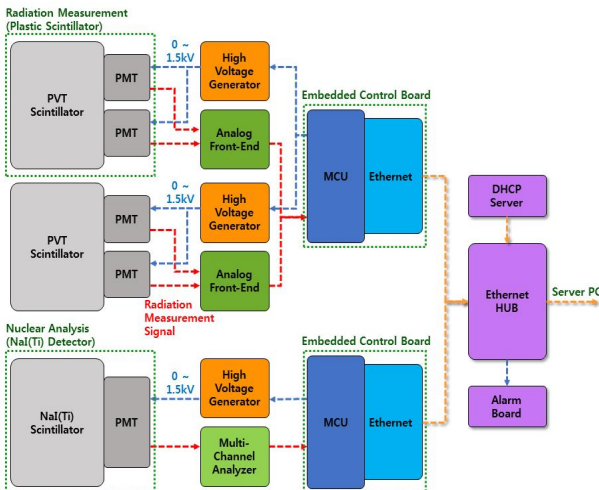


Fig. 1. Radiation Source Location Determination and Radiation Dose Measurement System Block Diagram.  
그림 1. 방사선원 위치판별 및 방사선량 측정 시스템 블록도

#### 1.1 방사선 측정(플라스틱 Scintillator)

PVT Scintillator는 고전압(1,100V~1,250V)을 인

가하면 감마선에 반응하는 약한 섬광을 발생시킨다. PMT (Photo Multiplier Tube)는 PVT Scintillator에서 발생한 아주 약한 형광을 10<sup>6</sup>배 이상 증폭하여 큰 전기적 펄스를 2채널 Pulse Counter Board에 전달한다. 본 논문에서는 그림 2와 같이 500mm × 500mm × 50mm 크기로 제작한 EPIC Crystal사(중국)의 PVT 섬광체를 플라스틱 Scintillator(PVT) 1개에 Hamamatsu사(일본)의 CR105-3의 PMT를 2개 결합하여 사용한다[3].

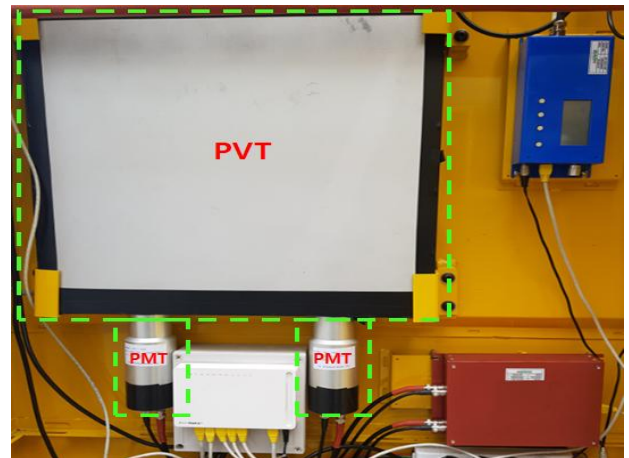


Fig. 2. Radiation Measurement(Plastic Scintillator).  
그림 2. 방사선 측정(플라스틱 Scintillator)

#### 1.2 2채널 Pulse Counter Board

2채널 Pulse Counter Board는 High Voltage Generator (HVG), Analog Front-End, MCU, Ethernet 등으로 구성된다. HVG는 플라스틱 Scintillator가 정상적으로 운영되기 위해 고전압을 인가하는 고전압 발생장치 모듈이다. HVG는 400~2,000V의 범위에

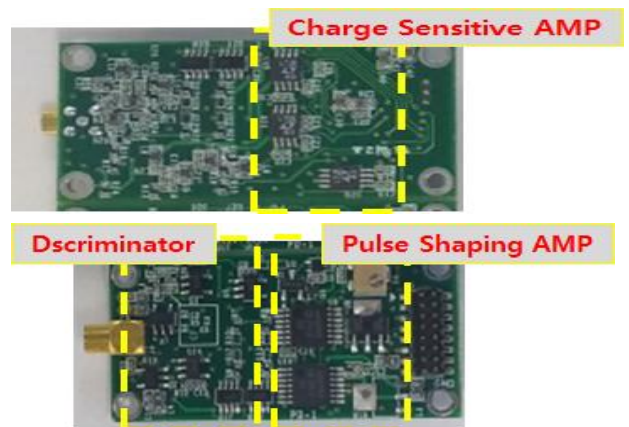


Fig. 3. AFE(Analog Front-End).  
그림 3. AFE(Analog Front-End)

서 리플이 10mV 이하로 적은 전압을 생성한다[4]. 그림 3의 Analog Front-End(AFE)는 측정된 방사선에 의한 출력 신호에 대해 신호의 증폭 및 가우시안 펄스로의 변형 및 노이즈 및 뉘운 신호 등을 제거하고 각 펄스의 수를 측정한다. AFE는 Charge sensitive AMP, Pulse shaping AMP, Discriminator 등으로 구성되어진다.

그림 4의 MCU(Micro Control Unit)은 입력된 디지털 펄스를 펄스 카운팅하여 측정된 방사선의 수를 계수한다. 계수된 CPS 값을 Ethernet Port를 통해 Server PC로 전송한다. MCU는 Cortex-M4 STM32F407V를 사용하며, 포팅된 운영체제는 FreeRTOS V8.2.1이다.

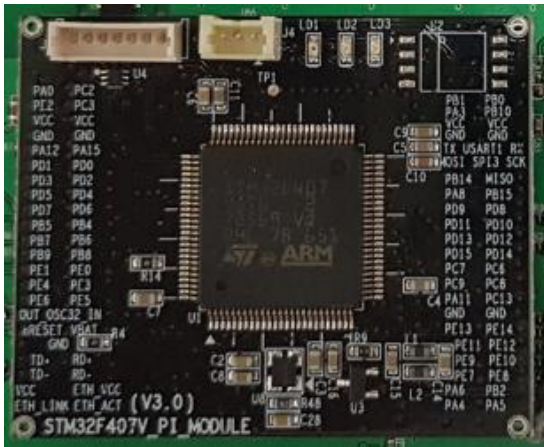


Fig. 4. MCU(Micro Control Unit).  
그림 4. MCU(Micro Control Unit)

2채널 Pulse Counter Board는 HVG, AFE, MCU 등이 통합된 Board이다. 그림 5는 2채널 Pulse Counter Board이다.



Fig. 5. 2 Channel Pulse Counter Board.  
그림 5. 2채널 Pulse Counter Board

### 1.3 핵종분석(NaI(Tl) 검출기)

NaI(Tl) 검출기는 고전압(500 ~ 900V)을 인가하면 감마선에 반응하는 강한 섬광을 발생시킨다. PMT에서는 NaI(Tl) 검출기에서 발생한 강한 섬광을  $10^6$ 배 이상 증폭한다. 본 논문에서는 핵종 분석을 위해 그림 6과 같이 NaI(Tl) 검출기 및 PMT(Photo Multiplier Tube)가 결합된 REXON사(미국)의 제품을 사용한다[5].

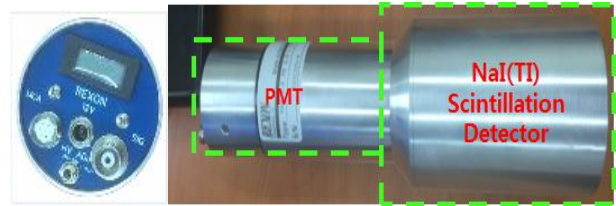


Fig. 6. Nuclide Analysis (NaI (TI) Detector).  
그림 6. 핵종분석(NaI(TI) 검출기)

### 1.4 1채널 MCA(Multi Channel Analyzer) 모듈

그림 7의 1채널 MCA Board는 High Voltage Generator, MCU, Ethernet 등으로 구성되어진다. MCA 모듈에서는 NaI(Tl) 검출기와 PMT가 결합된 핵종분석(NaI(Tl) 검출기)를 통해 들어온 펄스 신호를 Charge Sensitive AMP, Pulse Shaping AMP 등을 사용하여 증폭 및 펄스 모양을 정형화한 후 디지털 데이터로 변환한다. 펄스의 높이 및 펄스의 크기 등을 통해 각 펄스가 가지는 에너지를 분리스펙트럼화하기 위해 배치하여 각 에너지 대역별로 계수하여 저장한다. MCA 모듈에서는 단위시간을 주기로 측정된 전체 에너지에 대한 스펙트럼 대역의 데이터를 1채널 MCA Board를 통해 전송하여 PC상의 GUI에 스펙트럼으로 나타나도록 한다. MCA 모듈은 AMPTEK사(미국)의 DP5G를 사용한다.

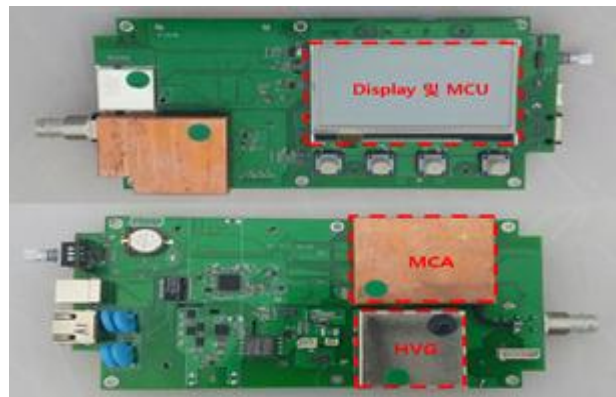


Fig. 7. 1 Channel MCA Module.  
그림 7. 1채널 MCA 모듈



2. 방사선원 위치 판별을 위한 시스템 구성 하드웨어

방사선원 위치 판별을 위하여 그림 8과 같이 방사선 측정(플라스틱 Scintillator), 2채널 Pulse Counter Board, 핵종분석(NaI(Tl) 검출기), 1채널 MCA Board 등으로 시스템을 구성한다.

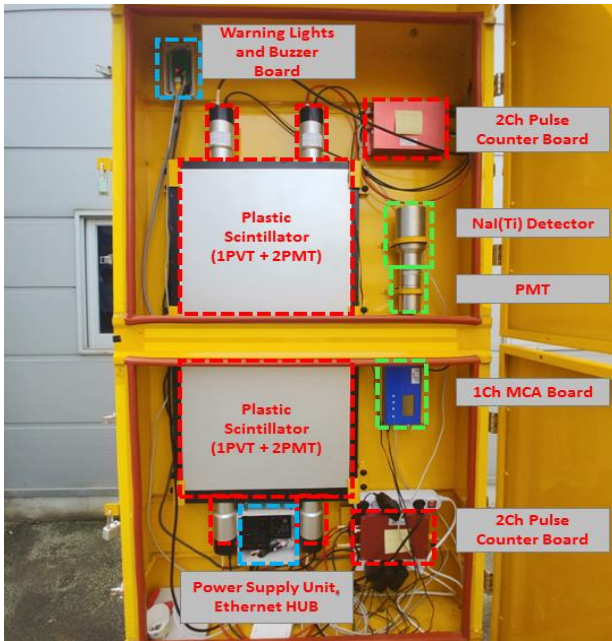


Fig. 8. System Configuration Hardware Image to Determine Source Location.

그림 8. 방사선원 위치 판별을 위한 시스템 구성 하드웨어 사진

3. 방사선원 위치 판별 알고리즘

방사선원 2개 이상 일 때, 다음과 같은 방법으로 방사선원의 위치를 판별하게 된다. 먼저 그림 9와 같이 방사선 측정부1의 방사선량의 CPS 값(K1)이 그리는 반지름의 범위( $r_{1\text{sensor}}$ )와 방사선 측정부2의 방사선량의 CPS 값(K2)이 그리는 반지름의 범위( $r_{2\text{sensor}}$ )와의 교차되는 부분 밖의 영역에 방사선 물질이 존재하게 된다. 같은 원리로 방사선 측정부3과 측정부 4에 적용하면 방사선원이 2개 이상 일 때는 방사선 측정부1, 측정부2, 측정부3, 측정부4의 방사선량의 CPS 값(K1, K2, K3, K4)이 그리는 반지름의 범위( $r_{1\text{sensor}}$ ,  $r_{2\text{sensor}}$ ,  $r_{3\text{sensor}}$ ,  $r_{4\text{sensor}}$ )와 교차되는 부분 밖의 영역에 방사선 물질이 존재하게 된다. 최종적으로 2개의 방사선원의 교점부에 방사선원의 위치를 표시하게 되며, 방사선원의 핵종 및 방사능량 등은 핵종 분석을 통해 확인한다[6].

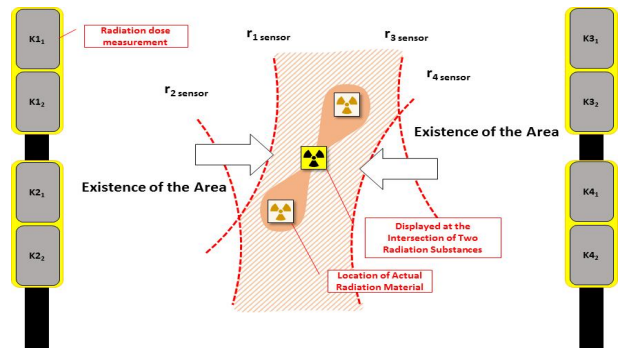


Fig. 9. Radiation Area for Two or More Radiation Sources. 그림 9. 2개 이상의 방사선원에 대한 방사선 영역

그러나, 실험을 통해 살펴보면 센서의 결과 값이  $1/r^2$  값에 비례하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 이는 방사선량의 CPS 값의 결과가 거리에만 의존하지 않고 방사선원과 센서와의 각도에 따라서도 그 값이 변하게 된다는 것이 확인되었다. 따라서 거리 이외의 방사선원과 센서와의 각도에 따른 방사선량을 보상하는 알고리즘을 이용하여 방사선량의 CPS 값을 보상한다. 각도 보상 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 그림 10과 같이  $r_1$ 와 평행한 2개의  $\overline{AG}$ 와  $\overline{CE}$ 를 센서(K1)의 상단과 하단부에 추가하여 2개의  $\overline{AG}$ 와  $\overline{CE}$  사이에  $r_1$ 에 직교하는  $\overline{AD}$ 를 추가하여 직각삼각형  $ACD$ 를 만든다.  $\angle FBE(\theta_1)$ 와  $\angle AFB$ 는 서로 엇각이므로 2개의 각은 동일하다.  $\angle FAC=90^\circ$  이므로  $\angle FAD$ 는  $90^\circ - \theta_1$ 이다.  $\angle FAC=90^\circ$  이므로  $\angle CAD = \angle FAC - \angle FAD = \theta_1$ 이다. 삼각공식에 의해 직교하는  $\overline{AD}$ 의 길이는  $\overline{AC}(50\text{cm}) \times \cos(\theta_1)$ 가 된다. 따라서, 방사선원과 센서와의 각도에 따른 방사선량의 CPS 값의 보상은,  $\overline{AC}(50\text{cm}) \times \cos(\theta_1)$ 의 값을 산출하여 각도에 따른 보상을 수행한다. 나머지 센서 K2, K3, K4에 대하여 위와 같은 방법을 적용하여 방사선원과 센서와의 각도에 따른 방사선량의 CPS 보상 값을 구한다[7].

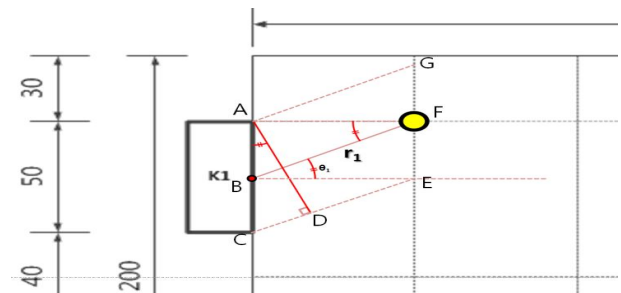


Fig. 10. Correlation of Radiation Dose With Radiation Source and Sensor Angle.

그림 10. 방사선원과 센서와의 각도에 따른 방사선량 상관관계

방사선 물질과 센서 K1 사이의 거리는  $r_1 = \sqrt{(X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2}$  이고, 이고, 그 사잇각은 위에서 증명한대로  $\cos\theta_1 = \frac{|X_1 - X|}{r_1}$  와 같이 정의할 수 있으므로 만약 1MBq 방사선 물질이 좌표  $(x, y)$  상에 존재할 경우, 센서 K1에서 측정되는 CPS 값은 식 (1)과 같다.

$$CPS_{K1} = 1MBq \text{에 해당하는 CPS 값} \times \frac{1}{r_1^2} \times (50cm \times \cos\theta_1) \quad (1)$$

마찬가지로 K2, K3, K4 센서에 대해서도 식 (1)을 적용하여 총 4개의 CPS 값을 계산한 뒤 비례식을 세우면 공통소자인 1MBq과 50cm는 서로 상쇄되고  $\frac{1}{r^2}$  과  $\cos\theta$ 만 남게 된다. 결과적으로 아래의 식과 같이 위치에 따른 방사선량의 CPS 값의 비율만을 학습하게 되면 핵종과 방사능량에 관계없이 식 (2)와 같이 핵종의 위치 정보를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1MBq}{r_1^2} \times (50cm \times \cos\theta_1) &: \frac{1MBq}{r_2^2} \times (50cm \times \cos\theta_2) \\ &: \frac{1MBq}{r_4^2} \times (50cm \times \cos\theta_4) : \frac{1MBq}{r_3^2} \times (50cm \times \cos\theta_3) \\ &= \frac{\cos\theta_1}{r_1^2} : \frac{\cos\theta_2}{r_2^2} : \frac{\cos\theta_3}{r_3^2} : \frac{\cos\theta_4}{r_4^2} \end{aligned} \quad (2)$$

최종적으로 거리 자승에 반비례 ( $1/r^2$ )하고 각도 ( $\theta$ )에 따른 방사선원의 CPS 값의 비율을 (0cm, 0cm) 좌표부터 (400cm, 200cm) 좌표까지 총 80,000가지의 경우의 수에 대하여 Support Vector Machine(이하 SVM)으로 학습한다. 학습이 완료되었으면 실제 방사선 물질을 임의의 좌표 상에 두고 CPS 값을 측정하여 이를 SVM 분류기에 입력시키게 되면 해당 CPS 값의 비율과 가장 유사한  $(x, y)$  좌표 값을 계산한다. 최종적으로 그림 11과 같이 4개의 센서에 대한 방사선량의 CPS 값이 입력되면 SVM 분류를 통해  $(x, y)$  좌표 값을 산출한다[8].

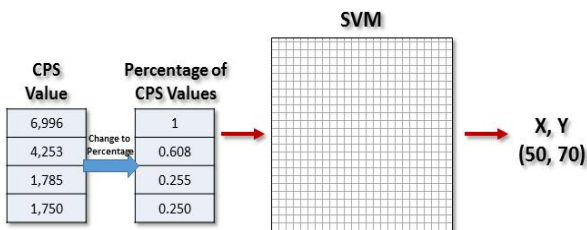


Fig. 11. Calculate  $(X, Y)$  Coordinate Values Through SVM Classification.

그림 11. SVM 분류를 통해  $(x, y)$  좌표 값을 산출

다음으로  $(z)$  좌표 값은 스펙트럼을 정해진 주기마다 입력받아 단위 주기당 스펙트럼을 분석한 후에, 이 중에서 Background 영역을 제외한 나머지 부분에서 해당 시간에서의 핵종의 위치인  $(z)$ 좌표 값을 산출하게 된다.  $^{60}\text{Co}$ 와  $^{137}\text{Cs}$  핵종이 차지하는 비중이 방사선 측정 장치와 직교하는 시점에서 가장 큰 값을 가지므로 해당 시간(초)대에 방사선 측정 장치와 직교하였다고 판단하고 해당 위치를 방사선의  $(z)$  좌표 값으로 한다. 즉 그림 12와 같이 움직이는 대상체와 센서가 직교한 시점에서  $^{60}\text{Co}$ 와  $^{137}\text{Cs}$  핵종이 차지하는 비중이 가장 큰 시간(초)을  $(z)$  좌표 값으로 결정하게 된다. 최종적으로 방사선원의  $(x, y, z)$ 의 3차원 좌표를 표시하게 된다.

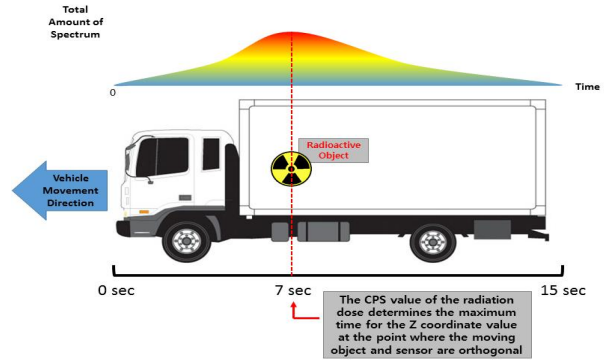


Fig. 12. Calculation Method of  $(Z)$  Coordinate Value of Nuclide.

그림 12. 핵종의  $(z)$  좌표 값의 산출 방법

## 4. 성능 실험

### 4.1. 실험 방법

방사선 위치 판별 실험은 그림 13과 같이 플라스틱 Scintillator 중앙을 기준으로 거리별 방사선 측정에 대한 펄스 수 및 선량률 환산을 적용한 표를 기준으로, 4개의 플라스틱 Scintillator를 4m 떨어진 거리에서 (주)엔바이로코리아에서 보유하고 있는 실험소스인 1MBq(약 27uCi) 방사능량을 가지는  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  등 2개의 측정선원을 사용하여 실험을 진행하였다.

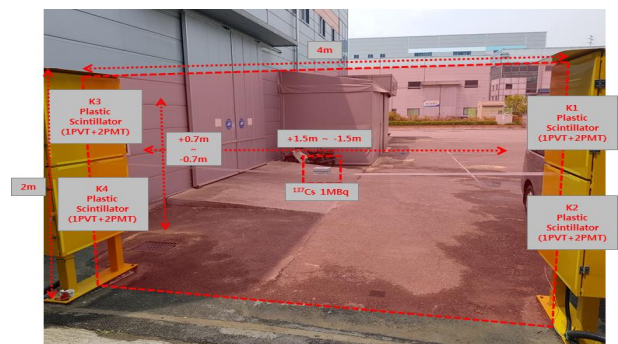


Fig. 13. Experimental Environment for Determining Source Location.

그림 13. 방사선원 위치판별 실험 환경

## 4.2. 실험 결과

방사선원을 차량에 탑재한 뒤 위치 정확도 실험을 진행하였으며, 아래 표는  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{60}\text{Co}$  등의 방사선원의 각 거리별 실제위치와 실험 위치의 평균 오차 결과를 나타내고 있다. 표 1에서와 같이 방사선원 위치 판별 실험 결과는 오차거리가  $\pm 100\text{cm}$  범위 이내 이므로 국제 표준인  $\pm 1\text{m}$ 이내의 오차거리를 나타내었다. 따라서 본 논문에서 제안한 차량 적재물에 존재하는 다수의 방사선원 위치를 3차원으로 판별하는 측정 시스템의 효용성이 입증되었다.

Table 1. Mean Error of Actual Position and Experimental Position.

표 1. 실제 위치와 실험 위치의 평균 오차

Mean Error in Actual and Experimental Positions		
$^{137}\text{Cs}$	X	-3.85 cm
	Y	9.75 cm
	Z	0.18 cm
$^{60}\text{Co}$	X	6.87 cm
	Y	13.3 cm
	Z	-0.3 cm
Result of an Experiment		$\pm 100$ cm or less

## III. 결론

본 논문에서는 플라스틱 Scintillator와 NaI(Tl) 검출기를 이용하여 움직이는 차량 적재물에 존재하는 다수의 방사선원 위치를 3차원으로 판별하는 측정시스템을 구현하였다. 방사선원 위치 판별에 대한 실험 결과는 국제 표준인  $\pm 1\text{m}$  이내의 오차거리를 나타내어 제안된 시스템의 효용성이 입증되었다. 향후 연구 과제로는 방사선원이 여러 개 존재하는 경우에 여러 개의 방사선원의 위치를 더욱 정밀하게 판별할 수 있는 방사선 검출 시스템에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

## References

[1] Buddemeier, Robert W., and James R. Hunt. "Transport of colloidal contaminants in groundwater: radionuclide migration at the Nevada Test Site." *Applied geochemistry*, vol.3, no.5, 1988: 535-548.

DOI:10.1016/0883-2927(88)90025-X

[2] Knuteson, R. O., et al. "Atmospheric emitted radiance interferometer. Part I: Instrument design." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.21, no.12 pp.1763-1776, 2004.

DOI:10.1175/JTECH-1662.1

[3] Kim, Jeong-Ho, and Koan-Sik Joo. "Study on Scintillator Polishing Technology for Increasing the Detection Efficiency of Radiation Detectors Using Plastic Scintillators." *Journal of IKEEE*, vol.18, no.4, pp.456-462, 2014.

DOI:10.7471/ikeee.2014.18.4.456

[4] Tae-Young Ko, Hee-Yeol Lee, Seung-Tak Ra, Dong-Hoon Kwak, Joo-Hyun Lee and Seung-Ho Lee, "Development of Radiation Position Identification and Radiation Dosage Measurement System for Moving Vehicle Load Radiation Management using Plastic Scintillator." *The Institute of Electronics and Information Engineers Conference*, pp.86-89, 2017.

[5] Dong-Hoon Kwak, Hee-Yeol Lee, Seung-Tak Ra, Tae-Young Ko, Joo-Hyun Lee and Seung-Ho Lee, "Development of Nuclide Analysis System for Moving Vehicle Load Radiation Management using SVM Method." *The Institute of Electronics and Information Engineers Conference*, pp.82-85, 2017.

[6] Ely, James H., et al. "Discrimination of naturally occurring radioactive material in plastic scintillator material." *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.51, no.4, pp.1672-1676, 2004.

DOI:10.1109/TNS.2004.832286

[7] Malioutov, Dmitry, Müjdat Cetin, and Alan S. Willsky. "A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays." *IEEE transactions on signal processing*, vol.53, no.8, pp.3010-3022, 2005. DOI:10.1109/TSP.2005.850882

[8] Gu, Bin, and Victor S. Sheng. "A Robust Regularization Path Algorithm for nu-Support Vector Classification." *IEEE Transactions on neural networks and learning systems*, vol.28, no.5, pp.1241-1248, 2017.

DOI:10.1109/TNNLS.2016.2527796

## BIOGRAPHY

### **Dong-Hoon Kwak** (Student Member)



2012 : BS degree in  
Electronics&Control Engineering,  
Hanbat National University  
2018 ~ current : MS degree course of  
Electronic Engineering,  
Hanbat National University

### **Tae-Young Ko** (Student Member)



2012 : BS degree in Electronics &  
Control Engineering, Hanbat National  
University  
2018~current : MS degree course of  
Electronic Engineering, Hanbat National  
University

### **Seung-Ho Lee** (Member)



1986 : BS degree in Electronic  
Engineering, Hanyang University  
1989 : MS degree in Electronic  
Engineering, Hanyang University  
1994 : Ph .D degree Electronic  
Engineering, Hanyang University  
1994~current : Professor, Department  
of Electronics & Control Engineering,  
Hanbat National University