포털 모니터의 배경 방사선 평가를 위한 자연방사선 모델 개발

김종범[1,*] · 이진형[1] · 문명국[1]

[1]한국원자력연구원

Development of Natural Radiation Model for Evaluation of Background Radiation in Radiation Portal Monitor

Jong Bum Kim[1,*], Jin Hyung Lee[1] and Myung Kook Moon[1]

[1]*Radioisotope Research and Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - In ports and airports, radiation portal monitors (RPM) are deployed to detect illicit radioactive materials. Detected gamma rays in a RPM include background radiation and radiation from a freight. As a vehicle moves through the RPM, the vehicle causes the fluctuations in the natural background radiation signal, which ranges of up to 30%. The fluctuation increases the uncertainty of detection signal and can be a cause of RPM false alarm. Therefore, it is important to evaluate background radiation as well as radiation from a container. In this paper, a natural background radiation model was developed to evaluate RPM. To develop natural background radiation model, a Monte Carlo simulation was performed and compared with experimental measurements from a RPM for ^{40}K, ^{232}Th series, and ^{235}U series, which are major sources of natural background radiation. For a natural radiation source, we considered a cylindrical soil volume with 300 m radius and 1 m depth, which was estimated as the maximum range affecting the RPM by MCNP6 simulation. The volume source model was converted to surface source by using MCNP SSW card for computational efficiency. The computational efficiency of the surface source model was improved to approximately 200 times better than that of the volume source model. The surface source model is composed of a hemisphere with 20 m radius in which the RPM and container are modelled. The natural radiation spectrum from the simulation was best fitted to the experimental measurement when portions of ^{40}K, ^{232}Th series, and ^{235}U series were 0.75, 0.0636, and 0.0552 Bq·g^{-1}, respectively. For gross counting results, the difference between simulation and experiment was around 5%. The background radiation model was used to evaluate background suppression from a 40 ft container with 7.2 m·s^{-1} speed. In further study, background models and freight models for RPM in real container ports will be developed and applied to optimize the operating system of port security.

Key words : Monte Carlo simulation, Background radiation, Radiation portal monitor, Port, Container inspection

* Corresponding author: Jong-Bum Kim, Tel. +82-42-868-8050, Fax. +82-42-862-6980, E-mail. jong@kaeri.re.kr

서 론

방사선 포털 모니터(Radiation Portal Monitor: RPM)는 방사성 오염물질의 불법적인 유입과 유통을 방지하기 위해 국내외에 널리 사용되고 있다(IAEA 2002). 미국의 경우 2002년부터 Radiation Portal Monitor Project를 운영하고 있으며, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 및 Los Alamos National Laboratory (LANL) 등에서는 RPM 최적화, RPM 측정 모델 개발, polyvinyltoluene (PVT) 특성 평가 등 관련 연구를 수행하고 있다(Siciliano *et al*. 2005; Charles *et al*. 2006; Tom and Kary 2008; Gerald *et al*. 2009; Tom and Kary 2009; Deborah *et al*. 2012). 우리나라 또한 생활주변방사선 안전관리법 제정 및 시행에 따라 방사성물질의 탐지를 위해 2012년부터 공항 항만에서 RPM을 운영 중이다(이병수 등 2015). 공항 항만에 설치된 RPM은 방사성 물질 감시를 위해 감지 준위에 대해 경보를 울리는 시스템으로 구성되어 있다. 감지 준위를 낮게 설정하면 적은 양의 방사성물질도 찾아낼 수 있지만, 화물에 포함된 천연 방사성 물질로 인해 잦은 경보가 발생하게 되고 설정을 높게 하면 경보는 줄어들지만 적은 양의 방사성 물질이 감지되지 않을 수 있다. 따라서 경보 설정의 최적화가 필요하며 이를 위해서는 항만 특성에 맞는 배경 방사선, RPM 모델 등에 대한 분석이 선행되어야 한다.

일반적으로 RPM은 검출 감도를 높이기 위해 대용적의 PVT 검출기로 구성되어 있다. 대략 30~60리터 용적의 PVT 검출기 2개에서 6개까지로 구성된다. 1개의 PVT에 검출되는 통상적인 배경 방사선 값은 3,000~10,000 CPS이며 설치된 환경에 따라 편차가 있다. 일반적으로 RPM의 PVT 검출 신호의 특성은 대용적 검출기 사용으로 인해 배경 방사선은 높고 감지해야 할 최저 방사선 준위는 낮은 편이다. 또한, 화물 차폐로 인해 배경 방사선이 변동되기 때문에 화물에서 방사성물질이 없더라도 화물진입에 따른 배경 방사선 자체가 30% 범위의 변동이 생긴다. Fig. 1은 차량 진입에 따른 배경 방사선이 감소되는 현상인 배경 방사선 차폐(background suppression)의 일반적인 형태를 보여주고 있다. 차폐 정도는 화물 구성에 따라 다르다. 예를 들어 화물이 20 ft 컨테이너, 40 ft 컨테이너, 또는 20 ft를 2량 연결된 컨테이너 등에 따라 달라지고 적재된 화물의 형태, 밀도에 따라 달라지기 때문에 배경 방사선을 제거하거나 배경 방사선 변동 신호를 일반화하는 것은 본질적으로 불가능하다. 이러한 변화로 인해 검출 신호의 불확실성이 증가하여 감마선 검출기의 민감도를 제한하는 요소가 되거나 오경보(false alarm)의 주요 원인이 된다. 따라서 관련 연구자들은 배경 방사선이 포함된 RPM 신호를 이용하여 최적화 연구를 수행하고 있다. 이를 위해서 위험물질이 포함되지 않은 화물이 지나가면서 RPM에서 측정된 수백에서 수천 개의 데이터를 사용하거나(Tom and Kary 2008; Tom and Kary 2009), 실제와 유사한 배경 방사선을 몬테칼로 전산모사 기반으로 만드는 시도(Gerald *et al*. 2009)를 하고 있다. 이와 같이 생성된 배경 방사선 또는 차량에 의해 차폐된 배경 방사선 신호는 threat-injection method (Tom *et al*. 2007)에 사용될 수 있다. Threat-injection method 실험이란 위험물질이 없는 순수 background suppression 신호에 위험 물질의 방사선 신호를 더하여 데이터를 생성하는 것이다. 본 논문에서는 이와 같은 연구의 일환으로 RPM의 성능 최적화를 위한 화물 내의 방사선뿐만 아니라 배경 방사선을 포함한 RPM의 몬테칼로 평가가 가능하도록 배경 방사선 모델을 개발하고 이에 대한 활용 기술을 제시하고 있다. 배경 방사선 평가 및 측정을 위해 몬테칼로 전산모사 코드로 Monte Carlo N-Particle 6 (MCNP6)을 사용하였으며, 28.5 cm × 170.2 cm × 6.5 cm 크기의 PVT와 3 inch NaI 검출기로 구성된 실험용 RPM을 사용하였다.

재료 및 방법

1. RPM 시스템 배경 감마선 발생원 분석

인간에 대한 피폭선량 관점의 배경 방사선 발생원은 세계 평균 지각 방사선이 0.480 mSv·yr^{-1}, 라돈에 의한 내부 피폭이 1.15 mSv·yr^{-1}, 우주 방사선이 0.240 mSv·yr^{-1}이다(UNSCEAR report 2000). 그러나 지표면에 위치한 RPM에 영향을 주는 요인은 이와는 다른 양상을 보인다. 우선 RPM은 라돈에 대해 직접적인 영향을 받지 않으며, 우주 방사선에 의한 뮤온은 에너지는 평균 4 GeV로 높지만 지표면의 flux가 1 muon·cm^{-2}·min^{-1} (Eric 2007) 정도로 낮으므로 RPM 계측 값에 큰 영향을 주지 않는다. PNNL에서는 RPM의 계측에 주는 영향을 원인별로 Table 1과 같이 분석하였다(Gerald *et al*. 2009). 지각 방사선으로부터의 직접 도달하는 부분이 70%, 지각 방사선과 대기와의 산란 방사선이 30%, 라돈 및 라돈의 딸핵종이 1% 이하, 우주 방사선 1% 이하이다. 따라서 지표면의 RPM에 영향을 주는 감마선 발생원을 대략적으로 지각의 방사성 핵종으로 제한할 수 있

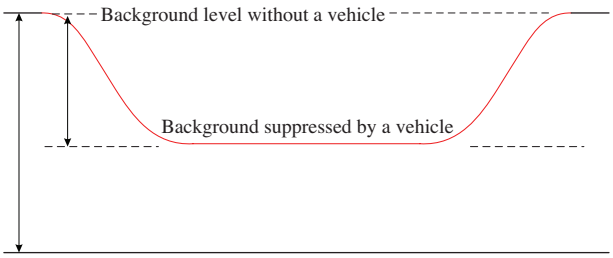


Fig. 1. Background suppression.

Table 1. Background gamma ray source for RPM (Gerald *et al*. 2009)

Source	Gamma flux fraction (%)
Direct soil gamma decay	~70
Scattered soil gamma with air	~30
Soil-bremsstrahlung	<3
Radon in air	<1
Cosmic rays	<1
Other	

다. 지각으로부터 직접 도달하는 감마선과 대기와의 산란 후 입사되는 방사선을 구분하는 이유는 차폐에 의한 배경 방사선 변동이 RPM에 입사되는 방사선의 방향성과 에너지에 영향을 받기 때문이다. 지각으로부터 직접 도달하는 감마선의 방향은 아래에서 위로 향하는 반면 대기와의 산란 후 입사되는 방사선은 다양한 각도로 전 범위에서 입사되며, 낮은 에너지대를 구성하는 것으로 알려져 있다(Gerald *et al*. 2009).

지각 방사성 핵종에 의한 방사선은 주로 흙과 인근 건물 재료에 포함된 ^{40}K, ^{232}Th 계열, ^{238}U 계열 및 ^{235}U 계열의 방사성 핵종으로부터 나온다. 그러나 ^{235}U 계열의 방사성핵종은 상대적인 존재량이 미미하기 때문에 ^{40}K, ^{232}Th 계열 및 ^{238}U 계열의 방사성 핵종으로 제한할 수 있다. 계열 붕괴 중 딸핵종에 비해 모핵종의 반감기가 매우 길고 충분한 시간이 지난 경우에 계열 붕괴 중인 이들 핵종들의 방사능은 거의 같아야 한다. 그러나 계열 붕괴 핵종 중에 지질학적 변화에 비해 반감기가 긴 핵종은 풍화에 의해 농도에 변화가 생기기 때문에 영속평형 조건이 성립되지 않는다(Saifeldin *et al*. 2014). 따라서 반감기가 긴 자손핵종에 대해 별도로 계열을 구분하여 영속 평형을 고려하는 것이 필요하다. 토양 속의 ^{232}Th 계열 붕괴 핵종은 대체로 반감기가 비교적 짧고, 일부 반감기가 비교적 긴 ^{228}Ra (6.7년)와 ^{228}Th (1.9년) 등이 있으나 지각 변동 기간에 비해 짧기 때문에 존재비의 변동에 큰 영향을 주지 않는다(Stephen *et al*. 2012).

^{232}Th decay series (Human Health Fact Sheet 2005)

^{232}Th (1.41E10y)→^{228}Ra (6.7y)→^{228}Ac (6.13h)→^{228}Th (1.913y)→^{224}Ra (3.66d)→^{220}Rn (55.6s)→^{216}Po (0.15s)→^{212}Pb (10.64h)→^{212}Bi (60.55m)→^{208}Ti (3.1m) (36%)→^{208}Pb (stable)

암석 내에서 측정된 값들은 대체적으로 ^{228}Ra 및 ^{228}Th의 농도가 표준편차 내에서 일치하는 것으로 나타난다(Stephen *et al*. 2012). 따라서 토양 속의 ^{232}Th 계열 붕괴 핵종의 농도는 영속 평형으로 가정할 수 있다. ^{238}U의 경우는 ^{226}Ra 이전의 계열과 이후의 계열로 구분하여 생각할 필요가 있다. ^{226}Ra 이전의 계열핵종은 감마선 방출이 거의 없어 RPM에 거의 영향을 주지 않는다.

Table 2. Gamma emitting radionuclide in ^{232}Th and ^{226}Ra series

Parental nuclide	Major gamma emitting radionuclide	Major gamma energy (MeV)	Yield rate (%)
^{232}Th	^{228}Ac	0.911	29
		0.969	17.46
	^{212}Pb	0.238	43.1
	^{208}Ti	0.511	21.6
		0.583	85.8
		2.615	99.8
^{226}Ra	^{214}Pb	0.295	17.9
		0.352	34.3
	^{214}Bi	0.609	42.6
		1.120	13.9
		1.765	14.6

^{226}Ra 이전 decay series (Human Health Fact Sheet 2005)

^{238}U (4.468E10y)→^{234}Th (24d)→^{234m}Pa (1.17min)→^{234}U (2.45E5y)→^{230}Th (7.7E4y)

^{226}Ra 이후 decay series (Human Health Fact Sheet 2005)

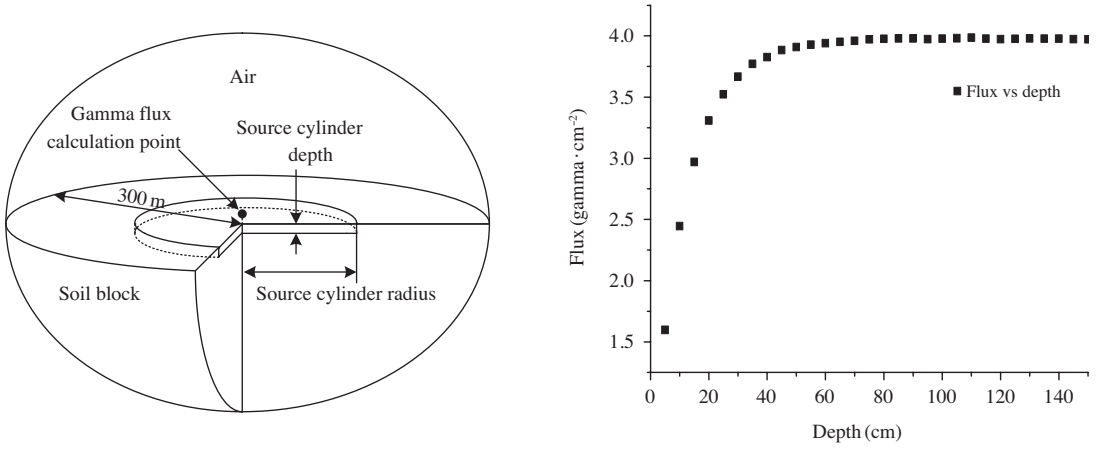
^{226}Ra (1620y)→^{222}Rn (3.8d)→^{218}Po (3m)→^{214}Pb (26.8m)→^{214}Bi (19.7m)→^{214}Po (1.64E-4s)→^{210}Pb (22.3y)→^{210}Bi (5d)→^{210}Po (138d)→^{206}Pb

이에 비해 ^{226}Ra 이후 핵종은 ^{222}Rn (3.8d) ^{214}Pb (26.8min), ^{214}Bi (19.7min) 등의 핵종을 갖는데 이 중 ^{222}Rn의 경우 기체로서 유동적이기 때문에 이로 인해 핵종 농도의 불확실성이 발생한다. 토양 속에 갇혀있는 ^{222}Rn 농도는 토양의 성질에 따라 값이 다르지만 특정 장소에 국한한 경우 시간에 따라 변하지 않는다고 볼 수 있다. 이에 비해 대기로 방출된 ^{222}Rn은 유동적이기 때문에 ^{222}Rn의 농도는 날씨와 관계된 대기 상태에 따라 달라진다(Livesay *et al*. 2014). ^{232}Th 및 ^{226}Ra 계열 핵종 중에 주요 감마선 방출 핵종은 Table 2와 같다. ^{232}Th, ^{226}Ra의 농도가 규명되는 경우 이들의 계열 붕괴 핵종의 농도는 모 핵종과 같다고 가정할 수 있다.

2. MCNP 및 측정값 비교를 통한 배경 방사선 모델 설정

RPM에 계측되는 배경 방사선 값은 ^{226}Ra 계열, ^{232}Th 계열 및 ^{40}K로 인한 영향의 합이다. 각각에 의한 배경 방사선 기여분은 이들의 토양 속의 농도에 비례하게 된다. 이들에 의한 배경 방사선 값은 전산모사 값과 측정값 비교를 통해 ^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra 비율 및 선속 값이 일치되도록 결정된다. 항만 시설의 운용 중인 RPM에 대한 배경 방사선 모델을 개발하기에 앞서 Fig. 2의 실험용 RPM에 대해 적용하였다. 실험용 RPM은 28.5 cm×170.2 cm×6.5 cm 크기의 PVT와 3 inch NaI 검출기 2개로 구성되어 있다. 일반적인 RPM에서의 경보에 사용되는 감마선은 PVT로 만 측정되는데 실험용

Fig. 2. Experimental portal monitoring system.



(a) (b)

Fig. 3. Effect of depth of source volume vs. gamma flux in air.

RPM의 설치된 NaI는 PVT 측정되는 감마선원에 대한 추가적인 정보를 얻기 위한 것이다. PVT 및 NaI 검출기의 계측값은 동일한 배경 방사선에 의해 발생되므로 배경 방사선 분석을 위해 에너지 분해능이 상대적으로 좋은 NaI의 측정값과 비교하였다.

지각 방사성 핵종들에 대한 영향 비율 및 선속을 결정하기에 앞서 RPM에 영향을 주는 범위를 설정하였다. 배경 방사선이 RPM에 영향을 주는 범위를 정확하게 평가하기 위해서는 이에 대한 에너지 스펙트럼이 결정되어야 한다. 그러나 RPM 설치 지점에서의 배경 방사선에 대한 스펙트럼에 대한 정보가 없는 상태이므로 지방 환경 방사선 측정소의 토양 시료로부터 측정된 핵종별 농도 값(김정훈 등 2009)을 이용하여 대략적인 배경 방사선 영향 범위를 설정하였다. 배경 방사선 영향 범위 설정은 토양속의 선원을 실린더 형태의 체적선원으로 가정하고 지표면 높이 1 m 지점에 대해 깊이별 영향과, 볼륨선원의 넓이별 영향을 평가하였다. Fig. 3(a)는 전산모사에 사용된 모델과 Fig. 3(b)는 깊이별 배경 방사선 영향 범위에 대한 MCNP6 전산모사 결과로서 배경 방사선 전체 flux의 98%로 영향을 주는 깊이가 70 cm로 나타났다.

Fig. 4는 깊이 75 cm의 실린더 모양의 토양에 동일 농도의 감마선 방출 지각 방사성핵종을 설정하고 반지름을 변경하면서 중앙 1 m 높이에서 dose rate과 flux를 계산한 것이다. 이는 배경 방사선 영향 범위 중 넓이에 대한 설정을 위한 것으로 flux를 기준으로 하는 경우 98%의 영향을 주는 범위가 대략 250 m 정도인 것을 알 수 있다. 선량률(dose rate) 계산 값은 일정 값에 도달하는 반지름이 다르게 나타나는데, 그 이유는 에너지대별 flux-to-dose conversion factor가 다르기 때문이다. 전산모사 반지름이 커질 때 대기와의 산란 방사선에 의해 발생된 저에너지 영역의 flux가 상대적으로 많

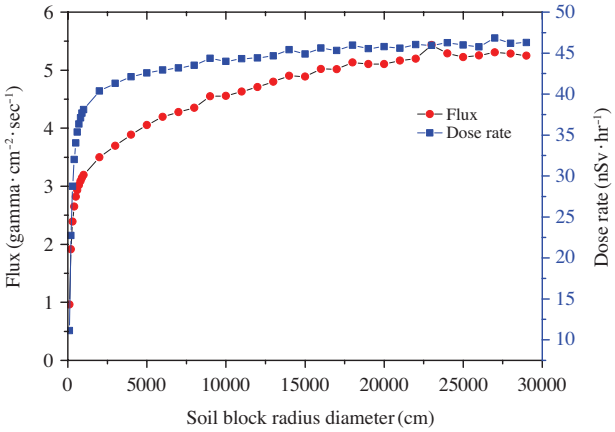


Fig. 4. Effect of radius of source cylinder volume.

이 증가된다. 그러나 이 영역의 dose conversion factor가 고에너지 영역에 비해 상대적으로 작기 때문에 dose 증가율이 상대적으로 작기 때문이다. RPM의 경우 펄스 모드의 방사선을 계수하기 때문에 선량율이 아닌 flux 값을 기반으로 해야 한다.

전산모사 범위는 Fig. 3 및 Fig. 4의 결과를 바탕으로 마진을 고려하여 체적 선원의 범위를 반경 300 m 및 깊이 1 m 이내로 설정하고 ^{40}K, ^{232}Th 계열, ^{226}Ra 계열 핵종에 해당하는 감마선들을 선원으로 설정한 후 실험용 RPM의 NaI 검출기 모델을 구성하여 MCNP 전산모사를 수행하였다. Fig. 5(a)는 ^{40}K의 NaI 스펙트럼, ^{226}Ra 계열의 NaI 스펙트럼 및 ^{232}Th 계열의 NaI 스펙트럼 simulation 값을 하나의 그래프에 각각 표시한 것이다. Fig. 5(b)는 ^{40}K, ^{232}Th 계열 및 ^{238}U 계열의 각 스펙트럼에 대한 전산모사 값의 비율을 조정하여 실험용 RPM의 3 inch NaI 검출기 측정값의 에너지 피크가 가장 일치하는 값을 구한 것이다. 이때의 조건은 ^{40}K, ^{232}Th 계열 및 ^{238}U 계열의 토양농도가 각각 0.75 Bq·g^{-1}, 0.0636 Bq·g^{-1} 및 0.0552 Bq·g^{-1}이었으며 Fig. 5(b)에서 측정값과 전산모사 값이 갖는 전 계수 값의 차이는 5% 정도로 나타났다.

본 연구에서 전산모사 및 측정값의 비교를 통해 방사성 핵종들의 비율을 결정하고 이들의 합인 배경 방사선 모델의 결과가 실험값과 잘 일치됨을 확인하였다. 배경 방사선 모델을 몬테칼로 전산모사에 적용하기 위해서는 계산 효율 향상을 위한 추가적인 작업이 필요하다. 깊이 1 m, 반지름 300 m의 체적선원을 배경 방사선 모델로 이용하게 되면 계산 효율이 낮아져 계산시간이 오래 걸린다. 계산 효율이 높은 몬테칼로 전산모사 선원 모델을 위해 MCNP의 Surface Source Write (SSW) card 기능을 이용하였다. SSW는 MCNP 전산모사에 있어서 특정 surface에 대해 방사선 궤적, 에너지 등을 기록하여 파일로 저장한 후 이를 surface source로 사용할 수 있도록 작동하는 기능이다. Surface source 생성

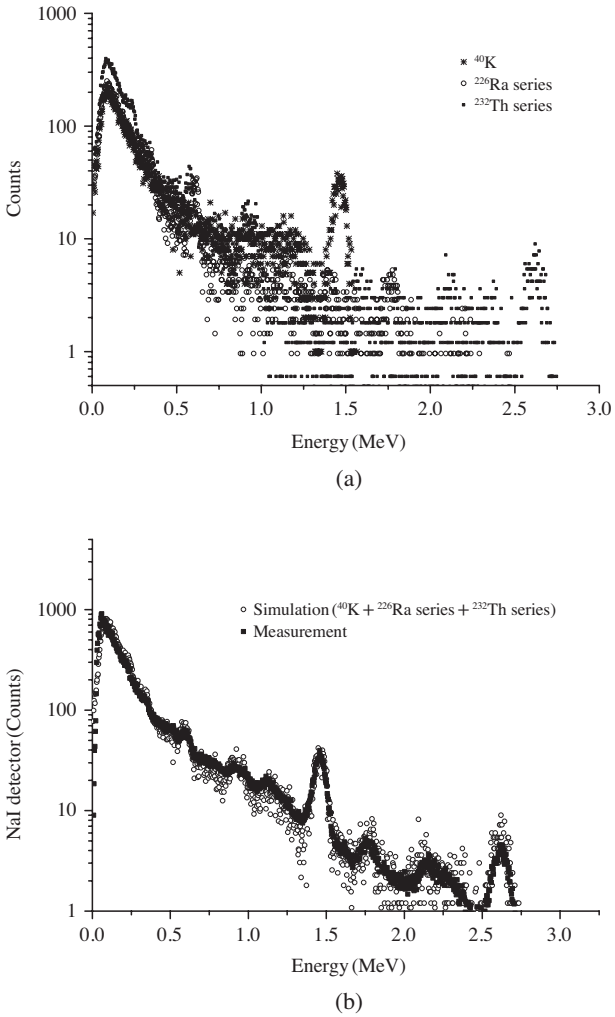


Fig. 5. Comparison of the calculated to measured gamma ray for 3 inch NaI detector of RPM.

시 배경 방사선 모델의 영향을 받는 전산모사 공간은 선원으로 사용될 surface로 둘러싸여야 하며, 산란 방사선의 중복 기록을 피하기 위해 surface source 내부의 cell importance (IMP) 값을 0으로 설정해야 한다. Surface source는 차량 및 화물 컨테이너의 길이가 대략 15 m 정도이기 때문에 이동 공간까지 고려하여 surface source는 Fig. 6과 같이 반경 20 m 크기의 반구로 설정하였다. Surface source는 별도의 파일로 저장되며, 저장된 파일은 MCNP의 Surface Source Read (SSR) card를 통해 불러오게 된다. Surface source를 이용하는 simulation geometry에서는 surface source 범위 내에서 정상적인 cell IMP를 가진 RPM, 트럭, 트레일러 등에 대한 MCNP model이 위치한다. 이와 같은 방법을 통해 체적선원 모델에 비해 약 200배의 계산효율을 갖는 배경 방사선 surface source를 작성하였다.

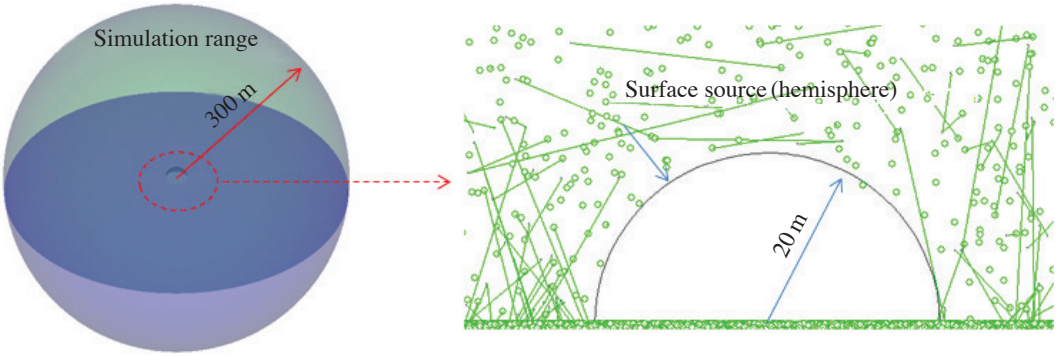


Fig. 6. Surface Source model.

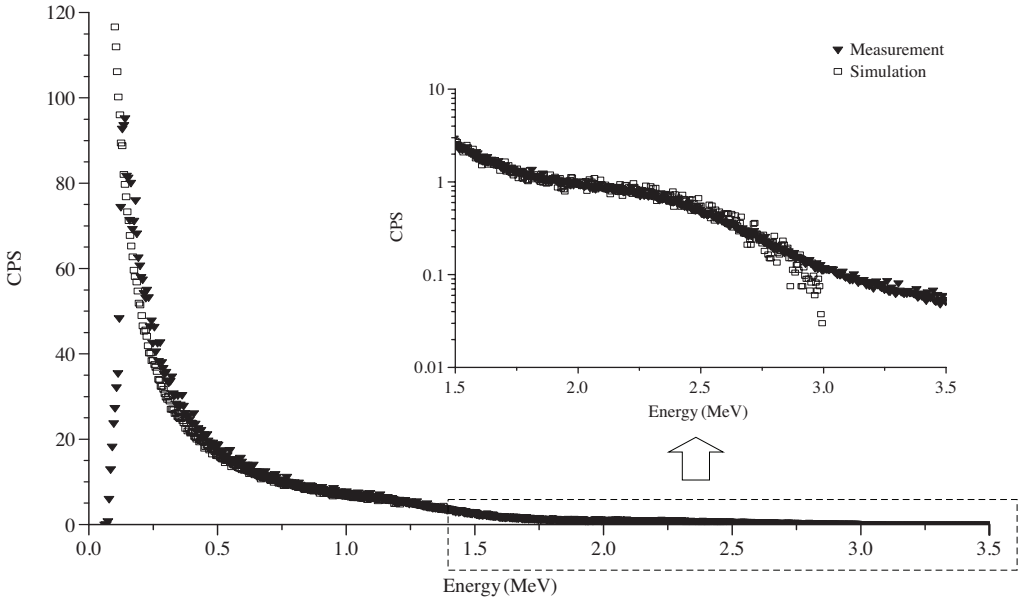


Fig. 7. Comparison of the calculated to measured gamma ray background for PVT.

결 과

Fig. 7은 반경 20 m 크기의 반구형 배경 방사선 surface source를 적용하여 RPM에 대한 MCNP 모델을 포함하여 PVT 측정값과 계산결과를 비교한 결과이다. 그 결과, 120 keV~3 MeV 범위의 스펙트럼 에너지 범위에서 전반적으로 일치하는 것으로 나타났다. 저 에너지 부근에서 차이가 상대적으로 늘어나는데, 이는 MCNP에서 감마선의 섬광체에 대한 에너지 전달만 계산하는 pulse height tally 결과와는 다르게 실제 PVT에서는 감마선에 의해 발생된 광자의 일부가 섬광체 내부에서 흡수되어 전체적으로 낮은 에너지 쪽으로 이동한 것으로 판단할 수 있다. 또한 log scale에서 보면 3 MeV 이상 영역에서도 차이를 보이고 있는데 이는 2.61 MeV 이상의 우주 방사선에 의한 영향과 pulse pile up 등에 의한 영향이 실측값에 포함되었기 때문인 것으로 볼 수 있다. MCNP로 설정한 배경 방사선 모델에서 우주 방사선은 제외되었기 때문에 전산모사 스펙트럼에서는 2.61 MeV 이상 감마선은 존재하지 않으며 gaussian energy broadening에 의해 대략 3 MeV 정도까지 나타나게 된다. 이에 비해 스펙트럼 측정값은 우주선에 의한 3 MeV 이상 에너지 방사선이 계측된다. 이러한 이유로 3 MeV 이상 에너지에서 차이가 발생하지만 전 계수 대비 약 0.3% 정도로 무시할 수 있는 수준이다.

Fig. 8은 반구형의 surface source 모델 내부에 40 ft 컨테이너 통과 시 PVT에서 계측되는 신호를 모사한 결과이다. 이 경우는 화물에 위험물질이 없는 컨테이너를 가정하여 밀도 0.62 g·cm^{-3}와 높이 1.47 m 높이의 화물이 7.2 km·h^{-1}로 진입하는 경우에 대한 배경 방사선 차폐 현상을 계산한 결과이다. 배치된 RPM의 PVT에서 계측되는 신호는 차량 진입 전의 PVT 신호는 차폐가 발생하지 않은 배경 방사선 준위를 나타낸다. 화물 진입 후 신호는 화물에 위험물질이 포함

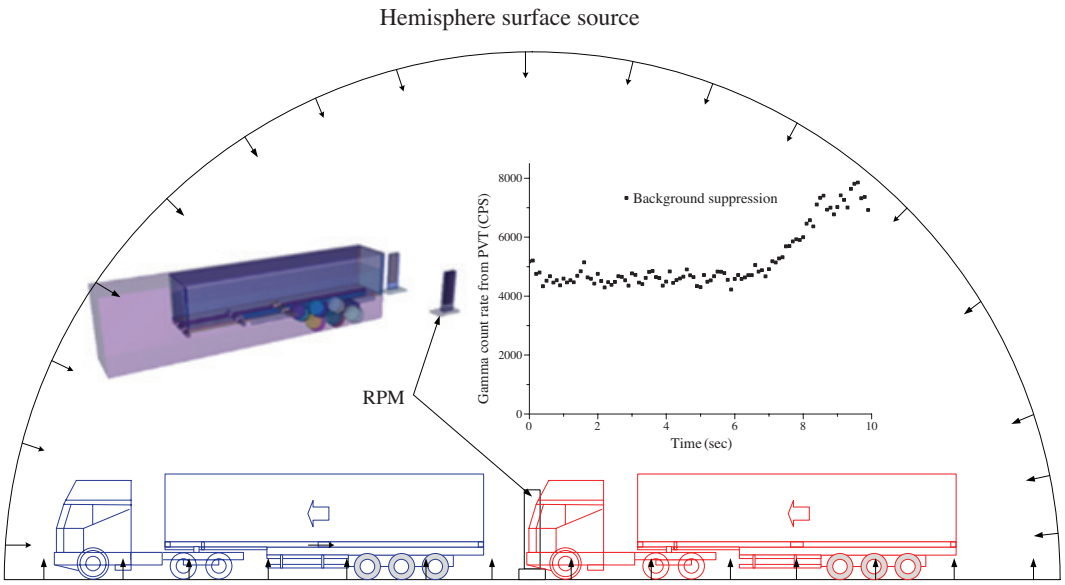


Fig. 8. Simulation of background suppression.

되지 않은 경우는 예시와 같이 일반적으로 감소형태를 보이나, 일부 자연 발생 방사성 물질(Naturally Occurring Radioactive Material: NORM)의 경우 화물 진입으로 인해 준위가 상승되는 형태를 보일 수 있다.

고 찰

RPM 최적화에 관련되어 어려운 점은 너무 많은 경우의 수가 존재하여 모델을 일반화 시킬 수 없으며, 동일한 경보 조건에 대해 화물들이 동일한 경보를 발생시키지 않는다는 데 있다. 동일 종류화물에 의해 같은 종류의 컨테이너에 대해서도 경보 발생이 달라질 수 있다. 따라서 경보 발생 패턴은 소수의 실험이나 전산모사 결과로 일반화할 수 없으며, 결과 또한 확률적으로 표현 되며, 이를 위해서는 의미가 있는 데이터를 위해서는 충분한 샘플이 필요하다. 충분한 샘플을 얻기 위해 여러 가지 방법이 적용되는데, 실험적 방법의 경우 화물 크기 및 다양성으로 인해 인위적 실험이 어렵고 이로 인해 대부분의 인위적 실험은 실 규모가 아닌 파일럿 규모로 진행된다. 방대한 규모의 실 규모 데이터의 경우 인위적 화물이 아닌 실제 운용 중인 항만에서 임으로 추출된 RPM 데이터가 대부분이다(Charles *et al*. 2006; Tom *et al*. 2007; Tom and Kary 2008; Tom and Kary 2009; Deborah *et al*. 2012). 실측 배경 방사선 data base에 의한 threat-injection method (Tom *et al*. 2007)의 경우 위험물질 신호의 화물과 배경 방사선을 발생시킨 화물 간에 상관관계가 없다. 이에 비해 몬테칼로 방법의 경우 위험물질이 포함된 화물 모델과 배경 방사선 차폐의 화물 모델을 일치 시킬 수 있으며 화물 특성에 따라 다양한 조건에서 전산모사를 수행할 수 있다. 다만 몬테칼로 모델의 경우 실제와 유사한 화물, 계측시스템, 배경 방사선 등에 기반해야 하며 이에 대한 검증이 필요하다. 따라서 실험값과 비교를 통하여 검증된 전사모사 모델을 화물 모델에 적용하여 몬테칼로 전산모사를 수행하는 것이 중요하다. 이때 모델은 PVT 신호는 화물에 포함된 유의 물질뿐만 아니라 차폐에 의한 배경 방사선의 변동이 중첩된 상태이기 때문에 배경 방사선의 정확한 모델이 필요한 이유를 알 수 있다.

결 론

본 연구를 통해 실험용 RPM에 대해 배경 방사선의 모델을 만들고 측정값과 비교를 통해 모델의 정확성을 보여주었으며, RPM 검출 신호 분석에 적용하는 것을 보여주었다. 몬테칼로 전산모사를 이용한 RPM 측정 모델 분석 자료는 RPM 최적화 연구에 대한 기초데이터로서 중요한 의미를 갖는다고 볼 수 있다. 향후 연구에서는 실제 컨테이너항에 설치된 RPM에 대한 측정 모델을 만들고 실제 화물 통계 데이터에 기반을 둔 종합 평가모델을 개발할 예정이다. 이를 통해 항만별 특성에 맞는 경보 시스템의 최적화를 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부 지원으로 수행되었습니다

(NRF-2015M2A8A4047136).

참 고 문 헌

김정훈, 김아름, 고성진, 황주호. 2009. 한국토양 내 천연 방사성핵종에 의한 거주민의 방사선피폭평가, 방사선기술과학 **32**(2):219-224

이병수, 권정완, 김병직, 박윤환, 서규석, 오장진, 윤기훈, 이승행, 이재국, 이지연, 이헌철, 최원철. 2013. 공항만 방사선 감시기 설치운영 효율화 방안 연구, 원자력안전위원회.

Burr T and Myers K. 2008. Signatures for several types of naturally occurring radioactive materials. *Appl. Radiat. Isotopes* **66**:1250-1261.

Burr T and Myers K. 2009. Effects of background suppression of gamma counts on signal estimation. *Appl. Radiat. Isotopes* **67**:1729-1737.

Burr T, Gattiker JR, Myers K and Tompkins G. 2007. Alarm criteria in radiation portal monitoring. *Appl. Radiat. Isotopes* **65**:569-580.

Fagan DK, Robinson SM and Runkle RC. 2012. Statistical methods applied to gamma-ray spectroscopy algorithms in nuclear security missions. *Appl. Radiat. Isotopes* **70**:2428-2439.

Human Health Fact Sheet. 2005. Natural Decay Series: Uranium, Radium, and Thorium, Argonne National Laboratory, EVS.

IAEA, 2002. Detection of radioactive materials at borders IAEA-TECDOC-1312.

Livesay RJ, Blessinger CS, Guzzardo TF and Hausladen PA. 2014. Rain-Induced Increase in Background Radiation Detected by Radiation Portal Monitors. *J. Environ. Radioact.* **137**(2014):137-141.

Long S, Sdraulig S, Tate B and Martin P. 2012. A Survey of Naturally Occurring Radioactive Material Associated with Mining, Technical Report Series No. 161, Australian Radiation Protection and nuclear Safety Agency.

Presti CAL, Weier DR, Kouzes RT and Schweppe JE. 2006. Baseline suppression of vehicle portal monitor gamma count profiles: A characterization study. *Nucl Instrum. Methods Phys. Res. A* **562**:281-297.

Sandness GA, Schweppe JE, Hensley WK, Borgardt JD and Mitchell AL. 2009. Accurate Modeling of the Terrestrial Gamma-Ray Background for Homeland Security Applications, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.

Siciliano ER, Ely JH, Kouzes RT, Milbrath BD, Schweppe JE and Stromswold DC. 2005. Comparison of PVT and NaI (Tl) scintillators for vehicle portal monitor applications, Nucl Instrum. *Methods Phys. Res. A* **550**:647-674.

Siddeeg SM, Bryan ND and Livens FR. 2014. Dispersion of U-series natural radionuclides in stream sediments from Edale. *Environ. Sci. Processes Impacts* **16**(5):991-1000.

UNCEAR report 2000. Sources and effects of ionizing radiation, ANNEX B. Exposures from natural radiation source.

Wright ET. 2007. A Detector for Muon Tomography: Data Acquisition and Preliminary Results, Master's thesis, UT university Texas.

Received: 1 May 2016
Revised: 29 May 2016
Revision accepted: 3 June 2016