Journal of Radiation Industry 11(3) : 157~165(2017)

방사선 포털 모니터용 대용적 플라스틱 섬광체 내부 빛 수집 효율 평가

이 진 형[1] · 김 종 범[1,*]

[1]한국원자력연구원

Light Collection Efficiency of Large-volume Plastic Scintillator for Radiation Portal Monitor

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

[1]*Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-daero, Yuseong, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - In this paper, we calculate the light photons collection efficiency of large-volume plastic scintillation detector mainly used for radiation portal monitor (RPM). A Monte Carlo light photon transport code, DETECT2000, were used to quantitatively evaluate light collection efficiency of plastic scintillation detector. DETECT2000 calculated the placement of light collection efficiency based on the energy spectrum. We calculated the light collection efficiency relative to the position of the energy spectrum that proportional to the placement of the source. The 850×285×65 mm^3 size of polyvinyl toluene (PVT) scintillator was used for measurements. Through DETECT2000 simulation, the light collection efficiency of 5×5 arrays were calculated and verification was performed by comparing with experimentally measured. And then, the corrected MCNP simulation by applying the light collection efficiency in 21×13 arrays was compared and analyzed. Comparing the Monte Carlo simulation with measured results, it shows an average difference of 10.1% in 5×5 arrays. Particularly, about twice of the difference was found in the edge of first column, which coupled with PMT. In whole 5×5 array, the overall ratio was the same except for the first column. And then comparing the energy spectra of the 21×13 array with and without the light collection efficiency, it shows a difference of 6.69% in Compton edge area. The DETECT2000 based light collection efficiency simulation showed well agreement with the point source experiment. And comparing with measured energy spectra, we could compare the differences according to whether or not the light collection efficiency was applied. As a results, it is possible to increase the accuracy and reliability of Monte Carlo simulation results by pre-calculating the light collection efficiency according to the PVT geometry by using the DETECT2000.

Key words : Radiation portal monitor, Monte Carlo simulation, Plastic scintillator, Light collection efficiency, DETECT2000

* Corresponding author: Jong Bum Kim, Tel. +82-42-868-8050, Fax. +82-42-866-6217, E-mail. jong@kaeri.re.kr

서 론

공항 및 항만에서 운용되는 방사선 포털 모니터(Radiation Portal Monitor; RPM)는 불법적인 방사성 오염물질의 유입 및 유통을 방지하기 위해 사용되고 있으며 현재 우리나라에서는 2012년 제정 및 시행된 생활주변방사선 안전관리법에 따라 방사성물질 탐지를 위해 다수의 RPM을 운용 중이며 RPM의 주요 구조는 Fig. 1과 같다(Kouzes 2005; Burr *et al*. 2007; Siciliano *et al*. 2008; Sandness *et al*. 2009). 항만에서 운용되는 RPM은 대용적의 플라스틱 섬광체를 이용하여 화물이 지나가는 짧은 시간 동안 방사선을 측정한다. 그리고 화물 컨테이너 내부의 방사성물질 유무를 미리 설정된 감지 준위에 따라 경보를 울리는 시스템으로 구성되어 있다.

RPM을 이용한 화물 검색 시 인공 방사성 물질뿐 만 아니라 ^{232}Th 계열, ^{238}U 계열, 그리고 ^{40}K 등을 포함한 천연 방사성 핵종에 의해서도 경보가 발생한다(Burr *et al*. 2008; Long *et al*. 2012). 이런 경우, 경보 발생 원인 핵종을 판별하기 위해 휴대용 스펙트로스코피를 통한 2차 검사를 수행하게 된다. 항만 시설의 RPM에서 발생되는 경보는 대부분 천연 방사성 핵종에 의한 것으로 인공 방사성 물질을 효율적으로 탐지하고 천연 방사성 물질에 의한 경보를 줄이도록 감지기를 운영하는 것이 중요하다.

최근 원활한 시스템 운영 및 방사선 물질 관리를 위해 오경보를 줄일 수 있는 방사선 포털 모니터의 최적화 연구가 다수 진행되고 있다. 예를 들어, 경보 조건의 최적화, 천연, 인공 방사성 핵종 판별 알고리즘 개발 등이 있다(Presti *et al*. 2006; Kwak *et al*. 2010; Fagan *et al*. 2012; Shin *et al*. 2015; 김 등 2016). 이와 같은 RPM 관련 연구는 화물의 재현성의 어려움, 대용적 섬광체 검출기 사용 등 측정 규모가 크기 때문에 실증실험이 어려운 경우가 많으며 이로 인해 많은 부분 몬테 칼로 기반 전산모사에 의존한다.

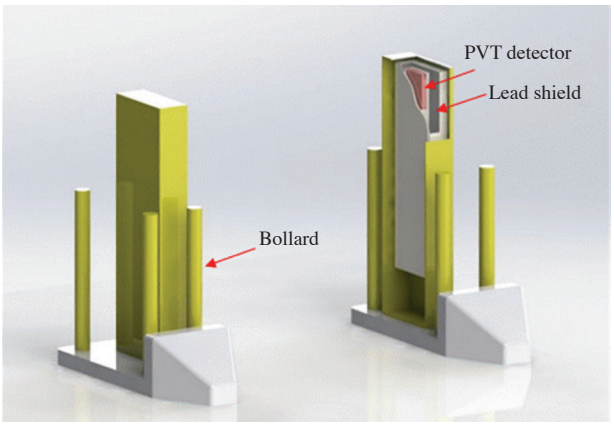

Fig. 1. Radiation portal monitor deployed in port.

그러나 몬테 칼로 전산모사 계산 결과는 실제 측정값과 차이가 발생한다. 오차의 원인으로는 검출기 및 회로 내의 전기 잡음, 방사선 펄스에 의한 불감시간, 섬광체 내의 빛 발생 위치에 따른 빛 수집 효율 차이 등 여러 가지 요인 등이 있을 수 있다. 신호 잡음의 경우 스펙트럼 상 저 에너지 측에서 신호잡음을 발생시키며, 이는 문턱값을 조절하여 제거가 가능하다. 불감시간의 경우 계수율 및 신호 조절로 어느 정도 보정을 할 수 있다(Knoll 2000). 이와 같은 보정에도 불구하고 측정 에너지 스펙트럼은 몬테 칼로 전산모사 결과와 차이를 보이는데 이것은 섬광체 내의 위치에 따른 빛 수집 효율에 의한 차이에 의한 것으로 볼 수 있다. 특히 대용적 Polyvinyl toluene (PVT)의 경우 섬광 발생지점에서 광전자증배관(Photo-multiplier tube; PMT)까지의 빛의 이동거리가 길기 때문에, 다른 섬광체 검출기에 비해 좀 더 큰 영향을 받아 가시적인 차이를 보인다고 할 수 있다(Neal *et al*. 2004; Jordan *et al*. 2007).

본 논문에서는 섬광체 내부의 빛의 흡수에 의한 실제 측정값과 몬테 칼로 전산모사 결과의 차이에 대한 정량적인 분석을 위하여, 몬테 칼로 방사선 수송해석코드로 MCNP와 가시광선 해석코드로 DETECT2000을 사용하였다(Moisan *et al*. 2000; Pelowitz *et al*. 2005). DETECT2000은 몬테 칼로 기반의 프로그램으로써 NaI (Tl), CsI (Tl) LYSO (Ce) 등의 무기 섬광체와 플라스틱을 비롯한 유기 섬광체 등의 전산모사를 진행할 수 있으며 반사율, 굴절율, 발생 및 감쇠시간, 그리고 빛 감쇠 길이(Light Attenuation Length) 등의 주요 광학적 특성을 적용하여 더욱 정확하게 섬광체 내부 빛의 발생과 이동, 그리고 수집에 대한 계산이 가능하다. 본 연구에서는 DETECT2000을 사용하여 선원의 위치에 따른 자체 흡수(Self-Absorption) 현상에 의해 발생하는 에너지 스펙트럼 차이와 비례하는 빛 수집 효율을 계산하였다. 그리고 계산된 빛 수집 효율을 실제 플라스틱 섬광체 검출기 측정값과 비교를 진행하여 DETECT2000의 빛 수집 효율 계산에 대한 검증을 수행하였다. 마지막으로 각 배열에 빛 수집 효율을 적용하여 MCNP 전산모사를 진행하였으며 각 배열의 합, 일반적인 MCNP 결과, 그리고 실제 측정값의 에너지 스펙트럼 비교 분석을 진행하였다.

재료 및 방법

1. 광 수집 효율이 에너지 스펙트럼에 미치는 영향

대용적 PVT 섬광체 내부 빛 발생 위치에 따른 빛 수집 효율 차이에 대한 원리는 다음과 같다. 감마선을 측정할 때 섬광체에 감마선이 입사되면 에너지 크기에 비례하는 빛이 발생한다. 그리고 빛이 섬광체 내에서 이동하여 PMT에 도달

한 뒤 전기 펄스가 생성되며 이 펄스의 크기 및 개수 등에 따라 감마선의 에너지 및 강도 등을 측정회로를 통해 계측한다. 이때 섬광체 내에서 동일한 에너지에 의해 발생한 빛은 섬광체 내부에서 발생한 빛이 자체 섬광체 내에서 흡수되어 소멸하는 자체 흡수 현상과 서로 다른 매질을 투과하면서 굴절, 반사체를 통한 반사 등 광학적 특성으로 인해 선원의 위치 및 PMT까지의 거리 등의 차이에 따라 발생하는 빛의 개수의 차이로 인해 펄스의 크기가 변하고 결과적으로 에너지 스펙트럼의 변동이 나타난다.

Fig. 2는 빛 수집 효율 차이에 따라 에너지 스펙트럼의 변동을 간략하게 나타낸 것이다. 빛 수집 효율이 감소하면 에너지 축이 빛 수집 효율과 비례하게 감소하여 왼쪽으로 이동하고 이에 반비례하게 계수 축은 증가한다. 에너지 스펙트럼의 변동이 각 위치에서 빛 수집 효율에 따라 일어나기 때문에 실제 선원으로 계측할 때, 에너지 스펙트럼은 각 위치별 에너지 스펙트럼의 중첩으로 인해 몬테 칼로 전산모사 결과의 차이가 발생한다.

2. 5×5 배열에 대한 검출기 전산모사와 실험과 비교 측정

DETECT2000을 이용하여 위치별 광 수집 효율을 계산하기 위하여 Fig. 3과 같이 플라스틱 섬광체의 X, Y축 중심 위치인 X축 420 mm, Y축 140 mm를 기준으로 각각 200 mm와 60 mm의 간격을 가진 5×5 배열로 구획화하였다. 각 배열에서 100,000개의 빛을 발생시켜 PMT A, B에 빛이 검출되는 개수를 각각 계산하였다. 그리고 PVT 섬광체 중심 값을 기준으로 정규분포화 하여 해당 위치에서의 빛 수집 효율을 계산하였다.

실험은 850×285×65 mm^3의 사이즈를 가진 PVT 재질의 섬광체를 사용하였으며 PVT의 특성은 Table 1과 같다. PVT 섬광체는 1 mm 두께의 알루미늄 재질의 하우징을 이용하여 빛 손실을 최소화하고 섬광체 하단에 2인치 사이즈의 PMT 2개를 통해 빛을 수집할 수 있다. 그리고 고전압발생장치(Model 3102D for 0-2 kV, Canberra™), 스펙트로스코피 증폭기(Model 2026)와 다중채널 분석기(8k Multi-Channel Analyzer with Maestro Software Program, ORTEC™)를 통해 에너지 스펙트럼을 획득하였다. 각 배열 위치에 2 μCi의 방사능을 가진 ^{137}Cs 선원을 600초 동안 측정하였으며 Fig. 4와 같다. 이때 전산모사 환경과 동일한 조건을 갖도록 감마 선원이 섬광체와 수직으로 입사하여 반응하는 것을 구현하기 위해 납 재질의 선원 콜리메이터를 이용하여 해당 배열의 위치에서 수직으로 방사선이 진행할 수 있도록 하였다. 실험을 통해 획득한 각 배열에서의 에너지 스펙트럼을 컴프턴 엣지 영역의 채널 기준으로 5×5 배열을 나타냈으며 섬광체 중심 값을 기준으로 정규분포화한 실험값을 DETECT2000을 통해 획득한 빛 수집 효율과 비교 분석을 통해 검증을 진행하였다.

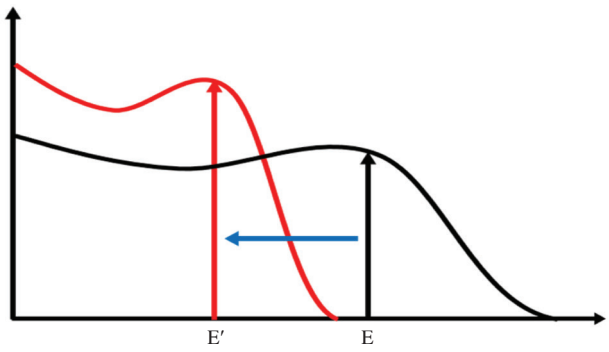

Fig. 2. The fluctuation of energy spectrum caused by the light collection efficiency.

Table 1. Optical properties of PVT scintillator

Property	EJ-200
Scintillation efficiency [Photons · MeV^{-1}]	10,000
Wavelength of max. emission [mm]	425
Light attenuation length [cm]	380
Rise time [ns]	0.9
Decay time [ns]	2.1
Density [g · cm^{-3}]	1.023
Refractive index	1.58

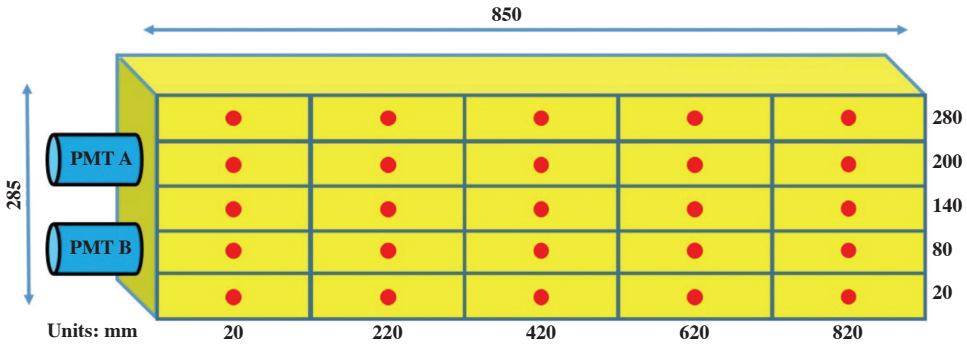

Fig. 3. 5×5 Arrays in the PVT scintillator for calculating the light collection efficiency.

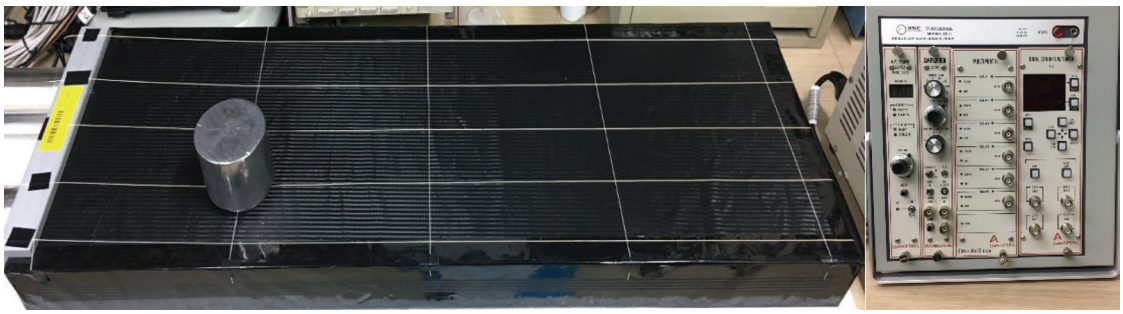

Fig. 4. Experimental study of light collection efficiency by using PVT scintillator.

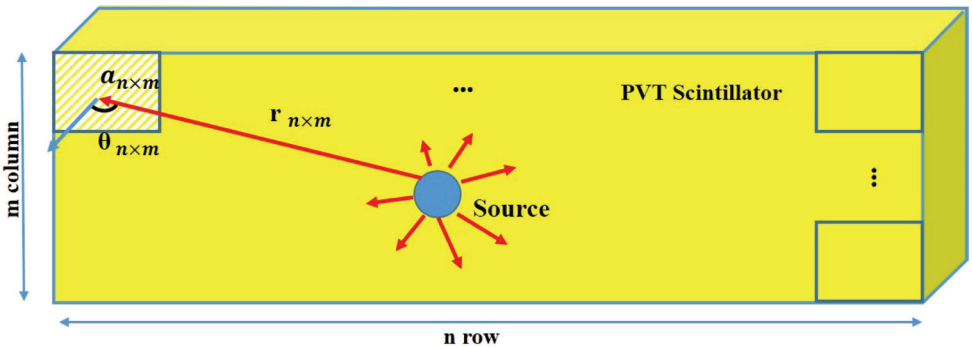

Fig. 5. Schema of gamma event probability in PVT scintillator.

3. 보정인자를 적용한 점선원에 대한 MCNP 전산모사값과 실험값 비교

앞서 방사선 입사 지점에 따른 광 발생효율의 차이가 발생하는 것을 전산모사 및 실험을 확인하였다. 본 부분에서는 빛 발생 효율을 보정하는 경우 전산모사와 측정값 차이가 감소될 것을 보여주고자 한다. DETECT2000을 이용하여 빛 수집 효율 차이에 따른 에너지 스펙트럼 상에서의 변동을 자세히 비교하기 위해 실제 PVT 섬광체를 이용하여 실험한 측정값과 보정 계수를 적용한 MCNP의 각 배열의 에너지 스펙트럼을 중첩한 값과 비교하였다. 이때 보정 계수는 빛 수집 효율에 따라 차이가 발생하는 에너지 스펙트럼을 보정하기 위해 빛 수집 효율의 역수를 나타낸 값이다. 이를 위해 우선 X와 Y축의 간격이 각각 40 mm와 20 mm를 가진 21×13 배열을 설계하였다. 이전과 다르게 21×13 배열로 DETECT2000을 계산하는 이유는 5×5 배열과 비교하여 각 배열의 사이즈가 작아 자세하고 정량적인 빛 수집 효율 차이의 구분이 가능하기 때문이다. 따라서 21×13 배열에 DETECT2000을 이용하여 100,000개의 빛을 각각 발생시켜 각 위치에 따른 빛 수집 효율을 계산하였으며 결과값을 바탕으로 보정 계수를 계산하여 MCNP 전산모사에 적용하였다.

배열 위치에 따른 감마선 반응확률은 Fig. 5와 같이 배열에 입사되는 감마선이 위치에 따라 다르기 때문에 거리 및 각도에 따른 발생확률을 각 배열에 적용하여 MCNP 전산모사를 진행하였다. $a_{n\times m}$는 해당 배열의 면적이며, $\theta_{n\times m}$는 감마선이 배열에 입사한 각도, 그리고 $r_{n\times m}$는 감마선원과 배열 중심 지점 사이의 거리를 나타낸다. 방사선원이 섬광체 중심에 있을 때 한 배열에 감마선이 들어올 확률은 아래 수식과 같다.

Incidence Probability in n × m array:

$$P_{n\times m}=\frac{a_{n\times m}\times\cos\theta_{n\times m}}{(4\pi\times r^2{}_{n\times m})}$$

이를 통해 한 배열에 2 μCi의 방사능을 가진 ^{137}Cs 선원(85% 방출확률)이 600초 동안 들어올 수 있는 개수는 다음 식과 같다.

Number of Particles (NPS) in n × m array:

$$NPS_{n\times m}=P_{n\times m}\times 0.85\times \text{Activity}\times 600\ (\text{time})$$

거리와 각도에 따라 입사되는 감마선의 개수가 다르기 때문에 입사 개수를 각 배열에 맞게 MCNP에 적용하였으며 수식을 이용해 PVT 섬광체 중심 값을 기준으로 각 배열의 에너지 스펙트럼을 중첩하였다. 그리고 PVT 중심에서 등방하게 선원을 발생한 MCNP 스펙트럼 및 측정된 스펙트럼과

비교를 진행하였다. 특히, 실제 측정값과 보정된 MCNP의 에너지 스펙트럼 비교는 아래와 같은 식을 통해 표현할 수 있다. 이때 $f(energy)$는 실험적으로 측정된 에너지 스펙트럼, $g(energy)_{n\times m}$은 n×m 배열에서 전산모사 에너지 스펙트럼, 그리고 $C_{n\times m}$은 DETECT2000을 통해 계산된 n×m 배열에서의 빛 수집 효율을 적용한 보정 계수를 나타낸다.

$$f(energy)=\sum_{n=1}^{21}\sum_{m=1}^{13} g(C\times energy)_{n\times m}\times NPS_{n\times m}$$

이를 바탕으로 PVT 섬광체 중심 값을 기준으로 정규분포화 된 에너지 스펙트럼을 통해 빛 수집 효율에 따라 발생하는 차이에 대해 비교 분석하였다.

결 과

1. 5×5 배열에 대한 검출기 전산모사 실험과 비교 측정 결과

Fig. 6은 실제 측정 시 위치에 따라 빛 손실로 인하여 각 배열의 에너지 스펙트럼에서 에너지 축의 변동이 나타나는 것을 보여준다. 그리고 이때 컴프턴 엣지 채널의 값을 나타낸 배열과 PVT 섬광체 중심 값을 기준으로 정규분포화 한 배열은 Fig. 7과 Fig. 8에 나와있다. Fig. 8과 같이 같은 선원을 측정했지만 배열 위치에 따라 컴프턴 엣지 채널의 차이를 보이며 특히 PMT 접합 부분인 1열 2행과 4행에서는 약 3배 이상의 차이를 나타낸다. 그 이유는 1열 2행에서 발생한 빛은 PMT에 여러 면을 거쳐 간접적으로 입사되기 때문에 반사 및 섬광체 내부 이동으로 인한 빛 손실에 의한 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 PMT와 섬광체 사이의 거리가 멀어질수록 전반적인 비율의 감소로 인해 스펙트럼의 변동이 나타나며 이는 거리가 멀어질수록 빛 수집 효율 감소로 인해 비율이 전체적으로 감소하는 것으로 보인다.

Fig. 9는 섬광체 내부에서 발생한 빛의 이동에 의해 Fig. 7과 같이 나타나는 에너지 스펙트럼 변동의 발생을 평가할 수 있도록 DETECT2000으로 계산한 값이며 Fig. 10은 빛 수집 효율을 PVT 섬광체 중심 값을 기준으로 정규 분포하여 오차와 함께 나타낸 것이다. Fig. 8과 Fig. 10을 비교하였을 때, 평균적으로 10.1%의 차이를 나타내며 PMT와 접합한 부분인 1열 가장자리 부분에서 약 2배의 차이가 발생한 것을 알 수 있다. 측정값과의 차이는 일정한 면적의 빛을 발생한 DETECT2000과 다르게 감마선과의 반응으로 빛이 면

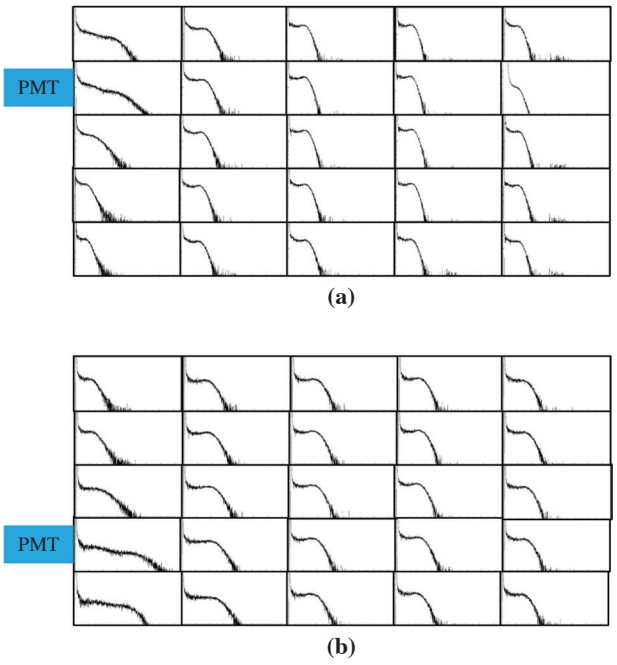

Fig. 6. Experimental energy spectrum of (a) PMT A, (b) PMT B in 5×5 array.

559	322	245	238	219
615	306	261	239	229
264	293	278	234	214
182	281	255	234	228
168	274	253	249	244

277	377	360	350	338
270	386	399	342	327
386	448	371	328	341
857	498	390	370	338
758	508	412	353	335

Fig. 7. Experimental compton edge based channel in 5×5 array PVT scintillator.

2.0108	1.1583	0.8813	0.8561	0.7878
2.2122	1.1007	0.9388	0.8597	0.8237
0.9496	1.0540	1.0000	0.8417	0.7698
0.6547	1.0108	0.9173	0.8417	0.8201
0.6043	0.9856	0.9101	0.8957	0.8777

0.7466	1.0162	0.9704	0.9434	0.9111
0.7278	1.0404	1.0755	0.9218	0.8814
1.0404	1.2075	1.0000	0.8841	0.9191
2.3100	1.3423	1.0512	0.9973	0.9111
2.0431	1.3693	1.1105	0.9515	0.9030

Fig. 8. Normalized compton edge based channel in 5×5 array PVT scintillator.

634	388	300	292	248
885	366	293	267	244
382	353	319	262	253
115	310	281	262	274
101	314	276	257	245

100	311	301	255	270
101	302	331	285	294
334	353	330	272	284
848	374	298	266	257
665	405	315	279	257

Fig. 9. 5×5 array PVT scintillator light collection efficiency by using DETECT2000.

2.2205	1.2677	0.9957	0.8667	0.8493
2.9115	1.2222	0.9632	0.8753	0.8256
1.0577	1.1135	1.0000	0.8988	0.8568
0.3288	1.0674	0.9739	0.8734	0.8568
0.3191	0.9752	0.9395	0.8607	0.8226

0.3345	1.0337	0.9842	0.8992	0.8682
0.3669	1.1056	1.0099	0.9311	0.8698
1.2093	1.1998	1.0000	0.9096	0.8594
3.1248	1.2814	1.0190	0.8854	0.8639
2.2245	1.3174	1.0452	0.9539	0.8644

Fig. 10. Normalized light correction factor in 5×5 array PVT scintillator.

적 이상으로 발생하였기 때문에 가장자리의 빛 수집 효율이 증가한 것으로 보인다. 그러나 전체 배열을 비교해 보았을 때 1열을 제외한 나머지 열에서는 전반적인 비율이 일치함을 알 수 있다.

2. 보정인자를 적용한 점 선원에 대한 MCNP 전산모사값과 실험값 비교

앞서 검증된 보정 계수를 바탕으로 에너지 스펙트럼 적용을 진행하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 21×13 배열에서의 빛 수집 효율과 위치마다 다른 입사 각도와 거리에 따른 반응확률을 계산하여 MCNP에 적용된 입사 방사선 개수를 나타낸 배열이며 Fig. 11은 Fig. 10과 비슷한 경향을 나타내고 Fig. 12는 거리 및 입사 각도에 따라 가장자리에서 급격하게 감소하는 것을 보인다.

Fig. 13은 빛 수집 효율과 발생 확률을 적용한 MCNP 결과를 보정 계수를 적용하지 않은 MCNP값과 비교하여 선축적으로 나타낸 그림이다. 그 결과, 빛 수집 효율을 적용 유무에 따른 에너지 스펙트럼을 비교하였을 때 선축적 그래프 에너지 축에서 왼쪽으로 이동이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 빛 수집 효율 적용 전후를 비교할 때, 이때 피크 영역에서 약 30 keV의 에너지 축 이동이 발생하며 약 6.69%의 차이를 나타낸다. 그리고 피크 영역에서 빛 수집 효율을 적용하였을 때 피크 주변으로 검출되는 계수값이 많아지기 때문에 보정 계수 적용 전과 비교하여 폭이 넓은 것을 알 수 있다.

또한 로그축적으로 나타낸 Fig. 14에서는 컴프턴 엣지 영역에서 차이가 발생하고 1 MeV 이상의 에너지에서 큰 차이를 보인다. 그 이유는 검출 효율이 높은 PMT 주변 섬광체에서 발생된 빛이 높은 에너지 영역으로 계수되어 차이가 발생하였다. 결과적으로, MCNP 전산모사에서 로그축적의 컴프턴 엣지 영역을 결정하는 MCNP (F8 tally Gaussian energy broadening, GEB)의 반치폭 (full width at half maximum, FWHM) 차이가 나타나게 된다.

Fig. 15와 Fig. 16은 빛 수집 효율과 발생 확률을 적용한 MCNP 결과를 실험값과 비교하여 선축적 및 로그축적으로 각각 나타낸 그림이다. 그 결과, 낮은 에너지 부분의 신호 잡음으로 인해 발생하는 차이를 제외하고 그래프가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

고찰 및 결론

방사선 포털 모니터 연구를 위해 다양한 조건과 충분한 양의 데이터가 필요하지만 시스템 특성상 실험적으로 데이터를 추출하기에는 많은 어려움을 가지고 있다. 현재, 실제 항만 데이터를 임의로 추출하거나 몬테 칼로 기반 전산모사를 주로 사용하고 있다. 그중 몬테 칼로 전산모사는 실험값과 차이가 발생하는데 PVT 내의 방사선 위치별 빛의 발생과 PMT 위치 간 수집 효율의 차이로 인해 에너지 스펙트럼의 변동이 발생하며 이러한 영향을 자세히 고려하기 어려움을 알 수 있다. 일반적으로 사용하는 몬테 칼로 기반 전산모사인 Geant4에서는 감마선과 가시광선을 동시에 모사할 경우 계산 시간이 기하급수적으로 증가하고, MCNP의 F8 tally와 같이 해당 cell의 흡수 에너지만 고려하는 전산모사의 경우 섬광체 내부 빛에 의한 영향을 반영하지 못하기 때문에 실제 측정값과 차이를 발생시키는 요인이 된다.

본 논문에서 DETECT2000 기반의 빛 수집 효율 전산모사는 점 선원 실험을 통해 전반적으로 일치하는 것을 보여주었고, 실제 에너지 스펙트럼과 비교를 통해 빛 수집 효율 적용 유무에 따른 차이를 비교할 수 있었다. DETECT2000을 통해 빛 수집 효율을 계산하는 것은 섬광체 재질 및 구

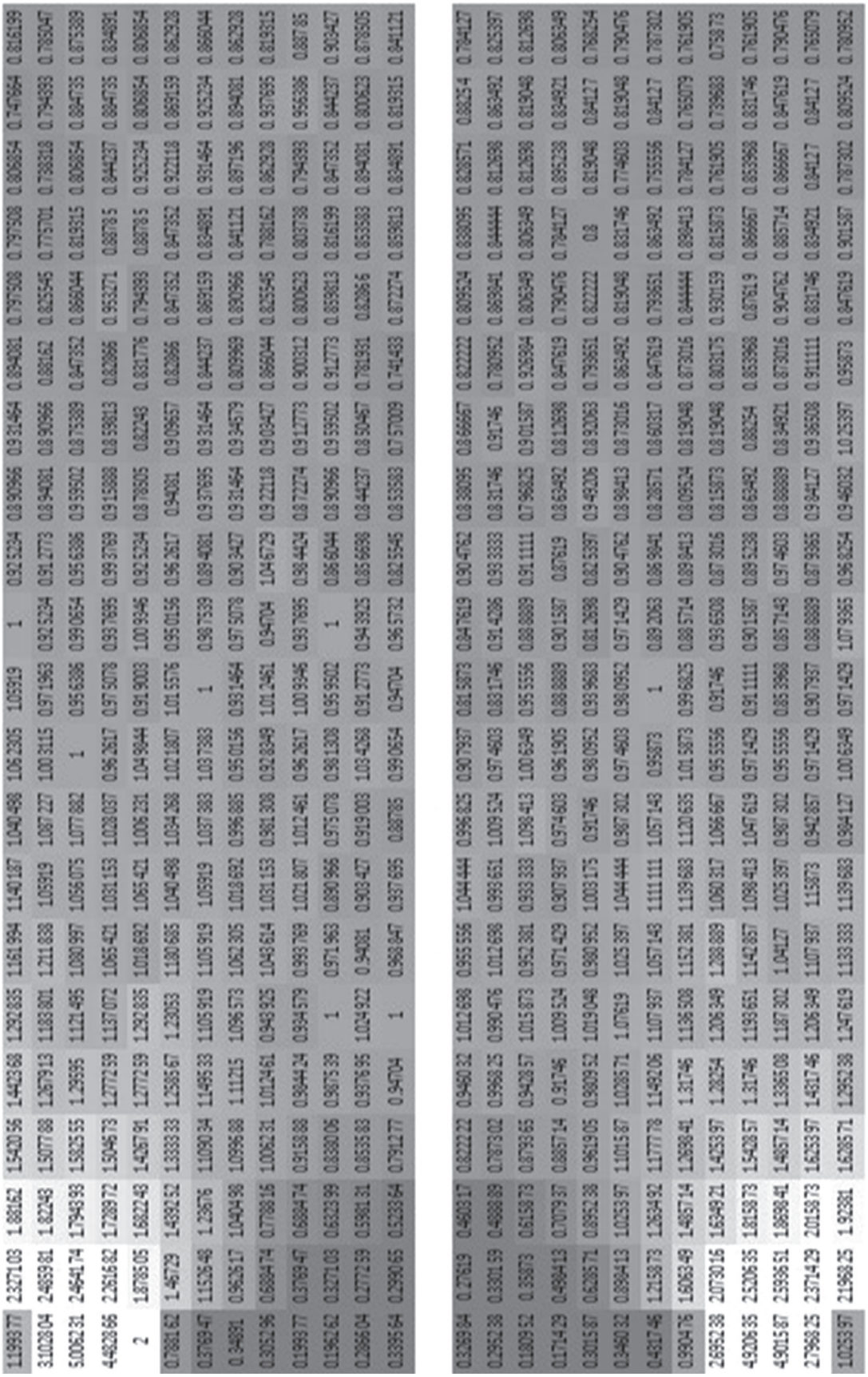

Fig. 11. Normalized light correction factor in 21 × 13 array PVT scintillator

1615	2142	2915	4083	5908	8851	13711	21694	33777	47741	54679	47741	33777	21694	13711	8851	5908	4083	2915	2142	1615
1677	2243	3084	4383	6473	9986	16153	27228	46234	71750	85958	71750	46234	27228	16153	9986	6473	4383	3084	2243	1677
1731	2331	3235	4657	7005	11109	18747	33777	63477	111652	143076	111652	63477	33777	18747	11109	7005	4657	3235	2331	1731
1775	2403	3361	4891	7472	12137	21284	40928	85958	177794	252149	177794	85958	40928	21284	12137	7472	4891	3361	2403	1775
1807	2457	3456	5070	7838	12972	23470	47741	111652	279151	457590	279151	111652	47741	23470	12972	7838	5070	3456	2457	1807
1827	2491	3516	5182	8073	13520	24968	52794	133945	397954	769228	397954	133945	52794	24968	13520	8073	5182	3516	2491	1827
1834	2502	3536	5221	8153	13711	25503	54679	143076	457590	961041	457590	143076	54679	25503	13711	8153	5221	3536	2502	1834
1827	2491	3516	5182	8073	13520	24968	52794	133945	397954	769228	397954	133945	52794	24968	13520	8073	5182	3516	2491	1827
1807	2457	3456	5070	7838	12972	23470	47741	111652	279151	457590	279151	111652	47741	23470	12972	7838	5070	3456	2457	1807
1775	2403	3361	4891	7472	12137	21284	40928	85958	177794	252149	177794	85958	40928	21284	12137	7472	4891	3361	2403	1775
1731	2331	3235	4657	7005	11109	18747	33777	63477	111652	143076	111652	63477	33777	18747	11109	7005	4657	3235	2331	1731
1677	2243	3084	4383	6473	9986	16153	27228	46234	71750	85958	71750	46234	27228	16153	9986	6473	4383	3084	2243	1677
1615	2142	2915	4083	5908	8851	13711	21694	33777	47741	54679	47741	33777	21694	13711	8851	5908	4083	2915	2142	1615

Fig. 12. Angular distribution and probability applied number of particles (NPS) in 21 × 13 array.

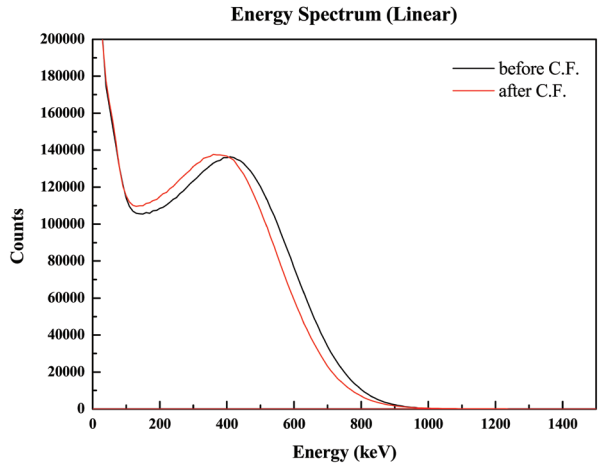

Fig. 13. Linear scale energy spectrum of correction factor corrected (Red) and uncorrected (Black) MCNP results.

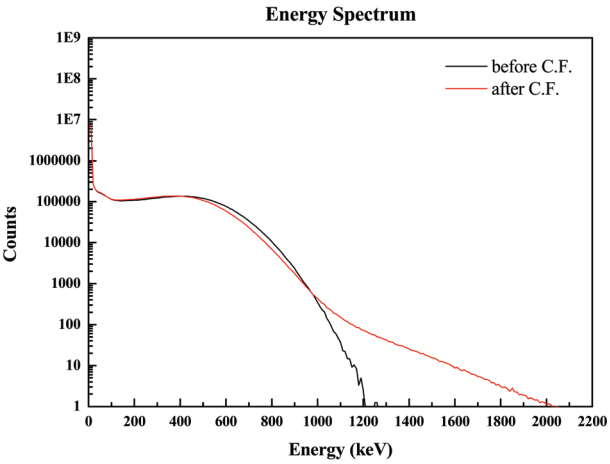

Fig. 14. Log scale energy spectrum of correction factor corrected (Red) and uncorrected (Black) MCNP results.

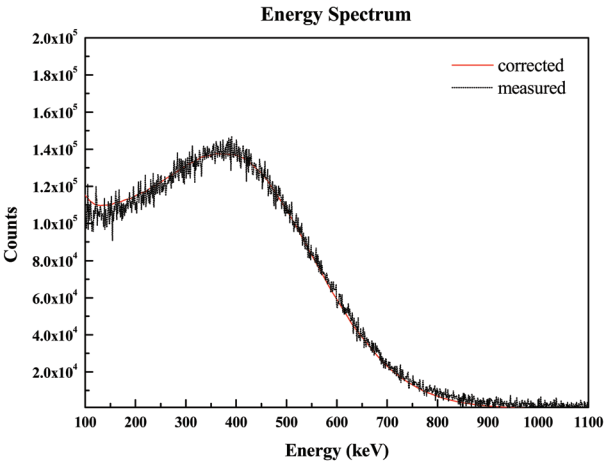

Fig. 15. The linear scale energy spectrum of corrected MCNP (Red) and measured (Black) results.

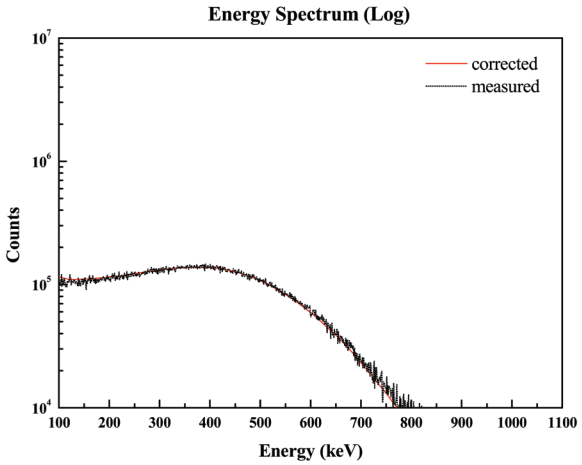

Fig. 16. The log scale energy spectrum of corrected MCNP (Red) and measured (Black) results.

조, PMT와의 접합 위치 및 개수가 다른 여러 종류의 방사선 포털 모니터에 대한 광학적 특성 평가가 가능한 것을 알 수 있다. 따라서 DETECT2000을 통해 PVT 구조에 따른 광수집 효율을 미리 계산할 수 있는 경우, 이를 반영한 보정계수를 적용한다면 몬테 칼로 전산모사 결과의 정확성 및 신뢰성을 높일 수 있다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부 지원으로 수행되었습니다 (NRF-2015M2A8A4047136).

참 고 문 헌

김종범, 이진형, 문명국. 2016. 포털 모니터의 배경 방사선 평가를 위한 자연방사선 모델 개발. 방사선산업학회지. **10**(2):67-74.

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

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

Eljen Technology Plastic Scintillator, URL <http://www/eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>

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.

Jordan DV, Reeder PL, Todd LC, Warren GA, McCormick KR, Stephens DL Jr, Geelhood BD, Alzheimer JM, Crowell SL and Sliger WA. 2007. Advanced Large-Area Plastic Scintillator Project (ALPS): Final Report, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL).

Kouzes RT. 2005. Detecting Illicit Nuclear Materials. *American Scientist* **93**:422-427.

Knoll GF. 2000. Radiation Detection and Measurements, Third Edition. Wiley.

Kwak SW, Jang SS and Yoo HS. 2010. Determination of optimal boundary for algorithmic method of plastic scintillator-based radiation detector against nuclear terrorism, IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST) 570-573.

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.

Moisan C, Cayouet F, McDonald G. 2000. DETECT 2000, the Object Oriented C++ Language Version of DETECT, Laval University, Quebec, Canada, Version 5.0.

Neal JS, Mihalczo JT, Hiatt MT and Edwards JD. 2004. Large Plastic Scintillation Detectors for the Nuclear Materials Identification System, Institute of Nuclear Materials Management Annual Meetings, Orlando, FL, United States of America.

Pelowitz DB. 2005. MCNPX User's Manual version 2.5.0, LA-CP-05-0369, Los Alamos National Laboratory (LANL).

Presti CAL, Weier DR, Kouzes RT and Schweppe JE. 2006. Baseline Suppression of Vehicle portal Monitor Gamma Count Profiles: A Characterization Study. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. 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.

Shin W-G, Lee H-C, Choi C-I, Park CS, Kim H-S and Min CH. 2015. A Monte Carlo study of an energy-weighted algorithm for radionuclide analysis with a plastic scintillation detector. *Appl. Radiat. Isotopes* **101**:53-59.

Siciliano ER, Ely JH, Kouzes RT, Schweppe JE, Strachan DM and Yokuda ST. 2008. Energy calibration of gamma spectra in plastic scintillators using Compton kinematics. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. A* **594**:232-243.

Received: 24 May 2017
Revised: 1 September 2017
Revision accepted: 17 September 2017