

# The Calculation of Response Matrix of 2-Dimensional Radiation Monitoring System Using EGS4 Simulation

S.H. Kim, S.H. Han, H.D. Kang, J.C. Kim, I.K. Park,  
Y.S. Choi\*, Y.B. Lee\*, J.M. Lee\*

Kyungpook National University, \*Korea Atomic Energy Research Institute

## EGS4 simulation을 이용한 2차원 방사선준위 분포측정 시스템의 Response Matrix 계산

김성환 · 한상효 · 강희동 · 김재철 · 박인규 · 최영수\* · 이용범\* · 이종민\*

경북대학교, \*한국원자력연구소

**Abstract**—In this study an EGS4 simulation code was used to calculate real energy spectrum from measured  $\gamma$ -ray energy spectrum obtained using 2-dimensional radiation monitoring system. As a result, the  $39 \times 39$  response matrix was calculated the energy range of 0.1 to 2 MeV which energy interval of 50 keV. The real energy spectrum for Co-60 radioisotope was calculated using inverse of response matrix. It was confirmed that the calculated response matrix was useful to the analysis of the measured energy spectrum for the radiation monitoring system.

*Key words* : Response Matrix, Monte Carlo Simulation, CsI(Tl), Unfolding.

**요약**—2차원 방사선 측정시스템에서 측정된 감마선의 에너지 스펙트럼으로부터 실제 에너지 스펙트럼을 얻기 위하여 CsI(Tl) 섬광계수기에 대한 EGS4 모의실험을 실시하였다. 0.1~2 MeV의 감마선에 대하여 50 keV 간격으로 모의실험을 실시하여  $39 \times 39$  response matrix를 계산하였고 이에 대한 역행렬을 구하였다. 이를 이용하여 실제 측정된 Co-60 에너지 스펙트럼에 대하여 unfolding을 실시하였다. 그 결과 계산된 response matrix가 실제 스펙트럼 분석에 유용한 것으로 판단되었다.

**중심어** : 에너지스펙트럼, 섬광계수기, 모의실험

### 1. 서 론

최근 원자력관련 시설의 증대와 방사선 사용량의 증가에 따라 보다 안전하고 효율적인 방사선 관리를 목적으로 원격, 무인 감시 체제에 관한 많은 연구가

진행되고 있다.<sup>1,4)</sup> 본 측정시스템 또한 CsI(Tl) 섬광체 검출기와 로봇트가 결합하여 사람의 출입이 불가능한 고준위 감마선 방사선장에서 실제 방사선 준위의 분포를 측정하기 위하여 개발되었다.<sup>5)</sup> 이때 방사선장의 선량평가와 미지 선원의 핵종 판정을 위하여 정확한

에너지스펙트럼의 측정은 필수적이다. 그러나 일반적으로 감마선 분광분석에 사용되어지는 방사선측정기로 측정된 에너지스펙트럼은 후방산란, 콤프턴산란, 쌍소멸 등에 의하여 실제 방사선원에서 방출되는 감마선의 에너지 스펙트럼과는 다른 형태를 가진다. 따라서 실제로 방출되는 감마선의 에너지 스펙트럼을 얻기 위한 방법으로 Graphical Analysis, Linear Least Square Fitting, Response Matrix method<sup>6-10)</sup> 등이 사용되어지고 있으며 그 중 response matrix 법은 측정된 복잡한 에너지 스펙트럼으로부터 비교적 간단히 각 에너지에 해당하는 입사광자수를 계산할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 그러나 이 방법은 검출기의 모양, 크기, 검출기물질, 차폐체 등에 따라 response matrix가 다르게 나타나므로 본 연구에서는 EGS 4<sup>11)</sup> (Electron Gamma Shower) 모의실험을 이용하여 본 측정시스템의 response matrix를 계산하였다.

## 2. 본 론

에너지 스펙트럼에 영향을 미치는 요인으로 크게 검출기와 주위물질에 의한 영향으로 나눌 수 있다. 대부분의 측정기가 일정한 체적을 가지므로 입사방사선에 의하여 생성된 콤프턴산란이나 쌍생성에 의하여 생성된 양전자가 쌍소멸할 때 생성되는 511 keV 감마선 등이 검출기밖으로 손실되므로써 콤프턴 continuum이나 single escape peak, double escape peak들이 측정된다. 이때의 반응함수는 주로 검출기의 크기, 모양, 검출기물질 및 방사선 측정시 기하학적 요소에 많은 영향을 받는다. 또한 방사선 검출기 주위에서 생성된 2차 산란선 등이 에너지 스펙트럼에 영향을 미치게 되며 검출기를 차폐하고 있는 물질과 입사 방사선의 작용의 결과로 특정 X선 peak, 후방산란 peak, 쌍소멸 peak등이 생성된다.<sup>12)</sup>

이상에서 보는 바와 같이 실제 입사된 감마선의 에너지에 비하여 측정되어지는 에너지 스펙트럼은 복잡한 모양을 가진다. 특히 2종류 이상의 에너지를 가진 감마선이 입사할 경우 측정 스펙트럼은 더욱 복잡해진다. 이러한 측정 결과로부터 감마선원의 실제 방출되는 감마선의 에너지스펙트럼을 구하기 위하여

본 측정시스템에 대한 response matrix를 EGS4 모의실험으로 계산하였다. EGS 코드는 1978년, SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)에서 개발된 이후 1986년 EGS4로 개량되어 고에너지 물리학 실험이나 의학등 여러분야에 활용되고 있다.<sup>13,14)</sup>

한편 그림 1은 제작된 측정시스템의 개략도이다. 본 검출시스템은 collimator, 감지센서부, Pan/Tilt부, 방사선 영상 신호처리부, 제어용 interface부, 방사선의 에너지 스펙트럼을 측정하는 다중과도분석기(Multi Channel Analyzer) 및 컴퓨터와 구동 소프트웨어로 구성된다. 각 부분은 로봇트 탑재를 고려하여 소형 및 경량화, 저소비전력형으로 제작되었으며 이를 위하여 모든 신호처리회로를 가능한 기존의 상용회로로 사용하지 않고 최소한의 부품을 이용하여 설계 및 제작하였다.

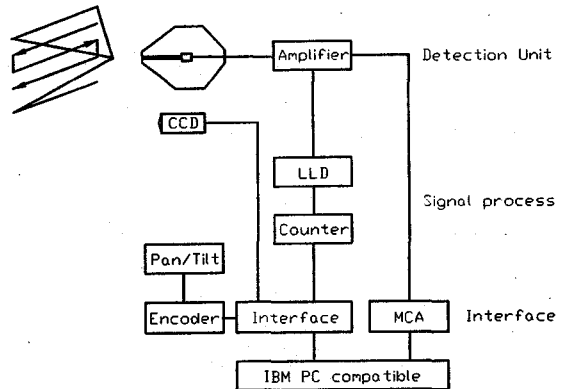


Fig. 1. Block diagram of the radiation monitoring system

방사선 검출기로 CsI(Tl)와 Si pin photodiode와 hybrid preamplifier가 결합된 섬광계수기를 사용하였다. 섬광체 검출기는 비교적 검출효율이 높고 외부의 충격에 강하며 에너지 분광 분석이 가능하므로 본 측정 시스템이 로봇트와 결합하여 이동하면서 측정하는 점을 고려할 때 목적이 가장 잘 부합되는 검출기이다. 그림 2는 사용된 측정기의 단면도로써 CsI(Tl) 결정체는 10×10×20mm 크기의 직육면체 모양이고, φ32×58mm, 두께 1mm인 원통형 알루미늄 케이스로 빛에 대한 차폐가 되어 있다.

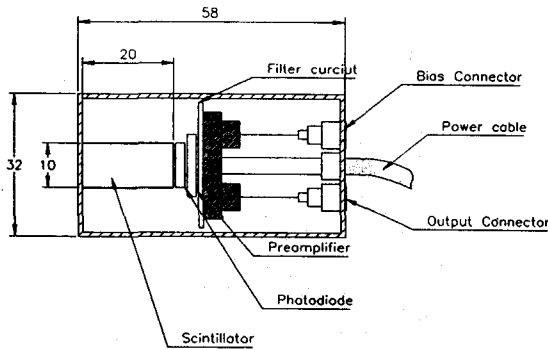


Fig. 2. Cross sectional view of CsI(Tl) scintillation detector

한편 모의 실험은 경북대학교 물리학과에 있는 HP 750 워크스테이션에서 EGS4 code를 사용하여으며 섬광체를 방사선의 입사 방향에 대하여 수직방향으로 1mm 간격씩 총 20개의 얇은 판으로 나누어 프로그래밍하였다. 그리고 입사 방사선으로 광자를 100 keV부터 2 MeV까지 50 keV간격으로 각각 1,000,000 회에 걸쳐 모의실험을 실시하였으며 각각의 얇은 판에 흡수되는 에너지를 계산함으로써 각 입사 방사선의 에너지에 대한 응답함수를 구할 수 있었다. 여기서 Response matrix를 구하고 이를 이용하여 (1)식에서와 response matrix의 역행렬을 이용하여 간단히 원래의 방사선원에 대한 에너지 스펙트럼을 구할 수 있다.

$$M=RS$$

M : measured spectrum

R : response matrix

S : real source energy spectrum

$$S=R^{-1}M \quad (1)$$

### 3. 결 과

측정된 에너지 스펙트럼을 평가하기 위하여 Co-60, Cs-137, Na-22, Ba-137 등의 표준선원을 사용하여 그림 3과 같이 에너지 교정곡선을 구하였다. 이때 가로축은 실험에 사용된 표준 감마선원에서 방출되는 감마선의 에너지에 해당하고 세로축은 이에 대한 다

중과고분석기(Multi Channel Analyzer, EG&G Ortec Co. Trump 2K)의 측정채널이다. 측정된 512 channel에 대하여 에너지교정식은 (2)식과 같다. 이 교정식을 이용하여 입사 감마선의 에너지를 분석하고 핵종을 판정하게 된다.

$$\text{Channel} = 10.32 + 0.1995 \times \text{Energy(keV)} \quad (2)$$

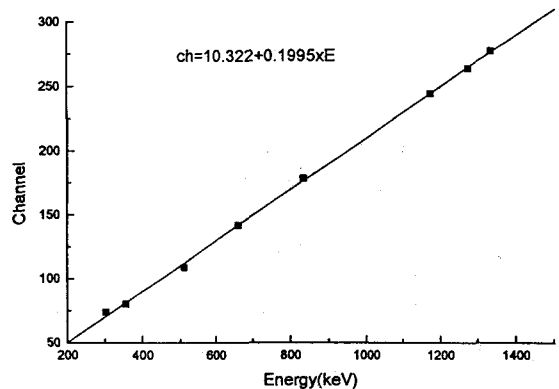


Fig. 3. The energy calibration curve

그림 4는 본 검출시스템에 대하여 EGS4 모의실험으로 계산한 고유검출효율이다. 가로축은 모의실험을 실시한 광자의 에너지 축이며 100 keV에서 2 MeV에 대하여 50 keV 간격으로 계산하였고 세로축은 이때의 고유검출효율이다. 에너지가 낮은 범위에서 광전효과에 의해 검출효율이 높게 나오고 있다.

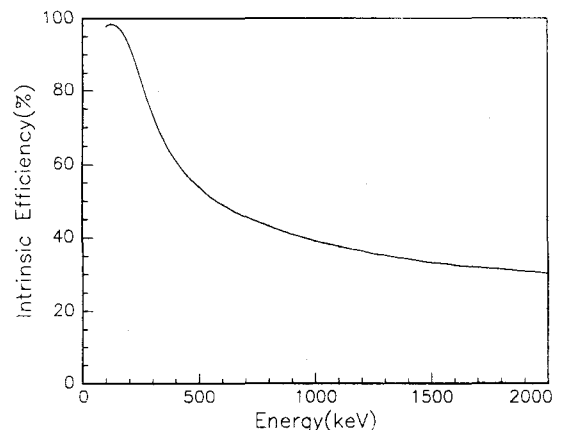


Fig. 4. Intrinsic efficiency for CsI(Tl) detector using EGS4 calculation

그림 5는 여러 에너지의 광자가 검출기에 입사했을 때 EGS4 모의실험에 의하여 각각 응답함수를 보여 주고 있다. 가로축은 입사한 각 광자에 대하여 검출기에서 측정되어지는 에너지 스펙트럼이고 세로축은 각 에너지에 해당하는 측정수를 나타낸다. 입사에너지가 커질수록 고유검출효율이 감소하므로 광전 peak의 크기가 작아짐을 볼 수 있고 각각에 대하여 컴프턴 edge, 컴프턴 continuum, single escape peak, 후방산란 peak 등이 잘 나타나고 있다.

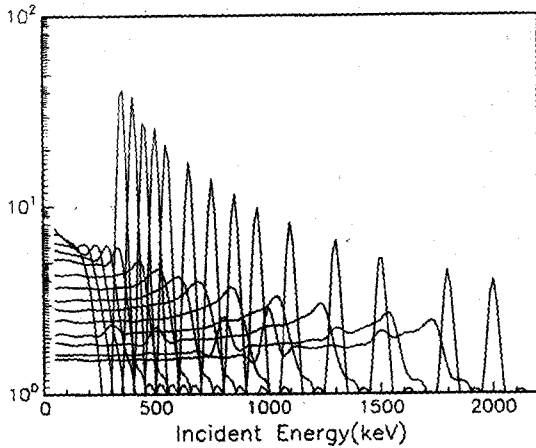


Fig. 5. Response function for 10×10×20mm CsI(Tl) scintillator for gamma ray from 0.1~2MeV

표 1은 이상에서 구해진 100 keV에서 2 MeV에 대하여 100 keV 간격으로 계산된 39×39 Response Matrix이다. 그림 6은 계산된 Response Matrix를 3차원으로 표현한 것이다. X축은 입사광자의 에너지이고 Y축은 각 입사광자의 에너지에 대하여 계산된 에너지 스펙트럼이고 Z축은 이때의 응답함수를 나타낸다. 각 광자에 대한 광전 peak, 컴프턴 Edge, 컴프턴 continuum, single escape peak 등이 잘 나타나고 있다.

구해진 response matrix의 역행렬을 구하고(표 2) 실제 측정된 Co-60의 에너지 스펙트럼에 대하여 unfolding을 실시하였다.

그림 7의 (a)는 1 μCi Co-60선원에 대하여 20분간 측정된 에너지 스펙트럼을 히스토그램으로 나타낸 것이다. 가로축은 다중과고분석기의 각 channel에 해당하고 세로축은 각 channel에 대한 측정수이다.

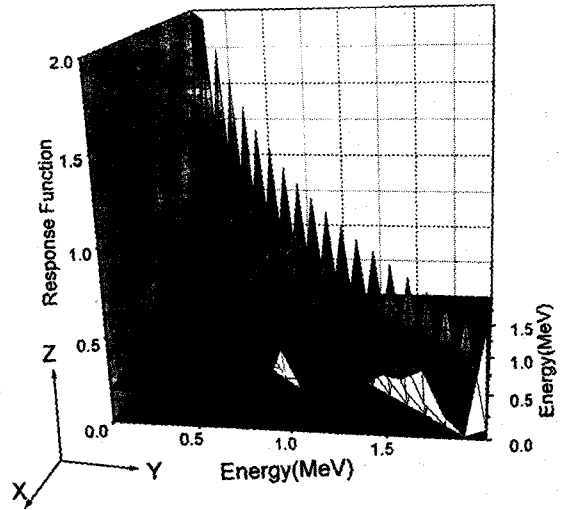
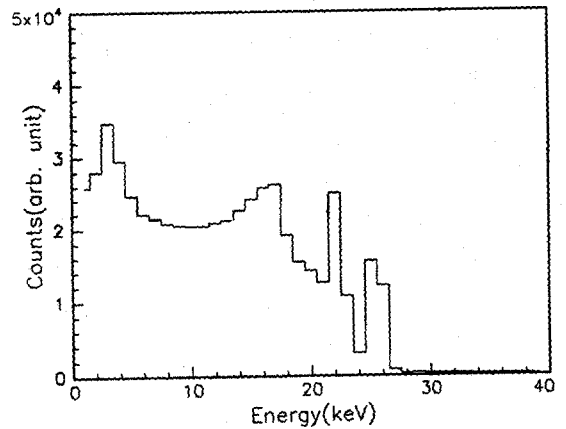
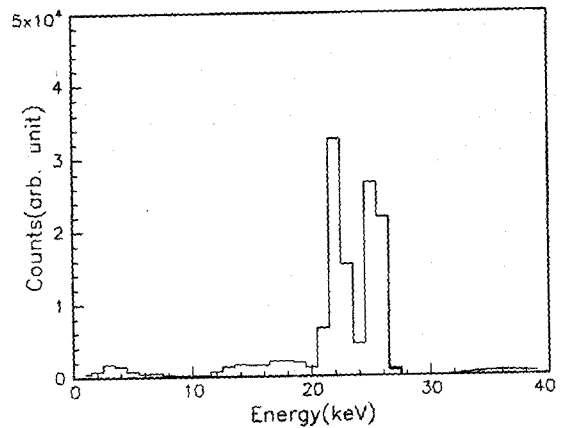


Fig. 6. Response matrix for CsI(Tl) scintillator



(a) Histogram of measured energy spectrum for Co-60



(b) Unfolding energy spectrum of Co-60

Fig. 7. Energy spectrum of Co-60 radioisotope





한편 그림 7의 (b)는 EGS4 모의실험에 의하여 계산된 response matrix의 역함수를 사용하여 unfolding을 실시한 것이다. 컴프턴 edge 부분에서 약간의 차이를 보여주고 있으나 Co-60의 1.17, 1.33 MeV의 광전 peak를 구할 수 있었다. 또한 1.17, 1.33 MeV의 광전 peak에 대한 측정수의 비가 4801/4855 로 거의 1에 가까운 결과를 얻을 수 있었다. 실제 Co-60의 1.17 MeV와 1.33 MeV의 감마선에 대한 branch ratio와 거의 같은 값을 가진다.

#### 4. 결 론

CsI(Tl) 섬광계수기를 이용한 2차원 방사선준위 분포 측정시스템에서 EGS4(Electron Gamma Shower) 모의실험을 실시하여 response matrix를 계산하였다. 검출기로 사용된 CsI(Tl) 섬광체의 결정은  $10 \times 10 \times 20$  mm의 직육면체이고 원통형 알루미늄 케이스에 들어 있으며 이에 대하여 프로그램을 하였다. 0.1~2 MeV의 감마선에 대하여 50 keV간격으로 1,000,000 회의 EGS4 모의실험을 실시하여  $39 \times 39$  response matrix를 계산하였다. 구해진 response matrix의 역행렬을 구하여 실제 측정된 Co-60 에너지 스펙트럼에 unfolding을 실시함으로써 원래의 감마선원에서 방출되는 에너지 스펙트럼과 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 컴프턴 edge에서 실제와 unfolding된 계산치에서 다소 차이를 보였다.

따라서 본 연구의 결과로 볼 때 다양한 형태 및 검출기들의 response matrix를 EGS4 모의실험을 통하여 비교적 간단히 계산할 수 있고 실제 상황에서 적용시켜 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 5. 참고문헌

1. R. Glould, J. E. Tarpinian and E. S. Kenney, "An automated system for radiation field mapping" : Nucl. Instr. Meth. A299 : 538, 1990.
2. R. E. Carlton and L. R. Tripp, "Remote mapping of hot spots in nuclear power plants.", J. Machine Perception, Vol. 9, No.11, 1992.
3. L. Tripp, R. Carlton, and G. Westrom, "The development of the integrated radiation mapper assistant.", Proc. 39th. conf. on Remote Systems Technology, 1991.
4. H. O. Anger, "Scintillation camera.", Rev. of Scientific. Instr., Vol. 29, No. 1, 1958.
5. 강희동 외, "2차원 방사선준위 분포 측정용 방사선 감지기의 개발" : KAERI/CM-001/95, 1995.
6. K. Shin, Y. Hayashida, S. Shiroya and T. Hyodo, "Calculation of response function of NE-213 organic liquid scintillator for gamma rays" : J. Nucl. Sci. and Tech., 16(6) : 390, 1979.
7. V. V. Verbinski, et al., "The response of source organic scintillators to fast neutrons.", ANS-SD-2, p189, 1964.
8. C. Y. Fu, et al., "Gamma-ray response of the NE-213 Liquid scintillation detector.", ORNL-TM-2273, 1968.
9. 김성관, 전재식, "response Matrix에 의한 감마선 spectrum 및 그 조사선량의 해석.", 방사선방어 학회지, 11권, 1호, 1986.
10. M Belluscio, R. de Leo, A. Pantaleo and A. Vox, "Efficiencies and response function of NaI(Tl) crystals for gamma rays from thick disk sources.", Nucl. Instr. Meth., 118, 553-563, 1974.
11. W. R. Nelson, H. Hyrayama and D. W. O. Rogers, "The EGS4 code system.", SLAC Report-265, 1985.
12. G. F. Knoll, "Radiation detection and measurement.", 2nd ed., 293-302, 1989.
13. D. W. O. Rogers and A. F. Bielaiew, "Differences in electron depth-dose curves calculated with EGS and ETRAN and improved energy range relationship.", Med. Phys. Vol. 13, No. 5, 687-694, 1986
14. Q. W. O. Rogers, "Fluence to dose equivalent conversion factors calculated with EGS3 for electron from 100keV to 20GeV and Photons from 11keV to 20GeV.", Health Phys. Vol. 46, No. 4, 891-914, 1984.