

Monte Carlo 모사기법을 이용한 배관 내부의 베타선 오염도 측정용 플라스틱 검출기 모델링

김계홍 · 박재우

305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지,
한국원자력연구소

Modeling of the plastic detector for measuring the inpipe beta-ray contamination using Monte Carlo simulation methods

Gye-Hong Kim and Jae-Woo Park

Korea Atomic Energy Research Institute,
Deokjin-dong 150, Yuseong-gu, Daejeon,
305-353, Korea

Abstract

The characterization of radiological contamination inside pipes generated during the decommission of a nuclear facility is necessary before pipes can be recycled or disposed. But, direct measurements of radioactive contamination level using the survey-meter can not estimate the characteristic of contamination on a local area such as the pipe inside. Moreover, the measurement of surface contamination level using the indirect methods has many problems of an application because of the difficulty of collecting sample and contamination possibility of a worker when collecting sample. In this work, plastic scintillator was simulated by using Monte Carlo simulation method for

detection of beta radiation emitted from internal surfaces of small diameter pipe. Simulation results predicted the optimum thickness and geometry of plastic scintillator at which energy absorption for beta radiation was maximized.

Key words : contamination level inside pipe, Monte Carlo simulation, beta radiation, plastic scintillator.

서 론

원자력시설의 해체시 필요한 기술은 OECD/NEA 회원국과 같은 원자력 선진국들을 중심으로 1970년대부터 개발되기 시작되었으며, 개발된 기술의 실증 및 적용은 수명을 다한 연구로나 설중로를 중심으로 단위 요소기술들의 조합을 통하여 이루어졌다. 그러나 전 세계 대부분의 원자력 시설들이 나뉠대로의 고유한 설계적 특성과 운전특성을 가지고 있기 때문에 개발된 어느 한 해체기술이 모든 시설들에서 활용되기는 어려운 측면이 있다. 이러한 여러 가지 제약성으로 인하여 각국에서는 각자 고유의 원자력 시설에 맞는 장비를 개발하고 있으며, 현재 해체 분야의 세계적인 추세는 원격조작 및 경제성 향상 등을 목표로 기술을 개발 중에 있으며, 방사선 측정 분야도 마찬가지로 작업자의 안전성 확보 및 작업 시간 단축을 위하여 측정 장비의 자동화 및 원격장치 개발로 그 초점이 맞추어져 있다.

원자력시설 해체와 더불어 발생하는 방사성 폐기물은 시설의 운전기간 동안 발생한 폐기물보다 훨씬 많은 양이 일시에 발생되며, 해체 작업 중에 작업자들의 방사성 피폭과 방사성 물질의 환경으로의 방출 가능성이 있기 때문에 철저한 방사선/능의 측정 및 평가가 요구된다. 또한 오염구역에서 자유롭게 방출하기 위해 방사선학적인 검사를 받아야 하는데, 특히 작은 직경의 파이프 내부 표면같이 접근하기 어려운 경우 기존의 survey-meter를 이용한 측정은 압파/베타선에 대해서는 내부 오염도를 측정할 수 없다. 그래서 비교적 비정이 짧은 방사선을 방출하는 배관 내부의 방사

성물질의 오염을 평가할 수 있는 장비의 개발이 요구된다.

최근 크기와 모양을 측정공간에 맞도록 쉽게 제작할 수 있는 장점이 있는 플라스틱 섬광체가 다방면에 여러 가지 용도로 이용되고 있다. 플라스틱 섬광체는 유기섬광체인 PPO (diphenyloxazole), p-terphenyl, stilbene 등의 유기섬광체를 유기용제에 녹인 후 중합과정을 통하여 정형화된 검출기로서 1950년에 Schorr 및 Torney에 의해 개발된 후 베타선, 감마선, 중성자 및 기타 방사선을 측정하는데 넓은 용도로 이용되고 있다. 특히 중성자와 감마선이 동시에 존재하는 혼합장에서 감마선을 측정해야할 경우, crystal 섬광검출기나 고순도 반도체검출기보다 중성자에 대한 손상의 위험이 적으며 의료용 장비, 고 에너지 측정, photon beam monitor 등 다방면에 여러 가지 용도로 이용되고 있다.[1-3]

방사선 계측기 설계, 시제품 성능평가 및 검출기 보정에 Monte Carlo 코드가 많이 이용되고 있다.[4-6] Monte Carlo 방사선 시뮬레이션 전산 코드인 MCNP는 주어진 환경에서 의미의 반응을 생성함으로써 반응 자료를 생성한다. 선원 입자들은 개별적으로 생성되고 주변 환경 내역과 실험적인 반응 자료를 포함하는 사용자가 생성한 입력 파일과 결합함으로써 확률적으로 결정된 일련의 반응을 진행한다. 이런 선원 입자들과 이것들의 반응은 시뮬레이션의 길이 또는 특정한 편차 값 같은 사용자가 정의한 상황이 만족될 때까지 기록된다[7].

본 연구에서는 배관 내부의 베타선에 의한 오염도 측정을 위해 Monte Carlo 방법을 이용하여 베타선 검출에 유용하게 이용되고 있는 플라스틱 섬광체의 형상 및 크기 변화에 따른 방사선 검출 특성을 조사 하였다.

재료 및 방법

1. 플라스틱 섬광체의 특성

베타선 측정에 사용되는 플라스틱 섬광체는 Bicron사에서 생산되는 플라스틱 섬광체(BC-400, BC-408)로 하전입자 검출에 아주 유

한 섬광체이다. 표 1은 플라스틱 섬광체의 특성을 나타낸 것으로 표에서 보는 바와 같이 섬광체의 주성분은 polyvinyltoluene으로 밀도는 1.302 g/cc 이고 굴절률은 1.58이다. 섬광체의 최대 peak 파장은 BC-400, BC-408 각각 423, 425nm이다. 그림 1은 플라스틱 섬광체가 측정할 수 있는 하전 입자와 입자의 에너지 영역을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전자는 10 MeV의 에너지 영역까지 측정이 가능하다.

표 1. 플라스틱 섬광체의 일반적인 특성.

Parameter	BC-400	BC-408
Base	Polyvinyltoluene	
Density	1.32 g/cc	
Light Output, % Anthracene	65	64
Refractive Index	1.58	
Rise Time, ns	0.9	
Decay Time	2.4	2.1
Wavelength of Max. Emission, nm	423	425
Ratio H:C Atoms	1.103	1.104

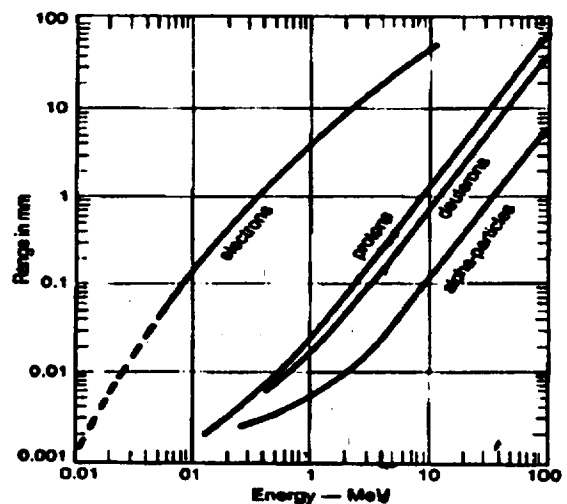


그림 1. 플라스틱 섬광체 내에서 입자의 비정.

2. 플라스틱 섬광체 에너지 흡수효율 계산

베타선 에너지 그리고 섬광체 두께에 따른 비정을 알아보기 위해 그림 2와 같이 섬광체 표면에서 10mm 떨어진 지점에서 전자가 섬광체 중심에 입사했을 때 입사 입자의 전 에너지가 섬광체에 흡수되는 비율을 계산하였다. 플라스틱 섬광체 두께는 1~10mm로 변화시켰으며 계산한 전자 에너지 범위는 일반적인 방사성 물질이 방출하는 에너지에 포함되는 2MeV이하 까지 계산하였다.

일반적인 방사선장에서는 감마선도 동시에 존재하기 때문에 이것이 베타선 검출에 noise로 작용할 수 있어서 electron 에너지에 따른 플라스틱 검출기의 효율 계산과 마찬가지로 섬광체 두께 및 감마선 에너지에 따른 전 에너지 흡수율 및 Compton continuum을 계산하였다.

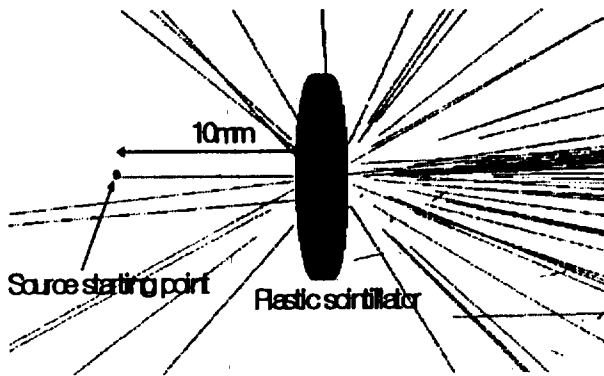


그림 2. SABRINA를 이용한 섬광체 형태 및 입자 궤도 묘사.

3. 플라스틱 섬광체의 배관내부 베타선 검출 특성

실제 배관내부 표면에 방사성 물질이 오염되었을 경우 섬광체의 두께에 따른 파고 스펙트럼의 특성을 비교하였다. 섬광체의 탄소와 수소의 원자 구성비는 BC-400, BC-408 각각 1.103, 1.104(H/C)로 섬광체를 모델링하였다. 그림 3과 같이 섬광체를 감싸는 holder는 두께 1mm의 알루미늄으로 플라스틱 섬광체 전면을 제외하고 옆면을 감쌌다. 파이프는 길이가 1m, 외경 5cm, 두께 2mm의 철이며 내부는 공기로 채워져 있는 것으로 가정하였다. PMT는 외경이 2.6mm와

1.8mm인 소형이며 내부에 존재하는 구성품은 베타선 검출에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 PMT 내부 전체가 진공이라 가정하였다.

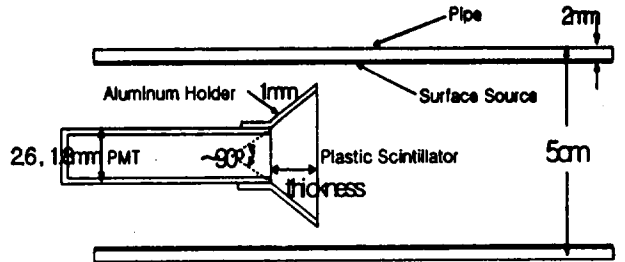


그림 3. 플라스틱 섬광체에서 펄스파고 스펙트럼을 모사하기 위한 개략도

결과 및 논의

그림 4는 베타선 에너지 그리고 섬광체 두께에 따른 비정을 알아보기 위해 두께가 1, 3, 5, 10mm인 경우 electron 에너지에 따른 플라스틱 검출기의 전 에너지 흡수효율을 계산한 것이다. 전자는 그 비적에 대해 아주 큰 각으로 편향되는 것이 있는데, 이것을 후방산란 현상이라 부른다. 검출기의 어떤 면에 입사된 한 개의 전자가 매우 큰 편향이 되었다면 그것은 입사면으로부터 재차 튀어나오는 경우가 있다. 이와 같은 후방산란된 전자는 흡수체에 그 전 에너지를 주지 않는다. 따라서 외부로부터 입사한 전자의 에너지를 측정하도록 설계되어 있는 검출기의 응답에 적지 않은 영향을 줄 수 있다. 낮은 입사 에너지를 갖는 전자

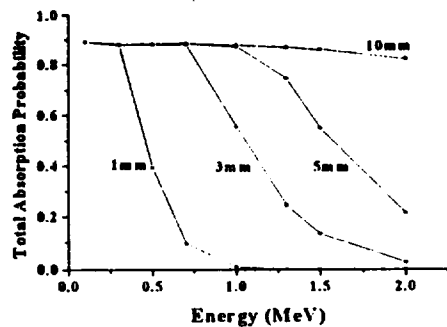


그림 4. 다양한 플라스틱 섬광체 두께에 따른 전자의 전에너지 흡수율 (total absorption probability).

와 원자번호가 큰 흡수체에 대해서 후방산란이 가장 뚜렷하다[8].

그러나 원자번호가 낮은 플라스틱 섬광체 표면에서의 후방 산란 때문에 섬광체 두께가 전자의 비정에 비해 충분히 클 경우에도 전 에너지 흡수율이 1에 도달하지 못한다. 얇은 섬광체는 전 베타 에너지 검출 능력이 떨어지기 때문에 섬광신호를 감소시킨다. 전산 모사 결과에서 섬광체 두께가 10mm인 경우 electron 에너지가 ~2 MeV 일 때 80~90%의 검출 효율을 나타내며 섬광체 두께가 5mm일 때 1MeV까지 거의 90%의 검출 효율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

플라스틱 섬광체 두께 1, 3, 5, 10mm에 대하여 electron 에너지 1MeV에 대한 파고 스펙트럼을 계산하여 그림 5에 나타냈다. 섬광체 두께가 비교적 두꺼운 경우 전에너지 흡수 피크를 볼 수 있으나 섬광체 두께가 얇은(두께 1, 3mm) 경우 전에너지 흡수 피크는 나타나지 않고 입사된 에너지보다 낮은 에너지 영역에서 비대칭의 피크를 확인할 수 있다. 이 피크는 전자가 섬광체 내에서 이동하면서 일부 에너지만 섬광체에 흡수되고 나머지 에너지는 섬광체 외부로 방출됨으로써 전자 에너지 중 가장 가능성 있는 에너지 손실에 기인하는 것이다.

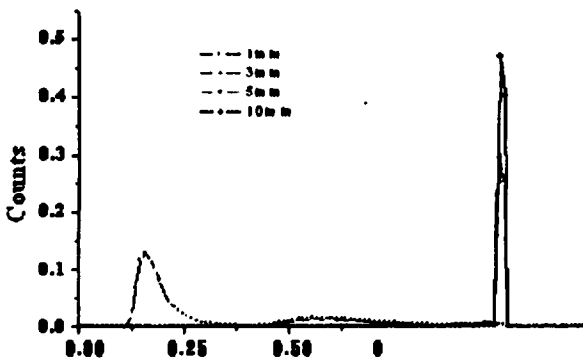


그림 5. 1MeV 전자에 대한 플라스틱 섬광체의 에너지 스펙트럼

감마선인 경우 그림 6에서 섬광체 두께가 10mm인 경우에도 감마선 에너지가 0.1MeV의 효율이 1.5% 이하이고 0.2MeV인 경우는 0.2%이하의 계산 결과를 보이고 있다. 이것은 플라스틱 섬광체의 성분들이 수소, 탄소 및 산소와 같이 Z가

낮은 성분에 의해 형성되기 때문에 보통 자주 이용되는 감마선 에너지에 대한 광전단면적(photoelectric cross section)은 사실상 거의 0과

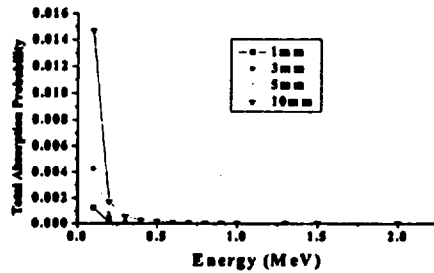


그림 6. 다양한 플라스틱 섬광체 두께에 따른 광자의 전에너지 흡수율 (total absorption probability).

같다. 그 결과 전형적인 유기 섬광체는 광전피크를 나타내지 않고 감마선에 대한 펄스높이 스펙트럼에의 에너지 0에서부터 Compton edge 영역까지 나타내는 Compton continuum 만을 증가시킨다. 그래서 베타선 검출에 noise로 나타날 수 있는 감마선의 Compton continuum을 고려해야 한다.

그림 7은 플라스틱 섬광체 두께가 10mm일 때 감마선 에너지에 따른 파고 스펙트럼을 계산한 결과이다. 감마선 에너지가 0.3MeV일 때 Compton edge의 효율이 약 1%이며 그 이상의 에너지에 대해서는 1% 이하임을 볼 수 있다. 이것은 플라스틱 섬광체의 베타선 검출효율에 비해 감마선에 대한 계수치는 무시할 만큼 작음을 알 수 있다.

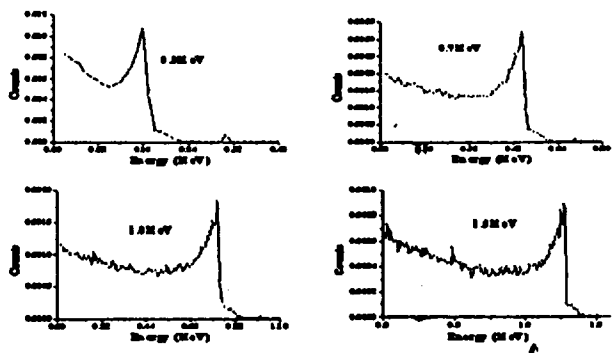


그림 7. 10mm 플라스틱 섬광체의 감마선에 대한 펄스파고 스펙트럼.

그림 8은 opening angle이 45°인 cone type의 검출기로 두께가 1 ~ 8 mm인 섬광체의 베타선에 대한 파고 스펙트럼을 나타낸 것이다. 베타선원은 높은 에너지에서의 검출 성능을 확인하기 위해 최대에너지가 비교적 높은 Y-90을 사용하였다. 결과에서 보듯이 섬광체 두께가 커질수록 높은 에너지 영역에서 검출효율이 높아지고 두께가 작아질수록 높은 에너지 영역에서 효율이 작아지고 이 감소한 계수의 일부분이 저에너지 영역에 해당하는 bin에서 계수됨을 확인할 수 있다.

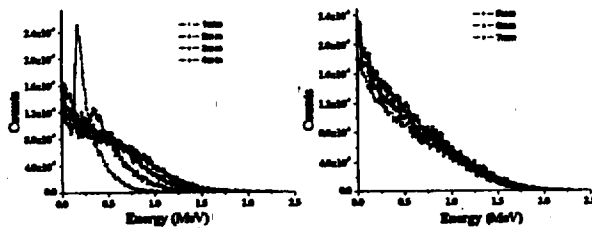


그림 8. 라스틱 섬광체의 두께에 따른 펄스파고 스펙트럼.

그림 9에서 스펙트럼의 총 계수치를 나타냈는데 두께 7mm까지 섬광체가 커짐에 따라 총계수치가 증가함을 볼 수 있다. 그러나 PMT와 결합된 플라스틱 검출기가 직경이 작은 파이프 내부를 검사할 경우 검출기가 커짐으로써 이송장치에 의한 이동 및 회전에 어려움이 생긴다. 그렇기 때문에 전자 에너지 ~1.5 MeV까지 전에너지 흡수효율이 50% 이상인 섬광체 두께 5 mm가 적합한 두께로 보여진다.

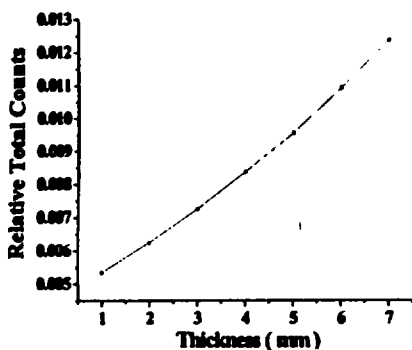


그림 9. 1MeV 전자에 대한 플라스틱 섬광체의 응답 스펙트럼의 총계수치.

섬광체의 기하학적인 형태가 cylinder type이 아니라 cone type으로 가공했을 때 섬광체 두께는 같지만 부피는 cone type이 커지게 된다. opening angle이 커질수록 계수치가 증가함을 알 수 있고 cone type의 섬광체가 계측 시스템의 이송에 문제가 되지 않는 범위에서 cylinder 형태보다는 cone type의 형태가 방사선 검출에 더욱 효율적임을 알 수 있다.

섬광체의 직경은 PMT의 입사창 크기에 맞춰서 제작하는 것이 광 수집 면에서 효율적인데 PMT의 입사창 크기가 26, 18mm 일 때 섬광체 직경을 PMT 입사창 크기와 같은 직경으로 제작했을 때 계수율은 직경이 26mm인 섬광체가 18mm일 때보다 계수치가 50%정도 증가함을 볼 수 있다.

결론

배관내부 베타선 검출기를 제작하기 위한 준비 과정으로 플라스틱 섬광체의 방사선 검출 특성을 Monte Carlo 모사방법을 통하여 확인하였다. Monte Carlo 코드인 MCNP를 이용하여 섬광체 두께에 따른 에너지 흡수효율, 스펙트럼 특성 분석, 혼합 방사선장에서 감마선이 베타선 검출에 미치는 정도를 계산하여 실제 검출기 적용 가능성을 확인하였다. 적용될 방사선장에서 주로 방출되는 베타 에너지를 효율적으로 흡수하고 베타선 검출 시 noise로 작용할 수 있는 감마선이 신호에 영향을 미치지 않는 섬광체 최적 두께를 도출하였다.

이 계산 결과를 바탕으로 실제 검출기 설계 및 제작은 물론 얻어진 파고스펙트럼의 분석, 계측기 성능평가, 베타선 에너지 교정 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Monte Carlo 모사기법을 이용하여 플라스틱 섬광체 모델링 결과를 바탕으로 검출기 제작에 적용하고 크기가 다른 PMT, 플라스틱섬광체를 교체할 수 있는 측정함을 제작하여 여기에서 얻어진 검출신호를 Monte Carlo 모사를 통해 얻어진 결과를 검출기의 스펙트럼 분석, 성능평가, 베타선 에너지 교정 자료로 활용할 것이다.

참고문헌

1. A.A. Kriss, D.M. Hamby, "Beta spectroscopy with a large-area avalanche photodiode module and plastic scintillator", Nucl. Instr. Meth., A525, 553-559 (1991)
2. Lino Miramonti, "A plastic scintillator detector for beta particles", Radi. Meas. 35, 347-354 (2002)
3. A. Tarancon, J.F. Garcia and G. Rauret, "Mixed waste reduction in radioactivity determination by using plastic scintillators", Anal. Chim. Acta, 463, 125-134 (2002)
4. P.L. Reeder, T.W. Bowyer, J.I. McIntyre, W.K. Pitts, A. Ringbom and C. Johansson, "Gain calibration of a β/γ coincidence spectrometer for automated radon analysis", Nucl. Instr. Meth, A 521, 586-599 (2004)
5. Nathan L. Childress, William H. Miller, "MCNP analysis and optimization of a triple crystal phoswich detector", Nucl. Instr. Meth., A 490, 263-270 (2002)
6. Jose Rodenas, Antonio Martinavarro and Vicente Rius, "Validation of the MCNP code for the simulation of Ge-detector calibration", Nucl. Instr. Meth., A 450, 88-97 (2000)
7. P.H.G.M. Hendriks, M. Maucee and R.J. de Meijer, "MCNP modelling of scintillation-detector γ -ray spectra from natural radionuclides", Appl. Radi. Isot., 57, 449-457
8. Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement" Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. 47 (1999)