

Fabrication and estimation of the plastic detector for measuring the contamination for beta-ray level of the kind of duct waste

배관류 폐기물의 베타선 오염도 측정용 플라스틱 검출기 제작 및 특성평가

Gye-Hong Kim, Won-Zin Oh, Kune-Woo Lee and Bum-Kyoung Seo

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duck-Jin Dong, Yuseong-gu, Daejeon

ghkim@kaeri.re.kr

김계홍, 오원진, 이근우, 서범경

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

(Received January 7, 2005 / Approved August 8, 2005)

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, existing 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. In addition, the problem of scintillator processing and transferring the detector into the pipe inside was considered when fabricating the plastic detector on the basis of simulation results. The characteristic of detector fabricated was also estimated. As a result, it was confirmed that detector capability was suitable for the measurement of contamination level. Also, the development of a detector for estimating the radiological characteristic of contamination on a local area such as the pipe inside was proven to be feasible.

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

요 약

원자력 시설의 해체 시 발생하는 다양한 종류의 폐기물 중에서 배관류를 재활용하거나 처분하기 위해서는 배관 내부의 정확한 방사선학적인 오염 특성의 평가가 선행되어야 한다. 그러나 기존의 측정법인 survey-meter를 이용한 오염도의 직접 측정은 배관 내부와 같은 국소지역의 오염 특성을 정확하게 평가할 수 없으며, 간접법을 이용한 표면오염도 측정의 경우도 시료채취의 어려움뿐만 아니라 시료채취 시 작업자의 오염 가능성이 있기 때문에 적용성에 많은 문제점이 있다. 본 연구에서는 Monte Carlo 모사기법을 이용해 직경이 작은 배관 내부의 베타선 오염도를 측정하기 위하여 플라스틱 섬광체를 모사하였으며, 모사 결과에서 베타선 에너지를 효율적으로 측정할 수 있는 최적의 플라스틱 섬광체 두께 및 형상을 도출할 수 있었다. 이 전사모사 결과를 바탕으로 섬광체의 가공 및 배관 내부에서의 검출기 이송 문제를 고려해 검출기를 제작하였으며 그 특성을 평가하였다. 그 결과 배관 내부의 오염도 측정에 적합한 검출기 성능을 확인하였고, 파이프 내부처럼 국소 지역의 방사선학적 오염 특성 평가를 위한 검출기 개발 가능성을 확인하였다.

중심단어 : 배관 내부 오염도, 몬테칼로 모사, 베타선, 플라스틱 섬광체

I. 서론

원자력연구시설의 해체(연구로 1,2호기 및 우라늄 변환시설)와 더불어 다양한 종류의 폐기물들이 발생하고 있으며, 이와 관련하여 폐기물의 처분 및 재활용을 위해서는 정확한 방사선학적인 오염 특성이 평가되어야 한다. 이러한 해체 폐기물들의 오염도 평가와 관련하여 미국에서는 자국의 다양한 연구로의 해체 경험을 바탕으로 다양한 측정 기술을 개발하여 실증하고 있다[1-2]. 그러나, 이러한 기술들은 원자력시설의 다양한 구조와 특성으로 인하여 공통적으로 활용되기에는 많은 어려운 측면이 있다. 이러한 제약성으로 인하여 각국에서는 각자 고유의 원자력 시설에 맞는 장비를 개발하고 있으며, 현재 해체 분야의 전반적인 추세는 원격조작 및 경제성 향상 등을 목표로 작업자의 안전성 확보 및 작업 시간 단축을 위하여 측정 장비의 자동화 및 원격장치 개발로 그 초점이 맞추어져 있다.

특히, 방사선 관리 측면에서 원자력시설 해체와 더불어 발생하는 방사성 폐기물은 해체 작업 중에 작업자들의 방사선 피폭과 방사성 물질의 환경으로의

방출 가능성이 있기 때문에 철저한 방사선학적인 측정 및 평가가 요구된다. 또한, 방사선관리구역 안의 물품을 규제해제하기 위해서는 대상 물품들이 오염되어 있지 않다는 것을 증명하여야 한다. 그러나, 일반적으로 배관류와 같은 측정 대상은 내부가 오염되어 있기 때문에 측정 시 많은 문제점을 가지고 있다. 기존의 측정법은 크게 직접법과 간접법으로 나눌 수 있는데, 서베이미터(survey meter)와 같은 장비를 이용하여 표면오염을 직접 측정하는 직접법의 경우는 장비를 배관 내부로 넣어서 직접 측정할 수가 없으므로 외부에서 오염도를 측정하여야 한다. 그러나, 알파와 베타선과 같은 경우에는 배관에 의한 자체흡수에 의하여 외부에서 오염도를 측정할 수가 없다. 또한, 스메어 매질을 이용하여 시료를 채취하여 오염도를 측정하는 간접법의 경우도 배관 내부의 시료를 채취하기 위하여 배관을 절단하고 시료채취를 하여야 하는 등 많은 문제점을 가지고 있다. 즉, 이러한 문제점을 해결하고 배관 내부의 오염도를 평가할 수 있는 장비의 개발이 요구된다. 이러한 문제점을 해결하고, 배관 내부의 오염도를 직접 측정할 수 있는 장비 개발의 일환으로서 플라스틱 섬광체를 이용하여 배관

내부의 오염도를 측정할 수 있는 검출기의 제작 요건을 알아보고, 그 특성을 평가하였다.

플라스틱 섬광체(plastic scintillator)는 쉽게 크기와 모양을 자유로이 만들 수 있고, 제작이 용이하며, 가격이 저렴하므로 액면계, 밀도계, 의료용 장비, 고강도·고선량 방사선이용분야 등에 활용되고 있다. 플라스틱 섬광체는 원자번호가 작기 때문에 제동복사선이 발생되지 않아 β 선 계측에 적합하며 형광감쇠시간이 수 ns이므로 ns영역의 핵 혹은 양성자의 수명 측정, 베타선 측정과 관련하여 A. A. Kriss, L. Miramonti, A. Taranconi 플라스틱섬광체를 이용하는 등 원자력 분야에서 많이 사용되고 있는 검출기이다[3-5].

Nathan L. Childress와 William H. Miller는 phoswich 검출기의 최적 운영 인자를 결정하고 기존의 설계를 바탕으로 장래의 검출기의 최적 설계를 결정하기 위한 기준을 정하기 위하여 MCNP 코드를 이용하였고[6], José Ródenas 등은 Ge 검출기의 효율 보정을 위해 MCNP version 4A와 4B를 사용[7]하는 등 방사선 계측기 설계, 시제품 성능평가 및 검출기 보정에 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 베타선 검출에 유용한 플라스틱 섬광체에 대해 몬테칼로 코드 MCNP 4C를 이용하여 배관 내부의 베타선 오염도 측정을 위한 섬광체의 형상 및 크기 변화에 따른 방사선 검출 특성을 모사 하였다[8]. 또한, MCNP 계산 결과를 바탕으로 플라스틱 섬광체를 제작하여 베타선 방출핵종인 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 선원을 이용하여 파고 스펙트럼을 측정하여 그 성능을 평가하였고, 배관 내부에서의 적용성 시험을 거쳐 오염도 측정 가능성을 평가하였다.

II. 재료와 방법

가. Monte Carlo 전산모사

몬테칼로 방사선 시뮬레이션 전산 코드인 MCNP에서는 선원 입자들이 개별적으로 생성되고 주변 환경 내역과 실험적인 반응 자료를 포함하는 사용자가 생성한 입력 파일과 결합함으로써 확률적으로 결정된 일련의 반응을 진행한다. 이런 선원 입자들과 물

질과의 반응은 시뮬레이션의 히스토리 또는 특정한 편차 값 같은 사용자가 정의한 상황이 만족될 때까지 기록된다[9].

베타선 에너지 그리고 섬광체 두께에 따른 효율을 알아보기 위해 입사된 전자의 궤적 및 섬광체를 기하학적 형태를 묘사한 Fig. 1과 같이 직경이 26mm인 섬광체 표면에서 10mm 떨어진 지점에서 전자가 섬광체 중심에 입사했을 때 입사 입자의 전 에너지가 섬광체에 흡수되는 비를 계산하였다. 또 일반적인 방사선장에서는 감마선도 동시에 존재하기 때문에 이것이 베타선 검출에 noise로 작용할 수 있어서 전자 에너지에 따른 플라스틱 검출기의 효율 계산과 마찬가지로 섬광체 두께 및 감마선 에너지에 따른 전 에너지 흡수율을 위와 같은 방법으로 계산하였다. 모든 계산에 대해 F8 tally(pulse height)를 이용하였고 채널폭은 $1.1 \times 10^2 \text{MeV}$ 로 정하였으며 섬광체 주변은 공기로 채워져 있다고 가정하였다. 계산 과정에서 생길 수 있는 오차는 1% 이하가 되도록 히스토리를 500,000으로 정하였다.

나. 플라스틱 섬광검출기 및 특성 평가 측정 방법

배관 내부 베타 측정에 적용된 플라스틱 섬광체는 방출파장이 360nm에서 520nm까지 이며 최대 피크 파장이 425nm인 Bicron 사의 BC-408을 사용하였다. 섬광체의 주성분은 PVT로 밀도는 1.302g/cm^3 이며 수소와 산소 원소의 분율(H:C)은 1.104 이고 굴절률은 1.58이다. 플라스틱 섬광체를 지름이 26mm인 디스크 형태로 두께 1.2, 3.1, 5.2, 그리고 12mm로 가공한 후 polishing하였다. 가공한 플라스틱 섬광체는

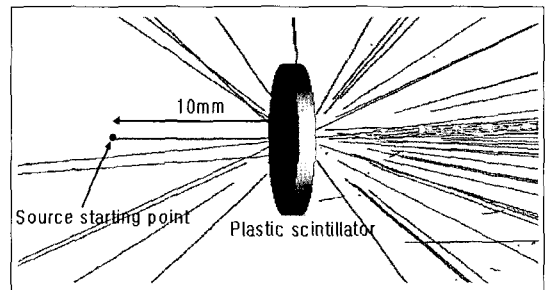


Fig.1. SABRINA rendering of the geometry and particle tracks for a beam to the plastic scintillator.

베타 입자가 에너지 손실 없이 통과할 수 있는 테프론으로 감싸 PMT와 연결하였으며 측정함은 외부 광을 차단할 수 있게 제작하였다. 적용된 PMT는 플라스틱섬광체의 발광파장과 감도를 맞추기 위해 응답 파장이 300~650nm 이며 피크 파장이 420nm인 HAMAMATSU사의 Head-on type의 R1924A를 사용하였다. 또 배관 내부 표면 베타선 및 감마선 오염도 검출 성능을 시험할 수 있도록 측정함 내부에 직경 54.5mm의 파이프를 제작·설치 하였다.

다. 플라스틱 섬광검출기 특성 평가

베타선 검출 시 noise로 검출신호에 영향을 미칠 수 있는 감마선의 영향을 알아보기 위해 플라스틱 섬광체 두께 1.2, 3.1, 5.2, 그리고 12mm에 따른 감마선과 베타선 검출 특성을 Fig. 2 (a)와 같은 시스템을 구성하여 확인하였다. 선원은 감마선의 경우에는 0.949 μ Ci의 ¹³⁷Cs과 0.95 μ Ci의 ⁶⁰Co 점선원을 이용하였으며 베타선원은 농도가 3.8 $\times 10^3$ Bq/g으로 희석된 용액선원 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 100 μ l를 스메어 용지에 도포한 뒤 건조시켜 측정하였으며 선원과 플라스틱섬광체의 거리는 15mm를 유지하였다.

실제 배관 내부 표면이 베타선에 의해 오염된 경우 베타선 검출특성을 확인하기 위해 Fig. 2 (b)와 같이 파이프 형태의 반투명 필름 내부 표면에 3.8 $\times 10^3$ Bq/g으로 희석된 용액선원 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 100 μ l를 도포하여 스펙트럼을 측정하였다.

III. 결과 및 논의

가. 플라스틱 섬광체의 검출 특성 모사 결과

Monte Carlo 전산 코드인 MCNP 4C를 이용하여 배관 내부의 베타선 오염도 측정을 위한 섬광체의 두께 변화에 따른 방사선 검출 특성을 모사 하였다. 섬광체 두께가 1, 3, 5, 그리고 10mm인 경우 단일 에너지(0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5, 2MeV)를 갖는 전자의 에너지에 따른 플라스틱 섬광체의 전 에너지 흡수율에 대한 계산 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 계산 결과에서 플라스틱 섬광체의 두께가 전자의 비경에 비해 충분히 클 경우에도 전 에너지 흡수율이 100%에 도달하지 못하고 거의 90% 이하의 값을 나타내고 있다. 이 이유는 전자의 원래 비경에 대해 플라스틱 섬광체 입사 표면에서 아주 큰 각으로 편향되는 후방산

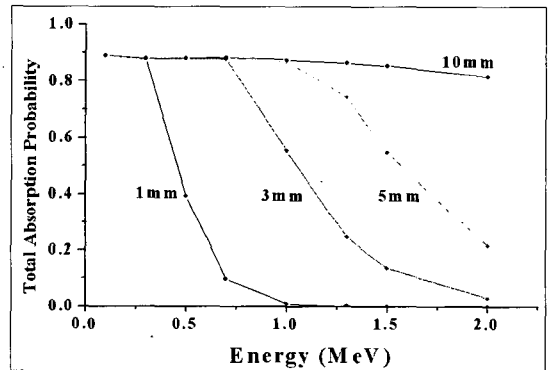


Fig. 3. Total absorption probability as a function of electron energy and scintillator thickness.

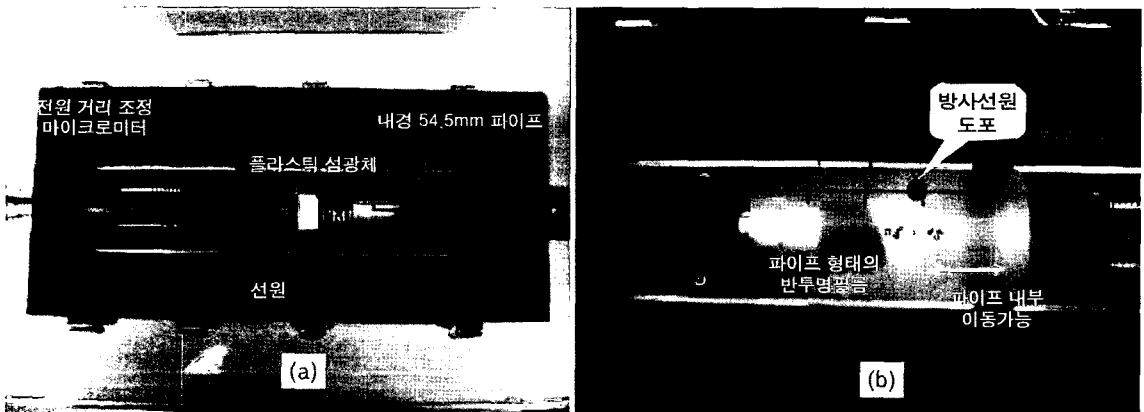


Fig. 2. Photograph of the prototype system for detecting radiation particles.

란 현상 때문이라고 Glenn F. Knoll은 소개하고 있다 [10]. 물론 낮은 입사 에너지를 갖는 전자와 원자번호가 큰 흡수체에 대해서 후방산란이 뚜렷하지만 원자번호가 낮은 플라스틱 섬광체의 응답에도 조금은 영향을 미침을 알 수 있다.

섬광체 두께가 10mm인 경우 전자 에너지가 2MeV 까지 80 ~ 90%의 전 에너지 흡수 효율을 나타냈으며 섬광체 두께가 5mm일 때 1MeV까지 거의 90%의 흡수 효율을 얻을 수 있었으나 얇은 섬광체는 전 에너지 검출 능력이 떨어지며 그로인해 섬광신호가 감소함을 확인할 수 있었다. 제동복사 또는 후방산란과 같이 베타선의 전 에너지가 섬광체에 흡수되지 않고 일부 에너지만 섬광체에 흡수되어 검출신호에 미치는 경우 계산된 스펙트럼의 전 에너지 흡수 피크에는 영향을 미치지 않지만 입사된 전자의 에너지보다 낮은 영역에서 피크가 형성되었다. 전자의 단일 에너지가 1.5MeV에서 약 60%의 전 에너지 흡수율을 보이는 섬광체 두께가 5mm이면 베타선 검출에 충분함을 보여준다. 베타선 검출 시 노이즈로 영향을 미칠 수 있는 감마선인 경우 섬광체 두께가 10mm인 경우에도 감마선 에너지 0.1과 0.2MeV일 때 전 에너지 흡수 효율이 각각 1.5 및 0.2% 이하였으며, 컴프턴 산란에 의해 흡수된 것을 반영하는 컴프턴 연속부 (compton continuum)까지의 총계수치 효율도 각각 9.8 및 10%였고 이 이상의 에너지에 대해서는 이보다 다소 낮은 계수 효율을 보였는데, 5mm일 때 1MeV까지 거의 90%의 전 에너지 흡수 효율을 보이는 베타선에 대한 경우보다 아주 낮았다.

나. 플라스틱 섬광체의 방사선 검출 특성

제작된 검출기의 감마선 및 베타선에 대한 검출 특성을 확인하기 위해 섬광체 두께 및 선원과의 거리 변화에 따른 파고스펙트럼을 측정해 계수율을 계산하였다. ^{137}Cs 과 ^{60}Co 에서 방출되는 감마선과 같은 경우 플라스틱 섬광체같이 원자번호가 낮은 성분에 의해 형성된 물질과 반응에서 광전단면적(photoelectric cross-section)은 거의 일어나지 않고 컴프턴산란에 의해 에너지가 흡수된다. 그 결과 파고 스펙트럼에의 에너지 0에서부터 컴프턴단(compton edge) 영역까

지 나타내는 컴프턴 연속부(compton continuum) 만을 증가시킨다. Fig. 4에서 12mm 두께의 플라스틱 섬광체의 $0.949\mu\text{Ci}$ 의 ^{137}Cs 과 $0.95\mu\text{Ci}$ 의 ^{60}Co 점선원에 대해 측정된 파고스펙트럼을 나타냈는데 비교적 낮은 에너지의 감마선을 방출하는 ^{137}Cs 의 경우 ^{60}Co 보다 낮은 채널에서 컴프턴단이 생성됨을 볼 수 있다. ^{60}Co 에서는 1.17와 1.33MeV의 감마선이 방출하기 때문에 두 개의 단이 형성돼야 하지만 측정된 파고스펙트럼에서는 이 두 개의 컴프턴단을 구별할 수 없었다. 각각의 입자가 잃어버리는 에너지는 통계적인 요동 및 에너지 전이의 요동 때문에 항상 평균값과 똑같지 않아서 델타함수가 아닌 특정한 에너지 분포를 갖게 된다. 이런 이유에서 생기는 에너지 흩어짐(energy broadening)의 발생으로 비교적 근접한 두 컴프턴단이 겹쳐져 생성된 것이다. 섬광체 두께에 따른 계수율을 계산했는데 계수율이 가장 높은 섬광체 두께 12mm인 경우에도 ^{60}Co 와 ^{137}Cs 의 파고스펙트럼의 총 계수치에 대한 방사선원 붕괴 당 계수율이 각각 0.4, 0.18% 정도로 효율이 아주 낮음을 확인할 수 있었다.

Fig. 5, 6은 두께 5.2와 1.2mm의 플라스틱 섬광체를 이용해 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 을 측정된 파고 스펙트럼이다. 이 측정결과에서 두 스펙트럼이 겹친 것 같이 스펙트럼이 형성됐는데 낮은 channel에 나타난 분포는 ^{90}Sr 에 의해 형성된 것이고 높은 channel에서 형성된 분포는 최대 에너지가 ^{90}Sr 보다 높은 ^{90}Y 에 의한 검출 신호를 나타낸다. 그런데 두께 1.2mm의 섬광체의 경우

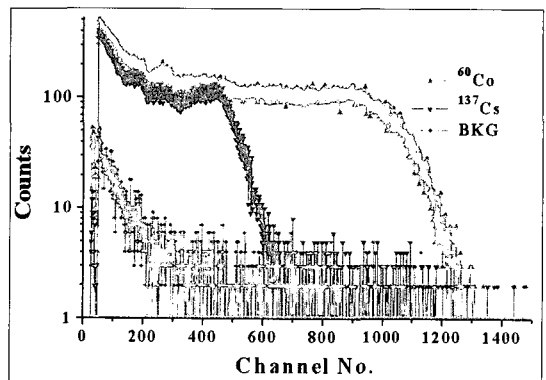


Fig. 4. The pulse-height spectrum obtained using 12 mm thickness plastic scintillator for a gamma ray.

5.2mm 두께의 섬광체에 비해 전체적으로 고에너지 영역에 해당하는 channel에서 계수치가 떨어지고 낮은 에너지 영역에 해당하는 channel에서 계수치가 증가함을 볼 수 있다. 이는 MCNP 계산 결과와 같은 경향으로 섬광체 두께가 베타선의 평균 비정(2MeV 전자 : 약 10mm)에 비해 작기 때문에 입사 입자의 일부분의 에너지만 흡수되고 나머지는 검출기 외부로 방출되는 비율의 증가로 생기는 파고 스펙트럼의 분포로 보여진다. 섬광체 두께에 따른 파고스펙트럼의 총 계수치에 대한 방사선원 붕괴 당 계수율은 모든 경우 10% 내외의 값을 나타냈다. 이 결과와 0.4%의 계수율을 나타낸 ^{60}Co 의 경우와 비교할 때 베타선 검출 시 노이즈로 작용할 수 있는 감마선의 영향이 무시할 정도로 작음을 알 수 있다.

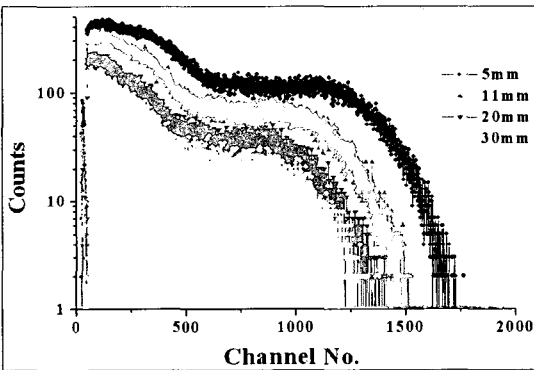


Fig. 5. The pulse-height spectra obtained using 5.2 mm thickness plastic scintillator for $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ as a function of distance between the scintillator and source.

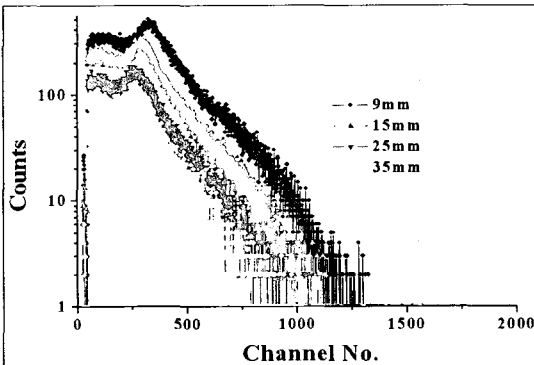


Fig. 6. The pulse-height spectra obtained using 1.2 mm thickness plastic scintillator for $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ as a function of distance between the scintillator and source.

실제 배관 내부 표면이 베타선 방출 선원에 의해 오염된 경우 파고 스펙트럼을 측정하여 계수율을 계산하여 Fig. 7에 나타냈다. 선원이 섬광체 전면 15mm 거리에 있을 때 계수율의 30% 이하임을 볼 수 있는데 기하학적인 효율 감소가 주원인이다. 섬광체와 선원 거리가 파이프 중심축을 기준으로 0, 2, 4, 6cm로 변했을 때 계수율이 동일 축 선상에 있을 때 (거리 : 0cm)와 2cm 떨어져 있을 때 계수율이 거의 차이가 없음을 볼 수 있다. 이는 거리가 0cm 일 때 방사선과 반응하는 섬광체의 겉보기 면적이 상대적으로 작아 계수율이 낮다. 그러나 거리가 멀어질수록 겉보기 면적이 거의 일정해져 계수율에 영향을 미치는 변수는 선원과의 거리이기 때문에 거리가 2cm 이후에는 거리에 따른 지수적인 감소를 보인다.

IV. 결론

배관 내부의 오염도를 평가하기 위한 검출기를 제작하기 위하여, 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 도출할 수 있었다. 베타선의 에너지는 대부분 1.5MeV 이하인데 1MeV에

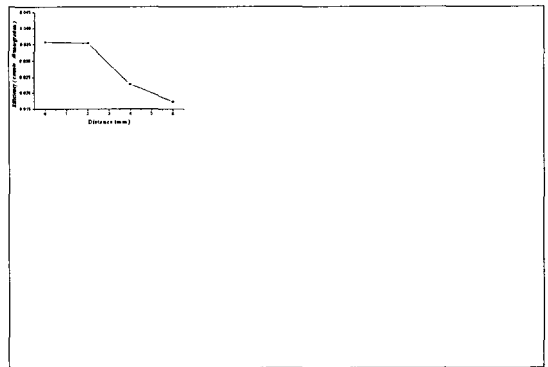


Fig. 7. The count rate for $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ as a function of distance between the scintillator and source.

서 약 90%의 전 에너지 흡수율을 보이는 섬광체 두께가 5mm이면 베타선 검출에 충분함을 보여줬다.

플라스틱 섬광체 모델링 결과를 바탕으로 섬광체는 가공이나 배관내부 이송에 유리한 원통형으로 선택하여 제작하였다. 제작된 검출기를 실제 방사선장과 유사한 측정함을 제작하여 베타, 감마선에 대한 파고스펙트럼을 측정하여 선원과의 거리, 섬광체 두께, 핵종에 따른 방사선 검출 특성을 확인하였다. 이 과정에서 기존의 검출기로는 접근이 곤란한 배관내부 표면의 베타선을 검출하기 위해 직경 26mm의 소형의 플라스틱 섬광체를 광전자증배관에 적용해 알파선과 감마선에 비해 상대적으로 높은 계수율을 얻을 수 있었다. 또 이 시스템을 자동 이송장비와 결합할 경우 작업자의 안전성 확보 및 작업 시간을 단축할 수 있는 원격장치 개발이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. U.S. Department of Energy, "Pipe Explorer™ Surveying System," INNOVATIVE TECHNOLOGY Summary Report, DOE/EM-0440(1999).
2. U.S. Department of Energy, "Pipe Crawler® Internal Piping Characterization System," INNOVATIVE TECHNOLOGY Summary Report, DOE/EM-0355(1998).
3. A.A. Kriss and D.M. Hamby, "Beta spectroscopy with a large-area avalanche photodiode module and plastic scintillator," Nucl. Instr. Meth., A525, pp. 553-559(1991).
4. L. Miramonti, "A plastic scintillator detector for beta particles," Radi. Meas. 35, pp. 347-354(2002).
5. A. Tarancon, J.F. Garcia and G. Rauret, "Mixed waste reduction in radioactivity determination by using plastic scintillators," Anal. Chim. Acta, 463, pp. 125-134(2002).
6. N.L. Childress, W.H. Miller, "MCNP analysis and optimization of a triple crystal phoswich detector," Nucl. Instr. Meth., A 490, pp. 263-270(2002).
7. J. Rodenas, A. Martinavarro and V. Rius, "Validation of the MCNP code for the simulation of Ge-detector calibration," Nucl. Instr. Meth., A 450, pp. 88-97(2000).
8. J. D. Briesmeister (Ed), MCNP-a general Monte Carlo n-particle transport code, version 4c, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, LA-12625, 1993.
9. 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, pp. 449-457(2002).
10. G.F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," 3rd eds., pp. 47, John Wiley & Sons, Inc., New York(1999).