

방사선 차폐체의 감마스캐닝검사법에 대한 고찰

서 경 원

한국원자력연구소, 원자력연수원

요 약 원자력산업이 발전함에 따라 우리나라에서도 방사성동위원소 및 방사선발생장치를 사용하는 시설이 매년 증가하고 있으며 그에 따라 방사선 차폐시설에 대한 방사선 안전성 문제도 크게 대두되기 시작하였다. 그러므로 안전성 확보의 일환으로 방사선 차폐체 건전성검사는 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 방사선 차폐체 건전성검사를 위한 비파괴검사방법중의 하나인 감마스캐닝검사법 (gamma scanning test, GST)의 검사 방법에 대한 평가와 실제 현장에서의 적용 예를 비교 고찰하였다.

또한 본 연구에서는 사용된 감마스캐닝검사방법에서 정확성을 위해 검사시 갖추어야 할 기본 장치와 개선해야 할 사항 등을 제시하였다. 이러한 기술을 국내 관련기관 및 산업체에서 널리 보급하여 보다 효율적이고 정확한 검사 방법을 수행한다면 앞으로 구조물의 건전성검사시 비파괴검사방법의 한 수단으로 정착하여 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

1. 서론

감마선 방사성 물질을 사용하는 시설의 방사선 차폐체는 콘크리트, 철, 납 등의 비중이 큰 물질들이 이용된다. 대부분의 경우 일반 차폐벽의 구조검사는 최근에 개발된 여러가지 비파괴검사법으로 가능하나 대응량의 차폐 성능을 갖는 여러 물질이 복합된 구조물의 대단위 방사선 차폐체에 대한 검사는 공식적으로 국내에서는 시행되지 못하고 있다.

본 연구에서는 이러한 방사선 차폐체를 고준위 감마선 방사성동위원소를 이용하여 구조물을 검사하는 감마스캐닝법에 대하여 고찰하였는데, 이 방법은 감마방사성동위원소를 피검사물에 조사시켜 투과된 방사선량을 측정하여 차폐체의 두께에 따른 선량의 변화를 비교하여 차폐체의 방사선 차폐정도를 평가하는 것이다.

이때 방사선 측정의 방법은 크게 두가지로 구분하

는데, 누설방사선이 클 경우 휴대용 방사선 측정기 (surveymeter)로 직접 방사선량을 측정하며, 누설방사선이 자연방사선 정도로 낮을 경우에는 섬광계수관(scintillation counter tube)을 이용하여 총방사능을 측정한다.

또한 측정치로 차폐체의 두께를 상대 평가하기 위해 기준 차폐체(reference block)를 이용하는데 이는 시설물과 같은 재질로 기준보다 낮은 두께에서 높은 두께까지 일정한 간격의 두께로 기준 차폐체를 제작하여 사용한다. 기준 차폐체의 두께별로 기준치를 결정한 다음, 같은 조건으로 시설물을 측정한 후 측정치를 비교하면 시설물에 대한 차폐체의 두께로 환산하여 결정하거나, 차폐체의 건전성(균열, 이물질침가 등)을 확인할 수 있다.

이 방법은 방사성동위원소나 방사선발생장치를 사용하는 시설이나 대단위 방사선 차폐체를 설치해야 하는 시설들에 있어서는 필수적으로 수행되어야 하

는 방사능 차폐검사에서 자주 이용될 수 있는 검사법이다. 따라서 앞으로 원자로, 방사성폐기물저장고, 방사성동위원소 사용실 및 저장실 등 원자력산업체에서의 이용도 증가로 자동화 개발 등이 활발히 전개되어야 할 것이다.

2. 검사 방법

2.1. 이론적 배경

방사선 차폐검사에서 사용되는 방사선원은 Table 1과 같이 반감기가 긴 것을 사용하여야 하며, 이중 Co-60은 에너지도 크고 에너지의 종류도 단순하여 대단위 방사선 차폐체 검사에 많이 사용되고 있다.

Table 1. Sources for test of radiation shielding material¹⁾

Sources	Energy		Half life	Gamma factor, Γ (R.cm ² /mCi/h)
	MeV	%		
Co-60	1.173	100	5.26년	13.2
	1.332	100		
Ir-192	0.296	29	74.2일	4.8
	0.308	30		
	0.316	81		
	0.468	49		
Cs-137	0.662	85	30.0년	3.3

방사선 차폐에서 좁은 빔의 감쇄현상을 식으로 표현하면 다음과 같다. 즉 단위길이당 감소되는 방사선의 수는

$$-d\phi/dt = -\mu\phi \dots\dots\dots (1)$$

이며, 여기서 μ 는 감쇄계수이다. 이 식을 적분하면

$$\phi = \phi_0 e^{-\mu t} \dots\dots\dots (2)$$

이고, 여기에 log를 취하면 $\log \phi = \log \phi_0 - \mu t$ 이다.

그러나 넓은 빔의 거동현상을 보면, 넓은 빔(broad beam)의 방사선 차폐체는 예상보다 많은 방사선이 검출된다. 즉 방사선이 입사하여 산란된 후 도달하는 입자는 산란에 의해 다소 에너지를 잃기 때문에 원래의 에너지보다 다소 낮은 에너지를 갖게된다. 그러므로 두께가 증가할수록 산란방사선이 많아져 축적인자는 커질 것이고 각각의 원소마다 감마선 에너지가 다르

고 산란면적의 크기가 다르기 때문에 차폐물질의 종류나 감마선의 에너지에 따라 축적인자는 변한다. 따라서 계산치와 실측치는 Fig. 1과 같이 차이점을 갖게 된다.

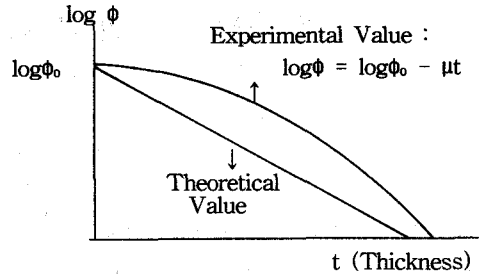


Fig. 1. Difference of theoretical and experimental value.

여기서 축적인자 $B^{2,3)}$ 는 실측치/계산치로 나타낼 수 있으므로

$$B = \phi_b / \phi \quad (B \geq 1) \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi_b = B\phi = B\phi_0 e^{-\mu t} \dots\dots\dots (4)$$

로 나타낸다. 이러한 축적인자에 의해 계산치를 보정하면 실측치와 같게 된다.

본 연구에서는 점선원(point source)을 이용하여 방사선 차폐체중에서 납이나 콘크리트의 두께를 결정하고자 하는 것이므로 이 축적인자를 고려한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_0 = \frac{S}{4\pi r^2}, \phi = \frac{S}{4\pi r^2} \cdot e^{-\mu t}, \phi_b = \frac{S}{4\pi r^2} \cdot B e^{-\mu t} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 양변에 에너지를 곱하고, 실제 측정시 방사능을 직접 방사선량으로 쉽게 변환하기 위하여 감마상수(gamma factor, $\Gamma^4)$ 를 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(R/h) = B(\mu t) \Gamma S e^{-\mu t} / r^2 \dots\dots\dots (6)$$

이때, 사용되는 부호의 의미는 다음과 같다.

- R : 선량을
- S : 선원의 방사능 양(Ci)
- u : 질량감쇄계수
- r : 선원과 차폐체 사이의 거리

t : 차폐체의 두께(mm)

Γ : 감마상수

B(μ t) : 축적인자

또한 축적인자(buildup factor, B(μ t))는 지금까지 많은 연구자들에 의해 여러가지 실험식이 발표되었다³⁾. 이중 Taylor근사식은 차폐실험에 의한 결과나 수송 방정식에 Monte Carlo해나, 각분할법에 의한 비교적 정밀한 계산에 의하여 얻어진 것으로 다음과 같다.

$$B(\mu) = Ae^{\alpha(\mu t)} + (1-A)e^{-\alpha(\mu t)} \dots\dots\dots (7)$$

이상과 같이 실험식에 의해 축적인자가 결정되며, 또한 계산치와 실측치의 차이를 축적인자로 보정해 주기 때문에 절대측정만으로 차폐체의 두께를 결정할 수는 없다.

따라서 동일조건에의 기준차폐체에 의한 두께별 기준치를 실험적으로 결정한 후 이와 비교하여 실제 검사 대상 차폐체의 두께를 결정하는 상대비교 측정 방법을 이용하여야 한다.

기준차폐체의 두께와 선량을이나 계수치와의 관계로 전자계산법인 Curve Fitting법을 이용하여 그래프를 그리거나 식을 세워서 계산시 기준치로 적용하면 간단하고 정확히 차폐체의 두께를 결정할 수 있다.

그러므로 감마스캐닝검사시에는 이러한 복잡한 계산을 매번 시행하지 않고 기준차폐체의 두께별 기준치와 상대비교하여 측정결과를 직접 차폐체의 두께로 결정하여 평가할 수 있다. 따라서 이러한 검사 평가시에는 그 측정상의 오차를 최소한으로 할 수 있도록 하여야 할 것이다.

오차의 종류로는 측정기의 오차, 기준차폐체 제작시 오차, 기준치 설정시 오차, 실제 검사시 부대 이용장비 등의 위치 변동에 대한 오차, 계산시 처리 결과에서 취급되는 오차 등으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 지금까지 실험한 결과로 보아 이러한 오차를 최소로 줄이는데 필요한 장치 및 개선사항 등을 제시하였다.

2.2. 검사 방법의 종류

(1) 휴대용 방사선 측정기(surveymeter)에 의한 검사 방법

방사선원을 피검사체에 조사시켰을 때 피검사체의

내부에서 균일하게 차폐체의 외부로 누설되는 방사선을 방사선 측정기로 방사선량을 측정하여 그 양의 대소로 차폐체의 건전성 유무를 검사하는 방법이다. 방사선량율과 차폐체의 두께에 따른 함수관계를 적절하게 이용하여 정확하게 평가할 수 있다. 선원의 전에너지에서 산란되어 감소된 에너지까지도 포함하여 측정되는 방사선량율로 계산된다. 따라서 비교 계산치와 실측치와는 많은 차이가 나지만, 상대비교 측정 방법으로 오차를 크게 줄일 수 있다.

(2) 방사능 측정기(counter)에 의한 검사 방법

방사선원을 피검사체에 조사시켰을 때, 이 방사선중 선택된 단일에너지의 방사선을 NaI섬광계수관이 부착된 섬광계수기⁵⁾로 방사능 양을 측정한다 다음 그 대소로 차폐체의 건전성을 검사하는 방법이다. 선택된 단일에너지의 누설방사선의 측정치와 차폐체의 두께와의 함수 관계를 이용하여 평가한다. 그 전에 먼저 기준차폐체에 의한 기준치를 결정한 후 검사하여야 정확한 평가를 할 수 있다. 휴대용 방사선 측정기와 방사능 측정기에 의한 검사 방법을 Table 2와 같이 비교할 수 있다.

Table 2. Comparison for methods of gamma scanning test

Contents	Test by Surveymeter	Test by Counter
Sources	High level Co-60 1600 Ci, 30 Ci	Low level Co-60 1 Ci, 5 Ci
Measure-ment	Radiation by Surveymeter(mR/h)	Radioactivity by NaI Sci. Counter(cpm)
Merit	Possible measurement in high level radiation	Low error Possible measurement in low leakage radiation
Defect	High error	Impossible measurement in high level radiation
Example	Radiation shielding barrier of Hotcell	Cask

3. 검사 장치

3.1. 검사 장치의 구조 및 특성

감마스캐닝검사 장치의 기본적인 구조는 선원이 있는 조사장치(irradiator), 방사선을 검출하는 측정장치(measuring system), 이들을 정확히 측정할 수 있

계 평형을 유지시켜 주는 평형연동장치(jig)로 구분할 수 있으며, 구조의 개략도는 다음의 Fig. 2와 같다⁶⁾.

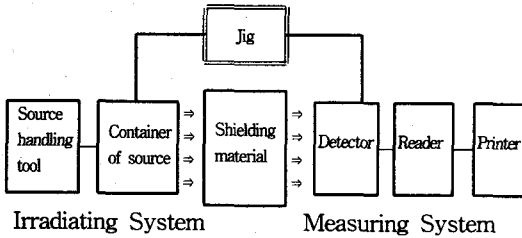


Fig. 2. Outline of gamma scanning test system

(1) 방사선 조사장치(irradiator)

방사선 조사장치는 방사선원과 방사선빔이 평형(alignment)을 유지하도록 하는 방사선빔 조준기(collimator)로 구성되어 있다.

방사선빔 조준기는 방사선을 정해진 구간의 일정한 방향으로만 조사되도록 한 것으로 Fig. 3과 같은 순서로 선원 보관용기(container)와 연결하여 제작되었다.

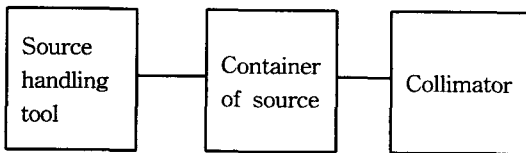


Fig. 3. Outline of irradiator

방사선 조사장치에는 선원의 종류에 따라 여러가지 차폐체를 구성하여 제작될 수 있으나 현재 국내에서 이용된 선원⁷⁾들은 3000Ci 이하의 Co-60가 내장된 방사선 조사장치(대단위용, 특수제작)와 20Ci 이하의 Co-60가 내장된 방사선 조사장치(소단위용, 비파괴검사용)가 있다.

(2) 측정 장치(measuring system)

측정장치는 NaI검출기(detector)와 계수기(counter)가 연결된 방사능 측정장치와 직접 측정할 수 있는 휴대용 방사선 측정기로 구분될 수 있다. 이 중 NaI검출기와 계수기가 연결된 경우는 다음의 Fig. 4와 같이 측정

장치가 구성되어 있다.

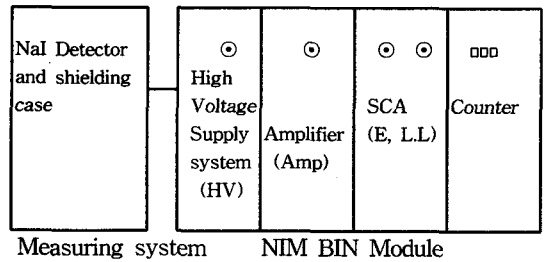


Fig. 4. Measuring system.

NaI검출기는 감마선 검출기로 저에너지에서 고에너지 영역까지 검출할 수 있다. 방사능 측정장치 검사법에서는 판독시 한정된 단일에너지만 선정하는 선택판(NIM BIN)에서 범위(에너지 차이- ΔE , 에너지 하한준위-LL등을 결정)를 정한 후, 그때의 방사능을 단일파고분석기(SCA)로 측정한다. 에너지의 범위를 선정하기 위하여 다중파고분석기(MCA)를 이용할 수도 있으나 검사시에는 직접 필요하지 않다.

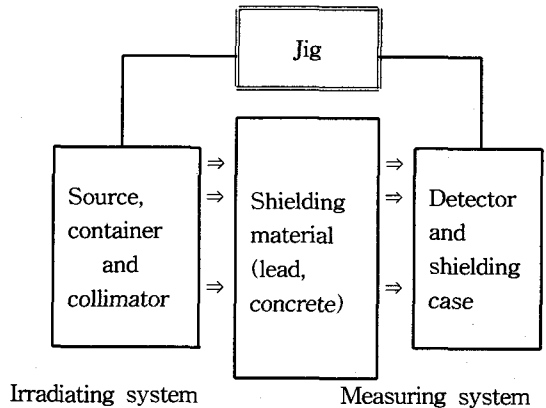


Fig. 5. Jig

(3) 평형연동장치(jig)

방사선원의 방사선빔과 검출기의 검출 위치가 서로 평형을 유지하기 위한 장치가 평형연동장치(jig)이다. 이 장치는 Fig. 5와 같이 방사선원이 있는 빔 조준기의 무게와 검출기 보호 차폐체의 무게로 수백 kg이상을 견딜 수 있으면서 쉽게 움직일 수 있는 것이어야 한다. 본 장치의 무게와 작업 환경 조건에 따

라 정밀도가 크게 좌우되므로 본 검사법에서 오차의 한계를 줄일 수 있는 역할을 한다. 그러므로 검사 대상에 따라 조건을 고려해야 하므로 매번 검사시 설계 제작하여야 할 것이다⁸⁾.

(4) 기준 차폐체(reference block)

차폐체의 성능을 상대평가하기 위하여 피검사체와 같은 재질로 기준차폐체를 제작하여야 한다. 이 기준 차폐체는 피검사체의 두께보다 대개 $\pm 20\%$ 정도 얇은 것에서부터 두꺼운 것까지 여러가지 차폐체를 만들어야 한다. 두께와 크기는 피검사체의 종류에 따라 다르다. 그 예는 다음의 Table 3과 같다⁹⁾

Table 3. Reference block

Type	Category	Sample thickness	Thickness interval	Example
Lead	140 -170mm	166mm	1mm	Lead thickness of Cask
Concrete	650-1200mm	800mm 900mm 1100mm 1200mm	50mm	Concrete thickness of Hot cell barrier

이 기준차폐체는 실제 검사 제품과 동일한 구조로 구성하여 측정하되 기준차폐체의 두께를 변화시키면서 두께별로 기준치를 설정하여야 한다. 기준차폐체에 대한 측정치는 검사 방법에 따라 방사선량율(mR/h)이나 방사능(cpm)을 측정하여 두께에 따른 기준치를 결정한다.

(5) 기타 필요한 장비

- 선원 이동 기구(source handling tool)

선원을 보관 용기에서 인출하여 빔 조준기까지 이동하는데 사용되는 기구이며 선원과 연결되는 고리부분, 이를 이동하는데 사용되는 10-20m의 긴 철사 부분, 감거나 밀어내는 회전장치로 구성되어 있다.

- 방사선방호장비(radiation protection equipment) 및 기타

개인 방사선 피폭선량 측정 평가용으로 방사선 안전관리상 필요로 하는 장비이다. 그 종류로는 포켓 선량계(PD), 열형광선량계(TLD), 필름배지(film badge) 등이 있다. 기타 방호장비로는 방호복 및 말단선량계(손목, 발목, 손가락 등)와 납치마 등이 이

용된다. 이외에 검사시 구비 조건으로 방사성동위원소의 이동사용 신고에 따른 장비의 구비나 방사선구역 표지판 등이 설치되어야 한다.

3.2. 검사 개발을 위해 앞으로 부가적으로 요구되는 장치

- (1) 선원의 조준기(alignment, collimator)

선원에 따라 개별적으로 차폐체를 갖춰진 용기로 조사됨으로 자동으로 조종되는 빔조준기를 제작하여야 한다.

- (2) 평형조정장치(jig)

피검사체의 종류에 따라 특별 제작되는 장치이기는 하나, 자동 조정 또는 자동 이동을 할 수 있게 설계 제작하여 다방면으로 쓸 수 있게 하여야 한다.

- (3) 측정 자료의 전산화

측정된 자료가 자동적으로 입력되어 계수치로 환산해서 두께를 나타내는 프로그램을 통해서 그 결과가 프린트로 인쇄되어 나오게 만들어진 자동시스템이 요구된다.

Table 4. Comparison for result of gamma scanning test

Manufacturer	Hyundai Heavy Eng. Co.	Korea Heavy Eng. Co.	Hyundai Constr. Co.	
Type	Cask	Cask	KMRR IMEF Hot cell barrier	
Material and thickness	Lead, 166mm	Lead, 166mm	Concrete 80, 90, 110, 120cm	
Method	Radioactivity measurement by counter	Radioactivity measurement by counter	Radiation measurement by surveymeter	
Sources	Co-60, 1.9Ci	Co-60, 1.14Ci	Co-60, 1600Ci, 30Ci	
Results	Error	1 mm	1 mm	5 cm
	Max. defect	14 mm	12 mm	30 cm

3.3. 실험적 결과

방사선 차폐체로서는 핵연료 운반용기(cask), 방사

성동위원소 분배, 저장 및 이용시설로 대단위 방사선 차폐를 요하는 장치나 시설이며, 대개 납으로 수십 mm 이상, 콘크리트로 1m 이상의 차폐를 요하는 것이다.

본 연구에서 검토 사용된 감마스캐닝 방법으로 검사대상을 비교한 결과 Table 4와 같이 되었다.

4. 평가 방법 및 개선 방안

4.1. 평가 방법

감마스캐닝의 최종 평가는 질량감쇄계수로 계산하여 이론과 실험적 결과를 비교하여야 하며 계산방법에는 직접 계산하는 방법과 컴퓨터 코드에 의한 방법이 있다. 즉, 평가 방법으로는 상대 평가 방법으로서 계산하는 방법, 그래프 이용 방법, 컴퓨터 계산 방법(MCNP code 등) 등이 있으며, 그래프 이용시에는 전자계산법인 Curve Fitting으로 그래프를 보완하여 계산하면 보다 정확히 결과를 평가할 수 있다¹⁰⁾

4.2. 평가 결과

검사 결과를 평가할 때 발생하는 오차는 측정오차로서 장치의 불안정, 측정기의 자체 오차에 의한 것과 계산 오차로서 입력인자의 불확실성 등에 기인하는 것이 있다. 또한 상대평가로서 기준차폐체에 의한 기준치 결정시 생기는 오차는 검사시의 피검사체와 동일조건으로 차폐체의 재질 및 차폐조건을 구성하여 측정하여야 오차를 줄일 수 있다.

평가 결과에서의 이상시 차폐체 결함 원인으로는 차폐체 두께 부족(얇음), 이물질 혼합, 금, 흠, 균열등에 의한 것이 있다.

4.3. 개발된 방법에서 요구되는 개선 방안

본 검사 방법에서는 측정장치와 평형연동장치(jig)의 정밀한 설계로 정확하게 이동하여야 하며, 측정장치의 정확한 측정과, 이에 따른 정확한 오차 평가가 요구된다. 또한 보다 개선된 방법으로는 자동이동 시스템 및 전산화된 계산장치를 갖춘 검사 조건으로, 개발된 컴퓨터 코드를 직접 이용할 수 있다면 가장 우수한 검사 방법이 될 것이다.

5. 결론

본 연구의 결론적인 사항은 다음과 같다.

- 1) GST방법은 휴대용 방사선 측정기(surveymeter)와 방사능 측정기(counter)를 이용한 두가지 측정 방법이 있다.
- 2) 평가 방법은 기준차폐체의 두께별 기준치를 비교하여 두께를 계산하는 것으로 기준치는 방사선량을 이용한 것과 방사능을 이용한 것이 있다.
- 3) 정확한 평가를 위해서는 정확한 평형연동장치(jig)를 제작하여 자동적으로 이동 측정되는 전자동시스템으로 검사가 이루어져야 한다.
- 4) 현재는 소규모이고 간헐적으로 이용되기 때문에 경제성이 없어 전자동시스템의 운영은 어려우나 충분한 업무량과 컴퓨터에 의한 검사 및 평가가 동시에 이루어 진다면 이상적인 평가방법이 될 것이다.

이상과 같은 사항을 수정하여 개발된 GST검사방법을 사용한다면, 구조물의 건전성검사시 비파괴검사방법의 하나로서 유용하게 사용될 것이다.

참고 문헌

1. "Radiological Health Handbook", U.S. Department of Health, Education and Welfare (1970)
2. H. Goldstein and J. E. Wilkins, Jr., "Calculation of the Penetration of Gamma Ray", NDA/AEC Report-3075, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. (1954)
3. A. B. Chilton, "Buildup Factor", in Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. 1, R. G. Jaeger(ed.), Spinger-Verlag, New, York (1968), Sec. 4.3.1.2
4. Frank. H. Attix, "Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry", John Wiley & Sons (1986)
5. Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons (1979)
6. Safety Analysis Report of the NAC-1, "Spent Fuel Shipping Cask", Nuclear Assurance Co.

(1975)

Finite Thickness", (1958)

7. 서경원의, "IMEF Hot Cell의 감마스캐닝테스트 기술지원", 한국원자력연구소 (1993)

10. "Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X-Rays and Gamm Rays of Energies up to 10 MeV", NCRP Report No. 49 (1979)

8. 서경원의, "Gamma Scanning Test", 한국원자력연구소 (1990)

9. ORNL-2195, "Concrete Radiation Effects of

A Study on the Gamma Scanning Test Used for Nondestructive Test Radiation Shielding Material

Kyung-Won Seo
Nuclear Training Center
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract As nuclear industry in Korea is being expanded, the number of users for radioisotope and radiation generators has been remarkably increased. As a result, radiation shielding problems for radiation safety have arisen as a question of great interest nowadays. In this report, gamma scanning test (GST), one of the nondestructive test methods of radiation shielding material was introduced and the review of the test method and its application were described. In addition for accurate evaluation of the test result, necessary basic equipments for the test and for improvement of the equipment were suggested. If the effective test method described above were widely and properly applied by GST related companies, the technology would be used effectively, as one of the safe nondestructive tests for radiation shielding material in the future.

(Received : June 22, 1995)