

Gamma Scanning Test에 의한 대단위 차폐체의 결함 평가 연구

이봉재, 서경원

한국원자력연구소 방사선안전관리실

요 약 본 연구에서는 비파괴검사 방법의 하나인 gamma scanning test에 의한 대단위 차폐체의 결함을 평가하는 방법을 제시하고 방사선 차폐를 해석하는 유용한 방법중의 하나인 Monte Carlo 코드로 이에 대한 검증하였다. Gamma scanning test로 차폐체의 결함을 평가하기 위한 모델은 원통형 차폐체를 대상으로 하였다. 먼저 방사성물질 운반용기에 대한 설계기준에 따라 기준차폐체를 설치하여 Co-60 선원과 섬광계수기로 기준치를 측정하고, 그 다음 실물의 원통형 차폐체를 측정하였다. 기준치로 원통형 차폐체의 납두께를 환산한 결과 결함두께는 최대 12mm로 평가되었다. 이를 검증하기 위한 MCNP 코드의 계산에서는 결함두께가 실험적 결과에 비해 4.1%에 해당하는 최대 11.6mm를 나타내었으며, 두 결과가 만족할 정도로 일치함을 보여주고 있다. 따라서 이러한 평가방법은 방사성물질을 사용하는 시설에 설치되는 대단위 방사선 차폐체나 대용량의 운반용기 차폐능 검사시 현장에서 적용시킬 수 있으며 측정치의 신뢰도를 제고할 수 있다. 앞으로 보다 정확한 측정을 위하여 차폐체의 두께 측정결과가 화면에 직접 표시되는 측정장치의 연구 개발이 요구된다.

1. 서 론

원자력기술이 발전함에 따라 방사성물질의 이용이 증가추세에 있으며 이러한 방사성물질을 사용하는 시설이나 운반하는 용기의 사용 또한 급증하고 있는 실정이므로 방사성 물질로 인한 재해를 방지하기 위하여는 시설이나 운반용기의 방사선 안전성 확보가 필수적이다. 방사성물질을 사용하는 시설이나 운반용기의 방사선 차폐체는 콘크리트, 철, 납 등의 비중이 큰 물질을 이용하여 설치되며 대부분의 경우 일반적인 차폐구조 검사는 최근에 개발된 여러가지 비파괴검사 방법으로 가능하나 대단위 방사선 차폐체의 구조로 대용량의 차폐능을 갖는 복합된 여러 물질이 사용된 구조물의 검사는 공식적으로 국내에서 시행되지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 대단위 방사선 차

폐체에 대한 검사방법의 하나로 방사선원을 이용하여 구조물을 검사하는 gamma scanning test로 차폐체의 결함을 평가하는 방법에 대하여 고찰하였는데, 이는 감마선을 방출하는 방사선원을 피검사물에 조사시켜 투과된 방사선량을 측정하여 차폐체의 두께에 따른 선량의 변화를 비교함으로써 차폐체의 결함을 평가하는 방법이다. 설계 구조물과 같은 재질로 기준이 되는 차폐체를 두께별로 제작하고 차폐체의 외부로 투과되는 방사선량을 섬광검출기를 이용하여 측정한 후 이 측정치를 기준치로 하여 실제 차폐체의 측정치를 상대적으로 비교하면 구조물에 대한 차폐체의 두께를 결정하거나 차폐체의 건전성을 확인할 수 있다. 또한 이를 검증하기 위한 방법으로 미국 Los Alamos National Laboratory에서 개발한 Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code(MCNP)¹⁾를 사용하여 구조물의 차폐능을 해석

함으로써 이러한 방사선 차폐체의 결함 평가 방법을 검증하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 차폐이론

무한공간의 균일하고 등방성 매질에 어떤 입자가 상호작용없이 거리 X에 도달할 확률을 P(x), x+dx 거리에 도달할 확률을 P(x+dx)라 하고, dx거리에 상호작용할 확률을 μdx라고 하면 상호작용을 하지 않을 확률은 1-μx가 되어 다음의 식이 성립한다.

$$P(x+dx) = P(x) (1-\mu dx) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dP(x)}{dx} = -\mu P(x) \dots\dots\dots (2)$$

경계조건이 P(0)=1이면 (2)식 미분방정식의 해는 다음식으로 주어진다.

$$P(x) = e^{-\mu x} \dots\dots\dots (3)$$

(3)식을 단일에너지의 Parallel Beam에 적용하면 거리 X에서 비산란입자의 선속(flux) φ⁰(x)는 X=0에서의 원래의 선속 φ⁰(0)와 e^{-μx}의 곱으로 다음과 같이 표현된다.

$$\phi^0(x) = \phi^0(0) e^{-\mu x} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 μx는 매질의 평균자유행로(mean free path : mfp)를 나타내는 두께이다. 매질이 비균일성이면 μ는 X의 함수가 되므로 (2)식의 해는

$$P(x) = \exp\left[-\int_0^x \mu(x) dx\right] \dots\dots\dots (5)$$

가 되므로 균일매질에서의 감쇄함수는 비균일매질에도 동일하게 적용된다. 따라서 비균일 차폐매질에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$\phi^0(x) = \phi^0(0) \exp\left[-\sum_i \mu_i x_i\right] \dots\dots\dots (6)$$

비산란성분과 매질과의 상호작용으로 인한 산란 성분 및 부수적인 방사선을 고려하면 거리 X에서의 총선속은

$$\phi(x) = \phi^0(x) = B(x)\phi^0(0) \exp\left[-\sum_i \mu_i x_i\right] \dots (7)$$

로 된다. 여기서 B(x)는 축적인자(buildup factor)로서 거리 X에서의 총선속 φ(x)와 비산란선속 φ⁰(x)의 비로서 정의되고 감쇄매질의 원자수 Z, 단일에너지 E₀, μx의 함수인 B(Z, E₀, μx)로 표시된다. 축적인자는 수송방정식(transport equation)의 Moment 해²⁾나 Monte Carlo 해, 각분할법(discrete ordinate method)³⁾ 등에 의한 정밀한 계산으로 얻어질 수 있으며 일반적인 차폐계산에는 감쇄매질과 단일에너지에 대한 μx의 해석함수에 근사시킨 실험식⁴⁻⁶⁾이 많이 이용되고 있다.

2.2. Monte Carlo Method

방사선 차폐 문제에서 가장 널리 사용되는 Boltzmann 수송방정식은 속밀도에 대한 일반적인 표현으로 다음과 같다.

$$\Omega \cdot \nabla \phi(r, E, \Omega) + \mu(r, E)\phi(r, E, \Omega) = \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} d\Omega' \mu_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega)\phi(r, E', \Omega) + S(r, E, \Omega) \dots\dots\dots (8)$$

여기서 φ(r, E, Ω)는 미분에너지와 방향성을 갖는 속밀도로서 단위시간에 방향 Ω에 수직한 단위면적에 단위 입체각내로의 이동방향과 단위에너지를 갖는 r지점에서 기대되는 입자의 수를 나타낸다. 위식의 좌변에서 Ω · ∇φ(r, E, Ω)는 단위시간에 체적 V를 나가는 순입자의 수이고, μ(r, E)φ(r, E, Ω)는 단위시간에 체적 V에서 충돌을 일으키는 총입자의 수이며, 우변에서 ∫₀[∞] dE' ∫_{4π} dΩ' μ_s(r, E' → E, Ω' → Ω) φ(r, E', Ω)는 단위시간에 체적 V에서 입자와 매질의 상호작용에 의하여 생성되어 에너지 dE를 갖고 방향 dΩ로 움직이는 이차입자의 수이고, S(r, E, Ω)는 외부 또는 선원자체에 의하여 생성된 단위시간에 에너지 dE를 갖고 방향 dΩ로 움직이는 입자의 수를 나타낸다.

위의 Boltzmann 수송방정식의 해를 구하기 위하여 사용되는 Monte Carlo 방법은 어떤 매질안에서 입자의 운동을 미시적 입장에서 임의의 변수(random variables)를 사용하여 추적하면서 해를 구하는 통계적 방법으로서 현재 대형 선원 또는 복잡한 기하학적 구조물에 대한 방사선 차폐해석 분야에 널리 이용되고 있는 방법이다. 이론적 배경은 선원항

의 임의의 지점에서 에너지를 가진 하나의 입자(history)를 탄생시켜 그 입자가 매질안에서 일으키는 운동의 방향, 형태를 추적하여 그에 관한 여러가지 정보를 분석하여 관심있는 값을 구하는 것이다.

선원항에서 탄생한 입자 추적과정(random walk routines)을 도중 기하학적 구조에서의 이탈(escape), 에너지 한계(energy cut off), russian roulette, 또는 시간 종속인 경우에는 age cut off 등의 option으로 입자가 소멸된다. MCNP 코드는 크게 나누어 입자추적 과정과 입자 분석과정으로 나누어진다. 입자추적과정에서 만들어진 정보는 입자분석과정을 거쳐 선속밀도, 선량률, 입자커런트 등의 값이 통계적 방법에 의해 계산된다.

3. 실험

3.1. 방사선원의 선정

차폐체의 차폐능을 검사하는데 사용되는 감마 방사선원에는 여러가지의 핵종이 있겠으나 다음과 같은 조건을 고려하여 비파괴검사에서 보통 사용되는 Ir-192, Cs-137, Co-60을 사용한다. 첫째, 감마선을 측정할 때 peak를 찾기 쉽고, 산란되지 않고 직접 방사되는 선량이 충분하여야 비례성이 있으므로 에너지가 높아야 하고, 둘째, energy peak의 수가 너무 많으면 측정치의 비교가 어려우므로 energy peak의 수가 적어야 하며 세째, 반감기에 따라서 방사능이 감소하므로 사용중 감소된 방사능이 무시될 정도로 반감기가 충분히 길어야 한다.

본 실험에서 사용될 수 있는 감마 방사선원에 대한 자료⁷⁾를 NCRP report No. 49에서 인용하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1에 의하면 Cs-137은 반감기는 길고 단일 energy peak이지만 energy가 낮고, Ir-192는 반감기가

비교적 짧으나 energy peak가 많아 부적합하며, Co-60이 반감기나 energy 측면에서 본 실험에 가장 적합한 것으로 나타났다.

투과되는 감마 방사선은 차폐체의 두께, 모양, 재질 등에 따라 다르므로⁸⁾ 적절한 방사능을 갖는 방사선원을 선정하여야 한다. 방사능양이 적을 때에는 차폐체를 투과해서 나오는 방사선량이 미약하여 측정되지 않고, 너무 크면 작업자의 과피폭이 발생할 우려가 있으므로 측정하기 어렵다. 따라서 차폐체의 차폐능을 고려하여 적절한 방사능을 갖는 방사선원을 선택하여야만 한다. 위와 같은 조건을 고려하여 본 연구에서는 Co-60, 7.11×10^{10} Bq를 사용하였다.

3.2. 기준치의 결정

본 연구에서 사용된 측정장치의 검출기는 NaI 3" × 3" 섬광검출기(scintillation detector, Model 802-4, CANBERRA)이며 이 검출기에 입사한 감마 방사선은 광전증배관에서 증배되고 증폭기에 입력된다. 또한 증폭기에서 증폭된 출력은 다시 에너지별로 구분하여 계측하는 단일과도분석기(single channel analyzer : SCA, Model 2030, CANBERRA)로 입력되어 계측되며 그 계수치는 계수율계와 기록계에 출력되도록 Fig. 1과 같이 계측장치를 구성하였다.

평가대상 차폐체는 원통형으로서 스텐레스+납+스텐레스의 구조로 차폐체를 형성하고 있다. 기준치

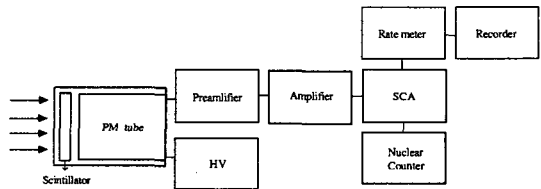


Fig. 1. Counting system using a scintillation detector.

Table 1. Gamma-ray source.

Radionuclide	Half Life	Gamma Energy (MeV)	Specific Gamma-Ray Constant (Rcm ² per mCi h)
Cs-137	27 y	0.66	3.2
Ir-192	74 d	0.13 to 1.06	5.0
Co-60	5.24 y	1.17, 1.33	12.8

를 측정하기 위하여 설계 기준과 같은 재질로 원통형 기준 차폐체를 설치하였다. 차폐체중 납두께의 변화에 따른 계수치를 측정하기 위하여 납을 두께별로 제작하고 Fig. 2와 같이 전체적인 실험장치를 설치하였다. Co-60 선원은 한쪽 방향으로 조사되도록 collimator에 넣고 기준차폐체는 원통형 차폐체의 구조로 배열하고 그 다음에 섬광계수기와 계측장치가 설치되었다. 섬광검출기는 다른 구조에서 산란된 감마선의 영향을 감소시키기 위하여 4cm 두께의 원통형 납으로 차폐하였다.

Table 1의 에너지를 방출하는 Co-60 방사선원은 차폐체에 의한 산란으로 인하여 에너지 스펙트럼이 넓게 분포하게 된다.⁹⁾ MCNP의 계산결과를 비교하기 위하여 다중과도분석기(multi channel analyzer : MCA, Model 35 PLUS, CANBERRA)로 스펙트럼을 분석하여 Co-60 방사선원에 대한 섬광검출기의 효율을 결정하고, 측정을 간결하게 하기 위하여 Fig. 1의 계측장치중 단일과도분석기의 window와 low level를 조정하여 채널별 계수치를 측정하고 에너지가 가장 높은 1.33MeV만을 측정하도록 설정한다. 이것은 차폐체를 투과한 감마선은 산란성분과 비산란성분으로 구성되는데 직접 투과해 나오는 비산란 방사선만을 측정하기 위한 것이다. 차폐체중의 납의 두께를 설계 기준치를 중심으로 1mm씩 증감하여 납두께에 따른 계수치를 얻었다.

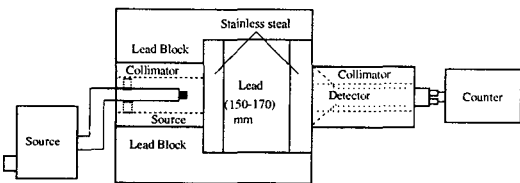


Fig. 2. Equipment for measurement of reference values.

3.3. 원통형 차폐체의 측정 장치

원통형 차폐체의 크기는 내경 10cm, 외경 46.12 cm, 높이 100cm이며 이에 대한 측정장치는 Fig. 3과 같다. 감마선이 한쪽 방향으로 조사되도록 선원에는 외경 10cm, 높이 15cm인 원통형의 납 차폐체를 사용하여 원통 외부 표면을 중심으로 5cm×5cm의 정

사각형의 조사창을 만든 Fig. 4와 같은 collimator를 설치하였다. 또한 collimator의 중심에 선원이 잘 위치할 수 있도록 guide로서 직경 1.28cm, 두께 2mm의 동관을 설치하였다. 측정대상 원통형 차폐체는 5cm씩 회전할 수 있도록 하고 그 외부 표면을 5cm×5cm로 구획한다. 섬광검출기는 내부 선원과 평행하게 유지하도록 고정하였다. 검출기의 신호는 계측장치를 통하여 계수기와 계수율계에서 동시에 측정되며 기록계에 연속 기록된다. 단일채널분석기는 기준

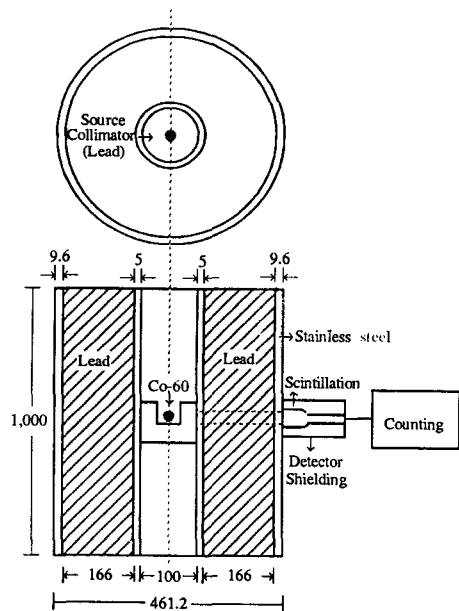


Fig. 3. Gamma scanning system of the cylindrical shielding.

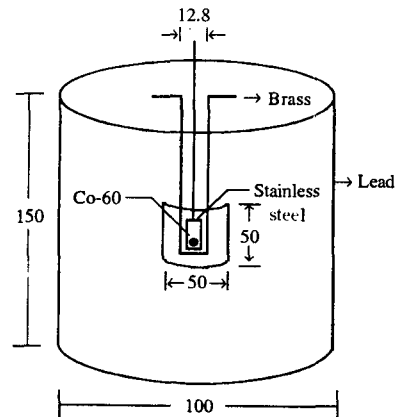


Fig. 4. Collimator of source.

Table 2. Reference values for lead thickness of reference shielding.

Thickness of Lead (mm)	Counts	
	Total Counts	Counts/mm
151	8560	470
152	8090	460
153	7630	450
154	7180	440
155	6740	430
156	6310	420
157	5890	410
158	5480	400
159	5080	390
160	4690	380
161	4310	370
162	3940	360
163	3580	350
164	3230	340
165	2890	330
166	2560	320
167	2240	310
168	1930	300
169	1630	290
170	1340	280

차폐체의 측정시와 같은 조건으로 설정하고 원통형 차폐체를 회전시키면서 각 구획별로 측정한다.

4. 전산모의

기하학적으로 복잡한 구조물에 이용하고 있는 MCNP의 계산에는 다상 구조물의 3차원 모델을 사용할 수 있으며 여기서 사용한 기하학적 모델은 Fig. 3 과 같은 원통형이다. 따라서 원통에 대한 Boltzmann 의 수송방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi(r, E, \Omega) drdEd\Omega = \int_{r_0}^{r_0+t_0} dr' \int_0^{E_s} dE' \cdot \int_{4\pi} d\Omega' (\gamma', E', \Omega') \mu_s(\gamma' \rightarrow \gamma, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) drdEd\Omega + S(\gamma, E, \Omega) drdEd\Omega \dots\dots\dots (9)$$

여기서 r_0 는 원통의 내부직경, t_0 는 원통형 차폐체의 두께, E_s 는 산란된 에너지를 나타낸다. μ_s 와 S대신에 임의의 양함수 $\bar{\mu}_s$ 와 \bar{S} 를 사용하면 위식은 다음과 같이 된다.

$$\bar{\phi}(r, E, \Omega) = \int_{r_0}^{r_0+t_0} dr' \int_0^{E_s} dE' \int_{4\pi} d\Omega' \bar{\phi}(r', E', \Omega) \bar{\mu}_s(r' \rightarrow r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) + \bar{S}(r, E, \Omega) \dots\dots\dots (10)$$

위식의 해를 구하기 위한 MCNP 계산의 개략적인 흐름도는 Fig. 5와 같으며 본 계산에서는 감마선의

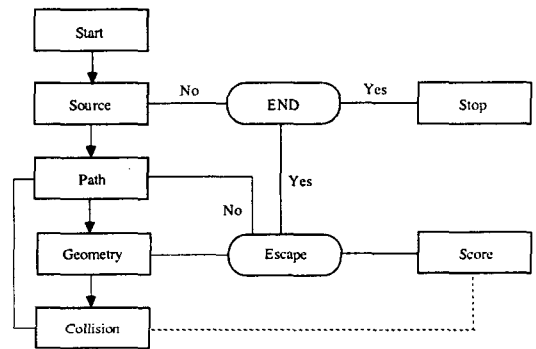


Fig. 5. Simplified flow diagram for a Monte Carlo calculation.

예상값(importance)^{10,11)}를 사용하였다. 위상공간 임의의 점에서 입자의 예상값은 입자가 생성될 기대치와 같은 것으로서 위상공간을 많은 cell로 세분하였을 때 각 셀의 예상값은 셀을 떠난 후 한 입자에 의해 생성되는 기대 값이다. 편차감소 기법은 기하학적 분리와 roussian roulette을 이용하였으며 이 기법은 기하학적 구조 전체를 셀로 구분하며 이 셀들에 예상값을 부여하고 셀 m에서 셀 n으로 넘어갈 때 $V=In/Im$ 을 계산하는 것으로서, $V=1$ 이면 입자 수송이 계속되고, $V<1$ 이면 입자에 roussian roulette이 적용되며, $V>1$ 이면 입자가 $V=In/Im$ 트랙으로 splitting하는 것이다. Co-60의 에너지 스펙트럼을 선스펙트럼으로 선정하였으며 선원의 확률 분포는 가우스의 확률분포식이 적용되었으며 에너지 분포별 감마선량을 환산인자로서는 ANSI 자료¹²⁾가 이용되었으며 출발입자수는 5000개로 선정하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 원통형 차폐체의 중심

Table 3. Material compositions of cylindrical shielding.

Material	Density (g/cm ³)	Element	Atomic Number	Nominal Density (g/cm ³)
Source	8.9	Co	27	8.9
lead	11.35	Pb	82	11.3
Stainless Steel	8.0	C	6	6.4×10^{-3}
		Si	14	0.08
		Mn	25	0.16
		Ni	28	1.12
		Mo	42	2.40
Brass	8.47	Fe	26	4.95
		Cu	29	5.17
		Zn	30	3.12
		Pb	82	0.08
		Sn	50	0.08
Void(Air)	1.293×10^{-3}	Al	13	0.013
		C	6	1.293×10^{-7}
		N	7	1.013×10^{-3}
		O	8	2.771×10^{-4}
		Ar	18	1.202×10^{-5}

축으로 부터 스텐레스, 납, 스텐레스 순서로 차폐물질이 구성되어 있다. 감마선원항은 Table 1의 붕괴 에너지를 갖는 Co-60인 점선원으로서 선원강도는 $7.11 \times 10^{10} \text{Bq}$ 이다. 이 선원은 스텐레스가 이중으로 캡슐된 끝부분에 위치하고 캡슐내의 선원은 collimator의 내부 중심에 위치한다. 원통형 차폐체의 중심 위치를 3차원 직교 좌표(x, y, z)의 원점(0, 0, 0)으로 가정하였으며 Co-60, 스텐레스, 납, 주석, 황동의 구성원소별 부분밀도는 Table 3과 같다.

5. 결과 및 고찰

차폐체의 결함두께를 측정하기 위한 감쇄곡선은 Table 2에서 Fig. 6과 같이 얻어졌으며 Fig. 6에 의하면 기준차폐체 166mm중 납의 두께가 1mm 변화 하여도 계수치의 변화를 측정할 수 있다는 것을 알 수 있으며 계수치가 납두께에 따라 지수함수적으로 감소하는 것으로 보아 이론과 일치함을 보여주고 있다. 따라서 이것은 평가기준치로서 Table 2의 값

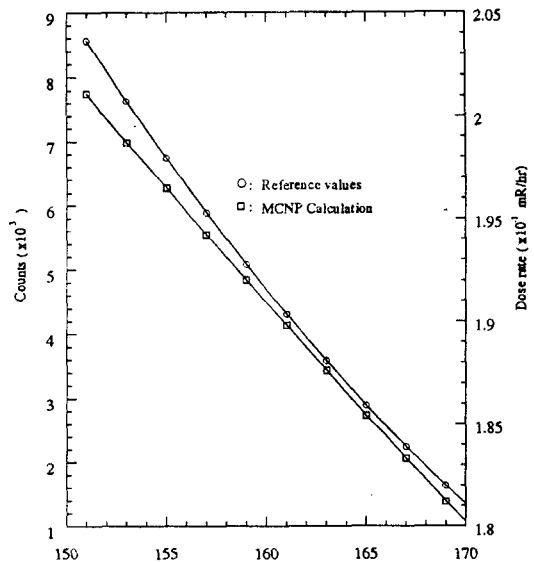


Fig. 6. Attenuation curve of reference values and dose rate.

을 사용할 수 있다는 것을 나타내 주는 것이다.

본 연구에서 gamma scanning test에 의한 실물의 원통형 차폐체의 측정결과를 평가기준치로 평가한 납두께중 최소로 나타난 두께는 154mm였으며, 이것은 설계기준 납두께 166mm와 비교하여 보면 납의 결합두께가 12mm임을 나타내는 것이다. 이처럼 보수적으로 고려한 실물의 원통형 차폐체의 납두께는 설계기준 납두께 166mm의 7%에 해당하며 차폐체 외부의 방사선량이 방사선 안전성 측면에서 고려된 설계조건을 만족함과 동시에 IAEA의 수송 규정¹³⁾과도 부합하는 것으로 나타났다.

섬광검출기의 효율을 결정하기 위하여 표준선원을 이용하여 다중과고분석기로 측정된 결과 Co-60 1.33MeV에 대한 검출기의 효율은 1.09%였다. 이 효율은 원통형 차폐체를 측정된 계수치를 선량률로

Table 4. Lead thickness vs dose rates resulting from MCNP calculation of cylindrical shielding using workstation(Model 715/50, HP).

Thickness of Lead (mm)	Dose rate(mR/h)
151	2.011×10^{-1}
152	1.998×10^{-1}
153	1.987×10^{-1}
154	1.976×10^{-1}
155	1.965×10^{-1}
156	1.953×10^{-1}
157	1.942×10^{-1}
158	1.931×10^{-1}
159	1.920×10^{-1}
160	1.909×10^{-1}
161	1.898×10^{-1}
162	1.887×10^{-1}
163	1.876×10^{-1}
164	1.865×10^{-1}
165	1.854×10^{-1}
166	1.844×10^{-1}
167	1.833×10^{-1}
168	1.823×10^{-1}
169	1.812×10^{-1}
170	1.802×10^{-1}

환산하는데 이용된다.

검증하기 위한 MCNP 계산에서는 원통형 차폐체를 측정할 때와 같이 납두께를 1mm씩 변화시키면서 선량률을 계산하였고, Table 4와 같은 납두께에 따른 선량률의 변화를 얻었다. Table 4에서 얻은 감쇄곡선을 기준치 감쇄곡선과 함께 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 의하면 기준치에 의한 감쇄곡선과 MCNP 계산에 의한 감쇄곡선이 같은 추이를 나타내고 있으며 이것은 Table 2의 기준치가 원통형 차폐체의 납두께를 평가하는 평가기준치로서 사용될 수 있음을 입증하여 주는 것이다.

측정된 검출기의 효율로 원통형 차폐체를 측정된 계수치를 선량률로 환산하고 MCNP 계산결과인 납두께의 변화에 따른 선량률을 이용하여 원통형 차폐체의 납에 대한 결합을 두께로 환산하여 계산한 결과 최소 납두께는 144.6mm를 나타내었으며, 따라서 결합두께는 최대 11.6mm로 평가되었다. 이것은 평가기준치로 평가한 최대 결합두께와 4.1% 범위에서 일치하는 것이다.

6. 결 론

본 연구에서 gamma scanning test에 의한 대단위 차폐체의 결합두께를 평가하는 기술을 확립하기 위하여 원통형 차폐체를 대상으로 실험 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 결합을 평가하려는 대상 차폐체의 두께에 따라서 감마 방사선원의 핵종 및 그 방사능량이 적절한 것을 선정하여야 실측시 정확한 자료를 얻게 된다.
- (2) Gamma scanning test로 차폐체의 결합을 평가하기 위하여 기준차폐체를 제작하여 평가기준치를 결정하고 이것으로 실제 차폐체의 결합을 평가하는 방법을 확립하였다.
- (3) 방사선차폐 해석 코드인 MCNP코드로 계산한 결과로 원통형 차폐체의 결합두께를 환산하고, 평가기준치로 계산한 결합두께를 비교하여 두 값이 일치함을 얻었다. 이러한 결과는 본 연구에서 수행한 실험의 신뢰성을 검증하여 주는 것이며, 여러가지 기하학적 구조의 차폐체에도 적용될 수 있을 것이라 생각된다.

- (4) 본 gamma scanning test로 대단위 차폐체의 결함두께를 측정하여 방사선 차폐체의 결함 평가시 현장에서 정확히 평가할 수 있음을 확인하였다. 그러므로 이러한 검사방법은 대단위 차폐체를 검사하는 비파괴검사 현장에서 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Briesmeister, J. F. (ed.) MCNP—A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport, Version 3A, Los Alamos National Lab. (1989)
- 2) U. Fano, L. V. Spencer, and M. J. Berger, "Penetration and Diffusion of X Ray," in Handbuch der Physik, Vol. 38/2, S. Flugge(ed.), Springer-Verlag, Berlin (1959)
- 3) J. J. Duderstadt and W. R. Martin, "Transport Theory", Wiley, New York (1979)
- 4) H. Goldstein and J. E. Wilkins, Jr., "Calculations of the Penetration of Gamma Ray." NDA/AEC Report NYO-3075, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C. (1954)
- 5) A. B. Chilton, "Buildup Factor," in Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. I, R. G. Jaeger(ed.), Springer-Verlag, New York (1968), Sec 4.3.1.2
- 6) M. J. Berger, "Effects of Boundaries and Inhomogeneities on the Penetration of Gamma Radiation," Report NBS-4249, U. S. National Bureau of Standards, Washington, D. C. (1956)
- 7) "Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X-Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV, NCRP Report No. 49 (1979)
- 8) A. B. Chilton & J. Kenneth Shultis, "Principles of Radiation Shielding," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1984)
- 9) Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiles & Son (1979)
- 10) T. E. Booth and J. S. Hendricks, "Importance Estimation in Forward Monte Carlo Calculation," Nucl. Tech./Fusion, 5, 90 (1984)
- 11) T. E. Booth, "A Sample Problem for Variance Reduction in MCNP," LA-10363-MS, Los Alamos National Laboratory (1985)
- 12) "American National Standard Neutron and Gamma Ray Flux-to-Dose Rate Factors," ANSI/ANS-6.1.1 Working Group, Am. Nucl. Soc. (1977)
- 13) Safety Analysis Report of the NAC-1, "Spent Fuel Shipping Cask," Nuclear Assurance Co. (1975)

A Evaluation of Shielding Deficiency by Means of Gamma Scanning Test

B. J. Lee and K. W. Seo
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract In this paper the method to evaluate shielding deficiency by gamma scanning test was presented and verified theoretically by Monte Carlo code which is one of the best effective method for radiation shielding calculation. The cylindrical shielding model was selected to evaluate shielding deficiency by gamma scanning test. First, the reference shielding according to the design requirement of cask was fabricated specially and reference values were measured with Co-60 source and scintillation detector. As a result with which calculated the reference values, it is shown that maximum deficiency thickness for lead of true cylindrical shielding model was 12mm. To verify this, thickness of lead was calculated by MCNP code and maximum deficiency thickness was 11.6mm. The experimental result obtained by the use of reference shielding was in good agreement with the theoretical result within 4.1%. So, this method can be applied to inspect the shielding ability for great shielding or cask which the radioactive material is used. To perform measurement more exactly, the further work on the development of measuring equipment to display the results on the screen will be required.

(Received : June 27, 1994)