

## Monte Carlo 방법을 이용한 밀도측정계기의 기하학적 배치

최원철, 이석근, 황주호  
경희대학교

전홍배, 양세학, 권정광  
(주) 도화종합기술공사

### 요약

직접적 또는 실험적인 방법들에 의한 밀도측정계기의 설계는 많은 시간의 소비와 인적, 물적인 비용의 소모가 요구되기 때문에 계산된 속(flux) 분포에 근거한 비실험적인 방법들이 일반적으로 사용된다. 이전에는 2그룹 확산방정식으로 밀도측정계기를 설계해 왔으나 복잡한 기하학적 모사에서의 한계로 인하여 계산시간의 문제로 도외시되었던 몬테카를로(Monte Carlo) 방법이 컴퓨터 기술의 발전으로 유용하게 되었다. 본 연구에서는 3차원 모델링이 가능하고 검증용 프로그램으로 알려져 있으며 몬테카를로방법을 사용하는 MCNP 코드를 이용하여 밀도측정계기의 기하학적 배치를 제시하고자한다.

### 1. 서론

현재 우리 나라에서 건설되었거나 건설중인 토목구조물중 국제공항, 고속전철 및 고속도로 등 국가의 주요산업기반 시설물의 건설에는 방대한 양의 흙이 사용되며 부지위 흙의 다짐조절은 구조물의 안정성과 내구성 향상에 매우 중요하게 된다. 그러나 현재 시행되고 있는 흙의 다짐관리를 위한 주요 시험항목중 실험실 다짐시험(KSF 2312), 모래치환법에 의한 밀도시험은 시험후 결과가 나오기까지 많은 시간이 소요되며 시험에 상당한 노력이 요구될 뿐만 아니라 충분한 횡수로 시험을 수행할 수 없기 때문에 신뢰도와 정확도가 문제시되고 있다.

최근 선진국에서는 방사성 동위원소를 사용하여 보다 간편하고 정확하게 흙의 밀도를 측정할 수 있는 계기를 개발하여 사용하고 있다. 방사성 동위원소 계기는 같은 측정위치에서 몇번이라도 반복측정이 가능하며, 측정소요시간이 1분 정도로 매우 짧아 현장에서 바로 확인할 수 있어서 유용하다. 그러나 이전까지 우리 나라에서는 방사성 동위원소를 이용한 밀도측정계기를 개발한적이 없으며 외국산 방사성 동위원소 계기를 도입하여 이용코자 하였으나 국내방사능 규제법의 엄격한 관리와 계기의 현장적용방법에 대한 연구미흡과 계기 사용시의 지침 및 기준 등이 마련되지 않음으로 이용하지 못하였으며 현재 전통적인 시험방법을 답습하고 있는 실정이다. 본 연구는 향후 방사성 동위원소를 이용하여 밀도를 측정할 수 있는 계기를 개발할 때에 기준이 될 수있는 설계기준을 몬테카를로방법을 이용하여 제시하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 계산코드

몬테카를로기법은 무작위적으로 발생하는 현상의 해석에 이용되며 난수를 이용하여 인위적으로

표본을 추출함으로써 무작위적으로 진행되는 과정을 모사하고 이 과정에서 얻어지는 표본들의 정보를 수집·추정하는 방법이다<sup>(1)</sup>.

몬테카를로는 2차 대전중 미국 Los Alamos 에서 Fermi, Von Neumann, Ulam 등에 의해서 개발 되었으며 MCNP(Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code)는 이곳에서 1977년에 개발되었고, 1986년에 대형컴퓨터용으로 MCNP3가 개발되어 사용되어 오다가 최근 들어 PC의 기능이 향상됨에 따라 1993년에 이르러서는 MCNP4A version 까지 발표되었다<sup>(2)</sup>.

MCNP코드는 물리실험과 원자로 설계, 핵안전장치, 방사선차폐, 그리고 핵측정장치의 설계, 보전물리, 방사선 선량측정, 방사선 손상 연구등 다양한 분야에 활용되어 왔다. MCNP는 연속에너지를 가지고 일반화된 기하학적 구조에 관련된 시간에 의존하는 중성자/광자 에대한 몬테카를로수송 코드이다. MCNP 는 중성자 입자 수송문제를 풀며 다음의 3가지 modes, 즉, 중성자만 수송, 광자만 수송, 또는 중성자와 광자가 복합된 수송(여기서 광자는 중성자 상호작용으로부터 생성된 것)에 사용된다. 중성자 에너지범위는  $10^{-11}$ MeV~20MeV이며 광자에너지 범위는 1keV~100MeV이다. 본 연구에서는 가장 최신 version으로 알려져있는 MCNP4A를 사용하여 밀도 측정계계의 기하학적 배치를 하고자 한다<sup>(3)</sup>.

## 2.2 밀도측정원리<sup>(4)</sup>

RI를 이용한 밀도 측정은 선원으로부터 방출된  $\gamma$ 선이 흡수를 통과하면서 감쇄되고 이 감쇄된  $\gamma$  선을 검출부에서 감지함으로 이루어진다.  $\gamma$  선의 특성은 전하나 질량을 가지고 있지 않으나, 매질속으로 깊이 파고드는 투과력을 가지고 있어 흡수를 통과할 때 흡의 구성 원자와 충돌하여 그 에너지가 크게 손실된다. 선원과 일정한 거리가 떨어진  $\gamma$  선 검출부에서 감지되는  $\gamma$  선의 수는 흡의 흡수능력과 RI계기의 형상에 따라 변한다. 같은 계기를 사용할 경우 RI계기의 형상은 일정하므로 변수는 흡의  $\gamma$  선 감쇄능력이 된다. 이 감쇄능력은 흡의 밀도와 흡을 구성하고 있는 원소들의 원자량에 대한 원자번호의 비에 따라 변화한다. 토질내에 있는 대부분의 원소들은 원자량에 대한 원자번호의 비가 약 1/2이 되는 것으로 보고되어 있다(표.1). 따라서 흡의 밀도와 검출부에서 감지된  $\gamma$  선 사이에는 일정한 관계가 성립하게 된다.

투과형  $\gamma$  선밀도계기는  $\gamma$  선원을 선단에 넣은 선원봉을 지중에 소정의 심도까지 삽입해서 지표면에 놓여있는 검출기에 입사하는 투과 $\gamma$  선의 강도( $\gamma$  선의 개수)로부터 물질의 밀도를 구하게 된다. 검출기로 직접 입사하는  $\gamma$  선속과 물질의 밀도와의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n = n_0 \cdot B \cdot e^{-\phi \ell \rho}$$

where  $n_0$  : 밀도가 0인 밀도측정계기의 계수율

$n$  : 밀도측정계기의 계수율

$B$  : Buildup 계수

$\ell$  : 선원과 중심사이의 거리(cm)

$\phi$  : 질량흡수계수

$\rho$  : 흡의 밀도

Buildup계수는 감쇄거리( $\phi, \ell, \rho$ )의 함수이고 또 검출관의 종류와 치수에 따라 달라지므로 일반적으로 정의하기는 어렵다. 그런데 질량흡수계수  $\phi$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\phi = N_0 \times \frac{\sigma}{A}$$

where  $N_0$  : 아보가드로수

$A$  : 원자량

$$\sigma = \sigma_p \cdot e + \sigma_c$$

일반적으로 흡을 구성하는 원소는 규소, 산소가 주를 이루며 비교적 가벼운 핵에 한하지만 흡

에 따라서 그 구성비는 다르다. 따라서 매질의  $\rho$ 는 토질의 종류에 따라서 변할 가능성이 있다. 그런데 그림.1에서와 같이  $\gamma$ 선의 에너지가 0.2-0.3MeV의 범위에 있어서 Compton산란 대해서 비교하면 전자 1개당 Compton산란 단면적을 S로 하면  $\sigma_c = SZ$ 의 관계가 성립한다. 따라서 광전효과가 무시 가능한 에너지 범위에서는 질량흡수계수는  $\rho = N_0 \cdot S(Z/A)$ 에 의해서 주어진다. 혼합매질에 대해서는 각 원소의 함유비율을 고려하여 질량흡수계수가 구해진다.

흙중의 주요원소의 Z/A의 수치는 표.1과 같이 다른 원소의 약 2배에 달하는 수소원소를 제외하면 모든 원소의 값은 비슷하다고 할 수 있다. 흙중의 수소는 물분자(H<sub>2</sub>O)의 화합체로서 존재하고 있기 때문에 이 점을 고려하면 다른 원소와 큰 차이가 나지 않는다는 것에 주목된다.

Element	Value	Element	Value
H	0.9911	Si	0.4984
C	0.4995	S	0.4990
N	0.4997	Cl	0.4795
O	0.5000	K	0.4859
Na	0.4784	Ca	0.4990
Mg	0.4934	Fe	0.4656
Al	0.4813	H <sub>2</sub> O	0.5521

표.1 주요 원자와 물의  $\frac{Z}{A}$  값

많은 원소의 혼합체인 흙에서는 토질의 차이에 따라서 Z/A의 차는 표.1에 보인 각 원소간의 Z/A의 차이보다도 작으며(예를 들면 모래:0.4959, 콘크리트:0.4878, 유리:0.4921) 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 따라서 Compton산란에 의한 질량 흡수계수는 토질의 차이에 따라서 거의 영향을 받지 않는다고 하는 중요한 결과가 얻어진다.

## 2.3. 감마선원 결정

RI계기의 밀도측정은 감마선이 물질을 투과할 때 물질에 흡수되어 손실되는 비율이 물질의 밀도와 일정한 관계가 있다는 점을 이용한 것이다. 즉 조밀한 상태의 흙에서는 흡수량이 많고 투과량이 적은 반면 느슨한 상태의 흙에서는 흡수량이 적고 투과량이 많아진다는 원리이다. 보통 1.4~2.7g/cm<sup>3</sup>의 범위에 있는 흙의 밀도를 측정하려면 350~1000keV의 에너지를 발생시킬 수 있는 감마선을 방출하는 동위원소가 필요하게 되며 여기에 Cs-137, Co-60 등의 방사성 동위원소가 주로 사용된다.

### 2.3.1 감마선원의 특징

#### 2.3.1.1 Cs-137

Cs-137의 붕괴 도해는 그림.2와 같으며  $\beta_1$ 붕괴반응에 의해 Ba-137m을 생성하고 2.55m이하의 짧은 시간에 걸쳐 0.6616MeV  $\gamma_1$ 을 방출하고 안정한 핵인 Ba-137로 붕괴한다. 이때  $\beta_1$ 반응에 의해 Ba-137m의 %/disintegration은 93.5이며  $\beta_2$ 반응에 의해 Ba-137의 안정한 핵종으로 붕괴하는 %/disintegration은 6.5이다. 표.2는 84%의  $\gamma_1$ 이 0.6616MeV의 에너지를 가지고 방출되고 나머지 9.5%는 궤도전자와 반응하여 내부전자 방출을 보여준다.

Radiation	Mean number/dis integration	Mean energy (MeV)
Gamma-1	0.840	0.6616
K int. con. electron, gamma-1	0.0781	0.6242
L int. con. electron, gamma-1	0.0140	0.6560
M int. con. electron, gamma-1	0.0031	0.6605
Total	0.935	

표.2 Transformation Scheme and Output Data for <sup>137</sup>Cs Dosimetry

### 2.3.1.2 Co-60

Co-60은  $\beta^-$  붕괴를 하고 동시에 1.173(100%), 1.332(100%)MeV의  $\gamma$  선 두 개를 방출한다. 이것은 그림.3에서와 같이 2.5057MeV의 여기상태로  $\beta^-$  붕괴한후 1.332MeV의 여기상태로 천이하면서 1.17323MeV의  $\gamma$  선을 방출하고  $0.7 \times 10^{-12}$ sec의 시간후 1.332MeV의 에너지를 방출하고 안정한 Ni-60으로 천이한다.

### 2.3.2 선원결정

Cs-137은 원자핵 붕괴당 0.84개의 감마선이 0.6616MeV의 에너지를 가지고 방출되지만 Co-60은 원자핵 붕괴당 1.173MeV, 1.332MeV의 감마선이 2개가 방출된다. 그러므로 Cs-137과 Co-60이 같은 방사능을 가지는 감마선원일때에는 Co-60이 Cs-137보다 2배의 효과를 나타낸다. 또한 감마선의 에너지에 있어서도 Co-60에서 방출되는 감마선의 에너지가 Cs-137의 에너지 보다 2배정도 높은 값을 가지므로 Cs-137의 선원을 사용했을때보다 넓은 범위를 측정할 수 있다. 즉 사용성에 비추어볼 때 Co-60이 Cs-137보다 더 우수하므로 밀도측정에 사용되는 감마선원으로 Co-60이 적합하다. 본 연구에서는 후방산란법보다 넓은 측정범위를 가지는 직접전달방법을 선택하여 증성자 선원 밑에 감마선원이 위치하도록 하였다. 또한 선원봉의 크기를 작게 하기 위하여 감마 선원은 점선원이어야하며 동위원소실험실(Isotope Products Laboratories)의 카탈로그(catalog)에서 가장 작은 기하학적 형태를 가지는 3814 캡슐로 결정하고 표.3 의 3814 캡슐 수치를 이용하여 증성자 선원 밑에 위치하도록 모사하였다. 그리고 3814 캡슐은 stainless steel 304로 이중 밀봉되어있다.

Capsule Number	Overall Length	Overall Diameter	Active Length	Active Diameter
3814	5.08mm	1.52mm	2.8mm	0.76mm

표.3 감마 점선원 캡슐

## 2.4 감마 검출기의 위치 및 개수 결정

검출기의 위치를 결정하기 위하여 그림.4와 같이 열중성자 흡수재에 인접하는 위치에서 +Y축방향으로 반경 1.4285cm, 길이 13.208cm의 검출기를 밀착하여 15개를 배열하였다. 감마선원으로부터 방출된 감마선이 투과하는 흡의 건조밀도를  $1.2\text{g/cm}^3$ 부터  $2.6\text{g/cm}^3$ 까지 0.2의 간격으로 증가시키고 수분함량은 10%로 고정한 후 각 검출기에서의 총감마선속을 측정하였다. 흡의 밀도가 낮을수록 또 검출기의 위치가 감마선원에 가까울수록 검출기에서 측정되는 총감마선속은 증가한다. 그러나 선원으로부터 가까운 위치에 놓인 검출기에서의 총감마선속이 감마선원으로부터 멀리 떨어져있는 검출기보다 높은 값을 보이지만 측정범위가 작게된다. 그러므로 본 연구에서는 검출기

를 놓을 위치를 결정하기 위하여 높은 총감마선속을 보이고 충분한 측정범위를 가지며 밀도의 변화에 대해 민감한 위치를 결정한다. 그림.5는 각각의 검출기에서 밀도가  $1.2\text{g/cm}^3$ 부터  $2.6\text{g/cm}^3$ 까지 0.2씩 증가할 때 변화하는 총감마선 속의 변화량을 평균하여 나타낸 것이다.

그림.5는 검출기의 거리가 증가함에 따라 총감마선속의 평균변화량은 8번 위치까지 증가하는 경향을 보이다 10번 위치까지 감소한후 다시 증가한다. 변화량이 감소하는 9번, 10번의 위치는 제외되고 11번의 위치에서부터는 다시 증가한다고 해도 감마선원으로 부터의 거리가 멀어 측정되는 총감마선속이 작은 값을 보인다. 그러므로 8번 이후의 검출기는 제외한다. 그리고 8번 이하의 검출기에서  $2.0\sim 2.6\text{g/cm}^3$ 의 밀도증가에 따라 측정값의 승(order)이변하게 되는 6번, 7번, 8번의 위치를 검출기가 놓일 위치로 결정한다.

## 2.5 검출기의 배열

2.4절까지의 계산결과는 감마 검출기의 위치와 개수를 결정하였으나 이번 계산에서는 이전 계산으로 결정된 감마 검출기의 가장 바깥쪽 위치를 기준으로 감마 검출기의 간격을 증가시켜 가면서 측정되는 감마선속의 변화량을 계산하여 변화량이 상대적으로 높은 위치에 감마검출기를 배열하였다. 그림.6은 흙의 bulk density가  $1.4\text{g/cm}^3$ 이고 수분함량이 10%일 때 감마검출기의 배열을 결정하기 위하여 (0, 28.7275, 22.0285)인 3번 검출기를 기준으로 반경 1.4285cm 길이 13.208cm인 검출기를 밀착하여 작성한 MCNP input geometry이다. 그림.7은 3번 검출기 위치를 기준으로 2번, 1번의 검출기 사이의 간격인 d를 0.1cm씩 증가시켜가면서 측정한 총감마선속은 간격의 증가에 따라 선형적으로 증가하며 1번 검출기는 1cm증가시 17.18%의 감마선속이 증가하고 2번 검출기는 9.7%가 증가함을 보인다. 이것은 2번 검출기와 3번검출기 사이의 간격을 0.1cm 늘리게 되면 1번검출기도 0.1cm밀린 뒤 2번검출기와와의 간격도 0.1cm의 거리가 멀어지게 되므로 2번검출기가 처음의 위치에서 0.1cm가 멀어지게 되면 1번 검출기는 처음의 위치에서 0.2cm가 -y축 방향으로 이동하게 되어 총감마선 속의 증가율이 1번 검출기가 2번 검출기보다 2배가 되는 것이다. 그러나 기준이 되는 3번 검출기는 일정한 값을 보이고 있다. 그림.8에서 1번, 2번 감마 검출기의 간격증가에 따른 총감마선속의 변화량은 1번의 경우 0.3cm에서 0.4cm로 간격이 증가할 때 증가폭이 가장 크게 나타나며 2번 검출기의 경우에는 0.5cm에서 0.6cm의 간격으로 증가할 때 가장 높은 증가폭을 보이고 있다. 그러므로 3번 검출기를 기준으로 -y축방향으로 0.6cm떨어진 위치에 2번 검출기를 배열하고 0.8cm떨어진 곳에 1번 검출기를 배열한다.

## 2.6 계측기 외부 케이스 재질 및 두께

계측기 외부케이스에 일반적으로 사용되는 재질로는 폴리카보네이트<sup>(5)</sup>와 cast aluminum<sup>(6)</sup>을 들 수 있으며 계측기 외부케이스의 재질에 따라 변화하는 감마선속의 변화를 보기 위하여 계측기 내부의 요소로부터 3cm 떨어진 곳에 계측기 외부케이스를 놓아 두께를 0.5mm씩 증가시켜가면서 변화되는 총감마선속의 변화를 살펴보았다. 그림.9는 계측기의 케이스 재질에 따른 총감마선속의 변화를 계산하기 위하여 작성한 MCNP input geometry 이다. 흙의 bulk density는  $1.4\text{g/cm}^3$ 이고 수분함량은 10%로 고정하여 계산을 수행하였다. 그림.10은 외부케이스의 재질을 cast aluminum으로 하여 계산하였을때가 폴리카보네이트로 했을 때보다 5mm의 두께에서 1번위치 계측기에서는 약 2.16%, 2번에서는 0.73%, 3번에서는 4.57%가 높게 나타남을 보여주고 있다. 보다 높은 측정효율로는 폴리카보네이트보다 cast aluminum이 좋으나 cast aluminum이 폴리카보네이트보다 밀도에 있어서 두배이상 크다. 즉 cast aluminum으로 계측기의 외부케이스로 결정을 할 경우 무게가 많이 나가게 되는 단점이 있다.

케이스의 재질이 cast aluminum인 경우 두께를 5mm까지 증가시켰을 때 1번에서는 3.58%, 2번은 2.77%, 3번은 6.44%가 증가하고 폴리카보네이트인 경우 1번에서는 1.97%, 2번은 2.12%, 3번은 2.88%가 증가하였다. 두께의 증가에 따라 총감마선 속의 증가폭이 매우 작음을 알 수 있다. 그러

므로 재질의 두께는 기계적인 강도를 충분히 가질 수 있는 4mm두께로 결정한다.

## 2.7 측정범위

밀도측정계기에서 얻어지는 밀도는 선원으로부터 방출된 방사선이 측정대상매질을 통과하여 검출부에 도달할 때까지의 변화에 따라 그 값이 결정되므로 밀도측정계기에서 방출된 방사선이 흡수속에서 변화되는 감마선을 감마검출기가 측정하는 측정범위를 파악해야 밀도측정이 대표하는 지반의 체적을 알 수 있다. 이번 계산에서는 수평방향과 깊이방향의 크기를 그림.11과 같이 변화시켜가면서 측정하였다. d1방향으로의 측정범위는 28cm이고 d2는 6cm, d3은 24cm이며 d4는 40cm이다. 그러므로 밀도측정기로 측정 가능한 흙의 체적은  $32640\text{cm}^3$ 가 된다.

## 3. 결론 및 고찰

방사성 동위원소를 이용한 수분/밀도 측정계기의 사용은 토목구조물의 안정성과 내구성향상을 위해 실시되고 있는 여러 시험방법보다 빠르고 정확하며 비용적인 측면에서도 매우 유리하다. 본 연구에서는 수분/밀도 측정계기의 개발에 있어서 실험적인 방법을 통한 많은 시간과 비용을 줄이기 위하여 몬테카를로 방법을 이용한 MCNP 코드를 이용하여 다음과 같은 측정요소들의 기하학적 크기 및 재질을 제시하였다.

저방사능으로 밀도를 측정하기 위한 감마 선원으로는 Cs-137보다 Co-60이 유리하며 위치는 지표면으로부터 22.134cm의 깊이에 위치하고 감마검출기의 개수는 3개로 결정하였다. 3개의 감마검출기 배열은 첫 번째 검출기를 y축 28.7275cm에 위치시키고 첫 번째 검출기를 기준으로 -y축 방향으로 0.6cm 떨어진 곳에 두 번째 검출기를 놓았으며 세 번째 검출기는 0.8cm 떨어진 곳에 배열하였다. 계측기 외부 케이스 재질은 폴리카보네이트와 cast aluminum이 일반적으로 사용되고 있으며 cast aluminum 0.4cm로 결정하였으며 측정범위는 d1=28cm, d2=6cm, d3=24cm, d4=40cm이 된다. 향후 본 연구에서 제시한 수분/밀도 측정계기의 기하학적 배열은 실험을 통한 검증이 요구된다.

## 4. 참고문헌

1. 조남진, "원자로물리 특강," pp.135-170, 현진사. 1993.
2. J.S. Hendricks and J.F.Briesmeister, "Recent MCNP Developments," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 39, No. 4, 1035-1040, August 1992.
3. J.F.Briesmeister, Ed., A General Monte Carlo N-particle Transport Code (MCNP), Version 4A, LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1993.
4. Changsong Ji, "Introduction to Basic Principle of Nuclear Gauging," National Executive Management Seminars on the Application of Nucleonic Gauging Techniques to Civil Engineering, pp.18-27, 1989.
5. George S. Brady, Henry R. Clauser, "Materials Handbooks," pp.605-606, 1977
6. The ASM handbook Committe, "Metal Handbook Ninth Edition," vol.2 Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Pure Metals, pp 152-179, 1979.

### ※감사의글

- 본 계산에 도움을 주신 한양대학교 김 종경 교수님과 원자로 해석실 여러분께 감사드립니다.
- 본연구는 건설교통기술연구개발 사업비의 지원으로 수행하고 있습니다.

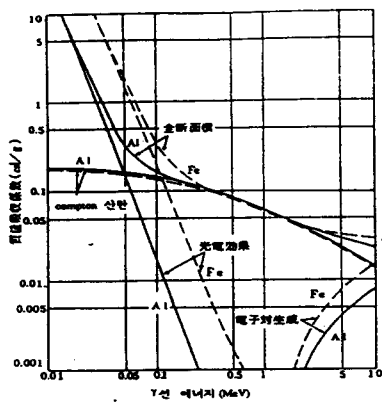


그림.1 질량흡수계수 vs. 감마 에너지(Al, Fe)

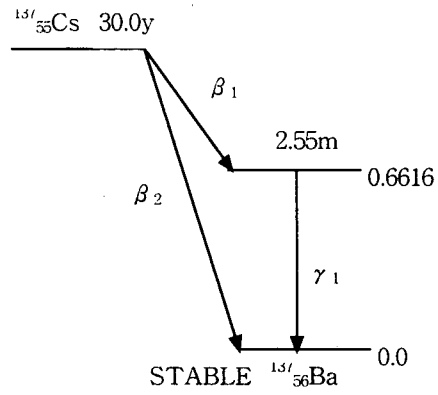


그림.2 Cs-137 붕괴 도해

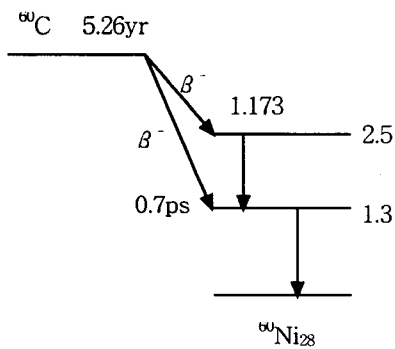


그림.3 Co-60 붕괴 도해

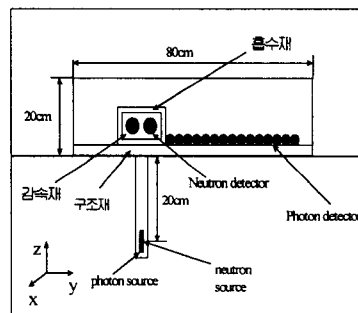


그림.4 검출기 위치 결정 MCNP Geometry

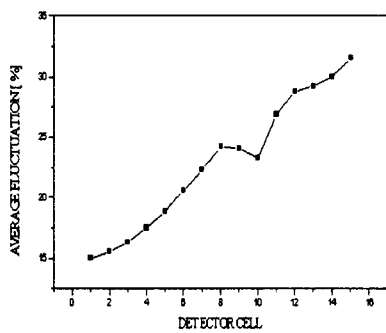


그림.5 검출기 위치에 따른 총감마선속의 평균변화량

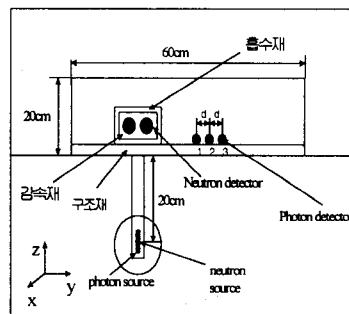


그림.6 검출기 배열 결정 MCNP Geometry

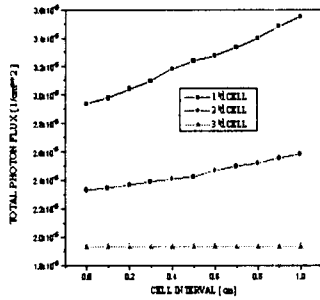


그림.7 케이스 두께 증가에 따른 각 검출기에서의 총감마선속 변화

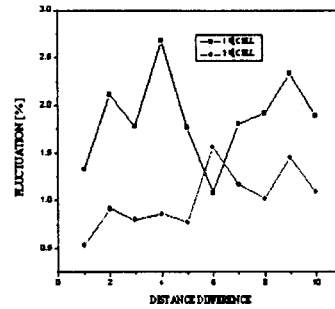


그림.8 감마 검출기의 간격 증가에 따른 총감마선속 변화량

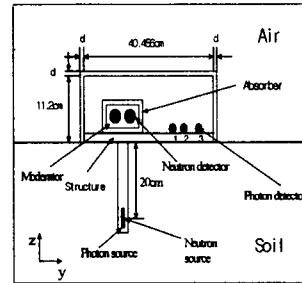
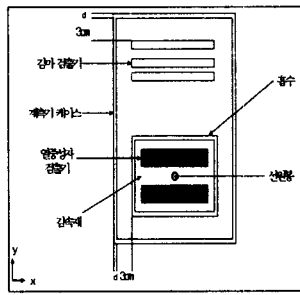


그림.9 케이스 두께 결정 MCNP Geometry

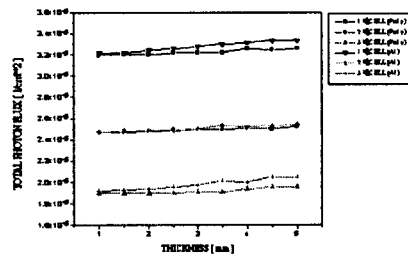


그림.10 각 검출기에서 케이스 두께증가에 따른 총감마선속변화

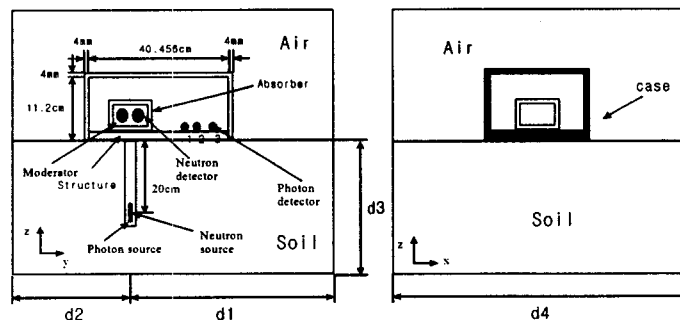


그림.11 측정범위 계산을 위한 MCNP Input Geometry