

MCNP 코드를 이용한 후방산란형 수분/밀도측정 RI장비의 기하학적 구조설계(II)

Design of Backscatter Type Moisture/Density RI gauge by MCNP4A code (II)

최규섭, 황주호

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천1리

요 약

본 연구에서는 토목분야에서 다양한 목적으로 사용할 수 있는 후방산란형 RI장비의 설계를 위해 몬테카를로 기법을 이용한 MCNP 코드를 사용하여 중요한 설계변수인 방사선원의 위치와 검출기 사이의 거리 그리고 감속재 및 차폐체의 크기 및 위치 등을 계산하여 장비의 기하학적 배치를 제시하였다. 수분/밀도 측정계산에 사용된 선원과 검출기는 국내에서 연구 개발된 투과형 장비와 동일한 Cf-252 중성자선원과 He-3 비례계수관, Co-60 감마선원과 G-M 검출기를 사용하였으며 검출경향을 실험을 통하여 비교한 결과 잘 일치하였다. 실험결과 수분측정에 있어서는 현재 국내에서 사용 중인 투과형 장비의 성능을 상회하였고 밀도측정에 있어서는 정밀한 측정이 어려웠다. 정밀한 밀도측정을 위해서 추가적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

abstract

This study investigated geometrical arrangement of RI gauge using backscattered radiation. Calculations of important parameters such as distance between the source and detectors, the number of detectors and the position of the detectors were carried out using a Monte Carlo computer code MCNP4A. Depth of soil that is meaningful in determining wet and dry density was also calculated by MCNP4A. Cf-252 neutron source and He-3 detectors were adopted for wet density measurement and Co-60 gamma source and G·M detectors were used for dry density measurement. It was shown that calculated curve of backscatter type RI gauge were well agree with experiment result. As a experimental results, designed backscatter type RI gauge is superior to transmission type RI gauge in wet density, but additional study for precision measurement in dry density were need.

1. 서론

수분/밀도 측정에 있어서 RI장비의 장점은 첫째 비파괴적이므로 동일위치에서 반복 측정할 수 있어 흙의 성질변화 및 압밀의 진행 상태를 알 수 있다. 둘째 측정시간이 수분으로 현장에서 측정 결과를 얻을 수 있어 다짐상태에 대한 고도의 신뢰도를 갖을 수 있다. 셋째 현재 사용 중인 모래 치환법^{1,2)}은 가장 원시적이고 이해하기 쉬울 뿐 객관적으로 정확도를 추정하기 어렵고 측정오차가

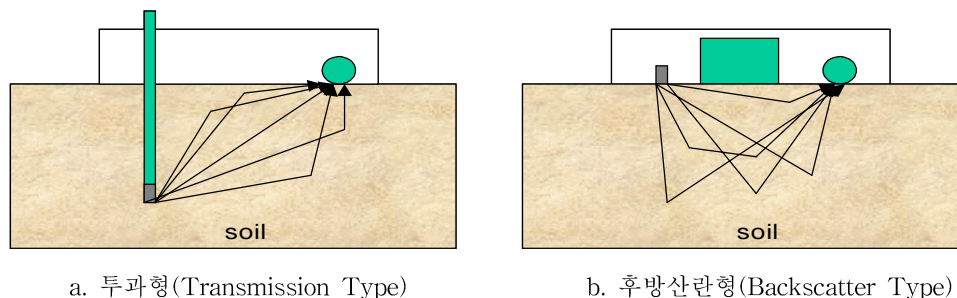
발생한다. 반면에 RI장비는 모래치환법에 비해 정확도에서 10배 이상의 측정횟수를 얻을 수 있으며 신뢰도는 4~10배정도 크다. 넷째 측정 개소수가 많을수록 밀도시험에 드는 단가가 적어진다.

이러한 RI장비는 측정방식에 따라 투과형 장비와 후방산란형 장비로 나눌 수 있다. 현재 개발된 투과형 장비는 설계가 용이하다는 점에서 후방산란형 장비보다 우수하다. 그러나 측정 전에 선원봉을 삽입시킬 삽입구멍이 필요하므로 구멍을 만들기 위한 준비작업을 수반한다는 단점을 가지고 있으며 삽입구멍을 만들 수 없는 포장층에서는 사용이 불가능하다. 따라서 토목분야에서 RI장비의 활용을 증대시키기 위해서 후방산란형 RI장비에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 MCNP 코드를 이용한 민감도 분석을 통해 후방산란에 적합한 계측수와 변화량을 얻을 수 있는 최적의 기하학적 배치 설계를 하고 실험을 통해 코드계산 결과를 검증하여 투과형 장비와 비교 개발가능성을 알아보려고 한다.

2. RI 장비의 특성과 측정원리

RI 장비는 크게 물리탐사에 사용되는 공내측정형과 성토의 품질관리에 사용되는 표면측정형이 있다. 본 연구에서 다루게될 표면측정형 장비는 밀도 및 함수량을 동시에 측정할 수 있는 것으로 측정방법에 따라 투과형과 후방산란형으로 구분된다. 투과형 장비의 경우 선원봉을 흙 속에 삽입하여 측정하고 후방산란형의 경우 선원을 장비에 위치시켜 직접 검출되는 방사선을 차폐하여 산란된 방사선을 검출한다.³⁾ 또한 함수량 측정에 있어서 투과형 장비는 흙 속에서 산란되어 표면으로 나온 중성자 중 열중성자를 제거하고 속중성자를 감속시켜 계측하는 반면 후방산란형 장비는 산란하여 표면으로 나온 열중성자를 계측한다. 각각의 측정형태를 그림1에 나타내었다.



<그림 1> 검출형태에 따른 RI장비의 분류

2.1 중성자에 의한 함수량 측정원리

중성자는 전하를 갖고 있지 않기 때문에 하전입자나 전자에 대한 에너지 손실을 갖게 하는 쿨롱력에 의해 상호작용하지 않는다. 따라서 중성자는 물질에서 상호작용하지 않고 수 cm를 이동할 수 있으며 일반 검출기의 크기로는 잘 검출되지 않는다. 중성자는 흡수 물질의 원자핵과 상호작용을 하여 완전히 사라지거나 하나 또는 그 이상의 2차 방사선을 만들거나 혹은 중성자의 방향이 상당히 변한다. 이러한 중성자와 원자핵과의 반응을 흡수와 산란이라 하며 흡수반응은 중성자 포획, 핵분열, 하전입자 방출, 중성자 방출 등으로 세분되고 산란반응은 탄성산란과 비탄성산란으로 구분된다. 탄성산란은 속중성자가 매질 내에서 감속하는 주요한 원인으로 함수량 측정 RI장비의 원리에 있어 중성자의 상호작용은 탄성산란만을 고려한다. 그 이유는 비탄성산란의 경우 표적핵의 최저 여기상태보다 큰 운동에너지를 가지고 있을 때만 일어날 수 있으므로 주로 비탄성산란은 최저 여기상태의 에너지가 낮은 무거운 핵종에 한하여 일어나며 중성자의 에너지가 0.1 MeV 이상

에서만 일어난다. 반면에 탄성산란은 중성자가 가지는 에너지에 상관없이 일어날 수 있고 반응단면적 역시 비탄성산란에 비해 훨씬 높기 때문이다.

가. 중성자 감쇠

고속중성자가 흠 속에서 원자핵과 탄성산란에 의해 열중성자로 변화하는 현상을 중성자 감쇠라 한다. 중성자의 에너지 손실은 충돌 시마다 $0 \sim 180^\circ$ 로 분산하므로 에너지의 손실은 일정한 값이 아닌 확률적인 변수가 된다. 또한 충돌 전 에너지와 충돌하는 핵의 질량수와 함수관계를 가지므로 에너지 손실의 평균값도 충돌 전 중성자 에너지에 따라 달라진다. 따라서 중성자 에너지 손실은 (식 1-1) 과 같이 평균값을 사용한다.

$$\xi = \ln \frac{E_b}{E_a} \text{의 평균} = (\ln E_b - \ln E_a) \text{의 평균} \text{-----}(1-1)$$

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} \text{-----}(1-2)$$

위 식에서 Lethargy(에너지 평균 대수값)는 충돌 핵의 질량수만의 함수이며 질량수의 크기에 반비례한다. 따라서 가장 가벼운 원소인 수소는 평균감소율이 크고 중성자에 대한 산란단면적도 가장 크므로 흠 속에 입사한 중성자는 수소의 농도에 지배적인 영향을 받는다.

나. 중성자 분산

흠 속에서 중성자의 진행방향은 매 충돌 시마다 바뀌며 중성자 분산각의 평균치(μ)는 (식 1-3) 으로 계산된다.

$$\mu = \frac{2}{3A} \text{-----}(1-3)$$

$$1/\lambda_{tr} = \sum_{tr} = \sum_s (1 - \mu) \text{-----}(1-4)$$

where Σ_{tr} : macroscopic transport cross section
 Σ_s : macroscopic scattering cross section

흠 속에 일반적으로 존재하는 원소들은 특별히 큰 값의 Σ_{th} 를 가지는 핵이 없으므로 대부분 비슷한 값을 갖는다. 따라서 함수량 측정 RI장비는 흠을 구성하는 모든 원자들은 중성자의 이동방향을 변화시켜 중성자의 이동을 돕고 수소가 중성자 감쇠에 있어 흠 속의 다른 원자들에 비해 매우 크다는 점을 이용하여 흠 속에 열중성자의 밀도 차로 함수량을 측정한다.⁴⁾

2.2 감마선에 의한 밀도 측정원리

감마선은 중성자와 같이 물질과의 끊임없는 상호작용을 통해 에너지를 잃는다. 감마선이 갖는 물질과의 상호작용은 여러 가지가 있지만 방사선 측정에는 단지 세가지 과정이 주된 역할을 한다. 에너지의 범위에 따라 광전흡수(photoelectric absorption), Compton scattering(콤프턴 산란), pair production(전자-양전자 쌍생성) 반응을 일으킨다. 이들 과정은 감마선의 일부 또는 전부를 전자의 에너지로 변환시키며 완전히 사라지거나 여러 각도로 산란하게 된다.

가. 광전흡수(photoelectric absorption)

광전효과(photoelectric effect)는 광자가 궤도전자와 상호작용하여 광자 자신은 사라지며 고속전자가 원자의 외각 전자로부터 방출되는 현상이다. 이 반응으로 수백 keV 이상의 감마선 에너지의 대부분은 광전자가 갖게되며 또한 광전효과로부터 생긴 궤도 전자내의 빈자리는 더 높은 에너지를 갖는 다른 궤도의 전자가 에너지를 잃고 채우는데, 이 때 잃은 에너지는 특성 X선으로 방출하거나 또는 이 에너지가 다른 궤도 전자에 흡수되어 Auger 전자로 방출된다.

이러한 광전효과는 0.5 MeV 이하의 저 에너지에 있어서 매우 중요한 상호작용이 되며 일어날 단면적($\sigma_{p.e}$: 상호작용 확률)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{p.e} \cong \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}} \text{ -----(1-5)}$$

where Z : 물질의 원자번호

E_γ : 입사 감마선의 에너지

n : 관심있는 감마선 에너지(3과 5 사이의 값)

위의 식에서 보는 바와 같이 광전효과는 원자번호의 3~5 제곱에 비례하고 입사 감마선 에너지의 3.5 제곱에 반비례한다. 따라서 에너지가 작은 감마선이 원자번호가 큰 물질과 반응할 때 매우 중요하다.

나. 콤프턴 산란(Compton scattering)

콤프턴 산란(Compton scattering)은 물질내 자유전자와 감마선이 상호 작용하여 감마선의 에너지 일부를 전자에게 전달함과 동시에 감마선이 산란되는 현상이다. 이 상호작용에 대한 에너지 전달과 산란각의 관계는 에너지와 운동량 보존법칙으로부터 유도할 수 있으며 그 결과를 기술하면, 산란 감마선의 에너지 $h\nu'$ 와 콤프턴 전자의 에너지 E_c 는 입사 감마선의 에너지($h\nu$) 및 전자의 산란각(θ)의 함수로써 각각 다음과 같이 나타내 진다.

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \text{ -----(1-6)}$$

$$E_c = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \text{ -----(1-7)}$$

where $\alpha : h\nu/m_0c^2$

m_0c^2 : 전자의 정지질량 에너지

위의 식에서 산란각 θ 가 커질수록 콤프톤 전자에 전달되는 에너지가 커지므로 산란되는 감마선의 에너지는 작아진다.

콤프톤 산란의 단면적(σ_c)은 감마선 에너지(E)와 물질의 원자수(Z)에 따라 달라지며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c \cong \frac{Z}{E} \text{ -----(1-8)}$$

다. 쌍생성

전자-양전자 쌍생성은 원자핵 쿨롱장에서 일어나 감마선은 소멸되고 대신 전자와 양전자가 생성되는 현상이며 입사 감마선이 전자와 양전자를 생성하기 위해서는 에너지가 보존되기 위해 적어도 전자의 정지질량 에너지 m_0c^2 의 2배인 1.02 MeV이상의 에너지가 필요하다. 이때 원자핵의 운동에너지는 무시할 수 있으며 생성된 전자와 양전자의 운동 에너지를 각각 E^- , E^+ 라고 하면

아래와 같이 표시할 수 있다.

$$E^- + E^+ = h\nu - 2m_0c^2 \quad \text{-----}(1-9)$$

또한 양전자는 물질을 통과하면서 자신의 에너지를 모두 잃게 되며 인접한 자유 전자와 결합하여 자신은 소멸되고 0.511 MeV의 광자 두개를 생성한다.

한편 전자-양전자 쌍생성이 일어날 반응 단면적은 아래와 같다.

$$\sigma_{pp} \propto Z^2 \cdot (E - 2m_0c^2) \quad \text{-----}(1-10)$$

위의 세가지 상호작용을 하는 감마선의 강도는 일반적으로 식(1-11)와 같이 표현하며 산란된 감마선의 영향인 Build-up factor를 고려한 밀도에 따른 감마선의 측정치비는 다음의 식(1-12)와 같다.

$$\varphi \propto S_0 \cdot e^{-\Sigma \ell \rho} \quad \text{-----}(1-11)$$

$$n = n_0 \cdot B \cdot e^{-\Sigma \ell \rho} \quad \text{-----}(1-12)$$

where S_0 : 감마선원의 강도
 Σ : 질량흡수계수(cm^2/g)
 B : Build-up factor

위의 식에서 Build-up factor는 방사선 물질의 자연붕괴속도 $\Sigma \ell \rho$ 에 대한 매우 복잡한 함수일 뿐만 아니라 감지장치의 종류 및 칫수에 따라서도 달라지므로 어느 일정한 식으로 나타내기 불가능하다. 그러나 밀도측정기에 있어서 특정물질 및 적절한 범위의 밀도에 다음과 같은 식(1-13)을 채용한다.

$$n = K_0 \cdot e^{-\Sigma_{eff} \cdot \ell \cdot \rho} \quad \text{-----}(1-13)$$

여기서 질량흡수계수 Σ 는 전체상호작용단면적 σ 에 아래의 식과 같은 관계를 갖는다.

$$\Sigma = \frac{N_0}{A} \sigma \quad \text{-----}(1-14)$$

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_c \quad \text{-----}(1-15)$$

where N_0 : 아보가드로수
 A : 원자의 질량수
 σ_p : 광전흡수 단면적
 σ_c : 콤프톤 산란단면적

물질이 여러종류의 원자로 구성되어 있으면 질량흡수계수는 각 원소의 가중합으로 구해진다.

$$\Sigma = \sum_i (P_i \Sigma_i) \quad \text{-----}(1-16)$$

where P_i : i 번째 원자의 중량 구성을
 Σ_i : i 번째 원자의 질량흡수계수

특정 물질과 감마선 발생원에 대해 Σ 는 상수이므로 측정수비 $n(\rho)$ 는 그 물질의 밀도에 의해 특정한 값을 갖는다. 이러한 측정수비를 후방산란에 그대로 적용할 수 없으나 직접 검출되는 감마선이 없다고 가정할 경우 측정되는 기하학적 구조는 다르지만 흡과 산란된 감마선 역시 밀도에 의해 특정한 값을 갖는다.⁴⁾

3. MCNP 코드를 이용한 설계변수 연구

3.1 MCNP 코드 기술

몬테카를로 기법은 무작위로 발생하는 현상을 난수를 이용하여 인위적으로 표본을 추출하여 모사하는 방법이다. MCNP 코드⁵⁾는 몬테카를로 기법을 이용한 전산코드로 임의의 3차원 기하학적 구조에 대해 중성자, 광자, 전자의 수송을 계산하며 물리실험, 방사선 차폐, 핵임계 계산, 방사선량 계산 등에 이용되고 있다. 이 코드에서 계산할 수 있는 중성자 에너지 범위는 $10^{-11} \sim 20$ MeV, 광자 에너지 범위는 $10^{-3} \sim 10^3$ MeV 이다.

또한 MCNP에서 사용하는 핵데이터는 ENDF(Evaluated Nuclear Data Files), ENDL(Evaluated Nuclear Data Library), ACTL(Activation Library)에서 평가된 자료들이며 NJOY와 같은 코드에 의해 변환시켜 사용한다. 핵데이터는 중성자의 상호작용, 광자의 상호작용, 방사화, 열입자 산란 (α, β) 등에 대한 자료가 포함되어 있다.

3.2 선원 및 검출기

함수량 및 밀도 변화에 따른 RI장비의 민감도 분석에 있어 선원 및 검출기는 현재 연구 개발된 투과형 장비와 동일한 것들을 사용하였고 그 특징은 아래와 같다.

가. 중성자 선원

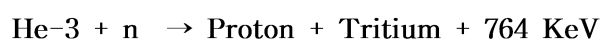
RI장비에서 사용되는 중성자 선원은 밀봉선원이며 일반적으로 RI장비에 사용되는 중성자 선원은 Am-Be, ²⁵²Cf 등이 있다. 본 연구에서 사용하는 30 μ Ci의 강도를 갖는 ²⁵²Cf은 방사능 대비 방출 중성자가 Am-Be에 비해 매우 높으며 그 특징은 표 2와 같다.

나. 감마선원

일반적으로 RI 장비에 사용되는 감마선원은 Cs-137과 Co-60이 있으며 Co-60은 그림4와 같이 1번 붕괴당 1.173, 1.332 MeV의 감마선을 방출하므로 Cs-137에 비해 방출되는 감마선이 많다. 본 연구에서는 70 μ Ci의 강도를 갖는 Co-60 선원을 사용하였다.

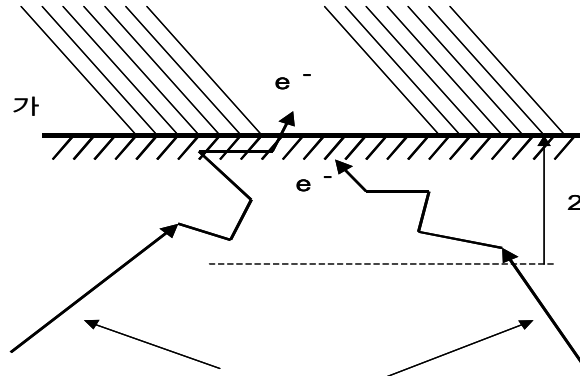
다. 중성자검출기

일반적으로 RI 장비에 사용되는 중성자 검출기는 BF₃와 He-3 가스충전비례계수관이 있으며 He-3 검출기는 BF₃ 검출기에 비해 감마선 선별능력은 떨어지나 열중성자 검출효율은 높다. He-3 검출기는 열중성자의 입사에 의해 생성된 하전입자가 검출기내의 기체를 이온화시켜 생성된 전자를 증폭시켜 검출한다. He-3 검출기의 검출원리는 다음의 반응식과 같으며 특징을 아래의 그림과 표에 나타내었다.



라. 감마선 검출기

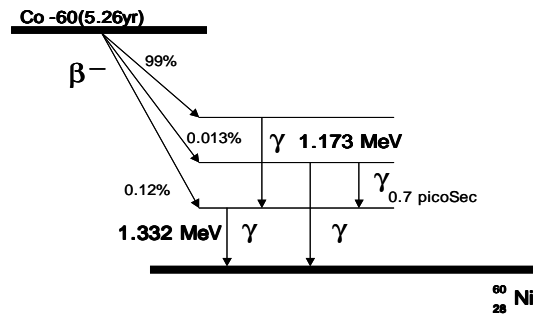
RI 장비에 사용되는 감마선 검출기로는 검출효율은 떨어지나 그 운반성 및 강도가 우수해 G·M 검출기가 널리 쓰이고 있다. G·M 검출기는 검출기 외벽과 감마선과의 반응으로 발생한 전자를 검출하며 감마선 검출기의 검출원리와 특징을 아래의 그림과 표에 나타내었다.



<그림 2> G·M 검출기의 검출원리

<표 1> ²⁵²Cf 선원의 특징

α 붕괴(97%) 반감기	2.73년
자발핵분열(3%) 반감기	85.5년
유효 반감기	2.65년
등가선량 평균에너지	2.4Mev (중성자에 대해)
비중성자 선원강도	2.4×10 ⁹ /sec·mg
비광자 조사선량율	116 mR/h·mg (at 1m)
비방사능	536 mCi/mg
에너지 스펙트럼	연속에너지 스펙트럼



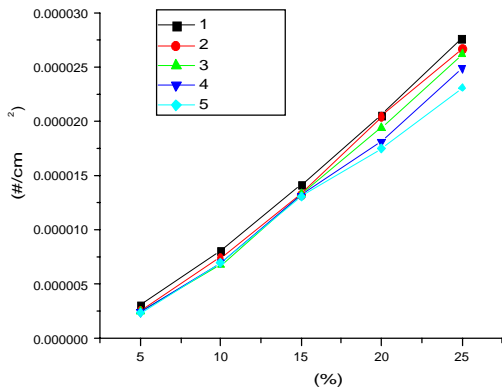
<그림 3> Co-60의 붕괴도

3.3 함수량 측정

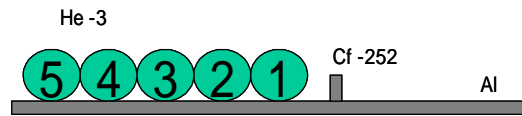
함수량 측정에 사용되는 중성자 선원인 ²⁵²Cf의 스펙트럼을 묘사함에 있어 MCNP에 내장된 함수가 이용 가능하다. 핵분열에 사용되는 함수로는 Watt와 Maxwellian 스펙트럼이 있으며 ²⁵²Cf의 에너지 스펙트럼으로 ISO에서 권고하는 Maxwellian 스펙트럼을 사용하였다.^{6,7)}

3.3.1 중성자 검출기의 위치 및 개수

측정설계에 있어 가장 중요한 설계 변수는 검출기의 위치이다. 후방산란형은 열중성자 검출기를 이용하여 흡속에서 감속된 열중성자를 검출방식으로 흡의 밀도를 1.6 ~ 2.0 g/cm³까지, 함수량을 5 ~ 25 %까지 5%씩 변화시켜가며 검출기의 위치에 따라 검출되는 열중성자속의 변화를 계산하였다. 코드를 이용한 중성자 검출은 He-3 검출기의 실제 검출방식인 He-3와 중성자와의 (n p) 반응을 volume tally인 Fm4 tally를 사용하여 계산하였고 그 계산 결과는 중성자속으로 다음과 같다.



<그림 4> 함수량 변화에 따른 중성자속의 변화



<그림 5> 검출기 선정을 위한 Geometry

코드 계산결과 검출되는 중성자속은 선원에 근접한 1번 검출기가 가장 컸으며 선원으로부터 멀어질수록 점차 줄어들었다. 또한 함수량 변화에 따른 중성자속의 평균 변화량은 3번 검출기가 가장 컸으며 점차 거리가 증가할수록 변화량도 줄어들었다. 1 ~ 5번 검출기 사이의 평균변화량은 차이가 나지 않았으며 선원으로부터 멀어질수록 검출되는 중성자속은 작아지므로 장비의 정밀도를 높이기 위해 1번 검출기를 검출기의 위치로 결정하였다. 선원을 중심으로 좌우가 똑같은 geometry이므로 좌우의 코드 계산결과에는 차이가 별로 없다. 따라서 측정할 수 있는 흠의 영향 범위를 증가시키기 위해 우측에도 똑같은 위치에 검출기를 위치시켰다.

3.3.2 정밀도 향상

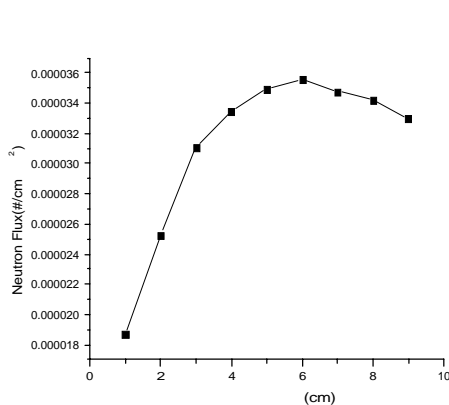
코드 계산으로 검출된 중성자속은 검출수로 표현할 수 있으며 검출수는 장비의 정밀도로 표현될 수 있다. 따라서 정밀도를 증가시키기 위해서 선원에서 방출되는 속중성자의 에너지를 흠을 구성하는 원자들의 반사단면적에 적합한 에너지로 만들 필요가 있다. 선원으로부터 방출되는 속중성자는 열중성자로 감속되지만 상당량이 흠 속을 산란하며 통과하여 지나가거나 검출기 위치가 아닌 다른 방향으로 산란되어 손실된다. 이러한 손실을 줄이기 위해서는 중성자의 산란 및 흡수를 증가시켜 흠 속에 열중성자의 밀도를 증가시켜야 한다. 또한 선원의 solid angle을 증대시키기 위해 흠 속으로 입사하는 방향이 아닌 다른 방향으로 유실되는 중성자들을 산란시켜 흠 속으로 입사하도록 방향을 유도하여야 한다.

²⁵²Cf에서 나오는 중성자의 에너지는 평균 2.4 MeV이며 흠을 구성하는 원소들의 중성자에 대한 흡수, 산란단면적은 중성자의 에너지가 낮을수록 산란과 흡수단면적이 커지고 중성자의 에너지가 높은 1 MeV 이상에서는 흡수단면적이 비약적으로 증대되는 것을 알 수 있다. 따라서 감속재를 사용하여 입사 중성자의 에너지를 감쇠시켜 산란을 극대화시키고 쉽게 열중성자화 시켜 검출이 용이하도록 만들어야 한다.

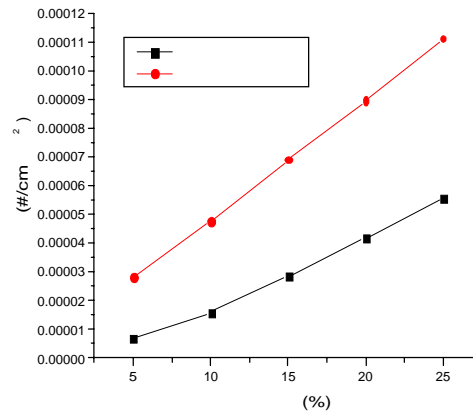
가. 감속재 크기결정

중성자 감속재로 수소를 많이 포함하고 있는 파라핀과 폴리에틸렌이 있다. 특히 폴리에틸렌은 파라핀에 비해 높은 수소밀도를 가지고 있기 때문에 적은 부피로 큰 효과를 볼 수 있으므로 폴리에틸렌을 사용하였다. 감속재의 크기를 결정하기 위해 선원을 폴리에틸렌으로 원기둥형태로 감쌌으며 폴리에틸렌을 통해 He-3 검출기로 직접 검출되는 열중성자를 막기 위해 0.1 cm의 카드뮴으로

폴리에틸렌을 감쌌다. 그림은 밀도와 함수량이 각각 1.65 g/cm^3 , 10 %인 흡에서의 폴리에틸렌 반경 크기에 따른 열중성자속의 변화를 코드로 계산한 결과이다.



<그림 6> 폴리에틸렌의 반경에 따른 중성자속의 변화



<그림 7> 속중성자선원과 감속시킨 선원의 중성자속 변화 비교

<그림 6>에서 폴리에틸렌의 반경이 증가함에 따라 검출되는 열중성자속도 증가함을 나타내고 있으며 폴리에틸렌의 반경 6 cm 이상부터 다시 감소함을 나타내고 있다. 이러한 감소현상은 선원 주변이 중성자의 밀도가 가장 높고 열중성자의 밀도 및 변화도 가장 크기 때문에 폴리에틸렌의 반경이 커질수록 검출기와 선원과의 거리가 멀어져 중성자가 산란하면서 감소되어 검출기에 도달하기 이전에 흡 속에서 흡수되기 때문이다. 폴리에틸렌의 반경은 6 cm에서 가장 큰 중성자속을 나타내지만 큰 넓이를 차지하므로 밀도 측정을 위한 감마선 검출 설계 감안하여 급속히 변화하는 마지막 반경인 3 cm로 결정하였고 높이는 He-3 검출기의 높이인 2.5 cm로 결정하였다.

<그림 7>은 함수량 변화에 따른 코드 계산 결과이며 중성자 선원의 solid angle의 증대와 선원의 에너지 감쇠로 중성자속 검출에 있어 약 2배 이상, 함수량 변화에 따른 열중성자속 변화에 있어 약 1.5배 증가 효과를 얻을 수 있었다.

3.4 밀도측정

후방산란으로 밀도측정을 하기 위해서는 선원으로부터 검출기로 직접 검출되는 일차 감마선의 차폐가 필요하며 감마선은 흡 속에서 중성자가 다른 원소와 달리 수소와 크게 반응하는 것과 같은 주 반응 물질이 없고 물질의 밀도와 일정한 관계를 가지므로 선원으로부터 관심있는 밀도 영역에서 민감한 변화를 보이는 선원과 검출기간의 거리가 필요하다. 코드계산에서 감마선 검출은 광전효과와 콤프톤산란으로 인한 G·M 검출기의 2차 전자의 검출을 volume tally인 Fm4 tally를 사용하여 계산하였고 그 결과는 감마선속으로 나타내었다.

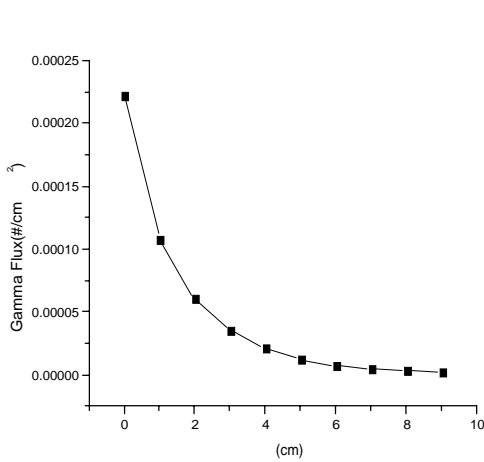
3.4.1 선원과 검출기간의 거리

함수량 측정에 있어 열중성자에 민감하게 만들기 위해 중성자 검출기는 선원과 가까운 곳에 위치시켜야 한다. 반면에 밀도측정에 있어서 감마선 검출은 선원 주변에 감마선의 밀도가 높아 흡의 밀도의 차에 영향을 받지 않으므로 Co-60 선원의 감마선 에너지인 1.137, 1.332 MeV가 산란, 흡수되어 흡의 밀도 변화에 영향을 받을 수 있는 선원과 검출기간의 일정한 거리가 필요하다. 또한 후방산란에서는 직접 검출되는 감마선을 차폐하기 위해 차폐체를 두어야 한다. 차폐체로는 납을

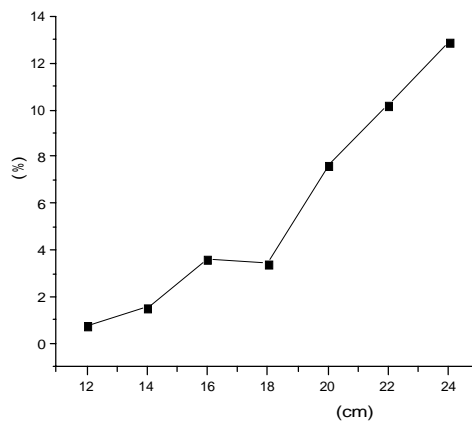
사용하였고 1.5 MeV 감마선에 대한 납의 반가층은 약 1 cm이므로 감마선 검출수에 영향을 미치지 않는 납차폐체의 두께로 7 cm 이상으로 결정하였다. <그림 8>는 납차폐체의 두께에 따른 감마선속의 변화를 나타낸 것이다.

차폐체의 위치에 따라 다른 값을 나타내지만 선원과 검출기와의 대략적인 거리를 결정하기 위해 7 cm 납차폐체를 사이에 두고 선원을 차폐체에서 3 cm 떨어진 곳에 위치시킨 후 1.575 ~ 2.025 g/cm³ 까지 밀도 0.075 g/cm³씩 변화시켜가며 검출기의 거리에 따른 감마선속의 평균변화량을 계산하였다. 감마선속은 흡의 밀도가 낮을수록 선원에 가까울수록 증가하였지만 밀도변화에 따른 변화는 적었다.

<그림 9>에서 선원과 검출기 사이의 거리가 멀어짐에 따라 밀도변화에 따른 검출 감마선속의 변화가 증가하기 시작했으며 22 cm부터 10 %이상의 변화를 보이기 시작했다. 따라서 선원과 검출기 사이의 거리에 약 22 cm이상의 거리가 필요함을 알 수 있다.



<그림 8> 차폐체 두께에 따른 감마선속의 변화



<그림 9> 검출기 위치에 따른 감마선속의 평균변화율

3.4.2 ²⁵²Cf의 감마선 영향

²⁵²Cf은 중성자 방출과 더불어 많은 양의 감마선을 방출하며 감마선을 방출하는 경향은 아래의 6가지와 같다.

- a. Radioactive sources
- b. Prompt fission gamma rays
- c. Fission product gamma rays
- d. Neutron capture gamma rays
- e. Gamma rays from inelastic neutron scattering events
- f. Neutron activation gamma rays

이러한 감마선의 영향을 계산하기 위해 Neutron capture gamma rayse, Gamma rays from inelastic neutron scattering events는 MCNP 코드의 (n γ)반응을 이용하여 계산하였으며 MCNP 코드에서는 내장된 함수 이외의 선원의 분포를 구할 수 없으므로 Radiation sources, Prompt fission gamma rays, Fission product gamma rays, Neutron activation gamma rays은 Origen 코드를 사용하여 감마선 스펙트럼을 구하였고⁹⁾ 그 스펙트럼을 MCNP 코드에 사용하여 계산하였

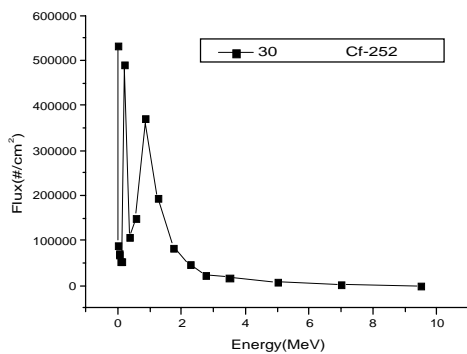
다.

가. Origen code 기술

Origen 코드는 130개 핵종의 액티나이드(actinides), 850개 핵종의 핵분열 생성물(fission products), 720개 핵종의 방사화 생성물(activation products) 등 모두 1700개 핵종을 취급할 수 있으며, 조사(irradiation) 및 냉각(decay)에 따른 각 핵종별 연소이력을 생산한다.

각 핵종별로 질량(mass), 동위원소별 성분비(isotopic composition), 방사능(radioactivity), 열출력(thermal power), 위해도(toxicity), 반응률(reaction rate), 중성자 방출(neutron emission), 광자방출(photon emission) 반응 등을 계산할 수 있다.

아래의 그림은 Origen 코드를 사용하여 구한 ²⁵²Cf의 감마선 스펙트럼으로 ²⁵²Cf에서 방출되는 감마선은 연속적인 에너지를 가지고 있으며 저에너지로 갈수록 그 방출량이 매우 증가한다. 저에너지 감마선은 흡 속에서 대부분 흡수되고 고에너지의 감마선만이 검출된다. 고에너지 감마선은 흡의 밀도 변화에 민감하지 못하고 ²⁵²Cf에서의 방출량도 적으므로 장비설계 시 ²⁵²Cf의 감마선 이용은 부적합하다. 하지만 1 MeV이하의 감마선을 효과적으로 이용하기 위해 검출기와 근접한 위치를 설정하여야 한다.



<그림 10> ²⁵²Cf의 감마선 스펙트럼
(Prompt fission gamma rays,
Fission product gamma rays,
Neutron activation gamma rays)

<표 2> ²⁵²Cf의 시간 경과에 따른 감마선속의 변화

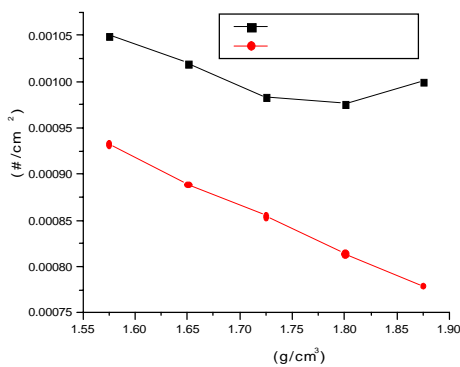
energy	1hr	30d	60d	90d	120d	150d
1.00E-02	4.56E+05	5.34E+05	5.33E+05	5.31E+05	5.29E+05	5.27E+05
2.50E-02	6.01E+04	8.98E+04	9.04E+04	9.07E+04	9.07E+04	9.04E+04
3.75E-02	4.32E+04	6.87E+04	6.95E+04	6.98E+04	6.99E+04	6.97E+04
5.75E-02	5.48E+04	7.16E+04	7.17E+04	7.18E+04	7.18E+04	7.17E+04
8.50E-02	3.80E+04	5.35E+04	5.37E+04	5.37E+04	5.36E+04	5.34E+04
1.25E-01	3.11E+04	5.39E+04	5.51E+04	5.56E+04	5.59E+04	5.58E+04
2.25E-01	4.64E+05	4.93E+05	4.84E+05	4.76E+05	4.68E+05	4.59E+05
3.75E-01	8.05E+04	1.07E+05	1.07E+05	1.06E+05	1.06E+05	1.05E+05
5.75E-01	7.82E+04	1.50E+05	1.53E+05	1.54E+05	1.54E+05	1.53E+05
8.50E-01	3.11E+05	3.71E+05	3.70E+05	3.69E+05	3.68E+05	3.66E+05
1.25E+00	1.67E+05	1.94E+05	1.92E+05	1.90E+05	1.89E+05	1.88E+05
1.75E+00	7.02E+04	8.44E+04	8.46E+04	8.36E+04	8.23E+04	8.08E+04
2.25E+00	4.16E+04	4.59E+04	4.52E+04	4.44E+04	4.37E+04	4.29E+04
2.75E+00	2.25E+04	2.44E+04	2.40E+04	2.36E+04	2.31E+04	2.27E+04
3.50E+00	1.84E+04	1.86E+04	1.82E+04	1.79E+04	1.75E+04	1.71E+04
5.00E+00	7.81E+03	7.64E+03	7.49E+03	7.34E+03	7.19E+03	7.03E+03
7.00E+00	8.14E+02	7.96E+02	7.79E+02	7.63E+02	7.46E+02	7.29E+02
9.50E+00	9.25E+01	9.04E+01	8.85E+01	8.65E+01	8.46E+01	8.27E+01
total	1.95E+06	2.37E+06	2.36E+06	2.35E+06	2.33E+06	2.31E+06

3.4.3 선원과 검출기의 위치결정

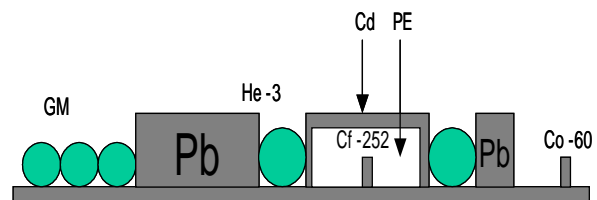
위의 코드계산 결과 선원과 검출기의 위치를 결정하는데 있어 22 cm 이상의 거리가 요구되며 흡수량측정 범위와 같은 곳을 측정하기 위한 설계가 필요하다. 또한 차폐체의 위치는 감마선원뿐만 아니라 ²⁵²Cf의 감마선 영향도 고려하여야 하기 때문에 감마선원, 중성자선원, 중성자 검출기, 차폐체, 감마검출기의 순서로 배열되었다. 검출기는 차폐체 뒤에 위치시켰으며 차폐체 뒤의 검출기는 차폐체로 인해 검출기의 solid angle이 작아져 차폐체에서 1 ~ 2 cm 떨어진 검출기 보다 검출수가 떨어진다. 따라서 위치에 따른 감마선의 영향이 민감하므로 가장 민감한 검출기를 중심으로 양 옆에 검출기 1개씩을 더하여 총 검출기 3개를 사용하였다. <그림 9>의 결과에서 선원과 검출기 사이의 거리는 22 cm 이하에서는 밀도 변화에 따라 변화가 적었으며 24 cm 이상에서는 변화는 많아졌으나 선원의 위치에 따른 감마선속 변화의 차이는 적었다. 또한 30 cm 이상에서는 선원과

검출기 사이의 거리가 멀어 감마선속이 너무 작아지므로 감마선속과 흡의 밀도변화에 따른 감마선속의 변화를 고려할 때 25 cm ~ 30 cm 범위가 가장 적합하였다. 그림27은 선원으로부터 가장 민감한 거리인 27 cm 떨어진 검출기를 중심으로 3개의 검출기가 흡의 밀도 변화에 따라 검출되는 감마선속과 그 변화를 나타낸 것이다.

<그림 11>에서 보면 밀도 1.7 ~ 1.9 변화에서 검출되는 중성자속의 변화가 매우 적게 나타나거나 그 변화 경향이 반대로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 선원의 solid angle이 커서 선원과 검출기 사이에 낮은 각도로 산란하여 검출되는 감마선에 의한 것으로 흡의 밀도가 낮은 범위에서 밀도변화 시 전방 산란하던 감마선들이 후방산란되어 들어오기 때문이다. 따라서 선원의 solid angle을 줄이기 위해 납차폐체를 선원 앞에 위치시켰으며 차폐체 두께별 변화와 선원과의 거리를 계산한 결과 2 cm의 납차폐체를 선원으로부터 4 cm 떨어진 곳에 위치시켰으며 그 결과 밀도변화에 따른 감마선속의 검출경향을 유지할 수 있었다.



<그림 11> 감마선원 앞 차폐에 따른 감마선속 비교

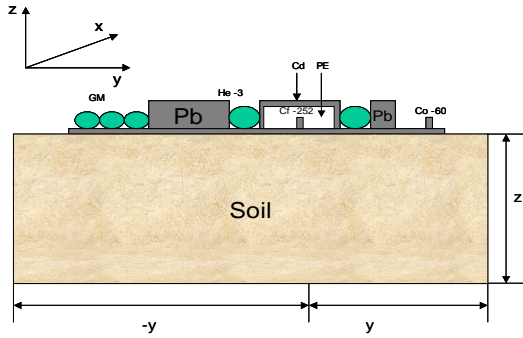


<그림 12> 후방산란형 RI 장비의 Geometry

3.5 측정 영향범위

함수량 및 밀도 측정은 각각의 방사선이 흡을 통과하여 그 변화를 검출하므로 1회 측정으로 얻을 수 있는 흡의 측정범위를 알 수 있다.⁸⁾ 따라서 측정범위를 계산하기 위해 흡의 밀도는 1.6 g/cm³, 함수량은 13.4 %에 고정시키고 그림에서와 같이 x축, y축, z축으로 흡의 범위를 늘려가며 변화에 따른 열중성자속과 감마선속을 계산하였다.

<그림 13>는 영향범위를 계산하기 위한 Geometry로 함수량 계산에서는 중성자 선원을 원점으로 좌우가 대칭이므로 각각 ±X, ±Y 양 방향과 Z 방향으로 흡의 범위를 넓혀가며 계산하였다. 계산한 결과는 <표 3>과 같으며 ±X축 방향으로서는 각각 25 cm, ±Y, Z축 방향으로서는 각각 20 cm 이상부터 변화가 없었다. 밀도계산에서는 원점에서 검출기와 선원의 거리가 다르므로 Y 방향과 -Y 방향을 따로 계산하였으며 계산한 결과를 <표 3>에 나타내었다. 흡의 크기 변화에 따라 검출 감마선속은 Z 방향으로 20 cm, ±X 방향으로 각각 25 cm, Y 방향으로 19 cm, -Y 방향으로 28 cm에서 변화가 없었다. 따라서 함수량은 RI 장비의 중성자 선원을 중심으로 50×40×20(깊이)의 부피를 측정할 수 있으며 밀도는 함수량 측정범위를 포함하는 50×47×20(깊이)의 부피를 측정할 수 있음을 알 수 있다.



<그림 13> 측정범위 계산을 위한 Geometry

<표 3> 1회 측정으로 얻을 수 있는 측정범위

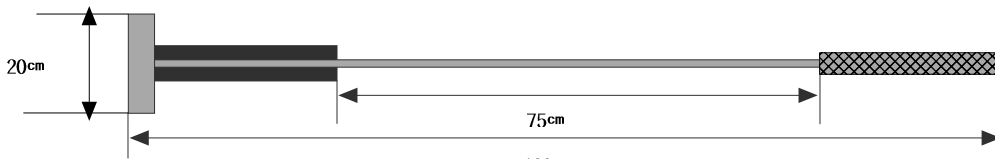
방향	수분측정범위	밀도측정범위
±X축	50 cm	50 cm
+y축	20	19
-y축	20	28
-z축	20	20

4. 함수량 및 밀도 측정실험

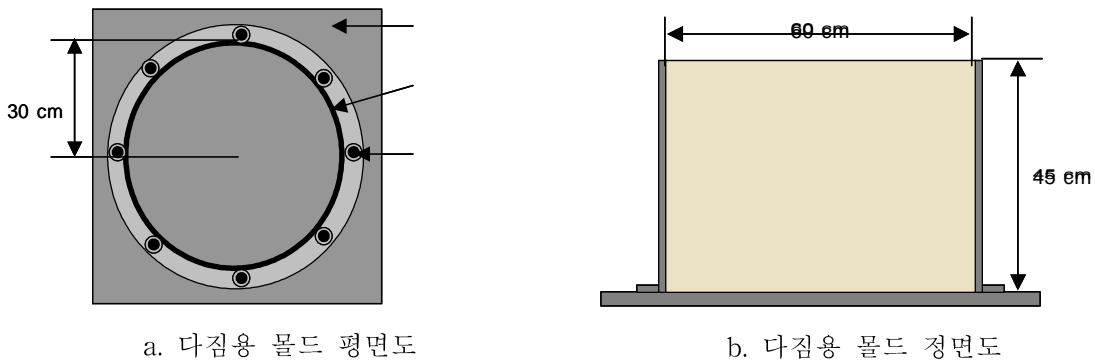
MCNP 코드로 계산한 설계결과에 따른 검출경향을 검증하기 위해 공시체를 제작하여 코드계산 결과의 검출경향과 실험을 통한 검출경향을 비교하였다. 공시체 실험은 경희대에서 투과형장비 연구개발에 이용하였으며 이 실험방법은 토목분야에 RI장비를 사용하고 있는 나라들의 실험방법과 국내 KSF 기준방법을 이용하여 실험한 것이다.⁸⁾

4.1 공시체 제작

공시체 제작에 사용된 몰드와 다짐용 햄머는 철재로 되어 있으며 몰드의 크기는 직경 60 cm, 높이 45 cm로 그림과 같다. 공시체에 사용된 흙은 강원도 둔내 IC 흙으로 밀도범위 1.6 ~ 2.1 g/cm³, 함수량범위 6 ~ 14 % 사이의 4개를 제작하였다. 함수량 변화는 물을 첨가한 뒤 자연건조를 하였고 밀도변화는 햄머를 이용 일정한 힘으로 고르게 다졌으나 실험장비로 쓰인 몰드의 크기와 햄머의 무게 특성상 2.1 g/cm³ 이상의 밀도를 제작하기 어려웠으며 제작한 공시체 4개의 밀도와 함수량은 아래의 <표 4>와 같다.



<그림 14> 공시체 다짐용 햄머



a. 다짐용 몰드 평면도

b. 다짐용 몰드 정면도

<그림 15> 공시체 제작용 다짐몰드

<표 4> 제작한 공시체의 함수량 및 밀도

	함수량(%)	밀도(g/cm ³)
공시체1	6.4	1.6
공시체2	7.8	1.75
공시체3	9.5	1.9
공시체4	13.4	2.05

표 7에서 공시체 제작에 사용한 전체질량, 물무게, 함수비는 아래와 같은 방식으로 구하였다.

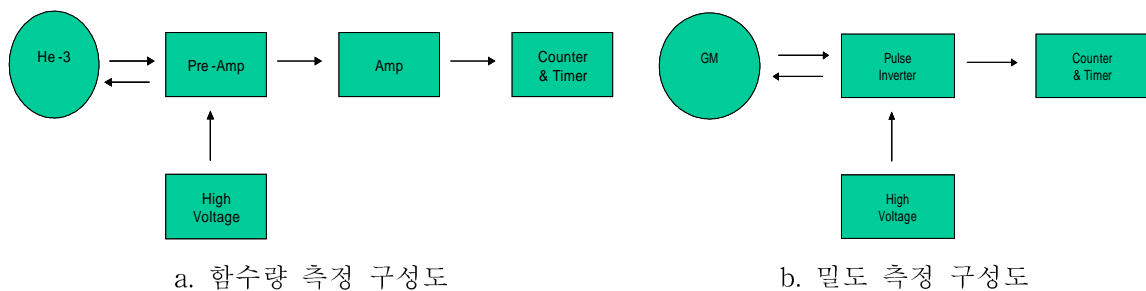
$$\text{전체질량(흙무게 + 물무게)} = \text{계획밀도} \times \text{몰드 부피} \quad \text{-----}(3-1)$$

$$\text{물무게} = \frac{(\text{함수비} \times \text{전체질량})}{(1 + \text{함수비})} \quad \text{-----}(3-2)$$

$$\text{함수비} = \frac{\text{노건조 전 흙 무게} - \text{노건조 후 흙 무게}}{\text{노건조 후 흙 무게}} \quad \text{-----}(3-3)$$

4.2 측정실험

공시체 측정실험은 High Voltage, AMP/SCA, Counter로 이루어진 NIM(Nuclear Instrument Module)/BIN과 Pre-Amplifier, Pulse-Inverter를 이용하여 검출하였다.⁸⁾ 함수량 측정은 전기신호를 전치증폭기(Pre-Amplifier)와 주증폭기(Amplifier)로 증폭하여 검출하였으며 He-3 검출기 특성상 낮은 에너지에서 검출되는 감마선의 영향을 cutoff하여 실제측수를 얻었다.¹⁰⁾ 반면에 밀도측정에서는 신호를 증폭하지 않으므로 G·M 검출기에서 검출되는 전기신호를 인식하기 위해 Pulse-Inverter를 사용하여 계측하였다. 함수량 및 밀도의 측정 구성도는 <그림 16>과 같다.



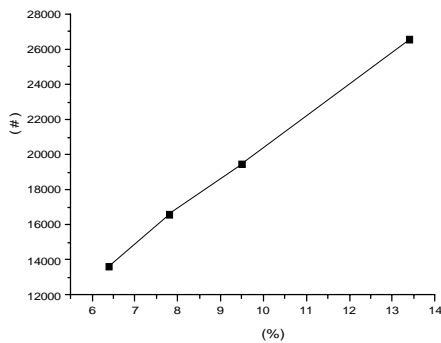
<그림 16> 실험실용 장비에 쓰인 함수량 및 밀도 측정 구성도

<표 5> 공시체의 함수량 및 밀도 측정결과

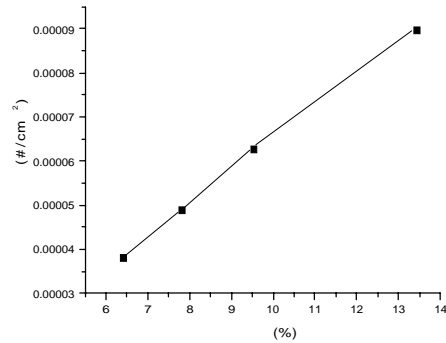
함수량 (%)	공시체 측정 (cpm)	background (cpm)	밀도 (g/cm ³)	공시체 측정 (cpm)	background (cpm)
6.4	13653	19	1.6	3495	574
7.8	16623	17	1.75	3009	575
9.5	19459	20	1.9	2810	578
13.4	26600	20	2.05	2581	575

4.3 실험결과

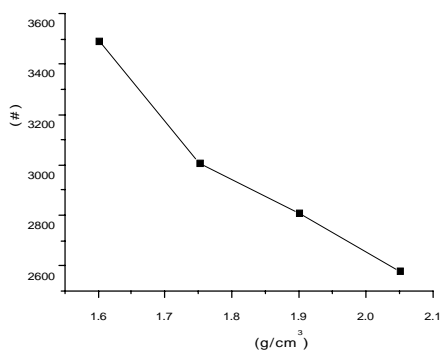
제작된 공시체의 함수량과 밀도 그리고 MCNP로 설계한 RI 장비의 기하학적 구조를 가지고 측정 실험한 중성자와 감마선의 변화는 아래의 <그림 17>, <그림 19>와 같으며 MCNP 코드로 공시체를 측정을 모사한 계산 결과는 <그림 18>, <그림 20>과 같다. 함수량 측정에 있어서 MCNP 코드모사의 중성자속 변화는 실중성자의 계측수 변화와 검출경향이 잘 일치하였고 현재 국내에서 사용 중인 투과형 장비를 사용하여 실험에 사용된 공시체를 측정된 결과 7000 ~ 14000개로 설계한 후방산란형 장비가 더 많은 수의 계측수와 변화량을 갖는 것을 알 수 있었다. 하지만 밀도 측정에 있어서 MCNP 코드모사의 감마선속 변화는 실감마선 계측수의 변화와 비슷한 검출경향을 보이지만 일치하지는 않았으며 검출되는 계측수와 변화량이 작았다. 또한 투과형 장비를 사용하여 실험에 사용된 공시체를 측정된 결과 6000 ~ 9000개로 계측수는 2배 이상, 변화량은 3배 이상 차이를 보였다. 그러나 투과형 장비의 경우 감마선 검출기가 5 개이고 본 실험에서는 감마선 검출기를 3개 사용하였으며 ^{252}Cf 의 감마선 영향을 고려하지 않았으므로 검출기 2개의 계측수와 검출기 5개에서 검출되는 ^{252}Cf 의 감마선 계측수를 고려한다면 투과형 장비에 가까운 계측수와 변화량을 얻을 수 있다. 그러나 장비의 크기를 고려할 때 검출기 3개가 적합하므로 검출기를 늘리기보다는 선원의 강도를 높이거나 측정시간을 증가시켜야 한다. 오차 1 % 미만의 신뢰 계측수를 얻으려면 선원의 강도를 증가시킬 경우 실험에 사용한 선원의 강도인 $70 \mu\text{Ci}$ 보다 4배 더 강한 선원이 필요하고 측정시간을 늘릴 경우 최소 4분 이상의 측정시간이 필요하다.



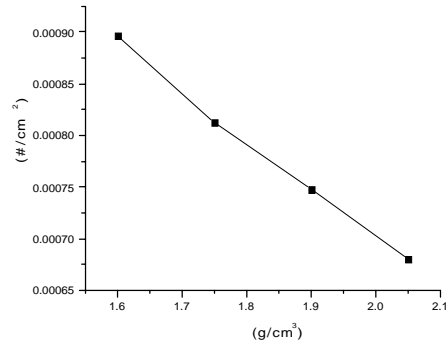
<그림 17> 함수량 변화에 따른 중성자 계측수의 변화



<그림 18> 함수량 변화에 따른 중성자속의 변화



<그림 19> 밀도 변화에 따른 감마선 계측수의 변화



<그림 20> 밀도 변화에 따른 감마선속의 변화

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 연구 개발된 투과형 장비의 선원(30 μCi 의 ^{252}Cf , 70 μCi 의 Co-60)과 검출기(He-3 검출기, G·M 검출기)를 가지고 MCNP 코드를 이용하여 후방산란형 RI 장비를 설계하였고 실험을 통하여 후방산란형 장비의 개발 가능성을 살펴보았다.

함수량 측정에 있어서 검출기의 위치는 열중성자속이 가장 민감한 선원의 바로 옆에 위치시켰으며 선원의 solid angle을 증대시키고 열중성자 검출을 용이하게 하기 위해 선원을 폴리에틸렌으로 감쌌다. 폴리에틸렌의 크기는 감마선원 및 검출기가 놓일 위치를 고려하여 직경 6 cm, 높이 2.5 cm로 결정하였다. 또한 감속재로 인해 검출기와 선원 사이에 직접 검출되는 중성자를 막기 위해 1 mm 두께의 카드뮴을 사용하여 직접 검출되는 열중성자를 차폐하였다.

밀도 측정에 있어서 선원과 검출기 사이에 직접 검출되는 감마선을 차폐하기 위해, 그리고 밀도 변화에 따른 검출경향을 저해하는 선원의 solid angle을 줄이기 위해 납차폐체를 사용하였으며 총 8 cm를 사용하여 검출기 옆에 6 cm를 선원 앞에 2 cm를 위치시켰다. 선원과 검출기는 25 ~ 30 cm 거리에서 가장 민감하였고 장비의 크기를 고려하여 총 3개의 검출기를 선원으로부터 25 cm, 27 cm, 29 cm 떨어진 곳에 위치시켰다.

설계한 장비의 측정범위는 함수량의 경우 설계한 RI 장비의 중성자 선원을 중심으로 $50 \times 40 \times 20$ (깊이)의 부피를 측정할 수 있으며 밀도는 함수량 측정범위를 포함하는 $50 \times 47 \times 20$ (깊이)의 부피를 측정할 수 있다.

MCNP 코드로 설계한 후방산란형 장비의 기하학적 구조로 실험용 RI 장비를 만들어 공시체 실험한 결과 MCNP 코드 계산결과와 잘 일치하였으며 실험결과 함수량 측정에 있어서 중성자 계측수와 변화량이 투과형 장비의 성능을 상회하였고 밀도 측정에 있어서는 감마선 계측수와 변화량이 정밀한 밀도 측정에 적합하지 않았다. 따라서 후방산란으로 정밀한 밀도측정을 위해서는 선원의 강도를 4배 이상 높이거나 또는 측정시간을 4배 이상 늘려야 한다. 또한 ^{252}Cf 에서 방출되는 감마선을 이용할 경우 현 상태의 30% 이상의 효과를 얻을 수 있으므로 ^{252}Cf 의 감마선을 이용한 연구가 필요하다.

본 연구에서 제시한 함수량 및 밀도 측정 장비의 기하학적 구조는 후방산란형 RI 장비를 개발하는데 기초자료로서 사용되어 질 수 있을 것이라 보이며 향후 정밀한 실험 검증을 하기 위해 더 많은 공시체 실험으로 교정식을 작성하여 현장 검증이 이루어져야 한다.

참고문헌

1. 공업진흥청, “한국공업규격,” 공업진흥청, KS F2306, 1995
2. 공업진흥청, “한국공업규격,” 공업진흥청, KS F2308, 1995
3. 한국건설기술연구원, “도로구조체를 지지하는 노상 및 노체의 성토시공관리를 위한 시스템 개발에 관한 연구(I),” 한국과학재단, pp.77, 1990.
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. J.F.Briesmeister, Ed., A General Monte Carlo N-particle Transport Code(MCNP), Version 4A, LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory (1993).
6. 장중하, “핵자료표,” 한국원자력연구소 KAERI/GP-106/95, pp.5, 1995.
7. 한국표준과학연구원, “중성자 플루언스 및 에너지스펙트럼 측정 연구,” 과학기술처, 1994.
8. 경희대학교, “성토 시공관리를 위한 방사성동위원소 장비 개발,” 건설교통부, 1999.

9. A. Hotzel, "High-energy gamma-rays accompanying the spontaneous fission of ^{252}Cf ", Z. Phys. A 356, pp. 299-308, 1996.
10. Glenn F. Knoll, 2nd Edition, "Radiation Detection and Measurement," JOHN WILEY & SONS, pp 211, 481-495, 1989.
11. I. F. GONCALVES, J. SALGADO, and F. G. CARVALHO, "Calibration of a Neutron Moisture Gauge by Monte-Carlo Simulation" Nucl. Geophys. Vol. 6, No. 3, pp. 371-381, 1992.
12. I. F. GONCALVES, J. SALGADO, J. NEVES and F. G. CARVALHO, "Calibration and Design Optimization of a Nuclear Surface Moisture-Density Gauge by Monte Carlo Simulation" Nucl. Geophys. Vol. 8, No. 6, pp. 527-537, 1994.