

'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MCNP4A 코드를 이용한 후방산란형 밀도/수분 측정 RI 계기의 기본 배치설계
Design of Backscatter Type Moisture/Density RI gauge by MCNP4A code

최규섭, 황주호

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천1리

임천일, 이재석

(주) 프론티어 정공

요약

본 연구에서는 실제 투과형 밀도/수분 측정기를 후방산란형으로 개량 및 시제품을 개발하기 위해 몬테카를로 코드인 MCNP4A를 이용하여 계측기 설계에 있어서 중요한 설계변수인 방사선원의 위치와 검출기 사이의 거리 그리고 계기 구성요소인 검출기의 위치 및 개수 등을 계산하여 RI계기의 기하학적 배치를 제시하였다. 수분밀도를 측정하기 위해서 Cf-252 중성자선원과 He-3 비례계수관을, 습윤밀도를 측정하기 위해 Cs-137 감마선원과 G-M 검출기를 이용하였으며 이 계산코드의 결과로 후방산란형 RI계기의 기하학적 배치 및 후방산란형 계기의 흙에 대한 영향범위를 계산할 수 있었다.

Abstract

This study suggests geometrical arrangement of RI gauge that makes use of 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 Cs-137 gamma source and G·M detectors were used for dry density measurement.

제 1 서론

성토관리에 있어서 RI계기는 같은 측정위치에서 몇 번이라도 반복측정이 가능하며, 측정소요 시간이 1분 정도로 매우 짧아 시험결과를 현장에서 바로 확인할 수 있는 이점을 가지고 있다. 또한 인적오류의 가능성이 모래치환법^{1,2)}보다 매우 작아서 정밀도가 $\pm 30\%$ 정도인 모래치환법 보다 우수하여 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있으며 측정횟수가 증가할수록 현장다짐 관리의 단가가 저렴하게 된다.

수분/밀도 측정 RI계기로는 투과형과 후방산란형 있으며 앞에서 언급한 RI계기의 국산화 개발의 필요성에 의해 수분/밀도 측정기인 투과형 RI계기를 연구하여 지금 상용화 단계에 있다. 투과형계기는 후방산란형 보다 경우 보다 넓은 측정 범위를 갖는다는 장점을 가지고 있지만 선원을 측정하고자 하는 물질 속에 고정 시켜야 하므로 건설현장에서 그 사용용도가 상당히 제한적이다. 반면에 후방산란의 경우 RI계기 자체에 선원이 고정되어 있으므로 사용 용도에 제한이 적어 건설현장에서 좀 더 다양하게 쓰일 수 있다.

따라서 본 연구는 사업화한 밀도/수분 측정기의 기존 형태인 방사선 투과형 장비를 후방산란형으로 개량 및 시제품을 개발하는 것을 목적으로 하며 방사선 측정관련 설계인자 계산과 전자회로 설계, 중성자 감속 및 감마선 차폐체 설계 및 제작, 후방산란 측정대상 실험을 통한 검교정식 도출 등을 목표로 한다.

제 2 MCNP 계산

1. MCNP4A 전산코드

MCNP4A(Monte Carlo N-particle Transport Computer Code, Version 4A)³⁾는 몬테카를로 방법을 이용하여 무작위적으로 일어나는 현상을 해석한다. 즉, 난수를 발생시켜 인위적으로 표본을 추출함으로써 자연현상등이 진행하는 과정을 모사한다. 이 전산코드는 1977년에 Los Alamos 연구소에서 처음 개발되었다. 그후 1986년 대형컴퓨터용으로서 MCNP3가 개발되었고, 1993년에 개인용 컴퓨터에서도 사용 가능한 MCNP4A가 개발되었다. 이 코드는 임의의 3차원 기하학적 구조에 대해 중성자, 광자 및 전자에 대한 수송문제를 풀 수 있다. 이때 MCNP4A 전산코드로 계산할 수 있는 중성자의 에너지 범위는 $10^{-11} \sim 1000\text{MeV}$ 이다. 본 연구에서는 이 MCNP4A를 사용하여 RI계기 설계변수를 결정하고자 한다.

2. 수분밀도 측정부분

2.1 중성자 선원 및 선원의 위치 결정

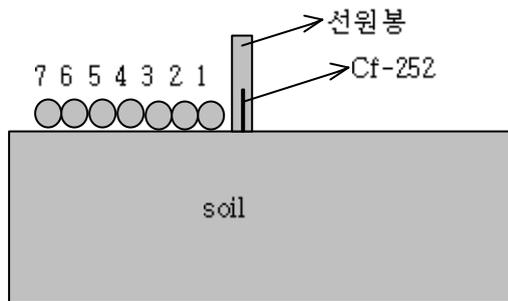
RI계기에서 사용할 수 있는 중성자 선원은 밀봉선원이어야 하며 그 종류는 Ra-Be, Am-Be, Po-Be, Ac-Be, Pu-Be, Cf-252 등이 있다. 이들 중성자 선원 중 방사능대비 방출 중성자의 강도가 가장 높은 Cf-252 선원을 본 연구의 중성자 선원으로 결정하였다. Cf-252 중성자 선원은 자발핵분열을 일으키면서 중성자를 방출하고 핵분열 할 때 방출되는 중성자는 연속적인 스펙트럼을 가진다. ²⁵²Cf의 에너지 스펙트럼을 묘사함에 있어서는 일반적으로 Watt스펙트럼과 Maxwellian스펙트럼을 사용하고 ²⁵²Cf로부터 나오는 중성자 스펙트럼에 대해서는 선진국의 여러 연구기관에서 측정 및 평가가 이루어졌으며 투과형 연구시 사용한 Watt 스펙트럼을 사용하기로 하였다.⁴⁾

2.2 중성자 검출기의 위치 및 개수

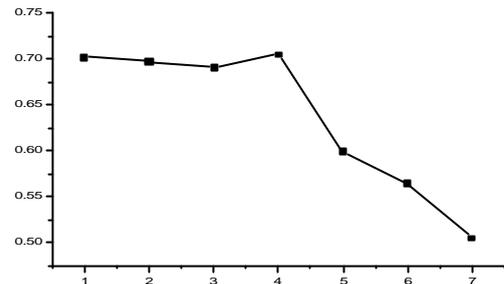
검출기의 위치를 결정하기 위해 선원의 좌측으로 직경 2.5cm, 길이 17cm인 He-검출기를 좌측으로 7개를 배열하였고 수분밀도를 5~25%까지 변화시키면서 측정되는 중성자

의 검출을 비교한 결과 <그림 1>과 같았다.

본 연구에서는 검출기의 위치를 선정하기 위해 높은 중성자속과 충분한 측정범위를 가지며 밀도변화에 민감한 위치를 결정한다. <그림 2>은 수분밀도가 0.07875~0.46875까지 5%씩 증가시키어 총중성자속의 변화량을 평균하여 나타낸 것이다. 즉 밀도 0.07875g/cm³일 때 총중성자속이 a, 밀도 0.165g/cm³일 때 총중성자속을 b라 하면 총 중성자속의 변화량은 $\frac{a-b}{a} = x_1$ 이 된다. 이와 같은 방법으로 계산된 x_2, x_3, \dots 의 평균값을 나타낸다.⁵⁾



<그림 1> 검출기 결정 MCNP Geometry



<그림 2> 각 검출기의 중성자속 평균 변화량

선원 왼쪽으로부터 1~7번까지 검출기를 위치시켰으며 선원에 가까울수록 중성자속이 증가하였다. <그림 2>에서 보는 바와 같이 1~4번 검출기가 변화량이 가장 크며 선원에서 가까우므로 중성자속도 5~7번 검출기에 비해 컸다. 따라서 1, 4번 위치의 검출기를 검출기 위치로 정하고 좀 더 많은 량의 검출 수를 위해 변화량의 차이가 적은 2, 3번 검출기 중간에 1개의 검출기를 더 선정하여 총 3개의 검출기로 결정하였다.

3. 습윤밀도 측정부분

3.1 감마선원의 종류 및 특징

FI계기의 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/cm³의 범위에 있는 흙의 밀도를 측정하려면 350~1000KeV의 에너지를 발생시킬 수 있는 감마선을 방출하는 동위원소가 필요하게 되며 여기에 Cs-137, Co-60등의 방사성 동위원소가 주로 사용된다.^{6,7)}

3.2 선원 및 위치 결정

Cs-137은 원자핵 붕괴당 0.84개의 감마선이 0.6616MeV의 에너지를 가지고 방출되고 Co-60은 원자핵 붕괴당 1.17MeV, 1.332MeV의 감마선이 2개 방출된다. 그러므로 같은

방사능을 가지는 감마선원일 때에는 Co-60이 Cs-137보다 2배의 방출효과를 나타낸다. 또한 감마선의 에너지에 있어서도 Co-60에서 방출되는 감마선의 에너지가 Cs-137의 에너지에서 보다 2배정도 높은 값을 가지므로 Cs-137의 선원을 사용했을 때 보다 넓은 범위를 측정할 수 있다. 하지만 후방산란에 사용하기에 높은 에너지일수록 차폐에 어려움이 있다. 또한 0.35~2.5MeV의 에너지 범위에서 감마선의 물질과 상호작용시 compton산란이 지배적인데 에너지가 클수록 흩 속에서 compton산란 없이 낮은 각도로 검출되는 것이 많아 효과적인 감마선 검출이 어렵다. 따라서 투과형에서와는 달리 후방산란형에서는 Co-60에 비해 Cs-137이 더 적합하다.

밀도를 측정하기 위해서 감마선원의 위치를 결정하는 것은 매우 중요한 일이다. 앞 절에서 중성자 선원의 위치가 결정되었고 수분밀도와 습윤밀도를 동시에 측정하기 위해서는 중성자 선원과 감마선원이 같이 사용되어야 한다. 결국 후방산란의 경우 검출기와 같은 높이인 지표면에 위치해야 한다.

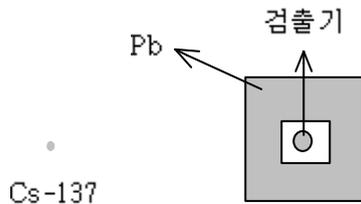
3.3 감마선 차폐체 두께 및 길이 결정

감마선 차폐를 위해 <그림 3>과 같이 geometry를 설계하여 납 두께를 1cm ~ 7cm까지 변화시키며 MCNP로 계산한 결과 <표 3>와 같다. 납 차폐를 통과하여 검출되는 flux의 양은 <그림 4>에서 보이는 바와 같이 두께 증가에 따라 지수적으로 감소하며 두께 7cm 이상부터는 두께변화에 따라 검출되는 flux의 변화량이 적으므로 7cm로 결정하였다.

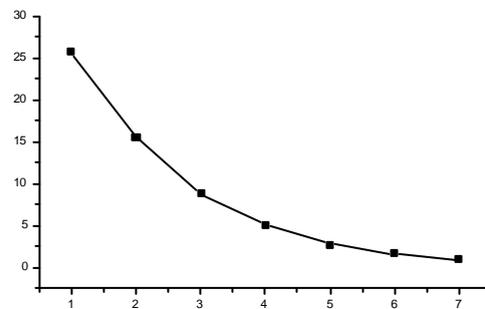
차폐체의 X축 길이에 따른 변화는 검출되는 flux의 양이나 변화량에 거의 영향을 미치지 않으므로 GM검출기 길이에 맞추어 23,26499cm로 결정하였다.

<표 1> 납 두께에 따른 감마선속의 변화

Pb 두께	1	2	3	4	5	6	7
flux($\times 10^{-9}$)	13.3201	4.34884	1.40683	0.399428	0.129258	0.0433203	0.01136



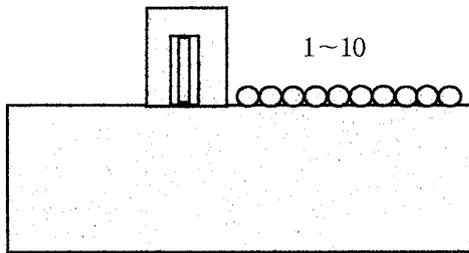
<그림 3> MCNP를 이용한 납두께 측정



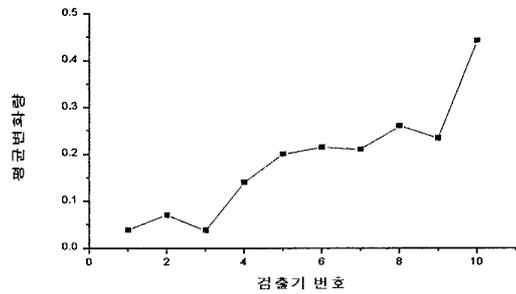
<그림 4> 납두께 변화에 따른 총감마선속의 변화

3. 4 감마 검출기의 위치 및 개수 결정

검출기의 위치를 결정하기 위해 <그림 5>과 같이 차폐체에 인접하는 위치에서 +Y축 방향으로 GM검출기 10개를 배열하였다. 감마선원으로부터 방출된 감마선이 후반산란하는 흡의 습윤밀도를 5, 10, 15, 10, 25%로 변화시키며 각 검출기에서의 총 감마선속을 측정하였다. <그림 6>는 각각의 GM검출기에서 밀도변화에 따른 감마선 검출수의 변화량으로서 1번~4번 검출기는 선원으로부터 가까우므로 총감마선속은 크나 그에 비해 변화량이 너무 적어 제외하였다. 8번, 9번, 10번의 경우 변화량은 크나 선원으로부터 거리가 멀어 측정되는 총감마선속이 작은 값을 보이므로 8번 이후의 검출기는 제외한다. 그러므로 5, 6, 7번의 위치를 검출기가 놓일 위치로 결정한다.



<그림 5> 검출기 결정 MCNPGeometry

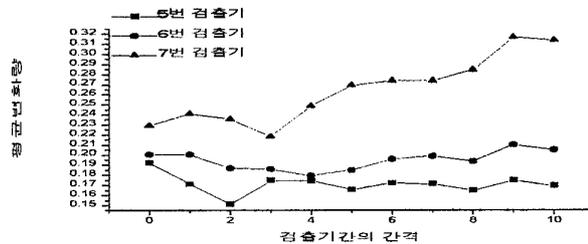


<그림 6> 각 검출기의 감마선속 변화량

3. 5 감마 검출기의 배열 결정

3. 4절에서 결정된 3개의 감마선 검출기 중 6번 검출기를 기준으로 1mm씩 간격을 증가시켜 가면서 습윤밀도 변화에 따른 감마선속을 계산하여 변화량이 큰 위치에 감마선 검출기를 배열하였다.

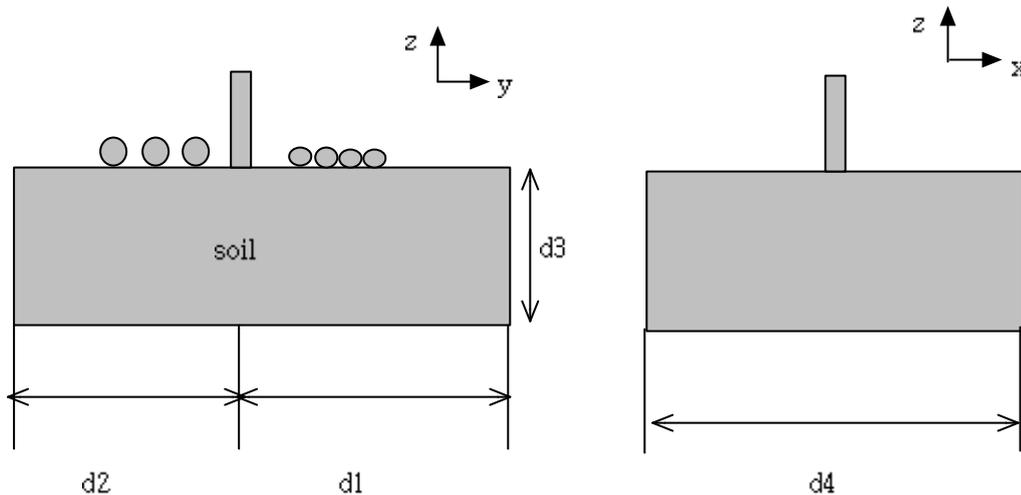
<그림 7>은 습윤밀도 변화에 따른 총감마선속의 변화량을 나타낸 것으로 5, 6번 검출기는 간격이 증가할수록 선원가 가까워지므로 검출량은 증가하나 변화량은 감소한다. 7번 검출기의 경우 변화량은 계속 증가하지만 선원과 너무 멀어져 검출되는 감마선의 양이 너무 작아진다. 그러므로 감마선 검출기의 배열은 변화량과 검출량을 고려할 때 각각의 검출기간의 간격없이 붙여서 배열하였다.



<그림 7> 각 검출기의 평균 감마선속 변화

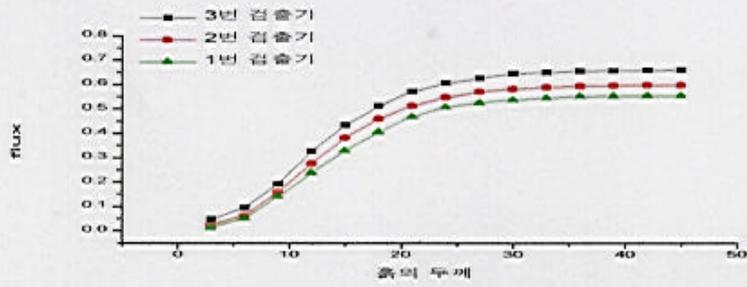
4. RI계기의 영향범위 계산

RI 측정에서 얻어지는 밀도 및 수분량은 선원으로부터 방출된 방사선이 측정대상매질을 통과하여 검출부에 도달할 때까지의 변화에 따라 그 값이 결정되므로 RI계기에서 방출된 방사선이 흙 속에 미치는 영향범위를 파악해 보면 측정이 대표하는 지반의 체적을 알 수 있다. 흙 속에 미치는 영향범위를 알기 위해 수분밀도와 습윤밀도를 10%로 고정하고 수평방향과 깊이의 크기를 <그림 8>과 같이 변화시켜가면서 계산하여 흙의 두께변화에 따라 계산되는 열중성자속과 감마선의 변화로서 영향범위를 설정하였다.

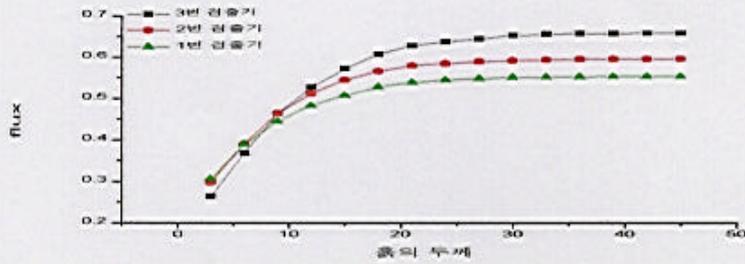


<그림 8> 측정범위 계산을 위한 MCNP geometry

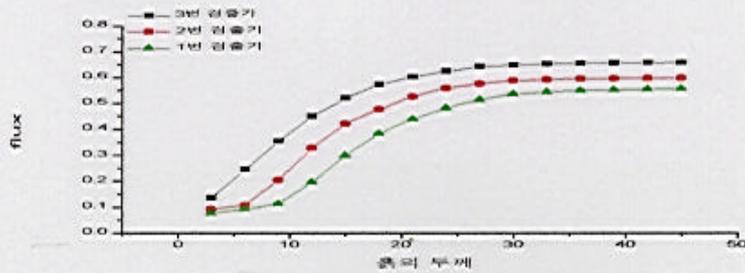
수분밀도 계산에서는 d_1 , d_2 , d_4 방향으로 33cm 이상의 두께 변화에서 flux의 변화가 없어지고 d_3 방향으로 39cm 이상에서 변화가 없어진다. 그리고 습윤밀도 계산에서는 d_3 방향으로 23cm, d_4 방향으로 15cm 이상의 두께 변화에서 flux의 변화가 없어지고 d_1 방향으로 25cm, d_2 방향으로 12cm 이상에서 flux 변화가 없어졌다. 다음의 <그림 9>, <그림 10>, <그림 11>, <그림 12>, <그림 13>, <그림 14>, <그림 15>, <그림 16>은 방사선원으로부터 흙의 두께변화에 따른 열중성자속과 감마선속의 변화를 d_1 , d_2 , d_3 , d_4 각 방향에 대해 나타낸 것이다.



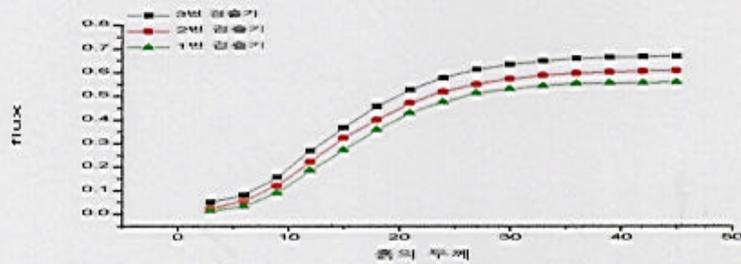
<그림 9> X축 방향으로 홀의 두께 증가에 따른 열중성자속 변화



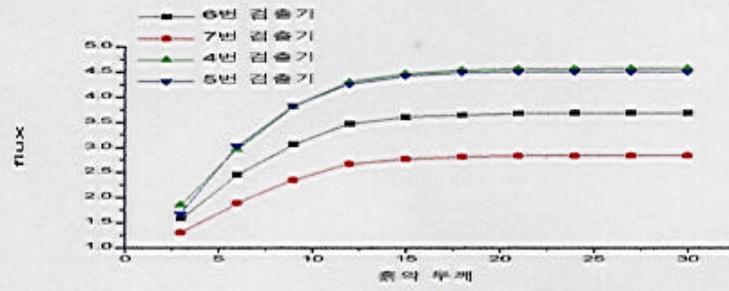
<그림 10> Y축 방향으로 홀의 두께 증가에 따른 열중성자속 변화



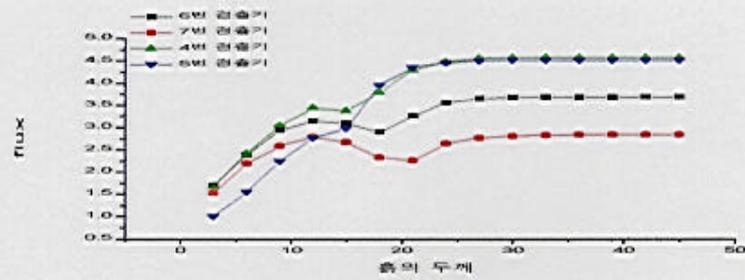
<그림 11> -Y축 방향으로 홀의 두께 증가에 따른 열중성자속 변화



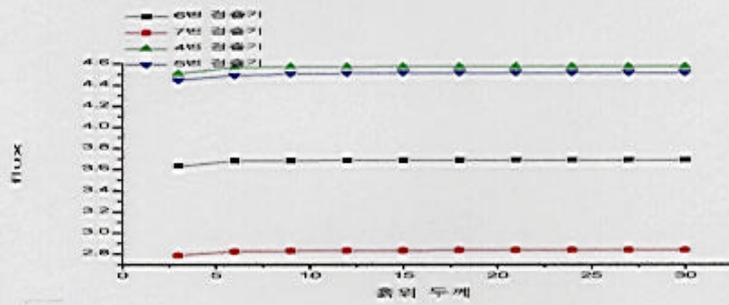
<그림 12> -Z축 방향으로 홀의 두께 증가에 따른 열중성자속 변화



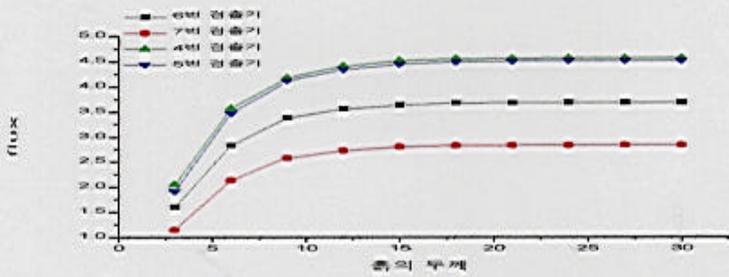
<그림 13> X축 방향으로 흡의 두께 증가에 따른 감마선속 변화



<그림 14> Y축 방향으로 흡의 두께 증가에 따른 감마선속 변화



<그림 15> -Y축 방향으로 흡의 두께 증가에 따른 감마선속 변화



<그림 16> -Z축 방향으로 흡의 두께 증가에 따른 감마선속 변화

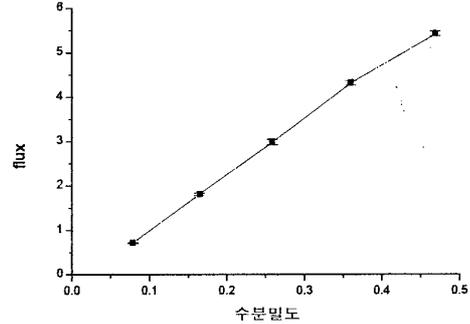
5. MCNP CODE 모사 결과

5. 1 수분밀도 MCNP 모사

2장의 MCNP CODE 모사로 얻은 geometry를 사용하여 중성자 측정 결과 <표 2>와 <그림 17>과 같은 결과를 얻었다.

<표 2> 수분밀도 변화에 따른 총중성자속

수분밀도	flux(10^{-9})	상대오차(%)
0.07875	0.72177	0.0215
0.165	1.81651	0.0152
0.25875	2.99282	0.0193
0.36	4.32088	0.0100
0.46875	5.43236	0.0090



<그림 17> 수분밀도 변화에 따른 총중성자속

5. 2 습윤밀도 MCNP 모사

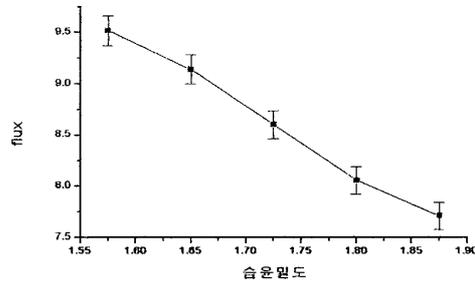
감마선의 경우 3장에서 한 방향으로만 감마선이 나오도록 good geometry 형식을 취한 것과 검출기 방향만을 차폐한 것을 비교하여 <표 3>와 <표 4>, <그림 18>에 나타내었다. 검출기 부분만 차폐한 경우 후방산란하지 않고 직접 들어오는 감마선속의 양이 극히 적고 <그림 5>에서 제시한 geometry와 비교하여 더 많은 감마선속과 변화량을 얻을 수 있었다.

<표 3> 습윤밀도 변화에 따른 총감마선속
(good geometry)

습윤밀도	flux(10^{-9})	상대오차(%)
1.575	6.81581	0.0177
1.65	6.59895	0.0181
1.725	6.26783	0.0187
1.8	6.05889	0.0188
1.875	5.65559	0.0195

<표 4> 습윤밀도 변화에 따른 총감마선속
(검출기 방향만 차폐)

습윤밀도	flux(10^{-9})	상대오차(%)
1.575	9.51804	0.01517
1.65	9.14125	0.0156
1.725	8.60342	0.0159
1.8	8.05767	0.01646
1.875	7.71274	0.0171



<그림 18> 습윤밀도 변화에 따른 총감마선속 변화

제 3 결과 및 고찰

MCNP CODE 계산으로 후방산란형 밀도/수분 측정기의 기하학적 배치를 수행하였다. 수분밀도를 측정하기 위해서 Cf-252 중성자선원과 He-3 비례계수관을 사용하여 습윤밀도를 측정하기 위해 Cs-137 감마선원과 G-M 검출기를 이용하였다. 수분밀도 측정요소 중 열중성자 검출기의 위치와 개수는 선원의 좌측인 -Y축 방향으로 -2.81cm, -6.62cm, -10.43cm에 총 3개의 He-검출기를 지표면에 위치하도록 하였다. 습윤밀도 측정에 있어서 검출기의 위치로는 선원의 우측인 +Y축 방향 19.265cm, 21.175cm, 23.085cm에 총 3개를 지표면에 위치하도록 하였고 선원으로부터 후방산란하지 않고 직접 검출되는 감마선을 막기 위해 납 차폐체를 설치하였으며 차폐체는 7cm 두께로 GM검출기 바로 옆에 위치하도록 결정하였다. 또한 RI계기의 측정범위로 수분밀도 측정부분의 경우 d1, d2, d4 방향으로 33cm, d3 방향으로는 39cm이고 습윤밀도 측정부분의 경우 d1, d3 방향으로 25cm, d2 방향으로는 12cm, d4 방향으로는 15cm가 된다.

이와 같은 geometry로 MCNP 계산을 한 결과 후방산란형 시스템 개발을 위해 중성자와 감마선의 검출 경향을 파악하였다. 중성자의 경우 수분밀도 변화에 따른 열중성자속의 변화량이 커서 정밀한 계산이 가능하나 감마선의 경우 변화량 적어 습윤밀도의 정밀한 계산을 위한 연구가 필요하다. 향후 이 기하학적 배치를 토대로 완전한 후방산란형 모델을 제작하여 실험에 의한 수분밀도와 습윤밀도 결정교정식을 얻어 현장실험에 의한 검증이 요구된다.

참고문헌

1. 공업진흥청, "한국공업규격," 공업진흥청, KS F2306, 1995
2. 공업진흥청, "한국공업규격," 공업진흥청, KS F2308, 1995
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. Glenn F. Knoll, 2nd Edition, "Radiation Detection and Measurement," JOHN WILEY & SONS, pp 211, 481-495, 1989.

5. 최원철, "Monte Carlo 방법을 이용한 수분/밀도 측정 RI계기의 기하학적 배열 설계," 경희대학교 석사학위논문, 1997.
6. 경희대학교, "성토 시공관리를 위한 방사성동위원소 장비 개발," 건설교통부, 1996.
7. 경희대학교, "성토 시공관리를 위한 방사성동위원소 장비 개발," 건설교통부, 1998.