성토다짐의 밀도 및 수분 측정에 관한 연구

김기준 (인천전문대학 제어계측과)

요약 본 연구에서는 성토 다짐용 밀도 및 수분의 측정을 위하여 중성자 검출기는 2개 이상 그리고 감마선 검출기는 5개 이상 사용하여함을 알 수 있었고, 또한 방사능 대비 방사선 방출수가 다른 선원에 비하여 우수한 Co-60 감마선원과 Cf-252 중성자 선원을 본 계기에 이용하는 것이 정밀도를 향상시키기 위하여 유리하다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 설계하고 제작한 성토 다짐용관리용 밀도 및 수분 함량 측정기는 국내의 도로 공사 현장에서 성토의 다짐관리를 위하여 이용될 수 있을것으로 사료된다.

I. 서론

최근에 이르러 성토시공용 다짐장비의 개선으로 성토다짐을 위한 시공속도가 매우 빨라지고 있으나 국내에서 적용하고 있는 현장다짐밀도 및 수분함량 측정방법은 신속한 측정이 어려운 여건이며 외국에서 수행하고 있는 성토시공의 통계적 품질관리를 불가능한 실정이다. 또한 현재 추진중인 대단위의 사회간접자본시설 건설과 앞으로 예견되는 건설시장의 개방하에서는 보다 더 신속, 정밀한 시공이 요구되어지고있다.

도로의 포장후 도로의 포장파손의 주요원인인 노상 및 노체의 지지력부족, 지반의 부등침하 등이 도로파손의 부분적인 갈라짐이나 전체적인 변형을 일으키는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상의 주요원인은 성토다짐관리의 체계적이고 과학적인 품질관리가 이루어지지 않기 때문이다. 현재 국내에서 성토다짐관리에 이용되는 방법은 모래치환법에 의한 흙의 단위중량 시험방법(KSF 2311)과 흙의 함수량 시험방법(KSF 2306)이다. 이들 방법은 최근 같은 빠른 시공속도가 요구되는 상황에서는 관리 효율상의 문제와 측정자의 오차로 인해 낮은 신뢰도를 갖고 있으며, 과학적이고 체계적인 성토다짐관리를 불가능하게 하고 있다. 선진 외국에서는 이미 1960년대부터 방사성동위원소를 이용한 흙의 밀도 및 함수량을 측정하는 방법에 대해 연구하여 최근에는 토목분야 뿐만아니라 건축, 기계 분야 등 산업전반에 걸쳐 그 이용을 확대하고 있다[1].

방사성 동위원소를 이용한 성토의 밀도 및 수분함량 측정의 방법은 1941년 B. Pontecormo에 의해서 제안된 후 꾸준히 개발되었다. 선진국들은 방사성동위원소를 이용한 RI 계기의 개발로 성토의 밀도 및 수분함량을 측정하여 신속하고 정확한 토목시공의 품질관리를 수행해 오고 있다.

우리 나라의 경우 1970년대에 국립건설연구소와 한국도로공사에서 미국에서 개발한 RI 계기를 도입하여 성토시공다짐관리에 이용하고자 하였다. 그러나 이 계기는 국내 원자력법상 그 사용절차가 복잡하고 계기에 사용하는 방사성동위원소에 대한 엄격한 관리를 요구하게 되어 연구개발이 미루어졌다. 또한 국내 실정에 맞는 수분함량 측정계기를 개발하였으나 이 역시 장비의 비대함으로 현장 적용이 이루어지지 않았다[2].

기존에 미국 등에서 개발된 RI 계기는 수십 mCi 의 방사능을 가진 선원을 사용하고 있으며, 이 방사능의 세기는 현재 우리 나라의 원자력법상 신고 및 허가를 받아야 하기 때문에 계기의 국내 이용에 있어서 여러 가지 제약을 가져온다. 따라서 본 연구에서의 RI 계기는 우리 나라 원자력법상 신고만으로 사용이 가능한 100μCi 이하의 방사능의 세기를 갖는다. 기존의 RI 계기에 비해 약 1/1000으로 줄어든 방사능의 세기로 인해 본 연구에서 개발하는 RI 계기는 방사선계측수와 밀도 및 수분함량의 상관성이 기존의 계기보다 떨어지게 된다. 따라서 방사선계측수와 밀도 및 수분함량의 상관성을 높이기 위한 보정이 필수적으로 요구된다.

2. 검출기 설계

2.1 중성자 검출기

수분함량을 측정하기 위해 측정하는 중성자는 고속중성자로서 흙속의 수분과 충돌한 중성자는 그 에너지를 잃고 열중성자로 변한다. 이 열중성자는 고속중성자 측정을 위해 카드뮴을 이용하여 제거한다. 열중성자가 제거되면 고속중성자만이 중성자 검출부로 들어오게 된다. 이 고속중성자는 다시 폴리에틸렌과 충돌하여 열중성자로 바뀐후 중성자 검출기 속으로 입사된다. 이와같이 측정된 중성자는 흙속의 수분함량 변화에 따라 그림 1과 같은 관계를 갖는다[3].

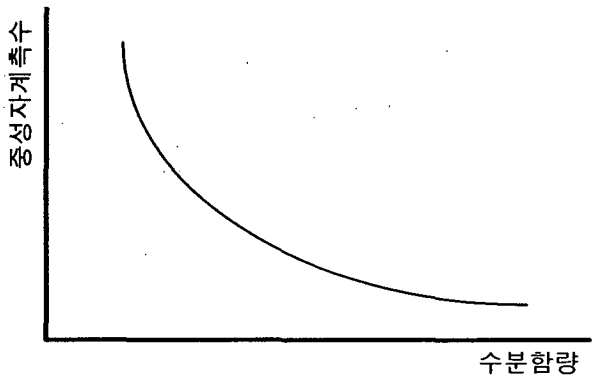

그림 1. 중성자계측수와 수분함량의 관계

중성자 검출기는 그 크기가 지름방향으로 변하지 않고 길이방향으로만 변화하기 때문에 고속중성자 검출부의 크기는 길이방향으로 변화시켰다. 또한 폴리에틸렌속의 중성자 검출기의 위치를 결정하기 위해 MCNP4A 전산코드를 이용하여 결정하였다. 폴리에틸렌의 크기는 10×25×7 cm 크기로 결정하고 검출기사이의 거리를 변화시켜가며 검출기속의 중성자 플럭스(Flux)를 측정하였다. 그림 2는 중성자검출부를 설계하기 위한 MCNP4A 전산코드의 입력 중성자검출부의 개략도이다.

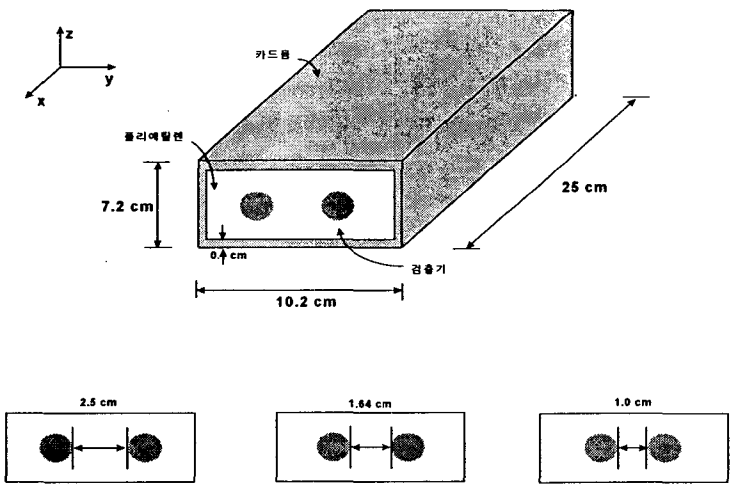

그림 2. 중성자 검출부 개략도

MCNP4A 전산코드의 계산결과는 표 1과 같다. 즉, 검출기 사이의 거리는 가까울수록 증가하는 경향을 보이나 그 값은 차이는 크지 않음을 알 수 있었다. 이 결과는 이전의 연구결과와 비교하여 볼 때 폴리에틸렌의 x축방향으로 길이 변화는 y축 변화에 따른것보다 검출되는 중성자의 수에 영향을 크게 미치지 않는것과 같은 것임을 알 수 있었다. 따라서 RI계기의 최종적인 중성자 검출부의 기하학적 배치는 이전의 연구결과를 바탕으로 x,y축은 그대로 z축은 약간의 변화를 주어서 그림 2와 같이 설계하고 검출기 사이의 거리는 1.64cm 로 결정하였다.

표 1. 중성자 검출기 사이의 거리에 따른 중성자 검출수의 변화

	검출기 1	검출기 2
2.5 cm	3.30807E-4	3.42815E-4
1.64 cm	3.48195E-4	3.52503E-4
1.0 cm	3.57815E-4	3.63449E-4

2.2 감마선 검출기

방사성 동위원소를 이용한 밀도 측정은 감마선이 물질을 투과할 때 물질에 흡수되어 손실되는 비율이 물질의 밀도와 일정한 관계가 있다는 점을 이용하는 것이다. 이 이론은 조밀한 상태의 흙에서는 흡수량이 많고 투과량이 적은 반면 느슨한 상태의 흙에서는 흡수량이 적고 투과량이 많아진다는 원리이다. 일반적으로 1.4~2.7g/㎤의 범위에 있는 흙의 밀도를 측정하려면 350~1000keV의 에너지를 발생시킬 수 있는 감마선을 방출하는 동위원소가 필요하게되며 여기에 Cs-137, Co-60 등의 방사성 동위원소가 주로 이용된다.

감마선 검출기에서 감마선계측에 가장 민감한 부분은 감마선선원으로부터 x축방향으로 25.275 cm 떨어진 지점이었다[4]. 따라서 검출기 5개를 이 지점을 중심으로 하여 +x축으로 4.775 cm, -x축으로 4.775 cm 걸쳐 배열하였다. 또한 선원으로부터 감마선검출기로 들어오는 감마선의 입사각에 대한 감마선계측수의 영향을 알아보기 위해 틸트장치를 설치하였다. 감마선 검출부의 설계 개략도는 그림 3과 같다.

감마선은 감마선검출기주위를 둘러싼 물질에 의해서 그 응답에 영향을 받게 된다. 특히 검출기 주변의 물질은 감마선선원에 의해 방출된 일차 감마선과의 상호작용에 의해서 이차방사선을 생성하게 된다. 이 이차방사선이 검출기에 도달하는 경우에는 계수되는 감마선수에 크게 영향을 미치게 된다. 특히 감마선이 검출기 주변의 물질과 컴프턴산란(compton scattering), 광전흡수(photoelectric absorption), 전자쌍생성(pair production)의 반응을 일으키면 특성 X선 , 소멸방사선(annihilation radiation) 등을 방출하게 된다[5]. 이 상호반응 메커니즘을 나타내면 그림 4와 같다.

이와 같은 효과는 검출기 주변의 물질이 높은 원자번호를 가지고 있으면 더 큰 에너지를 가진 방사선이 방출되게 된다. 따라서 검출기 주변에 높은 원자번호의 물질을 피해야 한다. 이차방사선의 발생은 피할 수는 없지만 가려막기 물질을 사용하여 그 효과를 어느정도 줄일 수 있게 된다. 가장 많이 이용되는 방법은 복층 가력막기(graded shield) 방법으로서 하나의 높은 원자번호를 가진 물질에 낮은 원자번호를 가진 물질을 붙여 검출기 주변에 설치하는 것이다. 일반적으로 높은 원자번호의 물질은 납을 사용하고 낮은 원자번호의 물질은 알루미늄을 사용한다. 높은 원자번호의 물질은 감마선의 투과를 방지하여 검출기 주변의 물질과 상호작용을 줄인다. 낮은 원자번호의 물

질은 높은 원자번호의 물질에서 나오는 방사선을 막는 역할을 한다. 즉, 높은원자번호 물질에서 나오는 특성 X-선 같은 방사선을 낮은 원자번호의 물질이 흡수하여 저에너지 또는 투과력이 약한 X-선을 방출하게 된다. 본 연구에서도 감마선검출부 상단에 알루미늄과 납을 차례로 붙여 이차방사선에의한 효과를 줄였다.

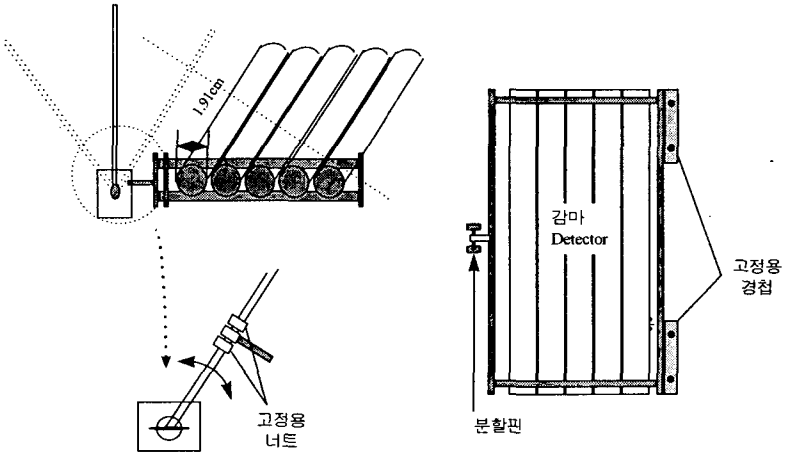

그림 3. 감마선 검출부 설계 개략도

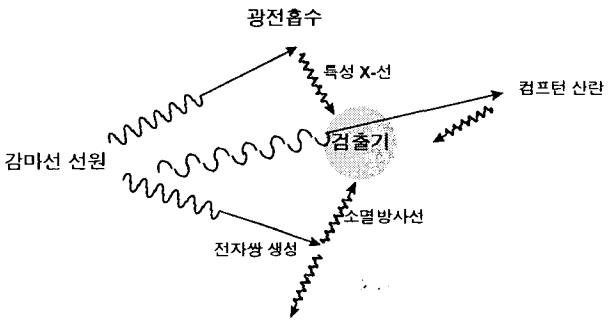

그림 4. 2차 방사선 생성 메커니즘

3. RI 계기 설계 및 제작

그림 5는 RI계기의 중성자 검출부와 감마선검출부의 정면도와 평면도로서 RI계기의 기초 설계시 사용한 자료이다. 그림 5는 실제 RI 계기를 제작하는데 있어서 전체적인 설계개념을 갖기에는 충분하나 실제제작에는 불충분하다. 따라서 실제설계를 할 수 있는 설계도가 필요하였다. 아래의 내용은 RI계기의 실제제작에 사용한 설계개략도와 부분상세도이다.

먼저, RI계기의 선원봉은 중성자검출부 하단부에 위치한다. 선원봉에는 감마선선원과 중성자선원이 같이 들어있고 이전의 연구결과에 동일하게 중성자선원과 감마선 선원의 사이가 RI계기의 밑판에서 20 cm 거리에 있게 그림 6과 같이 설계하였다.

선원봉을 RI계기에 고정하게 위해서는 선원봉의 중성자 검출부침입이 불가피하였다. 따라서

선원봉의 중성자 검출부침입의 영향을 최소로 하기위해 중성자 검출기 영향범위를 침입하지 않는 부분까지 선원봉을 침입시켰다. 그림 7은 중성자 검출부와 선원봉의 연결부위를 설계한 개략도이다.

앞에서도 언급한 것과 같이 감마선검출부는 감마선 입사각에 대한 감마선 검출의 영향을 알아보기 위해 틸트(tilt)장치를 설치하였다. 또한 이차감마선으로 인한 감마선의 계수를 줄이기 위해 감마선 검출부 상부에 알루미늄판과 납판을 차례로 장착하였다. 방사선검출부와 PCB 기판부를 분리하기 위한 알루미늄판을 0.5 cm 로 설치하고 볼트를 이용하여 고정하였다. 이 알루미늄판위에 PCB 기판을 스페이서(spacer)를 사용하여 고정하였다. 그림 8은 방사선검출부와 잡음차폐용 알루미늄판 그리고 PCB 기판부분의 설계개략도이다.

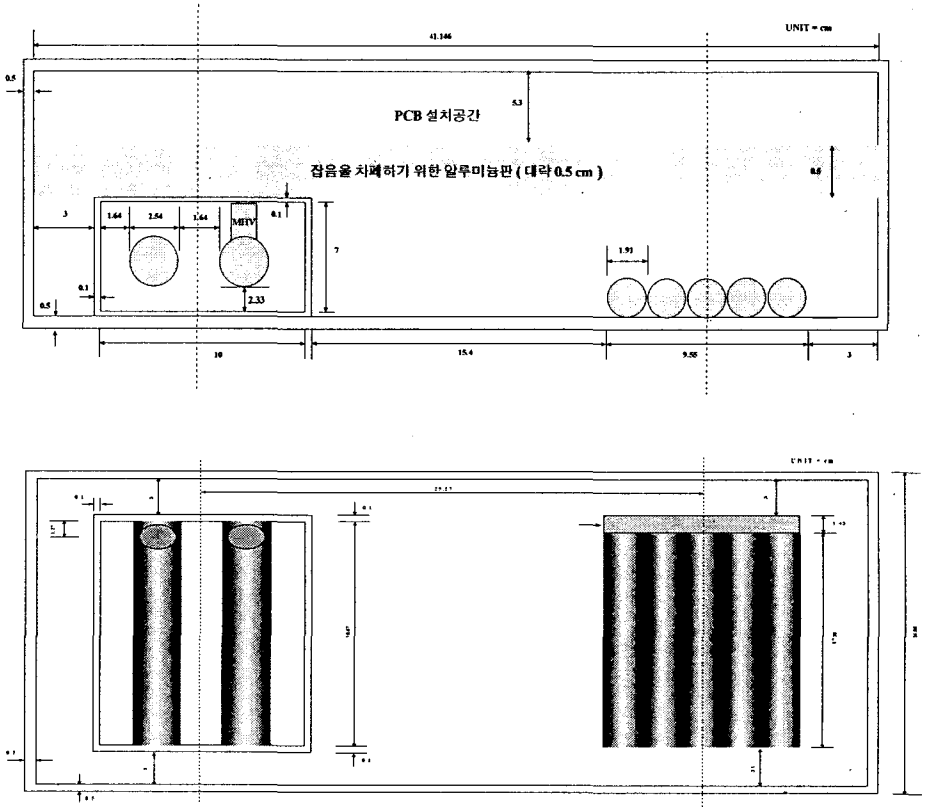

그림 5. RI계기 방사선검출부 정면도와 평면도

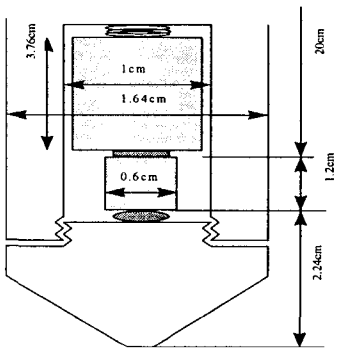

그림 6. 선원봉의 설계

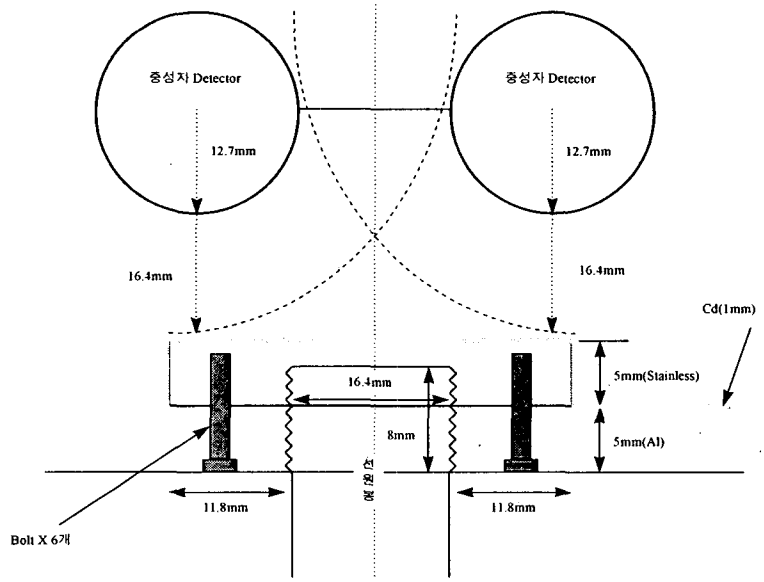

그림 7. 중성자검출부와 선원봉의 연결부위

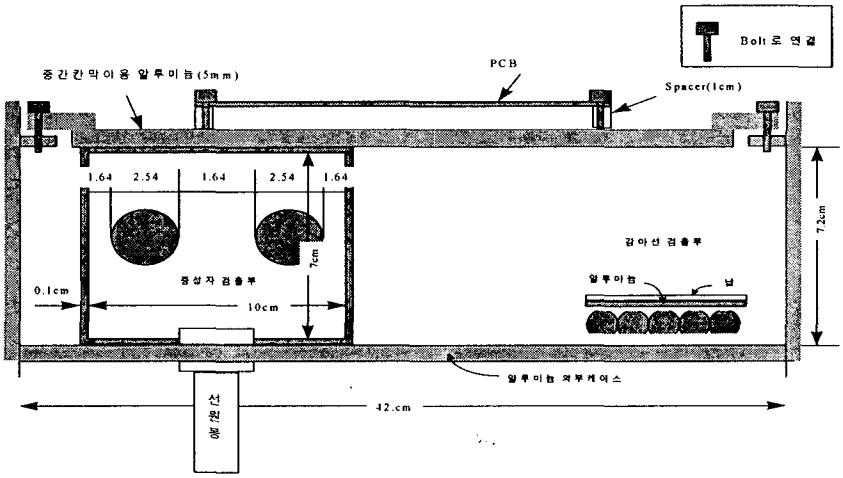

그림 8. RI계기 방사선검출부 설계개략도 (정면도)

4. 감마선 차폐체의 설계 및 제작

본 연구로 개발하는 RI계기는 수분함량 측정 및 밀도측정을 동시에 할 수 있도록 중성자 선원과 감마선 선원을 동시에 사용하고 있다.

흙속의 수분함량 측정을 위해서 Cf-252 중성자 선원으로 방출된 중성자를 흙을 통과시킨후 중성자 검출부로 들어온 속중성자를 폴리에틸렌으로 일정한 에너지 범위 이하로 감속시킨후 He-3 중성자 검출기로 검출한다. 고속중성자 검출부 주변에는 열중성자 차폐체인 카드뮴을 설치하여 흙속에서 감속된 고속중성자를 제거하였다.

그러나, 열중성자를 차폐하기 위해 고속중성자 검출부 주변에 설치한 카드뮴은 열중성자 차폐에는 유용하지만 수식 1과 같은 중성자 포획반응 (neutron capture interaction) 으로 인해 감마선

을 방출하게 된다. 또한 고속중성자를 감속하기 위해 설치한 폴리에틸렌 고속중성자 감속재는 그림 9와 같은 수소와 열중성자의 상호반응으로 감마선을 방출하게 된다[6,7].

Cd-113 (n, γ) Cd-114 ------(1)

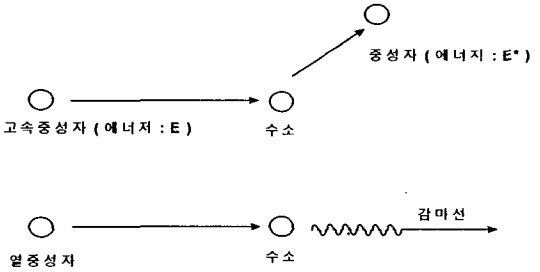

그림 9. 중성자와 수소의 상호반응.

중성자와 수소와의 상호반응확률이나 중성자와 카드뮴의 중성자 포획반응등은 중성자 반응 X-section 으로 나타낸다. 그림 10과 그림 11은 카드뮴과 중성자의 포획반응확률과 수소의 (n,γ) 반응 확률을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 감마선선원으로부터 들어오는 감마선을 제외하고 다른 반응으로 발생한 감마선을 제거하였다. 만약 다른 반응으로 생성된 감마선이 감마선 검출부로 입사되어 계측된다면 감마선과 흙의 밀도의 관계가 그 상관성을 잃게 된다. 즉, 감마선검출수와 흙의 밀도의 민감도가 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 MCNP4A 전산코드를 이용하여 카드뮴과 폴리에틸렌에서 생성된 감마선이 감마선 검출부로 들어오는 것을 막는 납차폐체를 설계하였다. MCNP4A 전산코드를 이용한 납차폐체 두께 및 위치결정을 위해 흙의 건조밀도는 1.6g/cm^3, 수분함량은 10%로 정하고 차폐체 설계를 수행하였다.

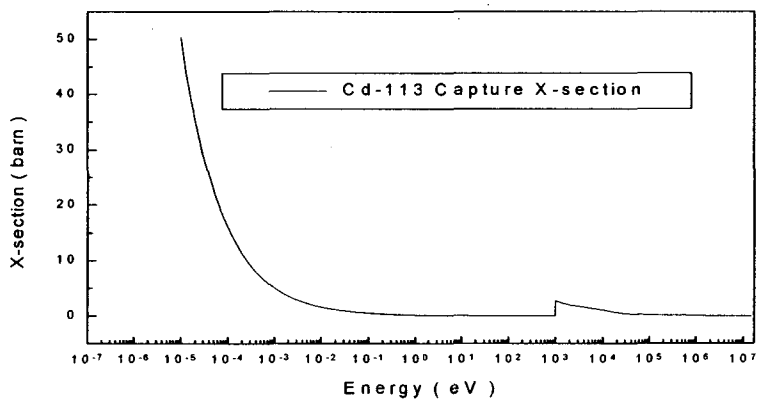

그림 10. 중성자와 카드뮴의 포획 반응단면적

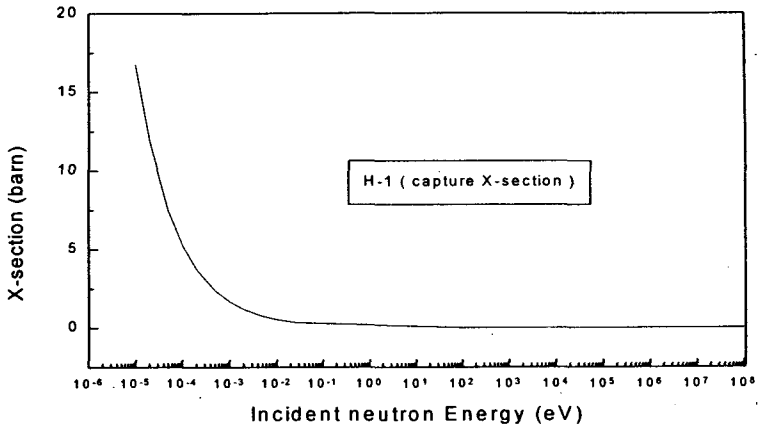

그림 11. 중성자와 수소의 포획 반응단면적

그림 12에서와 같이 납차폐체를 각각 A와 B의 위치에 놓은 후 두께를 2cm씩 증가시키면서 6~10번으로 지정한 감마선 검출기에서의 감마선 Flux를 기준값(카드뮴판을 설치하지 않았을 경우의 Flux값: 표 2 이하가 되도록 만드는 납차폐체의 두께를 구하였다.

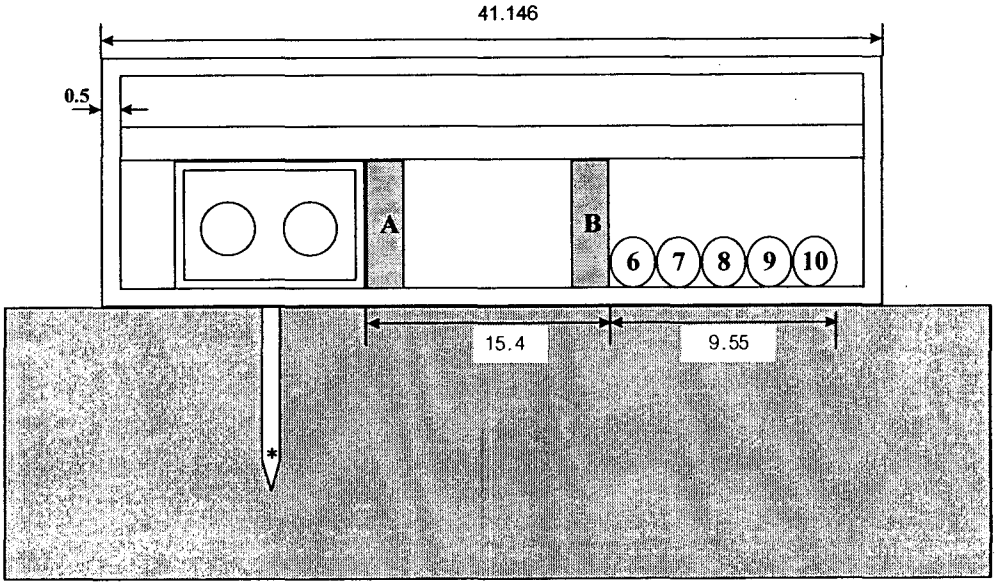

그림 12. 검출기 단면도

A위치에 납차폐체를 두었을 경우, 납차폐체 두께가 6cm가 될 때 8, 9, 10번 검출기에 영향을 미치는 감마선은 기준값 이하로 차폐되는 결과를 나타내었으나, 6, 7번 검출기에 영향을 미치는 감마선은 기준값 이하로 완전히 차폐되지 않았다.

표 2. 카드뮴 설치에 따른 감마선 Flux의 비교

(단위 : $1/cm^2$)

검출기 번호	카드뮴을 설치하지 않은 경우	카드뮴을 설치한 경우
6	2.1×10E-5	3.3×10E-5
7	1.9×10E-5	3.1×10E-5
8	1.7×10E-5	2.7×10E-5
9	1.5×10E-5	2.3×10E-5
10	1.4×10E-5	2.0×10E-5

5. 결론

도로의 아스팔트나 콘크리트를 포장하기 이전에 실시하는 성토의 다짐은 도로의 안정성을 좌우하는 매우 중요한 인자이기 때문에 성토다짐의 체계적이고 과학적인 품질관리가 필요하다. 이에 본 연구에서는 성토 다짐용 밀도 및 수분의 측정을 위하여 중성자 검출기는 2개 이상 그리고 감마선 검출기는 5개 이상 사용하여함을 알 수 있었고, 또한 방사능 대비 방사선 방출수가 다른 선원에 비하여 우수한 Co-60 감마선원과 Cf-252 중성자 선원을 본 계기에 이용하는 것이 정밀도를 향상시키기 위하여 유리하다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 설계하고 제작한 성토 다짐용관리용 밀도 및 수분 함량 측정기는 국내의 도로 공사 현장에서 성토의 다짐관리를 위하여 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

<참고문헌>

1. R. P. Gardner, et al," Density and Moisture Content Measurement by Nuclear Methods", AASHTO, 1967
2. 한국원자력연구소 원자력연수원,"원자력법령집", 한국안전기술원, 1993
3. 일본도로공단시험소, "RI 計器 で土の密度.水分量るしくみ," 시험소 기술자료 제 213호, 1984(昭和59年)
4. 김기준외 15인, "성토시공관리를 위한 방사성동위원소 장비개발", '95 연구개발사업 1차년도 보고서, 건설교통부, pp. 3~27, 1996
5. John R. Lamarsh, 2nd Edition, "Introduction to Nuclear Engineering," Addison-Wesley Publishing Company, pp.78~82, 1982
6. 장종하,"핵자료표," 한국원자력연구소 KAERI/GP-106/95, pp.5, 1995
7. IAEA, "Neutron Moisture Gauge," Technical Reports Series No. 112, pp.30, 1970