

성토의 밀도 및 수분 함량을 측정하기 위한 시스템 설계

(The system design for contents measurement of
density and moisture in compaction)

김기준*

(Ki-Joon Kim)

요약 본 연구에서는 다짐 성토의 밀도 및 수분을 측정하기 위해서 중성자 검출기는 2개 그리고 감마선 검출기는 5개를 사용하여 설계하였고, 또한 방사능 대비 방사선 방출수가 다른 선원에 비하여 우수한 Co-60 감마선원과 Cf-252 중성자 선원을 본 시스템에 이용하는 것이 정밀도를 향상시키기 위하여 유리하다는 것을 알 수 있었다. 특히, 중성자와 감마선의 상호 반응으로 인한 간섭을 제거하기 위하여 2개의 중성자와 5개의 감마선 검출부 사이에 차폐체인 납을 각각 설치하였으며, 제시된 기준값 이하로 완전히 차폐하기 위한 최적 설계를 수행하였다. 이러한 최적 설계에 의하여 휴대용으로 사용될 본 시스템은 각 검출부 사이에 차폐체를 설치함에 따라 5.2[kg]의 무게를 경감할 수 있었고, 이는 산업 현장에서 쉽게 이동하고 간편하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract In this study, to measure the density and moisture of compaction, it is designed to use the 2 neutron and 5 gamma-ray detectors. Also, it can be know that Co-60 gamma-ray and Cf-252 neutron source are more useful for this system, because discharge of radiation are better than other sources. They are more profitable to improve their accuracy. Especially, to remove the interference of their reciprocal action between neutron and gamma-ray detectors it is designed shield materials with lead between 2 neutron and 5 gamma-ray detectors each other. It is performed the optimal design to shield under the suggested values completely. Because this system will use portable, so decrease of their weight are so important. For this reason, it can be decrease their weight of 5.2[kg] with shield material between each detectors and it can be think more easy to carry and use on the industrial spot.

1. 서론

일반적으로 도로를 포장한 후에 도로의 포장 파손의 주요 원인인 노상 및 노체의 지지력 부족, 그리고 지반의 부등 침하 등이 도로파손의 부분적인 갈라짐이나 전체적인 변형을 일으키는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 현상의 주요 원인은 성토 다짐 관리의 체계적이고 과학적인 품질 관리가 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 성토 다짐 관리를 불가능하게 하고 있다. 선진 외국에서는 이미 1960년대부터 방사성동위원소를 이용한 흙의 밀도 및 함수량을 측정하는 방법에 대해 연구하여 최근에는 토목분야 뿐만 아니라 건축, 기계 분야 등 산업 전반에 걸쳐 그 이용을 확대하고 있는 추세이다^[1].

방사성 동위 원소를 이용한 성토의 밀도 및 수분 함량 측정의 방법은 1941년 B. Pontecormo에 의해 제안된 후 꾸준히 개발되었다. 선진국들은 방사성 동위 원소를 이용한 RI 계기의 개발로 성토의

* 인천전문대학 제어계측과 부교수

밀도 및 수분 함량을 측정하여 신속하고 정확한 토목 시공의 품질 관리를 수행해 오고 있다.

우리 나라의 경우 1970년대에 국립 건설 연구소와 한국도로 공사에서 미국에서 개발한 RI 계기를 도입하여 성토 시공 다짐 관리에 이용하고자 하였다. 그러나 이 계기는 국내 원자력법상 그 사용 절차가 복잡하고 계기에 사용하는 방사성 동위 원소에 대한 엄격한 관리를 요구하게 되어 연구개발이 미루어졌다. 또한 국내 실정에 맞는 수분 함량 측정 계기를 개발하였으나 이 역시 장비의 비대함으로 현장 적용이 이루어지지 않았다^[2].

기존에 미국 등에서 개발된 RI 계기는 수십 mCi의 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 연구에서 설계하고자 하는 RI 계기는 우리 나라 원자력법상 신고만으로 사용이 가능한 100 μ Ci 이하의 방사능 세기를 갖도록 기준을 정하였으며, 이와 같은 기준에 따라 방사선 계측수와 밀도 및 수분 함량의 상관성이 기존의 계기보다 떨어지게 된다. 이를 극복하기 위하여 기존의 RI 계기에 비해 약 1/1000으로 줄어든 방사능의 세기로 방사선 계측수와 밀도 및 수분 함량의 상관성을 높여서 기존의 계기의 기능을 수행할 수 있는 시스템을 설계하고자 한다.

2. 검출기 설계

2.1 수분 함량을 측정하기 위한 검출기 설계

수분 함량을 측정하기 위하여 사용되는 중성자는 고속중성자로서 흡속의 수분과 충돌한 후 그 에너지를 잃고 열중성자로 변한다. 이 열중성자는 고속중성자 측정을 위하여 사용되는 카드뮴에 의하여 제거되고, 오직 고속 중성자만이 중성자 검출부로 들어오게 된다. 이 고속 중성자는 다시 폴리에틸렌과 충돌하여 열중성자로 바뀐후 중성자 검출기 속으로 입사되게 된다. 이와 같이 측정된 중성자는 흡속의 수분함량 변화에 따라 그림 1과 같은 관계를 갖는다^[3].

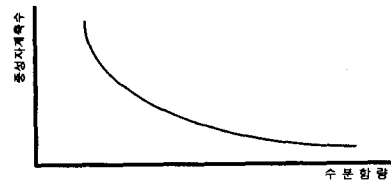


그림 1. 중성자 계측수와 수분 함량의 관계

본 연구에 사용된 중성자 검출기의 특징은 표 1과 같으며, 그 크기가 지름 방향으로 변하지 않고 길이 방향으로만 변화하기 때문에 고속 중성자 검출부의 크기는 길이 방향으로 변화시켰다. 또한 폴리에틸렌속의 중성자 검출기의 위치를 결정하기 위해 MCNP4A 전산 코드를 이용하여 결정하였다.

MCNP4A 전산 코드는 몬테칼로 기법을 이용한 것으로 무작위적으로 발생하는 현상의 해석에 이용되며 난수(random number)를 이용하여 인위적으로 표본을 표출하므로써 무작위적으로 진행되는 과정을 모사하고 이 과정에서 얻어지는 표본들의 정보를 수집하고 추정하는 기법이다^[4-7].

표 1. 중성자 검출기의 특징

Gas Filling	3800 torr, He-3
Cathode Material	SS
Maximum Length (inch/mm)	7.35/185.7
Effective Length (inch/mm)	5.16/131.0
Maximum Diameter (inch/mm)	1.0/25.4
Effective Diameter (inch/mm)	0.94/23.87
Connector	MHV
Operating Temperature Range °C	-25°C ~ +150

폴리에틸렌의 크기는 10×25×7 [cm] 크기로 결정하고 검출기 사이의 거리를 변화시켜가며 검출기 속의 중성자 플럭스(Flux)를 측정하였다. 그림 2는 중성자 검출부를 설계하기 위한 MCNP4A 전산코드의 입력 중성자 검출부의 개략도이다. 그림 2의 하단에서와 같이 검출기 간격에 따른 중성자 검출수의 변화를 관측하기 위하여 검출기 간격을 먼저 2.5cm에서 부터 1.0cm까지 길이 변화를 주며 변화 추이를 관찰하였다.

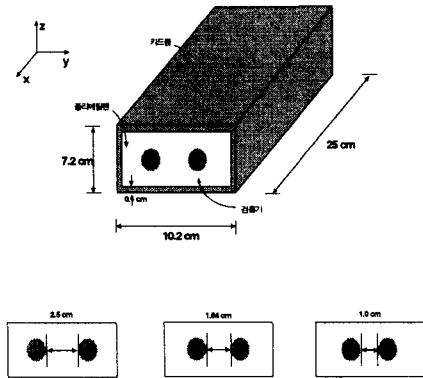


그림 2. 중성자 검출부 개략도

MCNP4A 전산코드의 계산결과는 표 2와 같으며, 검출기 사이의 거리는 가까울수록 증가하는 경향을 보이나 그 값은 차이는 크지 않음을 알 수 있었다. 이 결과는 이전의 연구 결과와 비교하여 볼 때 폴리에틸렌의 x축방향으로 길이 변화는 y축 변화에 따른 것보다 검출되는 중성자의 수에 영향을 크게 미치지 않는 것과 같은 것임을 알 수 있었다^[8]. 따라서 RI계기의 최종적인 중성자 검출부의 기하학적 배치는 이전의 연구결과를 바탕으로 x, y축은 변화를 주지 않았고, z축은 약간의 변화를 주어서 그림 2와 같이 설계하고 검출기 사이의 거리는 1.64cm 로 결정하였다.

표 2. 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 성토의 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 반면에 느슨한 상태의 흙에서는 흡수량이 적고 투과량이 많아진다는 원리이다. 일반적으로 1.4~2.7[g/cm³]의 범위에 있는 흙의 밀도를 측정하려면 350~1000[keV]의 에너지를 발생시킬 수 있는 감마선을 방출하는

동위원소가 필요하게되며 여기에 Cs-137, Co-60 등의 방사성 동위원소가 주로 이용된다.

본 연구에 사용된 감마선 검출기의 특징은 표 3과 같으며, 설계 사양 검토로는 감마선 검출기에서 감마선계측에 가장 민감한 부분은 감마선 선원으로부터 x축 방향으로 25.275[cm] 떨어진 지점이었다^[8]. 따라서 검출기 5개를 이 지점을 중심으로 하여 +x축으로 4.775[cm], -x축으로 4.775[cm]의 위치에 걸쳐 배열하였다. 또한 선원으로부터 감마선 검출기로 들어오는 감마선의 입사각에 대한 감마선계측수의 영향을 알아보기 위해 고정용 경첩을 중심으로 하여 회전 반경을 그리는 방향으로 동작하도록 틸트 장치를 설치하였으며 검출부의 설계 개략도는 그림 3과 같다.

표 3. 감마선 검출기의 특징

Gas Filling	Ne +Halogen
Cathode Material	446 Stainless Steel
Maximum Length (inch/mm)	6.83 / 173.5
Effective Length (inch/mm)	5.10 / 129.5
Maximum Diameter (inch/mm)	0.75 / 19.1
Effective Diameter (inch/mm)	0.73 / 18.4
Connector	LEMO COAX
Operating Temperature Range °C	-55 to +100

감마선은 감마선 검출기 주위를 둘러싼 물질에 의하여 민감한 반응을 보이게 된다. 특히 검출기 주변의 물질은 감마선선원에 의해 방출된 일차 감마선과의 상호작용에 의해서 이차방사선을 생성하게 된다. 이 이차 방사선이 검출기에 도달하는 경우에는 계수되는 감마선수에 크게 영향을 미치게 된다. 특히 감마선이 검출기 주변의 물질과 콤프턴 산란(compton scattering), 광전 흡수(photo electric absorption), 전자쌍 생성(pair production)의 반응을 일으키면 특성 X선, 소멸 방사선(annihilation radiation) 등을 방출하게 되는데^[9]. 이 상호반응 메커니즘을 나타내면 그림 4와 같다.

이와 같은 효과는 검출기 주변의 물질이 높은 원자 번호를 가지고 있으면 더 큰 에너지를 가진 방사선이 방출되게 된다. 따라서 검출기 주변에 높은 원자 번호의 물질을 피해야 한다. 이차 방사선의 발생은 피할 수는 없지만 차단 물질을 사용하여 그 효과를 어느 정도 줄일 수 있게 되는데, 가장 많이 이용되는 방법은 복층 차단(graded shield) 방법으로서 하나의 높은 원자 번호를 가진 물질에 낮은 원자 번호를 가진 물질을 붙여 검출기 주변에 설치하는 것이다. 일반적으로 높은 원자 번호의 물질은 납을 사용하고 낮은 원자 번호의 물질은 알루미늄을 사용한다. 높은 원자 번호의 물질은 감마선의

투과를 방지하여 검출기 주변의 물질과 상호작용을 줄이게 되고, 낮은 원자 번호의 물질은 높은 원자 번호의 물질에서 나오는 방사선을 막는 역할을 한다. 즉, 높은 원자 번호 물질에서 나오는 특성 X-선 같은 방사선을 낮은 원자 번호의 물질이 흡수하여 저에너지 또는 투과력이 약한 X-선을 방출하게 된다. 본 연구에서도 감마선 검출부 상단에 알루미늄과 납을 차례로 붙여 이차 방사선에 의한 효과를 줄였다.

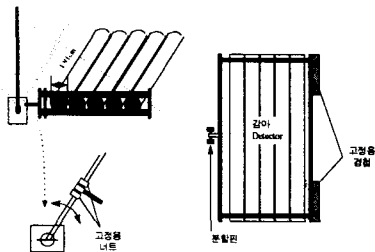


그림 3. 감마선 검출부 설계 개략도

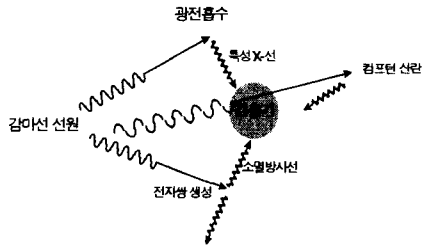


그림 4. 2차 방사선 생성 메커니즘

3. RI 계기 설계 및 제작

그림 5는 RI계기의 중성자 검출부와 감마선 검출부의 정면도와 평면도로서 RI계기의 기초 설계시 사용한 자료이다. 그림 5는 실제 RI 계기를 제작하는데 있어서 전체적인 설계 개념을 갖기에는 충분하나 실제 제작에는 불충분하다. 따라서 실제설계를 할 수 있는 설계도가 필요하였다. 아래의 내용은 RI계기의 실제제작에 사용한 설계 개략도와 부분 상세도이다.

먼저, RI계기의 선원봉은 중성자 검출부 하단부에 위치하게 되는데, 선원봉에는 감마선 선원과 중성자 선원이 같이 들어있고 중성자 선원과 감마선 선원의 사이가 RI계기의 밑판에서 20[cm] 거리에 그림 6과 같이 설계하였다.

선원봉을 RI계기에 고정하게 위해서는 선원봉의 중성자 검출부 침입이 불가피하기 때문에 선원봉의

중성자 검출부 침입의 영향을 최소로 하기 위하여 중성자 검출기 영향 범위를 침입하지 않는 부분까지 선원봉을 침입시켰다. 그림 7은 중성자 검출부와 선원봉의 연결부위를 설계한 개략도이다.

앞에서도 언급한 것과 같이 감마선 검출부는 감마선 입사각에 대한 감마선 검출의 영향을 알아보기 위해 틸트(tilt)장치를 설치하였고, 이차 감마선으로 인한 감마선의 계수를 줄이기 위하여 감마선 검출부 상부에 알루미늄판과 납판을 차례로 장착하였다. 방사선 검출부와 PCB 기판부를 분리하기 위한 알루미늄판을 0.5[cm]로 설치하고 볼트를 이용하여 고정하였다. 이 알루미늄판 위에 PCB 기판을 스페이서(spacer)를 사용하여 고정하였다. 그림 8은 방사선 검출부와 잡음 차폐용 알루미늄판 그리고 PCB 기판 부분의 설계 개략도이다.

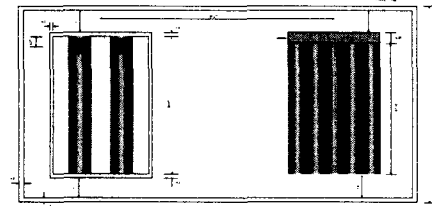
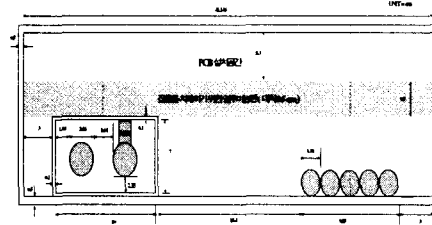


그림 5. RI계기 방사선검출부 정면도와 평면도

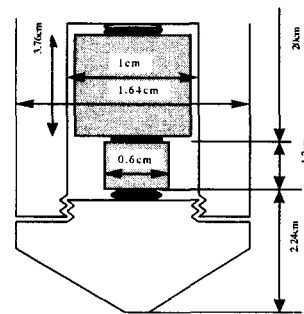


그림 6. 선원봉의 설계

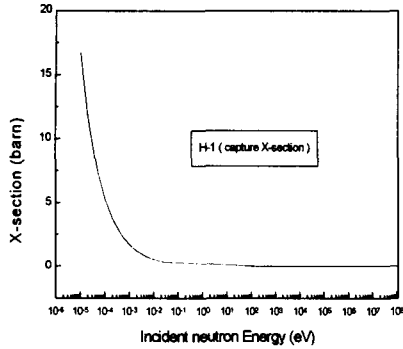


그림 11. 중성자와 수소의 포획 반응 단면적

그림 12에서와 같이 납차폐체를 각각 A와 B의 위치에 있는 것으로 가정하여 두께를 2[cm]씩 증가시키면서 6~10번으로 지정한 감마선 검출기에서의 감마선 Flux를 조사하여 본다. 이때 감마선 Flux가 카드뮴판을 설치하지 않았을 경우의 Flux값을 근거로 하여 표 4에서 제시된 기준값 이하가 되도록 납차폐체의 두께를 MCNP4A 프로그램에 의하여 계산하였다.

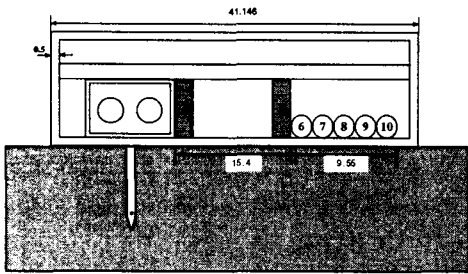


그림 12. 검출기 단면도

A위치에 납차폐체를 두었을 경우, 납차폐체 두께가 6cm가 될 때 8, 9, 10번 검출기에 영향을 미치는 감마선은 표 5와 그림 13에 나타난 것과 같이 좌측에 제시된 기준값 이하로 차폐되는 결과를 나타내었으나, 6, 7번 검출기의 경우에는 감마선은 기준값 이하로 완전히 차폐되지 않았다.

표 4. 카드뮴 설치에 따른 감마선 Flux의 기준값 (단위 : 1/cm²)

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

B위치에 납차폐체를 두었을 경우, 표 6과 그림 14에서 보여지는 것과 같이 납차폐체 두께가 4cm가 될 때 6, 7, 8번 검출기에 영향을 미치는 감마선이 기준값 이하로 차폐되는 결과를 나타내었으나, 9, 10번 검출기에 영향을 미치는 감마선은 기준값 이하로 완전히 차폐되지 않았다. 그러나, 차폐체 두께가 6cm가 되면 카드뮴의 중성자 포획 결과로 생긴 감마선을 기준값 이하로 완전히 차폐할 수 있었다.

표 5. A위치에 납차폐체를 두었을 경우 각 검출기에서의 감마선 Flux

기준값	0 cm	2cm	4cm	6cm	
6	2.10693	3.31938	2.66475	2.41834	2.25169
7	1.92273	3.09688	2.24984	2.05227	1.95947
8	1.73716	2.66822	1.9367	1.78554	1.71337
9	1.5483	2.34618	1.80185	1.67256	1.57857
10	1.40241	2.04273	1.54382	1.40584	1.3589

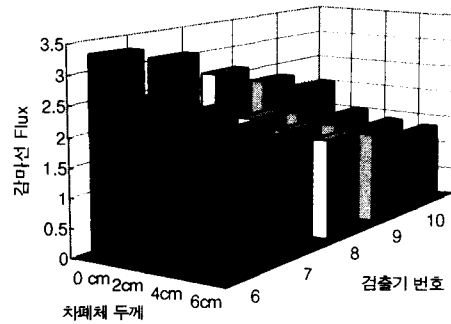


그림 13. A위치에 납차폐체를 두었을 경우의 감마선 Flux의 비교

위의 두가지 결과로부터 차폐체를 위치 A에 두었을 경우에는 즉, 차폐체가 카드뮴과 가까이 있으면 먼 곳에 있는 검출기(8, 9, 10번)로 들어가는 감마선의 차폐가 용이하며, 차폐체를 위치 B에 두었을 경우에는 즉, 차폐체를 검출기 쪽에 가까이 두면 차폐체와 가까운 검출기로 들어가는 감마선의 차폐가 용이함을 알 수 있었다.

이를 이용하여 납차폐체를 A와 B의 위치에 나누어 설치하고 두께를 변화시키며 MCNP4A 전산코드를 이용하여 계산한 결과를 표 7과 그림 15에 나타내었다.

표 7에 나타난 MCNP4A 계산 결과에 대해서 A 위치에 1.5[m] B위치에 2[m]두께의 납차폐체를 설치하였을 경우 그림 16서와 같이 카드뮴의 중성자 포획으로부터 방출된 감마선 flux가 각 검출기에서 기준값 이하로 완전히 차폐됨을 알 수 있다.

납의 밀도는 $11.35[\text{kg}/\text{cm}^3]$ 이므로 납차폐체 두께를 1[cm] 줄일 경우 수분 함량 및 밀도 측정계의 무게를 약 2.1[kg] 정도 줄일 수 있게 된다. 따라서 납차폐체를 A와 B의 위치에 나누어 설치함으로써 B위치에만 납차폐체를 두었을 경우보다 무게를 5.2[kg]정도 줄일 수 있는 효과를 가져올 수 있는데, 이 시스템의 경우는 휴대용이기 때문에 현장에 쉽게 이동하여 간편하고 가볍게 사용하기 위한 장점이 될 수 있다.

표 6. B위치에 납차폐체를 두었을 경우 각 검출기에서의 감마선 Flux

	기준값	0 cm	2cm	4cm	6cm
6	2.10693	3.31938	2.06768	1.78006	1.71339
7	1.92273	3.09688	2.08074	1.86202	1.76044
8	1.73716	2.66822	1.84068	1.73478	1.66599
9	1.5483	2.34618	1.5975	1.56418	1.50449
10	1.40241	2.04273	1.49404	1.35794	1.34346

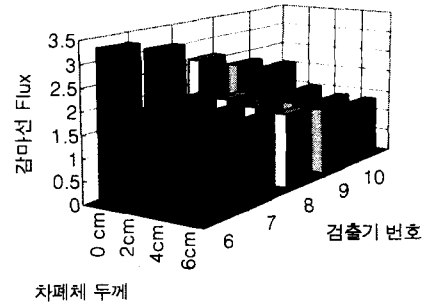


그림 14. B위치에 납차폐체를 두었을 경우의 감마선 Flux의 비교

표 7. A와 B위치에 납차폐체를 두었을 경우 각 검출기에서의 감마선 Flux

	기준값	0 cm	1 & 1.5cm	1.5 & 1.5cm	1.5 & 2cm	2 & 2cm
6	2.10693	3.31938	1.93844	1.9325	1.80261	1.82724
7	1.92273	3.09688	2.01627	1.92451	1.84522	1.79355
8	1.73716	2.66822	1.79642	1.73562	1.64939	1.63545
9	1.5483	2.34618	1.70855	1.64816	1.49609	1.46844
10	1.40241	2.04273	1.45622	1.39436	1.3727	1.31214

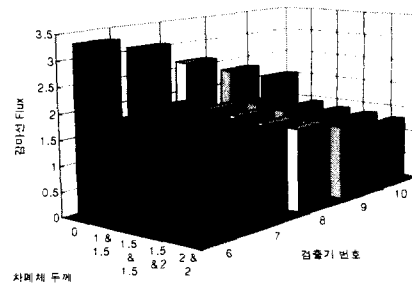


그림 15. 납 차폐체를 A와 B의 위치에 두었을 경우의 감마선 Flux의 비교

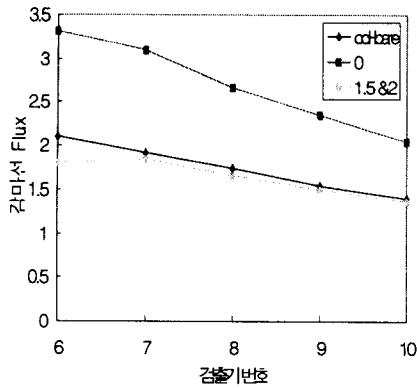


그림 16. 기준값과 위치 A에 1.5[cm], B에 2[cm] 납차폐체를 두었을 경우의 flux 비교

5. 결 론

도로의 아스팔트나 콘크리트를 포장하기 이전에 실시하는 성토의 다짐은 도로의 안정성을 좌우하는 매우 중요한 요소이기 때문에 성토 다짐의 체계적이고 과학적인 품질 관리가 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. 특히, 중성자와 감마선의 상호 반응으로 인한 간섭을 제거하기 위하여 2개의 중성자와 5개의 감마선 검출부 사이에 차폐체인 납을 각각 설치하였으며, 제시된 기준 값 이하로 완전히 차폐하기 위한 최적 설계를 수행하였다. 이러한 최적 설계에 의하여 휴대용으로 사용될 본 시스템은 각 검출부 사이에 차폐체를 설치함에 따라 5.2[kg]의 무게를 경감할 수 있었고, 이는 쉽게 이동하고 간편하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [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・水分量をしくみ", 시험소 기술자료
제 213호, 1984(昭和59年)
- [4] 조남진, " 원자로 물리 특강," pp,135-170,
1993
- [5] J. S. Hendricks and J. F. Briesmeister,
"Recent MCNP Development," IEEE
Transactions on Nuclear Science, Vol. 39,
No. 4, pp.1035-1040, 1992
- [6] J. S. Hendricks and R. E. Prael, "Monte
Carlo Next-Event Estimates from Thermal
Collisions," Nuclear Science and Engineering,
Vol. 109, No. 3, pp.150-158, 1991
- [7] J. F. Briesmeister, Ed., A General Monte
Carlo N-particle Transport Code(MCNP),
Version 4A, La-12625-M, Los Alamos
National Lab, 1993
- [8] 김기준외 15인, "성토시공관리를 위한
방사성동위원소 장비개발", '95 연구개발사업
1차년도 보고서, 건설교통부, pp. 3~27, 1996
- [9] John R. Lamarsh, 2nd Edition,
"Introduction to Nuclear Engineering,"
Addison-Wesley Publishing Company,
pp.78~82, 1982
- [10] 장중하, "핵자료표," 한국원자력연구소
KAERI/GP- 106/95, pp.5, 1995
- [11] IAEA, "Neutron Moisture Gauge,"
Technical Reports Series No. 112, pp.30,
1970



김 기 준 (Kim, Gee-Jun)

1983년 광운대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1988년 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1992년 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1986년-1994년 한국원자력연구소 연구원, 선임연구원

1994년-현재 시립인천전문대학 제어계측과 조교수, 부교수

2001년-2002년 미국 Iowa State University 교환교수

(관심분야 : 계측기기설계, 시스템 자동화, 신뢰성 평가)