

## MCNP코드를 이용한 수분 측정계기의 기하학적 배치

최원철, 이석근, 황주호  
경희대학교

전홍배, 양세학, 권정광  
(주) 도화종합기술공사

### 요 약

도로건설시 다짐조절은 안정성과 내구성 향상에 중요한 의미를 가지며 이러한 다짐조절에 있어서 수분함량의 측정은 매우 중요하다. 이전에는 흙의 수분함량을 측정하기 위한 계기를 설계하기 위하여 주로 실험에 의한 방법을 사용하였으나 본 연구에서는 3차원 모델링이 가능한 MCNP코드<sup>(1)</sup>를 이용하여 계측기 설계에 있어서 중요한 설계변수인 방사선원의 위치와 측정계기 사이의 거리 그리고 계기구성요소인 검출기의 위치, 개수, 흡수재, 감속재의 기하학적 구조 등을 계산하여 설정하였다.

### 1. 서론

기존의 수분함량 측정방법인 함수량 시험(KSF 2306)<sup>(2)</sup>은 많은 시간을 요하며 충분한 횟수로 시험을 수행하기에는 많은 어려움이 따른다. 신뢰도에 있어서도 의문이 제기되었다. 선진국에서는 방사성 동위원소를 사용하여 보다 간편하고 정확하게 수분 함량을 측정할 수 있는 계기를 개발하여 사용하고 있다. 방사성 동위원소를 이용하여 수분을 측정하는 방법으로는 중성자 선원과 계측기의 상대적인 위치에 따른 후방산란형방법과 투과형방법 두 가지가 있다. 후방산란형방법은 중성자 선원으로 방출된 속중성자가 매질인 흙에서 감속된 열중성자를 열중성자 검출기로 직접 검출하여 수분을 측정하는 방법이며 투과형방법은 흙에서 감속되어 생성된 열중성자를 열중성자 흡수능력이 뛰어난 물질로 제거하고 속중성자를 열중성자로 감속하여 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 투과형방법을 선택하여 수분 측정계기의 기하학적인 배치를 하고자 한다. 이전의 방사선원과 계측기 사이의 거리와 기하학적 배열의 결정을 실험을 통하거나 2그룹 확산방정식으로 수분 측정 계기를 설계<sup>(3)</sup>해 왔던 것을 Monte Carlo방법을 이용한 보다 정확하고 정밀한 코드인 MCNP 코드를 사용하여 수분 측정 계기의 배치를 하였다.

### 2. 계산방법

#### 2.1 계산코드<sup>(4),(5)</sup>

MCNP 코드는 1963년 Los Alamos에서 개발한 Monte Carlo 코드인 MCS로부터 여러 가지 코드로 발전해오다 MCNP의 첫번째 version은 1983년에 MCNP3라는 이름으로 오크리지

의 방사선차폐정보센터(RSIC)에서 발표하였다. 그 후 MCNP는 2-3년 간격으로 새로운 version으로 upgrade되어 MCNP4A(1993)에 이르렀다. MCNP 코드는 실제의 상황을 3차원으로 묘사 가능한 컴퓨터 코드로서 중성자, 광자, 전자의 시간종속적, 연속에너지 수송을 계산하기 위한 다목적 Monte Carlo 코드이며 핵 임계도 계산, 방사선 차폐, 계측기 설계 및 분석, 보건물리, 폐기물 처분, 핵분열과 핵융합 원자로 설계 등과 같이 여러 분야에서 널리 쓰이는 코드이다. 본 연구에서는 가장 최신 version으로 알려져 있는 MCNP4A를 수분측정요소의 기하학적 배치에 사용하고자 한다.

## 2.2 수분측정 원리<sup>(6)</sup>

선원으로부터 핵 중에 방출된 속중성자는 핵을 구성하는 원소의 원자핵과 주로 탄성산란을 일으킨다. 이때 자신의 운동에너지는 몇 번의 충돌에 의해서 점차 손실되며 주변의 원자와 열적 평형상태에 달할 때 더 이상 에너지의 손실은 발생하지 않는다. 이와 같이 주위의 원자핵들과 열적 평형을 이루는 중성자를 열중성자라 부르고 열중성자는 기체분자와 유사한 에너지 스펙트럼을 가지고 있으며 평균에너지 0.0253eV, 속도 2200m/sec이다. 한 번의 충돌로 중성자가 잃어버린 에너지의 양은 충돌 원자핵의 질량이 작을수록 크고 가장 가벼운 수소 원자핵과의 충돌에 의해서 잃어버리는 에너지가 최대로 된다. Table.1에서보듯이 수소원소에대한 에너지의 평균감소율이 다른 원소에 비해 에너지 감소율이 큼을 알 수 있다. 이것은 수소의 감속능이 다른 원소에 비해서 현저하게 크다는 것이다. 따라서 핵중에 생성된 열중성자속은 수소농도에 지배된다고 생각하는 것이 가능하다. 핵중의 수소농도는 함수량에 대응하기 때문에 열중성자량을 검출하는 것에 의해서 핵의 함수량을 간접적으로 인지할 수 있다. 이와 같이 중성자 수분계는 속중성자의 감속에 대해서 수소가 그 외의 원소보다 현저하게 효과적이라는 것에 착안해서 속중성자 선원과 열중성자 검출기를 조합해서 일정한 기하학적 조건으로 설치하는 것에 의해서 핵중의 열중성자를 측정해서 그 출력으로부터 간접적으로 핵중의 함수량을 구하는 장치라고 할 수 있다. 수분측정기는 2 가지 형식이 사용되고 있다. 그림.1.a는 후방산란형 또는 열중성자 검출방식이라고 불리는 것으로 중성자 선원과 열중성자 검출기를 비교적 근접 배치해서 핵중의 열중성자량을 직접 검출하는 방법이다. 그림.1.b는 투과형 혹은 속중성자 검출방식 이라고 불리는 것으로 핵 중에서 열중성자로 되지 않은 상태에서 지표면으로 투과해오는 에너지가 높은 중성자속을 검출하는 방법이다.

Table.1 Atomic Value of Elements

원소	원자량	에너지의 평균감소율	열중성자로 되기까지의 충돌횟수	열중성자의 흡수단면적 (barn)	산란단면적(barn)	
					열중성자	epithermal 중성자
H	1.008	1.0	18	0.332	38	20.4
O	16.000	0.121	152	0.00019	4.2	3.75
Na	22.997	0.085	215	0.505	4.0	3.1
Mg	24.32	0.087	224	0.063	3.6	3.4
Al	26.77	0.073	252	0.230	1.4	1.4
Si	28.06	0.070	261	0.13	1.7	2.2
K	39.096	0.051	361	1.97	1.5	2.1
Ca	40.08	0.050	370	0.43	3	3.0
Fe	55.85	0.036	516	2.53	11	11.4

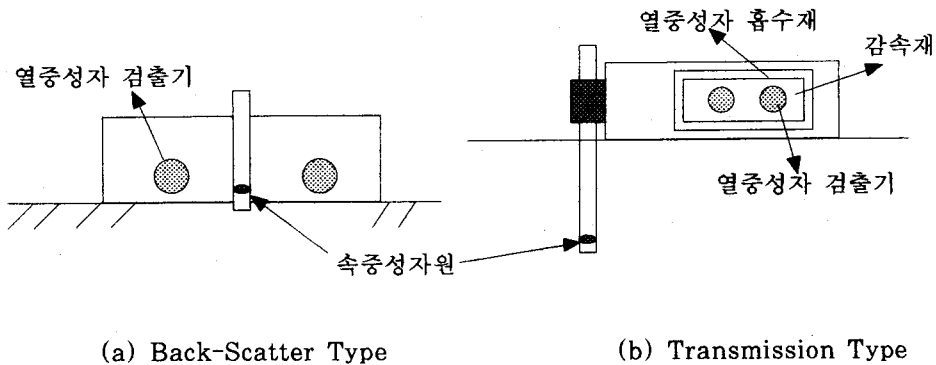


Fig.1 Moisture Gauge Type

### 2.3 선원의 위치 및 스펙트럼

수분측정에 사용된 중성자선원으로는  $^{252}\text{Cf}$ 을 사용하고 선원의 위치는 지표면으로부터 20cm 아래에 선원봉끝에 고정되어 있다고 가정하였다.  $^{252}\text{Cf}$ 의 스펙트럼으로 MCNP에서는 Watt 스펙트럼을 사용하게 되어있으나 ISO 8529<sup>(7)</sup>, H. Werle<sup>(8)</sup>, M.R. Iyer et al<sup>(9)</sup> 등은 Maxwellian 스펙트럼이  $^{252}\text{Cf}$ 의 스펙트럼으로 더 적합하다고 실험을 통하여 제시하였다. 본 연구에서는 ISO 8529에서 제시하고 있는 Maxwellian 스펙트럼을  $^{252}\text{Cf}$ 의 스펙트럼을 결정하였다.

### 2.4 검출기의 위치 및 개수

검출기의 위치를 결정하는 것은 수분 측정장치에서 가장 중요한 설계변수이다. 검출기의 위치를 결정하기 위하여 Fig.2와 같이 선원봉위를 중심으로 직경이 2.5cm이고 길이가 17cm인 검출기를 좌우를 대칭으로 10개를 배열하였다. 선원봉으로부터 방출된 속중성자를 열중성자로 감쇠시키는 매질인 흙<sup>(10)</sup>의 건조밀도는 1.0, 1.6, 2.0g/cm<sup>3</sup>로 변화시켰고 수분함량을 0 ~ 40%까지 5%씩 변화시켜가면서 10개의 검출기 위치에서 측정되는 열중성자속과 속중성자속을 계산하였다. Table.2는 흙의 건조밀도가 1.0, 1.6, 2.0g/cm<sup>3</sup>일 때 수분함량 증가에 따른 열중성자속과 속중성자속의 가장 높은 중성자속이 측정되는 검출기 위치에서의 빈도수를 보여준다.

Fig.2 MCNP Geometry for Detector Cell Position Determination

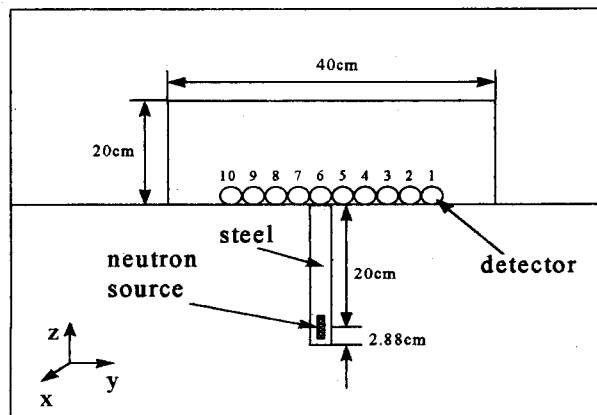


Table. 2 Maximum Flux Frequency of Detector Cell Position

y(cm)	12.5(1)	10.0(2)	7.5(3)	5.0(4)	2.5(5)	0.0(6)	-2.5(7)	-5.0(8)	-7.5(9)	-10.0(10)
Frequency	0	5	0	7	10	11	14	3	0	1

Table.2에서는 수분함량증가에 따라 가장 높은 중성자속이 측정된 빈도수는 7(-2.5)번 검출기 위치에서이며 다음으로 많은 빈도수를 보이고 있는 검출기 Cell의 위치는 6(0.0)번과 5(2.5)번에서이다. 그러나 6번과 5번 검출기 Cell에서의 상대적 변화량은 6번에서 보다 5번에서 큼으로 7번과 5번의 위치를 검출기가 놓일 위치로 결정하였다.

## 2.5 흡수재

투과형방법은 매질인 흡을 통과한 속중성자를 열중성자로 감속시켜 감속된 열중성자를 열중성자 검출기인  $^{10}\text{BF}_6$ ,  $^3\text{He}$ 등과 같은 검출기<sup>(11)</sup>로 검출하는 방법이므로 이미 흡속에서 감속된 열중성자는 검출기에 도달하기 이전에 제거되어야만 한다. 그러므로 열중성자 흡수단면적이 큰 물질을 이용하여 열중성자를 효과적으로 제거하기 위한 기하학적 모델링을 Fig.3과 같이 작성하여 흡수재의 두께를 결정하는데 사용하였다. 2.4절에서 실험한 결과를 기준으로 검출기는 반경 1.25cm, 길이 17cm, 그리고 중심은 지표면 위에 (0, 2.5, 22.6), (0, -2.5, 22.6)인 위치에 놓여져 있다. 검출기 사이의 거리는 검출기 반경만큼 떨어져 있으며 흡수재와 검출기 사이의 거리는 1.25cm이다. 흡수재의 두께를 결정하기 위하여 표면 선속계산을 사용하고 계산 표면은 Fig.4와 같이 17, 18, 19, 20, 21, 22번으로 하였다. Table.3은 흡수재 물질로 열중성자 흡수능력이 뛰어난 카드뮴(Cd)으로 하고 흡수재가 없을 때의 측정값을 기준으로 삼고 흡수재의 두께를 0.1cm씩 증가시켜 가면서 열중성자속의 변화를 계산한 것이다. 흡의 건조밀도를  $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 하고 수분함량은 열중성자속을 가장 많이 생성시키는 10%로 하여 계산을 수행하였다. 흡속에 존재하는 수분으로 인하여 생성된 대부분의 열중성자속은 0.1cm의 카드뮴으로 완전히 제거되었으나 Fig.4에서의 계산표면 18, 20에서는 열중성자속이 완전히 제거되지 0.1cm 증가시켜 다시 계산을 수행하였다. 흡수재인 카드뮴 0.2cm로 측정표면 18에서는 열중성자속이 제거되었으나 20에서는 약간의 열중성자속이 검출되어 계산표면 20에서만 다시 0.1cm의 카드뮴을 증가시켜 계산을 하였다. 총 0.3cm의 카드뮴으로 계산표면 20에서 열중성자가 완전히 제거되었다. 즉 계산표면 17, 19, 21, 22는 0.1cm, 18은 0.2cm, 그리고 20은 0.3cm의 카드뮴으로 열중성자가 완전히 제거되었다. 0.3cm 두께의 흡수재로 결정하여 감속재, 구조재의 계산을 수행하였다.

Fig.3 MCNP Geometry for the Fast Neutron Flux Calculation

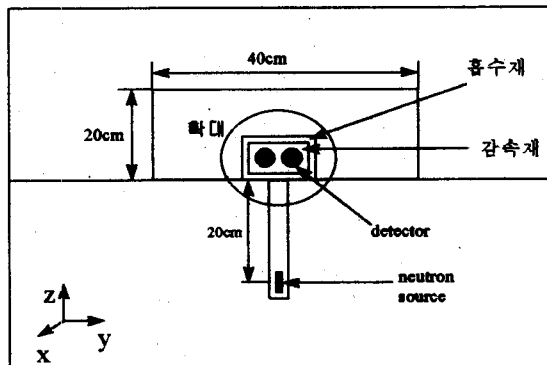


Fig.4 Magnified MCNP Geometry for the Fast Neutron Flux Calculation

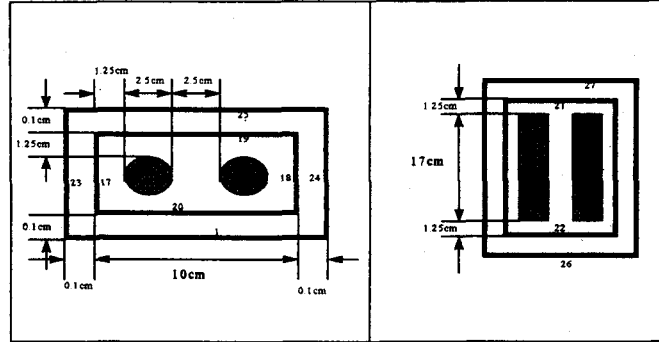


Table.3 Thermal Neutron Flux Change with Increasing Absorber(Cd) Thickness

Surface absorber (cm)	17	18	19	20	21	22
0.0	3.87851e-5	3.77721e-5	8.58531e-5	9.90971e-5	2.89791e-5	3.01490e-5
0.1	0	8.16674e-8	0	1.79236e-7	0	0
0.2	-	0	-	4.49357e-8	-	-
0.3	-	-	-	0	-	-

## 2.6 감속제

2.4.절에서 결정된 위치에 놓인 검출기에서 매질인 흡속을 통과하고 흡속에서 생성된 열중성자를 제거하기 위한 흡수재를 통과한 속중성자는  $^{10}\text{BF}$ ,  $^3\text{He}$ 등과 같은 열중성자 검출기로 검출가능한 열중성자로 감속을 시켜야 하므로 산란단면적이 큰 물질과 열중성자로 충분히 감속시킬 수 있는 기하학적 모델을 결정하여야 한다. 속중성자를 효과적으로 감속시킬 수 있는 원소로는 수소가 가장 뛰어나며 수소를 많이 포함하고 있는 물질로는 파라핀과 폴리에틸렌을 들 수 있다. 파라핀 ( $0.9\text{g}/\text{cm}^3$ )보다 폴리에틸렌( $1.05\text{g}/\text{cm}^3$ )이 밀도에서는 약간 높은 값을 갖으나 제작하는 측면에서는 파라핀이 더 용이하므로 본 연구에서는 파라핀을 감속재로서 사용하여 계산하였다. 계산 모델은 Fig.4와 같이 모사 하였으며 계산의 기준은 Fig.4의 모델을 기준으로 x, y, z축으로 1cm씩 증가하면서 계산하였다. Table.4, 5, 6은 속중성자를 열중성자로 감속시켜 계산한 값으로 x, y, z축 길이의 변화에 따른 열중성자속의 변화 값을 나타낸다.

Table.4 Y, Z축은 기준으로 고정, X축으로 1cm씩 증가에 따른 열중성자 변화

X(cm)		0	1	2	3
Thermal Neutron Flux	1(2.5)	1.02322E-4	1.07853E-4	1.17071E-4	1.17392E-4
	2(-2.5)	1.00403E-4	1.04889E-4	1.07506E-4	1.13613E-4

Table.5 X, Z축은 기준으로 고정, Y축으로 1cm씩 증가에 따른 열중성자 변화

		Y(cm)	0	1	2	3
		1(2.5)	1.02322E-4	1.16852E-4	1.35307E-4	1.45695E-4
Thermal	1(2.5)					
Neutron Flux	2(-2.5)		1.00403E-4	1.24192E-4	1.45091E-4	1.46002E-4

Table.6 X, Y축은 기준으로 고정, Z축으로 1cm씩 증가에 따른 열중성자 변화

		Z(cm)	0	1	2	3
		1(2.5)	1.02322E-4	1.18756E-4	1.39043E-4	1.18862E-4
Thermal	1(2.5)					
Neutron Flux	2(-2.5)		1.00403E-4	1.36398E-4	1.32569E-4	1.37988E-4

Table.4, 5, 6에서 X축으로는 매우 적은 양의 열중성자가 증가함을 보이고 Y, Z축의 증가가 X축의 증가보다 상대적으로 많은 양의 열중성자를 검출하는 경향을 보이고 있다. 그러나 본 연구에서의 10,000이상의 열중성자를 검출하기 위해서는 계산 값이 1.5015E-4이상의 열중성자속값을 얻어야 한다. Table.4, 5, 6에서는 1.5015E-4이상의 값을 얻을 수 없으며 1.5015E-4이상의 값을 얻기 위해서는 어느 한쪽의 축을 상당한 길이를 늘려야하므로 상대적으로 함수량을 측정하는 계측기의 크기가 한 방향으로 커지게 되므로 Y, Z축방향으로 동시에 늘려서 모델을 결정하는 것이 계측기의 크기를 줄일 수 있게 된다. X축방향 증가에 대한 열중성자 증가폭이 Y, Z축방향에 비해 상대적으로 적으므로 X축방향에 대해서는 고려하지 않았으며 Table.7은 열중성자 측정에 별다른 기여를 하지 않는 X축방향으로 기준모델값인 1.25cm의 감속재 두께를 0.5cm로 줄이고 0.5cm의 두께를 고정하여 1.5015E-4이상의 값을 얻을 수 있는 Y, Z축의 길이증가에 따른 열중성자속 변화를 나타낸 것이다.

Table.7 X축방향의 길이는 0.5cm 고정, Y, Z축의 길이에 따른 열중성자 변화

Length(cm)		Y=1		Y=2	
		Z=1	Z=2	Z=1	Z=2
		Thermal	1(2.5)	1.39237E-4	1.57309E-4
Neutron Flux	2(-2.5)	1.44934E-4	1.61167E-4	1.60347E-4	1.84606E-4

Table.7의 Y=1, Z=1인 모델에서는 1.5015E-4이상의 값을 갖지 않으므로 10,000이상의 열중성자를 측정할 수 없다. 그리고 Y=1, Z=2와 Y=2, Z=1에서는 1.5015E-4이상의 값을 갖으며 거의 비슷한 값을 보이고 있다. Table.7에서 열중성자의 변화는 Y=2, Z=2인 모델에서 가장 높은 값을 갖으며 본 연구에서는 10,000이상을 충분히 측정할 수 있는 4번째 기하학적 모델을 선택하였다.

## 2.7 구조재

수분함량측정기는 어느 정도의 구조재가 검출기와 전자회로를 감싸고 있으며 검출기와 흡사이에 존재하는 구조재는 중성자속에 영향을 미치게 된다. 흡수재와 감속재의 모델은 2.6절에서 계산하여 결정한 4번째 모델을 사용하였고 구조재 물질로는 알루미늄(A1)을 가정하였다. 구조재의

두께는 지표면을 기준으로 Z축의 +방향으로 0.1cm씩 증가시켰다. Table.8은 구조재의 두께에 따른 열중성자속 변화를 계산한 것이다.

Table.8 구조재 두께증가에 대한 열중성자속 변화

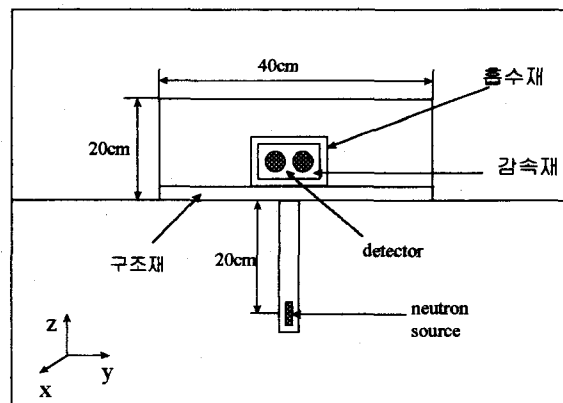
Z(cm)		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
		Thermal Neutron Flux	1(2.5)	1.93432E-4	1.88437E-4	1.98256E-4	1.86652E-4
		2(-2.5)	1.59582E-4	1.71364E-4	1.64311E-4	1.69552E-4	1.71232E-4
Z(cm)		0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
		Thermal Neutron Flux	1(2.5)	1.76192E-4	1.76992E-4	1.72591E-4	1.7360E-4
		2(-2.5)	1.71788E-4	1.64733E-4	1.64063E-4	1.59852E-4	1.70753E-4

Table.8에서 열중성자속은 0.1cm-0.5cm 사이의 구조재 두께에서 변화가 매우심하나 0.6cm-1.0cm 사이의 두께변화에 대해서는 변화의 폭이 완만함을 알 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

이상의 계산을 통하여 수분측정계의 기하학적인 배치를 수행하였다. 검출기의 위치는 선원봉을 중심으로 지표면 위에 대칭적으로 놓여져 있고 흡수재는 0.3cm의 카드뮴으로 열중성자를 제거하였으며 속중성자속의 감속재로는 높은 수소밀도를 가지는 파라핀으로 하였으며 기하학적 모델은 검출기로부터  $X = \pm 0.5\text{cm}$ ,  $Y = \pm 3.5\text{cm}$ ,  $Z = \pm 3.5\text{cm}$ 의 크기로 결정하였다. 구조재 물질은 알루미늄으로 하고 두께는 0.6cm로 결정하였다. Fig.5는 본 연구에서 결정한 측정요소들의 최종적인 배치이며 계산으로 결정된 수분측정계기들의 기하학적 모델은 향후 실험에 의한 검증과 실제 수분함량측정기의 자세한 모사로 좀더 정밀한 계산을 하여야 한다.

Fig.5 수분측정요소의 최종 모델



#### ※감사의글

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

#### 4. 참고문헌

1. J.F.Briesmeister, Ed., A General Monte Carlo N-particle Transport Code (MCNP), Version 4A, LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory (1993).
2. 공업진흥청, "흙의 함수량 시험방법," KS F-2306, 1995.
3. IAEA, "Neutron Moisture Gauges," Technical Reports Series No. 112, pp.37-43, Vienna, 1970
4. R.A. Forster, R.C. Little, J.F.Briesmeister, and J.S. Hendricks, "MCNP Capabilities For Nuclear Well Logging Calculations," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 37, No. 3, 1378(June 1990).
5. J.S. Hendricks and J.F.Briesmeister, "Recent MCNP Developments," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 39, No. 4, 1035-1040(August 1992).
6. 韓國科學財團, "道路建設 및 鋪裝 維持管理시스템 開發 - 도로구조체를 지지하는 노상 및 노체의 성토시공관리를 위한 시스템에 관한 연구(I)," 한국건설기술연구원, pp.69-76, 1990.
7. International Organization for Standardization, "Neutron Reference Radiations for Calibrating Neutron Measuring Devices Used for Radiation Protection Purposes and for Detecting Their Response As a Function of Neutron Energy," ISO 8529, ISO, Geneva, Switzerland, 1986.
8. H. Werle, "<sup>252</sup>Cf Fission Neutron Spectrum and Use of <sup>252</sup>Cf Sources to Examine Neutron Cross-Sections by Neutron Spectrum Measurements," Proc. an educational Seminar, Some Physical Dosimetry and Biomedical Aspect of Californium-252, IAEA, Vienna, 1976.
9. M.R. Iyer, P.K. Sarkar, P.P. Chakraborty, S.D. Soman, "Neutron and Gamma Spectra from Californium-252 Sources," Proc. an educational Seminar, Some Physical Dosimetry and Biomedical Aspect of Californium-252, IAEA, Vienna, 1976.
10. Joseph E. Bowles, "Physical and Geotechnical Properties of Soils," pp.65, 1983.
11. Changsong Ji, "Introduction to Basic Principle of Nuclear Gauging," National Executive Management Seminars on the Application of Nucleonic Gauging Techniques to Civil Engineering, pp.12-15, 1989.