

A Study on Calibration of Neutron Moisture Gauge Using MCNP4A

JooHo Whang, ChunIl Lim, JungHo Song
Department of Nuclear Engineering

MCNP4A 전산코드를 이용한 중성자 수분함량 측정기의 교정식 및 교정상수 도출방법 연구

황주호 · 임천일 · 송정호
경희대학교

Abstract - Time-consuming experiments have been required in the development of neutron moisture gauge to induce a relation between the water content in soil and the neutron counts. Applying a monte carlo computer code to simulate the experiments of neutron moisture gauging may contribute to reduce time and efforts for experiments and produce a calibration equation which is more applicable to soil in general. In this study MCNP4A, a monte carlo computer code, was employed to simulate soil experiments and the simulated results were compared with experimental ones. The comparative study showed that MCNP4A is applicable to simulate the experiments and calibration equation can be obtained through simulations. Effects of dry density changes were also studied.

Key words : Neutron moisture gauge, MCNP code, calibration, dry bulk density

요약 - 중성자 수분함량 측정기의 개발에 있어서 중성자 계측값과 흙속의 수분함량에 대한 관계식을 유도하기 위해서는 공시체 제작등의 많은 실험을 통해 유도한 교정식이 필요하다. 또한 공시체 제작 및 측정실험의 통계적 오차를 줄이기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 하지만 몬테카를로방법을 사용한 전산코드를 이용하여 수행할 경우 시간과 노력을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 보다 일반적인 흙에 대한 교정식을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 중성자의 수송문제를 계산하는데 유용한 MCNP4A 전산코드를 이용하여 실제 실험을 모사하였다. 또한 모사결과를 공시체를 제작하여 실험한 결과와 비교하였다. 비교결과 실제실험의 결과와 모사 범위내에서 일치함을 알 수 있었다. 중성자 수분함량 측정기의 교정식 도출 및 교정상수를 결정하기 위해 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 수분함량 측정기의 계측값에 영향을 미치는 인자중의 하나인 흙의 건조밀도 변화에 대한 영향을 살펴 보았다.

중심어 : 중성자 수분함량 측정기, MCNP 코드, 교정, 건조밀도

서론

현재 국내에서 시행되고 있는 고속도로 성토 다짐관리를 위한 주요 시험항목으로는 실험실 다짐시험(KSF 2312), 함수량 측정시험(KSF2306), 현장에서 모래치환법에 의한 단위중량 시험(KSF 2311)등이 있다. 이러한 기존의 시험방법은 시험 후 최소한 1일 후에 시험성고가 나오며 시험에 상당한 노력이 요구될 뿐만아니라 충분한 회수로 시험을 수행할 수 없기 때문에 성토 다짐관리를 수행하는데 있어서 신뢰도와 정확도가 문제시 되고 있다[1].

이미 미국, 독일, 프랑스, 덴마크, 네델란드, 영국, 소련, 중국, 일본등에서는 방사성동위원소(Radioisotope, RI)를 사용하여 보다 간편하고 정확하게 성토속의 수분함량을 측정할 수 있는 계기를 개발하고 이를 이용한 토목공사의 통계적 품질관리를 수행하고 있다[2]. 예로서, 일본은 1960년대 초부터 방사성동위원소를 이용한 계기(RI계기)의 사용에 대한 연구를 수행하여 오면서 광범위한 자료축적을 토대로 1987년에 RI계기를 사용한 표준다짐관리법을 승인 및 시행하고 있다.

방사성동위원소를 이용한 측정법은 측정소요시간이 짧고, 반복측정이 용이하며, 정밀도가 $\pm 30\%$ 정도인 모래치환법보다 4~10배의 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있고, 같은 시간에 많은 측정회수를 얻을수 있는 장점을 가지고 있다[3].

방사성동위원소를 이용한 고속도로 성토시공 다짐관리를 위한 수분함량 측정기의 개발에 있어서 측정기의 흙에 대한 계측수와 수분함량에 대한 관계식을 유도하기 위해서는 흙의 수분함량을 변화시키며 많은 공시체를 제작하여 측정한 자료들이 있어야 한다[3,4]. 그러나 공시체 제작실험에는 많은 시간과 노력이 필요하므로 전산코드를 이용하여 공시체 제작실험을 대신할 수 있다면 그 비용과 시간을 절감할 수 있다. 또한 전산코드를 이용할 경우 흙의 모사에 있어 공시체 실험에서 사용하는 흙을 균질하게 모사할 수 있으므로 보다 일반적인 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 MCNP4A Version을 이용하여 중성자 수분함량 측정기의 교정식 도출을 위해 함수량 및 수분밀도 변화에 대한 중성자속 계산을 수행하였으며, 교정식 도출을 위한 과정에 대해 설명하고, 코드 계산과 공시체 제작 실험 결과를 비교하여

MCNP4A 전산코드의 교정식 도출에 대한 적용성 여부를 검증하였다.

이론

기본원리

중성자는 물질과 고유의 상호작용을 한다. 고속 중성자를 흙속에서 방출하면 속중성자는 흙을 구성하는 원자핵과 주로 탄성산란을 일으키며 이때 자기의 운동에너지를 잃는다. 수소의 고속중성자 감속능이 다른 흙을 구성하는 원자보다 매우 크다. 따라서 흙중에서 생성된 열중성자는 흙속에 들어있는 수소농도에 의해 지배적으로 변한다. 중성자를 이용한 수분함량 측정기는 흙을 구성하는 주요 원자들중 수소가 고속중성자를 감속하는 능력이 현저하게 크다는 점을 착안하여 흙속에 포함되어 있는 수분의 양을 측정한다. 또한 여러 실험의 결과로서 고속중성자와 흙속 수분함량의 관계가 exponential 형태의 함수를 갖는다는 것을 알 수 있다[5].

흙속의 수분함량과 중성자계측수와와의 관계를 규명하기 위해서는 2가지 고려할 사항이 있다. 첫 번째로 중성자선원의 붕괴이다. 중성자선원은 시간이 지남에 따라 점진적으로 방사능이 감소하게 된다. 따라서 선원으로부터 방출되는 중성자의 수도 감소하게 된다. 중성자선원의 붕괴에 의한 방출 중성자수의 감소 및 검출 중성자수의 감소효과는 표준체를 사용하므로써 보정을 할 수 있다. 즉, 실제 흙을 측정하기전에 먼저 물리·화학적으로 안정되어 있는 일정한 밀도의 표준체를 투과한 중성자를 측정하고 실제흙을 투과한 중성자를 측정하여 이 측정값들을 비로서 나타내면 선원붕괴로 인한 중성자검출수의 감소를 보정할 수 있다. 두 번째로 흙착수의 보정이다. 중성자와 흙속 수분의 반응은 흙속의 토중수(자유수)뿐만이 아니라 흙속의 주요 구성원소에 흡착되어 있는 흡착수(결정수)와도 이루어지게 된다. 일반적으로 논의되는 수분밀도는 흙속의 자유수에 대한 것이다 [6]. 즉, 흙의 단위부피당 공극속에 존재하는 수분의 양이다. 하지만 중성자 수분함량 측정기가 측정하는 수분함량은 공극속에 존재하는 수분뿐만 아니라 흡입자에 흡착되어 있는 흡착수까지 측정하게 된다. 낮은 방사능의 ($100 \mu\text{Ci}$ 이하) 중성

자선원을 쓰게 되는 경우에는 이 흡착수에 의한 영향이 중성자 수분함량 측정기의 정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 중성자 수분함량 측정기의 교정식은 이 흡착수의 영향을 고려하여 흡착수의 양에 상관없는 것이어야 한다. 흡입자와 같이 존재하는 흡착수나 결정수는 일반적인 노건조(110℃, 12~15시간 건조)에서는 제거되지 않는다. 흡입자와 같이 존재하는 수분은 850℃에서 흡의 증량이 일정해 질때까지 건조를 시키는 강열감량을 이용해 제거할 수 있다[7]. 노건조에 의해서 제거된 수분의 양과 노건조후 다시 강열감량을 사용해 제거된 수분의 양을 합해서 수분밀도 결정 교정식에 나타내면 흡착수의 양에 상관없는 단일한 교정식을 만들 수 있다. 그림 1은 흡의 영역별 구성을 도식화 한 것이다.

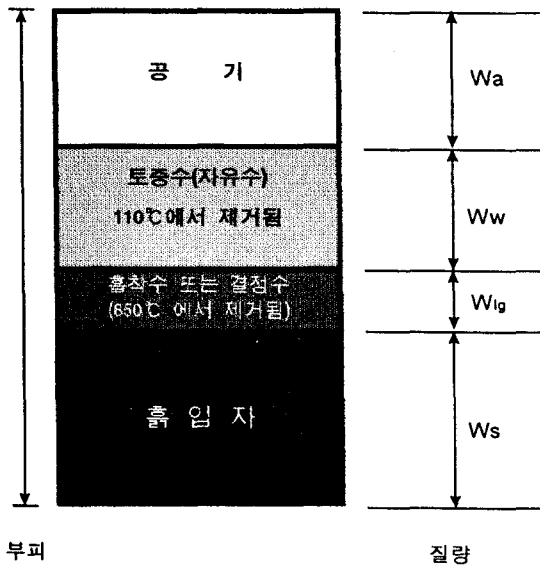


Fig. 1. 흡의 영역별 구성

여기서 필요한 용어를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{건조밀도} = \frac{W_s + W_{Ig}}{V} = \rho_d$$

$$\text{습윤밀도} = \frac{W_s + W_w + W_{Ig}}{V} = \rho_i$$

$$\text{수분밀도} = \frac{W_w}{V} = \rho_w$$

$$\text{강열감량 수분밀도} = \frac{W_{Rg}}{V} = \rho_{Rg}$$

$$\text{입자밀도} = \frac{W_s}{V} = \rho_s$$

$$\text{총수분밀도} = \rho_{wlg} = \text{수분밀도} + \text{강열감량 수분밀도}$$

흡을 투과한 중성자 계측값을 NR, 표준체를 투과한 중성자 계측값을 NS라 하면, 중성자 계측비와 흡속에 존재하는 총수분밀도인 ρ_{wlg} 와의 관계를 식 (1)과 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{NR}{NS} = C \cdot e^{-D \cdot \rho_{wlg}} \tag{1}$$

여기서,

C, D : 실험으로 결정하는 상수

ρ_{wlg} : 총수분밀도 = 수분밀도 + 강열감량수분밀도

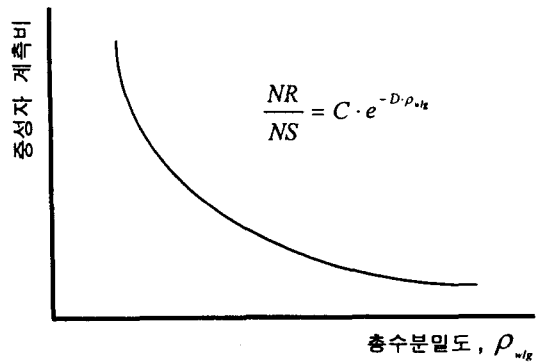


Fig. 2. 중성자 계측비와 수분밀도(토중수+흡착수)의 관계

이다. 식 (1)을 ρ_{wlg} 에 대하여 전개하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\rho_{wlg} = \frac{\ln C - \ln \frac{NR}{NS}}{D} \tag{2}$$

앞에서 언급한 바와 같이 중성자 수분함량 측정기는 흡 공극속에 존재하는 토중수(자유수)뿐만

아니라 흡착수, 결정수 까지 측정하게 된다. 즉, 식 (2)의 $\rho_{w,lg}$ 는 토중수뿐만아니라 흡착수, 결정수까지 포함한 총수분밀도이다. 일반적으로 논의되는 수분밀도는 흙 공극속에 존재하는 자유수에 대한 것이다. 따라서 흡입자에 존재하는 흡착수의 양을 제거할 필요가 있다. 흡입자에 존재하는 흡착수의 양은 흙의 종류에 따라서 고유의 값을 갖는다. 강열감량수분밀도를 건조밀도로 나눈값은 흙의 건조밀도에 의존하지 않고 흙의 종류에만 종속하는 함수가 된다. 중성자계측비로 얻어진 $\rho_{w,lg}$ 를 일반적인 수분밀도로 나타내면 식 (3)와 같은 관계를 갖는다.

$$\rho_{w,lg} = \rho_w + \frac{I_g}{1 - I_g} (\rho_t - \rho_{w,lg}) \quad (3)$$

여기서, $I_g = \frac{\rho_{lg}}{\rho_d}$

MCNP4A 모사

중성자 수분함량 측정기는 속중성자원과 중성자 감지장치의 상대적 위치에 따라 직접전달형(Transmission Type)과 후방산란형(Back-scatter Type)으로 분리하고 있으며, 이 연구에서는 후방산란형에 비해 넓은 측정범위를 가지며 흙의 비균질성에 대한 영향을 적게 받는 직접전달형 중성자 측정기를 대상으로 설계하였다.

직접전달형 중성자 수분함량 측정원리는 중성자선원으로부터 방출된 속중성자가 흙을 통과하면서 흙을 구성하는 여러 성분 및 흙속에 함유된 수분과의 탄성충돌로 인하여 에너지를 손실하며 열중성자 검출기까지 도달하게 된다. 이때 선원으로부터 방출된 속중성자중 검출기에 도달하기 전에 흙속에서 열중성자 영역까지 감속된 중성자는 중성자 검출기 주변에 설치된 열중성자 흡수체에 의해 제거되고, 열중성자 흡수체를 통과한 속중성자들은 열중성자 흡수체 안쪽에 설치된 중성자 감속장치에 의해 열중성자 검출기에 검출되기에 적합한 에너지 이하로 감속됨으로서 열중성자 검출기에서 측정된다.

수분함량 및 밀도 측정기의 설계에 있어서 선원과 검출기의 위치 결정, 흡수체와 감속체의 재

질 및 크기 결정, 구조재의 재질 및 두께 결정등은 MCNP4A 전산코드를 이용하여 수행하였다[8].

중성자검출기는 He-3 검출기로 선정하였고, 검출기의 위치는 지표면으로부터 20cm아래의 선원봉 끝에 선원이 고정되어 있다고 가정한 상태에서 속중성자속이 가장 높은 곳을 계산하여 열중성자 검출기 2개를 설치하였다. 열중성자 흡수체는 카드뮴으로 결정하고, 두께는 흙속에서 감속된 열중성자를 완전히 흡수하는 카드뮴의 두께를 계산하여 속중성자만이 카드뮴을 통과하도록 설계하였다. 감속재로는 수소밀도가 충분히 높은 폴리에틸렌을 선정하여 흡수체를 통과한 속중성자가 열중성자 검출기에 검출되기 충분한 열중성자가 되는 두께를 계산하였다. 구조재는 일반적으로 사용하고 있는 폴리카보네이트와 Cast Aluminum중에서 열중성자속의 변화와 재질의 강도등을 고려하여 무게가 약 2배정도 무겁지만 기계적 강도에서 3배정도 높은 값을 갖으며, 열중성자의 발생률이 적은 Cast Aluminum을 선정하였다[9]. 중성자선원은 방사능대비 중성자 방출수가 높은 Cf-252 선원을 선정하였다. 그림 3과 그림 4는 MCNP4A 전산코드에서 모사한 수분함량/밀도 측정기의 정면도와 실제 제작한 계기이다.

본 연구에서는 MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport) Code를 이용하여 수분함량/밀도 측정기를 설계하였다. MCNP Code는 임의의 3차원 기하학적 구조에 대해 중성자, 광자, 전자만의 수송 및 중성자와 광자의 복합수송등에 대한 계산에 사용할 수 있다. 이때 MCNP Code로 계산할 수 있는 중성자의 에너지 범위는 10^{-11} Mev~20Mev이며, 광자에너지 범위는 1kev~1000Mev이다[10].

직접적 또는 실험적 방법들에 의한 수분 및 밀도 측정을 위한 RI계기의 설계에는 많은 시간과 비용이 소모되므로, 확산방정식으로 계산한 중성자속(flux)을 이용한 비실험적인 방법들이 사용되기도 하였다. 2그룹 확산방정식을 이용한 설계에는 복잡한 기하학적 모사에 대한 한계가 있다. 현재는 컴퓨터 기술이 발전함에 따라 계산시간과 비용의 문제로 도외시 되었던 몬테칼로 방법이 유용하게 되었다. 현재 MCNP 코드는 원자로내의 중성자속 계산, 방사선 차폐, 방사선 선량측정의 계산등 다양한 분야에 이용하고 있으며, 특히 흙속에서 중성자의 수송, 감속, 열중성자화를 모사하는데 유용하다.

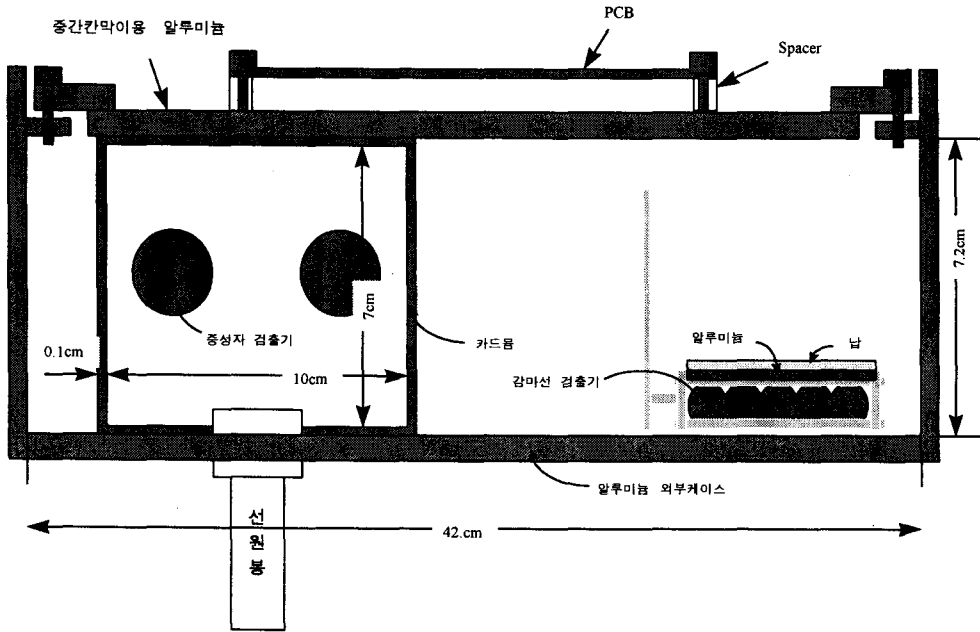


Fig. 3. 방사성동위원소를 이용한 수분함량/밀도 측정기의 정면도

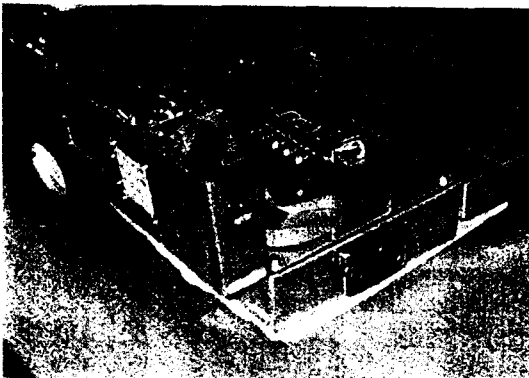


Fig. 4. 실제 제작한 수분함량/밀도 측정기

의 방사능은 시간이 지남에 따라 붕괴하므로 중성자원의 시간에 따른 방사능 변화에 대한 교정 없이는 정확한 측정치를 얻을 수 없다. 따라서 측정결과를 흙에 대한 중성자속의 측정값과 물리·화학적으로 안정되어 있는 표준체에 대한 중성자속의 측정값에 대한 비로서 나타내어 선원의 방사능 감소에 대한 영향을 배제할 수 있다. 표준체로서는 아크릴판과 유리판을 혼합배열[11]하여 사용하였으며, 계측비는 다음과 같다.

$$\text{계측비} = \frac{\text{흙에 대한 측정치}}{\text{표준체에 대한 측정치}}$$

계산결과 및 고찰

MCNP4A 코드 계산결과

앞에서 언급한 바와 같이 중성자 수분함량 측정기의 선원으로 사용하고 있는 방사성동위원소

MCNP4A 전산코드에서 사용하는 흙의 구성성분 모사를 위해, X선을 물체에 조사하여 물체가 구성하고 있는 각 원소의 종류에 따라 발생하는 특유한 파장의 2차 X선을 분광분석함으로써 물질의 구성성분 및 무게분율을 분석하는 EDX 분석(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)을 통하여 강열감량한 흙에 대한 분석결과를 이용하였으며 그 결과는 표 1과 같다.

Table 1. EDX 분석을 통해 구한 흙의 구성성분 (단위 : Weight Percents, w/o)

성분	O	Si	Al	Fe	C	K	Na	Ti	Ca	Mg
구성비	52.05	24.49	11.58	6.36	2.24	1.67	1.44	0.46	0.4	0.04

MCNP4A 전산코드를 이용하여 계산한 건조밀도 1.5g/cm³일 때 수분함량 증가에 따른 계측비를 그림 5에 나타내었다. 그림 5와 같이 계측비는 수분함량의 증가에 따라 기본원리에서 설명한 것과 같이 지수형태로 감소하였다.

식 (1)에 대한 교정상수를 비선형식에 대한 최소자승법(Least Square Method)를 이용하여 구한 결과 식 (4)의 결과를 얻었다. 또한 이 때의 χ^2 (Chi-square)값은 0.00618 이었다.[12, 13]

$$\frac{NR}{NS} = 4.86074 \cdot e^{-0.04866 \cdot \text{함수량}} \quad (4)$$

이 교정상수를 대입한 식의 교정곡선을 그림 6에 나타내었다.

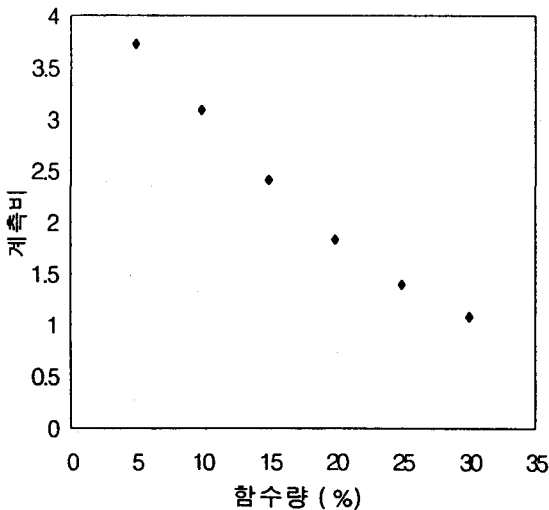


Fig. 5. 건조밀도 1.5g/cm³일 때 수분함량변화에 대한 계측비

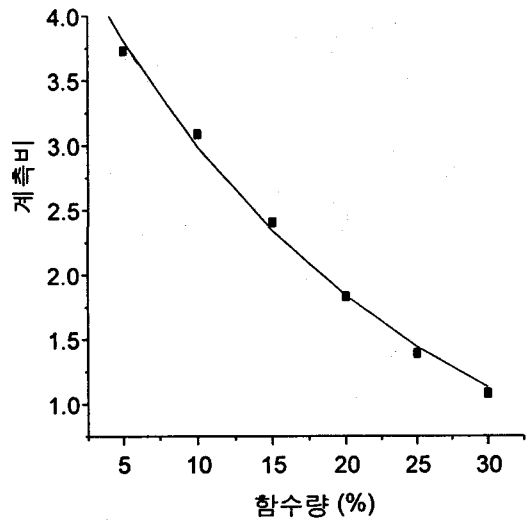


Fig. 6. 수분함량 변화에 따른 계측비의 교정곡선 (건조밀도 1.5g/cm³일 때)

흙속의 수분함량이 증가함에 따라 속중성자가 흙속 수분과의 반응에 의해서 감소되는 유효 증가함으로 검출기까지 도달하여 계측되는 중성자 속은 지수함수의 형태로 감소하게 된다. 이때 선원으로부터 방출된 속중성자는 검출기에 도달하기 전에 대부분 흙속의 수분과의 반응에 의하여 그 에너지를 잃게되나, 흙속의 수분외에 흙의 구성성분들과도 반응을 하여 그 에너지를 잃게된다. 흙의 구성성분들과의 반응은 흙의 건조밀도에 의해 영향을 받으며, 흙의 건조밀도가 증가함에 따라 속중성자가 흙의 구성성분들과 반응하여 감소되는 유효 커지게 된다. 따라서, 중성자 계측비로서 흙의 수분함량을 구하기 위해서는 흙의 건조밀도가 계측비에 미치는 영향[14]을 고려하여야 한다.

흙의 건조밀도가 계측비에 미치는 영향을 구하기 위해서 건조밀도를 1.2~1.9g/cm³의 범위에 대해서 변화시켜 가면서 MCNP4A 전산코드를 이용하여 계산한 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 그림 7은 중성자계측비와 함수량(%)의 관

Table 2. MCNP Code와 공시체 제작실험을 통해 얻은 함수량 변화에 따른 계측비의 비교

건조밀도	함수량	MCNP		실험		오차((A-B)/B)
		계측비(A)	표준편차	계측비(B)	표준편차	
1.422	5.513	3.6848	0.1027	4.0118	0.1679	-0.0815
1.439	9.492	3.2084	0.0912	2.8577	0.0973	0.1227
1.447	15.23	2.4718	0.0731	2.2248	0.1029	0.111
1.504	18.76	1.9664	0.0591	1.9353	0.1062	0.0161
1.521	20.79	1.7251	0.0532	1.7346	0.0583	-0.0055

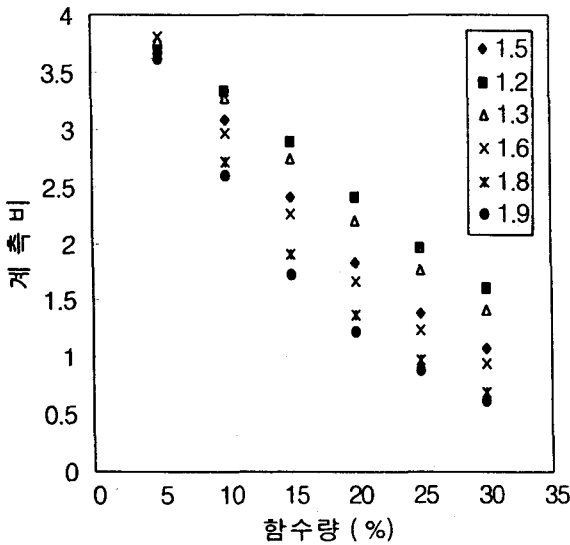


Fig. 7. 건조밀도 및 수분함량 변화에 대한 계측비 (MCNP 계산)

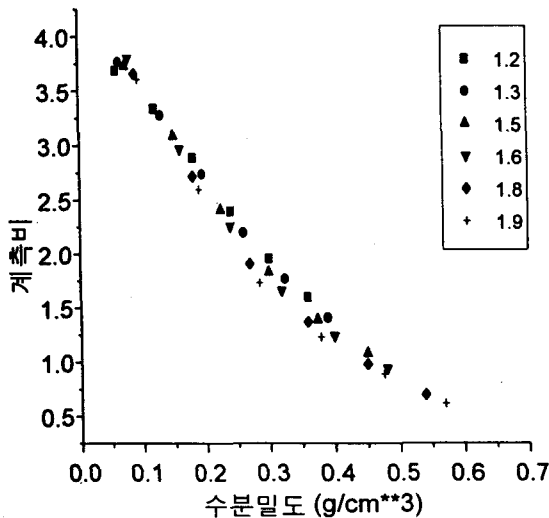


Fig. 8. 건조밀도 및 수분밀도 변화에 대한 계측비 (MCNP 계산)

계를 나타낸 것이고, 그림 8은 중성자계측비와 수분밀도의 관계를 나타낸 것이다. 2개의 결과 모두 건조밀도가 증가함에 따라 중성자 계측비가 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

MCNP 코드 계산과 공시체 실험 결과의 비교

MCNP4A 전산코드의 적용성 여부를 판단하기 위하여 공시체 제작실험으로부터 얻은 계측비와 MCNP4A 전산코드를 이용하여 얻은 결과를 비교하여 표 2와 그림 9에 나타내었다.

계측비는 흙의 수분함량 및 건조밀도에 의해 영향을 받으므로 MCNP4A 전산코드로부터 얻은 계측비들을 수분함량과 건조밀도에 대해 보간한 후 공시체 실험결과와 비교하였다. 실험결과에 대한 MCNP4A 전산코드 결과값의 오차는 0.55%~

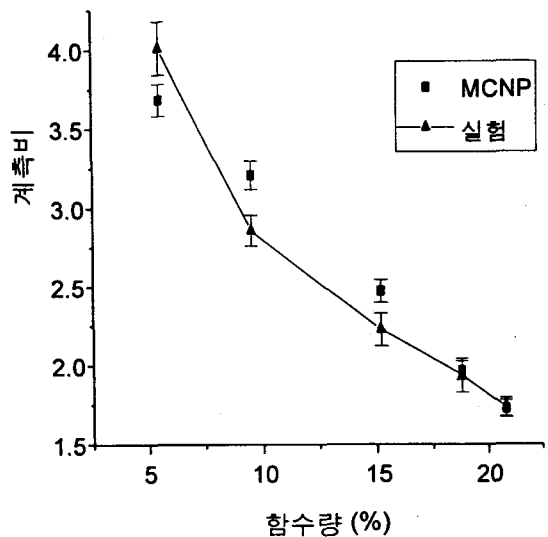


Fig. 9. 함수량 변화에 대한 MCNP 코드와 공시체 실험 계측비의 비교

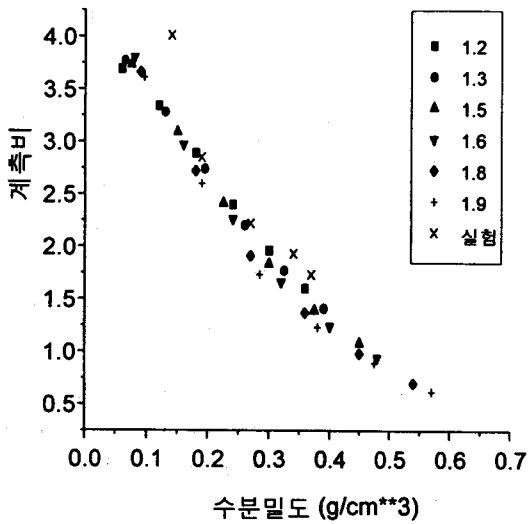


Fig. 10. 수분밀도 변화에 대한 MCNP 코드와 공시체 실험 계측비의 비교

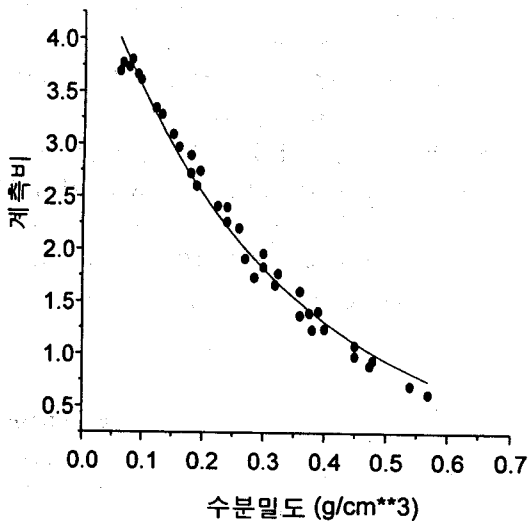


Fig. 11. 수분밀도 변화에 따른 계측비의 교정곡선

12.27%의 범위에 있으며, 수분함량이 증가함에 따라 두 결과가 잘 일치하였다.

수분밀도 변화에 대한 코드계산값과 공시체 실험의 결과를 그림 10에 나타내었다. 두 값은 잘 일치하였으며 코드계산값들에 대한 식 (1)을 이용한 교정식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{NR}{NS} = 4.88453 \cdot e^{-3.29226 \cdot \rho_w/g} \quad (5)$$

식 (5)에 대한 교정상수는 식 (4)와 같이 비선형식에 대한 최소자승법(Least Square Method)를 이용하여 구한 결과, $C=4.88453 \pm 0.07704$, $D=3.29226 \pm 0.07984$ 이었고, χ^2 (Chi-square)값은 0.01489이었다. 이 교정상수에 대한 교정곡선을 그림 11에 나타내었다.

결과고찰

본 연구에서는 흙의 흡착수에 의한 영향을 제거하기 위해 수분함량의 값을 MCNP4A 전산코드 모사에서 흡착수가 포함된 수분함량을 입력하였다. 하지만 일반적으로 논의되는 흙속의 수분함량을 공극사이에 존재하는 토중수로서 이에 따른 보정을 위해 식 (3)을 이용하여야 한다. 식 (3)을 이용하기 위해서는 Ig 값을 구해야 하며, 감마선 계측비에 의한 습윤밀도(ρ_w) 또한 구해야 한다. 즉, 흙속에 존재하는 수분함량값을 구하기 위해 작성된 수분함량과 중성자계측비의 교정식은 그 정밀도를 높이기 위해 Ig와 습윤밀도 값이 반드시 필요하다.

본 연구의 결과를 살펴보면 중성자계측비가 수분함량뿐만 아니라 흙의 건조밀도에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 그 영향의 정도는 미세하지만 더욱 정밀한 수분함량을 측정하기 위하여 보정이 필요한 것으로 판단된다. 이에 따른 수분밀도 결정 교정식의 개선도 필요하다.

계기를 실제 제작하여 측정된 값과 MCNP4A를 이용하여 계산한 값은 수분함량이 낮아질수록 오차가 커졌다. 이는 공시체제작실험의 오차와 MCNP4A 모사의 차이에 의한 오차가 복합적으로 나타난 것으로 보인다. 특히 검출기모사는 매우 중요하게 고려해야 할 사항이다. 즉, 중성자 검출부로 들어오는 중성자가 모든 에너지에서 검출되는 것이 아니라 검출기속으로 입사한 중성자 에너지에 따라 확률적으로 He-3와 반응하여 검출되므로 본 연구에서 사용한 중성자속과 실제 중성자계측값은 오차가 있는 것으로 판단된다. 따라서 MCNP4A의 모사에서 (n,P) 반응의 고려가 필요하다. 그외에도 검출기의 외벽두께 및 유효검출길이에 따른 영향도 고려해야 할 것으로 판단된다.

실제 측정실험결과와 MCNP4A 전산코드의 모사실험결과는 시간과 노력이 많이 드는 공시체제작 및 측정실험을 하지 않고도 교정식 및 교정상

수를 구할 수 있는 것을 보여주고 있다. 따라서 그림12와 같은 과정을 통해 실제 측정실험을 많이 하지 않고도 MCNP4A 전산코드를 통해 중성자 수분함량 측정기의 설계, 교정상수 및 교정식을 구할 수 있다.

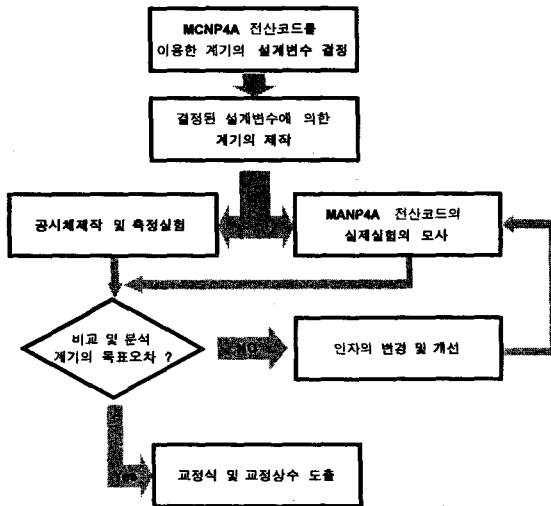


Fig. 12. MCNP4A 전산코드를 이용한 교정식 및 교정상수 도출 개념도

결론

본 연구에서는 중성자 수분함량 측정기의 교정식 및 교정상수 도출을 위해 제작한 공시체실험과 측정기를 MCNP4A 전산코드를 이용하여 모사하고, 중성자속을 측정 후 실제 공시체측정실험의 결과와 비교하였다. 실험값과 코드 계산값의 비교결과는 함수량 20.79%에서 오차율이 0.55%로 두 값이 잘 일치하였으나, 함수량 9.5%, 15.23%에서는 오차율이 각각 12.27%, 11.1%로 큰 차이를 보였다. 이러한 두 값의 차이는 실제실험값과 전산코드 계산값이 가질 수 있는 오차를 고려함으로써 줄일 수 있으며, 수분함량의 변화에 따른 계측비의 변화경향은 일정 오차범위내에서 일치하므로 교정식 작성 및 교정상수의 도출을 위한 수많은 공시체 실험을 대신하여 MCNP4A 전산코드를 적용할 수 있다고 판단된다. 또한 두 결과의 차이는 공시체 실험에서도 발생하지만, 전산코드 결과값의 교정방법 개선, 검출기 및 흡에

대한 보다 사실적인 모사등을 통해 더욱 줄일 수 있다. 따라서, 중성자 수분함량 측정기와 실제실험과 MCNP4A 모사실험과의 오차를 줄이기 위해 MCNP4A의 사실적 모사에 대한 많은 자료의 축적이 필요하다.

감사의 글

* 본 연구는 건설교통기술연구 개발 사업비의 지원으로 수행하고 있습니다.

참고 문헌

1. 한국건설기술연구원, "도로구조체를 지지하는 노상 및 노체의 성토시공관리를 위한 시스템 개발에 관한 연구(Ⅰ)," 한국과학재단, 1990.
2. IAEA, "Commercial Portable gauges for Radiometric Determination of the Density and Moisture Content of Building Materials : A Comparative Study," Technical Reports Series, No. 130, 1971.
3. 한국건설기술연구원, "아스팔트 및 콘크리트 포장구조체를 지지하는 노상 및 노체의 성토시공관리를 위한 시스템 개발," 과학기술처, 1991.
4. 일본도로공단시험소, "RI計器で土の密度・水分量るしくみ," 시험소 기술자료 제213호, 1984 (昭和59年)
5. I.F.Gonçavels, J.Salgado, J.NEVES and F.G.Carvalho, "Calibration and Design Optimization of a Nuclear Surface Moisture-Density Gauge by Monte Carlo Simulation," Nuclear Geophysics, Vol. 8, No. 6, pp. 527-537, 1994.
6. Branja M.Das, "토질공학원론," 구미서관, pp. 30-33, 1994
7. 공업진흥청, "흙의 함수량 시험 방법(KSF2312)," 공업진흥청, 1980.
8. 최원철, "Monte Carlo 방법을 이용한 수분/밀도 측정 RI계기의 기하학적 배열설계," 석사학위논문, 1997.
9. The ASM Handbook Committee, "Material

- Handbook Ninth Edition," Vol. 2, Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Pure Metals, pp.152-179, 1979.
10. J.Briesmeister, Ed., "A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, November 1993.
 11. 경희대학교, "성토시공관리용 방사성동위원소 장비개발," 한국건설기술연구원, pp.80, 1988.
 12. 박성현, "회귀분석," 대영사, pp. 76-84, 1987.
 13. Philip R.Bevinton, D.Keith Robinson, 2nd ed, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Science," McGraw-Hill, Inc., pp. 101-105, 1992.
 14. I.F.Gonçalves, J.Salgado, and F.G.Carvalho, "Calibration of a Neutron Moisture Gauge by Monte-Carlo Simulation," Nuclear Geophysics, Vol. 6, No. 3, pp. 373-376, 1992.