

‘96 춘계 학술 발표회 논문집

한국원자력학회

RI를 이용한 도로성토계기의 측정신뢰구간 예측 I

전태훈, 이석근, 황주호
경희대학교

호광일
수원대학교

권정광, 전종배, 양세학
(주) 도화중합기술공사

요 약

외국에서는 도로건설시 성토관리용으로 ‘방사성동위원소(Radioisotope : 이하 RI)를 이용한 습윤밀도 및 함수량 측정장비’가 많이 사용되고 있는 추세이다. 국내에서는 1989년 제정된 건설기술관리법 감리전문회사건립 등록기준에 밀도·함수량 측정기의 보유가 명시되어 있고 시공성향상 차원에서 도입될 예정이다. 그러나 국내의 토양에 맞게 제작되어지지 않았고 사용상의 방사선 관련 제약 때문에 기대만큼 실제 사용이 되지 않고 있다.⁽¹⁾

연구발표내용은 국내에서 제작, 실험하여 만들 RI계기개발의 기초가 되는 내용이며, 만들어질 계기의 부품과 계산과정 등을 예측하는 것이다.

1. 서론

제작될 RI계기의 측정계수값이 목표오차율을 가지려면 어느정도의 계수를 보여야하는지와 기존의 실험자료를 사용하여 교정상수를 계산한 후 완성된 교정식이 어느정도의 정확성을 가지는가를 평가한다. 최종적으로 제작될 RI계기의 총 오차율을 계산, 목표로하는 오차이하를 가질 제작조건을 제시할 것이다.

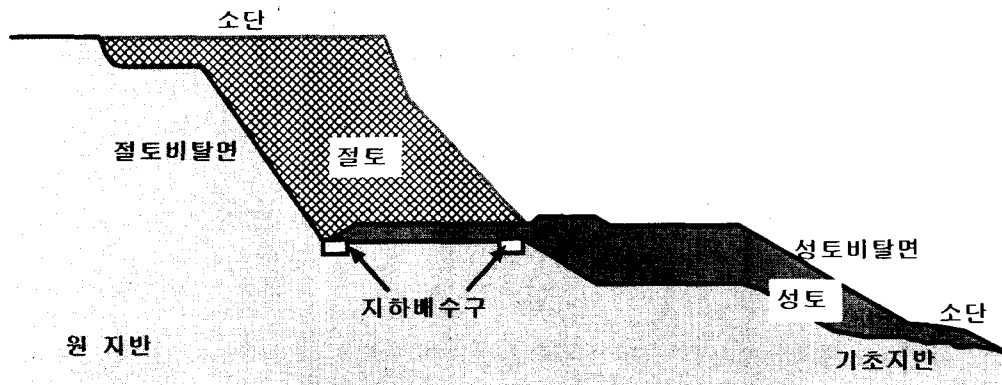
2. 본론

먼저 성토관리라는 측면에서 RI계기를 사용하는 성토 및 노상 등을 먼저 설명한 뒤 RI계기의 측정원리, 일반적인 구조, 신뢰측정구간, 교정상수 및 교정식의 완성등을 수행함으로 RI계기의 기본적 측정범위를 설정한다.

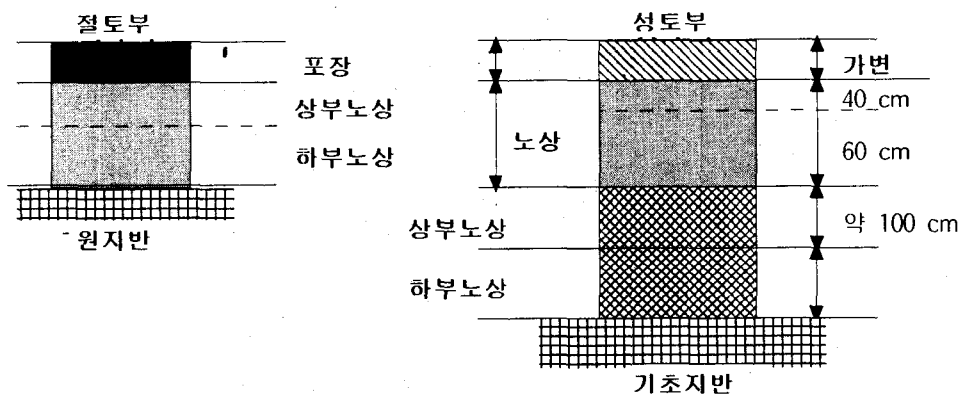
2.1 일반적 성토의 구조

RI계기의 사용목적은 노상의 습윤밀도 및 함수량을 측정하는 것으로서 방사선의 감쇄정도를 이용하는 것이다. 노상이란 도로공사시 포장전에 포장재 밑에서 포장기초의 역할을 하는 것으로서 포장 노면을 주행하는 교통 하중으로부터 포장체를 통하여 전달되는 분산하중을 충분히 지지하는 동시에 노상의 시공중에는 시공 기계와 공사용 차량 등의 하중을 견딜 수 있는 흙 구조물이다.⁽²⁾

<그림 1.>은 노상의 표준구조로 도로의 횡단면을 나타내며 절토부와 성토부의 노상부분을 보여준다. <그림 2.>는 절토부 및 성토부의 부분별 호칭과 대략적 두께를 보여주고있다. 일반적으로 노상은 포장밑면으로부터 약 1m의 거의 균질한 흙으로 구성된 부분을 가리키며 성토부에서는 노상 마무리면으로부터, 절토부에서는 굴착한 면으로부터 하층부의 약 1m를 노상으로 하고 있다. 노상의 마무리면을 노상면이라 부르며, 노상의 지지력과 강도는 포장의 두께와 보조 기층 및 기층의 공법을 결정하는 중요한 기초가 되는 것이다.



<그림 1.> 노상의 표준구조



<그림 2.> 노상의 구조

2.2 RI계기의 형태와 규격

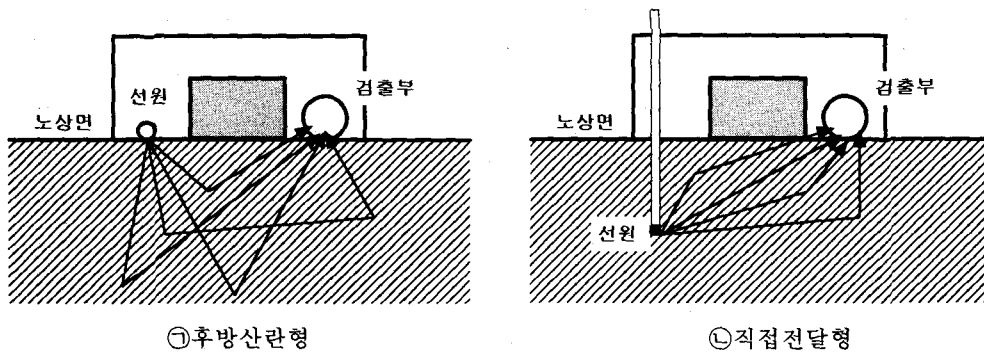
RI계기는 현재 미국과 일본, 프랑스, 중국을 비롯한 여러나라에서 생산하여 사용하고 있으며 우리나라에서도 여러대를 수입하였으나 실제 현장에서는 사용하지 않고 있다. 이들 RI계기의 일반적인 형태와 국내 실정을 고려하여 보기로 한다.

2.2.1 RI계기의 일반적 형태(밀도 및 함수량 겸용 측정기)

RI계기는 측정방법에 따라 <표 1.>과 같이 분류되며, 각 측정상의 특징을 <그림 3.>에 나타내었다.⁽³⁾

RI 계기		
형태	표면 측정형	
측정법	직접 전달	후방 산란
		후방산란

<표 1.> RI계기의 분류



<그림 3.> 표면측정형의 측정형태

2.2.2 RI의 법적인규제와 이에 따른 선원의 세기

현재 원자력법상 $100\mu\text{Ci}$ 이하의 밀봉선원을 가진 RI계기를 사용하고자 하는 경우에는 계기의 사용에 규제가 없으나, $100\mu\text{Ci}$ 이상 100mCi 이하의 선원을 가진 RI계기를 사용하고자 하는 경우에는 원자력관련 법규에 의거하여 적절한 조치를 취한 뒤 시험을 실시해야 한다.⁽⁴⁾

그런데, 기존에 외국에서 만들어져서 국내에 수입된 여러 RI계기들이 $100\mu\text{Ci}$ 이상의 규제대상이었기 때문에 여러 제약으로 인하여 대중화에 어려움이 되어왔다.

그러므로 선원의 세기는 $100\mu\text{Ci}$ 이하로 하는 것이 RI계기 이용확산에 유리하다. 중성자 선원으로는 비 방사능이 높은 Cf-252를 γ 선원으로는 Co-60 또는 Cs-137를 사용하는 것이 바람직하다.

2.3 신뢰측정계수 예측

위에서 기술된 RI계기로 계수율을 얻는 실험을 할 때 주의를 기울여야 하는점이 여러 가지가 있는데 먼저 계수의 설정오차를 고려한 계수시간의 설정이다.

RI계기의 계수시간은 기존의 밀도 및 함수량 측정법(KS F 2306, 2312)에 비해서 현저히 짧아야만이 측정횟수를 늘리고 통계적 성도관리를 할 수 있다.

식(1)를 가지고 오차를 계산하는데 계수시간을 상수라고 생각하고 오차를 계산한 후 이를 그래프로 그려서 목표로한 1%의 오차를 위한 계수, 즉 측정수를 예측하여보자.

식(1)과 같이 오차는 계수율의 표준편차(σ_r)를 측정계수(r)로 나눈 것이다. 그러므로 아래 식

(4)와 같이 오차가 계산될수 있으며, 계수시간(t)과는 상관없이 측정계수(x)와만 관계가 있다.⁽⁵⁾

$$\frac{\sigma_r}{r} = \frac{\frac{\sigma_x}{t}}{r} = \frac{\frac{\sqrt{x}}{t}}{r} = \frac{\frac{\sqrt{x}}{t}}{\frac{x}{t}} = \frac{1}{\sqrt{x}} \dots\dots\dots (1)$$

식(1)에 의한 각 측정계수에 따른 오차계산의 결과는 아래 <표 2.>과 같으며(계수시간을 편의상 30초로 계산)아래에서 보는 바와 같이 계수가 10,000이상이면 오차가 1%이하로 떨어지며 계수가 약 10,000에서 13,000정도는 되어야만 1%이하의 오차내에 들면서도 계기의 경제적구성요건을 충족시킬것으로 보인다.

계수(x)	계수시간(t)	측정계수(σ _x)	오차(%)
3000	100	1.83	1.83
5000	166.7	2.36	1.44
8000	266.7	2.98	1.12
10000	333.3	3.33	0.99
13000	433.3	3.80	0.88

<표 2.> 계수시간 30초일경우의 계수에 따른 오차

2.4 습윤밀도와 함수량산출 고정식

중성자나 γ선은 각각 흙의 함수량이나 습윤밀도가 증가함에 따라서 지수적으로 감소한다. 이는 여러 실험에 의해 보여졌으며, 일반적으로 습윤밀도측정비와 습윤밀도의 상관관계식은 식(2), 함수량측정비와 함수량과의 상관관계식은 식(5)으로 나타내어진다. (방사선 반감기에 따른 영향 등을 없애기 위하여 물리·화학적으로 안정된 표준물질을 측정하여 얻은 값에 대한 측정대상매질을 측정하여 얻어진 값의 비를 측정비(Count Ratio)라 말한다.)

다음의 식들은 회귀분석에 의해 정리된 것들이다.⁽⁶⁾

먼저, 습윤밀도측정비와 습윤밀도의 상관관계식을 쓰자.

$$R_g = A \times e^{-B \times \rho_t} = \frac{(N_g - N_{gb})}{(S_g - S_{gb})} \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서 R_g : 습윤밀도측정비
- N_g : 측정현장에 대한 투과감마선 측정값(cpm)
- N_{gb} : 측정현장에 자연방사선 측정값(cpm)
- S_g : 표준물질에 대한 투과감선 측정값(cpm)
- S_{gb} : 표준물질에 대한 투과감마선 측정값(cpm)
- ρ_t : 흙의 습윤밀도(g/cm³)
- A, B : 교정 상수(Constant)

위의 식(2)을 양변정리하여 식(3), (4)와 같이 만든다.

$$\ln(Rg) = \ln(A) + [(-B) \times \rho_d] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\ln(Rg) = E + (F \times \rho_d) \quad \dots\dots\dots (4)$$

그러면, 함수량추정비와 함수량과의 상관관계식은 다음과 같다.

$$R_m = A' \times e^{B' \times \rho_m'} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서 R_m : 습윤밀도추정계수(cpm)
 ρ_m' : 결보기 수분밀도(g/cm³)
 A', B' : 교정 상수(Constant)

여기에서 ρ_{m_i} 는 결보기 수분밀도로 아래 식(6)와 같이 나타내어질 수 있으며, 이를 식(5)에 대입 후 정리하면 식(7)와 같이 된다.

$$\rho_m' = \rho_m + 0.692619 \times \rho_{m_i} + 0.4305 \times \rho_{d_i} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서 ρ_m : 참 수분밀도 값(g/cm³)
 ρ_{m_i} : 강열감량 시험에서 얻어진 수분밀도(g/cm³)
 ρ_{d_i} : 노건조에서 얻어진 건조밀도에서 ρ_{m_i} 을 뺀 값(g/cm³)

$$\ln(R_m) = G + H(\rho_m + I \times \rho_{m_i}) + J \times \rho_a \quad \dots\dots\dots (7)$$

G, H, I, J : 교정 상수(Constant)

2.5 습윤밀도와 함수량산출 교정식을 위한 교정상수 계산

식(4)와 (7)의 교정상수들은 실험에 의해서 얻어진다. 여기서는 기존 실험자료를 사용하여 산출하였다. 밀도곡선은 모두 266개, 함수량곡선은 149개의 data를 사용하였으며, 교정상수의 계산방법은 Gauss-Newton방법에 의하여 작성된 FORTRAN프로그램이다.⁽⁷⁾

E	0.560181
G	-0.989065
G	0.692307
I	0.586377
J	-0.0975232

<표 3.> 교정상수의 값

2.6 RI계기 측정값의 평가

이들 교정상수값을 넣어 계산한 밀도, 함수량값과 각각의 실측정치를(모래치환법 등을 사용한) 참값으로 볼 수 있는 기준값에 대한 회귀분석(Regression Analysis) 및 상관분석(Correlation Analysis)을 하였다.⁽⁸⁾ 계산값과 기준값을 1차회귀분석을 하여 회귀식이 이상치인 $y = x$ 에 근접하였는지를 비교하여 평가, 판단 하였다.

습윤밀도 교정식에 의한 측정값을 가지고 회귀분석한 결과 아래 식(8)과 같이 나타났으며, 함수량의 경우는 식 (9)과 같이 나타났다.

$$y = 1.0079x - 0.014084 \dots\dots\dots (8)$$

$$y = 0.98087x + 0.016836 \dots\dots\dots (9)$$

그리고, 이들 두 식들에 대한 결정계수(r^2)를 계산하여 상관분석을 하면 다음 <표 4.>과 같은 결과를 가지며, 그러므로 밀도의 경우 약 3.1%, 함수량의 경우 5%가 회귀분석식에 의하여 설명할 수 없는 범위에 들어가게 된다고 말할 수 있다.

	밀도 교정곡선	함수량 교정곡선
결정계수(R^2)	0.969	0.950
시료의 수(N)	266	149

<표 4.> 각 교정곡선에 대한 결정계수의 값

2.7 오차분석

이들 교정상수를 사용하여 산출한 함수량값에 대한 총 오차율을 계산하였다. 기존의 함수량 측정방법인 '흙의 함수량 시험방법'(KS F 2306)⁽⁹⁾에 근거한 실험방법과 위에서 기술한 교정식작성절차 및 함수량계산등 모든 절차에 대한 오차를 오차확산(Error Propagation)을 사용하여 계산하는 방식이다.

2.7.1 KS F 2306에 근거한 오차분석

교정식 작성시 기준값인 함수량측정값 산출절차 및 오차(불확정도)는 다음과 같다.

- ① 시료를 담은 용기의 무게와(a) 및 시료와 용기의 무게를(b) 측정
- ② 시료를 110℃로 일정하게 노건조시킨다.
- ③ 노건조된 시료를 테시케이터에 넣어 실온이 될 때까지 식힌후 흙과 용기의 무게를(c) 측정
- ④ 공식에 의하여 기준값을 계산 $\left(\frac{b - c}{c - a} \times 100(\%) \right)$

위 절차④에서 나온 공식에 의하면 다음과 같이 나온다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{160g(\pm 0.16g) - 150g(\pm 0.15g)}{150g(\pm 0.15g) - 50g(\pm 0.05g)} \times 100$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(160\text{ g} - 150\text{ g}) \pm \sqrt{(0.16^2\text{ g} + 0.15^2\text{ g})}}{(150\text{ g} - 50\text{ g}) \pm \sqrt{(0.15^2\text{ g} + 0.05^2\text{ g})}} \times 100 \\
&= \frac{10\text{ g} \pm 0.22\text{ g}}{100\text{ g} \pm 0.16\text{ g}} \times 100 \\
&= \frac{10\text{ g} \pm 2.2\%}{100\text{ g} \pm 0.16\%} \times 100 \\
&= (0.1 \pm \sqrt{2.2^2 + 0.16^2}\%) \times 100 \\
&= (0.1 \pm 2.2\%) \times 100
\end{aligned}$$

따라서, 기준값에 대한 오차율은 2.2%라고 예측할 수 있다.

2.7.2 RI계기의 총 오차율

이번에는 RI계기상의 함수량값을 계산하는데의 산출과정 및 오차는 다음과 같다. (이하 실험값)

- ㉠ 위의 과정(기준값산출과정)을 여러번하여 자료를 만든다.
- ㉡ ㉠의 자료를 사용하여 교정상수를 결정하여 교정식을 작성.
- ㉢ RI계기를 사용하여 계수측정(1분간)
- ㉣ 교정식을 사용하여 실험값을 산출

절차㉠에 의한 오차는 2.2%(S_1), 절차 ㉢에 의한 오차를 1%(S_2)라고 하고 ㉣에 의한 오차는 2.6에서 보인것과 같이 5%(S_3)이라면, 총 오차율 S_T 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
S_T &= \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \\
&= \sqrt{2.2^2 + 1^2 + 5^2} \\
&= 5.6
\end{aligned}$$

총 오차율은 5.6%이다.

3. 결론 및 고찰

RI계기의 측정방식은 표면 측정형중 직접전달형을 방사성동위원소의(밀봉선원) 세기는 $100\mu\text{Ci}$ 이하로 사용하며, 중성자선원으로는 Cf-252, γ 선원으로는 Cs-137으로한다.

그리고, 위 2.7에서 나온 것과 같이 제작될 RI계기의 예상 오차율은 5.6%이다.

▶ 감사의 글

-- 본 연구는 건설교통기술연구개발 사업비의 지원으로 수행하고 있습니다. --

4. 참고문헌

1. 나경준, "RI계기를 이용한 성토다짐관리," 건설기술정보, 1991
2. 한국도로공사, "고속도로공사일반시방서," 한국도로공사, 1990
3. "흙의 현장밀도와 함수비 측정방법의 개선에 관한 실험연구," 건설부국립건설시험소, 1989
4. "원자력법령집," 한국원자력연구소, 1995
5. Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Mearsurment," JOHN WILEY & SONS, pp.80~94, 1989
6. R.P.Gardner 외 4인, "Density and Moisture Content Mearsurements by Nuclear Methods," American Association of State Highway Officials, 1967
7. J.L.Kvester & Joe H. Mize, "Optimization Techniques with FORTRAN," McGRAW-HILL Book Co., pp.218~239, 1973
8. 박성현, "현대실험계획법," 민영사, 1995
9. 공업진흥청 "흙의 함수량 시험방법," 공업진흥청, KS F-2306, 1995
10. 김강진 외 3인 역, "분석화학," 자유아카데미, pp.33~68, 1991