

RI 계기의 측정회로 시스템에 관한 연구

(A Study on the Measurement Circuit System of RI Gauge)

김기준(金起僑)

인천전문대학 제어계측과

요 약

본 연구에서는 토목공사에서 필요한 성토시공관리용 방사성 동위원소 이용계기의 측정회로를 개발하고자 하였다. 제작된 계기는 감마선과 열중성자 검출회로, 고전압 공급장치 그리고 마이크로프로세서 등으로 구성하였다. 성토의 밀도측정에 충분한 계측수를 얻기 위하여 감마선 검출 5회로, 열중성자 검출 2회로로 구성하였으며, 또한, 모든 회로는 자연 방사선과 잡음에 의한 영향을 최소화하기 위하여 정전차폐하였으며, 계수판에 인가하는 고전압의 리플 진폭과 주파수를 고려하여 펄스 계수시에 리플 성분에 의한 펄스수는 제거하였다.

Abstract In this study, an objection, to be needed at public works, is to develop a measurement circuit of a gauge using radioisotope for compaction control. The developed gauge consists of measuring circuits for gamma-rays and thermal neutrons, a high voltage supply unit, and a microprocessor. To obtain meaningful numbers of pulse counts, parallel five and two circuits are provided for gamma-rays and thermal neutrons, respectively. Also, to minimize effects of natural environmental radiation and electrical noise, circuits are electrostatically shielded and pulses made by ripples are eliminated by taking frequency of high voltage supplied to the circuit and pulse height of ripples into consideration.

1. 서론

토양의 수분 함유량과 밀도 측정에 방사선 동위원소를 이용한 연구가 1960년대부터 진행되어, 최근에는 성토시공용 흙의 밀도 및 함유량 측정에 화학적 방법을 이용하지 않고 측정할 수 있는 방사성 동위원소(RI) 이용계기가 개발되어 정확하고 신속한 품질관리를 수행해 오고 있다^[1].

현재 선진국에서 개발되어 사용하고 있는 RI 이용계기는 수십 mCi 이상의 방사능을 가진 방사

선원을 사용하고 있다. 그러나 외국의 장비를 국내에서 사용할 경우, 방사능의 세기가 국내에서 허용하는 기준치 이상으로 원자력법상 허가를 받아야 하고 관리가 어려우므로, RI 이용계기 사용에 복잡한 절차를 가져온다. 따라서 성토시공관리에 RI 이용계기의 광범위한 적용을 위하여는 우리나라 원자력법상 신고만으로 사용할 수 있는 100 μ Ci 이하의 방사능을 적용하고 이 정도의 세

기에서 측정이 가능한 RI 이용계기의 개발이 요구되어 지고 있다^[2].

본 연구에서는 국외에서 사용하는 RI 이용계기에 비해 방사선의 세기를 약 1/1000정도로 감소시켜도 측정이 가능한 RI 이용계기를 제작하기 위해서, 방사능 대비 방출 방사선의 개수가 많은 Co-60 감마선 선원과 Cf-252 중성자 선원을 사용하여 검출기와 측정회로의 개수를 늘려 방사선 계측수를 증가시키고자 하였다. 이를 위하여 감마선 계수관으로 검출수 측정목적에 이용되는 펄스 모드 G-M 검출기를, 열중성자 계수관으로는 이동성과 검출효율이 우수한 He-3 검출기를 사용하여 충분한 수의 감마선과 열중성자를 검출하여 계수 할 수 있는 회로를 개발하고자 하였다.

2. 측정 원리

방사선을 이용하여 성토의 습윤 밀도와 수분 밀도를 측정하려면 성토를 통하여 방출되는 감마선 및 열중성자의 계측수가 필요하다. 이들의 계측으로부터 식 (1)과 식 (2)를 적용하면 토양의 수분밀도(R_T)와 습윤밀도(R_W)를 구할 수 있다.

$$R_T = \frac{\ln A + \ln(S_C - S_B) - \ln(R_G - R_B)}{B} \quad (1)$$

여기서 A , B 는 상수, S_B 는 표준체에서의 배후 감마선수, S_C 는 표준체에서 선원삽입후 계측수,

R_B 는 성토에서의 배후감마선 계측수, R_G 는 성토에 선원삽입후 계측수이다.

$$R_W = \frac{\ln C + \ln M_S - \ln N_R}{D}$$

$$E \cdot R_M + F(R_D + R_M) \quad (2)$$

여기서 C , D , E , F 는 상수, M_S 는 표준체에서의 선원삽입후 중성자 계측수, N_R 은 토양에 선원삽입후 중성자 계측수, R_M 은 강열 감량후 계측수, R_D 는 노건조후 건조밀도 측정값이다. 이와 같이 성토의 습윤 밀도와 수분 밀도의 측정에는 방사선 계측수가 필요하므로 검출 및 계수를 위한 회로가 필요하다.

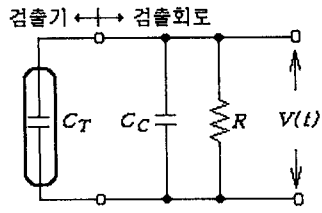
방사선 검출기내에서 방사선의 상호작용시간은 기체의 경우 수 [ns]로 대단히 짧기 때문에 방사

선 에너지의 전달은 순간적으로 일어난다. 이 때 계수관의 유감체적중에서는 일정한 양의 전하가 축적되므로 이 전하를 수집하여 기본적인 전기적 신호를 형성하면 계수관에 입사되는 방사선의 개수를 측정할 수 있다.

전형적인 전하의 수집방법은 방사선에 의해서 생성된 양전하와 음전하를 서로 반대방향으로 이동시키도록 계수관 내부에 고전계를 형성시킴으로서 얻어질 수 있다. 물론 계수관의 종류에 따라 전하를 완전히 수집하는데 요구되는 시간은 달라진다.

한 개의 입자 또는 방사선의 양자가 입사한 경우 전하수집시간 t_c 와 같은 시간만큼 전류가 흐르며, 이 기간 동안 적분시키면 생성된 전하의 총량 Q 는 $\int_0^{t_c} i(t) dt$ 로 구할 수 있다. 이 원리를 이용한 검출기는 펄스 모드(pulse mode), 전류 모드(current mode)와 평균 제곱 전압 모드(mean square voltage mode)로 대별되며, 현재 개별적인 에너지 측정에는 펄스 모드가 이용된다^[5].

단일의 현상으로 생성된 신호 펄스의 특성은 그림 1과 같이 계수관과 여기에 접속되어 있는 회로 즉, 전치 증폭기(preamplifier)의 입력특성으로 결정된다. 그림에서 R 은 검출회로의 입력 저항, C_C 는 검출회로의 정전용량 그리고 C_T 는 계수관 자체의 정전용량이다. 여기서 $R(C_T + C_C)$ 의 적(積) 시정수(τ)가 검출기의 전하수집시간 t_c 보다 큰 경우, 처음의 신호펄스가 최대값에 도달하는데 필요한 시간은 검출기 자체내에서 전하수집시간에 의해 결정되며, 펄스의 감쇠시간은 회로의 시정수에 의해 결정된다. 즉, 펄스의 상승시간은 계수관의 특성에 의존하며, 감쇠시간은 회로의 시정수에 의존하는 것을 의미한다. 따라서 방사선 계수관으로부터의 발생되는 신호펄스를 정확히 계측하기 위하여는 검출회로의 시정수를 방사선 계수관의 불감시간(수 십 [μs]) 이하로 하는 것이 바람직하며 계수장치에 인가되는 정형된 펄스폭도 짧을수록 좋다.

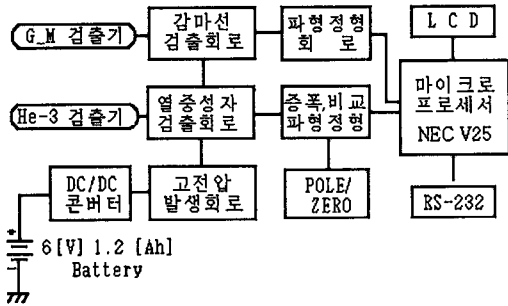


<그림 1> 검출부의 등가 회로

3. 회로의 설계 및 제작

전체 회로구성은 그림 2와 같이 감마선 검출 5 회로, 열중성자 검출 2회로, 고전압 발생회로, 창 비교 및 파형정형회로, 계수회로, 연산처리 및 기억장치 그리고 전압안정화회로 등으로 구성된다.

감마선 검출용 G-M 계수관에 고전계 형성을 위하여 인가하는 고전압은 직류 800 [V]로 수 [mV] 정도의 리플을 포함하여도, G-M 계수관으로부터 검출되는 펄스의 진폭은 수 [V]에 달하므로 측정에 오차를 발생시키지 않는다. 그러나 열중성자 검출용 He-3 비례계수관에서 검출된 열중성자 펄스신호는 1 [mV] 이하로 대단히 작기 때문에 직류 고전압(약 1200 [V])에는 0.5 [mV_{p-p}] 이하의 리플도 허용하지 않는다.



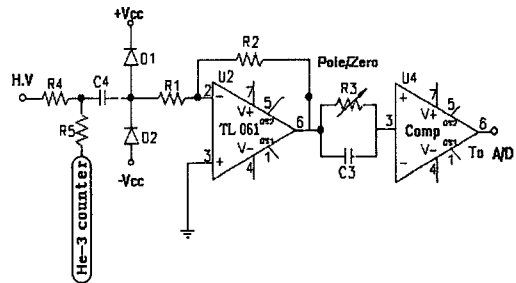
<그림 2> RI 이용계기의 전자회로 구성

직류 고전압에 이 이상의 리플이 포함될 경우 리플 주파수에 해당하는 만큼의 펄스원이 신호원으로 검출되기 때문이다^[6]. 따라서 고전압 회로는 리플이 없도록 필터와 대용량의 평활 회로로 구성하든가, 리플 주파수를 수 [Hz] ~ 수십 [Hz] 이하로 하여 계수회로에서 보정을 하면 된다. 설계제작된 고전압 발생장치는 직류 출력전압 1200 [V]에서 리플전압 15 [mV]이하, 리플 주파수 30.3

[Hz]이며, 이 때의 소비전력은 정격입력 5 [V]에서 1 [mA]이하이었다. 그리고 G-M 계수관과 He-3 비례계수관의 고전압 입력에는 동일한 고전압 발생장치에서 계수관에 요구되는 전압이 분압되어 인가된다.

3.1 He-3 비례계수관의 열중성자 검출회로

He-3와 열중성자가 반응해서 발생하는 에너지는 극히 미약한 양이므로 연산증폭기를 3단으로 구성하여 증폭도가 최대 약 50 [dB]가 되도록 설계하였다. 검출 및 증폭된 펄스는 입력펄스와 전치증폭기에서의 감쇠시간 관계로부터 파미의 감쇠후 영점에 교차하거나 언더슈트하게 되고, 이 부분에 다음의 펄스가 도래하면 펄스의 진폭에 영향을 주어 오차를 나타내게 된다. 따라서 증폭회로에 폴-제로회로를 부가하여 부중진동없는 단순한 지수함수의 출력신호가 되도록 하였다. 또한 검출신호의 진폭은 감마선 검출시와 달리 펄스마다 다르므로, 펄스 계수회로의 앞단에 연산증폭기에 의한 창비교기를 설계하여 일정 진폭 이상과 이하의 펄스만이 계수되도록 그림 3과 같이 구성하였다.

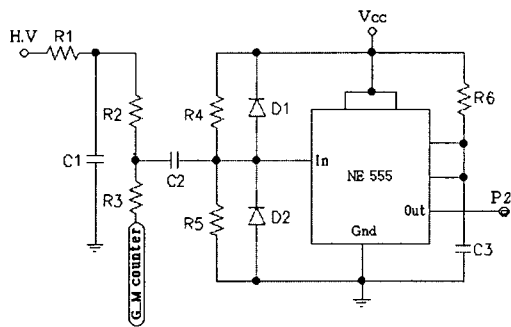


<그림 3> 열중성자 검출회로

3.2 G-M 계수관의 감마선 검출회로

감마선 검출기로 이용되는 G-M 계수관에서 발생한 출력펄스의 진폭은 수 [V] 정도이므로 열중성자 계수관으로 이용되는 비례계수관과는 다르게 감마선 검출회로는 비교적 간단하며, 발생하는 감마선의 진폭이 일정하므로 진폭에 따른 파형의

선별작업이 필요없어 주변 회로도 그림 4와 같이 단순하게 구성할 수 있다. 본 장치에 적용한 G-M 계수관은 LND Model No.743으로 불감시간이 75 [μ s]이므로 검출회로의 시정수와 정형된 펄스폭도 75 [μ s]로 하였다. 여기서 검출된 펄스의 계수를 위한 파형정형회로에는 Timer IC 555를 사용하였다.



<그림 4> 감마선 검출회로

4. 결과 및 검토

제작된 회로의 검출성능 평가에는 Co-60 감마선 선원(50 [μ Ci])과 Cf-252 중성자 선원(50 [μ Ci])을 이용하였다. 성토의 습윤밀도 측정시는 감마선원을 이용하고 수분밀도 측정시는 중성자 선원을 이용하므로, 서로의 간섭을 피하기 위하여 감마선 측정시에는 열중성자 검출회로의 전원과 입력포트(P₀-P₁)를 차단하고 감마선 선원만으로 측정하였다. 검출회로설계에 있어서 다른 중요한 점은 고전압공급부분이다. 중성자검출기나 감마선 검출기는 900~1200V 까지의 전압이 공급된다. 고전압이 순간적으로 He-3 검출기에 인가되면 G-M 검출기와 마찬가지로 검출기 양극도선의 요철부분에서 국부방전, 즉 코로나방전이 일어나기 쉽다. 이는 검출기 내에 걸리는 전기장을 불안정하게 하여 이상 방사선 계측수를 나타낸다. 또한 검출기에는 전류가 거의 제로에 가깝게 흘러야 한다. 이와 같은 조건을 충족시키기 위하여 저역 통과필터를 사용하였다. 비례계수관으로 입력되는 고전압 리플은 검출기로 출력되는 신호에 겹쳐서 나타나기 때문에 고전압공급장치의 리플(Ripple)도 줄여야 한다. 제작한 고전압발생장치의 리플주

파수는 30.3 Hz 로서 중성자 신호와 같이 출력되게 된다.

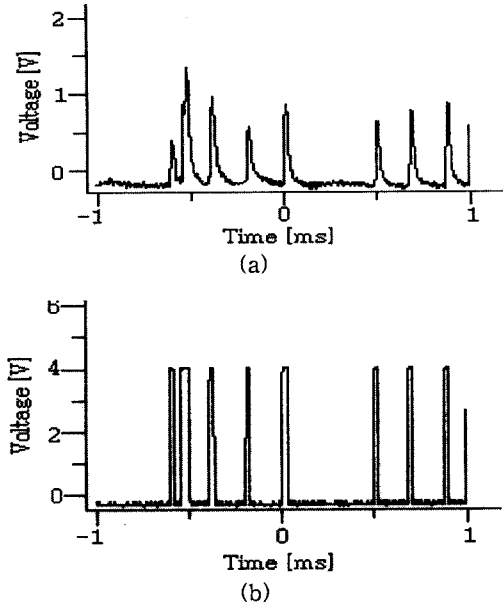
4.1 수분 밀도 측정회로

검출기에서 수집된 양이온이나 전자에 의해 발생한 펄스를 전달 및 적분하는 기능을 하는 회로는 전치증폭기이다. 기존의 비례계수관 전기회로에서는 CR-RC 또는 가우스 함수의 형태를 갖는 CR-(RC)ⁿ 회로를 사용하지만 이 수동성 적분기보다 성능이 우수한 능동성적분기를 사용하므로써 회로의 방사선검출특성을 우수하게 할 수 있다. 검출기에서 발생하는 신호는 고전압측으로는 매우 큰 저항 때문에 콘덴서측으로 이동되기 시작한다. 즉 검출기 입장에서 보면 그림 3의 검출기 부근 회로는 고역통과필터 또는 미분회로가 되는데, 이 부분의 저항과 콘덴서는 수십 μ sec 이상의 시정수를 갖도록 설계하였다. 시정수가 너무 길게 되면 검출회로의 불감시간이 크게 되므로 계수손실이 많아지게 된다. 이번 연구에서는 이 같은 점을 고려하여 적절한 시정수를 사용하여 설계하였다.

검출 및 증폭된 펄스는 입력펄스와 전치증폭기에서의 감쇠시간 관계로부터 펄스후미의 감쇠후영점에 교차하거나 언더슈트하게 되고, 이 부분에 다음의 사상이 발생하여 펄스가 생성되면 펄스의 진폭에 영향을 주어 오차를 나타내게 된다. 따라서 증폭회로에 폴-제로회로를 부가하여 언더슈트 없는 단순한 지수함수의 출력신호가 되도록 하였다.

이와 같은 파형을 기초로 하여 감마선 선원은 제거되고 감마선 검출회로와 입력포트(P₂-P₆)가 차단된 후 측정과 계수가 시작된다. 그림 5는 열중성자의 신호펄스를 3단 증폭기에서 약 50 [dB] 증폭한 후의 파형과 펄스 계수를 위해 정형된 파형을 나타낸 것이다. 그림 5의 (a)에서 보는 바와 같이 증폭단의 출력에서 얻어진 파형의 진폭은 약 500 [mV]에서 1.5 [V] 정도로 다양하게 검출되었으며, 파미의 부족진동은 폴-제로 회로로 조정되어 깨끗하고 연속되는 펄스의 진폭에는 영향을 주지 않았다. 또한 각각의 검출펄스에 대하여 정형된 파형(b)은 마이크로 프로세서에서 계수할

수 있는 특성(4.4 [V], 50 [μ s])이다.



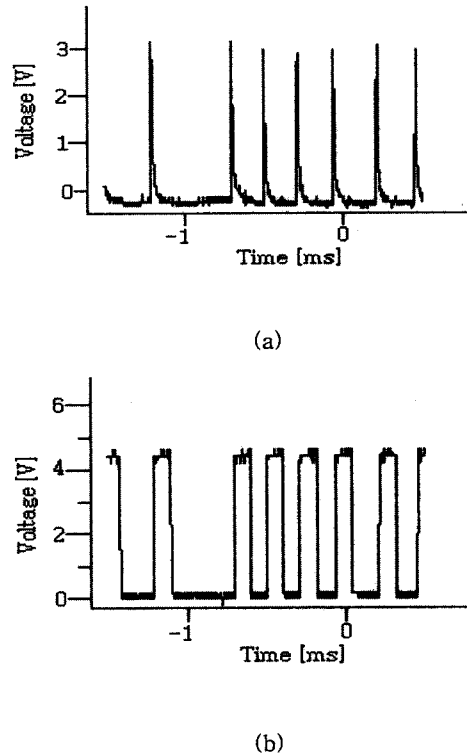
<그림 5> 열중성자 검출파형

4.2 습윤밀도 측정회로

감마선 검출기로 이용되는 G-M 검출기는 진폭이 일정하므로 중성자 검출기회로와는 달리 파형의 선별작업이 필요 없어 주변 회로도 단순하게 구성할 수 있었다. 일반적인 G-M 검출기의 펄스 오름시간은 μ sec 정도이다. 또한 출력펄스에 시간에 대한 의존성은 중성자 검출기 (He-3 비례계수관) 펄스의 시간적인 이력과는 크게 다르지 않다. 최초의 전자사태가 완전히 가이거 방전에 까지 전파되는데 필요한 시간은 보통 1 μ sec 이하이다. 이 방전으로 부터의 전자의 수집시간은 1 μ sec 내에 이루어 지게 된다. 수집회로의 시정수가 무한대인 경우에 출력펄스가 최대치에 도달하는 데는 이온수집시간(수 msec)만큼 걸린다.

그림 6의 (a)에 나타낸 검출회로 출력단의 펄스 파형의 진폭은 전술한 바와 같이 약 3.0 [V] 정도로 균일하게 나타났으며, 감마선원의 세기에 의한 감마선 방출개수와 계수관의 검출효율(약 1 [%])의 관계에서 계수관 불감시간내의 펄스는 발생하지 않았기 때문에 중첩된 신호파형은 관측되지 않았다. 또한 그림 (b)에서 계수를 위한 정형된

파형의 펄스폭도 G-M 계수관의 불감시간과 같이 설정하였기 때문에 계수회로의 동작시간에 의한 신호펄스의 중첩도 발생하지 않았다. 측정대상에 따라 감마선 선원의 세기를 가감시킬 경우는 방사선 방출개수도 가감되므로 펄스폭을 신호펄스 발생주기보다 짧게 하면 연속된 펄스와의 중첩을 제거할 수 있다.



<그림 6> 감마선 검출파형

5. 결 론

본 연구에서는 토목공사 현장에서 필요한 성토 다짐을 분석하기 위하여 휴대용 RI 이용계기의 방사선 측정 및 계수를 위한 전자회로를 설계 및 제작하였다.

제작된 RI 이용계기는 국내 원자력법이 제한하는 세기 이하의 방사선원을 사용하여 Co-60(50 μ Ci) 감마선 선원과 Cf-252(50 μ Ci) 중성자 선원에서 측정 가능하도록 설계하였으며, 각 검출기 사용시 다른 검출기의 전원을 사용하지 않으므로서 각각의 검출기에서 발생하는 간섭 신호를

제거하였다. 이들의 선원을 이용하여 검출성능을 평가한 결과 성토시공관리에 필요한 습윤밀도 및 수분밀도 측정에 충분한 방사선 계측수를 얻을 수 있었다. 특히, 고전압 발생장치의 리플 주파수를 30.3 [Hz]로 낮게 하여 계수시 리플 성분에 의한 계측수를 제거함에 따라 정확한 측정이 가능하였으며, 각각의 검출기로부터 측정된 검출신호가 마이크로 프로세서에서 계수할 수 있는 특성을 갖기 위한 회로를 설계 및 제작하였다.

참 고 문 헌

- [1] R.P. Gardner, et. al., Density and Moisture Content Measurements by Nuclear Methods, AASHTO, 1967
- [2] 원자력 법령집, 한국원자력연구소, 1995
- [3] 황주호 외 15인, "성토시공관리를 위한 방사성 동위원소 장비개발, '95 연구개발사업 1차년도 보고서, 건설교통부, pp. 110~114, 1996
- [4] S. Shalev et al., "The Wall Effect in He-3 Counters", Nuclear Instruments and Methods, Vol. 71, pp. 292~296, 1969
- [5] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," John Wiley & Sons, pp. 107~110, 1988
- [6] Nicholas Tsoufanidis, "Measurement and Detection of Radiation," McGraw-Hill, pp. 185~187, 1983