

성토시공관리용 방사성 동위원소 이용계기의 측정회로설계

길경석*, 송재용*, 김기준**, 황주호***, 송정호***

Measuring Circuit Design of RI-Gauge for Compaction Control

Gyung-Suk Kil*, Jae-Yong Song*, Ki-Joon Kim**, Joo-Ho Whang***, Jung-Ho Song***

요 약

본 연구의 목적은 성토시공관리용 방사성 동위원소 이용계기의 회로개발에 있다. 본 연구에서 제작한 계기는 국내 원자력법에서 제한하는 세기 이하의 밀봉선원을 사용하며, 감마선과 열중성자 검출회로, 고전압 공급장치 그리고 마이크로프로세서 등으로 구성하였다.

성토의 밀도측정에 충분한 계측수를 얻기 위하여 감마선 검출 5회로, 열중성자 검출 2회로로 구성하였다. 감마선의 검출은 G-M 검출기의 전기적 특성상 검출회로가 간단하므로 파형정형회로만 거쳐 계수된다. 그러나 He-3 검출기에서 발생하는 열중성자 신호펄스는 대단히 작기 때문에 최대 50 [dB]까지 증폭하고 창비교기(window comparator)를 거쳐 원하는 신호만 계수할 수 있도록 하였다. 모든 회로는 자연 방사선과 잡음에 의한 영향을 최소화하기 위하여 정전차폐하였으며, 계수관에 인가하는 고전압의 리플 진폭과 주파수를 고려하여 펄스 계수시에 리플 성분에 의한 펄스수는 제거하였다. 방사선의 계수 및 연산처리에는 원칩 마이크로프로세서를 이용하였으며, 계측결과는 메모리장치에 저장되고 PC와의 통신도 가능하다.

시제작한 RI계기의 검출성능을 평가한 결과 성토의 밀도측정에 충분한 계측수를 얻을 수 있음이 확인되었다.

Abstract

An objection of this study is to develop a measuring circuit of a gauge using radioisotope for compaction control. The gauge developed in this study makes use of radioisotope with the activity exempted from domestic atomic law and 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. Being simple in electrical characteristics of G-M detector for gamma-rays, pulses are counted through only a shaping circuit.

Very small pulses generated from He-3 proportional detector for thermal neutrons are amplified to the maximum of 50 [dB] and a window comparator accepts only pulses with meaning. 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.

One-chip microprocessor is applied to process various counts, results are stored and the gauge is made capable to communicate with PC.

Enough and meaningful numbers of pulses are counted with the prototype gauge for compaction control.

* 한국해양대학교 전기공학과 (Dept. of Electrical Engineering, Korea Maritime University)

** 인천전문대학 제어계측과 (Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Junior College of Incheon)

*** 경희대학교 원자력공학과(Dept. of Nuclear Engineering, Kyung Hee University)

<접수일자 : 1997년 7월 29일>

1. 서 론

고밀도 집적회로와 고성능 마이크로 프로세서의 등장으로 방사성 동위원소를 이용한 계측기술이 여러 분야에 적용되고 있다. 그 중에서도 토양의 수분 함유량

과 밀도 측정에 방사선 동위원소를 이용한 연구가 1960년대부터 진행되어, 최근에는 성토시공용 흙의 밀도 및 함수량 측정에 화학적 방법을 이용하지 않고 측정할 수 있는 방사성 동위원소(RI) 이용계가 개발되어 정확하고 신속한 품질관리를 수행해 오고 있다¹¹⁾.

현재 선진국에서 개발되어 사용하고 있는 RI 이용계기는 수십 [mCi]이상의 방사능을 가진 방사선원을 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 [μCi]이하의 방사능을 적용하고 이 정도의 세기에서 측정이 가능한 RI 이용계기의 개발이 요구된다¹²⁾.

이와 같은 배경으로 본 연구에서는 국외에서 사용하는 RI 이용계기에 비해 방사선의 세기를 약 1/1000 정도로 감소시켜도 측정이 가능한 RI 이용계기를 설계·제작하였다. 수십 [mCi]의 방사능 세기의 선원을 사용하는 기존 선진국 RI 이용계기들은 중성자와 감마선 계수관을 각각 1개씩 사용하여도 계측수의 통계적 처리를 위한 충분한 데이터를 얻을 수 있었으나, 국내의 여건상 방사능의 세기가 약 1/1000로 줄어들게 됨에 따라 방사선 계측수가 줄어들게 되므로 통계적 처리를 위한 데이터가 부족하게 된다. 그러므로 기존의 Cs-137, Am-Be의 방사선원보다는 방사능 대비 방출 방사선의 개수가 많은 Co-60 감마선 선원과 Cf-252 중성자 선원을 사용하여야 하며, 검출기와 측정회로의 개수를 늘려 방사선 계측수를 증가시켰다. 이에 따른 RI 이용계기의 부피 증가나 검출회로의 복잡성은 피할 수 없었다.

본 연구에서는 감마선 계수관으로 검출수 측정목적에 이용되는 펄스모드 G-M 검출기를, 열중성자 계수관으로는 이동성과 검출효율이 우수한 He-3 검출기를 사용하였다¹³⁾. 시제작된 RI 이용계기는 충분한 수의 감마선과 열중성자를 검출하였으며, 대화방식의 운영프로그램으로 토목공사의 성토시공관리에 간편하게 활용될 수 있음을 확인하였다¹⁴⁾.

2. 이 론

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.

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

여기서 A, B 는 상수, S_B 는 표준체에서의 배후 감마선 수, S_C 는 표준체에서 선원삽입후 계측수, R_B 는 성토에서의 배후감마선 계측수, R_C 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 방사선 에너지의 전달은 순간적으로 일어난다. 이 때 계수관의 유감체적중에서는 그림 1과 같이 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 이동시키도

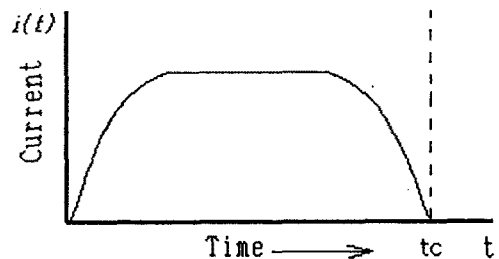


그림 1. 검출기의 전류파형

Fig. 1. A current pulse shape of detector

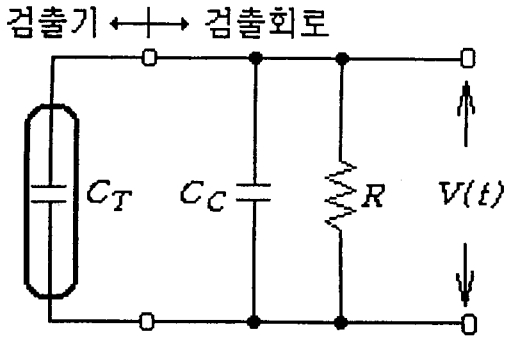


그림 2. 검출부의 동가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of detecting part

록 계수관 내부에 고전계를 형성시킴으로써 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 모우드(pulse mode), 전류 모우드(current mode)와 평균 제곱 전압 모우드(mean square voltage mode)로 대별되며, 현재 개별적인 에너지 측정에는 펄스 모우드가 이용된다¹⁵⁾.

단일의 현상으로 생성된 신호 펄스의 특성은 그림 2와 같이 계수관과 여기에 접속되어 있는 회로 즉, 전치 증폭기(preamplifier)의 입력특성으로 결정된다. 그림 2에서 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 도달되는데 필요한 시간은 검출기 자체 내에서 전하수집시간에 의해 결정되며, 펄스의 감쇠시간은 회로의 시정수에 의해 결정된다. 즉, 펄스의 상승시간은 계수관의 특성에 의존하며, 감쇠시간은 회로의 시정수에 의존하는 것을 의미한다. 따라서 방사선 계수관으로부터의 발생하는 신호펄스를 정확히 계측하기 위하여는 검출회로의 시정수를 방사선 계수관의 불감시간(수 십 μs) 이하로 하는 것이 바람직하며 계수장치에 인가되는 정형된 펄스폭도 짧을수록 좋다.

3. 계측회로의 설계 및 제작

전술한 바와 같이 성토의 습윤 밀도와 수분 밀도 측정에는 감마선과 열중성자의 계측수가 필요하다. 따라서 전체 회로구성은 그림 3과 같이 감마선 검출 5회로, 열중성자 검출 2회로, 고전압 발생회로, 장비교 및 파형정형회로, 계수회로, 연산처리 및 기억장치 그리고 전압안정화회로 등으로 구성된다. 각 부분은 동판으로 정전차폐하여 외부의 자연 방사선과 전원선 잡음 그리고 상호간섭으로부터의 영향을 최소화하였다.

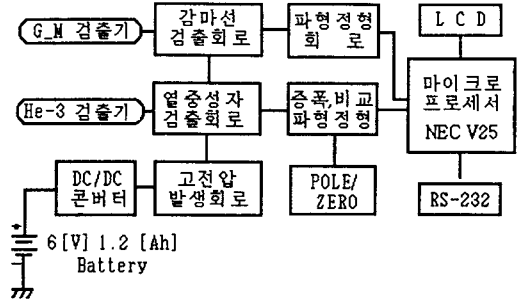


그림 3. 제작한 RI 이용계기의 구성
Fig. 3. Block diagram of the RI-Gauge

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. 직류 고전압에 이 이상의 리플이 포함될 경우 리플 주파수에 해당하는 만큼의 펄스원이 신호원으로 검출되기 때문이다¹⁶⁾. 따라서 고전압 회로는 리플이 없도록 필터와 대용량의 평활 회로로 구성하든가, 리플 주파수를 수 [Hz] ~ 수십 [Hz]이하로 하여 계수회로에서 보정을 하면 된다. 그러나 전자의 경우는 부품 규모가 커지고 소비전력이 증가하므로 휴대용 기기에는 적합하지 않기 때문에, 본 연구에서는 후자와 같이 열중성자 계측시에 펄스 계측수에서 리플 계측수를 제거하여 정확한 보정과 측정이 될 수 있도록 그림 4의 고전압 발생장치를 설계·제작하였다. 본 장치는 직류 출력전압 1200 [V]에서 리플전

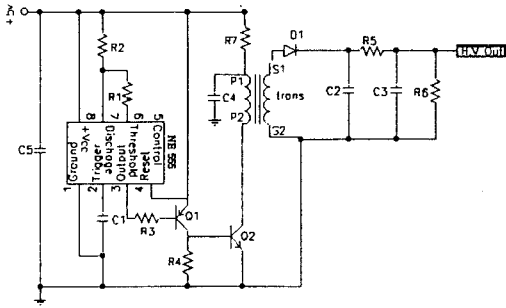


그림 4. 고전압 공급장치의 회로
Fig. 4. Circuit of the high voltage supply unit

압 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 G-M 계수관의 감마선 검출회로

감마선 검출기로 이용되는 G-M 계수관의 기본적인 원리는 비례계수관과 같다. 하지만 가스증배가 시작되면 초기에 생성된 이온쌍에는 관계없이 항상 $10^9 \sim 10^{10}$ 개의 이온쌍을 생성하는 가이거 방전을 일으킨다^[6]. 또한 이때 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 단순하게 구성할 수 있다.

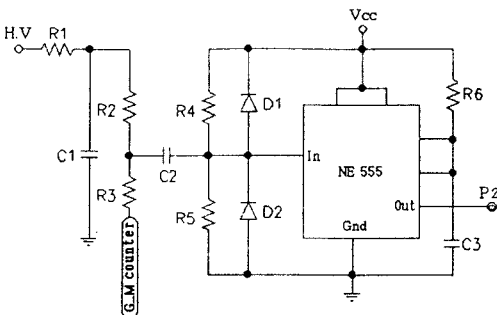


그림 5. 감마선 검출회로
Fig. 5. Detection circuit for gamma-rays

그림 5에 본 연구에서 설계한 감마선 검출회로를 나타내었다. 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.

3.2 He-3 비례계수관의 열중성자 검출회로

열중성자 계수관으로 널리 쓰이는 He-3 비례계수관의 측정원리는 He-3와 열중성자의 반응으로 발생하는 Proton(571 [keV]), Triton(191 [keV])의 에너지를 측정한다^[7]. 즉, He-3와 열중성자가 반응해서 발생하는 입자는 계수관 내부가스를 이온화시키면서 그 에너지를 잃는다. 이온화된 가스는 계수관 내부에 걸린 고전계에 의해 전자는 양극도선(anode), 양이온은 음극벽(cathode)으로 이동한다. 이 때 검출되는 에너지는 극히 미약한 양이므로 다단의 증폭이 필요하다.

따라서 열중성자 검출회로는 연산증폭기를 3단으로 구성하여 증폭도가 최대 약 50 [dB]가 되도록 설계하였으며, 펄스 검출회로와 주변의 대단히 미약한 잡음원에 대해서도 동작하므로 정전차폐를 실시하였다.

검출 및 증폭된 펄스는 입력펄스와 전치증폭기에서의 감쇠시간 관계로부터 파미의 감쇠후 영점에 교차하거나 부족진동(undershoot)하게 되고, 이 부분에 다음의 펄스가 도래하면 펄스의 진폭에 영향을 주어 오차를 나타내게 된다. 따라서 증폭회로에 폴-제로(pole-zero)회로를 부가하여 부족진동없는 단순한 지수함수의 출력신호가 되도록 하였다. 또한 검출신호의 진폭은 감마선 검출시와 달리 펄스마다 다르므로, 펄스 계수회로의 앞단에 연산증폭기(TL 061)에 의한 창비교기(window comparator)를 설계하여 일정 진폭 이상과 이하의 펄스만이 계수되도록 구성하였다. 그림 6에 열중성자의 전체검출회로를 나타내었다.

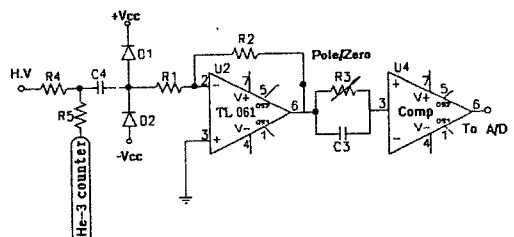


그림 6. 열중성자 검출회로
Fig. 6. Detection circuit for thermal neutrons

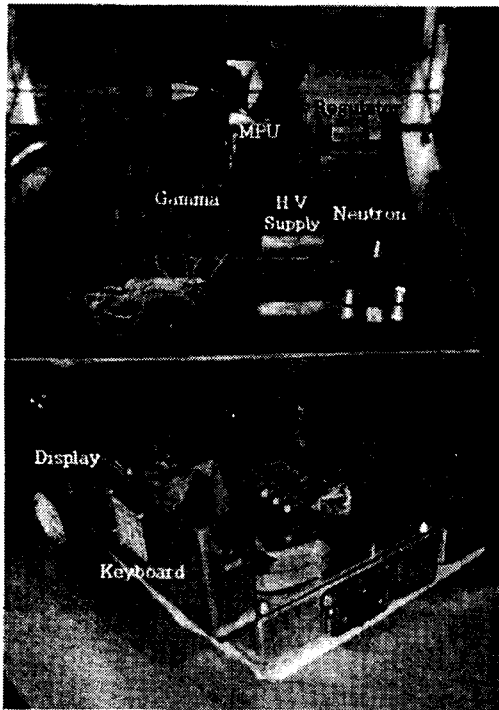


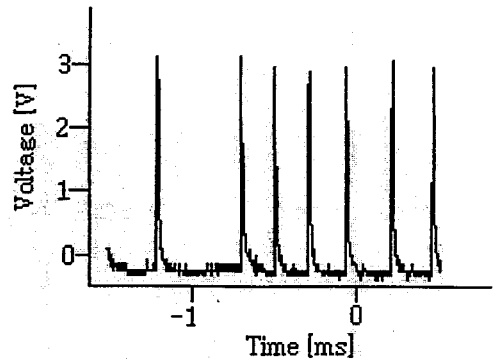
그림 7. RI 이용계기의 사진
Fig. 7. Photograph of the RI-gauge

이상의 회로로부터 검출된 방사선 펄스는 파형 정형 회로를 거쳐 원칩 마이크로프로세서(NEC V25, 8 bit, 16 [MHz])에 의해 계수 및 연산처리된다. 계기의 운영을 위한 프로그램은 대화식으로 작성하였으며, 프로그램 순서에 따라 감마선($P_2 \sim P_6$)과 열중성자($P_0 \sim P_1$)를 구분하여 계측한다. 그림 7에 본 연구에서 시제작한 RI 이용계기의 개방된 사진을 나타내었다.

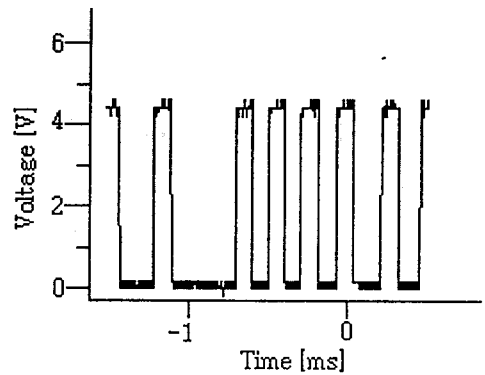
4. 결과 및 고찰

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($P_0 \sim P_1$)를 차단하고 감마선 선원만으로 측정하였다.

그림 8에 감마선 검출 1회로의 출력단에서 얻어진 파형과 파형정형회로 후단 즉, 마이크로 프로세서 입력



(a)검출회로 출력단에서의 파형



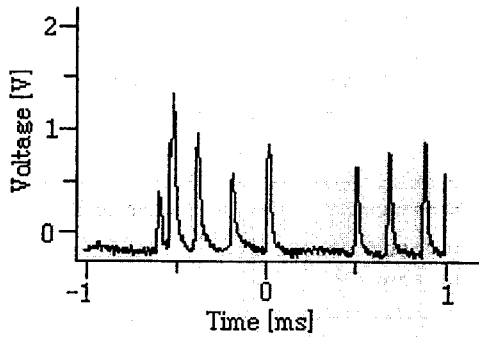
(b)마이크로프로세서 입력(P_2)에서의 파형

그림 8. 감마선 검출파형

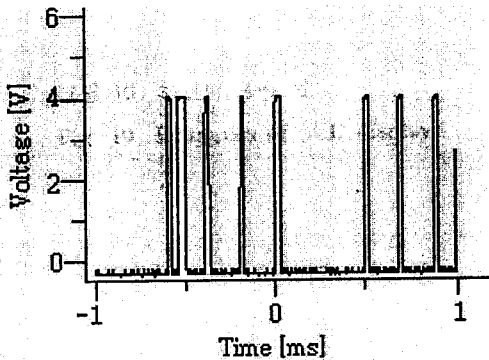
Fig. 8. Detected waveforms of gamma-rays

포트(P_2)에서 측정된 파형을 나타내었다. 그림 8(a)에 나타낸 검출회로 출력단의 펄스파형의 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 8(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.

열중성자의 검출시에도 마찬가지로 감마선 선원은 제거되고 감마선 검출회로와 입력포트($P_2 \sim P_6$)가 차단



(a) 검출회로 출력단에서의 파형



(b) 마이크로프로세서 입력(P0)에서의 파형

그림 9 열중성자 검출파형

Fig. 9 Detected waveforms of thermal neutrons

된 후 측정과 계수가 시작된다. 그림 9는 열중성자의 신호펄스를 3단 증폭기에서 약 50 [dB] 증폭한 후의 파형과 펄스 계수를 위해 정형된 파형을 나타낸 것이다. 그림 9(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 파형은 마이크로 프로세서에서 계수할 수 있는 특성(4.4 [V], 50 [μ s])이다.

이들의 일련과정은 계측기에 내장된 프로그램에 의해 단계적으로 수행되며, 그림 10에 나타낸바와 같이 측정의 단계와 준비는 액정화면(LCD 16 Ch \times 2 L)에 대화식으로 표시하게 하므로 사용이 간편하고 측정의 단계마다 확인이 가능하다.

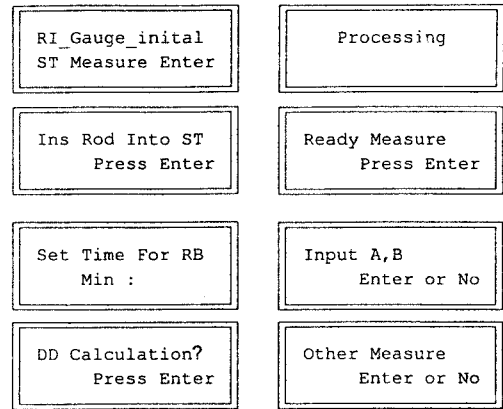


그림 10. 화면의 표시 예

Fig. 10. Examples of LCD display

5. 결 론

본 연구에서는 토목공사의 성토시공관리를 위한 휴대용 RI 이용계기의 방사선 측정 및 계수를 위한 전자 회로에 대하여 중점적으로 연구하였다.

시제작한 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, 이들의 선원을 이용하여 검출성능을 평가한 결과 성토시공관리에 필요한 습윤밀도 및 수분밀도 측정에 충분한 방사선 계측수를 얻을 수 있었다.

측정회로 설계에 있어서 고전압 발생장치의 리플 성분과 열중성자의 선별을 위한 장비회로는 방사선 검출수에 큰 영향을 주므로 특히 고려할 부분이었으며, 본 연구에서는 고전압 발생장치의 리플 주파수를 30.3 [Hz]로 낮게 하여 계수시 리플 성분에 의한 계측수를 제거함에 따라 정확한 측정이 가능하였다.

본 RI 이용계기는 휴대용이므로 가능한 한 저전력(50 [mA])을 소비하도록 설계하여 현재는 1회의 충전으로 약 40시간 이상 사용할 수 있으며, 측정시 모든 단계는 액정화면에 표시된다.

※ 본 연구는 건설교통부에서 시행한 건설교통기술연구 개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

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] 홍성환 외 3인, "아스팔트 및 콘크리트 포장구조체를 지지하는 노상 및 노체의 성토시공관리를 위한 시스템 개발", 한국건설기술연구원, 과학기술처, 1991
- [5] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," John Wiley & Sons, pp. 107~110, 1988
- [6] Nicholas Tsoufanidis, "Measurement and Detection of Radiation," McGraw-Holl, pp. 185~187, 1983
- [7] S. Shalev et al., "The Wall Effect in He-3 Counters", Nuclear Instruments and Methods, Vol. 71, pp. 292~296, 1969

著 者 紹 介



길경석(吉喙碩)
1962년 6월 30일생. 1984년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1987년 2월 인하대 대학원 전기공학과(공학석사), 1996년 2월 인하대 대학원 전기공학과(공학박사), 1996년 4월~현재 한국해양대 이공대

전기공학과 전임강사



황주호(黃柱鎬)
1956년 3월 22일생. 1982년 2월 서울대 공대 원자력공학과 졸업, 1984년 3월 Georgia Institute of Technology(공학석사), 1986년 8월 Georgia Institute of Technology(공학박사), 1986년 9월~1991년 8월

한국원자력연구소 선임연구원, 1991년 9월~현재 경희대학교 공대 원자력공학과 부교수



송재용(宋在鏞)
1975년 1월 28일생 1997년 2월 한국해양대 이공대 전기공학과 졸업, 1997년 9월 한국해양대 전기공학과(석사과정)



송정호(宋政昊)
1974년 7월 13일생. 1996년 2월 경희대 공대 원자력공학과, 1997년 9월 경희대 공대 원자력공학과(석사과정)



김기준(金起儁)
1960년 3월 16일생. 1983년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업, 1988년 2월 광운대 대학원 전기공학과(공학석사), 1992년 8월 광운대 대학원 전기공학과(공학박사), 1986년 3월~1994년 2월 한국원자력연

연구소, 1994년 3월~현재 인천전문대학 제어계측과 조교수