

## 방사성동위원소를 이용한 밀도/수분함량 측정계기의 회로설계

송 정 호, 황 주 호

경희대학교

길 경 석

한국해양대학교

김 기 준

인천대학교

### 요 약

이 연구의 목적은 밀도측정 및 수분함량측정용 RI 계기의 개발에 있다. 방사성동위원소를 이용하여 성토시공의 현장다짐 밀도 및 수분함량 측정에 이용되고 있는 RI 계기는 중성자 검출부분, 감마선 검출부분, 고전압 공급부분, 마이크로 컴퓨터 부분으로 크게 나눌 수 있다. 감마선을 검출하는 G-M 검출기는 그 특징으로 인해 방사선검출 전기회로가 간단하다. 그러나 열중성자를 검출하는 He-3 검출기는 검출기에서 발생하는 신호원이 매우 작아서 검출회로의 상호 간섭으로 인한 전기적 잡음이 발생한다. 이 잡음을 제거하는 것이 He-3 중성자 검출기로 열중성자를 검출하는데 중요한 문제이다. 본 연구에서 제작하는 RI 계기는 원자력법에서 제한하는 방사능 이하를 ( 100  $\mu$ Ci 의 밀봉선원 ) 사용하므로 종래의 RI 계기에 비해 방사선의 검출수가 줄어든다. 이에 따라 검출기의 개수를 늘려서 방사선을 검출해야 한다. 또한 본 연구에서는 He-3검출기의 검출 스펙트럼을 분석하여 적절한 방사선 검출 측정영역을 결정하였다.

### 1. 서 론

방사성 동위원소를 이용한 흙의 함수량 및 밀도 측정의 방법은 1960 년대 이후로 꾸준히 개발되었다. 선진국들은 방사성동위원소를 이용한 RI 계기의 개발로 성토시공용 흙의 밀도 및 함수량을 측정하여 신속하고 정확한 품질관리를 수행해 오고 있다.

선진국에서 사용하고 있는 기존의 RI 계기는 수십 mCi 이상의 방사능을 가진 선원을 사용하고 있다. 이 방사능의 세기는 현재 우리나라의 원자력법상 신고 및 허가를 받아야 한다<sup>[1]</sup>. 이는 RI

계기사용에 여러 가지 복잡한 절차를 가져온다. 따라서 이번에 개발하게 되는 RI 계기는 우리나라 원자력법상 신고만으로 사용할 수 있는  $100\mu\text{Ci}$  이하의 방사능의 세기를 가져야 한다. 기존의 RI 계기에 비해 약 1/1000 로 줄어든 방사능의 세기로 인해 본 연구에서 개발하는 RI 계기는 여러 가지 개선할 점을 가지고 있다. 첫 번째로 방사능의 세기가 약 1/1000로 줄어들게 됨에 따라 방사선 계측수가 줄어들게 된다. 수십 mCi 의 방사능세기의 선원을 사용하는 기존 선진국 RI계기들은 중성자나 감마선 검출기를 1개씩 사용하여도 계측수의 통계적 처리를 위한 충분한 계측수를 얻을수 있었다. 하지만 1/1000로 약해진 방사능 세기를 가진 선원을 사용하게 되는 RI 계기는 통계적 처리를 위한 계측수가 부족하다. 따라서 기존의 Am-Be , Cs-137의 방사 선원보다는 방사능 대비 방출 방사선의 개수가 많은 Cf-252 중성자 선원과 Co-60 감마선 선원을 사용하여야 한다. 또한 검출기의 개수를 늘려 방사선 계측수를 늘려야 한다. 이에 따르는 RI 계기의 부피 증가나 검출회로의 복잡성 증가는 피할 수 없다. 두 번째로 함수량 측정을 위한 열중성자 측정정보는 고속중성자 측정이 더욱 효율적이다. 이에 따르는 중성자 측정장치의 복잡성증가 또한 피할 수 없다. 더욱이 흡속의 수분과 반응한 열중성자를 제거하기 위한 천연 카드뮴의 사용은 감마선을 발생시키기 때문에 흡의 밀도를 측정하기가 더욱 어려워진다. 이에 따라 중성자 검출장치와 감마선 검출장치의 격리는 필수불가결하게 되고, RI 계기의 부피증가나 무게 증가 또한 피할 수 없다.

방사성 동위원소를 이용한 RI 계기의 성토시공용 흡의 밀도 및 함수량 측정은 기존의 성토시공용 흡의 밀도 및 함수량 측정방법인 KS F 2311 ( 모래치환법에 의한 흡의 단위중량 시험방법 ), KS F 2306 ( 흡의 함수량 시험방법 )<sup>[2]</sup>보다 측정시간이 빠르고 정확성이 우수 하기 때문에 이 장비의 개발은 도로공사 성토시공관리의 통계적 품질관리에 필요하다.

## 2. RI 계기 설계

### 2.1 중성자 검출회로

#### 가. He-3 비례계수관의 열중성자 검출원리

열중성자검출기로 널리 쓰이는 He-3 가스비례계수관의 측정원리는 He-3 와 열중성자의 반응으로 발생하는 Proton ( 571 keV ), Triton ( 191 keV )의 에너지를 측정한다. 즉, He-3 와 열중성자가 반응해서 발생하는 입자는 검출기 내부가스를 이온화 시키면서 그 에너지를 잃는다. 이온화된 가스는 검출기내부에 걸린 전기장에 의해 전자들은 양극도선 ( Anode ), 양이온들은 음극벽( Cathode )으로 이동한다. 이 때에 검출기 내부에서는 가스증배 ( Gas Multiplication ) 현상에 의해 양이온 및 전자의 전하를 증폭한다. 가스 증배에 의한 전하량은 입사된 중성자의 에너지에 비례한다.

### 나. He-3 비례계수관의 발생 펄스형태

전자나 양이온이 수집되는 시간은 크게 유동시간 ( Drift Time ) 과 가스증배시간으로 나눌 수 있다. 이중 유동시간은 가스증배시간보다 매우 크므로 이온 수집시간은 거의 유동시간으로 볼 수 있다. 따라서 비례계수관의 양이온 수집시간은 <수식 1><sup>[3]</sup> 과 같이 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{(b^2 - a^2) \cdot p \cdot \ln(b/a)}{2\mu V_0} \text{ -----(1)}$$

여기서,

p : 충전가스의 압력

$\mu$  : ion or electron 의 mobility ( 입자의 평균속도 / 전기장의 세기 )

$V_0$  : 검출기에 인가한 전압. 즉 고전압장치에서 공급되는 전압

b : 음극벽까지의 검출기반지름

a : 양극도선의 굵기

전자수집시간은 방사선 검출전기회로의 시정수결정과 매우 밀접한 관계가 있다. RI 계기 시제품 제작을 위해 구입한 He-3 검출기에 대해 전자 수집시간을 계산해서 <그림 1>, <그림 2> 와 같은 결과를 얻었다. 양이온이나 전자의 비례계수관 내에서의 수집시간은 양극도선의 굵기에 크게 변화된다. 하지만 실제적인 값은 크지 않아 전자의 경우 수집시간이 수십  $\mu\text{sec}$ , 양이온의 경우 수집시간이 수십 msec 라고 말할 수 있다. 특히 전자수집시간  $t \propto 1/\mu$ ,  $\mu \propto p$  이므로  $t \propto 1/p$  이다. 따라서 <그림 1> 결과와 같이 전자의 수집시간은 수십  $\mu\text{sec}$  이하라고 말할 수 있다. 즉, 검출기 내부의 압력이 증가할수록 전자수집시간은 감소한다. 비례계수관에서 발생하는 펄스의 일반적인 형태는 <그림 3> 과 같다.

### 다. He-3 검출기의 고속중성자 스펙트럼 및 적정 측정영역

RI 계기에서 고속중성자를 측정하기 위해서는 <그림 4>와 같이 열중성자 제거를 위한 카드뮴등으로 검출기를 둘러싸야 한다. 카드뮴의 두께가 0.3cm 이면, 흡속의 습윤밀도 변화량이 1.0 ~ 2.5 g/cm<sup>2</sup> 일 때 흡속의 수분과 충돌하여 발생한 열중성자를 거의 제거할 수 있다.<sup>[4]</sup> <그림 5>는 고속중성자를 폴리에틸렌으로 감속후 측정된 열중성자의 스펙트럼 이다. <그림 5>와 같이 He-3 검출사상은 크게 3가지로 나누어 질 수 있다. 감마선 및 전자잡음, 벽효과, 중성자 전에너지 Peak 이다. 본 연구에서 제작하는 RI 계기의 적정 측정구간은 A ~ B 이다. 고속중성자측정장치의 흡수재가 흡속의 수분과 반응하여 감속된 열중성자를 모두 제거한다면 벽효과도 고속중성자로 인해 발생한 검출사상이기 때문에 RI 계기에서 중성자 측정영역에 포함해야 한다.

### 라. 중성자검출 전기회로

RI 계기에서의 중성자 검출전기회로는 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 고전압공급부이다. He-3 중성자 검출기에는 1200 V 의 고전압이 가해지게 된다. RI 계기의 특성상 고전압의 공급은 순간적으로 이루어진다. 고전압이 순간적으로 He-3 검출기에 인

가되면 G-M 검출기와 마찬가지로 검출기 양극도선의 요철부분에서 코로나방전이 일어나거나 연속적인 방전이 일어난다.<sup>[5]</sup> 이는 검출기 내에 걸리는 전기장을 불안정하게 하여 이상 방사선 계측수를 나타낸다. 또한 검출기에는 전류가 거의 제로에 가깝게 흘러야 한다. 이와 같은 조건을 충족시키기 위하여 <그림 6>과 같은 여러단의 Low Pass Filter ( RC - Circuit )를 사용하였다. RI 계기 증성자검출 전기회로의 기초설계를 위해 제작한 회로의 R 은  $10M\Omega$  C는  $3nF$  이다. 이 Low Pass Filter를 통해 검출기로 인가되는 전압을 1개의 Low Pass Filter 과 2개의 Low Pass Filter을 쓸때를 비교하여 <그림 7>과 <그림 8> 에 나타내었다. 비례계수관으로 입력되는 고전압은 검출기로 출력되는 신호에 겹쳐서 나타나기 때문에 고전압공급장치의 리플 ( Ripple ) 또한 줄여야한다.

두 번째로 검출기에서 수집된 양이온이나 전자에 의해 발생한 펄스를 전달 및 적분하는 전치증폭기이다. 기존의 비례계수관 전기회로에서는 CR-RC 또는 가우스 함수의 형태를 갖는 CR-(RC)<sup>n</sup> 회로를 사용하지만 이 수동형 적분기 보다 성능이 우수한 능동형적분기를 사용하므로써 회로의 방사선검출특성을 우수하게 할 수 있다. 검출기에서 발생하는 신호는 고전압쪽으로는 매우 큰 저항 (  $10 M\Omega$  ) 때문에 C 쪽으로 이동되기시작한다. 즉 검출기 입장에서 보면 <그림 6> 의 회로는 High Pass Filter 또는 미분회로가 된다. <그림 6>의 R1 과 C1 은 2.1 의 나. 항에서 계산한 값을 바탕으로 수십  $\mu sec$  이상의 시정수를 갖도록 설계하였다. 하지만 시정수가 너무 길게 되면 검출회로의 불감시간이 크게 되므로 계수손실이 많아지게 된다. 이번 연구에서는 이 같은 점을 고려하여 적절한 시정수를 사용하여 설계하였다. <그림 9>는 미분회로를 통과한 신호를 능동적분기를 통하여 적분한후 다시 약간의 증폭을 한후 오실로스코프로 측정한 펄스의 형태이다. 이 결과는 검출기 및 회로의 잡음을 아직 제거하지 못했음을 보여준다.

세 번째로 마이크로 프로세서가 발생된 펄스를 계수할 수 있게 하는 디지털화 ( Digitalize ) 부분이다. 이 부분은 아직 잡음의 제거와 최적의 시정수를 결정하지 못하여 추후에 설계할 계획이다.

## 2.2 감마선 검출회로

### 가. G-M계수관의 감마선 검출원리

감마선검출기로 이용되는 G-M 검출기의 기본적인 원리는 비례계수관과 같다. 하지만 가스증배가 시작되면 초기의 생성된 이온쌍에는 관계없이 항상  $10^9 \sim 10^{10}$  개의 이온쌍을 생성하는 가이거 방전을 일으킨다. 또한 이때 발생한 출력펄스의 진폭은 수 V 에 이른다.<sup>[5]</sup> 이와 같은 이점은 비례계수관과는 다르게 감마선검출 전기회로를 매우 간단하게 만든다.

### 나. G-M계수관의 감마선검출 전기회로

<그림 10> 은 이 연구에서 설계한 감마선검출 전기회로이다. 기본적인 회로설계이론은 비

계수관과 같지만 G-M Tube에서 발생하는 출력펄스가 매우크기 때문에 적분기, 증폭기 등은 거의 필요가 없다. 이 연구에서 사용한 G-M 검출기는 LND Model No.743 으로 불감시간이 75  $\mu$ sec 이다. 따라서 검출회로의 시정수 또한 75  $\mu$ sec 보다 크거나 같아야 한다. 보통 가이거 방전 후 양이온들의 음극벽으로 이동되는 시간은 수백  $\mu$ sec 이다. 따라서 회로의 시정수를 이보다 작게하여도 출력펄스의 크기는 크게 줄지않는다. 즉, 전자에 의한 가이거방전이 펄스의 빠른 오름시간에 기여한다.

이 연구로 제작한 검출회로의 시정수는 110  $\mu$ sec 이다. <그림 10>의 검출회로에서 C1 의 콘덴서를 줄이면 출력펄스의 폭이 줄어든다. 또한 R3 와 C2 는 디지털화된 펄스의 응답도와 관련된다. 즉, 디지털회로의 계수 불감시간과 관련된 펄스의 폭을 결정한다. <그림 11> 와 <그림 12> 은 이 연구에서 설계한 회로를 이용하여 측정된 펄스의 디지털화 되기전의 펄스의 형태 와 디지털화 된후의 펄스이다.

#### 다. G-M 검출기의 효율 및 계수손실

G-M 검출기 ( LND Model No.743 ) 의 Co-60 에 대한 민감도(Sensitivity)는 60 cps/mR/hr 이다. 이 연구에서 사용한 Co-60 의 방사능은 약 50  $\mu$ Ci 이다. 공기중에서 G-M 검출기가 받는 피폭선량이 1 mR/hr 일 때 G-M 검출기가 Co-60 의 선원으로부터 받는 방사선의 개수는  $4.53 \times 10^2$  #/cm<sup>2</sup> sec 이다. 이 연구에서 사용한 G-M검출기가 평면이라고 가정한다면 검출기의 효율은 약 0.6 % 임을 확인할 수 있다. 아래의 <그림 13><sup>[7]</sup> 의벽물질에 따른 G-M 검출기의 효율을 나타낸 것이다. 이 같은 G-M 검출기의 낮은 효율은 RI 계기에서 검출기사용 개수를 증가시키는 요인이 된다. RI 계기에서의 통계적 오차처리를 위한 최소 계측수가 10000 개 임을 고려할 때 검출기의 개수는 5개 이상 사용 되어져야 함을 알 수 있다.

G-M 계수관의 개수가 많아짐으로서 RI 계기 감마선 검출회로의 복잡성 증가는 피할수 없다. 만약, 이 복잡성을 제거하기위해서 검출기 출력신호를 하나로 모아 디지털화를 한다면 검출회로의 불감시간에 의한 계수손실은 피할 수 없다. 이 계수손실은 감마선 검출회로의 디지털화 회로가 비정체형임을 가정하고 <수식 3>을 사용하여 보상할 수 있다.

$$n = \frac{m}{1 - m\tau} \text{ -----(3)}$$

여기서,

m : 기록된 계수율

n : 참계수율

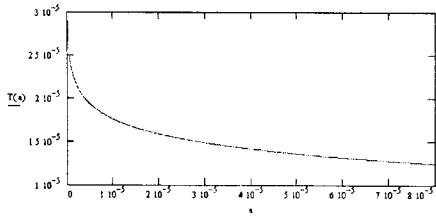
$\tau$  : 회로의 시정수

### 3. 결과 및 고찰

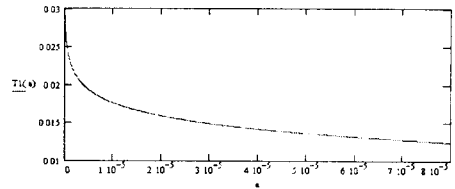
이번 연구에서 He-3 비례계수관 및 G-M 감마선검출기로부터 나오는 신호를 <그림 9>, <그림 11>, <그림 12> 과 같이 측정하였다. 하지만 이 연구의 최종목적은 RI계기의 장비개발이다. 따라서 검출기 신호 대 잡음비를 최소화하고 방사선검출수가 손실되지 않는 최적의 시정수를 결정해야한다. 나아가서 디지털화 된 신호를 마이크로컴퓨터로 계수하여 도로공사 성토시공용 흙의 밀도 및 수분함량을 계산하는데 이용되어야 한다.

### 4. 참고문헌

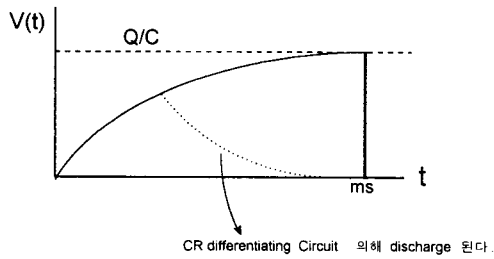
1. “원자력 법령집,” 한국원자력연구소, 1995
2. 공업진흥청, “흙의 함수량 시험방법,” 공업진흥청, KS F-2306,2312,2311, 1995
3. Nicholas Tsoufanidis, “Measurement and Detection of Radiation,” MaGRAW-HILL, pp. 181, 1972
4. 최원철외 5인, “MCNP코드를 이용한 수분측정계기의 기하학적 배치,” '96 춘계 한국원자력학회 논문집 IV, 1996
5. Glenn F. Knoll, “Radiation Detection and Measurement,” JOHN WILEY & SONS, pp. 219, 1976
6. 이영근, “펄스·스위칭 전자회로,” 광림사, pp. 658, 1978
7. W.K Sinclair, “Radiation Dosimetry,” Academic Press, Chapter 5, 1956



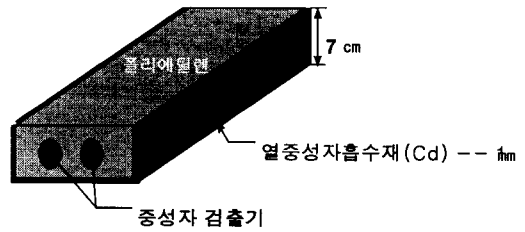
<그림 1> 양극도선 굽기에 따른 전자의 수집시간



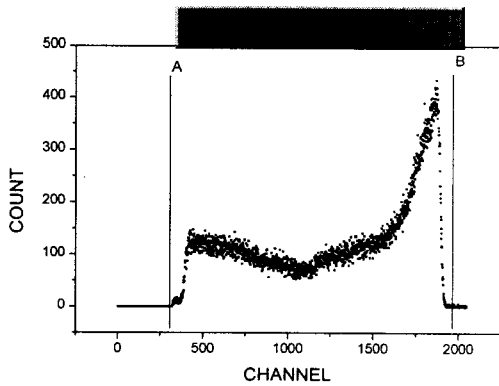
<그림 2> 양극도선 굽기에 따른 양이온의 수집시간



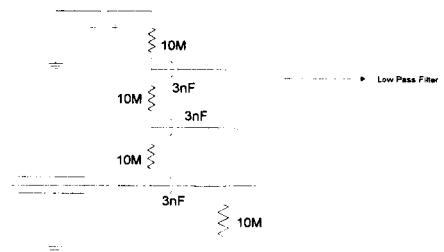
<그림 3> 일반적 비례계수관의 검출기 신호



<그림 4> RI 계기이용 고속중성자 측정 장치

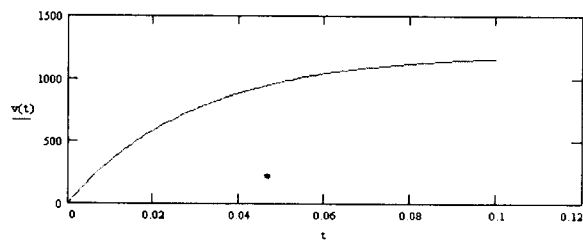


<그림 5> He-3 검출기를 이용한 Cf-252 Spectrum

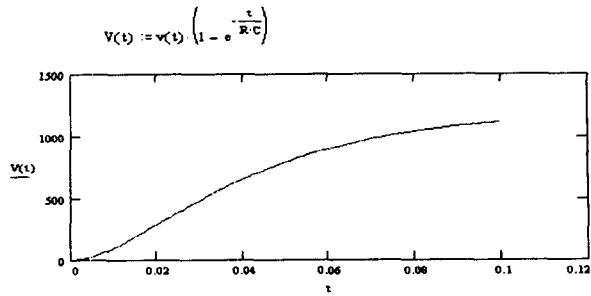


<그림 6> 중성자 검출회로

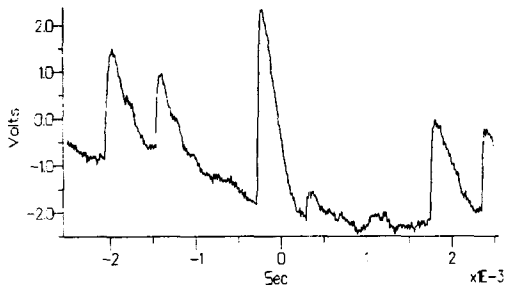
$$v(t) = E \left( 1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right)$$



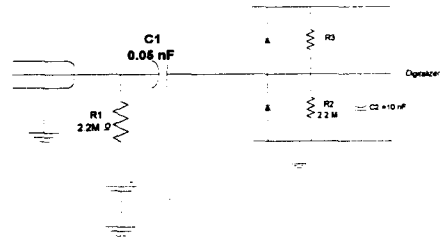
<그림 7> 1개의 필터를 통과했을 때의 검출기에 인가되는 전압.



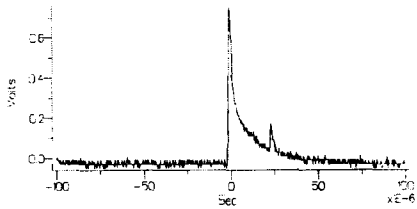
<그림 8> 2개의 필터를 통과했을 때의 검출기에 인가되는 전압.



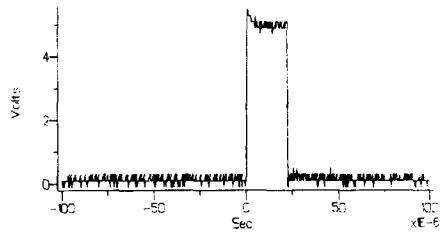
<그림 9> 중성자검출회로 발생신호



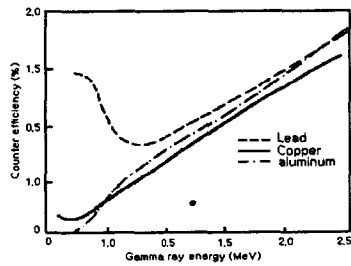
<그림 10> 감마선 검출회로



<그림 11> 감마선검출회로의 신호



<그림 12> 디지털화한후 감마선 검출회로의 출력



<그림 13> G-M 검출기의 외벽물질에 대한 검출효율