중성자 검출을 위한 회로설계

김상진, 성낙진, 김기준

시립인천전문대

The Circuit design for Neutron Detection

Sang-Jin Kim, Nak-Jin Seong, Ki-Joon Kim

Abstract In this study, to measure the moisture of compaction, it is designed to use the 2 neutron detectors. To perform the optimal design of their circuit, it is planned high voltage generator and voltage stable circuit and they are very suitable for detection demand. Also, it can be count to data calibration excluded count of ripple.

Key Words : RI 계기, 회로, 중성자, 고전압 발생회로, 전압 안정화 회로, 수분 함량

1. 서 론

도로가 파손되는 주요 원인은 성토 다짐 관리의 체계적이고 과학적인 품질 관리가 이루어지지 않기 때문이다. 현재 국내에서 성토다짐관리에 이용되는 방법은 모래치환법에 의한 흙의 단위중량 시험방법(KS F 2311)과 흙의 함수량 시험방법(KS F 2306)이다. 이들 방법은 최근 같은 빠른 시공속도가 요구되는 상황에서는 관리 효율상의 문제와 측정자의 오차로 인해 낮은 신뢰도를 갖고 있으며, 과학적이고 체계적인 성토 다짐 관리를 불가능하게 하고 있다. 선진 외국에서는 이미 1960년대부터 방사성동위원소를 이용한 흙의 밀도 및 함수량을 측정하는 방법에 대해 연구하여 최근에는 토목분야 뿐만 아니라 건축, 기계 분야 등 산업 전반에 걸쳐 그 이용을 확대하고 있는 추세이다. 방사성 동위원소를 이용한 성토의 밀도 및 수분 함량 측정의 방법은 1941년 B. Pontecormo에 의해서 제안된 후 꾸준히 개발되었다. 선진국들은 방사성 동위 원소를 이용한 RI 계기의 개발로 성토의 밀도 및 수분 함량을 측정하여 신속하고 정확한 토목 시공의 품질 관리를 수행해 오고 있다. 우리 나라의 경우 1970년대에 국립 건설 연구소와 한국도로 공사에서 미국에서 개발한 RI 계기를 도입하여 성토 시공 다짐 관리에 이용하고자 하였다. 그러나 이 계기는 국내 원자력법상 그 사용 절차가 복잡하고 계기에 사용하는 방사성 동위 원소에 대한 엄격한 관리를 요구하게 되어 연구개발이 미루어졌다. 또한 국내 실정에 맞는 수분 함량 측정 계기를 개발하였으나 이 역시 장비의 비대함으로 현장 적용이 이루어지지 않았다. 따라서 설계하고자 하는 RI 계기가 우리나라 원자력법상 신고만으로 사용이 가능한 100μCi 이하의 방사능 세기를 갖도록 기준을 정함에 따라 방사선 계측수와 수분 함량의 상관성이 기존의 계기보다 떨어지는 것을 보완하기 위하여 수분 함량을 측정하기 위한 중성자 검출 회로를 설계하고자 한다.

2. 검출기

수분 함량을 측정하기 위하여 사용되는 중성자는 고속중성자로서 흙 속의 수분과 충돌한 후 그 에너지를 잃고 열중성자로 변한다. 이 열중성자는 고속 중성자 측정을 위하여 사용되는 카드뮴에 의하여 제거되고, 오직 고속 중성자만이 중성자 검출부로 들어오게 된다.

이 고속 중성자는 다시 폴리에틸렌과 충돌하여 열중성자로 바뀐 후 중성자 검출기 속으로 입사되게 된다. 이와 같이 측정된 중성자는 흙 속의 수분함량 변화에 따라 그림 1과 같은 관계를 갖는다.

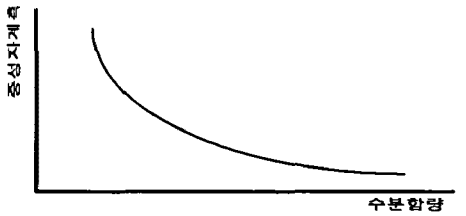


그림 1. 중성자 계측수와 수분 함량의 관계

본 연구에 사용된 중성자 검출기의 특징은 표 1과 같으며, 그 크기가 지름 방향으로 변하지 않고 길이 방향으로만 변화하기 때문에 고속 중성자 검출부의 크기는 길이 방향으로 변화시켰다.

표 1. 중성자 검출기의 특징

Gas Filling	3800 torr, He-3
Cathode Material	SS
Maximum Length (inch/mm)	7.35/185.7
Effective Length (inch/mm)	5.16/131.0
Maximum Diameter (inch/mm)	1.0/25.4
Effective Diameter (inch/mm)	0.94/23.87
Connector	MHV
Operating Temperature Range ^{0}C	-25℃ ~ +150

3. 회로 설계

3.1 고전압 공급장치

설계한 회로도는 그림 2와 같이 Timer IC 555를 이용하여 단안정 멀티바이브레이터를 구성하고 이 회로의 출력에서 얻어지는 부극성 펄스를 반전하여 NPN 트랜지스터 Q_2의 베이스에 정극성의 펄스를 인가하는 발진회로를 이용하였다. 이때 발진 주파수는 30.3[Hz]로 출력의 직류 고전압에 수 mV의 리플을 포함하는데, 이 리플이 중성자 검출회로에서 신호로 검출되므로 이는 펄스 계측수에서 제거하였다. 이때 중성자 검출관에 인가하는 고전압에는 1[mV]이하의 리플만 있어도 신호성분으로 검출되므로 일반적인 수 kHz~수십 kHz의 발진주파수를 가지는 인버터 회로는 리플에 의한 펄스 계측수가 너무 많아 적용이 곤란하였으며, 또한 리플 전압을 감소시키려면 평활회로의 규모가 커지고 소비전력도 증가하는 것을 방지하였다.

시제작한 고전압 공급장치의 출력전압은 최대 요구전압을 고려하여 1500V까지 출력되도록 설계하였다. 방사선 검출기의 특성에 맞게 출력전류는 최대 1[mA]를 넘지 않도록 설계를 하였으며, 회로내 입력 전압에 따라 출력전압을 가변하면, 출력전압의 범위는 직류 400~1500[V]이다.

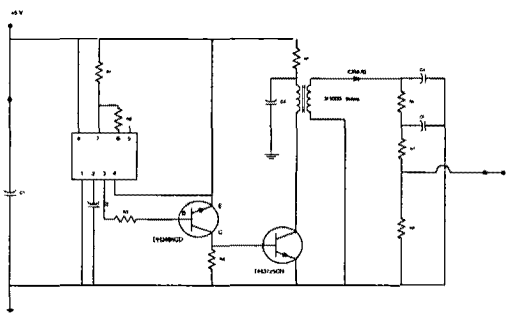


그림 2. 고전압 공급장치의 회로

고전압 공급장치의 성능 실험 결과 중성자 검출기로 인가되는 적정 고전압(900~1150V)과 감마선 검출기로 인가되는 적정 고전압(850~1200V)에서 전압의 안정도를 측정하였다. 그 측정 결과는 표 2와 같이 나타났다.

표 2. 고전압 공급장치 성능 실험결과

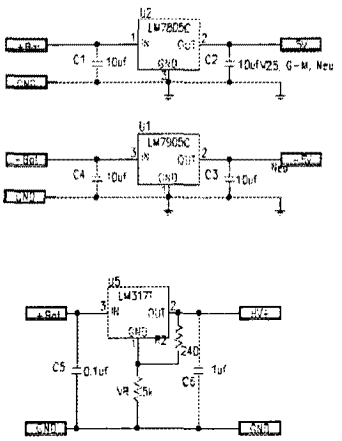
고전압공급장치 공급전압	고전압공급장치 출력전압
	중성자검출기공급
5	964~972
5.12	988~996
5.4	1044~1052
5.6	1076~1084

표 2의 결과를 보면 본 고전압 발생장치와 같이 출력 임피던스가 대단히 큰 회로의 고전압의 정확한 측정은 고입력 임피던스의 프로브와 고가 측정장비가 요구되므로 본 연구에서는 고전압 출력을 여러 번 측정하여 산술 평균값으로 판

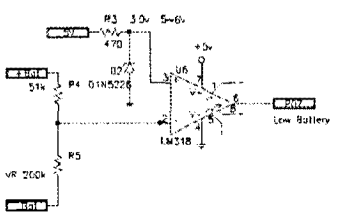
단하고, 최종적으로 검출기에 인가되는 고전압의 안정도는 방사선 검출수로 분석하는 것이 2차적으로 필요하다.

3.2 전압안정화 회로구성

본 연구로서 RI 계기에 사용되는 전압은 고전압 발생장치의 입력에 5.6[V], 1[mA], 감마선 검출회로 +5 [V], 3[mA], 중성자 검출회로 ±5[V], 8[mA], 마이크로프로세서 및 주변회로 +5[V], 50[mA]이다. 이들 회로의 요구에 적합하고 안정한 전원회로를 구성하기 위하여 그림 3과 같이 구성하였다.



(a) 직류 안정화전압 공급회로



(b) 전압 검출회로

그림 3. 전압안정화 및 검출회로

여기에 사용한 축전지는 리듐 이온의 3.6[V], 1800 [mA]를 직 병렬로 조합하였다. 중성자 검출회로에 ±5 [V]를 공급하기 위하여 전압레귤레이터용 IC LM 7805와 LM7905를 적용하고, 별도의 축전지(7.2[V], 1800 [mA])로부터 LM7805를 거쳐 +5[V]를 감마선 검출회로와 마이크로프로세서 부분에 공급하였다. 또한 고전압 발생장치용 직류전원은 LM317 전압레귤레이터 IC를 통하여 가변시킬 수 있으며, 필요한 전압(본 연구에서는 5.6[V])으로 설정할 수 있도록 하였다. 모든 전원은 전압비교기에 의해 항시 감시되며, 각 회로에 필요한 전압이하로 떨어질 경우는 LCD에 "Low Battery"가 나타나면서 측정작업이 중단된다.

현재까지 구성된 회로의 평가결과 총 소비전력은 약 80[mA]로, 소비전력이 가장 큰 마이크로프로세서 부분에 공급하는 축전지 용량을 고려하면 1회의 충전으로 약 30시간 사용이 가능하다.

3.3 중성자 검출회로

열중성자검출기로 널리 쓰이는 He-3 가스 비례 계수관의 측정 원리는 He-3와 열중성자의 반응으로 발생하는 양성자(Proton:571[keV]), 삼중수소핵(Triton: 191[keV])의 에너지를 측정한다. 즉, He-3와 열중성자가 반응해서 발생되는 입자는 검출기 내부가스를 이온화시키면서 그 에너지를 잃는다. 이온화된 가스는 검출기 내부에 걸린 전기장에 의해 전자들은 양극 도선(Anode), 양이온들은 음극벽(Cathode)으로 이동한다. 이 때에 검출기 내부에서는 가스 증배(Gas Multipli- cation) 현상에 의해 양이온 및 전자의 전하를 증폭한다. 가스 증배에 의한 전하량은 입사된 중성자의 에너지에 비례한다. 이들 전자나 양이온이 수집되는 시간의 중성자 검출회로의 설계에 있어서 회로 시정수 결정에 중요한 인자이다. 전자나 양이온이 수집되는 시간은 크게 유동시간(Drift Time)과 가스증배시간으로 나눌 수 있다. 이 중 유동시간은 가스증배시간보다 매우 크므로 이온 수집시간은 거의 유동시간으로 볼 수 있다. 따라서 비례 계수관의 이온 수집시간은 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

----------(1)

여기서,

p: 충전가스의 압력

μ: ion or electron의 mobility (입자의 평균속도/전기장의 세기)

V_0: 검출기에 인가한 전압. 즉 고전압장치에서 공급되는 전압

b: 음극벽까지의 검출기반지름

a: 양극도선의 굵기

앞에서 언급한 바와 같이 전하수집시간은 방사선 검출전기회로의 시정수 결정과 매우 밀접한 관계가 있다. RI 계기 시제품 제작을 위해 구입한 He-3 검출기에 대해 전하수집시간을 계산해서 그림 4, 5와 같은 결과를 얻었다. 양이온이나 전자의 비례계수관 내에서의 수집시간은 양극 도선의 굵기에 크게 변화된다. 하지만 실제적인 값은 크지 않아 전자의 경우 수집시간이 수십 μsec, 양이온의 경우 수집시간이 수십 msec라고 말할 수 있다.

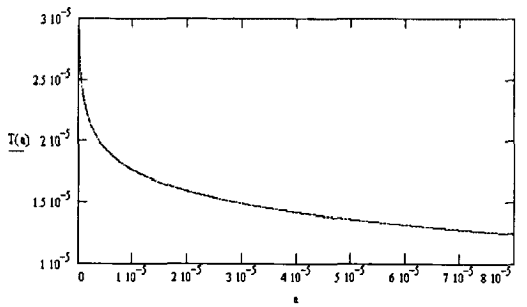


그림 4. 양극도선 굵기에 따른 전자의 수집시간

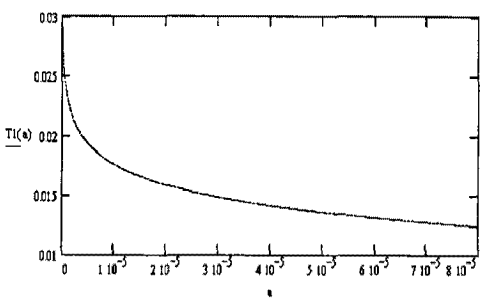


그림 5. 양극도선 굵기에 따른 양이온의 수집시간

검출기에는 전류가 거의 제로에 가깝게 흘러야 하기 때문에 여러 단의 저역통과필터(Low Pass Filter : RC - Circuit)를 사용하였다. RI 계기 중성자검출 전기회로의 기초설계를 위해 제작한 회로의 저항은 10MΩ, 콘덴서는 1nF 이다. 이 저역통과필터를 통해 검출기로 인가되는 전압을 1개의 저역통과필터와 2개의 저역통과필터를 쓸때 비교하여 그림 6과 7에 나타내었다.

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

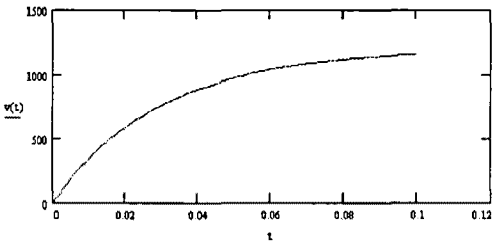


그림 6. 1개의 필터를 통과했을 때의 검출기에 인가되는 전압

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

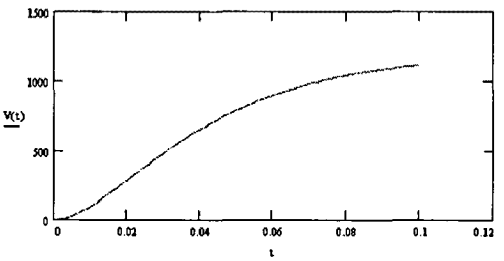


그림 7. 2개의 필터를 통과했을 때의 검출기에 인가되는 전압

또한 비례 계수관으로 입력되는 고전압 리플은 검출기로 출력되는 신호에 겹쳐서 나타나기 때문에 고전압공급장치의 리플(Ripple) 또한 줄여야 한다. 시제작한 고전압발생장치의 리플주파수는 30.3[Hz]로서 중성자 신호와 같이 출력되게 된다. 이 신호는 중성자 신호를 계수화(Digitalize)하여 마이크로프로세서로 계수할 때 리플성분에 의한 계측수를 제거함으로서 보정이 가능하다. 고전압공급장치의 리플을 줄이는 또 다른 방법은 필터와 대용량의 평활 회로를 구성하는 것이다. 하

지만 이 방법은 부품 규모가 커지고 소비전력이 증가되므로 휴대용 계기에는 적합하지 않다.

검출기에서 수집된 양이온이나 전자에 의해 발생한 펄스를 전달 및 적분하는 기능을 하는 회로는 전치증폭기이다. 기존의 비례 계수관 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 고전압쪽으로는 매우 큰 저항 때문에 콘덴서쪽으로 이동되기 시작한다. 즉, 검출기 입장에서 보면 시정수를 결정하기 위한 회로는 고역통과필터(High Pass Filter) 또는 미분회로가 된다. 저항과 콘덴서는 앞서 계산한 값을 바탕으로 수십 μsec 이상의 시정수를 갖도록 설계하였지만 시정수가 너무 길게 되면 검출회로의 불감시간이 크게 되므로 계수손실이 많아지게 된다. 이번 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 적정한 시정수를 사용하여 설계하였다. 이와 같은 과정을 통하여 그림 8과 같이 중성자 검출회로는 연산증폭기를 3단으로 구성하여 증폭도가 최대 약 50[dB]이 되도록 설계하였다. 중성자 검출회로는 주변의 대단히 미약한 잡음원에 대해서도 이상 펄스를 발생하므로 동판을 이용하여 정전차폐하여 외부 잡음원에 대해 대비하였다.

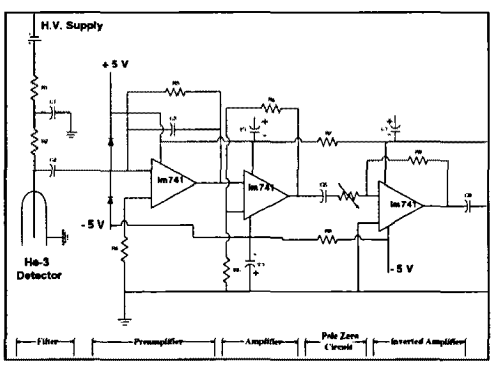


그림 8. 중성자 검출 회로도

4. 결론

성토의 수분을 측정하기 위한 RI 계기의 설계는 우리 나라 원자력법상 신고만으로 사용이 가능한 100μCi 이하의 방사능 세기를 갖도록 기준을 정함에 따라 방사선 계측수와 수분 함량의 상관성이 기존의 계기보다 떨어지는 것을 보완하기 위하여 수분 함량을 측정하기 위한 중성자 검출 회로를 설계하였다. 본 연구에서 설계된 고전압 발생회로와 전압 안정화 회로는 회로의 요구에 적합하게 구성되었다.

또한, 비례 계수관으로 입력되는 고전압 리플은 검출기로 출력되는 신호에 겹쳐서 나타나기 때문에 고전압공급장치의 리플(Ripple)을 줄여야 하는데, 시제작한 고전압발생장치의 리플주파수는 30.3[Hz]로서 중성자 신호와 같이 출력되게 된다. 이 신호는 중성자 신호를 계수화(Digitalize)하여 마이크로프로세서로 계수할 때 리플성분에 의한 계측수를 제거함으로서 보정이 가능하였다.

참 고 문 헌

[1] 한국원자력연구소 원자력연수원,"원자력법령집", 한국안전기술원, 1993

[2] 일본도로공단시험소, "RI 計器で土の密度.水分量るしくみ," 시험소 기술자료 제 213호, 1984(昭和59年)

[3] IAEA, "Neutron Moisture Gauge," Technical Reports Series No. 112, pp.30, 1970

[4] 김기준외 15인, "성토시공관리를 위한 방사성동위원소 장비개발", '95 연구개발사업 1차년도 보고서, 건설교통부, pp. 3~27, 1996

[5] J. S. Hendricks and J. F. Briesmeister, "Recent MCNP Development," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 39, No. 4, pp.1035-1040, 1992

[6] J. S. Hendricks and R. E. Prael, "Monte Carlo Next-Event Estimates from Thermal Collisions," Nuclear Science and Engineering, Vol. 109, No. 3, pp.150-158, 1991

[7] J. F. Briesmeister, Ed., A General Monte Carlo N-particle Transport Code(MCNP), Version 4A, La-12625-M, Los Alamos National LAb, 1993