

방사선 펄스의 고안정 계측회로 설계

송재용* · 한주섭 · 천상규 · 길경석

한국해양대학교 전기공학과

Design of a High Stable Measuring Circuit for Radioactive Pulses

Jae-Yong Song* · Joo-Sup Han · Sang-Gyu Chun · Gyung-Suk Kil

Dept. of Electrical Engineering, Korea Maritime Univ.

E-mail : hvlab@eng.kmaritime.ac.kr

ABSTRACT

The aim of this paper is to develop a high stable measuring device for radioactive pulses. The device consists of a high voltage supply unit using a fly-back converter principle, and a pulse detection unit for gamma-rays and neutrons.

The high voltage supply unit designed can generate DC voltage up to 1,500V at 5V-input, and have a series voltage regulator to maintain the output voltage constantly, resulting in less than 1.63% of voltage regulation.

The pulse detection parts consists of an active integrator, a pole-zero circuit, and a 3-stage amplifier of 60 dB, and its frequency bandwidth is from 37 Hz to 300 kHz.

From the experimental results, it is confirmed that the measuring device can count at least 10,000 pulses in a second.

I. 서론

고도화·정보화에 힘입어 사회전반의 기술이 급속한 발전을 보이면서 일상생활과 산업사회에 보다 나은 기술적응에 있어 환경문제에 깊은 관심을 나타내고 있다. 이러한 배경에서 환경파괴 또는 환경오염을 최소화하기 위하여 각종의 계측과 분석기술이 과거의 역학적, 화학적 분석방법에서 현재는 방사성 동위원소를 이용한 비파괴 검사기술의 광범위한 확산이 국내·외적으로 진행되고 있다[1].

국내의 경우 많은 분야에 방사성 동위원소 이용기술이 보급되어 있지만 아직도 핵심기술과 소자 및 장치는 모두 수입에 의존하고 있는 실정이며, 국내와 국외의 기술수준이 다르기 때문에 적용기술에 대한 충분한 연구 없이 외국의 기술과 장비를 그대로 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 이 분야의 기술 중에서 핵심적인 방사선 계측 및 분석기술을 국내실정에 맞게 확립할 필요성이 있다.

본 연구에서는 방사선 이용기술을 확보하기 위하여 고전압 발생회로 및 감마선 검출회로, 중성자 검출회로를 설계·제작하였으며, 회로 시뮬레이션을 통하여 회로를 검증하고, 방사선 검출기 특성을 고려하여 회로 정수들을 선정하였다. 감마선 검출에 사용되는 검출기는 펄스모드 G-M 검출기를 사용하였으며, 열중성자 검출기로는 이동성과 검출특성이 우수한 He-3 비례계수관을 사용하였다[2].

제안한 고전압 발생 회로는 검출회로에 요구되는 고전압의 전압변동율은 $\pm 1.63\%$ 정도로 안정되게 공급할 수 있었다. 감마선 검출회로는 Co-60 감마선원에서 발생하는 방사선 펄스의 고정도 계측이 가능하였으며, 중성자 검출회로는 중성자 선원 Cf-252로부터 방사되는 방사선 펄스의 고정도 계측이 가능함을 확인하였다.

II. 방사선 검출원리

방사선 검출기내에서 방사선의 상호작용시간은 기체의 경우 수 ns로 대단히 짧기 때문에 방사선 에너지의 전달은 순간적으로 일어난다.

이 때 검출기의 유감체적 중에서 그림 1과 같이 일정한 양의 전하가 축적되므로 이 전하를 수집하여 기본적인 전기적 신호를 형성하면 검출기에 입사되는 방사선의 개수를 측정할 수 있다[3].

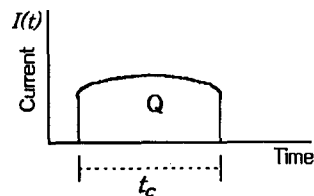


그림 1 검출기의 전류 파형

Fig. 1 Current pulse waveform of a detector

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

한 개의 입자 또는 방사선의 양자가 입사한 경우 전하 수집시간 t_c 와 같은 시간만큼 전류가 흐르며, 이 기간동안 생성된 전하의 총량은 식 (1)과 같다[4].

$$\int_0^{t_c} i(t) dt = Q \quad (1)$$

이 원리를 이용하여 방사선으로 발생한 전하를 측정하는 방법은 펄스모드(pulse mode), 전류모드(current mode), 평균제곱 전압모드(mean square voltage mode)가 있다. 현재 개별적인 방사선의 에너지를 측정하는 방법인 펄스모드가 널리 이용되고 있으며, 본 연구에서도 이 방법을 이용하였다.

방사선 검출에 있어서 두 개 이상의 신호펄스를 기록하기 위해서 필요한 최소의 시간이 있다. 이 최소 검출시간은 검출기 자체 또는 부속 전자회로에 의해 정해지는데 이 최소의 분리시간을 불감시간(dead time)이라고 한다. 방사선 붕괴의 불규칙한 성질에 의해 연속된 펄스가 검출기에 입력될 경우 불감시간내에 여러 개의 펄스가 존재하면 최초의 펄스만이 기록되고 나머지 신호펄스에 대해서는 상실되는 경우가 발생한다. 따라서 전자 수집이 끝나는 시점에서 회로 시정수에 의해 전압이 방전되도록 하여 검출회로의 불감시간이 최소가 되도록 하여야 한다. 회로의 시정수를 결정하는 것은 검출기 자체의 정전용량과 검출회로의 입력임피던스에 따라 결정된다. 그러므로 불감시간을 최소로 할 수 있도록 회로 시정수를 선정하는 것이 중요하다.

III. 검출회로의 설계 및 제작

방사성 동위원소 이용기술에 감마선과 중성자 검출이 널리 이용되고 있다. 방사선 검출을 위해서는 전용의 검출기가 필요하며 검출기 내부에는 고전계를 인가해 줄 수 있는 고전압 발생회로가 필요하다.

1. 고전압 발생회로

방사선 펄스 검출에 사용되는 검출기는 검출기내에 고전계 형성을 위한 고전압을 필요로 하게 된다. 인가되는 고전압이 불안정하게 되면 방사선 펄스의 계측에 있어 원하지 않는 오차를 유발하게 된다.

따라서 본 연구에서는 방사선 검출기에 안정된 고전압을 인가하기 위하여 구성이 간단하고 안정한 동작, 경제성을 고려하여 가장 적합한 플라이

백(fly-back) 방식의 컨버터 원리를 적용하였다. 컨버터의 스위칭 회로는 동작이 안정하고 제어가 용이한 비안정 멀티 바이브레이터를 구성하였다.

또한 방사선 검출기에 인가되는 고전압은 일정하게 유지되어야 하는데, 주위 온도변화에 따른 소자의 특성변화, 검출기와 접속부에서 발생할 수 있는 누설전류 등에 의해 전압변동이 발생할 수 있다. 따라서 고전압 공급장치에서 일정한 전압을 유지하도록 직렬형의 안정화회로를 첨가하였으며, 회로는 그림 2와 같다.

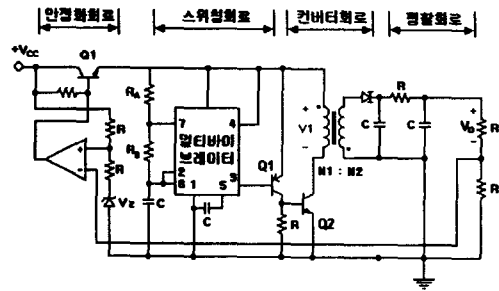


그림 2 고전압 발생회로
Fig. 2 Circuit of the high voltage supply

2. 중성자 검출회로

중성자 검출에 사용되는 검출기는 현재 널리 사용되고 있는 He-3 비례계수관을 사용하였다. He-3 가스 비례계수관의 측정원리는 He-3 가스와 열중성자의 반응으로 발생하는 양성자(Proton : 571 keV), 삼중수소핵 (Triton : 191 keV)의 에너지를 측정한다. 즉, He-3와 열중성자가 반응해서 발생하는 입자는 검출기 내부가스를 이온화시키면서 그 에너지를 잃는다. 이온화된 가스는 검출기내부에 걸린 고전계에 의해 전자들은 양극도선(Anode), 양이온들은 음극벽(Cathode)으로 이동한다. 이때 수 mV 정도의 미약한 열중성자 펄스가 발생하는데 검출신호가 미약하므로 다단의 증폭회로를 필요로 한다.

본 연구에서 중성자 검출회로는 그림 3과 같이 연산증폭기를 이용하여 60 dB의 전압이득을 갖도록 증폭회로를 구성함으로써 최종적으로 출력되는 신호펄스의 크기는 수백 mV ~ 수 V 정도가 된다. 60 dB의 이득을 얻기 위해서 단일의 연산증폭기만으로 구성할 경우, 펄스응답이 느려 방사선 펄스의 검출에 많은 오차가 발생한다. 따라서 응답특성을 개선하여 안정된 계측수를 얻기 위해 3단 증폭회로를 구성하였다.

검출 및 증폭된 펄스는 입력펄스와 전치증폭기에서의 감쇠시간 관계로부터 파미의 감쇠 후 영점에 교차하거나 부족진동(undershoot)이 생기게 되고, 이 부분에 다음의 펄스가 도래하면 펄스의 진폭에 영향을 주어 오차를 나타내게 된다. 또한 증폭회로에 폴-제로(pole-zero)회로를 부가하여 부족진동 없는 단순한 지수함수의 출력신호가 되도록 하였다.

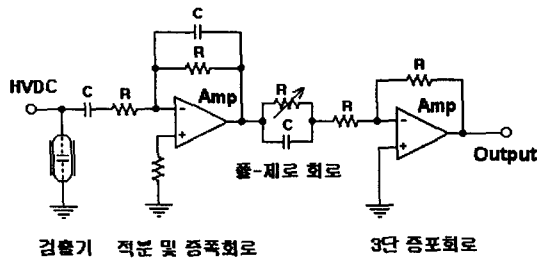


그림 3 중성자 검출회로
Fig. 3 Detection circuit for neutrons

3. 감마선 검출회로

G-M 계수관의 기본적인 원리는 비례계수관과 같지만, 가스증배가 시작되면 초기에 생성된 이온쌍에는 관계없이 항상 $10^9 \sim 10^{10}$ 개의 이온쌍을 생성하는 가이거 방전을 일으킨다[5]. 이때 발생한 출력 펄스의 진폭은 수 V 정도이므로 중성자 검출회로와는 달리 검출회로가 비교적 간단하며, 발생되는 감마선의 진폭이 일정하므로 파형 선별작업이 필요 없어 주변회로도 단순하게 구성할 수 있다.

그림 4에는 본 연구에서 설계한 감마선 검출회로를 나타내었다. 본 장치에 적용한 G-M 계수관은 불감시간이 $75 \mu s$ 이므로 검출회로의 시정수를 $75 \mu s$ 로 하였다. 검출회로의 구성은 연산증폭기 및 플립플롭 회로를 조합하여 구성하였으며, 출력 파형은 별도의 회로 없이 정형된 파형이 얻어진다. 또한 검출회로의 갑작스런 리셋을 피하기 위하여 리셋단자는 공급전원에 직접 연결하였다.

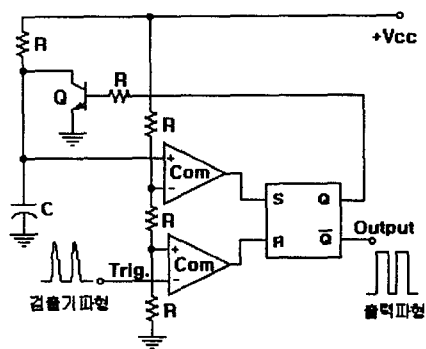


그림 4 감마선 검출회로
Fig. 4 Detection circuit for gamma-rays

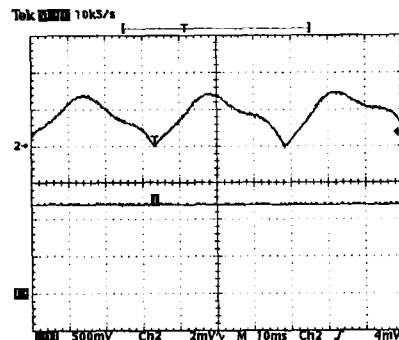
IV. 결과 및 고찰

방사선 동위원소 이용기술 중 그 핵심이 되는 고전압 발생회로, 감마선 및 중성자 검출회로를 개발할 목적으로 각 회로를 설계·제작하였으며, 특성을 평가하였다.

1. 고전압 발생회로

고전압 발생회로는 방사선 펄스 계측에 있어서 검출기내에 고전계를 형성해 주기 위한 것으로 방사선 펄스 계측에 대단히 중요한 역할을 한다. 회로구성방식이 플라이백 컨버터 방식을 사용하기 때문에 인가고전압에 리플이 포함되게 된다. 이 리플은 방사선 펄스 계측에 있어서 오차를 유발시킬 수 있다. 특히 검출기에서의 중성자 신호 펄스는 수 mV 정도로 대단히 작기 때문에 리플에 의한 영향을 고려하여야 한다.

그림 5는 고전압 발생회로의 출력전압 파형을 나타낸 것으로 출력전압을 1200 V로 설정하였을 때 리플의 크기 및 주파수는 약 $2.8 mV_{p-p}$, 30 Hz 정도로 안정된 출력 특성을 나타내었다. 이렇게 미소한 리플전압은 스위칭 주파수를 높이거나 평활회로의 대용량화로 제거할 수 있으나, 방사선 펄스의 주파수 스펙트럼, 소비전력, 주변회로에 잡음의 영향, 방사선 검출기에의 영향, 경제성 등을 고려할 때, 전혀 문제가 되지 않는다. 그러나 본 연구에서는 이러한 미소 리플전압이 펄스검출회로에 영향을 주지 않도록 검출회로의 입력단에는 C-R 고역통과 필터를 구성함으로써 리플전압에 의한 계측오차를 줄일 수 있도록 하였다.



상 : 리플 파형 [2mV/div, 10ms/div]
하 : 고전압 파형 [500V/div, 10ms/div]

그림 5 고전압 발생장치의 출력파형
Fig. 5 Output waveforms of the high voltage supply unit

2. 중성자 검출회로

본 연구에서 설계한 중성자 검출회로를 제작하고 중성자 선원에 의한 방사선 검출 특성을 평가하기 위하여 중성자 선원 Cf-252에서 방사되는 중성자 펄스를 계측하였다.

그림 6은 중성자 선원에 의한 검출 파형의 예를 나타낸 것으로 미소 방사선 펄스가 필터, 능동성 적분회로, 3단 증폭회로 및 폴-제로 회로를 거쳐 정확히 검출하고 있음을 알 수 있다. 또한 폴-제로 회로의 시정수를 최적화하여 노이즈나 언더슈트(undershoot) 없이 깨끗한 파형이 검출되었

다. 이와 같이 본 연구에서 설계한 중성자 검출회로는 상한 주파수대역 300 kHz이내에서 방사선 펄스를 정확히 검출할 수 있으며, 검출기의 종류에 따라 회로 시정수를 조정하여 최적화 할 수 있는 구성이다.

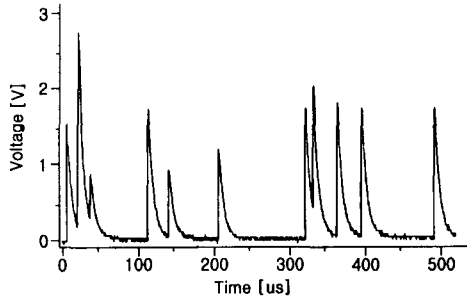


그림 6 중성자 측정 파형
Fig. 6 Measured waveforms of neutrons

3. 감마선 검출회로

그림 7은 감마선 검출회로 출력파형을 나타낸 것으로 검출기 출력단에서 검출된 파형 (a)와 같이 약 3V정도로 균일하게 나타났으며, 검출회로의 출력 파형은 (b)와 같이 정형된 파형이 얻어졌다. 검출회로에서 파형의 증첩은 나타나지 않았으며, 측정대상에 따라 감마선원의 세기를 가감할 경우 방사선의 방출개수도 가감되므로 펄스폭을 신호펄스의 발생주기보다 짧게 하면 연속된 펄스와의 증첩을 제거할 수 있다. 펄스 폭을 50 μ s로 조절할 경우 10,000 pulse/sec를 검출할 수 있다.

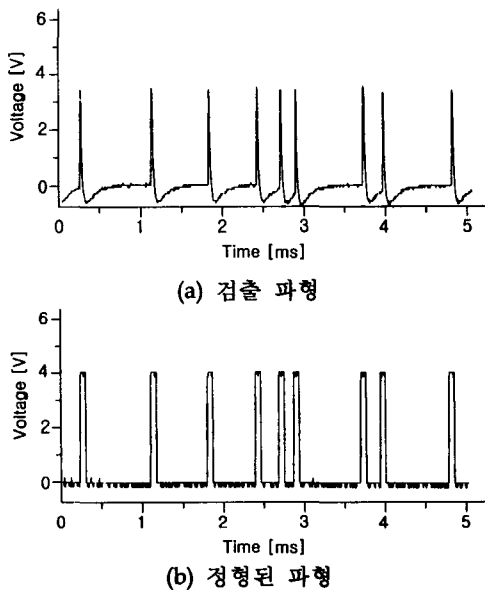


그림 7 감마선 측정 파형
Fig. 7 Measured waveforms of gamma-rays

V. 결 론

본 연구에서는 방사선 동위원소 이용기술의 핵심기술인 고전압 발생회로, 감마선 검출회로, 중성자 검출회로에 대하여 중점적으로 연구하였다.

시제작한 고전압 발생회로는 플라이백 컨버터 방식을 사용하여 최대 1500 V의 고전압을 발생시킬 수 있었으며, 직렬형 전압 안정화 회로를 부가하여 주위 환경변화에서도 전압변동율은 $\pm 1.63\%$ 로 안정된 고전압을 인가할 수 있었다. 출력전압에 포함되는 리플의 주파수를 30 Hz 정도로 낮게 함으로써 리플에 의한 계측오차를 최소화 할 수 있었다.

중성자 검출회로에서는 방사선 검출신호가 대단히 적기 때문에 60 dB의 이득을 갖는 다단 증폭회로를 구성하여 최종적으로 측정되는 신호펄스는 수백 mV ~ 수 V가 되도록 하였다. 폴-제로 회로의 첨가로 부족진동이 없는 신호의 검출이 가능하였다.

감마선 회로에서는 검출 신호 펄스가 크기 때문에 검출회로의 구성은 대단히 용이하였고, 최종적인 신호는 정형화된 펄스로 얻을 수 있었다.

향후에는 프로그래머블 고전압 공급회로, 감마선 및 중성자 검출회로를 통합한 방사선 펄스 계측 및 분석용 시스템과 소프트웨어 개발에 지속적인 연구를 수행 할 것이다.

본 연구는 2000년도 과학기술부 원자력 기초 연구사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.P. Gardner, et. al., Density and Moisture Content Measurements by Nuclear Methods, AASHTO, 1967.
- [2] 황주호외 15인, "성토시공관리를 위한 방사성 동위원소 장비개발", 건설교통부, pp.110-114, 1996.
- [3] J. L. Friedes and R. E. Carien, "Design of He-3 Filled Proportional Counters" Nuclear Instruments and Methods 71, pp.292-296, 1969
- [4] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley and Sons, pp.107-110, 1988
- [5] Nicholas Tsoulfanidis, "Measurement and Detection of Radiation", McGraw-Hill, pp.185-187, 1983