

工學碩士 學位論文

방사선 펄스의 고안정 계측 및 분석  
기술에 관한 연구

A Study on the High Stable Instrumentation and Analytic  
Techniques for Radioactive Pulse

指導教授 吉 暻 碩

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 孫 源 振

本 論 文 을 孫 源 振 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 : 工 學 博 士 金 潤 植 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 吉 暻 碩 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 李 成 根 ㉠

2002年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 氣 工 學 科 孫 源 振

# 목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	iii
Abstract	V
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용 및 활용방안	3
제 2 장 이 론	5
2.1 방사선의 성질	5
2.1.1 방사선 펄스	5
2.1.2 방사선의 투과, 흡수 및 직진성	7
2.1.3 방사선과 물질과의 상호작용	8
2.2 방사선 펄스의 검출원리	10
2.2.1 방사선 검출기	10
2.2.2 검출원리	13
2.3 응용분야	18

제 3 장 계측 및 분석 시스템의 설계와 제작 .....	21
3.1 고전압 공급장치 .....	21
3.2 중성자 검출회로 .....	29
3.3 감마선 검출회로 .....	38
3.4 통합 계측 및 분석 시스템의 구성 .....	42
제 4 장 시스템 평가 및 분석 .....	49
4.1 평가 방법 .....	49
4.2 기본특성실험 .....	51
4.3 적용실험 .....	54
제 5 장 결    론 .....	58
참 고 문 헌 .....	60

## 그림 및 표 목차

### <그림 목차>

그림 2.1	검출기의 전류파형 .....	13
그림 2.2	검출부의 등가회로 .....	14
그림 2.3	시정수에 따른 출력펄스 .....	15
그림 2.4	검출회로의 입력신호와 출력신호 .....	16
그림 2.5	절연재료의 비파괴 검사 .....	19
그림 3.1	플라이백 컨버터의 기본구성 .....	22
그림 3.2	플라이백 컨버터의 동작 .....	22
그림 3.3	Volt · sec 평형조건 .....	22
그림 3.4	비안정 멀티바이브레이터의 구성 .....	24
그림 3.5	전압 안정화 회로의 개략도 .....	25
그림 3.6	직렬형 전압 안정화 회로 .....	26
그림 3.7	고전압 공급장치의 구성 .....	27
그림 3.8	고전압 공급장치의 출력파형 .....	28
그림 3.9	시정수 결정회로의 개략도 .....	30
그림 3.10	능동성 적분기 .....	32
그림 3.11	$CR-RC$ 회로망 .....	32
그림 3.12	$CR-RC$ 회로망 응답특성 .....	33
그림 3.13	폴-제로 소거회로 .....	34
그림 3.14	중성자 검출회로 .....	35
그림 3.15	중성자 검출회로의 주파수 특성 .....	36
그림 3.16	중성자 측정 파형 .....	37

그림 3.17	가이저 방전의 메카니즘 .....	38
그림 3.18	감마선 검출회로 .....	40
그림 3.19	감마선 측정 파형 .....	41
그림 3.20	통합 계측 및 분석 시스템 .....	43
그림 3.21	파고검출의 블록도 .....	45
그림 3.22	파고분석의 흐름도 .....	46
그림 3.23	통합 시스템과 분석 프로그램의 연결 .....	46
그림 3.24	분석 프로그램의 주화면 .....	47
그림 3.25	파고분석의 결과 .....	48
그림 4.1	실험장치의 개략도 .....	49
그림 4.2	거리에 따른 검출특성 .....	51
그림 4.3	중성자의 파고분포특성 .....	53
그림 4.4	중성자에 대한 파고분포 결과 .....	56
그림 4.5	ZnO 소자에 대한 파고분포 결과 .....	57

**<표 목차>**

표 2.1	방사선의 종류 .....	6
표 2.2	검출원리에 따른 검출기의 종류 .....	11
표 3.1	설정전압과 출력전압 .....	48
표 4.1	거리에 따른 검출특성 .....	51
표 4.2	감마선의 기본특성 .....	52
표 4.3	중성자의 기본특성 .....	52
표 4.4	폴리에틸렌의 투과특성 .....	54
표 4.5	전력용 케이블의 투과특성 .....	55

# A Study on the High Stable Instrumentation and Analytic Techniques for Radioactive Pulse

*by Son, Won-Jin*

Department of Electrical Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime University  
Busan, Republic of Korea

## **Abstract**

The objective of this thesis is to develop an integrated data acquisition and analysis system for radioisotope application technology. The system developed in this study makes use of radioisotope of the low activity exempted from domestic atomic law and consists of a detection circuit for gamma-rays and neutrons, a high voltage supply unit, a digital signal processor, and a PC-base program.

The high voltage supply unit can generate DC voltage up to 1,500 [V] at 5 [V] input, and have a series voltage regulator to maintain the output voltage constantly. The neutron pulse detection circuit 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]. Gamma-ray detection circuit can count pulse up to 10,000 [pps].

Also, pulse height distributions and pulse numbers are very important data in analyzing radioactive pulses. In this study, A/D converter of 12 [bit], 100 [ns] and 60 [MHz] DSP are used to analyze the pulse height distribution and the analytic system is fabricated to be operated in personal computer.

Radioactive pulse has superior penetration ability to almost all kinds of materials, and it is also possible to evaluate the soundness of electrical insulation materials by analyzing the pulse numbers and/or pulse height distributions.

In the experiment, pulse numbers counted by the gamma source and pulse height distributions by the neutron source are applied to evaluate the condition of materials such as power cables, insulators, and ZnO blocks. From the experimental results, it is proven that the measurement of pulse numbers and pulse height distributions for radioactive pulse make possible to diagnose the soundness of materials.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

산업 사회의 고도화, 정보화에 힘입어 모든 분야의 기술이 나날이 급속한 발전을 거듭하고 있으며 산업의 정밀성 및 전력사용형태의 고급화로 인해 고신뢰, 고품질 전력이 국내기반 산업과 사회적 환경에 미치는 영향이 높아지고 있다. 첨단 산업사회의 중추적인 에너지원인 전기에너지의 전달과정에서 일어나는 사고는 막대한 손실을 가져다 주고있는 실정으므로 전력공급과 전력설비에 대한 신뢰도가 한층 높게 요구되고 있다. 이러한 사고는 전력계통설비의 결함이나 열화 등에 의한 사고가 대부분이기 때문에 전력계통설비의 결함이나 수명예측에 많은 관심이 집중되고 있다. 그중 전력설비에서 절연재료의 결함과 열화는 사고와 직접적으로 관련되어 있다.

모든 재료는 완전한 상태가 아니고 또한 재료를 계속 사용함으로써 재료의 결함이 새로이 생기거나 기존의 것이 성장되기도 한다. 그러므로 사고가 일어나기 전에 절연재료의 상태를 평가하여 이를 적절히 보수 또는 교체함으로써 전력공급의 신뢰성을 높여야 한다. 현재 전력설비에서 전기 절연물의 이상이나 결함상태를 검출하는 방법에는 여러 가지 방법이 있지만 일상생활과 산업사회에 보다 나은 기술적응에 있어 환경문제를 고려한 기술을 중요시하는 추세에 있다. 이러한 배경에서 환경파괴 또는 환경오염을 최소화하기 위하여 각종의 계측과 분석기술이 과거의 역학적, 화학적 분석방법에서 현재는 방사성 동위원소를 이용한 비파괴 검사기술이 확대되고 있다. 이 방법은 방사선이 물질내에서 재질과 밀도에 따라 투과하고 흡수되는 정도가 다른 성질을 이용하는 방법이다.

국내의 경우 방사선 이용기술은 원자력 분야는 물론 의료분야, 토목분야의 시공관리, 용접품질의 비파괴 검사, 특수 계측분야 등 많은 분야에서 적용되고 있는 추세이며, 방사성 동위원소 이용기술이 많은 부분 보급되어 있지만 아직도 핵심기술과 소자 및 장치는 모두 수입에 의존하고 있는 실정이다<sup>[1]</sup>.

따라서 이 분야의 기술 중에서 핵심적인 방사선 계측 및 분석기술을 개발하여 국내실정에 맞게 확립할 필요성이 있다. 본 연구를 통해 이 분야의 핵심적인 기술 중에서 고전압 공급장치, 방사선 검출회로에 관한 기술을 확보하고 또한 이론적, 실험적 연구결과를 정립하여 본 기술이 필요한 곳에 제공함으로써 방사성 동위원소 이용계기의 사용에 따른 신뢰성을 확보할 수 있도록 한다. 그리고 방사성 동위원소 이용계기를 통한 비파괴 검사를 적용하여 전기절연물의 상태를 평가함으로써 전력공급의 신뢰성평가에 본 연구가 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 이러한 배경으로 방사성 동위원소 이용계기의 핵심기술 중에서 고전압 공급장치, 중성자 및 감마선 검출회로, 디지털 신호처리를 이용한 방사선 펄스의 고안정 계측 및 분석 시스템을 제작하고 이를 이용한 방사선 펄스의 파고패턴분석을 통하여 전기절연물의 특성을 평가함으로써 전력설비의 상태 예측에 적용성을 검토하고자 한다.

## 1.2 연구내용 및 활용방안

본 연구에서는 방사선의 성질과 중성자 및 감마선 검출회로, 고전압 공급장치에 대한 이론적 검토와 시뮬레이션을 바탕으로 최적회로를 설계·제작하였다. 중성자 및 감마선 검출회로에 있어서는 검출기에 따라 검출회로의 특성이 달라지므로 전자회로의 입력정수를 조정할 수 있도록 구성함으로써 검출기 종류에 관계없이 안정된 검출이 가능하도록 하였고 고전압 공급장치는 검출기내에 안정된 고전압을 공급해야만 하므로 직렬형 전압 안정화회로를 첨가하여 일정한 고전압이 인가되도록 설계·제작하였다.

또한 부분기술에 해당하는 각 회로를 디지털 신호처리장치(DSP)를 적용하여 고안정 계측 및 분석이 가능한 통합 시스템을 구성하였으며, 보다 효율적 분석을 위하여 PC기반의 분석 프로그램을 개발하였다.

현재까지 방사성 동위원소 이용계기는 대부분 방사선 펄스의 계수에 의해 분석이 이루어지고 있다. 그러나 방사선 펄스의 계수만으로는 정확한 분석이 어려우므로 신호의 파고분석이 병행되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 디지털 신호처리를 이용하여 방사선의 검출과 계수는 물론 파고 분석 기능을 갖도록 구성하였으며, 연계 프로그램 또한 보다 사용하기 편리하도록 시각화하여 구성하였다.

최종적으로 본 연구에서는 방사선 펄스의 고안정 계측과 분석이 가능한 통합적 시스템을 제작하였으며, 실제 중성자선원 및 감마선원을 적용하여 기본특성과 적용성 평가를 수행하였다.

기본특성실험 결과로부터 본 통합 시스템은 안정된 계측과 분석이 가능하므로 전기절연물을 대상으로 중성자가 수소와 반응하는 특성, 감마선의 높은 투과성 등 방사선이 물질과의 상호작용 하는 것을 이용하여 전기절연물 내의 결함과 수분함유의 유무에 대하여 평가하였다.

결함이 없는 시편과 결함이 있는 시편에 중성자 및 감마선을 조사하여 시편을 투과한 방사선 펄스를 검출하여 분석 프로그램으로 펄스 패턴을 분석하였으며 분석된 결과는 전기절연물의 상태 예측에 관한 적용성 검토에 중요한 결과를 제공하였다.

이제까지 방사선 펄스의 응용기술은 성토시공, 아스팔트 함량 측정 등 건설분야에서 일부분 연구되고 있으나, 향후에는 용접부의 품질검사, 절연재료인 애자, 케이블의 비파괴 검사 등 전기적 분야에서도 그 활용 가치가 대단히 높을 것으로 생각되며, 뿐만 아니라 본 연구에서 제작한 시스템은 방사성 동위원소 이용분야에서 적용범위가 넓기 때문에 많은 활용이 기대된다.

## 제 2 장 이 론

### 2.1 방사선의 성질

방사선은 가시광선이나 라디오파 등과 같은 전자파이므로 이들 전자파가 가지는 일반적인 성질을 지니고 있다. 즉, 광속으로 직진하기 때문에 방사선 그림자가 생기고 물질에 부딪치면 반사한다. 그러나 방사선은 눈으로 볼 수 없고 물질을 전리시키며 파장이 짧아 물질을 투과하는 성질 등 여러 가지 특성을 지니고 있다.

#### 2.1.1 방사선 펄스

방사성원소의 붕괴에 따라 방출되는 입자선, 복사선 및 방사성 핵종의 붕괴에 따라 방출되는  $\alpha$ 선,  $\beta$ 선,  $\gamma$ 선을 가리키지만, 넓은 뜻에서 원자핵이 관여하는 각종 반응에 의해서 생기는 입자선이나 전자파를 포함시키기도 한다. 이 중에서  $\alpha$ 선과  $\beta$ 선은 방사성 붕괴에 의한 원자핵의 붕괴와 직접 관계가 있는 입자선이며  $\alpha$ 선의 본체는 헬륨의 원자핵,  $\beta$ 선의 본체는 전자이다. 이에 대하여  $\gamma$ 선은 파장이 짧은 전자파이며 핵붕괴에는 직접 관여하지 않는다. 방사선의 공통인 성질로는 이온화작용, 사진작용, 형광작용이며 방사선이 통과하면 통로에 있는 물질은 이온화되고 사진필름은 감광되며 형광체는 형광을 낸다. 다만,  $\alpha$ 선,  $\beta$ 선 등 전하를 가진 입자선은 그 자체가 이온화작용을 가지지만  $\gamma$ 선, X선, 중성자 등 전하를 가지지 않은 방사선은 그 자체에는 이온화작용이 없고, 그것이 물질을 통과할 때 2차원적으로 발생하는 하전입자(전자, 양성자)의 이온화작용에 의해서 간접적으로 물질을 이온화한다. 그 작용의 세기는 일반적으로 방사선의 종류와 에너지에 따라서 다르지만  $\alpha$ 선  $\rightarrow$  빠른 중성자  $\rightarrow$

느린 중성자 →  $\beta$ 선 →  $\gamma$ 선의 차례이다. 이러한 성질들은 방사선을 검출하고 그 양을 측정하는 방법을 제시하며 방사선을 여러 방면에서 이용하는 원리가 된다<sup>[2],[3]</sup>. 또한 생체에 방사선을 조사하면 이온화작용에 의해서 생체 내의 세포조직이 얼마간 파괴되며 어느 정도 이상으로 선량을 받을 때에는 급성 또는 만성적인 방사선 장애가 생기기도 하고 유전적인 변이가 유발된다. 따라서 방사선을 사용할 때에는 취급에 신중을 기해야 하며 이에 대한 관리가 법률에 의해 규제되어 있다. 표 2.1에 방사선의 종류를 나타내었다.

표 2.1 방사선의 종류

Table 2.1 Species of radiation

방사선	전자파		X선
			$\gamma$ 선
	고속입자선	하전입자선	$\alpha$ 선
			$\beta$ 선
			양자선
		중성자선	중성자

### 2.1.2 방사선의 투과, 흡수 및 직진성

방사선은 물질을 투과하는 능력이 있으며, 투과나 흡수되는 양은 시편의 두께, 밀도, 방사선의 에너지 등에 따라 달라지는데, 일반적으로 시험체의 두께, 원자번호 및 밀도가 클수록 흡수되는 양이 커지고, 방사선의 에너지가 클수록 투과되는 양이 커진다. 이 관계를 나타낸 식 (2.1)이 방사선 흡수 기본식이다.

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad [\text{Gy}] \quad (2.1)$$

여기서,  $I$  : 두께  $t$ 인 시험체를 투과한 방사선의 강도

$I_0$  : 시험체로 입사하는 방사선 강도

$t$  : 시험체의 두께

$\mu$  : 선형흡수 계수 (단위 :  $\text{cm}^{-1}$ )

또한 방사선은 빛과 같이 직선으로 진행하며, 거리가 멀어질수록 강도는 거리의 제곱에 반비례하여 약해진다. 이를 역제곱법칙이라 하며, 식 (2.2)와 같이 나타낸다.

$$\frac{I}{I_0} = \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \quad [\text{Gy}] \quad (2.2)$$

여기서,  $I$  : 거리  $d$ 에서의 방사선 강도

$I_0$  : 거리  $d_0$ 에서의 방사선 강도

$d, d_0$  : 방사선원으로부터의 거리

### 2.1.3 방사선과 물질과의 상호작용

방사선은 물질과 상호작용을 하여 에너지를 잃고 흡수한다. 방사선의 검출이나 안전관리를 위한 차폐 등의 관점에서 보면 방사선과 물질과의 상호작용에 관한 기본과정을 이해하는 것이 중요하다. 방사선의 종류에 따라 상호작용의 매개가 되는 힘이 달라져 상호작용의 현상이 다르게 나타나게 된다. 감마선은 전자파 방사선이므로 충돌 등에 의한 급격한 에너지의 상실보다는 주로 전자기적 힘에 의한 물질과의 상호작용을 통해 에너지를 상실하며 주로 광전효과(photoelectric effect), 콤프턴 산란(compton scattering), 쌍생성(pair production) 과정으로 에너지를 상실한다<sup>[4]~[6]</sup>.

광전효과란 원자의 궤도전자에 감마선의 전(全)에너지를 주어 궤도전자를 원자에서 튀어나가게 함으로써 감마선의 에너지를 잃는 과정이다. 그 특징으로는 입사한 감마선의 에너지가 비교적 낮을 때 잘 일어나며, 궤도전자의 에너지 준위가 높을수록 일어날 확률이 높다. 즉, 최내각 전자가 광전효과에 관계될 확률이 높다는 의미이다. 또한 원자번호가 큰 물질에서 잘 일어나기 쉬우며 입사한 감마선의 전(全)에너지를 소비한다. 따라서 방사선 측정기에 사용되는 물질은 방사선과 광전효과를 일으키기 쉬운 물질을 사용한다.

콤프턴 산란은 입사한 감마선이 물질 내의 전자에 의해 산란되어 그 에너지와 방향이 바뀌는 것인데, 즉 전자에 의한 광자의 산란으로 입사한 에너지보다 낮은 에너지의 감마선이 방출되고, 동시에 전자도 방출되는 과정을 말한다. 콤프턴 효과에 의한 산란 방사선은 2차 방사선으로 정의할 수 있으며 이 산란방사선은 또다시 콤프턴 산란을 일으키거나 광전효과를 일으켜 에너지를 상실한다. 콤프턴 산란의 특징으로는 입사한 감마선의 에너지가 비교적 높을 때 잘 일어나며 에너지 준위가 낮은 전자(최

외각전자)와 산란이 일어날 확률이 높다. 그리고 입사한 감마선의 일부 에너지만 소비하고 산란하는 특징을 가진다.

전자쌍생성은 입사한 감마선의 에너지가 전자의 정지질량 에너지(511 [keV])의 두 배인 1.02 [MeV] 이상일 때 감마선의 에너지가 음전자와 양전자로 바뀌는 과정이다. 감마선의 입사 에너지가 1.02 [MeV] 이상이 되면 전자쌍의 질량으로 바뀌고 나머지 에너지는 생성된 전자쌍의 운동에너지로 소요된다.

중성자는 전하를 가지고 있지 않으므로 하전입자나 전자에 미치는 쿨롱의 힘에 영향을 받지 않는다. 중성자의 상호작용은 흡수체의 원자핵과 반응하여 흡수 또는 산란을 일으키며 그 결과로 중성자는 완전히 소실되어 하나 또는 그 이상의 이차방사선으로 대신되는 경우와 에너지나 중성자의 방향을 대폭적으로 바꾸는 경우가 있다. 중성자의 상호작용에 의한 이차방사선으로 감마선을 방출하며 이는 중성자에 의한 핵반응의 결과로 생성되거나 아니면 중성자가 충돌한 결과로 에너지를 얻게 되는 흡수체의 원자핵 자체인 경우도 있다. 중성자는 일반적으로 빠른 중성자와 느린 중성자의 두 유형으로 나눌 수 있으며 느린 중성자는 운동에너지가 작기 때문에 탄성산란에 의해 원자핵으로 전달되는 에너지는 극히 작은 특징을 가진다. 빠른 중성자는 중성자의 에너지가 증가하면 한번의 충돌로 탄성산란에 의해 중성자가 아주 많은 양의 에너지를 전달할 수 있다. 개개의 산란에서 중성자는 에너지를 상실하고, 또 감속되어 낮은 에너지가 된다.

## 2.2 방사선 펄스의 검출원리

방사선 계측은 원자핵 붕괴시 방출되는 방사선 입자를 검출하여 그 붕괴 수를 헤아리는 것을 의미한다. 또한 방사선은 인간의 오감으로 감지할 수 없는 것이 특징이므로 측정시 주의가 요구되며, 방사선 측면에서는 방사선의 종류, 붕괴특성, 에너지, 방사선의 강약을 고려해야하고, 검출기 측면에서는 검출기의 종류, 배경계수(background), 분해시간, 계수 중의 방사능 감소, 계측기의 효율, 계수의 통계성을 고려해야만 정확한 검출을 이룰 수 있다.

### 2.2.1. 방사선 검출기

방사선 검출기는 입사방사선과 검출물질과의 상호작용으로 인한 전리, 여기, 형광, 화학작용의 효과를 이용하여 측정하게 된다<sup>[7]</sup>.

본 연구에서는 산업계의 비파괴 검사에서 주로 사용되는 방사선 중 중성자와 감마선을 측정 대상으로 하였으며 이들 검출에 있어 가장 널리 사용되고 있는  $^3\text{He}$  비례계수관과 G-M 검출기를 사용하였다.

RI계기에 사용되는 일반적인 중성자 검출기는  $\text{BF}_3$  가스충전 비례계수관과  $^3\text{He}$  가스충전 비례계수관이 주로 사용된다. 최근에는 에너지 분해능과 검출효율이 우수한 반도체 검출기의 사용도 증가하는 추세이다. 하지만 반도체 검출기 사용시에는 반드시 액체질소로 냉각시켜 주어야 하는 단점이 있다. 그리고  $\text{BF}_3$  검출기 보다는  $^3\text{He}$  검출기가 검출효율이 높기 때문에 이러한 중성자 검출기의 장단점을 고려하여 본 연구에서는  $^3\text{He}$  검출기를 사용하였다.

표 2.2 검출원리에 따른 검출기의 종류

Table 2.2 Species of detector to the principle of detection

검출원리		검출기명칭	주요용도
전리	기체전리	전리함	선량(률)측정
		비례계수관	$\alpha/\beta$ 방사능측정
		G-M 검출기	$\beta$ 방사능측정, 선량률측정
	고체전리	반도체 검출기	에너지측정(핵종분석), 방사능측정
여기	고체섬광	NaI(Tl)	$\gamma$ 측정
		ZnS(Ag)	$\alpha$ 측정
		플라스틱	$\beta$ 측정
	액체섬광	액체섬광계수관	저에너지 $\beta$ 측정
	열형광	TLD	방사선량측정
	유리형광	유리선량계	방사선량측정
화학	감광	필름벤티지	방사선량측정, 방사선영상
	물질분해	화학선량계	고선량측정
결함유발작용		고체비적 검출기	$\alpha$ , 하전입자, 중성자측정

$^3\text{He}$  검출기는 열중성자 측정을 위한 비례계수관으로써 열중성자의 입사에 의해 생성된 하전입자가 검출기내의 기체를 이온화시키며, 이때 생성된 전자는 고전압을 이용하여 전자증폭을 시킨 후 검출기 중심부분에 있는 양극도선에 수집하여 계수를 측정하게 된다.  $^3\text{He}$ 기체와 중성자의 반응은 다음과 같다<sup>[8]</sup>.



검출기의 전기적, 기계적 특징은 검출회로나 시스템 설계시 매우 중요하다. 검출기의 전기적 특징은 중성자 검출회로에서 시정수 선택에 중요한 역할을 하므로 검출회로 설계시 고려해야 한다.

일반적으로 감마선계측용 검출기는 G-M 검출기를 사용한다. G-M 검출기는 섬광 검출기(NaI)에 비해 상대적으로 감마선 검출효율이 떨어지나 그 운반성 및 강도가 섬광 검출기에 비해 우수하며 조작성이 쉽다.

G-M 검출기의 외벽의 두께는 1 ~ 2[mm] 정도로 한다. 하지만 외벽의 두께를 두껍게 하더라도 감마선 검출효율 증가에 전혀 영향을 미치지 않는다. 그 이유는 검출기 외벽에서 감마선과 반응하여 발생한 전자가 검출기 내부에 도달하여 전자사태를 일으키지 못하기 때문이다. G-M 검출기에서는 보통 검출효율을 높이기 위해서 외벽의 물질을 원자번호 Z가 높은 물질을 사용한다<sup>[9]</sup>. 그리고 검출회로의 최적설계를 위해 전기적, 기계적 특성을 고려하였다.

### 2.2.2 검출원리

방사선 검출기내에서 방사선의 상호작용 시간은 기체의 경우 수 [ns]로 대단히 짧기 때문에 방사선의 에너지 전달은 순간적으로 일어난다. 이 때 방사선 검출기의 유감체적 중에서는 그림 2.1과 같이 일정한 양의 전하가 축적되므로 이 전하를 수집하여 기본적인 전기적 신호를 형성하면 방사선 검출기 내에 입사되는 방사선 펄스의 갯수를 측정할 수 있다.

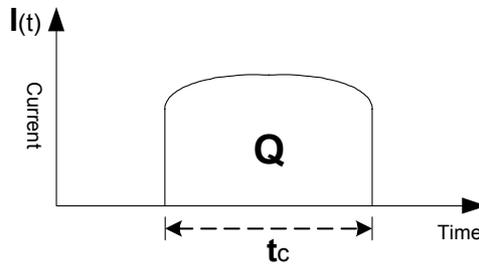


그림 2.1 검출기의 전류파형

Fig. 2.1 Typical current waveform of a detector

전형적인 전하의 수집방법은 방사선에 의해서 생성된 양전하와 음전하를 서로 반대방향으로 이동시키기 위해 방사선 검출기 내부에 고전계를 형성함으로써 얻어질 수 있다. 물론 검출기의 종류에 따라 전하를 완전히 수집하는데 요구되는 시간은 달라진다. 한 개의 방사선이 검출기로 입사한 경우 검출기의 고유의 메카니즘에 따라서 전자를 발생시키게 된다. 이 전자가 검출기에 수집되는 시간  $t_c$ 만큼 전류가 흐르며, 이 시간 동안 생성된 전하를 적분하면 전하의 총량  $Q$ 를 식 (2.4)와 같이 구할 수 있다.

$$\int_0^{t_c} i(t) dt = Q \text{ [c]} \quad (2.4)$$

이 원리를 이용하여 방사선으로 발생한 전하를 측정하는 방법은 펄스모드(pulse mode), 전류모드(current mode), 평균제곱전압모드(mean square voltage mode)가 있다. 현재 개별적인 방사선의 에너지를 측정하는 방법에는 펄스모드가 널리 이용되고 있다<sup>[10]</sup>.

단일현상으로 생성된 신호펄스의 특성은 그림 2.2와 같이 검출기와 검출기에 접속되어 있는 전치 증폭기(pre-amplifier)의 입력특성으로 결정된다. 그림 2.2에서  $R$ 은 검출회로의 입력저항,  $C_C$ 는 검출회로의 정전용량,  $C_T$ 는 검출기 자체의 정전용량이다.

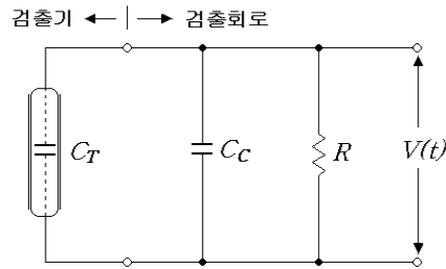


그림 2.2 검출부의 등가회로

Fig 2.2 Equivalent circuit of detecting part

여기서  $R \cdot (C_T + C_C)$ 의 적분 시정수( $\tau$ )가 검출기의 전하수집시간  $t_c$ 보다 작은 경우에는 그림 2.3의 (b)와 같으며 큰 경우에는 그림 2.3의 (c)와 같이 된다. 즉, 처음의 신호펄스가 최대값에 도달하는데 필요한 시간은 검출기 자체 내에서 전하수집시간으로 결정되며, 펄스의 감쇠 시간은 회로의 시정수에 의해 결정된다. 즉, 펄스의 상승시간은 검출기의 특성에 의존하며, 감쇠시간은 회로의 시정수에 의존하는 것을 의미한다.

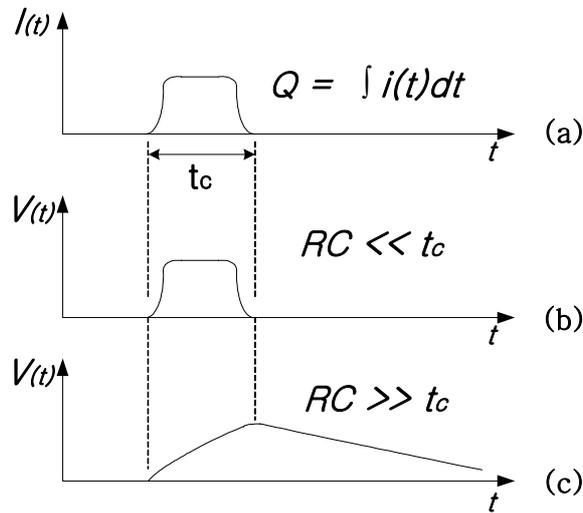


그림 2.3 시정수에 따른 출력펄스

Fig. 2.3 Output pulse by time constant

따라서 방사선 검출기로부터 발생하는 신호펄스를 정확히 검출하기 위해서는 검출회로의 시정수를 방사선 검출기의 불감시간 이하로 하는 것이 바람직하다<sup>[11],[12]</sup>.

방사선 검출에 있어서 두 개 이상의 신호펄스를 기록하기 위해서 필요한 최소의 시간이 있다. 이 최소 검출시간은 검출기 자체 또는 부속 전자 회로에 의해 정해지는데 이 최소의 분리시간을 불감시간(dead time)이라고 한다. 방사선 붕괴의 불규칙한 성질에 의해 연속된 펄스가 검출기에 입력될 경우 불감시간 내에 여러 개의 펄스가 존재하면 최초의 펄스만이 기록되고 나머지 신호펄스에 대해서는 상실되는 경우가 발생한다. 따라서 이러한 손실을 보정해야만 정확한 검출이 가능하며, 불감시간의 보정 방법에는 그림 2.4와 같이 정체형(paralyzable)과 비정체형(nonparalyzable)의 두 모델이 이용된다.

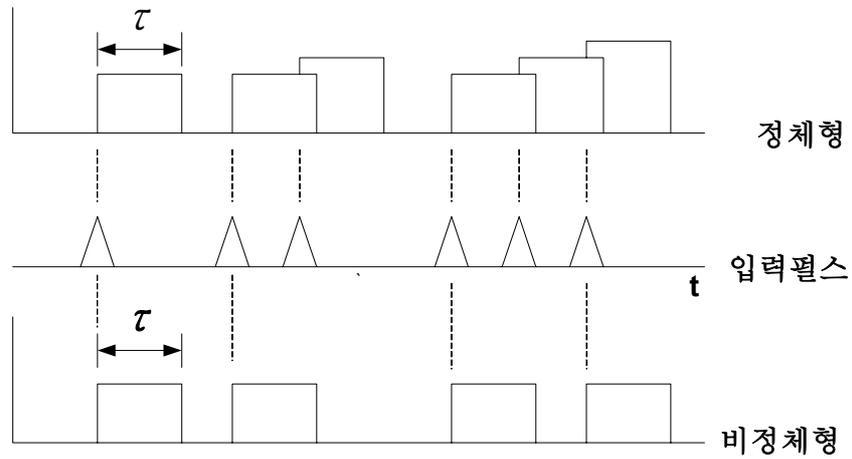


그림 2.4 검출회로의 입력신호와 출력신호

Fig. 2.4 Typical signals by detection circuit

두 모델의 경우 참 계수율(true interaction rate)  $n$  을 실제 검출된 계수율  $m$  과 불감시간  $\tau$  의 함수로써 표현한다.

비정체형의 경우에는 검출기가 불감되는 모든 시간율은  $m\tau$  로 주어지고 손실의 시간율은

$$n - m = nm\tau \quad (2.5)$$

가 되고, 참 계수율  $n$  에 대하여 정리하면

$$n = \frac{m}{1 - m\tau} \quad (2.6)$$

와 같이 되어 불감시간에 따른 손실을 보정해 줄 수 있다.

정체형의 경우에는 불감시간이 반드시 일정한 것은 아니기 때문에 실제 기록된 계수율은 참 계수율과의 시간간격이 불감시간  $\tau$ 를 넘는 비율과 같은 것으로 착안한다. 따라서 평균 발생률이 참 계수율  $n$ 에서 발생하는 불규칙한 신호펄스들 사이의 간격분포를 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$m = ne^{-nr} \quad (2.7)$$

본 연구에서는 두 모델의 보정방법 중 전자의 비정체형을 고려하여 검출기 불감시간에서의 신호펄스 손실을 보정하였다.

## 2.3 응용분야

방사선의 유용한 가치나 그 부작용인 방사선의 위험에 대해 널리 알려진 지금에도 방사선의 이용과 그 용도가 나날이 확대되어 가는 원동력은 방사선을 이용하는 기술이 다른 기술이 갖지 못하는 기능을 가졌거나 같은 기능이 있는 다른 기술에 비해 상대적으로 비용이 적게 들기 때문이다. 방사선은 물질을 투과할 수 있는 능력과 전리, 핵반응, 여기, 산란 등 원자단위의 반응능력뿐만 아니라 민감한 검출성 등의 특성을 지니고 있어 전반적인 산업분야에 활용되고 있다. 방사선 이용계기의 주된 응용분야는 치료 및 진단에 사용되는 의료용과 식품조사나 비파괴 검사 등의 공학용으로 크게 구분할 수 있다.

의료용으로 사용하는 방사선 이용계기는 크게 치료용과 진단용으로 구분할 수 있다. 의료용으로 사용되는 방사선은  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  등으로 비교적 에너지가 큰 방사선원을 사용한다. 사용량은 대개 1 ~ 10 [kCi]가 보통이며 납, 텅스텐, 우라늄 금속 등의 차폐함에 넣어 사용한다.

진단용으로 사용되는 방사선 이용계기는 인체조직과 친화성이 있는 수명이 짧은 방사성 동위원소를 트레이서로써 인체에 투여하고 그의 이동하는 상태를 검출기로 검출하여 정상 여부를 조사하는 장치이다.

따라서 본 연구를 통해 감마선 검출회로를 사용하여 감마선의 방사선량을 검출할 수 있으며, 고전압 공급장치의 경우에는 각종 방사선 장비의 전원 장치로 활용 할 수 있다.

공학분야에서 방사선 이용계기의 응용은 다양하게 사용되고 있다. 먼저 비파괴 검사용으로 방사선에 의한 투과사진을 이용하는 라디오그래피, 방사성 동위원소를 이용하는 두께 측정기 등이 있으며, 이들은 대부분  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  등을 용도에 맞게 선정하여 사용한다.

또한 방사선의 투과 산란 작용을 이용하는 것으로 밀도계, 적설계, 수분계

등이 있으며 피측정물에 접촉하지 않고, 간단하게 측정할 수 있다.

밀도계 및 적설계는 수분량을 검출하는 것으로 밀도 및 적설량을 알 수 있으며, 수력 발전량이나 하천의 유량을 추정하는데 사용된다. 수분계의 경우에는 중성자선원을 이용하여 중성자가 수소원자에 의하여 커다란 산란을 받는 현상을 이용하는 것으로 이것은 대개 다른 방법으로 측정하기 곤란한 경우에 사용되고 있다.

감마선은 고분자 화합물에 조사하여 반응의 촉진이나 성질의 개선을 이루기 위하여 사용되기도 하는데, 살균처리, 야채의 싹틔 방지 등의 목적으로도 사용된다. 또한 전기적 절연재료(케이블, 애자류 등)의 비파괴 검사에도 사용되는데 그림 2.5와 같이 감마선을 조사하여 검출된 방사선 펄스의 분석으로 절연재료 내에 존재하는 결함을 검출할 수 있다.

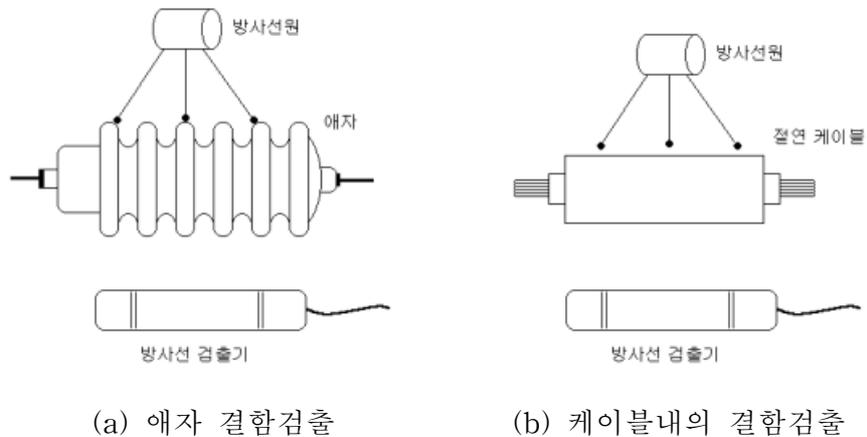


그림 2.5 절연재료의 비파괴 검사

Fig. 2.5 Nondestructive testing of insulation

방사선을 이용하여 피측정체의 습윤밀도와 수분밀도를 측정하려면 피측정체를 통하여 방출되는 감마선 및 열중성자의 계측수가 필요하다.

이들의 계측으로부터 식 (2.8)와 식 (2.9)를 적용하면 피측정체의 수분밀도( $R_T$ )와 습윤밀도( $R_W$ )를 구할 수 있다.

$$R_T = \frac{\ln A + \ln(S_C - S_B) - \ln(R_G - R_B)}{B} \quad (2.8)$$

$$R_W = \frac{\ln C + \ln M_S - \ln N_S}{D} - E \cdot R_M + F(R_D + R_M) \quad (2.9)$$

여기서,  $A, B, C, D, E, F$ 는 상수는 상수

$S_B$  : 표준체에서의 배후 감마선 계측수

$S_C$  : 표준체에서의 선원삽입 후 계측수

$R_B$  : 피측정체에서의 배후 감마선 계측수

$R_G$  : 피측정체에서의 선원 삽입후 계측수

$M_S$  : 표준체에서의 선원삽입 후 중성자 계측수

$N_S$  : 피측정체에서의 선원삽입 후 중성자 계측수

$R_M$  : 강열감량 후 계측수

$R_D$  : 노건조 후 건조밀도 측정값

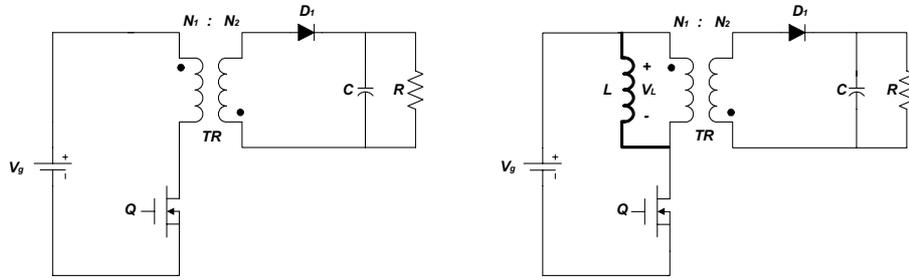
이와 같이 피측정체의 습윤밀도와 수분밀도의 측정에는 방사선 계측수가 필요하므로 검출 및 계수를 위한 회로가 필요하다.

## 제 3 장 계측 및 분석 시스템의 설계와 제작

### 3.1 고전압 공급장치

방사선 검출기의 동작 메카니즘은 검출기내에 고전계를 형성시켜 주면 검출기내의 방전현상으로 방사선 펄스를 검출한다. 따라서 검출기내에는 고전계 형성을 위한 고전압 공급장치가 필요하다. 검출기의 동작영역은 900 [V]이상이기 때문에 검출기에 인가되는 전압 범위는 최소 900 [V]이상의 고전압을 인가하여야 한다. 방사선 펄스의 검출에 있어 검출기에 가해지는 직류 고전압은 검출효율에 큰 영향을 미친다. 그러므로 검출기에 인가되는 고전압은 일정하게 유지되어야 하는데, 주위 온도변화에 따른 소자의 특성변화, 검출기와의 접속부에서 발생할 수 있는 누설전류 등에 의해 전압변동이 발생할 수 있다. 방사선 펄스의 고정도 계측을 위해서는 인가되는 고전압은 안정적이고 일정하여야 하며 검출기의 종류에 따라 인가전압의 제어가 가능하도록 설계하여야 한다.

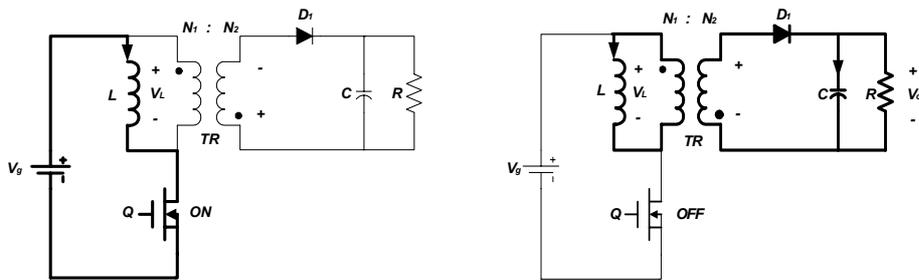
본 연구에서는 방사선 검출기에 인가할 안정된 고전압 출력을 얻기 위해 구성이 간단하고 안정한 동작 및 경제성을 고려하여 그림 3.1과 같은 플라이백(fly-back) 방식의 컨버터를 적용하였다. 플라이백 방식의 컨버터는 그림 3.2의 (a)회로에서 스위칭 소자  $Q$ 가 도통하면 트랜스의 2차 권선에는 1차와 반대 극성의 전압이 유도되므로 다이오드  $D$ 는 역바이어스 되어 차단이 된다. 따라서 2차 권선에는 전류가 흐르지 않고 1차 권선으로만 전류가 흘러 자화 인덕턴스에 의해 에너지가 축적된다. 그후 그림 3.2의 (b)회로에서 스위칭 소자  $Q$ 가 차단되면 2차 권선에는 전 상태와 반대 극성의 전압이 유도되어 다이오드를 도통시킴으로써 트랜스의 자화 인덕턴스에 의해 축적된 에너지를 출력으로 방출시킨다.



(a) 기본회로 (b) 자화인덕턴스를 고려한 회로

그림 3.1 플라이백 컨버터의 기본구성

Fig. 3.1 Configuration of fly-back converter



(a)  $Q$  도통 (b)  $Q$  차단

그림 3.2 플라이백 컨버터의 동작

Fig. 3.2 Operation of fly-back converter

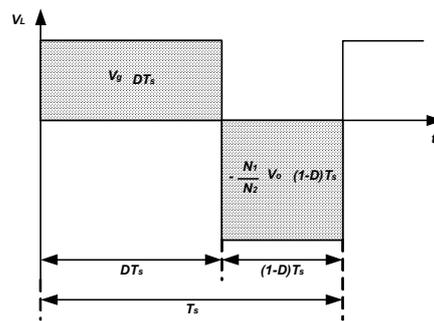


그림 3.3 Volt · sec 평형조건

Fig. 3.3 Volt · sec balance condition

이와 같이 플라이백 컨버터의 ON-OFF 동작에 대하여 Volt · sec 평형 조건을 적용시키면

$$V_g D T_s + \left( -\frac{N_1}{N_2} V_o (1-D) T_s \right) = 0 \quad (3.1)$$

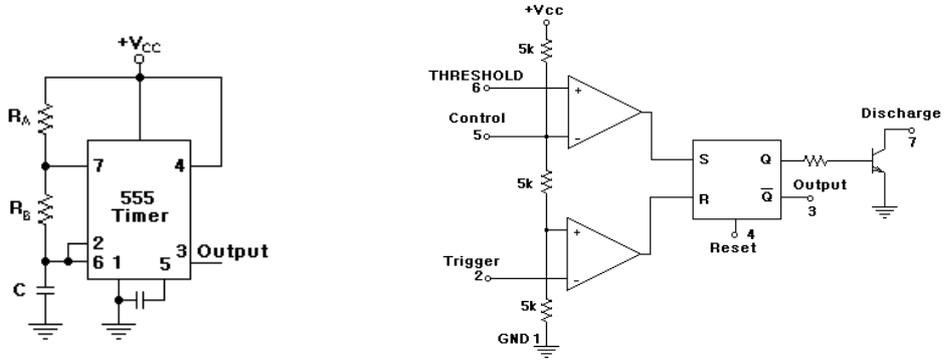
$$V_g D T_s = \frac{N_1}{N_2} V_o (1-D) T_s \quad (3.2)$$

가 되고, 이 식으로부터 다음 식과 같은 출력 전압을 얻을 수 있다<sup>[13]</sup>.

$$V_o = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{D}{1-D} V_g \quad [\text{V}] \quad (3.3)$$

이 컨버터에 삽입된 트랜스는 입출력간의 절연 등 고유의 역할뿐 아니라 동시에 필터의 인덕터 역할도 겸하고 있어 경제적 측면 등의 이점을 가지고 있다.

또한 본 연구에서 컨버터의 스위칭 회로는 동작이 안정하고 제어가 용이한 불안정 멀티바이브레이터(Timer IC 555 이용)를 구성하여 스위칭 소자 Q를 동작시켰다. 그림 3.4와 같이 적용된 Timer IC 555는 Q가 low 이면 트랜지스터가 차단되고 콘덴서는  $R_A + R_B$ 의 합성저항을 통해서 충전된다. 그러므로 충전 시정수는  $(R_A + R_B)C$ 로 된다. 콘덴서가 충전하면 문턱전압이 증가하여  $+2 V_{cc}/3$ 까지 된다. 그러면 위쪽의 비교기가 high 출력을 갖고, 이것이 플립플롭을 세트시킨다. Q가 high로 되면 트랜지스터가 포화되고 7번 핀이 접지된다. 콘덴서는  $R_B$ 를 통해서 방전한다. 따라서 시정수는  $R_B C$ 가 된다. 콘덴서 전압이  $+V_{cc}/3$  약간 아래로 떨어지면 아래쪽 비교기는 high 출력을 갖고 플립플롭을 리셋시킨다.



(a) Timer IC 555 (b) Timer IC 555의 등가회로

그림 3.4 비안정 멀티바이브레이터의 구성

Fig. 3.4 Configuration of non-stability multivibrator

충전과 방전 방정식으로 출력주파수를 구할 수 있는데 출력주파수는

$$f = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C} \quad [\text{Hz}] \quad (3.4)$$

이고, 듀티 사이클은

$$D = \frac{W}{T} \times 100 [\%] = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B} \times 100 [\%] \quad (3.5)$$

로 된다. 이렇게 얻어지는 구형파 펄스로 트랜지스터 회로를 구동시키게 된다. 본 연구에서는 리플 함유율, 소비전력, 중성자 및 감마선 검출기에 전원회로의 영향 등을 고려하여 스위칭 주파수를 약 30 [Hz]로 설계하였다. 한편 방사선 검출기에 인가되는 고전압은 일정하게 유지되어야 하는

데, 주위 온도변화에 따른 소자의 특성변화, 검출기와의 접속부에서 발생 가능한 누설전류 등에 의해 전압변동이 발생할 수 있다. 따라서 고전압 공급장치에서 일정한 전압을 유지하도록 그림 3.5와 같은 구성의 전압 안정회로를 설계하였다.

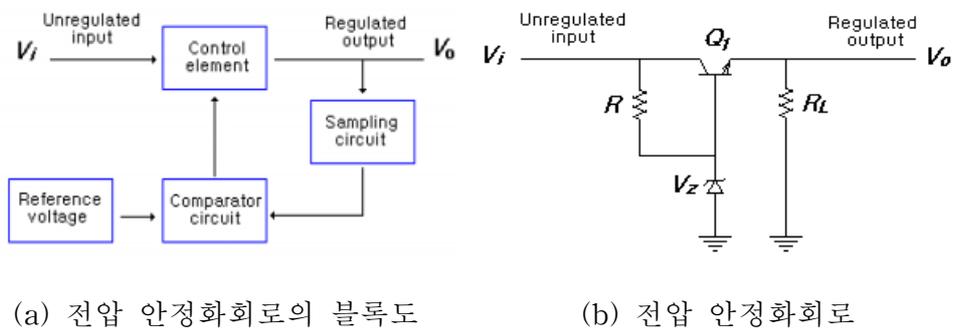


그림 3.5 전압 안정화 회로의 개략도

Fig. 3.5 Schematic of a voltage stabilization circuit

직렬요소는 출력에 이르는 입력전압의 양을 제어하고 출력전압은 기준 전압과 비교하기 위해 피드백전압을 제공하는 회로에 의해 샘플된다. 즉, 출력전압이 증가하면 비교기는 제어신호를 내보내서 직렬제어요소가 출력 전압의 양을 감소시키도록 하고 출력전압이 감소하면 비교기는 제어신호를 내보내서 직렬제어요소가 출력전압의 양을 증가시켜 출력전압을 유지하게 한다. 트랜지스터  $Q_1$ 은 직렬제어요소이고, 제너 다이오드  $D_z$ 는 기준전압을 제공한다. 조정동작을 설명하면 출력전압이 감소하면, 증가된 베이스-에미터 전압은 트랜지스터  $Q_1$ 을 도통이 더 잘되도록 하고, 출력전압이 증가하면, 감소된 베이스-에미터 전압은 트랜지스터  $Q_1$ 을 도통이 잘 되지 않도록 한다. 이것에 의하여 출력전압이 감소하여 일정한 출력을

유지한다. 본 연구에서는 그림 3.6과 같이 연산증폭기를 이용하여 직렬형 전압 안정화 회로를 설계하였다. 연산증폭기는 제너 다이오드의 기준전압과 저항  $R_2$  과  $R_3$  의 감지로부터 얻은 피드백전압을 비교한다. 출력전압이 변하면,  $Q_1$  의 도통에 의해 출력전압을 일정하게 유지하도록 제어한다. 그리고 출력전압은 다음 식으로부터 구할 수 있다<sup>[14]</sup>.

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) V_z \quad [\text{V}] \quad (3.6)$$

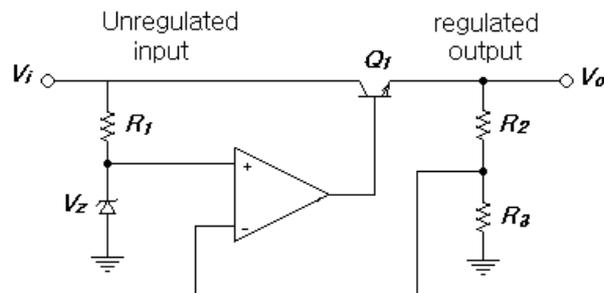


그림 3.6 직렬형 전압 안정화 회로

Fig. 3.6 Series voltage stabilization circuit

고전압 공급장치의 제어를 위해서는 고분해능을 가지는 12 bit D/A 컨버터(AD 664)를 사용하여 중앙컴퓨터에서 방사선 펄스의 계측과 동시에 고전압 공급장치의 정밀제어가 가능하도록 구성하였다. 최종적으로 고전압 공급장치는 그림 3.7과 같이 구성된다.

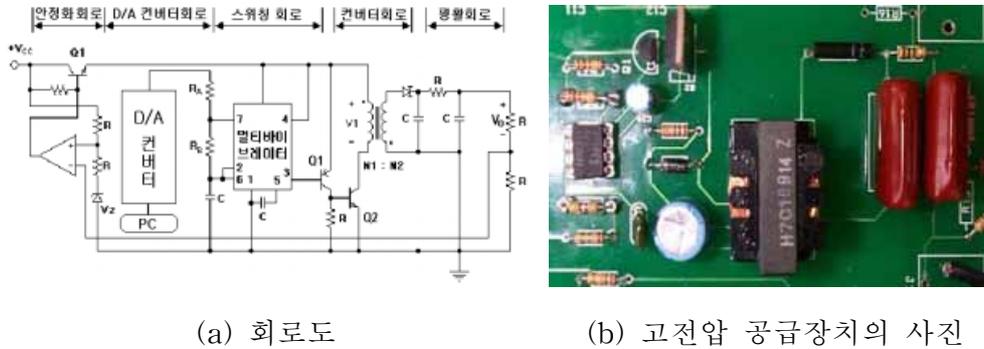


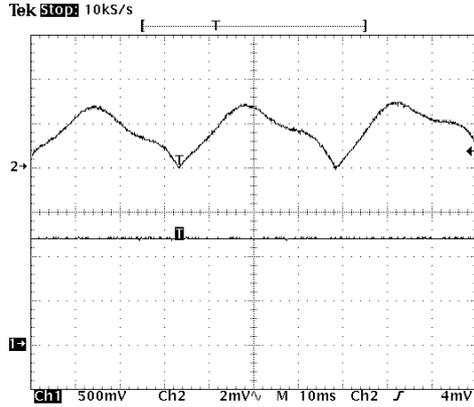
그림 3.7 고전압 공급장치의 구성

Fig. 3.7 Configuration of a High voltage power supply

본 연구에서는 플라이백 컨버터 방식을 적용하여 직렬형 전압 안정화 회로, D/A 컨버터 회로를 포함한 고전압 공급장치를 설계·제작하였다.

비안정 멀티바이브레이터의 출력에서 얻어지는 펄스를 반전시켜 충분한 전류가 파워 트랜지스터  $Q_2$ 의 베이스에 인가되도록 하여, 승압용 트랜스의 1차측에 흐르는 전류를 ON-OFF 함으로써 설계된 권수비( $N_1/N_2$ ) 만큼 승압된 전압이 2차측 권선에 유기된다. 이 전압은 약 30 [Hz]의 교류원 이므로 정류회로와 평활회로를 거쳐 안정한 직류 고전압을 얻게된다. 본 회로에서는 350 ~ 1,500 [V]까지 제어가 가능하다. 이렇게 얻어진 고전압 출력은 다시 피드백 회로를 거쳐 비교기에 입력되어 설정전압과 비교하여 출력전압을 안정화시킨다.

시제작한 고전압 공급장치에서 출력전압을 1,200 [V]로 설정하였을 때, 고압출력단자에서 검출한 파형의 예를 그림 3.8에 나타내었다.



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

그림 3.8 고전압 공급장치의 출력파형

Fig. 3.8 Output waveforms of the H.V power supply

그림 3.8의 파형에서 알 수 있듯이 1,200 [V]의 직류 전압에는 약 30 [Hz], 1.4 [mV]의 리플전압이 포함되어 있다. 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  $C-R$  고역 통과 필터를 구성함으로써 신뢰성을 향상시켰다. 최종적으로 고전압 공급장치의 출력전압은 12 bit의 D/A 컨버터(AD 664)를 사용하여 프로그래머블 타입으로 설계·제작함으로써 중앙컴퓨터에서 1500 [V]까지 제어가 가능하도록 하였다.

### 3.2 중성자 검출회로

중성자 검출회로에서 열중성자 계수관으로 널리 쓰이는  $^3\text{He}$  가스 비례 계수관의 측정원리는  $^3\text{He}$ 와 열중성자의 반응으로 발생하는 양성자(Proton : 571 [keV]), 삼중수소핵 (Triton : 191 [keV])의 에너지를 측정한다. 즉,  $^3\text{He}$ 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<sup>[15]</sup>. 이 때에 검출기 내부에서는 가스증배(gas multiplication) 현상에 의해 양이온 및 전자의 전하를 증폭한다. 가스증배에 의한 전하량은 입사된 중성자의 에너지에 비례한다. 이들 전자나 양이온이 수집되는 시간은 중성자 검출회로의 설계에 있어서 회로 시정수 결정에 중요한 파라미터이다.

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 이온 수집시간은

$$t = \frac{(b^2 - a^2) \cdot p \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\mu V_o} \quad [\text{s}] \quad (3.7)$$

여기서,  $p$  : 충전가스의 압력

$\mu$  : 전자의 이동도(입자의 평균속도/전기장의 세기)

$V_o$  : 검출기에 인가한 전압

$b$  : 음극벽까지의 검출기 반지름

$a$  : 양극도선의 굵기

와 같이 나타낼 수 있다.

전하수집시간은 방사선 검출회로의 시정수 결정에 중요한 요소이며, 회로의 시정수는 검출기의 불감시간을 좌우하는 요소가 된다. 다시 말해서 비례계수관에 발생하는 펄스의 형태는 양이온 수집시간이 모두 끝나게 되면 전하수집은 끝이 나고 그 크기가 최대가 되지만 검출기 불감시간이 대단히 커지게 되므로 다음 펄스가 발생하더라도 신호가 검출되지 않을 수 있다. 따라서 전자 수집이 끝나는 시점에서 회로 시정수에 의해 전압이 방전되도록 하여 검출회로의 불감시간이 최소가 되도록 하여야 한다.

앞에서도 언급했듯이 회로의 시정수를 결정하는 것은 검출기 자체의 정전용량과 검출회로의 입력임피던스에 따라 결정된다. 시정수 결정을 위해서 그림 3.9와 같은 회로를 구성하고 저항 및 콘덴서의 값을 변화시키면서 적절한 시정수를 선정하였다. 그림 3.9와 같이 고전압 공급장치와 비례계수관 사이에 저주파 통과 필터를 겸하는 RC 적분회로를 구성하였고, 이후 증폭기 앞단에는 고주파 통과 필터 역할을 병행하는 CR 미분회로를 구성하였다.

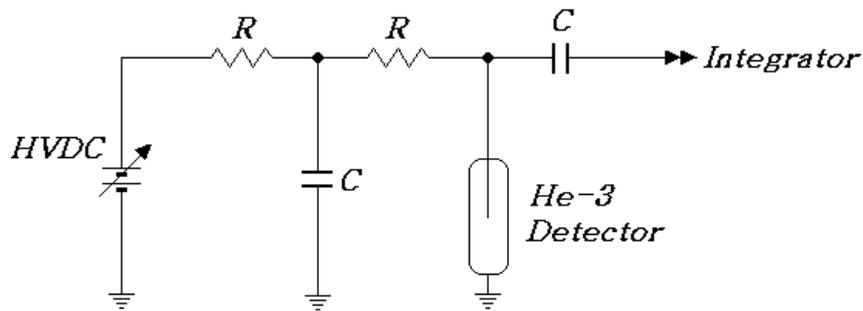


그림 3.9 시정수 결정회로의 개략도

Fig. 3.9 Schematic of a time constant decision circuit

비례계수관에서 열중성자를 검출하기 위해서는 900 ~ 1200 [V]의 직류 고전압이 인가되는데, 이 때 검출기 양극도선의 요철부분에서 코로나와 같은 국부방전이 발생할 수 있다. 이러한 국부방전의 발생으로 검출기내에 공급되는 전기장이 불안정하게 되어 검출신호를 왜곡시킬 수 있다. 게다가 국부방전의 주파수 범위는 고주파 성분을 포함하기 때문에 검출신호에 잡음으로 작용하게 된다. 따라서 그림 3.9와 같이 고전압이 인가되는 앞단에 고주파 필터 역할의  $RC$  적분회로를 첨가하여 국부방전에 의한 영향을 방지할 수 있다.

검출기에서 감지되는 방사선 펄스는 직류 고전압에 중첩된 형태이므로 검출회로에 그대로 유입될 경우에는 전자회로를 파손시키는 결과를 초래한다. 따라서 방사선 펄스만이 검출회로에 전달되도록 고주파 통과 필터의 역할을 병행하는  $CR$  미분회로를 구성하였다. 이 때 검출기의 불감시간을 고려하여 회로의 시정수는 수 [ $\mu s$ ]가 되도록 설계하였다. 만일 회로의 시정수가 너무 길게 되면 방사선 펄스의 검출에 있어서 손실이 많아지게 되는 단점이 있다. 또한 시정수의 결정에 있어서 영향을 미치는 검출기의 특성을 고려하여 검출기가 달라질 경우 시정수 조정이 가능하도록 설계하였다. 검출기로부터 전달되는 방사선 펄스는 고주파 통과 필터 역할을 하는 미분회로를 거치게 되므로 이 신호 펄스를 원래의 검출신호로 변환하기 위해서는 적분기가 필요하다. 비례계수관을 사용하는 경우 대부분  $CR-RC$  또는 가우스 함수의 형태를 갖는  $CR-(RC)^n$  회로를 사용하지만<sup>[16]</sup>, 본 연구에서는 수동성 적분기보다 성능이 우수한 능동성 적분기를 사용함으로써 방사선 펄스의 검출성능을 향상시켰다.

능동성 적분기는 그림 3.10과 같이 연산증폭기로 구성되며, 회로의 시정수를 고려하여 저항과 콘덴서의 값을 선정하였다.

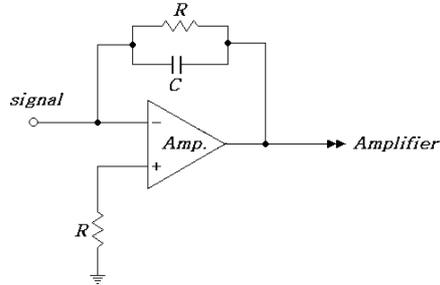


그림 3.10 능동성 적분기

Fig. 3.10 Active integrator

본 연구에서 구성한 중성자 검출회로는 그림 3.11과 같이  $CR-RC$  회로망으로 입력에 대한 출력 응답특성을 전달함수로써 해석할 수 있다.

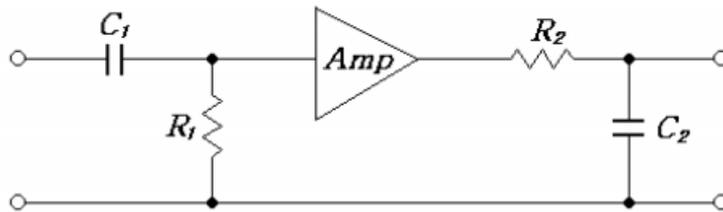


그림 3.11  $CR-RC$  회로망

Fig 3.11  $CR-RC$  network

입력신호 펄스에 대한 응답 특성을 살펴보기 위해 각 회로망의 전달함수를 구해보면 먼저  $CR$  회로망의 전달함수는

$$\frac{R_1}{(1/sC_1) + R_1} = \frac{sR_1C_1}{1 + sC_1R_1} \quad (3.8)$$

와 같으며  $RC$  회로망에 대한 전달함수는

$$\frac{(1/sC_2)}{(1/sC_2)+R_2} = \frac{1}{1+sC_2R_2} \quad (3.9)$$

로 표현된다. 그러므로 전체 시스템의  $CR-RC$  회로망인 2차 시스템의 전달함수는

$$\frac{sR_1C_1}{1+sC_1R_1} \times \frac{1}{1+sC_2R_2} = \frac{sR_1C_1}{(1+sC_1R_1)(1+sC_2R_2)} \quad (3.10)$$

로 표현되게 된다. 1차 시스템의 응답특성은 그림 3.12의 (a)와 같이 감쇠 시간이 무한대의 값을 가지는 것이 아닌 유한의 감쇠시간을 가지는 입력에 대해서는 부족진동이 없는 단순한 지수함수로서 일정한 감소를 나타내지만  $CR-RC$  회로망을 거친 2차 시스템의 출력응답은 단극성(monopolar)을 나타내지 않고 그림 3.12의 (b)와 같이 영점과 교차하거나 부족진동(undershoot)을 나타내게 되고, 그 후 시스템의 감쇠 시간에 따라 다시 영점으로 되돌아가게 된다<sup>[17]</sup>.

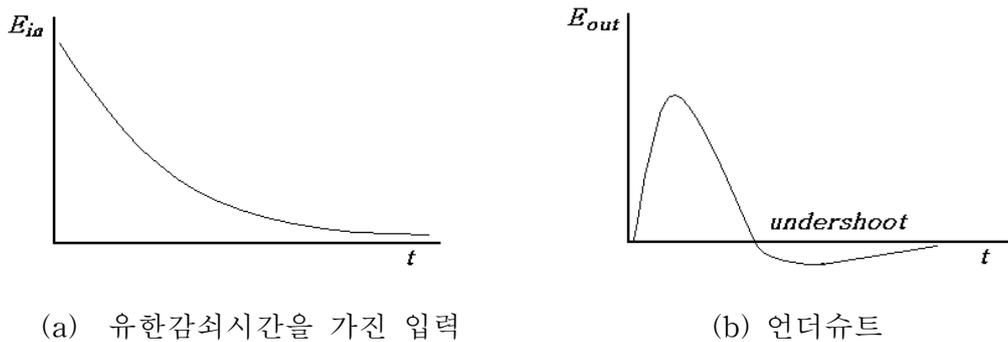


그림 3.12  $CR-RC$  회로망 응답특성

Fig. 3.12 Response characteristic of  $CR-RC$  network

시스템의 감쇠시간은 대개 수 ~ 수십  $[\mu s]$  정도로 긴 감쇠시간을 가지므로 부족진동은 이 시간 동안 지속되게 된다. 그러므로 부족진동이 이루어지고 있는 동안 신호펄스가 발생하게 되면 부족진동 성분만큼 오차가 발생하게 된다. 즉,  $CR-RC$  회로망의 전달함수 분모에 두 개의 극(poles)을 가지고 있으므로 단순한 지수함수로써 감쇠하는 것이 불가능하게 되어 과도상태의 부족진동이 발생하게 된다.

본 연구에서는 부족진동에 의한 오차를 소거시켜주기 위하여 그림 3.13 과 같이 증폭회로에 폴-제로(pole-zero)회로를 부가하여 전달함수의 분모에 극을 소거함으로써 부족진동이 없는 단순한 지수함수의 출력신호가 얻어지도록 하였다.

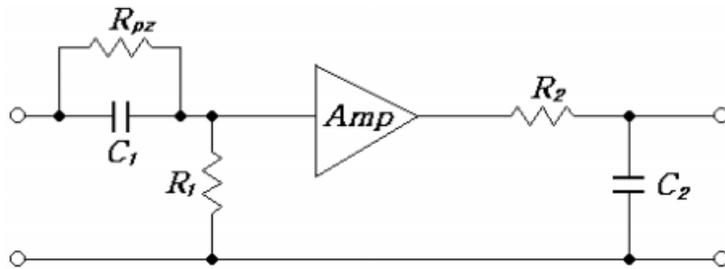


그림 3.13 폴-제로 소거회로

Fig. 3.13 Pole-zero elimination circuit

폴-제로 회로를 추가한  $CR-RC$  회로망의 전달함수는

$$\frac{R_1}{(R_{pz}/1 + sR_{pz}C_1) + R_1} \cdot \frac{1}{1 + sC_2R_2} \quad (3.11)$$

$$= \frac{R_1(1 + sR_{pz}C_1)}{R_{pz} + R_1(1 + sR_{pz}C_1)} \cdot \frac{1}{(1 + sC_2R_2)} \quad (3.12)$$

로 구해지며 만일  $R_{p2}C_1 = R_2C_2$  조건이 되어지면 분모의 극 하나가 소거됨으로 부족진동이 없는 단순한 지수함수의 출력신호가 얻어지게 된다.

최종적으로 구성된 중성자 검출회로는 비례계수관을 통해 검출되는 방사선 신호가 수 mV로 대단히 작기 때문에 안정된 신호를 검출하기 위해서는 증폭회로가 필요하다. 본 연구에서는 증폭회로의 이득을 60 [dB]가 되도록 구성하여 최종적으로 검출되는 신호의 크기는 수 [V] 정도가 되도록 하였다. 60 [dB]의 이득을 얻기 위해서는 1,000배의 증폭도가 필요하다. 따라서 단일의 연산증폭기만으로는 실현이 불가능하며 주파수대역을 좁히지 않기 위하여 3단의 다단 증폭회로를 구성하여 최종적으로 구성된 회로는 그림 3.14와 같다.

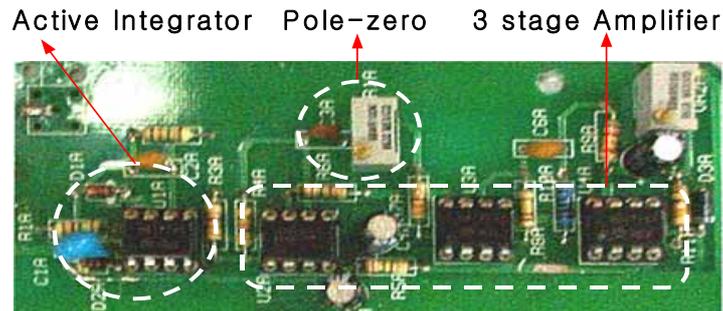
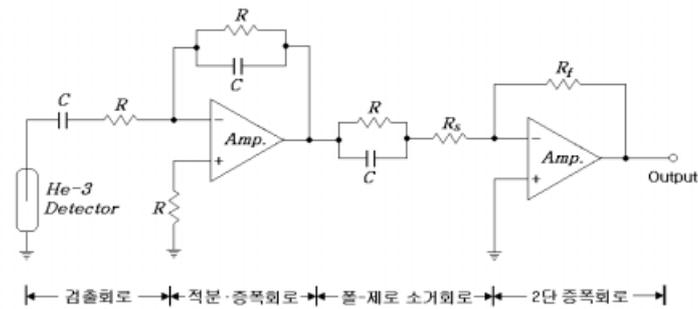


그림 3.14 중성자 검출회로

Fig. 3.14 Detection circuit for neutrons

중성자 검출회로는 직류 고전압전원에 포함된 리플전압 제거를 위한 수동성 필터, 능동성 적분증폭회로, 3단 증폭회로 및 폴-제로 회로로 구성되어 있다.

본 연구에서 설계한 중성자 검출회로를 제작하고 주파수 대역과 중성자에 의한 방사선 검출특성을 평가하였다.

그림 3.15에 나타낸 바와 같이 주파수 응답특성은 상한 300 [kHz]로 우수한 응답특성을 나타내었으며, 증폭회로는 3단으로 구성하여 주파수 대역의 감소 없이 60 [dB]의 증폭도를 실현하였다.

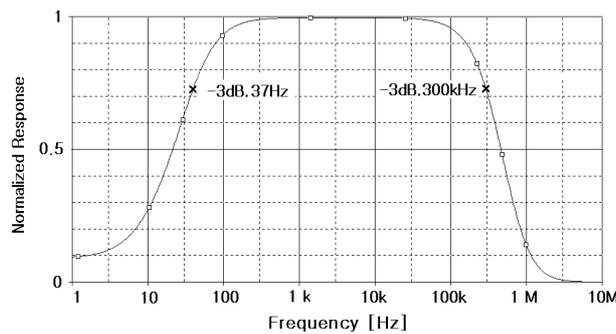


그림 3.15 중성자 검출회로의 주파수 특성

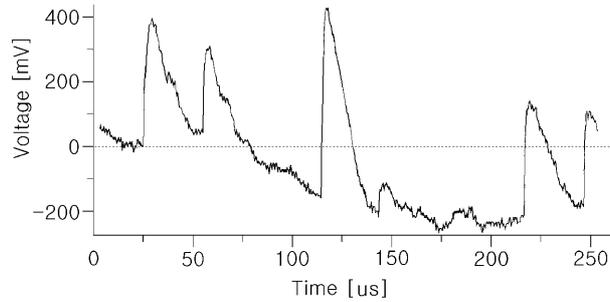
Fig. 3.15 Bandwidth of the neutron detecting circuit

그림 3.16은 중성자에 의한 검출 파형의 예를 나타낸 것으로 미소 방사선 펄스가 필터, 적분회로, 3단 증폭회로 및 폴-제로 회로를 거쳐 정확히 검출하고 있음을 알 수 있다.

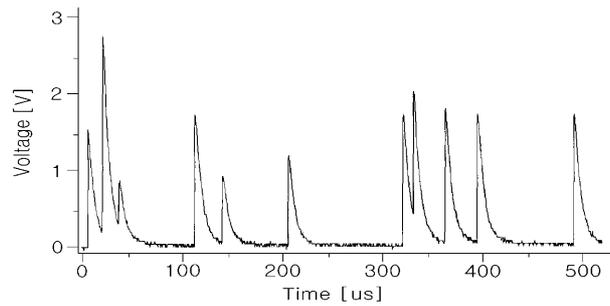
검출 및 증폭된 펄스는 입력펄스와 전치증폭기에서의 감쇠시간 관계로부터 그림 3.16의 (a)와 같이 파미의 감쇠 후 영점에 교차하거나, 영점이하로 떨어지는 부족진동(undershoot)이 생기게 되고, 이 부분에 다음의 펄스가 도래하면 펄스의 진폭에 영향을 주어 오차를 나타내게 된다. 따라서 증폭회로에 폴-

제로(pole-zero)회로를 부가하여 그림 3.16의 (b)와 같이 부족진동 없는 단순한 지수함수의 출력신호가 되도록 하였다. 또한 폴-제로 회로의 시정수를 최적화하여 노이즈나 언더슈트(undershoot) 없이 깨끗한 파형이 검출되었다.

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



(a) 폴-제로 회로 입력 파형



(b) 폴-제로 회로 출력 파형

그림 3.16 중성자 측정 파형

Fig. 3.16 Typical waveforms of neutrons

### 3.3 감마선 검출회로

감마선 검출기로 이용되는 G-M 검출기는 그 기본적 검출원리가 비례 계수관과 같이 가스증배를 이용하지만 가스증배가 일어나기 시작하면 초기에 생성된 이온쌍(ion pair)과는 상관없이 항상  $10^9 \sim 10^{10}$  개의 이온쌍을 생성하는 가이저 방전을 일으킨다<sup>[18]</sup>.

구체적으로 G-M 검출기는 감마선에 의해 생성된 전자가 G-M 검출기에 걸려있는 고전계에 의해서 전자사태(electron avalanche)를 일으키고 이 전자사태는 다시 다른 전자사태를 발생시킨다. 즉, 자발증배연결반응(self propagation chain reaction)이라는 가이저 방전을 일으킨다. 가이저 방전이 개시된 최초의 이온쌍 수의 다소에도 불구하고 G-M 검출기의 모든 펄스는 같은 진폭을 나타낸다. 그리고 가이저 방전은 어떤 한계점에 도달해야만 연쇄반응이 종료된다. 이때 생성된 출력펄스의 진폭은 수 [V]에 이른다. 그림 3.17은 초기에 생성된 전자가 가이저 방전을 일으키는 메카니즘을 나타낸 것이다.

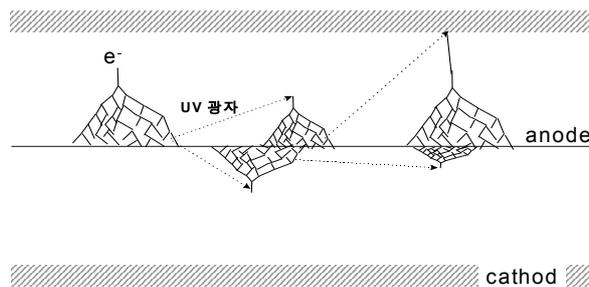


그림 3.17 가이저 방전의 메카니즘

Fig. 3.17 Mechanism of a Geiger discharge

G-M 검출기에서 발생하는 펄스의 크기가 수 [V]에 이른다는 것은 감마선 검출회로를 중성자 검출회로와는 달리 매우 간단하게 만드는 이점이 있다. 일반적인 G-M 검출기의 펄스 상승시간은 [ $\mu\text{s}$ ] 정도로 최초의 전자 사태가 완전히 가이거 방전까지 전파되는데 필요한 시간은 보통 1 [ $\mu\text{s}$ ] 이하이다. 따라서 방전으로부터 전자의 수집시간은 1 [ $\mu\text{s}$ ] 내에 이루어지게 된다. 수집회로의 시정수가 무한대인 경우에 출력펄스가 최대치에 도달하는 데는 이온수집시간(수 [ms])만큼 걸린다<sup>[19]</sup>.

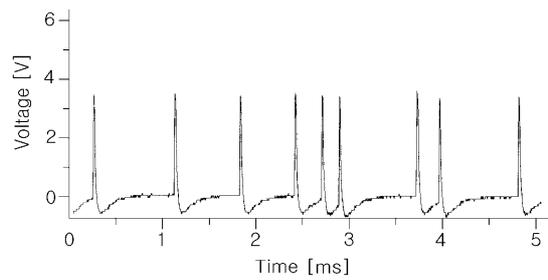
본 연구에서는 최대 계수율을 고려하여 펄스의 느린 상승 부분을 제거하고 빠른 상승 부분만 남게 하였다. 이로 인하여 진폭의 상당부분을 잃게 되지만 가이거 방전에서 발생된 전하의 양은 아주 큰 펄스를 발생하므로 많은 진폭의 손실은 피할 수 있다. 또한 모든 가이거 방전은 크기와 시간 프로파일(time profile)이 거의 일정하기 때문에 전체 펄스는 성형과정에 의해서 감쇠되고 그 출력펄스는 거의 일정한 진폭이 됨을 알 수 있다.

G-M 검출기의 가장 큰 단점은 불감시간이 크다는 것이다. 양이온이 반지름 방향의 바깥쪽으로 향해 유동됨에 따라 공간전하는 보다 광범위하게 확산되고 증배영역내의 전기장 초기 값으로 되돌아가기 시작한다. 양이온이 어느 정도의 거리를 이동한 후에 전기장은 다음 가이거 방전을 일으킬 수 있도록 초기 값을 회복하게 된다. 따라서 검출기내에 걸린 고전계가 초기의 값을 회복할 때까지는 가이거 방전은 일어나지 않게 된다. 이 시간 동안 검출기는 불감상태가 되고 이 사이에 일어나는 어떠한 방사선의 상호작용도 신호로 나타나지 않게 된다. G-M 검출기는 이 시간을 불감시간(dead time)으로 정의한다. 대부분의 G-M 검출기는 50 ~ 100 [ $\mu\text{s}$ ]의 불감시간을 갖는데 본 연구에서 사용하는 G-M 검출기 또한 75 [ $\mu\text{s}$ ]의 불감시간을 가지고 있다. 따라서 감마선 검출회로의 시정수도 되도록 이 시간을 넘지 않도록 설계를 하여야 하며, 회로내의 시정수를 너무 짧게 하

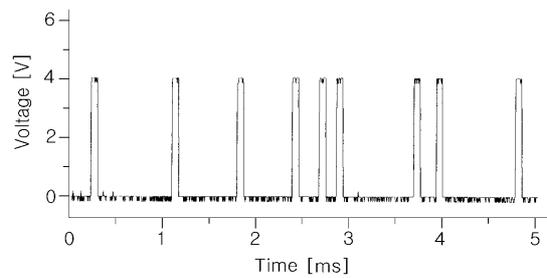


또한 갑작스런 리셋을 피하기 위하여 리셋 단자는 공급전원에 직접 연결하여야 한다. 이 회로의 장점으로서는 출력이 구형파 펄스의 형태로 얻어지기 때문에 계수화 과정에서도 별도의 계수회로가 불필요하다는 것이다.

감마선 검출기에 의해 측정된 펄스 파형의 예를 그림 3.19에 나타내었다. 트랜지스터 및 연산증폭기로 구성된 회로 모두 검출된 신호가 신호변환회로를 거쳐 증폭되고, 연산증폭기로 구성된 경우 파형이 정형되어 출력됨을 알 수 있으며, 펄스폭을 50 [ $\mu$ s]로 조절할 경우 10,000 [pulse/sec]를 검출할 수 있다.



(a) 검출 파형



(b) 정형된 파형

그림 3.19 감마선 측정 파형

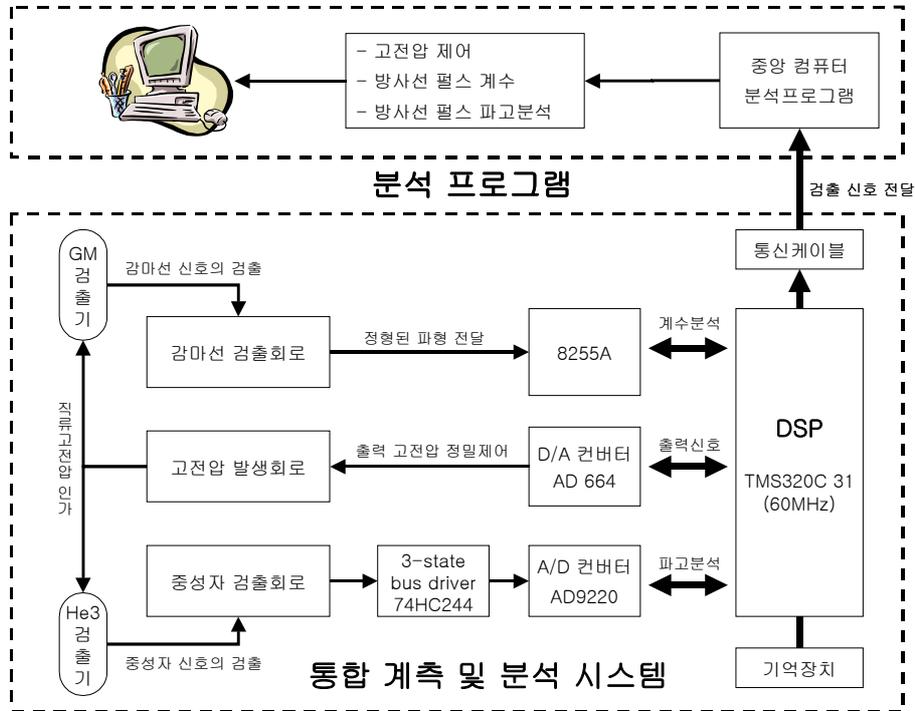
Fig. 3.19 Typical waveforms of gamma-rays

### 3.4 통합 계측 및 분석 시스템의 구성

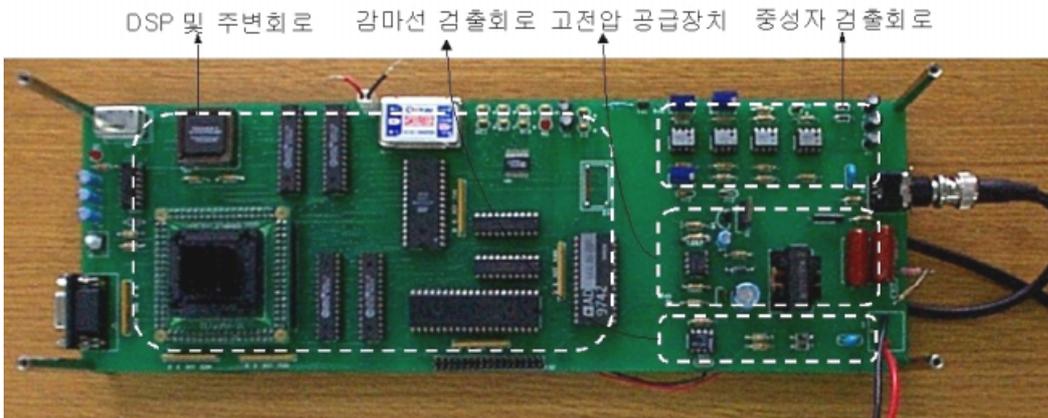
중성자 및 감마선 검출회로, 고전압 공급장치를 종합하여 PC기반의 통합 계측 및 분석 시스템을 제작하였다. 신호처리를 위한 프로세서로는 고속의 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하였으며, PC기반으로 컴퓨터의 병렬 포트에 연결된다.

이제까지 방사선 펄스의 계측 및 분석에 있어서는 단순히 계수에 의존한 방식이 주류를 이루고 있다. 이 방식은 감마선과 같이 검출기 자체의 신호가 수 [V] 정도로 크고 일정한 경우에는 대단히 유용한 방법이다. 그러나 중성자와 같이 검출신호의 크기가 미약하고, 크기가 일정하지 않은 경우에는 상당한 오차를 포함하게 된다. 특히 중성자 검출회로는 외부 노이즈의 영향을 받기 쉬우며, 고전압 공급장치에 포함되는 리플 전압도 중성자 신호와 같이 처리되기 때문에 계수에 의한 분석은 항상 오차를 포함하게 된다.

따라서 본 연구에서는 그림 3.20과 같이 DSP를 기본으로 한 방사선 펄스 검출 시스템을 구성하여 방사선 신호의 크기별 누적 분포를 나타냄으로써 계수는 물론 신호의 파고분석이 가능하도록 구성하였다. 또한 이 시스템은 PC에 연결되어 계측, 분석, 저장이 이루어지므로 보다 효율적인 분석이 가능하다.



(a) 시스템 구성도



(b) 시스템 사진

그림 3.20 통합 계측 및 분석 시스템

Fig. 3.20 Measurement and analysis system

검출된 감마선 신호는 파형정형회로를 거쳐 정형된 출력 파형이 분석 시스템의 8255A의 입력포트에 입력되게 된다. 입력된 펄스는 DSP의 counting routine에 따라 감마선의 펄스가 계수되고, 이때 계수된 값은 분석 시스템의 RAM에 저장되게 된다. 이후 중앙컴퓨터의 분석 프로그램으로부터 감마계수값 취득명령이 DSP에 보내어지면 DSP는 RAM에 저장된 감마선 펄스의 계수 데이터를 PC의 병렬포트를 통해 전송하게 된다. 전송된 데이터는 분석 프로그램에 의해 화면에 표시되고, 계수에 의해 감마선의 에너지 분포 및 각종 정보를 분석할 수 있다<sup>[20]</sup>.

중성자 검출회로에서는 출력되는 파형의 신호가 미약하고, 그 크기 또한 일정하지 않기 때문에 감마선과 같이 단순히 계수에 의한 분석은 한계를 가지게 된다. 또한 중성자 검출에 있어서 검출기 및 검출회로의 특성 때문에 외부의 잡음 또는 고전압 공급장치에 포함되는 리플전압 등에 의해 계수오차를 유발시키게 되며, 이 오차는 계수회로에서 계수로 판단하여 계수에 포함하게 된다. 따라서 중성자 신호는 단순히 계수만으로 분석하게 되면 방사선 신호와 오차를 구분할 수 없으며, 오차에 의한 것도 방사선 펄스와 같이 취급 될 수 있다는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 중성자 신호에 대한 파고값을 분석하여 방사선 신호와 오차에 의한 신호를 구분해 주는 것이 필요하다. 뿐만 아니라 방사선 펄스의 파고값을 검출하면 검출신호의 에너지 분포 등도 분석할 수 있다는 장점이 있다.

초기의 파고분석기는 그림 3.21과 같이 미분기에 의해 파고값을 검출하고, 파고의 발생시점에서 샘플·홀드회로에 트리거 신호를 주어 이때의 값을 파고값으로 저장하는 방법을 사용하였다. 이 방법에서는 하드웨어의 구조가 복잡하고, 주파수가 높아지면 미분기 자체에서 제대로 된 파고시점 검출이 어렵다는 단점이 있다.

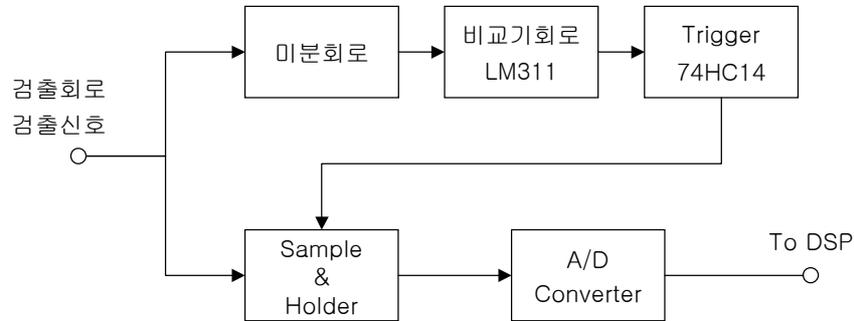


그림 3.21 파고검출의 블록도

Fig. 3.21 Block diagram of a pulse height detection

따라서 본 연구에서는 고속의 A/D 컨버터와 DSP를 적용하여 소프트웨어적인 파고검출 방법을 사용하여 파고분석기를 구성하였으며, 계수회로와 더불어 보다 정확한 분석이 가능하도록 하였다. 다중 파고분석기는 중성자 검출회로에서 출력된 신호의 파고점을 찾기 위하여 고속의 샘플링을 가지는 A/D컨버터(AD9220, 12 bit, 100 [ns/s])를 사용하였다. 중성자 검출회로에서 검출된 펄스의 파고지속시간은 수  $\mu\text{s}$  정도이므로 샘플링 시간이 100 [ns]이면 파고점 검출에 있어 충분한 시간을 갖는다. A/D 컨버터에서 변환된 데이터는 DSP에 입력되고, 그림 3.22의 파고분석 흐름도에 의해 파고값을 분석하게 된다. 검출된 파고값은 DSP를 통해 RAM의 해당채널에 누적되고, 파고의 누적분포는 중앙컴퓨터로 전달되어 분석 프로그램에 의해 파고분포 및 중성자 펄스의 계수 값이 표현되어, 보다 효율적인 분석이 가능해진다.

분석 프로그램은 그림 3.23의 계통으로 구성되며 파고분석, 계수 및 고전압 공급장치의 제어가 가능하다. 분석 프로그램 개발환경은 델파이 4.0을 이용하였으며<sup>[21],[22]</sup>, 프로그램 상에서 방사선 펄스의 검출과 분석에 관한 모든 명령과 제어를 가능하도록 구현하였다.

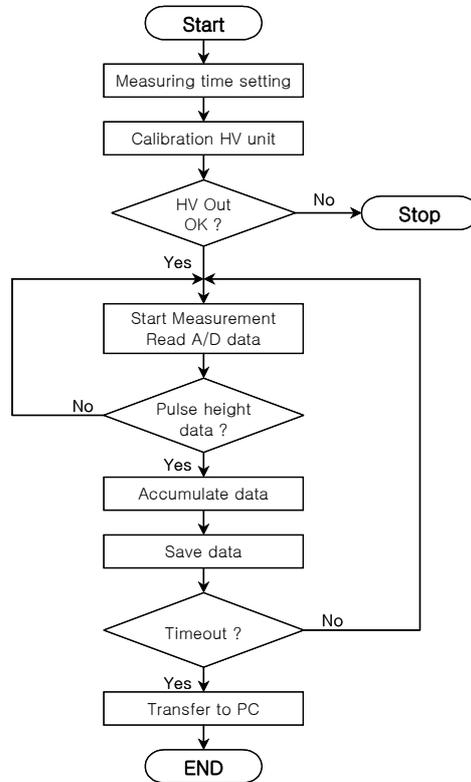


그림 3.22 파고분석의 흐름도

Fig. 3.22 Flowchart of the pulse height analysis

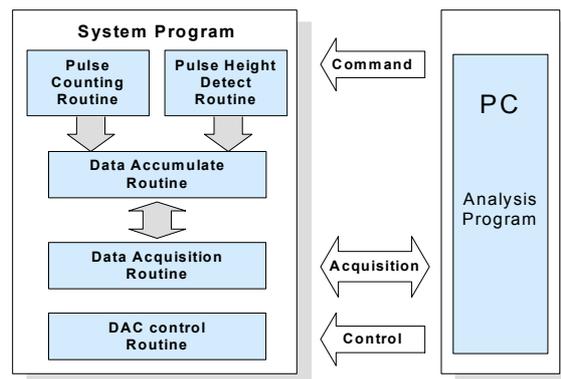


그림 3.23 통합 시스템과 분석 프로그램의 연결

Fig. 3.23 Connection of integrated system and analysis program

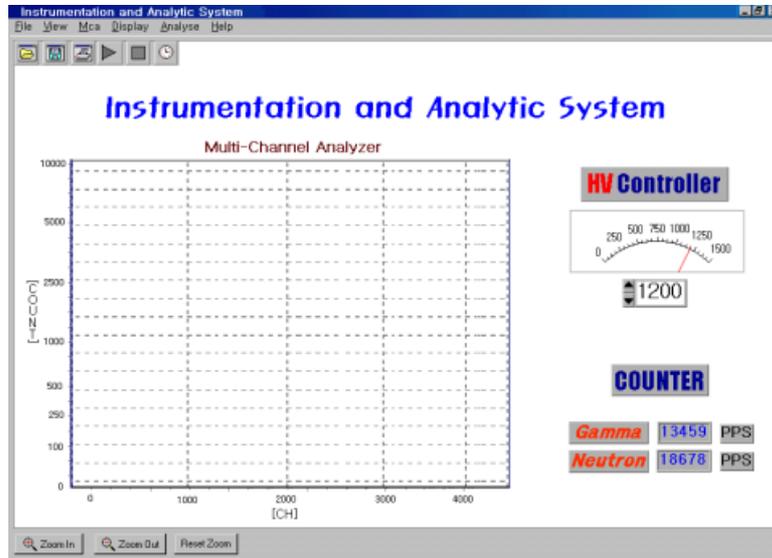


그림 3.24 분석 프로그램의 주화면

Fig. 3.24 Main screen of the analysis program

그림 3.24는 분석 프로그램의 주화면으로 프로그램은 측정에 필요한 아이콘 및 분석에 사용되는 측정값 표시화면을 시각적(GUI: Graphical User Interface)으로 구성하여 계측과 동시에 분석이 가능하다. 화면의 구성은 상단에 메뉴를 두고, 가장 기본적인 기능들은 아이콘으로 표시하였으며, 고전압 공급장치 제어부, 계수를 표시하는 카운터부, 파고분석의 표시화면으로 시각적으로 알아보기 쉽고 조작이 편리하게 구성하였다.

본 연구에서 구성한 분석 시스템과 분석 프로그램을 이용하여 시스템 특성을 살펴보았다. 먼저 분석 프로그램에서 고전압 공급장치의 출력전압을 설정하여 시스템에 출력된 AD664 전압과 고전압 공급장치에서 출력 전압 특성을 평가하였다. AD664 출력신호와 고전압 공급장치의 관계는 표 3.1과 같이 나타났으며, 1.63% 이하의 오차를 발생하므로 안정적인 제어 가능함을 확인하였다.

표 3.1 설정전압과 출력전압

Table 3.1 Setting voltage and output voltage

분석 프로그램 설정전압 [V]	AD664 출력전압 [V]	고전압 공급장치 출력전압 [V]	오 차	
			[V]	[%]
500	1.72	493	7	1.4
900	3.05	887	13	1.4
1,200	4.04	1,182	18	1.5
1,500	5.08	1,476	24	1.6

다음은 본 시스템에서 가장 중요한 역할을 하는 파고분석기의 특성 평가를 수행하였다. 파형 발생기를 사용하여 삼각파형을 발생시키고 검출회로에 입력될 때 파고분석기의 정밀도를 파악하였다. 그림 3.25는 크기가 일정한 삼각파를 입력하였을 때 파고의 누적분포를 나타내는 것으로 입력에 따른 파고검출 결과가 정확하게 일치함을 알 수 있다.

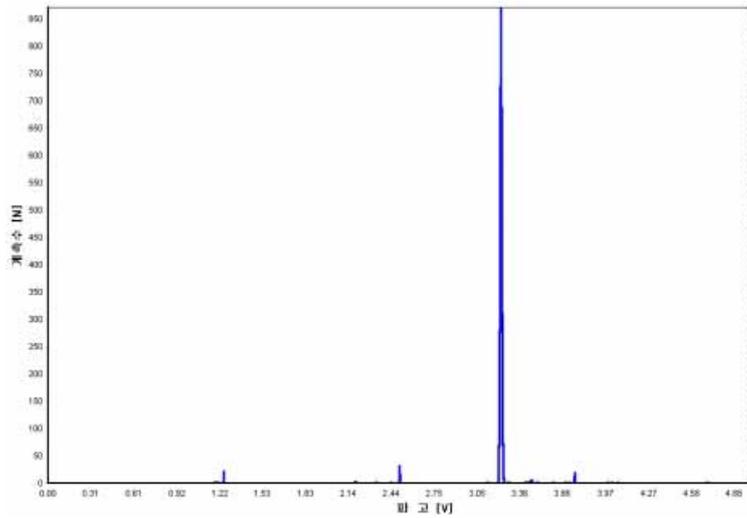


그림 3.25 파고분석의 결과

Fig. 3.25 Result of pulse height analysis

## 제 4 장 시스템 평가 및 분석

### 4.1 평가 방법

방사선 펄스 검출 시스템을 이용하여 전기재료의 특성을 평가하기 위해 그림 4.1과 같이 기본특성실험과 시편의 적용실험을 수행하였다.

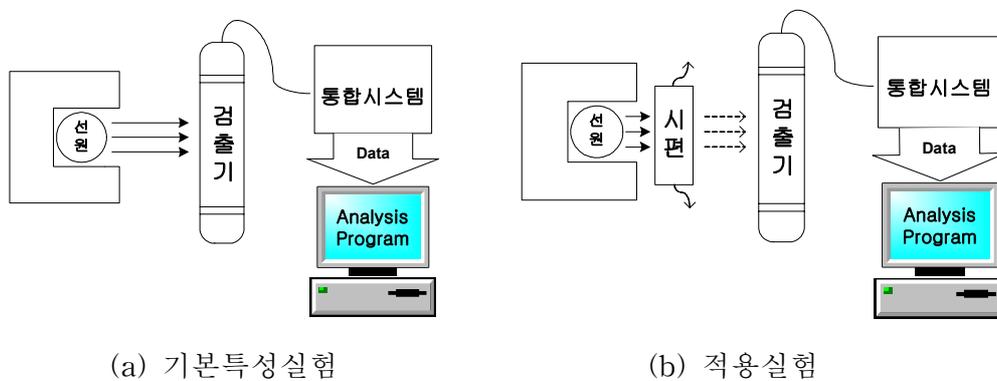


그림 4.1 실험장치의 개략도

Fig. 4.1 Schematic of experimental apparatus

기본특성실험에서는 본 연구에서 제작한 고전압 회로와 증성자, 감마선 검출회로를 통합시킨 방사선 펄스 계측 및 분석 시스템에 대하여 방사선 검출특성을 평가하였다. 이러한 기본특성실험은 계측 및 분석 시스템의 기본적인 특성을 파악하고 적용실험에 있어 평가에 기준이 된다. 또한 방사선 펄스는 거리에 따라 검출수가 달라지게 되므로 이에 따른 특성도 평가하였다.

적용실험은 방사선이 재료의 형태나 성분에 따라 투과성질이 달라지기 때문에 전기절연물에 흔히 쓰이는 폴리에틸렌과 실제에 적용되는 케이블을 일정한 크기와 두께로 시편을 제작하여 같은 조건의 환경 하에서 결함

이 있는 시편과 결함이 없는 시편으로 나누어 투과특성을 비교 평가하였다. 결함이 있는 시편에서 결함은 재료의 사용으로 인한 결함이나 자연적인 결함을 형성하는데 어려움이 있기 때문에 인위적으로 흠을 내거나 구멍을 만들어 시편에 결함을 부여하였다. 그리고 중성자가 수분과 상호작용 하는 성질을 이용하여 케이블 시편과 ZnO 피뢰기 소자의 수분함유에 대한 특성도 평가하였다.

전기절연물에 대한 결함진단에 관한 기술을 확립하기 위하여 기본특성 실험과 적용실험 결과로부터 얻어진 방사선 펄스의 계수 및 파고분포를 통해 방사선 펄스 계측 및 분석 시스템의 기본특성을 파악하였다. 이를 기준으로 시편의 투과특성 실험을 통하여 무결함 시편, 결함 시편, 수분함유 시편에 대한 방사선 검출패턴을 분석하였다. 시편에 감마선을 조사하였을 경우에는 계수에 의한 방법으로 분석하고 중성자를 조사하였을 경우에는 계수와 파고분포에 의한 방법으로 분석하였다. 또한, 물질과 방사선이 서로 상호작용 하는 성질을 적절히 이용하여 방사선 펄스 계측 및 분석 시스템을 효과적으로 사용하여 평가하였다.

## 4.2 기본특성실험

본 연구에서 제작한 방사선 펄스 계측 및 분석 시스템의 기본적인 특성을 파악하기 위하여 방사선 선원을 검출기에 직접적으로 조사하여 검출특성을 파악하였다. 감마선과 중성자에 대해서 검출특성을 파악하였으며 감마선은 계수 특성, 중성자는 계수 및 파고분포 특성을 파악하였다.

감마선 1 [μCi]를 1분 동안 조사하여 거리변화에 따른 시스템의 기본 계수특성을 표 4.1과 그림 4.2에 나타내었다.

표 4.1 거리에 따른 검출특성

<<sup>60</sup>Co 1 [μCi]>

Table 4.1 Detection characteristics with distance

측정거리 [cm]	3	6	9	12	15	18
계측수 [cpm]	3,149	1,303	759	581	461	431

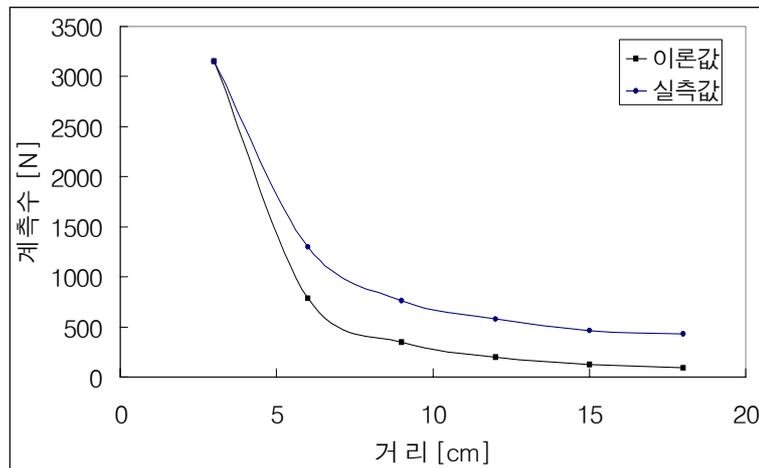


그림 4.2 거리에 따른 검출특성

Fig. 4.2 Detection characteristics with distance

표 4.2 감마선의 기본특성

<거리 : 12[cm] >

Table 4.2 Basis characteristics of gamma-rays

회 선원세기	1	2	3
<sup>60</sup> Co 70 [μCi]	12,401	12,170	12,166
평 균	12,245	표준편차	135

감마선의 거리에 따른 검출특성은 방사선 강도가 거리의 제곱에 반비례하는 이론적인 특성과 같이 적용실험에서도 유사한 결과를 나타내었다. 또한, 많은 방사선 펄스를 얻기 위해 70 [μCi]의 감마선을 조사하여 기본 검출특성의 표준편차를 구하여 검출 변화량이 표준편차 범위내에 있으면 오차로 간주하고 표준편차 범위밖에 있으면 오차가 아닌 것으로 간주한다. 즉, 표준편차를 통해 오차범위의 기준을 선정하였다.

중성자에 대해서는 4분 동안 측정하여 계수와 파고분포에 대한 검출특성을 파악하였으며 계수에 의한 특성은 표 4.3에 나타내었으며 파고분포는 그림 4.3에 나타내었다.

표 4.3 중성자의 기본특성

<거리 : 12[cm] >

Table 4.3 Basis characteristics of neutrons

회 선원세기	1	2	3
<sup>252</sup> Cf 30 [μCi]	82,679	82,145	82,453
평 균	82,425	표준편차	268

중성자의 기본특성실험에서도 검출된 방사선 펄스 계수에 대한 표준편차를 구함으로써 적용실험에 대한 오차범위의 기준을 선정하였으며 중성자의 기본적인 파고분포 패턴을 알 수 있다.

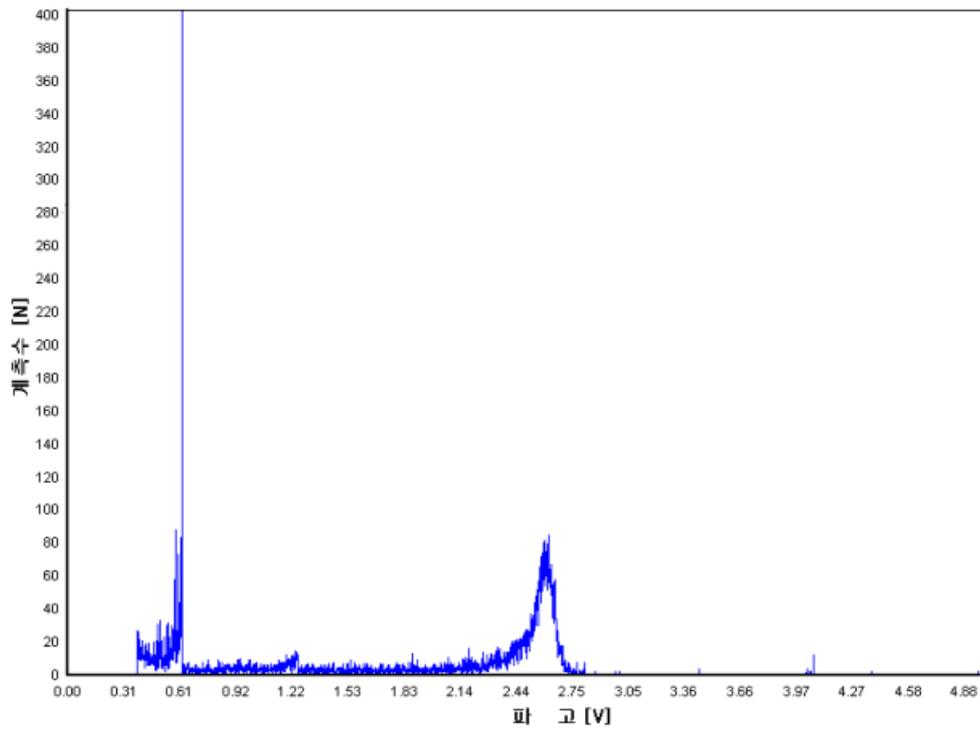


그림 4.3 중성자의 파고분포 특성

Fig. 4.3 Characteristics of P.H.A for neutrons

### 4.3 적용실험

선원과 검출기 사이에 시편을 두어 방사선을 시편에 투과시켜 투과된 방사선에 대하여 검출특성을 파악하였다. 기본검출특성을 기준으로 삼아 절연재료인 폴리에틸렌 시편을 대상으로 정상적인 폴리에틸렌 시편에 대한 검출특성과 결함이 있는 폴리에틸렌 시편의 검출특성을 비교 분석하였다. 감마선원에 대하여는 계수에 의한 분석을 하였으며 중성자에 대해서는 계수에 의한 분석과 파고분석을 동시에 비교 분석하였다. 표 4.4는 감마선원에 대한 폴리에틸렌의 검출특성을 나타낸다. 이 결과는 기본특성에 비해 검출수가 적게 나타나는데 이는 절연재료가 가지는 재료의 방사선 흡수성에 따른 방사선 감쇠 결과이다.

표 4.4 폴리에틸렌의 투과특성

<<sup>60</sup>Co 70 [μCi]>

Table 4.4 Penetration characteristics of a polyethylene

거리	결함유무	결함 (有)				결함 (無)			
		1회	2회	3회	평균	1회	2회	3회	평균
12 [cm]		9,483	9,529	9,489	9,500	9,296	9,319	9,324	9,313
24 [cm]		3,391	3,439	3,433	3,421	3,197	3,207	3,217	3,207

실험결과에서 감마선 펄스의 검출수가 큰 변화 폭은 없지만 결함이 없을 때보다 결함이 있을 때 검출수가 많아진다. 이러한 결과는 폴리에틸렌의 방사선 흡수계수가 작기 때문이다. 그리고 결함이 있을 때 검출수가 많은 이유는 인위적으로 만든 3 [mm] 홀의 결함으로 인해 절연재료의 방사선 흡수율을 낮추는 효과를 나타내었기 때문이다. 또한, 평균의 차는 기본특성에서의 표준편차보다 크게 나타나므로 오차범위가 아님을 알 수 있

다. 표 4.5는 전력용 케이블 시편에 대한 감마선의 검출특성을 나타낸다. 절연물을 포함하는 케이블 시편도 폴리에틸렌 시편과 동일한 조건으로 결함을 만들어 감마선을 조사하여 결함이 있는 시편과 없는 시편의 투과특성을 비교 평가하였다.

표 4.5 전력용 케이블의 투과특성 <<sup>60</sup>Co 70 [μCi]>

Table 4.5 Penetration characteristics of a power cable

결함유무 거리	결함 (有)				결함 (無)			
	1회	2회	3회	평균	1회	2회	3회	평균
12 [cm]	9,199	9,175	9,214	9,196	9,009	8,935	9,011	8,985
24 [cm]	3,091	3,109	3,083	3,094	2,919	2,907	2,917	2,914

케이블 시편의 실험결과에서는 폴리에틸렌 시편을 사용하였을 때보다 적은 검출수를 나타내었다. 이는 폴리에틸렌 시편과 같이 흡수계수가 같은 재료만으로 구성되어 있지 않고 흡수계수가 폴리에틸렌 보다 높은 동도체가 포함되어 있기 때문에 방사선 투과시 방사선이 흡수되거나 산란되어 검출될 확률이 낮아지기 때문이다. 그리고 폴리에틸렌에서 적용한 실험 결과와 마찬가지로 결함이 있을 때 검출수가 증가하는 경향을 보였다.

전력용 케이블 투과 실험에서도 평균 검출수의 변화량이 기본특성의 표준편차보다 크게 나타나 오차의 범위가 아님을 알 수 있다.

중성자는 수소와 반응하여 흡수되거나 산란하는 성질을 가지고 있기 때문에 수분계로 많이 활용하고 있다. 이러한 수분이 절연재료나 전력설비에 함유되게 된다면 절연재료의 결함과 못지 않게 전력설비의 절연파괴에 영향을 미칠 우려가 크다. 그러므로 본 연구에서는 중성자의 흡수성과 산

란성을 이용하여 결함에 대한 특성뿐만 아니라 시편에 수분이 함유될 경우에 대한 검출특성을 살펴보았다. 그림 4.4는 중성자를 1분 동안 조사하여 검출된 케이블 시편에 대한 파고분포를 낸다.

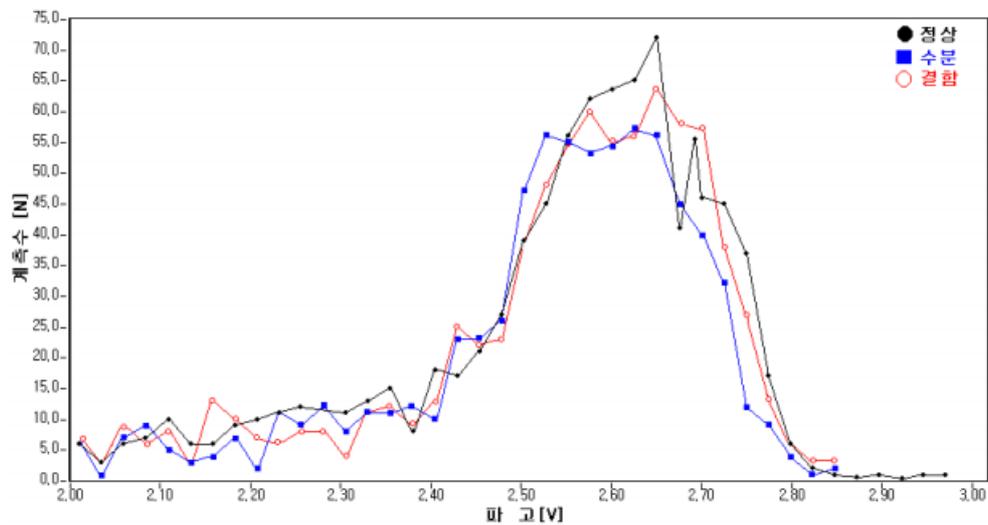


그림 4.4 케이블에 대한 파고분포 결과

Fig. 4.4 Results of P.H.A for cable

그림 4.4는 케이블 시편의 각 상태에 대해서 파고중심부분을 확대하여 분석한 결과이다. 정상적인 케이블 시편과 결함이 있는 케이블 시편의 파고분포를 비교하여 보면 감마선을 조사하였을 때와는 달리 파고중심의 검출 계측수가 감소하는 경향을 보였다. 정상일 때 보다 파고형태나 검출수가 많은 변화를 나타내지는 않았지만 파고중심이 낮아지고 계측수가 다소 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 수분이 함유된 케이블 시편과 비교하였을 경우에는 결함이 있을 때보다 많은 변화를 나타내었다. 이는 중성자가 수분에 흡수되거나 산란되어 에너지가 감쇠되는 특성에 의해 나타난

결과이다. 만약 검출기의 수를 늘리고 검출기의 감도를 향상시켜 분석하게 된다면 파고의 분포나 검출수의 변화가 시편의 상태에 따라 많은 변화가 나타날 것으로 기대된다.

ZnO 피뢰기 소자를 적용한 실험에서도 파고특성이 수분함유된 경우의 파고가 정상일 때 보다 다소 감소하였으며 그림 4.5와 같이 파고의 중심이 좌측으로 이동하는 특성을 보였다.

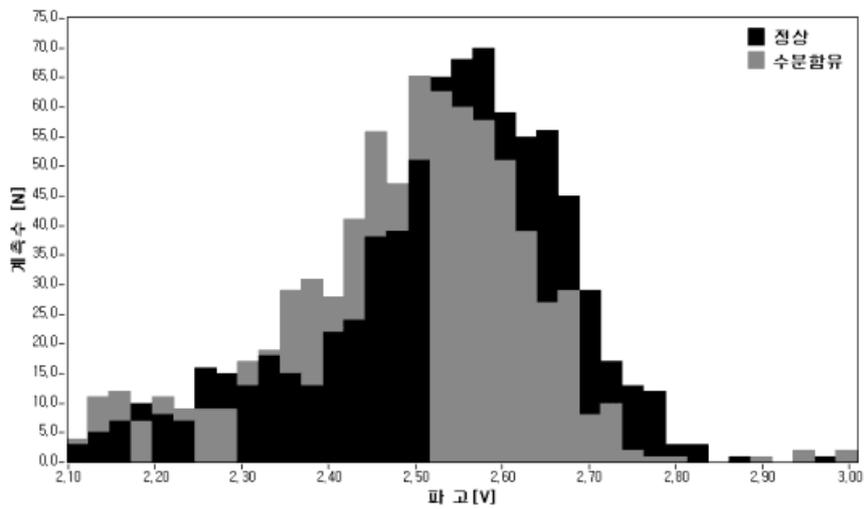


그림 4.5 ZnO 소자에 대한 파고분포 결과

Fig. 4.5 Results of P.H.A for ZnO block

적용실험을 통해 계수나 파고분포에 대한 분석결과에서 시편의 상태에 따라 검출패턴의 확연한 차이는 얻지 못하였지만 적용실험을 통해 분석시간과 거리에 따른 방사선 검출량, 방사선의 세기에 따른 투과량 등이 적용실험의 결과에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 방사선 펄스 계측 및 분석 시스템을 설계·제작하였으며 중성자선과 감마선을 전기재료에 적용하여 전기재료의 결함 및 수분함유에 대한 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 350 ~ 1500 [V]까지 제어가 가능한 고전압 공급장치를 설계·제작하였으며 주파수 대역 300 [kHz], 이득 60 [dB](1000배 증폭)로 얻어지는 중성자 검출회로와 비안정 멀티바이브레이터로 파형을 정형하여, 펄스 폭 조정이 가능한 감마선 검출회로를 구성하였다. 펄스 폭을 50 [ $\mu$ s]로 조절할 경우 10,000 [pps]를 검출할 수 있다.
2. 고전압 공급장치, 중성자 및 감마선 검출회로를 일체화하고 고속의 DSP(TMS320C31-60)를 사용하여 통합 계측 및 분석 시스템을 구성하였다. 시스템은 PC의 병렬포트에 접속되어 측정 후 중앙컴퓨터로 데이터를 전송하여 분석이 가능하도록 한다.
3. 텔파이 4.0을 기본으로 윈도우용 분석 프로그램을 개발하였다. 분석 프로그램은 고전압 공급장치 제어가 가능하며, 감마선 신호의 계수, 중성자 신호의 계수 및 파고분석(100 [ns], 4096 [ch])이 가능하다. 시스템의 계측 결과로부터 얻은 데이터로 계수 및 파고분석을 할 수 있으며, 파일의 형태로 저장되므로 효율적인 분석과 데이터 관리가 가능하다.
4. 통합계측 및 분석 시스템을 통해 케이블 시편에 감마선을 적용한 실험에서 시편의 결함유무에 따라 감마선 검출 계수 변화를 관측한 결과 결함이 있을 경우에는 흡수율이 낮아져 검출 계수가 정상적일 때보다 약 200 [pulse] 정도 증가하였다. 중성자를 적용한 실험에서는 수분함유 시편에서 계수의 파고분포가 정상적일 때보다 계측수가 감소하고 파고분포 패턴이 좌측하단으로 이동하는 특성을 얻었다.

5. 미소한 변화이지만 방사선이 물질과 상호작용 하여 검출특성의 변화를 일으키는 것을 적용실험을 통해 알 수 있었고 투과력이 좋은 감마선은 흡수력이 높은 재료의 결함유무, 중성자는 시편의 수분함유에 대한 평가에 충분한 적용 가능성을 나타내었다.

본 연구에서 시제작한 방사선 펄스 계측 및 분석 시스템은 전기재료의 결함 및 수분함유를 평가하는 것 외에도 방사선 진단 및 치료 등의 의료 분야, 용접품질 검사, 절연재료의 결함검출 등의 비파괴검사 분야, 성토시공 및 아스팔트 함량 측정과 같은 토목공사 분야 또한, 각종 고전압 응용 분야 등에 활용될 수 있을 것이다.

향후, 본 연구의 결과를 바탕으로 방사선 펄스 계측 및 분석 시스템의 안정성과 신뢰성을 보안하고 검출감도 개선 및 오차를 최소화 할 수 있는 방법을 확립함으로써 실용적인 적용이 가능한 최적의 시스템 개발에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] R.P. Gardner, et. al., Density and Moisture Content Measurements by Nuclear Methods, ASHTO, 1967.
- [2] E. Kowalski, Nuclear Electronics, Spring- Verlag, 1970
- [3] P. W. Nicholson, "Nuclear Electronics," JOHN WILEY & SONS, pp.109~113, 1982
- [4] I. F. Gonçalves, J. Salgado, J. NEVES and F. G. Garvalho, "Calibration of a Neutron Moisture Gauge by Monte-Carlo Simulation," Nuclear Geophysics, Vol, 6, No. 3, pp.373~376, 1992
- [5] I. F. Gonçalves, J. Salgado, J. NEVES and F. G. Garvalho, "Calibration and Design Optimization of a Nuclear Surface Moisture-Density Gauge by Monte-Carlo Simulation," Nuclear Geophysics, Vol. 8, No. 6, pp.527~537, 1994
- [6] R. P Gardner and K. F. Roberts, "Density and Moisture Content Measurements by Nuclear Methods," Highway Research Board(U.S.A), National Cooperative Highway Research Program Report 43, Part II, 1967
- [7] 정운혁, 방사성 동위원소 및 방사선의 취급기술, 청문각, pp.22-42, 1997.1
- [8] T. Fuse, T. Miura, A. Yamaji and T. Yoshimura. "Neutron Spectroscopy with a  $^3\text{He}$  Proportional Counter," Nuclear Instruments and Methods 74, pp.322~324, 1969

- [9] J. L. Fredes and R.E. Carien, "Design of  $^3\text{He}$  Filled Proportional Counters," The Review of Scientific Instruments Vol. 35 No.4, 1964
- [10] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley and Sons, pp.107-110, 1988
- [11] 길경석외 4인, "성토시공관리용 방사성 동위원소 이용계기의 측정회로 설계", 한국센서학회 논문지 6권 5호, pp.385-391, 1997.9
- [12] 황주호외 15인, "성토시공관리를 위한 방사성 동위원소 장비개발", 건설교통부, pp.110-114, 1996
- [13] 김희준, 스위치모드파워서플라이, 성안당, pp.34, 1987
- [14] 김인태, 전자회로, 도서출판 광명, pp.711~717, 1994
- [15] S. Shalev, Z. Fishelson and J. M. Cuttler, "The Wall Effect in  $^3\text{He}$  Counters," Nuclear Instruments and Methods 71, pp.292~296, 1969
- [16] Nicholas Tsoufanidis, "Measurement and Detection of Radiation", McGraw-Hill, pp.185-187, 1983
- [17] 강철구, 권옥현, 박영필, 이교일 공역, 현대제어공학, 도서출판 희중당, pp.521~597, 1997
- [18] W. K. Sinclair, "Radiation Dosimetry," Academic Press, Chapter 5, 1956
- [19] William J. Price, 2nd Edition, "Nuclear Radiation Detection," McGraw-Hill, pp.117~120, 1964
- [20] 윤덕용, TMS320C31 마스터, Ohm사, 1999
- [21] 안일준, Borland Delphi 4 실무프로그래밍, 사이버출판사, 1999
- [22] 안동훈, 박대규, 김학수, 김동익 공저, 텔파이 프로그래밍 비법(DPR), 도서출판 대림, 1999

## 감사의 글

이 논문이 있기까지 성심·성의껏 지도해주시고 부족한 제자에게 지식이 많은 공학도 보다는 지혜로운 공학도가 되라는 가르침을 주신 지도교수 길경석 교수님께 감사의 말씀을 올립니다. 또한, 보다 나은 논문이 되기 위해 보완점과 가르침을 주신 김윤식 교수님, 이성근 교수님 그리고 전기공학도가 되기위한 초석을 다져주신 박관수 교수님, 전태인 교수님께 감사의 말씀을 전합니다.

연구실 생활뿐만 아니라 인생의 선배로써 충고와 격려를 아끼지 않은 송재용 선배님께 이 글을 빌어 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 또한, 형처럼 인자하게 연구실 막내인 저를 이끌어 주신 한주섭 선배님과 김일권 선배님 그리고 먼저 졸업한 천상규, 이종혁 선배님에게도 감사드립니다. 바쁜 직장생활에서도 제 논문을 수정·보완에 관심을 기울여주신 김점식 선배님과 주문노 선배님께도 감사의 마음을 전해드립니다. 그리고 실험과 논문작성에 많은 도움을 준 동기 황동이와 후배 대원이 그리고 박상현씨에게 고마움을 이 글을 빌어 전합니다.

대학원에서 동문수학하며 논문작성시 서로에게 도움을 준 김명진, 강대규, 장수형, 박은식 형들에게도 감사하며 앞날에 좋은 일들만 일어나길 기원하겠습니다. 또한, 전력전자, 전기제어, 전기기기, 광전자 실험실 선후배님들에게도 감사의 뜻을 전합니다. 힘들 때 친형처럼 다독겨려준 성환, 영진 형님들 뿐만아니라 93학번 선배님들 가끔 학교에 찾아와 격려해 준 친구 성원, 현호, 태준, 용수 그리고 학과 동기들, 후배들, 나와 함께 했던 모든 사람들에게 고맙다는 말을 전하며 행복과 건강이 가득하기를 빌겠습니다. 마지막으로 제가 여기에 있게끔 만들어주신 사랑하는 부모님과 동생 창호에게 2002년 새해선물로 이 논문을 드리며 앞으로도 최선을 다하고 항상 웃을 수 있는 원진이가 되길 약속드리자 합니다.