工學碩士 學位論文

# 봉상접지극의 과도임피던스 특성

**Transient Impedance Characteristics of Grounding Rods**


指導敎授　吉　暻　碩



2001年　2月



韓國海洋大學校 大學院

電 氣 工 學 科

金　　一　　權

本 論文을 金一權의

工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 : 工學博士 朴 寬 秀 ㊞

委 員 : 工學博士 吉 暻 碩 ㊞

委 員 : 工學博士 李 成 根 ㊞

2001年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 金 一 權

# 목 차

그림 및 표 목차 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · iii
Abstract · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · V

제 1 장 서 론 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 1
1.1 연구 배경 및 필요성 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 1
1.2 연구 목적 및 내용 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 2

제 2 장 이 론 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 4
2.1 접지저항 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 4
2.1.1 대지저항률 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 6
2.1.2 접지저항 측정 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 10
2.2 접지임피던스 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 12
2.2.1 봉상접지극 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 13
2.2.2 임피던스 파라미터 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 20

제 3 장 실험장치 및 방법 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 22
3.1 실험장치 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 22
3.1.1 직각파 전류 발생장치 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 22
3.1.2 뇌충격 전류 발생장치 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 28
3.2 측정계의 구성 및 실험방법 · · · · · · · · · · · · · · · · · · 30

제 4 장 실험결과 및 고찰 ························35
4.1 직각파 전류에 대한 과도접지임피던스 ············36
4.2 뇌충격 전류에 대한 과도접지임피던스 ············41

제 5 장 결 론 ····························47

참 고 문 헌 ····························49

# 그 림 및 표 목 차

## 그림 목차


그림 2.1　접지계의 구성　4
그림 2.2　4전극법의 구성　6
그림 2.3　전위강하법의 구성　10
그림 2.4　간격 $x$에 따른 접지저항의 변화　11
그림 2.5　봉상접지극의 등가회로　14
그림 2.6　봉상접지극의 인덕턴스　14
그림 2.7　봉상접지극의 캐패시턴스　16
그림 2.8　접지임피던스의 과도특성　19
그림 2.9　임피던스 파라미터의 정의　20
그림 3.1　펄스 성형회로　23
그림 3.2　직각파 전류 발생장치의 사진 및 블럭도　26
그림 3.3　직각파 전류 발생장치의 시뮬레이션 결과 및 출력파형　27
그림 3.4　뇌충격 전압, 전류파형　29
그림 3.5　정상접지저항의 분포곡선　31
그림 3.6　과도접지임피던스 측정계　32
그림 3.7　접지극의 구성　33
그림 3.8　대지저항률 측정계　34
그림 4.1　직각파 전류에 대한 응답파형　38
그림 4.2　직각파 전류에 대한 과도접지임피던스　39
그림 4.3　뇌충격 전류에 대한 응답파형　42

**그림** 4.4 **뇌충격 전류에 대한 과도접지임피던스** 43
**그림** 4.5 **접지리드선의 길이에 따른 임피던스 파라미터 변화** 44

**표 목차**

**표** 3.1 **실험장치의 사양** 30
**표** 4.1 **접지계의 정상접지저항** 35
**표** 4.2 **직각파 전류에 대한 전위상승** 36
**표** 4.3 **직각파 전류에 대한 임피던스** 39
**표** 4.4 **뇌충격 전류에 대한 임피던스 파라미터**
(**접지리드선** = 5[m]) 45
**표** 4.5 **뇌충격 전류에 대한 임피던스 파라미터**
(**접지리드선** = 50[m]) 45

# Transient Impedance Characteristics of Grounding Rods

*by Kim, Il-Kwon*

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

## Abstract

This thesis deals with the correlation of the transient impedance and its parameters with the stationary resistance of grounding systems to a square pulse current and a lightning impulse current.

In experiment, the grounding system consists of a single grounding rod(φ10[mm], 1[m]) and/or a triple-grounding rods of equilateral triangles with 5[m] spacing for operation.

To analyze the transient impedance characteristics of the grounding system, a pulse generator which can produce square wave of a 30[ns] rise-time and a 20[μs] pulse duration is designed and fabricated.

Also, impulse current tests using the standard 8/20[μs] wave specified in IEC 61000-4-5 were carried out on the grounding system to simulate the transient characteristics in an actual field condition such as a grounding system for power distribution lines.

The injected current in the grounding system and the developed potential were recorded, and the time variation of the transient impedance were calculated as the ratio of the potential rising to the injected current at each time.

The experimental results showed that the transient impedance reaches its maximum value very fast (around 250[ns]) and consecutively is returned to the value of the stationary impedance.

The transient impedance and the effective surge impedance $Z_3$ which defines economic protection level were quite higher than the stationary resistance. The grounding impedance is decreased by the application of the triple-rods grounding system, and its effect is decreased as the frequency of the current is increased due to the inductance of the grounding leads.

It is therefore important to minimize the inductance of the grounding rods and leads to obtain the lowest grounding impedance and the lowest potential rising in a grounding system.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 필요성

전기에너지는 사용이 편리하고 쾌적하며, 정보 · 산업사회를 지탱하는 중추적인 에너지원으로 그 사용이 해마다 증가하고 있다. 최근 전력수요의 급증으로 전력계통이 복잡 · 다단화 되고, 전력공급에 고신뢰성이 요구되면서 효율적인 운용을 위하여 전자 · 제어장비를 이용한 무인시스템 구축이 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 운용설비를 비롯한 산업사회 전반에 사용되는 모든 전자 · 제어장비들은 뇌격이나 지락, 단락사고 등에 의해 발생하는 과도전류 및 고장전류에 매우 취약하여 기기의 오동작, 파손 및 정보의 손실을 가져오며 인체의 안전에도 커다란 위험 요인이 된다. 접지는 이러한 과도전류 및 고장전류를 대지로 흘려보내어 전위상승을 억제함으로써 각종 전기, 전자, 통신장비 및 설비에서 발생하는 재해를 방지할 수 있으므로 이에 대한 적절한 대책과 연구가 필요하다[1].

수 년 전까지만 해도 접지성능 즉, 접지저항은 직류 또는 상용주파수와 같은 저주파 전류로 평가하였다. 그러나 실제 운용조건에서 발생하는 과도전류 및 고장전류는 수 십 [kHz] 이상의 주파수 성분을 포함하여, 이러한 과도전류가 접지계를 통하여 유입될 때는 도전성 전류뿐만 아니라 접지계의 인덕턴스에 의한 유도성 전류, 접지극과 대지간의 캐패시턴스에 의한 용량성 전류가 흐르게 된다. 따라서 접지설계시 이러한 특성을 고려하여 직류 및 상용주파수에 상당하는 정상상태의 접지저항은 물론 이 보다 높은 과도상태의 접지임피던스로 해석해야한다.

뇌충격 전류와 같은 과도전류에 의해 접지임피던스의 값이 커지면 접지극의 전위가 높아지게 되며, 과도전압에 대한 내성이 약한 전자기기에 침

입하여 절연파괴를 일으키거나 연접되어 있는 전자 · 제어장비를 파손시키는 등 심각한 장해를 초래하게 된다[2]. 이러한 과도상태시 접지임피던스상승에 관하여 미국, 일본 등 선진 외국에서는 그 중요성이 부각되면서 여러 접지체를 대상으로 대지저항률 및 지층의 구조를 감안한 많은 연구가 활발히 이루어져 왔다. 그러나 국내에서는 접지분야는 학문적으로 관심밖의 영역으로 취급되고 있으며, 실무적인 기술자들 사이에서는 하나의 주변기술로 인식되고 있는 것이 지금까지의 실정이다. 더욱이 과도접지임피던스에 대한 해석은 아직도 초등적 연구단계이며, 이를 측정하기 위한 계측장비마저 보유하고 있지 못한 실정이다. 현재의 상태는 과도전류에 대한 과도접지임피던스 특성에 관한 검토가 부족하여 오로지 실험적으로 측정된 데이터에 의한 검토와 평가가 이루어질 수 밖에 없다. 앞으로 이러한 연구가 활성화되어 많은 실측데이터를 확보하는 것이 중요하며 이것을 기초로 체계적인 이론을 확립할 필요가 있다.

### 1.2 연구 목적 및 내용

접지는 전기 · 전자 · 통신기기 등을 대지와 전기적으로 접속하는 것이고, 이를 접속하기 위한 접속단자가 접지극이다. 접지극과 대지간에 전기적 저항을 갖기 때문에 이상전류가 유입되면, 옴의 법칙에 따라 접지극 부근에 전위상승이 생겨 여러 가지 장해를 일으키게 된다. 전위상승에 따른 장해로는 최악의 경우 인체를 감전시키고, 기기에 대해서는 손상, 잡음발생과 오동작을 일으키며 낙뢰에 의한 영향은 단지 시스템을 오동작시킬 뿐 아니라 부품의 소손 · 파괴를 야기할 수 있다.

이상적으로 접지저항이 0이라면 전위상승이 생기지 않기 때문에 아무런 장해가 발생하지 않지만, 이는 현실적으로 불가능하므로 이러한 장해가 없도록 전기설비 기술기준에 의한 접지저항을 충족시켜 접지시공을 하게

된다. 그러나 뇌충격 전류와 같은 과도전류가 접지계를 통하여 유입될 경우 접지극의 전위상승은 접지저항에 의한 설계시와는 상당히 다른 비선형적 양상을 보이게 된다. 이는 접지계의 임피던스에 의한 영향으로 과도상태에 대한 측정과 평가, 저감대책을 확립한다면 낙뢰에 대하여 효과적인 접지로써 보호동작을 도모할 수 있을 것이다.

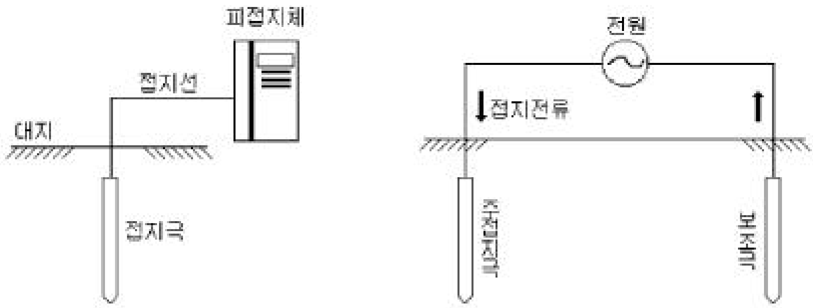
접지설계시 피접지체의 종류와 접지목적에 따라 접지체를 선정하며, 그 형상에 따라 선상, 판상, 봉상 등 여러 가지 접지극을 이용한다. 봉상접지극은 경제성 및 신뢰성이 뛰어난 대표적인 접지극으로, 본 연구에서는 이러한 봉상접지극을 대상으로 하여 접지임피던스의 과도특성을 측정 · 분석하였다. 이로 인하여 접지로부터 유입되는 과도전류에 대한 효과적인 보호대책 수립에 필요한 기초적 자료로 제공될 수 있을 것으로 판단되며, 주요 연구내용은 다음과 같다.

고주파 성분을 포함하는 과도전류에 대한 봉상접지극의 과도임피던스 특성을 파악하기 위해 급준한 상승시간을 갖는 직각파 전류를 단일, 3연접 접지극에 인가하여, 이 때의 대지전위상승과 과도접지임피던스 특성변화를 정상상태와 비교하여 측정 · 분석하였다. 실제 낙뢰에 의한 뇌격전류가 접지극에 유입되었을 때의 과도임피던스 특성을 관찰하기 위해 국제규격 ANSI/IEEE와 IEC에 규정되어 있는 뇌충격 전류를 인가하여, 이에 따른 과도접지임피던스의 특성변화를 측정 · 분석하였다. 연접에 의한 접지임피던스의 감소를 평가하였으며 접지리드선의 길이를 변화시키면서 이에 따른 특성변화를 관찰하였다. 또한, 실제 뇌격전류에 대한 보호수준을 평가 또는 예측하기 위한 과도임피던스로서 임피던스 파라미터를 측정결과로부터 산출하여 정상접지저항과 비교 · 분석하였다.

# 제 2 장 이 론

## 2.1 접지저항

접지계는 그림 2.1(a)와 같이 접지된 전기설비 기기가 있는 피접지체, 대지와 접촉되고 있는 접지극과 이를 전기적으로 결합하고 있는 접지선으로 구성되어 있다. 접지되어 있는 설비로부터 접지선, 접지극을 거쳐 대지로 접지전류 $I$[A]가 유입되면, 임의의 접지저항을 갖는 접지극에 옴의 법칙에 따라 전위가 주변의 대지에 비해서 $V$[V]만큼 높아진다. 이때 전위상승값과 접지전류의 비 $V/I$[Ω]를 그 접지극의 접지저항이라고 한다[3].




(a) 구성요소 (b) 보조극

그림 2.1 접지계의 구성

Fig. 2.1 Configuration of a grounding systems

접지극에 접지전류를 흘리기 위해서는 그림 2.1(b)와 같이 또 하나의 접지극 즉, 보조극을 대지에 설치할 필요가 있고, 2개의 접지극 사이에 전원을 넣어서 접지전류를 흘리게 된다. 이 때 보조극은 주접지극과 충분한 이격거리를 유지해야한다. 접지극의 전위상승을 대지의 무한히 먼 곳을

기준으로 하는 이유는 접지전류가 흘러도 전위가 변하지 않는 지점, 즉 통전전과 상태가 변하지 않는 장소를 전위의 기준점으로 하면, 거기서 측정한 전위상승값과 접지전류로부터 정확한 접지저항을 얻을 수 있기 때문이다.

접지저항에는 접지선, 접지극의 도체저항, 접지극과 토양 사이의 접촉저항, 접지극 주위의 토양이 나타내는 저항으로 나눌 수 있다. 이들 세 가지 요소 중에 토양이 나타내는 저항 즉, “대지저항률”은 접지저항의 90[%] 이상을 차지하는 중요한 요소이다.

어떤 접지극의 형상과 치수가 결정되면, 그 전극의 접지저항은 다음과 같이 표현된다.

$$R = \rho \times f\ (\text{형상, 치수}) \tag{2.1}$$

여기서; $R$ = 접지저항[Ω]

$\rho$ = 대지저항률[Ω・m]

$f$(형상, 치수) = 전극의 형상과 치수에 의해 결정되는 함수

낮은 접지저항을 얻으려면 대지저항률 $\rho$와 함수 $f$를 작게 하면 되지만, 대지저항률을 낮게 하는 것은 어렵기 때문에 전극의 형상이나 치수를 적절히 설계하여 접지저항을 낮추게 된다.

### 2.1.1 대지저항률

접지에 관련한 연구는 예전부터 계속되어 왔지만 연구가 더디게 진행된 이유는 토양이 매우 복잡한 매체이기 때문이다. 토양은 일반 저항체와는 달리 고려해야 할 많은 파라미터들이 있다. 대지의 구조는 복잡한 지층구조를 나타내는 것이 보통이며 접지저항을 좌우하는 대지저항률 $\rho$ 또한 흙의 종류나 수분의 양 혹은 온도, 흙에 함유되어 있는 용해성 물질이나 그 물질의 농도 그리고 토양 알맹이의 크기나 밀도 등에 의해 다양한 값을 나타내기 때문에 대지저항률의 취급이 중요하다[4],[5].

대지저항률을 측정하는 방법으로는 1915년 Frank Wenner에 의해 발표된 것으로 4전극법이 있으며, 이는 그림 2.2에 나타낸 것과 같이 구성하며 넓은 면적의 대지에 평균대지저항률을 측정하는 가장 정확한 방법이다.

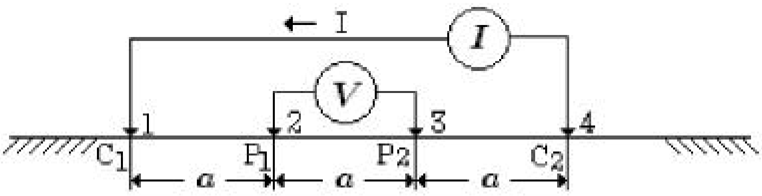



그림 2.2 4전극법의 구성

Fig. 2.2 Configuration of a four-point method

대지저항률 $\rho$[$\Omega \cdot$ m]인 균일한 대지에 반구상 전극이 타입되어 전류 $I$[A]가 유입된다면, 전류는 전극에서 주위의 대지를 향하여 방사형태로 유출해 나간다. 이 때의 거리 $r$[m] 지점의 전위는 다음과 같다.

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \ [V] \tag{2.2}$$

그림 2.2에서 $C_1$, $P_1$, $P_2$, $C_2$의 전극에 번호 1  4를 붙여 설명하면 전극 1에 유입하는 전류 $I$에 의한 전극 2의 전위는 식 (2.3)에 따라

$$V_{21} = \frac{\rho I}{2\pi a} \tag{2.3}$$

와 같이 구할 수 있다.

전극 1에 유입하는 전류 $I$에 의한 전극 3의 전위는 마찬가지로

$$V_{31} = \frac{\rho I}{4\pi a} \tag{2.4}$$

이 된다.

따라서 전극 2와 3 사이에 생기는 전위차는

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi a} - \frac{\rho I}{4\pi a} = \frac{\rho I}{4\pi a} \tag{2.5}$$

이다.

한편 전극 4로부터 유출하는 전류 $I$에 의한 전극 2와 3의 전위차는 전류를 $-I$라 놓으면, 같은 방법으로 다음과 같이 된다.

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi a} \tag{2.6}$$

전극 2와 3 사이에 발생하는 전위차는 $V_1$과 $V_2$의 합이므로, 식 (2.5)와 식 (2.6)으로부터

$$V = V_1 + V_2 = \frac{\rho I}{2\pi a} \qquad (2.7)$$

이 된다.

따라서 식 (2.7)를 변형해서 $\rho$를 구하면

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \qquad (2.8)$$

이다.

여기서 $V/I$는 전극 2와 3의 저항 $R$이므로

$$\rho = 2\pi a R \ [\Omega \cdot m] \qquad (2.9)$$

이 된다.

측정방법은 동일선상에 $a$[m]의 등간격을 갖는 4개의 전극을 대지에 매설하여 시험전류 $I$[A]를 외부 2개의 전류보조극을 통하여 흐르게 하고, 내부의 2개의 전위보조극에서 전압 $V$[V]를 측정한 뒤, 측정된 전압 $V$[V]를 시험전류 $I$[A]로 나누어 저항 $R$[Ω]을 구한다. 그러면 다음 식 (2.9)를 통하여 평균대지저항률을 구할 수 있다.

4전극법은 대략 전극의 간격과 동일한 대지깊이 $a$[m]까지의 평균대지저항률을 측정하게 된다. 그러나 실제 토양의 구조는 일정한 대지저항률 $\rho$[Ω·m]의 단일층이 아니라 각기 다른 대지저항률을 갖는 여러 층으로 이루어져 있다. 보다 정확한 측정을 위하여 대지구조를 파악하려면 전극의 간격 $a$[m]를 다르게 하여 전류의 침투깊이를 변화시키면 간격 $a$[m]마다 각기 다른 대지저항률 $\rho$를 구할 수 있다. 이렇게 측정한 $\rho$-$a$곡선을

Sundberg의 표준곡선과 Hummel의 보조곡선을 이용하면 각 층에 대한 대지저항률 $\rho$를 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 사용자의 경험과 능력에 따라 오차가 많이 발생하기 때문에 최근에는 수평탐사법과 수직탐사법을 이용한 전산 프로그램을 활용하여 오차를 최소화시키고 있다.

### 2.1.2 접지저항 측정

**접지저항을 측정하는 방법 중 전위강하법은 모든 형태의 접지저항 측정에 적용할 수 있으며 가장 일반적인 방법이기도 하다. 그림** 2.3**은 전위강하법의 구성을 나타낸 것이다**[6],[7].

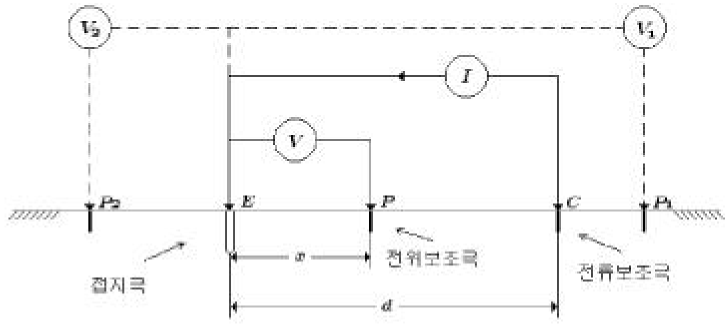



**그림** 2.3 **전위강하법의 구성**

Fig. 2.3 Configuration of a fall-of-potential method

**위 그림에서** *E***는 측정의 대상이 되고 있는 접지극이고,** *C*, *P***는 측정용 보조극으로** *E***의 저항구역을 벗어난 적당한 거리에 타입을 해야한다. 전위보조극** *P***에 의해** *E*-*P***간의 전위차** *V*[V]**를 측정하여 이를 대지간에 흘린 전류** *I*[A]**로 나누면** $V/I = R$ [Ω]**로써 접지저항을 구할 수 있다. 이상적인 전위강하법의 큰 특징은** 2**개의 보조극에 의한 접지저항값에 영향이 없다는 것이다. 하지만 실제에 있어서는 보조극을 유한의 거리에 설치하면 오차가 발생할 우려가 있기 때문에, 이를 검토하기 위하여 전위분포곡선 또는 접지저항분포곡선을 작성한다**[7],[8].

**전류** *I*[A]**가** *E***와** *C***를 통하여 흐르게 되면 결과적으로 대지에 전위의 변화가 생기며, 전위보조극의 위치를 변화시켜가면서 접지저항을 측정하면 그림** 2.4**와 같은** *E***와** *P***간의 거리** *x***의 함수로써 표현된다.**

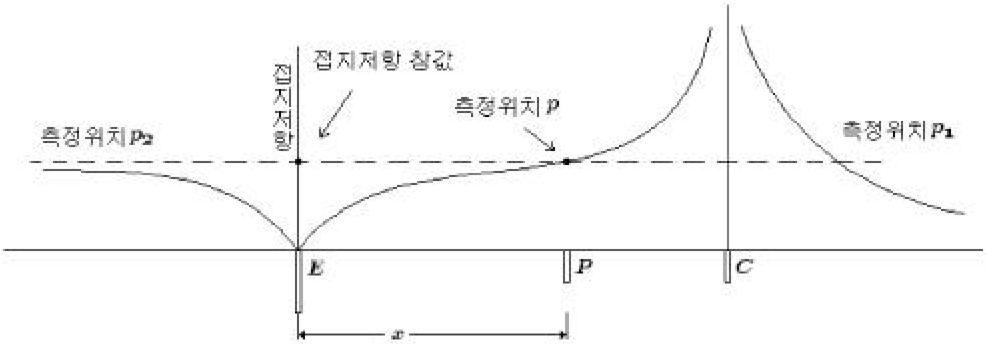



**그림** 2.4 **간격** $x$**에 따른 접지저항의 변화**

Fig. 2.4 Variation of grounding resistance for various spacing $x$

**정확한 접지저항의 측정을 위해서는** $P$**를 접지저항의 참값을 나타내는 특정위치** $p$**에 설치해야 한다.** $E$**와** $C$**간의 거리가 적당히 떨어져 있다면** $E$**와** $C$**간에 접지저항의 변화가 일정한 평탄부분이 생기는데 이 지점이 접지저항의 참값을 나타내는 위치** $p$**점이다. 하지만** $E$**와** $C$**간의 거리가 너무 가까우면 참의 접지저항을 나타내는** $p$**점을 찾기가 어렵다. 또한 메쉬접지와 같은 대규모 접지체로 이루어진 접지계는** 0.5[Ω] **이하의 매우 낮은 접지저항값을 갖기 때문에** $E$**와** $C$**간에 흐르는 전류에 의하여** $E$**와** $P$**간에 유도전압이 발생하여 참값을 나타내는** $p$**점을 찾기가 불가능하다. 따라서 이러한 대규모 접지체의 경우는** $E$**와** $C$**간에 흐르는 전류에 의한 유도를 피하기 위하여** $P$**를** $p_2$**점으로 이동시켜 전위를 측정하게 된다. 이론상,** $p_2$**점은** $E$**와 무한히 떨어져 있어야만 접지저항이 참값을 나타낸다.**

## 2.2 접지임피던스

접지저항은 보호종류와 보호수준을 정하는데 많은 영향을 주며, 직류 또는 상용주파수에 상당하는 정상접지저항은 선형적인 저항특성으로 접지저항을 해석한 것이다. 하지만 뇌격전류와 같이 급변하는 과도전류는 주파수가 수 십 [kHz] 이상이며, 이러한 전류가 접지계에 유입할 때는 접지특성이 비선형적으로 나타나게 된다. 따라서 접지로부터의 과도전류 유입에 대한 대책을 세우기 위해서는 접지계의 일반적인 특성뿐만 아니라 접지임피던스의 과도특성에 대한 정확한 분석이 필요하다.

접지계를 통하여 과도전류 $I$[A]가 유입되면, 이로 인하여 접지극 주변의 대지에 전위상승 $V$[V]가 발생한다. 이 때 접지임피던스는 접지저항과 마찬가지로 전위상승과 과도전류의 비 $V/I = Z$[Ω]로써 측정하게 된다.

일반적으로 과도접지임피던스는 정상접지저항보다 큰 값을 가지기 때문에 접지시공 당시의 정상접지저항값으로만 접지계의 보호수준을 정하기에는 무리가 있다. 과도접지임피던스를 이용한 접지계의 보호수준을 결정하기 위해선 여러 가지 파라미터를 고려해야하며, 특히 임피던스 파라미터 중 실효서지임피던스는 경제적인 보호수준을 결정하기 위한 중요한 요소가 된다.

뇌충격 전류가 접지계를 통하여 유입할 때 접지계의 효과적인 동작을 위해서 가능한 접지계가 낮은 임피던스를 유지해야하며 접지계를 상호 연결하는 접지리드선에 포함된 높은 유도성 성분에 의한 전위상승을 충분히 고려해야 한다. 접지계의 과도접지임피던스특성을 충분히 분석하여 저감대책을 세운다면 접지계의 효과적인 동작을 도모할 수 있을 것이다[9],[10].

### 2.2.1 봉상접지극

접지계의 회로모델을 통한 과도적인 성분의 구조적 해석은 일반적으로 회로망 접근으로 접지도체를 $R$-$L$-$C$ 집중정수회로와 전송선로와 같은 분포정수회로로 가정하는 방법과 전자계적인 해법으로 컴퓨터를 이용한 해석방법이 있지만, 아직 실험적 단계를 벗어나지 못하고 있으며 적용이 가능한 하나의 기법으로 통일되어있지 않다. 더욱이 토양은 매우 복잡한 매체로서 고려해야할 많은 파라미터들이 있으며 접지저항의 중요한 요소인 대지저항률 또한 상황에 따라 서로 다른 값을 나타내기 때문에 오로지 실측데이터에 의존할 수 밖에 없다. 그러나 일반적인 가정을 통하여 접지계의 등가회로 모델을 제시하고 이를 통하여 과도접지임피던스 특성을 대략적이나마 파악할 수 있다면 낙뢰로부터 방호를 위한 접지계의 과도특성을 예상·분석하는 절차를 간소화 할 수 있고, 이러한 절차는 시뮬레이션 모델의 도구로 이용할 수 있다.

봉상접지극은 타입 및 매설이 쉬운 형태의 전극으로 가장 간단하고 경제적이며 이론적인 해석이 용이하기 때문에 뇌충격 전류하에 실제 접지계의 과도분석을 하기 위해 사용된다. 뇌충격 전류에 의한 봉상접지극의 등가회로는 그림 2.5와 같이 표현할 수 있으며, 이 때의 정상접지저항 $R$은 dwight에 의해 유도된 식 (2.10)에 의해 주어진다[11].

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left( \ln \left( \frac{8 \cdot l}{d} \right) - 1 \right) [\Omega] \qquad (2.10)$$

여기서; $\rho$ = 대지저항률 $[\Omega \cdot m]$

$l$ = 접지봉의 길이 $[m]$

$d$ = 접지봉의 직경 $[m]$

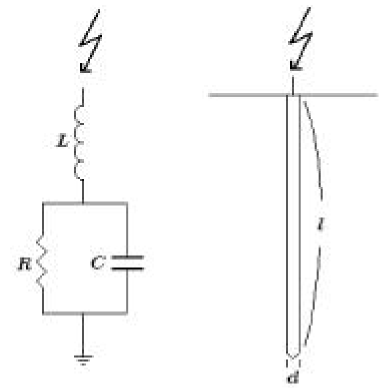



**그림** 2.5 **봉상접지극의 등가회로**

Fig. 2.5 Equivalent circuit of a grounding rod

**봉상접지극의 인덕턴스** $L$**은 그림** 2.6**에 나타낸 것과 같이 균일한 대지에 타입된 봉상접지극을 원통좌표계를 이용하여 그 식을 유도할 수 있다.**

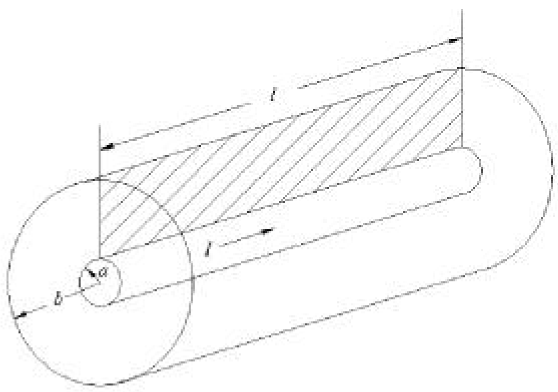



**그림** 2.6 **봉상접지극의 인덕턴스**

Fig. 2.6 Inductance of the grounding rod

그림 2.6과 같이 반지름 $a$[m]의 봉상접지극에 전류 $I$[A]가 흐른다고 가정하면 이 때 접지극으로부터 거리 $r$[m]만큼 떨어진 지점의 자계는 다음 식 (2.11)과 같다.

$$H = \frac{I}{2\pi r} a_\phi [A/m] \tag{2.11}$$

여기서, $a_\phi$ = 단위벡터

위 식을 이용하여 자속밀도 $B$를 계산하면,

$$B = \mu H = \frac{\mu I}{2\pi r} a_\phi [T] \tag{2.12}$$

이 된다.

자속 $\Phi$는 거리 $a$[m]에서 $b$[m]까지 자속밀도의 합이므로,

$$\Phi = \int_S B \cdot dS = \int_0^l \int_a^b \frac{\mu I}{2\pi r} a_\phi \cdot d_r d_z a_\phi = \frac{\mu_0 l I}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \ [Wb] \tag{2.13}$$

이다.

따라서 인덕턴스 $L$은 다음과 같이 표현된다.

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu l}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \ [H] \tag{2.14}$$

이 때, 대지의 비투자율을 1, 봉상접지극의 직경을 $d$[m]라 하고 거리 $2l$[m]까지의 인덕턴스 $L$을 구하면 다음 식 (2.15)와 같이 주어진다[12].

$$L = 2 \cdot l \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l}{d}\right) \cdot 10^{-7} \, [H] \qquad (2.15)$$

봉상접지극의 캐패시턴스 $C$는 인덕턴스 $L$을 구할 때와 마찬가지로 그림 2.7에 나타낸 것과 같이 균일한 대지에 타입된 봉상접지극을 원통좌표계를 이용하여 그 식을 유도할 수 있다.

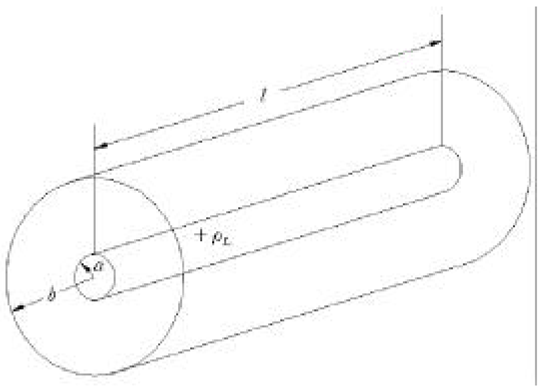



그림 2.7 봉상접지극의 캐패시턴스

Fig. 2.7 Capacitance of the grounding rod

그림 2.7과 같이 반지름 $a$[m]에 길이 $l$[m]인 봉상접지극에 선전하밀도 $+\rho_L$[C/m]이 주어지면 접지극으로부터 거리 $r$[m]인 지점의 전계와 전위는 다음과 같다.

$$E = \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon r} a_r \; [V/m] \qquad (2.16)$$

여기서, $a_r$ = 단위벡터

$$V = -\int E \cdot dL = -\int_a^b \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon r} dr = \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon} \cdot \ln\frac{b}{a} \; [V] \qquad (2.17)$$

이 때 전하 $Q = \rho_L \cdot l \, [C]$ 이므로

$$V = \frac{Q/l}{2\pi\varepsilon} \cdot \ln\frac{b}{a} \; [V] \qquad (2.18)$$

이 된다.

따라서 거리 $a$[m]에서 $b$[m]까지의 캐패시턴스 $C$는 다음과 같다.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\frac{b}{a}} \; [F] \qquad (2.19)$$

이 때, 대지의 유전상수를 $\varepsilon_r$, 봉상접지극의 직경을 $d$[m]라 하고 거리 $2l$[m]까지의 캐패시턴스 $C$를 구하면 다음 식 (2.20)과 같이 주어진다[12].

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot l}{18 \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l}{d}\right)} \cdot 10^{-9} \; [F] \qquad (2.20)$$

여기서; $\varepsilon_r$ = 토양의 유전상수

식 (2.10), (2.15), (2.20)은 몇 개의 가정을 통한 회로망적인 접근으로 봉상접지극을 $R$-$L$-$C$ 집중정수회로로 해석한 것이며, 전극에 인가된 전압이 시간에 따라 변할 때, 도전성 전류뿐만 아니라 유도성, 용량성 전류도 나타나게 되며 각각의 회로정수의 시정수에 따라 접지계는 용량성, 저항성, 유도성 특성을 나타낸다[8].

접지임피던스가 0.2 0.5[μs] 이전의 시간에 나타나는 초기치 특성을 제외하고, 1[μs] 이후의 시간특성을 보면 시간이 빠른 곳의 과도접지임피던스가 시간이 늦은 영역에 비해 낮은 값을 나타내며 이를 용량성 특성이라고 정의한다. 이는 봉상접지극의 등가회로 모델에 접지저항 $R$과 캐패시턴스 $C$의 작용으로 분석할 수 있으며 과도접지임피던스의 상승시간은 시정수 $RC$에 의해 결정된다. 일반적인 대지의 유전상수 $\varepsilon_r$은 대략 9정도의 값이므로, 이 때의 시정수는 대략 수 십 [ns]의 값을 갖는다. 이와 같은 경향은 산악지대의 송전철탑 탑각의 과도접지임피던스 특성에서 주로 나타나며 대지저항률이 높은 대지에 접지시공을 하는 경우에 종종 유사한 경향이 있다.

정상접지저항값이 20 40[Ω]의 범위를 갖는 길이 20 30[m]의 매설지선에서 과도접지임피던스특성은 시간의 경과에 대하여 대개 평탄한 특성을 나타낸다. 이러한 특성을 저항성 특성이라고 정의하지만 상승시간이 1[μs]보다 빠른 과도전류에 대해서는 완전한 저항성 특성을 나타내는 접지계는 거의 없다.

시간의 경과와 함께 과도접지임피던스가 낮게 되는 경향을 유도성 특성이라고 정의하며, 이는 봉상접지극의 등가회로 모델에 접지저항 $R$과 인덕턴스 $L$의 작용으로 해석할 수 있으며, 과도접지임피던스의 감소시간은 시정수 $L/R$에 의해 결정된다. 직접접지계통의 발·변전소의 접지계는 메시형태로서 거의 대부분 이 특성을 따른다.

실제로 급상승 직각파 전류에 대한 대부분의 접지계의 과도임피던스특성은 유도성 특성을 나타내며 접지계를 연결하는 접지리드선의 길이가 길면 길수록 인덕턴스 성분이 증가하므로 더욱 높은 유도성 특성을 나타낸다. 그림 2.8은 접지임피던스의 과도특성을 개략적으로 도시한 것이다.

봉상접지극의 과도접지임피던스는 $R$-$L$-$C$ 집중회로정수로써 표현될 수 있고, 실제로 측정한 과도접지임피던스 특성 결과도 모두 그러한 경향을 나타내지만 아직까지 용량성, 저항성, 유도성 특성으로 확연하게 구분하여 평가할 수 있는 기준은 없다. 다만 접지계에 인가하는 전류의 상승시간을 기준으로 평가한다면 보다 높은 타당성을 갖는다고 판단된다.

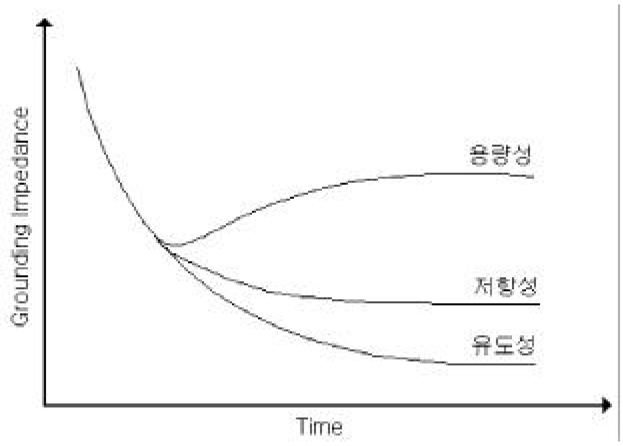



그림 2.8 접지임피던스의 과도특성

Fig. 2.8 Transient characteristics of a grounding impedance

### 2.2.2 임피던스 파라미터

**접지계의 임피던스 파라미터는 낙뢰나 과도접지의 실패와 같이 대지로 뇌충격 전류가 유입할 때, 접지계의 보호종류와 보호수준 결정에 필요하다. $Z$로 정의되는 임피던스 파라미터는 뇌충격 전압과 뇌충격 전류의 비로 정의된다**[13].

$$Z(t) = \frac{V(t)}{I(t)} \tag{2.21}$$

**임피던스의 네가지 파라미터는 그림** 2.9**에 나타낸 바와 같이 뇌충격 전압과 뇌충격 전류의 각 최대값을 기준으로 다음과 같이 정의한다.**

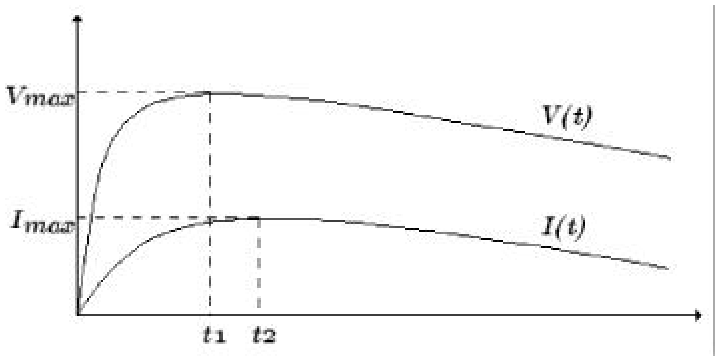



**그림** 2.9 **임피던스 파라미터의 정의**

Fig. 2.9 Definition of impedance parameters

$$Z_1 = \max(Z(t)) \tag{2.22}$$

$$Z_2 = \frac{V(t_1)}{I(t_1)} \tag{2.23}$$

$$Z_3 = \frac{V(t_1)}{I(t_2)} \tag{2.24}$$

$$Z_4 = \frac{V(t_2)}{I(t_2)} \tag{2.25}$$

여기서; $Z_1$ = 충격전압과 충격전류 비의 최대값

$Z_2$ = 전압이 최대값에 도달할 때,
전압의 최대값과 전류값의 비

$Z_3$ = 최대 전압과 최대 전류의 비

$Z_4$ = 전류가 최대값에 도달할 때
전압과 전류값의 비

이는 일반적으로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 > R \tag{2.26}$$

특히 $Z_3$는 실효서지임피던스(effective surge impedance)라 하여 뇌충격전류에 의한 접지계의 보호종류와 보호수준을 결정하는 중요한 요소가 된다.

# 제 3 장  실험장치 및 방법

## 3.1 실험장치

인가전류의 상승시간에 따라 접지극의 과도응답 특성은 현저하게 달라지기 때문에 상승시간이 완만한 전류를 인가하여 산출한 결과는 올바른 접지극의 과도임피던스 특성이라 할 수 없다. 급준한 과도전류에 대한 접지극의 과도특성을 측정 · 분석하기 위해서는 상승시간이 빠른 직각파 전류가 요구된다. 따라서 과도전류의 상승시간보다 빠른 전류를 발생시키는 직각파 전류 발생장치를 제작하여 접지극의 과도임피던스 측정에 이용하였다. 또한 접지계를 통하여 유입하는 과도전류는 낙뢰의 영향으로 뇌충격 전류의 형태를 나타내며 접지계의 보호종류 및 보호수준을 선정하기 위해서는 낙뢰의 파형과 동일한 전류가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 국제규격에 따른 8/20[㎲] 뇌충격 전류를 인가하여 실제 뇌격에 의한 과도접지임피던스 특성을 측정 · 분석하였다.

### 3.1.1 직각파 전류 발생장치

접지극의 과도임피던스 특성을 측정하기 위한 전류는 이상적으로 상승시간이 빠르고, 피측정전극의 전파시간 이상의 펄스폭을 갖는 직각파 전류가 가장 바람직하다. 상승시간이 직각파에 가까운 전류파형을 기존의 과도전류발생장치로는 얻기가 힘들기 때문에 인위적으로 원하는 인가전류 파형을 만들어주는 펄스 압축 · 성형회로가 필요하다[8].

펄스 성형회로는 집중정수인 인덕턴스 $L$을 직렬로 캐패시턴스 $C$를 병렬로 여러 개를 접속하여 구성함으로써 전송선로와 같은 동작원리로 적용할 수 있다. 또한, 펄스의 상승시간과 펄스폭의 조정이 편리하기 때문에 과도접지임피던스 특성을 측정하기에 적합하다.

그림 3.1은 $N$단의 캐패시턴스 $C$와 인덕턴스 $L$의 조합으로, 부하 R에서 원하는 직각파 출력파형을 얻기 위한 일반적인 펄스 성형회로의 구성이다. 출력파형의 기본적인 특성은 다음과 같다[14] [16].

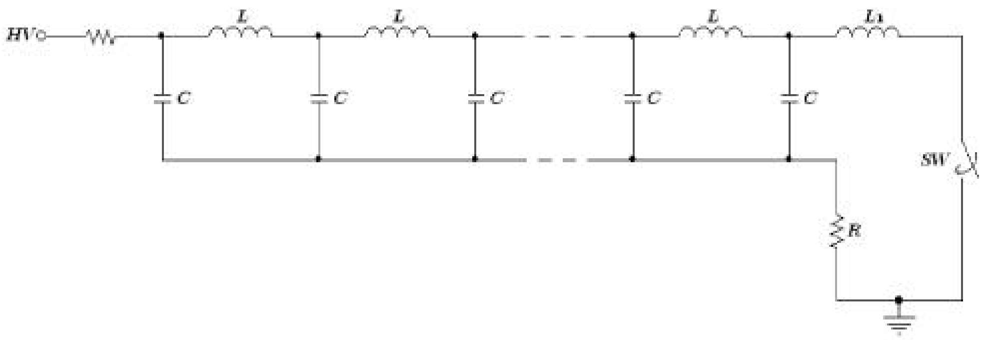



그림 3.1 펄스 성형회로

Fig. 3.1 Circuit of a pulse forming network

여기서; $N$ = 펄스 성형회로의 단수

$Z$ = 펄스 성형회로의 특성 임피던스 ($Z = \sqrt{L/C}$)

$V_0$ = 충전전압

$R$ = 부하 임피던스

$L$ = 한 단의 인덕턴스

$C$ = 한 단의 캐패시턴스

펄스폭은 다음 식에 의하여 결정된다.

$$\tau \fallingdotseq 2N\sqrt{LC} \qquad (3.1)$$

부하의 출력전압은 식 (3.2)와 같이 결정되며, 만일 임피던스 정합이 이루어지면 식 (3.2a)와 같이 출력전압은 인가전압의 1/2이 되며 출력전류는 식 (3.3)에 의하여 결정된다.

$$V = \frac{R}{Z + R} V_0 \tag{3.2}$$

$$V = \frac{V_0}{2} \tag{3.2a}$$

$$I = \frac{V_0}{Z + R} \tag{3.3}$$

주어진 부하 임피던스 $R$과 펄스 성형회로의 특성 임피던스 $Z$의 정합관계($R = Z$)로 단수 $N$이 주어지면, $C$와 $L$은 다음 식으로 결정된다.

$$C = \frac{\tau}{2NZ} \quad (R = Z) \tag{3.4}$$

$$L = \frac{\tau Z}{2N} \tag{3.5}$$

$$\tau_r \fallingdotseq \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{1}{L_1 C} - \frac{R^2}{4L_1^2}}} \tag{3.6}$$

제 1단의 인덕턴스 $L_1$은 출력스위치와 부하의 인덕턴스를 포함한 것으

로 출력파형에서 상승시간을 결정하는 중요한 요소이다. 펄스 성형회로의 제 1단의 $R$, $L_1$, $C$로 구성된 폐회로에 의해 출력파형의 상승시간이 식 (3.6)에 의해 결정된다.

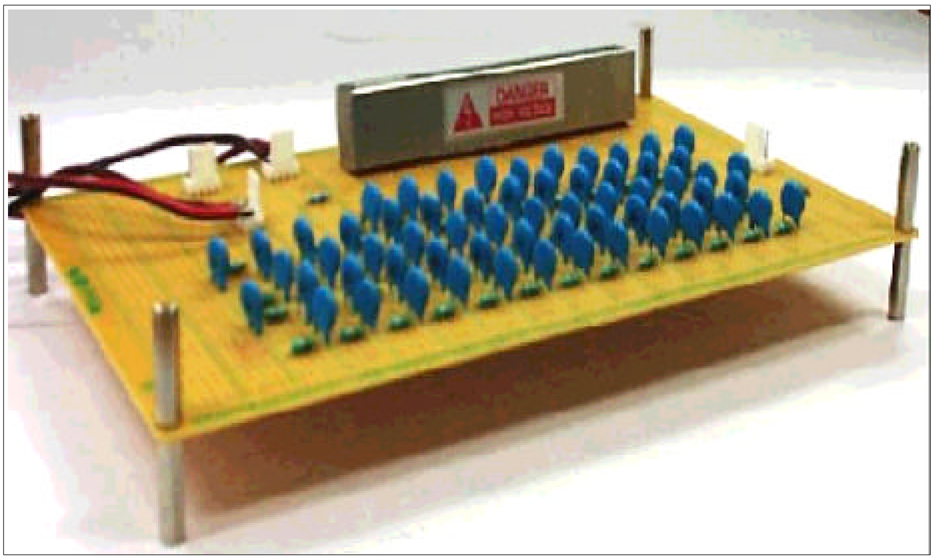
그림 3.2는 본 연구에서 제작한 직각파 전류 발생장치의 사진과 블록도를 나타낸 것이다. 그 구성은 크게 직류 고전압 발생장치와 스위칭 회로를 구동시키기 위한 전원부, 펄스 성형회로를 충전시키기 위한 직류 고전압 발생부와 펄스 성형회로의 방전을 통하여 직각파 전류를 발생시키기 위한 스위칭 회로로 나눌 수 있다. 스위칭 회로는 고속의 스위칭을 위하여 수은 릴레이를 이용하였다.

그림 3.3(a)는 시뮬레이션 출력파형으로 부하의 특성임피던스가 50[Ω], 상승시간이 30[ns]이하에 펄스폭 $\tau$가 20[μs]인 직각파 전류를 만들기 위하여 8.2[μH]의 인덕턴스 $L$과 3.3[nF]의 캐패시턴스 $C$로 이루어진 61단의 펄스 성형회로를 구성하였다.

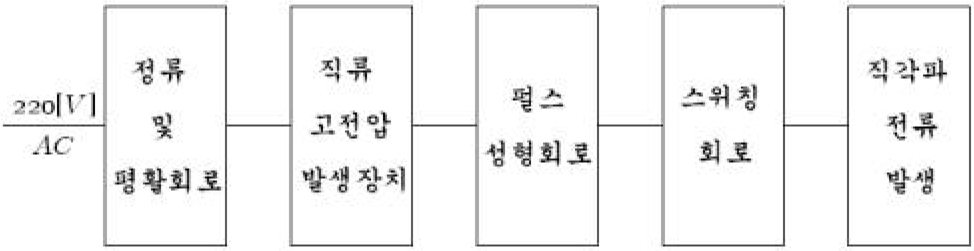
인가전압을 200[V]로 하였기 때문에 출력전압은 인가전압의 1/2인 100[V]이고, 출력전류는 2[A]가 된다. 각 파형의 초기부분에서 나타나는 진동성분은 30[ns] 이하의 짧은 상승시간을 얻기 위하여 $L_1$을 1[μH]로 구성한 것과 단수 $N$을 61단으로 작게 구성하였기 때문이다. 특성임피던스 50[Ω]을 만족하는 $L$과 $C$는 직접 제작하기에는 다소 무리가 따르고, $N \approx \tau / \tau_r$의 조건과 같이 단수를 늘리면 평탄한 파형을 얻을 수 있지만 실제 펄스 성형회로의 제작에 있어서는 초전도체가 아닌 이상 $L$과 $C$는 각각 누설저항을 포함하여 전압강하에 의한 파형의 감쇠가 나타나기 때문에 적절한 $L$과 $C$값을 선정하여 단수 $N$을 정할 수 밖에 없다.

그림 3.3(b)는 본 연구에서 제작한 직각파 전류 발생장치의 사진과 출력전압, 전류파형이다. 낮은 $L_1$에 의한 초기부분의 진동성분과 $L$과 $C$의 누설저항으로 인한 감쇠가 있지만 30[ns]이하의 상승시간과 20[μs]의 펄스

폭을 갖는 직각파 전류를 발생하므로 고주파 과도전류에 대한 과도접지저항 측정 · 평가 적용에 적합함을 알 수 있다.



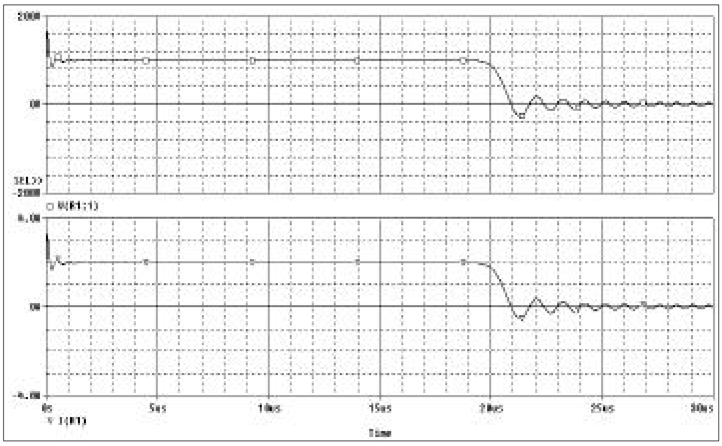
(a) 직각파 전류 발생장치의 사진




(b) 직각파 전류 발생장치의 블럭도

그림 3.2 직각파 전류 발생장치의 사진 및 블럭도

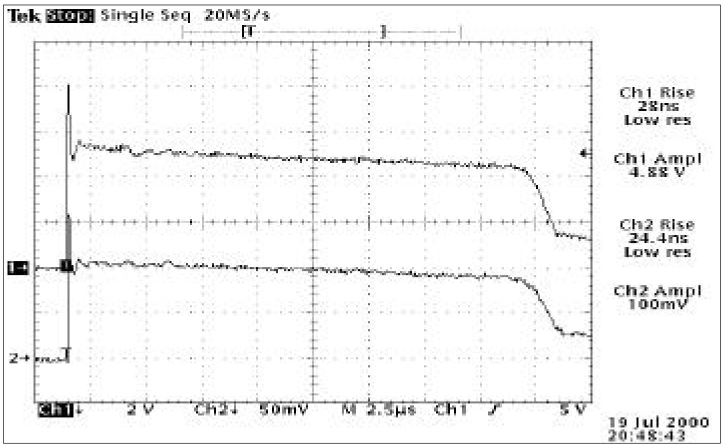
Fig. 3.2 Photograph and block-diagram of the square pulse current generator



상 : 출력전압

하 : 출력전류

(a) 시뮬레이션 결과




상 : 출력전압[ 2V/div, 2.5μs/div]

하 : 출력전류[50mA/div, 2.5μs/div]

(b) 출력파형

그림 3.3 직각파 전류 발생장치의 시뮬레이션 결과 및 출력파형

Fig. 3.3 Simulation results and output waveforms of the square pulse current generator

### 3.1.2 뇌충격 전류 발생장치

본 연구에서는 국제규격 ANSI/IEEE std. 4-1978, ANSI C62.1-1984, IEC 61000-4-5에서 규정한 뇌충격 전류 발생장치(PSURGE 4010, HAE-FELY사)를 이용하여 접지계의 과도접지임피던스 측정에 적용하였다. 뇌충격 전류 발생장치는 송·배전 선로상의 직격뇌에 의한 1.2/50[μs]의 전압이 인가되어 절연파괴가 이루어지면 8/20[μs]의 전류파형으로 변환되어, 실제 낙뢰에 의한 영향과 매우 유사하기 때문에 뇌충격 전류에 의한 접지계의 과도접지임피던스 특성을 측정·분석하는 데에 적합하다[17].

국제규격상의 1.2/50[μs]의 전압파형을 수식적으로 나타내면 식 (3.7)과 같고, 8/20[μs]의 전류파형의 수식적인 표현은 식 (3.8)과 같다[18] [20].

$$V(t) = A\,V_p\left\{1-\exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)\right\}\exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)[V] \qquad (3.7)$$

여기서; $\tau_1$ = 0.4074[μs]

$\tau_2$ = 68.22[μs]

$A$ = 1.037

$V_p$ = 전압의 최대값

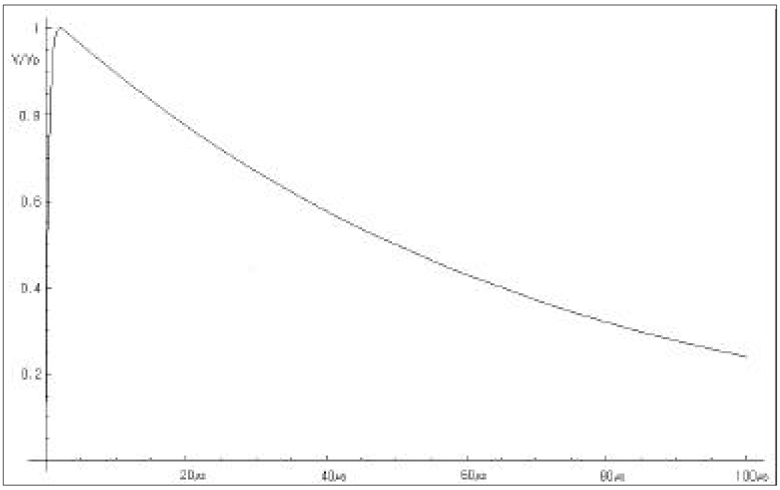
$$I(t) = A\,I_p t^3 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)[A] \qquad (3.8)$$

여기서; $\tau$ = 3.911[μs]

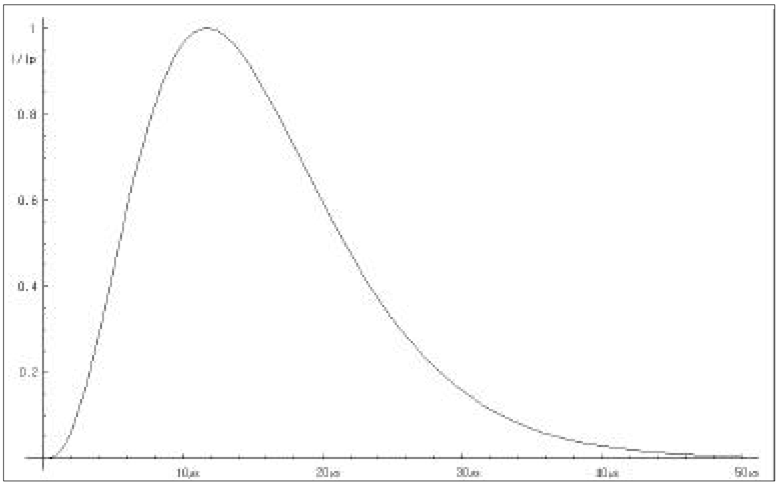
$A$ = 0.01243 [$\mu s^{-3}$]

$I_p$ = 전류의 최대값

그림 3.4는 위 식을 그래프로 나타낸 뇌충격 전압, 전류파형이다.



(a) 1.2/50[μs] 전압파형



(b) 8/20[μs] 전류파형

그림 3.4 뇌충격 전압, 전류파형

Fig. 3.4 Waveforms of the lightning impulse voltage and current

## 3.2 측정계의 구성 및 실험방법

봉상접지극의 과도임피던스 측정을 위하여 설계·제작한 직각파 전류 발생장치 및 주요 실험장치는 표 3.1과 같다.

표 3.1 실험장치의 사양

Table 3.1 Specification of the experiment apparatus

| 항 목 | 모델명 및 특성 | 비 고 |
|---|---|---|
| 직각파 전류 발생장치 | 펄스 성형회로(61단)<br>$\tau_r$ : 30[ns], $\tau$ : 20[μs] | 제 작 |
| 뇌충격 전류 발생장치 | PSurge 4010<br>4.2[$kV_{max}$], 2.1[$kA_{max}$] | HAEFELY사 |
| 전류 프로브 | A6302<br>DC 50[MHz] | Tektronix사 |
| 전압 프로브 | P6114B<br>DC 400[MHz] | Tektronix사 |
| 고전압 프로브 | P6015<br>DC 75[MHz] | Tektronix사 |
| 직류 고전압 발생장치 | DC 0 1500[V]<br>1300[$mA_{max}$] | Bellnix사 |
| 접지저항계 | Earth Hitester<br>오차 2.5[%] | Hioki사 |
| 오실로스코프 | TDS380<br>400[MHz], 2채널 | Tektronix사 |

제한된 구역 안에서 전위강하법을 이용한 측정계를 구성하기 위해 접지계의 저항구역과 적절한 보조극의 위치를 선정할 필요가 있다. 전위강하법을 위한 접지계의 접지저항분포를 측정하기 위하여 접지극 $E$로부터 20[m]의 간격을 두고 전류보조극 $C$를 설치한 후, 전위보조극 $P$를 접지극

$E$로부터 0.5[m]의 간격으로 11[m]까지 이동하며 측정한 접지저항을 그림 3.5에 나타내었다.

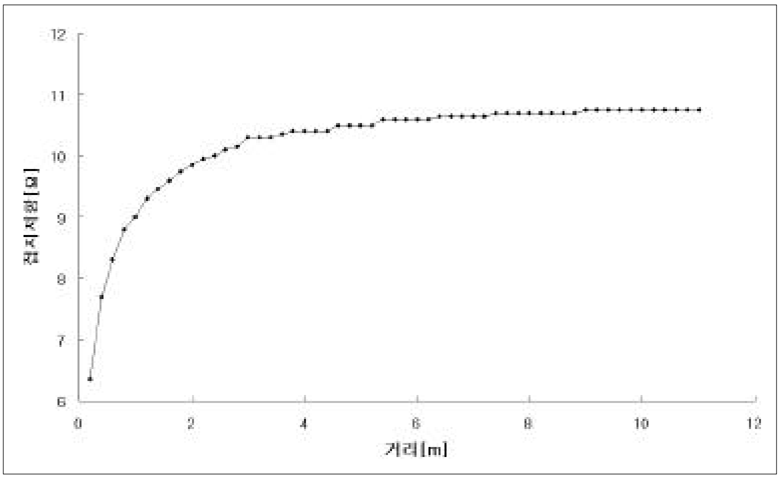



그림 3.5 정상접지저항의 분포곡선

Fig. 3.5 Distribution curve of the stationary grounding resistance

그림 3.5에서 나타낸 바와 같이 접지저항의 분포곡선이 평탄한 부분을 이루는 지점이 9[m]에서부터 시작하였고, 접지저항계의 오차를 고려한 전위보조극 $P$의 위치는 12.4[m]로 설정하였다. 또한 저항구역은 12.4[m]지점의 접지저항을 전저항으로 고려할 때 전저항의 97.7[%]인 5[m]를 저항구역으로 하였다.

그림 3.6은 전위강하법을 이용하여 정상접지저항 및 과도접지임피던스의 측정계를 나타낸 것이다. 메시전극과 같은 대규모 접지체의 과도접지임피던스를 측정할 때에는 대지에 유입되는 전류에 의한 유도전압 때문에 전위보조극 $P$를 정상접지저항을 측정할 때와는 다른 위치에 설치 해야하지만, 고임피던스 접지계의 경우는 접지저항 분포곡선에서 접지저항의 참

값을 얻을 수 있는 평탄한 부분이 나타나기 때문에 오히려 정상접지저항을 측정할 때와 같은 방법으로 하는 것이 바람직하다[21].

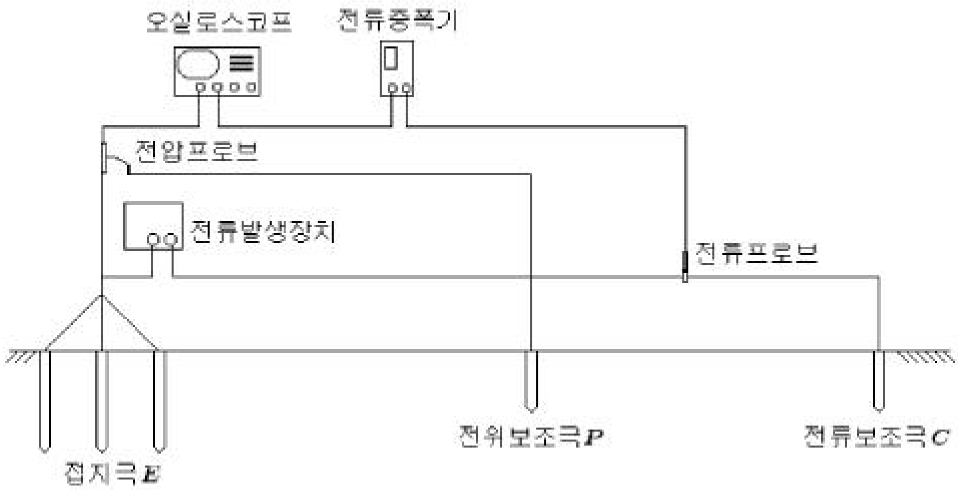


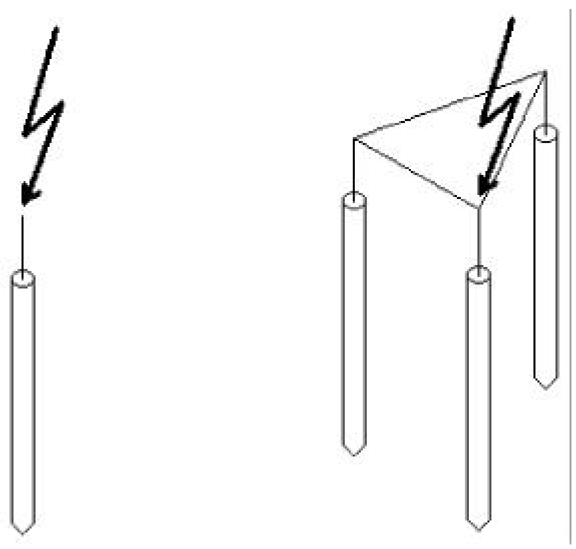

그림 3.6 과도접지임피던스 측정계

Fig 3.6 Transient impedance measuring system

봉상접지극은 이론적인 해석이 쉬울 뿐만 아니라 경제적이며 설치가 용이하기 때문에 상용 규격화되어 실제 전력계통이나 설비에 사용된다. 접지시스템 설계시 접지저항치를 낮추기 위한 방법으로 전극을 여러 개 설치한 후 이들을 연접하여 사용하는데, 이는 접지저항의 병렬연결로써 전류의 경로를 분산시켜 전위상승을 억제하는 효과가 있다.

본 연구에서는 접지극을 그림 3.7과 같이 구성하여 과도접지임피던스 특성을 비교·검토하였다. 접지극과 피접지체를 연결하는 접지리드선의 길이에 따라 과도접지임피던스 특성이 달라지기 때문에 각각의 접지극에 따라 접지리드선의 길이를 5 50[m]로 변화시키면서 접지리드선 길이에 대한 변화특성도 검토하였다.

단일 접지극의 크기는 직경 10[mm], 길이 1[m]이며 3연접의 경우 같은 크기의 접지극을 저항구역을 고려하여 각 전극간의 거리를 5[m]로 유지한 정삼각형으로 배치하였다. 측정계를 이루는 모든 리드선은 도선의 인덕턴스 성분을 줄이기 위하여 가능한 겹치거나 루프를 형성하지 못하게 하였다[22]. 접지극 시설기준에 따르면 모든 접지극은 지표면으로부터 0.75[m] 깊이에 매설을 하도록 규정하였으나 이는 지표면에 전위상승에 의한 전위경도를 줄이기 위한 것으로 측정장치를 접지극의 저항구역을 고려한 일정거리 이상으로 간격을 유지하면 규정에 따른 매설깊이를 고려하지 않아도 된다.



(a) 단일 (b) 3연접

그림 3.7 접지극의 구성

Fig. 3.7 Configuration of the ground electrodes

그림 3.8은 Wenner의 4전극법을 이용한 대지저항률 측정계를 나타낸 것으로, 7[m]의 간격을 두고 보조극을 배치하였으며, 575[Hz]의 교류전류를 외부 2개의 전류보조극에 인가하여 평균대지저항률 11.9[Ω·m]를 측정하였다.

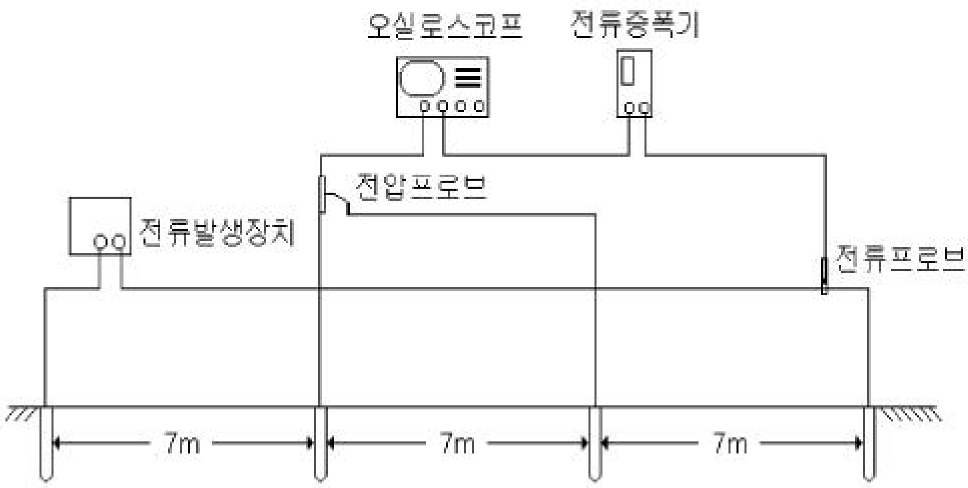



그림 3.8 대지저항률 측정계

Fig. 3.8 Ground resistivity measuring system

# 제 4 장 실험결과 및 고찰

표 4.1은 접지저항계를 이용하여 측정한 각 접지극의 정상접지저항을 나타낸 것이다.

표 4.1 접지계의 정상접지저항

Table 4.1 Stationary resistance of the grounding systems

| 접지계의 구성 | 정상접지저항[Ω] |
|---|---|
| 단일 접지극 | 10.8 |
| 3연접 접지극 | 4.4 |

3연접의 정상접지저항은 단일 접지극에 비하여 40.7[%]의 값을 나타내었다. 만일 3연접 접지극을 이루고 있는 개개의 접지극이 무한거리에 설치된다면, 단일 접지극의 정상접지저항값에 1/3을 나타내겠지만 이는 실제에 있어 불가능하며 저항구역을 고려한 유한거리에 설치된 경우 단일 접지극의 대략 40[%]의 정상접지저항값을 나타내므로 수치적인 계산으로도 상당히 일치하고 있다[23].

본 실험에서는 직각파 전류 및 뇌충격 전류에 대한 전위상승과 과도임피던스를 표 4.1에 나타낸 정상접지저항과 비교하여 정상상태와 과도상태의 특성을 비교·분석하였다.

### 4.1 직각파 전류에 대한 과도접지임피던스

접지극의 과도특성을 측정하기 위하여 펄스 성형회로(PFN; Pulse Forming Network) 이론을 적용한 직각파 전류 발생장치를 설계·제작하였으며, 상승시간 30[ns], 펄스폭 20[μs], 크기 2[A]를 갖는 직각파 전류를 접지극에 인가하였다.

그림 4.1은 직각파 전류에 대한 단일, 3연접 접지극의 인가전류 및 전위상승파형을 나타낸 것으로, 접지극 모두 전위상승파형은 250[ns]부근에서 최대값을 나타낸 후 점차 진동 감쇠하여 1.2[μs] 이후에는 정상상태를 유지하였다.

표 4.2는 직각파 전류에 대한 전위상승을 과도상태와 정상상태, 단일 접지극과 3연접 접지극으로 분류하여 나타낸 것이다.

표 4.2 직각파 전류에 대한 전위상승

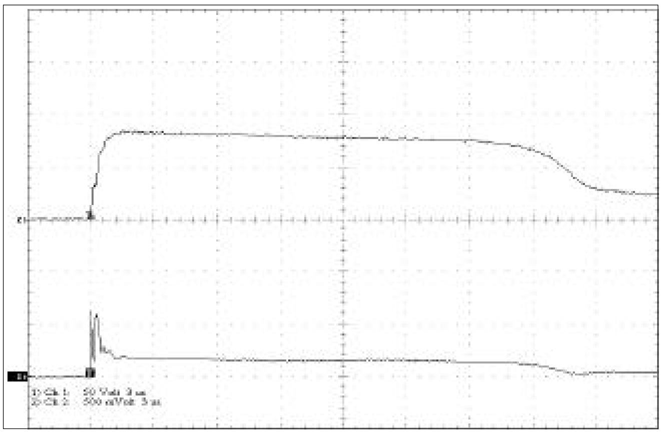
Table 4.2 Potential rising to the square pulse current

| 구 분 | | 접지계의 구성 | | 비 율[%] (3연접 / 단일) |
|---|---|---|---|---|
| | | 단일 접지극 | 3연접 접지극 | |
| 전위상승[V] | 과도상태 | 63.2 | 50.4 | 79.7 |
| | 정상상태 | 15.0 | 5.6 | 37.3 |
| 비 율[%] (과도상태 / 정상상태) | | 421.3 | 900.0 | |

단일 접지극의 경우 과도상태시의 최대전위상승은 정상상태시의 전위상승에 비하여 421.3[%]의 높은 값을 나타내었으며, 3연접 접지극의 경우

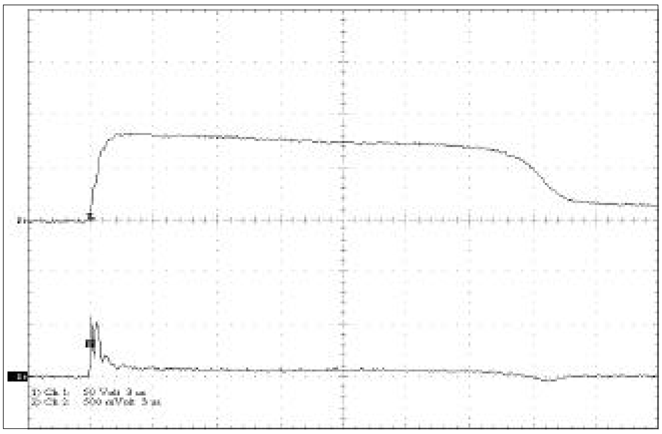
과도상태시의 최대전위상승은 정상상태시의 전위상승에 비하여 900.0[%]의 높은 값을 나타내었다. 또한 정상상태시 3연접 접지극의 전위상승은 단일 접지극의 전위상승에 비하여 37.3[%]의 값을 나타내어 62.7[%]가 감소한 반면 과도상태시의 최대전위상승은 79.7[%]로 20.3[%]가 감소한 값을 나타내었다. 이것은 연접을 했을 때 접지저항이나 접지임피던스는 감소하지만 각각의 전극을 서로 잇는 리드선의 인덕턴스 성분과 접속부의 접촉저항에 의한 전위상승이 더해지기 때문이다.

그림 4.2는 시간에 따른 접지극의 과도임피던스 변화를 나타낸다. 단일, 3연접 접지극의 과도접지임피던스의 특성은 모두 시간 경과에 따라 250[ns] 부근에 최대값을 나타낸 후 500[ns]까지 급격히 감소하다가 그 이후는 완만한 감쇠를 하여 1.2[㎲] 이후에는 정상상태로 안정되는 전형적인 유도성 특성을 보였다.



상 : 인가전류[ 1A/div, 3μs/div]
하 : 전위상승[50V/div, 3μs/div]

(a) 단일



상 : 인가전류[ 1A/div, 3μs/div]
하 : 전위상승[50V/div, 3μs/div]

(b) 3연접

그림 4.1 직각파 전류에 대한 응답파형

Fig. 4.1 Response waveforms to the square pulse current

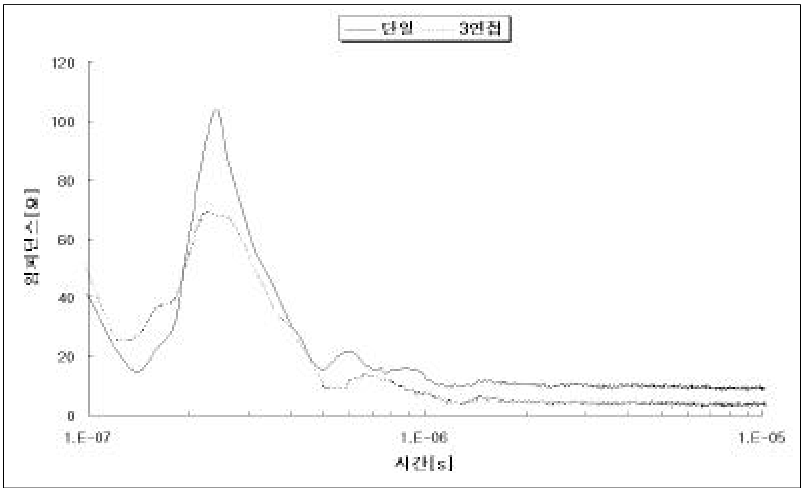



**그림** 4.2 **직각파 전류에 대한 과도임피던스**

Fig. 4.2 Transient impedance to the square pulse current

**표** 4.3**은 각 접지극의 정상접지저항과 최대임피던스의 값 그리고 이들의 비율을 나타낸 것이다**.

**표** 4.3 **직각파 전류에 대한 임피던스**

Table 4.3 Impedance to the square pulse current

| **구 분** | | **접지계의 구성** | | **비 율**[%] (3**연접** / **단일**) |
|---|---|---|---|---|
| | | **단일 접지극** | 3**연접 접지극** | |
| **임피던스**[Ω] | **최대임피던스** | 103.9 | 68.3 | 65.7 |
| | **정상접지저항** | 10.8 | 4.4 | 40.7 |
| **비 율**[%] (**최대임피던스** / **정상접지저항**) | | 962.0 | 1552.3 | |

단일 접지극의 경우 최대임피던스는 정상접지저항에 비하여 962.0[%]의 높은 임피던스 상승을 나타내었으며, 3연접 접지극의 경우 최대임피던스는 정상접지저항에 비하여 1552.3[%]의 높은 임피던스 상승을 나타내었다. 또한 연접에 따른 정상접지저항의 비율을 보면, 3연접을 했을 경우 단일 접지극에 비하여 40.7[%]의 값으로 단일 접지극에 비하여 59.3[%]가 감소된 값을 나타내었다. 반면에 최대임피던스의 비율을 보면, 3연접을 했을 경우 단일 접지극에 비하여 65.7[%]의 값으로 단일 접지극에 비하여 34.3[%]가 감소된 값을 나타내었다.

본 실험을 통하여 봉상접지극의 과도접지임피던스 특성은 모두 유도성을 나타내었고, 과도상태의 높은 전위상승 및 임피던스는 접지설계시 반드시 고려되어야 할 것이다. 또한 과도상태시 3연접 접지극의 최대전위상승 및 최대임피던스는 단일 접지극보다 적은 값을 나타내었지만, 정상상태만큼의 감쇠된 값을 얻기 위해서는 3연접 접지극을 이루는 리드선과 접속부의 접촉저항을 고려해야 한다.

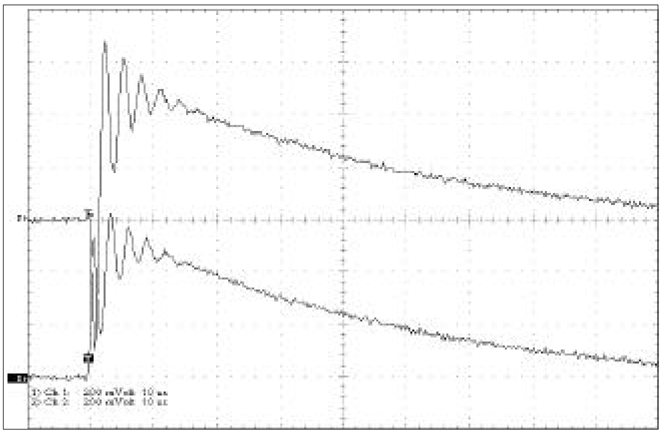
## 4.2 뇌충격 전류에 대한 과도접지임피던스

본 실험에서는 단일, 3연접 접지극의 시간에 대한 전류, 전위, 접지임피던스 특성을 측정·분석하고 실험 결과로부터 각 접지극에 대한 임피던스 파라미터를 결정하였다. 실제 접지계에서 접지리드선의 영향을 파악하기 위하여 각 접지극에 대한 접지리드선 길이의 변화에 대한 특성도 측정·분석하였다.

그림 4.3은 8/20[㎲] 뇌충격 전류에 대한 단일, 3연접 접지극의 과도응답 파형이다. 전압, 전류의 파형은 초기 급준한 상승을 하다가 최대값을 지나 점차 감소하였다. 전압, 전류파형 초기부분의 진동성분은 접지계의 인덕턴스 $L$과, 대지와 접지극간에 존재하는 캐패시턴스 $C$에 의한 고유진동, 토양에서의 비선형적인 전류의 전도와 뇌충격 전류 발생장치, 접지리드선, 접지극 등의 임피던스가 서로 정합되지 않았기 때문이다.

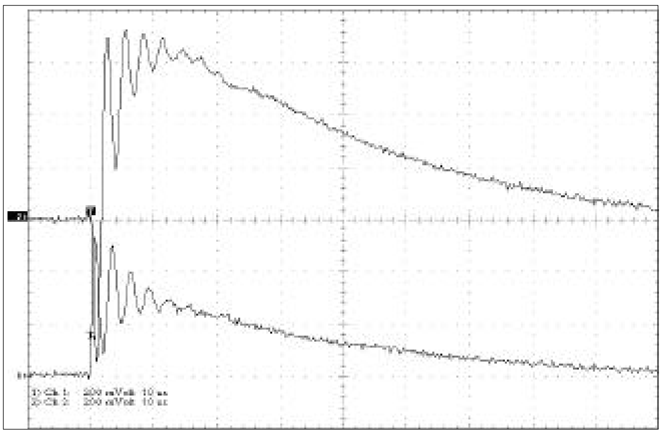
접지리드선의 길이가 5[m]와 50[m]일 경우 시간에 따른 각 접지극의 과도임피던스 변화를 그림 4.4에 나타내었다. 뇌충격 전류에 대한 접지극의 과도임피던스 특성은 모두 유도성 특성을 나타내었으며, 접지리드선의 길이가 5[m]보다 50[m]일 경우에 과도임피던스의 값이 더 높고 정상상태에 도달하기 위해 더 긴 시간이 걸렸다. 이는 접지리드선의 길이가 증가함에 따라 인덕턴스 성분이 증가했기 때문이라고 판단된다.

그림 4.5는 뇌충격 전류에 대한 접지극의 임피던스 파라미터를 접지리드선의 길이에 대하여 나타내었다. 크기를 볼 때, $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$의 순서로써 임피던스 파라미터간의 일반적인 관계와 일치하며, 그 크기는 단일 접지극보다 3연접 접지극으로 구성했을 때 전체적으로 감소함을 보였다. 또한 접지리드선의 길이가 길어질수록 증가하는 경향을 나타내어 접지계의 인덕턴스 증가에 따른 임피던스 파라미터의 상승을 확인하였다.



**상** : **인가전류**[ 15A/ div, 10**μs**/ div]
**하** : **전위상승**[200V/ div, 10**μs**/ div]

(a) **단일**

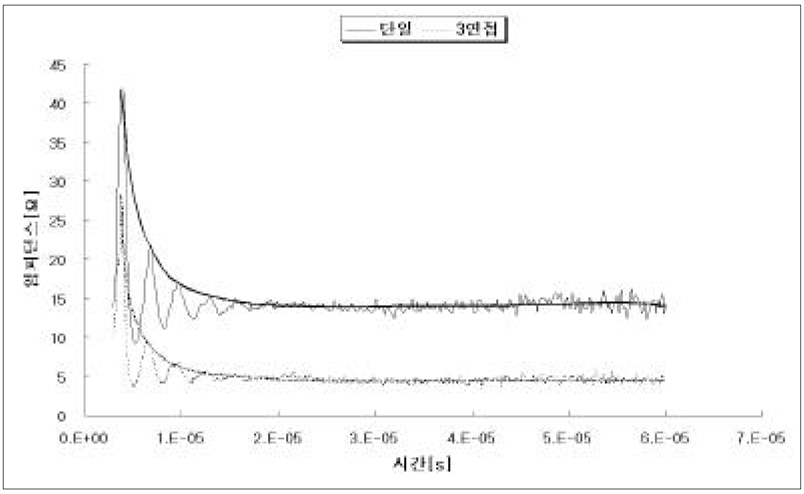


**상** : **인가전류**[ 17A/ div, 10**μs**/ div]
**하** : **전위상승**[200V/ div, 10**μs**/ div]

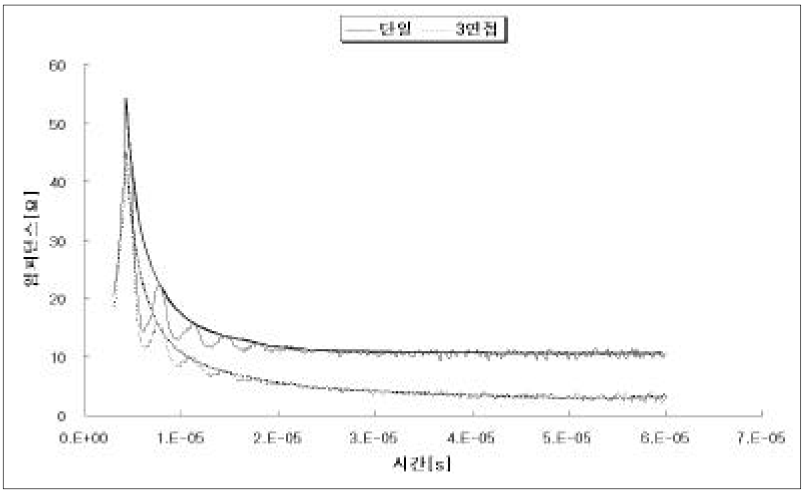
(b) 3**연접**

**그림** 4.3 **뇌충격 전류에 대한 응답파형**

Fig. 4.3 Response waveforms to the lightning impulse current



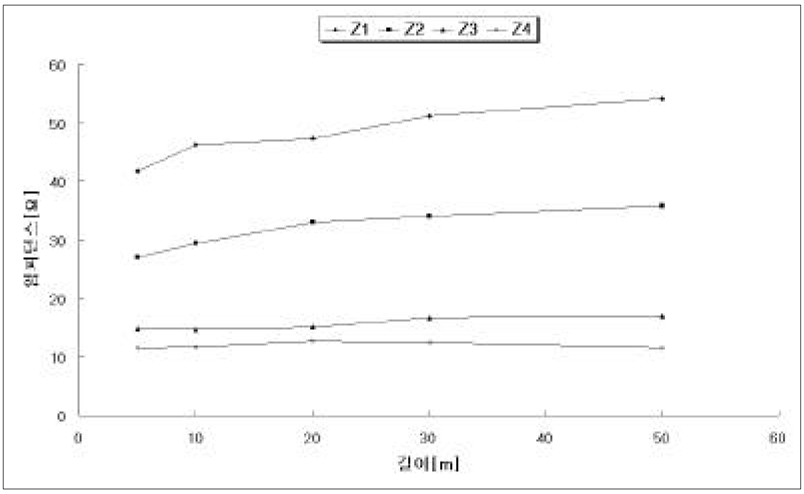

(a) **접지리드선이** 5[m]**일 경우**



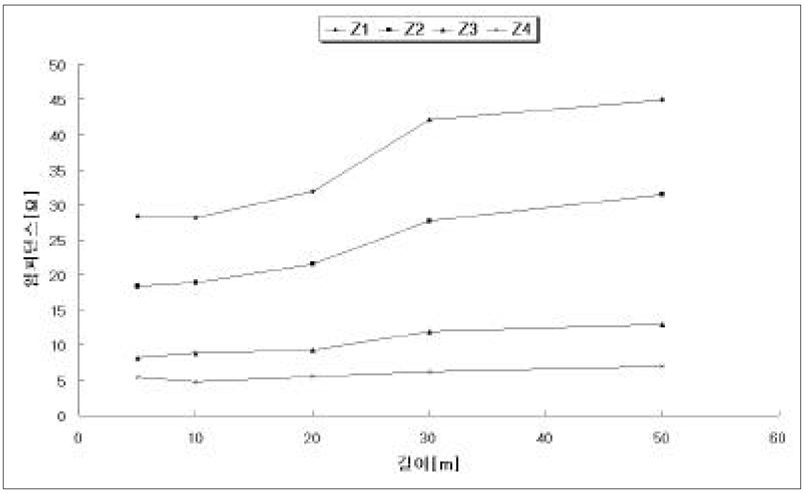

(b) **접지리드선이** 50[m]**일 경우**

**그림** 4.4 **뇌충격 전류에 대한 과도임피던스**

Fig. 4.4 Transient impedance to the lightning impulse current




(a) **단일**




(b) 3**연접**

**그림** 4.5 **접지리드선의 길이에 따른 임피던스 파라미터 변화**

Fig. 4.5 Changes of the impedance parameters with the length of grounding leads

접지리드선에 대한 임피던스 파라미터와 정상접지저항의 관계를 명확히 하기 위하여 임피던스의 최대값 $Z_1$, 실효서지임피던스 $Z_3$, 정상접지저항 및 각각의 비율을 표 4.4와 4.5에 나타내어 비교 · 분석하였다.

표 4.4 뇌충격 전류에 대한 임피던스 파라미터(접지리드선 = 5[m])

Table 4.4 Impedance parameters to the lightning impulse current (grounding leads = 5[m])

| 구분 | | 접지계의 구성 | | 비율[%] |
|---|---|---|---|---|
| | | 단일 접지극 | 3연접 접지극 | (3연접 / 단일) |
| 임피던스[Ω] | $Z_1$ | 41.8 | 28.3 | 67.7 |
| | $Z_3$ | 14.9 | 8.2 | 55.0 |
| | 정상접지저항 | 10.8 | 4.4 | 40.7 |
| 비율[%] ($Z_1$ / 정상접지저항) | | 387.0 | 643.2 | |
| 비율[%] ($Z_3$ / 정상접지저항) | | 138.0 | 186.4 | |

표 4.5 뇌충격 전류에 대한 임피던스 파라미터(접지리드선 = 50[m])

Table 4.5 Impedance parameters to the lightning impulse current (grounding leads = 50[m])

| 구분 | | 접지계의 구성 | | 비율[%] |
|---|---|---|---|---|
| | | 단일 접지극 | 3연접 접지극 | (3연접 / 단일) |
| 임피던스[Ω] | $Z_1$ | 54.0 | 44.9 | 83.1 |
| | $Z_3$ | 16.9 | 12.9 | 76.3 |
| | 정상접지저항 | 10.8 | 4.4 | 40.7 |
| 비율[%] ($Z_1$ / 정상접지저항) | | 500.0 | 1020.5 | |
| 비율[%] ($Z_3$ / 정상접지저항) | | 156.5 | 293.2 | |

표 4.4를 보면, 단일 접지극의 경우 정상접지저항에 대한 실효서지임피던스 $Z_3$는 138.0[%]의 값을 나타내었으며 3연접 접지극의 경우 정상접지저항에 대한 실효서지임피던스 $Z_3$는 186.4[%]로 정상접지저항보다 약간 높은 임피던스값을 나타내었다. 그러나 임피던스 최대값 $Z_1$은 단일 접지극의 경우 정상접지저항에 대하여 387.0[%], 3연접 접지극의 경우 643.2[%]의 높은 임피던스값을 나타내었다. 이러한 임피던스 파라미터는 표 4.5에서와 같이 접지리드선의 길이가 길어질 경우 더욱 증가하게 된다.

접지리드선이 연접에 의한 임피던스 파라미터의 감소에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각 접지극의 $Z_3$를 접지리드선의 길이 5[m]와 50[m]일 경우에 대하여 비교하였다. 접지리드선의 길이가 5[m]일 경우 3연접을 했을 때의 $Z_3$는 단일 접지극의 $Z_3$에 비하여 55.0[%]로 45.0[%]가 감소된 값을 나타내었지만, 접지리드선의 길이가 50[m]일 경우 3연접을 했을 때의 $Z_3$는 단일 접지극의 $Z_3$에 비하여 76.3[%]로 23.7[%]가 감소된 값을 나타내어 접지리드선의 길이가 길어질수록 연접에 대한 효과가 줄어들게 되었다. 이는 연접에 대한 임피던스의 감소보다는 접지리드선의 길이에 대한 임피던스의 증가가 더욱 우세한 영향을 미치기 때문이다. 따라서 연접을 통한 임피던스의 감소를 위해서는 가능한 접지리드선의 길이를 줄이는 것이 좋다.

# 제 5 장 결 론

본 연구에서는 접지계의 과도특성을 파악하기 위하여 봉상접지극을 단일 및 3연접으로 구성하고, 직각파 전류와 뇌충격 전류를 인가하여 전위상승 및 임피던스에 대한 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 접지계의 과도특성 분석에 필요한 빠른 상승시간을 갖는 전류원은 펄스성형회로(PFN; pulse forming network) 이론을 적용하여 상승시간 30[ns], 펄스폭 20[μs]을 갖는 직각파 전류 발생장치를 설계·제작하였다.
2) 직각파 전류에 대한 단일 및 3연접 접지극의 과도임피던스는 정상접지저항에 비하여 각각 962.0[%], 1552.3[%]의 대단히 높은 값을 나타내었다.
3) 뇌충격전류에 대한 단일 및 3연접 접지극의 실효서지임피던스 $Z_3$는 정상접지저항에 비하여 각각 138.0[%], 186.4[%], 최대임피던스 $Z_1$은 각각 387.0[%], 643.2[%]의 높은 값을 나타내었다.
4) 단일에 대한 3연접 접지극의 연접효과를 고려해 볼 때, 직각파 전류 인가실험에서는 최대임피던스가 34.3[%], 뇌충격전류 인가실험에서는 실효서지임피던스 $Z_3$가 45.0[%] 감소하였다. 전체적으로 연접에 대한 접지임피던스의 감소효과를 나타내고 있으나 정상접지저항의 감소효과 59.3[%]에 비하여 낮게 나타났다. 특히 접지리드선의 길이가 길어질수록 연접에 따른 임피던스의 감소효과는 더욱 낮아졌다. 이는 연접에 의한 접지저항 및 인덕턴스의 감소보다 접지계를 이루는 리드

선의 인덕턴스 성분과 접속부의 접촉저항의 증가가 우세하기 때문이다.

접지계는 과도전류에 대하여 각기 다른 비선형 특성을 나타내며 일반적으로 정상접지저항보다 큰 값을 나타낸다. 따라서 접지설계시 직류 및 상용주파수에 상당하는 정상접지저항뿐만 아니라 과도전류에 의한 과도접지임피던스를 고려해야 효과적인 접지대책을 수립할 수 있다.

향후 봉상접지극의 형상과 대지저항률을 감안한 접지계의 과도임피던스 특성을 측정 · 분석하고 여러 가지 접지극에 대하여 지속적인 연구를 수행한다면, 과도전류에 대한 임피던스의 저감대책을 확립할 수 있을 것이다.

# 참 고 문 헌


[1] 김세동, “첨단정보빌딩에서의 접지기술”, 전기저널, pp. 15 23, 1999. 12.

[2] 이복희, “정보화 기기의 뇌써-지 보호기술”, 電氣學會誌, 第45卷, 3號, pp. 23 32, 1996. 3.

[3] 高橋 健彦, 金聖模, 李炯秀 "接地技術入門“, オ一ム社, pp. 203 218, 1997.

[4] R. J. Gustafson, R. Pursley, V. D. Albertson, "Seasonal grounding Resistance Variations on Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, 1990. 4.

[5] Y. I. Chow, J. J. Yang, K. D. Srivastava, "Grounding Resistance of Buried Electrods in Multi-Layer Earth Predicted by Simple Voltage Measurements along Earth Surface - A Theoretical Discussion", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, 1995. 4.

[6] 高橋 健彦, "接地抵抗測定法の理論的検討“, 日本電氣設備學會誌, pp. 899 907, 1990.

[7] 井上一男, “接地抵抗測定における問題点”, 日本電氣設備學會誌, pp. 878 898, 1990. 2.

[8] 三谷 弘, "接地抵抗のサ一ジ特性とその測定法", 日本電氣設備學會誌, pp. 871 877, 1990.

[9] A. Geri, "Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, 1999. 7.

[10] Rajab Elarbi, Shohei Kato, Kunitaka Mizobe, "Transient Grounding Impedance of Electrode Elements for Grounding Mat", JIEE, Vol. 117-B, No. 3, 1997.

[11] **川瀬 太郎**, **高橋 健彦**, "**ドワイトの接地抵抗公式の導出過程**", **日本電氣設備學會誌**, pp. 342 344, 1987.

[12] M. Abdel-Salam, A. El-Morshedy et al., "High-Voltage Engineering", Marcel Dekker, pp. 419 428, 2000.

[13] I.F.Gonos, F.V.Topalis, I.A.Stathopulos, “Transient Impedance of Grounding Rods”, High Voltage Engineering Symposium, No. 467, 1999.

[14] **京都-ハイパワ―テクノロヅ-研究會**, "**パルズパワ―工學の基礎と應用**", **京都-ハイパワ―テクノロヅ-研究會**, pp. 78 80, 1992.

[15] Antonino Musolino, Marco Raugi, Bernardo Tellini, “Pulse Forming Network Optimal Design for the Power Supply of Eml Launchers”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No. 1, pp. 480 483, 1997.

[16] **佐藤 康宏**, **池田 長康**, “**枝狀**PFN**による單極性 パルス大電流の發生**”, JIEE, Vol.116-B, No. 2, pp. 218 224, 1996.

[17] **關岡昇三**, **林田 弘**, **原 武久**, **雨谷昭弘**, “**インパルス大電流に對する非線型接地抵抗モデルの開發**”, JIEE, Vol. 118-B, No. 1, 1998.

[18] Ronald B. Standler, "Protection of Electronic Circuits from Overvoltages", Wiley, pp. 86 91, 1989.

[19] M. S. Naidu, V. Kamaraju, "High Voltage Engineering", McGraw-Hill, pp. 143 147, 1995.

[20] **宅間**, **柳父**, “**高電壓大電流工學**”, **電氣學會**, pp. 4 7, 1988.

[21] IEEE Std 81, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, pp. 17  24, 1983.

[22] Henry W. Ott, "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", Wiley, pp. 93  96, 1988.

[23] V. Prasad Kodali, "Engineering Electromagnetic Compatibility", IEEE Press, pp. 185  196, 1996.

# 감사의 글

새천년을 알리는 제야의 종소리를 들으며 뜻깊은 한 해를 보내리라 다짐하던 때가 엊그제 같은데 어느덧 졸업을 앞두게 되었습니다. 2년이라는 기간동안 인내하고 고심하며 때론 웃고 때론 슬퍼하며 얻은 자그마한 결실을 선보이게 되어 도와주신 분들께 그 감사의 마음을 전합니다.

아들에게 한없는 정성을 쏟아주신 아버지께 감사드리며, 동생 일용이, 막내 일환이와 가족 모두의 건강을 기원합니다.

못난 제자를 위해 헌신적인 가르침과 따뜻한 격려를 아끼지 않으시며, 항상 최선을 다하는 모습을 몸소 보여주신 지도교수 길경석 교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 세심하게 논문수정을 지도해주시고 앞으로의 삶에 대하여 충고해주신 박관수 교수님과 이성근 교수님께 이 자리를 빌어 감사의 마음을 전합니다.

연구실생활을 함께하며 늘 모범이 되어준 상규형, 이제 막 신혼의 단꿈에 젖어있는 종혁이, 선배로써 많은 도움을 준 주섭형과 재용이 그리고 막내 원진이, 명진씨와 점식씨에게 고마움을 전하며, 1년이 넘는 자취생활을 같이 하며 불편함이 없도록 도와준 후배 효빈이와 민호에게 늘 행복이 가득하길 기원합니다.

끝으로 항상 내 곁에 있어줄 은정이와 그의 가족 모두에게 즐거움이 함께하길 빌겠습니다.

한 해가 기울고 새로운 한 해가 시작되었습니다. 본 논문이 나오기까지 도와주신 분들의 새해 소망이 모두 이루어지길 바라며, 항상 최선을 다하는 모습으로 그 고마움을 전하겠습니다.

- 2001년 2월 김 일 권