

안전분야 -연구자료
연구원 - -

무선주파수 전자파에 의한 감전 방지 기술 개발

한국산업안전공단
산업안전보건연구원

제 출 문

한국산업안전공단 이사장 귀하

본 보고서를 산업재해 예방기술의 연구개발 및 보급사업의 일환으로 수행한 “무선주파수 전자파에 의한 감전 방지 기술 개발” 최종보고서로 제출합니다.

2001. 12.

주관연구부서: 산업안전보건연구원 안전공학연구실

연구책임자 : 책 임 연 구 원 이 형수

공동연구자 : 한국표준과학연구원 김 정환

요 약 문

1. 과제명: 무선주파수 전자파에 의한 감전 방지 기술 개발

2. 연구기간: 2001. 1. 1. ~ 2001. 12. 31

3. 연 구 자: 안전공학연구실 책임연구원 이 형수

공동연구자: 한국표준과학연구원 책임연구원 김 정환

4. 연구목적

본 연구는 라디오 방송국 송신소 근처의 건설현장에서 크레인 작업을 할 때 전자파(중파 대역)에 의하여 크레인에 유기되는 전압으로 인하여 감전될 우려가 있는 건설현장의 크레인 작업자의 위험성을 예방하기 위하여 크레인에 유기되는 전자파의 문제점과 재해사례를 조사하고, 사전에 위험성의 정도를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하는데 그 목적을 두었다.

5 연구내용

본 연구에서는 전자파의 복잡한 발생 메커니즘 등과 구체적인 예방대책을 수립하기 위해서는 중장기적이고 광범위한 연구가 필요한 것으로, 이번 연구에서는 아래의 사항에 대해 연구의 중점을 두고 수행하였다.

- 크레인이 받는 전자파의 문제점과 재해사례 조사

- 우리나라 라디오 방송국 송신소의 위치 및 취락반경 조사
- 이상전압 현장측정법 개발
- 크레인에 유기되는 전압, 전류 예측 프로그램 개발(위탁연구분)
- 프로그램의 효용성 입증을 위한 실험(위탁연구분)

6. 활용계획

본 연구의 결과는 중파 방송국 송신소 근방의 건설현장에서 크레인 작업을 할 때 우리나라 방송국 송신소의 위치와 출력에 대한 정보를 제공하고, 개발된 프로그램을 이용하여 전격의 위험성 여부를 사전에 예측하도록 하는데 활용할 수 있다.

7. 연구개요

오늘날 전자파에 의한 인체의 유해성 문제, 전자소자를 갖는 기기의 오동작의 위험성에 관해서는 널리 알려져 있고, 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나, 전자파로 인해 금속 구조물에 전압이 유기되어 감전될 수는 위험성에 대해서는 우리나라 여러 곳에서 명백히 존재하는 현상임에도 지금까지 널리 인식되지 못한 실정에 있었다.

최근에 이르러, 국내 건설현장에서 크레인 작업 근로자들이 작업 중에 전기적 쇼크로 인한 위험성을 느끼고 대책을 요청하는 사례가 빈발하고 있어 우리 공단에서 이에 대한 현장 원인조사를 실시한 결과, 공중에 방사된 전자파가 수신안테나로 작용을 하는 크레인에 전압을 유기시키고, 크레인의 붐 등에 작업자의 손 등이 접촉되어 전격을 느끼게 된다는 사실을 밝히게 되었다.

구체적인 예를 들면, 중파대역의 방송국 송신소 근처에서 사용하는 타워형 크레인이 거대한 수신안테나로 작용하여 크레인 자체에 커다란 이상전압이 발생

해서 크레인 혹 등에 불꽃이 발생하거나, 이에 접촉해서 전기적인 충격을 받든지, 전자식의 과부하 방지장치 등의 안전장치가 오동작하거나 타버리는 등의 장애를 들 수 있다.

지금까지 건설현장에서 이런 현상이 발생할 때마다 섬유로 된 밧줄을 사용해서 크레인을 사용하는 정도의 대처방안이 적용되기도 하였다. 그러나, 많은 사례를 경험하는 현재에도 확실한 기술적인 대응방안이 확립되어 있지 않은 실정에 있다. 그 이유는 첫째, 이론적인 해명의 모호하여 모의시험도 어렵고, 둘째, 방송망을 포함한 전자파 환경의 조사, 정리가 용이하지 않았으며, 셋째, 방송국 측과의 충분한 의사소통이 되지 않았고, 네째, 크레인을 건설한 후에 트러블이 발생하여 응급조치로 대응해야 하므로 충분한 검토가 이루어지지 않았으며, 다섯째, 발생 당시의 현장상황 등이 체계적으로 정리되어 남아 있지 않다는 등이 원인이 될 수 있다.

본 연구에서는 크레인이 받는 전자파의 문제점과 재해사례를 조사하고, 우리나라 라디오 방송국의 송신소 위치와 출력을 파악하여 건설현장에 그 정보를 제공하는 한편, 유기되는 전압과 전류의 크기를 예측하는 프로그램을 개발하였으며, 프로그램의 타당성에 대한 검증을 실험을 통하여 증명하였다.

8. 중심어

전자파, 크레인, 유기전압, 송신소, 안테나

목 차

제1장 서론	1
1. 연구배경과 목적	1
2. 연구내용 및 범위	2
3. 기대효과 및 활용방안	3
제2장 크레인이 받는 무선주파수 전자파의 위험성	4
1. 무선주파수 전자파의 기초 개념	4
가. 파장과 주파수	4
나. 안테나	6
2. 크레인이 받는 전자파의 위험성	11
가. 크레인과 안테나	11
나. 이상전압에 따른 문제	13
제3장 라디오 방송국 송신소 위치와 재해사례	15
1. 방송국 송신소 위치	15
2. 송신소 위치 지도	24
3. 재해사례 조사	25
가. 조사 현장	25
나. 현장 개요	25
다. 조사 및 측정 방법	27
라. 조사 결과	30
마. 조사결과 검토	30
제4장 위험 예측 프로그램 개발	32

1. 타워크레인의 종류와 모델링	32
2. 수치해석 프로그램의 개발	34
가. 개 요	34
나. 모멘트법을 이용한 수치해석	37
3. 수치해석 결과	50
4. 모사실험	55
가. 실험장치의 구성	55
나. 실험결과	60
다. 결과 고찰	66
 제5장 유기전압 현장 측정법과 감전방지 대책	67
1. 유기전압 및 전계강도의 측정	67
가. 유기전압의 간이 확인방법	67
나. 이상전압의 현장측정 방법	67
다. 전계강도의 측정방법	69
2. 감전방지 대책	70
가. 크레인혹 선단 이상전압의 대책	70
나. 과부하방지장치 오작동의 대책	74
다. 배선에 유기되는 이상전압의 대책	74
 제6장 결론	77
 참 고 문 헌	79

제1장 서론

1. 연구배경과 목적

오늘날 전자파에 의한 인체의 유해성 문제, 전자소자를 갖는 기기의 오동작의 위험성에 관해서는 널리 알려져 있고, 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나, 전자파로 인해 금속 구조물에 전압이 유기되어 감전될 수는 위험성에 대해서는 우리나라 여러 곳에서 명백히 존재하는 현상임에도 지금까지 널리 인식되지 못한 실정에 있었다.

최근에 이르러, 국내 건설현장에서 크레인 작업 근로자들이 작업 중에 전기적 쇼크로 인한 위험성을 느끼고 대책을 요청하는 사례가 빈발하고 있어 우리 공단에서 이에 대한 현장 원인조사를 실시한 결과, 공중에 방사된 전자파가 수신 안테나로 작용을 하는 크레인에 전압을 유기시키고, 크레인의 붐 등에 작업자의 손 등이 접촉되어 전격을 느끼게 된다는 사실을 밝히게 되었다.

구체적인 예를 들면, 중파대역의 방송국 송신소 근처에서 사용하는 타워형 크레인이 거대한 수신안테나로 작용하여 크레인 자체에 커다란 이상전압이 발생해서 크레인 혹 등에 불꽃이 발생하거나, 이에 접촉해서 전기적인 충격을 받든지, 전자식의 과부하 방지장치 등의 안전장치가 오동작하거나 타버리는 등의 장애를 들 수 있다.

지금까지 건설현장에서 이런 현상이 발생할 때마다 섬유로 된 밧줄을 사용해서 크레인을 사용하는 정도의 대처방안이 적용되기도 하였다. 그러나, 많은

사례를 경험하는 현재에도 확실한 기술적인 대응방안이 확립되어 있지 않은 실정에 있다. 그 이유는 첫째, 이론적인 해명의 모호하여 모의시험도 어렵고, 둘째, 방송망을 포함한 전자파 환경의 조사, 정리가 용이하지 않았으며, 셋째, 방송국 측과의 충분한 의사소통이 되지 않았고, 네째, 크레인을 건설한 후에 트러블이 발생하여 응급조치로 대응해야 하므로 충분한 검토가 이루어지지 않았으며, 다섯째, 발생 당시의 현장상황 등이 체계적으로 정리되어 남아 있지 않다는 등이 원인이 될 수 있다.

위와 같은 연구의 당위성을 바탕으로 본 연구는 라디오 방송국 송신소 근처의 건설현장에서 크레인 작업을 할 때 전자파(중파 대역)에 의하여 크레인에 유기되는 전압으로 인하여 감전될 우려가 있는 건설현장의 크레인 작업자의 위험성을 예방하기 위하여 크레인에 유기되는 전자파의 문제점과 재해사례를 조사하고, 사전에 위험성의 정도를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하는데 그 목적을 두었다.

2. 연구내용 및 범위

본 연구에서는 전자파의 복잡한 발생 메커니즘 등과 구체적인 예방대책을 수립하기 위해서는 중장기적이고 광범위한 연구가 필요한 것으로, 이번 연구에서는 아래의 사항에 대해 연구의 중점을 두고 수행하였다.

- 크레인이 받는 전자파의 문제점과 재해사례 조사
- 우리나라 라디오 방송국 송신소의 위치 및 취락반경 조사
- 이상전압 현장측정법 개발
- 크레인에 유기되는 전압, 전류 예측 프로그램 개발(위탁연구분)
- 프로그램의 효용성 입증을 위한 실험(위탁연구분)

3. 기대효과 및 활용방안

방송국 송신소 안테나 근방의 건설현장에서 크레인 작업을 할 때 본 연구에서 제시되는 우리나라 방송국 송신소의 위치와 출력에 대한 정보를 개발된 예측 프로그램에 입력하면 크레인에 유기되는 전압과 전류를 정량적으로 계산할 수 있으며, 이를 토대로 전격의 위험성 여부를 사전에 알 수 예측하는데 활용하여 감전의 위험으로부터 근로자를 보호하는데 활용한다.

제2장 크레인이 받는 무선주파수 전자파의 위험성

1. 무선주파수 전자파의 기초 개념

연못의 수면에 돌을 던지면 파의 동그라미가 연못의 가장자리를 향해 넓게 퍼져나가는 것처럼 보이지만, 실제 물은 아래위로 운동하고 있는 것이다. 이 진동이 진행방향으로 조금씩 움직이고 있으므로 전체의 모양은 진행하고 있는 것처럼 보인다. 전파도 파동으로서 이와 같이 공간에 퍼져나가는데, 그림 2.1에 나타낸 바와 같이 전계와 자계가 있고 이들은 상호 직각인 관계를 유지하면서 진행한다.

전자파에서 전계와 자계의 관계는 공간에서 자계의 변화가 전계를 만들고 전계의 변화가 자계를 만들어 낸다고 할 수 있다. 전계와 자계의 변화를 그림으로 나타내면 그림 2.2와 같은 관계를 가지고 있다. 따라서, 안테나에 고주파 전류를 공급하면 공간에 자계와 전계를 만들어낼 수 있으며, 역으로 공간의 전계와 자계중에 안테나가 있으면, 고주파 전류를 발생시킬 수 있게 된다.

가. 파장과 주파수

전파는 주기적으로 반복하는 파동으로 진행하고 있으나, 이 진행속도는 빛의 속도($3 \times 10^8 \text{m}$)와 같다. 동일파형이 1초간에 반복되는 회수, 즉 1초간의 진동수가 주파수다.

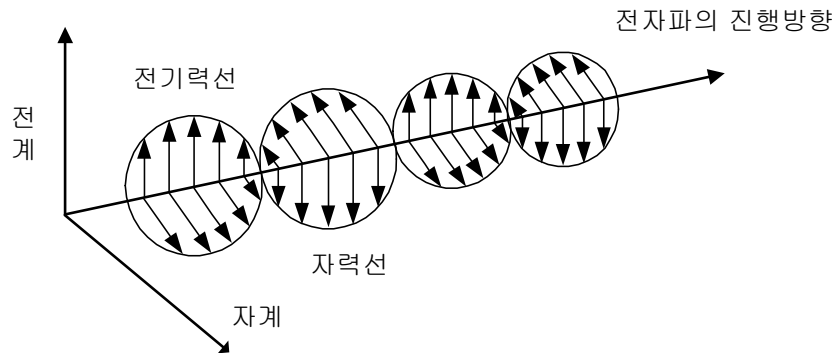


그림 2.1 전계와 자계의 관계

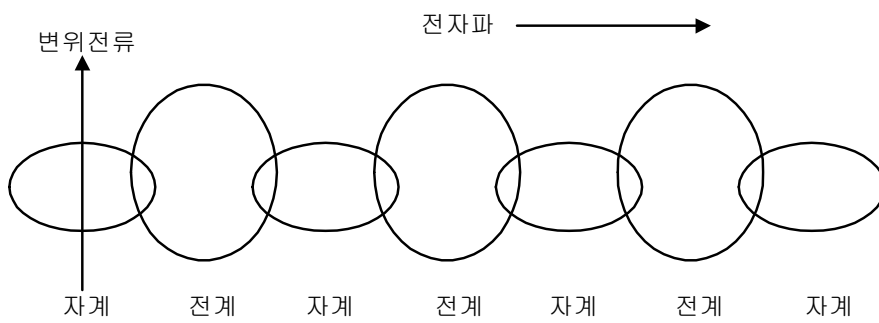


그림 2.2 전자파의 생성

여기서, 전파의 파장을 $\lambda(\text{m})$, 주파수를 $f(\text{Hz})$, 전파의 진행속도를 $c(\text{m/s})$ 라 할 때, 다음과 같은 관계가 있다.

$$c=f\lambda$$

따라서, 파장 $\lambda=c/f$, 주파수 $f=c/\lambda$ 가 된다.

전파는 표 2.1과 같이 일반적으로 파장 또는 주파수로 구분한다.

라디오방송에서 사용되는 전파(주파수 594kHz ~ 1422kHz)는 주파수대의 구분으로는 MF(300kHz ~ 3000kHz), 파장의 구분으로는 중파(100m ~ 1000m)에 속한다.

표 2.1 전파의 분류

구 분		주파수 범위	파장범위	이용분야
주파수	파장			
VLF	장파	3kHz ~ 30kHz	100,000 ~ 10,000m	무선항해용
LF		30kHz ~ 300kHz	10,000 ~ 1,000m	항로위치안내용
MF	중파	300kHz ~ 3000kHz	1,000 ~ 100m	라디오 방송 등
HF	단파	3MHz ~ 30MHz	100 ~ 10m	선박통신, 아마츄어무선 등
VHF	초단파	30MHz ~ 300MHz	10 ~ 1m	TV방송, FM방송 등
UHF	극초단파	300MHz ~ 3000MHz	1m ~ 10cm	자동차전화, UHF방송 등
SHF		3GHz ~ 30GHz	10 ~ 1cm	마이크로파 통신, 레이더 등
EHF		30GHz ~ 300GHz	1cm ~ 1mm	근거리통신, 밀리파 레이더 등
		300GHz ~ 3000GHz	1 ~ 0.1m	전파망원경 등

나. 안테나

전파를 공간에 발사해서 공간의 전파를 받기 위한 도선 또는 도체를 안테나라 한다. 송신에 사용하는 안테나를 송신안테나, 수신에 사용하는 안테나를 수신안테나라 한다. 그러나, 안테나의 성질은 송수신이 모두 가능하다. 안테나는 그림 2.3에 나타낸 바와 같이 안테나의 한끝을 접지하는 접지형과 그림 2.4와 같이 접지하지 않은 비접지형의 두 가지로 나눌 수 있다.

일반적으로 단파대(30MHz) 이하에는 접지형과 비접지형의 양방 안테나를 사용하고 초단파대(30MHz) 이상에서는 거의 비접지형이 사용되고 있다.

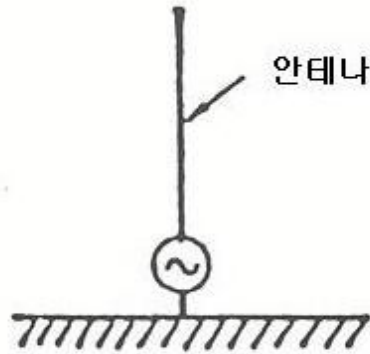


그림 2.3 접지형 안테나

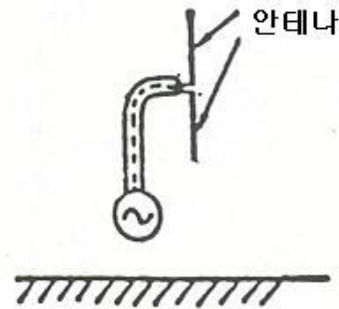


그림 2.4 비접지형 안테나

안테나의 길이가 파장의 $1/2$ 인 비접지형 안테나(수직 다이폴 안테나라 한다)는 그림 2.5와 같은 전류, 전압분포가 된다. 이 $\lambda/2$ (또는 반파)비접지형 안테나의 전류, 전압분포를 비교할 때, 접지안테나의 전류, 전압분포는 그림과 같이 대지에 대한 이미지를 고려하면 실제 길이의 2배가 되는 비접지형 안테나의 전류분포와 같게 된다.

양자도 전류는 선단에서 최대, 접지점 또는 급전점에서 최대가 되고, 전압은 선단에서 최대, 접지점에서는 최소가 된다.

일정 길이의 수직안테나의 기초부에 고주파 전류계를 넣어 고주파 전원의 주파수를 연속적으로 변화시키면 특정주파수에서 큰 전류가 흐른다. 이 때를 그 주파수에 공진한다고 말한다. 안테나에 흐르는 전류분포는 어느 경우든 접지점의 어딘가에 전류의 가장 큰 부분이 되고, 선단에서 최소가 된다. 이 때문에 접지형 안테나에서는 안테나의 길이가 파장의 $1/4$ 이 되도록(또는 안테나의 전류가 최대가 되도록) 조정한다.

따라서, 중단파대(1606.5kHz ~ 4MHz)의 경우 $1/4$ 파장의 접지형 안테나의 길이는

약 47~19m가 되는데, 꼭 이 길이로 하지 않을 수 있다. 즉, 이 때 안테나의 길이를 직접 변화시키지 않고 전기적으로 변화시키는 방법을 취하면 된다.

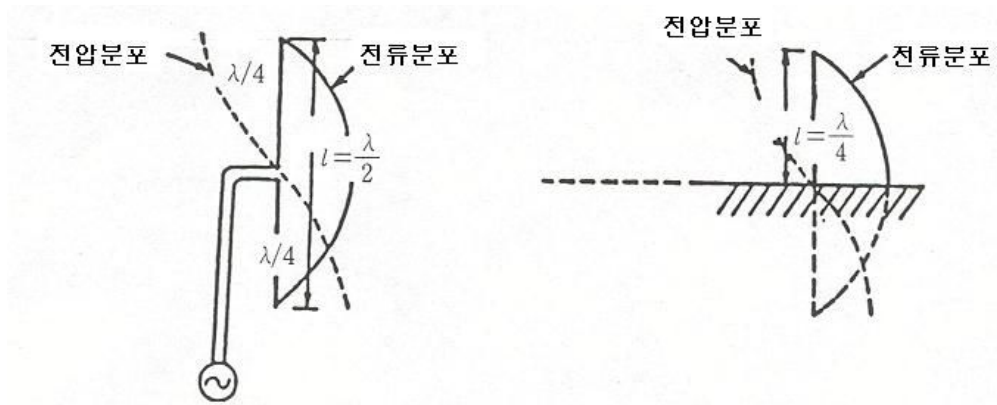


그림 2.5 접지와 비접지 안테나의 전류 전압 분포의 비교

그림 2.6과 같은 코일을 안테나회로에 직렬로 삽입하면 안테나의 공진 주파수는 낮아지고, 긴 파장의 전파에 공진하게 되는데, 이것은 안테나를 연장한 것과 같다. 이와 같은 목적으로 상용하는 코일을 연장코일이라 한다.

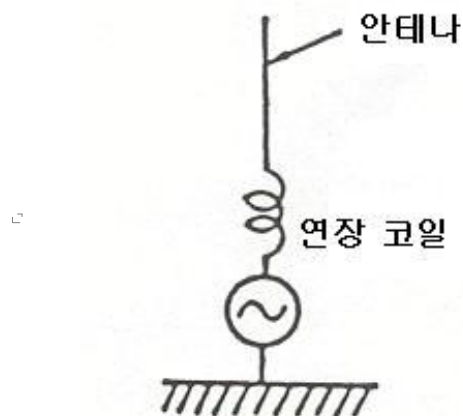


그림 2.6 연장 코일

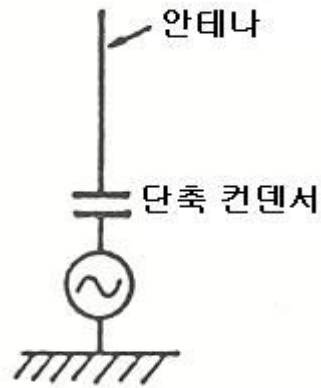


그림 2.7 단축 컨덴서

또, 그림 2.7과 같이 콘안테나를 안테나회로에 직렬로 삽입하면 안테나의 공진은 높게 되고 짧은 파장에 공진하게 된다. 이와 같은 목적으로 삽입하는 컨덴서를 단축 컨덴서라 한다. 일반적으로 접지형 안테나를 사용하는 경우 연장 코일의 인덕턴스 또는 단축 컨덴서의 정전용량이 쉽게 변하는 것을 사용하고 있다. 안테나를 어떤 주파수에 공진시켜 큰 전류가 흐르도록 조정하는 것을 안테나 동조라 한다. 대표적인 안테나로 다음과 같은 것이 많이 사용된다.

(1) 다이폴 안테나

기본적인 안테나로 길이가 파장의 $1/2$ 이 되고, 이 중앙부에서 급전한다. TV의 수신안테나는 다이폴 안테나에 반사기와 도파기라 부르는 소자가 첨가된 것으로 특정의 방향성을 가지고 있으며, 도파기 수를 증가시키면 방향성은 커진다(그림 2.8).

(2) $1/4$ 파장의 수직 안테나

수직으로 세운 $1/4$ 파장의 수직안테나로 대지 등을 반사면으로 하여 이용

하고 1/2파장의 다이폴과 같은 성질을 가지고 있다. 자동차 등에 탑재되어 있는 것이 많고 이 안테나에서 방사되는 전파의 세기는 각 방향에 대해 같은, 즉 무방향성이다(그림 2.9).

(3) 파라볼 안테나

그림 2.10와 같은 반사기를 가진 안테나로 주로 마이크로파 대역에 사용되며 최근에는 위성방송용으로 보급되고 있다.

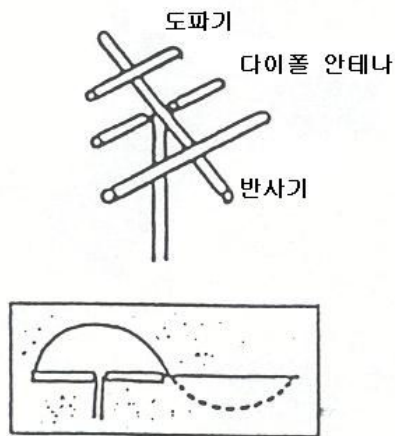


그림 2.9 다이폴 안테나

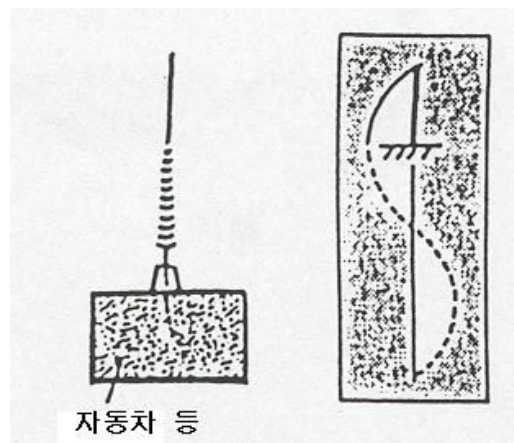


그림 2.10 1/4 파장의 수직 안테나

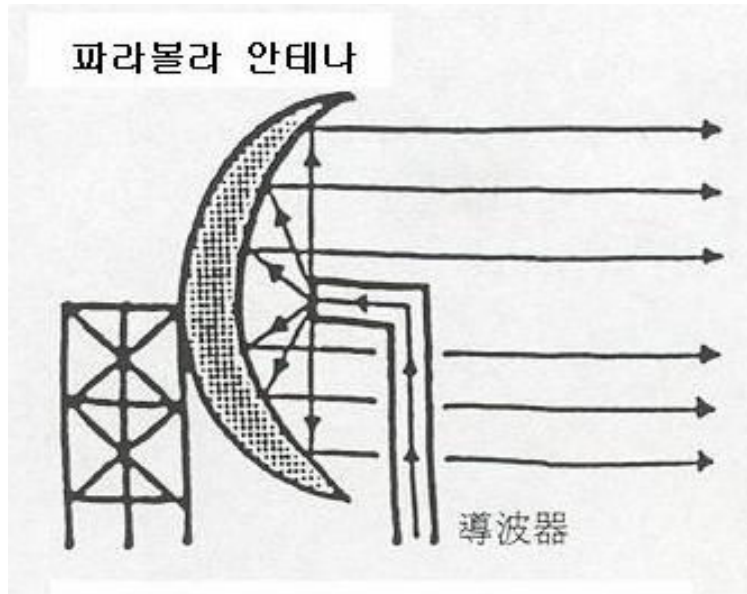


그림 2.11 파라볼라 안테나

2. 크레인이 받는 전자파의 위험성

가. 크레인과 안테나

전파가 있는 장소에 금속봉을 두면, 금속봉은 안테나가 되어 전압이 유기된다. 금속봉의 한 쪽이 대지에 접지되어 있는 경우, 이 금속봉의 다른 쪽 끝의 유기전압은 봉의 길이가 전파파장의 $1/4$ 인 때 가장 크게 된다. 게다가, 금속봉이 환상 또는 꺾어진 형태로 되어 있으면, 유기전압은 그 전자에너지가 금속봉 주변에 일시적으로 축적되는 공진 현상 때문에 수십배로 증폭된다.

중파 라디오전파와 대형 크레인 사이에는 이러한 관계가 있어, 하물을 싣고 내리는 부분(荷物部)에 높은 이상전압이 발생한다. 크레인의 전장이 근처 중파

라디오 송신소 전파파장의 약 1/4 길이가 될 때, 최대 전압이 유기되어, 이 전압이 공진에 의해 약 10배로 증폭되어 하물부에 발생한다.

중파 라디오 송신소로부터의 거리와 대형 크레인의 하물부에 발생하는 이상 전압과의 관계식에 대해서는, 송신소의 출력전력에 관계되기 때문에 단순히 말할 수는 없다. 예를 들면, 100 kW 출력의 송신소 전파의 경우에는 전계강도와 안테나에 유기되는 전압과의 관계는 다음과 같다.

전계강도는 거리에 반비례하고, 방송국의 송신전력의 제곱근에 비례한다.

$$E \approx 10\sqrt{P}/r \quad (2.1)$$

예: 송신전력 100 kW, 거리 1 km라고 하면,

$$E = 10 \times \sqrt{100 \times 1000 / 1000} \approx 3 \text{ V/m}$$

여기서, 안테나에 유기되는 전압은

- 전계강도의 크기에 비례
- 크레인의 높이에 비례
- 크레인의 첨예도(Q factor)에 비례한다.

크레인에 발생되는 이상전압의 값을 표시하면,

$$V = 2 \cdot E \cdot h \cdot Q / \pi \text{ (V)} \quad (2.2)$$

예: 높이 50 m, 전계강도 3 V/m, 크레인의 첨예도를 10이라고 하면,

$$2 \times 3 \times 50 \times 10 / \pi \approx 1000 \text{ V}$$

지상에 설치되어 이용되는 대형 크레인의 경우는, 송신소로부터 반경 약 4

km 이내의 영역에서 높은 이상전압이 발생한 일이 있다. 또, 건설중인 고층빌딩의 최상층에 설치되어 사용되는 타워크레인의 경우는, 송신소로부터 반경 약 10 km이내의 영역에서 높은 이상전압이 발생한 예도 있다.

크롤러 타워크레인, 이를 수신안테나로 보는 경우 등가회로는, 크레인 붐과 지브, 그리고 와이어로프로 구성된 크롤러 타워 크레인 본체는, 그 자체가 저항성분과 인덕턴스 성분을 가지고 있고, 그 저항성분 R과 인덕턴스 L이 직렬로 접속된 것으로 생각할 수 있다. 또, 혹 자체는 대지에 대한 정전용량을 가지고 있다. 크레인의 하물부에 높은 이상전압이 발생하는 상황은 다음과 같다. 우선, 크레인에 그 크기와 전계강도로부터 결정된 수신전압이 유기되고, 다음에 크레인은 하물부를 개방단자로 하는 병렬공진회로로 되기 때문에, 이 수신전압은 공진시 Q(첨예도)배로 증대된다. 크레인의 수신안테나로서의 특성은, 수직안테나와 반으로 꺾은 안테나의 중간적 성질을 가지기 때문에, 크레인의 전파에의 공진조건은 크레인의 전장(= 붐 + 지브 + 와이어 길이)이 특정전파의 1/4파장의 1.0-1.5배로 될 때로 된다. 또한 수신안테나로서의 크레인은 지향성은 없다.

크레인의 첨예도 Q값은 공진점에서 최대로 되고, 공진점으로부터 멀어질수록 작아진다. 또, 크레인의 공진 주파수는 붐의 길이, 지브의 길이, 지브 각도에 의해 변화된다. 여기서 크롤러 타워크레인의 경우에 대해서, 공진 주파수와 Q의 특성으로부터 주파수를 파라미터로 한 혹의 대전전압을 시뮬레이션으로 구한 결과 지브 각도에 의해 공진점 및 Q값이 변화하는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 붐의 길이와 지브의 길이에 의해서도 공진점 및 Q값이 변화하는 것을 알 수 있다.

한편, 일본의 조사결과에 따르면, 송신소 출력과 크레인에서 송신소까지의 거리에 따라 발생하는 전계강도는 그림 2.12와 같다.

나. 이상전압에 따른 문제

일반적으로 이상전압의 값은 1000 ~ 2000 V_{p-p} 정도의 것이 많다. 이러한 이상전압은 주파수가 높기 때문에, 전류는 표피효과에 의해 인체의 표면을 흐르기 쉬운 것으로, 작업자가 하물부에 접촉하여도 직접 생명에의 위험은 없지만, 이러한 하물부에 작업자가 직접 접촉을 하면 강한 전기적인 충격과, 닿은 곳에 흰색의 핀홀 형태의 상처를 남기는 화상을 입는다. 이 때문에 작업진행의 장애가 될 뿐만 아니라, 고소작업에서는 전기충격에 따른 추락 등의 재해가 발생할 위험이 있다. 또, 이 이상전압이 원인이 되어 리미트 등의 안전장치가 오작동해서 부상을 당하는 수도 있으며, 와이어로프가 손상을 받는 일도 있다. 따라서, 시급한 안전대책의 확립이 필요하다.

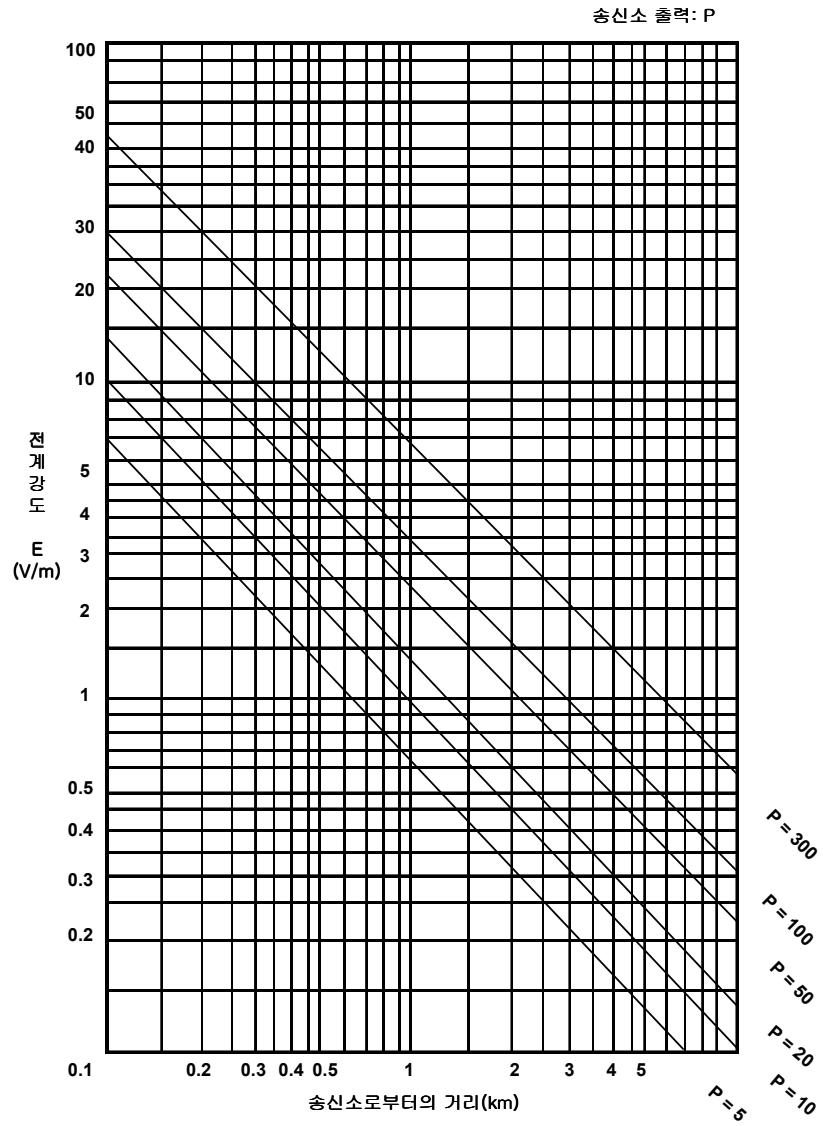


그림 2.12 전계강도와 송신소와의 거리 관계

제3장 라디오 방송국 송신소 위치와 재해사례

1. 방송국 송신소 위치

가. AM방송국(109국)

방송국명	주파수(kHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방송구역		송 신 소
KBS 제1라디오	711	500	서울 영등포구 여의도동 18
	서울, 경기 일원 및 충남·북일부		시흥시 미산동 산26-1
태백라디오	621	10	태백시 황지1동 82-2
	태백 일원 및 삼척, 영월, 정선, 봉화		“
춘천라디오	657	50	춘천시 낙원동 86
	춘천, 홍천, 화천, 양구, 가평 일부		춘천시 사농동 1구 218
영월라디오	783	10	영월군 영월읍 영흥리 893
	영월, 제천, 단양, 정선 일부		“
강릉라디오	864	100	강릉시 용강동 62-5
	강릉, 동해, 정선, 속초, 양양, 고성 일부		강릉시 초당동 443-2
원주라디오	1152	10	원주시 원동 79-1
	원주시, 횡성군 일부		원주시 태장동 807
청주라디오	1062	50	청주시 흥덕 사직2동 604-26
	청주권 및 충남·북 일부		청원군 오창면 가곡리
충주라디오	1089	10	충주시 문화동 417
	충주, 제천, 괴산, 음성 일부		충주시 연수동 787
공주라디오	1485	1	충남 공주시 신관동571-2
	공주시, 연기군 일부		충남 공주시 신관동571-2
대전라디오	882	20	대전 중구 목동 산15
	대전·청주 일원 및 충남·북 일부		대전 대덕구 와동 297
전주라디오	567	100	전주시 금암동 523-3
	전북권 및 충남, 전남 일부		김제시 하동 132-2

남원라디오	1260	10	남원시 향교동 500
	남원, 구례, 곡성, 장수, 담양 일부		남원시 주생면 지당리 22
여수라디오	630	10	여주시 관문동 8-7
	여수권 및 전남 일부		여주시 신월동 181
광주	747	100	광주 서구 사동 177
제1라디오	광주권 및 전남·북 일부		광주 광산구 수완동 산99-2
목포라디오	1467	50	목포시 용당동 845
	목포권 및 전남 일부		영암군 삼호면 난전리 558-3
대구라디오	738	100	대구 동구 신천3동 100
	대구권 및 경북 일부		경산시 진량면 부기동 141
안동라디오	963	10	안동시 태화동 666
	안동, 예천, 영주, 의성 일부		안동시 수상동 615
포항라디오	1035	10	포항시 상도동 655
	포항, 경주, 영천, 영덕, 울진 일부		포항 남구 대보면 구만1리 380
부산	891	250	부산 수영구 남천동 63
제1라디오	부산권 및 경남·북 일부		김해시 부원동 339
진주라디오	1098	20	진주시 신안동 326-2
	진주, 사천 일원 및 경남 일부		진주시 평거동 695-74
울산라디오	1449	10	울산 남구 달동 528-18
	부산, 경주, 울산, 포항, 양산 일부		울산 남구 삼산동 373-1
제주라디오	963	10	제주시 연동 302-3
	제주시 일원 및 북제주군 일부		제주시 아라동 3-8

나. KBS라디오(AM) 송신소, 중계소(47국)

방송국명	주파수(kHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방송구역		송 신 소
KBS제주송신소	1143	100	
	통영여수 일원 및 제주남북일부		제주 남제주 성산읍 성산리31
KBS김포송신소	1134	100	
	서울, 인천 일원 및 의정부, 남양주		김포시 양촌면 학운리 산170-2
KBS여주송신소	756	100	
	하남, 이천, 진천 일원 및 서울, 대전 일부		경기 여주군 능서면 용문리 산34
KBS김천중계소	1503	1	
	김천시, 영동, 성주군 일부		경북 김천시 교동 567-1

KBS철원중계소	1395	10	
	철원,연천,포천 일부		강원 철원군 갈말읍 군탄리 930
KBS인제중계소	630	5	
	인제군 일부		강원 인제군 인제읍남북리116-40
KBS하동중계소	927	1	
	사천,광양시,하동,남해,여천 일부		경남 하동군 하동읍 비파리 177
KBS홍성중계소	540	10	충남 홍성군 홍성읍 오관리 861
	홍성군 일원 및 천안,아산등 일부		충남 홍성군 홍성읍 오관리 861
KBS화천중계소	1026	1	
	춘천시, 화천군 일부		강원 화천 하남면 위라리 산73-1
KBS보성중계소	648	1	
	보성,장흥,고흥,화순군 일부		전남 보성군 보성읍 옥평리 786
KBS점촌중계소	540	1	
	문경,상주,안동시.예천,의성 일부		경북 문경시 흥덕동 97-17
KBS장흥중계소	540	1	
	장흥,보성,강진,고흥 일부		전남 장흥군 장흥읍 건산리7
KBS울릉중계소	1323	1	경북 울릉군 울릉읍 도동523-1
	울릉군		경북 울릉군 울릉읍 도동523-1
KBS삼척중계소	1044	10	강원 삼척시 마달동 산40-1
	삼척, 동해 일원 강릉,정선 일부		강원 삼척시 마달동 산40-1
KBS정선중계소	1206	1	
	정선군 일부		강원 정선군 정선읍 봉양리54
KBS서귀포 중계소	621	10	제주 서귀포시 서홍동822-2
	서귀포, 남제주군 일원		제주 서귀포시 하효동1452-1
KBS울진중계소	1305	10	
	울진, 울릉군		경북 울진군 근남면 수산리32-1
KBS구례중계소	1269	1	
	순천시,구례,곡성군 일부		전남 구례군 구례읍 백연리 81-1
KBS양구중계소	846	5	
	춘천,양구,인제,화천군 일부		강원양구군 남면 창리 134
KBS함양중계소	1458	1	
	함양,거창,산청,남원군 일부		경남 함양군 함양읍 백연리 21-5
KBS장수중계소	540	1	
	진안,장수,함양,무주군 일부		전북 장수군 장계면 장계리527
KBS무주중계소	1368	1	
	무주,영동,금산군 일부		전북 무주군 무주읍 읍내리117

방송국명	주파수(kHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방송구역		송 신 소
KBS 제천중계소	1044	10	충북 제천시 고명동 795-2
	제천,충주,원주시,단양,영월군일부		충북 제천시 고명동 795-2
KBS 부여중계소	927	10	
	익산,군산,공주,보령,논산시 일부		충남 부여읍 군수리 266-1
KBS 영동중계소	621	1	
	상주,영동,옥천군 일부		충북 영동군 영동읍 계산리 752
KBS 평창중계소	1233	1	
	평창, 영월군 일부		강원 평창군 평창읍 하리 195
KBS 영주중계소	594	10	
	안동,영주시,봉화,예천,의성군일부		경북 영주시 가흥동457
KBS 거창중계소	1026	1	
	거창,합천,함양군 일부		경남 거창읍 정장리 956-18
KBS 김포중계소	1341	10	
	인천,부천 일원 및 서울,광명일부		경기 김포시 하성면 원산리456-1
KBS 양주중계소	1269	10	
	의정부 일원 및 서울,남양주시,양주 일원		경기 양주군 회천면 회정리355-1
KBS 고산중계소	1539	1	
	남제주, 북제주 일부		제주 북제주 한경면 고산리362
KBS 영광중계소	1323	1	
	영광,고창,장성,함평군 일부		전남 영광읍 남천리 358-1
KBS 홍천중계소	927	1	
	홍천군 일부		강원 홍천읍 연봉리 134-1
KBS 영양중계소	1233	1	
	영양군, 청송군 일부		경북 영양읍 서부1리 119-1
KBS 청송중계소	1206	1	
	청송군 , 영덕군 일부		경북 청송읍 금곡리 872
KBS 고흥중계소	1485	1	
	고흥,장흥,보성군 일부		전남 고흥읍 등암리 169-13
KBS 연천중계소	918	50	
	의정부,동두천 일원 및 서울시일부		경기 연천군 전곡면 전곡리 290

방송국명	주파수(kHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방 송 구 역		송 신 소
KBS 구미중계소	909	10	
	대구, 김천, 상주, 구미, 의성, 성주 일부		경북 구미시 송정동 250-6
KBS 합천중계소	1278	1	
	합천, 의령, 고령군 일부		경남 합천군 합천읍 합천리 633
KBS 보은중계소	945	10	
	청주, 상주, 보은, 영동, 청원, 괴산, 옥천 일부		충북 보은군 보은읍 풍취리 233-3
KBS 진부중계소	675	1	
	평창군 일부		강원 평창군 진부면 간평리 572
KBS 봉화중계소	1458	1	
	봉화군 일부		경북 봉화군 춘양면 의양리
KBS 단양중계소	1584	1	
	단양군 일부		충북 단양군 매포읍 상진리 산 7번지
KBS 금산중계소	1584	1	
	금산군 일부		충남 금산군 금산읍 신대리 379-3
KBS 산청중계소	1584	1	
	산청군 일부		경남 산청군 산청읍 지리 723
KBS 사북중계소	1602	1	
	정선군 일부		강원도 정선군 사북읍 산 349
사회교육 제2라디오 중계소(KBS화성)	1134	500	서울 영등포구 여의도동 18
	인천, 부천, 안산, 안양 일원 및 서울, 구리, 하남, 고양, 용인, 화성 일부		경기 화성군 마도면 두곡리 산 113

다. KBS 단파방송국(2국)

방송국명	주파수(kHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방 송 구 역		송 신 소
KBS국제방송 (화성)	5950-26100	10, 100	서울 영등포구 여의도동 18
	아세아, 미주 및 구주 전역		경기 화성군 마도면 두곡리 산 113
KBS국제방송 (김제)	5950-26100	250	서울 영등포구 여의도동 18
	북미, 호주, 남미, 동남아, 동북아, 중동		전북 김제시 신곡동

라. KBS 제2라디오(5국)

방송국명	주파수(kHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방송구역		송 신 소
KBS제2라디오	603	500	서울 영등포구 여의도동 18
	서울·경기 일원 및 충남,북 일부		경기 화성군 송산면 고정리
군산제2라디오	675	10	전북 군산시 나운동 796
	전북 일원		군산시 대야면 죽산리 379-24
광주제2라디오	1224	20	광주 서구 사동 177
	광주권 및 전남·북 일부		광주 광산 수완동 산99-2
순천제2라디오	576	10	순천시 석현동 95
	여수, 광양, 고흥, 여천 및 순천 일부		순천시 해룡면 대안리 998
대구제2라디오	558	250	대구 동구 신청3동 100
	대구권 및 경남·북 일부		포항 남구 대보면 구만1리380

마. KBS 제3라디오 사랑의 소리 방송(3국)

방송국명	주파수(kHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방송구역		송 신 소
KBS 제3라디오 사랑의 소리 방송	639	50	서울 영등포구 여의도동 18
	서울 경기일원 및 충남북		서울 구로구 개봉동 195
KBS 제3라디오 사랑의 소리 방송	1008	50	
	속초, 강릉, 양양, 고성 일부		강원 양양군 손양면 송현리 19-1
KBS 제3라디오 사랑의 소리 방송	936	10	경남 창원시 신월동 97-1
	창원권 및 부산, 경남 일부		경남 마산 가포동 산97-1

바. KBS 사회교육라디오(2국)

방송국명	주파수(MHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방송구역		송 신 소
사회교육 제1라디오	972	1500	서울 영등포구 여의도동 18
	서울·경기 일원 및 충남·북 일부		충남 당진군 석문면 삼화리
사회교육 제2라디오	1170	500	서울 영등포구 여의도동 18
	전북권 및 충남·전남 일부		김제시 백산면 하서리

사. MBC라디오(20국)

방송국명	주파수(kHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방 송 구 역		송 신 소
MBC	900	50	서울 영등포구 여의도동 31
	서울·경기 일원 및 충남 일부		경기 고양시 토당동 717-9
춘천MBC	774	10	춘천시 삼천동 238-3
	춘천·화천 일원 및 강원 일부		춘천시 신동 1035-1
원주MBC	1242	10	원주시 학성1동 1023-70
	원주,제천,횡성,양평,여주 일부		원주시 소초면 홍양리 1479
강릉MBC	1287	10	강릉시 포남동 1091-6
	속초 일원 및 강릉, 동해 평창		강릉시 초당동 강문 131
삼척MBC	1350	10	삼척시 갈천동 111
	동해 일원 및 삼척,강릉,정선		동해시 추암동 산48-1
청주MBC	1287	10	청주시 우암동 261-30
	청주청원 일원 및 충남북 일부		청주시 흥덕구 죽림동 산48
충주MBC	1332	10	충주시 호암동 680
	충주 일원 및 강원·충북 일부		충주시 호암동 459-2
대전MBC	765	10	대전 중구 선화동 381-171
	대전·논산 일원 및 충남 일부		대전 서구 복수동 산10
전주MBC	855	10	전주 완산 중화산2동 151-9
	전주권 및 전북·충남 일부		완주 삼례읍 후정리 170-8
광주MBC	819	20	광주 남구 월산동 300-10
	광주권 및 전남·북 일부		광주 광산구 월계동 286
여수MBC	1080	10	여수시 문수동 101-1
	여수권 및 전남·경남 일부		여천 돌산읍 우두리 794-46
목포MBC	1386	10	목포시 용당동 1096-1
	목포권 및 전남 일부		목포시 용해동 608-162
대구MBC	810	20	대구 수성구 범어동 1
	대구권 및 경북 일부		대구 달서구 월암동 산27-5
포항MBC	1107	10	포항시 대잠동 907-4
	경주, 초량, 울산, 영천, 영덕 일부		포항시 연일읍 중단동 311
안동MBC	1017	10	안동시 태화동 709-1
	안동, 영주, 청송, 예천, 의성		안동시 송현동 509
울산MBC	846	10	울산시 학성동 산7-1
	울산, 경주, 양산 일부		울산시 남구 삼산동 352

마산MBC	990	10	마산시 회원 양덕동 525-1
	마산권 및 경남 일부		마산시 합포구 가포동 산1
진주MBC	1215	10	진주시 평안동 47
	진주·사천 일원 및 경남 일부		진주 명석 우수리 산130-1
부산MBC	1161	20	부산 수영구 민락동 산25-1
	부산시 및 경남 일부		부산 진구 초읍동 산5-2
제주MBC	774	10	제주시 연동 321-22
	제주시 일원 및 전남·경남 일부		제주시 해안동 66-1

아. 기타 종교 및 민영AM방송국(8국)

방송국명	주파수(kHz)	출력(kW)	연 주 소
	주 방 송 구 역		송 신 소
기독교중앙방송국	837	50	서울 양천구 목동 917-1
	서울·경기 일원 및 충남 일부		경기 고양시 행주내동 373-7
기독교부산방송국	1404	10	부산 동래구 온천3동 1248-4
	부산 일원 및 경남 일부		부산 남구 용호동 산54
기독교대구방송국	1251	10	대구 북구 침산동 3-7
	대구 일원 및 경북 일부		대구 북구 조야동 산62-3
기독교광주방송국	999	10	광주 서구 금호동 721-2
	광주 일원 및 전남·북 일부		광주 광산구 신용동 산52-1
기독교전북방송국	1314	10	전북 익산시 남중동 1가 86-8
	익산,군산 일원 및 전북 일부		익산 오산면 오산리 산211-8
극동방송국	1188	100	서울 마포구 상수동 89
	서울,경기 일원 및 충남 일부		경시 시흥시 방산동 929
아세아방송국	1566	250	서울 마포구 상수동 89
	한반도 남단 및 일본,중국 일부		북제주 애월읍 구엄리 444
서울방송국	792	50	서울 영등포구 여의도동 10-2
	서울,경기 일원 및 충남 일부		경기 고양시 내곡동 216-10

2. 송신소 위치 지도

위에서 방송국별 송신소 위치를 나타내었는데, 이들 중 출력 50kW 이상을 대상으로 그 위치에 대한 지도를 작성하였으며 이를 부록에 수록하였다. 참고로 위치 탐색은 인터넷의 여러 콘텐츠에서 지도검색을 통하여 제공하고 있으므로 이를 이용하면 쉽게 검색할 수 있을 것이다.

3. 재해사례 조사

지금까지 국내에서 크레인이 받는 전자파에 의한 전격으로 근로자가 재해를 당했다는 공식적인 보고는 없다. 일본의 경우, 장해사례에 대해 (사)일본크레인 협회에서 1996년에 실시한 설문조사에 의하면, 75건의 장해가 있었다는 보고가 있다.

국내에서는 1999년 여름에 용산소재 국립중앙박물관 신축현장으로부터 이 현장에 설치된 대형 크레인에서 발생한 심한 전격 현상에 대해 우리 공단에 원인조사를 해달라는 요청이 있었다.

이에 정밀조사를 한 결과, 공사 현장에서 약 200여 미터 떨어진 곳의 미군 방송국 송신안테나에서 방사되는 전자파가 설치된 타워크레인에 전압을 유기한 사실을 밝혀냈다. 이후, 서울시내 라디오 방송국 송신소 근처를 중심으로 아파트 공사 등 현장을 조사한 결과 4개소에서 이와 같은 장해현상이 발생한다는 것이 조사되었다.

가. 조사 현장

- 용산 국립박물관 신축 현장 (A건설)
- 남가좌동 아파트 신축 현장 (B건설)
- 신당동 아파트 신축 현장 (C건설)
- 개봉동 아파트 신축 현장 (D건설)
- 목동 아파트 신축 현장(E건설)

나. 현장 개요

- ① 용산 국립박물관 건설 현장

· 타워크레인: 그림 3.1 참조

(높이: 70 m, 붐대 길이: 100 m, 용량: 최대 60 ton)

· 송신소: 그림 3.2 참조 (AFKN, 주파수: 1.549 MHz)

· 송신소와 타워크레인 사이의 거리: 약 200 m

· 수신 전계강도: 0.0427 V/m

② 남가좌동 아파트 건설 현장

· 타워크레인 (높이: 80 m, 붐대 길이: 70 m, 용량: 최대 10 ton)

· 송신소: 가시거리 밖에 위치

· 최대 수신 주파수: 793.7 kHz

③ 신당동 아파트 건설 현장

· 타워크레인 (높이: 80 m, 붐대 길이: 70 m, 용량: 최대 10 ton)

· 송신소 위치: 남산으로부터 수 km

· 최대 수신 주파수: 714 kHz

④ 개봉동 아파트 건설 현장

· 타워크레인 (높이: 60 m, 붐대 길이: 55 m, 용량: 최대 10 ton)

· 송신소 (KBS 2, AM 송신탑위, 송출 주파수: 639 kHz, 송신 출력: 50 kW)

· 송신소와 타워크레인 사이의 거리: 약 200 m

④ 목동 아파트 건설 현장

· 타워 크레인 위치 : 서울시 양천구 신정6동

· 타워크레인 구조 및 사진: 그림 3.1, 3.2. 참조

· 중계소(개봉동 소재): KBS, 주파수: 639 kHz

· 방송국(목동 소재): CBS, 주파수: 837 kHz, 98.1MHz, 98.9MHz

· 송신소와 타워크레인 사이의 거리: 약 3.4km (KBS), 약 800m (CBS)

· 수신 주파수: 635kHz, 2230kHz

다. 조사 및 측정 방법

- 전구를 이용한 수신 전력 육안 확인 (그림 3.3 참조)
 - 200 V, 100 W, 백열전구
- Spectrum Analyzer를 이용한 수신 주파수 측정 (그림 3.4 참조)
 - 측정범위: 9 kHz ~ 26.5 GHz
 - 모델: HP8593A (HEWLETT PACKARD, 미국)
- Digital Oscilloscope를 이용한 유기 전압 및 전류 측정 (그림 3.5 참조)
 - 측정범위: DC ~ 500 MHz
 - 모델: 9354TM (Lecroy, 스위스)



그림 3.1 타워크레인 사진



그림 3.2 AM 방송용 송신타워

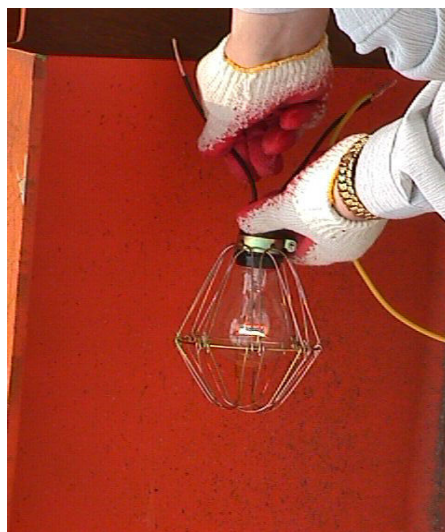


그림 3.3 백열전구를 이용한
간이측정



그림 3.4 Spectrum Analyzer를 이용한
수신 주파수 측정



그림 3.5 디지털 오실로스코프를 이용한 유기 전압 및
전류 측정

라. 조사 결과

앞서 설명한 측정방법을 이용하여 전기적인 파라미터를 측정한 결과는 다음 표 3.1과 같다.

표 3.1 전기적인 파라미터를 측정한 결과

조사장소	주파수[kHz]	전압[V]	전류[A]	비 고
용산박물관	1549	200(최대:400)	1.5(최대:4)	
남가좌동 현장	792	최대 60	-	
신당동 현장	711	최대 25	-	
개봉동 현장	639	200(최대:400)	0.5(최대:1)	
목동 현장	625/2230	320(최대: 528)	0.28(최대: 0.62)	

마. 조사결과 검토

① 용산 현장에서 측정한 결과 타워크레인에 유기되는 전자파 원(Source)는 AFKN (1549 kHz) 방송 주파수로 판단된다.

② 남가좌동 건설현장의 타워크레인에 유기되는 전자파 원은 멀리 떨어져 있는 SBS AM (792 kHz) 방송용 송신소로 추정되며, 또한 신당동 건설현장에서 측정한 결과 타워크레인에 유기되는 전자파 원은 남산에 위치한 KBS 1 AM 방송용 송신소로 추정된다.

③ 개봉동에서 측정한 결과 타워크레인에 유기되는 전자파 원은 개봉동 KBS

제 3라디오 방송국 송신탑 (주파수: 639 kHz, 출력: 50 kW)로 판단된다.

④ 목동 아파트 신축현장에서 측정한 결과 타워크레인에 유기되는 가장 큰 전자파 원은 개봉동 현장의 예와 같은 KBS 제3라디오 방송국 (개봉동 소재, 주파수: 639kHz) 방송 주파수로 판단된다.

현장에서 측정한 주파수 635kHz와 KBS의 송출 주파수 639kHz의 차이는 현장의 타워크레인의 전기적인 특성에 의해 부분공진 등을 일으켜 Frequency Shift된 것으로 생각된다. 또한 현장에서 측정한 주파수 2230kHz도 위와 같은 현상으로 판단된다.

⑤ 크레인에 유기되는 이상전압은 주파수가 높기 때문에, 전류는 표피효과에 의해 인체의 표면을 흐르는 경향이 있기 때문에, 작업자가 접촉하여도 직접 생명에의 위험은 없지만, 강한 전격이 가해지며, 접촉점에 흰색의 핀홀 형태의 상처를 남기는 화상을 입는다. 따라서, 고소작업에서는 전기충격에 따른 추락 등의 재해가 발생할 위험이 있다.

제4장 위험 예측 프로그램 개발

1. 타워크레인의 종류와 모델링

일반적으로 건설현장 등에서 사용되는 대형크레인은 타워회전형 건축용 크레인, 이동 arrow를 갖는 회전형 건축용 크레인, 부두선적용 크레인, 재장하(reloading) 브릿지 등이 있으며 그림 4.1 ~ 그림 4.3에 이들의 기계적/전기적 구조를 보였다.

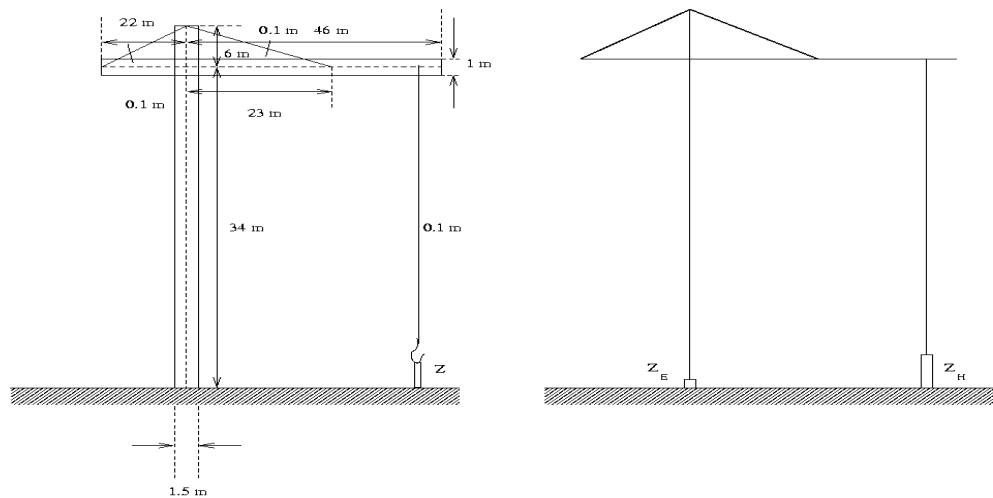


그림 4.1 타워회전형 건축용 크레인과 그 모델

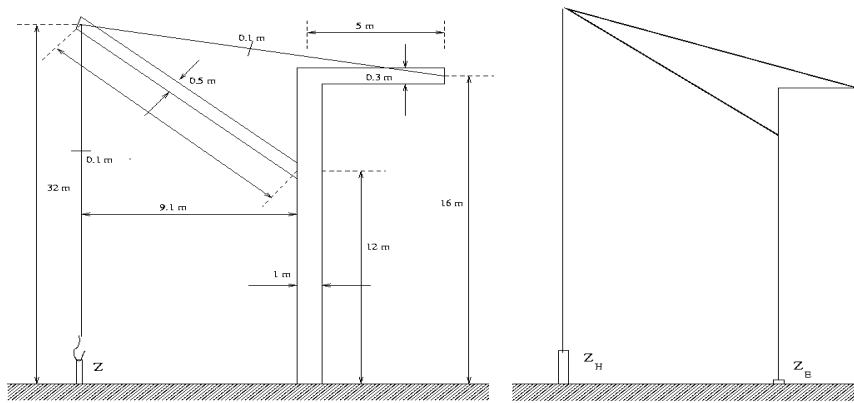
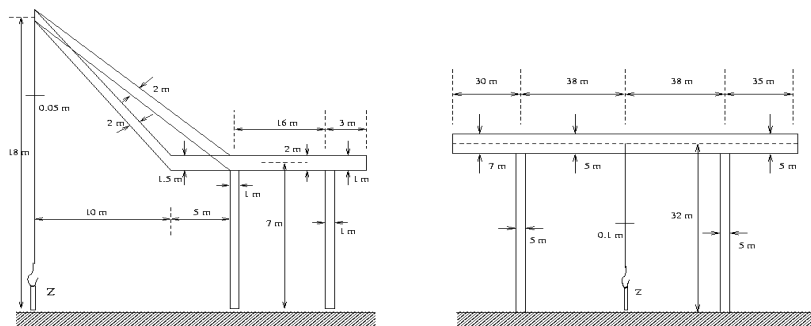


그림 4.2 이동 arrow를 갖는 회전형 건축용 크레인과 그 모델.



(a)

(b)

그림 4.3 부두선적용 크레인 (a)과 재장하 브릿지 (b).

2. 수치해석 프로그램의 개발

가. 개 요

AM 방송용 송신안테나는 대부분 접지형 1/4파장 모노폴 안테나를 사용하며 안테나 하단의 지면에 120개의 단면이 원형인 와이어 (radial wire)를 묻고 결속하여, 전기적 손실을 줄일 수 있도록 매우 낮은 RF 접지저항을 갖는다. 이 모노폴 안테나는 또한 사용주파수에서 공진되도록 설계하며 이 경우는 약 36 Ω 의 입력임피던스를 갖는다. 따라서 전기영상법 (image theory)을 적용하면 1/4파장 모노폴 안테나는 해석의 편의성을 위하여 1/2파장 공진 다이폴 안테나로 생각할 수 있다.

크레인이 있는 지역도 대부분의 경우 지면의 도전율이 0.001 S/m ~ 0.03 S/m 정도이고 AM 방송의 중간주파수인 1 MHz에서는 이보다 훨씬 크므로 지면은 전도성이 좋은 도체이고, 수치해석의 편의성을 위하여 완전도체로 가정하였다. 그림 4.4에 전기영상법을 적용한 송신용 안테나와 타워크레인의 전기적인 등가 모델을 보였다.

크레인의 붐과 지면사이에 RF접지저항이 있는 경우를 위하여 그림 4.4에서와 같이 접지저항을 모사하는 저항이 연결되는 경우도 포함시켰으며, 크레인의 결쇠를 작업자가 접촉하고 있는 경우에 대한 해석을 위하여 결쇠부분과 대지면 사이에 인체 임피던스를 고려하여 수치를 결정한 저항시트 (resistive sheet)를 가정하였다. RF 주파수 대역에서 도전성 물체에는 표피효과로 인하여 물체표면에만 전류가 흐르기 때문에 이 저항시트의 단위 길이당 저항값은 인체의 임피던스와 작업자의 키 등을 고려하여 결정할 수 있다.

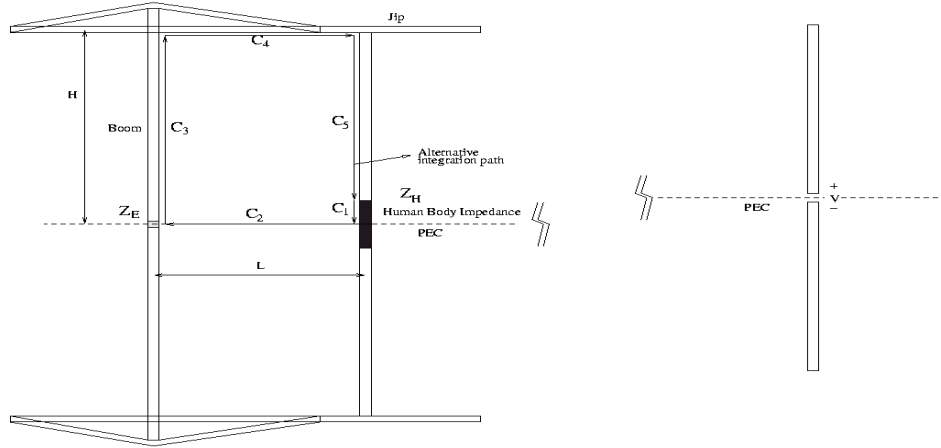


그림 4.4 전기영상법을 이용한 송신안테나와 크레인의 등가모델 및 유도전압 계산을 위한 적분경로

AM 방송주파수인 560 kHz ~ 1600 kHz에서의 파장은 약 600 m ~ 200 m 이고, 크레인의 붐 (boom)이나 jip반경이 1 m 이내이기 때문에 크레인을 전기적으로 모델링하는 데에 있어 가느다란 와이어 근사 (thin wire approximation)를 할 수 있으며 크레인 구조를 고려하여 등가반경 a_e 을 갖는 원형 도체실린더로 할 수 있다.

수치해석에서 비교적 정확한 해를 얻기 위해서는 먼저 송신안테나와 크레인에 유기되어 흐르는 전류분포를 송신안테나 여기부에 가해진 전압을 발생원으로 하여 적분방정식을 세워야 한다. 이 전류분포를 기저함수 (basis function)의 중첩 (superposition)으로 근사한 다음, 도체면 또는 면저항 (sheet resistance)에서의 경계조건을 적용하여 얻어지는 선형방정식의 해를 구함으로써 얻어야 한

다. 그렇지만 실제 현장에서 측정되는 수직 전기장의 세기로부터 크레인에 유기될 수 있는 RF전압을 예측하기 위해서, 실제로 송신안테나로부터 원역장조건이 만족되는 거리에서는 송신안테나에 흐르는 전류분포에 대한 적분방정식의 해로부터 크레인이 놓여진 위치에서의 전기장을 구한 다음 이를 입사파로 가정해서 크레인에 흐르는 전류분포에 대한 적분방정식을 독립해서 구하여도 큰 오차는 없다. 따라서 주파수와 크레인의 특성에 따라 이러한 원역장조건이 어떻게 달라지는가도 살펴보아야 한다. 또한 송신안테나와 크레인의 수직 높이차, 송신안테나로부터의 위치, 거리, 방향에 따른 특성, 크레인의 구조에 따른 주파수 및 공진주파수 특성, 크레인의 접지상태에 따른 특성, 결쇠에 저항성분을 가지는 물체 (작업자 포함)가 연결되었을 경우의 특성 등을 살펴보고자 한다. 크레인의 위치에서 측정되는 전기장 (대개의 경우 지상 1 m에서의 수직 전기장의 크기를 사용함)을 입사파로 하여 크레인에 유기되는 전류분포를 구하거나 송신안테나의 전류분포에 대한 적분방정식과 함께 구하는 방법으로부터 전류분포를 구한다. 크레인에 유기되는 전압을 구하기 위해서는 도체면인 지면으로부터 결쇠부분까지의 수직 전기장을 적분하여야 하는데 이 경로의 길이가 파장에 비하여 매우 짧기 때문에 정확한 값을 구하기 위해서는 그림 4.4에 보인 바와 같이 대체적분경로를 이용하는 것이 필요하다. 이 경우 송신안테나로부터 거리에 따라 지상 1 m에서 측정된 전기장이 크레인이 차지하는 부피내에서 어느 정도 균일한 가도 살펴보아야 한다. 또한 크레인 결쇠에 유기된 RF 전압에 의하여 결쇠와 지면사이의 전기용량 (capacitance)에 충전된 전하가 작업자가 접촉하였을 경우에 작업자에 흐르는 전류의 특성을 살펴보기 위해서는 결쇠와 지면사이의 전기용량을 두 지점 사이의 전압과 전하로부터 구한 다음 인체 임피던스 모델을 이용하여 해석하여 볼 필요도 있다.

모멘트법을 이용하여 도체에 유기되는 전류분포를 구하기 위해서는 full 행렬

의 역연산이 필요하고, 이 행렬의 요소를 구하기 위해서는 다중적분을 수행하여야 한다. 따라서 행렬의 차수 (rank)를 줄이기 위해서는 적절한 기저함수의 선택과 세그먼트의 개수선택이 필요하다. 기저함수로는 정확도가 높은 NEC(Numerical Electromagnetic Code) 2에서 사용되는 기저함수를 사용했으며, 세그먼트의 길이는 약 반파장 당 33개 정도를 사용하여 해의 수렴성에는 문제가 없을 것이다. 행렬요소를 구하는데 필요한 다중적분에 필요한 계산시간을 줄이기 위한 방법으로는 등가 원기둥 도체에 흐르는 전류를 원기둥 축의 중앙에 흐르고 경계조건을 원기둥 표면에 적용하여 적분항에 특이점 (피적분항이 전원점과 관측점 사이의 거리가 0으로 갈 때 무한대로 발산하는 경우를 말함)을 피하는 방법이 있으나 이 경우 해의 정확도는 떨어진다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 한가지 방법으로는 어떤 세그먼트에 대하여 자기 자신 (행렬의 대각방향에 있는 요소)과 가까이 있는 세그먼트 (행렬의 대각 요소에 가까이 있는 요소)에 대해서는 축방향 전류가 원기둥 표면에 흐르고 경계조건도 원기둥 표면에서 적용하고, 행렬의 나머지 요소는 전자의 방법을 적용하는 방법이 있으며 이 경우에 있어 적용범위를 살펴보는 것도 필요하다. 이러한 정확한 행렬요소의 계산에 필요한 적분항의 특이점 제거를 위한 적분항 계산 및 관련 프로그램을 개발하였으며 이를 모듈화하여 사용하기 편리하게 하였다.

나. 모멘트법을 이용한 수치해석

일반적으로 도체표면에 흐르는 전류에 의한 산란전자기장은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{E}_s = -j\omega \mathbf{A} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) \quad (4-1)$$

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{S'} \mathbf{J}(\mathbf{s}') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} d\mathbf{s}' \quad (4-2)$$

여기서, $\mathbf{A}$ 는 벡터포텐셜이고 k 는 파수, ω 는 각주파수이고, ϵ, μ 는 각각 매질의 유전율과 투자율이다. 또한 R 는 전원점과 관측점간의 거리이고 $d\mathbf{s}'$ 은 전류원 표면의 증분 면적을 나타내며 $\mathbf{J}(\mathbf{s}')$ 은 전원점 $\mathbf{s}'$ 에서의 전류밀도이다.

식 (4-1), (4-2)를 이용하여 접선 단위벡터가 $\mathbf{s}_0$ '인 방향인 반경이 a '인 원통형 도체 표면 위를 흐르는 전류에 의한 산란전자기장을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{E}_s = \left(\frac{-j\omega\mu}{8\pi^2} \right) \left[\mathbf{s}_0' \int_{S'} I(s') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' d\phi' + \frac{1}{k^2} \nabla \int_{S'} \frac{\partial I(s')}{\partial s'} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' d\phi' \right] \quad (4-3)$$

또한 접선 단위벡터가 $\mathbf{s}_0$ 인 원통형 도체 표면 위에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\mathbf{s}_0 \cdot (\mathbf{E}_{inc} + \mathbf{E}_s) = 0 \quad (4-4)$$

따라서, 식 (4-3)과 (4-4)로부터 다음의 식을 얻는다.

$$- \mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{E}_{inc} = \left(\frac{-j\omega\mu}{8\pi^2} \right) \left[(\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{s}_0') \int_{S'} I(s') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' d\phi' + \frac{1}{k^2} \frac{\partial}{\partial s} \int_{S'} \frac{\partial I(s')}{\partial s'} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' d\phi' \right] \quad (4-5)$$

식 (4-3)에서의 미지의 전류분포를 구하기 위하여 도체면에서의 전류를 다음과 같은 기저함수의 중첩으로 표현하고,

$$I_m(z) = A_m + B_m \sin k(z - z_m) + C_m \cos k(z - z_m) \quad (4-6)$$

식 (4-5)의 경계조건을 적용하여 적분방정식을 선형방정식으로 변환하여 해를 구한다. 식 (4-5)의 경계조건을 만족시키는지를 test하기 위하여 사용된 Galerkin 방법에서는 식 (4-5)의 양변에 전류분포의 표현에 사용된 기저함수를 weighting(test) 함수로 사용한다. 따라서 식 (4-5)의 양변에 위치벡터 $\mathbf{s}$ 인 관측 점에 흐르는 전류 $I(s)$ 를 곱하여 반경이 a 인 도체 표면 위에서 경계조건을 시험 (testing) 하면 다음의 식을 얻는다.

$$- \int_S (\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{E}_{inc}) I(s) ds d\phi = \left(\frac{-j\omega\mu}{8\pi^2} \right) \left[(\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{s}_0') \int_S \int_{S'} I(s) I(s') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' d\phi' ds d\phi + \frac{1}{k^2} \int_S I(s) \left(\frac{\partial}{\partial s} \int_{S'} \frac{\partial I(s')}{\partial s'} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' d\phi' \right) ds d\phi \right] \quad (4-7)$$

식 (4-7)에 모멘트법을 적용하면 다음과 같은 선형방정식을 얻는다.

$$[Z][I] = [V] \quad (4-8)$$

여기서, Z 행렬은 식 (4-7)의 우변으로부터 구해지는 임피던스 행렬이라고 하며 V 행렬은 식 (4-7)의 좌변으로부터 구해지는 전압행렬이며 I 행렬은 구하고자 하는 미지의 전류분포의 계수로 이루어지는 전류행렬이라고 한다. 따라서 식 (4-8)로부터 역행렬을 구하면 해를 구할 수 있다. 지금까지 식의 유도에는 thin 와이어 가정이 사용되었으며, 이는 와이어의 축에 대하여 수직방향(transverse)의 전류는 축방향 전류에 비하여 무시할 수 있으며, 축방향 전류의 와이어 둘레에 따른(circumferential) 변화는 무시할 수 있으며, 전기장에 대한 경계조건은 축방향으로만 적용할 필요가 있다는 가정이다.

식 (4-4)의 경계조건은 완전도체에 대한 것으로 도체중 일부가 유한한 전도도를 갖는 불완전 도체일 경우에는 그 부분에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\mathbf{s}_0 \cdot (\mathbf{E}_{inc} + \mathbf{E}_s) = Z_w(s) I(s) (\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{s}_0') \quad (4-9)$$

여기서, $Z_w(s)$ 는 s 에서의 단위길이당 임피던스로 lumped loading의 경우 delta 함수로 표현할 수 있으며, 식 (4-5)에서 식 (4-7)을 구하는 과정을 적용하면 완전도체의 경우에 대하여 구한 임피던스 행렬에 분포 또는 집중소자 loading에 의한 항을 더해 주는 것으로 새로운 임피던스 행렬을 구할 수 있다. 식 (4-9)에서 $\mathbf{s}_0$ 와 $\mathbf{s}_0'$ 은 물론 임피던스가 연결된 곳에서의 관측점과 전원점에서의 접선 단위벡터로 그 부분의 전류에 기여하는 기저함수의 전류방향에 대한 효과를 나타내 주기 위한 것이다. 따라서 임피던스 loading에 흐르는 j 기저함수에 의한 i 시험함수에 의한 임피던스 행렬은

$$Z_{ij} = Z_{ij}^0 - (\mathbf{s}_0^i \cdot \mathbf{s}_0^j) \int_{S_z} Z_w(s) I_i(s) I_j(s) ds d\phi \quad (4-10)$$

가 되며 적분구간은 임피던스 loading된 부분에 한정되고 $\mathbf{s}_0^i$ 와 $\mathbf{s}_0^j$ 는 각각 s 에서 i, j 기저함수의 단위벡터이며 Z_{ij}^0 는 완전도체의 경우에 대하여 식 (4-7)으로 구한 임피던스 행렬요소이다.

이러한 임피던스 loading은 크레인 기저부에서의 접지저항 Z_g 의 크기에 의한 크레인 유도전압에 대한 영향과 크레인 걸쇠를 대지면 위에 있는 작업자가 접촉할 경우 작업자에게 걸리는 전압을 해석하기 위한 것으로서 후자의 경우 전압 V_I 은 식 (4-9)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_I = -(\mathbf{s}_0' \cdot \mathbf{z}_0) \int_0^h Z_w(z) I(z) dz \quad (4-11)$$

여기서 $\mathbf{s}_0'$ 은 z 에서의 전류의 방향을 나타내는 단위벡터이다.

임피던스 행렬 요소 등을 구하는 과정에서 전원점과 관측점이 근접하게 되면 적분의 피적분항이 그 위치에서 특이성을 가지게 되므로 수치적분을 할 수 없으며 다음의 관계를 이용하여 해석적으로 특이성 (singularity)를 제거한다.

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} d\phi' = \int_0^{2\pi} \left(\frac{e^{-jkR} - 1}{R} + \frac{1}{R} \right) d\phi' \\ &= \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR} - 1}{R} d\phi' + \frac{2\beta}{\sqrt{\rho_s^2 + a^2} a'} F\left(\frac{\pi}{2}, \beta\right) \end{aligned} \quad (4-12)$$

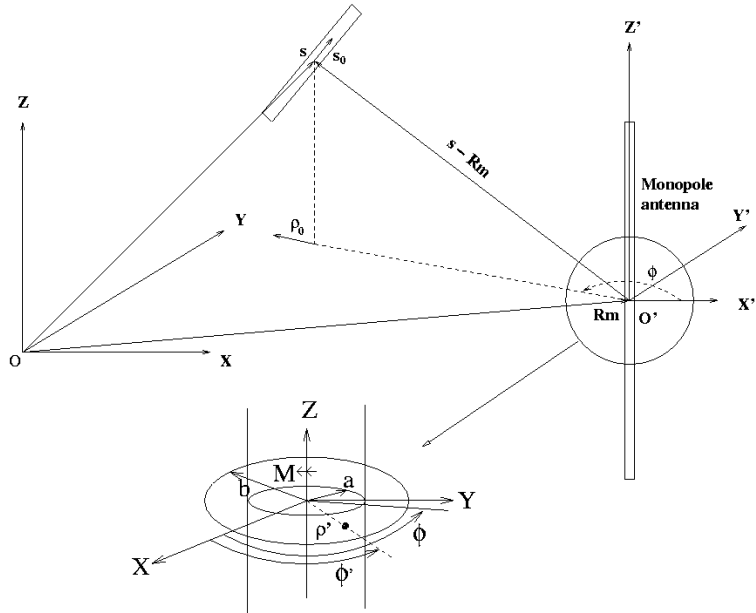


그림 4.5 송신 모노폴 안테나 급전부 모델링 및 geometry

여기서 F 는 일종 타원 (elliptic) 적분함수이고 β 는

$$\beta^2 = \frac{4 a' \sqrt{\rho_s^2 + a^2}}{dl^2 + (\sqrt{\rho_s^2 + a^2} + a')^2} \quad (4-13)$$

이다.

공진 모노폴 안테나의 급전은 안테나의 공진 입력임피던스가 36 Ω 이기 때
문에 이와 같은 특성임피던스를 갖는 동축선으로 급전되는 것으로 가정하여

magnetic frill로 모델링하였다.

따라서, 그림 4.5 에서와 같이 동축선의 내부도체 외경과 외부도체 내경을 각각 a, b 라고 하면 이로부터 모노폴안테나 및 크레인에 입사되는 입사파는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{inc} = & \frac{-1}{2\pi \log(b/a)} \left\{ \mathbf{z}_0 \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} \Big|_{\rho'=a}^b d\phi' \right. \\ & \left. + \rho_0 \int_a^b \int_0^{2\pi} \cos(\phi - \phi') \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) d\phi' d\rho' \right\} \end{aligned} \quad (4-14)$$

여기서, $\mathbf{z}_0$ 는 모노폴안테나의 급전부를 좌표의 원점으로 하였을 경우에 모노폴안테나의 축 방향의 단위벡터이고 ρ_0 는 관측점에서의 ρ 방향 단위벡터이다. 크레인의 기저부 (base)를 원점으로 하는 좌표계에서 관측점의 위치벡터가 $\mathbf{s}$ 이고 모노폴안테나의 급전부의 위치벡터를 $\mathbf{R}_m$ 이라고 하면,

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\mathbf{y}_0 \cdot (\mathbf{s} - \mathbf{R}_m)}{\mathbf{y}_0 \cdot (\mathbf{s} - \mathbf{R}_m)} \quad (4-15)$$

이며, ϕ', ρ' 은 모노폴안테나 local 원통 좌표계에서 magnetic frill 상의 전원점의 좌표이다. 따라서 입사파에 의한 각 세그먼트에서의 전압행렬의 값 V_m 은 Galerkin법을 사용할 경우 thin wire를 가정하여 각 세그먼트 표면에 균일한 전류 $I(s)$ 가 흐른다고 가정하면,

$$V_m = \int_s \{ -\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{E}_{inc} \} I(s) ds \quad (4-16)$$

로 계산할 수 있으며, s_0 는 각 세그먼트 축의 단위벡터이고 s 는 세그먼트 축 상의 길이를 나타낸다.

식 (4-14)이나 식 (4-16)를 이용하여 관측점에서의 입사파를 계산하거나 전압 행렬 값을 계산할 경우 전원점에서 관측점까지의 거리 R 은 다음과 같다. 그림 4.6에서와 같이 크레인의 기저부를 원점으로 하는 좌표계에서 전원점 세그먼트의 시작 위치벡터를 R_s 라고 하고 관측점 세그먼트의 시작 위치벡터를 R_o 라고 하면 전원점과 관측점의 세그먼트 축 상의 위치벡터 s' , s 는

$$\begin{aligned} s' &= R_s + s' s'_0 \\ s &= R_o + s s_0 \end{aligned} \quad (4-17)$$

가 되며 축상의 두 점 사이의 거리 R_o 는

$$R_o = \sqrt{\rho_s^2 + dl^2} = \sqrt{\rho_s'^2 + dl'^2} \quad (4-18)$$

가 된다.

여기서 $R_{os} = |R_o - R_s|$ 라고 하면,

$$\begin{aligned} \rho_s &= \sqrt{R_{os}^2 \sin^2 \psi_s + s^2 \sin^2 \Theta + 2sR_{os}(\cos \psi_o - \cos \Theta \cos \psi_s)} \\ dl &= R_{os} \cos \psi_s + s \cos \Theta - s' \end{aligned} \quad (4-19)$$

$$\begin{aligned} \rho_s' &= \sqrt{R_{os}^2 \sin^2 \psi_o + s'^2 \sin^2 \Theta + 2s'R_{os}(\cos \Theta \cos \psi_o - \cos \psi_s)} \\ dl' &= R_{os} \cos \psi_o + s - s' \cos \Theta \end{aligned} \quad (4-20)$$

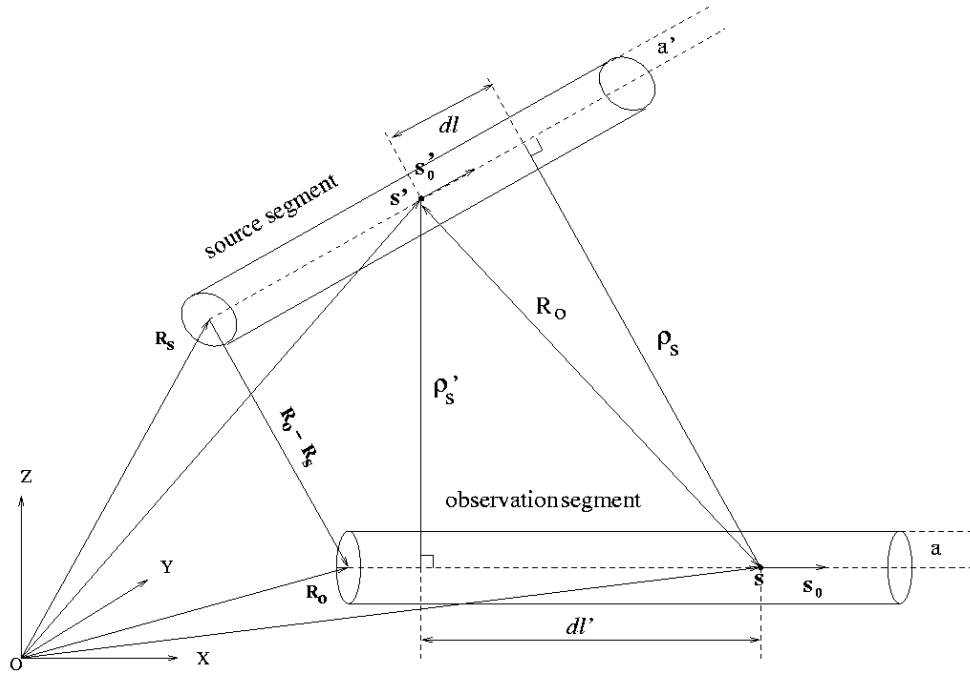


그림 4.6. 전원점과 관측점 사이의 거리.

여기서, θ 는 전원 세그먼트 단위벡터와 관측점 세그먼트 단위벡터 사이의 각이며, ψ_o 는 관측점 세그먼트 단위벡터 $\mathbf{s}$ 와 $\mathbf{R}_o - \mathbf{R}_s$ 벡터 사이의 각, ψ_s 는 관측점 세그먼트 단위벡터 $\mathbf{s}'$ 와 $\mathbf{R}_o - \mathbf{R}_s$ 벡터 사이의 각이다.

전원점 세그먼트의 반경을 a' , 관측점 세그먼트의 반경을 a 라고 할 때 각 세그먼트 표면에 있는 전원점과 관측점 사이의 거리는 다음과 같이 표현한다.

$$R = \sqrt{R_o^2 + a^2 + a'^2 - 2a'\sqrt{\rho_s^2 + a^2} \cos(\phi')} \quad (4-21)$$

관측점이 선 (line) 상에 위치하고 있을 경우에는 식 (4-21)에서 $a = 0$ 으로 하여 계산하며, 두 세그먼트가 일직선상에 있는 경우에는 ρ_s 가 0이 되어 선형안테나 해석에서 사용되는 식이 된다. 일반적인 안테나 해석에서는 구부러지는 부분의 처리가 해석 결과의 정확도에 영향을 미치기 때문에 전원점 세그먼트가 구부러지는 곳에 위치하는 경우에는 thin wire 근사를 하여 전류가 축상에 흐른다고 가정하여 식 (4-21)에서 $a' = 0$ 으로 하여 거리를 계산한다. 식 (4-21)은 적분을 전원점 세그먼트에 대하여 수행할 경우 사용되며 적분 경로를 관측점 세그먼트에 대하여 수행할 경우에는

$$R = \sqrt{R_o'^2 + a'^2 + a^2 - 2 a \sqrt{\rho_s'^2 + a'^2} \cos(\phi')} \quad (4-22)$$

을 사용한다.

한편 동적 (dynamic) 전기장은 정전기장의 경우처럼 보존적이지 않지만 전기장에 flux 항인 벡터포텐셜을 추가하면 폐쇄된 적분경로에 대하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\oint_C \{ \mathbf{E} + j\omega\mu_0 \mathbf{A} \} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (4-23)$$

식 (4-23)의 적분경로 C를 그림 4.7의 $C_1 \sim C_5$ 로 선택하면 C_1 로 표시된 대지면(완전도체)과 hook 사이의 적분을 나머지 $C_2 \sim C_5$ 에서의 적분으로 표현할 수 있다. 식 (4-23)의 적분을 그림 4.7에 표시된 파라미터를 이용하면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 &= 0 \\
I_1 &= \int_0^h (E_z + j\omega A_z) dz \Big|_{x=Lj+a} \\
I_2 &= \int_h^d (E_z + j\omega A_z) dz \Big|_{x=Lj+a} \\
I_3 &= \int_{Lj+a}^{Lj+a+w} (E_x + j\omega A_x) dx \Big|_{z=d} \\
I_4 &= \int_0^d (E_z + j\omega A_z) dz \Big|_{x=Lj+a+w} \\
I_5 &= \int_{Lj+a}^{Lj+a+w} (E_x + j\omega A_x) dx \Big|_{z=0}
\end{aligned} \tag{4-24}$$

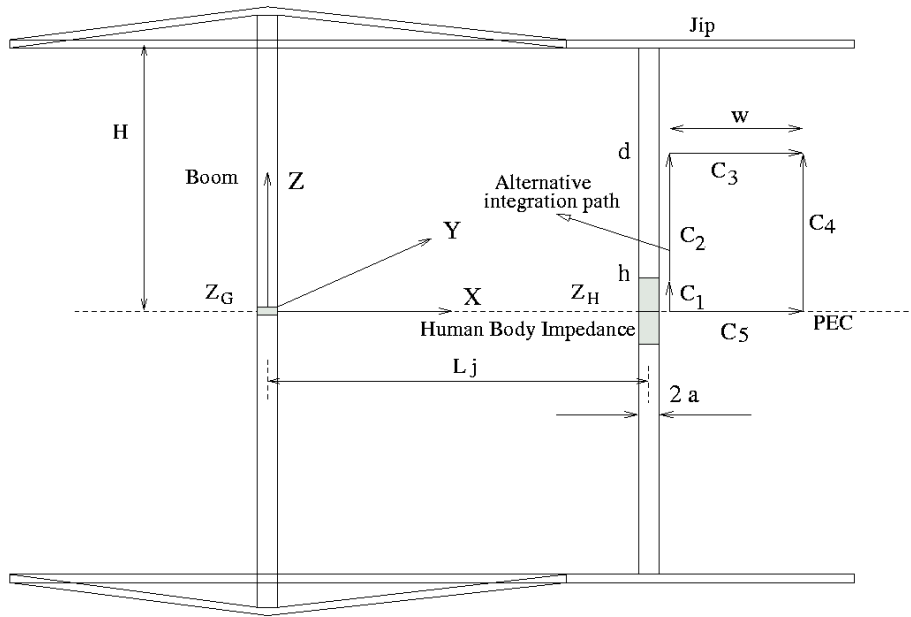


그림 4.7 개방회로전압을 구하기 위한 대체적분경로

식 (4-24)에서 I_2 는 적분경로 C_2 에서

$$E_z + E_{z,inc} = 0 \quad \text{on } C_2 \quad (4-25)$$

의 관계가 있으므로

$$I_2 = \int_h^d (-E_{z,inc} + j\omega A_z) dz \Big|_{x=Lj+a} \quad (4-26)$$

가 되며 I_5 는 적분경로 C_5 에서

$$E_x + E_{x,inc} = 0 \quad \text{on } C_5 \quad (4-27)$$

의 관계로부터

$$I_5 = \int_{Lj+a}^{Lj+a+w} (-E_{x,inc} + j\omega A_x) dx \Big|_{z=0} \quad (4-28)$$

가 된다. I_3 와 I_4 는 식 (4-1)을 이용하여 적분하면

$$I_3 = \frac{-j}{\omega \mu_0 \epsilon} (\nabla \cdot \mathbf{A}) \Big|_{x=Lj+a}^{Lj+a+w} \Big|_{z=d} \quad (4-29)$$

$$I_4 = \frac{-j}{\omega \mu_0 \epsilon} (\nabla \cdot \mathbf{A}) \Big|_{z=0}^d \Big|_{x=Lj+a+w} \quad (4-30)$$

가 되어

$$I_4 - I_3 = \frac{-j}{\omega \mu_0 \varepsilon} (\nabla \cdot \mathbf{A}) \Big|_{x=Lj+a, z=0}^{x=Lj+a, z=d} \quad (4-31)$$

가 된다. 따라서 구하고자 하는 개방회로 (open circuit) 전압 V_{oc} 는

$$V_{oc} = - \int_0^h (E_{z,inc} + E_z) dz \Big|_{x=Lj+a} \quad (4-32)$$

으로

$$V_{oc} = - \int_0^h (E_{z,inc} - j\omega A_z) dz \Big|_{x=Lj+a} - (I_5 - I_2 + I_4 - I_3) \quad (4-33)$$

로 구할 수 있다.

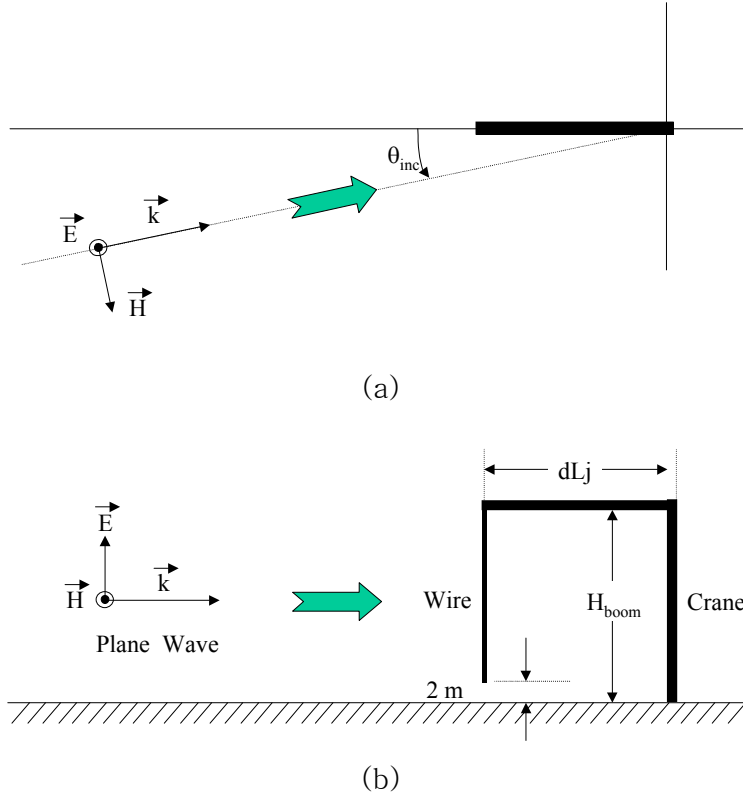


그림 4.8 수치계산구조; (a) 평면도, (b) 측면도.

3. 수치해석 결과

크레인에 평면파가 입사할 때 수치계산에 사용되는 구조는 그림 4.5와 같다. 크레인의 높이 H_{boom} 및 arm 길이 dL_j 가 각각 98.1 m, 47.2 m이고, 결쇠가 지표면으로부터 2m 떨어져 개방되어 있을 때 개방회로전압(open circuit voltage)

V_{oc} 의 계산 결과는 그림 4.9와 같다. 0.9 ~ 1 MHz 주파수 영역에서 공진현상으로 인해 V_{oc} 가 최대값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 주파수에 대한 크레인의 공진특성이 입사파 입사각이 변하더라도 거의 변하지 않는 것을 그림 4.9로부터 확인할 수 있는데, 이는 신호의 파장(약 300 m)에 비해 크레인의 크기가 작아서 입사파 입사각이 변하더라도 크레인에 유기되는 전류의 위상이 크게 변하지 않기 때문으로 생각된다. 공진특성이 크레인의 기하학적인 구조에 의해 결정되므로 크레인의 높이나 arm 길이가 변화되면 공진특성이 크게 변하는 것을 그림 4.10으로부터 볼 수 있다.

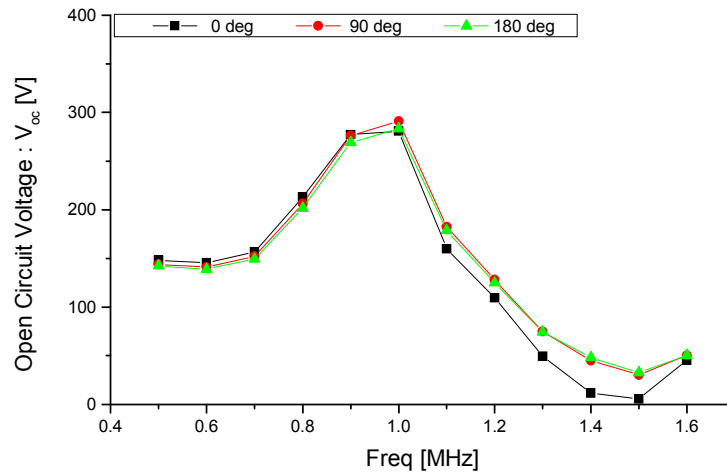


그림 4.9 $H_{boom} = 98.1$ m, $dL_j = 47.2$ m인 경우에,
 $\theta_{inc} = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 일 때 개방회로전압

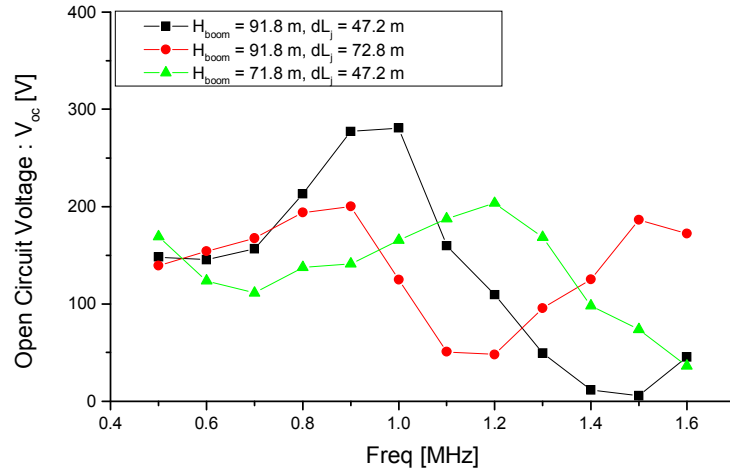


그림 4.10. $\theta_{inc} = 0^\circ$ 일 때 H_{boom} 및 dL_j 변화에 의한 크레인의 공진특성 변화

한편 크레인이 지면에 접지가 잘 되지 않아 크레인 붐과 지면사이에 RF 저항 (Z_g)이 존재하는 경우에, 그 효과를 조사해 본 결과 저항 크기가 50 Ω 이상이면 공진특성이 변하기 시작하는 것을 그림 4.11로부터 볼 수 있다. 그리고 작업자가 크레인 결쇠에 접촉했을 때, 그 효과를 보기 위해 작업자를 RF 저항 Z_{h_tot} 로 모사하여 0.8과 1.2 MHz 두 주파수에서 Z_{h_tot} 를 증가시키면서 저항 양단에 걸리는 전압을 계산해 보았다. Z_{h_tot} 크기가 증가할수록 저항양단에 걸리는 전압이 증가하고, 2000 Ω 이상이면 개방회로전압으로 접근하는 것을 그림 4.12로부터 볼 수 있다.

모노폴 안테나로부터 크레인까지 거리와 공진현상과의 관계를 또한 조사해 보았다. 이를 위해 거리를 증가시키면서 크레인 결쇠와 지면의 중간높이에서 입사파(E_{inc}) 및 개방회로전압을 계산하고, 그 비를 또한 계산해 보았다. 일반

적으로 전원으로부터 거리가 멀어지면 입사파의 크기는 작아지며, 입사파의 크기가 작아지면 입사파에 의해 발생하는 개방회로전압도 또한 작아지게 된다. 그 현상은 그림 4.13에서도 볼 수 있다. 입사파 및 개방회로전압을 비 (V_{oc}/E_{inc})를 계산해 보면 그림 4-13에서와 같이 모노폴 안테나와 크레인이 500 m 이상 떨어지면 그 비가 일정해지므로, 이 영역을 모노폴 안테나의 원역장(far-field) 영역으로 볼 수 있다.

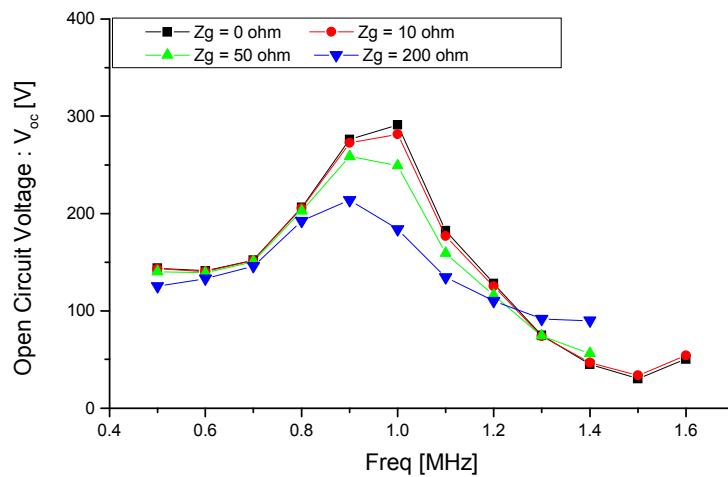


그림 4.11 $H_{boom} = 98.1$ m, $dL_j = 47.2$ m, $\theta_{inc} = 90^\circ$ 일 때 Z_g 변화에 의한 크레인의 공진특성 변화

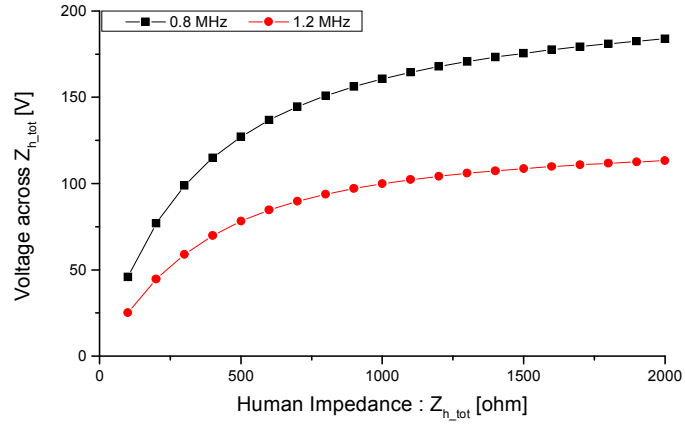


그림 4.12 $H_{boom} = 98.1$ m, $dL_j = 47.2$ m, $\theta_{inc} = 90^\circ$, $Z_g = 0$ 옴일 때 Z_{h_tot} 변화에 의한 크레인 공진 특성 변화

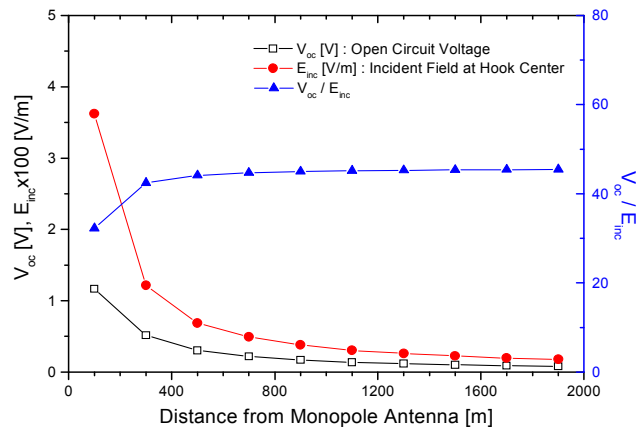


그림 4.13 $H_{boom} = 98.1$ m, $dL_j = 47.2$ m, $\theta_{inc} = 0^\circ$, $Z_g = 0$ 옴일 때 1 MHz 주파수에서 크레인과 모노폴 안테나사이 거리에 대한 개방회로전압 변화

4. 모사실험

가. 실험장치의 구성

수치해석을 통하여 얻은 결과의 유효성을 검증하기 위하여 수치해석에서 사용된 모델을 약 1/40으로 축소시킨 타워회전형 건축용 크레인의 모델을 제작하고, AM 방송용 송신 1/4파장 모노폴 안테나를 제작하여 한국표준과학연구원의 30 m x 60 m 1/4 "wire mesh로 된 야외시험장에서 모사실험을 수행하였다. 제작된 축소 크레인 모형의 설계도면을 Fig. 5-1에 보였다. 송신안테나로는 야외시험장의 접지면을 통하여 Fig. 5-2에 보여진 바와 같이 50 Ω —5/8 " EIA 동축형 연결기를 통하여 RF전력을 공급하고, 야외시험장 지하에 설치된 신호원, 고전력증폭기의 출력을 송신안테나에 공급하고 송신안테나 여기부에 흐르는 RF전류를 열전소자(thermoelement)로 측정하고, 이론적으로 계산된 또는 실험적으로 측정된 안테나의 입력 임피던스로부터 송신안테나를 통하여 방사되는 전력을 계산한다.

1/4파장 공진 모노폴 안테나는 직경이 8.65 mm인 원형 스테인레스 튜브를 이용하여 설계, 제작하였으며 안테나의 개수 (주파수의 개수)는 우리 나라 AM 방송의 주파수 상황을 고려하여 8개의 공진 모노폴을 사용하였다.

송신안테나로부터 전파되는 전자파에 의해서 제작된 크레인 모형의 결쇠에 유기되는 RF전압을 측정하기 위하여 SMA 동축형 Tee와 SPST 전기기계적인 스위치를 이용하였다.

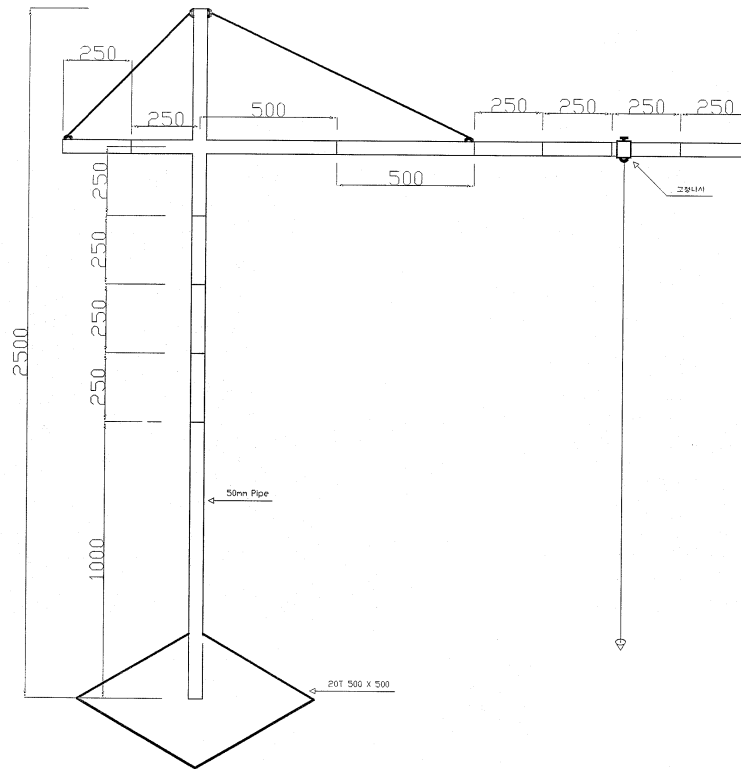


그림 4.14 타워회전형 건축용 크레인 모형의 설계도

사용한 SPST 스위치의 제원을 실물사진과 함께 표5.1에 나타내었다.

이 스위치는 결쇠부분이 개방된 상태와 작업자가 접촉할 경우를 모사하여 과도 (transient) 현상을 측정하였다. 이때 작업자의 신체 임피던스와 키를 고려하여 금속필름 저항을 직렬로 연결하여 1.5 k Ω 저항을 4 cm의 길이로 제작하여 실험에 사용하였다. RF전압측정기로는 RF 전압계, 오실로스코프 등을 사용하였다.

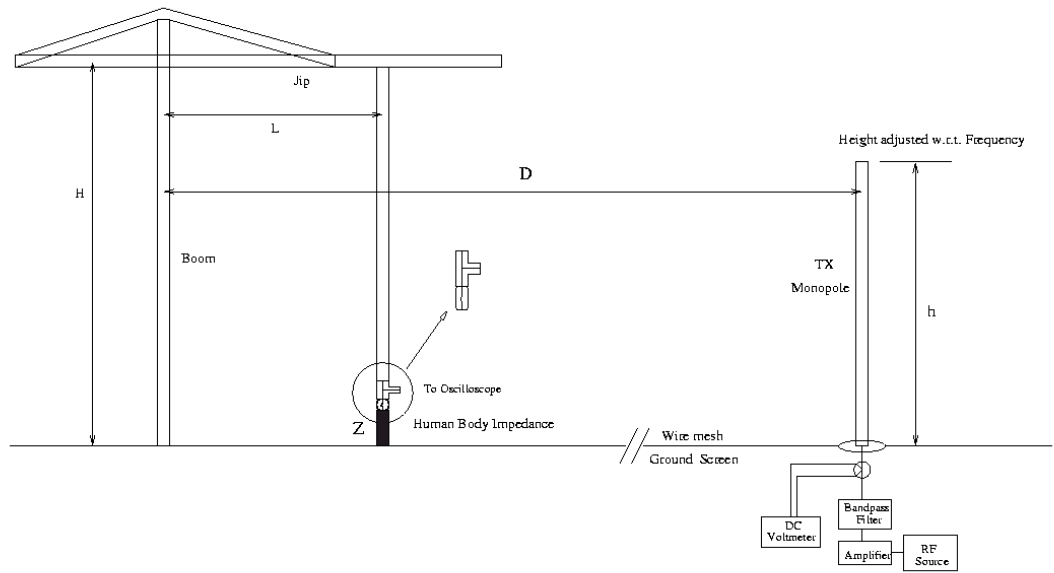


그림 4.15 야외시험장에서의 모사실험 set-up

그림 4.16은 한국표준과학연구원의 야외시험장에서 실험하는 모습에 대한 사진이다. 그림 4.16에서 앞부분에 보이는 것이 AM방송용 안테나에 해당하는 모노폴 안테나이고 흰색의 돔 (dome) 가까이에 서 있는 것이 1/40으로 축소된 타워회전형 건축용 크레인 모형이다.

그림 4.17은 크레인을 가까이에서 본 그림이고 그림 4.18은 작업자가 크레인 결쇠를 잡았을 때의 상태를 모사하기 위해 설치한 전기기계적인 SPST 스위치와 금속필름저항을 보인 사진이다.

표 4.1 SPST RF스위치의 제원

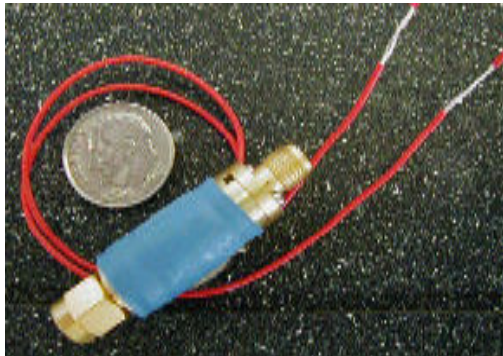
MSM1 Series Switches (Single Pole, Single Through) 전기적 특성						
주파수범위 (GHz)	삽입손실 (dB max)	포트간 격리 (dB min)	VSWR	스위칭속 도(ms)	CW RF전력 정격 (W max)	DC전압@100 mA max
DC-2 GHz	0.5	20	<1.5:1	<1	2.0	+ 5 to + 28
2-3 GHz	0.7	18				
제품 일반규격						
스위치형태: Single Pole, Single Through 주파수범위: DC ~ 3 GHz 임피던스: 50 Ω 연결기: 동축형 SMA Female/Male 스위칭시간: < 1 ms, PRF = 2 kHz min 수명: 100 M+ 사이클 사용환경: 온도 -55 ~ 125 ℃						



그림 4.16 한국표준과학연구원 전자과
야외시험장에서 실험하는 모습



그림 4.17 타워회전형 건축용 크레인의 모형

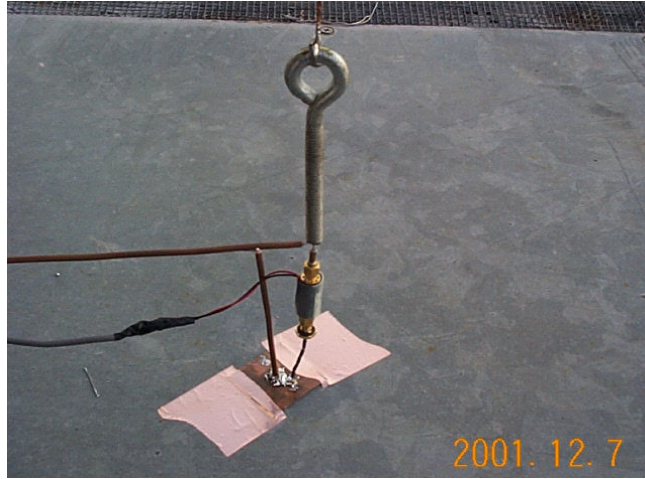


그림 4.18 모의 사진

나. 실험결과

송신안테나와 크레인과의 거리는 20 m이고 크레인의 높이를 229.5 cm로 하여 각각의 주파수에서 크레인에 유기되는 전계를 측정하여 표 4.2에 나타내었다. 20 MHz 부근에서 크레인의 공진현상으로 인해 peak가 존재하는 것을 볼 수 있다. 수치해석 결과와 비교해 보면 실험에서 얻은 공진주파수($21 \text{ MHz} / 40 = 0.5 \text{ MHz}$)가 수치해석에서 얻은 값(약 9.5 MHz)보다 낮은 것을 볼 수 있는데, 실험에 사용된 크레인 모델이 수치해석 모델에 비해 크기가 큰 것과 크레인 주변에 위치한 돔이 한 원인으로 생각된다.

수신 전파의 방향과 크레인의 위치에 따른 영향을 살펴보기 위하여 크레인을 0° , 90° , 180° , 270° 회전시키면서 전계를 측정하여 표 4.3에 측정결과를 나타내었다. 또한 크레인의 붐의 길이에 대한 영향을 알아보기 위하여 붐의 길이를 182 cm, 142 cm, 102 cm, 62 cm로 조절하면서 전계를 측정하였고, 크레인의 높이에 대한 영향을 보기 위하여 crane의 높이를 229.5 cm, 204.5 cm, 179.5 cm, 154.5 cm로 조절하면서 전계를 측정하여 각각 표 4.4과 표 4.5에 측정결과를 나타내었다.

표 4.2 크레인에 유기되는 전계의 주파수 특성

주파수 (MHz)	Io (mA)	Ez (V/m)	Vr (mV)	Vr/Ez	No of Monopole
10	197.0205	1.49E-01	19.4	1.30E-01	No 1
13	196.9779	1.96E-01	63.1	3.22E-01	
16	197.0631	2.43E-01	165.5	6.81E-01	
19	197.1554	2.90E-01	340.7	1.18E+00	
21	197.0915	3.39E-01	263.7	7.78E-01	No 2
24	197.2334	4.01E-01	204.9	5.11E-01	
27	197.4531	4.71E-01	189.7	4.03E-01	
30	197.3043	5.48E-01	179.2	3.27E-01	
33	197.1696	5.02E-01	161.0	3.21E-01	No 3
35	197.0915	5.47E-01	112.5	2.06E-01	
37	197.2759	5.97E-01	218.3	3.66E-01	
38	197.2050	5.07E-01	98.7	1.95E-01	
40	197.1199	5.47E-01	100.8	1.84E-01	No 4
42	197.2972	5.90E-01	145.9	2.47E-01	
43	197.4319	5.12E-01	65.3	1.28E-01	
45	197.2972	5.47E-01	87.8	1.61E-01	
47	197.4035	5.85E-01	64.7	1.10E-01	No 5
48	197.4744	5.15E-01	41.8	8.11E-02	
50	197.4886	5.47E-01	76.8	1.40E-01	
52	197.3539	5.81E-01	43.5	7.50E-02	
54	197.1610	6.16E-01	103.2	1.68E-01	No 6
56	197.1341	4.93E-01	67.7	1.37E-01	
58	197.3610	5.19E-01	88.2	1.70E-01	
60	197.1270	5.45E-01	110.5	2.03E-01	
62	197.2121	5.73E-01	128.3	2.24E-01	No 7
64	197.3327	6.03E-01	126.4	2.10E-01	
66	197.1554	4.99E-01	81.2	1.63E-01	
68	197.1412	5.21E-01	73.0	1.40E-01	
70	197.3468	5.44E-01	46.6	8.55E-02	No 8
72	197.0702	5.67E-01	25.0	4.41E-02	
74	197.0773	5.92E-01	39.7	6.71E-02	

표 4.3. 전파의 입사각에 대한 전계의 변화

입사각	주파수 (MHz)	Io	Ez	Vr	Vr/Ez
0°	48	197.2759	5.14E-01	87.7	1.70E-01
	50	197.0773	5.46E-01	189.0	3.46E-01
	52	197.0347	5.80E-01	129.2	2.23E-01
	54	197.0063	6.15E-01	145.5	2.36E-01
90°	48	196.9779	5.14E-01	66.9	1.30E-01
	50	196.7932	5.45E-01	142.9	2.62E-01
	52	197.1199	5.80E-01	61.7	1.06E-01
	54	197.2050	6.16E-01	72.7	1.18E-01
180°	48	197.1483	5.14E-01	31.0	6.04E-02
	50	197.2618	5.47E-01	39.0	7.13E-02
	52	196.9779	5.79E-01	52.4	9.05E-02
	54	197.2050	6.16E-01	103.4	1.68E-01
270°	48	197.0205	5.14E-01	70.7	1.38E-01
	50	196.9637	5.46E-01	131.6	2.41E-01
	52	196.8500	5.79E-01	77.6	1.34E-01
	54	197.0489	6.15E-01	91.6	1.49E-01

표 4.4. 크레인 붐의 길이에 대한 전계 변화

붐의 길이	주파수 (MHz)	Io	Ez	Vr	Vr/Ez
182 cm	48	197.0063	5.14E-01	70.6	1.37E-01
	50	197.1766	5.46E-01	135.2	2.47E-01
	52	196.9424	5.79E-01	86.2	1.49E-01
	54	197.1483	6.16E-01	108.0	1.75E-01
142 cm	48	197.1341	5.14E-01	79.2	1.54E-01
	50	197.1341	5.46E-01	120.6	2.21E-01
	52	197.2476	5.80E-01	79.3	1.37E-01
	54	197.1057	6.16E-01	88.1	1.43E-01
102 cm	48	197.4177	5.15E-01	76.0	1.48E-01
	50	197.3894	5.47E-01	160.9	2.94E-01
	52	197.0631	5.80E-01	85.5	1.48E-01
	54	196.9211	6.15E-01	89.6	1.46E-01
62 cm	48	197.0205	5.14E-01	58.4	1.14E-01
	50	197.0205	5.46E-01	154.1	2.82E-01
	52	197.0489	5.80E-01	72.6	1.25E-01
	54	197.2476	6.16E-01	108.4	1.76E-01

표 5.5 크레인의 높이에 따른 전계의 변화

높이	주파수 (MHz)	Io	Ez	Vr	Vr/Ez
229.5 cm	48	197.0063	5.14E-01	70.6	1.37E-01
	50	197.1766	5.46E-01	135.2	2.47E-01
	52	196.9424	5.79E-01	86.2	1.49E-01
	54	197.1483	6.16E-01	108.0	1.75E-01
204.5 cm	48	196.9779	5.14E-01	78.2	1.52E-01
	50	197.0063	5.46E-01	109.5	2.01E-01
	52	197.1766	5.80E-01	80.5	1.39E-01
	54	197.2050	6.16E-01	117.2	1.90E-01
179.5 cm	48	196.8784	5.13E-01	81.0	1.58E-01
	50	196.9211	5.46E-01	149.2	2.73E-01
	52	196.9637	5.79E-01	96.6	1.67E-01
	54	196.9779	6.15E-01	119.6	1.94E-01
154.5 cm	48	196.9779	5.14E-01	80.2	1.56E-01
	50	196.8500	5.45E-01	157.8	2.89E-01
	52	197.0063	5.79E-01	96.3	1.66E-01
	54	197.0631	6.16E-01	119.0	1.93E-01

표 5.6. 크레인 결쇠 접촉시의 전계의 변화

실험조건	주파수 (MHz)	Io	Ez	Vr	Vr/Ez
open	48	197.0631	5.14E-01	77.9	1.52E-01
	50	197.2334	5.46E-01	155.6	2.85E-01
	52	197.0347	5.80E-01	91.7	1.58E-01
	54	196.8500	6.15E-01	118.3	1.92E-01
1500 ohm	48	196.8074	5.13E-01	77.0	1.50E-01
	50	196.8358	5.45E-01	143.0	2.62E-01
	52	196.8500	5.79E-01	91.2	1.58E-01
	54	196.8927	6.15E-01	108.9	1.77E-01

크레인의 결쇠에 유기된 전압에 의하여 작업자가 결쇠에 접촉할 경우에 발생하는 과도 전류에 대한 특성을 측정하기 위하여 결쇠에 작업자의 신체임피던스에 해당하는 1.5 k Ω 의 저항을 연결하고 스펙트럼분석기로 전계를 측정하여 표4.6에 나타내었고, 작업자가 결쇠를 접촉하는 순간의 과도전류를 오실로스코프로 측정하여 그림 4.19에 나타내었다.

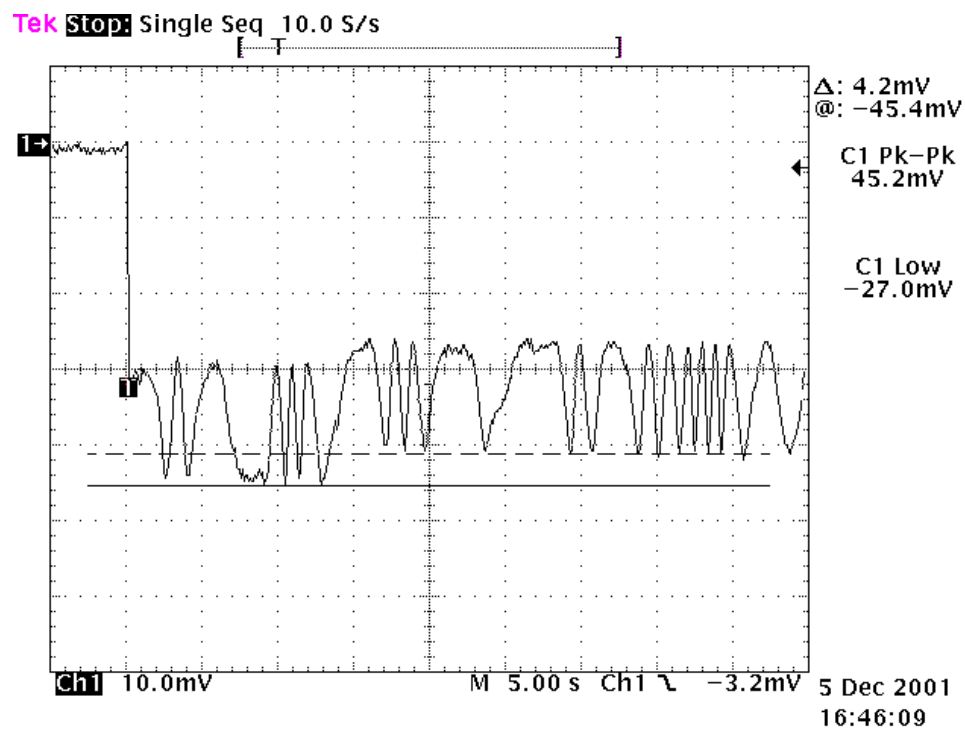


그림 4.19(a) 크레인 유도전압의 과도특성; 48 MHz

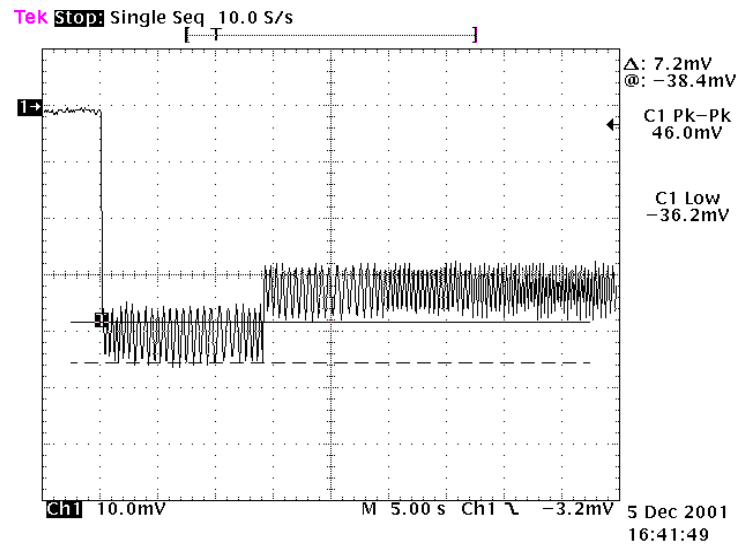


그림 4.19(b) 크레인 유도전압의 과도특성; 50 MHz

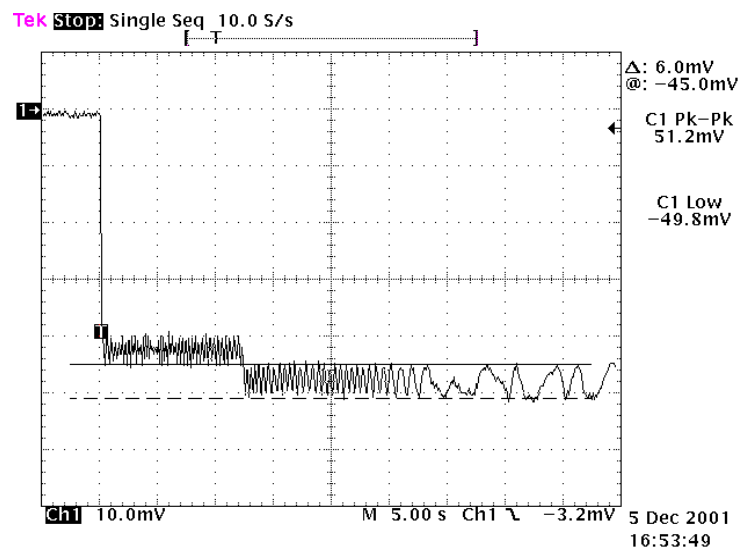


그림 4.19(c) 크레인 유도전압의 과도특성; 54 MHz

다. 결과 고찰

모멘트법이 사용된 수치해석 과정에서 기저함수로는 정확도가 높은 NEC2에서 사용되는 기저함수가 사용되었고, 적분항의 singularity 제거를 위한 적분항 계산 및 관련 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 송신안테나와 크레인 사이의 기하학적인 구조(거리, 높이, 거리, 입사방향 등) 및 전기적인 특성(크레인과 지면과의 접지정도, 작업자가 결쇠를 접촉한 경우)과 크레인에 유기되는 전압과의 관계를 해석하여 크레인 사용시 무선주파수 전자파에 의한 감전 방지를 위한 기초자료를 제시하였다.

모사실험에서는 크기가 1/40로 축소된 tower-turnover construction crane의 모델을 제작하고, AM 방송용 송신안테나를 모의하기 위하여 1/4파장 모노폴 안테나를 제작하여 한국표준과학연구원의 30 m × 60 m의 접지면(wire mesh 간격은 1/4"임)을 갖는 야외시험장에서 모사실험을 수행하였다. 1/4파장 공진 모노폴 안테나의 소자의 길이는 개발된 모멘트법을 이용하여 설계하였으며, 안테나 소자의 소재로는 직경이 8.65 mm인 원형 stainless tube를 이용하였다.

수치해석 및 모의실험에서 크레인의 결쇠와 지면사이의 개방회로전압이 특정 주파수에서 커지는 공진현상이 모두 발견되었으며, 공진주파수는 수치해석에서 얻은 결과가 다소 높게 나왔는데 이는 실험에 사용된 크레인 모델이 수치해석 모델에 비해 크기가 큰 것과 크레인 주변에 위치한 돔이 한 원인으로 생각된다. 수치해석 및 모의실험에 사용된 모델이 서로 같고, 보다 개선된 환경에서 실험이 다시 수행된다면 보다 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

제5장 유기전압 현장 측정법과 감전방지 대책

1. 유기전압 및 전계강도의 측정

가. 유기전압의 간이 확인방법

크레인 혹에 발생하는 이상전압을 현장에서 간단하게 확인하는 방법의 하나로, 형광등이나 백열등을 이용하는 방법이 있다. 구체적인 방법은 그림 5.1에 나타낸 바와 같이 10 ~ 20 W의 형광램프나 시중에서 사용되는 10~100W의 백열전구의 한 쪽을 접지하고, 다른 한 쪽을 크레인의 혹에 접촉한다. 이 때, 이상전압이 발생되어 있다면 형광램프가 점등한다. 또, 고전압이 발생되어 있는 때는 접지하지 않아도, 형광등을 손으로 잡고 혹에 접촉하기만 해도 점등된다.

나. 이상전압의 현장측정 방법

크레인의 혹에 발생하는 이상전압을 파악하기 위해서는, 그림 5.2와 같이 측정기로 전자전압계나 오실로스코프를 사용한다. 전자전압계는 1MHz 이상의 주파수범위에서 100 V 이상의 교류전압이 측정 가능한 계기를 선정하고, 고전압프로브 100:1, 또는 1000:1을 병용해서 측정하며, 전압은 실효값으로 표시된다.

오실로스코프로 측정하는 경우도 전자전압계와 같은 방법이지만 전압은 파형의 최고점으로부터 최저점까지 읽으며, 전압은 V_{p-p} 로 표시한다.

이상에서 설명한 측정순서를 자세히 언급하면 아래와 같다.

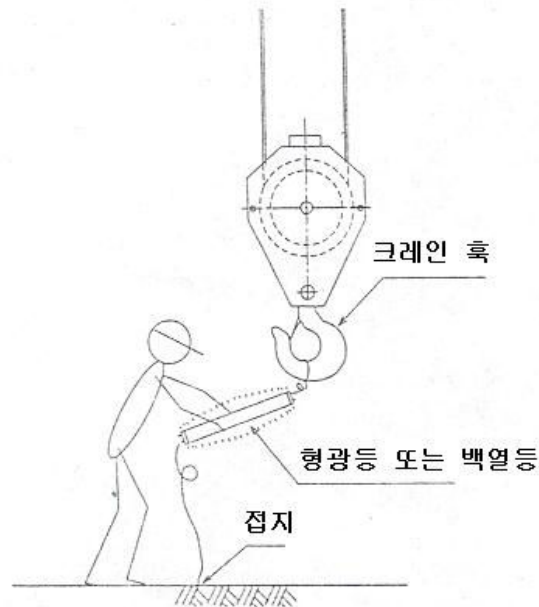


그림 5.1 이상전압 간이측정법

(1) 측정순서

- ① 크레인 훅을 지상 약 1m 정도까지 내린다.
- ② 훅과 대지간을 접지 시킨다(전선 양단에 와이어 클립을 부착한 IV전선).
- ③ 편조선을 훅에 감아 단단히 고정시킨다.
- ④ 분전반에서 전원을 끌어온다.
- ⑤ 훅 편조선에 고전압 프로브를 접속하고 전압계나 오실로스코프를 접속한다.
- ⑥ 훅과 대지간의 접지선을 툰다.
- ⑦ 전압계 또는 오실로스코프 전원을 켜고 측정을 시작한다.
- ⑧ 측정이 종료되면 훅과 대지간을 접지한다.

⑨ 계기의 전원을 끄고 혹에서 고압 프로브를 분리시킨다.

⑩ 혹에 감았던 편조선을 푼다.

⑪ 혹과 대지간의 접지선을 떼어낸 후 측정작업을 종료한다.

이와 같은 측정에서 주의할 점은 접지를 할 때 혹에 접촉되면 화상을 입을 우려가 있으므로 절연 고무장갑을 사용하도록 한다.

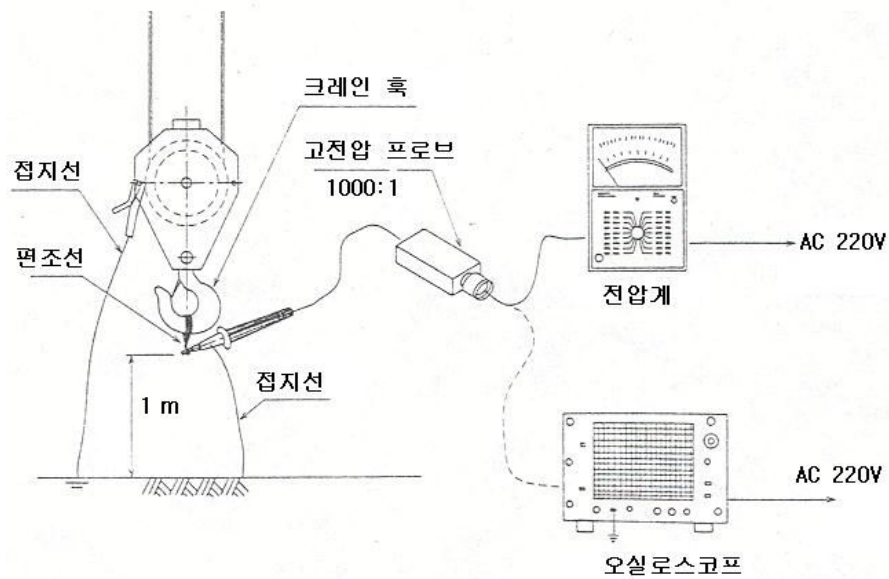


그림 5.2 이상전압 측정법 예시

다. 전계강도의 측정방법

앰프에 루프안테나를 붙인다. 제로 조정 후, 회망주파수를 다이얼로 선정한 다. 계측기의 수치가 최소가 되도록 앰프 위의 루프안테나의 방향을 변화시키고, 이 때의 수치를 읽는다. 수치단위는 dB_μV 이다. V/m 의 환산식은 아래와 같으며, P는 전계강도를 나타낸다.

$$X = (\text{측정치}/20) - 6$$

$$P(V/m) = 10^X$$

2. 감전방지 대책

장해의 현상과 그 대책에 대하여 검토한 결과, 유기전압의 크기, 장해의 발생 부위, 장해의 정도 등에 따라 대책도 달라지기 때문에, 대책을 실시할 때는 당면한 장해의 상황에 따른 유효한 대책을 선정하여야 한다.

가. 크레인혹 선단 이상전압의 대책

(1) 크레인 장치

① 혹의 절연 처리 또는 절연 혹, 절연용 달기구를 사용한다(그림 5.3 ~ 5.5).

② 전기적 루프가 형성되지 않도록 나일론슬링(Nylon Sling), 웨빙슬링벨트(Webbing Sling Belt) (그림 5.6, 5.7) 사용한다.

단, 이 경우, 우천시나 습기가 많은 경우 절연효과가 크게 감소하므로 이를 고려하여야 한다.

③ 접지용 기구를 사용한다.

④ 혹 block에 주의를 환기시키는 표지를 부착한다.

⑤ 전계강도의 측정

지도에서, 송신소로부터의 거리가 가깝고 영향이 있을 것 같은 작업장소는 사전에 전계강도를 측정한다. 장해사례에 따르면, 100kW 송신소에서 약 10km 이하의 작업장소는 영향이 있는 것으로 보면 된다.

⑥ 고주파전압의 측정

장해 발생시, 빨리 상황을 파악하기 위해서 고주파전압을 측정한다.

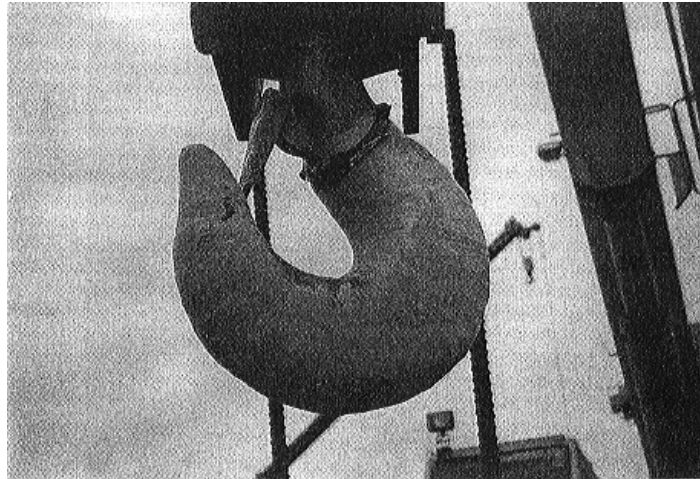


그림 5.3 절연처리된 크레인 훅

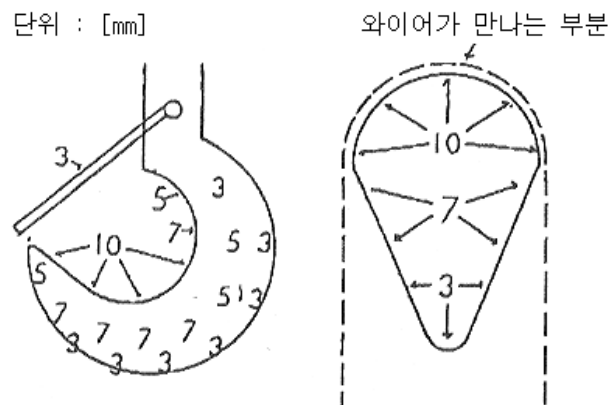


그림 5.4 절연재의 두께 예시

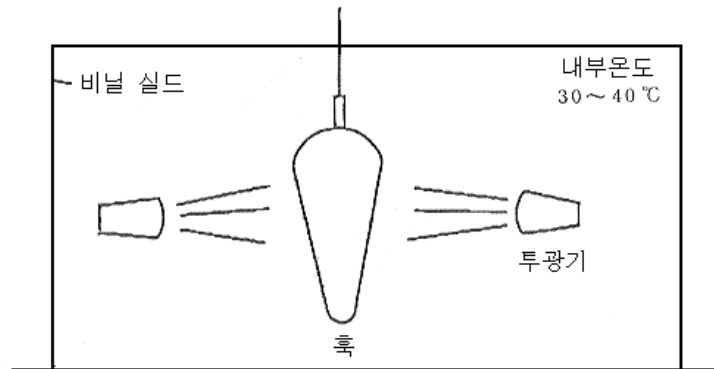


그림 5.5 절연재의 건조방법 예시

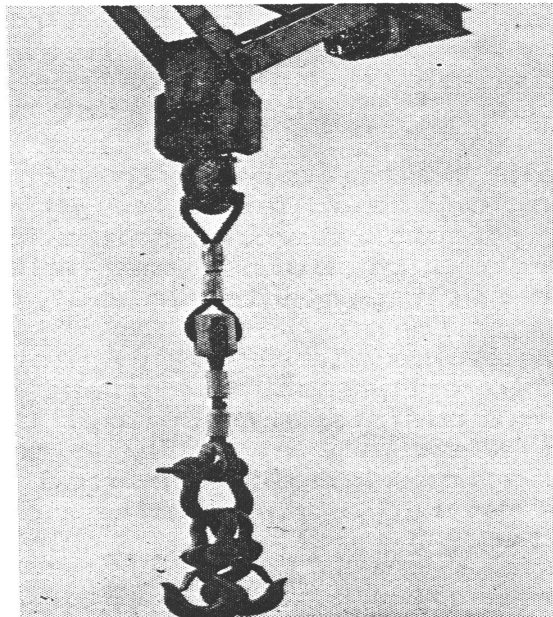


그림 5.6 절연 달기구 사용 예



그림 5.7 슬링 벨트로 절연시킨 방법의 예

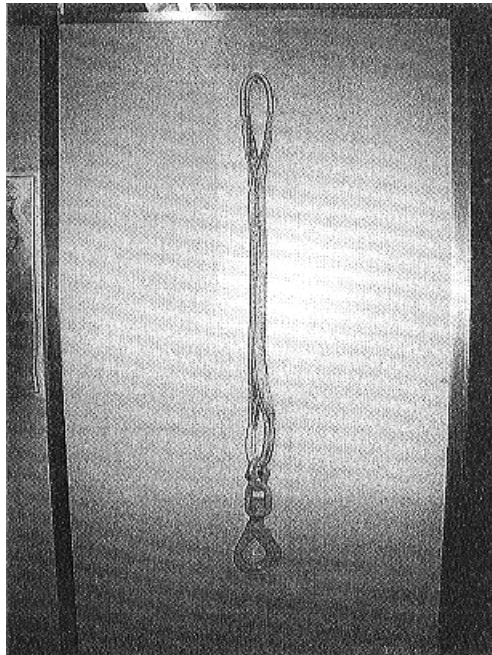


그림 5.8 Nylon Sling 사용 예

(2) 작업자에 대한 주의사항

- ① 걸기작업에는 와이어로프가 아닌 나일론 슬링을 사용한다(와이어에 의한 걸기가 필요한 경우에는 와이어로프+ 나일론슬링).
- ② 나일론 슬링을 사용하는 때에는 사용하중 및 일상점검을 해서 사용한도를 초과하는 물건은 피한다.
- ③ 혹에 직접 링을 거는 경우는 고압 활선작업용 고무장갑을 착용한다.
- ④ 개구부나 철골의 사이에 혹을 내리는 경우, 혹이나 감아올리기 wire를 정리할 필요가 있는 경우는 고압 활선작업용 고무장갑을 착용한다.
- ⑤ 타워크레인의 조립, 해체작업에서 와이어로프나, 표면이 절연체로 피복되지 않고 안테나 역할을 하는 물체를 다루는 경우에는 저압 활선작업용 고무장갑을 사용한다.

이상의 유의점에 대해 반복해서 지도를 해야하며, 특히 신규로 작업에 투입되는 사람에 대해서는 철저한 교육이 필요하다.

나. 과부하방지장치 오작동의 대책

크레인의 과부하방지장치가 전자파로 인하여 오동작할 우려가 있으므로, 과부하방지장치를 차폐하거나, 전자파 장애에 대한 검정을 받은 제품을 사용하도록 하고, 이에 인입되는 배선도 차폐를 시키도록 한다(그림 5.9, 5.10).

다. 배선에 유기되는 이상전압의 대책

(1) 일반적인 대책

- 전원 케이블, 모터 구동용 케이블, 제어케이블 등의 케이블을 실드재로 감싼다.
- 제어반류들을 실드재(금속망 등)로 감싼다.
- 제어반 내의 배선을 실드선으로 교체한다.
- 전원케이블을 마스트 내에서 올라오도록 한다.

(2) 배선 실드재

이미 설치된 배선을 모두 실드선으로 교환하는 하고자 할 때는 현장에서 간단히 배선을 실드 처리하는 것이 가능한 배선실드재가 시판되고 있다. 이 것은 폴리스에스텔 등의 판상의 시트에 알루미늄박이나 금속망을 붙이고, 끝부분에 지퍼, 버튼, 혹은 매직테이프 등을 붙여, 배선을 감싸서 관 형태로 결속시키는 것이다.

실드선의 선정이나 사용상 주의사항은 다음과 같다.

- ① 배선의 크기에 맞는 사이즈를 선정한다.
- ② 실드 효과를 높이기 위해서는 알루미늄박의 두께가 두꺼운 것이 좋지만, 유연성은 나빠진다.
- ③ 움직이는 부분에 사용하는 것은 금속망이 적합하다.
- ④ 실드재로부터 나온 배선은 반드시 접지한다.

표 5.1 크레인 과부하방지장치의 오작동 대책사례

부 분	특 징	대 책	비고
로드셀	미소전압 출력	- 로드셀 접지	로드셀의 대전전압을 낮춰서 출력에 실리는 노이즈를 감소시킴.
배선	미소전압 전송	- 실드선 사용 - 다른 배선과 분리 - 접지한 전선관에 넣을 것	신호배선에 실리는 노이즈를 감소시킴.
		- 차동전송(差動伝送)방식으로 할 것.	신호배선에 실리는 노이즈 감소
앰프	증폭율이 높음	- 입출력단에 EMI 필터 사용	고주파 노이즈 성분 감쇠
		- 케이스 실드 성능 높일 것	외부 강전계의 영향을 앰프 내부에 미치지 않게함.
표시기		입력에 노이즈필터 사용	노이즈성분을 감쇠

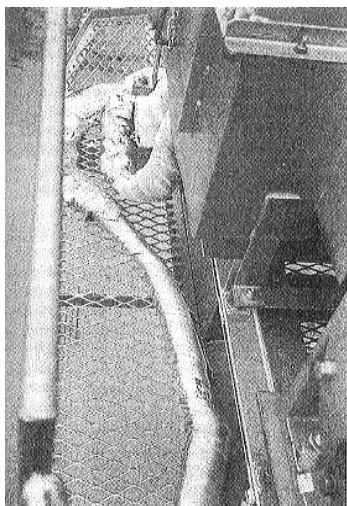


그림 5.9 배선류의 차폐

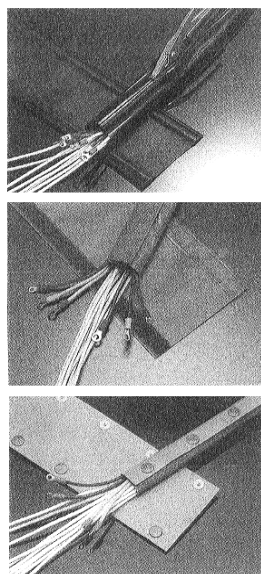


그림 5.10 차폐방법

제6장 결론

본 연구는 라디오 방송국 송신소 근처의 건설현장에서 크레인 작업을 할 때 전자파(중파 대역)에 의하여 크레인에 유기되는 전압에 감전될 우려가 있는 건설현장의 크레인 작업자의 위험성을 예방하기 위하여 크레인에 유기되는 전자파의 문제점과 재해사례 및 우리나라 방송국의 송신소 위치 및 취약반경을 조사하고 현장에서 유기전압의 위험성을 측정할 수 있는 측정법을 제시하였다.

또, 한국표준과학연구원에 용역을 의뢰하여 AM 방송송신소의 송신안테나로부터 복사된 방송신호에 의해 크레인에 유기되는 전류와 전압을 계산할 수 있는 수치해석 프로그램을 모멘트법을 사용하여 개발하였다. 이 프로그램을 통하여 사전에 유기전압의 위험성을 예측할 수 있을 것이다. 구체적인 연구결과는 다음과 같다.

(1) 재해사례를 통하여 살펴본 바에 따르면, 송신소 반경 약 4 km 이내는 유기전압이 발생할 수 있는 취약반경으로 나타났다. 따라서, 출력 50 kW 이상인 방송국 송신소 부근의 반경 4 km 이내의 건설현장에서 크레인 작업을 할 때는 반드시 유기전압의 발생 유무를 확인하여 본 연구에서 제시한 여러 안전조치를 취한 후 작업하도록 한다.

현장에서 측정한 유기전압이 최대 500V 정도로 나타났다. 이러한 이상전압은 주파수가 높으므로 전류는 표피효과에 의해 주로 인체의 표면을 흐르게 되어 인체가 접촉하여도 직접적인 생명에 지장을 초래하지 않는다.

그러나, 고소작업을 할 때 강한 전격으로 추락하여 사망할 위험이 있으며, 화

스파크로 인해 화상을 입을 우려가 있다.

(2) 이러한 현상들이 가연성 물질을 사용하는 화학공장 등에서 발생하는 경우는 루프의 불연속 지점에서 발생하는 스파크에 의한 화재·폭발을 유발시키는데 충분한 에너지가 됨을 확인하였다.

(3) 우리나라 주파수 분배에 따른 방송국 송신소의 위치를 전부 파악하여 전파에 의한 감전 및 점화 위험성을 나타내는 취약지역을 사전에 알 수 있도록 하였으며, 이를 토대로 현장에서 사전에 안전대책을 수립할 수 있도록 하였다.

(4) 작업현장이 송신소 위치로부터 취약반경 내에 있는 경우, 개발된 위험예측프로그램을 이용하여 위험성 정도를 평가하여 안전조치를 취한 후 작업에 임하도록 한다.

참 고 문 헌

- [1] OSHA (Occupational Safety and Health Administration) Regulation (Standards-29 CFR)
- [2] E. W. Plischke and W. F. Wolff, "Tuned in or Turned on RF Radiation Study", ASSE Journal, pp. 12-15, June 1969
- [3] G. H. Butcher, P. S. Excell and D. P. Howson, "The Ignition Hazard Due to Radiation from Radio Transmitters", Postgraduate School of Electrical and Electronic Engineering, University of Bradford, UK., pp. 143-147, 1975.
- [4] A. J. Maddocks, and G. A. Jackson, "Measurements of Radio Frequency Voltage and Power Induced in Structures on the St Fergus Gas Terminals", The Radio and Electronic Engineers, Vol. 51, No. 4, pp. 187-194, April 1981
- [5] BS 6656, Prevention of inadvertent ignition of flammable atmospheres by radio-frequency radiation", 1991.
- [6] 산업안전연구원, 고주파 전기회로에 의한 가연성가스의 점화 위험성 분석 및 방지 대책에 관한 연구, 연구보고서 기전연 95-6-7, 1995. 12.
- [7] 산업안전보건연구원, 방폭지역의 불꽃점화 시험을 위한 장치의 개발, 안전 분야-연구자료, 연구원 99-25-95, 1998.12.