

工學博士 學位論文

HVDC 가공 송전선로의 최적 도체방식 선정을
위한 전기환경 특성평가에 관한 연구

A Study on the Assessment of Electrical Environmental Characteristic to
Decide an Optimal Bundle Type for HVDC Overhead Transmission Lines

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朱 玠 魯

工學博士 學位論文

HVDC 가공 송전선로의 최적 도체방식 선정을
위한 전기환경 특성평가에 관한 연구

A Study on the Assessment of Electrical Environmental Characteristic to
Decide an Optimal Bundle Type for HVDC Overhead Transmission Lines

指導教授 吉 暲 碩

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

朱 玠 魯

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	iii
Abstract	vii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용	2
제 2 장 직류선로 전압계급 검토	4
2.1 전 세계의 직류계통 현황	4
2.2 예상 송전전압과 전망	8
2.3 선로전압 계급의 범위산정	12
제 3 장 HVDC 송전선로의 전기환경특성	15
3.1 코로나 방전 메커니즘	15
3.2 송전선로 설계와 환경문제	24

제 4 장	코로나 케이지 환경모의실험용 계측시스템	
	설계 및 제작	40
4.1	직류 코로나 케이지 모의실험설비	40
4.2	측정항목	49
4.3	전원 노이즈 대책	66
4.4	모의실험용 및 분석용 DAS 개발	68
제 5 장	최적도체방식 선정 및 무한선로 환산	79
5.1	실험결과 및 평가	79
5.2	친환경 최적 도체방식 선정	105
5.3	단극데이터를 이용한 무한선로 환산기법	107
제 6 장	결 론	121
참 고 문 헌	123

그림 및 표 목차

<그림목차>

그림 2.1	북유럽의 계통연계 HVDC 송전망	5
그림 2.2	Cross-Channel HVDC System 경과지 개요도	6
그림 3.1	음극에서의 전자사태 과정	16
그림 3.2	정극성 코로나 방전에서의 전자사태 발생	20
그림 3.3	부극성 코로나 방전에서의 전자사태 발생	21
그림 3.4	송전선로 설계와 환경대책 개념도	26
그림 3.5	환경설계 및 규제 관련 기준들의 관계	28
그림 3.6	라디오 수신품질 평가용 SNR 기준 곡선	34
그림 3.7	텔레비전 수신품질 vs. SNR 평가기준	38
그림 4.1	반파정류회로	41
그림 4.2	반파정류회로의 출력파형	42
그림 4.3	배전압 및 3배전압 정류회로	42
그림 4.4	Cockcroft-Walton 회로	43
그림 4.5	DC 전원설비와 AC 시험용 변압기	45
그림 4.6	DC 실험 측정설비와 제어흐름도	46
그림 4.7	DC 실험설비 200 mA/600 kV 평면도	46
그림 4.8	코로나 케이지에 설치된 HVDC 전원설비	47
그림 4.9	코로나 케이지 구성도	48
그림 4.10	측정항목 및 설치지점	48
그림 4.11	병렬 공진법을 이용한 정전용량 측정	50
그림 4.12	라디오 잡음 검출회로	51
그림 4.13	라디오 잡음 측정회로의 등가임피던스 계측도	51
그림 4.14	라디오 잡음 측정회로의 주파수 응답특성	52
그림 4.15	구갭 위치에 따른 라디오 잡음전압	54
그림 4.16	정방향 케이지를 원통형으로 등가변환	57

그림 4.17	직류 라디오 잡음 케이지 실험법 흐름도	58
그림 4.18	직류 코로나 소음 케이지 실험법 흐름도	60
그림 4.19	코로나 케이지의 이온전류밀도 측정용 평판전극	61
그림 4.20	이온전류 측정용 평판전극	62
그림 4.21	변위전류 보상	63
그림 4.22	평판센서 교정실험 개략도	63
그림 4.23	기상요소 측정 전용 기상 Tower	66
그림 4.24	코로나 케이지 및 전원계통 등가회로도	67
그림 4.25	전원측 불요이잡음 차단용 Blocking Coil	68
그림 4.26	PC-Based DAS 개념 설계도	69
그림 4.27	코로나 케이지 환경모의실험 프로그램(실험조건 입력mode)	74
그림 4.28	계측기 측정조건 변경하기 위한 Window	74
그림 4.29	직류코로나 케이지 환경모의실험 프로그램(실행 mode)	75
그림 4.30	시간동기화 후의 최종 저장파일	76
그림 4.31	직류 코로나 케이지 데이터베이스 처리 프로그램	77
그림 4.32	직류 코로나 케이지 DAS 구축 장면	78
그림 5.1	도체표면 전계강도별 라디오 잡음특성	81
그림 5.2	코로나 케이지 인가전압별 라디오 잡음발생함수 Γ	82
그림 5.3	후보도체방식별 라디오 잡음발생함수 Γ 비교	82
그림 5.4	기상조건별 라디오 잡음발생함수 Γ 비교	84
그림 5.5	상대습도 변화에 따른 라디오 잡음강도	84
그림 5.6	온도 변화에 따른 라디오 잡음강도	85
그림 5.7	풍속 변화에 따른 라디오 잡음강도	85
그림 5.8	도체표면 전계강도별 텔레비전 잡음 특성	87
그림 5.9	코로나 케이지 인가전압별 텔레비전 잡음	88
그림 5.10	후보도체방식별 텔레비전 잡음 발생량 비교	89
그림 5.11	기상조건별 텔레비전 잡음 발생특성	90

그림 5.12	상대습도 변화에 따른 텔레비전 잡음강도	90
그림 5.13	도체표면 전계강도별 코로나 전류	92
그림 5.14	코로나 케이지 인가전압별 코로나 전류 발생량	93
그림 5.15	장시간 측정에 의한 후보 도체방식별 코로나 전류 비교	94
그림 5.16	기상조건별 코로나 전류 비교	95
그림 5.17	상대습도 변화에 따른 코로나 전류	95
그림 5.18	도체표면 전계강도별 이온전류밀도 발생특성	97
그림 5.19	코로나 케이지 인가전압별 이온전류밀도 증가 추이	98
그림 5.20	후보도체방식별 이온전류밀도 발생량 비교	99
그림 5.21	기상조건별 이온전류밀도 발생특성	99
그림 5.22	도체표면 전계강도별 코로나 소음 발생특성	102
그림 5.23	코로나 케이지 인가전압별 코로나 소음	103
그림 5.24	후보도체방식별 코로나 소음 비교	103
그림 5.25	기상상태별 직류 코로나 소음의 주파수 스펙트럼	104
그림 5.26	선로 단위길이 등가회로	108
그림 5.27	RI Magnetic field 계산	109
그림 5.28	무한선로 환산 시 잡음발생함수의 배치방법	114
그림 5.29	코로나와 갭방전에 따른 전류펄스	115
그림 5.30	쌍극1회선 직류선로의 라디오 잡음 Lateral Profile	116
그림 5.31	직류 케이지 라디오 잡음 무한선로 환산알고리즘	116
그림 5.32	직류 케이지 코로나 소음 무한선로 환산알고리즘	120

<표 목 차>

표 2.1	NORDEL 국가의 HVDC 계통실태	4
표 2.2	“러시아~북한~남한” 계통연계 주요 예상 시나리오	9
표 2.3	±500 kV 직류송전 Project 세계 현황	10
표 2.4	전선 허용전류	12
표 2.5	±500 kV상용선로 전계강도 모의용 코로나 케이지 인가전압	14
표 2.6	후보도체방식별 코로나 케이지 인가 직류전압	14
표 3.1	고압 송전선의 원인별 환경영향	25
표 3.2	직교류 송전선로의 환경특성 비교	25
표 3.3	미국 각 주의 주거지역 소음규제 현황	29
표 3.4	세계 각국 전력회사의 코로나 소음 설계목표치 현황	30
표 3.5	한전 765 kV 송전선로 코로나 소음 설계목표치	32
표 3.6	청명시 라디오 잡음 캐나다 규제치	35
표 3.7	국내의 잡음 등급별 방송구역 전계강도 기준	36
표 3.8	해외의 라디오 잡음 측정 관련 규격 비교	37
표 3.9	한전 765 kV 송전선로 라디오 잡음 설계목표치	37
표 4.1	DC 전원설비 설계사양	45
표 4.2	후보도체방식별 단위길이당 정전용량	56
표 4.3	기상요소 계측장치의 사양	65
표 4.4	데이터베이스 통계처리 프로그램 처리 항목	78
표 5.1	후보도체방식별 코로나 케이지 모의실험 현황	79
표 5.2	후보도체방식별 환경영향 평가	106
표 5.3	코로나와 깃방전에 따른 전류펄스 특성	114

A Study on the Assessment of Electrical Environmental Characteristic to Decide an Optimal Bundle Type for HVDC Overhead Transmission Lines

by Mun-No, Ju

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

Abstract

Corona characteristic of conductors depends on the electric field conditions in the immediate vicinity of the conductors. For high voltage direct current transmission lines, in particular, the space charge plays an important role in the electric field distribution. Therefore, the HVDC transmission line conductor configuration needs to consider corona interferences such as radio noise, audible noise and television noise in its design. In addition, the transmission line design requires data that estimate the corona performance of any set of conductors. This paper first presents the design and construction of DC power supply, measurement system and data acquisition system to carry out the corona cage simulation and then shows the corona cage test results for three types of conductors. The DC corona cage was longitudinally divided into five equal lengths, and three

inner sections were isolated from the outer cage ground to measure radio noise and corona current. The research measured the following: radio noise, corona current, television noise, audible noise, ion current density and meteorological conditions. The radio noise and corona current measuring circuits were installed between the outer and inner sections of the cage, and then calibration experiments and cage simulations were conducted. Since television noise has high frequencies 75 MHz, an antenna pick-up system has been selected to measure the television noise. The audible noise was measured by a conventional method, which measures the noise level with a microphone attached to the cage. The ion current density was measured by a plate electrode manufactured from a metal flat board. To obtain a satisfactory set of conductor design data, it is necessary to examine corona test results on a large number of conductor geometries. Therefore, a number of experiments were conducted on several bundle types. To reliably analyze corona discharge phenomenon, corona cage test data were obtained over a long period of time, under various weather conditions, and expressed as a statistical distribution. In conclusion, it is quite clear from test results that conductor geometries play an important role in establishing the magnitude of corona noise. Based on this result, we determined the environmentally friendly conductor bundle type for HVDC ± 500 kV overhead transmission line.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

증가하는 전력수요에 대비하고 전력수송비 절감, 전력공급의 신뢰도 향상 및 국토의 효율적인 이용 등을 고려하기 위해서는 전력계통을 신설 및 증설하고 송전전압을 격상해야한다. 국내도 현재 송전전압이 765 kV까지 격상되어 어느 정도 전력수요 문제를 해결했지만 송전전압이 초고압화 및 송전선로의 대형화로 선로 주변에 각종 장애가 발생되어 765 kV 송전선로 주변의 전기적 환경장애, 즉 가청소음, 라디오 잡음, 텔레비전 잡음 등에 의한 장애대책을 수립하여 적용하고 있다. 전력설비의 개발은 에너지 개발사업의 일환으로써 전원개발 및 환경정책 등의 관련 법률에서 정한 일정 기준을 만족하도록 설계되어야 한다^{[1],[2]}. 또한 현재 국가간의 전력거래를 위한 동북아 국가간 전력계통 연계기술개발 예비 타당성 연구가 진행 중인 시점에서 초고압 직류(High Voltage Direct Current, 이하 HVDC) 송전계통 설계 시에 최우선적으로 연구개발, 조사, 검토되는 기술분야는 환경설계분야로서 계통해석, 송전용량, 경제성 등이 동시에 고려된 송전도체방식 결정, 전선 최저 지상고 및 지지물 설계자료 도출, 환경설계 목표치 설정, 특정 목적의 저소음·저잡음 신전선의 개발, 전계해석기법 개발, 환경영향 평가·분석·예측기법 개발 등이 요구된다. 따라서 전력계통 연계 시나리오인 러시아-몽고-북한-남한 간에 있어서 초고압 대용량 직류 송전선로의 건설 가능성에 대비한 초고압 직류 가공송전선로의 친환경 설계와 건설기술이 필요하다.

초고압 직류 가공송전선로 환경대책설계는 코로나 방전에 의한 이온류를 고려한 송전도체 방식 선정, 전선의 기하학적 배치(line geometry), 전

선 지상고 결정 및 선로 상용화의 적합성 등을 평가하는 작업으로서 국내는 물론 선진 외국에서도 코로나 케이지(Corona Cage)를 이용한 단상모의 실험연구와 실규모 시험선로(Test Line)에서의 장기간 환경실증 실험연구를 수행한다. 따라서 국가간 계통연계에 대비한 직류 송전계통을 실용화하기 위해 본 논문에서는 HVDC 가공송전 후보도체방식에 관한 코로나 케이지 모의실험연구를 수행하고 초고압 직류 가공송전선로의 코로나 방전에 의해 발생하는 각종 전기환경장해를 평가하여 우선적으로 실규모 크기의 시험선로에 그 결과를 적용하고, 향후 상용선로를 건설할 때 본 논문의 연구결과를 전기환경대책 설계 자료로 활용하고자 한다.

1.2 연구내용

초고압 직류 가공송전선로는 고유한 형상과 송전전압, 부하전류 그리고 기상조건 등에 따라서 다양한 종류의 환경장해를 유발하게 된다. 이러한 환경문제를 완전히 해결하는 것은 불가능하지만, 일정 환경기준을 만족하도록 설계할 수는 있다. HVDC 가공송전선로의 전기적인 환경장해항목으로는 라디오 잡음, 텔레비전 잡음, 코로나 소음, 이온류에 의한 대전체의 대전전압 등이 있고 기계적인 장해로는 텔레비전 전파장해, 경관장해 등이 있다. 이러한 대용량 장거리 송전에 적합한 HVDC 가공송전선로에서의 환경문제를 평가하기 위해서는 실규모의 시험선로를 이용하는 것이 가장 신뢰성이 높은 방법이다. 그러나 상용선로와 동일한 조건의 실규모 모델 실증실험을 위해서는 상당한 시간적, 경제적 부담이 요구된다. 따라서 이러한 난제의 해결책으로써 본 연구에서는 융통전력 등을 고려한 후보도체방식들의 환경특성 모의실험이 용이한 코로나 케이지(Corona Cage)를 활용했다. 코로나 케이지를 이용하게 되면, 도체방식을 용이하게 변경하면서 낮은 전압으로 실규모 선로의 코로나 방전현상을 모의할 수

있어 매우 효율적이며 경제적이다. 코로나 케이지에서의 직류송전 환경모의실험 대상이 되는 후보도체 방식은 우선 전력계통 측면에서 검토를 거쳐 결정되어야 한다. 따라서 송전용량 관점인 용통전력(5%, 3 GW), 회선당 전류허용용량, 송전용량 여유도 등을 만족하는 6×480(Cardinal, 이하 C) mm², 4×810 mm², 6×810 mm²를 후보도체방식으로 선정하여 코로나 케이지에서 코로나 특성 실험을 수행하였다. 전기환경의 관점에서 직류케이지에서의 측정항목은 라디오장해(Radio Interference, RI), 텔레비전 장해(Television Interference, TVI), 코로나 소음(Audible Noise, AN), 코로나 전류(Corona Current, CC), 및 이온전류밀도(Ion Current Density)이며, 기상조건에 따른 각 장해항목의 특성을 평가하기 위해 풍향, 풍속, 온도, 습도 등의 기상조건도 동시에 계측하였다.

따라서 본 논문에서는 직류 코로나 케이지 모의실험을 수행하기 위한 직류실험 전원설비 및 코로나 잡음 계측시스템을 먼저 구축하였다. 또한 모의실험용 DAS(Data Acquisition System) 및 운용프로그램을 개발, 전기환경 측면에서 6×480(C) mm², 4×810 mm², 6×810 mm² 직류송전 후보도체 방식에 대한 환경평가를 수행하여 ±500 kV HVDC 가공송전선로의 최적도체 방식을 선정하였고, 향후 임의의 실규모 HVDC 가공송전선로 모델에서 발생할 수 있는 라디오 잡음 및 코로나 소음을 예측할 수 있는 기법을 개발하였다.

제 2 장 직류선로 전압계급 검토

2.1 전 세계의 직류계통 현황

본 장에서는 전 세계의 직류송전 현황을 국가 별로 정리하였으며, 설비용량, 운전개시년도, 직류계통 도입목적 및 채용사유 등을 명기했다.

2.1.1 북유럽의 직류계통 실태

표 2.1 NORDEL 국가의 HVDC 계통실태
Table 2.1 HVDC system condition of NORDEL countries

설비명	연계국가	용량 [MW]	도입목적	직류송전 채용사유	비고
Gotland I, II & III	스웨덴본토~ 고틀란드섬	30 130, 130	부하공급	경제성 (케이블)	1954년, 수은-정류소 자 1983년, 1987년
Konti-Skan I & II	덴마크~ 스웨덴	250	경제운용/긴급응원	비동기 연계	1955년, 케이블
Skagerrak	덴마크~ 노르웨이	500	경제운용	비동기 연계	1976년, 케이블
Vyborg	핀란드~ 러시아	1070	경제운용/긴급응원	비동기 연계	1982년, BTB연계
Fenno-Skan	핀란드~ 스웨덴	500	경제운용/긴급응원	경제성	1989년, 가공선
Store Belt	덴마크내부	350	경제운용/긴급응원		1995년
Kontec	덴마크~ 독일	600	경제운용/긴급응원	경제성	1995년

2.1.2 CROSS-CHANNEL(II) HVDC SYSTEM

(1) 일반개요

(가) 영국과 프랑스간을 연결한 HVDC 계통으로써 1986년부터 상업운전에 돌입(± 270 kV, 2000 MW, 70 km 해저케이블 선로, 2개의 쌍극 1회선 형식)

(나) 변환소 명칭: AC 400 kV 계통에 연결됨

① 영국: Sellindge, 과거 CEGB 관할이었으나 구조개편 이후 NGC(National Grid Company) 소속으로 변경

② 프랑스: IES Mandarins, EDF 관할

(다) 1961년도에 건설된 160 MW 규모의 Cross-Channel(I)이 운전되고 있음.

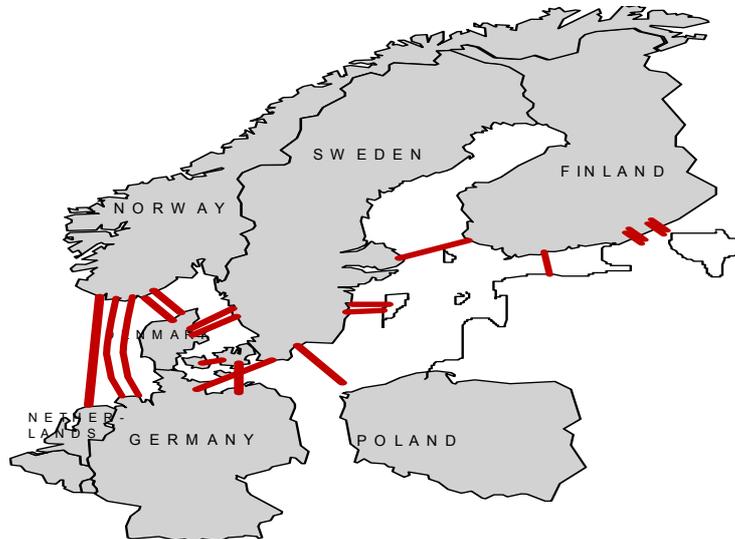


그림 2.1 북유럽의 계통연계 HVDC 송전망

Fig. 2.1 HVDC transmission interconnection network of Northern Europe

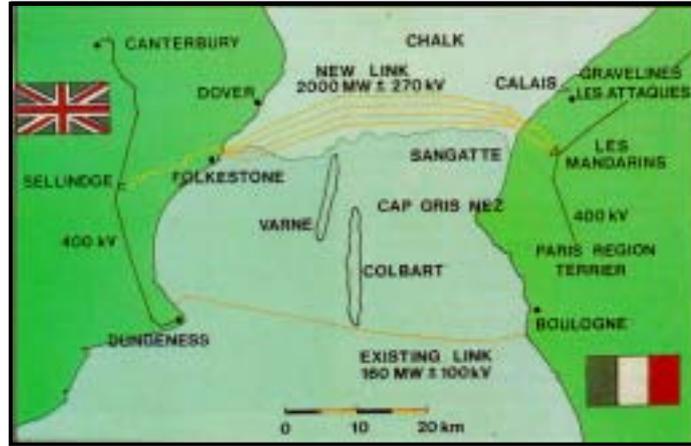


그림 2.2 Cross-Channel HVDC System 경과지 개요도
 Fig. 2.2 Outline of Cross-Channel HVDC system route

(2) 운용목적

- (가) 영국과 프랑스는 현재 충분한 전원 설비용량과 잉여전력을 가지고 있음.
- (나) 프랑스의 값싼 원자력 전력을 영국에 공급하는 것이 우선적인 운용목적임.
- (다) 즉, 경제적인 전력공급이 건설목적이므로 1년 내내 상시 프랑스에서 영국으로 정격용량(2,000 MW)의 전력을 공급함.
- (라) 연간 송전전력량은 140억 kWh (선로이용률 80% 가정시) 정도로 추정됨. 이는 2000년도 기준 한국전력공사 연간 판매 전력량의 7% 내외에 해당함.

2.1.3 고압 대용량 직교류 변환설비 개발 현황

초고압, 대용량 직교류 변환설비는 직류변환소에서 사용되는 사이리스

터 브릿지, 직류/교류 고조파필터, 직류리액터 및 변환용변압기 등의 각종 변환설비를 의미한다. 이중에서 핵심적인 설비는 직류/교류 변환용 사이리스터 밸브이며, 대용량 전력용 반도체소자 기술 및 해당 소자들을 조합하여 필요한 성능을 구현하기 위한 점호회로, 통신과 제어기술이 결합된 종합적인 기술 분야이다.

현재 전 세계의 직류변환설비는 총 60,000 MW 내외에 불과하지만, 국가간 전력계통 연계 등 직류송전 자체가 가지고 있는 많은 장점과 경제성의 향상 때문에 80년대 중반이후 직류설비의 채용이 급격하게 증가하고 있다. 특히, 향후 21세기에는 연간 5,000 MW 이상의 직류송전 설비수요가 발생할 것으로 예상되며, 이를 금액으로 환산하면 연간 3조원 이상의 수요에 해당되며, 이러한 신규수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

북미, 유럽 등 선진국에서는 70년대 중반이후 사이리스터와 같은 전력용 반도체소자를 사용한 직류송전 시스템을 적용하고 있으며, 최대 6,300 MW의 변환설비를 개발하여 운용하고 있다. 현재 기존의 변환소자인 SCR을 대체하기 위하여 대용량 GTO 혹은 IGBT와 같은 전압제어용 반도체소자 개발연구가 활발히 진행 중이며, 50~100 MW 규모의 소자개발은 거의 상용화 단계에 도달하고 있는 실정이다.

우리나라의 경우 1998년 해남-제주간 300 MW 규모의 직류송전 시스템을 처음으로 운용 개시하였으며, 전력용반도체 개발에 관련한 후진국 수준이다. 수년 후로 예상되는 한국, 일본, 중국 및 러시아 등의 동북아 국가간 전력계통 연계를 앞두고 관련기술 개발, 특히 대용량 변환설비 개발은 국가적으로 시급한 사업이나, 선진국과의 기술격차와 국내 중전기산업의 경쟁력 등을 고려하여 직교류 변환설비 자체 개발의 타당성 등에 관한 검토가 필요하다.

2.2 예상 송전전압과 전망

2.2.1 직류 송전전압 결정방식

직류송전전압은 특정한 수식 혹은 방법론이 아니라 연계계통에 대한 기술성, 경제성 및 해당 국가의 중전기 산업현황과 수준 등의 정책적인 판단에 따른 종합 분석을 통하여 도출된다. 따라서 향후에 건설 예정인 직류 가공선로의 송전전압을 현 시점에서 정확하게 예측할 수는 없다. 국내에서 직류 가공송전이 적용될 가능성을 가진 분야는 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 국가간 계통연계 분야로서 장기적인 관점에서 남북한, 일본, 러시아, 중국을 포함한 동북아 지역의 전력용통을 위한 연계선로 건설이다. 두 번째는 국내 계통에의 직류 가공선로 건설이다. 동북아 계통연계이든 아니면 국내계통에의 적용이든 초기 논의단계인 현시점에서 직류 송전전압을 확정적으로 언급할 수는 없다. 그러나 기술적 관점에서 고찰할 때 초안 수준의 직류 송전전압을 아래와 같이 상정할 수 있다.

현재 우리나라의 입장에서 예상되는 가장 핵심적인 동북아 계통연계 시나리오는 “러시아~북한~남한”간의 전력용통을 염두에 둔 것이다. 이 경우 러시아와 남북한은 서로 주파수가 상이하므로 계통연계를 위해서는 필수적으로 초고압 대용량 직류송전 방식이 도입되어야 한다. 본 시나리오의 직류송전 연계전압은 ± 500 kV로 예상되는데 그 배경은 아래와 같다.

(가) 1990년대 이후 동북아 계통연계를 가장 활발하게 검토하여 온 러시아 ESI(표 2.2 참조), 미국 NI 연구소 등이 발표한 모든 동북아 계통연계 시나리오에서 “러시아~북한~남한” 연계계통의 전압을 ± 500 kV로 예상하고 있다.

(나) 에너지안보(energy security) 측면에서 연계계통을 통하여 수입되는 전력은 자국 전력수요의 5% 이하가 바람직하다. 참고로 세계 최대 HVDC

송전계통인 브라질의 ITAIPU의 경우 송전용량이 전체 합계 6.3 GW인데 연계전압은 ± 600 kV이다. 표 2.3은 전 세계적인 ± 500 kV급 직류송전 Project 들만을 정리한 것이다.

표 2.2 “러시아~북한~남한” 계통연계 주요 예상 시나리오 (출처:러시아 ESI)
 Table 2.2 Principal prospect scenario of “Russia ~ North Korea ~ South Korea” system interconnection

번호	연계선로	길이 [km]	전압 [kV]	송전 용량 [GW]	용통전력 [TWh/년]	연계 비용 [십억\$]	전원비용 [십억\$]	전체 비용 [십억\$]	경제성 평가
1	ROK~DPRK	-	154 /345 (AC)	-	-	0.85	-	-	전체 비용 절감 22.0억\$
2	RFE (Uchur Hydro)~NEC (Shenyang) ~ROK (Seoul)	3500	500	3.5	17	4.5	6 (Uchursk Hydro)	10.5	현가 23억\$
3	RFE (Uchur Hydro)~DPR K (Pyongyang) ~ROK (Seoul)	900 /250	500	4 /8	-	-	-	-	경제성 분석사례

표 2.3 ± 500 kV 직류송전 Project 세계 현황^[3]

Table 2.3 Present world situation of ± 500 kV DC transmission project

Project	HVDC Supplier	Year Commissioned	Power Rating(MW)	DC Voltage(kV)	Line &/Or Cable(kM)	Location
Cohora Bassa	J	1978	1920	±533	1414	Mocambique -So.Africa ^{§§}
Nelson River II	J	1978	900 1800 [§]	±250 ±500	930	Canada, <그림 2.1>
Inga-Shaba	A	1982	560	±500	1700	Zaire
Pac Intertie Upgrade ^{§§}	A	1984	2000	±500	1362	U.S.A
Intermountain	A	1986	1920	±500	784	U.S.A
Gezhouba-Shanghai	B+G	1989 1990	600 1200	500 ±500	1000	China
PAC Interitie Expansion	B	1989	1100	±500	1362B-B	U.S.A. ^{§§§§}
Rihand-Delhi	AB	1991 1991	750 1500	500 ±500	910	India
Chandrapur-Padghe	AB	1998 est	1500	±500	900	India
KII Channel HVDC Link		2000 est	1400 2800	±250 ±500	102	Japan
Tian-Guang	G	2000 est	1800	±500	960	China
Norned		2001 est	600	500	600	Norway -Netherlands
Talcher Bangalore		2002 est	2000	±500	1200	India
Three Goreges I		2002 est	3000	500	--	China
Three Goreges II		2007 est	3000	±500		China
Bakun	AB	2003 est	2130	3×±500	1335	Sarawak-Malaysia
Eurocable		2002 est	600	500	600	Norway-Germany

주) A - ASEA, B - Brown Boveri, G - Siemans, J - HVDC W.G.

(AEG, BBC, Siemens)

§ 2000 MW in Winter

§§ Out of service 1994.

§§§§ Out of service Oct.1993 to Nov. 1995.

2.2.2 직류 송전전압 도체선정

직류 송전선로의 도체선정에 있어서 계통관점의 검토는 요구되는 송전 용량에 대한 검토가 기본조건인데, 선정에 따른 고찰 점을 기술하면 다음과 같다.

(1) 현 단계에서 동북아 계통연계 선로의 송전용량을 정확하게 예상할 수는 없다. 그러나 에너지안보(energy security), 러시아 및 북한의 용통가능전력 등을 종합적으로 고려하면, 국내 전력수요의 5% 내외인 3~4 GW 이하가 될 것으로 예상된다.

(2) 동북아 연계선로의 직류송전계통 구성방식 역시 현 단계에서 정확히 예상할 수는 없다. 그러나 연계용량을 3~4GW로 상정한다면 해외의 사례와 송전용량 등을 고려할 때 쌍극 1회선 혹은 쌍극 2회선 시스템이 될 가능성이 높다고 볼 수 있다.

상기와 같이 직류송전용량을 3~4GW, 직류송전전압을 $\pm 500\text{kV}$ 로 상정할 경우 활용 가능한 송전도체방식의 선정은 다음과 같다.

① 쌍극 1회선 시스템이면 한 선로 당 전류용량은 3~4kA, 쌍극 2회선 시스템이면 한 선로 당 전류용량은 1.5~2kA 정도가 되어야 한다.

② 일반적으로 세계 각국에서 AC 345kV 혹은 DC $\pm 500\text{kV}$ 급에서 상정할 수 있는 송전도체와 각 송전도체별 허용전류는 표 2.4 및 아래와 같다.

표 2.4의 송전용량, 도체별 허용전류 및 시스템 구성방식을 고려하면 케이스별로 2번들(Bundle, 이하 B) ~ 5B 정도가 적합하다. 송전용량 3GW, 쌍극 2회선인 경우 $810\text{mm}^2 \times 2\text{B}$ 이면 전류용량은 만족하며, 4GW, 쌍극 1회선인 경우에는 480mm^2 를 채용한다면 5B 이상을 채용해야 한다. 만약 한 쪽 1회선 혹은 한 개 극성이 고장 시 타 회선의 용량을 다른 회선이 감당하는 (N-1) 기준을 고려한다면 전선의 굵기 및 복도체 수를 적

표 2.4 전선 허용전류 (JCS 374A)
 Table 2.4 Conductor allowed current (JCS 374A)

구 분	ACSR 허용전류(A)	TACSR 허용전류(A)
160(mm ²)	454	705
240(mm ²)	593	932
410(mm ²)	829	1,323
480(mm ²)	917	1,463
610(mm ²)	1,041	1,676
810(mm ²)	1,231	1,998

주) 조건: 기온 40℃, 풍속 5 m/sec, 일사량 0.1 W/cm², 방사량 0.9, 주파수 60 Hz

정한 여유도를 고려하여 선정해야 한다. 만약 한 쪽 1회선 혹은 한 개 극성이 고장시 타 회선의 용량을 다른 회선이 감당하는 (N-1) 기준을 고려한다면 전선의 굵기 및 복도체 수를 적정한 여유도를 고려하여 선정해야 한다. 예를 들면 일본 Anan-Kihoku 직류송전시스템은 ±500 kV, 2.8 GW 쌍극 1회선으로 설계되어 있으며, 전류용량이 2.8 kA이지만, 송전도체는 810 mm² × 4B이다. 즉, 전류용량 상으로는 3B이면 충분하나, 송전용량 여유 혹은 환경요소 등 다른 이유 때문에 4B 방식을 적용하고 있다.

2.3 선로전압 계급의 범위산정

개발하고자 하는 송전선로에 관한 선로전압은 전력 수송능력과 경제성 등에 따른 후보도체방식 선정, 전계해석에 의한 전선표면전계강도 확인 및 소요 Gradient 모의를 위한 실험전압계급 검토 등의 과정을 통하여 결정될 수 있으며, 또한 이의 결과는 전원발생장치의 사양 결정에도 결정적인 요소로 작용한다. 송전선로의 설계관점에서 보면 코로나에 가장 많은

영향을 주는 요소는 도체표면전계강도이다. 따라서 가공 직류 송전선의 도체방식을 결정하기 위해서는 최적의 도체표면전계강도를 예측하여 코로나 발생정도를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 코로나 케이지에서 수행하는 실험은 실규모의 도체가 발생하는 도체표면전계강도를 낮은 전압에서 모의하여 실험하므로, 실규모 선로와 케이지 내부의 실험 도체주변의 전계를 계산하여 동일한 전계를 발생하는 실험전압을 상정하여야 한다. 이러한 도체표면전계강도를 계산하는 방법에는 등가사상법, 선전하치환법, 영상법, 전하중첩법 및 유한요소법 등이 있다.

코로나 케이지 모의실험 시의 실험전압계급의 기준전압은 앞에서 검토한 바와 같이 동북아 계통연계 시나리오의 연계전압인 ± 500 kV로 한다. 따라서 각종 후보도체방식의 실험전압의 범위는 각 방식의 전기환경특성 파악에 필요한 기준전압의 $\pm 20\%$ 즉, ± 400 kV ~ ± 600 kV가 적합하다. 표 2.5는 ± 500 kV 상용선로 형상이 최저지상고 18 m, 극간격 22 m인 경우 케이지에서 모의실험을 수행할 후보도체의 표면전계강도를 나타냈고, 표 2.6는 실험전계를 코로나 케이지에서 모의하기 위해 필요한 인가전압의 크기를 구한 것이다. 전계해석은 공간전하나 바람의 조건을 고려하지 않고 전하중첩법을 적용하여 구한 것이다.

향후의 동북아 융통전력 면에서 480 mm²는 5B 이상, 810 mm²는 2B가 적당한 것으로 추정되므로, 이상의 도체방식 중에서 6×480 mm² 방식과 4×810 mm² 방식이 가장 유력한 후보도체방식인 것으로 판단된다.

표 2.5 ±500 kV 상용선로 전계강도 모의용 코로나 케이지 인가전압
 Table 2.5 DC cage applied voltage to simulate the conductor surface gradient of ±500 kV commercial transmission line

도체방식	500kV 상용선로의 도체표면 전계강도 [kV/cm]	코로나 케이지 인가전압 [kV]
6×480(C) mm ²	16.83 kV/cm	301.5
4×810 mm ²	17.77 kV/cm	314.2
6×810 mm ²	13.77 kV/cm	293.9

표 2.6 후보도체방식별 코로나 케이지 인가 직류전압
 Table 2.6 Applied voltage by candidate conductor bundle at cage

실험전계 [kV/cm] \ 후보도체방식	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
6×480 mm ²	215	251	287	322	358	394	430	466	501	538
4×810 mm ²	212	248	283	319	354	389	424	460	495	530
6×810 mm ²	256	299	342	384	470	512	555			

제 3 장 HVDC 송전선로의 전기환경특성

3.1 코로나 방전 메커니즘

전압의 증가에 따라 기체중의 전자는 전기장에 의하여 가속되며, 전리전압이상의 에너지로 되면 분자와 충돌할 때 전자와 이온을 발생시킨다. 이 현상을 전리라 하며 더욱 전기장이 높아지면 전리에 의하여 생긴 전자가 가속되어 또 다시 전리를 일으켜 전류가 증가되는데 이러한 자속성이 없는 범위의 전류를 암류(dark current)라고 한다. 평등전계 또는 준평등 전기인 전극배치에서는 암류에서 갑자기 전극간이 도전상태로 되는데 이것을 섬락 또는 불꽃방전이라 하며, 이 전압을 섬락전압 또는 불꽃전압이라고 한다. 보통 고체의 경우는 절연파괴전압 또는 파괴전압(breakdown)이라고 한다. 기체의 섬락은 전류가 비약적으로 증가하는 과도적인 방전형태로 통상 격렬한 소리와 빛을 수반한다. 전원의 용량이 크면 섬락은 최종의 방전형태인 아크방전(arc discharge)으로 이행된다.

불평등 전기의 배치에서는 봉이나 선의 부근만이 높은 전기이고(전계 집중), 인가전압을 증가시키면 우선 봉이나 선의 표면 부근에서 빛이나 소리를 수반하는 방전이 발생한다. 이것이 코로나 방전이라 하는 국부적인 절연파괴 형태이고, 이때의 전압을 코로나 개시전압이라 한다. 코로나 방전은 갭의 도중까지 신장하는 스트리머 코로나(streamer corona; 직류 전압에서도 펄스상의 전류가 흐른다), 전극표면근방에서만 빛이 나는 글로우 코로나(glow corona) 등 여러 가지 종류가 있으며, 코로나 방전을 국부파괴 또는 부분파괴라고도 한다.

불평등전계에서도 전극간 거리가 특히 클 때(대기압 공기에서 수 10 cm 이상)에는 리이더(leader)라 하는 도전성이 높은 방전로가 진전하여 섬

락에 이르게 된다. 리더란 뇌방전이 대지로 진전될 때 간헐적으로 신장하는 선행방전(step leader)에서 유래된 명칭이다^{[4],[5]}.

3.1.1 공기 중의 방전과정

공기 중의 방전은 공기 중에 있는 자유전자가 전계에 의해 가속되면서 시작된다. 전계에 의해 충분한 에너지를 얻은 전자들이 원자들과 충돌해서 이온(ion)을 생성시킨다. 이러한 과정은 그림 3.1과 같고, 양이온들에 의해 전극에서 전자들을 공급해 방전이 지속적으로 이루어질 때까지 전자들의 수는 계속 증가한다. 이 때의 초기전자는 광전리에 의해서 생성된다^[6].

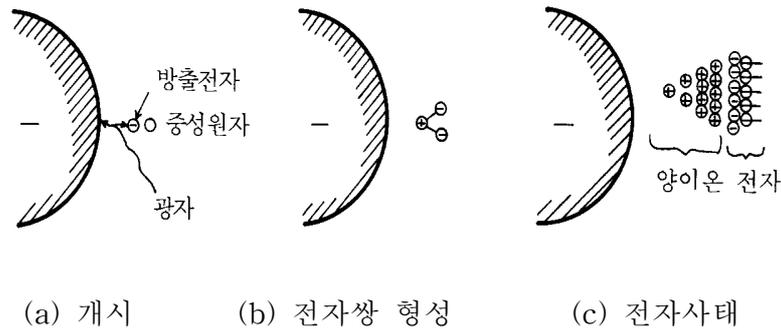


그림 3.1 음극에서의 전자사태 과정

Fig. 3.1 Process of an electron avalanche from a negative electrode

전계에 의해 전자들이 기체를 통과할 때 기본적인 이온화 과정은 식 (3.1)과 같이 나타낸다.



여기서 A 는 원자, A^+ 는 양이온, e 는 전자이다.

식(3.1)에서와 같이 중성원자에 어떤 전자가 충돌하면 양이온과 전자가 생기고, 이때 전자들은 각각 두 개 이상의 전자들을 생성시킨다. 이러한 과정이 연쇄적으로 일어나 전자들의 양이 급속하게 증가하는 것을 전자사태(electron avalanche)라 하며, 이 때의 방전전류는 식(3.2)와 같다.

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad [\mu\text{A}] \quad (3.2)$$

여기서 d 는 갭(gap) 간격, α 는 Townsend의 1차 이온화 계수이다. 식(3.2)에서 Townsend의 1차 이온화 계수 α 는 일정한 전계에서 하나의 전자가 1 cm의 거리를 이동할 때 생성된 전자의 수를 나타내는 계수(coefficient)이다. 이상의 과정을 거치면서 전자들의 양이 급속히 증가하는 이온화 과정을 1차 과정(primary process)이라 하고, 양이온과 광자들이 전극을 강타해 전자들이 방출되는 과정은 2차 과정(secondary process)이라고 한다. 1차 및 2차 과정을 거쳐 방출된 전자들은 전극의 극성에 따라 전극에 흡수되거나 중성원자에 부착하여 음이온을 형성한다. 이후 이온들이 모두 소멸할 때까지 전계의 세기는 이온의 영향으로 변한다. 국부적으로 전계가 다시 집중되면 위에서 설명한 일련의 과정이 반복된다. 이와 같이 전계가 집중된 부분에서만 절연파괴가 일어나고 다른 부분에서는 절연이 파괴되지 않은 상태로 남게 되는 현상을 국부방전 또는 코로나(corona)라고 한다. 전계의 집중은 전선의 표면상태에 따라 결정되는데 물방울(水滴, water drops)이나 곤충, 먼지 등이 부착된 부분에서 보다 집중되며, 전선의 경년 정도에 따라서도 집중의 정도가 크게 차이 난다. 전계 집중점에서의 코로나 발생은 식(3.3) 피크(Peek) 식의 임계전계치 E_0 이상이 되면 본격적으로 시작한다.

$$E_0 = 30 \delta M \quad [\text{kV}_{\text{peak}}/\text{cm}] \quad (3.3)$$

단, E_0 : 코로나 방전개시 전계강도

$\delta = 2.94 P / (273 + \theta)$: 상대공기밀도

P : 기압, kPa

θ : 온도, °C

M : 도체표면상태계수 (≈ 0.5)

3.1.2 직류 코로나의 형태

같은 극성의 전압이 인가되었다 하더라도 코로나는 인가되는 전압, 전극형상, 전극의 표면상태 등에 따라 방전전류의 크기와 펄스(pulse) 주파수가 다른 특성을 갖는다. 그러므로 코로나의 형태에 따라 코로나 가청소음, 라디오 잡음, 코로나 손등에 다른 방식으로 영향을 미친다. 직류 코로나 방전현상은 진전 과정에 따라 세 가지로 구분된다.

(1) 글로우(glow) 코로나

바늘과 평판 구조된 전극에서 바늘 쪽에 정(正)의 직류전압을 인가하여 직류전압의 크기를 점차로 증가시켜 전압이 200 V 정도에 달하면 바늘의 끝에 자주색의 빛 발생, 수 μ A 정도의 전류가 흐른다.

(2) 브러시 코로나 방전

바늘과 평판전극과의 간극이 수 cm 이상인 경우 전압을 더욱 상승시키면 자주색의 빛은 더욱 커지고, 바늘에서 코로나는 신장한다. 이 단계의 코로나는 글로우 코로나와 같이 불안정하고, 독특한 소리를 내면서 발생한다.

(3) 스트리머(streamer) 코로나

브러시(brush) 코로나 단계에서 전압을 더욱 상승시키면 코로나의 발광부와 전극간이 단락된 것처럼 보이는 방전이 형성된다. 글로우(glow) 코로나는 공기중의 습도에 의하여 거의 영향을 받지 않지만, 브러시

(brush) 코로나 및 스트리머(streamer) 코로나는 습도가 높아지면 그 발달이 저감되는 경향을 나타낸다. 또한 직류코로나 방전은 극성에 따라 다른 현상을 나타낸다. 정극성의 코로나는 발생조건에 따라 클로우 코로나, 브러쉬 코로나, 스트리머 코로나의 단계가 있으며, 전압의 증가와 더불어 이것이 순차적으로 발달하여 간다. 따라서 코로나 개시전압 또는 개시전압보다 약간 높은 정극성 전압이 전극에 인가되면 그림 3.2와 같이 전계에 의한 자유전자가 양극 쪽으로 이동하여 전자사태 발생하고 양극근처의 전자사태 선단의 정이온군이 양극 쪽으로 확장한다. 이후 전자사태 2차 발생이 정이온의 밀도를 증대시켜 스트리머 발생환경을 만든다. 전압을 조금 더 상승시키면 양극근처에는 음이온군 형성되고 전류가 준지속적인 상태가 된다. 이 상태에서 전압은 더욱 더 상승시키면 양극 쪽에 있는 음이온군은 더 이상 안정성을 유지하지 못하고 불규칙하고 매우 큰 펄스 전류가 발생하는 pre-breakdown 스트리머 현상이 나타나고 결국 공기절연 파괴가 된다.

부극성의 코로나 발생은 브러쉬 코로나와 유사하지만 정극성보다는 안정적이며 클로우방전과 유사한 특성을 나타낸다. 코로나 개시전압 또는 개시전압보다 약간 높은 음극성 전압이 음극에 인가되면 그림 3.3과 같이 매우 빠르고 지속적으로 맥동하는 트리첵(Trichel) 펄스가 발생한다. 전리 영역은 음극표면으로부터 바깥쪽으로 확대되고 충돌에 의한 전리가 약하게 되는 지점까지 확대되며 이 영역 이상의 지점에서는 전자가 기체분자에 부착되어 음극으로부터 매우 천천히 멀어지는 음이온을 형성한다. 전자사태 성장 동안 생성된 광자는 전자사태 밀집지역에서 복사되어 광전자를 발생시켜 보조전자사태를 생성한다. 이 상태에서 인가전압을 상승시키면 트리첵 펄스는 부극성 코로나가 지속적인 음극 클로우가 되는 임계값까지 증가되고 pre-breakdown 스트리머가 발생된다. 따라서 더욱 높은

전압에서 결국 완전한 공기절연파괴가 발생한다^[6].

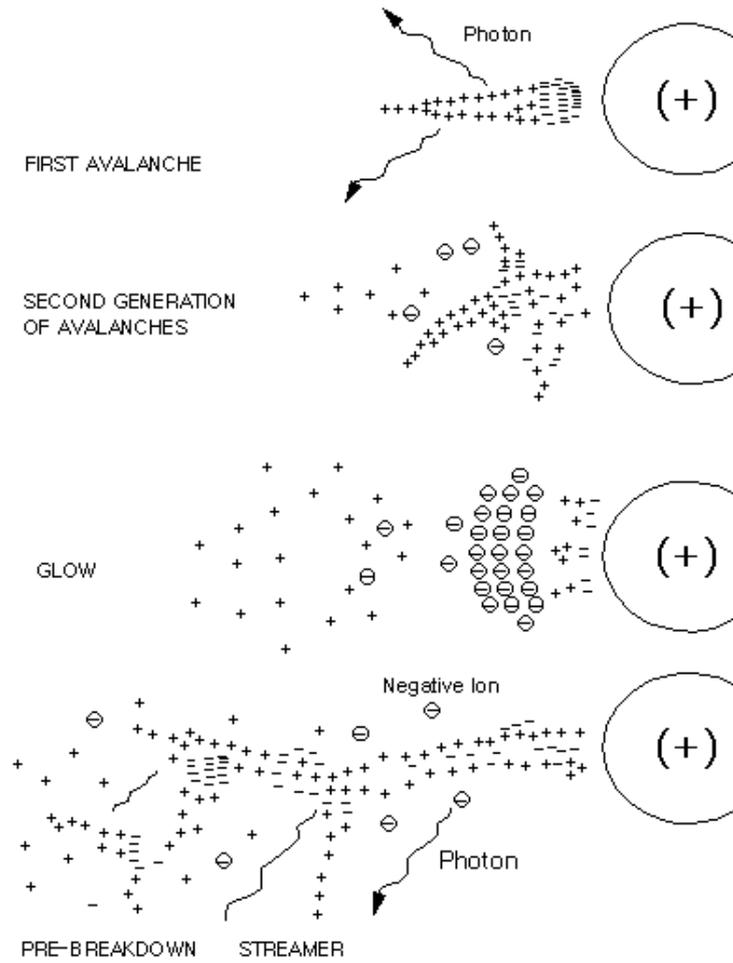


그림 3.2 정극성 코로나 방전에서의 전자사태 발생

Fig. 3.2 The development of avalanches in positive corona discharge

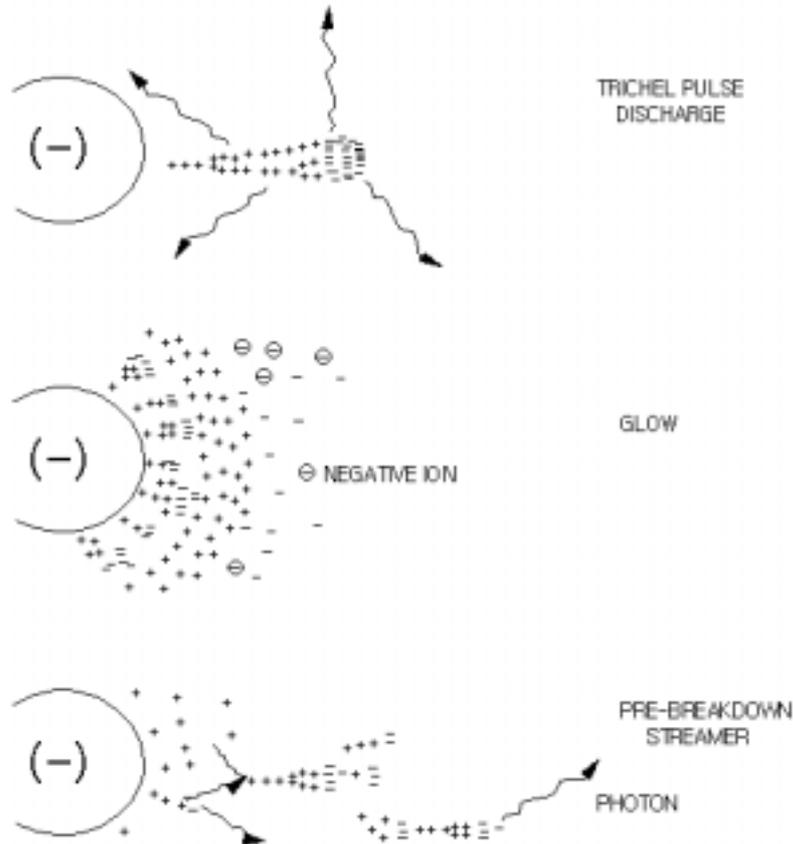


그림 3.3 부극성 코로나 방전에서의 전자사태 발생
 Fig. 3.3 The development of avalanches in negative corona discharge

바늘이 부(負)극인 경우가 정(正)극인 경우보다 코로나 발생이 크지 않다. 정극성의 코로나가 지속적으로 발달되고 부극성에서는 신장하지 않는 이유는 다음과 같다.

① 정이온에 의한 공간전하의 효과. 코로나 방전에서 발생된 전자와 정이온 중에서 공간전하로 작용하는 것은 이동도(mobility)가 적은 정이온이다.

② 바늘이 정극인 경우에는 코로나의 선단에 있는 정이온 그룹이 부극의 평판전극과의 사이의 전계가 강해져 더욱 더 코로나의 발달을 촉진한다.

③ 바늘이 부극인 경우에는 정이온 그룹과 바늘과의 사이의 전계가 강해져 안정한 코로나 방전이 발생되지만, 정이온의 평판측의 전계는 반대로 약화되어 코로나가 신장되기 어렵다.

따라서 직류송전선로에서 코로나소음, 라디오잡음은 주로 정극 전선에서 발생하고, 부극 전선에서의 발생분은 사실상 무시할 수 있기 때문에 보통 DC 코로나 케이지 모의실험에서는 정극 전압만을 전선에 인가하여 수행한다^[7]. 습도에 대한 효과의 경우 글로우 코로나는 공기 중의 습도에 의하여 거의 영향을 받지 않지만 브러쉬 코로나 및 스트리머 코로나는 습도가 높아지면 공기 중의 물 분자에 전자가 부착하여 음이온이 되며, 이 동도가 저하되기 때문에 그 발달이 저해되는 경향을 나타낸다^[8].

3.1.3 교류 및 직류 가공선로 전기환경 비교

송전선로 도체 표면에서 공기의 절연파괴 강도를 초과하는 전계가 집중되었을 때 코로나가 발생한다. 도체표면 주위의 공기절연파괴는 빛, 가청소음, 라디오 잡음, 전선진동, 오존(ozone) 등의 장애를 유발하며, 이때 필요한 에너지는 손실로 나타난다^[9]. 직류 송전선로의 코로나의 발생 메커니즘은 공간전하(space charge)의 영향에 의해 교류 송전선로와 달라기 상별 각종 환경장애의 발생특성이 서로 상반되게 나타난다^{[10],[11]}.

(1) 교류 가공 송전선로

반주기마다 전압의 극성이 교번하기 때문에 전선표면상의 코로나 방

전에 의해 발생하는 공간전하의 극성과 진행방향도 반주기마다 변화한다.

① 공간전하는 전선 부근의 전계분포에 미치는 영향이 크지 않다.

② 교류가공송전선에서 코로나특성(코로나소음, 라디오잡음)을 예측하는 수단으로 코로나 케이지가 이용되며, 예측을 위한 주 변수로 정전계 계산에 의한 최대도체표면전계(G_{max})가 이용된다.

(2) 직류 가공 송전선로

코로나 방전에 의해 발생된 공간전하의 흐름은 한쪽으로만 진행되어 지표면 또는 반대 극성을 가진 전선방향을 향해 이동한다.

① 전선에서 어느 정도 이격된 공간까지 분포되는 공간전하는 전선표면과 그 근방의 전계분포에 영향을 주고, 근접한 반대극성의 전선주위의 전계분포에도 영향을 준다.

② 전선근방의 전계분포에 미치는 영향이 크기 때문에 전선지상고와 송전선로의 구조물에서 받는 영향도 교류가공 송전선로에 비해 크다.

③ 직류송전선로에서는 최대도체표면전계에 따른 코로나 특성 변화가 전선 주변 전극계에 크게 의존하기 때문에 직류송전선로의 코로나 특성 예측에는 최대도체표면전계를 주 변수로 하는 교류의 기법을 적용하지 않는다.

④ 직류 송전선로(또는 시험선로)에서는 공간전하를 고려한 최대도체표면전계를 도입하여야 극배열 및 선로형상에 따라 달라지는 직류송전선로의 코로나 특성을 예측할 수 있다.

3.2 송전선로 설계와 환경문제

3.2.1 선로환경장해의 종류

초고압 송전선로에서의 환경문제는 대형 구조물에 의한 시설장해와 코로나 방전현상에 의한 전기적 환경장해 및 코로나 손(corona loss) 등으로 구분된다. 후자의 코로나 방전은 가공 송전선로의 도체표면에서 공기의 절연과괴강도를 초과하는 전계가 집중되었을 때 보통 광전리에 의해 생성된 공기중의 자유전자가 불평등 전계에 의해 가속되면서 생기며, 특히 기상조건에 따라 그 발생량이 크게 변한다. 이에 따른 전기적 환경장해는 코로나 소음, 라디오 및 TV 수신장해, 각종 전자계 영향 등이 있다. 설비 규모로 결정되는 기계적 시설장해로는 송전철탑의 대형화 및 선로의 복도 체화에 따른 경관장해(visual impact)와 풍소음(aeolian noise) 장해 및 텔레비전 전파 허영장해(TV ghost and blocking) 등이 있다. 이상의 각종 송전선로 환경장해를 원인별로 분류하면 표 3.1과 같다.

표 3.1에서 송전전압이 높아짐에 따라 송전선로 하에서의 정전유도, 전선과 애자 등에서의 부분방전에 기인하는 라디오 수신장해, 코로나 소음 등이 문제로 되며, 또한 전류가 커짐에 따라 송전선 부근의 펜스(fence) 등 금속선으로의 전자유도에 의한 감전과 자계의 인체에 대한 영향 등이 환경문제로 된다. 국내에서는 1단계 765 kV 송전선로 건설기간 중에 전자계, TV 전파장해 및 풍소음에 관한 환경민원도 상당수 발생하고 있다. 표 3.2에서는 각 환경장해항목들의 크기와 특징을 초고압 직류 가공송전선로의 경우와 비교하면서 나타내었다.

표 3.1 고압 송전선의 원인별 환경영향

Table 3.1 Environmental interferences from HV transmission lines

원인		장애항목	피해 대상	특 징
기계적	설비	TV 전파장애	TV 수상기	○허상 발생 → 수신전계 저감 ○탁월주파수 소음 장애 ○시각적 장애 → 경과지 선정 기술
		풍소음 경관장애	사람 사람	
전기적	전압	정전유도, 이온류 대전 전 계 코로나 잡음: RI TVI	사람, 동물 사람, 동물 사람, 동식물 라디오수신기 TV 수상기	○전압, 전류에 의한 감지 직류 송전선로 ○생리적 영향 ○청취장애 화상장애 ○랜덤 소음과 험음 장애 ○광화학 Oxidant 농도 조장
		코로나 소음 오 존	사람 사람	
	전류	전자유도 자계영향	사람, 동물 사람	○전류에 의한 충격(shock) ○생물학적 영향 또는 심장박동 조절장치 기능장애

표 3.2 직교류 송전선로의 환경특성 비교

Table 3.2 Environmental characteristics of HVDC and HVAC lines

		초고압 교류송전선로	초고압 직류 송전선로
코로나 소음		큼 (강우시)	작음 (청명시)
라디오 잡음 장애	기상별 크기	청명 < 강우 (단, 청명 평가)	
	저감대책	• 소도체의 수, 직경 증대	• 소도체의 수, 직경 증대 • 극배열 조정
TV 수신장애		큼	작음
정전유도전압		큼	-
이온류 대전전압		-	작음
자계 및 전계영향		대체로 문제 있음	• 지자기 (500 mG) 이하 • 자연계 전계수준 ⇒ 대체로 문제없음
TV 전파장애		큼	작음
경관장애		큼	작음
물리적 특이성		• 코로나 부분방전 • 정전유도전압	• 직류 특유의 이온류 현상 • 이온류 대전전압 유도 • 설계시 공간전하밀도, 지표상의 이온밀도 및 직류 전계강도 평가 필요 • 효과적 대책: 전선 지상고 증대

3.2.2 환경대책기술

송전선로를 신규로 설계, 건설하는 경우 개념설계 단계에서 환경문제를 조사, 반영하는 이유는 '인간 생활환경과 조화가 되는 송전선'을 건설함으로써 운전 후에 환경영향으로 인한 선로 인근 거주자의 불평(civil complaints) 발생과 전국적인 송전선로 건설 반대 여론을 사전에 방지하는데 있다. 강력한 환경민원에 의해 기설 송전선로를 막대한 경비를 재투입하여 이설한 실제적인 예가 있으며, 미국의 플로리다 주에서는 송전전압 격상 소요시기에 격상을 하지 못하여 원활한 전력수급계획에 차질을 빚고 있다. 이러한 새로운 사회문제에 대한 효과적인 대책은 경제성을 갖춘 선로환경 친화설계기술을 적용하는 것이며, 이의 결과 각종 환경비용이 절감될 것이다.

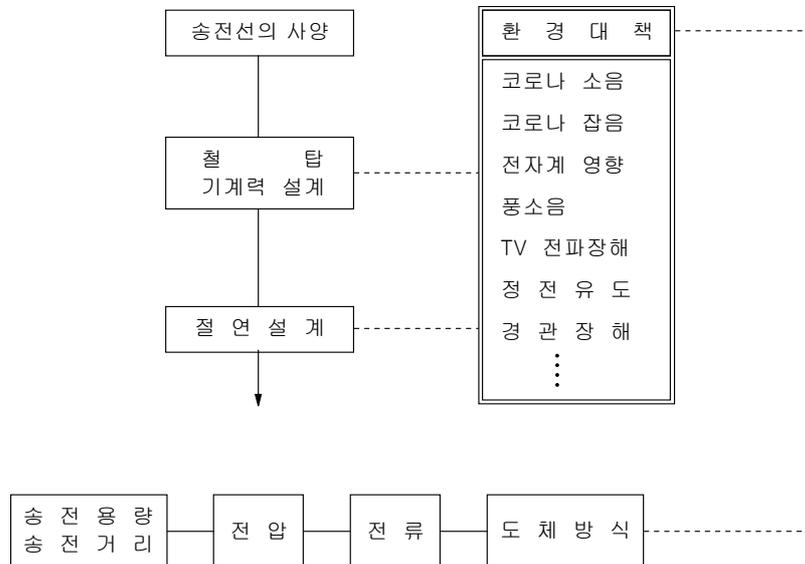


그림 3.4 송전선로 설계와 환경대책 개념도

Fig. 3.4 Concept of environmental countermeasure in line design

환경영향에 대한 예비적 검토단계에서 영향이 있다고 평가되는 경우에는 이에 대한 환경대책 적용을 송전선로에 대해서 행하거나 또는 선로 이외에서 행하는 것을 기술적인 효과와 실용화 가능성 및 경제성 등으로부터 판단해야 한다. 송전선로 설계와 환경대책의 개념도는 그림 3.4와 같으며, 선로에 있어서 대책을 행하는 경우는 그 대책 적용에 따른 다른 환경영향 문제, 절연설계, 철탑의 기계력 설계 등에 대한 파급효과도 충분히 검토되어야 한다^{[12]~[14]}.

(1) 설비측 대책설계기술

선로환경 설계기술중 그 중요도가 가장 크고 전력계통계획시 전원계획, 계통해석, 절연설계 등에 우선하여 검토되어야 하는 것이 기계력 설계와의 협조를 통한 환경설계자료이다. 설계자는 이 자료를 활용하여 송전선로 및 철탑 등을 실시 설계할 수 있다. 선로 설계요소들의 타 기술과의 연계성과 환경장해요소와의 관계는 다음과 같다.

① 송전도체방식 선정 (소도체 직경과 소도체 수)

- 전류허용용량 및 송전용량
- 코로나 소음 및 라디오 잡음 등
- 송전 금구류 개발

② 전선 상배치 방법 (line configuration)

- 환경설계 및 절연협조설계
- 경과지 점유면적 즉, 국토의 효율적 이용 면 고려

주) 국내 765 kV 송전선로는 세계 최초로 800 kV급 3상 2회선 수직 역상배열을 채택했음.

③ 최하상 전선 지상고 결정

- 지지물 설계
- 지표면 전계강도

④ 선로 상용화 기술의 적합성 평가

- 평가기준 : 설계 및 시공기술의 수준, 경제성 그리고 환경법률, 전기설비 기술기준 및 송전설계기준 등의 부합성

(2) 환경설계목표치

송전선로 환경설계목표치는 각국의 지역적 사정과 경제적인 선로 건설을 고려하여 각기 다른 기준들을 정해 놓고 있다. 이러한 선로설계기준(line design guide)은 전력회사 자체의 환경영향 허용목표(internal limits)이지만 관련 환경 법률에서 정한 규제기준도 만족하는 것은 물론 민원의 소지를 사전에 예방할 수 있는 수준이어야 한다. 전력회사의 설계목표치는 자체 권고안(guidelines)에 속하며, 이와 관련된 기준으로는 표준안(standards), 규제안(limits 또는 regulation) 등이 있는데 그림 3.5는 이것들의 상호관계를 보여 주고 있다. 표준안과 규제안은 모두 국가나 지방자치단체가 명령하는 강제성이 있다는 특징이 있다. 권고안은 임의의 표준안 또는 규제치로써 전문기관(전력회사)에서 자율적으로 어떤 압력에 대응하기 위해 노력하는 것이며, 표준안이나 규제치가 설정되어 있지 않은 곳에서 송전선로 설계치를 권고할 수 있도록 규정한 것이다.

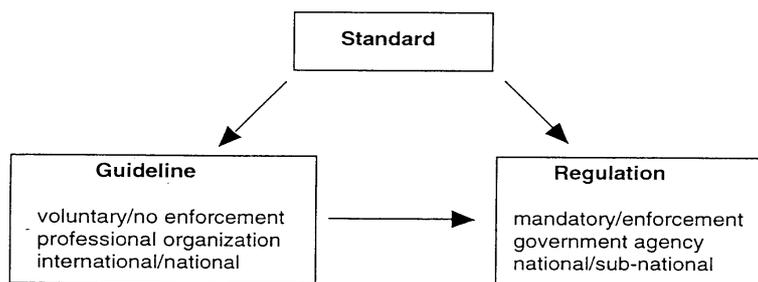


그림 3.5 환경설계 및 규제 관련 기준들의 관계

Fig. 3.5 Various limits related to environmental design

(가) 코로나 소음

① 국외 현황

대부분의 법률들은 특별히 송전선로의 코로나 소음(audible noise)을 규정하여 제한하고 있지 않지만, 송전선로 소음 장해도 법률에서 정한 기준의 제한을 받는 것이 일반적이다. 유럽 및 미국의 10개 주에서는 전력선 코로나 가청소음을 포함한 소음 제한 규정(noise guideline)을 마련하여 규제하기도 한다. 한편 전력회사는 자사 설비의 법률적 위배를 미연에 방지하기 위해 설비 설계시의 기준이 되는 설계기준 또는 설계 목표치를 내부 정책(internal policy)으로 정하여 시행하고 있다. 표 3.3은 미국 각 주의 주거지역 소음규제 현황이며, 기타 각국의 기관별 코로나 소음 설계 목표 현황은 표 3.4와 같다.

표 3.3 미국 각 주의 주거지역 소음규제 현황 [dB(A)]
Table 3.3 Summary of state noise limits in residential area

주 명	최대허용소음		비 고
	주 간	야 간	
Colorado	55	50	
New Jersey	65	50	Octave band level
Illinois	55	45	주택지역
	55	45	상업지역
	61	51	공업지역
Oregon Washington	50		용지 경계에서 BPA L ₅₀ 설계 목표치 기준
Ohio Virginia W-Virginia			환경 문제 법률 제정
Montana	50		주거지역에서 용지 경계선 기준 (L _{dn})

표 3.4 세계 각국 전력회사의 코로나 소음 설계목표치 현황
 Table 3.4 Audible noise design guidelines of electric power companies

국가명(기관명)	기준치 (dBA)	적용기준	비 고
미국(BPA)	50	- 강우시 L50 %치 - ROW 경계	- 주전력청 내부 방침 (BPA)
캐나다(IREQ)	60	- 강우시 ROW 경계 - 735 kV 1회선	- Regulation
남아공(ESCOM)	53	- 선로중심에서 40 m 또는 ROW 경계 - 765 kV 1회선	
일본(TEPCO)	50	- 경우시, 1000 kV 2회선	- 전력회사 내부 방침
미국(PASNY)	53	- 경우시, 765 kV T/L - 선로중심 외측 약 38 m	
한국(KEPCO)	50	- 강우시 L50 %치 - 선하지 보상 경계 - 765 kV 2회선	- 설계목표
미국 뉴욕주 (Public Service Commission)	52	- 강우시 L50 % - ROW 경계	
이탈리아(ENEL)	56	- 강우시 L50 %, 1000 kV T/L - 선로 외측 56 m	- 설계목표
브라질(CEPEL)	58	- 경우시 ROW - 765 kV 1회선, 4×31.95 mm Φ	
소련	55	- 강우시 L50 %, 1150 kV T/L - 선로 외측 45 m	- 설계목표

이상의 해외 현황을 종합하면, 유럽은 코로나 소음 목표치를 특별히 규정하지 않고 사안에 따라 대처하고 있으며, 미국은 많은 전력회사가 자체 목표치를 갖고 있고 Colorado 등 약 7개 주는 선로소음에 관한 법규를 제정 또는 입법을 추진하고 있다. 전 세계적인 설계목표치 현황은 강우시

의 L50 %치(또는 평균치)로서 약 58 dB(A) 이하인 것으로 조사되었다. 코로나 소음의 자국 내 규제 수준은 그 나라의 국민생활 및 문화수준에 비례하여 엄격해 진다고도 볼 수 있다.

② 국내 기준

국내의 환경법률은 기존의 환경보전법이 폐지되고 1991년 2월 17개의 환경복수법이 제정되어 각종 에너지 개발 사업이 환경영향평가의 대상이 되어 왔다. 특히 1994년도에 개정 고시된 ‘환경영향평가서 작성 등에 관한 규정’에서는 발전소, 옥외 변전소 외에도 구체적으로 154 kV 이상의 가공 송전선로를 명시하여 평가대상사업에 포함하고 선로 건설전후의 환경영향평가서 제출과 사후 관리를 의무화하고 있다. 환경부는 1994년부터 중점 평가항목들을 지정하여 보다 엄격한 관리를 시작했다. 소음과 관련된 환경법규를 정리하면 아래와 같다^[2].

㉠ 환경정책기본법(‘93. 6.)

제10조 및 동법 시행령 제2조의 별표1 - 소음환경기준

㉡ 소음진동규제법(‘93. 7.)

제39조 및 동법 시행규칙 제57조의 별표15 - 생활소음규제기준

㉢ 기타 관련법규

○ 환경영향평가법(‘93. 6.) : 제4조 환경영향평가대상사업

○ 환경영향평가서 작성규정(‘91. 5.): 환경처 고시제91-30호(‘94년 개정)

○ 전원개발에 관한 특별법 : 제5조 제1항 전원개발사업

소음환경기준은 정부가 국민의 건강보호와 쾌적한 환경조성을 위하여 대통령령으로 정한 환경기준이고, 생활소음규제기준은 시·도지사가 총리령으로 정한 규제기준이라는 차이가 있다. 그러나 양 법에서의 규제치중 가장 엄격한 경우는 일반 주거지역에서의 밤(또는 심야)시간대의 규제치가 45 dB(A) 이하인 것은 동일하다.

한국전력공사는 345 kV 송전망 건설 시까지는 환경설계요소를 고려하지 않았으나, 1996년 2월 765 kV 차기 초고압 송전선로를 건설할 때는 10년 이상의 예비 연구를 수행하여 표 3.5와 같은 코로나 소음 환경설계목표를 정하고 이를 만족하는 각종 사양의 송전선로를 설계했다. 목표치는 환경 법률에서 정한 가장 가혹한 조건을 만족하지는 못하지만, 대부분의 선로가 비거주지역인 산악지대를 경유하므로 경제성을 고려하여 선진 외국의 수준인 경우시(輕雨時) 50 dB(A) 이하가 되도록 했다.

표 3.5 한전 765 kV 송전선로 코로나 소음 설계목표치
Table 3.5 Audible noise design guide of KEPCO 765 kV T/L

환경장해	적용지역 구분	설계목표	적용조건 및 관련 법률
코로나 소음	주거지역	50 dB(A) 이하	① 강우시 L50 %치 ② 선하용지 보상 경계 및 지상 1.5m ③ 환경정책기본법 소음환경기준
	준주거지역	55 dB(A) 이하	
	기타지역	60 dB(A) 이하	

주) 주거 및 준주거지역: 환경정책기본법 소음기준 적용대상지역 중 '가'지역 및 '나'지역 기준

(나) 라디오 잡음

현재까지 직류선로에서 발생하는 라디오 잡음에 관한 허용 가능한 신호 대 잡음비(SNR) 권고치는 아직 제정되어 있지 않다. 이는 교류선로보다 직류 선로에 대한 조사연구가 훨씬 적기 때문이며, 설계를 목적으로 각 나라에서는 수신장애의 영향을 받지 않는 SNR을 교류와 같이 약 24 dB 이상으로 권장하고 있다. 그러나 어떤 조사에서는 직류선로에서의 신호 대 잡음비가 교류선로에서 주관적인 동일 수신 상태를 청취자가 느끼는 신호 대 잡음비보다 9 dB 정도 낮다는 보고도 있다. 따라서 향후 실험 연구를 통하여 이러한 차이가 해결되기 이전까지는 직류선로의 한계치 설정에 교류선로의 신호 대 잡음비 자료를 사용할 것을 IEC/CISPR는 권장하고 있다^[15].

① 국외 현황

해외의 송전선로 라디오 장애 규제는 법률적인 법규(regulation), 규격의 권고치(recommendation value) 및 전력회사의 설계목표치(design guide) 등으로 구분할 수 있다. 라디오 방송 수신품질의 평가지수는 식 (3.4)와 같은 신호 대 잡음비인 SNR(signal-to-noise ratio)을 사용하며, 해외 각국 기관들의 송전선로 라디오 잡음 설계목표치 현황은 아래와 같다.

$$SNR = 20 \log \frac{\text{Signal } [\mu V/m]}{\text{Noise } [\mu V/m]} \quad [dB \ 1\mu V/m] \quad (3.4)$$

㉠ 미국

송전선로에서 발생하는 라디오 장애에 대한 특별한 법규는 없고, 연방통신위원회(FCC: Federal Communications Commission)의 규정과 법규를

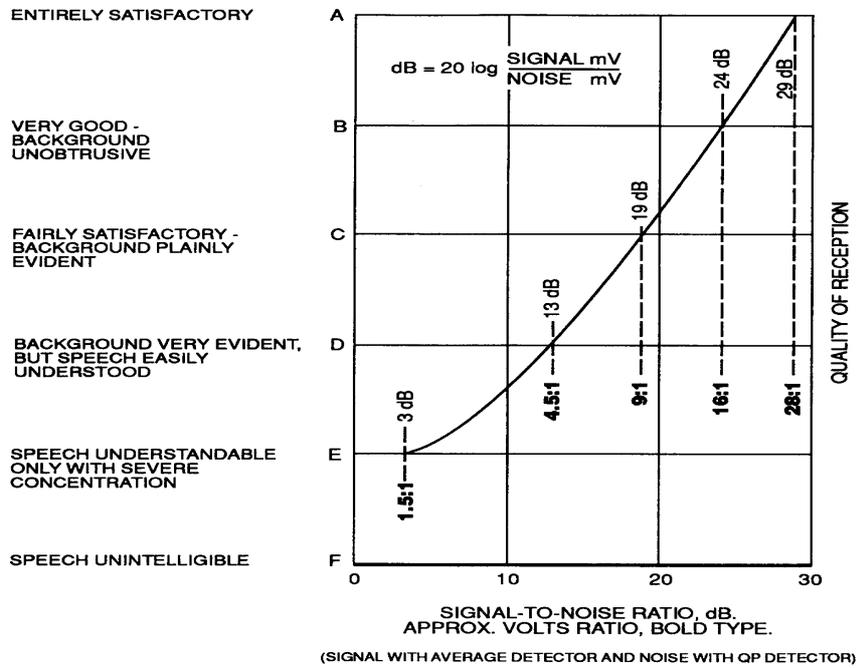


그림 3.6 라디오 수신품질 평가용 SNR 기준 곡선 (IEEE)
Fig. 3.6 AM radio reception quality vs. signal-to-noise ratio

따르고 있다. 또한 그림 3.6의 IEEE 라디오 잡음 소위원회 보고서에 의한 실용적인 SNR 평가기준도 보편적으로 적용되고 있다^[16].

㉠ 캐나다

고압 교류 송전선로로 인한 장애에 대한 CSA(Canadian Standards Association)의 voluntary standard가 적용되고 있다. 이 규격에 의하면 선로 최외상 도체 또는 변전소 부지 경계로부터 15m 떨어진 지점에서 청명시 라디오 장애가 표 3.6의 수치를 넘지 않아야 한다.

표 3.6 청명시 라디오 잡음 캐나다 규제치 (CSA)

Table 3.6 CSA standard for radio interference in fair weather

공칭 상간전압 [kV]	라디오 잡음 전계강도 [dB above 1 μ V/m]
70 이하	40
70 ~ 200	46
200 ~ 300	50
300 ~ 400	53
400 ~ 600	57
600 이상	60

㉔ IEEE Radio Noise Design Guide

선로 최외상 도체로부터 30.5m 떨어진 지점에서 측정된 청명시 라디오 장애 크기가 약 40 dB(100 μ V/m) 이하 되도록 하고 있다.

② 국내 기준

라디오 장애는 기상조건에 따라 변화가 심한데 청명(fair weather)시의 장애량을 평가하는 이유는 1) 1년 중 맑은 날의 비율이 약 95% 이상 되기 때문이며, 2) 강우 조건별 기준 설정과 강우시 라디오 장애 측정과 평가가 어렵기 때문이다. 이러한 이유 때문에 IEC CISPR 18-3 등의 근거로 라디오 장애는 청명시의 장애량을 평가하고 있다^[17].

국내 방송체계는 미국의 방송체계(NTSC방식)를 따르고 있으므로 미국의 FCC 규정을 반영한 IEEE 라디오장애 소위원회의 SNR 기준을 채택하는 것이 정밀한 라디오장애 평가에 적합하므로 이에 따라 송전선로 라디오장애 설계기준이 작성되었다. 즉 동일한 구조의 방송신호를 이용해 평가된 SNR 수치를 국내에 적용하는 것이 타당하다는 것이다. 국내방송

체제는 상업방송을 근간으로 하는 구미 선진국의 방송체제와는 달리 공영 방송을 근간으로 하는 방송체제이므로, 신호강도는 송전선로가 경과하는 지역의 방송전계강도를 적용하도록 하며, 표 3.7의 구 체신부 고시에 규정된 저잡음 지역에서의 방송전계강도인 71 dB μ V/m를 적용하자는 안도 있다. 환경영향 허용목표치는 IEEE 라디오장애 소위원회에서 제시한 수신 품질 B등급(매우 양호)일 때의 SNR 24 dB(신호강도: Field Intensity, 장애강도: Quasi Peak)로 정의되었다. 즉, 송전선로로 인한 라디오 잡음의 크기는 관심 있는 지점에서 청명시에 47 dB μ V/m 이하가 되어야 한다. 송전선로 라디오 잡음장애 평가를 위한 측정조건 즉, 측정주파수, 측정안테나의 종류와 높이, 검파기(detector) 종류 및 기상조건(청명) 등은 표 3.8과 같은 해외 규격과 국내 관련 법규를 참조하여 설정되었다^[18]. 따라서 한전의 송전선로 라디오장애 설계기준은 표 3.9와 같이 작성되었다. 한편 산업설비에서 발생하는 전자파 장애는 전자파장애 검정규칙(정보통신부령 제18호, 1996.2.12.)의 전자파방사기준으로 규제되고 있다.

표 3.7 국내의 잡음 등급별 방송구역 전계강도 기준
Table 3.7 Signal strength according to service grades in Korea

방송국		방송구역 전계강도 [dB μ V/m]			비고
		고잡음지역	중잡음지역	저잡음지역	
라디오방송을 하는 방송국		77	74	71	방송국의 전계강도 측정 은 지상 4m 높이 기준
텔레비전 방송 및 텔레비전 문자방송을 하는 방송국	VHF	74	68	54	
	UHF	70			

주) 출처: 전파법시행령 제2조 제75호 및 제24조 제4항 규정 (대통령령 제13996호, 1993년 10월 18일)에 따른 체신부 고시 제1992-126호

표 3.8 해외의 라디오 잡음 측정 관련 규격 비교

Table 3.8 Standards related to the measurement of radio interference

규격	탐지기	측정주파수 [MHz]	측정안테나		기상 조건	측정 지점 [m]	신호강도	적용전압 범위[kV]	적용주파수 범위[MHz]
			종류	지상고 [m]					
ANSI/IEEE Std. 430-1986	준첨두치 (Q.P.)	0.5 ± 0.1	Loop	2	청명시	15	-	-	0.01~30
CAN3-C108.3.1 -M84	준첨두치 (Q.P.)	0.5	Loop	-	청명시	15	지역방송 전계강도 평균치	800이하 (상간전압)	0.15~30
CISPR Pub. 18-2 1st Ed.(1986)	준첨두치 (Q.P.)	0.5MHz±10%	Loop	2	전천후시 80%	20	ITU 권고치 (표 3.4)	1 ~ 800	0.15~30

표 3.9 한전 765kV 송전선로 라디오 잡음 설계목표치

Table 3.9 Radio noise design guide of KEPCO 765 kV transmission line

환경장해	지역구분	설계목표치	적용조건 및 근거
라디오 잡음	전 지역	SNR 24 dB 이상 (F.I./Q.P.)	① 청명시 L50 %치 ② 선하용지 보상경계, 지상 2 m ③ 측정주파수: 0.5 MHz ④ 신호강도: 지역별 방송전계강도 (저잡음지역=71 dB μV/m) ⑤ 근거: IEEE 라디오 잡음 소위원회 수신품질 평가기준

주) 지역별 방송전계강도: 송전선로 경과지 해당지역의 방송전계강도

(다) 텔레비전 잡음

송전선로 텔레비전 장애에 관한 측정법과 수신품질 평가 법에 대한 규격은 확립되어 있지 않다. 이는 송전선로 TV 전파특성 이론, 측정 및 평가 등이 쉽지 않아 발전이 더디기 때문이다. 한국전력공사 800 kV 송전선로 도체선정에 관한 Westinghouse 보고서에서는 선로 중심으로부터 250 feet (약 76 m) 지점에서 24.2 dB 이하로 하도록 제안됐었다. 미국 EPRI (Electric Power Research Institute)에서는 그림 3.7과 같이 TV signal에 영향을 주는 송전선로의 TV 수신장애를 평가하기 위한 SNR 평가기준을 제시했다^[1]. Signal은 FCC에서 정의한 VHF(Ch. 2-6) 대역에서의 Grade A, B에 해당하는 70 dB $\mu\text{V}/\text{m}$ 와 50 dB $\mu\text{V}/\text{m}$ 로 되어 있고, 수신품질 등급은 6개로 구성된다. 그림 2.2에서 방송신호강도가 50 dB인 경우에 수신등급 3이상(SNR 약 40 dB 이상)이면 시청에 지장이 없다는 것을 알 수 있다.

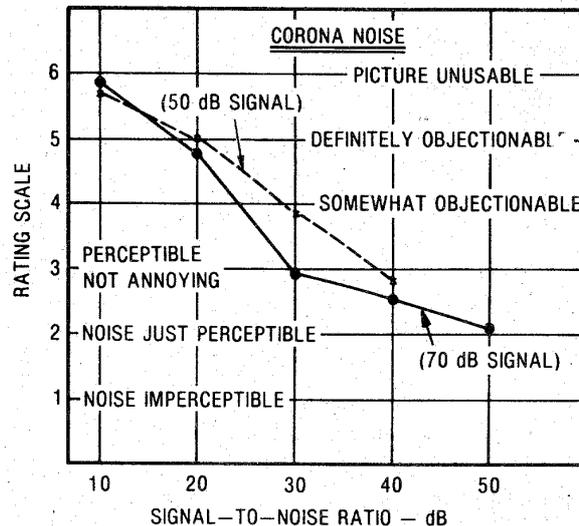


그림 3.7 텔레비전 수신품질 vs. SNR 평가기준 (EPRI, 1980)
 Fig. 3.7 Television reception quality vs. signal-to-noise ratio

(라) 대전 전압

(1) 인체 대전전압목표치 상정

일반 송전선로의 최저지상고는 지표상 전계강도 제한 목표치에 따라서 설계하는 것이 일반적이다. 교류 송전선로의 경우는 정전유도전압을 제한할 목적으로 지표상 전계강도를 제한하나, 직류 송전선로의 경우는 인체에 대한 대전전압 제한을 목표로 한다. 우리나라는 전기설비기술기준(산업자원부 고시 제2004-19호, 2004.2.17, 119조 유도장해의 방지)에서 교류전계를 3.5 kV/m로 규제하고 있다. 그러나 현재 직류전계에 의한 인체대전전압 제한치가 설정되어 있지 않다. 따라서 직류선로에서 교류 경우와 동일한 전계가 발생하고, 이 전계를 균등전계로 가정했을 때 대전체 높이 1.5 m 상에서의 대전전압 V_{ac} 는 5.25 kV가 된다. 한편 인체에 대한 전기적 충격은 AC와 DC간에 DC/AC=3의 관계가 있는 것으로 나타나, AC 3.5 kV/m에서의 전기적 충격을 DC 대전전압으로 환산하면 17.75 kV가 된다. 즉, AC 3.5 kV/m에서의 전기적 충격은 DC 대전전압 15.75 kV_{DC}와 유사하다는 의미이다. DC/AC=3의 의미는 인체를 대상으로 AC에서 느껴지는 감지전압과 DC에서의 감지전압과의 크기를 실험을 통하여 통계적으로 구한 값이다. 일본 전력중앙연구소의 경우는 인체에 관한 문제이므로 안전율을 고려하여 AC의 경우 2 kV/m를 적용하여 직류대전전압 설계치를 9 kV_{DC}로 제안했다. 이때 인체 유도전압 설계기준치는 100 G Ω 의 인체모델을 사용하였다. 100 G Ω 은 사람이 높은 절연성능을 갖는 고무신 등을 신었을 때의 대지 접촉저항 모의값이다. 한편 DC선로에 의한 대전전압은 바람, 습도, 온도 및 계절적 변화 등 기상조건에 따라 크게 영향을 받기 때문에 청명시의 데이터를 기준으로 정규분포에 따라 통계 처리하여 3 σ (99%)값을 취하는 것이 일반적이다.

제 4 장 코로나 케이지 환경모의실험용 계측시스템 설계 및 제작

본 장에서는 직류 코로나 케이지 모의실험용 정류설비를 설계하고 직류 전원설비를 구축하였다. 또한 직류 코로나 케이지에서 후보도체방식별 환경장해를 평가하기 위해 DAS 프로그램을 먼저 개발하고 라디오 잡음, 코로나 전류, 이온전류 밀도의 측정센서를 제작 및 교정실험을 수행하여 코로나 케이지에서 라디오 잡음을 비롯한 5개의 환경장해와 기상요소를 측정할 수 있는 계측시스템 구성을 나타내었다.

4.1 직류 코로나 케이지 모의실험설비

4.1.1 직류 고전압의 정류이론

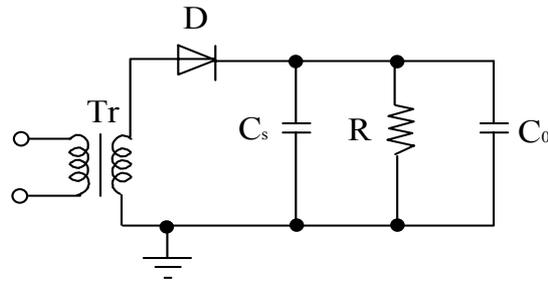
그림 4.1은 변압기, 정류기 및 평활용 콘덴서로 구성된 반파정류회로이며, 고전압 시험용 변압기의 2차 전압을 직접 정류하는 간단한 직류고전압 발생회로로 자주 사용된다. 출력전압 V_c 는 그림 4.2에 나타낸 바와 같이 콘덴서 $C(C=C_o+C_s)$ 의 충전전압의 반복으로 나타난다. $C \approx 0$ (또는 $R \approx 0$)일 때의 출력전압은 교류의 반파로 되며, $C \neq 0$ 일 때는 맥동분을 가지는 직류전압 V_c 로 된다. 전원 주파수를 f 라고 하면, CR 이 주기 $T(=1/f)$ 에 비하여 대단히 클 때 맥동률(ripple factor) η 는 식(4.1)이 된다.

$$\eta = \Delta V / 2V_c = (2fCR)^{-1} \quad (4.1)$$

그림 4.1의 회로에서 정류기에 가해지는 전압은 부의 파고치 부근에서

최대 약 $2V_m$ 되는 것에 주의하여야 한다. 정류기의 역방향으로 인가되는 전압을 역전압, 정류기가 견디어야 될 역방향의 전압을 역내전압이라 한다. 정류기로는 고전압용 진공정류관(Kenotron)이 많이 사용되어 왔으나 최근에는 대부분 반도체 정류기, 특히 실리콘 정류기(Silicon Rectifier)가 사용되고 있다. 직류 고전압을 발생시키기 위해서는 정류기를 직렬로 접속하고, 이것에 병렬로 콘덴서나 저항을 접속한다.

정류기는 1개당의 전압 1~10 kV, 전류 10 mA~10 A 정도의 것이 주로 사용된다. 이들의 병렬임피던스는 정류소자특성의 편차나 대지표류용량(stray capacitance)의 영향으로 생기는 전위분담에 대한 불평등성의 개선용이다. 또한 병렬콘덴서는 순방향전압시의 전하가 잔류하여 역전압시에 과대한 전압의 발생(홀 축적효과; hole storage effect)을 방지하는 역할을 하기도 한다. 이와 같은 정류장치는 FRP원통이나 애관에 넣고, 절연유나 SF₆가스를 충전시킨다.



단, T_r : 변압기, C_0 : 시험품의 정전용량
 D : 정류기, C_s : 평활콘덴서, R : 시험품의 저항

그림 4.1 반파정류회로

Fig. 4.1 Half-wave rectification circuit

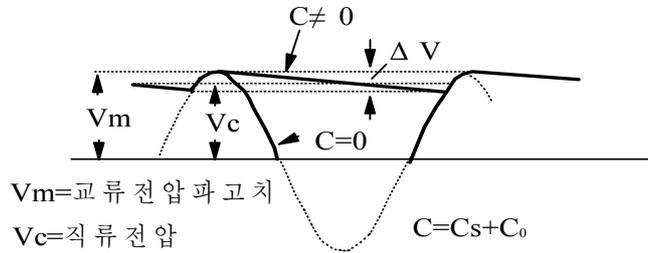
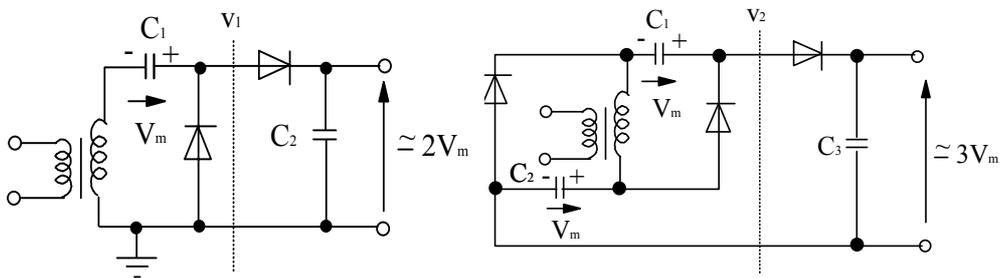


그림 4.2 반파정류회로의 출력파형
 Fig. 4.2 Output waveform of half-wave rectification circuit

교류전압 파고치의 2배, 3배인 직류전압을 발생시키는 회로의 예를 그림 4.3에 나타내었다. 그림 4.3(a)의 배전압 정류회로(voltage double circuit)는 C_1 을 거쳐 C_2 가 충전되기 때문에 점선부분의 전압 V_1 을 고려하면 정상상태에서는 C_1 의 충전에 의해서 V_m 만큼 직류적으로 상승된 교류전압이 된다. 따라서 출력전압은 거의 교류파고치의 2배(무부하시)로 된다. 같은 방법으로 그림 4.3(b)의 3배 전압 정류회로에서는 점선부분의 전압이 $V_2 = 2V_m + V_m \sin(2\omega t)$ 로 되므로 출력전압이 $3V_m$ 으로 됨을 알 수 있다. 변압기의 2차 전압을 2배, 3배로 높이는 정류회로를 확장시키면 n 개의 정류기와 콘덴서를 사용하여 n 배의 직류전압을 얻을 수가 있다.



(a) 배전압 정류회로 (b) 3배전압 정류회로

그림 4.3 배전압 및 3배전압 정류회로
 Fig. 4.3 Voltage double and voltage triple rectification circuit

이와 같은 다단회로로 유명한 것이 Cockcroft-Walton 회로이며, 1932년 최초로 원자핵의 인공적 파괴시험에 사용되었다. 이 회로는 그림 4.4와 같이 콘덴서를 직렬로 연결하는 것이 특징이고, 1개 콘덴서의 부담전압은 $2V_m$ (C_1 만은 V_m)이며, n 개의 콘덴서를 사용하면 nV_m 의 전압(무부하시)이 얻어진다. 동작원리는 그림 4.3 (a)의 배전압 정류회로에서 V_1 으로 V_m 이 얻어지는 것과 마찬가지로 C_2 가 $2V_m$ 으로 충전되고, C_3 도 $2V_m - V_m + V_m \sin(2\pi ft)$ 의 전압으로부터 역시 $2V_m$ 으로 충전되며, 이러한 과정이 반복된다.

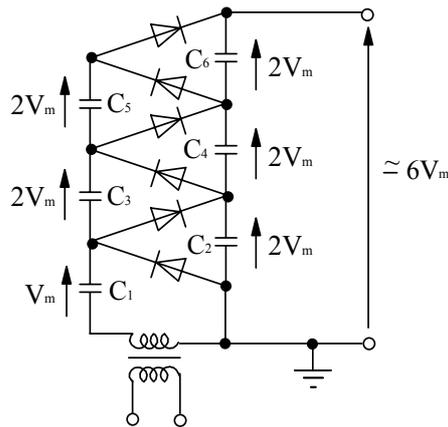


그림 4.4 Cockcroft-Walton 회로
Fig. 4.4 Cockcroft-Walton circuit

모두 같은 용량 C 인 콘덴서(및 정류기) $2n$ 개를 사용한 경우 출력전압 V_c 및 맥동전압 ΔV_R 은 식(4.2)로 주어진다.

$$V_c = 2nV_m - \Delta V, \quad \Delta V = (2n^3/3 + n^2/2 - n/6)I/fC$$

$$\Delta V_R = n(n+1)I/(4fC) \quad (4.2)$$

여기서, I 는 부하 전류이다. 전압강하 ΔV 나 맥동률을 작게 하기 위해서는 C 와 f 를 크게 할 필요가 있으므로 500 Hz ~ 10 kHz의 고주파전원이 사용되기도 한다^[5].

4.1.2 전원설비

(1) 교류 변압기 (FWP 2000/600)

- 출력전압 : 600 kV
- 정격용량 : 2,000 kVA
- 정격주파수 : 60 Hz
- 출력전류 : 333 mA
- 입력전압 : 22.9 kV

(2) 직류 전원설비 설계사양

직류 코로나 케이스에 설치된 직류전원설비는 1단의 Cockcroft-Walton 회로로 구성되며, 200 mA / + 600 kV, 200 mA / - 600 kV를 발생시킬 수 있는 발생기 두 대로 설계하였다. 설치된 DC 발생기는 환경장해실험에 적합하도록 리플을 고려하여 설계하였다. 설치된 DC 발생기의 주요 사양은 다음과 같다.

- 정격 전압 : DC \pm 600 kV
- 최대 출력 전압 : DC \pm 600 kV
- 운전 전압 범위 : DC 0 kV ~ \pm 600 kV
- 정격 전류 : 200 mA(600 kV인 경우)
- 최대 출력 Power : 2×120 kW
- 200 mA일 때 Ripple : $\leq 3\%$

설비는 표 4.1과 같이 크게 4가지로 직류발생기, 교류/직류 전압계, 접지장치, 제어장치로 구분하여 나타낼 수 있으며, 그림 4.5에는 설비 구성에 대한 개략도를 나타냈다. 또한 그림 4.6에는 설치된 직류전원시스템을 제어하기 위한 흐름도를 나타냈고, 그림 4.7과 4.8에 직류 시험설비의 평면도와 시험장에 설치된 전경사진을 각각 나타내었다.

표 4.1 DC 전원설비 설계사양

Table 4.1 Design specification of DC power supply equipment

품 명	개수	사 양			비고	
		용량	누설전류경로 (mm)	중량 (kg)		
DC 발생기	평활콘덴서	4	DC 300 kV, 390 nF	7,500	500	
	충전용콘덴서	2	DC 300 kV, 390 nF	7,500	500	
	정류기	4	600 kV, 200 mA	7,500	400	단극성 유중절연
	Damping 저항	2	4kΩ	-	35	
	HV 측정저항	2	300MΩ	7550	300	유중절연
	Basic frame	2		1,000		
AC/DC 전압계	2					
접지장치	2					
제어장치	1	<ul style="list-style-type: none"> • 직류전압 측정 • +, - 전압간의 평형유지 • 전압 제한 및 과전압 보호 • 전류측정, 과전류보호 				

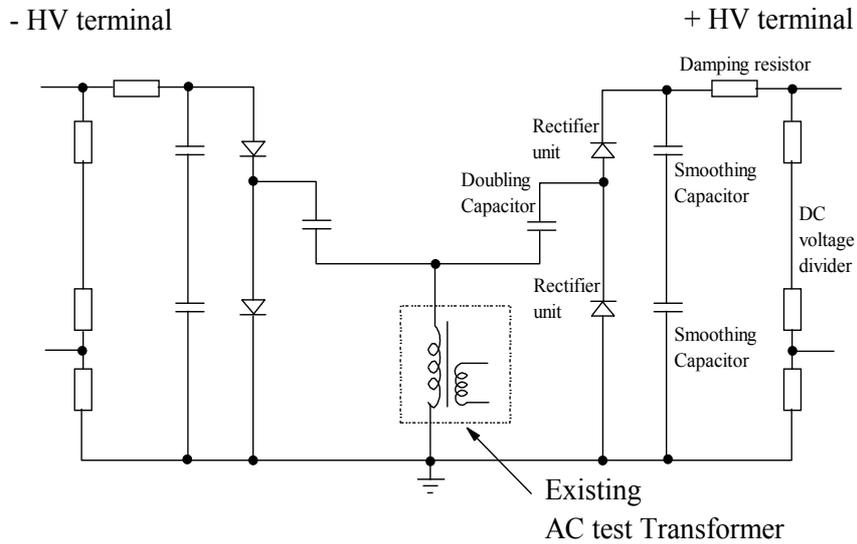


그림 4.5 DC 전원설비와 AC 시험용 변압기

Fig. 4.5 DC power equipment and AC test transformer

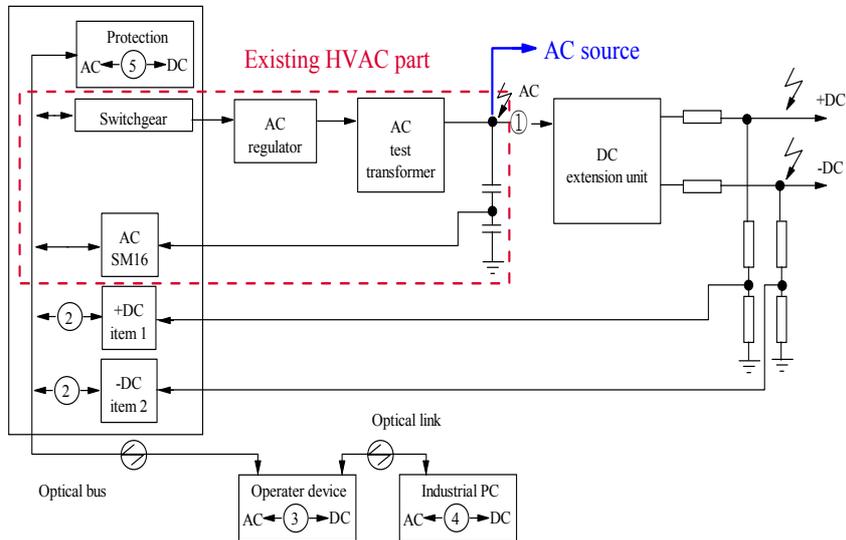


그림 4.6 DC 실험 측정설비와 제어흐름도
 Fig. 4.6 Measurement system and control flow chart for DC test

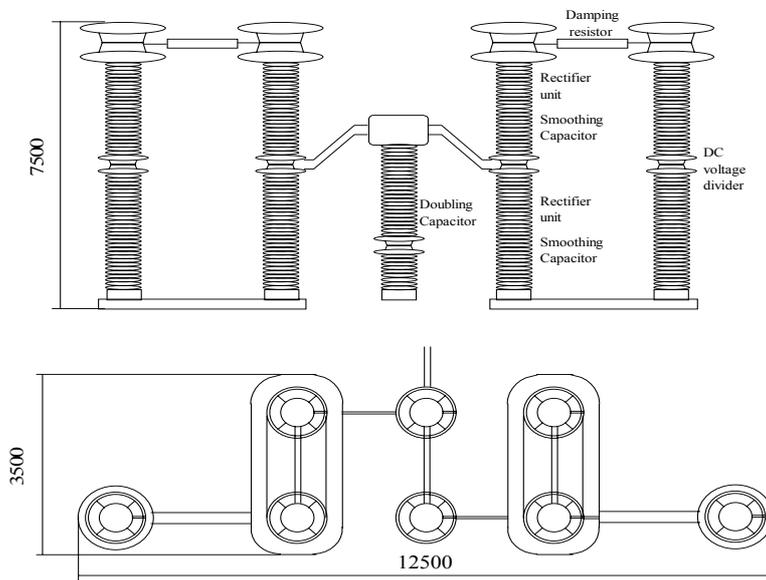


그림 4.7 DC 실험설비 200 mA / 600 kV 평면도
 Fig. 4.7 Plane figure of DC test equipment 200 mA / 600 kV



그림 4.8 코로나 케이지에 설치된 HVDC 전원설비

Fig. 4.8 HVDC power supply equipment installed at corona cage

4.1.3 직류 코로나 케이지

코로나 케이지는 정사각형구조이며 그림 4.9에 코로나 케이지의 개략도를 나타냈다. 코로나 케이지는 각 4m 씩 5개 부분으로 되어있고 중앙의 3개 부분은 라디오 잡음 측정을 위한 안테나 역할을 위하여 대지로부터 절연시킬 수 있도록 내부 케이지에 접지된 외부케이지를 부착한 2중 구조로 되어있다. 코로나 케이지에서의 측정항목은 라디오 잡음, 텔레비전 잡음, 코로나 소음, 코로나전류, 이온전류밀도이며 그림 4.10에 각 측정센서의 설치지점과 케이지의 개략도를 나타냈다^[19].

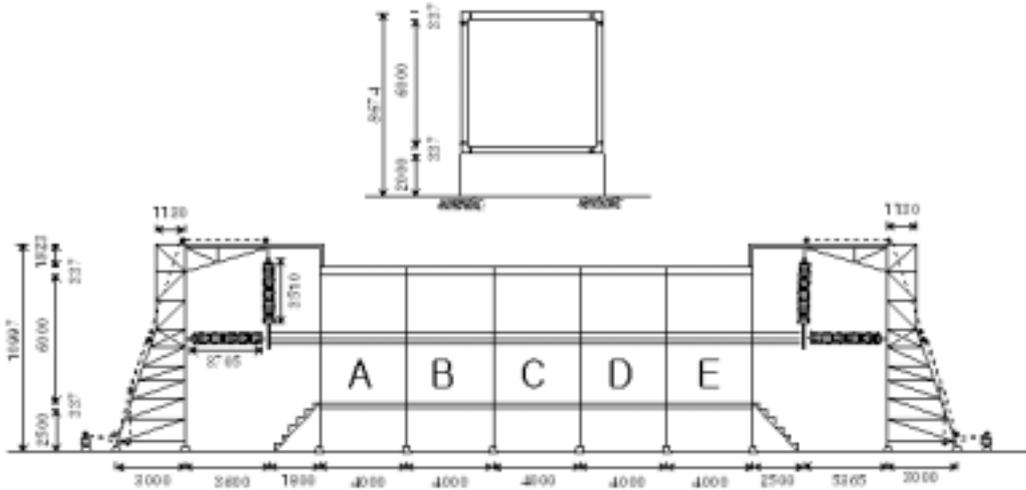


그림 4.9 코로나 케이지 구성도

Fig. 4.9 Diagram of corona cage

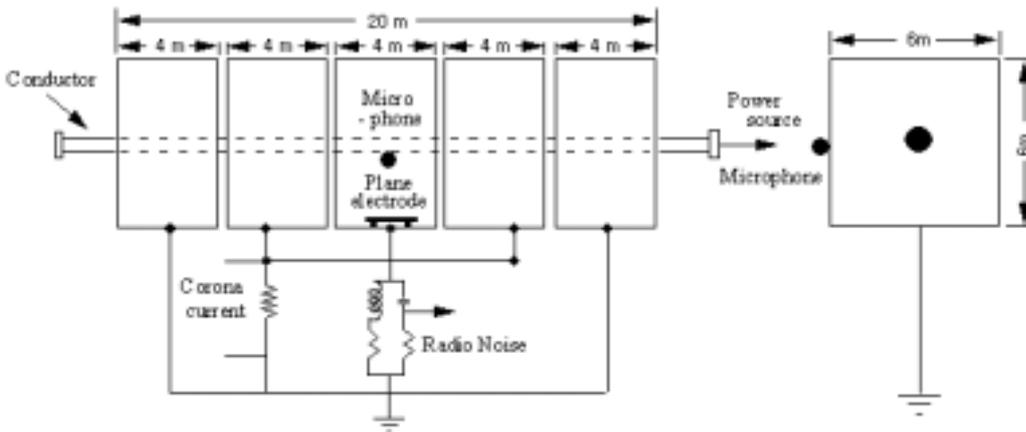


그림 4.10 측정항목 및 설치지점

Fig. 4.10 Measuring items and installing points

4.2 측정 항목

4.2.1 라디오 잡음

케이지에서 라디오 잡음측정은 일반적으로 두 종류의 측정법이 이용되며, 아래에 측정법마다 개요를 나타냈다^[20]. 두 방법 모두 라디오잡음 측정기를 이용하고, 측정주파수는 비방송 대역인 0.5 ± 0.1 MHz 범위에서 선택한다.

① 라디오 잡음전류를 코로나케이지의 금속망으로 측정하는 방법

코로나 케이지의 금속망과 대지간의 사이에 삽입된 라디오 잡음전류 검출회로를 이용하여 라디오 잡음전류를 측정한다.

② 라디오 잡음전류를 결합콘덴서로 측정하는 방법

전원과 실험전선간의 트랩(Trap) 코일을 삽입하여 전원측에서의 불요 잡음의 혼입을 방지하고, 결합콘덴서로 라디오잡음 전류검출회로를 직속하여 실험전선을 흐르는 라디오잡음전류를 측정한다.

본 연구에서는 코로나 케이지에서 측정이 용이한 방법인 항목 ①에 대한 라디오 잡음 전류발생 측정법을 이용하여 실험을 수행하였다. 라디오 잡음전류를 측정하기 위해서는 라디오 잡음 측정주파수인 $0.5 \text{ MHz} \pm 0.1 \text{ MHz}$ 범위에서 측정회로의 임피던스가 내부케이지와 외부케이지간 정전용량에 의한 임피던스보다 매우 작은 값을 가져야한다^[21]. 따라서 먼저 병렬공진법으로 내부케이지와 외부케이지간의 정전용량을 구했으며, 측정시의 회로도들 그림 4.11에 나타냈다.

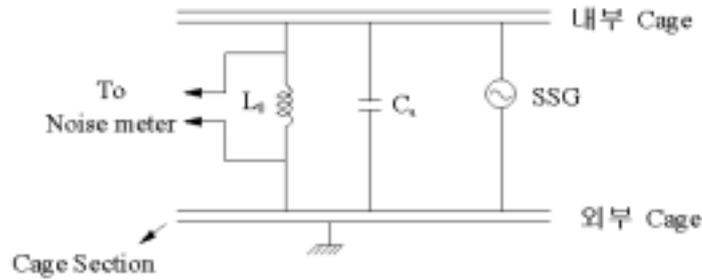


그림 4.11 병렬 공진법을 이용한 정전용량 측정
 Fig. 4.11 Measurement of capacitance by the parallel resonance method

표준신호발생기(SSG)를 내부케이지와 외부케이지에 연결하고 330 μ H 와의 병렬공진현상을 이용하여 내외부 케이지 간의 정전용량을 조사하였다. 측정결과에 의해 공진주파수는 550 kHz가 되고, 식(4.3)을 이용하여 계산하면 내부케이지와 외부케이지간의 정전용량은 0.25 nF인 것을 알 수 있다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}] \quad (4.3)$$

따라서 케이지 내외부 간의 표류정전용량이 약 0.25 nF로 측정되었기 때문에 라디오 잡음 검출회로의 임피던스를 10 Ω 이하로 하면 측정 주파수 0.5 MHz에서 라디오 잡음전류 신호를 99.1 % 이상 검출할 수 있다. 또한 노이즈를 없애기 위해 LR회로를 병렬로 설치해 저주파대의 잡음전류를 제거시키고 측정 주파수에서 CR회로를 통과하는 잡음전류를 거의 100 %가 되도록 소자값을 결정하였다. 그림 4.12에는 이를 고려한 제작회로를 나타내었다.

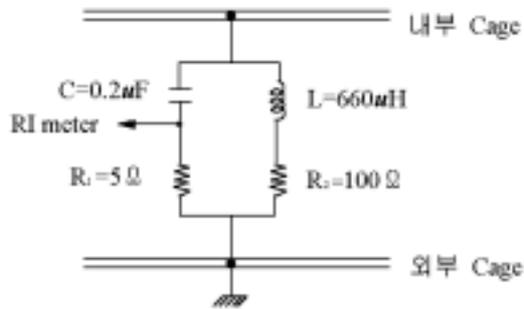


그림 4.12 라디오 잡음 검출회로
 Fig. 4.12 Radio noise measuring circuit

제작된 회로의 등가임피던스를 구하기 위해 회로를 코로나 케이지에 그림 4.13과 같이 설치하여 정전류원인 표준신호발생기(SSG)로 10 μ A(CT로 전류 크기 반복 확인)를 회로에 입력한다. 이 때 주파수별로 측정된 임피던스 특성값을 그림 4.14에 나타내었다. 측정된 결과를 통해 측정회로의 등가임피던스가 측정주파수 475 kHz일 때 등가임피던스는 7.76 Ω 임을 알 수 있었다.

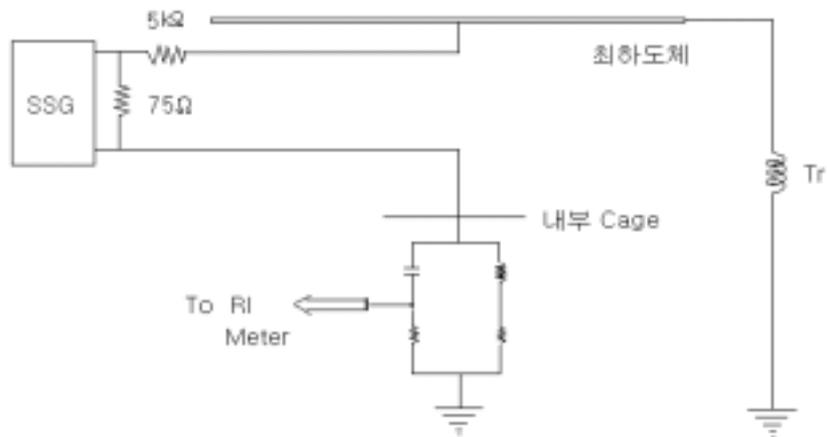


그림 4.13 라디오 잡음 측정회로의 등가임피던스 계측도
 Fig. 4.13 Diagram for measuring equivalent impedance of measuring circuit

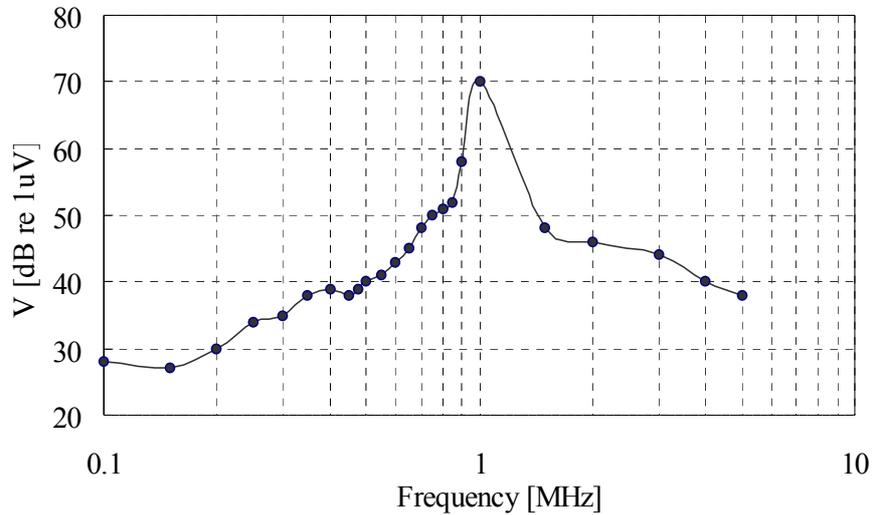


그림 4.14 라디오 잡음 측정회로의 주파수 응답특성
 Fig. 4.14 Frequency response characteristic of radio noise measuring circuit

코로나 케이지의 라디오 잡음 측정 시 측정구간의 End Effect를 줄이기 위해 케이지를 여러 구간으로 나누어 바깥쪽 케이지는 접지 시키고 중앙의 구간만을 측정에 이용하였다. 이 때 주의 할 점은 코로나 발생원이 도체에서 케이지간 거리의 수배에 걸쳐 분포하므로 어느 정도의 전류는 측정구간을 벗어나 직접 대지로 흘러 들어갈 우려가 있기 때문에 측정된 잡음전압과 도체 상에서 발생하는 전류간의 상관관계를 구하여 측정전압을 보정해야 한다. 따라서 보정계수(K_{ms})를 구하기 위해 비교적 넓은 주파수대에 걸쳐 균일한 코로나 전류를 발생하는 구검장치를 이용하여 보정 실험을 수행하였다. 측정된 전압과 실제 도체 상에서 발생하는 전류간의 상관관계를 얻기 위해 먼저 라디오 잡음전류 I_c 의 크기를 도체상의 미소 길이 dx 마다 동일하고 도체상의 코로나 발생원이 균일하게 분포한다고 가정하면, I_c 는 식(4.4)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_c = cI_s \quad (4.4)$$

여기서 I_s 는 스파크 갭에서 발생하는 전류이다. 내부 케이지의 중앙 부분에서 검출되는 크기는 잡음원의 위치에 의존하기 때문에 식(4.5)와 같이 나타내며 $K(x)$ 는 미소면적 dx 에서 발생하는 총 발생 전류를 중앙부분에서 검출하는 비율이다.

$$\Delta I(x) = K(x)cI_s \quad (4.5)$$

따라서 중앙부분에서 검출하는 총 전류는 식(4.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \sqrt{\int_0^l [K(x)cI_s]^2 dx} = cI_s \sqrt{l} \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l [K(x)]^2 dx} \quad (4.6)$$

l 은 케이지 유효길이이며, I_s , c 는 상수이고, 식(4.7)과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$I_c = cI_s = \frac{I}{K_{ms}\sqrt{l}} = \frac{(V_r/Z)}{(K_{ms}\sqrt{l})} \quad (4.7)$$

여기서 보정계수 K_{ms} 는 그림 4.9의 B, C, D 섹션에 검출회로를 설치하면서 구갭실험을 반복 수행하게 되면 얻을 수 있다. V_r 는 라디오 잡음 수신레벨[dB re. 1 μ V], Z 는 측정 주파수에서의 라디오잡음 검출회로의 등가 임피던스 이다. 그림 4.15에는 갭 방전실험을 실험전선의 전장(全長)에

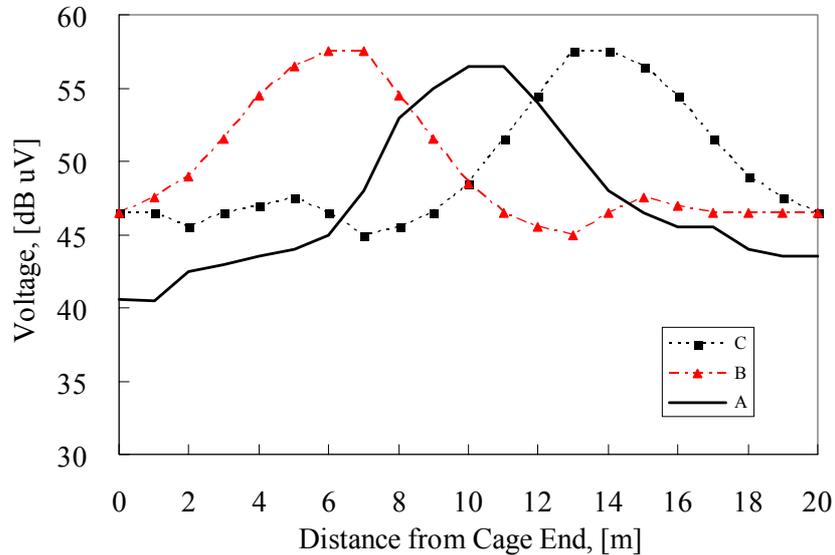


그림 4.15 구갯 위치에 따른 라디오 잡음전압

Fig. 4.15 Radio noise voltage as a function of the locations of spark gap

결쳐서 수행한 실험결과를 나타냈다. 이와 같이 라디오 잡음측정회로를 통해 얻어진 잡음전압과 케이지 변수, 보정계수를 이용해 라디오 잡음전류를 구한다.

송전선로 주변에서 발생하는 라디오 잡음의 크기는 본질적으로 도체에 서의 코로나 발생여부와 선로에서의 코로나 전류 전파특성에 의존한다. 따라서 이론적 관점뿐만 아니라 실제로 불규칙하고 맥동적인 코로나 전류 특성을 도체근처의 공간전하와 전계분포에만 의존하고, 실제도체와 선로 형상에 영향을 받지 않는 코로나 발생량으로 정의하는 것은 매우 실용적 이다. 이러한 물리적인 양은 먼저 전파분석을 이용하여 발생밀도 (Generation Density: GD)를 정의한 Adam에 의해 제안되었다. 이 후 Gary는 Adam의 제안을 심층 연구하여 실험적으로 측정 가능하고 상용

송전선로 형상의 전파분석에 이용되는 "Excitation Function"의 개념을 개발하였다^[22]. 단상뿐만 아니라 다상선로 형상에서의 Excitation Function 유도는 아래와 같이 나타난다. 단일 도체에서 도체근처의 코로나 발생에 의해 생성된 전하 q 의 이동은 도체 상에서 전류를 유도시키며, 이 유도전류 I_c 는 식(4.8)과 같이 나타난다.

$$I_c = \rho \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} v_r \quad (4.8)$$

C 는 도체의 단위길이당 정전용량, r 은 전하 q 로부터의 방사거리, v_r 은 방사속도이다. 식(4.8)은 식(4.9)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$I_c = \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \frac{\rho}{r} v_r = \frac{C}{2\pi r} I \quad (4.9)$$

식(4.8)에서 $\frac{\rho}{r} v_r$ 을 I 로 대치하면, I 는 도체근방에 존재하는 공간전하 이동만의 함수가 된다. 따라서 도체상에 유도되는 전류는 본질적으로 두 가지 요소만 고려할 수 있다. 첫째는 도체의 형상에만 의존하는 도체의 정전용량이고, 둘째는 도체주위의 전계분포에만 의존하는 도체 근방의 공간전하 밀도와 이동이다. I_c 는 도체상에 유도되는 불규칙적인 전류펄스 스케이지 실험에서 계측기로 측정할 수 있다. 따라서 Excitation Function 개념의 주요 장점은 도체와 선로배열에 독립적이며 코로나 케이지에서 쉽게 측정되며, 무한선로로 라디오 장해를 예측할 수 있다는 것이다. 식(4.9)에 나타난 것처럼 코로나 케이지에서 I 를 구하기 위해서는 교

표 4.2 후보도체방식별 단위길이당 정전용량

Table 4.2 Capacitance per unit length among candidate bundle types

도체단면적 [mm ²]	도체직경 [cm]	소도체수	도체간격 [cm]	정전용량 [pF/m]
410	2.850	6	40	23.7
480	2.961	6	40	23.7
480	2.961	8	40	27.7
480	3.042	6	40	23.8
480	3.042	8	40	27.7
810	3.840	4	40	20.1
810	3.840	6	40	24.2

정된 라디오 잡음측정 회로를 통해 측정된 잡음전류 데이터와 도체의 단위 길이당 정전용량이 필요하다. 도체의 단위 길이당 정전용량은 계산에 의한 방법과 병렬공진법을 이용하여 측정할 수 있다. 계산에 의한 방법은 코로나 케이지를 동축 원통형의 경우로 가정하여 식(4.10)으로부터 구할 수 있으며 표 4.2에 직류 ±500 kV 선로의 후보도체방식별 단위 길이당 정전용량의 계산 결과를 나타냈다.

$$C = 2\pi\epsilon_0 / \ln(D/d) \quad (4.10)$$

여기서 D 는 케이지 등가직경, d 는 도체의 등가반경이며 다도체 경우 d 는 소도체의 등가변환식 $R_{eq} = [nrA^{n-1}]^{1/n}$ 로 구하며, n 은 r 은 각각 소도체 수, 소도체 반경, Bundle의 반경이다. 그림 4.16과 같이 실제 길이 L 을 갖는 정방형 케이지에서의 도체 정전용량이 등가직경 D 를 갖는 원통형 케이지에서도 동일한 값을 갖기 위해서는 식(4.11)과 같은 관계를 만족해야한다.

$$D = 1.08L \quad (4.11)$$

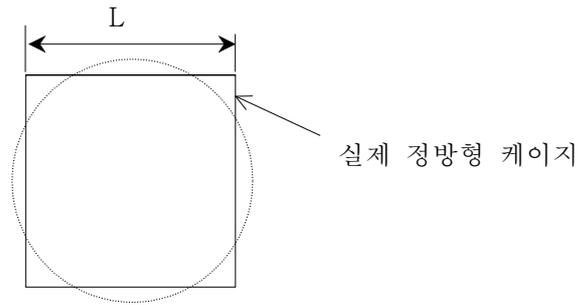


그림 4.16 정방형 케이지를 원통형으로 등가변환
 Fig. 4.16 Equivalent conversion cylindrical corona cage in regular square

라디오잡음 전류발생량 I 를 I_c 로 표현하면 식(4.12)와 같이 된다.

$$\Gamma = \frac{2\pi\epsilon_0}{C} I_c \quad (4.12)$$

따라서 최종적으로 케이지의 측정값에서 I 로의 환산식은 식(4.13)을 통해 구할 수 있다^[23].

$$\Gamma = V_r - 20\log Z - 20\log(\sqrt{I} K_{rms}) + 20\log(2\pi\epsilon_0/C) \quad (4.13)$$

그림 4.17에는 직류 코로나 케이지에서 라디오 잡음장해 평가실험을 수행하기 위한 순서를 나타내었다.

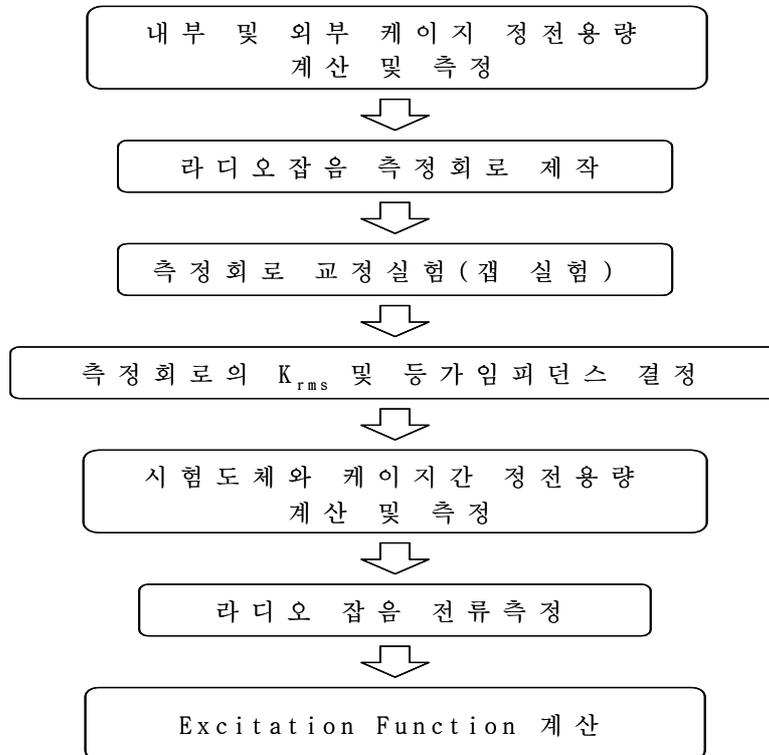


그림 4.17 직류 라디오 잡음 케이지 실험법 흐름도

Fig. 4.17 Flowchart of DC radio noise measuring method at corona cage

4.2.2 텔레비전 잡음

내부와 외부 케이지 간의 정전용량이 0.3 nF 이하이기 때문에 텔레비전 잡음 측정의 경우, 측정주파수인 75 MHz에서 임피던스가 매우 작게 된다. 따라서 텔레비전 잡음신호를 라디오 잡음 측정과 같이 내부와 외부케이지 사이에 회로를 삽입하여 측정하는 것은 어렵기 때문에 내부케이지 중간부분에 dipole 안테나를 설치하여 측정한다^[24, 25]. 직류 코로나 케이지에서 텔레비전 잡음을 측정하기 위한 계측기 및 안테나의 사양은 아래와 같다.

■ 텔레비전 계측기 (ESVS30)

- 제작사 : Rohde & Schwarz
- 측정주파수 범위 : 20 ~ 1000 MHz
- 측정범위 : - 6 ~ 120 dB μ V(ANSI C63.2)
- Measurement Mode : Average, Peak, Quasi-peak

■ $\lambda/4$ Dipole Antenna

- 측정주파수 범위 : 30 ~ 300 MHz
- Source Impedance : 50 Ω
- 정재파비(VSWR) : < 2.5

4.2.3 코로나 전류

코로나 케이지의 내부 케이지와 외부 케이지 간에 저항을 삽입하여 금속망에 흐르는 전류를 측정하고, 실험전선에서의 코로나방전이 코로나 케이지의 유효한 길이에 걸쳐서 일정하게 발생한다고 가정하여 단위 길이당 코로나 전류를 구한다. 측정저항은 그림 4.10에서와 같이 내부 케이지의 B와 D 섹션에 설치하여 코로나 전류를 측정하였다.

측정 저항값은 실험도체의 코로나 전류 발생을 고려하여 측정전압이 수 mV 이상이 되도록 500 Ω 이상을 선택하였으며, 저항값을 가변할 수 있게 하였다.

4.2.4 코로나 소음

측정센서인 마이크로폰을 실험전선 span의 중앙 지점에 해당하는 코로나 케이지 mesh 외측에 설치하고, 정밀소음계를 이용하여 SPL A특성치를 측정한다. 측정신호는 Sound Noise Analyzer로 입력되고, AC 출력신호는 Front-End(B&K 2825)를 거쳐 PULSE software로 주파수 spectrum 분석에 활용하고, 디지털 변환신호는 RS232C 통신을 거쳐 LabVIEW Based DAS 운용프로그램에 의해 Database에 저장된다.

측정값은 배경소음의 영향을 보정한 후, 마이크론에서 실험전선까지의 거리차이 및 실험전선 길이 등에 의해 기인하는 영향을 작게 하기 위해서 무한선로의 각 bundle에서 1m 떨어진 지점에서의 코로나 소음 출력음압레벨 P_1 을 구하고, 이를 이용하여 실규모 모델 직류선로 주변 지역의 지상 1.2 ~ 1.5m 지점에서의 발생량 P를 환산의 방법으로 예측한다^{[26],[27]}. 이상의 청명 시 직류 코로나 소음 케이지 실험의 흐름을 그림 4.18에 정리했다.

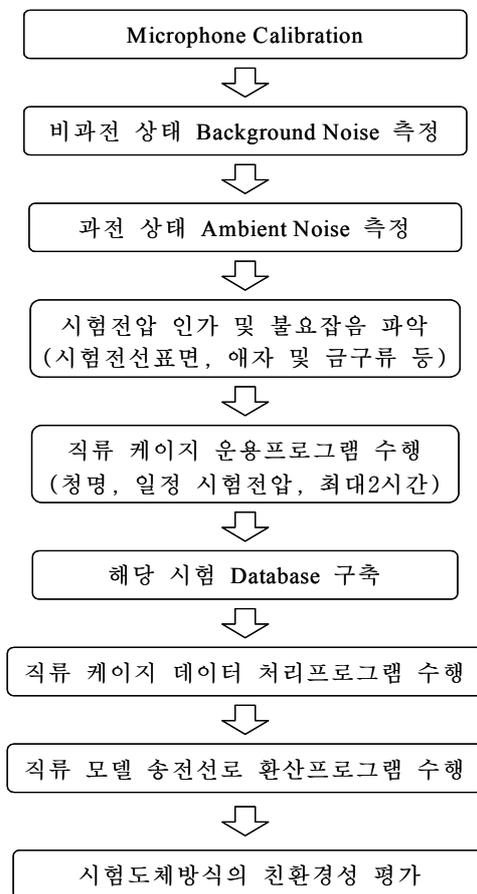


그림 4.18 직류 코로나 소음 케이지 실험법 흐름도
Fig. 4.18 Flowchart of DC audible noise measuring method at corona cage

4.2.5 이온 전류밀도

직류 코로나 방전에 의해 도체에서 발생하는 이온의 상대비교를 위해 케이지 내부 중앙에 그림 4.19와 같이 평판전극을 설치하여 이온전류밀도를 측정하였다. 평판의 크기는 가로세로 각각 0.8m이며 평판전극으로 이동된 이온이 저항을 통해 대지로 흐를 때의 전압을 검출함으로써 이온전류밀도를 측정한다. 측정된 전압은 매우 작기 때문에 증폭기를 이용하여 신호를 검출하였으며 증폭기 사양은 다음과 같다.

- Gain: $\times 20 \sim \times 1000$
- Attenuation: 100
- Output: DC ± 10 V, ± 15 mA
- Frequency Response: DC ~ 100 kHz
- Noise: 1 μ V 미만
- Filter: Cut-off 50 Hz ~ 50 kHz
- Operating Temperature: 0 ~ 50 °C



그림 4.19 코로나 케이지의 이온전류밀도 측정용 평판전극
Fig. 4.19 Measuring plane electrode for ion current density

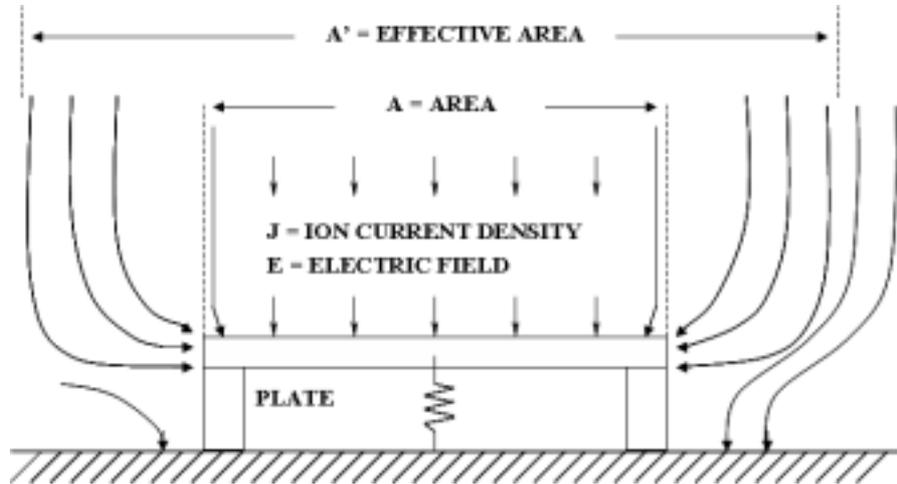


그림 4.20 이온전류 측정용 평판전극
Fig. 4.20 Plane electrode for measuring ion current

그림 4.20에는 이온전류밀도를 측정하는 방법을 나타냈다. 평판전극을 케이지에 설치할 경우 평판의 끝 부분에서 전계가 집중될 수 있다. 따라서 실제평판면적 A보다 더 큰 A'의 면적에 해당하는 이온이 측정된다. 이러한 문제는 평판전극의 크기에 비해 매우 낮은 높이로 평판을 지면에 설치하여 오차를 줄일 수 있다^[28].

또한 평판 전극을 이용하여 측정하는 방법은 전계의 변화에 의해 발생되는 변위전류와 실제 이온의 흐름에 의한 도체의 전류를 구별할 수 없다. 평판전극에 의해 측정되는 전류의 합은 식(4.14)와 같다.

$$I = JA + \epsilon A \frac{dE}{dt} \quad (4.14)$$

여기서 ϵ 는 자유공간의 유전율로 8.85 pF/m이다. 식(4.14)의 첫 번째 항은 이온전류이고, 두 번째 항은 평판전극위의 전계의 변동에 의해 발생

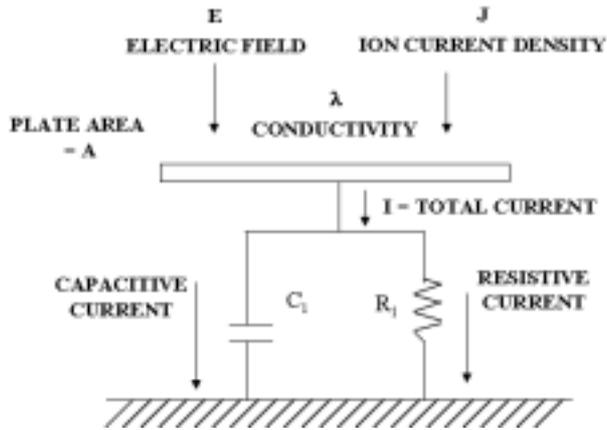


그림 4.21 변위전류 보상
 Fig. 4.21 Displacement current compensation

되는 변위전류이다. 이러한 변위전류의 효과를 최소화하기 위해 측정저항에 콘덴서 $10\ \mu\text{F}$ 를 그림 4.21과 같이 설치하였다.

평판센서의 감도는 그림 4.22와 같이 먼저 전류 검출용 저항의 저항값을 tester로 확인하고, 표준신호발생기를 이용해 전류를 흘려 직류증폭기의 출력전압을 확인하여 구한다.

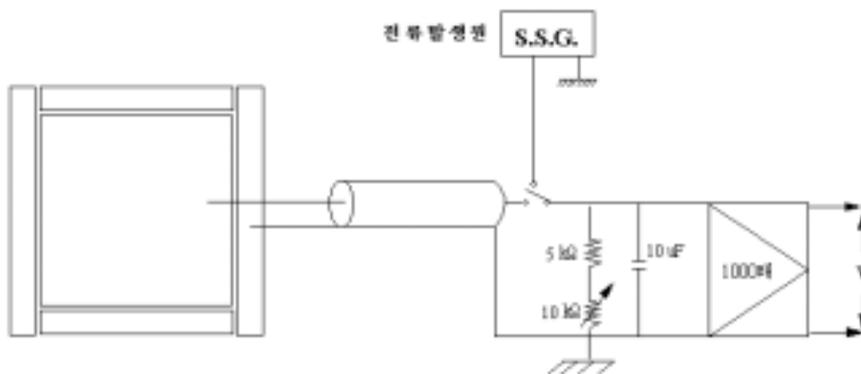


그림 4.22 평판센서 교정실험 개략도
 Fig. 4.22 Diagram of calibration for plane electrode

따라서 $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 의 평판전극, 측정저항 $10\text{ k}\Omega$, Gain 1000인 증폭기를 통하여 구한 평판센서의 이온전류밀도의 감도는 $0.156\text{ }\mu\text{A}/\text{m}^2/\text{V}$ 로 나타났다.

4.2.6 기상요소

직류 송전선로의 코로나 장애량과 기상요소와의 상관관계를 조사하기 위해서 풍향, 풍속, 온도 및 습도를 측정해야한다. 기상전용 철탑에 설치된 각 센서에서 계측된 신호는 DAQ로 입력되고, 여기서 A/D 변환된 신호는 LabVIEW Based DAS 운용프로그램에 의하여 Database에 저장된다. 기상요소의 측정은 각 장애항목을 동일한 실험조건에서 평가해야 하기 때문에 요구되며, 또한 장애항목과 기상조건과의 상관관계 조사를 위해서도 필요하다. 직류 코로나 케이지에서 측정되는 기상요소는 코로나 장애항목들과 함께 DAS의 운용프로그램을 통해 실시간으로 모니터에 표시되고 동시에 저장된다. 표 4.3에는 기상측정 장치의 방식과 측정범위 등을 나타내었다. 기상센서 설치지점은 표준위치 요구조건을 고려하여 그림 4.23과 같이 코로나 케이지와 측정동 사이의 기상타워로 하였다.

표 4.3 기상요소 계측장치의 사양

Table 4.3 System specification for measuring weather condition

장치	형상	사양
온습도계		<ul style="list-style-type: none"> ○ 측정범위 : 온도 -40~+120°C, 습도 0~100 % ○ 허용오차 : 온도:±0.1°C, 습도 ±1 %RH ○ 출력사양 : 0~10 Full Scale Analog out ○ 전원 : 9.5 .. 15.5 VDC, 20 mA ○ 본체 재질 : 알루미늄 표면처리
풍향계		<ul style="list-style-type: none"> ○ 감지 방법 : 광전 방식 ○ 측정범위 : 0 .. 360 ° ○ 해상도 : 5.6 ° ○ 기동풍속 : < 0.4 m/s ○ 작동온도 : -50 .. +55°C ○ 전원 : 9.5 .. 15.5 VDC, 20 mA ○ 본체 재질 : 알루미늄 표면처리 ○ EMC : EN 50081-1, EN 50082-1
풍속계		<ul style="list-style-type: none"> ○ 감지 방법 : 광전 방식 ○ 측정범위: 0.4 .. 75 m/s ○ 해상도: 1 Hz ~ 0.1 m/s ○ 거리 상수 : 2.0 m ○ 기동풍속 : < 0.5 m/s ○ 작동온도 : -50 .. +55°C ○ 전원 : 9.5 .. 15.5 VDC, 20 mA ○ 본체 재질 : 알루미늄 표면처리 ○ 컵 재질: 탄소 섬유 ○ EMC : EN 50081-1, EN 50082-1



그림 4.23 기상요소 측정 전용 기상 Tower
 Fig. 4.23 Meteorological tower for measuring weather condition

4.3 전원 노이즈 대책

전원설비측의 고주파 잡음전류가 전원 인입선을 통해 실험전선으로 유입되어 측정오차를 발생시킬 수 있기 때문에, 이러한 불요잡음의 혼입을 억제하기 위해서 Choke Coil을 yoke 전단의 jumper부에 설치하였다. Choke Coil의 Inductance를 결정하기 위해서는 도체의 정전용량과 차단율을 고려해야 한다. 전원측의 노이즈 차단율 1/100로 하기 위해서 Coil의 인덕턴스 값은 도체의 정전용량 C 와 $\frac{1}{\omega C} > 1/100$ 의 관계를 가지면 전원측 노이즈를 차단할 수 있다. 코로나 케이지에서의 Choke Coil을 전원측에 설치했을 때의 등가회로를 그림 4.24에 나타냈다.

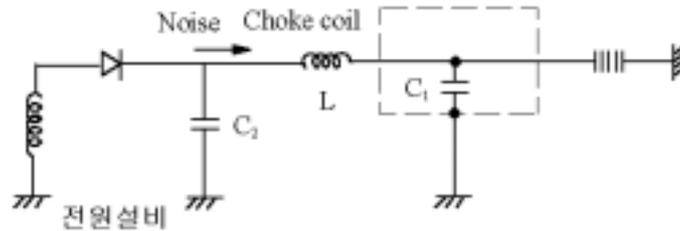


그림 4.24 코로나 케이지 및 전원계통 등가회로도
 Fig. 4.24 Equivalent circuit of cage and power equipment

그림 4.24에서 C_1 은 도체와 케이지간의 정전용량으로 C_1 이 작은 경우 전원설비의 노이즈를 차단하기 위해서는 큰 값의 인덕턴스가 필요하게 된다. 그러나 인덕턴스의 값이 크게 되면 Choke Coil의 크기도 크게 되어 코로나 케이지에 Choke Coil을 설치하는 것이 불가능 할 수도 있다. 이러한 경우는 코로나 케이지에 콘덴서(C_2)를 설치하면 작은 인덕턴스의 값으로 노이즈를 차단할 수 있기 때문에 설치에 용이한 사양의 Choke Coil을 제작하여 설치할 수 있다. 따라서 인덕턴스의 제작단가와 Choke Coil의 크기를 고려하여 적절한 C_2 를 설치할 수 있다.

직류 케이지에서 라디오 잡음 측정주파수 f 를 475 kHz에서 노이즈를 1/100(40 dB 감쇠)로 하기 위한 인덕턴스의 값은 $100/w^2c$ 로 계산하면 23.6 mH가 된다. 따라서 설치할 인덕턴스는 23.6 mH 이상이 되도록 20 cm 직경의 FRP에 직경 0.8 mm, 권선 수 600회로 제작하여 그림 4.25와 같이 전압 인가선에 설치하였다.



그림 4.25 전원측 불요잡음 차단용 Blocking Coil
 Fig. 4.25 Blocking coil for trapping unwanted noises from power supply

4.4 모의실험 및 분석용 DAS 개발

직류 코로나 케이지에서 발생하는 각종 장애항목을 수 시간 이상 자동으로 측정하기 위해 PC를 기반으로 한 DAS(Data Acquisition System)를 구축하였다. 본 절은 이러한 DAS가 어떠한 방법으로 PC상에서 각 측정장비들을 제어하고 데이터를 획득하는지를 소개하고 DAS의 Hardware와 운용 Software에 대해서 기술하였다.

4.4.1 DAS Hardware 구성

라디오 잡음, 텔레비전 잡음 측정기의 경우는 GPIB Port를 갖고 있기 때문에 GPIB Card를 통해 측정기를 제어하고, 코로나 소음 측정기는 GPIB Port가 없기 때문에 Serial 통신을 이용하였다. 한편 기상장비와 이온전류밀도, 코로나 전류는 각 센서의 단자전압을 DAQ(data acquisition) Board를 통해 측정하였다. 이와 같은 PC-based DAS 구성을 그림 4.26에 나타내었다.

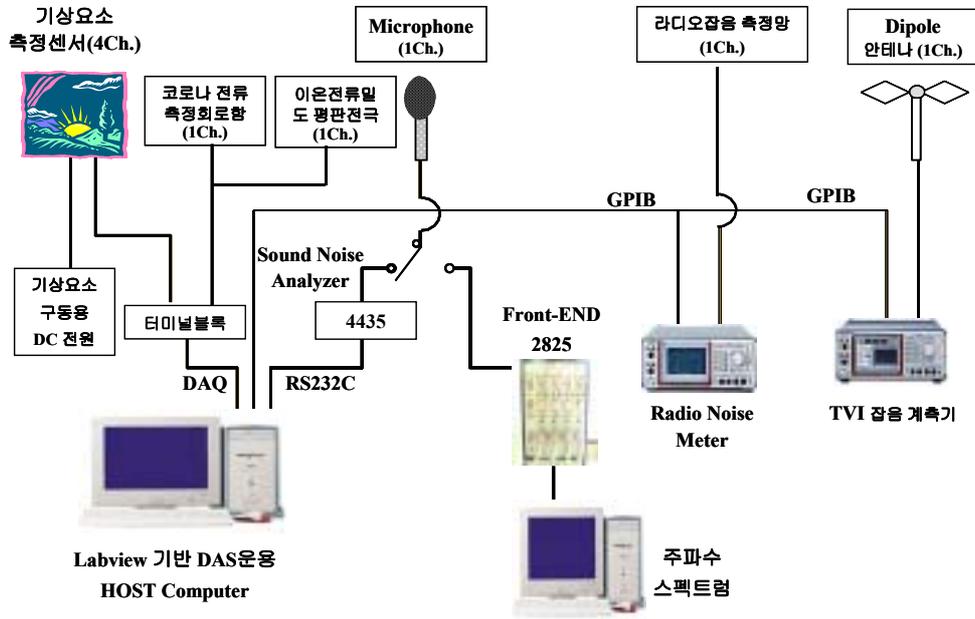


그림 4.26 PC-Based DAS 개념 설계도
 Fig. 4.26 Diagram of PC-Based DAS

(1) GPIB 통신

GPIB 통신을 하기 위해서는 우선 PC에 GPIB Card 및 케이블이 있어야 되고 대상 장비에는 GPIB Port가 있어야 된다. 또한 GPIB Card에 해당하는 드라이버가 PC에 설치되어 있어야 한다. 본 개발에서는 그래픽 언어인 LabView로 계측장비의 드라이버를 개발하여 장비와의 통신을 구현하였으며 사용된 구성품은 다음과 같다.

- PCI-GPIB Card
 - High-performance GPIB plug-in and external controllers
 - 8 Mbytes/s maximum transfer rates with PCI and HS488
 - Reduced development time using industry-standard NI-488.2 software

- Large assortment of GPIB support and accessory products
- GPIB solutions for OEMs
- GPIB Cable
 - Very flexible system
 - High-quality shielded GPIB cabling to meet your system needs
 - Optional rack-mount kits available
 - Cable adapters

(2) DAQ 하드웨어

일반적인 DAQ 시스템에는 3가지 유형의 기본적인 하드웨어 즉, 터미널 블록, 케이블 및 DAQ Device가 필요하다. 터미널 블록은 신호를 연결하기 위한 위치를 제공하며, 센서와의 연결단자와 DAQ Device에 케이블을 연결하기 위한 커넥터로 구성된다. DAQ Device는 신호를 주고받기 위해 I/O 커넥터, 컴퓨터 I/O 인터페이스 회로 및 실시간 시스템(RTSP)으로 구성된다. I/O 커넥터는 신호가 DAQ Device로 들어가고 나올 수 있도록 해주는 수단을 제공한다. I/O 커넥터에는 Device에 따라 핀(pin)수가 다르며, 케이블의 한쪽은 I/O 커넥터에 연결하고 다른 쪽은 터미널 블록에 연결한다. 컴퓨터 I/O 인터페이스 회로는 DAQ Device와 컴퓨터 간에 정보가 입출력 되도록 한다. 실시간 시스템 통합(RTSP) bus는 동일 컴퓨터에서 여러 DAQ Device 사이에 신호를 공유하고 동기화 시킨다.

터미널 블록에서 케이블을 통해 DAQ Device로 전달된 아날로그 입력 신호는 I/O 커넥터의 아날로그 입력회로를 통과한 후 아날로그-디지털(A/D) converter로 들어간다. A/D converter는 아날로그 전압을 컴퓨터 I/O 인터페이스 회로를 통해 디지털 수치로 변환한다. 본 개발의 기상요소 및 이온전류밀도, 코로나 전류를 측정하기 위해 이용된 DAQ 구성품

은 다음과 같다.

- NI PCI-6013
 - 8 digital I/O lines; two 24-bit counters; digital triggering
 - Basic functionality for simple applications or OEM products
 - Superior integration – LabVIEW, CVI, and Measurement Studio for Visual Basic and
 - FREE award-winning global services and support
 - NI-DAQ Measurement Services to simplify configuration and measurements

- CB-68LP
 - Low-cost accessory with 68 screw terminals for easily connecting to 68-pin DAQ devices
 - Metal standoff feet for use on a desktop or mounting on a custom panel
 - Vertical mounted 68-pin connector
 - Dimensions: 7.6 by 16.2 cm (3.0 by 6.4 in.)

- R6868
 - 68-pin connector on each end
 - 1 m length
 - Download datasheet for compatibility charts, more detailed descriptions, and ordering information

- Personal Computer
 - Pentium 4 2.4GHz CPU
 - DDR 256Mbyte Memory
 - 80GByte HDD
 - Windows XP Home Edition

4.4.2 DAS 운용 및 Database 처리 프로그램

각 계측장비를 제어하기 위한 구동 드라이버와 데이터를 측정하고 저장하기 위해 사용한 DAS 운용 Software는 National Instruments사의 그래픽 언어인 LabView Version 7.0 Express를 이용하였다. 또한 저장된 파일을 분석하기 위한 Tool도 LabView를 이용하여 구성하였다. LabView(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)는 oscilloscope, multi-meter, function generator 등과 같은 실제 장비(instrument)를 모방하여 작동시키는 프로그램이다. 따라서 가상장비(VI : virtual instrument)라고도 불리어 지며, 실제 신호에 대한 입, 출력을 가상장비를 통해 프로그래밍 함으로서 실제 하드웨어에 대한 신호획득 및 제어를 가능하게 한다. 따라서 데이터의 수집, 분석, 표시 및 저장 등을 하기 위한 광범위한 도구로 많이 사용되고 있다^[29].

개발된 DAS 운용 Software는 크게 두 가지 모듈(module)로 구성하였으며, 각 모듈의 기능은 아래와 같다.

① ‘직류 코로나 케이지 환경모의시험 프로그램’

라디오 잡음 등 4가지 코로나 장애항목과 기상요소 4개 요소를 동시에 측정, 표시 및 저장 기능

② ‘직류 코로나 케이지 데이터베이스 처리프로그램’

저장된 데이터 파일을 불러와 유효조건 별로 분석할 수 있도록 통

계적으로 처리하는 기능

(1) 선로환경 모의시험 프로그램

초기화면에서 ‘선로환경 모의시험 프로그램’ module 을 실행하면 그림 4.27과 같이 코로나 장애항목과 기상요소를 측정할 수 있는 프로그램 창이 나타난다. ‘선로환경 모의시험 프로그램’에서는 다음과 같은 기능을 수행한다.

(가) 공통사항

- ① 실험 일시 및 조건 입력: 저장파일의 header 부분에 저장됨
- ② 실시간 장애량, 기상요소 측정값 및 간이 통계처리 값 Display
⇒ 그래프 및 Text로 표시되며, 저장되는 데이터를 Table을 통해 실시간으로 Display
- ③ 이상신호 발생 시 항목별 alarm 표시 (예: 풍속 5m/s이상 데이터 계측 시 풍속 경고등 On)

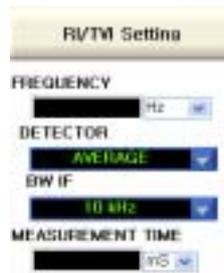
(나) 코로나 장애항목

- ① 측정하고자 하는 항목 선택
- ② 측정(표시)주기와 저장주기 선택
- ③ 파일에 저장되는 데이터 수 표시
- ④ Setting: 장애항목의 계측기 동작조건 조정 (예, 측정주파수, Detector 등)

그림 4.27에서 각 장애항목의 Setting 버튼을 클릭 하게 되면 그림 4.28과 같은 sub window가 생성되어 각 계측기의 동작조건을 변경하면서 측정할 수 있다.



그림 4.27 직류 코로나 케이지 환경모의시험 프로그램 (실험조건 입력 mode)
 Fig. 4.27 DC Corona cage simulation program (mode to input testing condition)



(a) RI/TVI 계측기



(b) AN 계측기

그림 4.28 계측기 측정조건 변경하기 위한 Window
 Fig. 4.28 Window to set menu of measuring instrument

(다) 기상요소

- ① 측정하고자 하는 기상요소 선택
- ② 측정(표시)주기와 저장주기 선택
- ③ 파일에 저장되는 데이터 수 표시

그림 4.27의 프로그램 창을 불러와 실험조건, 장애항목 및 기상요소별 측정조건을 선택하여 시작 버튼을 클릭하면 프로그램은 실행하게 된다. 그림 4.29는 실제 운용의 예로써 실시간으로 장애항목과 기상요소가 측정되는 화면을 나타낸 것이다. 측정과 동시에 파일은 저장되지만 장애항목과 기상요소의 저장파일의 저장주기가 다를 수 있기 때문에 저장파일은 장애요소만 저장되는 파일과 기상요소만 저장되는 파일이 각각 생성되도록 했다. 그림 4.30에는 ‘직류 코로나 케이지 환경모의시험 프로그램’을 종료 후 기상요소와 장애항목을 하나의 파일로 시간을 동기화하여 저장한 파일의 일례를 나타내었다.

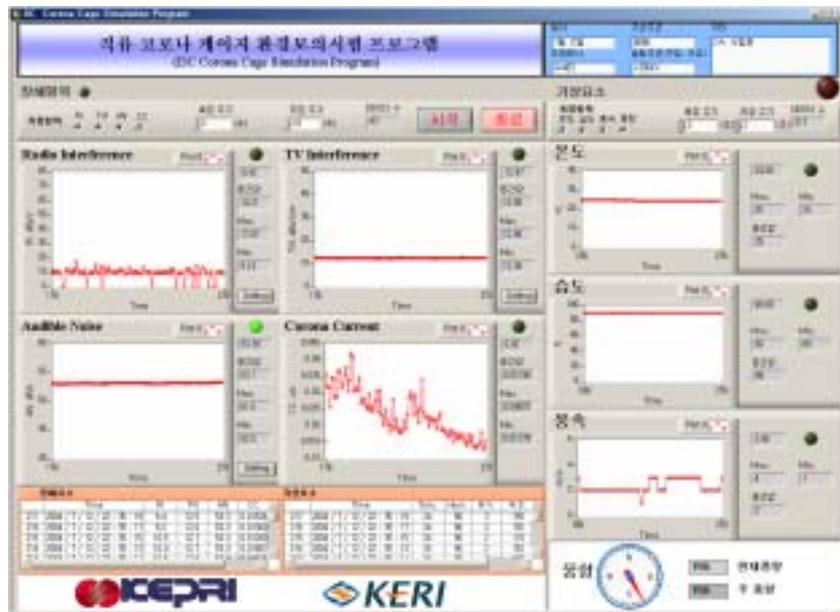


그림 4.29 직류 코로나 케이지 환경모의시험 프로그램 (실행 mode)
 Fig. 4.29 DC corona cage simulation program(running mode)

일시 7월5일 도체방식: 483 기상조건: 맑음 후 흐림 실험조건(전압, 극성): +500 kV 기타: 배경소음 큼										
	Time	RI	TVI	AN	CC	Tem.	Hum.	W.V.	W.D.	
1	2005 / 7 / 5 / 19 : 23 : 24	12.7	12.6	58.1	0.751	28	57	0	310	
2	2005 / 7 / 5 / 19 : 23 : 34	12.8	12.7	48.0	1.46	28	57	0	218	
3	2005 / 7 / 5 / 19 : 23 : 44	12.7	12.6	45.5	2.063	28	57	0	252	
4	2005 / 7 / 5 / 19 : 23 : 54	12.7	12.6	46.8	2.452	28	57	0	243	
5	2005 / 7 / 5 / 19 : 24 : 4	12.6	12.8	45.8	2.308	28	57	5	232	
6	2005 / 7 / 5 / 19 : 24 : 14	12.6	12.6	56.3	2.445	28	57	2	199	
7	2005 / 7 / 5 / 19 : 24 : 24	12.7	12.6	58.2	2.573	28	60	1	221	
8	2005 / 7 / 5 / 19 : 24 : 34	12.6	12.7	46.1	2.64	28	85	2	210	

그림 4.30 시간동기화 후의 최종 저장파일
 Fig. 4.30 Final saved file after synchronization

(2) 데이터베이스 처리 프로그램

그림 4.31에는 장해항목별 누적분포도와 기상요소와의 상관성을 파악할 수 있는 프로그램 창을 나타내었다. 본 프로그램에서는 다음과 같은 기능을 수행한다.

- 장해항목 선택 : 분석하고자하는 장해항목을 선택
- 유효조건 선택
 - A: 분석하고자 하는 장해량의 최대값과 최소값을 선택하여 불필요한 데이터를 버림(discard)
 - B: 풍속의 상한값을 설정하여 임계풍속 이상의 데이터를 버림
 - C: 습도의 상한값을 설정하여 임계습도 이상의 데이터를 버림
- 유효기준 적용 후 남은 유효데이터 수 표시
- 처리된 장해항목의 누적분포도 그래프 표시

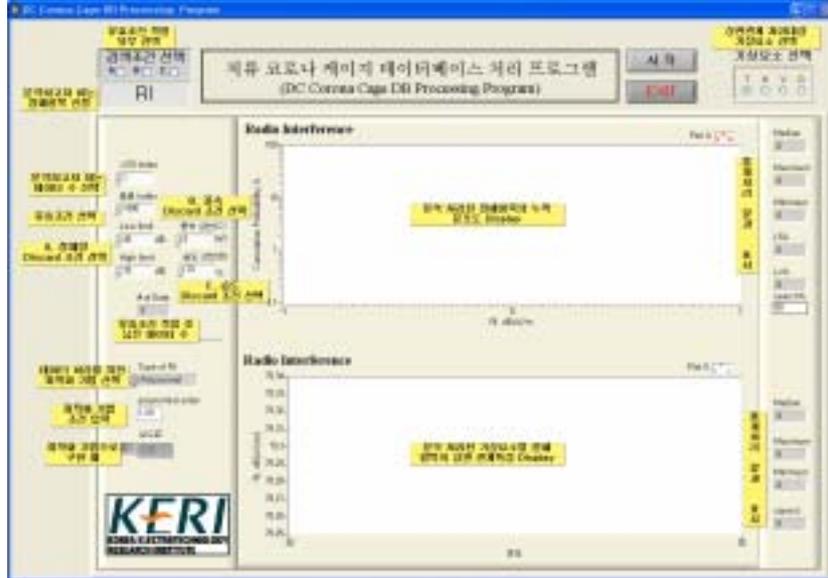


그림 4.31 직류 코로나 케이지 데이터베이스 처리 프로그램
 Fig. 4.31 DC corona cage DB processing program

- 장해항목의 통계처리 결과치 Text 표시
- 각 기상요소와 장해항목 간의 상관관계그래프 표시
- 상관관계 데이터를 기초로 최적화식 구함
 - 최적화기법 선택가능: Linear, Exponential, Polynomial

따라서 '코로나 케이지 환경모의시험 프로그램'을 이용하여 생성한 저장파일을 불러 분석하고자 하는 항목을 선택하고 유효조건을 적용하면 DB 처리결과를 얻을 수 있다. 이와 같이 '데이터베이스 통계처리 프로그램'을 통하여 얻을 수 있는 항목들을 라디오 잡음의 예로 하여 표 4.4에 나타내었다. 따라서 텔레비전 잡음, 코로나 소음, 코로나 전류, 이온전류밀도도 표 4.4에 정리된 처리 결과값을 각각 얻을 수 있다. 이상과 같이 수 시간동안의 장기 케이지 시험을 수행하기 위해 구축된 DAS의 현장 설치 장면을 그림 4.32에 나타내었다.

표 4.4 데이터베이스 통계처리 프로그램 처리 항목
Table 4.4 The items for DB processing program

장해 항목	데이터 종류	처 리 결 과	표현 방식
라 디 오 잡 음	라디오 장해 Raw data	<ul style="list-style-type: none"> • 최대값, 최소값, 중간값, 누적분포%값, 데이터 수 	그래프 및 Text 형식
	유효조건 적용 후 라디오 잡음 data	<ul style="list-style-type: none"> • 회망 분석시간의 해당 데이터 만 추출 • 유효조건 A, B, C를 and 또는 or 조건으로 적용한 최대값, 최소값, 중간값, 누적분포 % 	
	라디오 잡음 對 기상요소 Raw data	<ul style="list-style-type: none"> • 측정시간 동안 변화된 기상요소에 따른 라디오 잡음의 최대값, 최소값, 중간값, 누적분포 %값 및 데이터 수 • 선택된 최적화 기법에 따라 기상요소 변화에 따른 라디오 잡음 최적화식 구함 	
	유효조건 적용 후 라디오 잡음 對 기상요소 data	<ul style="list-style-type: none"> • 회망 분석시간의 해당 데이터 만 추출 • 측정시간 동안 변화된 기상요소와 유효조건 A, B, C를 and 또는 or 조건으로 적용한 기상요소 변화에 따른 라디오 잡음의 최대값, 최소값, 중간값, 누적분포 %값 및 데이터 수 • 유효조건 A, B, C를 and 또는 or 조건으로 적용하고 선택된 최적화기법에 의해 기상요소 변화에 따른 라디오 잡음 최적화식 구함 	



그림 4.32 직류 코로나 케이지 DAS 구축 장면
Fig. 4.32 Picture of DC corona cage DAS

제 5 장 최적도체방식 선정 및 무한선로 환산

5.1 실험 결과 및 평가

전력수송 능력의 관점에서 제반 조건을 만족하는 6×480(C) mm², 4×810 mm², 6×810 mm² 등 3종의 복도체 방식을 후보도체방식으로 선정하여 코로나 케이지에서 코로나 및 이온류 특성실험을 수행하였다. 코로나 케이지 모의실험에서 측정항목은 라디오 잡음, 텔레비전 잡음, 코로나 소음, 코로나 전류, 이온전류밀도 및 기상요소 등이며, 각 후보도체방식별로 5~10회 실험하여 얻은 결과를 통계적으로 처리하여 분석하였다. 표 5.1에서 각 후보도체방식별로 유효한 실험 횟수와 유효 데이터 수를 정리했다.

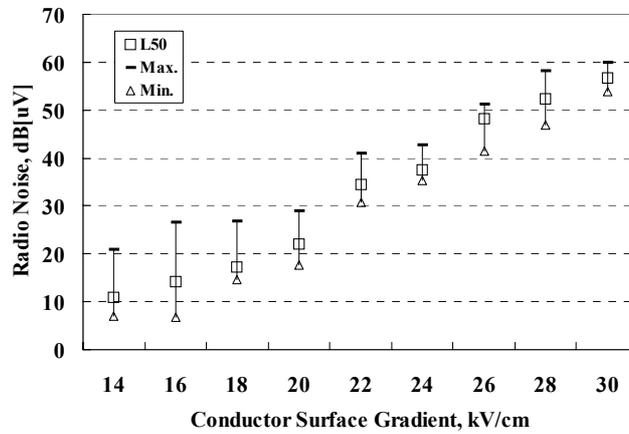
표 5.1 후보도체방식 별 코로나 케이지 모의실험 현황

Table 5.1 Present state of corona cage simulation among candidate bundle types

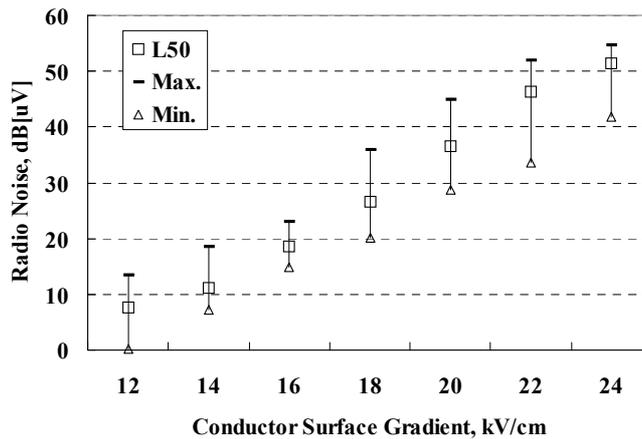
도체방식	실험횟수			유효 Data 수
	전압특성 실험	장기 실험	강우 실험	
6×480(C) mm ²	17회	4회	1회	11,217
4×810 mm ²	3회	1회	1회	2,410
6×810 mm ²	4회	2회	1회	2,060

5.1.1 라디오 잡음

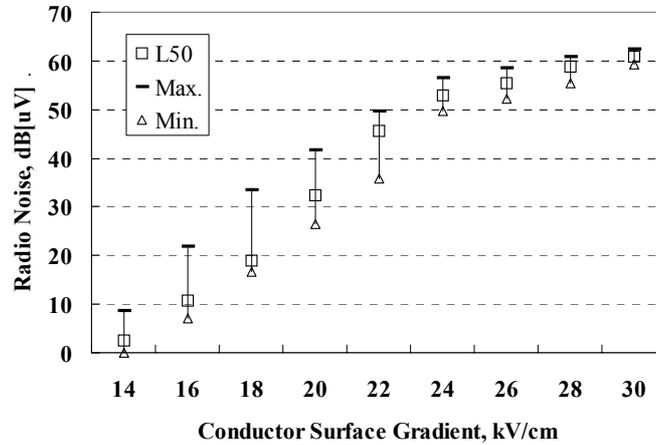
그림 5.1에는 각 후도도체방식을 케이지에 가선하고 후보도체의 표면 전계강도가 12~30 kV/cm가 되도록 인가전압을 가변했을 때의 라디오 잡음 발생특성을 나타내었다. 도체표면전계강도가 상승할수록 라디오 잡음은 증가하였으며, 전계강도가 높은 경우는 코로나 방전의 발생분포가 안정적으로 되어 최대값과 최소값의 차이가 작아졌다.



(a) 6×480(C) mm²



(b) 6×810 mm²



(c) $4 \times 810 \text{ mm}^2$

그림 5.1 도체표면 전계강도별 라디오 잡음특성

Fig. 5.1 Radio noise level versus conductor surface gradient

그림 5.2에는 세 가지 후보도체방식의 코로나 케이지 인가전압별 라디오잡음 발생함수(P)를 나타내었다. 코로나 케이지 인가전압을 상승함에 따라 라디오잡음 발생함수는 모두 증가하였으며, 라디오 잡음발생함수 크기가 $4 \times 810 \text{ mm}^2$, $6 \times 480(\text{C}) \text{ mm}^2$, $6 \times 810 \text{ mm}^2$ 순으로 나타나 $6 \times 810 \text{ mm}^2$ 방식이 라디오 잡음 관점에서 가장 친환경적인 도체방식으로 나타났다. 또한 각 후보도체방식에 $\pm 500 \text{ kV}$ 상용선로에 해당하는 도체표면 전계강도를 코로나 케이지에서 모의하여 약 3시간 이상 장기 측정된 결과를 그림 5.3에 나타내었다. 장기적으로 측정된 결과 $6 \times 480(\text{C}) \text{ mm}^2$ 가 $6 \times 810 \text{ mm}^2$ 보다 약간 크게 나타났고, $4 \times 810 \text{ mm}^2$ 방식의 잡음이 가장 크게 발생되어 $6 \times 810 \text{ mm}^2$ 도체방식이 전기환경 면에서 보다 적합한 것을 재확인했다.

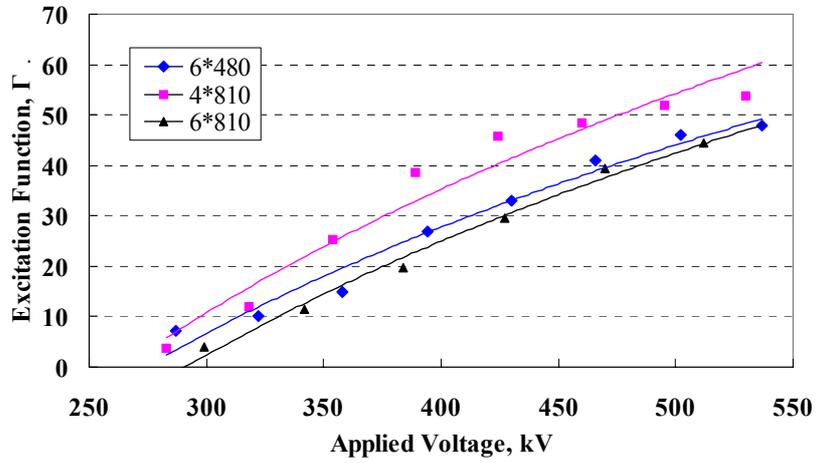


그림 5.2 코로나 케이지 인가전압별 라디오 잡음발생함수 Γ
 Fig. 5.2 Excitation function Γ versus applied voltage at cage

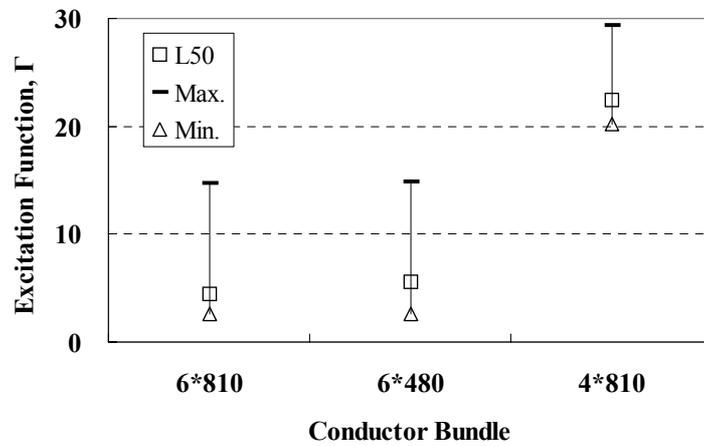


그림 5.3 후보도체방식별 라디오 잡음발생함수 Γ 비교
 Fig. 5.3 Comparison of excitation function Γ among candidate bundle types

그림 5.4에는 기상조건별 라디오 잡음 발생특성을 나타내었다. 동일 도체표면 전계강도에서 청명시에 강우시보다 라디오 잡음 발생이 약 10 ~ 12 dB정도 크게 나타났다. 이러한 현상은 강우 시 도체에 부착되는 물방울(水滴) 주변에서의 이온발생 차이에 기인한 것으로 판단된다. 도체상에 물방울이 부착되면 낮은 도체표면 전위경도에서도 코로나가 쉽게 발생된다. 일반적으로 DC 상용선로의 코로나 개시전계는 15~25 kV/cm인데, 송전선로에 물방울이 부착되면 코로나 개시전계는 6~10 kV/cm로 낮아진다. 강우 시 직류 도체의 표면 근방에서의 공기 이온화는 매우 활성화되어 상당한 양의 공간전하가 발생된다. 이 공간전하가 이온 발생을 증가시키고, 도체 주변에 상당히 균일한 이온층(ion cloud)이 형성된다. 따라서 이러한 이온층이 도체의 직경을 커지게 하는 효과를 나타내어, 물방울이 부착된 도체의 개시전계는 상대적으로 낮은 도체표면 전계강도 상태가 된다^[28]. HVDC 이러한 조건에서의 코로나는 청명시의 코로나만큼 매우 강하고 시끄럽지 않기 때문에 강우시의 라디오 잡음이 청명시보다도 적게 발생하는 것으로 판단된다.

그림 5.5에서 그림 5.7에는 일정한 도체표면 전계강도인 조건에서 기상 변화에 따른 라디오 잡음특성을 나타내었다. 기상조건 변화에 대한 라디오 잡음량은 실증시험선로에서 수개월 이상의 장기간 데이터를 분석해야만 신뢰성 있게 평가할 수 있다. 그러나 시험선로에 의한 실험은 시간적, 경제적인 문제점이 있기 때문에 코로나 케이지에서 수행한 단기간 간이실험 결과, 도체의 기상조건이 변화해도 라디오 잡음량은 크게 변화하지 않아 온도, 습도, 풍속 등의 기상조건 변화가 라디오 잡음 발생량에는 큰 영향을 미치지 않았지만 상대습도가 낮고, 온도가 높을수록 약간 상승하는 결과를 나타냈다.

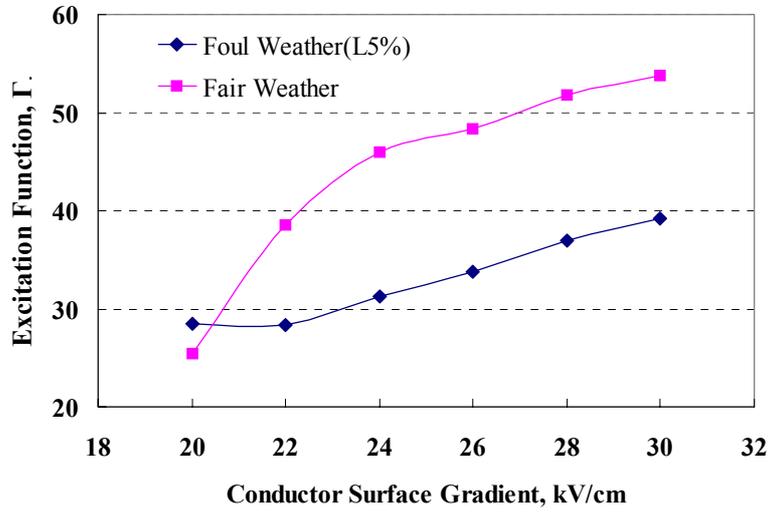


그림 5.4 기상조건별 라디오 잡음발생함수 Γ 비교 ($4 \times 810 \text{ mm}^2$)
 Fig. 5.4 Comparison of excitation function Γ between fair weather and heavy rain ($4 \times 810 \text{ mm}^2$)

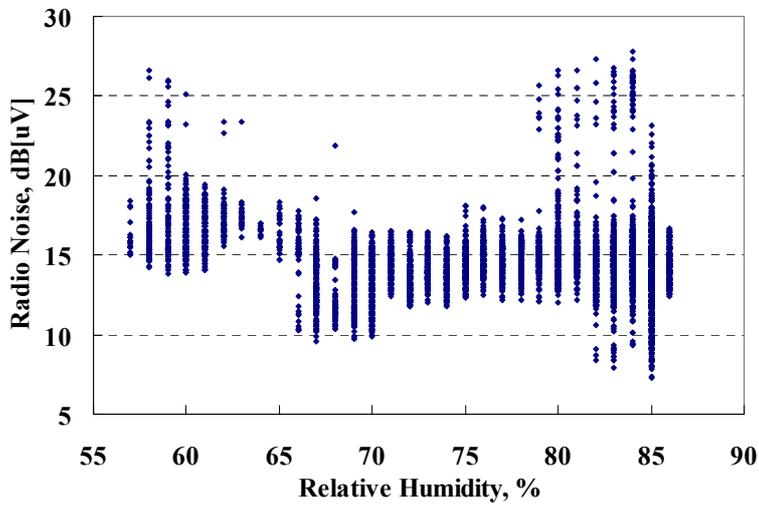


그림 5.5 상대습도 변화에 따른 라디오 잡음강도 ($6 \times 480 \text{ (C) mm}^2$)
 Fig. 5.5 Relative humidity versus radio noise level ($6 \times 480 \text{ (C) mm}^2$)

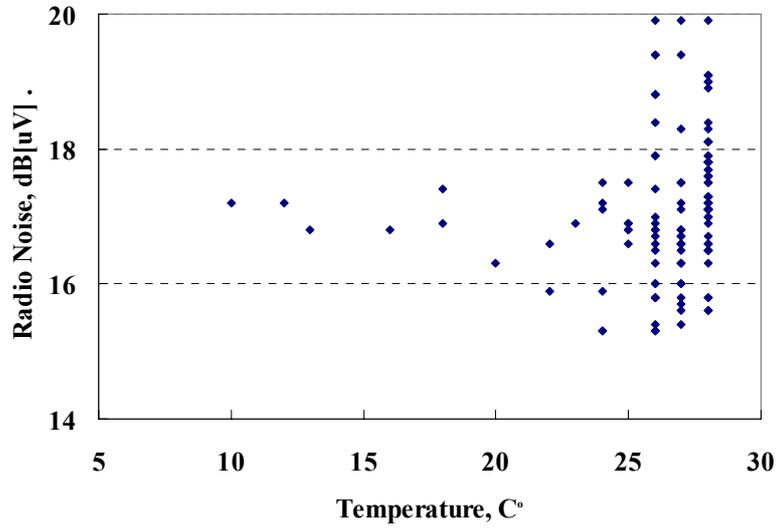


그림 5.6 온도 변화에 따른 라디오 잡음강도 ($6 \times 480(C) \text{ mm}^2$)
 Fig. 5.6 Temperature versus radio noise level ($6 \times 480(C) \text{ mm}^2$)

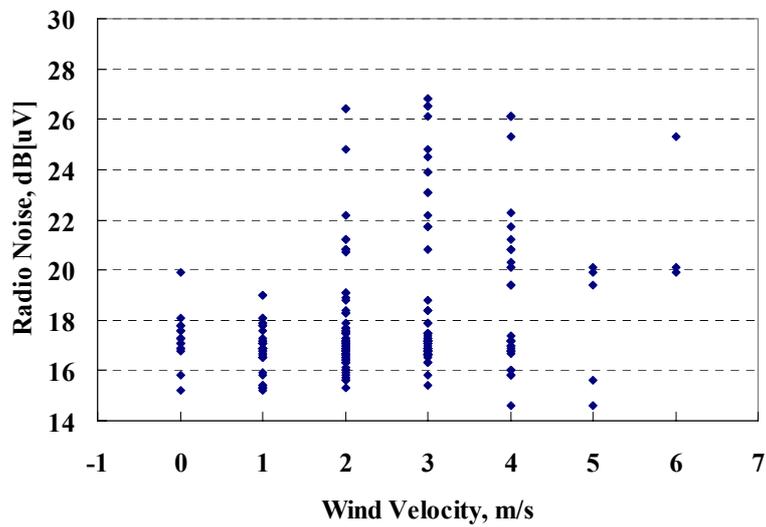
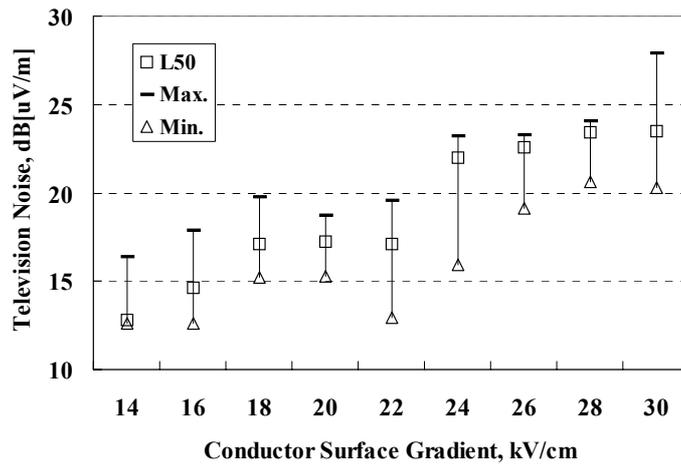


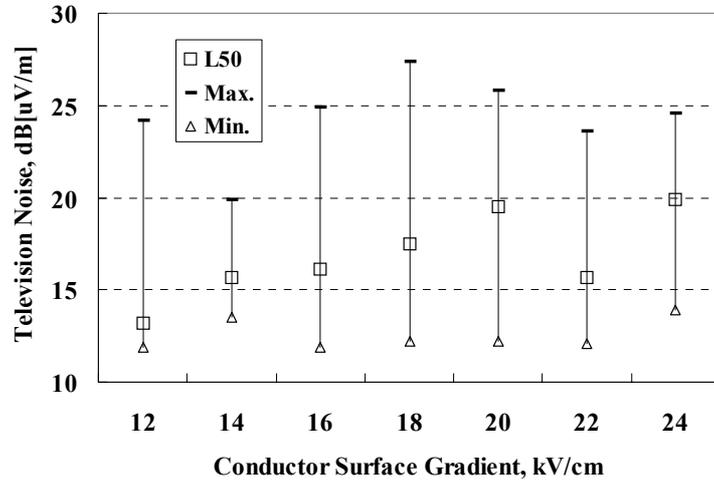
그림 5.7 풍속 변화에 따른 라디오 잡음강도 ($6 \times 480(C) \text{ mm}^2$)
 Fig. 5.7 Wind direction versus radio noise level ($6 \times 480(C) \text{ mm}^2$)

5.1.2 텔레비전 잡음

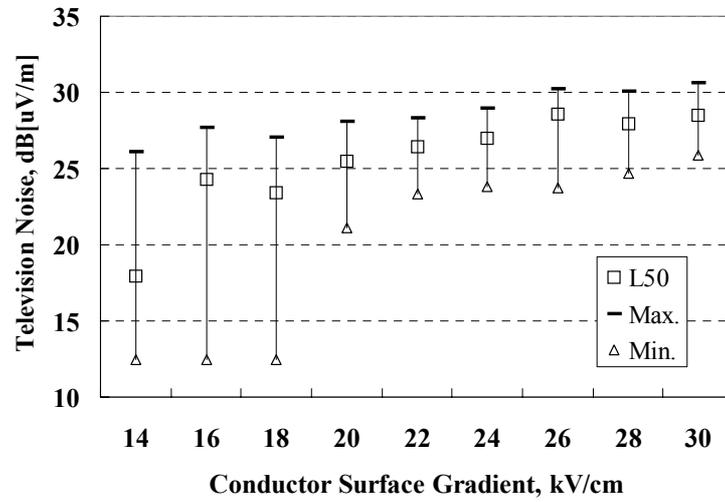
그림 5.8에는 각 후보도체방식을 케이지에 가선하고 후보도체의 표면 전계강도가 12~30 kV/cm가 되도록 인가전압을 가변했을 때의 텔레비전 잡음 발생특성을 나타내었다. 도체표면 전계강도가 상승할수록 텔레비전 잡음발생의 변화는 라디오 잡음보다 영향이 작은 것으로 나타났으며, 동일한 도체표면 전계강도에서의 최대값과 최소값 편차가 크게 나타났다. 특히 6×810 mm² 도체방식의 경우는 최대값과 최소값 편차도 크고 다른 후보도체방식의 경우보다 도체표면 전계강도 변화에 대한 영향이 작게 나타났다. 일반적으로 도체에서 발생하는 코로나 방전 시 텔레비전 잡음은 라디오 잡음에 비해 고주파이며 잡음의 크기가 매우 작다. 실제로 상용선로의 경우 텔레비전 잡음을 발생시키는 발생원은 선로의 도체보다 애자 및 금구류 등에 의한 갭(gap) 방전이 지배적이다. 따라서 텔레비전 잡음 측정은 라디오 잡음보다 용이하지 않으며, 재현성이 낮아 최대값과 최소값의 편차가 크게 나타나는 것으로 판단된다.



(a) 6×480(C) mm²



(b) $6 \times 810 \text{ mm}^2$



(c) $4 \times 810 \text{ mm}^2$

그림 5.8 도체표면 전계강도별 텔레비전 잡음 특성

Fig. 5.8 Television noise level versus conductor surface gradient

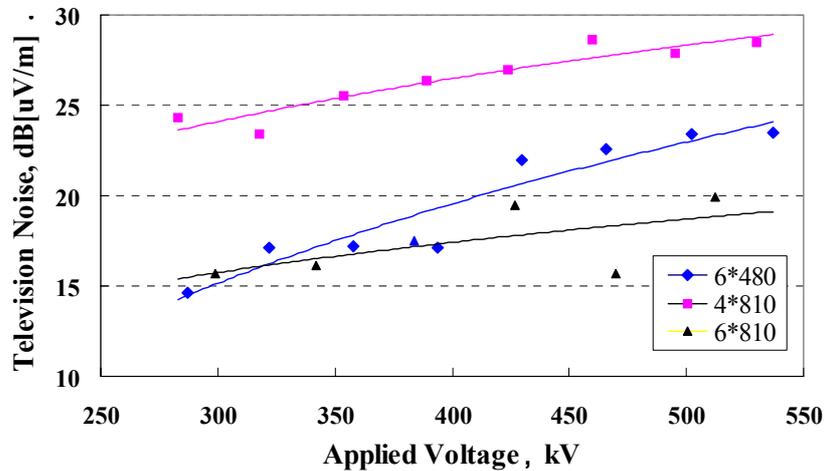


그림 5.9 코로나 케이지 인가전압별 텔레비전 잡음
 Fig. 5.9 Television noise versus applied voltage at cage

그림 5.9는 3개 후보도체방식의 코로나 케이지 인가전압별 텔레비전 잡음을 비교한 것이다. 텔레비전 잡음 크기도 4×810 mm², 6×480(C) mm², 6×810 mm² 순으로 나타나 6×810 mm² 도체방식이 텔레비전 잡음 관점에서 가장 친환경적인 것으로 나타났다.

그림 5.10에는 각 후보도체방식에 ±500 kV 상용선로에 해당되는 도체 표면 전기장도를 코로나 케이지에서 모의하여 약 3시간 이상 장기 측정 한 결과이다. 장기측정결과 또한 4×810 mm² 도체방식이 가장 잡음이 크게 발생되었으며, 세 가지 후보도체방식 중에 6×810 mm² 도체방식이 텔레비전 잡음 관점에서 보다 적합한 것을 재확인했다.

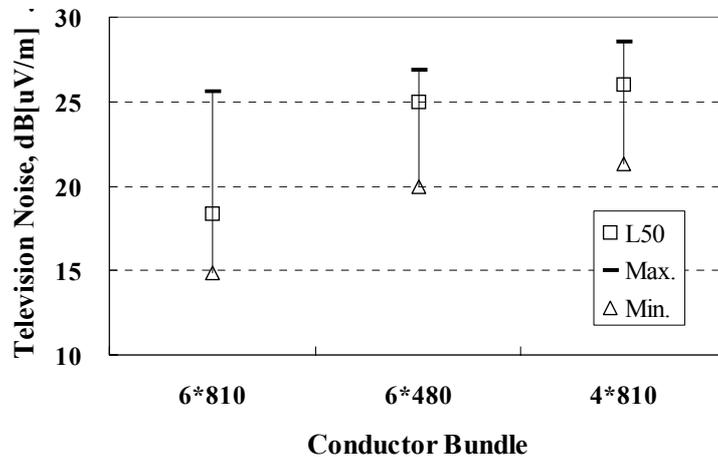


그림 5.10 후보도체방식별 텔레비전 잡음 발생량 비교
 Fig. 5.10 Comparison of television noise among candidate bundle types

그림 5.11에는 기상조건별 텔레비전 잡음 발생특성을 나타내었다. 동일 도체표면 전계강도에서 강우시에 청명시보다 텔레비전 잡음 발생이 크게 나타났다. 그러나 청명시와 강우시 간의 잡음 발생량 차이가 근소하여 강우의 경우가 청명시보다 항상 텔레비전 잡음 발생량이 크게 발생한다고 단정할 수 없는 결과를 얻었다. 따라서 텔레비전 잡음의 경우 강우 시 선로에 형성되는 물방울의 영향은 무시할 수 있는 정도로 작은 것으로 판단된다. 그림 5.12에는 일정한 도체표면 전계강도인 조건에서 습도변화에 따른 라디오 잡음특성을 나타내었다. 상대습도 변화에 따른 텔레비전 잡음량의 변화는 거의 없는 것으로 나타났고, 또한 온도, 풍속과 같은 기상 조건의 변화에도 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

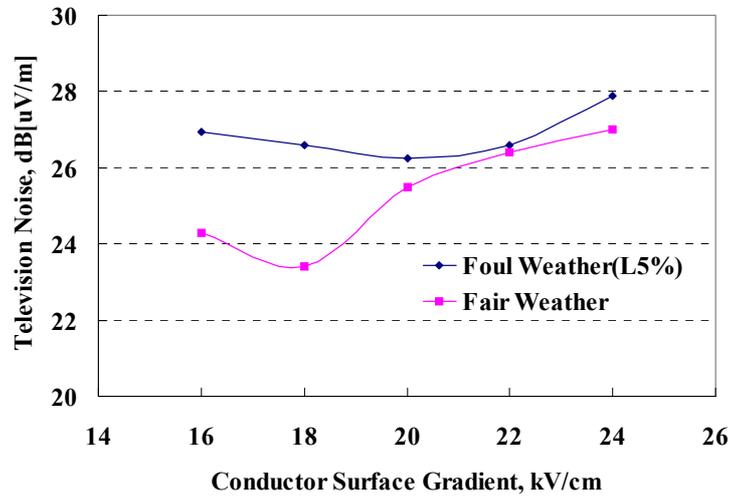


그림 5.11 기상조건별 텔레비전 잡음 발생특성 ($4 \times 810 \text{ mm}^2$)
 Fig. 5.11 Comparison of television noise between fair weather and heavy rain ($4 \times 810 \text{ mm}^2$)

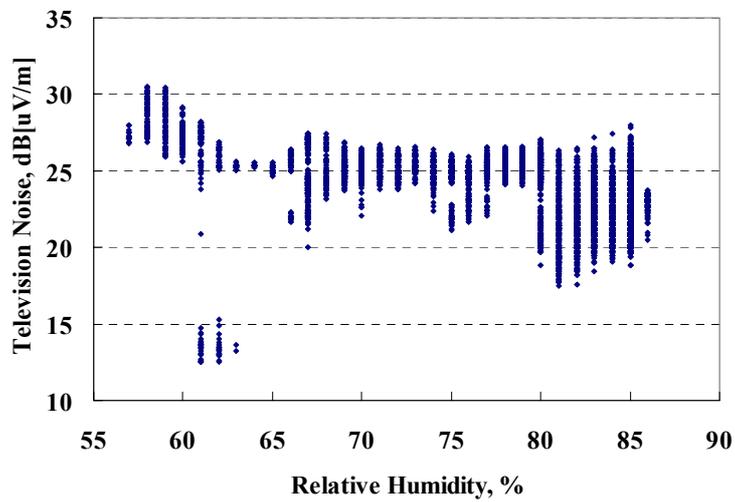
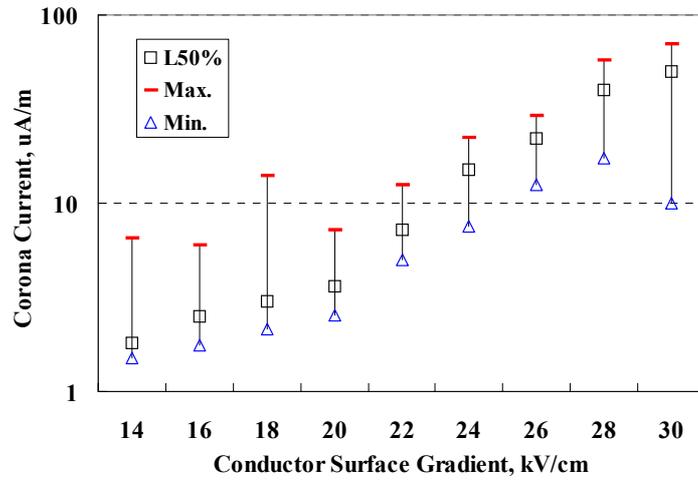


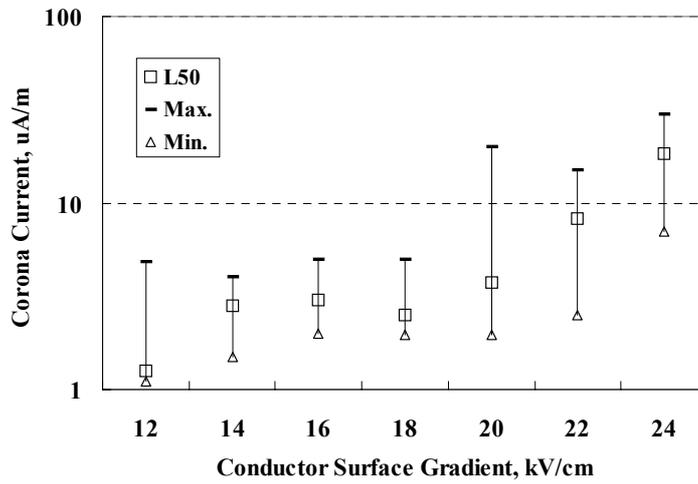
그림 5.12 상대습도 변화에 따른 텔레비전 잡음강도 ($6 \times 480 \text{ (C) mm}^2$)
 Fig. 5.12 Relative humidity versus television noise level ($6 \times 480 \text{ (C) mm}^2$)

5.1.3 코로나 전류

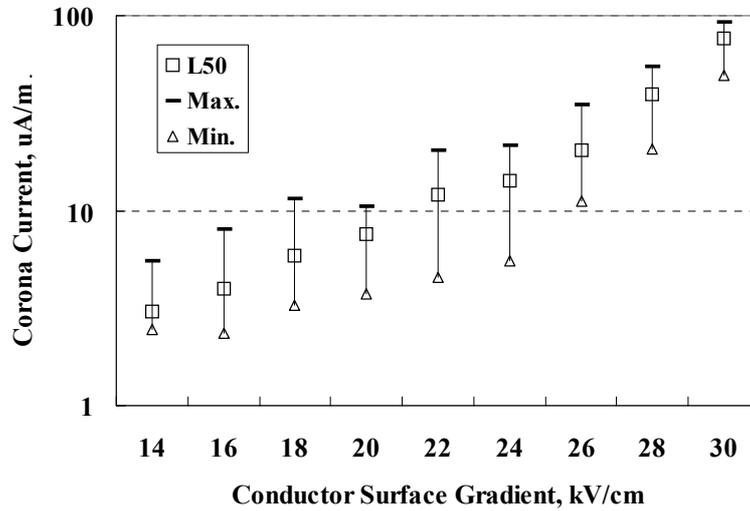
그림 5.13에는 각 후도도체방식을 케이지에 가선하고 후보도체의 표면 전계강도가 12~30 kV/cm가 되도록 인가전압을 가변했을 때의 코로나 전류 발생특성을 나타내었다.



(a) 6×480(C) mm²



(b) 6×810 mm²



(c) 4×810 mm²

그림 5.13 도체표면 전계강도별 코로나 전류

Fig. 5.13 Conductor surface gradient versus corona current

측정값은 측정시기의 기상조건에 따라서 다른 장해항목보다도 많은 영향을 받았으나, 유사한 기상조건에서는 코로나 케이지 인가전압을 상승함에 따라 코로나 전류도 증가하였다.

그림 5.14에는 세 가지 후보도체방식의 코로나 케이지 인가전압별 코로나 전류 발생량을 나타내었다. 코로나 케이지 인가전압을 상승함에 따라 모든 후보도체방식의 코로나 전류 발생은 증가하였으며, 4×810 mm²와 6×480(C) mm² 도체방식의 코로나 전류는 거의 유사한 발생량을 나타냈고, 6×810 mm²방식이 코로나 전류 발생 면에서 보다 경제적인 것으로 나타났다.

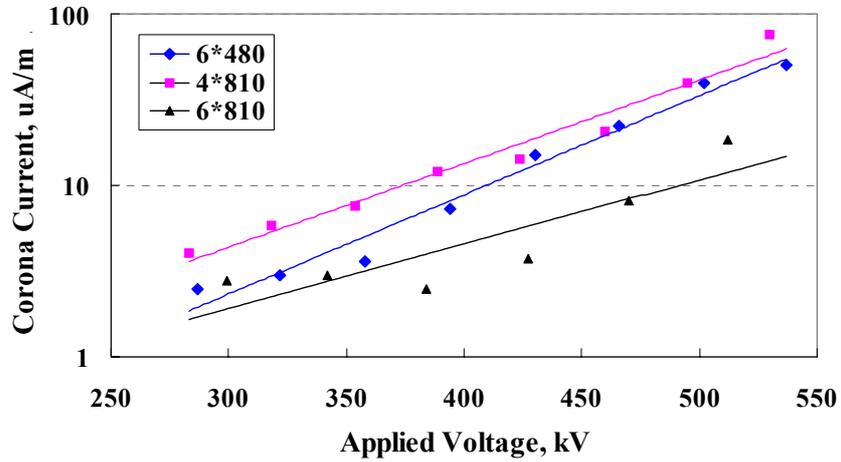


그림 5.14 코로나 케이지 인가전압별 코로나 전류 발생량
 Fig. 5.14 Corona current versus applied voltage at corona cage

그림 5.15에는 각 후보도체방식에 ± 500 kV 상용선로에 해당되는 도체 표면 전계강도를 코로나 케이지에서 모의하여 약 3시간 이상 측정된 결과를 나타내었다. 장기적으로 측정된 결과, $6 \times 480 \text{ mm}^2$ 와 $6 \times 810 \text{ mm}^2$ 도체방식과의 차이값이 2 uA/m 이하로서 ± 500 kV 상용선로에 해당되는 도체표면 전계강도에서 코로나 전류는 거의 동일한 발생량을 보였지만, $6 \times 810 \text{ mm}^2$ 도체방식의 코로나 전류가 가장 작게 발생됨을 알 수 있다.

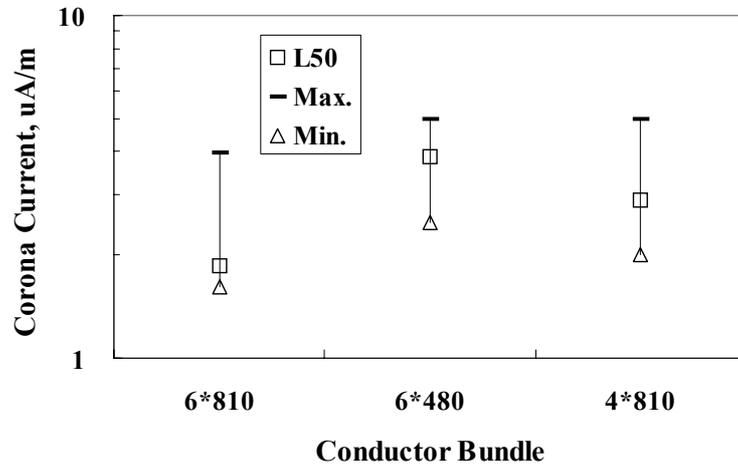


그림 5.15 장시간 측정에 의한 후보도체방식별 코로나 전류 비교
 Fig. 5.15 Comparison of corona current among candidate bundle types

그림 5.16에는 기상조건별 코로나 전류 발생특성을 나타내었다. 동일 도체표면 전계강도에서 강우시가 청명시보다 코로나 전류 발생이 약 10~20배 크게 나타났다. 이는 강우 시 도체에 부착되는 물방울(水滴)에 의해 코로나가 쉽게 발생하여 코로나 전류의 발생량이 증가된 것으로 판단된다.

그림 5.17에는 일정한 도체표면 전계강도인 조건에서 습도변화에 따른 코로나 전류 발생 특성을 나타내었다. 상대습도 변화에 따른 코로나 전류 발생량의 변화도 거의 없는 것으로 나타났고, 온도, 풍속과 같은 기상 조건의 변화에도 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

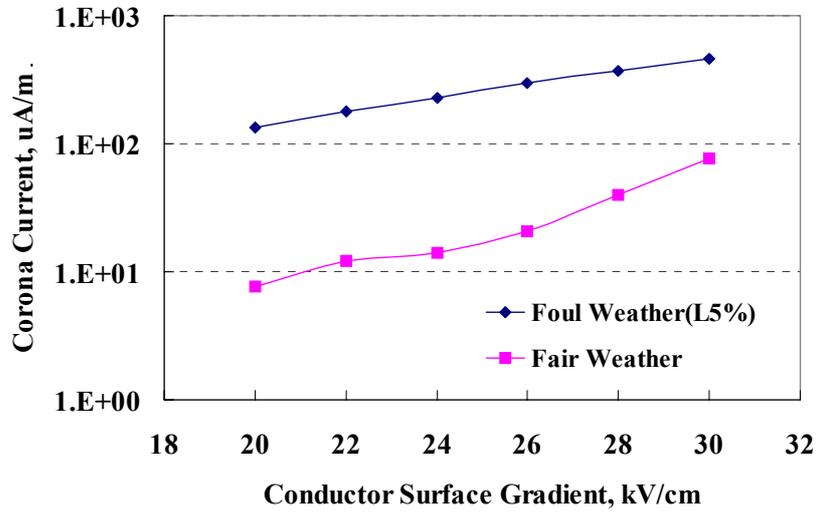


그림 5.16 기상조건별 코로나 전류 비교 (4×810 mm²)
 Fig. 5.16 Comparison of corona current between fair weather and heavy rain (4×810 mm²)

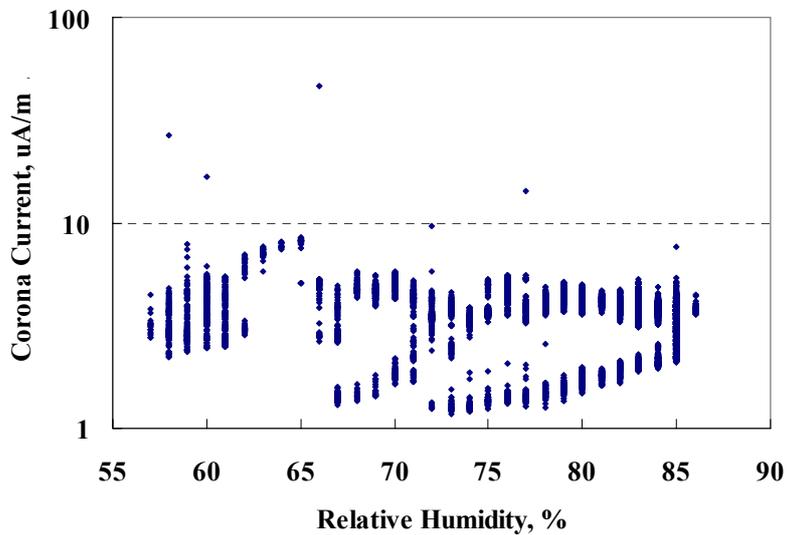
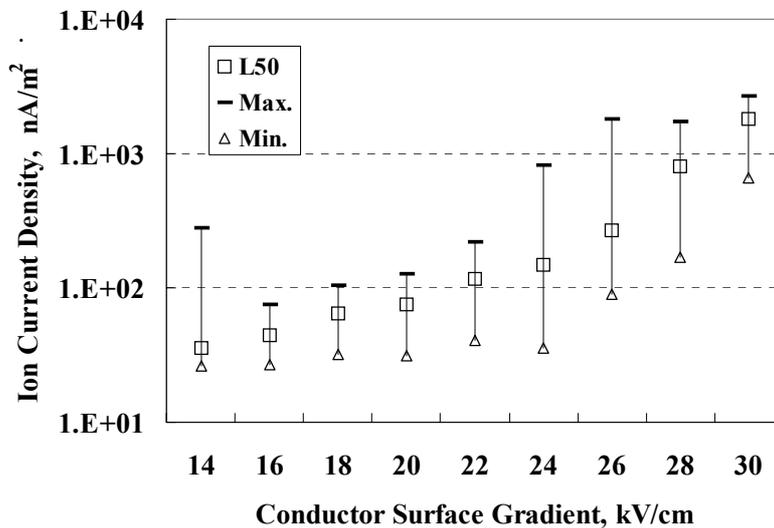


그림 5.17 상대습도 변화에 따른 코로나 전류 (6×480 mm²)
 Fig. 5.17 Relative humidity versus corona current (6×480 mm²)

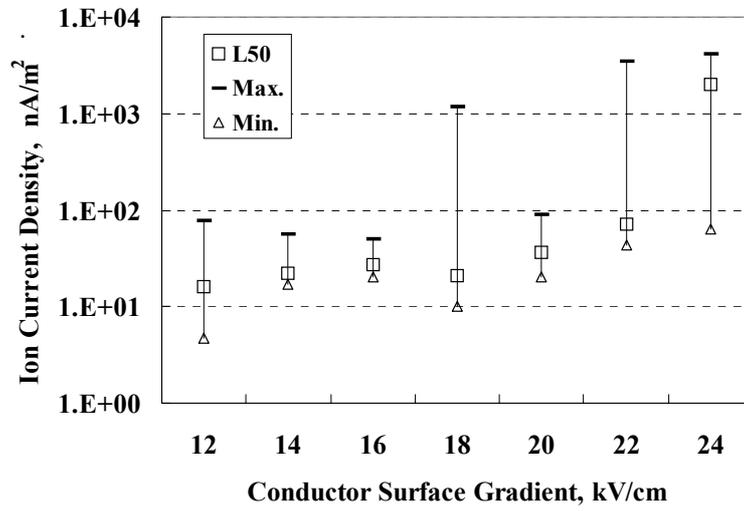
5.1.4 이온전류밀도

직류 코로나 방전의 경우 교류와 달리 동일한 극이 지속되므로 코로나 방전에 의해 발생한 이온은 먼지, 입자 등에 부착되어 지표면으로 이동하는 이온흐름 즉, 이온류(ion flow)를 형성한다. 이러한 이온의 흐름이 도체 밑에 놓인 인체 또는 물체에 대전되어 전압이 유도된다. 이러한 대전체를 인체가 접촉하는 경우 대전체에 대전된 전압이 인체에 방전되어 충격에 의한 불쾌감을 주기 때문에 직류 송전선로의 경우 이온전류밀도의 측정과 조사는 매우 중요하다.

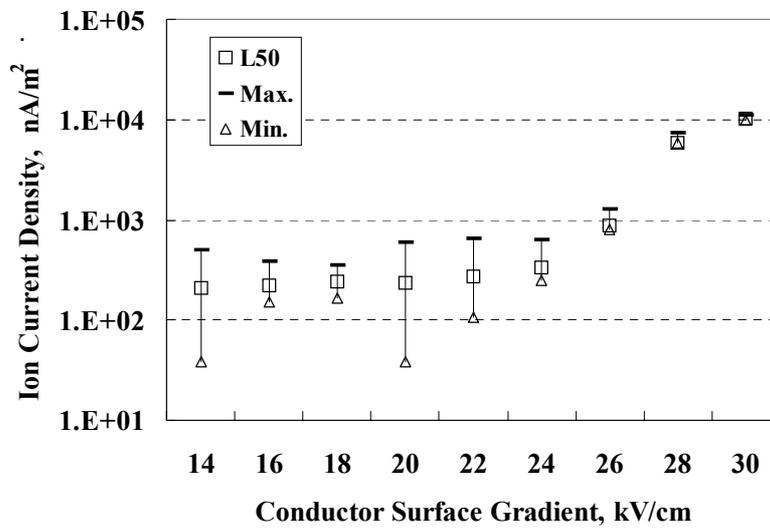
그림 5.18에는 각 후보도체방식을 케이지에 가선하고 후보도체의 표면전계강도가 12~30 kV/cm가 되도록 인가전압을 가변했을 때의 이온전류밀도 발생특성을 나타내었다. 세 후보도체방식 모두 약 20 kV/cm이상부터 코로나에 의한 이온 발생량이 증가하는 경향을 나타낸다.



(a) 6×480(C) mm²



(b) 6×810 mm²



(c) 4×810 mm²

그림 5.18 도체표면 전계강도별 이온전류밀도 발생특성
 Fig. 5.18 Conductor surface gradient versus ion current density

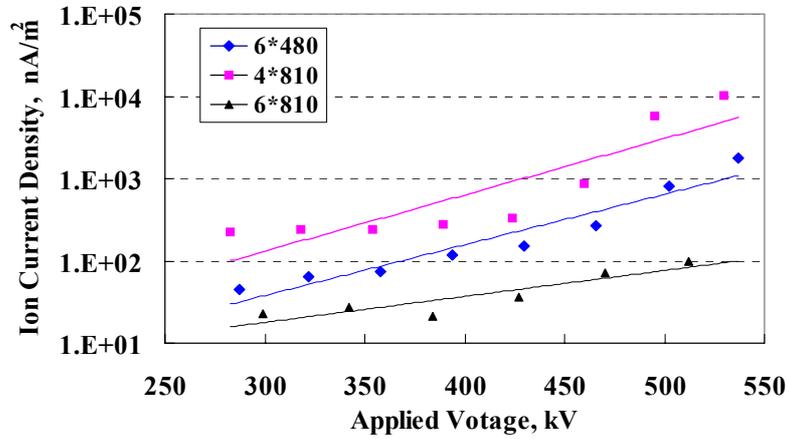


그림 5.19 코로나 케이지 인가전압별 이온전류밀도 증가 추이
 Fig. 5.19 Ion current density versus applied voltage at corona cage

그림 5.19에는 세 가지 후보도체방식의 코로나 케이지 인가전압별 이온전류밀도 특성을 나타내었다. 코로나 케이지 인가전압을 상승함에 따라 이온전류밀도는 모두 증가하였으며, 발생량의 크기가 4×810 mm², 6×480(C) mm², 6×810 mm² 순으로 나타나 6×810 mm² 방식이 대전에 의한 유도전압 면에서 가장 친환경적인 도체방식으로 나타났다.

또한 각 후보도체방식에 ±500 kV 상용선로에 해당하는 도체표면 전계강도를 코로나 케이지에서 모의하여 장시간 측정된 결과를 그림 5.20에 나타내었다. 장기적으로 측정된 결과 6×480(C) mm²가 6×810 mm²보다 약간 크게 나타났고, 4×810 mm² 방식의 잡음이 가장 크게 발생되어 6×810 mm² 도체방식이 선하 대전전압 면에서 보다 유리한 것으로 나타났다.

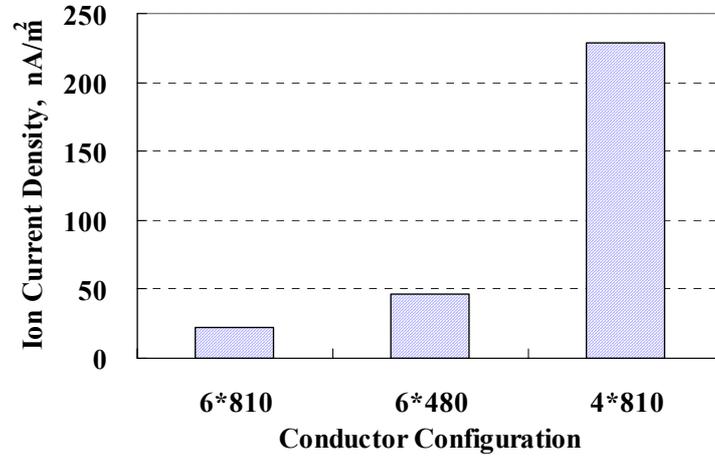


그림 5.20 후보도체방식별 이온전류밀도 발생량 비교
 Fig. 5.20 Comparison of ion current density among candidate bundle types

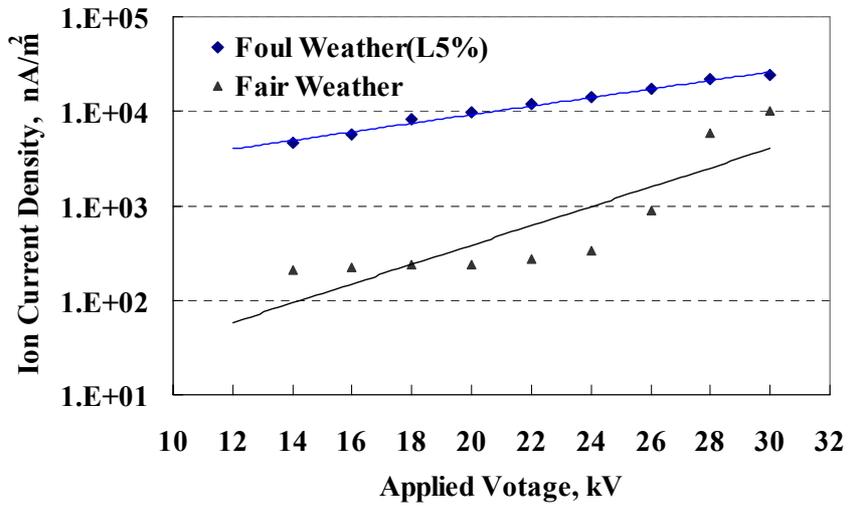


그림 5.21 기상조건별 이온전류밀도 발생특성 (4×810 mm²)
 Fig. 5.21 Comparison of ion current density between fair weather and heavy rain (4×810 mm²)

그림 5.21에는 기상조건별 이온전류밀도 발생특성을 나타내었다. 동일 도체표면 전계강도에서 강우시가 청명시보다 이온전류밀도가 높게 나타났다. 이는 강우 시 도체에 부착되는 물방울(水滴)에 의해 코로나 방전이 청명시보다 용이하게 발생되어 이로 인해 이온전류밀도가 증가된 것으로 판단된다.

5.1.5 코로나 소음

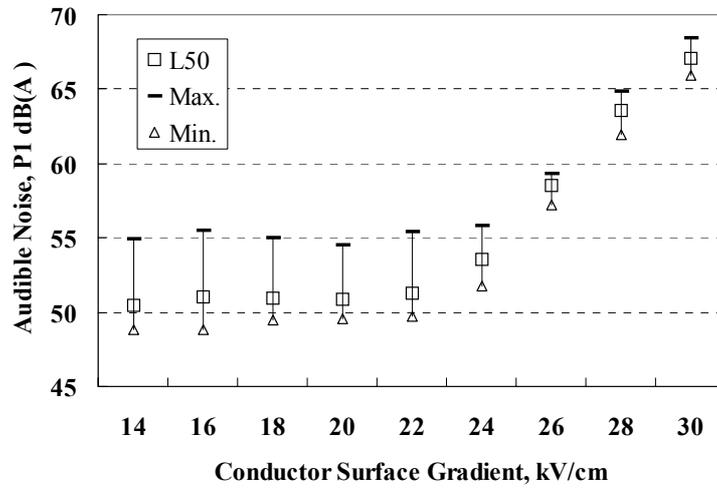
가공 송전선로의 코로나 소음은 측정지점, 전선길이 등에 따라 다르기 때문에 이러한 요소들의 영향을 받지 않고 코로나 케이지에서의 측정치를 이용하여 실선로의 소음장해 정도를 평가하기 위해서는 발생량을 대표하는 기준치로 환산할 필요가 있다. 이 기준치로는 일반적으로 식(5.1)의 코로나 소음 출력음압 P_1 을 사용하는데, 이는 코로나 케이지 실험전선의 길이인 유한장 전선에서의 측정치를 무한장 전선에서 1m 떨어진 지점의 코로나 소음량으로 환산한 것이다. 라디오 잡음의 경우와 마찬가지로 현재까지 시험선로 형상설계가 완료되지 않았기 때문에 field에서의 합성소음 대신에 단위발생량인 P_1 으로 나타내는 것이다.

$$P_1 [dB \text{ re. } P_a] = P [dB \text{ re. } P_a] + 10 \log R + 10 \log \left\{ \frac{\pi}{2 \tan^{-1}(l/2R)} \right\} - 0.02R \quad (5.1)$$

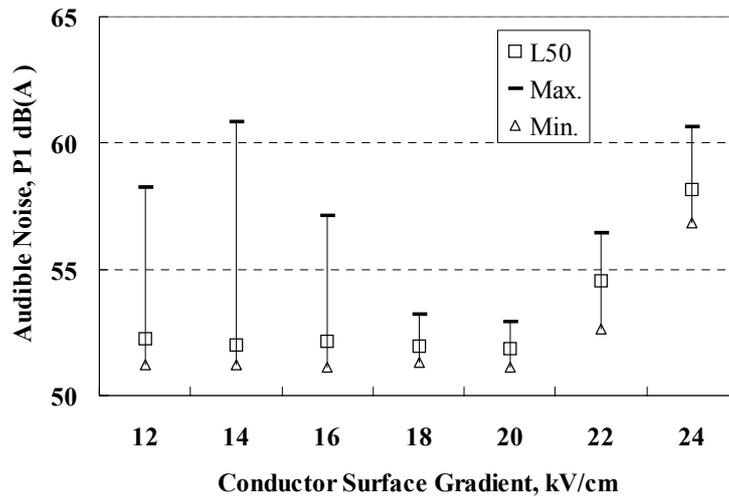
단, P : 코로나 케이지 측정 음압레벨, dB(A)
 L : 코로나 케이지 실험전선의 길이, m
 R : 실험전선에서 마이크로폰 간의 거리, m

그림 5.22에는 각 후도도체방식을 케이지에 가선하고 후보도체의 표면 전계강도가 12~30 kV/cm가 되도록 인가전압을 가변했을 때의 코로나 소

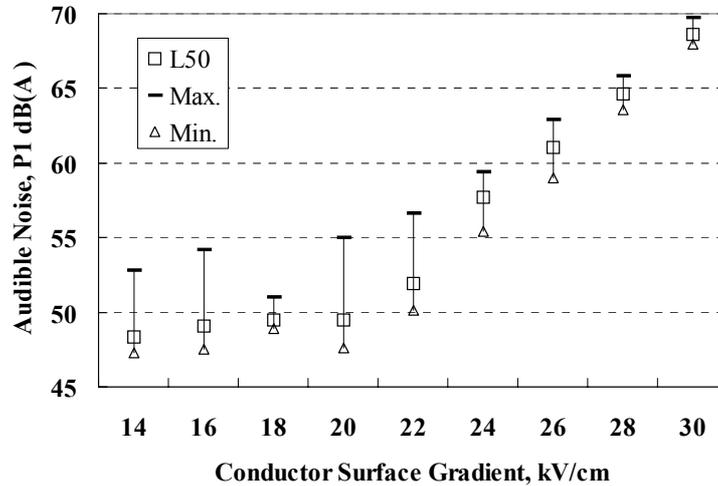
음 발생특성을 나타내었다. 도체표면 전계강도가 상승할수록 코로나 소음도 증가하는데, 전계강도가 14~16 kV/cm 부근부터 라디오잡음과 텔레비전 잡음이 검출되는 것에 반해 코로나 소음은 약 22 kV/cm 이상부터 발생량이 급격히 증가하기 시작한다.



(a) 6×480(C) mm²



(b) 6×810 mm²



(c) $4 \times 810 \text{ mm}^2$

그림 5.22 도체표면 전계강도별 코로나 소음 발생특성

Fig. 5.22 Audible noise versus conductor surface gradient

그림 5.23에서는 세 가지 후보도체방식의 코로나 케이지 인가전압별 코로나 소음량을 비교하였다. 인가전압이 낮은 경우는 배경잡음의 영향 때문에 인가전압의 변화에 따른 도체방식간의 소음량 차이가 작아 상대 비교가 어렵지만, 인가전압이 높은 경우에는 $4 \times 810 \text{ mm}^2$, $6 \times 480(\text{C}) \text{ mm}^2$, $6 \times 810 \text{ mm}^2$ 순으로 나타나 $6 \times 810 \text{ mm}^2$ 방식이 코로나 소음 관점에서 보다 친환경적인 것으로 나타났다.

그림 5.24에는 각 후보도체방식에 $\pm 500 \text{ kV}$ 상용선로에 해당되는 도체 표면 전계강도를 코로나 케이지에서 모의하여 약 3시간 이상 코로나 소음을 측정된 결과를 나타내었다. 장기측정결과에 따르면 코로나 소음은 배경소음 42 dB(A) 보다 불과 약 $1 \sim 2 \text{ dB(A)}$ 높은 $43 \sim 44 \text{ dB(A)}$ 로 나타나, 후보도체방식들의 코로나 소음 발생량이 무시할 수 있는 정도임을 알 수 있다. 따라서 $\pm 500 \text{ kV}$ 상용선로에 해당되는 도체표면 전계강도에서

4×810 mm², 6×480(C) mm², 6×810 mm² 후보도체방식들의 코로나 소음은 거의 발생하지 않고 배경소음의 수준이며, 따라서 어느 도체방식이 코로나 소음 관점에서 보다 친환경적이라고 단정할 수 없는 결과를 얻었다.

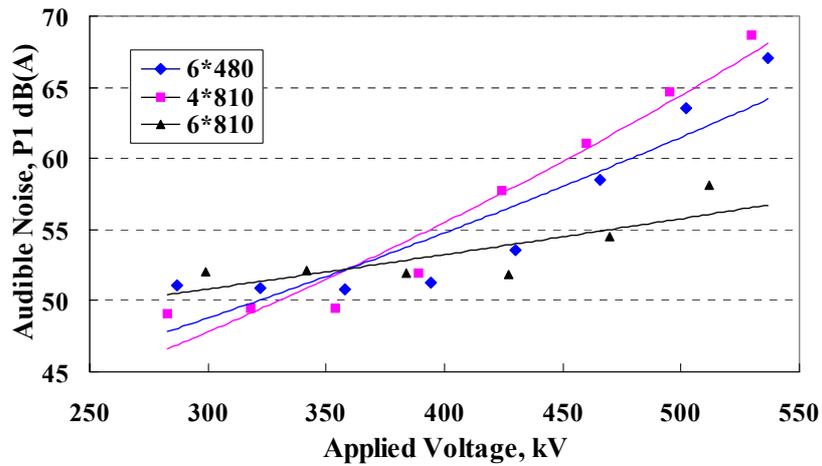


그림 5.23 코로나 케이지 인가전압별 코로나 소음
 Fig. 5.23 Audible noise versus applied voltage at corona cage

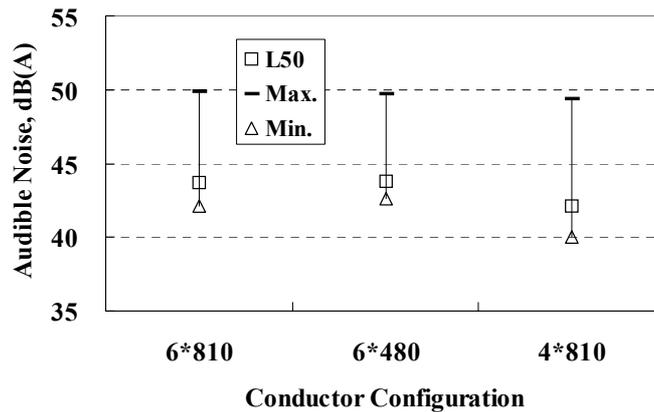
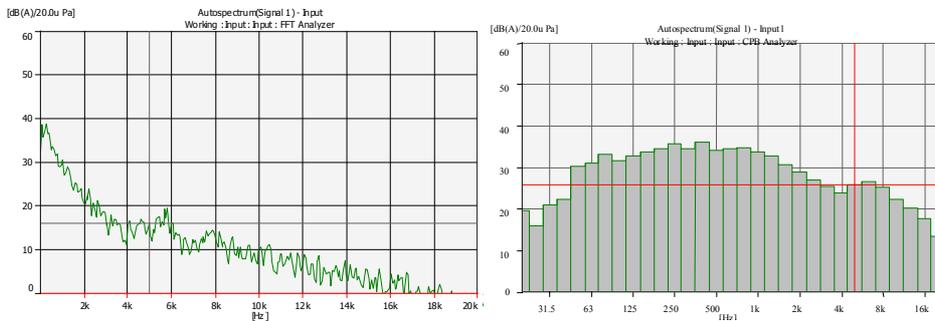
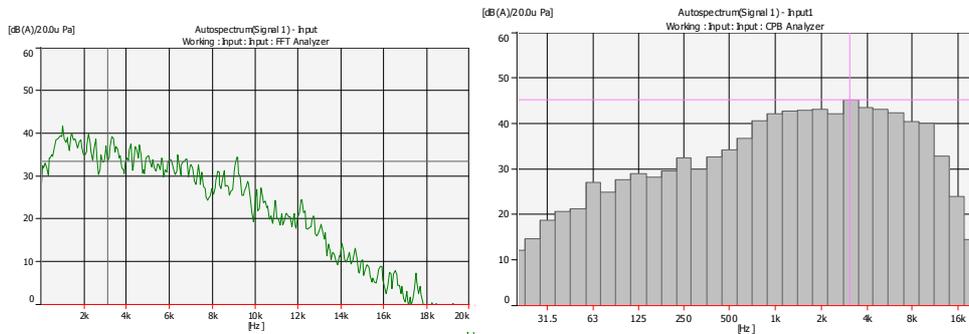


그림 5.24 후보도체방식별 코로나 소음 비교
 Fig. 5.24 Comparison of corona current among candidate bundle types

그림 5.25는 기상상태에 따른 직류 코로나 소음의 FFT 및 1/3 Octave 주파수 스펙트럼의 예로써 인가전압은 DC + 322kV인 경우이다. 강우시에도 발생량은 급격히 증가하지 않으나 청명시에 비하여 상대적으로 고주파수 성분이 많아짐을 알 수 있다.



(a) 청명시



(b) 강우시

그림 5.25 기상상태별 직류 코로나 소음의 주파수 스펙트럼 (4×810 mm²)
 Fig. 5.25 Frequency spectrum of audible noise in fair weather and heavy rain (4×810 mm²)

5.2 친환경 최적 도체방식 선정

코로나 케이지에서 인가전압, 기상조건 등의 변화에 따른 특성실험을 수행하여 환경면을 고려한 시험선로에서의 최적 도체방식을 선정하였다. 특성실험의 종합결과를 표 5.2에 나타내었다.

라디오 잡음의 경우 도체표면 전계강도가 약 14~16 kV/cm부터 잡음이 발생되기 시작하며, ±500 kV 상용선로에 해당되는 도체표면 전계강도를 코로나 케이지에서 모의한 장기 측정결과, 표 5.2와 같이 라디오 잡음 관점에서 6×810 mm² 도체방식이 가장 친환경적인 것으로 나타났다. 텔레비전 잡음의 경우는 동일한 도체표면 전계강도에서 잡음의 최대값과 최소값의 편차는 다른 장애항목보다 크게 나타났으며 텔레비전 잡음 관점에서도 6×810 mm² 도체방식이 전기환경 면에서 보다 적합한 것으로 평가되었다. 코로나 전류와 이온전류 밀도의 경우도 인가전압 증가에 따른 특성은 잘 나타났으며, 상대적인 평가에서 표 5.2와 같은 결과를 얻어 6×810 mm² 도체방식이 전기환경 면에서 보다 적합한 것으로 나타났다. 후보도체방식들의 코로나 소음은 배경소음의 수준으로써 무시할 수 있는 정도이었다. 따라서 어느 도체방식이 코로나 소음 관점에서 보다 친환경적이라고 단정할 수 없는 결과를 얻었다.

이상의 후보 도체방식별 환경장해특성들을 종합 평가한 결과, 전기환경 관점에서 6×810 mm² 도체방식이 6×480(C) mm², 4×810 mm² 방식보다 친환경적인 것으로 나타났다. 그러나 6×810 mm² 방식에 비해 6×480(C) mm² 방식의 환경특성도 큰 차이 없이 우수하기 때문에 시험선로 가선 도체방식 후보군에 포함하는데 문제가 없는 것으로 평가할 수 있다. 단, 최종적인 송전도체방식 선정은 환경성 외에도 경제성, 국내 송전기술의 현황과 수준, 송전기자재, 송전용량 등의 계통특성 등을 종합적으로 고려하여 결정해야 할 것이다. 따라서 본 연구는 코로나 케이지에서 각 후보

도체방식의 전기환경모의실험을 수행하여 향후 직류 ± 500 kV급 직류시험 선로에 가선될 최적도체방식을 방식을 우선적으로 선정하였으며, 그 연구 결과를 시험선로 및 상용선로의 설계, 건설 시 전기환경 대책설계 기본자료로 활용하고자 한다.

표 5.2 후보도체방식별 환경영향 평가

Table 5.2 Environmental effect analysis by candidate bundle types

후보도체방식 장해항목	6×810 mm ²	6×480(C) mm ²	4×810 mm ²	상대적으로 유리한 장해항목별 친환경 도체방식
라디오 잡음 [dB uV]	11.5 (91%)	12.6 (100%)	29.5 (234%)	6×810 mm ²
텔레비전 잡음 [dB uV/m]	18.4 (74%)	25.0 (100%)	26.0 (104%)	6×810 mm ²
코로나 전류 [uA/m]	1.9 (49%)	3.9 (100%)	2.9 (74%)	6×810 mm ²
이온전류밀도 [nA/m ²]	22.7 (49%)	46.4 (100%)	228.9 (493%)	6×810 mm ²
코로나 소음(P1) [dBA]	43.7 (100%)	43.8 (100%)	42.1 (96%)	4×810 mm ²

주) 괄호안의 수치는 6×480(C) mm² 도체방식을 기준한 상대값

5.3 단극 데이터를 이용한 무한선로 환산기법

코로나 케이지에서 얻은 단극 직류 선로 환경 데이터를 무한장 실규모 송전선로로 환산하는 예측 알고리즘은 기본적으로 교류의 경우와 같으나, 풍조건, 전계계산법 등에서 발생이온에 의한 공간전하를 고려하는 것과 상이한 선로 형상에 따른 극수(數)의 차이, 정극에서의 발생만을 고려하는 점 등은 판이하게 다르다^{[30],[31]}. 따라서 이러한 특성들을 감안하여 코로나 케이지에서 얻은 코로나 잡음 단극 데이터를 이용하여 임의의 실규모 직류 송전선로 모델 주변에서의 발생량과 분포특성을 파악하는데 활용되는 무한선로로의 환산예측알고리즘을 정립하였다.

(1) 전압에 따른 전선표면전계(이하 전계) 별로 코로나 소음, 라디오 잡음, 코로나 전류 등을 측정한다.

(2) 전계에 따른 코로나 소음 출력음압 P_1 , 라디오 잡음전류함수 I 를 구한다.

(3) 이온을 고려한 전계(F_{max})에 따른 코로나 소음 출력음압 P_1 , 라디오 잡음전류함수 I 를 구한다.

(4) 교류의 경우는 케이지에서 G_{max} 로 구한 P_1 , I 를 무한선로의 각 상에 배치하여 전체 잡음크기를 구하지만, 직류의 경우는 실제 운전전압범위 하에서 (-)극성의 잡음량은 negative streamer corona가 발생해도 실질적인 잡음이 생성될 정도로 충분한 에너지가 되지 않으므로 무시할 수 있다. 따라서 부극에는 잡음전류($AN-P_1$, $RI-I$)를 주입할 필요가 없고, F_{max} 로 구한 P_1 , I 를 정극에만 배치하여 잡음량의 lateral profile을 구한다. 이때 무한선로에 배치하는 P_1 , I 는 중성선, 부극 등의 유무 등 모든 선로형상요소들이 고려되어 계산된 F_{max} 값에 해당하는 P_1 , I 값이다^[32].

5.3.1 직류선로 라디오 잡음 환산예측법

라디오 잡음의 특성은 크게 발생과 전파로 분류할 수 있다. 코로나 발생으로 인한 펄스 전류가 도체에 유입되어 라디오 잡음 발생이 시작되고 이 전류가 도체를 따라 진행함에 따라서 잡음이 전파된다^[33].

(1) 단극 선로(Unipolar line)

단극 선로의 경우 라디오 잡음 및 전압의 전파과정은 그림 5.26과 같으며 전압 및 전류의 전파방정식은 식(5.2), (5.3)으로 표현할 수 있다.

도체에서 불규칙하게 발생하는 코로나를 도체를 따라 균일하게 발생한다고 가정하면 코로나로 인해 도체에 흐르는 전류 I 는 식(5.4)와 같이 된다.

$$\frac{dV}{dx} = -zI \quad (5.2)$$

$$\frac{dI}{dx} = -yV + J \quad (5.3)$$

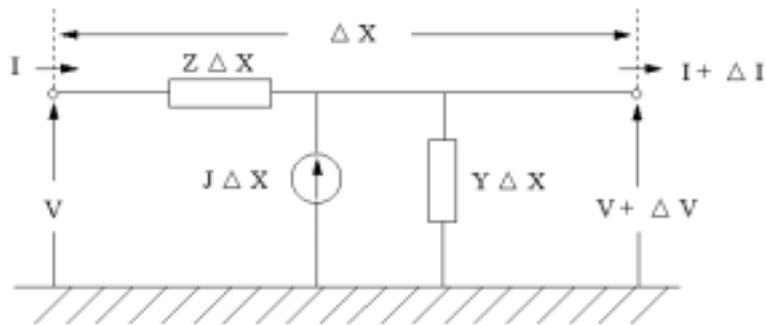


그림 5.26 선로의 단위길이 등가회로
Fig. 5.26 Equivalent circuit for an elemental length of the line

$$I = \frac{J}{2\sqrt{a}} \quad (5.4)$$

여기서 J 는 도체를 따라 단위 길이당 주입되는 코로나 전류이고, a 는 선로의 감쇠정수이다. 식(5.4)는 식(5.5)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$I = \frac{J}{2\sqrt{a}} = \frac{1}{2\sqrt{a}} \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \Gamma \quad (5.5)$$

따라서 식(5.5)에서 얻은 전류에 의해 지면에서의 전계와 자계성분을 구할 수 있다. 먼저 그림 5.27의 선로에서 이격된 임의의 지점 P 에서의 자계는 식(5.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = \frac{I}{2\pi} \frac{2h}{h^2 + x^2} \quad (5.6)$$

여기서 h 는 지상에서 도체와의 수직거리, x 는 도체와 계산점과의 수평 거리이다.

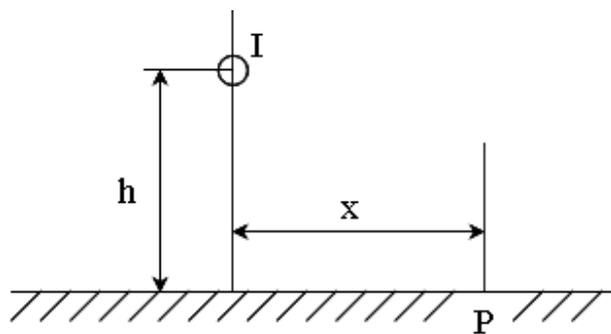


그림 5.27 RI Magnetic field 계산
Fig. 5.27 Calculation of RI magnetic field

최종적으로 $E = Z_o H$ 을 이용하여 전계를 나타내면 라디오 잡음강도는 식(5.7)과 같이 된다. Z_o 는 자유공간에서의 파동임피던스를 나타내며 $Z_o = \sqrt{\mu_o / \epsilon_o} = 376.7 \approx 120\pi$ 이다.

$$E = 60I \frac{2h}{h^2 + x^2} = 60 \frac{2h}{h^2 + x^2} \frac{1}{2\sqrt{\alpha}} \frac{C}{2\pi\epsilon_o} \Gamma \quad (5.7)$$

따라서 식(5.7)을 이용하여 단극선로에서의 라디오 잡음강도 및 lateral profile을 계산할 수 있다.

(2) 쌍극 선로(Bipolar line)

쌍극 선로의 경우 식(5.2), (5.3)이 식(5.8), (5.9)와 같이 행렬형식으로 변형되어야 한다.

$$-\frac{d}{dx}[V] = -[z][I] \quad (5.8)$$

$$-\frac{d}{dx}[I] = -[y][V] + [J] \quad (5.9)$$

분석을 간략화 하기 위해 선로의 기하학적 형상을 식(5.10)처럼 행렬 $[G]$ 로 표현할 수 있다.

$$g_{ii} = \ln \frac{2h_i}{r_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad g_{ij} = \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}}, \quad i \neq j \quad (5.10)$$

여기서 h_i 는 지면에서의 도체 높이, r_i 는 도체의 반경, D_{ij} 는 i 번째 도

체와 지표면 상에서의 j 번째 영상 도체와의 거리, d_{ij} 는 i 번째 도체와 j 번째 도체와의 거리이다. 따라서 임피던스와 어드미턴스의 행렬은 식(5.11), (5.12)와 같이 표현된다.

$$[z] = u[L] = \frac{w\mu_o}{2\pi} [G] \quad (5.11)$$

$$[y] = u[C] = w2\pi\epsilon_o [G]^{-1} \quad (5.12)$$

식(5.11), (5.12)를 식(5.8), (5.9)에 적용하면 쌍극선로의 전파방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$-\frac{d}{dx} [V] = -\frac{w\mu_o}{2\pi} [G][I] \quad (5.13)$$

$$-\frac{d}{dx} [I] = -w2\pi\epsilon_o [G]^{-1} [V] + [G]^{-1} [I] \quad (5.14)$$

쌍극선로의 경우 도체는 두개이므로 $[G]$ 는 식(5.15)로 표현될 수 있다.

$$[G] = \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix}, \quad a = \ln \frac{2h}{r_c}, \quad b = \ln \frac{\sqrt{4h^2 + s^2}}{s} \quad (5.15)$$

r_c 는 도체의 반경이고 s 는 극간 거리이다. 직류 쌍극선로에서 라디오 장애의 잡음원은 (+)극성 도체만이기 때문에 $[I]$ 는 식(5.16)과 같이 표현된다.

$$[I] = \begin{bmatrix} \Gamma_+ \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

modal analysis를 적용하기 위해 $[G]$ 의 modal 변환행렬 $[M]$ 을 식 (5.17)과 같이 표현한다.

$$[M]^{-1} = [G][M] = [\lambda]_d \quad (5.17)$$

$[\lambda]_d$ 는 $[G]$ 의 고유값으로 구성된 대각선 행렬이며 고유값은 식(5.18)과 같이 되고 $[M]$ 을 표준화 하면 식(5.19)와 같이 표현된다.

$$\lambda_1 = (a-b), \quad \lambda_2 = (a+b) \quad (5.18)$$

$$[M] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

또한 코로나 주입전류의 modal 성분은 식(5.20)처럼 표현된다.

$$[J^m] = [M]^{-1}[G]^{-1}[I] \quad (5.20)$$

식(5.15), (5.19)에서 $[G]^{-1}$ 과 $[M]^{-1}$ 을 계산하여 식(5.20)에 대치하면 코로나 주입전류의 modal 성분은 식(5.21), (5.22)와 같이 된다.

$$J_1^m = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\Gamma_+}{(a-b)} \quad (5.21)$$

$$J_2^m = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\Gamma_+}{(a+b)} \quad (5.22)$$

따라서 도체에서의 전류의 modal 성분은 식(5.23), (5.24)와 같이 된다.

$$I_1^m = \frac{J_1^m}{2\sqrt{\alpha_1}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\Gamma_+}{(a-b) \cdot \sqrt{\alpha_1}} \quad (5.23)$$

$$I_2^m = \frac{J_2^m}{2\sqrt{\alpha_2}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\Gamma_+}{(a+b) \cdot \sqrt{\alpha_2}} \quad (5.24)$$

여기서 α_1 , α_2 는 modal 감쇠정수이며 코로나 주입 J 로부터 도체 전류 I 를 계산하기 위해 이용한다^[22]. 최종적으로 도체의 전류는 $[I] = [M][I^m]$ 을 이용하면 식(5.25)와 같이 된다.

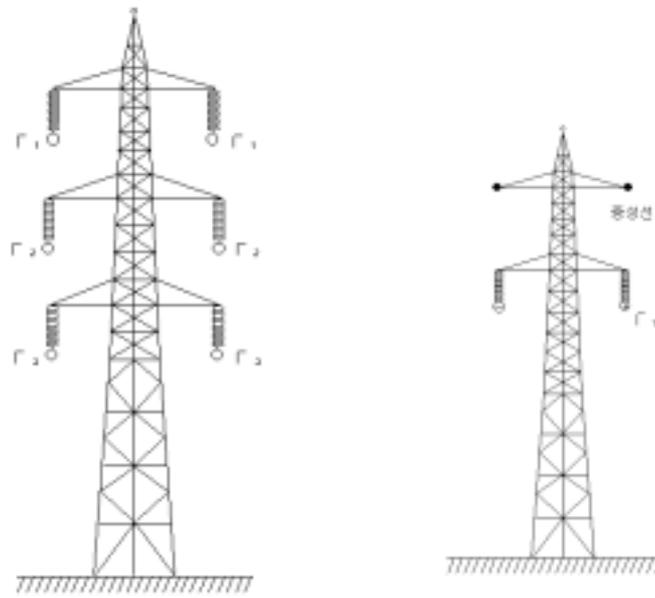
$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{(a-b)\sqrt{\alpha_1}} \\ 1 \\ \frac{1}{(a+b)\sqrt{\alpha_2}} \end{pmatrix} \cdot \Gamma_+ \quad (5.25)$$

케이지에서 측정한 I 를 통해 HVDC 무한선로에서 라디오 잡음을 예측하는 경우 그림 5.28과 같이 (+)극성 도체에만 I 를 배치한다. 이는 극성에 따른 코로나 발생과정의 차이에 의한 것이다. 극성에 따른 코로나 펄스의 특성을 표 5.3 그림 5.29에 나타내었다. (+)극성 도체에서의 코로나 펄스는 (-)극성보다 높은 펄스크기를 가지고 긴 지속시간을 가진다. 또한 그림 5.29에 나타난 것처럼 (+)도체와 (-)도체의 도체표면전계강도가 동일해도 주파수 1 MHz 이하 영역에서는 (+)극성 도체에서의 잡음강도가 (-)극성보다 약 20 dB이상 크게 발생된다. 이러한 (+)극성 코로나 펄스가 라디오 방송대역에 영향을 주로 미치기 때문에 무한선로로 환산시 (-)극성은 무시한다.

표 5.3 코로나와 갭방전에 따른 전류펄스 특성

Table 5.3 Current pulse characteristic due to corona and gap discharge

특 성	펄스 형태		
	정극성	부극성	Gap 방전
크기, [mA]	10 - 50	1 -10	500-2000
상승시간, [ns]	50	10	1
지속시간 [ns]	250	100	5
반복률, [pulses/s]	1000-5000	10,000-10,0000	100-5000



(a) 교류 송전선로

(b) 직류 송전선로

그림 5.28 무한선로 환산 시 잡음발생함수의 배치방법

Fig. 5.28 Disposition of excitation function at converting infinite T/L

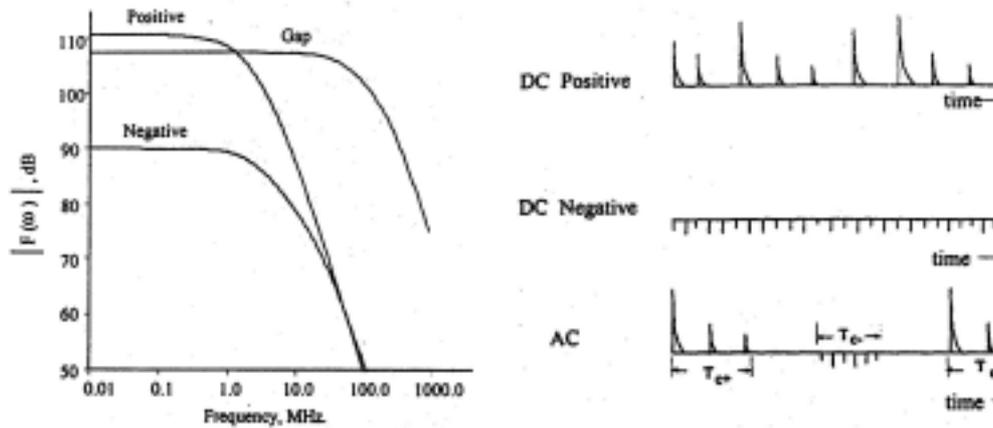


그림 5.29 코로나와 갭방전에 따른 전류펄스
 Fig. 5.29 Current pulse produced by corona and gap discharge

따라서 각 도체의 전류 $[I]$ 에 의한 합성전계 $[E]$ 를 구하고 식(5.26)을 이용하여 쌍극선로의 경우 라디오 잡음 lateral profile을 계산할 수 있다.

$$E(x) = \left(\sum_{i=1}^n \{E_i(x)\}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.26)$$

그림 5.30에는 상기의 식들을 이용하여 계산한 쌍극1회선 직류 선로의 라디오 잡음 lateral 특성을 나타내었다.

이와 같이 케이지에서 측정된 I 를 이용하면 무한장 송전선로의 라디오 잡음을 예측할 수 있으며, 이러한 환산 알고리즘의 흐름도를 그림 5.31에 나타내었다.

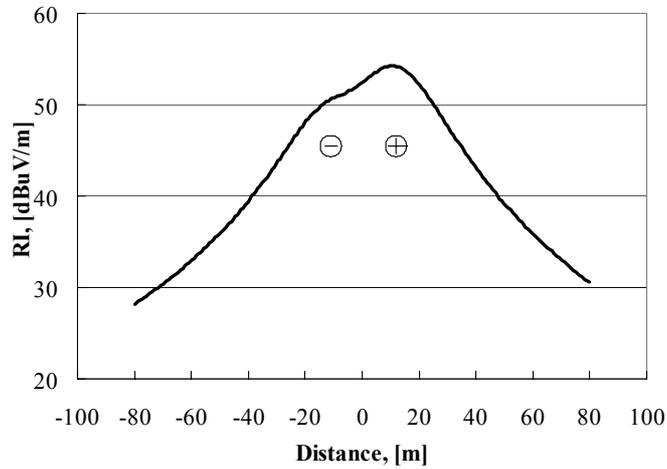


그림 5.30 쌍극1회선 직류선로의 라디오 잡음 Lateral Profile
Fig. 5.30 RI lateral profile of bipolar DC line

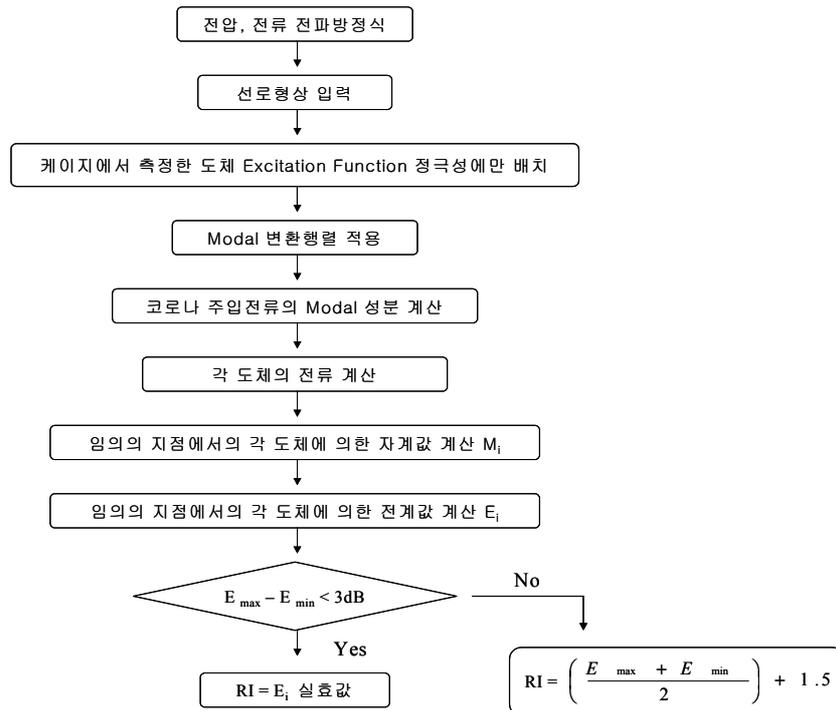


그림 5.31 직류 케이지 라디오 잡음 무한선로 환산알고리즘
Fig. 5.31 Infinite conversion algorithm for radio noise of DC cage

5.3.2 직류선로 코로나 소음 환산예측법

코로나에 의한 선로 소음 전파는 음향이론에 따르며, 소음은 도체를 따라서 일정하게 발생된다고 가정한다. 도체 단위 길이당 발생하는 noise power(A)는 전선표면전계강도, 도체크기, 소도체의 수 등에 따라 변하며, 이는 코로나 케이지에서 실측하여 구한다. 코로나 발생원이 선로를 따라 A (W/m)의 noise power로 균등하게 분포되어 있다면, 선로 미소구간 Δx 에 의한 선로 주변 임의 지점(Z)에서의 음향 power density는 식(5.27)과 같고, 이때 선로 전 구간에서의 음압레벨 P 는 식(5.28)로 구할 수 있다. 측정점이 선로의 중간인 경우의 음압레벨은 상용선로의 경우 $l \gg R$ 이므로 식(5.29)로 표현된다^[34].

$$\Delta J = \frac{A \Delta x}{4\pi r^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (5.27)$$

$$P \approx \sqrt{\int_l \frac{\delta CA}{4\pi r^2} dx} \quad [\text{dBre. } 20\mu\text{Pa}] \quad (5.28)$$

$$P = \sqrt{\frac{\delta CA}{4R}} \quad [\text{dBre. } 20\mu\text{Pa}] \quad (5.29)$$

단, r : Δx 에서 Z 지점까지의 방사거리, m

C : 음속, 344 m/s

l : 선로 길이, m

δ : 공기밀도, 1.205 kg/m²

R : 선로와 Z 지점까지의 직선거리, m

그러나 이상은 전파손실, 지면반사 등이 없는 단도체의 이상적인 소음 전파 경우이며, 실제로는 사용 마이크로폰 응답특성에 따른 측정오차, 다도체의 상호 간섭효과, 지표면 반사 그리고 공기의 소리에너지 흡수 등으

로 인한 차이가 있다^[35].

송전선로의 코로나 소음은 이상과 같이 측정지점, 전선길이 등에 따라 달라지므로, 이러한 영향을 받지 않고 코로나 케이지에서 얻은 측정 데이터를 평가하기 위해서는 발생량을 대표하는 기준치로 환산할 필요가 있다^{[36]~[38]}. 이 기준치로서는 일반적으로 코로나 소음 출력음압 P_1 을 적용하는데, 이는 유한장 전선(코로나 케이지의 실험전선)에서의 측정치를 무한장 전선(모델 직류 상용선로)에서 1 m 떨어진 지점의 코로나 소음량으로 환산한 것이다^{[39],[40]}. 따라서 식(5.29)에서 R 이 1 m이므로 P_1 은 식(5.30)이 되고, 선로 총 음향 power A 는 식(5.31)과 같으므로, P_1 은 다시 식(5.32)로 나타낼 수 있다. 식(5.33)은 이것을 dB로 단위 환산한 것이다.

$$P_1^2 = \frac{\delta CA}{4} \quad [20\mu P_a] \quad (5.30)$$

$$A = 2\pi RP^2 / \delta C \tan^{-1} \left(\frac{l}{2R} \right) \quad [W/m] \quad (5.31)$$

$$P_1 = \sqrt{\frac{\pi R}{2} P^2 / \tan^{-1}(l/2R)} \quad [20\mu P_a] \quad (5.32)$$

$$P_1 [dB re. 20\mu P_a] = P [dB re. 20\mu P_a] + 10 \log R + 10 \log \left\{ \frac{\pi}{2 \tan^{-1}(l/2R)} \right\} \quad (5.33)$$

코로나 케이지는 ρ 이 20 m, R 이 약 4 m이므로, 측정치 P 와 P_1 과의 관계는 식(5.34)와 같이 되고, 이식을 이용하여 무한장 송전선로 외측 r m에서의 코로나 소음량을 거리감쇠와 공기흡수를 고려하여 나타내면 식(5.35)가 된다. 그러나 상용선로는 다상선로이므로 각상을 독립적인 선음원(line source)으로 보고 각상의 코로나 소음을 구한 후 식(5.36)의 출력음압 합성식으로 코로나 소음 총 발생량을 구할 수 있다.

$$P_1 = P + 7.2 \quad [\text{dB re. } 20\mu\text{P}_a] \quad (5.34)$$

$$P_r = P_1 - 10 \log r - 0.02r \quad [\text{dB re. } 20\mu\text{P}_a] \quad (5.35)$$

$$P_{Total} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{P_r(i)/10} \quad [\text{dB re. } 20\mu\text{P}_a] \quad (5.36)$$

단, N : 정극의 수

$P_r(i)$: i 번째 정극 전선의 코로나 소음

라디오 잡음 예측과 같이 코로나 케이지에서 얻은 단극 데이터를 이용하여 쌍극 1회선 또는 2회선인 실규모 직류 송전선로 또는 시험선로에서의 코로나 소음도 예측할 수 있는 무한선로로의 환산 알고리즘을 개발하였다. 코로나 소음 예측 알고리즘의 흐름도는 그림 5.32에 나타내었다. 이와 같은 상기의 알고리즘을 이용하면 임의의 상용선로의 모델에 대한 라디오 잡음과 코로나 소음을 예측함으로써 초고압 직류 가공송전선로의 설계단계에서 전기환경문제를 미리 예측하고 대책을 마련할 수 있다. 따라서 케이지에서 구한 후보도체방식의 단극 실험데이터와 무한선로 환산 알고리즘을 선로의 전기환경대책 설계 자료로 활용할 수 있다.

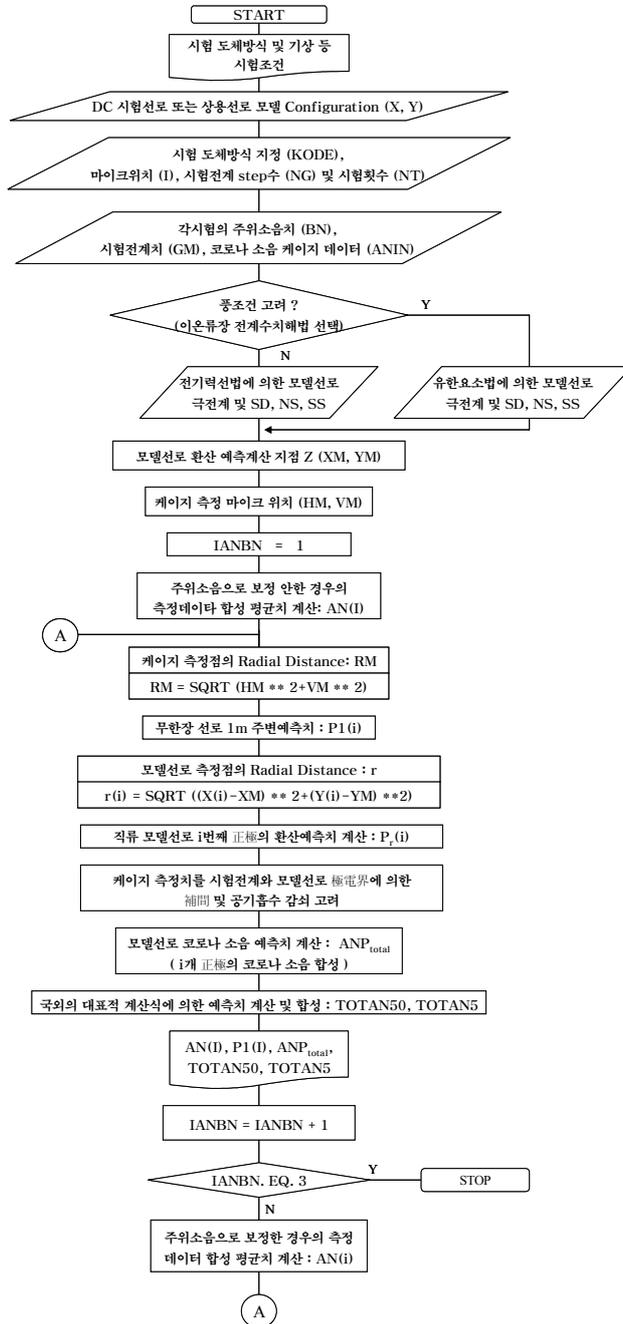


그림 5.32 직류 캐지 코로나 소음 무한선로 환산알고리즘
 Fig. 5.32 Infinite conversion algorithm for audible noise of DC cage

제 6 장 결 론

본 연구는 국가간 계통연계에 대비한 직류송전계통의 선로환경 대책설계기술을 확립하기 위해 먼저 국내용통전력, 전선의 허용전류 등의 전력계통면을 고려하여 ± 500 kV급 직류송전선로 후보도체방식들을 선정하고, 코로나 케이지에서 후보도체별로 전기환경 모의실험을 수행한 결과를 통해 상용선로 규모의 시험선로에 가설될 최적도체방식을 선정하였다. 따라서 본 논문에서는 HVDC ± 500 kV 가공 송전선로의 최적도체방식을 선정하기 위해 도체방식별 잡음 특성 분석용 측정시스템을 설계, 제작하고 6×480 (C)mm², 4×810 mm², 6×810 mm²의 3가지 후보도체에 대하여 코로나 케이지에서 코로나 방전 모의실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 측정항목은 라디오 잡음, 텔레비전 잡음, 코로나 전류, 이온전류밀도, 코로나 소음이며 각 측정항목과 기상조건과의 상관관계를 파악하기 위해 온도, 습도, 풍향, 풍속도 측정하였다. 라디오, 잡음, 코로나 전류, 이온전류 밀도는 측정주파수, 변위전류들을 고려하여 측정센서를 설계, 제작하여 케이지에 설치하였으며, 텔레비전잡음, 코로나 소음은 다이폴 안테나와 마이크로 폰으로 각각 측정하였다.
- (2) 장기간 대량의 측정값을 얻기 위해 각 측정항목을 자동으로 측정 가능한 DAS(Data Acquisition System)을 개발하였다. 모의실험을 약 1년간 장기적으로 수행하여 측정 데이터를 통계처리 후 분석하였다.
- (3) 라디오 잡음의 경우 도체표면 전계강도가 약 14~16 kV/cm부터 잡음이 발생되기 시작하였으며, ± 500 kV 상용선로에 해당되는 도체표면 전계강도를 코로나 케이지에서 모의한 장기 측정결과 6×810 mm² 도

체방식이 가장 친환경적인 것으로 나타났다. 텔레비전 잡음의 경우도 $6\times 810\text{ mm}^2$ 도체방식이 전기환경 면에서 보다 적합한 것으로 평가되었다.

- (4) 코로나 전류와 이온전류 밀도의 경우도, 인가전압 증가에 따른 특성은 잘 나타났으며 $\pm 500\text{ kV}$ 상용선로에 해당되는 도체표면 전계강도를 코로나 케이지에서 모의한 장기측정결과 $6\times 810\text{ mm}^2$ 도체방식이 전기환경 면에서 보다 적합한 것으로 평가되었다. 후보도체방식들의 코로나 소음은 배경소음의 수준으로써 무시할 수 있는 정도이었다. 따라서 어느 도체방식이 코로나 소음 관점에서 보다 친환경적이라고 단정할 수 없는 결과를 얻었다.
- (5) 이상의 후보도체방식별 환경장해특성들을 종합 평가한 결과, 전기환경 관점에서 $6\times 810\text{ mm}^2$ 도체방식이 $6\times 480(\text{C})\text{ mm}^2$, $4\times 810\text{ mm}^2$ 방식보다 친환경적인 것으로 나타났다. 그러나 $6\times 810\text{ mm}^2$ 방식에 비해 $6\times 480(\text{C})\text{ mm}^2$ 방식의 환경특성도 큰 차이 없이 우수하기 때문에 향후 HVDC 가공송전선로의 후보도체는 선로의 건설비용을 고려한 경제성 및 송전기술 등을 종합적으로 고려하여 결정해야 하는 것이 타당하다.
- (6) 향후 HVDC 가공송전선로의 전선지상고, 극간거리와 같은 대상모델의 형상이 확정되면 대상모델의 라디오잡음, 코로나소음을 코로나 케이지에서 측정된 값을 통해 환산 예측할 수 있는 기법을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines and Substations, ANSI/IEEE Std. 430-1986, 1986.11
- [2] 전국환경관리인연합회, “환경관계법규 I”, 홍문관, 1993. 8.
- [3] HVDC Project listing, IEEE WG on HVDC and FACTS, Bibliography and Records, 2000.1.
- [4] N. Giao Trinh, “Short Notes on the Physics of Corona Discharge”, IEEE/PES Special Course on Corona and Field Effects of High Voltage Transmission Lines, 1981
- [5] 宅間 董・柳父 悟 執筆, 李福熙 譯, “高電壓大電流工學”, 青文閣, 1982
- [6] 정성계, 이덕출, “고전압 공학”, 문운당, 1982
- [7] Mazen Abdel-Salam, Hussein Anis, Ahdab El-Morshedy, Roshdy Radwan, High-Voltage Engineering Theory and Practice, Marcel Dekker, Inc. pp115-166, 2000
- [8] 전춘생, 방진·고전압공학, 동명사, 1986. 11.
- [9] M. Lauersdorf, K. Feser, “Detection and Suppression of Corona Discharge During PD-Measurement by Means of RI-Reception”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 310-313, 1994
- [10] Transmission Line Reference Book - 345kV and Above, 2nd Edition, Electric Power Research Institute(EPRI), pp.205-328 1982
- [11] Mitsura Yasui, Yochi Takahashi, A. Takenaka, K. Naito, Y. Hasegawa, K. Kato, “RI, TVI, and AN Characteristics of HVDC Insulator Assemblies under Contaminated Condition”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, pp.1913-1921, 1988
- [12] Patrick D. Pedrow, Bai Lin Qin, Qing Yuan Wang, “Influence of Load Current on Bipolar DC Corona”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp.1443-1450, 1992

- [13] D.E. Perry, V.L. Chartier, G.L. Reiner, "BPA 1100kV Transmission System Development Corona and Electric Field Studies, *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-98, No. 5, pp.1728-1738, 1979
- [14] Vernon L. Chartier, David E. Blair, M. Dale Easley, Ronald T. Raczkowski, "Corona Performance of a Compact 230-kV Line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-10, No. 1, January 1995, pp. 410-420.
- [15] Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment, - Part 2 : Methods of measurement and procedure for determining limits, CISPR Publication 18-2, 1996.12
- [16] IEEE Radio Noise Committee Report, "Transmission System Radio Influence", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-84, Aug. 1965, pp. 714-727
- [17] Radio Interference Characteristics of Overhead Power Lines and High Voltage Equipment - Part 3: Code of Practice for Minimizing the Generation of Radio Noise, IEC CISPR Publication 18-3, First edition, 1986
- [18] Limits and Measurement Methods of Electromagnetic Noise from AC Power System, 0.15~30MHz, CAN3-C108.3.1-M84, Canadian Standard Association, 1984
- [19] 한전기술연구원, "차기 초고압 송전연구를 위한 Corona Cage 설계", KRC-84S-J11, 1985. 4.
- [20] Y. Nakano, Y. Sunaga, "直流送電線路のコロナ雑音およびラジオ雑音の豫測法-コロナケージを用いた方法", 電力中央研究所 研究報告 T86065, 1987
- [21] Yukio Nakano, Yoshitaka Sunaga, "Availability of Corona Cage for Predicting Radio Interference Generated from HVDC Transmission Line", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, pp.1436-1442, 1990

- [22] P. Sarma Maruvada, Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines, pp.111-162, 2000
- [23] "CIGRE/IEEE Survey on Extra High Voltage Transmission Line Radio Noise", CIGRE Study Committee No. 36 WG No. 1, IEEE Radio Noise Subcommittee WG No. 1, Paper T72 192-8, IEEE Winter Meeting, 1972. 2.
- [24] 電力中央研究所 研究報告 177072, "交直流送電線路のテレビ雑音-火花放電のテレビ雑音特性", 1978
- [25] K. Kannus, A. Lehtio, E. Lakervi, "Radio and TV Interference Caused by Public 24kV Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 4, pp.1856-1861, 1991
- [26] T. Vinh, C. H. Shih, J. V. King, W. R. Roy, "Audible Noise and Corona Loss Performance of 9-Conductor Bundle for UHV Transmission Lines", *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-104, No. 10, pp. 2764-2770, October 1985
- [27] T. I. Azernikova, N. P. Emelyanov, "The Problem of Acoustical Noise in the Development of 1150 kV Transmission Lines", *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Energetika I. Transport*, Vol. 26, No. 3 (translated into English by Allerton Press, Inc.)
- [28] HVDC Transmission Line Reference Book, Electric Power Research Institute(EPRI), pp 4-24~4-35, 1993
- [29] 광두영, "LabView 컴퓨터 기반의 제어와 계측 Solution", Ohm사, 2002
- [30] "Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results", IEEE Radio Noise Subcommittee Report, *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-92, No. 3, May/June 1973.
- [31] 電力中央研究所 総合報告 T24, "直流送電線路のコロナ雑音およびラジオ雑音の豫測に関する研究", 1992
- [32] Addendum to CIGRE Document N20 (1974), "Interferences Produced by Corona Effect of Electric Systems', CIGRE Working Group 36.01, 1996. 12.

- [33] IEEE Radio Noise Committee Report, "Transmission System Radio Influence", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-84, pp. 714-727, Aug. 1965
- [34] 한국전기술연구원 "초고압 송전에 관한 연구(V)" KRC-84S-J11, 1989. 9.
- [35] Yukio Nakano, Yoshitaka Sunaga, "Availability of Corona Cage for Predicting Audible Noise", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp.1422-1431, 1989
- [36] V. L. Chartier, *Results of Long-Term Audible Noise Measurements made on the Dixonville-Meridian 500-kV Transmission Line*, U.S. Department of Energy - Bonneville Power Administration Laboratory Services Report, Report No. TTL(E)-95-213, September 14, 1995.
- [37] Dong I. Lee, Jeong B. Kim, Kwang H. Yang, et al., "Audible noise performance of 6-Rail conductors on a 765-kV double circuit test line", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 3, pp. 1343-1351, July 1997
- [38] J. Lundquist, "Methods for Predicting AC Transmission Line Audible Noise by Short-Term Single-Phase Tests", *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-103, No. 2, February 1984, pp. 283-291.
- [39] V. L. Chartier, R. D. Stearns, "Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-100, No. 1, January 1981, pp. 121-129
- [40] Kwang H. Yang, Gi H. Hwang, June H. Park, et al., "New Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead HV AC Lines Using Evolutionary Algorithms", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 4, October 2000, pp. 1243-1251.

연구논문 발표실적

◎ 국제전문학술지

- (1) “A New Environmentally Friendly Design Program, TLCALC 2001 for HVAC Transmission Lines”, IEEJ TRans. PE, Vol. 124, No. 11, pp. 137~142, 2004. 1.
- (2) “The Design and Applications of a Gap Noise Generator for Simulating Corona Discharge from Test Line”, IEEJ TRans. PE, Vol. 123, No. 11, pp. 1296~1300, 2003. 11.

◎ 국내전문학술지

- (1) “HVDC ± 500 kV 가공 송전선로의 최적 도체방식 선정을 위한 전기환경특성 평가□□, 대한전기학회 논문지, Vol. 55C, No. 11, 2006. 11.
- (2) “HVDC 가공 송전선로 전기환경특성 모의시험용 코로나 케이지 계측시스템 개발□□, 대한전기학회 논문지, Vol. 55C, No. 5, pp.245~250, 2006. 5.
- (3) “새로운 초고압 송전선로 친환경설계프로그램 TLCALC□□, 대한전기학회 논문지, Vol. 55A, No. 4, pp.151~156, 2006. 4.
- (4) “가전기기 발생 극저주파 자계 고조파 특성 해석□□, 대한전기학회 논문지, Vol. 54C, No. 1, pp.31~37, 2005. 1.
- (5) “생활환경에서의 표본 한국인의 개인자계 노출량조사□□, 대한전기학회 논문지, Vol. 53C, No. 2, pp.97~102, 2004. 2.
- (6) “유전율 및 도전율을 고려한 765kV 송전선하의 전계에 의한 인체내부 유도전류밀도 해석□□, 대한전기학회 논문지, Vol. 53C, No. 8, pp.461~465, 2004. 8.
- (7) “누설전류측정에 의한 피뢰기 열화진단에 있어 전원고조파의 영향□□, 대한전기학회 논문지, Vol. 52C, No. 1, pp.42~46, 2003. 1.
- (8) “가전기기에서 발생하는 극저주파 과도자계 예측기법 연구□□, 대한전

- 기학회 논문지, Vol. 51C, No. 11, pp.616~621, 2002. 11.
- (9) "A Preliminary Survey on Personal Magnetic Field Exposure of Sample Koreans" 대한전기학회 영문 논문지, Vol. 2-C, No. 4, pp.195~200, 2002. 8.
- (10) "송전선로 EMI 특성 실험용 인공잡음 발생장치 설계, 제작 및 적용", 대한전기학회 논문지, Vol. 51A, No. 1, pp.23~28, 2002. 1.
- (11) "765kV 송전선로용 특수 다중도체 방식의 코로나 잡음특성 및 전계 분포해석", 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No. 12, 2001. 12

◎ 국제학술회의 논문집

- (1) "Development OF calculation Program 16magexpo On 24-hour Personal Magnetic Field Exposure under High School Students", 4th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, 2006. 10
- (2) "Development of Formulas for Predicting Personal Exposures to ELF Magnetic Field in Living Environments", Bioelectromagnetics 2005, pp. 453, 2005. 6.
- (3) "Personal Exposure to Magnetic Field over a 24-hour Period in Korea", Asia-Pacific EMF Conference, pp. 85, 2004. 1.
- (4) "Experimental Prediction Method for ELF Transmission Magnetic Field from Electrical Appliances", Asia-Pacific EMF Conference, pp. 86, 2004. 1.
- (5) "Experimental Prediction Method for Extremely Low Frequency Transient Magnetic Field from Electric Appliances", BEMS Annual Meeting, pp. 315~316, 2004. 6.
- (6) "Sample Korean's Occupational and Residential Exposures to ELF Magnetic Field over A 24-Hour Period", BEMS Annual Meeting, pp. 188~189, 2004. 6.
- (7) "Occupational and Residential Personal Exposures to Magnetic Field over 24-hour Periods in Korea", IEEE PES T&D 2003, 2003. 9.

- (8) "A New Environmentally Friendly Design Program, TLCALC 2001 for High Voltage AC Transmission Lines", Proceedings of IWHV 2003, pp. 33~37, 2003. 1.
- (9) "The Design and Applications of a Gap Noise Generator for Simulating Corona Discharge from Test Line", Proceedings of IWHV 2003, pp. 39~44, 2003. 1.
- (10) "New Formulas for Predicting Audible and Radio Noises from HVAC Transmission Lines", Proceedings of 2002 ACED, pp. 304~307, 2002. 11.
- (11) "Investigation of shielding Method of ELF Magnetic Field Generated from single Phase Conductors ", ACED &k-J proceeding, pp. 39~42, 2002. 11.
- (12) "Electromagnetic Interference from a Three Phase Double Circuit 765-kV Transmission Line in Korea", 2001 Asia Pacific Radio Science Conference, pp. 147~1558, 2002. 7.
- (13) "Development of New Formulas for Predicting Corona Noise from HVAC Transmission Lines", International Conference on Electrical Engineering, pp 2147-2150, 2002. 7.
- (14) "Development of an Environmentally Friendly Design Program, TLCALC 2002 for HVAC Transmission Lines", International Conference on Electrical Engineering, pp 2215-2218, 2002. 7.
- (15) "A Preliminary Survey on Personal Magnetic Field Exposure of Koreans", International Conference on Electrical Engineering, pp 2427-2430, 2002. 7.
- (16) "Harmonics Characteristics of ELF Magnetic Fields Generated by Electric Appliances", International Conference on Electrical Engineering, pp 1472-1475, 2002. 7.
- (17) "3-Dimensional Analysis on Electric Field Distributions and Corona Characteristics of Special Conductor", International Conference on Electrical Engineering, pp 1187-1190, 2001. 7.

◎ 국내학술회의 논문집

- (1) “16세 이하 전자계 역학조사용 개인자계노출량 추정식 개발”, 제8회 전자기장의 생체영향에 관한 워크숍 논문집, 2005. 11.
- (2) “표본 한국인의 생활환경에서의 개인자계노출량 조사 II”, 제7회 전자기장의 생체영향에 관한 워크숍 논문집, pp. 141~150, 2003. 10.
- (3) “한국인의 생활환경에서의 노출자계분포에 관한 조사”, 제6회 전자기장의 생체영향에 관한 워크숍 논문집, pp. 65~74, 2002. 10.
- (4) “Harmonics Characteristics of ELF Magnetic Fields Generated by Electric Appliances”, 제6회 전자기장의 생체영향에 관한 워크숍 논문집, pp. 193~206, 2002. 10.
- (5) “HVAC 가공 송전선로 환경친화설계프로그램 개발”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A, pp. 472~474, 2002. 7.
- (6) “한국인의 개인 자계 노출량 조사(I)”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A, pp. 469~471, 2002. 7.
- (7) “초고압 송전선로용 저풍소음 전선개발을 위한 전기환경 시험”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A, pp. 475~477, 2002. 7.
- (8) “한국인의 개인 자계 노출량 예비조사”, 경남지부 2002년도 춘계 학술대회 논문집, A, pp. 5~8, 2002. 4.
- (9) “초고압 송전선로 환경친화설계프로그램 TLCCALC 2001 개발”, 경남지부 2002년도 춘계 학술대회 논문집, A, pp. 1~4, 2002. 4.
- (10) “송전선로 EMI 실험용 인공잡음 발생장치의 설계, 제작 및 적용”, 고전압 및 방전응용기술 춘계발표회, 2001. 4.

◎ 연구보고서

- (1) “초고압 직류 가공선로 설계기술 및 핵심요소 기술개발(4차년도)”, 2005. 9~2006. 8, 산업자원부
- (2) “극저주파 전자계 안전성 평가 및 저감실증 기술개발(4차년도)”, 2005. 9~2006. 8, 산업자원부
- (3) “전자기 환경장해 실증 및 기술지원 사업(5차년도)”, 2005. 1~2005. 12, 과학기술부
- (4) “고속열차 운행구간의 전자파 분포현황 조사용역”,

2004. 11~2004. 12, 철도청
- (5) “초고압 직류 가공선로 설계기술 및 핵심요소 기술개발(3차년도)”,
2004. 9~2005. 8, 산업자원부
- (6) “극저주파 전자계 안전성 평가 및 저감실증 기술개발(3차년도)”,
2004. 9~2005. 8, 산업자원부
- (7) “전자기 환경장해 실증 및 기술지원 사업(4차년도)”,
2004. 1~2004. 12, 과학기술부
- (8) “초고압 직류 가공선로 설계기술 및 핵심요소 기술개발(2차년도)”,
2003. 9~2004. 8, 산업자원부
- (9) “극저주파 전자계 안전성 평가 및 저감실증 기술개발(2차년도)”,
2003. 9~2004. 8, 산업자원부
- (10) “전자기 환경장해 실증 및 기술지원 사업(3차년도)”,
2003. 1~2003. 12, 과학기술부
- (11) “초고압 직류 가공선로 설계기술 및 핵심요소 기술개발(1차년도)”,
2002. 9~2003. 8, 산업자원부
- (12) “극저주파 전자계 안전성 평가 및 저감실증 기술개발(1차년도)”,
2002. 9~2003. 8, 산업자원부
- (13) “전자기 환경장해 실증 및 기술지원 사업(2차년도)”,
2002. 1~2002. 12, 과학기술부
- (14) “초고압 가공 직류송전에 관한 연구(I)”,
2001. 7~2002. 10, 한국전력공사
- (15) “전자기 환경장해 실증 및 기술지원 사업(1차년도)”,
2001. 1~2001. 12, 과학기술부

감사의 글

그 동안 입은 은혜에 대한 감사를 몇 글자로 표현하다는 것이 어렵다는 것을 새삼 느끼게 됩니다. 오랫동안 학문의 길뿐만 아니라 인생의 선배님으로 저를 이끌어 주신 길경석 교수님께 감사드립니다. 학위과정동안 가르쳐 주셨고 심사에서조차 부족한 논문을 지도해 주신 김윤식 교수님, 장낙원 교수님, 서동환 교수님께 감사드립니다. 또한 저의 아내를 만나게 해주시고 논문을 심사해 주신 양광호 박사님에게도 감사드립니다.

연구원 생활을 하면서 항상 존경했었고, 저를 연구원에 올 수 있도록 해 주신 명성호 박사님, 이재복 박사님에게도 진심으로 감사드립니다. 그룹에서 제가 순조롭게 학업을 마무리할 수 있도록 도와주신 이형권 박사님, 손홍관 박사님, 장석훈 연구원, 손병현씨, 김용진씨에게 진심으로 감사드립니다. 그리고 학업이 가능하도록 저에게 기회를 주신 권영한 원장님, 박동욱 원장님, 임근희 선임부장님께 감사드리며, 가까이에서 도움을 주신 문영환 단장님이하 연구원 직원들께도 감사의 말씀을 드립니다.

초고압 송전기술 연구분야를 약 10년간 같이 동고동락한 한전 전력연구원의 이동일 부처장님, 신구용 과장님, 이성두 과장님에게도 진심으로 감사드립니다. 학교에 가면 항상 옆에서 세세한 도움을 많이 준 송재용 박사, 김일권, 서황동, 박대원, 문승보 이외 후배들에게도 감사드립니다.

항상 자식 걱정하시고 안쓰러워하시던 아버님과 어머님에게 이 논문을 바치게 되어 기쁘게 생각하며, 더 자랑스런 아들이 될 수 있도록 노력하겠습니다. 감사합니다. 또한 막내 동생을 항상 지켜봐 주셨던 큰형님 내외분, 작은형님 내외분, 누님 내외분께도 감사드립니다. 귀한 막내딸을 내주시고, 아들 이상으로 대해주시는 장인어른, 장모님께 감사드리며, 친동생이상으로 이쁘게 봐주시는 처형 내외분들께도 감사한 마음 전합니다. 앞으로 큰사람 되어 베풀어주시는 은혜 조금이나마 갚을 수 있도록 노력하겠습니다. 마지막으로 평생의 동반자로 늘 제 곁에서 내조해준 아내 전병현에게 말로는 다 표현할 수 없는 고마움을 전하며, 우리에게 부모님의 마음을 알게 해준 큰아들 현성이, 그리고 2006년 논문을 마무리 하는 해에 태어나 아빠가 많이 놀아주지 못해 미안한 둘째 아들 현규와 함께 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

다시 한번 저에게 도움을 주셨던 모든 분들께 감사드리며, 저를 지켜봐 주시는 모든 분들께 부끄럽지 않을 수 있도록 항상 최선을 다하겠습니다.

2006년 12월 주 문 노 드림