

## 제 출 문

본 보고서를 「도시시설물이 전력유도에 미치는  
영향 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2008. 11. 28.

연구책임자 : 조평동(한국전자통신연구원)

연 구 원 : 이상무(한국전자통신연구원)

최문환(한국전자통신연구원)

연구보조원 : 임동민(한국정보통신기능대학교)

박진철(한국정보통신기능대학교)



## 요 약 문

1. 과제명 : 도시시설물이 전력유도에 미치는 영향 연구
2. 연구 기간 : 2008. 7. 8. ~ 11. 28.
3. 연구책임자 : 조 평 동
4. 계획 대 진도
  - 가. 월별 추진내용

세부내용	연구자	월별 추진일정					비 고
		7	8	9	10	11	
<b>□ 원론 연구</b> ○ 접지된 도전성 시설물의 전자기학적 차폐 영향력 해석	(ETRI / 충남대)						
<b>□ 실측 연구</b> ○ 측정 전략 수립 ○ 측정개소 확보 ○ 고속전철시설 측정	(ETRI, 기 능 대)						
<b>□ 실증 모의 실험</b> ○ 실험시스템 구축 ○ 현장 실험 및 데이터 분석	(EMF-Safety ETRI)						
분기별 수행진도(%)		30%		70%			

### 나. 세부 과제별 추진사항

- 1) 고속전철 인근 유도전압 현장 측정 수행
  - 7/29~7/30 : 측정 개소 선정을 위한 현장 답사
  - 7/29 : 충청/경기 지역 개소 선정

- 7/30 : 서울 및 충남, 경상 지역/동대구 측정 개소 선정
- 8/5 ~ 8/8 : 충청, 경기지역 선정 개소 유도전압 측정
  - 충남 시목 병렬 급전소 구간(8/5), 충북 강내(8/6), 충남 소정(8/7), 아산 음봉(8/8)
- 8/12 ~ 8/14 : 경기 평택 지역 유도전압 측정
- 8/18 ~ 8/22 : 경남 지역 유도전압 측정
  - 8/18 : 영동 심천 개소 노선 유도전압 측정
  - 8/19 : 영동 주곡 개소 노선 유도전압 측정
  - 8/20 : 김천 개소 유도전압 측정
  - 8/21 : 동대구 ~ 부산역 노선 측정 개소 선정
  - 8/22 : 동대구 ~ 부산역 선정 개소 노선중 측정
- 8/26 ~ 8/29 : 도시지역 전력유도 현장 측정
  - 8/26 : 서울 도시지역(구로 가산디지털역) 유도전압 측정
  - 8/27 : 대전시내 지역 유도 측정 구간 선정 답사
  - 8/28 : 동대구 시내 지역 및 교외 인접 루트 구간 선정 및 측정
  - 8/29 : 부산 지역 유도전압 측정
- 9/9 ~ 9/11 : 전력유도 효과 실험을 위한 시험 측정
  - 9/9 : 평택 측정 개소(팽성) 2 지점의 위치 이동 연결 구간 시설 측정
  - 9/10 : 평택 측정 개소(팽성) 테스트베드 측정
  - 9/11 : 평택 측정 개소(팽성) 테스트베드 측정
- 9/22 ~ 9/26 : 현장 측정 추가 개소 수행
  - 9/22 : 칠곡지천 개소 측정
  - 9/23 : 부산 지역 개소 측정(시내 덕천동 국철 통과 구간)
  - 9/24 : 부산 시내 모라동 선정 개소 측정
  - 9/25 : 밀양 삼랑진 선정 개소 측정
  - 9/26 : 경산 옥곡/옥산 선정 개소 측정

- 10/15 ~ 10/17 : 현장 보완 측정
  - 10/15 : 충북 강외면(오송 과학산업단지 인근) 측정개소 선정 답사 및 측정
  - 10/16 : 천안 아산 시내 지역 측정개소 답사
  - 10/17 : 화성시 봉담지구 측정개소 답사 및 선정 측정
- 10/29 ~ 10/31 : 영남 지역 추가 현장 측정
  - 10/29 : 영동 심천, 경산 기측정 대지저항률 측정
  - 10/30 : 청도군 청도읍 선정 개소 유도전압 측정
  - 10/31 : 양산 원동2 지역 유도전압 측정
- 11/12 ~ 11/13 : 대지저항률 미측정 지역 및 추가 시행
  - 11/12 : 오송 및 평택 정자 측정 개소 대지저항률 측정, 안산 및 군포 연결 교외 인접 루트에 대한 유도전압 측정
  - 11/13 : 부산 당감 측정 개소 대지저항률 측정 및 밀양 상동 선정 개소 유도전압 측정
- 2) 측정 유도전압 정규화 및 데이터 분석
- 3) 경부선 전국 구간 30개소 지역별 특성 비교 및 도시효과의 거시적/미시적 특정 분석
- 4) 유도원 모의 실증 시험
  - 유도원 전류 및 고전압 출력 변압기 및 합체 시설물 제작
  - 대지 기반 전력선 구축 및 모의선로 시설에 의한 전계 및 자계에 의한 유도전압 측정
- 5) 전자기학적 유도효과 해석 시뮬레이션
  - 전자파 전파에 의한 유도원 기초 해석
  - 유도 상호인덕턴스의 단위 모델 해석 기반 시뮬레이션

## 5. 연구결과

- 1) 거시적 고속전철 노선 유도전압 측정 수행
  - 도시차폐효과의 영향성은 도시지역에 있어서 전압이 낮아지는 경향이 있는 것으로 측정됨.
  - 원인 해석적 측면에서는 구조물과 차폐성과의 연관성 기술 연구가 필요함.
- 2) 미시적 관점에 있어서 특정 도시지역 인접 루트 인터페이스 경계 선상의 진입 유도중전압의 천이 분석에 의하여 도시 지역 진입에 따른 유도전압의 저감 측정 현상이 있음.
  - 대구 지역 인터페이스 진입에 있어서 상위 국철 노선 철곡 지천역으로부터 대구 교외(실제 대구 시내)와 도심 비산동으로 연결되는 전압이 10V 이상으로부터 8V대로 저감됨.
  - 대구를 인접 남하한 중소도시 경산의 관통 루트 옥산과 옥곡에 있어서도 경계를 벗어나는 시골 지역 진입 루트에 비하여 전압이 낮은 현상으로 파악됨.
- 3) 시뮬레이션 유도원 시설 구축 유도전압 모의 테스트 베드 구축
  - 고전압 출력 정격기를 제작하여 유도원 전력선과 피유도원 통신선의 이격거리를 변형하여 전자계 유도의 실제 발생 영향성 측정 실증
  - 전자계에 의한 근접 도체에 유도 전압을 유기하는 것으로 검증도됨.
  - 신호 출력이 미소한 것으로서 이격거리에 따른 변화에 있어서는 50cm 이격 반경에서 출력의 변화가 없어짐.
- 4) 전자기 유도 해석적 시뮬레이션
  - 실제 유도원 상호인덕턴스에 의한 지중매설물의 단위 요소간 유도 전자계 영향력에 대한 기초 해석 방식에 대한 조사 연구
  - 유도전압을 계산할 수 있는 고시 근간의 기본적 산식 수립
  - 복잡한 구성 루트들에 의한 유도전류의 흐름 확대 방안 전개

## 6. 기대 효과

- 유도전압 문제의 유도기관과 피유도기관의 시설 투자비의 타당성에 관한 이해 관계의 대립은 법적으로도 중재하기 어려운 첨예한 사안인 바, 이러한 문제의 근본적 기술 연구 해석 지원의 측면에서 실증적 연구를 바탕으로 한 타당한 근거 제시를 이루어 합리적 유도 대책 시행이 이루어질 수 있도록 시스템을 개선
- 비용 투자의 측면에서 불필요한 대책 시설비를 경감시킴으로서 경제성 문제를 해소할 수 있는 기대 효과
- 국내에 타당한 유도전압 예측의 기술적 근간을 마련하고 자체 기술 해석 능력과 경험을 보유함으로써 국제 기술 종속성에서 탈피, 국제 기술 규격에 독창적 의견을 제공
- 도시효과의 평가 부문에 있어서는 국가 지역 의존적 측면이 강한 면이 있으나 가장 이해하기 어렵고 정량적으로 평가하기 힘든 기술 분야에 대한 실증 연구를 수행하는 의미
- 법률 적용의 측면에서 의무 규정에 의한 최소한도의 규격의 과당성에 대한 의문과 통신서비스 피해 감소 목적의 규격기준 적용의 절충 차원에서 경제성과 안정성의 두 가지 상충된 목적의 최적화를 달성하여 합리적 기준 적용 일환으로서의 기틀을 마련

## 7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규 격	수량	용도	보유현황	확보방안	비 고
EPIMS-T			종전압 측정	보유		
접지저항측정기			접지저항측정	보유		
PSM			잡음전압측정	차용		
미티게이터			잡음전압측정	보유		
멀티테스터			파라미터측정	보유		





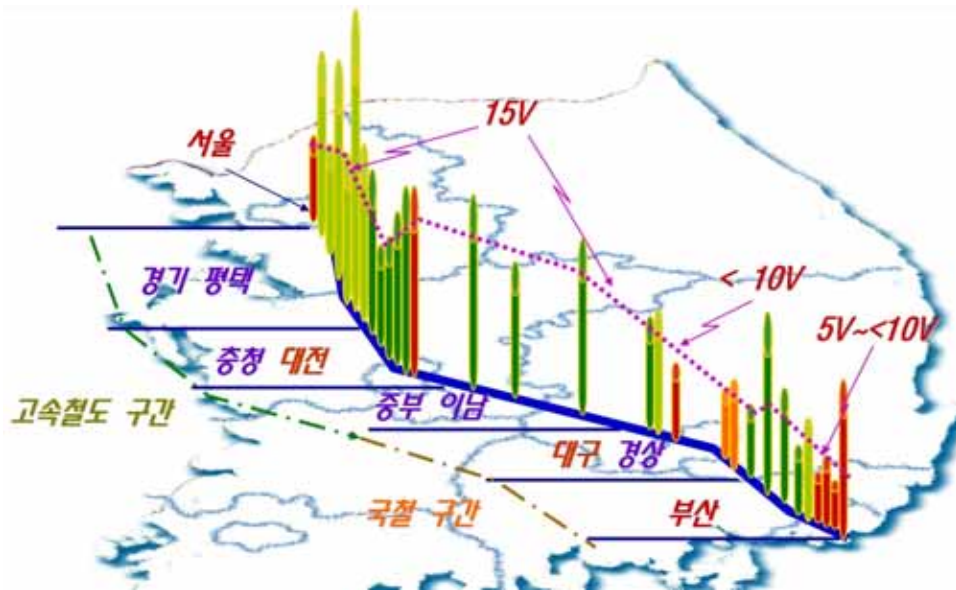
## 최종보고서 초록

국문 초록		
<p>본 연구는 「전기통신설비의 기술기준 규정」 및 「전파연구소고시 제2007-102호 (전력유도전압의 구체적 산출방법에 관한 기술기준)」에 의하여 전력유도 대책을 수행하는데에 있어서의 합리성을 추구하고 대책 시설비 투자의 경제성을 이루고자 하는 취지를 내포하고 있다. 유도대책을 위하여는 상기 규정에서 정해진 유도전압제한치에 의한 조정을 위하여 상기 고시에 의하여 유도전압을 계산하도록 하고 있다. 따라서 유도전압 계산의 정확성은 사업자 이해 갈등의 중요한 의미를 부여한다.</p> <p>이러한 유도전압의 평가에 있어서 실제 환경상 유도전압을 경감시키는 파라미터의 반영 여부가 관건이 되는데 본연구에서는 그중 특별히 가장 미지수가 되고 있는 도시차폐효과에 대한 정량성 개발을 위한 실측 및 실증 연구를 수행한 것이다</p>		
영문 초록		
<p>This research is on the prevention method against power induction. The power induction voltage limitation is provided by the regulation. And the voltages are calculated with the RRA notice. Among shield effects, the urban parameter is most mysterious. This research is to practice measurement and experiment and simulate several induction environment and to establish and abstract the urban factor after recognizing the practical existence characteristic of urban factor. To do this, we practiced measurement of normal operation induced voltage by the power feeder line of AC traction system distributed thorough national wide, thereafter analyzing the data to scrutinize the existence of urban shielding effect.</p>		
색 인 어	한글	도시효과, 차폐계수, 유도전압, 고속전철
	영문	shielding effect, urban factor, induced voltage



# SUMMARY

전체 구간 측정 데이터 분포와 정규화 전압은 아래 그림 및 표와 같으며 결론을 기술하였다.



- 도시 지역 통과 루트상의 전압 강하 경향이 있음.
  - 교외성 지역에 있어서 중소도시 외곽 인접경계로 지나치는 구간의 전압은 영향성이 나타나지 않음.
  - 부산 지역의 저전압 루트 현상에 대한 해석적 연구가 필요함.
- 전후 경과 루트에 비하여 상대적 전압이 낮은 개소의 매설물 연관성 추정
  - 매설물에 의한 차폐성은 사실상 도시효과 의미의 기저 원리이므로 이에 대한 해석을 통한 정량 규명이 필요함.
- 유도원 모의 실증 실험과 관련하여는 전자파 유도에 전압/전류 발생 현상은 입증됨.
  - 거시적 형상의 도시 영역에 대한 신호 입력 출력 판단으로서 차폐성 현장 적용 판단하기가 용이치 않은 문제가 있음.
- 해석 시뮬레이션은 해석 단위 요소 접근 방법의 기초 작업으로서 전자기학적 해석 기반 연구로서의 의미를 가지며 향후 이론적 밑받침을 위하여는 꼭 병행하여야 할 연구 사안이 됨.
  - 요소간의 복합적 configuration에 의한 확장 해석 진행



# 목 차

표 목 차 .....	15
그림목차 .....	16
제 1 장 연구 개요.....	23
제 1 절 수행 배경.....	23
제 2 절 연구 목표.....	23
제 3 절 연구 추진 체계.....	23
제 4 절 측정 실행 방안.....	24
제 5 절 측정기술-측정 회로의 구성.....	25
제 6 절 측정 예정 선정 개소.....	26
제 7 절 측정 수행 계획 일정.....	29
제 2 장 유도기술 일반과 도시효과 연구 해석 정보.....	33
제 1 절 전력유도전압의 계산 시스템.....	33
제 2 절 도시차폐효과의 분석 방법론.....	37
제 3 장 현장 측정 수행 연구.....	45
제 1 절 현장 측정 수행 현황.....	45
제 2 절 예측계산시스템에 의한 정규화 전략.....	81
제 3 절 유도전압 측정 데이터 분석.....	88
제 4 절 도시효과 측면의 상대적 비교평가.....	91
제 4 장 유도원 구축 모의 실험 연구.....	99
제 1 절 실증실험 모델링 기법에 관한 기술보고.....	99
제 2 절 물리적 실험 모의 시스템 구축 설계.....	115
제 3 절 유도발생 현상 검증.....	121

제 5 장 도시시설물 차폐효과 해석 시뮬레이션.....	143
제 1 절 연구 배경 및 필요성.....	143
제 2 절 전력선 주변 낮은 주파수의 전계와 자계 특성.....	147
제 3 절 환경 차폐 효과.....	167
제 4 절 다중 도체 선로.....	186
제 5 절 전자장 해석의 의미.....	209
제 6 장 종합 결론.....	211
참고 문헌.....	215
부    록 유도측정일지.....	223

## 표 목 차

표 1-1	측정 수행 계획 일정.....	30
표 2-1	전력 유도 전압 계산 기준 구성 항목.....	33
표 2-2	유도전압계산시스템-전력선.....	34
표 2-3	유도전압계산시스템-급전선.....	35
표 2-4	유도전압계산 적용 차폐 계수 및 파라미터.....	36
표 2-5	터널 차폐 계수.....	36
표 2-6	고가 차폐 계수.....	37
표 2-7	타래도 효과.....	37
표 2-8	도시차폐효과분석 방법론.....	38
표 3-1	지역별 측정 일정 및 위치 개략.....	45
표 3-2	측정 개소별 전력선과 통신선간 수직, 수평, 직선거리.....	83
표 3-3	대지도전율과 대지비저항.....	84
표 3-4	측정개소별 대지비저항.....	84
표 3-5	측정개소별 전파상수 $k_{\text{값}}$ .....	85
표 3-6	각 측정 개소별 $kD_{\text{값}}$ 에 따른 상호인덕턴스 $M$ .....	86
표 3-7	정규화 측정 전압 데이터.....	88
표 3-8	매설물 분포 현황.....	96

## 그 립 목 차

그림 1-1	연구추진체계 .....	24
그림 1-2	측정회로 구성 방식 .....	26
그림 2-1	유도원 시설별 유도전압 계산 대상 체계 .....	34
그림 3-1	시목 측정구간 이격도 .....	48
그림 3-2	시목 구간 유도전압 .....	49
그림 3-3	강내 측정구간 이격도 .....	49
그림 3-4	강내지역 유도전압 변화 특성 .....	50
그림 3-5	소정 측정 구간 이격도 .....	51
그림 3-6	소정 유도전압 변화 특성 .....	52
그림 3-7	아산 음봉 측정구간 이격도 .....	52
그림 3-8	아산 음봉 유도전압 변화 특성 .....	53
그림 3-9	평택 팽성1 측정구간 이격도 .....	54
그림 3-10	평택 팽성1 유도전압 변화 특성 .....	54
그림 3-11	평택 팽성2 측정 구간 이격도 .....	55
그림 3-12	평택 팽성2 유도전압 변화 특성 .....	55
그림 3-13	평택 팽성 2-2 측정 구간 이격도 .....	56
그림 3-14	평택 팽성 2-2 유도전압 변화 특성 .....	56
그림 3-15	강외 오송 측정구간 이격도 .....	57
그림 3-16	강외 오송 유도전압 변화 특성 .....	57
그림 3-17	평택 정자 측정 구간 이격도 .....	58
그림 3-18	평택 정자 유도전압 변화 특성 .....	58
그림 3-19	화성 봉담 측정 구간 이격도 .....	59
그림 3-20	화성 봉담 유도전압 변화 특성 .....	59
그림 3-21	안산 상록 측정 구간 이격도 .....	60
그림 3-22	안산 상록 유도전압 변화 특성 .....	60



그림 3-23	영동 심천 측정구간 이격도 .....	61
그림 3-24	영동 심천 유도전압 변화 특성 .....	62
그림 3-25	영동 주곡 측정 구간 이격도 .....	63
그림 3-26	영동 주곡 유도전압 변화 특성 .....	63
그림 3-27	김천 봉산 측정 구간 이격도 .....	64
그림 3-28	김천 봉산 유도전압 변화 특성 .....	64
그림 3-29	양산 원동 측정 구간 이격도 .....	65
그림 3-30	양산 원동 유도전압 변화 특성 .....	65
그림 3-31	칠곡 지천 측정 구간 이격도 .....	66
그림 3-32	칠곡 지천 유도전압 변화 특성 .....	66
그림 3-33	밀양 삼랑진 측정 구간 이격도 .....	67
그림 3-34	밀양 삼랑진 유도전압 변화 특성 .....	67
그림 3-35	경산 옥산 측정 구간 이격도 .....	68
그림 3-36	경산 옥산 유도전압 변화 특성 .....	68
그림 3-37	경산 옥곡 측정 구간 이격도 .....	69
그림 3-38	경산 옥곡 유도전압 변화 특성 .....	69
그림 3-39	청도 청도 측정 구간 이격도 .....	70
그림 3-40	청도 청도 유도전압 변화 특성 .....	70
그림 3-41	양산 물금 측정 구간 이격도 .....	71
그림 3-42	양산 물금 유도전압 변화 특성 .....	71
그림 3-43	밀양 상동 측정 구간 이격도 .....	72
그림 3-44	밀양 상동 유도전압 변화 특성 .....	72
그림 3-45	서울 가산 측정 구간 이격도 .....	73
그림 3-46	서울 가산 유도전압 변화 특성 .....	74
그림 3-47	부산 화명 측정 구간 이격도 .....	75
그림 3-48	부산 화명 유도전압 변화 특성 .....	75
그림 3-49	대구 비산 측정 구간 이격도 .....	76
그림 3-50	대구 비산 유도전압 변화 특성 .....	76

그림 3-51	부산 덕포 측정 구간 이격도 .....	77
그림 3-52	부산 덕포 유도전압 변화 특성 .....	77
그림 3-53	부산 가야 측정 구간 이격도 .....	78
그림 3-54	부산 가야 유도전압 변화 특성 .....	78
그림 3-55	부산 덕포2 측정 구간 이격도 .....	79
그림 3-56	부산 덕포2 유도전압 변화 특성 .....	79
그림 3-57	대구 지천 측정 구간 이격도 .....	80
그림 3-58	대구 지천 유도전압 변화 특성 .....	80
그림 3-59	대전 갑천 측정 구간 이격도 .....	81
그림 3-60	대전 갑천 유도전압 변화 특성 .....	81
그림 3-61	상호 인덕턴스 계산을 위한 기초 규격 .....	83
그림 3-62	kd factor의 정규화 요율 .....	88
그림 3-63	측정 개소 지역 정규 전압 분포(지도 조판) .....	88
그림 3-64	측정 개소별 정규전압 분포도 .....	90
그림 3-65	고속전철 구간의 데이터 분포 .....	91
그림 3-66	국철 구간의 데이터 분포 .....	91
그림 3-67	대구 시내 진입 구간 데이터 변화 .....	92
그림 3-68	부산 시내 진입 구간 데이터 변화 .....	92
그림 3-69	부산 측정 개소의 국철/지하철 병행 특성 .....	93
그림 3-70	부산 덕포 지역의 토목 건축 구조물의 특성 .....	93
그림 3-71	급전소 위치 구간에서의 종전압 분포 .....	94
그림 3-72	KTX 주행 속도와 종전압과의 상관 관계 .....	95
그림 3-73	매설물 특성에 따른 영향 고려 .....	96
그림 4-1	국내 유도전압 측정 회로 .....	113
그림 4-2	미국 벨코어 측정 회로(1) .....	114
그림 4-3	미국 벨코어 측정 회로(2) .....	114
그림 4-4	일본 측정 회로 .....	114
그림 4-5	본 연구과제에서 사용된 전력유도 통신선로회로 .....	115

그림 4-6	모의 시험장비 구성도	115
그림 4-7	모의 시험 회로도	116
그림 4-8	장비 제어 채널 설명	116
그림 4-9	고전압 및 고전류 발생 장비	117
그림 4-10	고전압 부하 및 고전류 부하	118
그림 4-11	유도전압 측정장치 회로도	118
그림 4-12	통신선 유도전압 측정 장치	118
그림 4-13	통신선 유도전압 부하 장치	119
그림 4-14	고전압 통신선 유도전압 측정시스템	119
그림 4-15	고전압 통신선 유도전압 모의시험 현장	120
그림 4-16	고전류 통신선 유도전압 측정시스템	120
그림 4-17	고전류 통신선 유도전압 모의시험 현장	121
그림 4-18	고전압/고전류 선로 선대진간 유도시험 구성	122
그림 4-19	통신선 이격거리에 따른 유도전압 측정 그래프	123
그림 4-20	출력전압=0kV일 경우 유도전압 파형	124
그림 4-21	출력전압=5kV일 경우 유도전압 파형	124
그림 4-22	출력전압=10kV일 경우 유도전압 파형	125
그림 4-23	출력전압=15kV일 경우 유도전압 파형	125
그림 4-24	d=30cm, 5kV일 경우 유도전압 파형	126
그림 4-25	d=30cm, 10kV일 경우 유도전압 파형	127
그림 4-26	d=30cm, 15kV일 경우 유도전압 파형	127
그림 4-27	d=60cm, 0kV일 경우 유도전압 파형	128
그림 4-28	d=60cm, 5kV일 경우 유도전압 파형	129
그림 4-29	d=60cm, 10kV일 경우 유도전압 파형	129
그림 4-30	d=60cm, 15kV일 경우 유도전압 파형	130
그림 4-31	고전류 이격거리에 따른 유도전압 측정 그래프	131
그림 4-32	출력전류=0A일 경우 유도전압 파형	132
그림 4-33	출력전류=30A일 경우 유도전압 파형	133

그림 4-34	출력전류=60A일 경우 유도전압 파형	133
그림 4-35	출력전류=90A일 경우 유도전압 파형	134
그림 4-36	출력전류=0A일 경우 유도전압 파형(2)	135
그림 4-37	출력전류=30A일 경우 유도전압 파형(2)	135
그림 4-38	출력전류=60A일 경우 유도전압 파형(2)	136
그림 4-39	출력전류=90A일 경우 유도전압 파형(2)	136
그림 4-40	출력전류=0A일 경우 유도전압 파형(3)	137
그림 4-41	출력전류=30A일 경우 유도전압 파형(3)	138
그림 4-42	출력전류=60A일 경우 유도전압 파형(3)	138
그림 4-43	출력전류=90A일 경우 유도전압 파형(3)	139
그림 5-1	전류소스	150
그림 5-2	전류루프의 등가회로	151
그림 5-3	전기 다이폴: 3차원 소스	152
그림 5-4	전기 다이폴: 2차원 소스	153
그림 5-5	무한히 긴 선로 주변의 자계	154
그림 5-6	단일 와이어 전력선 유한 원통 표면 구조	160
그림 5-7	Collinear elementary 다이폴	165
그림 5-8	전위와 대지전압의 계산 예	169
그림 5-9	선로 배치	170
그림 5-10	통신선의 분포 정수 회로	170
그림 5-11	전력선과 통신선의 길이가 동일하지 않은 경우	174
그림 5-12	차폐도체, 유도구간과도 무한 길이의 경우	176
그림 5-13	차폐도체 무한 길이, 유도구간 유한길이	177
그림 5-14	차폐도체, 유도구간이 동일한 유한 길이	180
그림 5-15	등간격 다점 접지도체의 계산 모델	181
그림 5-16	특성 임피던스에 대한 오차	182
그림 5-17	관의 접속 방법	183
그림 5-18	매설관	183



---

## 제 1 장    연구개요

---





# 제 1 장 연구 개요

## 제1절 수행 배경

- 2006년 2월 8일부터 2월 28일까지 시행된 전력유도대책 비용의 남용성 감사 결과에 따른 전파연구소측 답신 내용에 따른 후속 조치
- 현 전파연구소고시 제2007-102호(전력유도전압의 구체적 산출방법)의 내용에 국제규격 변화에 따른 파라미터를 조정하고 제반 미해결 의문 사항에 대하여는 추가의 연구를 수행하여 보완키로 함.
- 이와 연관된 핵심 기술 연구 사항으로서 도시차폐효과에 대한 규명 연구 수행

## 제2절 연구 목표

- 도시차폐 발생 원리 해석
- 제외국 도시차폐효과 적용 기술에 관한 환경평가 및 기술의미 분석
- 차폐효과 영향 요소 분석
- 도시차폐효과 규명 방안 수립
- 지역별 유도전압 실측 데이터 수집 및 정량 비교 분석
- 지역성에 따른 도시차폐 효과 규명

## 제3절 연구 추진 체계

- 가. 대의에 있어 기술 해석과 정립 기반 형성을 위한 이론 연구를 추진하고 현장 실측을 병행하여 나타나는 현상 분석에 이론적 근거를 부합시킴.
- 원론 연구에 있어서 학계 연구 인력을 활용
  - 이론적 근거와 실제의 상황에서 나타나는 현상과의 괴리 부분에 대한 보정 검토가 필요할 수 있음.
- 나. 실측의 수행에 있어서 유도 측정에는 유도기관과 피유도기관 시설 지원 협조가 필수적이므로 이에 대한 협력 시스템을 구축하고 테스트베드 설치의 효과적 수행을 위한 기능 인력을 활용

#### 다. 조사분석 소요의 비교 활용

- 도시 차폐 영향의 원천인 지중매설물의 구성 상태 파악 및 이에 대한 기술 해석을 부여등

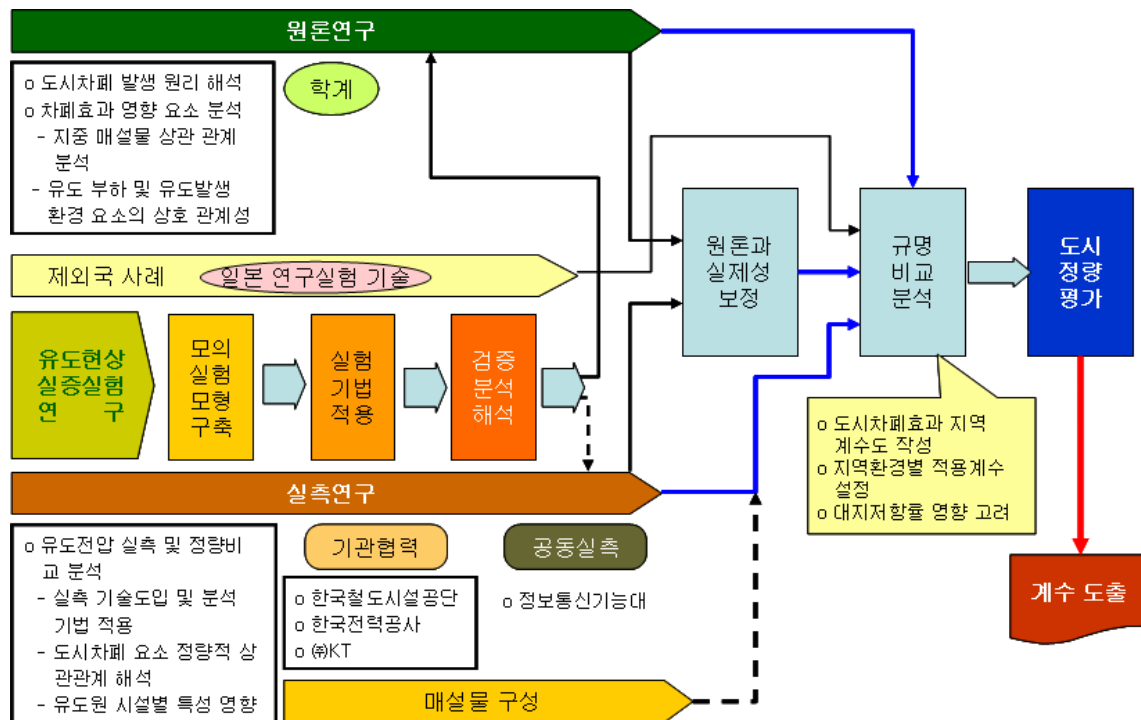


그림 1-1 연구 추진 체계

## 제4절 측정 실행 방안

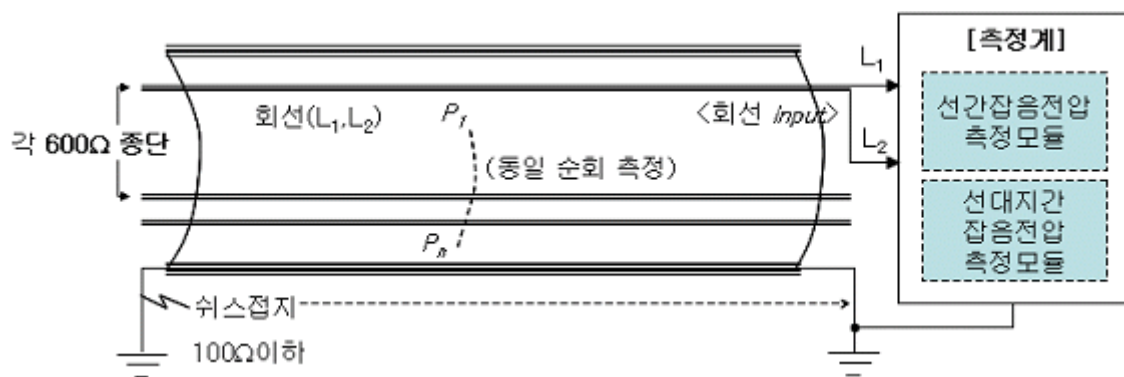
- 고속전철 직접 주변 접근 케이블 포설 유도전압 측정
  - 서울역 ~ 부산역 전구간 노선중 접근 가능 구간
  - 호남선 기점 구간(서대전~목포선) 접근 가능 구간 선정
  - 단위 유도 구간 거리 1km 통신케이블 포설 측정
- 배전선 유도전압 측정
  - 도시지역/시골지역 비교 측정
- 전구간 경로상의 유도전압 분포 비교 분석에 의한 도시지역 인터페이스 구간과 시골지역의 변화 특성 분석
- 주요 측정 수행 전략
  - 도시효과 판단에 있어서는 종전압 변화 중심 측정



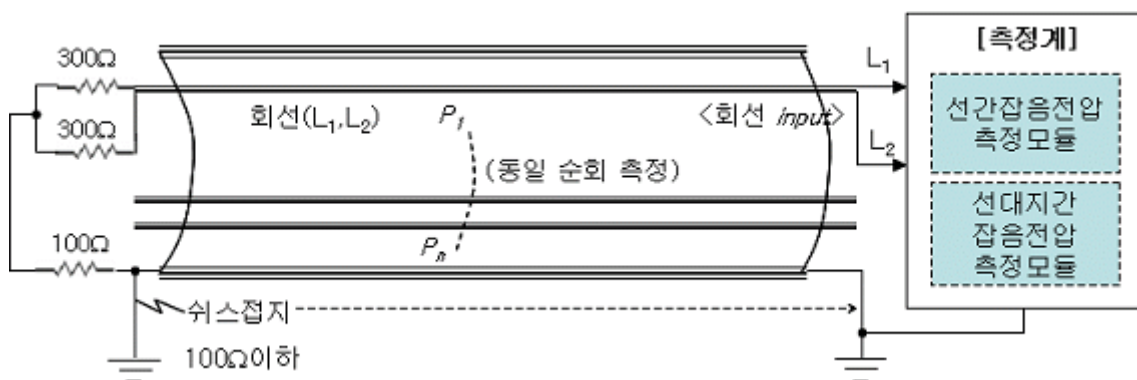
- 잡음전압 변화 특성 부가 측정
  - 측정단과 종단의 변경 측정
  - 케이블 시설 위치 변화 변수 측정 : 유도 환경의 간접 조정
- o 케이블 포설 예(이전 현장 측정 사진)
- 고속전철 근접 측정
    - 접근 가능한 교량 구간등 1km 통신케이블 연속 포설 가능 개소 선정
  - 배전선 측정 현장
    - 도심지의 가공 케이블 시설에 관하여는 전문 시설 업체 지원 용역

## 제5절 측정 기술 - 측정 회로의 구성

### o 600Ω 종단



### o 300Ω 발란스 종단 방식



### o 회선 오픈 방식

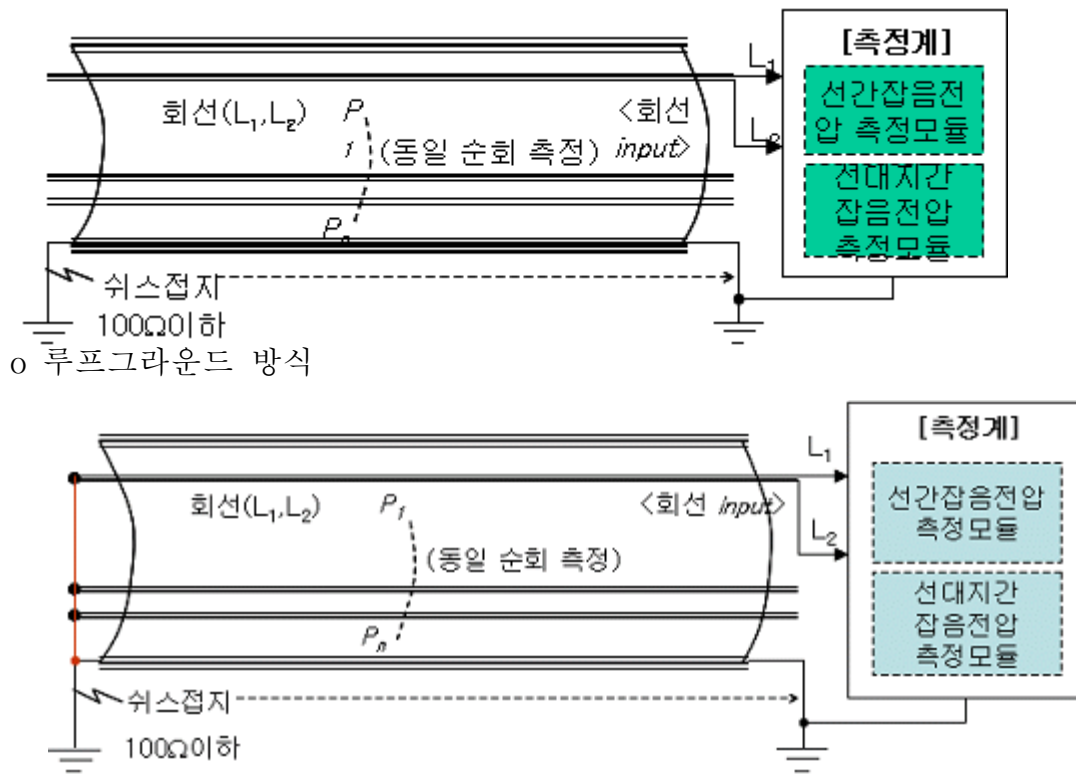


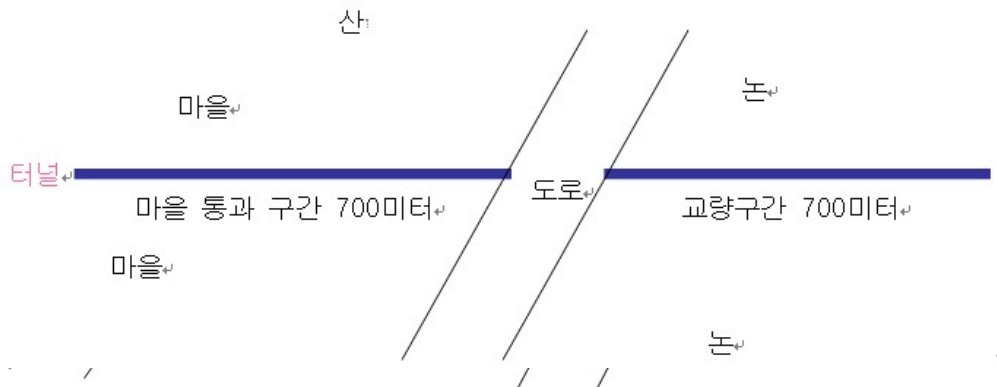
그림 1-2 측정회로 구성 방식

## 제6절 측정 예정 선정 개소

### ○ 고속전철 주변 포설 개소

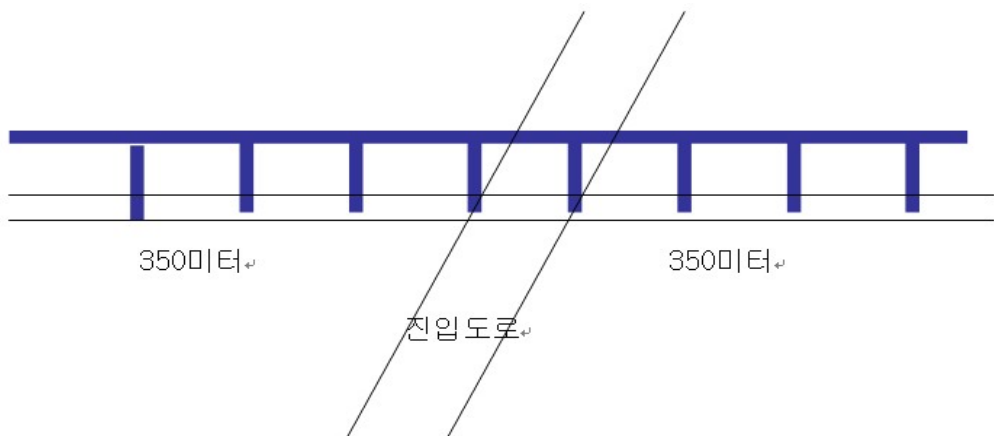
- 7.29.~7.30. 현장 답사 추진(12개소 예비 선정)
  - 대전역 → 광명역 구간 루트 선정
  - 서울지역(가산디지털단지, 서울역 개소 검토) : 가산디지털단지 선정
  - 대전역 동부~동대구역 구간 선정
- 선정 구간 정보

1. 시목 지역 : 기 포설된 차폐시설된 통신 케이블과 병행하는 500미터 정도의 KTX 교량 밑
2. 강내 지역 : 총 1,400미터의 병행길이, 교량+평지(700미터) 및 교량(700미터)간 가공이 필요한 주도로로 인한 케이블 가공 포설 필요



3. 연기군 소정면 : 1600미터의 병행구간으로 최적의 장소로 고려됨. KTX 교각 및 병행거리 1600미터

4. 아산 음봉 : 진입로 양쪽으로 350미터씩 총 700미터 병행길이



5. 평택 팽성: 총 1300미터 병행구간, 노반과 교량의 혼재지역



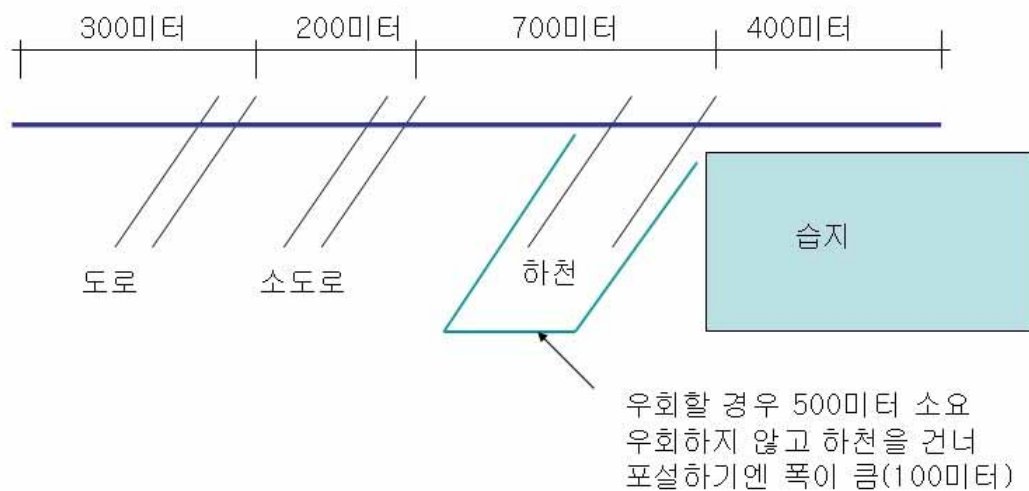
6. 평택 팽성 : 노반지역과 교량(일부)지역의 혼재된 1200미터 병행거리

7. 평택 팽성 : 6번과 동일 지역으로 6번 지역 종단을 기점으로 도로를 건너

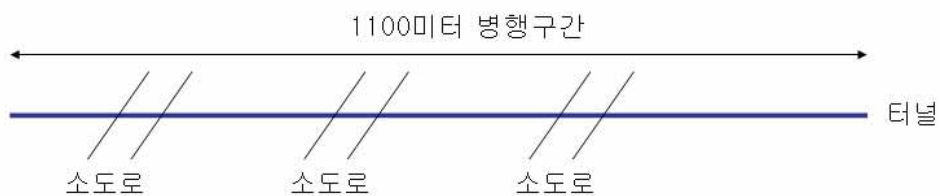
논지역으로 1000미터 병행 교각 지역

8. 서울 가산 디지털 단지 역 : 선로를 따라 서울역 방향으로 담장을 사이로 하여 1000미터 이상 인접 병행, 진입로 등 방해물 없음

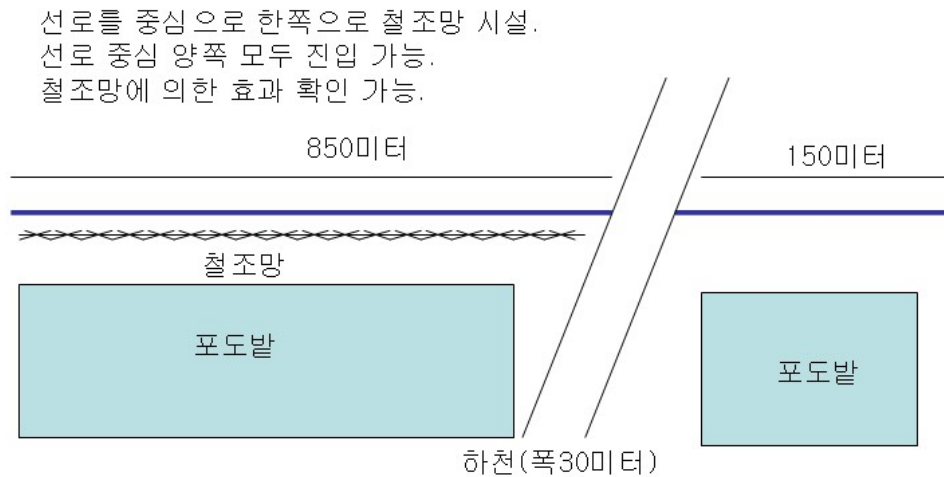
9. 영동 심천



10. 영동 주곡 : 소도로를 몇 개 낀 1100미터 병행 구간

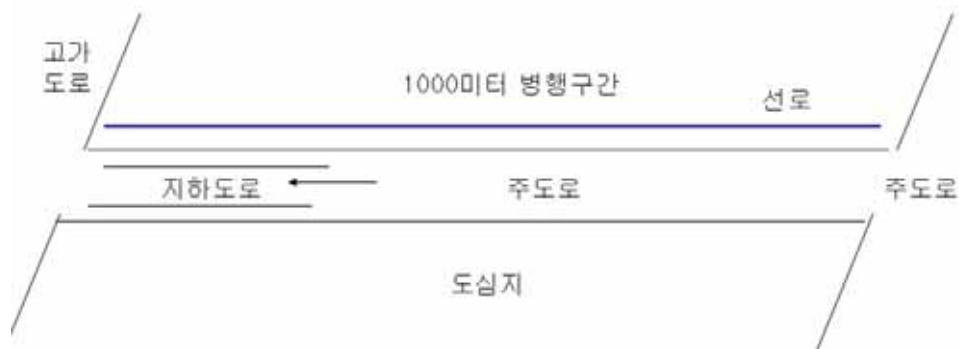


11. 김천 봉산



12. 수성 만촌 : 번잡한 도심 구역. 동대구역으로 진입하는 선로에 병행한 1000미터 포설 가능. 측정단과 종단에서의 측정 수행에 다소 어려움 예상(차량 통행이 많은 도심지)

- o 동대구역~부산역, 호남선 구간 추가 루트 선정 검토가 필요함.
- o 배전선에 측정 개소는 추후 선정 검토




## 제7절 측정 수행 계획 일정

- o 기본 8월 측정 수행 완료
- o 9월은 추가 측정 분
  - 측정 개소 추가에 의한 측정
  - 측정 개소 실험 보완 측정 수행 소요
  - 배전선에 대한 측정 일정 추가 예상

<표 1-1> 측정 수행 계획 일정


월	차수(주)	계 획 기 간	기본일수	측 정 개 소
8	1	8. 5.~8. 8.	4	시목, 강내, 연기 소정(충남)
	2	8.11.~8.14.	4	아산 음봉, 평택 팽성(충남) 가산 구로(서울)
	3	8.18.~8.22.	5	영동 심천, 주곡, 김천 봉산(경북) 수성 만촌(대구)
	4	8.25.~8.29.	5	부산역까지 구간과 호남선 구간 선정 측정
9	5	9. 1.~9. 5.	5	8월 측정 수행 구간 보완 측정
	6	9. 8.~9.10.	3	배전선 구간 선정 검토 협의 및 측정
	7	9.23.~9.26.	4	배전선 구간 검토 및 보완 측정
계			30	



---

## 제 2 장 유도기술 일반과 도시효과 연구 해석 정보

---







## 제2장 유도기술 일반과 도시효과 연구 해석 정보

### 제1절 전력유도전압의 계산시스템

전력유도전압을 계산하는 방법은 전파연구소고시 제2007-102호(전력유도전압의 구체적 산출방법에 관한 기술기준, 2007.12.21, 이라 ‘고시’라 한다)에서 다루고 있다. 전력유도전압에 관한 고시의 주요 구성 내용은 <표 2-1>과 같다.

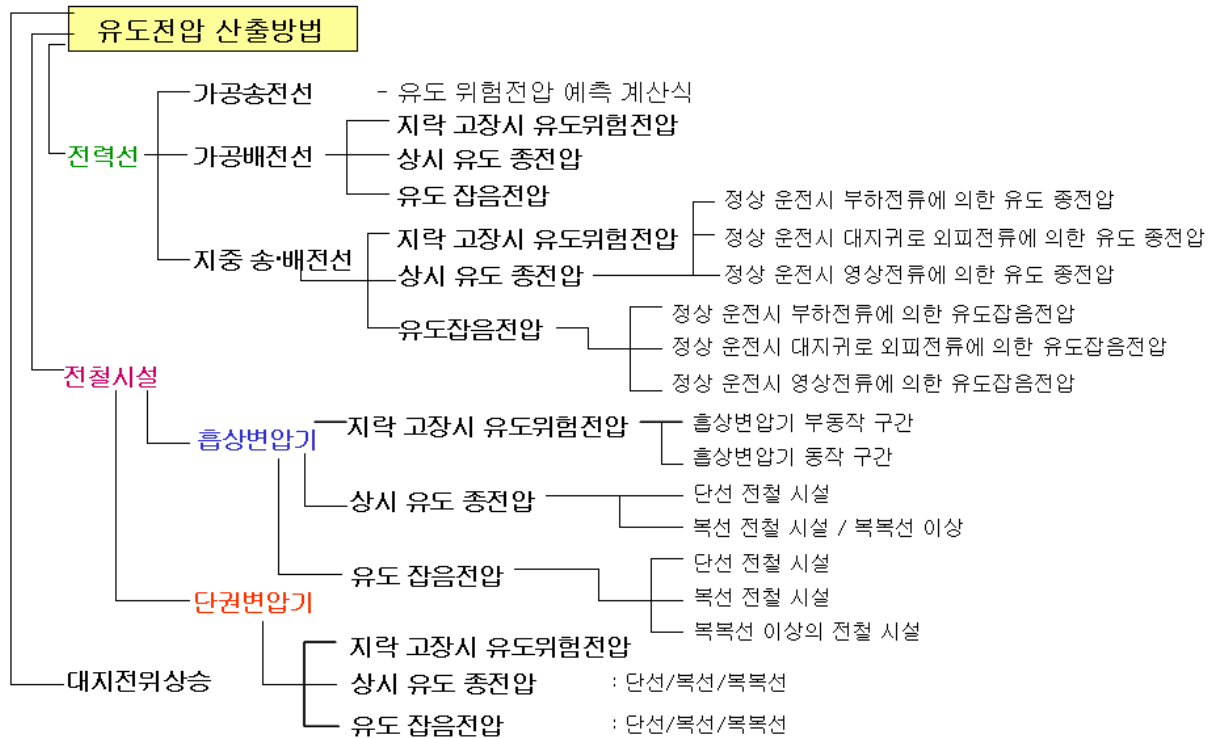
<표 2-1> 전력유도전압 계산 기준 구성 항목

조항		별표처리		비고
제3조 전력선에 의한 유도전압 산출방법	1. 가공송전선에 의한 이상시 유도위험전압 예측계산식	[별표 1]	[별표 4] 각종 계수적용표 *가공지선의 차폐계수( $K_{11}$ )와 분류계수( $K_{12}$ ), 지중송배전선의 분류계수( $K_{32}$ )는 산식에 의함	- 계수의 적용은 합리적이고 보편화된 과학적 산출치, 실측치, 또는 실험치를 사용 - 적용하기 곤란할 경우에 별표를 사용
	2. 가공배전선에 의한 유도전압 예측계산식	[별표 2]		
	3. 지중 송·배전선에 의한 유도전압 예측계산식	[별표 3]		
제4조 전철시설에 의한 유도전압 산출방법	1. 흡상변압기 급전방식의 교류전철시설에 의한 유도전압 예측계산식	[별표 5]	[별표 7] 각종 계수적용표	
	2. 단권변압기 급전방식의 교류전철시설에 의한 유도전압 예측계산식	[별표 6]		
제5조 대지전위 상승에 의한 이상시 유도위험전압 산출방법		[별표 8]		

고시에서 정하고 있는 계산 대상이 되는 유도전압 종별 구성 체계는 (그림 2-1)과 같다.

각 유도전압 구성 항목별 계산식 시스템은 <표 2-2> 및 <표 2-3>과 같다. <표 2-2>는 유도원 시설로서 최종 사용 부하 전원인 220V를 공급하기 위한 전력선으로서 대표적으로 송전선과 배전선으로 구분되며 이들은 다시 시설 위치에 따라 가공과 지중 전력선으로 분류된다. 이어지는 두번 째 <표 2-3>은 전철시설에 의한 것으로서 특히 교류전철 시설들에 의한 것이고 크게 흡상변압기에 의한 것과 고속전철(KTX)에 사용되는 단권변압기(AT: Auto Transformer)에 의한 것

으로 구분된다.



(그림 2-1) 유도원 시설별 유도전압 계산 대상 구성 체계

<표 2-2> 유도전압계산시스템 - 전력선

No.	유형	산식
1	가공송전선	$V_f = \Delta I \begin{bmatrix} K_3 & K_7 & K_{11} & K_{12} \end{bmatrix} M \quad j\omega l \cdot I_p$
2	가공배전선	지락고장 $V_f = \Delta I \begin{bmatrix} K_3 & K_7 & K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} M \quad j\omega l \cdot I_p$
3		상시유도종전압 $V_L = \Delta I \begin{bmatrix} K_3 & K_7 & K_{21} \end{bmatrix} M \quad j\omega l \cdot I_n$
4		유도잡음전압 $V_n = \Delta I \quad \eta \alpha \quad V_L 10^3$
5	지중송배전선	지락고장 $V_f = \Delta I \begin{bmatrix} K_3 & K_7 & K_{31} & K_{32} \end{bmatrix} M \quad j\omega l \cdot I_p$
6		상시유도종전압 $V_L = \sqrt{V_f^2 + V_s^2 + V_0^2}$
7		- 부하전류 $V_f = \Delta I \begin{bmatrix} K_3 & K_7 & K_{31} \end{bmatrix} M_a + a^2 M_b + a M_c \quad j\omega l \cdot I_p$
8		- 외피전류 $V_s = \Delta I \begin{bmatrix} K_3 & K_7 & K_{21} \end{bmatrix} M \quad j\omega l \cdot I_p$
9		- 영상전류 $V_0 = \Delta I \begin{bmatrix} K_3 & K_7 & K_{s0} \end{bmatrix} M \quad j\omega l \cdot I_0$
10		유도잡음전압 $V_n = \sqrt{V_{en}^2 + V_{sn}^2 + V_{0n}^2}$
11		- 부하전류 $V_{en} = \Delta I \begin{bmatrix} K_{1n} & K_{3n} \end{bmatrix} \lambda M_a + a^2 M_b + a M_c \quad j\omega_n l \cdot I_{en} 10^3$
12		- 외피전류 $V_{sn} = \Delta I \begin{bmatrix} K_{3n} \end{bmatrix} \lambda M_n \quad j\omega_n l \cdot I_{sn} 10^3$
13		- 영상전류 $V_{0n} = \Delta I \begin{bmatrix} K_{3n} & K_{0n} \end{bmatrix} \lambda M_n \quad j\omega_n l \cdot I_{0n} 10^3$

<표 2-3> 유도전압계산시스템 - 급전선

No.	유형	산식
14	지락고장	$V_a = V_0 + \mathcal{L}V_1$
15	- 무동작 구간	$V_0 = \mathcal{L} \begin{matrix} K \\ 1-n \end{matrix} \begin{matrix} M \\ j\omega l_0 \cdot I_a \end{matrix} 10^{-6}$
16	- 동작 구간	$V_1 = \mathcal{L} \begin{matrix} K \\ K_A \end{matrix} \begin{matrix} M \\ j\omega l_1 \cdot I_a \end{matrix} 10^{-6}$
17	흡상유도중전압	$V_L = \mathcal{L} \begin{matrix} K \\ 1-n \end{matrix} \begin{matrix} M \\ j\omega l \cdot I_L \end{matrix} 10^{-6}$
18	유도잡음전압 - 일반전화회선	$V_n = \mathcal{L} \begin{matrix} K \\ \lambda(1-n)n \end{matrix} \begin{matrix} M_n \\ j\omega_n l \cdot I_p \end{matrix} 10^{-3}$
19	- 양방향 중계기외	$V_n = \mathcal{L} \begin{matrix} K_{nf} \\ K_{3n} \end{matrix} \begin{matrix} \lambda_{nf}(1-n) S_{nf} G_{nf} \\ M_{nf} j\omega_{nf} l \cdot I_{nf} \end{matrix} 10^{-3}$
20	- 양방향 중계기	$V_n = \begin{matrix} \mu \\ V_n(\text{일반전화}) \end{matrix}$
21	지락고장	$V_a = \mathcal{L} \begin{matrix} K_3 K_4 K_6 K_7 \\ M \end{matrix} \begin{matrix} j\omega l \cdot [\text{Amp} \cdot \text{Km}/D] I_a \end{matrix} 10^{-6}$
22	상시유도중전압	$V_L = \mathcal{L} \begin{matrix} K_3 K_4 K_7 K_8 \\ M \end{matrix} \begin{matrix} j\omega l \cdot [\text{Amp} \cdot \text{Km}/D] I_L \end{matrix} 10^{-6}$
23	유도잡음전압 - 일반전화회선	$V_n = \mathcal{L} \begin{matrix} K \\ \lambda \end{matrix} \begin{matrix} M_n \\ j\omega_n l \cdot [\text{Amp} \cdot \text{Km}/D] I_p \end{matrix} 10^{-3}$
24	- 복선전철시설	$\begin{aligned} V_n(\text{합성}) &= \sqrt{V_{1n}^2(\text{상}) + V_{2n}^2(\text{상}_{12n})} + \sqrt{V_{2n}^2(\text{하}) + V_{2n}^2(\text{하}_{12n})} \\ V_{cn}(\text{합성}) &= 1.41 \sqrt{V_{1n}^2(\text{상}) + V_{2n}^2(\text{상}_{12n})} \\ V_{1n}(\text{상}) &= \sqrt{V_{1n}^2(\text{상}) + V_{2n}^2(\text{상}_{12n})} \\ V_{2n}(\text{하}) &= \sqrt{V_{2n}^2(\text{하}) + V_{2n}^2(\text{하}_{12n})} \end{aligned}$
25	대지전위 상승	$V = \rho I / 2\pi D$

- **Amp·Km** : 60Hz에 대한 (1-n) I K<sub>5</sub> D
- **K<sub>nf</sub>** : 기수구조파 차수에 대한 각종 차폐계수(K<sub>1</sub> K<sub>2</sub> K<sub>3</sub> K<sub>4</sub> K<sub>5</sub> 등)
- **K** : 각종 차폐계수중 필요한 계수들의 곱(K<sub>3</sub> K<sub>4</sub> K<sub>5</sub> K<sub>7</sub> K<sub>8</sub>; 단권변압기에서의 경우: K<sub>3n</sub> K<sub>4</sub> K<sub>6</sub> K<sub>7</sub> K<sub>8</sub>)
- 흡상변압기에 의한 복선전철 적용 전압 합성식은 제외

유도전압 구성 체계별 차폐계수의 및 각종 파라미터의 종류 및 분류 특성은 <표 2-4>와 같다.

각종 파라미터와 차폐계수는 고시상으로부터 정리된 것으로서 29개종에 달한다. 이것들은 유도원 시설별로 분류 적용된다. 직접 차폐계수에 해당하는 것 외에 이와 유사하거나 준하는 성격의 파라미터들이 있으며 계산상 필요한 여러 유형의 파라미터들이 포함된다.

특히 본 연구 수행에 직접 관련된 고속전철 시설 특성에 따른 차폐계수로는 전차차폐(K<sub>1</sub>), 터널차폐계수(K<sub>4</sub>), 고가차폐계수(K<sub>6</sub>), 타케조효과(K<sub>8</sub>)가 있다. 다음장에서 설명할 측정 연구 수행상에서의 측정 전압들의 동일 조건 형성을 위한 정규화의 관점에서 전차차폐(K<sub>1</sub>)는 철도 시설의 일반적 특성상 측정 개소의 모든 현장에서 동일한 것이므로 정규화가 필요치 않고 터널차폐계수와 고가차폐계수, 타케조효과는 개소에 따라 존재 유무의 차이가 있으므로 정규화를 해주어야 한다. 이에 대한 사전 정보로서 고시의 계수치를 <표 2-5>, <표 2-6>, <표 2-7>에 나타내었다.

터널차폐계수와 고가차폐계수는 대지저항률( $\rho$ )의 범위별로 구분되어 있다. 터널

차폐계수는 터널의 길이 따라 또한 구분되며, 고가차폐계수는 고가의 길이가 500m에서부터 적용된다. 실 측정 수행 개소의 특성상 터널 주변에서는 측정 실행이 곤란하므로 실질적으로 사용되지는 않았다.

<표 2-4> 유도전압 계산 적용 차폐계수 및 파라미터

No.	계수분류	계수표기	계수명	특성/해설
1	차폐계수	$K_1$	전차차폐	
2		$K_2$	전기통신선의 차폐계수	
3		$K_3$	터널차폐계수	
4		$K_4$	고가차폐계수	
5		$K_5$	타개조효과	
6		$K_{6a}$	800Hz 영상전류 차폐계수	800Hz에서의 영상전류에 대한 지중전력선의 차폐계수
7		$K_{61}$	송전선 가공지선	
8		$K_{6a}$	지중전력선 차폐계수	800Hz
9		$K_{61}$	중성선 차폐계수	배전선의 중성선
10		$K_{61}$	지중송배전선의 차폐계수	
11		$K_{6a}$	800Hz 전기통신선	
12		$K_{6a}$	60Hz 영상전류 차폐계수	60Hz에서의 영상전류에 대한 지중전력선의 차폐계수
13		$K_{6f}$	기수고조파 차폐계수	흡상변압기 전철시설에서의 기수고조파 차수에 대한 각종 차폐계수
14	저감계수	$K_7$	유도저감계수	통신케이블 조수에 의한 유도 저감계수
15	분류계수	$K_{12}$	가공송전선의 분류계수	
16		$K_{12}$	가공배전선의 분류계수	
17		$K_{12}$	지중송배전선의 분류계수	
18	경감계수	$\alpha$	유도잡음경감계수	전력선 가공배전선의 유도 잡음 경감계수
19		$K_8$	유도경감계수	단·복선 전철에 있어서 흡상변압기 유도에 대한 경감계수
20	잡음계수	$S_{nf}$	평가잡음계수	
21	평 형 도	$\lambda$	전기통신회선의 평형도	
22		$\lambda_{nf}$	기수고조파 회선평형도	
23	합 유 율	$\eta$	평가잡음합유율	전력선 가공배전선
24		$I_{nf}$	고조파합유율	전철시설 흡상변압기
25	개조효과	$1-n$	60Hz 개조효과	
26		$(1-n)n$	800Hz 개조효과	
27	분류효과	$K_8$	분류효과	
28	(증강계수)	$\mu$	중계기 미득	
29		$G_{nf}$	기수고조파 미득	기수고조파에 의한 중계기의 미득

<표 2-5> 터널차폐계수

터널의 길이(m) 대지고유저항( $\Omega \cdot M$ )	200 내지 1,000	1,000이상	
		양단 500까지	기 타
$\rho \geq 250$	0.775	0.775	0.550
$17 \leq \rho < 250$	0.785	0.785	0.570
$17 > \rho$	0.800	0.800	0.600

타케도효과에 대한 부분은 고속전철이 통과되는 당해 선로 이외의 선로는 차폐체로서의 의미를 갖는다. 이는 선로 복합적 구성 특성 관계에 의하여 단선, 복선, 복복선으로 구분 적용되며 전철궤도와 타케도의 병행 거리에 따른 것과 유도원 급전선과 피유도원 통신선과의 위치에 따른 관계로서 이들 사이에 놓이는가 아니면 바깥쪽에 놓이는가에 따라 계수치가 구분 적용된다.

<표 2-6> 고가차폐계수

고가의 길이(m) 대지고유저항( $\Omega \cdot M$ )	500 내지 1,000	1,000이상	
		양단 500까지	기 타
$\rho \geq 250$	0.650	0.650	0.300
$17 \leq \rho < 250$	0.665	0.665	0.330
$17 > \rho$	0.685	0.685	0.370

<표 2-7> 타케도효과

전철궤도와 타케도의 병행거리(m)		500 내지 1,000	1,000 내지 1,500	1,500 내지 3,000
타케도 위치	타케도수			
타케도가 통신회선과 전차선 간에있을때(전기통신회선과전 차선의 이격거리가 300m이내)	1. 단 선	0.93	0.87	0.81
	2. 복 선	0.87	0.76	0.67
	3. 복복선	0.80	0.65	0.54
타케도가 통신회선과 전차선 외측에 있을 때(타케도와 가장 먼쪽의 시설과의 이격거리가 300m이내)	1. 단 선	0.97	0.95	0.92
	2. 복 선	0.95	0.90	0.86
	3. 복복선	0.92	0.86	0.82

## 제2절 도시차폐효과의 분석 방법론

유도전압 계산의 원형은 식(2-1)과 같다.

$$V = j\omega M \ell IK \quad (2-1)$$

- V : 유도전압(V)
- M : 상호인덕턴스(H/km)
- $\ell$  : 병행거리(km)
- I : 기유도전류(A)
- K : 종합 차폐계수
- $\omega$  : 각주파수,  $2\pi f$

이것은 단순히 전압 계산의 옴의 법칙  $V=IR$ 에 의한 변형으로서 이해하면 된다.  $j\omega M \ell$ 은 R성분으로서 교류에 의한 임피던스에 해당하는 것이고 K가 유도 영향에 대하여 유도전압을 낮춰주는 차폐계수로서 사용된 것이다.

차폐효과를 나타내는 실재는 유도를 받는 통신선과 유도를 일으키는 전력선의 유도전류가 흐를 수 있는 다른 피유도체가 있을 때 이것이 상대적으로 통신선에 일으키는 유도전압을 상쇄시켜 주기 때문에 나타나는 현상이다.

도시차폐효과를 측정하고 정량적으로 분석하기 위한 방법론은 다음의 <표 2-8>과 같이 크게 네 가지로 대별할 수 있다.

<표 2-8> 도시차폐효과 분석 방법론

분 석 방법론	계산 정량	특징	문제점	Solution	적용 선정
<b>직접측정 방식</b>	$K_x = V' / V$ V': 효과전압 V: 유도전압	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 원초적 실측 방법</li> <li>• 차폐계수 원론식</li> <li>• 해석 불요(단순)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지역 의존성</li> <li>• 특정 계수치</li> <li>• 시설 제약</li> <li>• 기간 의존성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일반화 요율</li> <li>• 원인 해석요법</li> <li>• 건설 지역 초기 선정 공정 진행</li> </ul>	장기 소요
<b>직접 산출 방식</b>	$K_x = V_m / V_c$ V <sub>m</sub> : 측정전압 V <sub>c</sub> : 계산전압	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 직접산출 (Straight-forward)</li> <li>• 장소 독립성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• V<sub>c</sub>의 정밀성</li> <li>• V<sub>m</sub>의 정밀성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 예측계산시스템 개선</li> <li>• 측정기술 개발</li> </ul>	보완 연구
<b>실측기반 비교 방식</b>	$K_x = V_{Be} / V_{Bo}$ V <sub>Be</sub> : 매설전압 V <sub>Bo</sub> : 토지전압	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 매설 영향</li> <li>• 장소 의존성</li> <li>• 시골/도시 측정 비교</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유도조건 다양</li> <li>• 기유도전류 해석의 곤란성</li> <li>• 매설물 맹점</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 파라미터 보정(정규화)</li> <li>• 매설물 조사</li> <li>• 전자장 해석</li> </ul>	실측 수행 적용
<b>예측계산 상대성요율</b>	$K_x = K'_u / K'_o$ K' <sub>u</sub> : 도시오차 K' <sub>o</sub> : 시골오차	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지역별 예측계산과 실측을 비교</li> <li>• 계산오차 무관</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 예측계산 자원의 한계성/신뢰성</li> <li>• 계산요소의 실측성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 예측계산시스템 검증</li> <li>• 실측요소 보정</li> <li>• 매설물 특성 부여</li> </ul>	시간 예산 소요

## ■ 직접 측정 방식

이것은 차폐효과의 단순 원리적 방법을 적용하는 것이다. 차폐효과란 차폐성 시설물이 없을 때의 전압( $V$ )에 대한 차폐성 시설물이 존재할 때의 전압( $V'$ )의 비이므로 다른 차폐성 시설물이나 전반 유도 환경 및 유도 전력 조건등의 동일성 유지 상태에서 고시의 공식적 계산시스템에 반영되어 있지 않은 도시성 시설물이 존재하지 않을 때의 유도전압에 대한 도시성 시설물이 존재할 때의 유도전압의 비를 구할 수 있다면 바로 도시차폐효과(계수)를 구하게 되는 것이다.

실제에 있어 어떤 지역에 전력시설이 공급되고 이후에 순차적인 도시형 시설물이 들어선다고 할 때 그러한 순차성에 따른 측정전압간의 비는 곧 추가적인 시설물에 의한 차폐효과를 의미한다.

좀 더 구체적인 예로서 현재 경부고속전철 구간이 경주지역 루트를 통과하는 선로가 신설 중에 있는데 선로시설이 들어서기 전의 유도전압, 시설 직후의 유도전압, 선로시설 이후에 수도관이나 가스관 또는 빌딩, 건물 등이 건설되는 과정에서의 측정값간의 차이는 그러한 시설물들에 의한 유도전압에의 영향성을 알 수 있게 됨으로 선로시설 직후 유도전압에 대하여 다른 건물이 들어선 후의 유도전압이 떨어진다면 건설된 건물에 의한 차폐효과가 있다는 알 수 있으며 이 두 전압간의 비가 그 건물에 의한 차폐계수를 직접 실측 비교된 것과 같은 것이다. 그런데 이러한 직접 측정 방식은 유도시설 환경을 임의로 다룰 수는 없는 한계점이 있기 때문에 시설물들의 건설 과정을 거쳐야 하는 기간상의 제약을 갖는 것이 단점이다.

## ■ 직접 산출 방식

이것은 ITU-T의 Directive(concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines)에 제시되어 있는 원론적 방법이다<sup>1)</sup>. 상기와 같이 직접 측정 방식에서 차폐성 시설물이 이루어질 때까지의 시간 종속성에 의한 기다림없이 즉시적으로 판별할 수 있는 방법으로서 대신 차폐효과를 판별하고자 하는 지역의 유도전압을 계산하고 실측하여 이 두 개 값을 비교함으로써 차폐효과를 분별하는 것이다. 이것은 예측 계산이 오직 도시차폐효과만을 제외한 모든 차폐 변수를 포함하고 있는 또 계산상 이상적으로는 100% 정확하다는 가정에서 정확한 도시차폐계수를 도출할 수

1) ITU-T(구 CCITT) Directives Vol.VII(Protective Measures and Safety Precautions) 3.8절 Screening conductors pp.12-13에 기술되어 있다.

있다는 난점이 있다. 예측계산 자체의 정확성에 대한 신뢰가 보장되지 못한 상태에서는 계산 자체에 의한 오차율이 도시차폐효과로 정량 평가되는 문제가 있기 때문이다. 이 문제를 극복하기 위하여는 예측계산시스템 자체를 정밀성을 갖도록 보완 개발하여야 한다.

## ■ 예측계산 상대성 효율

이것은 각 지역(시골지역, 도시지역 등)에서의 유도 환경에 대한 각개의 예측계산치와 실측치간의 차이간의 비교 평가하는 방식이다. 이 방식의 이점은 단지 각 지역 예측치와 실측치의 차이를 상호 비교하는 것으로서 당해 유도 조건 환경을 반영한 각개의 예측치가 상대적으로 계산되는 것이므로 원칙적으로는 지역 환경 시설에 독립적이라는 것이다.

도시차폐효과를 평가하기 위한 것이므로 일단 도시차폐계수  $K_x$ 가 없는 것이라고 가정할 때 어느 측정 지역에 있거나 동일한 유도전압 유형(이 경우에 있어서 상시유도종전압)에 대하여는 예측치와 실측치간의 괴리율은 동일한 것이다. 따라서 동일시설조건 형성은 굳이 필요치 않다. 다만 유도에 있어서는 내재된 오차 변수들이 있을 수 있으므로 오차율 자체가 일정한 지에 대하여 실측 자료 분석에 의한 확인이 요구된다.

기본적으로 도시지역에서의 예측치와 실측치간의 괴리가 더 크다면 이 부분에 있어 평균적 도시차폐효과의 영향으로 해석할 수 있을 것이다. 오차율 자체가 일정하지 않은 경우 이의 적용을 위하여는 오차율의 오차에 대한 별도의 보정 해석이 또한 필요하다.

괴리에 대한 차폐효과 해석 산출로서 오차율 자체가 일정한 관계라면 각기 차이분에 대한 도시차폐효과로서의 상대적 효율은 다음과 같이 계산될 수 있다.



$$\begin{aligned}
K_x &= \frac{K'_u}{K'_o} \\
&= \frac{\frac{V_{Ru}}{V_{Cu}}}{\frac{V_{Ro}}{V_{Co}}} \\
&= \frac{V_{Ru} V_{Co}}{V_{Cu} V_{Ro}}
\end{aligned}
\tag{2-2}$$

$K_x$  : 도시차폐계수

$K'_u$  : 도시지역에서의 예측치에 대한 실측값의 괴리율

$K'_o$  : 시골지역에서의 예측치에 대한 실측값의 괴리율

$V_{Ru}$  : 도시지역에서의 실측치

$V_{Cu}$  : 도시지역에서의 예측치

$V_{Ro}$  : 시골지역에서의 실측치

$V_{Co}$  : 시골지역에서의 예측치

오차율의 오차율 고려를 위하여는 시골 지역과 도시지역에서의 여러 측정 데이터에 대한 클러스터링된 정량적 관계 해석을 통하여 실제 도시차폐효과를 판별하고 그 효율을 도출하여야 할 것이다. 이는 또한 상대평가이므로 대책전에 있거나 대책후에 있거나 마찬가지로 효율로 산정될 수 있다. 단, 이 때 대책 수위의 동일 조건 형성이 필요하다.





## 제3장 현장 측정 수행 연구





## 제3장 현장 측정 수행 연구

유도원 시설을 추적하여 도시 지역과 시골 지역을 경계선상으로 이동하는 유도전압의 전체적인 분포를 파악하고 지역별로 나타나는 특성을 분석하기 위하여 고속전철 시설 루트를 따라 접근 가능한 노선을 선정하여 전국적 분포의 유도전압을 측정하였다. 각 측정 개소 그룹별 측정 내용을 제1절에서 설명한다.

### 제1절 현장 측정 수행 현황

#### 1. 전 측정 일정 및 개소 현황

현장 측정 개소는 경부선 고속전철(KTX) 경과 루트를 종행하여 가장 가까이 최대 1km 케이블을 시설할 수 있도록 접근이 가능한 구간을 선정하여 상시 유도종전압 및 잡음전압 측정을 수행하였다.

측정 일정은 8월부터 10월까지와 개소수 예비를 위하여 11월 12~13일에 3개소를 추가 측정하였다.

전반적인 지역별 일정 및 개소수의 개략은 <표 3-1>과 같다.

<표 3-1> 지역별 측정 일정 및 위치 개략

No.	측정일자 (요일)	측정 개소	지역 구분	위치주소 / 설명	위도/경도
1	2008/08/05 (화)	충북 시목	시골	충청북도 청원군 부용면 노호리 74-0	E: 127°24'22.5" N: 36°29'40.1"
2	2008/08/06 (수)	충북 강내	시골	충청북도 청원군 강내면 태성리 11-1	E: 127°21'53.6" N: 36°35' 7.0"
3	2008/08/07 (목)	충남 소정	시골	충청남도 연기군 소정면 대곡리 196-0	E: 127° 4'46.5" N: 36°53'46.3"
4	2008/08/08( 금)	아산 음봉	시골	충청남도 아산시 음봉면 신휴저수지 윗단	E: 127° 4'46.5" N: 36°53'46.4"
5	2008/08/13 (수)	평택 팽성 1	시골	충청남도 아산시 둔포면 대사리 추 팔지방산업단지 약 1.5km 후방 평원 목장 인근 아래쪽	E: 127° 4'25.0" N: 36°56'13.7"
6	2008/08/14	평택	교외	경기도 평택시 팽성읍 신호리 농산	E: 127° 3'54.9"

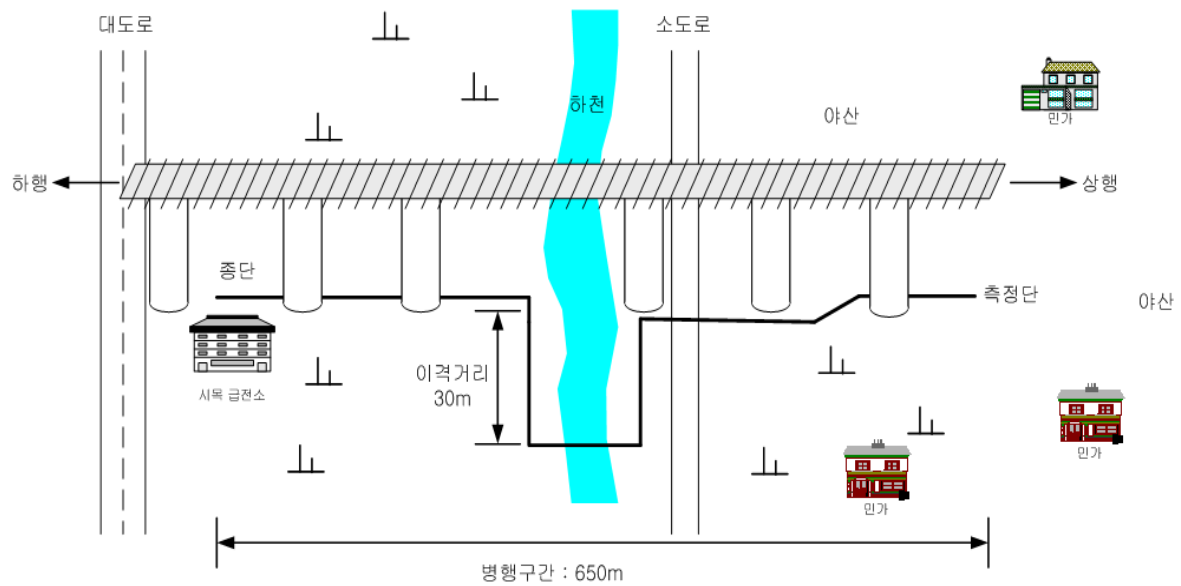
No.	측정일자 (요일)	측정 개소	지역 구분	위치주소 / 설명	위도/경도
	(목)	팽성 2		물산지유통센터 10번 지방도 교차 북방선 1km	N: 36°58'35.4"
7	2008/08/18 (월)	영동 심천	시골	충청북도 영동군 심천면 고당리 심 천중교 인근 밤섬 통과루트	E: 127°43'16.0" N: 36°12'59.0"
8	2008/08/19 (화)	영동 주곡	교외	충청북도 영동군 영동읍 화신리 화 신1터널 전단 해성 oil-bank 주유소 상하 1km 국철 병행 구간	E: 127°48'15.0" N: 36°12'59.1"
9	2008/08/20 (수)	김천 봉산	교외	경상북도 김천시 봉산면 덕천리 포 도농원 덕천교 좌우 0.8km 구간	E: 128° 3' 1.5" N: 36° 8'17.8"
10	2008/08/22 (금)	양산 원동	시골	경상남도 양산시 원동면 용당리 중 리마을회관 앞 남방 1km	E: 128°55' 3.1" N: 35°21'51.2"
11	2008/08/26 (화)	서울 구로	도시	서울특별시 금천구 가산동 서울디지 털산업단지 가산/독산역간 직선 1km 구간	E: 126°53' 3.7" N: 37°28'48.5"
12	2008/08/28 (목)	부산 화명	도시	부산광역시 북구 화명동 화명역 직 북방 0.95km	E: 129° 0'37.8" N: 35°13'54.9"
13	2008/08/29 (금)	대구 비산	도시	대구광역시 서구 비산1동 비산아파 트 전단 1km 구간	E: 128°33'43.2" N: 35°52'42.7"
14	2008/09/09 (화)	평택 팽성 2-2	교외	경기도 평택시 팽성읍 신호리 농산 물산지유통센터 10번 지방도 교차 남방선 0.95km	E: 127° 3'54.9" N: 36°58'35.4"
15	2008/09/22 (월)	칠곡 지천	시골	경상북도 칠곡군 지천면 용산리 지 천초교 건너편 병행 0.85km	E: 128°29'59.7" N: 35°54' 4.4"
16	2008/09/23 (화)	부산 덕포	도시	부산광역시 사상구 덕포동 덕포초교 인근 북노선 도로 접경 병행 0.92km	E: 128°59'26.7" N: 35°10'23.5"
17	2008/09/24 (수)	부산 가야	도시	부산광역시 부산진구 당감2동 벽산 블루밍APT. 전단 0.92km 병행 구간	E: 129° 2'50.5" N: 35° 9'15.7"
18	2008/09/24 (수)	부산 덕포 2	도시	부산광역시 사상구 감전동 국철 커 브구간 0.92km	E: 128°59'39.9" N: 35° 9' 9.8"
19	2008/09/25 (목)	밀양 삼랑 진	시골	경상남도 밀양시 삼랑진읍 용당리 도요나루 건너블럭 1km 병행 구간	E: 128°52'14.4" N: 35°23'31.9"
20	2008/09/26 (금)	경산 옥산	중소 도시	경상북도 경산시 서부2동 E마트 건 너편 아래쪽 0.85km	E: 128°43'24.4" N: 35°49'55.9"
21	2008/09/26 (금)	경산 옥곡	중소 도시	경상북도 경산시 서부1동 옥곡 측면 0.95km	E: 128°44' 7.0" N: 35°48'12.0"

No.	측정일자 (요일)	측정 개소	지역 구분	위치주소 / 설명	위도/경도
22	2008/10/15 (수)	강외 오송	시골	충청북도 청원군 강외면 연제리 503-1/오송고속철도시설사무소 바로 뒷편, 오송생명과학단지 좌측 인근	E: 127°19'16.8" N: 36°37'27.9"
23	2008/10/16 (목)	평택 정자	시골	경기도 평택시 고덕면 동고리 태평 아파트 아래 병행 1km 구간	E: 127° 2'32.0" N: 37° 0'27.4"
24	2008/10/17( 금)	화성 봉담	교외	경기도 화성시 매송면 원평리 원평 교차로 바로 아래 0.51km 구간	E: 126°55'37.0" N: 37°14'22.6"
25	2008/10/29 (수)	대구 지천	교외	대구광역시 서구 상중리동 대구시달 서천 환경사업소 전방 금호대교 전 단 0.95km	E: 128°31'42.2" N: 35°53' 3.6"
26	2008/10/30 (목)	청도 청도	시골	경상북도 청도군 청도읍 월곡리 청 도농공단지 입구 아래쪽	E: 128°45'53.5" N: 35°36'46.7"
27	2008/10/31 (금)	양산 물금	교외	경상남도 양산시 물금읍 증산리 남 평 인근 병행 0.95km	E: 129°00'26.1" N: 35°17'22.9"
28	2008/11/14 (금)	대전 갑천	도시		
29	2007/02/	화성 기지	시골	경기도 화성시 향남면 동오리 83-4 경부고속철도 화성보수궤도기지	(기측정)
30	2007/03/	대전 역내	도시	대전광역시 동구 정동 대전역	(기측정)

## 2. 충청경기 지역 측정 수행 내역

### 가. 충남 시목 구간

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.65km
- (2) 구간 특성
  - 시목급전소가 있는 단거리 교량 구간
  - 논/밭, 산(구릉) 지역
- (3) 포설 이격도



(그림 3-1) 시목 측정 구간 이격도

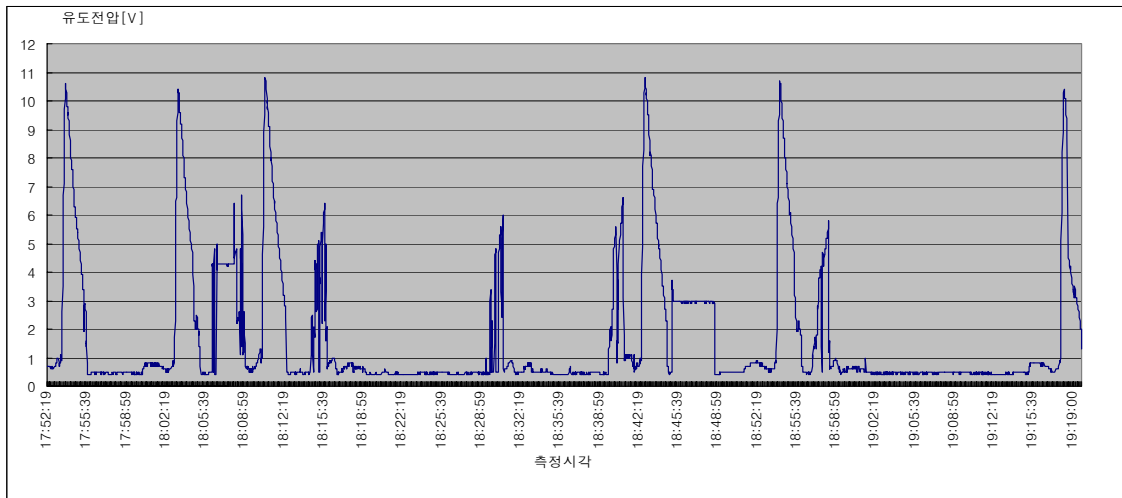
도시시설물이 전력 유도에 미치는 영향을 연구하기 위한 측정 수행 일정 상 첫 번째 측정 개소인 충남 시목 구간은 교량으로 이루어진 KTX 선로를 따라 650m의 총 병행 거리를 갖는다. 측정단으로부터 종단 방향으로의 포설 작업은 수작업으로 이루어졌으며 측정 참여자들의 작업 숙련도의 미숙과 포설 경로의 경사 및 측정단으로부터 약 200 여 m 지점에 가로놓인 하천으로 인한 우회 경로의 이용으로 포설에 어려움을 더하였다.

측정단 측 주변 포설 경로 상 좌우로 야산과 민가가 위치하였으며 종단 방향으로 시골의 농로 및 소도로를 통과하여 종단측 시목 급전소 인근에 종단 접지저항을 설치하고 통신선의 종단 처리를 하였다.

측정을 위한 장비의 이용에는 전원 시설이 필요한데 야외 현장에서의 전원 공급의 어려움으로 발전기를 이용하여 각종 측정 장비 및 기록 장비, 측정 업무 수행을 위한 전력을 공급하였다.

#### (4) 유도전압 변화 특성

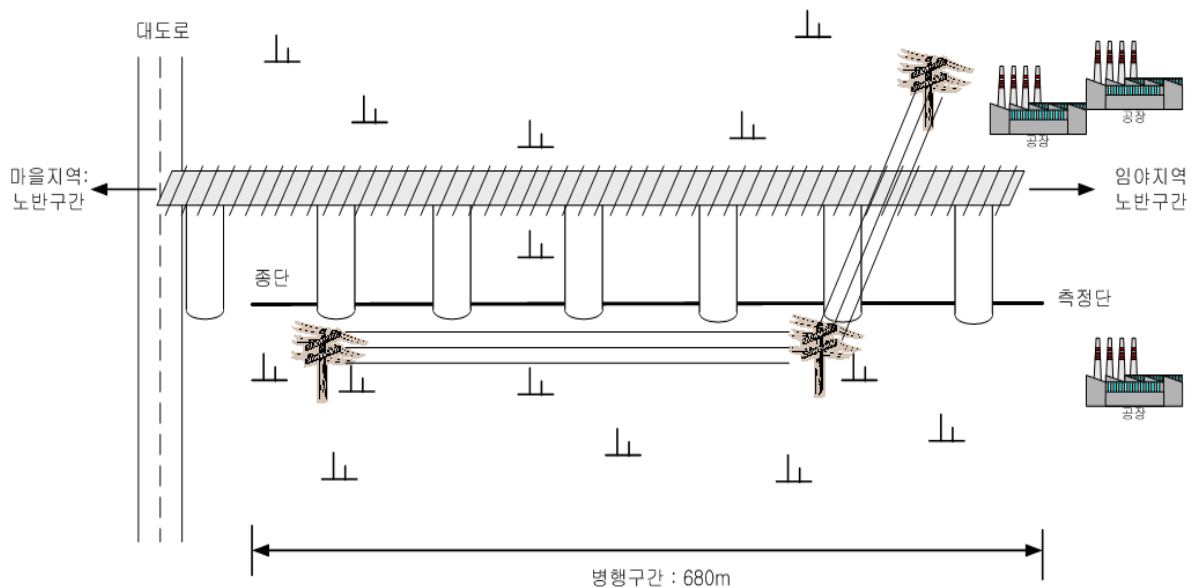




(그림 3-2) 시목구간 유도전압

#### 나. 충북 강내 구간

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.68km
- (2) 구간 특성
  - 교량 구간
  - 논/밭, 산(구릉) 지역
- (3) 포설 이격도



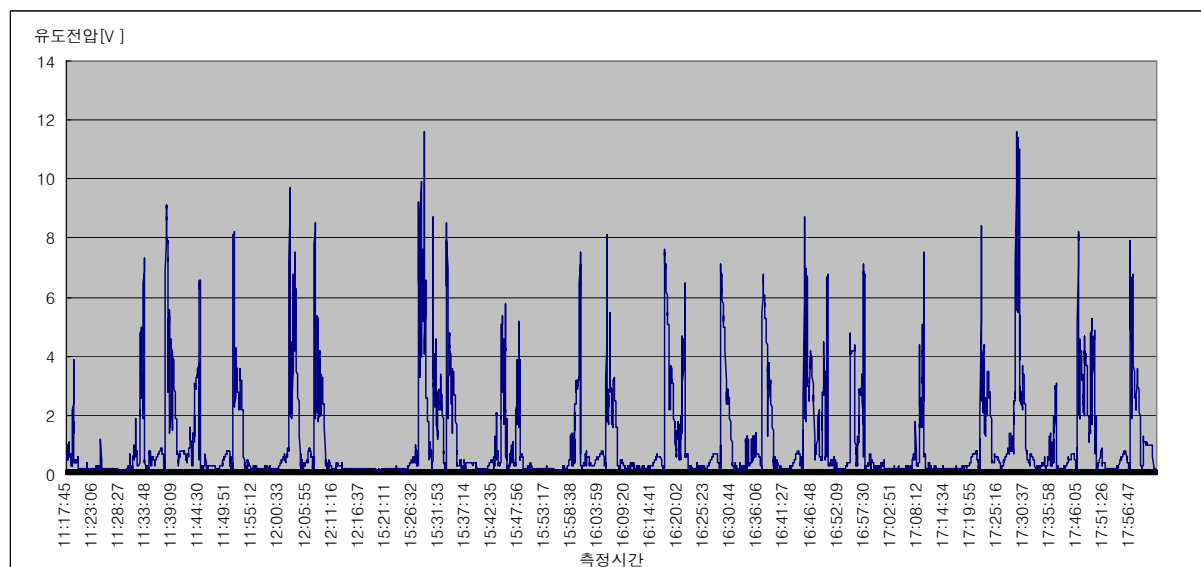
(그림 3-3) 강내 측정 구간 이격도

충북 강내의 측정 구간 역시 시목과 유사한 교량 구간으로 이어지는 포설 경로를 선택하였으며 총 병행거리는 680m에 이른다. 포설 경로 좌우로는 전형적인 시골 지역으로 논/밭 지형이었으며 측정단 인근 좌우로 조그만 공장들이 들어서 있어 종단방향으로 송배전선이 병행하는 특징을 보이고 있어 KTX 전력선으로부터 야기되는 유도 전압에 이러한 송배전선에 의한 유도 전압이 갖는 의미에 대한 분석 작업의 필요성이 제기되었으나 이를 위해 필요한 송배선 시설에 대한 제반 정보 획득의 어려움으로 기본적인 추정을 통한 반영 작업만이 이루어졌다.

측정단과 종단의 연장선상을 보면 측정 구간이 교량지역이었던 것에 반해 그 이후로는 측정단 방향으로는 야산의 노반구간으로 이어졌으며 종단방향으로는 마을을 통과하는 노반구간의 KTX 선로가 이어졌다.

충북 강내 지역에서 측정된 종전압은 통상 8V를 보였으며 최대 12V의 종전압이 측정되었다.

#### (4) 유도전압 변화 특성

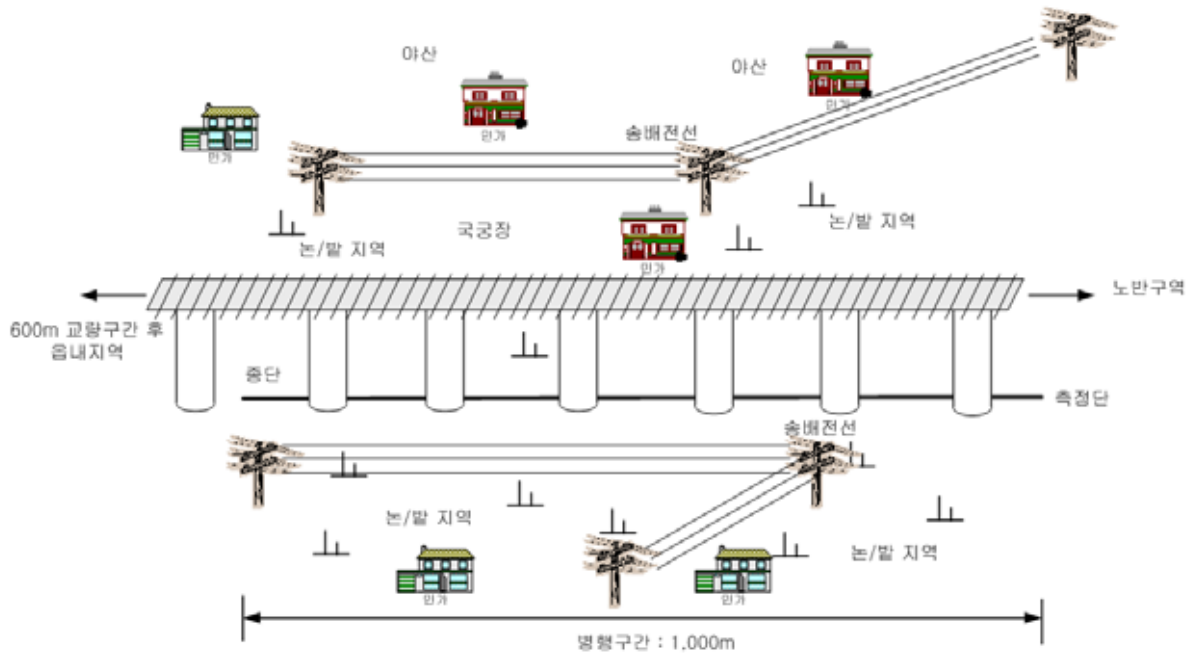


(그림 3-4) 강내지역 유도전압 변화 특성

#### 다. 충북 소정

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km
- (2) 구간 특성
  - 교량 구간

- 논/밭, 산(구릉) 지역
- (3) 포설 이격도



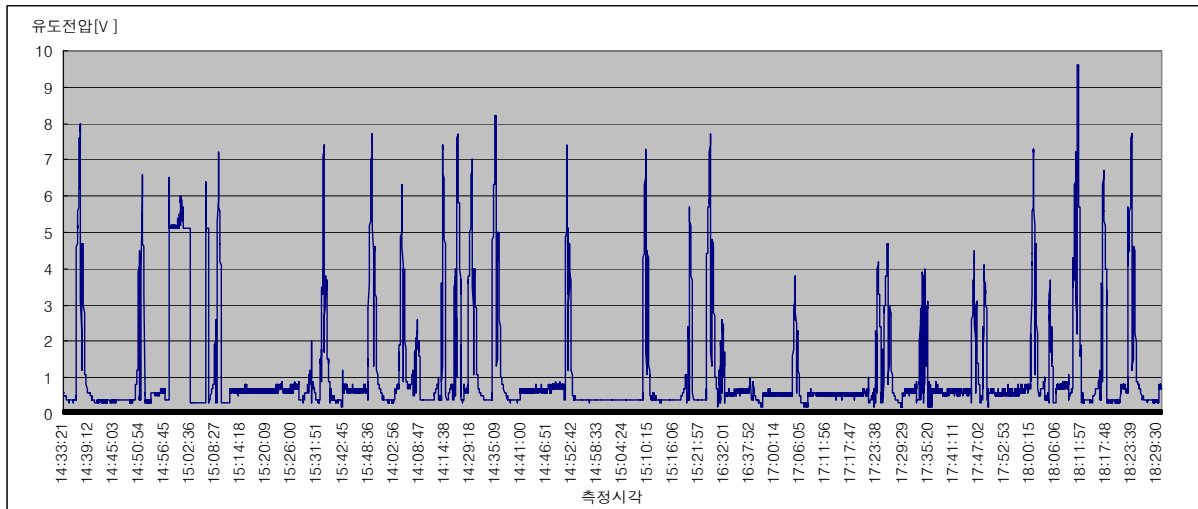
(그림 3-5) 소정 측정 구간 이격도

충남 소정의 측정 구간은 읍내 지역을 벗어나는 교량 구간의 KTX 선로가 총 1.6km의 직전 코스를 이루는 곳으로서 측정 수행을 위해 읍내와의 경계지점에서 600m를 이후 지점을 종단으로 하여 접지 시설을 하고 이후 1km의 25pair 통신케이블을 포설하여 노반 구간으로 이어지기 직전에 측정단을 선정, 접지 시설 및 측정에 필요한 부대 설비를 설치하였다.

(그림 3-5)에서 알 수 있듯이 측정단과 종단간 KTX 선로와 통신케이블의 병행 구간 좌우로 야산 지역에 위치한 민가와 논/밭 구간이 이어져 있었으며 이들 민가에서 수용하는 전력의 공급을 위한 송배전 시설이 양쪽으로 위치하였다.

유도 영향을 분석하기 위하여 EPIMS-T 장비를 이용한 종전압을 측정하였으며 MITIGATOR 장비를 이용한 선간/선대지간 잡음 및 평형도의 측정이 이루어졌다. 이전 측정 개소와 유사하게 소정 지역에서 측정된 종전압은 통상 8V 정도의 레벨을 보였으며 최대 10V까지 측정되는 경우도 빈번하게 보이고 있었다.

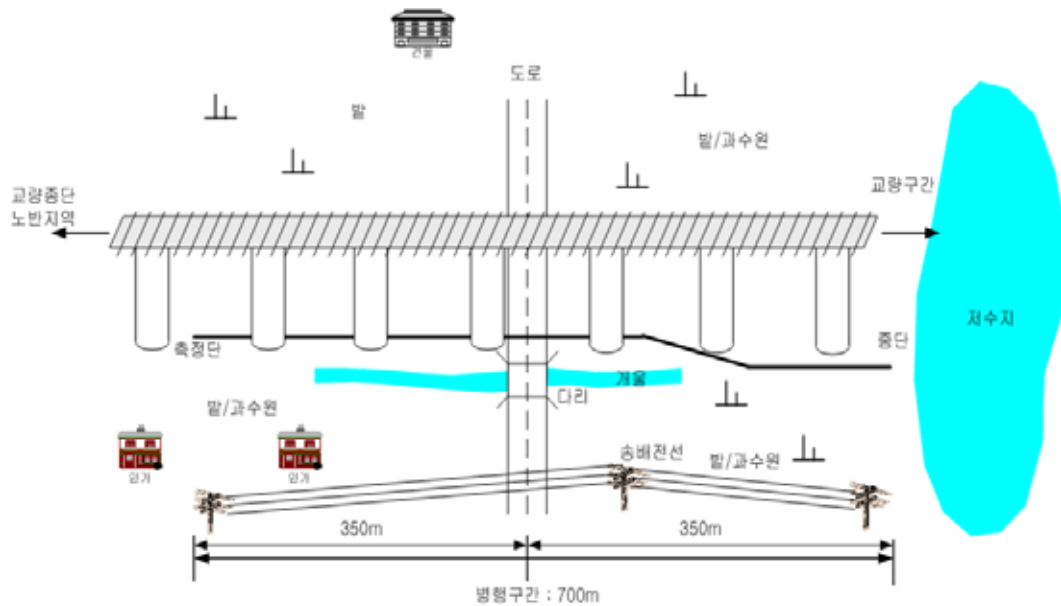
#### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-6) 소정 유도전압 변화 특성

#### 라. 아산 음봉

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.7km
- (2) 구간 특성
  - 교량 구간, 중간 지점 간선 도로 분할
  - 논/밭 지역
- (3) 포설 이격도

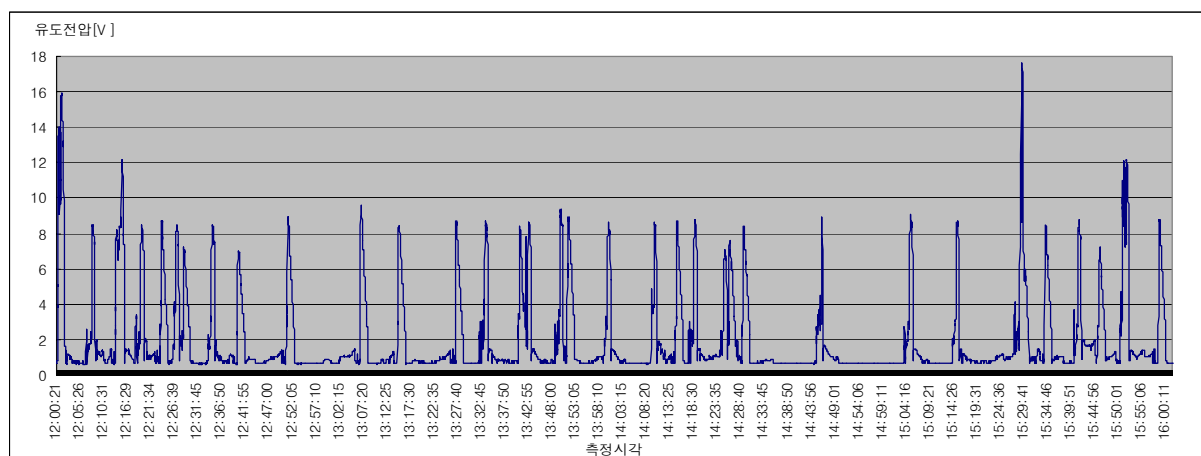


(그림 3-7) 아산 음봉 측정 구간 이격도

충남 아산에 위치한 음봉 지역의 측정 개소는 전형적인 시골지역으로서 노반구간의 KTX 선로에 이어지는 약 700m의 교량구간의 KTX 선로의 교량 하단 지면상에 25pair 통신 케이블을 인접하여 포설하였으며, 포설 경로 좌우는 대규모의 과수원과 논/밭 지역으로 과수원의 관리 및 산재한 민가의 전원 공급을 목적을 갖는 송배전 시설이 펼쳐져 있었다. 종단 지점 이후로는 넓은 저수지로 인하여 추가적인 포설에 어려움이 있었으며, 측정단과 종단의 중간 지점에 가로놓인 소도로를 이용하는 차량의 통행량 예상 외로 많아 통신 케이블의 보호를 위해 다리를 건너는 약 10m 정도를 매립하여 포설하였다.

아산 음봉 지역에서 측정된 종전압은 통상 8V를 상회하는 것으로 나타났으며 KTX 상행과 하행의 교차 통과 시에는 최대 16V까지 측정되었다. 측정단과 종단에 시설한 접지의 저항은 각각 82 $\Omega$ 과 37 $\Omega$ 으로 나타났으며 통신케이블 포설 지역의 대지저항률은 20.4 $\Omega$ ·m로 측정되었다.

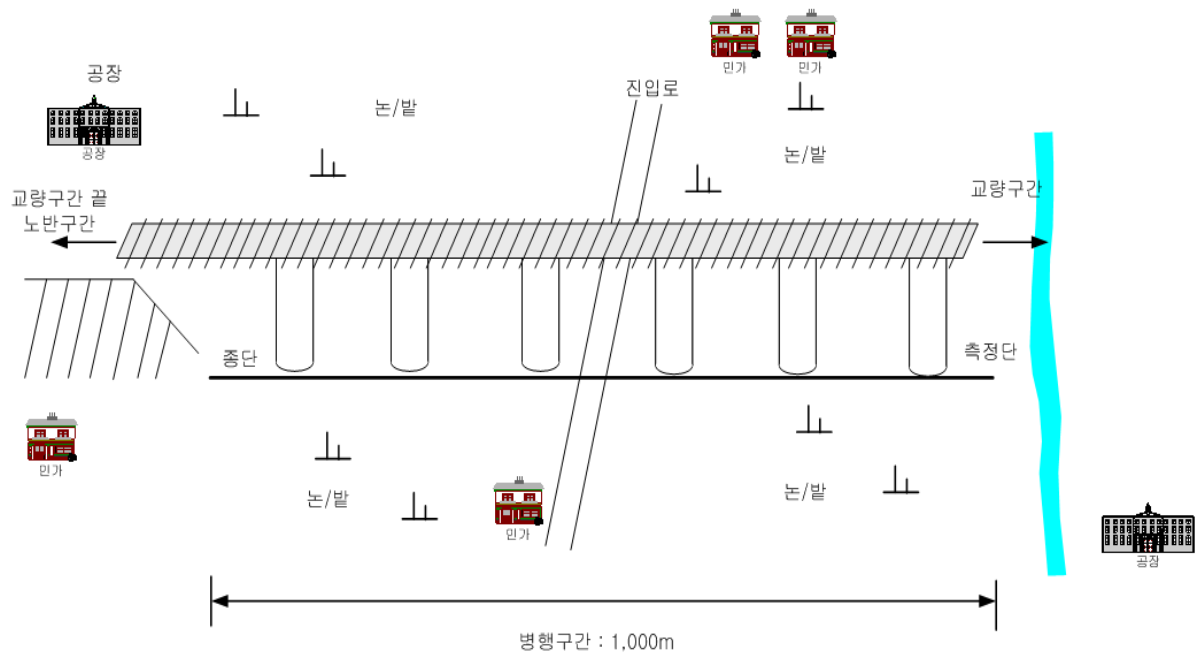
#### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-8) 아산 음봉 유도전압 변화 특성

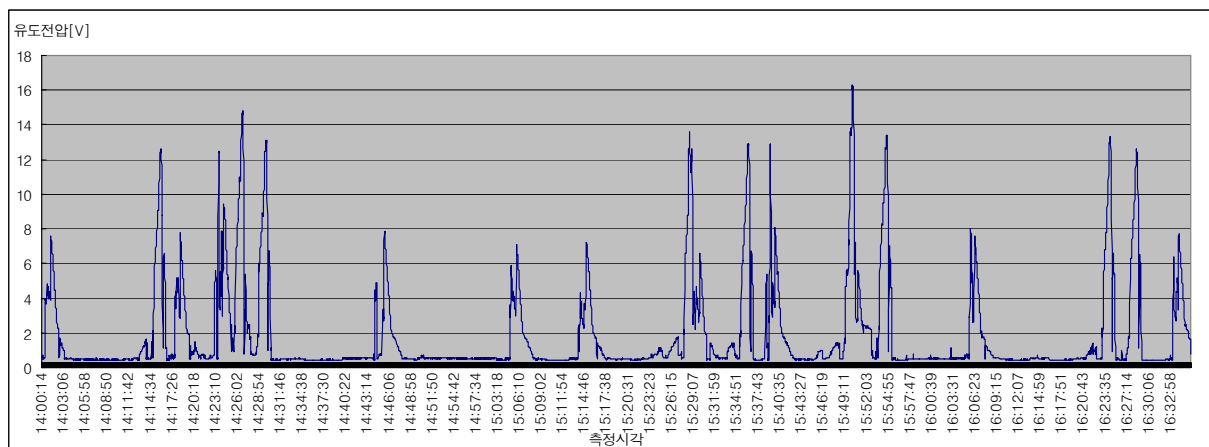
#### 마. 평택 팽성 - 개소1

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km
- (2) 구간 특성
  - 교량 직선 구간
  - 논/밭, 평야 및 인근 약 2km 공단 지역
- (3) 포설 이격도



(그림 3-9) 평택 팽성1 측정 구간 이격도

#### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-10) 평택 팽성1 유도전압 변화 특성

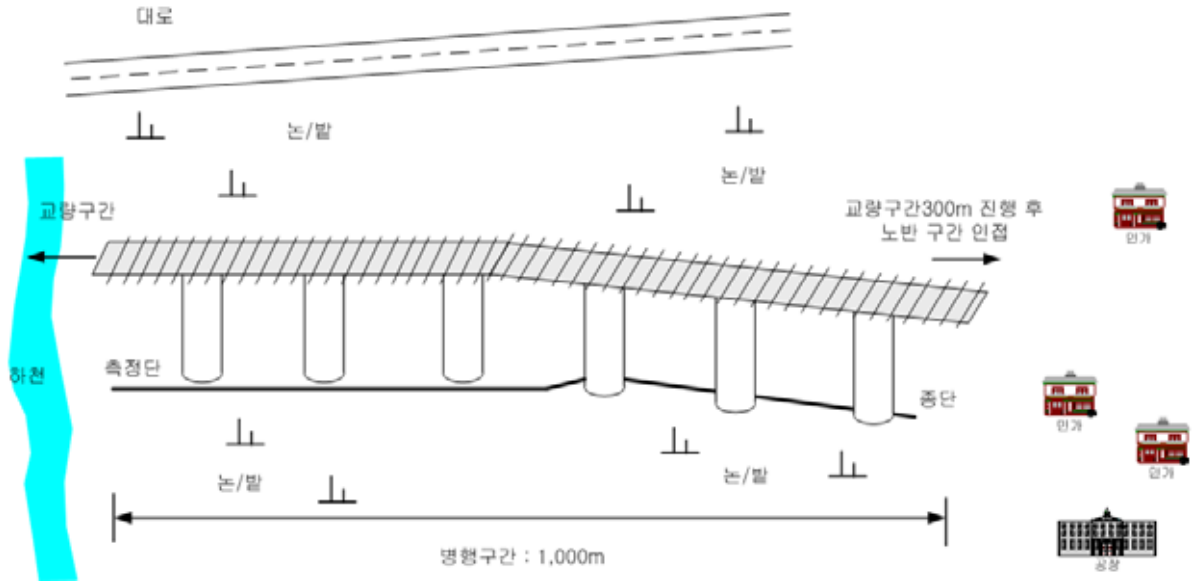
#### 바. 평택 팽성 - 개소2

(1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km

(2) 구간 특성

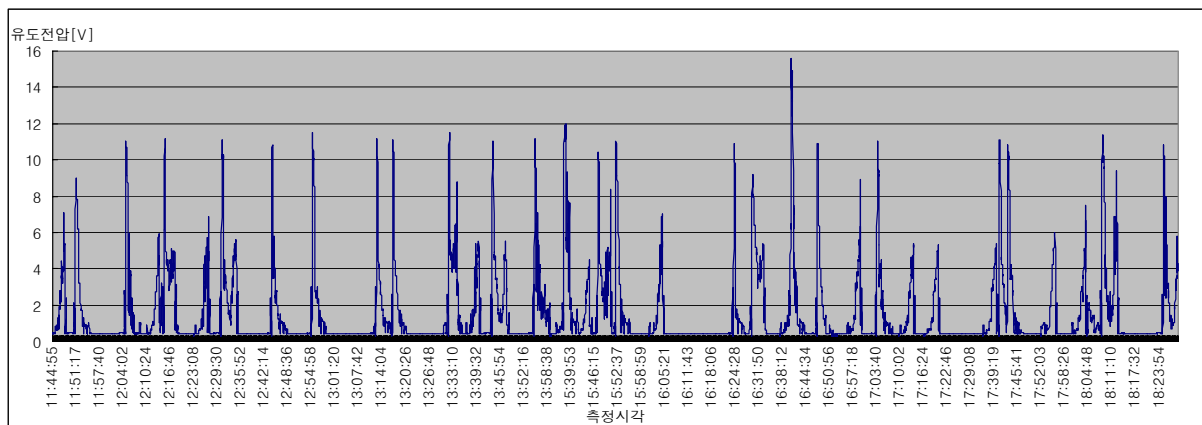
- 교량 완만한 곡선 구간
- 논 평야지역

### (3) 포설 이격도



(그림 3-11) 평택 팽성2 측정 구간 이격도

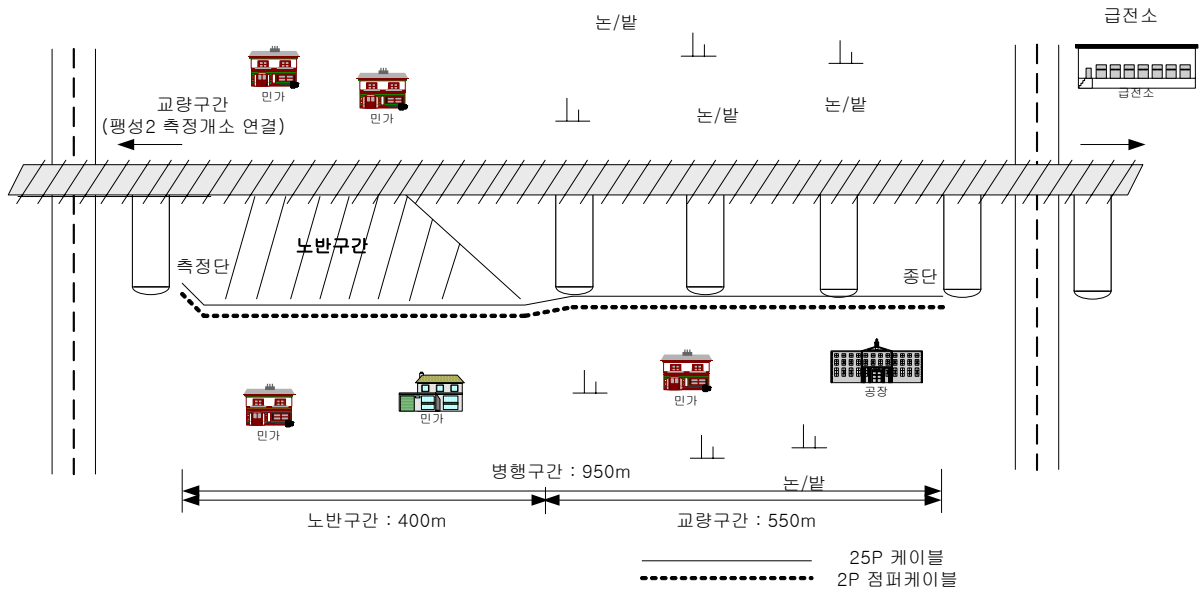
### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-12) 평택 팽성2 유도전압 변화 특성

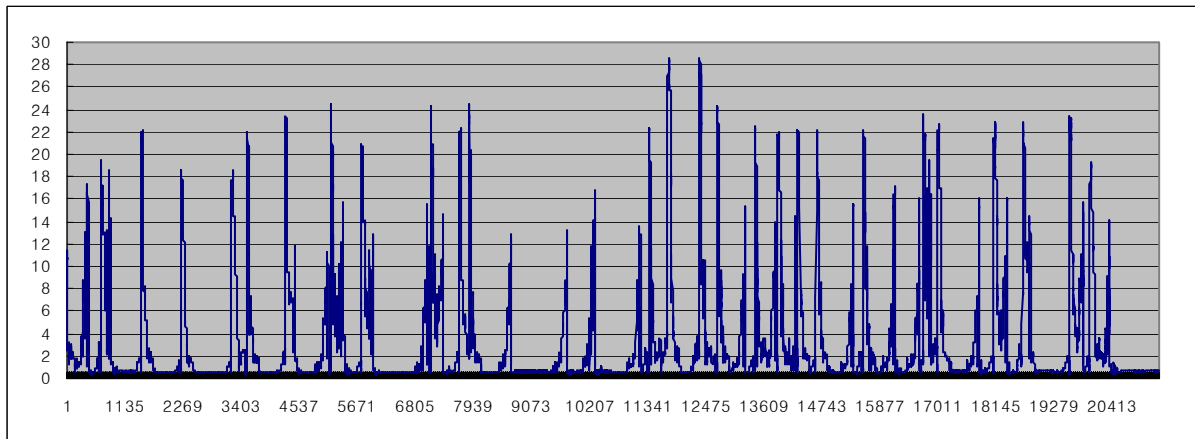
## 사. 평택 팽성 - 개소2-2

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.95km
- (2) 구간 특성
  - 교량, 노반의 혼재 구간
  - 논/밭, 민가 및 급전소 인접 지역
- (3) 포설 이격도



(그림 3-13) 평택 팽성2-2 측정 구간 이격도

#### (4) 유도전압 변화 특성



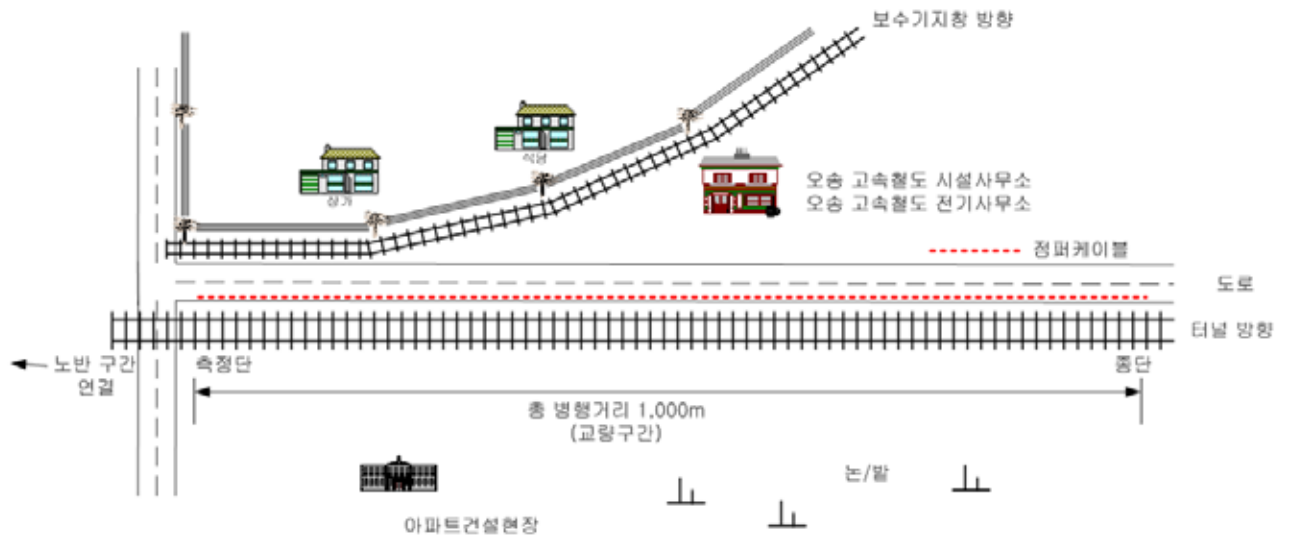
(그림 3-14) 평택 팽성2-2 유도전압 변화 특성

#### 아. 강외 오송

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km
- (2) 구간 특성
  - 직선 교량 구간
  - 논/밭, 야산 인접 지역
  - 보수기지창향 선로 곡선 병행 구간

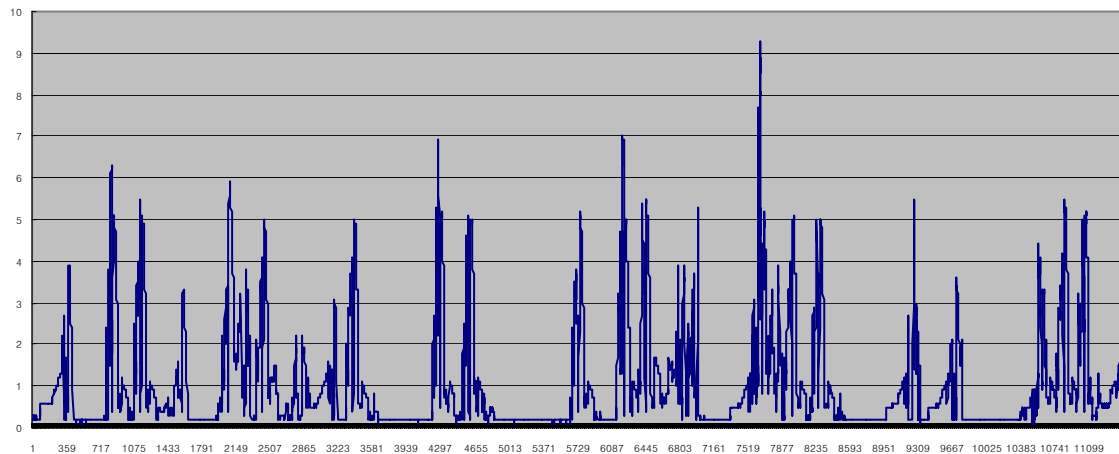


### (3) 포설 이격도



(그림 3-15) 강의 오송 측정 구간 이격도

### (4) 유도전압 변화 특성



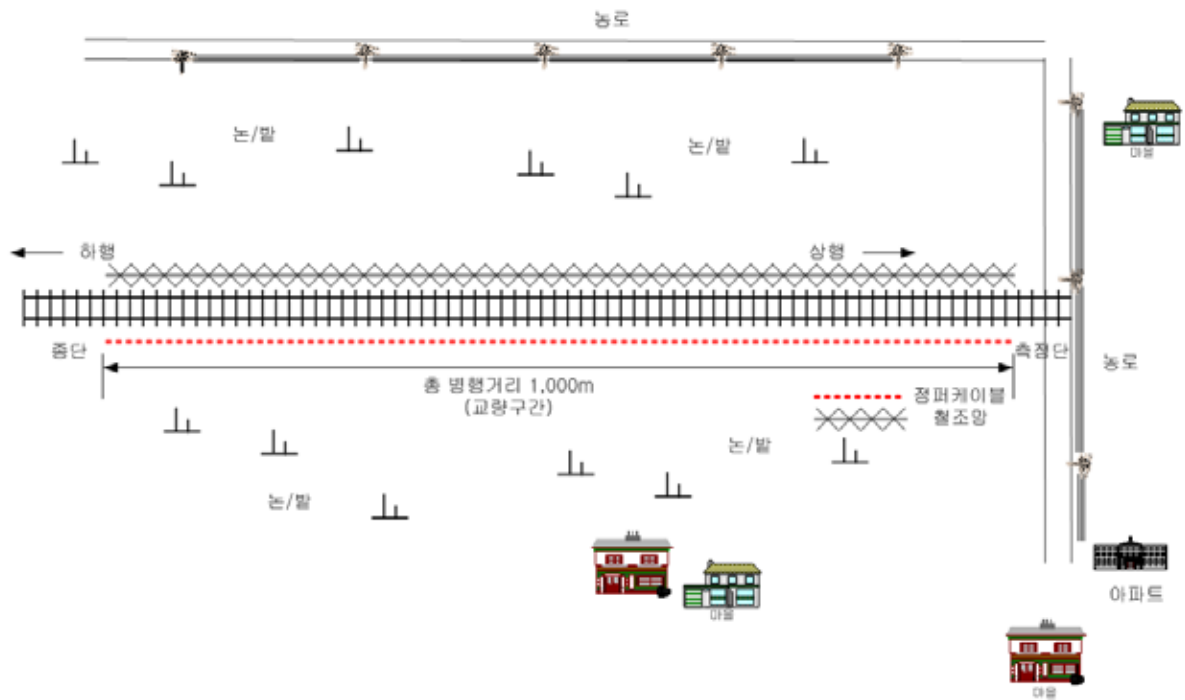
(그림 3-16) 강의 오송 유도전압 변화 특성

## 자. 평택 정자

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km
- (2) 구간 특성
  - 직선 교량 구간

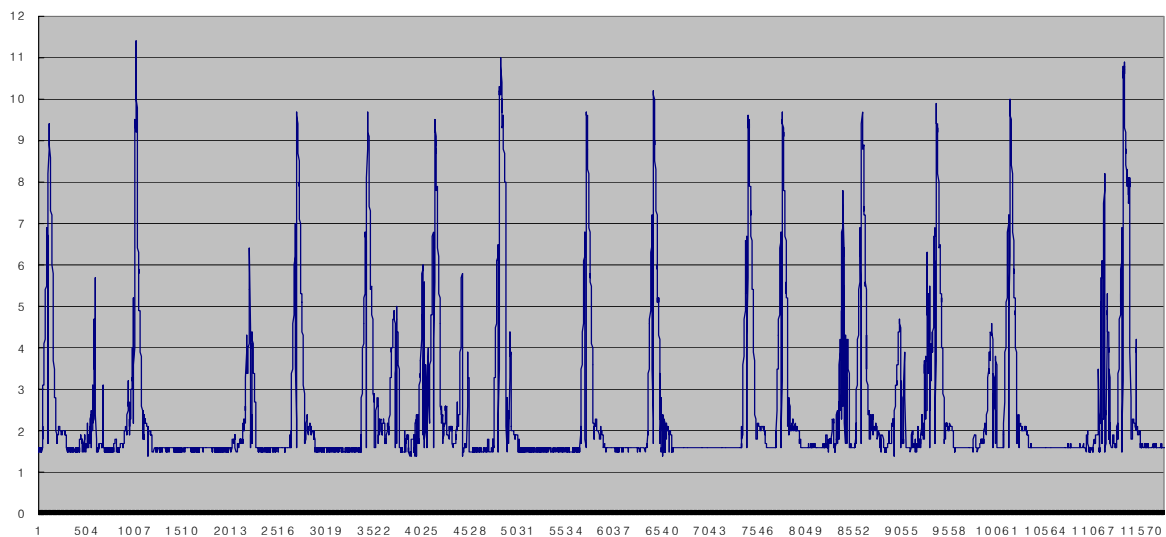
- 논/밭, 전원 민가 인근

(3) 포설 이격도



(그림 3-17) 평택 정자 측정 구간 이격도

(4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-18) 평택 정자 유도전압 변화 특성

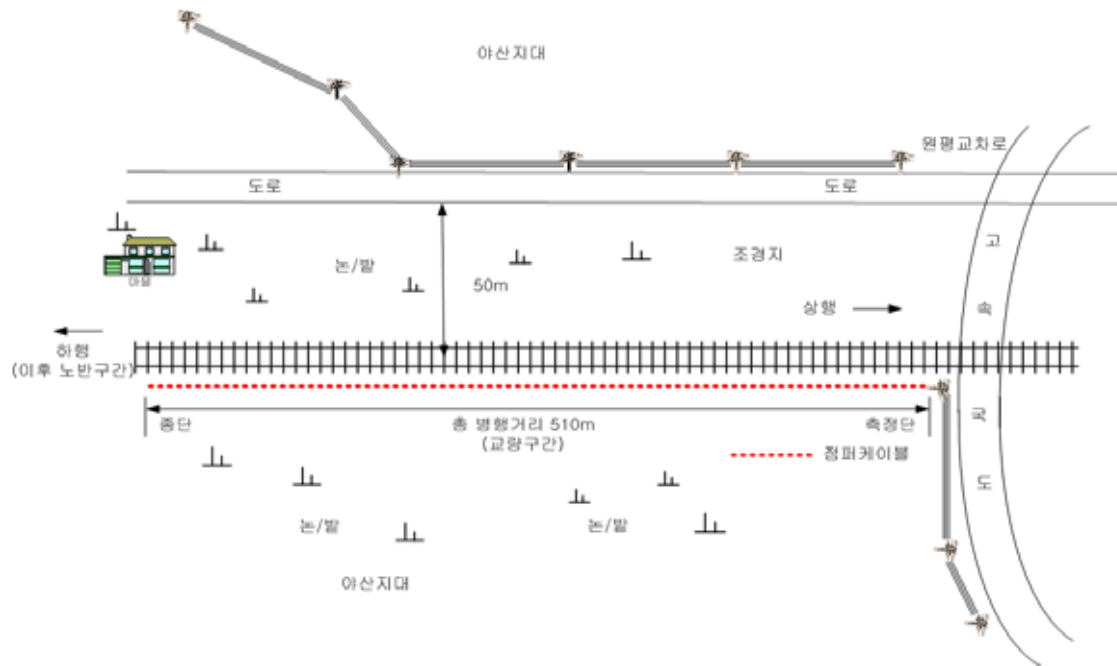
차. 화성 봉담

(1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.51km

(2) 구간 특성

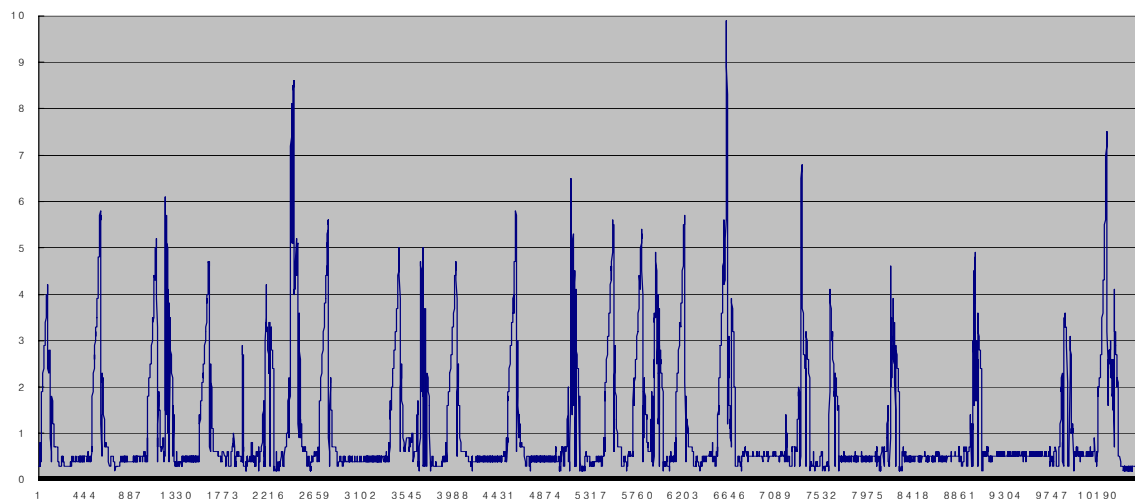
- 직선 교량 구간
- 고속국도와 국도 교차로 인접
- 논/밭, 조정지역

(3) 포설 이격도



(그림 3-19) 화성 봉담 측정 구간 이격도

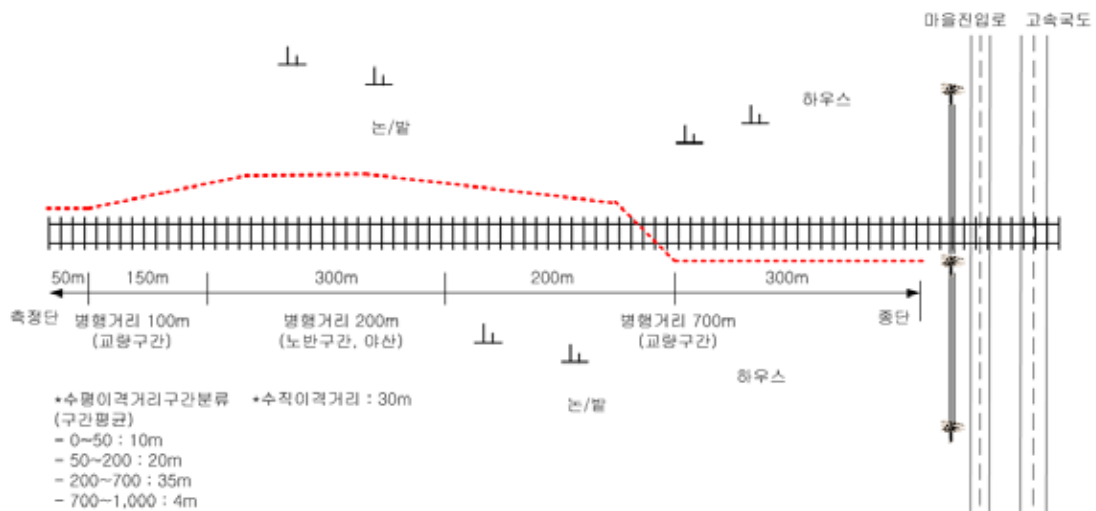
(4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-20) 화성 봉담 유도전압 변화 특성

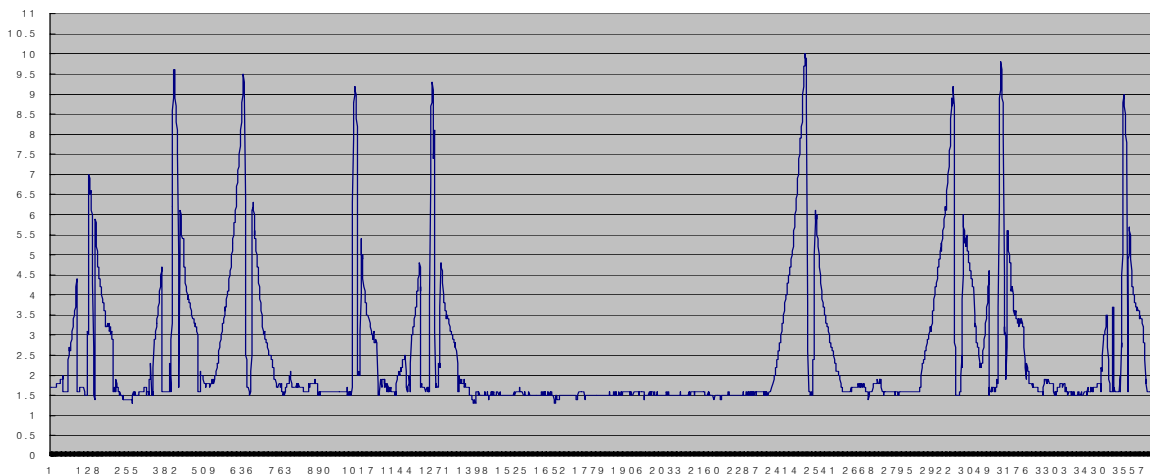
## 카. 안산 상록

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km
- (2) 구간 특성
  - 도심을 벗어나 교외로 접어드는 교량 구간
  - 논/밭, 하우스 인접 지역
  - 병행 중간 구간에 야산을 넘는 노반 구간 포함
- (3) 포설 이격도



(그림 3-21) 안산 상록 측정 구간 이격도

## (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-22) 안산 상록 유도전압 변화 특성

### 3. 충청경상 지역 측정 수행 내역

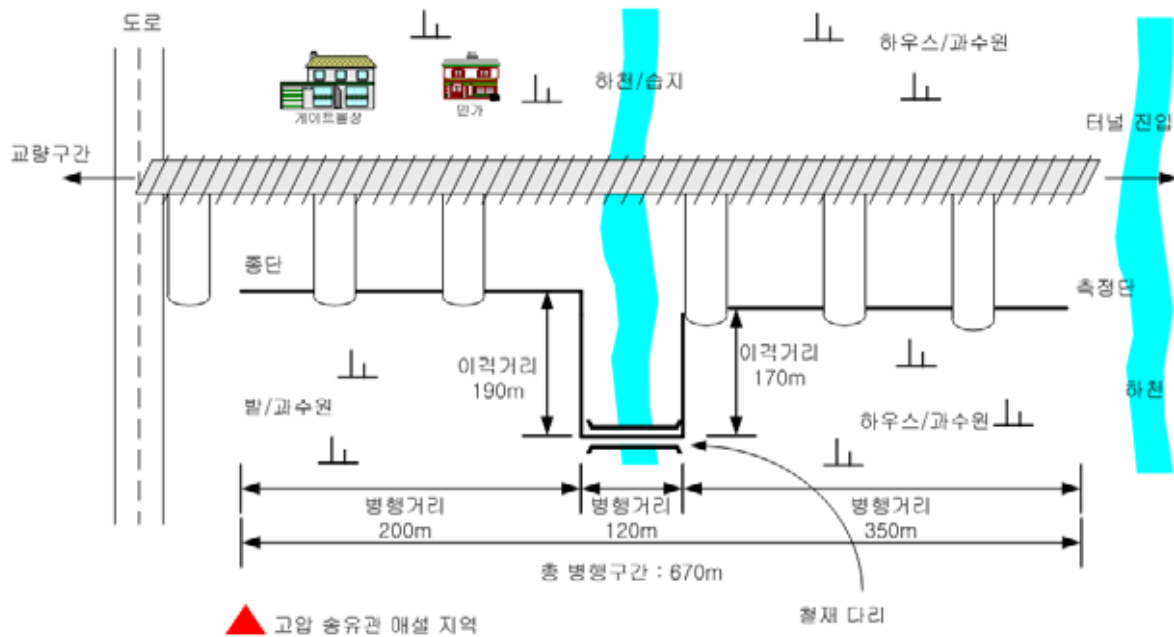
#### 가. 영동 심천

(1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.67km

(2) 구간 특성

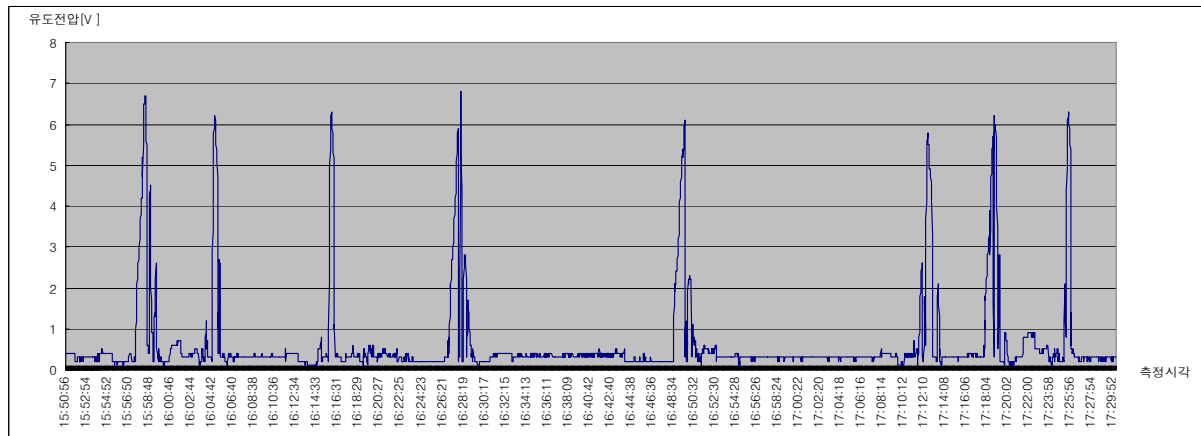
- 교량구간
- 중간 하천 분리(약 100m), 하천 구간 190m 이격; 120m 병행
- 비닐하우스/밭 지역 및 인근 저산악 지대
- 송유관 매설 경고 표지판 있음.

(3) 포설 이격도



(그림 3-23) 영동 심천 측정구간 이격도

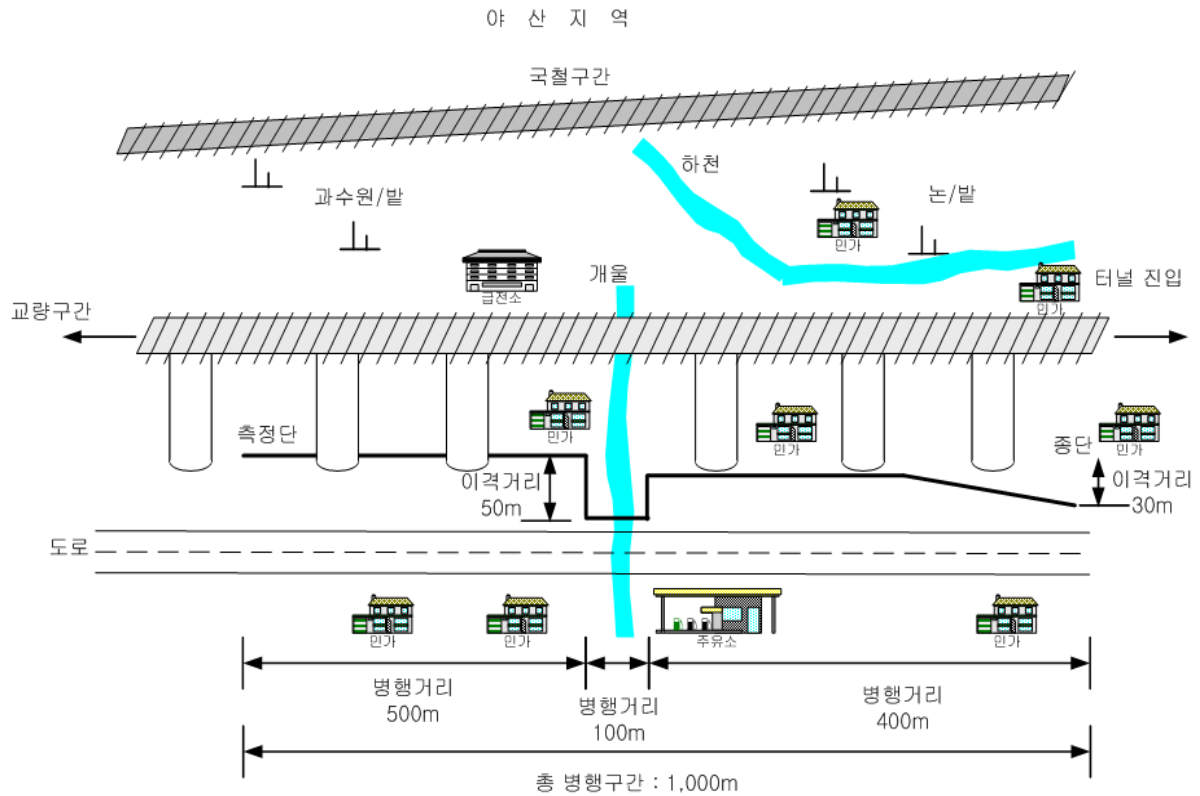
(4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-24) 영동 심천 유도전압 변화 특성

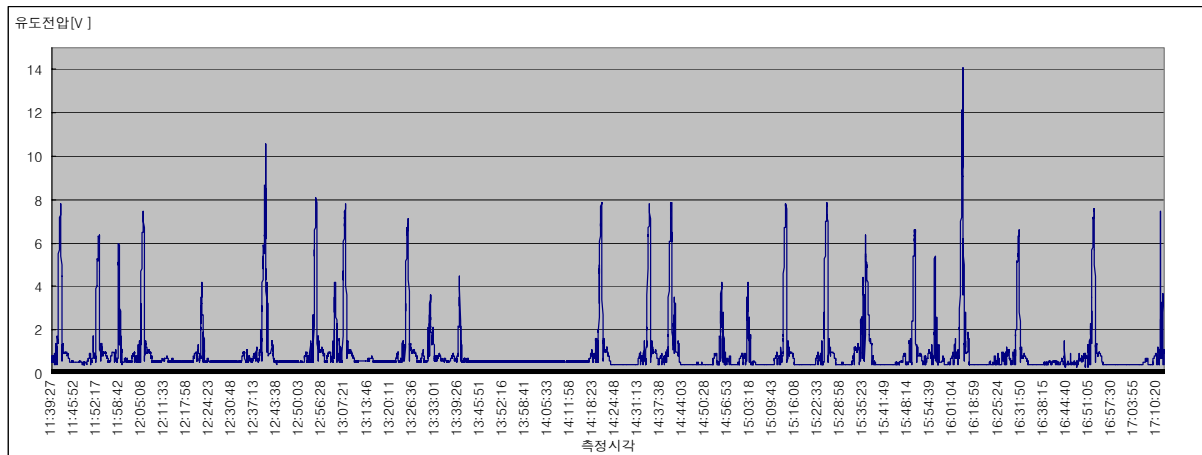
#### 나. 영동 주곡

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km
- (2) 구간 특성
  - 교량구간
  - 중간 좁은 하천 분리 포설 난제로 사이드 도로 우회 약 100m, 수평 이격 약 50m
  - 도로변 500m 인근 국철 병행
- (3) 포설 이격도



(그림 3-25) 영동 주곡 측정구간 이격도

#### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-26) 영동 주곡 유도전압 변화 특성

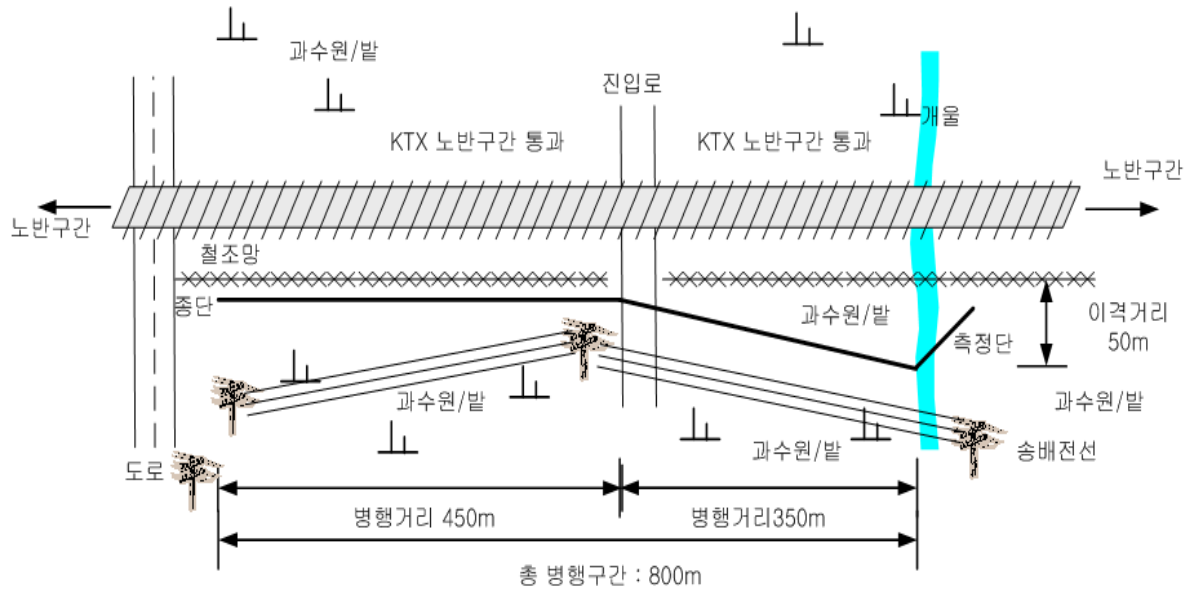
#### 다. 김천 봉산

##### (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.8km

## (2) 구간 특성

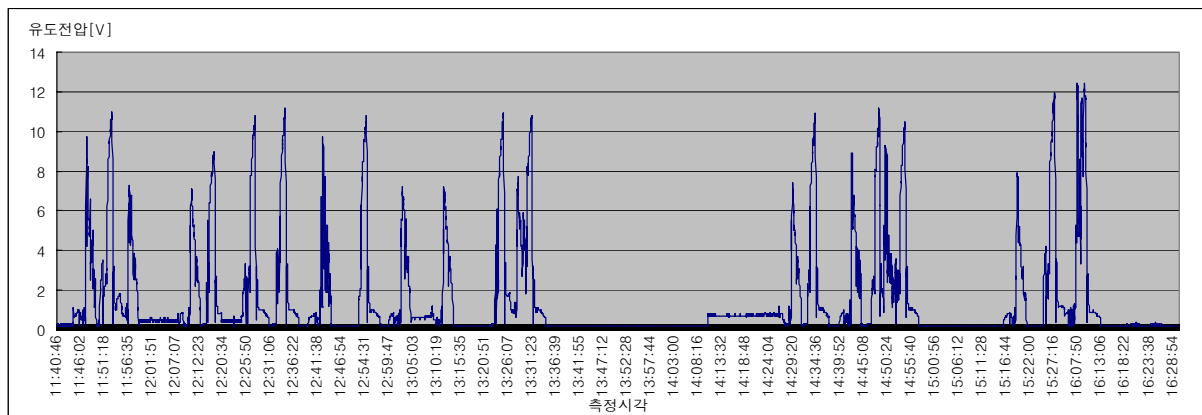
- 전 노반 구간, 측정단 근접 거리 이격거리 사선 확대; 사선구간 : 약 350m, 약 30°
- 김천 포도밭 생산지 일대

## (3) 포설 이격도



(그림 3-27) 김천 봉산 측정구간 이격도

## (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-28) 김천 봉산 유도전압 변화 특성

## 라. 양산 원동

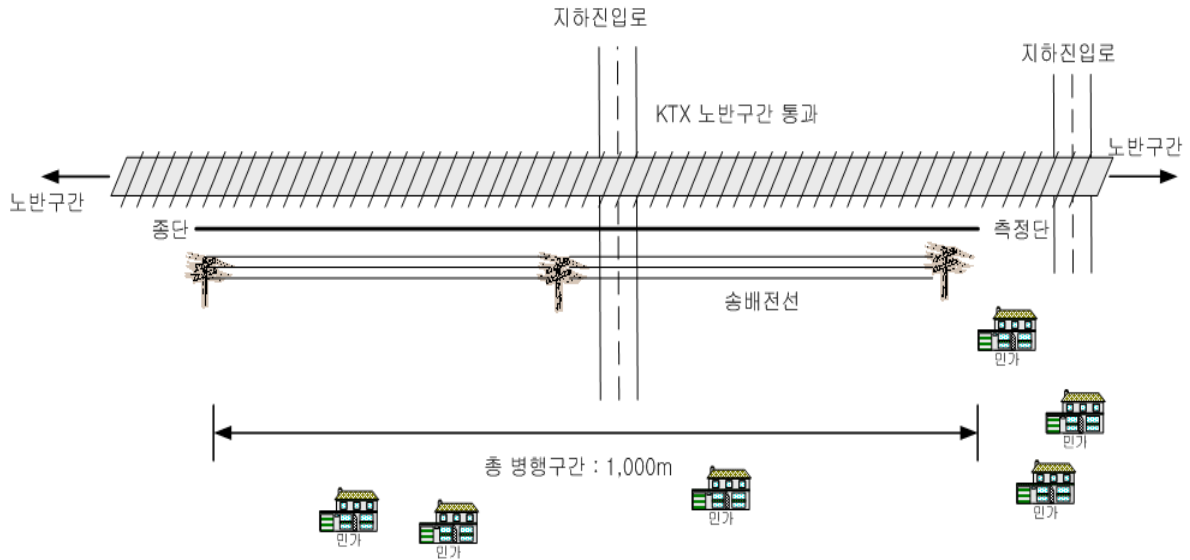
### (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km



(2) 구간 특성

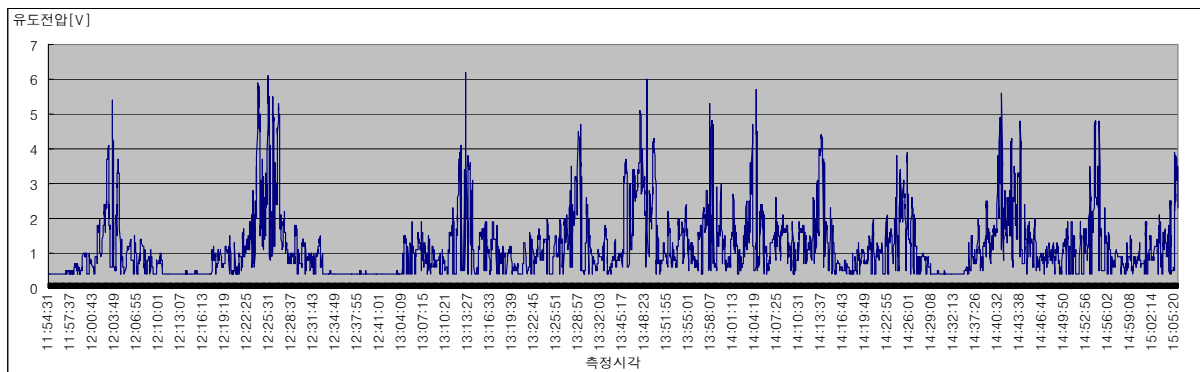
- 국철 완전 병행, KTX 속도가 느림
- 종단쪽으로 1km 후반경 급전소가 있음

(3) 포설 이격도



(그림 3-29) 양산 원동 측정 구간 이격도

(4) 유도전압 변화 특성



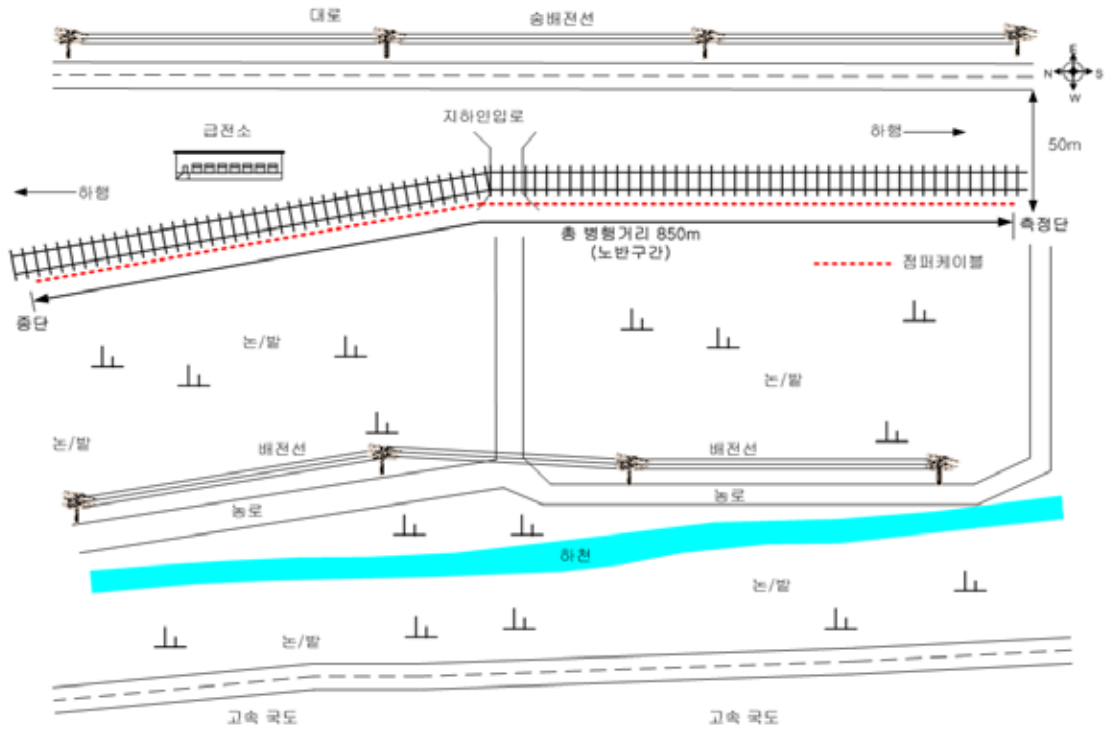
(그림 3-30) 양산 원동 유도전압 변화 특성

마. 칠곡 지천

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.85km
- (2) 구간 특성

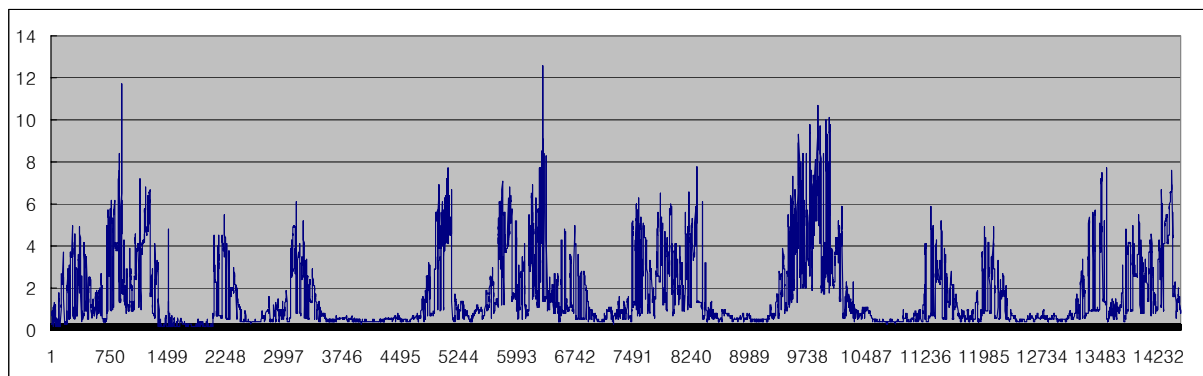
- 노반구선 KTX 선로 근접, KTX 속도가 느림
- 종단 이전 200m 지점에 급전소

### (3) 포설 이격도



(그림 3-31) 철곡 지천 측정 구간 이격도

### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-32) 철곡 지천 유도전압 변화 특성

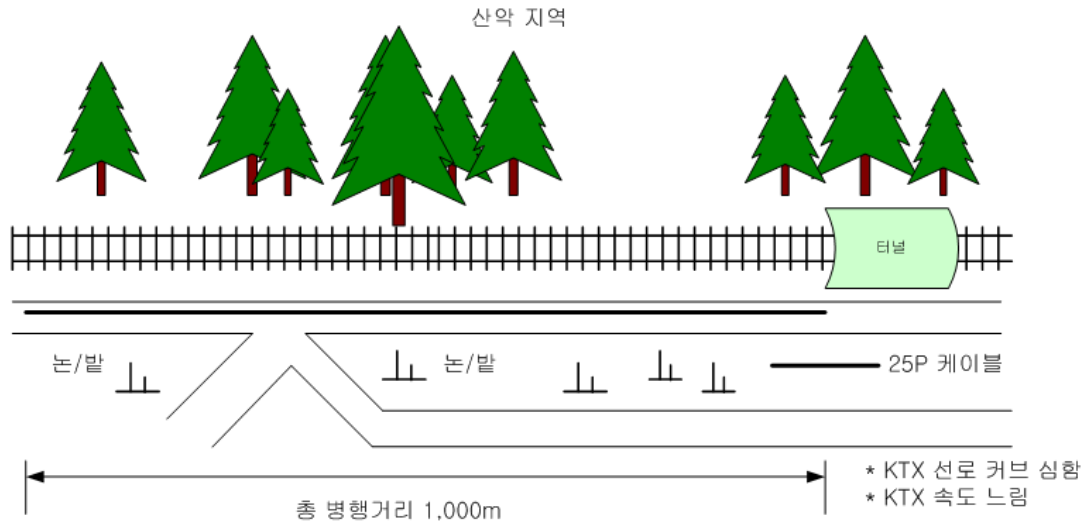
### 바. 밀양 삼랑진

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km

(2) 구간 특성

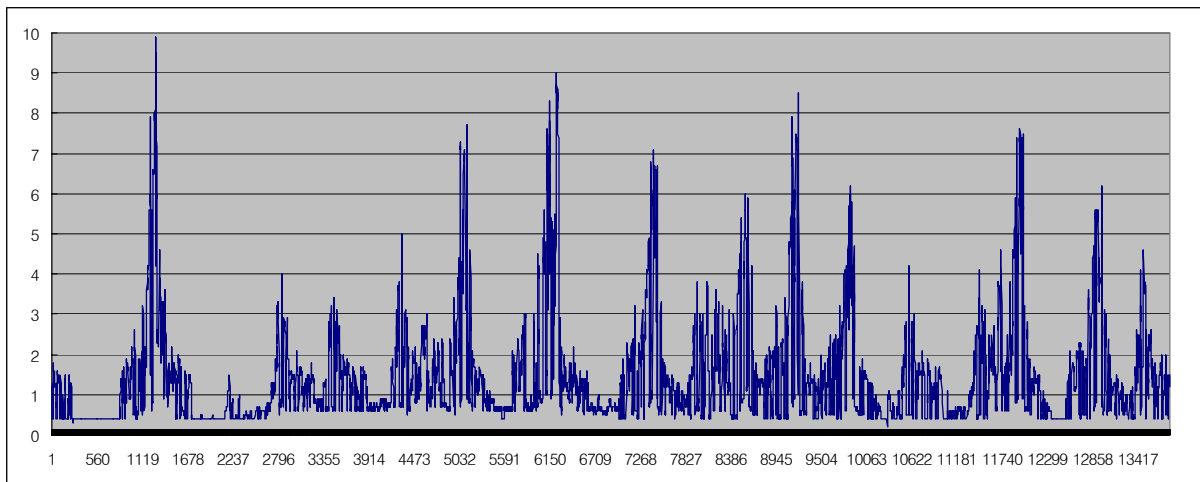
- 야산 인접한 논/밭 지역
- 심한 곡선 경로 구간, KTX 속도 느림

(3) 포설 이격도



(그림 3-33) 밀양 삼랑진 측정 구간 이격도

(4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-34) 밀양 삼랑진 유도전압 변화 특성

사. 경산 옥산

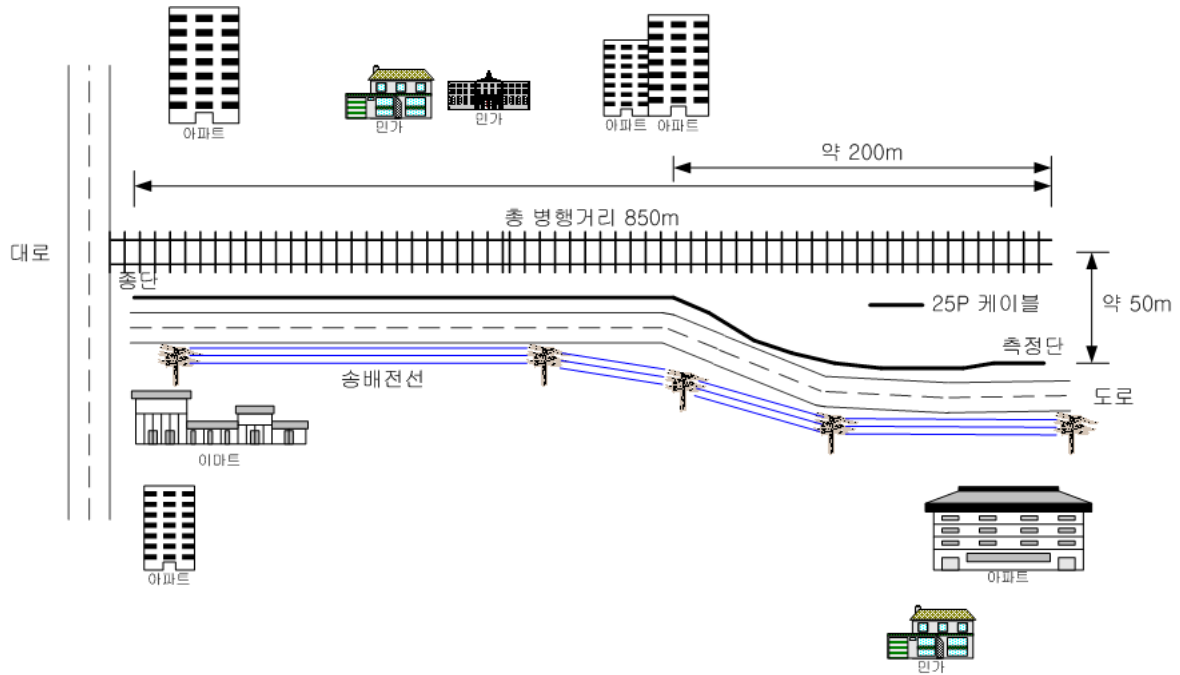
(1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.85km

(2) 구간 특성

- 경산역 인근 공사현장 일부(200m) 포함

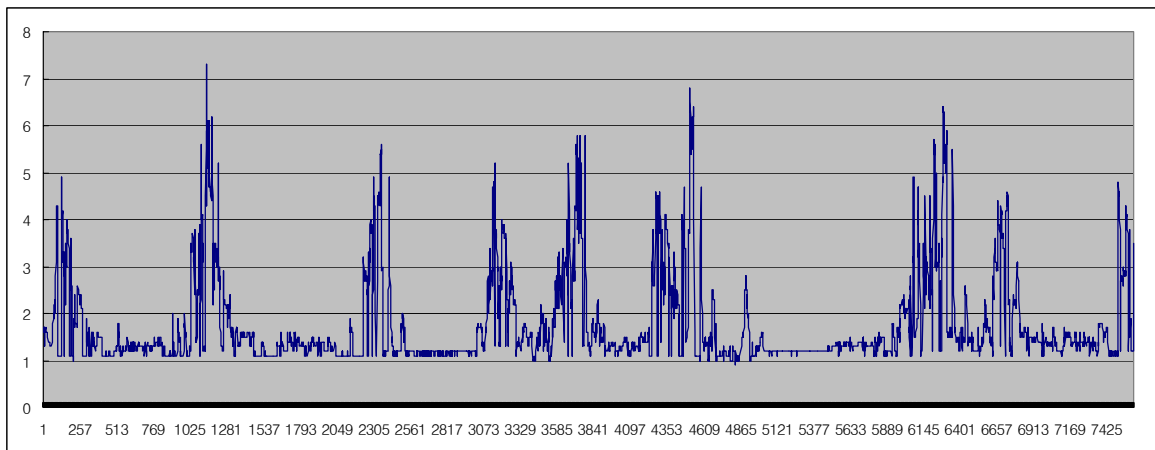
- 송배전선 인접 병행하는 주택가 변두리

### (3) 포설 이격도



(그림 3-35) 경산 옥산 측정 구간 이격도

### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-36) 경산 옥산 유도전압 변화 특성

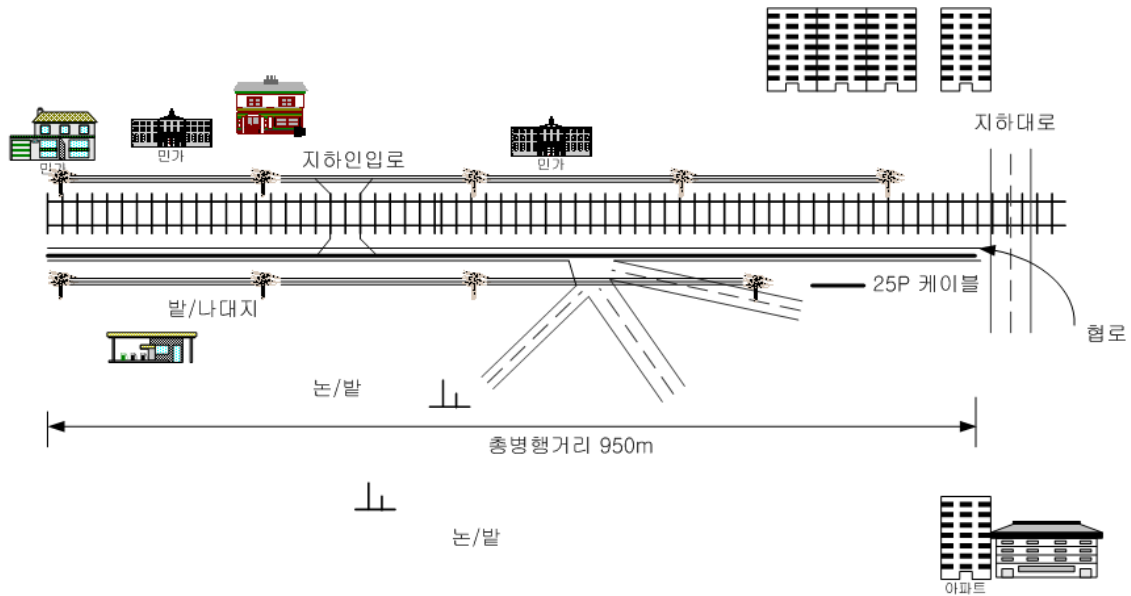
## 아. 경산 옥곡

(1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.95km

(2) 구간 특성

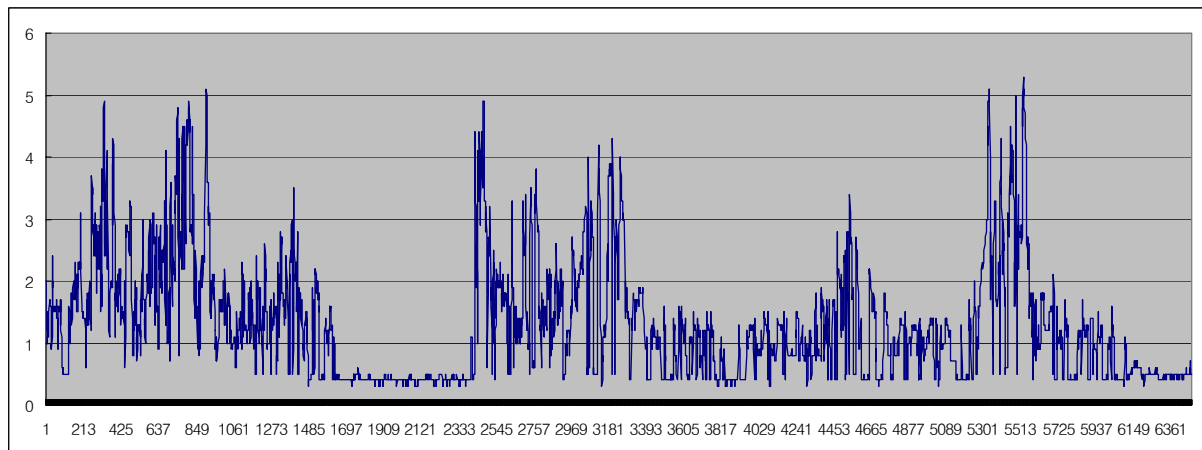
- 주택가 뒤편 좁은 진입로와 나대지 인근 선로 병행
- 교통 교차로 인근으로 차량 통행 빈번(측정단측)

### (3) 포설 이격도



(그림 3-37) 경산 옥곡 측정 구간 이격도

### (4) 유도전압 변화 특성



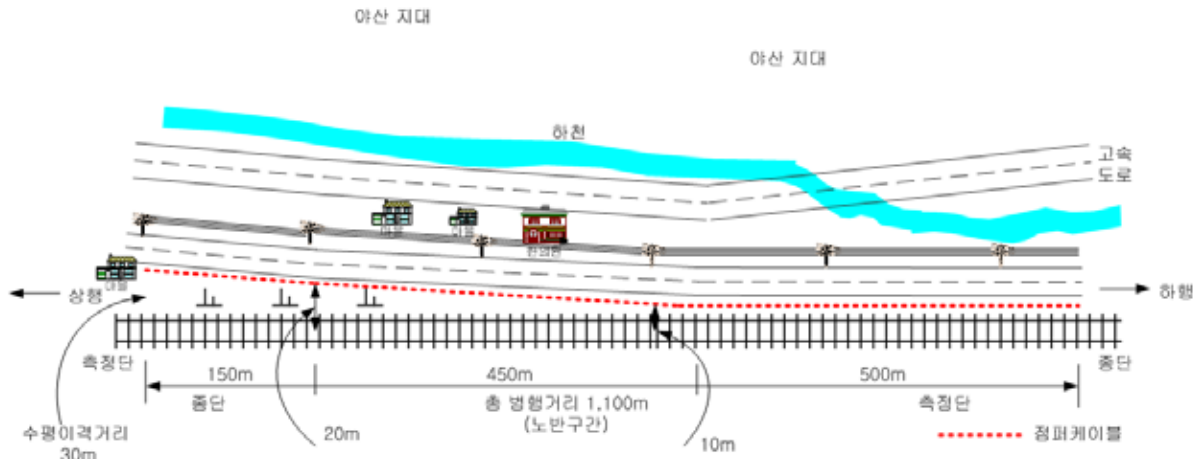
(그림 3-38) 경산 옥곡 유도전압 변화 특성

## 자. 청도 청도

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1.1km
- (2) 구간 특성

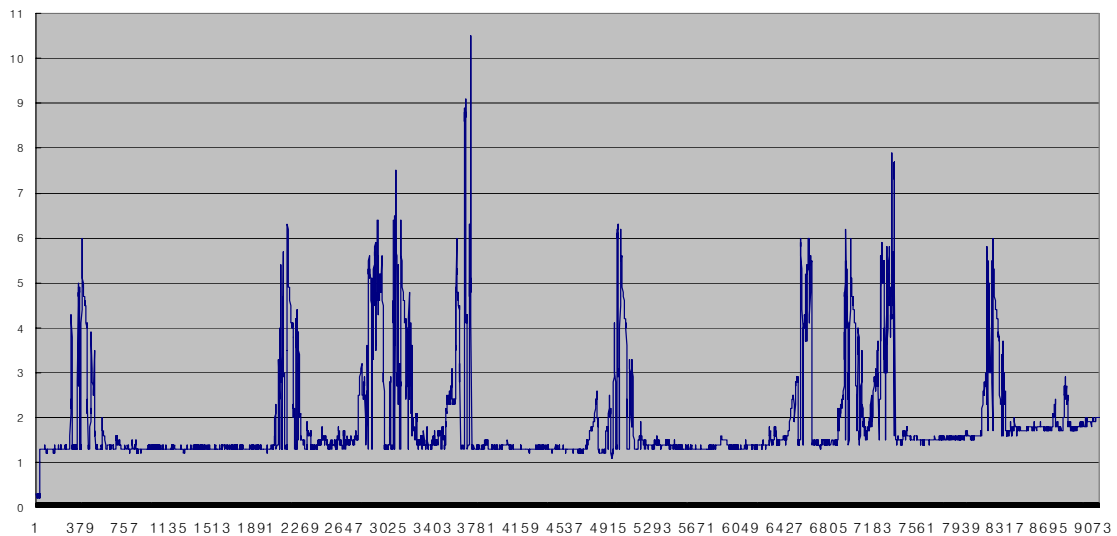
- 도로변을 따라 노반 구간 KTX 선로 병행
- 간헐적인 민가 및 상점 인접, 차량 통행 번잡

### (3) 포설 이격도



(그림 3-39) 청도 청도 측정 구간 이격도

### (4) 유도전압 변화 특성



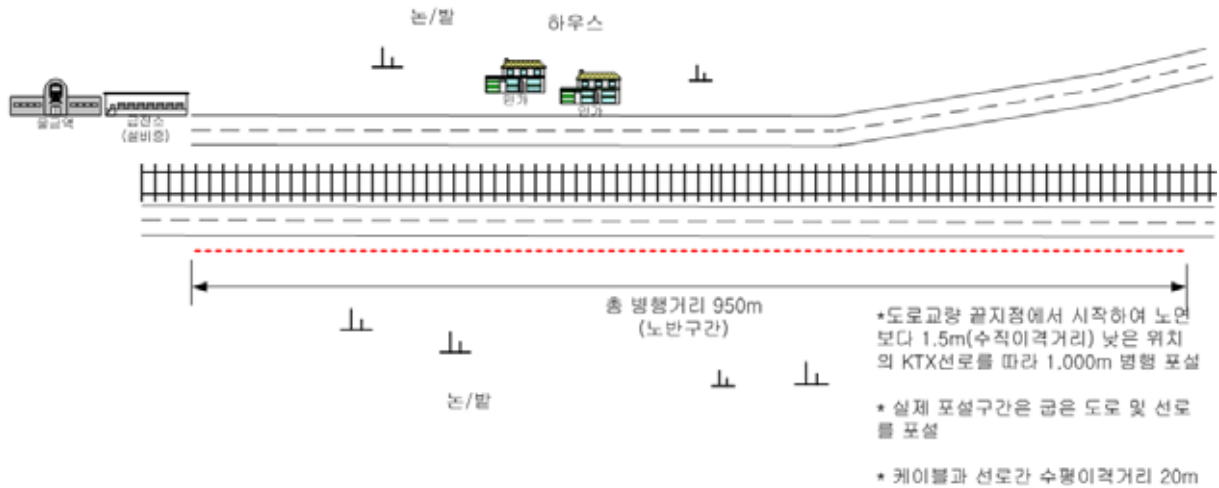
(그림 3-40) 청도 청도 유도전압 변화 특성

## 차. 양산 물금

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.95km
- (2) 구간 특성

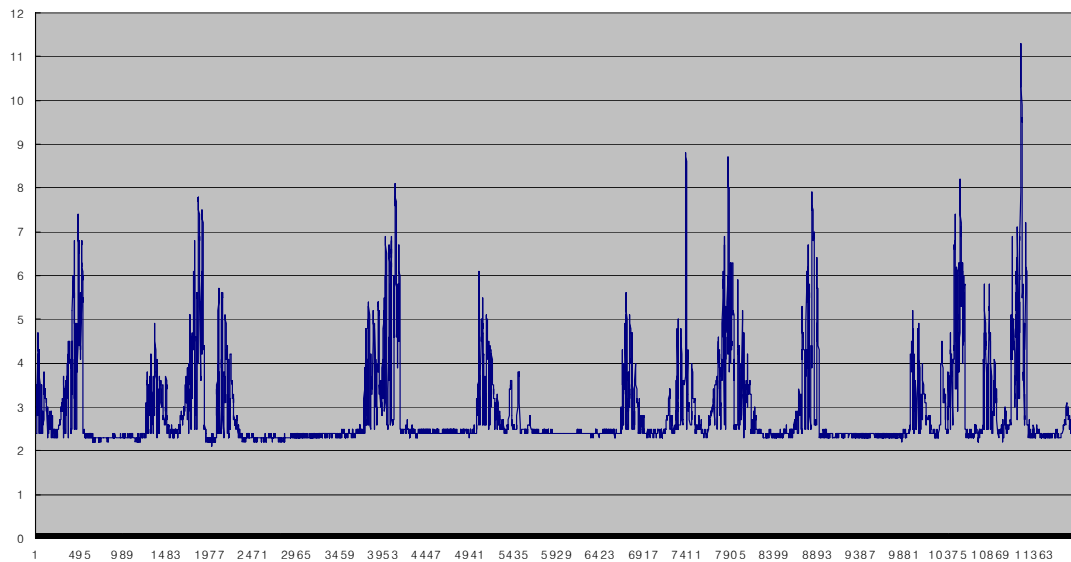
- 물금역 이후 급전소(미운용) 인접
- 도로면보다 낮은 KTX 곡선 선로 구간
- 인근에서 KTX 선로 신설 공사 중

### (3) 포설 이격도



(그림 3-41) 양산 물금 측정 구간 이격도

### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-42) 양산 물금 유도전압 변화 특성

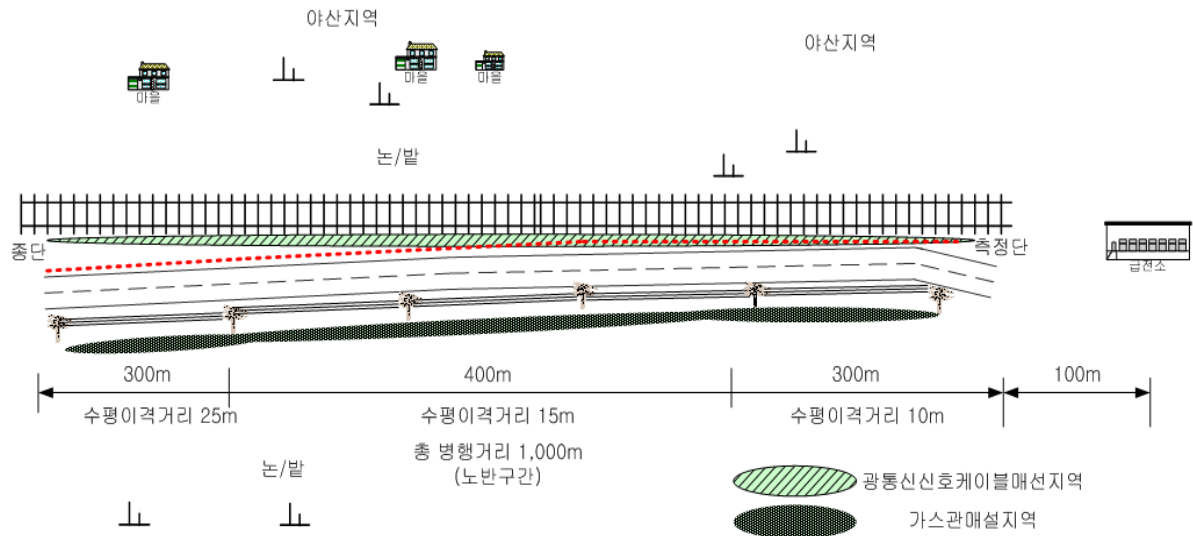
## 카. 밀양 상동

### (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km

## (2) 구간 특성

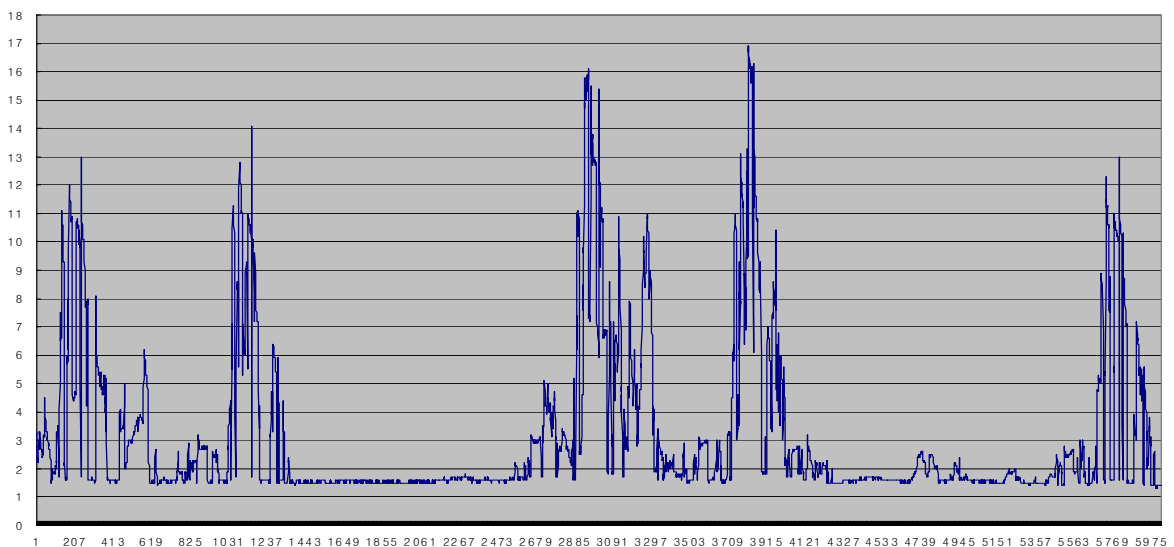
- 측정단 이전 100m 지점 급전소
- 산밑 민가와 논/밭 지역 노반 구간 선로 병행
- 종단방향 우측에 광통신신호케이블 매설지역
- 종단방향 좌측에 가스관 매설 지역

## (3) 포설 이격도



(그림 3-43) 밀양 상동 측정 구간 이격도

## (4) 유도전압 변화 특성



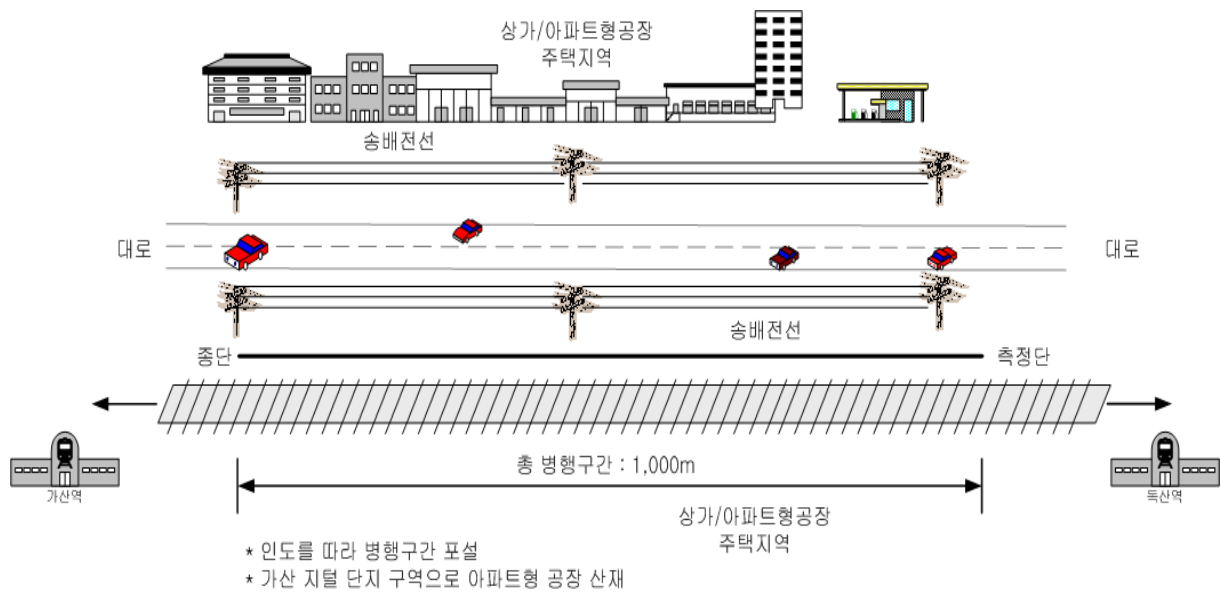
(그림 3-44) 밀양 상동 유도전압 변화 특성



#### 4. 도시 지역 측정 수행 내역

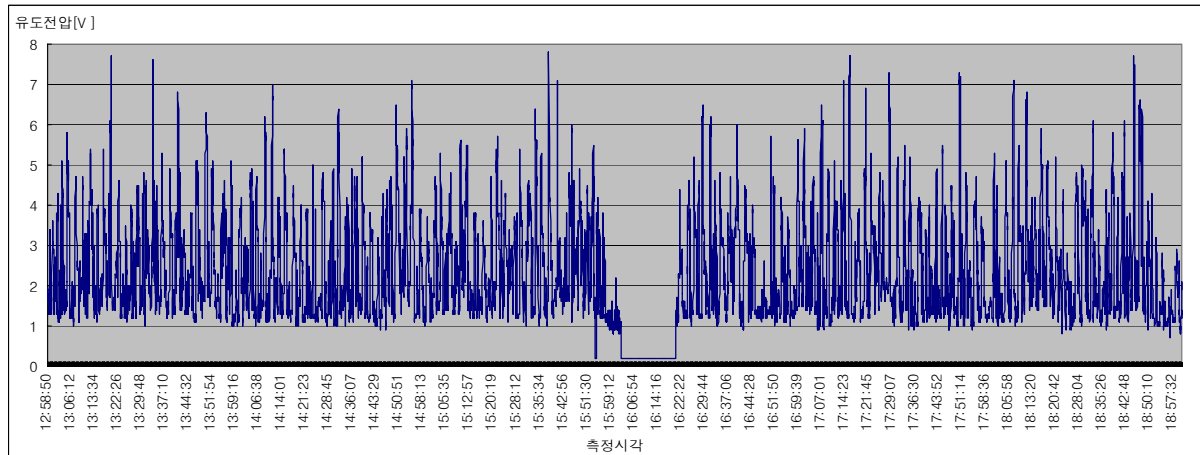
##### 가. 서울 가산

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km
- (2) 구간 특성
  - 국철구간
  - 상가 건물 좌우 도열, 우측 가산역 지점까지 400m
  - 주변에 배전선은 없음. 좌측 약120m 독산역
- (3) 포설 이격도



(그림 3-45) 서울 가산 측정구간 이격도

- (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-46) 서울 가산 유도전압 변화 특성

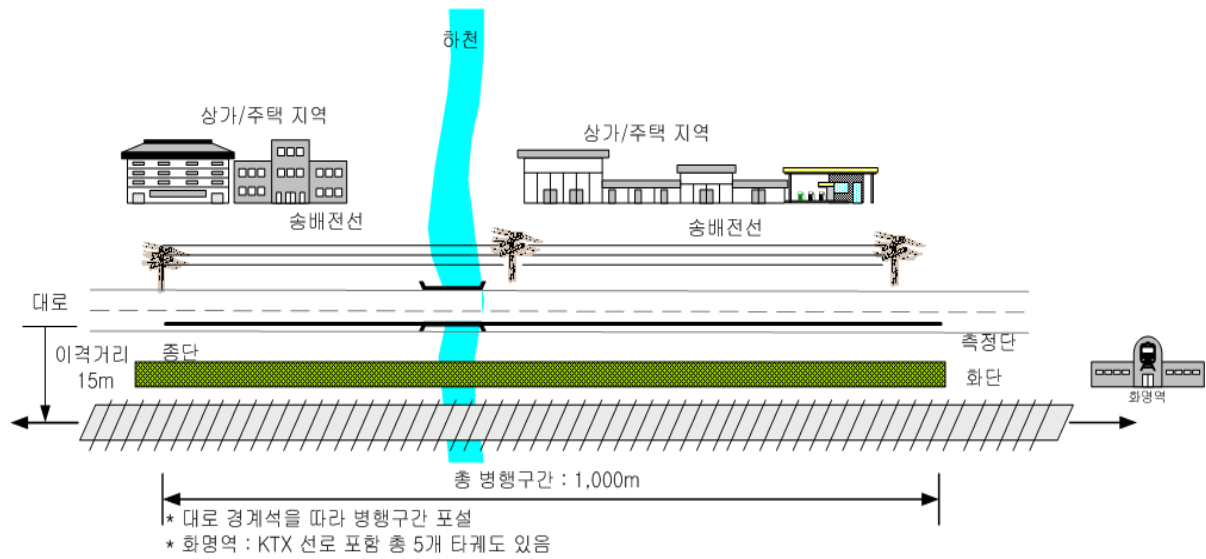
#### 나. 부산 화명

(1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1(0.95)km

(2) 구간 특성

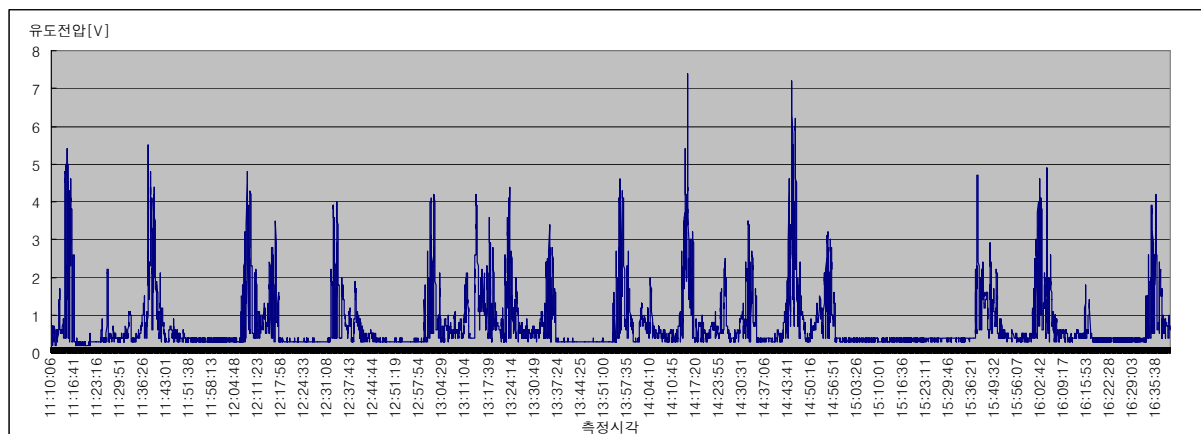
- 국철구간
- 국철 화명역까지 우측 도로에서부터 도로 병행, 지하철은 1km(도보 10분거리) 인근
- 선로 복복선(4개 선로) 궤도
- 종단쪽 300m 이후 구간 외곽도로
- 선로 건너편은 미개발 지역 구분선
- 인근 아파트 단지 및 대형 상가 밀집

(3) 포설 이격도



(그림 3-47) 부산 화명 측정구간 이격도

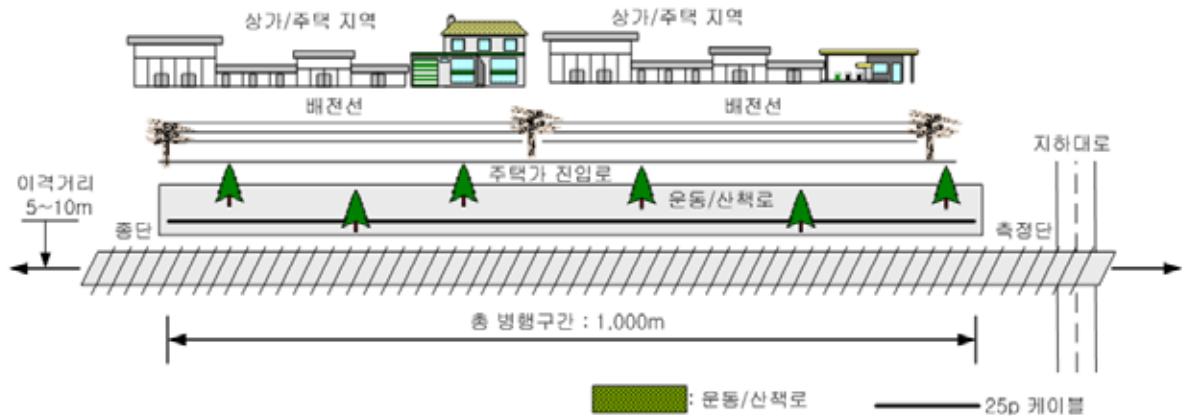
#### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-48) 부산 화명 유도전압 변화 특성

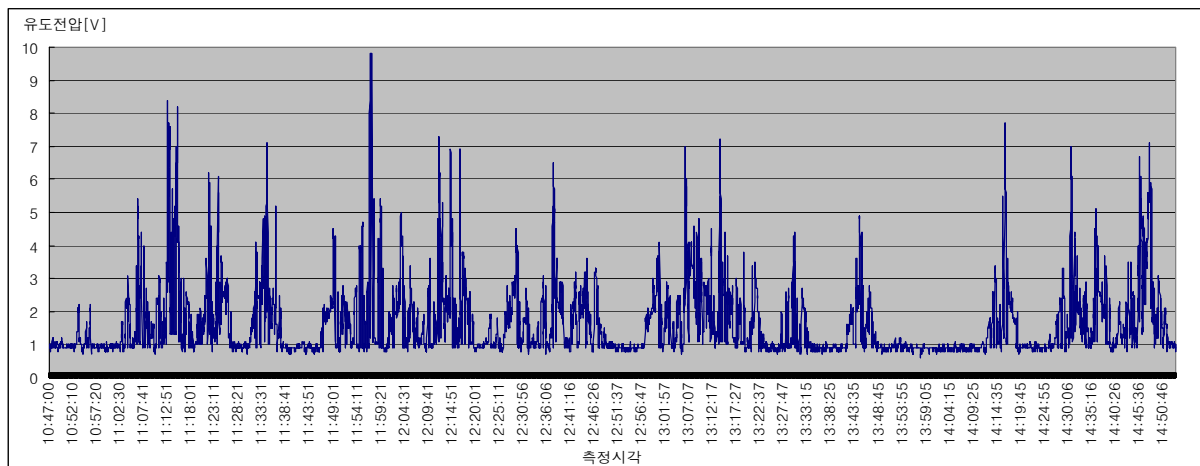
#### 다. 대구 비산

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 1km
- (2) 구간 특성
  - 국철구간
  - 마을과 선로 셋길 산책로상 포설
  - 좌측 지하도, 우측 종단 육교- 종단쪽 300m 이후 구간 외곽도로
- (3) 포설 이격도



(그림 3-49) 대구 비산 측정구간 이격도

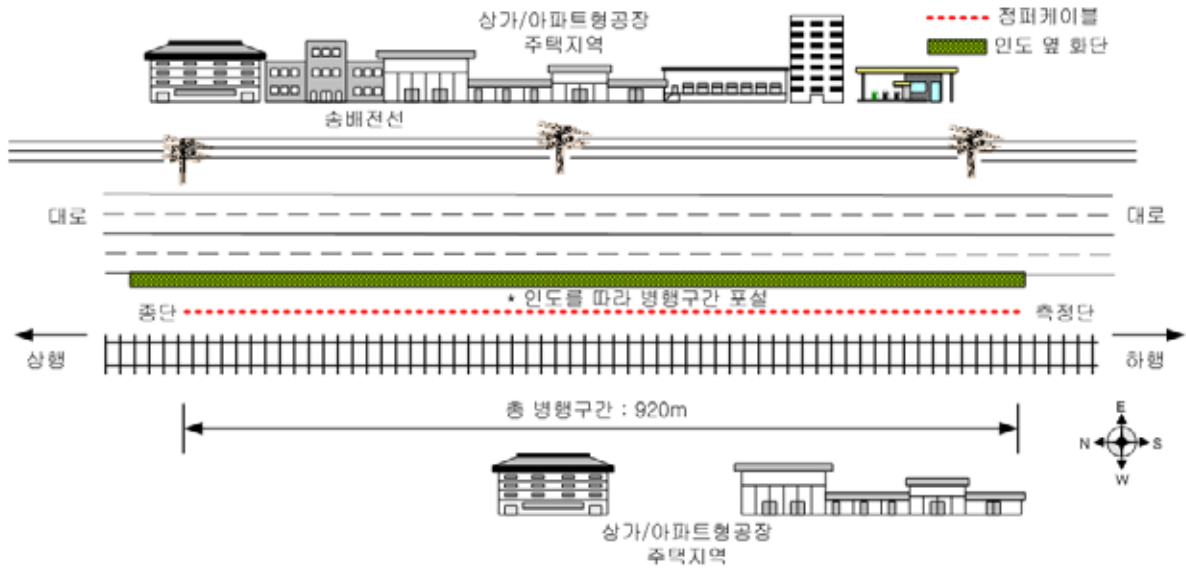
#### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-50) 대구 비산 유도전압 변화 특성

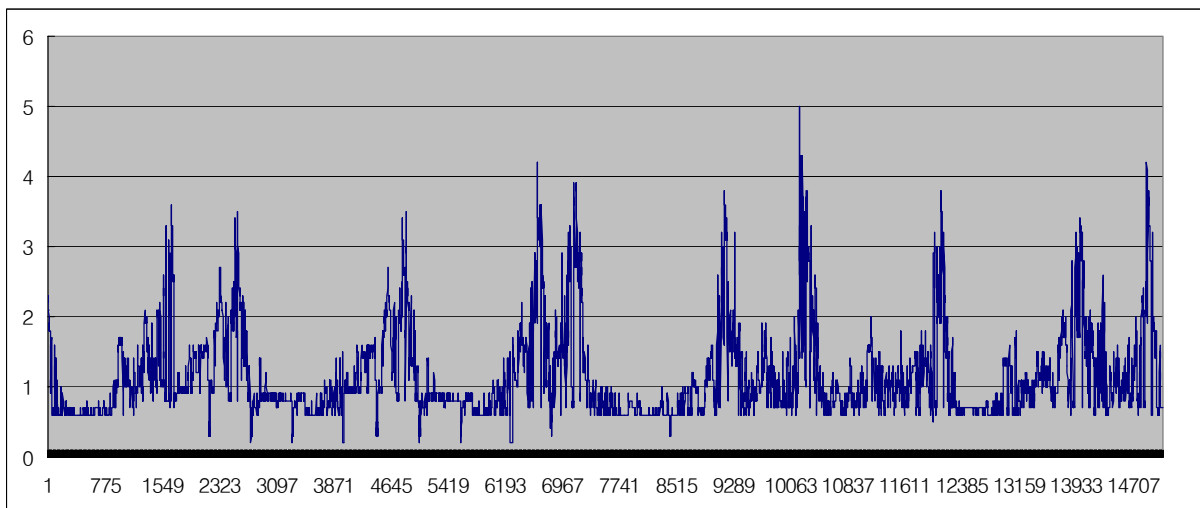
#### 라. 부산 덕포

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.92km
- (2) 구간 특성
  - 국철구간
  - 대로와 선로간 인도를 따라 포설
  - 인도보다 낮은 선로 구간
  - 선로 건너편에 상가 및 아파트형 공장 운집
- (3) 포설 이격도



(그림 3-51) 부산 덕포 측정구간 이격도

#### (4) 유도전압 변화 특성



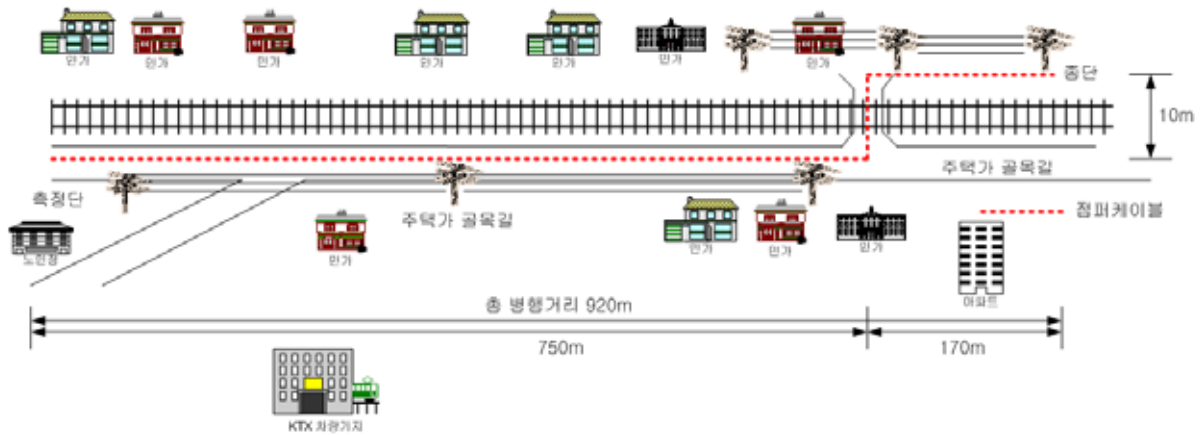
(그림 3-52) 부산 덕포 유도전압 변화 특성

#### 마. 부산 가야

- (1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.92km
- (2) 구간 특성
  - 국철구간
  - 주택가와 선로 사이 도로변 포설
  - 송배전 병행 구간

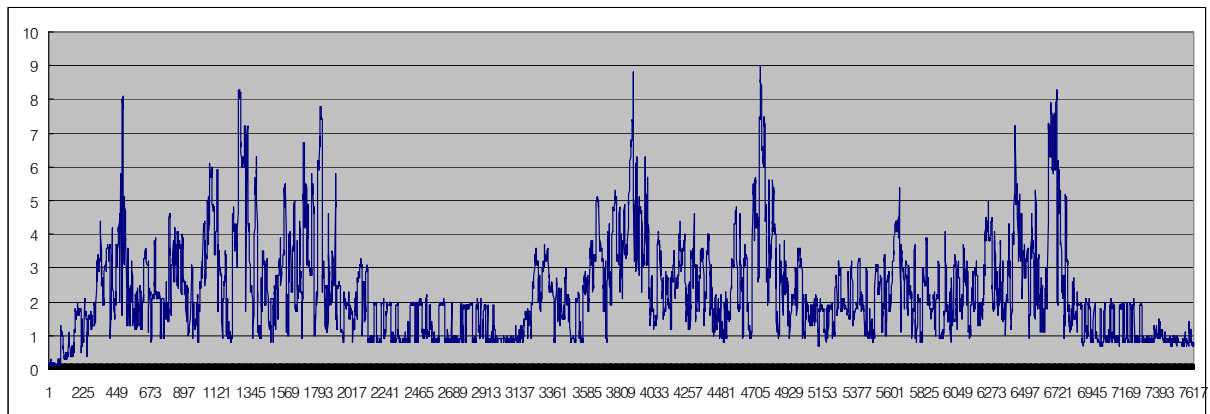
- 측정단으로부터 720m 이후 선로 건너편 공장 지역 병행

(3) 포설 이격도



(그림 3-53) 부산 가야 측정 구간 이격도

(4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-54) 부산 가야 유도전압 변화 특성

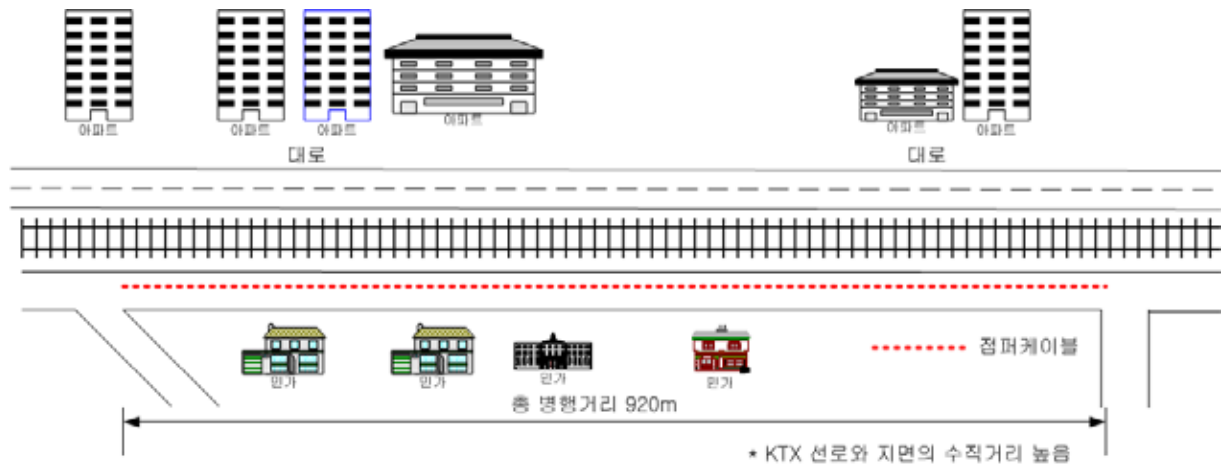
바. 부산 덕포2

(1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.92km

(2) 구간 특성

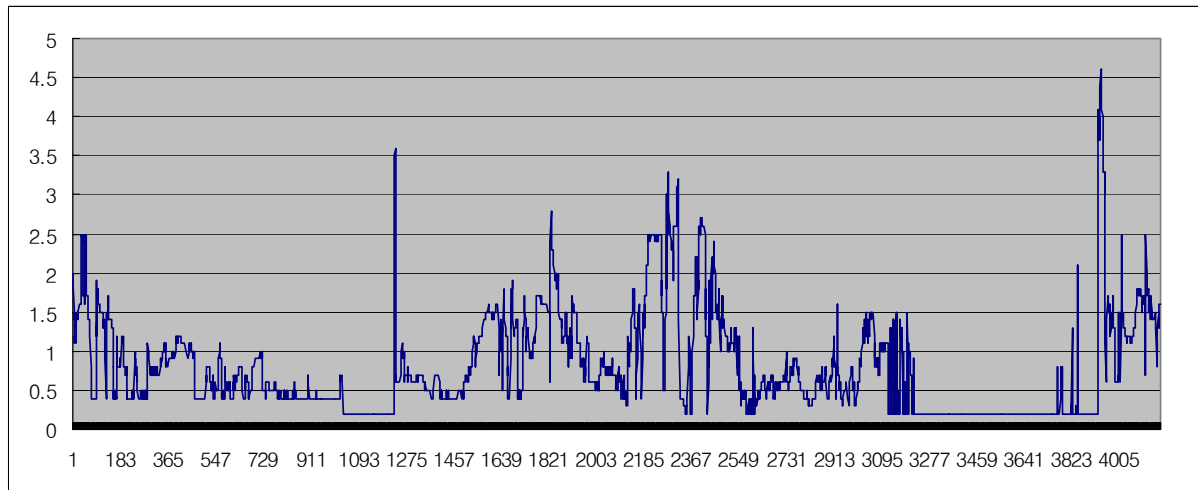
- 국철구간
- 주택가와 선로 사이 골목길 포설
- KTX 선로와 노면의 수직거리가 높음

(3) 포설 이격도



(그림 3-55) 부산 덕포2 측정 구간 이격도

#### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-56) 부산 덕포2 유도전압 변화 특성

### 사. 대구 지천

(1) 통신케이블 포설 병행 길이 : 0.95km

(2) 구간 특성

- 선로 옆 갓길을 병행하는 700m 구간 이후 15° 선로의 곡선 구간
- 곡선 구간 이후 250m 구간의 열악한 포설 환경으로 배수로 병행 포설
- 측정단 측 공업사 밀집 지역은 KTX 선로면보다 낮은 지대 위치

(3) 포설 이격도



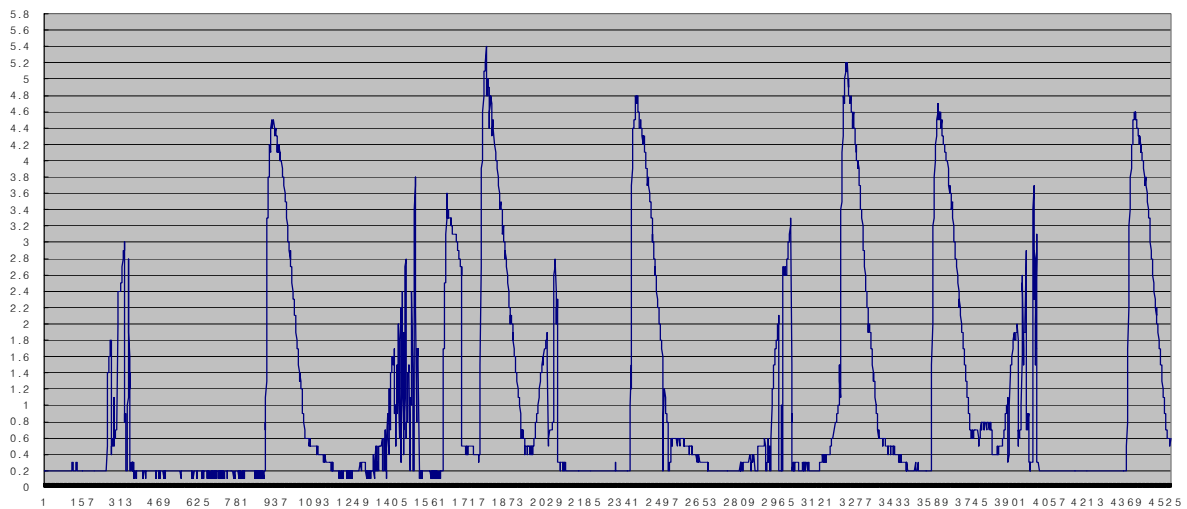


### (3) 포설 이격도



(그림 3-59) 대전 갑천 측정 구간 이격도

### (4) 유도전압 변화 특성



(그림 3-60) 대전 갑천 유도전압 변화 특성

## 제2절 예측계산시스템에 의한 정규화 전략

### 1. 상호 인덕턴스의 계산

KTX 고속전철의 운용을 위한 전력선으로부터 통신케이블에 야기되는 유도 전압은 일반적으로 식 (3-1)과 같이 구할 수가 있다.

$$V = j\omega M I K \quad (3-1)$$

여기서,

V : 유도전압

M : 상호인덕턴스(H/km)

$l$ : 병행거리(km)

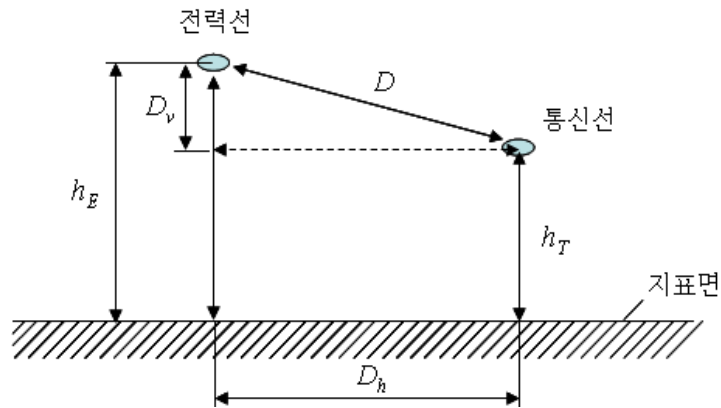
I : 기유도전류(A)

K : 종합 차폐계수

상호 인덕턴스(M)는 2개의 인덕턴스가 있는 경우 한쪽의 인덕턴스에 흐르는 전류에 의한 자속이 다른 인덕턴스와 쇄교함으로써 유도성 전압이 유기되는 경우에 그 전압과 전류의 시간변화율에 대한 비로써 유전 전압의 계산에 중요한 의미를 갖는다. 일반적인 전자장 해석상의 상호 인덕턴스를 구하는 방법은 하나의 도체와 완전히 같은 종류의 도체가 존재하고 전류는 모두 이 가상의 도체 내부를 흐르는 것으로 가정한 것으로 유한한 대지 도전율로 인하여 과류 전류의 전력 손실에 의한 허수분의 인덕턴스가 발생하게 되고 이는 허수분의 인덕턴스를 설명할 수가 없을 뿐만 아니라 서로 쇄교하는 자속을 구한다고 하더라도 물리적인 의미를 부여하지 못한다는 문제를 가지고 있다.

이에 본 측정 수행 연구에서는 전류를 만들어내는 자기장과 자기장을 만들어내는 전류와의 관련성을 고려하여 맥스웰의 전자기장 방정식을 기본으로 Carson Pollaczek 식의 대지 귀로 전류에 의한 상호 인덕턴스(M)를 구하였다.

KTX 전력선과 통신선간의 상호 인덕턴스를 계산하기 위한 기초 규격이 (그림 3-61)과 같다. 유도원인 전력선과 피유도원인 통신선간의 이격거리(D)는 상호 인덕턴스를 계산하기 위해 필요한 인자로서 본 측정 수행을 위한 측정 개소에서 포설 과정에서 고속전철의 전력선과 통신선의 수평 이격거리( $D_h$ ) 및 전력선과 통신선의 수직 이격거리( $D_v$ )를 측정하고 식 (3-2)와 식 (3-3)을 이용하여 계산된 전력선과 통신선간의 이격거리를 <표 3-2>에 나타내었으며, 이때 통신선의 지상 높이( $h_T$ )를 0cm로 한 것은 측정에 사용된 통신선을 지표면상에 포설하였기 때문이다.



주)  $D$  : 통신선과 전력선의 이격거리 [cm]

$h_T$  : 통신선의 지표면으로부터의 높이 [cm]

$h_E$  : 전력선의 지표면으로부터의 높이 [cm]

$D_h$  : 통신선과 전력선의 수평 이격거리 [cm]

$D_v$  : 통신선과 전력선의 수직 이격거리 [cm]

(그림 3-61) 상호인덕턴스 계산을 위한 기초 규격

$$D_v = |h_E - h_T| \quad [\text{cm}] \quad (3-2)$$

$$D = \sqrt{D_h^2 + D_v^2} = \sqrt{D_h^2 + (h_E - h_T)^2} \quad [\text{cm}] \quad (3-3)$$

<표 3-2> 측정 개소별 전력선과 통신선간 수직, 수평, 직선거리

측정개소	$h_E(D_v)(\text{cm})$	$h_T(\text{cm})$	$D_h(\text{cm})$	$D(\text{cm})$
시목	2000	0	300	2022.3748
강내	2000	0	300	2022.3748
소정	1500	0	500	1581.1388
아산음봉	1500	0	300	1529.7059
팽성1	1500	0	300	1529.7059
팽성2	1500	0	300	1529.7059
영동심천	2000	0	1050	2258.8714
영동주곡	1500	0	300	1529.7059
김천봉산	700	0	500	860.23253
양산원동	700	0	500	860.23253
서울가산	500	0	500	707.10678
부산화명	500	0	1500	1581.1388
대구비산	500	0	1000	1118.034
팽성2-2	1100	0	750	1331.3527
칠곡지천	700	0	300	761.57731
부산덕포	150	0	500	522.01533
부산당감	500	0	300	583.09519

밀양삼랑진	400	0	300	500.000
경산옥산	500	0	2650	2696.7573
경산옥곡	500	0	300	583.09519
강외오송	1000	0	400	1077.033
평택정자	1500	0	400	1552.4175
화성봉담	2500	0	400	2531.7978
대구지천	500	0	500	707.10678
청도청도	700	0	3000	3080.5844
양산물금	350	0	2000	2030.3941
안산군포	2000	0	3450	3987.7939
밀양상동	500	0	2500	2549.5098
대전갑천	1500	0	400	1552.4175

또한 상호 인덕턴스를 계산하기 위한 또 하나의 주요 인자인 전파 상수  $k$ 는 식 (3-4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$k = \sqrt{4\pi\sigma\omega} = 2\pi\sqrt{2f\sigma} \quad (\sigma \text{은 대지도전율}(CGS \text{ emu})) \quad (3-4)$$

여기서  $\sigma$ 는 대지비저항의 역수로서 본 측정 연구 수행에서 측정한 MKS 단위의 대지비저항과 차폐계수의 계산에 사용되는 대지도전율(CGS emu)간의 관계를 <표 3-3>에 보이며, 본 연구에서 측정을 수행한 각 측정 개소의 대지비저항은 <표 3-4>와 같다. 식 (3-4)를 이용하여 본 연구에서의 측정 개소별 전파 상수를 <표 3-5>에 나타내었다.

<표 3-3> 대지 도전율과 대지비저항의 관계

대지 도전율		대지비저항
CGS emu $\sigma$	MKS $\rho(\Omega/m)$	MKS $\rho(\Omega-m)$
$10^{-14}$	$10^{-3}$	1000
$10^{-13}$	$10^{-2}$	100
$10^{-12}$		

<표 3-4> 측정 개소별 대지비저항

측정개소	$\rho[\Omega \cdot m]$	측정개소	$\rho[\Omega \cdot m]$
시목	15.1	부산덕포	4706.7
강내	39.0	부산당감	2900.0
소정	29.0	밀양삼랑진	174.2
아산음봉	20.4	경산옥산	169.1

팽성1	29.0	경산옥곡	961.0
팽성2	33.2	강외오송	3500.0
영동심천	3665.1	평택정자	4973.0
영동주곡	91.2	화성봉담	10.7
김천봉산	129.0	대구지천	487.5
양산원동	91.2	청도청도	1506.9
서울가산	62.2	양산물금	531.2
부산화명	109.2	안산군포	4372.0
대구비산	91.2	밀양상동	1451.0
팽성2-2	49.7	대전갑천	4572.0
칠곡지천	52.8		

<표 3-5> 측정 개소별 전파상수 k값

개소	k	개소	k
시목	5.60121E-05	부산덕포	3.17E-06
강내	3.48528E-05	부산당감	4.04E-06
소정	4.04177E-05	밀양삼랑진	1.65E-05
아산음봉	4.81898E-05	경산옥산	1.67E-05
팽성1	4.04177E-05	경산옥곡	7.02E-06
팽성2	3.77747E-05	강외오송	3.68E-06
영동심천	3.59524E-06	평택정자	3.09E-06
영동주곡	2.27915E-05	화성봉담	6.65E-05
김천봉산	1.91635E-05	대구지천	9.86E-06
양산원동	2.27915E-05	청도청도	5.61E-06
서울가산	2.75979E-05	양산물금	9.44E-06
부산화명	2.08286E-05	안산군포	3.29E-06
대구비산	2.27915E-05	밀양상동	5.71E-06
팽성2-2	3.0874E-05	대전갑천	3.22E-06
칠곡지천	2.99539E-05		

여기서, <표 3-5>의 각 측정 개소별 전파상수 k와 전력선과 통신선간 이격거리 D의 곱인 kD의 범위에 따라 상호 인덕턴스를 계산하는 식은 크게 세 가지로 나타나는데 각각 식 (3-5), 식 (3-7) 그리고 식 (3-8)과 같다.

가.  $kD < 0.5$ 인 경우

$$M = \left[ 4.6 \log_{10} \frac{2}{kD} - 0.1544 + \frac{2\sqrt{2}}{3} k(h_E + h_T) - \left\{ \frac{\pi}{2} - \frac{2\sqrt{2}}{3} k(h_E + h_T) \right\} \right] \times 10^{-4} (H/km) \quad (3-5)$$

여기서, 상용 주파수에서 대지도전율이  $10^{-14}$ 급 이하인 경우 또는 이격거리가 30,000cm 이하인 경우는 식 (3-6)을 이용해도 실용상 충분하다.

$$M = \left[ 4.6 \log_{10} \frac{2}{kD} - j \frac{\pi}{2} \right] \times 10^{-4} (H/km) \quad (3-6)$$

나.  $10 \geq kD \geq 0.5$  인 경우

$$M = \left[ 4 \frac{kei''(kx)}{kx} - j \left\{ \frac{ker'(kx)}{kx} + \frac{1}{(kx)^2} \right\} \right] \times 10^{-4} (H/km) \quad (3-7)$$

다.  $kD > 10$  인 경우

$$M = -j \frac{4}{(kx)^2} \times 10^{-4} (H/km) \quad (3-8)$$

<표 3-6>에서 알 수 있듯이 본 연구에서 측정 수행된 각 개소에서의 kD값은 모두 0.5보다 작은 경우에 속하고 또한 <표 3-2>의 전력선과 통신선간 이격거리가 모두 30,000cm 이하인 경우에 해당되기 때문에 식 (3-6)을 이용하여 상호 인덕턴스를 계산하였다.

<표 3-6> 각 측정 개소별 kD값에 따른 상호인덕턴스 M

개소	kD	M	개소	kD	M
시목	0.113278	0.000595	부산덕포	0.001656	0.001426
강내	0.070486	0.000687	부산당감	0.002357	0.001356
소정	0.063906	0.000706	밀양삼랑진	0.008245	0.001108
아산음봉	0.073716	0.000678	경산옥산	0.045138	0.000774
팽성1	0.061827	0.000712	경산옥곡	0.004094	0.001247
팽성2	0.057784	0.000725	강외오송	0.003962	0.001253
영동심천	0.008121	0.001111	평택정자	0.004791	0.001216
영동주곡	0.034864	0.000824	화성봉담	0.168464	0.000519
김천봉산	0.016485	0.000971	대구지천	0.006971	0.001141
양산원동	0.019606	0.000937	청도청도	0.017273	0.000962
서울가산	0.019515	0.000938	양산물금	0.019174	0.000942
부산화명	0.032933	0.000835	안산군포	0.013127	0.001016
대구비산	0.025482	0.000886	밀양상동	0.014568	0.000996
팽성2-2	0.041104	0.000792	대전갑천	0.004997	0.001207
칠곡지천	0.022812	0.000907			

## 2. 정규화 전략

본 측정 연구 수행을 위하여 KTX 선로의 경부선 라인을 따라 도시 지역과 중소 도시, 교외 지역 및 시골 지역을 구분하여 총 30 개소를 측정하였다. 유도원과 피유도원간의 이격 거리 및 병행 거리 그리고 접지 저항 및 대지의 특성에 따라 서로 다른 대지 저항률의 차이로 인하여 각 측정 개소에서의 측정 결과를 직접적으로 비교 분석하는 데는 어려움이 따른다. 따라서 측정 개소의 환경 및 유도 계산 시스템에 의한 정규화를 통한 비교 분석을 수행하였으며, 정규화된 요소를 이용한 측정 결과의 비교 분석 결론을 도출하였다.

### 가. 병행거리 및 차폐계수에 관한 정규화

30개소에 이르는 측정 개소에서의 측정 수행 시 유도원과 피유도원의 병행거리는 510m에서 1,100미터의 범위로 병행거리에 따른 유도 전압의 특성 분포를 분석하기 위하여 모든 개소에서의 병행 거리를 1,000m로 정규화하여 측정된 유도 전압을 정규화하였다. 이와 함께 차폐계수 K에 대한 정규화 전압은 다음 식과 같이 구해진다.

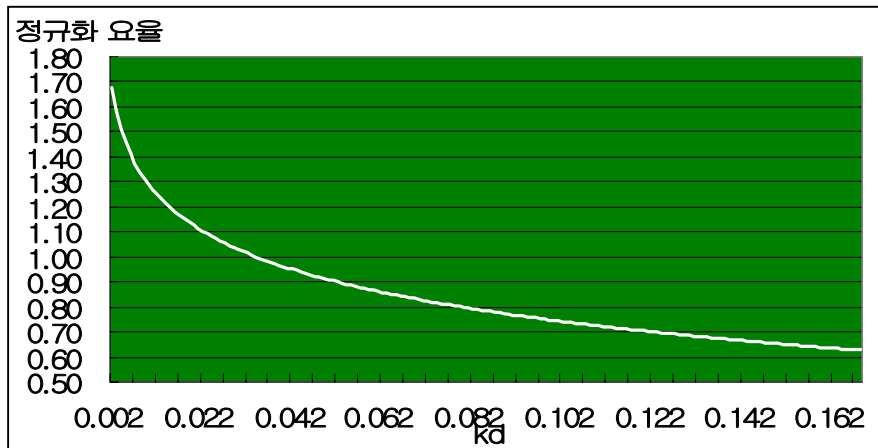
$$\overline{V} = V/K \quad (3-9)$$

여기에서 적용하여야 할 차폐계수는 각각 고가차폐효과에 대하여  $0.65(\rho \geq 250)$ ,  $0.665(17 \leq \rho < 250)$ ,  $0.685(\rho < 17)$ 이며, 궤도효과(외치)에 대하여는 각각  $0.97$ (단선),  $0.95$ (복선) 그리고  $0.92$ (복복선)이다.

### 나. 이격거리 및 대지저항률 내포 요소에 대한 정규화

로그함수상의 대지저항률과 이격거리의 종속적인 관계를 해소하고 두 개의 요소가 복합된 인자로서 하나의 파라미터로 정규화 처리가 가능할 수 있도록 상호 인덱턴스를 계산함에 있어서 <표 3-6>에서 구해진 kD factor를 정규화 한다.

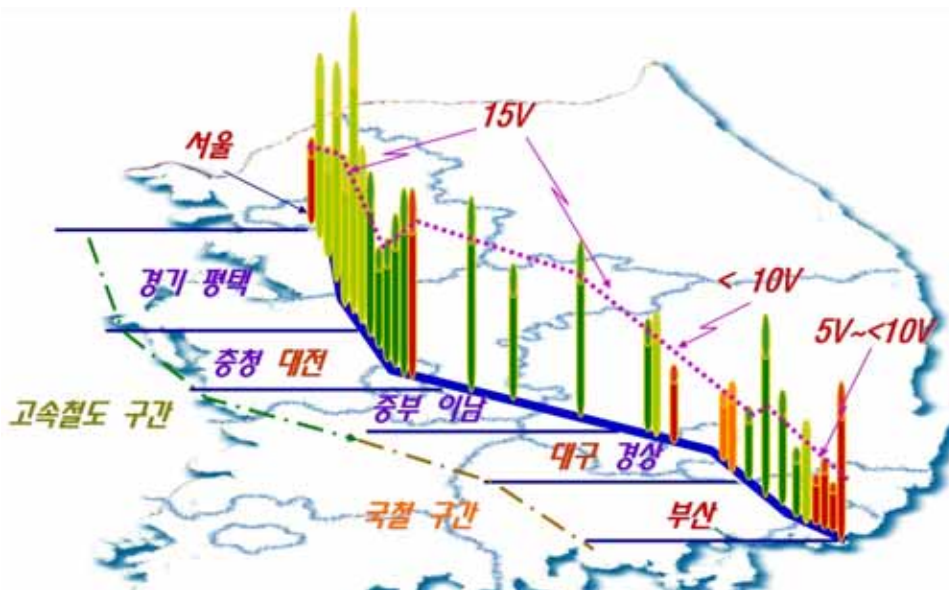
이에 대한 계산범위가 크기 때문에 kd의 평균값으로 정규화 하면 (그림 3-62)와 같다.



(그림 3-62) kd factor의 정규화 요율

### 제 3 절 유도전압 측정 데이터 분석

측정을 수행한 30여 개소의 정규화 측정 전압 데이터를 <표 3-7>에 보이며, 이때의 전국적인 전압 분포를 (그림 3-63)과 같이 나타낼 수 있다.



(그림 3-63) 측정 개소 지역 정규 전압 분포

<표 3-7> 정규화 측정 전압 데이터

No.	측정순	지역순	개소	$r[W \cdot m]$	지역	선로	$V' \ell CRkd$	전압 [V]	$\ell$ [km]
1	22	10	강외오송	3500.0	교외	고속	12.4	5.3	1.00



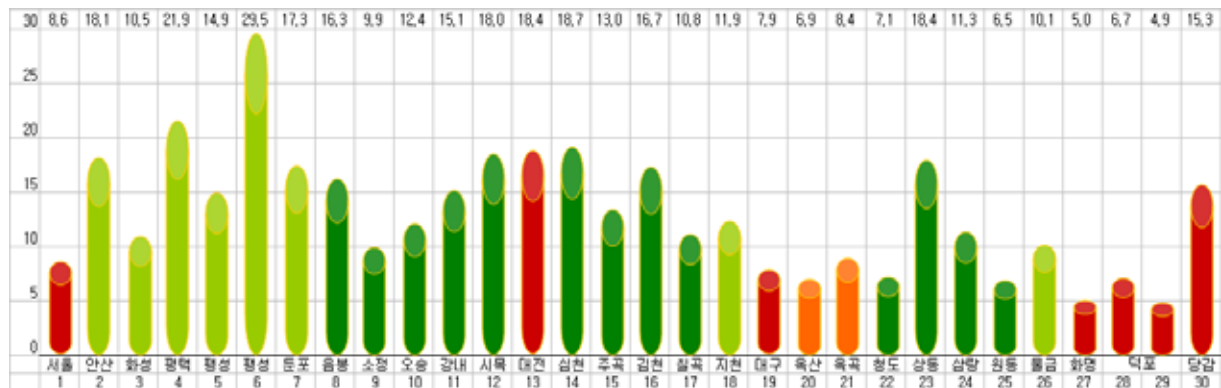
2	28	2	안산군포	4372.0	교외	고속	18.1	9.5	1.00
3	5	7	팽성1	29.0	교외	고속	17.3	13.0	1.00
4	6	5	팽성2	33.2	교외	고속	14.9	11.0	1.00
5	14	6	팽성2-2	49.7	교외	고속	29.5	22.0	0.95
6	23	4	평택정자	4973.0	교외	고속	21.9	9.7	1.00
7	24	3	화성봉담	10.7	교외	고속	10.5	5.5	0.51
8	25	18	대구지천	487.5	교외	국철	11.9	8.0	0.95
9	27	26	양산물금	531.2	교외	국철	10.1	8.0	0.95
10	30	13	대전갑천	4572.0	도시	고속	18.4	4.9	0.60
11	13	19	대구비산	91.2	도시	국철	7.9	7.0	1.00
12	17	30	부산당감	2900.0	도시	국철	15.3	8.0	0.92
13	16	28	부산덕포	4706.7	도시	국철	6.7	3.5	0.92
14	18	29	부산덕포2	182.0	도시	국철	4.9	4.2	0.92
15	12	27	부산화명	109.2	도시	국철	5.0	4.5	0.95
16	11	1	서울가산	62.2	도시	국철	8.6	7.0	1.00
17	2	11	강내	39.0	시골	고속	15.1	8.0	0.68
18	9	16	김천봉산	129.0	시골	고속	16.7	11.0	0.80
19	3	9	소정	29.0	시골	고속	9.9	7.5	1.00
20	1	12	시목	15.1	시골	고속	18.0	10.5	0.65
21	4	8	아산음봉	20.4	시골	고속	16.3	9.0	0.70
22	7	14	영동심천	3665.1	시골	고속	18.7	6.0	0.67
23	8	15	영동주곡	91.2	시골	고속	13.0	8.0	1.00
24	19	24	밀양삼랑진	174.2	시골	국철	11.3	8.0	1.00
25	29	23	밀양상동	1451.0	시골	국철	18.4	14.6	1.00
26	10	25	양산원동	91.2	시골	국철	6.5	5.5	1.00
27	26	22	청도청도	1506.9	시골	국철	7.1	6.5	1.10
28	15	17	칠곡지천	52.8	시골	국철	10.8	8.0	0.85
29	21	21	경산옥곡	961.0	중소	국철	8.4	5.0	0.95
30	20	20	경산옥산	169.1	중소	국철	6.9	6.0	0.85

## 1. 거시적 관점의 고찰

측정 결과에 대한 거시적인 관점에서 보면 (그림 3-64)와 같이 시골지역과 도시지역의 인터페이스 경계점이라고 할 수 있는 교외지역에서의 특성을 구분하는데 어려움이 따랐으며 오히려 높은 전압을 보이는 경우도 발생하여 시골지역과 유사성을 가지고 있다고 할 수 있다.

또한 대전지역을 제외한 대도시 지역에서는 전반적으로 낮아지는 특성을 보이고 있었으며 대구지역의 경우 대구로 진입하는 방향에서의 남하 외국 중소도시인 경산시에서 전반적으로 시골 지역과 비교하여 낮은 전압 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 부산 지역에서는 특히 전압이 낮게 측정되는 양상을 보이고 있으며

시골지역이라도 다른 지역과 비교하여 낮은 전압을 보이는 측정 개소들이 일부 보이고 있다.



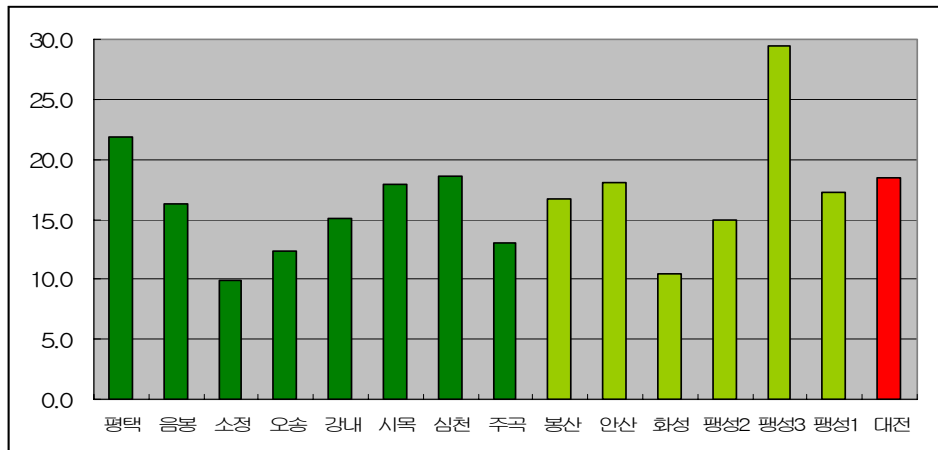
(그림 3-64) 측정 개소 별 정규 전압 분포도

## 2. 건설시설 격리 국철구간 분리 분석

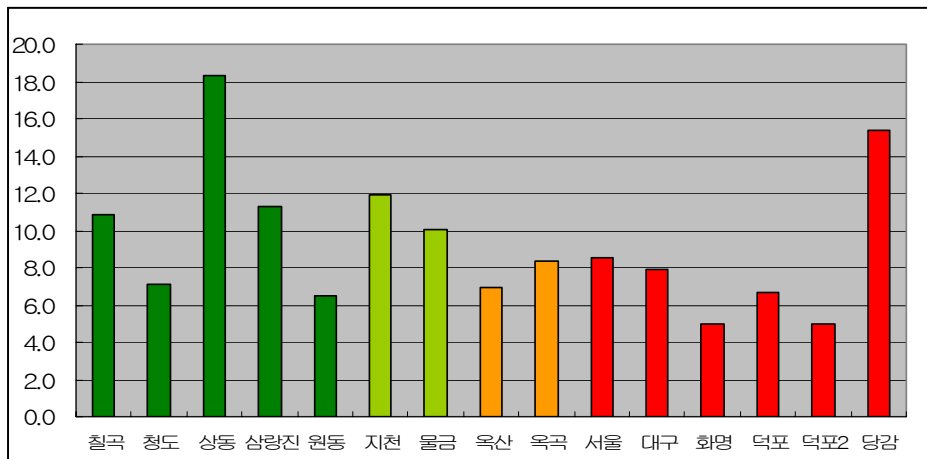
(그림 3-65)는 고속철 구간에서의 측정 전압 분포를 보이고 있으며 (그림 3-66)은 국철 구간에서의 측정 전압 분포를 보이고 있다.

(그림 3-65)에서 알 수 있듯이 교외 지역이나 시골지역에 있어서의 특성 구분이 어렵고 측정 개소수의 부족으로 인하여 대전 지역과 같은 도시 지역에서의 효과는 불확실하다. 시골 지역에 있어서 다른 시골 지역과는 달리 특이상 분포 데이터를 보이는 경우로 강위 오송과 소정에서는 상대적으로 낮은 전압이 나타나고 있었다. 상기한 바와 같이 교외지역에 대한 명확한 구분을 하기에는 어려움이 있었으며 교외지역의 경우 시골지역에서의 측정 결과와 유사한 면을 보이고 있다.

(그림 3-66)에서는 전체적인 전압 분포의 평균값이 아닌 측정 전압의 양상을 놓고 보았을 때 대구와 부산과 같은 도시 지역 진입지역에서 8V 정도의 낮은 전압이 측정되었으며 시골 지역에서는 12V에 이르는 전압이 측정되었으나 청도와 원동 지역에서는 특이하게 낮은 전압이 측정되었다.



(그림 3-65) 고속철 구간의 데이터 분포

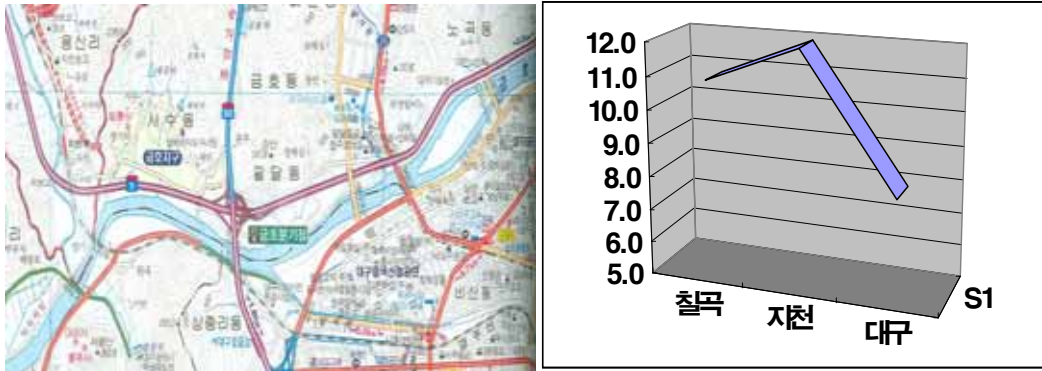


(그림 3-66) 국철 구간의 데이터 분포

## 제 4 절 도시효과 측면의 상대적 비교평가

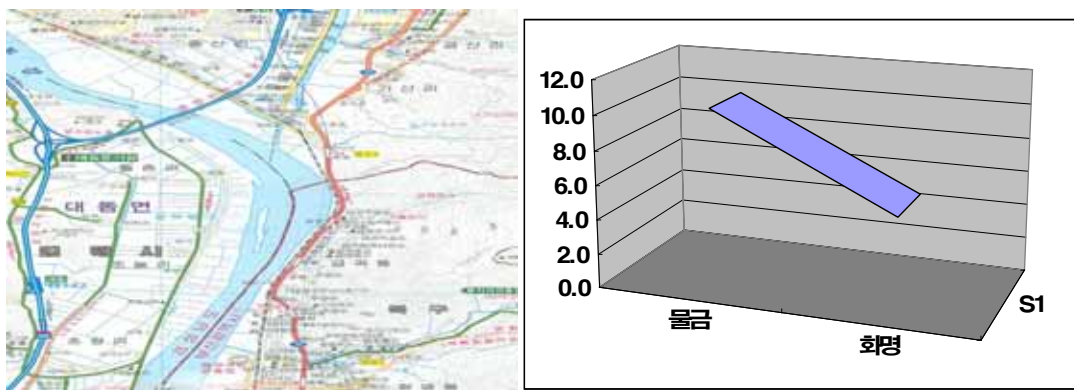
### 1. 도시 진입 인터페이스 경로의 종전압 변화 특성

대구와 부산과 같은 대도시로의 진입 인터페이스 경로상에서 나타나는 종전압의 변화 특성을 보면 먼저 (그림 3-67)과 같이 대구 시내 진입 인터페이스 구간의 데이터 변화는 진입 전 10V 이상의 레벨을 보이다가 시내에 들어와서는 7V 수준으로 떨어지는 것을 알 수 있다.



(그림 3-67) 대구 시내 진입 구간 데이터 변화

또한 (그림 3-68)과 같이 부산 시내 진입 구간에서는 진입 전 양산 물금 지역에서는 10V 수준의 전압 분포를 보이다가 부산 외곽 시내 화명역 인근에서는 5V 수준으로 낮아짐을 알 수 있다.



(그림 3-68) 부산 시내 진입 구간 데이터 변화

## 2. 부산 지역의 측정 개소 주변 환경 변화 특성

부산 지역의 경우 다른 측정 개소와 비교하여 환경 특성면에 있어서 특이한 점이 있는데 먼저 (그림 3-69)와 같이 부산 시내를 관통하는 지하철 노선과 병행하는 구간이 존재한다는 것이다. 또한 부산 지역에서의 측정 개소는 전체적으로 (그림 3-70)과 같이 측정 개소 인근의 토목 건축 구조 환경면에서 기유도 전력선과 통신선간의 이격 거리의 변화와 포설 환경 조건이 동일 구간 거리에서 빈번하게 달라지는 특성을 보인다.



(그림 3-69) 부산 측정 개소의 국철과 지하철의 노선 병행 구간



(그림 3-70) 부산 덕포 지역의 토목 건축 구조물의 특성

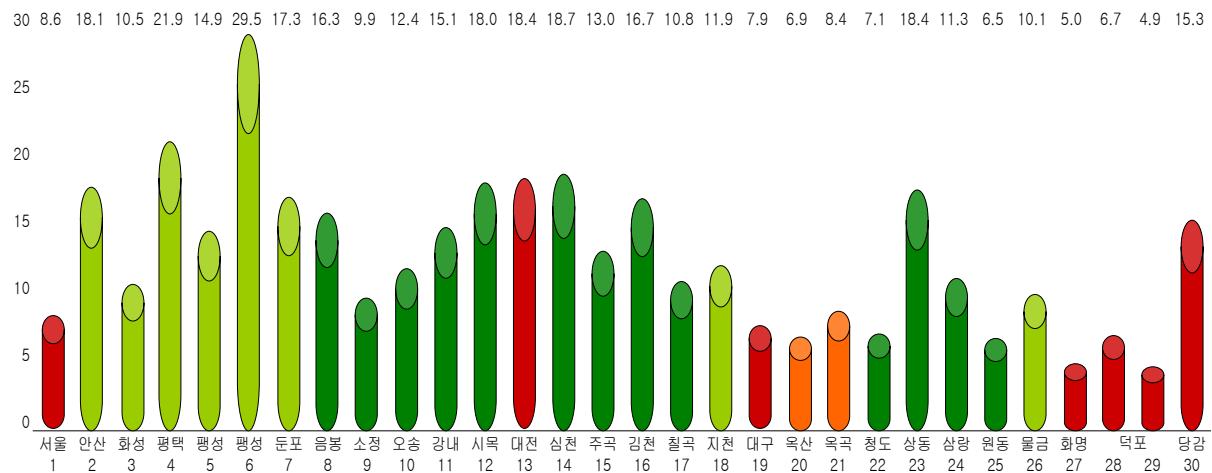
상기한 바와 같이 지하철 경로의 병행에 의한 영향성이나 덕포 지역의 지역 지반 구조 건축 특성과 관련하여 도시 지역을 통과하는 경로상에서 전압 강하의 경향을 볼 수가 있지만, 부산 지역과 같은 도시 지역에서의 저전압 현상에 대한 추가적인 해석 연구가 필요하다고 할 수 있다. 또한 덕포 지역과 같이 복잡한 지반 구조물과 주변 건축물의 특성을 보이는 곳에서는 접지시설의 어려움으로 인한 대지 접속이 곤란하거나, 축조 토대의 내부 구성 특성에 의한 차폐 현상 등, 측정 상 유도 전류 경로 형성이 곤란하다는 문제에 관한 전문적인 분석 또한 필요한

실정이다.

### 3. 급전소 개소 위치와의 상관 관계성 검토

본 연구 수행을 통해 측정된 30개소의 측정 개소의 주변 환경을 살펴보면 측정 병행 구간 내에 또는 측정 병행 구간 인근에 고속 전철로의 전력 공급을 위한 급전소가 위치하고 있는 경우로 팽성지역과 시목, 칠곡, 청도 그리고 상동 지역을 들 수 있다.

(그림 3-71)은 전체 측정 개소에서 측정 데이터와 급전소가 위치한 측정 개소에서 데이터를 비교한 것으로 급전소가 위치하는 개소에서 다른 개소에 비하여 다소 종전압이 높게 측정되는 경향을 보임을 알 수 있으나, 전체적으로 볼 때 모든 급전소 위치 개소가 그러한 경향에 일치하는 것은 아니며 급전소가 있음으로 해서 시골 지역 측정 개소에서 전압이 높게 측정된다고 단정짓기에는 어렵다고 할 수 있다. 보다 정확하고 신뢰성 있는 분석을 위해 급전소가 위치하는 구간과 그 구간의 전/후의 연속된 구간상에서 유도 전압을 측정할 필요가 있다.



(그림 3-71) 급전소 위치 구간에서의 종전압 분포

### 4. KTX 주행 속도와 종전압과의 상관관계 특성

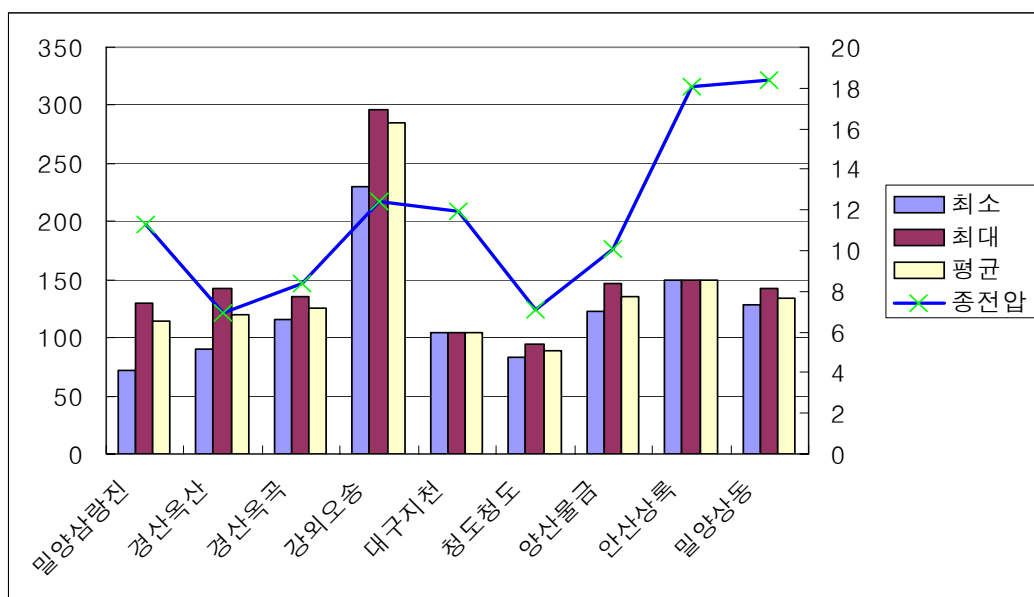
대전을 중심으로 북쪽에 위치한 KTX 선로는 전용 선로로서 고속 전철의 속도가 지역에 따라 다소 차이가 있긴 하지만 전체적으로 300km/h에 이르는 특성을



보이는 반면 대전 이남으로 위치하는 KTX 선로는 국철 구간과 혼용되는 선로로서 상호 운용 시간 및 충돌 방지 등의 목적으로 교차 운행 및 서행 특성을 보인다.

본 연구 수행을 위해 선정된 측정 개소 중 KTX의 주행 속도와 측정된 종전압과의 상관관계의 분석을 위하여 진행하는 KTX 열차의 주행 속도를 측정하고 이때의 종전압을 비교하여 (그림 3-72)에 보인다.

(그림 3-72)에서 알 수 있듯이 강외 오송 지역의 경우 KTX 주행 속도가 300km/h에 달하고 이때 측정된 종전압 역시 다른 지역과 비교하여 높게 측정되었다. 하지만 안산 상록이나 밀양 상동 지역의 경우 KTX의 주행 속도가 다른 지역과 비슷한 150km/h 수준이지만 이때 측정된 종전압은 강외 오송 지역보다 월등히 높게 측정되어 KTX 주행 속도와 종전압의 상관관계 분석에 있어서 단순 비교하기에는 무리가 따르게 된다.



(그림 3-72) KTX 주행속도와 종전압과의 상관관계 특성

## 5. 매설물 분포 현황과 종전압의 연관성

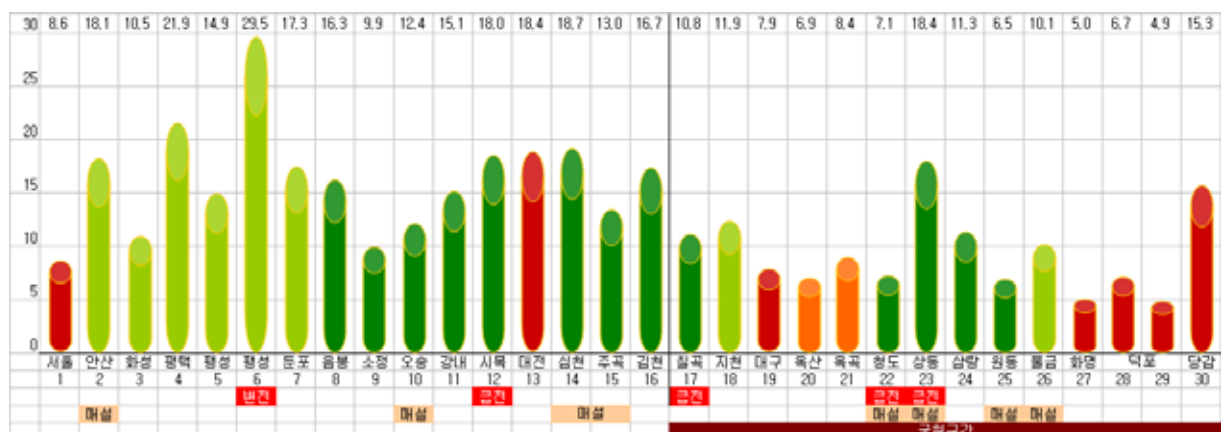
<표 3-8>은 본 연구를 통해 측정된 개소 중 지하 매설물을 확인할 수 있었던 측정 개소와 각 개소별 지하 매설물의 현황을 나타내고 (그림 3-73)은 종전압 측정 데이터에서 지하매설물 분포된 개소의 종전압 분포를 보이고 있다.

청도와 양산 원동의 측정 지역과 오송 지역의 측정 종전압이 다른 측정 지역에

비하여 다소 낮게 측정되었으며, 안산 상록의 경우 지하매설된 고압케이블이 유도 전압의 차폐물로서의 역할이 아닌 유도 전압의 증가성 매설물의 역할을 하고 있다. 지하 매설물의 차폐 효과를 확인하기 위해서는 매설된 시설물의 구조와 특성, 재질 등을 파악하여야 하지만 본 연구 수행 진행 상 그러한 특성의 직접 확인에 어려운 점이 있었다. 이를 위해 지하 매설물과 관련된 정보의 확인을 위해 관련 기관의 협조와 도움이 절실히 요구되고 있고, 매설물에 의한 차폐성은 사실상 도시효과 의미의 기저 원리이기 때문에 이에 대한 심도 있는 해석을 통한 정량적인 원인 규명을 해야만 한다.

<표 3-8> 매설물 분포 현황

No.	해당개소	고압 송유관	가스관	광케이블 (사업자)	광신호 케이블 (철도청)	특고압 케이블 (철도청)	광역상수도	하수관
1	영동심천	O						
2	영동주곡	O						
3	양산원동			O (데이콤)				
4	강외오송						O	
5	청도청도				O			O
6	양산물금			O (SKT)				
7	안산군포					O		
8	밀양상동		O		O			



(그림 3-73) 매설물 특성에 따른 영향 고려





## 제 4 장 유도원 구축 모의실험 연구





## 제 4 장 유도원 구축 모의 실험연구

### 제1절 실증실험 모델링 기법에 관한 기술보고

#### 1. 전력 유도 전압과 관련된 국내 규정

통신선은 전력선에 의한 유도 장애를 받기 때문에 이에 대한 보호 대책이 필요하다. 전력유도의 전압이 “전기통신설비의 기술기준에 관한 규정 (대통령령 제 20664호, 제정 2008년 2월 29일)”<sup>[1]</sup> 제9조(전력유도의 방지) 2항의 각 호의 제한치를 초과하거나 초과할 우려가 있는 경우에는 전력유도 방지조치를 하여야 한다. 전기통신설비의 기술기준에 관한 규정의 제9조(전력유도의 방지)의 내용은 아래와 같다.

제9조(전력유도의 방지) ① 전송설비 및 선로설비는 전력유도로 인한 피해가 없도록 건설·보전되어야 한다.

② 전력유도의 전압이 다음 각 호의 제한치를 초과하거나 초과할 우려가 있는 경우에는 전력유도 방지조치를 하여야 한다.

1. 이상시 유도위험전압: 650 볼트. 다만, 고장시 전류제거시간이 0.1초 이상인 경우에는 430 볼트로 한다.
2. 상시 유도위험중전압 : 60 볼트
3. 기기 오동작 유도중전압 : 15볼트. 다만, 해당 전기통신설비의 통신선로가 왕복 2개의 선으로 구성되어 있는 경우에는 적용하지 아니하되, 통신선로의 2개의 선 중 1개의 선이 대지를 통하도록 구성되어 있는 경우(대지귀로방식)에는 적용한다.
4. 잡음전압 : 0.5 밀리볼트. 다만, 전철시설로 인한 잡음전압이 0.5 밀리볼트보다 크고 2.5 밀리볼트 보다 작은 경우에는 1분 동안에 0.5 밀리볼트보다 크고 2.5 밀리볼트보다 작은 잡음전압과 그 잡음전압이 지속되는 시간(초)을 곱한 전압의 총 합계가 30 밀리볼트·초를 초과하지 아니하여야 한다.

각 설비 시설시 한계 유도전압을 초과하는지 여부를 예측하여 대책을 세우도록 하여야 한다. 유도전압을 계산하는 데 있어서는 다양한 설정 조건들이 적용되며 그러한 예측 계산 방법에 대하여 “전파연구소고시 제2007-102호(전력유도전압의 구체적 산출방법에 대한 기술기준, 2007. 12.27)”<sup>[2],[3]</sup>로 정하여져 있으며, 전력유도 전압의 구체적 산출방법에 대한 기술기준의 제3조(전력유도 검토대상 시설)와 제4조(전력선에 의한 유도전압 산출방법)는 다음과 같다.

제3조(전력유도 검토대상시설) ①전력유도 검토대상 시설은 다음 각호와 같다.

1. 전기통신시설이 가공송전선과 5km이내의 이격거리로 500m이상 병행할 경우
2. 케이블인 전기통신시설이 특고압배전선과 100m이내의 이격거리로 500m이상 병행할 경우(단, 가공지선이 설치된 경우에는 1km이상 병행할 경우로 한다)
3. 전기통신시설이 지중송·배전선과 50m이내의 이격거리로 5km이상 병행할 경우
4. 전기통신시설이 발전소 또는 변전소의 접지체와 500m이내의 이격거리에 있을 경우
5. 전기통신시설이 교류전력공급방식 전철시설과 500m 이내의 이격거리로 500m 이상 병행할 경우(고속철도의 경우에는 1km 이내의 이격거리로 500m이상 병행할 경우)

②제1항의 규정에 의한 검토대상시설 이외의 시설에 대해서도 유도자와 피유도자 상호간의 요청에 따라 전력유도관련 자료를 제공받아 검토할 수 있다.

제4조(전력선에 의한 유도전압 산출방법) ①전력선에 의한 유도전압 예측은 다음 각호의 계산식에 의한다.

1. 가공송전선에 의한 이상시 유도위험전압 예측계산식 : 별표 1
2. 가공배전선에 의한 유도전압 예측계산식 : 별표 2
3. 지중송·배전선에 의한 유도전압 예측계산식 : 별표 3

②제1항에서 규정한 예측계산식에서 사용되는 적용계수 등은 별표 4와 같다. 다만, 별표 4에 규정되지 아니한 적용계수 등을 예측계산식에 사용할 필요가 있는 때에는 유도자와 피유도자가 상호 합의하여 그 적용계수 등을 정하여 사용할 수 있다.

[별표 1] 가공송전선에 의한 이상시 유도위험전압 예측계산식(제4조제1항제1호 관련)

$$V_f = \sum (j \omega \cdot M \cdot \ell \cdot I_g \cdot K_{11} \cdot K_{12} \cdot K_3 \cdot K_7)$$

- 주)  $V_f$  : 지락시 유도위험전압(V)  
 $\omega$  : 60Hz에 대한 각속도  
 $M$  : 60Hz에 대한 전력선과 전기통신선의 상호인덕턴스(H/km)  
 $\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)  
 $I_g$  : 전력선 지락시 고장전류 (A)  
 $K_{11}$  : 송전선 가공지선의 차폐계수  
 $K_{12}$  : 송전선 가공지선의 분류계수

$K_3$  : 전기통신선의 차폐계수

$K_7$  : 통신케이블 조수에 의한 유도 저감계수

[별표 2] 가공배전선에 의한 유도전압 예측계산식(제4조제1항제2호 관련)

1. 지락시 유도위험전압

$$V_f = \sum (j \omega \cdot M \cdot \ell \cdot I_g \cdot K_{21} \cdot K_{22} \cdot K_3 \cdot K_7)$$

(주)  $V_f$  : 배전선 지락시 유도위험전압(V)

$\omega$  : 60Hz에 대한 각속도

$M$  : 60Hz에 대한 전력선과 전기통신선의 상호인덕턴스 (H/km)

$\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)

$I_g$  : 전력선 지락시 고장전류 (A)

$K_{21}$  : 배전선 중성선의 차폐계수

$K_{22}$  : 배전선 중성선의 분류계수

$K_3$  : 전기통신선의 차폐계수

$K_7$  : 통신케이블 조수에 의한 유도 저감계수

2. 상시유도 종전압

$$V_L = \sum (j \omega \cdot M \cdot \ell \cdot I_n \cdot K_{21} \cdot K_3 \cdot K_7)$$

(주)  $V_L$  : 배전선 정상운전시 유도종전압(V)

$\omega$  : 60Hz에 대한 각속도

$M$  : 60Hz에 대한 전력선과 전기통신선의 상호인덕턴스(H/km)

$\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)

$I_n$  : 배전선 중성선에 흐르는 불평형 전류(A)

$K_{21}$  : 배전선 중성선의 차폐계수

$K_3$  : 전기통신선의 차폐계수

$K_7$  : 통신케이블 조수에 의한 유도 저감계수

3. 유도잡음전압

$$V_n = \sum (V_L \cdot \eta \cdot \alpha) \times 10^3$$

(주)  $V_n$  : 배전선 정상운전시 유도잡음전압(mV)

$V_L$  : 배전선 정상운전시 유도종전압(V)

$\eta$  : 평가 잡음 함유율

$\alpha$  : 유도잡음 경감계수

[별표 3] 지중 송·배전선에 의한 유도전압 예측계산식(제4조제1항제3호 관련)

1. 지락시 유도위험전압

$$V_f = \sum (j \omega \cdot M \cdot \ell \cdot I_g \cdot K_{31} \cdot K_{32} \cdot K_3 \cdot K_7)$$

(주)  $V_f$  : 지중송·배전선 지락시 유도위험전압(V)

$\omega$  : 60Hz에 대한 각속도

$M$  : 60Hz에 대한 전력선과 전기통신선의 상호인덕턴스  
(H/km)

$\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)

$I_g$  : 전력선 지락시 고장전류 (A)

$K_{31}$  : 지중송·배전선의 차폐계수

$K_{32}$  : 지중송·배전선 외피의 분류계수

$K_3$  : 전기통신선의 차폐계수

$K_7$  : 통신케이블 조수에 의한 유도 저감계수

2. 상시유도 종전압

$$V_L = \sqrt{V_\ell^2 + V_s^2 + V_0^2}$$

(주)  $V_L$  : 지중송·배전선의 합성 유도종전압(V)

$V_\ell$  : 정상운전시 부하전류에 의한 유도종전압(V)

$V_s$  : 정상운전시 대지귀로 외피전류에 의한 유도종전압(V)

$V_0$  : 정상운전시 영상전류에 의한 유도종전압(V)

가. 정상운전시 부하전류에 의한 유도종전압

$$V_\ell = \sum \{ j \omega \cdot (M_a + a^2 M_b + a M_c) \cdot I_e \cdot \ell \cdot K_{31} \cdot K_3 \cdot K_7 \}$$

(주)  $V_\ell$  : 정상운전시 부하전류에 의한 유도종전압(V)

$\omega$  : 60Hz에 대한 각속도

$M_a \cdot M_b \cdot M_c$  : 60Hz에서 지중전력선의 각 심선과 전기통신선간의 상호  
인덕턴스(H/km)

$a$  :  $-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  : 120°의 위상차를 가진 단위벡터

$$a^2 : -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$I_e$  : 지중전력선의 상전류(지중전력선의 정상운전시 그 계획 최대 전류값)

$\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)

$K_{31}$ : 지중송·배전선의 차폐계수

$K_3$  : 전기통신선의 차폐계수

$K_7$  : 통신케이블 조수에 의한 유도 저감계수

나. 정상운전시 대지귀로 외피전류에 의한 유도종전압

$$V_s = \Sigma(j\omega \cdot M \cdot \ell \cdot I_s \cdot K_3 \cdot K_7)$$

(주)  $V_s$  : 정상운전시 대지귀로 외피전류에 의한 유도종전압(V)

$\omega$  : 60Hz에 대한 각속도

$M$  : 60Hz에 대한 전력선과 전기통신선의 상호인덕턴스(H/km)

$\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)

$I_s$  : 대지귀로 외피전류 (A)

$K_3$  : 전기통신선의 차폐계수

$K_7$  : 통신케이블 조수에 의한 유도 저감계수

다. 정상운전시 영상전류에 의한 유도종전압

$$V_0 = \Sigma(j\omega \cdot M \cdot \ell \cdot I_0 \cdot K_{s0} \cdot K_3 \cdot K_7)$$

(주)  $V_0$  : 정상운전시 영상전류에 의한 유도종전압(V)

$\omega$  : 60Hz에 대한 각속도

$M$  : 60Hz에 대한 전력선과 전기통신선의 상호인덕턴스(H/km)

$\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)

$I_0$  : 정상운전시 영상전류 (1회선당 계통허용전류의 6%로 한다)(A)

$K_{s0}$  : 60Hz에서의 영상전류에 대한 지중전력선의 차폐계수

$K_3$  : 전기통신선의 차폐계수

$K_7$  : 통신케이블 조수에 의한 유도 저감계수

### 3. 유도잡음전압

$$V_n = \sqrt{V_{en}^2 + V_{sn}^2 + V_{on}^2}$$

(주)  $V_n$  : 합성유도잡음전압 (mV)

$V_{en}$  : 정상운전시 부하전류에 의한 유도잡음전압(mV)

$V_{sn}$  : 정상운전시 대지귀로 외피전류에 의한 유도잡음전압(mV)

$V_{on}$  : 정상운전시 영상전류에 의한 유도잡음전압(mV)

가. 정상운전시 부하전류에 의한 유도잡음전압

$$V_{en} = \sum \{ j \omega_n (M_{an} + a^2 M_{bn} + a M_{cn}) \cdot \ell \cdot I_{en} \cdot K_{ln} \cdot K_{3n} \cdot \lambda \} \times 10^3$$

(주)  $V_{en}$  : 정상운전시 부하전류에 의한 유도잡음전압(mV)

$\omega_n$  : 800Hz에 대한 각속도

$M_{an}, M_{bn}, M_{cn}$  : 800Hz에 대한 지중전력선의 각상과 전기통신선간의 상호 인덕턴스 (H/km)

$$a : -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} : 120^\circ \text{의 위상차를 가진 단위벡터}$$

$$a^2 : -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)

$I_{en}$  : 부하전류의 등가방해전류 (A)

$K_{ln}$  : 800Hz에서의 지중전력선 차폐계수

$K_{3n}$  : 800Hz에서의 전기통신선 차폐계수

$\lambda$  : 전기통신회선의 평형도

나. 정상운전시 대지귀로 외피전류에 의한 유도잡음전압

$$V_{sn} = \sum ( j \omega_n \cdot M_n \cdot \ell \cdot I_{sn} \cdot K_{3n} \cdot \lambda ) \times 10^3$$

(주)  $V_{sn}$  : 정상운전시 대지귀로 외피전류에 의한 유도잡음전압(mV)

$\omega_n$  : 800Hz에 대한 각속도

$M_n$  : 800Hz에 대한 지중전력선과 전기통신선간의 상호 인덕턴스(H/km)

$\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)

$I_{sn}$  : 대지귀로 외피전류의 등가방해전류(A)

$K_{3n}$  : 800Hz에서의 전기통신선 차폐계수



$\lambda$  : 전기통신회선의 평형도

다. 정상운전시 영상전류에 의한 유도잡음전압

$$V_{0n} = \sum \{ j \omega_n \cdot M_n \cdot \ell \cdot I_{0n} \cdot K_{0n} \cdot K_{3n} \cdot \lambda \} \times 10^3$$

(주)  $V_{0n}$  : 정상운전시 영상전류에 의한 유도잡음전압(mV)

$\omega_n$  : 800Hz에 대한 각속도

$M_n$  : 800Hz에 대한 지중전력선과 전기통신선간의  
상호인덕턴스(H/km)

$\ell$  : 전력선과 전기통신선의 병행거리(km)

$I_{0n}$  : 영상전류의 등가방해전류(A)

$K_{0n}$  : 800Hz에서의 영상전류에 대한 지중전력선의 차폐계수

$K_{3n}$  : 800Hz에서의 전기통신선 차폐계수

$\lambda$  : 전기통신회선의 평형도

#### [별표 4] 전력선에 의한 유도전압 산출계수 적용방법(제4조제2항 관련)

1. 상호인덕턴스(M)의 산정은 카슨·폴라체크(Carson·Pollaczek)의 계산식에 의한다.
2. 전력선 지락시 고장전류( $I_g$ )는 전력계통의 100MVA를 기준으로 하여 계산식에 의하여 산정한 값으로 한다.

가. 계산식

$$V_g = \frac{3 \times 100}{\%Z_1 + \%Z_2 + \%Z_0 + 3\%R_f} \times \frac{10^5(\text{kVA})}{\sqrt{3 \times E(\text{kV})}}$$

(주)  $\%Z_1$  : 고장점으로부터 발·변전소까지 퍼센트 임피던스로 본 정상 임피던스

$\%Z_2$  : 고장점으로부터 발·변전소까지 퍼센트 임피던스로 본 역상 임피던스

$\%Z_0$  : 고장점으로부터 발·변전소까지 퍼센트 임피던스로 본 영상 임피던스

$R_f$  : 고장점의 지락저항

E : 송·배전선로의 공칭전압(kV)

나. 고장점의 지락 저항( $R_f$ )

구 분	발·변전소로부터 고장점까지의 거리(km)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15 이상
지락저항 ( $\Omega$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

(주) 중간값은 선형(직선)보간법을 적용한다.

3. 대지고유저항

지 형 별	대 지 고 유 저 항
도심지형	$100\Omega \cdot m$
도로, 철로지형	$300\Omega \cdot m$
논, 밭, 하천지형	$500\Omega \cdot m$
산악지형	$1,000\Omega \cdot m$
기타지형	$300\Omega \cdot m$

(주) 도심지형이라 함은 주택, 상가, 공장 등 건물이 밀집되어 있는 지역을 말하며, 대지고유저항은 측정값을 적용할 수 있다.

4. 전기통신선의 차폐계수( $K_3$ ,  $K_{3n}$ )

가. 전기통신선의 차폐계수( $K_3$ ,  $K_{3n}$ )는 다음표와 같이 한다.

구 분		선 종 별	차 폐 계 수	
			기본파(K <sub>3</sub> ) 60Hz	잡 음(K <sub>3n</sub> ) 800Hz
가공선로		1. 차폐층이 없는 것	1.0	1.0
		2. 차폐층이 있는 LAP형 케이블	1.0	0.6
		3. 차폐층이 있는 LAP형 이외의 케이블	0.95	0.15
지 하 선 로	관	1. 합성수지관에 수용된 선로	가공선로와 동일	
		2. 강관내 수용된 케이블	0.6	0.1
	로 내 수 용 선 로	3. 맨홀내 관 상호간을 전기적으로 접속한 강철훈로 내에 차폐층이 있는 LAP형 이외의 가공케이블을 수용하는 경우로서 공장 거리 2km이상	0.2	0.03
		4. 맨홀에 관 상호간을 전기적으로 접속한 관 내에 차폐층이 없는 가공선로 및 차폐층이 있는 LAP형 가공케이블을 수용한 경우로서 공장 거리 2km이상	0.6	0.1
	직매 선로	5. 강대외장 평형케이블	0.6	0.1

(주) LAP : Laminated Aluminium Polyethylene

나. “가”목 표에서 제시된 선로 선종을 적용할 수 없을 경우에는 아래의 계산식에 의하여, 전력유도를 방지할 목적의 차폐케이블로서 고유의 차폐계수 값이 있는 경우에는 그 값을 사용할 수 있다.

$$K_3 = \frac{R_S + \frac{R_a + R_b}{l}}{R_S + Z_E + R_A + \frac{R_a + R_b}{l} + jX_A}$$

(주)  $R_S$  : 케이블 시스의 직류저항[Ω/km]

$R_a, R_b$  : 케이블 양단의 접지저항[Ω]

$l$  : 전력선과 전기통신선과의 병행 거리[km]

$Z_E$  : 케이블시스의 대지귀로 외부임피던스[ $\Omega/\text{km}$ ]

$R_A$  : 강대내 (자성체)의 손실저항[ $\Omega/\text{km}$ ]

$X_A$  : 강대의 자속에 의한 리액턴스[ $\Omega/\text{km}$ ]

5. 전기통신선 케이블 조수에 의한 유도경감계수( $K_7$ )는 다음표와 같다.  
다만, 전력유도를 방지할 목적으로 사용하는 차폐케이블은 제외한다.

구 분	케 이 블 조 수		
	2조이상 4조이하	5조이상 8조이하	9조이상
지하관로내 국간선로	0.85	0.75	0.7

6. 평가잡음함유계수( $\eta$ )는 주파수 60Hz에서 0.12를 적용한다.

7. 전기통신회선의 평형도는 52dB(1/400)로 한다.

8. 유도잡음경감계수( $\alpha$ )는 1/2000로 한다.

9. 가공송전선 적용계수는 다음 각 호와 같이 적용한다.

- 가. 가공지선의 차폐계수( $K_{11}$ )는 철탁종별, 가공지선의 종별 및 대지도전율에 따라 다음 계산식에 의하여 산정한 값으로 한다.

$$K_{11} = 1 - \frac{Z_m}{Z_s}$$

(주)  $Z_m$  : 가공지선의 대지귀로 상호임피던스[ $\Omega/\text{km}$ ]

$Z_s$  : 가공지선의 대지귀로 자기임피던스[ $\Omega/\text{km}$ ]

- 나. 가공지선의 분류계수( $K_{12}$ )는 송전선 고장지점이 발·변전소로 부터 거리가 10km이상인 경우는 1.0을 적용하고 10km미만인 경우는 다음 계산식에 의하여 산정한 값으로 한다.

$$K_{21} = \frac{I_{g1} + I_{g2}}{I_{g1}} \frac{1}{\cosh h\gamma \ell_2 - \sinh h\gamma \ell_1}$$

$$I_{g1} \gamma (\ell_2 - \ell_1) \cos h\gamma \ell + \sinh h\gamma \ell$$

(주)  $I_{g1}$  : 지락점점에서 가까운 발·변전소로부터 고장전류(A)

$I_{g2}$  : 지락점점에서 먼 발·변전소로부터 고장전류(A)

$\gamma$  : 가공지선의 대지귀로 전파정수 ( $\sqrt{Z_s \cdot G}$ ) (Nep/km + jrad/km)

$Z_s$  : 가공지선의 대지귀로 자기임피던스( $\Omega$ /km)

$G$  : 가공지선의 대지콘덕턴스( $\mathcal{S}$ /km)

$\ell$  : 지락점에서 가까운 발·변전소까지의 거리(km)

$\ell_1$  : 가까운 발·변전소로 부터 전기통신시설의 가까운 곳까지의 거리(km)

$\ell_2$  : 가까운 발·변전소로 부터 전기통신시설의 먼곳까지의 거리(km)

cosh, sinh : 쌍곡선 함수

## 10. 가공배전선의 적용계수

가. 중성선 차폐계수( $K_{21}$ ) (단, 가공지선이 있는 경우에는 제9호제가목의 계산식을 이용한다)

전 력 선 종(mm <sup>2</sup> )	차 폐 계 수
ACSR 160	0.63
" 95	0.65
" 58	0.68
" 32	0.75

나. 중성선분류계수( $K_{22}$ )

구 분	분 류 계 수
발·변전소로부터 5km지점까지	0.6
발·변전소로부터 10km지점까지	0.8
발·변전소로부터 10km초과지역	1.0

다. 불평형전류( $I_n$ )

전력선의 방식	불평형 전류
단상 또는 2상 선로	상전류 $\times 1$
3상 선로	상전류 $\times 0.2$

(주) 위 표에서 상전류는 3상부하를 제외한 계획 최대전류값으로 한다.

## 11. 지중전력선의 적용계수

가. 차폐계수( $K_{31}$ )

(1) 절연유를 충전한(O.F) 케이블의 차폐계수 ( $K_{31}$ )

구 분 회선수	삼 각 포 설 시		수 평 포 설 시	
	비 연 가	연 가	비 연 가	연 가
1 회선	0.023	0.023	0.029	0.024
2 회선	0.015	0.013	0.024	0.013
3 회선	0.013	0.011	0.020	0.011

(2) 강관에 절연유를 충전한 (P.O.F) 케이블의 차폐계수 ( $K_{31}$ )

구분 회선수	고 장 전 류	차 폐 계 수
1 회선	5kA 내지 17kA	0.005
	18kA 내지 22kA	0.007
2 회선	5kA 내지 22kA	0.005

(3) 송전선용 가교 폴리에틸렌절연 비닐외장(C.A.Z.V) 케이블의 차폐계수 ( $K_{31}$ )

구 분 회선수	삼 각 포 설 시		수 평 포 설 시	
	비 연 가	연 가	비 연 가	연 가
1 회선	0.019	0.019	0.026	0.020
2 회선	0.013	0.011	0.023	0.011
3 회선	0.012	0.009	0.020	0.009

(4) 배전용 동심중성선 가교 폴리에틸렌절연 비닐외장(C.N.C.V) 케이블의 차폐계수 ( $K_{31}$ )

선종(mm <sup>2</sup> ) 구분	60				200				325			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
회 선 수 포설방법												
관로포설	0.347	0.204	0.146	0.113	0.122	0.069	0.049	0.038	0.073	0.041	0.029	0.022
직매포설	0.38	0.194			0.122	0.068			0.073	0.04		
공동구 및 덕트내포설					0.122	0.068	0.05	0.038	0.073	0.04	0.029	0.023

나. 분류계수( $K_{32}$ )는 가공송전선의 분류계수( $K_{12}$ )의 계산식과 같이 산정한 값으로 한다.

다. 정상운전시 영상전류에 대한 차폐계수( $K_{s0}$ ,  $K_{0n}$ )

(1)송전용케이블

주파수 회선수	O.F 케이블		P.O.F케이블		C.A.Z.V케이블	
	60Hz	800Hz	60Hz	800Hz	60Hz	800Hz
1 회선	0.024	0.002	0.021	0.0046	0.019	0.002
2 회선	0.013	0.001	0.021	0.0046	0.010	0.001
3 회선	0.010	0.001	0.021	0.0046	0.007	0.001

(2) 배전용 케이블 (C.N.C.V 케이블)

선종(mm <sup>2</sup> ) 구분	60		200		325	
주 파 수 차폐 계수	60Hz	800Hz	60Hz	800Hz	60Hz	800Hz
K <sub>s0</sub> , K <sub>sm</sub>	0.358	0.034	0.096	0.008	0.07	0.008

라. 800Hz에 있어서 차폐계수(K<sub>ln</sub>)는 정상운전시 영상전류의 800Hz에 대한 차폐계수(K<sub>0n</sub>)값을 적용한다.

마. 대지귀로 외피전류(I<sub>s</sub>)

케이블배치 회선수	순상단독	역상단독
1 회선	부하전류×0.001	부하전류×0.01
2 회선	부하전류×0.002	부하전류×0.02
3 회선	부하전류×0.003	부하전류×0.02

바. 정상운전시 등가방해전류(I<sub>en</sub>, I<sub>sn</sub>, I<sub>0n</sub>)



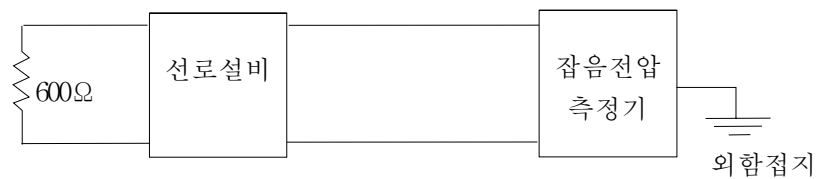
구 분 상 황 전력선부하	부하전류에 대한 등가방해전류 ( $I_{en}$ )	대지귀로외피 전류에 대한 등가방해전류 ( $I_{sn}$ )	상시영상전류에 대한 등가방해전류 ( $I_{on}$ )
일반부하가 대부분 인 지중전력선 (조명등부하)	1.9A	$1.9A \times$ $I_s$ 의 계수 $\times 1.25$	0.22A/회선당
일반부하와 일부 특수부하가 있는 지중전력선 (조명등및동력부하)	3.8A	$3.8A \times$ $I_s$ 의 계수 $\times 1.25$	0.44A/회선당
큰 특수부하에 직접 공급하는 지중전력 선(동력부하)	실 측	실 측	실 측

## 2. 전력 유도 전압 측정에 관한 연구

가) 국내외 측정회로

o 국내 측정회로

- 전파연구소고시 제2005-98호(2005년 10월 26일)는 [전기통신설비의 기술기준에 관한 규칙]<sup>[4]</sup> 제29조의 규정에 의한 전기통신설비의 기술 기준에 관한 표준시험방법
- 측정 회로

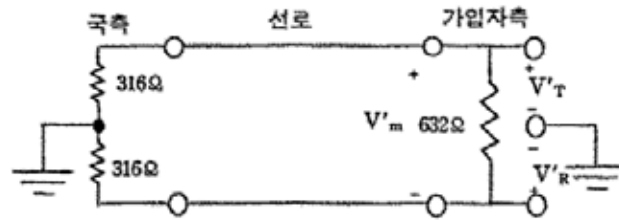


(그림 4-1) 국내 측정 회로

- . 유도 잡음은 선로설비만을 대상으로 하며, 잡음전압측정기에 외함 접지를 함.
- . 타단설비의 끝을 600Ω으로 종단함.
- . 선로설비의 회선당 선간 평가잡음전압은 다른 전기통신설비를 접속하지 아니한 상태에서 측정함.
- . 각각의 주파수에 대한 상대레벨 입력에 따른 신호성분의 평가잡음 전압을 측정함.

o 미국 Bellcore 측정회로<sup>[5]</sup>

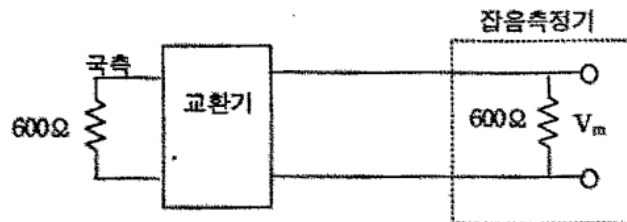
- 측정회로(I)



(그림 4-2) 미국 Bellcore 측정 회로(I)

. 가입자측에서 측정하며 반대측 단말은 저항을 통해 접지시켜 측정함

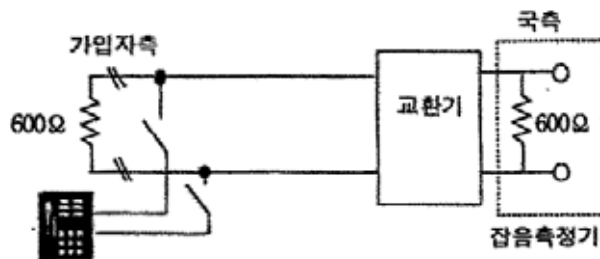
- 측정회로(II)



(그림 4-3) 미국 Bellcore 측정 회로(II)

. 교환시설을 통해 통화로를 구성한 후 묵음처리(quit termination)을 하는 방법임.

o 일본의 측정회로



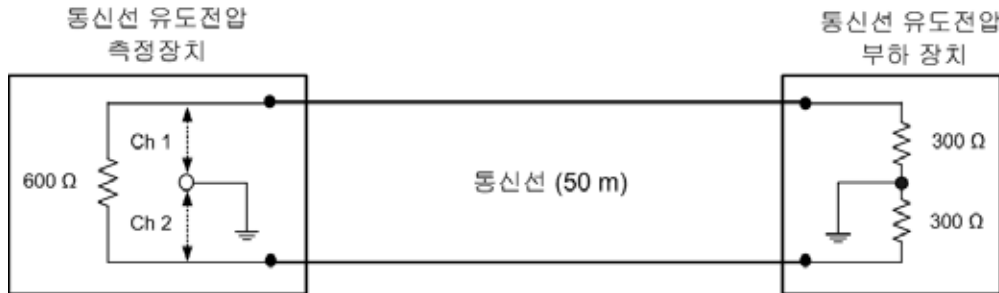
(그림 4-4) 일본 측정 회로

- . 국측에서 측정을 하며 가입자 측에서는 600 Ω 종단과 일반전화를 접속하고 일반전화기를 이용해 국측으로 다이얼하여 통화로를 구성한 다음 일반전화를 분리시킴.
- . 이러한 상태에서 국측 잡음측정기를 이용하여 잡음을 측정함.
- . 이 방법은 미국의 묵음측정방법(측정회로 II)와 동일한 방법임.

나) 실증실험 모델링

o 실증실험에 적용한 회로

이 과제에서 채택한 전력유도 통신선로 회로는 아래와 같다.



(그림 4-5) 본 연구 과제에서 사용된 전력유도 통신선로 회로

Ch1 및 Ch2 전압은 오실로스코프 (Digital CRO)로 측정하였다. 선-대지 (線-大地) 간 전압 Ch1과 Ch2는 항상 동일(同一)하였다.

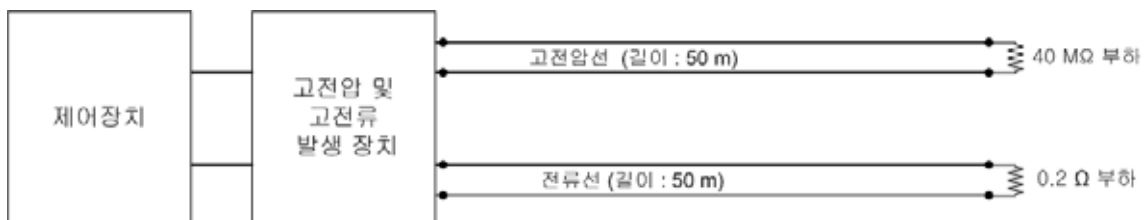
## 제2절 물리적 실험 모의 시스템 구축 설계

### 1. 고전압 및 고전류 발생장비 제작

o 장비 제원

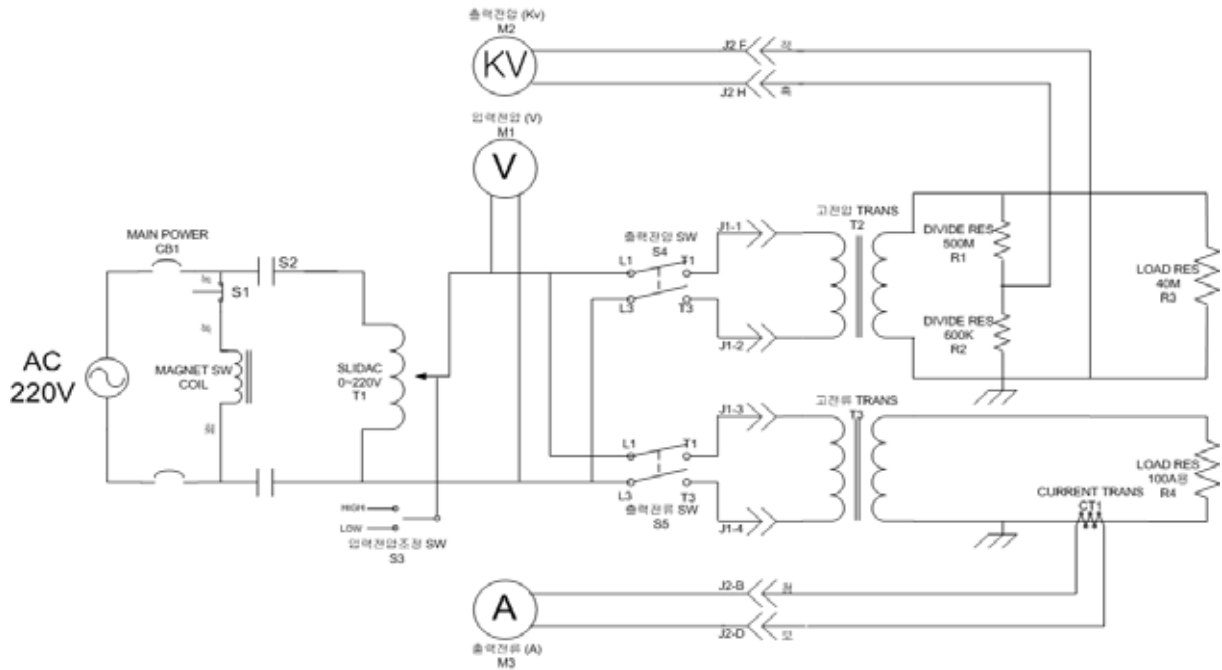
- 입력전압 : 220 VAC
- 전압과 전류를 동시에 출력하거나, 전압 및 전류를 선택하여 출력할 수 있으며 출력 범위는 아래와 같음.
  - . 출력 전압 : 0 ~ 15 kV
  - . 출력 전류 : 0 ~ 100 A

o 장비 구성도



(그림 4-6) 모의 시험 장비 구성도

## 0 회로도



(그림 4-7) 모의 시험 회로도

## 0 제어 패널 설명



(그림 4-8) 장비 제어 채널 설명

o 장비 운용법

- 출력전압 스위치 및 출력전류 스위치를 OFF 시킴.
- 고전압/고전류 발생장비의 전원을 ON 시킴.
- 입력 전원 조정 버튼의 LOW 버튼을 눌러 입력전압이 0 VAC 가 되도록 함.
  - 출력전압 및 출력전류 스위치를 이용하여 전압과 전류 출력을 선택함.
  - . 출력전압 또는 출력전류를 선택할 수 있으며, 동시에 전압과 전류 출력을 선택할 수 있음.
- 입력전압 조정 버튼의 HIGH 버튼을 누르면서 원하는 전압 또는 전류 출력이 되도록 함.
- 장비 사용 후, 장비를 OFF 시키는 방법
  - . 입력전원 조정 버튼의 LOW 버튼을 눌러 입력전압이 0 VAC 일 때 고전압/고전류 발생장비의 전원 스위치를 OFF 시킴.

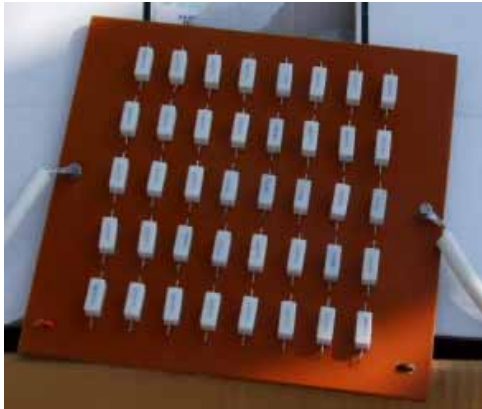
o 제작된 장비 사진

- 고전압 및 고전류 발생 장비
- . 전압 및 전류 제어 장치



(그림 4-9) 고전압 및 고전류 발생 장비

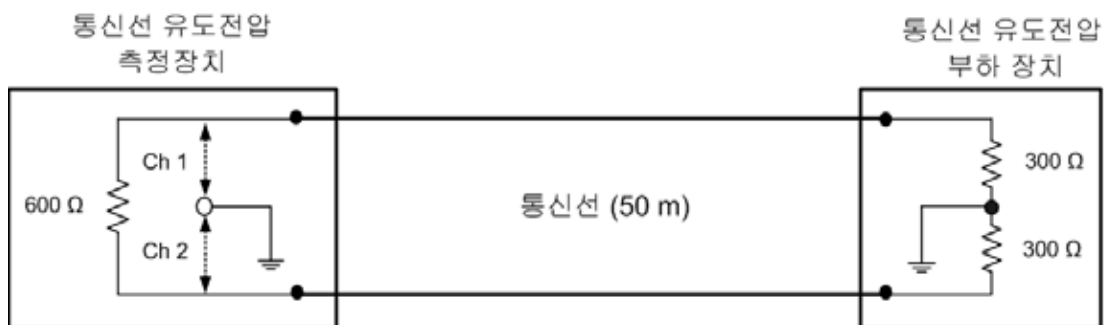
- 고전압 부하 (40 M $\Omega$ , 200 W)
- 고전류 부하 : 0.2  $\Omega$ , 1 kW



(그림 4-10) 고전압 부하 및 고전류 부하

## 2. 고전압 및 고전류 선로에 의한 線 - 大地간 유도전압 측정장치 제작

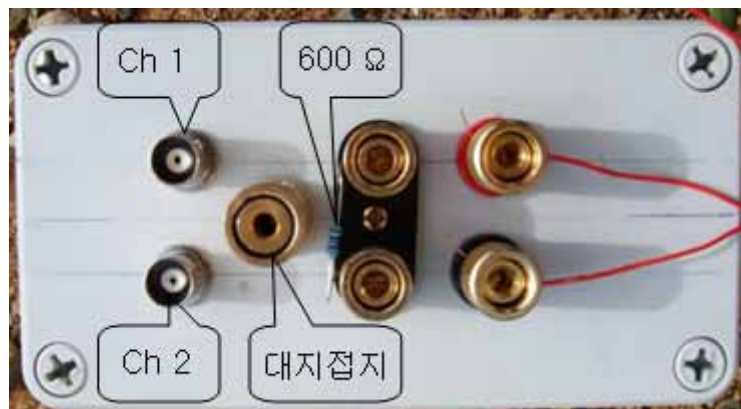
o 유도전압 측정 장치 회로도



(그림 4-11) 유도전압 측정 장치 회로도

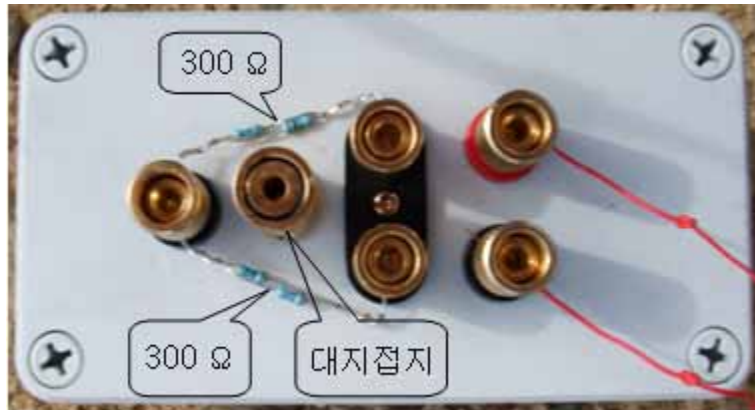
o 제작된 장치 사진

- 통신선 유도전압 측정 장치



(그림 4-12) 통신선 유도전압 측정 장치

- 통신선 유도전압 부하 장치

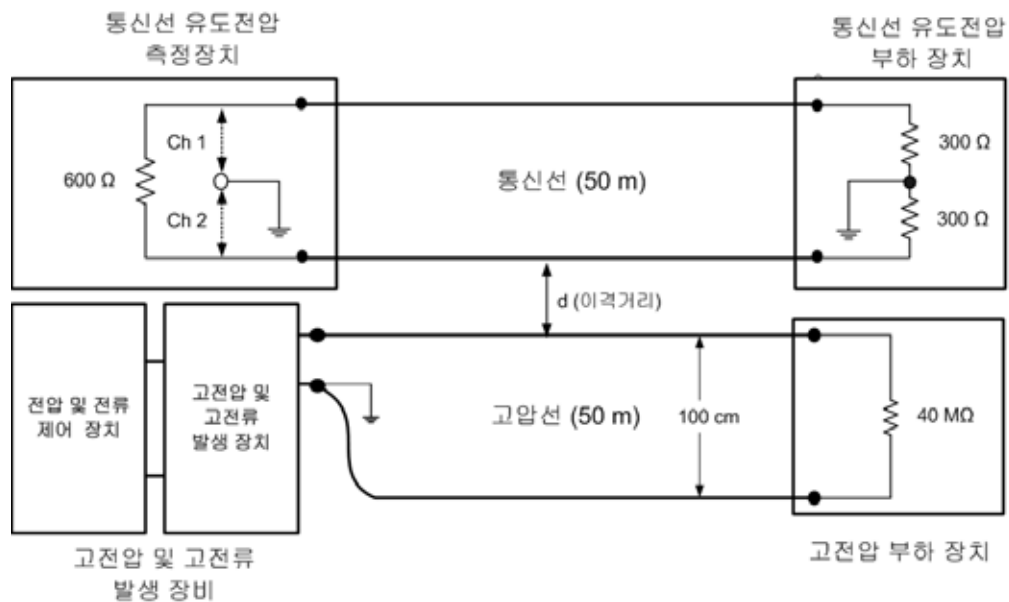


(그림 4-13) 통신선 유도전압 부하 장치

### 3. 물리적 실험 모의 시스템 구축

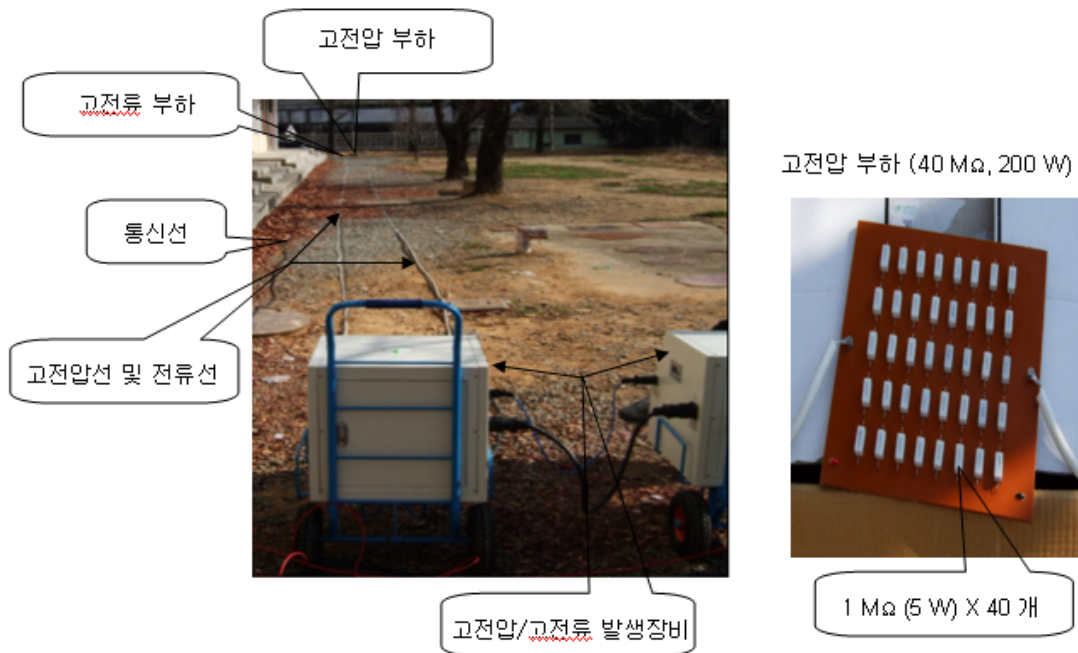
- o 고전압 통신선 유도 전압 측정 시스템

- 구성도



(그림 4-14) 고전압 통신선 유도 전압 측정 시스템

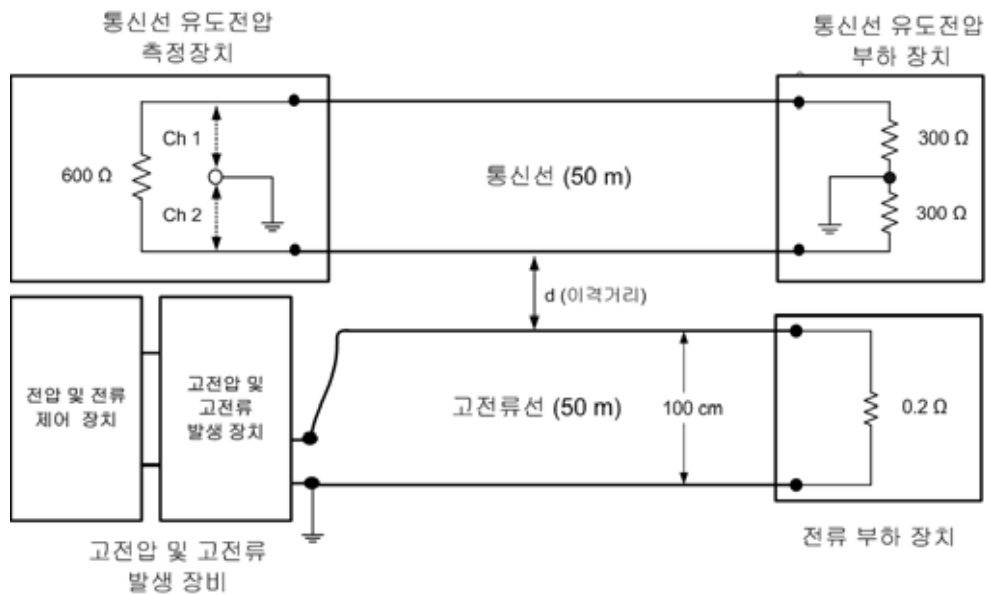
- 현장 Set up 사진



(그림 4-15) 고전압 통신선 유도 전압 측정 모의 시험 현장도

o 고전류 통신선 유도 전압 측정 시스템

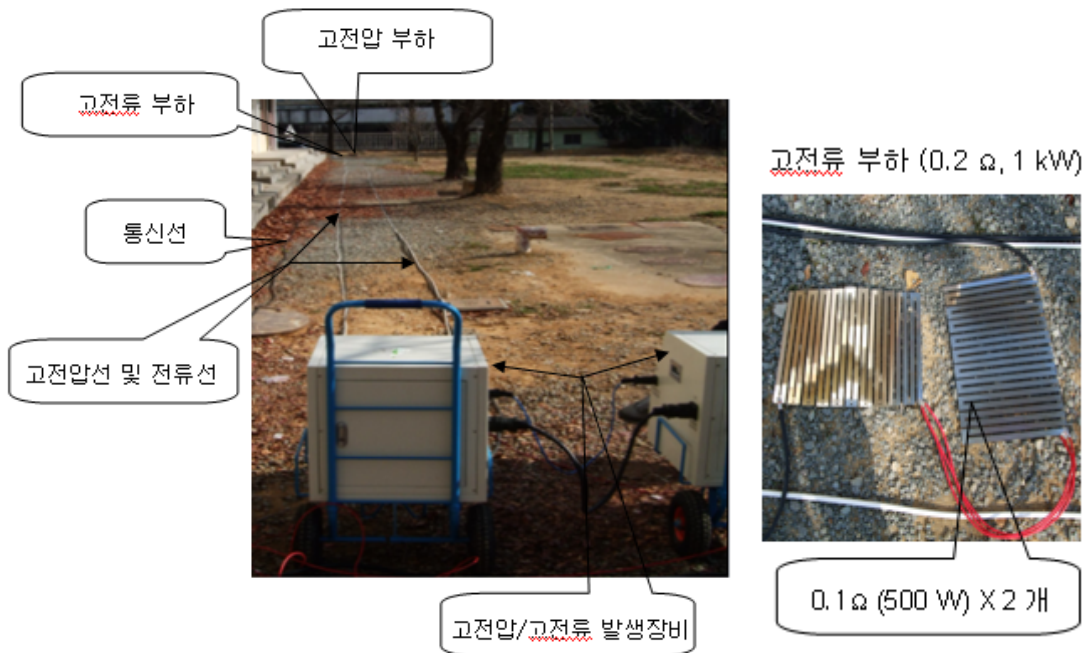
- 구성도



(그림 4-16) 고전류 통신선 유도 전압 측정 시스템

- 현장 Set up 사진





(그림 4-17) 고전류 통신선 유도 전압 측정 모의 시험 현장도

### 제3절 유도발생 현상 검증

#### 1. 고전압/고전류 선로에 의한 線 - 大地간 유도 전압 측정 환경

- 전방 측정환경 setup 사진

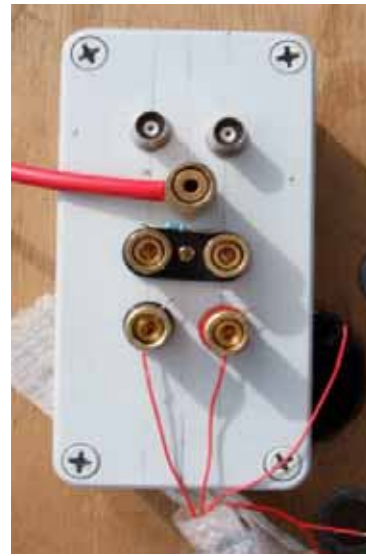
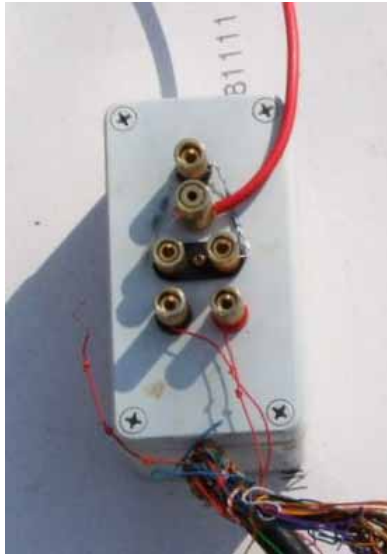


- 후방 측정환경 setup 사진



- 통신선 유도전압 부하 장치

- 통신선 유도전압 측정 장치



(그림 4-18) 고전압/고전류 선로에 의한 線 - 大地간 유도 시험 구성도

## 2. 고전압회선에 의한 線 - 大地간 유도 전압 측정

### o 고전압 및 유도전압 회선 구성 방법

#### - 고전압 유도회선 구성

- . 고전압 및 고전류 발생장비의 고전압 출력단에 고전압선을 연결함.
- . 고전압선 간의 이격거리를 1 m로 포설하여 종단에는 40 MΩ 부하를 연결하여 유도회선을 구성함.
- . 고전압선의 한쪽 선을 대지 접지시킴.

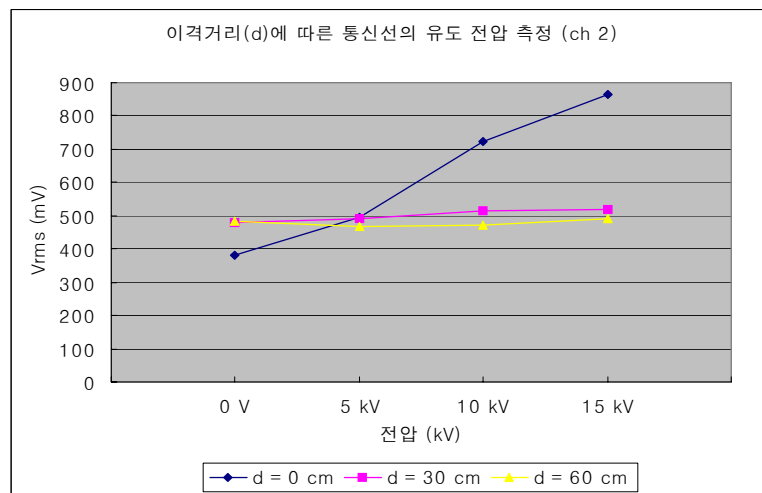
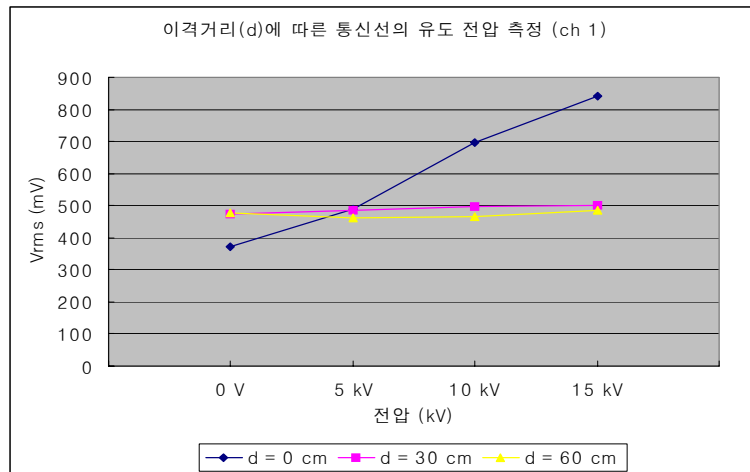
#### - 통신선 유도전압 회선 구성

- . 통신선의 유도전압 측정단자는 회선 간에 600 Ω 저항을 연결함.
- . 통신선의 종단은 각 선에 대하여 부하 300 Ω을 대지 접지로 연결하여 회선을 구성함.

### o 유도전압 측정 방법

- 고전압회선과 통신회선 간의 이격거리(0 cm, 30 cm, 60 cm)를 두고, 고전압회선에 전압(0 V, 5 kV, 10 kV, 15 kV)을 공급함.
- 통신회선의 유도전압 측정단자(ch1, ch2)와 대지접지 간에 Digital Oscilloscope를 연결하여 유도되는 전압을 측정함.

### o 통신선 이격거리에 따른 유도전압 측정



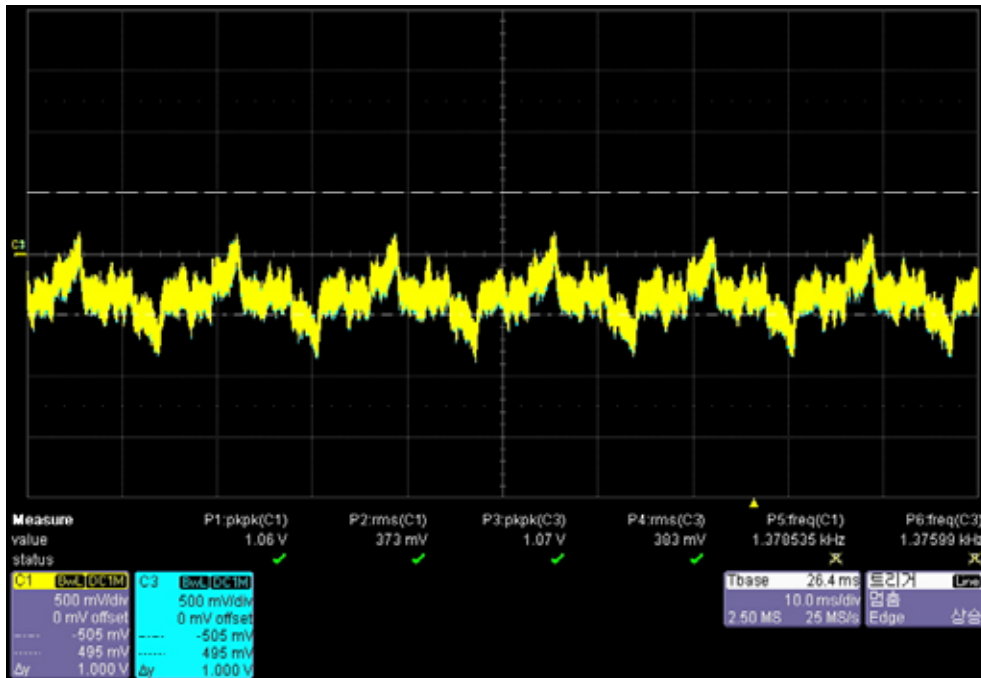
(그림 4-19) 통신선 이격거리에 따른 유도전압 측정 그래프

#### o 유도 전압 및 파형

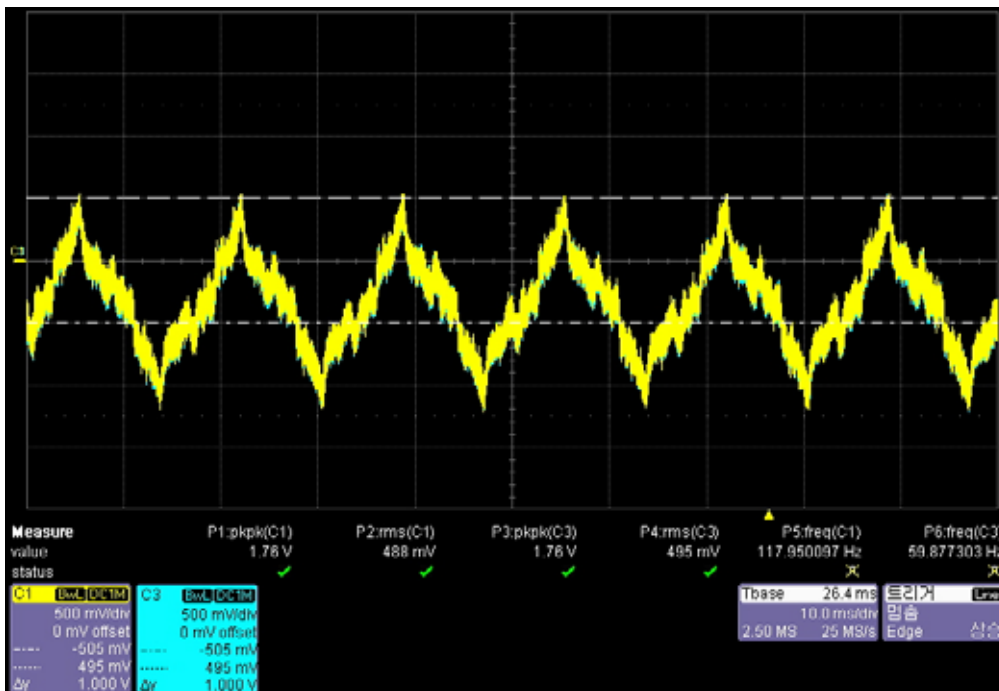
##### - 유도전압 측정 환경

- 통신선과 고전압선과의 거리 (d) : 0 cm
- 고압선과 고전압선과의 거리 : 100 cm
- 주파수 : 60 Hz
- 유도전압 측정

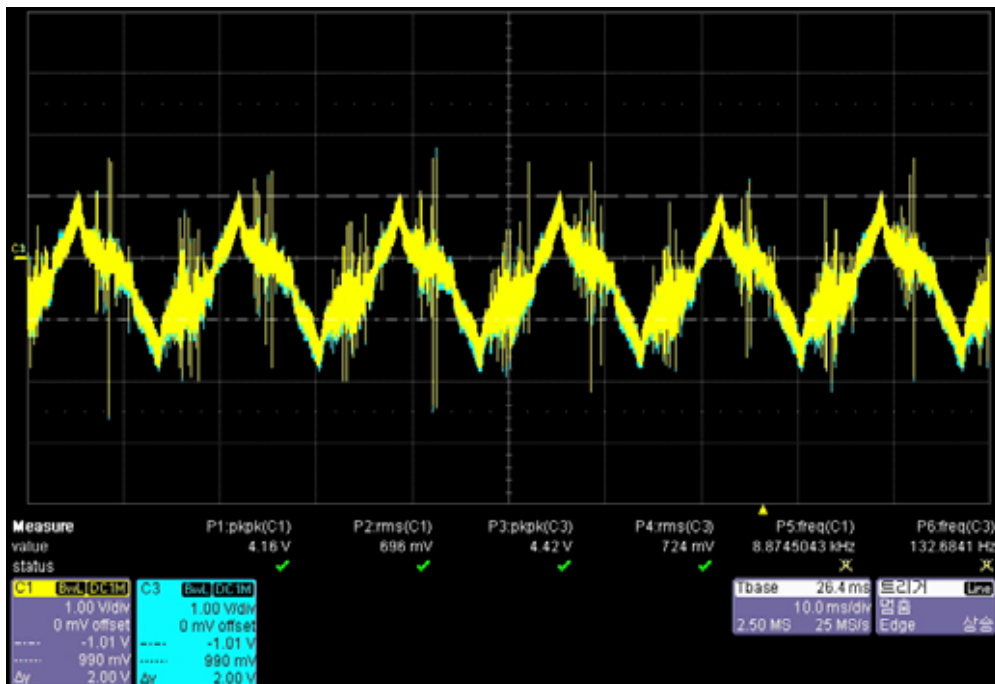
구분	CH 1		CH 2	
	$V_{p-p}$ (V)	$V_{rms}$ (mV)	$V_{p-p}$ (V)	$V_{rms}$ (mV)
0 V	1.06	373	1.07	383
5 kV	1.76	488	1.76	495
10 kV	4.16	696	4.42	724
15 kV	11.01	840	10.94	865



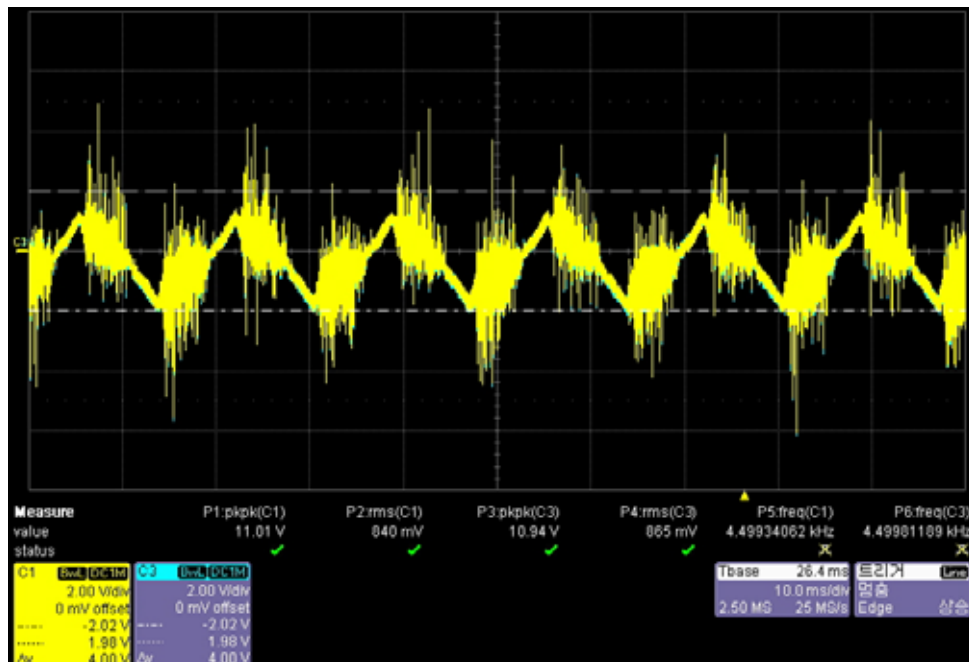
(그림 4-20) 출력 전압 = 0 kV 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-21) 출력 전압 = 5 kV 일 경우 유도전압 파형



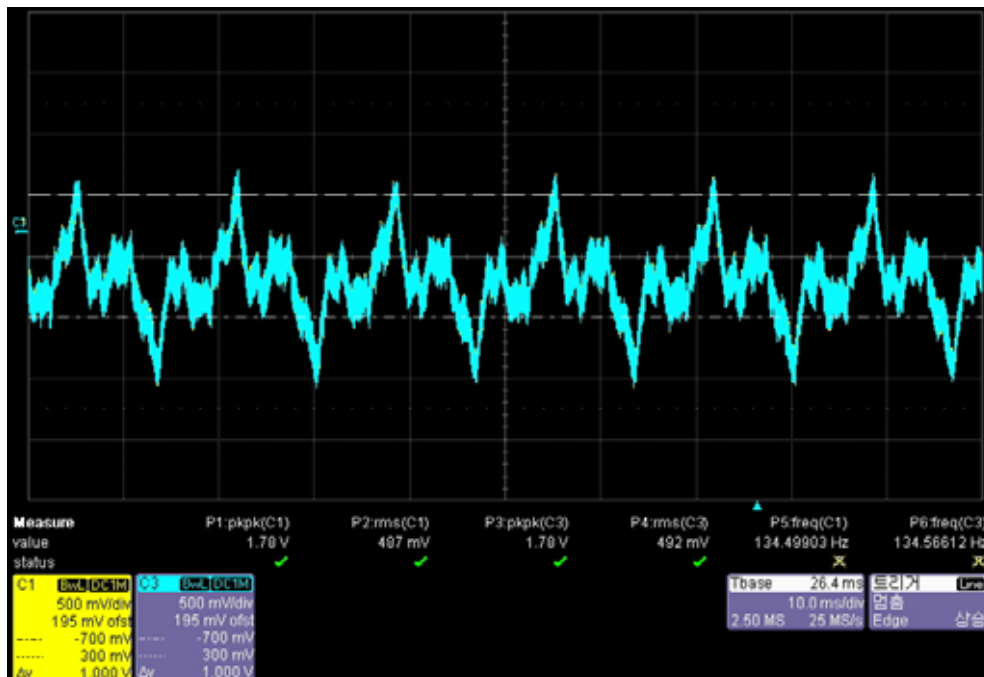
(그림 4-22) 출력 전압 = 10 kV 일 경우 유도전압 파형



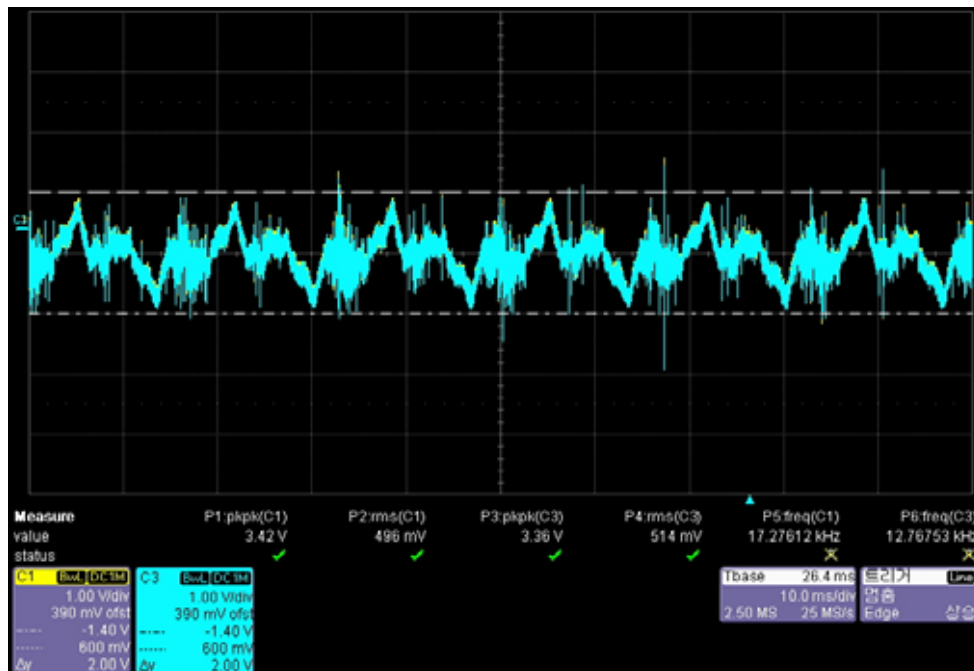
(그림 4-23) 출력 전압 = 15 kV 일 경우 유도전압 파형

- 유도전압 측정 환경
  - . 통신선과 고전압선과의 거리 (d) : 30 cm
  - . 고압선과 고전압선과의 거리 : 100 cm
  - . 주파수 : 60 Hz
  - . 유도전압 측정

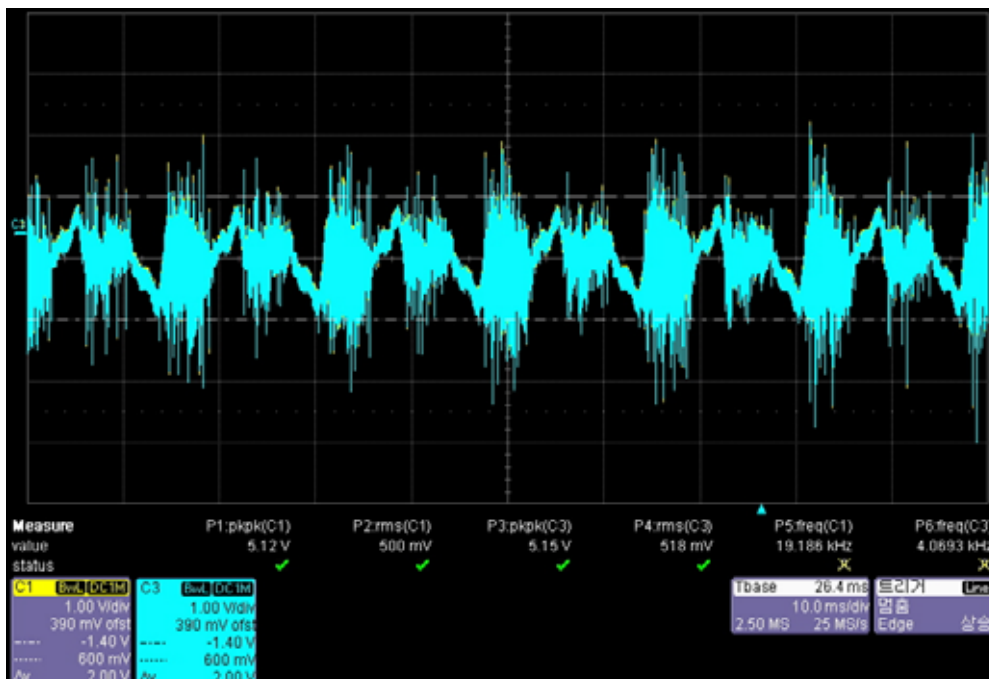
구분	CH 1		CH 2	
	V <sub>p-p</sub> (V)	V <sub>rms</sub> (mV)	V <sub>p-p</sub> (V)	V <sub>rms</sub> (mV)
0 V	1.65	474	1.66	479
5 kV	1.78	487	1.78	492
10 kV	3.42	496	3.36	514
15 kV	5.12	500	5.18	518



(그림 4-24) d = 30cm, 5 kV 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-25)  $d = 30\text{cm}$ , 10 kV 일 경우 유도전압 파형

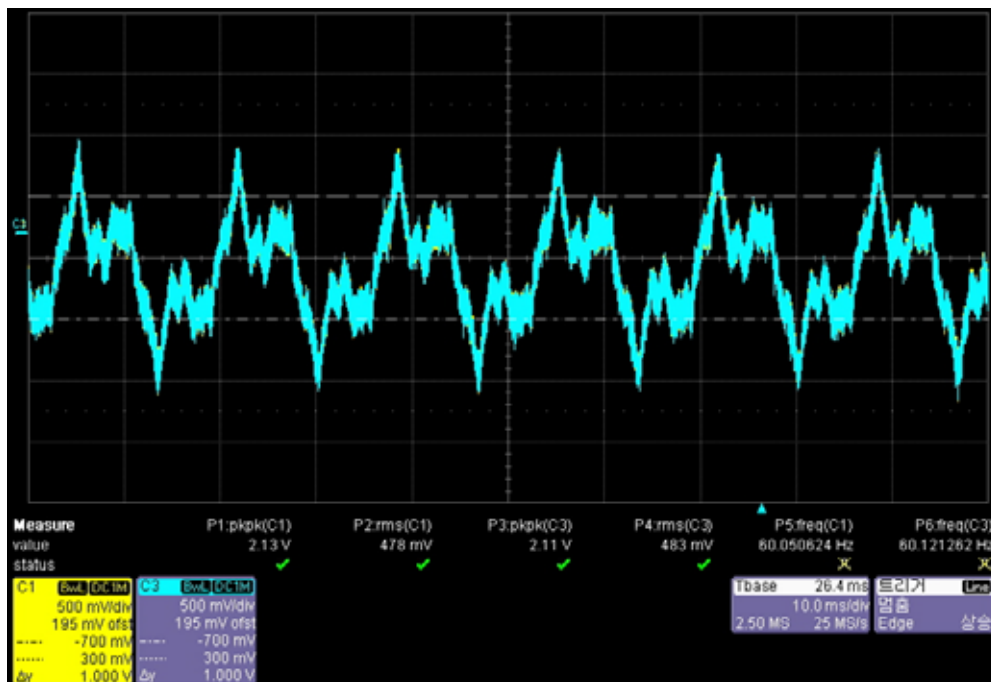


(그림 4-26)  $d = 30\text{cm}$ , 15 kV 일 경우 유도전압 파형



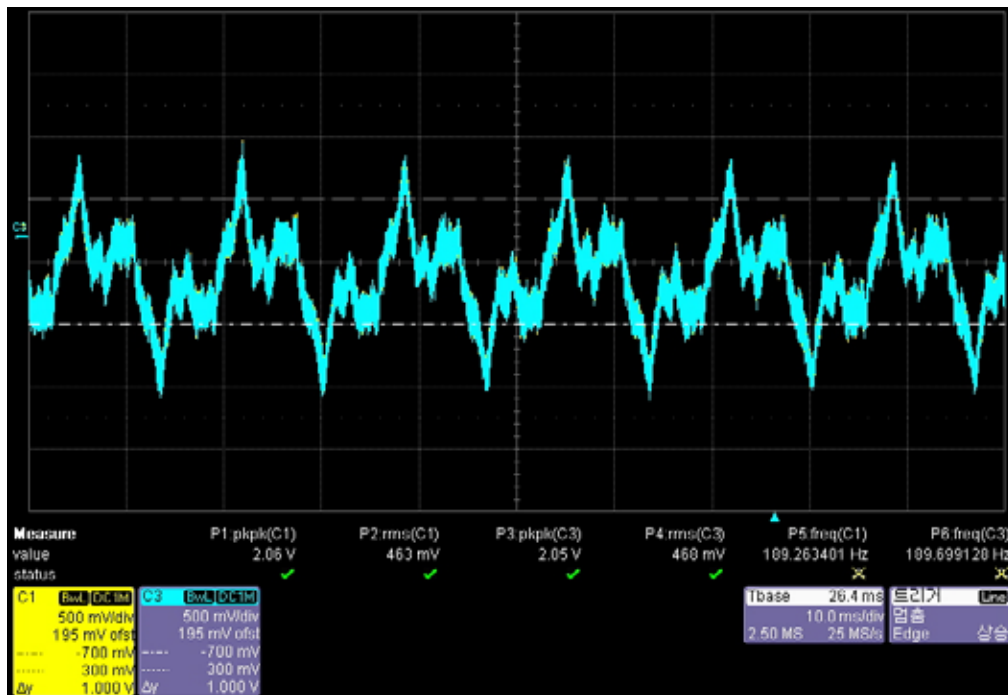
- 유도전압 측정 환경
  - . 통신선과 고전압선과의 거리 (d) : 60 cm
  - . 고압선과 고전압선과의 거리 : 100 cm
  - . 주파수 : 60 Hz
  - . 유도전압 측정

구분	CH 1		CH 2	
	$V_{p-p}$ (V)	$V_{rms}$ (mV)	$V_{p-p}$ (V)	$V_{rms}$ (mV)
0 kV	2.13	478	2.11	483
5 kV	2.06	463	2.05	468
10 kV	2.13	466	2.08	471
15 kV	4.58	486	4.45	493

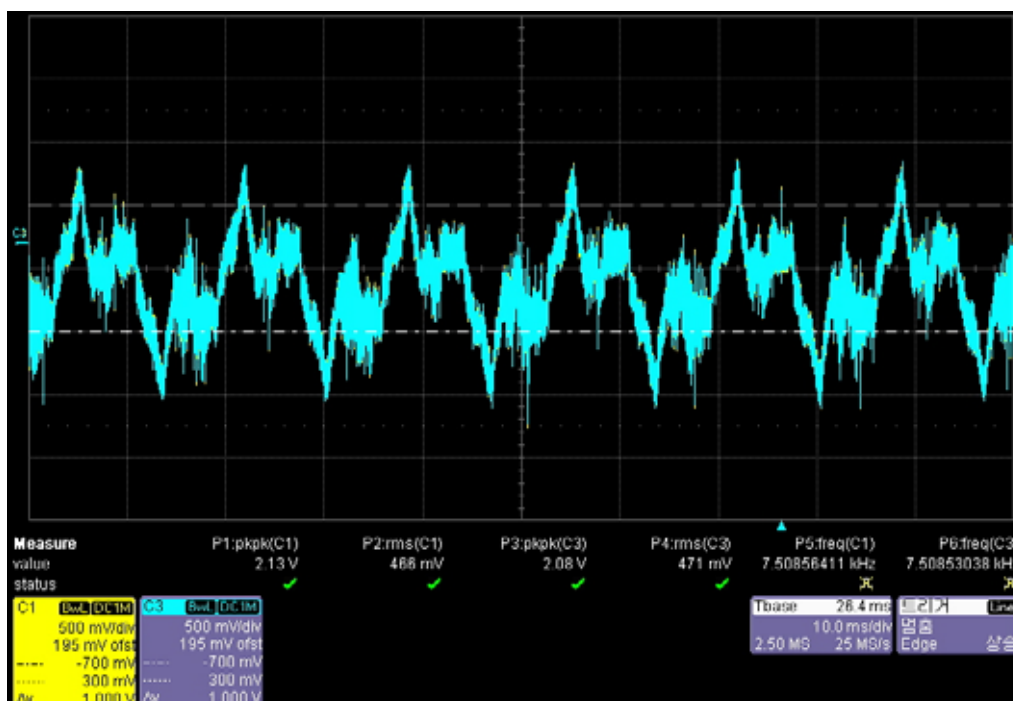


(그림 4-27) d = 60cm, 0 kV 일 경우 유도전압 파형

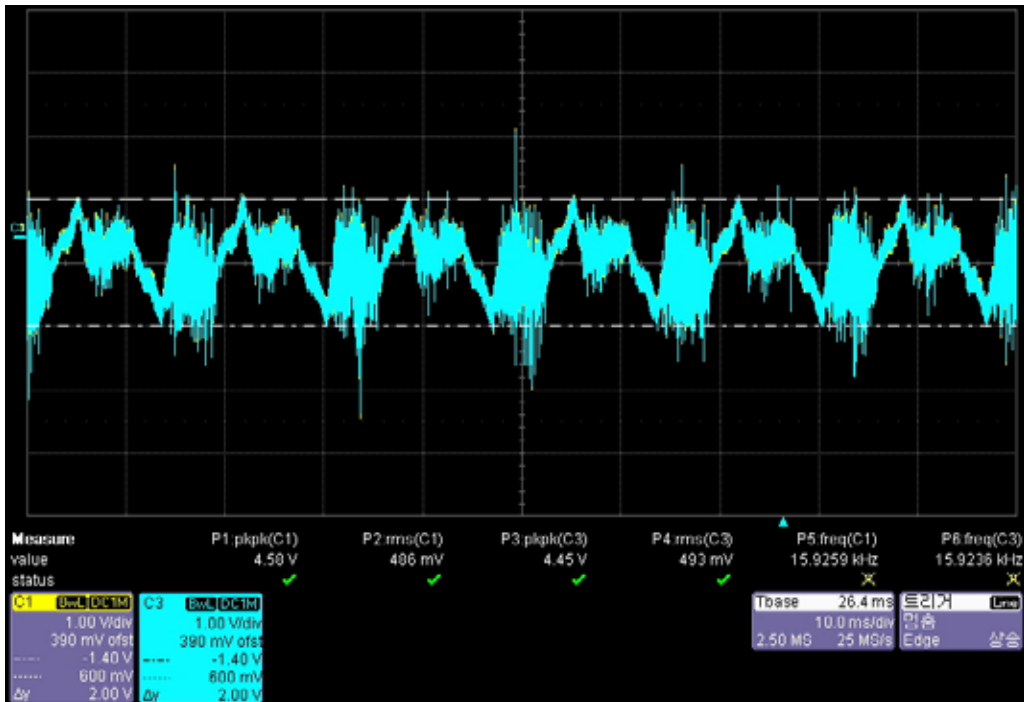




(그림 4-28)  $d = 60\text{cm}$ , 5 kV 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-29)  $d = 60\text{cm}$ , 10 kV 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-30) d = 60cm, 15 kV 일 경우 유도전압 파형

### 3. 고전류회선에 의한 線 - 大地간 유도 전압 측정

#### o 고전류 및 유도전압 회선 구성 방법

##### - 고전류 유도회선 구성

- . 고전압 및 고전류 발생장비의 고전류 출력단에 전류선을 연결함.
- . 전류선 간의 이격거리를 1 m로 포설하여 종단에는 0.2 Ω 부하를 연결하여 유도회선을 구성함.
- . 전류선의 한쪽 선을 대지 접지시킴.

##### - 유도전압 측정 회선 구성

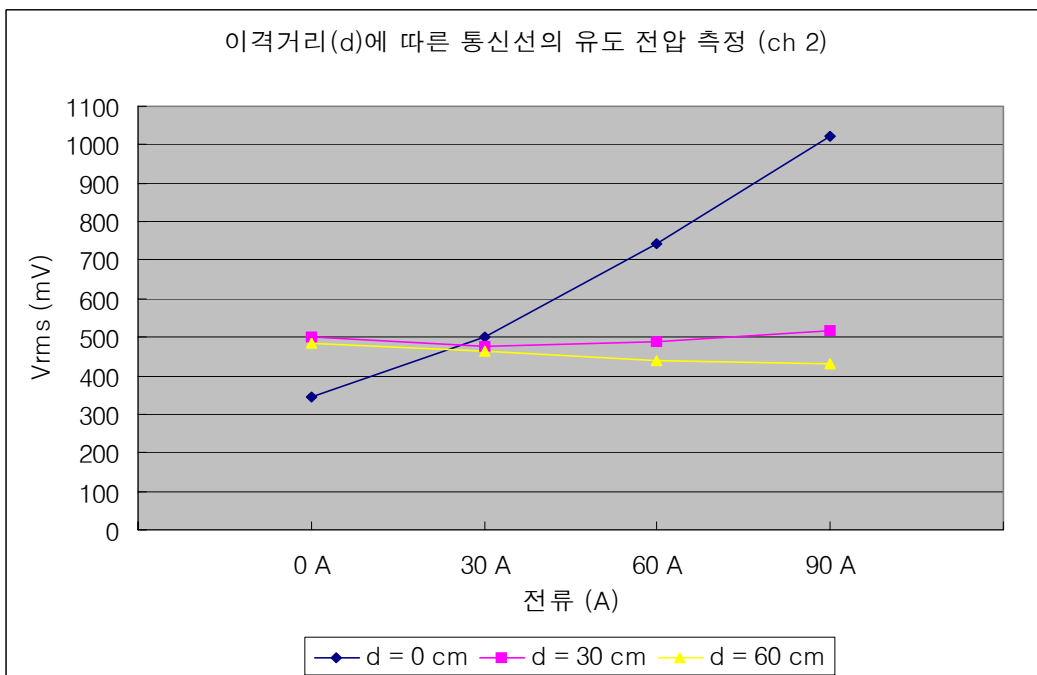
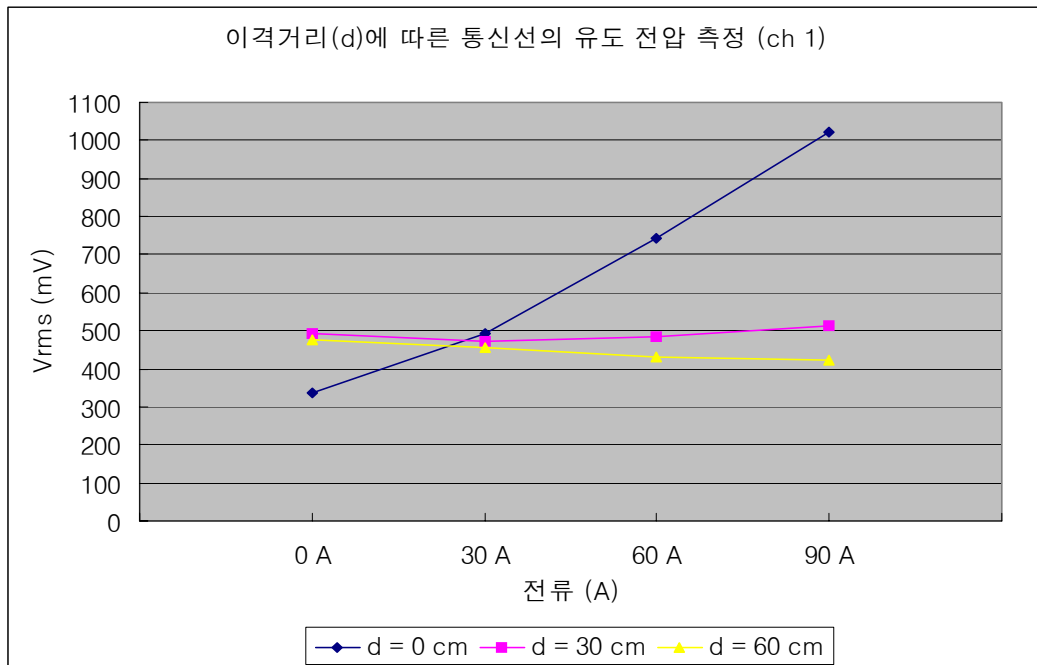
- . 통신선의 유도전압 측정단자는 회선 간에 600 Ω 저항을 연결함.
- . 통신선의 종단은 각 선에 대하여 부하 300 Ω을 대지 접지로 연결하여 회선을 구성함.

#### o 유도전압 측정 방법

- 전류회선과 통신회선 간의 이격거리(0 cm, 30 cm, 60 cm)를 두고, 전류회선에 전류(0 A, 30 A, 60 A, 90 A)를 출력시킴.
- 통신회선의 유도전압 측정단자(ch1, ch2)와 대지접지 간에 전압계

또는 Oscilloscope를 연결하여 유도되는 전압을 측정함.

o 통신선 이격거리에 따른 유도전압 측정



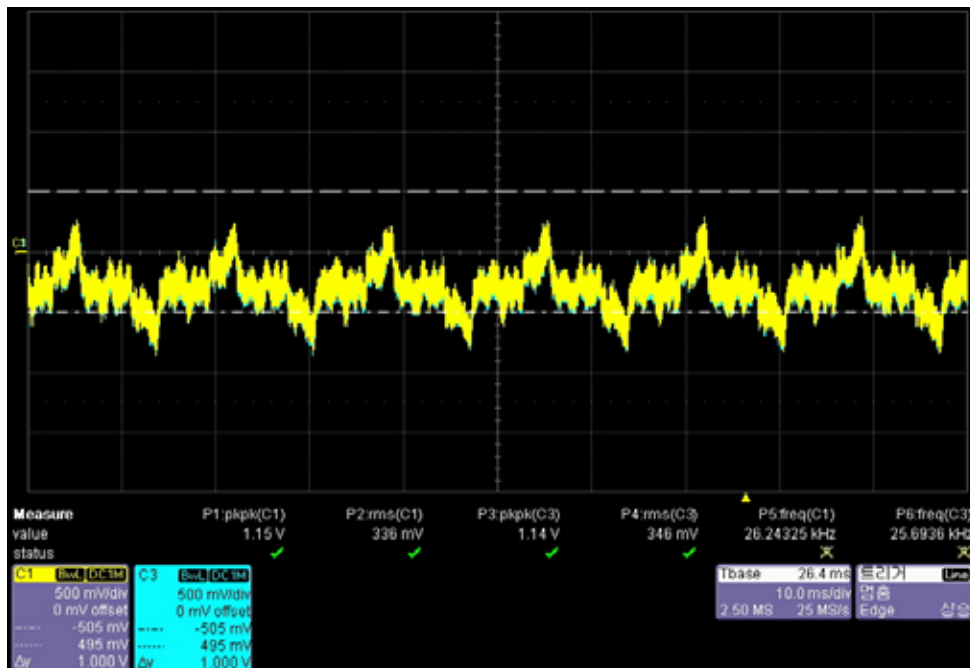
(그림 4-31) 통신선 이격거리에 따른 유도전압 측정 그래프(고전류회선)

o 유도 전압 및 파형

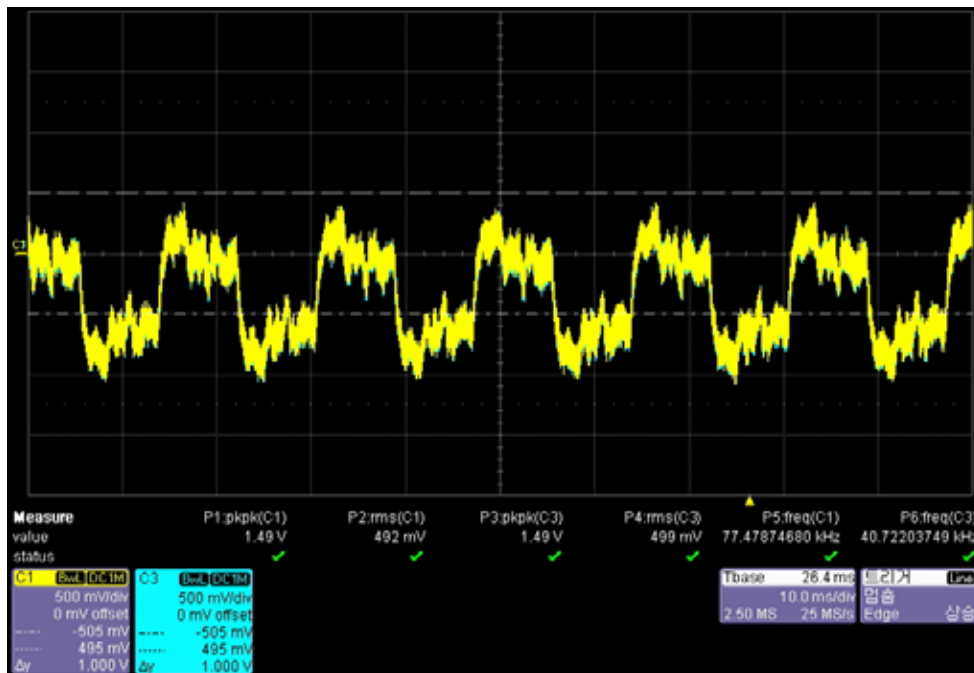
- 유도전압 측정 환경

- . 통신선과 전류선과의 거리 (d) : 0 cm
- . 전류선과 전류선과의 거리 : 100 cm
- . 주파수 : 60 Hz
- . 유도전압 측정

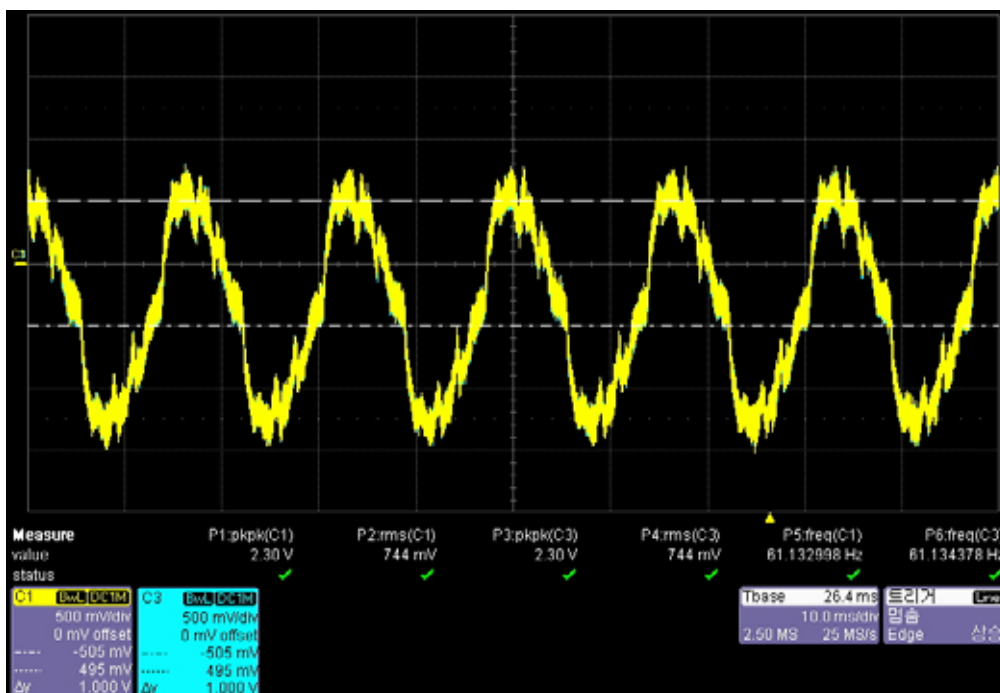
구분	CH 1		CH 2	
	p-p (V)	rms (mV)	p-p (v)	rms (mV)
0 A	1.15	336	1.14	346
30A	1.49	492	1.49	499
60A	2.31	744	2.31	744
90A	3.16	1022	3.12	1021



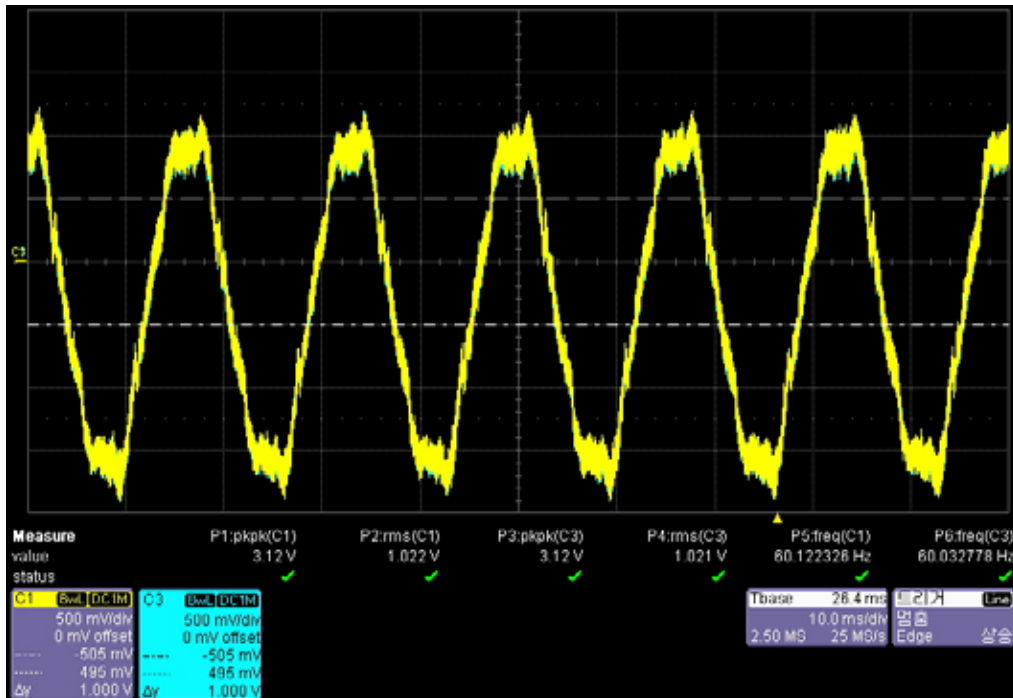
(그림 4-32) 출력 전류 = 0 A 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-33) 출력 전류 = 30 A 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-34) 출력 전류 = 60 A 일 경우 유도전압 파형

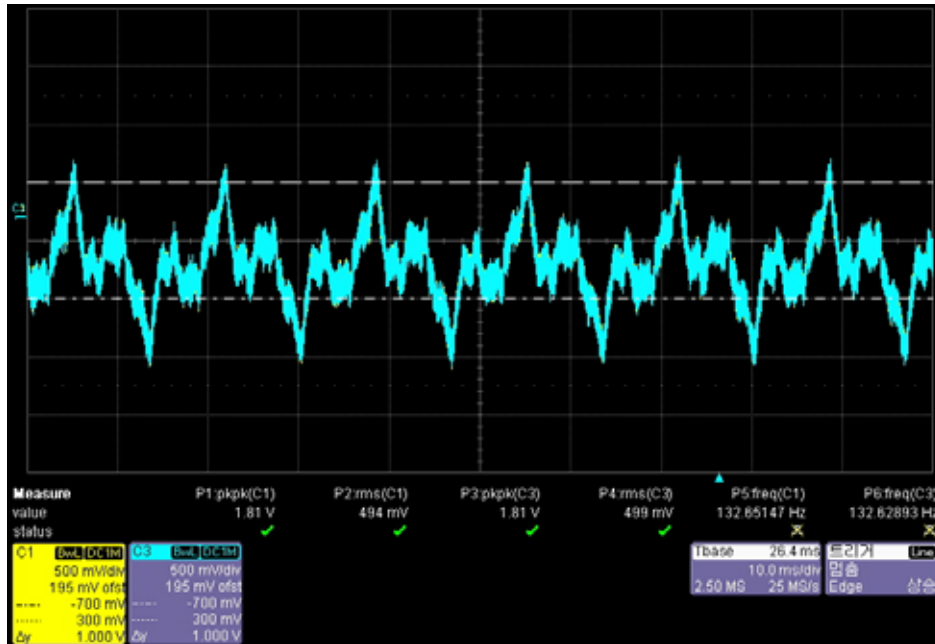


(그림 4-35) 출력 전류 = 90 A 일 경우 유도전압 파형

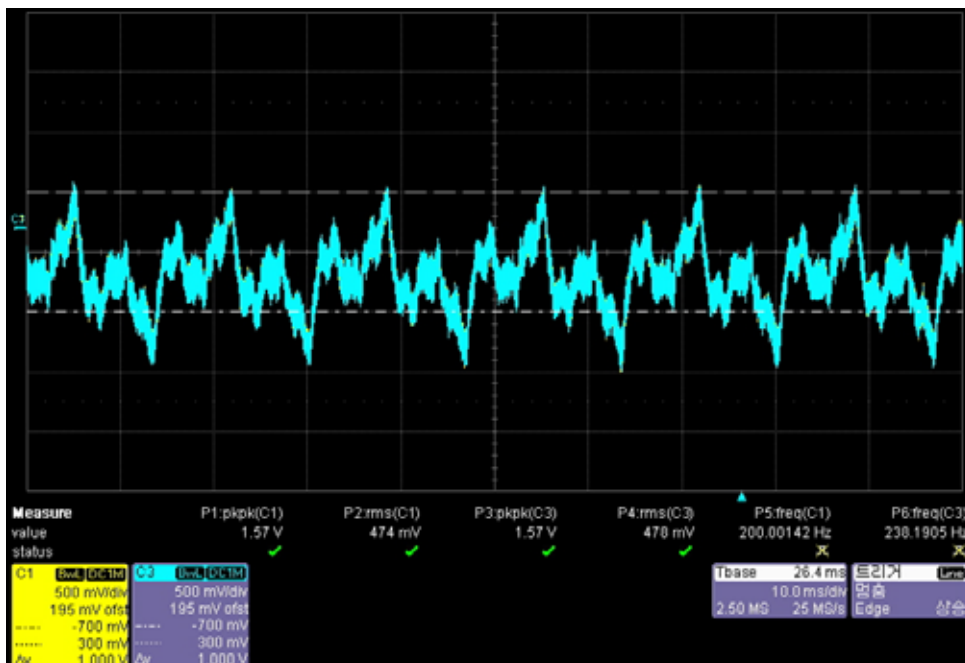
- 유도전압 측정 환경
  - . 통신선과 전류선과의 거리 (d) : 30 cm
  - . 전류선과 전류선과의 거리 : 100 cm
  - . 주파수 : 60 Hz
  - . 유도전압 측정

구분	CH 1		CH 2	
	p-p (V)	rms (mV)	p-p (v)	rms (mV)
0 A	1.81	494	1.81	499
30A	1.57	474	1.57	478
60A	1.33	486	1.34	490
90A	1.52	515	1.55	519

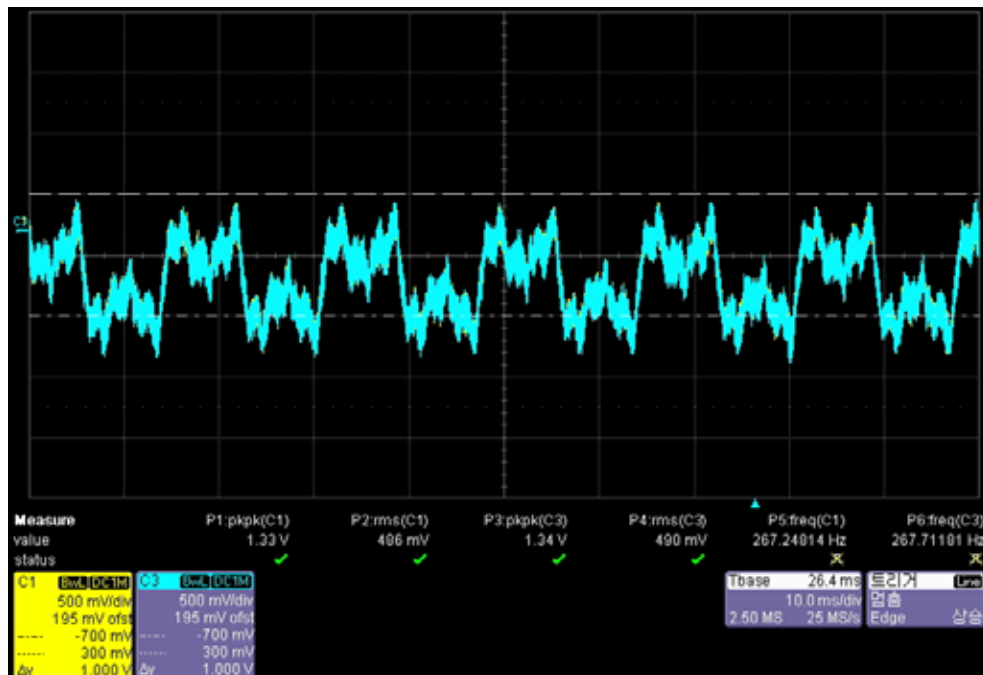
. 출력 전류 = 0 A 일 경우 유도전압 파형



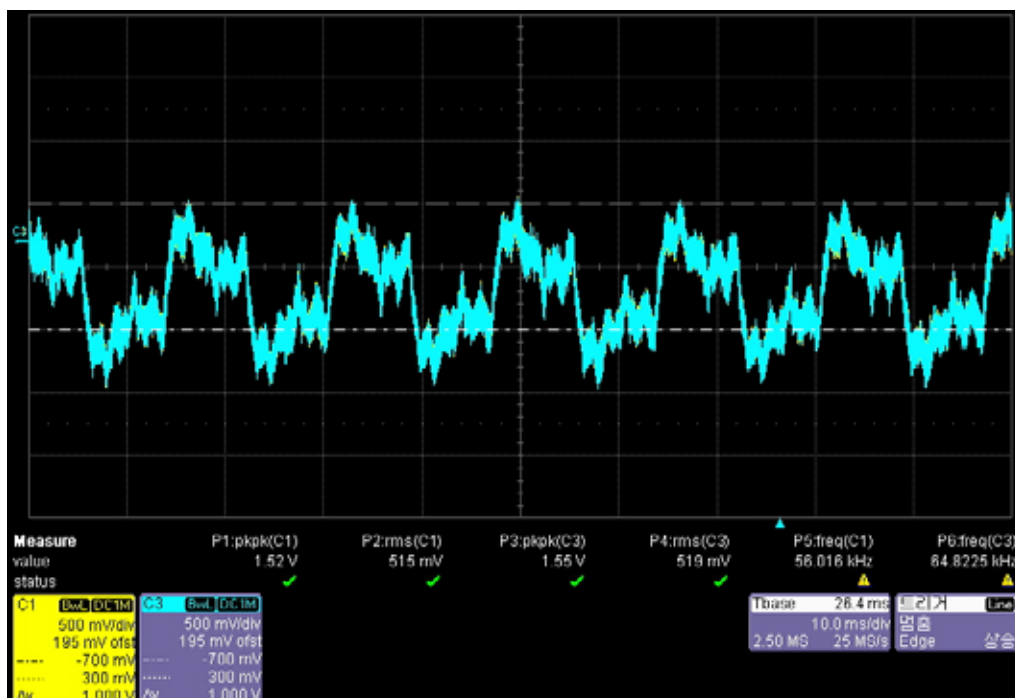
(그림 4-36) 출력 전류 = 0 A 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-37) 출력 전류 = 30 A 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-38) 출력 전류 = 60 A 일 경우 유도전압 파형

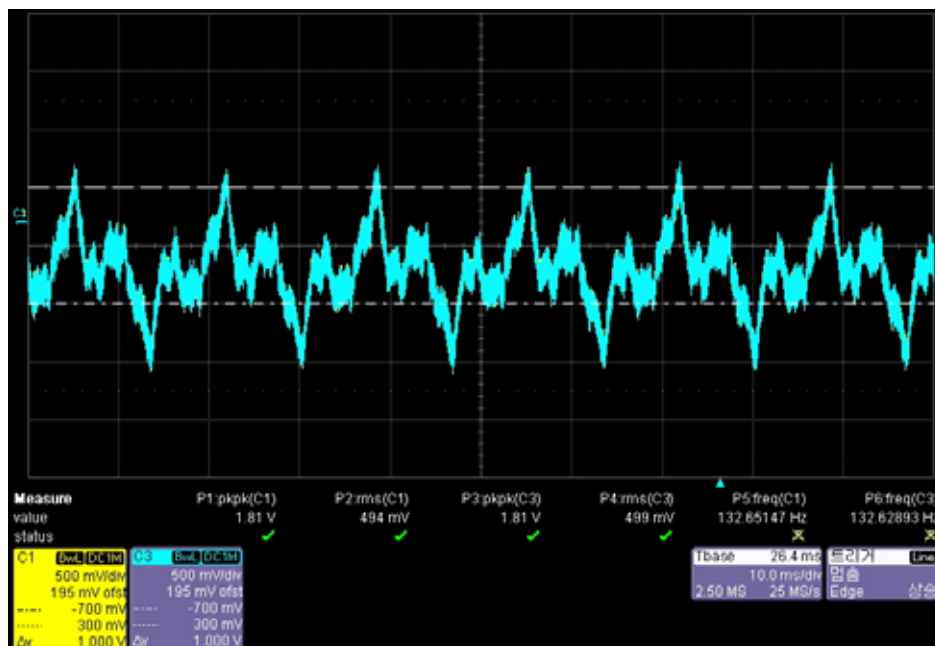


(그림 4-39) 출력 전류 = 90 A 일 경우 유도전압 파형

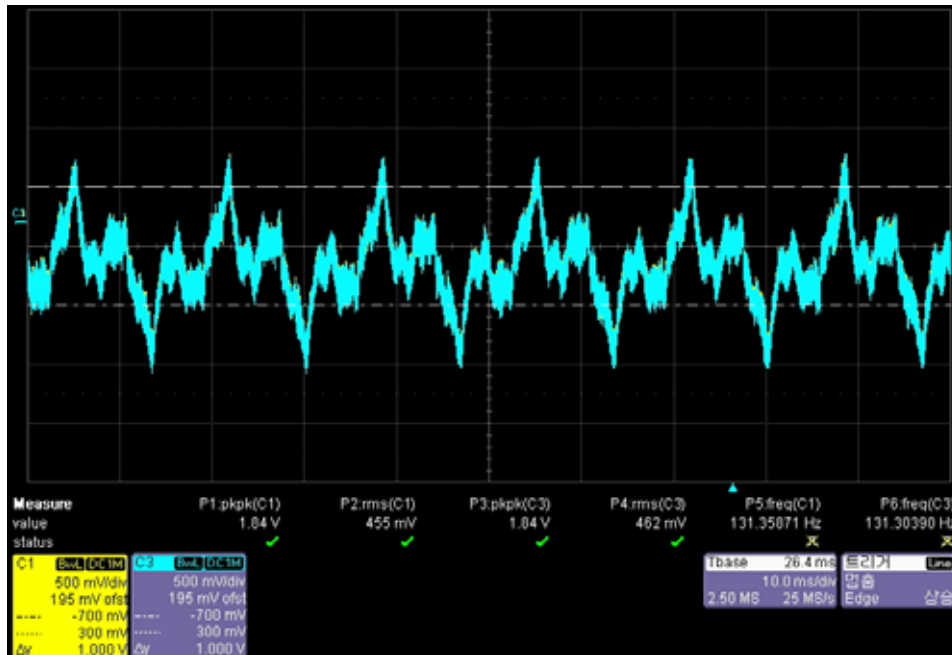


- 유도전압 측정 환경
  - . 통신선과 전류선과의 거리 (d) : 60 cm
  - . 전류선과 전류선과의 거리 : 100 cm
  - . 주파수 : 60 Hz
  - . 유도전압 측정

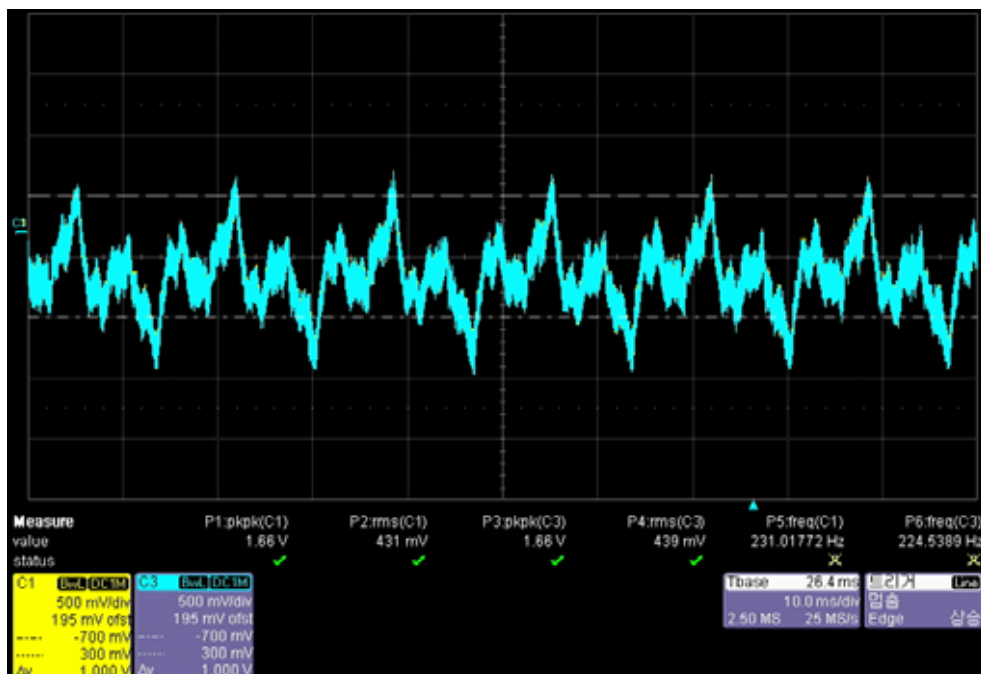
구분	CH 1		CH 2	
	p-p (V)	rms (mV)	p-p (v)	rms (mV)
0 A	2.13	478	2.11	483
30A	1.84	455	1.84	462
60A	1.66	431	1.66	439
90A	1.44	422	1.46	430



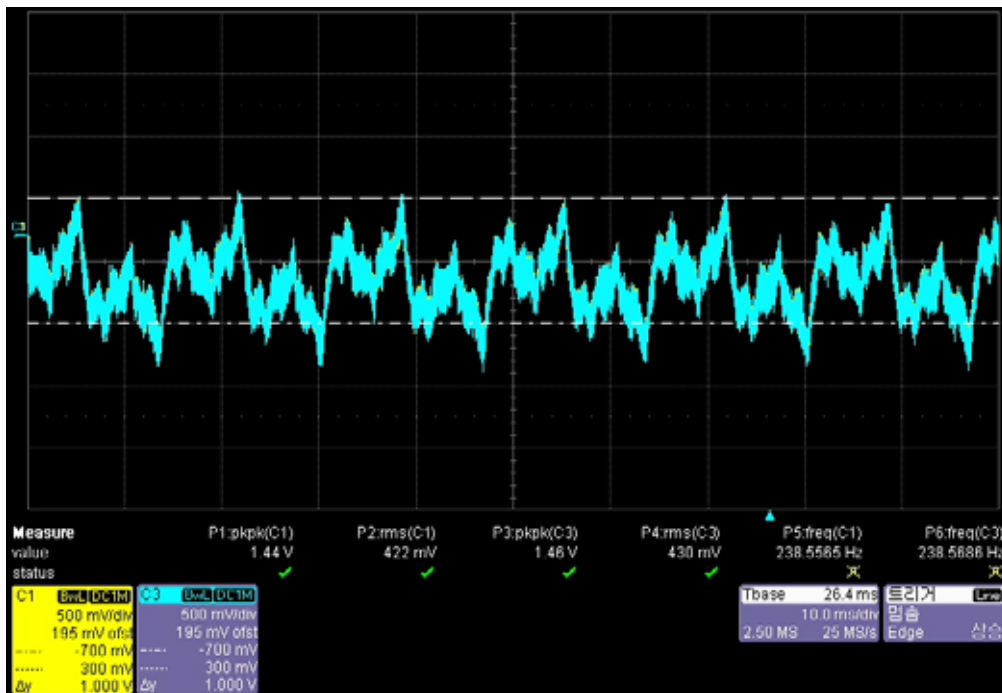
(그림 4-40) 출력 전류 = 0 A 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-41) 출력 전류 = 30 A 일 경우 유도전압 파형

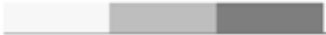


(그림 4-42) 출력 전류 = 60 A 일 경우 유도전압 파형



(그림 4-43) 출력 전류 = 90 A 일 경우 유도전압 파형






---

## 제5장 도시시설물 차폐효과 해석 시뮬레이션

---





## 제 5 장 도시시설물 차폐효과 해석 시뮬레이션

### 제1절 연구배경 및 필요성

1998년에 ITU-T 내 네트워크 전송 특성을 다루는 Study Group인 SG13과 SG15에서 전반 권고시리즈 재편 과정에서 네트워크 관리차원의 전반 잡음전압 제한값에 대하여 원래 그것의 출처인 SG5에 리에존 문서를 통하여 당시의 기준 1 mV의 유지가 적합한지를 검토하였다.

이에 대하여 SG5에서 기존의 1 mV에 대한 우려를 감안, 통화 잡음 청취 테스트를 실시한 결과, 잡음전압 0.5 mV를 기점으로 하여 응답자의 50%는 잡음이 심하다고 답변한 반면, 응답자의 50%는 그렇지 않다고 하여 통신사업자들의 의견에 있어서도 0.5 mV가 적절하다고 판단, 기존 ITU-T Directives에서 정하고 있던 잡음전압 제한 기준 1 mV를 0.5 mV로 조정할 것을 통보함으로써 SG13에서 다루는 권고G.120에 네트워크 운영 관리 잡음을 0.5 mV로 결정하였다.

이후 2000년 2월에 SG5에서도 사업자 책임 관리 차원에서 각종 유도전압 제한치에 관한 사항을 다루는 권고 표준 K.53(Values of induced voltages on telecommunication installations to establish telecom and a.c. power and railway operators responsibilities)을 발행하여 잡음전압 제한치를 0.5 mV로 제시하였다.

SG5에서는 최근 2006년 2월에 전력유도대책 전압 운영관리 차원의 새로운 표준K.68(Management of electromagnetic interference on telecommunication systems due to power systems)을 발행하면서 역시 유도잡음전압의 제한치를 0.5 mV로 규정한다. 다만, 전철시설에 대한 제한치는 전철의 경과에 따른 잡음의 지속 시간과 레벨과의 상관 관계에 따른 프로덕션의 합으로써 평가하여 0.5 mV를 초과하더라도 2.5 mV 미만 범위에 있어서는 어떠한 1분간에 있어서 그러한 범위의 발생잡음전압의 지속시간과의 곱의 합이 30 mV·s를 초과하지 않는다면 허용할 수 있는 잡음으로 해석하였다.

전력선 및 고속전철시설에 의하여 통신선에 유기되는 전력유도 전력유도: 전력선에 의한 전자기장의 변화에 의하여 인근 통신선에 유도전류를 유기하는 현상에 의한 서비스 장애 방지를 위하여 전기통신설비의 기술기준에 관한 규칙 및 기존 전파연구소고시 제2005-95호(전력유도전압의 구체적 산출방법에 관한 기술기준)에 의거 유도 대책을 시행하였다.

유도대책을 위하여는 상기 전기통신설비의 기술기준에 관한 규칙에 따른 유도

전압 제한치가 설정되어 있으며 대책을 위한 유도전압 계산을 위하여는 상기 전파연구소고시 제2005-95호의 계산 기준을 따른다.

## 1. 우리나라

국내 기술기준은 규칙과 규칙에서 위임된 사항을 고시에서 정하도록 구분하여 규정하고 있는 바, 그 내용은 크게 인체에 대한 것과 통신설비에 대한 것, 그리고 통화품질에 대한 것으로 대별. 즉, 유도원은 통신선로와 교차 또는 인접해 있을 때 전력선 지락사고 및 전자기적 유도에 의한 인명피해, 통신시설 파손, 잡음 및 임펄스 등에 의한 통화품질 저하, 데이터통신 속도저하, 기기오동작 등의 발생이다. 이러한 영향을 방지하기 위해 전기통신설비의 기술기준에 관한 규칙에 따르면 다음과 같은 제한값을 정하고 이 전압을 초과하거나 초과할 우려가 있는 경우에는 전력유도 방지조치를 취하도록 규정하고 있다.

- 이상시 유도위험전압: 650 V
- 상시 유도위험중전압: 60 V
- 기기오동작 유도중전압: 15 V
- 잡음전압: 1 mV

## 2. 일본

일본 NTT와 전력회사의 협정서상에서 잡음전압 예측계산을 위한 잡음평형도 잡음평형도: 전력유도에 의하여 유기된 유도전압에 의하여 통화잡음이 발생하는 대수비를 말함. 적용 수치는 일괄적으로 최악의 경우를 고려한 46 dB(1/200)를 사용한다.

통신회사와 전력회사, 철도회사 등의 전력유도대책 협정서상의 내용에 관하여는 예측계산방법에 대한 결정 방식을 기술. 유도전압 계산에 있어서의 주요 인자인 상호인덕턴스 계산 방식은 다케우치 산식을 선 적용하고, 이로써 유도전압 초과 판단이 불명할 경우 칼손-폴라젠 식으로 확인 계산하는 방식을 선택한다. 계산식 등의 기술 변화 문제에 관하여는 별다른 변화는 없으며 기존 유도자료에 의한 계산방식을 그대로 이용하였다.

예측과 실측대비의 사후 평가 및 조정에 관하여 는 NTT와 전력회사의 협정서에 따라 예측에 따른 대책으로 종결될 뿐이며 이에 대한 사후 평가 활동은 없다.



중전압 관련 제한치에 있어서 상시 유도중전압의 기기오동작 제한 관련 15 V에 대하여는 기존의 협정 내용에 따라 그대로 사용하고 있다. 유도대책 비용 지불과 관련하여서는 기본적으로 선행조치 원리에 따라 영향을 미치는 후발 시설자가 비용을 부담한다.

유도대책 기술방식에 있어서 기시설 선로상의 문제에 대한 유도중화코일 등을 사용하는 방법이 예전에는 있었으나, 현재는 그러한 방식은 거의 사용되지 않으며 광케이블로 대체하는 방식도 있겠으나, 이보다는 차폐케이블을 이용한 대책이 주된 것이다.

전력유도 예측 대상 시설에 관한 부분에서는 지중송전선에 대하여 100 m 이격거리상에서 어떠한 병행거리에 있어서도 예측계산 수행, 전철시설에 대하여 500 m 이내 이격거리에서 1 km 이상 병행구간에 대하여 유도대책 대상 시설로서 평가, 가공송전선에 대하여는 이격거리 상관없이 5 km 병행거리에 대하여 예측 수행, 변전 접지체로부터의 이격거리에 따른 유도전압 고려 기준은 없다.

### 3. 독일

독일의 경우에는 전력유도와 관련된 구체적인 기술적 규제사항이 명시된 것은 없다. 다만, EMI/EMC 전반을 다루는 독일 경제부 산하기관에서 자체 규격인 VDE 0028을 정하여 전기안전 문제 등에 관한 내용들을 수록하고 있는데 여기에 전력유도와 관련된 내용들(예측계산식에 관련된 사항 등)을 기술한다.

상시 유도중전압의 제한치는 60 V이며, 이상시 유도위험전압은 인체에 대한 위험전압으로  $0.35 \leq t \leq 0.5s$  일때 650 V 등 고장전류 제거시간에 따라 7가지로 세분화. 선대지잡음전압은 ITU-T 규격기준에 따라 200 mV를 감안한다. 잡음전압에 대하여는 예측하기 곤란하므로 별도의 예측계산을 수행치 않고 있음에 따라 예측계산에 적용되는 잡음평형도의 사용 문제도 고려하지 않고 있다. 독일은 도시 차폐계수를 적용하는 국가로서 도시지역과 시골지역으로 분류하고 감쇄지수를 0.05~1까지 9단계로 세분화하여 상시유도중전압 및 이상시 유도위험전압 계산 시에 적용한다.

전력유도 대책 등의 기술 시행에 관한 세부 규격은 독일의 통신회사(Deutsche Telekom: T-Com), 전력회사, 철도회사 등으로부터의 관계 전문가들의 연합체인 SfB(Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen)에서 자율적인 협의체를 통하여 전력 유도대책을 위한 지침서를 제작 활용하고 있다.

#### 4. 프랑스

프랑스의 전력유도에 관한 규정은 산업노동부에서 발행 고시한 UTE C11-001 (기술규정) 및 하부 규정인 ARTICLE 68에 명시된 바에 의해 상시유도종전압은 60 V이며, 이상시 유도위험전압은 430 V (단, 고정전류제거시간에 따라 650 V)이다. 선간 잡음전압에 대한 것은 ITU-T에서 정한 제시치를 따르고 있고, 잡음전압 제한의 적용에 있어서는 고속전철시설에 대해서만 적용하고 있으며, 일반 전력선 시설에 대한 잡음전압은 고려하지 않고 있다.

또한, 유도전압의 예측계산은 ITU-T Directives Vol. II, III에 의하여 계산하고 있는데, 고장시 유도위험전압과 상시유도종전압의 경우 예측계산상 제한치를 넘어서면 사전대책을 시행하고 있다. 일반 전력선에 의한 잡음은 거의 발생치 않는 것으로 판단하여 예측계산을 수행치 않고 있으나 고속전철의 경우에는 잡음평형도 52 dB로 예측계산을 수행하여 잡음전압이 2 mV 이상인 경우 사전대책을 수행하고 그렇지 않은 경우에는 시설 후 0.5 mV 초과 여부를 실측으로 확인하여 대책을 수행하고 있다.

유도대책 비용부담은 후발 시설기관에서 부담하고 있으며, 대책 방식의 우선순위는 예측계산 결과에 따라 걱정 수위의 유도전압 제한치 초과 범위에 들어올 경우 우선 유도선로 시설과 통신선로 시설의 유도전압 제한치 범위 밖으로 이격조치를 검토하고, 곤란하다면 케이블을 대체하는 방법을 적용한다. 케이블 대체방안으로는 주로 차폐케이블을 사용하고 있다.

통신선은 전력선에 의한 유도 장애를 받기 때문에 이에 대한 기준 및 유도전압 산출방법을 기술기준으로 규정하고 있다. 전력유도를 차폐시키는 다양한 계수들은 정립되어 있으나 도시시설물에 의한 차폐효과 인구가 미약한 실정이다. 전력유도에 대한 제반 차폐 시설 중에 있어서 도시시설물들에 의한 것은 그 비정형성으로 인하여 정량적 계수 설정이 이루어지고 있지 못함으로 인한 유도 대책 적용상의 오차가 우려됨으로 본 연구를 통하여 실제의 유도전압 산출상 도입할 수 있는 차폐계수로서의 도시차폐효과를 규명하고자 한다. 전력유도 대책을 위한 유도전압에 대한 예측계산상의 실측값과의 오차에 대한 보정 해석을 위하여 도시시설물에 의한 차폐량 도출이 요구된다. 금속 가스관, 수도관, 철제 구조물 등 도시시설물이 전력유도에 미치는 영향을 분석하여 기술기준 개선 여부를 검토하기 위함이다.

## 제2절 전력선 주변 낮은 주파수의 전계와 자계 특성

전력 엔지니어는 전력선(PLs: power lines) 주변에서 LF(low frequency) 전자계 특성에 대하여 관심을 갖는다. 이를 위하여 다음과 같은 것들에 의문을 갖게 된다. 이 전자계를 계산하기 위하여 준정적(QS: quasi-static) 이론을 사용하는 것이 적절한가? 이 전자계를 방사(radiation)로 기술하는 것이 옳은 것인가? 이 물음에 답하기 위하여 포인팅 정리를 어떻게 사용 할 수 있는가? 결합 맥스웰 방정식(ME: Maxwell's equations)을 만족하는 전자장을 알고 있을 때, 전계와 자계를 독립적으로 계산할 수 있는 이유는? 어떤 조건에서 전계와 자계의 비가 자유공간 임피던스와 같은가?

전력선 주변에 복잡한 전계와 자계 환경이 존재한다. 실제, 전력 엔지니어들은 전력 주파수에서 이들 전자장들의 특성에 대한 물음에 답을 하여야 한다. 주요 질문들은 다음과 같다.

- 1) QS 방법을 이용 하여 전계와 자계를 계산할 때 오류 백분율은 얼마인가?
- 2) QS 전계와 자계가 맥스웰 방정식에 의하여 서로 결합되어 있는가? 하나의 전자계로부터 다른 전자계를 유도할 수 있는가?
- 3) QS 전계와 자계가 일반적으로 자유공간 임피던스로 관련지을 수 있는 이유는?
- 4) 전력선 부근의 전체 전자장의 어느 부분이 방사 전자계인가?
- 5) 방산 전자계가 안테나로부터 전력을 운반한다. 전력선을 따라 전력을 운반하는 전자계는 무엇인가?

QS 근사식으로 계산된 전자계는 전력선으로부터 100 m 이하에서 0.000002%이다. QS 전자계를 ME와 함께 어떻게 결합되어야 하는가가 고려되어야 한다. 전력선의 전계는 공식적으로 자계로부터 결정되어야 하지만 실제 그렇지 않다. 따라서, 전계와 자계가 서로 독립적이며, 각각 전압과 전류와 관계 있다. 다음으로 전계와 자계가 자유공간 임피던스와 관련이 되는 조건에 대하여 거론한다. 일반적으로 전력선 전자장의 경우가 아니다. 끝으로, 포인팅 이론을 전력선 전자장에 적용 하여 전력선을 따라 전달되는 벌크 전력을 QS 전자장의 결과로 기술하고 전력선으로부터 측면으로 방사되는 미미한 전력량(선로를 따라 전달되는 전력의 210-11 수준)을 계산한다.

## 1. 전계 소스와 자계 소스

전계와 자계원은 전하와 전류이다. 이들은 전력선에 존재하거나, 지상에 있는 전력선 또는 매설된 파이프와 같은 물체에 의하여 유도된다. 이런 전자계는 ME를 계산하여 결정할 수 있다. 자유공간에 있는 전류분포에 의한 자계를 공간상의 임의의 점에서 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\underline{B} = \nabla \times \int_{All\ Space} \frac{\mu_0}{4\pi r} \underline{J} \left( t - \frac{r}{c} \right) dV \quad (5-1)$$

$\underline{B}$  : 자속밀도,

$c$  : 진공에서의 빛의 속도 300,000 km/s,

$\underline{J}$  : 공간에서 전류 분포,

$r$  : 소스에서 전자장을 계산하는 위치까지의 거리,

$\mu_0$  : 자유공간의 투자율 = 4107 H/m,

$\nabla \times$  : curl 연산자.

지상의 전류 분포에 대하여  $\underline{J}$ 는 공간상의 모든 전류를 포함한다. 만약 존재한다면 지구에 유도된 전류도 포함된다. 지구를 자유공간에서 등가전류분포로 대체할 수 있다. 이것은 자유공간방정식을 이용 하여 어떻게 지구상의 전력선의 전자장을 계산하는 가이다. 전하는 식 (5-1)에 숨겨져 있다. 시변 전자장을 연속방정식에 의하여 시변 전하와 관련 지을 수 있기 때문이다. 식 (5-1)은 임의의 전류분포로부터 전자장을 계산하는데 유효한 것이다. 즉, 전류분포가 전력선 위에 있던, 안테나 또는 광 케이블의 등가전류이던 관계없다. 이것이 ME를 이용 하여 계산할 수 있는 모든 전자장 문제들이다.

## 2. 맥스웰 방정식의 해

일반적으로 전계와 자계는 그들이 결합되어 있지 않는 것처럼 결정될 수 있는 상황일지라도 결합되어 있다. 즉 하나의 전자장을 완전히 알면 다른 것을 그것으로부터 계산할 수 있다. 이것이 전력선 부근 전자장에 대한 경우이다. 전자장이 시간적으로 매우 서서히 변화하기 때문에 ME는 결합되지 않아서 정자계와 정전계 방정식을 나눌 수 있다.

시변 전류는 라플라스 또는 푸리에 변환에 의하여 정현적 시변 성분들의 중첩

으로 표현할 수 있다. 각 정현파를 하나의 주파수로 특정 지을 수 있다. 선형 매질에서 전체 전자장을 먼저 각 정현파 성분의 전자장을 계산하고, 이 각 전자장들을 중첩하게 결정할 수 있다.

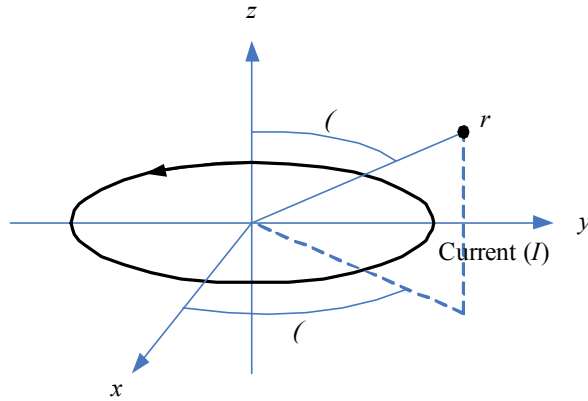
각 정현파 성분의 주파수는 전자장을 계산하는 적절한 방법을 결정하고 전자장을 기술한 그림을 선택하는 중요한 변수이다. 예를 들어, 60 Hz와 같이 낮은 주파수에 QS 방법을 사용 한다. 이 방법은 먼저 static 또는decouple MEs을 이용하여 정전계와 정자계를 유도하고, 이들 전자장들은 단순히 정현파 소스 전류의 주파수에서 진폭이 진동한다. 이때 전자장은 공간적으로 동일한 분포를 갖지만, 시간적으로 소스와 같이 진동하는 진폭을 갖는다.

광파와 같이 높은 주파수에서 기하광학 또는 광선법을 이용 하여 전자장을 계산할 수 있다. 렌즈를 통과하는 광선 연구에서 사용 되는 것과 같이 공간을 통과하는 광선으로 표시할 수 있다. QS와 광선법 모두 근사법으로 적절한 주파수 영역에서 ME 해를 구할 수 있다. EM 해석에서 근사식을 사용 하는 것이 비정상적인 것은 아니다. Closed form의 정확한 해를 갖는 상황이 몇 개 안되기 때문이다. 이런 근사식에 대한 수학적 검증은 적절한 경우에 대한 정확한 해로부터 확보할 수 있다. 해가 관심 있는 파라미터의 영역에서 근사해로 될 수 있다. 전력선 전자장을 계산할 때처럼 이다.

### 3. 준정적 전자장과 방사 전자장

#### 가. 3차원 소스

전계와 자계 환경의 특징을 보이기 위하여 시간상 정현적으로 진동하는 전류( $I$ )가 흐르는 작은 루프를 기본 소스(elementary source)로 하는 것은 (그림 5-1)과 같이 생각할 수 있다.



(그림 5-1) 전류 소스

자유공간에서 이런 소스의 자계는 다음과 같다:

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0 I a^2}{4} \left[ \frac{\cos(\omega t - kr)}{r^3} - \frac{k \sin(\omega t - kr)}{r^2} - \frac{k^2 \cos(\omega t - kr)}{r} \right] \sin \theta \quad (5-2)$$

$$B_r = \frac{\mu_0 I a^2}{2} \left[ \frac{\cos(\omega t - kr)}{r^3} - \frac{k \sin(\omega t - kr)}{r^2} \right] \cos \theta \quad (5-3)$$

$$B_{\phi} = 0 \quad (5-4)$$

$a$  : 루프의 반경,

$k$  : 파수 =  $2\pi/\lambda$ ,

$f$  : 주파수 -  $\omega = 2\pi f$ ,

$r$  : 루프에서 전자기장 측정점까지의 거리,  $r > a$ .

식 (5-2)에 있는  $B_{\theta}$ 의 3개 항은 "static" ( $1/r^3$ ), "induction" ( $1/r^2$ ), "radiation" ( $1/r$ ) 전자장을 나타낸다. 처음 2개 항은 모아서 QS라고 한다. 식 (5-3)의  $B_r$ 에는 방사항이 없어서, 완전히 QS이다. QS와 방사항 사이에 가장 분명한 차이는 소스로부터의 거리에 따른 감쇠율이다. QS는 적어도 거리 제곱에 역 비례하여 감소하여 짧은 거리에서 우세하며, 방사항은 거리에 비례하여 먼 거리에서 우세하다. 짧은 거리와 먼 거리를 구분하는 경계선은 파장이다. 60 Hz에서 파장이 5,000 km이다. 예를 들면, 60 Hz 소스로부터 짧은 거리인 100 m 떨어진 곳에서 방사 전자장의 진폭과 QS 전자장의 진폭 비는 63,300,000 ( $1/k^2 r^2$ 에 비례)이다. 따라서, 총 전자장을 QS 전자장만으로 표현할 수 있다. 일반적으로 전력선에 의한 전자장에 대하여 행해진다.

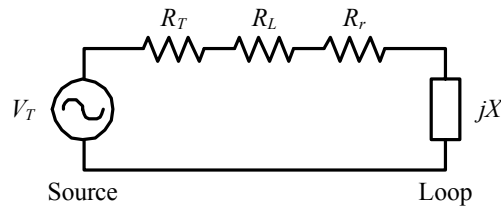
QS 항의 첫 번째만을 고려하면, 식(5-2)와 (5-3)은 다음과 같다:

$$B_{\theta} \approx \frac{\mu_0 I a^2}{4r^3} \sin \theta \cos(\omega t) \quad (5-5)$$

$$B_r \approx \frac{\mu_0 I a^2}{2r^3} \cos \theta \cos(\omega t) \quad (5-6)$$

$kr \ll 1$  이기 때문에, 전자장의 진행과 특성 또는 전자장 분포의 시간상 움직임을 무시한다.  $k$  항을 0이라고 하면, 전자장 분포의 형태는 시간의 함수로 변화하지 않고, 진폭만이 변화된다.

방사 전자장의 또 다른 중요한 특징은 소스로부터 분리되어 소스로부터 더 멀리 진행하고 소스가 꺼진 후에도 계속 진행한다. 소스가 꺼진 후, QS 전자장에 저장된 에너지가 소스로 되돌아가거나 소스 주변에 있는 손실 매질에서 소비되거나 방사된다. 이것을 작은 전류 루프의 등가회로를 평가하여 이것을 (그림 5-2)에 나타내었다. 전류원( $I$ )을 테브닌 등가전압  $V_T$  과 저항  $R_T$  로 나타내며, 루프를 QS 전자장에 저장된 에너지를 나타내는 리액턴스  $X$ , 열로 손실된 에너지를 나타내는 손실 저항  $R_L$ , 방사로 손실되는 에너지를 나타내는 방사 저항  $R_r$  을 나타낸다. 소스가 꺼지면, 리액턴스에 저장된 에너지는 소스에서, 루프에서, 방사로 손실로 소비된다. 더구나, 방사 전자장에 대한 코멘트는 포인팅 이론을 따른다.



(그림 5-2) 전류 루프의 등가회로

완전성을 위하여, 루프의 전계는 다음과 같다:

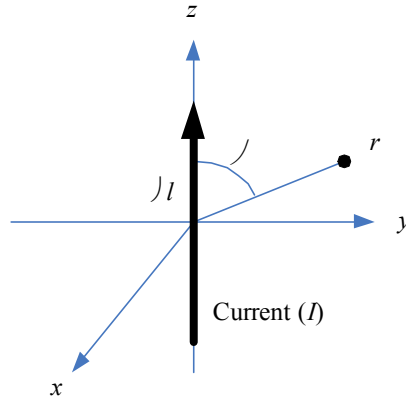
$$E_{\phi} = \frac{\eta I a^2}{4} \left[ \frac{k \sin(\omega t - kr)}{r^2} + \frac{k^2 \cos(\omega t - kr)}{r} \right] \sin \theta \quad (5-7)$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

$$\eta = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi \text{ } \Omega = \text{자유공간 임피던스}$$

또 다른 기본 소스는 (그림 5-3)과 같이 시간상 정현적으로 진동하는 전기 다

이폴(electric dipole: 길이가  $\Delta l$  인 전류 요소  $I$ )이다. 자유공간에서의 전자기장은 다음과 같다:



(그림 5-3) 전기 다이폴: 3차원 소스

$$E_{\theta} = \frac{\eta I \Delta l}{4\pi} \left[ \frac{\sin(\omega t - kr)}{kr^3} + \frac{\cos(\omega t - kr)}{r^2} - \frac{k \sin(\omega t - kr)}{r} \right] \sin \theta \quad (5-8)$$

$$E_r = \frac{\eta I \Delta l}{2\pi} \left[ \frac{\sin(\omega t - kr)}{kr^3} + \frac{\cos(\omega t - kr)}{r^2} \right] \sin \theta \quad (5-9)$$

$$B_{\phi} = \frac{\mu_0 I \Delta l}{4\pi} \left[ \frac{\cos(\omega t - kr)}{r^2} - \frac{k \sin(\omega t - kr)}{r} \right] \sin \theta \quad (5-10)$$

전류 루프의 경우처럼, 3가지 감쇠율을 갖는 항들이 있다.  $kr \gg 1$  이고 첫번째 항만을 QS 근사에 사용 한다면,

$$E_{\theta} \approx \frac{\eta I \Delta l}{4\pi k r^3} \sin \theta \sin(\omega t) \quad (5-11)$$

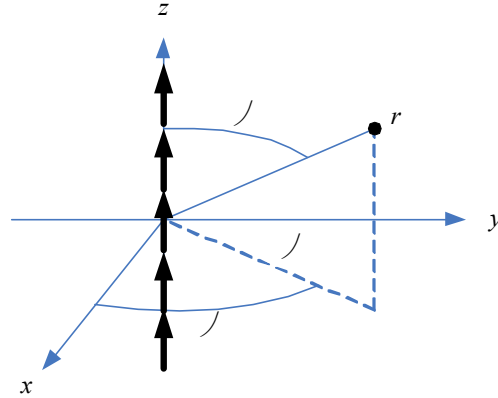
$$E_r = \frac{\eta I \Delta l}{2\pi k r^3} \sin \theta \sin(\omega t) \quad (5-12)$$

## 나. 2차원 소스

위에서 고려된 3차원 소스는 모든 차원에서 유한한 크기를 갖는다. 3차원 소스는 전력선과 직접 견줄 수 없고, 전력선을 무한 길이의 전류가 흐르는 전선인 2차원 소스로 가정 적절하게 모델링 할 수 있다. 이런 모델 조차도 지구를 무시하고



있기 때문에 단순화 된 것이다. 그림에도 불구하고, 이것을 이용 하여 많은 유용한 결론을 얻을 수 있다. 이런 소스의 자계를 (그림 5-4)와 같이  $z$  축을 따라 정렬된 각개의 다이폴의 자계를 합하여 계산된다:



(그림 5-4) 전기 다이폴: 2차원 소스

결과는 다음과 같다:

$$B_{\phi} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I(z') \cos \left\{ \omega t - k \left( \rho^2 + (z - z')^2 \right)^{1/2} \right\}}{\left\{ \rho^2 + (z - z')^2 \right\}^{3/2}} \rho dz' - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k I(z') \sin \left\{ \omega t - k \left( \rho^2 + (z - z')^2 \right)^{1/2} \right\}}{\rho^2 + (z - z')^2} \rho dz' \right] \quad (5-13)$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2},$$

$$\sin \theta = \rho / r,$$

$I(z')$  :  $z$  축을 따라 분포된 전류.

전류가 균일하다는 단순한 가정을 한 경우에 조차, 식 (5-13)의 평가는 어렵다. 2차원 소스의 자계는 일반적으로 아래와 같은 방법으로 계산한다.

자유공간에 있는 무한히 긴 선로에 균일한 전류  $I(t)$ 가 흐를 때의 자계를 (그림 5-5)와 같이 생각할 수 있다.  $I(t)$ 는 식 (5-14)와 같이 공간에서 일정하지만, 시간적으로 정현적으로 변화한다고 가정한다.

$$I(t) = I \cos(\omega t) \quad (5-14)$$

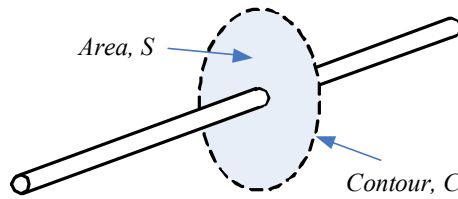
암페어의 법칙을 따라:

$$\oint_C \underline{B} \cdot d\underline{l} = \mu_0 \int_S (\underline{J} + j\omega\epsilon_0 \underline{E}) \cdot d\underline{S} \quad (5-15)$$

$\underline{J}$  : 전류 밀도,

$C$  : 와이어를 중심으로 반경이  $\rho$  인 원,

$S$  : 빗금친 표면 (와이어 단면을 포함).



(그림 5-5) 무한히 긴 선로 주변의 자계

대칭성 때문에, 식 (5-15)의 좌변은  $2\pi\rho B_\phi$ 이다.  $\underline{B}$ 의 다른 성분들은 0이다. 우변의 첫 번째 항은 와이어의 총 전류( $I \cos(\omega t)$ )이다. 우변의 2번째 항을 무시한다면, 다음과 같다.

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I \cos(\omega t)}{2\pi\rho} \quad (5-16)$$

이것은 정확한 해를  $k\rho \ll 1$ 일 때 아래와 같이 계산한 QS 결과이다. 식 (5-14)일 때 식 (5-15)에 대한 정확한 해는 다음과 같다:

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I k}{4} [J_1(k\rho) \sin(\omega t) - Y_1(k\rho) \cos(\omega t)] \quad (5-17)$$

$J_1(x)$ 와  $Y_1(x)$ 는 각각 1종과 2종의 1차 베셀 함수이다. 식(5-16)과 (5-17)의 차이 점은 식(5-15)의 우변의 2번째 항으로부터 나오는 것이다. 이것은 식(5-16)을 유도할 때는 무시하였던 것이지만, 식(5-17)에서는 아니다.

$k\rho \ll 1$ 인 경우, 베셀함수를 다음과 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$J_1(z) = \frac{z}{2}$$

$$Y_1(z) = -\frac{1}{\pi z} + \frac{1}{\pi} z \ln\left(\frac{z}{2}\right)$$

식 (5-17)의 지배적인 부분은 식 (5-16)과 같다. 최대 오류항은 식 (5-16)보다 약  $(1/k\rho)^2$  배 작다. 60 Hz에서  $\rho = 100$  m인 경우 약 63,000,000 times이다. 한편,  $k\rho \ll 1$  (과장보다 훨씬 먼 거리에서) 식 (5-17)은 식(5-2)의 3번째 항과 유사한 방사항만 남게 된다.

#### 4. 전계와 자계의 결합

라인 소스를 전력선의 간단한 모델이라고 생각할 수 있다면, 자계는 단면(즉,  $x-y$  평면)에 존재하는 것으로 알려진 강한 전계와 결합되지 않는다. 이 전계는 전력 엔지니어에 의하여 정전계(electrostatic field)라고 하는 것이며, 크기는 kV/m이다. 이런 정전계의 형태는 다음과 같다.

$$\underline{E} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon_0\rho} \hat{\rho} \quad (5-18)$$

단위 벡터  $\hat{\rho}$ 는 원통형 좌표계의 방사상 방향을 나타낸다.  $\rho_L$ 는 와이어에서 단위 길이당 전하이며, 연속방정식에 의하여 전류와 관계된다.

이런 감결합을 나타내기 위하여 방향 성분만을 갖고  $z$  방향 변화는 없는 자계에 대한 미분형 패라데이 법칙을 이용 하여 전계를 결정하는 것을 생각한다.

$$\mu_0\epsilon_0 \frac{\partial \underline{E}}{\partial t} = \nabla \times \underline{B} = \hat{z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho B_\phi) \quad (5-19)$$

자계의 QS 형태 식 (5-16)을 사용 한다면,  $\rho B_\phi$ 가 일정하기 때문에  $\epsilon$ 는 0이다. 자계의 훨씬 정확한 베셀 함수 형태 식 (5-17)을 사용 한다면, 전계의  $z$  방향 성분만이 나타날 것이다. 전계와 자계가 ME에서 함축적으로 진짜로 결합된다면, 식

(5-18)의 강한 단면 전계는 어디에 있는가? 전력선을 따라 변화하지 않는 간단한 전류 분포를 식 (5-14)로 가정하기 때문에 단면 전계가 없다. 진행하는 전류파는 훨씬 적절한 형태이다. 이 위치에서 는 모른다.

$$I(z,t) = I \cos(\omega t - \gamma z) \quad (5-20)$$

실제 문제에서, 전력선인 와이어와 지표면에서 EM 경계조건을 정합시켜 를 구할 수 있다. 계산된 값 은 개별 모드(QS-TEM을 포함함)와 모드들의 연속 스펙트럼에 대응한다. 이것은 마이크로스트립과 같은 EM 전자파 가이드 구조를 해석하기 위하여 사용 되는 동일한 절차이다. 전력선을 정확하게는 개방 도파관으로 부를 수 있다. 더구나, 식 (5-20)이 아닌 더 일반적인 전류 분포로부터 전자계를 공간 푸리에 변환의 도움으로 구할 수 있다. 그러나, 전력선을 따라 흐르는 전류에 대하여 식 (5-20)에 가정된 전류 분포(반대 방향으로 진행하는 전자파와 함께  $I \cos(\omega t + \gamma z)$ )이면 일반적으로 충분하다.

이렇게 가정된 전류 분포에서 자계는  $z$ 의 함수이며 전계는 다음과 같다.

$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \underline{E}}{\partial t} = \nabla \times \underline{B} = -\hat{\rho} \frac{\partial B_\phi}{\partial z} + \hat{z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho B_\phi) \quad (5-21)$$

전계는 단면에 있는 성분이고 이것은 식 (5-18)의 정전계로 보여질 것이다. 식 (5-20)의 전류분포를 식 (5-16)에 사용 된다면, 식 (5-21)로부터 전계의 단면 성분은 다음과 같다.

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_\rho}{\partial t} = -\frac{1}{2\pi\rho} \frac{\partial}{\partial z} [I \cos(\omega t - \gamma z)] \quad (5-22)$$

전류 연속방정식(5-23)을 적용 하면 식(5-22)는 식(5-24)로 된다.

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho_L(z,t)}{\partial t} \quad (5-23)$$

$$E_\rho = \frac{\rho_L(z,t)}{2\pi\epsilon_0\rho} \quad (5-24)$$

이것은 정확하게 식 (5-18)의 단면 정전계이다. 이 결과는 전류가 어떠한  $z$ 의 존성을 갖느냐와 관계없이 얻어진다. 이것은 일반적으로 전력선 전류는 식 (5-20)과 같이 순방향으로 진행하는 파와 식 (5-25)와 같은 역방향 성분으로 구성되기 때문에 중요하다.

$$I_r(z,t) = I_r \cos(\omega t + \gamma z) \quad (5-25)$$

이 두 전류의 합을 정재파 전류라고 한다.

원리적으로 선로 방향으로 거리에 따라 자계가 변화한다고 가정한다면 전계를 자계로부터 계산할 수 있다. 정현파적 시간 변화를 가정한다면, 식 (5-21)로부터 단면 전계 크기는 다음과 같다.

$$\mu_0 \epsilon_0 \omega E_p \quad \frac{\Delta B_\phi}{\Delta z} \quad (5-26)$$

알고 있는 자계로부터 전계를 결정할 때 실제적 어려움은 거리에 따른 자계의 차이를 정확하게 측정할 수 있는 것이다. 예를 들면, 전계가 10 kV/m이고, 주파수가 60 Hz이고 자계 측정점들 사이의 거리가 1 km이라면 자계 크기의 차이  $\Delta B_\phi$ 는 0.042 T (microtesla) [4107 8.851012 2 60 104 103 = 0.42 mG (milligauss)]이다. 선로를 따라 기하학적 불규칙성, 전류의 시간 변화, 주변 자계에 의하여 거리 1 km마다 어떤 정확도를 갖고 이런 차이를 측정하는 것이 분명하게 실제로 불가능하다. 이런 이유 때문에 전력선의 자계와 전계를 전류에 의하여 자계가 결정되고, 전압에 의하여 전계가 결정되는 결과와 마치 관계없는 것처럼 취급하는 것이 더 간단하다.

전류가 식 (5-20)과 같을 때, 와이어에 의한 정확한 자계와 전계는 다음과 같다.

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I \zeta}{4} \{J_1(\zeta \rho) \sin(\omega t - \gamma z) - Y_1(\zeta \rho) \cos(\omega t - \gamma z)\} \quad (5-27)$$

$$E_p = \frac{I \zeta \gamma}{4 \omega \epsilon_0} \{J_1(\zeta \rho) \sin(\omega t - \gamma z) - Y_1(\zeta \rho) \cos(\omega t - \gamma z)\} \quad (5-28)$$

$$E_z = -\frac{I\zeta^2}{4\omega\epsilon_0} \{J_0(\zeta\rho)\cos(\omega t - \gamma z) + Y_0(\zeta\rho)\sin(\omega t - \gamma z)\} \quad (5-29)$$

$$\zeta = \sqrt{k^2 - \gamma^2}, \quad \gamma \leq k$$

요약하면, 전력선의 전류를 전력선 방향으로 변화한다고 가정하는 한, 전계와 자계는 결합된다. 그러나, 실제로 이 변화는 매우 느려서 흔히 무시할 만하다. 만약 이렇다면, 두 가지가 일어난다. 첫째는 전계와 자계가 결합되지 않는다는 것이다. 둘째로, 전계와 자계를 각각 결정하기 위하여 매우 간단하고 정확한 QS 방법을 사용 할 수 있다. 이 경우, 전계는 선로 전압과 직접 관계가 있고 자계는 선로 전류와 직접 관계가 있다. 이것은 전력 엔지니어에 의하여 일반적으로 사용되는 방법이다.

## 5. 자유공간 임피던스

전계와 자계는 자유공간 임피던스( $|\mathbf{E}|/|\mathbf{H}| = 120$ )에 의하여 관계 지을 수 있다. 자유공간에서 자계 세기는  $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0$ 이다. 이에 대한 좋은 이유가 있지만, 이 가정이 유효하지 않는 많은 경우가 있다.

전계와 자계가 자유공간 임피던스에 의하여 관계를 갖는 2가지 경우가 있다. 첫째는 전자장을 정의하는 위치가 자유공간에서 방사 소스로부터 멀리 떨어진 경우(소스가 파장에 비하여 매우 클 때를 제외하고 일반적으로 여러 파장이 떨어진 경우)로 전자장은 근사적으로 평면파 특성을 갖는다. 2번째 경우는 동축선 또는 유전체로 자유공간을 갖고 있는 완전도체로 구성된 개방 와이어 선로와 같은 무손실 전송선로를 따라 전파되는 순수한 TEM 파에 대한 것이다.

분명하게 전력선은 첫 번째 분류에 속하지 않지만, 전력선이 개방 와이어 전송 선로이기 때문에 두 번째 분류에 대략적으로 속한다. 이런 외형에도 불구하고, 전계와 자계의 비가 120 가 아닌 2가지 이유가 있다. 첫번째 이유는 개방 와이어 선로가 손실이 있는 지구에 있다는 것이다. 따라서, 전자파는 순수한 TEM 전자파가 아니다. 이것으로 인하여 전계와 자계의 비가 1,000 까지 된다. 두 번째 이유는 일반적으로 전력선으로부터의 전자계가 반대방향으로 진행하는 전자파(즉, 반사파)가 존재하기 때문에 단일 진행파의 전자계가 아니다. 전자계 비에서 이것이 갖고 있는 효과를 이해하기 위하여, 동축선 내부 전자계를 생각해보자. 동축선 단면

에서의 전계는 다음과 같다.

$$|E(z,t)| = |E_f \cos(kz - \omega t) + E_r \cos(kz + \omega t)| \quad (5-30)$$

$E_f$ 는 순방향 진행파의 크기이고  $E_r$ 은 역방향 진행파의 크기이다. 동일 위치에 서 대응하는 자계는 다음과 같다.

$$|H(z,t)| = \left| \frac{E_f}{\eta} \cos(kz - \omega t) - \frac{E_r}{\eta} \cos(kz + \omega t) \right| \quad (5-31)$$

반사파 앞의 음의 부호는 반사파 방향이 역방향이라는 것을 나타낸다. 대부분의 전력선이 파장에 비하여 짧기 때문에 이 두 방정식에서  $k_z = 0$ 이라고 하는 것이 합리적이다.

$$\left| \frac{E(z,t)}{H(z,t)} \right| = \eta \left( \frac{E_f + E_r}{E_f - E_r} \right) \quad (5-32)$$

분명하게,  $E_r = 0$ 일 때 비율은 120 이지만, 그렇지 않다면, 비율은 어떤 값이라도 취할 수 있다. 전력선의 경우, 전계와 자계의 비를 120 라고 가정하는 것은 적절 하지 않다.

## 6. 포인팅 이론의 적용

식 (5-31)에서 주어진 포인팅 이론은 다음과 같다.

$$P_S = P_L + \frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) + \int_S (\underline{E} \times \underline{H}) \cdot d\underline{S} \quad (5-33)$$

$P_S$  = 체적  $V$  내에 있는 소스에 의하여 발생된 전력,

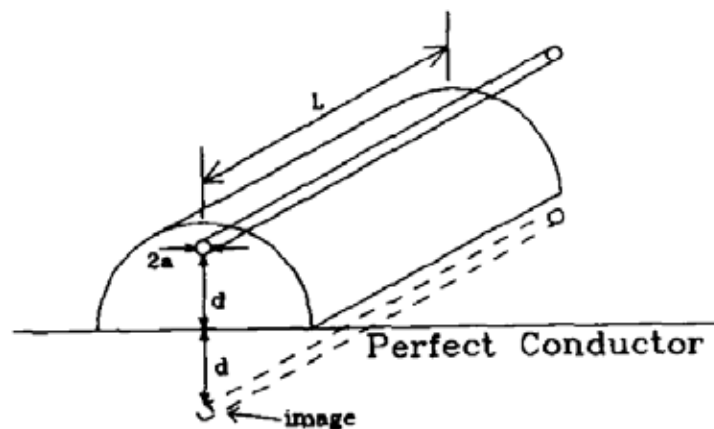
$P_L$  = 체적  $V$  내에 있는 손실 매질에서 소비된 전력,

$W_e$  = 체적  $V$  내에 있는 전기에 축적된 에너지,  
 $W_m$  = 체적  $V$  내에 있는 자기에 축적된 에너지,  
 $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  = 포인팅 벡터,  
 $S$  = 체적  $V$ 를 둘러싼 표면.

포인팅 이론은 기본적으로 체적  $V$  내에서 전력 균형을 기술한 것이다. 체적  $V$  내에서 발생한 전력은 열로 소비된 전력과 전자장에 저장된 에너지 변화와 식 (5-33)의 표면적분에 의하여 표시된 것과 같이 체적  $V$ 의 경계가 외부로 가로지르는 전력이 평형을 이룬다.

포인팅 이론을 소형 전류 루프의 전자장에 적용한 것 또는 전류 소자는 복사장이 시평균 전력을 소스로부터 무한대까지 운반한다는 것을 보인다. 비하여, QS 항은 소스로부터 어떤 평균 전력도 운반하지 않는다.

평균전력을 전력선 문제를 적용하기 위하여 완전 도체인 지구 위의 단일 와이어 전력선을 둘러싼 유한 길이  $L$ 의 반 원통 표면을 생각하자(그림 5-6). 원통 반의 끝에서 전력선이 통과하는 end caps이 존재한다. 반 원통을 들어오거나 나가는 전력을 2 부분에서 계산된다. 첫 번째는 작은 것처럼 보일 반 원통의 옆을 통하여 나가는 것이다. 반 원통의 편평한 측을 통하여 어떤 전력도 흐르지 않는다. 이 예제에서 지구는 완전 도체이어서 접선 전계는 0이다. 두 번째는 크게 보이는 반 원통의 끝을 통하여 흐르는 것이다. 사실 반 원통의 반경이 커지면 각각 끝을 통하여 흐르는 전력은 선로를 흐르는 전력과 동일하다(반 원통 내에서 흡수와 측면을 통하여 복사에 의하여 손실된 전력을 제외). 전력선의 목적이 선로 방향을 따라 에너지를 전달하는 것이기 때문에 이것은 놀랄만한 것이 아니다.



(그림 5-6) 단일 와이어 전력선을 둘러싼 유한 길이  $L$ 의 반 원통 표면



단일 와이어 전력선을 이용 하여 전력선의 "zero sequence mode"로부터 전자장을 나타낸다. 즉, 모든 도체 전류가 동상인 경우이다. zero sequence 전류는 일반적으로 전송선로의 평균 전류 크기의 수 %보다 작아서, 대부분 복사에 책임이 있다. 다른 모드의 전류들을 합하면 0이 되어 전력선의 와이어가 파장에 비하여 밀접하게 위치하기 때문에 그들의 복사 전자계는 와이어 사이 곱하기  $k$ 의 오더로 훨씬 작다. 이 와이어는 진행 전류와 식 (5-20)를 운반한다고 생각하자. 전계는 식 (5-27)로 주어지며 전계는 식 (5-28)과 (5-29)로 주어진다. 반 원통의 옆을 통하여 전력 흐름을 야기하는 포인팅 벡터의 성분은 다음과 같다.

$$E_z \hat{z} \times \left( \frac{B_\phi}{\mu_0} \right) \hat{\phi} = - \frac{E_z B_\phi}{\mu_0} \hat{\rho} \quad (5-34)$$

단일 와이어 전력선은 완전 도체 지구 위에 있기 때문에, 선로의 전계와 자계는 영상 전자기장에 의하여 증가되어야 한다.

$$\underline{B} = \frac{\mu_0 I \zeta}{4} \left[ \begin{array}{l} \left\{ J_1(\zeta \rho_1) \sin(\omega t - \gamma z) - Y_1(\zeta \rho_1) \cos(\omega t - \gamma z) \right\} \hat{\phi}_1 \\ - \left\{ J_1(\zeta \rho_2) \sin(\omega t - \gamma z) - Y_1(\zeta \rho_2) \cos(\omega t - \gamma z) \right\} \hat{\phi}_2 \end{array} \right] \quad (5-35)$$

$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} > d$  인 경우,

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \sqrt{x^2 + (y-d)^2} \approx \rho - \frac{2yd - d^2}{2\rho} \\ \rho_2 &= \sqrt{x^2 + (y+d)^2} \approx \rho + \frac{2yd + d^2}{2\rho} \end{aligned} \quad (5-36)$$

$a_{\phi 1}$  와  $a_{\phi 2}$  는 와이어와 그 와이어의 영상 사이에 중심이 있는 좌표계 시스템에서 방향 단위 벡터이다.

식 (5-35)에서  $\zeta d \ll 1$ ,  $\rho > d$  에 대하여 베셀 함수를 테일러 급수의 2개 항으로 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_1(\zeta \rho_1) &= J_1(\zeta \rho) - \left[ J_0(\zeta \rho) - \frac{J_1(\zeta \rho)}{\zeta \rho} \right] \zeta \frac{2yd - d^2}{2\rho} \\ J_1(\zeta \rho_2) &= J_1(\zeta \rho) + \left[ J_0(\zeta \rho) - \frac{J_1(\zeta \rho)}{\zeta \rho} \right] \zeta \frac{2yd + d^2}{2\rho} \end{aligned} \quad (5-37)$$

$Y_1(\zeta\rho_1)$ 와  $Y_1(\zeta\rho_2)$ 에 대한 급수를 식 (5-37)에서  $J$  대신에  $Y$ 를 대입하여 얻을 수 있다.  $\rho > d$ 인 경우  $a_{\phi 1} = a_{\phi 2} = a_{\phi}$ 이며,  $y = \rho \sin \phi$ 이므로, 식(5-35)는 다음과 같다.

$$B_{\phi} = -\frac{\mu_0 I \zeta^2 d}{2} \sin \phi \left[ \begin{aligned} & \left\{ J_0(\zeta\rho) - \frac{J_1(\zeta\rho)}{\zeta\rho} \right\} \sin(\omega t - \gamma z) \\ & - \left\{ J_0(\zeta\rho) - \frac{J_1(\zeta\rho)}{\zeta\rho} \right\} \cos(\omega t - \gamma z) \end{aligned} \right] \quad (5-38)$$

$\xi d \ll 1$ ,  $\rho > d$ 인 경우, 0차 베셀함수에 대한 테일러 급수 표현식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_0(\zeta\rho_1) &= J_0(\zeta\rho) + \zeta \left( \frac{2yd - d^2}{2\rho} \right) J_1(\zeta\rho) \\ J_0(\zeta\rho_2) &= J_0(\zeta\rho) - \zeta \left( \frac{2yd + d^2}{2\rho} \right) J_1(\zeta\rho) \end{aligned} \quad (5-39)$$

2종 베셀함수에 대한 표현식을  $Y$ 를  $J$ 로 대체하여 구할 수 있다. 식 (5-39)을 이용 하여,  $E_z$ 는 다음과 같다.

$$E_z = -\frac{I \zeta^3 d}{2\omega \epsilon_0} \sin \phi \left[ J_1(\zeta\rho) \cos(\omega t - \gamma z) + Y_1(\zeta\rho) \sin(\omega t - \gamma z) \right] \quad (5-40)$$

반 원통의 측면을 통과하여 흐르는 시평균 전력은 다음에 비례한다.

$$\frac{1}{T} \int_0^T E_z B_{\phi} dt \quad (5-41)$$

$T = 2\pi/\omega$ 는 한 주기의 길이이다.  $\cos(\omega t - \gamma z)$  또는  $\sin(\omega t - \gamma z)$ 에 비례하는 항만이 평균전력에 기여한다. 다른 항은 직교성에 의하여 0이다. 따라서, 길이  $L$ 인 반 원통의 측면을 통하여 흐르는 시평균 전력은 다음과 같다.

$$P_{avg}^{side} = \int_0^L \int_0^\pi \left\{ -J_1(\zeta\rho)Y_0(\zeta\rho) + J_0(\zeta\rho)Y_1(\zeta\rho) \right\} A\rho d\phi dz \quad (5-42)$$

$$A = -\frac{I^2\zeta^5 d^2}{8\omega\epsilon_0} \sin^2 \phi.$$

Wronskian을 이용 하여, 식 (5-42)은 다음과 같다.

$$P_{avg}^{side} = \frac{I^2\zeta^4 d^2 L}{8\omega\epsilon_0} \quad (5-43)$$

반 원통의 각 끝을 통하여 흐르는 전력은 다음에 비례한다.

$$E_\rho \hat{\rho} \times \left( \frac{B_\phi}{\mu_0} \right) \hat{\phi} = \frac{E_\rho B_\phi}{\mu_0} \hat{z} \quad (5-44)$$

와이어 부근의 대칭성이 부족하기 때문에 식(5-44)를 직접 적분하는 것이 어렵기 때문에 전력을 계산하는 다른 방법을 사용 할 것이다. 선로 부근의 전자장이 본질적으로 QS이기 때문에 와이어와 그라운드 사이의 전압을 정의한다. 전압과 전류의 곱이 포인팅 이론에 의하여 주어진 전력에 동일하다. 순방향으로 진행되는 전류와만이 존재한다고 가정하면 와이어를 통과하는 수직 선을 따라 식 (5-58)의 전계를 QS로 식 (5-45)로 감소시킬 수 있고, 그라운드에 대한 와이어의 전압은 식 (5-47)과 같이 주어진다.

반사파의 전계와 자계의 상대적인 부호는 순방향 진행파에 대하여 서로 반대이다. 따라서, 반사파가 존재한다면, 반 원통의 끝과 측면을 통하여 흐르는 전력 모두  $(1 - |E_r/E_f|^2)$ 의 인자로 감소한다. 이 때문에, 끝을 통하여 흐르는 전력과 방사 전력의 비율은 순방향 진행파만에 대하여 유도된 것과 동일하다.

$$E_y = \frac{I\gamma}{2\pi\omega\epsilon_0} \left( \frac{1}{y-d} - \frac{1}{y+d} \right) \cos(\omega t - \gamma z) \quad (5-45)$$

$$V = -\frac{I\gamma}{2\pi\omega\epsilon_0} \int_0^{d-a} \left( \frac{1}{y-d} - \frac{1}{y+d} \right) \cos(\omega t - \gamma z) dy \quad (5-46)$$

$$\approx \frac{I\gamma}{2\pi\omega\epsilon_0} \ln\left(\frac{2d}{a}\right) \cos(\omega t - \gamma z), \quad d \gg a \quad (5-47)$$

식 (5-41)에서  $E_z B_\phi$  을 식 (5-20)과 식 (5-47)의 곱으로 대체하여 얻어진 시평균 전력은 다음과 같다.

$$P_{avg}^{end} = \frac{I^2 \gamma}{4\pi\omega\epsilon_0} \ln\left(\frac{2d}{a}\right) \quad (5-48)$$

측면을 통하여 방사된 전력과 끝을 통하여 흐르는 전력의 비는 다음과 같다.

$$\frac{P_{avg}^{side}}{P_{avg}^{end}} = \frac{\zeta^4 d^2 \pi L}{2\gamma \ln(2d/a)} \quad (5-49)$$

지구가 완전 도체라면, 식 (5-49)는 0이다. zero sequence mode의  $k$  이어서,  $k=0$  이기 때문이다. 지구가 완전도체가 아니기 때문에 실제 지구에 대한 식 (5-49)에 대한 대략적인 근사를 하는 것이 도움이 된다. zero sequence mode에 대한  $k$  의 일반적인 값은  $k \approx 2/5000$  또는  $0.00126 \text{ km}^{-1}$ 이다. 전체 계산을 위하여, 지구는 거의 완전 도체이어서  $d$  는 그라운드 위의 도체 높이로 약 20 m이다. 자체 계산을 위하여, 지구를 표피 깊이 크기의 깊이로 있는 영상으로 대체한다. 표피 깊이는 흙의 저항율이 100 -m인 경우 약 650 m이다. 따라서,  $d$  는 335 m이다. 식 (5-49)의 분자에 있는  $d$  의 하나는 자체 계산으로부터 나온다. 다른  $d$  들은 전체 계산으로부터 온다.  $a=0.03 \text{ m}$  인 전력선의 길이가 100-km 일때 적절한 값을 식 (5-49)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{P_{avg}^{side}}{P_{avg}^{end}} \approx 3 \times 10^{-10} \quad (5-50)$$

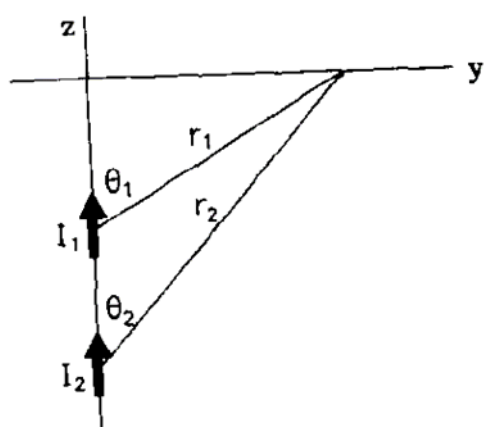
3개 와이어 전력선의 경우, zero sequence 전류를 운반하는 3개의 와이어가 존재한다. 식 (5-50)의 비율은 3배 증가한다. 그러나, 선로 끝을 통과하여 진행되는 전력은 총 전류(양, 음과 zero sequence 전류의 합)에 비례한다. 총 전류는 zero

sequence 전류에 비하여 몇 배(약 50배)가 훨씬 크다. 비율은 21011로 될 것이다. 이것은 측면으로 방사되는 전력과 100-km 길이의 전력선에 대한 전송된 전력의 비율이다. 모든 실제적 목적에서 방사 전력을 무시할 수 있을 정도로 매우 작다. 전력선으로부터 방사되는 전력은 없다.

철학적 물음이 남는다. 평균 전력이 전자장의 방사 성분에 의해서만 기본 다이폴로부터 멀리 운반된다. QS 성분은 평균 전력을 운반하지 않는다. 2차원 전력선이 기본 다이폴의 중첩이라면, (QS 전자장에 의한) 선로를 따라 운반되는 전력이 적절하다고 불리워지는 방사입니까?

(그림 5-7)과 같은 2개의 collinear elementary 다이폴이 질문의 답을 구할 수 있다.  $z=\text{constant}$  plane을 통하여 흐르는 평균 전력은 식 (5-44)와 식 (5-48)에서 계산된 전력선을 따라 흐르는 전력에 대응된다. 2개 다이폴의 경우,  $z=0$  평면을 통하여 시 평균 전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \hat{\mathbf{z}} dt &= \frac{1}{T} \int_0^T (E_\theta \cos \theta + E_r \sin \theta) H_\phi dt \\ &= \frac{\eta(\Delta I)^2}{32\pi^2} \left[ \frac{I_1^2 k^2}{r_1^2} \sin^2 \theta_1 \cos \theta_1 + \frac{I_2^2 k^2}{r_2^2} \sin^2 \theta_2 \cos \theta_2 + \right. \\ &\quad \left. I_1 I_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \left\{ \begin{aligned} &\left( \frac{k^2}{r_1 r_2} + \frac{3}{r_1^2 r_2^2} - \frac{3}{r_1^3 r_2} \right) \cos \theta_1 \cos(kr_1 - kr_2) + \\ &\left( -\frac{k}{r_1 r_2^2} + \frac{3}{kr_1^3 r_2^2} + \frac{3k}{r_1^2 r_2} \right) \cos \theta_1 \sin(kr_2 - kr_1) + \\ &\left( \frac{k^2}{r_1 r_2} + \frac{3}{r_1^2 r_2^2} - \frac{3}{r_1^3 r_2} \right) \cos \theta_2 \cos(kr_2 - kr_1) + \\ &\left( -\frac{k}{r_2 r_1^2} + \frac{3}{kr_2^3 r_1^2} + \frac{3k}{r_2^2 r_1} \right) \cos \theta_2 \sin(kr_1 - kr_2) \end{aligned} \right\} \right] \end{aligned}$$



(그림 5-7) collinear elementary 다이폴

$I_1=0$  또는  $I_2=0$  라면, 식 (2-51)은  $r^2$ 에 반비례하는 항을 갖는 것이 된다. 이것은 방사 전자장만이 소스로부터 멀리 시 평균 전력을 운반하는 기본 다이폴의 성질과 일치한다. 그러나, 두 전류가 모두 0이 아니라면  $r^2$ 보다 더 큰  $r$ 의 멱수에 반비례하는 항에 의하여 시 평균 전력이 운반된다. 이들 항은 QS 전자장 성분들로부터 온다. 이 경우, collinear elements의 QS 전자장은 elements 방향으로 전력을 운반한다고 결론을 짓는 것이 옳다. 그러므로, 시평균 전력은 소스의 QS 전자장에 의하여 선형 소스의 방향으로 운반된다.

실제로, 측정 장비는 QS와 방사 전자장의 차이를 구분할 수 없다. 한 위치에서 전계 또는 자계를 시간의 함수로 진폭과 방향에 의하여 규정되고, 방사 전자장 또는 QS 전자장인가에 영향을 받지 않는다.

## 7. 요약

1. 전계와 자계는 맥스웰 방정식을 만족하고 시간영역에서 변화하는 속도에 관계없이 결합을 일으킨다. 유일한 예외는 시간영역에서 전혀 변화하지 않는 전자장의 경우이다.

2. 전력선의 자계를 알고 있다면 전력선의 전계도 구할 수 있다. 즉 두 개의 전자장이 결합되어 있다. 그러나, 실제로는 그것이 일어나지 않는다. 따라서, 전계와 자계는 독립적이라고 가정하고 각각 전압과 전류로 관계 지을 수 있다.

3. 준정적 근사(quasi-static approximation)는 60 Hz 전력선 전자장에 대하여 전력선으로부터 100 m 이하에서 0.000002%내에서 유효하다.

4. 일반적으로, 전력선의 단면 전계와 자계는 지구의 손실과 순방향 전자파와 반사파 모두가 존재한다는 사실 때문에 자유공간 임피던스에 의하여 관계를 맺게 할 수 없다.

5. 포인팅 이론을 전력선에 적용한다. 전력선을 따라 전달되는 전력과 측면으로 방사되는 전력의 비는 100-km 길이의 선로에 대하여 21011의 order이다. 그러므로, 전력선으로부터 측면으로 방사되는 전력이 실제로 존재하지 않는다. 전력은 소스단에서 부하단으로 선로를 따라 흐른다.

6. 기본적인 전류 루프 또는 전류 소자에 대하여 방사 전자장만이 소스로부터 멀리 전력을 전달한다. 동일선상의 전력 소자와 2차원 전력선에 대하여 방사상 전자장과 준정적 전자장은 전류 방향으로 전력을 전달한다. 실제 목적상 이런 전력 흐름에 대한 방사 전자장의 기여는 무시할 만하다.

### 제3절 환경 차폐 효과

#### 1. 유도종전압과 대지전압

송전선이나 전기철도로부터 인근 통신선에 유도장해가 발생한다. 직접접지 시스템의 초고압전선의 실현이나 일본의 신간선으로 대표되는 교류전화의 보급에 의하여 많은 문제점이 지적되었기 때문에 관계 여러 기관의 노력에 의하여 이런 문제 점을 일단 분명하게 하는 것이 되었다.

##### 가. 유도종전압과 대지전압의 관계

전력선의 한 선 지락사고 시에 근방 통신에 발생하는 유도장해의 예측으로부터는 통신선의 길이 방향으로 발생하는 유도종전압이 구해진다. 하지만, 유도대책을 필요로 할까 아닐까는 통신선 심선의 대지표면에 대한 대지전압이 제한치를 초월 할까 아닐까에 의하여 판단하여야 한다.

##### 1) 대지전위 상승에 의한 통신선 대지전압으로의 영향

통신선의 대지전압은 통신선과 대지면의 전위차가 이기 때문에, 통신선의 금속 sheath의 전류, 혹은 전자유도대책용 arrestor의 방전에 의하여 접지극에 전류가 흐르는 경우에는 접지극 및 근방의 대지면의 전위가 상승하여, 그 지점에 있어서 대지전압은 영전위로부터의 전압과는 다른 값이 된다. 이제 arrestor가 방전하여 일부의 심선군이 양단 각각  $R_0$  되는 저항으로 접지된 상황을 고려하여 본다. 이 경우 회로구성과 전위분포는 다음과 같이 계산한다. 좌단으로부터 거리  $x$ 의 지점의 전위는 다음 식으로 표시된다.

$$V_{A_2-G} = \frac{1}{2}E - \frac{x}{l}E \quad (5-51)$$

$$V_{A_2-G} = \frac{1}{2\pi\sigma x} \cdot \frac{E}{2R_0 + Zl} \quad (5-52)$$

$E$ : 유도기전력 [V]

$Z$ : 통신선의 단위 km당의 임피던스 [/m]

$R_0$ : 양단의 접지전압 []

$l$ : 통신선의 길이 [km]

$V_x$ : x 지점의 대지전압 [V]

$\sigma$ : 대지 전도율 [S/m]

역시, 식 (5-52)는 접지점의 가장 근방을 제외하여 성립하는 식이 된다. 또한, 통신선의 정전용량은 비정상적으로 작은 것으로 무시하여 취급되는 것을 전제로 하고 있다. 따라서, 미방전심선의 대지전압  $V_x$ 는 다음과 같다.

$$V_x = V_{A_2-G} - V_{A_3-G} = \frac{1}{2}E - \frac{x}{l}E - \frac{1}{2\pi\sigma x} \cdot \frac{E}{2R_0 + Zl} \quad (5-53)$$

$V_x$ 가 극대로 되는  $x$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dx} &= -\frac{E}{l} + \frac{1}{2\pi\sigma} \cdot \frac{E}{2R_0 + Zl} \cdot \frac{1}{x^2} = 0 \\ x_{\max} &= \sqrt{\frac{l}{2\pi\sigma(2R_0 + Zl)}} \end{aligned} \quad (5-54)$$

다만,  $x \geq 0$  이다.  $d^2V_x/dx^2$ 는  $x \geq 0$ 의 범위에서는 음으로 되기 때문에 식 (5-54)도 생각되어지는  $x$  지점의  $V_x$ 는 극대값이 된다. 이것에 의하여 최대값  $V_{x,\max}$ 는

$$V_{x,\max} = \frac{E}{2} - E \frac{2x}{l} = \frac{E}{2} \left( 1 - \frac{4x}{l} \right) \quad (5-55)$$

로 표시된다.

심선전위와 대지전압의 관계를 알아보기 위하여 각 정수는 다음과 같이 설정하여 계산하면 (그림 5-1)로 표시된다.



$$E := 1000 \text{ [V]} \quad l_1 := 1 \text{ [km]} \quad R_0 := 10 \text{ [ohm]} \quad Z := 50 \text{ [ohm]} \quad \sigma := 0.01 \text{ [S/m]}$$

$$x := 0, 0.1 \dots 50$$

$$VA1\_G(x) := \frac{(R_0 + Z \cdot x \cdot 10^{-3})}{(2 \cdot R_0 + Z \cdot l_1)} \cdot E - \frac{x \cdot 10^{-3}}{l_1} \cdot E$$

$$x_{\max} := \sqrt{\frac{l_1}{(2 \cdot R_0 + Z \cdot l_1)}} \cdot \left( \frac{10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \sigma} \right)$$

$$x_{\max} \cdot 10^3 = 15.079$$

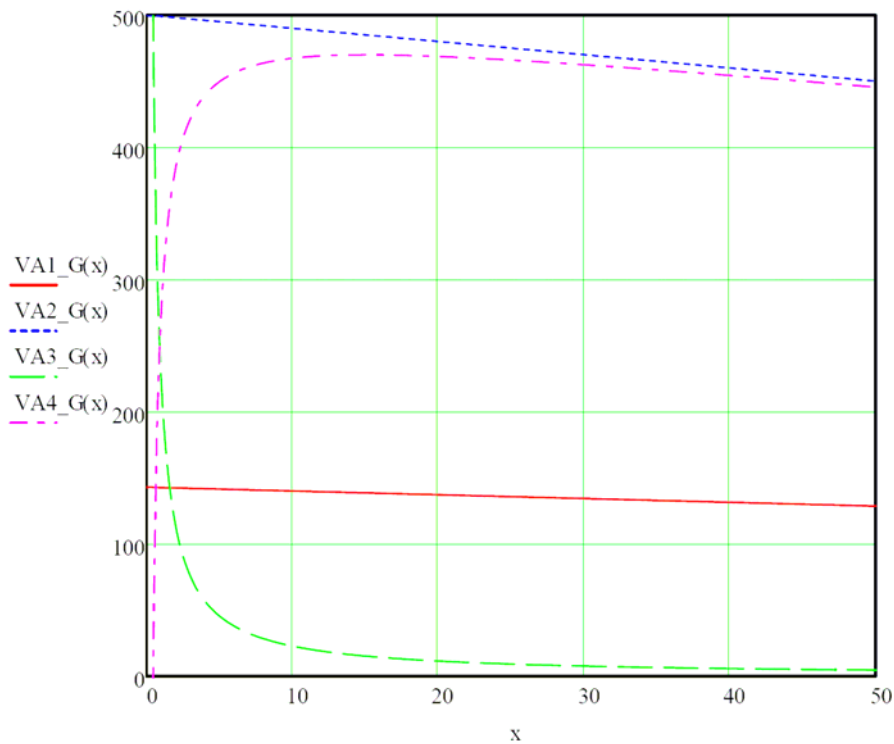
$$VA2\_G(x) := \frac{1}{2} \cdot E - \frac{x \cdot 10^{-3}}{l_1} \cdot E$$

$$VA4\_G_{\max} := \frac{E}{2} \cdot \left( 1 - 4 \cdot \frac{x_{\max}}{l_1} \right)$$

$$VA4\_G_{\max} = 469.843$$

$$VA3\_G(x) := \frac{1}{(2 \cdot R_0 + Z \cdot l_1)} \cdot E \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot x} \right)$$

$$VA4\_G(x) := VA2\_G(x) - VA3\_G(x)$$



(그림 5-8) 전위와 대지전압의 계산 예

미방전심선의 대지전압은 대지표면전위의 영향을 받기 때문에 극대값은 다음과 같다.  $x = 15.1 \text{ [m]}$ 의 지점에서  $V_{x,\max} = 469.8 \text{ [V]}$ 이다. (그림 5-1)로부터 다음의 것이 명확해진다.

- (1) 대지전위상승이 영향을 주는 범위는 접지점의 아주 근방에 한정된다.
- (2) 미방전심선의 대지전압의 최대값은 미방전심선의 전위의 최대값보다 약간 작아질 뿐이다.
- (3) 접지점의 아주 근방을 제거하면 미방전심선의 대지전압과 전위과는 동일하다

고 간주할 수 있다.

따라서, 일반적으로는 통신선 등의 위치에 두어도

$$\text{심선의 대지전압} = \text{심선의 전위} \quad (5-56)$$

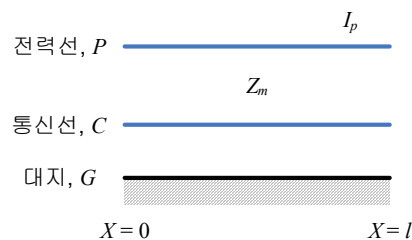
라고 고려해서 차이가 크지 않기 때문에 그 결과는 안전측으로 작용한다.

나. 통신선의 대지정전용량을 고려한 대지전압분포

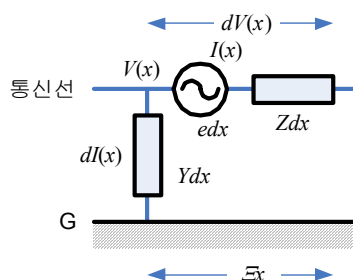
통신선의 대지정전용량을 고려한 대지전압분포를 구하기 위하여 그 말단에 있는 대지전압과 유도종전압의 관계를 구할 수 있다. 검토순서로는 대지정전용량을 고려한 대지전압분포를 구할 수 있는 기본이 되는 분포정수회로의 기본해를 (a)로 표시한다. 그래서 그의 해를 기초로, (b)에서는 가입자회선, (c)에서는 중계시외회선의 설비형태에 적용하여 전압분포를 구할 수 있다. 또한, (d)에서는 통신 케이블의 sheath를 고려한 경우의 sheath 및 심선의 대지전압분포를 구할 수 있다.

#### 1)기본식

(그림 5-2)과 같이 전력선과 평행한 통신선이 한결 같은 유도를 받는 경우의 통신선에 있어서 대지전압분포는 통신선의 분포정수회로에 대한 미분방정식을 푸는 것에 의하여 구할 수 있다.



(그림 5-9) 선로 배치



(그림 5-10) 통신선의 분포정수회로

(그림 5-3)에 표시한 통신선에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{d}{dx}V(x) = ZI(x) - e \quad (5-57)$$

$$-\frac{d}{dx}I(x) = YV(x) \quad (5-58)$$

$V(x)$  :  $x$  지점의 전압 [V]

$I(x)$  :  $x$  지점의 전류 [A]

$Z = R + j\omega L$  : 단위 길이의 선로 임피던스 [/km]

$Y = G + j\omega C$  : 단위 길이의 선로 어드미턴스 [S/km]

$e = Z_m I_p$  : 단위 길이의 선로 유도기전력 [V/km]

일반해를 쌍곡선 함수로 표현하면, 다음과 같은 식이 된다.

$$V(x) = A \cosh(\gamma x) + B \sinh(\gamma x) \quad (5-59)$$

$$I(x) = -\frac{B \cosh(\gamma x) + A \sinh(\gamma x)}{Z_0} + \frac{e}{Z} \quad (5-60)$$

$Z_0 = \sqrt{Z/Y}$  : 특성 임피던스

$\gamma = \sqrt{ZY}$  : 전파상수

$A, B$  : 경계조건으로부터 구해지는 적분상수

식 (5-59)와 식 (5-60)을 기본식으로 통신설비의 형태에 따라 계산한다. 그래서 통신설비의 형태에 대응하여 각각의 모델에 대하여 검토한다.

## 2) 가입자 회선

가입자 측은 개방하고, 전화국 측은 relay를 삽입하거나 또는 직접 접지시킨다. 그러나, 통신선로의 대지정전용량이 대지전압분포에 미치는 영향을 검토하는 경우 relay의 저항  $R_{ON}$ ,  $R_{OFF}$ , 교환기회로의 내부저항  $R_1$ ,  $R_2$ , 국측 접지저항  $R_0$ 는 계산 결과에 대부분 영향을 고려할 수 없기 때문에 무시할 수 있다. 따라서, 여기에서는 전화국측은 대지에 직접 접지되어 있는 것으로 해석한다. 이러한 가정을 전제로 하면 통신선의 대지전압분포는 식 (5-59)와 식 (5-60)의 미분방정식의 일반해에 있어서 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} V(0) = 0 & \text{at } x = 0 \\ I(l) = 0 & \text{at } x = l \end{cases} \quad (5-61)$$

따라서, 적분정수 A, B는 다음과 같다.

$$A = 0 \quad (5-62)$$

$$I(x=l) = -\frac{B \cosh(\gamma l)}{Z_0} + \frac{e}{Z} = 0$$

$$B = \frac{Z_0}{Z} \frac{1}{\cosh(\gamma l)} e = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{\cosh(\gamma l)} e \quad (5-63)$$

대지전압분포  $V(x)$ 는 다음과 같다.

$$V(x) = \frac{e \sinh(\gamma x)}{\gamma \cosh(\gamma l)} \quad (5-64)$$

식 (5-64)에 의하여, 대지전압분포를 구할 수 있지만, 다음의 조건을 고려하면 매우 간단한 근사식을 얻는다. 즉, 일반적으로 통신선의 대지정전용량은 작은 값이기 때문에 전파상수 도 작은 값이 되어 쌍곡선함수를 멍급수 전개하여 제1항을 보면 다음과 같다.

$$\cosh(\gamma l) \approx 1 \quad \sinh(\gamma x) \approx \gamma x$$

따라서, 식 (5-64)의 근사식은 다음과 같다.

$$V(x) \approx ex \quad (5-65)$$

정전용량을 무시할 수 있을 때, 대지전압분포는 직선이 된다. 가입자 회선의 대표적인 값은 다음과 같다.

$$\gamma = 89, 139 \text{ [1/km]}, \quad L = 2 \text{ [mH/km]}, \quad C = 50 \text{ [nF/km]}$$

### 3) 중계시외회선

양단을 개방한다.

#### ㄱ) 전력선과 통신선의 길이가 동일한 경우

경계조건:

$$\begin{cases} I(0) = 0 & \text{at } x = 0 \\ I(l) = 0 & \text{at } x = l \end{cases} \quad (5-66)$$

이 경우,

$$I(x=0) = -\frac{B}{Z_0} + \frac{e}{Z} = 0$$

$$B = \frac{Z_0}{Z} e \quad (5-67)$$

$$I(x) = -\frac{1}{Z_0} \left[ \frac{Z_0}{Z} e \cosh(\gamma x) + A \sinh(\gamma x) \right] + \frac{e}{Z} = 0$$

$$A = \frac{Z_0}{Z} e \frac{1 - \cosh(\gamma l)}{\sinh(\gamma l)} \quad (5-68)$$

통신선의 전류분포:

$$I(x) = \frac{1}{Z} \left[ 1 - \frac{\cosh \gamma(l/2 - x)}{\cosh \gamma(l/2)} \right] e \quad (5-69)$$

전압분포:

$$V(x) = -\frac{e}{\gamma} \frac{\sinh \gamma(l/2 - x)}{\cosh \gamma(l/2)} \quad (5-70)$$

전파상수 가 작은 경우,

$$\cosh \gamma(l/2) \approx 1 \quad \sinh \gamma(l/2 - x) \approx \gamma(l/2 - x)$$

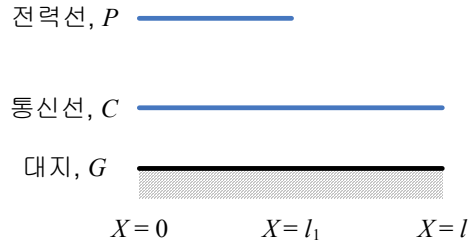
따라서,

$$V(x) \approx e \left( x - \frac{l}{2} \right) \quad (5-71)$$

정전용량을 무시할 수 있을 때, 대지전압분포는 직선이 된다. 대표적인 값은 다음과 같다.

$$\gamma = 52.5 \text{ [1/km]}, \quad L = 2 \text{ [mH/km]}, \quad C = 50 \text{ [nF/km]}$$

ㄴ) 전력선과 통신선의 길이가 같지 않은 경우



(그림 5-11) 전력선과 통신선의 길이가 동일하지 않은 경우

i)  $x=0 \sim l_1$

$$V_1(x) = A_1 \cosh(\gamma x) + B_1 \sinh(\gamma x) \quad (5-72)$$

$$I_1(x) = -\frac{1}{Z_0} [B_1 \cosh(\gamma x) + A_1 \sinh(\gamma x)] + \frac{e}{Z} \quad (5-73)$$

ii)  $x=l_1 \sim l_2$

$$V_2(x) = A_2 \cosh(\gamma x) + B_2 \sinh(\gamma x) \quad (5-74)$$

$$I_2(x) = -\frac{1}{Z_0} [B_2 \cosh(\gamma x) + A_2 \sinh(\gamma x)] \quad (5-75)$$

경계조건:

$$\begin{cases} I_1(0) = 0 & \text{at } x=0 \\ I_2(l) = 0 & \text{at } x=l \\ I_1(x=l_1) = I_2(x=l_1) & \text{at } x=l_1 \\ V_1(x=l_1) = V_2(x=l_1) & \text{at } x=l_1 \end{cases} \quad (5-76)$$

i)  $x=0 \sim l_1$

$$V_1(x) = \frac{Z_0}{Z} e \left[ \left\{ \frac{\cosh(\gamma l)}{\sinh(\gamma l)} (\cosh(\gamma l_1) - 1) - \sinh(\gamma l_1) \right\} \cosh(\gamma x) + \sinh(\gamma x) \right] \quad (5-77)$$

$$I_1(x) = -\frac{1}{Z} e \left[ \cosh(\gamma x) + \left\{ \frac{\cosh(\gamma l)}{\sinh(\gamma l)} (\cosh(\gamma l_1) - 1) - \sinh(\gamma l_1) \right\} \sinh(\gamma x) - 1 \right] \quad (5-78)$$

ii)  $x=l_1 \sim l_2$

$$V_2(x) = \frac{Z_0}{Z} e^{\left\{ \frac{\cosh(\gamma l)}{\sinh(\gamma l)} \cosh(\gamma x) - \sinh(\gamma x) \right\}} \{ \cosh(\gamma l_1) - 1 \} \quad (5-79)$$

$$I_2(x) = \frac{Z_0}{Z} e^{\left\{ \cosh(\gamma x) - \frac{\cosh(\gamma l)}{\sinh(\gamma l)} \sinh(\gamma x) \right\}} \{ \cosh(\gamma l_1) - 1 \} \quad (5-80)$$

## 2. 환경 차폐 효과

복수의 지점에서 접지상태에 있는 금속구조물이랑 연속적으로 접지상태로 되어 있는 매설관 등과 같은 시설은 전자유도(電磁誘導)에 대하여 차폐작용을 갖고 있다. 이러한 형태로 본래의 목적이 전자유도와 직접 관계없는 시설에 의한 차폐효과는 본 장에서는 환경차폐효과라고 호칭한다.

이러한 환경차폐효과를 가져오는 시설은 다수 존재하고 있어서, 많은 통신선은 차폐환경 중에 있다고 하는 것이 될 수 있다. 따라서, 앞으로 보다 합리적인 대책을 실시하는 중에 주변의 금속시설의 차폐효과를 정량적으로 평가하여 예측 계산에 기대되어 온 것은 비상적으로 큰 의의를 갖는 것이 된다.

환경차폐효과가 기대되는 다음과 같은 시설에 대하여 검토를 상세히 할 필요가 있다.

- (1) 철도 레일
- (2) 기유도원이 되는 송전선 이외의 루-도의 가공지선 및 전력 케이블의 금속 sheath
- (3) 매설관 (주로 수도관)
- (4) 고속도로의 금속성방음벽

또한 이들의 환경차폐체가 복수로 존재할 때의 전체 차폐계수의 근사값을 구하기 위한 간이 계산법도 있다.

### 가. 분포 접지 도체의 차폐계수 계산 방법

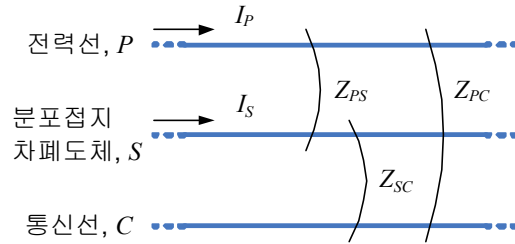
환경차폐체는 일반적으로 분포접지상태라고 간주할 수 있는 경우가 많다. 따라서, 환경차폐효과를 정량적으로 검토할 목적에는 분포접지도체의 전류분포가 구해지고, 그의 결과를 이전에 차폐계수를 산출할 필요가 있다. 그래서 본 절에서는 각종의 도체배치에 대하여 분포접지도체에 의한 차폐계수를 구할 목적의 계산방법을 이하에 상술한다.

#### 나. 단일 도체의 차폐효과

분포접지상태에 있는 차폐도체가 하나뿐일 때의 차폐계수를 구할 수 있다. 도체 배치로서는 차폐도체의 길이와 유도구간(통신선이 전력선으로부터 유도를 받고 있는 구간)의 길이가 각각 무한길이라고 간주되는 경우와 유한길이의 경우에 대하여 검토한다.

##### 1) 차폐도체와 유도구간이 모두 무한길이인 경우

(그림 5-5)의 경우에 전력선 P, 통신선 C, 분포접지차폐도체 S가 무한길이라고 간주하여 평행한 경우, 그림의 모양으로 각 도체간의 대지귀로 상호임피던스를 정의하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.



(그림 5-12) 차폐도체, 유도구간과도 무한길이의 경우

$$\text{차폐도체 전류, } I_S = \frac{Z_{PS}}{Z_S} I_P \quad (5-81)$$

$$\text{P로부터 C로의 유도전압, } V_{PC} = -Z_{PC} I_P \quad (5-82)$$

$$\text{S로부터 C로의 유도전압, } V_{SC} = -Z_{SC} I_S = \frac{Z_{PS} Z_{SC}}{Z_S} I_P \quad (5-83)$$

$Z_S$ 는 S의 대지귀로 자기임피던스,  $I_S = \frac{Z_{PS}}{Z_S} I_P$ 는 전력선을 흐르는 전류를 표시하고 있다. S에 의한 차폐계수  $\lambda_0$ 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

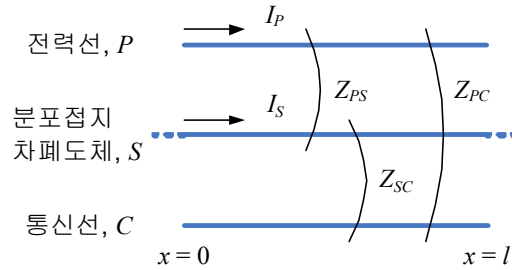
$$\lambda_0 = \frac{V_{PC} + V_{SC}}{V_{PC}} = 1 + \frac{V_{SC}}{V_{PC}} = 1 - \frac{Z_{PS} Z_{SC}}{Z_S Z_{PC}} \quad (5-84)$$



이 식에 의한 차폐계수는 P, S, C가 무한길이라고 간주되는 경우에는 S의 대지에 대한 대지 어드미턴스  $Y_S$ 에는 존재하지 않고, S의 자기 및 P, S, C의 상호간의 대지 귀로 임피던스만으로 결정된다.

## 2) 차폐도체 무한길이, 유도구간 유한길이의 경우

(그림 5-6)과 같이 전력선 P와 통신선 C의 길이  $l$ 에 대하여 평행이고 차폐도체 S가 무한길이라고 볼 수 있는 경우는 S의 대지 어드미턴스  $Y_S$ 를 고려할 필요가 있다. 차폐도체의 전류  $I_s$ , 전압(전위)  $V_s$ 의 분포를 표시하는 전송방정식은 다음과 같다.



(그림 5-13) 차폐도체 무한길이, 유도구간 유한길이의 경우

$$\begin{cases} -\frac{d}{dx}V_s = Z_s I_s - \varepsilon \\ -\frac{d}{dx}I_s = Y_s V_s \end{cases} \quad (5-85)$$

$\varepsilon = -Z_{PS}I_P$  이고  $\varepsilon$ 는 차폐도체가 전력선으로부터 받고 있는 단위 km당의 유도기 전력을 나타낸다. 식 (5-54)의 일반해는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{cases} V_s = Ae^{+\gamma x} + Be^{-\gamma x} \\ I_s = -\frac{1}{Z_0}(Ae^{+\gamma x} - Be^{-\gamma x}) + \frac{\varepsilon}{Z_s} \end{cases} \quad (5-86)$$

A와 B는 적분정수이고, 경계조건으로부터 구할 수 있다. 또한  $\gamma$ 와  $Z_0$ 는 다음과 같다.

$$\gamma = \sqrt{Z_s Y_s} : \text{전파정수}$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_s / Y_s} : \text{특성 임피던스}$$

경계조건은 다음 2가지가 성립한다.

$$\begin{cases} V_s(0) = -Z_0 I_s(0) & @ x = 0 \\ V_s(l) = Z_0 I_s(l) & @ x = l \end{cases} \quad (5-87)$$

따라서, 적분정수 A와 B는 다음 식으로 된다.

$$\begin{cases} A = \frac{Z_0}{2Z_s} \varepsilon e^{+\gamma l} \\ B = -\frac{Z_0}{2Z_s} \varepsilon \end{cases} \quad (5-88)$$

이 결과를 식 (5-86)에 대입하여 차폐도체의 전압과 전류의 분포를 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} V_s = \frac{Z_0}{2Z_s} \varepsilon \left\{ e^{-\gamma(l-x)} - e^{-\gamma x} \right\} \\ I_s = -\frac{1}{2Z_s} \varepsilon \left\{ e^{-\gamma(l-x)} + e^{-\gamma x} \right\} + \frac{\varepsilon}{Z_s} \end{cases} \quad (5-89)$$

그래서, 유도구간에 있는 차폐도체의 평균전류  $\bar{I}_s$ 를 구하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\bar{I}_s = \frac{1}{l} \int_0^l I_s dx = \frac{\varepsilon}{Z_s} \left\{ 1 - \frac{1 - e^{-\gamma l}}{\gamma l} \right\} \quad (5-90)$$

이것에 의하여 차폐계수  $\lambda_1$ 은 다음 식에 의하여 산출할 수 있다.

$$\lambda_1 = 1 + \frac{V_{SC}}{V_{PC}} = 1 + \frac{-Z_{SC} I_s}{-Z_{PC} I_P} = 1 + \frac{Z_{SC} \varepsilon}{Z_{PC} Z_s I_P} \left\{ 1 - \frac{1 - e^{-\gamma l}}{\gamma l} \right\} = 1 - \frac{Z_{SC} Z_{PS}}{Z_{PC} Z_s} \left\{ 1 - \frac{1 - e^{-\gamma l}}{\gamma l} \right\} \quad (5-91)$$

유도구간도 무한길이로 간주되는 경우의 차폐계수  $\lambda_0$ 의 결과 식 (5-84)를 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_1 = \lambda_0 + (1 - \lambda_0) \frac{1 - e^{-\gamma l}}{\gamma l} \quad (5-92)$$

3) 차폐도체와 유도구간이 유한길이의 경우

(그림 5-7)과 같이 차폐도체, 유도구간이 함께 유한길이며 평행인 경우, 식 (5-86)에 대응하는 경계조건은 다음 식으로 생각될 수 있다.

$$\begin{cases} I_s(0) = 0 & @ x = 0 \\ I_s(l) = 0 & @ x = l \end{cases} \quad (5-93)$$

따라서, 적분정수 A와 B는 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{cases} A = \frac{1 - e^{-\gamma l}}{e^{+\gamma l} - e^{-\gamma l}} \frac{Z_0}{Z_s} \varepsilon \\ B = \frac{1 - e^{+\gamma l}}{e^{+\gamma l} - e^{-\gamma l}} \frac{Z_0}{Z_s} \varepsilon \end{cases} \quad (5-94)$$

이 결과를 식 (5-55)에 대입하여 차폐도체의 전압과 전류의 분포를 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} V_s = \left( \frac{1 - e^{-\gamma l}}{e^{+\gamma l} - e^{-\gamma l}} e^{+\gamma l} + \frac{1 - e^{+\gamma l}}{e^{+\gamma l} - e^{-\gamma l}} e^{-\gamma l} \right) \frac{Z_0}{Z_s} \varepsilon \\ I_s = - \left( \frac{1 - e^{-\gamma l}}{e^{+\gamma l} - e^{-\gamma l}} e^{+\gamma l} - \frac{1 - e^{+\gamma l}}{e^{+\gamma l} - e^{-\gamma l}} e^{-\gamma l} \right) \frac{\varepsilon}{Z_s} + \frac{\varepsilon}{Z_s} \end{cases} \quad (5-95)$$

그래서, 차폐도체의 평균전류  $\bar{I}_s$ 를 구하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\bar{I}_s = \frac{1}{l} \int_0^l I_s dx = \frac{\varepsilon}{Z_s} \left\{ 1 - \left( \frac{2}{\gamma l} \right) \left( \frac{e^{+\gamma l} + e^{-\gamma l} - 2}{e^{+\gamma l} - e^{-\gamma l}} \right) \right\} \quad (5-96)$$

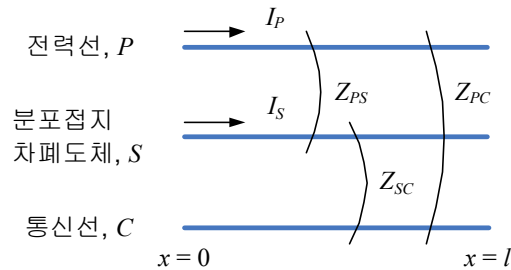
이것보다 차폐계수  $\lambda_2$  는  $\varepsilon = -Z_{PS}I_P$  이기 때문에, 다음 식으로부터 산출할 수 있다.

$$\lambda_2 = 1 + \frac{Z_{SC}I_S}{Z_{PC}I_P} = 1 - \frac{Z_{SC}I_S}{Z_{PC}I_P} \left\{ 1 - \left( \frac{2}{\gamma l} \right) \left( \frac{e^{+\gamma l} + e^{-\gamma l} - 2}{e^{+\gamma l} - e^{-\gamma l}} \right) \right\} \quad (5-97)$$

차폐도체, 유도구간이 함께 무한길이로 보여지는 경우의 차폐계수  $\lambda_0$  의 결과식 (5-84)를 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_2 = \lambda_0 + (1 - \lambda_0) \left( \frac{2}{\gamma l} \right) \left( \frac{e^{+\gamma l} + e^{-\gamma l} - 2}{e^{+\gamma l} - e^{-\gamma l}} \right) \quad (5-98)$$

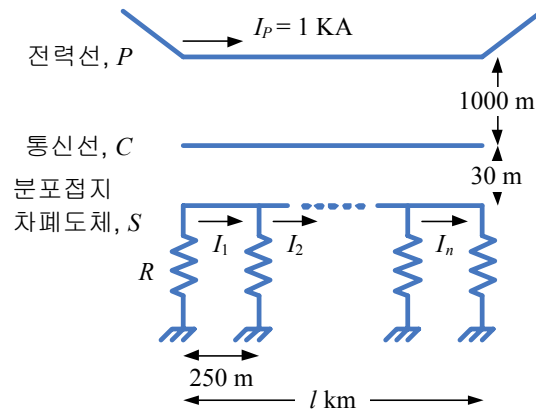
이상과 같이 단일 차폐도체에 관하여 차폐계수를 산출할 수 있다.



(그림 5-14) 차폐도체, 유도구간이 동일한 유한길이의 경우

#### 4) 등간격 접지도체의 취급

차폐도체에 따르면 분포접지로는 없고 거의 등간격으로 다점접지로 되어 있는 것이 있다. 다점접지는 (그림 5-8)과 같이 집중정수회로로 전류분포를 구하면 변수가 많아져서, 상당히 복잡한 계산을 필요로 한다. 일반적으로 이러한 등간격 다점 접지회로는 등가적으로 분포접지로 간주하여 분포정수회로로 하여 취급하는 것이 많다.



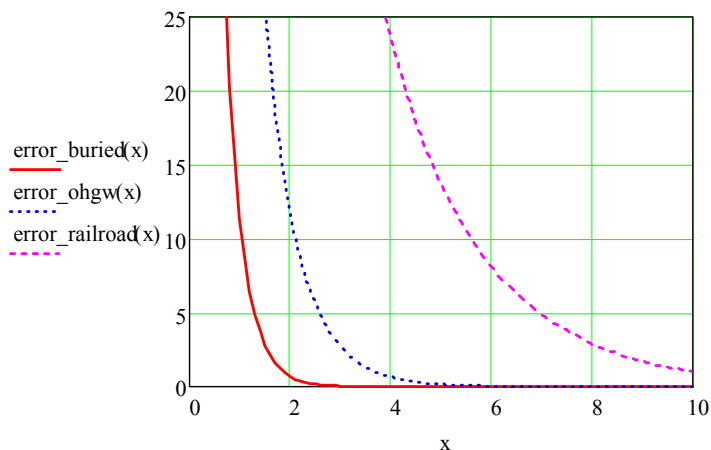
(그림 5-15) 등간격 다점 접지 도체의 계산 모델

가공지선전류는 본래 계단 모양으로 되는 곳, 분포정수회로로 해석과 거의 그의 계단 모양의 최소값을 결합한 결과를 얻을 수 있다. 따라서, 가공지선의 평균전력도 본래의 결과보다도 약간 작은 값이 된다. 그러므로, 차폐계수로 평가하면 약간 큰 값이 된다.

이들의 결과로부터 등간격 다점 접지회로는 분포접지회로로 간주하여도 그 정도 큰 차이는 없고 그 차이는 유도장애의 면으로 보면 안전 측면에 작용하고 있다. 따라서, 분포정수회로로 하여 해석하는 것은 실용상 유효하다고 할 수 있다.

##### 5) 무한길이라고 볼 수 있는 한계

전술의 (a), (b)에서는 차폐도체가 무한길이라고 보여지는 예를 다루었다. 이것은 차폐도체가 실제에 무한히 길게 연속되어 있지 않은데도 유도구간의 말단으로부터 어느 정도의 길이가 있다면 좋다. 그래서 무한길이라고 간주하는 것에 필요한 길이를 이하에 검토한다.



$\gamma_1 := 1.42 + i \cdot 1.05$	nep rad/km	Buried pipe
$\gamma_2 := 0.718 + i \cdot 0.213$	nep rad/km	Overhead ground wire
$\gamma_3 := 0.264 + i \cdot 0.216$	nep rad/km	Railroad

(그림 5-16) 특성 임피던스에 대한 오차

검토 모델에서 A점으로부터 우측을 본 임피던스는 분포점지도체인 차폐도체의 특성임피던스를  $Z_0$ , 전파상수를 라고 하면, 무한길이의 경우  $Z_0$ , 유한길이의 경우  $Z_0 \coth \gamma l$ 로 된다. 그래서 그 차이를 검토하기 위하여

$$e = \left| \frac{Z_0 \coth \gamma l - Z_0}{Z_0} \right| \times 100(\%) = |\coth \gamma l - 1| \times 100(\%)$$

을 계산하면 (그림 5-9)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 그림에서

- 가공지선의 경우 : 3 km
- 주철관의 경우 : 2 km
- 철도 레일의 경우 : 8 km

로 거의 무한길이라고 볼 수 있다. 따라서, 상당히 많은 환경 차폐체가 실제에는 무한길이라고 볼 수 있는 것이 명백하다.

#### 다. 매설관의 차폐효과

노면 밑에는 수도관이나 가스관 등의 금속관이 매설되어 있다. 이러한 매설관이 전기적으로 접속되어 대지에 대하여 연속적인 접지상태가 되면 근방의 통신선에 대한 차폐작용을 기대할 수 있다. 조사에 따르면, 수도관은 비교적 상기 조건을 만족하는 경우가 많다고 생각되어 지기 때문에 이것을 대상으로 차폐효과를 검토한다.

다음과 같이 수도용 배수관 시설의 상태를 가정한다.

배수관의 종류

- 주철관 (약 70%) : 이후 더욱 증가
- 강관 (1% 이하) : 강도를 요하는 곳에 사용
- 석면 시멘트관 (약 30%) : 주철관으로 교환중

배수관의 크기

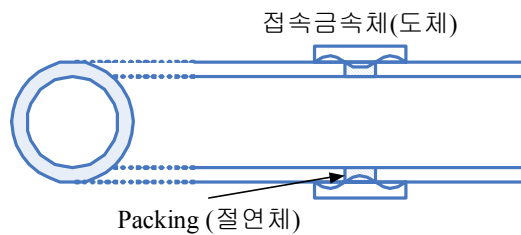
- 외경 : 75 ~ 800 mm (100 mm 이상이 80%를 점유)
- 길이 : 4 ~ 5 m (외경에 따라 다름)

#### 설치방법

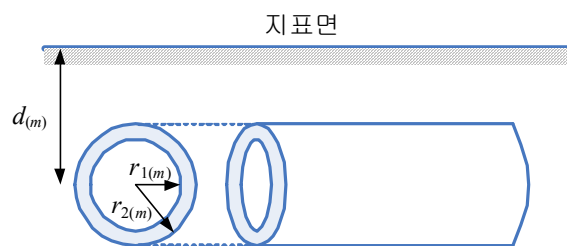
- 매설 깊이 : 1.2 m를 표준으로 한다.
- 관로 구성 : 환상식
- 시설 밀도 : 공공도로의 노면 하에는 100% 시설된다.

#### 관의 접속방법

- (그림 5-10)과 같이 전기적으로 도통상태에 있다.
- 역시 전해부식대책 혹은 토양에 의한 부식대책을 위하여 접속부를 절연하기도 하고 절연 slip으로 덮는 경우가 있다.



(그림 5-17) 관의 접속 방법



(그림 5-18) 매설관

#### 1) 관로정수의 계산방법

(그림 5-11)과 같은 매설관의 자기 임피던스, 대지 어드미턴스, 전파상수는 다음과 같다.

$$Z(\Gamma) = Z_i + \frac{j\omega\mu_e}{\pi y r^2} \left[ \Gamma K_1(\Gamma y) - (r^2 - \Gamma^2) K_1(y\sqrt{r^2 + \Gamma^2}) \right] [\Omega/m] \quad (5-99)$$

$$Y(\Gamma) = \frac{1}{\frac{1}{Y_i} + \frac{1}{\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)} K_0(\Gamma y)} [S/m] \quad (5-100)$$

- $Z_i$  : 관로 내부 임피던스 [ $\Omega/m$ ]
- $Y_i$  : 관로와 대지의 접촉 어드미턴스 [ $S/m$ ]
- $y = \sqrt{2r_2d}$  : 관로의 내부 임피던스 [ $m$ ]
- $r_2$  : 매설관 외부 반경 [ $m$ ]
- $d$  : 매설 깊이 [ $m$ ]
- $\sigma$  : 대지 도전율 [ $S/m$ ]
- $\mu_e$  : 대지 투자율 [ $H/m$ ]
- $\varepsilon$  : 대지 유전율 [ $m$ ]
- $r = \sqrt{j\omega\mu_e(\sigma + j\omega\varepsilon)}$
- $\Gamma = \sqrt{ZY}$  : 전파상수
- $K_0$  : 제2종 0차 변형 베셀 함수
- $K_1$  : 제2종 1차 변형 베셀 함수

식 (5-99) 및 식 (5-100)의  $Z$ 와  $Y$ 는  $\Gamma$ 의 함수이기 때문에, 바로 구할 수는 없다. 그래서 먼저 적당하게  $\Gamma$ 를 가정하여 식 (5-99) 및 식 (5-100)으로부터  $Z$ 와  $Y$ 를 구한다. 다음에

$$\Gamma = \sqrt{ZY} \quad (5-101)$$

에 의하여  $\Gamma$ 를 구하고, 그것을 다시 식 (5-99) 및 식 (5-100)에 대입한다. 얻어진  $Z$ 와  $Y$ 를 이용하여 식 (5-101)로부터 다시  $\Gamma$ 를 구한다. 이런 과정을 반복하여 얻어진 결과값을 매설관 정수라고 한다.

$\Gamma y$ 와  $y\sqrt{r^2 + \Gamma^2}$ 가 0.01보다 작으면, 다음의 근사식을 사용할 수 있다.



$$Z(\Gamma) = Z_i + \frac{j\omega\mu_\varepsilon}{2\pi} \log \left[ \frac{1.85}{r_2 \sqrt{r^2 + \Gamma^2}} \right] \quad (5-102)$$

$$Y(\Gamma) = \frac{1}{\frac{1}{Y_i} + \frac{1}{\pi(r + j\omega\varepsilon)} \log \left( \frac{1.12}{\Gamma r_2} \right)} \quad (5-103)$$

$Z_i$ 는 매설관의 내부 임피던스로, 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$Z_i = -\frac{A^2}{2\pi k D x_2} \{K_1(x_1)I_0(x_2) + I_1(x_1)K_0(x_2)\} \quad (5-104)$$

- $k$ : 매설관의 도전율 [S/m]
- $\mu$ : 매설관의 투자율 [H/m]
- $D = I_1(x_1)K_1(x_2) - I_1(x_2)K_1(x_1)$
- $A = \sqrt{j\omega\mu k}$
- $x_1 = Ar_1$
- $x_2 = Ar_2$
- $r_1$ : 관로내 반경 [m]
- $r_2$ : 관로외 반경 [m]
- $I_0$ : 제1종 0차 변형 베셀 함수
- $I_1$ : 제1종 1차 변형 베셀 함수

매설관의 외반경  $r_2$ 와 표피효과의 깊이  $\delta$ 의 관계가

$$\delta \ll r_2 \text{ (또는 } \delta < \frac{1}{5}r_2) \quad (5-105)$$

일 때, 식 (5-108)과 식 (5-109)와 같은 경우 근사식을 사용할 수 있다.

$$Z_i = R_i + j\omega L_i \quad (5-106)$$

$$R_i = \omega L_i = \frac{1}{2\pi r_2 \delta k} \quad (5-107)$$

■  $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu k f}}$ : 표피효과의 깊이 [m]

■  $f$ : 주파수 [Hz]

$Y_i$ 는 매설관과 대지의 접촉 어드미턴스이고 매설관의 도포층의 유무에 따라 달라진다.

매설관이 여러 개가 존재하는 경우의 상호 임피던스와 상호 어드미턴스는 각각의 매설관 전파상수를  $\Gamma_1$ 와  $\Gamma_2$ 라고 하면 다음의  $\Gamma_{12}$ 를 사용한다.

$$\Gamma_{12} = \sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2} \quad (5-108)$$

$$y = \sqrt{a_{12} \sqrt{4d^2 + a_{12}^2}} \quad (5-109)$$

■  $a_{12}$ : 매설관의 이격 거리

■  $d$ : 매설 깊이

식 (5-50)과 식 (5-51)으로 계산할 수 있다. (이 경우  $Z_i$ 와  $Y_i$ 를 제외) 매설관 격리가 큰 경우에는 식 (5-53)과 식 (5-54)의 근사식을 사용할 수 없다.

## 제4절 다중 도체 선로

### 1. 이중 도체 선로

$z$ -축과 평행인 축을 갖는  $m+1$ 개의 평행인 원형 도체로 구성된 다중 선로 시스템을 생각한다.  $i$ 번째 도체에 흐르는 전류  $I_i$ 를 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$-I_k(z) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{m+1} I_i(z) \quad (4-1)$$

$k$ 번째 도체에서 다른 도체들의 모든 전류들이 거꾸로 흐를 때, 다중 선로를  $m$ 개의 서로 다른 두 개의 도체 선로의 중첩으로 생각할 수 있다. 각각은  $k$ 번째 도체와 나머지  $m$ 개 도체들 중에서 하나와 형성된다. 대부분의 경우 다중 선로 시스템

템은  $m$  개의 금속 도체와 지구로 구성된다. 지구를 모든 도체에 대한 공통 귀환으로 생각하는 것이 편리하다.

가.  $m+1$  개의 원통형 도체로 구성된 다중 도체 선로

균일 전송선로 모델(uniform transmission line model)은 다음과 같은 가정을 한다.

- a) 선로는 균일하다.
- b) 존재하는 유일한 모드는 quasi-TEM 모드이다.
- c) 선로들을 둘러싸고 있는 매질과 도체의 재료는 선형(linear)이며 등방성(isotropic)이다.
- d) 얇은 와이어 가정(thin wire approximation)이 유효하다.

총 전자계( $\underline{E}', \underline{H}'$ )는 다음과 같다.

$$\underline{E}' = \underline{E}^e + \underline{E}^s \quad (4-2)$$

$$\underline{H}' = \underline{H}^e + \underline{H}^s \quad (4-3)$$

$\underline{E}^e, \underline{H}^e$  : 외부 전자계 - 다중 선로가 없을 때 전자계

$\underline{E}^s, \underline{H}^s$  : 2차 전자계 - 소스에 영향을 주지 않는 전자계

$$\underline{E}^s = \sum_{k=1}^m \underline{E}_k^s \quad (4-4)$$

$$\underline{H}^s = \sum_{k=1}^m \underline{H}_k^s \quad (4-5)$$

길이 방향 결합 (longitudinal coupling)

$$\nabla \times \underline{E} = -j\omega\mu\underline{H}$$

$L_i$  로 둘러싸인  $S_i$  에 대하여 위 식을 적용한다.

$$\int_{S_i} \nabla \times \underline{E}' \cdot d\underline{S}_i = -j\omega\mu \int_{S_i} \underline{H}' \cdot d\underline{S}_i \quad (4-6)$$

스톡스 정리(Stokes theorem)를 좌변에 적용하면 다음과 같다.

$$\int_{L_i} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} = -j\omega \Phi_i'(z) \Delta z \quad (4-7)$$

$\Phi_i'(z)$  :  $S_i$ 를 통과하는 단위 길이당의 총 자속(magnetic flux)

$$\Phi_i'(z) = \Phi_i^e(z) + \Phi_i^s(z) = \Phi_i^e(z) + \sum_{k=1}^m \Phi_{ik}^s(z) \quad (4-8)$$

$$\Delta z \Phi_i^e(z) = \int_{S_i} \mu \underline{H}^e \cdot d\underline{S} = \Delta z \int_{\tau_i'}^{\tau_i''} \mu H_{ni}^e(\tau, z) d\tau \quad (4-9)$$

$$\tau' = a_0 \quad (4-10)$$

$$\tau_i'' = \frac{X_i}{\cos \theta_i} - a_i \quad (4-11)$$

$H_{ni}^e$ 는 표면  $S_i$ 에 수직인  $\hat{n}_i$  방향의  $\underline{H}^e$  성분임.

$$\Delta z \Phi_{ik}^s(z) = \int_{S_i} \mu \underline{H}_k^s \cdot d\underline{S} \quad (4-12)$$

$$\Phi_{ik}^s(z) = L_{ik} \underline{I}_k(z) \quad (4-13)$$

$$\int_{L_i} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} = \int_{AB} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} + \int_{BC} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} + \int_{CD} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} + \int_{DA} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} \quad (4-14)$$

$\int_{AB} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} + \int_{CD} \underline{E}^t \cdot d\underline{l}$ 는  $i$ 번째 도체와  $z$ 에 있는 선로 AB와  $z + \Delta z$ 에 있는 선로 CD를 따라 있는 기준선 사이의 총 전압이다.

$$\int_{AB} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} = -\underline{U}_i^t(z) \quad (4-15)$$

$$\int_{CD} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} = \underline{U}_i^t(z + \Delta z) \quad (4-16)$$

연속 조건(continuity condition)과 표면 임피던스(surface impedances)의 정의로 부터 두 번째와 네 번째 적분은 다음과 같다.

$$\int_{BC} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} = \underline{E}_z^t(x_i - a_i \cos \theta_i, y_i - a_i \sin \theta_i, z) \Delta z = Z_i^{e/e} \underline{I}_i(z) \Delta z \quad (4-17)$$

$$\int_{DA} \underline{E}^t \cdot d\underline{l} = -\underline{E}_z^t(a_0 \cos \theta_i, a_0 \sin \theta_i, z) \Delta z = -\Delta z Z_0^{e/e} \left[ -\sum_{k=1}^m \underline{L}_k(z) \right] \quad (4-18)$$

따라서, 식 (4-7)은 다음과 같다.

$$\underline{U}_i^t(z + \Delta z) - \underline{U}_i^t(z) = \Delta z \left[ -Z_i^{e/e} \underline{L}_i(z) - \sum_{k=1}^m (Z_0^{e/e} + j\omega L_{ik}) \underline{L}_{ik}(z) \right] - j\omega \Delta z \int_{\tau_i^*}^{\tau_i^*} \mu H_{mi}^e(\tau, z) d\tau \quad (4-19)$$

임피던스  $Z_{ik}$  를 다음과 같이 정의한다.

$$Z_{ik} = \begin{cases} Z_i^{e/e} + Z_0^{e/e} + j\omega L_{ii} & \text{for } i = k \\ Z_0^{e/e} + j\omega L_{ik} & \text{for } i \neq k \end{cases} \quad (4-20), (4-21)$$

$\Delta z \rightarrow 0$  인 경우, 식(4-7)은 다음과 같다.

$$-\frac{d}{dz} \underline{U}_i^t(z) = \sum_{k=1}^m Z_{ik} \underline{L}_k - \underline{f}_i^t(z) \quad (4-22)$$

$$\underline{f}_i^t(z) = -j\omega \int_{\tau_i^*}^{\tau_i^*} \mu H_{mi}^e(\tau, z) d\tau \quad (4-23)$$

$\underline{f}_i^t(z)$  는 단위 길이당 유도 기전력(induced electromotive force per unit length)이다. 이 기전력을 이상적인 길이 방향 전압원으로 생각할 수 있다.  $i$  번째 회로의 외부 전자장과 결합을 나타낸다. 따라서, 이 결합을 길이 방향 결합(longitudinal coupling)이라고 한다.

다른 방법으로 유도하면 다음과 같다. 식 (4-2)  $\underline{E}^t = \underline{E}^e + \underline{E}^s$  로부터 식 (4-15)와 식 (4-16)은 다음과 같다.

$$-\underline{U}_i^t(z) = \int_{AB} \underline{E}^s \cdot d\underline{l} + \int_{AB} \underline{E}^e \cdot d\underline{l} = -\underline{V}_i^s(z) + \int_{AB} \underline{E}^e \cdot d\underline{l} = -\underline{V}_i^s(z) - \underline{U}_i^e(z) \quad (4-24)$$

$$\underline{U}_i^t(z + \Delta z) = \int_{CD} \underline{E}^s \cdot d\underline{l} + \int_{CD} \underline{E}^e \cdot d\underline{l} = \underline{V}_i^s(z + \Delta z) + \int_{CD} \underline{E}^e \cdot d\underline{l} = \underline{V}_i^s(z + \Delta z) - \underline{U}_i^e(z + \Delta z) \quad (4-25)$$

$\underline{V}_i^s$  는 전자기장과 관계 있는 시스템에서 발생한  $i$  번째 도체의 전위이다. 전위  $\underline{V}_i^s$  만이 가정 b)의 결과로써 나타난다.

외부 전자기장만에 대하여,  $\nabla \times \underline{E} = -j\omega \mu \underline{H}$  을  $L_i$  로 둘러싸인  $S_i$  에 적용하면 다음과

같다.

$$\begin{aligned} & \int_{AB} \underline{E}^e \cdot d\underline{l} + \underline{E}_z^e(x_i - a_i \cos \theta_i, y_i - a_i \sin \theta_i, z) \Delta z \\ & + \int_{CD} \underline{E}^e \cdot d\underline{l} - \underline{E}_z^e(a_0 \cos \theta_i, a_0 \sin \theta_i, z) \Delta z = -j\omega \Delta z \Phi_i^e(z) \end{aligned} \quad (4-26)$$

식 (4-24), (4-25), (4-26)을 고려하면, 식 (4-19)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_i^s(z + \Delta z) - V_i^s(z) = \Delta z & \left[ -Z_i^{e/e} \underline{L}_i(z) - \sum_{k=1}^m (Z_0^{e/e} + j\omega L_{ik}) \underline{L}_{ik}(z) \right] \\ & + \underline{E}_z^e(x_i - a_i \cos \theta_i, y_i - a_i \sin \theta_i, z) \Delta z - \underline{E}_z^e(a_0 \cos \theta_i, a_0 \sin \theta_i, z) \Delta z \end{aligned} \quad (4-27)$$

식 (4-27)로부터

$$-\frac{d}{dz} V_i^s(z) = \sum_{k=1}^m Z_{ik} \underline{L}_k(z) - \underline{f}_i^s(z) \quad (4-28)$$

$$\underline{f}_i^s(z) = \underline{E}_z^e(x_i - a_i \cos \theta_i, y_i - a_i \sin \theta_i, z) - \underline{E}_z^e(a_0 \cos \theta_i, a_0 \sin \theta_i, z) \quad (4-29)$$

## 2. 지구 리턴을 갖는 선로

지구 리턴(Earth return)을 갖는 선로란 와이어로 구성된 모든 선로를 의미한다. 와이어는 공기 중에 있을 수도 있고 ( $h > 0$ ), 지구 속에 있을 수도 있고 ( $h < 0$ ), 공기와 지구의 경계면 ( $h = 0$ )에 있을 수도 있다. 선로는 길다고 가정하여 수학적 관점에서 무한히 긴 선로로 간주한다. 선로 길이가 지구의 표피 깊이보다 클 때, 이렇게 가정한다.

$n$  개의 층으로 구성된 매질을 생각한다. 첫 번째 층은 공기로 전기적 특성은 1,  $\epsilon_1 = 1$ , 다른 층들( $i = 2, 5, n$ )은 지구를 나타내고  $\epsilon_i, i = 2, 5, n$ . 공기와 마지막 층은  $x$  방향으로 semi-infinite이고, 기타 층들의 두께는  $t_i$  ( $i = 2, 5, n$ )이다. 와이어는 원통형이며 반지름은  $a$  이고,  $z$  축을 따라 분포되어 있다. 대부분의 경우 와이어는 외부 반경  $b$  이며 전기적 특성  $c, c = 0, c \infty$  인 매질로 코팅되어 있다. 와이어에 흐르는 전류는  $z$  방향으로만 흐르며, 방사상 대칭이다. 이런 가정("thin wire approximation")에서 전류 밀도를 filamentary라고 생각하고 식 (4-30)로 나타낼

수 있다.

$$\underline{J} = I e^{-\gamma z} \delta(x-h) \delta(y-d) \hat{z} \quad \text{Re}(\underline{J}) > 0 \quad (4-30)$$

식 (4.30)의 전류밀도에 의하여 와이어와 코팅 외부에 발생된 전자장은 와이어의 실제 전류 밀도에 의하여 발생된 것과 동일한 전자장이다. 그럼에도 불구하고 식 (4.30)로는 와이어 내부와 코팅 내부의 전자장을 계산할 수 없다.

가. 전자장 계산

정확한 계산

와이어는  $i$  번째 층에 있다고 가정한다. 각 층에서의 진행방향 전자장 성분( $\underline{H}_z$ ,  $\underline{E}_z$ )만으로 단면방향 전자장을 계산할 수 있다.

$$\nabla^2 \underline{E} + k^2 \underline{E} = - \left( \frac{1}{j\omega\epsilon} \text{grad} \nabla \cdot \underline{J}_A - j\omega\mu \underline{J}_A \right)$$

$$\nabla^2 \underline{H} + k^2 \underline{H} = -\nabla \times \underline{J}_A$$

$$\frac{\partial^2 E_{mz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_{mz}}{\partial y^2} - \chi_m^2 E_{mz} = \begin{cases} - \left( \frac{1}{j\omega\epsilon_m} \gamma^2 - j\omega\mu_0 \right) I e^{-\gamma z} \delta(x-h) \delta(y-d) & m = i \\ 0 & m \neq i \end{cases} \quad (4-31)$$

$$(4-32)$$

$$\frac{\partial^2 H_{mz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_{mz}}{\partial y^2} - \chi_m^2 H_{mz} = 0 \quad (4-33)$$

$$\chi_m^2 = -k_m^2 - \gamma^2 \quad (4-34)$$

$i$  번째 층에만 전류 소스(와이어)가 있기 때문에 파동방정식은 inhomogeneous 하다. 해는 다음과 같다.

$$E_{mz}(x, y, z) = - \frac{\chi_m^2}{j\omega\epsilon_m 4\pi} I e^{-\gamma z} \int_{-\infty}^{+\infty} [A_m(\lambda) e^{-u_m x} + B_m(\lambda) e^{+u_m x}] e^{-j\lambda(y-d)} d\lambda \quad (m \neq i) \quad (4-35)$$

$$H_{mz}(x, y, z) = - \frac{\chi_m^2}{j\omega\epsilon_m 4\pi} I e^{-\gamma z} \int_{-\infty}^{+\infty} [C_m(\lambda) e^{-u_m x} + D_m(\lambda) e^{+u_m x}] e^{-j\lambda(y-d)} d\lambda \quad (4-36)$$

$$E_{iz}(x, y, z) = -\frac{\chi_i^2}{j\omega\epsilon_i 4\pi} I e^{-\gamma z} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{e^{-u_i|x-h|}}{u_i} + A_i(\lambda) e^{-u_i x} + B_i(\lambda) e^{+u_i x} \right] e^{-j\lambda(y-d)} d\lambda \quad (4-37)$$

$$u_m = \sqrt{\lambda^2 + \chi_m^2} \quad \text{Re}(u_m) > 0 \quad (4-38)$$

$A_m(\lambda)$ ,  $B_m(\lambda)$ ,  $C_m(\lambda)$ ,  $D_m(\lambda)$  을 경계조건으로부터 구할 수 있다.

$$|k_c b| \ll 1 \quad |k_i b| \ll 1 \quad (4.39-4.40)$$

$$k_c^2 = j\omega\mu_c \left( \frac{1}{\rho_c} + j\omega\epsilon_c \right) \quad (4.41)$$

인 경우, 공기와 지구에서 진행 방향 전자장을 계산할 때, 와이어를 덮고 있는 것을 무시할 수 있다.

선로가 공기 중에 있는 경우

- 길이 방향 전계

$$E_{1z} = \frac{k_1^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{I e^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ K_0(\chi_1 R) - K_0(\chi_1 R') + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-u_1(x+h)} e^{-j\lambda(y-d)}}{u_1 + u_2} d\lambda \right] \\ + \frac{\gamma^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{I e^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ K_0(\chi_1 R) - K_0(\chi_1 R') + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_1^2 e^{-u_1(x+h)} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \right] \quad (4-42)$$

$$E_{2z} = \frac{k_1^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{I e^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-u_1 h} e^{+u_2 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{u_1 + u_2} d\lambda + \frac{\gamma^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{I e^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_1^2 e^{-u_1 h} e^{-u_2 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \quad (4-43)$$

$$R = \sqrt{(x-h)^2 + (y-d)^2} \quad R' = \sqrt{(x+h)^2 + (y-d)^2}$$

$$V_1 = \frac{\gamma}{j\omega\epsilon_1} \frac{I e^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ K_0(\chi_1 R) - K_0(\chi_1 R') + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_1^2 e^{-u_1(x+h)} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \right] \quad (4-44)$$

$$V_2 = \frac{\gamma^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{I e^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_1^2 e^{-u_1 h} e^{+u_2 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \quad (4-45)$$

공기와 지구 경계면에 선로가 있는 경우 ( $h=0$ )

- 길이 방향 전계



$$E_{1z} = \frac{k_1^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-u_1 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{u_1 + u_2} d\lambda + \frac{\gamma^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_1^2 e^{-u_1 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \quad (4-46)$$

$$E_{2z} = \frac{k_1^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{+u_2 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{u_1 + u_2} d\lambda + \frac{\gamma^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_1^2 e^{-u_2 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \quad (4-47)$$

- 스칼라 포텐셜

$$V_1 = \frac{\gamma}{j\omega\epsilon_1} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_1^2 e^{-u_1 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \quad (4-48)$$

$$V_2 = \frac{\gamma^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_1^2 e^{u_2 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \quad (4-49)$$

## 지중 선로

- 길이 방향 전계

$$E_{1z} = \frac{k_2^2}{j\omega\epsilon_2} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-u_1 x} e^{+u_2 h} e^{-j\lambda(y-d)}}{u_1 + u_2} d\lambda + \frac{\gamma^2}{j\omega\epsilon_2} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_2^2 e^{-u_1 x} e^{+u_2 h} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \quad (4-50)$$

$$E_{2z} = \frac{k_2^2}{j\omega\epsilon_2} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ K_0(\chi_2 R) - K_0(\chi_2 R') + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{+u_2(x+h)} e^{-j\lambda(y-d)}}{u_1 + u_2} d\lambda \right] \\ + \frac{\gamma^2}{j\omega\epsilon_2} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ K_0(\chi_2 R) - K_0(\chi_2 R') + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_2^2 e^{+u_2(x+h)} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \right] \quad (4-51)$$

- 스칼라 포텐셜

$$V_1 = \frac{\gamma}{j\omega\epsilon_2} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_2^2 e^{-u_1 x} e^{+u_2 h} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \quad (4-52)$$

$$V_2 = \frac{\gamma}{j\omega\epsilon_2} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ K_0(\chi_2 R) - K_0(\chi_2 R') + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_2^2 e^{+u_2(x+h)} e^{-j\lambda(y-d)}}{k_1^2 u_2 + k_2^2 u_1} d\lambda \right] \quad (4-53)$$

전력선 주파수가 낮기 때문에 다음의 가정을 할 수 있다.

1) 지구의 변위전류와 변위전류의 공기중 진행방향 성분을 무시할 수 있다.

$$u_m = \sqrt{\lambda^2 + \chi_m^2} = \sqrt{\lambda^2 - k_m^2 - \gamma^2} \quad \chi_m^2 = -k_m^2 - \gamma^2 \\ u_1 \cong \sqrt{\lambda^2 - \gamma^2} \quad u_2 = \sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \gamma^2} \cong \sqrt{\lambda^2 - \frac{j\omega\mu_0}{\rho_2} - \gamma^2}$$

$$2) \quad k_2^2 \cong -\frac{j\omega\mu_0}{\rho_2} \quad |k_2^2| \gg |k_1^2|$$

3) 각 단면에서 QS (Quasi-Static) 가정을 사용할 수 있다. 이 경우 아래의 4개 결과를 얻을 수 있다.

a) 전송선로 모드만을 생각한다.

b) 베셀 함수  $K_0$ 에서 독립변수가 작을 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_0(x) \cong \ln \frac{1.123}{x}$$

c) 벡터 포텐셜  $A$ 에 비례하는 항은 시변 자계에 의한 전계 성분이다. 유도성 부분이고  $E^{ind}$ 로 표시한다.

스칼라 포텐셜의 gradient로 표현되는 항은 전하에 의한 전계 성분이다. static part이고  $E^{st}$ 로 표시한다.

d) 지구에서의 스칼라 포텐셜을 dc 조건(0)에서 계산한다.

4) 와이어가 코팅으로 덮혀 있을 때, remote earth에 대한 포텐셜  $V_w(z)$ 은 아래 두 항의 합이다.

$$V_w(z) = V_c(z) + V_{ex}(z)$$

$V_c(z)$ 는 와이어와 덮개의 외피 사이의 전위차이다. Aerial 와이어 또는 buried 와이어에서 코팅 영역에서 전자장을 동축선의 유전체 영역에서와 동일한 방법으로 계산한다.

$$V_c(z) = \gamma I e^{-\gamma z} \frac{\ln(b/a)}{2\pi(1/\rho_c + j\omega\epsilon_c)} \quad (4-54)$$

지구 경계면에 와이어가 있는 경우

$$V_c(z) = \gamma I e^{-\gamma z} w_c \quad (4-55)$$

$w_c$ 는 덮개 층의 어드미턴스  $y_c$ 이다.

$$w_c = 1/y_c$$

$y_c$ 에 대한 식을 알 수 없다면, 추정하여야만 한다.

### 공기 중에 있는 와이어

- 길이 방향 전계의 유도성 부분

직접 계산법

$$E_{1z}^{ind} = \frac{k_1^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ K_0(\chi_1 R) - K_0(\chi_1 R') + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-u_1(x+h)} e^{-j\lambda(y-d)}}{u_1 + u_2} d\lambda \right] \quad (4-56)$$

$$E_{2z}^{ind} = \frac{k_1^2}{j\omega\epsilon_1} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-u_1 h} e^{+u_2 x} e^{-j\lambda(y-d)}}{u_1 + u_2} d\lambda \quad (4-57)$$

$$u_1 \cong \sqrt{\lambda^2 - \gamma^2} \quad u_2 = \sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \gamma^2} \cong \sqrt{\lambda^2 - \frac{j\omega\mu_0}{\rho_2} - \gamma^2}$$

$$k_2^2 \cong -\frac{j\omega\mu_0}{\rho_2} \quad |k_2^2| \gg |k_1^2|$$

$$E_{1z}^{ind} = j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ \ln \frac{R'}{R} + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2e^{-\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2}(x+h)} \cos(y-d)}{\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2} + \sqrt{\lambda^2 - \gamma^2 - k_2^2}} d\lambda \right] \quad (4-58)$$

$$E_{2z}^{ind} = j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2e^{-\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2}h} e^{+\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2 - k_2^2}x} \cos(y-d)}{\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2} + \sqrt{\lambda^2 - \gamma^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-59)$$

복소 영상법

$$\gamma \cong jk_1 \cong 0$$

$$u_1 \cong \lambda \quad u_2 \cong \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}$$

$$\gamma_2 = 0$$

$$E_{1z}^{ind} = j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \ln \left( \frac{R'}{R} \right) \quad (4-60)$$

$$\int_0^{+\infty} \frac{2e^{+(\lambda+h)} \cos \lambda(y-d)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\lambda} \left( 1 - \frac{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} - \lambda}{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} + \lambda} \right) e^{-(\lambda+h)} \cos \lambda(y-d) d\lambda$$

$$f(\lambda) = \frac{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} - \lambda}{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} + \lambda} = e^{-\frac{2\lambda}{jk_2}} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{\lambda}{jk_2} \right)^3 - \frac{3}{20} \left( \frac{\lambda}{jk_2} \right)^5 + 6 \right]$$

$$\int_0^{+\infty} \frac{1}{\lambda} \left( 1 - \frac{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} - \lambda}{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} + \lambda} \right) e^{-(\lambda+h)} \cos \lambda (y-d) d\lambda$$

$$= \int_0^{+\infty} \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda(x+h)} e^{-\lambda \left( x+h+\frac{2}{jk_2} \right)} \cos \lambda (y-d) d\lambda + \left[ \frac{1}{3} \frac{1}{(jk_2)^3} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{3}{20} \frac{1}{(jk_2)^5} \frac{\partial^4 Q}{\partial x^4} + 6 \right]$$

$$Q = \int_0^{+\infty} e^{-\lambda \left( x+h+\frac{2}{jk_2} \right)} \cos \lambda (y-d) d\lambda = \frac{\left( x+h+\frac{2}{jk_2} \right)}{\left( x+h+\frac{2}{jk_2} \right)^2 + (y-d)^2}$$

$$\int_0^{+\infty} \frac{1}{\lambda} \left\{ e^{-\lambda(x+h)} - e^{-\lambda \left( x+h+\frac{2}{jk_2} \right)} \right\} \cos \lambda (y-d) d\lambda = \ln \frac{\bar{R}}{R}$$

$$\bar{R} = \sqrt{\left( x+h+\frac{2}{jk_2} \right)^2 + (y-d)^2}$$

따라서,

$$E_{1z}^{ind} = j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{\bar{R}'}{R} \right) + C \right] \quad (4-61)$$

$$x = -h - 2/jk_2$$

$$x = -1/jk_2$$

- 스칼라 포텐셜

$$V_1 = \frac{\gamma}{j\omega\epsilon_1} \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \ln \left( \frac{R'}{R} \right) + \gamma\rho_2 \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\gamma R'} \right) \quad (4-62)$$

$$V_2 = \gamma\rho_2 \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} K_0(j\gamma R) \quad (4-63)$$

$$V_2 = \gamma\rho_2 \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\gamma R} \right) \quad (4-64)$$

$$V_w(z) = \gamma Ie^{-\gamma z} \left[ \frac{1}{2\pi(1/\rho_c + j\omega\epsilon_c)} \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{1}{j\omega\epsilon_1} \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{2h-b}{b} \right) + \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\gamma(2h-b)} \right) \right] \quad (4-65)$$

선로가 공기와 지구 경계면에 있는 경우 ( $h=0$ )

- 길이 방향 전계의 유도성 부분

$$E_{1z}^{ind} = -j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2e^{-\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2}x} \cos(y-d)}{\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2} + \sqrt{\lambda^2 - \gamma^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-66)$$

$$E_{2z}^{ind} = -j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2e^{+\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2 - k_2^2}x} \cos(y-d)}{\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2} + \sqrt{\lambda^2 - \gamma^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-67)$$

지표면에서는 다음과 같다.

$$E_z^{ind} = -j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\cos(y-d)}{\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2} + \sqrt{\lambda^2 - \gamma^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-68)$$

$$E_z^{ind} = -j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi k_2^2 |y-d|} \left[ \chi_2 K_1(\chi_2 |y-d|) - j\gamma K_1(j\gamma |y-d|) \right] \quad (4-69)$$

$$E_z^{ind} = -j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi k_2^2} \left[ k_2^2 \ln \frac{1.851}{\chi_2 |y-d|} + \gamma^2 \ln \frac{j\gamma}{\chi_2} \right] \quad (4-70)$$

$$E_z^{ind} = -j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \ln \frac{1.851}{\chi_2 |y-d|} \quad (4-71)$$

- 스칼라 포텐셜

$$V_1 = \rho_2 \gamma \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} K_0(j\gamma R) \quad (4-72)$$

$$V_2 = \rho_2 \gamma \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} K_0(j\gamma R) \quad (4-73)$$

$$V_1 = \rho_2 \gamma \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} \ln \frac{1.123}{j\gamma R} \quad (4-74)$$

$$V_2 = \rho_2 \gamma \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} \ln \frac{1.123}{j\gamma R} \quad (4-75)$$

와이어의 전위는 다음과 같다.

$$V_2 = \gamma I e^{-\gamma z} \left[ \frac{1}{y_c} + \frac{\rho_2}{\pi} \ln \frac{1.123}{j\gamma b} \right] \quad (4-76)$$

지중 선로

- 길이 방향 전계의 유도성 부분

$$E_{1z}^{ind} = j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2e^{-u_1x}e^{-u_2h} \cos\lambda(y-d)}{u_1+u_2} d\lambda \quad (4-77)$$

$$E_{2z}^{ind} = -j\omega\mu_0 \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ K_0(\chi_2 R) - K_0(\chi_2 R') + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2e^{+u_2(x+h)} \cos\lambda(y-d)}{u_1+u_2} d\lambda \right] \quad (4-78)$$

- 스칼라 포텐셜

$$V_1 = \rho_2 \gamma \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2}(x-h)} e^{-j\lambda(y-d)}}{2\sqrt{\lambda^2 - \gamma^2}} d\lambda = \rho_2 \gamma \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} K_0(j\gamma R) \quad (4-79)$$

지구 속에서의 전위는 다음과 같다.

$$V_2 = \rho_2 \gamma \frac{Ie^{-\gamma z}}{2\pi} [K_0(j\lambda R) + K_0(j\lambda R')] \quad (4-80)$$

$$V_1 = \rho_2 \gamma \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} \ln \frac{1.123}{j\gamma R} \quad (4-81)$$

$$V_2 = \rho_2 \gamma \frac{Ie^{-\gamma z}}{\pi} \ln \frac{1.123}{j\gamma \sqrt{RR'}} \quad (4-82)$$

와이어의 전위는 다음과 같다.

$$V_w = \gamma I e^{-\gamma z} \left[ \frac{1}{2\pi(1/\rho_c + j\omega\epsilon_c)} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{\rho_2}{\pi} \ln\left(\frac{1.123}{j\gamma \sqrt{2|h|b}}\right) \right] \quad (4-83)$$

나. 등가회로의 변수

공기 중에 선로가 있는 경우

- 임피던스

$$L_{ai} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{b_i}{a_i} \quad (4-84)$$

$L_{ai}$ 를 계산하기 위하여 공기 중에서 자계의  $x$  성분을 알아야 한다.

$$\nabla \times \underline{E} = \nabla \times \underline{E}^{ind} = -j\omega\mu\underline{H} \quad (4-85)$$

Quasi-TEM 가정을 하면 다음과 같다.

$$\underline{E}_x^{ind} = 0 \quad \underline{E}_y^{ind} = 0 \quad (4-86)$$

따라서, 다음과 같다.

$$H_{1y} = \frac{\partial}{\partial x} E_z^{ind} \quad (4-87)$$

$$H_{1y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{I_i e^{-\gamma z}}{2\pi} \left[ \ln \frac{R'}{R} + \int_0^{+\infty} \frac{2e^{-\lambda(x+x_i)}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} \cos \lambda(y - y_i) d\lambda \right] \right\} \quad (4-88)$$

$$j\omega L_{ai} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{2x_i - b_i}{b_i} + 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{-2\lambda x_i}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \right] \quad (4-89)$$

$$Z_{eii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{2e^{-2\lambda x_i}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-90)$$

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{b_i}{a_i} \right) + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2x_i - b_i}{b_i} \right) + 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{-2\lambda x_i}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \right] \quad (4-91)$$

Bare 와이어( $a_i = b_i$ )의 경우 다음과 같다.

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2x_i - a_i}{a_i} \right) + 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{-2\lambda x_i}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \right] \quad (4-92)$$

$$\sqrt{\frac{\mu_0\omega}{\rho}} \quad x_i \leq 0.125$$

$$\int_0^{+\infty} \frac{2e^{-2\lambda x_i}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \cong \ln \frac{2}{jk_2 2x_i} + \frac{1}{2} - \ln C + \frac{4}{3} jk_2 x_i \quad (4-93)$$

$$C = 1.7811...$$

$$\int_0^{+\infty} \frac{2e^{-2\lambda x_i}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \cong \ln \frac{1.851}{jk_2 2x_i} + \frac{4}{3} + jk_2 x_i \quad (4-94)$$

$$b_i \leq 2x_i$$

$$\ln \frac{2x_i - b_i}{b_i} \cong \ln \frac{2x_i}{b_i} \quad (4-95)$$

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{1.851}{jk_2 2x_i} + \frac{4}{3} + jk_2 x_i \right] \quad (4-96)$$

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2x_i + 2/jk_2}{a_i} \right) \quad (4-97)$$

- 전위의 계수

$$-\frac{d}{dz} I_i(z) = -\frac{d}{dz} I_i e^{-\gamma z} = \gamma I_i e^{-\gamma z} \quad (4-98)$$

$$w_{ii} = \frac{1}{2\pi(1/\rho_{ci} + j\omega\epsilon_{ci})} \ln \left( \frac{b_i}{a_i} \right) + \frac{1}{j\omega 2\pi\epsilon_1} \ln \left( \frac{2x_i - b_i}{b_i} \right) + \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\Gamma_i(2x_i - b_i)} \right) \quad (4-99)$$

$$a_i = b_i$$

$$w_{ii} = \frac{1}{j\omega 2\pi\epsilon_1} \ln \left( \frac{2x_i - a_i}{a_i} \right) + \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\Gamma_i(2x_i - a_i)} \right) \quad (4-100)$$

$$b_i \ll 2x_i$$

$$w_{ii} = \frac{1}{2\pi(1/\rho_{ci} + j\omega\epsilon_{ci})} \ln \left( \frac{b_i}{a_i} \right) + \frac{1}{j\omega 2\pi\epsilon_1} \ln \left( \frac{2x_i}{b_i} \right) \quad (4-101)$$

$$w_{ii} = \frac{1}{j\omega 2\pi\epsilon_1} \ln \left( \frac{2x_i}{a_i} \right) \quad (4-102)$$

공기와 지구 경계면에 선로가 있는 경우

- 임피던스

$$Z_{eii} = -\frac{j\omega\mu_0}{\pi k_2^2 b_i} \left[ j\Gamma_i K_1(j\Gamma_i b_i) - j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} K_1 \left( j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} b_i \right) \right] \quad (4-103)$$



$$Z_{eii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} b_i} \quad (4-104)$$

$$Z_{eii} = -\frac{j\omega\mu_0}{\pi k_2^2 b_i} \left[ \frac{1}{b_i} - jk_2 K_1(jk_2 b_i) \right] \quad (4-105)$$

$$Z_{eii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{jk_2 b_i} \quad (4-106)$$

코팅된 와이어의 전체 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} - \frac{j\omega\mu_0}{\pi k_2^2 b_i} \left[ j\Gamma_i K_1(j\Gamma_i b_i) - j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} K_1\left(j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} b_i\right) \right] \quad (4-107)$$

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} b_i} \quad (4-108)$$

Insulated 와이어의 전체 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} - \frac{j\omega\mu_0}{\pi k_2^2 b_i} \left[ \frac{1}{b_i} - jk_2 K_1(jk_2 b_i) \right] \quad (4-109)$$

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{jk_2 b_i} \quad (4-110)$$

Bare 와이어( $a_i = b_i$ )의 전체 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} - \frac{j\omega\mu_0}{\pi a_i k_2^2} \left[ j\Gamma_i K_1(j\Gamma_i a_i) - j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} K_1\left(j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} a_i\right) \right] \quad (4-111)$$

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} a_i} \quad (4-112)$$

- 전위의 계수

$$w_{ii} = \frac{1}{y_{ci}} + \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\Gamma_i a_i} \right) \quad (4-113)$$

$$w_{ii} = \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\Gamma_i a_i} \right) \quad (4-114)$$

지중 선로

- 임피던스

$$L_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{b_i}{a_i} \quad (4-115)$$

$$Z_{eii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ K_0 \left( j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} b_i \right) - K_0 \left( j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} 2|x_i| \right) + 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \Gamma_i^2} 2x_i}}{\sqrt{\lambda^2 - \Gamma_i^2} + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \Gamma_i^2}} d\lambda \right] \quad (4-116)$$

$$Z_{eii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} \sqrt{b_i^2 + 4x_i^2}} \quad (4-117)$$

와이어가 잘 insulate되어 있다면 다음과 같다.

$$Z_{eii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ K_0 \left( jk_2 b_i \right) - K_0 \left( jk_2 2|x_i| \right) + 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} 2x_i}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \right] \quad (4-118)$$

$$Z_{eii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{jk_2 \sqrt{b_i^2 + 4x_i^2}} \quad (4-119)$$

따라서, 코팅된 와이어의 총 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{b_i}{a_i} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} \sqrt{b_i^2 + 4x_i^2}} \quad (4-120)$$

insulate된 와이어의 총 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{b_i}{a_i} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{jk_2 \sqrt{b_i^2 + 4x_i^2}} \quad (4-121)$$

$$Z_{eii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ K_0 \left( j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} a_i \right) - K_0 \left( j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} 2|x_i| \right) \right] + 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \Gamma_i^2} 2x_i}}{\sqrt{\lambda^2 - \Gamma_i^2} + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \Gamma_i^2}} d\lambda \quad (4-122)$$

$$Z_{ii} = Z_i^{e/e} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i^2} \sqrt{a_i^2 + 4x_i^2}} \quad (4-123)$$

- 전위의 계수

$$w_{ii} = \frac{1}{2\pi(1/\rho_{ci} + j\omega\varepsilon_{ci})} \ln \left( \frac{b_i}{a_i} \right) + \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\Gamma_i \sqrt{2|x_i|b_i}} \right) \quad (4-124)$$

$$w_{ii} = \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\Gamma_i \sqrt{2|x_i|a_i}} \right) \quad (4-125)$$

공기 중에 2개의 선로가 있는 경우 상호 변수

- 임피던스

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R'_{ij}}{R_{ij}} + 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{-\lambda(x_i+x_j)} \cos \lambda(y_i - y_j)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-126)$$

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4-127)$$

$$R'_{ij} = \sqrt{(x_i + x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4-128)$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{1.851}{jk_2 R_{ij}} + \frac{2}{3} jk_2 (x_i + x_j) \right] \quad (4-129)$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\bar{R}_{ij}}{R_{ij}} \quad (4-130)$$

$$\bar{R}_{ij} = \sqrt{\left( x_i + x_j + \frac{2}{jk_2} \right)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4-131)$$

- 전위의 계수

$$w_{ij} = \frac{1}{2\pi j\omega\varepsilon_1} \ln \left( \frac{R'_{ij}}{R_{ij}} \right) + \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\sqrt{\Gamma_i \Gamma_j} R'_{ij}} \right) \quad (4-132)$$

공기와 지구 경계면에 2개의 선로가 있는 경우 상호 변수

- 임피던스

$$Z_{ij} = -\frac{j\omega\mu_0}{\pi k_2^2 |y_i - y_j|} \left[ \frac{j\sqrt{\Gamma_i \Gamma_j} K_1(j\sqrt{\Gamma_i \Gamma_j} |y_i - y_j|)}{-j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i \Gamma_j} K_1(j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i \Gamma_j} |y_i - y_j|)} \right] \quad (4-133)$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{j|y_i - y_j| \sqrt{k_2^2 + \Gamma_i \Gamma_j}} \quad (4-134)$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{j|y_i - y_j| k_2} \quad (4-135)$$

- 전위의 계수

$$w_{ij} = \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\sqrt{\Gamma_i \Gamma_j} |y_i - y_j|} \right) \quad (4-136)$$

지중에 2개의 선로가 있는 경우 상호 변수

- 임피던스

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ K_0(j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i \Gamma_j} R_{ij}) - K_0(j\sqrt{k_2^2 + \Gamma_i \Gamma_j} R'_{ij}) + 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \Gamma_i \Gamma_j} (x_i + x_j)} \cos \lambda (y_i - y_j)}{\sqrt{\lambda^2 - \Gamma_i \Gamma_j} + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \Gamma_i \Gamma_j}} d\lambda \right] \quad (4-137)$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{jR_{ij} \sqrt{k_2^2 + \Gamma_i \Gamma_j}} \quad (4-138)$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ K_0(jk_2 R_{ij}) - K_0(jk_2 R'_{ij}) + 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} (x_i + x_j)} \cos \lambda (y_i - y_j)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \right] \quad (4-139)$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.851}{jk_2 R_{ij}} \quad (4-140)$$

- 전위의 계수

$$w_{ij} = \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j\sqrt{\Gamma_i \Gamma_j} j\sqrt{R_{ij} R'_{ij}}} \right) \quad (4-141)$$

하나의 선로는 공기 중에 있고 하나의 선로는 지중에 있는 경우

- 임피던스

$j$  번째 와이어는 공기 중에 있고,  $i$  번째 와이어는 땅 속에 있다고 가정한다. 상호 임피던스를 계산하기 위하여  $j$  번째 와이어가  $i$  번째 와이어에 영향을 준다고 생각한다.

상호 임피던스는 다음의 2가지 항으로 주어진다.

1)  $j\omega L_{ij}$  : 유전체 코팅과 관련이 있음

2)  $Z_{eij}$  : 지구와 관련 있음

실제의 경우, 코팅이 매우 얇다면 첫 번째 항을 무시할 수 있다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} 2 \int_0^{+\infty} \frac{e^{-\lambda x_j} e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} x_i} \cos\lambda(y_i - y_j)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-142)$$

$\sqrt{\mu_0\omega/\rho_2} x_j \leq 0.5$  와  $\sqrt{\mu_0\omega/\rho_2} |x_i| \leq 0.1$  인 경우,  $Z_{ij}$  는 다음과 같다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{1.851}{jk_2 R_{ij}} + \frac{2}{3} jk_2 (x_i + x_j) \right] \quad (4-143)$$

$i$  번째 와이어는 공기 중에 있고,  $j$  번째 와이어는 땅 속에 있다고 가정한다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{2e^{-\lambda x_i} e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} x_j} \cos\lambda(y_j - y_i)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-144)$$

$\sqrt{\mu_0\omega/\rho_2} x_i \leq 0.5$  와  $\sqrt{\mu_0\omega/\rho_2} |x_j| \leq 0.1$  인 경우,  $Z_{ij}$  는 다음과 같다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{1.851}{jk_2 R_{ij}} + \frac{2}{3} jk_2 (x_i + x_j) \right]$$

- 전위의 계수

$$w_{ij} = \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{|j\sqrt{\Gamma_i\Gamma_j}|R_{ij}} \right) \quad (4-145)$$

하나의 선로는 공기 중에 있고, 다른 하나는 공기과 지구의 경계면에 있는 경우

- 임피던스

$j$  번째 와이어는 공기 중에 있고,  $i$  번째 와이어는 공기과 땅의 경계면에 존재한다고 가정한다. 즉,  $x_i = 0$  이다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{2e^{-\lambda x_j} \cos \lambda (y_i - y_j)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-146)$$

$\sqrt{\mu_0\omega/\rho_2} x_j \leq 0.5$  인 경우,  $Z_{ij}$  는 다음과 같다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{1.851}{jk_2 R_{ji}} + \frac{2}{3} jk_2 x_j \right) \quad (4-147)$$

$i$  번째 와이어는 공기 중에 있고,  $j$  번째 와이어는 공기과 땅의 경계면에 존재한다고 가정한다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{2e^{-\lambda x_j} \cos \lambda (y_i - y_j)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-148)$$

$\sqrt{\mu_0\omega/\rho_2} x_i \leq 0.5$  인 경우,  $Z_{ij}$  는 다음과 같다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{1.851}{jk_2 R_{ij}} + \frac{2}{3} jk_2 x_i \right) \quad (4-149)$$

- 전위의 계수

$$w_{ij} = \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j \sqrt{\Gamma_i \Gamma_j} R_{ij}} \right) \quad (4-150)$$

하나의 선로는 대기과 지구 경계면에 있고 다른 하나의 선로는 지중에 있는 경우  
- 임피던스

$j$  번째 와이어는 땅 속에 있고,  $i$  번째 와이어는 공기와 땅의 경계면에 존재한다고 가정한다. 즉,  $x_i = 0$  이다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{2e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} x_j} \cos \lambda (y_i - y_j)}{\sqrt{\lambda^2 - \Gamma_i \Gamma_j} + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \Gamma_i \Gamma_j}} d\lambda \quad (4-151)$$

$\sqrt{\mu_0\omega/\rho_2} x_j \leq 0.5$  인 경우,  $Z_{ij}$  는 다음과 같다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{1.851}{jk_2 R_{ji}} + \frac{2}{3} jk_2 x_j \right)$$

이 식들은 leaky 와이어에도 적용할 수 있다. 두 개의 와이어 중에서 적어도 하나를 insulate된다면 다음과 같다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{2e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} x_j} \cos \lambda (y_i - y_j)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-152)$$

$i$  번째 와이어는 땅 속에 있고,  $j$  번째 와이어는 공기와 땅의 경계면에 존재한다고 가정한다. 즉,  $x_i = 0$  이다.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{2e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} x_i} \cos \lambda (y_i - y_j)}{\sqrt{\lambda^2 - \Gamma_i \Gamma_j} + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2 - \Gamma_i \Gamma_j}} d\lambda \quad (4-153)$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{2e^{\sqrt{\lambda^2 - k_2^2} x_i} \cos \lambda (y_i - y_j)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k_2^2}} d\lambda \quad (4-154)$$

## - 전위의 계수

$$w_{ij} = \frac{\rho_2}{\pi} \ln \left( \frac{1.123}{j \sqrt{\Gamma_i \Gamma_j} R_{ij} R'_{ij}} \right) \quad (4-155)$$

## 실제 경우에 적용

이제까지의 가정은 전자장을 발생시키는 구조는 지표면에 평행인 직선 선로이고 지표면은 평면이며 지구는 일정한 저항율을 갖는다고 가정하였다. 이것은 이상적인 상황이다. 실제 해석하여야 할 구조는 공간상에서 곡선이고 땅 표면은 평면이 아니고 지구 저항율은 상수가 아니다. 그럼에도 불구하고 단순성을 위하여 이제까지의 이론을 적용할 수 있다.

편의상 실제의 전력선을 지표에 투영하였을 때 짧은 길이의 직선 선로로 모델링 한다. 선로의 earthing points를 A와 B이며, 땅속 전류는 최단거리(B에서 A까지의 직선)를 따라 흐르지 않지만, proximity effect의 경우 전력선 경로를 따라 흐르려 할 것이다. 이것은 주파수가 높을수록 사실이므로, 직류에 대하여 사실이 아니다.

선로의 단면에서 전류 분포는 무한 길이의 직선에 의하여 발생된 것과 본질적으로 동일하다. 단면이 선로 종단으로부터 또는 broken line의 각 직선 구간으로부터 멀어질수록 더욱 그러해진다.

## - 기하학적 단순화

기하학적 단순화는 다음과 같다.

1) 전력선, 철도, 통신선로를 구성하는 모든 도체를 broken line으로 생각할 수 있으며, 각 부분은 지표면에 평행이다. 각 부분의 길이에서 도체 높이 (또는 깊이)에는 큰 변화는 없다. 따라서, 각 부분의 높이를 일정한 값(평균값)으로 가정한다. 대부분의 경우, 결합(유도성 결합)은 높이 보다는 도체들 사이의 수평 거리에 좌우된다. 따라서, 진행방향 임피던스에 대한 근사식에서 도체의 높이가 나타나지 않는다.

2) 지표면을 언제나 편평한 표면으로 생각한다. 그러나, 도체가 산 또는 언덕 위에 있을 때 기준면은 지평선을 포함하는 면이 아니고 경사면이다.

## - 물리적 단순화



물리적 단순화는 다음과 같다.

- 1) 동일 선로에 속한 서로 다른 segment들 사이의 상호 결합을 무시한다.
- 2) 선로의 각 단면에서 전자장 계산을 일정한 평균 높이(또는 깊이)를 갖는 무한 길이의 직선에 대하여 하는 것처럼 한다.
- 3) 각 부분에서 땅의 저항율은 일정하다. 땅의 저항율( $\rho = \rho(x, y, z)$ )을 정확히 아는 것은 불가능하다. 저항율에 대한 정보를 지질학적 지도 또는 측정으로부터 유도할 수 있다. 주어진 면적과 주어진 깊이에 대한 평균값을 얻을 수 있다.

## 제5절 전자장 해석의 의미

통신선 전자유도에 관한 도시차폐효과를 정량적으로 해석하였다. 이를 위하여 도시차폐 발생 원리를 해석하였다. 도시 시설물들에 의한 차폐 영향성에 대하여 원론적인 고찰 수행하고, 도시 시설물의 비정형성 해석을 위한 모델링 기법 적용을 연구하였다.

또한, 도시차폐효과 규명 방안도 수립하였다. 도시시설물에 의한 실질적 차폐 효과 발생 여부 규명하고 정량적 해석 기법을 수립하였다. 도시시설물의 차폐 정량성 평가를 위한 기본적 수식화 하고 실제적 계산 방법을 연구하였다.

구체적으로는 전력 유도를 발생하는 전력선 주변의 낮은 주파수 전계와 자계의 특성을 분석하였다. 높은 주파수와 달리 전계와 자계를 별개로 취급할 수 있음을 알았다.

매설관의 특성에 따른 차폐효과도 분석하였다. 차폐도체와 유도구간이 모두 무한길이인 경우, 차폐도체 무한길이이며 유도구간 유한길이인 경우, 차폐도체와 유도구간이 유한길이인 경우, 등간격 접지도체인 경우에 대하여 분석하였다.

지구 리턴 경로를 갖는 다중 도체 선로의 특성도 분석하였다. 이중 도체에서 다중 도체로 확장하였다.

전력선에 의한 유도 장애 문제는 근거리장 문제에 해당하는 것으로 매우 복잡한 현상으로 볼 수 있다. 또한, 60 Hz인 낮은 전력 주파수와 통신선에 장애를 주는 전력 주파수의 고조파 성분을 분석하는 것은 별개의 문제이므로, 실제 상황에서 나타나는 실측값과의 비교를 위하여 좀더 정밀한 분석 방법을 강구할 필요가 있다.





## 제 6 장    종합   결론





## 제 6 장 종합 결론

도시차폐의 영향성 실재에 대한 연구를 위하여 전국 경부 고속 전철 루트 30개소를 선정하여 상시유도종전압을 측정하고 이들을 정규화하여 분석한 결과 도시 지역에서 전반적으로 낮은 전압 분포를 나타내었다.

전체적인 종전압의 수위는 특별히 변전시설 인근의 20V를 넘는 경우를 제외하고는 통상 10V내외 수준으로 측정된다. 시골 지역에 있어서 10V를 넘는 경우가 많이 있는 반면, 도시 지역(서울, 대구)에서는 8V 정도의 수위이고 특별히 부산에서는 5V 정도로 더욱 낮은 전압 분포를 나타내었다.

유난히 부산이 낮은 전압 분포를 나타내는 특성과 관련하여 지역적 특성의 관점에서 부산 시내 고속전철이 운송되는 국철 루트를 계속 병행하여 다른 도시들과는 다르게 지하철이 구축되어 있다. 또한, 남북 노선 구간에 있어서는 내륙측 산악 경사 지반으로서 대부분 축조된 지반 구조하에 노선이 운행되고 있어 이러한 시설 구조상의 특성에 의한 차폐 영향성에 대하여 면밀한 조사 분석과 근거있는 해석 수행이 소요된다 하겠다.

시골 지역에 있어서도 상대적으로 유난히 낮게 측정되는 개소들이 있는데 그 주변으로 광역상수도관이나 하수관등의 매설물이 시설되어 있는 연관성 측면이 있고 이에 대한 실제의 차폐 영향성에 대한 전자기학적 해석/시뮬레이션을 추가적으로 수행함으로써 정량성 파악을 이룰 수 있을 것이다.

유도원을 직접 제작하여 실험하는 모의 실증 실험을 통하여 유도 발생 전자계 근접의 통신선에 상호 인덕턴스에 의한 기전력이 인가되는 유도 현상이 검증되었다. 이것을 통한 도시차폐성 평가 실험은 규모의 관점에서 실제 유도 발생의 회로적 구현을 달성하여야 하는 과제가 있다.

차폐 영향 해석을 위한 기초 작업으로서 전자기학적인 단위 요소 발생원과 피유도체와 차폐체들간의 상관 관계성 및 배치 특성에 따른 계산 방식에 대한 학술적 조사와 분석이 이루어졌으며 복합적 시설 레벨에 이르기까지 차후에 정량적인 수식 수립을 추진해 나가야 한다.

유도 현상은 매우 임의적인 많은 변수들이 복합적으로 작용함으로 실물 유형의 해석이 심히 어려운 것이므로 단시간에 어떠한 계수 도출의 결론을 얻기에는 충분치 못하다. 향후 유도 영향 파라미터들의 실증 수행과 수학적 모델링 기법들이 어우러진, 아울러 다양한 기법의 도입들에 의한 연구 수행으로 결론에 도달하여야 할 것이다.



## 참고 문헌

- [1] 방송통신위원회, 전기통신설비의 기술기준에 관한 규정, 대통령령 제20664호 제정 2008년 2월 29일
- [2] 방송통신위원회, 전기통신설비의 기술기준에 관한 표준시험방법, 전파연구소고시 제2005-98호
- [3] 방송통신위원회, 전력유도전압의 구체적 산출방법에 대한 기술기준, 전파연구소고시 제207-102호, 2007년 12월 27일.
- [4] 방송통신위원회, 전기통신설비의 기술기준에 관한 규칙, 전파연구소고시 제 2005-98호, 2005년 10월 26일.
- [5] 오호석, 정경희, 가입자 통신선로의 잡음측정에 관한 고찰, 한국정보통신진흥원, 199.11.1.
- [6] [Banos\_66] A. Banos, *Dipole Radiation in the Presence of a Conducting Half Space*. New York: Pergamon, 1966, sec. 3.1, 4.10.
- [7] [Carson\_26] J. R. Carson, "Wave propagation in overhead wires with a ground return," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 5, pp. 539 - 554, Oct. 1926.
- [8] [Chang\_74] D. C. Chang and J. R. Wait, "Extremely low frequency (ELF) propagation along a horizontal wire located above or buried in the earth," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 22, pp. 421 - 427, Apr. 1974.
- [9] [Chang\_75] D. C. Chang and R. G. Olsen, "Excitation of an infinite horizontal wire above a dissipative earth," *Radio Sci.*, vol. 10, pp. 823 - 831, Aug. - Sept. 1975.
- [10] [Collin\_60] Collin, R.E., *Field Theory of Guided Waves*, McGraw-Hill, New York, p.68, 1960.
- [11] [Deri\_81] A. Deri, G. Tevan, A. Semlven and A. Castanheira, "The Complex Ground Return Plane: A Simplified Model for Homogenous and Multilayer Earth Return", *IEEE Trans PAS*, vol. PAS-100, Aug. 1981, pp 3686-3693.
- [12] [Deri\_85] A. Deri, A. Semlyen, "Time domain modeling of frequency-dependent three-phase transmission line impedance", *IEEE Trans. PAS*, vol. PAS-104, June 1985, pp. 1549-1555.
- [13] [Dommel\_85] Dommel, H.W., "Overhead line parameters from handbook

- formulas and computer programs", *IEEE Trans PAS*, vol. PAS-104, Feb 1985, pp. 366-372.
- [14] [Dommel\_86] Dommel, H.W., *Electromagnetic Transients Program* (EMTP theory book), Bonneville Power Administration, 1986.
- [15] [EPRI\_87] Electric Power Research Institute, *Transmission line Reference Book. 345 kV and Above*, Second Edition, revised 1987.
- [16] [Felsen\_94] L. B. Felsen and N. Marcuvitz, *Radiation and Scattering of Waves*. New York: IEEE Press, 1994.
- [17] [Gary\_76] C. Gary, "Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes", EDF Bulletin de la direction des études et recherches-Série B, No. 3/4, 1976, pp. 5-20.
- [18] [Harrington\_61] Harrington, R.F., *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, New York, p.126, p.223, 1961.
- [19] [Jackson\_88] D. R. Jackson and A. A. Oliner, "A leaky-wave analysis of the high-gain printed antenna configuration," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, pp. 905 - 910, July 1988.
- [20] [Judkins\_74] R. E. Judkins and D. E. Nordell, "Discussion of electromagnetic effects of overhead transmission lines practical problems, safeguards and methods of calculation," *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, vol. PAS-93, pp. 892 - 902, May/June 1974.
- [21] [Kikuchi\_56] H. Kikuchi, "Wave propagation along an infinite wire above ground at high frequencies," *Proc. Electrotech. J.*, vol. 2, pp. 73 - 78, Dec. 1956.
- [22] [Kikuchi\_57] , "On the transition from a ground return circuit to a surface waveguide," in *Proc. Int. Congress Ultrahigh Frequency Circuits Antennas*, Paris, France, Oct. 1957, pp. 39 - 45.
- [23] [Kikuchi\_78] H. Kikuchi, "Propagation characteristics along a dielectric coated cylindrical conductor above the ground," *Proc. IEEE*, vol. 66, pp. 351 - 352, Mar. 1978.
- [24] [Kostenko\_55] M. V. Kostenko, "Mutual impedance of earth-return overhead lines taking into account the skin effect" (in Russian), *Elektrichestvo*, vol. 10, pp. 29 - 34, 1955.



- [25] [Kuester\_76] E. F. Kuester and D. C. Chang, "Modal representation of a horizontal wire above a finitely conducting earth," Dept. Elect. Eng., Univ. Colorado, Boulder, CO, Scientific Rep. 21, RADC-TR-76-287, 1976.
- [26] [Kuester\_77] E. F. Kuester and D. C. Chang, "Propagating modes along a thin wire located above a grounded dielectric slab," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-25, pp. 1065 - 1069, Dec. 1977.
- [27] [Kuester\_78] E. F. Kuester, D. C. Chang, and R. G. Olsen, "Modal theory of long horizontal wire structures above the earth—Part I: Excitation," *Radio Sci.*, vol. 13, pp. 605 - 613, July - Aug. 1978.
- [28] [Kuester\_79] , "An analytic theory for narrow open microstrip," *Arch. Elek. Übertragungstechn.*, vol. 33, pp. 199 - 206, 1979.
- [29] [Leslie\_49] J. R. Leslie and J. R. Wait, "Detection of overheated transmission line joints by means of a bolometer," *Trans. AIEE*, vol. 68, pp. 1 - 5, 1949.
- [30] [Olsen\_74a] R. G. Olsen, "Electromagnetic characteristics of horizontal and vertical wires over a dissipative half-space," Ph.D. dissertation, Univ. Colorado, 1974.
- [31] [Olsen\_74b] R. G. Olsen and D. C. Chang, "Current induced by a plane wave on a thin infinite wire near the earth," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-22, pp. 586 - 589, July 1974.
- [32] [Olsen\_77a] R. G. Olsen and M. A. Usta, "The excitation of current on an infinite horizontal wire above earth by a vertical electric dipole," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-25, pp. 560 - 565, July 1977.
- [33] [Olsen\_77b] R. G. Olsen and D. C. Chang, "Analysis of semi-infinite and finite thin-wire antennas above a dissipative earth," *Radio Sci.*, vol. 12, pp. 699 - 707, 1977.
- [34] [Olsen\_78] R. G. Olsen, E. F. Kuester, and D. C. Chang, "Modal theory of long horizontal wire structures above the earth—Part II: Modes," *Radio Sci.*, vol. 13, pp. 615 - 623, July - Aug. 1978.
- [35] [Olsen\_83] Olsen, R.G. and Pankaskie, "On the Exact, Carson and Image Theories for Wires at or Above the Earth's Interface," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 3, pp 769-774, March


1983.

- [36] [Olsen\_84] Olsen, R.G. and Jaffa, KC., "Electromagnetic Coupling from Power Lines and Magnetic Field Safety Analysis," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 12, pp 3595-3607, Dec. 1984.
- [37] [Olsen\_85] Olsen, R.G. and Rouseff, D., "On the Wave Impedance for Power Lines," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, pp. 711-717, March 1985.
- [38] [Olsen\_91] R. G. Olsen, "A wideband model for electromagnetic interference from corona on multiconductor power lines," *Radio Sci.*, vol. 26, pp. 73 - 88, Jan. - Feb. 1991.
- [39] [Pistol'kors\_52] A. A. Pistol'kors, "On the theory of a wire near the interface between two media" (in Russian), in *Dokl. Akad.*, vol. 86, Nauk, USSR, 1952, pp. 941 - 943.
- [40] [Pistol'kors\_53] , "On the theory of a wire parallel to the plane interface between two media," in *Radiotek.*, vol. 8, Moscow, Russia, 1953, pp. 8 - 18.
- [41] [Pollaczek\_31] F. Pollaczek, "Sur le champ produit par un conducteur simple infiniment long parcouru par un courant alternatif", *Revue Gen. Elec.*, 1931, 29, PP. 851- 867.
- [42] [Pogorzelski\_77] R. J. Pogorzelski and D. C. Chang, "On the validity of the this wire approximation in analysis of wave propagation along a wire over a ground," *Radio Sci.*, vol. 12, no. 5, pp. 699 - 707, Sept. - Oct. 1977.
- [43] [Rachidi\_96] F. Rachidi, C. A. Nucci, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Influence of lossy ground on lightning induced voltages on overhead lines," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, pp. 250 - 264, Aug. 1996.
- [44] [Ramo\_67] Ramo, S., Whinnery J.R., and VanDuzer T., *Fields and waves in Communication Electronics*, John Wiley, New York, p. 262, p. 230, 1967.
- [45] [Saad\_96] O. Saad, G. Gaba, and M. Giroux, "A Closed-Form Approximation for Ground Return Impedance of Underground Cables," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, July 1996, p.1536
- [46] [Santos\_72] A. F. dos Santos, "Electromagnetic wave propagation along a horizontal wire above ground," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 119, pp. 1103 -

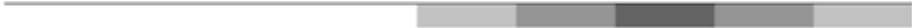
1109, Aug. 1972.

- [47] [Schennum\_95] S. D. Schennum and R. G. Olsen, "A method for calculating wideband electromagnetic interference from power line corona," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. PWRD-10, pp. 1535 - 1540, July 1995.
- [48] [Shen\_68] L. C. Shen, T. T. Wu, and R. W. P. King, "A simple formula of current in dipole antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-16, pp. 542 - 547, Sept. 1968.
- [48] [Srivallipuranandan\_86] N. Srivallipuranandan, "Series Impedance and Shunt Admittance Matrices of Underground Cables", M Sc A Thesis, University of British Columbia, 1986.
- [49] [Stratton\_41] Stratton, J.A., *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York, p. 437, 1941.
- [50] [Sunde\_68] E. D. Sunde, *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. New York: Dover, 1968.
- [51] [Tesche\_92] F. M. Tesche, "Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 34, pp. 93 - 99, May 1992.
- [52] [Wait\_69] J. R. Wait and K. P. Spies, "On the image representation of the quasistatic fields of a line current source above ground," *Canadian J. Phys.*, vol. 47, pp. 2731 - 2733, Dec. 1969.
- [53] [Wait\_72] J. R. Wait, "Theory of wave propagation along a thin wire parallel to an interface," *Radio Sci.*, vol. 7, pp. 675 - 679, June 1972.
- [54] [Wait\_75] J. R. Wait and D. A. Hill, "Propagation along a braided coaxial cable in a circular tunnel," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 23, May 1975.
- [55] [Wait\_77a] J. R. Wait, "Excitation of a coaxial cable or wire conductor located over the ground by a dipole radiator," *AEÜ*, vol. 31, pp. 121 - 127, 1977.
- [56] [Wait\_77b] J. R. Wait, "Excitation of an ensemble of J parallel cables by an external dipole over an M layered ground," *AEÜ*, vol. 31, pp. 489 - 493, Dec. 1977.
- [57] [Wedepohl\_73] L.M. Wedepohl, D.J. Wilcox, "Transit analysis of

- underground power-transmission systems", *Proc. IEE*, 1973, 120, pp. 253-260.
- [58] [Wise\_31] W.H. Wise, "Effect of Ground Permeability on Ground Return Circuits", *Bell Syst. Tech. J.*, 1931, vol.10, pp. 471-484.
- [59] [Wise\_34] W. H. Wise, "Propagation of HF currents in ground return circuits," in *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 22, London, U.K., 1934, pp. 522 - 527.
- [60] [Young\_91] J. L. Young and J. R. Wait, "Electromagnetic response of two crossing, infinitely long, thin wires," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, pp. 732 - 739, June 1991.
- [61] [Young\_94] J. L. Young, "TEM coupling between orthogonal thin wires: A closed-form approximation," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 884 - 890, May 1994.



## 부록: 유도측정일지





## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 5 일(화요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	시목 - 급전선 구간				
	주소					
측정인력	이상무 책임연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대)					
날씨(변화)	맑음/무더움			기온	30° ↑	
포설길이	650M	구간 특성	시목 급전소가 있는 교량구간			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항				비고	
06:00~09:00						
09:00~10:00	차량 적재	측정장비, 시설 차량 짐 싣기				
10:00~11:00						
11:00~12:00	(11:30)	연구소 출발				
13:00~14:00	시목 도착	케이블 포설 루트 탐색				
14:00~15:00	케이블 포설	하천을 건너도록 우회 시설				
15:00~16:00	장비 설치	발전기 초기 가동				
16:00~17:00						
17:00~18:00	측정 개시	상시유도종전압 측정			최대 10V 수준	
18:00~19:00	측정 계속					
19:00~20:00	케이블 철거					
20:00~24:00	짐 적재	10:00 저녁식사				
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	289.0Ω	
	Ω · m			중 단	163.4Ω	
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음중단			
	루프저항	Ω	종단저항	Ω		
종전압 요점 데이터	통상	정규화				
	10V	15.4V/km				
주변 시설 환경	논/밭, 산(구릉) 지역					

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 6 일(수요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	강내				
	주소	(주)JUNTECH 앞				
측정인력	이상무 책임연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대)					
날씨(변화)	맑음/무더움			기온	30° ↑	
포설길이	680M	구간 특성				
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항				비고	
06:00~09:00	아침준비	출발				
09:00~	장소 마련	짐 하차, 텐트시설, 측정 준비		양지 차양		
~11:00	케이블 포설					
11:00~12:00	냉방기 설치					
13:00~14:00	중식					
14:00~15:00	종전압 측정					
15:00~16:00		PSM 장비 시험				
16:00~17:00		사진 촬영				
17:00~18:00		접비저항 측정				
18:00~19:00	철거					
19:00~21:00						
21:00~24:00	저녁					
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	104.8Ω	
	Ω · m			중 단	138.6Ω	
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음중단			
	루프저항	Ω	종단저항	Ω		
종전압 요점 데이터	통상	최대				정규화
	8V	12V				11.8V/km
주변 시설 환경	논/밭, 산(구릉) 지역					



## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 7 일(목요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	소정				
	주소					
측정인력	이상무 책임연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대)					
날씨(변화)	맑음/무더움			기온	30° ↑	
포설길이	1km	구간 특성	1.6km 직선 구간			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항				비고	
06:00~09:00	아침준비	출발				
09:00~	장소 마련	짐 하차, 텐트시설, 측정 준비			양지 차양	
~11:00	케이블 포설					
11:00~12:00	종전압 측정					
12:00~14:00		중식				
14:00~15:00						
15:00~16:00		PSM 장비 시험, 잡음전압 측정			미티게이터	
16:00~17:00		사진 촬영				
17:00~18:30		대지저항률 측정 포설				
18:30~19:00	대지저항률 측정					
19:00~20:00	철거					
20:00~24:00	저녁	숙박 이동			천안	
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	104.8Ω	
	Ω · m			중 단	138.6Ω	
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음중단			
	루프저항	Ω	종단저항	Ω		
종전압 요점 데이터	통상	최대				정규화
	8V	10V				V/km
주변 시설 환경	논/밭, 산(구릉) 지역					

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 8 일(금요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	아산 음봉				
	주소					
측정인력	이상무 책임연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대)					
날씨(변화)	맑음/무더움		기온	30° ↑		
포설길이	700M	구간 특성	중간 지점 간선도로 분할			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항			비고		
06:00~09:00	기상 출발					
09:00~10:00	케이블 포설	측정장비 준비				
10:00~11:00		도로 분할 지점 케이블 보호 작업		도로 연결 교량 홈 매입		
11:00~12:00	대지저항률 측정	$R=0.013$ , $a=250m$ $\rho=2\pi aR$ $=2\times3.14\times250\times0.013=20.41\Omega\cdot m$		700m 구간 측정: 4전극-1/3; 접지저항 측정		
12:00~	종전압 측정	* 12:01 상하행 교차		행 12V; 행 15V		
~14:00						
14:00~15:00						
15:00~16:00		사진 촬영, 잡음 측정 상하행 인접 교차시 12V최고 (전압 10V정도에서 비하락)		미티게이터		
16:00~18:00						
18:00~19:00						
19:00~20:00						
20:00~24:00						
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항	측정단	82Ω	
	20.4Ω · m			종 단	37Ω	
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음종단	자회		
	루프저항	188.6Ω	종단저항	783Ω (600Ω 종단)		
종전압 요점 데이터	통상	최대	교차최대		정규화(최대)	
	8V	16V	V		11.4V/km	
주변 시설 환경	논/밭 지역					

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 12 일(화요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	시목, 강내				
	주소					
측정인력	이상무 책임연구원, 임동민, 박진철(기능대)					
날씨(변화)	비후 흐림(아침까지 비후 크치고 흐림)			기온	30° ↑	
포설길이	0.65, 0.68		구간 특성			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항				비고	
~09:30	아침준비		출발, 측정기 적재		세피아 II	
10:50~	케이블 포설		2 pair 케이블 및 점퍼선		시목구간	
	종전압 측정		10V		이전 변화 없음	
~13:00	대지저항률 측정		$R=0.012\Omega$ , $a=200m$ $\rho=2\pi aR=15.1\Omega \cdot m$			
~15:00	선로 철거					
15:00~16:00	중식		강내 이동			
16:00~17:00	선로 포설					
17:00~17:30	종전압 측정		9V		이전 대비 미약	
	대지저항률 측정		$R=0.027\Omega$ , $a=230m$ $\rho=2\pi aR=39\Omega \cdot m$			
17:00~18:00	철거					
18:00~	복귀				학생 대전 숙박	
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	Ω	
	15/39Ω · m			종 단	Ω	
확인 파라미터	측정회선		잡음종단			
	루프저항			Ω	종단저항	Ω
종전압 요점 데이터	통상					정규화
	V					V/km
주변 시설 환경	논/밭, 산(구릉) 지역					

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 13 일(수요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	평택 팽성 - 개소 1				
	주소					
측정인력	이상무 책임연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대)					
날씨(변화)	흐림			기온	30° ↑	
포설길이	1km	구간 특성	직선 구간			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항				비고	
~09:30	아침준비	출발				
11:30~	케이블 포설	짐 하차, 측정 준비				
~12:30	케이블 포설					
~13:00	접지저항 측정	선로 셋팅, 루프저항등 측정				
13:00~14:00	종전압 측정	중식			측정 노트북 다운	
14:00~15:00						
15:00~16:00		대지저항률 측정/ R=0.014, a=330,ρ=2πaR=29				
16:00~17:00						
17:00~18:30	철수					
18:30~19:00						
19:00~20:00	자료 정리					
20:00~24:00		업무처리				
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	73.8Ω	원거리
	29Ω · m			중 단	147.6Ω	193.8Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음중단	자회		
	루프저항	189Ω	중단저항	785Ω		
종전압 요점 데이터	통상	최고(상행)	하행			정규화
	12V	16V	V대			-
주변 시설 환경	논/밭, 평야 지역 인근 약 2km 공단 지역					

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 14 일(목요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	평택 팽성 - 개소 2				
	주소					
측정인력	이상무 책임연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대)					
날씨(변화)	맑음(구름)			기온	30° ↑	
포설길이	1km	구간 특성	약간 곡선 구간(완만한 커브 루트) #2: 노반구간 포함 - 약 300m			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항				비고	
~09:30~	아침준비	출발				
10:00~	케이블 포설	짐 하차, 측정 준비				
~11:30	기초측정	루프저항, 접지저항				
~	종전압 측정					
13:00~14:00		중식				
14:00~15:00						
15:00~16:00		건너편 구간 측정 - 멀티테스터기 - 통상 20V 특이			2 pair 회선	
16:00~17:00					최고 30V * 노반구간 특성 재측 검토요	
17:00~18:30		대지저항률 측정/ R=0.034, a=300m , $\rho=2\pi aR=64\Omega \cdot m$		건너편 구간 단봉 접지봉(50cm)		
18:30~21:00	철수					
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	Ω	원거리
	64Ω · m			중 단	Ω	Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음중단	자회		
	루프저항	Ω	중단저항	Ω		
종전압 요점 데이터	통상	최고(상행)	하행			정규화
	11V	16V	V대			-
주변 시설 환경	논 평야 지역					

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 18 일(월요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	영동 심천				
	주소					
측정인력	이상무 책임연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대), 최한섭(군산대)					
날씨(변화)	비/흐림				기온	30° ↓
포설길이	0.67km	구간 특성	중간 하천 분리(약 100m), 하천 구간 190m 이격; 120m 병행			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항					비고
~10:30~	아침준비	출발				테라칸 렌트 수령
11:30~	테라칸 조정	뒷좌석 제거				조이렌트 카센터
~13:30	도착	영동 심천				
~14:00~	자리 셋팅	측정물 준비 측정/종단 접지시설 및 접지지향 측정				
~15:00~15:30~	케이블 포설	루프 테스트				
16:00~17:30	종전압 측정	사진 촬영 - 선로루트 답사 확인 및 경로 특성 점검				· 송유관 매설 지역 · 우회 직선 경로 루트 철재 가교
17:30~	철수					
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	360Ω	원거리
	Ω · m			종 단	260Ω	Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음종단	자회(미티 게이터)	적청(psm)	
	루프저항	200Ω	종단저항	802Ω	open	
종전압 요점 데이터	통상	최고	하행	잡음/PIF/Bal		정규화
	6V	7V	V대			9V
주변 시설 환경	비닐하우스/ 밭 지역 및 인근 저산악 지대					

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 19 일(화요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	영동 주곡				
	주소					
측정인력	최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대), 최한섭(군산대) (*이상무 책임 연구원 서울 전파연구소 업무회의 참석)					
날씨(변화)	흐린 후 개임.				기온	30° ↓
포설길이	1km	구간 특성	중간 좁은 하천 분리 포설 난제로 사이드 도로 우회 약 100m, 수평 이격 약 50m			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항					비고
~08:00~	출발					
9:30~	포설 루트 확인		중간 하천 분리 비연결성 문제 해결을 위한 도로 우회 결정			
~10:00~11:30	케이블 포설		루프 확인, 접지저항 측정			
~11:30~	종전압 측정		잡음 측정 병행			이상무 책연 서울 출발
~	대지저항률 측정		R=0.044, 91.2Ω·m			
18:00~	철거					
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	197.6Ω	원거리
	91.2Ω·m			중 단	88.9Ω	Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음종단	자회(미터 게이터)	자녹(psm)	
	루프저항	180Ω	종단저항	780Ω	open	
종전압 요점 데이터	통상	최고	하행	잡음/PIF/Bal		정규화
	8V	14V	V대			V
주변 시설 환경	도로변, 500m 인근 국철 병행					

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 20 일(수요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	김천				
	주소					
측정인력	이상무 책임 연구원(오후 동대구 이동 : 유도 시뮬레이션 테스트베드 방문), 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대), 최한섭(군산대)					
날씨(변화)	맑음(구름 약간)				기온	30° ↑
포설길이	0.8km	구간 특성	전 노반 구간, 측정단 근접 거리 이격거리 사선 확대; 사선구간 : 약 350m, 약 30°			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항					비고
~08:00~	출발		아침, 기름 보충			
9:30~	포설 루트 확인		접지저항 측정			
~10:00~11:30	케이블 포설		루프 확인 측정 자리/측정기 셋팅			
~11:30~	종전압 측정		잡음 측정 병행 · 하행 특성 : 지나 간 다음 상향 곡선 및 전압 지속 · 상행 특성 : 지나가면서 상승			
~	대지저항률 측정		R=, Ω·m			
18:00~	철거					
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	196.5Ω	원거리
	Ω · m			중 단	90Ω	Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음종단	자회(미티 게이터)	자녹(psm)	
	루프저항	186Ω	종단저항	786Ω	open	
종전압 요점 데이터	통상	최대	하행	잡음/PIF/Bal		정규화
	11V	12V	9.7V대			13.8V
주변 시설 환경	김천 포도밭 생산지 일대					



## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 21 일(목요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	동대구역~부산역 KTX 국철노선 구간 측정개소 선정 답사				
	주소	선정 지역 : 경산, 청도, 밀양, 양산, 부산(14개소 이상)				
측정인력	이상무 책임 연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대), 최한섭(군산대졸)					
날씨(변화)	맑음(구름 약간)			기온	30° ↓	
포설길이	1km	구간 특성	평행 병행 인근			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항				비고	
~09:00~	출발	동대구역				
~14:00~	개소선정	밀양까지 1. 경산 옥산 : 도시지역 2. 경산 옥곡 : 외곽 교외 인접 3. 청도 : 청도읍 4. 밀양 상동 : 국도변 5. 밀양 삼랑진 : 도로변			5개소  밀양시내 주변 통과	
~19:00		부산역까지 6. 양산 원동(2개소) 7. 양산 물금 8. 부산시 진입 구간 9. 부산 화명 10. 부산 덕천 11. 부산 사상 12. 부산 모라			1km 이상 연장 9개소(이상 가능), 양산 원동 포설 환경 가장 좋음.	
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	Ω	원거리
	Ω · m			중 단	Ω	Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음중단	자회(미티 게이터)	자속(psm)	
	루프저항	Ω	중단저항	Ω		
종전압 요점 데이터	통상	상행	하행	잡음/PIF/Bal		정규화
	V	V	V대			V
주변 시설 환경						

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 22 일(금요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	양산 원동				
	주소					
측정인력	이상무 책임 연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대), 최한섭(군산대졸)					
날씨(변화)	흐림/비				기온	30° ↓
포설길이	1km	구간 특성		국철 완전 병행, KTX 속도가 느림 종단쪽으로 1km 후반경 급전소가 있음		
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항					비고
~08:40~	출발					
~10:00~	케 이 블 포설	전원 셋팅 선로 확인 : 저항등 측정				마을회관 전원 전원잡음 : 20dB
~11:20~	중 전 압 측정	12:00 이후 비옴(가랑비) 상행 새마을 통과시 1.6V 정도 올라감.				
~14:00~		비 소강 지속적으로 1.5V 내외 유지되는 경향이 있음. 무궁화 통과시 약 2V 상승 KTX 속도 자체가 일반 철도와 비슷함. 상·하행 교차시에 추가 상승 없음.				
~15:00~	철거	대지저항률 측정				R=0.044
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	149.4Ω	원거리
	Ω · m			종 단	50Ω	Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음종단	자회(미터 게이터)	자녹(psm)	
	루프저항	180.3Ω	종단저항	780Ω	open	
중전압 요점 데이터	통상	상행	최대	하행	잡음/PIF/Bal	
	5V	5.9V	6V	6V		정규화 -
주변 시설 환경	주변 산세 지형 배전선 병행(약 850M 측정단으로부터) 왼쪽편 작은 마을 일반 기차 통과시 변동될 때가 있음.					

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 26 일(화요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	서울 구로					
	주소	가산디지털단지역과 독산역 중간 구간					
측정인력	이상무 책임 연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대), 최한섭(군산대졸)						
날씨(변화)	맑음				기온	30°	
포설길이	1km	구간 특성		도시지역, 국철 병행 구간			
시간별 활동 요지							
시간	활동 사항					비고	
~07:20~	출발	대전 → 서울					
~10:30~11:00	도착~케이블 포설	케이블 포설 구간 확인 - 원 선정 지점의 접지시설 문제로 독산역쪽 후방 이동 1km 구간 재선정 - 포설 용이 가로수 직선 구간 - 선로 벽면 병행 시설				케이블 견인 시설	
~12:50~ ~14:00~  * KTX통과: 시간 별도 기록  16:00	종전압 측정	· 전철 통과시 5.x V 상승 경우 있음. · 독산역 방향 전철 통과시 4.x V 상승 경우 있음. · 무궁화호 통과시 3.x V 상승 영향 · KTX 하행 5.4V, 후 상행 3V 정도 · 7V KTX 하행 · 무궁화호 상행 5.7V, 무통과시 7V · Open이 600옴보다 잡음dB가 높음 · 대지저항률 측정 - EPIMS 이상전압 단자(상측단자)로 활용 → 단자 완전 분리 재측정				R≒0.03	
~19:00~	철거	중단점검/ 종료시점 데이터 이상 검토				심선하나 떨어짐	
접지 파라미터[Ω]	대지저항률			접지저항 (루프)	측정단	298Ω	원거리
	62.2Ω · m				중 단	310Ω	Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹		잡음중단	자회(미티게이터)	적청(ps m)	
	루프저항	183.4Ω		중단저항	785Ω	open	
종전압 요점 데이터	통상	상행	하행	최대	잡음/PIF/Bal		정규화
	6V	4.7V	7V	7V			-
주변 시설 환경	상가 건물 좌우 도열, 우측 가산역 지점까지 400m 주변에 배전선은 없음. 좌측 약120m 독산역						

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 27 일(수요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	대전/대구				
	주소	대전 오정동 KTX 경과 루트 답사, 김천 이남 신동 국철 합류 구간 ~ 대구역 시내 인터페이스 구간 답사 개소 선정				
측정인력	이상무 책임 연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대), 최한섭(군산대졸)					
날씨(변화)	맑음			기온	30°	
포설길이	(답사)	구간 특성	시골지역과 도시지역 진입 경계 인터페이스			
시간별 활동 요지						
시간	활동 사항					비고
~07:00~	출발	서울 → 대전				
~10:00~12:40	대전 측정 개소 선정 답사	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대전 시내 구간 불능 : 대전 동부 상·하행선 이격 분리</li> <li>· 신탄진 구간 이전 측정 장소 → 테크노벨리 인근 갑천</li> <li>※ 대전 시내지역 측정개소 선정 곤란                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- KTX 상·하행 복합 노선 최소 0.7 km 이상 접근 가능 포설 구간 수색 곤란</li> </ul> </li> </ul>				이전 기기 시험측정 데이터 활용  시내 공간 협소, 단거리 시내 범위 이탈
~13:00~	부산 이동	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 중간 신동역~지천역~대구역 구간 시내 경계 인터페이스 측정 구간 선정</li> </ul>				지천역 인근 노선 구간 답사 사고 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 스타렉스 차량 뒷바퀴 논두렁 콘크리트 도록 사이드 아래로 빠져 견인차 호출 처리</li> </ul>
22:00	부산 도착	화명역 인근				
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	Ω	원거리
	Ω · m			종 단	0Ω	Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음종단	자회(미티게이터)	적청(ps m)	
	루프저항	Ω	종단저항	Ω	open	
종전압 요점 데이터	통상	상행	하행	잡음/PIF/Bal		정규화
	V	V	V			-
주변 시설 환경						

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 28 일(목요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	부산 화명역					
	주소						
측정인력	이상무 책임 연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대), 최한섭(군산대졸)						
날씨(변화)	맑음				기온	30°	
포설길이	1(0.95)km	구간 특성		국철 화명역까지 우측 도로에서부터 도로 병행, 지하철은 1km(도보 10분거리) 인근 선로 복복선(4개 선로) 궤도 종단쪽 300m 이후 구간 외곽도로 선로 건너편은 미개발 지역 구분선			
시간별 활동 요지							
시간	활동 사항					비고	
~09:00~	장소 셋팅	포설 루트 확인				부산 숙박	
~11:00	케이블 포설	20m 폭 도로변, 안쪽 가로수 화단					
11:00~	종전압 측정	5V 무궁화 2V				기본 0.2	
15:00		대지저항률 측정 R=0.058				a <sub>1</sub> =330, a <sub>2</sub> =680	
접지 파라미터[Ω]	대지저항률		접지저항 (루프)	측정단	186.4Ω	원거리	
	109.2Ω · m			종 단	63.2Ω	Ω	
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음종단	자회(미티게이터)	적청(ps m)		
	루프저항	191.4Ω	종단저항	794Ω	open		
종전압 요점 데이터	통상	상행	하행	최대	잡음/PIF/Bal		정규화
	4V	V	V	7V			-
주변 시설 환경	인근 아파트 단지 및 대형 상가 밀집						

## 도시영향 연구 유도측정일지

기록일 : 2008년 8 월 29 일(금요일)

작성자 : 이 상 무 (인)

측정장소	지명	대구 비산동					
	주소						
측정인력	이상무 책임 연구원, 최문환 박사(ETRI), 임동민, 박진철(기능대), 최한섭(군산대졸)						
날씨(변화)	맑음/구름 조금				기온	30°	
포설길이	1km	구간 특성		마을과 선로 셋길 산책로상 포설 좌측 지하도, 우측 종단 육교			
시간별 활동 요지							
시간	활동 사항					비고	
~09:00~	장소 셋팅	포설 루트 확인				부산 숙박	
09:00~	케이블 포설	KTX 방호벽 사이드 산책로상					
10:50~	종전압 측정						
14:30		대지저항률 측정 R=0.044				a <sub>1</sub> =330, a <sub>2</sub> =660	
접지 파라미터[Ω]	대지저항률			접지저항 (루프)	측정단	41.7Ω	원거리
	Ω · m				종 단	138Ω	Ω
확인 파라미터	측정회선	흑녹	잡음종단	자회(미티게이터)	적청(ps m)		
	루프저항	187Ω	종단저항	783Ω	open		
종전압 요점 데이터	통상	상행	하행	최대	잡음/PIF/Bal		정규화
	7V	V	V	10V			-
주변 시설 환경							

### 주 의

1. 이 연구보고서는 전파연구소의 연구개발비 재정 지원으로 이루어진 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 인용하거나 발표할 때에는 반드시 전파연구소 정책연구의 연구결과임을 밝혀야 합니다.